รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report)

โครงการวิจัยแนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data

เสนอ

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง
กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ

ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

25 พฤศจิกายน 2565

กทปส

รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report)

โครงการวิจัยแนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data

เสนอ

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์
และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ

โดย

ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

25 พฤศจิกายน 2565

คำนำ

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการส่งมอบงานงวดที่ 5 (งวดสุดท้าย) โดยศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์ โดยมีเนื้อหารายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1 (บทที่ 1 ถึง 5) รายงานความหน้าฉบับที่ 2 (บทที่ 6 ถึง 10) รายงานความหน้าฉบับที่ 3 (บทที่ 11 ถึง 14) และรายละเอียดรายงานเพิ่มเติม (บทที่ 15 ถึง 18) ประกอบด้วย การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับ 1.จัดการการอนุมัติใบอนุญาต 2.การตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค 3.การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ 4.การประเมินการรบกวนและการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ ตามขอบเขตการดำเนินงานใน **โครงการวิจัยแนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data** ตามสัญญาเลขที่ B62-1-(2)-003 ลงวันที่ 8 กันยายน 2563 ให้กับสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) ภายใน 720 วัน (หกร้อยวัน) นับถัดจากวันลงนามในสัญญา ต่อมาได้ขอขยายระยะเวลาส่งมอบงานออกไปอีก 90 (เก้าสิบ) วัน

25 พฤจิกายน 2565

สารบัญ

หน้าที่

บทที่ 1 แผนงานดำเนินโครงการ (Project Plan) 1-1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ 1-2
1.2 ขอบเขต และกิจกรรมการดำเนินงาน 1-2
1.3 กรอบแนวคิดการศึกษา 1-3
1.4 วิธีการ/ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ 1-26
1.5 แผนการดำเนินงานและระยะเวลา 1-28

บทที่ 2 บทนำ 2-1
2.1 หลักการและเหตุผลความจำเป็น 2-1
2.2 ทฤษฎี/งานวิจัย/โครงการที่เกี่ยวข้อง 2-8

บทที่ 3 การศึกษากรณีตัวอย่างในต่างประเทศ 3-1
3.1 ประเทศจีน – การจัดการคลื่นความถี่ในมหานครเซี่ยงไฮ้ 3-1
3.2 ภาคพื้นยุโรป – การเฝ้าตรวจสอบคลื่นความถี่แบบเปิด 3-5
3.3 ประเทศสหรัฐอเมริกา – การบริหารจัดการคลื่นความถี่ในมุมของภาครัฐ 3-11
3.4 ประเทศเมียนมา – การบริหารจัดการคลื่นความถี่ในมุมของภาครัฐ 3-15
3.5 บทสรุป 3-17

บทที่ 4 วิเคราะห์เปรียบเทียบกับต่างประเทศ 4-1
4.1 บทนำ 4-1
4.2 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากแผนการเฝ้าสังเกตคลื่นความถี่แบบพลวัตโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้แบบลึกที่ประสบความสำเร็จ 4-2
4.3 เกณฑ์การวัดสมรรถนะ 4-4
4.4 การศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบ 4-7

บทที่ 5 การศึกษาความพร้อมใช้งานในประเทศ 5-1
5.1 บทนำ 5-1
5.2 การประเมินขอบเขตการนำเอาปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับการบริหารความถี่โดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญในต่างประเทศ 5-2
5.3 กรอบแนวคิดของการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ 5-6
5.4 สถานการณ์จำลองของการใช้ปัญญาประดิษฐ์บริหารคลื่นความถี่ในบริบทของประเทศไทย 5-7
5.5 การประเมินความพร้อมของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อบริหารคลื่นความถี่ในสถานการณ์จำลองที่เสนอ 5-12
5.6 บทสรุป 5-16

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 6 ฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติของเว็บแอป 6-1
6.1 เบื้องต้นเกี่ยวกับแดชบอร์ด (Dashboard) 6-1
6.2 เมนู (Menu) สำหรับการลงทะเบียนความถี่ที่ให้บริการผ่านเว็บ (Web Services) ของประเทศต่าง ๆ 6-2
6.3 เครื่องมือและกรอบการทำงาน (Tools and Framework) ในการพัฒนาแดชบอร์ด 6-8
6.4 การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการนำกรอบการทำงานปัญญาประดิษฐ์เข้าไปร่วมกับการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน 6-12
6.5 บทสรุป 6-16

บทที่ 7 ประเด็นปัญหา ความต้องการใช้งาน และสถานะปัจจุบัน 7-1
7.1 ประเด็นปัญหา (Pain Points) 7-1
7.2 ความต้องการใช้งาน (Requirements) 7-4
7.3 สถานะปัจจุบัน 7-8
7.4 บทสรุป 7-11

บทที่ 8 การวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) 8-1

บทที่ 9 เว็บแอปที่เสนอ 9-1
9.1 ฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติ (Functionalities & Features) 9-1
9.2 ฉากทัศน์และกรณีใช้งาน (Scenarios & Use Cases) 9-3
9.3 ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) 9-6
9.4 แพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์สำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) 9-18
9.5 การวัดสมรรถนะ (Performance Matrix) ของการใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการบริหารจัดการทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมและคลื่นความถี่ 9-30
9.6 แผนการดำเนินงาน 9-35
9.7 บทสรุป 9-35

บทที่ 10 แดชบอร์ด และระบบสร้างรายงาน 10-1
10.1 เบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบแดชบอร์ด (Dashboard Design) 10-1
10.2 การนำเสนอข้อมูลบนแดชบอร์ด 10-2
10.3 บทสรุป 10-6

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 11 การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับจัดการเอกสารอัจฉริยะ 11-1

11.1 การพัฒนาอัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับดึงตารางและรูปภาพจากรายงานทางเทคนิค (Technical Report) ที่อยู่ในรูปแบบของ pdf ไฟล์ 11-1

11.2 การพัฒนาอัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับดึงรูปภาพจากรายงานทางเทคนิคที่อยู่ในรูปแบบของไฟล์ pdf 11-5

11.3 การพัฒนาอัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับรู้จำชื่อของเอกลักษณ์ (Name Entities Recognition, NER) เพื่อดึงข้อมูลจากเอกสารรายงานทางเทคนิคและเอกสารทางกฎหมาย 11-9

11.4 บทสรุป 11-13

บทที่ 12 การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลความต้องการคลื่นความถี่ 12-1

12.1 การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับตรวจทานความถูกต้องของฐานข้อมูล (Database Validating) และวิเคราะห์ความหนาแน่นของการใช้คลื่นความถี่ (Frequency Usage Density) โดยใช้การวิเคราะห์พหุตัวแปร (Multivariate Analysis) 12-1

12.2 แมชชีนเลิร์นนิง (Machine Learning) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความต้องการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Demand) 12-5

12.3 การใช้ Jupyter Notebook สำหรับวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ 12-12

12.4 บทสรุป 12-12

บทที่ 13 การพัฒนาวิธีเฝ้าฟังคลื่นความถี่โดยใช้การเรียนรู้อย่างลึก 13-1

13.1 การดำเนินการกับอุปกรณ์ ElectroSense เพื่อใช้กับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ 13-1

13.2 การพัฒนาการระบุการใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติ (Abnormal Frequency Usage Identification) โดยใช้การเรียนรู้อย่างลึก (Deep Learning) 13-8

13.3 การพัฒนาการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดการรบกวน (Interference Source Location Identification) 13-13

13.4 การพัฒนาการวิธีการระบุค่าพารามิเตอร์ของคลื่นความถี่ (Spectrum Parameter) 13-20

13.5 บทสรุป 13-29

บทที่ 14 การสร้างแดชบอร์ดของเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการบริหารจัดการกระบวนการอนุมัติใบอนุญาต 14-1

14.1 เบื้องต้นเกี่ยวกับแดชบอร์ด (Dashboard) สำหรับบริหารจัดการกระบวนการพิจารณาอนุมัติใบอนุญาต 14-1

14.2 การดำเนินการสร้างแดชบอร์ดด้วย html และ css 14-1

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 15 การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับจัดการการอนุมัติใบอนุญาต 15-1
15.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features) 15-1
15.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps) 15-1
15.3 การออกแบบและการสร้าง (Design and Implementation) เว็บแอปพลิเคชันสำหรับดึงข้อมูลตารางจากรายงานผลการทดสอบ 15-3
15.4 การประเมินสมรรถนะ (Performance Evaluation) 15-6
15.5 การอภิปรายและสรุปผล 15-9

บทที่ 16 การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค 16-1
16.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features) 16-1
16.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps) 16-1
16.3 การสร้างอัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence (AI) Algorithms) และเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค 16-4
16.4 การประเมินสมรรถนะ (Performance Evaluation) 16-17
16.5 การอภิปรายและสรุปผล 16-19

บทที่ 17 การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ 17-1
17.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features) 17-1
17.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps) 17-1
17.3 การเขียนโค๊ด (Code Implementation) ในกรอบการทำงาน (Framework) Flask และการออกแบบเว็บแอปพลิเคชัน 17-5
17.4 ผลการวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ 17-6
17.5 การอภิปรายและสรุปผล 17-10

บทที่ 18 การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการประเมินการรบกวนและการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ 18-1
18.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features) 18-1
18.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps) 18-1
18.3 การสร้างและออกแบบเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ 18-6
18.4 กรอบการทำงาน (Framework) สำหรับการสร้างเว็บแอปพลิเคชัน 18-7
18.5 การอภิปรายและสรุปผล 18-8

สารบัญ (ต่อ)

หน้าที่

บทที่ 19 การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนบริเวณชายแดน **19-1**
19.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features) 19-1
19.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps) 19-1
19.3 การใช้และการทดสอบเซนเซอร์สำหรับการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร 19-4
19.4 การใช้และการทดสอบเซนเซอร์สำหรับการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในพื้นที่จังหวัดสระแก้ว 19-13
19.5 การอภิปรายและสรุปผล 19-22

บทที่ 20 ผลการจัดอบรมการใช้งานระบบฯ **20-1**
20.1 ระดับผู้ใช้งาน 20-1
20.2 ระดับผู้ดูแลระบบ 20-3
20.3 ประโยชน์ที่ได้รับ 20-5

บทที่ 21 บทสรุปและการเผยแพร่ผลการศึกษา **21-1**

บทที่ 22 สรุปสถานะการดำเนินโครงการ **22-1**

บรรณานุกรม

ภาคผนวก
ภาคผนวก ก รายชื่อผู้ลงทะเบียนและเข้าร่วมอบรม
ภาคผนวก ข เอกสารประกอบการอบรม
ภาคผนวก ค ผลการตอบคำถามในการอบรม

บทที่ 1
แผนงานดำเนินโครงการ (Project Plan)

พระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่และกำกับการประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง วิทยุโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติมบัญญัติให้สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) มาตรา 57 ให้มีหน้าที่ตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ รวมถึงรับและพิจารณาเรื่องร้องเรียนเกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่เพื่อตรวจสอบและแก้ไขปัญหา หรือเสนอความคิดเห็นจากประชาชน

ปัจจุบันสำนักงาน กสทช. ได้ดำเนินการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ โดยมีสำนักงาน กสทช. ภาค 1 ถึง 4 และสำนักงาน กสทช. เขตทั่วประเทศ รวมจำนวน 21 เขต เพื่อทำหน้าที่บริหารจัดการและปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับงานตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ ตลอดจนการรับและพิจารณาเรื่องร้องเรียนจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และประชาชนในพื้นที่ต่าง ๆ และได้นำเครื่องมือและระบบการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่และระบบการรับเรื่องร้องเรียนที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานของสำนักงาน กสทช. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน และตอบสนองความต้องการของประชาชนมากขึ้น แต่เนื่องจากข้อมูลการตรวจสอบการใช้ความถี่และเรื่องร้องเรียนที่ได้รับจากผู้ร้องเรียนมีประเด็นที่หลากหลายและเป็นข้อมูลขนาดใหญ่ การกำหนดแนวทางการบริหารคลื่นความถี่ทั้งเพื่อการจัดสรรคลื่นความถี่ใหม่หรือการแก้ไขปัญหาการรบกวนแต่ละกรณีจำเป็นต้องรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้งานตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งไม่อาจละเลยข้อมูลการตรวจสอบการใช้ความถี่และข้อร้องเรียนที่เกิดขึ้นได้

จากข้อจำกัดในการปฏิบัติงานของสำนักงาน กสทช. ดังกล่าว ประกอบกับแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ เช่น Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เพื่อรวบรวมข้อมูลจำนวนมหาศาลทั้งรูปภาพ เสียง ข้อความ ตัวเลข และกราฟฟิกต่าง ๆ เพื่อนำมาประกอบการวิเคราะห์ข้อมูลและการตัดสินใจทุกระดับ ซึ่งปัจจุบันการก้าวเข้าสู่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมดิจิทัลและนโยบายไทยแลนด์ 4.0 ที่มีเป้าหมายสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศด้วยชุดข้อมูลที่ถูกต้องและการสร้าง AI Platform มาใช้เพื่อให้สามารถคาดการณ์สถานการณ์อนาคตได้อย่างถูกต้องแม่นยำ สำนักงาน กสทช. จึงเล็งเห็นว่าเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) จะเพิ่มศักยภาพการตรวจสอบคลื่นความถี่และการรับเรื่องร้องเรียนต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในระดับนโยบายในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าบนพื้นฐานข้อมูลเชิงสถิติที่น่าเชื่อถือ เพื่อนำข้อมูลมารวมกันเป็น Big Data ที่มีข้อมูลประชากรที่หลากหลาย มีแหล่งข้อมูลจากทั้งกระทรวงสาธารณสุข กระทรวงมหาดไทย กระทรวงพาณิชย์ และกรมสรรพากร เป็นต้น

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) ในหน่วยงานรัฐบาลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารข้อมูลเช่น บัตรสวัสดิการแห่งรัฐซึ่งรัฐบาลต้องการช่วยเหลือผู้มีรายได้น้อยซึ่งมีการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างกระทรวง ทบวง กรม กองต่าง ๆ เป็นต้น สำนักงาน กสทช. ตระหนักว่าข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ที่เชื่อมโยงถึงกันมีมูลค่าและสามารถนำข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ไปใช้ในการวางแผน จัดสรร ออกใบอนุญาต จนถึงกระบวนการสืบค้นจับกุมตามกระบวนการบริหารคลื่นความถี่ได้ และด้วยความสามารถของเทคโนโลยี AI หากสามารถวิเคราะห์ปริมาณคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา/วัน/เดือน/ปี รวมถึงกรณี

การรบกวนกิจการการบินด้วยเทคโนโลยี AI ในการวิเคราะห์และเรียนรู้ลักษณะของการรบกวนที่เกิดขึ้นในลักษณะซ้ำ ๆ กัน และวิเคราะห์หาสาเหตุของการรบกวนทั้งเชิงพื้นที่แหล่งแพร่คลื่นและประเภทของการรบกวนได้จะช่วยให้การกำหนดหลักเกณฑ์การใช้คลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพต่อไป

ดังนั้น สำนักงาน กสทช. โดยสำนักงานกองทุนวิจัยและพัฒนาจึงดำเนินการจัดให้มีโครงการวิจัยแนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม (กทปส.) และแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่ด้านการบริหารคลื่นความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่า และเกิดประโยชน์อย่างทั่วถึง

ทั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้จัดทำรายละเอียดแผนงานดำเนินโครงการ (Project Plan) ซึ่งประกอบด้วยวัตถุประสงค์ของโครงการ ขอบเขตและกิจกรรมการดำเนินงาน กรอบแนวคิดการศึกษา วิธีการ/ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ แผนงานและระยะเวลาในการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานด้านการบริหารคลื่นความถี่ ดังนี้

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1) เพื่อศึกษาแนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ทั้งในด้านการวางแผน การจัดสรร และการตรวจสอบคลื่นความถี่ของประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2) เพื่อเสนอแนวทางในการบริหารคลื่นความถี่ด้วยการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI)

3) เพื่อศึกษาแนวทางการบูรณาการข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่เพื่อวิเคราะห์และเสนอแนะเชิงนโยบายให้กับสำนักงาน กสทช.

4) เพื่อให้สำนักงาน กสทช. มีข้อมูลเชิงสถิติที่ครอบคลุมทั้งภายในและภายนอกสำนักงาน กสทช. และสามารถพัฒนาแบบจำลองที่ช่วยวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้สำหรับการกำหนดนโยบายและวางแผนเชิงกลยุทธ์ในการแก้ไขปัญหาจากการใช้คลื่นความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5) เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของการตรวจสอบคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. รองรับการจัดตั้งศูนย์ตรวจสอบคลื่นความถี่แห่งชาติ (National Spectrum Monitoring Center)

1.2 ขอบเขต และกิจกรรมการดำเนินงาน

ขอบเขต และกิจกรรมการดำเนินงานของโครงการประกอบด้วย ดังต่อไปนี้

1) ศึกษา เสนอกรอบแนวคิดการศึกษา วิธีการ และแผนงานในการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานด้านการบริหารคลื่นความถี่

2) ศึกษาเปรียบเทียบ (Benchmark) หน่วยงานกำกับดูแลในต่างประเทศหรือองค์กรอื่น ๆ ที่มีการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้สำหรับงานการบริหารคลื่นความถี่หรือไม่/อย่างไร อย่างน้อย 3 หน่วยงาน โดยให้วิเคราะห์ ข้อดี/ข้อด้อย ของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว

3) ศึกษาและพัฒนาการเชื่อมต่อระบบคลังข้อมูลเพื่อนำไปวางแผนและวิเคราะห์ผลกระทบของการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่ โดยออกแบบวิธีการวิจัยหรือสถานการณ์จำลอง (Scenario) ที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยอย่างน้อย 3 สถานการณ์ พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อดี/ข้อด้อย ของแต่ละสถานการณ์

4) เสนอรูปแบบเพื่อการจัดทำและพัฒนา Software ที่เป็น Web Application (Prototype) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ โดยรูปแบบที่เสนอแต่ละส่วนมีองค์ประกอบขั้นต้น ดังนี้

4.1) ด้าน Big Data

4.1.1) จำนวนโนด (nodes) เพื่อการประมวลผล และการจัดเก็บข้อมูลใน data lake

4.1.2) การสร้างผลการวิเคราะห์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในภารกิจการจัดทำแผนการกำหนดและจัดสรรคลื่นความถี่ในปัจจุบันและอนาคต

4.1.3) แนวทางการนำข้อมูลไปใช้งาน กรณีที่ต้องการเชื่อมต่อกับระบบสารสนเทศอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานตรวจสอบคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช.

4.2) ด้านปัญญาประดิษฐ์ (AI)

4.2.1) ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม

4.2.2) การพัฒนาแบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่ในพื้นที่ที่น่าสนใจ

4.2.3) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวนและวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตเพื่อแจ้งเตือน โดยแบ่งตามพื้นที่ในการใช้ความถี่นั้น ๆ ได้

4.2.4) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์

4.2.5) ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่

5) ระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม

6) จัดอบรมการใช้งานระบบการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ให้กับเจ้าหน้าที่สำนักงาน กสทช. โดยแบ่งตามระดับของผู้เข้าอบรมได้แก่ ผู้ดูแลระบบ จำนวน 1 ครั้ง ครั้งละ 20 คน และผู้ใช้งานจำนวน 1 ครั้ง ครั้งละ 100 คน เพื่อเผยแพร่ผลการศึกษาการนำระบบปัญญาประดิษฐ์ (AI) และ Big Data มาใช้ในการสนับสนุนเพื่อพัฒนาประเทศต่อไป

1.3 กรอบแนวคิดการศึกษา

กรอบแนวคิดในการดำเนินโครงการวิจัยแนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data เริ่มด้วยการศึกษาเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล จากแหล่งข้อมูลดังต่อไปนี้

1) ตัวอย่างการใช้งานจริงในต่างประเทศโดยคัดเลือกประเทศที่เป็นผู้นำการใช้เทคโนโลยี Big Data และ AI มาใช้สำหรับการบริหารคลื่นความถี่ (Spectrum Management)

2) สถานะปัจจุบันของการบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. ทั้งในแง่ของกระบวนการจัดการข้อจำกัด รวมถึงความต้องการ (Requirements) เพื่อปรับปรุงการบริหารคลื่นความถี่ให้ตอบโจทย์การใช้งานของผู้ใช้ (Users) และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3) ข้อมูลทางเทคนิคจากมาตรฐาน และงานวิจัยต่าง ๆ ถึงวิธีการในการประยุกต์ใช้ Big Data และ AI กับการบริหารคลื่นความถี่ รวมไปถึงข้อดีและข้อจำกัดของแนวทางต่าง ๆ เพื่อที่จะระบุทางเหมาะสมกับการใช้งานของสำนักงาน กสทช.

ในส่วนของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และ AI มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ ตามหัวข้อในขอบเขตการดำเนินงานของโครงการประกอบฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ เป็นดังนี้

1.3.1 ด้าน Big Data

1.3.1.1 จำนวน nodes เพื่อการประมวลผล และการจัดเก็บข้อมูลใน data lake

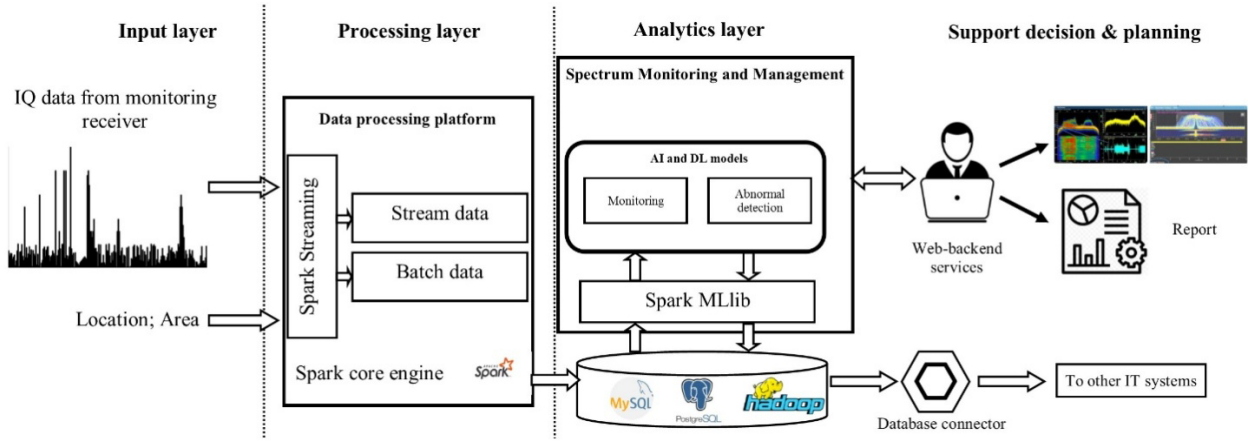
คณะผู้วิจัยเสนอระบบ Spark สำหรับใช้เป็นแพลตฟอร์ม (Platform) วิเคราะห์ข้อมูล Big Data โดยจะใช้สำหรับการเก็บและบริหารจัดการข้อมูลคลื่นความถี่ เนื่องจากจุดประสงค์ของโครงการที่เสนอนี้คือการใช้แบบจำลองปัญญาประดิษฐ์สำหรับการติดตาม ตรวจสอบ และการบริหารคลื่นความถี่ ความต้องการทางเทคนิค (Technical Specifications) ของฮาร์ดแวร์ที่ใช้จึงควรมีหน่วยประมวลผลกราฟิก (Graphic Processing Unit: GPU) แพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์หลาย ๆ แพลตฟอร์ม เช่น MXNet-1.4, TensorFlow-1.14, PyTorch-1.1, Keras-2.2, Chainer-6.1, Caffe-2.0.8, Theano-1.0 & CNTK-2.7 ใช้พลังของการ์ดหน่วยประมวลผลกราฟฟิกเพื่อให้แบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ทำงาน นอกจากนั้น คณะผู้วิจัยเสนอให้ใช้ MySQL, PostgreSQL หรือ Hadoop ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลแบบโอเพนซอร์ส (Open Source Data Storage) สามารถใช้งานได้กับเซิร์ฟเวอร์ข้อมูลท้องถิ่น (Local Data Server) หรือบริการคลาวด์ (Cloud Service) เพื่อเก็บข้อมูลคลื่นความถี่สำหรับการวิเคราะห์ในอนาคต

จากงานวิจัย [1] เครื่องรับสัญญาณทั่วไปที่มีแถบกว้างของคลื่นความถี่ (Bandwidth) 100 เมกะเฮิร์ตซ์ จะสร้างข้อมูลอินเฟสควอดเดรเจอร์เฟส (IQ Data) ขนาด 500 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) และสามารถจัดการข้อมูลได้ที่อัตรา 1,000 เมกะไบท์ต่อวินาที (MBps) การวิเคราะห์แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning: ML) สามารถขยายให้ใหญ่ขึ้น (Scale Up) ได้ดีหากเพิ่มตัวประมวลผลหรือหน่วยความจำ สำหรับการประมวลผลข้อมูลที่จัดเก็บไว้ (Archive Processing) ความเร็วในการประมวลจะถูกจำกัดด้วยเวลาในการอ่าน (Read Access Time) ของหน่วยความจำไม่ลบเลือน (Non-Volatile Memory) สำหรับฐานข้อมูลท้องถิ่น (Local Storage) รายละเอียดความต้องการทางเทคนิคของทั้งสองทางเลือกสรุปไว้ในตารางที่ 1-1

ตารางที่ 1-1 ความต้องการทางเทคนิค (Technical Specification) ของหน่วยประมวลผลสำหรับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์

Option	Amazon Elastic Compute (EC) cloud [2]	Local workstation machine [3]
CPU	Intel® Xeon® CPU E5-2686 v4 (2.3 GHz, 18 cores)	Intel® Xeon® E5-2695 v4 (2.1 GHz, 18 cores, Intel® vPro™)

Option	Amazon Elastic Compute (EC) cloud [2]	Local workstation machine [3]
RAM	60 กิกะไบต์ (GB)	64 กิกะไบต์ (GB)
GPU	High performance GPU computing: NVIDIA Tesla K80; รองรับ AI and DL models; รองรับ CUDA cores	High performance GPU computing: NVIDIA® Tesla® K40; รองรับ AI and DL models; รองรับ CUDA cores
Network for data transfer	อย่างน้อย 10 กิกะบิต	อย่างน้อย 10 กิกะบิตอีเทอร์เน็ต (Gigabit Ethernet)
Data Storage	อย่างน้อย Amazon S3 storage 10 เทราไบต์ (Terabyte); รองรับ MySQL; PostgreSQL; Hadoop	อย่างน้อย 10 เทราไบต์ SATA SSD; รองรับ MySQL; PostgreSQL; Hadoop
Operation System	Linux	Linux



รูปที่ 1-1 แพลตฟอร์ม Spark สำหรับการวิเคราะห์ Big Data ของข้อมูลคลื่นความถี่ (Spectrum Information)

ในรูปที่ 1-1 แสดงชั้น (Layers) สำหรับการวิเคราะห์ Big Data ของข้อมูลคลื่นความถี่ (Spectrum Data Analytics) โดยใช้แพลตฟอร์ม Spark ซึ่งได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นแพลตฟอร์มสำหรับวิเคราะห์ Big Data ที่มีประสิทธิภาพและยังสามารถรองรับการจัดการข้อมูลได้ทั้งข้อมูลแบบเวลาจริง (Real-Time) และข้อมูลแบบอดีต (แบตช์) (Historical (i.e., Batch)) ข้อมูลอินเฟสและควอดเดรเจอร์เฟส (In-Phase and Quadrature-Phase) จากเครื่องรับความถี่จะถูกป้อนเข้าสู่สตรีมมิ่งของ Spark (Spark Streaming) เพื่อสร้างชุดข้อมูลทั้งแบบเวลาจริงและแบบแบตช์ ชุดข้อมูลแบบเวลาจริงจะถูกใช้สำหรับการตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ และการตรวจจับแหล่งกำเนิดการรบกวน (Interference Source Detection) ชุดข้อมูลแบบแบตช์จะถูกใช้สำหรับฝึก (Train) แบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning: DL) ต่าง ๆ และถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์

ของแอปพลิเคชันที่ใช้ข้อมูลแบบแบตช์ต่าง ๆ เช่น การทำนายพฤติกรรมการใช้คลื่นความถี่ (Forecast Spectrum Behavior) หรือใช้ในกระบวนการรายงานและวางแผน (Report and Planning Process) เนื่องจากต้องการข้อมูลคลื่นความถี่สำหรับฝึกปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึก (DL) ให้มากที่สุด ตัวอย่างของกรอบงาน (Framework) สำหรับเก็บข้อมูลส่วนกลาง (Data Lake) ควรจะใช้เป็น MySQL, PostgreSQL หรือ Hadoop ซึ่งที่เก็บข้อมูลส่วนกลางเหล่านี้สามารถรับส่งข้อมูลได้จากระบบ Spark

1.3.1.2 การสร้างผลการวิเคราะห์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในภารกิจการจัดทำแผนการกำหนดและจัดสรรคลื่นความถี่ในปัจจุบันและอนาคต

จากนั้นผลลัพธ์ขาออก (Output Results) จากแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกจะถูกนำเสนอโดยใช้บริการต่าง ๆ บนเว็บ (Web-Based Services) เพื่อนำไปใช้สนับสนุนการตัดสินใจและการวางแผนที่เกี่ยวกับการกำหนดและจัดสรรคลื่นความถี่ในปัจจุบันและอนาคต ภาษาที่ใช้ทำการโปรแกรม (Programming Language) ของ Spark สำหรับใช้กับปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกได้แก่ SCALA, Python, Java และ R

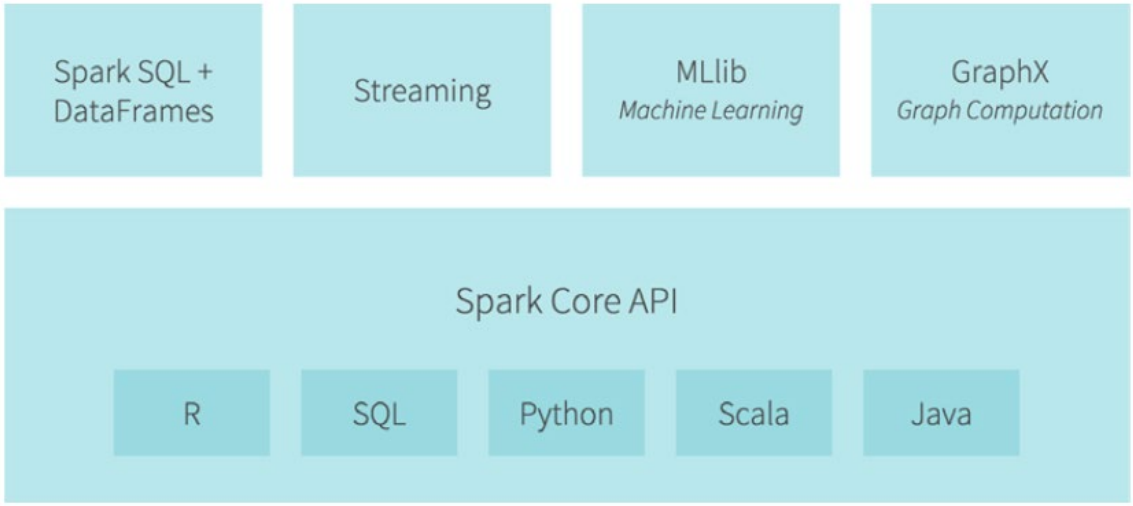
13.1.3 แนวทางการนำข้อมูลไปใช้งาน กรณีที่ต้องการเชื่อมต่อกับระบบสารสนเทศอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานตรวจสอบคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช.

เพื่อที่จะให้สามารถใช้ข้อมูลดิบของคลื่นความถี่ (Spectrum Raw Data) ร่วมกันกับระบบเทคโนโลยีสารสนเทศอื่น ๆ ของสำนักงาน กสทช. แบ็คเอนด์ของที่เก็บข้อมูลส่วนกลาง (Backend of Data Lake) จะมีพอร์ตสำหรับให้ผู้ใช้เข้าถึงและดาวน์โหลด (Access and Download) ข้อมูลไปใช้ได้

<u>แพลตฟอร์ม Apache Spark</u>

แพลตฟอร์ม Apache Spark เป็นกรอบงานแบบโอเพนซอร์สสำหรับการประมวลผล Big Data ที่สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว มีความสะดวกในการใช้งาน และรองรับการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน เริ่มแรกถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2009 ใน AMPLab ของ University of California, Berkeley และเปิดเป็นโอเพนซอร์สในปี ค.ศ. 2010 ภายใต้โครงการ Apache

แพลตฟอร์ม Apache Spark มีจุดเด่นหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับแพลตฟอร์ม Big Data อื่น ๆ และเทคโนโลยี MapReduce เช่น Hadoop และ Storm กล่าวคือ Spark เป็นกรอบการทำงาน (Framework) แบบครบวงจรที่สนับสนุนความต้องการของการประมวลผลของ Big Data ที่มีชุดข้อมูลหลากหลายและคุณลักษณะแตกต่างกัน (เช่น ข้อมูลข้อความ/ข้อมูลกราฟ) รวมไปถึงความแตกต่างของแหล่งข้อมูล (เช่น ข้อมูลแบบแบตช์/ข้อมูลสตรีมแบบเวลาจริง) นอกจากนี้ Spark ช่วยให้แอปพลิเคชันในกลุ่ม Hadoop สามารถทำงานในหน่วยความจำได้เร็วขึ้นสูงสุด 100 เท่า และทำงานบนดิสก์ได้เร็วขึ้น 10 เท่า อีกทั้งยังช่วยสนับสนุนการพัฒนาแอปพลิเคชันใน Java, Scala หรือ Python ได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น เนื่องจากมีชุดตัวดำเนินการระดับสูง (High-level Operator) กว่า 80 ตัว รวมทั้งรองรับการสืบค้นข้อมูลภายในเชลล์ (Shell)



รูปที่ 1-2 ภาพรวมของแพลตฟอร์ม Apache Spark

ดังแสดงในรูปที่ 1-2 แพลตฟอร์ม Apache Spark สามารถรองรับทั้งการสืบค้นข้อมูลจาก SQL, การสตรีมข้อมูล, แมชชีนเลิร์นนิ่ง (ML), และ Graph Data Processing โดยนักพัฒนาสามารถใช้ความสามารถเหล่านี้ทั้งแบบ Standalone หรือรวมความสามารถหลายอย่างเข้าด้วยกันให้ทำงานในลักษณะ Pipeline เดียวกัน ซึ่งคุณสมบัติด้าน Pipeline ดังกล่าวของ Spark เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้กับแอปพลิเคชันแบบเวลาจริงจำนวนมาก

นอกเหนือจาก Core API แล้ว Spark ยังมีไลบรารี (Library) เพิ่มเติมที่เป็นส่วนหนึ่งของแพลตฟอร์ม Spark ซึ่งมอบความสามารถเพิ่มเติมให้กับการวิเคราะห์ Big Data และรองรับการใช้แบบจำลองแมชชีนเลิร์นนิ่ง โดยสามารถสรุปไลบรารีดังกล่าวได้ดังนี้

1) Spark Streaming

Spark Streaming มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลที่เป็นลักษณะการสตรีมแบบเวลาจริง โดยทำงานบนพื้นฐานของการคำนวณและประมวลผลในรูปแบบ Micro Batch และใช้ DStream (Discretized Streams) ซึ่งมีลักษณะเป็นชุดของ RDD (Resilient Distributed Dataset) เพื่อประมวลผลข้อมูลแบบเวลาจริง

2) Spark SQL

Spark SQL (Structured Query Language) ทำให้สามารถใช้ชุดข้อมูล Spark ผ่าน JAVA Database Connectivity Application Program Interface (JDBC API) และช่วยให้สามารถสืบค้นข้อมูลบน Spark ในลักษณะเดียวกับการสืบค้นข้อมูลของ SQL โดยใช้เครื่องมือ BI (Business Intelligence) และ Visualization ดังนั้น Spark SQL จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถ ETL (Extract, Transform, Load) ข้อมูลจากรูปแบบที่แตกต่างกับรูปแบบในปัจจุบัน (เช่น JSON (JavaScript Object Notation), Parquet, ฐานข้อมูล) รวมทั้งแปลงและแสดงข้อมูลสำหรับการสืบค้นแบบ Ad-hoc

3) Spark MLlib

Spark MLlib เป็นไลบรารีด้านแมชชีนเลิร์นนิ่ง ที่ปรับขนาดได้ ประกอบด้วยอัลกอริทึมด้านการเรียนรู้ทั่วไปและอรรถประโยชน์ต่าง ๆ (Utilities) เช่น Classification, Regression, Clustering, Collaborative Filtering, Dimensionality Reduction และ Optimization

4) Spark GraphX

Spark GraphX เป็น API ใหม่ที่รองรับการประมวลผลด้านกราฟ โดยอธิบายในภาพใหญ่ได้ คือ GraphX จะขยาย Spark RDD โดยใช้ Resilient Distributed Property Graph ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟระบุทิศทางจำนวนมากที่มีคุณสมบัติแนบอยู่กับแต่ละจุดยอด (Vertex) และเส้นเชื่อม (Edge) GraphX ใช้ชุดตัวดำเนินการพื้นฐาน (เช่น subgraph, joinVertices และ aggregateMessages) รวมถึง Pregel API เพื่อสนับสนุนการประมวลผลด้านกราฟ นอกจากนี้ GraphX ยังมีชุดอัลกอริทึมกราฟและตัวสร้าง (Builder) เพื่อลดความซับซ้อนของงานวิเคราะห์กราฟ

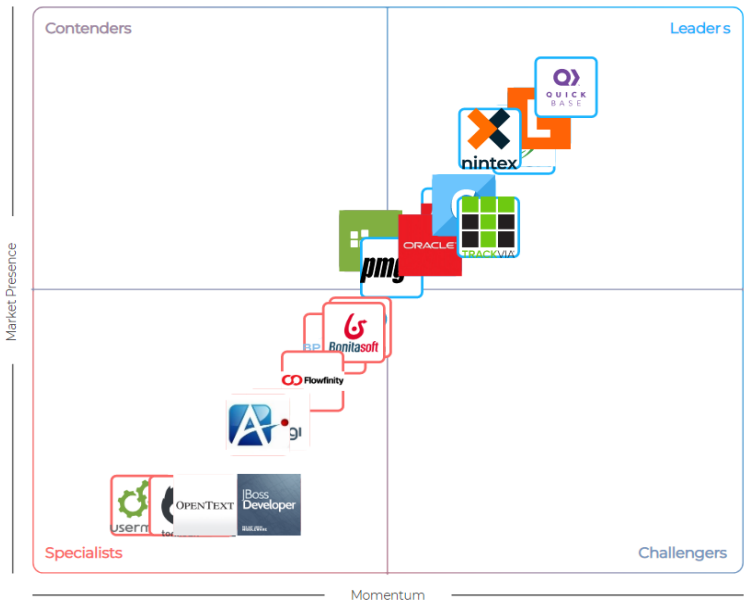
1.3.2 ด้านปัญญาประดิษฐ์ (AI)

1.3.2.1 ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่ และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม

<u>ทฤษฎีพื้นฐานของการใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติ (Business Process Automation)</u>

การจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติ (Business Process Automation (BPA)) โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์และแมชชีนเลิร์นนิ่งช่วยให้บริษัทหรือองค์กรต่าง ๆ สามารถที่จะทำให้กระบวนการทำงานต่าง ๆ เป็นอัตโนมัติ (Automate) โดยสามารถทำทั้งกระบวนการหรือเลือกทำเป็นบางส่วนได้ เช่น การพิจารณาว่าลูกค้าต้องการอะไรจากข้อมูลที่ลูกค้าป้อนเข้ามา อย่างเช่นในกรณีที่ลูกค้าที่ใช้งานร้านค้าออนไลน์ (Online Store) เริ่มที่จะพิมพ์ข้อความ เพื่อค้นหาสินค้า แมชชีนเลิร์นนิ่งจะสามารถทำนายและแนะนำข้อความที่เกี่ยวข้องให้กับลูกค้าโดยอัตโนมัติ นอกจากนั้นยังสามารถแสดงข้อมูลสินค้าที่เกี่ยวข้องกับคำที่ค้นหานั้นได้ด้วย เป็นต้น แพลตฟอร์มการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัตินี้ช่วยให้องค์กรสามารถประหยัดเวลาในการทำงานลักษณะซ้ำ ๆ ทำให้เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแก้ปัญหา (Mean Time to Resolution) เร็วขึ้น และสามารถควบคุมโครงสร้างพื้นฐานของระบบสารสนเทศ (IT Infrastructure) ได้มากขึ้น จากรายงานทางการตลาด (Market Report) เกี่ยวกับการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติของ AIMultiple [4] มีบริษัทชั้นนำทั่วโลกประมาณ 27 บริษัทที่ให้บริการซอฟต์แวร์และโซลูชัน (Solution) สำหรับการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัตินี้ (ดูรูปที่ 1-3)

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. ขั้นตอนการทำงาน (Workflow) และคำร้องต่าง ๆ จะมีลักษณะที่เป็นการทำซ้ำ (Repetitive) ดังนั้นจึงสามารถที่จะทำเป็นการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติได้ ยกตัวอย่างเช่น ผู้ประกอบการหรือผู้ใช้คลื่นความถี่ สถานีวิทยุ หน่วยงานราชการที่ต้องการใช้คลื่นความถี่จะต้องส่งแบบคำร้องเพื่อขอใช้คลื่นความถี่มาที่สำนักงาน กสทช. คำร้องเหล่านี้มีข้อมูลต่าง ๆ เช่น ย่านความถี่ที่ขอใช้งาน ชนิดของมอดูเลชัน (Modulation) กำลังส่งของอุปกรณ์ และข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่นำเข้ามา จากข้อมูลเหล่านี้สำนักงาน กสทช. ก็จะนำมาพิจารณาว่าจะอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่หรือขอให้ผู้ยื่นคำร้องเปลี่ยนแปลงข้อมูลในคำร้องที่ยื่นเข้ามา เป็นต้น



รูปที่ 1-3 ตัวอย่างบริษัทชั้นนำทั่วโลกที่เชี่ยวชาญเกี่ยวกับโซลูชันการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติ

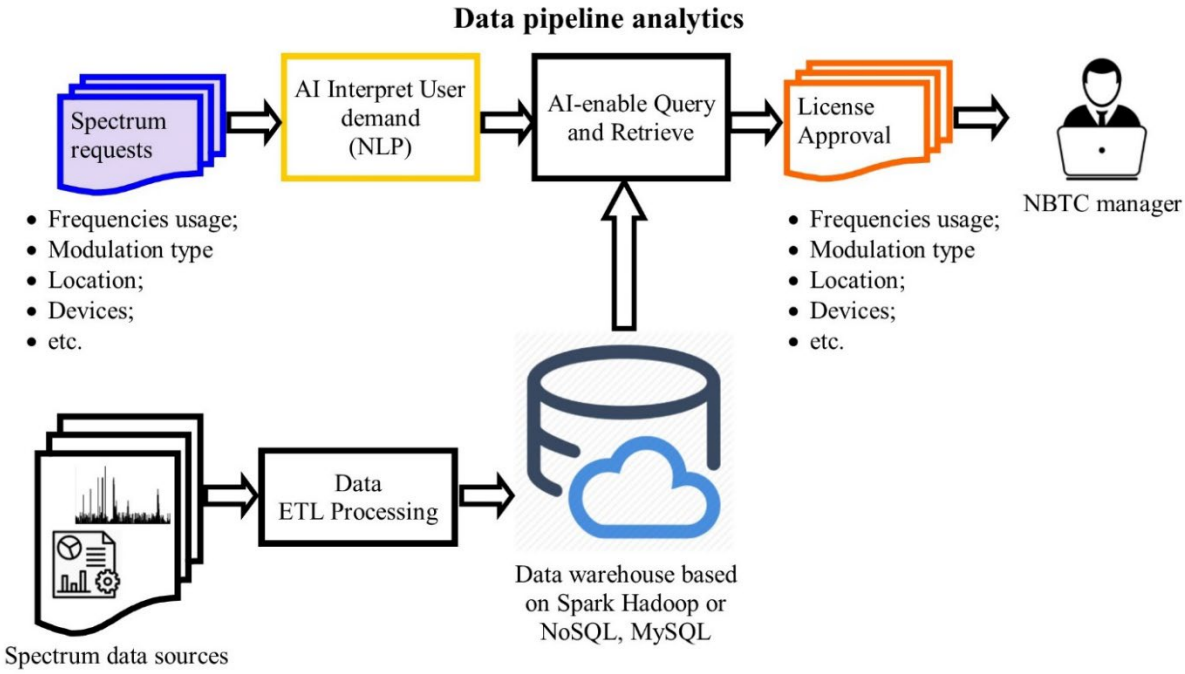
ในขอบเขตของการทำงานนี้ คณะผู้วิจัยเสนอการนำเอาปัญญาประดิษฐ์และแมชชีนเลิร์นนิ่งมาใช้เพื่อประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมเพื่อทดแทนระบบรับคำร้องเดิม มาเป็นระบบออนไลน์ที่ประมวลผลอัตโนมัติ (ระบบประมวลผลอัตโนมัติ) ระบบประมวลผลอัตโนมัตินี้จะช่วยผู้ยื่นคำร้องตั้งแต่ขั้นตอนแรกโดยการให้ข้อมูลต่าง ๆ เช่น คลื่นความถี่ที่จะขอรับใบอนุญาตมีอยู่หรือไม่ รวมถึงชนิดของมอดูเลชันที่อนุญาต เป็นต้น จากนั้นระบบประมวลผลอัตโนมัติจะสร้างแบบฟอร์มการอนุมัติใบอนุญาต (License Approval Form) สำหรับเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบเพื่อพิจารณาต่อไป

<u>สภาพปัจจุบันเกี่ยวกับการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมจากสำนักงาน กสทช.</u>

การพิจารณาคำร้องการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมทั้งในฝั่งของกิจการโทรคมนาคม และในฝั่งของกิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์ ตามประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่อง การมี ใช้เครื่องวิทยุคมนาคม และตั้งสถานีวิทยุคมนาคม พ.ศ. 2554 ในอดีตที่ผ่านมาผู้ที่ประสงค์จะขอรับใบอนุญาตต้องนำส่งแบบคำขอใบอนุญาตทำ มี ใช้ นำเข้า นำออก ค้าซึ่งวิทยุคมนาคม และตั้งสถานีวิทยุคมนาคม พร้อมกับเอกสารประกอบอื่น ๆ ที่จำเป็นแก่การพิจารณา ได้แก่ สำเนาหนังสือรับรองการจดทะเบียนนิติบุคคล สำเนาบัตรประจำตัวประชาชน/สำเนาทะเบียนบ้านของผู้มีอำนาจผูกพันของหน่วยงาน สำเนาหนังสือสำนักงาน กทช./กสทช. หรือกรมไปรษณีย์โทรเลข ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคมหรือตั้งสถานีวิทยุคมนาคม ใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคมฉบับเดิม (กรณีต้องออกใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคมฉบับใหม่) หนังสือมอบอำนาจพร้อมเอกสารทั้งผู้มอบอำนาจและผู้รับมอบอำนาจ รวมทั้งเอกสารอื่นใดที่จำเป็นแก่การพิจารณาตามที่เห็นสมควร ซึ่งบ่อยครั้งมักพบปัญหาที่หลากหลายในการนำส่งเอกสารต่าง ๆ มากมายที่เป็นลักษณะแบบกระดาษ (Hard Copy) เช่น เอกสารไม่ถูกต้องหรือยังไม่ครบถ้วนต้องเสียเวลายื่นเอกสารใหม่ การเก็บรวบรวมข้อมูลเอกสารที่เป็นกระดาษอาจตกหล่นหรือเสียหายได้ง่าย ต้องมีพื้นที่จัดเก็บเอกสารกระดาษจำนวนมาก ความยุ่งยากในการค้นหาเอกสารและข้อมูลต่าง ๆ ย้อนหลัง เป็นต้น

ปัจจุบันสำนักงาน กสทช. ได้เริ่มใช้งานระบบยื่นคำขอพิจารณาใบอนุญาตวิทยุคมนาคมผ่าน Web Application โดยผู้ที่ประสงค์จะขอรับใบอนุญาตสามารถส่งแบบคำขอใบอนุญาตทำ มี ใช้ นำเข้า นำออก ค้าซึ่งวิทยุคมนาคม และตั้งสถานีวิทยุคมนาคม พร้อมกับเอกสารประกอบอื่น ๆ ที่จำเป็นแก่การพิจารณาได้แบบออนไลน์ผ่านเว็บไซต์ของสำนักงาน กสทช. โดยแอปพลิเคชันดังกล่าวจะมีช่องว่างให้ผู้ใช้งาน (User) ที่ได้ลงทะเบียนกับสำนักงาน กสทช. สามารถกรอกข้อมูลสำคัญต่าง ๆ ลงในแบบฟอร์มคำขอใบอนุญาตได้โดยสะดวก พร้อมทั้งสามารถนำส่ง (Upload) ไฟล์ (File) เอกสารประกอบอื่น ๆ ในรูปแบบของ PDF เพื่อใช้ประกอบในการพิจารณา แอปพลิเคชันนี้ถูกออกแบบมาให้สามารถใช้บริการได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น รวมทั้งเพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการนำส่งเอกสารด้วยกระดาษ เช่น ผู้ประสงค์จะขอรับใบอนุญาตไม่ต้องเดินทางเพื่อมาส่งเอกสารที่สำนักงาน กสทช. แอปพลิเคชันนี้มีฟังก์ชันเตือนปรากฏขึ้นในกรณีที่ช่องว่างที่สำคัญยังไม่มีข้อมูลซึ่งผู้ใช้งานต้องใส่ข้อมูลจนครบถ้วนทั้งหมดจึงจะสามารถส่งคำขอพิจารณาใบอนุญาตวิทยุคมนาคมได้ การเก็บข้อมูลเป็นลักษณะข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสามารถเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์และยังค้นหาเอกสารและข้อมูลต่าง ๆ ย้อนหลังได้โดยง่าย เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนผ่านจากรูปแบบของข้อมูลที่เป็นกระดาษไปสู่ข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวข้างต้นยังไม่มีเทคโนโลยีหรือโปรแกรมที่ช่วยในจัดการและประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่หรือ Big Data ดังนั้นโครงการวิจัยแนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data จึงมีแนวคิดที่จะนำข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ จากระบบยื่นคำขอพิจารณาใบอนุญาตวิทยุคมนาคมผ่าน Web Application ทั้งในฝั่งของกิจการโทรคมนาคม และในฝั่งของกิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์ ซึ่งมีทั้งข้อมูลในรูปแบบของตัวอักษร ตัวเลข และการนำส่งไฟล์ เอกสารประกอบต่าง ๆ มาใช้ในการวิจัยออกแบบและสร้าง AI Platform ในระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมเพื่อใช้ประกอบและสนับสนุนในการพิจารณาใบอนุญาตวิทยุคมนาคมได้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วยิ่งขึ้น



รูปที่ 1-4 ระบบประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมอัตโนมัติที่เสนอ

ระเบียบวิธี

ระบบประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมอัตโนมัติที่เสนอมีภาพรวมดังแสดงในรูปที่ 1-4 ข้อมูลคลื่นความถี่ที่สำนักงาน กสทช. มีอยู่จะถูกเก็บไว้ที่คลังข้อมูล (Data Warehouse) และจะถูกอัปเดตโดยการจัดการข้อมูลแบบ ELT (Extract, Transform, and Load) ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายโอนข้อมูลจากแหล่งข้อมูลหลาย ๆ แหล่งมาไว้ที่คลังข้อมูลเดียวกันอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อผู้ใช้ส่งคำร้องเข้าสู่ระบบประมวลผลอัตโนมัติ มอดูล (Module) ที่เรียกว่า AI Interpret User จะดึงเอาข้อมูลจากแบบคำร้อง เช่น ย่านความถี่ มอดูเลชัน ตำแหน่งของอุปกรณ์ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าสู่มอดูล Query and Retrieve ซึ่งจากข้อมูลที่ได้รับจะไปดึงเอาข้อมูลที่จำเป็นจากคลังข้อมูลของสำนักงาน กสทช. ด้วยข้อมูลจากคลังข้อมูลระบบประมวลผลอัตโนมัติจะพิจารณาว่าควรอนุมัติตามคำขอหรือควรขอให้มีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลในคำร้อง จากนั้นผลการพิจารณาของระบบอัตโนมัติจะถูกส่งมายังสำนักงาน กสทช. เพื่อพิจารณาขั้นสุดท้าย

คณะผู้วิจัยเสนอใช้การจัดการข้อมูลแบบ NLP (Natural Language Processing) ในส่วนของมอดูล AI Interpret User เพื่อที่จะดึงข้อมูลที่เกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่จากคำร้องโดยการค้นหาคำสำคัญ (Keyword Searching) โดยในส่วนนี้คณะผู้วิจัยเสนอให้ใช้โครงข่ายนิวรอลแบบคอนโวลูชันนัล (Convolutional Neural Network: CNN) และโครงข่ายนิวรอลแบบคอนโวลูชันนัลที่เกิดขึ้นซ้ำ (Recurrent Convolutional Neural Network: RNN) เป็นหลักสำหรับการทำการแบ่งกลุ่มข้อความ (Text Classification)

จากข้อมูลที่ได้รับจากขั้นตอน NLP ข้างต้น มอดูล AI-enable Query and Retrieve จะไปดึงข้อมูลที่จำเป็นจากคลังข้อมูล ซึ่ง BigQuery ของ Google [5] เหมาะที่จะใช้ในขั้นตอนนี้ เนื่องจากมี Big Query ML ซึ่งเป็นแมชชีนเลิร์นนิ่ง นอกจากนั้นยังมี Cloud ML Engine และมี TensorFlow ซึ่งทำให้สามารถฝึก (Train) ระบบให้เข้าใจข้อมูลที่มีโครงสร้าง (Structured Data) ได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เพียงแค่ SQL

แกนหลัก (Core) ของระบบประมวลผลอัตโนมัติที่เสนอได้แก่ ขั้นตอนการจัดการข้อมูลแบบ ETL ซึ่งนอกจากจะถ่ายโอนข้อมูลจากหลายแหล่งข้อมูลมารวมไว้ในคลังข้อมูลเดียวแล้ว การจัดการข้อมูลแบบ ETL ยังแปลง (Convert/ Transform) ฐานข้อมูลต่าง ๆ ให้เป็นรูปแบบเดียว โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ดึงข้อมูล (Extract) : รวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ซึ่งมักมีรูปแบบของข้อมูลแตกต่างกัน
- แปลง (Transform) : แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่ถูกต้องเพื่อให้ข้อมูลจากฐานข้อมูลหรือแอปพลิเคชันหนึ่งสามารถใช้ร่วมกับฐานข้อมูลหรือแอปพลิเคชันอื่น ๆ ได้ โดยมีฟังก์ชันการทำงานหลัก (Key Functions) ดังนี้
    - Standardization : การทำให้เซ็ตของค่าการค้นหา (Set of Lookup Value) ต่าง ๆ เป็นมาตรฐานสอดคล้องกัน
    - Cleansing : การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเพื่อที่จะแก้ไขหรือนำข้อมูลที่มีปัญหาออก
    - Transposing : มักจะเป็นการปรับรูปแบบและโครงสร้าง (De-Normalizing and Reorganizing) ข้อมูลให้เป็นรูปแบบที่เหมาะที่สุดในการรายงานผล
    - Creating Surrogate Keys : การสร้างตัวแทนของค่า (Value) ที่จะถูกนำไปปรับใช้กับข้อมูลที่คล้ายกันจากแหล่งข้อมูลอื่น ๆ ที่แตกต่างกัน
- โหลด (Load) : บันทึกข้อมูลลงสู่ฐานข้อมูลปลายทางหรือลงคลังข้อมูล

การจัดการข้อมูลแบบ ETL ให้บริบทในอดีตที่ลึกขึ้น (Deeper Historical Context) ของข้อมูลคลื่นความถี่ ทำให้ระบบสามารถตัดสินใจได้ดีกว่าโดยไม่ต้องผ่านการพิจารณาของมนุษย์ ข้อดีอื่น ๆ ของการนำเอาการจัดการข้อมูลแบบ ETL มาใช้ได้แก่

- ความสามารถในการย่อยข้อมูลขนาดใหญ่จากหลาย ๆ แหล่ง โดยเฉพาะข้อมูลขนาดใหญ่ที่มีกฎและการแปลงที่ซับซ้อน (Complex Rules and Transformation)
- ความถูกต้อง (Accuracy) ของข้อมูลที่สูงขึ้น ทำให้การรายงานผลและการตรวจสอบ (Reporting and Auditing) มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- ความยืดหยุ่นในการดำเนินการ (Operational Resilience) เนื่องจากเครื่องมือต่าง ๆ มีฟังก์ชันจัดการความผิดพลาดในตัว (Built-in Error Handling Functionality)

ในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยเสนอใช้เครื่องมือ ETL แบบโอเพนซอร์ส (Open Source ETL Tools) เช่น Apache Airflow, Apache Kafka, Apache NiFi และ Talend Open Studio [6]

การตรวจสอบความถูกต้องและการทดสอบ (Validation and Testing)

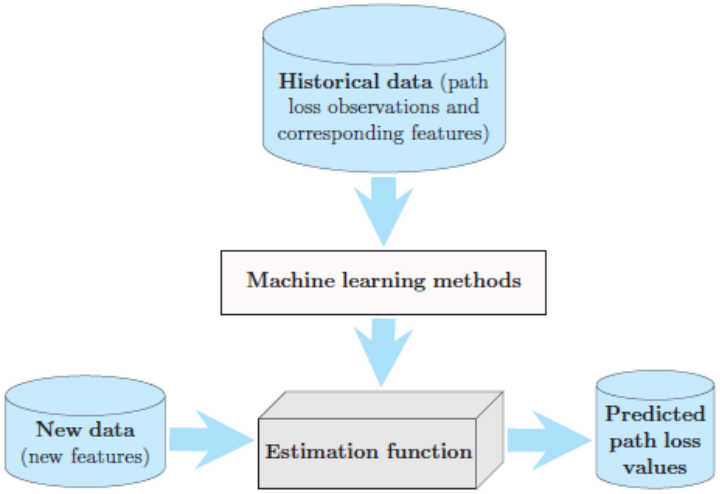
เพื่อให้แน่ใจว่าระบบประมวลผลอัตโนมัติที่เสนอมีประสิทธิภาพและตอบโจทย์ความต้องการของสำนักงาน กสทช. คณะผู้วิจัยจะทดสอบระบบโดยใช้กรณีทดสอบ (Test Case) ในหลายรูปแบบ กรณีทดสอบเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนแปลงและทดสอบเป็นระยะ ๆ กับแหล่งข้อมูลเกี่ยวกับคลื่นความถี่ใหม่ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในคลังข้อมูลคลื่นความถี่

1.3.2.2 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่ในพื้นที่ที่น่าสนใจ

ในการประเมินการรบกวนของการใช้คลื่นความถี่ องค์ประกอบที่สำคัญในการประเมินการรบกวนคือแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณ (Propagation Model) ซึ่งค่าการลดทอนสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ย่านความถี่ สภาพพื้นที่ (เช่น ในเมืองที่เต็มไปด้วยตึก หรือพื้นที่ห่างเมืองออกไปซึ่งเป็นที่โล่งหรือมีต้นไม้ปกคลุม เป็นต้น) ระยะห่างระหว่างจุดส่งกับจุดรับสัญญาณ รวมไปถึงความสูงของสายอากาศ (Antenna) ของทั้งจุดส่งและจุดรับสัญญาณ เป็นต้น ด้วยแบบจำลองการทดทอนสัญญาณในพื้นที่ที่สนใจ ระดับสัญญาณที่รับได้ ณ จุดต่าง ๆ ในพื้นที่นั้นก็จะสามารถประมาณออกมาได้และสามารถนำมาประเมินการรบกวน ณ จุด และพื้นที่ที่สนใจได้

โดยหลักการ การประมาณการลดทอนสัญญาณเป็นการหาฟังก์ชัน (Function) ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลขาเข้า (Input) เช่น ย่านความถี่ ระยะห่างระหว่างจุดรับกับจุดส่งสัญญาณ และปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการลดทอนสัญญาณตามที่ได้กล่าวถึงไปก่อนหน้านี้ กับข้อมูลขาออก (Output) ซึ่งได้แก่การลดทอนสัญญาณ และด้วยข้อมูลที่ได้จากการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ในย่านต่าง ๆ ซึ่งเป็นหนึ่งในขอบเขตการดำเนินงานของข้อเสนอโครงการวิจัยนี้ รวมถึงจากข้อมูลตำแหน่งและกำลังส่งของเครื่องส่งวิทยุคมนาคมจากฐานข้อมูลที่สำนักงาน กสทช. มีอยู่แล้ว การประมาณการลดทอนสัญญาณนี้จัดได้ว่าเป็น Supervised Regression Problem ซึ่งสามารถประมาณการลดทอนสัญญาณได้โดยใช้ Supervised Machine Learning Algorithms [7]

จากงานวิจัย [8] และ [9] พบว่าการใช้แมชชีนเลิร์นนิ่ง (ML) เพื่อประมาณการลดทอนสัญญาณมีข้อดีกว่าแบบจำลองดั้งเดิมที่ใช้ในการประมาณการลดทอนสัญญาณ กล่าวคือมีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณที่พัฒนามาจากการวัดสัญญาณจริง (Empirical Model) เช่น Log-Distance Model และมีความซับซ้อนของการคำนวณอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยความซับซ้อนในการคำนวณจะน้อยกว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากความรู้ในกลไกการแพร่กระจายของคลื่น (Deterministic Model) เช่น Ray Tracing Model เป็นต้น นอกจากนั้น แมชชีนเลิร์นนิ่งยังเหมาะที่จะใช้ในการประมาณการลดทอนสัญญาณซึ่งโดยธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดทั้งในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ด้วยเหตุผลอีก 2 ประการคือ แมชชีนเลิร์นนิ่งสามารถประมาณการลดทอนของสัญญาณพร้อมกับบอกขนาดของความไม่แน่นอนของการประมาณนั้น ๆ ได้ และมีความยืดหยุ่นสูงเหมาะสำหรับการประเมินการรบกวนในสถานการณ์ที่อาจมีการใช้ความถี่ย่านใหม่หรือในพื้นที่ใหม่ สอดคล้องกับการทำงานของสำนักงาน กสทช. ที่ต้องกำกับดูแลการใช้คลื่นความถี่ทั้งย่านเก่าและใหม่ของทั้งประเทศ



รูปที่ 1-5 หลักการของการประมาณการลดทอนสัญญาณด้วย Machine Learning [6]

โดยหลักการ ตามรูปที่ 1-5 ข้อมูลการลดทอนของสัญญาณ และปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการลดทอนสัญญาณ เช่น ย่านความถี่ ระยะห่างระหว่างจุดส่งกับรับสัญญาณ เป็นต้น ที่ได้จากการเฝ้าฟังการใช้คลื่นความถี่จะถูกใช้เพื่อฝึก (Train) แมชชีนเลิร์นนิ่ง ให้สร้างแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณในพื้นที่ที่สนใจ จากนั้นเมื่อสร้างแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณได้แล้วก็สามารถประมาณการลดทอนของสัญญาณ ณ จุดต่าง ๆ ในพื้นที่ที่สนใจได้ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ML อัลกอริทึม (Algorithm) ที่นำมาใช้ประมาณการลดทอนของสัญญาณได้ดีมีหลายอัลกอริทึม ได้แก่ [7] และ [10]

- Artificial Neural Network (ANN) ซึ่งในที่นี้จะใช้ Feedforward NN ซึ่งข้อมูลออกจากชั้นของนิวรอน (Neuron) แต่ละชั้นจะเชื่อมต่อเป็นข้อมูลขาเข้าของนิวรอนในชั้นถัดไปโดยไม่มีการป้อนกลับ ระหว่างนิวรอนชั้นข้อมูลขาเข้ากับนิวรอนชั้นข้อมูลขาออก (Output Layer) จะมีชั้นของนิวรอนที่ซ่อนอยู่ (Hidden Layer) อีกอย่างน้อย 1 ชั้น

- Support Vector Regression (SVR) ซึ่งเป็น ML อัลกอริทึม ที่จะประมาณความสัมพันธ์ซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างข้อมูลขาเข้า (Input) กับข้อมูลขาออก (Output) โดยการแก้ Optimization Problem
- Random Forest (RF) ซึ่งเป็น ML อัลกอริทึม ที่เกิดจากการประมาณความสัมพันธ์ (ซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น) ระหว่างข้อมูลขาเข้ากับข้อมูลขาออกโดยใช้ผลการประมาณของการตัดสินใจแบบลำดับขั้น (Decision Tree) หลาย ๆ ขั้น
- การผสมผสานระหว่าง ML และแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณจากการวัดจริง เช่น Log-Distance Model เป็นต้น

โดยปกติข้อมูลลักษณะที่เป็นข้อมูลขาเข้าของการประมาณการลดทอนสัญญาณ (Input Feature) จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ พารามิเตอร์ที่ขึ้นกับระบบ (การสื่อสาร) (System-Dependent Parameter) เช่น ย่านความถี่ ตำแหน่งของเครื่องรับและเครื่องส่ง เป็นต้น และพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับสภาพแวดล้อม (Environment-Dependent Parameter) เช่น ลักษณะทางภูมิศาสตร์และสภาพอากาศของพื้นที่ เป็นต้น

ระเบียบวิธีวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะนำเสนอต้นแบบ (Prototype) ของการประเมินสัญญาณรบกวนในพื้นที่ที่กำหนดร่วมกับสำนักงาน กสทช. โดยจะพิจารณาจากพื้นที่ที่จะก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการศึกษาการบริหารคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์

นอกเหนือจากการกำหนดพื้นที่แล้ว คณะผู้วิจัยจะศึกษาข้อมูลของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่สำนักงาน กสทช. เก็บไว้ในฐานข้อมูล เช่น ย่านความถี่ ความสูงของสายอากาศ ตำแหน่งเครื่องรับเครื่องส่ง เป็นต้น ซึ่งจะเป็นหนึ่งในแหล่งข้อมูลของข้อมูลลักษณะที่จะใช้สำหรับฝึกแมชชีนเลิร์นนิ่ง และใช้เป็นข้อมูลขาเข้า (Input Feature) สำหรับการประมาณการลดทอนสัญญาณ (ดูกล่อง Historical Data และกล่อง New Data ในรูปที่ 1-5)

จาก ML อัลกอริทึมที่กล่าวถึงข้างต้น 4 อัลกอริทึม โครงการวิจัยนี้จะระบุ ข้อมูลลักษณะขาเข้าที่จำเป็น และ ML อัลกอริทึมที่สามารถประมาณการลดทอนสัญญาณได้ดีที่สุด พร้อมทั้งค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของการประมาณการลดทอนสัญญาณด้วย และข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการประเมินการรบกวนในพื้นที่ต้นแบบต่อไป โดยคณะผู้วิจัยจะเน้นที่การใช้ข้อมูลลักษณะขาเข้าที่สำนักงาน กสทช. มีเก็บอยู่แล้วก่อน หากพบว่าจำเป็นต้องเพิ่มก็จะระบุข้อมูลลักษณะขาเข้าที่ควรเก็บเพิ่มโดยคำนึงถึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติของการเก็บข้อมูลร่วมด้วย

ระบบทดสอบ (Test System)

ชุดข้อมูลสำหรับฝึก (Training Set) ประมาณ 70% ของชุดข้อมูล (Datasets)

ชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ (Testing Set) ประมาณ 30% ของชุดข้อมูล

ชุดข้อมูลสำหรับตรวจสอบสอบ (Validating Set) ชุดข้อมูลใหม่ที่ยังไม่ถูกใช้สำหรับฝึกหรือทดสอบ

ตัววัดสมรรถนะ (Performance Metrics)

ความแม่นยำในการประมาณการลดทอนสัญญาณสามารถถูกวัดได้หลายวิธี เช่น ความคลาดเคลื่อนสูงสุดของการประมาณ (Maximum Prediction Error) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน (Error Standard Deviation) ค่าเฉลี่ยของรากที่สองของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error) และค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (Mean Absolute Percentage Error) เป็นต้น [7]

นอกจากความแม่นยำในการประมาณการลดทอนแล้ว คณะผู้วิจัยจะประเมินความสามารถของ ML อัลกอริทึมทั้ง 4 อัลกอริทึมข้างต้นที่จะประมาณการลดทอนสัญญาณในสถานการณ์ใหม่ที่ไม่เคยถูกฝึกมาก่อน (Generalization) เช่น ในย่านความถี่ใหม่ เป็นต้น ด้วย

1.3.2.3 ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวนและวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตเพื่อแจ้งเตือน โดยแบ่งตามพื้นที่ในการใช้ความถี่นั้น ๆ ได้

เพื่อตอบโจทย์ความต้องการต่าง ๆ ของสำนักงาน กสทช. เกี่ยวกับการบริหารจัดการและการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ คณะผู้วิจัยจะพิจารณาเลือกใช้ระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่จากตัวเลือกสามระบบต่อไปนี้เพื่อใช้สำหรับการวิจัยโครงการนี้

1) ระบบแยกเดี่ยวแบบประจำที่ (Standalone System/Fixed Unit)

ระบบแยกเดี่ยวแบบประจำที่นี้ถูกออกแบบมาเพื่อติดตามความเปลี่ยนแปลง (Variation) ในส่วนของความหนาแน่นประชากร อาคาร สภาพพื้นที่ (Terrain) และปัจจัยอื่น ๆ ในหรือรอบ ๆ พื้นที่ที่กำหนด (อาจจะเป็น ในเมือง ชานเมือง และพื้นที่นอกเมือง)

2) ระบบแยกเดี่ยวแบบเคลื่อนที่ (Standalone System/Mobile Unit)

ระบบแยกเดี่ยวแบบเคลื่อนที่จำเป็นสำหรับการเสริมการทำงานในพื้นที่ที่เป็นจุดบอดของของระบบประจำที่ ยกตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์ที่วางประจำที่อยู่ทุก ๆ กิโลเมตรอาจจะไม่เห็นสัญญาณ WiFi หรืออุปกรณ์กำลังส่งต่ำในความถี่ย่าน Unlicensed อย่างที่อุปกรณ์ในระบบแยกเดี่ยวแบบเคลื่อนที่เห็นได้ เป็นต้น โดยเมื่อคำนึงเรื่องต้นทุนที่เพิ่มขึ้นซึ่งอาจจะต่ำหากอุปกรณ์แบบเคลื่อนที่เหล่านี้ถูกใช้งานเป็นประจำทุกวัน เช่นในพาหนะสำหรับส่งไปรษณีย์หรือเก็บขยะ เป็นต้น นอกจากนั้นยังไม่จำเป็นต้องใช้ทักษะพิเศษในการทำให้ระบบนี้ทำงานอีกด้วย

3) ระบบที่ติดตั้งทั่วทั้งเมืองหรือทั่วประเทศ

ในการวางแผนการใช้งานอุปกรณ์วิทยุคมนาคมใด ๆ มีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ รวมถึงแบบจำลองเบื้องต้น (First Order Model) ของเมืองและสภาพพื้นที่โดยรอบเพื่อที่ประมาณตำแหน่งที่ดีเหมาะสำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่รวมไปถึงการป้องกันการรบกวนต่าง ๆ จากนั้นจึงพิจารณาตำแหน่งสำหรับการเฝ้าฟังจากโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีอยู่แล้วเพื่อประสิทธิภาพการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่ดีที่สุด

13.2.3.1 เครื่องรับคลื่นความถี่ (Spectrum Receiver)

ในส่วนของเครื่องรับคลื่นความถี่ที่ใช้ในข้อเสนอโครงการวิจัยนี้ เครื่องรับนี้จะต่างจากตัววิเคราะห์คลื่นความถี่ (Spectrum Analyzer) ซึ่งจะใช้วัดสัญญาณที่รู้จักอยู่แล้ว (Known Signals) เครื่องรับคลื่นความถี่จะใช้สำหรับ

- การวัดสัญญาณที่ไม่รู้จัก (Unknown Signals) ในย่าน 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามที่สำนักงาน กสทช. ต้องการ
- เฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่ไม่มีช่องว่าง (Gap-Free Spectrum) อย่างรวดเร็ว
- สัญญาณสามารถถูกดีมอดูเลต (Demodulated) และเฝ้าฟัง (Monitored) ได้
- ฮาร์ดแวร์สำหรับเครื่องเฝ้าฟังคลื่นความถี่สามารถสร้างลำดับของข้อมูลอินเฟสและควอดเดรเจอร์ของสัญญาณตามเวลา (In-Phase and Quadrature Time Sequences) ได้

ปัจจุบันย่านความถี่ที่ถูกนำมาใช้สำหรับเทคโนโลยี 5G สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่ [11]

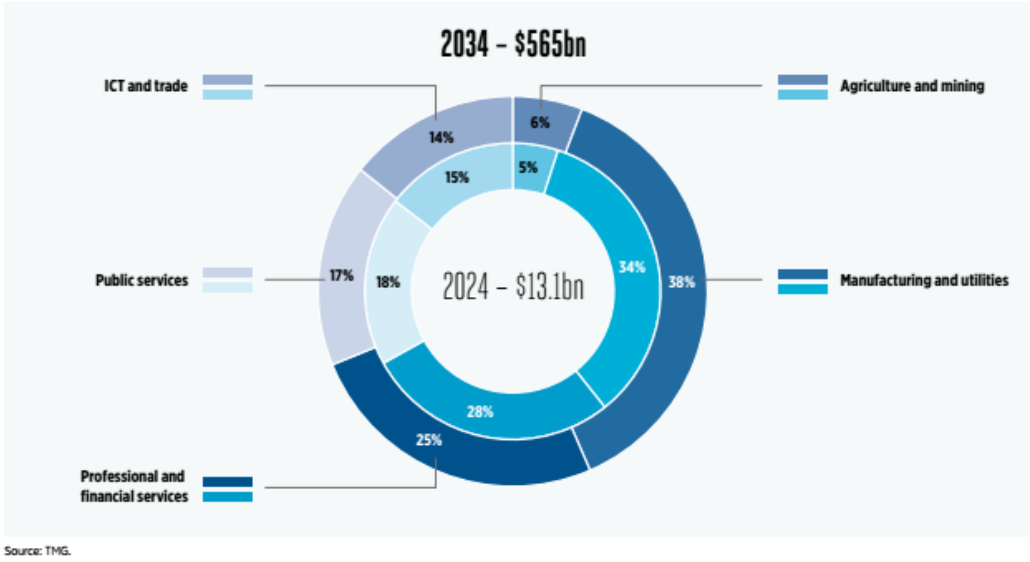
- ย่านความถี่ต่ำ (Low Band): เช่นย่านความถี่ 600 - 700 เมกะเฮิร์ตซ์ สำหรับการใช้งานที่ต้องการพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณเป็นบริเวณกว้าง
- ย่านความถี่ปานกลาง (Mid Band): เช่นย่านความถี่ 2.3 – 4.2 กิกะเฮิร์ตซ์ สำหรับการใช้งานที่ต้องการผสมผสานระหว่างพื้นที่ครอบคลุมและอัตราการรับส่งข้อมูล
- ย่านความถี่สูง (High Band): เช่น คลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรหรือ millimeter Wave (mmWave) ในย่านความถี่ 26 กิกะเฮิร์ตซ์ หรือ 28 กิกะเฮิร์ตซ์ หรือ 40 กิกะเฮิร์ตซ์ เป็นต้น สำหรับการรับส่งข้อมูลความเร็วสูงแบบ Ultra-High Broadband ในพื้นที่จำกัด

คลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรเป็นการใช้งานสำหรับอนาคต ซึ่งปัจจุบันย่านความถี่สูงนี้ยังถูกนำมาใช้งานน้อยมาก ทั้งนี้คาดว่าการใช้งานคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร (mmWave) ในอนาคตจะสามารถสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจในระดับสูงในด้านต่าง ๆ เช่น Manufacturing and Utilities, Professional and Financial Services เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1-6 ในขณะนี้สถานะของการใช้งานคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร (mmWave) ดังกล่าวทั่วโลกอยู่ระหว่างสถานะที่ได้รับการจัดสรรใบอนุญาต (Licensed) แล้ว หรืออยู่ระหว่างการทดลองใช้งาน (Trial) ดังแสดงในรูปที่ 1-7

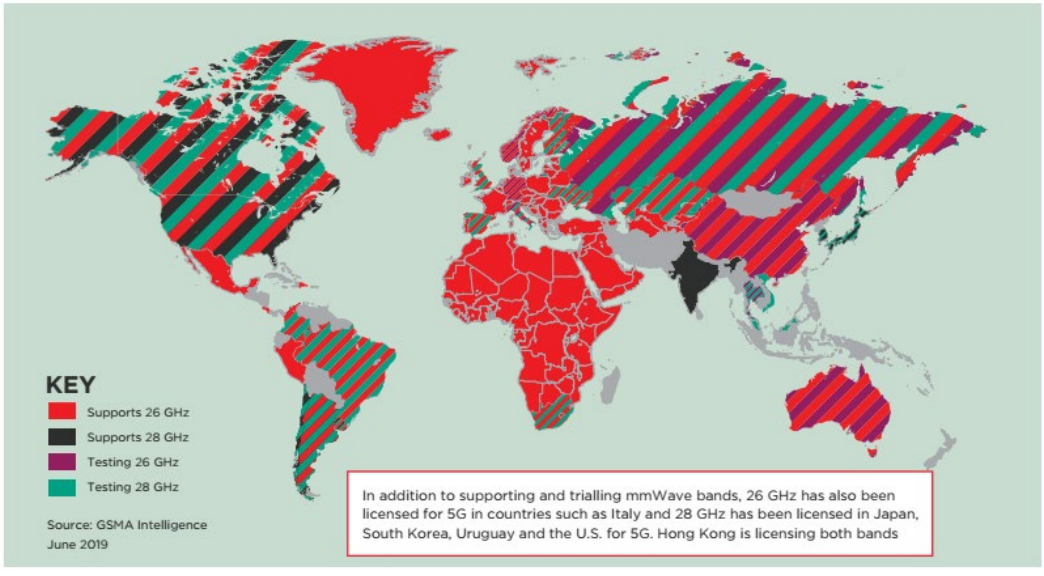
อย่างไรก็ตามคุณลักษณะที่สำคัญของคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร (mmWave) นี้คือมีพื้นที่ครอบคลุมที่จำกัด เช่นในระยะรัศมีเพียงไม่กี่ร้อยเมตรและสัญญาณถูกลดทอนโดยวัตถุต่าง ๆ เช่น อาคาร ต้นไม้ รถยนต์ กำแพง ได้ง่าย [14] ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้ในพื้นที่ที่จำกัดแต่รองรับอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง คุณลักษณะเช่นนี้ทำให้การรบกวนกันของสัญญาณคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรในวงกว้างมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย และด้วยพื้นที่ครอบคลุมที่จำกัดนี้ทำให้การเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (spectrum monitoring) ระดับมิลลิเมตรจำเป็นต้องใช้ความหนาแน่นของเซ็นเซอร์ (Sensors) ที่สูง ซึ่งในปัจจุบันเซ็นเซอร์ที่หาได้ทั่วไปตามท้องตลาดสำหรับเฝ้าฟังคลื่นความถี่ในย่านความถี่สูงนี้กำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนา ยกตัวอย่างเช่นในโครงการเฝ้าติดตามตรวจสอบคลื่นความถี่ระดับโลกอย่างโครงการ ElectroSense ในภูมิภาคยุโรปก็ยังคงพัฒนาและทดลองเซ็นเซอร์ที่สามารถใช้เฝ้าฟังคลื่นความถี่ได้ถึงเพียงแค่ 6 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) เท่านั้น [15]

ด้วยกำลังของสัญญาณคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตรที่ครอบคลุมพื้นที่จำกัดทำให้โอกาสที่จะเกิดการรบกวนกันในวงกว้างมีน้อย ประกอบกับความไม่พร้อมของอุปกรณ์เซ็นเซอร์ที่สามารถทำงานในย่านความถี่ระดับ mmWave ซึ่งยังคงจำกัดความสามารถในการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ในย่านนี้ ดังนั้นงานวิจัยในโครงการนี้จึงเสนอแนวทางในการ

พัฒนาการบริหารคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์และ Big Data ที่มุ่งเน้นไปที่คลื่นความถี่ในย่านที่มีโอกาสจะเกิดการรบกวนกันของสัญญาณในวงกว้าง ซึ่งถือเป็นสถานการณ์ที่มีความยากและท้าทายโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานคลื่นความถี่ในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 6 กิกะเฮิร์ตซ์ ลงมา ซึ่งในอนาคตการพัฒนาขยายการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ไปสู่ย่านความถี่ที่สูงขึ้นเมื่อการพัฒนาอุปกรณ์เซ็นเซอร์มีความพร้อมแล้วจะสามารถทำได้โดยง่ายโดยใช้กระบวนการทำงานของการบริหารคลื่นความถี่เดิมที่ถูกทดสอบด้วยการใช้งานในย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 6 กิกะเฮิร์ตซ์ลงมาแล้ว ทั้งนี้งานวิจัยในโครงการนี้จึงเสนอการวัดสัญญาณที่ไม่รู้จัก (Unknown Signals) ในย่านความถี่ระหว่าง 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ก่อน



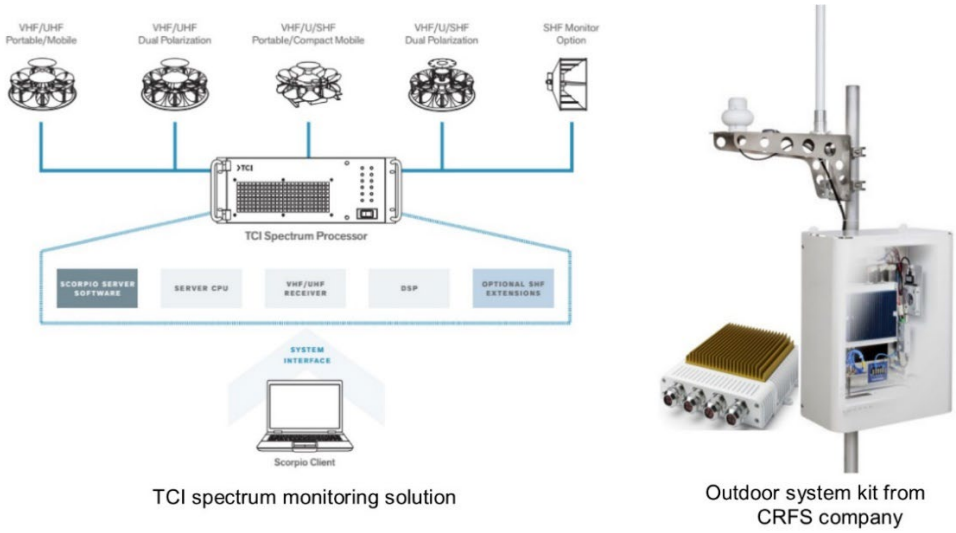
รูปที่ 1-6 มูลค่าทางเศรษฐกิจของการใช้งานย่านความถี่สูง (mmWave) ในอนาคต (ค.ศ. 2024-2034) [12]



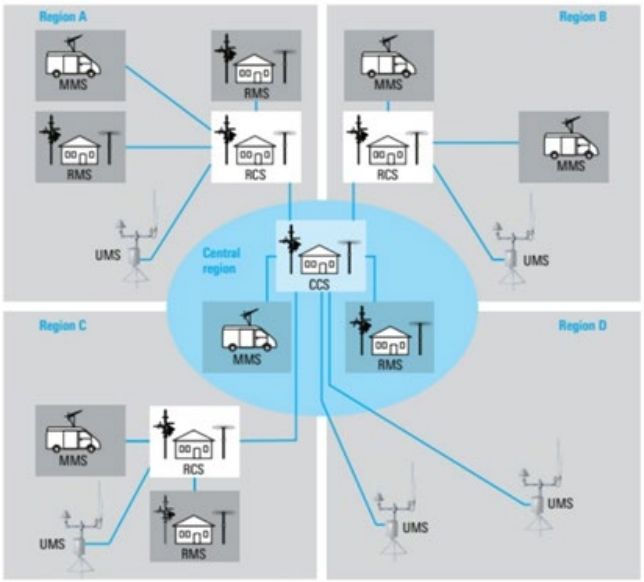
รูปที่ 1-7 สถานะของการใช้งานย่านความถี่สูง (mmWave) สำหรับ 5G ทั่วโลก [13]

1) อุปกรณ์ที่มีขายในท้องตลาด (Commercial Devices)

ในปัจจุบันมีอุปกรณ์สำหรับระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่แบบพร้อมใช้งานวางขายอยู่แล้ว เช่นของ TCI CRFS และ Rhode & Schwarz (ตามรูปที่ 1-8 และ 1-9) ข้อได้เปรียบของอุปกรณ์เหล่านี้คือ ความสอดคล้องกับมาตรฐานความถี่ต่าง ๆ (Spectrum Standard) ความพร้อมใช้งาน และความเชื่อถือได้ (Reliability) อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เหล่านี้มีราคาค่อนข้างแพงอาจไม่เหมาะกับการติดตั้งสำหรับระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ทั้งเมืองหรือทั้งประเทศ



รูปที่ 1-8 ระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่แบบแยกเดี่ยวที่มีขายในตลาด

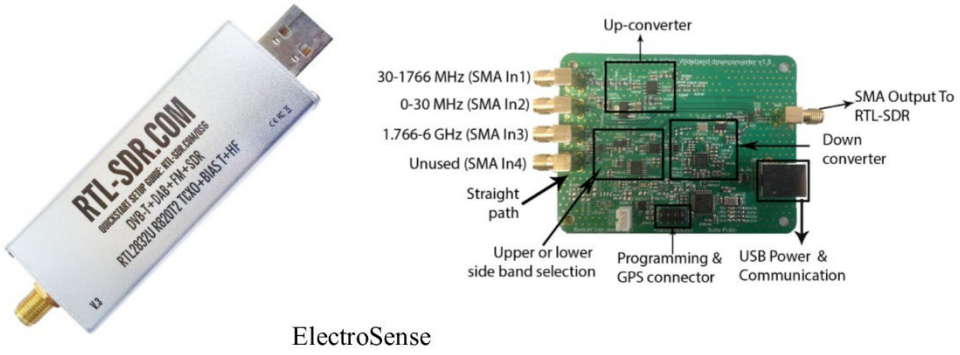


รูปที่ 1-9 ระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่แบบติดตั้งทั่วประเทศจากบริษัท Rhode & Schwarz

2) ฮาร์ดแวร์แบบเปิดสำหรับเครื่องรับคลื่นความถี่ (Open-Hardware for Spectrum Receiver)

เซ็นเซอร์ Electrosense (ดังรูปที่ 1-10) ถูกออกแบบมาให้ใช้ฟรอนต์เอนด์ส่วนที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณวิทยุและแพลตฟอร์มแบบฝังที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (Software-Defined Radio (SDR) Front-Ends and Embedded Platforms) อุปกรณ์ดังกล่าวราคาไม่แพง เข้าถึงง่าย เช่น Rasberry Pi เป็นการลดต้นทุนให้กับผู้ให้ข้อมูลคลื่นความถี่ (Spectrum Data Contributor) ภาคแปลงสัญญาณขาลงที่ถูกออกแบบให้มีราคาต่ำ (Low-Cost Down Converter) ถูกใช้เพื่อขยายช่วงความถี่ด้านต่ำของแพลตฟอร์มที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (Low-End SDR Platforms) จาก 1.7 กิกะเฮิร์ตซ์ ไปเป็น 6 กิกะเฮิร์ตซ์

HackRF One จาก Great Scott Gadgets เป็นอุปกรณ์วิทยุข้างเคียงซึ่งถูกกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (SDR Peripheral) สามารถส่งและรับสัญญาณวิทยุตั้งแต่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ไปจนถึง 6 กิกะเฮิร์ตซ์ HackRF One เป็นแพลตฟอร์มของฮาร์ดแวร์แบบเปิด (Open-Source Hardware Platform) ถูกออกแบบเพื่อให้สามารถทดสอบและพัฒนาสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายยุคใหม่และยุคถัดไปได้ สามารถใช้ได้ทั้งเป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อผ่าน USB (USB Peripheral) หรือลงโปรแกรมให้ทำงานเดี่ยว ๆ (Standalone Operation)

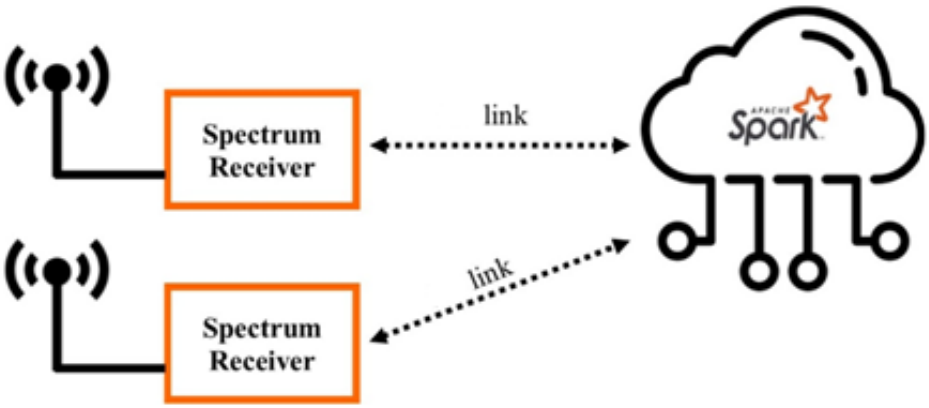


รูปที่ 1-10 ฮาร์ดแวร์แบบเปิด (Open Hardware) ของโครงการ ElectroSense

1.3.2.3.2 ระบบวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่

ระบบที่ทำงานแยกเดี่ยวซึ่งรวมเซิร์ฟเวอร์สำหรับไคลเอนต์และเวิร์กสเตชันท้องถิ่น (Client and Local Workstation Server) เหมาะสำหรับนำมาใช้กับแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้เชิงลึก (DL) ในโครงการนำร่อง (Pilot Project) นี้ เมื่อคำนึงถึงการลดต้นทุนและความพร้อมในการใช้งานของระบบ คณะผู้วิจัยจะพิจารณาสองทางเลือกต่อไปนี้ (รูปที่ 1-11)

- ใช้ระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่มีอยู่แล้วในตลาด (Commercial Spectrum Monitoring System) โดยเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์ เช่น Spark แพลตฟอร์ม
- ใช้เครื่องรับคลื่นความถี่ระบบฮาร์ดแวร์เปิด (Open-Hardware Spectrum Receiver) โดยเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์ เช่น Spark แพลตฟอร์ม



รูปที่ 1-11 กรอบแนวคิดสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการเฝ้าฟังคลื่นความถี่บนคลาวด์

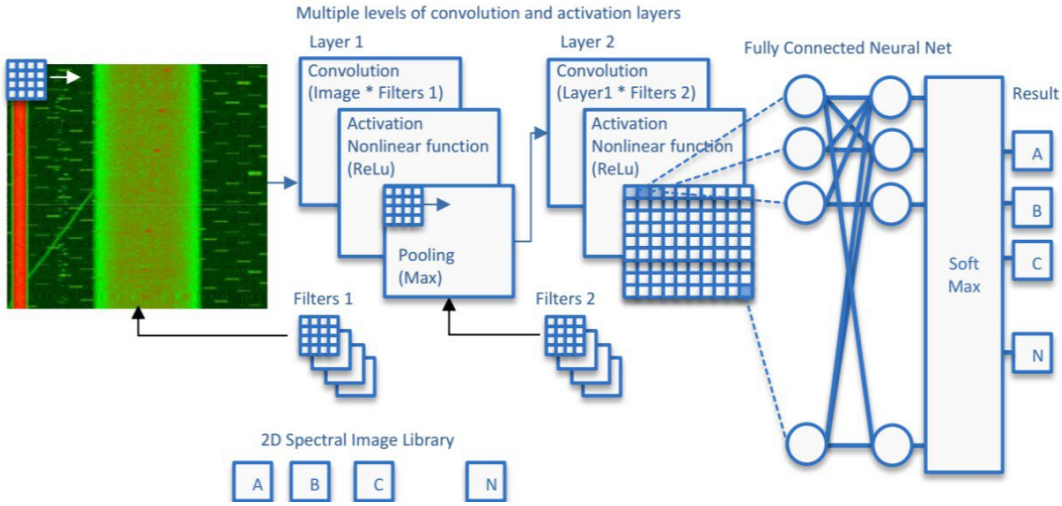
1) การเฝ้าฟังคลื่นความถี่โดยใช้โครงข่ายนิวรอลแบบคอนโวลูชันนอล (Convolutional Neural Network (CNN))

จุดมุ่งหมายสำคัญของการเฝ้าฟังคลื่นความถี่คือ การตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน การวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตจากข้อมูลแบบเวลาจริงหรือข้อมูลในอดีต วิธีการหนึ่งที่มีศักยภาพคือแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก (DL Model) โดยการใช้การรู้จำภาพหรือรูปแบบ (Image or Pattern Recognition) โครงข่ายนิวรอลแบบคอนโวลูชันนอล 2 มิติ จะถูกฝึกด้วยข้อมูลภาพ 2 มิติของคลื่นความถี่ (ที่แสดงว่ากำลังของสัญญาณขึ้นกับย่านความถี่และเวลาอย่างไร เช่น Waterfall Plot เป็นต้น) แต่ละภาพจะมีข้อมูลคุณสมบัติต่าง ๆ ของสัญญาณและมีโอกาสน้อยมากที่คุณสมบัติเหล่านี้จะไปปรากฏอยู่ในสัญญาณรบกวน (Noise) เช่น กลุ่มของพลังงานที่ถูกจำกัดอยู่ในเวลาและย่านความถี่หนึ่ง ๆ หรือกลุ่มของพลังงานที่มีแถบกว้างความถี่คงที่แต่มีการเปลี่ยนย่านความถี่ในอัตราที่คงที่ เป็นต้น CNN ถูกพัฒนาเพื่อใช้กับการรู้จำภาพและใบหน้า ด้วยเหตุที่การเปลี่ยนแปลงของการใช้คลื่นความถี่สามารถแทนได้ด้วยภาพซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนของกำลังของสัญญาณ ความถี่ และเวลาจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ CNN ได้

ในการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ จะมีประโยชน์มากหากระบบเฝ้าฟังสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติตลอดเวลาโดยไม่ต้องมีมนุษย์มาเกี่ยวข้อง ระบบเฝ้าฟังจึงต้องสามารถเรียนรู้ลักษณะการถูกใช้งานปกติของคลื่นความถี่ (Normal Behavior) เพื่อให้ระบบสามารถตรวจจับและรายงานเหตุการณ์ที่น่าสนใจหรือผิดไปจากสถานการณ์ปกติ งานลักษณะนี้เหมาะที่จะใช้ CNN และ Unsupervised Neural Network เพื่อที่จะดึงเอาคุณสมบัติหลัก ๆ (High-Level Features) ของการใช้คลื่นความถี่ออกมาจากข้อมูลจำนวนมหาศาล โครงข่ายนิวรอลประดิษฐ์ (Artificial Neural Network (ANN)) จะถูกฝึกด้วยข้อมูลการใช้ความถี่ปกติจำนวนหลายร้อยชั่วโมง ดังนั้น ANN จะสามารถรู้จำและระบุเหตุการณ์ที่ไม่ปกติหรือไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อนได้

ระเบียบวิธี

ระบบที่ถูกฝึกจะสามารถตรวจจับคุณสมบัติต่าง ๆ ในข้อมูลแบบเวลาจริงหรือข้อมูลในอดีตได้ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแปรเป็นภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อ เนื่องจากตัวรู้จำรูปแบบ (Pattern Recognizer) สามารถตรวจจับสัญญาณที่ไม่เคยเจอมาก่อนได้ (ทั้งนี้สัญญาณดังกล่าวต้องมีคุณสมบัติบางอย่างที่ตัวรู้จำเคยเรียนรู้มาก่อน) จึงสามารถใช้สำหรับค้นหาสัญญาณใหม่ได้อย่างดี



รูปที่ 1-12 ตัวอย่างของแบบจำลอง Convolutional Neural Network (CNN) สำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ [1]

ส่วนหลักของแบบจำลอง CNN คือตัวเข้ารหัสอัตโนมัติ (Autoencoder) ซึ่งเรียนรู้การรับเอาข้อมูลเข้าบีบอัดเป็นการแทนสัญญาณหรือที่เรียกว่าการเข้ารหัส (Encoding) และจากนั้นก็สร้างสัญญาณขาเข้าเดิม (Original Input) จากการเข้ารหัสนี้ จากนั้นตัวเข้ารหัสอัตโนมัตินี้ก็จะทำให้ CNN สร้างภาพนี้ขึ้นมาใหม่แทนที่จะส่งกลับสิ่งที่ CNN เห็นจากข้อมูลขาเข้า ตัวเข้ารหัสช่วยให้ CNN สามารถรู้จำรูปแบบที่หลากหลายขึ้นเช่น การสร้างภาพแสดงการถูกใช้งานของคลื่นความถี่ในเชิงเวลาและความถี่ เป็นต้น

ระบบสำหรับทดสอบ

เซ็ตข้อมูลฝึก (Training Set): ประมาณ 70% ของข้อมูลทั้งหมด มีเฉพาะข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ในสถานการณ์ปกติ

เซ็ตข้อมูลทดสอบ (Testing Set): ประมาณ 30% ของข้อมูลทั้งหมด

เซ็ตข้อมูลตรวจสอบ (Validating Set): ชุดข้อมูลใหม่ จาก RF Fingerprints ของแหล่งข้อมูลที่รู้จัก กรณีนี้ต้องพิจารณารายละเอียดของรูปแบบสัญญาณด้วย

ตัววัดสมรรถนะ (Performance Metric)

คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) เหมาะที่จะนำมาใช้วัดสมรรถนะของการรู้จำรูปแบบ

2) การตรวจจับแหล่งกำเนิดการรบกวนด้วยโครงข่ายนิวรอลแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Neural Network (FFNet))

แมชชีนเลิร์นนิ่งสามารถเรียนรู้คุณสมบัติ (Feature) ที่ดึงมาจากสัญญาณวิทยุที่รับได้ คณะผู้วิจัยจะนำเสนอผลของการใช้โครงข่ายนิวรอลประดิษฐ์ (Artificial Neural Network (ANN)) เพื่อจำแนกประเภทของสัญญาณ ในที่นี้จะใช้โครงข่ายนิวรอลแบบป้อนไปข้างหน้าซึ่งข้อมูลขาออก (Output) จากชั้นของนิวรอน (Layer of Neurons) ถูกเชื่อมต่อไปเป็นเฉพาะส่วนข้อมูลขาเข้า (Input) ของนิวรอนชั้นถัดไป โดยไม่มีการป้อนกลับในขบวนการตัดสินใจ คุณสมบัติต่าง ๆ ถูกป้อนเข้าสู่ชั้นข้อมูลขาเข้า (Input Layer) ระหว่างชั้นข้อมูลขาเข้ากับชั้นข้อมูลขาออก (Output Layer) จะมีชั้นของนิวรอนที่ซ่อนอยู่ (Hidden Layer) อย่างน้อย 1 ชั้น ชั้นข้อมูลขาออกจะเชื่อมกับฟังก์ชันสำหรับโวต (Voting Function (SoftMax)) ซึ่งจะประมาณค่าความน่าจะเป็นของประเภทของสัญญาณประเภทต่าง ๆ

หากประเภทสัญญาณชนิดใดชนิดหนึ่งมีความน่าจะเป็นที่สูงกว่าประเภทของสัญญาณอื่น ๆ ผลลัพธ์การแบ่งประเภทสัญญาณก็จะชัดเจนและง่ายต่อการตีความ หากประเภทของสัญญาณต่าง ๆ มีความน่าจะเป็นใกล้เคียงกัน โครงข่ายนิวรอลประดิษฐ์ก็จะให้คำตอบพร้อมด้วยค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) แทนที่จะฟันธงลงไปว่าสัญญาณที่ตรวจจับอยู่นั้นเป็นประเภทใด นี่เป็นส่วนที่แตกต่างจากการใช้วิธีต้นไม้การตัดสินใจ (Decision Tree) ซึ่งจะถูกบังคับให้ต้องเลือกตอบอย่างใดอย่างหนึ่งแม้ว่าจะมีความคลุมเครือไม่ชัดเจนเกี่ยวกับสัญญาณที่กำลังพิจารณา คุณสมบัติ (Feature) ที่ FFNet เรียนรู้จะแตกต่างกับคุณสมบัติของสัญญาณที่ CNN เรียนรู้ สำหรับการจำแนกประเภทสัญญาณในหัวข้อที่แล้ว

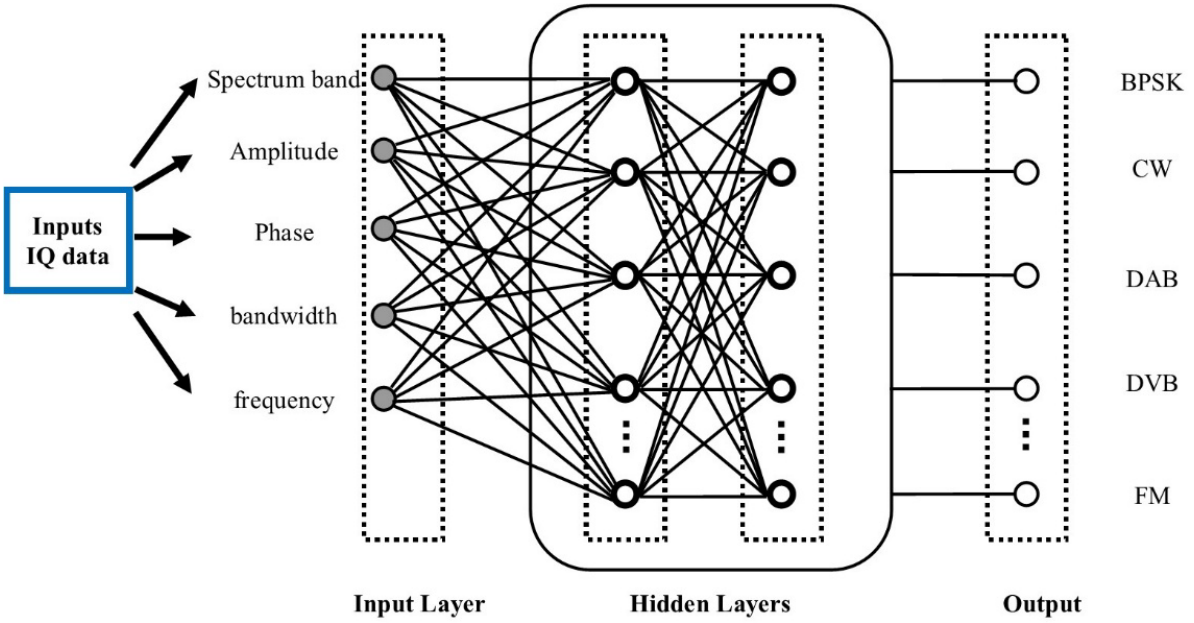
การจำแนกประเภทสัญญาณโดยใช้ FFNet มีข้อได้เปรียบหลายข้อ กระบวนการที่เป็นอัตโนมัติทำให้การจำแนกประเภทสามารถถูกปรับปรุงให้ดีที่สุด (Optimized) ด้วยการฝึกด้วยข้อมูลที่มากขึ้นโดยไม่ต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญ สามารถที่จะนำไปติดตั้งบนเซิร์ฟเวอร์ท้องถิ่นหรือบนคลาวด์ซึ่งผู้ใช้สามารถฝึก FFNet ได้เองหากไม่ต้องการเปิดเผยข้อมูลสำหรับฝึกต่อผู้ให้บริการคลาวด์ (เช่นในกรณีที่ต้องการความปลอดภัยของข้อมูล (Security))

ข้อได้เปรียบอีกข้อหนึ่งคือ การใช้แมชชีนเลิร์นนิ่ง (ML) มีคุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) จึงอาจสามารถปรับให้เข้ากับข้อมูลได้ดีกว่าวิธีเชิงเส้น ผลลัพธ์ขาออกจาก ML มีข้อมูลที่เป็นประโยชน์มากกว่าเนื่องจากมีการรายงานความน่าจะเป็นของประเภทสัญญาณต่าง ๆ แทนที่จะฟันธงไปเลยว่าเป็นสัญญาณประเภทใด ทำให้ทราบว่าสามารถมั่นใจกับคำตอบที่ได้ในระดับใด

<u>ระเบียบวิธี</u>

ชุดข้อมูลขาเข้าที่ต้องการสำหรับการจำแนกประเภทสัญญาณโดยอัตโนมัตินี้ได้แก่ ย่านความถี่ แอมพลิจูด (Amplitude) เฟส (Phase) แถบกว้างความถี่ (Bandwidth) และความถี่ (Frequency) คุณสมบัติเหล่านี้สามารถดึงออกมาจากข้อมูลอินเฟสและควอดเดรเจอร์เฟส (IQ Data) ของสัญญาณที่เฝ้าฟังโดยใช้อัลกอริทึม FFT คุณสมบัติ (Feature) อื่น ๆ ที่แนะนำ เช่น การแปลงเวฟเล็ตของข้อมูลอินเฟสและควอดเดรเจอร์เฟส (Wavelet Transform of IQ Data) เอนโทรปี (Entropy) สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงการจำแนกประเภทของสัญญาณต่าง ๆ ได้ คุณสมบัติเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าสู่ชั้นข้อมูลขาเข้าของ FFNet จำนวนชั้นถัดไปขึ้นอยู่กับสมรรถนะของ FFNet ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ โนดแต่ละโนดของชั้นข้อมูลขาออกจะให้ค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งแสดงความน่าจะเป็นของการจำแนกประเภทสัญญาณ

เนื่องจากย่านความถี่ที่ต้องเฝ้าฟังอยู่ในช่วง 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 5 กิกะเฮิร์ตซ์ คลื่นความถี่จะถูกแบ่งเป็นย่าน ๆ ตามการจำแนกของ กสทช. เช่น VHF UHF แต่ละย่านจะมี FFNet ที่คอยเฝ้าฟังโดยเฉพาะความถี่



รูปที่ 1-13 FFNet ที่เสนอสำหรับใช้จำแนกประเภทสัญญาณอัตโนมัติ (Automatic Signals Classification)

ระบบสำหรับทดสอบ

จากฐานข้อมูลของสัญญาณที่รู้จัก (Known Signals) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแบ่งสำหรับใช้ฝึกและใช้ทดสอบสมรรถนะของ FFNet ข้อมูลเหล่านี้สามารถเก็บได้โดยระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่เสนอไว้ข้างต้น ปริมาณของข้อมูลฝึกสำหรับสัญญาณแต่ละประเภทควรใกล้เคียงกัน (เช่นวัดเป็นระยะเวลาหน่วยชั่วโมงสำหรับสัญญาณแต่ละประเภท) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดไบแอส (Bias) ของ FFNet

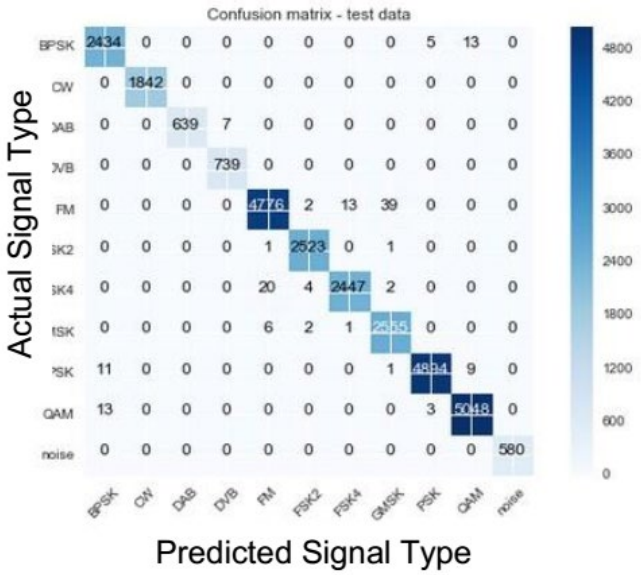
เซ็ตข้อมูลฝึก (Training Set): ประมาณ 70% ของข้อมูลทั้งหมด

เซ็ตข้อมูลทดสอบ (Testing Set): ประมาณ 30% ของข้อมูลทั้งหมด

เซ็ตข้อมูลตรวจสอบ (Validating Set): ชุดข้อมูลใหม่ เช่นจากเครื่องรับอื่น หรือจากการวัดอื่น

ตัววัดสมรรถนะ (Performance Metric)

คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) เหมาะที่จะนำมาใช้วัดสมรรถนะของการจำแนกประเภทสัญญาณ เช่นตามตัวอย่างในรูปที่ 1-14 [1]



รูปที่ 1-14 ตัวอย่างของคอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) สำหรับประเมินการจำแนกประเภทสัญญาณ

1.3.2.4 ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์

การตรวจสอบความสอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์จะเป็นการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) ที่จะคอยเฝ้าฟังคลื่นความถี่และระบุคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณที่เฝ้าฟัง เช่น มอดูเลชัน (Modulation) ตำแหน่งของเครื่องส่งกำลังส่ง (Transmit Power) เป็นต้น รวมทั้งระบุตัวตน (Identity) ของเครื่องส่ง เมื่อระบุตัวตนของเครื่องส่งแล้ว โดยการทำงานร่วมกับฐานข้อมูลที่สำนักงาน กสทช. มีอยู่แล้วก็สามารถที่จะดึงเอามาตรฐานทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องมาเทียบเพื่อประเมินความสอดคล้องได้

ในการระบุคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณ เช่น มอดูเลชัน จำเป็นต้องมีข้อมูลซึ่งเป็นตัวแทนของเครื่องส่งหรือระบบการสื่อสารไร้สายนั้น ๆ (Wireless Signal Representation) เป็นข้อมูลอ้างอิง โดย [10] พบว่าข้อมูลซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแทนนี้ได้มีหลายรูปแบบ เช่น Temporal IQ Data, Amplitude/Phase Representation หรือ Frequency Domain Representation (เช่น Fast Fourier Transform ของสัญญาณ เป็นต้น) โดยคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณอาจต้องการข้อมูลตัวแทน (ของเครื่องส่งหรือระบบการสื่อสารไร้สาย) สำหรับอ้างอิงที่ต่างกัน เช่น สำหรับการระบุมอดูเลชัน การระบุด้วย Temporal IQ Data หรือ Amplitude/Phase Representation จะแม่นยำว่าการระบุด้วย Frequency Domain Representation เป็นต้น

นอกจากนั้น ลักษณะเฉพาะของการส่งสัญญาณหรือของเครื่องส่งแต่ละชนิดก็สามารถนำมาใช้ร่วมในการระบุคุณลักษณะของสัญญาณที่เฝ้าฟังโดยปัญญาประดิษฐ์ได้ เช่น [16] สามารถแยกแยะสัญญาณเรดาร์จากสัญญาณ LTE และ WLAN ที่อยู่ในย่านเดียวกันได้ [17] สามารถแยกแยะการสื่อสารตามมาตรฐานต่าง ๆ ใน Unlicensed Band เช่น IEEE 802.11b/g/n 802.15.4, 802.15.1 และ Bluetooth Low Energy ได้โดยดูจาก Cleared Channel Assessment ของแต่ละมาตรฐานได้ และ [18] สามารถระบุการส่งสัญญาณ LTE ที่ผิดปกติและสถานีฐาน LTE ที่การตั้งค่า (Configuration) ไม่ถูกต้องโดยใช้รูปแบบการใช้คลื่นความถี่ของการส่งสัญญาณ LTE ปกติในเชิงเวลาและความถี่เป็นข้อมูลอ้างอิงได้

ระเบียบวิธีวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะนำเสนอต้นแบบ (Prototype) ของการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ โดยจะกำหนดชนิดของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ที่ต้นแบบนี้สามารถตรวจสอบความสอดคล้องกับมาตรฐานได้ร่วมกับสำนักงาน กสทช. โดยจะพิจารณาจากประโยชน์สูงสุดในการศึกษาการบริหารจัดการคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์

นอกจากนั้น คณะผู้วิจัยจะศึกษาข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ในฐานข้อมูลของสำนักงาน กสทช. เพื่อที่จะนำมากำหนดว่าในการเฝ้าฟังความถี่ ปัญญาประดิษฐ์ เช่น ANN จะต้องระบุคุณลักษณะใดของสัญญาณที่เฝ้าฟังออกมาบ้าง

ระบบทดสอบ (Test System)

ชุดข้อมูลสำหรับฝึก (Training Set) ประมาณ 70% ของชุดข้อมูล (Datasets)

ชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ (Testing Set) ประมาณ 30% ของชุดข้อมูล

ชุดข้อมูลสำหรับตรวจสอบสอบ (Validating Set) ชุดข้อมูลใหม่ที่ยังไม่ถูกใช้สำหรับฝึกหรือทดสอบ

ตัววัดสมรรถนะ (Performance Metrics)

เนื่องจากฟังก์ชันพื้นฐานของการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์คือการระบุคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณที่เฝ้าฟังคลื่นความถี่ จึงใช้ตัววัดสมรรถนะเดียวกันกับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ซึ่งได้แก่ Confusion Matrix ตามรูปที่ 1-14

1.3.2.5 ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่

ด้วยหลักการที่คล้ายกันกับการตรวจสอบความสอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ การประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดนและการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่ จะเป็นการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันพื้นฐานของการบริหารคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ 2 ฟังก์ชันหลักได้แก่

การเฝ้าฟังคลื่นความถี่ ที่จะคอยเฝ้าฟังคลื่นความถี่และระบุคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณที่เฝ้าฟัง เช่น มอดูเลชัน ตำแหน่งของเครื่องส่ง และกำลังส่ง เป็นต้น รวมทั้งระบุตัวตนของเครื่องส่ง เมื่อระบุตัวตนของเครื่องส่งแล้วโดยการทำงานร่วมกับฐานข้อมูลความถี่ตามบริเวณชายแดนที่สำนักงาน กสทช. มีอยู่แล้วก็สามารถที่จะดึงเอามาตรฐานทางเทคนิคและข้อตกลงการประสานงานความถี่ที่เกี่ยวข้องมาเทียบเพื่อประเมินความสอดคล้องได้

นอกจากนั้นในส่วนของการประสานงานความถี่ชายแดนจะจำเป็นต้องใช้อีกหนึ่งฟังก์ชันของการบริหารคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ซึ่งได้แก่ การประเมินการรบกวน ในพื้นที่ชายแดนที่สนใจ

ระเบียบวิธีวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะนำเสนอต้นแบบ (Prototype) ของการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดนและการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่ โดยจะกำหนดพื้นที่ต้นแบบร่วมกับสำนักงาน กสทช. โดยจะพิจารณาจากประโยชน์สูงสุดในการศึกษาการบริหารคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์

นอกจากนั้น คณะผู้วิจัยจะศึกษาข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ และข้อตกลงการประสานงานความถี่ในฐานข้อมูลของสำนักงาน กสทช. เพื่อที่จะนำมากำหนดในการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ เช่น ANN จะต้องระบุคุณลักษณะใดของสัญญาณที่เฝ้าฟังออกมาบ้าง

ในส่วนของการประสานงานคลื่นความถี่ ML อัลกอริทึมทั้ง 4 อัลกอริทึมสำหรับการประมาณการลดทอนสัญญาณ (ดูหัวข้อ การพัฒนาแบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่ในพื้นที่ที่น่าสนใจ) จะถูกนำมาศึกษาเพื่อประเมินสมรรถนะของการประเมินการรบกวนในพื้นที่ชายแดน

ระบบทดสอบ (Test System)

ชุดข้อมูลสำหรับฝึก (Training Set) ประมาณ 70% ของชุดข้อมูล (Datasets)

ชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ (Testing Set) ประมาณ 30% ของชุดข้อมูล

ชุดข้อมูลสำหรับตรวจสอบสอบ (Validating Set) ชุดข้อมูลใหม่ที่ยังไม่ถูกใช้สำหรับฝึกหรือทดสอบ

ตัววัดสมรรถนะ (Performance Metrics)

เนื่องจากฟังก์ชันพื้นฐานของการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดนและการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่คือ การระบุคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณที่เฝ้าฟังคลื่นความถี่ และการประเมินการรบกวน จึงใช้ตัววัดสมรรถนะเดียวกันกับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ซึ่งได้แก่ Confusion Matrix ตามรูปที่ 1-12 ในหัวข้อระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) และตัววัดสมรรถนะของการประเมินการรบกวนซึ่งได้แก่ ความแม่นยำในการประมาณการลดทอนสัญญาณสามารถรวมถึงความสามารถของ ML อัลกอริทึมที่จะประมาณการลดทอนสัญญาณในสถานการณ์ใหม่ที่ไม่เคยถูกฝึกมาก่อน (Generalization) เช่น ในย่านความถี่ใหม่ เป็นต้น (ดูหัวข้อ ตัววัดสมรรถนะ ของ 1.3.2.2 การพัฒนาแบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่ในพื้นที่ที่น่าสนใจ)

1.4 วิธีการ/ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ

ในการดำเนินงานตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายของโครงการดังกล่าวในข้างต้นนี้ คณะผู้วิจัยได้ออกแบบและแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 7 แผนงาน โดยมีรายละเอียดและความเชื่อมโยงของแต่ละแผนงาน ดังแสดงในตารางที่ 1-2

ตารางที่ 1-2 แผนงานในการดำเนินโครงการ

แผนงาน	รายละเอียด	สิ่งที่ต้องมีก่อน (Prerequisite)	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง
แผนงานที่ 1: การวางแผนโครงการ	วางแผนการดำเนินโครงการอย่างละเอียด โดยเสนอกรอบแนวคิดการศึกษา วิธีการ และแผนงานในการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานด้านการบริหารคลื่นความถี่	-	แผนงานดำเนินโครงการ
แผนงานที่ 2: กรณีศึกษาจากต่างประเทศ	ศึกษากรณีตัวอย่างของหน่วยงานกำกับดูแลในต่างประเทศหรือองค์กรอื่น ๆ ที่มีการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้สำหรับงานการบริหารคลื่นความถี่ อย่างน้อย 3 หน่วยงาน โดยให้วิเคราะห์ ข้อดี/ข้อด้อย ของแต่ลักษณะการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว	-	การศึกษาเปรียบเทียบกับต่างประเทศ (International Benchmark)
	ศึกษาหรือตัวอย่างของกลุ่มประเทศที่มีข้อจำกัดในเรื่องการเข้าถึงและการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ	-	ผลการศึกษาข้อมูลประกอบการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายและครบทุกมิติ
แผนงานที่ 3: ศึกษาความพร้อมใช้งานในประเทศ	ศึกษาข้อมูลทางด้านเทคนิค และความพร้อมในการพัฒนาการเชื่อมต่อระบบคลังข้อมูลเพื่อนำไปวางแผนและวิเคราะห์ผลกระทบของการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่ โดยออกแบบวิธีการวิจัยหรือสถานการณ์จำลอง (Scenario) ที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยอย่างน้อย 3 สถานการณ์ พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อดี/ข้อด้อยของแต่ละสถานการณ์	ผลการศึกษาจากแผนงานที่ 2	ผลการศึกษาและข้อเสนอแนะการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่ ในประเทศไทย
แผนงานที่ 4: เสนอรูปแบบการพัฒนา Software	เสนอรูปแบบเพื่อการจัดทำและพัฒนา Software ที่เป็น Web Application (Prototype) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ โดยรูปแบบที่เสนอแต่ละส่วนมีองค์ประกอบขั้นต้นตามขอบเขตการดำเนินงานของโครงการ	ผลการศึกษาจากแผนงานที่ 2 และ 3	ผลสรุปและรูปแบบการจัดทำและพัฒนา Software การนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่
แผนงานที่ 5: การเขียนและทดสอบ Software	นำรูปแบบและอัลกอริทึมไปเขียน Source Code พร้อมทั้งทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่ได้พัฒนาสร้างขึ้น โดยวัดสมรรถนะ (Performance Metrics) การทำงานของโปรแกรมในฟังก์ชันต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ในกรอบแนวคิด	ผลการศึกษาจากแผนงานที่ 4	มี Software ที่เป็น Web Application (Prototype)

แผนงาน	รายละเอียด	สิ่งที่ต้องมีก่อน (Prerequisite)	ผลลัพธ์ที่คาดหวัง
แผนงานที่ 6: ระบบแสดงผลและระบบจัดทำรายงาน	พัฒนาโปรแกรมจากแผนงานที่ 5 ให้มีระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม	มี Source Code และโปรแกรมจากแผนงานที่ 5	โปรแกรมมีระบบแสดงผลและระบบจัดทำรายงาน
แผนงานที่ 7: จัดอบรม	จัดอบรมการใช้งานระบบการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ให้กับเจ้าหน้าที่สำนักงาน กสทช. โดยแบ่งตามระดับของผู้เข้าอบรมตามขอบเขตการดำเนินงานของโครงการ	มีโปรแกรมจากแผนงานที่ 6	เผยแพร่ผลการศึกษาการนำระบบ AI และ Big Data มาใช้สนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่

หมายเหตุ: ผู้รับทุนจะเป็นผู้รับผิดชอบในการบริหารจัดการดูแลและบำรุงรักษาระบบโปรแกรมที่ได้รับจากการดำเนินโครงการ (Maintenance Service Agreement) เป็นระยะเวลา 1 ปี หลังสิ้นสุดโครงการ

1.5 แผนการดำเนินงานและระยะเวลา

ในการวางแผนการดำเนินโครงการตาม 7 แผนงาน ซึ่งมีกำหนดระยะเวลาดำเนินการแล้วเสร็จภายใน 720 (เจ็ดร้อยยี่สิบ) วัน คณะผู้วิจัยได้กำหนดระยะเวลาการดำเนินงานในแต่ละแผนงาน โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 1-3

ตารางที่ 1-3 แผนการดำเนินงานของโครงการ

กิจกรรม	ปี พ.ศ. 2563				ปี พ.ศ. 2564												ปี พ.ศ. 2565							
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
เริ่มดำเนินโครงการ (ลงนามในสัญญา) 8/9/2563	●																							
แผนงานที่ 1: การวางแผนโครงการ	◄	►																						
ส่งมอบงานงวดที่ 1 (ภายใน 60 วัน นับถัดจากได้ทำสัญญาฯ)		7/11/2563 ●																						
แผนงานที่ 2: กรณีศึกษาจากต่างประเทศ		◄	►		►																			
แผนงานที่ 3: ศึกษาความพร้อมใช้งานในประเทศ					◄	►		►																
ส่งมอบงานงวดที่ 2 (ภายใน 240 วัน นับถัดจากได้ทำสัญญาฯ)								6/5/2564 ●																
แผนงานที่ 4: เสนอรูปแบบการพัฒนา Software								◄	►			►												
แผนงานที่ 5: การเขียนและทดสอบ Software													◄	►							►			
ส่งมอบงานงวดที่ 3 (ภายใน 420 วัน นับถัดจากได้ทำสัญญาฯ)														2/11/2564 ●										

กิจกรรม	ปี พ.ศ. 2563				ปี พ.ศ. 2564												ปี พ.ศ. 2565							
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.
แผนงานที่ 6: ระบบแสดงผลและระบบจัดทำรายงาน																		←				→		
ส่งมอบงานงวดที่ 4 (ภายใน 600 วัน นับถัดจากได้ทำสัญญาฯ)																				1/5/2565 ●				
แผนงานที่ 7: จัดอบรม																							←	→
ส่งมอบงานงวดสุดท้าย (ภายใน 720 วัน นับถัดจากได้ทำสัญญาฯ)																								29/8/2565 ●

บทที่ 2
บทนำ

2.1 หลักการและเหตุผลความจำเป็น

พระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่และกำกับการประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง วิทยุโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติม ตามมาตรา 57 (3) (4) และ (5) บัญญัติให้สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) มีอำนาจหน้าที่ตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ รับและพิจารณาเรื่องร้องเรียนเกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่ เพื่อตรวจสอบและแก้ไขปัญหาหรือเสนอความคิดเห็นจากประชาชน รวมถึงศึกษารวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับคลื่นความถี่ การใช้คลื่นความถี่ การประกอบกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม

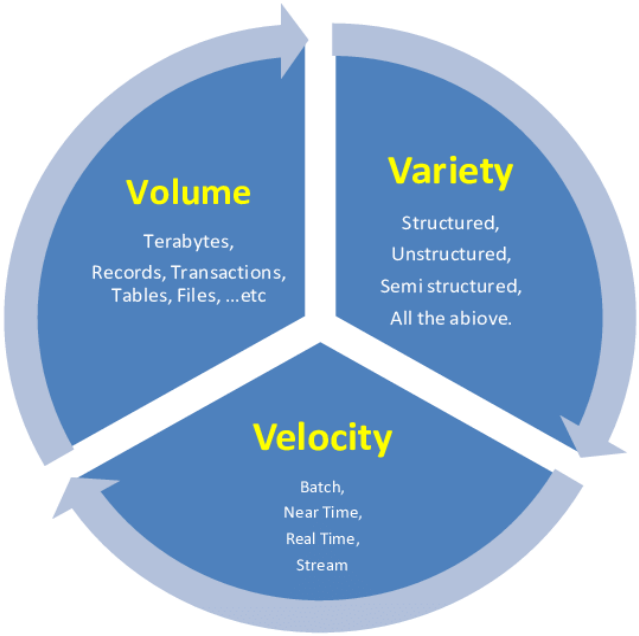
ความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีและการเติบโตขยายตัวของกิจการโทรคมนาคม กิจการกระจายเสียง และกิจการโทรทัศน์ ส่งผลให้ความต้องการใช้งานคลื่นความถี่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทั่วทุกพื้นที่ เนื่องจากคลื่นความถี่เป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงจำเป็นต้องมีการติดตาม ตรวจสอบ และบริหารคลื่นความถี่ เพื่อให้มีการใช้งานคลื่นความถี่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกันทั้งจากกิจการประเภทเดียวกันและต่างประเภท สามารถรองรับการใช้งานคลื่นความถี่จากผู้ใช้จำนวนมากและหลากหลายยิ่งขึ้นในอนาคต

ปัจจุบัน สำนักงาน กสทช. ได้ดำเนินการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ในทั่วภูมิภาคของประเทศไทย โดยมีสำนักงาน กสทช. ภาค 1 ถึง 4 และสำนักงาน กสทช. เขตทั่วประเทศ รวมจำนวน 21 เขต เพื่อทำหน้าที่บริหารจัดการและปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับงานตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ ตลอดจนการรับและพิจารณาเรื่องร้องเรียนจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และประชาชนในพื้นที่ต่าง ๆ ทั้งนี้ สำนักงาน กสทช. ได้นำเครื่องมือและระบบการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ต่าง ๆ ทั้งในรูปแบบ สถานีหลัก (Fixed Station) สถานีเคลื่อนที่และสถานีระยะไกล (Mobile and Remote Station) และอุปกรณ์เคลื่อนที่ได้ (Portable Equipment) อีกทั้งยังมีระบบการรับเรื่องร้องเรียนที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานของสำนักงาน กสทช. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานและตอบสนองความต้องการของประชาชนมากขึ้น

การตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ตามมาตรฐานของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ-ภาคการสื่อสารวิทยุ หรือ ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication sector) ได้กำหนดบริบทสำหรับการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่หลัก ๆ ดังนี้

- ตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ตามที่ได้รับอนุญาตให้มีการใช้งานเป็นไปตามเงื่อนไข
- การสังเกตการณ์คลื่นความถี่และวัดการครอบครองคลื่นความถี่
- ตรวจสอบกรณีการเกิดการรบกวนที่สร้างความเสียหาย
- ตรวจสอบและแก้ปัญหาการลักลอบใช้งานคลื่นความถี่โดยไม่มีใบอนุญาต

อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อมูลการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่และเรื่องร้องเรียนที่ได้รับจากผู้ร้องเรียนมีประเด็นที่หลากหลายและเป็นข้อมูลขนาดใหญ่ นอกจากนี้ในการกำหนดแนวทางการบริหารคลื่นความถี่ทั้งเพื่อการจัดสรรคลื่นความถี่ใหม่หรือการแก้ไขปัญหาการรบกวนในแต่ละกรณี จำเป็นต้องรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การใช้งานคลื่นความถี่ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ข้อมูลการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่และข้อร้องเรียนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เป็นต้น ส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในการรวบรวมข้อมูลที่หลากหลายและวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อนจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อช่วยในการจัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่ รวมทั้งการพัฒนาระบบประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มศักยภาพการตรวจสอบคลื่นความถี่และการรับเรื่องร้องเรียนต่าง ๆ รวมทั้งสนับสนุนการตัดสินใจในระดับนโยบายในการบริหารคลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าบนพื้นฐานข้อมูลเชิงสถิติที่น่าเชื่อถือ



รูปที่ 2-1 ลักษณะพื้นฐานของข้อมูลในโครงสร้าง Big Data
(ที่มา: www.researchgate.net/figure/Big-Data-Definition-3-Vs_fig3_264129835)

เทคโนโลยี Big Data เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีสำคัญที่เป็นกระแสในยุคอุตสาหกรรมดิจิทัลและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกทั้งภาครัฐและภาคธุรกิจ เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการนำข้อมูลทุกอย่างซึ่งเป็นข้อมูลขนาดใหญ่มาวิเคราะห์เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเรื่องสำคัญในการพัฒนาหลาย ๆ ด้านขององค์กร ช่วยปรับปรุงแก้ไขหรือหาวิธีการจัดการกระบวนการผลิตและการดำเนินงานให้ตอบโจทย์ความต้องการของผู้ใช้งานหรือลูกค้ายุคใหม่ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว โดย Big Data เป็นได้ทั้งข้อมูลจากภายในองค์กรและข้อมูลที่ได้รับจากภายนอก ซึ่งระดับของข้อมูลที่จัดเก็บมีทั้งข้อมูลเชิงลึกที่มีรายละเอียดในประเด็นที่สนใจไปจนถึงข้อมูลเชิงกว้างที่มีรายละเอียดหลากหลาย โครงสร้างของ Big Data แบ่งลักษณะพื้นฐานของข้อมูลออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ หรือเรียกว่า "3Vs Model" (ดังรูปที่ 2-1) ดังนี้

- ปริมาณ (Volume) เป็นลักษณะข้อมูลที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนมหาศาล
- ความเร็ว (Velocity) เป็นลักษณะข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลง มีการหลั่งไหลข้อมูลมาอย่างรวดเร็วหรือแบบเวลาจริง (Real-time)
- ความหลากหลาย (Variety) เป็นลักษณะข้อมูลที่มีหลากหลายรูปแบบแตกต่างกันออกไป ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งแบบมีโครงสร้าง กึ่งโครงสร้าง และไม่มีโครงสร้างมาตรฐาน

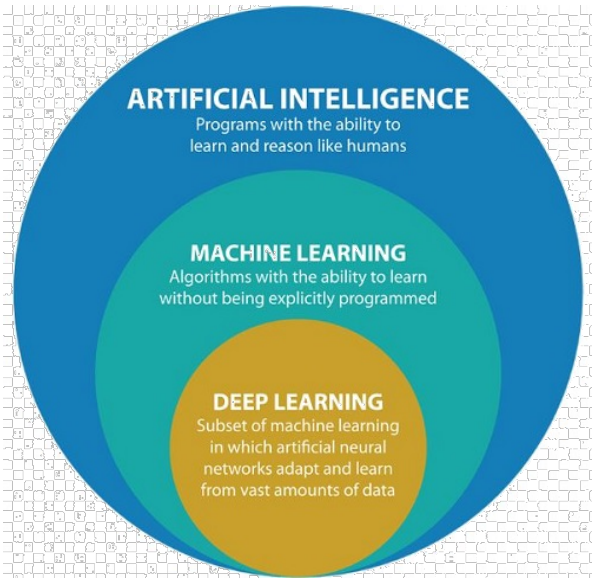
ต่อมาได้มีการแบ่งลักษณะข้อมูล Big Data เพิ่มอีก 2 Vs ได้แก่ คุณค่า (Value) เป็นลักษณะข้อมูลที่มีคุณค่าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง และความถูกต้อง (Veracity) เป็นลักษณะข้อมูลจริงที่มีความน่าเชื่อถือในการนำข้อมูล Big Data ซึ่งมีคุณลักษณะของข้อมูลที่หลากหลายและมีจำนวนมหาศาลทั้งรูปภาพ เสียง ข้อความ ตัวเลข กราฟฟิก ไฟล์เอกสาร และข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยทั่วไปมี 4 ขั้นตอนหลัก ๆ ประกอบด้วย

1) การเก็บข้อมูล (Data Collection) เป็นขั้นตอนเริ่มต้นเพื่อกำหนดลักษณะการเชื่อมต่อข้อมูลและข้อมูลที่ต้องการจะเก็บไว้ การเก็บข้อมูลสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและประเภทของข้อมูลที่ต้องการเก็บด้วย

2) การจัดการข้อมูล (Data Management) เป็นขั้นตอนการบริหารจัดการชุดข้อมูลที่มีอยู่จำนวนมหาศาลในคลังข้อมูล (Data Warehouse) ได้แก่ การจัดเก็บข้อมูล (Data Storage) การทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleaning) การบูรณาการข้อมูล (Data Integration) การแปลงสภาพข้อมูล (Data Transformations) เป็นต้น

3) การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analytics) ขั้นตอนนี้เป็นที่สนใจอย่างมากในยุคดิจิทัลปัจจุบันนี้ซึ่งต้องอาศัยเทคโนโลยีที่ชาญฉลาดที่สามารถช่วยในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของข้อมูลต่าง ๆ เช่น เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ หรือ AI (Artificial Intelligence) เป็นต้น

4) การนำข้อมูลมาช่วยตัดสินใจ (Decision) เป็นขั้นตอนสรุปผลวิเคราะห์ข้อมูลให้เข้าใจง่าย ๆ เพื่อนำไปเสนอผู้บริหารในการพิจารณาตัดสินใจ ซึ่งในขั้นตอนรวมไปถึง การสื่อสารข้อมูล (Data Communication) และการแสดงผลข้อมูล (Data Visualization)

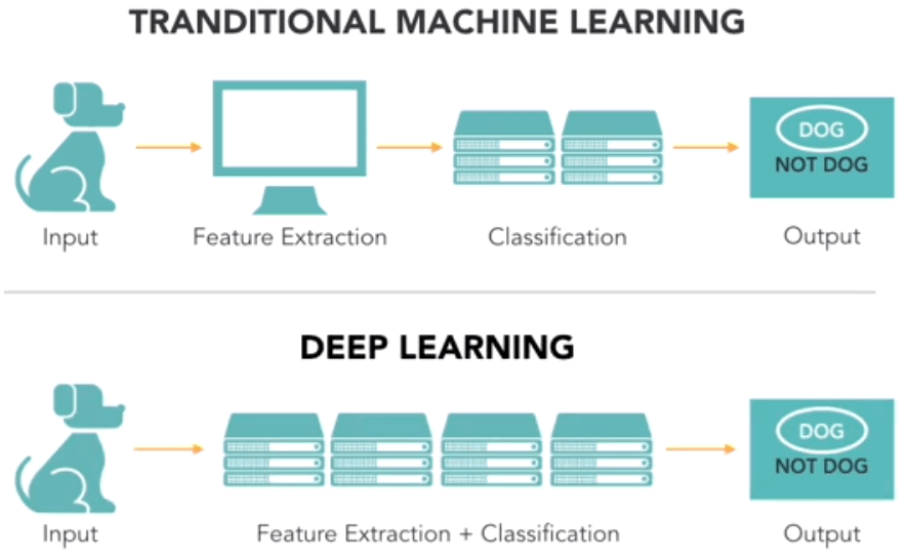


รูปที่ 2-2 เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์หรือ AI (Artificial Intelligence)
(ที่มา: www.qubole.com/blog/deep-learning-the-latest-trend-in-ai-and-ml)

ปัจจุบันมีงานวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในธุรกิจและอุตสาหกรรมดิจิทัลกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยมีเป้าหมายสำคัญในการพัฒนาธุรกิจและอุตสาหกรรมด้วยชุดข้อมูลที่ถูกต้องและการสร้างแพลตฟอร์ม (Platform) AI มาใช้เพื่อให้สามารถวางแผนนโยบายและคาดการณ์สถานการณ์อนาคตได้อย่างถูกต้องแม่นยำเพื่อตอบโจทย์ความต้องการของลูกค้าหรือผู้ใช้งานยุคใหม่ เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) โดยหลักการทั่วไปเป็นการนำชุดข้อมูลต่าง ๆ มาสอนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้เรียนรู้และวิเคราะห์ได้เสมือนมนุษย์ โดยการเรียนรู้ของเทคโนโลยี AI ที่อยู่ในกระแสมากที่สุด ได้แก่ แมชชีนเลิร์นนิ่งหรือ ML (Machine Learning) และการเรียนรู้เชิงลึกหรือ DL (Deep Learning) ดังแสดงในรูปที่ 2-2

แมชชีนเลิร์นนิ่ง (ML) เป็นส่วนหนึ่งของ AI โดยการป้อนข้อมูลขนาดใหญ่ให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และให้เครื่องคอมพิวเตอร์สามารถเรียนรู้ด้วยตัวเอง โดยใช้โปรแกรมที่ซับซ้อนหรืออัลกอริทึม (Algorithms) ในการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ จดจำรูปแบบของข้อมูล และทำนายผลลัพธ์ออกมาให้มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุด โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะหาวิธีทำงานจนสำเร็จด้วยตัวมันเอง และโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะยิ่งฉลาดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปหรือได้เรียนรู้มากขึ้น

การเรียนรู้เชิงลึก (DL) เป็นส่วนหนึ่งของ ML ซึ่งมีลักษณะการทำงานที่เลียนแบบให้เหมือนกับโครงข่ายเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ DL เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบชั้น (layers) ที่แตกต่างและเชื่อมโยงเป็นโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) เพื่อเรียนรู้ข้อมูล โดยใช้วิธีการประมวลผลแบบคู่ขนานเพื่อทำให้สามารถเข้าใจและเรียนรู้จากข้อมูลจำนวนมากที่ได้รับอย่างต่อเนื่อง ความฉลาดของแบบจำลองมักขึ้นอยู่กับจำนวนชั้นที่ซับซ้อนมากขึ้นในแบบจำลอง

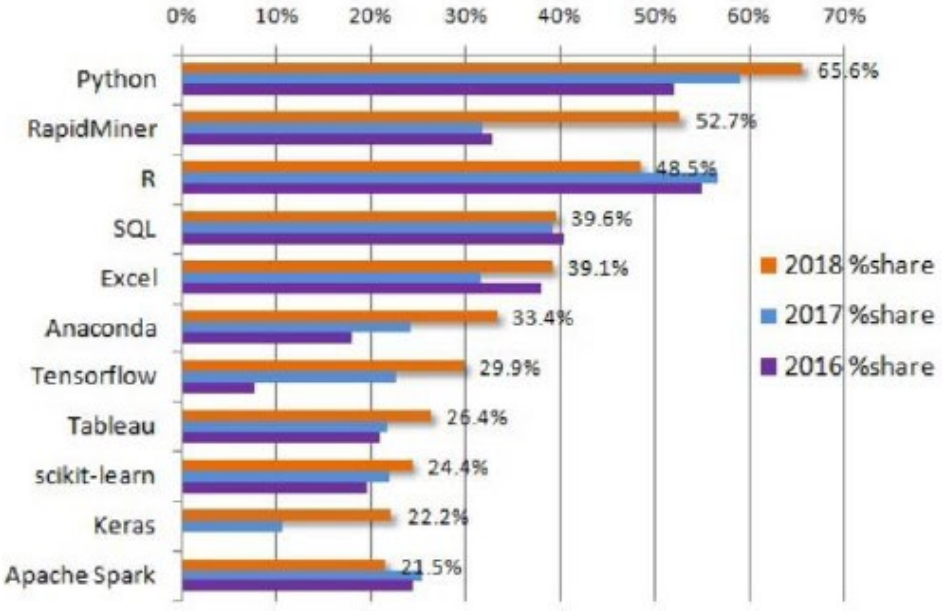


รูปที่ 2-3 ความแตกต่างระหว่างแมชชีนเลิร์นนิ่ง (ML) และการเรียนรู้เชิงลึก (DL)
(ที่มา: www.guru99.com/machine-learning-vs-deep-learning.html)

เพื่อให้เข้าใจความแตกต่างระหว่าง ML กับ DL ยกตัวอย่างการจำแนกภาพสัตว์ด้วยเทคโนโลยี AI ว่าใช่สุนัขหรือไม่ ในกรณีที่ใช้ ML แบบดั้งเดิม ผู้ใช้จะต้องป้อนข้อมูลคุณสมบัติ (Features) ของสุนัข เช่น มีหูหรือไม่ และมีหนวดหรืออวัยวะอื่น ๆ ของสุนัขด้วยหรือไม่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นข้อมูลคุณสมบัติง่าย ๆ เพื่อให้ระบบเรียนรู้ว่าสัตว์

ลักษณะดังกล่าวคือสุนัข โดยระบบจะยิ่งฉลาดขึ้นเมื่อได้เรียนรู้มากขึ้น ในอีกกรณีหนึ่งการใช้ DL ระบบจะถูกกำหนดคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการจำแนกประเภทโดยอัตโนมัติ ซึ่งการค้นหาว่าภาพสัตว์ดังกล่าวใช่สุนัขหรือไม่จะเริ่มต้นจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากที่สุดโดยรวบรวมข้อมูลเพื่อกำหนดรูปร่างและขอบเขตในการจดจำลักษณะของสัตว์อย่างลึกซึ้งยิ่งขึ้น เช่น โครงหน้ามีหูและมีหนวด หลังนั้นจะกำหนดการรับรู้และแยกแยะแบบเป็นลำดับชั้นอย่างต่อเนื่องเพื่อตัดสินใจและค้นหาคำตอบที่ถูกต้องว่าเป็นสุนัขหรือไม่ ความแตกต่างของการทำงานระหว่าง ML กับ DL ดังแสดงในรูปที่ 2-3

โปรแกรมที่มีเครื่องมือสนับสนุนสำหรับการพัฒนาแพลตฟอร์ม ML ปัจจุบันมีหลากหลายให้เลือกใช้งาน เช่น RapidMiner เป็นโปรแกรมแอปพลิเคชันด้านการวิเคราะห์การทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) TensorFlow ของ Google เป็นแพลตฟอร์มแบบโอเพนซอร์ส (Open-Source) สำหรับการพัฒนา ML และ DL แพลตฟอร์ม Apache Spark เป็น Engine แบบโอเพนซอร์สในการพัฒนา ML เพื่อวิเคราะห์ Big Data ซึ่งได้ทั้งข้อมูลแบบเวลาจริงและข้อมูลในอดีต ภาษาคอมพิวเตอร์ Python คือชื่อภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมภาษาหนึ่ง ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาโดยไม่ยึดติดกับแพลตฟอร์ม ภาษาคอมพิวเตอร์ R คือ ภาษาของคอมพิวเตอร์ตัวหนึ่งที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านสถิติและตัวเลขเป็นต้น ทั้งนี้ KDnuggets ได้จัดทำแบบสำรวจ (Poll) การใช้งานโปรแกรมในการทำงานทางด้าน ML ในวงการวิทยาศาสตร์ข้อมูล (Data Science) ในปี พ.ศ. 2559 - 2561 ดังแสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 แบบสำรวจโปรแกรมที่มีเครื่องมือสนับสนุนการทำงานทางด้าน ML
(ที่มา: www.kdnuggets.com/2018/05/poll-tools-analytics-data-science- machine-learning-results.html)

ดังนั้น การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้จำเป็นต้องมีการศึกษาและพิจารณาเลือกใช้โปรแกรมที่มีเครื่องมือสนับสนุนที่ความเหมาะสมและสามารถนำมาใช้งานให้ได้ตรงตามเป้าหมายและวัตถุประสงค์ แนวทางในการนำคุณสมบัติของปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้เพิ่มศักยภาพในการบริหารคลื่นความถี่ ดังแสดงในตารางที่ 2-1 ปัญญาประดิษฐ์สามารถนำเข้ามาใช้กับทุกกระบวนการของการบริหารคลื่นความถี่ไม่ว่าจะเป็น การวางแผนบริหารคลื่นความถี่ (Planning) การบริหารจัดการให้เกิดการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนคลื่นความถี่

(Sharing) การจัดสรรและอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่ (Authorization) การตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ (Monitoring) และการกำหนดมูลค่าของคลื่นความถี่ที่เหมาะสม (Pricing)

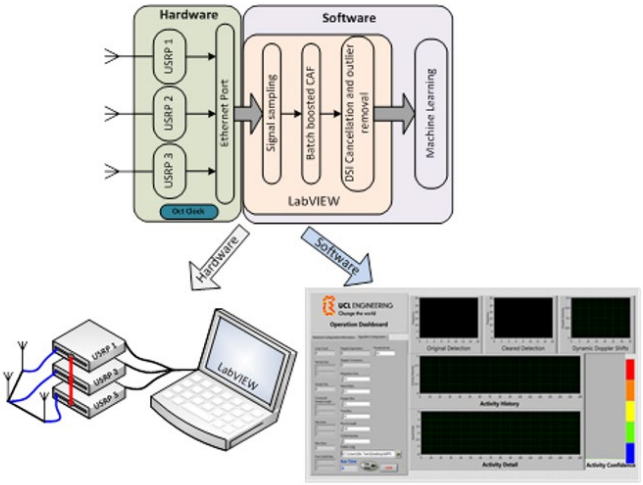
ตารางที่ 2-1 การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่

คุณสมบัติของ AI	การบริหารคลื่นความถี่ (Spectrum Management)				
	การวางแผน (Planning)	การใช้ร่วมกัน (Sharing)	การอนุญาต (Authorization)	การตรวจสอบ (Monitoring)	การกำหนดราคา (Pricing)
ค้นหาและเพิ่มประสิทธิภาพ	✓	✓	✓		✓
เหตุผลเชิงตรรกะ		✓	✓		
การคิดความน่าจะเป็นสำหรับความไม่แน่นอน	✓				✓
การเรียนรู้ข้อมูลสถิติและจัดประเภท				✓	
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ที่ทำงานเลียนแบบโครงข่ายเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์				✓	
การประเมินผลความเติบโต			✓		✓

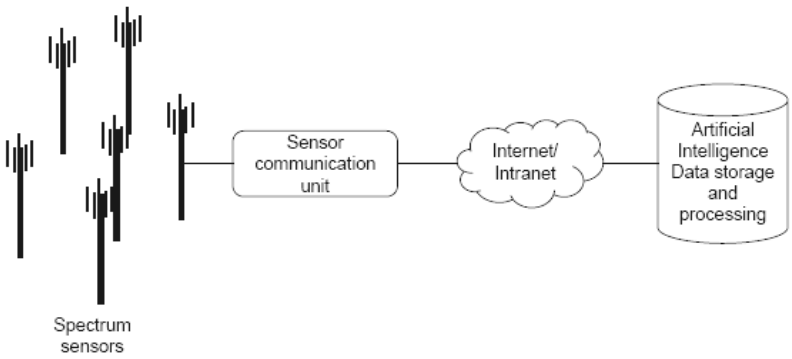
การใช้งานและบริหารคลื่นความถี่จำเป็นต้องมีการวางแผนเพื่อให้การใช้งานคลื่นความถี่สอดคล้องกับเป้าหมายและวัตถุประสงค์ที่ประเทศกำหนดไว้ สามารถตอบสนองความต้องการใช้งานคลื่นความถี่ที่เพิ่มขึ้นอยู่ตลอดเวลา การบริหารคลื่นความถี่จะช่วยอำนวยความสะดวกในกระบวนการวางแผนและตัดสินใจ สร้างฐานสำหรับการประเมินการดำเนินการต่าง ๆ รวมถึงการออกกฎระเบียบ ข้อกำหนดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารและการใช้ประโยชน์คลื่นความถี่ [19]

ยกตัวอย่างเช่น เป็นที่คาดการณ์กันว่าความต้องการใช้งานคลื่นความถี่สำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นอย่างมากในอีก 5 ถึง 10 ปีข้างหน้า การวางแผนการใช้งานคลื่นความถี่จะต้องคาดการณ์ปริมาณความต้องการคลื่นความถี่ในอนาคต พร้อมทั้งการบริหารคลื่นความถี่เพื่อให้มั่นใจว่าจะสามารถตอบสนองความต้องการใช้งานคลื่นความถี่เหล่านั้นได้ในอนาคตอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ หรืออีกวิธีที่จะสามารถตอบสนองความต้องการใช้งานคลื่นความถี่ที่เพิ่มขึ้นได้คือการให้ใช้คลื่นความถี่ร่วมกัน ซึ่งไม่ว่าจะเป็นการจัดสรรคลื่นความถี่ให้ใหม่หรือการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์โอกาสที่จะเกิดการรบกวนที่กระทบต่อระบบสื่อสาร (Harmful Interference) นอกจากนั้นเมื่อคลื่นความถี่ได้ถูกจัดสรรใบอนุญาตและนำไปใช้งานแล้วก็จำเป็นต้องมีการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขต่าง ๆ และข้อกำหนดตามที่ได้รับอนุญาตให้มีการใช้งานคลื่นความถี่ เพื่อป้องกันการเกิดสัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบระหว่างระบบสื่อสารต่าง ๆ หากพบการรบกวนของสัญญาณคลื่นความถี่ก็ต้องเร่งวิเคราะห์หาสาเหตุและดำเนินการแก้ไข กระบวนการเหล่านี้จำเป็นต้องวิเคราะห์

ข้อมูลประกอบจำนวนมากจากหลายแหล่ง และชุดข้อมูลบางชุดก็มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาเช่น ข้อมูลจากการเฝ้าสังเกตการณ์สัญญาณคลื่นความถี่จากพื้นที่ทั่วประเทศ และข้อมูลจากฐานข้อมูลใบอนุญาต เป็นต้น การนำเอาปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการเหล่านี้จะช่วยให้สามารถประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ได้ ทำให้การดำเนินการต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการวางแผน การจัดสรรคลื่นความถี่ การตรวจสอบและแก้ไขการรบกวนที่อาจเกิดขึ้นสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพด้วยข้อมูลที่ครบถ้วน นอกจากนั้นในส่วนของการกำหนดมูลค่าของคลื่นความถี่ที่เหมาะสม สามารถนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้วิเคราะห์ข้อมูลตัวอย่างเช่น ราคาคลื่นความถี่ที่ได้จัดสรรใบอนุญาตไปแล้ว (คลื่นความถี่ในย่านเดียวกันที่ถูกจัดสรรใบอนุญาตไปแล้วในประเทศอื่น ๆ) สภาพการแข่งขัน สภาวะเศรษฐกิจ การลงทุนในโครงข่ายที่ต้องสร้างเพิ่ม รวมถึงผลการดำเนินธุรกิจของผู้ให้บริการ เพื่อนำมาทำการจำลอง (Simulations) ในสถานการณ์จำลอง (Scenarios) แบบต่าง ๆ เพื่อกำหนดราคาคลื่นความถี่ที่เหมาะสมกับบริบทและสถานการณ์ของประเทศไทยได้



รูปที่ 2-5 การพัฒนาอัลกอริทึมแมชชีนเลิร์นนิ่ง (ML) สำหรับการบริหารคลื่นความถี่
(ที่มา: spectrum.ieee.org/computing/software/how-ai-is-starting-to-influence-wireless-communications)



รูปที่ 2-6 การตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI)
(ที่มา: www.kdnuggets.com/2018/05/poll-tools-analytics-data-science- machine-learning-results.html)

ตัวอย่างงานวิจัยและกรณีศึกษาการนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้งานในด้านคลื่นความถี่ในต่างประเทศ เช่น บริษัท National Instruments ได้พัฒนาอัลกอริทึม ML และ DL สำหรับการบริหารคลื่นความถี่วิทยุ โดยการพัฒนาวิธีการตรวจวัดรูปแบบสัญญาณด้วยเซ็นเซอร์และวิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ของคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี ML และ DL บนโปรแกรม Labview เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานทรัพยากรคลื่นความถี่ (ดังรูปที่ 2-5) บริษัท DeepSig ได้พัฒนาเซ็นเซอร์ (Sensor) OmniSIG ที่สามารถตรวจวัดและจำแนกการปล่อยคลื่นความถี่วิทยุบนแบนด์วิดท์ขนาดใหญ่ได้ใกล้เคียงแบบเรียลไทม์ (เปลี่ยนแปลงระดับมิลลิวินาที) โดยใช้โปรแกรมประมวลผลคลื่นความถี่วิทยุและสัญญาณด้วยเทคโนโลยี DL เพื่อเรียนรู้รูปแบบจำลองคลื่นความถี่เพื่อรายงานความผิดปกติหรือการถูกรบกวนจากการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต บริษัท Fairspectrum ได้เสนอโซลูชัน (Solution) สำหรับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ในการใช้งานคลื่นความถี่ร่วมกัน (Sharing) อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ รูปแบบการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ดังแสดงในรูปที่ 2-6 สำนักงานโครงการวิจัยขั้นสูงของกระทรวงกลาโหมหรือ DARPA ของสหรัฐอเมริกาได้มีโครงการจัดแข่งขัน (ในลอสแองเจลิส) แบบเปิดรับสมัครจากทีมทั่วโลก เพื่อค้นหาผู้ชนะในการแก้ไขปัญหาความขาดแคลนคลื่นความถี่และการบริหารจัดการสำหรับการใช้งานคลื่นความถี่แบบใหม่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ซึ่งมีเงินรางวัลสำหรับผู้ชนะเกือบ 4 ล้านดอลลาร์สหรัฐ

ในประเทศไทย ปัจจุบันการก้าวเข้าสู่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมดิจิทัลและนโยบายไทยแลนด์ 4.0 ที่มีเป้าหมายสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศด้วยชุดข้อมูลที่ถูกต้องและสามารถคาดการณ์สถานการณ์อนาคตได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ในหน่วยงานรัฐบาลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารข้อมูล เช่น บัตรสวัสดิการแห่งรัฐซึ่งรัฐบาลต้องการช่วยเหลือผู้มีรายได้น้อยที่มีการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างกระทรวง ทบวง กรม กองต่าง ๆ เป็นต้น ดังนั้น สำนักงาน กสทช. จึงเล็งเห็นว่า เทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ จะเพิ่มศักยภาพการตรวจสอบคลื่นความถี่และการรับเรื่องร้องเรียนต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในระดับนโยบายในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าบนพื้นฐานข้อมูลเชิงสถิติ ที่น่าเชื่อถือ เพื่อนำข้อมูลมารวมกันเป็น Big Data ที่มีข้อมูลประชากรที่หลากหลาย มีแหล่งข้อมูลจากทั้งกระทรวงสาธารณสุข กระทรวงมหาดไทย กระทรวงพาณิชย์ และกรมสรรพากร เป็นต้น นอกจากนี้ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ที่เชื่อมโยงถึงกันมีมูลค่า และสามารถนำข้อมูลสำคัญที่ได้จากการตรวจสอบคลื่นความถี่ไปใช้ในการวางแผน จัดสรร ออกใบอนุญาต จนถึงกระบวนการสืบค้นจับกุมตามกระบวนการบริหารคลื่นความถี่ได้ ทั้งนี้ด้วยความสามารถของเทคโนโลยี AI หากสามารถวิเคราะห์ปริมาณคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา/วัน/เดือน/ปี รวมถึงกรณีการรบกวนกิจการการบินด้วยเทคโนโลยี AI ในการวิเคราะห์และเรียนรู้ลักษณะของการรบกวนที่เกิดขึ้นในลักษณะซ้ำ ๆ กันและวิเคราะห์หาสาเหตุของการรบกวนทั้งเชิงพื้นที่ แหล่งแพร่คลื่น และประเภทของการรบกวนได้ จะช่วยให้การกำหนดหลักเกณฑ์การใช้คลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพต่อไป

2.2 ทฤษฎี/งานวิจัย/โครงการที่เกี่ยวข้อง

การศึกษารายละเอียดข้อมูลทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าคลื่นความถี่ยังถูกใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพเมื่อมองในมิติของย่านความถี่ เวลา หรือพื้นที่ [16, 17]

ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ (Spectrum Usage) สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อให้การบริหารคลื่นความถี่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในปัจจุบันและอนาคตอันใกล้ที่ความต้องการใช้งานคลื่นความถี่จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก การวิเคราะห์และการเข้าใจ (Analytics and Understanding) ในการใช้ทรัพยากรคลื่นความถี่จึงเป็นสิ่งที่จะช่วยให้

การกำกับดูแลและการใช้งานคลื่นความถี่มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมไปถึงสามารถวิเคราะห์รูปแบบและแนวโน้มที่คลื่นความถี่จะถูกใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เช่น [18, 20 และ 21]

- การแจ้งเตือน และแก้ปัญหาการรบกวน (Interference Alarm and Resolution)
- การระบุเครื่องส่งพร้อมคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น Modulation, Protocol ในการสื่อสาร รวมถึงตำแหน่งของเครื่องส่ง (Signal Classification and Geo-location)
- การระบุการใช้งานคลื่นความถี่ที่ผิดปกติ ไม่ถูกต้อง หรือไม่ได้รับอนุญาต (Anomaly/Violation Detection)
- การสร้างแผนที่การใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Map) (ที่ได้จากการวัดสัญญาณไม่ใช่จาก propagation model ซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแผนที่ที่สร้างจากการวัดสัญญาณจริง) เพื่อวางแผนการใช้งานคลื่นความถี่ในอนาคตได้

อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่มีความที่ซับซ้อน เนื่องจากการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ต้องการข้อมูลที่ครอบคลุมทั้งในมิติของพื้นที่ที่กว้างใหญ่ ย่านความถี่ที่ถูกใช้งานซึ่งมีมากมายหลายย่าน รวมถึงระบบการสื่อสารไร้สายที่มีมากมายหลายระบบ ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่มีความซับซ้อนและเป็นข้อมูลขนาดใหญ่ การจัดการข้อมูลเพื่อดึงเอาข้อมูลที่มีประโยชน์จากข้อมูลขนาดใหญ่และซับซ้อนเช่นนี้ต้องการการจัดการข้อมูลขั้นสูง [22] เช่น Big Data และ AI

ในการระบุคุณลักษณะต่าง ๆ ของเครื่องส่งเช่น มอดูเลชัน (Modulation) และการตรวจจับการรบกวน (Interference Detection) จำเป็นต้องมีข้อมูลซึ่งเป็นตัวแทนของเครื่องส่ง หรือระบบการสื่อสารไร้สายนั้น ๆ (Wireless Signal Representation) เป็นข้อมูลอ้างอิง [22] พบว่าข้อมูลซึ่งใช้เป็นตัวแทนนี้ใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น Temporal IQ Data, Amplitude/Phase Representation หรือ Frequency Domain Representation (เช่น Fast Fourier Transform ของสัญญาณ เป็นต้น) โดยการระบุคุณลักษณะที่ต่างกันอาจต้องการข้อมูลตัวแทน (ของเครื่องส่งหรือระบบการสื่อสารไร้สาย) สำหรับอ้างอิงที่ต่างกัน เช่น Interference Detection ด้วย Frequency Domain Representation จะแม่นยำกว่าการใช้ Temporal IQ Data หรือ Amplitude/Phase Representation เป็นต้น

ในการตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติ (Abnormal Use of Spectrum) สามารถใช้ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ในเชิงพื้นที่และเวลา (Spatio-Temporal Data) ของย่านความถี่ที่ได้รับอนุญาตเป็นข้อมูลอ้างอิง จากนั้นด้วยหลักการทางสถิติการใช้งานคลื่นความถี่ที่ผิดปกติจะมีลักษณะเป็นเหมือน Outliers เมื่อเทียบกับข้อมูลอ้างอิง [23] ทั้งนี้ตัวตรวจจับความผิดปกติที่ดีต้องสามารถระบุได้ว่าการส่งสัญญาณที่พิจารณาอยู่ได้รับอนุญาตในย่านความถี่ที่กำหนดหรือไม่ และยังต้องสามารถระบุลักษณะเฉพาะสำหรับการใช้เครื่องส่งแต่ละเครื่องได้ (Fingerprint)

Fingerprint สามารถระบุได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่และเวลาของระดับกำลังและการใช้คลื่นความถี่ของสัญญาณ (Power Level and Spectrum Occupancy) [24] และนอกจากข้อมูลระดับกำลังและการใช้คลื่นความถี่ของสัญญาณแล้ว ลักษณะเฉพาะของการส่งสัญญาณหรือของเครื่องส่งแต่ละชนิดก็สามารถนำมาใช้ร่วมในการตรวจจับได้ เช่น [25] สามารถแยกแยะสัญญาณเรดาร์จากสัญญาณ LTE และ WLAN ที่อยู่ในย่านความถี่เดียวกันได้ [26] สามารถแยกแยะการสื่อสารตามมาตรฐานต่าง ๆ ในย่านความถี่แบบ Unlicensed เช่น IEEE 802.11b/g/n 802.15.4, 802.15.1 และ Bluetooth Low Energy ได้โดยดูจาก Cleared Channel Assessment ของแต่ละ

มาตรฐานได้ และ [27] สามารถระบุการส่งสัญญาณ LTE ที่ผิดปกติและสถานีฐาน LTE ที่ configuration ไม่ถูกต้อง โดยใช้รูปแบบการใช้คลื่นความถี่ของการส่งสัญญาณ LTE ปกติในเชิงเวลาและความถี่เป็นข้อมูลอ้างอิงได้

ในส่วนที่เหลือของรายงานฉบับนี้ บทที่ 3 และบทที่ 4 จะเป็นการศึกษากรณีตัวอย่างในต่างประเทศ (จากประเทศจีน ภาคพื้นยุโรป สหรัฐอเมริกา และเมียนมา) และวิเคราะห์เปรียบเทียบ ตามลำดับ จากนั้นในบทที่ 5 จะเป็นการศึกษาและประเมินความพร้อมใช้งานในประเทศ

บทที่ 3
การศึกษากรณีตัวอย่างในต่างประเทศ

การศึกษาในบทนี้เป็นรายละเอียดกรณีตัวอย่างของหน่วยงานกำกับดูแลหรือองค์กรอื่น ๆ ในต่างประเทศ ที่มีการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้งานจริงสำหรับการบริหารคลื่นความถี่ โดยคัดเลือกประเทศที่เป็นผู้นำการใช้เทคโนโลยี Big Data และ AI จำนวน 3 ประเทศ ได้แก่ จีน ภูมิภาคยุโรป และสหรัฐอเมริกา รวมถึงการศึกษาข้อมูลประกอบการวิเคราะห์กรณีตัวอย่างของกลุ่มประเทศที่มีข้อจำกัดในเรื่องการเข้าถึงและการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ได้แก่ สาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายและครบทุกมิติ

3.1 ประเทศจีน – การจัดการคลื่นความถี่ในมหานครเซี่ยงไฮ้

3.1.1 บทนำ

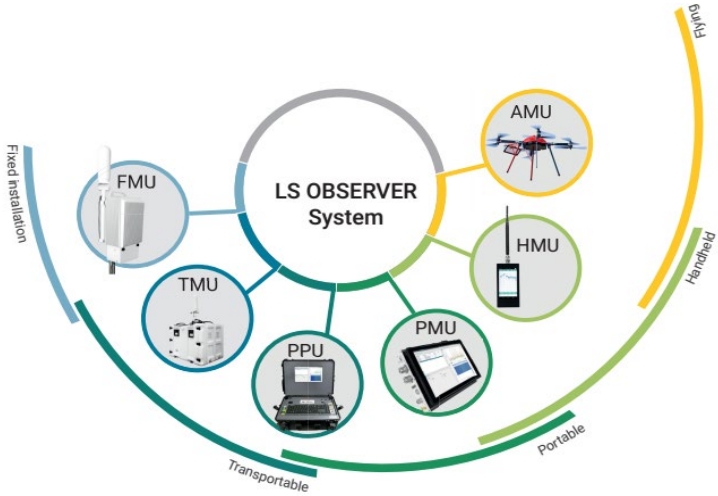
ในการบริหารจัดการ การวางแผน และการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานคลื่นความถี่ การเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่เป็นงานที่มีความท้าทาย ซึ่งจำเป็นจะต้องคำนึงถึงประเด็นในหลากหลายมิติไม่ใช่เฉพาะการแพร่กระจายสัญญาณ (Propagation) การรบกวนของสัญญาณ (Interference) ความไวของเครื่องรับและการปรับลดความไว (Receiver Sensitivity and Desensitization) การเชื่อมต่อ (Interconnection) กำลังส่ง (Power) ภูมิประเทศ (Terrain) ความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ (Site Accessibility) แต่ยังรวมถึงวัตถุประสงค์ที่ต้องการจากการดำเนินการเช่น งบประมาณ ค่าใช้จ่าย ข้อจำกัดในการใช้งาน กฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง รวมถึงทิศทางการพัฒนาของเทคโนโลยีในอนาคตด้วย ในขณะที่โครงสร้างพื้นฐานด้านโทรคมนาคมมีการพัฒนาและเจริญก้าวหน้าไปอย่างมากจากนวัตกรรมต่าง ๆ เช่น 4G/LTE, 5G หรือ IoT สำหรับเมืองอัจฉริยะ (Smart City) อย่างไรก็ตามการบริหารคลื่นความถี่ยังไม่สามารถปรับตามให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงหลักในเทคโนโลยีทางโทรคมนาคมเหล่านี้ได้ซึ่งเป็นปัญหาที่หน่วยงานกำกับดูแลของเซี่ยงไฮ้ต้องเผชิญในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การบริหารคลื่นความถี่แบบใหม่จำเป็นต้องสามารถรองรับทั้งการแลกเปลี่ยนคลื่นความถี่ (Spectrum Trading) การเช่าคลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic Frequency Lease) และการจัดการความถี่ที่ไม่ถูกใช้งาน (Whitespace Management) เพื่อสนับสนุนการใช้งานเทคโนโลยี 5G สิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อกระบวนการทำงานและระบบบริหารคลื่นความถี่ โดยระบบอัตโนมัติต่าง ๆ จะต้องสามารถรองรับทั้งแอปพลิเคชันต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้น และปริมาณข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ

สิ่งที่หน่วยงานกำกับดูแลของเซี่ยงไฮ้ได้ดำเนินการคือ สรรหาบริษัทผู้เชี่ยวชาญด้านการบริหารคลื่นความถี่ที่สามารถช่วยวางแผนการตั้งโครงข่ายการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่แบบใหม่ หรือการขยายและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบที่มีอยู่ ซึ่งบริษัท LS AG ได้รับเลือกให้เป็นผู้สร้างโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ขึ้นมาใหม่สำหรับมหานครเซี่ยงไฮ้ ทั้งนี้บริษัท LS AG เป็นผู้นำระดับโลกในด้านประสิทธิภาพคลื่นความถี่ที่มีลูกค้ามากกว่า 100 ประเทศทั่วโลก [28, 29]

3.1.2 โซลูชัน (Solution) ระบบเก็บข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่

ระบบ LS OBSERVER สามารถรองรับอุปกรณ์สำหรับเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่จากระยะไกล (Remote Monitoring Unit: RMU) ที่ครอบคลุมหลายประเภท อุปกรณ์เหล่านี้จะถูกควบคุมโดยซอฟต์แวร์ตรวจสอบส่วนกลาง (Central Monitoring Software: CMS) ที่มีประสิทธิภาพ ระบบควบคุมส่วนกลางนี้ถูกสร้างขึ้นเพื่อตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ในย่านที่สนใจทั้งหมดได้อย่างต่อเนื่อง โดยจะสามารถใช้ได้กับทั้งโครงข่ายของเซ็นเซอร์ที่กระจายออกไปตามที่ต่าง ๆ หรือกับเครื่องวัดแบบแยกเดี่ยว (Standalone) การทำงานของระบบ LS OBSERVER นี้ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องให้เจ้าหน้าที่คอยเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ตลอด 24 ชั่วโมงทุกวันอีกต่อไป โดยผู้ใช้สามารถมุ่งเน้นไปที่สิ่งที่คาดว่าจะเป็นปัญหาได้ การทำงานของระบบ LS OBSERVER นี้สอดคล้องกับแนวทางและข้อแนะนำ (Guidelines and Recommendations) ในการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU)

เมื่อตรวจพบความผิดปกติในคลื่นความถี่ (Anomaly in Spectrum) ซอฟต์แวร์ CMS จะแจ้งเตือนและสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณด้วยเทคโนโลยีที่แตกต่างกันสามรูปแบบ ด้วยหลักการบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องอัตโนมัติที่เป็นเอกลักษณ์ของระบบ LS OBSERVER ข้อมูลจะไม่สูญหาย ข้อมูลการวัดตลอดย่านความถี่ทั้งหมดที่สนใจจะถูกเก็บไว้อย่างถาวรใน RMU ข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้จะสามารถถูกกรอง (Filtered) และดาวน์โหลดเพื่อการวิเคราะห์ในภายหลังได้ ด้วยวิธีการเฉพาะของระบบ LS OBSERVER (ซึ่งได้แก่ DF (Direction Finder), Time Travel, and GROA (Gain Ratio of Arrival)) จะสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้โดยพิจารณาจากข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ นอกเหนือจากการตรวจจับและระบุตำแหน่งของความผิดปกติสำหรับการใช้งานคลื่นความถี่แล้ว ระบบ LS OBSERVER ยังสามารถสรุปค่าสถิติที่มีประโยชน์ (Meaningful Statistics) เกี่ยวกับการใช้งานคลื่นความถี่ในช่วงเวลาต่าง ๆ (Spectrum Usage over Time) ด้วยรูปแบบของข้อมูลการครอบครองช่องสัญญาณ (Channel Occupancy Data) อุปกรณ์ RMU (Remote Monitoring Unit) ถูกพัฒนาให้มีหลากหลายรูปแบบสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน เริ่มตั้งแต่แบบที่ติดตั้งถาวร แบบที่เคลื่อนย้ายได้ (Trans-portable) ไปจนถึงแบบที่เป็นอุปกรณ์พกพา (Handheld) และแบบที่ใช้กับระบบโดรน (Drone-based Systems) ดังแสดงในรูปที่ 3-1

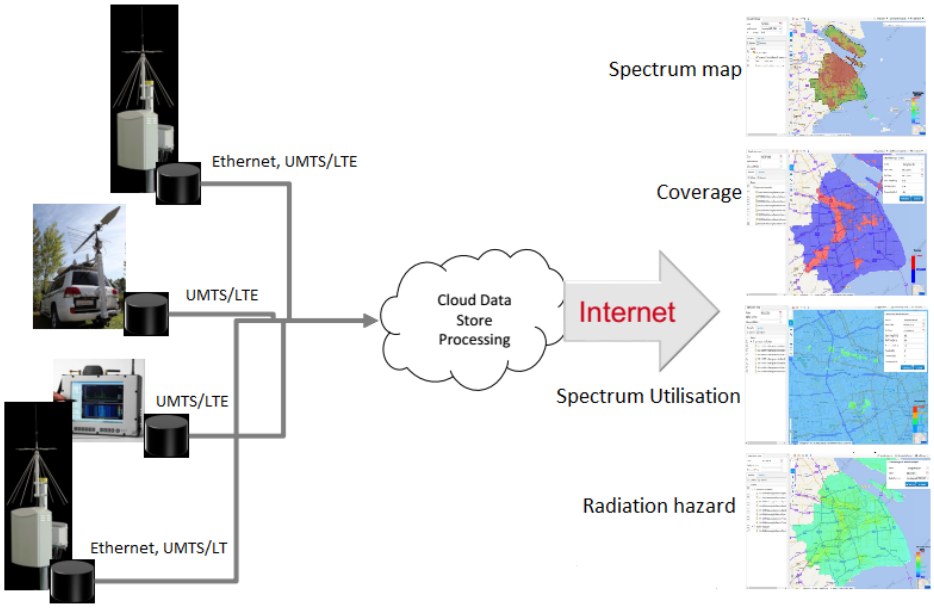


รูปที่ 3-1 โซลูชันระบบตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring System Solution) ในมหานครเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน (บริษัท LS telecom AG)

ระบบ LS OBSERVER สามารถใช้งานร่วมกับระบบบริหารคลื่นความถี่อื่น ๆ สำหรับการแลกเปลี่ยนข้อมูลอัตโนมัติและการเปรียบเทียบข้อมูลแบบเวลาจริง ซึ่งรวมถึงข้อมูลที่วัดได้และข้อมูลตามที่ได้รับอนุญาตในฐานข้อมูลการบริหารคลื่นความถี่ ความสามารถของการทำงานร่วมกันนี้เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิด (Real Enabler) การจัดสรรคลื่นความถี่และการใช้งานที่มีประสิทธิภาพอย่างแท้จริง [29]

3.1.3 การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลบนระบบคลาวด์

ระบบที่สองของ LS สำหรับการบริหารคลื่นความถี่ในมหานครเซี่ยงไฮ้คือ การจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลบนคลาวด์ที่ถูกเรียกว่า SpectrumMap (ดังแสดงในรูปที่ 3-2) ซึ่งเป็นระบบข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) บนคลาวด์ที่รวบรวมข้อมูลการใช้งานจริงของคลื่นความถี่จากอุปกรณ์เฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ต่าง ๆ และนำข้อมูลมาเสนอบนแผนที่ (Map) ในรูปแบบที่ใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว ระบบ SpectrumMap นี้สามารถรวบรวมข้อมูลของคลื่นความถี่ที่ได้จากอุปกรณ์เฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ของระบบ LS OBSERVER ซึ่งมีอยู่หลากหลายรูปแบบเช่น อุปกรณ์ที่ติดตั้งแบบประจำที่ หรือติดตั้งแบบชั่วคราว อุปกรณ์เคลื่อนที่ และอุปกรณ์แบบพกพา นอกจากนี้ระบบ SpectrumMap ยังสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่ของ LS ได้อีกด้วย



รูปที่ 3-2 โซลูชันระบบตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่สำหรับมหานครเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน จากบริษัท LS Telecom AG เว็บ SpectrumMap ให้ข้อมูลแผนที่คลื่นความถี่ ความครอบคลุมของย่านความถี่ (Coverage) การใช้คลื่นความถี่ (Utilization) และระดับความเป็นอันตรายจากรังสี (Radiation Hazard)

ระบบ SpectrumMap จะสร้างแผนที่การใช้งานคลื่นความถี่ของพื้นที่ต่าง ๆ จากข้อมูลการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ที่รวบรวมได้ [30] อัลกอริทึมสำหรับคาดการณ์อัจฉริยะจะประมาณระดับสัญญาณที่คาดหวังในแต่ละจุดของแผนที่ที่ถูกเฝ้าสังเกตการณ์โดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องทราบว่าอุปกรณ์ RMU แต่ละตัวติดตั้งอยู่ในพื้นที่ใดและไม่จำเป็นต้องระบุคำสั่งสำหรับดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน ระบบ SpectrumMap นี้จะนำเสนอข้อมูลในลักษณะที่ใช้งานได้ง่าย (User-friendly) บนเว็บเบราว์เซอร์ นอกจากนี้ยังช่วยสนับสนุนการวิเคราะห์คลื่นความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการตรวจสอบผลการจำลองและการตรวจจับสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต รวมถึงการระบุคลื่นความถี่ที่ใช้งานมากและน้อยเกินไป นอกจากนั้นระบบดังกล่าวจะเป็นข้อมูลการใช้คลื่นความถี่พื้นฐานเพื่อใช้ประกอบสำหรับการกำหนดนโยบาย

ตารางที่ 3-1 สรุประบบการจัดการคลื่นความถี่ในเซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน

การดำเนินการ	ระบบ/แอปพลิเคชัน	อุปกรณ์/ฟังก์ชันการทำงาน
การเก็บข้อมูลคลื่นความถี่	LS OBSERVER	- แบบประจำที่ (Fixed Stations) - แบบกริด (Grid Monitoring Nodes) - แบบติดตั้งบนยานพาหนะ/ยานพาหนะไร้คนขับ (Vehicle/UAV Measurement) - แบบติดตั้งบนโดรน (Drone Measurement Unit) - แบบติดตั้งบนอุปกรณ์พกพา (Handle Measurement Unit)
การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล (Data Storage and analytics)	SpectrumMap (บนระบบคลาวด์)	Data Mining/Fusion - Spectrum Data Processing - Fusion ตามตำแหน่ง เวลา และความถี่ (on Location, Time, and Frequencies)
		Data rendering/visualization - 2D/3D Display - Dynamic Display - การเปรียบเทียบในทางเวลา/ความถี่ (Time/Frequency Domain)
การดำเนินการผ่านเว็บ (Web-based approach)	การแสดงภาพข้อมูลคลื่นความถี่ (Visualization of Radio Spectrum) เป็น Web GIS - ความเข้มของสัญญาณ (Field Strength of Frequency Band)	

การดำเนินการ	ระบบ/แอปพลิเคชัน	อุปกรณ์/ฟังก์ชันการทำงาน
	- ความครอบคลุมของสัญญาณ (Coverage of a Frequency Band) - แถบคลื่นความถี่ที่ถูกใช้งาน (Band Occupancy) - การใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Utilization) - ระดับความเป็นอันตรายจากรังสี(Radiation Hazard) - Dynamic Display	

ตารางที่ 3-2 ประโยชน์ของระบบการบริหารคลื่นความถี่ (ที่บริษัท LS เสนอ)

ต่อทีมนโยบาย / หน่วยงานกำกับดูแล	ต่อทีมบังคับใช้และภาคสนาม
● เจ้าหน้าที่สามารถเข้าถึงข้อมูลการวัดที่เก็บไว้ (Off-Air Measurements) จากโครงข่ายการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ ● ช่วยให้การตัดสินอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลใช้งานจริงและมีหลักฐาน (Evidence Based) ● เกิดการประเมินการใช้งานคลื่นความถี่ตามจริงไม่ใช่จากการคาดการณ์ด้วยแบบจำลอง ● เห็นการใช้งานจริงในเวลาต่าง ๆ (Temporal Domain) ● สามารถตรวจสอบนโยบายการออกใบอนุญาตว่ายังใช้งานอยู่และใช้งานได้ (Active and Usable) เช่น คลื่นความถี่ การกระจายของการบริการ ● เปิดโอกาสให้เกิดการจัดสรรคลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic Assignments)	● วิศวกรภาคสนามและเจ้าหน้าที่ทั้งหมดสามารถเข้าถึงข้อมูลการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ได้ ● รองรับมุมมองสำหรับการใช้งานคลื่นความถี่ และการรบกวนของสัญญาณ ● สามารถระบุการใช้งานคลื่นความถี่ในลักษณะที่ไม่ถูกต้อง หรือไม่เป็นไปตามใบอนุญาตได้ ● ยืนยันความครอบคลุมของสัญญาณเป็นตามที่คาดไว้จากข้อมูลจริงไม่ใช่จากการสร้างแบบจำลอง ● ลดเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบ ● เพิ่มมูลค่าของข้อมูลและมูลค่าโดยรวมของการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่

3.2 ประเทศในภูมิภาคยุโรป – การเฝ้าตรวจสอบคลื่นความถี่แบบเปิด

3.2.1 บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาการสื่อสารข้อมูลบนสมาร์ตโฟนและเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตประสานสรรพสิ่งหรือ IoT (Internet of Things) ได้เพิ่มขึ้นอย่างมากในหลายประเทศของภูมิภาคยุโรป เพื่อตอบสนองต่อความต้องการสำหรับการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายนี้จึงจำเป็นต้องใช้คลื่นความถี่วิทยุ (RF) มากขึ้น พื้นที่ครอบคลุม (Cells) มีขนาดเล็กลง อัตราการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น และสามารถรองรับผู้ใช้ที่ได้มากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่สามารถใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีและประเภทการมอดูเลตแบบเดิม (Legacy Technology and Modulation) ได้

นอกจากนั้นการสื่อสารข้อมูลของ IoT ทั้งระยะใกล้และระยะไกลจะเพิ่มความหลากหลายของรูปแบบและโปรโตคอลการเข้าถึง (Physical and Medium Access Protocols) เพื่อต่อกับอินเทอร์เน็ต ด้วยเหตุนี้การใช้งานคลื่นความถี่วิทยุจึงมีลักษณะได้ทั้งแบบกระจัดกระจาย เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน และมีความหลากหลาย (Fragmented, Burst, and Diverse) การตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่จึงเป็นงานที่ซับซ้อน เนื่องจากต้องมีการสุ่มตัวอย่างที่หนาแน่นมากพอทั้งในเชิงด้านเวลา ย่านความถี่ และพื้นที่ ส่งผลให้เกิดข้อมูลการใช้คลื่นความถี่วิทยุจำนวนขนาดใหญ่ และด้วยความซับซ้อนในการใช้งานคลื่นความถี่ที่เพิ่มขึ้นนี้ ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับรูปแบบการใช้งานคลื่นความถี่จึงมีความสำคัญมากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อที่จะทำให้แน่ใจว่าการใช้ทรัพยากรด้านคลื่นความถี่วิทยุที่มีอยู่อย่างจำกัดนี้เป็นไปอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ

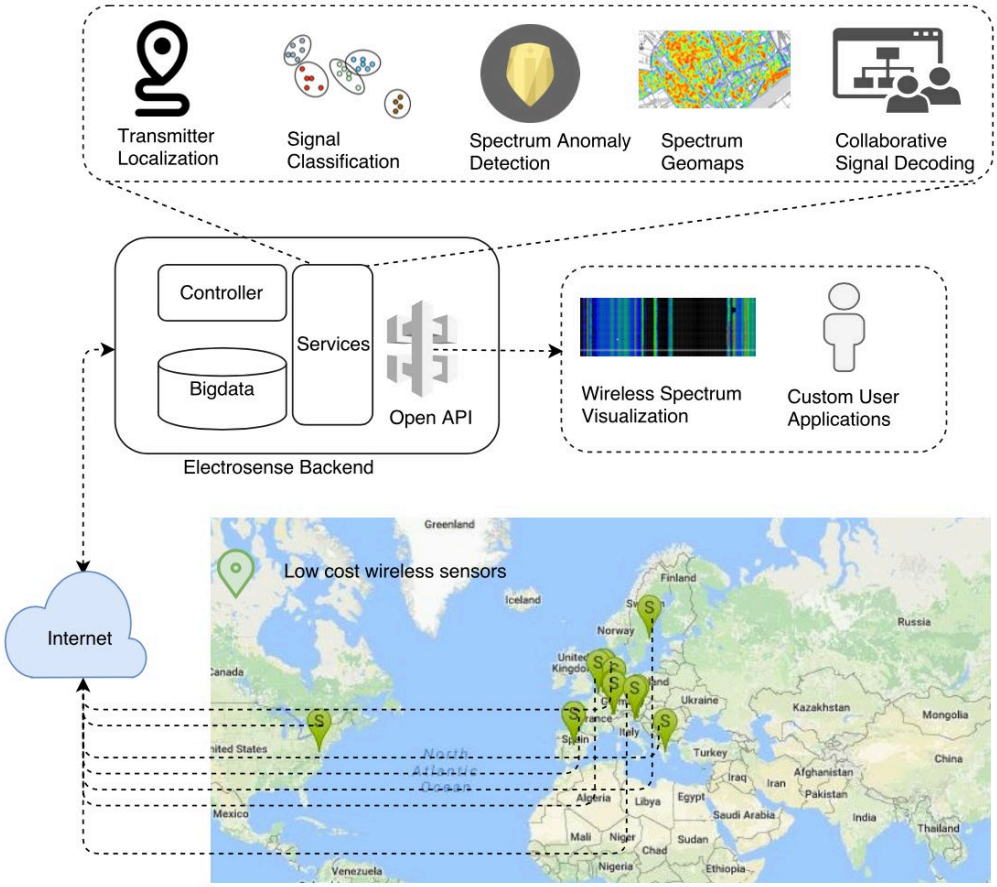
การตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับผู้ใช้ปลายทาง ผู้ให้บริการ (Operators) หน่วยงานกำกับดูแลคลื่นความถี่ และการใช้งานทางทหาร เนื่องจากในแต่ละกรณี การใช้งานมีความต้องการและความท้าทายเฉพาะของตนเอง ยกตัวอย่างเช่น ผู้ใช้ปลายทางอาจสนใจการเพิ่มประสิทธิภาพโครงข่ายสื่อสารแบบไร้สายสำหรับบ้านอัจฉริยะ (Smart Home) หน่วยงานกำกับดูแลอาจให้ความสำคัญกับการบังคับใช้กฎระเบียบที่เกี่ยวกับคลื่นความถี่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพโครงข่ายหรือปรับแผนการใช้งานคลื่นความถี่ (Spectrum Re-farming) ผู้ให้บริการอาจให้ความสำคัญกับความครอบคลุมของสัญญาณในช่วงเวลาต่าง ๆ การใช้งานทางทหารซึ่งอาจเป็นเรื่องที่ท้าทายที่สุดเนื่องจากต้องมีการตรวจจับและระบุตำแหน่งของการส่งสัญญาณที่ตั้งใจปกปิดหลบซ่อนแหล่งกำเนิด ในขณะที่ผู้ให้บริการรายใหม่อาจสนใจเกี่ยวกับการใช้งานด้าน IoT เช่น การตรวจจับสัญญาณที่ส่งจากตัวรับ-ส่งสัญญาณที่ใช้พลังงานต่ำและราคาประหยัด

Electrosense ถูกตั้งขึ้นเพื่อเป็นโครงข่ายการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ที่ตอบโจทย์ความต้องการทั้งหมดที่กล่าวถึงข้างต้น และสามารถใช้งานได้อย่างรวดเร็ว โดยเกิดจากการร่วมมือกันระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งหมดในยุโรปผ่านอุปกรณ์เฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่แบบราคาประหยัด ชุดข้อมูลของการใช้งานคลื่นความถี่จะถูกจัดเก็บและประมวลผลด้วยสถาปัตยกรรมข้อมูลขนาดใหญ่และส่งกลับไปยังกลุ่มผู้ใช้ (Community) ด้วยโมเดลการให้บริการข้อมูลคลื่นความถี่แบบเปิด (Open Spectrum Data as a Service Model) ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถสร้างแอปพลิเคชันที่หลากหลายและแปลกใหม่ตามความต้องการที่แตกต่างกันของผู้ใช้แต่ละกลุ่มได้ [31, 32]

3.2.2 โครงข่ายการเฝ้าตรวจสอบคลื่นความถี่ Electrosense

โครงการ Electrosense ได้ดำเนินการตามกระบวนทัศน์ (Paradigm) ของการทำงานแบบ Crowdsourcing ซึ่งเป็นการกระจายปัญหาไปยังกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเพื่อค้นหาคำตอบและวิธีการในการแก้ปัญหานั้น ๆ โดยรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จากเซ็นเซอร์ (Sensors) แบบราคาประหยัดจำนวนมาก ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในการตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่ เป้าหมายหลักของการโครงการริเริ่มนี้ (ดังแสดงในรูปที่ 3-3) คือการตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่ทั้งหมดในพื้นที่ต่าง ๆ ของยุโรป และให้ข้อมูลคลื่นความถี่ที่ประมวลผลแล้วแก่ผู้ใช้ที่สนใจจะได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่ ซึ่งจะช่วยให้เกิดแอปพลิเคชันสำหรับการบริหารคลื่นได้เป็นจำนวนมาก การนำไปปรับใช้ทั่วโลกมีความเป็นไปได้ด้วยการใช้กระบวนทัศน์แบบ Crowdsourcing ร่วมกับเซ็นเซอร์ต้นทุนต่ำ ในส่วนของเซ็นเซอร์สำหรับโครงการ Electrosense ได้รับการออกแบบโดยใช้ฟรอนต์เอนด์ที่กำหนดได้ด้วยโปรแกรม SDR (Software Defined Radio) ที่ราคาไม่แพงและเข้าถึงได้ง่าย และใช้แพลตฟอร์มแบบฝังตัว (Embedded Platform) เช่น Raspberry Pi เป็นต้น เพื่อลดต้นทุนที่ผู้ให้ข้อมูลคลื่นความถี่ต้องแบกรับ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบอุปกรณ์

ตัวแปลงสัญญาณขาลง (Down Converter) ราคาประหยัดเพื่อขยายช่วงการทำงานของแพลตฟอร์ม SDR ราคาถูกนี้จาก 1.7 กิกะเฮิร์ตซ์ เป็น 6 กิกะเฮิร์ตซ์ แม้ว่าเป้าหมายของโครงการ Electrosense คือการใช้ฮาร์ดแวร์ราคาประหยัด แต่อุปกรณ์ SDR ราคาสูง (High End) ก็สามารถเป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายได้เช่นกัน Electrosense มีโมดูลซอฟต์แวร์แบบเปิด (Open Source Software Modules) สำหรับทั้งเซ็นเซอร์ราคาถูกและราคาแพงเพื่อให้ผู้ใช้งานสะดวกในการตั้งค่า

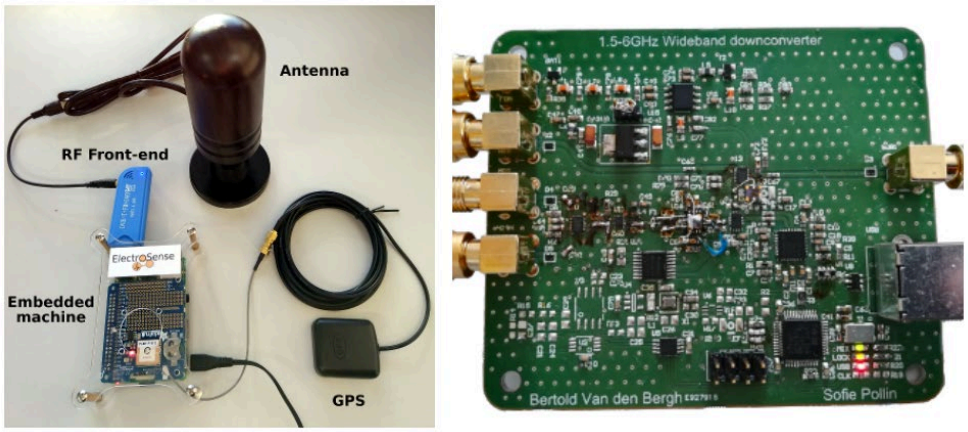


รูปที่ 3-3 ภาพรวมของโครงข่ายการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ Electrosense เซ็นเซอร์ส่งข้อมูลคลื่นความถี่ไปยังแบ็กเอนด์ อัลกอริทึมต่าง ๆ จะทำงานบนข้อมูลที่รวบรวมมาได้ในแบ็กเอนด์ และผลการประมวลของอัลกอริทึมเหล่านี้จะถูกจัดเตรียมให้กับผู้ใช้ในรูปแบบบริการผ่าน API แบบเปิด ผู้ใช้สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันเกี่ยวกับคลื่นความถี่ของตนเองได้จากข้อมูลคลื่นความถี่ที่ดึงมาโดยใช้ API นี้

ปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งจากเซ็นเซอร์เพียงตัวเดียวโดยทั่วไปมักจะอยู่ในช่วงระหว่าง 50 กิโลบิตต่อวินาที (kbps) ถึง 50 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ขึ้นอยู่กับแพลตฟอร์มของเซ็นเซอร์และการกำหนดค่า การจัดเก็บข้อมูลคลื่นความถี่ที่ได้รับจากเซ็นเซอร์เหล่านี้สามารถทำให้พื้นที่จัดเก็บข้อมูลของเครื่องเซิร์ฟเวอร์เต็มได้อย่างรวดเร็ว ตัวอย่างเช่น ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ 60 ตัวที่เก็บข้อมูลเป็นเวลาหนึ่งเดือนจะต้องการพื้นที่จัดเก็บประมาณ 1 เทราไบต์ (TB) ด้วยการรับส่งข้อมูลที่ 50 กิโลบิตต่อวินาที (kbps) ดังนั้น โครงการนี้จึงได้ออกแบบสถาปัตยกรรมข้อมูลขนาดใหญ่ที่ยืดหยุ่นได้ขึ้นมารองรับการจัดการกับข้อมูลจำนวนมากนี้ในแบ็กเอนด์และยังสามารถดึงข้อมูลคลื่นความถี่ที่มีประโยชน์ออกมาใช้งานได้อย่างรวดเร็ว โดยสถาปัตยกรรมสำหรับการบริหารคลื่นความถี่นี้จะมีหน้าที่เกี่ยวกับการ

ควบคุมเซ็นเซอร์ต่าง ๆ การจัดเก็บข้อมูล และการใช้อัลกอริทึม (Algorithm Deployment) ในแบ็กเอนด์สำหรับการประมวลผล

Electrosense ยังมีกรอบงาน (Framework) ที่ครอบคลุมสำหรับการระบุตำแหน่งและการใช้เซ็นเซอร์อย่างปลอดภัยผ่านกระบวนการลงทะเบียนอย่างสม่ำเสมอ (Consistent Registration Process) รวมถึงการควบคุมเซ็นเซอร์จากระยะไกล ข้อมูลคลื่นความถี่ที่ตรวจจับได้จากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ สามารถดึงได้จากแบ็กเอนด์โดยใช้ API แบบเปิดผ่านทางอินเทอร์เน็ต ความเป็นส่วนตัวของข้อมูล (Data Privacy) จะถูกป้องกันโดยการกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงข้อมูลได้ 3 รูปแบบได้แก่ แบบสาธารณะ แบบส่วนตัว และแบบจำกัด ซึ่งจะจำกัดการเข้าถึงข้อมูลของผู้ใช้ด้วยเวลาที่ใช้งานที่เหมาะสม ข้อดีอีกหนึ่งข้อของ ElectroSense คือ มีเครื่องมือ (Tools) สำหรับรวบรวมข้อมูลคลื่นความถี่ที่พร้อมใช้งานในแบ็กเอนด์ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นความถี่ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น



รูปที่ 3-4 ต้นแบบเซ็นเซอร์ราคาประหยัดและต้นแบบของตัวแปลงวิทยุ (RF Converter) ที่ปรับแต่งเพื่อให้สามารถสแกนคลื่นความถี่ในช่วง 0-6 กิกะเฮิร์ตซ์ ได้ [33]

3.2.3 การประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นความถี่

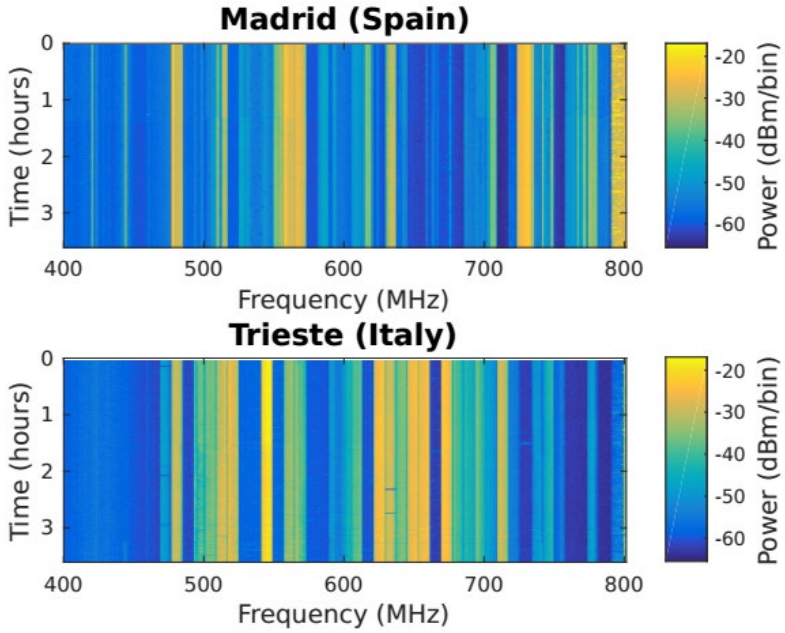
3.2.3.1 การแสดงภาพของคลื่นความถี่ (Spectrum Visualization)

โครงการ Electrosense ได้พัฒนาฟรอนต์เอนด์บนเว็บไซต์ (Web Front-End) เพื่อให้สามารถแสดงข้อมูลคลื่นความถี่ได้โดยง่าย ตัวแสดงภาพของคลื่นความถี่สามารถเลือกปรับเปลี่ยนเซ็นเซอร์และความละเอียดของย่านความถี่ (Frequency Resolution) ที่แสดงในระดับต่าง ๆ สำหรับการดูภาพแบบละเอียดได้ นอกจากนั้นยังสามารถดูข้อมูลคลื่นความถี่จากเซ็นเซอร์ย้อนหลังได้ตั้งแต่ตอนที่เซ็นเซอร์เริ่มถูกใช้งานในระบบ ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จะถูกประมวลผลทั้งในระดับหน่วยเวลาและหน่วยความถี่ต่าง ๆ โดยจัดเก็บไว้ในรูปแบบของตารางเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลคลื่นความถี่ได้อย่างรวดเร็วผ่านเว็บไซต์ นอกจากนี้ยังมีการอัปเดตข้อมูลคลื่นความถี่แบบสด (Live) ผ่านเว็บไซต์ด้วย ซึ่งจะมีดีเลย์ (Delay) ประมาณ 5 วินาที

3.2.3.2 การเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic Spectrum Access)

การเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัตช่วยให้เกิดโมเดลเทคโนโลยีที่สามารถจะบริหารคลื่นความถี่ได้ตามความต้องการใช้งานย่านความถี่ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ไม่ว่าจะในแง่ของย่านความถี่ เวลา พื้นที่ คุณภาพ และต้นทุนของการให้บริการ วิธีการตรวจจับคลื่นความถี่แบบมีส่วนร่วมและแบบกระจาย (Cooperative and Distributed Spectrum Sensing) สามารถช่วยแก้ไขปัญหาความผิดพลาดในการตรวจจับผู้ใช้คลื่นความถี่หลักและช่วยลดความน่าจะเป็นในการตรวจจับสัญญาณผิดพลาดลงได้อย่างมาก อย่างไรก็ตามการศึกษาทดลองใช้งานยังต้องมีการวิเคราะห์ถึงกลยุทธ์ในการตรวจจับคลื่นความถี่แบบมีส่วนร่วมขั้นสูงร่วมกับรายละเอียดเกี่ยวกับความหนาแน่นของเซ็นเซอร์ ซึ่งในปัจจุบันกำลังอยู่ระหว่างการศึกษาการตรวจสอบคลื่นความถี่ที่ไม่ถูกใช้งาน (White Space) เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของกรอบงานของโครงการ Electrosense

White Space หมายถึงคลื่นความถี่ที่ไม่ถูกใช้งานในย่านความถี่โทรทัศน์ (400-800 เมกะเฮิร์ตซ์) ความถี่ที่พร้อมใช้งานในย่านนี้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่พิจารณาเป็นอย่างมาก เช่น White Space ในย่านความถี่ 470-790 กิกะเฮิร์ตซ์ของในยุโรปจะมีน้อยกว่าสหรัฐอเมริกา การใช้โครงสร้างพื้นฐานของ Electrosense และเซ็นเซอร์ที่ตรวจจับความหนาแน่นของกำลังส่ง (Power Spectral Density: PSD) ทำให้สามารถตรวจจับ White Space ในพื้นที่ต่าง ๆ ได้ รูปที่ 3-5 แสดงตัวอย่างการใช้งานคลื่นความถี่ในแถบสัญญาณโทรทัศน์ (400-800 กิกะเฮิร์ตซ์) ในสองเมืองของยุโรป ในหน่วยความละเอียดของย่านความถี่ (Frequency Resolution) ที่ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ และหน่วยความละเอียดของเวลา (Time Resolution) อยู่ที่ 60 วินาที การวิเคราะห์ที่คล้ายกันนี้สามารถทำได้อย่างง่ายดายโดยการดึงข้อมูลที่รวบรวมจากแบ็กเอนด์ของ Electrosense ผ่าน API



รูปที่ 3-5 การใช้งานช่องสัญญาณ TV (Band Occupancy) ในมาดริด (สเปน) และเอสเต (อิตาลี) จากผลการวิเคราะห์ของ Electrosense

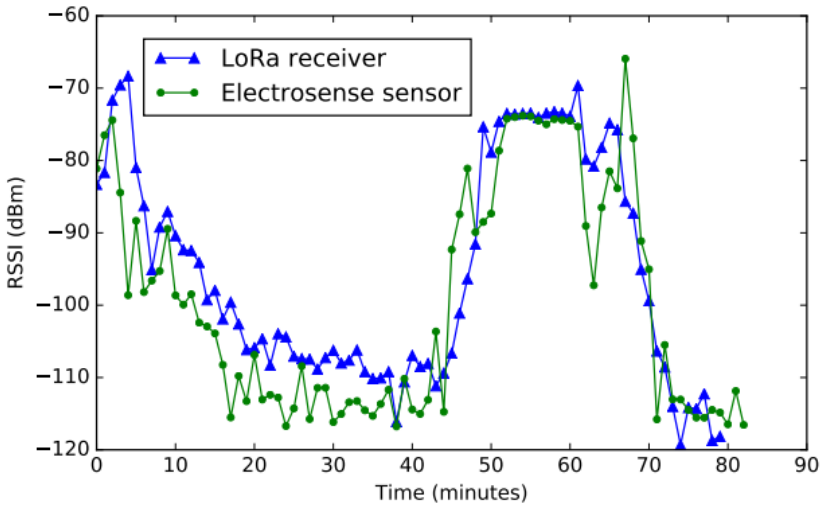
3.2.3.3 การตรวจจับความผิดปกติของการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Anomalies Detection)

การตรวจสอบความผิดปกติสำหรับการใช้งานคลื่นความถี่เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ระบบอัตโนมัติในการตรวจจับสถานีวิทยุในระบบ FM (Frequency Modulation) ที่ไม่ได้รับอนุญาต เครื่องส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ไม่ได้รับอนุญาต การส่งสัญญาณโดยไม่ได้รับอนุญาตซึ่งไปขัดขวางการทำงานปกติของเรดาร์อุตุนิยมวิทยา และการส่งสัญญาณที่ระดับกำลังส่งสูงกว่าที่ได้รับอนุญาต เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการบังคับใช้กฎระเบียบเกี่ยวกับการบริหารคลื่นความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องตรวจจับความผิดปกติที่ดีควรตรวจสอบก่อนว่า การส่งสัญญาณต่าง ๆ ในย่านความถี่ที่สนใจได้รับอนุญาตหรือไม่ ยิ่งไปกว่านั้นระบบดังกล่าวจะต้องสามารถเรียนรู้คุณลักษณะเฉพาะ (Fingerprint) ของการส่งสัญญาณโดยวิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานย่านความถี่ทั้งเชิงเวลาและพื้นที่ของเครื่องส่งสัญญาณทั้งในแง่ของระดับกำลังส่งและการครอบครองย่านความถี่ (Spectral Occupancy) การวิเคราะห์กำลังส่งสามารถทำได้ในระดับหนึ่งโดยใช้การจัดกลุ่มตามลักษณะการมอดูเลต (Modulation Classifier) ในขณะที่การวิเคราะห์การครอบครองย่านความถี่สามารถทำได้โดยการเรียนรู้การแจกแจงของการครอบครองคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา (Spectral Occupancy Distributions over Time) การเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากของคุณลักษณะเฉพาะที่กล่าวถึงในข้างต้นนี้จะถูกจัดเป็นความผิดปกติของการใช้งานคลื่นความถี่

ในการทดสอบความถูกต้องของการจำแนกประเภทการมอดูเลตโดยใช้ Electrosense ตัวจำแนกการมอดูเลตเชิงเวลาโดยการเรียนรู้เชิงลึก (Time Domain Deep Learning Modulation Classifier) ซึ่งทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพกับ Electrosense ด้วยข้อมูลอินเฟสควอดเดรเจอร์เฟส (IQ Data) ของสัญญาณ จะถูกใช้ในแบ็กเอนด์แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกใช้ตัวอย่างข้อมูลอินเฟสควอดเดรเจอร์เฟส (IQ) เป็นข้อมูลป้อนเข้าโดยให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นความน่าจะเป็นของประเภทการมอดูเลตของสัญญาณแบบต่าง ๆ แบบจำลองนี้ได้รับการฝึกฝน (Train) ให้เรียนรู้จากข้อมูลขนาดและเฟสของสัญญาณจากโดเมนเวลาของการมอดูเลตแบบต่าง ๆ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลขั้นสูงเช่น Higher Order Cyclic Moment เป็นต้น การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่นำเสนอสามารถจำแนกประเภทการมอดูเลตได้อย่างแม่นยำโดยมีอัตราความแม่นยำเฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 90 ที่ระดับของอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อการรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) แตกต่างกันตั้งแต่ 0 เดซิเบล ถึง 20 เดซิเบล โดยไม่ขึ้นกับคุณลักษณะของช่องสัญญาณ ในอนาคตจะมีการพัฒนาเป็นโมเดลที่มีประสิทธิภาพเชิงคำนวณ (Computationally Efficient) สูงขึ้นทำให้สามารถใช้ในเซ็นเซอร์ราคาประหยัดเพื่อลดปริมาณข้อมูลตัวอย่างข้อมูลอินเฟสควอดเดรเจอร์เฟส (IQ) ที่ต้องส่งกลับมาที่แบ็กเอนด์ได้ [34]

3.2.3.4 การระบุตำแหน่งของเครื่องส่งสัญญาณ (Transmitter Localization)

การระบุตำแหน่งของเครื่องส่งสัญญาณเป็นแอปพลิเคชันสำคัญสำหรับสร้างทั้งแผนที่เครื่องส่งอัตโนมัติ (Automated Transmitter Maps) และการเรียนรู้คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องส่ง (Transmitter Fingerprinting) งานวิจัยเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งทั้งในอาคารและนอกอาคารด้วยระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามต้องมีการตรวจสอบความถูกต้อง (Accuracy) ของข้อมูล RSSI ที่ดึงมาจากเซ็นเซอร์ในโครงข่าย Electrosense ด้วย เพื่อทดสอบความถูกต้องของการระบุตำแหน่ง เซ็นเซอร์จะได้รับการปรับเทียบ รวมถึงอัตราขยายของระบบ (System Gains) ซึ่งประกอบด้วยอัตราขยายของเสาอากาศ (Antenna Gains) การสูญเสียสายเคเบิล (Cable Loss) และอัตราขยายส่วนหน้า (Front-End Gains) จะต้องถูกวัดเพื่อหากำลังส่งสัมบูรณ์ (Absolute Power)



รูปที่ 3-6 ระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) วัดโดยใช้เซ็นเซอร์ LoRa และ Electrosense

รูปที่ 3-6 เปรียบเทียบการวัดระดับความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (RSSI) ของ ISM ในย่านความถี่ 435 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้เซ็นเซอร์ LoRa แบบมาตรฐาน กับ RSSI โดยใช้เซ็นเซอร์ Electrosense (โดยที่ตัวแยกสัญญาณถูกนำมาใช้เพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณจากเสาอากาศไปถึงตัวรับ LoRa และเซ็นเซอร์ Electrosense ราคาประหยัดเท่ากัน) เครื่องส่ง LoRa แบบเคลื่อนที่ถูกตั้งค่าให้ส่งแพ็กเก็ตข้อมูลทุก ๆ 3 วินาทีตลอดช่วง 80 นาที ตำแหน่ง GPS ที่บันทึกและประทับเวลาจะถูกส่งไปยังเครื่องรับ การวัดระดับสัญญาณ RSSI ที่รวบรวมจากเซ็นเซอร์ LoRa และ Electrosense แสดงไว้ในรูปที่ 3-6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์ Electrosense ที่ปรับเทียบอย่างเหมาะสมสามารถให้ข้อมูล RSSI ที่ถูกต้องได้ การตกลงของค่า RSSI (RSSI Dips) จากการวัดของเซ็นเซอร์เป็นผลมาจากการที่เซ็นเซอร์จะต้องใช้เวลาสแกนย่านความถี่ที่นานถึงกว่า 40 วินาทีทำให้พลาดไม่ได้รับข้อมูลบางแพ็กเก็ตไป อัลกอริทึมสำหรับระบุตำแหน่งจากงานวิจัยต่าง ๆ สามารถถูกนำมาใช้โดยดึงข้อมูลคลื่นความถี่ที่เก็บไว้ผ่าน API แบบเปิด หรือนำมาใช้ได้โดยตรงในแบ็กเอนด์ [34]

3.3 ประเทศสหรัฐอเมริกา – การบริหารจัดการคลื่นความถี่ในมุมของภาครัฐ

3.3.1 บทนำ

ความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างมากที่จะเข้าถึงอินเทอร์เน็ตแบบไร้สายความเร็วสูงทำให้รัฐบาลสหรัฐอเมริกา มีดำริที่จะเพิ่มปริมาณคลื่นความถี่สำหรับแอปพลิเคชันบรอดแบนด์เชิงพาณิชย์ (Commercial Broadband Applications) คลื่นความถี่วิทยุที่เป็นที่ต้องการส่วนใหญ่ในสหรัฐฯ ได้รับการจัดสรรไปหมดแล้วดังจะเห็นได้จากแผนภูมิการจัดสรรคลื่นวิทยุของ National Telecommunications and Information Administration (NTIA) ดังนั้นการทำให้คลื่นความถี่มีมากขึ้นด้วยวิธีพื้นฐานที่สามารถดำเนินการได้มีอยู่ด้วยกันสองวิธีหลัก ๆ ได้แก่ (1) เปิดให้มีการใช้ความถี่ร่วมกันหรือ (2) ย้ายผู้ใช้เดิมไปยังย่านความถี่อื่น ทั้งสองวิธีนี้จะทำให้ความหนาแน่นของระบบสื่อสารต่าง ๆ เพิ่มขึ้นไม่ว่าจะในมุมของพื้นที่ ย่านความถี่ และเวลา ซึ่งหากไม่มีการวางแผนและความระมัดระวังอย่างเพียงพอ อาจเพิ่มโอกาสที่จะเกิดการรบกวนกันของสัญญาณ ส่งผลกระทบกับผู้ใช้งานคลื่นความถี่และนักลงทุน รวมถึงลดมูลค่าของคลื่นความถี่ลง การวัดการใช้งานคลื่นความถี่ (Measurement of Spectral Occupancy) เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มากสำหรับการวางแผน การออกแบบ รวมถึงการบังคับใช้งานคลื่นความถี่ร่วมกันและการย้ายคลื่นความถี่

(Spectrum Sharing and Relocation) ด้วยการกำหนดมาตรฐานและการพัฒนาแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุด (Best Practice) เพื่อประกันคุณภาพของข้อมูล ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ที่วัดได้สามารถนำมาใช้ควบคู่ไปกับข้อมูลใบอนุญาตและข้อมูลการจัดสรรคลื่นความถี่เพื่อปรับปรุงคุณภาพและปริมาณข้อมูลสำหรับการวางแผนโดยผู้กำหนดนโยบาย ผู้จัดการคลื่นความถี่ และนักลงทุน ในขั้นตอนของการออกแบบกระบวนการเปลี่ยนผ่าน (Transition Process) ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ที่วัดได้แบบเวลาจริง (Real-time) และที่เก็บได้จากอดีตสามารถนำมาใช้เพื่อตรวจสอบสมมติฐาน ตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการแพร่กระจายสัญญาณ และทดสอบภาคสนามของวิธีการและเทคโนโลยีการประสานงานแบบพลวัต (Dynamic Coordination Schemes and Technologies) ซึ่งหลังจากการเปิดให้ใช้งานคลื่นความถี่ร่วมกันหรือเกิดการย้ายคลื่นความถี่แล้ว การเปิดเผยและความโปร่งใสของข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จะมีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาการรบกวน และการบังคับใช้ข้อกำหนดต่าง ๆ ในสภาวะที่การรบกวนมีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากขึ้นเรื่อย ๆ

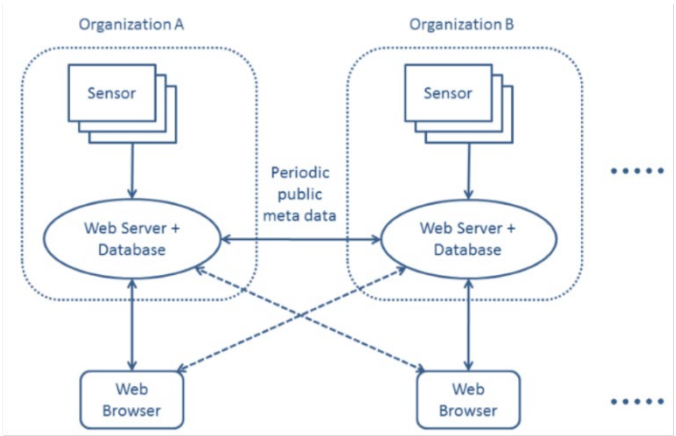
ในสหรัฐฯ ภาคส่วนต่าง ๆ ทั้งภาคอุตสาหกรรม สถาบันการศึกษา และรัฐบาล กำลังเก็บข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ทั้งในแบบระยะยาวและข้อมูลต่อเนื่องจากการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) ด้วยวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย อย่างไรก็ตามยังไม่มีการจัดการเพื่อให้ข้อมูลที่เก็บมาจากหลากหลายองค์กร และหลากหลายแหล่งเหล่านี้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อส่วนรวม แต่ละองค์กรที่เก็บข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จะเก็บข้อมูลหลากหลายประเภทที่ตอบวัตถุประสงค์เฉพาะขององค์กรเท่านั้น วิธีการเก็บข้อมูลมีได้หลากหลายและไม่มีวิธีการใดวิธีการหนึ่งที่จะสามารถตอบโจทย์วัตถุประสงค์ที่หลากหลายนี้ได้หมด ด้วยแหล่งที่มา ประเภท และวิธีการที่แตกต่างกันเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีโครงสร้างพื้นฐานและการกำหนดมาตรฐานในการรวบรวมข้อมูลเพื่อให้บรรลุประโยชน์สูงสุดของการรวมข้อมูล (Full Collective Value of Data) [35]

ตามบันทึกประธานาธิบดีของสหรัฐฯ (Presidential Memorandum) ในปี 2013 NTIA และ National Institute of Standards and Technology (NIST) ซึ่งเป็นหน่วยงานภายใต้กระทรวงพาณิชย์ของสหรัฐฯ ได้ร่วมลงทุนในการพัฒนาความสามารถในการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ โดยเป้าหมายของโครงการนำร่องของ NIST คือ (1) พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานเพื่อรองรับและรวบรวมข้อมูลการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่จำนวนมาก และทำให้มีข้อมูลซึ่งพร้อมใช้งานแก่สาธารณะในแบบเวลาจริง (Real-Time) ผ่านอินเทอร์เน็ต [35] และ (2) กำหนดแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดสำหรับการรวบรวมข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่

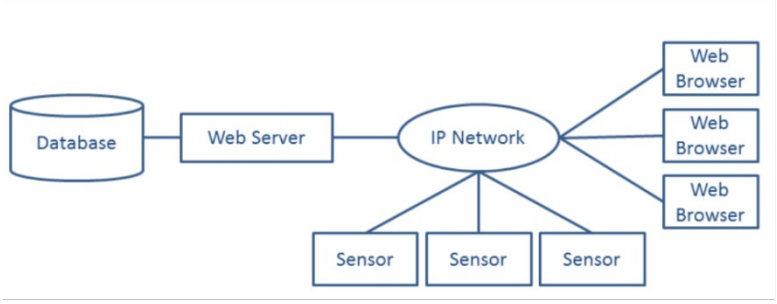
เพื่อให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าว NIST ได้พัฒนาสถาปัตยกรรม Measured Spectrum Occupancy Database (MSOD) แบบกระจายขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2014 โดย MSOD จะช่วยให้ภาคอุตสาหกรรม สถาบันการศึกษา และหน่วยงานภาครัฐ สามารถส่งข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ให้โครงการได้ ผู้ใช้จะสามารถเชื่อมต่อข้อมูลจาก MSOD ผ่านเว็บ รวมทั้งสามารถดูและดาวน์โหลดข้อมูลด้วยแอปพลิเคชันที่แสดงภาพข้อมูลบนเบราว์เซอร์ ภาพของสถิติการใช้งานคลื่นความถี่ (Visualized Band Occupancy Statistics) ในช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกใช้ในการพิจารณาและอภิปรายในระดับนโยบาย นอกจากนี้ข้อมูลแอมพลิจูดเทียบกับความถี่แบบใกล้เวลาจริงจะสามารถถูกใช้สำหรับการประสานงานคลื่นความถี่และการบังคับใช้กฎระเบียบต่าง ๆ ได้ ในขณะเดียวกัน NIST ก็กำลังศึกษาการพัฒนาและการใช้เซ็นเซอร์วัดคลื่นความถี่วิทยุด้วยเช่นกัน ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเซ็นเซอร์ได้รับการออกแบบมาเพื่อตรวจจับการส่งสัญญาณของระบบที่กำหนดไว้อย่างชัดเจนในย่านความถี่ที่กำหนดเช่น LTE ที่ 700 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 1.7 กิกะเฮิร์ตซ์ และพัลส์เรดาร์ (Pulse Radar) ที่ 3.0 กิกะเฮิร์ตซ์ และ 3.5 กิกะเฮิร์ตซ์ เป็นต้น ทั้งนี้แง่มุมใหม่ ๆ ของการออกแบบเซ็นเซอร์ที่กำลังถูกพัฒนาขึ้นได้แก่ (1) การสอบเทียบในพื้นที่ (Local Calibration) เพื่อระบุความสมบูรณ์ของเซ็นเซอร์ในสนามและเพื่อวัดระดับสัญญาณรบกวนของระบบ (2) รูปแบบมาตรฐานสำหรับการถ่ายโอนการวัดที่ปรับเทียบจากเซ็นเซอร์ไปยังที่เก็บข้อมูล และ (3) การเปรียบเทียบเซ็นเซอร์ที่มีจำหน่ายเชิงพาณิชย์แล้ว (Commercial Off The Shelf: COTS) กับอุปกรณ์วิทยุที่กำหนดโดยซอฟต์แวร์ (SDR) เพื่อประเมินความสามารถและข้อจำกัด

3.3.2 โครงการนำร่องการจัดการคลื่นความถี่ - MSOD

การออกแบบ MSOD รองรับการใช้งานฐานข้อมูลและเซิร์ฟเวอร์แบบกระจาย ซึ่งจะครอบคลุมไปในหลายพื้นที่และหลายองค์กร (รูปที่ 3-7) แต่ละองค์กรสามารถดูแลฐานข้อมูลและเว็บเซิร์ฟเวอร์ของตนเอง (หรือที่เรียกว่า MSOD Instance หรือโนด) ซึ่งส่งออกเว็บอินเตอร์เฟสที่ปลอดภัยด้วย Hyper-text Transfer Protocol (https) ข้อมูลจะไม่มีการทำซ้ำลงในฐานข้อมูลทั้งหมด องค์กรแต่ละองค์กรจะแบ่งปันข้อมูลสาธารณะของตนให้กับองค์กรอื่น ๆ ที่เลือกที่จะร่วมศูนย์ข้อมูลกัน เมื่อผู้ใช้สอบถามข้อมูลที่ไม่ได้ถูกจัดเก็บอยู่ในฐานข้อมูลที่ผู้ใช้ต่ออยู่แต่อาจอยู่ในฐานข้อมูลอื่นที่เข้าร่วม เว็บเบราว์เซอร์จะดึงข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ที่เหมาะสมมาให้ (ดังลูกศรในรูปที่ 3-7) ด้วยวิธีนี้เว็บเบราว์เซอร์อาจสื่อสารโดยตรงกับเว็บเซิร์ฟเวอร์หลายเครื่องเพื่อให้แสดงข้อมูลในรูปแบบที่เป็นหนึ่งเดียวกัน ในการใช้งานการจัดเก็บและการเข้าถึงข้อมูลแบบกระจาย เว็บเซิร์ฟเวอร์แต่ละแห่งจะเก็บข้อมูลการเชื่อมต่อ soft-state กับเซิร์ฟเวอร์อื่น ๆ ในกลุ่ม (Peer Servers) ไว้ ข้อความซึ่งแสดงสถานะของการเชื่อมต่อนี้จะถูกส่งออกไปเป็นระยะ และแสดงข้อมูลระดับสูง (High-Level Information) เกี่ยวกับเซ็นเซอร์ที่เชื่อมต่ออยู่กับ โนด MSOD ต่าง ๆ ด้วยข้อความ soft-state ที่ได้รับจากโนด MSOD ต่าง ๆ ดังกล่าว เว็บเซิร์ฟเวอร์แต่ละเว็บจะสามารถทราบได้ว่าข้อมูลที่วัดจากเซ็นเซอร์แต่ละตัวในระบบถูกเก็บอยู่ที่ใด หากโนด MSOD ใดถูกตัดขาดการเชื่อมต่อกับระบบ ข้อความ soft-state ที่ลงทะเบียนโดยเว็บเซิร์ฟเวอร์นั้นจะถูกทิ้งโดยเซิร์ฟเวอร์อื่น ๆ ในกลุ่ม สถาปัตยกรรมแบบนี้ทำให้เกิดการจัดการแบบไม่รวมศูนย์และเป็นอิสระ (Non-Centralized, Autonomous Management) อย่างไรก็ตามสถาปัตยกรรมนี้ต้องอาศัยการปฏิบัติตามข้อกำหนดร่วมกัน (Common Specifications) สำหรับการโต้ตอบระหว่างเว็บเซิร์ฟเวอร์และเบราว์เซอร์



Distributed MSOD architecture



Architecture of an organization's MDOS infrastructure

รูปที่ 3-7 โครงการนำร่องฐานข้อมูลการครอบครองคลื่นความถี่แบบกระจาย (MSOD) จาก NIST ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.2.1 การแสดงข้อมูลคลื่นความถี่

การแสดงภาพข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จะเกิดขึ้นผ่านแอปพลิเคชันบนเว็บเบราว์เซอร์ แอปพลิเคชันสามารถกำหนดค่าให้ผู้ใช้ต้องป้อนชื่อผู้ใช้และรหัสผ่านเพื่อดูข้อมูล การป้องกันด้วยรหัสผ่านช่วยให้ระบบสามารถเก็บข้อมูลการวัดที่มีความละเอียดอ่อน (Sensitive Measurements) ได้ หลังจากลงชื่อเข้าใช้งาน (Login (หากจำเป็น)) ผู้ใช้จะมองเห็นแผนที่ของเซ็นเซอร์ที่ตนได้รับอนุญาตให้เห็น ผู้ใช้สามารถกรองเซ็นเซอร์ที่แสดงบนแผนที่ตามย่านความถี่หรือระบบที่ต้องการ นอกจากนี้ผู้ใช้ยังสามารถขยายความละเอียดของแผนที่เพื่อไปยังพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ที่ต้องการ เมื่อเลือกเซ็นเซอร์ผู้ใช้จะเห็นรายละเอียดเฉพาะซึ่งรวมถึงคุณลักษณะของเซ็นเซอร์ ช่วงความถี่ และช่วงเวลาที่มีการเก็บข้อมูลโดยเซ็นเซอร์นั้น จากนั้นผู้ใช้จะสามารถระบุช่วงวันและเวลา รวมถึงช่วงความถี่ที่ต้องการ และยังสามารถเลือกการใช้งานเพื่อสร้างพล็อตการครอบครองคลื่นความถี่ (Band Occupancy) เทียบกับเวลาโดยสามารถเพิ่มช่วงเวลาที่แสดงได้ครั้งละ 24 ชั่วโมง (24-Hour Increment) (รูปที่ 3-8)

รูปที่ 3-8 การแสดงข้อมูลการใช้คลื่นความถี่รายวัน และข้อมูลระหว่างวัน

การครอบครองคลื่นความถี่ ถูกกำหนดเป็นเปอร์เซ็นต์ของย่านความถี่หรือช่องสัญญาณของย่านความถี่ที่กำหนดที่มีระดับสัญญาณที่ตรวจพบสูงกว่าเกณฑ์ที่ผู้ใช้กำหนดขึ้น (User-Defined Threshold) [35] โดยปกติค่าเกณฑ์นี้จะถูกกำหนดตามข้อกำหนดของช่วงการวัดและรูปแบบการตรวจจับที่ระบุ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความไว (Sensitivity) ของเซ็นเซอร์ แผนภูมิการครอบครองคลื่นความถี่รายวันจะแสดงค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่ามัธยฐานของแต่ละวัน และเมื่อผู้ใช้กดเลือกจุดข้อมูลในแผนภูมิจะมีการแสดงรายละเอียดข้อมูลการครอบครองคลื่นความถี่ของวันนั้น ๆ ด้วย

3.3.2.2 เซ็นเซอร์คลื่นความถี่

เซ็นเซอร์ถูกออกแบบให้เป็นอุปกรณ์ต้นทุนต่ำ ที่สามารถควบคุมได้ด้วยซอฟต์แวร์ โดยมีหน่วยประมวลผลแบบทั่วไป (General Purpose) หรือแบบฝังตัว (Embedded) สำหรับใช้ในการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลในปัจจุบัน ภาคความถี่วิทยุ (RF Front-End) ของเซ็นเซอร์นี้สามารถที่จะปรับได้ตั้งแต่ 400 ถึง 4,400 เมกะเฮิร์ตซ์ และสามารถใช้เพื่อตรวจสัญญาณที่มีแถบกว้างของคลื่นความถี่ (Bandwidth) สูงถึง 20 เมกะเฮิร์ตซ์ สถานการณ์ใน

การใช้งานทั่วไปสำหรับเซ็นเซอร์ดังกล่าวคือการตรวจสอบความถี่ LTE ย่าน 700 เมกะเฮิร์ตซ์ เป้าหมายการออกแบบหลักของเซ็นเซอร์นี้คือการให้ข้อมูลการครอบครองคลื่นความถี่แบบเวลาจริงแก่ MSOD โดยแรงจูงใจสำหรับการเก็บข้อมูลแบบเวลาจริงก็เพื่อสนับสนุนการประสานงานคลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic Spectrum Coordination) ระหว่างระบบต่าง ๆ ที่จะใช้ความถี่ร่วมกัน อัตราการส่งข้อมูลของการวัดแบบเวลาจริงนี้จะขึ้นอยู่กับ แถบกว้างของคลื่นความถี่ ความละเอียดของเวลา และความถี่ของการวัด รวมถึงประเภทข้อมูลของการวัด ตัวอย่างเช่น การวัดข้อมูลอย่างต่อเนื่องของความถี่ย่าน LTE ขนาดความกว้าง 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ความละเอียดความถี่ 180 กิโลเฮิร์ตซ์ และความละเอียดเวลา 1 มิลลิวินาที (ซึ่งเท่ากับความละเอียดของความถี่และเวลาของบล็อกทรัพยากร LTE (Resource Block)) ที่ถูกแทนด้วยข้อมูล 8 บิตแบบมีเครื่องหมาย (8-bit Signed Integers) จะสร้างกระแสข้อมูลที่อัตราส่งข้อมูลประมาณ 0.5 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) จากเซ็นเซอร์ไปยัง MSOD เซ็นเซอร์สำหรับการสื่อสารในโครงการนี้กำลังอยู่ในขั้นของการพิสูจน์แนวคิด (Proof of Concept) โดยมีราคาประมาณ 6,000 ดอลลาร์สหรัฐ และยังจำเป็นต้องมีการทดสอบและพัฒนาเพิ่มเติมก่อนที่จะพร้อมใช้งานในภาคสนามต่อไป

3.4 ประเทศเมียนมา – การบริหารจัดการคลื่นความถี่ในมุมของภาครัฐ

3.4.1 บทนำ

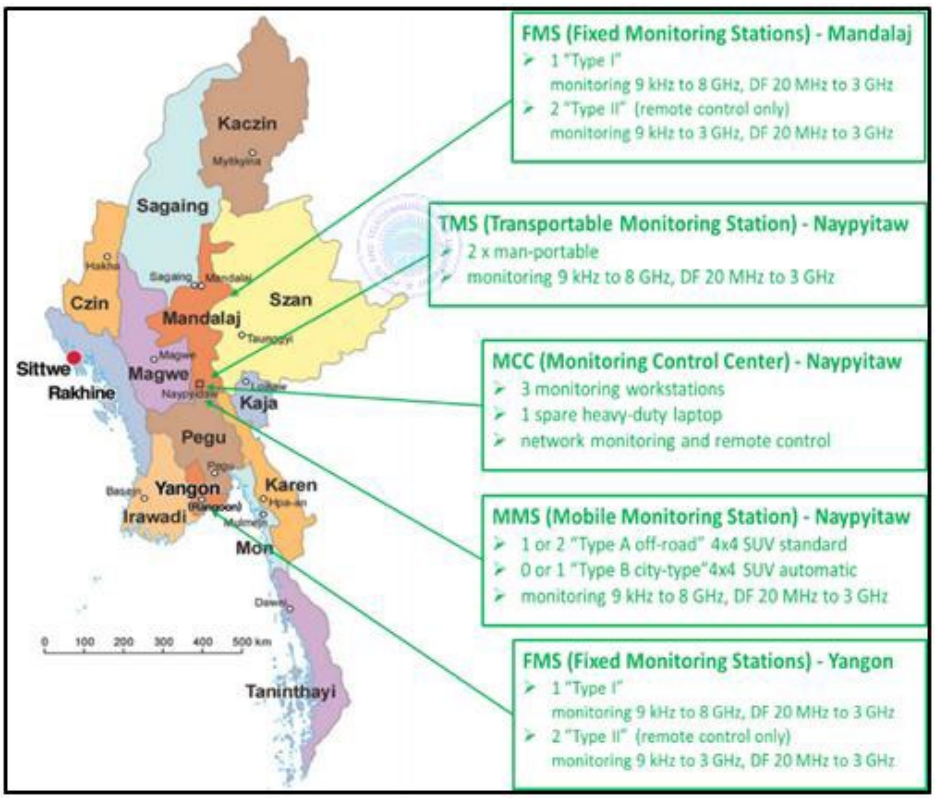
ประเทศเมียนมาได้เข้าเป็นสมาชิกของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1937 ตั้งแต่นั้นจนถึงก่อนปี ค.ศ. 2013 MPT (Myanmar Posts and Telecommunications) เป็นผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Network Operators: MNO) เพียงรายเดียวของประเทศ ในช่วงเวลาดังกล่าว รัฐบาลเมียนมาใช้แนวทางในการบริหารคลื่นความถี่แบบดั้งเดิม เมียนมาเป็นหนึ่งในประเทศที่มีการพัฒนาน้อยที่สุดในตลาดโทรคมนาคม ตามข้อมูลของ ITU ปี 2013 อัตราการเข้าถึงผู้ใช้อินเทอร์เน็ตอยู่ในระดับต่ำเพียงประมาณร้อยละ 1 ในระหว่างปี ค.ศ. 2010 ถึง 2015 รัฐบาลใหม่ได้กระตุ้นและส่งเสริมภาคการไปรษณีย์และโทรคมนาคมให้ปฏิรูปเป็นอย่างมาก [36, 37] ในปี ค.ศ. 2013 รัฐบาลเมียนมาอนุญาตให้ผู้ให้บริการต่างชาติรายใหม่เข้าสู่อุตสาหกรรมโทรคมนาคมของประเทศ บริษัท Ooredoo และ Telenor ได้กลายเป็นผู้ให้บริการต่างชาติสองรายแรกในปี ค.ศ. 2014 และ บริษัท Mytel เข้าสู่ตลาดโทรคมนาคมของเมียนมาในปี ค.ศ. 2017 ซึ่งในที่สุดส่งผลให้เมียนมามีผู้ให้บริการทั้งหมด 4 ราย ได้แก่ MPT, Telenor, Ooredoo และ Mytel อย่างไรก็ตาม แม้ว่าแนวทางการบริหารคลื่นความถี่ในปัจจุบันจะเปลี่ยนไป จากการนำโดยรัฐบาล (Government-Based) ไปสู่การนำโดยตลาด (Market-Based) แต่คลื่นความถี่ส่วนใหญ่ของประเทศก็ยังคงถูกใช้ประโยชน์ไม่เต็มที่ (Under-Utilized) เมียนมายังคงไม่มีนโยบายที่ชัดเจนในการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ รวมถึงไม่มีการป้องกันการรบกวนให้กับคลื่นความถี่ที่จัดสรรไปแล้ว

ตามรายงานของ APT (Asia Pacific Telecommunity) ในปี ค.ศ. 2010 พบว่าเมียนมามีการรบกวนเกิดขึ้นเฉลี่ย 6 ครั้งต่อปี [38] การรบกวนระหว่างประเทศเพื่อนบ้านมีประมาณ 3 ครั้งต่อปี และบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นบริการที่ได้รับรายงานการเกิดการรบกวนระหว่างประเทศเพื่อนบ้านมากที่สุด

จากการรายงานของแผนก Post and Telecommunication (PTD) แจ้งว่า ปี ค.ศ. 2020 เกิดการรบกวนคลื่นความถี่ GSM Uplink Band ในย่านความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่เมืองย่างกุ้ง ซึ่งทีมจาก PTD ก็ได้ตรวจสอบและติดตามการวัดการรบกวนเหล่านั้นในเดือนตุลาคมและพฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2020 เพื่อแก้ปัญหาและเผยแพร่ข้อมูลการรบกวน

3.4.2 ระบบตรวจสอบคลื่นความถี่ที่มีอยู่เดิมของเมียนมา

รูปที่ 3-9 แสดงสถานีบริหารคลื่นความถี่ทั้งหมด 5 แห่งซึ่งอยู่ในเมืองย่างกุ้ง มัณฑะเลย์ และเนปิดอว์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม PTD ยังไม่ได้สร้างระบบการบริหารคลื่นความถี่ซึ่งจำเป็นต้องสามารถเชื่อมต่อและผสานกับระบบการตรวจสอบที่มีอยู่เดิมได้ ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการบริหารคลื่นความถี่ทั้งหมด และเพื่อลดปัญหาการรบกวนในการใช้คลื่นความถี่ ซึ่ง PTD กำลังเชิญชวนให้องค์กรหรือบุคคลที่สนใจเข้ามาร่วมจัดตั้ง "ระบบการบริหารคลื่นความถี่แบบอัตโนมัติ"

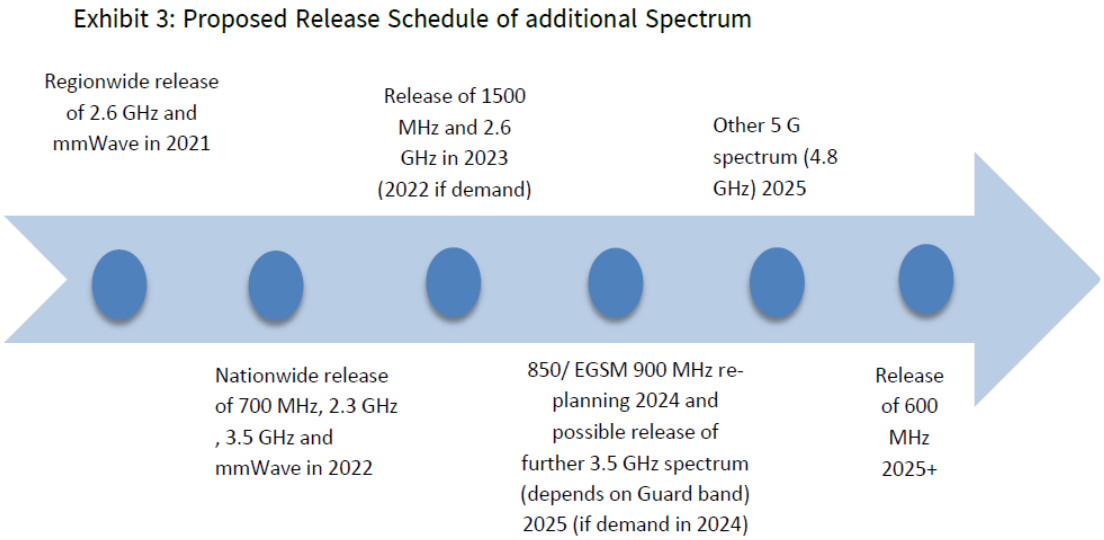


รูปที่ 3-9 สถานีบริหารคลื่นความถี่ที่มีอยู่ในเมียนมา

3.4.3 แผนสำหรับคลื่นความถี่ในเมียนมา

ในปี ค.ศ. 2016 กระทรวงคมนาคมและการสื่อสารของเมียนมาออกแผนคลื่นความถี่ (ที่ตอบสนองความต้องการในอีก 5 ปีข้างหน้า) ในระหว่างปี ค.ศ. 2019 PTD ได้ออกเอกสารขอคำปรึกษา เรื่อง Review of IMT Aspects of Myanmar's Spectrum Roadmap, Spectrum Optimization of the 850 MHz Band และ Myanmar's IMT and 5G Spectrum Roadmap Preliminary Positions เพื่อเปิดรับความเห็นจากสาธารณะทั้ง ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Network Operator, MNO) ผู้ให้บริการอินเตอร์เน็ตแบบไร้สายความเร็วสูงในระดับภูมิภาค กระทรวงต่าง ๆ ผู้ขาย (Vendors) และผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอื่น ๆ ในปี ค.ศ. 2020 PTD ได้ออกแผนงานคลื่นความถี่ปี ค.ศ. 2020 (ฉบับร่าง) ซึ่งครอบคลุมถึงเรื่องการบริหารคลื่นความถี่สำหรับบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ (International Mobile Telecommunications, IMT) เพิ่มเติมในเมียนมาเพื่อรองรับตลาดการแข่งขัน การส่งเสริมนวัตกรรมในเมียนมา และการประสานงานความถี่กับประเทศเพื่อนบ้าน

ในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2019 เมียนมาได้จัดสรรคลื่นความถี่ IMT อีกเกือบ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ และกำลังพิจารณาจัดสรรเพิ่มขึ้นอีกในปีต่อ ๆ มา แม้ว่าประเทศส่วนใหญ่จะจัดสรรคลื่นความถี่ 5G ในย่านความถี่ 3.5 เมกะเฮิร์ตซ์ และคลื่นความถี่ระดับมิลลิเมตร (mmWave) เมียนมากำลังพยายามสร้างสมดุลที่เหมาะสมระหว่างโครงสร้างพื้นฐานแบบประจำที่ (Fixed Network Infrastructure) สัดส่วนของการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่และการใช้ข้อมูล กับตลาดผู้บริโภคที่กำลังเติบโตขึ้น ตามร่างแผนงานคลื่นความถี่ IMT ปี ค.ศ. 2020 PTD ของเมียนมากำหนดการจัดสรรคลื่นความถี่สรุปได้ตามแผนที่กำหนดในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 กำหนดการจัดสรรคลื่นความถี่เพิ่มเติมในเมียนมาที่ Post and Telecommunication Department (PTD) เสนอ (ร่าง)

ตามรูปที่ 3-10 เมียนมามีแผนที่จะจัดสรรคลื่นความถี่ใหม่ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2021 ถึง 2025 คลื่นความถี่หลักสำหรับการส่งข้อมูล (Capacity Spectrum) คือย่าน 2.3 กิกะเฮิร์ตซ์ รวมถึง 120 เมกะเฮิร์ตซ์ ของคลื่นความถี่ย่าน 3.5 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยคลื่นความถี่สำหรับสร้างความครอบคลุม (Coverage Spectrum) ย่าน 700 เมกะเฮิร์ตซ์ สำหรับระบบ 5G จะเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 2022 และในปี ค.ศ. 2025 คลื่นความถี่ย่าน 600 กะเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะได้จากการเปลี่ยนระบบโทรทัศน์จากระบบแอนะล็อกให้เป็นระบบดิจิตอลจะถูกจัดสรรเพิ่มต่อไป นอกจากนี้ PTD ยังประกาศว่าแผนก่อนหน้านี้ของคลื่นความถี่ย่าน 2.6 กิกะเฮิร์ตซ์ ที่จะจัดสรรในปี ค.ศ. 2021 จะถูกปรับเปลี่ยนเป็นระบบ Time Division Duplex (TDD) ทั้งหมด เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานของประเทศเพื่อนบ้าน และภายในปี ค.ศ. 2024 คลื่นความถี่ย่าน 850 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ จะถูกนำมาจัดเรียงใหม่ร่วมกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ E-GSM ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันและการปิดระบบดั้งเดิมซึ่งเป็นโครงข่ายระบบ CDMA

3.5 บทสรุป

จากการศึกษากรณีตัวอย่างของต่างประเทศในข้างต้นจะพบว่า หน่วยงานกำกับดูแลหรือองค์กรอื่น ๆ ในประเทศชั้นนำของโลกต่าง ๆ ได้แก่ จีน ภูมิภาคยุโรป และสหรัฐอเมริกา ได้มีการพัฒนาระบบที่ช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการคลื่นความถี่ รวมถึงการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่เพื่อให้การใช้ทรัพยากรด้าน

คลื่นความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดเป็นไปอย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ซึ่งการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่เป็นงานที่มีความซับซ้อนและท้าทาย เนื่องจากการใช้งานคลื่นความถี่มีลักษณะได้ทั้งแบบกระจัดกระจาย เกิดขึ้นอย่างฉับพลัน และมีความหลากหลาย นอกจากนี้การใช้งานคลื่นความถี่ยังต้องคำนึงถึงประเด็นในหลากหลายมิติไม่ใช่เฉพาะการแพร่กระจายสัญญาณ การรบกวนของสัญญาณ ความไวของเครื่องรับและการปรับลดความไว การเชื่อมต่อ กำลังส่ง ภูมิประเทศ ความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่ แต่ยังรวมถึงวัตถุประสงค์ที่ต้องการจากการดำเนินการด้วยเช่น งบประมาณ ค่าใช้จ่าย ข้อจำกัดในการใช้งาน กฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง ทิศทางการพัฒนาของเทคโนโลยีในอนาคต เป็นต้น สิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อกระบวนการทำงานและการบริหารคลื่นความถี่ ซึ่งหากไม่มีข้อมูลการตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่อย่างเพียงพอและการวางแผนที่ดี อาจเพิ่มโอกาสที่จะเกิดการรบกวนกันของสัญญาณ ส่งผลกระทบกับผู้ใช้งานคลื่นความถี่และนักลงทุน รวมถึงการลดมูลค่าของคลื่นความถี่ที่น้อยลง ดังนั้นข้อมูลการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผู้ใช้ปลายทาง ผู้ให้บริการ (Operators) และหน่วยงานกำกับดูแลคลื่นความถี่ ทั้งนี้จากการศึกษากรณีตัวอย่างของประเทศชั้นนำทั้ง 3 ประเทศ จึงมีแนวคิดที่สอดคล้องกันในการพัฒนาระบบอัตโนมัติอันทันสมัยสำหรับการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ที่สามารถจะปรับตามได้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยีทางโทรคมนาคม เพื่อรองรับข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จำนวนขนาดใหญ่และปริมาณข้อมูลที่เกี่ยวข้องที่จะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต

การพัฒนาระบบและโครงข่ายการเฝ้าตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่ของแต่ละประเทศทั้ง 3 ประเทศนี้มีรูปแบบและการดำเนินการตามกระบวนทัศน์ที่แตกต่างกัน โดยในประเทศจีน หน่วยงานกำกับดูแลของเซี่ยงไฮ้ได้เลือกบริษัท LS AG ให้เป็นผู้สร้างโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ขึ้นมาใหม่ในมหานครเซี่ยงไฮ้ นอกจากนี้บริษัทยังได้พัฒนาระบบ LS OBSERVER และซอฟต์แวร์ตรวจสอบส่วนกลาง (Central Monitoring Software: CMS) ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกับโครงข่ายเซ็นเซอร์ที่มีหลากหลายรูปแบบสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น แบบที่ติดตั้งถาวร แบบที่เคลื่อนย้ายได้ไปจนถึงแบบที่เป็นอุปกรณ์พกพา และแบบที่ใช้กับระบบโดรน โดยซอฟต์แวร์ CMS สามารถแจ้งเตือนแบบอัตโนมัติเมื่อตรวจพบความผิดปกติในการใช้งานคลื่นความถี่และยังสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณด้วยวิธีการเฉพาะของระบบ LS OBSERVER ทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องให้เจ้าหน้าที่คอยเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ตลอด 24 ชั่วโมงทุกวัน ส่วนในภูมิภาคยุโรปเลือกใช้รูปแบบการเฝ้าตรวจสอบคลื่นความถี่แบบเปิดด้วยการใช้กระบวนทัศน์แบบ Crowdsourcing ภายใต้โครงการ Electrosense ซึ่งเกิดจากการร่วมมือกันระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งหมดในภูมิภาคยุโรปผ่านอุปกรณ์เฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ด้วยเซ็นเซอร์แบบราคาประหยัดจำนวนมาก เพื่อลดต้นทุนที่ผู้ให้ข้อมูลคลื่นความถี่ต้องแบกรับ ชุดข้อมูลของการใช้งานคลื่นความถี่จะถูกจัดเก็บและประมวลผลด้วยสถาปัตยกรรมข้อมูลขนาดใหญ่และส่งกลับไปยังกลุ่มผู้ใช้ด้วยรูปแบบของการให้บริการข้อมูลคลื่นความถี่แบบเปิดซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถสร้างแอปพลิเคชันที่หลากหลายและแปลกใหม่ตามความต้องการที่แตกต่างกันของผู้ใช้แต่ละกลุ่มได้ ขณะที่ในส่วนของสหรัฐอเมริกา National Institute of Standards and Technology (NIST) ซึ่งเป็นหน่วยงานภายใต้กระทรวงพาณิชย์ของสหรัฐอเมริกาได้พัฒนาสถาปัตยกรรม Measured Spectrum Occupancy Database (MSOD) แบบกระจายขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2014 เพื่อให้ภาคอุตสาหกรรม สถาบันการศึกษา และหน่วยงานภาครัฐสามารถส่งข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ให้โครงการได้ องค์กรแต่ละองค์กรจะแบ่งปันข้อมูลสาธารณะของตนให้กับองค์กรอื่น ๆ ที่เลือกที่จะร่วมศูนย์ข้อมูลกัน โดยผู้ใช้จะสามารถเชื่อมต่อข้อมูลจาก MSOD ผ่านเว็บ รวมทั้งสามารถดูและดาวน์โหลดข้อมูลด้วยแอปพลิเคชันที่บนเบราว์เซอร์ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์มากสำหรับการวางแผน การออกแบบ รวมถึงการบังคับใช้งานคลื่นความถี่ร่วมกัน นอกจากนี้การเปิดเผยและความโปร่งใสของข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จะมีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาการรบกวน และการบังคับใช้ข้อกำหนดต่าง ๆ

ถึงแม้ว่าการพัฒนาระบบและโครงข่ายการเฝ้าตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่จะมีความแตกต่างกันตามความต้องการและบริบทของแต่ละประเทศทั้ง จีน ภูมิภาคยุโรป และสหรัฐอเมริกา แต่หากพิจารณาในแง่มุมของผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างโครงข่ายการเฝ้าตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่ของทั้ง 3 ประเทศนี้จะพบว่ามีจุดมุ่งหมายที่สอดคล้องในทิศทางเดียวกันคือ การใช้อุปกรณ์หรือเซ็นเซอร์จำนวนมากและจำเป็นต้องใช้ความหนาแน่นของเซ็นเซอร์ที่สูงเพื่อตรวจวัดการใช้งานคลื่นความถี่ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดไม่ว่าจะในแง่ของพื้นที่ ย่านความถี่ และเวลา ส่งผลให้เกิดข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จำนวนขนาดใหญ่ ดังนั้นแต่ละประเทศจึงจำเป็นต้องออกแบบสถาปัตยกรรมที่ยืดหยุ่นเพื่อรองรับการจัดการกับข้อมูลขนาดใหญ่เหล่านี้ รวมทั้งมีการพัฒนาอัลกอริทึมอัจฉริยะหรือปัญญาประดิษฐ์เพื่อประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะพบว่าในมหานครเซี่ยงไฮ้ประเทศจีน บริษัท LS ได้พัฒนา SpectrumMap เพื่อใช้ในการจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่บนคลาวด์ที่รวบรวมข้อมูลการใช้งานจริงของคลื่นความถี่จากอุปกรณ์ของระบบ LS OBSERVER ซึ่งมีอยู่หลากหลาย และนำข้อมูลต่าง ๆ มาเสนอในรูปแบบของแผนที่ซึ่งใช้งานได้ง่ายและรวดเร็วบนเว็บเบราว์เซอร์ นอกจากนี้ระบบ SpectrumMap ยังสามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์เซ็นเซอร์อื่น ๆ ที่ไม่ใช่ของ LS ได้อีกด้วย โดยอัลกอริทึมการสำหรับคาดการณ์อัจฉริยะจะประมาณระดับสัญญาณที่คาดหวังในแต่ละจุดของแผนที่ที่ถูกใช้เฝ้าสังเกตการณ์เพื่อตรวจจับสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต รวมถึงการระบุคลื่นความถี่ที่ใช้งานมากและน้อยเกินไป นอกจากนั้นระบบดังกล่าวจะเป็นข้อมูลการใช้คลื่นความถี่พื้นฐานเพื่อใช้ประกอบสำหรับการกำหนดนโยบาย ในส่วนของภูมิภาคยุโรป โครงการ Electrosense ได้พัฒนาแบ็กเอนด์ที่มีหน้าที่เกี่ยวกับการควบคุมเซ็นเซอร์ต่าง ๆ จากระยะไกล ข้อมูลคลื่นความถี่ที่ตรวจจับได้จากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ สามารถดึงได้จากแบ็กเอนด์โดยใช้ API แบบเปิดผ่านทางอินเทอร์เน็ต ข้อดีอีกหนึ่งข้อของ ElectroSense คือ มีเครื่องมือ (Tools) สำหรับรวบรวมข้อมูลคลื่นความถี่ที่พร้อมใช้งานในแบ็กเอนด์ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นความถี่ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น นอกจากนี้โครงการ Electrosense ได้พัฒนาฟรอนต์เอนด์บนเว็บไซต์ (Web Front-End) เพื่อให้สามารถแสดงข้อมูลคลื่นความถี่ได้โดยง่ายระบบ ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จะถูกประมวลผลทั้งในระดับหน่วยเวลาและหน่วยความถี่ต่าง ๆ โดยจัดเก็บไว้ในรูปแบบของตารางเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลคลื่นความถี่ได้อย่างรวดเร็วผ่านเว็บไซต์ และสุดท้ายในสหรัฐอเมริกาการออกแบบสถาปัตยกรรม MSOD รองรับการใช้งานฐานข้อมูลและเซิร์ฟเวอร์แบบกระจายซึ่งจะครอบคลุมไปในหลายพื้นที่และหลายองค์กร โดยแต่ละองค์กรสามารถดูแลรักษาฐานข้อมูลและเว็บเซิร์ฟเวอร์ของตนเองได้ ด้วยวิธีนี้เว็บเบราว์เซอร์อาจสื่อสารโดยตรงกับเว็บเซิร์ฟเวอร์หลายเครื่องเพื่อให้แสดงข้อมูลในรูปแบบที่เป็นหนึ่งเดียวกันสำหรับการใช้งานการจัดเก็บและการเข้าถึงข้อมูลแบบกระจาย การแสดงภาพข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่จะเกิดขึ้นผ่านแอปพลิเคชันบนเว็บเบราว์เซอร์ สถาปัตยกรรมแบบนี้ทำให้เกิดการจัดการแบบไม่รวมศูนย์และเป็นอิสระ อย่างไรก็ตามสถาปัตยกรรมนี้ต้องอาศัยการปฏิบัติตามข้อกำหนดร่วมกันสำหรับการโต้ตอบระหว่างเว็บเซิร์ฟเวอร์และเบราว์เซอร์

ทั้งนี้จากผลการศึกษากรณีตัวอย่างของประเทศชั้นนำทั้ง 3 ประเทศได้แก่ มหานครเซี่ยงไฮ้ (ประเทศจีน) ภูมิภาคยุโรป สหรัฐอเมริกา อยู่ระหว่างพัฒนาการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์มาใช้งานสำหรับการบริหารคลื่นความถี่อย่างเป็นรูปธรรมซึ่งมีแนวทางและรูปแบบที่แตกต่างกันไปด้วยบริบทและข้อจำกัดต่าง ๆ ของแต่ละประเทศ ขณะที่ผลการศึกษากรณีตัวอย่างของกลุ่มประเทศมีข้อจำกัดในเรื่องการเข้าถึงและการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศยกตัวอย่างเช่น ประเทศเมียนมา การบริหารจัดการคลื่นความถี่ในมุมของภาครัฐ แม้ว่าแนวทางการบริหารคลื่นความถี่ในปัจจุบันจะเปลี่ยนแปลงไปสู่การแข่งขันแบบตลาดเสรี ซึ่งมีผู้ให้บริการทั้งหมด 4 ราย ได้แก่ MPT, Telenor, Ooredoo และ Mytel แต่คลื่นความถี่ส่วนใหญ่ของเมียนมาก็ยังคงถูกใช้ประโยชน์ไม่เต็มที่ และเมียนมายังคงไม่มีนโยบายที่ชัดเจนในการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ รวมถึงไม่มีการป้องกันการรบกวนให้กับคลื่นความถี่ที่จัดสรรไปแล้ว ซึ่งในปี ค.ศ. 2010 พบว่าเมียนมามีการรบกวนเกิดขึ้นเฉลี่ย 6 ครั้งต่อปี การรบกวน

ระหว่างประเทศเพื่อนบ้านมีประมาณ 3 ครั้งต่อปี และบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นบริการที่ได้รับรายงานการเกิดการรบกวนระหว่างประเทศเพื่อนบ้านมากที่สุด และในปี ค.ศ. 2020 เกิดการรบกวนคลื่นความถี่ GSM Uplink Band ในย่านความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่เมืองย่างกุ้ง อย่างไรก็ตามเมียนมายังไม่ได้สร้างระบบสำหรับการบริหารคลื่นความถี่ซึ่งจำเป็นต้องสามารถเชื่อมต่อและผสานกับระบบการตรวจสอบที่มีอยู่เดิมได้ ซึ่งปัจจุบันเมียนมากำลังเชิญชวนให้องค์กรที่สนใจเข้ามาร่วมจัดตั้ง "ระบบการบริหารคลื่นความถี่แบบอัตโนมัติ" เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการบริหารคลื่นความถี่ทั้งหมดและเพื่อลดปัญหาการรบกวนในการใช้งานคลื่นความถี่ ดังนั้นอาจสรุปได้ว่ากลุ่มประเทศมีข้อจำกัดในเรื่องการเข้าถึงและการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศจะมีความล่าหลังกว่ากลุ่มประเทศชั้นนำที่เริ่มมีการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์มาใช้งานจริงสำหรับการบริหารคลื่นความถี่

ทั้งนี้ข้อดี-ข้อด้อยของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์สำหรับงานการบริหารคลื่นความถี่ของแต่ละประเทศ วิเคราะห์ได้ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3 วิเคราะห์ข้อดี-ข้อด้อยของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งาน

ประเทศ	ลักษณะการประยุกต์ใช้งาน	ระบบ/แอปพลิเคชัน	ข้อดี	ข้อด้อย
ประเทศจีน (มหานครเซี่ยงไฮ้)	การเก็บข้อมูลคลื่นความถี่	ระบบ LS OBSERVER	- หน่วยงานกำกับดูแลสามารถตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ในย่านที่สนใจและมุ่งเน้นไปในที่สิ่งที่คาดว่าจะเป็นปัญหาได้ - ความยืดหยุ่นของอุปกรณ์ RMU (Remote Monitoring Unit) ซึ่งถูกออกแบบพัฒนาให้มีหลากหลายรูปแบบสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน - สามารถใช้งานร่วมกับระบบบริหารคลื่นความถี่อื่น ๆ ซึ่งรวมถึงข้อมูลที่ตรวจวัดได้และข้อมูลตามที่ได้รับอนุญาตในฐานข้อมูลการบริหารคลื่นความถี่ - ซอฟต์แวร์ตรวจสอบส่วนกลาง (CMS) สามารถจะแจ้งเตือน	- ระบบและซอฟต์แวร์เป็นแบบ Proprietary ที่พัฒนาโดยบริษัท LS AG ในการปรับปรุงและพัฒนาระบบและซอฟต์แวร์ให้ทันกับเทคโนโลยีสื่อสารที่เปลี่ยนแปลงในอนาคตจำเป็นต้องพึ่งพาบริษัทในระยะยาว - ระบบ LS OBSERVER ถูกนำมาใช้เฉพาะในพื้นที่มหานครเซี่ยงไฮ้ หากจะขยายออกไปในพื้นที่อื่น ๆ เหมือนเช่นภูมิภาคยุโรปและสหรัฐอเมริกาจำเป็นจะต้องสร้างอุปกรณ์เฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่จำนวนมากและอาจมีค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงมากขึ้นตามไปด้วย

			เมื่อตรวจพบความผิดปกติในคลื่นความถี่ จึงไม่มีความจำเป็นต้องให้เจ้าหน้าที่คอยเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ตลอด 24 ชั่วโมง	
	การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	ระบบ SpectrumMap (บนคลาวด์)	- ระบบสามารถรวบรวมข้อมูลการใช้งานจริงจากอุปกรณ์และนำข้อมูลมาเสนอบนแผนที่ (Map) ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว - จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) บนคลาวด์และมีอัลกอริทึมสำหรับคาดการณ์อัจฉริยะโดยจะประมาณระดับสัญญาณที่คาดหวังในแต่ละจุดของแผนที่ที่ถูกเฝ้าสังเกตการณ์	- ระบบและซอฟต์แวร์เป็นแบบ Proprietary ที่พัฒนาโดยบริษัท LS AG เช่นเดียวกับ LS OBSERVER ในการปรับปรุงและพัฒนาระบบและซอฟต์แวร์ให้ทันกับเทคโนโลยีสื่อสารที่เปลี่ยนแปลงในอนาคตจำเป็นต้องพึ่งพาบริษัทในระยะยาว - การจัดเก็บและประมวลผลข้อมูลจำเป็นต้องมีระบบคลาวด์พร้อมทั้งมีเครื่องมือ (Tool) สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data)
	การนำเสนอและแสดงผลข้อมูล	การแสดงภาพข้อมูลคลื่นความถี่เป็น Web GIS	- หน่วยงานกำกับดูแลสามารถตรวจจับสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต รวมถึงการระบุคลื่นความถี่ที่ใช้งานมากและน้อยเกินไป - ช่วยให้การตัดสินอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลใช้งานจริง และมีหลักฐาน - สามารถตรวจสอบการออกใบอนุญาตว่ายังใช้งานอยู่และใช้งานได้	

			- มีข้อมูลการใช้คลื่นความถี่พื้นฐานเพื่อใช้ประกอบสำหรับการกำหนดนโยบาย	
ภูมิภาคยุโรป	การเก็บข้อมูลคลื่นความถี่	โครงข่าย Electrosense	- เป็นลักษณะการแบ่งปันข้อมูลคลื่นความถี่จากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งหมดโดยใช้เซ็นเซอร์และส่งข้อมูลที่ตรวจจับได้จากเซ็นเซอร์ไปยังแบ็กเอนด์ - เลือกใช้เซ็นเซอร์แบบราคาไม่แพงและเข้าถึงได้ง่ายเป็นอุปกรณ์หลักในการตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่เพื่อลดต้นทุนที่ผู้ให้ข้อมูลคลื่นความถี่ต้องแบกรับ - ช่วยลดค่าใช้จ่ายของหน่วยงานกำกับดูแลในการจัดซื้ออุปกรณ์ตรวจจับการใช้งานคลื่นความถี่และเซ็นเซอร์จำนวนมาก	- เนื่องจากการติดตั้งเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นความถี่เป็นของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทำให้หน่วยงานกำกับดูแลไม่สามารถจะกำหนดและเลือกจุดติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ในย่านที่สนใจและมุ่งเน้นไปในที่สิ่งที่คาดว่าจะเป็นปัญหาได้โดยง่าย - ความเชื่อถือได้และถูกต้องแม่นยำของเซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นความถี่ที่นำมาติดตั้งใช้งาน
	การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	ElectroSense Backend	- สถาปัตยกรรมข้อมูลขนาดใหญ่ที่ยืดหยุ่นได้ถูกออกแบบให้รองรับการจัดการกับข้อมูลจำนวนมากนี้ในแบ็กเอนด์ - มีเครื่องมือ (Tools) สำหรับรวบรวมข้อมูลคลื่นความถี่ที่พร้อมใช้งานในแบ็กเอนด์ช่วยให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นความถี่ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น	- เนื่องจากข้อมูลจากเซ็นเซอร์ทั้งหมดที่กระจายอยู่โดยทั่วไปถูกส่งเข้ามายังแบ็กเอนด์ในอนาคตอาจจะเกิดปัญหาด้านคอขวดและพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่หากเซ็นเซอร์มีจำนวนเพิ่มมากขึ้นมหาศาล - การจัดเก็บข้อมูลแบบรวมศูนย์มีความสุ่มเสี่ยงสูงจากการเป็นเป้าหมาย

				ที่จะถูกโจมตีระบบและการจารกรรมข้อมูลทางธุรกิจของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย - ต้องมีโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่าง ๆ
	การนำเสนอและแสดงผลข้อมูล	ElectroSense Frontend	- เป็นการให้ข้อมูลคลื่นความถี่ที่ประมวลผลแล้วแก่ผู้ใช้ที่สนใจจะได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่บนเว็บไซต์ - ด้วยโมเดลการให้บริการข้อมูลคลื่นความถี่แบบเปิดผู้ใช้สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันเกี่ยวกับคลื่นความถี่ของตนเองได้จากข้อมูลคลื่นความถี่นี้ - เกิดแอปพลิเคชันจำนวนมากที่หลากหลายและแปลกใหม่ตามความต้องการที่แตกต่างกันของผู้ใช้แต่ละกลุ่มสำหรับการบริหารคลื่น - เป็นการบริหารคลื่นความถี่ร่วมกันทั้งหน่วยงานกำกับดูแลและผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	- สถาปัตยกรรมนี้จำเป็นต้องอาศัยกระบวนการลงทะเบียนเพื่อการใช้งานเซ็นเซอร์อย่างปลอดภัยและการกำหนดสิทธิการเข้าถึงข้อมูล
สหรัฐอเมริกา	การเก็บข้อมูลคลื่นความถี่	เซ็นเซอร์ที่ถูกติดตั้งในโนด MSOD	- ใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ต้นทุนต่ำ ที่สามารถควบคุมได้ด้วยซอฟต์แวร์ - ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเซ็นเซอร์ได้รับการออกแบบมาเพื่อตรวจจับการส่งสัญญาณในย่านความถี่ที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน	- เนื่องจากการติดตั้งเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นความถี่เป็นของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ทำให้หน่วยงานกำกับดูแลไม่สามารถจะกำหนดและเลือกจุดติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อตรวจสอบและติดตาม

			- องค์กรแต่ละองค์กรจะแบ่งปันข้อมูลคลื่นความถี่จากเซ็นเซอร์ในโนด MSOD ของตนให้กับองค์กรอื่น ๆ ที่เลือกที่จะร่วมศูนย์ข้อมูล - ช่วยลดค่าใช้จ่ายของหน่วยงานกำกับดูแลในการจัดซื้ออุปกรณ์ตรวจจับการใช้งานคลื่นความถี่และเซ็นเซอร์จำนวนมาก	การใช้งานคลื่นความถี่ในย่านที่สนใจและมุ่งเน้นไปในที่สิ่งที่คาดว่าจะเป็นปัญหาได้โดยง่าย - ความเชื่อถือได้และถูกต้องแม่นยำของเซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นความถี่ที่นำมาติดตั้งใช้งาน
	การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	โนด MSOD	- องค์กรแต่ละองค์กรสามารถดูแลฐานข้อมูลคลื่นความถี่และเว็บเซิร์ฟเวอร์ของตนเอง - การจัดการแบบไม่รวมศูนย์และเป็นอิสระ	- สถาปัตยกรรมนี้ต้องอาศัยการกำหนดมาตรฐานในการรวบรวมข้อมูลเพื่อให้บรรลุประโยชน์สูงสุดของการรวมข้อมูล - การจัดการและบริหารการแบ่งปันข้อมูลแบบไม่รวมศูนย์ต้องกำหนดแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดสำหรับการรวบรวมข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่เพื่อรองรับการใช้งานแก่สาธารณะในแบบเวลาจริงผ่านอินเทอร์เน็ต - ต้องมีโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่าง ๆ
	การนำเสนอและแสดงผลข้อมูล	แอปพลิเคชันบนเว็บเบราว์เซอร์	- ผู้ใช้จะสามารถเชื่อมต่อข้อมูลจาก MSOD ผ่านเว็บ - สามารถดูและดาวน์โหลดข้อมูลด้วยแอปพลิเคชันที่แสดงภาพข้อมูลบนเบราว์เซอร์	- สถาปัตยกรรมนี้ต้องอาศัยการปฏิบัติตามข้อกำหนดร่วมกันสำหรับการโต้ตอบระหว่างเว็บเซิร์ฟเวอร์กับเบราว์เซอร์

			- ข้อมูลสถิติการใช้งานคลื่นความถี่ในช่วงเวลาต่าง ๆ จะถูกใช้ในการพิจารณาและอภิปรายในระดับนโยบาย - ข้อมูลแอมพลิจูดเทียบกับความถี่แบบใกล้เวลาจริงจะถูกใช้สำหรับการประสานงานคลื่นความถี่และการบังคับใช้กฎระเบียบต่าง ๆ ได้	
เมียนมา	ไม่มี	ไม่มี	- ปัจจุบันกำลังเชิญชวนให้องค์กรที่สนใจเข้ามาร่วมจัดตั้ง "ระบบการบริหารคลื่นความถี่แบบอัตโนมัติ" เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการบริหารคลื่นความถี่	- คลื่นความถี่ส่วนใหญ่ของประเทศยังคงถูกใช้ประโยชน์ไม่เต็มที่ - ไม่มีการป้องกันการรบกวนให้กับคลื่นความถี่ที่จัดสรรไปแล้ว - ไม่มีนโยบายที่ชัดเจนในการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่เนื่องจากขาดข้อมูลและหลักฐาน - มีความล่าหลังกว่ากลุ่มประเทศชั้นนำที่เริ่มมีการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์มาใช้งานจริงสำหรับการบริหารคลื่นความถี่

บทที่ 4
วิเคราะห์เปรียบเทียบกับต่างประเทศ

จากการศึกษากรณีตัวอย่างการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาประยุกต์ใช้งานสำหรับการบริหารคลื่นความถี่ในต่างประเทศได้แก่ มหานครเซี่ยงไฮ้ (ประเทศจีน) ภูมิภาคยุโรป สหรัฐอเมริกา และประเทศเมียนมา จะเห็นว่าประเทศชั้นนำแต่ละประเทศอยู่ระหว่างพัฒนาการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่ที่แตกต่างกันไปด้วยบริบทและข้อจำกัดต่าง ๆ ดังนั้นในบทนี้จึงได้ศึกษาเปรียบเทียบ (Benchmark) และวิเคราะห์ข้อดี/ข้อด้อย ของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว โดยพิจารณาในประเด็นต่าง ๆ ประกอบด้วย (1) ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากแผนการเฝ้าสังเกตคลื่นความถี่แบบพลวัตโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning: DL) ที่ประสบความสำเร็จ (2) เกณฑ์การวัดสมรรถนะ ได้แก่ การตระหนักรู้และความเข้าใจของภาครัฐ ความสนใจจากภาคการศึกษา และความพร้อมของภาคอุตสาหกรรม

4.1 บทนำ

ในช่วงเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา ภาครัฐบาลและภาคอุตสาหกรรม ทั่วโลกให้ความสนใจกับการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้เชิงลึก (DL) เพื่อพัฒนาระบบการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring System) และระบบการบริหารคลื่นความถี่ (Spectrum Management System) ที่มีอยู่เดิมให้ทันสมัย อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐาน การกำกับดูแล หรือแผนพัฒนาที่จะบอกได้อย่างชัดเจนถึงขั้นตอนที่ควรดำเนินการเพื่อที่จะพลิกโฉม (Transform) การบริหารคลื่นความถี่ให้เป็นระบบอัจฉริยะ (Intelligent/ Smart) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการสำรวจและเปรียบเทียบแผนการพลิกโฉมของประเทศต่าง ๆ เพื่อที่จะศึกษาบทเรียนจากสิ่งที่รัฐบาลหรือองค์กรกำกับดูแล (Regulatory Authority) ทั่วโลกได้ดำเนินการไปแล้ว งานศึกษาวิจัยในโครงการนี้ไม่ได้มีจุดมุ่งหวังที่จะศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบของการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน หากแต่มุ่งที่จะประเมินความพร้อมของตลาดซึ่งมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจรูปแบบของการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่มีอยู่ในปัจจุบัน และในขณะเดียวกันก็ช่วยให้สามารถประเมินได้ว่ารูปแบบของการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่มีอยู่สอดคล้องสัมพันธ์กับความคาดหวังของผู้ใช้เพียงใด

ตามแนวทาง (Guideline) ของการประเมินกลยุทธ์ทางธุรกิจใน [39-41] คณะผู้วิจัยได้วางโครงร่าง (Outline) ของรูปร่างหน้าตาของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ที่คาดหวังไว้ในหัวข้อที่ 4.2 จากนั้นคณะผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การวัดสมรรถนะ (Performance Metrics) ซึ่งสำคัญมากต่อความสำเร็จของแผนการดำเนินการในการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI-based Spectrum Monitoring Roadmap) โดยในรายละเอียด คณะผู้วิจัยพิจารณาเกณฑ์การวัดสมรรถนะสามเกณฑ์ได้แก่ การตระหนักรู้และความเข้าใจของภาครัฐ (Government Awareness and

Understanding) ความสนใจจากภาคการศึกษา (Academic Interest) และ ความพร้อมของภาคอุตสาหกรรม (Industry Readiness) ซึ่งเกณฑ์การวัดเหล่านี้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการศึกษาเปรียบเทียบการพัฒนาการใช้เทคโนโลยีนวัตกรรมในตลาด จากนั้นคณะผู้วิจัยได้ให้คะแนนเพื่อประเมินสถานะปัจจุบันของการพลิกโฉมการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ของกรณีศึกษาที่ถูกกำหนดไว้ระหว่างการทบทวนวรรณกรรมในบทที่ **3** ซึ่งได้แก่ มหานครเซี่ยงไฮ้ (ประเทศจีน) ภูมิภาคยุโรป สหรัฐอเมริกา และประเทศเมียนมา

คณะผู้วิจัยคาดหวังว่าการศึกษาเปรียบเทียบที่เสนอจะเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนากระบวนทัศน์ (Paradigms) ในการจัดการข้อมูลจากการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ และในการควบคุมโครงข่ายการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ของสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) ซึ่งจะเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหาในการบริการจัดการข้อมูลการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ของระบบที่มีในปัจจุบัน นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยยังคาดหวังว่างานศึกษาวิจัยนี้จะสามารถทำให้เกิดโครงข่ายการวัดอัจฉริยะ (Intelligent Measurement Network) ซึ่งจะสร้างความเข้าใจที่ลึกซึ้ง (Insight) และให้ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งานคลื่นความถี่ ช่วยลดค่าใช้จ่ายและทรัพยากรที่ต้องใช้สำหรับการบริหารคลื่นความถี่ที่สำคัญนี้ให้กับทั้งสำนักงาน กสทช. และผู้ให้บริการโทรคมนาคมรายอื่นซึ่งอาจเข้าร่วมเพื่อใช้ประโยชน์จากกรอบงานสำหรับการบริหารคลื่นความถี่นี้

4.2 ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากแผนการเฝ้าตรวจสอบคลื่นความถี่แบบพลวัตโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกที่ประสบความสำเร็จ

หัวข้อนี้จะให้ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคแมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning: ML) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning: DL) ซึ่งทำให้เกิดกลไกการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่แบบพลวัตที่ใช้ปัญญาประดิษฐ์ต่าง ๆ (AI-based DSM Mechanisms) เช่น การตรวจจับคลื่นความถี่ (Spectrum Sensing) การจำแนกสัญญาณ (Signal Classification) และการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic Spectrum Access) กลไกเหล่านี้จำเป็นต้องถูกบรรจุอยู่ในผลลัพธ์ที่คาดหวังจากแผนการพลิกโฉม เพื่อให้เกิดการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่มีสมรรถนะและความทนทาน (Performance and Robustness) ที่ดีขึ้นกว่ากระบวนการในปัจจุบัน

4.2.1 การตรวจจับคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์

การตรวจจับคลื่นความถี่เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดการบริหารคลื่นความถี่แบบพลวัตได้ในระบบสื่อสารแบบไร้สาย และมักจะถูกใช้เพื่อช่วยให้ผู้ให้บริการ (Operator) ทราบสถานะของช่องสัญญาณ ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา อัลกอริทึมมากมายถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความถูกต้อง (Accuracy) ของการตรวจจับคลื่นความถี่ เช่น เครื่องตรวจจับแบบใช้ตัวประมาณและสหสัมพันธ์ (Estimator-Correlator Detector) เครื่องตรวจจับพลังงานแบบกึ่งบอด (Semi-Blind Energy Detector) และเครื่องตรวจจับพลังงานโดยใช้การรวมสัญญาณแบบบอด (Blindly Combined Energy Detector) เทคนิคแมชชีนเลิร์นนิ่ง (ML) ถูกนำมาใช้ในการพัฒนากรอบงานสำหรับตรวจจับคลื่นความถี่แบบประสานความร่วมมือ (Cooperative Spectrum Sensing (CSS) Framework) ทั้งนี้ ในการตรวจจับคลื่นความถี่แบบประสานความร่วมมือ ผู้ใช้แต่ละคนจะประมาณระดับพลังงานของสัญญาณที่ตนรับได้และ

รายงานให้กับผู้ใช้ลำดับถัดไปซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์รวมข้อมูล (Fusion Center) หลังจากที่รวบรวมรายงานจากผู้ใช้ทุกคนแล้ว ศูนย์รวมข้อมูลจะสามารถประเมินช่องสัญญาณที่ว่างได้ (Channel Availability)

ศูนย์รวมข้อมูลจะประเมินช่องสัญญาณที่ว่างโดยใช้เทคนิคแมชชีนเลิร์นนิ่ง (ML) แบบต่าง ๆ เช่น อัลกอริทึม K-means การแบ่งกลุ่มโดยใช้โมเดลผสมแบบเกาส์ (Gaussian Mixture Model (GMM) Clustering) อัลกอริทึม Support Vector Machine (SVM) และอัลกอริทึม K-Nearest Neighbors (KNN) หากใช้เทคนิคแมชชีนเลิร์นนิ่งแบบไม่ต้องมีการดูแล (Unsupervised Machine Learning) เช่น K-means และการแบ่งกลุ่มโดยใช้โมเดลผสมแบบเกาส์ การตรวจจับช่องสัญญาณที่ว่างอยู่จะทำได้โดยการประมวลผลรายงานการตรวจจับสัญญาณของผู้ใช้ต่าง ๆ ที่ส่งเข้ามาได้เลยโดยไม่ต้องมีการฝึก (Train) ระบบก่อน หากเทคนิคแมชชีนเลิร์นนิ่งที่ใช้เป็นแบบที่ต้องมีการดูแล (Supervised Machine Learning) เช่น อัลกอริทึม SVM และ KNN ตัวตรวจจับช่องสัญญาณจะต้องถูกฝึกโดยใช้ข้อมูลรายงานการตรวจจับคลื่นความถี่ที่ระบุผลของการตรวจจับช่องสัญญาณที่ถูกต้องเอาไว้แล้ว (Labeled Sensing Report) ก่อน หลังจากฝึกแล้วจึงจะสามารถใช้ตรวจจับช่องสัญญาณที่ว่างได้ต่อไป เมื่อเปรียบเทียบกับการตรวจจับคลื่นความถี่แบบประสานความร่วมมือแบบดั้งเดิม (Traditional CSS) กรอบงานโดยใช้แมชชีนเลิร์นนิ่งที่เสนอจะมีข้อได้เปรียบสองข้อคือ กรอบที่เสนอจะ (1) ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมของคลื่นวิทยุ (Radio Environment) และ (2) มีความถูกต้อง (Accuracy) ที่สูงกว่า

4.2.2 การจำแนกสัญญาณโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์

โดยทั่วไป การจำแนกสัญญาณ (Signal Classification) ซึ่งจะถูกทำก่อนการตรวจจับสัญญาณ (Signal Detection) เป็นกระบวนการพื้นฐานของโครงข่ายวิทยุแบบรู้จำ (Cognitive Radio Network) ยกตัวอย่างเช่น การจำแนกมอดูเลชัน (Modulation Classification) ของสัญญาณ ในแบบดั้งเดิมจะสามารถทำได้ 2 วิธีคือ ใช้ความน่าจะเป็น (Likelihood-based (LB) Approach) หรือใช้คุณลักษณะของสัญญาณ (Feature-based (FB) Approach) การจำแนกมอดูเลชันแบบ LB จะพิจารณาจากค่าความน่าจะเป็นที่สัญญาณที่รับได้จะมีมอดูเลชันแบบต่าง ๆ ตามสมมุติฐานที่กำหนด ซึ่งหากมีข้อมูลที่ครบถ้วนเกี่ยวกับช่องสัญญาณและพารามิเตอร์ของสัญญาณรบกวน (Perfect Knowledge of Channel and Noise Parameters) การจำแนกมอดูเลชันแบบ LB จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Optimal) อย่างไรก็ตามการประมาณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีความซับซ้อนในการคำนวณระดับสูง สำหรับการจำแนกมอดูเลชันแบบ FB คุณลักษณะของสัญญาณที่มีประโยชน์เช่น ค่าทางสถิติอันดับสูง (Higher-Order Statistics) จะถูกดึงมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจ โดยทั่วไป วิธี FB จะมีความซับซ้อนในการคำนวณที่น้อยกว่าแต่ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นผลลัพธ์ที่ดีแต่ไม่ได้ดีที่สุด (Sub-Optimal) ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงผลลัพธ์ที่ดีที่สุดโดยเกิดความซับซ้อนในการคำนวณในระดับต่ำจึงได้มีการนำเอาเทคนิคแมชชีนเลิร์นนิ่งเข้ามาใช้ในการจำแนกมอดูเลชันของสัญญาณและพบว่าได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการแบบเดิม นอกจากนั้น ด้วยสมรรถนะในการจัดการข้อมูลที่ขึ้นกับเวลา (Time-Dependent Data) ที่ดีกว่า โครงข่ายความจำระยะสั้นแบบยาว (Long Short-Term Memory (LSTM) Network) จะถูกผนวกเข้าไปในการออกแบบโครงข่ายนิวรอล (Neural Network) ที่คณะผู้วิจัยเสนอ [42]

4.2.3 การเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัตโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์

กลไกการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัตที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (Traditional DSA Mechanisms) จะมีศูนย์ควบคุมกลางที่คอยจัดสรรคลื่นความถี่ให้กับผู้ใช้ต่าง ๆ ซึ่งก่อนที่จะสามารถตัดสินใจให้ใช้ช่องสัญญาณใดได้

ศูนย์ควบคุมนี้จะต้องรวบรวมข้อมูลทั้งหมดจากทั้งโครงข่ายเช่น ข้อมูลตำแหน่งของผู้ใช้และสถานีฐานทั้งหมด รวมถึงข้อมูลสถานะของช่องสัญญาณทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการรวบรวมข้อมูลข้างต้นทั้งหมดทำได้ยาก เนื่องจากระบบต้องมีการรับส่งข้อมูลกันในปริมาณที่สูงมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีจำนวนผู้ใช้เป็นจำนวนมาก นอกจากนั้นในกรณีที่สภาพแวดล้อมของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Highly Dynamic Network Environment) ข้อมูลที่เก็บมาได้อาจจะล้าสมัยไปแล้วส่งผลให้กลยุทธการเข้าถึงคลื่นความถี่ที่กำหนดไว้มีสมรรถนะที่ไม่ดี เพื่อแก้ปัญหาดังที่ได้กล่าวมา กรอบงานของการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัตอัจฉริยะ (Intelligent DSA Framework) ซึ่งใช้การเรียนรู้เสริมแรงเชิงลึก (Deep Reinforcement Learning: DRL) ซึ่งทำงานด้วยข้อมูลโครงข่ายเฉพาะถิ่น (Local Network Information) จึงเป็นที่ต้องการ โดยเมื่อไม่นานมานี้นักวิจัยได้นำเอาเทคนิค DRL ไปใช้กับการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัตและพบว่ามีสมรรถนะดีขึ้น ช่วยให้กลไกการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัตมีความยืดหยุ่นและมีความเป็นอัจฉริยะมากขึ้น [43-45] และเนื่องจากเอเจนท์ (Agent) ใน DRL สามารถใช้ความสามารถในการนำเสนอ (Representation Ability) ของโครงข่ายนิวรอลได้อย่างเต็มที่ สเปซในการตัดสินใจ (Decision Space) จึงมีมิติที่สูงขึ้นและต่อเนื่อง (High-Dimension, and Continuous) ซึ่งจะทำให้กลไกการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัตยังคงมีสมรรถนะที่ดีอยู่เมื่อใช้กับโครงข่ายขนาดใหญ่ได้

4.3 เกณฑ์การวัดสมรรถนะ

สำหรับแต่ละประเทศหรือภูมิภาคที่พิจารณา คณะผู้วิจัยจะพิจารณาเกณฑ์ดังต่อไปนี้สำหรับใช้ประเมินและเปรียบเทียบระดับการพลิกโฉมจากการใช้วิธีการแบบดั้งเดิมไปสู่การใช้ปัญญาประดิษฐ์ เกณฑ์การวัดที่ได้คะแนนสูงจะหมายถึงการเข้าใกล้ผลลัพธ์ปลายทางที่ต้องการของแผนการใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการบริหารคลื่นความถี่ตามที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1 สำหรับเกณฑ์วัดแต่ละประเภท คณะผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลจากเว็บไซต์ของภาครัฐและองค์กรกำกับดูแลต่าง ๆ บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ และจากช่องทางของภาควิชาการเช่น Google Scholar และฐานข้อมูล Scorpus นอกจากนั้น สำหรับทุกเกณฑ์การวัด คณะผู้วิจัยยังได้พิจารณาข้อมูลจากผู้ให้บริการในระดับนานาชาติ (International Providers) จำนวน 7 รายซึ่งปัจจุบันเป็นผู้นำในด้านแอปพลิเคชัน (Application) สำหรับการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึก ผู้ให้บริการเหล่านี้ถูกคัดเลือกเนื่องจากมีประวัติการเข้าร่วมงานกับคณะทำงาน (Working Party) ด้านการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่และการบริหารคลื่นความถี่ของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) อย่างสม่ำเสมอ และเนื่องจากผู้ให้บริการเหล่านี้มีประวัติการทำงานร่วมกับภาครัฐและองค์กรในโครงการที่เกี่ยวข้องกับการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ และการบริหารคลื่นความถี่ของภาครัฐ และองค์กรกำกับดูแลที่คณะผู้วิจัยทำการศึกษา (ได้แก่ สหรัฐอเมริกา จีน ภูมิภาคยุโรป เมียนมา และประเทศไทย) บริษัทผู้ให้บริการเหล่านี้ได้แก่

- ATDI (http://www.atdi.com/spectrum-engineering/?lang=en)
- CRFS (https://www.crfs.com/)
- GEW (http://www.gew.co.za/spectrum-monitoring/)
- LSTelecom (https://www.lstelcom.com/en/home/)
- Narda - L3Harris (https://www.narda-sts.com/en/company/news/)

- Rohde&Schwarz (https://www.rohde-schwarz.com/vn/products/aerospace-defense-security/spectrum-monitoring/pg_overview_63720.html)
- TCI (https://www.tcibr.com/)

4.3.1 การตระหนักรู้และความเข้าใจของภาครัฐ (Government Awareness and Understanding)

ในมุมมองของคณะผู้วิจัย นี่เป็นเกณฑ์การวัดที่สำคัญที่สุดในการศึกษาเปรียบเทียบนี้ ซึ่งคาดว่าจะสามารถประกันความสำเร็จของการแผนการพลิกโฉมการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ได้ คณะผู้วิจัยได้ค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับแผน การเผยแพร่ข่าวสาร ข้อกำหนด รวมถึงการสนับสนุนโครงการต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกในการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ของภาครัฐและองค์กรกำกับดูแลอย่างครอบคลุมทั้งในอินเทอร์เน็ตและแหล่งข้อมูลออนไลน์ต่าง ๆ ของภาครัฐ หลักฐานประกอบ (Evidence) ที่สนับสนุนเกณฑ์การวัดนี้ของประเทศต่าง ๆ ที่พิจารณาถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-1 ในกรณีที่ประเทศใดไม่มีหลักฐานที่สนับสนุนเกณฑ์การวัดนี้ สามารถบอกเป็นนัย (Imply) ได้ว่าประเทศนั้นจะได้รับคะแนนประเมินในระดับต่ำสุด

- **ตระหนักมาก** (5 คะแนน) : ภาครัฐหรือองค์กรกำกับดูแลได้ประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ และได้ประกาศใช้ข้อกำหนด กฎเกณฑ์ต่าง ๆ (Regulations) เกี่ยวกับการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่แล้ว
- **ค่อนข้างตระหนัก** (4 คะแนน) : ภาครัฐหรือองค์กรกำกับค่อนข้างเข้าใจความสำคัญของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ และสนับสนุนแผนการพลิกโฉมหรือโครงการนำร่องต่าง ๆ ของทั้งภาคการศึกษาและอุตสาหกรรม รวมทั้งมีความร่วมมือกันในการดำเนินการตามแผนการพลิกโฉมหรือข้อกำหนด กฎเกณฑ์ต่าง ๆ เกี่ยวกับการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารจัดการคลื่นความถี่
- **กลาง** (3 คะแนน) : ภาครัฐหรือองค์กรกำกับดูแลทราบเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ แต่ไม่มีแผนการดำเนินการที่เกี่ยวข้อง
- **ค่อนข้างไม่ตระหนัก** (2 คะแนน) : ภาครัฐหรือองค์กรกำกับดูแลรับทราบถึงการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในหลาย ๆ ด้าน แต่ยังไม่ได้ตระหนักว่าสามารถนำมาใช้กับการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ได้
- **ไม่ตระหนัก อย่างมาก** (1 คะแนน) : ภาครัฐหรือองค์กรกำกับดูแลไม่ทราบถึงการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในด้านต่าง ๆ

4.3.2 ความสนใจจากภาคการศึกษา (Academic Interest)

ความสนใจจากภาคการศึกษาแสดงให้เห็นจากกลุ่มวิจัยต่าง ๆ ในสถาบันการศึกษาซึ่งค้นหว้าหารูปแบบการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่มีศักยภาพในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ คณะผู้วิจัยได้สำรวจฐานข้อมูลงานวิจัยจาก Google Scholar และ Scopus เพื่อรวบรวมจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งถูกตีพิมพ์ในวารสารและการประชุมวิชาการระดับนานาชาติต่าง ๆ ของประเทศและภูมิภาคที่พิจารณา หลักฐานประกอบที่สนับสนุนเกณฑ์การวัดนี้ของประเทศต่าง ๆ ที่พิจารณาถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-2 ในกรณีที่ประเทศใดไม่มีหลักฐานที่สนับสนุนเกณฑ์การวัดนี้ สามารถบอกเป็นนัยได้ว่าประเทศนั้นจะได้รับคะแนนประเมินในระดับต่ำสุด

- **สนใจมาก** (5 คะแนน) : กลุ่มวิจัยในสถาบันการศึกษาจำนวนมากได้ร่วมมือกับภาครัฐในการกำหนดข้อกำหนด กฎเกณฑ์ต่าง ๆ เกี่ยวกับการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการเฝ้าตรวจสอบเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ และได้ตีพิมพ์วารสารวิชาการ (Journals) เกี่ยวกับความสำเร็จในการใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่
- **ค่อนข้างสนใจ** (4 คะแนน) : กลุ่มวิจัยในสถาบันการศึกษาจำนวนมากได้รับโครงการวิจัยเกี่ยวกับการหาแนวทางในการใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อพลิกโฉมการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ รวมทั้งได้นำเสนอแนวคิดต่าง ๆ (Ideas) ในการประชุมวิชาการ (Conferences) เป็นจำนวนมาก
- **กลาง** (3 คะแนน) : กลุ่มวิจัยในสถาบันการศึกษาจำนวนมากมีหัวข้อวิจัยเกี่ยวกับปัญญาประดิษฐ์เป็นจำนวนมาก แต่ไม่มีหัวข้อที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่
- **ค่อนข้างไม่สนใจ** (2 คะแนน) : กลุ่มวิจัยในสถาบันการศึกษาจำนวนมากมีหัวข้อวิจัยเกี่ยวกับปัญญาประดิษฐ์บ้าง แต่ยังไม่เห็นความเชื่อมโยงที่จะประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการเฝ้าสังเกตและบริหารคลื่นความถี่
- **ไม่สนใจ อย่างมาก** (1 คะแนน) : กลุ่มวิจัยในสถาบันการศึกษาจำนวนมากยังไม่ได้รับรู้ถึงแนวโน้มของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในด้านต่าง ๆ

4.3.3 ความพร้อมของภาคอุตสาหกรรม (Industry Readiness)

เกณฑ์การวัดสุดท้ายคือความพร้อมของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งจะระบุถึงส่วนของตลาด การค้า หรืออุปกรณ์ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกที่ถูกใช้สำหรับการเฝ้าตรวจสอบและบริหารจัดการคลื่นความถี่ รวมถึงผู้ให้บริการโทรคมนาคมหรือองค์กรกำกับดูแลที่มีการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์สำหรับการเฝ้าตรวจสอบและบริหารจัดการคลื่นความถี่จากผู้ให้บริการทั้ง 7 รายที่พิจารณาแล้ว โดยประเมินจากข่าวสารและเว็บไซต์ต่าง ๆ หลักฐานประกอบที่สนับสนุนเกณฑ์การวัดนี้ของประเทศต่าง ๆ ที่พิจารณาถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4-3 ในกรณีที่ประเทศใดไม่มีหลักฐานที่สนับสนุนเกณฑ์การวัดนี้ สามารถบอกเป็นนัยได้ว่าประเทศนั้นจะได้รับคะแนนประเมินในระดับต่ำสุด

- **พร้อมมาก** (5 คะแนน) : ตลาดของอุปกรณ์และระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับบริการคลื่นความถี่ในประเทศหรือภูมิภาคโตเต็มที่ (Mature Market) โดยมีผู้ให้บริการไม่น้อยกว่า 3 ราย
- **ค่อนข้างพร้อม** (4 คะแนน) ตลาดของอุปกรณ์และระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับบริการคลื่นความถี่ยังคงอยู่ในขั้นเริ่มต้น มีผู้ให้บริการโทรคมนาคมหรือภาครัฐนำไปใช้บ้าง
- **กลาง** (3 คะแนน) : มีตลาดของอุปกรณ์และระบบปัญญาประดิษฐ์สำหรับบริการคลื่นความถี่ แต่ยังไม่มีความต้องการใช้จากผู้ให้บริการโทรคมนาคมหรือภาครัฐ
- **ค่อนข้างไม่พร้อม** (2 คะแนน) : มีตลาดของอุปกรณ์และระบบปัญญาประดิษฐ์ในกลุ่มอื่น ๆ เช่น บ้านอัจฉริยะ (Smart Home) IoT (Internet of Things) แต่ยังไม่มีสำหรับการบริหารคลื่นความถี่
- **ไม่พร้อม อย่างมาก** (1 คะแนน) : ยังไม่มีตลาดของอุปกรณ์และระบบปัญญาประดิษฐ์ในประเทศหรือภูมิภาค

4.4 การศึกษาวิเคราะห์เปรียบเทียบ

จากการศึกษาและข้อสรุปเกี่ยวกับสถานการณ์และการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ คณะผู้วิจัยได้ประเมินและเปรียบเทียบความพร้อมในด้านต่าง ๆ ของประเทศและภูมิภาคที่พิจารณาตามเกณฑ์ที่เสนอในหัวข้อที่ 4.2 โดยได้สรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 4-1 ถึง 4-3 ตามลำดับ ทั้งนี้พบว่าในกลุ่มของประเทศที่พัฒนาแล้วจะมีความพร้อมในระดับที่ค่อนข้างสูงถึงพร้อมในระดับสูง โดยภาคอุตสาหกรรมดูจะมีความพร้อมมากที่สุด รองลงมาคือภาคการศึกษาและภาครัฐตามลำดับ อย่างไรก็ตามประเทศในภูมิภาคเดียวกันกับประเทศไทยและกำลังอยู่ในช่วงของการพัฒนาระบบโทรคมนาคมของประเทศเช่น ประเทศเมียนมา ยังค่อนข้างไม่พร้อมในการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่

เห็นได้ชัดว่าสำหรับเกณฑ์การวัดที่ 1 (การตระหนักรู้และความเข้าใจของภาครัฐ) ไม่มีประเทศหรือภูมิภาคที่พิจารณาที่ได้คะแนนสูงสุด เนื่องจากยังไม่มีที่ใดที่มีข้อกำหนดหรือแม้แต่แนวทางที่เกี่ยวกับประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์หรือการเรียนรู้เชิงลึกในการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ สำหรับประเทศจีน ภูมิภาคยุโรป และสหรัฐอเมริกาได้รับคะแนนประเมินระดับ 4 เนื่องจากภาครัฐหรือองค์กรกำกับดูแลมีการสนับสนุนโครงการนำร่องที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมากแล้ว ในขณะที่ประเทศเมียนมายังไม่ได้เริ่มหรือสนับสนุนการพัฒนาโครงการที่เกี่ยวข้อง

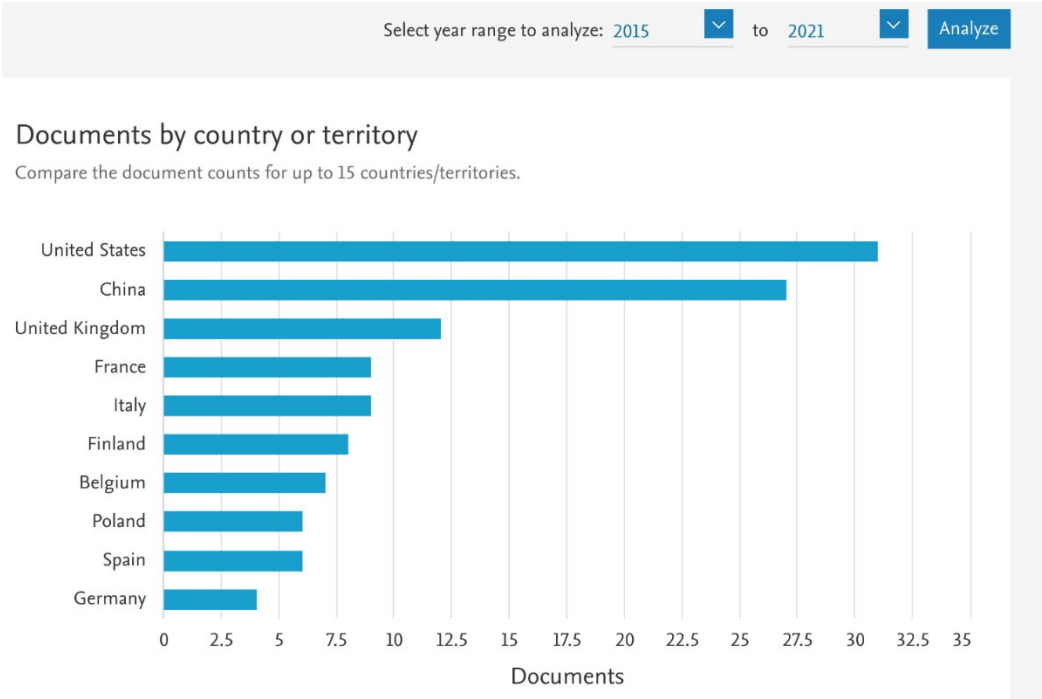
ตารางที่ 4-1 การศึกษาเปรียบเทียบความพร้อมในการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ – เกณฑ์ที่ 1 การตระหนักรู้และความเข้าใจของภาครัฐ

ประเทศ/ภูมิภาค	ภาครัฐ	หลักฐานสนับสนุน
เซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน	4	Survey Report in China, Radio Spectrum in China, Borderland China-Spectrum Management
ภูมิภาคยุโรป	4	TCI.3, TCI.5, CRFS.1, Market Survey Report 2019
สหรัฐอเมริกา	4	USA.1, Market Survey Report 2019, NITRD, Pilot1, Pilot2
เมียนมา	2	

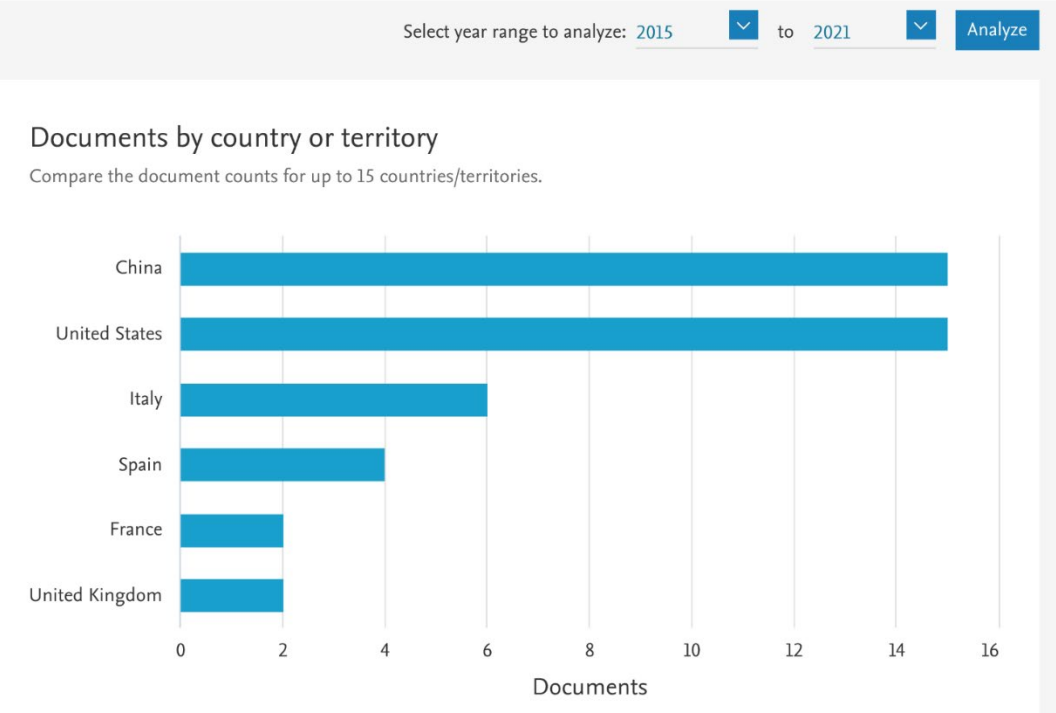
ในตารางที่ 4-2 ประเทศจีน ภูมิภาคยุโรป และสหรัฐอเมริกาได้รับคะแนนสูงสุดเนื่องจากได้มีการสร้างความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยหรือกลุ่มวิจัยเพื่อพัฒนาแผนการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์แล้ว นอกจากนั้นยังมีการตีพิมพ์การศึกษาเกี่ยวกับการใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ออกมาเป็นจำนวนมาก (ดังแสดงในรูปที่ 4-1 และ 4-2)

ตารางที่ 4-2 การศึกษาเปรียบเทียบความพร้อมในการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ – เกณฑ์ที่ 2 ความสนใจจากภาคการศึกษา

ประเทศ/ภูมิภาค	ภาคการศึกษา	หลักฐานสนับสนุน
เซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน	5	รูปที่ 4-1 และ 4-2
ภูมิภาคยุโรป	5	
สหรัฐอเมริกา	5	
เมียนมา	2	



รูปที่ 4-1 จำนวนงานวิจัยที่มีคำว่า "Spectrum Management" ในชื่อของบทความ (ข้อมูลจากฐานข้อมูล Scorpus ปี 2015 ถึง 2021)



รูปที่ 4-2 จำนวนงานวิจัยที่มีคำว่า "Spectrum Monitoring" ในชื่อของบทความ (ข้อมูลจากฐานข้อมูล Scorpus ปี 2015 ถึง 2021)

ตารางที่ 4-3 การศึกษาเปรียบเทียบความพร้อมในการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ – เกณฑ์ที่ 3 ความพร้อมของภาคอุตสาหกรรม

ประเทศ/ภูมิภาค	ภาคอุตสาหกรรม	หลักฐานสนับสนุน
เซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน	5	Survey Report in China, Radio Spectrum in China, Borderland China-Spectrum Management
ภูมิภาคยุโรป	5	TCI.3, TCI.5, Market Survey Report 2019, LS.1, CRFS.1
สหรัฐอเมริกา	5	TCI.1, TCI.2, TCI.3, Market Survey Report 2019, LS.1
เมียนมา	2	

บทที่ 5
การศึกษาความพร้อมใช้งานในประเทศ

การศึกษาในบทนี้เป็นรายละเอียดการศึกษาข้อมูลทางด้านเทคนิค และความพร้อมในการพัฒนาการเชื่อมต่อระบบคลังข้อมูลเพื่อนำไปวางแผนและวิเคราะห์ผลกระทบของการนำเทคโนโลยี Big Data และ ปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่ และเสนอวิธีการวิจัยหรือสถานการณ์จำลอง (Scenario) ที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยอย่างน้อย 3 สถานการณ์ พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อดี/ข้อด้อยของแต่ละสถานการณ์ โดยได้ทำการศึกษาในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้ (1) การประเมินขอบเขตการนำเอาปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับการบริหารความถี่โดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญในต่างประเทศ (2) กรอบแนวคิดของการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ (3) สถานการณ์จำลองของการใช้ปัญญาประดิษฐ์บริหารคลื่นความถี่ในบริบทของประเทศไทย และ (4) การประเมินความพร้อมของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อบริหารคลื่นความถี่ในสถานการณ์จำลองที่เสนอ

5.1 บทนำ

คลื่นความถี่ถูกบริหารและใช้งานมาเป็นเวลานานด้วยกรอบข้อกำหนด (Regulatory Framework) และนโยบายที่ทยอยออกมาเพื่อแก้ปัญหาหรือปรับการใช้คลื่นความถี่ให้เข้ากับสถานการณ์ของแต่ละช่วงเวลา การบริหารคลื่นความถี่และประเมินความต้องการใช้งานคลื่นความถี่ที่เป็นอยู่ในปัจจุบันยังต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญในการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ และจะมีความซับซ้อนและยุ่งยากมากขึ้นด้วยการเพิ่มขึ้นของเทคโนโลยีการสื่อสารที่หลากหลาย และการใช้งานคลื่นความถี่ที่เติบโตขึ้นในพื้นที่และในย่านความถี่ต่าง ๆ อย่างรวดเร็ว ด้วยปริมาณข้อมูลที่ต้องวิเคราะห์จำนวนมหาศาล การจัดสรรคลื่นความถี่ในปัจจุบันจึงอยู่บนฐานของความสามารถในการวิเคราะห์ข้อมูลของมนุษย์ที่มีข้อจำกัด ส่งผลให้การบริหารคลื่นความถี่ไม่คล่องตัวและไม่ได้อยู่ในจุดที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด [46] ปริมาณข้อมูลขนาดใหญ่ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาของการใช้งานคลื่นความถี่นี้เองที่ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่นี้เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับปัญญาประดิษฐ์

แนวคิดของ "ปัญญาประดิษฐ์" เกิดขึ้นตั้งแต่ประมาณ 70 ปีที่แล้ว ปัญญาประดิษฐ์ได้รับการศึกษา พัฒนาและถูกนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ อย่างต่อเนื่องเช่น Character Recognition, Machine Vision, Speech Recognition, Knowledge Systems, Classification Systems, Search, Customer Relationship Management และ Analysis of High Dimensional Data เป็นต้น [47] โดยหลักการ ปัญญาประดิษฐ์ทำให้คอมพิวเตอร์หรือระบบอัตโนมัติ (Automated Systems) ต่าง ๆ สามารถทำงานที่ในอดีตต้องใช้ความสามารถในการเข้าใจและตัดสินใจของมนุษย์ (Human Cognition and Decision-Making Capabilities) ซึ่งได้แก่ การวางแผน การรู้จำ (Recognition) และการตัดสินใจ (Decision Making) [46] ด้วยคุณลักษณะนี้จึงมีความเป็นไปได้และเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับงานที่มีความซับซ้อนสูงเช่น การบริหาร จัดการ และจัดสรรคลื่นความถี่ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันปัญญาประดิษฐ์ยังคงไม่สามารถเลียนแบบความสามารถในการตัดสินของมนุษย์ได้ทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสถานการณ์ที่มีความคลุมเครือ สถานการณ์ที่ไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน ซึ่งต้องใช้*สามัญสำนึก* (Common Sense) ในการ

ตัดสินใจ [47] แต่ปัญญาประดิษฐ์อาจสามารถทำงานได้ดีกว่ามนุษย์มากในสถานการณ์ที่ต้องตัดสินใจบนข้อกำหนดหรือข้อมูลเดิมที่เคยมีมาก่อน (Rule-based/Knowledge-based Systems) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องประมวลข้อมูลขนาดใหญ่

การศึกษาวิจัยในบทนี้จะประเมินศักยภาพ ความเป็นไปได้ และความพร้อมของการนำเอาปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ โดยประมวลข้อมูลจาก ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ สถานะและข้อจำกัดของงานวิจัยในปัจจุบันที่เกี่ยวข้อง รวมถึงกรอบการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level Framework)

5.2 การประเมินขอบเขตการนำเอาปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับการบริหารความถี่โดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญในต่างประเทศ

ด้วยคุณลักษณะของปัญญาประดิษฐ์ที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 5.1 ในช่วงปลายปี ค.ศ. 2020 (พ.ศ. 2563) ที่เพิ่งผ่านมา หน่วยงานกำกับดูแลคลื่นความถี่เช่น FCC (Federal Communication Commission) ของประเทศสหรัฐอเมริกา โดยคณะทำงานด้านปัญญาประดิษฐ์ (AIWG: AI Working Group) ซึ่งประกอบด้วยตัวแทนจากภาครัฐ สถาบันการศึกษา และบริษัทเอกชนชั้นนำเช่น National Science Foundation (NSF), National Telecommunications and Information Administration (NTIA), National Institute of Standards and Technology (NIST), MIT, UC Berkeley, Georgia Tech, U of Colorado Law School, Google, Intel, AT&T Research, Qualcomm, Cisco เป็นต้น ได้ประชุม ระดมความเห็น และวิเคราะห์ถึงความสามารถของปัญญาประดิษฐ์ในการช่วยปรับปรุงสมรรถนะของการให้บริการและโครงข่ายโทรคมนาคม ผู้เชี่ยวชาญกลุ่มนี้เห็นว่า *มีด้านต่าง ๆ ของการบริหารจัดการคลื่นความถี่ที่ FCC สนใจ และมีความเป็นไปได้ ที่จะนำเอาปัญญาประดิษฐ์เข้าไปประยุกต์ใช้* โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 การบริหารจัดการคลื่นความถี่ที่ FCC สนใจและเห็นว่าเป็นไปได้ที่จะนำเอาปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้ [47]

การประยุกต์ใช้งาน	ประโยชน์ที่จะได้
Improved Propagation Models	เพิ่มการใช้ประโยชน์คลื่นความถี่
Identification of Interference Sources	ทำให้การบังคับใช้กฎระเบียบมีความเป็นอัตโนมัติ
Analysis of Outage Data	กำจัดสาเหตุของปัญหาคุณภาพสัญญาณ
Spectrum Sharing	เกิดการแชร์คลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic Sharing) เพิ่มขึ้น

นอกจากนั้นในช่วงเดียวกัน กลุ่มผู้เชี่ยวชาญอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งได้แก่ Interagency Working Group (IWG) (ประกอบด้วยตัวแทนจากภาครัฐ สถาบันการศึกษา และบริษัทเอกชนที่เชี่ยวชาญด้าน ปัญญาประดิษฐ์ แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning) โครงข่าย (Networking) และการบริหารคลื่นความถี่) ภายใต้โครงการ The Networking and Information Technology Research and Development (NITRD)/ Wireless Spectrum R&D (WSRD) ของรัฐบาลสหรัฐฯ ได้มีการประชุมเชิงปฏิบัติการ (Workshop) เพื่อระดมความเห็นและมีข้อสรุปว่า [46] *การนำเอาปัญญาประดิษฐ์เข้ามาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ซึ่งเป็นงานที่มีความซับซ้อนและมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาในหลายแง่มุม (Multidimensional) จำเป็นต้องดำเนินการอย่างค่อยเป็นค่อยไป* โดยถึงแม้ว่าความสามารถของปัญญาประดิษฐ์จะมีการพัฒนามาอย่างมาก เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในปัจจุบันยังอยู่ในระดับความพร้อมที่ต่างกันและยังต้องการการศึกษาเพื่อให้แน่ใจว่าสามารถนำมาใช้ได้ครอบคลุมกับปัญหาต่าง ๆ โดยได้ระบุถึงประเด็นที่อาจเป็นปัญหาสำหรับการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับระบบบริหารคลื่นความถี่ไว้ดังนี้

- ทฤษฎีในปัจจุบันยังไม่สามารถอธิบายหรือป้องกันความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นในโมเดลปัญญาประดิษฐ์ต่าง ๆ ได้
- การตรวจหา Spurious Correlation (การที่ตัวแปรสองตัวดูเหมือนว่าจะมีความสัมพันธ์ในลักษณะตัวหนึ่งเป็นต้นเหตุให้เกิดตัวแปรอีกตัวหนึ่ง (Causal) แต่จริง ๆ แล้วความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรดังกล่าวไม่ได้เป็นเช่นนั้น) ในข้อมูลแฝง (Hidden Data) ยังทำได้ยาก
- ความเข้าใจเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์เชิงระบบระหว่างมนุษย์และปัญญาประดิษฐ์ (Human-Ai System Interaction) ยังมีจำกัด
- ประเด็นปัญหาเกี่ยวกับความเสถียร (Stability) ของการทำนาย (Prediction) ในกรณีที่เงื่อนไขต่าง ๆ (Conditions) เปลี่ยนแปลงไป
- ความสามารถในการแปลความ/ตีความ ของโมเดล (Interpretability of Models)
- การใช้ประโยชน์จากข้อมูลป้อนกลับจากมนุษย์ (Human Feedback) ในกระบวนการฝึกและเรียนรู้ในเรื่องต่าง ๆ (Multidomain Training/Learning Process)
- การใส่ข้อมูลเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมทางกายภาพ (Physical Environment) เข้าไปในโมเดลการฝึก

ผู้เชี่ยวชาญกลุ่มนี้ได้สรุปเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (AI Techniques) ที่สามารถนำไปประยุกต์กับการบริหารคลื่นความถี่ด้านต่าง ๆ ไว้ดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ที่สามารถนำไปประยุกต์กับการบริหารคลื่นความถี่ด้านต่าง ๆ ในอนาคต [46]

เทคนิคปัญญาประดิษฐ์	การประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่
Anomaly Identification	Spectrum monitoring
Prediction	Spectrum diagnosis

เทคนิคปัญญาประดิษฐ์	การประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่
Recommendation	Mitigation of interference
Translation	Network integration
Detection and Classification	Spectrum sensing

กลุ่มผู้เชี่ยวชาญกลุ่มนี้ได้อภิปรายถึงการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการจัดสรรความถี่แบบพลวัตและการบริหารนโยบาย (Dynamic Spectrum Allocation and Policy Management) และระบุถึงสามส่วนหลักที่ต้องการระบบอัตโนมัติได้แก่

1) การใส่ปัญญาประดิษฐ์เข้าไปในเครื่องมือบริหารความถี่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

   - ปัญญาประดิษฐ์สามารถช่วยให้การกำหนดคลื่นความถี่ที่ต้องอาศัยการคาดการณ์ (Predictive Spectrum Assignments) มีความเชื่อถือได้ (Reliability) มากขึ้นด้วยชุดข้อมูลสำหรับฝึก (Training Sets) ที่ดีขึ้น รวมถึงอัลกอริทึมสำหรับประมาณการลดทอนสัญญาณ (Propagation Algorithms) ที่ใช้ในกระบวนการวางแผน
   - การใช้ปัญญาประดิษฐ์สามารถใช้ประโยชน์ (Leverage) และพัฒนาเครื่องมือเดิมที่มีอยู่โดยพุ่งเป้าเจาะจงไปที่บางฟังก์ชั่นก่อนเช่น การวางแผนความถี่ (Spectrum Planning) และการตรวจวัดสภาพแวดล้อม (Real Environment Sensing) เพื่อพัฒนากระบวนการเข้าถึงคลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic Spectrum Access Operations)
   - การดำเนินการสำคัญ (Key Actions) ที่จะทำให้การใช้ปัญญาประดิษฐ์กับคลื่นความถี่ก้าวหน้าขึ้นได้แก่
     - การสร้างการจำลอง (Simulations) ที่ใช้ชุดข้อมูลมาตรฐานสำหรับฝึก (Standardized Training Datasets) ที่จะเป็นตัวแทนข้อมูลจริง (Real-Life Data) โดยต้องคำนึงถึงเรื่องความเป็นส่วนตัวของข้อมูลและความสามารถในการขยาย (Privacy and Scalability) ด้วย
     - ใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่มีอยู่แล้วของสัญญาณการสื่อสารไร้สายต่าง ๆ (Known Wireless Signal Information) ที่ได้จากการวัด (Spectrum Measurement) เพื่อลดปริมาณการฝึก (Training Overhead) ปัญญาประดิษฐ์

2) การใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อเรียนรู้จากชุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ ที่เก็บมาอย่างต่อเนื่องยาวนาน (Very Large Datasets and Time Horizons)

   - ข้อจำกัดสำคัญต่อการพัฒนาและทดสอบปัญญาประดิษฐ์ซึ่งจำเป็นต่อการบริหารคลื่นความถี่แบบอัตโนมัติคือ การขาดชุดข้อมูลขนาดใหญ่ที่เก็บมาอย่างต่อเนื่องยาวนานและเปิดให้ทุกคนเข้าถึงได้ (Large, Common, Open Source Datasets with Extended Time Horizons)

- ปัญญาประดิษฐ์สามารถเรียนรู้อย่างต่อเนื่องและปรับตัวได้อย่างรวดเร็วหากเกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาวะหรือเงื่อนไขต่าง ๆ (Conditions) ซึ่งสามารถช่วยให้การตัดสินใจในการออกนโยบายต่าง ๆ เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามจะเกิดภาพนี้ได้ต้องมีการพัฒนาและใช้โครงสร้างพื้นฐานที่สามารถใช้สำหรับทดสอบระบบปัญญาประดิษฐ์ได้ในเวลาจริง (Real-Time)

3) การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการคาดการณ์ต่าง ๆ (Predictions) เพื่อช่วยพัฒนานโยบายการจัดสรรคลื่นความถี่

- การอนุมาน (Inference) ด้วยปัญญาประดิษฐ์เมื่อผนวกกับชุดข้อมูลจากเซ็นเซอร์ (Sensors) ที่เก็บมาอย่างต่อเนื่องสามารถช่วยให้การตัดสินใจต่าง ๆ เกี่ยวกับการบริหารความถี่รวดเร็วมีประสิทธิภาพขึ้นเช่น การจัดสรรคลื่นความถี่สามารถทำได้บนฐานของข้อมูลการใช้คลื่นความถี่จริงที่เก็บสรุปได้ทุกปีแทนที่จะเป็นรายสิบปี
- การดำเนินการสำคัญที่จำเป็นต้องทำได้แก่
  - ระบุปัญหาที่ต้องการใช้ปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วย
  - ทดสอบและตรวจสอบความถูกต้อง (Test and Validate) แนวทางแก้ปัญหานั้นก่อนนำไปใช้จริง
  - สร้างระบบที่ผู้ใช้วางใจได้ (Trustworthy) อัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์ต่าง ๆ ต้องสามารถอธิบายได้ (Explainability) และตรวจสอบย้อนกลับได้ (Traceability)

จากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญทั้งสองกลุ่ม ประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการพิจารณาและดำเนินการ สามารถสรุปได้ดังนี้

- เราจะสามารถใช้ปัญญาประดิษฐ์ได้อย่างปลอดภัยและวางใจได้ ได้อย่างไร?
- จากความจริงที่ว่าสมรรถนะ (Performance) ของปัญญาประดิษฐ์ไม่ได้สมบูรณ์แบบ อะไรคือตัววัดที่เราจะใช้ในการตัดสินใจรับเอาปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้งาน (Metrics for Acceptability)?
- กำหนดปัญหาที่ต้องการใช้ปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยแก้ไขอย่างละเอียดถี่ถ้วน
- สร้างความไว้วางใจด้วยการทดสอบความถูกต้อง (Validation) ของแนวทางแก้ปัญหาด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI Solutions) ที่ได้โดยใช้พื้นที่ทดสอบที่ถูกปูพรมออกไปในหลายพื้นที่ (Large-Scale Wireless Testing Regions)
- จัดหาชุดข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการพิสูจน์และทดสอบความถูกต้องของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นในสถานการณ์ต่าง ๆ

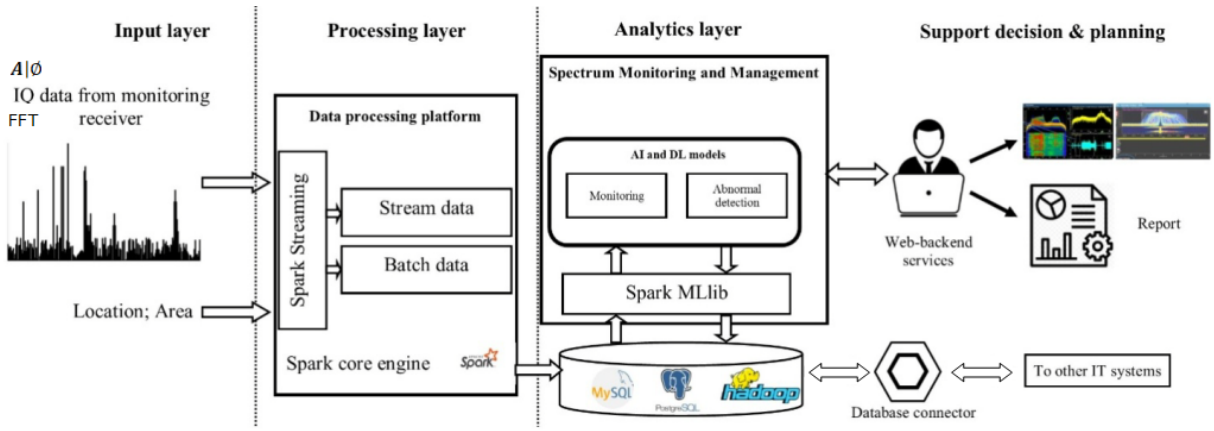
5.3 กรอบแนวคิดของการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการบริหารจัดการคลื่นความถี่

การนำเอาปัญญาประดิษฐ์เข้ามาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่สามารถวาดออกมาเป็นกรอบแนวคิด (Conceptual Framework) ซึ่งอ้างอิงมาจาก Spark Platform ซึ่งเป็นแพลตฟอร์มสำหรับวิเคราะห์ Big Data ที่มีประสิทธิภาพและถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ได้ตามรูปที่ 5-1 ซึ่งประกอบด้วย 5 ส่วนหลัก ได้แก่

1) Input Layer
2) Processing Layer
3) Analytics Layer
4) ฐานข้อมูลกลาง (Data Lake)
5) การเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลภายนอก (Database Connector)

Input Layer จะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างพื้นฐานในการตรวจวัดสัญญาณคลื่นความถี่ต่าง ๆ (Sensing Infrastructure) ด้วยกลุ่มของเซ็นเซอร์ (Sensors) โดยข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกส่งต่อให้กับชั้นถัดไปซึ่งได้แก่ Processing Layer จากการศึกษาพบว่าข้อมูลที่เซ็นเซอร์จะตรวจวัดและส่งต่อนี้มี 3 รูปแบบ (Data Representations) หลัก [2] ได้แก่

1) In-Phase & Quadrature-Phase (IQ)
2) Amplitude & Phase ($A|\emptyset$) และ
3) Power Spectral Density (ด้วย Fast Fourier Transform: FFT ของสัญญาณ)



รูปที่ 5-1 กรอบแนวคิด (Conceptual Framework) ของการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่

ข้อมูลจาก Input Layer จะเข้าสู่ Processing Layer ซึ่งสามารถรองรับการจัดการข้อมูลได้ทั้งข้อมูลตามเวลาจริง (Real-Time) และข้อมูลในอดีต (Historical (i.e., Batch)) เพื่อสร้างชุดข้อมูลทั้งแบบเวลาจริงและแบบอดีต (Real-Time Dataset and Batch Dataset) ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยัง Analytics Layer

ที่ Analytics Layer ชุดข้อมูลเวลาจริงจะถูกใช้สำหรับบริการการวิเคราะห์ต่าง ๆ (Analytics Services) ที่เป็นการนำเอาปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้งานเช่น การเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) การตรวจจับแหล่งกำเนิดการรบกวน (Interference Source Detection) เป็นต้น ชุดข้อมูลในอดีตจะถูกใช้สำหรับฝึก (Train) แบบจำลองปัญญาประดิษฐ์รวมถึงการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) และถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์สำหรับบริการที่ต้องใช้ข้อมูลในอดีตเช่น การทำนายพฤติกรรมการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Behavior Forecast) หรือใช้ในกระบวนการรายงานและวางแผน (Report and Planning Process) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ต้องการข้อมูลคลื่นความถี่จำนวนมากสำหรับฝึกปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึก

ส่วน Processing Layer และ Analytics Layer จะเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล ซึ่งตัวอย่างของกรอบสำหรับเก็บข้อมูลส่วนกลาง (Data Lake Framework) ที่จะใช้ ได้แก่ MySQL, PostgreSQL หรือ Hadoop โดยฐานข้อมูลนี้จะมีส่วนที่เชื่อมต่ออยู่กับฐานข้อมูลอื่นจากภายนอก (Database Connector) และเพื่อที่จะให้เกิดการใช้ข้อมูลดิบของคลื่นความถี่ (Spectrum Raw Data) ร่วมกันกับระบบเทคโนโลยีสารสนเทศอื่นของสำนักงาน กสทช. แบ็คเอนด์ของที่เก็บข้อมูลส่วนกลาง (Backend of Data Lake) จะมีพอร์ต (Port) สำหรับให้ผู้ใช้เข้าถึงและดาวน์โหลด (Access and Download) ข้อมูลไปใช้ได้

ผลลัพธ์ขาออก (Output Results) จากแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ในชั้น Analytics Layer จะถูกนำเสนอในรูปแบบของการให้บริการบนเว็บ (Web-Based Services) เพื่อใช้สนับสนุนการตัดสินใจและการวางแผนที่เกี่ยวกับคลื่นความถี่

5.4 สถานการณ์จำลองของการใช้ปัญญาประดิษฐ์บริหารคลื่นความถี่ในบริบทของประเทศไทย

โครงการนี้เสนอสถานการณ์จำลอง (Scenario) ของการนำเอาปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ของประเทศไทย จำนวน 3 สถานการณ์ ได้แก่

1) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต
2) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์
3) ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่

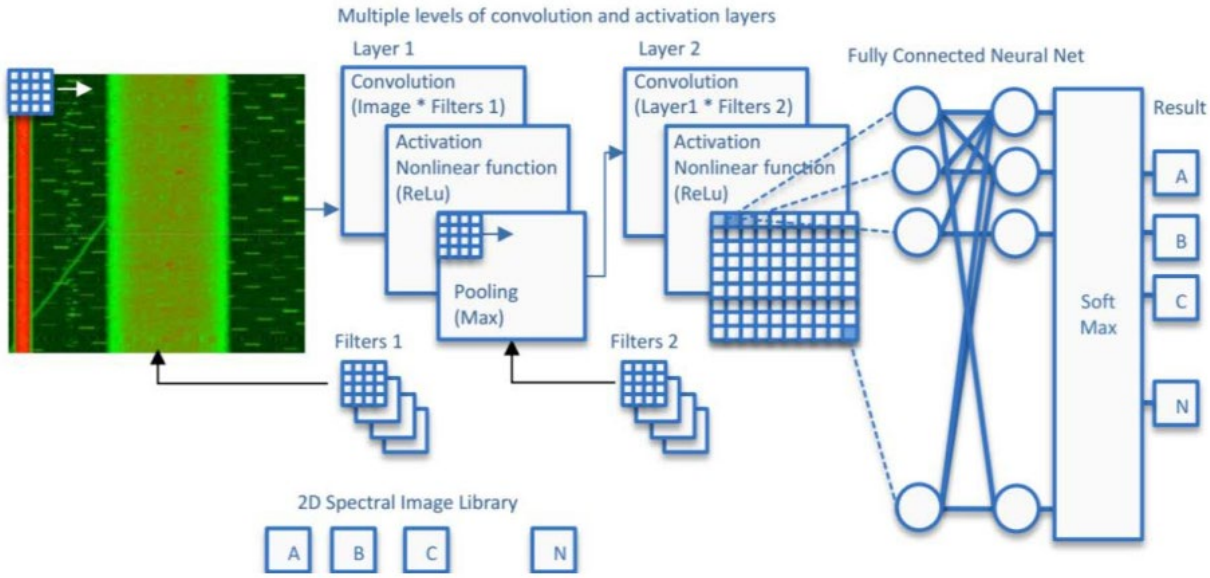
สถานการณ์จำลอง 3 สถานการณ์นี้ สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศในหัวข้อที่ 5.2 ทั้งในด้านของความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งาน เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ รวมถึงการดำเนินการหลักที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาการบริหารคลื่นความถี่แบบอัตโนมัติ

หัวข้อที่ 5.4.1 ถึง 5.4.3 จะอธิบายภาพเบื้องต้น (Overview) ของสถานการณ์จำลองทั้ง 3 สถานการณ์ และหัวข้อที่ 5.4.4 จะเป็นการประเมินความต้องการทางเทคนิคเบื้องต้น (High-Level Technical Requirements) ของทั้ง 3 สถานการณ์ตามกรอบแนวคิด (Conceptual Framework) ของการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ (ตามหัวข้อที่ 5.3)

5.4.1 ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต (สถานการณ์จำลองที่ 1)

ในสถานการณ์จำลองที่ 1 นี้ จากข้อมูลที่เก็บมาได้จากกลุ่มของเซ็นเซอร์ที่วางไว้ตามพื้นที่ต่าง ๆ ที่สนใจเพื่อเฝ้าฟังคลื่นความถี่ ปัญญาประดิษฐ์จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ใน 2 ส่วน (2 Analytics Services) คือ การวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาต และการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน

วิธีการที่มีศักยภาพในการวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตจากข้อมูลที่เฝ้าฟังสดหรือข้อมูลในอดีต (Livestream Data or Historical Data) คือแบบจำลองเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning Model) ซึ่งเป็นการรู้จำภาพหรือรูปแบบ (Image or Pattern Recognition) โดยใช้โครงข่ายนิวรอลแบบคอนโวลูชันนอล (Convolutional Neural Network: CNN) 2 มิติ (ตัวอย่างดังเช่น รูปที่ 5-2) CNN จะถูกฝึกด้วยข้อมูลภาพ 2 มิติของคลื่นความถี่ (ที่แสดงว่ากำลังของสัญญาณขึ้นกับย่านความถี่และเวลาอย่างไร เช่น Waterfall Plot เป็นต้น) แต่ละภาพจะบรรจุข้อมูลคุณสมบัติต่าง ๆ ของสัญญาณซึ่งมีโอกาสน้อยมากที่คุณสมบัติเหล่านี้จะไปแสดงอยู่ในสัญญาณรบกวน (Noise) เช่น กลุ่มของพลังงาน (Power Spectrum) ที่ถูกจำกัดอยู่ในเวลาและย่านความถี่หนึ่ง ๆ หรือกลุ่มของพลังงานที่มีแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) คงที่แต่มีการเปลี่ยนย่านความถี่ในอัตราที่คงที่ เป็นต้น CNN ถูกพัฒนาเพื่อใช้กับการรู้จำภาพและใบหน้า ด้วยเหตุที่การเปลี่ยนแปลงของการใช้คลื่นความถี่สามารถแทนได้ด้วยภาพซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนของ กำลังของสัญญาณ ความถี่ และเวลา จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ CNN ได้



รูปที่ 5-2 ตัวอย่างของแบบจำลอง Convolutional Neural Network สำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ [1]

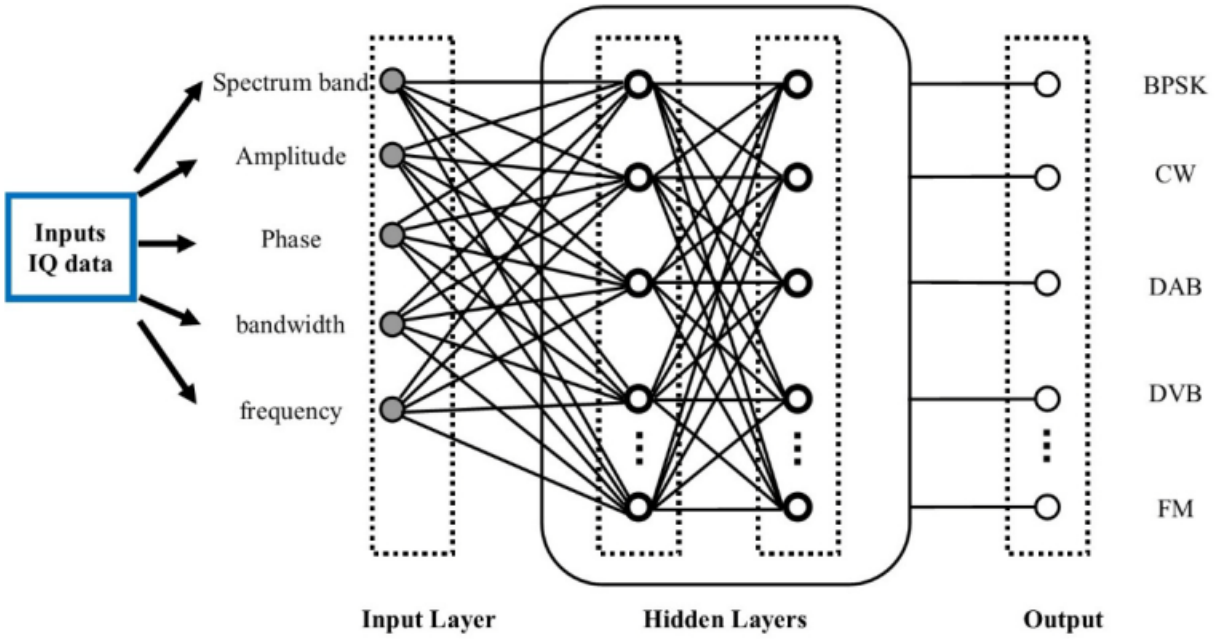
ในการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ จะมีประโยชน์มากหากระบบเฝ้าฟังสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติตลอดเวลาโดยไม่ต้องมีมนุษย์มาเกี่ยวข้อง ระบบเฝ้าฟังจึงต้องสามารถเรียนรู้ลักษณะการถูกใช้งานปกติของคลื่นความถี่ (Normal Behavior) เพื่อให้ระบบสามารถตรวจจับและรายงานเหตุการณ์ที่น่าสนใจหรือผิดไปจากสถานการณ์ปกติ งานลักษณะนี้จึงเหมาะที่จะใช้ CNN และ Unsupervised Neural Network เพื่อที่จะดึงเอาคุณสมบัติหลักต่าง ๆ (High-

Level Features) ของการใช้คลื่นความถี่ออกมาจากข้อมูลจำนวนมหาศาลที่ได้จากเซ็นเซอร์ CNN จะถูกฝึกด้วยข้อมูลการใช้ความถี่ปกติจำนวนหลายร้อยชั่วโมงจึงสามารถรู้จำและระบุเหตุการณ์ที่ไม่ปกติหรือไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อนได้

ในส่วนของการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning: ML) สามารถเรียนรู้คุณสมบัติ (Feature) ที่ดึงมาจากสัญญาณที่รับได้ โครงข่ายนิวรอลประดิษฐ์ (Artificial Neural Network: ANN) จะถูกใช้เพื่อจำแนกประเภทของสัญญาณ

ในที่นี้จะใช้โครงข่ายนิวรอลแบบป้อนไปข้างหน้า (FeedForward Neural Network: FFNet) ซึ่งข้อมูลขาออก (Output) จากชั้นของนิวรอน (Layer of Neurons) ถูกเชื่อมต่อไปเป็นเฉพาะส่วนข้อมูลขาเข้า (Input) ของนิวรอนชั้นถัดไป โดยไม่มีการป้อนกลับในขบวนการตัดสินใจ คุณสมบัติต่าง ๆ ถูกป้อนเข้าสู่ชั้นข้อมูลขาเข้า (Input Layer) ระหว่างชั้นข้อมูลขาเข้ากับชั้นข้อมูลขาออก (Output Layer) จะมีชั้นของนิวรอนที่ซ่อนอยู่ (Hidden Layer) อย่างน้อย 1 ชั้น ชั้นข้อมูลขาออกจะเชื่อมกับฟังก์ชันสำหรับโวต (Voting Function (SoftMax)) ซึ่งจะประมาณค่าความน่าจะเป็นของประเภทของสัญญาณประเภทต่าง ๆ (ตัวอย่างตามรูปที่ 5-3)

หากประเภทสัญญาณชนิดใดชนิดหนึ่งมีความน่าจะเป็นที่สูงกว่าประเภทของสัญญาณอื่น ๆ ผลลัพธ์การแบ่งประเภทสัญญาณก็จะชัดเจนและง่ายต่อการตีความ หากประเภทของสัญญาณต่าง ๆ มีความน่าจะเป็นใกล้เคียงกัน โครงข่ายนิวรอลประดิษฐ์ก็จะให้คำตอบพร้อมด้วยค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) แทนที่จะเลือกว่าสัญญาณที่ตรวจจับอยู่นั้นเป็นสัญญาณประเภทใด นี่เป็นส่วนที่แตกต่างจากการใช้วิธีต้นไม้การตัดสินใจ (Decision Tree Approach) ซึ่งจะถูกบังคับให้ต้องเลือกตอบอย่างใดอย่างหนึ่งแม้ว่าจะมีความคลุมเครือไม่ชัดเจนเกี่ยวกับสัญญาณที่กำลังพิจารณา



รูปที่ 5-3 Feed Forward Neural Network ที่เสนอสำหรับใช้จำแนกประเภทสัญญาณโดยอัตโนมัติ (Automatic Signals Classification)

การจำแนกประเภทสัญญาณโดยใช้ FFNet มีข้อได้เปรียบหลายข้อ ได้แก่

- กระบวนการที่เป็นอัตโนมัติทำให้การจำแนกประเภทสามารถถูกปรับปรุงให้ดีที่สุด (Optimized) ด้วยการฝึกด้วยข้อมูลที่มากขึ้นโดยไม่ต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญ
- สามารถที่จะนำไปติดตั้งบนเซิร์ฟเวอร์ท้องถิ่นหรือบนคลาวด์ซึ่งผู้ใช้สามารถฝึก FFNet ได้เองหากไม่ต้องการเปิดเผยข้อมูลสำหรับฝึกต่อผู้ให้บริการคลาวด์ (เช่นในกรณีที่ต้องการความปลอดภัยของข้อมูล (Security))
- ข้อได้เปรียบอีกข้อหนึ่งคือ การใช้ ML มีคุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) จึงอาจสามารถปรับให้เข้ากับข้อมูลได้ดีกว่าวิธีเชิงเส้น ผลลัพธ์ขาออกจาก ML มีข้อมูลที่เป็นประโยชน์ชน์มากกว่า เนื่องจากมีการรายงานความน่าจะเป็นของประเภทสัญญาณต่าง ๆ แทนที่จะเลือกตัดสินไปเลยว่าเป็นสัญญาณประเภทใด ทำให้ผู้ใช้ทราบว่าสามารถมั่นใจกับคำตอบที่ได้ในระดับใด

5.4.2 ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ (สถานการณ์จำลองที่ 2)

การตรวจสอบความสอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์จะเป็นการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) ที่จะคอยเฝ้าฟังคลื่นความถี่และระบุคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณที่เฝ้าฟัง เช่น มอดูเลชัน (Modulation) ตำแหน่งของเครื่องส่ง กำลังส่ง (Transmit Power) เป็นต้น รวมทั้งระบุตัวตน (Identity) ของเครื่องส่ง เมื่อระบุตัวตนของเครื่องส่งแล้ว โดยการทำงานร่วมกับฐานข้อมูลที่สำนักงาน กสทช. มีอยู่แล้วก็สามารถที่จะดึงเอามาตรฐานทางเทคนิคที่เกี่ยวข้องมาเทียบเพื่อประเมินความสอดคล้องได้ ในการระบุคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณ เช่น มอดูเลชัน จำเป็นต้องมีข้อมูลซึ่งเป็นตัวแทนของเครื่องส่งหรือระบบการสื่อสารไร้สายนั้น ๆ (Wireless Signal Representation) เป็นข้อมูลอ้างอิง โดย [10] พบว่าข้อมูลซึ่งสามารถใช้เป็นตัวแทนนี้ได้มีหลายรูปแบบ เช่น Temporal IQ Data, Amplitude/Phase Representation หรือ Frequency Domain Representation (เช่น Fast Fourier Transform ของสัญญาณ เป็นต้น) โดยคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณอาจต้องการข้อมูลตัวแทน (ของเครื่องส่งหรือระบบการสื่อสารไร้สาย) สำหรับอ้างอิงที่ต่างกัน เช่น สำหรับการระบุมอดูเลชัน การระบุด้วย Temporal IQ Data หรือ Amplitude/Phase Representation จะแม่นยำกว่าการระบุด้วย Frequency Domain Representation เป็นต้น

นอกจากนั้น ลักษณะเฉพาะของการส่งสัญญาณหรือของเครื่องส่งแต่ละชนิดก็สามารถนำมาใช้ร่วมในการระบุคุณลักษณะของสัญญาณที่เฝ้าฟังโดยปัญญาประดิษฐ์ได้ เช่น [16] สามารถแยกแยะสัญญาณเรดาร์จากสัญญาณ LTE และ WLAN ที่อยู่ในย่านเดียวกันได้ [17] สามารถแยกแยะการสื่อสารตามมาตรฐานต่าง ๆ ใน Unlicensed Band เช่น IEEE 802.11b/g/n 802.15.4, 802.15.1 และ Bluetooth Low Energy ได้โดยดูจาก Cleared Channel Assessment ของแต่ละมาตรฐานได้ และ [18] สามารถระบุการส่งสัญญาณ LTE ที่ผิดปกติและสถานีฐาน LTE ที่การตั้งค่า (Configuration) ไม่ถูกต้องโดยใช้รูปแบบการใช้คลื่นความถี่ของการส่งสัญญาณ LTE ปกติในเชิงเวลาและความถี่เป็นข้อมูลอ้างอิงได้

5.4.3 ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่ (สถานการณ์จำลองที่ 3)

ด้วยหลักการเดียวกันกับการตรวจสอบความสอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ การประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดนและการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่ จะเป็นการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันพื้นฐานของการบริหารจัดการคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ 2 บริการการวิเคราะห์ (Analytics Services) ได้แก่ การเฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่จะคอยเฝ้าฟังคลื่นความถี่และระบุคุณลักษณะต่าง ๆ ของสัญญาณที่เฝ้าฟังเช่น มอดูเลชัน ตำแหน่งของเครื่องส่ง กำลังส่ง รวมทั้งระบุตัวตนของเครื่องส่ง เป็นต้น เมื่อระบุตัวตนของเครื่องส่งแล้ว โดยการทำงานร่วมกับฐานข้อมูลความถี่ตามบริเวณชายแดนที่สำนักงาน กสทช. มีอยู่แล้วก็สามารถที่จะดึงเอามาตรฐานทางเทคนิคและข้อตกลงการประสานงานความถี่ที่เกี่ยวข้องมาเทียบเพื่อประเมินความสอดคล้องได้

นอกจากนั้นในส่วนของการประสานงานความถี่ชายแดนจะจำเป็นต้องใช้อีกหนึ่งฟังก์ชันของการบริหารจัดการคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ซึ่งได้แก่ การประเมินการรบกวนในพื้นที่ชายแดนที่สนใจ

5.4.4 การประเมินความต้องการทางเทคนิคเบื้องต้น (High-Level Technical Requirements) ของสถานการณ์จำลองที่เสนอ ตามกรอบแนวคิดของการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่

จากข้อมูลเบื้องต้นของสถานการณ์จำลองที่เสนอในหัวข้อที่ 5.4.1 ถึง 5.4.3 สามารถนำมาสรุปความต้องการทางเทคนิคเบื้องต้นได้ตามตารางที่ 5-3 ซึ่งพบว่าทั้ง 3 สถานการณ์จำลองจำเป็นต้องใช้

- Input Layer ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานในการตรวจวัดสัญญาณคลื่นความถี่ต่าง ๆ (Sensing Infrastructure)
- Processing Layer และ
- ฐานข้อมูลกลาง (Data Lake)

นอกจากนั้น แต่ละสถานการณ์จำลองจะมีการเรียกใช้บริการการวิเคราะห์ (Analytics Services) จาก Analytics Layer ที่แตกต่างกันซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบปัญหาเจาะจง (Specific Problem) ที่แตกต่างกันไปในแต่ละสถานการณ์ โดยอาจต้องมีการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลอื่นซึ่งได้แก่ ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคของสำนักงาน กสทช. และฐานข้อมูลคลื่นความถี่ชายแดน ด้วย

ตารางที่ 5-3 ความต้องการทางเทคนิคเบื้องต้น (High-Level Technical Requirements) ของสถานการณ์จำลองที่เสนอ ตามกรอบแนวคิดของการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่

สถานการณ์จำลอง	กรอบแนวคิดของการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ (ดู หัวข้อ 3)				
	Input Layer	Processing Layer	Analytics Layer	ฐานข้อมูลกลาง	การเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลอื่น
1	√	√	1) Spectrum Monitoring 2) Detection and Classification 3) Anomaly Identification 4) Identification of Interference Source	√	- ฐานข้อมูลของสำนักงาน กสทช.
2	√	√	1) Spectrum Monitoring 2) Detection and Classification	√	- ฐานข้อมูลของสำนักงาน กสทช. - ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคของสำนักงาน กสทช.
3	√	√	1) Spectrum Monitoring 2) Detection and Classification 3) Interference Evaluation 4) Propagation Modeling	√	- ฐานข้อมูลของสำนักงาน กสทช. - ฐานข้อมูลคลื่นความถี่ชายแดน

หมายเหตุ: **สถานการณ์จำลองที่ 1** - ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวนและวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต

สถานการณ์จำลองที่ 2 - ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์

สถานการณ์จำลองที่ 3 - ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่

5.5 การประเมินความพร้อมของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อบริหารคลื่นความถี่ในสถานการณ์จำลองที่เสนอ

หัวข้อนี้จะประเมินความพร้อมทางเทคโนโลยีของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อบริหารคลื่นความถี่ในสถานการณ์จำลองที่เสนอทั้ง 3 สถานการณ์ ในการประเมินความพร้อมทางเทคโนโลยีจะอ้างอิงกับ กรอบการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) [48, 49] โดยจะพิจารณาแต่ละส่วนของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ที่เสนอโดยแยกตามกรอบแนวคิด (Conceptual Framework) ที่วางไว้ในหัวข้อที่ 5.3 ซึ่งแบ่งการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการบริหารคลื่นความถี่ออกเป็น 5 ส่วนหลักได้แก่ 1) Input Layer 2) Processing Layer 3) Analytics Layer 4) ฐานข้อมูลกลาง (Data Lake) และ 5) การเชื่อมต่อกับ

ฐานข้อมูลภายนอก (Database Connector) จากนั้นจึงวิเคราะห์ข้อดีและข้อด้อย (หรือความท้าทาย) ของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับสถานการณ์จำลองที่เสนอ

จากนี้ หัวข้อที่ 5.5.1 จะนำเสนอที่มาและหลักการของกรอบการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (TRL) หัวข้อที่ 5.5.2 จะสรุปผลการประเมินความพร้อมของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อบริหารคลื่นความถี่ใน 3 สถานการณ์จำลองที่เสนอ รวมถึงความพร้อมในการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลภายนอกเช่น ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคของ และฐานข้อมูลความถี่ชายแดนของสำนักงาน กสทช. และข้อดี-ข้อด้อย (หรือความท้าทาย) ของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับสถานการณ์จำลองที่เสนอ ตามลำดับ

5.5.1 กรอบการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level (TRL) Framework)

กรอบการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) ถูกพัฒนาโดยองค์การนาซ่า (National Aeronautics and Space Administration: NASA) ของสหรัฐอเมริกา TRL ช่วยให้สามารถประเมินความพร้อมที่เทคโนโลยีต่าง ๆ จะถูกนำไปใช้งานได้จริงได้บนฐานการประเมินเดียวกัน โดยมีการให้คะแนนระดับความพร้อมจาก 1 ถึง 9 โดยที่ระดับ 9 หมายถึงเทคโนโลยีมีความพร้อมสูงสุดที่จะถูกนำไปใช้งาน [48] ในปี พ.ศ. 2553 คณะกรรมการสหภาพยุโรป (European Commission) ออกข้อแนะนำให้โครงการวิจัยและนวัตกรรมที่ได้รับทุนจากสหภาพยุโรปนำเอากรอบนี้ไปประเมินระดับความพร้อมด้านเทคโนโลยีของโครงการโดยแบ่งเป็น 9 ระดับตามตารางที่ 5-4 [49]

ตารางที่ 5-4 ระดับความพร้อมของเทคโนโลยีตาม Technology Readiness Level [49]

TRL 1 – basic principles observed	TRL 6 – technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
TRL 2 – technology concept formulated	TRL 7 – system prototype demonstration in operational environment
TRL 3 – experimental proof of concept	TRL 8 – system complete and qualified
TRL 4 – technology validated in lab	TRL 9 – actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)
TRL 5 – technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)	

5.5.2 ความพร้อมของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อบริหารคลื่นความถี่ และข้อดี-ข้อด้อย (หรือความท้าทาย) ของสถานการณ์จำลองที่เสนอ

จากตารางที่ 5-3 สถานการณ์จำลองทั้ง 3 สถานการณ์มีการใช้ 1) Input Layer ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานในการตรวจวัดสัญญาณคลื่นความถี่ต่าง ๆ (Sensing Infrastructure) 2) Processing Layer และ 3) ฐานข้อมูลกลาง (Data Lake) เป็นพื้นฐาน

ในส่วนของ โครงสร้างพื้นฐานในการตรวจวัดสัญญาณคลื่นความถี่ต่าง ๆ (Input Layer) และ Processing Layer นั้น ในปัจจุบันเซ็นเซอร์ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจวัดสภาพแวดล้อมอย่างแพร่หลายมาเป็นเวลานานในงานด้านต่าง ๆ นอกเหนือจากการบริหารคลื่นความถี่ ในส่วนของคลื่นความถี่ได้มีความพยายามที่จะนำเอาเซ็นเซอร์ประเภทต่าง ๆ เช่น เซ็นเซอร์ขนาดเล็ก เซ็นเซอร์ราคาถูก เซ็นเซอร์ที่ปรับคุณสมบัติได้ด้วยซอฟแวร์ (Software-Defined) มาร่วมกันเก็บข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ โครงการลักษณะนี้มีการทดลองในสภาพใช้งานจริงแล้ว ยกตัวอย่างเช่นโครงการ ElectroSense ซึ่งเปิดโอกาสให้อาสาสมัครนำเซ็นเซอร์ของตนเองมาเข้าร่วมโครงการ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเฝ้าตรวจวัดและวิเคราะห์คลื่นความถี่ ในพื้นที่ที่มีคนอยู่อาศัยทั่วโลก และเผยแพร่ข้อมูลการใช้คลื่นความถี่แบบเวลาจริง โครงข่ายความร่วมมือในการเฝ้าสังเกตุการณ์คลื่นความถี่ (Collaborative Spectrum Monitoring Network) ถูกออกแบบและสร้างขึ้น ชุดข้อมูลที่ได้มีลักษณะเป็น Big Data ของการใช้คลื่นความถี่ซึ่งเปิดให้สาธารณะเข้ามาดึงไปใช้ประโยชน์ได้ [24] ในขณะเดียวกันรัฐบาลสหรัฐอเมริกานำโดย NTIA (National Telecommunication and Information Administration) ซึ่งเป็นหน่วยงานกำกับดูแลคลื่นความถี่ที่ถูกใช้โดยรัฐและ NIST (National Institute of Standards and Technology) ซึ่งเป็นหน่วยงานกำหนดมาตรฐานแห่งชาติ ได้ร่วมกันทำโครงการนำร่อง (Pilot Project) ที่พัฒนาสถาปัตยกรรมของฐานข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ที่กระจายอยู่ตามสถานที่และองค์กรต่าง ๆ (Measured Spectrum Occupancy Database: MSOD) ซึ่งเปิดโอกาสให้ภาคเอกชน สถาบันการศึกษา และภาครัฐ ตั้งฐานข้อมูล MSOD และแชร์ข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันในโครงการ [35]

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเซ็นเซอร์จะเป็นเทคโนโลยีที่ถูกใช้งานจริงอย่างแพร่หลาย และมีการออกแบบและเริ่มทดลองใช้งานโครงข่ายของข้อมูลที่สนับสนุนการตรวจวัดการใช้คลื่นความถี่จากหลายพื้นที่พร้อมกัน ในแง่ของการจัดการข้อมูล เซ็นเซอร์เหล่านี้ยังมีกำลังในการประมวลผล (Computational Power) ย่านความถี่ (Frequency Range) และแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) ของการตรวจวัดสัญญาณที่จำกัด นอกจากนั้นการส่งข้อมูลที่วัดได้กลับมายังมีความท้าทายในแง่ของความสามารถในการขยาย (Scalability) ซึ่งยังคงเป็นประเด็นที่กำลังมีการศึกษาวิจัยอยู่ทั้งสิ้น [50] ดังนั้นเมื่อพิจารณาระดับความพร้อมของเทคโนโลยี TRL (ตาม หัวข้อที่ 5.5.1) ในส่วนของ Input & Processing Layers นี้ควรจะอยู่ที่ระดับ TRL 3 ถึง 4

ในส่วนของฐานข้อมูลกลางและการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลภายนอก พบว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้งานจริงอย่างแพร่หลายอยู่แล้วเช่น MySQL, PostgreSQL หรือ Hadoop เป็นต้น (ดู หัวข้อที่ 5.3) ดังนั้นใน 2 ส่วนนี้ ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี TRL ควรจะอยู่ที่ระดับ TRL 8 ถึง 9

ในส่วนของชั้น Analytics Layer สถานการณ์จำลองที่เสนอทั้ง 3 สถานการณ์ มีความต้องการใช้บริการการวิเคราะห์ (Analytics Services) ที่แตกต่างกัน (ดังแสดงในตารางที่ 5-3) อย่างไรก็ดีตามความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในหัวข้อที่ 5.2 และสถานะของงานวิจัยในปัจจุบัน [2][51] การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ยังอยู่ในระดับของงานวิจัยที่มีการทดสอบความถูกต้องในห้องปฏิบัติการหรือสาธิตในสภาพแวดล้อมจริงนอกห้องปฏิบัติการบ้างแล้ว และยังคงมีประเด็นของการวิจัย (Research Issues) สำคัญที่ยังต้องค้นหาคำตอบอยู่เช่น "จากความจริงที่ว่าสมรรถนะ (Performance) ของปัญญาประดิษฐ์ไม่ได้สมบูรณ์แบบ เราจะใช้ตัววัดอะไรเพื่อ

ประกอบการตัดสินใจรับเอาปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้งาน (Metrics for Acceptability)?" เป็นต้น ดังนั้นในส่วนนี้ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี TRL ควรจะอยู่ที่ระดับ TRL 4 ถึง 6

ตารางที่ 5-5 สรุปผลการประเมินความพร้อมของการใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อบริหารคลื่นความถี่ในสถานการณ์จำลองที่เสนอทั้ง 3 สถานการณ์

ตารางที่ 5-5 สรุปความพร้อมของการใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อบริหารคลื่นความถี่ในสถานการณ์จำลองที่เสนอ

<table>
<tr><th rowspan="2">สถานการณ์จำลอง</th><th colspan="5">ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี TRL ของการนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ (1 = พร้อมน้อยสุด ถึง 9 = พร้อมที่สุด)</th></tr>
<tr><th colspan="2">Input Layer / Processing Layer</th><th>Analytics Layer</th><th>ฐานข้อมูลกลาง</th><th>การเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลอื่น</th></tr>
<tr><td>1</td><td colspan="2" rowspan="3">TRL 3 - 4</td><td rowspan="3">TRL 4 - 6</td><td rowspan="3">TRL 8 - 9</td><td>TRL 8 – 9
(ฐานข้อมูลของสำนักงาน กสทช.)</td></tr>
<tr><td>2</td><td>TRL 8 – 9
(ฐานข้อมูลของสำนักงาน กสทช. และ ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคของสำนักงาน กสทช.)</td></tr>
<tr><td>3</td><td>TRL 8 – 9
(ฐานข้อมูลของสำนักงาน กสทช. และ ฐานข้อมูลความถี่ชายแดน)</td></tr>
</table>

หมายเหตุ: **สถานการณ์จำลองที่ 1** - ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวนและวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต

สถานการณ์จำลองที่ 2 - ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์

สถานการณ์จำลองที่ 3 - ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่

ตารางที่ 5-6 สรุปข้อดีและข้อด้อย (หรือความท้าทาย) ของสถานการณ์จำลองที่เสนอสำหรับประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการบริหารคลื่นความถี่

ตารางที่ 5-6 ข้อดีและข้อด้อย (หรือความท้าทาย) ของสถานการณ์จำลองที่เสนอสำหรับประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการบริหารคลื่นความถี่

สถานการณ์จำลอง	ข้อดี	ข้อด้อย (ความท้าทาย)
1	1) ทำให้เกิดการเก็บข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ที่ครอบคลุมทั้งในมิติของย่านความถี่และเวลาเกิดเป็นฐานข้อมูลสำคัญทั้งในแง่ของการบริหารคลื่นความถี่ และการพัฒนาการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการบริหารคลื่นความถี่ 2) ช่วยให้การบริการคลื่นความถี่มีสมรรถนะสูงขึ้นรวดเร็ว และมีความยืดหยุ่นมากขึ้น 3) ความถี่สามารถถูกใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น 4) เกิดชุดข้อมูลมาตรฐานสำหรับฝึก (Standardized Training Datasets) ที่จะเป็นตัวแทนข้อมูลจริง (Real-Life Data) ชุดข้อมูลที่มีขนาดใหญ่มาก ๆ ที่เก็บมาอย่างต่อเนื่องยาวนาน ซึ่งจำเป็นต่อการพัฒนาการใช้ปัญญาประดิษฐ์ 5) เป็นรากฐานสำหรับการพัฒนาไปสู่ การแชร์คลื่นความถี่แบบพลวัต (Dynamic Spectrum Sharing) ในอนาคต	อาจมีการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลนอกโครงการ แต่ยังอยู่ภายในสำนักงาน กสทช. ความซับซ้อนในการประสานอาจสูงขึ้น
2		มีการเชื่อมต่อกับฐานข้อมูลนอกโครงการ แต่ยังอยู่ภายในสำนักงาน กสทช. ความซับซ้อนในการประสานอาจสูงขึ้น
3		อาจต้องมีการเชื่อมต่อข้อมูลกับหน่วยงานนอกสำนักงาน กสทช. ความซับซ้อนในการประสานงานสูงกว่าสถานการณ์จำลองที่ 1 และ 2

หมายเหตุ: **สถานการณ์จำลองที่ 1** - ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต

สถานการณ์จำลองที่ 2 - ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์

สถานการณ์จำลองที่ 3 - ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่

5.6 บทสรุป

การศึกษาในบทนี้ประเมิน ศักยภาพ ความเป็นไปได้ และความพร้อมของการนำเอาปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม และประเมินเฉพาะเจาะจงลงไปกับสถานการณ์จำลอง (Scenario) ที่ประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการบริหารคลื่นความถี่ในบริบทของประเทศไทย โดยประมวลข้อมูลจาก ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ สถานะและข้อจำกัดของงานวิจัยในปัจจุบันที่เกี่ยวข้อง รวมถึงความต้องการใช้งานและข้อจำกัดในการใช้เครื่องมือและข้อมูลต่าง ๆ เพื่อบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช.

สถานการณ์จำลองของการนำเอาปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ที่เสนอประกอบด้วย 3 สถานการณ์ ได้แก่

1) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต
2) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์
3) ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่

ในภาพรวมผู้เชี่ยวชาญ (ทั้งในและต่างประเทศ) ในด้านต่าง ๆ เช่น ปัญญาประดิษฐ์ แมชชีนเลิร์นนิ่ง โครงข่าย (Networking) และการบริหารคลื่นความถี่ จากทั้ง ภาครัฐ สถาบันการศึกษา และภาคเอกชน มีความเห็นตรงกันว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ และจะทำให้การบริหารคลื่นความถี่มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น รวดเร็วและมีความยืดหยุ่นคล่องตัวมากขึ้น

โดยเมื่อประเมินความพร้อมทางเทคโนโลยีพบว่า การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการบริหารคลื่นความถี่ประกอบด้วยหลายส่วนและแต่ละส่วนมีระดับความพร้อมของเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน ส่วนที่พร้อมที่สุดจะเป็นส่วนของกรอบการบริหารจัดการฐานข้อมูลซึ่งสามารถใช้เทคโนโลยีการจัดการฐานข้อมูลที่มีการใช้งานแพร่หลายอยู่แล้วได้ (ความพร้อมของเทคโนโลยี Technology Readiness Level (TRL) อยู่ที่ระดับสูง: 8 ถึง 9) ในส่วนของการวัดสัญญาณ (Sensing) จัดการข้อมูล (Data Processing) และการวิเคราะห์โดยปัญญาประดิษฐ์ (Analytics) พบว่ายังอยู่ในระดับของงานวิจัย ความพร้อมของเทคโนโลยีจึงอยู่ในระดับกลาง (ความพร้อมของเทคโนโลยี TRL อยู่ที่ระดับ 3 ถึง 6)

สถานการณ์จำลองที่เสนอทั้ง 3 สถานการณ์ สอดคล้อง อยู่ในแนวทางเดียวกันกับความเห็นของผู้เชี่ยวชาญทั้งในด้านของ ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งาน เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ รวมถึงการดำเนินการหลักที่จำเป็นสำหรับพัฒนาการบริหารคลื่นความถี่โดยประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์

ทั้งนี้ถึงแม้ว่าปัญญาประดิษฐ์จะมีการพัฒนาไปมาก ในการนำมาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ ยังมีประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการพิจารณาและดำเนินการ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- เราจะสามารถใช้ปัญญาประดิษฐ์ได้อย่างปลอดภัยและวางใจ ได้อย่างไร?
- จากความจริงที่ว่าสมรรถนะ (Performance) ของปัญญาประดิษฐ์ไม่ได้สมบูรณ์แบบ อะไรคือตัววัดที่เราจะใช้ในการตัดสินใจรับเอาปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้งาน (Metrics for Acceptability)?
- การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ควรเริ่มต้นด้วย การกำหนดปัญหาที่ต้องการใช้ปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยแก้ไขอย่างละเอียดถี่ถ้วน
- ควรสร้างความไว้วางใจด้วยการทดสอบความถูกต้อง (Validation) ของแนวทางแก้ปัญหาด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI Solutions) ที่ได้โดยใช้พื้นที่ทดสอบที่ถูกปูพรมออกไปในหลายพื้นที่ (Large-Scale Wireless Testing Regions)
- ควรจัดหาชุดข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการพิสูจน์และทดสอบความถูกต้อง (Test and Validate) ของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นในสถานการณ์ต่าง ๆ

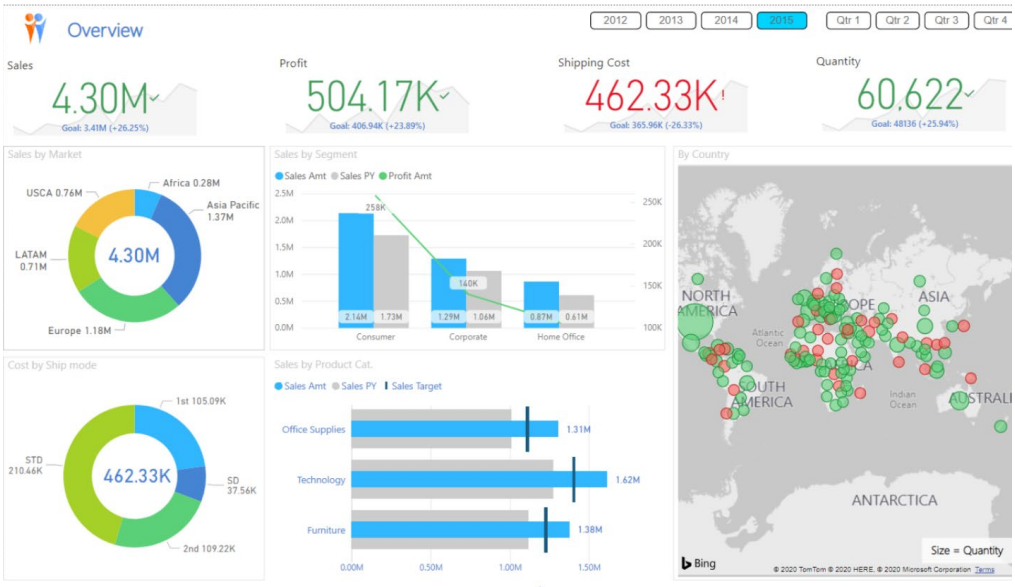
บทที่ 6
ฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติของเว็บแอป

การศึกษาในบทนี้เป็นผลการศึกษาเกี่ยวกับแดชบอร์ด (Dashboard) และการให้บริการเกี่ยวกับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ผ่านเว็บ (Web) ขององค์กรกำกับดูแลที่เกี่ยวข้องในประเทศต่าง ๆ รวมถึงเครื่องมือและกรอบการทำงาน (Tools and Framework) เพื่อจัดทำและพัฒนา Software ที่เป็น Web Application ต้นแบบ (Prototype) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่

6.1 เบื้องต้นเกี่ยวกับแดชบอร์ด (Dashboard)

6.1.1 แดชบอร์ดคืออะไร

แดชบอร์ดคือการนำเสนอข้อมูลออกมาเป็นภาพเพื่อติดตาม วิเคราะห์ และแสดงผล ตัวชี้วัด (KPIs) มาตรวัด (Metrics) ชุดข้อมูลที่สำคัญ (Critical Data Points) แดชบอร์ดช่วยให้ผู้ใช้ทั้งที่มีความรู้ด้านเทคนิคและที่ไม่มีความรู้ด้านเทคนิคสามารถที่จะเข้าใจและใช้ประโยชน์จากการใช้เทคโนโลยีมาประมวลผลข้อมูลเชิงธุรกิจต่าง ๆ (Business Intelligence) เพื่อช่วยในการประกอบการตัดสินใจได้ดีขึ้น ผู้ใช้จะสามารถเข้าไปร่วมในกระบวนการวิเคราะห์โดยประมวลข้อมูลและภาพของแนวโน้มหรือสิ่งที่เกิดขึ้น (Occurrences) ต่าง ๆ และสามารถเข้าใจตัวชี้วัดต่าง ๆ ได้ในทันที



รูปที่ 6-1 ตัวอย่างของแดชบอร์ด (Dashboard)

แดชบอร์ดนำเสนอข้อมูลออกมาเป็นภาพในรูปแบบของแผนภูมิ (Charts) ตาราง มาตรวัด (Gauges) ผู้ใช้จะสามารถใช้ข้อมูลที่นำเสนอเป็นภาพเหล่านี้ในการติดตามสถานะของการดำเนินการเทียบกับเป้าหมาย และเกณฑ์เทียบต่าง ๆ (Benchmarks) ของอุตสาหกรรมนั้น ๆ

6.1.2 แดชบอร์ดประเภทต่าง ๆ ที่พบได้ทั่วไป

ด้านการตลาด : ใช้แดชบอร์ดสำหรับติดตามสมรรถนะ (Performance) ของโปรแกรมการตลาดดิจิทัลซึ่งรวมถึงการสร้างการมีส่วนร่วมทางโซเชียลมีเดีย (Social Media Engagement) การแสดงผลการค้นหาข้อมูล (Search Engine Optimization, SOE) ทราฟฟิกของเว็บ (Web Traffic) และอัตราการเปิดอีเมล์ หรือใช้แดชบอร์ดสำหรับเข้าใจว่ากรวยทางการตลาด (Marketing Funnel) ที่ใช้มีสมรรถนะอย่างไรโดยการติดตามลูกค้าเป้าหมาย (Leads) ที่เกิดขึ้นตามช่องทางต่าง ๆ

ด้านการขาย : ใช้แดชบอร์ดสำหรับติดตามสมรรถนะของพนักงานขายแต่ละคน หรือติดตามการเสนอขายที่สำเร็จและไม่สำเร็จ รวมถึง Pipeline Conversion Rate การนัดสาธิตสินค้า และอื่น ๆ เพื่อช่วยให้ทีมขายเห็นว่าสมรรถนะของการทำงานเป็นอย่างไรและควรให้ความสำคัญที่จุดไหนเพื่อให้ทำได้ตามเป้าของบริษัท

ด้านวิศวกรรม : วิศวกรซอฟต์แวร์ใช้แดชบอร์ดเพื่อติดตามการพัฒนาผลิตภัณฑ์ การใช้ และสมรรถนะ แดชบอร์ดช่วยให้การพูดคุยสื่อสารเกี่ยวกับมาตรวัดต่าง ๆ ง่ายขึ้นรวมถึงช่วยให้การค้นพบประเด็นปัญหาต่าง ๆ ได้รวดเร็วก่อนที่ปัญหาเหล่านั้นจะขยายตัวกลายเป็นปัญหาใหญ่

ด้านการบริหาร : ผู้มีหน้าที่ตัดสินใจจะใช้แดชบอร์ดเพื่อติดตามเป้าหมายของบริษัท ระบุแนวโน้มต่าง ๆ ในระยะเริ่มต้น แจ้งเกี่ยวกับกลยุทธ์ และทำความเข้าใจว่าการดำเนินการต่าง ๆ ให้ผลที่คุ้มค่าหรือไม่

6.2 เมนู (Menu) สำหรับการลงทะเบียนความถี่ที่ให้บริการผ่านเว็บ (Web Services) ของประเทศต่าง ๆ

6.2.1 เว็บ FCC ID (สหรัฐอเมริกา)

FCC ID เป็นตัวระบุเฉพาะ (Unique Identifier) สำหรับอุปกรณ์แต่ละตัวที่ลงทะเบียนกับ FCC (Federal Communications Commission) ของสหรัฐอเมริกา เพื่อให้สามารถขายอุปกรณ์สื่อสารไร้สายได้อย่างถูกกฎหมายในสหรัฐฯ ผู้ผลิตจะต้อง

- ส่งอุปกรณ์ไปทดสอบยังศูนย์ทดสอบอิสระ (Independent Lab) เพื่อประเมินว่าอุปกรณ์นั้นสอดคล้องกับมาตรฐานที่ FCC กำหนด
- ส่งเอกสารผลการทดสอบให้กับ FCC
- ส่งคู่มือ เอกสาร และรูปภาพที่เกี่ยวกับอุปกรณ์
- ระบุ FCC ID ไว้บนอุปกรณ์จะโดยวิธีดิจิทัลหรือเป็นฉลากติดแบบปกติก็ได้ (เมื่อผ่านการลงทะเบียนแล้ว)

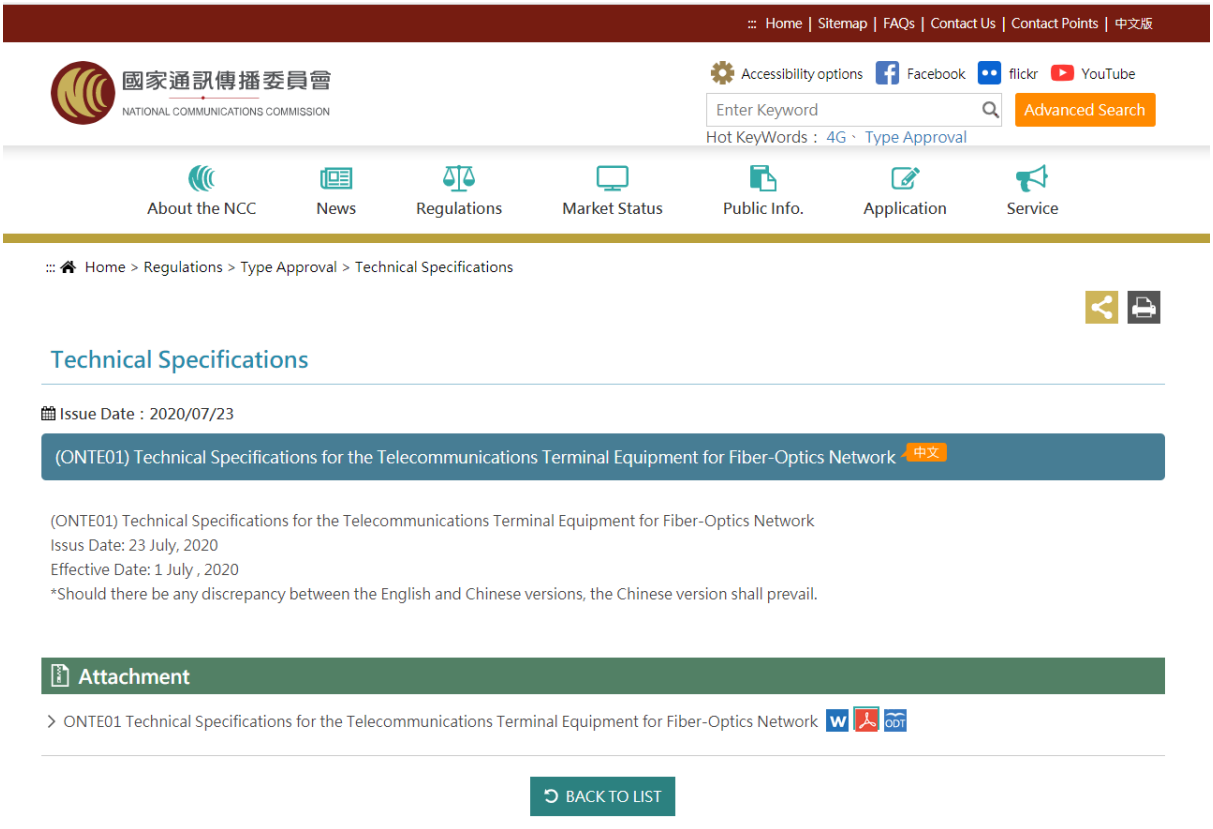
FCC ได้อำนาจ (Authority) นี้มาจากมาตราที่ 47 ของ Code of Federal Regulations (47 CFR) อุปกรณ์ทั้งหมดที่ส่งสัญญาณวิทยุที่วางขายได้ในสหรัฐฯ จะต้องมี FCC ID ซึ่งสามารถที่จะเชื่อมไปถึง ความถี่ใช้งาน (รวมถึงกำลังส่ง) รูปภาพของอุปกรณ์ คู่มือ และรายงาน Specific Absorption Rate ของการแพร่สัญญาณ

6.2.2 Industry Canada IC ID Search (แคนาดา)

เป็นฐานข้อมูลสำหรับค้นหาและเก็บข้อมูลการขึ้นทะเบียนในประเทศแคนาดา ประกอบด้วย รายการอุปกรณ์วิทยุ (Radio Equipment List) และรายการอุปกรณ์ปลายทาง (Terminal Equipment List) เท่านั้น

6.2.3 The National Communications Commission (NCC) (ไต้หวัน)

อยู่ภายใต้ National Communications Commission (NCC) ของประเทศไต้หวัน NCC ก่อตั้งเมื่อ 22 กุมภาพันธ์ 2006 ปัจจุบันกำกับดูแลทั้งกิจการโทรคมนาคม กิจการกระจายเสียง และโครงข่ายข้อมูลสารสนเทศ ซึ่งจำเป็นต้องมีข้อมูลเชิงลึกเพื่อใช้ประกอบกลยุทธในการกำกับดูแลรวมถึงการจัดการที่โปร่งใสมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้น NCC ยังต้องประสานงานกับฝ่ายบริหาร นิติบัญญัติ และภาคเอกชนเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อการพัฒนาที่รวดเร็ว รวมถึงความคาดหวัง และความเปลี่ยนแปลงของสังคม



รูปที่ 6-2 เว็บของ National Communications Commission (NCC) ไต้หวัน

6.2.4 Info-Communications Media Development Authority (สิงคโปร์)

ผู้จัดหาอุปกรณ์ (Suppliers) ลงทะเบียนอุปกรณ์ผ่าน Equipment Registration Online ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแอปพลิเคชัน Telecoms Licensing System (TLS) : https://eservice.imda.gov.sg/tls ผู้จัดหาจะต้องเลือกกลุ่มของอุปกรณ์ที่จะลงทะเบียนจากรายการต่อไปนี้

- การลงทะเบียนอุปกรณ์สำหรับอุปกรณ์ประเภท Complex Multi-Line หรืออุปกรณ์ระยะส่งสั้น/กำลังส่งต่ำ (Short Range/Low Power Devices, SRD/LPD)
- การลงทะเบียนอุปกรณ์แบบยืนยันด้วยตนเอง (Self-Declaration) สำหรับการลงทะเบียนอุปกรณ์ GSM, 3G โทรศัพท์มือถือแบบ GMPCS, ADSL และ Cable Modems
- การลงทะเบียนอุปกรณ์โทรคมนาคมในรายการตามตาราง B.1 และ B.2 ซึ่งอยู่ใน Guide for Registration of Telecommunication Equipment (IMDA GUIDE EQR) : www.imda.gov.sg/EquipmentRegistrationFramework

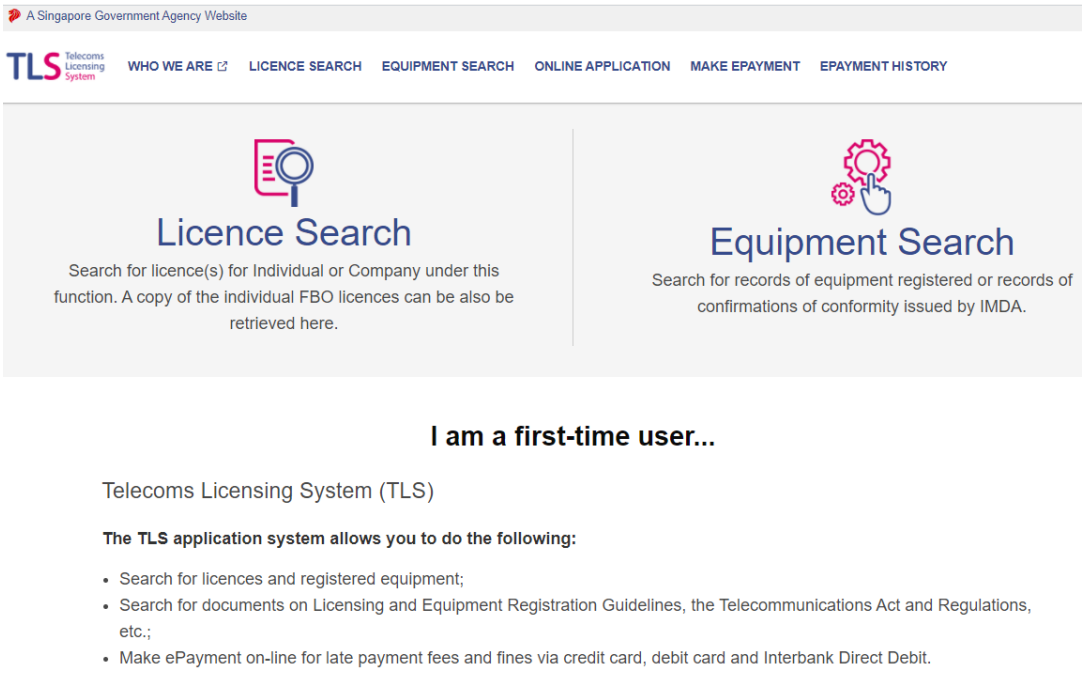
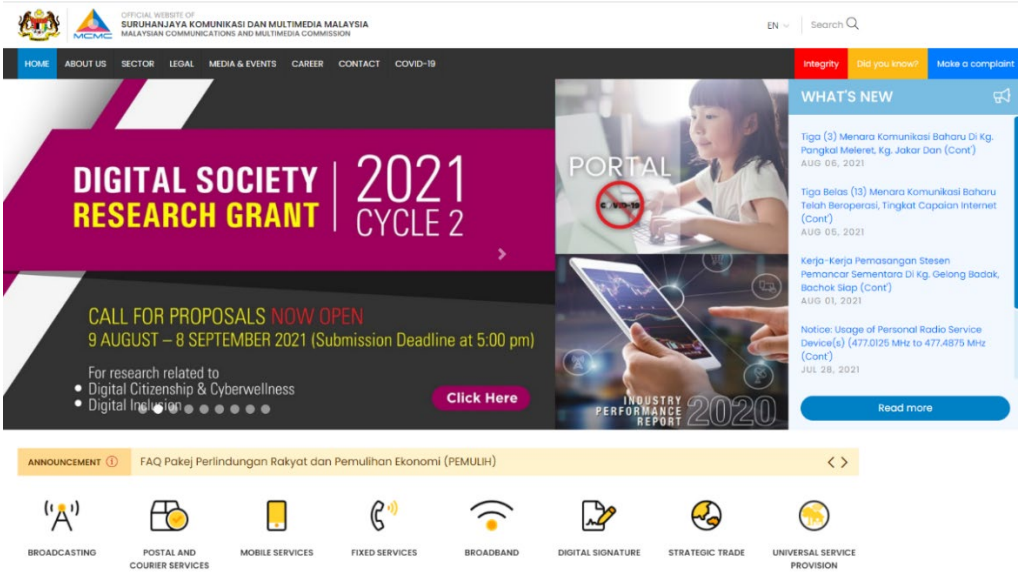


Figure 6-3 เว็บ Telecom Licensing System สิงคโปร์

6.2.5 Malaysian Communications and Multimedia Commission (MCMC) (มาเลเซีย)

บทบาทหลักของ Malaysian Communications and Multimedia Commission (MCMC) คือปฏิบัติตามและส่งเสริมนโยบายของประเทศที่เกี่ยวกับภาคการสื่อสารและมัลติมีเดีย (Communications and Multimedia Sector) ดูแลกรอบการกำกับดูแลด้านโทรคมนาคม กระจายเสียง และกิจกรรมออนไลน์ซึ่งกำลังหลอมรวมเข้าด้วยกัน รวมถึงกิจการไปรษณีย์และใบอนุญาตของ Certification Authorities ในการทำลายมือชื่อดิจิทัล (Digital Signature) ด้วย

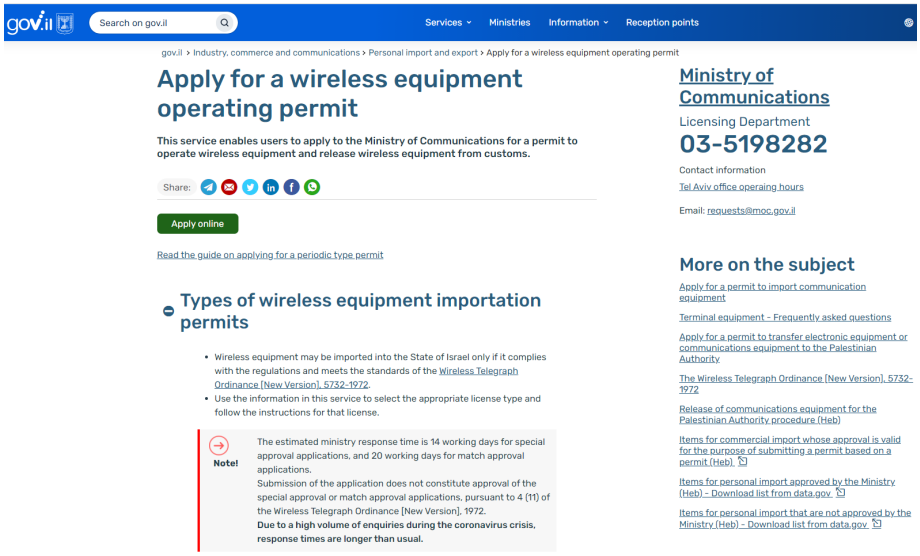


รูปที่ 6-4 เว็บของ Malaysian Communications and Multimedia Commission (MCMC) มาเลเซีย

6.2.6 อิสราเอล

กระทรวงการสื่อสาร (Ministry of Communications) ของอิสราเอลรับผิดชอบ

- การขอรับใบอนุญาตให้ใช้อุปกรณ์วิทยุ และการนำอุปกรณ์ออกจากศุลกากร
- การขอรับใบอนุญาตเพื่อให้บริการคลื่นวิทยุในกิจการทางน้ำ (Wireless Marine Services) การรับรองการเป็นผู้ใช้อุปกรณ์วิทยุในกิจการทางน้ำ (Maritime Operator Certifications) การอนุมัติอุปกรณ์และเรื่องทางเทคนิคอื่น ๆ ในกิจการทางน้ำ

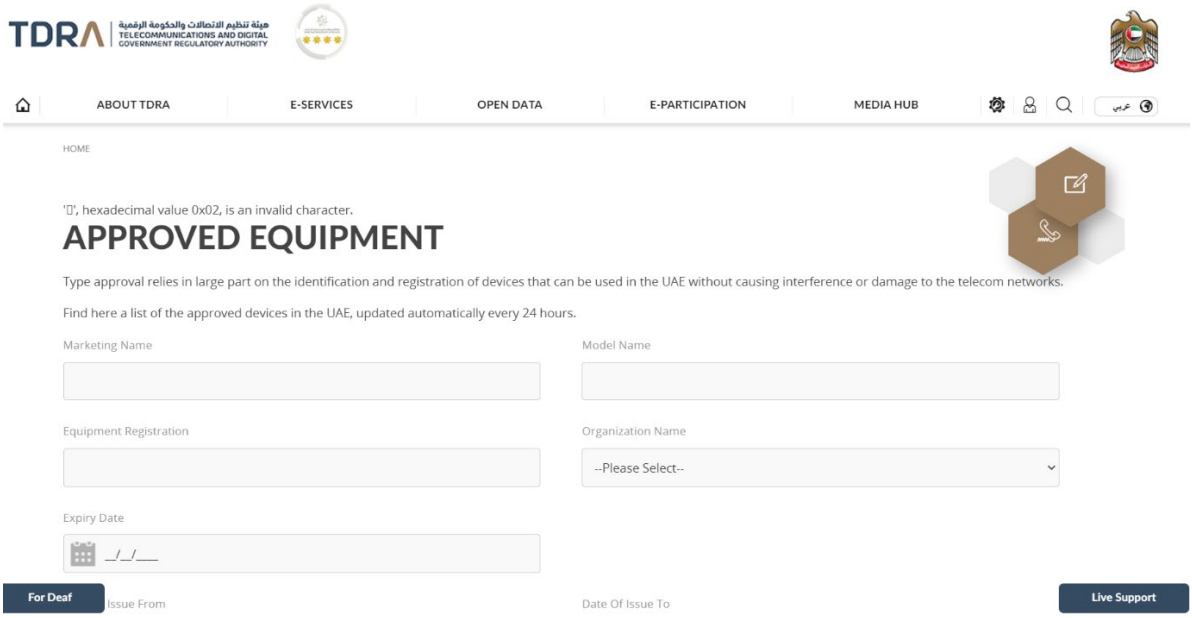


รูปที่ 6-5 เว็บของกระทรวงการสื่อสาร อิสราเอล

6.2.7 Telecommunications and Digital Government Regulatory Authority (สหรัฐอาหรับเอมิเรต)

ส่วนของโทรคมนาคมประกอบด้วย 3 แผนกหลักได้แก่ แผนกบริหารคลื่นความถี่ (Spectrum Management Affairs Department) แผนกกำกับดูแล (Regulatory Affairs Department) และแผนกพัฒนาเทคโนโลยี (Technology Development Affairs Department)

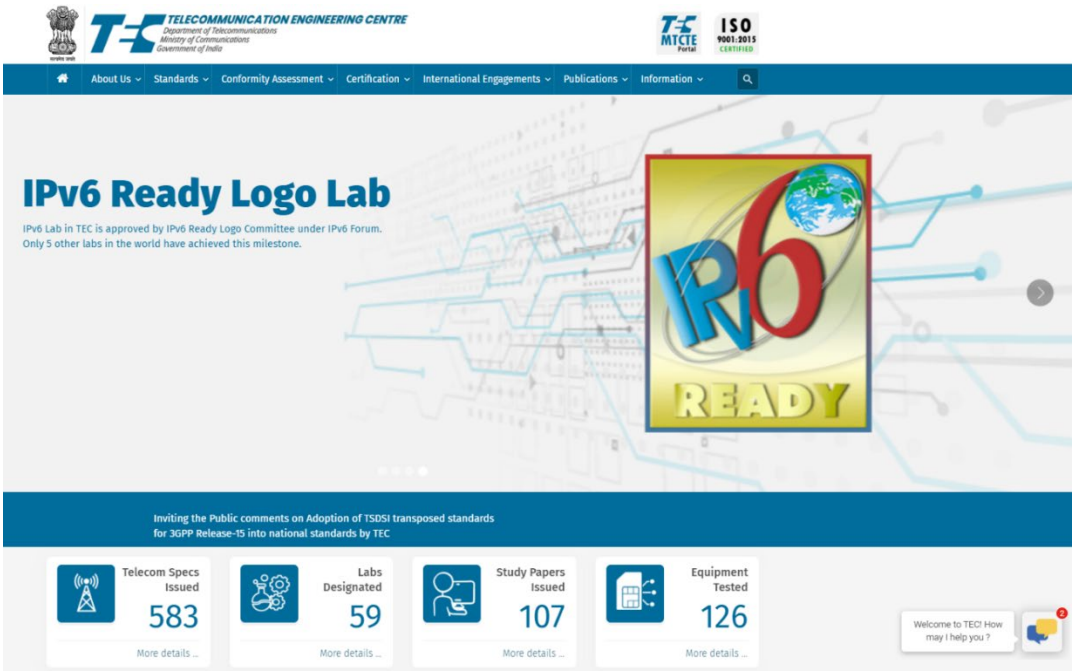
งานหลักของแผนกบริหารคลื่นความถี่คือ การเฝ้าฟัง (Monitoring) การวางแผนและจัดสรร และการบริการ แผนกกำกับดูแลมีหน้าที่พัฒนานโยบายกำกับดูแลที่เกี่ยวข้อง รวมถึงบริการจัดการเกี่ยวกับเศรษฐกิจและการแข่งขัน ผู้ใช้ และการออกใบอนุญาต แผนกพัฒนาเทคโนโลยีดูแลการให้บริการและโครงข่ายไร้สาย การอนุมัติแบบ (Type Approval) โครงสร้างพื้นฐานด้านโทรคมนาคมและมาตรฐาน รวมไปถึงเทคโนโลยีและการวางแผน



รูปที่ 6-6 เว็บของ Telecommunications and Digital Government Regulatory Authority (TDRA) สหรัฐอาหรับเอมิเรต

6.2.8 The Telecommunication Engineering Center (TEC) (อินเดีย)

Telecommunication Engineering Center (TEC) ให้บริการออกใบรับรองโดยสมัครใจ (Voluntary Certifications) ให้กับผลิตภัณฑ์/อุปกรณ์ (Product/Equipment) ที่ผ่านมาตรฐานทางเทคนิค ผลิตภัณฑ์/อุปกรณ์จะถูกทดสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายใต้เงื่อนไขที่ระบุไว้ในมาตรฐาน การทดสอบจะดำเนินการที่สถานที่ผลิตหรือในศูนย์ทดสอบ นอกจากนั้นยังสามารถยื่นผลการทดสอบต่าง ๆ เช่น EMC (Electromagnetic Compatibility) การทดสอบความปลอดภัย การทดสอบด้านสิ่งแวดล้อม จากศูนย์ทดสอบที่ได้รับการรับรอง เพื่อขอรับใบรับรองได้ด้วย โดยประเภทของการออกใบรับรองประกอบด้วย การอนุมัติแบบ การอนุมัติอินเตอร์เฟส (Interface Approval) ใบรับรองการอนุมัติ (Certificate of Approval) และการอนุมัติเทคโนโลยี



รูปที่ 6-7 เว็บของ Telecommunication Engineering Center (TEC) อินเดีย

ตารางที่ 6-1 สรุปฟังก์ชันการทำงานของเว็บสำหรับให้บริการใบอนุญาตต่าง ๆ

ลำดับที่	องค์กร	เว็บ	ประเทศ	ลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุ	ฐานข้อมูลอุปกรณ์	เมนูค้นหาอุปกรณ์	ฟังก์ชันขั้นสูง
1	FCCID	https://fccid.io/	USA	No	Yes	Yes	No
2	Industry Canada IC ID Search	https://industrycanada.co/	Canada	No	Yes	No	No
3	NCC Taiwan	https://www.ncc.gov.tw/english/gradation.aspx?site_content_sn=65	Taiwan	Yes	Yes	Yes	ประมาณการเวลาที่ต้องใช้ในกระบวนการ
4	Info-communications Media Development Authority	https://eservice.imda.gov.sg/tls/searchEquipment.action	Singapore	Yes	Yes	Yes	การค้นหาใบอนุญาต การค้นหาอุปกรณ์
5	Malaysian communications and multimedia commission	https://www.mcmc.gov.my/en/legal/registers/register-of-apparatus-assignments-search?type=lmob_cell	Malaysia	Yes	Yes	Yes	การค้นหาตามประเภทของใบอนุญาต

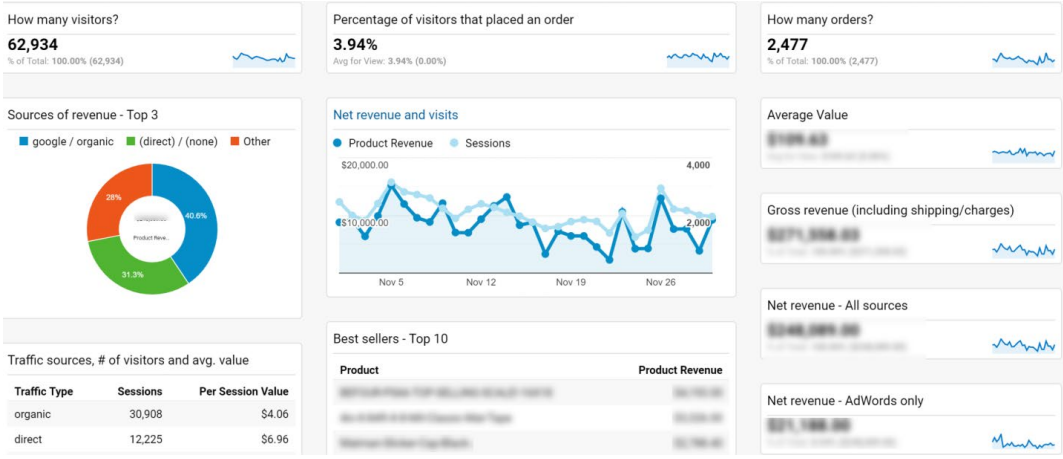
ลำดับที่	องค์กร	เว็บ	ประเทศ	ลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุ	ฐานข้อมูลอุปกรณ์	เมนูค้นหาอุปกรณ์	ฟังก์ชันขั้นสูง
6	Government services and information	https://www.gov.il/en/subjects/industry_and_trade/business_and_professionals_licensing	Israel	Yes	No	No	No
7	Telecommunications and Digital Government Regulatory Authority	https://www.tec.gov.in/voluntary-testing-certification	UAE	Yes	Yes	Yes	แดชบอร์ด (Dashboard)
8	The TEC authority, India	https://dot.gov.in/	India	Yes	No	No	แดชบอร์ด (Dashboard)

6.3 เครื่องมือและกรอบการทำงาน (Tools and Framework) ในการพัฒนาแดชบอร์ด

6.3.1 Google Analytics

ข้อดีของ Google Analytics คือ มีเวอร์ชันที่ฟรีสำหรับลูกค้ากลุ่มที่ต้องการใช้งานแบบพื้นฐาน มี Solutions และ Templates มากมายสำหรับจัดการข้อมูลที่มาจากหลากหลายรูปแบบ และสามารถเชื่อมต่อกับส่วนที่สร้างรายงาน (Report Generator) ได้

อย่างไรก็ตามข้อด้อยของ Google Analytics คือ สามารถใช้ได้กับ Google Analytics เท่านั้น สามารถโหลด (Load) ข้อมูลแบบอัตโนมัติได้เฉพาะจาก Google Ads เท่านั้น นอกจากนั้นการสุ่มข้อมูลขนาดใหญ่และการจัดการข้อมูลอาจเกิดความล่าช้าได้ถึง 48 ชั่วโมง



รูปที่ 6-8 ตัวของแดชบอร์ด (Dashboard) ของ Google Analytics

6.3.2 Google Data Studio

ข้อดีคือมีการอัพเดตปรับปรุงบ่อย ทำงานร่วมกับผลิตภัณฑ์ของ Google ได้ทั้งหมด สะดวกในการนำเสนอรายงานจาก Google Big Query และสามารถดึงข้อมูลได้จากหลายแหล่งในแดชบอร์ดเดียว

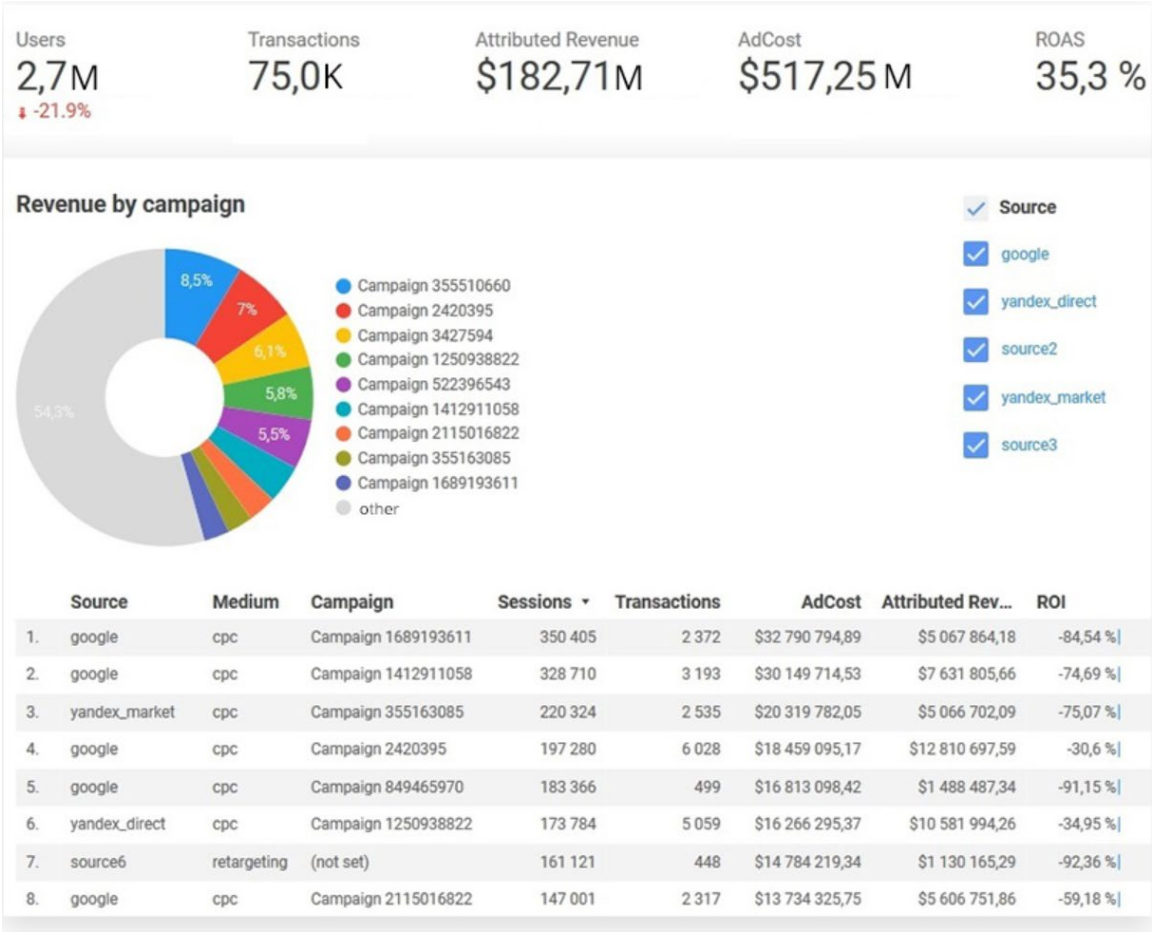
ข้อด้อยได้แก่ ไม่สามารถทำ Data Alignment เพิ่มได้ ข้อมูลต้องถูกเตรียมให้เรียบร้อยก่อนอัพโหลด (Upload) ไม่สามารถจะจัดวางได้ล่วงหน้าว่าแดชบอร์ดที่จะปรากฏบนโทรศัพท์มือถือจะมีหน้าตาอย่างไร และหากข้อมูลมาจากหลายแหล่งกระบวนการจัดการข้อมูลจะช้าลง

รูปที่ 6-9 ตัวอย่างแดชบอร์ด (Dashboard) ของ Google Data Studio

6.3.3 OWOX BI Smart Data

ข้อดีคือ สามารถทำงานร่วมกับแหล่งข้อมูลได้หลายแหล่ง ไม่จำเป็นต้องมีการเทรนการใช้งานเฉพาะ ทำการแบ่งกลุ่มข้อมูล (Segmentation) ที่มาจากหลายแหล่งได้ และสามารถตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลได้โดยอัตโนมัติ [52, 53]

ข้อด้อยคือ มีจำนวน Templates สำหรับการแสดงภาพข้อมูลที่จำกัด มีชุดคำสั่งสำหรับดึงและรวมข้อมูล (Queries and Combinations) ที่จำกัด



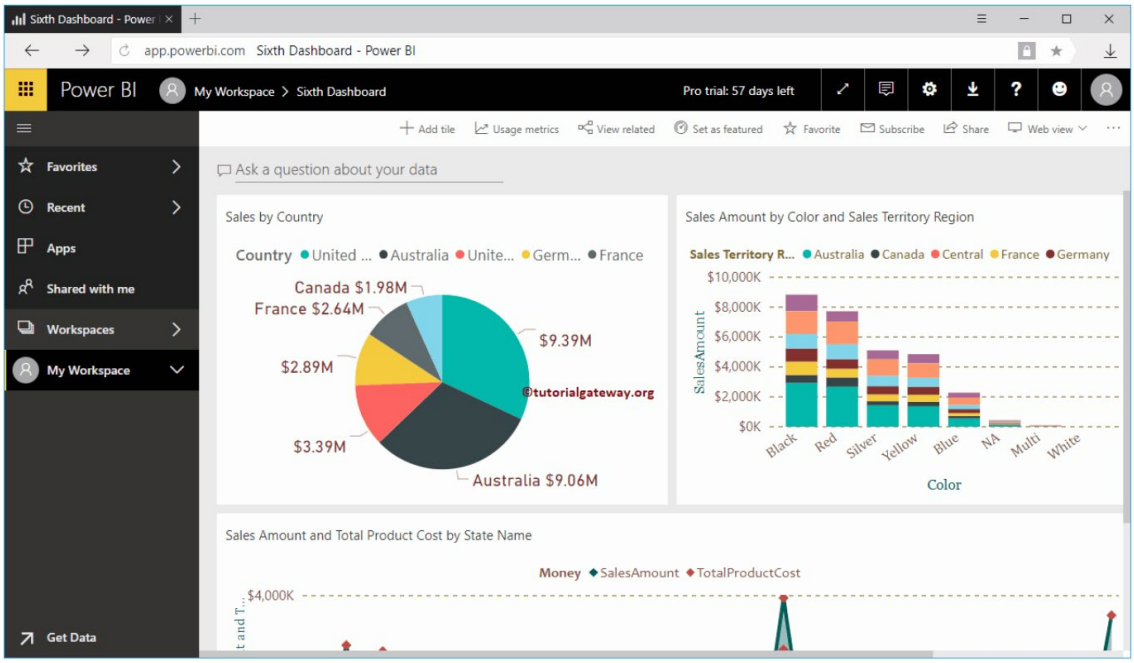
	Source	Medium	Campaign	Sessions	Transactions	AdCost	Attributed Rev...	ROI
1.	google	cpc	Campaign 1689193611	350 405	2 372	$32 790 794,89	$5 067 864,18	-84,54 %
2.	google	cpc	Campaign 1412911058	328 710	3 193	$30 149 714,53	$7 631 805,66	-74,69 %
3.	yandex_market	cpc	Campaign 355163085	220 324	2 535	$20 319 782,05	$5 066 702,09	-75,07 %
4.	google	cpc	Campaign 2420395	197 280	6 028	$18 459 095,17	$12 810 697,59	-30,6 %
5.	google	cpc	Campaign 849465970	183 366	499	$16 813 098,42	$1 488 487,34	-91,15 %
6.	yandex_direct	cpc	Campaign 1250938822	173 784	5 059	$16 266 295,37	$10 581 994,26	-34,95 %
7.	source6	retargeting	(not set)	161 121	448	$14 784 219,34	$1 130 165,29	-92,36 %
8.	google	cpc	Campaign 2115016822	147 001	2 317	$13 734 325,75	$5 606 751,86	-59,18 %

รูปที่ 6-10 ตัวอย่างแดชบอร์ด (Dashboard) ของ OWOX BI Smart Data

6.3.4 Microsoft Power BI

ข้อดีคือ สามารถรวม (Combine) ข้อมูลจากหลายแหล่งได้ สามารถตรวจสอบ (Preview) แดชบอร์ดและปรับหน้าจอสำหรับแทปเล็ต (Tablets) และโทรศัพท์มือถือได้ สามารถทำงานร่วมกับผลิตภัณฑ์ของ Microsoft ได้ และสามารถฝัง (Embed) ลงบนเว็บได้

ข้อด้อยคือ มีเครื่องมีที่ไม่เพียงพอสำหรับการทำความสะอาดและจัดการข้อมูล (Clean and Process Information) การนำเข้าและจัดการข้อมูลขนาดใหญ่ใช้เวลานาน



รูปที่ 6-11 ตัวอย่างแดชบอร์ด (Dashboard) ของ Microsoft Power BI

6.3.5 Tableau

ข้อดีคือ สามารถทำงานร่วมกับแพลตฟอร์ม Big Data ต่าง ๆ (Big Data Platforms) ได้ง่ายและรองรับแพลตฟอร์มบนโทรศัพท์มือถือ มีการอัพเดตอย่างสม่ำเสมอ และมีข้อมูลสนับสนุนการใช้งานมากมาย เช่น คอร์ส (Courses) วีดิโอ และการสอนใช้งาน (Tutorials))

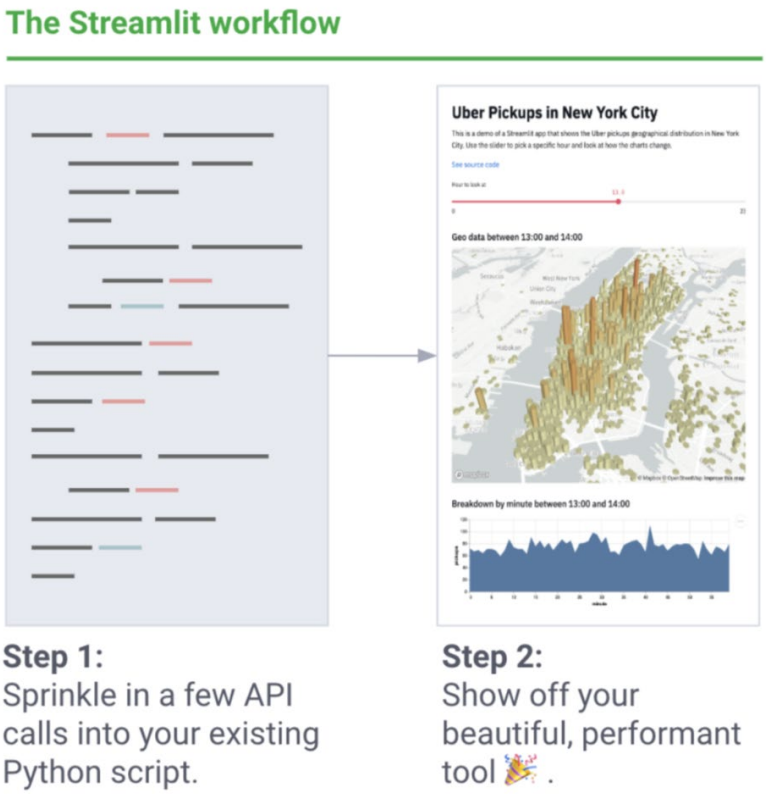
ข้อด้อยคือ การปกป้องข้อมูล (Data Protection) อยู่ในระดับต่ำ ต้องมีการเตรียมข้อมูลก่อนการโหลด การนำข้อมูลออก (Exporting) ใช้เวลานาน

รูปที่ 6-12 ตัวอย่างแดชบอร์ด (Dashboard) ของ Tableau

6.4 การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการนำกรอบการทำงานปัญญาประดิษฐ์เข้าไปร่วมกับการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน

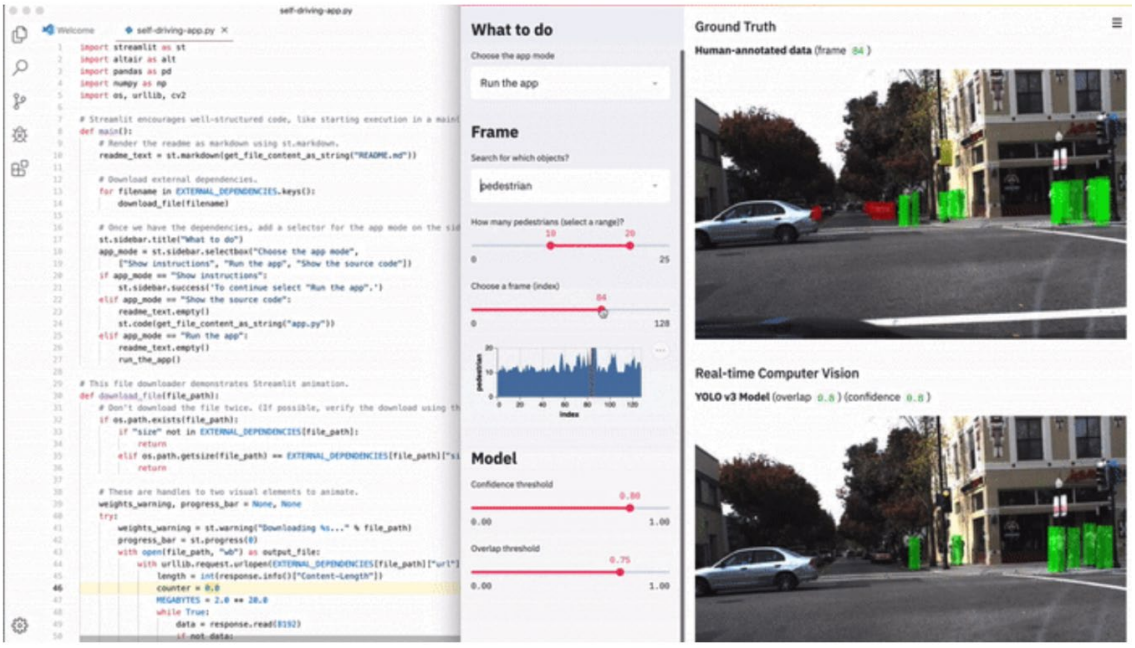
6.4.1 Streamlit Framework

Streamlit เป็นกรอบการทำงานไพธอนแบบเปิด (Open-Source Python Framework) ที่ช่วยให้ทีมแมชชีนเลิร์นนิ่งและวิทยาศาสตร์ข้อมูล (Machine Learning and Data Science) สามารถสร้างและแชร์แอปพลิเคชันที่รูปลักษณ์สวยงามอย่างมืออาชีพได้อย่างง่ายดายโดยไม่ต้องมีความรู้ด้านการพัฒนาเว็บส่วนที่ปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ (Front-End Web Development) Streamlit มีลูปการพัฒนาแอปพลิเคชันแบบทำซ้ำและโต้ตอบ (Iterative and Interactive Development Loop) ที่รวดเร็ว ผู้ใช้สามารถแบ่งหน้าจอออกเป็นส่วนที่แสดงการเขียนโค๊ด (Code Editing Tool) และเบราเซอร์ (Browser) ช่วยให้สามารถปรับโค๊ดและเห็นรูปลักษณ์ของแอปพลิเคชันได้ในทันที [54, 55]



รูปที่ 6-13 การออกแบบโมเดลปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence (AI) Model) โดยใช้กระบวนการของกรอบการทำงาน (Framework) Streamlit

นักพัฒนา (Developer) สามารถใส่อัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Algorithm) เข้าไปใน Streamlit เพื่อให้ปัญญาประดิษฐ์จัดการข้อมูลที่ฝั่งเซิร์ฟเวอร์ (Server) ตามตัวอย่างต่อไปนี้ซึ่งผู้ใช้สามารถให้ปัญญาประดิษฐ์หาคนเดินถนนจากชุดข้อมูลภาพได้



รูปที่ 6-14 ตัวอย่างการใช้ Streamlit สำหรับทำ Semantic Visual Search ร่วมกับ Interactive Neural Net Inference [56]

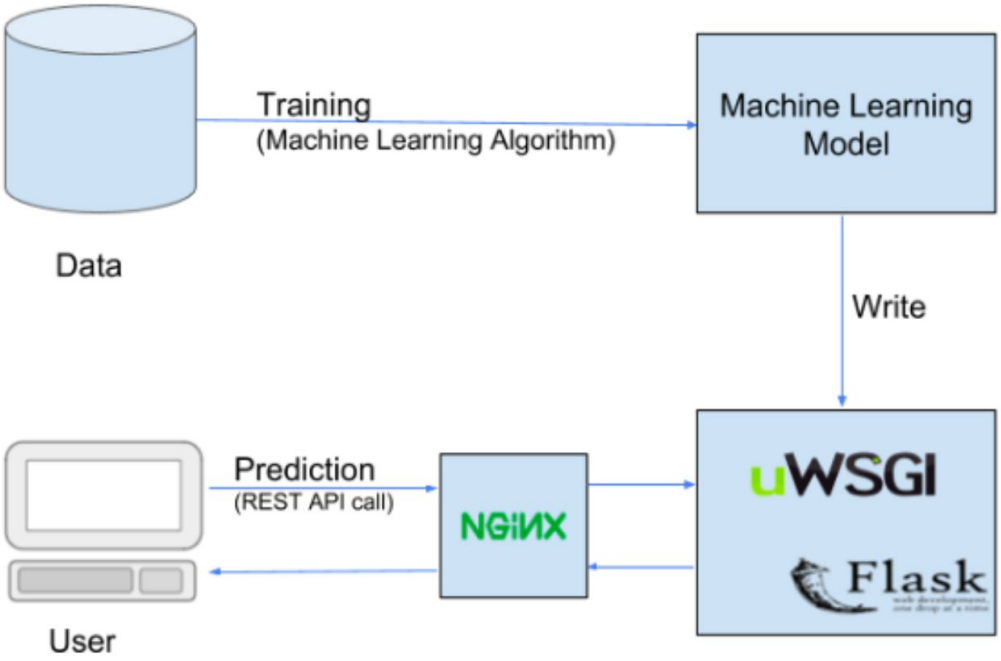
ตัวอย่างนี้เกิดจากโค๊ดประมาณ 300 บรรทัดโดยส่วนใหญ่เป็นส่วนที่เกี่ยวกับแมชชีนเลิร์นนิ่ง Streamlit ช่วยให้นักพัฒนาสามารถมุ่งความสนใจไปที่อัลกอริทึมซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของเว็บที่กำลังพัฒนาและลดเวลาที่ต้องใช้ในการจัดการเรื่องรูปลักษณ์ของเว็บ

6.4.2 Flask Framework

Flask เป็นกรอบการทำงานสำหรับสร้างเว็บแอปพลิเคชันแบบ Lightweight Web Server Gateway Interface (WSGI) Flask ถูกออกแบบมาให้ผู้ใช้สามารถเริ่มทำงานได้อย่างรวดเร็วและง่ายดาย และสามารถที่จะขยายออกเป็นแอปพลิเคชันที่ซับซ้อนได้ โดยเริ่มจากการเป็นส่วนห่อหุ้ม (Wrapper) ของ Werkzeug และ Jinja และกลายเป็นกรอบการทำงานไพธอนในการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันที่ได้รับความนิยมสูงที่สุด

Flask มีส่วนที่เป็นคำแนะนำแต่ไม่ได้มีการกำหนดข้อจำกัด นักพัฒนาสามารถที่จะเลือกใช้เครื่องมือและไลบรารี่ต่าง ๆ (Tools and Libraries) ได้ตามต้องการ นอกจากนั้นกลุ่มผู้ใช้งาน (Community) ของ Flask ยังได้สร้างส่วนขยาย (Extensions) ไว้มากมาย ทำให้การเพิ่มฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ (Functionalities) ทำได้อย่างง่ายดาย

Flask เป็นกรอบการทำงานที่ไม่เทอะทะ (Lean) นักพัฒนาไม่จำเป็นต้องเตรียมอะไรหลายอย่างเพื่อให้เว็บเซิร์ฟเวอร์เริ่มทำงาน สิ่งที่ต้องการมีเพียงการติดตั้งไพธอนและจากนั้นติดตั้ง Flask (โดยใช้ตัวติดตั้ง pip) นอกจากนั้นยังสามารถติดตั้งไลบรารี่ต่าง ๆ ของไพธอนเช่น PyTorch TensorFLow หรือ ไลบรารี่สำหรับการเรียนรู้เชิงลึกอื่น ๆ (Deep Learning Libraries) ได้ [57-59]



รูปที่ 6-15 ไปป์ไลน์ (Pipeline) สำหรับพัฒนาโมเดลแชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning Model) ด้วย Flask

ความท้าทายของการทำโมเดลแมชชีนเลิร์นนิ่งที่ฝั่งของเซิร์ฟเวอร์ :

- เวลาแฝง (Latency) : หากแอปพลิเคชันที่พัฒนาต้องเรียกใช้งานแมชชีนเลิร์นนิ่งเป็นอย่างมาก เช่น การหาวัตถุจากวีดิโอตามเวลาจริง (Real-Time Video Object Detection) ผลที่ได้จากแมชชีนเลิร์นนิ่ง (ที่อยู่ที่เซิร์ฟเวอร์) อาจจะช้าไม่ทันต่อความต้องการของผู้ใช้
- ต้นทุน (Cost) : โดยทั่วไปเว็บแอปพลิเคชันไม่จำเป็นต้องใช้งานอุปกรณ์ที่มี Graphic Processing Unit (GPU) สมรรถนะสูง อย่างไรก็ตามการทำโมเดลแมชชีนเลิร์นนิ่งจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มี GPU สูงซึ่งจะมีราคาค่อนข้างสูง ยกตัวอย่างเช่น โมเดลสำหรับจับภาพจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ซึ่งต้นทุนเฉลี่ยสูงถึง 24 เหรียญสหรัฐฯ ต่อวัน (9,000 เหรียญสหรัฐฯต่อปี) ซึ่งถือว่าค่อนข้างสูงหากเทียบกับเว็บแอปพลิเคชันทั่ว ๆ ไป

6.4.3 Client-side Web-based Apps

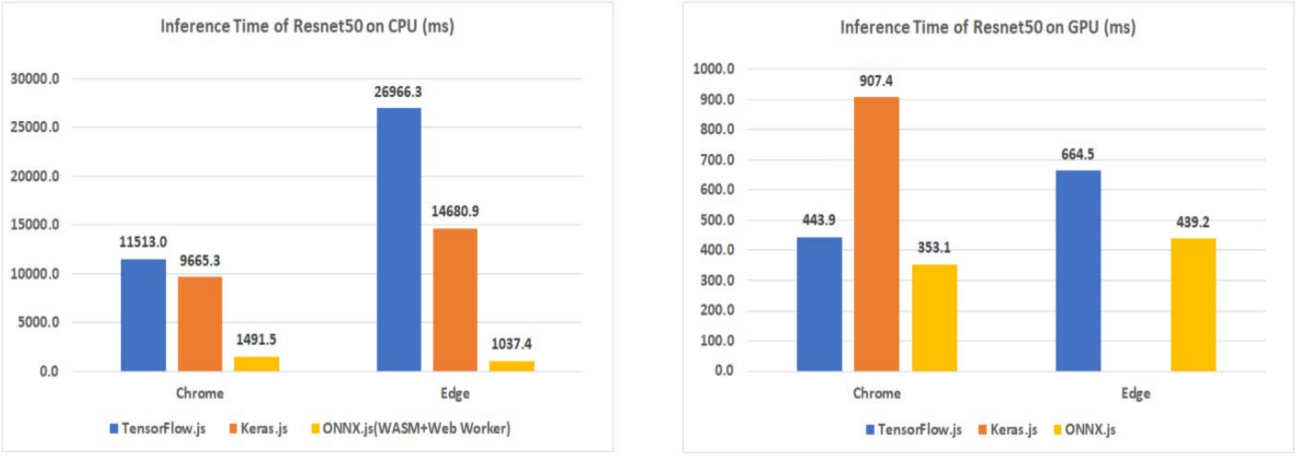
เวปแอปพลิเคชันที่อยู่ฝั่งผู้ใช้ (Client-Side Web-Based App) จะมีต้นทุนที่ต่ำกว่าแบบก่อนหน้า (ที่การทำงานอยู่ฝั่งเซิร์ฟเวอร์เป็นหลัก) มาก ในทางทฤษฎีเวปแอปพลิเคชันที่อยู่ฝั่งผู้ใช้จะเกิดเวลาแฝงที่ต่ำกว่าเนื่องจากไม่ต้องส่งข้อมูลไปกลับกับเซิร์ฟเวอร์อื่น ทุกอย่างจะเกิดขึ้นบนอุปกรณ์ของฝั่งผู้ใช้ (Client) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ฝั่งผู้ใช้ เวลาแฝงที่เกิดขึ้นอาจสูงกว่า และการติดตั้งใช้งาน (Implementation) อาจจะยากกว่าเนื่องจากต้องมีการปรับแต่งหลายอย่างเพื่อให้ระบบแมชชีนเลิร์นนิ่งสามารถทำงานได้อย่างราบรื่นดังที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้

ปัญหาหลักของการวางโมเดลแมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning, ML) ไว้ที่ฝั่งผู้ใช้ (ทั้งโทรศัพท์มือถือหรือเบราเซอร์) มาจากข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์และการบูรณาการ (Hardware and Integration Limitations) หลักการสำคัญคือ เว็บแอปพลิเคชันส่วนใหญ่ที่ทำงานบนเบราเซอร์ (ยกเว้นกลุ่มเกมส์) มักจะไม่ต้องการการคำนวณในระดับสูง (Compute-Intensive Operation) อย่างไรก็ตามมีการเสนอการทำ Optimizations ออกมามากมายที่จะช่วยให้การทำโมเดลแมชชีนเลิร์นนิ่งที่ฝั่งผู้ใช้เป็นไปได้มากขึ้น

6.4.3.1 ONNX.js

Open Neural Network Exchange (ONNX) เป็นมาตรฐานแบบเปิด (Open Standard) สำหรับโมเดลแมชชีนเลิร์นนิ่ง ข้อได้เปรียบที่สำคัญที่สุดของ ONNX คือ การอนุญาตให้เกิดการทำงานร่วมกัน (Interoperability) ระหว่างกรอบการทำงานปัญญาประดิษฐ์แบบเปิด (Open-Source AI Framework) แบบต่าง ๆ ซึ่งช่วยให้เกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น ONNX.js เป็นไลบรารี่ ของ Javascript สำหรับใช้งานโมเดล ONNX บนเบราเซอร์และบน Node.js ONNX.js รับเทคโนโลยี WebAssembly และ WebGL เข้ามาใช้เพื่อให้เกิดการประมวลผลที่ดีที่สุดทั้งที่ CPU (Central Processing Unit) และ GPU โดยการใช้ ONNX.js นักพัฒนาเว็บสามารถลดการสื่อสารระหว่างเซิร์ฟเวอร์และผู้ใช้ และปกป้องความเป็นส่วนตัวของข้อมูล (Data Privacy) และนำเสนอการใช้แมชชีนเลิร์นนิ่งจากหลากหลายแพลตฟอร์มบนเบราเซอร์โดยไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้ง (Install-Free) ได้

ONNX.js มาสามารถทำงานได้ทั้งบน CPU และ GPU สำหรับการทำงานบน CPU WebAssembly จะถูกนำมาใช้โดยเพิ่มเวลาสำหรับการประมวลผลเข้ามาเพียงเล็กน้อยจนถือว่าเป็น Near-Native Speed นอกจากนั้นยังมีการใช้ Web Workers สำหรับทำการประมวลผลข้อมูลแบบคู่ขนาน ("Multi-Threaded" Environment to Parallelize Data Processing) ซึ่งจากการประเมินผลเชิงประจักษ์ (Empirical Evaluation) พบว่ามีสมรรถนะที่ดีมากสำหรับการทำงานบน GPU WebGL จะถูกนำมาใช้ นอกจากนั้น ONNX.js ยังนำเอาเทคนิคใหม่ต่าง ๆ ในการ Optimizations เพื่อที่จะลดการถ่ายโอนข้อมูลระหว่าง CPU และ GPU รวมถึงเทคนิคในการลดรอบการประมวลผลของ GPU (GPU Processing Cycle) เพื่อให้ได้สมรรถนะที่เข้าใกล้จุดสูงสุดอีกด้วย



รูปที่ 6-16 การเปรียบเทียบระหว่าง TensorFlow, Keras และ ONNX Js

6.4.3.2 WebGL & WebAssembly

WebGL : (การนำ OpenGL มาใช้ (Implementation) บนเบราเซอร์) WebGL ถูกนำมาใช้ตั้งปี ค.ศ. 2011 และมีประโยชน์สำหรับโมเดลแมชชีนเลิร์นนิ่ง WebGL เป็น API แบบ Javascript ซึ่งช่วยให้แอปพลิเคชันต่าง ๆ ที่ทำงานบนเว็บเบราเซอร์สามารถใช้งาน GPU ได้อย่างราบรื่น โดยปกติจะใช้ในการแสดงกราฟฟิกและปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้เช่นในระหว่างการเล่นเกมส์

WebAssembly : เกิดขึ้นเมื่อประมาณ 4 ปีที่แล้ว โดยจะเกี่ยวข้องกับการคอมไพล์และโค๊ดระดับรากฐาน (Compiling and Low-Level Code) WebAssembly นำเสนอวิธีใหม่สำหรับคอมไพล์เว็บแอปพลิเคชันให้มีรูปแบบที่กระทัดรัดขึ้นซึ่งช่วยให้แอปพลิเคชันสามารถทำงานได้ราบรื่นขึ้นบนเบราเซอร์โดยใช้ Abstract Syntax Tree (AST) ซึ่งจะถูกเรียกขึ้นมาก่อน "Javascript's nitrous boost" [60-62]

6.4.3.3 WebGPU

WebGPU : โดยหลักเป็น WebGL ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อที่จะเพิ่มสมรรถนะ (Optimize) ของ GPU ที่ทำงานบนเบราเซอร์ WegGPU เป็นมาตรฐานใหม่ที่จะเพิ่มสมรรถนะของ WebGL โดยมุ่งไปที่การทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ (Components) สามารถทำงานไปพร้อมกันได้ (Run Concurrently) เพื่อให้ได้สมรรถนะที่สูงขึ้น

6.4.3.4 WebDNN

WebDNN : เป็นหนึ่งในไลบรารี่แบบเปิดที่ดีที่สุดสำหรับใช้งาน Deep Neural Networks บนเบราเซอร์ องค์ประกอบแรกของ WebDNN คือ API ไพธอนซึ่งแปลง (Transpile) โมเดลให้เป็นกราฟ จากนั้นกราฟนี้จะถูกส่งต่อให้กับองค์ประกอบที่สองซึ่งได้แก่ JS API ซึ่งจะแปลงกราฟให้อยู่ในรูปแบบที่จะทำงานบนเบราเซอร์ได้ (เช่น สามารถที่จะถูกใช้งานโดย WebGL, WebAssembly ได้) [63]

6.5 บทสรุป

แดชบอร์ด (Dashboard) เป็นวิธีการนำเสนอสรุปข้อมูลบนหน้าจอในมุมมองต่าง ๆ ที่สนใจได้หลากหลายมิติ เช่น ตาราง แผนภูมิ กราฟ มาตรวัด เป็นต้น เพื่อให้สามารถดูสรุปข้อมูลได้โดยง่ายและสะดวก รวมทั้งยังสามารถตอบโจทย์ในการติดตามเรื่องที่สนใจเพื่อเห็นการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลตลอดเวลา รวมถึงการติดตามสถานะของการดำเนินการเทียบกับเป้าหมายที่ต้องการและเกณฑ์เทียบต่าง ๆ ที่สนใจ แดชบอร์ดจึงเป็นวิธีการนำเสนอสรุปข้อมูลที่ทันสมัยและด้วยการใช้งานที่ง่ายจึงได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน โดยแดชบอร์ดได้ถูกพัฒนาและนำมาใช้งานในหลากหลายด้านตามความต้องการของผู้ใช้ ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของแดชบอร์ดที่พบโดยทั่วไปใน 4 ด้านหลัก ๆ ได้แก่ ด้านการตลาด ด้านการขาย ด้านวิศวกรรม และด้านการบริหาร สำหรับส่วนหนึ่งของงานวิจัยในโครงการนี้จะต้องพัฒนาโปรแกรม (Software) ที่เป็นเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) ให้มีระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม โดยจากผลการศึกษาในบทนี้เกี่ยวกับการให้บริการเกี่ยวกับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ผ่านเว็บ (Web) ขององค์กรกำกับดูแลที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ (ได้แก่ สหรัฐอเมริกา แคนนาดา ไต้หวัน สิงคโปร์ มาเลเซีย อิสราเอล สหรัฐเอมิเรต และอินเดีย) พบว่าการให้บริการแบบผ่านเว็บจะมีฟีเจอร์ (Feature) ในการให้บริการ 4 รูปแบบหลัก ๆ ได้แก่ ลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุ

ฐานข้อมูลอุปกรณ์ เมนูค้นหาอุปกรณ์ และฟังก์ชันขั้นสูงต่าง ๆ (เช่น การค้นหาใบอนุญาต ระยะเวลาที่ต้องใช้ในกระบวนการ สรุปข้อมูลแบบแดชบอร์ด เป็นต้น) ปัจจัยที่ส่งผลให้การให้บริการเกี่ยวกับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ผ่านเว็บของแต่ละประเทศมีฟีเจอร์ที่ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญได้แก่ พระราชบัญญัติ กฎหมาย ข้อบังคับและกฎระเบียบ กระบวนการ ขั้นตอนการอนุมัติ และนโยบายกำกับดูแลของแต่ละประเทศ ส่วนในทางด้านเทคนิคสำหรับการพัฒนาแดชบอร์ดในปัจจุบันมีเครื่องมือ (Tools) และกรอบการทำงาน (Framework) สนับสนุนมากมายซึ่งมีทั้งข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น Google Analytics, Google Data Studio, OWOX BI Smart Data, Microsoft Power BI และ Tableau สำหรับในส่วนของเว็บแอปพลิเคชันที่มีการใช้งานกรอบการทำงานปัญญาประดิษฐ์ร่วมด้วยมีหลากหลายกรอบการทำงานซึ่งที่ได้รับความนิยมอยู่ในปัจจุบัน เช่น Streamlit Framework, Flask Framework และ Client-side Web-based Apps การพิจารณาเลือกใช้เครื่องมือและกรอบการทำงานในการพัฒนาโปรแกรมที่เป็นเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบ (Prototype) ได้อย่างเหมาะสมและตรงตามความต้องการใช้งานของสำนักงาน กสทช. ดังนั้นงานวิจัยในโครงการนี้จึงได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลประเด็นปัญหา (Pain Points) ความต้องการใช้งาน (Requirements) และสถานะปัจจุบัน โดยนำข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้มาวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) พร้อมทั้งเสนอรายละเอียดของแอปพลิเคชันต้นแบบโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform รวมถึงการพัฒนาแดชบอร์ด และระบบสร้างรายงานมาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ ซึ่งรายละเอียดดังปรากฏในบทที่ 7 ถึง 10 ตามลำดับ

บทที่ 7

ประเด็นปัญหา ความต้องการใช้งาน และสถานะปัจจุบัน

การศึกษาในบทนี้เป็นผลการศึกษาประเด็นปัญหา (Pain Points) ความต้องการใช้งาน (Requirements) และสถานะปัจจุบันของการประมวลผลคำร้อง ประเมินการรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่ การตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ การตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ และการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน ของสำนักงาน กสทช.

7.1 ประเด็นปัญหา (Pain Points)

ความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีและการเติบโตขยายตัวของกิจการโทรคมนาคม กิจการกระจายเสียง และกิจการโทรทัศน์ ส่งผลให้ความต้องการใช้งานคลื่นความถี่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทั่วทุกพื้นที่ เนื่องจากคลื่นความถี่เป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงจำเป็นต้องมีการติดตาม ตรวจสอบ และบริหารคลื่นความถี่ เพื่อให้มีการใช้งานคลื่นความถี่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกันทั้งจากกิจการประเภทเดียวกันและต่างประเภท สามารถรองรับการใช้งานคลื่นความถี่จากผู้ใช้จำนวนมากและหลากหลายยิ่งขึ้นในอนาคต

ปัจจุบัน สำนักงาน กสทช. ได้ดำเนินการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ในทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยมีสำนักงาน กสทช. ภาค 1 ถึง 4 และสำนักงาน กสทช. เขตทั่วประเทศ รวมจำนวน 21 เขต เพื่อทำหน้าที่บริหารจัดการและปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับงานตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ ตลอดจนการรับและพิจารณาเรื่องร้องเรียนจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และประชาชนในพื้นที่ต่างๆ ทั้งนี้ สำนักงาน กสทช. ได้นำเครื่องมือและระบบการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ต่างๆ ทั้งในรูปแบบ สถานีหลัก (Fixed Station) สถานีเคลื่อนที่และสถานีระยะไกล (Mobile and Remote Station) และอุปกรณ์เคลื่อนที่ได้ (Portable Equipment) อีกทั้งยังมีการใช้งานระบบการรับเรื่องร้องเรียนแบบอิเล็กทรอนิกส์ในการปฏิบัติงานของสำนักงาน กสทช. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงาน และตอบสนองความต้องการของประชาชนมากขึ้น

การตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ตามมาตรฐานของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ-ภาคการสื่อสารวิทยุ หรือ ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication sector) ได้กำหนดบริบทสำหรับการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่หลักๆ ดังนี้

- ตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ตามที่ได้รับอนุญาตให้มีการใช้งานเป็นไปตามเงื่อนไข
- การสังเกตการณ์คลื่นความถี่และวัดการครอบครองคลื่นความถี่
- ตรวจสอบกรณีการเกิดการรบกวนที่สร้างความเสียหาย
- ตรวจสอบและแก้ปัญหาการลักลอบใช้งานคลื่นความถี่โดยไม่มีใบอนุญาต

อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อมูลการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่และเรื่องร้องเรียนที่ได้รับจากผู้ร้องเรียนมีประเด็นที่หลากหลายและเป็นข้อมูลขนาดใหญ่ นอกจากนี้ในการกำหนดแนวทางการบริหารคลื่นความถี่ทั้งเพื่อการจัดสรรคลื่นความถี่ใหม่หรือการแก้ไขปัญหาการรบกวนในแต่ละกรณี จำเป็นต้องรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมาก เช่น การใช้งานคลื่นความถี่ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ข้อมูลการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่และข้อร้องเรียนต่างๆ ที่เกิดขึ้น เป็นต้น ส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในการรวบรวมข้อมูลที่หลากหลายและวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อนจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อช่วยในการจัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่ รวมทั้งการพัฒนาระบบประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มศักยภาพการตรวจสอบคลื่นความถี่และการรับเรื่องร้องเรียนต่างๆ รวมทั้งสนับสนุนการตัดสินใจในระดับนโยบายในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าบนพื้นฐานข้อมูลเชิงสถิติที่น่าเชื่อถือ

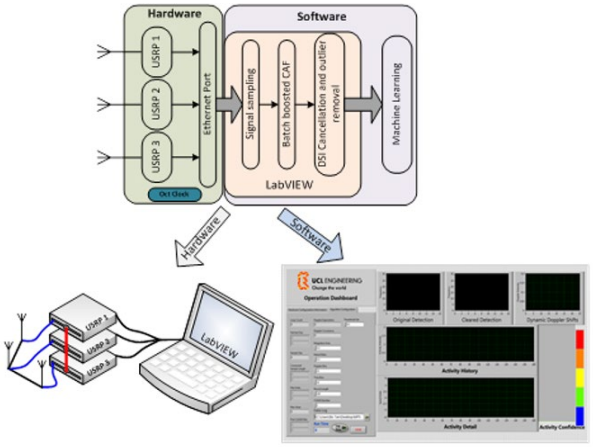
แนวทางในการนำคุณสมบัติของปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้เพิ่มศักยภาพในการบริหารคลื่นความถี่สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 7-1

ตารางที่ 7-1 การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่

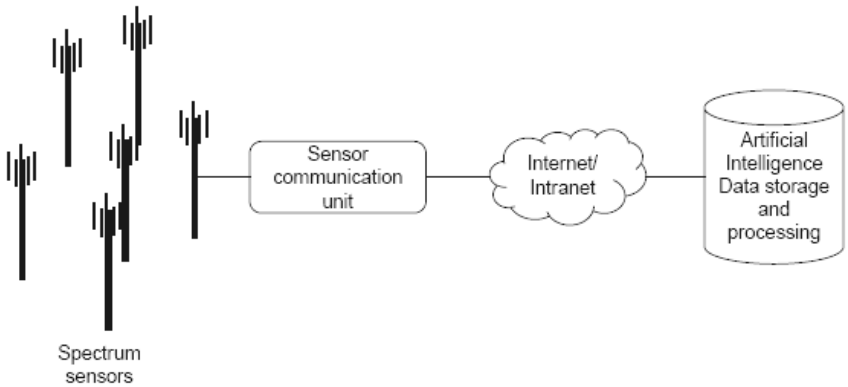
คุณสมบัติของ AI	การบริหารคลื่นความถี่ (Spectrum Management)				
	การวางแผน (Planning)	การใช้ร่วมกัน (Sharing)	การอนุญาต (Authorization)	การตรวจสอบ (Monitoring)	การกำหนดราคา (Pricing)
ค้นหาและเพิ่มประสิทธิภาพ	✓	✓	✓		✓
เหตุผลเชิงตรรกะ		✓	✓		
การคิดความน่าจะเป็นสำหรับความไม่แน่นอน	✓				✓
การเรียนรู้ข้อมูลสถิติและจัดประเภท				✓	
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ที่ทำงานเลียนแบบโครงข่ายเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์				✓	
การประเมินผลความเติบโต			✓		✓

ตัวอย่างงานวิจัยและกรณีศึกษาการนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้งานในด้านคลื่นความถี่ในต่างประเทศ เช่น บริษัท National Instruments ได้พัฒนาอัลกอริทึม ML และ DL สำหรับการบริหารคลื่นความถี่วิทยุ โดยการพัฒนาวิธีการตรวจจับรูปแบบสัญญาณด้วยเซ็นเซอร์และวิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ของคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี ML และ DL บนโปรแกรม Labview เพื่อเพิ่มประสิทธิการใช้การใช้ทรัพยากรคลื่นความถี่ (ดังรูปที่ 7-1) บริษัท DeepSig ได้พัฒนาเซ็นเซอร์ OmniSIG ที่สามารถตรวจจับและจำแนกการปล่อยคลื่นความถี่วิทยุบนแบนด์วิดท์ขนาดใหญ่ได้ใกล้เคียงแบบเรียลไทม์ (เปลี่ยนแปลงระดับมิลลิวินาที) โดยใช้โปรแกรมประมวลผลคลื่นความถี่วิทยุและสัญญาณด้วย

เทคโนโลยี DL เพื่อเรียนรู้รูปแบบจำลองคลื่นความถี่เพื่อรายงานความถี่ผิดปกติหรือการถูกรบกวนจากการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต บริษัท Fairspectrum ได้เสนอโซลูชันในการจัดการคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI) สำหรับการใช้สเปกตรัมร่วมกัน (Sharing) อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ รูปแบบการตรวจสอบ (Monitoring) คลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI) ดังแสดงในรูปที่ 7-2 สำนักงานโครงการวิจัยขั้นสูงกลาโหมสหรัฐได้มีโครงการจัดแข่งขันแบบเปิดจากทีมทั่วโลกในลอสแองเจลิส เพื่อหาผู้ชนะในการแก้ไขปัญหาความขาดแคลนคลื่นความถี่และการจัดการคลื่นความถี่ใหม่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) ซึ่งมีเงินรางวัลเกือบ 4 ล้านดอลลาร์สหรัฐ



รูปที่ 7-1 การพัฒนาอัลกอริทึม ML สำหรับการบริหารคลื่นความถี่วิทยุ
(ที่มา: spectrum.ieee.org/computing/software/how-ai-is-starting-to-influence-wireless-communications)



รูปที่ 7-2 การตรวจสอบ (Monitoring) คลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI)
(ที่มา: www.kdnuggets.com/2018/05/poll-tools-analytics-data-science- machine-learning-results.html)

สำหรับโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยเสนอรูปแบบเพื่อการจัดทำและพัฒนา Software ที่เป็น Web Application (Prototype) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1) ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม
2) แบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่ในพื้นที่ที่น่าสนใจ
3) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวนและวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต เพื่อแจ้งเตือน โดยแบ่งตามพื้นที่ในการใช้ความถี่นั้นๆ ได้
4) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์
5) ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่

นอกจากนั้น คณะผู้วิจัยยังได้เสนอระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม ซึ่งจะอยู่ในแผนงานที่ 6 ของโครงการวิจัยนี้ที่จะส่งมอบในปี 2565 ด้วย

7.2 ความต้องการใช้งาน (Requirements)

จากการศึกษาฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติของเว็บแอปของหน่วยงานกำกับดูแลคลื่นความถี่ในต่างประเทศ (ในบทที่ 6) และการประชุมระดมความเห็นกับทีมปฏิบัติงานของสำนักงาน กสทช. ได้แก่ทีมปฏิบัติงานจาก สำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม (ทท.) สำนักบริหารคลื่นความถี่ (คบ.) และ สำนักการอนุญาตวิทยุคมนาคม (คท. โดยทีมปฏิบัติงานที่เข้าร่วมระดมความเห็นมาจาก คท.2) คณะผู้วิจัยสรุปความต้องการใช้งานของสำนักงาน กสทช. ได้ดังนี้

1) <u>ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม</u>

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ (Prototype) : การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการประมวลผลข้อมูลและเอกสารประกอบการพิจาณาออกใบอนุญาตให้มี ใบอนุญาตให้ใช้ ใบอนุญาตให้ตั้งวิทยุคมนาคม โดยจากการพิจารณาร่วมกับ คท. 2 จะใช้อุปกรณ์วิทยุคมนาคมในกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับระบบ Cellular (โทรศัพท์เคลื่อน) ที่กับต้นแบบ

ความต้องการใช้งาน :

- ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์
- การใช้ปัญญาประดิษฐ์มาประมวลเอกสารประกอบคำขอ คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ และสรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของเจ้าหน้าที่
- การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics
- การลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
- ฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
- การค้นหาอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
- ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ

2) <u>แบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่</u>

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ (Prototype) : จากการพิจารณาร่วมกับ คท. และ คบ. (ส่วนวางแผนคลื่นความถี่) มีความต้องการใช้งานดังนี้

ความต้องการใช้งาน :

- ใช้ Machine Learning เพื่อสอบทาน (Validate) ความถูกต้องของข้อมูลการจัดสรรคลื่นความถี่ในฐานข้อมูล เช่น ช่วยในการทำ Data Cleansing
- วิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ เช่น
  - ความหนาแน่นในการใช้งานคลื่นความถี่จากฐานข้อมูล ซึ่งอาจแบ่งออกได้หลายมุมมอง เช่น ความหนาแน่นในแต่ละช่องความถี่ (ตามการจัดแบ่งช่องความถี่ในแผนความถี่) ความหนาแน่นในเชิงพื้นที่ที่ขออนุญาตตั้งสถานี อัตราการเพิ่มของความหนาแน่นในแต่ละช่วงเวลา เป็นต้น และจัดทำ Visualization เพื่อแสดงผลการวิเคราะห์ดังกล่าว (Dashboard)
  - ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อ Spectrum Demand เช่น อาจใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อทำ Feature Selection จากการทำ Regression ยกตัวอย่างเช่น แนวโน้มการขอจัดสรรคลื่นความถี่ในแต่ละกิจการ และในแต่ละย่านความถี่ ปริมาณแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) ที่ต้องการในแต่ละย่านความถี่หรือแต่ละกิจการ เป็นต้น และจัดทำ Visualization เพื่อแสดงผลการวิเคราะห์ดังกล่าว (Dashboard)
- สร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างมาตราต่าง ๆ ในตารางกำหนดคลื่นความถี่ และเชิงอรรถในข้อบังคับวิทยุ ข้อเสนอแนะของ ITU-R และแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่/ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ รวมถึงประกาศ กสทช. ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ Natural language processing เช่น เชิงอรรถ 5.443AA จะมีความสัมพันธ์กับคลื่นความถี่ที่ครอบคลุมทั้งช่วงความถี่ 5000-5030 MHz หรือ 5091-5150 MHz หรือบางส่วนของช่วงความถี่ดังกล่าว มีความสัมพันธ์กับกิจการเคลื่อนที่ทางการบินผ่านดาวเทียม ในเส้นทางบินพาณิชย์ และต้องประสานงานด้วยตามมาตรา 9.21 ของข้อบังคับวิทยุ
- ทำระบบ Search Engine ที่สามารถกรอกข้อมูลประเภทกิจการและคลื่นความถี่ที่สนใจ โดยระบบสามารถประมวล รวบรวมข้อมูลต่างๆ จากความสัมพันธ์ที่กำหนด เพื่อนำเสนอออกมาในรูปแบบที่เข้าใจง่าย เช่น อาจมีผู้สอบถามเกี่ยวกับ "ความถี่ที่ กสทช. อนุญาตให้ใช้ คลื่นเรดาร์ (RADAR) ว่า ถ้าเป็นเรดาร์ตรวจจับความเร็วรถ หรือเรดาร์ที่ใช้ในการทหาร กสทช. อนุญาต ย่านใดบ้าง และมีมาตรฐานข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องอย่างไรบ้าง"

3) <u>ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่</u>

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ (Prototype) : การใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้ คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยสามารถแสดงทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ก่อให้เกิดการรบกวนได้ โดยปัจจุบันมีการรบกวนคลื่นความถี่ย่าน 700 MHz (703 – 803

MHz) ในกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (IMT) บริเวณชายแดนไทย-กัมพูชา อ.อรัญประเทศ จ.สระแก้ว โดยมีแหล่งกำเนิดการรบกวนมาจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินของกัมพูชา

ความต้องการใช้งาน :

- การวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตจากข้อมูลที่เฝ้าฟังสดหรือข้อมูลในอดีต (Livestream Data or Historical Data)
- การตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน
- การตรวจสอบการรบกวนจะต้องวัดค่าพารามิเตอร์ทางเทคนิคของสัญญาณรบกวน ดังนี้
  - ความถี่ (Frequency)
  - ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth)
  - ประเภทการแพร่คลื่น (Class of Emission)
  - ความแรงสัญญาณที่วัดได้ (Field Strength or Power Flux-Density)
  - Polarization ของสัญญาณรบกวน (Observed Polarization)
  - ทิศทางของสัญญาณรบกวน (Bearing or Other Particulars)
  - วันที่ตรวจพบสัญญาณรบกวน (Date of Measurement)
  - เวลาที่พบสัญญาณรบกวน (Time of Measurement)
  - พิกัดที่ทำการตรวจวัด (Location of the Facility which made the above measurements)
- หากปัญญาประดิษฐ์สามารถระบุได้ว่าสัญญาณรบกวนมาจากกิจการประเภทใด จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานของสำนักงาน กสทช. เป็นอย่างยิ่ง

4) <u>ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคม</u>

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ (Prototype): การตรวจสอบเครื่องลูกข่าย Cellular ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบเทคโนโลยีต่าง ๆ ดังนี้ :

- GSM
- WCDMA
- LTE
- NR (5G New Radio)
- Bluetooth
- WLAN 2.4 GHz
- WLAN 5 GHz
- NFC (Near Field Communications)
- FM

- GPS (ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม)
- GLONASS (ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม)
- Galileo (ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม)
- Beidou (ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม)

ความต้องการใช้งาน :

- ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์
- การใช้ปัญญาประดิษฐ์มาประมวลเอกสารประกอบคำขอ คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ และสรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของเจ้าหน้าที่
- การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics
- การลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
- ฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
- การค้นหาอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
- ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ

5) <u>ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน</u>

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ (Prototype) : การใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อช่วยตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ (Parameters) ที่ใช้สำหรับการประสานงานคลื่นความถี่ตาม Excel template ของการประสานงานคลื่นความถี่ทั้ง 3 ประเภท ให้สอดคล้องกันกับข้อตกลงการใช้งานคลื่นความถี่ระหว่างประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้าน

1. การจดทะเบียนคลื่นความถี่ (Frequency Registration)
2. การแจ้งการใช้คลื่นความถี่ (Frequency Notification)
3. การจดทะเบียนคลื่นความถี่แบบชั่วคราว (Temporary acceptance)

ความต้องการใช้งาน :

- การตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบไฟล์ Excel ได้ โดยอ้างอิงจาก Big Data ของฐานข้อมูลการจดทะเบียนคลื่นความถี่ที่ สำนักงาน กสทช. มีอยู่
- การตรวจสอบว่าสถานีวิทยุคมนาคมถูกจัดตั้งอยู่ในระยะประสานงานบริเวณชายแดน โดยอ้างอิงจากค่า Latitude และ Longitude ของสถานีวิทยุคมนาคม

7.3 สถานะปัจจุบัน

7.3.1 กระบวนการประมวลผลคำร้อง

การพิจารณาคำร้องการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมทั้งในฝั่งของกิจการโทรคมนาคม และในฝั่งของกิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์ ตามประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่อง การมี ใช้เครื่องวิทยุคมนาคม และตั้งสถานีวิทยุคมนาคม พ.ศ. 2554 ในอดีตที่ผ่านมาผู้ที่ประสงค์จะขอรับใบอนุญาตต้องนำส่งแบบคำขอใบอนุญาตทำ มี ใช้ นำเข้า นำออก ค้าซึ่งวิทยุคมนาคม และตั้งสถานีวิทยุคมนาคม พร้อมกับเอกสารประกอบอื่น ๆ ที่จำเป็นแก่การพิจารณา ได้แก่ สำเนาหนังสือรับรองการจดทะเบียนนิติบุคคล สำเนาบัตรประจำตัวประชาชน/สำเนาทะเบียนบ้านของผู้มีอำนาจผูกพันของหน่วยงาน สำเนาหนังสือสำนักงาน กทช./กสทช. หรือกรมไปรษณีย์โทรเลข ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคมหรือตั้งสถานีวิทยุคมนาคม ใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคมฉบับเดิม (กรณีต้องออกใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคมฉบับใหม่) หนังสือมอบอำนาจพร้อมเอกสารทั้งผู้มอบอำนาจและผู้รับมอบอำนาจ รวมทั้งเอกสารอื่นใดที่จำเป็นแก่การพิจารณาตามที่เห็นสมควร ซึ่งบ่อยครั้งมักพบปัญหาที่หลากหลายในการนำส่งเอกสารต่าง ๆ มากมายที่เป็นลักษณะแบบกระดาษ (Hard Copy) เช่น เอกสารไม่ถูกต้องหรือยังไม่ครบถ้วนต้องเสียเวลายื่นเอกสารใหม่ การเก็บรวบรวมข้อมูลเอกสารที่เป็นกระดาษอาจตกหล่นหรือเสียหายได้ง่าย ต้องมีพื้นที่จัดเก็บเอกสารกระดาษจำนวนมาก ความยุ่งยากในการค้นหาเอกสารและข้อมูลต่าง ๆ ย้อนหลัง เป็นต้น

ปัจจุบันสำนักงาน กสทช. ได้เริ่มใช้งานระบบยื่นคำขอพิจารณาใบอนุญาตวิทยุคมนาคมผ่าน Web Application โดยผู้ที่ประสงค์จะขอรับใบอนุญาตสามารถส่งแบบคำขอใบอนุญาตทำ มี ใช้ นำเข้า นำออก ค้าซึ่งวิทยุคมนาคม และตั้งสถานีวิทยุคมนาคม พร้อมกับเอกสารประกอบอื่น ๆ ที่จำเป็นแก่การพิจารณาได้แบบออนไลน์ผ่านเว็บไซต์ของสำนักงาน กสทช. โดยแอปพลิเคชันดังกล่าวจะมีช่องว่างให้ผู้ใช้งาน (User) ที่ได้ลงทะเบียนกับสำนักงาน กสทช. สามารถกรอกข้อมูลสำคัญต่าง ๆ ลงในแบบฟอร์มคำขอใบอนุญาตได้โดยสะดวก พร้อมทั้งสามารถ Upload File เอกสารประกอบอื่น ๆ ในรูปแบบของไฟล์ pdf เพื่อใช้ประกอบในการพิจารณา แอปพลิเคชันนี้ถูกออกแบบมาให้สามารถใช้บริการได้สะดวกและรวดเร็วยิ่งขึ้น รวมทั้งเพื่อแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากการนำส่งเอกสารด้วยกระดาษ เช่น ผู้ประสงค์จะขอรับใบอนุญาตไม่ต้องเดินทางเพื่อมาส่งเอกสารที่สำนักงาน กสทช. แอปพลิเคชันนี้มีฟังก์ชันเตือนปรากฏขึ้นในกรณีที่ช่องว่างที่สำคัญยังไม่มีข้อมูลซึ่งผู้ใช้งานต้องใส่ข้อมูลจนครบถ้วนทั้งหมดจึงจะสามารถส่งคำขอพิจารณาใบอนุญาตวิทยุคมนาคมได้ การเก็บข้อมูลเป็นลักษณะข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสามารถเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์และยังค้นหาเอกสารและข้อมูลต่าง ๆ ย้อนหลังได้โดยง่าย เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนผ่านจากรูปแบบของข้อมูลที่เป็นกระดาษไปสู่ข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวข้างต้น สำนักงาน กสทช. ยังไม่มีเทคโนโลยีหรือโปรแกรมที่ช่วยในจัดการและประมวลผลข้อมูลเหล่านี้

7.3.2 การประเมินการรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่ การตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ การตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ และการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน

สำหรับ การตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ การตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ และการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน จะเป็นการดำเนินการเป็นรายกรณีไป โดยที่ยังไม่มีระบบอัตโนมัติที่รองรับการทำงานเพื่อช่วยวิเคราะห์ตรวจสอบการรบกวนเหล่านี้ หากเกิดเหตุลักษณะ

การตรวจสอบโดยทั่วไปจะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีการกำหนดไว้ เช่น หากมีรายงานการรบกวนกันระหว่างสถานีโทรคมนาคมในบริเวณชายแดน การแก้ไขปัญหาจะเป็นลักษณะแบบเป็นกรณี ๆ ไป เช่น ปรับลดความแรงของสัญญาณจนเป็นที่พึงพอใจทั้ง 2 ฝ่าย การยึดหลักเกณฑ์ตามการจดทะเบียนการขอใช้คลื่นความถี่ก่อน หากประเทศใดได้จดก่อนจะมีสิทธิ์ใช้ก่อน เป็นต้น นอกจากนี้ยังไม่มีระบบที่เก็บรวมรวมข้อมูลสถิติไว้ว่าการรบกวนเกิดขึ้นบ่อยครั้งเพียงใดเกิดขึ้น

7.3.3 ฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของ สำนักงาน กสทช.

ปัจจุบัน สำนักงาน กสทช. มีฐานข้อมูลเกี่ยวกับใบอนุญาตฯ และการใช้ความถี่หลักจำนวน 4 ฐานข้อมูลได้แก่

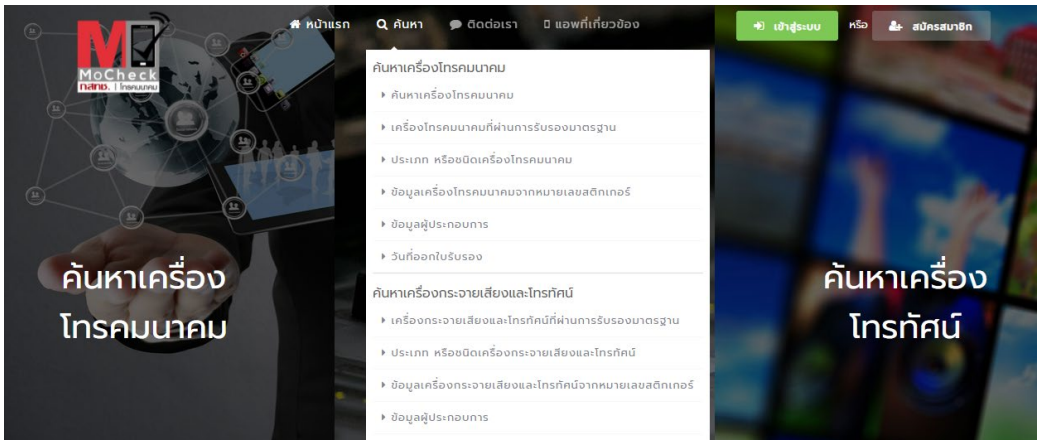
1) ฐานข้อมูลใบอนุญาตให้ตั้งและใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคม
   - เป็นไฟล์ฐานข้อมูลใบอนุญาตให้ตั้ง และใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคมซึ่งจะประกอบด้วยข้อมูล เช่น เลขที่ใบอนุญาต วันที่ สัญญาณเรียกขาน รายละเอียดของผู้ขอใบอนุญาต ประเภทใบอนุญาต ประเภทและชนิดอุปกรณ์ หมายเลขเครื่อง ข้อมูลความถี่ ข้อมูลเกี่ยวกับใบนำเข้า เป็นต้น
2) ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคมแต่ละประเภทที่ได้รับอนุญาต
   - เป็นฐานข้อมูลออนไลน์ http://standard.nbtc.go.th/index.php (ดูรูปที่ 7-3) ซึ่งเปิดให้บุคคลทั่วไปสามารถค้นหาข้อมูล คัดสำเนาเอกสารออนไลน์ และนัดหมายล่วงหน้าเพื่อติดต่อดำเนินการเกี่ยวกับการทดสอบมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคม
   - ในส่วนของการตรวจสอบและรับรองมาตรฐาน ประกอบด้วยฟังก์ชัน (Functions) การใช้งานต่าง ๆ ดังนี้
     - ค้นหาเครื่องวิทยุคมนาคมที่ผ่านการจดทะเบียน
     - ค้นหาเครื่องวิทยุคมนาคมที่ผ่านการรับรอง
     - ค้นหาประกาศในราชกิจจานุเบกษาของเครื่องวิทยุคมนาคมที่ผ่านการรับรอง
     - ค้นหาลำดับคิวการตรวจสอบและรับรอง
     - ค้นหาลำดับคิวทดสอบเครื่องวิทยุคมนาคม
     - ตรวจสอบเครื่องที่ผู้ประกอบการยื่นแบบรับรองตนเอง
3) ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบรับรองมาตรฐาน
   - เป็นฐานข้อมูลออนไลน์ http://mocheck.nbtc.go.th (ดูรูปที่ 7-4) ซึ่งเปิดให้บุคคลทั่วไปสามารถค้นหาข้อมูล เครื่องโทรคมนาคมที่ผ่านการรับรองมาตรฐาน และ เครื่องกระจายเสียงและโทรทัศน์ที่ผ่านการรับรองมาตรฐานของสำนักงาน กสทช.
   - ประกอบด้วยฟังก์ชันการใช้งานต่าง ๆ ดังนี้
     - ค้นหาเครื่องโทรคมนาคม เครื่องกระจายเสียงและโทรทัศน์ที่ผ่านการรับรองมาตรฐาน

- ค้นหาประเภท หรือชนิดของเครื่องโทรคมนาคม เครื่องกระจายเสียงและโทรทัศน์
- ค้นหาข้อมูลเครื่องโทรคมนาคม เครื่องกระจายเสียงและโทรทัศน์จากหมายเลขสติกเกอร์
- ค้นหาข้อมูลผู้ประกอบการ และวันที่ออกใบรับรอง

4) ฐานข้อมูลสถานีวิทยุคมนาคมที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน และข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน

- เป็นไฟล์ฐานข้อมูลซึ่งประกอบด้วย ข้อตกลงการใช้ความถี่บริเวณชายแดน และข้อมูลสถานีวิทยุคมนาคมที่ตั้งอยู่บริเวณชายแดนซึ่งจะระบุข้อมูลต่าง ๆ เช่น ชื่อและตำแหน่งของสถานีฯ ข้อมูลเกี่ยวกับคลื่นความถี่ กำลังส่ง และสายกาศ (Antenna) ที่ใช้ เป็นต้น

รูปที่ 7-3 เว็บไซต์ (Website) ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคมของสำนักงาน กสทช. (http://standard.nbtc.go.th/index.php)



รูปที่ 7-4 เว็บไซต์ (Website) ฐานข้อมูลเครื่องวิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบรับรองมาตรฐานของสำนักงาน กสทช. (http://mocheck.nbtc.go.th)

7.4 บทสรุป

จากผลการศึกษาประเด็นปัญหา (Pain Points) เกี่ยวกับการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่และการกำหนดแนวทางการบริหารคลื่นความถี่ทั้งเพื่อการจัดสรรคลื่นความถี่ใหม่หรือการแก้ไขปัญหาการรบกวนในแต่ละกรณีที่มีจำนวนข้อมูลเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วตามความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีและการเติบโตขยายตัวของกิจการโทรคมนาคม กิจการกระจายเสียง และกิจการโทรทัศน์ ซึ่งเป็นประเด็นปัญหาที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ที่ทันสมัยเพื่อช่วยในการรวบรวมข้อมูลที่หลากหลายและวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มศักยภาพการตรวจสอบคลื่นความถี่และการรับเรื่องร้องเรียนต่างๆ รวมทั้งสนับสนุนการตัดสินใจในระดับนโยบายในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่า ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้จัดประชุมร่วมกับทีมปฏิบัติงานจากสำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม (ทท.) สำนักบริหารคลื่นความถี่ (คบ.) และสำนักการอนุญาตวิทยุคมนาคม 2 (คท.2) เพื่อสำรวจและรวบรวมข้อมูลความต้องการใช้งาน (Requirements) เกี่ยวกับฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติของเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ในด้านต่างๆ ซึ่งจะช่วยแบ่งเบาภาระของเจ้าหน้าที่และทำให้การตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยปัจจุบันมีฐานข้อมูล (Database) เกี่ยวกับใบอนุญาตฯ และการใช้ความถี่หลักจำนวน 4 ฐานข้อมูลได้แก่

1) ฐานข้อมูลใบอนุญาตให้ตั้งและใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคม
2) ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคมแต่ละประเภทที่ได้รับอนุญาต
3) ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบรับรองมาตรฐาน
4) ฐานข้อมูลสถานีวิทยุคมนาคมที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน และข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน

อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงการนี้เป็นลักษณะงานวิจัยพัฒนาและสร้างต้นแบบระบบปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งมีระยะเวลาดำเนินการโครงการที่จำกัดตามที่ระบุไว้ในสัญญา ดังนั้นการพัฒนาระบบปัญญาประดิษฐ์ในโครงการวิจัยนี้เพื่อมาช่วยสนับสนุนภารกิจของเจ้าหน้าที่ของสำนักงาน กสทช. จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดขอบเขตลักษณะของการใช้งานที่ชัดเจนโดยการนำระบบปัญญาประดิษฐ์มาใช้งานที่ดีควรเริ่มต้นจากการพัฒนาด้วยอุปกรณ์จำนวนน้อยๆ เพื่อดูผลลัพธ์ที่ได้ก่อนจะขยายจำนวนอุปกรณ์ให้เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการใช้งานของต้นแบบที่ชัดเจนร่วมกับทีมปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องจากสำนักงาน กสทช. ทั้งนี้จากการสำรวจและรวบรวมข้อมูลสถานะปัจจุบันและเป้าหมายที่ต้องการใช้งาน คณะผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้ดังกล่าวมาวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) และเสนอวิธีการปิดส่วนต่างรายละเอียดดังปรากฏในบทถัดไป

บทที่ 8

การวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis)

การวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) เป็นการตรวจสอบและประเมินสถานะปัจจุบันของสิ่งที่สนใจเช่น คุณลักษณะ (Features) ฟังก์ชันการทำงาน (Functions) สมรรถนะ (Performance) เพื่อที่จะระบุความแตกต่างระหว่างสถานะปัจจุบันของสิ่งที่สนใจกับเป้าปลายทางที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น บริษัทต่าง ๆ อาจจะใช้การวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำธุรกิจ ปรับปรุงผลิตภัณฑ์ เพิ่มความสามารถในการทำกำไร เป็นต้น โดยเมื่อสามารถระบุส่วนต่างระหว่างสถานะปัจจุบันของด้านต่าง ๆ ที่สนใจกับเป้าที่ต้องการแล้ว ก็จะสามารถพุ่งความสนใจและทรัพยากรที่มีไปกับส่วนต่างที่ระบุไว้แล้วได้ [64-66]

การวิเคราะห์ส่วนต่าง ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอนได้แก่ [67]

1) ระบุสถานะปัจจุบันของสิ่งที่สนใจ
2) ระบุเป้าหมายปลายทางที่ต้องการให้สิ่งที่สนใจเป็นหรือไปถึง
3) ระบุส่วนต่าง (Gap) ระหว่างเป้าปลายทางและสถานะปัจจุบันของสิ่งที่สนใจ
4) วางแผน กำหนดวิธีการที่จะปิดส่วนต่างนั้นเพื่อทำให้สามารถบรรลุเป้าหมายปลายทางที่ต้องการได้

จากข้อมูลฟังก์ชันการทำงาน (Functions) และคุณสมบัติของเว็บแอปสำหรับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของหน่วยงานกำกับดูแลในประเทศต่าง ๆ ที่ได้สรุปไว้ในบทที่ 6 "ฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติของเว็บแอป" รวมถึงการประชุมหารือกับเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบในด้านที่เกี่ยวข้องจาก สำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม (ทท.) สำนักบริหารคลื่นความถี่ (คบ.) และ สำนักการอนุญาตวิทยุคมนาคม (คท.2) เกี่ยวกับประเด็นปัญหาในปัจจุบัน (Pain Points) และความต้องการใช้งาน (Requirements) คณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์ส่วนต่างของเว็บแอปสำหรับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของโครงการวิจัยฯ นี้ ดังสรุปได้ตาม ตารางที่ 8-1

ตารางที่ 8-1 การวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) ของเว็บแอปสำหรับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ในโครงการวิจัยฯ [65, 58]

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
1. ระบบจัดการคำร้อง	- ด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 เปิดให้มีการยื่นคำร้องผ่านอีเมล์ แต่ยังไม่มีระบบอัตโนมัติ (Automation) ในการ	1) ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์ ที่ใช้ AI ประมวลเอกสารประกอบคำขอเพื่อ	1) ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์ ที่ใช้ AI ประมวลเอกสารประกอบคำขอเพื่อ	พัฒนาเว็บแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดู

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
	จัดการคำร้องต่าง ๆ - มีฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม - สามารถค้นหาข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน	- คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน - ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ - สรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของเจ้าหน้าที่ 2) การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics 3) ระบบลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมออนไลน์ 4) ฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม 5) การค้นหาข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน 6) ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ	- คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน - ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ - สรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของเจ้าหน้าที่ 2) การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics 3) ระบบลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมออนไลน์ 4) ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ	รายละเอียดและแผนการดำเนินการในบทที่ 9 "เว็บแอปที่เสนอ"
2. แบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่	- ไม่มีระบบอัตโนมัติที่รองรับการทำงาน - หากเกิดเหตุลักษณะการตรวจสอบโดยทั่วไปจะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีการกำหนดไว้ - การแก้ไขปัญหาจะทำเป็นกรณี ๆ ไป (Case by Case)	1) ใช้ Machine Learning เพื่อสอบทาน (Validate) ความถูกต้องของข้อมูลการจัดสรรคลื่นความถี่ในฐานข้อมูล เช่น ช่วยในการทำ Data Cleansing 2) ใช้ AI วิเคราะห์ข้อมูลการใช้ความถี่ เช่น ความหนาแน่นในการใช้งานคลื่นความถี่ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อ Spectrum Demand	1) ใช้ Machine Learning เพื่อสอบทาน (Validate) ความถูกต้องของข้อมูลการจัดสรรคลื่นความถี่ในฐานข้อมูล เช่น ช่วยในการทำ Data Cleansing 2) ใช้ AI วิเคราะห์ข้อมูลการใช้ความถี่ เช่น ความหนาแน่นในการใช้งานคลื่นความถี่ ปัจจัยที่มีความสำคัญ	พัฒนาเว็บแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดูรายละเอียดและแผนการดำเนินการในบทที่ 9 "เว็บแอปที่เสนอ"

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
		3) สร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างมาตราต่าง ๆ ในตารางกำหนดคลื่นความถี่ และเชิงอรรถในข้อบังคับวิทยุ ข้อเสนอแนะของ ITU-R และแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่/ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ รวมถึงประกาศ กสทช. ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ Natural language processing 4) ทำระบบ Search Engine ที่สามารถกรองข้อมูลประเภทกิจการและคลื่นความถี่ที่สนใจ และระบบสามารถประมวล รวบรวมข้อมูลต่างๆ จากความสัมพันธ์ที่กำหนด เพื่อนำเสนอออกมาในรูปแบบที่เข้าใจง่าย	ต่อ Spectrum Demand 3) สร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างมาตราต่าง ๆ ในตารางกำหนดคลื่นความถี่ และเชิงอรรถในข้อบังคับวิทยุ ข้อเสนอแนะของ ITU-R และแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่/ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ รวมถึงประกาศ กสทช. ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ Natural language processing 4) ทำระบบ Search Engine ที่สามารถกรองข้อมูลประเภทกิจการและคลื่นความถี่ที่สนใจ และระบบสามารถประมวล รวบรวมข้อมูลต่างๆ จากความสัมพันธ์ที่กำหนด เพื่อนำเสนอออกมาในรูปแบบที่เข้าใจง่าย	
3.ระบบเฝ้าติดตามการใช้คลื่นความถี่	- ไม่มีระบบอัตโนมัติที่รองรับการทำงาน - หากเกิดเหตุลักษณะการตรวจสอบโดยทั่วไปจะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีการกำหนดไว้ - การแก้ไขปัญหาจะทำเป็นกรณี ๆ ไป (Case by Case)	1) การวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตจากข้อมูลที่เฝ้าฟังสดหรือข้อมูลในอดีต (Livestream Data or Historical Data) 2) การตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน 3) การตรวจสอบการ	1) การวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตจากข้อมูลที่เฝ้าฟังสดหรือข้อมูลในอดีต (Livestream Data or Historical Data) 2) การตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน 3) การตรวจสอบการ	พัฒนาเว็ปแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดูรายละเอียดและแผนการดำเนินการในบทที่ 9 "เว็ปแอปที่เสนอ"

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
		รบกวนจะต้องวัดค่าพารามิเตอร์ทางเทคนิคของสัญญาณรบกวน ดังนี้ - ความถี่ (Frequency) - ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) - ประเภทการแพร่คลื่น (Class of Emission) - ความแรงสัญญาณที่วัดได้ (Field Strength or Power Flux-Density) - Polarization ของสัญญาณรบกวน (Observed Polarization) - ทิศทางของสัญญาณรบกวน (Bearing or Other Particulars) - วันที่ตรวจพบสัญญาณรบกวน (Date of Measurement) - เวลาที่พบสัญญาณรบกวน (Time of Measurement) - พิกัดที่ทำการตรวจวัด (Location of the Facility which made the above measurements) 4) หากปัญญาประดิษฐ์สามารถระบุได้ว่าสัญญาณรบกวนมาจากกิจการประเภทใด จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานของสำนักงาน กสทช. เป็นอย่างยิ่ง	รบกวนจะต้องวัดค่าพารามิเตอร์ทางเทคนิคของสัญญาณรบกวน ดังนี้ - ความถี่ (Frequency) - ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth) - ประเภทการแพร่คลื่น (Class of Emission) - ความแรงสัญญาณที่วัดได้ (Field Strength or Power Flux-Density) - Polarization ของสัญญาณรบกวน (Observed Polarization) - ทิศทางของสัญญาณรบกวน (Bearing or Other Particulars) - วันที่ตรวจพบสัญญาณรบกวน (Date of Measurement) - เวลาที่พบสัญญาณรบกวน (Time of Measurement) - พิกัดที่ทำการตรวจวัด (Location of the Facility which made the above measurements) 4) หากปัญญาประดิษฐ์สามารถระบุได้ว่าสัญญาณรบกวนมาจากกิจการประเภทใด จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานของสำนักงาน กสทช. เป็นอย่างยิ่ง	

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
4. ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์	- ด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 เปิดให้มีการยื่นคำร้องผ่านอีเมล์ แต่ยังไม่มีระบบอัตโนมัติ (Automation) ในการจัดการคำร้องต่าง ๆ - มีฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม - สามารถค้นหาข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน	1) ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์ ที่ใช้ AI ประมวลเอกสารประกอบคำขอเพื่อ - คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน - ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ - สรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของเจ้าหน้าที่ 2) การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics 3) ระบบลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมออนไลน์ 4) ฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม 5) การค้นหาข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน 6) ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ	1) ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์ ที่ใช้ AI ประมวลเอกสารประกอบคำขอเพื่อ - คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน - ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ - สรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของเจ้าหน้าที่ 2) การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics 3) ระบบลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมออนไลน์ 4) ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ	พัฒนาเว็บแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดูรายละเอียดและแผนการดำเนินการในบทที่ 9 "เว็บแอปที่เสนอ"
5. ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน	- ไม่มีระบบอัตโนมัติที่รองรับการทำงาน - หากเกิดเหตุลักษณะการตรวจสอบโดยทั่วไปจะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีการกำหนดไว้ - การแก้ไขปัญหาจะทำเป็นกรณี ๆ ไป (Case by Case)	1) การตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบไฟล์ Excel ได้โดยอ้างอิงจาก Big Data ของฐานข้อมูลการจดทะเบียนคลื่นความถี่ที่ สำนักงาน	1) การตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบไฟล์ Excel ได้โดยอ้างอิงจาก Big Data ของฐานข้อมูลการจดทะเบียนคลื่นความถี่ที่	พัฒนาเว็บแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดูรายละเอียดและแผนการดำเนินการในบทที่ 9 "เว็บแอปที่เสนอ"

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
		กสทช. มีอยู่ 2) การตรวจสอบว่าสถานีวิทยุคมนาคมถูกจัดตั้งอยู่ในระยะประสานงานบริเวณชายแดน โดยอ้างอิงจากค่า Latitude และ Longitude ของสถานีวิทยุคมนาคม	สำนักงาน กสทช. มีอยู่ 2) การตรวจสอบว่าสถานีวิทยุคมนาคมถูกจัดตั้งอยู่ในระยะประสานงานบริเวณชายแดน โดยอ้างอิงจากค่า Latitude และ Longitude ของสถานีวิทยุคมนาคม	
6. ระบบฐานข้อมูล		มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำแมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning, ML) เช่น Spark Hadoop, NoSQL, MySQL		
6.1 ฐานข้อมูลใบอนุญาตให้ตั้งและใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคม	- เป็นไฟล์ Excel - พร้อมนำเข้าระบบฐานข้อมูล	มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	ฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	นำไฟล์ Excel เข้าสู่ฐานข้อมูลที่รองรับ ML
6.2 ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคม	- เป็นไฟล์ pdf	มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	ฐานข้อมูลที่รองรับ ML	แปลงไฟล์จาก pdf ให้อยู่ในรูปแบบของฐานข้อมูลที่รองรับ ML
6.3 ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบรับรอง	- เป็นฐานข้อมูล web-based - พร้อมนำเข้าระบบฐานข้อมูล	มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	ฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	นำไฟล์ข้อมูล เข้าสู่ฐานข้อมูลที่รองรับ ML
6.4 ฐานข้อมูลสถานีวิทยุคมนาคมที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน	- เป็นไฟล์ Excel - พร้อมนำเข้าระบบฐานข้อมูล	มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	ฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	นำไฟล์ Excel เข้าสู่ฐานข้อมูลที่รองรับ ML

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
และข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน				

<u>บทสรุป</u>

การวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) ของเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ ซึ่งสถานะปัจจุบันส่วนใหญ่ยังไม่มีระบบอัตโนมัติที่รองรับการทำงาน และต้องการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์มาช่วยสนับสนุนภารกิจต่าง ๆ ในด้านการบริหารคลื่นความถี่ของเจ้าหน้าที่ซึ่งจะช่วยแบ่งเบาภาระของเจ้าหน้าที่และทำให้การตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น เช่น คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน ค้นหาจุดที่สนใจ วิเคราะห์และตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ค้นหาและดึงข้อมูล เป็นต้น ซึ่งฐานข้อมูลทั้ง 4 ฐานข้อมูลในปัจจุบันยังไม่ได้เชื่อมต่อข้อมูลเข้าด้วยกันและไม่รองรับการทำแมชชีนเลิร์นนิ่ง ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการพัฒนาเว็ปแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการเพื่อปิดส่วนต่าง รายละเอียดดังปรากฏในบทถัดไป

บทที่ 9
เว็บแอปที่เสนอ

การศึกษาในบทนี้เป็นรายละเอียดของเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบ (Web Application Prototype) ที่เสนอในโครงการวิจัยฯ นี้ โดยจะมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่

9.1 ฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติ (Functionalities & Features)

จากการศึกษาฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติของเว็บแอปของหน่วยงานกำกับดูแลคลื่นความถี่ในต่างประเทศ (ในบทที่ 6) และการประชุมระดมความเห็นกับทีมปฏิบัติงานของสำนักงาน กสทช. ได้แก่ทีมปฏิบัติงานจาก สำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม (ทท.) สำนักบริหารคลื่นความถี่ (คบ.) และ สำนักการอนุญาตวิทยุคมนาคม (คท. โดยทีมปฏิบัติงานที่เข้าร่วมระดมความเห็นมาจาก คท.2) เว็บแอปต้นแบบที่เสนอจะมีฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติดังนี้

1) ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม ที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้
   - ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์
   - การใช้ปัญญาประดิษฐ์มาประมวลเอกสารประกอบคำขอ คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ และสรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของเจ้าหน้าที่
   - การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics
   - การลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
   - ฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
   - การค้นหาอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
   - ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ
2) แบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่ ที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้
   - ใช้ Machine Learning เพื่อสอบทาน (Validate) ความถูกต้องของข้อมูลการจัดสรรคลื่นความถี่ในฐานข้อมูล เช่น ช่วยในการทำ Data Cleansing

- วิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ เช่น
  - ความหนาแน่นในการใช้งานคลื่นความถี่จากฐานข้อมูล ซึ่งอาจแบ่งออกได้หลายมุมมอง เช่น ความหนาแน่นในแต่ละช่องความถี่ (ตามการจัดแบ่งช่องความถี่ในแผนความถี่) ความหนาแน่นในเชิงพื้นที่ที่ขออนุญาตตั้งสถานี อัตราการเพิ่มของความหนาแน่นในแต่ละช่วงเวลา เป็นต้น และจัดทำ Visualization เพื่อแสดงผลการวิเคราะห์ดังกล่าว (Dashboard)
  - ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อ Spectrum Demand เช่น อาจใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อทำ Feature Selection จากการทำ Regression ยกตัวอย่างเช่น แนวโน้มการขอจัดสรรคลื่นความถี่ในแต่ละกิจการ และในแต่ละย่านความถี่ ปริมาณแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) ที่ต้องการในแต่ละย่านความถี่หรือแต่ละกิจการ เป็นต้น และจัดทำ Visualization เพื่อแสดงผลการวิเคราะห์ดังกล่าว (Dashboard)
- สร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างมาตราต่าง ๆ ในตารางกำหนดคลื่นความถี่ และเชิงอรรถในข้อบังคับวิทยุ ข้อเสนอแนะของ ITU-R และแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่/ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ รวมถึงประกาศ กสทช. ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ Natural language processing เช่น เชิงอรรถ 5.443AA จะมีความสัมพันธ์กับคลื่นความถี่ที่ครอบคลุมทั้งช่วงความถี่ 5000-5030 MHz หรือ 5091-5150 MHz หรือบางส่วนของช่วงความถี่ดังกล่าว มีความสัมพันธ์กับกิจการเคลื่อนที่ทางการบินผ่านดาวเทียม ในเส้นทางบินพาณิชย์ และต้องประสานงานด้วยตามมาตรา 9.21 ของข้อบังคับวิทยุ
- ทำระบบ Search Engine ที่สามารถกรอกข้อมูลประเภทกิจการและคลื่นความถี่ที่สนใจ โดยระบบสามารถประมวล รวบรวมข้อมูลต่างๆ จากความสัมพันธ์ที่กำหนด เพื่อนำเสนอออกมาในรูปแบบที่เข้าใจง่าย เช่น อาจมีผู้สอบถามเกี่ยวกับ "ความถี่ที่ กสทช. อนุญาตให้ใช้ คลื่นเรดาร์ (RADAR) ว่า ถ้าเป็นเรดาร์ตรวจจับความเร็วรถ หรือเรดาร์ที่ใช้ในการทหาร กสทช. อนุญาต ย่านใดบ้าง และมีมาตรฐานข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องอย่างไรบ้าง"

3) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ ที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- การวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตจากข้อมูลที่เฝ้าฟังสดหรือข้อมูลในอดีต (Livestream Data or Historical Data)
- การตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน
- การตรวจสอบการรบกวนจะต้องวัดค่าพารามิเตอร์ทางเทคนิคของสัญญาณรบกวน ดังนี้
  - ความถี่ (Frequency)
  - ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth)
  - ประเภทการแพร่คลื่น (Class of Emission)
  - ความแรงสัญญาณที่วัดได้ (Field Strength or Power Flux-Density)
  - Polarization ของสัญญาณรบกวน (Observed Polarization)
  - ทิศทางของสัญญาณรบกวน (Bearing or Other Particulars)

- วันที่ตรวจพบสัญญาณรบกวน (Date of Measurement)
- เวลาที่พบสัญญาณรบกวน (Time of Measurement)
- พิกัดที่ทำการตรวจวัด (Location of the Facility which made the above measurements)

- หากปัญญาประดิษฐ์สามารถระบุได้ว่าสัญญาณรบกวนมาจากกิจการประเภทใด จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานของสำนักงาน กสทช. เป็นอย่างยิ่ง

4) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคม ที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์
- การใช้ปัญญาประดิษฐ์มาประมวลเอกสารประกอบคำขอ คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ และสรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของเจ้าหน้าที่
- การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics
- การลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
- ฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
- การค้นหาอุปกรณ์วิทยุคมนาคม
- ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ

5) ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน ที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- การตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบไฟล์ Excel ได้ โดยอ้างอิงจาก Big Data ของฐานข้อมูลการจดทะเบียนคลื่นความถี่ที่ สำนักงาน กสทช. มีอยู่
- การตรวจสอบว่าสถานีวิทยุคมนาคมถูกจัดตั้งอยู่ในระยะประสานงานบริเวณชายแดน โดยอ้างอิงจากค่า Latitude และ Longitude ของสถานีวิทยุคมนาคม

9.2 ฉากทัศน์และกรณีใช้งาน (Scenarios & Use Cases)

จากการประชุมระดมความเห็นกับทีมปฏิบัติงานของสำนักงาน กสทช. ได้แก่ทีมปฏิบัติงานจาก สำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม (ทท.) สำนักบริหารคลื่นความถี่ (คบ.) และ สำนักการอนุญาตวิทยุคมนาคม (คท. โดยทีมปฏิบัติงานที่เข้าร่วมระดมความเห็นมาจาก คท.2) ฉากทัศน์ (Scenario) และขอบเขตการใช้งานของเว็บแอปต้นแบบที่เสนอเป็นดังนี้

1) ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ (Prototype) : การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการประมวลผลข้อมูลและเอกสารประกอบการพิจารณาออกใบอนุญาตให้มี ใบอนุญาตให้ใช้ ใบอนุญาตให้ตั้งวิทยุคมนาคม โดยจากการพิจารณาร่วมกับ คท. 2 จะใช้อุปกรณ์วิทยุคมนาคมในกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับระบบ Cellular (โทรศัพท์เคลื่อน) ที่กับต้นแบบ

2) แบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ : จากการพิจารณาร่วมกับ คท. และ คบ. (ส่วนวางแผนคลื่นความถี่) มีความต้องการใช้งานดังนี้

- ใช้ Machine Learning เพื่อสอบทาน (Validate) ความถูกต้องของข้อมูลการจัดสรรคลื่นความถี่ในฐานข้อมูล เช่น ช่วยในการทำ Data Cleansing
- วิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ ได้แก่ ความหนาแน่นในการใช้งานคลื่นความถี่ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อ Spectrum Demand
- สร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างมาตราต่าง ๆ ในตารางกำหนดคลื่นความถี่ และเชิงอรรถในข้อบังคับวิทยุ ข้อเสนอแนะของ ITU-R และแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่/ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ รวมถึงประกาศ กสทช. ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ Natural language processing
- ทำระบบ Search Engine ที่สามารถกรอกข้อมูลประเภทกิจการและคลื่นความถี่ที่สนใจ โดยระบบสามารถประมวล รวบรวมข้อมูลต่างๆ จากความสัมพันธ์ที่กำหนด เพื่อนำเสนอออกมาในรูปแบบที่เข้าใจง่าย

3) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ : การใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้ คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยสามารถแสดงทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ก่อให้เกิดการรบกวนได้ โดยปัจจุบันมีการรบกวนคลื่นความถี่ย่าน 700 MHz (703 – 803 MHz) ในกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (IMT) บริเวณชายแดนไทย-กัมพูชา อ.อรัญประเทศ จ.สระแก้ว โดยมีแหล่งกำเนิดการรบกวนมาจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินของกัมพูชา

4) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ (Prototype) : การตรวจสอบเครื่องลูกข่าย Cellular ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบเทคโนโลยีต่าง ๆ ดังนี้

- GSM
- WCDMA
- LTE
- NR (5G New Radio)
- Bluetooth

- WLAN 2.4 GHz
- WLAN 5 GHz
- NFC (Near Field Communications)
- FM
- GPS (ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม)
- GLONASS (ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม)
- Galileo (ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม)
- Beidou (ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม)

5) ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ : การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อช่วยตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ (Parameters) ที่ใช้สำหรับการประสานงานคลื่นความถี่ตาม Excel template ของการประสานงานคลื่นความถี่ทั้ง 3 ประเภท ให้สอดคล้องกันกับข้อตกลงการใช้งานคลื่นความถี่ระหว่างประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้าน

- การจดทะเบียนคลื่นความถี่ (Frequency Registration)
- การแจ้งการใช้คลื่นความถี่ (Frequency Notification)
- การจดทะเบียนคลื่นความถี่แบบชั่วคราว (Temporary acceptance)

ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน เป็นระบบที่จะทำงานประสานกับระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ซึ่งต้นแบบจะนำไปใช้ประสานงานการใช้คลื่นความถี่ชายแดนจังหวัดสระแก้วและประเทศกัมพูชา และสามารถใช้ร่วมกับเฝ้าฟังคลื่นความถี่ในบริเวณชายแดนได้

ข้อมูลขาเข้า (Input) หลักของระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดนคือ

- การจดทะเบียนคลื่นความถี่ (Frequency Registration) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของไฟล์ excel
- การแจ้งการใช้คลื่นความถี่ (Frequency Notification) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของไฟล์ excel
- การจดทะเบียนคลื่นความถี่แบบชั่วคราว (Temporary acceptance) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของไฟล์ excel
- ข้อตกลงการใช้งานคลื่นความถี่ระหว่างประเทศไทยและประเทศกัมพูชา ซึ่งอยู่ในรูปแบบของไฟล์ word
- เอกสารอ้างอิงทางเทคนิคอื่น ๆ เช่น ITU-R Recommendations ซึ่งอยู่ในรูปแบบของไฟล์ pdf รวมถึงเอกสารอื่น ๆ ที่สามารถเพิ่มเข้ามาในฐานข้อมูลได้ตลอดเวลา

- และในกรณีที่พบสัญญาณรบกวนบริเวณชายแดน ข้อมูลของสัญญาณรบกวนเช่น แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ประเภทของสัญญาณรบกวน ก็จะถูกใช้เป็น Input ของระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน เพื่อเข้าสู่กระบวนการประสานงานและแก้ไขต่อไป

ปัจจุบันข้อมูลการใช้ความถี่ชายแดนไทย-กัมพูชามีมากกว่า 2,900 รายการ โดยแต่ละรายการประกอบด้วยฟิลด์ (Field) ข้อมูลได้มากถึง 47 ฟิลด์ข้อมูล

ข้อมูล Input ข้างต้น จะถูกประมวลผลด้วยปัญญาประดิษฐ์โดยที่ผลลัพธ์ (Output) ที่ได้ของระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน จะอยู่ในรูปแบบของ

- รายงานสถานะความสอดคล้องของข้อมูล การจดทะเบียนคลื่นความถี่ การแจ้งการใช้คลื่นความถี่ การจดทะเบียนคลื่นความถี่แบบชั่วคราว กับ ข้อตกลงการใช้งานคลื่นความถี่ระหว่างประเทศ หรือข้อกำหนดทางเทคนิคต่าง ๆ เช่น ITU-R Recommendations โดยสามารถกำหนดให้มีการอัพเดตสถานะอย่างสม่ำเสมอ หรืออัพเดตสถานะทุกครั้งที่ข้อมูลการใช้ความถี่ ข้อตกลง ข้อกำหนด มีการเปลี่ยนแปลง
- รายงานผลจากการค้นหาเฉพาะที่เจ้าหน้าสำนักงาน กสทช. อาจต้องการค้นหาเช่น ข้อกำหนดเกี่ยวกับระดับกำลังส่งของสัญญาณที่กำหนดไว้ในข้อตกลงการใช้งานคลื่นความถี่ระหว่างประเทศ ใน ITU-R Recommendations และในข้อกำหนดของประเทศไทยเอง ว่ามีความเกี่ยวข้องสอดคล้องกันอย่างไร และไปปรากฏอยู่ในเอกสารใดบ้าง เป็นต้น โดยที่ฐานข้อมูลที่ค้นหามีข้อมูลทั้งที่เป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
- รายงานสถานะความสอดคล้องของข้อมูลในกรณีพิเศษ เช่น กรณีที่ระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ตรวจพบสัญญาณรบกวน ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบของ การระบุสัญญาณและแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ข้อตกลงการใช้คลื่นความถี่หรือข้อกำหนดการใช้คลื่นความถี่อื่น ๆ ที่ไม่เป็นไปตามที่ตกลงหรือบันทึกไว้ เป็นต้น

9.3 ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data)

9.3.1 Trending of Big Data

คำว่า "Big Data" มักจะถูกหมายถึงทั้งแบบที่เป็นแหล่งข้อมูลแบบมีโครงสร้าง (Structured Data Sources) เช่น ไฟล์ excel ไฟล์ Microsoft Access เป็นต้น และแหล่งข้อมูลแบบไม่มีโครงสร้าง (Unstructured Data Sources) เช่นไฟล์ข้อความ (text files) ไฟล์ pdf เสียง วีดิโอ รวมไปถึงไฟล์ภาพ ข้อมูลเหล่านี้เป็นผลที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินงานต่าง ๆ ของทั้งภาครัฐและบริษัทเอกชน

ข้อมูล Big Data มักจะถูกกำหนดคุณลักษณะไว้ด้วย 3V ได้แก่ ปริมาณข้อมูลมหาศาล (Volume) ชนิดข้อมูลที่มีหลากหลาย (Variety) และความเร็ว (Velocity) ที่ข้อมูลเหล่านี้ต้องถูกประมวลผล คุณลักษณะเหล่านี้ถูกนำเสนอขึ้นมาครั้งแรกโดย Doug Laney นักวิเคราะห์ของ Gartner ในรายงานที่เผยแพร่ออกมาในปี ค.ศ. 2001 และเร็ว ๆ นี้ คุณลักษณะอื่น ๆ ยังได้ถูกเพิ่มเข้ามาเพื่ออธิบายลักษณะของ Big Data เช่น ความเชื่อถือได้ (Veracity)

คุณค่า (Value) ความผันแปร (Variability) ของข้อมูล ถึงแม้ว่าจะไม่มีการระบุชัดว่า Big Data ควรมีปริมาณข้อมูลเท่าไร Big Data มักจะมีปริมาณข้อมูลในระดับ Terabytes Petabytes หรือ แม้แต่ Exabytes [69, 70]

- ปริมาณข้อมูลมหาศาลเกิดขึ้นได้จากแหล่งข้อมูลที่หลากหลายมากมายเช่น ระบบธุรกรรมทางธุรกิจ ฐานข้อมูลลูกค้า ประวัติการรักษา บันทึกการคลิ๊กในอินเตอร์เน็ต แอปพลิเคชันมือถือ โซเชียลเน็ตเวิร์ค บันทึกผลการทดลองทางวิทยาศาสตร์ ข้อมูลที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ต่าง ๆ (Machine Generated Data) และข้อมูลเวลาจริง (Real Time) ที่ได้จากเซนเซอร์ (Sensor) ที่ใช้ใน IoT (Internet of Things) ข้อมูลอาจจะอยู่ในรูปแบบข้อมูลดิบ (Raw Data) หรือถูกประมวลผลด้วยเครื่องมือหรือซอฟต์แวร์ต่าง ๆ ก่อนที่จะถูกวิเคราะห์ในลำดับถัดไป

- Big Data สามารถเกิดจากข้อมูลหลากหลายชนิด ได้แก่ จากข้อมูลที่มีโครงสร้าง (Structured Data) จากฐานข้อมูล SQL หรือคลังข้อมูล จากข้อมูลที่ไร้โครงสร้าง (Unstructured Data) เช่น ข้อความหรือไฟล์เอกสารที่อยู่ในคลัสเตอร์ (Cluster) Hadoop หรือระบบ NoSQL หรือจากข้อมูลกึ่งมีโครงสร้าง (Semi-Structured Data) เช่น บันทึกของเว็บเซิร์ฟเวอร์ (Web Server Logs) หรือ ข้อมูลที่เก็บได้จากเซนเซอร์ นอกจากนั้น Big Data อาจจะมาจากข้อมูลหลากหลายแหล่งที่เข้ามาพร้อม ๆ กันโดยที่ยังไม่ได้มีการบูรณาการ (Integrate) ข้อมูลเข้าด้วยกัน เช่น โครงการวิเคราะห์ Big Data อาจจะพยายามวัดความสำเร็จหรือล้มเหลวของการขายโดยหาความสัมพันธ์ (Correlation) ของข้อมูลการขายในอดีต ข้อมูลสินค้าที่ถูกคืน และข้อมูลการรีวิวการสินค้าของลูกค้า

- ความเร็ว (Velocity) ในที่นี้หมายถึงความเร็วที่ Big Data ถูกสร้างขึ้นมา และจะต้องถูกประมวลผลและวิเคราะห์ ในหลายกรณี ชุดข้อมูล Big Data จะถูกอัพเดต (Update) แบบเวลาจริงหรือใกล้เคียงเวลาจริง (Real Time or Near Real Time) ในขณะที่ข้อมูลในคลังข้อมูลอื่นอาจจะถูกอัพเดตเป็นรายวัน รายสัปดาห์ หรือรายเดือน โครงการวิเคราะห์ Big Data (Big Data Analytics Project) จะนำเอาข้อมูลเข้ามา ประมวลผลเช่น หาความสัมพันธ์หรือวิเคราะห์ข้อมูล และหลังจากนั้นหาคำตอบหรือผลลัพธ์จากข้อมูลที่ได้มาจากการประมวลผลที่ครอบคลุมนี้ นอกจากนั้น ความเร็วยังมีความสำคัญในกรณีที่การวิเคราะห์ Big Data ถูกนำไปใช้กับแมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning) และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ซึ่งจะเป็นกระบวนการวิเคราะห์โดยอัตโนมัติเพื่อหารูปแบบ (Pattern) ในข้อมูลที่รวบรวมมาเพื่อหาข้อมูลเชิงลึก (Insight) ต่อไป

- ความเชื่อถือได้ (Veracity) ของข้อมูลหมายถึงระดับของความชัดเจน (Certainty) ในชุดข้อมูล ข้อมูลดิบที่ไม่ชัดเจนซึ่งเก็บมาจากหลายแหล่งอย่างเช่นแพลตฟอร์มโซเชียลมีเดียและเว็บเพจต่าง ๆ อาจก่อให้เกิดปัญหาร้ายแรงเกี่ยวกับคุณภาพของข้อมูลซึ่งอาจส่งผลให้การระบุว่าข้อมูลส่วนไหนมีปัญหาทำได้ยากเช่น บริษัทที่เก็บข้อมูลจากแหล่งข้อมูลหลายร้อยแหล่งอาจจะสามารถระบุข้อมูลที่ไม่ถูกต้องได้ โดยการจะทำเช่นนั้นได้นักวิเคราะห์จะต้องมีข้อมูลความเชื่อมโยง (Data Lineage Information) สำหรับสืบหาตำแหน่งที่เก็บข้อมูลเพื่อที่จะได้ไปแก้ไขให้ถูกต้องได้

- คุณค่า (Value) ของข้อมูลมีความสำคัญเนื่องจากข้อมูลที่เก็บมาอาจไม่ได้มีประโยชน์กับธุรกิจทั้งหมด และการใช้ข้อมูลที่ไม่ถูกต้องอาจทำให้ข้อมูลเชิงลึกที่ได้จากการวิเคราะห์มีประโยชน์น้อยลง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleansing) และยืนยันว่าข้อมูลเกี่ยวข้องกับปัญหาของธุรกิจที่สนใจก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ข้อมูล Big Data ต่อไป

- ความผันแปร (Variability) มักจะเป็นคุณลักษณะที่พบได้บ่อยของข้อมูล Big Data ซึ่งจะมีความสอดคล้องกันของข้อมูลน้อยกว่าเมื่อเทียบกับข้อมูลธุรกรรมปกติ (Conventional Transaction Data) นอกจากนั้น Big Data อาจจะมีหลายความหมายหรือต้องถูกฟอร์แมต (Format) ในรูปแบบที่แตกต่างกันไปสำหรับแต่ละแหล่งข้อมูล สิ่งเหล่านี้ทำให้การจัดการและวิเคราะห์ข้อมูลซับซ้อนยิ่งขึ้น

Big Data มีศักยภาพมากมายที่จะใช้ประโยชน์ได้ในกิจกรรมต่าง ๆ ของธุรกิจตั้งแต่ประสบการณ์ของลูกค้า (Customer Experience) ไปจนถึงการวิเคราะห์และบูรณาการกับปัญญาประดิษฐ์เกิดเป็นปัญญาประดิษฐ์สำหรับธุรกิจ (ยุคที่สองของวิวัฒนาการของปัญญาประดิษฐ์) ดังตัวอย่างที่ยกมาตามด้านล่าง

- การพัฒนาผลิตภัณฑ์ : บริษัทเช่น Netflix และ Procter & Gamble (P&G) ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อคาดการณ์ความต้องการของลูกค้า บริษัทเหล่านี้สร้างโมเดลสำหรับทำนาย (Predictive Model) สินค้าและบริการใหม่ ๆ โดยจัดกลุ่มคุณลักษณะ (Attributes) ของสินค้าและบริการในอดีตและทำโมเดลหาความสัมพันธ์ของคุณลักษณะเหล่านั้นกับความสำเร็จในการเสนอขาย นอกจากนั้น P&G ยังใช้ข้อมูลและการวิเคราะห์ (Analytics) จากโฟกัสกรุ๊ป (Focus Group) โซเชียลมีเดีย ตลาดทดสอบ (Test Market) และการทดลองเสนอผลิตภัณฑ์ (Early Store Rollout) เพื่อที่จะวางแผน ผลิต และเปิดตัวผลิตภัณฑ์ใหม่ด้วย

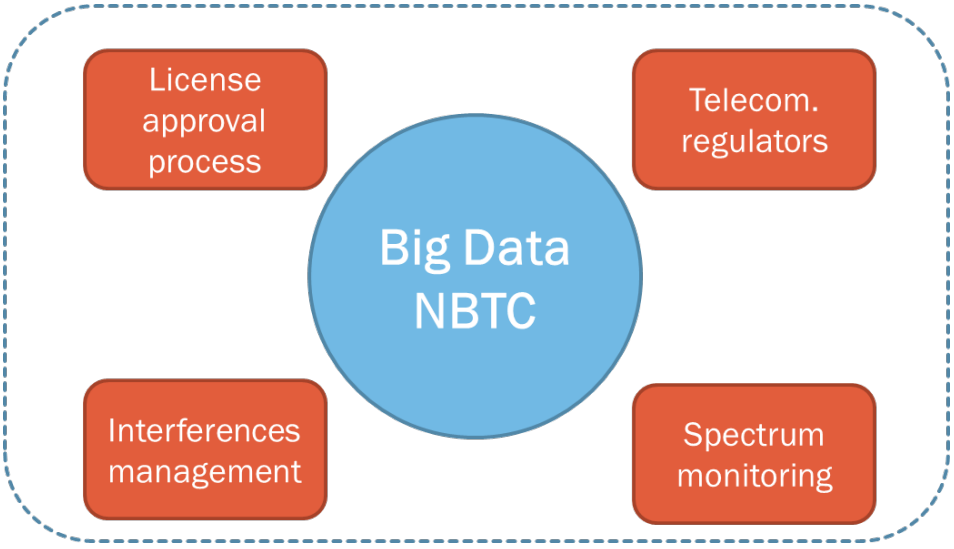
- การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) ปัจจัยที่สามารถใช้คาดการณ์ความผิดพลาดของกลไกต่าง ๆ จะซ่อนอยู่ในข้อมูลทั้งแบบมีโครงสร้างเช่น ปี ยี่ห้อ และรุ่นของอุปกรณ์ และในข้อมูลแบบไร้โครงสร้างซึ่งอยู่จะในรายการข้อมูลนับล้านรายการที่ถูกบันทึกไว้ (Log Entries) เช่น ข้อมูลจากเซนเซอร์ ข้อความแจ้งข้อผิดพลาด และอุณหภูมิของอุปกรณ์ เป็นต้น ด้วยการวิเคราะห์ตัวบ่งชี้ถึงปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นนี้ก่อนที่ปัญหาจะเกิดขึ้นจริง องค์กรต่าง ๆ สามารถบริหารต้นทุนการบำรุงรักษาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและทำให้ชิ้นส่วนและอุปกรณ์ทำงานได้นานที่สุด

- แมชชีนเลิร์นนิ่ง : ปัจจุบันเราสามารถที่จะสอนแมชชีนแทนที่จะตั้งโปรแกรมมัน สิ่งที่ทำให้การสอนแมชชีนให้เรียนรู้เกิดขึ้นได้ก็คือข้อมูล Big Data ที่สามารถนำมาใช้เทรน (Train) ในโมเดลแมชชีนเลิร์นนิ่งได้

- ประสิทธิภาพของการดำเนินงาน (Operation Efficiency) : ประสิทธิภาพของการดำเนินงานอาจจะไม่ใช่ปัจจัยโดดเด่นที่ได้รับความสนใจอยู่ตลอดเวลา แต่นี่คือด้านที่จะได้ประโยชน์จากการใช้ Big Data มากที่สุด ด้วย Big Data เราสามารถวิเคราะห์และประเมินการผลิต ความคิดเห็นและพฤติกรรมการคืนของ (Return) ของลูกค้า รวมถึงปัจจัยอื่น ๆ เพื่อลดการขาดแคลนสินค้าและคาดการณ์ความต้องการสินค้าในอนาคต Big Data สามารถใช้เพื่อปรับปรุงการตัดสินใจให้สอดคล้องกับแนวโน้มตลาดในปัจจุบันได้

จากการวิเคราะห์การให้บริการและการดำเนินงานของสำนักงาน กสทช แหล่งข้อมูล Big Data (หรือที่เรียกว่าโนดข้อมูลข่าวสาร (Information Node)) จะมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 9-1 ซึ่งได้แก่ กิจกรรมการออกใบอนุญาตฯ (License Approval Process) กิจกรรมการกำกับดูแล (Telecommunications Regulation) กิจกรรมการบริหารจัดการการรบกวนของคลื่นความถี่ (Interference Management) และกิจกรรมการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) กระบวนการอนุมัติใบอนุญาตฯ ประกอบด้วยการขออนุญาตที่เกี่ยวกับอุปกรณ์วิทยุคมนาคม และการขออนุญาตที่เกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่ กิจกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นบนเว็บ (Website) ของสำนักงาน กสทช โดยข้อมูลที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของไฟล์ pdf ที่เป็นข้อกำหนดของอุปกรณ์ (Device

Specification) และรายงานการทดสอบต่าง ๆ ข้อมูลเกี่ยวกับการกำกับดูแลและกฎระเบียบเกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่ที่ถูกเก็บไว้ในรูปแบบไฟล์ pdf แหล่งข้อมูลการรบกวนถูกเก็บไว้ในรูปแบบไฟล์ excel และสำหรับข้อมูลจากการระบบเฝ้าสังเกตคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring System) ซึ่งจะใช้สำหรับการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน การวิเคราะห์หาการใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือไม่ได้รับอนุญาตแบบเวลาจริง (Real-Time) สามารถเก็บไว้ในรูปแบบข้อมูล IoT เช่น MQQT (Message Queueing Telemetry Transport) แบบ Node JS หรือ SQL การบริหารจัดการโนดข้อมูลจ่าวสารต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นเรื่องที่ท้าทายอย่างยิ่งสำหรับสำนักงาน กสทช หากไม่มีแพลตฟอร์ม Big Data



รูปที่ 9-1 ภาพรวม Big Data ของสำนักงาน กสทช.

9.3.2 โนด (Nodes) เพื่อการประมวลผล และการจัดเก็บข้อมูลใน Data Lake

คณะผู้วิจัยเสนอระบบ Spark สำหรับใช้เป็นแพลตฟอร์มวิเคราะห์ข้อมูล Big Data โดยจะใช้ทั้งสำหรับการเก็บและบริหารจัดการข้อมูลคลื่นความถี่ เนื่องจากจุดประสงค์ของโครงการที่เสนอนี้คือการใช้แบบจำลองปัญญาประดิษฐ์สำหรับการบริหารจัดการและการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ ฮาร์ดแวร์ที่ใช้จึงควรมีหน่วยประมวลผลกราฟิก (Graphic Processing Unit, GPU) แพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์หลาย ๆ แพลตฟอร์ม เช่น MXNet-1.4, TensorFlow-1.14, PyTorch-1.1, Keras-2.2, Chainer-6.1, Caffe-2.0.8, Theano-1.0 & CNTK-2.7 ใช้พลังของการ์ดหน่วยประมวลผลกราฟฟิกเพื่อให้แบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ทำงาน นอกจากนั้น คณะผู้วิจัยเสนอให้ใช้ MySQL, PostgreSQL หรือ Hadoop ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลแบบเปิดเผยซอร์สโค๊ด (Open Source Data Storage) ที่สามารถใช้งานได้กับเซิร์ฟเวอร์ข้อมูลท้องถิ่น (Local Data Server) หรือบริการคลาวด์ (Cloud Service) เพื่อเก็บข้อมูลคลื่นความถี่สำหรับการวิเคราะห์ในอนาคต

จากงานวิจัย [1] เครื่องรับสัญญาณทั่วไปที่มีแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) 100 เมกะเฮิร์ตซ์ จะสร้างข้อมูลอินเฟสควอดเดรเจอร์เฟส (IQ Data) ขนาด 500 Mbps และสามารถจัดการข้อมูลได้ที่อัตรา 1,000 MBps การวิเคราะห์แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning, ML) สามารถขยายให้ใหญ่ขึ้น (Scale Up) ได้ดีหากเราเพิ่มตัวประมวลผลหรือหน่วยความจำ สำหรับการประมวลผลข้อมูลที่จัดเก็บไว้ (Archive Processing) ความเร็วในการ

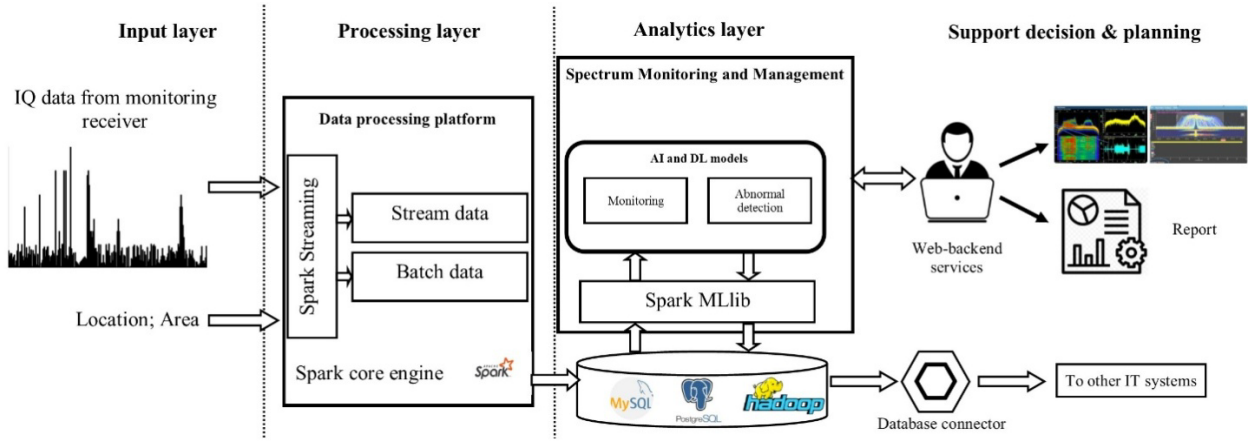
ประมวลจะถูกจำกัดด้วยเวลาในการอ่าน (Read Access Time) ของหน่วยความจำไม่ลบเลือน (Non-Volatile Memory) สำหรับฐานข้อมูลท้องถิ่น (Local Storage) รายละเอียดสเปคของทั้งสองทางเลือกสรุปไว้ในตารางที่ 9-1 ด้านล่าง

ตารางที่ 9-1 สเปกของหน่วยประมวลผลสำหรับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ด้วยปัญญาประดิษฐ์

Option	Amazon Elastic Compute (EC) cloud [2]	Local workstation machine [3]
CPU	Intel® Xeon® CPU E5-2686 v4 (2.3 GHz, 18 cores)	Intel® Xeon® E5-2695 v4 (2.1 GHz, 18 cores, Intel® vPro™)
RAM	60 GB	64 GB
GPU	High performance GPU computing: NVIDIA Tesla K80; รองรับ AI and DL models; รองรับ CUDA cores	High performance GPU computing: NVIDIA® Tesla® K40; รองรับ AI and DL models; รองรับ CUDA cores
Network for data transfer	อย่างน้อย 10 กิกะบิต	อย่างน้อย 10 กิกะบิตอีเทอร์เน็ต (Gigabit Ethernet)
Data Storage	อย่างน้อย Amazon S3 storage 10 เทราไบต์ (Terabyte); รองรับ MySQL; PostgreSQL; Hadoop	อย่างน้อย 10 เทราไบต์ SATA SSD; รองรับ MySQL; PostgreSQL; Hadoop
Operation System	Linux	Linux

รูปที่ 9-2 แสดงชั้น (Layers) ของการวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นความถี่ (Spectrum Data Analytics) โดยใช้ Spark แพลตฟอร์ม Spark ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเป็นแพลตฟอร์มสำหรับวิเคราะห์ Big Data ที่มีประสิทธิภาพซึ่งสามารถรองรับการจัดการข้อมูลได้ทั้งข้อมูลตามเวลาจริง (Real-Time) และข้อมูลในอดีต (Historical (Batch)) ข้อมูลอินเฟสและควอดเดรเจอร์เฟสจากเครื่องรับความถี่จาก Input Layer จะถูกป้อนเข้าสู่สตรีมมิ่งของ Spark (Spark Streaming) ใน Processing Layer เพื่อสร้างชุดข้อมูลทั้งแบบเวลาจริงและแบบอดีต (Real-Time Data Set and Historical (Batch) Data Set) ใน Analytics Layer ชุดข้อมูลเวลาจริงจะถูกใช้สำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่และการตรวจจับแหล่งกำเนิดการรบกวน (Interference Source Detection) ชุดข้อมูลในอดีตจะถูกใช้สำหรับฝึกแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้อย่างลึกต่าง ๆ (Deep Learning) และถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์ของแอปพลิเคชันที่ใช้ข้อมูลในอดีตต่าง ๆ เช่นการทำนายพฤติกรรมการใช้คลื่นความถี่ (Forecast Spectrum Behavior) หรือใช้ในกระบวนการรายงานและวางแผน (Report and Planning Process) ซึ่งจะถูกนำเสนอผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application)

ในส่วนของฐานข้อมูล เนื่องจากมีความต้องการข้อมูลคลื่นความถี่สำหรับฝึกปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้อย่างลึกให้มากที่สุด ตัวอย่างของกรอบการทำงานสำหรับเก็บข้อมูลส่วนกลาง (Data Lake Framework) ควรจะใช้เป็น MySQL PostgreSQL หรือ Hadoop ซึ่งที่เก็บข้อมูลส่วนกลางเหล่านี้สามารถรับส่งข้อมูลได้จากระบบ Spark ออกไปยังระบบสารสนเทศอื่นได้ผ่านทางตัวเชื่อมต่อฐานข้อมูล (Database Connector)



รูปที่ 9-2 แพลตฟอร์ม Spark สำหรับการวิเคราะห์ Big Data ของข้อมูลคลื่นความถี่ (Spectrum Information)

9.3.3 การวิเคราะห์ข้อความ (Text Analysis) โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) สำหรับการบริหารจัดการการให้บริการสาธารณะ (Public Service Management)

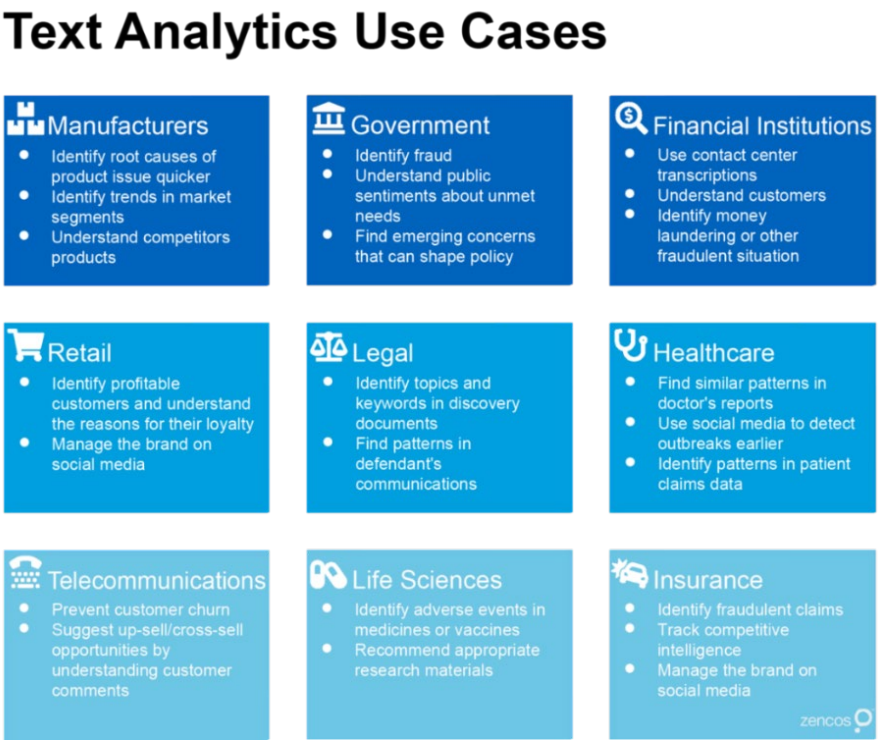
จากการดำเนินการตามปกติในแต่ละวัน องค์กรต่าง ๆ ต้องพบเจอกับข้อมูลประเภทข้อความ (Textual Data) ทั้งแบบค่อนข้างมีโครงสร้าง (Semi-Structured) และแบบไม่มีโครงสร้าง (Unstructured) แหล่งของข้อมูลดังกล่าวมีหลายประเภทเช่น ข้อความอิเล็กทรอนิก (Electronic Text) บันทึกของศูนย์บริการข้อมูลลูกค้า (Call Center Log) เอกสารของบริษัท (Corporate Documents) เอกสารงานวิจัย (Research Papers) ใบสมัคร (Application Forms) บันทึกการให้บริการ (Service Notes) อีเมล์ เป็นต้น องค์กรอาจจะสามารถเข้าถึงข้อมูลเหล่านี้อยู่แต่ไม่ได้เอามาใช้ประโยชน์เนื่องจากอาจยังไม่ได้ตระหนักถึงคุณค่ามหาศาลของข้อมูลที่กำลังบริหารจัดการอยู่นี้ หรืออาจยังไม่มีวิธีการหรือเทคโนโลยีที่จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลและดึงเอาข้อมูลเชิงลึก (Insight) ที่มีประโยชน์มาใช้ได้

ข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ ไม่ว่าอยู่ในรูปแบบใดเป็นสินทรัพย์ที่องค์กรสามารถดึงเอาข้อมูลเชิงลึกมาใช้ประโยชน์ในการประกอบการตัดสินใจได้ เช่นการตัดสินใจเกี่ยวกับ ลูกค้า คู่ค้า คู่แข่ง ข้อมูลเกี่ยวกับลูกค้าอาจช่วยให้องค์กรสามารถบริการที่ดีขึ้นและเพิ่มฐานลูกค้าได้ ข้อมูลเกี่ยวกับคู่ค้าอาจช่วยให้สามารถรักษาความสัมพันธ์ที่ดีกับคู่ค้าปัจจุบัน และสร้างสัมพันธ์กับคู่ค้าใหม่ที่มีประโยชน์ ในขณะที่ข้อมูลเกี่ยวกับคู่แข่งอาจสามารถช่วยให้องค์กรยังสามารถสร้างความได้เปรียบนำคู่แข่งอยู่ได้ อย่างไรก็ตามองค์กรอาจไม่สามารถดึงเอาข้อมูลเชิงลึกจากข้อมูลทั้งหมดที่ดำเนินการอยู่ได้เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบที่ไม่มีโครงสร้างซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ประมวลผลเมื่อเทียบกับข้อมูลที่มีโครงสร้าง นอกจากนั้นเป็นที่คาดการณ์ว่าข้อมูลมหาศาลเหล่านี้ซึ่งมีคุณค่าทั้งในเชิงการค้า เศรษฐศาสตร์และสังคม จะเติบโตขึ้นในอัตราที่เร็วกว่าเดิมในอนาคตอันใกล้นี้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้วิธีการและเทคนิคอัตโนมัติเช่น การวิเคราะห์และการทำเหมืองข้อความ (Text Analytics and Text Mining) ที่สามารถดึงเอา

ข้อมูลเชิงลึกที่ซ่อนอยู่ในข้อมูลเหล่านี้ออกมาได้ [71] ซึ่งมีกรณีใช้งาน (Use Cases) ในหลากหลายธุรกิจเช่น ภาคการผลิต ภาครัฐ การเงิน ค้าปลีก กฎหมาย สุขภาพและเวชภัณฑ์ โทรคมนาคม ประกันภัย เป็นต้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9-3 โดยการวิเคราะห์ข้อความที่เสนอจะมีความใกล้เคียงกับกรณีใช้งานในภาครัฐและโทรคมนาคม

วิธีการวิเคราะห์ข้อความ (หรือเรียกอีกอย่างว่า การทำเหมืองข้อความ) หรือเทคโนโลยี Natural Language Processing (NLP) มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี วิธีแรกเป็นการวิเคราะห์ข้อความที่มีอยู่เช่น การรีวิวของลูกค้า (Customer Review) คำความสะอาด (Cleaning) ข้อมูลเพื่อหาข้อมูลเชิงลึก อีกวิธีหนึ่งคือการจัดโครงสร้างของข้อมูลเพื่อให้โมเดล Machine Learning ทำนายสิ่งที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

การดึงข้อมูลข่าวสาร (Information Extracting, IE) ถูกนำมาใช้ในการดึงเอาข้อมูลประเภทที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า (Predefined Data Types) จากเอกสารข้อความ โดยหลักระบบ IE จะมุ่งไปที่การระบุและดึงเอาข้อความที่เกี่ยวข้องมาวางรวมกันในรูปแบบที่กำหนดไว้ หลังจากการดึงข้อมูลข่าวสาร DiscoTEX (Discovery from TextEXtraction) ซึ่งเป็นอีกหนึ่งกระบวนการหลัก (Core Method) จะแปลงข้อมูลที่นำมาวางรวมกันในโครงสร้าง (รูปแบบ) ที่กำหนดไว้เพื่อค้นหาความรู้ (Knowledge) ที่เป็นประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 9-3 ตัวอย่างของการใช้การวิเคราะห์ข้อความ (Text Analytics) ในเชิงธุรกิจ [72]

ในด้านการเงิน Name-Entity Recognition (NEM) ถูกใช้เพื่อดึงเอาชนิดของข้อมูลที่ถูกกำหนดไว้จากเอกสาร ในธุรกิจธนาคาร เอกสารคำสั่งทำธุรกรรมของลูกค้าอาจถูกส่งมาทางแฟกซ์ทำให้เอกสารมีรูปแบบที่หลากหลายเนื่องจากไม่ได้มีการกำหนดรูปแบบที่แน่นนอนทำให้ต้องมีการดึงข้อมูลข่าวสารที่เหมาะสมเพื่อนำมาสร้างเป็นเอกสารที่มีโครงสร้าง (Structured Documents) ก่อน

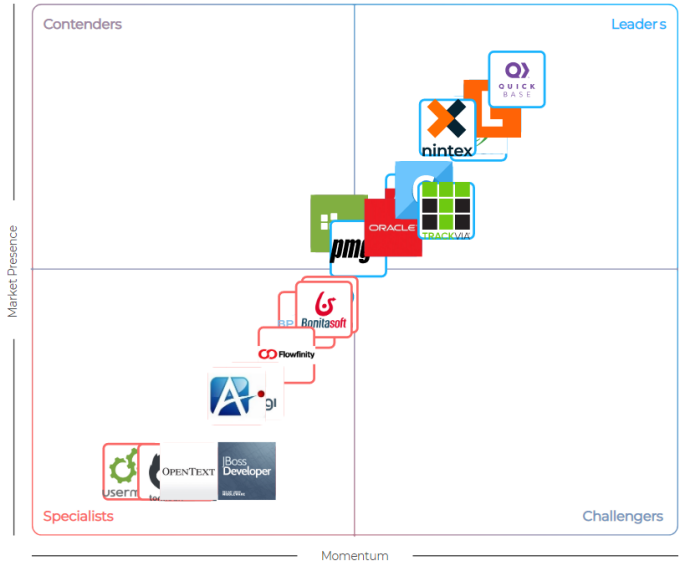
IE ซึ่งเป็นเทคนิคการดึงข้อมูลข่าวสารที่มีคุณค่าจากกลุ่มข้อมูลจำนวนมหาศาล เป็นขั้นเริ่มต้นของระบบที่จะดึงเอาข้อมูลสำคัญจากกลุ่มข้อมูลที่ไม่มีโครงสร้างโดยการค้นหาวลีหลัก (Key Phrases) และความสัมพันธ์ภายในข้อความ โดยมีกระบวนการทำงานแต่ละขั้น (Tasks) ดังนี้ Tokenization, Identification of Named Entities, Sentence Segmentation และ Part-of-Speech Assignments

ระบบ IE นี้จะดึงเอาข้อมูลข่าวสารจำเพาะ คุณลักษณะ และเอกลักษณ์ (Specific Information, Attributes, and Entities) รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างกันของสิ่งเหล่านี้ออกมาจากเอกสาร หลังจากนั้นคลังข้อความที่ถูกดึงออกมานี้จะถูกนำไปรวมกันเป็นฐานข้อมูลเพื่อประมวลผลต่อ กระบวนการ Precision and Recall จะถูกใช้เพื่อตรวจสอบและประเมินข้อมูลข่าวสารและผลลัพธ์ (Information/Outcomes) ที่ต้องการจากข้อมูลที่ดึงออกมา ข้อมูลข่าวสารทั้งแบบเชิงลึกและแบบครอบคลุม (Deep and Extensive Information) มีความจำเป็นอย่างยิ่งในการที่จะเชื่อมโยงและดึงเอาข้อมูลสำคัญออกมาเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด [73, 74]

9.3.4 การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อเตรียม และทำความสะอาด (Prepare and Clean) ข้อมูลสำหรับทำกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติ (Business Process Automation)

9.3.4.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติ

การจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติ (Business Process Automation, BPA) โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์และแมชชีนเลิร์นนิ่งช่วยให้บริษัทหรือองค์กรสามารถที่จะทำให้กระบวนการของการทำงานต่าง ๆ ดำเนินไปได้โดยอัตโนมัติ (Automate) โดยสามารถทำตลิดทั้งกระบวนการหรือเลือกทำเป็นบางส่วนได้ เช่น การพิจารณาว่าลูกค้าต้องการอะไรจากข้อมูลที่ลูกค้าป้อนเข้ามา อย่างในกรณีที่ลูกค้าที่ใช้งานร้านค้าออนไลน์ (Online Store) เริ่มที่จะพิมพ์ข้อความต่าง ๆ เพื่อค้นหาสินค้า แมชชีนเลิร์นนิ่งสามารถที่ทำนายและแนะนำข้อความที่เกี่ยวข้องให้กับลูกค้าโดยอัตโนมัติ นอกจากนั้นยังสามารถแสดงข้อมูลสินค้าที่เกี่ยวข้องกับคำที่ค้นหานั้นได้ด้วย เป็นต้น แพลตฟอร์ม (Platform) การจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัตินี้ช่วยให้องค์กรสามารถประหยัดเวลาในการทำงานลักษณะซ้ำ ๆ ทำให้เวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแก้ปัญหา (Mean Time to Resolution) เร็วขึ้น และสามารถควบคุมโครงสร้างพื้นฐานของระบบสารสนเทศ (IT Infrastructure) ได้มากขึ้น จากรายงานทางการตลาด (Market Report) เกี่ยวกับการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติของ AIMultiple [4] มีบริษัทชั้นนำทั่วโลกประมาณ 27 บริษัทที่ให้บริการซอฟต์แวร์และโซลูชัน (Software and Solution) สำหรับการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัตินี้ (ดูรูปที่ 9-4)



รูปที่ 9-4 ตัวอย่างบริษัทชั้นนำทั่วโลกที่เชี่ยวชาญเกี่ยวกับโซลูชันการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติ (Business Process Automation) [75]

ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. ขั้นตอนการทำงาน (Workflow) และคำร้องต่าง ๆ จะมีลักษณะที่เป็นการทำซ้ำ (Repetitive) ดังนั้นจึงสามารถที่จะทำเป็นการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติได้ ยกตัวอย่างเช่น ผู้ประกอบการหรือผู้ใช้คลื่นความถี่ สถานีวิทยุ หน่วยงานราชการที่ต้องการใช้คลื่นความถี่ จะต้องส่งแบบคำร้องเพื่อขอใช้คลื่นความถี่มาที่สำนักงาน กสทช. คำร้องเหล่านี้มีข้อมูลต่าง ๆ เช่น ย่านความถี่ที่ขอใช้งาน ชนิดของมอดูเลชัน (Modulation) กำลังส่ง (Transmit Power) ของอุปกรณ์ และข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่นำเข้ามา จากข้อมูลเหล่านี้ สำนักงาน กสทช. ก็จะนำมาพิจารณาว่าจะอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่หรือขอให้ผู้ยื่นคำร้องเปลี่ยนแปลงข้อมูลในคำร้องที่ยื่นเข้ามา เป็นต้น

ในขอบเขตของการทำงานนี้ คณะผู้วิจัยเสนอการนำเอาปัญญาประดิษฐ์และแมชชีนเลิร์นนิ่งมาใช้สำหรับการจัดการกระบวนการธุรกิจอัตโนมัติเพื่อประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมเพื่อทดแทนระบบรับคำร้องเดิม มาเป็นระบบออนไลน์ที่มีระบบประมวลผลอัตโนมัติ ระบบประมวลผลอัตโนมัตินี้จะช่วยผู้ยื่นคำร้องตั้งแต่ขั้นตอนแรกโดยการให้ข้อมูลต่าง ๆ เช่น คลื่นความถี่ที่จะขอรับใบอนุญาตมีอยู่หรือไม่ รวมถึงชนิดของมอดูเลชันที่อนุญาต เป็นต้น จากนั้นระบบประมวลผลอัตโนมัติจะสร้างแบบฟอร์มอนุมัติใบอนุญาต (License Approval Form) สำหรับเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบเพื่อพิจารณาต่อไป

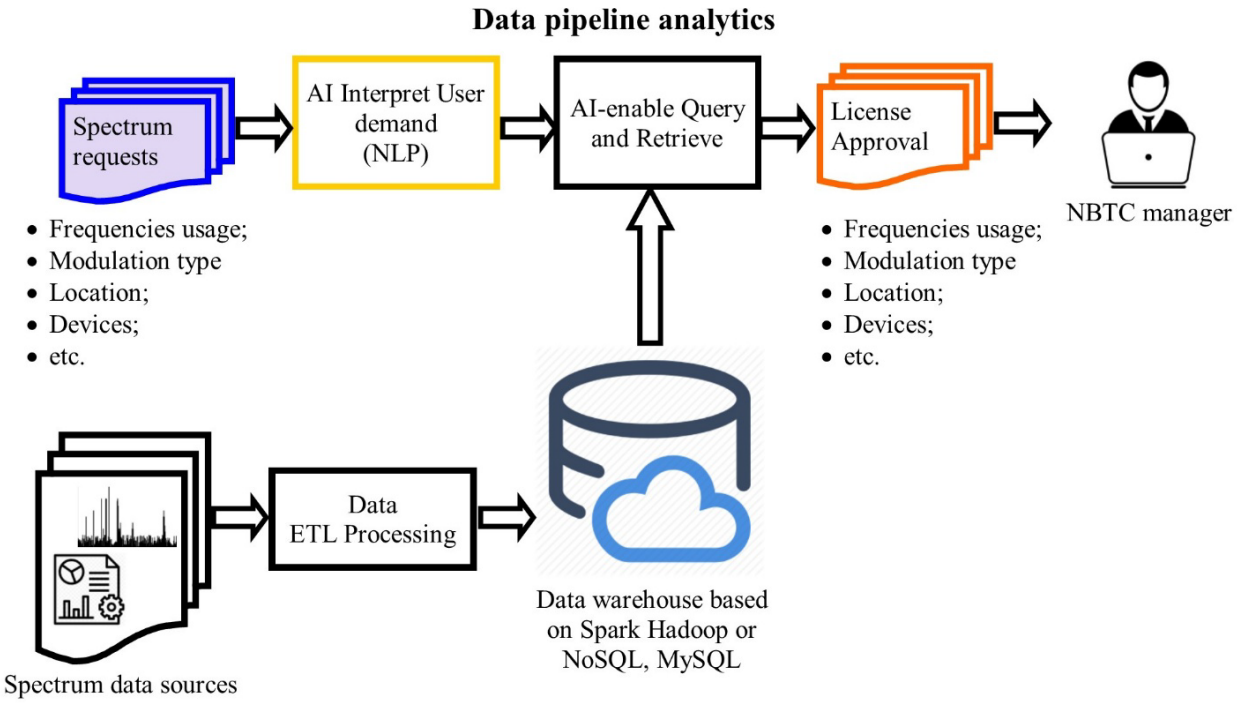
9.3.4.2 ระเบียบวิธี (Methodology)

ระบบประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมอัตโนมัติที่เสนอมีภาพรวมดังแสดงในรูปที่ 9-5 ข้อมูลคลื่นความถี่ที่สำนักงาน กสทช. มีอยู่จะถูกเก็บไว้ที่คลังข้อมูล (Data Warehouse) และจะถูกอัปเดตโดยการจัดการข้อมูลแบบ ELT (Extract, Transform, and Load) ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายโอนข้อมูลจากแหล่งข้อมูลหลาย แหล่งมาไว้ที่คลังข้อมูลเดียวกันอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อผู้ใช้ส่งคำร้องเข้าสู่ระบบประมวลผลอัตโนมัติ มอดูล (Module) ที่เรียกว่า AI Interpret User จะดึงเอาข้อมูลจากแบบคำร้อง เช่น ย่านความถี่ มอดูเลชัน ตำแหน่งของอุปกรณ์ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกป้อนเข้าสู่มอดูล Query and Retrieve ซึ่งจากข้อมูลที่ได้รับจะไปดึงเอาข้อมูลที่จำเป็นจากคลังข้อมูลของสำนักงาน กสทช. ด้วยข้อมูลจากคลังข้อมูลระบบ

ประมวลผลอัตโนมัติจะพิจารณาว่าควรอนุมัติตามคำขอหรือควรขอให้มีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลในคำร้อง จากนั้นผลการพิจารณาของระบบอัตโนมัติจะถูกส่งมายังสำนักงาน กสทช. เพื่อพิจารณาขั้นสุดท้าย ทั้งนี้ในภาพรวมคุณสมบัติหลักของระบบที่เสนอคือการใช้ปัญญาประดิษฐ์แปลและประมวลคำขอของผู้ใช้โดยใช้การจัดการข้อมูลแบบ NLP (Natural Language Processing) และฐานข้อมูลซึ่งอาจจะเป็นแบบ Spark Hadoop, NoSQL หรือ MySQL

คณะผู้วิจัยเสนอใช้การจัดการข้อมูลแบบ NLP กับมอดูล AI Interpret User เพื่อที่จะดึงข้อมูลที่เกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่จากคำร้องด้วยการค้นหาคำสำคัญ (Keyword Searching) โดยในส่วนนี้คณะผู้วิจัยเสนอให้ใช้โครงข่ายนิวรอลแบบคอนโวลูชันนัล (Convolutional Neural Network, CNN) และโครงข่ายนิวรอลแบบคอนโวลูชันนัลที่เกิดขึ้นซ้ำ (Recurrent Convolutional Neural Network, RNN) เป็นหลักสำหรับการทำการแบ่งกลุ่มข้อความ (Text Classification)

จากข้อมูลที่ได้รับจากขั้นตอน NLP ข้างต้น มอดูล AI-enable Query and Retrieve จะไปดึงข้อมูลที่จำเป็นจากคลังข้อมูล ซึ่ง BigQuery ของ Google [76] เหมาะที่จะใช้ในขั้นตอนนี้ เนื่องจากมี Big Query ML ซึ่งเป็นแมชชีนเลิร์นนิ่ง นอกจากนั้นยังมี Cloud ML Engine และมี TensorFlow ซึ่งทำให้สามารถฝึก (Train) ระบบให้เข้าใจข้อมูลที่มีโครงสร้าง (Structured Data) ได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เพียงแค่ SQL



รูปที่ 9-5 ระบบประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคมอัตโนมัติที่เสนอ

แกนหลัก (Core) ของระบบประมวลผลอัตโนมัติที่เสนอได้แก่ขั้นตอนการจัดการข้อมูลแบบ ETL ซึ่งนอกจากจะถ่ายโอนข้อมูลจากหลายแหล่งข้อมูลมารวมไว้ในคลังข้อมูลเดียวแล้ว การจัดการข้อมูลแบบ ETL ยังแปลง (Convert/Transform) ฐานข้อมูลต่าง ๆ ให้เป็นรูปแบบเดียว โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ดึงข้อมูล (Extract) : รวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ซึ่งมักมีรูปแบบของข้อมูลแตกต่างกัน
- แปลง (Transform) : แปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่ถูกต้องเพื่อให้ข้อมูลจากฐานข้อมูลหรือแอปพลิเคชันหนึ่งสามารถใช้ร่วมกับฐานข้อมูลหรือแอปพลิเคชันอื่น ๆ ได้ โดยมีฟังก์ชันการทำงานหลัก (Key Functions) ดังนี้
  - Standardization : การทำให้เซ็ตของค่าการค้นหา (Set of Lookup Value) ต่าง ๆ เป็นมาตรฐานสอดคล้องกัน
  - Cleansing : การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเพื่อที่จะแก้ไขหรือนำข้อมูลที่มีปัญหาออก
  - Transposing : มักจะเป็นการปรับรูปแบบและโครงสร้าง (De-Normalizing and Reorganizing) ข้อมูลให้เป็นรูปแบบที่เหมาะที่สุดในการรายงานผล
  - Creating Surrogate Keys : การสร้างตัวแทนของค่า (Value) ที่จะถูกนำไปปรับใช้กับข้อมูลที่คล้ายกันจากแหล่งข้อมูลอื่น ๆ ที่แตกต่างกัน
- โหลด (Load) : บันทึกข้อมูลลงสู่ฐานข้อมูลปลายทางหรือลงคลังข้อมูล

การจัดการข้อมูลแบบ ETL ช่วยให้ข้อมูลคลื่นความถี่มีบริบทในอดีตที่ลึกขึ้น (Deeper Historical Context) ทำให้ระบบสามารถตัดสินใจได้ดีกว่าโดยไม่ต้องผ่านการพิจารณาของมนุษย์ ข้อดีอื่น ๆ ของการนำเอาการจัดการข้อมูลแบบ ETL มาใช้ได้แก่

- ความสามารถในการย่อยข้อมูลขนาดใหญ่จากหลาย แหล่ง โดยเฉพาะข้อมูลขนาดใหญ่ที่มีกฎและการแปลงที่ซับซ้อน (Complex Rules and Transformation)
- ความถูกต้อง (Accuracy) ของข้อมูลที่สูงขึ้น ทำให้การรายงานผลและการตรวจสอบ (Reporting and Auditing) มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- ความยืดหยุ่นในการดำเนินการ (Operational Resilience) เนื่องจากเครื่องมือต่าง ๆ มีฟังก์ชันจัดการความผิดพลาดในตัว (Built-in Error Handling Functionality)

คณะผู้วิจัยพิจารณาการใช้เครื่องมือการทำ ETL ไว้สองแนวทาง แนวทางแรกได้แก่การเลือกใช้เครื่องมือสำหรับทำ ETL จากผู้ให้บริการตามรายชื่อในตารางที่ 9-2 [77]

ตารางที่ 9-2 รายชื่อของผู้ให้บริการ ETL (Extract, Transform, and Load)

Name	Year Founded	Status	Additional Features
Informatica	1993	Public	-Range of prebuilt transformations -Embeddable engine for real-time and batch data execution

Name	Year Founded	Status	Additional Features
Stitch	2016	Private	-Was created from RJMetrics
IBM: Infosphere Information Server	2008	Public	-Netezza integration for faster loading
Oracle Data Integrator (ODI)	2006	Public	-Separation of declarative rules from implementation details -ELT architecture can use RDBMS engine
ETLeap	2013	Private	-Data wrangling enables working off sample data alone
SAP Business Objects Data Services (BODS)	2007	Public	-Structured and unstructured data integration -Web-based DI administrator for repository management
CloverETL	2002	Private	-Open source based on Java -Has its own transformation language for complex validation rules
Microsoft SQL Server Integration Services (SSIS)	2005	Public	-Transformation is processed in the memory, making the integration process in SQL server much faster
SAS Data Management	2006	Public	-Access to Hadoop via Impala or Pivotal HAWQ -Role-based GUI with drag-and-drop functionality
Matillion	2011	Private	-Tools built specifically for Redshift, BigQuery, Snowflake

แนวทางที่สองคือการใช้เครื่องมือ ETL แบบเปิดเผยซอร์สโค๊ด (Open Source ETL Tools) ซึ่งในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยเสนอใช้เครื่องมือ ETL แบบเปิดเผยซอร์สโค๊ดเช่น Apache Airflow, Apache Kafka, Apache NiFi, Talend Open Studio [6]

การตรวจสอบความถูกต้องและการทดสอบ (Validation and Testing)

เพื่อให้แน่ใจว่าระบบประมวลผลอัตโนมัติที่เสนอมีประสิทธิภาพและตอบโจทย์ความต้องการของสำนักงาน กสทช. คณะผู้วิจัยจะทดสอบระบบโดยใช้กรณีทดสอบ (Test Case) ในหลายรูปแบบ กรณีทดสอบเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนแปลงและทดสอบเป็นระยะ ๆ กับแหล่งข้อมูลเกี่ยวกับคลื่นความถี่ใหม่ที่ถูกเพิ่มเข้าไปในคลังข้อมูลคลื่นความถี่

9.4 แพลตฟอร์มปัญญาประดิษฐ์สำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)

เพื่อตอบโจทย์ความต้องการต่าง ๆ ของสำนักงาน กสทช. เกี่ยวกับการบริการจัดการและการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ คณะผู้วิจัยจะพิจารณาเลือกใช้ระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่จากตัวเลือกสามระบบต่อไปนี้เพื่อใช้สำหรับการโครงการวิจัยนี้

1) ระบบแยกเดี่ยวแบบประจำที่ (Standalone System/Fixed Unit)

ระบบแยกเดี่ยวแบบประจำที่ถูกออกแบบมาเพื่อติดตามความเปลี่ยนแปลง (Variation) ในส่วนของความหนาแน่นประชากร อาคาร สภาพพื้นที่ (Terrain) และปัจจัยอื่น ๆ ในหรือรอบ ๆ พื้นที่ที่กำหนด (อาจจะเป็น ในเมือง ชานเมือง และพื้นที่นอกเมือง เป็นต้น)

ในการวางแผนการใช้งานอุปกรณ์วิทยุคมนาคมใด ๆ มีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ รวมถึงแบบจำลองเบื้องต้น (First Order Model) ของเมืองและสภาพพื้นที่โดยรอบเพื่อที่จะประมาณตำแหน่งที่ดีเหมาะสำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่รวมไปถึงการป้องกันการรบกวนต่าง ๆ จากนั้นจึงพิจารณาตำแหน่งสำหรับการเฝ้าฟังจากโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีอยู่แล้วเพื่อประสิทธิภาพการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่ดีที่สุด

2) ระบบแยกเดี่ยวแบบเคลื่อนที่ (Standalone System/Mobile Unit)

ระบบแยกเดี่ยวแบบเคลื่อนที่จำเป็นสำหรับการเสริมการทำงานในพื้นที่ที่เป็นจุดบอดของของระบบประจำที่ ยกตัวอย่างเช่น เซ็นเซอร์ที่วางประจำที่อยู่ทุก ๆ กิโลเมตรอาจจะไม่เห็นสัญญาณ WiFi หรืออุปกรณ์กำลังส่งต่ำในความถี่ย่าน Unlicensed อย่างที่อุปกรณ์ในระบบแยกเดี่ยวแบบเคลื่อนที่เห็นได้ เป็นต้น โดยเมื่อคำนึงเรื่องต้นทุน ต้นทุนที่เพิ่มขึ้นอาจจะต่ำหากอุปกรณ์แบบเคลื่อนที่เหล่านี้ถูกใช้งานเป็นประจำทุกวัน เช่นในพาหนะสำหรับส่งไปรษณีย์หรือเก็บขยะ เป็นต้น นอกจากนั้นยังไม่จำเป็นต้องใช้ทักษะพิเศษในการทำให้ระบบนี้ทำงานอีกด้วย

3) ระบบที่ติดตั้งทั่วทั้งเมืองหรือทั่วประเทศ

ในการวางแผนการใช้งานอุปกรณ์วิทยุคมนาคมใด ๆ มีความจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ รวมถึงแบบจำลองเบื้องต้น (First Order Model) ของเมืองและสภาพพื้นที่โดยรอบเพื่อที่ประมาณตำแหน่งที่ดีเหมาะสำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่รวมไปถึงการป้องกันการรบกวนต่าง ๆ จากนั้นจึงพิจารณาตำแหน่งสำหรับการเฝ้าฟังจากโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ที่มีอยู่แล้วเพื่อประสิทธิภาพการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่ดีที่สุด

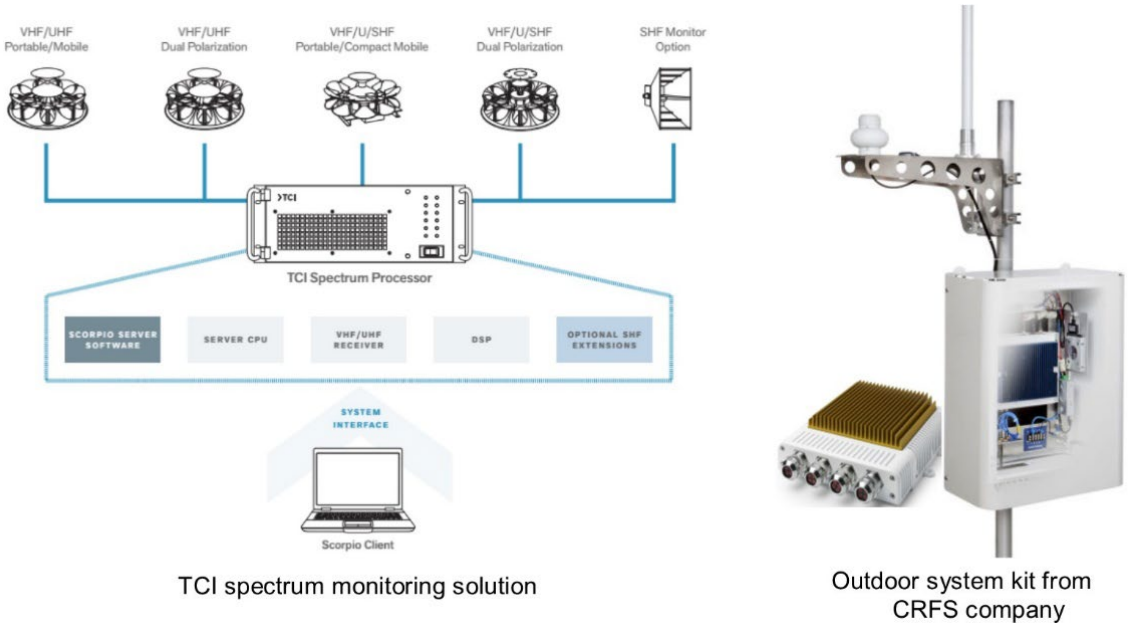
9.4.1 เครื่องรับคลื่นความถี่ (Spectrum Receiver)

ในส่วนของเครื่องรับคลื่นความถี่ที่ใช้ในข้อเสนอโครงการวิจัยนี้ เครื่องรับนี้จะต่างจากตัววิเคราะห์คลื่นความถี่ (Spectrum Analyzer) ซึ่งจะใช้วัดสัญญาณที่รู้จักอยู่แล้ว (Known Signals) เครื่องรับคลื่นความถี่จะใช้สำหรับ

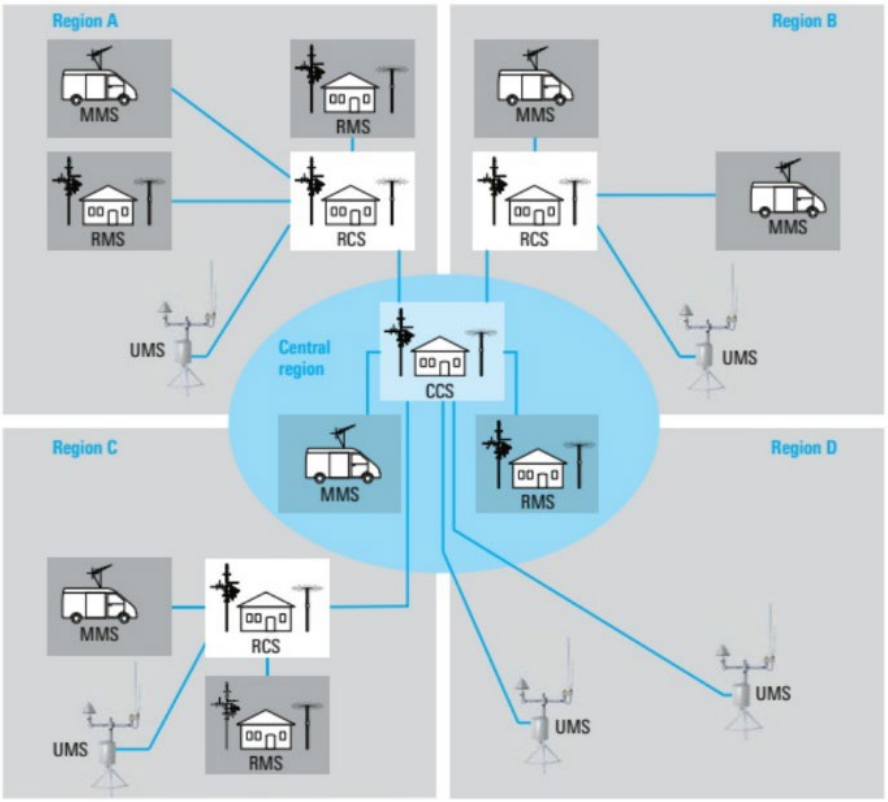
- การวัดสัญญาณที่ไม่รู้จัก (Unknown Signals) ในย่าน 20 เมกะเฮิร์ตซ์ถึง 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามที่สำนักงาน กสทช. ต้องการ
- เฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่ไม่มีช่องว่าง (Gap-Free Spectrum) อย่างรวดเร็ว
- สัญญาณสามารถถูกดีมอดูเลต (Demodulated) และเฝ้าฟัง (Monitored) ได้
- ฮาร์ดแวร์สำหรับเครื่องเฝ้าฟังคลื่นความถี่สามารถสร้างลำดับของข้อมูลอินเฟสและควอดเดรเจอร์ของสัญญาณตามเวลา (In-Phase and Quadrature Time Sequences) ได้

9.4.1.1 อุปกรณ์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด (Commercial Devices)

ในปัจจุบันมีอุปกรณ์สำหรับระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่แบบพร้อมใช้งานวางจำหน่ายอยู่แล้ว เช่นของ TCI CRFS และ Rhode & Schwarz (ตามรูปที่ 9-6 และ 9-7) [78, 79] ข้อได้เปรียบของอุปกรณ์เหล่านี้คือ ความสอดคล้องกับมาตรฐานความถี่ต่าง ๆ (Spectrum Standard) ความพร้อมใช้งาน และความเชื่อถือได้ (Reliability) อย่างไรก็ตามอุปกรณ์เหล่านี้มีราคาค่อนข้างแพงอาจไม่เหมาะกับการติดตั้งสำหรับระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ทั้งเมืองหรือทั้งประเทศ นอกจากนั้นยังอาจเป็นระบบปิดที่ไม่สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์หรือระบบของผู้ผลิตรายอื่นด้วย



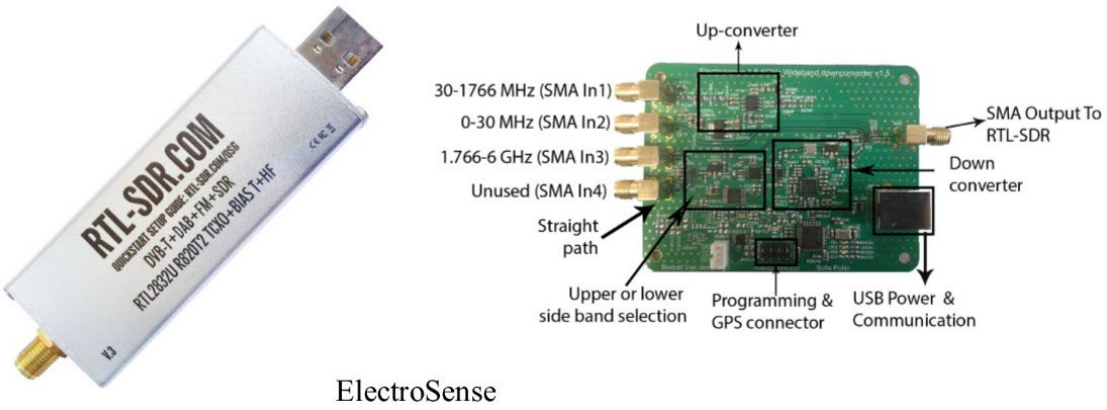
รูปที่ 9-6 ระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่แบบแยกเดี่ยวที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด



รูปที่ 9-7 ระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่ติดตั้งทั่วประเทศของบริษัท Rohde & Schwarz ซึ่งผสมผสานทั้งระบบแบบประจำที่และแบบเคลื่อนที่ (Fixed and Mobile Units)

9.4.1.2 ฮาร์ดแวร์แบบเปิดสำหรับเครื่องรับคลื่นความถี่ (Open-Hardware for Spectrum Receiver)

เซ็นเซอร์ Electrosense (ดังรูปที่ 9-8) ถูกออกแบบมาให้ใช้ฟรอนต์เอนด์ส่วนที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณวิทยุและแพลตฟอร์มแบบฝังที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (Software-Defined Radio (SDR) Front-Ends and Embedded Platforms) อุปกรณ์ดังกล่าวราคาไม่แพง เข้าถึงง่าย เช่น Rasberry Pi เป็นการลดต้นทุนให้กับผู้ให้ข้อมูลคลื่นความถี่ (Spectrum Data Contributor) ภาคแปลงสัญญาณขาลงที่ถูกออกแบบให้มีราคาต่ำ (Low-Cost Down Converter) ถูกใช้เพื่อขยายช่วงความถี่ด้านต่ำของแพลตฟอร์มที่กำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (Low-End SDR Platforms) จาก 1.7 กิกะเฮิร์ตซ์ไปเป็น 6 กิกะเฮิร์ตซ์ ข้อได้เปรียบสำคัญของฮาร์ดแวร์แบบเปิดคือสามารถเชื่อมต่อและแชร์ (Share) ข้อมูลกับระบบอื่นหรืออุปกรณ์อื่นเช่นคอมพิวเตอร์ (Laptop Computer, PC) ได้ [31, 32, 80]



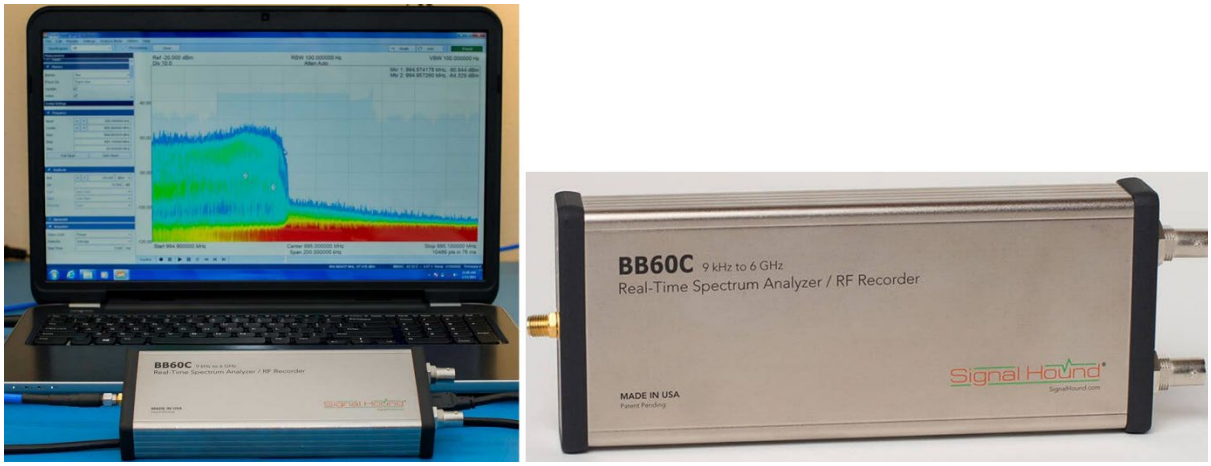
รูปที่ 9-8 ฮาร์ดแวร์แบบเปิด (Open Hardware) ของโครงการ ElectroSense

HackRF One จาก Great Scott Gadgets เป็นอุปกรณ์วิทยุข้างเคียงซึ่งถูกกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (SDR Peripheral) สามารถส่งและรับสัญญาณวิทยุตั้งแต่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ไปจนถึง 6 กิกะเฮิร์ตซ์ HackRF One เป็นแพลตฟอร์มของฮาร์ดแวร์ที่เปิดเผยซอร์สโค้ด (Open-Source Hardware Platform) ถูกออกแบบเพื่อให้สามารถทดสอบและพัฒนาสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายยุคใหม่และยุคถัดไปได้ สามารถใช้ได้ทั้งเป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อผ่าน USB (USB Peripheral) หรือลงโปรแกรมให้ทำงานเดี่ยว ๆ (Standalone Operation) [81]

9.4.1.3 เครื่องรับคลื่นความถี่แบบไฮบริด – อุปกรณ์ของ Signal Hound

เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมคลื่นวิทยุแบบเวลาจริง (Real-Time RF Spectrum Analyzer) รุ่น BB60C ดังแสดงในรูปที่ 9-9 เป็นอีกหนึ่งวิธีที่เสนอในโครงการวิจัยนี้ อุปกรณ์นี้จะส่งข้อมูลดิจิทัลของสัญญาณวิทยุที่จับได้ไปยังคอมพิวเตอร์ด้วยอัตราเร็ว 130 MB/วินาทีผ่านทาง USB 3.0 โดยมีแถบกว้างความขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Bandwidth) เท่ากับ 27 MHz และอัตราการกวาด (Sweep Speed) เท่ากับ 24 GHz/วินาที

อุปกรณ์รุ่น BB60C มีสมรรถนะที่ดีกว่าอุปกรณ์ในโครงการ ElectroSense ซึ่งรวมถึง Spurious-Free Dynamic Range (SFDR) ที่ดีขึ้น 20 dB ลดระดับสัญญาณรบกวน (Flattening the Noise Floor) และ Band Transition ได้มากกว่า 8 dB และขยายช่วงอุณหภูมิใช้งาน (Operating Temperature) ให้อยู่ในช่วง -40 C ถึง +65 C (จากเดิมที่อยู่ในช่วง 0 C ถึง +50 C) อุปกรณ์ถูกทดสอบและปรับเทียบให้ทำงานได้อย่างถูกต้อง (Calibrated Accuracy) ในสถาวะที่อุปกรณ์ถูกแช่ในอุณหภูมิ -40 C ไว้ถึง 3 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ +65 C



รูปที่ 9-9 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมคลื่นวิทยุแบบเวลาจริง (Real-Time RF Spectrum Analyzer) รุ่น BB60C ของ Signal Hound อุปกรณ์มาพร้อมกับฐานข้อมูล (Library) ที่สามารถแปลงข้อมูลไปยังซอฟแวร์แบบเปิดเผยซอร์สโค๊ดเช่น GNU Radio หรือ Python.

อุปกรณ์รุ่น BB60C ยังมีฟังก์ชันการทำงานใหม่ที่สามารถปรับ I/Q streaming bandwidths ได้ อุปกรณ์จะมี API เฉพาะ (Proprietary Application Programming Interface) ที่สามารถประมวล 1.2 ล้าน FFT Spectrums หรือ 320 ล้าน FFT Points ต่อวินาที ส่งข้อมูลความถี่แบบเวลาจริงไปยังแอปพลิเคชัน GUI (ที่ชื่อ Spike) หรือแอปพลิเคชันแบบเปิดอื่น ๆ เพื่อรองรับการประมวลข้อมูลในระดับเข้มข้นนี้คณะผู้วิจัยเสนอให้ใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มี Intel quad-core i7-2600 ขึ้นไป หรือคอมพิวเตอร์แลปท๊อปที่มี i7-3612QM ขึ้นไป คุณสมบัติอื่น ๆ ของอุปกรณ์ BB60C เป็นดังนี้

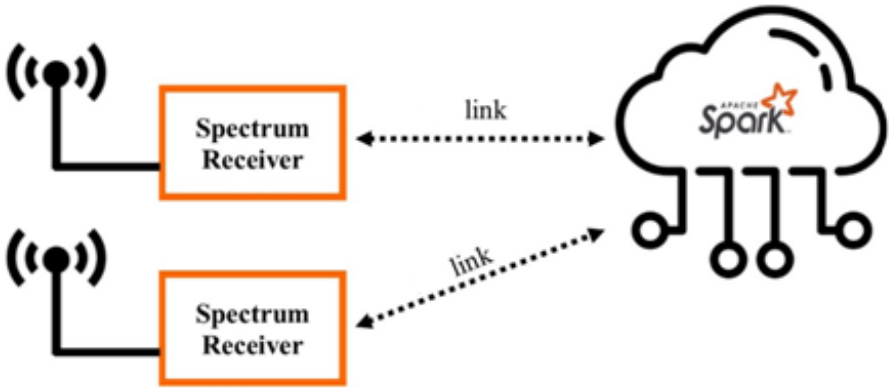
- ย่านความถี่วิทยุ (RF Frequency Range) จาก 9 kHz ถึง 6 GHz
- ความถี่ในการกวาด (Sweep Speed) สูงได้ถึง 24 GHz/sec (≥10 kHz RBW)
- Dynamic Range กว้าง จาก -158 dBm ถึง +10 dBm
- ความละเอียดของแถบความถี่ (Resolution Bandwidths) จาก 10 Hz ถึง 10 MHz
- ใช้พลังงานจาก USB ไม่ต้องการแหล่งพลังงานภายนอกอื่น ๆ
- มีการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing) ที่ทรงพลังบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- ได้ครบทั้งซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ในราคาที่ถูก
- สามารถใช้ API (Application Programming Interface) ที่มีให้เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชันอื่น ๆ ได้ตามต้องการ
- เริ่มใช้งานได้รวดเร็วและสามารถปรับตามความต้องการ (Customize) ได้ด้วย GUI แบบเปิดที่มีให้
- ทำข้อมูล IF ให้เป็นดิจิทัล (Digitize) ด้วยอัตราเร็ว 80 ล้านตัวอย่างต่อวินาที

- แถบกว้างความถี่ฉับพลัน (Instantaneous Bandwidth) เท่ากับ 27 MHz
- ใช้กับระบบปฏิบัติการ Windows 7/8/10 64-bit ได้
- ส่งข้อมูลผ่าน USB 3.0 ได้เร็วถึง 140 MB/วินาที อย่างสม่ำเสมอไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (วัดที่สายยาว 9 นิ้ว)

9.4.2 ระบบวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่

ระบบที่ทำงานแยกเดี่ยวซึ่งรวมเซิร์ฟเวอร์สำหรับไคลเอนต์และเวิร์กสเตชันท้องถิ่น (Client and Local Workstation Server) เหมาะสำหรับนำมาใช้กับแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้อย่างลึก (Artificial Intelligence and Deep Learning Models) ในโครงการวิจัยนำร่อง (Pilot Research Project) นี้ เมื่อคำนึงถึงการลดต้นทุนและความพร้อมในการใช้งานของระบบ คณะผู้วิจัยจะพิจารณาสองทางเลือกต่อไปนี้ (รูปที่ 9-10)

- ใช้ระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่มีอยู่แล้วในตลาด (Commercial Spectrum Monitoring System) โดยเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์ เช่น แพลตฟอร์ม Spark
- ใช้เครื่องรับคลื่นความถี่ระบบฮาร์ดแวร์เปิด (Open-Hardware Spectrum Receiver) โดยเชื่อมต่อกับระบบคลาวด์ เช่น แพลตฟอร์ม Spark



รูปที่ 9-10 กรอบแนวคิดสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลการเฝ้าฟังคลื่นความถี่บนคลาวด์

โดยทั้งสองทางเลือก คณะผู้วิจัยเสนอระบบ Spark สำหรับใช้เป็นแพลตฟอร์มวิเคราะห์ข้อมูล Big Data โดยจะใช้ทั้งสำหรับการเก็บและบริหารจัดการข้อมูลคลื่นความถี่ ซึ่งมีรายละเอียดตามหัวข้อ 9.3.2 "โนด (Nodes) เพื่อการประมวลผล และการจัดเก็บข้อมูลใน Data Lake" เครื่องรับคลื่นความถี่ (ทั้งแบบที่มีจำหน่ายในตลาดเช่น Signal Hound หรือแบบเปิดเช่น ElectroSense) จะเชื่อมต่อกับแพลตฟอร์ม Spark โดยที่ผลลัพธ์ขาออก (Output Results) จากแพลตฟอร์มซึ่งเป็นแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้อย่างลึกจะถูกนำเสนอโดยใช้บริการต่าง ๆ บนเว็บ (Web-Based Services) เพื่อนำไปใช้สนับสนุนการตัดสินใจและการวางแผนที่เกี่ยวกับคลื่นความถี่ ภาษา

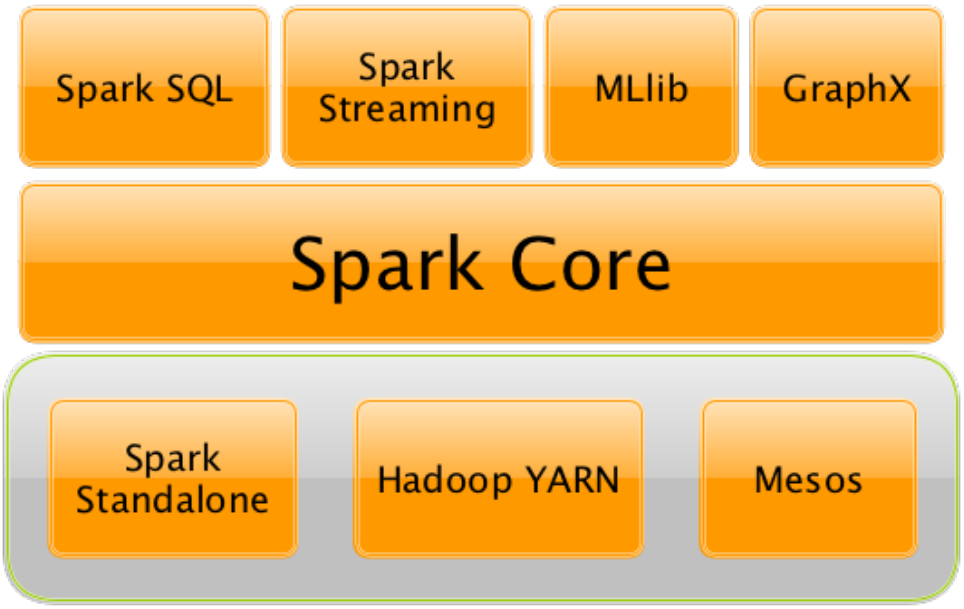
โปรแกรม (Programming Language) ของ Spark สำหรับใช้กับปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้อย่างลึกได้แก่ SCALA Python Java และ R

เพื่อที่จะใช้ข้อมูลคลื่นความถี่ดิบ (Spectrum Raw Data) ร่วมกันกับระบบเทคโนโลยีสารสนเทศอื่นของสำนักงาน กสทช. แบ็คเอนด์ของที่เก็บข้อมูลส่วนกลาง (Backend of Data Lake) จะมีพอร์ตสำหรับให้ผู้ใช้เข้าถึงและดาวน์โหลด (Access and Download) ข้อมูลไปใช้ได้ (ตามรูปที่ 9-2)

9.4.3 แพลตฟอร์ม Apache Spark

แพลตฟอร์ม Apache Spark เป็นกรอบงานแบบเปิด (Open Source) สำหรับการประมวลผล Big Data ที่สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว มีความสะดวกในการใช้งาน และรองรับการวิเคราะห์ที่ซับซ้อน เริ่มแรกถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 2009 ใน AMPLab ของ University of California, Berkeley และเปิดเป็นโอเพนซอร์สในปี ค.ศ. 2010 ภายใต้โครงการ Apache

แพลตฟอร์ม Apache Spark มีจุดเด่นหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับแพลตฟอร์ม Big Data อื่น ๆ และเทคโนโลยี MapReduce เช่น Hadoop และ Storm กล่าวคือ Spark เป็นกรอบงานแบบครบวงจรที่สนับสนุนความต้องการของการประมวลผลของ Big Data ที่มีชุดข้อมูลหลากหลายและคุณลักษณะแตกต่างกัน (เช่น ข้อมูลข้อความ/ข้อมูลกราฟ) รวมไปถึงความแตกต่างของแหล่งข้อมูล (เช่น ข้อมูลแบบแบตช์/ข้อมูลสตรีมแบบเวลาจริง) นอกจากนี้ Spark ยังช่วยให้แอปพลิเคชันในกลุ่ม Hadoop สามารถทำงานในหน่วยความจำได้เร็วขึ้นสูงสุด 100 เท่า และทำงานบนดิสก์ได้เร็วขึ้น 10 เท่า อีกทั้งยังช่วยสนับสนุนการพัฒนาแอปพลิเคชันใน Java, Scala หรือ Python ได้อย่างรวดเร็วมากขึ้น เนื่องจากมีชุดตัวดำเนินการระดับสูง (High-level Operator) กว่า 80 ตัว รวมทั้งรองรับการสืบค้นข้อมูลภายในเชลล์ (Shell)



รูปที่ 9-11 ภาพรวมของแพลตฟอร์ม Apache Spark

ดังแสดงในรูปที่ 9-11 นอกจากการทำ Map และ Reduce แพลตฟอร์ม Apache Spark ยังสามารถรองรับการสืบค้นข้อมูลจาก SQL การสตรีมข้อมูลแมชชีนเลิร์นนิ่ง และ Graph Data Processing โดยนักพัฒนาสามารถใช้ความสามารถเหล่านี้ทั้งแบบเดี่ยว (Standalone) หรือรวมความสามารถหลายอย่างเข้าด้วยกันให้ทำงานใน Pipeline เดียวกัน ซึ่งคุณสมบัติด้าน Pipeline ดังกล่าวของ Spark เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้กับแอปพลิเคชันแบบเวลาจริงจำนวนมากเช่นการเฝ้าฟังคลื่นความถี่

นอกเหนือจาก Core API แล้ว Spark ยังมีไลบรารีเพิ่มเติมที่เป็นส่วนหนึ่งของแพลตฟอร์ม Spark ซึ่งมอบความสามารถเพิ่มเติมให้กับการวิเคราะห์ Big Data และรองรับการใช้แบบจำลองแมชชีนเลิร์นนิ่ง โดยสามารถสรุปไลบรารี (Libraries) ดังกล่าวได้ดังนี้

1) Spark Streaming

Spark Streaming มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลที่เป็นลักษณะการสตรีมแบบเวลาจริง (Real-Time Streaming) โดยทำงานบนพื้นฐานของการคำนวณและประมวลผลในรูปแบบ Micro Batch และใช้ DStream (Discretized Streams) ซึ่งมีลักษณะเป็นชุดของ RDD (Resilient Distributed Dataset) เพื่อประมวลผลข้อมูลแบบเวลาจริง

2) Spark SQL

Spark SQL (Structured Query Language) ทำให้สามารถใช้ชุดข้อมูล Spark ผ่าน JAVA Database Connectivity Application Program Interface (JDBC API) และช่วยให้สามารถสืบค้นข้อมูลบน Spark ในลักษณะเดียวกับการสืบค้นข้อมูลของ SQL โดยใช้เครื่องมือ BI (Business Intelligence) และ Visualization ดังนั้น Spark SQL จะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถ ETL (Extract, Transform, Load) ข้อมูลจากรูปแบบที่แตกต่างกับรูปแบบในปัจจุบัน (เช่น JSON (JavaScript Object Notation), Parquet, ฐานข้อมูล) รวมทั้งแปลงและแสดงข้อมูลสำหรับการสืบค้นแบบ Ad-hoc

3) Spark MLlib

Spark MLlib เป็นไลบรารีด้านแมชชีนเลิร์นนิ่ง ที่ปรับขนาดได้ ประกอบด้วยอัลกอริทึมด้านการเรียนรู้ทั่วไปและอรรถประโยชน์ต่าง ๆ เช่น Classification, Regression, Clustering, Collaborative Filtering, Dimensionality Reduction และ Optimization

4) Spark GraphX

Spark GraphX เป็น API ใหม่ที่รองรับการประมวลผลด้านกราฟ โดยอธิบายในภาพใหญ่ได้ คือ GraphX จะขยาย Spark RDD โดยใช้ Resilient Distributed Property Graph ซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟระบุทิศทางจำนวนมากที่มีคุณสมบัติแนบอยู่กับแต่ละจุดยอด (Vertex) และเส้นเชื่อม (Edge) GraphX ใช้ชุดตัวดำเนินการพื้นฐาน (เช่น subgraph, joinVertices และ aggregateMessages) รวมถึง Pregel API เพื่อสนับสนุนการประมวลผลด้านกราฟ นอกจากนี้ GraphX ยังมีชุดอัลกอริทึมกราฟและตัวสร้าง (Builder) เพื่อลดความซับซ้อนของงานวิเคราะห์กราฟด้วย

9.4.4 การตรวจจับแหล่งกำเนิดการรบกวนด้วยโครงข่ายนิวรอลแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Neural Network, FFNet)

แมชชีนเลิร์นนิ่งสามารถเรียนรู้คุณสมบัติ (Feature) ที่ดึงมาจากสัญญาณวิทยุที่รับได้ คณะผู้วิจัยจะนำเสนอผลของการใช้โครงข่ายนิวรอลประดิษฐ์ (Artificial Neural Network, ANN) เพื่อจำแนกประเภทของสัญญาณ ในที่นี้จะใช้โครงข่ายนิวรอลแบบป้อนไปข้างหน้าซึ่งข้อมูลขาออก (Output) จากชั้นของนิวรอน (Layer of Neurons) ถูกเชื่อมต่อไปเป็นเฉพาะส่วนข้อมูลขาเข้า (Input) ของนิวรอนชั้นถัดไป โดยไม่มีการป้อนกลับในขบวนการตัดสินใจคุณสมบัติต่าง ๆ ถูกป้อนเข้าสู่ชั้นข้อมูลขาเข้า (Input Layer) ระหว่างชั้นข้อมูลขาเข้ากับชั้นข้อมูลขาออก (Output Layer) จะมีชั้นของนิวรอนที่ซ่อนอยู่ (Hidden Layer) อย่างน้อย 1 ชั้น ชั้นข้อมูลขาออกจะเชื่อมกับฟังก์ชันสำหรับโวต (Voting Function (SoftMax)) ซึ่งจะประมาณค่าความน่าจะเป็นของประเภทของสัญญาณประเภทต่าง ๆ รูปที่ 9-12 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของโครงข่ายนิวรอลแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Neural Network, FFNet) ซึ่งจำนวนของโนด (Node) ในชั้นของข้อมูลขาเข้า (Input Layer) จะเท่ากับจำนวนของข้อมูลที่จะป้อนเข้าสู่โครงการนิวรอลเช่น ย่านความถี่ (Spectrum Band) แถบกว้างความถี่ (Bandwidth) เป็นต้น ในชั้นของนิวรอนที่ซ่อนอยู่ (Hidden Layer) นิวรอนจะเชื่อมถึงกันหมด (Fully Connected) และในชั้นของข้อมูลขาออก (Output Layer) จำนวนโนดจะเท่ากับจำนวนของผลลัพธ์ที่พิจารณาเช่นตามตัวอย่างเป็นประเภทของสัญญาณได้แก่ BPSK, CW, DAB, DVB และ FM โดยค่าของผลลัพธ์ในแต่ละโนดจะเป็นความน่าจะเป็นระหว่าง 0 ถึง 1 ของสัญญาณที่จำแนกอัตโนมัติด้วย FFNet

หากประเภทสัญญาณชนิดใดชนิดหนึ่งมีความน่าจะเป็นที่สูงกว่าประเภทของสัญญาณอื่น ๆ ผลลัพธ์การแบ่งประเภทสัญญาณก็จะชัดเจนและง่ายต่อการตีความ หากประเภทของสัญญาณต่าง ๆ มีความน่าจะเป็นใกล้เคียงกัน โครงข่ายนิวรอลประดิษฐ์ก็จะให้คำตอบพร้อมด้วยค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty) แทนที่จะฟันธงลงไปว่าสัญญาณที่ตรวจจับอยู่นั้นเป็นประเภทใด นี่เป็นส่วนที่แตกต่างจากการใช้วิธีต้นไม้การตัดสินใจ (Decision Tree Approach) ซึ่งจะถูกบังคับให้ต้องเลือกตอบอย่างใดอย่างหนึ่งแม้ว่าจะมีความไม่ชัดเจนเกี่ยวกับสัญญาณที่กำลังพิจารณา

การจำแนกประเภทสัญญาณโดยใช้ FFNet มีข้อได้เปรียบหลายประการ กระบวนการที่เป็นอัตโนมัติทำให้การจำแนกประเภทสามารถถูกปรับปรุงให้ดีที่สุด (Optimized) ด้วยการฝึกด้วยข้อมูลที่มากขึ้นโดยไม่ต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญ สามารถที่จะนำไปติดตั้งบนเซิร์ฟเวอร์ท้องถิ่นหรือบนคลาวด์ซึ่งผู้ใช้สามารถฝึก FFNet ได้เองหากไม่ต้องการเปิดเผยข้อมูลสำหรับฝึกต่อผู้ให้บริการคลาวด์ (เช่นในกรณีที่ต้องการความปลอดภัยของข้อมูล (Security))

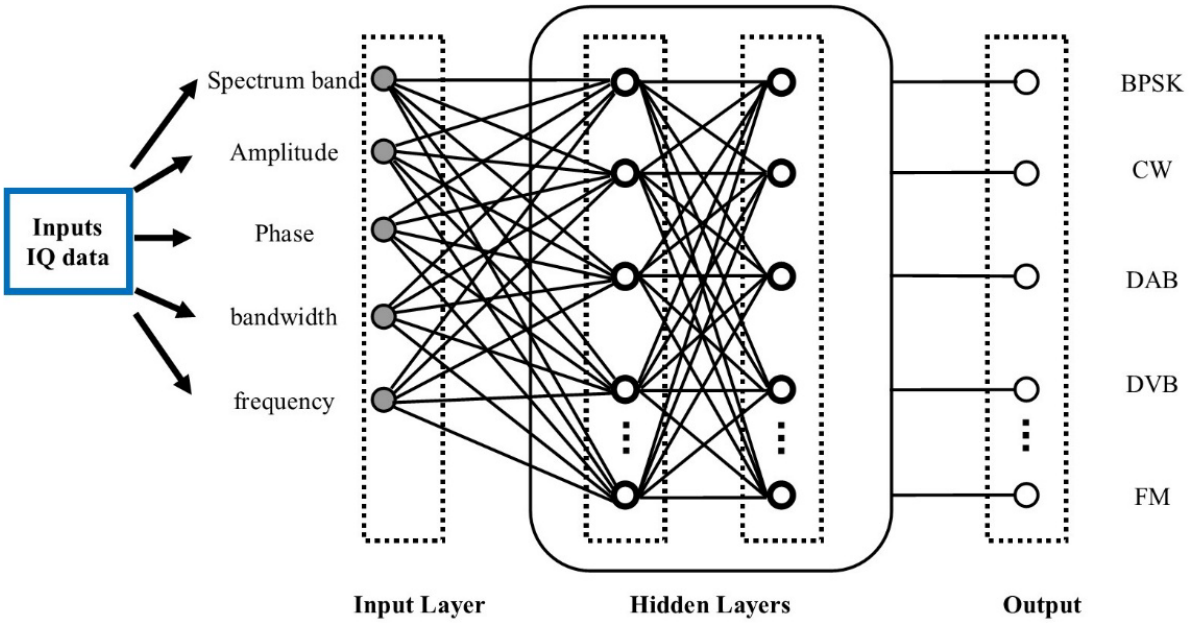
ข้อได้เปรียบอีกข้อหนึ่งคือ การใช้แมชชีนเลิร์นนิ่ง (ML) มีคุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinearity) จึงอาจสามารถปรับให้เข้ากับข้อมูลได้ดีกว่าวิธีเชิงเส้น ผลลัพธ์ขาออกจาก ML มีข้อมูลที่เป็นประโยชน์มากกว่าเนื่องจากมีการรายงานความน่าจะเป็นของประเภทสัญญาณต่าง ๆ แทนที่จะฟันธงไปเลยว่าเป็นสัญญาณประเภทใดทำให้เราตัดสินได้ว่าสามารถมั่นใจกับคำตอบที่ได้ในระดับใด

<u>ระเบียบวิธี</u>

ชุดข้อมูลขาเข้าที่ต้องการสำหรับการจำแนกประเภทสัญญาณโดยอัตโนมัตินี้ได้แก่ ย่านความถี่ แอมพลิจูด (Amplitude) เฟส (Phase) แถบกว้างความถี่ (Bandwidth) และความถี่ (Frequency) คุณสมบัติเหล่านี้สามารถดึงออกมาจากข้อมูลอินเฟสและควอดเดรเจอร์เฟส (IQ Data) ของสัญญาณที่เฝ้าฟังโดยใช้อัลกอริทึม FFT คุณสมบัติ (Feature) อื่น ๆ ที่แนะนำ เช่น การแปลงเวฟเล็ตของข้อมูลอินเฟสและควอดเดรเจอร์เฟส (Wavelet Transform of IQ Data) เอนโทรปี (Entropy) สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงการจำแนกประเภทของสัญญาณต่าง ๆ ได้ คุณสมบัติ

เหล่านี้จะถูกป้อนเข้าสู่ชั้นข้อมูลขาเข้าของ FFNet จำนวนชั้นถัดไปขึ้นอยู่กับสมรรถนะของ FFNet ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ โนดแต่ละโนดของชั้นข้อมูลขาออกจะให้ค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งแสดงความน่าจะเป็นของการจำแนกประเภทสัญญาณ

เนื่องจากย่านความถี่ที่ต้องเฝ้าฟังอยู่ในช่วง 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 5 กิกะเฮิร์ตซ์ คลื่นความถี่จะถูกแบ่งเป็นย่าน ๆ ตามการจำแนกของสำนักงาน กสทช. เช่น VHF UHF แต่ละย่านจะมี FFNet ที่คอยเฝ้าฟังโดยเฉพาะความถี่



รูปที่ 9-12 ตัวอย่างของ Feedforward Neural Network (FFNet) ที่เสนอสำหรับใช้จำแนกประเภทสัญญาณอัตโนมัติ (Automatic Signals Classification)

ระบบสำหรับทดสอบ

จากฐานข้อมูลของสัญญาณที่รู้จัก (Known Signals) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแบ่งสำหรับใช้ฝึกและใช้ทดสอบสมรรถนะของ FFNet ข้อมูลเหล่านี้สามารถเก็บได้โดยระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ที่เสนอไว้ข้างต้น ปริมาณของข้อมูลฝึกสำหรับสัญญาณแต่ละประเภทควรใกล้เคียงกัน (เช่นวัดเป็นระยะเวลาหน่วยชั่วโมงสำหรับสัญญาณแต่ละประเภท) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดไบแอส (Bias) ของ FFNet

เซ็ตข้อมูลฝึก (Training Set): ประมาณ 70% ของข้อมูลทั้งหมด

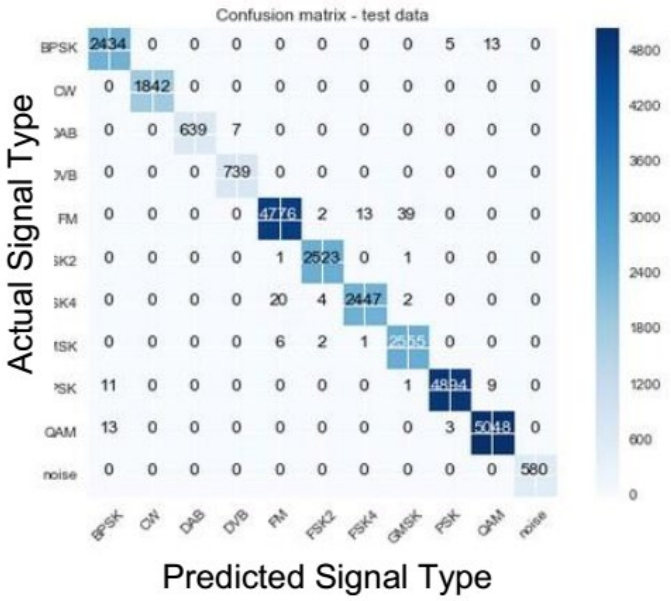
เซ็ตข้อมูลทดสอบ (Testing Set): ประมาณ 30% ของข้อมูลทั้งหมด

เซ็ตข้อมูลตรวจสอบ (Validating Set): ชุดข้อมูลใหม่ เช่นจากเครื่องรับอื่น หรือจากการวัดอื่น

ตัววัดสมรรถนะ (Performance Metric)

คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) เหมาะที่จะนำมาใช้วัดสมรรถนะของการจำแนกประเภทสัญญาณ เช่นตามตัวอย่างในรูปที่ 9-13 [1] ซึ่งเปรียบเทียบผลของการทำนาย (Predicted Value) เทียบกับค่าจริง (Actual

Value) โดยจากรูปที่ 9-13 ผลของการจำแนกประเภทสัญญาณ BPSK มีจำนวนครั้งที่จำแนกสัญญาณได้ถูกต้อง 2,434 ครั้ง และมีการจำแนกสัญญาณผิดพลาดไปเป็นชนิด PSK 5 ครั้ง และ QAM 13 ครั้ง เป็นต้น



รูปที่ 9-13 ตัวอย่างของคอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) สำหรับประเมินการจำแนกประเภทสัญญาณ [1]

9.4.5 การเฝ้าฟังคลื่นความถี่โดยใช้โครงข่ายนิวรอลแบบคอนโวลูชันนอล (Convolutional Neural Network, CNN)

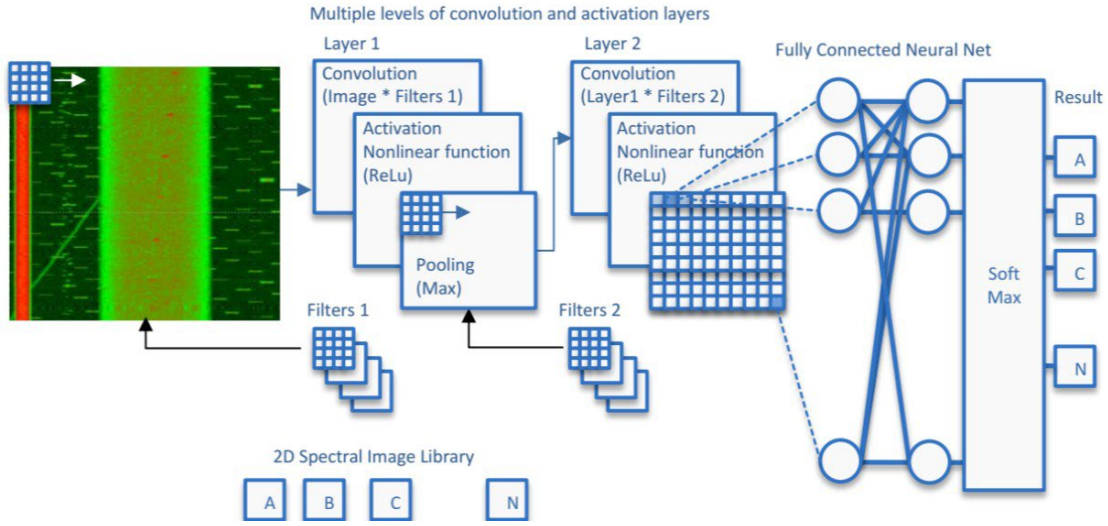
จุดมุ่งหมายสำคัญของการเฝ้าฟังคลื่นความถี่คือ การตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน การวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตจากข้อมูลที่เฝ้าฟังสดหรือข้อมูลในอดีต (Livestream Data or Historical Data) วิธีการหนึ่งที่มีศักยภาพคือแบบจำลองเรียนรู้อย่างลึก (Deep Learning Model) โดยการใช้การรู้จำภาพหรือรูปแบบ (Image or Pattern Recognition) โครงข่ายนิวรอลแบบคอนโวลูชันนอล 2 มิติ จะถูกฝึกด้วยข้อมูลภาพ 2 มิติของคลื่นความถี่ (ที่แสดงว่ากำลังของสัญญาณขึ้นกับย่านความถี่และเวลาอย่างไร เช่น Waterfall Plot เป็นต้น) แต่ละภาพจะมีข้อมูลคุณสมบัติต่าง ๆ ของสัญญาณและมีโอกาสน้อยมากที่คุณสมบัติเหล่านี้จะไปแสดงอยู่ในสัญญาณรบกวน (Noise) เช่น กลุ่มของพลังงานที่ถูกจำกัดอยู่ในเวลาและย่านความถี่หนึ่ง ๆ หรือกลุ่มของพลังงานที่มีแถบกว้างความถี่คงที่แต่มีการเปลี่ยนย่านความถี่ในอัตราที่คงที่ เป็นต้น CNN ถูกพัฒนาเพื่อใช้กับการรู้จำภาพและใบหน้า ด้วยเหตุที่การเปลี่ยนแปลงของการใช้คลื่นความถี่สามารถแทนได้ด้วยภาพซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนของกำลังของสัญญาณ ความถี่ และเวลาจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับ CNN ได้ คุณสมบัติ (Feature) ที่ CNN เรียนรู้จะต่างกับคุณสมบัติของสัญญาณที่ FFNet สำหรับการจำแนกประเภทสัญญาณในหัวข้อที่แล้วเรียนรู้

รูปที่ 9-14 แสดงตัวอย่างของแบบจำลอง CNN ซึ่งประกอบด้วยโนดที่เชื่อมต่อถึงกันหมดหลาย ๆ ชั้น แต่ละชั้นจะดึงเอาคุณสมบัติต่าง ๆ ของภาพ (Image Features) ออกมา โดยโมเดลปัญญาประดิษฐ์ที่เสนอสำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่จะใช้หลักการเดียวกันนี้สำหรับตรวจหาการรบกวน การใช้ความถี่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตที่เกิดขึ้น

ในการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ จะมีประโยชน์มากหากระบบเฝ้าฟังสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติตลอดเวลาโดยไม่ต้องมีมนุษย์มาเกี่ยวข้อง ระบบเฝ้าฟังจึงต้องสามารถเรียนรู้ลักษณะการถูกใช้งานปกติของคลื่นความถี่ (Normal Behavior) เพื่อให้ระบบสามารถตรวจจับและรายงานเหตุการณ์ที่น่าสนใจหรือผิดไปจากสถานการณ์ปกติ งานลักษณะนี้เหมาะที่จะใช้ CNN และ Unsupervised Neural Network เพื่อที่จะดึงเอาคุณสมบัติหลัก ๆ (High-Level Features) ของการใช้คลื่นความถี่ออกมาจากข้อมูลจำนวนมหาศาล ANN จะถูกฝึกด้วยข้อมูลการใช้ความถี่ปกติจำนวนหลายร้อยชั่วโมงดังนั้น ANN จะสามารถรู้จำและระบุเหตุการณ์ที่ไม่ปกติหรือไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อนได้

ระเบียบวิธี

ระบบที่ถูกฝึกจะสามารถตรวจจับคุณสมบัติต่าง ๆ ในข้อมูลสดหรือข้อมูลในอดีตได้ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแปรเป็นภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อ เนื่องจากตัวรู้จำรูปแบบ (Pattern Recognizer) สามารถตรวจจับสัญญาณที่ไม่เคยเจอมาก่อนได้ (โดยสัญญาณดังกล่าวต้องมีคุณสมบัติบางอย่างที่ตัวรู้จำเคยเรียนรู้มาก่อน) จึงสามารถใช้สำหรับค้นหาสัญญาณใหม่ได้อย่างดี



รูปที่ 9-14 ตัวอย่างของแบบจำลอง Convolutional Neural Network (CNN) ที่เสนอสำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ [1]

ส่วนหลักของแบบจำลอง CNN คือตัวเข้ารหัสอัตโนมัติ (Autoencoder) ซึ่งเรียนรู้การรับเอาข้อมูลเข้า บีบอัดเป็นการแทนสัญญาณหรือที่เรียกว่าการเข้ารหัส (Encoding) และจากนั้นก็สร้างสัญญาณขาเข้าเดิม (Original Input) จากการเข้ารหัสนี้ จากนั้นตัวเข้ารหัสอัตโนมัตินี้ก็จะทำให้ CNN สร้างภาพนี้ขึ้นมาใหม่แทนที่จะส่งกลับสิ่งที่ CNN เห็นจากข้อมูลขาเข้า ตัวเข้ารหัสช่วยให้ CNN สามารถรู้จำรูปแบบที่หลากหลายขึ้น เช่นการสร้างภาพแสดงการถูกใช้งานของคลื่นความถี่ในเชิงเวลาและความถี่ เป็นต้น

ระบบสำหรับทดสอบ

เซ็ตข้อมูลฝึก (Training Set): ประมาณ 70% ของข้อมูลทั้งหมด มีเฉพาะข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ในสถานการณ์ปกติ

เซ็ตข้อมูลทดสอบ (Testing Set): ประมาณ 30% ของข้อมูลทั้งหมด

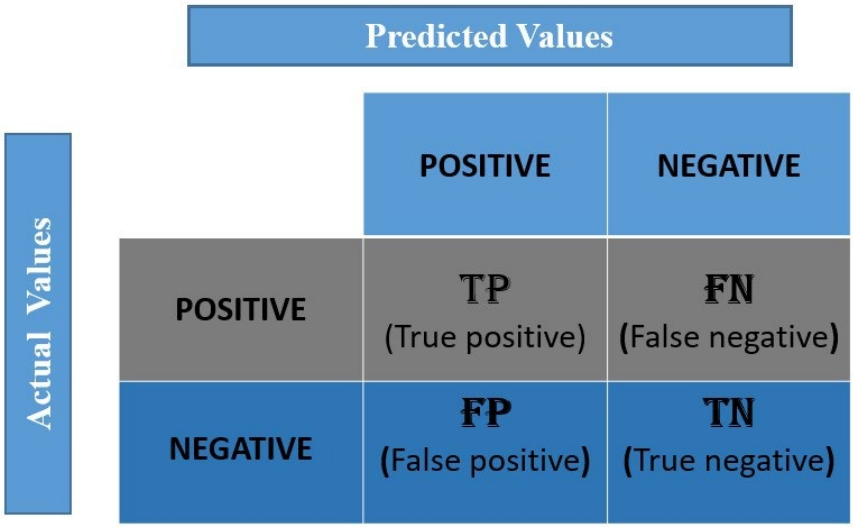
เซ็ตข้อมูลตรวจสอบ (Validating Set): ชุดข้อมูลใหม่ จาก RF Fingerprints ของแหล่งข้อมูลที่รู้จัก กรณีนี้ต้องพิจารณารายละเอียดของรูปแบบสัญญาณด้วย

ตัววัดสมรรถนะ (Performance Metric)

คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) เหมาะที่จะนำมาใช้วัดสมรรถนะของการรู้จำรูปแบบ

9.5 การวัดสมรรถนะ (Performance Matrix) ของการใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการบริหารจัดการทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมและคลื่นความถี่

มาตรวัดสมรรถนะ (Performance Metric) ที่จำเป็นในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลองปัญญาประดิษฐ์ที่เสนอในการตรวจจับและดึงข้อมูลที่จำเป็นจากเอกสารที่เกี่ยวข้องของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมได้แก่ คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) คอนฟิวชันเมตริกซ์เป็นตารางที่ช่วยให้เห็นสมรรถนะของอัลกอริธึม (Algorithm) สำหรับการเรียนรู้ ซึ่งโดยปกติเป็นการเรียนรู้แบบมีการดูแล (Supervised Learning) ในการตรวจจับและวิเคราะห์ข้อความ (Text Detection and Analysis) ตามที่แสดงในรูปที่ 9-15 ค่าตามแนวนอนจะแสดงค่าจริงของสิ่งที่ตรวจจับ ในขณะที่ค่าตามแนวตั้งจะแสดงผลการทำนายโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งผลของการตรวจจับจะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งสิ้น 4 กรณีดังนี้



รูปที่ 9-15 คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) เพื่อวัดสมรรถนะ (Performance) ของปัญญาประดิษฐ์

- True Positive (TP): ปัญญาประดิษฐ์ทำนายว่า ข้อความที่กำลังพิจารณาปรากฏในเอกสาร (Predicted Values = "Positive") และข้อความนั้นก็อยู่ในเอกสารจริง (Actual Values = "Positive")

- True Negative (TN): ปัญญาประดิษฐ์ทำนายว่า ข้อความที่กำลังพิจารณาไม่ปรากฏในเอกสาร(Predicted Values = "Negative") และข้อความนั้นก็ไม่อยู่ในเอกสารจริง (Actual Values = "Negative")
- False Positive (FP): ปัญญาประดิษฐ์ทำนายว่า ข้อความที่กำลังพิจารณาปรากฏในเอกสาร (Predicted Values = "Positive") แต่ในความเป็นจริงข้อความนั้นไม่อยู่ในเอกสาร (Actual Values = "Negative") ความผิดพลาดแบบนี้มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type 1 Error)
- False Negative (FN): ปัญญาประดิษฐ์ทำนายว่า ข้อความที่กำลังพิจารณาไม่ปรากฏในเอกสาร (Predicted Values = "Negative") แต่ในความเป็นจริงข้อความนั้นอยู่ในเอกสาร (Actual Values = "Positive") ความผิดพลาดแบบนี้มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type 2 Error)

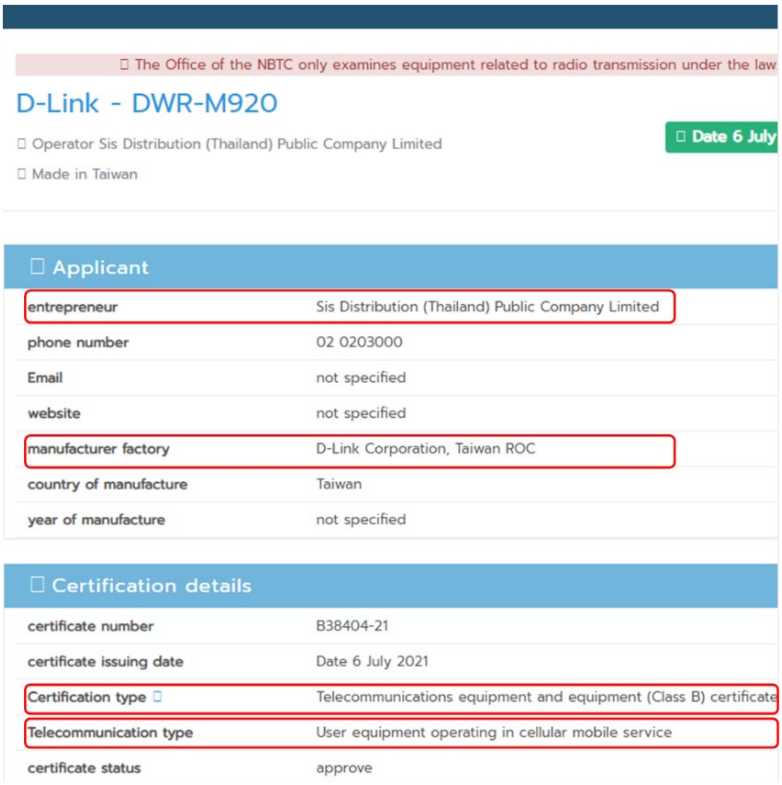
คอนฟิวชันเมตริกซ์นี้จะสามารถนำไปคำนวณมาตรวัดสมรรถนะลำดับที่สองซึ่งได้แก่ Precision and Recall (หรือ Sensitivity) สำหรับประเมินสมรรถนะของโมเดลปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 9-3

ตารางที่ 9-3 คำอธิบายการคำนวณมาตรวัดสมรรถนะ (Performance Metric) ของโมเดลปัญญาประดิษฐ์

มาตรวัด	สูตรการคำนวณ	คำจำกัดความ (Definition)
Accuracy	(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)	อัตราส่วนของการทำนายที่ถูกต้องทั้งหมด
Precision	TP/(TP+FP)	ความถูกต้องของการทำนายว่า Positive
Recall (Sensitivity)	TP/(TP+FN)	อัตรา Positive ที่ระบุได้ (True Positive Rate)
Specificity	TN/(TN+FP)	อัตรา Negative ที่ระบุได้ (True Negative Rate)

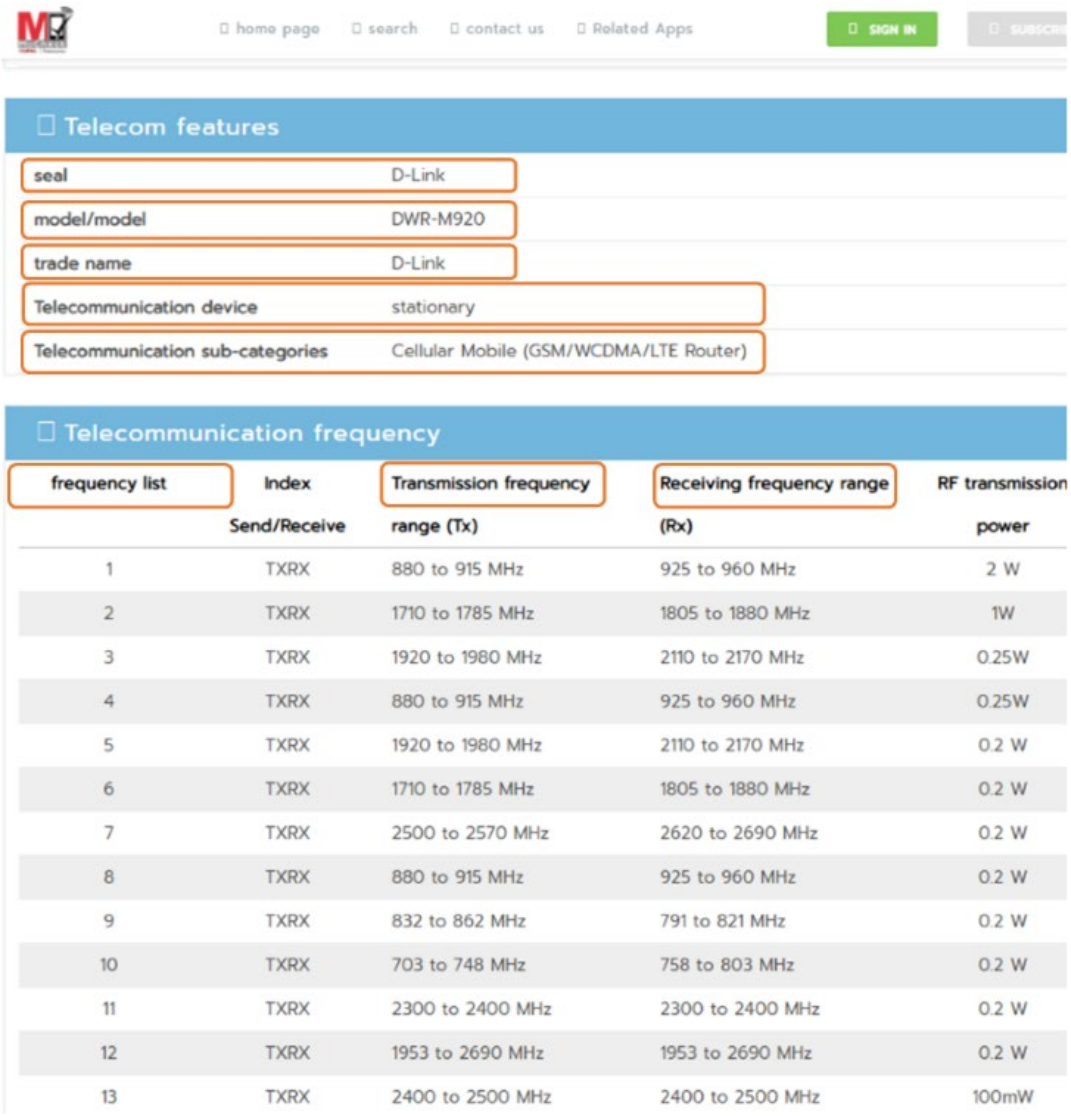
1) ตัวอย่างการวัดสมรรถนะของการวิเคราะห์ข้อความ (Text Analysis) ในเอกสารที่เกี่ยวข้องของอุปกรณ์วิทยุคมนาคม (ที่ลงทะเบียนผ่านเว็บไซต์ของ สำนักงาน กสทช.) โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์

ข้อมูลที่ต้องการตรวจหาจากทั้งที่ผู้ยื่นคำขอลงทะเบียนวิทยุคมนาคมกับ สำนักงาน กสทช. ให้ข้อมูลและจากเอกสารที่เกี่ยวข้องแสดงไว้ตามรูปที่ 9-16 และรูปที่ 9-17



รูปที่ 9-16 ข้อมูลที่ต้องการใช้โมเดลปัญญาประดิษฐ์ตรวจหาและดึงข้อมูลจากผู้ใช้ที่ต้องการลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมมนาคมกับ สำนักงาน กสทช.

ตามรูปที่ 9-16 ตัวอย่างการคำนวณมาตรวัดความแม่นยำ (Precision Metric) สำหรับ "ข้อมูลในส่วนของผู้ประกอบการ (Entrepreneur Field)" จะถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของชื่อผู้ประกอบการที่ปัญญาประดิษฐ์สามารถตรวจหาได้อย่างถูกต้องเทียบกับชื่อของผู้ประกอบการทั้งหมดในเอกสารทั้งหมดที่พิจารณา เป็นที่น่าสังเกตว่า "ข้อมูลในส่วนของผู้ประกอบการ" นี้อาจถูกระบบเข้าใจสับสนกับข้อมูลในส่วนอื่นได้เช่น ชื่อผู้ผลิต หรือที่อยู่ของผู้ใช้ อีกตัวอย่างหนึ่งที่โมเดลวิเคราะห์ข้อความ (Text Analysis Model) อาจจะสับสนและดึงข้อมูลผิดพลาดได้แก่ "ข้อมูลความถี่ส่งและรับ" ของอุปกรณ์วิทยุคมนาคม ดังที่แสดงในรูปที่ 9-17



home page | search | contact us | Related Apps | SIGN IN

Telecom features

seal	D-Link
model/model	DWR-M920
trade name	D-Link
Telecommunication device	stationary
Telecommunication sub-categories	Cellular Mobile (GSM/WCDMA/LTE Router)

Telecommunication frequency

frequency list	Index Send/Receive	Transmission frequency range (Tx)	Receiving frequency range (Rx)	RF transmission power
1	TXRX	880 to 915 MHz	925 to 960 MHz	2 W
2	TXRX	1710 to 1785 MHz	1805 to 1880 MHz	1W
3	TXRX	1920 to 1980 MHz	2110 to 2170 MHz	0.25W
4	TXRX	880 to 915 MHz	925 to 960 MHz	0.25W
5	TXRX	1920 to 1980 MHz	2110 to 2170 MHz	0.2 W
6	TXRX	1710 to 1785 MHz	1805 to 1880 MHz	0.2 W
7	TXRX	2500 to 2570 MHz	2620 to 2690 MHz	0.2 W
8	TXRX	880 to 915 MHz	925 to 960 MHz	0.2 W
9	TXRX	832 to 862 MHz	791 to 821 MHz	0.2 W
10	TXRX	703 to 748 MHz	758 to 803 MHz	0.2 W
11	TXRX	2300 to 2400 MHz	2300 to 2400 MHz	0.2 W
12	TXRX	1953 to 2690 MHz	1953 to 2690 MHz	0.2 W
13	TXRX	2400 to 2500 MHz	2400 to 2500 MHz	100mW

รูปที่ 9-17 ข้อมูลที่ต้องการใช้โมเดลปัญญาประดิษฐ์ตรวจหาและดึงข้อมูลจากเอกสารที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ผู้ยื่นขอลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมส่งให้กับ สำนักงาน กสทช.

2) ตัวอย่างการวัดสมรรถนะของการวิเคราะห์ข้อความ (Text Analysis) สำหรับการประสานงานความถี่ชายแดนโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์

การใช้งานในลักษณะนี้มีความซับซ้อนมากกว่าการใช้งานในตัวอย่างก่อนหน้าเนื่องจากมีพารามิเตอร์ (Parameters) ที่สนใจมากถึงประมาณ 40 ตัว นอกจากนี้เมื่อเวลาผ่านไปการวางแผนความถี่ของประเทศเพื่อนบ้านอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้อาจต้องปรับปรุงโมเดลที่อาจได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงนั้น ตารางที่ 9-4 แสดงฟิลด์ข้อมูล (Text Fields) ต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการบริหารจัดการความถี่ชายแดนของ สำนักงาน กสทช.

ตารางที่ 9-4 ตัวอย่างมาตรวัดสมรรถนะสำหรับการวิเคราะห์ฟิลด์ข้อมูล (Text Fields) ที่จำเป็นในการบริหารจัดการความถี่ชายแดน

ข้อมูลที่ต้องการ (Text Fields)	มาตรวัดสมรรถนะของการวิเคราะห์ข้อความ (Performance Metric)
Province	Accuracy
Zip Code	Accuracy
License Number	Accuracy
Equipment Category	Accuracy
Equipment Type (e.g., Module, Fixed, Mobile etc.)	Accuracy
Transmit Power	Precision
Unit of Transmit Power	Precision
Minimum Transmit Frequency	Precision
Maximum Transmit Frequency	Precision
Minimum Receive Frequency	Precision
Maximum Receive Frequency	Precision
Specified Transmit Frequency	Precision
Specified Receive Frequency	Precision
Unit of Transmit Frequency	Precision
Unit of Receive Frequency	Precision

9.6 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานของโครงการวิจัยฯ ในส่วนของการพัฒนาเว็บแอป (Web App) ที่เสนอ สรุปไว้ตามตารางที่ 9-5

ตารางที่ 9-5 แผนการดำเนินงานสำหรับการพัฒนาเว็บแอป (Web App) ที่เสนอ

กิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)	1	2	3	4	5	6
การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) วิเคราะห์ข้อความ (Text Analysis) สำหรับการขึ้นทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคม	3						
การใช้ปัญญาประดิษฐ์วิเคราะห์ข้อความสำหรับงานบริหารจัดการความถี่ชายแดน	3						
การสร้าง (Implement) แดชบอร์ด (Dashboard)	3						
การสร้างระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)	6						

9.7 บทสรุป

เว็บแอปพลิเคชันต้นแบบที่ออกแบบและพัฒนาจะมีฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติที่ช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ โดยฉากทัศน์ (Scenarios) และกรณีการใช้งาน (Use Case) สำหรับเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

ด้านปัญญาประดิษฐ์ (AI) ประกอบด้วย

1) ระบบจัดการคำร้อง
2) แบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่
3) ระบบเฝ้าติดตามการใช้คลื่นความถี่
4) ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์

5) ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน

ด้าน Big Data ประกอบด้วย

1) โนด (Nodes) เพื่อการประมวลผล และการจัดเก็บข้อมูลใน Data Lake
2) การสร้างผลการวิเคราะห์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในภารกิจการจัดทำแผนการกำหนดและจัดสรรคลื่นความถี่ในปัจจุบันและอนาคต
3) แนวทางการนำข้อมูลไปใช้งาน กรณีที่ต้องการเชื่อมต่อกับระบบสารสนเทศอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานตรวจสอบคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช

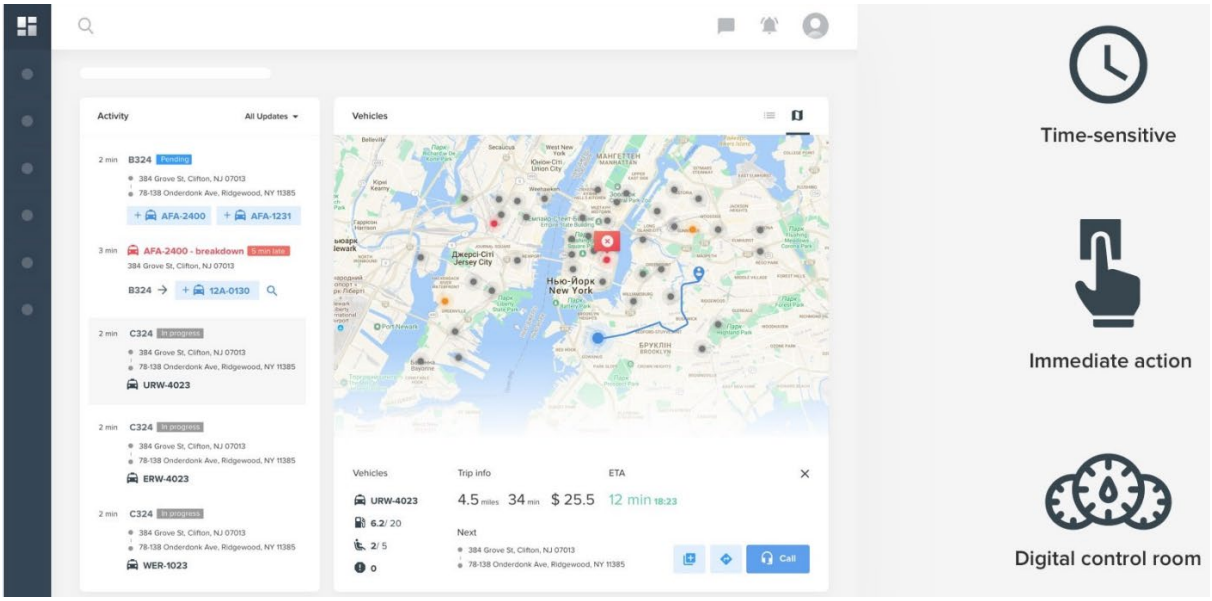
คณะผู้วิจัยได้ออกแบบอัลกอริทึมและเขียน Source Code พร้อมทั้งทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาสร้างขึ้น โดยวัดสมรรถนะ (Performance Metrics) การทำงานของโปรแกรมในฟังก์ชันต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ในกรอบแนวคิด รวมทั้งการพัฒนาระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม รายละเอียดเบื้องต้นเกี่ยวกับแดชบอร์ดและระบบสร้างรายงานดังปรากฏในบทถัดไป

บทที่ 10
แดชบอร์ด และระบบสร้างรายงาน

10.1 เบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบแดชบอร์ด (Dashboard Design)

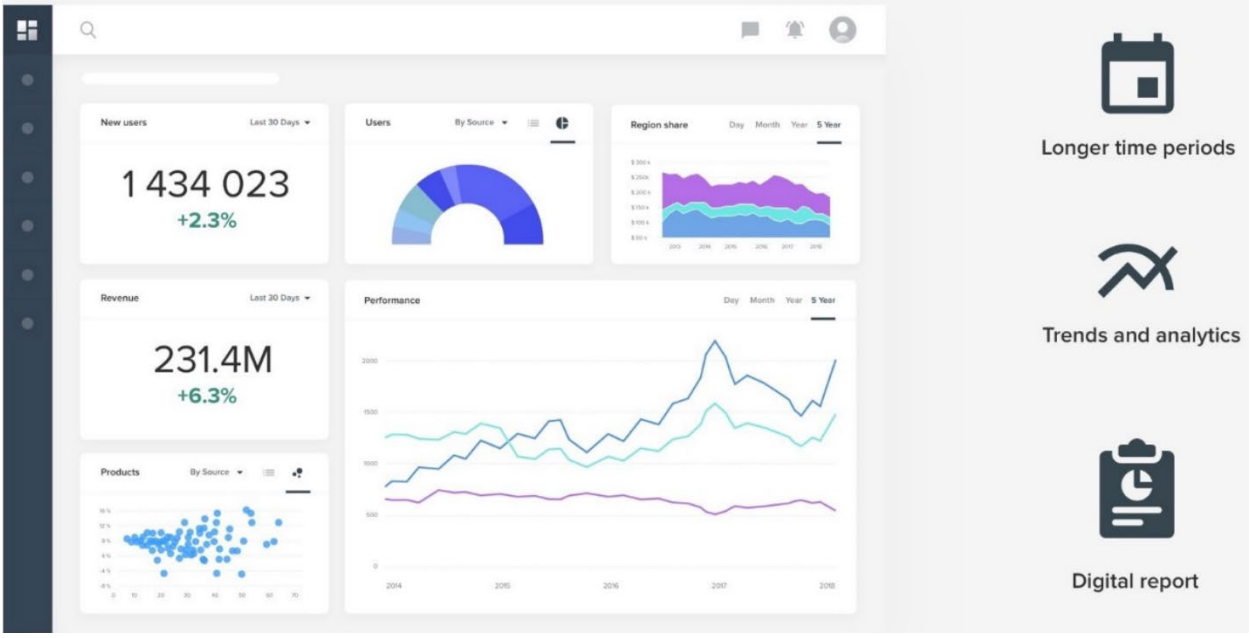
ในปัจจุบันรูปลักษณ์ (Design) ของแดชบอร์ด (Dashboard) เป็นสิ่งที่สำคัญ กิจกรรมทางธุรกิจต่าง ๆ ต้องการรูปแบบการนำเสนอที่เรียบง่าย สามารถนำเสนอข้อมูลต่าง ๆ รวมถึงแนวโน้มและประเด็นความเสี่ยง อัพเดต (Update) ผู้ใช้ถึงสิ่งที่เกิดขึ้น ให้มุมมองที่เป็นประโยชน์ที่จะทำให้ธุรกิจเติบโต แดชบอร์ดจะเป็นการแสดงภาพรวมของข้อมูลสำคัญที่ผู้ใช้สามารถดูและเข้าใจข้อมูลได้อย่างง่ายดาย และสามารถที่จะนำไปสู่การเจาะดูข้อมูลเชิงลึกซึ่งต้องการความสนใจจากผู้ใช้มากขึ้น คำว่าแดชบอร์ดเป็นคำอุปมาอุปมัยซึ่งเทียบมาจากแผงหน้าปัดแสดงมาตรวัดของรถยนต์หรือเครื่องบินซึ่งแสดงสถานะต่าง ๆ ให้กับคนขับระหว่างการเดินทาง

แดชบอร์ดแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ประเภทแรกได้แก่แดชบอร์ดที่แสดงการดำเนินการ (Operational Dashboard) ซึ่งแยกข้อมูลสำคัญออกเป็นส่วน ๆ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจได้อย่างรวดเร็วในขณะที่ต้องทำงานที่แข่งกับเวลา (Time-Sensitive Task) วัตถุประสงค์หลักของแดชบอร์ดที่แสดงการดำเนินการคือนำเสนอการเบี่ยงเบนไปของข้อมูล (Data Deviation) ให้กับผู้ใช้เห็นอย่างรวดเร็วและชัดเจน นำเสนอสถานะปัจจุบันของทรัพยากรที่มี แดชบอร์ดที่แสดงการดำเนินการจะเป็นห้องควบคุมแบบดิจิทัลที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็ว แบบเชิงรุกและมีประสิทธิภาพ (ดังรูปที่ 10-1)



รูปที่ 10-1 ตัวอย่างของแดชบอร์ดที่แสดงการดำเนินการ (Operational Dashboard) [82]

แดชบอร์ดอีกแบบหนึ่งคือ แดชบอร์ดที่แสดงการวิเคราะห์ (Analytical Dashboard) ที่ช่วยให้ผู้ใช้ได้รับข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์และตัดสินใจ (ดังรูปที่ 10-2) ข้อมูลเหล่านี้จะมีลักษณะที่แข่งกับเวลาและต้องการการดำเนินการฉับพลัน (Immediate Action) น้อยกว่าแดชบอร์ดที่แสดงการดำเนินการ วัตถุประสงค์หลักของแดชบอร์ดที่แสดงการวิเคราะห์คือ ช่วยให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจข้อมูล วิเคราะห์แนวโน้มต่าง ๆ เพื่อประกอบการตัดสินใจได้



รูปที่ 10-2 ตัวอย่างของแดชบอร์ดที่แสดงการวิเคราะห์ (Analytical Dashboard) [82]

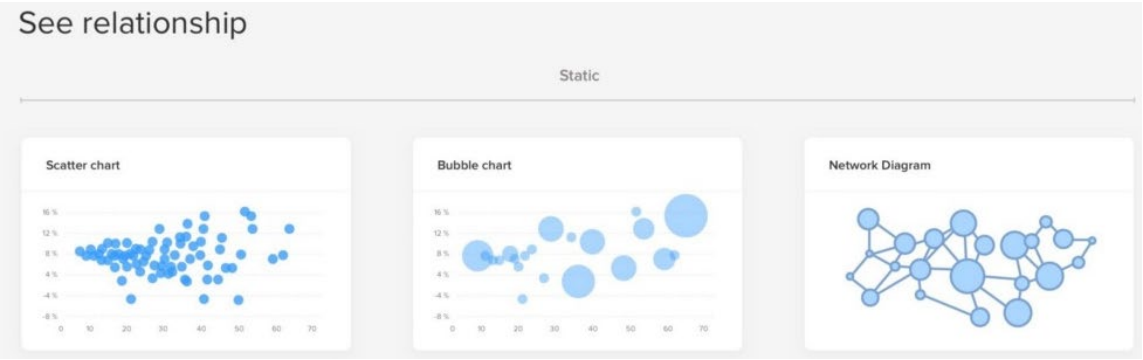
การพิจารณาว่าจะใช้แดชบอร์ดชนิดใดนั้น จะขึ้นกับบทบาทและความต้องการของผู้ใช้ซึ่งอาจจะมีได้หลายระดับ เจ้าหน้าที่ระดับผู้จัดการอาจต้องการแดชบอร์ดที่แสดงการดำเนินการในขณะที่ระดับบริหารอาจจะต้องการใช้แดชบอร์ดที่แสดงการวิเคราะห์ ซึ่งบ่อยครั้งที่ผู้ออกแบบเลือกที่จะผสมผสานแดชบอร์ดทั้งสองแบบเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ให้สามารถทั้งดำเนินการตอบสนองต่อสถานการณ์ต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว และมีข้อมูลการวิเคราะห์จำนวนมากเพื่อประกอบการตัดสินใจ

10.2 การนำเสนอข้อมูลบนแดชบอร์ด

10.2.1 การนำเสนอแผนภูมิ (Chart) บนแดชบอร์ด

การนำเสนอข้อมูลเป็นงานที่ซับซ้อนและท้าทาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องนำเสนอข้อมูลหลากหลายชนิดบนแดชบอร์ดทั้งข้อมูลที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Static) และเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dynamic) การเลือกแผนภูมิผิดประเภทหรือใช้แต่การนำเสนอข้อมูลด้วยภาพ (Data Visualization) แบบปริยาย (Default) ที่ไม่เหมาะกับข้อมูลจะสร้างความสับสนหรือนำไปสู่การตีความข้อมูลที่ผิดพลาด ต่อไปนี้เป็นคำแนะนำในการนำเสนอข้อมูลด้วยภาพที่เหมาะสมกับข้อมูลแบบต่าง ๆ

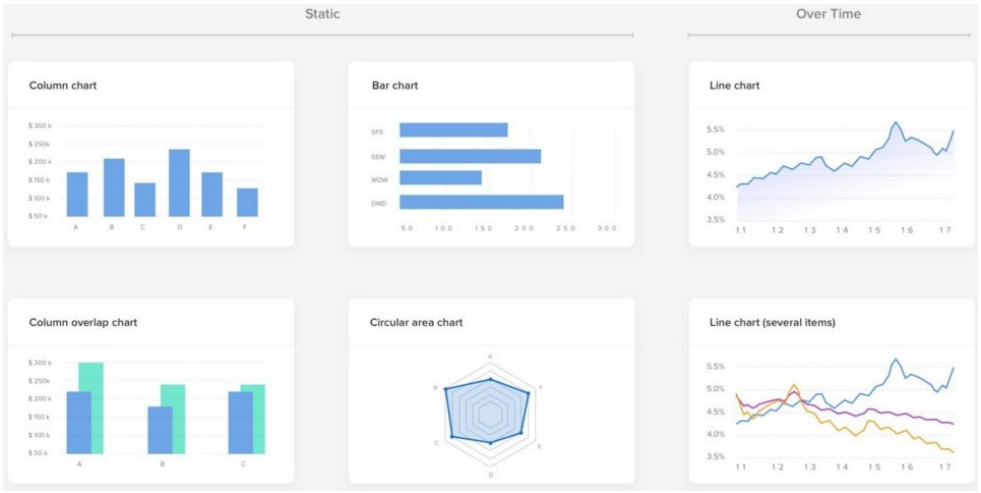
แผนภูมิแบบกระจาย (Scatter Chart) ตามที่แสดงในรูปที่ 10-3 จะถูกใช้กับการแสดงค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) และการวิเคราะห์การกระจายตัว (Distribution Analysis) แผนภูมิแบบฟองอากาศ (Bubble Chart) จะช่วยเพิ่มมิติของการนำเสนอข้อมูลเข้าไป และแผนภาพโครงข่าย (Network Diagram) จะมีประโยชน์เมื่อความเชื่อมโยงระหว่างจุดข้อมูลต่าง ๆ มีความสำคัญ



รูปที่ 10-3 ตัวอย่างของแผนภูมิแบบกระจาย (Scatter Chart) บนแดชบอร์ด

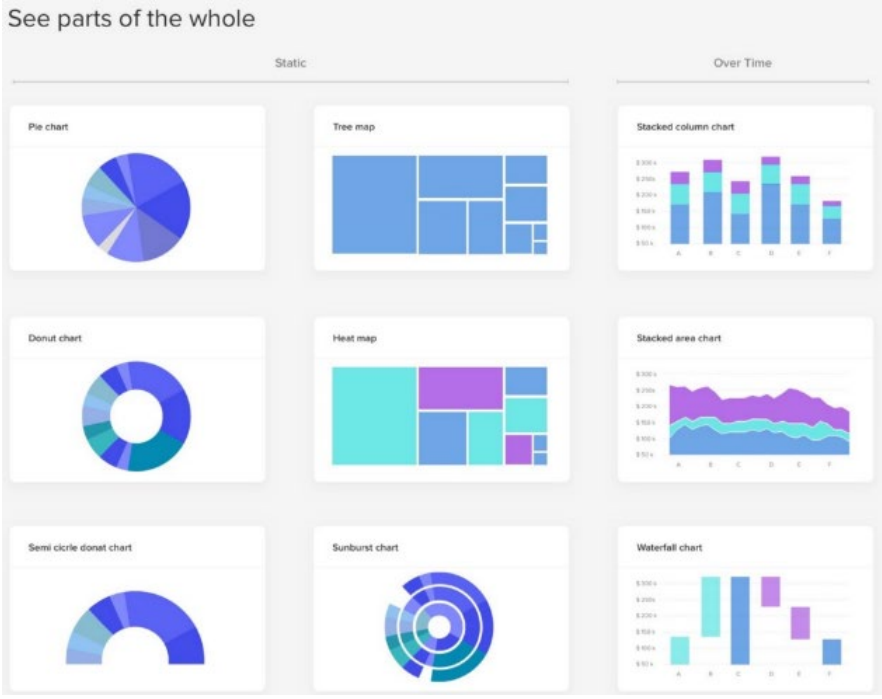
การทำให้เป็นภาพ (Visualization) ช่วยให้การเปรียบเทียบชุดข้อมูลต่าง ๆ เข้าใจได้ง่ายขึ้นกว่าการดูจากตัวเลขมาก แผนภูมิแท่งและกราฟตามที่แสดงในรูปที่ 10-4 จะเป็นรูปแบบที่ถูกใช้มากที่สุด

- เมื่อหนึ่งในมิติของข้อมูลเป็นเวลา มิติของเวลาจะต้องอยู่ในแกน X และเวลาจะต้องเริ่มจากซ้ายแล้วเคลื่อนไปทางขวา
- เมื่อแสดงแผนภูมิแท่งไม่ว่าจะแนวนอนหรือแนวตั้ง หากทำได้ควรจะเรียงลำดับของแผนภูมิจากค่ามากไปสู่ค่าน้อย
- การแสดงกราฟ ไม่ควรแสดงเกินกว่า 5 เส้นกราฟ และหากเป็นแผนภูมิแท่งไม่ควรแสดงมากเกินกว่า 7 แท่ง



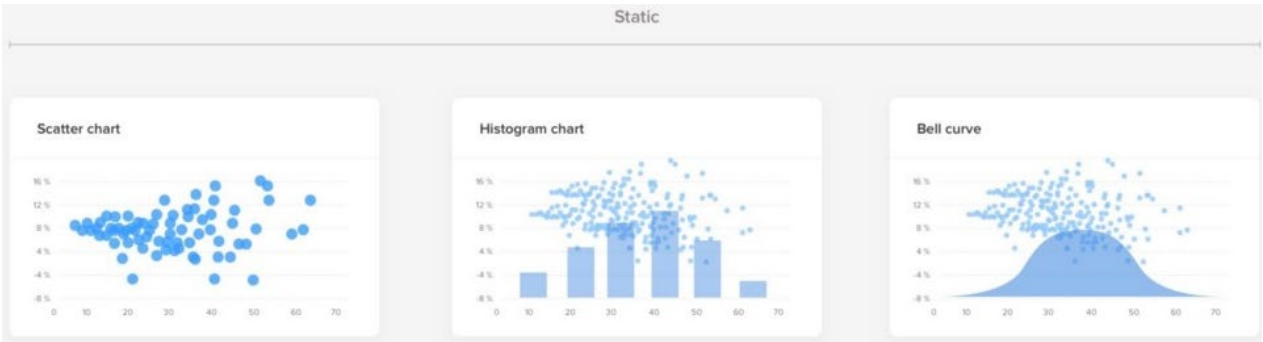
รูปที่ 10-4 ตัวอย่างของแผนภูมิสำหรับเปรียบเทียบแบบต่าง ๆ (Comparison Charts) บนแดชบอร์ด

แผนภูมิแบบพายและโดนัท (Pie and Donut Charts) ตามแสดงในรูปที่ 10-5 มักจะไม่เหมาะที่จะใช้กับแดชบอร์ด แผนภูมิสองแบบนี้อยู่ในกลุ่มที่ถูกใช้บ่อยที่สุดและถูกใช้อย่างไม่ถูกต้องบ่อยที่สุดด้วย แผนภูมิเหล่านี้จะอ่านค่าได้ยากเมื่อมีองค์ประกอบ (Components) มากเกินไปหรือมีข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียงกันหลายชุดเนื่องจากเป็นการยากสำหรับมนุษย์ที่จะแยกความแตกต่างของค่าต่าง ๆ ในรูปแบบของมุมและพื้นที่ (Angles and Areas)



รูปที่ 10-5 ตัวอย่างของแผนภูมิพายและโดนัท (Pie and Donut Charts)

แผนภูมิที่แสดงการกระจายตัวของข้อมูล (Distribution Chart) ตามที่แสดงในรูปที่ 10-6 ช่วยแสดงข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ (Outliers) แสดงแนวโน้มมาตรฐาน (Normal Tendency) และแสดงพิสัย (Range) ของค่าต่าง ๆ ในข้อมูล



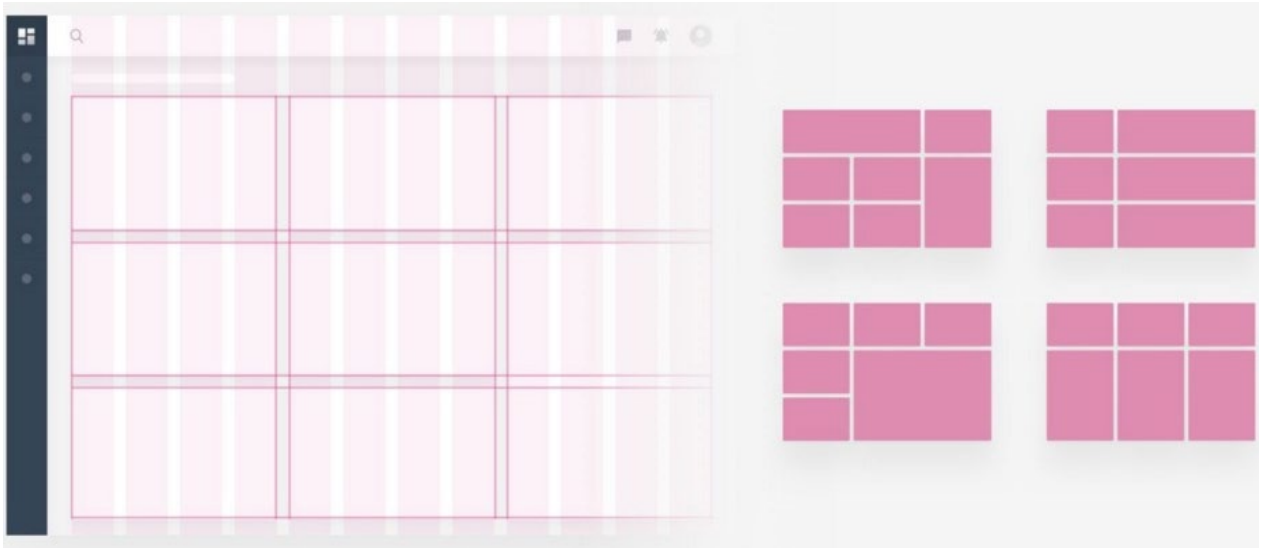
รูปที่ 10-6 ตัวอย่างของแผนภูมิแสดงการกระจายตัว (Distribution Chart) บนแดชบอร์ด

นอกจากนั้น ยังมีแผนภูมิบางประเภทที่ควรหลีกเลี่ยงที่จะใช้กับแดชบอร์ด หนึ่งในกลุ่มนี้คือแผนภูมิแบบมาตรวัดที่เคยได้รับความนิยมมากบนแดชบอร์ด แผนภูมิสามมิติและแผนภูมิที่ตกแต่งมากเกินไป (3D and Over-Styled Charts) เนื่องจากเป็นแผนภูมิที่อ่านและทำความเข้าใจได้ยาก รบกวนสมาธิของผู้อ่านจากข้อมูลที่ควรสนใจ นอกจากนั้น การทำแผนภูมิแบบนี้ก็ยากกว่าแผนภูมิทั่วไป จึงไม่มีเหตุผลที่เหมาะสมที่จะใช้งานแผนภูมิกลุ่มนี้ (ดูรูปที่ 10-7)

รูปที่ 10-7 ตัวอย่างของแผนภูมิที่ควรหลีกเลี่ยงที่จะนำมาใช้กับแดชบอร์ด

10.2.2 เลย์เอาต์และทิศทางการไหลของข้อมูลบนแดชบอร์ด (Layout and Flow of Dashboard)

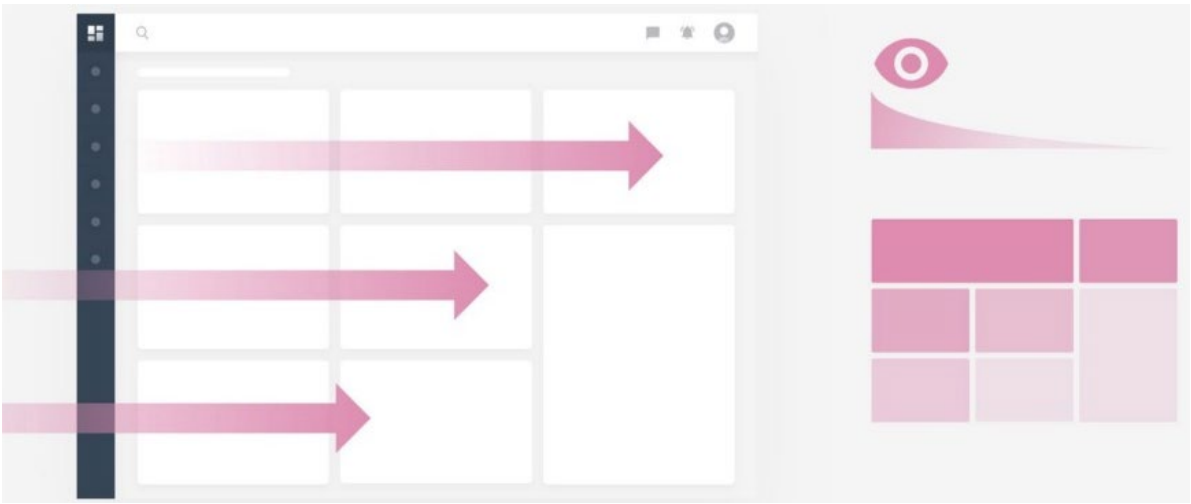
เส้นกริด (Grid) ช่วยให้สามารถจัดเรียงและจัดโครงสร้างของแดชบอร์ดได้ง่าย สอดคล้อง (Consistent) และมีประสิทธิภาพ สิ่งนี้มีความสำคัญมากต่อการออกแบบแดชบอร์ดเนื่องจากอาจมีความจำเป็นต้องวางข้อมูลจำนวนมากหลากหลายรูปแบบลงในแดชบอร์ดเดียวกัน



รูปที่ 10-8 ตัวอย่างของเลย์เอาต์สำหรับแดชบอร์ด (Dashboard Layout)

ในกรณีที่จะพิจารณาว่าต้องวางข้อมูลอะไรตรงส่วนไหนของแดชบอร์ด ให้ระลึกถึงประเด็นต่าง ๆ ต่อไปนี้

- โดยธรรมชาติ มุมบนซ้ายของจอจะได้รับความสนใจมากที่สุด ดังนั้นให้พยายามวางข้อมูลที่มีสำคัญหลักก่อนเริ่มจากซ้ายไปขวา ดังตัวอย่างในรูปที่ 10-8 (ยึดตามวิธีการอ่านข้อมูลข่าวสารทั่วไป ดังนั้นหลักการนี้อาจจะต้องปรับเปลี่ยนตามภูมิภาคของผู้ใช้ที่จะใช้แดชบอร์ดด้วย)
- เมื่อผู้อ่านอ่านบรรทัดแรกจบ ก็จะเคลื่อนลงไปอ่านบรรทัดต่อไป
- หากมีความเชื่อมโยง (Dependency) ของข้อมูลที่จะส่งผลต่อการตัดสิน ให้วางเลย์เอาต์ที่ช่วยให้ผู้อ่านไม่ต้องดูข้อมูลกลับไปกลับมา แต่มีการไหลของข้อมูลต่อเนื่องที่สามารถสแกนดูข้อมูลทั้งแดชบอร์ดได้โดยง่าย ดังแสดงในรูปที่ 10-9



รูปที่ 10-9 ตัวอย่างการไหลของข้อมูล (Information Flow) บนแดชบอร์ด

10.3 บทสรุป

การออกแบบรูปลักษณ์ของแดชบอร์ดเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะสื่อข้อมูลสำคัญให้ผู้ใช้สามารถดูและเข้าใจข้อมูลได้โดยง่าย แดชบอร์ดแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ แดชบอร์ดที่แสดงการดำเนินการ (Operational Dashboard) และแดชบอร์ดที่แสดงการวิเคราะห์ (Analytical Dashboard) ซึ่งทั้งสองประเภทนี้จะมีการแสดงลักษณะข้อมูลเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ในสถานการณ์ที่แตกต่างกัน ในบทนี้ได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับเลย์เอาต์และทิศทางการไหลของข้อมูลบนแดชบอร์ด รวมถึงลักษณะรูปแบบการนำเสนอข้อมูลในแดชบอร์ดซึ่งข้อมูลที่แสดงจะมีหลากหลายชนิดทั้งข้อมูลที่ไม่เปลี่ยนแปลง (Static) และเปลี่ยนแปลงตามเวลา (Dynamic) การเลือกแผนภูมิผิดประเภทหรือใช้แต่การนำเสนอข้อมูลด้วยภาพแบบปริยายที่ไม่เหมาะกับข้อมูลจะสร้างความสับสนหรือนำไปสู่การตีความข้อมูลที่ผิดพลาดได้เช่นกัน

บทที่ 11

การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับจัดการเอกสารอัจฉริยะ (Intelligent Document Processing Algorithms)

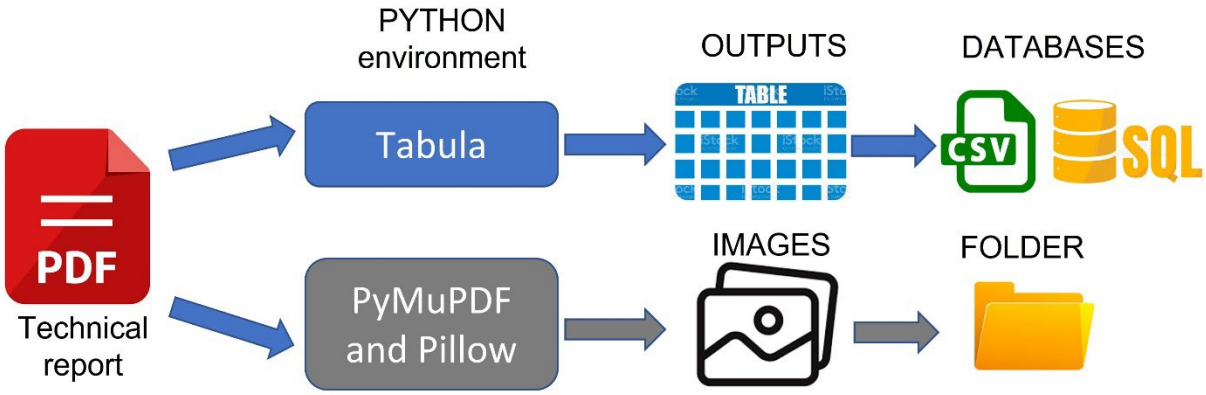
ขอบเขตของปัญหาที่ศึกษา (Problem Statement)

อัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์เอกสารข้อมูล (Document Processing Algorithms) ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้จะใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ในการวิเคราะห์ข้อความ (Text Analysis) สามารถที่จะดึงเอาข้อมูล ตาราง รูปภาพ ที่ต้องการจากเอกสารมาทำรายงานสรุป รวมถึงสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างคำสำคัญ (Keyword) ที่สนใจกับฐานข้อมูลเช่น กฎระเบียบ ประกาศที่เกี่ยวข้อง ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Specifications) และคำแนะนำต่าง ๆ เช่น ITU Recommendations ได้

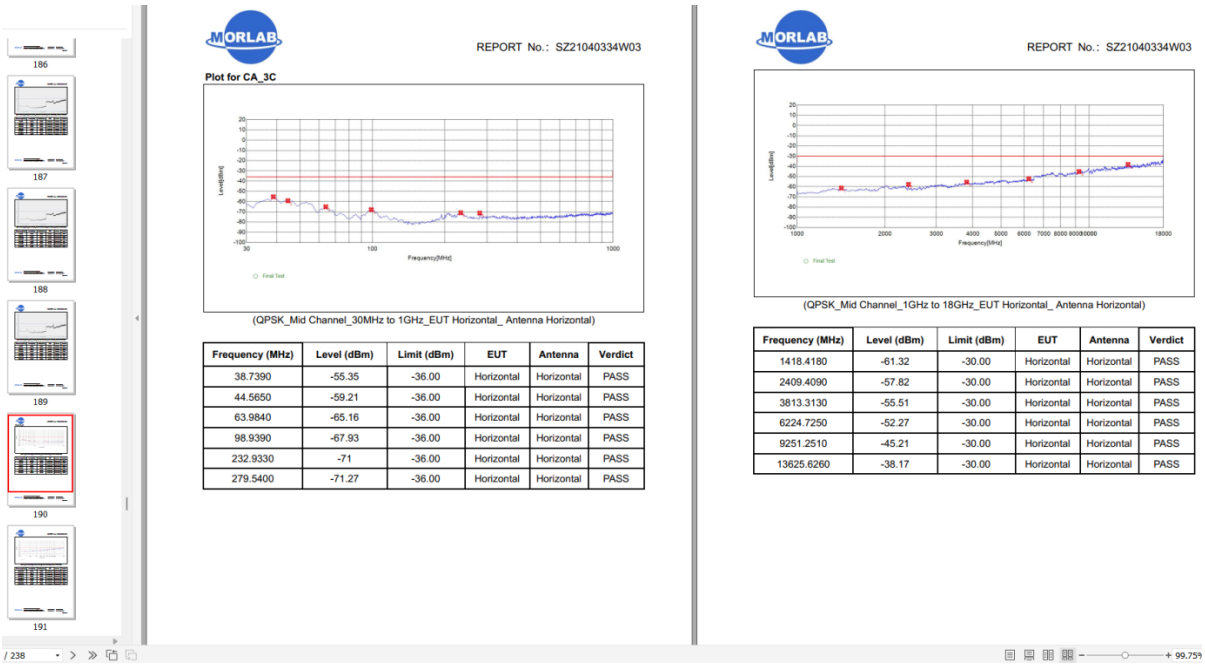
11.1 การพัฒนาอัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับดึงตารางและรูปภาพจากรายงานทางเทคนิค (Technical Report) ที่อยู่ในรูปแบบของ pdf ไฟล์

ภาพรวมของกระบวนการทั้งหมดของการดึงตารางและรูปภาพจากเอกสารรายงานทางเทคนิคแสดงไว้ตามรูปที่ 11-1 รายงานทางเทคนิคซึ่งมักจะอยู่ในรูปแบบไฟล์ pdf เป็นเอกสารที่จะต้องส่งให้แก่สำนักงาน กสทช. ในกระบวนการขอรับรอง การขอใบอนุญาตต่าง ๆ ของอุปกรณ์วิทยุโทรคมนาคม รายงานทางเทคนิคประกอบด้วยตาราง รูปภาพจากการทดสอบต่าง ๆ จากศูนย์ทดสอบ (Testing Laboratory) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในกระบวนการพิจารณาของสำนักงาน กสทช. เพื่อพัฒนากระบวนการดึงตารางและรูปภาพโดยอัตโนมัติ คณะผู้วิจัยเสนอให้อัปโหลด (Upload) เอกสารรายงานทางเทคนิคเข้าสู่สภาพแวดล้อมของไพธอนโปรแกรมมิง (Python Programming Environment) และใช้ไลบรารีต่าง ๆ ของไพธอน (Python Libraries) เพื่อดึงข้อมูลเหล่านี้ กระบวนการอัตโนมัตินี้จะช่วยประหยัดเวลาของบุคลากรของสำนักงาน กสทช. ในการพิจารณาตารางและรูปภาพต่าง ๆ ในรายงานทางเทคนิค นอกจากนั้นยังช่วยแปลงและเก็บรายงานในรูปแบบ pdf เหล่านี้ให้อยู่ในรูปแบบของฐานข้อมูลอื่นเช่น SQL Excel

ในหัวข้อต่อไปจะอธิบายกระบวนการของการดึงตารางและรูปภาพโดยใช้ไลบรารีของไพธอน ตัวอย่างที่ใช้ในการสาธิตการทำงานของอัลกอริทึมจะเป็นรายงานทางเทคนิคของอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือที่ประกอบด้วยตารางจำนวนประมาณ 235 ตารางและรูปภาพประมาณ 200 รูปภาพจากผลการทดสอบ ตัวอย่างของตารางและรูปภาพจากรายงานทางเทคนิคฉบับนี้แสดงไว้ในรูปที่ 11-2



รูปที่ 11-1 ผังงาน (Flowchart) ของการดึงตารางและรูปภาพจากรายงานทางเทคนิค



Frequency (MHz)	Level (dBm)	Limit (dBm)	EUT	Antenna	Verdict
38.7390	-55.35	-36.00	Horizontal	Horizontal	PASS
44.5650	-59.21	-36.00	Horizontal	Horizontal	PASS
63.9840	-65.16	-36.00	Horizontal	Horizontal	PASS
98.9390	-67.93	-36.00	Horizontal	Horizontal	PASS
232.9330	-71	-36.00	Horizontal	Horizontal	PASS
279.5400	-71.27	-36.00	Horizontal	Horizontal	PASS

Frequency (MHz)	Level (dBm)	Limit (dBm)	EUT	Antenna	Verdict
1418.4180	-61.32	-30.00	Horizontal	Horizontal	PASS
2409.4090	-57.82	-30.00	Horizontal	Horizontal	PASS
3813.3130	-55.51	-30.00	Horizontal	Horizontal	PASS
6224.7250	-52.27	-30.00	Horizontal	Horizontal	PASS
9251.2510	-45.21	-30.00	Horizontal	Horizontal	PASS
13625.6260	-38.17	-30.00	Horizontal	Horizontal	PASS

รูปที่ 11-2 ตัวอย่างของตารางและรูปภาพจากรายงานทางเทคนิคของอุปกรณ์โทรศัพท์มือถือ

11.1.1 เบื้องต้นเกี่ยวกับไลบรารี (Library) ของ Tabula

Tabula เป็นแวรปเปอร์ขั้นพื้นฐาน (Basic Wrapper) ของ Tabula-java ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถดึงตารางและแปลง (Convert) ไฟล์ pdf ไปเป็นกรอบข้อมูล (Data Frame) หรือ JSON โดยใช้ภาษาไพธอน นอกจากนั้นผู้ใช้ยังสามารถดึงตารางจากไฟล์ pdf และแปลงไปเป็นไฟล์รูปแบบต่าง ๆ ทั้ง tsv csv หรือ json

Tabula เป็นเครื่องมือที่ใช้ Graphical User Interface (GUI) ในขณะที่ Tabula-java เป็นเครื่องมือที่ใช้ Command-Line User Interface (CUI) Tabula-java มีตัวเชื่อม (Binding) กับ Ruby R และ NodeJS แต่ยังไม่สามารถใช้กับไพธอนได้ ดังนั้นกลุ่มนักพัฒนา (Developers) จึงพัฒนาหลักการของ tabula-py ซึ่งจะมีตัวเชื่อมกับไพธอน Tabula เป็นเครื่องมือประสิทธิภาพสูงที่สำนักข่าวทุกขนาดใช้เพื่อเพิ่มพลังในการวิเคราะห์สืบค้นรายงานต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น The Times of London, Propublica, Foreign Policy, The New York Times, La Nacion

(อาร์เจนตินา) และ St. Paul (MN) Pioneer Press องค์กรเพื่อสังคม (Grassroots Organizations) เช่น SchoolCuts.org ใช้ Tabula เพื่อแปลงไฟล์เอกสารจำนวนมหาศาลให้เป็นฐานข้อมูลสาธารณะที่เข้าถึงง่ายและใช้ง่าย นอกจากนั้นยังมีนักวิจัยจากหลากหลายสาขาที่ใช้ Tabula เพื่อแปลงรายงานต่าง ๆ ที่เป็นไฟล์ pdf ให้เป็นไฟล์ excel cvs และ json เพื่อใช้นำไปวิเคราะห์และทำฐานข้อมูลต่อไป

11.1.2 การติดตั้ง (Implementation) Tabula บนไพธอน

หลังจากได้รู้จักกับ Tabula ในเบื้องต้นแล้ว หัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการติดตั้ง Tabula บนไพธอนด้วยไลบรารีของ Tabula บนระบบปฏิบัติการวินโดว์ (Window OS) โดยจะติดตั้ง tabula-py ซึ่งเป็นไลบรารีแบบเปิด (Open-Source) ของไพธอนด้วยตัวติดตั้ง (Installer) pip คำสั่ง (Codes) ทั้งหมดถูกจัดการโดยใช้ PyCharm Editor บน Anaconda Tool

```
$ pip install tabula-py
Importing of the library
```

หลังจากที่ติดตั้งเสร็จสิ้นแล้วสามารถตรวจสอบได้โดยการสั่งให้ส่งไลบรารีออก (Import) ดังนี้

```
import tabula
```

หากส่งออกไลบรารีไม่สำเร็จ แนะนำให้ทำกระบวนการติดตั้งใหม่อีกครั้ง ไลบรารีของ tabula-py มีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายเช่น การอ่านไฟล์ pdf การอ่านตารางที่อยู่ในหน้าที่กำหนดของไฟล์ pdf การอ่านตารางหลาย ๆ ตารางที่อยู่ในหน้าเดียวกันของไฟล์ pdf หรือการแปลงไฟล์ pdf เป็นไฟล์ cvs

11.1.3 การดึงตารางในไฟล์ pdf (Extracting pdf Tables) โดยใช้ tabula-py

สามารถทำได้โดยง่ายโดยใช้วิธี (Method) read_pdf() เพื่อดึงตารางมาจากไฟล์ที่ต้องการ :

```
# read PDF file
tables = tabula.read_pdf("Test-Report-example.pdf", pages="all")
```

ค่า "pages" ถูกกำหนดไว้เป็น "all" เพื่อดึงเอาตารางจากทุกหน้าของไฟล์ pdf โดย tabula.read_pdf() จะสร้าง (Return) รายการ (List) ของ pamdas DataFrames โดยที่แต่ละกรอบข้อมูล (DataFrames) จะเก็บข้อมูลของแต่ละตารางที่ดึงมา นอกจากนั้นหากไฟล์ pdf อยู่ใน URL ที่ต้องดาวน์โหลด (Download) ก็สามารถใช้ URL กับ tabula.read_pdf() เพื่อให้ดาวน์โหลดไฟล์มาก่อนที่จะดึงตารางได้โดยอัตโนมัติ ตัวอย่างคำสั่งต่อไปนี้จะสร้างแฟ้มข้อมูล (Folder) ขึ้นมา ดึงตารางทั้งหมดออกมา และบันทึกแต่ละตารางไว้เป็นไฟล์ excel แยกไว้ในแฟ้มข้อมูลที่สร้างขึ้น :

```
# save them in a folder
folder_name = "tables"
if not os.path.isdir(folder_name):
    os.mkdir(folder_name)
# iterate over extracted tables and export as excel individually
```

```
for i, table in enumerate(tables, start=1):
    table.to_excel(os.path.join(folder_name, f"table_{i}.xlsx"), index=False)
```

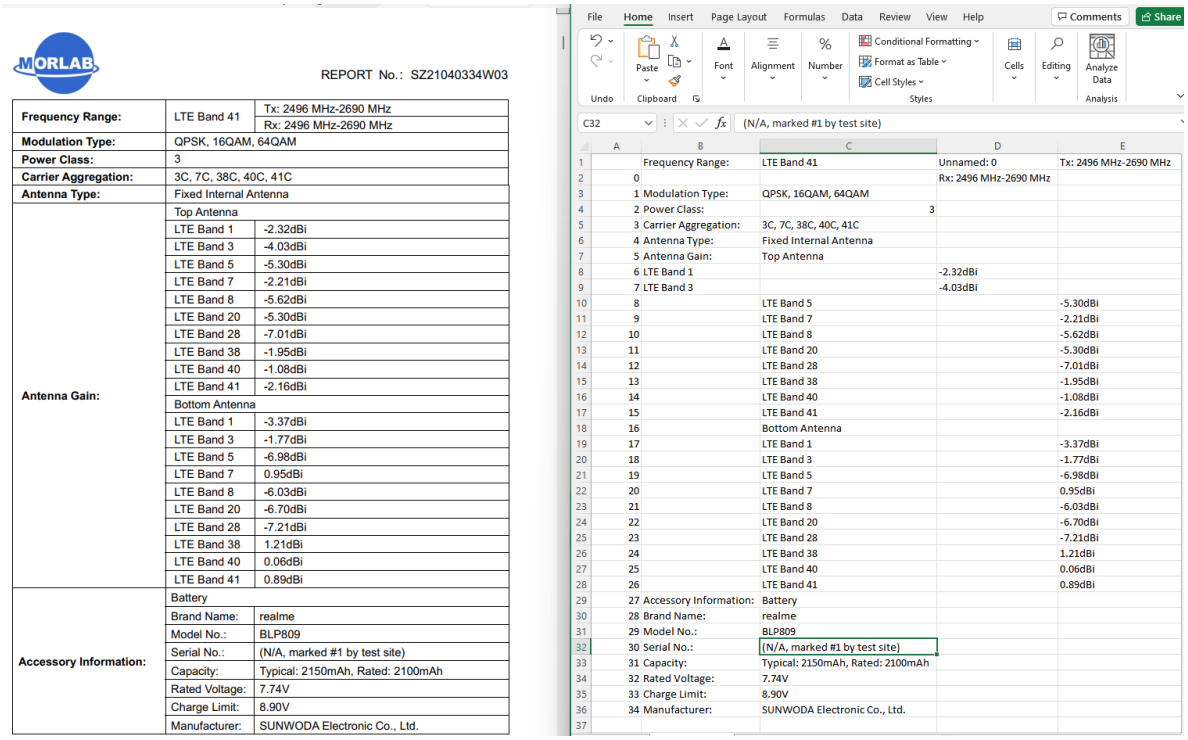
คำสั่งต่อไปนี้จะดึงตารางทั้งหมดออกมาจากไฟล์ pdf และบันทึกไว้ในไฟล์ csv เดียวกัน :

```
# convert all tables of a PDF file into a single CSV file
# supported output_formats are "csv", "json" or "tsv"
tabula.convert_into("Test-Report-example.pdf","output.csv",  output_format="csv", pages="all")
```

คำสั่งต่อไปนี้จะดึงตารางออกมาจากไฟล์ pdf จำนวนหลายไฟล์ที่อยู่ในแฟ้มข้อมูล pdf (pdf Folder) ที่ต้องการ โดยจะดึงตารางทั้งหมดของไฟล์ pdf แต่ละไฟล์ในแฟ้มข้อมูลบันทึกแยกเป็นรายไฟล์ในรูปแบบ csv :

```
# convert all PDFs in a folder into CSV format
# `pdfs` folder should exist in the current directory
tabula.convert_into_by_batch("pdfs", output_format="csv", pages="all")
```

ตัวอย่างของตารางที่ถูกดึงออกมาแสดงไว้ในรูปที่ 11-3



REPORT No.: SZ21040334W03

Frequency Range:	LTE Band 41	Tx: 2496 MHz-2690 MHz Rx: 2496 MHz-2690 MHz
Modulation Type:	QPSK, 16QAM, 64QAM	
Power Class:	3	
Carrier Aggregation:	3C, 7C, 38C, 40C, 41C	
Antenna Type:	Fixed Internal Antenna	
Antenna Gain:	Top Antenna	
	LTE Band 1	-2.32dBi
	LTE Band 3	-4.03dBi
	LTE Band 5	-5.30dBi
	LTE Band 7	-2.21dBi
	LTE Band 8	-5.62dBi
	LTE Band 20	-5.30dBi
	LTE Band 28	-7.01dBi
	LTE Band 38	-1.95dBi
	LTE Band 40	-1.08dBi
	LTE Band 41	-2.16dBi
	Bottom Antenna	
	LTE Band 1	-3.37dBi
	LTE Band 3	-1.77dBi
	LTE Band 5	-6.98dBi
	LTE Band 7	0.95dBi
	LTE Band 8	-6.03dBi
	LTE Band 20	-6.70dBi
	LTE Band 28	-7.21dBi
	LTE Band 38	1.21dBi
	LTE Band 40	0.06dBi
	LTE Band 41	0.89dBi
Accessory Information:	Battery	
	Brand Name:	realme
	Model No.:	BLP809
	Serial No.:	(N/A, marked #1 by test site)
	Capacity:	Typical: 2150mAh, Rated: 2100mAh
	Rated Voltage:	7.74V
	Charge Limit:	8.90V
	Manufacturer:	SUNWODA Electronic Co., Ltd.

	A	B	C	D	E
1		Frequency Range:	LTE Band 41	Unnamed: 0	Tx: 2496 MHz-2690 MHz
2	0			Rx: 2496 MHz-2690 MHz	
3	1	Modulation Type:	QPSK, 16QAM, 64QAM		
4	2	Power Class:		3	
5	3	Carrier Aggregation:	3C, 7C, 38C, 40C, 41C		
6	4	Antenna Type:	Fixed Internal Antenna		
7	5	Antenna Gain:	Top Antenna		
8	6	LTE Band 1		-2.32dBi	
9	7	LTE Band 3		-4.03dBi	
10	8		LTE Band 5		-5.30dBi
11	9		LTE Band 7		-2.21dBi
12	10		LTE Band 8		-5.62dBi
13	11		LTE Band 20		-5.30dBi
14	12		LTE Band 28		-7.01dBi
15	13		LTE Band 38		-1.95dBi
16	14		LTE Band 40		-1.08dBi
17	15		LTE Band 41		-2.16dBi
18	16		Bottom Antenna		
19	17		LTE Band 1		-3.37dBi
20	18		LTE Band 3		-1.77dBi
21	19		LTE Band 5		-6.98dBi
22	20		LTE Band 7		0.95dBi
23	21		LTE Band 8		-6.03dBi
24	22		LTE Band 20		-6.70dBi
25	23		LTE Band 28		-7.21dBi
26	24		LTE Band 38		1.21dBi
27	25		LTE Band 40		0.06dBi
28	26		LTE Band 41		0.89dBi
29	27	Accessory Information:	Battery		
30	28	Brand Name:	realme		
31	29	Model No.:	BLP809		
32	30	Serial No.:	(N/A, marked #1 by test site)		
33	31	Capacity:	Typical: 2150mAh, Rated: 2100mAh		
34	32	Rated Voltage:	7.74V		
35	33	Charge Limit:	8.90V		
36	34	Manufacturer:	SUNWODA Electronic Co., Ltd.		
37					

รูปที่ 11-3 (ซ้าย) ตารางในไฟล์ pdf (ขวา) ตารางที่ถูกดึงออกมาในรูปแบบไฟล์ csv จะเห็นได้ว่าในไฟล์ csv บางเซลล์ (Cell) จะถูกเลื่อน (เช่น "LTE Band 1" "LTE Band 3") อย่างไรก็ตามเนื้อหา (Content) ของตารางไม่ได้เปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ

11.1.4 ตัวเลือกคำสั่งอื่น ๆ (Other Options)

11.1.4.1 Lattice Mode vs. Stream Mode

Tabula รองรับการทำงานใน 2 โหมด (Modes) ของการดึงข้อมูลได้แก่โหมด Lattice และโหมด Stream

- โหมด Lattice (เมื่อ "lattice" = True) : จะรู้จำ (Recognize) เซลล์ต่าง ๆ ด้วย เส้นและขอบเขต (Ruling Lines & Borders)
- โหมด Stream (เมื่อ "stream" = True) : จะใช้ในกรณีที่ไม่มีเส้นและขอบเขตที่จะใช้แยกแต่ละเซลล์จากกัน โหมดนี้จะใช้ช่องว่าง (Space) เพื่อรู้จำเซลล์ต่าง ๆ

11.1.4.2 การกำหนดพื้นที่ (Area Selection)

ผู้ใช้สามารถกำหนดพื้นที่ในหน้า pdf ที่ต้องการได้โดยกำหนดตัวเลือก "top, left, bottom, right" ของ tabula.read_pdf() ซึ่งจะมีผลเท่ากับการลากเมาส์ (Mouse Dragging) และกำหนดพื้นที่ที่ต้องการใน Tabula เวอร์ชั่นเว็บแอป (Web Application) ค่าปกติ (Default) คือกำหนดพื้นที่เป็นทั้งหน้าของเอกสาร (Entire Page) นอกจากนั้นผู้ใช้ยังสามารถเลือกหน้าที่จะดำเนินการได้ด้วยตัวเลือกคำสั่ง pages

เกี่ยวกับ Escape Characters

เมื่อใช้ใน Lattice Mode Tabula จะแทนที่พื้นที่ว่างขนาดใหญ่ระหว่างข้อความ (Texts) กับบรรทัดใหม่ภายในเซลล์ด้วย \r ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วย การจัดการ "regex" อย่างง่าย (Simple Regex Manupulation)

```
clean_df = df.replace('\r',' ', regex=True)
clean_df
```

11.2 การพัฒนาอัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับดึงรูปภาพจากรายงานทางเทคนิคที่อยู่ในรูปแบบของไฟล์ pdf

11.2.1 เบื้องต้นเกี่ยวกับ PyMuPDF และ ไลบรารี Pillow

PyMuPDF เป็นตัวเชื่อมของไพธอนสำหรับ MuPDF ซึ่งเป็นตัวอ่านขนาดกระทัดรัด (Lightweight Viewer) ของไฟล์ pdf และ xps MuPDF สามารถเปิดไฟล์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ pdf, xps, openxps, cbz (comic book archive), fb2 และ epub (e-Book) PyMuPDF ทำให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงฟังก์ชันการทำงาน (Function) ที่สำคัญหลายอย่างของ MuPDF ด้วยไพธอน MuPDF มีความโดดเด่นด้วยความสามารถในการแสดงไฟล์ (Rendering Capability) และความเร็วในการประมวลผลที่ยังไม่มีใครเอาชนะได้ นอกจากนั้นความกระทัดรัด ทำให้ MuPDF เป็นตัวเลือกที่ยอดเยี่ยมสำหรับแพลตฟอร์ม (Platform) ที่มีทรัพยากรจำกัดเช่นสมาร์ตโฟน (Smartphones)

Pillow เป็นไลบรารีแบบเปิด (Open-Source Library) ของไพธอนสำหรับประมวลผลภาพ (Image Processing) ที่พัฒนาขึ้นโดย Secret Labs AB ภายใต้ใบอนุญาต (License) Python Imaging Library Pillow ใช้ได้กับการจัดการและประมวลผลภาพตั้งแต่ขั้นพื้นฐานไปถึงขั้นที่ต้องใช้การประมวลผลที่สูงพอควร (Fairly

Powerful) เป็นไลบรารีที่ใช้งานและสามารถประมวลผลได้หลากหลาย สามารถใช้ได้ตั้งแต่การทำงาน (Task) ง่าย ๆ เช่น เปิดไฟล์ภาพ ปรับขนาดภาพ หมุน ทรานส์โพส (Transpose) ครอป (Crop) และวาง (Paste) และยังสามารถใช้กับการทำงานที่ต้องประมวลผลสูงเช่น เสริม (Enhance) ภาพ ใส่ฟิลเตอร์ (Filter) แปลง (Convert) สีหรือชนิดของภาพ ใส่รูปร่าง (Shapes) หรือข้อความลงบนภาพ เป็นต้น

11.2.2 การติดตั้ง (Implementation) PyMuPDF และ Pillow

ด้วย PyMuPDF ผู้ใช้สามารถเปิดไฟล์ pdf xps openxps epub และไฟล์ชนิดอื่น ๆ อีกมากมาย PyMuPDF ทำงานได้บนหลายแพลตฟอร์มได้แก่ วินโดวส์ (Windows) Mac OSX และลีนุกซ์ (Linux)

การติดตั้ง (Install) PyMuPDF พร้อมกับ Pillow :

```
pip3 install PyMuPDF Pillow
```

การนำเข้า (Import) ไลบรารี :

```
import fitz # PyMuPDF
import io
from PIL import Image
```

การทดสอบไลบรารีต่าง ๆ ด้วยภาพในไฟล์ pdf ดึงและวางภาพเหล่านั้นไว้ในแฟ้มที่ใช้งานอยู่ (Working Directory)

```
# file path you want to extract images from
file = " Test-Report-example.pdf"
# open the file
pdf_file = fitz.open(file)
```

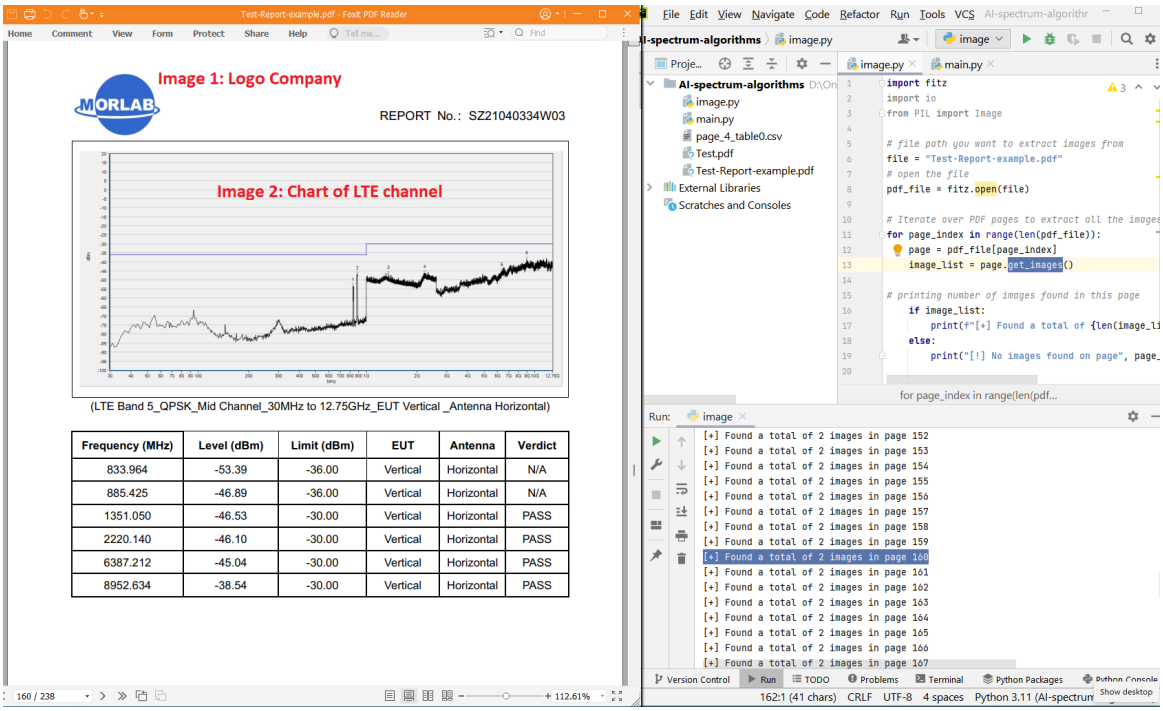
11.2.3 การดึง (Extract) รูปภาพจากไฟล์ pdf

คำสั่งต่อไปทำให้เกิดการดึงรูปภาพต่าง ๆ จากแต่ละหน้าของไฟล์ที่ต้องการโดยใช้การทำซ้ำ (Iteration) :

```
# iterate over PDF pages to extract all the images in technical report
for page_index in range(len(pdf_file)):
    # get the page itself
    page = pdf_file[page_index]
    image_list = page.get_images()
    # printing number of images found in this page
    if image_list:
        print(f"[+] Found a total of {len(image_list)} images in page {page_index}")
    else:
```

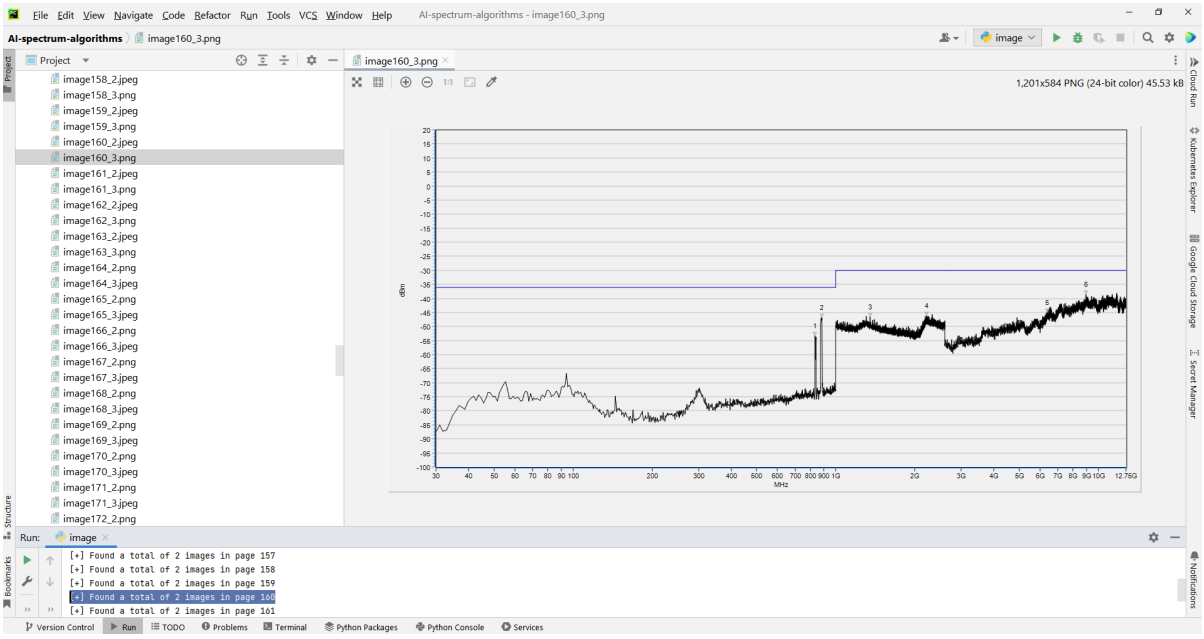
```
        print("[!] No images found on page", page_index)
    for image_index, img in enumerate(page.get_images(), start=1):
        # get the XREF of the image
        xref = img[0]
        # extract the image bytes
        base_image = pdf_file.extractImage(xref)
        image_bytes = base_image["image"]
        # get the image extension
        image_ext = base_image["ext"]
        # load it to PIL
        image = Image.open(io.BytesIO(image_bytes))
        # save it to local disk
        image.save(open(f"image{page_index+1}_{image_index}.{image_ext}", "wb"))
```

ผู้ใช้สามารถใช้คำสั่ง (Method) get_images() เพื่อสร้างรายการของรูปภาพในแต่ละหน้า (แต่ละรายการจะเก็บข้อมูลในรูปแบบของทูเปิล (Tuple)) โดยที่องค์ประกอบ (Element) แรกของทูเปิลจะเป็นลำดับ (Index) ของรูปภาพในแต่ละหน้า ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ get_images() แสดงไว้ตามรูปที่ 11-4 โดยจะพบว่าในทุกหน้าจะพบรูปที่ไม่ต้องการซึ่งเป็นโลโก้ของบริษัท อัลกอริทึมสามารถที่จะข้ามรูปโลโก้นี้ไปได้โดยการกรอง (Filter) ออกด้วยขนาดของรูป (เช่น ในหน่วยกิโลไบต์ (kBytes)) ได้

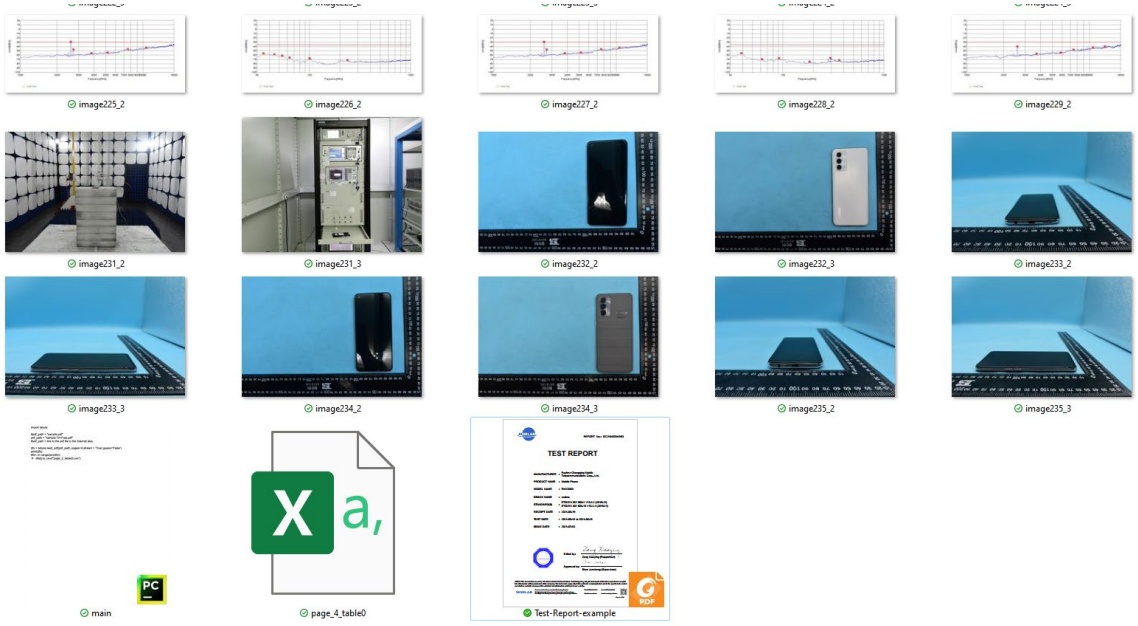


รูปที่ 11-4 ในหน้าที่ 160 อัลกอริทึมพบรูปภาพ 2 รูป อย่างไรก็ตามหนึ่งในสองรูปเป็นโลโก้ของบริษัท ซึ่งเป็นรูปที่ไม่ต้องการและสามารถกรอง (Filter) ออกโดยใช้ขนาดของรูปภาพได้

หลังจากนั้น ผู้ใช้สามารถใช้คำสั่ง (Method) extractImage() เพื่อดึงข้อมูลขนาดของรูปภาพในหน่วย Bytes และข้อมูลอื่น ๆ เช่นส่วนขยายของรูป (Image Extension) และท้ายที่สุดสามารถที่จะแปลงค่าขนาดของรูป (ในหน่วย Bytes) ให้เป็นอินสแตนส์ของรูป (PIL Image Instance) และบันทึกโดยใช้คำสั่ง save() ซึ่งต้องใส่ตัวชี้ไฟล์ (File Pointer) เป็นอาร์กิวเมนต์ (Argument) ตามตัวอย่างของรูปที่ถูกดึงออกมาในรูปที่ 11-5 ชื่อของรูปที่ถูกดึงออกมาแต่ละรูปจะถูกตั้งชื่อตามหน้าของเอกสารและลำดับของรูปนั้นในหน้าเอกสาร



รูปที่ 11-5 รูปกราฟที่ถูกดึงออกมาจากเอกสารหน้า 160 มีขนาด 45 กิโลไบต์ (kB)

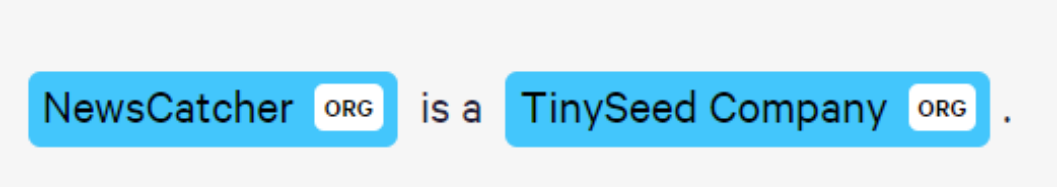


รูปที่ 11-6 รูปภาพทั้งหมดที่ถูกดึงออกมาจากเอกสารจะถูกเก็บอยู่ในแฟ้มรูปภาพ (Image Folder)

11.3 การพัฒนาอัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับรู้จำชื่อของเอกลักษณ์ (Name Entities Recognition, NER) เพื่อดึงข้อมูลจากเอกสารรายงานทางเทคนิคและเอกสารทางกฎหมาย

11.3.1 บทนำ

การรู้จำชื่อของเอกลักษณ์ (Name Entities Recognition, NER) เป็นหนึ่งในการประมวลผลข้อมูลที่สำคัญที่สุดของ การประมวลผลภาษาโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Language Processing, NLP) NER จะระบุและจัดกลุ่มของข้อมูลที่สนใจ (ซึ่งถูกเรียกว่า เอกลักษณ์ (Entities)) ที่อยู่ในข้อความ (Text Data) "เอกลักษณ์" นี้จะเป็นคำหรือกลุ่มคำ (มักจะเป็นคำเฉพาะ) ใด ๆ ที่ระบุถึงสิ่งใดสิ่งหนึ่งอย่างซ้ำ ๆ (Consistently) ในเอกสารที่สนใจ เช่น อัลกอริทึมอาจตรวจจับคำว่า "NewsCatcher" ในข้อความและจำแนก (Classify) คำนี้เป็นชื่อองค์กร (Organization) ดังแสดงในรูปที่ 11-7



รูปที่ 11-7 ตัวอย่างของการรู้จำชื่อของเอกลักษณ์ (Name Entities Recognition, NER) ที่สามารถจำแนกชื่อขององค์กร (Organization) ต่าง ๆ ได้

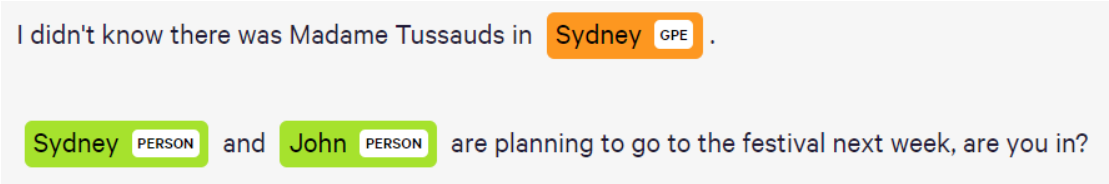
โดยหลักการ ระบบรู้จำชื่อของเอกลักษณ์จะทำงานใน 2 ขั้นตอน

- ตรวจหา (Detect) เอกลักษณ์ในข้อความ
- จำแนก (Classify) ของเอกลักษณ์ออกเป็นกลุ่มต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดชื่อเอาไว้แล้ว (Named Class)

ในขั้นแรก NER ตรวจหาเอกลักษณ์โดยใช้วิธี (Method) Inside-Outside-Beginning Chunking เพื่อหาจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดของเอกลักษณ์ต่าง ๆ ในขั้นตอนที่สองจะเป็นสร้างกลุ่มของเอกลักษณ์ กลุ่มของเอกลักษณ์นี้จะแตกต่างกันไปขึ้นกับลักษณะของงาน อย่างไรก็ตาม กลุ่มของเอกลักษณ์ที่พบได้บ่อยได้แก่ :

- บุคคล
- องค์กร
- สถานที่ (Location)
- เวลา
- การวัดหรือปริมาณ (Measurement or Quantities)
- รูปแบบของข้อความ (String Pattern) เช่น อีเมล เบอร์โทรศัพท์ และไอพีแอดเดรส (IP Address)

ถึงแม้ว่าจะมีวิธีรู้จำเอกลักษณ์จากฐานของกฎต่าง ๆ (Rule-Based Entity Recognition) การรู้จำชื่อของเอกลักษณ์สมัยใหม่ส่วนใหญ่จะใช้โมเดลแมชชีนเลิร์นนิงหรือการเรียนรู้อย่างลึก (Machine Learning/Deep Learning Model) โดยธรรมชาติข้อมูลประเภทข้อความจะมีความคลุมเครือ (Ambiguity) อยู่อย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 11-8 คำว่า "Sydney" สามารถเป็นได้ทั้งชื่อคนและชื่อสถานที่ ทั้งนี้ไม่มีวิธีที่จะกำจัดความคลุมเครือเหล่านี้ออกไปได้หมด แต่โดยรวมแล้วยิ่งสามารถเทรน (Train) ด้วยข้อมูลที่เกี่ยวข้อง (Relevant Data) มาก โมเดลก็จะสามารถทำงานได้ดีขึ้น ยกตัวอย่างเช่น หากเราใช้โมเดล NER เพื่อดึงข้อมูลทางการแพทย์จากเอกสารทางการแพทย์ (Clinical Text) มาดึงข้อมูลทางการแพทย์จากบล็อก (Blog) หรือข่าว บทความ โมเดลนี้จะทำงานได้ด้อยลงเป็นอย่างมาก



รูปที่ 11-8 ตัวอย่างของการรู้จำ (Recognizing) คนและสถานที่

11.3.2 การใช้การรู้จำชื่อของเอกลักษณ์สำหรับการดึงข้อมูล (Information Extraction)

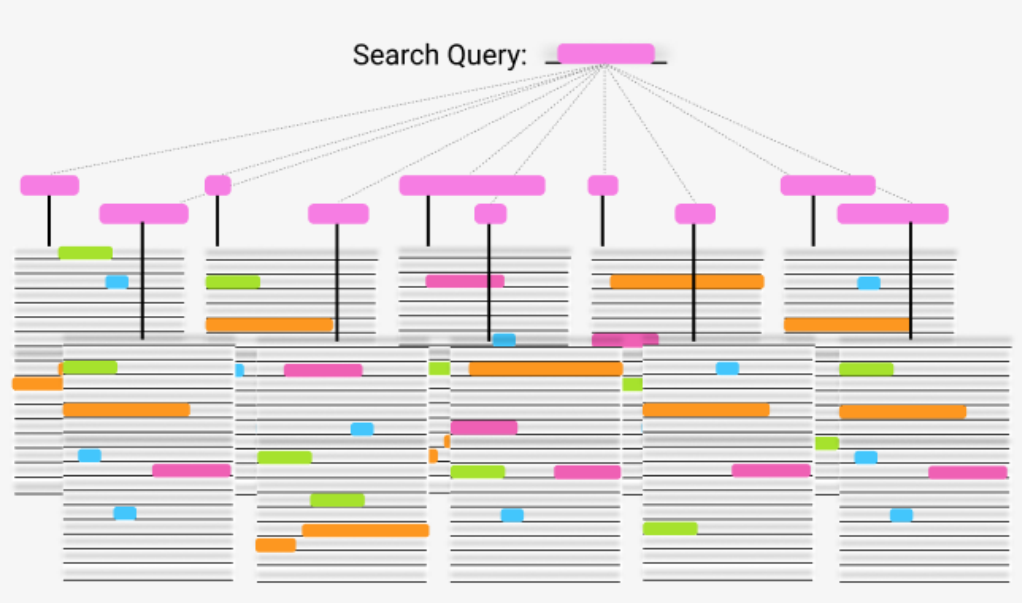
11.3.2.1 การดึงข้อมูลและการสรุปความ (Information Extraction and Summarization)

NER มีประโยชน์ในการใช้งานที่ต้องการความเข้าใจภาพรวม (High-Level Understanding) ของข้อความจำนวนมหาศาล NER ที่ดีจะช่วยให้คอมพิวเตอร์เข้าใจหัวข้อหรือธีม (Subject or Theme) ของข้อความในภาพรวมและสามารถจัดกลุ่มของเอกสารตามความเกี่ยวข้อง (Relevance) ของเอกสารเหล่านั้นได้ ในแต่ละวันมีข้อมูลประเภทข้อความเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก แต่ไม่จำเป็นว่าข้อมูลส่วนใหญ่เหล่านั้นจะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ ยกตัวอย่างเช่น เอกสารกรมธรรม์ประกันภัยมักจะมีความยาวและมีข้อมูลมาก แต่ผู้ตรวจสอบกรมธรรม์มักจะต้องการแค่กลุ่มของข้อมูลเฉพาะบางอย่างเช่น ชื่อ ที่อยู่ อายุ เป็นต้น ความสามารถในการดึงและสรุปข้อมูลที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วจะช่วยลดเวลาในการประมวลเอกสารเป็นอย่างมาก (ดังตัวอย่างในรูปที่ 11-9)

11.3.2.2 การออปติไมส์การค้นหา (Optimizing Search Engine)

สมมุติว่าเรากำลังสร้างอัลกอริทึมสำหรับค้นหา (Search Engine Algorithm) ให้สำนักข่าวซึ่งมีบทความจำนวนมากเป็นล้าน ๆ บทความ หากอัลกอริทึมใช้การมองหา (Look-Up) ส่วนของข้อความ (Substring) จะต้องตรวจหาคำทุกคำในบทความจำนวนเป็นล้าน ๆ บทความนี้ซึ่งจะใช้เวลามาก แต่หากอัลกอริทึมนี้ใช้ NER ซึ่งมองหาเอกลักษณ์ที่ต้องการจากบทความต่าง ๆ จะปรับปรุงกระบวนการค้นหาได้อย่างมาก การจับคู่ (Match) สิ่งที่ค้นหา (Search Query) กับเอกลักษณ์ที่เกี่ยวข้องของบทความต่าง ๆ ที่พิจารณาจะช่วยลดเวลาที่ต้องใช้ในการค้นหาเป็นอย่างมาก (ดังแสดงในรูปที่ 11-10)

รูปที่ 11-9 ตัวอย่างของการดึงและสรุปข้อมูล (Information Extraction and Summarization)



รูปที่ 11-10 ตัวอย่างของค้นหาข้อมูลในเอกสาร

11.3.2.3 การจำแนกกลุ่มคอนเทนต์ (Content Classification)

ในแต่ละสำนักข่าวและสำนักพิมพ์ต่าง ๆ ผลิตออนไลน์คอนเทนต์ออกมาเป็นจำนวนมาก ความสามารถในการจำแนกกลุ่มบทความเหล่านี้มีความสำคัญอย่างมากต่อความสามารถในการใช้ประโยชน์บทความเหล่านี้ NER สามารถที่จะสแกน (Scan) บทความต่าง ๆ และแสดงผลว่าบุคคล องค์กร สถานที่ที่ถูกกล่าวถึงเป็นหลักเป็นอย่างไร โดยอัตโนมัติ ความสามารถในการระบุเอกลักษณ์ต่าง ๆ ของบทความจะช่วยในการจำแนกกลุ่มและเข้าใจเนื้อหาได้อย่างมาก

11.3.3 ไลบรารี (Libraries) SpaCy สำหรับ NER

SpaCy เป็นไลบรารีแบบเปิด (Open-Source) สำหรับ NLP ขั้นสูง และ NER ในไพธอน มันถูกออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับการประมวลผลและ "เข้าใจ" ข้อมูลแบบข้อความ (Text) ปริมาณมหาศาล สามารถใช้สร้างระบบสำหรับดึงข้อมูลหรือทำความเข้าใจภาษา หรือทำการประมวลผลขั้นต้น (Pre-Process) ข้อความก่อนทำการเรียนรู้อย่างลึก ตัวอย่างของฟังก์ชั่นการใช้งาน (Features) ของ SpaCy ได้แก่ Tokenization, Parts-of-Speech (PoS) Tagging, Text Classification และ Named Entity Recognition

SpaCy มีระบบทางสถิติ (Statistical System) ประสิทธิภาพสูงให้กับ NER ช่วยให้สามารถกำหนดกลุ่ม (Group Label) ให้กับส่วนของข้อความ (Token) SpaCy ยังมีโมเดลมาตรฐานสำหรับรู้จำ ชื่อ ตัวเลข ที่หลากหลาย เช่น บุคคล องค์กร ภาษา งาน (Event) นอกจากนั้นยังทำให้สามารถกำหนดกลุ่มขึ้นได้เองตามต้องการ (Arbitrary Class) โดยการเทรนให้โมเดลด้วยตัวอย่างที่เกี่ยวข้อง

การโหลดไลบรารี :

```
import re
import parse
import pdfplumber
import pandas as pd
from collections import namedtuple
```

จากนั้น ผู้ใช้สามารถโหลด (Load) คำสำคัญ (Keyword) ที่ต้องการให้อัลกอริทึมค้นหาและเก็บข้อมูล ในกรณีของเอกสารทางเทคนิคที่พิจารณา ข้อมูลที่ต้องการเป็นดังนี้ :

```
Line = namedtuple('Line', 'manufacture manufacture_address factory
factory_address product_name model_name standards receipt_date test_dade
issue_date')
```

การโหลดรายงานทางเทคนิคเข้าสู่สภาพแวดล้อมไพธอน (Python Environment) :

```
file = ' Test-Report-example.pdf '
```

การเริ่มกระบวนการ NER :

```
lines = []
total_check = 0
with pdfplumber.open(file) as pdf:
   pages = pdf.pages
   for page in pdf.pages:
      text = page.extract_text()
      for line in text.split('\n'):
         print(line)
         comp = company_re.search(line)
         if comp:
```

```
        vend_no, vend_name = comp.group(1), comp.group(2)
    elif line.startswith('MANUFACTURE'):
        doctype = ' MANUFACTURE'
    elif line.startswith(' PRODUCT NAME'):
        doctype = ' PRODUCT NAME'
    elif line_re.search(line):
        items = line.split()
        lines.append(Line(model_name, standards, doctype, *items))
    elif line.startswith('issue_date'):
        tot = float(line.split()[2].replace(',', ''))
        total_check += tot
```

การจัดกลุ่มของผลลัพธ์เป็นชุดข้อมูล (Dataset) โดยใช้ชื่อของคอลัมน์ (Column Name) ตามที่กำหนดใน Line และแทรกเข้าไปในตารางโดยใช้ไลบรารี Pandas :

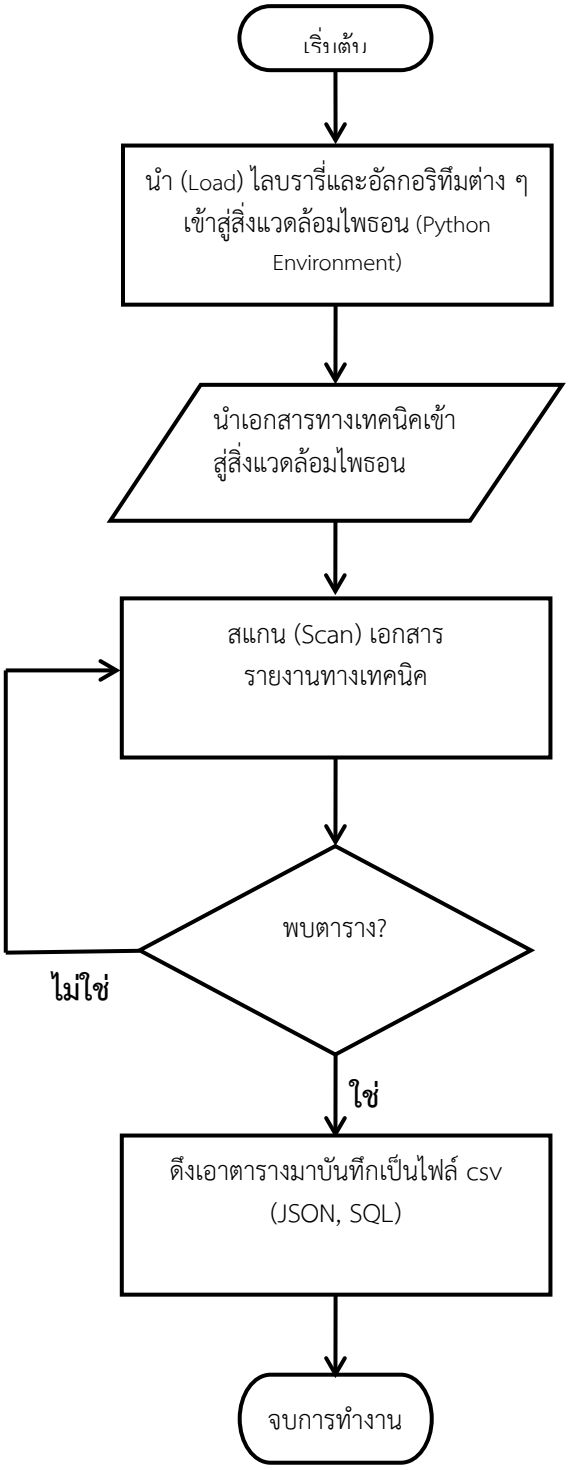
```
df = pd.DataFrame(lines)
df.head()
```

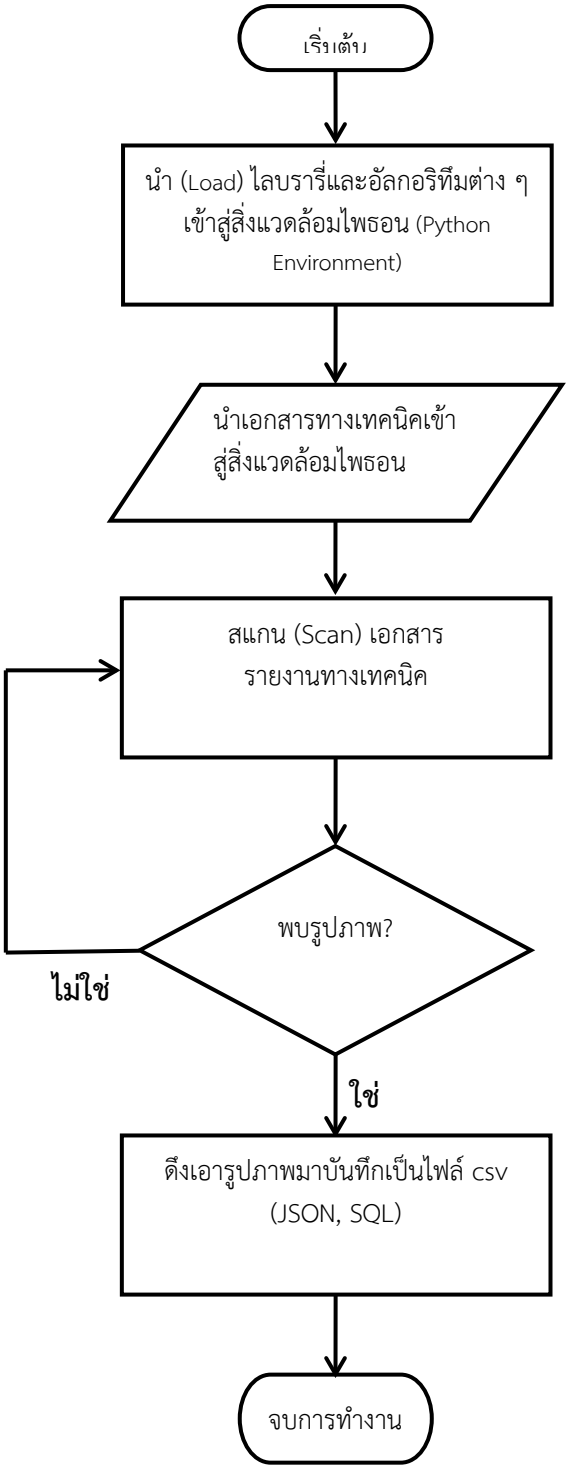
11.4 บทสรุป

คณะผู้วิจัยพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์เอกสารข้อมูล (Document Processing Algorithms) โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะดึงเอาข้อมูล ตาราง รูปภาพ ที่ต้องการจากเอกสารมาทำรายงานสรุป รวมถึงสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างคำสำคัญ (Keyword) ที่สนใจกับฐานข้อมูลเช่น กฎระเบียบ ประกาศที่เกี่ยวข้อง ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Specifications) และคำแนะนำต่าง ๆ เช่น ITU Recommendations ได้โดยใช้ไพธอนโปรแกรมมิง (Python Programming)

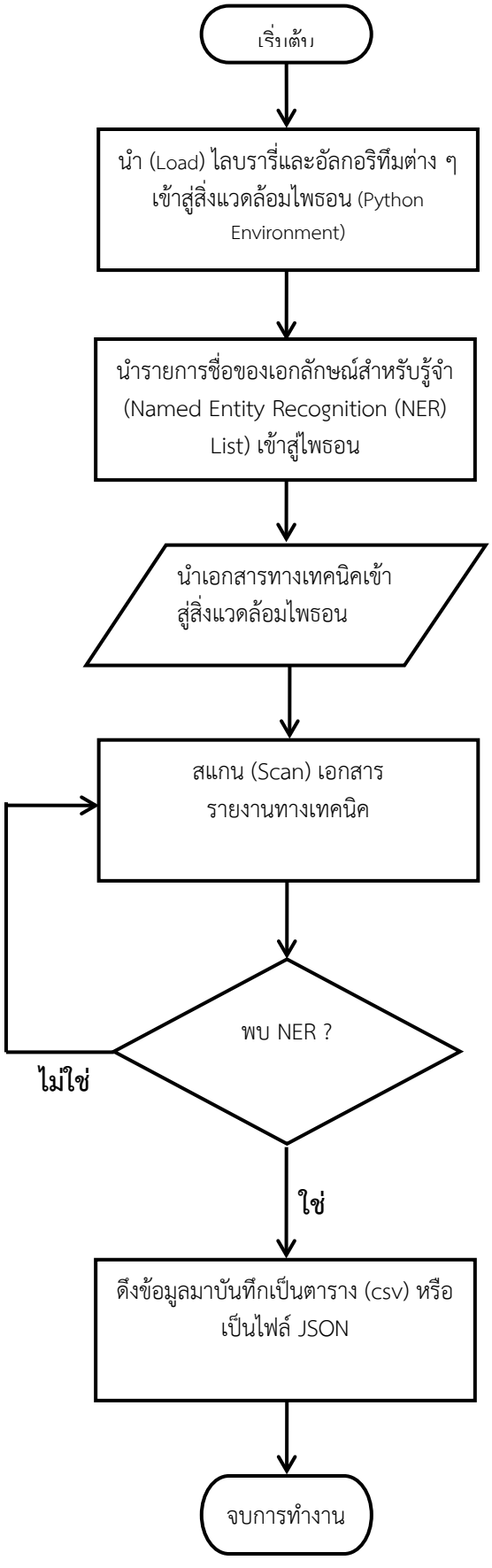
คณะผู้วิจัยพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อดึงตารางโดยใช้ Tabula ร่วมกับไลบรารี (Library) tabula-py อัลกอริทึมเพื่อรูปภาพถูกพัฒนาโดยใช้ PyMuPDF ร่วมกับไลบรารี Pillow และในส่วนของอัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์เอกสารข้อมูล (Document Processing Algorithms) คณะผู้วิจัยพัฒนาอัลกอริทึมดังกล่าวโดยใช้การรู้จำชื่อของเอกลักษณ์ (Name Entities Recognition, NER) ร่วมกับไลบรารี SpaCY ซึ่งสามารถที่จะดึงข้อมูลและสรุปความ ทำการออปติไมซ์การค้นหา (Optimizing Search Engine) และจำแนกกลุ่มคอนเทนต์ (Content Classification) ได้

ภาคผนวก : ผังงาน (Flowchart) ของการดึงตารางและรูปภาพ (Table and Image Extraction) จากไฟล์ pdf





ภาคผนวก : ผังงาน (Flowchart) ของการดึงข้อมูล (Information Extraction) จากเอกสาร



บทที่ 12

การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลความต้องการคลื่นความถี่ (Data Analysis Algorithms for Spectrum Demand)

ขอบเขตของปัญหาที่ศึกษา (Problem Statement)

อัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis Algorithms) ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้ จะใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ที่สามารถตรวจทานความถูกต้องของข้อมูลและวิเคราะห์ความหนาแน่นของการใช้คลื่นความถี่โดยใช้การวิเคราะห์พหุตัวแปร (Multivariate Analysis) วิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) ซึ่งจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Demand) กับปัจจัยต่าง ๆ ทั้งที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Linear and Non-Linear Relationships) รวมทั้งสามารถระบุปัจจัยสำคัญต่อความต้องการใช้คลื่นความถี่ได้

12.1 การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับตรวจทานความถูกต้องของฐานข้อมูล (Database Validating) และวิเคราะห์ความหนาแน่นของการใช้คลื่นความถี่ (Frequency Usage Density) โดยใช้การวิเคราะห์พหุตัวแปร (Multivariate Analysis)

12.1.1 อัลกอริทึมของการวิเคราะห์พหุตัวแปร (Multivariate Analysis Algorithms)

สมมุติว่าเราได้รับมอบหมายให้คาดการณ์ยอดขายของบริษัท เราไม่สามารถที่จะพูดว่าปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งเป็นเพียงปัจจัยเดียวที่ส่งผลต่อยอดขายเนื่องจากเป็นที่รู้กันทั่วไปว่ายอดขายจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ประเภทของผลิตภัณฑ์ ความสามารถในการผลิต ตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ การทำตลาด ภาพลักษณ์ของแบรนด์ในตลาด คู่แข่ง ต้นทุนการผลิต และปัจจัยอื่นอีกมากมาย นอกจากการวิเคราะห์ยอดขายแล้วอัลกอริทึมของการวิเคราะห์พหุตัวแปร (Multivariable Analysis, MVA) นี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับเกือบทุกปัญหา

การวิเคราะห์พหุตัวแปร ถูกใช้อย่างแพร่หลายในหลายอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมสุขภาพ จากสถานการณ์โควิด-19 เมื่อปี 2020 ทีมนักวิทยาศาสตร์ข้อมูลประเมินไว้ว่าเมืองเดลีจะมีผู้ป่วยโควิด-19 มากกว่า 500,000 คนภายในเดือนกรกฎาคม 2020 การวิเคราะห์นี้ทำบนฐานของตัวแปรหลายตัวเช่น การตัดสินใจของรัฐบาล พฤติกรรมของสาธารณะ ประชากร อาชีพ การขนส่งสาธารณะ บริการสุขภาพ และภูมิคุ้มกันของชุมชน หรือในอีกงานศึกษาหนึ่งซึ่งทำโดย Murtaza Haider จากมหาวิทยาลัย Ryerson เกี่ยวกับราคาของที่พักอาศัยและปัจจัยที่นำไปสู่การเพิ่มหรือลดของค่าที่พัก งานศึกษาดังกล่าวพบว่าหนึ่งในปัจจัยสำคัญคือระบบขนส่ง โดยที่คนจะมองหาที่พักในพื้นที่ที่การคมนาคมสะดวก ซึ่งในช่วงเริ่มของการศึกษาข้างต้นเป็นปัจจัยที่ถูกนึกถึงน้อยมาก

MVA เป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงวิเคราะห์ (Exploratory Data Analysis) ที่ช่วยให้เราเห็นข้อมูลเชิงลึก (Insight) ของตัวแปรต่าง ๆ วิธีการ (Methods) ในการทำ MVA มีมากกว่า 20 วิธีการให้เลือกใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของข้อมูลและปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์

ข้อดี-ข้อด้อยของ MVA สรุปได้ดังต่อไปนี้ :

- ข้อดี
  - ข้อดีหลักของ MVA คือมีความถูกต้องมากกว่าเนื่องจากพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่สนใจหลายตัวแปรพร้อม ๆ กัน
  - ข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกับสถานการณ์จริงมากกว่า
- ข้อด้อย
  - ข้อด้อยหลักของ MVA คือต้องใช้การคำนวณที่ซับซ้อน เนื่องจากต้องพิจารณาหลายตัวแปร
  - ต้องมีการเก็บข้อมูลจำนวนมากซึ่งเป็นกระบวนการที่ต้องใช้เวลา

การเลือกใช้วิธีการในการทำ MVA จะขึ้นอยู่กับข้อพิจารณาต่อไปนี้ :

- ตัวแปรที่พิจารณาสามารถแบ่งออกได้เป็นตัวแปรต้น (Independent Variables) และตัวแปรตาม (Dependent Variable) หรือไม่?
- มีตัวแปรตามกี่ตัวในการวิเคราะห์นี้?
- ตัวแปรต้นและตัวแปรตามเหล่านี้วัดค่าได้อย่างไร?

12.1.2 เทคนิค Dependence (Dependence Technique)

เทคนิค Dependence เป็นวิธีการทำ MVA ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่มีตัวแปรตาม (Dependence Variable) และตัวแปรต้น (Independence Variable)

12.1.2.1 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression)

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ เป็นส่วนขยายของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณจะใช้สำหรับทำนาย (Predict) ค่าตัวแปรหนึ่งโดยพิจารณาจากค่าของตัวแปรอื่นอีกอย่างน้อย 2 ตัวแปร ตัวแปรที่ต้องการจะทำนายค่าเรียกว่าตัวแปรตาม (หรืออาจเรียก ผลลัพธ์เป้าหมาย หรือตัวแปรเกณฑ์ (Criterion Variable)) การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณจะใช้สัญลักษณ์ "x" หลาย ๆ ตัวเพื่อแทนตัวแปรต้น

12.1.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบร่วม (Conjoint Analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบร่วม เป็นวิธีการเชิงสถิติสำหรับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจ (Survey-Based Statistical Technique*)* การวิเคราะห์องค์ประกอบร่วมถูกใช้ในการวิจัยตลาด *(*Market Research) เพื่อช่วยให้เข้าใจว่าผู้ใช้ *(*Users) ให้ความสำคัญกับคุณลักษณะ (Attributes*)* เช่น คุณสมบัติ (Features*)* ฟังก์ชัน (Functions*)* ประโยชน์ (Benefits*)* ของผลิตภัณฑ์หรือบริการอย่างไร ผู้ใช้มีตัวเลือกและการตัดสินใจอย่างไร เพื่อนำไป

ประกอบการขับเคลื่อนนโยบาย ผลิตภัณฑ์ หรือบริการ นอกจากในการตลาดแล้วการวิเคราะห์องค์ประกอบร่วมยังถูกใช้ในการจัดการผลิตภัณฑ์ การวิจัยเชิงปฏิบัติการ (Operation Research) ชื่ออื่น ๆ ของการวิเคราะห์องค์ประกอบร่วมได้แก่ Multi-Attribute Compositional Modeling, Discrete Choice Modeling หรือ Stated Preference Research วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบร่วมมีอยู่หลายวิธีเช่น Choice-Based Conjoint (CBC), Adaptive CBC (ACBC) เป็นต้น

12.1.2.3 การวิเคราะห์จำแนกประเภทพหุคูณ (Multiple Discriminant Analysis)

วัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์จำแนกประเภทพหุคูณคือการจัดกลุ่มให้วัตถุ (Object) ที่สนใจให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด การวิเคราะห์จำแนกประเภทพหุคูณจะหาสมการของผลรวมเชิงเส้น (Linear Combination) ของตัวแปรต้นที่สามารถใช้แยกกลุ่มของตัวแปรตามที่สนใจได้ดีที่สุด สมการดังกล่าวเรียกว่า ฟังก์ชันจำแนกประเภท (Discriminant Function) ค่าน้ำหนัก (Weight) ที่ให้กับแต่ละตัวแปรต้นในฟังก์ชันจำแนกประเภทจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างกันของตัวแปรเหล่านี้ (Interrelationships) และจะถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์จำแนกประเภท (Discriminant Coefficient)

สมการของฟังก์ชันจำแนกประเภท :

$$F = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

โดย F เป็นตัวแปรแฝง (Latent Variable) ซึ่งเป็นผลรวมเชิงเส้นของตัวแปรอิสระ (Independent Variable) $X_1, X_2, \ldots X_p$ โดยที่ ε แทนค่าความคลาดเคลื่อน (Error Term) และ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_p$ คือสัมประสิทธิ์จำแนกประเภท

12.1.2.4 การวิเคราะห์พหุตัวแปรสำหรับความแปรปรวนและความแปรปรวนร่วม (Variance and Covariance)

การวิเคราะห์พหุตัวแปรสำหรับความแปรปรวน (Multivariate Analysis of Variance, MANOVA) เป็นส่วนขยาย (Extension) ของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) สำหรับ MANOVA ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) จะเพิ่มขึ้นเป็นสองตัวขึ้นไป สมมุติฐาน (Hypothesis) ที่ทดสอบจะเกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวแปรต่าง ๆ

12.1.2.5 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์คาโนนิคอล (Canonical Correlation Analysis)

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์คาโนนิคอล (Canonical Correlation Analysis, CCA) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Relation) ระหว่างกลุ่มตัวแปร 2 กลุ่ม โดยเป็นการวิเคราะห์ที่ขยายมาจากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์

CCA จะถูกใช้เพื่อ 2 วัตถุประสงค์ต่อไปนี้ :

- การลดทอนข้อมูล (Data Reduction)
- การแปลความข้อมูล (Data Interpretation)

โดยทั่วไปเราสามารถที่จะหาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างกันของตัวแปรในสองกลุ่ม อย่างไรก็ตาม การแปลความหมายจะทำได้ยากเมื่อตัวแปรในสองกลุ่มตัวแปรมีจำนวนมาก CCA ช่วยให้เราสามารถสรุปความสัมพันธ์ข้างต้นได้ด้วยค่าทางสถิติจำนวนน้อยกว่า อาจกล่าวได้ว่าจุดมุ่งหมายของ CCA มีความคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis)

12.1.2.6 โมเดลสมการเชิงโครงสร้าง (Structural Equation Modeling)

โมเดลสมการเชิงโครงสร้าง (Structural Equation Modeling, SEM) เป็นการวิเคราะห์พหุตัวแปรเชิงสถิติที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงโครงสร้าง การวิเคราะห์นี้เป็นกรอบการทำงาน (Framework) ซึ่งประกอบด้วยวิธีการ (Methods) ที่หลากหลายสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่กว้างและยืดหยุ่น (Flexible) สูงมาก

SEM สามารถใช้ประเมิน (Assess) ต้นเหตุที่สมมุติขึ้น (Assumed Causation) ระหว่างตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม เพื่อสอบทานความถูกต้อง (Validate) ของโมเดลโครงสร้าง (Structural Model) และ โมเดลการวัด (Measurement Model) ทำให้สามารถรวมเอาการวิเคราะห์ความผิดพลาดในการวัด (Measurement Error) ของตัวแปรสังเกตุได้ (Observed Variable) เข้าไปในโมเดลได้

12.1.3 เทคนิค Independence (Independence Technique)

เทคนิค Independence เป็นวิธีการทำ MVA ที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่ไม่สามารถแยกตัวแปรที่พิจารณาออกเป็นตัวแปรตาม (Dependence Variable) และตัวแปรต้น (Independence Variable) ได้ เทคนิค Independence นี้มีจุดมุ่งหมายที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรหรือแบบแผน (Pattern) ในข้อมูล โดยไม่จำเป็นต้องมีการตั้งสมมุติฐาน (Assumptions) เกี่ยวกับตัวแปรต่าง ๆ มากนัก

12.1.3.1 การวิเคราะห์ปัจจัย (Factor Analysis)

การวิเคราะห์ปัจจัยเป็นวิธีบีบอัดข้อมูลที่มีหลายตัวแปรให้มีตัวแปรที่ต้องพิจารณาน้อยลง บางครั้งจึงถูกเรียกว่า "การลดมิติ" (Dimension Reduction) ของข้อมูลด้วย การวิเคราะห์นี้จะจัดกลุ่มข้อมูลที่มีค่าสหสัมพันธ์สูงเข้าด้วยกัน ตัวอย่างของการวิเคราะห์ปัจจัยได้แก่ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก การวิเคราะห์องค์ประกอบร่วม (Common Factor Analysis)

การวิเคราะห์ปัจจัยจะถูกใช้ในขั้นการเตรียมข้อมูล (Pre-Process) เมื่อข้อมูลมีจำนวนตัวแปรมากเกินไป สมรรถนะของการวิเคราะห์พหุตัวแปรจะลดลง เนื่องจากแบบแผนต่าง ๆ จะไม่ชัดเจน การวิเคราะห์ปัจจัยจะช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูลทำได้ง่ายขึ้น

12.1.3.2 การวิเคราะห์คลัสเตอร์ (Cluster Analysis)

การวิเคราะห์คลัสเตอร์ ใช้สำหรับจัดวัตถุออกเป็นกลุ่มที่มีความเกี่ยวพันกันเรียกว่าคลัสเตอร์ การวิเคราะห์คลัสเตอร์ไม่จำเป็นต้องมีข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับกลุ่มหรือการเป็นสมาชิกในกลุ่มของวัตถุใด ๆ ที่สนใจมาก่อน ข้อได้เปรียบหลักของการวิเคราะห์คลัสเตอร์คือเป็นการวิเคราะห์ที่ปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ (Adaptable to Changes) และช่วยเปิดเผย (Single Out) คุณสมบัติ (Features) ที่ช่วยในการแยกกลุ่มต่าง ๆ ออกจากกัน

การวิเคราะห์คลัสเตอร์ถูกใช้ในการตรวจหาค่าผิดปกติเช่น การตรวจจับการฉ้อโกงบัตรเครดิต ในฐานะที่เป็นฟังก์ชันในการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) การวิเคราะห์คลัสเตอร์เป็นเครื่องมือสำหรับศึกษาข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการแจกแจง (Distribution) ของข้อมูลรวมไปถึงคุณลักษณะ (Characteristics) ของคลัสเตอร์ต่าง ๆ

12.1.3.3 การปรับขนาดหลายมิติ (Multidimensional Scaling)

การปรับขนาดหลายมิติ (Multidimensional Scaling, MDS) เป็นเทคนิคในการสร้างแผนที่แสดงตำแหน่งระหว่างวัตถุต่าง ๆ (Relative Position) โดยใช้เพียงตารางของระยะห่างระหว่างวัตถุซึ่งเรียกว่า Proximity Matrix แผนที่นี้มีได้หลายมิติ โดยระยะห่างระหว่างวัตถุอาจจะได้โดยตรงจากการวัดหรือได้โดยอ้อมจาก Correlation Matrix

12.1.3.4 การวิเคราะห์ความสมนัย (Correspondence Analysis)

การวิเคราะห์ความสมนัย เป็นวิธีแสดงข้อมูลในตารางออกมาเป็นจุดต่าง ๆ บนแผนที่ โดยที่ระยะห่างระหว่างจุดต่าง ๆ มีความหมายเฉพาะ (Specific Spatial Interpretation) มีแนวคิดคล้ายกับการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก แต่ใช้กับข้อมูลที่เป็นหมวดหมู่มากกว่าข้อมูลแบบต่อเนื่อง โดยจะมีวิธีการแสดงหรือสรุปชุดข้อมูลในรูปแบบกราฟิกสองมิติเพื่อแสดงโครงสร้าง (Structure) ที่ซ่อนอยู่ในตารางข้อมูล ที่เรียกว่า ตารางสมนัย (Correspondence Table)

ตารางสมนัยเป็นตารางซึ่งข้อมูลในตารางแสดงระดับของความเกี่ยวพันกัน (Strength of Association) ของหมวดหมู่ข้อมูลที่กำหนดไว้ตามแถวและสดมภ์ (Row and Column) ของตาราง ตัวอย่างที่พบบ่อยของตารางสมนัย คือ ตารางการณ์จร (Contingency Table) ซึ่งข้อมูลในตารางเป็นความถี่ของหมวดหมู่ข้อมูลที่กำหนดไว้ในแถวและสดมภ์ของตาราง

12.2 แมชชีนเลิร์นนิง (Machine Learning) เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความต้องการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Demand)

เพื่อที่จะระบุปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความต้องการใช้คลื่นความถี่ของประเทศไทย คณะผู้วิจัยเสนอให้ใช้เทคนิค Feature Importance สำหรับการวิเคราะห์ โดยเทคนิคนี้จะกำหนดคะแนน (Score) ให้กับคุณสมบัติขาเข้า (Input Feature) ตามระดับความสามารถในการทำนายค่าตัวแปรเป้าหมาย (Target Variable) ที่สนใจ (เช่น ในการศึกษานี้คือความต้องการใช้คลื่นความถี่)

คะแนนที่ใช้มีได้หลายรูปแบบ โดยค่าที่นิยมนำมากำหนดเป็นคะแนนได้แก่ ค่าสหสัมพันธ์ ค่าสัมประสิทธิ์จากความสัมพันธ์เชิงเส้น ต้นไม้การติดสินใจ (Decision Tree) และค่าคะแนนความสำคัญเรียงสับเปลี่ยน (Permutation Importance Score) เป็นต้น ค่าคะแนนดังกล่าวมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ในหลายด้านเช่น เป็นค่าที่บอกเกี่ยวกับข้อมูลเชิงลึกของข้อมูลและของโมเดล เป็นค่าที่ใช้สำหรับการลดมิติ (Dimensional Reduction) ของข้อมูลและการเลือกคุณสมบัติ (Feature Selection) เพื่อปรับปรุงให้โมเดลมีประสิทธิภาพและประสิทธิผลสูงขึ้น

12.2.1 Feature Importance

Feature Importance หมายถึงกลุ่มของเทคนิคที่ใช้ในการให้คะแนนกับคุณลักษณะขาเข้าของโมเดลเพื่อทำนาย (Predictive Model) คะแนนนี้จะสะท้อนความสำคัญของคุณลักษณะขาเข้าแต่ละตัวต่อผลการทำนาย คะแนนของ Feature Importance สามารถคำนวณเพื่อใช้กับการทำนายที่ผลเป็นค่าตัวเลขซึ่งเรียกว่า การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression) และการทำนายที่ผลออกมาเป็นการจำแนกกลุ่มของข้อมูล (Classification) ได้

ประโยชน์ของคะแนน Feature Importance :

- **ให้ข้อมูลเชิงลึก (Insight) เกี่ยวกับข้อมูล** : ระดับคะแนนบ่งบอกถึงความสำคัญของแต่ละคุณสมบัติ (Feature) ต่อตัวแปรเป้าหมายที่สนใจ

- **ให้ข้อมูลเชิงลึก (Insight) เกี่ยวกับโมเดล** : ระดับคะแนนบ่งบอกถึงความสำคัญของแต่ละคุณสมบัติที่โมเดลใช้ในการทำนายค่าตัวแปรเป้าหมาย

- **สามารถใช้ในการปรับปรุงโมเดลทำนายให้ดีขึ้น** : ระดับคะแนนสามารถใช้ในการลดคุณสมบัติที่ไม่เกี่ยวข้อง (ได้คะแนนน้อย) ออก ซึ่งช่วยให้โมเดลซับซ้อนน้อยลงและใช้เวลาในการประมวลผลสั้นลง

บนไพธอน คะแนน Feature Importance สามารถส่งเข้าสู่ SelectFromModel เพื่อทำกระบวนการเลือกคุณลักษณะ (Feature Selection) ได้

12.2.2 ตัวอย่างของการใช้งานวิธีการ Feature Importance ด้วยไพธอน (Python)

12.2.2.1 การเตรียมชุดข้อมูลจำลอง (Dummy Dataset Preparation)

เพื่อการทดสอบอัลกอริทึม คณะผู้วิจัยสร้างชุดข้อมูลจำลองขึ้นมา ชุดข้อมูลจำลองประกอบด้วยคุณสมบัติต่าง ๆ โดยที่ 5 คุณสมบัติเป็นคุณสมบัติสำคัญ และที่เหลือเป็นคุณสมบัติที่ไม่สำคัญ

12.2.2.2 การจำแนกกลุ่มชุดข้อมูล (Classification Dataset)

คำสั่ง make_classification() ถูกใช้เพื่อสร้างชุดข้อมูลสำหรับทดสอบการจัดกลุ่ม ชุดข้อมูลประกอบด้วย 1,000 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างมี 10 คุณสมบัติ โดยที่ 5 คุณสมบัติมีข้อมูลสำคัญ และที่เหลือเป็นข้อมูลที่ซ้ำซ้อน (Redundant) Random Number Seed จะถูกกำหนดให้คงที่เพื่อให้ได้ตัวอย่างข้อมูลชุดเดียวกันทุกครั้งที่ทำการทดสอบ

ตัวอย่างของการสร้างและสรุปชุดข้อมูลเป็นดังนี้ :

```
# test classification dataset
from sklearn.datasets import make_classification
# define dataset
X, y = make_classification(n_samples=1000, n_features=10, n_informative=5, n_redundant=5, random_state=1)
# summarize the dataset
print(X.shape, y.shape)
```

สร้างชุดข้อมูลและยืนยันจำนวนของตัวอย่างและจำนวนคุณสมบัติตามที่กำหนด :

```
(1000, 10) (1000,)
```

คำสั่ง make_regression() ถูกใช้เพื่อสร้างชุดข้อมูลสำหรับทดสอบการวิเคราะห์ความถดถอย เช่นเดียวกับการจัดกลุ่ม ชุดข้อมูลประกอบด้วย 1,000 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างมี 10 คุณสมบัติ โดยที่ 5 คุณสมบัติมีข้อมูลสำคัญ และที่เหลือเป็นข้อมูลที่ซ้ำซ้อน (Redundant)

```
# test regression dataset
from sklearn.datasets import make_regression
# define dataset
X, y = make_regression(n_samples=1000, n_features=10, n_informative=5, random_state=1)
# summarize the dataset
print(X.shape, y.shape)
```

สร้างชุดข้อมูลและยืนยันจำนวนของตัวอย่างและจำนวนคุณสมบัติตามที่กำหนด :

```
(1000, 10) (1000,)
```

12.2.2.3 การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression)

เราสามารถใช้โมเดล LinearRegression กับชุดข้อมูลการวิเคราะห์ความถดถอยและดึงคุณสมบัติ (Property) *coeff* ซึ่งเก็บค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรขาเข้า (Input Variable) แต่ละตัว ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้จะบอกเกี่ยวกับค่าความสำคัญ (Importance) ของคุณสมบัติ (Feature) แต่ละตัว (ทั้งนี้กำหนดว่าตัวแปรขาเข้าแต่ละตัวอยู่บนสเกล (Scale) เดียวกัน)

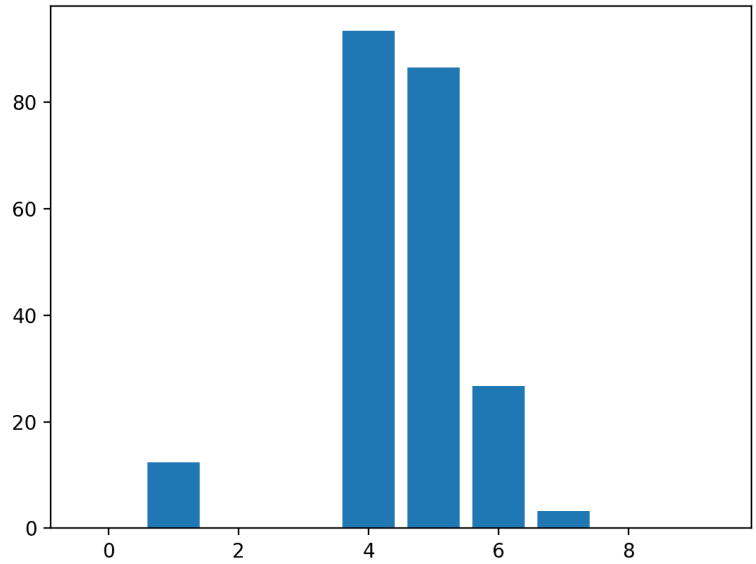
ตัวอย่างของคำสั่งสำหรับทำการวิเคราะห์ความถดถอยเป็นดังนี้ :

```
# linear regression feature importance
from sklearn.datasets import make_regression
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from matplotlib import pyplot
# define dataset
X, y = make_regression(n_samples=1000, n_features=10, n_informative=5, random_state=1)
# define the model
model = LinearRegression()
# fit the model
model.fit(X, y)
# get importance
importance = model.coef_
# summarize feature importance
for i,v in enumerate(importance):
	print('Feature: %0d, Score: %.5f' % (i,v))
# plot feature importance
pyplot.bar([x for x in range(len(importance))], importance)
pyplot.show()
```

ด้วยลักษณะของอัลกอริทึมและกระบวนการประเมินที่เป็นแบบสุ่ม (Stochastic) ผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละครั้งอาจจะไม่เหมือนกัน จึงต้องทำการทดลองหลาย ๆ ครั้งและพิจารณาค่าเฉลี่ย

ระดับคะแนนที่ได้ชี้ว่าโมเดลที่ใช้พบคุณลักษณะที่สำคัญ 5 คุณลักษณะ ในขณะที่คุณลักษณะที่ไม่สำคัญจะมีค่าคะแนน (สัมประสิทธิ์) เท่ากับ 0

```
Feature: 0, Score: 0.00000
Feature: 1, Score: 12.44483
Feature: 2, Score: -0.00000
Feature: 3, Score: -0.00000
Feature: 4, Score: 93.32225
Feature: 5, Score: 86.50811
Feature: 6, Score: 26.74607
Feature: 7, Score: 3.28535
Feature: 8, Score: -0.00000
Feature: 9, Score: 0.00000
```



รูปที่ 12-1 กราฟแท่ง (Bar Chart) แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Coefficients) ในฐานะคะแนน (Score) ของ Feature Importance

12.2.2.4 Random Forest

เราสามารถใช้อัลกอริทึม Random Forest สำหรับทำ Feature Importance โดยใช้ *RandomForestRegressor* และ *RandomForestClassifier*. โมเดลจะให้คุณสมบัติ *feature_importances__*ซึ่งแสดงคะแนนความสำคัญ (Importance Score) ของคุณสมบัติ (Feature) แต่ละตัว วิธีการนี้สามารถใช้ได้กับอัลกอริทึมพิเศษอื่น ๆ เช่น Bagging และ Extra Tree ได้ด้วย

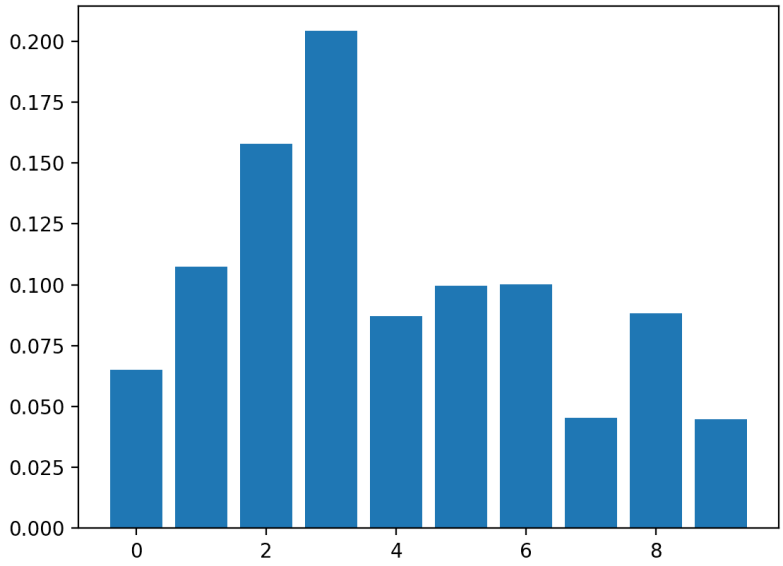
ตัวอย่างของคำสั่งสำหรับการจำแนกกลุ่ม (Classification) เป็นดังนี้ :

```
# random forest for feature importance on a classification problem
from sklearn.datasets import make_classification
from sklearn.ensemble import RandomForestClassifier
```

```
from matplotlib import pyplot
# define dataset
X, y = make_classification(n_samples=1000, n_features=10, n_informative=5, n_redundant=5, random_state=1)
# define the model
model = RandomForestClassifier()
# fit the model
model.fit(X, y)
# get importance
importance = model.feature_importances_
# summarize feature importance
for i,v in enumerate(importance):
	print('Feature: %0d, Score: %.5f' % (i,v))
# plot feature importance
pyplot.bar([x for x in range(len(importance))], importance)
pyplot.show()
```

ด้วยลักษณะของอัลกอริทึมและกระบวนการประเมินที่เป็นแบบสุ่ม ผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละครั้งอาจจะไม่เหมือนกัน จึงทำการทดลองหลาย ๆ ครั้งและพิจารณาค่าเฉลี่ย จากผลการทดสอบพบว่าประมาณ 2 หรือ 3 คุณลักษณะเป็นคุณลักษณะสำคัญ

```
Feature: 0, Score: 0.06523
Feature: 1, Score: 0.10737
Feature: 2, Score: 0.15779
Feature: 3, Score: 0.20422
Feature: 4, Score: 0.08709
Feature: 5, Score: 0.09948
Feature: 6, Score: 0.10009
Feature: 7, Score: 0.04551
Feature: 8, Score: 0.08830
Feature: 9, Score: 0.04493
```



รูปที่ 12-2 กราฟแท่ง (Bar Chart) แสดงค่าคะแนน (Score) ของ Feature Importance ด้วยวิธี RandomForestClassifier

12.2.2.5 Permutation Feature Importance

Permutation Feature Importance เป็นเทคนิคในการคำนวณค่าคะแนนความสำคัญสัมพัทธ์ (Relative Importance Score) ที่ไม่ขึ้นกับโมเดล (ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาเข้าและตัวแปนขาออก) ที่ใช้

ในขั้นแรก โมเดลจะถูกฟิต (Fit) เข้ากับข้อมูล ซึ่งอาจจะเป็นโมเดลที่ไม่รองรับการวิเคราะห์คะแนน Feature Importance ก็ได้ จากนั้นโมเดลดังกล่าวจะถูกใช้ทำนาย (Predict) ค่าจากชุดข้อมูลโดยทำซ้ำสำหรับค่า Feature แต่ละค่าในชุดข้อมูล กระบวรการนี้จะถูกทำซ้ำ 3, 5, 10 ครั้งหรือมากกว่า ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าเฉลี่ยของคะแนนความสำคัญของ Feature ขาเข้าแต่ละตัว รวมถึงการกระจายตัว (Distribution) ของคะแนนที่ได้จากการทำซ้ำด้วย

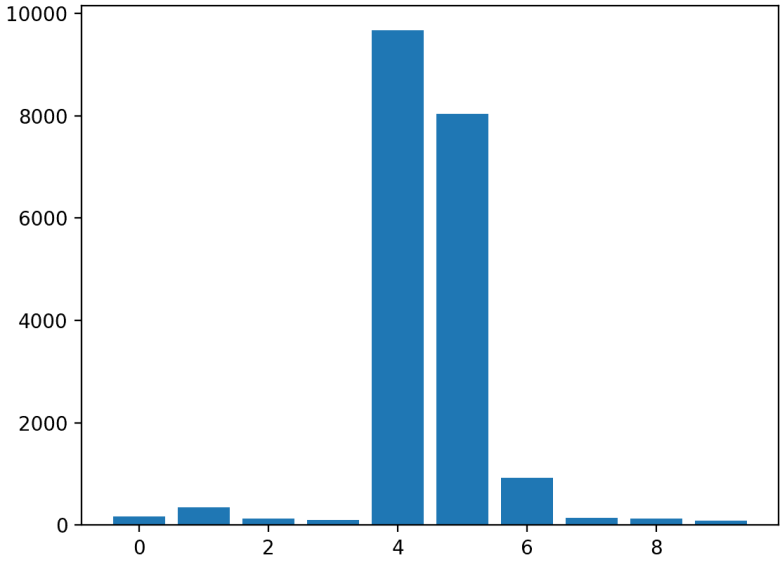
วิธิการนี้สามารถใช้ได้กับการวิเคราะห์การถดถอยหรือการจัดกลุ่ม โดยที่มาตรวัดสมรรถนะ (Performance Metric) เช่น ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดยกกำลังสอง (Mean Squared Error) ของการทำการวิเคราะห์ถดถอย และความถูกต้อง (Accuracy) สำหรับการจัดกลุ่ม ถูกใช้เป็นฐานในการคำนวณคะแนนความสำคัญ Permutation Feature Importance สามารถเรียกใช้ได้โดยคำสั่ง **permutation_importance() function** ซึ่งจะใช้โมเดลสำหรับฟิตข้อมูล ชุดข้อมูล และฟังก์ชั่นให้คะแนน (Scoring Function)

อัลกอริทึม K-Nearest Neighbors (KNN) เป็นเทคนิคที่ง่าย ชุดข้อมูลสำหรับเทรน (Training Dataset) จะถูกเก็บ (Stored) ไว้ เมื่อต้องการทำการทำนาย (Prediction) ข้อมูลจากชุดข้อมูลสำหรับเทรนที่คล้าย (Similar) กับข้อมูลชุดใหม่ที่สุดจำนวน K เรคคอร์ด (Records) จะถูกดึงออกมา ข้อมูลที่คล้ายกัน (Neighbors) เหล่านี้จะถูกใช้ในการทำนาย ความคล้ายคลึงระหว่างชุดข้อมูลสามารถวัดได้ด้วยหลายวิธี โดยทั่วไป ข้อมูลที่มีลักษณะเป็นตารางมักจะเริ่มด้วยการใช้ Euclidean Distance เมื่อสามารถระบุชุดข้อมูลที่คล้ายกันได้แล้ว การทำนายอาจทำได้โดยการใช้ผลลัพธ์ที่มีร่วมกันมากที่สุด (Most Common Outcome) หรือโดยการใช้ค่าเฉลี่ย ด้วยหลักการนี้ทำให้ KNN สามารถใช้ได้กับการจัดกลุ่ม (Classification) การทำการถดถอย (Regression) โดยไม่จำเป็นต้องอ้างถึงโมเดลอื่น ๆ อีก คำสั่งสำหรับการทำ Permutation Feature Importance ด้วย **KNeighborsRegressor** สรุปได้ดังนี้

```
# permutation feature importance with knn for regression
from sklearn.datasets import make_regression
from sklearn.neighbors import KNeighborsRegressor
from sklearn.inspection import permutation_importance
from matplotlib import pyplot
# define dataset
X,y=make_regression(n_samples=1000, n_features=10, n_informative=5, random_state=1)
# define the model
model = KNeighborsRegressor()
# fit the model
model.fit(X, y)
# perform permutation importance
results=permutation_importance(model,X,y,scoring='neg_mean_squared_error)
# get importance
importance = results.importances_mean
# summarize feature importance
for i,v in enumerate(importance):
        print('Feature: %0d, Score: %.5f' % (i,v))
# plot feature importance
pyplot.bar([x for x in range(len(importance))], importance)
pyplot.show()
```

จากการทดสอบข้อมูลตัวอย่าง อัลกอริทึมแสดงว่ามีคุณลักษณะสำคัญประมาณ 2 หรือ 3 คุณลักษณะจากทั้งหมด 10 คุณลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 12-3

```
Feature: 0, Score: 175.52007
Feature: 1, Score: 345.80170
Feature: 2, Score: 126.60578
Feature: 3, Score: 95.90081
Feature: 4, Score: 9666.16446
Feature: 5, Score: 8036.79033
Feature: 6, Score: 929.58517
Feature: 7, Score: 139.67416
Feature: 8, Score: 132.06246
Feature: 9, Score: 84.94768
```



รูปที่ 12-3 กราฟแท่ง (Bar Chart) แสดงค่าคะแนน (Score) ของ Feature Importance ด้วยวิธี KNeighborsRegressor

12.3 การใช้ Jupyter Notebook สำหรับวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่

ในโครงการวิจัยนี้ เพื่อความสะดวกต่อผู้ใช้ในการปรับเปลี่ยนโค๊ด (Code) หรือปรับเปลี่ยนรายละเอียดของการวิเคราะห์ได้โดยง่ายเช่น เมื่อข้อมูลคลื่นความถี่มีการเปลี่ยนแปลงหรือผู้ใช้ต้องการปรับเปลี่ยนวิธีการหรือรายละเอียดของการวิเคราะห์ ยกตัวอย่างกรณีการใช้งานจริงเช่น ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ชายแดนที่ชุดข้อมูลของแต่ละประเทศอาจจะฟิลด์ (Field) ข้อมูลที่แตกต่างกัน อย่างชุดข้อมูลการใช้ความถี่ชายแดนไทย-มาเลเซียที่มีฟิลด์ข้อมูล F7 SVCCODE (จุดประสงค์ของการใช้คลื่นความถี่) แต่ชุดข้อมูลการใช้ความถี่ชายแดนไทย-กัมพูชาไม่มีฟิลด์ข้อมูล F7 SVCCODE นี้ คณะผู้วิจัยเสนอให้ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ด้วยแอปพลิเคชัน (Application) ที่เรียกว่า Jupyter Notebook ซึ่งสามารถรัน (Run) ด้วย Python Editor ได้ แอปพลิเคชัน Jupyter Notebook เป็นแอปพลิเคชันแบบ Server-Client ที่สามารถแก้ไขโคดและทำงานผ่านทางเว็บเบราว์เซอร์ (Web Browser) ได้ นอกจากนั้นยังสามารถทำงานบนคอมพิวเตอร์ที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้ด้วย เคอร์เนล (Kernel) ของ Jupyter Notebook ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้คือ ipython เพื่อใช้งานกับโค๊ดในภาษา Python และยังมีเคอร์เนลต่าง ๆ ที่รองรับการทำงานกับโค๊ดในภาษาอื่น ๆ อีกด้วย

12.4 บทสรุป

คณะผู้วิจัยพัฒนาอัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis Algorithms) โดยในการศึกษานี้ จะใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ที่สามารถตรวจทานความถูกต้องของข้อมูลและวิเคราะห์ความหนาแน่นของการใช้คลื่นความถี่โดยใช้การวิเคราะห์พหุตัวแปร (Multivariate Analysis) วิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) ซึ่งจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Demand) กับปัจจัยต่าง ๆ ทั้งที่

มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นและที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Linear and Non-Linear Relationship) รวมทั้งสามารถระบุปัจจัยสำคัญต่อความต้องการใช้คลื่นความถี่ได้

อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นใช้แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning) ด้วยไพธอน (Python) โดยใช้เทคนิค Feature Importance ในการวิเคราะห์ โดยจะกำหนดคะแนน (Score) ให้กับคุณสมบัติขาเข้า (Input Feature) ตามระดับความสามารถในการทำนายค่าตัวแปรเป้าหมาย (Target Variable) ที่สนใจ (เช่น ในการศึกษานี้คือความต้องการใช้คลื่นความถี่)

อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติขาเข้าและค่าตัวแปรเป้าหมาย Random Forest และ K-Nearest Neighbors เพื่อจำแนกกลุ่ม (Classify) ข้อมูล รวมถึงสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบหลักเพื่อทำการลดทอนข้อมูล (Data Reduction) ในกรณีที่ข้อมูลมีความซับซ้อนสูงได้

ทั้งนี้การรัน (Run) อัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลจะทำบนแอปพลิเคชันที่ชื่อ Jupyter Notebook เพื่อความสะดวกของผู้ใช้ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนวิธีการหรือรายละเอียดของการวิเคราะห์ได้โดยง่าย

บทที่ 13

การพัฒนาวิธีเฝ้าฟังคลื่นความถี่โดยใช้การเรียนรู้อย่างลึก

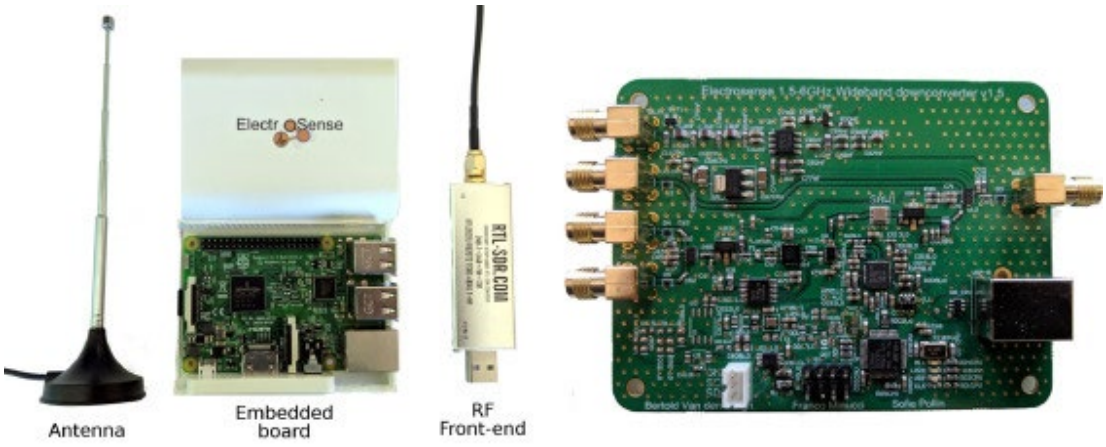
ขอบเขตของปัญหาที่ศึกษา (Problem Statement)

การพัฒนาระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring System) ในการศึกษานี้ ใช้เซนเซอร์ (Sensors) เก็บข้อมูลคลื่นความถี่ในย่านและพื้นที่ที่สนใจ และใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ในการวิเคราะห์ข้อมูล ตรวจสอบเพื่อระบุการเกิดสัญญาณรบกวนพร้อมทั้งแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต

ย่านความถี่ที่สนใจได้แก่ย่าน 700 MHz (703 – 803 MHz) ในกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (IMT) บริเวณชายแดนไทย-กัมพูชา อ.อรัญประเทศ จ.สระแก้ว โดยแหล่งกำเนิดการรบกวนอาจจะมาจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินของประเทศกัมพูชา

13.1 การดำเนินการกับอุปกรณ์ ElectroSense เพื่อใช้กับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่

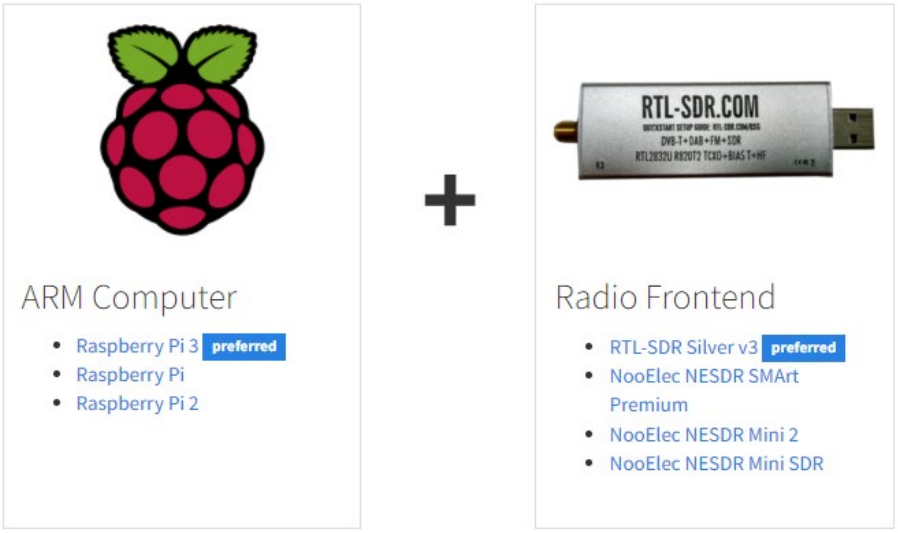
โหนดตรวจจับสัญญาณ (Sensing Node) ของโครงข่าย ElectroSense เป็นอุปกรณ์ประมวลผลขนาดเล็กราคาถูก ที่มีการกำหนดด้วยซอฟต์แวร์แบบฝังตัว (Software-Defined Embeded) โดยที่อุปกรณ์ประมวลผลนี้จะเชื่อมต่ออยู่กับภาคฟรอนต์-เอ็นด์วิทยุอย่างง่าย (Simplistic RF Front-End) และสายอากาศสำหรับใช้งานทั่วไป (General-Purpose Antenna) ดังแสดงในรูปที่ 13-1(a) เซนเซอร์เหล่านี้ (Sensors) สามารถวัดคลื่นความถี่ได้ในช่วง 20 MHz ถึง 1.3 GHz และมีการเพิ่มอุปกรณ์พิเศษที่เป็นตัวแปลงคลื่นความถี่ลง (Optional Down-Converter ตามรูปที่ 13-1(b) เข้าไป จะสามารถวัดคลื่นความถี่ได้สูงถึง 6 GHz



(a) IoT sensor: Raspberry Pi and RTL-SDR v3 (b) RF converter to enable 0-6 GHz range.

รูปที่ 13-1 เซนเซอร์คลื่นความถี่แบบ IoT (Internet of Things) ของ ElectroSense

โดยทั่วไป เซนเซอร์ของ ElectroSense ประกอบด้วยอุปกรณ์ประมวลผลแบบฝังตัวที่เรียกว่า Raspberry Pi ภาคฟรอนต์เอ็นด์วิทยุ และสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 13-2 ราคาของเซนเซอร์ ElectroSense จะอยู่ในช่วง 184.45 ถึง 238 ยูโร (Euro) รูปที่ 13-3 แสดงชุดอุปกรณ์ ElectroSense (ElectroSense Kits) สำหรับใช้งานในร่ม และกลางแจ้ง

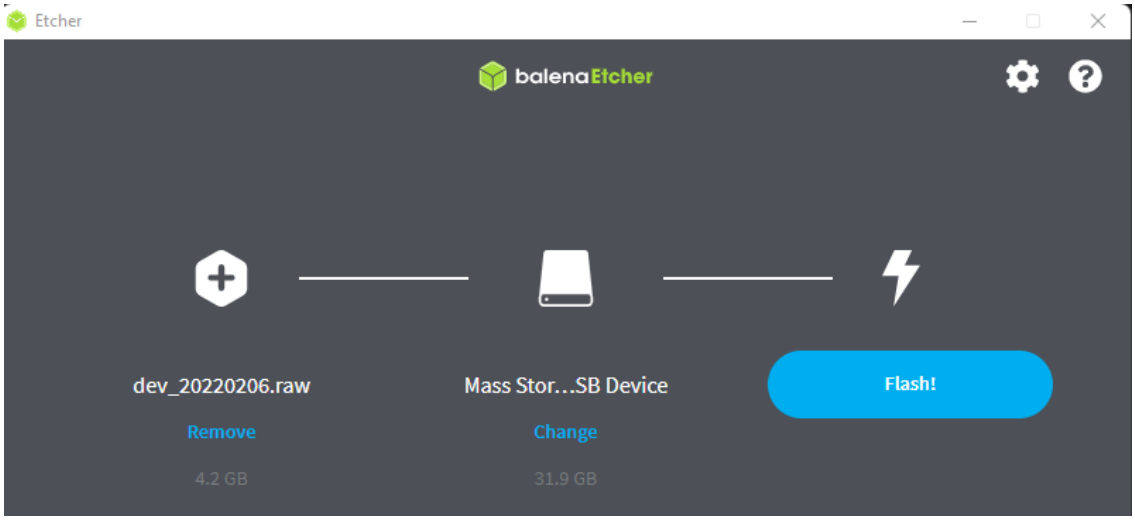


รูปที่ 13-2 อุปกรณ์เซนเซอร์ของ ElectroSense

รูปที่ 13-3 ตัวเลือก (Options) ของอุปกรณ์เซนเซอร์ของ ElectroSense สำหรับใช้งานในร่ม และกลางแจ้ง

13.1.1 การติดตั้งระบบปฏิบัติการ (Operating System Installation)

ตามปกติ ชุดเซนเซอร์จะมาพร้อมกับการ์ดหน่วยความจำ (SD Card) ที่บรรจุระบบปฏิบัติการซึ่งสามารถต่อเข้ากับ Raspberry Pi 3B+ ได้ทันที ในกรณีที่ไม่มีการ์ดหน่วยความจำที่บรรจุระบบปฏิบัติการหรือต้องการที่จะติดตั้งระบบปฏิบัติการใหม่ล่าสุด ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด (Download) ไฟล์ระบบปฏิบัติการล่าสุดได้จาก https://electrosense.org/open-source (เวอร์ชันล่าสุดในขณะที่เขียนรายงานฉบับนี้คือเมื่อ 2020-09-05) ขั้นตอนต่อไปคือเตรียมเครื่องอ่านการ์ดหน่วยความจำ (SD Card Reader) เชื่อมต่อกับการ์ดหน่วยความจำและคอมพิวเตอร์ตามลำดับ ในที่นี้ใช้ซอฟต์แวร์ Balena Etcher สำหรับแฟลช (Flash) ไฟล์ระบบปฏิบัติการ ในบางครั้งซอฟต์แวร์อาจจะเตือนขึ้นมาว่า "ไม่สามารถตรวจสอบความถูกต้องของไฟล์" ซึ่งสามารถที่จะเพิกเฉยต่อคำเตือนนี้ได้ เนื่องจากการ์ดหน่วยความจำจะถูกตัดการเชื่อมต่อ (Disconnect) อัตโนมัติหลังจากการทำแฟลชชิง (Flashing)



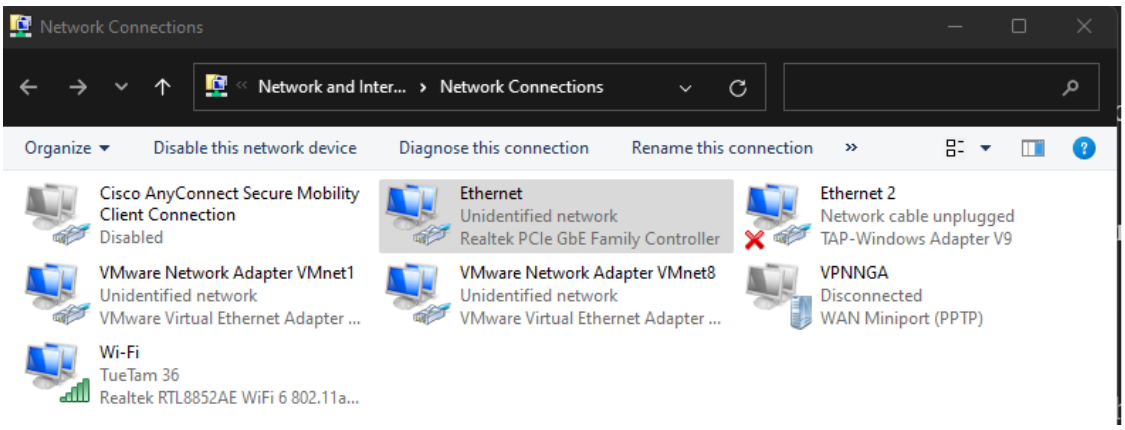
รูปที่ 13-4 Balena Etcher และกระบวนการแฟลช (Flash) ไฟล์ (ภาพ) ของระบบปฏิบัติการ

เมื่อเสร็จกระบวนการแฟลชชิง ให้แยกการ์ดหน่วยความจำออกจากไดรฟ์ USB (USB Drive) และเสียบการ์ดหน่วยความจำเข้ากับ Raspberry Pi 3B+ และในลำดับต่อไปให้เตรียมอุปกรณ์ดังต่อไปนี้ :

- 2.4 GHz WiFi ที่ใช้เพียงแค่ SSID และรหัสผ่านโดยที่ไม่ต้องมีการรับรองความถูกต้องผ่านเว็บ (Web Authentication)
- สาย Ethernet/LAN
- พัดลมขนาดเล็กสำหรับระบายความร้อน (ใช้หรือไม่ก็ได้ (Optional))

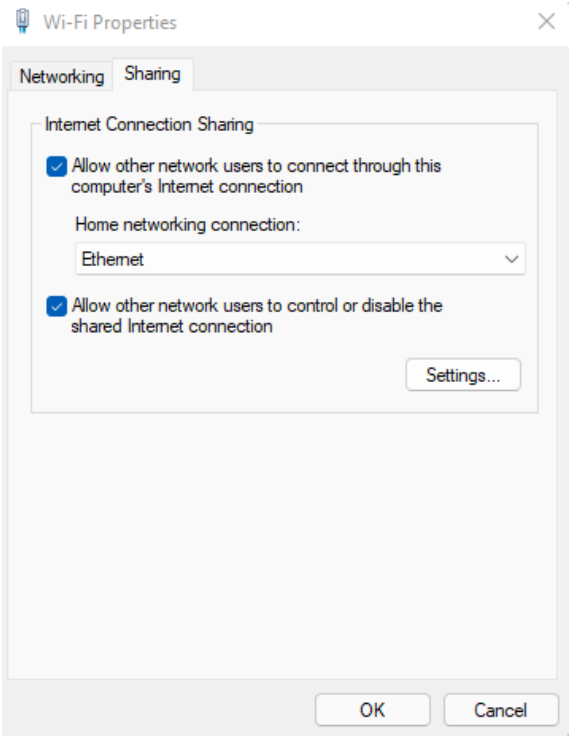
หากเป็นการเชื่อมต่อกับโครงข่ายที่เข้าถึงอินเตอร์เน็ตอยู่แล้วสามารถข้ามไปที่ขั้นที่สองได้เลย สำหรับการเชื่อมต่อกับ WiFi ขั้นแรก ให้เปิด WiFi (รหัสผ่านของ WiFi ต้องยากต่อการคาดเดา (Strong) เพียงพอ) อัตราการรับส่งข้อมูลของ WiFi ต้องอยู่ที่อย่างน้อย 1 Mbps โดยค่าที่แนะนำคือ 10 Mbps ขั้นที่สอง เชื่อมต่อ Raspberry Pi 3B+ เข้ากับคอมพิวเตอร์ (PC) ผ่านทางสาย Ethernet/LAN จากนั้นต่อ Raspberry Pi 3B+ เข้ากับตัวแปลงไฟ (Power Adapter) และเปิดเครื่อง Raspberry Pi 3B+ รอจนกระทั่งตัวแปลง Ethernet (Ethernet Adapter) บน

คอมพิวเตอร์พบ Unidentified Network (ทั้งนี้ตัวแปลง Ethernet จะต้องใช้ไอพีแบบพลวัต (Dynamic IP)) และไฟ LED ของช่อง RJ45 ของ Raspberry Pi 3B+ กระพริบ

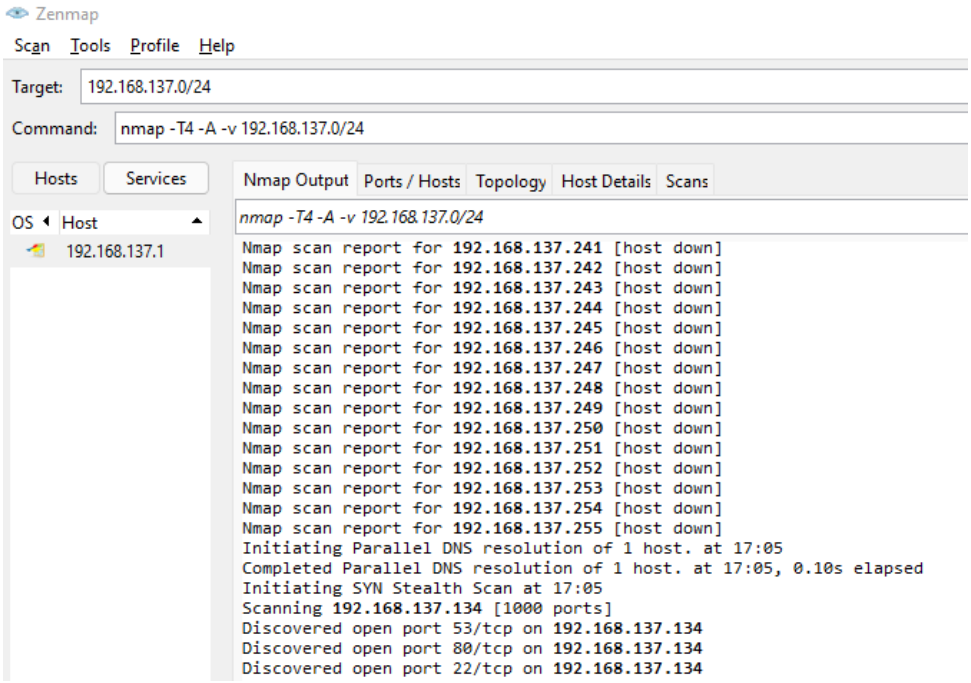


รูปที่ 13-5 ตัวอย่าง Unidentified Network ของ Ethernet

คลิกขวาที่ WiFi -> Properties -> Sharing แล้วเลือก "Allow other network users to connect ..." เลือก "Home networking connection" เป็น Ethernet แล้วกด OK ตอนนี้ตัวแปลง Ethernet จะกำหนดไอพีแอดเดรส (IP Address) โดยอัตโนมัติเป็น 192.168.137.1 จากนั้นเปิดโปรแกรม Nmap ค้นหา (Scan) 192.168.137.0/24



รูปที่ 13-6 เชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตเข้ากับ Raspberry Pi 3B+ ผ่านสาย LAN



รูปที่ 13-7 ค้นหาไอพีแอดเดรส (IP Address) ด้วยโปรแกรม Nmap

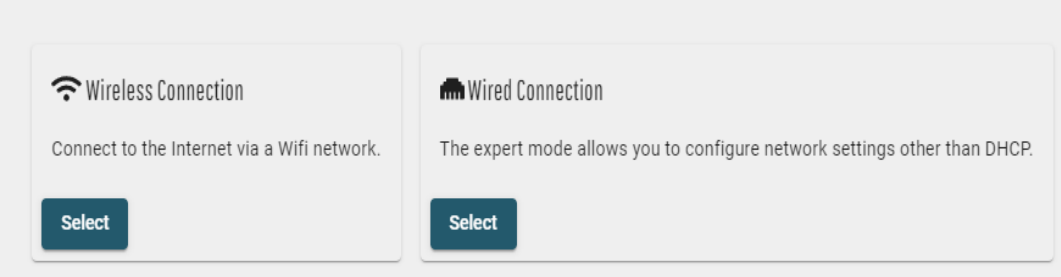
ตามรูปที่ 13-7 Nmap จะพบไอพีแอดเดรส 192.168.137.134 ซึ่งเป็นของ Raspberry Pi 3B+ ที่เครื่องคอมพิวเตอร์กำหนดให้ ไอพีแอดเดสนี้เป็นไอพีชั่วคราวที่จะเปลี่ยนไปทุกครั้งที่มีการเชื่อมต่อใหม่

13.1.2 การลงทะเบียนเซนเซอร์ (Sensor Registration)

ใส่ไอพีแอดเดรสที่ได้รับในหัวข้อที่ 13.1.1 ในเว็บเบราส์เซอร์ (Web Browser) หน้าเว็บหลักของเซนเซอร์ ElectroSense จะแสดงดังรูปที่ 13-8

รูปที่ 13-8 หน้าเว็บหลัก (Main Page) ของเซนเซอร์ (Sensor) ElectroSense

เลือก Setup Wizard -> Wizard Mode หากเชื่อมต่อด้วย WiFi เลือก Wireless Connection แล้วล็อกอิน (Login) เข้า WiFi หากไม่ใช้ WiFi เลือก Wired Connection

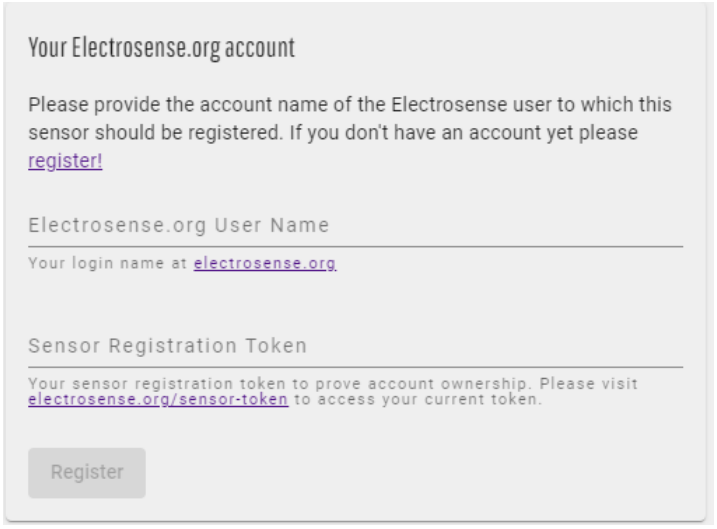


รูปที่ 13-9 การเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ (Sensor) ElectroSense

จากนั้น ใส่ข้อมูลของเซนเซอร์

รูปที่ 13-10 ข้อมูลของเซนเซอร์ (Sensor) ElectroSense

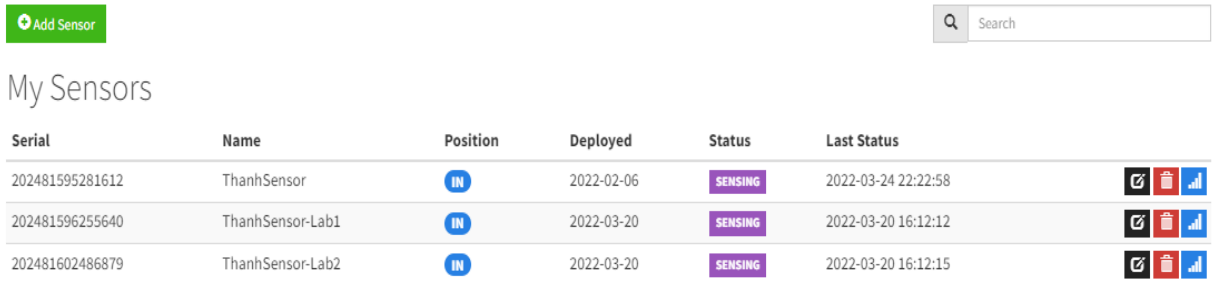
ขั้นตอนสุดท้าย ใส่ชื่อผู้ใช้ (User Name) สำหรับโครงข่าย ElectroSense จากนั้นใส่โทเค็น (Token) ที่ได้รับจากโครงข่าย ElectroSense และกด Register (การลงทะเบียนเซนเซอร์เสร็จสมบูรณ์)



รูปที่ 13-11 ขั้นตอนสุดท้ายของการลงทะเบียน (Registration) ของเซนเซอร์ (Sensor) ElectroSense

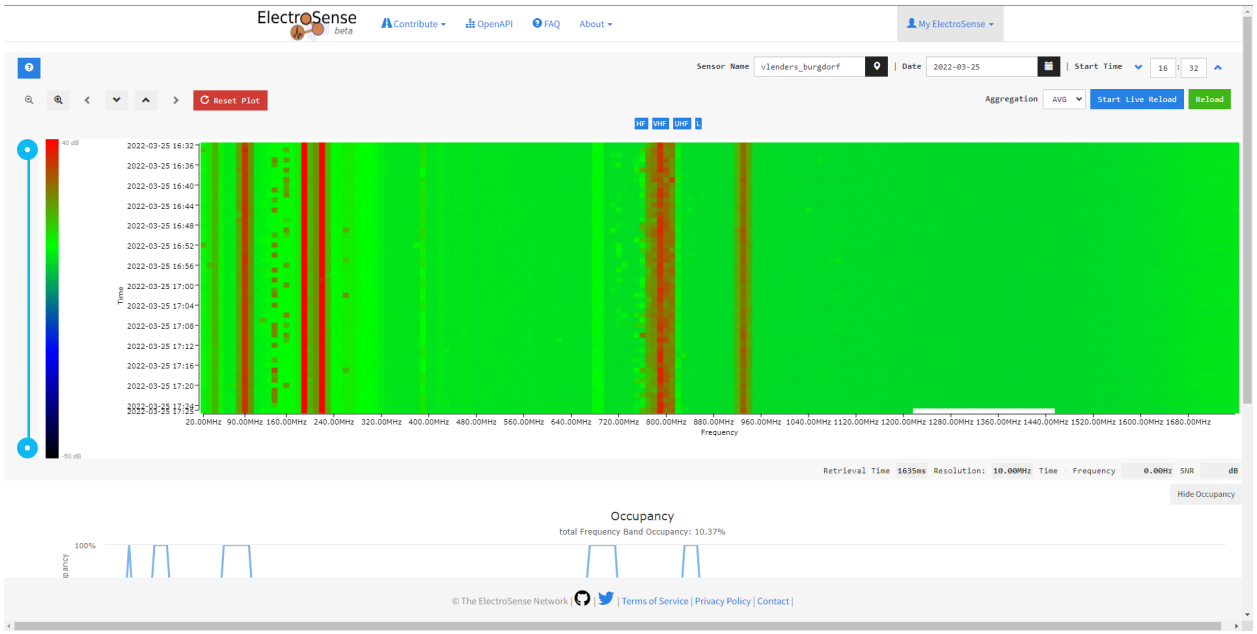
13.1.3 การเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)

หลังจากลงทะเบียนเซนเซอร์เสร็จสิ้น ปิดสวิตช์เซนเซอร์โดยถอดสายไฟจากตัวแปลงไฟ (Power Adapter) ออก จากนั้นต่อฟรอนต์-เอ็นด์ภาควิทยุ (RTL-SDR) ของเซนเซอร์เข้ากับสายอากาศและเปิดสวิตช์เซนเซอร์อีกครั้ง เซนเซอร์จะสามารถตรวจวัดสัญญาณและส่งค่าที่วัดได้ไปยังเซิร์ฟเวอร์ (Server) ของ ElectroSense โดยอัตโนมัติ ทั้งนี้สามารถดูสถานะของเซนเซอร์ต่าง ๆ ได้โดยล็อกอินที่ https://electrosense.org/ ดังแสดงในรูปที่ 13-12

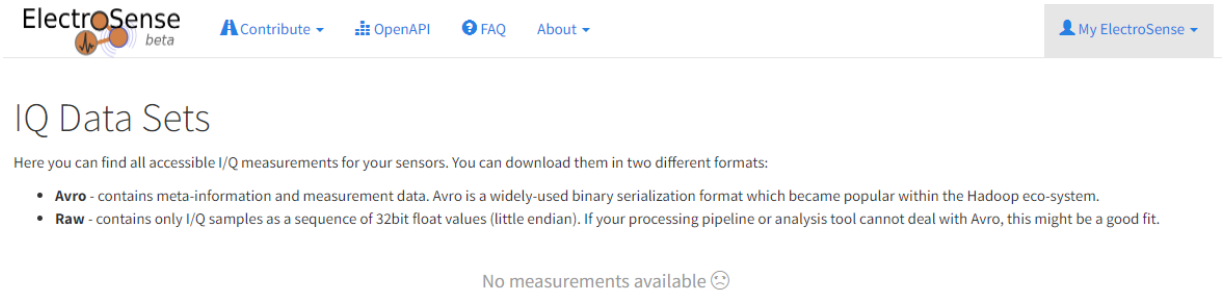


รูปที่ 13-12 รายการ (List) ของเซนเซอร์ในโครงการศึกษานี้

คลิก "Edit Sensor" (ปุ่มสีดำด้านขวาของเซนเซอร์แต่ละรายการ) และเปลี่ยน "Radio Format" เป็น RTL-SDR Silver v3 จะสามารถเห็นข้อมูลจากการเฝ้าฟังและถอดรหัส (Decode) สัญญาณได้



รูปที่ 13-13 ฟังก์ชันการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring Function)

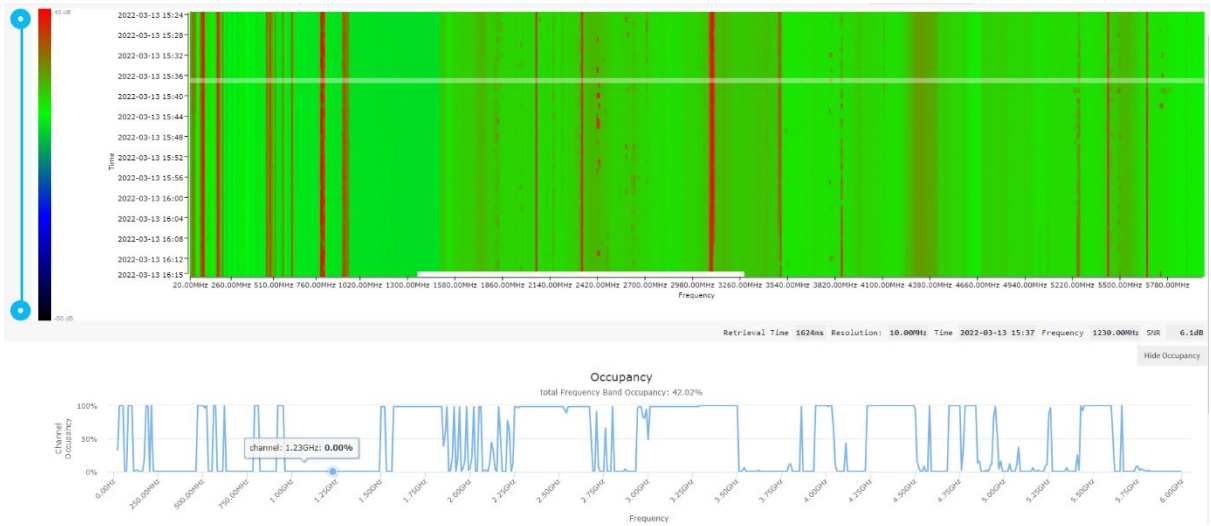


รูปที่ 13-14 ชุดข้อมูล IQ ที่ได้จากเซนเซอร์ (Sensor) ElectroSense

13.2 การพัฒนาการระบุการใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติ (Abnormal Frequency Usage Identification) โดยใช้การเรียนรู้อย่างลึก (Deep Learning)

การตรวจจับการใช้ความถี่ที่ผิดปกติเป็นหนึ่งในฟังก์ชันการใช้งาน (Features) ที่สำคัญที่สุดที่ควรมีในการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ การใช้ความถี่ที่ผิดปกติหมายถึงการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตหรือใช้ผิดไปจากที่ได้รับอนุญาต วิธีการตรวจจับที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่การตรวจวัดคลื่นความถี่ทั้งหมดแล้วเปรียบเทียบกับคลื่นความถี่ที่มีการขึ้นทะเบียนไว้ สัญญาณที่ไม่ได้ขึ้นทะเบียนไว้คือสัญญาณที่ผิดปกติ การศึกษานี้ตรวจวัดคลื่นความถี่ทั้งหมดโดยใช้วิธี You Only Look Once (YOLO) ซึ่งเป็นวิธีตรวจจับวัตถุ (Object Detection) ด้วยการเรียนรู้อย่างลึกที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย

13.2.1 การเก็บข้อมูล (Data Collection)



รูปที่ 13-15 ตัวอย่างข้อมูลที่รวบรวมจากการเฝ้าฟังจากเซิร์ฟเวอร์ (Server) ของ ElectroSense

ElectroSense มี API แบบเปิด (Open API) ไว้สำหรับให้ดึงข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ โดย API ที่มีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลัก กลุ่มแรกไว้สำหรับดึงข้อมูลเกี่ยวกับเซนเซอร์ เช่น ชื่อ เลขซีเรียล (Serial) ตำแหน่ง อีกกลุ่มหนึ่งไว้สำหรับดึงข้อมูลที่รวบรวมจากการเฝ้าฟัง (Aggregated Data) และข้อมูลที่ผ่านการแปลงแบบฟูเรียร์อย่างเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลที่รวบรวมจากการเฝ้าฟังโดยเฉลี่ย (Aggregated Data with the Average Aggregation Function) สำหรับเป็นข้อมูลขาเข้า (Input Data) ของโมเดล (Model) YOLOv5 รูปที่ 13-15 แสดงข้อมูลที่รวบรวมจากการเฝ้าฟังคลื่นความถี่

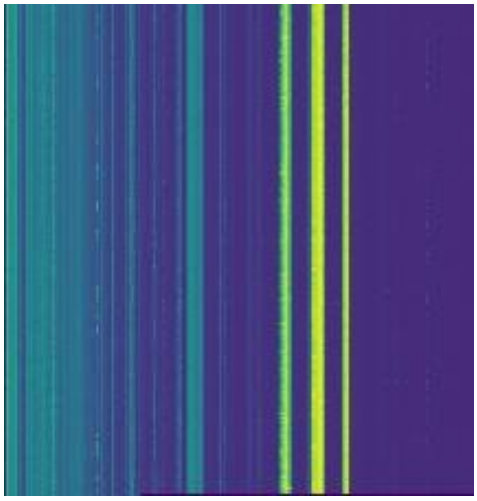
ตารางที่ 13-1 แสดงค่าพารามิเตอร์ (Parameters) ที่จำเป็นสำหรับดึงข้อมูลจาก ElectroSense ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดช่วงเวลา คลื่นความถี่ พร้อมทั้งความละเอียด (Resolution) ของช่วงเวลาและความถี่ที่ต้องการข้อมูล ความละเอียดสูงสุดอยู่ที่ 60 วินาที และ 100 kHz สำหรับโมเดล YOYLOv5 จะรับข้อมูลขาเข้าเป็นไฟล์ภาพ (Image) ขนาด 224x224 ดังนั้นจะต้องใช้ข้อมูลจาก 224 จุดเวลา (Point of Time) ซึ่งหมายถึง 224 นาทีที่ความละเอียดสูงสุดของเวลา นอกจากนั้น เซนเซอร์ ElectroSense ที่ไม่มีส่วนขยายของบอร์ด (Extension Board) จะสามารถวัดสัญญาณที่ความถี่จาก 30 ถึง 1300 MHz ดังนั้นความละเอียดของความถี่จึงควรถูกตั้งไว้ที่ 5 MHz เพื่อให้ได้ 201 จุดความถี่ (Points of Frequency) ซึ่ง YOLOv5 จะขยายข้อมูล (Scale) ให้เป็น 224 จุดโดยเกิดความผิดพลาดของการขยายต่ำที่สุด โดยทั่วไป ตารางที่ 13-1 สามารถจัดโครงสร้างใหม่เป็นตารางที่ 13-2 โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นอาเรย์ (Array) ของอัตราส่วนความแรงสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio, SNR) ณ เวลา และความละเอียดของเวลาตามพารามิเตอร์ที่กำหนด (ในตารางที่ 13-2) รูปที่ 13-16 แสดงตัวอย่างของข้อมูลที่ได้

ตารางที่ 13-1 พารามิเตอร์ (Parameters) ที่ต้องใช้สำหรับดึงข้อมูลจากเซนเซอร์ (Sensor) ElectroSense

ชื่อ (Name)	รายละเอียด	หน่วย (Unit)	ชนิด (Type)	หมายเหตุ
Sensor	เลขซีเรียล (Serial Number) ของเซนเซอร์		integer	จำเป็น (Required)
timeBegin	เวลาเริ่มต้น (unix)	วินาที	integer	จำเป็น
timeEnd	เวลาสิ้นสุด (unix)	วินาที	integer	จำเป็น
freqMin	ความถี่ต่ำสุด	เฮิร์ตซ์ (Hz)	integer	จำเป็น
freqMax	ความถี่สูงสุด	เฮิร์ตซ์	integer	จำเป็น
aggFreg	ความละเอียดของความถี่ (Frequency Resolution)	เฮิร์ตซ์	integer	จำเป็น
aggTime	ความละเอียดของเวลา (Time resolution)	วินาที	integer	จำเป็น
aggFun	ฟังก์ชั่นสำหรับการรวบรวม (Aggregation function)		string	ไม่จำเป็น (Optional) ค่าตั้งต้น (Default) = AVG

ตารางที่ 13-2 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ (Parameters) ที่ใช้สำหรับดึงข้อมูลจากเซนเซอร์ (Sensor) ElectroSense

ชื่อ (Name)	รายละเอียด	ค่า (Value)	หน่วย (Unit)	ชนิด (Type)	หมายเหตุ
timeBegin	เวลาเริ่มต้น (unix)	timeBegin + 224	วินาที	integer	จำเป็น (Required)
timeEnd	เวลาสิ้นสุด (unix)	20.000.000	เฮิร์ตซ์ (Hz)	integer	จำเป็น
freqMin	ความถี่ต่ำสุด	6.000.000	เฮิร์ตซ์	integer	จำเป็น
freqMax	ความถี่สูงสุด	1.300.000.000	เฮิร์ตซ์	integer	จำเป็น
aggFreg	ความละเอียดของความถี่ (Frequency Resolution)	60	วินาที	integer	จำเป็น
aggTime	ความละเอียดของเวลา (Time resolution)	AVG		integer	จำเป็น
aggFun	ฟังก์ชันสำหรับการรวบรวม (Aggregation function)			string	ไม่จำเป็น (Optional) ค่าตั้งต้น (Default) = AVG



รูปที่ 13-16 ตัวอย่างของข้อมูลที่ได้ (Response Data)

โมเดล YOLO ต้องการความหลากหลาย (Diversity) ของข้อมูลขาเข้า ถ้าเซนเซอร์ถูกตรึงอยู่กับที่ (Fixed) ข้อมูลที่วัดได้จะไม่มีความแตกต่างมากนักซึ่งจะทำให้โมเดลมีความถูกต้องลดลงหรืออาจไม่น่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตาม ElectroSense กำหนดให้เซนเซอร์ทุกตัวที่เชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ต้องเปิดข้อมูลเป็นสาธารณะ ดังนั้นจึงอาจทำให้

สามารถดึงข้อมูลจากเซนเซอร์ในตำแหน่งอื่น ๆ ได้ ในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์ 50 ตัวจากทั่วโลกสำหรับการเทรน (Train) และทดสอบ ตามที่สรุปในตารางที่ 13-3

ตารางที่ 13-3 ชุดข้อมูลที่เตรียมไว้สำหรับการเทรนและทดสอบ (Train and Test) ในการศึกษานี้

	Training	Testing	Total
sensor	46	4	50
image	2300	200	2500

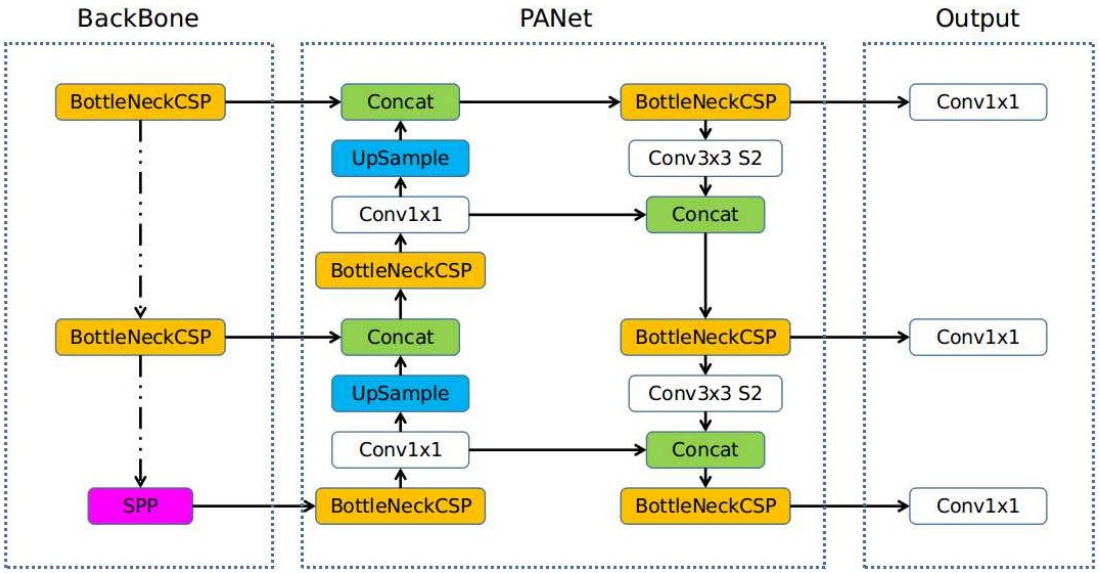
13.2.2 โมเดล (Model) YOLOv5

เวอร์ชั่น (Version) ล่าสุดของ YOLO คือ YOLOv5 (ซึ่งออกมาเมื่อ 27 พฤษภาคม 2563) ความเร็วของกระบวนการตรวจจับของ YOLOv5 ได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างมากซึ่งทำให้ YOLOv5 ทำงานได้เร็วกว่าและถูกต้องกว่าเวอร์ชันก่อนหน้า ด้วยขนาดที่กะทัดรัด YOLOv5 เหมาะกับระบบแบบฝังตัว (Embedded System) ปัจจุบัน YOLOv5 มีทั้งสิ้น 5 โครงสร้าง (Structures) ขึ้นอยู่กับโครงข่ายอย่างลึก (Deep Network) ที่ใช้ : YOLOv5n YOLOv5s YOLOv5m YOLOv5l และ YOLOv5x แต่ละโครงสร้างมีข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน สมรรถนะโดยคร่าว (Quick View Performance) ของแต่ละโครงสร้างสรุปไว้ในตารางที่ 13-4 การเลือกใช้โครงสร้างต่าง ๆ จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ ขนาดของข้อมูลเข้า สมดุลย์ระหว่างความถูกต้อง (Accuracy) และความซับซ้อน (Complexity) ในการศึกษานี้จะใช้ YOLOv5s เป็นโมเดลหลัก YOYLOv5 มีโครงสร้างดังแสดงตามรูปที่ 13-17

ตารางที่ 13-4 สมรรถนะ (Performance) ของแต่ละโครงสร้างของโมเดล YOLOv5 (YOLOv5 Structures)

Model	Size	mAP^{val} 0.5:0.95	mAP^{val} 0.5	Speed CPU b1	Speed V100 b1	Speed V100 b32	Number of Parameters (M)	FLOPs @640 (B)
YOLOv5n	640	28.0	45.7	45	6.3	0.6	1.9	4.5
YOLOv5s	640	37.4	56.8	98	6.4	0.9	7.2	16.5
YOLOv5m	640	45.4	64.1	224	8.2	1.7	21.2	49.0
YOLOv5l	640	49.0	67.3	430	10.1	2.7	46.5	109.1
YOLOv5x	640	50.7	68.9	766	12.1	4.8	86.7	205.7

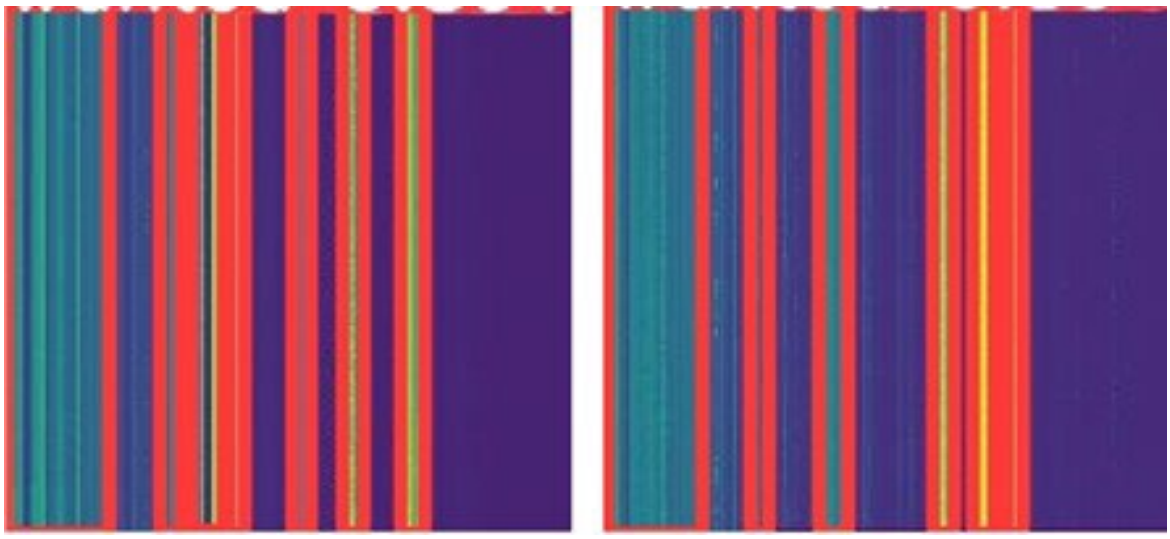
mAP = ค่าเฉลี่ยของความแม่นยำ (Mean Average Precision)



รูปที่ 13-17 ภาพรวมของโมเดลการเรียนรู้อย่างลึก (Deep Learning Model) YOLOv5

13.2.3 การตรวจจับการใช้งานความถี่ที่ผิดปกติ (Abnormal Frequency Usage Detection)

โมเดล YOLOv5 ทำงานด้วยชุดข้อมูลขาเข้าจาก 200 ช่วงเวลา (Epoch) ขนาดของกลุ่ม (Batch Size) เท่ากับ 16 ขนาดของไฟล์ภาพ (Image) เท่ากับ 224 และไฟล์ถ่วงน้ำหนักสำหรับก่อนเทรน (Pre-Trained Weight File) YOLOv5s ในการเทรนเส้นโค้งของความถูกต้อง (Accuracy Curve) ดูจะไม่ราบเรียบ (Smoothy) นัก อย่างไรก็ตามเส้นโค้งนี้มีแนวโน้มที่จะดีขึ้นและเกือบถึงระดับ 100% ในที่สุด โดยค่าความแม่นยำ (Precision) Recall mAP0.5 และ mAP0.5:0.9 (mAP คือค่าความแม่นยำเฉลี่ย (Mean Average Precision)) อยู่ที่ 99.27% 100% 99.49% และ 80% ตามลำดับ รูปที่ 13-18 แสดงตัวอย่างเมื่อมีการตรวจจับ (Detect) สัญญาณ



รูปที่ 13-18 ตัวอย่าง Frequency Spectogram ของไฟล์ภาพ (Image) ที่ทดสอบ

จากผลของโมเดลและนิยามของไฟล์ภาพที่กล่าวถึงข้างต้น คณะผู้วิจัยสามารถคำนวณช่วงความถี่ของสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากสมการดังต่อไปนี้เพื่อแปลงจากขนาดของไฟล์ภาพไปสู่ช่วงความถี่ของสัญญาณที่ตรวจวัด ทั้งนี้สามารถใช้วิธีการคำนวณเดียวกันกับแกนเวลา (แกน Y) เมื่อระบุช่วงความถี่ของสัญญาณได้แล้วสามารถนำไปเปรียบเทียบกับรายการของสัญญาณที่ขึ้นทะเบียนไว้เพื่อระบุว่าสัญญาณใดบ้างเป็นสัญญาณที่ไม่ได้ขึ้นทะเบียน

$$\begin{cases} x_{center} = 0.646765 \\ width = 0.06965 \end{cases} => \begin{cases} x_{left} = 0.61194 \\ x_{right} = 0.68159 \end{cases} => \begin{cases} pixel_{left} = 123 \\ pixel_{right} = 137 \end{cases}$$

$$=> \begin{cases} freq_{min} = 910e6 \\ freq_{max} = 980e6 \end{cases}$$

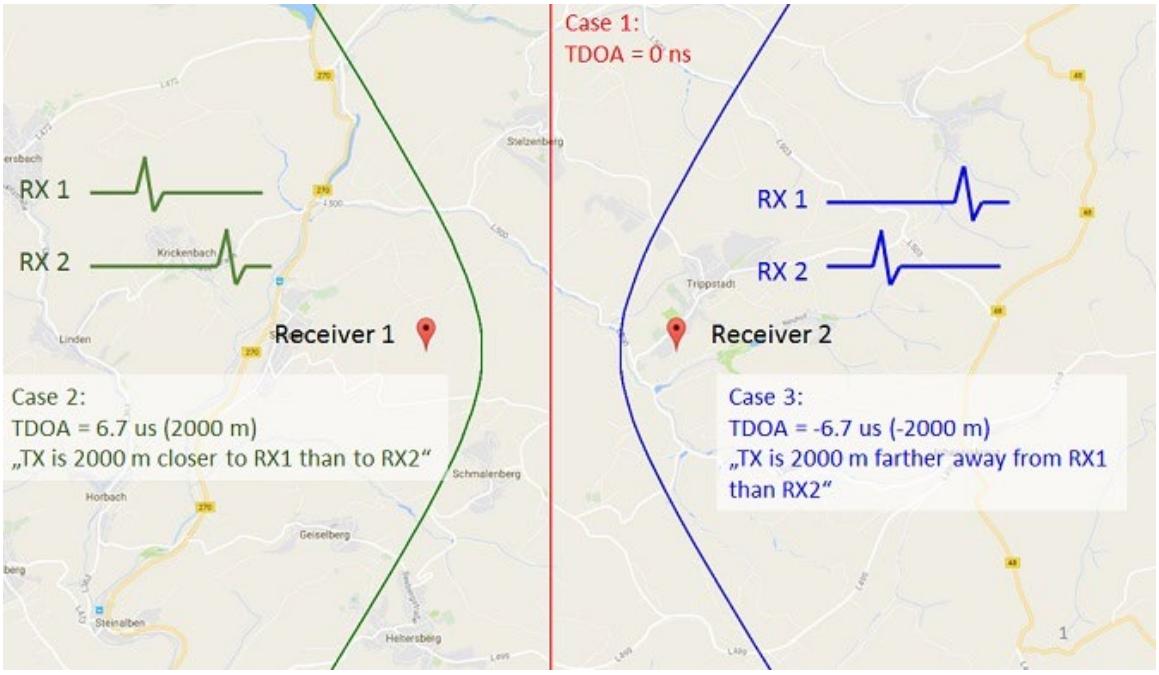
With $offset = 300MHz, resolution = 5MHz, width = 201\ points$

13.3 การพัฒนาการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดการรบกวน (Interference Source Location Identification)

13.3.1 พื้นฐานของ Time Difference of Arrival (TDOA)

สมมุติว่าสัญญาณถูกส่งออกจากเครื่องส่งที่ไม่รู้จัก (Unknown Transmitter) และถูกรับได้ที่เครื่องรับหลายเครื่อง โดยทั่วไปสัญญาณดังกล่าวจะไปถึงเครื่องรับต่าง ๆ ที่เวลาต่างกันเนื่องจากระยะทางระหว่างเครื่องส่งและแต่ละเครื่องรับแตกต่างกัน ความแตกต่างของเวลาที่สัญญาณไปถึงเครื่องรับต่าง ๆ เรียกว่า ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง (Time Difference of Arrival, TDOA) ซึ่งสามารถวัดได้ระหว่างเครื่องรับแต่ละคู่ จุดสำคัญที่ต้องเน้นย้ำคือ ในที่นี้วิธีการจะใช้ ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงเครื่องรับต่าง ๆ แทนที่จะเป็นเวลาที่มาถึงของสัญญาณเมื่อเทียบกับเวลาส่ง (Time of Arrival, TOA) ซึ่งโดยปกติจะไม่สามารถทราบข้อมูลเวลาที่ส่งเพราะเครื่องส่งเป็นอุปกรณ์ที่ระบบไม่รู้จัก

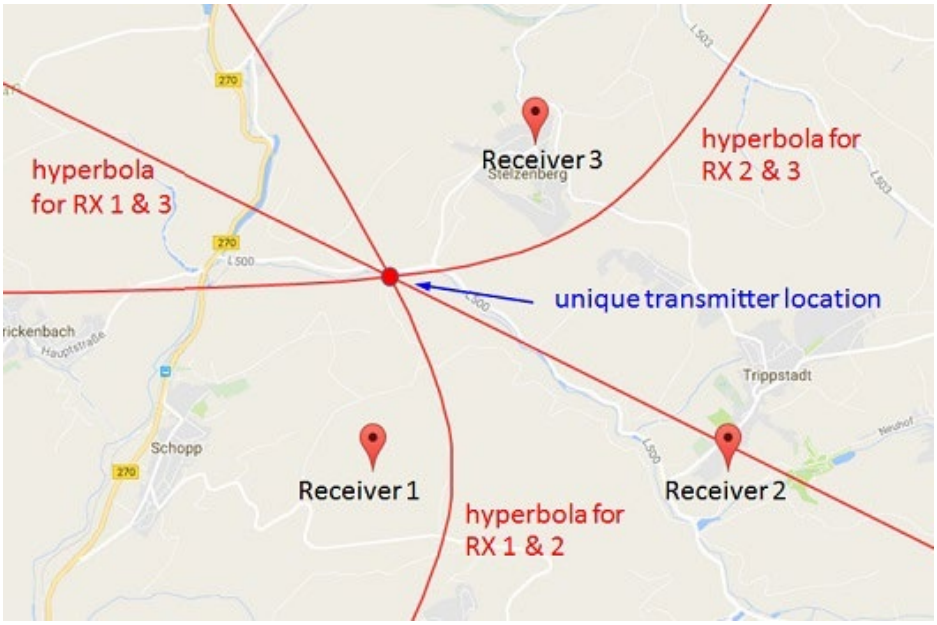
เพื่อให้เข้าใจหลักการของวิธีการระบุตำแหน่ง (Localization) ด้วย TDOA พิจารณากรณีตัวอย่างอย่างง่ายต่อไปนี้ซึ่งมีเครื่องรับ 2 เครื่อง และเครื่องส่งที่ไม่รู้จัก 1 เครื่อง ดังที่แสดงในรูปที่ 13-19 ในกรณีแรก สมมุติว่าเครื่องรับทั้ง 2 เครื่องได้รับสัญญาณที่เวลาเดียวกัน (TDOA = 0) กรณีนี้เห็นได้ชัดว่าระยะทางระหว่างเครื่องส่งที่ไม่รู้จักกับเครื่องรับ 1 และเครื่องรับ 2 เท่ากัน ตำแหน่งของเครื่องส่งจึงจะอยู่ในแนวของเส้นตรงที่อยู่กึ่งกลางระหว่างเครื่องรับทั้งสองเครื่อง กรณีนี้ยังไม่สามารถตำแหน่งที่เจาะจงของเครื่องส่งได้แต่ตำแหน่งของเครื่องส่งที่เป็นไปได้จะแคบลงโดยจะอยู่บนเส้นตรงดังกล่าว



รูปที่ 13-19 การระบุตำแหน่ง (Localization) โดยใช้ Time Difference of Arrival (TDOA) ด้วยเครื่องรับ 2 เครื่อง ใน 3 กรณี : TDOA > 0s, TDOA = 0s และ TDOA <0s. ตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเครื่องส่งจะอยู่บนเส้นไอเปอร์โบลา (Hyperbola)

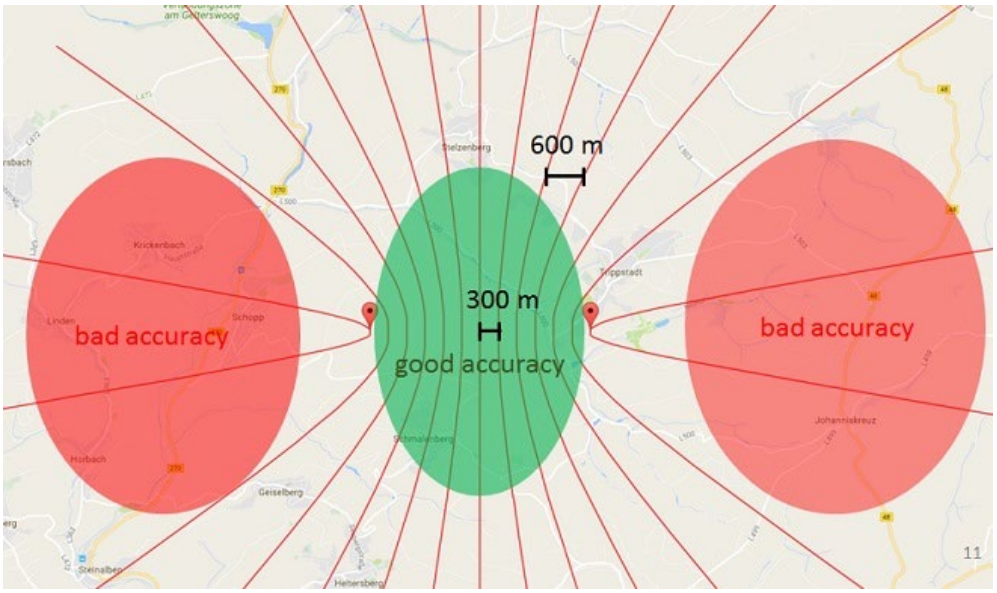
ต่อไปพิจารณากรณีที่ 2 โดยสมมุติว่าสัญญาณมาถึงเครื่องรับที่ 1 ก่อนเครื่องรับที่ 2 ค่า TDOA ในกรณีนี้จะไม่เท่ากับศูนย์ ในกรณีนี้ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ 1 จะใกล้กว่าเครื่องรับ 2 ในกรณีที่ 2 นี้ ตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเครื่องส่งจะอยู่บนเส้นไฮเปอร์โบล่า (Hyperbola) ที่มีตำแหน่งของหนึ่งในเครื่องรับเป็นจุดโฟกัส (Focal Point)

เพื่อให้การระบุตำแหน่งเสร็จสมบูรณ์ จะต้องใช้เครื่องรับสัญญาณมากกว่า 2 เครื่อง (อย่างน้อย 3 เครื่องรับสำหรับการระบุตำแหน่งใน 2 มิติดังแสดงตามรูปที่ 13-20) TDOA ของเครื่องรับแต่ละคู่สามารถเขียนตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเครื่องส่งตามเส้นไฮเปอร์โบลาได้ 1 เส้น ดังนั้น เครื่องรับ 3 เครื่องจะสร้างไฮเปอร์โบลาได้ 3 เส้น (เครื่องรับ 4 เครื่องจะสร้างไฮเปอร์โบลาได้ 10 เส้น) ในอุดมคติเส้นไฮเปอร์โบลาทั้งหมดจะต้องตัดกันที่จุดเดียวซึ่งก็คือตำแหน่งของเครื่องส่งที่สนใจ



รูปที่ 13-20 การระบุตำแหน่งอย่างเจาะจง (Exact Localization) โดยใช้เครื่องรับ 3 เครื่อง ไฮเปอร์โบลา (Hyperbola) 3 เส้น

ความละเอียด (Resolution) และความถูกต้อง (Accuracy) ของการระบุตำแหน่งไม่ได้ขึ้นกับเพียงความละเอียดของการวัด TDOA เท่านั้น แต่ยังขึ้นกับตำแหน่งของเครื่องส่งเทียบกับเครื่องรับด้วยอย่างมาก รูปที่ 13-21 แสดงให้เห็นว่าความถูกต้องของการระบุตำแหน่งจะดีมากในพื้นที่ที่อยู่ระหว่างเครื่องรับต่าง ๆ โดยทั่วไปการระบุตำแหน่งด้วย TDOA จะมีสมรรถนะที่ดีในพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเครื่องรับ



รูปที่ 13-21 ความละเอียดของการระบุตำแหน่งด้วย Time Difference of Arrival (Resolution of TDPA Localization) ความละเอียดของการระบุตำแหน่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับเป็นอย่างมาก

แม้ว่าหลักการของการระบุตำแหน่งด้วย TDOA จะไม่ได้ซับซ้อนมาก แต่ก็ยังมีประเด็นต่าง ๆ ที่ต้องจัดการดังต่อไปนี้ : ประเด็นที่ 1 เครื่องรับต่าง ๆ จะต้องมีการซิงโครไนซ์กันทางเวลา (Time Synchronization) ประเด็นที่ 2 จะต้องมีวิธีการที่จะพิจารณาความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงอย่างแม่นยำ ประเด็นที่ 3 เครื่องรับต่าง ๆ จะต้องอยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างกันแต่ยังต้องสามารถเชื่อมต่อและแลกเปลี่ยนข้อมูลจำนวนมากที่ได้จากการตรวจวัดสัญญาณได้ ความท้าทายเหล่านี้จะต้องได้รับการจัดการเพื่อให้เกิดระบบระบุตำแหน่งที่สามารถใช้งานได้จริง ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

13.3.2 ระบบระบุตำแหน่งด้วย TDOA อย่างง่ายด้วยฟรอนต์-เอนด์ภาควิทยุ (RF Front-End) RTL-SDRs

ระบบ TDOA ที่สมบูรณ์ประกอบด้วยเครื่องรับ 3 เครื่องซึ่งซิงโครไนซ์กัน และเชื่อมต่อกับหน่วยประมวลผลกลาง (Single Signal Processing Unit) ระบบสำหรับการระบุตำแหน่งอย่างง่ายและราคาถูกจะมีองค์ประกอบและคุณลักษณะดังต่อไปนี้

13.3.2.1 เครื่องรับ (Receivers)

เครื่องรับที่ใช้เป็นแบบอย่างง่าย (Minimalist) ประกอบด้วย RTL-SDR แท่ง USB (USB Stick) และ Raspberry Pi และสายอากาศแบบแส้ (Whip Antenna) ที่มาพร้อมกับ RTL-SDR ด้วยเหตุผลในทางปฏิบัติ สายอากาศจะถูกติดตั้งในอาคารทำให้จะได้สมรรถนะต่ำกว่าจุดที่ดีที่สุด (Suboptimal) ซึ่งมีโอกาสที่จะปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ อุปกรณ์ RTL-SDR สามารถที่จะรับสัญญาณด้วยแถบกว้างความถี่ในขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Bandwidth) ได้ 2 MHz ในช่วงความถี่ต่ำหว่า 100 MHz ถึงสูงกว่า 1GHz อุปกรณ์ RTL-SDR นี้สามารถปรับคุณลักษณะได้ด้วยซอฟต์แวร์ (Software-Defined Radio) เหมาะสำหรับใช้รับสัญญาณหลากหลายชนิด

เพื่อเป็นกรณีตัวอย่าง เครื่องรับ 3 เครื่องถูกติดตั้งใช้งานในบริเวณเมือง Kaiserslautern ประเทศเยอรมนี ในเชิงอุดมคติเครื่องรับเหล่านี้ควรถูกติดตั้งในบริเวณนอกเมือง อย่างไรก็ตามสภาพภายนอกเมืองที่เป็นป่าและมีข้อจำกัดเรื่องการเข้าถึงอินเทอร์เน็ตทำให้ไม่สามารถติดตั้งเครื่องรับได้ ถึงแม้ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องรับจะไม่ใช่ตำแหน่งที่ดีที่สุดแต่ความถูกต้องของการระบุตำแหน่งก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ล้อมรอบด้วยเครื่องรับต่าง ๆ

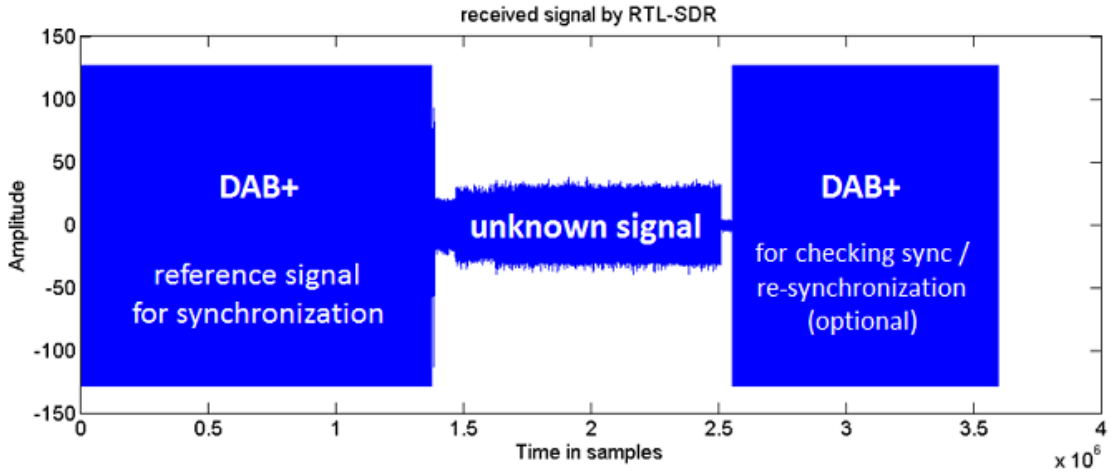
เครื่องรับทั้งหมดจะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์หลัก (Master PC) เพื่อประมวลผลสัญญาณผ่านทางอินเทอร์เน็ต เครื่องคอมพิวเตอร์หลักจะสั่งให้เครื่องรับทุกเครื่องเริ่มวัดสัญญาณพร้อมกัน จากนั้นเครื่องรับต่าง ๆ จะส่งสัญญาณที่สุ่มวัดได้กลับมาเพื่อประมวลผลและวิเคราะห์ดีเลย์ (Delay) ที่เกิดขึ้น ข้อมูลที่สุ่มกลับมาจะมีปริมาณมหาศาลอย่างรวดเร็ว ด้วยอัตราข้อมูลขาออกของ RTL-SDR ที่ 8 บิต (bit) ของข้อมูล IQ ขนาด 2 MHz อัตราการส่งข้อมูลของเครื่องรับแต่ละเครื่องจะเท่ากับ 32 Mbps (2 x 8 bits x 2 MHz) ด้วยอัตราการอัปโหลด (Upload) ข้อมูลของเทคโนโลยี DSL (Digital Subscriber Line) ที่ 1 Mbps การส่งข้อมูลที่สุ่มวัดได้เพียง 1 วินาทีจะต้องใช้เวลาประมาณกว่าครึ่งนาที การลดอัตราการสุ่มข้อมูลของ RTL-SDR หรือใช้การบีบอัดข้อมูล (Compression) อาจช่วยแก้ปัญหาเรื่องอัตราส่งข้อมูลนี้ได้

จุดสำคัญอีกจุดหนึ่งคือ เครื่องรับทุกเครื่องจะต้องปรับไปที่คลื่นความถี่เดียวกัน เพื่อปรับคลื่นความถี่รับของ RTL-SDR ให้ตรงกันในที่นี้จะใช้สัญญาณพิเศษที่ส่งออกมาจากสถานีฐาน GSM (Special Frequency Correction Busts) เพื่อทำการสอบเทียบ (Calibration) ซึ่งสามารถทำได้อย่างง่ายดายโดยใช้โปรแกรม kalibrate-rtl

13.3.2.2 การซิงโครไนซ์ (Synchronization)

จากที่ได้กล่าวถึงในข้างต้นว่า สิ่งที่จำเป็นสำหรับการระบุตำแหน่งด้วย TDOA คือการซิงโครไนซ์ของเครื่องรับทั้งหมด วิธีการหนึ่งที่เป็นไปได้คือการใช้เครื่องรับ GPS (Global Positioning System) เพื่อควบคุมนาฬิกาภายใน (Internal Clock) ของ Raspberry Pi อย่างไรก็ตาม ตามตัวอย่างของเมือง Kaiserslautern จะใช้อีกวิธีหนึ่งซึ่งได้แก่ การใช้เครื่องส่งสัญญาณที่ทราบตำแหน่งแน่นอนและเครื่องรับทุกเครื่องสามารถรับสัญญาณได้ดีเป็นจุดอ้างอิง โดยตามตัวอย่างจะใช้สัญญาณจากเครื่องส่ง DAB+ (217 MHz, 2kW) ซึ่งสามารถครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่เหมาะกับการทำซิงโครไนซ์

การทำซิงโครไนซ์เทียบกับสัญญาณอ้างอิงมีการทำงานดังต่อไปนี้ : เมื่อคอมพิวเตอร์หลักสั่งให้เริ่มการวัดสัญญาณเครื่องรับแต่ละเครื่องจะเริ่มต้นโดยรับสัญญาณจากเครื่องส่งอ้างอิงก่อนจากนั้นจึงเปลี่ยนไปตรวจวัดสัญญาณจากเครื่องส่งที่ไม่รู้จักอย่างไร้รอยต่อ (Seamlessly) เพื่อทำการซิงโครไนซ์ คอมพิวเตอร์หลักจะจัดเรียงสัญญาณที่เครื่องรับแต่ละเครื่องให้รับสัญญาณอ้างอิงได้บนแกนเวลาเดียวกันโดยใช้ข้อมูลระยะทางระหว่างเครื่องส่งอ้างอิงกับเครื่องรับต่าง ๆ เมื่อจัดเรียงเวลาเสร็จสิ้น (เสร็จกระบวนการซิงโครไนซ์) TDOA ของสัญญาณที่ไม่รู้จักจะถูกคำนวณออกมาเป็นดีเลย์ของสัญญาณที่ไม่รู้จักที่รับได้ระหว่างคู่ของเครื่องรับต่าง ๆ ดังนั้นในความเป็นจริงวิธีนี้จะไม่ได้ซิงโครไนซ์ตัวเครื่องรับหากแต่เป็นการซิงโครไนซ์สัญญาณที่เครื่องรับแต่ละเครื่องรับได้



รูปที่ 13-22 สัญญาณที่ภาควิทยุ RTL-SDR รับสำหรับการระบุตำแหน่งด้วย Time Difference of Arrival (TDOA) โดยเริ่มจากตรวจวัดสัญญาณอ้างอิง (DAB+: Reference Signal) จากนั้นจึงเปลี่ยนไปตรวจวัดสัญญาณที่ไม่รู้จัก (Unknown Signal)

ประเด็นสำคัญประเด็นหนึ่งของการทำซิงโครไนซ์คือการเปลี่ยนคลื่นความถี่ที่ตรวจวัดจะต้องทำแบบไร้รอยต่อสัญญาณที่สุ่มวัดจะต้องไม่หายไปแม้แต่ตัวอย่างเดียว (หากตัวอย่างสุ่มสูญหายจะถือว่าการทำซิงโครไนซ์ไม่มีประสิทธิภาพ) การปรับแต่งไลบรารี (Library) C ที่ชื่อ librtlsdr (ที่โดยปกติจะใช้สำหรับควบคุมภาควิทยุ RTL-SDR) โดยใช้คำสั่ง "rtl_sdr" เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนความถี่ที่ตรวจวัดอย่างไร้รอยต่อจะทำให้ระบบสะดุด (Crash) แนวทางแก้ปัญหาคือการใช้ librtlsdr ที่ถูกปรับแต่งซึ่งได้แก่ "async-rearrangements" เป็นฐานซึ่งพบว่าสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี ไลบรารีที่ถูกปรับแต่ง librtlsdr-2freq สำหรับการเปลี่ยนคลื่นความถี่นี้เป็นซอฟต์แวร์แบบเปิด (Open Source Software)

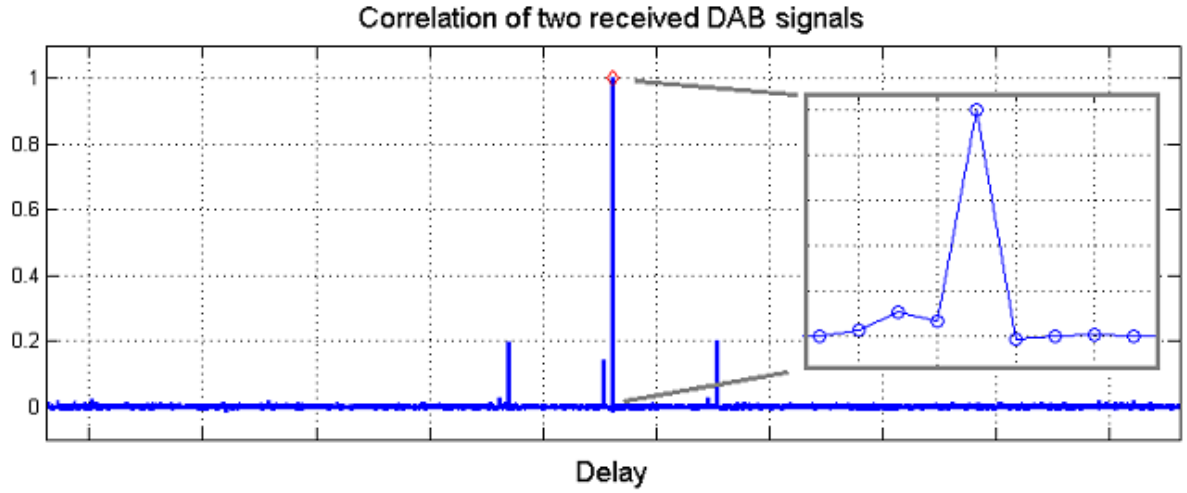
13.3.2.3 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) สำหรับคำนวณ TDOA

การวัดดีเลย์ระหว่างสัญญาณเข้า 2 สัญญาณเป็นการดำเนินการที่สำคัญที่สุดสำหรับการคำนวณ TDOA ซึ่งเหมาะที่จะวัดโดยใช้ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ (Correlation Function) ดังมีนิยามดังนี้

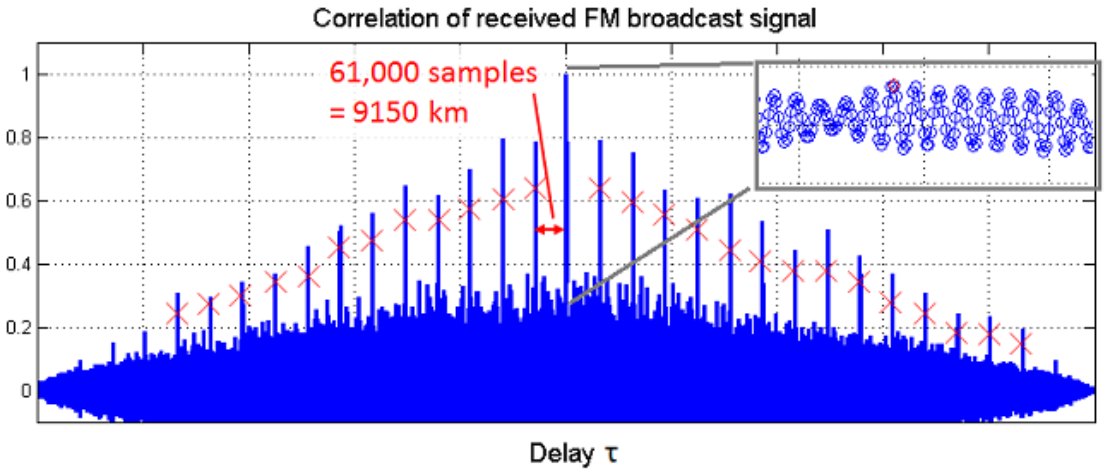
$$Corr(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} s_1(t)s_2(t+\tau)$$

โดย $s_1(t)$, $s_2(t)$ คือสัญญาณที่เครื่องรับ 1 และ 2 และค่าสหสัมพันธ์ Corr ($\boldsymbol{\tau}$) ที่ค่าดีเลย์สมมุติ ($\boldsymbol{\tau}$) ซึ่งจะเป็นค่าที่บอกว่าสัญญาณทั้งสองเป็นสัญญาณเดียวกันมากน้อยเพียงใดค่า $\boldsymbol{\tau}$ ที่ทำให้ค่าสหสัมพันธ์มีค่าสูงสุด (Peak) คือดีเลย์ระหว่างสัญญาณรับที่เครื่องรับที่ต้องการหา

อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติคุณภาพของค่าสหสัมพันธ์ (ซึ่งตามที่ควรจะเป็นควรมีจุดสูงสุดที่ชัดเจนเพียงจุดเดียว) จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น แถบกว้าง (Bandwidth) ของสัญญาณ ความเป็นคาบ (Periodicity) การแพร่กระจายพหุวิถี (Multi-Path Propagation) สัญญาณรบกวน (Noise) ข้อมูลที่ส่ง และความจริงที่ว่าสัญญาณทั้งสองเป็นสัญญาณที่รับได้ที่เครื่องรับคนละเครื่องกัน รูปที่ 13-23 และ 13-24 แสดงค่าสหสัมพันธ์ของสัญญาณที่ได้จากการวัดจริงโดยภาควิทยุ RTL-SDR 2 เครื่องที่อยู่คนละที่กัน สัญญาณ DAB มีค่าสหสัมพันธ์ที่ดีมีจุดสูงสุดที่ชัดเจนเพียงจุดเดียว ในขณะที่สัญญาณ FM ที่มีค่าสหสัมพันธ์ที่ด้อยคุณภาพกว่าจะเกิดสไปค์ (Spike) ขึ้นหลายจุดและไม่ชัดเจนว่าจุดสูงสุดอยู่ที่ใด



รูปที่ 13-23 ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของสัญญาณ DAB+ ที่รับได้โดยภาควิทยุ RTL-SDRs 2 ชุด (ทำงานได้เป็นอย่างดี)



รูปที่ 13-24 ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของสัญญาณ FM ที่รับได้โดยภาควิทยุ RTL-SDRs 2 ชุด (มีจุดสูงสุด (Peak) หลายจุด ไม่ชัดเจน)

ปัญหาในการระบุจุดสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์สามารถปรับปรุงได้โดยใช้ฟิลเตอร์ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving Average Filter) เพื่อให้เส้นกราฟสหสัมพันธ์เรียบ (Smooth) ขึ้น ในขณะที่ปัญหาจุดสูงสุดหลายจุดมักจะสามารถแก้ได้โดยการพิจารณาค่าดีเลย์ร่วมกับตำแหน่งระหว่างเครื่องรับคู่ต่าง ๆ เช่นในกรณีของสัญญาณ FM ดังรูปที่ 13-24 ระยะห่างระหว่างจุดสูงสุดต่าง ๆ จะมีค่าสูง (ประมาณ 61,000 ตัวอย่าง (Samples)) ซึ่งหากคำนวณเป็นระยะทางจะสูงถึง 9,150 กม. อย่างไรก็ตามระยะทางระหว่างเครื่องรับอยู่ในช่วงไม่กี่ กม. ดังนั้นจุดสูงสุดใดที่คำนวณแล้วได้ระยะทางระหว่างเครื่องรับสูงกว่าค่าระยะทางจริงสามารถที่จะตัดออกไปจากการพิจารณาได้ ซึ่งโดยทั่วไปเพื่อพิจารณาด้วยหลักการนี้จะเหลือเพียงจุดสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์เพียงจุดเดียว

การคำนวณค่าฟังก์ชันสหสัมพันธ์ข้างต้นสมมุติว่าข้อมูลขาเข้าเป็นตัวเลขจำนวนจริง (Real Value Data) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ออกมาจาก RTl-SDR เป็นข้อมูล I/Q ซึ่งเป็นตัวเลขเชิงซ้อน (Complex Value) จึงได้มีการทดลองคำนวณทั้งค่าสหสัมพันธ์ของขนาดของข้อมูล I/Q (Absolute Value of Complex I/Q Data) และค่าความต่างของเฟส (Phase Difference) ของข้อมูล I/Q และพบว่าค่าความต่างของเฟสเหมาะที่จะใช้ในการคำนวณดีเลย์ระหว่างสัญญาณได้หลากหลาย

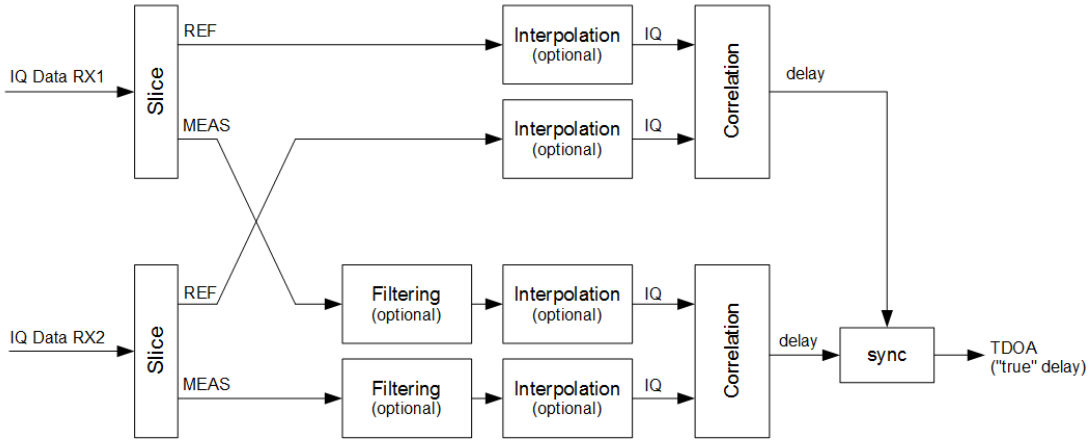
ด้วยค่าสหสัมพันธ์ที่ใช้คำนวณดีเลย์หรือ TDOA และการทำซิงโครไนซ์ของการรับสัญญาณต่าง ๆ ในภาพรวมการประมวลสัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ส่งสัญญาณที่รับได้ไปยังคอมพิวเตอร์หลักและพิจารณาสัญญาณดังกล่าวเป็นคู่ ๆ เพื่อจะได้ดำเนินการต่อไป
2) ทำการซิงโครไนซ์สัญญาณที่รับได้
   - คำนวณค่าสหสัมพันธ์ของสัญญาณอ้างอิง
   - ละทิ้งจุดสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ไม่เข้าเงื่อนไข (Invalid Peak)
   - ใช้ค่าดีเลย์ของสัญญาณที่คำนวณได้สำหรับซิงโครไนซ์การรับสัญญาณ
3) ตรวจวัดสัญญาณที่ไม่รู้จัก

- คำนวณค่าสหสัมพันธ์ของสัญญาณไม่รู้จักที่กำลังตรวจวัด
- ละทิ้งจุดสูงสุดของค่าสหสัมพันธ์ที่ไม่เข้าเงื่อนไข (Invalid Peak)
- คำนวณ TDOA ของตัวอย่างสัญญาณพร้อมทั้งระยะทาง

4) จาก TDOA ที่ได้ คำนวณเส้นไฮเปอร์โบลาที่แสดงที่เป็นไปได้ของตำแหน่งของเครื่องส่งที่ไม่รู้จัก

5) สร้างแผนที่ด้วย html javascript (บน Google Map หรือ Open Street Map) เพื่อแสดงผล



รูปที่ 13-25 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) เพื่อคำนวณ Time Difference of Arrival (TDOA) ระหว่างเครื่องรับ 2 เครื่อง (โดยใช้สัญญาณอ้างอิงสำหรับทำการซิงโครไนซ์ (Synchronization))

13.4 การพัฒนาการวิธีการระบุค่าพารามิเตอร์ของคลื่นความถี่ (Spectrum Parameter)

API แบบเปิด (Open API) มี 2 กลุ่มหลักได้แก่ : API เพื่อดึงข้อมูลเกี่ยวกับเซนเซอร์ และ API เพื่อดึงข้อมูลที่เซนเซอร์ตรวจวัด ตารางที่ 13-5 แสดงตัวอย่างของ API แบบเปิดหล่านี้

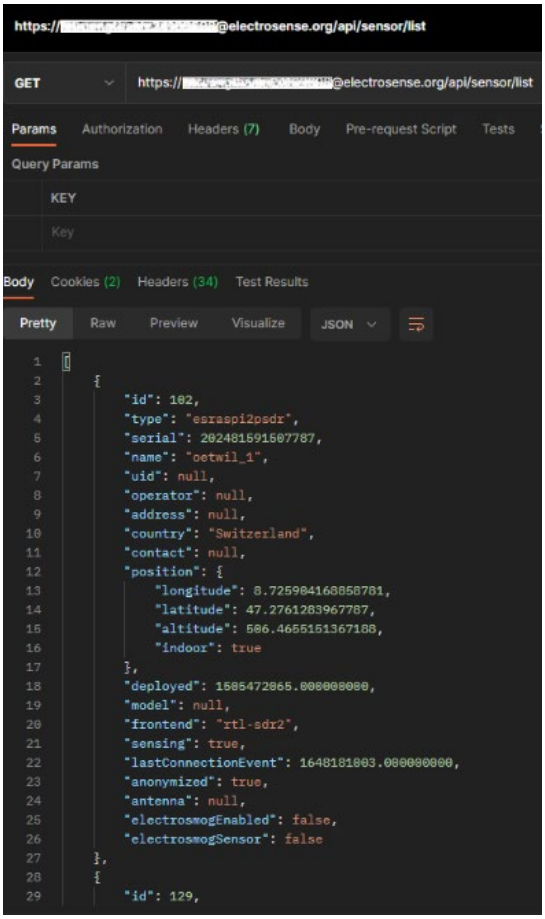
ตารางที่ 13-5 รายการ (List) ของข้อมูล API

เส้นทาง (Path)	การดำเนินการ (Operation)	คำอธิบาย
/sensor/list	GET	ดึง (Get) รายการ (List) ของเซนเซอร์ (Sensor) ทั้งหมด
/sensor/details/{serial}	GET	ดึงข้อมูลของเซนเซอร์ตัวใดตัวหนึ่ง
/spectrum/aggregated	GET	รวบรวมข้อมูล (Retrieve (aggregated)) การวัดคลื่นความถี่ (Spectrum Measurement) ของเซนเซอร์ที่กำหนด
/spectrum/fft	GET	รวบรวมข้อมูลการวัดผลการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว (Fast Fourier Transform Measurements) ที่เซนเซอร์ได้รับ

รูปแบบ (Format) เพื่อใช้ API เหล่านี้เป็นดังนี้ : *https://username:password@electrosense.org/api/ + Path*

ต้องใช้ชื่อผู้ใช้ (Username) และรหัสผ่าน (Password) ของบัญชี ElectroSense ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการใช้ API ผ่านซอฟต์แวร์ที่ชื่อ Postman

1) Sensor list:



รูปที่ 13-26 Sensor list API, เรียกฟังก์ชันจากคอมพิวเตอร์

Request:

- URI:

https://username:password@electrosense.org/api/sensor/list

- Parameter: ไม่มี

Response:

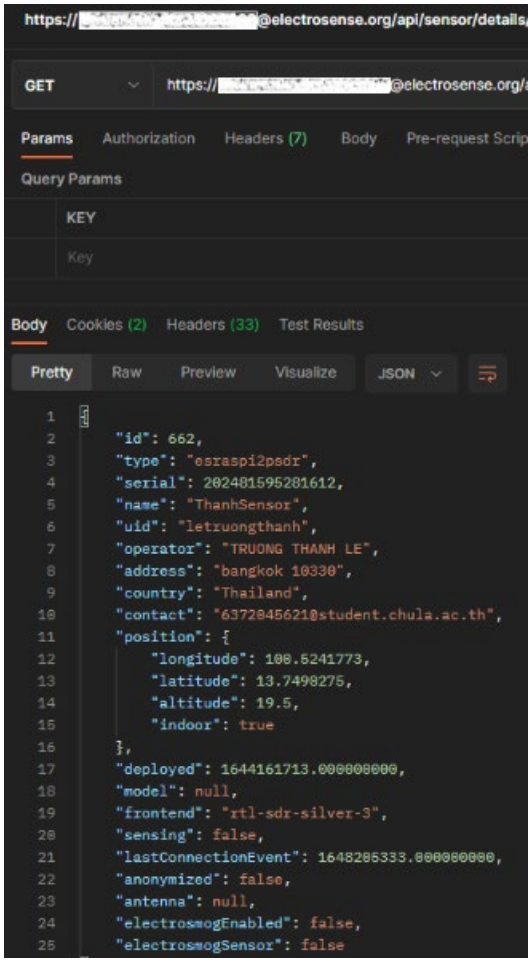
เซิร์ฟเวอร์ ElectroSense จะส่งรายการของเซนเซอร์ โดยแต่ละรายการมีองค์ประกอบตามที่แสดงในลิงค์ URL

ตารางที่ 13-6 โครงสร้างของข้อมูลเซนเซอร์

คุณสมบัติ (Properties)		**ชนิดข้อมูล (Data Type)**	**คุณสมบัติ**
type		string	ชนิดของอุปกรณ์ ('esraspi2psdr' หรือ 'misc')
id		int32	หมายเลขเฉพาะของเซนเซอร์สำหรับการใช้งานภายใน (Internal Use)
serial		int64	เลขซีเรียล (Serial Number) ของเซนเซอร์ สำหรับใช้เป็นตัวระบุ (Identifier) ให้ API
name		string	ชื่อเฉพาะของเซนเซอร์ (ผู้ใช้สามารถตั้งได้)
uid		string	ชื่อผู้ใช้ (Username) ของเจ้าของอุปกรณ์ สามารถปล่อยว่างไว้ได้หากต้องการความเป็นส่วนตัว
operator		string	ชื่อเต็มของเจ้าของอุปกรณ์ สามารถปล่อยว่างไว้ได้หากต้องการความเป็นส่วนตัว
contact		string	ที่อยู่ที่สามารถติดต่อเจ้าของอุปกรณ์ได้ สามารถปล่อยว่างไว้ได้หากต้องการความเป็นส่วนตัว หมายเหตุ : ข้อมูลนี้จะถูกนำออกไปในอนาคต
address		string	ที่อยู่ของตำแหน่งของเซนเซอร์ จะเห็นเฉพาะเจ้าของเซนเซอร์เท่านั้น
position	longitude	double	พิกัดตำแน่งเชิงภูมิศาสตร์ (Geographical Coordinates) ของอุปกรณ์
	latitude	double	
	altitude	double	
	indoor	boolean	
anonymized		boolean	ถ้ากำหนดเป็น 'true' เพื่อความเป็นส่วนตัวผู้ใช้จะไม่ให้ตำแหน่งที่เจาะจง (Exact Position)
deployed		Unix time	วันและเวลาที่เริ่มใช้งานเซนเซอร์ในหน่วยวินาที (Unix time)
frontend		string	ฟรอนต์-เอนด์ภาควิทยุ (Radio Frontend) ของอุปกรณ์ สามารถปล่อยว่างไว้ได้
antenna	directional	boolean	ตั้งเป็น 'true' หากเป็นสายอากาศแบบกำหนดทิศทาง (Directional Antenna)
	angle	float	สำหรับสายอากาศแบบกำหนดทิศทางเท่านั้น องศาอยู่ในหน่วยเลขฐานสิบ เริ่ม 0 องศาที่ทิศเหนือและเพิ่มขึ้นตามเข็มนาฬิกา
	gain	float	อัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศ
	minFreq	int64	ความถี่ต่ำสุดของสายอากาศตามข้อมูลทางเทคนิค (Specifications)

	maxFreq	int64	ความถี่สูงสุดของสายอากาศตามข้อมูลทางเทคนิค (Specifications)
sensing		boolean	แสดงว่าเซนเซอร์กำลังทำงานเก็บข้อมูลอยู่
lastConnectionEvent		int32	วันและเวลาของการเชื่อมต่อครั้งล่าสุดในหน่วยวินาที (Unix time) หาก 'connected' เป็นค่า false จะแสดงเวลาล่าสุดที่เซนเซอร์เชื่อมต่อกับระบบ ElectroSense หรือหาก 'connected' เป็นค่า true จะแสดงระยะเวลาของการเชื่อมต่อปัจจุบัน
country		string	ประเทศที่เซนเซฮร์ถูกนำไปใช้งาน ข้อมูลนี้จะป้อนโดยผู้ใช้ในขั้นตอนการลงทะเบียน

2) Single sensor detail:



รูปที่ 13-27 Single sensor detail API

Request:

- URI

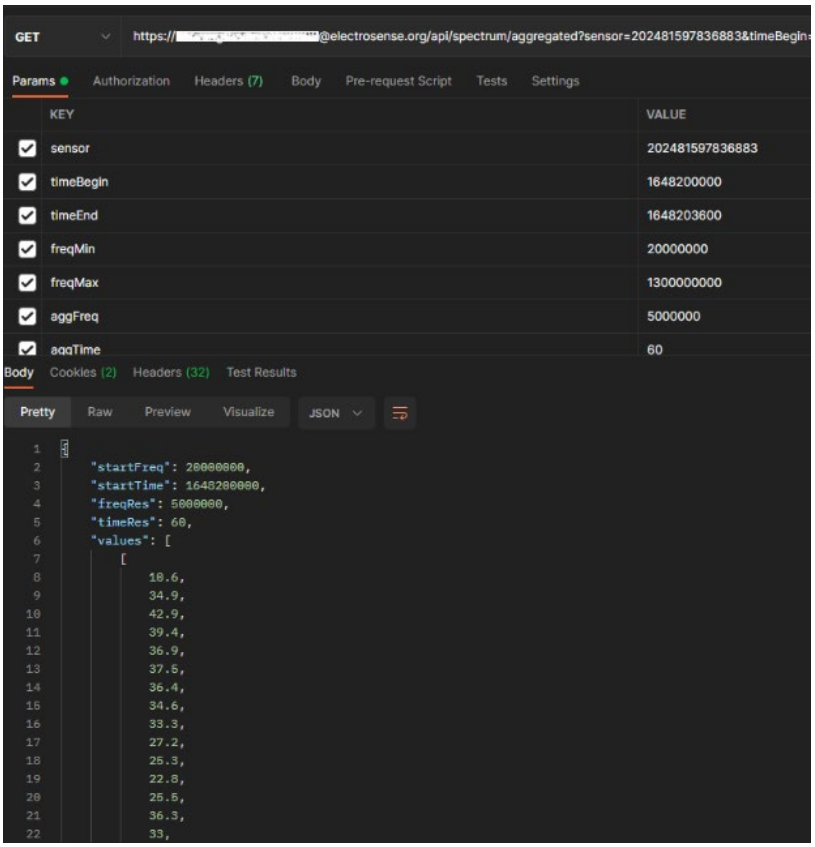
https://username:password@electrosense.org/api/sensor/details/{serial}

- Parameters: Serial (int64): เลขซีเรียล (Serial Number) ของเซนเซอร์

Response:

- เซิร์ฟเวอร์จะส่งข้อมูลตามรูปแบบในตารางที่ 13-6 โดยจะเป็นข้อมูลเฉพาะของเซนเซอร์ตัวที่สนใจ

3) SNR data:



รูปที่ 13-28 Aggregated data API.

Request:

- URI:

https://username:password@electrosense.org/api/spectrum/aggregated

- Parameters: ตามตารางที่ 13-7

ตารางที่ 13-7 พารามิเตอร์ (Parameters) ที่ต้องใช้สำหรับเรียก Aggregated API

ชื่อ (Name)	คำอธิบาย	หน่วย (Unit)	ชนิด	หมายเหตุ
sensor	เลขซีเรียล (Serial Number) ของเซนเซอร์		integer	จำเป็น (Required)
timeBegin	เวลาเริ่มต้น (unix)	วินาที	integer	จำเป็น
timeEnd	เวลาสิ้นสุด (unix)	วินาที	integer	จำเป็น
freqMin	ความถี่ต่ำสุด	เฮิร์ตซ์ (Hz)	integer	จำเป็น
freqMax	ความถี่สูงสุด	เฮิร์ตซ์	integer	จำเป็น
aggFreq	ความละเอียดของความถี่ (Frequency Resolution)	เฮิร์ตซ์	integer	จำเป็น
aggTime	ความละเอียดของเวลา(Time resolution)	วินาที	integer	จำเป็น
aggFun	ฟังก์ชั่นสำหรับการรวบรวม (Aggregation function)		string	ไม่จำเป็น (Optional) ค่าตั้งต้น (Default) = AVG

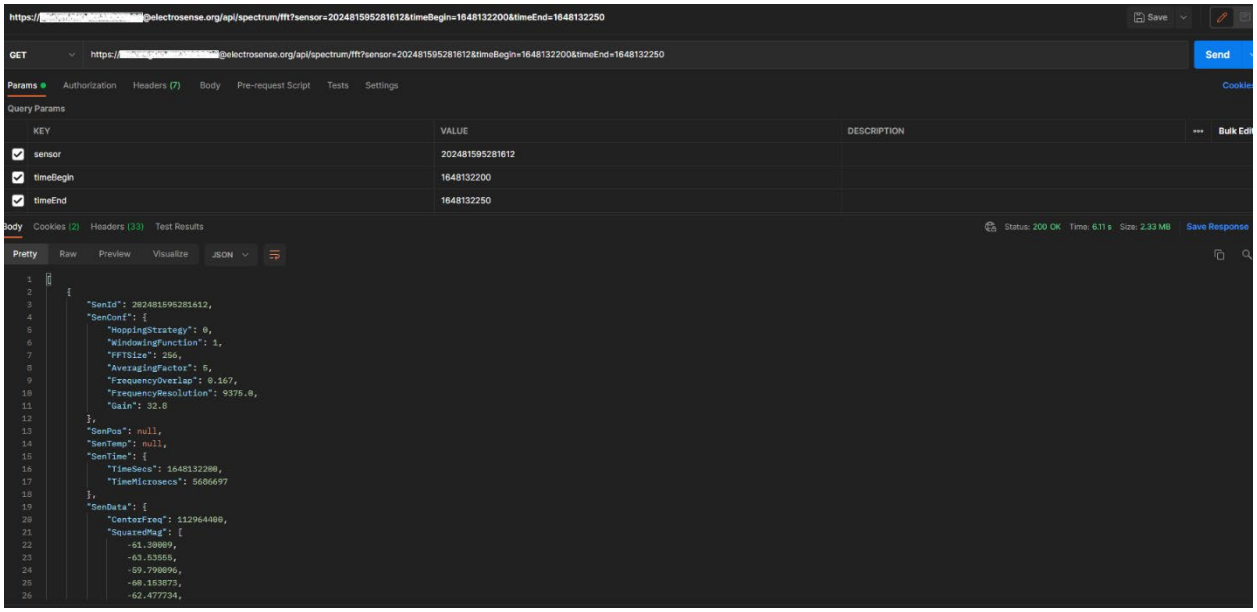
Response: ตามตารางที่ 13-8

ตารางที่ 13-8 พารามิเตอร์ (Parameters) ที่ได้จากการเรียก Aggregated API

คุณสมบัติ (Properties)	ชนิด (Type)	คำอธิบาย
startFreq	int64	ค่าความถี่เริ่มต้นใน 'values'
startTime	int64	ค่าเวลาเริ่มต้นใน 'values'
timeRes	int64	ความละเอียดของหน่วยเวลาใน values'. แถวที่ i-th ใน 'values' จะมีเวลาเท่ากับ startTime + i*(timeRes - 1)
freqRes	int64	ความละเอียดของหน่วยความถี่ใน values'. หลักที่ j-th ใน 'values' จะมีความถี่เท่ากับ startFreq + j*(freqRes - 1)

noiseFloor	float	ค่าประมาณของระดับสัญญาณรบกวนพื้นฐาน (Noise Floor)
values	2-D float array	เมตริกซ์ (Matrix) ของค่า SNR ในหน่วย dB แต่ละแถวรวบรวม (Aggregated) ค่าการวัดที่เวลา t และแต่ละหลัก (Column) วัดค่าที่ความถี่ f รายการ (Entry) $v[i][j]$ จะเป็นค่าที่เวลา $startTime + i(timeRes - 1)$ และที่ความถี่ $startFreq + j(freqRes - 1)$ ที่บางคลื่นความถี่และเวลาอาจไม่มีค่าการวัด ในกรณีนี้รายการที่บันทึก $v[i][j]$ จะถูกปล่อยว่างไว้ ('null')

4) FFT data:



รูปที่ 13-29. FFT data API.

Request:

- URI:

https://username:password@electrosense.org/api/spectrum/fft

- Parameter: ตามตารางที่ 13-9

ตารางที่ 13-9 พารามิเตอร์ (Parameters) ที่ต้องใช้สำหรับเรียก FFT Data API

ชื่อ (Name)	คำอธิบาย	ชนิด (Type)
sensor	เลขซีเรียล (Serial Number) ของเซนเซอร์	int64
timeBegin	เวลาเริ่มต้น (unix)	unix time
timeEnd	เวลาสิ้นสุด (unix)	unix time

Response: ตามตารางที่ 13-10

ตารางที่ 13-10.พารามิเตอร์ (Parameters) ที่ได้จากการเรียก FFT Data API

คุณสมบัติ (Properties)		ชนิด (Type)	คำอธิบาย
SenId		int64	เลขซีเรียล (Serial Number) ของเซนเซอร์ (MAC address ในรูปแบบเลขฐานสิบ)
SenConf	HoppingStrategy	int	ตัวระบุ (Identifier) ของ Hopping Strategy ที่ถูกใช้เพื่อเอาชนะข้อจำกัดของแถบกว้างความถี่ของฟรอนต์-เอนด์ภาควิทยุ (Bandwidth Limitations of the RF front-end) [0:Sequential, 1:Random, 2:Similarity]
	WindowingFunction	int	ตัวระบุ (Identifier) ของ Windowing Function ที่ถูกใช้เพื่อปรับรูปร่าง (Reshape) ของตัวอย่างสุ่มในทางเวลา (Time-domain Samples) [0:Rectangular, 1:Hanning, 2:BlackmanHarris]
	FFTSize	int	ขนาดของการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT): ซึ่งเป็นจำนวนของตัวอย่างสุ่มของสัญญาณในทางความถี่ [2^i เมื่อ i เป็นสมาชิกของเซ็ต {8,...,17}]
	AveragingFactor	int	จำนวนของสัญญาณในทางความถี่ (Frequency-domain Signals) ที่ถูกนำมาคำนวณค่าเฉลี่ย [>0]
	FrequencyOverlap	int	สัดส่วน (Fraction) ของสัญญาณในทางความถี่ ที่จะถูกลดลง (Drop) เนื่องจากการตอบสนองเชิงความถี่ที่ไม่เป็นเส้นตรงของฟรอนต์-เอนด์ภาควิทยุ (Non-linear

			Frequency Responses of the RF Front-end) จำนวนของตัวอย่างสุ่มของสัญญาณในทางความถี่จะถูกลดลงจาก FFTSize เป็น (1-FrequencyOverlap)(FFTSize+1) แถบกว้างความถี่ (Bandwidth) ของสัญญาณในทางความถี่จะถูกลดลงจาก FFTSizeFrequencyResolution เป็น (1-FrequencyOverlap)*FFTSizeFrequencyResolution. [0,...,1]
	FrequencyResolution	int	ส่วนต่างของความถี่ในหน่วยเฮิร์ตซ์ของตัวอย่างสุ่มที่อยู่ติดกันของสัญญาณในทางความถี่ [>0]
	Gain	float	ส่วนขยายภาควิทยุ (RF Gain) ในหน่วย dB. [-1 สำหรับ Automatic Gain Control]
SenPos	PosSys	string	คำอธิบายหรือการระบุ (Description/Identification) ของระบบระบุตำแหน่ง (Positioning System) ที่ใช้
	PosVal	array	ค่าของตำแหน่งจากระบบระบุตำแหน่งที่ใช้
SenTime	TimeSecs	int64	จำนวนของวินาทีนับตั้งแต่จุดเริ่มต้นของช่วงเวลา UNIX Time Epoch เมื่อ 1 ม.ค. ค.ศ. 1970 ณ เวลา UTC
	TimeMicrosecs	int32	ส่วนย่อยของเวลาในหน่วย Microseconds
SenData	CenterFreq	int	ค่าความถี่กลาง (Center Frequency) ในหน่วยเฮิร์ตซ์ที่ฟรอนต์-เอนด์ภาควิทยุถูกตั้งไว้ในระหว่างที่บันทึกข้อมูลคลื่นความถี่
	SquaredMag	array	ค่าข้อมูลความถี่ที่ถูกบันทึกได้ที่ค่าความถี่กลางที่ตั้งไว้ จุดข้อมูล (Data Points) จำนวน (1-FrequencyOverlap)*(FFTSize+1) จุดจะแทน (Represent) ขนาดยกกำลังสอง (Squared Magnitudes) ของสัญญาณในทางความถี่ในสเกล dB (Frequency-domain Signal on a dB Scale)

13.5 บทสรุป

คณะผู้วิจัยพัฒนาระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring System) โดย ใช้เซนเซอร์ (Sensors) ElectroSense เก็บข้อมูลคลื่นความถี่ในย่านและพื้นที่ที่สนใจ และใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ในการวิเคราะห์ข้อมูล ตรวจสอบเพื่อระบุการเกิดสัญญาณรบกวนพร้อมทั้งแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต

ย่านความถี่ที่สนใจได้แก่ย่าน 700 MHz (703 – 803 MHz) ในกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (IMT) บริเวณชายแดนไทย-กัมพูชา อ.อรัญประเทศ จ.สระแก้ว โดยแหล่งกำเนิดการรบกวนอาจจะมาจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินของประเทศกัมพูชา

คณะผู้วิจัยได้อธิบายถึงขั้นตอนพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการเตรียมเซนเซอร์ ElectroSense ทั้งการติดตั้งระบบปฏิบัติการ (Operating System Installation) การลงทะเบียนเซนเซอร์ (Sensor Registration) และการใช้ ElectroSense เพื่อเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)

อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถ

- ระบุการใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติ (Abnormal Frequency Usage Identification) โดยใช้การเรียนรู้อย่างลึก (Deep Learning) ด้วยวิธี You Only Look Once (YOLO)
- ระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดการรบกวน (Interference Source Location Identification) โดยใช้ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง (Time Difference of Arrival, TDOA)
- ระบุค่าพารามิเตอร์ของคลื่นความถี่ (Spectrum Parameter) โดยใช้ API แบบเปิด (Open API) เพื่อดึงข้อมูลเกี่ยวกับเซนเซอร์ และข้อมูลที่เซนเซอร์ตรวจวัดได้ผ่านซอฟต์แวร์ที่ชื่อ Postman โดยข้อมูลที่ดึงได้ได้แก่ รายการของเซนเซอร์ (Sensor list) รายละเอียดของเซนเซอร์แต่ละตัว (Single Sensor Detail) ค่า Signal to Noise Ratio (SNR) และการแปลงฟูเรียร์อย่างเร็ว (Fast Fourier Transform, FFT) ของข้อมูลที่เซนเซอร์เฝ้าฟังได้

บทที่ 14

การสร้างแดชบอร์ดของเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการบริหารจัดการกระบวนการอนุมัติใบอนุญาต

14.1 เบื้องต้นเกี่ยวกับแดชบอร์ดของผู้ดูแลระบบ (Admin Dashboard) สำหรับการบริหารจัดการกระบวนการอนุมัติใบอนุญาต

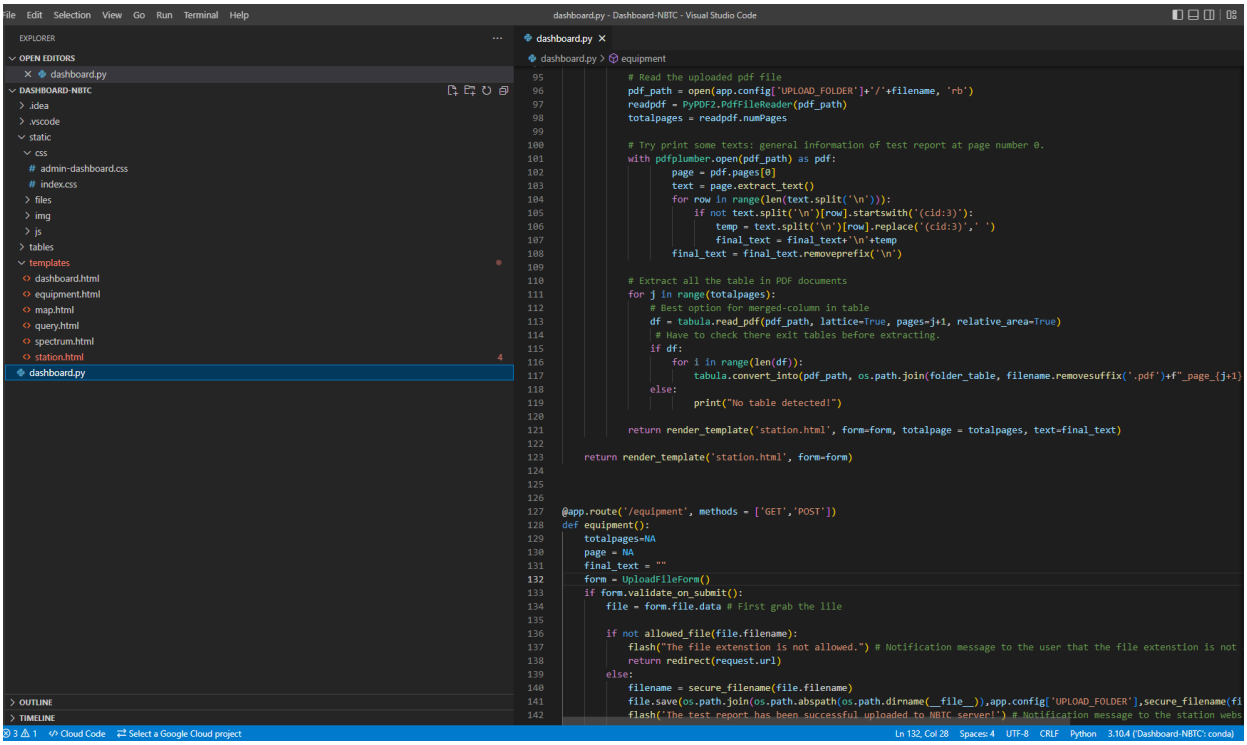
แดชบอร์ดสำหรับผู้ดูแลระบบ (Admin Dashboard) เป็นส่วนหนึ่งของเฮดเดอร์ (Header) ของเว็บแอปพลิเคชันซึ่งผู้มีหน้าที่รับผิดชอบสามารถเห็นภาพรวมและประสิทธิภาพของการดำเนินการทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการอนุมัติใบอนุญาต แผงข้อมูลแดชบอร์ดช่วยให้ผู้มีหน้าที่รับผิดชอบสามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วเกี่ยวกับกระบวนการทำและสิ่งที่สามารถปรับปรุงได้เพื่อให้กระบวนการทำงานดีขึ้น ฟังก์ชันการทำงานหลัก (Major Features) ของแดชบอร์ดที่สร้างขึ้นได้แก่

- รายละเอียดภาพรวมของเว็บ
- ลิงค์เมนูย่อย (Submenu Bar Links)
- กล่องค้นหา (Search Box)
- การเข้าและออกจากการใช้งาน (Log-In and Log-Out)

14.2 การสร้างแดชบอร์ดด้วย html และ css

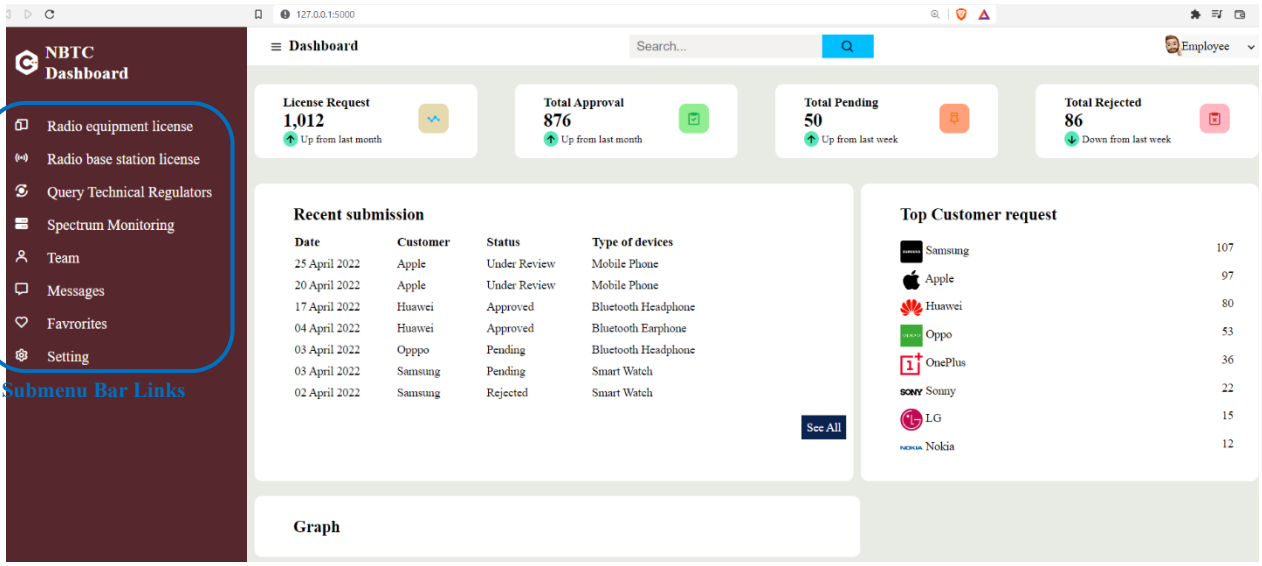
การสร้างแดชบอร์ดด้วย html css และ JavaScript จะต้องสร้างไฟล์ขึ้นมา 2 ไฟล์ในแฟ้มข้อมูล (Folder) เดียวกัน ไฟล์หนึ่งเป็นไฟล์ html และอีกไฟล์หนึ่งเป็นไฟล์ css รายละเอียดของไฟล์เหล่านี้อยู่ในภาคผนวก หลังจากสร้างไฟล์เหล่านี้แล้ว เราสามารถเขียนโปรแกรมสำหรับสร้างแดชบอร์ดได้โดยใช้ Visual Studio Editor ดังแสดงในรูปที่ 14-1

- การสร้างแดชบอร์ดในไฟล์ html : สร้างไฟล์ชื่อ index.html ใน Visual Studio Editor และคัดลอก (Copy) โค๊ด html สำหรับสร้างเทมเพลต (Template) ของแดชบอร์ดลงในไฟล์ index.html
- การสร้างแดชบอร์ดในไฟล์ css : ไฟล์ชื่อ style.css ใน Visual Studio Editor และคัดลอกโค๊ด (ที่กำหนดรูปลักษณ์ของแดชบอร์ด) ลงในไฟล์ css ตรวจสอบให้แน่ใจว่าไฟล์ html และ css อยู่ในแฟ้มข้อมูลเดียวกัน



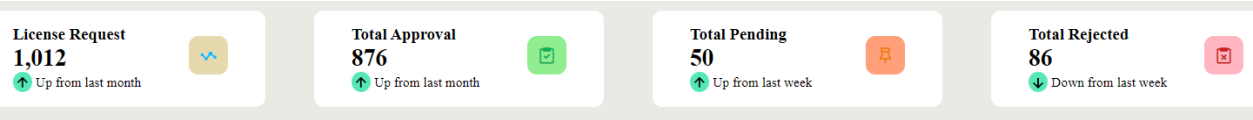
รูปที่ 14-1 ส่วนหนึ่งของโค๊ด (Code) ในไฟล์ (File) html สำหรับสร้างแดชบอร์ด (Dashboard) ด้วย Visual Studio Editor

ภาพรวมของแดชบอร์ดแสดงไว้ในรูปที่ 14-2 (ชื่อของบริษัทและค่าตัวเลขต่าง ๆ ใส่ไว้เพื่อสาธิตเท่านั้น)

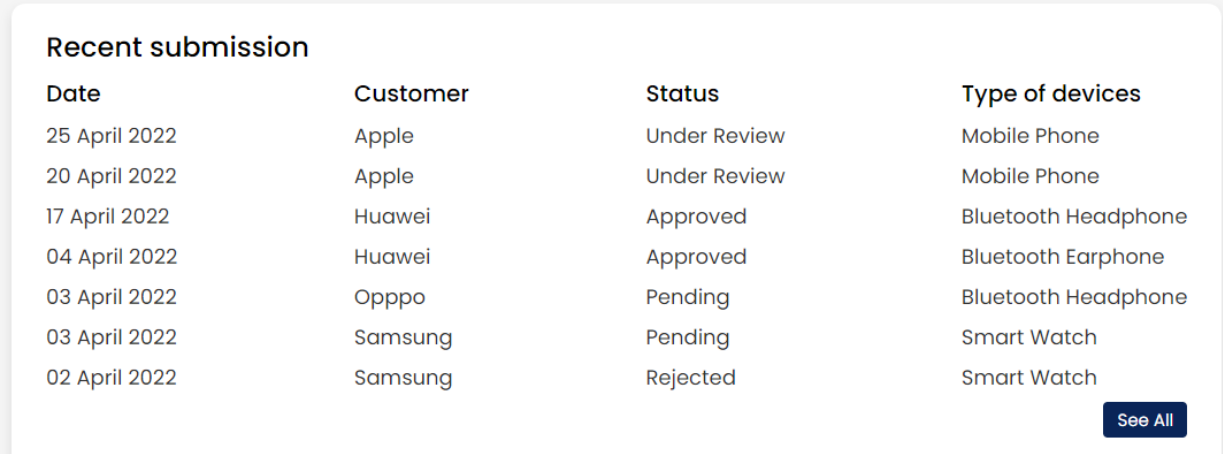


รูปที่ 14-2 ภาพรวมทั้งหมด (Overall) ของแดชบอร์ด (Dashboard) สำหรับบริการจัดการกระบวนการอนุมัติใบอนุญาต

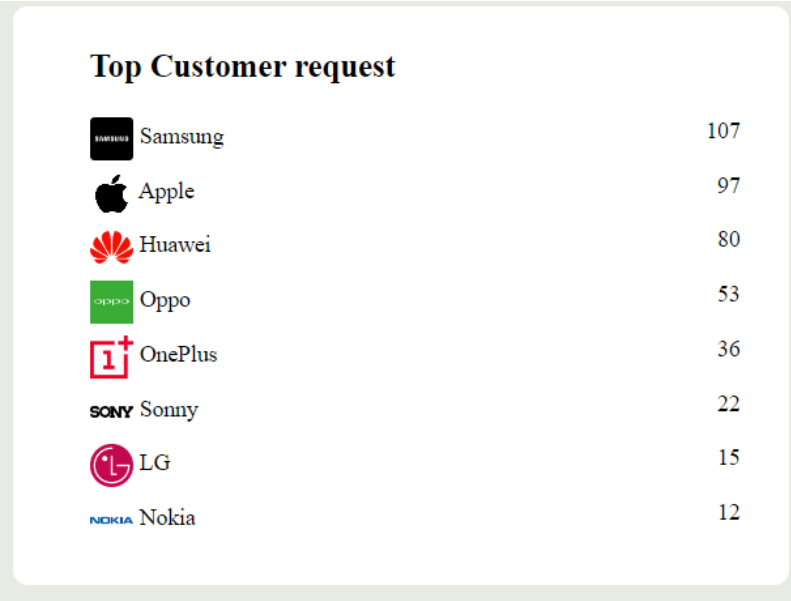
ลิงค์เมนูย่อย (Submenu Bar Links) ถูกวางอยู่ด้านซ้ายมือของแดชบอร์ด พื้นที่สามส่วนหลักของแดชบอร์ด ได้แก่ จำนวนใบอนุญาตที่ถูกขอเข้ามา (รูปที่ 14-3) รายการการยื่นขอล่าสุด (รูปที่ 14-4) กลุ่มผู้ที่ยื่นขอใบอนุญาตเข้ามาสูงสุด (รูปที่ 14-5)



รูปที่ 14-3 ภาพรวมของจำนวนใบอนุญาตที่ถูกขอเข้ามาเพื่อให้ผู้ที่รับผิดชอบสามารถเห็นภาพสถานะของการดำเนินการออกใบอนุญาตได้อย่างรวดเร็ว

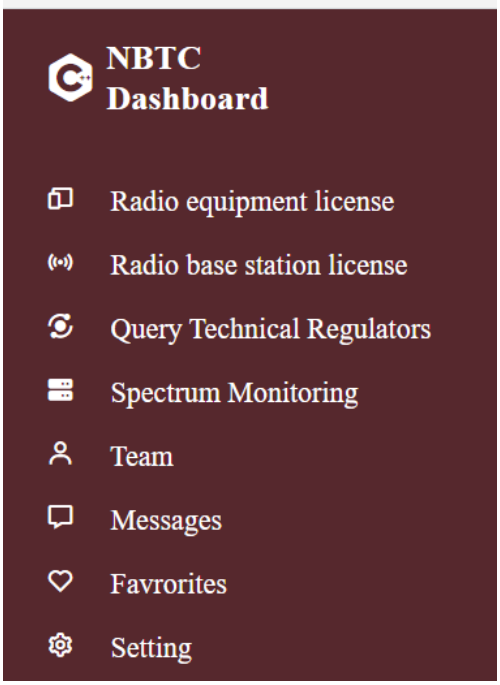


รูปที่ 14-4 รายการการขอใบอนุญาตล่าสุด



รูปที่ 14-5 รายการแสดงกลุ่มผู้ที่ยื่นขอใบอนุญาตเข้ามาสูงสุด

เมนูย่อย (Submenu) ของแดชบอร์ดถูกจัดวางไว้ด้านซ้ายมือดังแสดงในรูปที่ 14-6



รูปที่ 14-6 เมนูย่อย (Submenu) ของแดชบอร์ด

โค๊ดต้นแบบ (Source Code) สำหรับสร้างแดชบอร์ดถูกเขียนด้วยภาษาไพธอน (Python) ซึ่งสามารถใช้ได้กับระบบปฏิบัติการ Window, Mac OS และ Linux คณะผู้วิจัยได้ทดสอบการแสดงผลของแดชบอร์ดกับเว็บเบราว์เซอร์ (Web Browser) หลักได้แก่ Safari, Chromes และ Edge แล้ว

ทั้งนี้เมนูย่อยที่เปิดใช้งานแล้ว พร้อมกับจำนวนผู้ใช้งานในเวลาเดียวกันที่แต่ละเมนูย่อยสามารถรองรับได้สรุปไว้ดังนี้ :

- Radio equipment license : ผู้ใช้ 8 คนพร้อมกัน
- Radio Base station license : ผู้ใช้ 8 คนพร้อมกัน
- Query Technical Regulators : ผู้ใช้ 20 คนพร้อมกัน
- Spectrum Monitoring : ผู้ใช้สามารถทำ Spectrum Monitoring ได้พร้อมกัน 20 โดยที่การทำ Localization สามารถทำได้ครั้งละ 1 คน

บทที่ 15

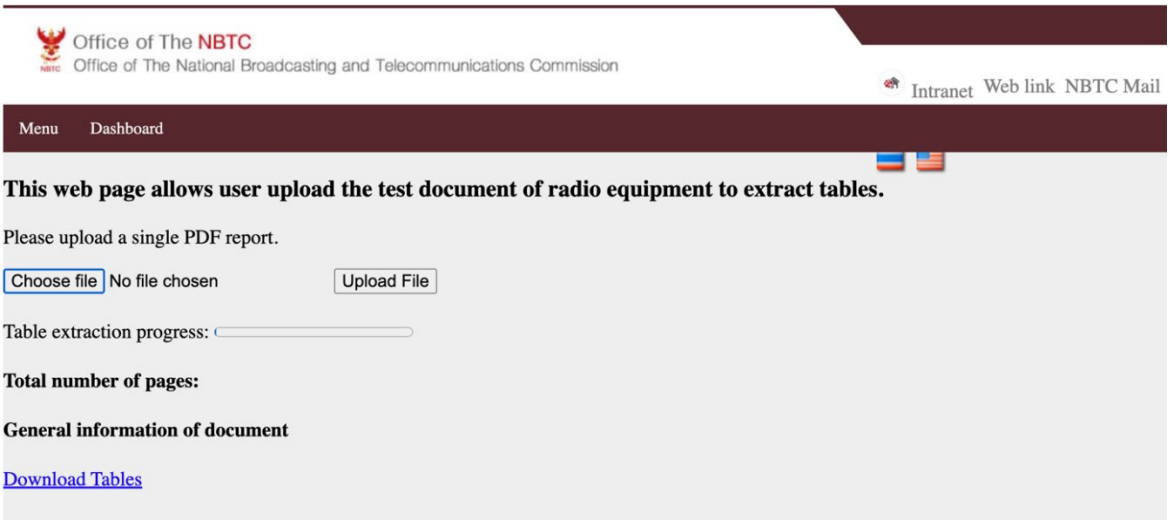
การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับจัดการการอนุมัติใบอนุญาต (The Implementation of Web-Apps for Processing License Approval)

15.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features)

ผู้ใช้ (User) สามารถส่งรายงานผลการทดสอบอุปกรณ์แก่สำนักงาน กสทช ผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน เว็บแอปพลิเคชันจะแสดงข้อมูลทั่วไป (General Information) ของอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบพร้อมทั้งดึง (Extract) ตารางต่าง ๆ ในรายงานผลการทดสอบออกมาในรูปแบบไฟล์ csv เก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลที่บีบอัด (Zipped Folder) ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด (Download) ไปได้

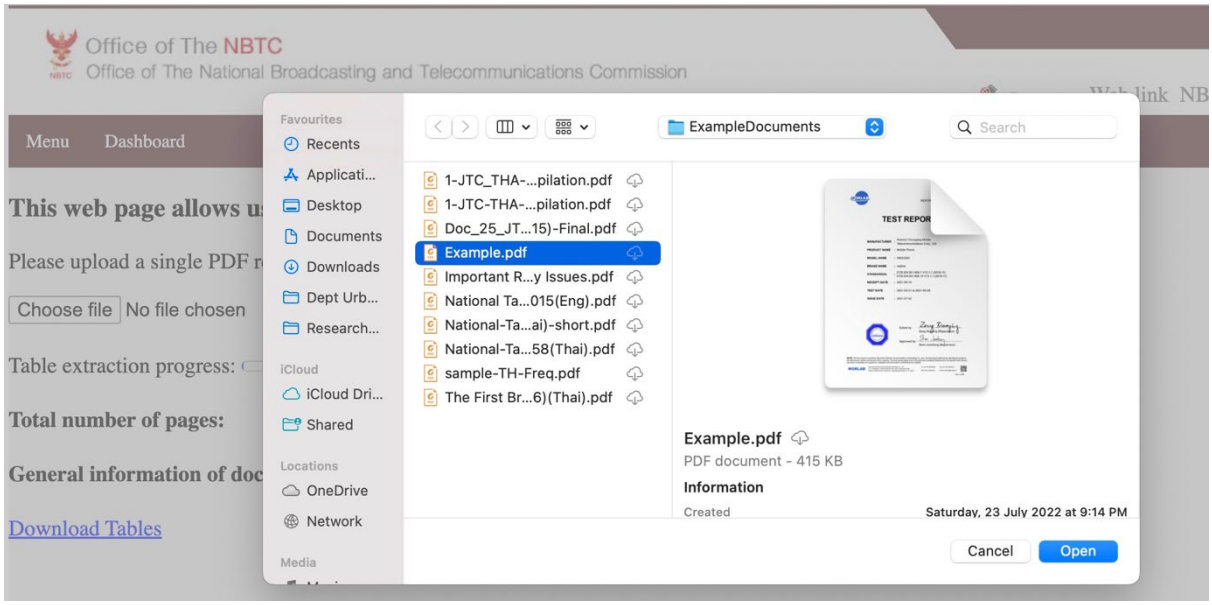
15.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps)

หลังจากเข้าใจวิธีใช้และเตรียมเอกสารที่จำเป็นสำหรับกระบวนการขอใบอนุญาตแล้ว ผู้ใช้สามารถเลือกเมนูย่อย "Processing License Approval for Radio Equipment" ที่อยู่ด้านซ้ายมือของแดชบอร์ด จะเห็นอินเตอร์เฟสของผู้ใช้ (User Interface) ดังแสดงในรูปที่ 15-1

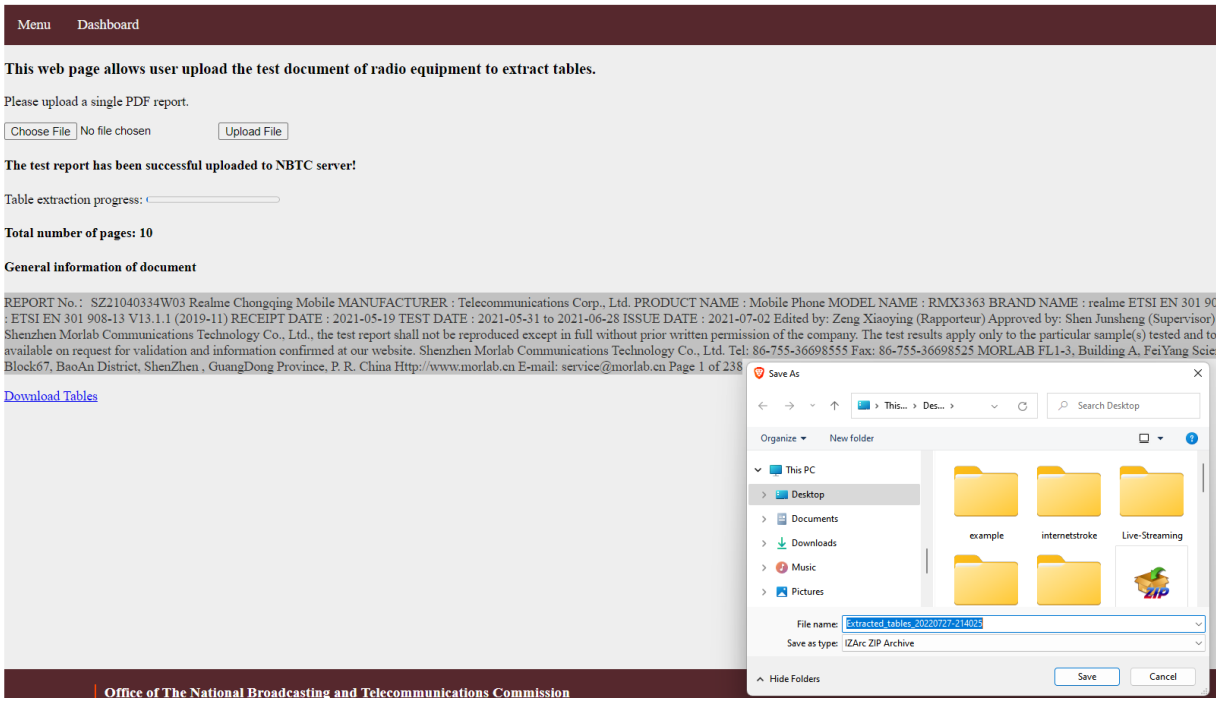


รูปที่ 15-1 อินเตอร์เฟสของผู้ใช้ (User Interface) ของเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการดึง (Extract) ตารางต่าง ๆ จากในรายงานผลการทดสอบ

ผู้ใช้สามารถอัปโหลด (Upload) ไฟล์ผลการทดสอบจากศูนย์ทดสอบที่ได้รับการรับรองในประเทศไทยโดยคลิกเลือกปุ่ม Choose File จากนั้นกด Upload เอกสารที่เป็นไฟล์ pdf ดังแสดงในรูปที่ 15-2 เว็บแอปพลิเคชันรองรับการอัปโหลดไฟล์ชนิด pdf ได้ครั้งละ 1 ไฟล์



รูปที่ 15-2 การอัปโหลด (Uploading) ผลทดสอบในรูปแบบไฟล์ pdf เข้าสู่เว็บแอปพลิเคชัน



รูปที่ 15-3 แอปพลิเคชันแสดงข้อมูลทั่วไปของรายงานผลการทดสอบ

หลังจากอัปโหลดไฟล์รายงานเข้าสู่เซิร์ฟเวอร์ (Server) อัลกอริทึม (Algorithm) จะเริ่มทำงานโดยอัตโนมัติ โดยดึงเอาตารางต่าง ๆ จากทุกหน้าของไฟล์รายงานไปเก็บไว้เป็นแฟ้มเอกสาร (Folder) ดังแสดงในรูปที่ 15-3 ตารางต่าง ๆ ที่ถูกดึง (Extract) จากไฟล์รายงานจะถูกเก็บในแฟ้มข้อมูล ผู้ใช้สามารถคลิก Download Tables เพื่อดาวน์โหลดแฟ้มข้อมูลตารางในรูปแบบของไฟล์ zip ได้ และเว็บแอปพลิเคชันจะแสดงข้อมูลทั่วไปของรายงานผลการทดสอบด้วย

15.3 การออกแบบและการสร้าง (Design and Implementation) เว็บแอปพลิเคชันสำหรับดึงข้อมูลตารางจากรายงานผลการทดสอบ

15.3.1 การเตรียมไลบรารี่ (Libraries)

เพื่อให้สามารถอ่านและดึงข้อมูลรวมถึงตารางจาดไฟล์ pdf ได้ จะต้องมีการโหลด (Load) ไลบรารี่เหล่านี้เข้าสู่สภาพแวดล้อมไพธอน (Python Environment) โปรแกรมสำหรับเขียนโค๊ด (Editor) ได้แก่ Visual Studio Code บนระบบปฏิบัติการ Window

```
# Importing the libraries that are needed for the Flask app.
from flask import Flask, redirect, request, render_template, url_for, flash, send_file
from flask_wtf import FlaskForm
from pandas import NA
from wtforms import FileField, SubmitField
from werkzeug.utils import secure_filename
import os, tabula, time, zipfile
from wtforms.validators import InputRequired
import PyPDF2, pdfplumber
from io import BytesIO
```

15.3.2 การออกแบบฟังก์ชันการทำงาน (Functionality Design)

15.3.2.1 ตรวจสอบรูปแบบ pdf ของไฟล์ที่ส่งเข้าสู่ระบบ

```
### Function to check the allowed PDF file only.
def allowed_file(filename):
    """
    If the file extension is in the list of allowed extensions, return True. Otherwise, return False.
    :param filename: The name of the file in string format
    :return: a boolean value.
    """
    if not "." in filename:
```

```
        return False
    ext = filename.rsplit(".",1)[1]
    if ext.upper() in app.config['ALLOWED_FILE_EXTENSIONS']:
        return True
    else:
  return False
```

15.3.2.2 สแกน (Scan) และดึงตารางต่าง ๆ เก็บไว้เป็นไฟล์ชนิด csv

```
@app.route('/equipment', methods = ['GET','POST'])
def equipment():
    totalpages=NA
    page = NA
    final_text = ""
    form = UploadFileForm()
    if form.validate_on_submit():
        file = form.file.data # First grab the lile
        if not allowed_file(file.filename):
            flash("The file extenstion is not allowed.") # Notification message to the user that the file extenstion is not allowed.
            return redirect(request.url)
        else:
            filename = secure_filename(file.filename)
file.save(os.path.join(os.path.abspath(os.path.dirname(__file__)),app.config['UPLOAD_FOLDER'],secure_filename(file.filename))) # Then save the file
            flash('The test report has been successful uploaded to NBTC server!') # Notification message to the station website.
            # Read the uploaded pdf file
            pdf_path = open(app.config['UPLOAD_FOLDER']+'/'+filename, 'rb')
            readpdf = PyPDF2.PdfFileReader(pdf_path)
            totalpages = readpdf.numPages
            # Try print some texts: general information of test report at page number 0.
            with pdfplumber.open(pdf_path) as pdf:
                page = pdf.pages[0]
                text = page.extract_text()
                for row in range(len(text.split('\n'))):
```

```
                if not text.split('\n')[row].startswith('(cid:3)'):
                    temp = text.split('\n')[row].replace('(cid:3)',' ')
                    final_text = final_text+'\n'+temp
            final_text = final_text.removeprefix('\n')
        # Extract all the table in PDF documents
        for j in range(totalpages):
            # Best option for merged-column in table
            df = tabula.read_pdf(pdf_path, lattice=True, pages=j+1, relative_area=True)
             # Have to check there exit tables before extracting.
            if df:
                for i in range(len(df)):
        tabula.convert_into(pdf_path,os.path.join(folder_table,
filename.removesuffix('.pdf')+f"_page_{j+1}.csv"), output_format="csv", pages=j+1)
            else:
                print("No table detected!")
    return render_template('equipment.html', form=form, totalpage = totalpages, text=final_text)
    return render_template('equipment.html', form=form)
```

15.3.2.3 บีบอัด (Zip) แฟ้มข้อมูลซึ่งรวบรวมตารางต่าง ๆ ที่ดึงมาจากไฟล์รายงานและให้ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดไปได้

```
@app.route("/zipped_tables")
def zipped_data():
    timestr = time.strftime("%Y%m%d-%H%M%S")
    fileName = "Extracted_tables_{}.zip".format(timestr)
    memory_file = BytesIO()
    file_path = folder_table
    with zipfile.ZipFile(memory_file, 'w', zipfile.ZIP_DEFLATED) as zipf:
        for root, dirs, files in os.walk(file_path):
            for file in files:
                zipf.write(os.path.join(root, file))
    memory_file.seek(0)
    return send_file(memory_file,
                     attachment_filename=fileName,
                     as_attachment=True)
```

15.3.3 การสาธิตการทำงาน (Demonstration)

การทดสอบเว็บแอปพลิเคชันทั้งหมดทำบนคอมพิวเตอร์วางตัก (laptop Computer) MSI ความจุ 16 GB, หน่วยประมวลผล (Processor) Intel Core i5-10500H และ GPU GTX 1650 ขนาด 4GB ในการประเมิน คณะผู้วิจัยใช้ตัวอย่างเอกสารที่เป็นไฟล์ pdf 2 ฉบับที่ได้รับจากเจ้าหน้าที่สำนักงาน กสทช ซึ่งสรุปรายละเอียดไว้ตามตารางที่ 15-1

- ตารางจัดสรรคลื่นความถี่แห่งชาติ ปี 2558 ซึ่งตารางต่าง ๆ มีเนื้อหาเป็นภาษาไทย
- รายงานผลการทดสอบหมายเลข SZ21040334W03 สำหรับอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Phone) ซึ่งมีรายละเอียดเป็นภาษาอังกฤษ : เอกสารประเภทนี้จะถูกส่งเข้ามาโดยผู้ที่ต้องการขอใบอนุญาต

ตารางที่ 15-1 สรุปข้อมูลเบื้องต้นของเอกสารที่ใช้สำหรับการสาธิตการทำงานของการดึงข้อมูลตารางจากเอกสาร

ลำดับที่	เอกสาร pdf	จำนวนหน้าทั้งหมด	จำนวนหน้าเอกสารที่มีตาราง	ภาษาที่ใช้ในเอกสาร
1	ตารางจัดสรรคลื่นความถี่แห่งชาติ ปี พ.ศ. 2558	212	122	ไทย
2	รายงานผลการทดสอบหมายเลข SZ21040334W03 สำหรับอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่นที่ (Mobile Phone Device)	238	231	อังกฤษ

15.4 การประเมินสมรรถนะ (Performance Evaluation)

15.4.1 คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix)

คำนิยามของพารามิเตอร์ (Parameter) ของคอนฟิวชันเมตริกซ์สำหรับการประเมินสมรรถนะของการดึงข้อมูลตารางเป็นดังนี้ :

- True Positive (TP): เว็บแอปพลิเคชันสามารถระบุหน้าเอกสารที่มีตารางได้อย่างถูกต้อง
- True Negative (TN): เว็บแอปพลิเคชันสามารถระบุหน้าเอกสารที่ไม่มีตารางได้อย่างถูกต้อง
- False Positive (FP) (Type 1 Error): เว็บแอปพลิเคชันระบุว่าหน้าเอกสารนั้นมีตาราง แต่ในความเป็นจริงแล้วเอกสารหน้านั้นไม่มีตาราง
- False Negative (FN) (Type 2 Error): เว็บแอปพลิเคชันระบุว่าหน้าเอกสารนั้นไม่มีตาราง แต่ในความเป็นจริงแล้วเอกสารหน้านั้นมีตาราง

ผลการประเมินสมรรถนะของอัลกอริทึมสำหรับดึงข้อมูลตารางจากเอกสารด้วยปัญญาประดิษฐ์สรุปไว้ในตารางที่ 15-2 และ 15-3

ตารางที่ 15-2 คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) ของเอกสารทดสอบลำดับที่ 1 (ภาษาไทย) ตามตารางที่ 15-1 เวลาที่ใช้ในการประมวลผลเอกสารทดสอบลำดับที่ 1 ประมาณ 4 นาที

	จำนวนหน้าเอกสารที่มีตาราง	
จำนวนหน้าเอกสารที่อัลกอริทึม (Algorithm) ระบุว่ามีตาราง	TP = 122	FP = 0
	FN = 0	TN = 90

ตารางที่ 15-3 คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) ของเอกสารทดสอบลำดับที่ 2 (ภาษาอังกฤษ) ตามตารางที่ 15-1 เวลาที่ใช้ในการประมวลผลเอกสารทดสอบลำดับที่ 1 ประมาณ 6 นาที

	จำนวนหน้าเอกสารที่มีตาราง	
Predicted จำนวนหน้าเอกสารที่อัลกอริทึม (Algorithm) ระบุว่ามีตารางalgorithm	TP = 230	FP = 0
	FN = 1	TN = 7

15.4.2 คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix)

จากคอนฟิวชันเมตริกซ์ที่ได้ในหัวข้อ 15.4.1 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความถูกต้องของอัลกอริทึมที่ใช้ได้ดังนี้ :

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{122 + 230}{(122 + 230) + (0 + 0)} = 1$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{122 + 230}{(122 + 230) + (0 + 1)} = 0.997$$

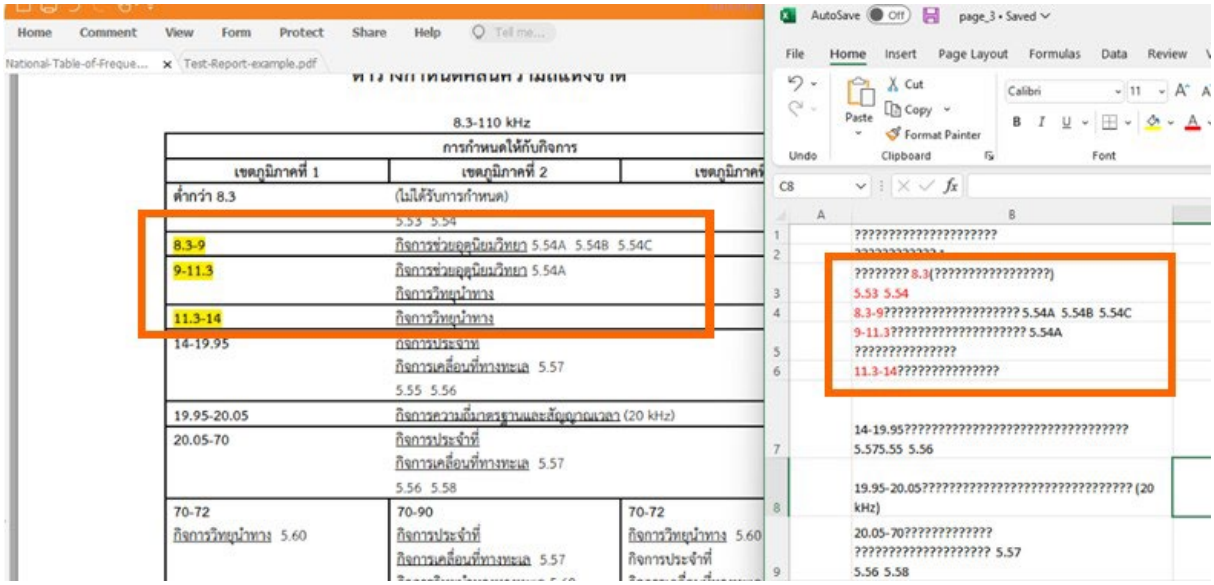
โดยที่ค่าความถูกต้องซึ่งแสดงด้วย F-Measure มีค่าเท่ากับ 99.8%

$$F-measure = \frac{2 \times Recall \times Precision}{Recall + Precision} = \frac{2 \times 0.997 \times 1}{0.997 + 1} = \mathbf{0.998}$$

ทั้งนี้ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (แบบ False Negative) เกิดขึ้นจากการที่ตารางในเอกสารทดสอบลำดับที่ 2 ไม่ใช้เส้นตารางทำให้ปัญญาประดิษฐ์ไม่สามารถตรวจจับขอบเขตของตารางได้

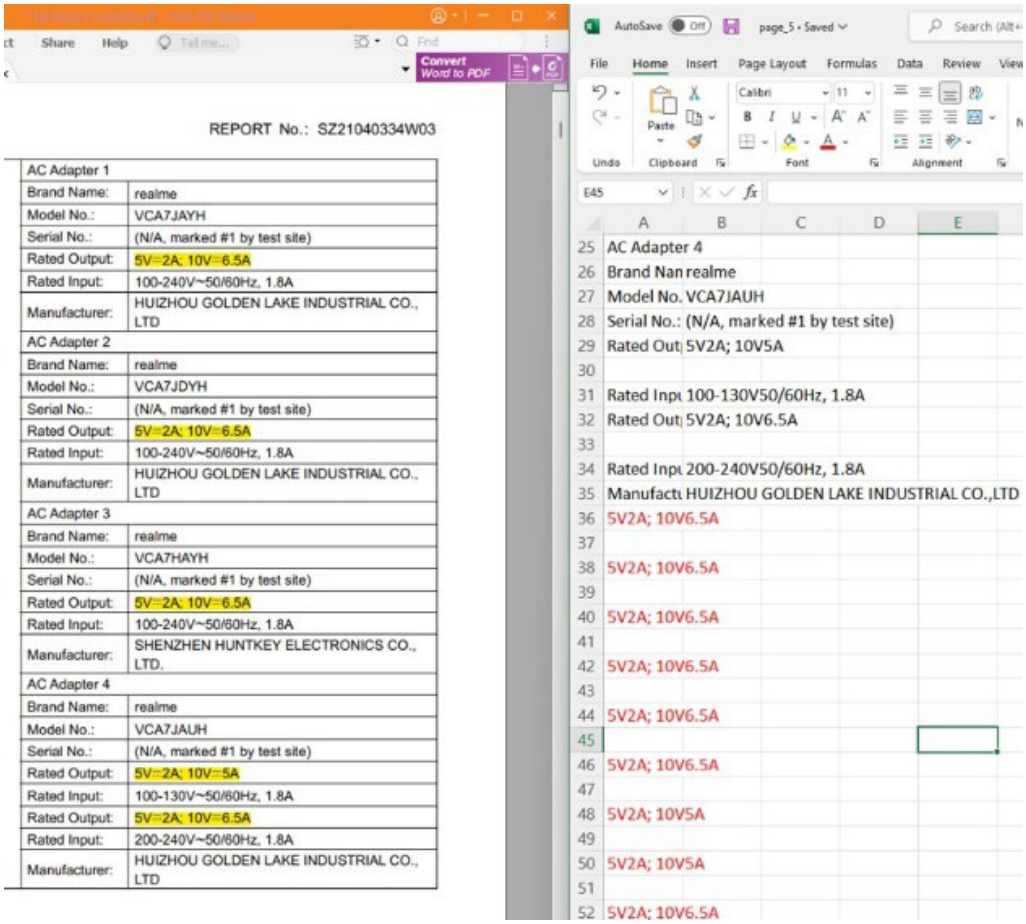
15.4.3 ความถูกต้องของเนื้อหาของตารางที่ถูกดึงออกมา

ถึงแม้จะมีความถูกต้องในการระบุตารางที่ระดับ 99.8% (ตามค่า F-Measure) อัลกอริทึมยังคงมีข้อจำกัดกับการดึงข้อความภาษาไทยเนื่องจากแพกเกจเข้ารหัสภาษา (Encoding Language Package) ยังไม่รองรับดังแสดงในรูปที่ 15-4



รูปที่ 15-4 ข้อผิดพลาดในการดึงข้อความภาษาไทย

สำหรับเอกสาร pdf ที่เป็นภาษาอังกฤษ อัลกอริทึมจะมีข้อจำกัดในการดึงสัญลักษณ์พิเศษเช่น สัญลักษณ์กระแสสลับหรือกระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 15-5 ซึ่งอัลกอริทึมที่ใช้จะแสดงผลออกมาเป็นแถวที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันในไฟล์ชนิด csv ที่สร้างขึ้น



REPORT No.: SZ21040334W03

AC Adapter 1	
Brand Name:	realme
Model No.:	VCA7JAYH
Serial No.:	(N/A, marked #1 by test site)
Rated Output:	5V=2A; 10V=6.5A
Rated Input:	100-240V~50/60Hz, 1.8A
Manufacturer:	HUIZHOU GOLDEN LAKE INDUSTRIAL CO., LTD
AC Adapter 2	
Brand Name:	realme
Model No.:	VCA7JDYH
Serial No.:	(N/A, marked #1 by test site)
Rated Output:	5V=2A; 10V=6.5A
Rated Input:	100-240V~50/60Hz, 1.8A
Manufacturer:	HUIZHOU GOLDEN LAKE INDUSTRIAL CO., LTD
AC Adapter 3	
Brand Name:	realme
Model No.:	VCA7HAYH
Serial No.:	(N/A, marked #1 by test site)
Rated Output:	5V=2A; 10V=6.5A
Rated Input:	100-240V~50/60Hz, 1.8A
Manufacturer:	SHENZHEN HUNTKEY ELECTRONICS CO., LTD.
AC Adapter 4	
Brand Name:	realme
Model No.:	VCA7JAUH
Serial No.:	(N/A, marked #1 by test site)
Rated Output:	5V=2A; 10V=5A
Rated Input:	100-130V~50/60Hz, 1.8A
Rated Output:	5V=2A; 10V=6.5A
Rated Input:	200-240V~50/60Hz, 1.8A
Manufacturer:	HUIZHOU GOLDEN LAKE INDUSTRIAL CO., LTD

รูปที่ 15-5 ข้อผิดพลาดเกี่ยวกับการดึง (Extract) สัญลักษณ์พิเศษ

15.5 การอภิปรายและสรุปผล

ในส่วนของฟังก์ชันการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันที่ดึง (Extract) ข้อมูลตารางออกมาเอกสารเช่น จากรายงานผลการทดสอบอุปกรณ์ ผู้ใช้สามารถอัปโหลดรายงานผลการทดสอบอุปกรณ์เข้าสู่เว็บแอปพลิเคชัน เมื่อประมวลผลเสร็จสิ้นเว็บแอปพลิเคชันจะแสดงข้อมูลทั่วไป (General Information) ของอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบพร้อมทั้งดึงตารางต่าง ๆ ในรายงานผลการทดสอบออกมาในรูปแบบไฟล์ csv เก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลที่บีบอัด (Zipped Folder) ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด (Download) ไปได้

ความถูกต้อง (Accuracy) ของการระบุตารางในเอกสาร วัดด้วย F-Measure อยู่ที่ 99.8% ทั้งนี้อัลกอริทึมยังคงมีข้อจำกัดในการดึงข้อความภาษาไทย และการดึงสัญลักษณ์พิเศษเช่น สัญลักษณ์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ เป็นต้น เนื่องจากระบบยังไม่รองรับภาษาไทย และสัญลักษณ์พิเศษเหล่านี้

บทที่ 16

การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค (The Implementation of Web-Apps for Checking Compliance to Technical Specifications)

16.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features)

ผู้ใช้ (User) สามารถป้อนคำถามที่ต้องการถาม คำ หรือข้อความที่ต้องการค้นหา ระบบค้นหาและตอบคำถามทำงานโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) และอัลกอริทึม (Algorithm) Levenshtein โดยระบบค้นหาและตอบคำถามสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีแม้จะมีความผิดพลาดต่าง ๆ เช่น การสะกดผิด การผิด

16.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps)

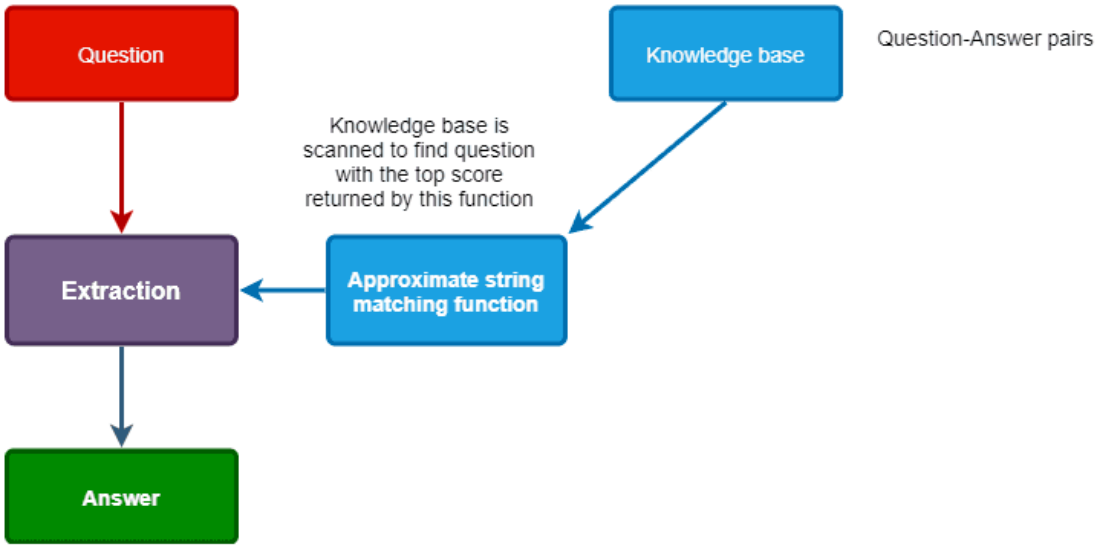
คณะผู้วิจัยเสนอใช้ระบบตอบคำถาม (Question Answering (QA) System) ด้วย Natural Language Processing (NLP) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ แทนที่จะให้รายการของคำตอบที่เป็นไปได้ระบบถามตอบข้างต้นเป็นเทคโนโลยีที่ให้คำตอบที่ถูกต้องและกระชับต่อคำถามที่ถูกถามขึ้น ในสถานการณ์ที่สนใจนี้ระบบถามตอบถูกออกแบบให้ไวต่อความคล้ายคลึงของข้อความ (Text Similarity) และตอบสิ่งที่ถูกถามด้วยภาษาธรรมชาติ (Natural Language) ซึ่งทางเดียวที่เป็นไปได้คือการใช้เทคโนโลยี NLP อย่างเช่น BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) ของ Google

ในการสร้างระบบตอบคำถามเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิคต่าง ๆ นี้ คณะผู้วิจัยใช้ NLP และอัลกอริทึมแมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning Algorithms) สำหรับตอบคำถามในโดเมนเฉพาะ (Domain-Specific) หรือคำถามทั่วไป และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้อง NLP จะใช้ทั้งการอนุมาน (Inference) และความน่าจะเป็น (Probability) ในการคาดเดาคำตอบที่ถูกต้อง และยิ่งผ่านการใช้งานมากขึ้นระบบตอบคำถามนี้ก็จะทำงานได้เป็นอย่างดีมากขึ้น

ในเชิงธุรกิจ ข้อได้เปรียบของการใช้ระบบตอบคำถามก็คือผู้ใช้สามารถใช้ระบบเหล่านี้ได้อย่างง่ายดาย (User-Friendly) ไม่ว่าใครก็สามารถใช้งานได้ ยกตัวอย่างเช่น อัลกอริทึมอัจฉริยะ (Smart Algorithms) สามารถที่จะถูกเทรน (Train) เพื่อทำสิ่งต่าง ๆ เหล่านี้ :

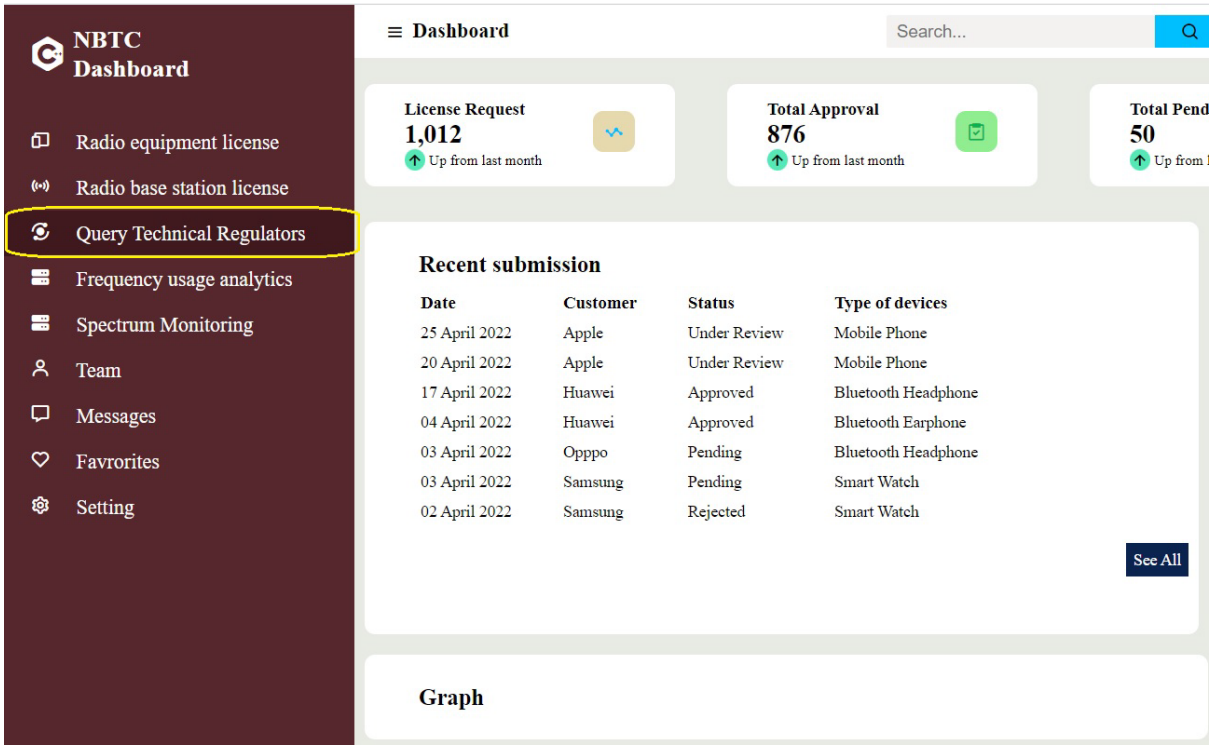
- งานธุรการ (Administration) : หาและปรับข้อมูลให้เข้ากับบริบท (Contextualize Information) เพื่อทำให้กระบวนการค้นหา การปรับเปลี่ยน และการบริหารจัดการเอกสาร (Searching, Modifying, and Managing Documents) เป็นอัตโนมัติ
- งานบริการลูกค้า (Customer Service) : ด้วย Chatbots ที่สามารถสร้างความสัมพันธ์ (Engage) กับลูกค้า รวมถึงระบุกลุ่มลูกค้าในอนาคต (Leads) โดยวิเคราะห์โปรไฟล์ (Profile) ส่วนของข้อความ (Phrases) และข้อมูลอื่น ๆ
- งานการตลาด (Marketing) : โดยการแจ้งเตือน (Alert) ทางออนไลน์ (Online) เกี่ยวกับบริษัทหรือแบรนด์ (Brand)

ระบบตอบคำถามพร้อมด้วยฟังก์ชันจับคู่แบบประมาณสตริง (Approximate String Matching Function) สามารถแสดงเป็นผังงานอย่างง่าย (Simple Flow Chart) ได้ตามรูปที่ 16-1 ในสถานการณ์นี้เราจะใช้ชุดข้อมูลขนาดเล็กของคู่คำถาม – คำตอบ (Question-Answer Pair) ที่อยู่ในรูปแบบไฟล์ csv ในประเด็นที่ผู้ใช้ให้ความสำคัญบ่อย ๆ เช่นเกี่ยวกับการลงทะเบียน การขอใบอนุญาต เป็นต้น ในการใช้งานจริงองค์กรต่าง ๆ จะใช้ฐานข้อมูลที่มีความเฉพาะเจาะจงสูง (Highly Specialized Database) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลตัวอย่าง (Samples) จำนวนมาก



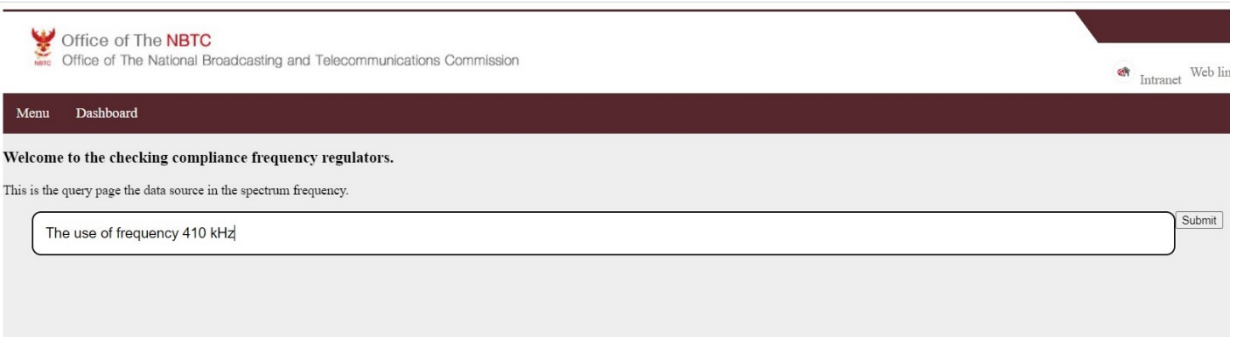
รูปที่ 16-1 ผังงาน (Flow Chart) ของระบบตอบคำถาม (Question Answering (QA) System) ที่ใช้ฟังก์ชันจับคู่แบบประมาณสตริง (Approximate String Matching Function)

ในแดชบอร์ดหลัก (Main Dashboard) ตามที่แสดงในรูปที่ 16-2 ผู้ใช้สามารถใช้งานฟังก์ชันการตรวจสอบนี้ได้โดยเลือกเมนูย่อย (Sub Menu) ที่ชื่อ Query Technical Regulators ซึ่งอยู่ด้านซ้ายของแดชบอร์ด



รูปที่ 16-2 เมนูย่อย (Submenu) Query Technical Regulators ในแดชบอร์ดหลัก (Main Dashboard)

เมื่อเลือก Query Technical Regulators แล้ว ผู้ใช้จะถูกยังไปหน้าที่สามารถป้อนคำถามที่ต้องการลงในกล่องค้นหาได้ดังแสดงในรูปที่ 16-3



รูปที่ 16-3 ผู้ใช้สามารถป้อนคำถามในกล่องค้นหาเพื่อหาคำตอบได้

16.3 การสร้างอัลกอริทึมปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence (AI) Algorithms) และเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค

16.3.1 สิ่งที่ต้องเตรียมเบื้องต้น (Prerequisites)

ในการรัน (Run) โค๊ดตัวอย่างต่อไปนี้ จะต้องใช้ Python 3, Jupyter Lab และโมดูล (Module) Python-Levenshtein โดยเริ่มด้วยการนำไลบรารี่และชุดข้อมูลเข้า (Importing Libraries and Dataset)

```
# this function is used to get printable results
def getResults(questions, fn):
  def getResult(q):
    answer, score, prediction = fn(q)
    return [q, prediction, answer, score]
  return pd.DataFrame(list(map(getResult, questions)), columns=["Q", "Prediction", "A", "Score"])
test_data = [
  “What is the band 285-325 kHz used for?”,
  "What is the frequency 410 kHz used for?",
  " The use of the band 3 155-3 195 kHz?"]
```

ตารางที่ 16-1 ตัวอย่างของฐานข้อมูลชุดคำถามและคำตอบบางส่วนในระบบค้นหา (Query System) ข้อมูลเหล่านี้ถูกดึง (Extract) มาจากตารางจัดสรรคลื่นความถี่แห่งชาติ พ.ศ. 2558 และสามารถเพิ่มฐานข้อมูลได้โดยเพิ่มคำถามและคำตอบจากข้อกำหนดข้อบังคับเกี่ยวกับคลื่นความถี่ (Frequency Regulations)

(a) ภาษาอังกฤษ

ลำดับที่	คำถาม	คำตอบ
1	The use of frequency 410 kHz	designated for radio direction-finding in the maritime radionavigation service.
2	What is the band 285-325 kHz used for?	the maritime radionavigation service may be used to transmit supplementary navigational information using narrow-band techniques, on condition that no harmful interference is caused to radio beacon stations operating in the radionavigation service.

3	Coast stations in the NAVTEX service on the frequencies 490 kHz, 518 kHz and 4 209.5 kHz recommendation	strongly recommended to coordinate the operating characteristics in accordance with the procedures of the International Maritime Organization (IMO) (see Resolution 339 (Rev.WRC-07))
4	The use of the band 3 155-3 195 kHz	Administrations are urged to authorize the use of the band 3 155-3 195 kHz to provide a common worldwide channel for low power wireless hearing aids. Additional channels for these devices may be assigned by administrations in the bands between 3 155 kHz and 3 400 kHz to suit local needs. It should be noted that frequencies in the range 3 000 kHz to 4 000 kHz are suitable for hearing aid devices which are designed to operate over short distances within the induction field.
5	The usage of the band for ISM applications	The use of these frequency bands for ISM applications shall be subject to special authorization by the administration concerned, in agreement with other administrations whose radiocommunication services might be affected. In applying this provision, administrations shall have due regard to the latest relevant ITU-R Recommendations.
6	The usage of the band 21 870-21 924 kHz	the fixed service for provision of services related to aircraft flight safety
7	The use of the bands 149.9-150.05 MHz and 399.9-400.05 MHz	the mobile-satellite service is subject to coordination under No. 9.11A. The mobile-satellite service shall not constrain the development and use of the radionavigation-satellite service in the bands 149.9-150.05 MHz and 399.9- 400.05 MHz

8	The frequency 156.525 MHz	the international distress, safety and calling frequency for the maritime mobile VHF radiotelephone service using digital selective calling (DSC). The conditions for the use of this frequency and the band 156.4875-156.5625 MHz are contained in Articles 31 and 52.
9	The use of the band 450-470 MHz	for use by administrations wishing to implement International Mobile Telecommunications (IMT). See Resolution 224 (Rev.WRC-07)*. This identification does not preclude the use of this band by any application of the services to which it is allocated and does not establish priority in the Radio Regulations.
10	Infrastructure Sharing for Mobile Networks	In order to promote free and fair competition and to bring the quality and efficient service to the consumers, the NBTC has prescribed the Notification Regarding Infrastructure Sharing for Mobile Network B.E. 2556 (2013) which requires thelicensee (Type III and the mobile operators under concessions) to permit other licensees to share its own infrastructure for mobile network. The Infrastructure sharing includes tower and mast, base station area, transmission network between base station controller. In sharing its own network, the licensees must treat other licensees on a fair, reasonable and non-discriminatory basis and the infrastructure sharing charge can be determined among licensees on a fair, reasonable and non-discriminatory basis. In addition, this Notification has also prescribed criteria and procedures for contract negotiation and dispute resolution where an agreement cannot be reached among the licensees.

11	Domestic Mobile Roaming Services	The NBTC has prescribed the Notification Regarding Domestic Mobile Roaming Services to promote free and fair competition and to enable nationwide service to consumers. This Notification requires the licensees (Type III mobile operators and mobile operators under concessions) to allow other mobile operators to roam on its own network except the licensees network is non-interoperable with the raomer network due to different standard and technology employed. Furthermore, the licensee must treat other licensees on a fair, reasonable, and non-discriminatory basis and the domestic mobile roaming charge can be determined among the licensees a fair, reasonable, and non-discriminatory basis as well as must be reasonable comparing with the retail rate paid by its customers. In addition, this Notification has also prescribed criteria and procedures for contract negotiation and dispute resolution where an agreement cannot be reached among the licensees.

12	Measure for the Prevention of Monopoly and the Identification of Market Power in Telecommunication Business	The NBTC implements two types of competition regulation - the ex-ante and ex-post regulation. Ex-post regulation is governed by the NTC Notification on Measures to Prevent Monopolistic and Unfair Competition Practice in Telecommunications Business B.E. 2549 (2006), which aims to ensure free and fair competition among telecommunications service providers and to promote and support competition in and development of the telecommunications industry in an efficient and sustainable manner. The Notification prohibits operators who have been deemed to have Significant Market Power (SMP) from carrying out certain anti-competitive practices such as service subsidization and cross service subsidization for the service or the business under competition. The Notification also institutes a process of inquiry dealing with the licensee who acts or behaves in such manner, as a standard of practice for the NBTC.

13	Current Spectrum Assignment for Telecommunication Services in Thailand	The utilization and the regulation of radio frequencies spectrum in telecommunication business is mandated by the Act on the Organization to Assign Radio Frequency and to Regulate the Broadcasting and Telecommunications Services B.E. 2553 (2010) (the Organization Act) and the Telecommunications Business Act, B.E. 2544 (2001). Section 46 of the Organization Act states that a spectrum license for telecommunications business is the exclusive rights and is not transferable. The license who has been authorized to use spectrum shall carry out the services by himself or herself. Also, business management either in whole or in part shall not be rendered or permitted to other to act on his, her behalf. In addition, Section 47 of the Organization Act stipulates that for any licensee who has been authorized to use spectrum for telecommunications services that has no carried out the business by using such spectrum within period specified by the NBTC, or by using such spectrum in other services not relating to its objectives, or fails to comply with the business operation conditions, or conducts any prohibitive acts as specified in Section 27 (11) or fails to comply with the provision of Section 46, the NBTC shall take action to rectify the situation or issue an order to revoke the spectrum license in whole or in part.

(b) ภาษาไทย

ลำดับที่	คำถาม	คำตอบ
1	การใช้คลื่นความถี่ 410 kHz	กำหนดให้ใช้สำหรับการหาทิศทางโดยคลื่นวิทยุ (Radio Direction-Finding) ในบริการนำทางด้วยคลื่นวิทยุในกิจการทางทะเล (Maritime Radionavigaion Service)
2	คลื่นความถี่ย่าน 285-325 kHz ถูกใช้สำหรับทำอะไร?	บริการนำทางด้วยคลื่นวิทยุในกิจการทางทะเล (Maritime Radionavigaion Service) อาจถูกใช้สำหรับส่งข้อมูลเสริมในการนำทาง (Supplementary Navigational Information) โดยใช้เทคนิคแถบกว้างความถี่แบบแคบ (Narrow-Band Techniques) โดยมีเงื่อนไขว่าจะต้องไม่ก่อให้เกิดการรบกวนที่ร้ายแรง (Harmful Interference) ต่อสถานีส่งสัญญาณนำทาง (Radio Beacon Station) ที่ทำงานในบริการนำทางด้วยคลื่นวิทยุ
3	ข้อแนะนำ (Recommendation) สำหรับสถานีชายฝั่ง (Coast Station) ของบริการ NAVTEX ในย่านความถี่ 490 kHz, 518 kHz และ 4 209.5 kHz	แนะนำเป็นอย่างยิ่งเพื่อประสานงานการทำงานตามขั้นตอนของ International Maritime Organization (IMO) (ดู Resolution 339 (Rev.WRC-07))
4	การใช้คลื่นความถี่ย่าน 3155-3195 kHz	ฝ่ายบริหารจัดการ (Administrations) ควรอนุญาตการใช้งานคลื่นความถี่ย่าน 3155-3195 kHz อย่างเร่งด่วนเพื่อให้มีเกิดการใช้ช่องสัญญาณสำหรับอุปกรณ์ช่วยฟังแบบไร้สายที่สอดคล้องกันทั่วโลก ฝ่ายบริหารจัดการอาจกำหนดคลื่นความถี่เพิ่มสำหรับอุปกรณ์ดังกล่าวในย่าน 3155 kHz ถึง 3400 kHz ตามความต้องการใช้ประเทศ ทั้งนี้พึงระลึกว่าคลื่นความถี่ในย่าน 3000 kHz ถึง 4000 kHz เหมาะกับอุปกรณ์ช่วยฟังแบบไร้สายซึ่งถูกออกแบบมาให้ทำงานในระยะทางสั้น ๆ ภายในระยะของสนามการเหนี่ยวนำ (Induction Field)

5	การใช้งานคลื่นความถี่สำหรับแอปพลิเคชัน ISM	การใช้งานคลื่นความถี่สำหรับแอปพลิเคชัน ISM ควรขึ้นอยู่กับสิ่งที่ฝ่ายบริหารจัดการให้ความสำคัญและสอดคล้องกับการบริหารจัดการอื่น ๆ ของบริการวิทยุคมนาคมที่อาจได้รับผลกระทบ การอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่สำหรับ ISM นี้ควรสอดคล้องกับ ITU-R Recommendations ล่าสุดที่เกี่ยวข้องด้วย
6	การใช้คลื่นความถี่ย่าน 21 870-21 924 kHz	การให้บริการแบบประจำที่ (Fixed Services) สำหรับบริการที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยในการบิน (Aircraft Flight Safety)
7	การใช้คลื่นความถี่ย่าน 149.9-150.05 MHz และ 399.9-400.05 MHz	การให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม (Mobile-Satellite Service) ต้องสอดคล้องกับการประสานงานภายใต้ No. 9.11A การให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ผ่านดาวเทียมจะต้องไม่ไปจำกัดการพัฒนาการใช้งานของบริการนำทางด้วยดาวเทียม (Radionavigation-Satellite Service) ในย่านความถี่ 149.9-150.05 MHz และ 399.9-400.05 MHz
8	คลื่นความถี่ 156.525 MHz	ความถี่นานาชาติสำหรับบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ในกิจการทางทะเลย่าน VHF ที่ใช้ Digital Selective Calling (DSC) เงื่อนไขการใช้งาน (Conditions) คลื่นความถี่นี้และในย่าน 156.4875-156.5625 MHz อยู่ใน Articles 31 และ 52
9	การใช้คลื่นความถี่ย่าน 450-470 MHz	สำหรับฝ่ายบริหารจัดการที่ต้องการใช้สำหรับ International Mobile Telecommunications (IMT) ดู Resolution 224 (Rev.WRC-07) อย่างไรก็ตาม ความต้องการนี้ไม่ได้ไปกันการใช้งานย่านความถี่นี้โดยแอปพลิเคชันอื่น ๆ (Applications) ที่คลื่นความถี่ย่านนี้ถูกกำหนดไว้ และไม่ได้เป็นการกำหนดลำดับความสำคัญ (Priority) ในข้อกำหนดเกี่ยวกับคลื่นความถี่ (Radio Regulations)

10	การแชร์โครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure Sharing) สำหรับโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่	เพื่อส่งเสริมการแข่งขันอย่างเสรีและเป็นธรรม และเพื่อให้เกิดบริการที่มีคุณภาพและประสิทธิภาพต่อผู้ใช้ กสทช. ได้ออกประกาศ (Notification) เกี่ยวกับการแชร์โครงสร้างพื้นฐานสำหรับโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ พ.ศ. 2556 (2013) ที่กำหนดให้ผู้รับใบอนุญาตประเภทที่ 3 และผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ภายใต้สัมปทาน ต้องอนุญาตให้ผู้รับใบอนุญาตรายอื่นสามารถมาใช้โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ของตนได้ โดยการแชร์โครงสร้างพื้นฐานรวมถึง เสาสัญญาณ พื้นที่สถานีฐาน โครงข่ายส่ง (Transmission Network) ระหว่างอุปกรณ์ควบคุมสถานีฐาน (Basestation Controller) ผู้รับใบอนุญาตจะต้องปฏิบัติต่อผู้รับใบอนุญาตรายอื่น อย่างเป็นธรรม สมเหตุสมผล ไม่เลือกปฏิบัติ นอกจากนั้น ประกาศนี้ยังกำหนดวิธีการและขั้นตอนสำหรับการเจรจาสัญญา และการแก้ไขข้อขัดแย้งหากผู้ได้รับใบอนุญาตไม่สามารถตกลงกันได้ไว้ด้วย
11	บริการโรมมิ่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ในประเทศ (Domestic Mobile Roaming Services)	กสทช. ได้ออกประกาศเรื่อง บริการโรมมิ่ง (Roaming) สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ในประเทศ เพื่อส่งเสริมการแข่งขันอย่างเสรีและเป็นธรรม และเพื่อให้เกิดการบริการที่ครอบคลุมทั่วประเทศแก่ผู้ใช้ ประกาศนี้กำหนดให้ผู้รับใบอนุญาตประเภทที่ 3 และผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ภายใต้สัมปทาน ต้องอนุญาตให้ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่รายอื่นโรม (Roam) มาที่โครงข่ายของตนได้ เว้นแต่โครงข่ายของตนนั้นจะไม่สามารถทำงานร่วมกันได้ (Interoperate) กับโครงข่ายของผู้ที่โรมมา (Roamer) เนื่องจากความแตกต่างของมาตรฐานและเทคโนโลยีที่ใช้ นอกจากนั้น ผู้รับใบอนุญาตจะต้องปฏิบัติต่อผู้รับใบอนุญาตรายอื่น อย่างเป็นธรรม สมเหตุสมผล ไม่เลือกปฏิบัติ และการคิดค่าบริการการโรมในประเทศระหว่างผู้ได้รับใบอนุญาตจะต้องเป็นธรรม สมเหตุสมผล ไม่เลือกปฏิบัติ และสมเหตุสมผลเพื่อเทียบกับราคาที่ผู้ใช้บริการต้องจ่าย นอกจากนั้น ประกาศนี้ยังกำหนดวิธีการและขั้นตอนสำหรับการเจรจาสัญญา และการแก้ไขข้อขัดแย้งหากผู้ได้รับใบอนุญาตไม่สามารถตกลงกันได้ไว้ด้วย

12	มาตรการป้องกันการผูกขาด (Monopoly) และการระบุผู้มีอำนาจตลาด (Market Power) ในธุรกิจโทรคมนาคม	กสทช. ใช้กฎระเบียบเกี่ยวกับการแข่งขัน (Competition Regulation) 2 แบบ ได้แก่แบบ Ex-Ante และ Ex-Post กฎระเบียบฯ แบบ Ex-Post ถูกกำหนดโดยประกาศ กทช. เรื่อง มาตรการป้องกันการปฏิบัติอย่างผูกขาดและแข่งขันอย่างไม่เป็นธรรมในธุรกิจโทรคมนาคม พ.ศ.2549 (2006) ซึ่งมุ่งที่จะสร้างการแข่งขันอย่างเสรีและเป็นธรรมในกลุ่มผู้ให้บริการโทรคมนาคม และเพื่อส่งเสริมการแข่งขันและการพัฒนาของอุตสาหกรรมโทรคมนาคมอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน ประกาศนี้ห้ามไม่ให้ผู้ให้บริการที่มีอำนาจตลาดอย่างมีนัยสำคัญ (Significant Market Power) กระทำการที่ขัดขวางการแข่งขัน (Anti-Competitive) เช่น การอุดหนุนบริการหรืออุดหนุนข้ามบริการ (Service Subsidization or Cross Service Subsidization) ในบริการที่อยู่ในการแข่งขัน ประกาศนี้ยังกำหนดขั้นตอนของการสอบถามกับผู้รับใบอนุญาตที่มีพฤติกรรมข้างต้นไว้ให้เป็นขั้นตอนมาตรฐานของ กสทช. ด้วย
13	สถานะปัจจุบันของการจัดสรรคลื่นความถี่ให้กับบริการโทรคมนาคมของประเทศไทย	การใช้งานและกฎระเบียบเกี่ยวกับคลื่นความถี่วิทยุในกิจการโทรคมนาคมถูกกำหนดด้วย พรบ.องค์กรจัดสรรคลื่นความถี่ และควบคุมกิจการกระจายเสียงและโทรคมนาคม พ.ศ. 2553 (2010) (พรบ.องค์กรจัดสรรฯ) และ พรบ.กิจการโทรคมนาคม พ.ศ. 2544 (2001) มาตรา 46 ของ พรบ. องค์กรจัดสรรฯ กำหนดให้ใบอนุญาตใช้คลื่นความถี่ของกิจการโทรคมนาคมเป็นสิทธิเฉพาะ (Eclusive Rights) ไม่สามารถถ่ายโอนได้ ผู้ได้รับอนุญาตฯ จะต้องให้บริการด้วยตนเอง นอกจากนั้นการบริหารจัดการธุรกิจ (Business Management) ไม่ว่าจะทั้งหมดหรือบางส่วนไม่สามารถให้บุคคลอื่นกระทำการแทนได้ นอกจากนั้น มาตรา 47 ของ พรบ. องค์กรจัดสรรฯ ยังกำหนดว่าสำหรับผู้ได้รับใบอนุญาตฯ ที่ไม่ดำเนินธุรกิจภายในระยะเวลาที่ กสทช . กำหนด หรือใช้คลื่นความถี่ในบริการอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับวัตถุประสงค์เดิม หรือไม่สามารถปฏิบัติตามเงื่อนไขการดำเนินการที่กำหนด หรือมีพฤติกรรมที่ต้องห้ามตามมาตรา 27 (11) หรือไม่สามารถปฏิบัติตามข้อกำหนดตามมาตรา 46 กสทช. มีอำนาจที่จะดำเนินการแก้ไข (Rectify) และเพิกถอนใบอนุญาตฯ ทั้งหมดหรือบางส่วนได้

16.3.2 การปรับปรุงระบบตอบคำถามด้วยโมดูล (Module) Levenshtein AI Python

ในระบบตอบคำถามอย่างง่ายที่สุด (QA System in the Simplest Form) ระบบจะสามารถตอบได้เฉพาะคำถามที่มีคู่คำถาม – คำตอบอยู่ในฐานข้อมูลเท่านั้นซึ่งในทางปฏิบัติจะเกิดขึ้นได้ยาก ฟังก์ชันสำหรับดึงเอาคำตอบที่มีในฐานข้อมูลมาใช้แสดงได้ดังนี้ :

```
import re
def getNaiveAnswer(q):
    # regex helps to pass some punctuation signs
    row = data.loc[data['Question'].str.contains(re.sub(r"[^\w'\s)]+", "", q),case=False)]
    if len(row) > 0:
        return row["Answer"].values[0], 1, row["Question"].values[0]
    return "Sorry, I didn't get you.", 0, ""
getResults(test_data, getNaiveAnswer)
```

ตารางที่ 16-2 ตัวอย่างของสถานการณ์ต่าง ๆ เมื่อผู้ใช้ป้อนคำถาม ด้วยความผิดพลาดในการพิมพ์เช่นตามตัวอย่างที่ 2 ระบบจะไม่สามารถจับคู่คำถาม – คำตอบได้ (ได้คะแนน (Score) เป็น 0)

ลำดับที่	คำถามที่ป้อนโดยผู้ใช้	คำถามที่คาดการณ์ (Predict) โดยอัลกอริทึม (Algorithm)	คำตอบ	คะแนน (Score)
1	The use of frequency 410 kHz	The use of frequency 410 kHz	designated for radio direction-finding in the maritime radionavigation service.	1
2	The usa of frequency 410 kHz		Sorry, I didn't get you.	0
3	some city in Finland		Sorry, I didn't get you.	0

จากตัวอย่างในตารางที่ 16-2 แม้ความผิดพลาดเชิงไวยากรณ์ (Grammatical Mistakes) เพียงเล็กน้อยก็สามารถที่จะลดประสิทธิภาพการทำงานของทั้งระบบได้ นอกจากการพิมพ์ผิดแล้วสาเหตุอื่น ๆ เช่น เครื่องหมายวรรคตอน (Punctuation Symbols) ตัวอักษรพิมพ์เล็ก/พิมพ์ใหญ่ ก็จะส่งผลที่คล้ายคลึงกันต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบค้นหา เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบค้นหาข้างต้น ในที่นี้จะใช้ฟังก์ชันจับคู่โดยการประมาณสตริง (Approximate String Matching Function) ด้วยโมเดลปัญญาณประดิษฐ์สำหรับการหาความ

คล้ายคลึงของข้อความ (Text Similarity) ด้วยวิธีการนี้ระบบค้นหาข้อความจะสามารถทำงานกับความผิดพลาดเชิงไวยากรณ์และความแตกต่างเล็ก ๆ น้อย ๆ ในข้อความได้

ฟังก์ชันจับคู่โดยการประมาณสตริงสามารถสร้างขึ้นได้หลายวิธี ในที่นี้จะใช้วิธีที่ใช้ปัญญาประดิษฐ์และการจับคู่จะอ้างอิงความแตกต่าง (Distance) ที่เรียกว่า Levenshtein โดยความแตกต่างระหว่างคำสองคำจะถูกนิยามเป็น จำนวนครั้งที่น้อยที่สุดของการปรับเปลี่ยนตัวอักษร (Minimum Number of Single-Character Edits) เช่น แทรก ลบ หรือแทนที่ ที่จำเป็นต้องทำเพื่อเปลี่ยนจากคำหนึ่งไปเป็นอีกคำหนึ่ง

ด้วยโมดูล Levenshtein Python ซึ่งมีชุดของฟังก์ชันจับคู่โดยการประมาณสตริงแบบต่าง ๆ สามารถเขียนเป็นโค๊ดออกมาได้ดังนี้ :

```
from Levenshtein import ratio
def getApproximateAnswer(q):
    max_score = 0
    answer = ""
    prediction = ""
    for idx, row in data.iterrows():
        score = ratio(row["Question"], q)
        if score >= 0.9: # I'm sure, stop here
            return row["Answer"], score, row["Question"]
        elif score > max_score: # I'm unsure, continue
            max_score = score
            answer = row["Answer"]
            prediction = row["Question"]
    if max_score > 0.8:
        return answer, max_score, prediction
    return "Sorry, I didn't get you.", max_score, prediction
getResults(test_data, getApproximateAnswer)
```

ตารางที่ 16-3 ตัวอย่างของสถานการณ์ต่าง ๆ เมื่อผู้ใช้ป้อนคำถาม ด้วยความผิดพลาดในการพิมพ์เช่นตามตัวอย่างที่ 2 ระบบค้นหาที่ปรับปรุงด้วยการจับคู่ (Matching) แบบ Levenshtein จะสามารถให้คำตอบที่ถูกต้องด้วยโดยคะแนนในการจับคู่ (Matching Score) เท่ากับ 0.94

ลำดับที่	คำถามที่ป้อนโดยผู้ใช้	คำถามที่คาดการณ์ (Predict) โดยอัลกอริทึม (Algorithm)	คำตอบ	คะแนน (Score)
1	The use of frequency 410 kHz	The use of	designated for radio direction-	1

		frequency 410 kHz	finding in the maritime radionavigation service.	
2	The usa of frequency 410 kHz	The use of frequency 410 kHz	designated for radio direction-finding in the maritime radionavigation service.	0.94
4	some city in Finland		Sorry, I didn't get you.	0

จากผลในตารางที่ 16-3 ระบบค้นหาทำงานได้ดีขึ้น สามารถให้คำตอบที่ถูกได้แม้ในคำถามที่ผู้ใช้ป้อนเข้ามาจะมีข้อผิดพลาดเชิงไวยากรณ์เล็กน้อย (ด้วยคะแนนการจับคู่ที่ต่ำกว่า 1.0 เล็กน้อยซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก) ระบบค้นหานี้สามารถทำงานได้ดีขึ้นอีกด้วยการปรับค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) max-score ยกตัวอย่างเช่น

```
from Levenshtein import ratio
def getApproximateAnswer2(q):
    max_score = 0
    answer = ""
    prediction = ""
    for idx, row in data.iterrows():
        score = ratio(row["Question"], q)
        if score >= 0.9: # I'm sure, stop here
            return row["Answer"], score, row["Question"]
        elif score > max_score: # I'm unsure, continue
            max_score = score
            answer = row["Answer"]
            prediction = row["Question"]
    if max_score > 0.3: # threshold is lowered
        return answer, max_score, prediction
    return "Sorry, I didn't get you.", max_score, prediction
getResults(test_data, getApproximateAnswer2)
```

16.4 การประเมินสมรรถนะ (Performance Evaluation)

16.4.1 คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix)

คำนิยามของพารามิเตอร์ (Parameter) ของคอนฟิวชันเมตริกซ์สำหรับการประเมินสมรรถนะของระบบค้นหาคำตอบเป็นดังนี้ :

- True Positive (TP): ระบบค้นหาคำตอบประเมินได้ถูกต้องว่าคำถามของผู้ใช้อยู่ในฐานข้อมูล (ตารางที่ 16-1) และส่งกลับคำตอบได้ถูกต้อง
- True Negative (TN): ระบบค้นหาคำตอบประเมินได้ถูกต้องว่าคำถามของผู้ใช้ไม่อยู่ในฐานข้อมูล (ตารางที่ 16-1) และส่งกลับคำตอบได้ถูกต้อง
- False Positive (FP) (Type 1 Error): ระบบค้นหาคำตอบประเมินคำถามของผู้ใช้อยู่ในฐานข้อมูล (ตารางที่ 16-1) แต่ในความเป็นจริงแล้วคำถามนั้นไม่อยู่ในฐานข้อมูล จึงส่งคำตอบที่ไม่ถูกต้องกลับไป
- False Negative (FN) (Type 2 Error): ระบบค้นหาคำตอบประเมินคำถามของผู้ใช้ไม่อยู่ในฐานข้อมูล (ตารางที่ 16-1) แต่ในความเป็นจริงแล้วคำถามนั้นอยู่ในฐานข้อมูล จึงไม่มีการส่งคำตอบกลับไป ความผิดพลาดในลักษณะนี้อาจเกิดจาก การพิมพ์ผิด การผิดไวยากรณ์ หรือปรับเปลี่ยนข้อความ (Paraphrase) ไปจากข้อความที่เก็บอยู่ในฐานข้อมูลเช่น เป็นคำถามที่เขียนต่างกันแต่มีความหมายเดียวกัน

ในการทดสอบ คณะผู้วิจัยใช้กลุ่มของคำถาม – คำตอบ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 16-1 อย่างไรก็ตามการขยายฐานข้อมูลของระบบตอบคำถามเป็นสิ่งที่ทำได้โดยง่าย การทดสอบ จะทดสอบด้วยคำถามตามตารางที่ 16-1 คำถามที่ถูกปรับเปลี่ยนแต่ความหมายยังเหมือนเดิม คำถามที่ถูกปรับโดยใส่การสะกดผิด ใส่การผิดไวยากรณ์ เข้าไป และดูผลคำตอบที่ได้รับจากระบบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของคอนฟิวชันเมตริกซ์ที่ได้จากการทดสอบสรุปไว้ตามตารางที่ 16-4

ตารางที่ 16-4 คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) แสดงสมรรถนะของระบบตอบคำถามที่ถูกทดสอบโดยรายการคำถามตามตารางที่ 16-1

	ค่าจริง (Actual Value)	
ค่าที่ประเมินโดยอัลกอริทึม (Prediction by Algorithm)	TP = 0.996 (99.6%)	FP = 0.07 (7%)
	FN = 0.08 (8%)	TN = 1 (100%)

16.4.2 การคำนวณค่าความถูกต้อง (Accuracy Calculation)

จากคอนฟิวชันเมตริกซ์ที่ได้ในหัวข้อ 4.1 สามารถนำมาคำนวณหาค่าความถูกต้องของอัลกอริทึมที่ใช้ได้ดังนี้ :

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} = \frac{0.996}{0.996 + 0.07} = 0.993$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{0.996}{0.996 + 0.08} = 0.992$$

โดยที่ค่าความถูกต้องซึ่งแสดงด้วย F-Measure มีค่าเท่ากับ 99.2%

$$F - measure = \frac{2 \times Recall \times Precision}{Recall + Precision} = \frac{2 \times 0.992 \times 0.993}{0.992 + 0.993} = \mathbf{0.992\ (99.2\%)}$$

จะสังเกตุได้ว่าสมรรถนะที่ดีตามที่แสดงด้วย F-Measure สำหรับระบบตอบคำถามส่วนหนึ่งอาจมีสาเหตุมาจากจำนวนคู่คำถาม – คำตอบในฐานข้อมูลที่ใช้ที่ยังมีอยู่อย่างจำกัด อย่างไรก็ตาม ฐานข้อมูลที่ใช้นี้ก็สามารถแสดงประสิทธิภาพของระบบตอบคำถามที่ใช้ปัญญาประดิษฐ์และอัลกอริทึม Levenshtein ได้เป็นอย่างดี

16.5 การอภิปรายและสรุปผล

ในส่วนของฟังก์ชันการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันที่ตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิคโดยใช้ระบบถามตอบ ผู้ใช้สามารถป้อนคำถามที่ต้องการถาม คำ หรือข้อความที่ต้องการค้นหา ด้วยปัญญาประดิษฐ์ และอัลกอริทึม Levenshtein ระบบค้นหาและตอบคำถามสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีแม้จะมีความผิดพลาดต่าง ๆ เช่น การสะกดผิด การผิดไวยากรณ์ หรือความหลากหลายของวิธีเขียนคำถามหรือข้อความที่ป้อนเข้าสู่ระบบ โดยที่ความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบถามตอบเมื่อวัดด้วย F-Measure อยู่ในระดับสูงที่ 99.2%

บทที่ 17

การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (The Implementation of Web-Apps for Analyzing Spectrum Usage)

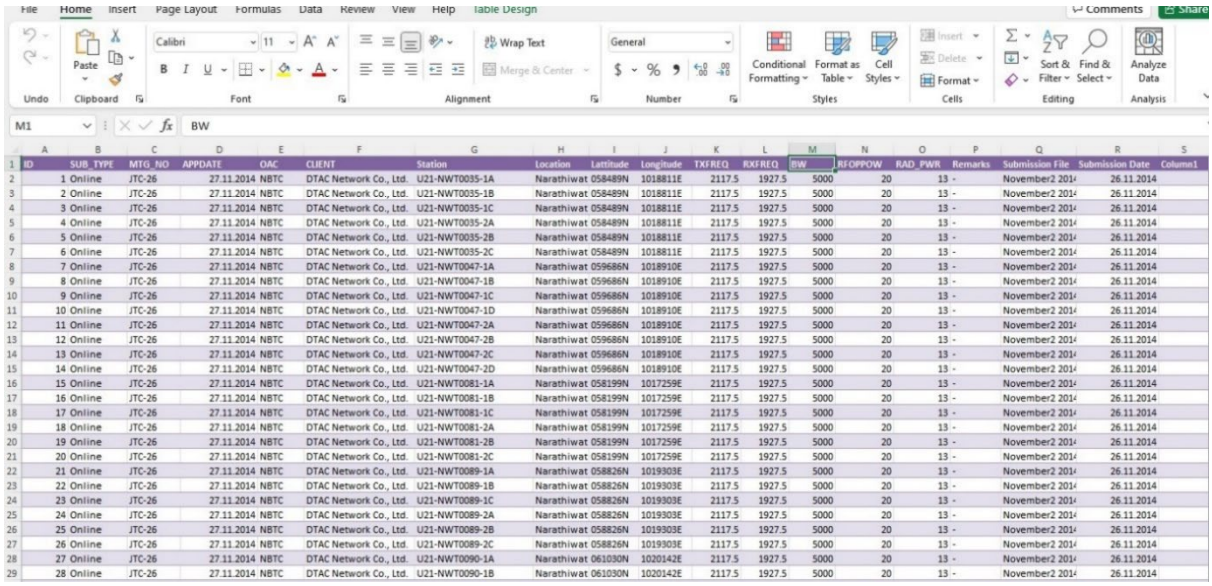
17.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features)

ผู้ใช้ (Users) สามารถใช้แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning) วิเคราะห์การแจกแจง (Distribution) และวิเคราะห์หาปัจจัยสำคัญ (Feature Importance Analysis) ที่มีผลต่อข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ที่สนใจได้ โดยโมเดล (Model) ที่สามารถใช้สำหรับการวิเคราะห์หาปัจจัยสำคัญได้แก่ Linear Regression, Random Forest Regression และ Random Forest Classification การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ จะช่วยให้ผู้รับผิดชอบการบริหารจัดการคลื่นความถี่สามารถติดตามแนวโน้ม การแจกแจงความถี่ (Frequency Distribution) ของการใช้คลื่นความถี่ในแง่มุมต่าง ๆ เช่น ในเชิงพื้นที่ หรือในเชิงผู้ได้รับใบอนุญาตแต่ละรายเป็นต้น ซึ่งแนวโน้มเหล่านี้สามารถนำไปคาดการณ์ปริมาณการใช้คลื่นความถี่ในอนาคตในแง่มุมที่สนใจ ได้ นอกจากนั้น การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ยังสามารถช่วยระบุปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่สนใจเช่น ความสัมพันธ์ระหว่างแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) กับย่านความถี่ที่ถูกใช้งานเป็นต้นได้ การวิเคราะห์เหล่านี้จะช่วยให้ผู้รับผิดชอบการบริหารจัดการคลื่นความถี่สามารถระบุปัจจัยที่มีความสำคัญ และการกระจายตัว รวมถึงแนวโน้มของการใช้คลื่นความถี่ที่สนใจได้อย่างรวดเร็ว และแสดงออกมาเป็นภาพ (Visualization) เพื่อการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพได้

17.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps)

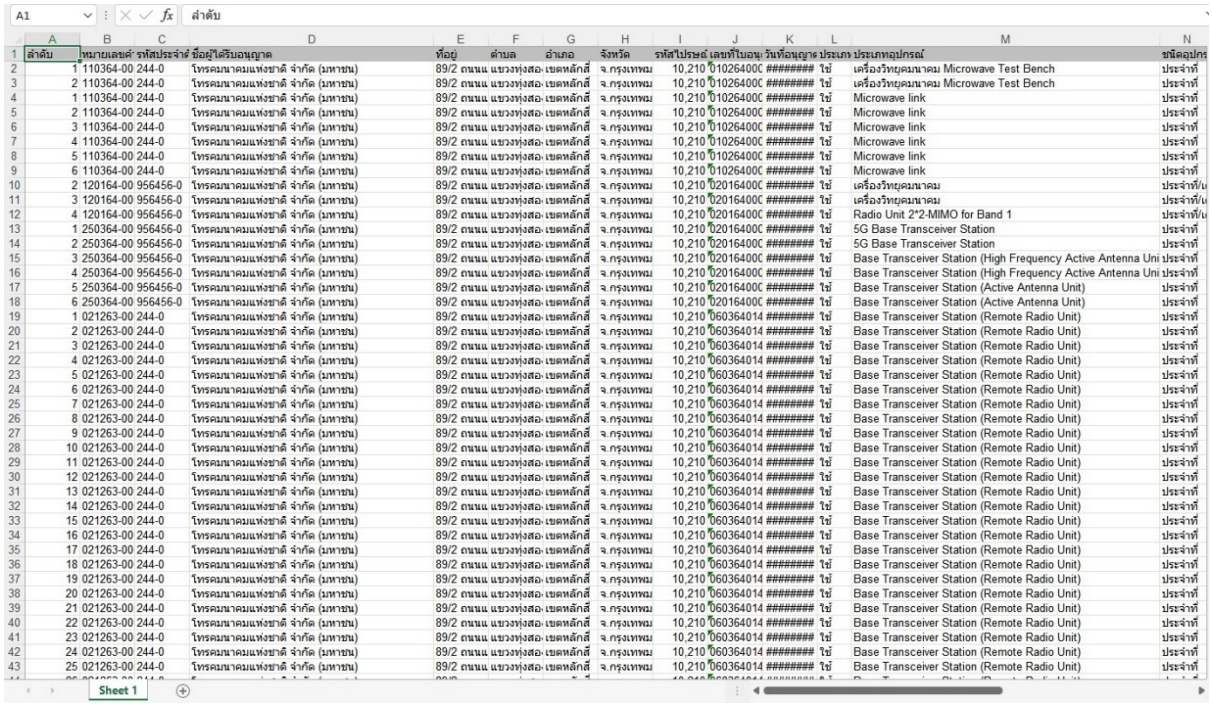
17.2.1 การเตรียม (Preprocessing) ชุดข้อมูลประเภท csv สำหรับการวิเคราะห์

ในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยใช้แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่จากข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ชายแดน (มาเลเซีย ลาว และกัมพูชา) และข้อมูลการใช้คลื่นความถี่สำหรับให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยบริษัท โทรคมนาคมแห่งชาติ เอไอเอส ทรู และดีแทค (ซึ่งเป็นข้อมูลในรูปแบบไฟล์ excel ที่ได้รับจากสำนักงาน กสทช.) ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์จะเป็นปริมาณคลื่นความถี่ที่ใช้โดยผู้ให้บริการข้างต้น ในขณะที่ข้อมูลขาเข้า (Input) จะแตกต่างกันไปตามการสื่อสารแต่ละประเภทเช่น ตำแหน่ง องค์กรที่ใช้คลื่นความถี่ ชนิดของอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย ชนิดของสถานีฐาน เป็นต้น รูปที่ 17-1 และ 17-2 แสดงตัวอย่างภาพรวมของข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ที่ใช้ในการสาธิตการวิเคราะห์



ID	SUB_TYPE	MTG_NO	APPDATE	OAC	CLIENT	Station	Location	Lattitude	Longitude	TXFREQ	RXFREQ	BW	RFOPPOW	RAD_PWR	Remarks	Submission File	Submission Date	Column1
1	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-1A	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
2	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-1B	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
3	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-1C	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
4	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-2A	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
5	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-2B	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
6	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-2C	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
7	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-1A	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
8	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-1B	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
9	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-1C	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
10	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-1D	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
11	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-2A	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
12	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-2B	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
13	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-2C	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
14	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-2D	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
15	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-1A	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
16	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-1B	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
17	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-1C	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
18	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-2A	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
19	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-2B	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
20	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-2C	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
21	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-1A	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
22	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-1B	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
23	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-1C	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
24	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-2A	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
25	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-2B	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
26	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-2C	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
27	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0090-1A	Narathiwat	061030N	1020142E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	
28	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0090-1B	Narathiwat	061030N	1020142E	2117.5	1927.5	5000	20	13	-	November2 2014	26.11.2014	

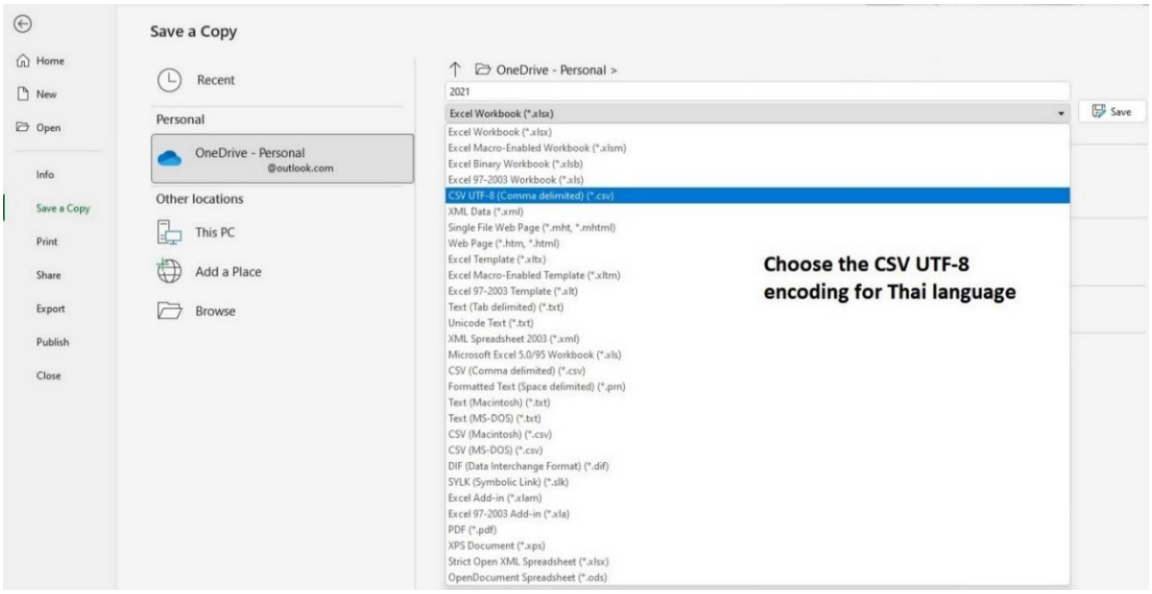
รูปที่ 17-1 ตัวอย่างข้อมูลความถี่ชายแดนไทย – มาเลเซีย ช่วงปี ค.ศ. 2014 ถึง 2019



ลำดับ	หมายเลขสถานี	รหัสประจำตัวผู้ได้รับอนุญาต	ชื่อผู้ได้รับอนุญาต	ที่อยู่	ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	รหัสไปรษณีย์	เลขที่ใบอนุญาต	วันที่อนุญาต	ประเภท	ประเภทอุปกรณ์	ชนิดอุปกร
1	110364-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	01026400(	########	ใช้	เครื่องวิทยุคมนาคม Microwave Test Bench	ประจำที่
2	110364-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	01026400(	########	ใช้	เครื่องวิทยุคมนาคม Microwave Test Bench	ประจำที่
1	110364-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	01026400(	########	ใช้	Microwave link	ประจำที่
2	110364-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	01026400(	########	ใช้	Microwave link	ประจำที่
3	110364-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	01026400(	########	ใช้	Microwave link	ประจำที่
4	110364-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	01026400(	########	ใช้	Microwave link	ประจำที่
5	110364-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	01026400(	########	ใช้	Microwave link	ประจำที่
6	110364-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	01026400(	########	ใช้	Microwave link	ประจำที่
2	120164-00	956456-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	02016400(	########	ใช้	เครื่องวิทยุคมนาคม	ประจำที่/
3	120164-00	956456-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	02016400(	########	ใช้	เครื่องวิทยุคมนาคม	ประจำที่/
4	120164-00	956456-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	02016400(	########	ใช้	Radio Unit 2*2-MIMO for Band 1	ประจำที่/
1	250364-00	956456-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	02016400(	########	ใช้	5G Base Transceiver Station	ประจำที่
2	250364-00	956456-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	02016400(	########	ใช้	5G Base Transceiver Station	ประจำที่
3	250364-00	956456-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	02016400(	########	ใช้	Base Transceiver Station (High Frequency Active Antenna Uni	ประจำที่
4	250364-00	956456-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	02016400(	########	ใช้	Base Transceiver Station (High Frequency Active Antenna Uni	ประจำที่
5	250364-00	956456-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	02016400(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Active Antenna Unit)	ประจำที่
6	250364-00	956456-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	02016400(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Active Antenna Unit)	ประจำที่
1	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
2	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
3	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
4	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
5	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
6	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
7	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
8	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
9	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
10	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
11	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
12	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
13	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
14	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
15	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
16	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
17	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
18	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
19	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
20	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
21	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
22	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
23	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
24	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่
25	021263-00	244-0	โทรคมนาคมแห่งชาติ จำกัด (มหาชน)	89/2 ถนน	แขวงทุ่งสอ	เขตหลักสี่	จ.กรุงเทพ	10,210	06036401(	########	ใช้	Base Transceiver Station (Remote Radio Unit)	ประจำที่

รูปที่ 17-2 ตัวอย่างข้อมูลรายการ (List) อุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ได้รับอนุญาตจากสำนักงาน กสทช. ในปี ค.ศ. 2021

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลในสภาพแวดล้อมไพธอน (Python Environment) ได้ ไฟล์ข้อมูลจะต้องอยู่ในรูปแบบไฟล์ csv ในกรณีที่ไฟล์ข้อมูลเป็นภาษาไทยในรูปแบบไฟล์ excel ดังแสดงตามรูปที่ 17-2 จะต้องแปลงไฟล์ตามตัวเลือกที่แสดงตามรูปที่ 17-3



รูปที่ 17-3 การแปลงไฟล์จากรูปแบบ excel เป็น csv โดยการเข้ารหัส (Encoding) แบบ UFT-8 สำหรับภาษาไทย

17.2.2 การวิเคราะห์ (Analysis) Feature Importance ของข้อมูลการใช้คลื่นความถี่

เนื่องจากผลลัพธ์ที่ต้องการของการวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่คือปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความต้องการใช้คลื่นความถี่ของบประเทศไทย การวิเคราะห์ Feature Importance โดยใช้โมเดลแมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning Model) จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการวิเคราะห์นี้

ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient) ที่ได้จากอัลกอริทึมแมชชีนเลิร์นนิ่งเชิงเส้น (Linear Machine Learning Algorithm) ซึ่งการทำนายค่า (Prediction) เป็นผลรวมถ่วงน้ำหนัก (Weighted Sum) ของพารามิเตอร์ขาเข้า (Input Parameter) สามารถใช้เป็นค่าที่แสดงความสำคัญของปัจจัย (Feature Importance) ได้ ตัวอย่างของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้ได้แก่ Linear Regression, Logistic Regression, Ridge Regression และ Elastic Net อัลกอริทึมที่กล่าวถึงข้างต้นนี้จะหาเซ็ต (Set) ของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทำนายค่าด้วยผลรวมถ่วงน้ำหนักของพารามิเตอร์ขาเข้า ค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้สามารถใช้เป็นค่าคะแนนแสดงความสำคัญของปัจจัย (Feature Importance Score) อย่างคร่าวได้

- Linear Regression Feature Importance : เราสามารถใช้โมเดล LinearRegression กับชุดข้อมูลและดึงข้อมูล *coeff* ซึ่งเก็บค่าสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ขาเข้าแต่ละตัวที่ได้จากการทำ Regression ค่าสัมประสิทธิ์นี้สามารถใช้เป็นค่าคะแนนแสดงความสำคัญอย่างคร่าวของพารามิเตอร์แต่ละตัวได้ ทั้งนี้ การวิเคราะห์นี้อยู่บนสมมุติฐานที่ว่าพารามิเตอร์ขาเข้าทั้งหมดอยู่บนสเกล (Scale) เดียวกันหรือได้รับการปรับสเกลก่อนทำการวิเคราะห์แล้ว
- Random Forest Feature Importance : อัลกอริทึม Random Forest สามารถใช้หา Feature Importance ใน scikit-learn ได้ โดยใช้คลาส (Class) *RandomForestRegressor* และ *RandomForestClassifier* เมื่อฟิต (Fit) ข้อมูลแล้ว โมเดลจะให้ค่า *feature_importances* ซึ่งแสดงค่าคะแนนความสำคัญเชิงเปรียบเทียบ (Relative Importance Score) ของพารามิเตอร์แต่ละตัวได้ วิธีการวิเคราะห์นี้สามารถใช้ได้กับอัลกอริทึม Bagging and Extra Trees เท่านั้น

17.2.3 การกำหนดข้อมูลขาออกและข้อมูลขาเข้า (Output and Input) จากชุดข้อมูลการใช้คลื่นความถี่

ตารางที่ 17-1 แสดงข้อมูลขาออกและข้อมูลขาเข้า (Output and Input) ก่อนการวิเคราะห์ Feature Importance สำหรับไฟล์ csv จากรูปที่ 17-1 ซึ่งแสดงการใช้งานคลื่นความถี่บริเวณชายแดนไทย – มาเลเซีย ในความเป็นจริงข้อมูลขาออกที่เป็นไปได้มี 2 ค่าดังแสดงในตารางที่ 17-1 ในที่นี้คณะผู้วิจัยจะเลือกเพียง 1 ตัวแปรคือ "ความถี่ส่งต่ำสุด (Minimum Transmission Frequency)" เป็นข้อมูลขาออกหลักในการวิเคราะห์ โดยมีข้อมูลขาเข้าสำหรับการวิเคราะห์ Feature Importance ทั้งสิ้น 6 ตัวแปร (ข้อมูลขาเข้าอื่น ๆ เช่น Latitude/Longitude มีความหมายเดียวกันกับข้อมูลขาเข้า Location จึงถูกละไว้)

ตัวแปรอิสระ (Independence Variables: Input)	ข้อมูลขาออก (Output) ของการวิเคราะห์ (Analysis) Feature Importance
CLIENT	
Station	
Location	
BW (Bandwidth)	
RFOPPOW (RF Operation Power)	
RAD_PWR (Radial Power)	
	TXFREQ (Transmission Frequency)
	RXFREQ (Receiver Frequency)

ตารางที่ 17-2 แสดงข้อมูลขาออกและข้อมูลขาเข้า (Output and Input) ก่อนการวิเคราะห์ Feature Importance สำหรับไฟล์ csv จากรูปที่ 17-2 ข้อมูลขาออกที่เป็นไปได้มี 4 ค่าดังแสดงในตารางที่ 17-2 ในที่นี้คณะผู้วิจัยจะเลือกเพียง 1 ตัวแปรคือ "ความถี่ส่งต่ำสุด (Minimum Transmission Frequency)" เป็นข้อมูลขาออกหลักในการวิเคราะห์ โดยมีข้อมูลขาเข้าสำหรับการวิเคราะห์ Feature Importance ทั้งสิ้น 9 ตัวแปร

ตัวแปรอิสระ (Independence Variables: Input)	ข้อมูลขาออก (Output) ของการวิเคราะห์ (Analysis) Feature Importance
ชื่อผู้ได้รับอนุญาต (Licensee Name)	
รหัสไปรษณีย์ (Zip Code)	
วันที่อนุญาต (Allowed Date)	
ประเภทใบอนุญาต (License Type)	
ประเภทอุปกรณ์ (Electronics Type)	
ชนิดอุปกรณ์ (Device Type)	
ตราอักษร (Manufacturer)	
แบบรุ่น (Model)	
กำลังส่ง หน่วยกำลังส่ง (Transmit Power in Watt)	
	ความถี่ส่งต่ำสุด (Minimum transmission frequency)
	ความถี่ส่งสูงสุด (Maximum transmission frequency)
	ความถี่รับต่ำสุด (lowest receiving frequency)
	ความถี่รับสูงสุด (maximum receiving frequency)

17.3 การเขียนโค๊ด (Code Implementation) ในกรอบการทำงาน (Framework) Flask และการออกแบบเว็บแอปพลิเคชัน

17.3.1 การส่งออก (Import) แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning) sklearn และการโหลด (Load) ชุดข้อมูล

```
# Import libraries
import pandas as pd
import numpy as np
from matplotlib import pyplot
from sklearn.linear_model import LinearRegression, LogisticRegression
# Import the dataset
# We load the dataset of frequency license of NTBC in 2021
data = pd.read_csv('Thailand-Malaysia.csv')
data.dropna(inplace = True)
```

การสาธิตการวิเคราะห์นี้ใช้ชุดข้อมูลการใช้คลื่นความถี่บริเวณชายแดนไทย – มาเลเซียตามที่แสดงในตารางที่ 17-1 โดยข้อมูลขาเข้าและข้อมูลขาออกถูกกำหนดตามที่แสดงด้านล่าง

```
# Define inputs
x = data[['CLIENT','Station','Location','BW','RFOPPOW','RAD_PWR']]
# Define the output
y = data['TXFREQ']
```

17.3.2 ฟังก์ชัน (Function) สำหรับ Feature Importance ในโมเดล Linear Regression

ในการทำโมเดล Regression จะสมมุติให้พารามิเตอร์ขาออก y ซึ่งได้แก่ความถี่ส่ง (Transmission Frequency) เท่ากับผลรวมเชิงเส้นแบบถ่วงน้ำหนัก (Linear Weighted Sum) ของพารามิเตอร์ขาเข้าซึ่งได้แก่ Client, Station, Location, Bandwidth (BW), RF Operation Power (RFOPPOWER) และ Radial Power (RAD_POWER)

```
# Define the model linear regression
model = LinearRegression()
# fit the model
model.fit(x,y)
```

17.3.3 ฟังก์ชัน (Function) สำหรับ Feature Importance ในโมเดล Random Forest Regression

ในการทำโมเดล Random Forest Regression จะสมมุติให้พารามิเตอร์ขาออก y ซึ่งได้แก่ความถี่ส่ง เท่ากับสมการต่าง ๆ ซึ่งแต่ละสมการเป็นผลรวมเชิงเส้นแบบถ่วงน้ำหนัก (Linear Weighted Sum) ของพารามิเตอร์ขาเข้า ซึ่งได้แก่ Client, Station, Location, Bandwidth (BW), RF Operation Power (RFOPPOWER) และ Radial Power (RAD_POWER)

```
# define the model
model1 = RandomForestRegressor()
# fit the model
model1.fit(x, y)
```

17.3.4 ฟังก์ชัน (Function) สำหรับ Feature Importance ในโมเดล Random Forest Classification

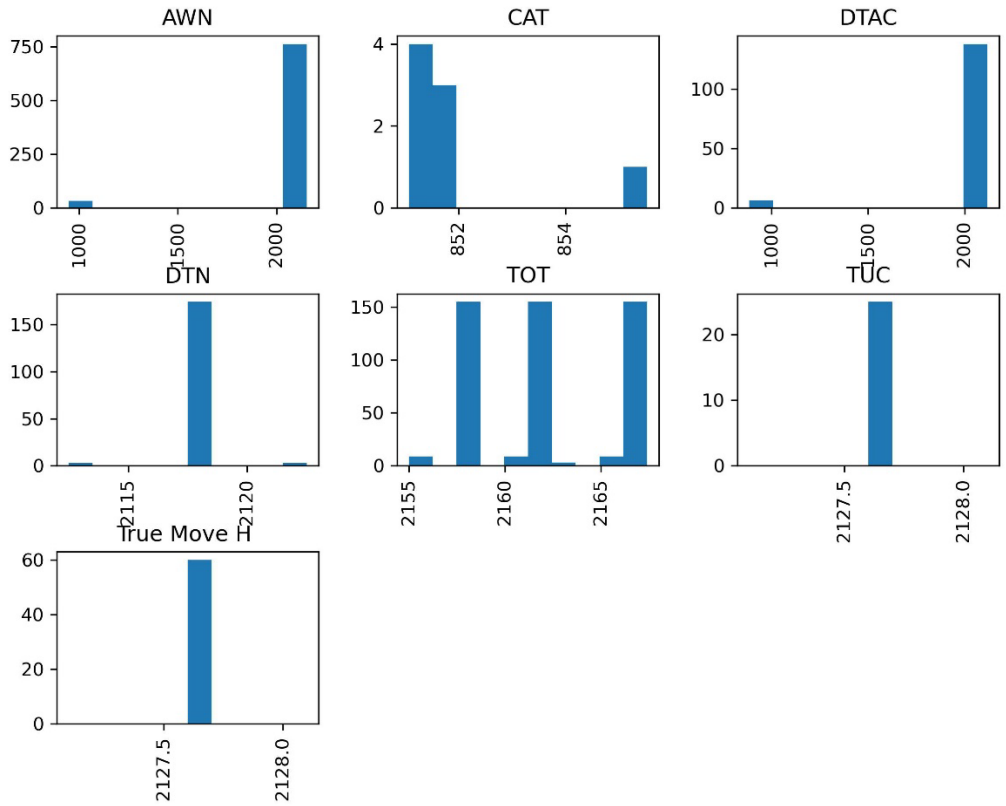
ในการทำโมเดล Random Forest Classification จะสมมุติให้พารามิเตอร์ขาออก y ซึ่งได้แก่ความถี่ส่ง ถูกจัดกลุ่มตามพารามิเตอร์ขาเข้าซึ่งได้แก่ Client, Station, Location, Bandwidth (BW), RF Operation Power (RFOPPOWER) และ Radial Power (RAD_POWER)

```
# define the model
model2 = RandomForestClassifier()
# fit the model
model2.fit(x, y)
```

17.4 ผลการวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่

17.4.1 การแจกแจง (Distribution) ของการใช้คลื่นความถี่บริเวณชายแดนไทย – มาเลเซีย ตามผู้ใช้งาน (Client)

```
data['TXFREQ'].hist(by=data['CLIENT'])
plt.savefig('test.jpg')
```



รูปที่ 17-4 ตัวอย่างการแจกแจง (Distribution) ของการใช้คลื่นความถี่บริเวณชายแดนไทย – มาเลเซีย ตามผู้ใช้งาน (Client) (ซึ่งได้แก่ AWN, CAT, DTAC. DTN. TOT. TUC และ True Move H) แกน x แสดงย่านความถี่ และแกน y แสดงจำนวนใบอนุญาตใช้คลื่นความถี่จากสำนักงาน กสทช.

17.4.2 ผลการวิเคราะห์ Feature Importance ของข้อมูลการใช้คลื่นความถี่บริเวณชายแดนไทย – มาเลเซีย

17.4.2.1 ผลการวิเคราะห์ Feature Importance จากโมเดล Linear Regression

```
# get importance
importance = model.coef_
# summarize feature importance
for i,v in enumerate(importance):
        print('Feature: %0d, Score: %.5f' % (i,v))
```

ผลการทำ Linear Regression ได้แก่ :

- Feature: 0 (CLIENT), Score: -0.84218
- Feature: 1 (Station), Score: 0.01571
- Feature: 2 (Location), Score: -0.25359

- Feature: 3 (BW), Score: 11.72885
- Feature: 4 (RFOPPOW), Score: -1.46681
- Feature: 5 (RAD_PWR), Score: 0.27035

จากผลข้างต้น สามารถอนุมาน (Infer) ได้ว่าปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดความถี่ส่งในบริเวณชายแดนไทย – มาเลเซีย ได้แก่ Bandwidth (แถบกว้างความถี่ของสัญญาณ) และกำลังส่ง (RF Operation Power) ของสถานีวิทยุ

ในโมเดล Linear Regression ค่า R-Squared (Rsquared) จะแสดงถึงความสามารถในการอธิบายหรือทำนายค่าพารามิเตอร์ขาออก y ของโมเดล Linear Regression ที่ได้ ค่าที่ดีที่สุดของ R-Squared คือ 1.0 และอาจมีค่าติดลบได้หากโมเดลที่เลือกใช้ไม่สอดคล้องไปกับแนวโน้มของข้อมูล (Data Trend) ซึ่งในตัวอย่างโมเดล Linear Regression ข้างต้นมีค่า Rsquared เท่ากับ 0.249 (หมายถึง 24.9% ของการเปลี่ยนแปลงของ พารามิเตอร์ขาออก y ที่พิจารณาสามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ขาเข้าที่ใช้)

```
Rsquared = model.score(x,y)
print(Rsquared)
```

Rsquared = 0.249.

17.4.2.2 ผลการวิเคราะห์ Feature Importance จากโมเดล Random Forest Regression

```
# get importance
importance1 = model1.feature_importances_
# summarize feature importance
for i,v in enumerate(importance1):
        print('Feature: %0d, Score: %.5f' % (i,v))
```

ผลการทำ Random Forest Regression ได้แก่ :

- Feature: 0 (CLIENT), Score: 0.41770
- Feature: 1 (Station), Score: 0.19289
- Feature: 2 (Location), Score: 0.31045
- Feature: 3 (BW), Score: 0.01904
- Feature: 4 (RFOPPOW), Score: 0.01423
- Feature: 5 (RAD_PWR), Score: 0.04569

จากผลข้างต้น สามารถอนุมานได้ว่า ปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดความถี่ส่งในบริเวณชายแดนไทย – มาเลเซีย ได้แก่ Client (ผู้ใช้เช่น AIS, DTAC, True), Station และ Location (ตำแหน่ง) ของสถานีวิทยุ โดยมีค่า Rsquared เท่ากับ 0.96

```
Rsquared = model1.score(x,y)
print(Rsquared)
```

Rsquared = 0.96.

17.4.2.3 ผลการวิเคราะห์ Feature Importance จากโมเดล Random Forest Classification

```
# get importance
Importance2 = model2.feature_importances_
# summarize feature importance
for i,v in enumerate(importance2):
        print('Feature: %0d, Score: %.5f' % (i,v))
```

ผลการทำ Random Forest Classification ได้แก่ :

- Feature: 0 (CLIENT), Score: 0.26161
- Feature: 1 (Station), Score: 0.45668
- Feature: 2 (Location), Score: 0.17085
- Feature: 3 (BW), Score: 0.00433
- Feature: 4 (RFOPPOW), Score: 0.01246
- Feature: 5 (RAD_PWR), Score: 0.0907

จากผลข้างต้น สามารถอนุมานได้ว่า ปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องกับการกำหนดความถี่ส่งในบริเวณชายแดนไทย – มาเลเซีย ได้แก่ Client (ผู้ใช้เช่น AIS, DTAC, True), Station และ Location (ตำแหน่ง) ของสถานีวิทยุ โดยมีค่า Rsquared เท่ากับ 0.56

```
Rsquared = model2.score(x,y)
print(Rsquared)
```

Rsquared = 0.56.

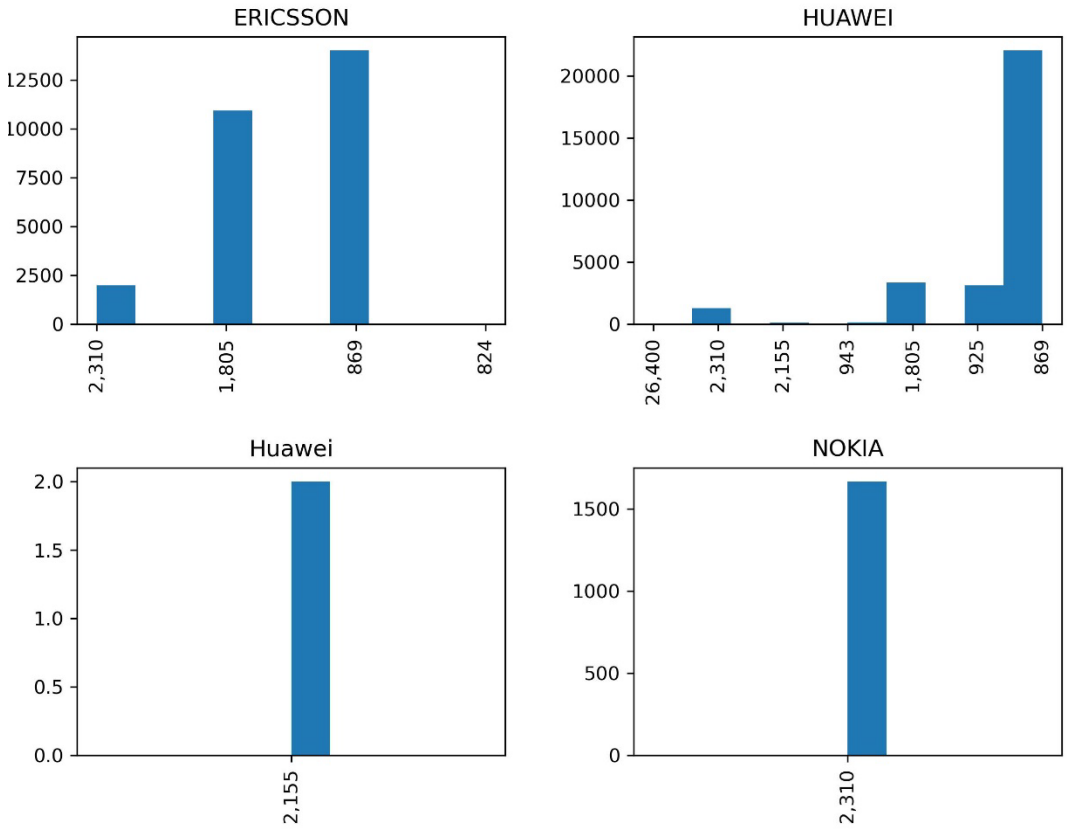
17.4.3 การแจกแจง (Distribution) ของการใช้คลื่นความถี่แบ่งตามบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์สถานีฐาน (Base Station Manufacturer)

ในที่นี้จะใช้ชุดข้อมูลใบอนุญาตฯ (สถานีฐาน) จากปี พ.ศ. 2564 ที่ได้รับจากสำนักงาน กสทช. :

```
# We load the dataset of frequency license of NBTC in 2021
data = pd.read_csv('2021.csv')
data.dropna(inplace = True)
# Define inputs
x = data[['รหัสไปรษณีย์','ประเภทใบอนุญาต','ประเภทอุปกรณ์','ชนิดอุปกรณ์']]

# Define the output
y = data['ความถี่สูงสุด']

x = x.astype('category')
```

```
y = y.astype('category')

data['ความถี่สงต่ำสุด'].hist(by=data['ตราอักษร'])
plt.savefig('test-demand.jpg')
```

การแจกแจงของการใช้คลื่นความถี่แสดงได้ดังรูปที่ 17-5 :



รูปที่ 17-5 ตัวอย่างของการแจกแจง (Distribution) ของการใช้คลื่นความถี่แบ่งตามผู้ผลิตอุปกรณ์สถานีฐาน (Base Station Manufacturer) แกน x แสดงค่าย่านความถี่ และแกน y แสดงจำนวนใบอนุญาตฯ จากสำนักงาน กสทช.

17.5 การอภิปรายและสรุปผล

ตารางที่ 17-3 สรุปสมรรถนะ (Performance) ของโมเดลต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ Feature Importance จากตัวอย่างในหัวข้อ 4 จากตัวอย่างข้างต้นพบว่าโมเดลที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาออกและพารามิเตอร์ขาเข้าของชุดข้อมูลที่ใช้ได้ดีที่สุดได้แก่ โมเดล Random Forest Regression โดยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ขาออกได้ถึง 96% โดยใช้พารามิเตอร์ขาเข้าที่พิจารณา โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพารามิเตอร์ขาออก (ความถี่ส่ง) ได้แก่ Client (ผู้ใช้เช่น AIS, DTAC, True), Station และ Location (ตำแหน่ง) ของสถานีวิทยุ

ตารางที่ 17-3 สรุปสมรรถนะ (Performance) ของการวิเคราะห์ Feature Importance ของข้อมูลการใช้ความถี่บริเวณชายแดนไทย – มาเลเซีย

โมเดล (Model)	Feature Importance	R-Squared
Random Forest Regression	Client, Station, Location	0.96 (96%)
Random Forest Classification	Client, Station, Location	0.56 (56%)
Linear Regression	Client, Bandwidth, RFOPPOW	0.25 (25%)

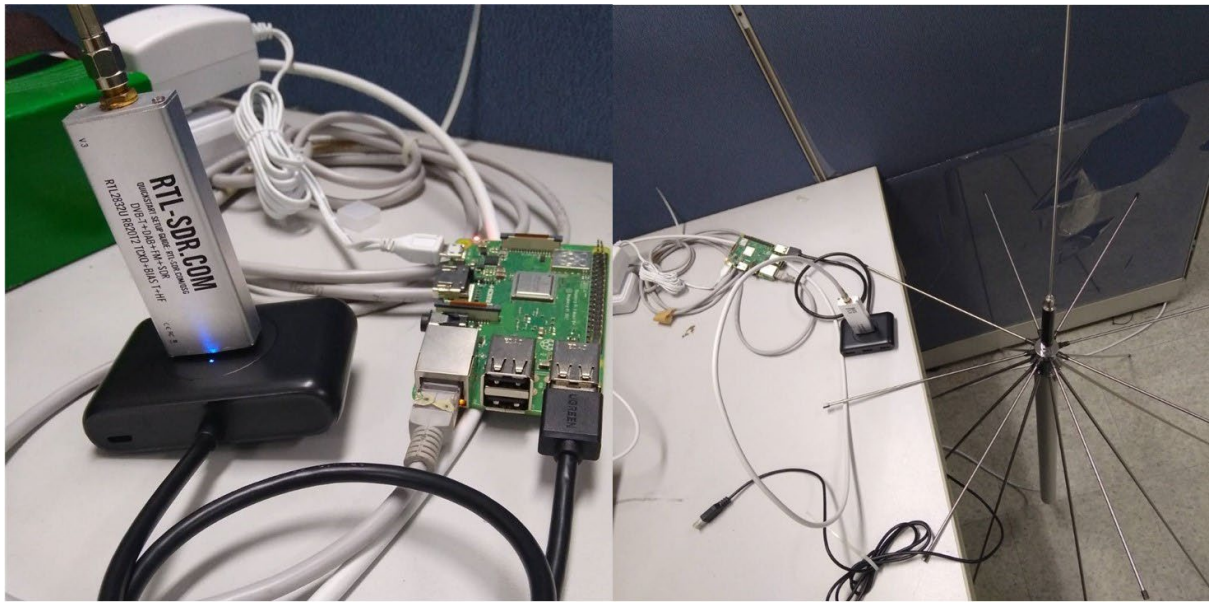
บทที่ 18

การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการประเมินการรบกวน และการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (The Implementation of Web-Apps for Interference Evaluation and Spectrum Monitoring)

18.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features)

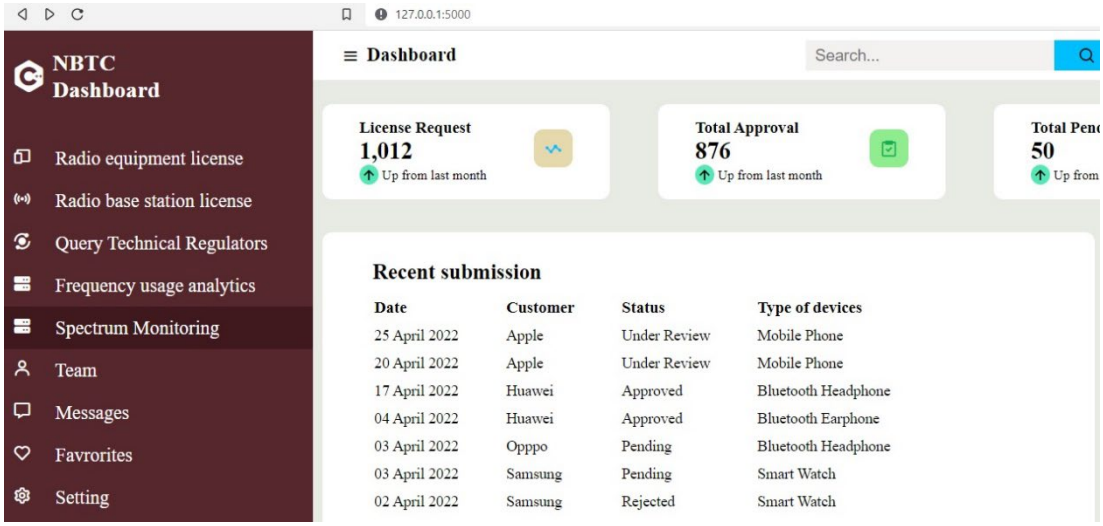
ผู้ใช้ (User)) สามารถเลือกดูข้อมูลเช่น ตำแหน่งของเซนเซอร์ (Sensors) ที่ถูกใช้ในการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ได้ นอกจากนั้นด้วยข้อมูลการใช้คลื่นความถี่จากกลุ่มของเซนเซอร์เว็บแอปพลิเคชันสามารถประมาณตำแหน่งของเครื่องส่งที่สนใจเช่น สถานีวิทยุนิรนาม (Unknown Radio Station) ได้

18.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps)

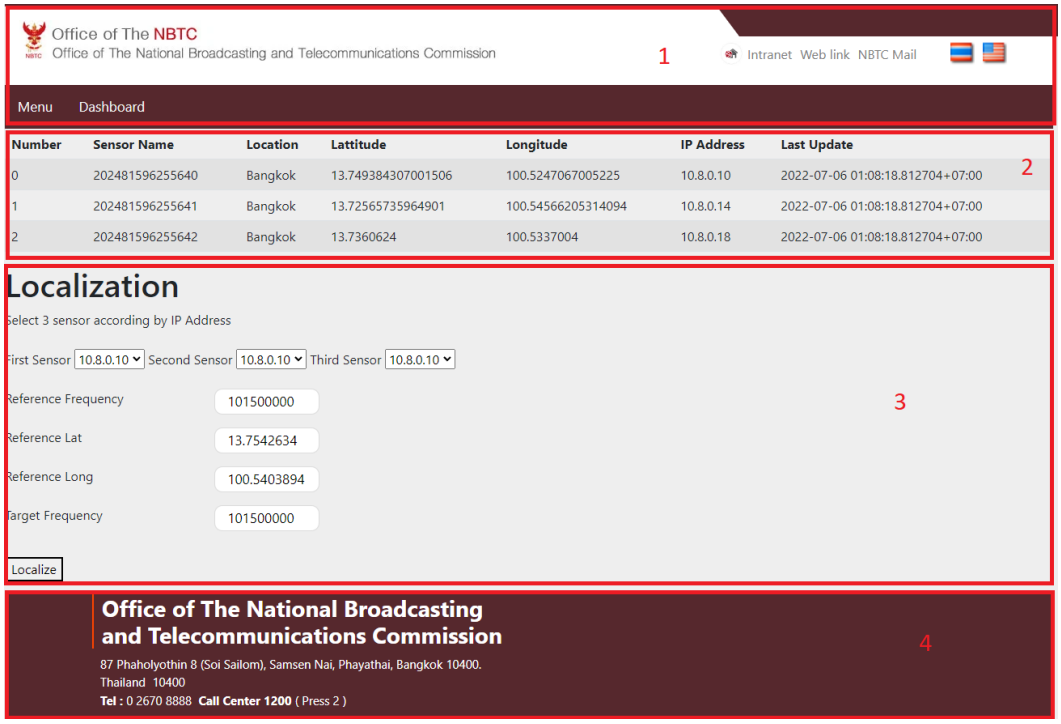


รูปที่ 18-1 ชุดอุปกรณ์เซนเซอร์ (Sensors) Electrosense ที่ใช้สำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)

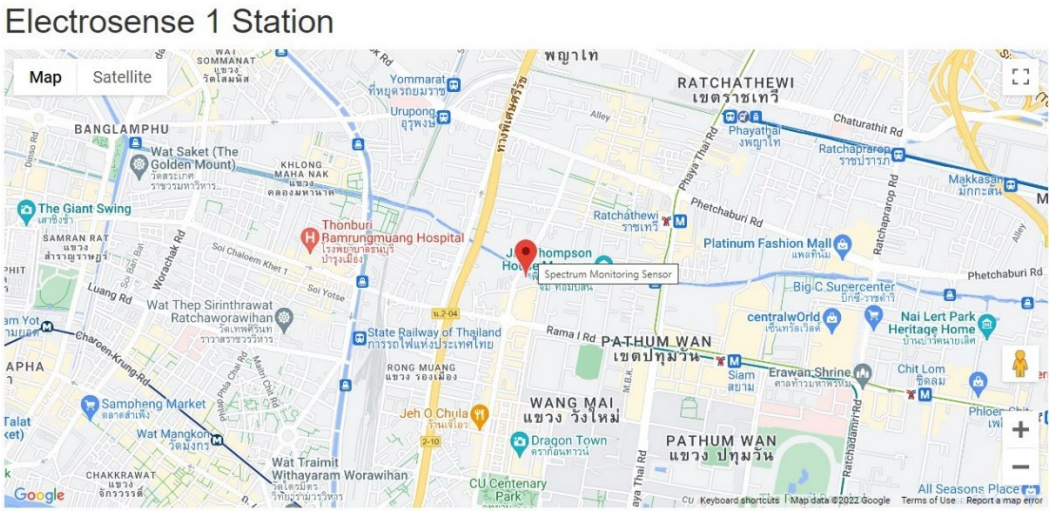
การประเมินการรบกวน (Interference Evaluation) และการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) จะต้องใช้กลุ่มของเซนเซอร์ (Sensors) ในการเก็บข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ ในที่นี้ คณะผู้วิจัยใช้เซนเซอร์ Electrosense ซึ่งเป็นเซนเซอร์ราคาถูกที่ใช้ในระบบการเฝ้าฟังคลื่นความถี่แบบเปิด (Open-Source Spectrum Monitoring System) ตัวอย่างของเซนเซอร์ Electrosense แสดงไว้ในรูปที่ 18-1



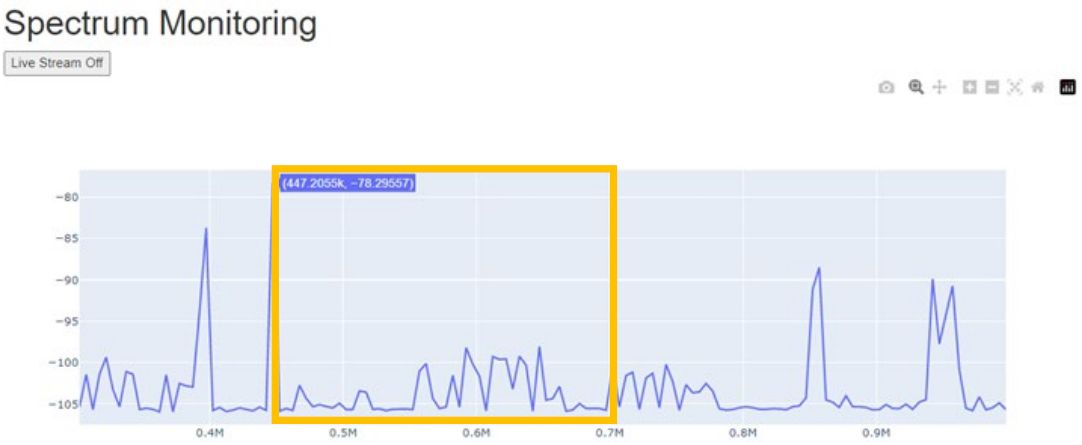
รูปที่ 18-2 ในแดชบอร์ดหลัก (Main Dashboard) เลือกเมนูย่อย (Submenu) Spectrum Monitoring เพื่อเข้าสู่รายการ (List) ของเซนเซอร์ (Sensors) Electrosense ที่กำลังเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)



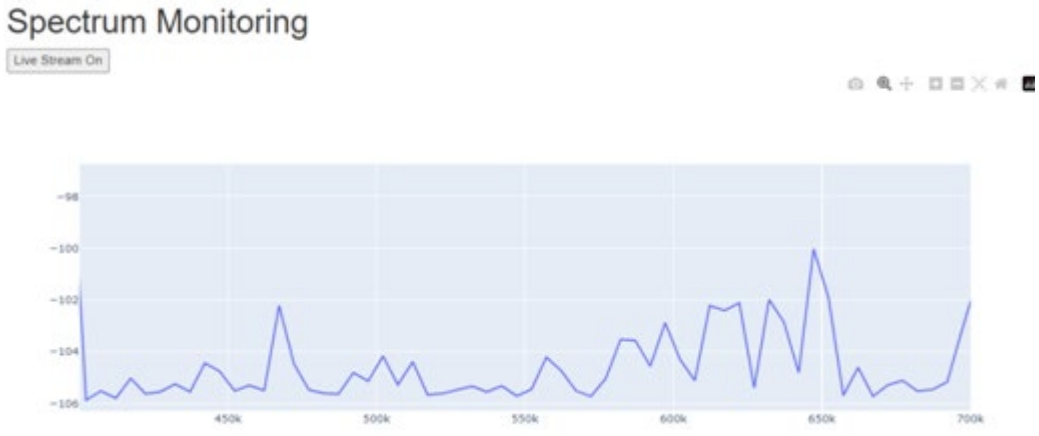
รูปที่ 18-3 รายการ (List) ของเซนเซอร์ (Sensors) Electrosense ที่กำลังเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) ตามภาพตัวอย่างนี้เซนเซอร์ทุกตัวถูกใช้งานในพื้นที่กรุงเทพมหานคร



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 18-4 (a) ตัวอย่างตำแหน่งของเซนเซอร์ (Sensors) Electrosense (Electrosense 1) บน Google Map (b) RSSI (Received Signal Strength Indication) ของสัญญาณที่เฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) (c) ภาพขยาย (Zoon In) ของ RSSI ของสัญญาณที่เฝ้าฟังคลื่นความถี่

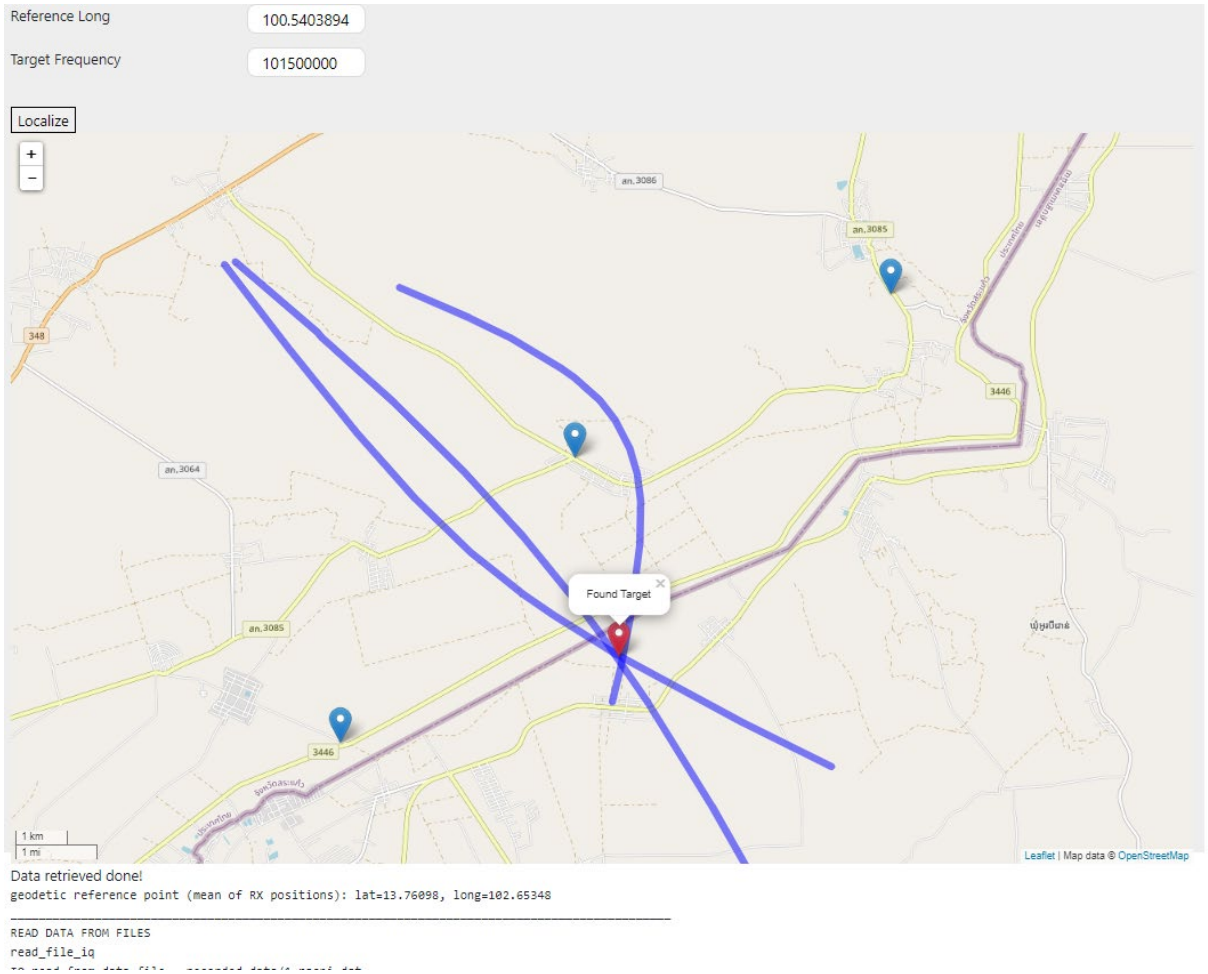
จากแดชบอร์ดหลัก (Main Dashboard) ผู้ใช้สามารถเลือกเมนูย่อย (Submenu) Spectrum Monitoring ดังแสดงในรูปที่ 18-2 เพื่อเข้าไปสู่หน้าซึ่งแสดงรายการ (List) ของเซนเซอร์ที่กำลังเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (ดูรูปที่ 18-3) ซึ่งจะแสดงตำแหน่งปัจจุบันของเซนเซอร์ที่เลือกตามที่แสดงในรูปที่ 18-4 ข้อมูลจากเซนเซอร์ถูกเชื่อมต่อด้วยสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G ที่อัตราการรับส่งข้อมูลอย่างน้อย 10 Mbps

จากรูปที่ 18-3 เมนูย่อย Spectrum Monitoring จะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่

1) Header
2) รายการของเซนเซอร์ที่ใช้งานในระบบ ซึ่งจะแสดงชื่อของเซนเซอร์ (Sensor Name) ตำแหน่งพร้อมพิกัด (Location with Latitude & Longitude) ไอพีแอดเดรส (IP Address) และการอัพเดตล่าสุด (Last Update) และเมื่อคลิกที่เซนเซอร์แต่ละตัวระบบจะแสดงตำแหน่งของเซนเซอร์นั่นบนแผนที่ (ดังแสดงในรูปที่ 18-4(a)) พร้อมย่านความถี่ที่เซนเซอร์นั้นวัดค่าล่าสุด
3) พื้นที่สำหรับใส่ข้อมูลเพื่อทำการระบุตำแหน่ง (Localization)
4) Footer ซึ่งในที่นี้จะแสดงชื่อ ที่อยู่ และหมายเลขโทรศัพท์ของสำนักงาน กสทช.

เมื่อคลิกเลือกเซนเซอร์ที่อยู่ในรายการแล้ว นอกจากตำแหน่งของเซนเซอร์ที่จะถูกแสดงบนแผนที่ ระบบจะแสดงค่าระดับสัญญาณที่เซนเซอร์นั้นวัดได้ในย่านความถี่ต่าง ๆ (Received Signal Strength Indication, RSSI) ในหน่วย dBm ดังแสดงในรูปที่ 18-4(b) โดยแต่ละจุดบนกราฟจะสามารถแสดงค่าระดับ RSSI และย่านความของแต่ละจุดได้ นอกจากนั้นผู้ใช้จะสามารถขยายกราฟที่แสดงระดับ RSSI เพื่อเลือกดูในย่านความถี่ที่สนใจได้ดังแสดงในรูปที่ 18-4(c) กราฟแสดงค่าระดับสัญญาณที่เซนเซอร์วัดได้ในย่านความถี่ต่าง ๆ นี้จะเป็นเครื่องมือให้ผู้ใช้สามารถระบุกรณีที่มีสัญญาณรบกวน (Interference) แปลกปลอมเกิดขึ้น หรือมีการใช้คลื่นความถี่ในย่านที่ยังไม่มีการอนุญาตให้ใช้งาน (Abnormal Frequency Usage) ได้

ฟังก์ชันการใช้งาน (Feature) อีกอย่างหนึ่งในส่วนนี้คือการระบุตำแหน่ง (Localization) ของสถานีวิทยุนิรนาม (Unknown Radio Station) ด้วยเซนเซอร์ Electrosense ทั้งนี้อัลกอริทึมสำหรับการระบุตำแหน่ง (Localization Algorithm) จะทำงานบนโปรแกรม Matlab และผลของการระบุตำแหน่งจะถูกผนวกเข้ากับเว็บแอปพลิเคชัน ในส่วนของการป้อนข้อมูลเพื่อประมาณตำแหน่ง จะต้องใส่ข้อมูลของเซนเซอร์ 3 ตัว ซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่ต่างกัน และจะต้องระบุคลื่นความถี่และพิกัดตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง (Reference Frequency together with Reference Latitude & Longitude) เมื่อต้องการระบุตำแหน่งของสัญญาณเป้าหมาย (Target) ผู้ใช้จะต้องใส่ข้อมูลคลื่นความถี่ของสัญญาณเป้าหมายแล้วกดปุ่ม Localize ซึ่งจะสั่งการให้ระบบทำงานโดยเซนเซอร์จะเริ่มวัดสัญญาณและเก็บข้อมูลเพื่อทำการระบุ (ประมาณ) ตำแหน่งของสัญญาณเป้าหมาย บันทึกข้อมูล (Log) เกี่ยวกับการระบุตำแหน่งจะถูกแสดงใต้ปุ่ม Localize และเมื่อการคำนวณต่าง ๆ เสร็จสิ้นระบบจะแสดงแผนที่ระบุตำแหน่งของสัญญาณเป้าหมายดังแสดงในรูปที่ 18-5



รูปที่ 18-5 ตัวอย่างของการระบุตำแหน่ง (Localization) ของสัญญาณเป้าหมาย (Target Signal) : หมุดสีแดงคือตำแหน่งของสถานีวิทยุนิรนามที่ประมาณโดยอัลกอริทึม (Algorithm) และอัลกอริทึมระบุตำแหน่งทำงานโดยใช้ชุดข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ (Sensors) Electrosense 3 ตัว (แสดงด้วยหมุดสีฟ้า)

ในส่วนของบันทึกข้อมูลของการระบุตำแหน่งของสัญญาณเป้าหมาย ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 18-6 มีเงื่อนไข (Conditions) 3 ข้อ ที่ต้องสอดคล้องดังนี้ และหากมีเงื่อนไขใดที่ไม่สอดคล้อง การวัดนั้นจะถือว่าล้มเหลว เชื่อถือไม่ได้

1) ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ค่ายิ่งสูงยิ่งดี โดยควรมีค่าไม่น้อยกว่า 2% ทั้งนี้ค่าระหว่าง 1% ถึง 2% ก็อาจยอมรับได้หากผ่านเงื่อนไขต่อไป

2) ค่าความน่าเชื่อถือ (Reliability) เป็นค่าที่แสดงว่าค่าสหสัมพันธ์ที่คำนวณได้ตามเงื่อนไขข้อ 1) มีค่าที่ Synchronization Time อื่นที่มีค่าใกล้เคียงอีกหรือไม่ โดยค่าความน่าเชื่อถือนี้ถูกนิยามด้วยสมการ

$$reliability = \frac{MaxPeak_{1st} - MaxPeak_{2nd}}{MaxPeak_{1st}}$$

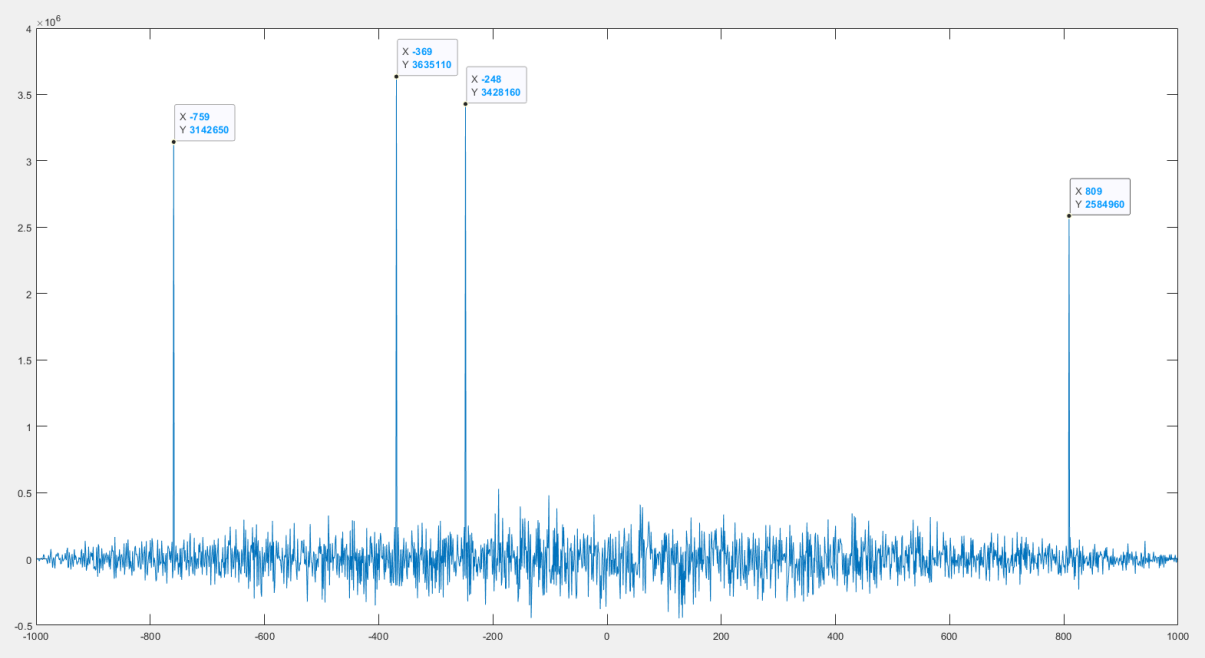
โดยที่ $MaxPeak_{1st}$ และ $MaxPeak_{2nd}$ คือค่ายอด (Peak) ลำดับที่หนึ่งและสองของค่าสหสัมพันธ์ที่คำนวณได้ยกตัวอย่างเช่นตามรูปที่ 18-7 หากค่ายอดลำดับหนึ่งและสองมีค่าต่างกันมากจะแสดงว่า

การทำ Synchronization มีความน่าเชื่อถือสูง แต่ตามรูปที่ 18-7 หากมีค่ายอดหลายค่าที่มีค่าสูงใกล้เคียงกัน จะเกิดความคลุมเครือ (Ambiguity) ว่าค่ายอดของค่าสหสัมพันธ์ที่นำมาทำ Synchronization เป็นค่าที่ถูกต้องหรือไม่เนื่องจากอาจมีหลายปัจจัยเช่นสัญญาณรบกวน หรือความผิดพลาดในการวัด (Measurement Error) ที่ทำให้ค่าดีเลย์ที่แท้จริงของสัญญาณไปอยู่ที่ค่ายอดอื่นที่ต่ำกว่าค่ายอดลำดับหนึ่งก็เป็นได้ ดังนั้นการทำSynchronization ในกรณีที่มีค่ายอดของค่าสหสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันหลาย ๆ ค่าจะมีความน่าเชื่อถือที่ต่ำกว่ากรณีที่มีค่ายอดที่เด่นชัดเพียงค่าเดียว ทั้งนี้ค่าความน่าเชื่อถือยิ่งมีค่าสูงจะยิ่งดี โดยควรมีค่ามากกว่า 0.5

3) ค่า "ans" เป็นค่าที่แสดง Internal Delay ซึ่งเป็นดีเลย์ที่เกิดจากการที่เซนเซอร์ต้องสลับวัดสัญญาณระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเป้าหมาย ค่า internal Delay ที่ยังทำให้การวัดสัญญาณเชื่อถือได้ควรอยู่ในช่วง -10 ถึง 10 โดยค่าที่ดีที่สุดจะอยู่ในช่วง -2 ถึง 2 เมื่อค่าสหสัมพันธ์และค่าความน่าเชื่อถืออยู่ในเกณฑ์ดี

```
_____________________________________________________________________________
CORRELATION 1 & 3
Filter measurement signal to actual bandwidth
Signal not filtered
Signal not filtered
Signal not filtered
Signal not filtered
Signal not filtered
Signal not filtered

CORRELATION CALCULATION DETAILS:
dphase cross-correlation, max (peak) 6.26e+05, autocorr1 max 1.67e+07, autocorr2 max 1.71e+07, => 3.7119%
dphase cross-correlation, max (peak) 4.7e+05, autocorr1 max 1.97e+07, autocorr2 max 1.97e+07, => 2.3854%
dphase cross-correlation, max (peak) 9.1e+05, autocorr1 max 1.67e+07, autocorr2 max 1.75e+07, => 5.326%

ans =

     1

CORRELATION RESULTS
raw delay1 (ref) (nativ/interp): 2078857 / 0, reliability nativ (0..1): 0.86344
raw delay2 (measure) (nativ/interp): 2078911 / 0, reliability nativ: 0.63199
raw delay3 (ref check) (nativ/interp): 2078856 / 0, reliability nativ: 0.85908
merged delay of ref and ref check: 2078856.5

specified distance difference to ref tx [m]: -4739
specified distance difference to ref tx [samples]: -39.1754
specified distance between two RXes [m]: 7494.1607

FINAL RESULT
TDOA in samples: 15.3246(how much is signal1 later than signal2)
TDOA in distance [m]: 1853.7792
Total Reliability (min of all 3): 0.63199
```

รูปที่ 18-6 ตัวอย่างของบันทึกข้อมูล (Log) ของการระบุตำแหน่ง (Localization) ของสัญญาณเป้าหมาย (Target)



รูปที่ 18-7 ตัวอย่างค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของสัญญาณ

18.3 การสร้างและออกแบบเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการเฝ้าฟังคลื่นความถี่

18.3.1 การเตรียมไลบรารี่ (Libraries) และรายการของเซนเซอร์ Electrosense

```
# Import libraries
import io
import base64
from matplotlib.backends.backend_agg import FigureCanvasAgg as FigureCanvas
import seaborn as sns

### Class for show Electrosense sensor on Google map.
class electrosense:
  def __init__(self, key, name, lat, lng):
    self.key  = key
    self.name = name
    self.lat  = lat
    self.lng  = lng

### Dictionary of Electrosense sensors
```

```
electrosenses = (
   electrosense('sensor1',    'Electrosense 1',   13.749384307001506, 100.5247067005225),
   electrosense('sensor2',    'Electrosense 2',   13.72565735964901,  100.54566205314094),
   electrosense('sensor3',    'Electrosense 3',   13.7360624, 100.5337004)
)
electrosenses_by_key = {electrosense.key: electrosense for electrosense in electrosenses}
```

18.3.2 การออกแบบฟังก์ชันการทำงาน (Functionality)

18.3.2.1 การแสดงรายการและแผนที่แสดงตำแหน่งของเซนเซอร์ Electrpsense

```
@app.route('/spectrum')
def spectrum():
   return render_template('spectrum.html', electrosenses = electrosenses)
@app.route("/<electrosense_code>")
def show_school(electrosense_code):
   electrosense = electrosenses_by_key.get(electrosense_code)
   if electrosense:
      return render_template('map.html', electrosense=electrosense)
   return render_template('map.html', electrosense=electrosense)
```

18.3.2.2 การแสดงตำแหน่งของสถานีวิทยุนิรนาม

```
@app.route("/visualize")
def visualize():
   sns.distplot(y, kde = True, color = "g")
   canvas = FigureCanvas(fig)
   img=io.BytesIO()
   fig.savefig(img)
   img.seek(0)
   return send_file(img, mimetype='img/png')
```

18.4 กรอบการทำงาน (Framework) สำหรับการสร้างเว็บแอปพลิเคชัน

การทดสอบเว็บแอปพลิเคชันทั้งหมดทำด้วยคอมพิวเตอร์แบบวางตัก (Laptop Computer) MSI ความจุ 16 GB หน่วยประมวลผล (Processor) Intel Core i5-10500H และ GPU GTX 1650 4GB เว็บแอปพลิเคชันถูกสร้างโดยใช้กรอบการทำงาน Flask python สำหรับระบบปฏิบัติการ (Operating System) Window 11

18.5 การอภิปรายและสรุปผล

ในส่วนของฟังก์ชันการทำงานของเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการประเมินการรบกวนและการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ คณะผู้วิจัยใช้เซนเซอร์ Electrosense ซึ่งเป็นเซนเซอร์ราคาถูกที่ใช้ในระบบการเฝ้าฟังคลื่นความถี่แบบเปิด จากแดชบอร์ด ผู้ใช้สามารถเลือกดูข้อมูลเช่น ตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ถูกใช้ในการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ได้ ด้วยข้อมูลการใช้คลื่นความถี่จากกลุ่มของเซนเซอร์ เว็บแอปพลิเคชันสามารถประมาณตำแหน่งของเครื่องส่งที่สนใจเช่น สถานีวิทยุนิรนาม (Unknown Radio Station) ได้

บทที่ 19

การสร้างเว็บแอปพลิเคชันสำหรับการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนบริเวณชายแดน (The Implementation of Web-Apps for Localizing Interference Source in Border Areas)

19.1 ฟังก์ชันการใช้งาน (Features)

ผู้ใช้ (User)) สามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์เพื่อประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่สนใจได้

19.2 ขั้นตอนการจัดการข้อมูลสำหรับเว็บแอปพลิเคชัน (Data Processing Pipeline for the Web-Apps)

หากมีการตรวจพบการส่งสัญญาณที่ผิดปกติ ถ้าเราสามารถที่จะระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ก็จะเป็นการง่ายที่จะดำเนินการต่อไปเพื่อที่จะบรรเทาหรือยับยั้งการส่งสัญญาณนั้นได้ ในปัจจุบันมีอัลกอริทึม (Algorithm) ในการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอยู่หลายอัลกอริทึมเช่น Time of Arrival (TOA), Time Difference of Arrival (TDOA), Angle of Arrival (AOA), Received Signal Strength Indicator (RSSI), Two-Way Ranging (TWR) เป็นต้น เนื่องจากโดยทั่วไปแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนมักจะเป็นแหล่งสัญญาณที่เราไม่รู้จัก (Unknown) อาจไม่สามารถรู้เวลาของการเริ่มส่งสัญญาณแต่ละครั้งได้ ดังนั้น TOA และ AOA จึงเป็นวิธีที่ทำได้ยากในสถานการณ์เช่นนี้ RSSI ที่พิจารณาระยะห่างจากกำลังของสัญญาณที่รับได้จะทำได้ง่ายกว่าแต่ข้อจำกัดของวิธี RSSI คือความน่าเชื่อถือและความเสถียร (Reliability and Stability) จะต่ำเนื่องจากเป็นวิธีการที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมสูง TWR เป็นวิธีการระบุตำแหน่งที่ไม่มีการซิงโครไนซ์ (Synchronized) เวลากับแหล่งกำเนิดสัญญาณแต่ต้องการการสื่อสารกันระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับเครื่องวัดสัญญาณจึงไม่เหมาะกับสถานการณ์ที่กำลังพิจารณาอยู่ และท้ายที่สุดคือวิธีที่จะใช้ในโครงการวิจัยนี้ วิธี TDOA ซึ่งใช้การคำนวณความต่างของสัญญาณที่มาถึงเครื่องวัด (เซนเซอร์ (Sensor)) แต่ละตัวแล้วนำมาคำนวณเป็นกราฟไฮเปอร์โบลา (Hyperbola) ที่แสดงตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ต้องการระบุตำแหน่ง สิ่งที่ต้องทำสำหรับวิธี TDOA คือต้องสามารถระบุเวลาที่ได้รับแพ็กเกต (Packet) สัญญาณ (Time Stamp) เดียวกันระหว่างเซนเซอร์ 2 ตัวได้ ซึ่งต้องมีการซิงโครไนซ์ (Synchronization)

ในขั้นตอนแรก สำหรับการระบุเวลาที่ได้รับแพ็กเกตสัญญาณเดียวกันระหว่างเซนเซอร์ 2 ตัวเพื่อนำมาคำนวณความต่างของเวลาที่ได้รับแพ็กเกตสัญญาณนั้น หากใช้การดีมอดูเลต (Demodulate) สัญญาณโดยตรงจะเป็นวิธีที่ใช้เวลาและความพยายามในการทำสูงมาก การที่จะ

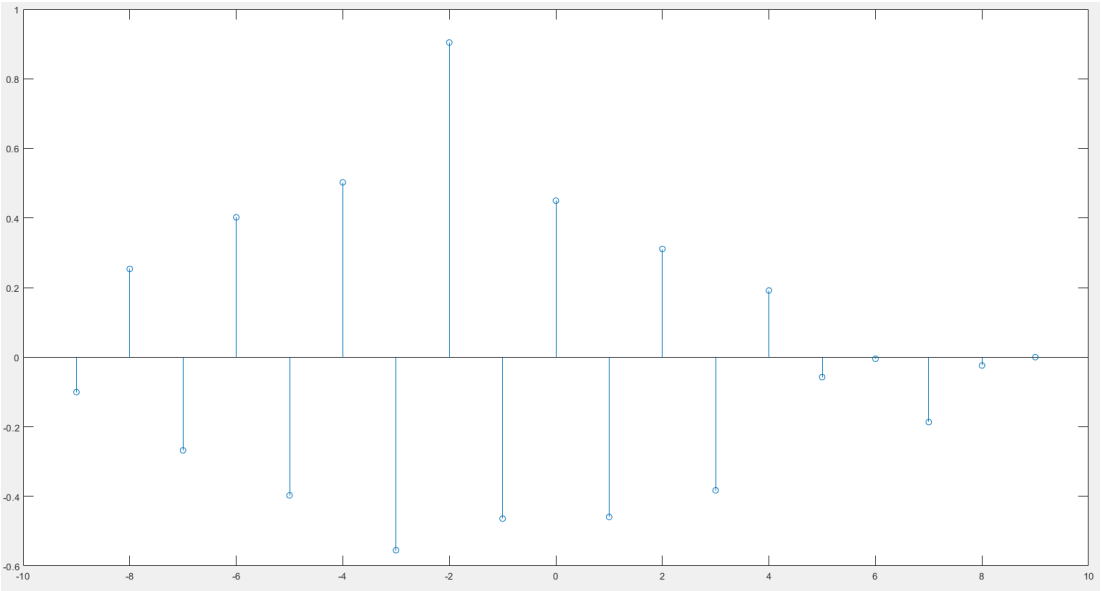
ดีมอดูเลตสัญญาณได้จะต้องทราบชนิดของการดีมอดูเลตซึ่งหมายถึงจะต้องกระบวนการในการระบุชนิดของการมอดูเลตเพิ่มขึ้นมาอีกขั้นตอนหนึ่ง ในอีกวิธีหนึ่งหากไม่ใช้การดีมอดูเลตสัญญาณ จะมีเพียงข้อมูลสัญญาณในรูปแบบ In-Phase & Quadrature Phase (IQ) ให้ประมวลผล ซึ่งในทางสถิติ หากเราคำนวณค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross Correlation) ของชุดข้อมูลเชิงเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time Series Data) 2 ชุด จะสามารถหาความหน่วยเชิงเวลา (Lagging/Delay) ระหว่างข้อมูล 2 ชุดนั้น ซึ่งก็คือความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง (TDOA) ระหว่างเซนเซอร์คู่หนึ่ง ๆ ได้

ยกตัวอย่างเช่น :

a = [-7,6,-4,1,-7,2,-5,3,4,5]

b = [0,-1,-7,6,-4,1,-7,2,-5,3]

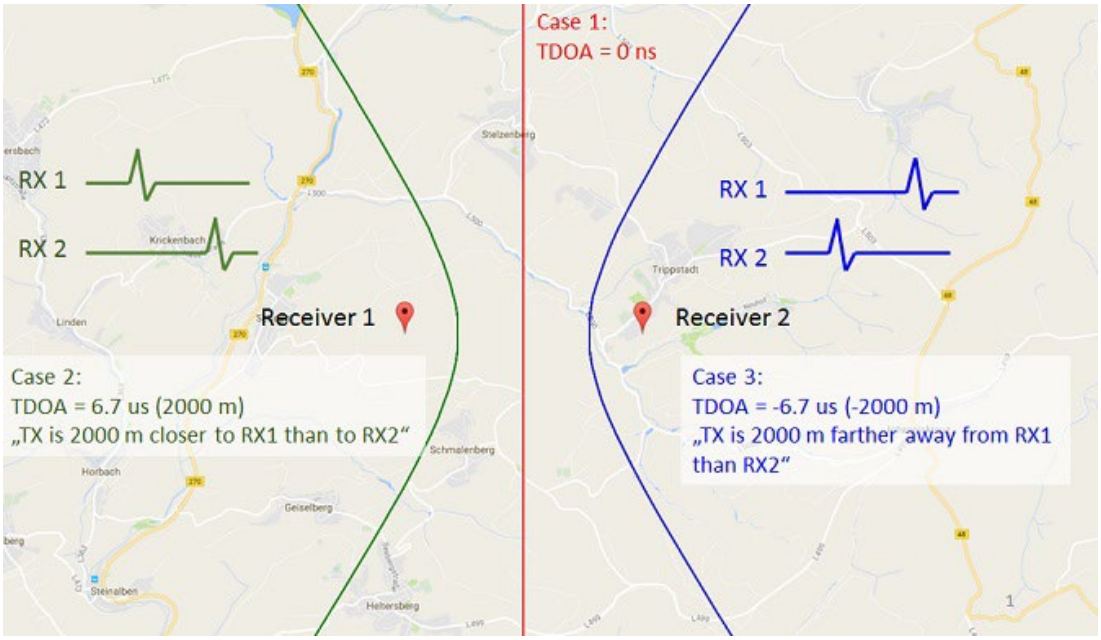
ค่าสหสัมพันธ์ไขว้มาตรฐาน (Normalized Cross Correlation) ระหว่าง a และ b จะเป็นดังรูปที่ 19-1



รูปที่ 19-1 ตัวอย่างของค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross Correlation) ระหว่างชุดข้อมูลเชิงเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time Series Data) 2 ชุด

จากรูปที่ 19-1 ค่าสหสัมพันธ์ไขว้สูงสุดอยู่ที่ค่า x = -2 ซึ่งหมายความว่าชุดข้อมูล a จะมาถึงก่อนชุดข้อมูล b อยู่ 2 หน่วยเวลา (ค่า TDOA ของสัญญาณระหว่างเซนเซอร์ a และ b เท่ากับ -2) และถึงแม้ว่าเราจะลองหาค่าสหสัมพันธ์ไขว้ระหว่าง a กับข้อมูลชุดอื่นที่แปลงค่ามาจาก b เช่น c = b + Constant ผลของค่าสหสัมพันธ์ไขว้จะยังคงเหมือนเดิม

หลักการระบุตำแหน่งจากค่า TDOA แสดงไว้ดังรูปที่ 19-2



รูปที่ 19-2 เส้นกราฟแสดงตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณเมื่อสามารถประเมินค่า TDOA (Time Difference of Arrival) ของสัญญาณได้

ในลำดับที่สอง เวลาเริ่มต้น (Start Time) ระหว่างคู่ของเซนเซอร์จะต้องถูกซิงโครไนส์ (Synchronized) ซึ่งหมายถึงเซนเซอร์ทั้งคู่จะต้องเริ่มวัดสัญญาณในเวลาเดียวกัน ในการทำการซิงโครไนส์นี้จะใช้สัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) จากแหล่งกำเนิดสัญญาณซึ่งทราบตำแหน่งที่แน่นอนดังนี้ :

โดยสมมุติให้ความแตกต่างของระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณอ้างอิงกับเซนเซอร์หมายเลข 1 และ 2 เท่ากับ dl (ค่าที่เป็นบวกจะหมายถึงระยะระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณอ้างอิงกับเซนเซอร์ 1 จะมากกว่าระยะกับเซนเซอร์ 2 หรือในทางกลับกัน) dt คือดีเลย์ (Delay) ของการเริ่มวัดสัญญาณระหว่างเซนเซอร์ 1 กับ 2 และ c คือความเร็วแสง จะได้ว่า

$$k_{ref_async} = k_{ref_sync} + dt$$

$$=> dt = k_{ref_async} - k_{ref_sync}$$

$$=> k_{target_sync} = k_{target_async} - dt = k_{target_async} - k_{ref_async} + k_{ref_sync}$$

เมื่อ $k_{X_sync} = \frac{dl}{c}$ คือดีเลย์ของการได้รับชุดสัญญาณเชิงเวลา (Time Series) X เมื่อไม่มีดีเลย์ของการเริ่มวัดสัญญาณ และ k_{X_async} คือดีเลย์ของการได้รับชุดสัญญาณเชิงเวลา (Time Series) X เมื่อมีดีเลย์ของการเริ่มวัดสัญญาณ (การวัดสัญญาณไม่ซิงโครไนส์กัน) โดยที่ X หมายถึงสัญญาณอ้างอิง (ref (reference)) หรือสัญญาณที่สนใจ (target)

อุปกรณ์ RTL SDR จะสุ่มสัญญาณที่อัตรา 2,048,000 ตัวอย่างต่อวินาที ดังนั้นเราสามารถใช้ความต่างของจำนวนตัวอย่างมาใช้วัดเวลาได้ ซึ่งความผิดพลาดจะอยู่ในช่วงของ $\pm$ 0.5 ตัวอย่างหรือเท่ากับ $\pm$ 75 เมตร ดังนั้นความ

แตกต่างของ k_{ref_async} และ k_{target_sync} จะต้องไม่มากเกินกว่า 1 วินาที ซึ่งส่งผลให้ $dt \leq 1$ หรือในอีกนัยหนึ่ง หากรู้ค่า dt จำนวนตัวอย่างสัญญาณที่จะรับได้จะเป็น $samples > dt * 2.048 * 10^6$ โดยในที่นี้กำหนดให้จำนวนตัวอย่างสุ่ม $samples = 2 * dt * 2.048 * 10^6$

จากวิธีการข้างต้น เราจะสามารถแก้ปัญหาการทำซิงโครไนส์และความต่างของเวลาของวิธี TDOA ได้

19.3 การใช้และการทดสอบเซนเซอร์สำหรับการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร

ระบบ TDOA ต้องการจุดวัดสัญญาณ (Anchor) อย่างน้อย 3 จุดจึงจะสามารถประมาณตำแหน่งของเป้าหมายได้ โดยที่ระยะทางระหว่างเซนเซอร์ซึ่งเป็นจุดวัดแต่ละจุดจะต้องห่างกันมากพอ (ในที่นี้แต่ละจุดวัดจะห่างกันอย่างน้อย 2 กิโลเมตร) เนื่องจากเซนเซอร์ 3 ตัวนี้อยู่ในตำแหน่งที่ต่างกันเซนเซอร์เหล่านี้ก็จะเชื่อมต่อกับโครงข่ายที่ต่างกันด้วย ดังนั้นจะต้องใช้เทคนิคการสื่อสาร (Communication Technique) ที่ทำให้สามารถควบคุมเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวนี้ได้

เซิร์ฟเวอร์สำหรับควบคุมและคำนวณ (Control/Calculation Server) ถูกตั้งไว้ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื่องจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยใช้ไอพีสาธารณะ (Public IP) จึงไม่จำเป็นต้องใช้ระบบ Network Address Translator (NAT) เพื่อเชื่อมต่อเซนเซอร์เข้ากับเซิร์ฟเวอร์ โดยในที่นี้จะใช้วิธีสร้างอุโมงค์ VPN (Virtual Private Network Tunnel) เพื่อเชื่อมต่อเซนเซอร์กับเซิร์ฟเวอร์ เซิร์ฟเวอร์ใช้ระบบปฏิบัติการ Window Server 2019 ซึ่งสำหรับการเชื่อมต่อเข้ามาจากภายนอกจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจะถูกกำหนดให้ทำผ่านพอร์ต (Port) 80 และ 443 เท่านั้น ในขณะที่โดยปกติระบบ VPN บน Window Server 2019 จำเป็นต้องใช้พอร์ตอื่น ๆ ด้วย ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงเปลี่ยนไปใช้ Open VPN ซึ่งเป็นแบบเปิด (Open Source) แทน

ขั้นตอนการติดตั้งสิ่งที่จำเป็นต่าง ๆ สำหรับเซิร์ฟเวอร์เป็นดังนี้ :

ขั้นที่ 1: ดาวน์โหลด (Download) และติดตั้ง Open VPN GUI

- เปิดเมนู Start และไปที่ "Window System" จากนั้นคลิกขวาเลือก "Command Prompt" เลือก "More" แล้วเลือก "Run as Administrator"
- จากนั้นคลิกขวาที่เมนู "Command Prompt"
- บนหน้าต่างที่ปรากฏ (Pop-Up Window) "User Account Control" คลิก "Yes" เพื่อให้โปรแกรมทำการเปลี่ยนแปลงค่าบนเซิร์ฟเวอร์
- หาแฟ้มข้อมูล (Folder) ต่อไปนี้โดยใช้คำสั่ง (Command) cd ที่ Administrative Command Prompt

```
cd "C:\Program Files\OpenVPN\easy-rsa"
```

ขั้นที่ 2: ตั้งค่า (Configure) เซิร์ฟเวอร์ Open VPN (รัน (Run) คำสั่ง init-config เพียงครั้งเดียวในระหว่างการติดตั้ง)

- พิมพ์คำสั่งต่อไปนี้

```
init-config
```

- ลำดับถัดไป เปิดไฟล์ "vers.bat" ด้วยโปรแกรม Notepad

```
notepad vars.bat
```

- จากนั้น เปลี่ยนข้อมูลต่อไปนี้ให้สอดคล้องกับตำแหน่งที่ใช้งาน

```
set KEY_COUNTRY=THAILAND
set KEY_PROVINCE=Bkk
set KEY_CITY=Ratchatewee
set KEY_ORG=OpenVPN
set KEY_EMAIL=mail@host.domain
```

- เสร็จแล้ว บันทึกไฟล์และออกจาก Notepad
- จากนั้นรันคำสั่งต่อไปนี้

```
vars
clean-all
```

ขั้นที่ 3: สร้าง Certificates และ Keys

- เพื่อที่จะสร้าง Certificate Authority (CA) ซึ่งได้แก่ Certificate และ Key จะต้องรันคำสั่งต่อไปนี้

```
build-ca
```

- คำสั่งนี้จะให้ใส่ข้อมูล ประเทศ รัฐ และเมือง โดยค่าตั้งต้น (Default Value) จะปรากฏใน [ ] สำหรับ "Common Name" ตัวเลือกที่ดีที่สุดคือตั้งชื่อให้เป็นเอกลักษณ์ (Unique)

```
Country Name (2 letter code) [US]:
State or Province Name (full name) [CA]:
Locality Name (eg, city) [SanFrancisco]:
Organization Name (eg, company) [OpenVPN]:
Organizational Unit Name (eg, section) []:
Common Name (eg, your name or your server's hostname) []:OpenVPN-CA
Email Address [mail@host.domain]:
```

- จากนั้น ให้เริ่มต้นการทำงาน (Initiate) Certificate และ Key ของเซิร์ฟเวอร์โดยใช้คำสั่ง

```
build-key-server server
```

  - เมื่อถูกถาม (Prompt) ให้ใส่ข้อมูล "Common Name" เป็น "server"
  - เมื่อถูกถามให้ลงเซ็น (Sign) Certificate ให้ใส่ค่า "y"
  - เมื่อถูกถามให้ตอบตกลง (Commit) ให้ใส่ค่า "y"

ขั้นที่ 4: สร้าง Certificates และ Keys –ของลูกข่าย (Clients)

- สำหรับลูกข่ายแต่ละรายที่จะเชื่อมต่อเข้ากับเซิร์ฟเวอร์จะต้องใช้ชื่อซึ่งเป็นเอกลักษณ์เช่น "mike-laptop" ดังตัวอย่างด้านล่าง

```
build-key mike-laptop
```

- จากนั้น เมื่อถูกถาม ให้ใส่ค่า "Common Name" เป็นชื่อที่เลือกไว้สำหรับ Certificate/Key ของลูกข่าย ขั้นตอนนี้จะต้องถูกทำซ้ำทุกครั้งสำหรับคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องที่จะเชื่อมต่อกับ VPN
- ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการสร้างพารามิเตอร์ (Parameter) "Diffie Hellman" โดยใช้คำสั่ง build-dh ขั้นตอนนี้เปฌนขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับการสร้างโมเดลการเข้ารหัส (Encryption Model)

```
build-dh
```

- จากนั้น จะเป้นการสร้างรหัสลับที่จะใช้ร่วมกัน (Shared Secret Key) ซึ่งจำเป็นจะต้องใช้เมื่อใช้คำสั่ง tls-auth-

```
"C:\Program Files\OpenVPN\bin\openvpn.exe" --genkey --secret
"C:\Program Files\OpenVPN\easy-rsa\keys\ta.key"
```

ต่อไป เป็นขั้นตอนสำหรับการตั้งค่าเซิร์ฟเวอร์ Open VPN :

ขั้นที่ 1: ไฟล์สำหรับตั้งค่าเซิร์ฟเวอร์

- เริ่มด้วยการคัดลอก (Copy) ไฟล์ตัวอย่าง "server configuration" ไปยังแฟ้มข้อมูลที่ชื่อ easy-rsa ด้วยคำลั่งที่จะให้ผลลัพธ์ดังนี้ :

```
copy "C:\Program Files\OpenVPN\sample-config\server.ovpn"
"C:\Program Files\OpenVPN\easy-rsa\keys\server.ovpn"
```

- ต่อไป แก้ไขไฟล์ server-ovpn

```
Notepad "C:\Program Files\OpenVPN\easy-rsa\keys\server.ovpn"
```

- จากนั้น หาบรรทัดของคำสั่งต่อไปนี้ในไฟล์

```
ca ca.crt
cert server.crt
key server.key
dh dh2048.pem
```

และแก้ไขบรรทัดต่าง ๆ เหล่านี้ดังนี้

```
ca "C:\\Program Files\\OpenVPN\\config\\ca.crt"
cert "C:\\Program Files\\OpenVPN\\config\\server.crt"
key "C:\\Program Files\\OpenVPN\\config\\server.key"
dh "C:\\Program Files\\OpenVPN\\config\\dh2048.pem"
```

- ขั้นต่อไป หาบรรทัดของคำสั่งต่อไปนี้ในไฟล์

```
;proto tcp
proto udp
```

และแก้ไขเป็น :

```
proto tcp
;proto udp
```

- หาบรรทัดของคำสั่งต่อไปนี้ในไฟล์

```
port 1194
```

และแก้ไขเป็น :

```
port 443
```

- ท้ายที่สุด บันทึกและปิดไฟล์

ขั้นที่ 2: ไฟล์สำหรับตั้งค่าลูกข่าย (ส่วนนี้จะคล้ายกับการตั้งค่าเซิร์ฟเวอร์)

- คัดลอกไฟล์ตัวอย่างสำหรับตั้งค่าเซิร์ฟเวอร์ไปไว้ที่แฟ้มข้อมูล east-rsa โดยใช้ Common Name ของลูกข่ายแต่ละคนเป็นชื่อไฟล์ (แต่ละลูกข่ายจะต้องใช้ชื่อไฟล์ที่ต่างกันมี

```
copy "C:\Program Files\OpenVPN\sample-config\client.ovpn"
"C:\Program Files\OpenVPN\easy-rsa\keys\mike-laptop.ovpn"
```

- แก้ไขไฟล์สำหรับตั้งค่าลูกข่าย

```
notepad "C:\Program Files\OpenVPN\easy-rsa\keys\mike-laptop.ovpn"
```

- หาบรรทัดของคำสั่งต่อไปนี้ในไฟล์ :

```
ca ca.crt
cert client.crt
key client.key
```

- แก้ไขเป็น :

```
ca "C:\\Program Files\\OpenVPN\\config\\ca.crt"
cert "C:\\Program Files\\OpenVPN\\config\\mike-laptop.crt"
key "C:\\Program Files\\OpenVPN\\config\\mike-laptop.key"
```

- จากนั้นหาบรรทัดของคำสั่งต่อไปนี้ในไฟล์ :

```
;proto tcp
proto udp
```

แก้ไขเป็น :

```
proto tcp
;proto udp
```

- แก้ไขบรรทัดต่อไปนี้ แทนที่ "my-server-1" ด้วยไอพีแอดเดรสสาธารณะ (Public Internet IP Address) หรือชื่อโดเมน (Domain Name):

```
remote 161.200.90.36 443
```

- บันทึกและปิดไฟล์

ขั้นที่ 3: คัดลอกไฟล์ของเซิร์ฟเวอร์และลูกข่ายไปยังตำแหน่งข้อมูล (Directories) ที่เหมาะสม

- บนเซิร์ฟเวอร์ คัดลอกไฟล์จาก C:\Program Files\OpenVPN\easy-rsa\keys\ ไปยัง C:\Program Files\OpenVPN\config\ :

```
robocopy "C:\Program Files\OpenVPN\easy-rsa\keys\ "
"C:\Program Files\OpenVPN\config\ " ca.crt ta.key dh2048.pem server.crt server.key server.ovpn
```

หมายเหตุ : ช่องวาง (Space) ที่อยู่ตอนท้ายของเส้นทาง (Path) ในแต่ละสตริง (String) มีความสำคัญ

- คัดลอกไฟล์จาก C:\Program Files\OpenVPN\easy-rsa\keys\ บนเซิร์ฟเวอร์ไปยัง C:\Program Files\OpenVPN\config\ -บนอุปกรณ์ของลูกข่ายแต่ละราย (ตามตัวอย่างนี้คือ mike-laptop):

```
ca.crt
ta.key
mike-laptop.crt
mike-laptop.key
mike-laptop.ovpn
```

ขั้นที่ 4: เริ่มการทำงาน OpenVPN

- บนอุปกรณ์ของลูกข่ายและเซิร์ฟเวอร์ รัน OpenVPN จาก :

```
Start Menu -> All Programs -> OpenVPN -> OpenVPN GUI
```

- ดับเบิ้ลคลิก (Double Click) ไอคอน (Icon) ที่ปรากฏขึ้นใน SYstem Tray เพื่อเริ่มต้นการเชื่อมต่อ ข้อความที่เกิดขึ้นควรจะถูกปิดเมื่อการเริ่มต้นสำเร็จ
- บนระบบปฏิบัติการ Ubuntu ติดตั้ง OpenVPN และคัดลอกไฟล์ต่าง ๆ ของลูกข่าย (Client Files) ในขั้นตอนที่ 3 ไปยัง /etc/openvpn จากนั้นเปลี่ยนชนิดไฟล์ (ใช้วิธีเดียวกับการเปลี่ยนชื่อไฟล์ที่ทำกันโดยทั่วไป) *.ovpn ให้เป็น *.conf และเพื่อที่จะเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์โดยอัตโนมัติตอนบูทอัพ (Boot Up) พิมพ์คำสั่ง

```
sudo systemctl enable openvpn@*.conf
```

* ในคำสั่งคือชื่อของไฟล์สำหรับตั้งค่า (.conf File) เช่น openvpn@client1.conf เมื่อไฟล์ตั้งค่าชื่อ client1.conf

เมื่อทำขั้นตอนต่าง ๆ ข้างต้นเสร็จ เมื่อลูกข่ายเชื่อมต่อกับเซิร์ฟเวอร์ ไอพีแอดเดรสของเซิร์ฟเวอร์จะมีค่าเป็น 10.8.0.1 และไอพีแอดเดรสของเซิร์ฟเวอร์จะเป็น 10.8.0.x โดยที่ x จะมีค่าตั้งแต่ 2 ถึง 252

เมื่อตั้งค่าระบบ VPN ที่ลูกข่ายทั้งหมด (เซนเซอร์ต่าง ๆ) อยู่ในโครงข่าย (Network) เดียวกับเซิร์ฟเวอร์แล้ว เซิร์ฟเวอร์จะสามารถสั่งการเซนเซอร์เหล่านี้ผ่านทางโปรโตคอล (Protocol) SSH

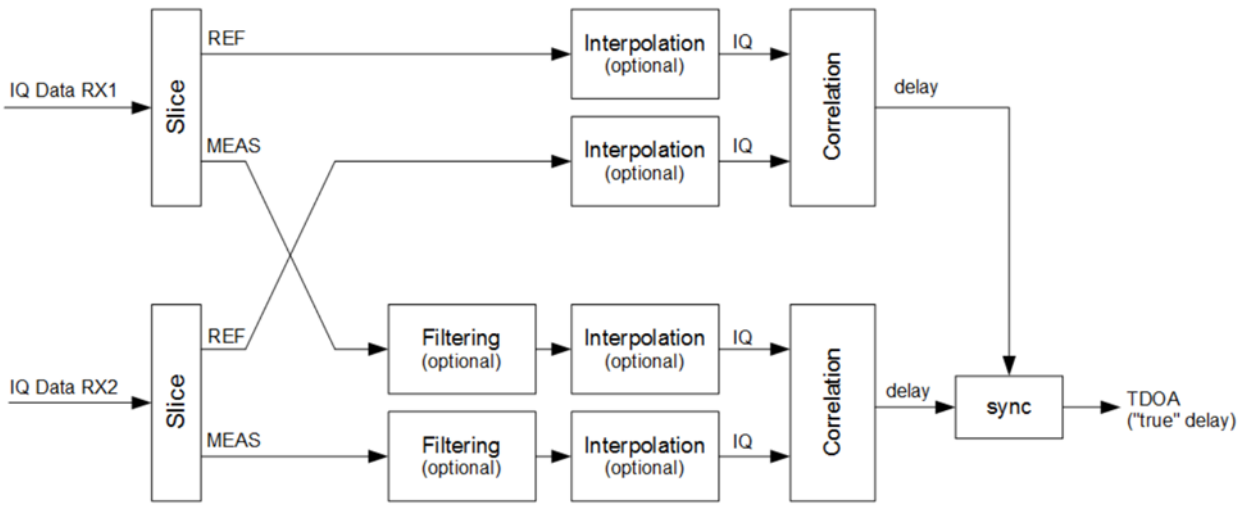
เนื่องจากในการประเมินตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณเซนเซอร์จะต้องวัดค่าทั้งสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) และสัญญาณที่สนใจ (Target Signal) เพื่อที่จะเพิ่มความเชื่อถือได้และความเสถียรของการประเมินตำแหน่งระบบควรต้องสามารถเปลี่ยนไปมา (Switch) ระหว่างการวัดสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณที่สนใจได้อย่างไร้รอยต่อ (Seamlessly) โดยไม่มีช่องว่าง (Gap) ของการวัด หากไม่สามารถทำได้อย่างน้อยจะต้องเปลี่ยนไปมาโดยให้เสียตัวอย่างสุ่ม (Sample) ของสัญญาณระหว่างการเปลี่ยนคลื่นความถี่ที่วัดให้น้อยที่สุด ซึ่งในที่นี้จะใช้ไลบรารี่ที่ชื่อ librtlsdr-2freq และเพื่อที่จะให้เสียสัญญาณตัวอย่างน้อยที่สุดจะต้องวัดค่าสัญญาณอ้างอิงอย่างสม่ำเสมอ (ลำดับการวัด เช่น สัญญาณอ้างอิง → สัญญาณที่สนใจ → สัญญาณอ้างอิง → ...) และใช้ค่าเฉลี่ยของดีเลย์ที่เกิดขึ้น ดังนี้

$$k_{target_sync} = k_{target_async} - dt = k_{target_async} - k_{ref_async_average} + k_{ref_sync}$$

19.3.1 ขั้นตอนของการทำ TDOA (TDOA Procedure)

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการตั้งค่าเซิร์ฟเวอร์และลูกข่าย (จุดวัด/เซนเซอร์) ขั้นตอนของการทำ TDOA เป็นดังนี้

- รับสัญญาณ ส่งข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์ (Server) และจับคู่สัญญาณ (ระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณที่สนใจ (Reference & Target)) เพื่อใช้สำหรับการประมวลผลในลำดับไป
- ซิงโครไนส์สัญญาณที่ได้รับ
  - คำนวณค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณอ้างอิง
  - ทิ้งค่าพีค (Peak) ของค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณที่ไม่ถูกต้อง (Invalid) ไป
  - ใช้ค่าดีเลย์ที่ประมาณได้สำหรับทำการซิงโครไนส์
- วัดสัญญาณที่สนใจ
  - คำนวณค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณที่สนใจ
  - ทิ้งค่าพีค (Peak) ของค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณที่ไม่ถูกต้องไป
  - ประมาณค่า TDOA ของสัญญาณที่สุ่มได้ พร้อมกับระยะทาง
- นำค่า TDOA และระยะทางที่ประมาณได้มาสร้างกราฟไฮเปอร์โบลาซึ่งแสดงตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่สนใจ
- สร้างแผนที่โดยใช้ html javascript (Google Map Open Street Map)



รูปที่ 19-3 การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) สำหรับการคำนวณค่า TDOA (Time Difference of Arrival) ระหว่างเครื่องรับสองเครื่อง (โดยใช้ REF (Reference) สำหรับทำการซิงโครไนส์ (Synchronization))

สคริปต์ (Script) สำหรับดึง (Retrieve) ข้อมูลแสดงไว้ตามด้านล่าง :

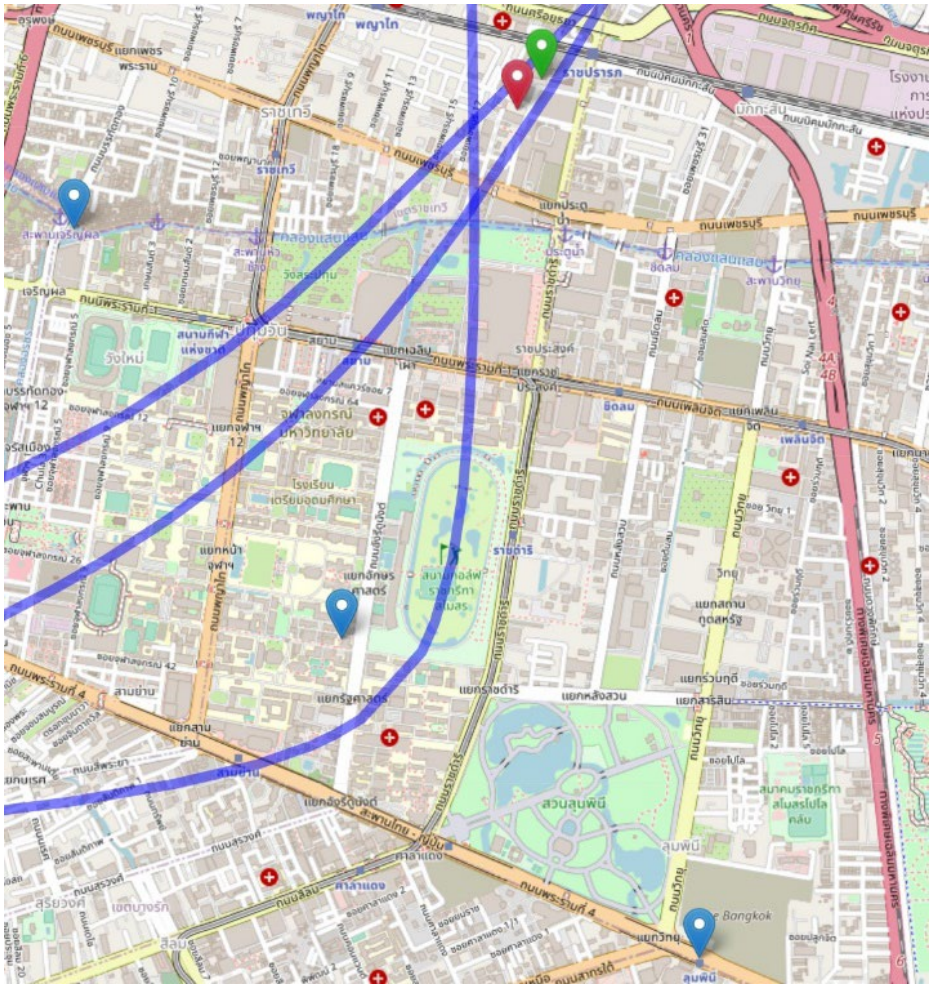
```
freq1=$1

freq2=$2

num_samples=7.2e6

echo "Specified parameters: reference frequency:" $freq1 ", measure frequency:" $freq2 ", samples_per_freq:" $num_samples

echo "--------------------------------------"

echo "Login to PI Radios and capture data simultaneously"

ssh alarm@<rx1_ip_address> /home/alarm/librtlsdr-2freq/build/src/rtl_sdr -f $freq1 -h $freq2 -n $num_samples 1_test.dat &\

ssh alarm@<rx2_ip_address> /home/alarm/librtlsdr-2freq/build/src/rtl_sdr -f $freq1 -h $freq2 -n $num_samples 2_test.dat &\

ssh alarm@<rx3_ip_address> /home/alarm/librtlsdr-2freq/build/src/rtl_sdr -f $freq1 -h $freq2 -n $num_samples 3_test.dat

echo "Copy received data to the master"

scp alarm@<rx1_ip_address>:/home/alarm/1_test.dat ~/<matlab_script_folder>/recorded_data/1_test.dat

scp alarm@<rx2_ip_address>:/home/alarm/2_test.dat ~/<matlab_script_folder>/recorded_data/2_test.dat

scp alarm@<rx3_ip_address>:/home/alarm/3_test.dat ~/<matlab_script_folder>/recorded_data/3_test.dat
```

เนื่องจากเครื่องลูกข่าย (Client) เชื่อมต่อกับอินเตอร์เน็ตผ่านทางระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G การปิง (Ping) จากแต่ละลูกข่ายไปยังเซิร์ฟเวอร์จะต่างกัน นอกจากนั้น ยังต้องพิจารณาการเริ่มต้น (Set Up) การเชื่อมต่อ (Connection) SSH ด้วย เวลาทั้งหมดจะอยู่ในช่วง 0.5 – 1.5 วินาที ดังนั้นในที่นี้จะสมมุติให้ dt < 1.5 วินาที และถ้ากำหนดให้ dt = 1.5 จะได้รับตัวอย่าง (Samples) ของสัญญาณ

19.3.2 ผลการทดสอบในพื้นที่กรุงเทพมหานคร

เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องเวลา ระบบระบุตำแหน่ง (Localization System) จะถูกสร้างโดยใช้โค๊ด Matlab ใน Matlab จะมีฟังก์ชัน (Function) xcorr ซึ่งใช้สำหรับคำนวณค่าสหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างชุดข้อมูลเชิงเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง และ lsqnonlin ซึ่งใช้สำหรับคำนวณคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Value) –ของสมการแสดงตำแหน่งของวิธี TDOA

รูปที่ 19-4 แสดงผลการทำงานของระบบระบุตำแหน่ง สัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล (DVB-T) ความถี่ส่ง 658 MHz ที่อาคารใบหยก สถานีเป้าหมายเป็นสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลความถี่ส่ง 568 MHz ที่อาคารใบหยกเช่นกัน เนื่องจากในพื้นที่กรุงเทพมหานครที่ทดสอบไม่มีสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลอื่น ผลการทดสอบนี้จึงแสดงให้เห็นว่าระบบระบบตำแหน่งทำงานได้เป็นอย่างดีโดยสามารถประมาณตำแหน่งของเป้าหมาย (จุดสีแดง) ได้ใกล้เคียงกับตำแหน่งจริง (จุดสีเขียว) มาก



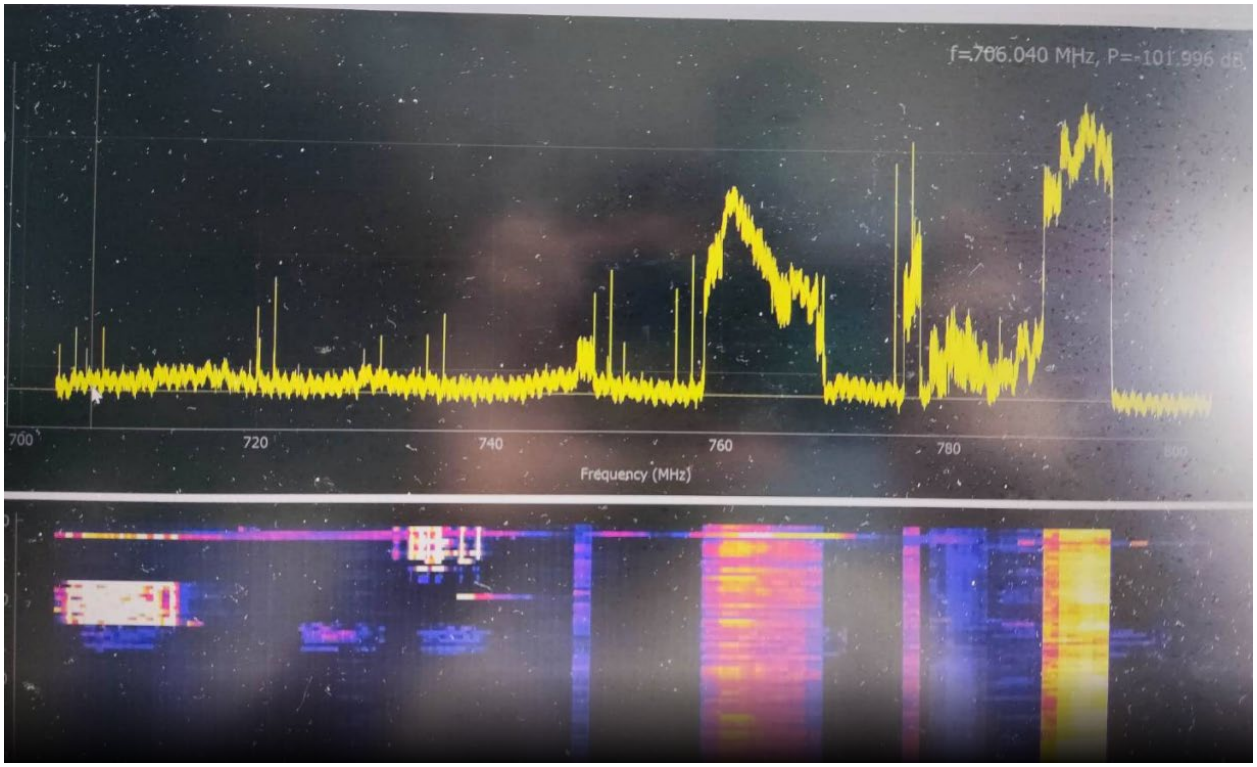
รูปที่ 19-4 ผลการทำงานของระบบระบุตำแหน่ง (Localization System) จุดสีฟ้าคือเซนเซอร์ (Sensor) ที่วัดสัญญาณ จุดสีเขียวคือตำแหน่งของเป้าหมายที่ต้องการระบุตำแหน่ง (Target) จุดสีแดงคือตำแหน่งของเป้าหมายที่ระบบประมาณได้

นอกจากนั้น จากการทดสอบพบว่า ความเชื่อถือได้ (Reliability) และความเสถียร (Stability) ของระบบจะลดลงหากเป้าหมายเป็นสถานีวิทยุอนาล็อก (FM Radio) และจะแย่ที่สุดเมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณอนาล็อกด้วย ปัญหานี้เกิดขึ้นเนื่องจากค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณอนาล็อกจะไม่ได้มีค่ายอดที่โดดเด่น (Distinct Peak) ทำให้การคำนวณที่อ้างอิงจากค่าสหสัมพันธ์ไขว้ไม่มีประสิทธิภาพ

19.4 การใช้และการทดสอบเซนเซอร์สำหรับการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในพื้นที่จังหวัดสระแก้ว

19.4.1 การสำรวจ (Survey) สัญญาณอ้างอิง สัญญาณรบกวน และสัญญาณที่ถูกรบกวน

จากข้อมูลที่รับจากบริษัทดีแทค สัญญาณที่ถูกรบกวนเป็นสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 4G ซึ่งความถี่ด้านขาขึ้น (Uplink) อยู่ในช่วง 713 – 723 MHz และความถี่ขาลง (Downlink) อยู่ในย่าน 768 – 778 MHz แสดงผลการทำงานของระบบระบุตำแหน่ง สัญญาณอ้างอิงเป็นสัญญาณจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล (DVB-T) ความถี่ส่ง 658 ดังแสดงในรูปที่ 19-5



รูปที่ 19-5 การสำรวจ (Survey) คลื่นความถี่ในช่วง 700 – 800 MHz

รูปที่ 19-5 แสดงให้เห็นว่ามีสัญญาณอยู่ในย่าน 758 – 769 MHz ซึ่งส่วนใหญ่ของแถบกว้างความถี่ของสัญญาณนี้อยู่ในบริเวณการ์ดแบนด์ (Guard Band) ของสัญญาณด้านขาลงของดีแทค 4G นอกจากนั้นยังพบว่าจะช่วงเล็ก ๆ ที่สัญญาณนี้ซ้อนทับกับสัญญาณขาลงของดีแทค 4G ซึ่งอาจทำให้เกิดการรบกวนและสร้างปัญหากับการรับส่งสัญญาณของดีแทคได้ ดังนั้นสัญญาณที่พบในช่วง 758 – 769 MHz จึงเป็นสัญญาณรบกวน

จากผลการทดสอบในพื้นที่กรุงเทพมหานครตามหัวข้อ 19.3.2 ระบบระบุตำแหน่งทำงานได้ถูกต้องที่สุดเมื่อสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณเป้าหมายเป็นสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัล (DVB-T) จากแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) ของสัญญาณในช่วง 758 – 769 MHz นี้ที่มีขนาด 11 MHz สัญญาณนี้อาจเป็นสัญญาณโทรทัศน์ดิจิทัลหรือสัญญาณที่ใช้โมดูเลชันแบบดิจิทัล (Digital Modulation)

ในพื้นที่จังหวัดสระแก้วและใกล้เคียงพบสถานี DVB-T 2 สถานี ดังแสดงรายละเอียดของสถานีและรายละเอียดของช่องสัญญาณ (Channel) ไว้ในตารางที่ 19-1 และ 19-2 ตามลำดับ

ตารางที่ 19-1 สถานีโทรทัศน์ดิจิทัล (DVB-T Station) ในพื้นที่จังหวัดสระแก้ว

เลขอ้างอิง	ชนิด	ละติจูด	ลองจิจูด	ความสูง	ชนิดความถี่	#1	#2	#3	#4	#5	กำลังส่ง
5.00	M	102.104231	13.804003	156	Dd	24	42	46	38	34	50
5.02	A	102.804796	14.002854	80	Dc+De	29	43	45	41	25	0.5

ตารางที่ 19-2 คำอธิบายช่องสัญญาณ (Channel) ของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล (DVB-T Station) ในพื้นที่จังหวัดสระแก้ว

หมายเลขช่องสัญญาณ (#)	ย่านความถี่		ความถี่กลาง (Frequency Center)
	ด้านต่ำ (Lower Bound)	ด้านสูง (Upper Bound)	
24	494	502	498
25	502	510	506
29	534	542	538
34	574	582	578
38	606	614	610
41	630	638	634
42	638	646	642
43	646	654	650
45	662	670	666
46	670	678	674

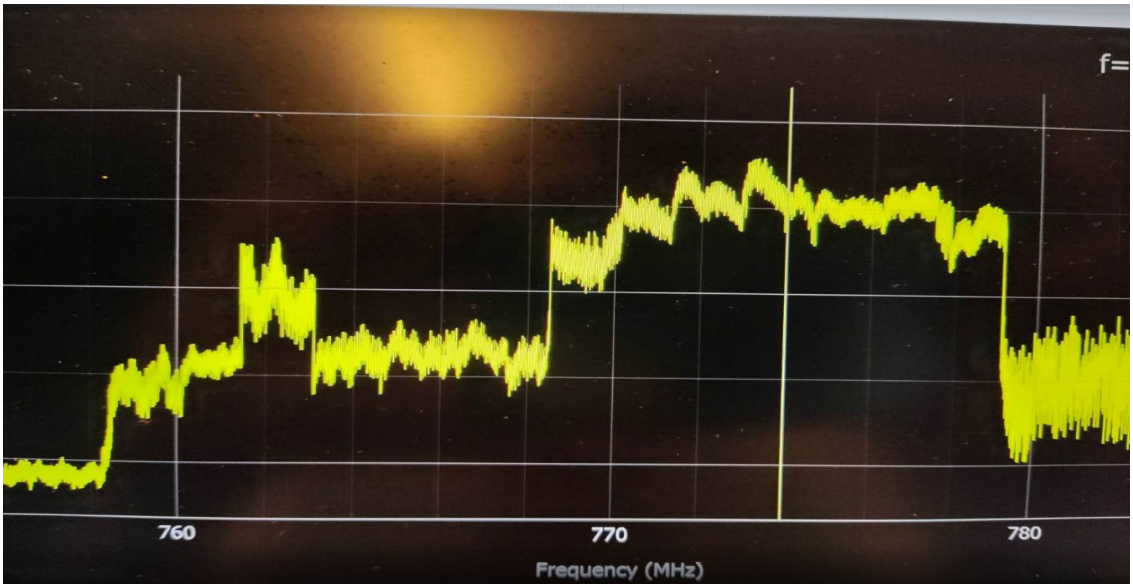
เนื่องจากกำลังส่งของสถานีหมายเลข 5.02 ต่ำเกินไป ในที่นี้จึงใช้สัญญาณจากสถานีหมายเลข 5.0 เป็นสัญญาณอ้างอิง นอกจากนั้นระยะห่างระหว่างสถานีอ้างอิงนี้กับพื้นที่ทดสอบค่อนข้างมาก (ประมาณ 65 กิโลเมตร) จึงต้องมีการตรวจสอบความแรงของสัญญาณเพื่อประเมินความเชื่อถือได้ของสัญญาณอ้างอิง จากการประเมินพบว่าในพื้นที่ทดสอบเซนเซอร์จะรับสัญญาณได้เฉพาะช่องสัญญาณที่ 34 (574 – 582 MHz) แต่ระดับสัญญาณที่รับได้ของช่องสัญญาณนี้อยู่ในระดับต่ำ (ด้วย SNR (Signal to Noise Ratio) เพียง 7 dB) ซึ่งการใช้ช่องสัญญาณนี้เป็นสัญญาณอ้างอิงอาจกระทบกับความน่าเชื่อถือและความเสถียรของอัลกอริทึมได้ แต่เนื่องจากเป็นเพียงช่องสัญญาณเดียวที่ใช้อ้างอิงได้ ในการทดสอบนี้จะใช้สัญญาณจากสถานี 5.0 ในช่วง 574 – 582 MHz เป็นสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณในช่วง 758 – 769 MHz เป็นสัญญาณเป้าหมาย

19.4.2 การเตรียม (Setup) เซนเซอร์

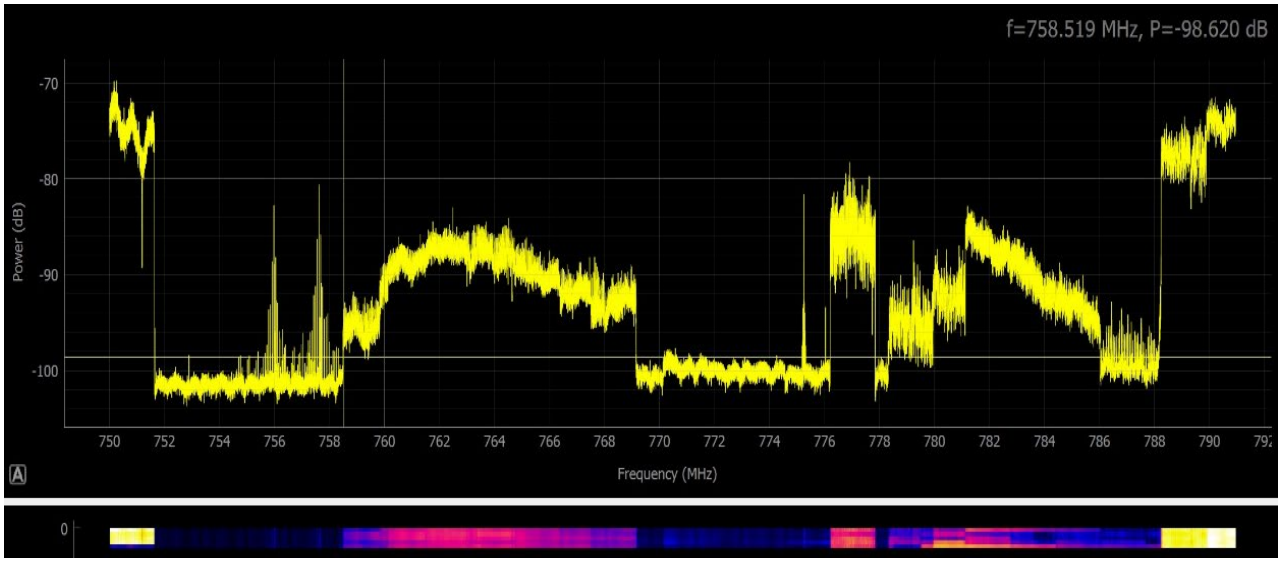
ตารางที่ 19-3 แสดงตำแหน่งของจุดวัดสัญญาณทั้ง 3 จุด

ตารางที่ 19-3 ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดสัญญาณ

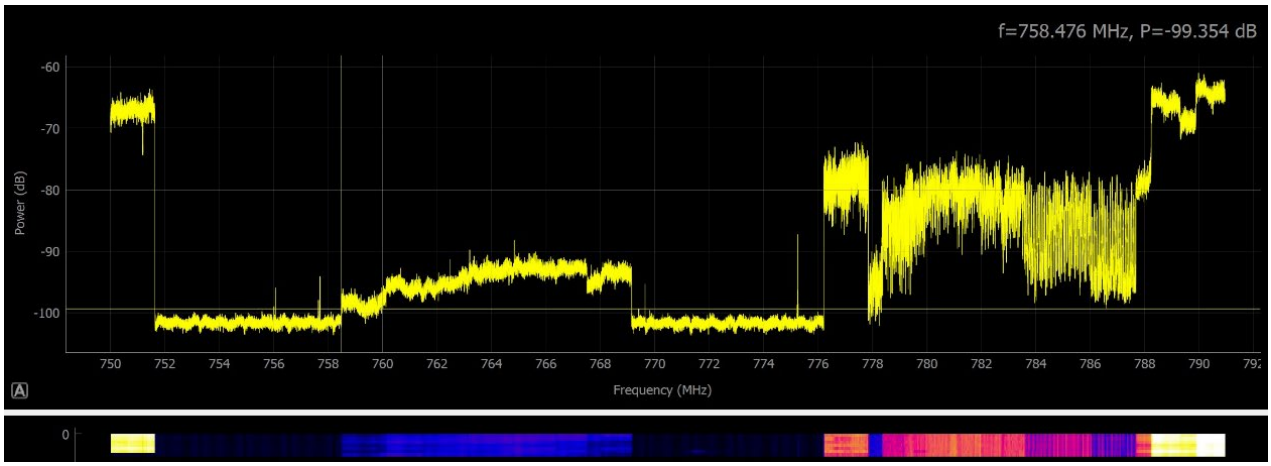
จุดวัดสัญญาณ	ละติจูด (Latitude)	ลองจิจูด (Longitude)
A	13.6959505	102.5002863
B	13.7164400	102.6042520
C	13.7981605	102.7077846



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 19-6 คลื่นความถี่ย่าน 750 – 800 MHz วัด ณ จุดวัดสัญญาณ (a) A, (b) B, (c) C

จากรูปที่ 19-6 (a) เนื่องจากการซ้อนทับของสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณคลื่นโทรศัพท์เคลื่อนที่ อาจมีผลกระทบกับการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ไขว้ และสมการแสดงตำแหน่งที่ได้จากการวัดที่จุดสัดสัญญาณ A (จากการทดสอบพบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ สมการแสดงตำแหน่งที่ได้จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา)

19.4.3 การทดสอบความเชื่อถือได้และความเสถียรของระบบเมื่อวัดสัญญาณอ้างอิง

เนื่องจากในพื้นที่ทดสอบมีสถานีที่ทราบตำแหน่งอยู่เพียงสถานีเดียว ในการทดสอบความเชื่อถือได้และความเสถียรจึงจะใช้สถานีสัญญาณซึ่งทราบตำแหน่งนี้เป็นทั้งแหล่งสัญญาณอ้างอิงและแหล่งสัญญาณเป้าหมาย

จากการทดลองวัดสัญญาณหลาย ๆ ครั้ง พบความผิดพลาดของตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ประมาณได้จากระบบ ดังแสดงในตารางที่ 19-4

ตารางที่ 19-4 ผลการประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนินสัญญาณเป้าหมาย จากการทดลองวัดสัญญาณหลาย ๆ ครั้ง

เลขอ้างอิง	อัตราสุ่ม (Sample Rate) [Msp]	ละติจูด (Latitude)	ลองจิจูด (Longitude)	ความผิดพลาดของตำแหน่งที่ประมาณได้ [เมตร]
1	2.048	13.79256255	102.1647699	6660.00
1	2.48	13.80400293	102.1042319	0.09
2		13.80400293	102.1042319	0.09
3		13.8086796	102.0530863	5554.85
4		13.8086796	102.0530863	5554.85
5		13.7997352	102.1396146	3855.51
1	2.88	13.799415	102.1248267	2284.87
2		13.8040029	102.1042319	0.09
3		13.8043938	102.1100079	626.18
4		13.8043938	102.1100079	626.18
5		13.8043938	102.1100079	626.18
6		13.8040029	102.1042319	0.09
7		13.799852	102.1300465	2829.49
8		13.7644758	102.4950855	42492.55
9		13.7960823	102.1532782	5376.39

จากตารางที่ 19-4 อัตราสุ่มที่ 2.88 Msp ความผิดพลาดของตำแหน่งจะมีค่าน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามที่อัตราสุ่มนี้จะมีความเสถียรน้อยที่สุดเนื่องจาก RTLSDR อาจพลาดการเก็บตัวอย่างสุ่มจำนวนมากไปได้ และตัวอย่างสุ่มที่

พลาดไปเพียงหนึ่งตัวอย่างอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งได้มาก ในกรณีของอัตราสุ่มที่ 2.48 Msp ผลการประมาณจะเสถียรมากกว่าแต่ความผิดพลาดของตำแหน่งจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าการใช้อัตราสุ่ม 2.88 Msp การใช้อัตราสุ่มที่ 2.048 Msp จะให้ผลการประมาณที่เสถียรที่สุด แต่ขนาดของความผิดพลาดของตำแหน่งได้เกิดขึ้นก็จะสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากปัญหาการรบกวนกับสัญญาณอ้างอิงที่จุดวัด A ตามที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 19.4.2 เพื่อให้ความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งมีค่าน้อยที่สุดจะใช้การประมาณโดยการวัดที่อัตราสุ่ม 2.88 Msp หลาย ๆ ครั้ง

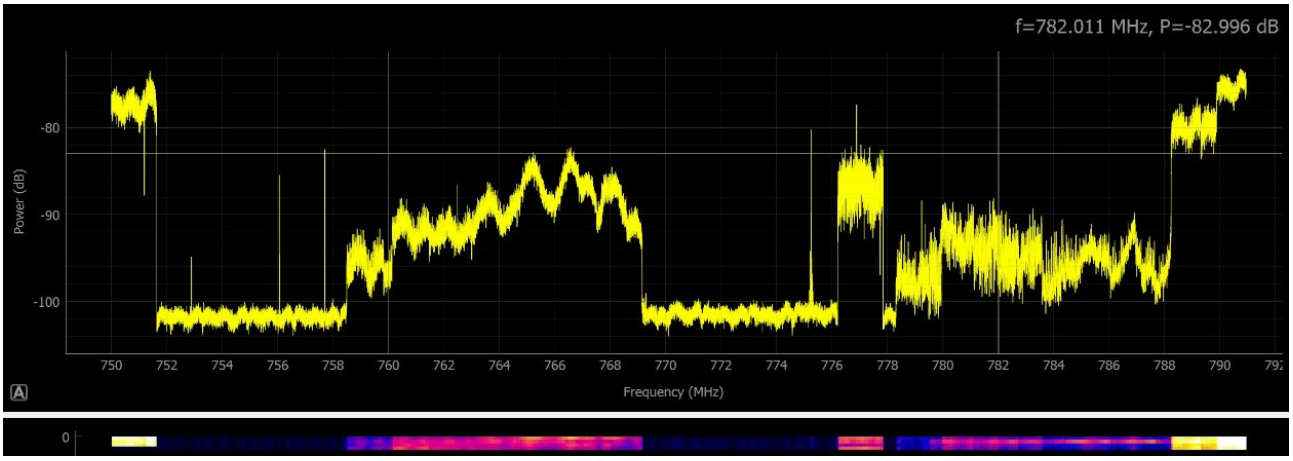
โดยสรุปจากตารางที่ 19-4 ค่าความผิดพลาดของการประมาณตำแหน่งโดยส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่า 5% เมื่อเทียบกับระยะห่าง 65 กม. ระหว่างสถานีอ้างอิงและจุดวัดสัญญาณ ซึ่งถือว่าอยู่ในค่าที่ยอมรับได้

19.4.4 การประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Localization of Interference Source)

เนื่องจากปัญหาการถูกรบกวนของสัญญาณอ้างอิงที่จุดวัดสัญญาณ A ตามที่แสดงในรูปที่ 19-6 (a) ในที่นี้จะกำหนดจุดวัดสัญญาณใหม่แทนจุด A ซึ่งไม่เกิดปัญหาการรบกวนเหมือนกับจุดเดิม ดังแสดงในตารางที่ 19-5 และรูปที่ 19-7

ตารางที่ 19-5 ผลการประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนินสัญญาณเป้าหมาย จากการทดลองวัดสัญญาณหลาย ๆ ครั้ง

จุดวัดสัญญาณ	ละติจูด (Latitude)	ลองจิจูด (Longitude)
A ใหม่	13.7683404	102.6483995
B	13.7164400	102.6042520
C	13.7981605	102.7077846



รูปที่ 19-7 คลื่นความถี่ย่าน 750 – 800 MHz วัด ณ จุดวัดสัญญาณ A ใหม่

ผลการทำงานของระบบประมาณตำแหน่งที่เสนอสรุปไว้ตามตารางที่ 6

ตารางที่ 19-6 ผลการประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนินสัญญาณรบกวน (Localization of Interference Source)

อัตราสุ่ม (Sample Rate) [Mbps]	เลขอ้างอิง	ละติจูด (Latitude)	ลองจิจูด (Longitude)	ความเชื่อถือได้ (Reliability)			ความผิดพลาดในการประมาณ [เมตร]
				AB	AC	BC	
2.048	1	13.71393572	102.6514025	x	x	x	1,367.95
	2	13.71118544	102.670053	x	x	x	2,125.36
	3	13.73539083	102.6578701	o	o	x	1,150.37
	4	13.6488469	102.5467581	x	u	x	14,604.43
	5	13.75204148	102.6528577	x	x	x	3,023.57
2.48	6	13.75197992	102.6158185	u	x	x	5,330.25
	7	13.72487923	102.6575906	x	x	x	107.87
	8	13.73550378	102.6601713	x	x	x	1,217.01
	9	13.73546029	102.6599619	x	x	x	1,205.45
	10	13.70918887	102.6710034	x	x	x	2,359.13
	11	13.70051056	102.5840703	o	x	x	8,311.64
2.88	12	13.73578131	102.659177	x	x	x	1,217.60
	13	13.73622463	102.6597766	x	x	x	1,281.41
	14	13.7503817	102.6126357	o	x	o	5,526.08
	15	13.77663882	102.6554583	o	o	x	5,735.48

ค่า 'x' ในตารางหมายความว่า การทำซิงโครไนส์ของสัญญาณอ้างอิง (Reference Synchronization) เป็นไปได้ด้วยดี 'o' หมายความว่า ค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณอ้างอิงมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดซึ่งจะนำไปสู่ความผิดพลาดของตำแหน่งที่มีค่าสูง 'u' หมายความว่า ค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณเป้าหมายมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด จากตารางที่ 6 ค่าความผิดพลาดในการประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่อัตราสุ่มต่าง ๆ มีค่าดังนี้

- อัตราสุ่ม 2.048 Mbps ค่าความผิดพลาดในการประมาณเฉลี่ยเท่ากับ 2.17 กม. พร้อมส่วนเลี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) 0.83 กม.
- อัตราสุ่ม 2. 48 Mbps ค่าความผิดพลาดในการประมาณเฉลี่ยเท่ากับ 1.22 กม. พร้อมส่วนเลี่ยงเบนมาตรฐาน 0.92 กม.
- อัตราสุ่ม 2.88 Mbps ค่าความผิดพลาดในการประมาณเฉลี่ยเท่ากับ 1.25 กม. พร้อมส่วนเลี่ยงเบนมาตรฐาน 0.05 กม.

ความผิดพลาดในการการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค TDOA ซึ่งอ้างอิงสัญญาณเวลาจากระบบดาวเทียมนำทาง GPS มีที่มาจาก 5 สาเหตุหลักทั้งที่เป็นผลจากอุปกรณ์และผลของช่องสัญญาณไร้สายที่ใช้ ได้แก่

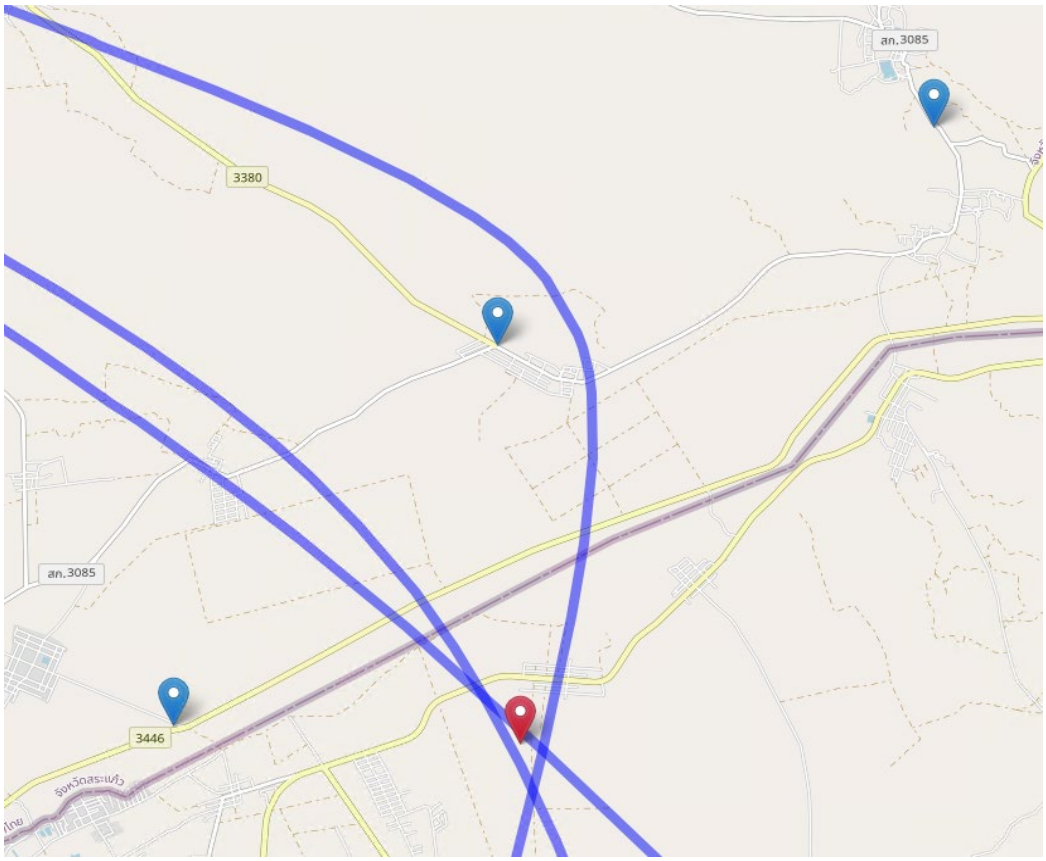
- ค่า SNR (Signal to Noise Ratio) ที่ต่ำ แสดงว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้มีค่าต่ำ หรือสัญญาณที่รับได้ไม่ใช่สัญญาณเป้าหมายแต่เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในย่านความถี่ที่กำลังเฝ้าฟัง (Monitor) อยู่
- สัญญาณรบกวนระหว่างการวัดสัญญาณ (Measurement Noise) ซึ่งจะแสดงให้เห็นออกมาในรูปของการเปลี่ยนแปลง (Variation) ของค่าตำแหน่งที่ประมาณได้
- ความผิดพลาดในการทำซิงโครไนส์ (Synchronization Error) เนื่องจากผิดพลาดของสัญญาณดาวเทียม GPS ที่รับได้ นอกจากนั้นความผิดพลาดในการทำซิงโครไนส์ยังอาจเพิ่มขึ้นระหว่างการทำซิงโครไนส์ของเซนเซอร์ด้วย
- ลักษณะตำแหน่งระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับเซนเซอร์ที่เป็น Non-Line of Sight ซึ่งเป็นความท้าทายที่ใหญ่ที่สุดของการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค TDOA
- ความแปรปรวนของสัญญาณจากการที่สัญญาณเดินทางผ่านหลายเส้นทาง (Multipath) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณมีค่ายอดหลายค่าที่ผิดเพี้ยนไป ทำให้การประมาณความแตกต่างที่สัญญาณมาถึงแต่ละเซนเซอร์มีความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ความผิดพลาดจาก Multipath นี้มักจะเกิดกับสัญญาณที่มีแถบกว้างความถี่แคบ (Narrow Band Signals)

จากตารางที่ 19-7 ความแตกต่างของค่าตำแหน่งที่ประมาณได้แต่ละครั้งอยู่ในช่วง 87 ถึง 5,158 เมตร และโดยส่วนใหญ่จะน้อยกว่า 5% ของระยะห่างระหว่างเป้าหมายที่สนใจและจุดวัด (ในที่นี้ 5% ของระยะห่างดังกล่าวเท่ากับ 3,500 เมตร) ดังนั้นถือว่าความแปรปรวนของการประมาณตำแหน่งของระบบอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

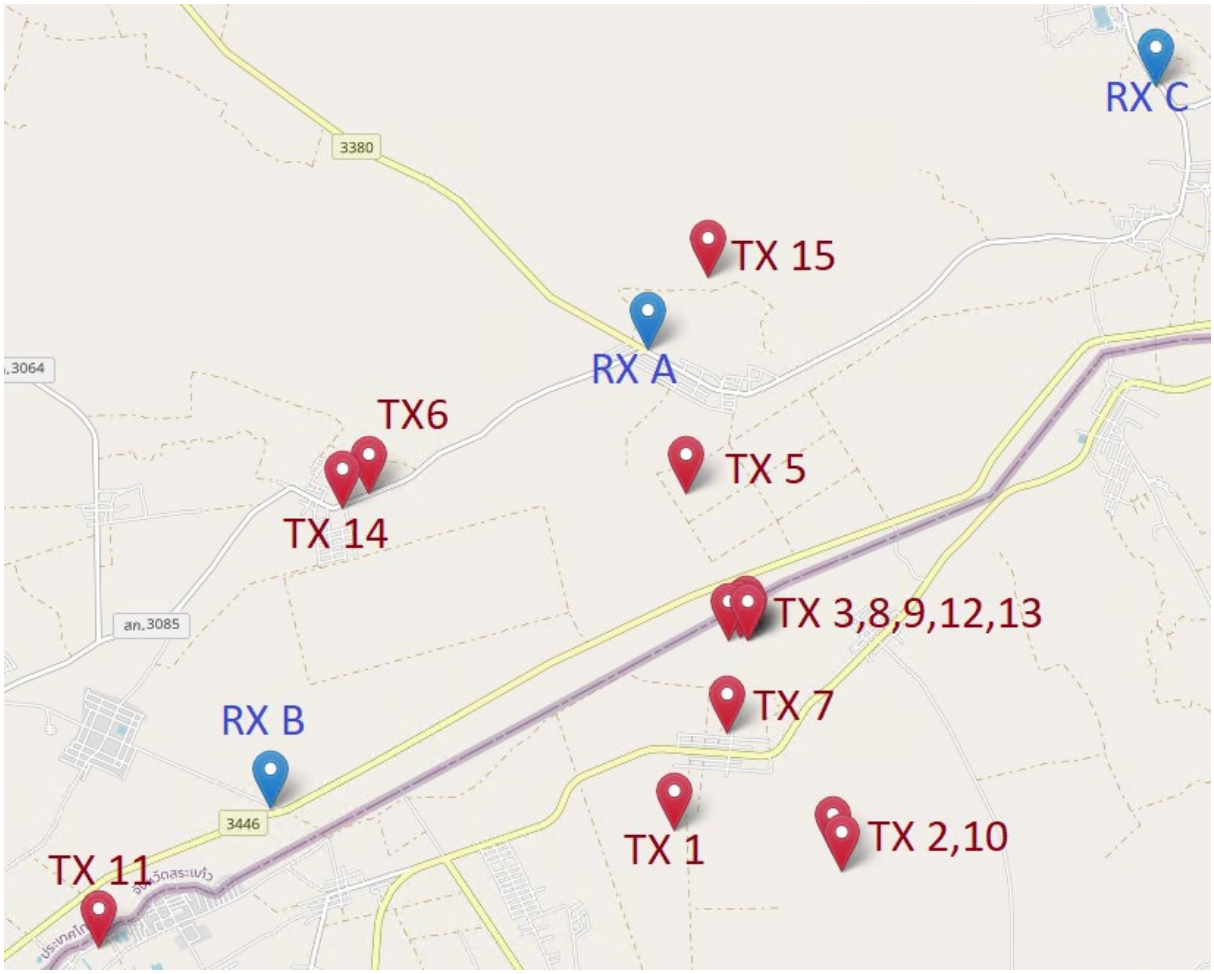
ตารางที่ 19-7 ความต่างระหว่างตำแหน่งที่ประมาณได้ในการทดลอง 13 ครั้ง (พิจารณาเฉพาะเมื่อทำการซิงโครไนส์เซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวได้สำเร็จ)

[หน่วย : เมตร]

	1	2	5	7	8	9	10	12	13
1	0	2040	4245	1390	2581	2569	2184	2573	2641
2	2040	0	4913	2035	2910	2914	245	2980	3001
5	4245	4913	0	3067	2004	1999	5158	1935	1913
7	1390	2035	3067	0	1215	1205	2270	1226	1285
8	2581	2910	2004	1215	0	23	3155	112	91
9	2569	2914	1999	1205	23	0	3159	92	87
10	2184	245	5158	2270	3155	3159	0	3225	3245
12	2573	2980	1935	1226	112	92	3225	0	81
13	2641	3001	1913	1285	91	87	3245	81	0



รูปที่ 19-8 ตัวอย่างของตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่ประมาณค่าได้ (จุดสีแดง) ด้วยวิธี TDOA (Time Difference of Arrival) (จุดสีฟ้าแสดงตำแหน่งของเซนเซอร์วัดสัญญาณ)

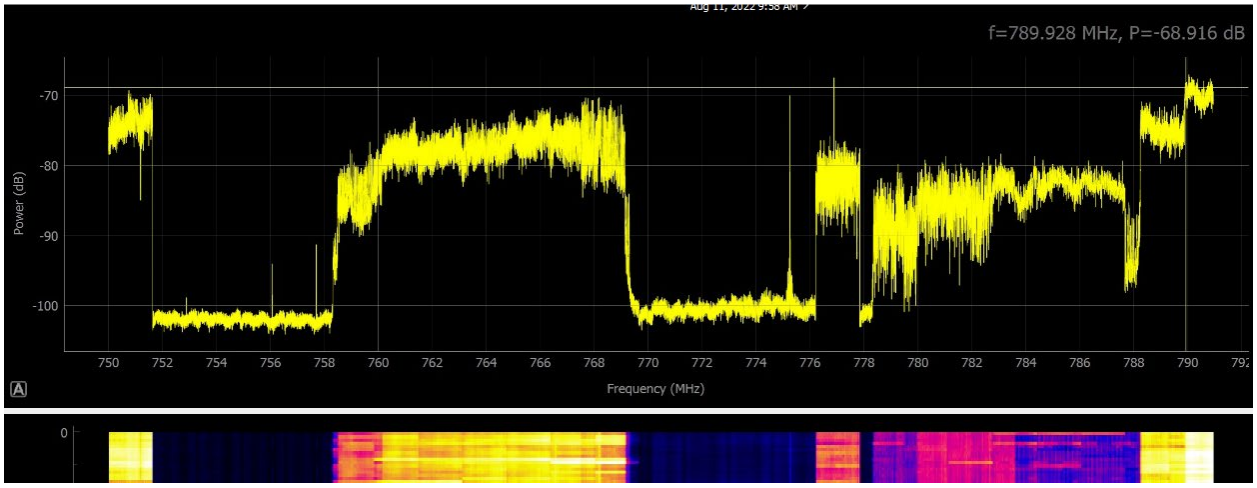


รูปที่ 19-9 ตัวอย่างของตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่ประมาณค่าได้ (Optimal Points) ด้วยวิธี TDOA (Time Difference of Arrival) ของการทดลอง 15 ครั้ง

19.5 การอภิปรายและสรุปผล

จากผลการทดสอบทั้งในพื้นที่กรุงเทพมหานครและจังหวัดสระแก้ว สามารถสรุปประเด็นสำคัญเกี่ยวกับการประมาณตำแหน่งด้วยวิธี TDOA (Time Difference of Arrival) ได้ดังนี้

- ความเชื่อถือได้ของสัญญาณอ้างอิงขึ้นอยู่กับระดับสัญญาณอ้างอิงที่แต่ละเซนเซอร์วัดได้ และนี่เป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการประมาณตำแหน่ง
- ความเสถียรของสัญญาณอ้างอิงขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสัญญาณอ้างอิงและเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณ หากความเสถียรสูงความแปรปรวนของตำแหน่งที่ประมาณได้จากการวัดหลาย ๆ ครั้งก็จะต่ำ
- สัญญาณอ้างอิงไม่ควรถูกรบกวนด้วยสัญญาณอื่น ๆ เนื่องจากจะกระทบต่อผลการประมาณตำแหน่ง ยกตัวอย่างเช่น จุดวัดสัญญาณ A เดิมในหัวข้อ 19.4.2 ที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G ดังแสดงในรูปที่ 19-10



รูปที่ 19-10 ตัวอย่างสัญญาณอ้างอิงที่ถูกรบกวนด้วยสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G ที่ความถี่ประมาณ 768 MHz

- สายอากาศ (Antenna) ของเซนเซอร์จะต้องวางไว้ในจุดที่สูงเพื่อให้สามารถรับสัญญาณได้ดี
- ระบบประมาณตำแหน่งต้องใช้การรับส่งและเก็บข้อมูลจำนวนมาก แต่ละครั้งของการวัดจะมีการรับส่งและเก็บข้อมูลมากกว่า 48*3 = 144 MB (ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 19.2)

บทที่ 20
ผลการจัดอบรมการใช้งานระบบฯ

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดอบรมการใช้งานระบบการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ให้กับเจ้าหน้าที่สำนักงาน กสทช. โดยแบ่งตามระดับของผู้เข้าอบรม ดังนี้

20.1 ระดับผู้ใช้งาน

การจัดอบรมการใช้งานระบบฯ ในระดับผู้ใช้งาน เมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน 2565 ตั้งแต่เวลา 9.00 – 12.00 น. โดยเป็นการจัดอบรมและเผยแพร่ความรู้ในรูปแบบออนไลน์ (Online) ด้วยแอปพลิเคชัน Zoom Meeting ในหัวข้อเรื่อง "การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data (สำหรับบุคคลทั่วไป)"แสดงดังรูปที่ 20-1 ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลการศึกษาการนำเทคโนโลยี AI และ Big Data มาใช้สนับสนุนการบริหารคลื่นความถี่ รวมทั้งให้เจ้าหน้าที่และพนักงานของสำนักงาน กสทช. ในระดับผู้ใช้งานสามารถเข้าใจและใช้งานระบบฯ ได้ ทั้งนี้มีผู้สนใจลงทะเบียนและเข้าร่วมอบรมในระดับผู้ใช้งานรวมทั้งสิ้นจำนวน 100 คน (รายชื่อผู้ลงทะเบียนและเข้าร่วมอบรมดังแสดงในภาคผนวก ก) การฝึกอบรมในครั้งนี้จะมีทั้งในส่วนของภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติซึ่งได้สาธิตแสดงวิธีการใช้งานเว็บแอปที่ได้พัฒนาสร้างขึ้นในโครงการวิจัยนี้ รายละเอียดหัวข้อในการบรรยายและระยะเวลาในการฝึกอบรมสรุปได้ดังตารางที่ 20-1

ตารางที่ 20-1 หัวข้อและระยะเวลาในการอบรมสำหรับระดับผู้ใช้งาน

เวลา	หัวข้อการอบรม
9.00 – 9.15 น.	เกริ่นนำการอบรม / แจ้งวัตถุประสงค์
9.15 – 9.45 น.	การใช้งานฟังก์ชัน การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต (ภาคทฤษฎี)
9.45 – 10.15 น.	การใช้งานฟังก์ชัน การทดสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค (ภาคทฤษฎี)
10.15 – 10.30 น	พักการอบรม
10.30 – 11.00 น	การใช้งานฟังก์ชัน การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต (ภาคปฏิบัติ)
11.00 – 11.30 น	การใช้งานฟังก์ชัน การทดสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค (ภาคปฏิบัติ)
11.30 – 12.00 น	ถามตอบข้อสงสัย

Topic: การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data (สำหรับบุคคลทั่วไป)

Time: Nov 21, 2022 08:45 AM Bangkok

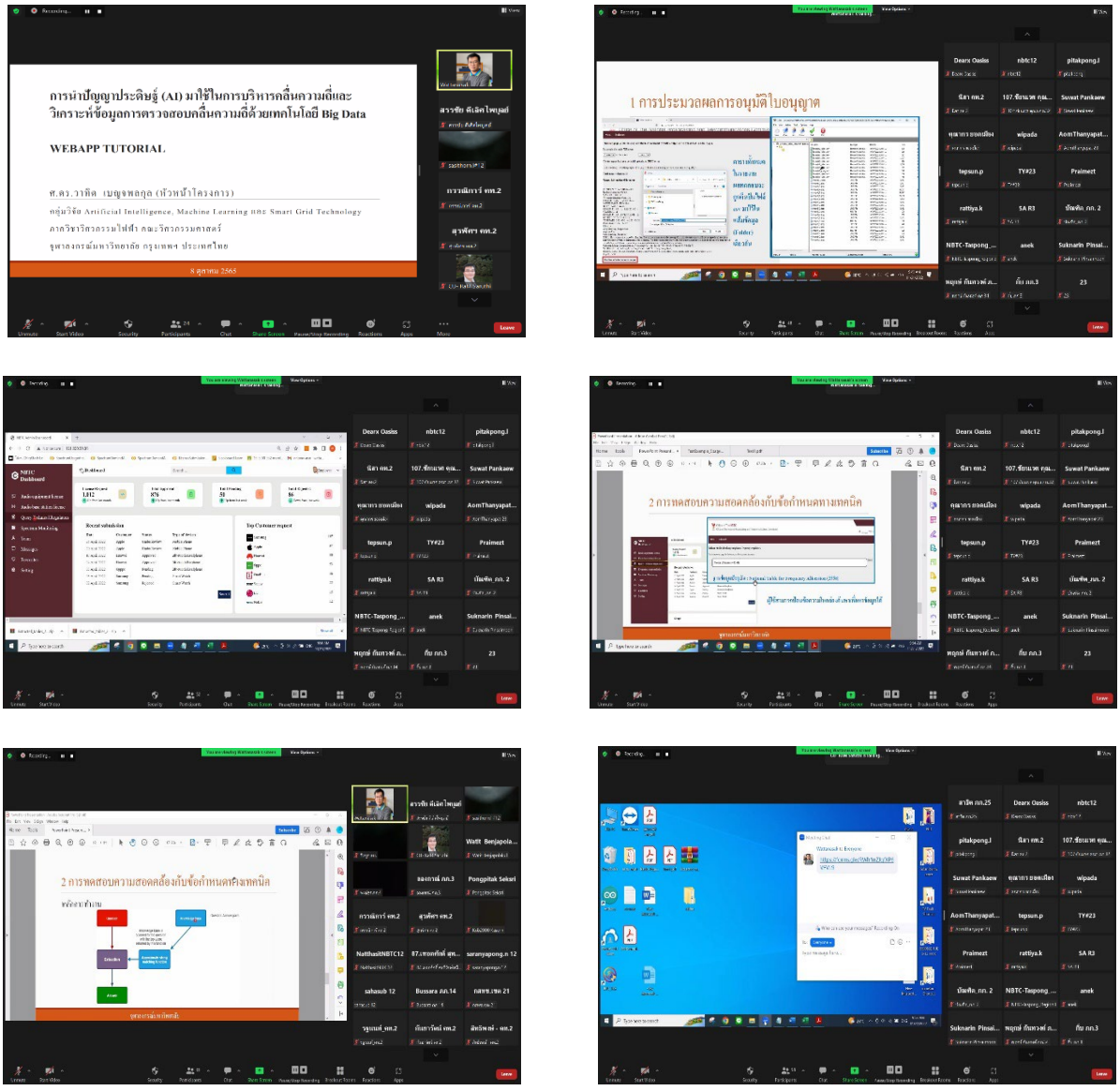
Join Zoom Meeting
https://chula.zoom.us/j/98003390153?pwd=RGJUS09taVNFN0hlRmhKUFhSNk9JUT09

Meeting ID: 980 0339 0153

Password: 140387

รูปที่ 20-1 ลิงค์การอบรมแบบออนไลน์สำหรับระดับผู้ใช้งาน

เอกสารประกอบการบรรยายดังแสดงในภาคผนวก ข ภาพบรรยากาศของการจัดอบรมแบบออนไลน์สำหรับระดับผู้ใช้งานแสดงดังรูปที่ 20-2



รูปที่ 20-2 การจัดอบรมแบบออนไลน์สำหรับระดับผู้ใช้งาน

สำหรับช่วงท้ายของการอบรมในครั้งนี้ได้ให้ผู้เข้าร่วมอมรมทำแบบข้อสอบจำนวน 5 ข้อ บน Google Form เพื่อประเมินความรู้ความเข้าใจระบบการนำเทคโนโลยี AI และ Big Data เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ ซึ่งมีผู้เข้าอบรมทำแบบข้อสอบรวมจำนวนทั้งสิ้น 54 คน โดยคณะผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์คะแนนสำหรับการประเมินผู้เข้ารับการอบรมไว้ที่ร้อยละ 75 ขึ้นไปจึงจะผ่านเกณฑ์ ทั้งนี้ผลคะแนนจากการทำข้อสอบปรากฏว่ามีผู้เข้าอบรมได้คะแนนผ่านเกณฑ์รวมทั้งสิ้นจำนวน 49 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 90.7 รายละเอียดผลการตอบคำถามดังแสดงในภาคผนวก ค

20.2 ระดับผู้ดูแลระบบ

การจัดอบรมการใช้งานระบบฯ ในระดับผู้ดูแลระบบ เมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน 2565 ตั้งแต่เวลา 9.00 – 12.00 น. โดยเป็นการจัดอบรมและเผยแพร่ความรู้ในรูปแบบออนไลน์ (Online) ด้วยแอปพลิเคชัน Zoom Meeting ในหัวข้อเรื่อง "การใช้งานระบบการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ (ผู้ดูแลระบบ)" แสดงดังรูปที่ 20-3 ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลการศึกษาการนำเทคโนโลยี AI และ Big Data มาใช้สนับสนุนการบริหารคลื่นความถี่ รวมทั้งให้เจ้าหน้าที่และพนักงานของสำนักงาน กสทช. ในระดับผู้ดูแลระบบสามารถเข้าใจและใช้งานระบบฯ ได้ มีผู้สนใจลงทะเบียนและเข้าร่วมอบรมในระดับผู้ดูแลระบบรวมทั้งสิ้นจำนวน 24 คน (รายชื่อผู้ลงทะเบียนและเข้าร่วมอบรมดังแสดงในภาคผนวก ก) การฝึกอบรมในครั้งนี้จะมีทั้งในส่วนของภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติซึ่งได้แสดงสาธิตการใช้งานเว็บแอปที่ได้พัฒนาสร้างขึ้นในโครงการวิจัยนี้ รวมทั้งขั้นตอนในการติดตั้งและวิธีการรันโปรแกรม AI ด้วยภาษา Python ใน Google Colab ด้วยเบราว์เซอร์ Chrome รายละเอียดหัวข้อในการบรรยายและระยะเวลาในการฝึกอบรมสรุปได้ดังตารางที่ 20-2

ตารางที่ 20-2 หัวข้อและระยะเวลาในการอบรมสำหรับระดับผู้ดูแลระบบ

เวลา	หัวข้อการอบรม
9.00 – 9.15 น.	เกริ่นนำการอบรม / แจ้งวัตถุประสงค์
9.15 – 9.45 น.	การใช้งานฟังก์ชัน การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต (ภาคทฤษฎี/ภาคปฏิบัติ)
9.45 – 10.15 น.	การใช้งานฟังก์ชัน การทดสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค (ภาคทฤษฎี/ภาคปฏิบัติ)
10.15 – 10.30 น	พักการอบรม
10.30 – 11.00 น	การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่ (ภาคทฤษฎี/ภาคปฏิบัติ)
11.00 – 11.30 น	การประสานงานความถี่ชายแดน (ภาคทฤษฎี/ภาคปฏิบัติ)
11.30 – 12.00 น	การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ด้วย Jupyter Notebook (ภาคทฤษฎี/ภาคปฏิบัติ)

Topic: การใช้งานระบบการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ (ผู้ดูแลระบบ)

Time: Nov 22, 2022 08:45 AM Bangkok

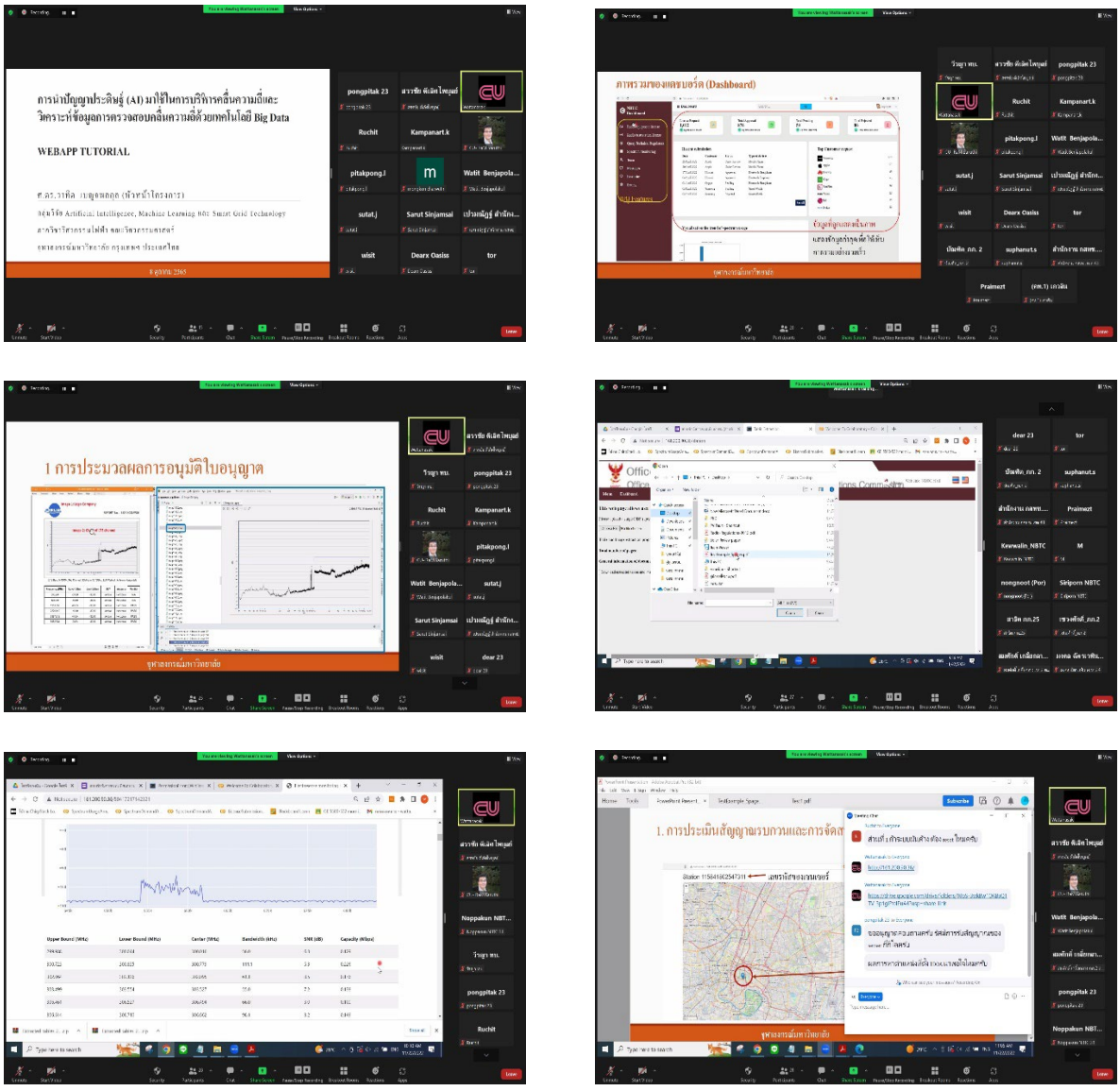
Join Zoom Meeting
https://chula.zoom.us/j/97673191959?pwd=VHZObWZvckttUmt3K3ptWERoenBvZz09

Meeting ID: 976 7319 1959

Password: 089381

รูปที่ 20-3 ลิงค์การอบรมแบบออนไลน์สำหรับระดับผู้ดูแลระบบ

เอกสารประกอบการบรรยายดังแสดงในภาคผนวก ข ภาพบรรยากาศของการจัดอบรมแบบออนไลน์สำหรับระดับผู้ใช้งานแสดงดังรูปที่ 20-4



รูปที่ 20-4 การจัดอบรมแบบออนไลน์สำหรับระดับผู้ดูแลระบบ

สำหรับช่วงท้ายของการอบรมในครั้งนี้ได้ให้ผู้เข้าร่วมอมรมทำแบบข้อสอบจำนวน 8 ข้อ บน Google Form เพื่อประเมินความรู้ความเข้าใจระบบการนำเทคโนโลยี AI และ Big Data เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ ซึ่งมีผู้เข้าอบรมทำแบบข้อสอบรวมจำนวนทั้งสิ้น 10 คน โดยคณะผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์คะแนนสำหรับการประเมินผู้เข้ารับการอบรมไว้ที่ร้อยละ 75 ขึ้นไปจึงจะผ่านเกณฑ์ ทั้งนี้ผลคะแนนจากการทำข้อสอบปรากฏว่าผู้เข้าอบรมทุกคนได้คะแนนผ่านเกณฑ์ทั้ง 10 คน หรือคิดเป็นร้อยละ 100 รายละเอียดผลการตอบคำถามดังแสดงในภาคผนวก ค

20.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

ประโยชน์ที่ได้รับจากการอบรมในครั้งนี้ มีดังนี้

- ได้เรียนรู้ และมีความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้งานระบบการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ให้กับเจ้าหน้าที่สำนักงาน กสทช.
- ได้เพิ่มพูนองค์ความรู้ และเสริมสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับฟังก์ชันการทำงาน ขั้นตอนการใช้งานเว็ปแอปและระบบฯ ที่ได้พัฒนาสร้างขึ้นในโครงการนี้
- ได้ทดลองติดตั้งและและวิธีการรันโปรแกรม AI ใน Google Colab เพิ่มทักษะและความเข้าใจในการทำงานของฟังก์ชันต่าง ๆ รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์พัฒนาและต่อยอดการใช้งานได้
- ได้เรียนรู้ และรับทราบข้อมูลเกี่ยวกับประโยชน์ รวมทั้งเป้าหมายในการพัฒนาการนำ AI มาประยุกต์ใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data

บทที่ 21

บทสรุปและการเผยแพร่ผลการศึกษา

เพื่อพัฒนาการบริหารจัดการคลื่นความถี่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้ประโยชน์จากข้อมูลเกี่ยวข้องที่มีอย่างมากมายและที่จะมีการบูรณาการร่วมกันเพิ่มขึ้นระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ อีกในอนาคต เทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) จะสามารถเพิ่มศักยภาพการตรวจสอบคลื่นความถี่และการรับเรื่องร้องเรียนต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในระดับนโยบายในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าบนพื้นฐานข้อมูลเชิงสถิติที่น่าเชื่อถือ ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ที่เชื่อมโยงถึงกันมีคุณค่าสามารถนำไปใช้ในการวางแผนจัดสรร ออกใบอนุญาต จนถึงกระบวนการสืบค้นตามกระบวนการบริหารคลื่นความถี่ได้

ในโครงการนี้คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาและเสนอกรอบแนวคิด วิธีการ และแผนงานในการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานด้านการบริหารคลื่นความถี่ รวมทั้งได้ศึกษาเปรียบเทียบ (Benchmark) หน่วยงานกำกับดูแลในต่างประเทศหรือองค์กรอื่น ๆ ที่มีการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาประยุกต์ใช้สำหรับงานการบริหารคลื่นความถี่ พร้อมทั้งวิเคราะห์ ข้อดี/ข้อด้อย ของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว และวิเคราะห์สถานะปัจจุบันของการบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. และส่วนต่าง (Gap Analysis) เพื่อนำไปสู่การวางแผนและวิเคราะห์ผลกระทบของการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่

จากการวิเคราะห์ข้างต้น คณะผู้วิจัยได้เสนอรูปแบบเพื่อการจัดทำและพัฒนาโปรแกรม (Software) ที่เป็นต้นแบบ (Prototype) ของเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ โดยประกอบด้วย

- ระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม
- ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม
- ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์
- ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)
- ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination)
- ระบบวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่เพื่อสนับสนุนการจัดสรรคลื่นความถี่

ทั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้จัดรายงานสรุปผลการศึกษาวิจัยที่ได้จากโครงการนี้ในรูปแบบบทความวิชาการ (รายงานฉบับย่อ) เพื่อเผยแพร่แนวทางการเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยนวัตกรรมเทคโนโลยี AI และ Big Data ดังแสดงในหน้าถัดไป

แนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data (รายงานฉบับย่อ)

The Application of Artificial Intelligence (AI) in Spectrum Management, and the Analytics of Frequency Data using Big Data Technology (A Short Summary)

บทคัดย่อ (ความยาวไม่เกิน 250 คำ)

เพื่อสนับสนุนการพัฒนาการบริหารจัดการคลื่นความถี่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยใช้เทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) คณะผู้วิจัยได้ศึกษาและเสนอกรอบแนวคิดการศึกษา วิธีการ และแผนงานในการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานด้านการบริหารคลื่นความถี่ โดยได้ศึกษาเปรียบเทียบ (Benchmark) หน่วยงานกำกับดูแลในต่างประเทศหรือองค์กรอื่น ๆ ที่มีการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาประยุกต์ใช้สำหรับงานการบริหารคลื่นความถี่ พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อดี/ข้อด้อย รวมถึงได้วิเคราะห์สถานะปัจจุบันของการบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) และส่วนต่าง (Gap Analysis) เพื่อนำไปสู่การวางแผนและวิเคราะห์ผลกระทบของการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่

จากการวิเคราะห์ข้างต้น คณะผู้วิจัยได้เสนอรูปแบบเพื่อการจัดทำและพัฒนาต้นแบบ (Prototype) ของเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) ที่ประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่

คำสำคัญ: การบริหารจัดการคลื่นความถี่ บิ๊กดาต้า ปัญญาประดิษฐ์ การวิเคราะห์ข้อความ การประมาณตำแหน่ง ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง คุณลักษณะที่สำคัญ

Abstract (ความยาวไม่เกิน 250 คำ)

In order to support the development of more efficient spectrum management by using Big Data and Artificial Intelligence (AI), the authors study and propose a methodological framework that allows the application of Big Data and AI into spectrum management. The authors benchmark how spectrum regulatories across the world are currently applying Big Data and AI technologies into their spectrum management, together with advancetage(s) and disadvantage(s) of each of the approaches. The authors analyze the current status of the Spectrum Management under the Office of National Broadcasting and Telecommunications Comission (NBTC). Moreover, the authors identify gaps that might exist between the current status and the future in which Big Data and AI technologies will be applied, and how to close the gaps so that the more efficient spectrum management could be achieved.

Based on these studies and analyses, the authors propose a framework and a prototype of a web application applying Big Data and AI Platform to support the Spectrum Management Miission of the Office of NBTC.

Keywords: Spectrum Management, Big Data, Artificial intelligence (AI), Text Analytics, Localization, Time Difference of Arrival (TDOA), Feature Importance

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการวิจัย

ความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีและการเติบโตขยายตัวของกิจการโทรคมนาคม กิจการกระจายเสียง และกิจการโทรทัศน์ ส่งผลให้ความต้องการใช้งานคลื่นความถี่มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในทั่วทุกพื้นที่ เนื่องจากคลื่นความถี่เป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดจึงจำเป็นต้องมีการติดตาม ตรวจสอบ และบริหารคลื่นความถี่ เพื่อให้มีการใช้งานคลื่นความถี่เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกันทั้งจากกิจการประเภทเดียวกันและต่างประเภท สามารถรองรับการใช้งานคลื่นความถี่จากผู้ใช้จำนวนมากและหลากหลายยิ่งขึ้นในอนาคต

ปัจจุบัน สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ได้ดำเนินการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ในทั่วภูมิภาคของประเทศไทย โดยมีสำนักงาน กสทช. ภาค 1 ถึง 4 และสำนักงาน กสทช. เขตทั่วประเทศ รวมจำนวน 21 เขต เพื่อทำหน้าที่บริหารจัดการและปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับงานตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ ตลอดจนการรับและพิจารณาเรื่องร้องเรียนจากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งภาครัฐ ภาคเอกชน และประชาชนในพื้นที่ต่าง ๆ ทั้งนี้ สำนักงาน กสทช. ได้นำเครื่องมือและระบบการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ต่าง ๆ ทั้งในรูปแบบ สถานีหลัก (Fixed Station) สถานีเคลื่อนที่และสถานีระยะไกล (Mobile and Remote Station) และอุปกรณ์เคลื่อนที่ได้ (Portable Equipment) อีกทั้งยังมีระบบการรับเรื่องร้องเรียนที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์มาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานของสำนักงาน กสทช. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการปฏิบัติงานและตอบสนองความต้องการของประชาชนมากขึ้น

การตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ตามมาตรฐานของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ-ภาคการสื่อสารวิทยุ หรือ ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication sector) ได้กำหนดบริบทสำหรับการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่หลัก ๆ ดังนี้

- ตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่ตามที่ได้รับอนุญาตให้มีการใช้งานเป็นไปตามเงื่อนไข
- การสังเกตการณ์คลื่นความถี่และวัดการครอบครองคลื่นความถี่
- ตรวจสอบกรณีการเกิดการรบกวนที่สร้างความเสียหาย
- ตรวจสอบและแก้ปัญหาการลักลอบใช้งานคลื่นความถี่โดยไม่มีใบอนุญาต

อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อมูลการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่และเรื่องร้องเรียนที่ได้รับจากผู้ร้องเรียนมีประเด็นที่หลากหลายและเป็นข้อมูลขนาดใหญ่ นอกจากนี้ในการกำหนดแนวทางการบริหารคลื่นความถี่ทั้งเพื่อการจัดสรรคลื่นความถี่ใหม่หรือการแก้ไขปัญหาการรบกวนในแต่ละกรณี จำเป็นต้องรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การใช้งานคลื่นความถี่ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ข้อมูลการตรวจสอบการใช้คลื่นความถี่และข้อร้องเรียนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เป็นต้น ส่งผลให้เกิดความยุ่งยากในการรวบรวมข้อมูลที่หลากหลายและวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อนจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยเพื่อช่วยในการจัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่ รวมทั้งการพัฒนาระบบประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อเพิ่มศักยภาพการตรวจสอบคลื่นความถี่และการรับเรื่องร้องเรียนต่าง ๆ รวมทั้งสนับสนุนการตัดสินใจในระดับนโยบายในการบริหารคลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าบนพื้นฐานข้อมูลเชิงสถิติที่น่าเชื่อถือ

1.2 วัตถุประสงค์

คณะผู้วิจัยเล็งเห็นว่า เทคโนโลยี Big Data และ AI จะเพิ่มศักยภาพการตรวจสอบคลื่นความถี่และการรับเรื่องร้องเรียนต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในระดับนโยบายในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าบนพื้นฐานข้อมูลเชิงสถิติที่น่าเชื่อถือ ในอนาคตจะมีการนำข้อมูลมารวมกันเป็น Big Data จากหลายแหล่งเช่น กระทรวงสาธารณสุข กระทรวงมหาดไทย กระทรวงพาณิชย์ และกรมสรรพากร เป็นต้น นอกจากนี้ข้อมูลการตรวจสอบคลื่น

ความถี่ที่เชื่อมโยงถึงกันมีมูลค่าสามารถนำไปใช้ในการวางแผน จัดสรร ออกใบอนุญาต จนถึงกระบวนการสืบค้นตามกระบวนการบริหารคลื่นความถี่ได้ ทั้งนี้ด้วยความสามารถของ AI หากสามารถวิเคราะห์ปริมาณคลื่นความถี่ตามช่วงเวลา วัน เดือน ปี รวมถึงกรณีการรบกวนหากสามารถวิเคราะห์หาสาเหตุของการรบกวนทั้งเชิงพื้นที่ แหล่งแพร่คลื่น และประเภทของการรบกวนได้ จะช่วยให้การกำหนดหลักเกณฑ์การใช้คลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตโครงการ

ในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้

- ศึกษาและเสนอ กรอบแนวคิดการศึกษา วิธีการ และแผนงานในการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานด้านการบริหารคลื่นความถี่ ทั้งนี้ได้สรุปความพื้นฐานที่จำเป็น และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ Big Data และ AI ในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ไว้ในหัวข้อที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
- ศึกษาเปรียบเทียบ (Benchmark) หน่วยงานกำกับดูแลในต่างประเทศหรือองค์กรอื่น ๆ ที่มีการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาประยุกต์ใช้สำหรับงานการบริหารคลื่นความถี่ พร้อมทั้งวิเคราะห์ ข้อดี/ข้อด้อย ของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว (หัวข้อ 4)
- ศึกษา วิเคราะห์สถานะปัจจุบันของการบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. (หัวข้อ 5) รวมถึงวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) เพื่อนำไปสู่การวางแผนและวิเคราะห์ผลกระทบของการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่ (หัวข้อ 6)
- เสนอรูปแบบเพื่อการจัดทำและพัฒนา Software ที่เป็นต้นแบบ (Prototype) ของเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ โดยประกอบด้วย (หัวข้อ 7)
    - ระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม (หัวข้อที่ 7 และ 8)
    - ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม (หัวข้อที่ 8)
    - ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ (หัวข้อที่ 9)
    - ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) (หัวข้อที่ 10)
    - ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) (หัวข้อที่ 10 และ 11)
    - ระบบวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่เพื่อสนับสนุนการจัดสรรคลื่นความถี่ (หัวข้อที่ 12)

2. ความรู้พื้นฐาน

2.1 Big Data

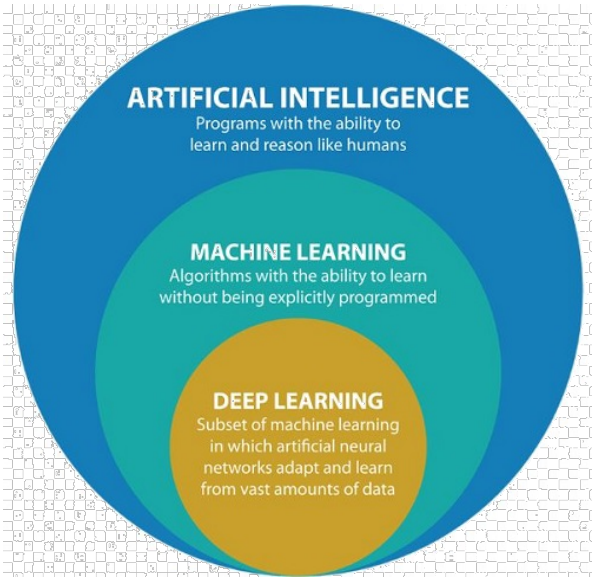
เทคโนโลยี Big Data เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีสำคัญที่เป็นกระแสในยุคอุตสาหกรรมดิจิทัลและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกทั้งภาครัฐและภาคธุรกิจ โดยนำข้อมูลขนาดใหญ่มาวิเคราะห์เพื่อใช้ประกอบการตัดสินใจเรื่องสำคัญในการพัฒนาองค์กร Big Data เป็นได้ทั้งข้อมูลจากภายในองค์กรและข้อมูลที่ได้รับจากภายนอก ซึ่งระดับของข้อมูลที่

จัดเก็บมีทั้งข้อมูลเชิงลึกที่มีรายละเอียดในประเด็นที่สนใจไปจนถึงข้อมูลเชิงกว้างที่มีรายละเอียดหลากหลาย โครงสร้างของ Big Data แบ่งลักษณะพื้นฐานของข้อมูลออกเป็น 5 ประเภทหลักที่เรียกว่า "5Vs Model" ดังนี้

- ปริมาณ (Volume) เป็นลักษณะข้อมูลที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนมหาศาล
- ความเร็ว (Velocity) เป็นลักษณะข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลง มีการหลั่งไหลข้อมูลมาอย่างรวดเร็วหรือแบบเวลาจริง (Real-time)
- ความหลากหลาย (Variety) เป็นลักษณะข้อมูลที่มีหลากหลายรูปแบบแตกต่างกันออกไป ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งแบบมีโครงสร้าง กึ่งโครงสร้าง และไม่มีโครงสร้างมาตรฐาน
- คุณค่า (Value) เป็นลักษณะข้อมูลที่มีคุณค่า สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริง
- ความถูกต้อง (Veracity) เป็นลักษณะข้อมูลจริงที่มีความน่าเชื่อถือในการนำข้อมูล Big Data ซึ่งมีคุณลักษณะของข้อมูลที่หลากหลายและมีจำนวนมหาศาลทั้งรูปภาพ เสียง ข้อความ ตัวเลข กราฟฟิก ไฟล์เอกสาร และข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ มาใช้ให้เกิดประโยชน์

2.2 ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI)

ปัจจุบันมีงานวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานในธุรกิจและอุตสาหกรรมดิจิทัลกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก โดยมีเป้าหมายสำคัญเพื่อพัฒนาธุรกิจและอุตสาหกรรมด้วยชุดข้อมูลที่ถูกต้องและการสร้างแพลตฟอร์ม (Platform) AI มาใช้เพื่อให้สามารถวางแผนนโยบายและคาดการณ์สถานการณ์อนาคตได้อย่างถูกต้องแม่นยำเพื่อตอบโจทย์ความต้องการของลูกค้าหรือผู้ใช้งานยุคใหม่ โดยหลักการทั่วไป AI เป็นการนำชุดข้อมูลมาสอนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้เรียนรู้และวิเคราะห์ได้เสมือนมนุษย์ โดยการเรียนรู้ของเทคโนโลยี AI ที่อยู่ในกระแสมากที่สุด ได้แก่ แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning, ML) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning, DL) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI)
(ที่มา: www.qubole.com/blog/deep-learning-the-latest-trend-in-ai-and-ml)

ML เป็นส่วนหนึ่งของ AI โดยการป้อนข้อมูลขนาดใหญ่ให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และให้เครื่องคอมพิวเตอร์สามารถเรียนรู้ด้วยตัวเอง โดยใช้โปรแกรมที่ซับซ้อนหรืออัลกอริทึม (Algorithms) ในการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ จดจำรูปแบบของข้อมูล และทำนายผลลัพธ์ออกมาให้มีข้อผิดพลาดน้อยที่สุด โปรแกรมคอมพิวเตอร์จะหาวิธีทำงานจนสำเร็จด้วยตัวมันเอง และจะยิ่งฉลาดขึ้นเมื่อได้เรียนรู้มากขึ้น

DL เป็นส่วนหนึ่งของ ML ซึ่งมีลักษณะการทำงานที่เลียนแบบให้เหมือนกับโครงข่ายเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ DL เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีแบบจำลองคณิตศาสตร์แบบชั้น (Layers) ที่แตกต่างและเชื่อมโยงเป็นโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) เพื่อเรียนรู้ข้อมูล โดยใช้วิธีการประมวลผลแบบคู่ขนานเพื่อทำให้สามารถเข้าใจและเรียนรู้จากข้อมูลจำนวนมากที่ได้รับอย่างต่อเนื่อง ความฉลาดของแบบจำลองมักเพิ่มตามจำนวนชั้นที่ซับซ้อนมากขึ้นในแบบจำลอง

การนำ AI มาใช้จำเป็นต้องมีการศึกษาและพิจารณาเลือกใช้โปรแกรมที่มีเครื่องมือสนับสนุนที่ความเหมาะสมและสามารถนำมาใช้งานให้ได้ตรงตามเป้าหมายและวัตถุประสงค์ แนวทางในการนำคุณสมบัติของ AI มาใช้เพิ่มศักยภาพในการบริหารคลื่นความถี่ ดังแสดงในตารางที่ 1 AI สามารถนำเข้ามาใช้กับหลายกระบวนการของการบริหารคลื่นความถี่ไม่ว่าจะเป็น การวางแผนบริหารคลื่นความถี่ (Planning) การบริหารจัดการให้เกิดการใช้คลื่นความถี่ร่วมกันเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนคลื่นความถี่ (Sharing) การจัดสรรและอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่ (Authorization) การตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ (Monitoring) และการกำหนดมูลค่าของคลื่นความถี่ที่เหมาะสม (Pricing)

ตารางที่ 1 การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่

คุณสมบัติของ AI	**การบริหารคลื่นความถี่ (Spectrum Management)**				
	การวางแผน (Planning)	**การใช้ร่วมกัน (Sharing)**	**การอนุญาต (Authorization)**	**การตรวจสอบ (Monitoring)**	**การกำหนดราคา (Pricing)**
ค้นหาและเพิ่มประสิทธิภาพ	✓	✓	✓		✓
เหตุผลเชิงตรรกะ		✓	✓		
การคิดความน่าจะเป็นสำหรับความไม่แน่นอน	✓				✓
การเรียนรู้ข้อมูลสถิติและจัดประเภท				✓	
โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ที่ทำงานเลียนแบบโครงข่ายเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์				✓	
การประเมินผลความเติบโต			✓		✓

ตัวอย่างงานวิจัยและกรณีศึกษาการนำ AI มาใช้งานในด้านคลื่นความถี่ในต่างประเทศ เช่น บริษัท National Instruments ได้พัฒนาอัลกอริทึม ML และ DL สำหรับการบริหารคลื่นความถี่วิทยุ โดยการพัฒนาวิธีการตรวจวัดรูปแบบสัญญาณด้วยเซ็นเซอร์และวิเคราะห์ข้อมูลพารามิเตอร์ของคลื่นความถี่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน

ทรัพยากรคลื่นความถี่ สำนักงานโครงการวิจัยขั้นสูงของกระทรวงกลาโหม (DARPA) ของสหรัฐอเมริกาได้มีโครงการจัดแข่งขันเพื่อค้นหาผู้ชนะจากทั่วโลกในการแก้ไขปัญหาความขาดแคลนคลื่นความถี่และการบริหารจัดการสำหรับการใช้งานคลื่นความถี่แบบใหม่ด้วย AI โดยมีเงินรางวัลสำหรับผู้ชนะเกือบ 4 ล้านดอลลาร์สหรัฐ เป็นต้น

ในประเทศไทย การก้าวเข้าสู่ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมดิจิทัลและนโยบายไทยแลนด์ 4.0 ที่มีเป้าหมายสำคัญในการขับเคลื่อนประเทศด้วยชุดข้อมูลที่ถูกต้องและสามารถคาดการณ์สถานการณ์อนาคตได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ได้มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และ AI ในหน่วยงานรัฐบาลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารข้อมูล เช่น บัตรสวัสดิการแห่งรัฐที่มีการเชื่อมโยงข้อมูลระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ เป็นต้น

2.3 กรอบการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level (TRL) Framework) (ปรากฏในหัวข้อ 5 ความพร้อมใช้งานของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์)

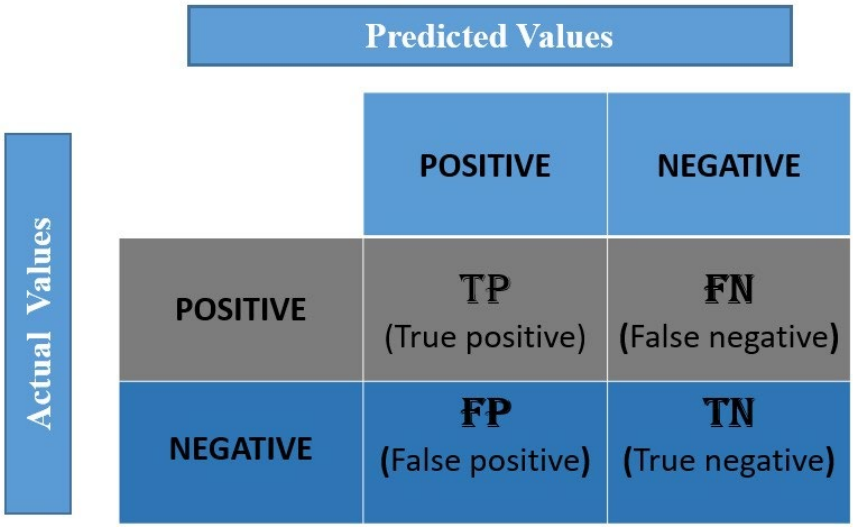
กรอบการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) ถูกพัฒนาโดยองค์การนาซ่า (National Aeronautics and Space Administration: NASA) ของสหรัฐอเมริกา TRL ช่วยให้สามารถประเมินความพร้อมที่เทคโนโลยีต่าง ๆ จะถูกนำไปใช้งานได้จริงได้บนฐานการประเมินเดียวกัน โดยมีการให้คะแนนระดับความพร้อมจาก 1 ถึง 9 โดยที่ระดับ 9 หมายถึงเทคโนโลยีมีความพร้อมสูงสุดที่จะถูกนำไปใช้งาน [Mih17] ในปี พ.ศ. 2553 คณะกรรมการสหภาพยุโรป (European Commission) ออกข้อแนะนำให้โครงการวิจัยและนวัตกรรมที่ได้รับทุนจากสหภาพยุโรปนำเอากรอบนี้ไปประเมินระดับความพร้อมด้านเทคโนโลยีของโครงการโดยแบ่งเป็น 9 ระดับตามตารางที่ 2 [Tec14]

ตารางที่ 2 ระดับความพร้อมของเทคโนโลยีตาม Technology Readiness Level [Tec14]

TRL 1 – basic principles observed	TRL 6 – technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
TRL 2 – technology concept formulated	TRL 7 – system prototype demonstration in operational environment
TRL 3 – experimental proof of concept	TRL 8 – system complete and qualified
TRL 4 – technology validated in lab	TRL 9 – actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)
TRL 5 technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)	

2.4 การวัดสมรรถนะ (Performance Matrix) ของการใช้ปัญญาประดิษฐ์กับตรวจจับและดึงข้อมูล (ปรากฏในหัวข้อ 8 ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม และ 9 ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์)

มาตรวัดสมรรถนะ (Performance Metric) ที่จำเป็นในการประเมินความแม่นยำของแบบจำลอง AIที่เสนอในการตรวจจับและดึงข้อมูลได้แก่ คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) ซึ่งเป็นตารางที่ช่วยให้เห็นสมรรถนะของอัลกอริธึม (Algorithm) สำหรับการเรียนรู้ ตามที่แสดงในรูปที่ 2 ค่าตามแนวนอนจะแสดงค่าจริงของสิ่งที่ตรวจจับ (ซึ่งในที่นี้ใช้การวิเคราะห์ข้อความในเอกสารเป็นตัวอย่าง) ในขณะที่ค่าตามแนวตั้งจะแสดงผลการทำนายโดยใช้ AI ซึ่งผลของการตรวจจับจะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งสิ้น 4 กรณีดังนี้



รูปที่ 2 คอนฟิวชันเมตริกซ์ (Confusion Matrix) เพื่อวัดสมรรถนะ (Performance) ของปัญญาประดิษฐ์ (AI)

- True Positive (TP): AI ทำนายว่า ข้อความที่กำลังพิจารณาปรากฏในเอกสาร (Predicted Values = "Positive") และข้อความนั้นก็อยู่ในเอกสารจริง (Actual Values = "Positive")
- True Negative (TN): AI ทำนายว่า ข้อความที่กำลังพิจารณาไม่ปรากฏในเอกสาร (Predicted Values = "Negative") และข้อความนั้นก็ไม่อยู่ในเอกสารจริง (Actual Values = "Negative")
- False Positive (FP): AI ทำนายว่า ข้อความที่กำลังพิจารณาปรากฏในเอกสาร (Predicted Values = "Positive") แต่ในความเป็นจริงข้อความนั้นไม่อยู่ในเอกสาร (Actual Values = "Negative") เรียกความผิดพลาดแบบนี้ว่า ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type 1 Error)
- False Negative (FN): AI ทำนายว่า ข้อความที่กำลังพิจารณาไม่ปรากฏในเอกสาร (Predicted Values = "Negative") แต่ในความเป็นจริงข้อความนั้นอยู่ในเอกสาร (Actual Values = "Positive") เรียกความผิดพลาดแบบนี้ว่า ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type 2 Error)

คอนฟิวชันเมตริกซ์นี้จะสามารถนำไปคำนวณมาตรวัดสมรรถนะลำดับที่สองซึ่งได้แก่ Precision and Recall (หรือ Sensitivity) สำหรับประเมินสมรรถนะของโมเดล AI ดังแสดงในตารางที่ 3

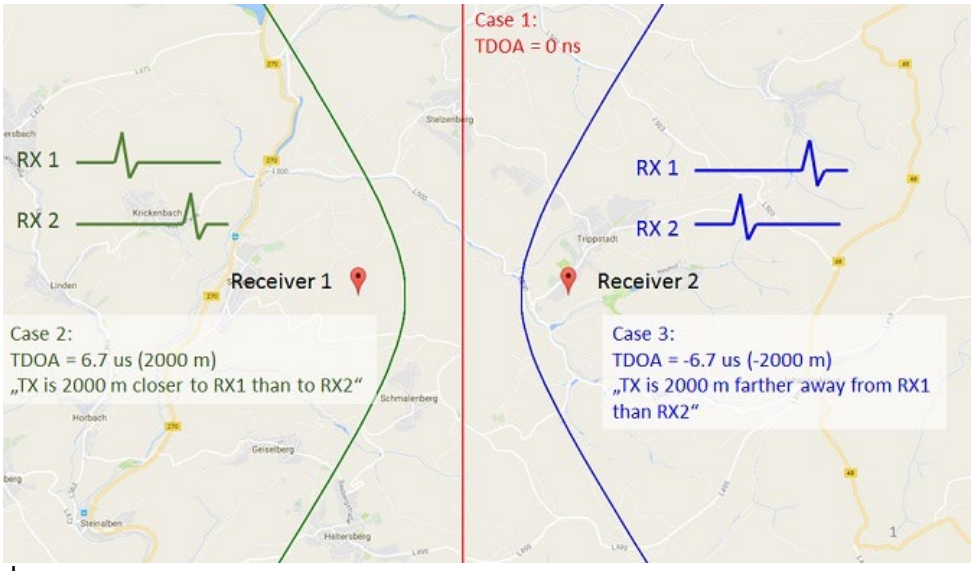
ตารางที่ 3 คำอธิบายการคำนวณมาตรวัดสมรรถนะ (Performance Metric) ของโมเดลปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI)

มาตรวัด	สูตรการคำนวณ	คำจำกัดความ (Definition)
Accuracy	(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)	อัตราส่วนของการทำนายที่ถูกต้องทั้งหมด
Precision	TP/(TP+FP)	ความถูกต้องของการทำนายว่า Positive
Recall (Sensitivity)	TP/(TP+FN)	อัตรา Positive ที่ระบุได้ (True Positive Rate)
Specificity	TN/(TN+FP)	อัตรา Negative ที่ระบุได้ (True Negative Rate)

2.5 การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดการรบกวน (Interference Source Location Identification) ด้วยเทคนิค Time Difference of Arrival (TDOA) (ปรากฏในหัวข้อ 11 ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน)

สมมุติว่าสัญญาณถูกส่งออกจากเครื่องส่งที่ไม่เป็นที่รู้จัก (Unknown Transmitter) และถูกรับได้ที่เครื่องรับหลายเครื่อง โดยทั่วไปสัญญาณดังกล่าวจะไปถึงเครื่องรับต่าง ๆ ที่เวลาต่างกันเนื่องจากระยะทางระหว่างเครื่องส่งและแต่ละเครื่องรับแตกต่างกัน เรียกว่า ความต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึง (Time Difference of Arrival, TDOA) ซึ่งจะต่างจาก เวลาที่มาถึงของสัญญาณ (Time of Arrival, TOA) ที่โดยปกติจะไม่สามารถทราบข้อมูลเวลาที่ส่งเพราะเครื่องส่งเป็นอุปกรณ์ที่ระบบไม่รู้จัก

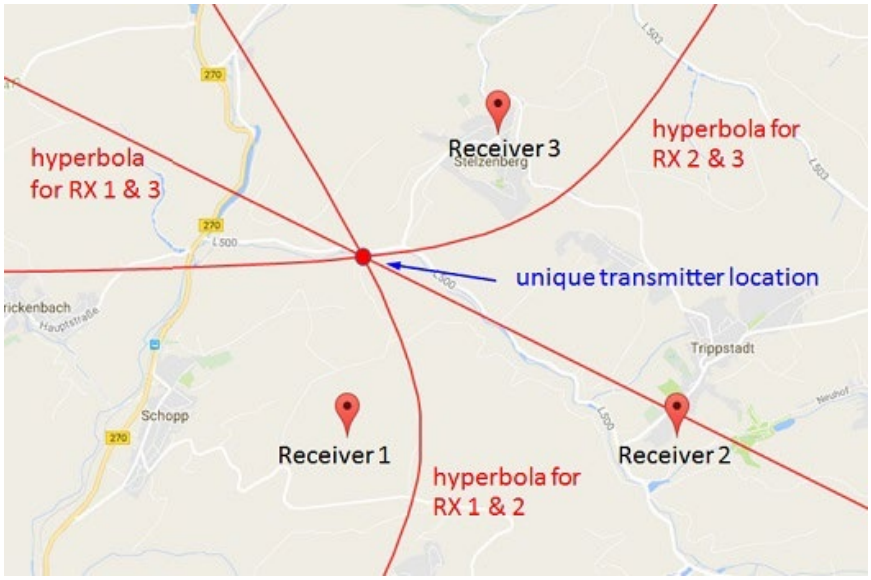
เพื่อให้เข้าใจหลักการของวิธีการระบุตำแหน่ง (Localization) ด้วยเทคนิค TDOA พิจารณากรณีตัวอย่างอย่างง่ายที่มีเครื่องรับ 2 เครื่อง และเครื่องส่งที่ไม่รู้จัก 1 เครื่อง ดังที่แสดงในรูปที่ 3 ในกรณีแรก สมมุติว่าเครื่องรับทั้ง 2 เครื่องได้รับสัญญาณที่เวลาเดียวกัน (TDOA = 0) กรณีนี้เห็นได้ชัดว่าระยะทางระหว่างเครื่องส่งที่ไม่รู้จักกับเครื่องรับ 1 และเครื่องรับ 2 เท่ากัน ดังนั้นตำแหน่งของเครื่องส่งจึงจะอยู่ในแนวของเส้นตรงที่อยู่กึ่งกลางระหว่างเครื่องรับทั้งสองเครื่อง ถึงจุดนี้เรายังคงไม่สามารถตำแหน่งที่เจาะจงของเครื่องส่งได้แต่ตำแหน่งของเครื่องส่งที่เป็นไปได้จะแคบลงโดยจะอยู่บนเส้นตรงดังกล่าว



รูปที่ 3 การระบุตำแหน่ง (Localization) โดยใช้เทคนิค Time Difference of Arrival (TDOA) ด้วยเครื่องรับ 2 เครื่อง ใน 3 กรณี : TDOA > 0s, TDOA = 0s และ TDOA <0s. ตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเครื่องส่งจะอยู่บนเส้นกราฟไอเปอร์โบลา (Hyperbola)

ต่อไปพิจารณากรณีที่ 2 โดยสมมุติว่าสัญญาณมาถึงเครื่องรับที่ 1 ก่อนเครื่องรับที่ 2 ค่า TDOA ในกรณีนี้จะไม่เท่ากับศูนย์ ในกรณีนี้ระยะทางระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ 1 จะใกล้กว่าเครื่องรับ 2 โดย ตำแหน่งที่เป็นไปได้ของเครื่องส่งจะอยู่บนเส้นกราฟไฮเปอร์โบล่า (Hyperbola) ที่อยู่ใกล้กับเครื่องรับ 1

เพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งได้ จะต้องใช้เครื่องรับสัญญาณมากกว่า 2 เครื่อง (อย่างน้อย 3 เครื่องรับสำหรับการระบุตำแหน่งใน 2 มิติดังแสดงตามรูปที่ 4) เครื่องรับ 3 เครื่องจะสร้างไฮเปอร์โบลาได้ 3 เส้น (เครื่องรับ 4 เครื่องจะสร้างไฮเปอร์โบลาได้ 10 เส้น) ในอุดมคติเส้นไฮเปอร์โบลาทั้งหมดจะต้องตัดกันที่จุดเดียวซึ่งก็คือตำแหน่งของเครื่องส่งที่สนใจ



รูปที่ 4 การระบุตำแหน่ง (Localization) โดยใช้เครื่องรับ 3 เครื่อง : ด้วยเทคนิค Time Difference of Arrival (TDOA) ซึ่งจะได้กราฟแสดงตำแหน่งที่เป็นไปได้เป็นกราฟไฮเปอร์โบลา (Hyperbola) 3 เส้น

2.6 การวิเคราะห์ Feature Importance (ปรากฏในหัวข้อ 12 ระบบวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่เพื่อสนับสนุนการจัดสรรคลื่นความถี่)

Feature Importance หมายถึงกลุ่มของเทคนิคที่ใช้ในการให้คะแนนกับคุณลักษณะขาเข้าของโมเดลเพื่อทำนาย (Predictive Model) คะแนนนี้จะสะท้อนความสำคัญของคุณลักษณะขาเข้าแต่ละตัวต่อผลการทำนาย คะแนนของ Feature Importance สามารถคำนวณเพื่อใช้กับการทำนายที่ผลเป็นค่าตัวเลขซึ่งเรียกว่า การวิเคราะห์ความถดถอย (Regression) และการทำนายที่ผลออกมาเป็นการจำแนกกลุ่มของข้อมูล (Classification) ได้

ประโยชน์ของคะแนน Feature Importance :

- **ให้ข้อมูลเชิงลึก (Insight) เกี่ยวกับข้อมูล** : ระดับคะแนนบ่งบอกถึงความสำคัญของแต่ละคุณสมบัติ (Feature) ต่อตัวแปรเป้าหมายที่สนใจ
- **ให้ข้อมูลเชิงลึก (Insight) เกี่ยวกับโมเดล** : ระดับคะแนนบ่งบอกถึงความสำคัญของแต่ละคุณสมบัติที่โมเดลใช้ในการทำนายค่าตัวแปรเป้าหมาย
- **สามารถใช้ในการปรับปรุงโมเดลทำนายให้ดีขึ้น** : ระดับคะแนนสามารถใช้ในการลดคุณสมบัติที่ไม่เกี่ยวข้อง (ได้คะแนนน้อย) ออก ซึ่งช่วยให้โมเดลซับซ้อนน้อยลงและใช้เวลาในการประมวลผลสั้นลง

3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษารายละเอียดข้อมูลทฤษฎี หลักการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า คลื่นความถี่ยังถูกใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพเมื่อมองในมิติของย่านความถี่ เวลา หรือพื้นที่ [Sub15][US03]

ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ (Spectrum Usage) สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อให้การบริหารคลื่นความถี่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะในปัจจุบันและอนาคตอันใกล้ที่ความต้องการใช้งานคลื่นความถี่จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก การวิเคราะห์และการเข้าใจ (Analytics and Understanding) ในการใช้ทรัพยากรคลื่นความถี่จึงเป็นสิ่งที่จะช่วยให้การกำกับดูแลและการใช้งานคลื่นความถี่มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมไปถึงสามารถวิเคราะห์รูปแบบและแนวโน้มที่คลื่นความถี่จะถูกใช้งาน นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เช่น [Ass18][Bri17][Tac18]

- การแจ้งเตือน และแก้ปัญหาการรบกวน (Interference Alarm and Resolution)
- การระบุตำแหน่งของเครื่องส่ง (Geo-location)
- การระบุการใช้งานคลื่นความถี่ที่ผิดปกติ ไม่ถูกต้อง หรือไม่ได้รับอนุญาต (Anomaly/Violation Detection)

อย่างไรก็ตาม การตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่มีความที่ซับซ้อนและเป็นข้อมูลขนาดใหญ่ เนื่องจากการตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ต้องการข้อมูลที่ครอบคลุมทั้งในมิติของพื้นที่ที่กว้างใหญ่ ย่านความถี่ที่ถูกใช้งานซึ่งมีมากมายหลายย่าน รวมถึงระบบการสื่อสารไร้สายที่มีมากมายหลายระบบ การจัดการข้อมูลเพื่อดึงเอาข้อมูลที่มีประโยชน์จากข้อมูลขนาดใหญ่และซับซ้อนเช่นนี้ต้องการการจัดการข้อมูลขั้นสูง [End18] เช่น Big Data และ AI

4. กรณีศึกษาจากต่างประเทศ

4.1 การนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้งานจริงสำหรับการบริหารคลื่นความถี่

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาใช้งานจริงสำหรับการบริหารคลื่นความถี่ โดยคัดเลือกประเทศที่เป็นผู้นำการใช้เทคโนโลยี Big Data และ AI จำนวน 3 ประเทศ ได้แก่ จีน ภูมิภาคยุโรป และสหรัฐอเมริกา รวมถึงตัวอย่างของกลุ่มประเทศที่มีข้อจำกัดในเรื่องการเข้าถึงและการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ได้แก่ สาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา เพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายและครบทุกมิติ ดังสรุปไว้ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์ข้อดี-ข้อด้อยของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งาน Big Data และปัญญาประดิษฐ์ AI จากกรณีศึกษาต่างประเทศ

ประเทศ	ลักษณะการประยุกต์ใช้งาน	ระบบ/แอปพลิเคชัน	ข้อดี	ข้อด้อย
ประเทศจีน (มหานครเซี่ยงไฮ้)	การเก็บข้อมูลคลื่นความถี่	ระบบ LS OBSERVER	- สามารถตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ในย่านที่สนใจและมุ่งเน้นไปที่สิ่งที่คาดว่าจะเป็นปัญหาได้ - ความยืดหยุ่นของอุปกรณ์ซึ่งถูกออกแบบพัฒนาให้มีหลากหลายรูปแบบสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน - สามารถใช้งานร่วมกับระบบบริหารคลื่นความถี่อื่น ๆ - ซอฟต์แวร์ตรวจสอบส่วนกลาง สามารถจะแจ้งเตือนเมื่อตรวจพบความผิดปกติในคลื่นความถี่ เจ้าหน้าที่ไม่ต้องคอยเฝ้าติดตาม	- ระบบและซอฟต์แวร์เป็นแบบ Proprietary จำเป็นต้องพึ่งพาบริษัทผู้พัฒนาในระยะยาว - ถูกนำมาใช้เฉพาะในพื้นที่มหานครเซี่ยงไฮ้ หากจะขยายออกไปในพื้นที่อื่น ๆ เหมือนเช่นภูมิภาคยุโรปและสหรัฐอเมริกาจำเป็นจะต้องสร้างอุปกรณ์เฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่จำนวนมากและอาจมีค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงมากขึ้นตามไปด้วย

ประเทศ	ลักษณะการประยุกต์ใช้งาน	ระบบ/แอปพลิเคชัน	ข้อดี	ข้อด้อย
	การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	ระบบ SpectrumMap (บนคลาวด์)	- ระบบสามารถรวบรวมข้อมูลการใช้งานจริงจากอุปกรณ์และนำข้อมูลมาเสนอบนแผนที่ (Map) ซึ่งสามารถใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว - จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) บนคลาวด์และมีอัลกอริทึมอัจฉริยะสามารถประมาณระดับสัญญาณที่คาดหวัง	- ระบบและซอฟต์แวร์เป็นแบบ Proprietary - การจัดเก็บ ประมวลผลข้อมูลต้องมีระบบคลาวด์พร้อมทั้งมีเครื่องมือ (Tool) สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data)
	การนำเสนอและแสดงผลข้อมูล	การแสดงภาพข้อมูลคลื่นความถี่ เป็น Web GIS	- หน่วยงานกำกับดูแลสามารถตรวจจับสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต รวมถึงการระบุคลื่นความถี่ที่ใช้งานมากและน้อยเกินไป - สามารถตรวจสอบการออกใบอนุญาตว่ายังใช้งานอยู่และใช้งานได้ - มีข้อมูลการใช้คลื่นความถี่พื้นฐานเพื่อใช้ประกอบสำหรับการกำหนดนโยบาย	
ภูมิภาคยุโรป	การเก็บข้อมูลคลื่นความถี่	โครงข่าย Electrosense	- เป็นลักษณะการแบ่งปันข้อมูลคลื่นความถี่จากผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งหมดโดยใช้เซ็นเซอร์และส่งข้อมูลที่ตรวจจับได้จากเซ็นเซอร์ไปยังแบ็กเอนด์ - เลือกใช้เซ็นเซอร์แบบราคาไม่แพงและเข้าถึงได้ง่ายเป็นอุปกรณ์หลักในการตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่เพื่อลดต้นทุนที่ผู้ให้ข้อมูลคลื่นความถี่ต้องแบกรับ - ช่วยลดค่าใช้จ่ายของ	- เนื่องจากการติดตั้งเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นความถี่เป็นของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทำให้หน่วยงานกำกับดูแลไม่สามารถจะกำหนดและเลือกจุดติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ในย่านที่สนใจและมุ่งเน้นไปในที่สิ่งที่คาดว่าจะเป็นปัญหาได้โดยง่าย - ความเชื่อถือได้และถูกต้องแม่นยำของ

ประเทศ	ลักษณะการประยุกต์ใช้งาน	ระบบ/แอปพลิเคชัน	ข้อดี	ข้อด้อย
			หน่วยงานกำกับดูแลในการจัดซื้ออุปกรณ์ตรวจจับการใช้งานคลื่นความถี่และเซ็นเซอร์จำนวนมาก	เซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นความถี่ที่นำมาติดตั้งใช้งาน
	การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	ElectroSense Backend	- สถาปัตยกรรมข้อมูลขนาดใหญ่ที่ยืดหยุ่นได้ถูกออกแบบให้รองรับการจัดการกับข้อมูลจำนวนมาก - มีเครื่องมือ (Tools) สำหรับรวบรวมข้อมูลคลื่นความถี่ที่พร้อมใช้งานในแบ็กเอนด์ช่วยให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลคลื่นความถี่ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น	- เนื่องจากข้อมูลจากเซ็นเซอร์ทั้งหมดจะถูกส่งเข้ามายังแบ็กเอนด์ในอนาคตอาจจะเกิดปัญหาด้านคอขวดและพื้นที่การจัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่หากมีเซ็นเซอร์จำนวนมาก - การจัดเก็บข้อมูลแบบรวมศูนย์มีความสุ่มเสี่ยงสูงจากการเป็นเป้าหมายที่จะถูกโจมตีระบบและการจารกรรมข้อมูลทางธุรกิจของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย - ต้องมีโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่าง ๆ
	การนำเสนอและแสดงผลข้อมูล	ElectroSense Frontend	- เป็นการให้ข้อมูลคลื่นความถี่เชิงลึกแก่ผู้ใช้ที่สนใจ - ด้วยโมเดลการให้บริการข้อมูลคลื่นความถี่แบบเปิดผู้ใช้สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันเกี่ยวกับคลื่นความถี่ของตนเองได้จากข้อมูลคลื่นความถี่นี้ - เกิดแอปพลิเคชันจำนวนมากที่หลากหลายและแปลกใหม่ตามความต้องการที่แตกต่างกันของผู้ใช้แต่ละกลุ่มสำหรับการบริหารคลื่น - เป็นการบริหารคลื่นความถี่ร่วมกันทั้งหน่วยงานกำกับดูแลและผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย	- ต้องมีการลงทะเบียนเพื่อการใช้งานเซ็นเซอร์อย่างปลอดภัยและการกำหนดสิทธิการเข้าถึงข้อมูล

ประเทศ	ลักษณะการประยุกต์ใช้งาน	ระบบ/แอปพลิเคชัน	ข้อดี	ข้อด้อย
สหรัฐอเมริกา	การเก็บข้อมูลคลื่นความถี่	เซ็นเซอร์ที่ถูกติดตั้งในโนด Measured Spectrum Occupancy Database (MSOD)	- ใช้อุปกรณ์เซ็นเซอร์ต้นทุนต่ำ ที่สามารถควบคุมได้ด้วยซอฟต์แวร์ - ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของเซ็นเซอร์ได้รับการออกแบบมาเพื่อตรวจจับการส่งสัญญาณในย่านความถี่ที่กำหนดไว้อย่างชัดเจน - แต่ละองค์กรจะแบ่งปันข้อมูลคลื่นความถี่จากเซ็นเซอร์ในโนด MSOD ของตนให้กับองค์กรอื่น ๆ ที่เลือกที่จะร่วมศูนย์ข้อมูล - ช่วยลดค่าใช้จ่ายของหน่วยงานกำกับดูแลในการจัดซื้ออุปกรณ์ตรวจจับการใช้งานคลื่นความถี่และเซ็นเซอร์จำนวนมาก	- เนื่องจากการติดตั้งเซ็นเซอร์และอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นความถี่เป็นของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย ทำให้หน่วยงานกำกับดูแลไม่สามารถจะกำหนดและเลือกจุดติดตั้งเซ็นเซอร์เพื่อตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ในย่านที่สนใจและมุ่งเน้นไปในที่สิ่งที่คาดว่าจะเป็นปัญหาได้โดยง่าย - ความเชื่อถือได้และถูกต้องแม่นยำของเซ็นเซอร์ตรวจจับคลื่นความถี่ที่นำมาติดตั้งใช้งาน
	การจัดเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล	โนด MSOD	- แต่ละองค์กรสามารถดูแลฐานข้อมูลคลื่นความถี่และเว็บเซิร์ฟเวอร์ของตนเอง - การจัดการแบบไม่รวมศูนย์และเป็นอิสระ	- ต้องอาศัยการกำหนดมาตรฐานในการรวบรวมข้อมูลเพื่อให้บรรลุประโยชน์สูงสุดของการรวมข้อมูล - ต้องกำหนดแนวทางปฏิบัติที่ดีที่สุดสำหรับการรวบรวมข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่เพื่อรองรับการใช้งานแก่สาธารณะในแบบเวลาจริงผ่านอินเทอร์เน็ต - ต้องมีโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นต่าง ๆ
	การนำเสนอและแสดงผลข้อมูล	แอปพลิเคชันบนเว็บเบราว์เซอร์	- ผู้ใช้จะสามารถเชื่อมต่อข้อมูลจาก MSOD ผ่านเว็บ - สามารถดูและดาวน์โหลดข้อมูลด้วยแอป	- สถาปัตยกรรมนี้ต้องอาศัยการปฏิบัติตามข้อกำหนดร่วมกันสำหรับการโต้ตอบระหว่างเว็บเซิร์ฟเวอร์

ประเทศ	ลักษณะการประยุกต์ใช้งาน	ระบบ/แอปพลิเคชัน	ข้อดี	ข้อด้อย
			พลิเคชันที่แสดงภาพข้อมูลบนเบราว์เซอร์ - ข้อมูลสถิติการใช้งานคลื่นความถี่ในช่วงเวลาต่าง ๆ จะถูกใช้ในการพิจารณาและอภิปรายในระดับนโยบาย - ข้อมูลแอมพลิจูดเทียบกับความถี่แบบใกล้เวลาจริงจะถูกใช้สำหรับการประสานงานคลื่นความถี่และการบังคับใช้กฎระเบียบต่าง ๆ ได้	กับเบราว์เซอร์
เมียนมา	ไม่มี	ไม่มี	- ปัจจุบันกำลังชวนให้องค์กรที่สนใจร่วมจัดตั้ง "ระบบการบริหารคลื่นความถี่แบบอัตโนมัติ"	- คลื่นความถี่ส่วนใหญ่ของประเทศยังคงถูกใช้ประโยชน์ไม่เต็มที่ - ไม่มีการป้องกันการรบกวนให้กับคลื่นความถี่ที่จัดสรรไปแล้ว - ไม่มีนโยบายที่ชัดเจนในการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่เนื่องจากขาดข้อมูลและหลักฐาน

จากกรณีศึกษาต่างประเทศข้างต้น จะเห็นว่าประเทศชั้นนำแต่ละประเทศอยู่ระหว่างพัฒนาการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่ที่แตกต่างกันไปด้วยบริบทและข้อจำกัดต่าง ๆ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาเปรียบเทียบ (Benchmark) และวิเคราะห์ข้อดี/ข้อด้อย ของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งานดังกล่าวโดยพิจารณาในประเด็นต่าง ๆ ประกอบด้วย (1) ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากแผนการเฝ้าสังเกตคลื่นความถี่แบบพลวัตโดยใช้ AI และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning, DL) ที่ประสบความสำเร็จ (2) เกณฑ์การวัดสมรรถนะ ได้แก่ การตระหนักรู้และความเข้าใจของภาครัฐ ความสนใจจากภาคการศึกษา และความพร้อมของภาคอุตสาหกรรม โดยได้สรุปผลการศึกษาเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 5 ทั้งนี้พบว่าในกลุ่มของประเทศที่พัฒนาแล้วจะมีความพร้อมในระดับที่ค่อนข้างสูงถึงสูง โดยภาคอุตสาหกรรมดูจะมีความพร้อมมากที่สุด รองลงมาคือภาคการศึกษาและภาครัฐตามลำดับ

สำหรับเกณฑ์การวัดที่ 1 (การตระหนักรู้และความเข้าใจของภาครัฐ) ไม่มีประเทศหรือภูมิภาคที่พิจารณาที่ได้คะแนนสูงสุด เนื่องจากยังไม่มีที่ใดที่มีข้อกำหนดหรือแม้แต่แนวทางที่เกี่ยวกับประยุกต์ใช้ AI หรือDL ในการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่ สำหรับประเทศจีน ภูมิภาคยุโรป และสหรัฐอเมริกาได้รับคะแนนประเมินระดับ 4 เนื่องจากภาครัฐหรือองค์กรกำกับดูแลมีการสนับสนุนโครงการนำร่องที่เกี่ยวข้องเป็นจำนวนมากแล้ว ในขณะที่ประเทศเมียนมายังไม่ได้เริ่มหรือสนับสนุนการพัฒนาโครงการที่เกี่ยวข้อง ในส่วนของภาคการศึกษา ประเทศ

จีน ภูมิภาคยุโรป และสหรัฐอเมริกาได้รับคะแนนสูงสุดเนื่องจากได้มีการสร้างความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยหรือกลุ่มวิจัยเพื่อพัฒนาแผนการเฝ้าตรวจสอบและติดตามการใช้งานคลื่นความถี่โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์แล้ว นอกจากนั้นยังมีการตีพิมพ์การศึกษาเกี่ยวกับการใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้เชิงลึกในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่ออกมาเป็นจำนวนมาก

ตารางที่ 5 การศึกษาเปรียบเทียบความพร้อมในการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการเฝ้าตรวจสอบและบริหารคลื่นความถี่

ประเทศ/ภูมิภาค	ภาครัฐ	ภาคการศึกษา	ภาคอุตสาหกรรม
เซี่ยงไฮ้ ประเทศจีน	4	5	5
ภูมิภาคยุโรป	4	5	5
สหรัฐอเมริกา	4	5	5
เมียนมา	2	2	2

4.2 การให้บริการเกี่ยวกับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ผ่านเว็บ (Web) ขององค์กรกำกับดูแล

ในหัวข้อนี้ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาและรวบรวมฟังก์ชันการทำงานของการให้บริการเกี่ยวกัลการบริหารจัดการคลื่นความถี่ผ่านเว็บ (Web) ในประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก โดยได้สรุปผลเบื้องต้นไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สรุปฟังก์ชันการทำงานของเว็บสำหรับให้บริการในต่างประเทศ

องค์กร	เว็บ	ลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุ	ฐานข้อมูลอุปกรณ์	เมนูค้นหาอุปกรณ์	ฟังก์ชันขั้นสูง
FCC, USA	https://fccid.io/	No	Yes	Yes	No
Industry Canada	https://industrycanada.co/	No	Yes	No	No
NCC Taiwan	https://www.ncc.gov.tw/english/gradation.aspx?site_content_sn=65	Yes	Yes	Yes	ประมาณการเวลาที่ต้องใช้ในกระบวนการ
Info-communications Media Development Authority, SIngapore	https://eservice.imda.gov.sg/tls/searchEquipment.action	Yes	Yes	Yes	การค้นหาใบอนุญาต การค้นหาอุปกรณ์
Malaysian communications and multimedia commission	https://www.mcmc.gov.my/en/legal/registers/register-of-apparatus-assignments-search?type=lmob_cell	Yes	Yes	Yes	การค้นหาตามประเภทของใบอนุญาต
Government services and information, Israel	https://www.gov.il/en/subjects/ind	Yes	No	No	No

องค์กร	เว็บ	ลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุ	ฐานข้อมูลอุปกรณ์	เมนูค้นหาอุปกรณ์	ฟังก์ชันขั้นสูง
	ustry_and_trade/business_and_professionals_licensing				
Telecommunications and Digital Government Regulatory Authority, UAE	https://www.tec.gov.in/voluntary-testing-certification	Yes	Yes	Yes	แดชบอร์ด (Dashboard)
The TEC Authority, India	https://dot.gov.in/	Yes	No	No	แดชบอร์ด (Dashboard)

5. ความพร้อมใช้งานของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์

หัวข้อนี้ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลทางด้านเทคนิค และความพร้อมในการพัฒนาการเชื่อมต่อระบบคลังข้อมูลเพื่อนำไปวางแผนและวิเคราะห์ผลกระทบของการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่ โดยศึกษาในประเด็นต่าง ๆ ดังนี้ (1) การประเมินขอบเขตการนำเอาปัญญาประดิษฐ์ไปประยุกต์ใช้กับการบริหารความถี่โดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญในต่างประเทศ (2) กรอบแนวคิดของการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ (3) สถานการณ์จำลองของการใช้ปัญญาประดิษฐ์บริหารคลื่นความถี่ในบริบทของประเทศไทย และ (4) การประเมินความพร้อมของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อบริหารคลื่นความถี่ในสถานการณ์จำลองที่เสนอ โดยประมวลข้อมูลจาก ความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ สถานะและข้อจำกัดของงานวิจัยในปัจจุบันที่เกี่ยวข้อง รวมถึงความต้องการใช้งานและข้อจำกัดในการใช้เครื่องมือและข้อมูลต่าง ๆ เพื่อบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช.

ในภาพรวม ผู้เชี่ยวชาญ (ทั้งในและต่างประเทศ) ในด้านต่าง ๆ เช่น ปัญญาประดิษฐ์ แมชชีนเลิร์นนิ่ง โครงข่าย (Networking) และการบริหารคลื่นความถี่ จากทั้ง ภาครัฐ สถาบันการศึกษา และภาคเอกชน มีความเห็นตรงกันว่า มีความเป็นไปได้ที่จะนำปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ และจะทำให้การบริหารคลื่นความถี่มีสมรรถนะเพิ่มขึ้น รวดเร็วและมีความยืดหยุ่นคล่องตัวมากขึ้น [Art19][FCC20]

โดยเมื่อประเมินความพร้อมทางเทคโนโลยีพบว่า การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับการบริหารคลื่นความถี่ประกอบด้วยหลายส่วนและแต่ละส่วนมีระดับความพร้อมของเทคโนโลยีที่แตกต่างกัน ส่วนที่พร้อมที่สุดจะเป็นส่วนของกรอบการบริหารจัดการฐานข้อมูลซึ่งสามารถใช้เทคโนโลยีการจัดการฐานข้อมูลที่มีการใช้งานแพร่หลายอยู่แล้วได้ความพร้อมของเทคโนโลยี Technology Readiness Level (TRL) อยู่ที่ระดับสูง: 8 ถึง 9 ในส่วนของการวัดสัญญาณ (Sensing) จัดการข้อมูล (Data Processing) และการวิเคราะห์โดยปัญญาประดิษฐ์ (Analytics) พบว่ายังอยู่ในระดับของงานวิจัย ความพร้อมของเทคโนโลยีจึงอยู่ในระดับกลาง (TRL อยู่ที่ระดับ 3 ถึง 6)

ทั้งนี้ถึงแม้ว่าปัญญาประดิษฐ์จะมีการพัฒนาไปมาก ในการนำมาประยุกต์ใช้กับการบริหารคลื่นความถี่ ยังมีประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการพิจารณาและดำเนินการ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- เราจะสามารถใช้ปัญญาประดิษฐ์ได้อย่างปลอดภัยและวางใจ ได้อย่างไร?
- จากความจริงที่ว่าสมรรถนะ (Performance) ของปัญญาประดิษฐ์ไม่ได้สมบูรณ์แบบ อะไรคือตัววัดที่เราจะใช้ในการตัดสินใจรับเอาปัญญาประดิษฐ์เข้ามาใช้งาน (Metrics for Acceptability)?
- การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ควรเริ่มต้นด้วย การกำหนดปัญหาที่ต้องการใช้ปัญญาประดิษฐ์เข้ามาช่วยแก้ไขอย่างละเอียดถี่ถ้วน

- ควรสร้างความไว้วางใจด้วยการทดสอบความถูกต้อง (Validation) ของแนวทางแก้ปัญหาด้วยปัญญาประดิษฐ์ (AI Solutions) ที่ได้โดยใช้พื้นที่ทดสอบที่ถูกปูพรมออกไปในหลายพื้นที่ (Large-Scale Wireless Testing Regions)
- ควรจัดหาชุดข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการพิสูจน์และทดสอบความถูกต้อง (Test and Validate) ของอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นในสถานการณ์ต่าง ๆ

คณะผู้วิจัยได้จัดประชุมร่วมกับทีมปฏิบัติงานจากสำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม (ทท.) สำนักบริหารคลื่นความถี่ (คบ.) และ สำนักการอนุญาตวิทยุคมนาคม 2 (คท.2) ของสำนักงาน กสทช. เพื่อสำรวจและรวบรวมข้อมูลความต้องการใช้งาน (Requirements) เกี่ยวกับฟังก์ชันการทำงานและคุณสมบัติของเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ในด้านต่างๆ ซึ่งจะช่วยแบ่งเบาภาระของเจ้าหน้าที่และทำให้การตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น โดยปัจจุบัน สำนักงาน กสทช. มีฐานข้อมูล (Database) เกี่ยวกับใบอนุญาตฯ และการใช้ความถี่หลักจำนวน 4 ฐานข้อมูลได้แก่

1) ฐานข้อมูลใบอนุญาตให้ตั้งและใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคม
2) ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคมแต่ละประเภทที่ได้รับอนุญาต
3) ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบรับรองมาตรฐาน
4) ฐานข้อมูลสถานีวิทยุคมนาคมที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน และข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน

6. การวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis)

จากข้อมูลฟังก์ชันการทำงาน (Functions) และคุณสมบัติของเว็บแอปสำหรับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของหน่วยงานกำกับดูแลในประเทศต่าง ๆ ที่ได้สรุปไว้ในหัวข้อที่ 4 "กรณีศึกษาจากต่างประเทศ" รวมถึงการประชุมหารือกับเจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบในด้านที่เกี่ยวข้องจาก สำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม (ทท.) สำนักบริหารคลื่นความถี่ (คบ.) และ สำนักการอนุญาตวิทยุคมนาคม (คท.2) เกี่ยวกับประเด็นปัญหาในปัจจุบัน (Pain Points) และความต้องการใช้งาน (Requirements) คณะผู้วิจัยได้วิเคราะห์ส่วนต่างของเว็บแอปสำหรับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของโครงการวิจัยนี้ และสรุปไว้ตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) ของเว็บแอปสำหรับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ที่เสนอ [Wri21][Kim18]

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
1. ระบบจัดการคำร้อง	- ด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 เปิดให้มีการยื่นคำร้องผ่านอีเมล์ แต่ยังไม่มีระบบอัตโนมัติ (Automation) ในการจัดการคำร้องต่าง ๆ - มีฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม - สามารถค้นหาข้อมูลทางเทคนิค	1) ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์ ที่ใช้ AI ประมวลเอกสารประกอบคำขอเพื่อ - คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน - ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ - สรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบ	1) ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์ ที่ใช้ AI ประมวลเอกสารประกอบคำขอเพื่อ - คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน - ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ - สรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบ	พัฒนาเว็บแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 7 "เว็บแอปพลิเคชั่น (Web Application) ที่

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
	ของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน	และพิจารณาของเจ้าหน้าที่ 2) การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics 3) ระบบลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมออนไลน์ 4) ฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม 5) การค้นหาข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน 6) ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ	และพิจารณาของเจ้าหน้าที่ 2) การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics 3) ระบบลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมออนไลน์ 4) ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ	เสนอ"
2. แบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่	- ไม่มีระบบอัตโนมัติที่รองรับการทำงาน - หากเกิดเหตุลักษณะการตรวจสอบโดยทั่วไปจะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีการกำหนดไว้ - การแก้ไขปัญหาจะทำเป็นกรณี ๆ ไป (Case by Case)	1) ใช้ Machine Learning เพื่อสอบทาน (Validate) ความถูกต้องของข้อมูลการจัดสรรคลื่นความถี่ในฐานข้อมูล เช่น ช่วยในการทำ Data Cleansing 2) ใช้ AI วิเคราะห์ข้อมูลการใช้ความถี่ เช่น ความหนาแน่นในการใช้งานคลื่นความถี่ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อ Spectrum Demand 3) สร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างมาตราต่าง ๆ ในตารางกำหนดคลื่นความถี่ และเชิงอรรถในข้อบังคับวิทยุ ข้อเสนอแนะของ	1) ใช้ Machine Learning เพื่อสอบทาน (Validate) ความถูกต้องของข้อมูลการจัดสรรคลื่นความถี่ในฐานข้อมูล เช่น ช่วยในการทำ Data Cleansing 2) ใช้ AI วิเคราะห์ข้อมูลการใช้ความถี่ เช่น ความหนาแน่นในการใช้งานคลื่นความถี่ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อ Spectrum Demand 3) สร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างมาตราต่าง ๆ ในตารางกำหนดคลื่นความถี่	พัฒนาเว็บแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 7 "เว็บแอปพลิเคชั่น (Web Application) ที่เสนอ"

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
		ITU-R และแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่/ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ รวมถึงประกาศ กสทช. ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ Natural language processing 4) ทำระบบ Search Engine ที่สามารถกรองข้อมูลประเภทกิจการและคลื่นความถี่ที่สนใจ และระบบสามารถประมวล รวบรวมข้อมูลต่างๆ จากความสัมพันธ์ที่กำหนด เพื่อนำเสนอออกมาในรูปแบบที่เข้าใจง่าย	และเชิงอรรถในข้อบังคับวิทยุ ข้อเสนอแนะของ ITU-R และแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่/ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ รวมถึงประกาศ กสทช. ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ Natural language processing 4) ทำระบบ Search Engine ที่สามารถกรองข้อมูลประเภทกิจการและคลื่นความถี่ที่สนใจ และระบบสามารถประมวล รวบรวมข้อมูลต่างๆ จากความสัมพันธ์ที่กำหนด เพื่อนำเสนอออกมาในรูปแบบที่เข้าใจง่าย	
3.ระบบเฝ้าติดตามการใช้คลื่นความถี่	- ไม่มีระบบอัตโนมัติที่รองรับการทำงาน - หากเกิดเหตุลักษณะการตรวจสอบโดยทั่วไปจะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีการกำหนดไว้ - การแก้ไขปัญหาจะทำเป็นกรณี ๆ ไป (Case by Case)	1) การวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตจากข้อมูลที่เฝ้าฟังสดหรือข้อมูลในอดีต (Livestream Data or Historical Data) 2) การตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน 3) การตรวจสอบการรบกวนจะต้องวัดค่าพารามิเตอร์ทางเทคนิคของสัญญาณรบกวน ดังนี้ - ความถี่ (Frequency) - ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth)	1) การวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือที่ไม่ได้รับอนุญาตจากข้อมูลที่เฝ้าฟังสดหรือข้อมูลในอดีต (Livestream Data or Historical Data) 2) การตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน 3) การตรวจสอบการรบกวนจะต้องวัดค่าพารามิเตอร์ทางเทคนิคของสัญญาณรบกวน ดังนี้ - ความถี่ (Frequency) - ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth)	พัฒนาเว็ปแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 7 "เว็บแอปพลิเคชั่น (Web Application) ที่เสนอ"

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
		- ประเภทการแพร่คลื่น (Class of Emission) - ความแรงสัญญาณที่วัดได้ (Field Strength or Power Flux-Density) - Polarization ของสัญญาณรบกวน (Observed Polarization) - ทิศทางของสัญญาณรบกวน (Bearing or Other Particulars) - วันที่ตรวจพบสัญญาณรบกวน (Date of Measurement) - เวลาที่พบสัญญาณรบกวน (Time of Measurement) - พิกัดที่ทำการตรวจวัด (Location of the Facility which made the above measurements) 4) หากปัญญาประดิษฐ์สามารถระบุได้ว่าสัญญาณรบกวนมาจากกิจการประเภทใด จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานของสำนักงาน กสทช. เป็นอย่างยิ่ง	- ประเภทการแพร่คลื่น (Class of Emission) - ความแรงสัญญาณที่วัดได้ (Field Strength or Power Flux-Density) - Polarization ของสัญญาณรบกวน (Observed Polarization) - ทิศทางของสัญญาณรบกวน (Bearing or Other Particulars) - วันที่ตรวจพบสัญญาณรบกวน (Date of Measurement) - เวลาที่พบสัญญาณรบกวน (Time of Measurement) - พิกัดที่ทำการตรวจวัด (Location of the Facility which made the above measurements) 4) หากปัญญาประดิษฐ์สามารถระบุได้ว่าสัญญาณรบกวนมาจากกิจการประเภทใด จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานของสำนักงาน กสทช. เป็นอย่างยิ่ง	
4. ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์	- ด้วยสถานการณ์การแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 เปิดให้มีการยื่นคำร้องผ่านอีเมล์ แต่ยังไม่มีระบบอัตโนมัติ (Automation) ในการจัดการคำร้องต่าง ๆ - มีฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม - สามารถค้นหาข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ผ่าน	1) ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์ ที่ใช้ AI ประมวลเอกสารประกอบคำขอเพื่อ - คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน - ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ - สรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของ	1) ระบบลงทะเบียนคำร้องออนไลน์ ที่ใช้ AI ประมวลเอกสารประกอบคำขอเพื่อ - คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน - ตรวจค้นหาจุดที่สนใจ - สรุปเป็นรายงานประกอบการตรวจสอบและพิจารณาของ	พัฒนาเว็บแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 7 "เว็บแอปพลิเคชั่น (Web Application) ที่เสนอ"

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
	การตรวจสอบมาตรฐาน	เจ้าหน้าที่ 2) การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics 3) ระบบลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมออนไลน์ 4) ฐานข้อมูลอุปกรณ์วิทยุคมนาคม 5) การค้นหาข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วิทยุคมนาคมที่ผ่านการตรวจสอบมาตรฐาน 6) ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาในการดำเนินการตามคำขอ	เจ้าหน้าที่ 2) การดึงข้อมูลจากเอกสารเช่นบัตรประชาชน ลงในฐานข้อมูลโดยไม่ต้องมีการกรอกข้อมูลโดยใช้ Text Analytics 3) ระบบลงทะเบียนอุปกรณ์วิทยุคมนาคมออนไลน์ 4) ฟังก์ชันขั้นสูงเช่น การประมาณเวลาที่ใช้ในการดำเนินการตามคำขอ	
5. ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน	- ไม่มีระบบอัตโนมัติที่รองรับการทำงาน - หากเกิดเหตุลักษณะการตรวจสอบโดยทั่วไปจะเป็นการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีการกำหนดไว้ - การแก้ไขปัญหาจะทำเป็นกรณี ๆ ไป (Case by Case)	1) การตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบไฟล์ Excel ได้โดยอ้างอิงจาก Big Data ของฐานข้อมูลการจดทะเบียนคลื่นความถี่ที่ สำนักงาน กสทช. มีอยู่ 2) การตรวจสอบว่าสถานีวิทยุคมนาคมถูกจัดตั้งอยู่ในระยะประสานงานบริเวณชายแดน โดยอ้างอิงจากค่า Latitude และ Longitude ของสถานีวิทยุคมนาคม	1) การตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบไฟล์ Excel ได้โดยอ้างอิงจาก Big Data ของฐานข้อมูลการจดทะเบียนคลื่นความถี่ที่สำนักงาน กสทช. มีอยู่ 2) การตรวจสอบว่าสถานีวิทยุคมนาคมถูกจัดตั้งอยู่ในระยะประสานงานบริเวณชายแดน โดยอ้างอิงจากค่า Latitude และ Longitude ของสถานีวิทยุคมนาคม	พัฒนาเว็ปแอปให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการ ดูรายละเอียดในหัวข้อที่ 7 "เว็บแอปพลิเคชั่น (Web Application) ที่เสนอ"
6. ระบบฐานข้อมูล		มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำแมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning, ML) เช่น Spark		

ด้าน	สถานะปัจจุบัน	เป้าหมาย	ส่วนต่าง (Gap)	การปิดส่วนต่าง (How we will close the GAP)
		Hadoop, NoSQL, MySQL		
6.1 ฐานข้อมูลใบอนุญาตให้ตั้งและใบอนุญาตให้ใช้เครื่องวิทยุคมนาคม	- เป็นไฟล์ Excel - พร้อมนำเข้าระบบฐานข้อมูล	มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	ฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	นำไฟล์ Excel เข้าสู่ฐานข้อมูลที่รองรับ ML
6.2 ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคม	- เป็นไฟล์ pdf	มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	ฐานข้อมูลที่รองรับ ML	แปลงไฟล์จาก pdf ให้อยู่ในรูปแบบของฐานข้อมูลที่รองรับ ML
6.3 ฐานข้อมูลมาตรฐานทางเทคนิคเครื่องวิทยุคมนาคมที่ผ่านการรับรอง	- เป็นฐานข้อมูล web-based - พร้อมนำเข้าระบบฐานข้อมูล	มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	ฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	นำไฟล์ข้อมูล เข้าสู่ฐานข้อมูลที่รองรับ ML
6.4 ฐานข้อมูลสถานีวิทยุคมนาคมที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ประสานงานและข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่บริเวณชายแดน	- เป็นไฟล์ Excel - พร้อมนำเข้าระบบฐานข้อมูล	มีฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	ฐานข้อมูลที่รองรับการทำ ML	นำไฟล์ Excel เข้าสู่ฐานข้อมูลที่รองรับ ML

จากการวิเคราะห์ส่วนต่าง (Gap Analysis) ของเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนการบริหารจัดการคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่พบว่า สถานะปัจจุบันส่วนใหญ่ยังไม่มีระบบอัตโนมัติที่รองรับการทำงาน และต้องการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์มาช่วยสนับสนุนภารกิจต่าง ๆ ในด้านการบริหารคลื่นความถี่ของเจ้าหน้าที่ซึ่งจะช่วยแบ่งเบาภาระของเจ้าหน้าที่และทำให้การตรวจสอบการใช้งานคลื่นความถี่มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น เช่น คัดกรองข้อมูลพื้นฐาน ค้นหาจุดที่สนใจ วิเคราะห์และตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ค้นหาและดึงข้อมูล เป็นต้น ซึ่งฐานข้อมูลทั้ง 4 ฐานข้อมูลในปัจจุบันยังไม่ได้เชื่อมต่อข้อมูลเข้าด้วยกันและไม่รองรับการทำแมชชีนเลิร์นนิ่ง ทั้งนี้คณะผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการพัฒนาเว็บแอปต้นแบบให้มีฟังก์ชันการทำงานตาม "เป้าหมาย" ที่ต้องการเพื่อปิดส่วนต่าง รายละเอียดดังปรากฏในหัวข้อถัดไป

7. เว็บแอปพลิเคชั่น (Web Application) ที่เสนอ

เนื่องจากโครงการศึกษานี้เป็นลักษณะงานวิจัยพัฒนาและสร้างต้นแบบระบบ AI ซึ่งมีระยะเวลาดำเนินการโครงการที่จำกัด ดังนั้นการพัฒนาระบบ AI ในครั้งนี้จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดขอบเขตลักษณะของการใช้งานที่ชัดเจน โดยการนำระบบ AI มาใช้งานที่ดีควรเริ่มต้นจากการพัฒนาด้วยอุปกรณ์จำนวนน้อยเพื่อดูผลลัพธ์ที่ได้ก่อนจะขยายจำนวนอุปกรณ์ให้เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ โดยคณะผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการใช้งานของต้นแบบที่ชัดเจนร่วมกับทีมปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องจากสำนักงาน กสทช.

ทั้งนี้ฉากทัศน์และกรณี (Scenarios & Use Cases) ที่เสนอ สอดคล้อง อยู่ในแนวทางเดียวกันกับความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ ทั้งในด้านของ ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งาน เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ที่ใช้ รวมถึงการดำเนินการหลักที่จำเป็นสำหรับพัฒนาการบริหารคลื่นความถี่โดยประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์

7.1 ฉากทัศน์และกรณีใช้งาน (Scenarios & Use Cases)

จากการประชุมระดมความเห็นร่วมกับทีมปฏิบัติงานของสำนักงาน กสทช. ได้แก่ทีมปฏิบัติงานจาก สำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม (ทท.) สำนักบริหารคลื่นความถี่ (คบ.) และ สำนักการอนุญาตวิทยุคมนาคม (คท. โดยทีมปฏิบัติงานที่เข้าร่วมระดมความเห็นมาจาก คท.2) ฉากทัศน์ (Scenario) และขอบเขตการใช้งานของเว็บแอปต้นแบบที่เสนอเป็นดังนี้

7.1.1 ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ (Prototype) : การใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการประมวลผลข้อมูลและเอกสารประกอบการพิจารณาออกใบอนุญาตให้มี ใบอนุญาตให้ใช้ ใบอนุญาตให้ตั้งวิทยุคมนาคม โดยจากการพิจารณาร่วมกับ คท. 2 จะใช้อุปกรณ์วิทยุคมนาคมในกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับระบบ Cellular (โทรศัพท์เคลื่อน) เป็นต้นแบบ

7.1.2 แบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ : จากการพิจารณาร่วมกับ คท. และ คบ. (ส่วนวางแผนคลื่นความถี่) มีความต้องการใช้งานดังนี้

- ใช้ Machine Learning เพื่อสอบทาน (Validate) ความถูกต้องของข้อมูลการจัดสรรคลื่นความถี่ในฐานข้อมูล เช่น ช่วยในการทำ Data Cleansing
- วิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ ได้แก่ ความหนาแน่นในการใช้งานคลื่นความถี่ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อ Spectrum Demand
- สร้างความสัมพันธ์ของข้อมูลระหว่างมาตราต่าง ๆ ในตารางกำหนดคลื่นความถี่ และเชิงอรรถในข้อบังคับวิทยุ ข้อเสนอแนะของ ITU-R และแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่/ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ รวมถึงประกาศ กสทช. ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้ Natural language processing
- ทำระบบ Search Engine ที่สามารถกรองข้อมูลประเภทกิจการและคลื่นความถี่ที่สนใจ โดยระบบสามารถประมวล รวบรวมข้อมูลต่างๆ จากความสัมพันธ์ที่กำหนด เพื่อนำเสนอออกมาในรูปแบบที่เข้าใจง่าย

7.1.3 ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ : การใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยสามารถแสดงทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ก่อให้เกิดการรบกวนได้ โดยปัจจุบันมีการรบกวนคลื่นความถี่ย่าน 700 MHz (703 – 803 MHz) ในกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (IMT) บริเวณชายแดนไทย-กัมพูชา อ.อรัญประเทศ จ.สระแก้ว โดยมีแหล่งกำเนิดการรบกวนมาจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินของกัมพูชา

7.1.4 ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ (Prototype) : การตรวจสอบเครื่องลูกข่าย Cellular ซึ่งประกอบด้วยการทดสอบเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น GSM, WCDMA, LTE, NR (5G New Radio), Bluetooth, WLAN 2.4/5 GHz, NFC (Near Field Communications), FM, GPS (ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม) เป็นต้น

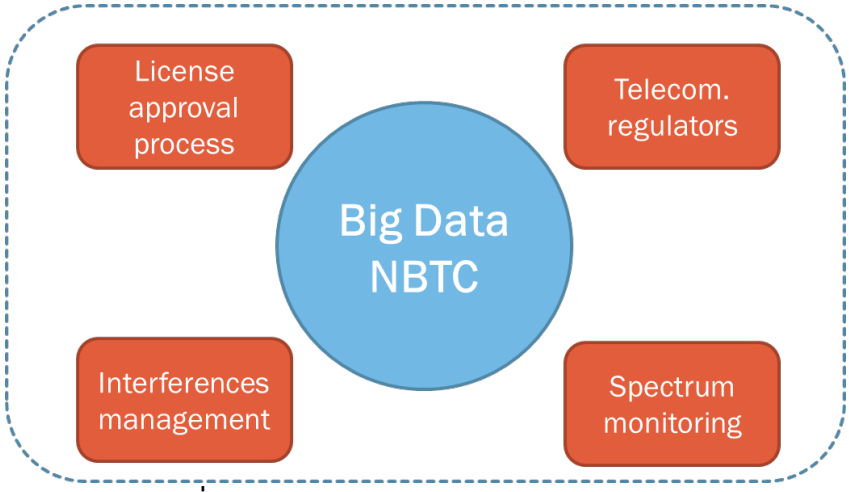
7.1.5 ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน

ขอบเขตการใช้งานของต้นแบบ : การใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) เพื่อช่วยตรวจสอบความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ (Parameters) ที่ใช้สำหรับการประสานงานคลื่นความถี่ตาม Excel Template ของการประสานงานคลื่นความถี่ทั้ง 3 ประเภท ให้สอดคล้องกันกับข้อตกลงการใช้งานคลื่นความถี่ระหว่างประเทศไทยและประเทศเพื่อนบ้าน

- การจดทะเบียนคลื่นความถี่ (Frequency Registration)
- การแจ้งการใช้คลื่นความถี่ (Frequency Notification)
- การจดทะเบียนคลื่นความถี่แบบชั่วคราว (Temporary acceptance)

ปัจจุบันข้อมูลการใช้ความถี่ชายแดนไทย-กัมพูชามีมากกว่า 2,900 รายการ โดยแต่ละรายการประกอบด้วยฟิลด์ (Field) ข้อมูลได้มากถึง 47 ฟิลด์ข้อมูล

จากการวิเคราะห์การให้บริการและการดำเนินงานของสำนักงาน กสทช แหล่งข้อมูล Big Data จะมาจากกิจกรรมต่าง ๆ ตามที่แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งได้แก่ กิจกรรมการออกใบอนุญาตฯ (License Approval Process) กิจกรรมการกำกับดูแล (Telecommunications Regulation) กิจกรรมการบริหารจัดการการรบกวนของคลื่นความถี่ (Interference Management) และกิจกรรมการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) กระบวนการอนุมัติใบอนุญาตฯ ประกอบด้วยการขออนุญาตที่เกี่ยวกับอุปกรณ์วิทยุคมนาคม และการขออนุญาตที่เกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่ กิจกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นบนเว็บ (Website) ของสำนักงาน กสทช โดยข้อมูลที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของไฟล์ pdf ที่เป็นข้อกำหนดของอุปกรณ์ (Device Specification) และรายงานการทดสอบต่าง ๆ ข้อมูลเกี่ยวกับการกำกับดูแลและกฎระเบียบเกี่ยวกับการใช้คลื่นความถี่ที่ถูกเก็บไว้ในรูปแบบไฟล์ pdf แหล่งข้อมูลการรบกวนถูกเก็บไว้ในรูปแบบไฟล์ excel และสำหรับข้อมูลจากการระบบเฝ้าสังเกตคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring System) ซึ่งจะใช้สำหรับการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน การวิเคราะห์หาการใช้คลื่นความถี่ที่ผิดปกติหรือไม่ได้รับอนุญาตแบบเวลาจริง (Real-Time) สามารถเก็บไว้ในรูปแบบข้อมูล IoT เช่น MQQT (Message Queueing Telemetry Transport) แบบ Node JS หรือ SQL การบริหารจัดการโนดข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ เหล่านี้จะเป็นเรื่องที่ท้าทายอย่างยิ่งสำหรับสำนักงาน กสทช หากไม่มีแพลตฟอร์ม Big Data

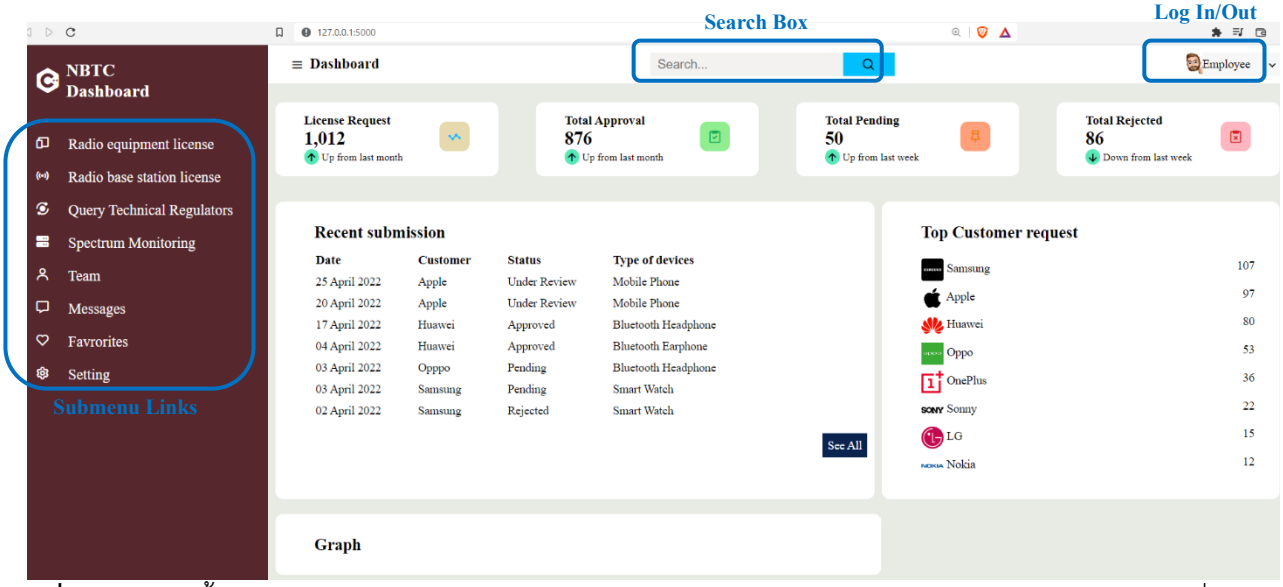


รูปที่ 5 ภาพรวม Big Data ของสำนักงาน กสทช.

7.2 ภาพรวมของเว็บแอปพลิเคชั่น (Web Application) ที่เสนอ

ภาพรวมและตัวอย่างแดชบอร์ด (Dashboard) ของเว็บแอปพลิเคชั่นที่เสนอแสดงไว้ตามรูปที่ 6 โดยแดชบอร์ดสำหรับผู้ดูแลระบบ (Admin) จะเป็นส่วนหนึ่งของเฮดเดอร์ (Header) ของเว็บแอปพลิเคชันซึ่งผู้มีหน้าที่รับผิดชอบสามารถเห็นภาพรวมและประสิทธิภาพของการดำเนินการทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง แผงข้อมูลแดชบอร์ดช่วยให้ผู้มีหน้าที่รับผิดชอบสามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วเกี่ยวกับกระบวนการทำและสิ่งที่สามารถปรับปรุงได้เพื่อให้กระบวนการทำงานดีขึ้น ฟังก์ชันการทำงานหลัก (Major Features) ของแดชบอร์ดที่สร้างขึ้นได้แก่

- รายละเอียดภาพรวมของเว็บ
- ลิงค์เมนูย่อย (Submenu Links)
- กล่องค้นหา (Search Box)
- การเข้าและออกจากการใช้งาน (Log-In and Log-Out)



รูปที่ 6 ภาพรวมทั้งหมด (Overall) และแดชบอร์ด (Dashboard) สำหรับบริการจัดการใยอนุญาตและความถี่ของเว็บแอปพลิเคชั่น (Web Application) ที่เสนอ

ในส่วนของลิงค์เมนูย่อย ผู้ใช้สามารถที่จะเรียกใช้เมนูย่อยที่เปิดใช้งานแล้ว พร้อมกับจำนวนผู้ใช้งานในเวลาเดียวกันที่แต่ละเมนูย่อยสามารถรองรับได้สรุปไว้ดังนี้

- ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม ด้วยเมนูย่อย Radio equipment license และ Radio base station license : ผู้ใช้เมนูย่อยละ 8 คนพร้อมกัน
- ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์ด้วยเมนูย่อย Query Technical Regulators : ผู้ใช้ 20 คนพร้อมกัน
- ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ และระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน ด้วยเมนูย่อย Spectrum Monitoring : ผู้ใช้สามารถทำ Spectrum Monitoring ได้พร้อมกัน 20 คนโดยที่การทำ Localization สามารถทำได้ครั้งละ 1 คน

ในส่วนของการวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่เพื่อสนับสนุนการจัดสรรคลื่นความถี่ เพื่อความสะดวกต่อผู้ใช้ในการปรับเปลี่ยนโค๊ด (Code) หรือปรับเปลี่ยนรายละเอียดของการวิเคราะห์ได้โดยง่ายเช่น เมื่อข้อมูลคลื่นความถี่มีการเปลี่ยนแปลงหรือผู้ใช้ต้องการปรับเปลี่ยนวิธีการหรือรายละเอียดของการวิเคราะห์ ยกตัวอย่างกรณีการใช้งานจริง เช่น ข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ชายแดนที่ชุดข้อมูลของแต่ละประเทศอาจจะมีฟิลด์ (Field) ข้อมูลที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่นชุดข้อมูลการใช้ความถี่ชายแดนไทย-มาเลเซียที่มีฟิลด์ข้อมูล F7 SVCCODE (จุดประสงค์ของการใช้คลื่นความถี่) แต่ชุดข้อมูลการใช้ความถี่ชายแดนไทย-กัมพูชาไม่มีฟิลด์ข้อมูล F7 SVCCODE นี้ คณะผู้วิจัยจึงเสนอให้ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ด้วยแอปพลิเคชัน (Application) ที่เรียกว่า Jupyter Notebook ซึ่งสามารถรัน (Run) ด้วย Python Editor ได้ แอปพลิเคชัน Jupyter Notebook เป็นแอปพลิเคชันแบบ Server-Client ที่สามารถแก้ไขโคดและทำงานผ่านทางเว็บเบราว์เซอร์ (Web Browser) ได้ นอกจากนั้นยังสามารถทำงานบนคอมพิวเตอร์ที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ตได้ด้วย เคอร์เนล (Kernel) ของ Jupyter Notebook ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้คือ ipython เพื่อใช้งานกับโค๊ดในภาษา Python และยังมีเคอร์เนลต่าง ๆ ที่รองรับการทำงานกับโค๊ดในภาษาอื่น ๆ อีกด้วย

ทั้งนี้ หัวข้อที่ 8 ถึง 12 ของรายงานฉบับนี้จะได้ให้รายละเอียดของฟังก์ชั่นการใช้งานเหล่านี้ต่อไป

8. ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม

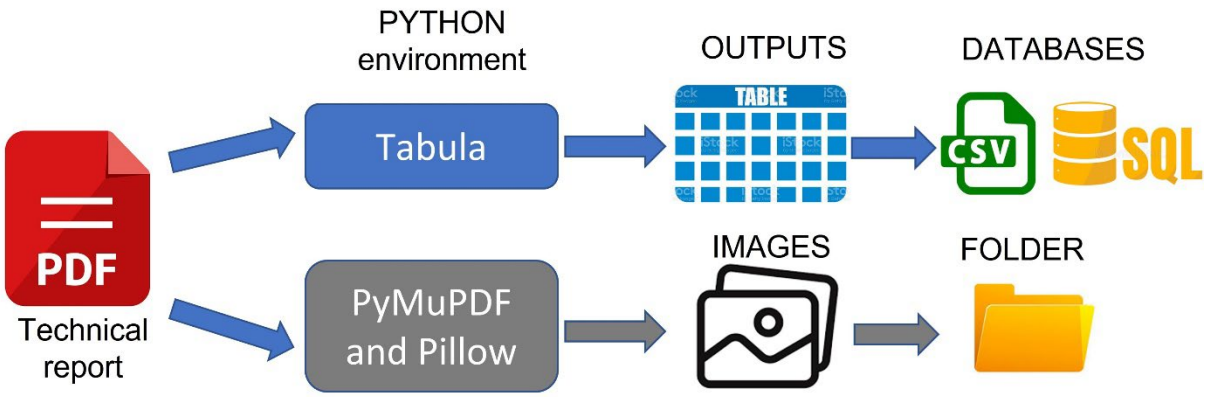
8.1 หลักการทำงาน

ผู้ใช้ (User) สามารถส่งรายงานผลการทดสอบอุปกรณ์แก่สำนักงาน กสทช ผ่านทางเว็บแอปพลิเคชัน โดยเว็บแอปพลิเคชันจะแสดงข้อมูลทั่วไป (General Information) ของอุปกรณ์ที่ถูกทดสอบพร้อมทั้งดึง (Extract) ตารางและรูปภาพต่าง ๆ ในรายงานผลการทดสอบออกมาในรูปแบบไฟล์ csv และไฟล์ jpeg ตามลำดับ เก็บไว้ในแฟ้มข้อมูลที่บีบอัด (Zipped Folder) ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลด (Download) ไปได้

อัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์เอกสารข้อมูล (Document Processing Algorithms) ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้จะใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ในการวิเคราะห์ข้อความ (Text Analysis) โดยจะสามารถดึงเอาข้อมูล ตาราง รูปภาพ ที่ต้องการจากเอกสารมาทำรายงานสรุป รวมถึงสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างคำสำคัญ (Keyword) ที่สนใจกับฐานข้อมูลเช่น กฎระเบียบ ประกาศที่เกี่ยวข้อง ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Specifications) และคำแนะนำต่าง ๆ เช่น ITU Recommendations ได้

ภาพรวมของกระบวนการทั้งหมดของการดึงตารางและรูปภาพจากเอกสารรายงานทางเทคนิคแสดงไว้ตามรูปที่ 7 รายงานทางเทคนิคซึ่งมักจะอยู่ในรูปแบบไฟล์ pdf เป็นเอกสารที่จะต้องส่งให้แก่สำนักงาน กสทช. ในกระบวนการขอรับรอง การขอใบอนุญาตต่าง ๆ ของอุปกรณ์วิทยุโทรคมนาคม รายงานทางเทคนิคประกอบด้วย

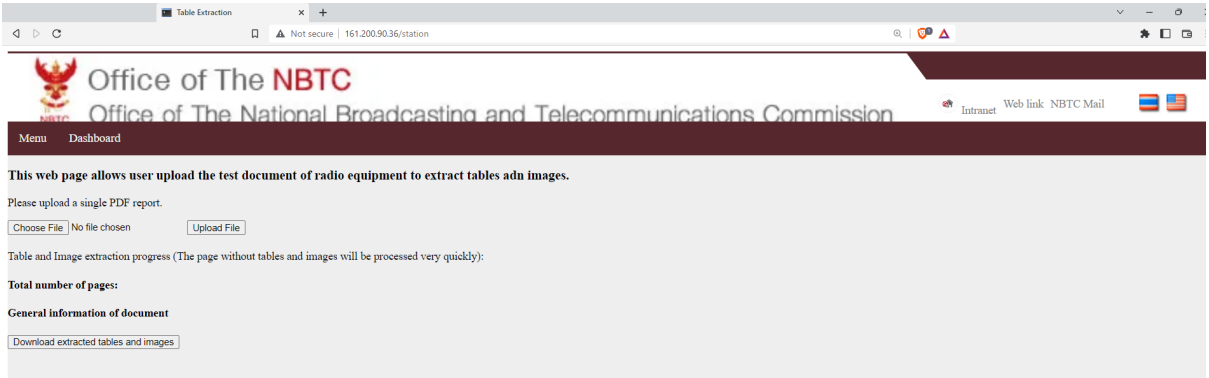
ตาราง รูปภาพจากการทดสอบต่าง ๆ จากศูนย์ทดสอบ (Testing Laboratory) ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในกระบวนการพิจารณาของสำนักงาน กสทช. เอกสารรายงานทางเทคนิคเหล่านี้จะถูกอัพโหลด (Upload) เข้าสู่สภาพแวดล้อมของไพธอนโปรแกรมมิง (Python Programming Environment) และใช้ไลบรารีต่าง ๆ ของไพธอน (Python Libraries) เพื่อดึงข้อมูลเหล่านี้ กระบวนการอัตโนมัตินี้จะช่วยประหยัดเวลาของบุคลากรของสำนักงาน กสทช. ในการพิจารณาตารางและรูปภาพต่าง ๆ ในรายงานทางเทคนิค นอกจากนั้นยังช่วยแปลงและเก็บรายงานในรูปแบบ pdf เหล่านี้ให้อยู่ในรูปแบบของฐานข้อมูลอื่นเช่น SQL Excel ได้



รูปที่ 7 ผังงาน (Flowchart) ของการดึงตารางและรูปภาพจากรายงานทางเทคนิค

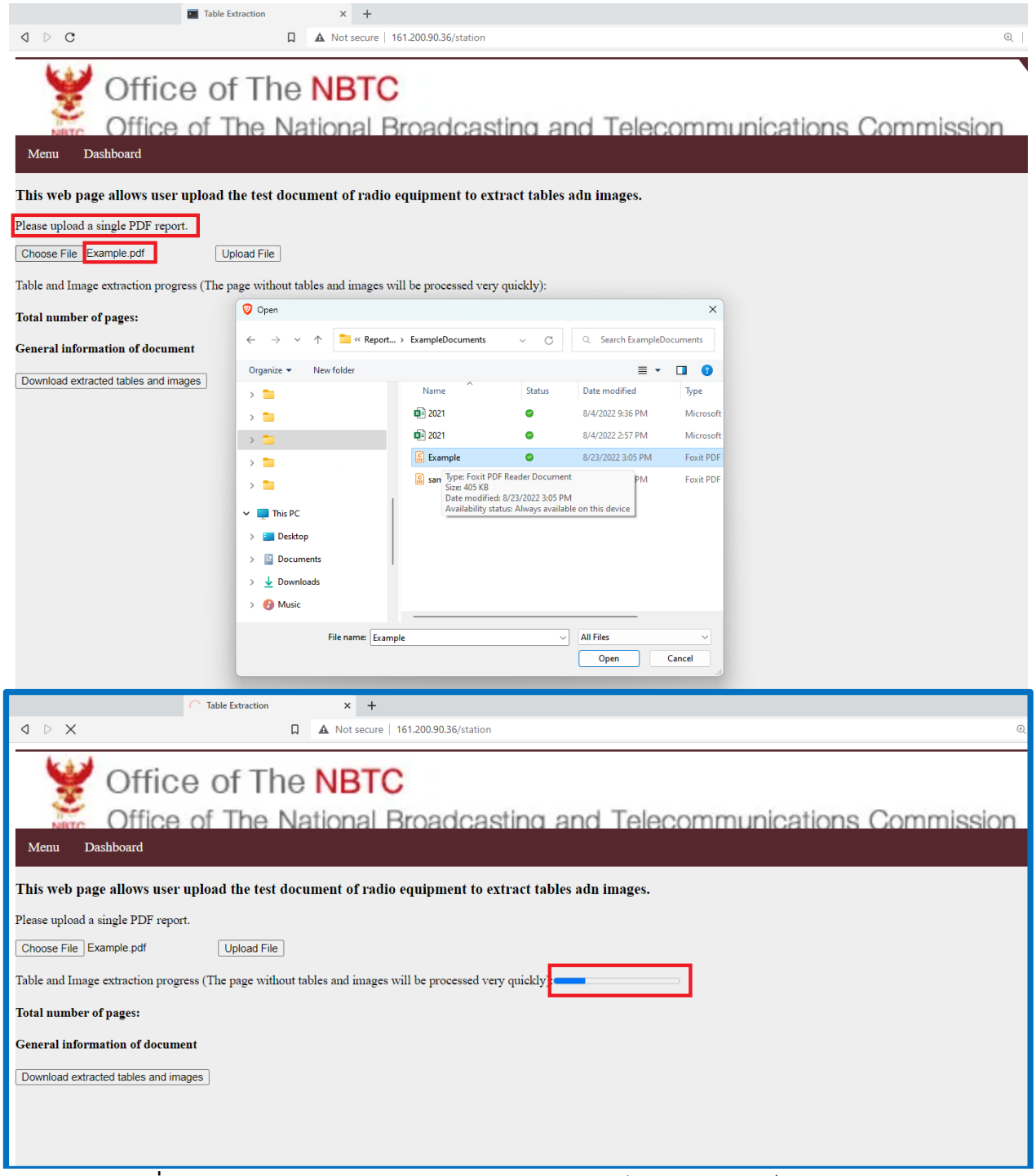
8.2 การใช้งาน

ผู้ใช้สามารถเลือกเมนูย่อย "Radio equipment license" หรือ "Radio base station license" ที่อยู่ด้านซ้ายมือของเว็บแอปพลิเคชัน (ตามรูปที่ 6) และ จะเห็นอินเตอร์เฟสของผู้ใช้ (User Interface) ดังแสดงในรูปที่ 8



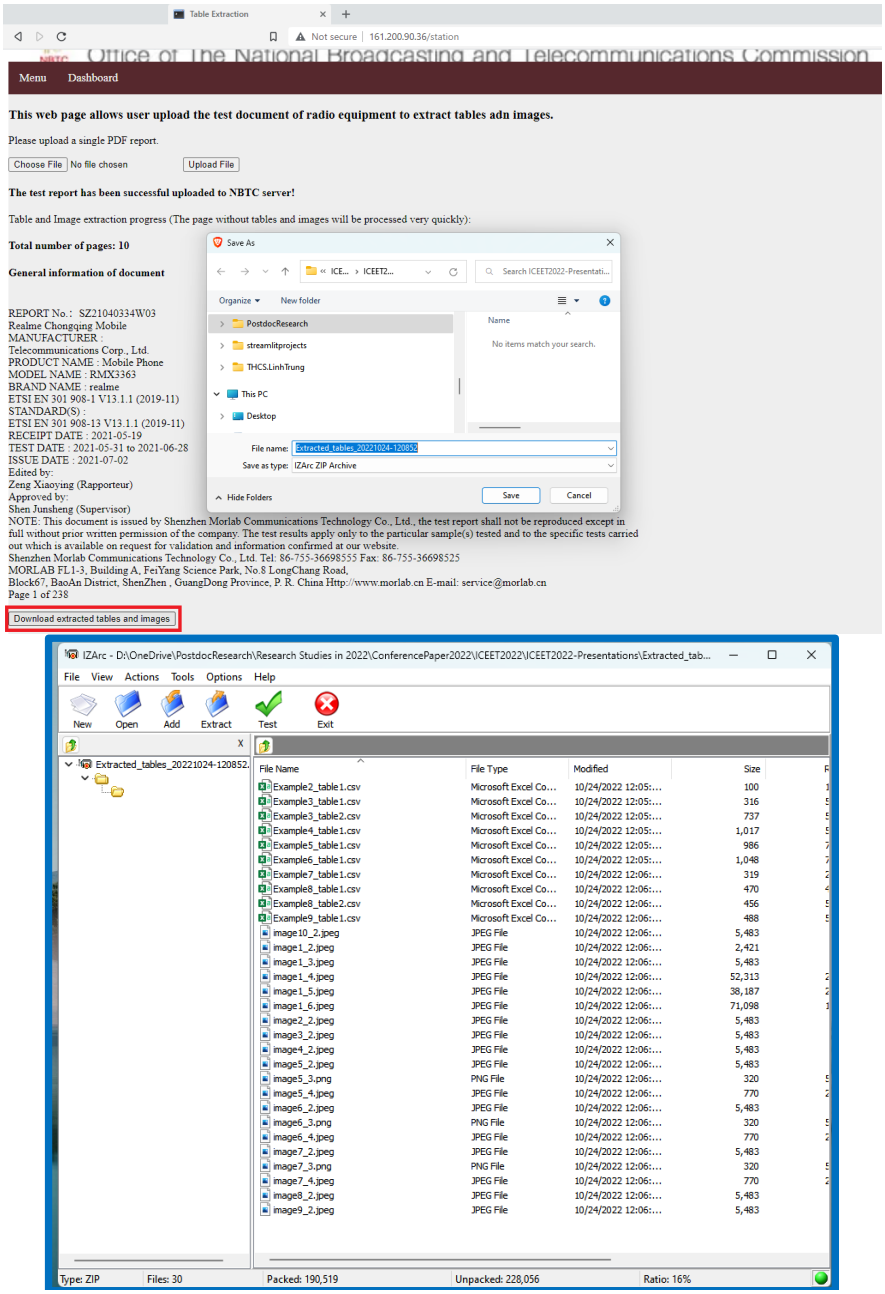
รูปที่ 8 อินเตอร์เฟสของผู้ใช้ (User Interface) ของเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) สำหรับการดึง (Extract) ตารางและรูปภาพต่าง ๆ จากรายงานผลการทดสอบ

ผู้ใช้สามารถอัปโหลด (Upload) ไฟล์ผลการทดสอบจากศูนย์ทดสอบที่ได้รับการรับรองในประเทศไทยโดยคลิกเลือกปุ่ม Choose File จากนั้นกด Upload File เอกสารที่เป็นไฟล์ pdf ดังแสดงในรูปที่ 9 เว็บแอปพลิเคชันรองรับการอัปโหลดไฟล์ชนิด pdf ได้ครั้งละ 1 ไฟล์



รูปที่ 9 การอัปโหลด (Uploading) ผลทดสอบในรูปแบบไฟล์ pdf เข้าสู่เว็บแอปพลิเคชัน

หลังจากอัปโหลดไฟล์รายงานเข้าสู่เซิร์ฟเวอร์ (Server) อัลกอริทึม (Algorithm) จะเริ่มทำงานโดยอัตโนมัติ โดยดึงเอาตารางและรูปภาพจากทุกหน้าของไฟล์รายงานไปเก็บไว้เป็นแฟ้มเอกสาร (Folder) ดังแสดงในรูปที่ 10 ตาราง และรูปภาพที่ถูกดึง (Extract) จากไฟล์รายงานจะถูกเก็บในแฟ้มข้อมูล ผู้ใช้สามารถคลิก "Download extracted tables and images" เพื่อดาวน์โหลดแฟ้มข้อมูลตารางและรูปภาพในรูปแบบของไฟล์ zip ได้ และเว็บแอปพลิเคชันจะแสดงข้อมูลทั่วไปของรายงานผลการทดสอบด้วย



รูปที่ 10 Download แฟ้มข้อมูลผลลัพธ์ และการแสดงข้อมูลทั่วไปของรายงานผลการทดสอบของเว็บแอปพลิเคชัน

ความถูกต้อง (Accuracy) ของการระบุตารางและรูปภาพในเอกสาร จะถูกวัดด้วย F-Measure โดยมีค่าอยู่ที่ 99.8% ทั้งนี้อัลกอริทึมยังคงมีข้อจำกัดในการดึงข้อความภาษาไทย และการดึงสัญลักษณ์พิเศษเช่น สัญลักษณ์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ เป็นต้น เนื่องจากระบบยังไม่รองรับภาษาไทย และสัญลักษณ์พิเศษเหล่านี้

$$F-measure = \frac{2\times Recall\times Precision}{Recall+Precision} = \frac{2\times 0.997\times 1}{0.997+1} = \mathbf{0.998} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} = \frac{122+230}{(122+230)+(0+0)} = 1 \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} = \frac{122+230}{(122+230)+(0+1)} = 0.997 \quad (3)$$

9. ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์

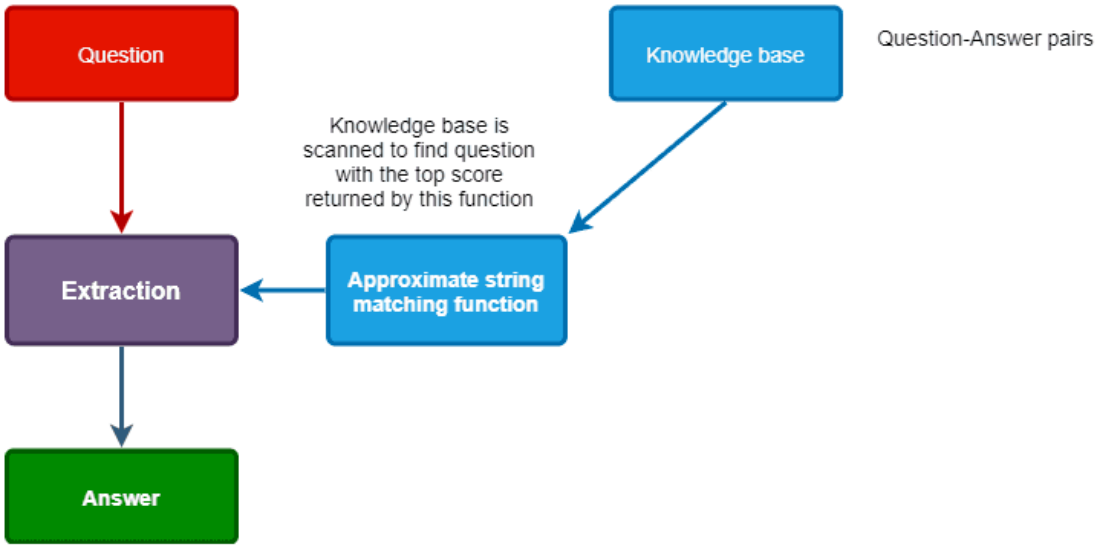
9.1 หลักการทำงาน

ผู้ใช้สามารถป้อนคำถามที่ต้องการถาม คำ หรือข้อความที่ต้องการค้นหา ระบบค้นหาและตอบคำถามทำงานโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) และอัลกอริทึม (Algorithm) Levenshtein โดยระบบค้นหาและตอบคำถามสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีแม้จะมีความผิดพลาดต่าง ๆ เช่น การสะกดผิด การผิด

คณะผู้วิจัยเสนอใช้ระบบตอบคำถาม (Question Answering (QA) System) ด้วย Natural Language Processing (NLP) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการคลื่นความถี่ แทนที่จะให้รายการของคำตอบที่เป็นไปได้ระบบถามตอบข้างต้นเป็นเทคโนโลยีที่ให้คำตอบที่ถูกต้องและกระชับต่อคำถามที่ถูกถามขึ้น ในสถานการณ์ที่สนใจนี้ระบบถามตอบถูกออกแบบให้ไวต่อความคล้ายคลึงของข้อความ (Text Similarity) และตอบสิ่งที่ถูกถามด้วยภาษาธรรมชาติ (Natural Language) ซึ่งทางเดียวที่เป็นไปได้คือการใช้เทคโนโลยี NLP อย่างเช่น BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) ของ Google

ในการสร้างระบบตอบคำถามเพื่อตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิคต่าง ๆ นี้ คณะผู้วิจัยใช้ NLP และอัลกอริทึมแมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning Algorithms) สำหรับตอบคำถามในโดเมนเฉพาะ (Domain-Specific) หรือคำถามทั่วไป และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้อง NLP จะใช้ทั้งการอนุมาน (Inference) และความน่าจะเป็น (Probability) ในการคาดเดาคำตอบที่ถูกต้อง และยิ่งผ่านการใช้งานมากขึ้นระบบตอบคำถามนี้ก็จะทำงานได้เป็นอย่างดีมากขึ้น

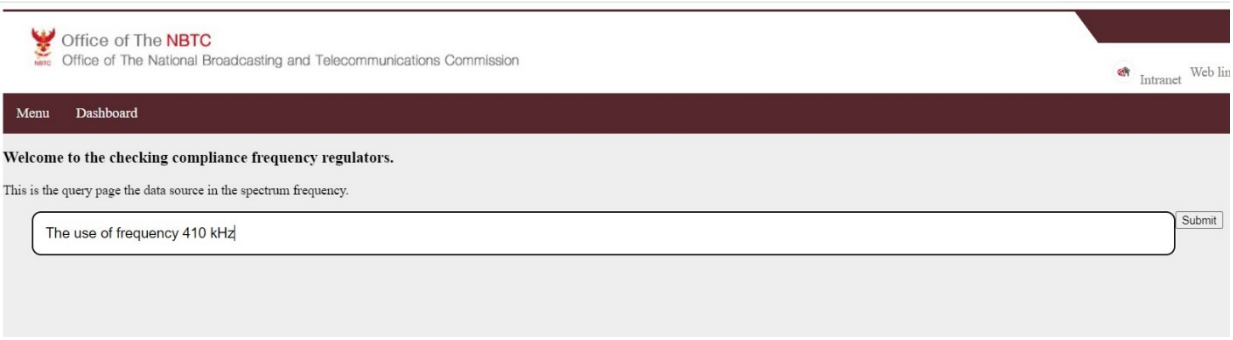
ระบบตอบคำถามพร้อมด้วยฟังก์ชันจับคู่แบบประมาณสตริง (Approximate String Matching Function) สามารถแสดงเป็นผังงานอย่างง่าย (Simple Flow Chart) ได้ตามรูปที่ 11 ในสถานการณ์นี้เราจะใช้ชุดข้อมูลขนาดเล็กของคู่คำถาม – คำตอบ (Question-Answer Pair) ที่อยู่ในรูปแบบไฟล์ csv ในประเด็นถูกถามบ่อย ๆ เช่น เกี่ยวกับการลงทะเบียน การขอใบอนุญาต เป็นต้น ในการใช้งานจริงองค์กรต่าง ๆ จะใช้ฐานข้อมูลที่มีความเฉพาะเจาะจงสูง (Highly Specialized Database) ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลตัวอย่าง (Samples) จำนวนมาก



รูปที่ 11 ผังงาน (Flow Chart) ของระบบตอบคำถาม (Question Answering (QA) System) ที่ใช้ฟังก์ชันจับคู่แบบประมาณสตริง (Approximate String Matching Function)

9.2 การใช้งาน

ในหน้าหลักของเว็บแอปพลิเคชัน ตามที่แสดงในรูปที่ 6 ผู้ใช้สามารถใช้งานฟังก์ชันการทำงานนี้โดยเลือกเมนูย่อย "Query Technical Regulators" จากนั้น ผู้ใช้จะถูกนำยังไปหน้าที่สามารถป้อนคำถามหรือข้อความที่ต้องการลงในกล่องค้นหาได้ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ผู้ใช้สามารถป้อนคำถามในกล่องค้นหาเพื่อหาคำตอบได้

จากการทดสอบการใช้งานพบว่า ระบบค้นหาและตอบคำถามสามารถทำงานได้เป็นอย่างดีแม้จะมีความผิดพลาดต่าง ๆ เช่น การสะกดผิด การผิดไวยากรณ์ หรือความหลากหลายของวิธีเขียนคำถามหรือข้อความที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ดังแสดงในตารางที่ 8 เช่น ตามตัวอย่างที่ 2 ในตาราง ระบบค้นหาที่ปรับปรุงด้วยการจับคู่ (Matching) แบบ Levenshtein จะสามารถให้คำตอบที่ถูกต้องด้วย (คะแนนในการจับคู่ (Matching Score) ที่ระบบคำนวณได้จะเท่ากับ 0.94) ทั้งนี้ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบถามตอบเมื่อวัดด้วย F-Measure อยู่ในระดับสูงที่ 99.2%

$$F-measure = \frac{2\times Recall\times Precision}{Recall+Precision} = \frac{2\times 0.992\times 0.993}{0.992+0.993} = \mathbf{0.992} \quad (4)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} = \frac{0.996}{0.996+0.07} = 0.993 \quad (5)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} = \frac{0.996}{0.996+0.08} = 0.992 \quad (6)$$

ตารางที่ 8 ตัวอย่างของสถานการณ์ต่าง ๆ เมื่อผู้ใช้ป้อนคำถาม ด้วยความผิดพลาดในการพิมพ์

ลำดับที่	คำถามที่ป้อนโดยผู้ใช้	คำถามที่คาดการณ์ (Predict) โดยอัลกอริทึม (Algorithm)	คำตอบ	คะแนน (Score)
1	The use of frequency 410 kHz	The use of frequency 410 kHz	designated for radio direction-finding in the maritime radionavigation service.	1
2	The usa of frequency 410 kHz	The use of frequency 410 kHz	designated for radio direction-finding in the maritime radionavigation service.	0.94
4	some city in Finland		Sorry, I didn't get you.	0

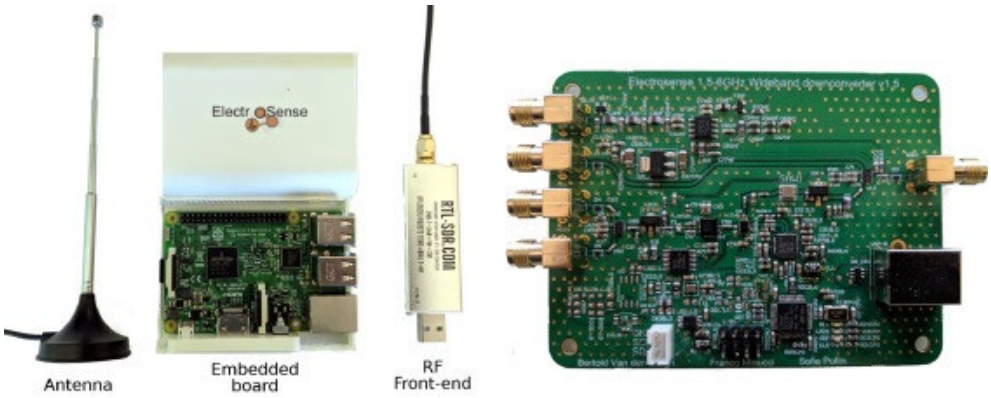
10. ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่

10.1 หลักการทำงาน

การพัฒนาระบบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring System) ในการศึกษานี้ ใช้เซนเซอร์ (Sensors) เก็บข้อมูลคลื่นความถี่ในย่านและพื้นที่ที่สนใจ และใช้ AI ในการวิเคราะห์ข้อมูล ตรวจสอบเพื่อให้สามารถระบุการเกิดสัญญาณรบกวนพร้อมทั้งแหล่งกำเนิดการรบกวน และวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตได้

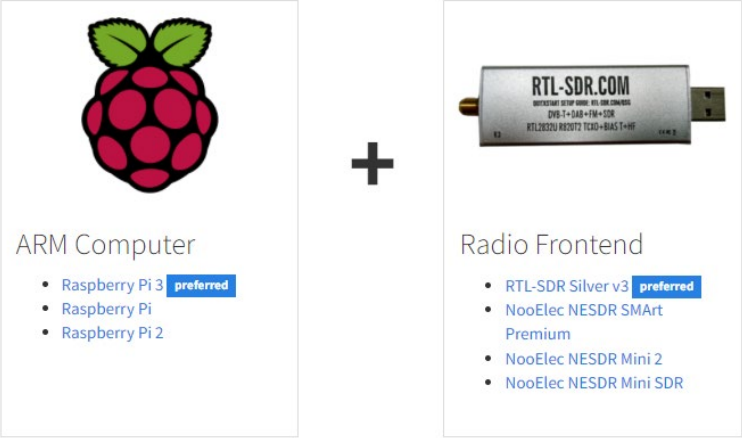
ย่านความถี่ที่สนใจได้แก่ย่าน 700 MHz (703 – 803 MHz) ในกิจการโทรคมนาคมเคลื่อนที่สากล (IMT) บริเวณชายแดนไทย-กัมพูชา อ.อรัญประเทศ จ.สระแก้ว โดยแหล่งกำเนิดการรบกวนอาจจะมาจากสถานีโทรทัศน์ภาคพื้นดินของประเทศกัมพูชา

การประเมินการรบกวน (Interference Evaluation) และการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) จะต้องใช้กลุ่มของเซนเซอร์ (Sensors) ในการเก็บข้อมูลการใช้งานคลื่นความถี่ ในที่นี้ คณะผู้วิจัยใช้เซนเซอร์ Electrosense ซึ่งเป็นเซนเซอร์ขนาดเล็ก ราคาถูกที่มีการกำหนดด้วยซอฟต์แวร์แบบฝังตัว (Software-Defined Embeded) และใช้ในระบบการเฝ้าฟังคลื่นความถี่แบบเปิด (Open-Source Spectrum Monitoring System) อุปกรณ์จะเชื่อมต่ออยู่กับภาคฟรอนต์-เอ็นด์วิทยุอย่างง่าย (Simplistic RF Front-End) และสายอากาศสำหรับใช้งานทั่วไป (General-Purpose Antenna) ดังแสดงในรูปที่ 13 (a) เซนเซอร์เหล่านี้ (Sensors) สามารถวัดคลื่นความถี่ได้ในช่วง 20 MHz ถึง 1.3 GHz และมีการเพิ่มอุปกรณ์พิเศษที่เป็นตัวแปลงคลื่นความถี่ลง (Optional Down-Converter ตามรูปที่ 13 (b) เข้าไป จะสามารถวัดคลื่นความถี่ได้สูงถึง 6 GHz



รูปที่ 13 เซนเซอร์คลื่นความถี่แบบ IoT (Internet of Things) ของ ElectroSense

โดยทั่วไป เซนเซอร์ของ ElectroSense ประกอบด้วยอุปกรณ์ประมวลผลแบบฝังตัวที่เรียกว่า Raspberry Pi ภาคฟรอนต์เอ็นด์วิทยุ และสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 14 ราคาของเซนเซอร์ ElectroSense จะอยู่ในช่วง 184.45 ถึง 238 ยูโร (Euro) รูปที่ 15 แสดงชุดอุปกรณ์ ElectroSense (ElectroSense Kits) สำหรับใช้งานในร่มและกลางแจ้ง



รูปที่ 14 อุปกรณ์เซนเซอร์ (Sensors) ของ ElectroSense

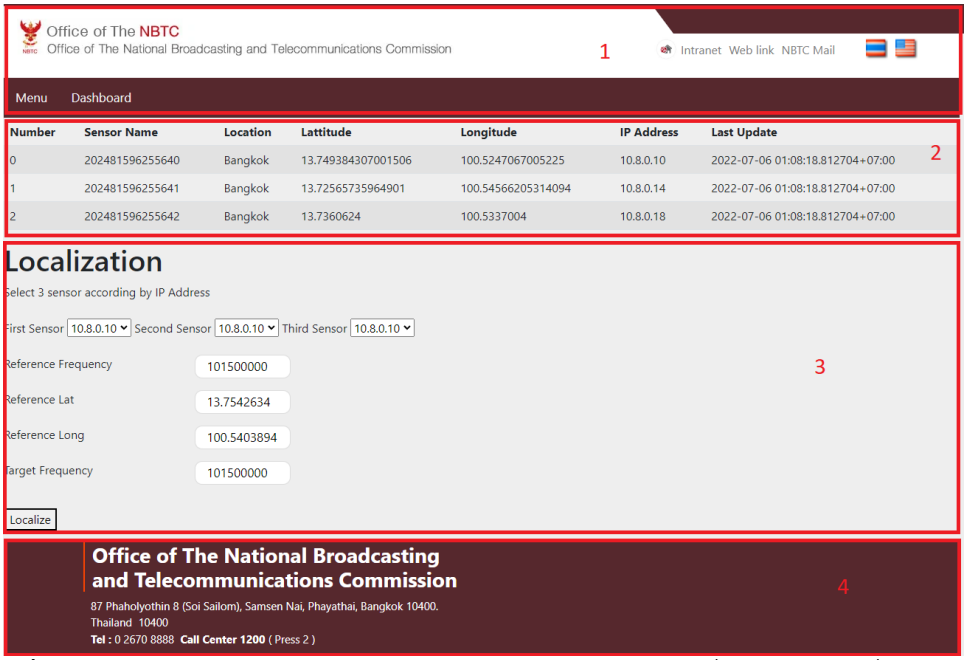
รูปที่ 15 ตัวเลือก (Options) ของอุปกรณ์เซนเซอร์ของ ElectroSense สำหรับใช้งานในร่ม และกลางแจ้ง

10.2 การใช้งาน

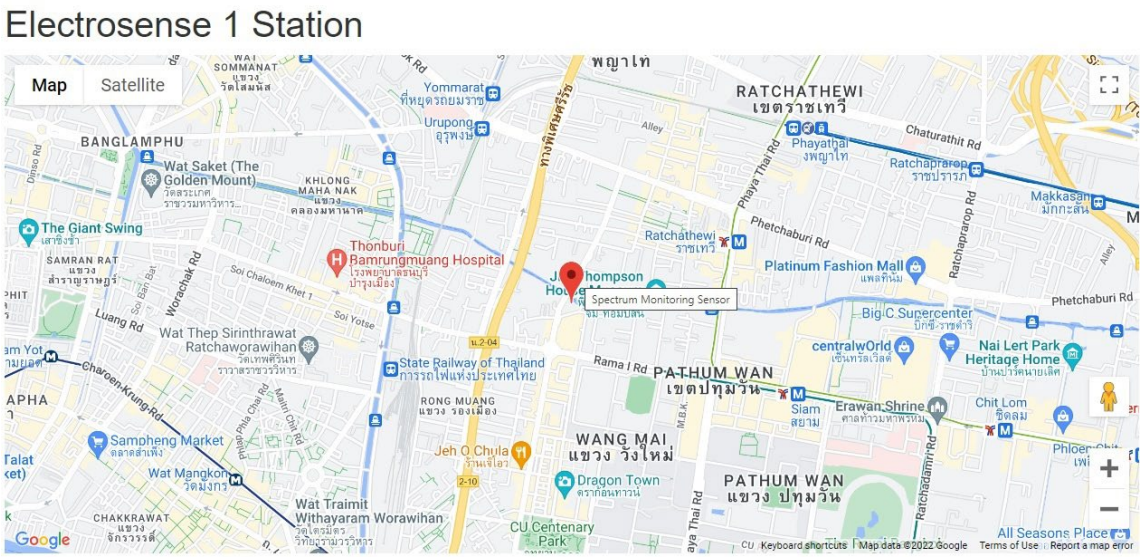
เมื่อเลือกเมนูย่อย "Spectrum Monitoring" ในหน้าหลักของเว็บแอปพลิเคชัน (ดูนรูปที่ 6) ผู้ใช้จะถูกนำยังไปหน้าเข้าไปสู่หน้าซึ่งแสดงรายการ (List) ของเซนเซอร์ที่กำลังเฝ้าฟังคลื่นความถี่ ตามรูปที่ 16 ซึ่งจะแสดงตำแหน่งปัจจุบันของเซนเซอร์ที่กำลังทำงานอยู่ ข้อมูลจากเซนเซอร์สามารถเชื่อมต่อด้วยการสื่อสารไร้สายแบบต่าง ๆ ซึ่งในที่นี้เลือกเชื่อมต่อด้วยสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ 4G ที่อัตราการรับส่งข้อมูลอย่างน้อย 10 Mbps จากรูปที่ 16 เมนูย่อย Spectrum Monitoring จะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่

1) ส่วนหัว (Header) ซึ่งสามารถใช้แสดงข้อความต่าง ๆ ตามที่ผู้ดูแลระบบต้องการได้
2) รายการของเซนเซอร์ที่ใช้งานในระบบ ซึ่งจะแสดงชื่อของเซนเซอร์ (Sensor Name) ตำแหน่งพร้อมพิกัด (Location with Latitude & Longitude) ไอพีแอดเดรส (IP Address) และการอัพเดตล่าสุด (Last Update) และเมื่อคลิกที่เซนเซอร์แต่ละตัวระบบจะแสดงตำแหน่งของเซนเซอร์นั่นบนแผนที่ดังแสดงในรูปที่ 17(a) พร้อมกราฟแสดงการวัดสัญญาณที่เซนเซอร์นั้นวัดค่าล่าสุด
3) พื้นที่สำหรับใส่ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการระบุตำแหน่ง (Localization)
4) ส่วนท้าย (Footer) ซึ่งในที่นี้จะแสดงชื่อ ที่อยู่ และหมายเลขโทรศัพท์ของสำนักงาน กสทช.

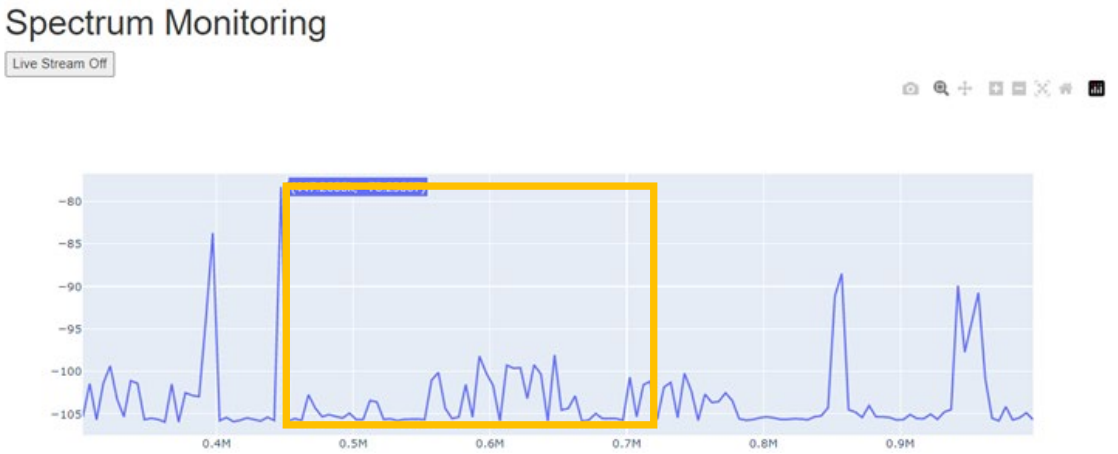
ผู้ใช้สามารถเลือกดูข้อมูลเช่น ตำแหน่งของเซนเซอร์ (Sensors) ที่ถูกใช้ในการเฝ้าฟังคลื่นความถี่ได้ นอกจากนั้นด้วยข้อมูลการใช้คลื่นความถี่จากกลุ่มของเซนเซอร์เว็บแอปพลิเคชันสามารถประมาณตำแหน่งของเครื่องส่งที่สนใจเช่น สถานีวิทยุนิรนาม (Unknown Radio Station) ได้



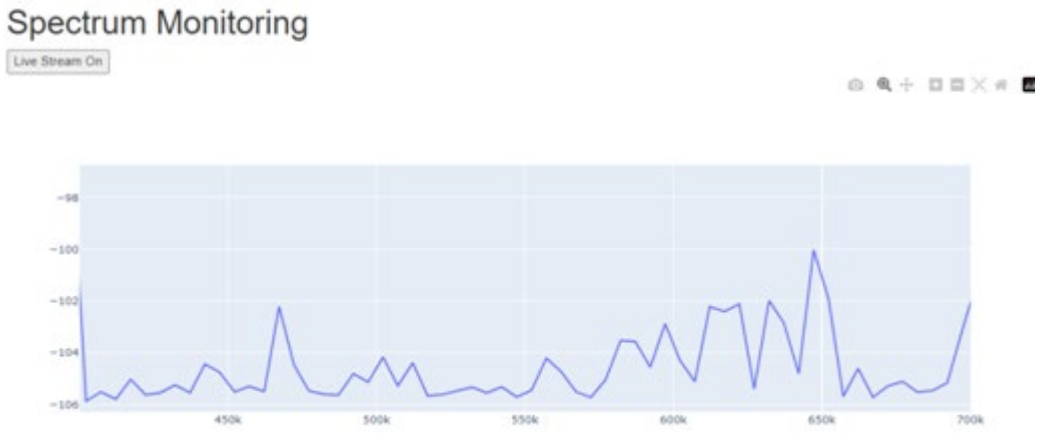
รูปที่ 16 รายการ (List) ของเซนเซอร์ (Sensors) Electrosense ที่กำลังเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) ตามภาพตัวอย่างนี้เซนเซอร์ทุกตัวถูกใช้งานในพื้นที่กรุงเทพมหานคร



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 17 (a) ตัวอย่างตำแหน่งของเซนเซอร์ (Sensors) Electrosense (Electrosense 1) บน Google Map (b) RSSI (Received Signal Strength Indication) ของสัญญาณที่เฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) (c) ภาพขยาย (Zoon In) ของ RSSI ของสัญญาณที่เฝ้าฟังคลื่นความถี่

เมื่อคลิกเลือกเซนเซอร์ที่อยู่ในรายการแล้ว นอกจากตำแหน่งของเซนเซอร์ที่จะถูกแสดงบนแผนที่ ระบบจะแสดงค่าระดับสัญญาณที่เซนเซอร์นั้นวัดได้ในย่านความถี่ต่าง ๆ (Received Signal Strength Indication, RSSI) ในหน่วย dBm ดังแสดงในรูปที่ 17(b) โดยแต่ละจุดบนกราฟจะสามารถแสดงค่าระดับ RSSI และย่านความถี่ของแต่ละจุดได้ นอกจากนั้นผู้ใช้จะสามารถขยายกราฟที่แสดงระดับ RSSI เพื่อเลือกดูในย่านความถี่ที่สนใจได้ ดังแสดงในรูปที่ 17(c) กราฟแสดงค่าระดับสัญญาณที่เซนเซอร์วัดได้ในย่านความถี่ต่าง ๆ นี้จะเป็นเครื่องมือให้ผู้ใช้สามารถระบุกรณีที่มีสัญญาณรบกวน (Interference) แปลกปลอมเกิดขึ้น หรือมีการใช้คลื่นความถี่ในย่านที่ยังไม่มีการอนุญาตให้ใช้งาน (Abnormal Frequency Usage) ได้

11. ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน

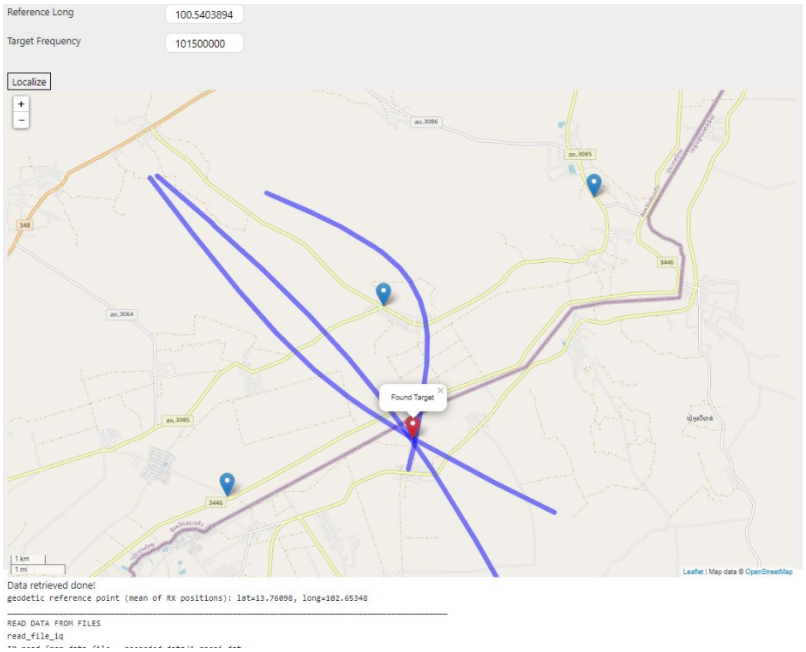
11.1 หลักการทำงาน

ในส่วนนี้เป็นการประยุกต์ใช้ฟังก์ชั่นการทำงานจากหัวข้อที่ 10 ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่กับการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชานแดน โดยผู้ใช้สามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์เพื่อประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่สนใจได้

จากรูปที่ 16 ฟังก์ชันการใช้งาน (Feature) อีกอย่างหนึ่งในส่วนของระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่คือการระบุตำแหน่ง (Localization) ของสถานีวิทยุนิรนาม (Unknown Radio Station) ด้วยเซนเซอร์ Electrosense ทั้งนี้อัลกอริทึมสำหรับการระบุตำแหน่ง (Localization Algorithm) จะทำงานบนโปรแกรม Matlab (การประมวลผลในส่วนนี้สามารถนำเข้าไปรวมกับเว็บแอปพลิเคชันได้ในอนาคต) และผลของการระบุตำแหน่งจะถูกผนวกเข้ากับเว็บแอปพลิเคชัน ในส่วนของการป้อนข้อมูลเพื่อประมาณตำแหน่ง จะต้องใส่ข้อมูลของเซนเซอร์ 3 ตัว ซึ่งอยู่ในพื้นที่ที่ต่างกัน และจะต้องระบุคลื่นความถี่และพิกัดตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิง (Reference Frequency together with Reference Latitude & Longitude) เมื่อต้องการระบุตำแหน่งของสัญญาณเป้าหมาย (Target) ผู้ใช้จะต้องใส่ข้อมูลคลื่นความถี่ของสัญญาณเป้าหมายแล้วกดปุ่ม Localize ซึ่งจะสั่งการให้ระบบทำงานโดยเซนเซอร์จะเริ่มวัดสัญญาณและเก็บข้อมูลเพื่อทำการระบุ (ประมาณ) ตำแหน่งของสัญญาณเป้าหมาย บันทึกข้อมูล (Log) เกี่ยวกับการระบุตำแหน่งจะถูกแสดงใต้ปุ่ม Localize และเมื่อการคำนวณต่าง ๆ เสร็จสิ้นระบบจะแสดงแผนที่ระบุตำแหน่งของสัญญาณเป้าหมายดังแสดงในรูปที่ 18

ในส่วนของความถูกต้องในการประมาณตำแหน่ง จากตารางที่ 9 ค่าความผิดพลาดในการประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่อัตราสุ่มต่าง ๆ จากการทดลองในพื้นที่จังหวัดสระแก้ว (พื้นที่ชายแดนไทย – กัมพูชา) มีค่าดังนี้

- อัตราสุ่ม 2.048 Mbps ค่าความผิดพลาดในการประมาณเฉลี่ยเท่ากับ 2.17 กม. พร้อมส่วนเลี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) 0.83 กม.
- อัตราสุ่ม 2.48 Mbps ค่าความผิดพลาดในการประมาณเฉลี่ยเท่ากับ 1.22 กม. พร้อมส่วนเลี่ยงเบนมาตรฐาน 0.92 กม.
- อัตราสุ่ม 2.88 Mbps ค่าความผิดพลาดในการประมาณเฉลี่ยเท่ากับ 1.25 กม. พร้อมส่วนเลี่ยงเบนมาตรฐาน 0.05 กม.



รูปที่ 18 ตัวอย่างของการระบุตำแหน่ง (Localization) ของสัญญาณเป้าหมาย (Target Signal) : หมุดสีแดงคือตำแหน่งของสถานีวิทยุนิรนาม (Unknown Radio Station) ที่ประมาณโดยอัลกอริทึม (Algorithm) และอัลกอริทึมระบุตำแหน่งทำงานโดยใช้ชุดข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ (Sensors) Electrosense 3 ตัว (แสดงด้วยหมุดสีฟ้า)

ตารางที่ 9 ผลการประมาณตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Localization of Interference Source)

อัตราสุ่ม (Sample Rate) [Mbps]	เลขอ้างอิง	ละติจูด (Latitude)	ลองจิจูด (Longitude)	ความเชื่อถือได้ (Reliability)			ความผิดพลาดในการประมาณ [เมตร]
				AB	AC	BC	
2.048	1	13.71393572	102.6514025	X	x	x	1,367.95
	2	13.71118544	102.670053	X	x	x	2,125.36
	3	13.73539083	102.6578701	O	o	x	1,150.37
	4	13.6488469	102.5467581	X	u	x	14,604.43
	5	13.75204148	102.6528577	X	x	x	3,023.57
2.48	6	13.75197992	102.6158185	u	x	x	5,330.25
	7	13.72487923	102.6575906	x	x	x	107.87
	8	13.73550378	102.6601713	x	x	x	1,217.01
	9	13.73546029	102.6599619	x	x	x	1,205.45
	10	13.70918887	102.6710034	x	x	x	2,359.13
	11	13.70051056	102.5840703	o	x	x	8,311.64
2.88	12	13.73578131	102.659177	x	x	x	1,217.60
	13	13.73622463	102.6597766	x	x	x	1,281.41
	14	13.7503817	102.6126357	o	x	o	5,526.08
	15	13.77663882	102.6554583	o	o	x	5,735.48

ค่า 'x' ในตารางหมายความว่า การทำซิงโครไนส์ของสัญญาณอ้างอิง (Reference Synchronization) เป็นไปได้ด้วยดี 'o' หมายความว่า ค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณอ้างอิงมีประสิทธิภาพต่ำที่สุดซึ่งจะนำไปสู่ความผิดพลาดของตำแหน่งที่มีค่าสูง 'u' หมายความว่า ค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณเป้าหมายมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

12. ระบบวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่เพื่อสนับสนุนการจัดสรรคลื่นความถี่

12.1 หลักการทำงาน

ผู้ใช้สามารถใช้แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning) วิเคราะห์การแจกแจง (Distribution) และวิเคราะห์หาปัจจัยสำคัญ (Feature Importance Analysis) ที่มีผลต่อข้อมูลการใช้คลื่นความถี่ที่สนใจได้ โดยโมเดล (Model) ที่สามารถใช้สำหรับการวิเคราะห์หาปัจจัยสำคัญได้แก่ Linear Regression, Random Forest Regression และ K-Nearest Neighbors Regression การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ จะช่วยให้ผู้รับผิดชอบการบริหารจัดการคลื่นความถี่สามารถติดตามแนวโน้ม การแจกแจงความถี่ (Frequency Distribution) ของการใช้คลื่นความถี่ในแง่มุมต่าง ๆ เช่น ในเชิงพื้นที่ หรือในเชิงผู้ได้รับใบอนุญาตแต่ละรายเป็นต้น ซึ่งแนวโน้มเหล่านี้สามารถนำไปคาดการณ์ปริมาณการใช้คลื่นความถี่ในอนาคตในแง่มุมที่สนใจได้ นอกจากนั้น การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ยังสามารถช่วยระบุปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่สนใจเช่น ความสัมพันธ์ระหว่างแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) กับย่านความถี่ที่ถูกใช้งานเป็นต้นได้ การวิเคราะห์เหล่านี้จะช่วยให้ผู้รับผิดชอบการบริหารจัดการคลื่นความถี่สามารถระบุปัจจัยที่มีความสำคัญ และการกระจายตัว รวมถึงแนวโน้มของการใช้คลื่นความถี่ที่สนใจได้อย่างรวดเร็ว และแสดงออกมาเป็นภาพ (Visualization) เพื่อการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพได้

อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นใช้แมชชีนเลิร์นนิ่ง (Machine Learning) ด้วยไพธอน (Python) โดยใช้เทคนิค Feature Importance ในการวิเคราะห์ โดยจะกำหนดคะแนน (Score) ให้กับคุณสมบัติขาเข้า (Input Feature) ตามระดับความสามารถในการทำนายค่าตัวแปรเป้าหมาย (Target Variable) ที่สนใจ

ทั้งนี้การรัน (Run) อัลกอริทึมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลจะทำบนแอปพลิเคชันที่ชื่อ Jupyter Notebook เพื่อความสะดวกของผู้ใช้ให้สามารถปรับเปลี่ยนวิธีการหรือรายละเอียดของการวิเคราะห์ได้โดยง่าย

12.2 การใช้งาน

ในการวิเคราะห์ Feature Importance เพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ (Parameters) ของข้อมูลความถี่ชายแดนไทย – มาเลเซีย จะกำหนดตัวแปรที่สนใจ (Target Variable) เป็นความถี่ส่ง (TXFREQ) โดยหาความสัมพันธ์ระหว่าง TXFREQ กับพารามิเตอร์อื่น ๆ (Independent Variables) ได้แก่ ผู้ใช้ความถี่ (Client) ชนิดสถานี (Station) ตำแหน่งของเครื่องส่ง (Location) แถบกว้างความถี่ของสัญญาณ (BW, Bandwidth) และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับกำลังส่งได้แก่ RFOPPOW (RF Operation Power) และ RAD_PWR (Radial Power) ดังสรุปในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ตัวแปรขาเข้า (Input Variable) และตัวแปรเป้าหมาย (Target Variable, i.e. Output) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ Feature Importance ของข้อมูลความถี่ชายแดนไทย – มาเลเซีย

Independence Variables (Input)	Target Variable (Output)
Client	TXFREQ (Transmission Frequency)
Station	
Location	
BW (Bandwidth)	
RFOPPOW (RF Operation Power)	
RAD_PWR (Radial Power)	

ตารางที่ 11 สรุปสมรรถนะ (Performance) ของโมเดลต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ Feature Importance ของข้อมูงความถี่ชายแดนไทย – มาเลเซีย ซึ่งพบว่าโมเดลที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ขาออกและพารามิเตอร์ขาเข้าของชุดข้อมูลที่ใช้ได้ดีที่สุดได้แก่ โมเดล Random Forest Regression โดยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ขาออก (ดูค่า R-Squared ในตารางที่ 11) ได้ถึง 96% โดยใช้พารามิเตอร์ขาเข้าที่พิจารณา และปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อพารามิเตอร์ขาออก (ความถี่ส่ง) ได้แก่ Client (ผู้ใช้เช่น AIS, DTAC, True), Station และ Location (ตำแหน่ง) ของสถานีวิทยุ

ตารางที่ 11 สมรรถนะ (Performance) ของการวิเคราะห์ Feature Importance ของข้อมูลการใช้ความถี่บริเวณชายแดนไทย – มาเลเซีย

โมเดล (Model)	Feature Importance	R-Squared
Random Forest Regression Model	**Client, Station, Location**	**0.96 (96%)**
Permutation K-NN Classification Model	**Client, Station, Location**	**0.95 (95%)**
Linear Regression Model	**Client, Bandwidth, RFOPPOW**	**0.2525%)**

13. บทสรุป

เพื่อพัฒนาการบริหารจัดการคลื่นความถี่ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยใช้ประโยชน์จากข้อมูลเกี่ยวข้องที่มีอย่างมากมายและที่จะมีการบูรณาการร่วมกันเพิ่มขึ้นระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ อีกในอนาคต เทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) จะสามารถเพิ่มศักยภาพการตรวจสอบคลื่นความถี่และการรับเรื่องร้องเรียนต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในระดับนโยบายในการบริหารจัดการคลื่นความถี่ได้อย่างคุ้มค่าบนพื้นฐานข้อมูลเชิงสถิติที่น่าเชื่อถือ ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ที่เชื่อมโยงถึงกันมีคุณค่าสามารถนำไปใช้ในการวางแผนจัดสรร ออกใบอนุญาต จนถึงกระบวนการสืบค้นตามกระบวนการบริหารคลื่นความถี่ได้

ในการนี้คณะผู้วิจัย ได้ศึกษาและเสนอกรอบแนวคิดการศึกษา วิธีการ และแผนงานในการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานด้านการบริหารคลื่นความถี่ รวมทั้งได้ศึกษาเปรียบเทียบ (Benchmark) หน่วยงานกำกับดูแลในต่างประเทศหรือองค์กรอื่น ๆ ที่มีการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาประยุกต์ใช้สำหรับงานการบริหารคลื่นความถี่ พร้อมทั้งวิเคราะห์ ข้อดี/ข้อด้อย ของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว และวิเคราะห์สถานะปัจจุบันของการบริหารคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. และส่วนต่าง (Gap Analysis) เพื่อนำไปสู่การวางแผนและวิเคราะห์ผลกระทบของการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่

จากการวิเคราะห์ข้างต้น คณะผู้วิจัยได้เสนอรูปแบบเพื่อการจัดทำและพัฒนา Software ที่เป็นต้นแบบ (Prototype) ของเว็บแอปพลิเคชัน (Web Application) โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ โดยประกอบด้วย

- ระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม
- ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม
- ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์
- ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)
- ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination)
- ระบบวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่เพื่อสนับสนุนการจัดสรรคลื่นความถี่

14. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ กองทุนกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.) สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) สำหรับทุนสนับสนุนการทำโครงการวิจัยนี้ และขอขอบพระคุณความเห็นข้อเสนอแนะจากทีมปฏิบัติงานจากสำนักเทคโนโลยีและมาตรฐานโทรคมนาคม (ทท.) สำนักบริหารคลื่นความถี่ (คบ.) และ สำนักการอนุญาตวิทยุคมนาคม 2 (คท.2) ภายใต้สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) รวมถึงผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ช่วยสนับสนุนให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ตามเป้าที่ตั้งไว้

รายการเอกสารอ้างอิง

[Art19] Artificial Intelligence & Wireless Spectrum, 2019 Workshop Report, USA

[Ass18] Assessing the role of data analytics to deliver innovative spectrum management, 2018 https:// slideplayer.com/slide/17384127

[Bri17] Bringing the worlds of Spectrum Management, Policy, and Monitoring together through Big Data analysis, 2017 https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Events/

[End18] End-to-End Learning From Spectrum Data. 2018 https://arxiv.org/pdf/1712.03987.pdf

[FCC20] FCC TAC AI and Computing WG Artificial Intelligence, Report. 2020, USA

[Kim18] Sora Kim, Yingru Ji, Gap Analysis, The International Encyclopedia of Strategic Communication, John Wiley & Sons, 2018, DOI:10.1002/9781119010722.iesc0079

[Mih17] Mihaly, Heder (September 2017). "From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation". The Innovation Journal. 22: 1–23. Archived from the original (PDF) on October 11, 2017.

[Sub15] Subramaniam, Sriram, Hector Reyes, and Naima Kaabouch. "Spectrum occupancy measurement: an autocorrelation based scanning technique using USRP." In Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2015 IEEE 16th Annual, pp. 1-5. IEEE, 2015.

[Tac18] Tackling the crowded Radio Frequency (RF) spectrum using deep learning, 2018 http://on-demand.gputechconf.com/gtc/2018/presentation/s8267-tackling-the-crowded-radio-frequency-spectrum-using-deep-learning.pdf

[Tec14] Technology readiness levels (TRL); Extract from Part 19 - Commission Decision (2014) 4995 (PDF). ec.europa.eu. 2014

[US03] U.S. Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, Office of Spectrum Management, "United States frequency allocations,"[Online]. Available: http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allochrt.pdf. [Oct., 2003].

[Wri21] Tom Wright, Gap Analysis: What Is It & How To Conduct One, https://www.cascade.app/blog/ gap-analysis (Accessed: 14 Apr 2021)

บทที่ 22
สรุปสถานะการดำเนินโครงการ

ในบทนี้เป็นสรุปสถานะการดำเนินโครงการโดยแสดงการเปรียบเทียบระหว่างแผนงานในการดำเนินโครงการที่กำหนดไว้ในข้อเสนอโครงการตามสัญญาฯ กับรายละเอียดการดำเนินโครงการ ณ ปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 22-1

ตารางที่ 22-1 สรุปสถานะการดำเนินโครงการ

ที่	แผนงานในการดำเนินโครงการที่กำหนดไว้ในข้อเสนอโครงการตามสัญญาฯ	รายละเอียดการดำเนินโครงการ	สรุปสถานะ
1.	วางแผนการดำเนินโครงการอย่างละเอียด โดยเสนอกรอบแนวคิดการศึกษา วิธีการ และแผนงานในการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางในการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพของงานด้านการบริหารคลื่นความถี่	มีแผนงานดำเนินโครงการ และได้ส่งมอบรายงานฉบับเบื้องต้น (Inception Report) เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 1 และ 2)	✓
2.	ศึกษากรณีตัวอย่างของหน่วยงานกำกับดูแลในต่างประเทศหรือองค์กรอื่น ๆ ที่มีการนำเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้สำหรับงานการบริหารคลื่นความถี่ อย่างน้อย 3 หน่วยงาน โดยให้วิเคราะห์ ข้อดี/ข้อด้อย ของแต่ลักษณะการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว	มีผลการศึกษาเปรียบเทียบกับต่างประเทศ (International Benchmark) และได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 3 และ 4)	✓
3.	ศึกษาข้อมูลทางด้านเทคนิค และความพร้อมในการพัฒนาการเชื่อมต่อระบบคลังข้อมูลเพื่อนำไปวางแผนและวิเคราะห์ผลกระทบของการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อเพิ่มศักยภาพการบริหารคลื่นความถี่ โดยออกแบบวิธีการวิจัยหรือสถานการณ์จำลอง (Scenario) ที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยอย่างน้อย 3 สถานการณ์ พร้อมทั้งวิเคราะห์ข้อดี/ข้อด้อยของแต่ละสถานการณ์	มีผลการศึกษาและข้อเสนอแนะการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่ในประเทศไทย และได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 5)	✓
4	เสนอรูปแบบเพื่อการจัดทำและพัฒนา Software ที่เป็น Web Application (Prototype) โดยประยุกต์ ใช้เทคโนโลยี Big Data และการสร้าง AI Platform มาช่วยสนับสนุนภารกิจของสำนักงาน กสทช. ด้านการบริหารคลื่นความถี่ โดยรูปแบบที่เสนอแต่ละส่วนมีองค์ประกอบขั้นต้นตามขอบเขตการดำเนินงานของโครงการ	มีผลสรุปและรูปแบบการจัดทำและพัฒนา Software การนำเทคโนโลยี Big Data และ AI มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่ และได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 6, 7, 8, 9 และ 10)	✓

ที่	แผนงานในการดำเนินโครงการที่กำหนดไว้ในข้อเสนอโครงการตามสัญญาฯ	รายละเอียดการดำเนินโครงการ	สรุปสถานะ
4.1	ด้าน Big Data	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 9)	✓
4.1.1	จำนวนโนด (Nodes) เพื่อการประมวลผล และการจัดเก็บข้อมูลใน Data Lake	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 9 หัวข้อที่ 9.3.2, 9.4.4 และ 9.4.5)	✓
4.1.2	การสร้างผลการวิเคราะห์เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจในภารกิจการจัดทำแผนการกำหนดและจัดสรรคลื่นความถี่ในปัจจุบันและอนาคต	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 8, 9 หัวข้อที่ 9.1 และ 10)	✓
4.1.3	แนวทางการนำข้อมูลไปใช้งาน กรณีที่ต้องการเชื่อมต่อกับระบบสารสนเทศอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในงานตรวจสอบคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช.	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 8, 9 หัวข้อที่ 9.2)	✓
4.2	ด้านปัญญาประดิษฐ์ (AI)	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว	✓
4.2.1	ระบบช่วยประมวลผลคำร้องการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และการขอรับใบอนุญาตวิทยุคมนาคม	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 8, 9 หัวข้อที่ 9.3.3. และ 9.3.4) ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 ได้อัปเดตรายละเอียดความต้องการใช้งานที่ได้จากการประชุมร่วมกับคณะทำงานของสำนักงาน กสทช. (รายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 7 หัวข้อที่ 7.2 บทที่ 8 และบทที่ 9 หัวข้อที่ 9.1 และ 9.2)	✓
4.2.2	การพัฒนาแบบจำลองเพื่อประเมินการรบกวนและความเหมาะสมก่อนจัดสรรคลื่นความถี่ในพื้นที่ที่น่าสนใจ	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 8, 9 หัวข้อที่ 9.1 และ 9.2) ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 ได้อัปเดตรายละเอียดความต้องการใช้งานที่ได้จากการประชุมร่วมกับคณะทำงานของสำนักงาน กสทช. (รายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 7 หัวข้อที่ 7.2 บทที่ 8 และบทที่ 9 หัวข้อที่ 9.1 และ 9.2)	✓

ที่	แผนงานในการดำเนินโครงการที่กำหนดไว้ในข้อเสนอโครงการตามสัญญาฯ	รายละเอียดการดำเนินโครงการ	สรุปสถานะ
4.2.3	ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring) เพื่อตรวจสอบหาแหล่งกำเนิดการรบกวนและวิเคราะห์การใช้คลื่นความถี่ผิดปกติหรือการใช้คลื่นความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตเพื่อแจ้งเตือน โดยแบ่งตามพื้นที่ในการใช้ความถี่นั้นๆ ได้	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 8, 9 หัวข้อที่ 9.4.4 และ 9.4.5) ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 ได้อัปเดตรายละเอียดความต้องการใช้งานที่ได้จากการประชุมร่วมกับคณะทำงานของสำนักงาน กสทช. (รายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 7 หัวข้อที่ 7.2 บทที่ 8 และบทที่ 9 หัวข้อที่ 9.1 และ 9.2)	✓
4.2.4	ระบบช่วยเหลือการตรวจสอบให้สอดคล้องกับมาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องวิทยุคมนาคมและอุปกรณ์	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 8, 9 หัวข้อที่ 9.3.3. และ 9.3.4) ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 ได้อัปเดตรายละเอียดความต้องการใช้งานที่ได้จากการประชุมร่วมกับคณะทำงานของสำนักงาน กสทช. (รายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 7 หัวข้อที่ 7.2 บทที่ 8 และบทที่ 9 หัวข้อที่ 9.1 และ 9.2)	✓
4.2.5	ระบบช่วยเหลือการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน (Border Coordination) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับการใช้งานจริงระหว่างข้อตกลงการประสานงานคลื่นความถี่	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงในบทที่ 8, 9 หัวข้อที่ 9.3.3. และ 9.3.4) ในรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 ได้อัปเดตรายละเอียดความต้องการใช้งานที่ได้จากการประชุมร่วมกับคณะทำงานของสำนักงาน กสทช. (รายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 7 หัวข้อที่ 7.2 บทที่ 8 และบทที่ 9 หัวข้อที่ 9.1 และ 9.2)	✓
5.	นำรูปแบบและอัลกอริทึมไปเขียน Source Code พร้อมทั้งทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่ได้พัฒนาสร้างขึ้น โดยวัดสมรรถนะ (Performance Metrics) การทำงานของโปรแกรมในฟังก์ชันต่าง ๆ ตามที่ได้กล่าวไว้ในกรอบแนวคิด	มี Software ที่เป็นWeb Application (Prototype) และได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 เรียบร้อยแล้ว ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 เรียบร้อยแล้วโดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับอัลกอริทึมและโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น	✓

ที่	แผนงานในการดำเนินโครงการที่กำหนดไว้ในข้อเสนอโครงการตามสัญญาฯ	รายละเอียดการดำเนินโครงการ	สรุปสถานะ
		(รายละเอียดแสดงไว้ ในบทที่ 11, 12 และ 13) ในรายงานฉบับสมบูรณ์ ได้เพิ่มรายละเอียดการสร้างเว็บแอปพลิเคชัน รวมทั้งการทดสอบและการวัดสมรรถนะ (รายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 15, 16, 17, 18 และ 19)	
6.	พัฒนาโปรแกรมจากแผนงานที่ 5 ให้มีระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม	ได้ส่งมอบรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 เรียบร้อยแล้วโดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับความคืบหน้าของการพัฒนาระบบแสดงผล (Dashboard) (รายละเอียดแสดงไว้ ในบทที่ 14) ในรายงานฉบับสมบูรณ์ ได้อัปเดตรายละเอียดในส่วนของการพัฒนาระบบแสดงผล และระบบจัดทำรายงานเพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวมที่เหลือ (รายละเอียดแสดงไว้ ในบทที่ 14)	✓
7.	จัดอบรมการใช้งานระบบการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ให้กับเจ้าหน้าที่สำนักงาน กสทช. โดยแบ่งตามระดับของผู้เข้าอบรมตามขอบเขตการดำเนินงานของโครงการ	ได้ดำเนินการจัดอบรมเรียบร้อยแล้ว (รายละเอียดแสดงไว้ ในบทที่ 20)	✓

การดำเนินการปรับแก้ไขรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1 ตามข้อสังเกตของคณะกรรมการพิจารณาผลงาน ดังสรุปในตารางที่ 22-2

ตารางที่ 22-2 สรุปการปรับแก้ไขรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1

ลำดับ	หัวข้อที่ต้องแก้ไข	ข้อสังเกตุคณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ	รายละเอียดการแก้ไข	จุดที่แก้ไข
1.	ผลการศึกษาตัวอย่างของหน่วยงานกำกับดูแลในต่างประเทศหรือองค์กรอื่น ๆ ที่มีการนำเทคโนโลยี Big	ควรมีตารางวิเคราะห์ข้อดี/ข้อเสีย ของแต่ละลักษณะในการประยุกต์ใช้งานอย่างชัดเจน เพื่อให้เป็นไปตาม	เพิ่มเติมข้อดี-ข้อด้อยของแต่ละลักษณะการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยี Big Data และปัญญาประดิษฐ์สำหรับงานการ	บทที่ 3 หน้า 3-20 ถึง 3-25

ลำดับ	หัวข้อที่ต้องแก้ไข	ข้อสังเกตุ คณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ	รายละเอียดการแก้ไข	จุดที่แก้ไข
	Data และปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาประยุกต์ใช้สำหรับงานการบริหารคลื่นความถี่	ขอบเขตของงาน (TOR) ข้อที่ 4.2	บริหารคลื่นความถี่ของแต่ละประเทศ	

การดำเนินการปรับแก้ไขรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 ตามข้อสังเกตของคณะกรรมการพิจารณาผลงาน ดังสรุปในตารางที่ 22-3

ตารางที่ 22-3 สรุปการปรับแก้ไขรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3

ลำดับ	หัวข้อที่ต้องแก้ไข	ข้อสังเกตุ คณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ	รายละเอียดการแก้ไข	จุดที่แก้ไข
1.	ความก้าวหน้าในการพัฒนาระบบแสดงผล (Dashboard) และระบบจัดทำรายงาน (Report) เพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและการบริหารคลื่นความถี่ในภาพรวม	ควรอธิบาย Flowchart บทที่ 11 หน้าที่ 11-17 ขั้นตอนการดึงข้อมูลจากไฟล์ และเอกสารโดยการใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอในรูปแบบภาษาไทยเพื่อความเข้าใจ	ปรับคำอธิบายเป็นภาษาไทยแล้วทั้ง 3 Flowcharts	บทที่ 11 ภาคผนวก
		ควรอธิบายรายละเอียดของพารามิเตอร์ของเซนเซอร์ในบทที่ 13 ตารางที่ 13-1 หน้า 13-13 ให้อยู่ในรูปแบบเดียวกัน ควรอธิบายทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษเช่น Aggregation Function มีชื่อเรียกภาษาไทยว่าอย่างไร	ปรับรูปแบบตาราง 13-1 และ 13-2 ให้เป็นแบบเดียวกันแล้ว เพิ่มคำอธิบายภาษาไทยแล้ว	บทที่ 13 ตาราง 13-1 และตาราง 13-2
		การระบุค่าพารามิเตอร์ของคลื่นความถี่ในลักษณะของ API ที่เรียกใช้งานตามตาราง 13-5 ถึง 13-10 หน้า 13-26 ถึงหน้า 13-35 Description ควรอธิบายเป็นภาษาไทย	เขียน Description ของตาราง 13-5 ถึงตาราง 13-10 เป็นภาษาไทยแล้ว	บทที่ 13 ตาราง 13-5 ถึงตาราง 13-10
		ขอให้ตรวจสอบการสะกดคำให้ถูกต้อง เช่นในบทที่ 11 หน้า 11-13 "จำนก" เป็น "จำแนก"	ตรวจสอบการสะกดคำของรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 ให้ถูกต้องแล้ว	ทั้งเอกสาร

ลำดับ	หัวข้อที่ต้องแก้ไข	ข้อสังเกตุ คณะกรรมการพิจารณาผลงานฯ	รายละเอียดการแก้ไข	จุดที่แก้ไข
		ควรเพิ่มเติมรายละเอียดในส่วนของหลักการและวิธีการทำงานของระบบ AI ในการประมวลข้อมูลการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดนจะทำให้สามารถเข้าใจภาพรวมของระบบได้มากยิ่งขึ้น	เพิ่มรายละเอียดในส่วนของหลักการและวิธีการทำงานของระบบ AI ในการประมวลข้อมูลการประสานงานคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน แล้ว	บทที่ 9 หน้า 9-5
		ควรรายงานความก้าวหน้าของโปรแกรมที่กำลังพัฒนาและนำเสนอให้คณะกรรมการได้ทราบ	อยู่ระหว่างการเตรียมการเพื่อสาธิตโปรแกรมที่พัฒนากับคณะกรรมการ	

บรรณานุกรม

[1] M. Knott, Machine Learning and RF Spectrum Intelligence Gathering, A CRFS White Paper, December 2017.

[2] M. Kulin, T. Kazaz, I. Moerman, and E. D. Poorter, End-to-End Learning from Spectrum data: A Deep Learning Approach for Wireless Signal Identification in Spectrum Monitoring Applications, IEEE Access, Vol. 6, 2018, pp. 18484-18501.

[3] https://www8.hp.com/th/en/workstations/z840.html#!&pd1=1

[4] https://aimultiple.com/bpa-software

[5] http://cloud.google.com/bigquery

[6] https://www.alooma.com/blog/etl-tools-modern-list

[7] Y. Zhang, J. Wen, G. Yang, Z. He, and J. Wang, "Path Loss Prediction Based on Machine Learning: Principle, Method, and Data Expansion," Applied Science, MDPI, May 2019

[8] Östlin, E.; Zepernick, H.J.; Suzuki, H. Macrocell path-loss prediction using artificial neural networks. IEEE Trans. Veh. Technol. 2010, 59, 2735–2747.

[9] Isabona, J.; Srivastava, V.M. Hybrid neural network approach for predicting signal propagation loss in urban microcells. In Proceedings of the 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC), Agra, India, 21–23 December 2016; pp. 1–5.

[10] Joseph Isabona and Viranjay M. Srivastava, "A Neural Network based Model for Signal Coverage Propagation Loss Prediction in Urban Radio Communication Environment," International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 22 (2016) pp. 11002-11008

[11] https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2020/03/5G-Spectrum-Positions.pdf

[12] The WRC series Study on Socio-Economic Benefits of 5G Services Provided in mmWave Bands Executive Summary, GSMA, Jan 2019

[13] The WRC Series – 26 GHz and 28 GHz The growing momentum behind millimetre wave bands, GSMA, 2019

[14] https://www.5gmmwave.com/5g-mmwave-frequency-bands/5g-mmwave-band-n258-26-ghz/

[15] https://www.rtl-sdr.com/testing-the-electrosense-up-downconverter-expansion-board-for-0-6-ghz/

[16] U.S. Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, Office of Spectrum Management, "United States frequency allocations," [Online]. Available: http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allochrt.pdf. [Oct., 2003].

[17] Subramaniam, Sriram, Hector Reyes, and Naima Kaabouch. "Spectrum occupancy measurement: an autocorrelation based scanning technique using USRP." In Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2015 IEEE 16th Annual, pp. 1-5. IEEE, 2015.

[18] Assessing the role of data analytics to deliver innovative spectrum management. https://slideplayer.com/slide/17384127

[19] ITU's Handbook on National Spectrum Management, 2015. https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-21-2015-PDF-E.pdf

[20] TACKLING THE CROWDED RADIO FREQUENCY (RF) SPECTRUM USING DEEP LEARNING. http://on-demand.gputechconf.com/gtc/2018/presentation/s8267-tackling-the-crowded-radio-frequency-spectrum-using-deep-learning.pdf

[21] Bringing the worlds of Spectrum Management, Policy, and Monitoring together through Big Data analysis. https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Events/2017/Spectrum%20Management/Robert_LS%20telcom%20Thelen_Bartholomew.pdf

[22] End-to-End Learning From Spectrum Data. https://arxiv.org/pdf/1712.03987.pdf

[23] Detection on Abnormal Usage of Spectrum by Electromagnetic Data Mining. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8713186

[24] Electrosense: Open and Big Spectrum Data. https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8121869

[25] Spectrum Monitoring for Radar Bands using Deep Convolutional Neural Networks. https://arxiv.org/pdf/1705.00462.pdf

[26] Real-Time Interference Identification via Supervised Learning: Embedding Coexistence Awareness in IoT Devices. https://arxiv.org/pdf/1809.10085.pdf

[27] Scaling Deep Learning Models for Spectrum Anomaly Detection. http://people.cs. uchicago.edu/~ravenben/publications/pdf/anomaly-mobihoc19.pdf

[28] https://www.lstelcom.com/en/company/about-us

[29] R ThelenBartholomew, Bringing the worlds of Spectrum Management, Policy, and Monitoring together through Big Data analysis, Technical presentation, LS telcom AG, 2017.

[30] LS OBSERVER, https://www.lstelcom.com/en/solutions-in/spectrum-monitoring/ls-observer

[31] S. Rajendran et al., "Electrosense: Open and Big Spectrum Data," in IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 1, pp. 210-217, Jan. 2018, doi:10.1109/MCOM.2017.1700200.

[32] https://electrosense.org/

[33] https://github.com/electrosense/hardware

[34] https://github.com/electrosense

[35] M. Cotton, et. al., An Overview of the NTIA/NIST Spectrum Monitoring Pilot Program, 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) - Workshop - International Workshop on Smart Spectrum

[36] https://www.researchgate.net/publication/273123078_Myanmar_national_spectrum_management_policy_Is_it_best_practice

[37] https://www.ptd.gov.mm/LawsFP.aspx (Spectrum Roadmap (Meet the Needs Over Next 5 Years)

[38] https://www.apt.int/AWG-REPTS

[39] https://www.imercer.com/articleinsights/market-pricing-101-establishing-a-benchmark-methodology-unique-to-your-organization

[40] https://about.crunchbase.com/blog/ultimate-guide-market-research/

[41] https://www.infodev.org/infodev-files/m7_traineemanual_part2_20101029.pdf

[42] Ying-Chang Liang, Chapter 6-Artificial Intelligence for Dynamic Spectrum Management, Dynamic Spectrum Management From Cognitive Radio to Blockchain and Artificial Intelligence, Springer Open, Singapore, 2020, DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0776-2.

[43] S. Hu, Y. Pei, P.P. Liang, Y.-C. Liang, Robust modulation classification under uncertain noise condition using recurrent neural network, in Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'18), United Arab Emirates, Abu Dhabi (2018), pp. 1–7.

[44] N.C. Luong, D.T. Hoang, S. Gong, D. Niyato, P. Wang, Y.-C. Liang, D.I. Kim, Applications of deep reinforcement learning in communications and networking: a survey. IEEE Commun. Surv, Tutor (2019).

[45] O. Naparstek, K. Cohen, Deep multi-user reinforcement learning for distributed dynamic spectrum access. IEEE Trans. Wirel. Commun. 18(1), 310–323 (2019).

[46] Artificial Intelligence & Wireless Spectrum, 2019 Workshop Report, USA

[47] FCC TAC AI and Computing WG Artificial Intelligence, Report. 2020, USA

[48] Mihaly, Heder (September 2017). "From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation". The Innovation Journal. 22: 1–23. Archived from the original (PDF) on October 11, 2017.

[49] Technology readiness levels (TRL); Extract from Part 19 - Commission Decision C (2014) 4995 (PDF). ec.europa.eu. 2014

[50] Deep Learning Models for Wireless Signal Classification with Distributed Low-Cost Spectrum Sensors, S. Rajendran, IEEE, 2018

[51] Dynamic Spectrum Management via Machine Learning: State of the Art, Taxonomy, Challenges, and Open Research Issues, F. Zhou, IEEE Network, July/Aug 2019

[52] https://github.com/microsoft/onnxjs

[53] https://towardsdatascience.com/implementing-ml-systems-tutorial-server-side-or-client-side-models-3127960f9244

[54] https://streamlit.io/

[55] https://www.analyticsvidhya.com/blog/2 0 2 1 / 0 6 / build-web-app-instantly-for-machine-learning-using-streamlit/

[56] https://towardsdatascience.com/streamlit-101-an-in-depth-introduction-fc8aad9492f2

[57] https://palletsprojects.com/p/flask/

[58] https://www.analyticsvidhya.com/blog/2 0 2 0 / 0 4 / how-to-deploy-machine-learning-model-flask/

[59] https://towardsdatascience.com/how-to-easily-deploy-machine-learning-models-using-flask-b95af8fe34d4

[60] https://github.com/microsoft/onnxjs

[61] https://get.webgl.org/

[62] https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/WebGL_API

[63] https://mil-tokyo.github.io/webdnn/

[64] BA Techniques RSS, An Introduction to Gap Analysis, An Introduction To Gap Analysis — Business Analyst Learnings (Accessed: 14 Apr 2021)

[65] Tom Wright, Gap Analysis: What Is It & How To Conduct One, https://www.cascade.app/blog/gap-analysis (Accessed: 14 Apr 2021)

[66] Sora Kim, Yingru Ji, Gap Analysis, The International Encyclopedia of Strategic Communication, John Wiley & Sons, 2018, DOI:10.1002/9781119010722.iesc0079

[67] Abby Serino, Conducting A Gap Analysis: A FourStep Template, https://www.clearpointstrategy.com/gap-analysis-template/ (Accessed: 14 Apr 2021)

[68] Julien Mineraud, Oleksiy Mazhelis, Xiang Su, Sasu Tarkoma, A gap analysis of Internet-of-Things platforms, Computer Communications, Volumes 89–90, 2016, Pages 5-16, ISSN 0140-3664, https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.03.015

[69] https://searchdatamanagement.techtarget.com/definition/big-data

[70] https://searchenterpriseai.techtarget.com/definition/AI-Artificial-Intelligence

[71] https://www.codeproject.com/Articles/822379/Text-Mining-and-its-Business-Applications

[72] https://www.zencos.com/blog/text-mining-examples-advanced-analytics/

[73] https://www.analyticssteps.com/blogs/top-7-text-mining-techniques

[74] https://jfin-swufe.springeropen.com/articles/10.1186/s40854-020-00205-1

[75] https://appliedai.com/use-cases/1

[76] https://cloud.google.com/bigquery/

[77] https://blog.aimultiple.com/etl/

[78] https://www.tcibr.com

[79] https://www.rohde-schwarz.com/vn/home_48230.html

[80] https://learn.adafruit.com/freq-show-raspberry-pi-rtl-sdr-scanner

[81] https://greatscottgadgets.com/hackrf/one/

[82] https://uxplanet.org/10-rules-for-better-dashboard-design-ef68189d734c

ภาคผนวก ก

รายชื่อผู้ลงทะเบียนและเข้าร่วมอบรม

“การใช้งานระบบการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ (ระดับผู้ใช้งาน)”

โครงการวิจัยแนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่
และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data

วันจันทร์ที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2565 เวลา 9.00 – 12.00 น.
การอบรมออนไลน์ ผ่าน ZOOM

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ)

ที่	ชื่อ-นามสกุล	ชื่อที่ปรากฏใน Zoom Meeting	ตำแหน่ง	หน่วยงาน
1	ศ. ดร.วาทิต เบญจพลกุล		หัวหน้าโครงการ	จุฬาฯ
2	ดร.รัฐพล ศรุติรัตนวรกุล		นักวิจัย	จุฬาฯ
3	นายสรรชัย ดีเลิศไพบูลย์		นักวิจัย	จุฬาฯ
4	นายวัฒนศักดิ์ ศรีศิริ		นักวิจัย	จุฬาฯ

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.)

ที่	ชื่อ-นามสกุล	ชื่อที่ปรากฏใน Zoom Meeting	ตำแหน่ง	หน่วยงาน
1	นางสาวอรศรี ศรีระษา		ผอ.ส่วน	สำนักงาน กสทช.
2	นายชัยนเรศ คุณา		นดป. ก3	สำนักงาน กสทช.
3	นางสาวธันยพัฒน์ ภาดาเพิ่มผลสมบัติ		นดป. ก1	สำนักงาน กสทช.
4	นางสาวบุศรา ผาซิว		นดป. ก3	สำนักงาน กสทช.
5	นายภูวกฤต พลชิงชัย		นดป. ก3	สำนักงาน กสทช.
6	นายกัมปนาท เกษรเกศรา		บ.3	สำนักงาน กสทช.
7	นางสาวเกวลิน เนตรเกื้อกูล		นนผ. ก3	สำนักงาน กสทช.
8	นายณัฐสิษฐ์ ปิยะประสิทธิ์		นตภ.	สำนักงาน กสทช.
9	นายนพคุณ ยะวัน		วก. ก1	สำนักงาน กสทช.
10	นายพิทักษ์พงศ์ ลี้ศัตรูพ่าย		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
11	นายพงษ์พิทักษ์ เสกศรี		นตป. ก1	สำนักงาน กสทช.
12	นายไปรเมษฐ์ เมฆบังวัน		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
13	นายฤชิษฐ์ หิตะวัฒนกุล		นนผ. ก2	สำนักงาน กสทช.
14	นายสหทรัพย์ นิมนากรณ์		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
15	นายศรัณยพงศ์ นุชนวล		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
16	นายศรุต ศีลแจ่มใส		ดบ.	สำนักงาน กสทช.
17	นางสาวศศิธร ลำจวน		นจท. ก1	สำนักงาน กสทช.

ที่	ชื่อ-นามสกุล	ชื่อที่ปรากฏใน Zoom Meeting	ตำแหน่ง	หน่วยงาน
18	นางสาวศิริพร ไทยปิ่นณรงค์		กด.	สำนักงาน กสทช.
19	นายศักนรินทร์ ปินทรายมูล		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
20	นายศุภณัฏฐ์ ศิริอมรพรรณ		นตป. ก1	สำนักงาน กสทช.
21	นางสาวสุรีย์พร เมี่ยงพันธ์		นนผ. ก3	สำนักงาน กสทช.
22	นายสุทัศน์ จงสินทวี		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
23	นายสุทธิศักดิ์ อัญญูโพธิ์		วก. ก1	สำนักงาน กสทช.
24	นายสุวัฒน์ ปั๋นแก้ว		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
25	นายเทพสรรค์ ปลอดอินทร์		วก. ก2	สำนักงาน กสทช.
26	นางสาววิภาดา สัญญูอาจ		วก. ก3	สำนักงาน กสทช.
27	นายวิศิษฐ์ ภูชาดึก		นตป. ก1	สำนักงาน กสทช.
28	นายเชวงศักดิ์ ท้าวนอก		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
29	นายบันฑิต สีเทา		วก. ก1	สำนักงาน กสทช.
30	นายพงษ์ธร รัตนะ		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
31	นายพฤกษ์ กันทวงค์		นตป.	สำนักงาน กสทช.
32	นางสาววีรญา นามเมือง		นจท.	สำนักงาน กสทช.
33	นายสาธิต สุขพันธ์		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
34	นายสุรพัศ ศีรีวิเชียร		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
35	นางสาวบุศรา ผาชิว		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
36	นายประภัทพล บุตดีวงษ์		นตป.	สำนักงาน กสทช.
37	นายบัญชา รัตนสร้อย		นตป. ก1	สำนักงาน กสทช.
38	นายจิรัฏฐ์ เรืองทองเมือง		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
39	นายสุพัฒน์ ทวีพัฒน์		นตป. ก1	สำนักงาน กสทช.
40	นายจตุพร นครเทพ		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
41	นายธนวัสน์ ฉายะจินดา		วก. ก1	สำนักงาน กสทช.
42	นายทรงศักดิ์ กิตติวราพล		วก. ก1	สำนักงาน กสทช.
43	นางสาววรางคณา จันทรมงคล		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
44	นางสาวปิยาพัชร เกิดไพบูลย์		นตป.	สำนักงาน กสทช.
45	นายทศคุณ ยิ่งวัฒนาถาวร		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
46	นายพงศธร อรุณมิตร์		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
47	นายนิเวศ ยอดมิ่ง		ผอ. เขต 12	สำนักงาน กสทช.
48	นางสาวสุดาทิพย์ เมี่ยงพันธ์		นตป.	สำนักงาน กสทช.
49	นายสภา อ้อยหอม			สำนักงาน กสทช.
50	นายสิทธิชัย สุปินนะ			สำนักงาน กสทช.
51	นางกุลรพี ศรีเพชร			สำนักงาน กสทช.
52	นางพันทิภา สุทธินนท์			สำนักงาน กสทช.
53	นางสาวนิศารัตน์ สมัครนิล			สำนักงาน กสทช.

ที่	ชื่อ-นามสกุล	ชื่อที่ปรากฏใน Zoom Meeting	ตำแหน่ง	หน่วยงาน
54	นายสิทธิ สามิภักดิ์			สำนักงาน กสทช.
55	นางสาวปรีชญาพร ยี่สิ้น			สำนักงาน กสทช.
56	นางสาวดาราวรรณ สุนงาม			สำนักงาน กสทช.
57	นางสาวนรีกานต์ อ่วมแป้น			สำนักงาน กสทช.
58	นางสาวการย์สิริ กิตติกุลธัญโรจน์			สำนักงาน กสทช.
59	นางสุภาภรณ์ อบเชย			สำนักงาน กสทช.
60	นางสาวธิธารา รุจิพลพัฒน์			สำนักงาน กสทช.
61	นางสาวกชกร แก้วจันทร์เหนือ			สำนักงาน กสทช.
62	นางสาวรตนพร สารีขาว			สำนักงาน กสทช.
63	นางสาวณิตญาภรณ์ วาจศร			สำนักงาน กสทช.
64	นางรฐา ศิรมลพิวัฒน์			สำนักงาน กสทช.
65	นายพิชญะ ตื้อคำ			สำนักงาน กสทช.
66	นางสาวศจีพร อิงคนินันท์			สำนักงาน กสทช.
67	นางสาวใหม่หทัย ไชยโย			สำนักงาน กสทช.
68	นางสาวสุจิตรา ห่านสัมฤทธิ์			สำนักงาน กสทช.
69		TY#23		สำนักงาน กสทช.
70		อลงกรณ์ ภภ.3		สำนักงาน กสทช.
71		สมศักดิ์ เกลี้ยกลาง ภก.2 ตภ.		สำนักงาน กสทช.
72		เปรมณัฏฐ์ สำนักงาน กสทช.		สำนักงาน กสทช.
73		นิสา คท.2		สำนักงาน กสทช.
74		สำนักงาน กสทช. เขต 43		สำนักงาน กสทช.
75		สิทธิพงษ์ - คท.2		สำนักงาน กสทช.
76		มงคล ฉัตรเวหิน ผภภ.24		สำนักงาน กสทช.
77		รฐนนท์_คท.2		สำนักงาน กสทช.
78		กิ๊บ ภภ.3		สำนักงาน กสทช.
79		คุณากร ยอดเมือง		สำนักงาน กสทช.
80		กรรณิการ์ คท.2		สำนักงาน กสทช.
81		กสทช.เขต 21		สำนักงาน กสทช.
82		กันยารัตน์ คท.2		สำนักงาน กสทช.
83		23		สำนักงาน กสทช.
84		43.ตณัฐพล กิตติ ภก24		สำนักงาน กสทช.
85		87.ทอดศักดิ์ สุทธิรักษ์สนีฝ ภก. 12		สำนักงาน กสทช.
86		Aeng Kajitwiwat		สำนักงาน กสทช.
87		anek		สำนักงาน กสทช.
88		jakkkachai		สำนักงาน กสทช.
89		Kaitisak.B		สำนักงาน กสทช.

ที่	ชื่อ-นามสกุล	ชื่อที่ปรากฏใน Zoom Meeting	ตำแหน่ง	หน่วยงาน
90		Kob2000 Kasorn		สำนักงาน กสทช.
91		NBTC_Pakorn		สำนักงาน กสทช.
92		nbtc12		สำนักงาน กสทช.
93		NBTC31		สำนักงาน กสทช.
94		NBTC-Taspong_Region3		สำนักงาน กสทช.
95		nongnoot (Por)		สำนักงาน กสทช.
96		rattiya.k		สำนักงาน กสทช.
97		SA R3		สำนักงาน กสทช.
98		Sanee Pawasarn		สำนักงาน กสทช.
99		Thanachai NBTC33		สำนักงาน กสทช.
100		tor		สำนักงาน กสทช.

รายชื่อผู้ลงทะเบียนและเข้าร่วมอบรม

“การใช้งานระบบการนำเทคโนโลยี Big Data และ AI เพื่อสนับสนุนในการตรวจสอบคลื่นความถี่ (ระดับผู้ดูแลระบบ)”

โครงการวิจัยแนวทางการนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่
และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data

วันอังคารที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2565 เวลา 9.00 – 12.00 น.
การอบรมออนไลน์ ผ่าน ZOOM

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ)

ที่	ชื่อ-นามสกุล	ชื่อที่ปรากฏใน Zoom Meeting	ตำแหน่ง	หน่วยงาน
1	ศ. ดร.วาทิต เบญจพลกุล		หัวหน้าโครงการ	จุฬาฯ
2	ดร.รัฐพล ศรุติรัตนวรกุล		นักวิจัย	จุฬาฯ
3	นายสรรชัย ดีเลิศไพบูลย์		นักวิจัย	จุฬาฯ
4	นายวัฒนศักดิ์ ศรีศิริ		นักวิจัย	จุฬาฯ

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.)

ที่	ชื่อ-นามสกุล	ชื่อที่ปรากฏใน Zoom Meeting	ตำแหน่ง	หน่วยงาน
1	นายสุทัศน์ จงสินทวี		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
2	นายนพคุณ ยะวัน		วก. ก1	สำนักงาน กสทช.
3	นางสาววีรญา นามเมือง		นจท.	สำนักงาน กสทช.
4	นายพงษ์พิทักษ์ เสกศรี		นตป. ก1	สำนักงาน กสทช.
5	นายฤชิษฐ์ หิตะวัฒนกุล		นนผ. ก2	สำนักงาน กสทช.
6	นายกัมปนาท เกษรเกศรา		บ.3	สำนักงาน กสทช.
7	นายพิทักษ์พงศ์ ลี้ศัตรูพ่าย		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
8	นายศรุต ศีลแจ่มใส		ดบ.	สำนักงาน กสทช.
9	นายวิศิษฐ์ ภูชาดึก		นตป. ก1	สำนักงาน กสทช.
10	นายภูวกฤต พลชิงชัย		นดป. ก3	สำนักงาน กสทช.
11	นายบันฑิต สีเทา		วก. ก1	สำนักงาน กสทช.
12	นายศุภณัฏฐ์ ศิริอมรพรรณ		นตป. ก1	สำนักงาน กสทช.
13	นายไปรเมษฐ์ เมฆบังวัน		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.
14	นางสาวเกวลิน เนตรเกื้อกูล		นนผ. ก3	สำนักงาน กสทช.
15	นางสาวศิริพร ไทยปิ่นณรงค์		กด.	สำนักงาน กสทช.
16	นายสาธิต สุขพันธ์		นตป. ก3	สำนักงาน กสทช.
17	นายเชวงศักดิ์ ท้าวนอก		นตป. ก2	สำนักงาน กสทช.

ที่	ชื่อ-นามสกุล	ชื่อที่ปรากฏใน Zoom Meeting	ตำแหน่ง	หน่วยงาน
18		เปรมณัฏฐ์ สำนักงาน กสทช.		สำนักงาน กสทช.
19		สมศักดิ์ เกลี้ยกลาง ภก.2 ตภ.		สำนักงาน กสทช.
20		มงคล ฉัตรเวหิน ผภภ.24		สำนักงาน กสทช.
21		nongnoot (Por)		สำนักงาน กสทช.
22		NBTC_Pakorn		สำนักงาน กสทช.
23		tor		สำนักงาน กสทช.
24		สำนักงาน กสทช. เขต 43		สำนักงาน กสทช.

ภาคผนวก ข

การนำปัญญาประดิษฐ์ (AI) มาใช้ในการบริหารคลื่นความถี่และวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจสอบคลื่นความถี่ด้วยเทคโนโลยี Big Data

WEBAPP TUTORIAL

ศ.ดร.วาทิต เบญจพลกุล (หัวหน้าโครงการ)

กลุ่มวิจัย Artificial Intelligence, Machine Learning และ Smart Grid Technology

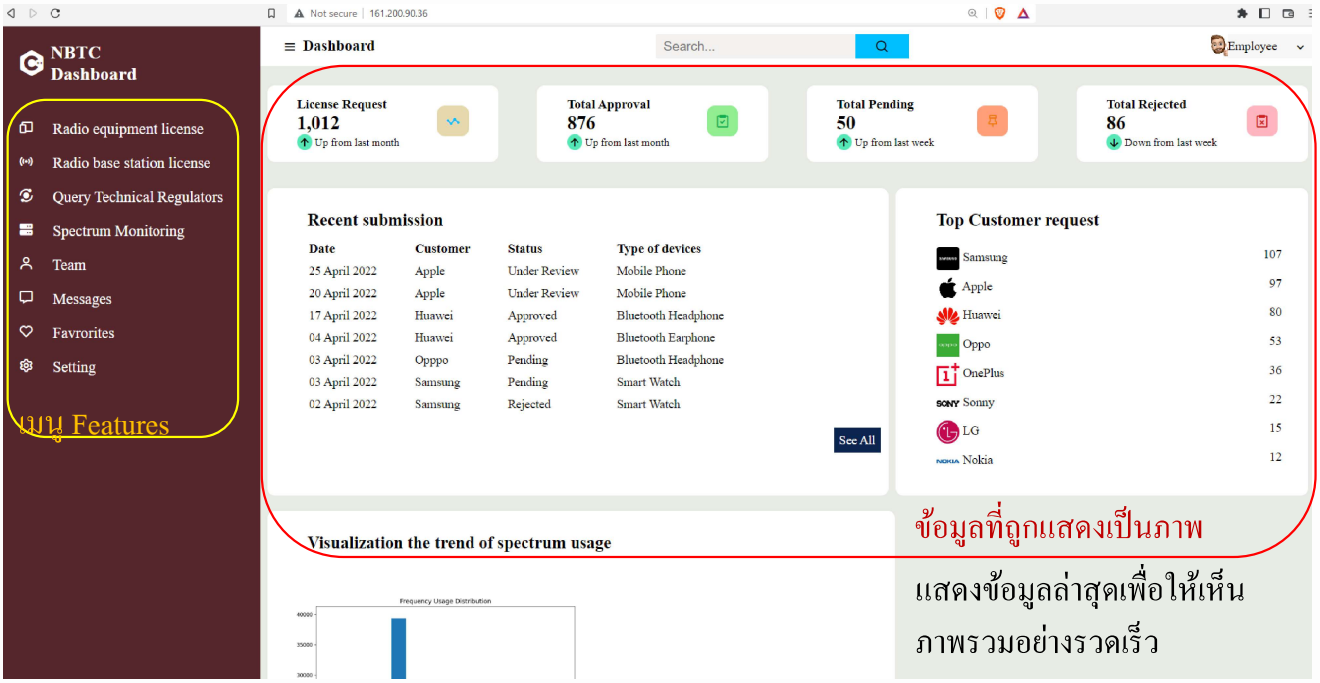
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย

เนื้อหาการอบรม

- ภาพรวมของ Dashboard
- Features สำหรับผู้ใช้ทั่วไป
  - การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต
  - การตรวจสอบความสอดคล้อง (Compliance) กับข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Specifications)
- Features สำหรับผู้ดูแลระบบ (Administrator, ผู้ปฏิบัติงาน ของ กสทช.)
  - การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่ (Interference & Frequency Assignment)
  - การประสานงานความถี่ชายแดน (การระบุตำแหน่งสัญญาณรบกวน)

ภาพรวมของแดชบอร์ด (Dashboard)



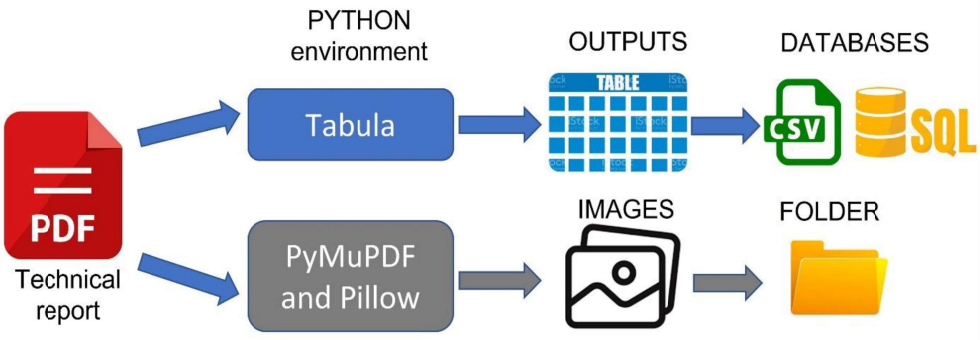
Features สำหรับผู้ใช้ทั่วไป

Features สำหรับผู้ใช้ทั่วไป

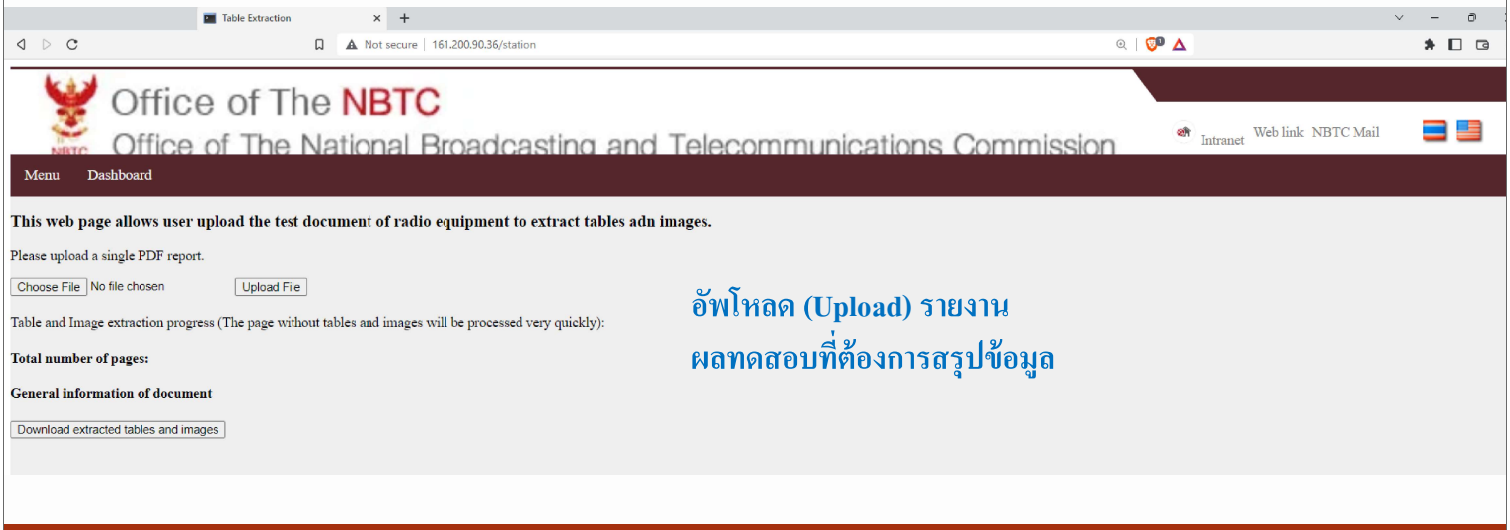
1. การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต
   - หลักการทำงาน
   - การอัพโหลด (Upload) รายงานผลการทดสอบ : ภาษาไทย ภาษาอังกฤษ
   - ผลลัพธ์ : ตารางผลทดสอบ
2. การตรวจสอบความสอดคล้อง (Compliance) กับข้อกำหนดทางเทคนิค
   - หลักการทำงาน
   - การสอบถาม (Query) เกี่ยวกับข้อกำหนดต่าง ๆ : ภาษาไทย ภาษาอังกฤษ

1 การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต

หลักการทำงาน

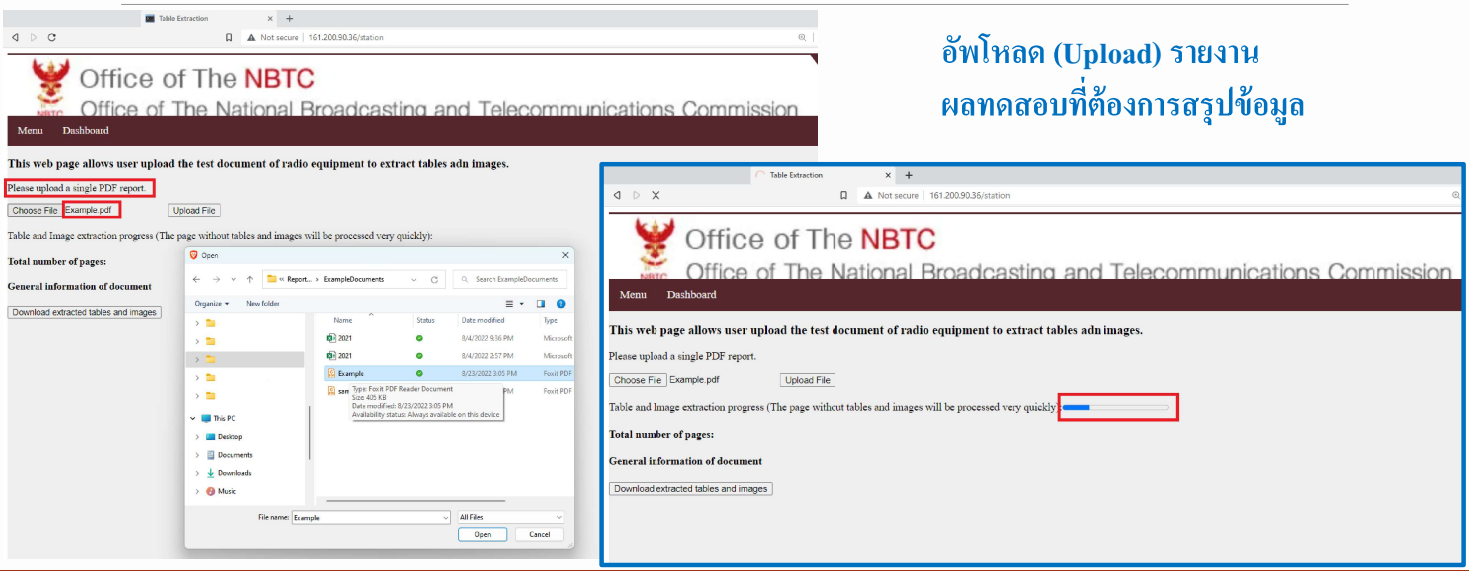


1 การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต



อัพโหลด (Upload) รายงาน
ผลทดสอบที่ต้องการสรุปข้อมูล

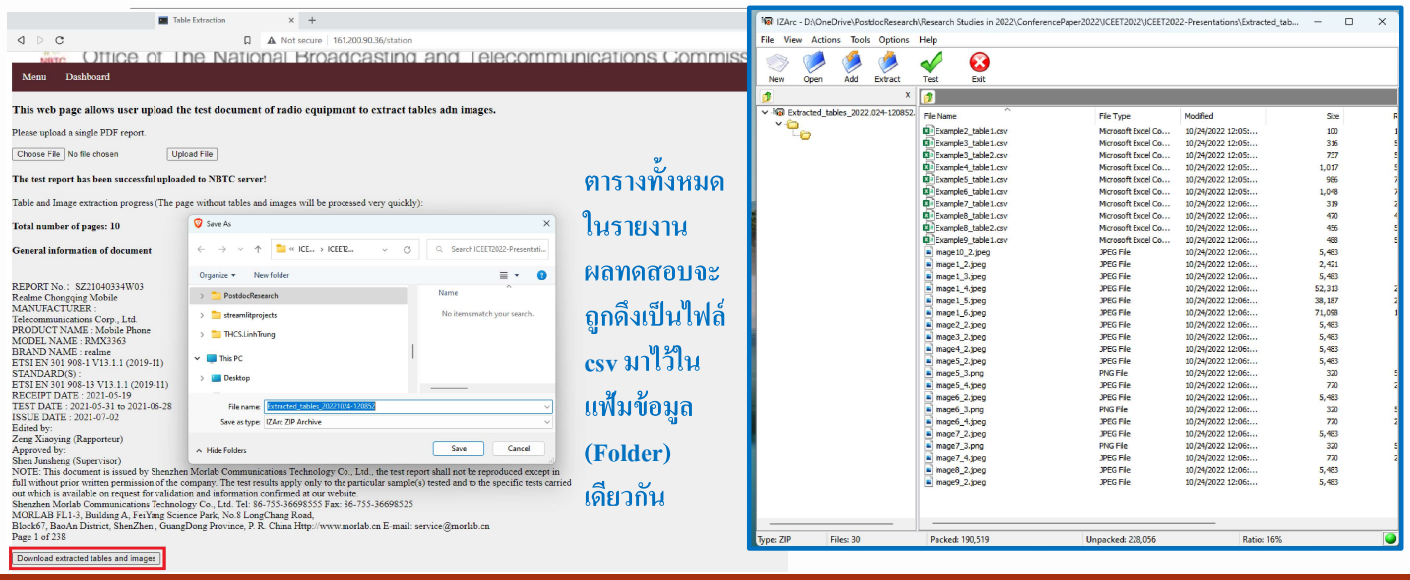
1 การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต



อัพโหลด (Upload) รายงาน
ผลทดสอบที่ต้องการสรุปข้อมูล

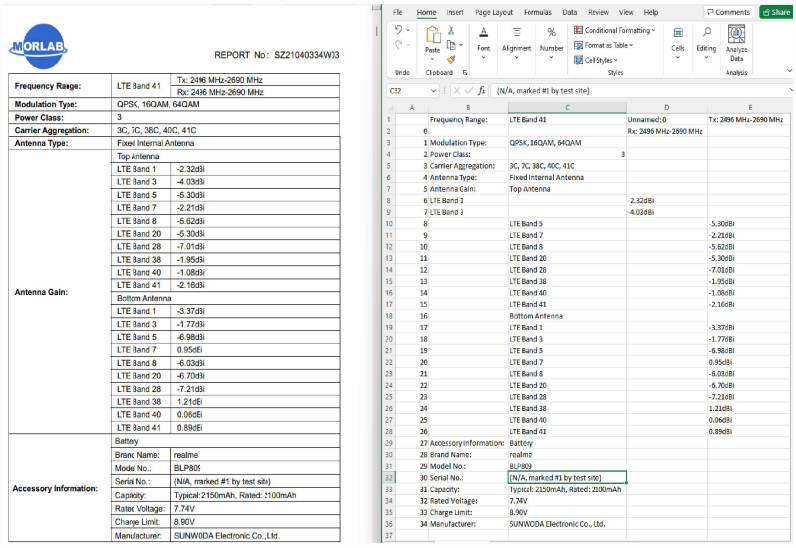
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1 การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต



ตารางทั้งหมดในรายงานผลทดสอบจะถูกดึงเป็นไฟล์ csv มาไว้ในแฟ้มข้อมูล (Folder) เดียวกัน

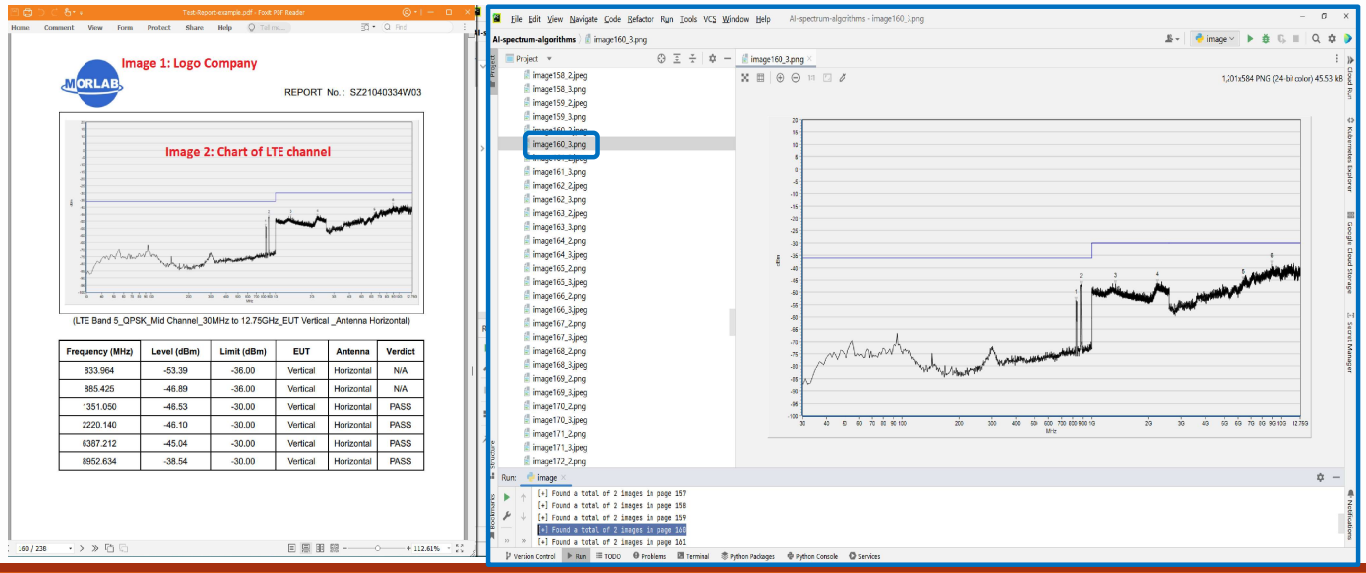
1 การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต



REPORT No: SZ21040334W03

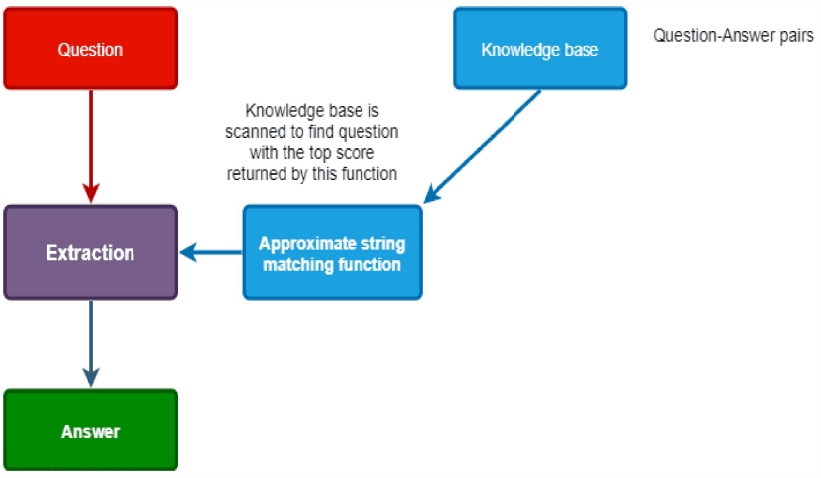
Frequency Range:	LTE Band 41	Tx: 2496 MHz-2690 MHz Rx: 2496 MHz-2690 MHz
Modulation Type:	QPSK, 16QAM, 64QAM	
Power Class:	3	
Carrier Aggregation:	3C, 7C, 38C, 40C, 41C	
Antenna Type:	Fixed Internal Antenna	
Antenna Gain:	Top Antenna	
	LTE Band 1	-2.32dBi
	LTE Band 3	-4.03dBi
	LTE Band 5	-5.30dBi
	LTE Band 7	-2.21dBi
	LTE Band 8	-5.62dBi
	LTE Band 20	-5.30dBi
	LTE Band 28	-7.01dBi
	LTE Band 38	-1.95dBi
	LTE Band 40	-1.08dBi
	LTE Band 41	-2.16dBi
	Bottom Antenna	
	LTE Band 1	-3.37dBi
	LTE Band 3	-1.77dBi
	LTE Band 5	-6.98dBi
	LTE Band 7	0.95dBi
	LTE Band 8	-6.03dBi
	LTE Band 20	-6.70dBi
	LTE Band 28	-7.21dBi
	LTE Band 38	1.21dBi
	LTE Band 40	0.06dBi
	LTE Band 41	0.89dBi
Accessory Information:	Battery	
	Brand Name:	realme
	Model No.:	BLP809
	Serial No.:	(N/A, marked #1 by test site)
	Capacity:	Typical:2150mAh, Rated: 2100mAh
	Rated Voltage:	7.74V
	Charge Limit:	8.90V
	Manufacturer:	SUNWODA Electronic Co.,Ltd.

1 การประมวลผลการอนุมัติใบอนุญาต

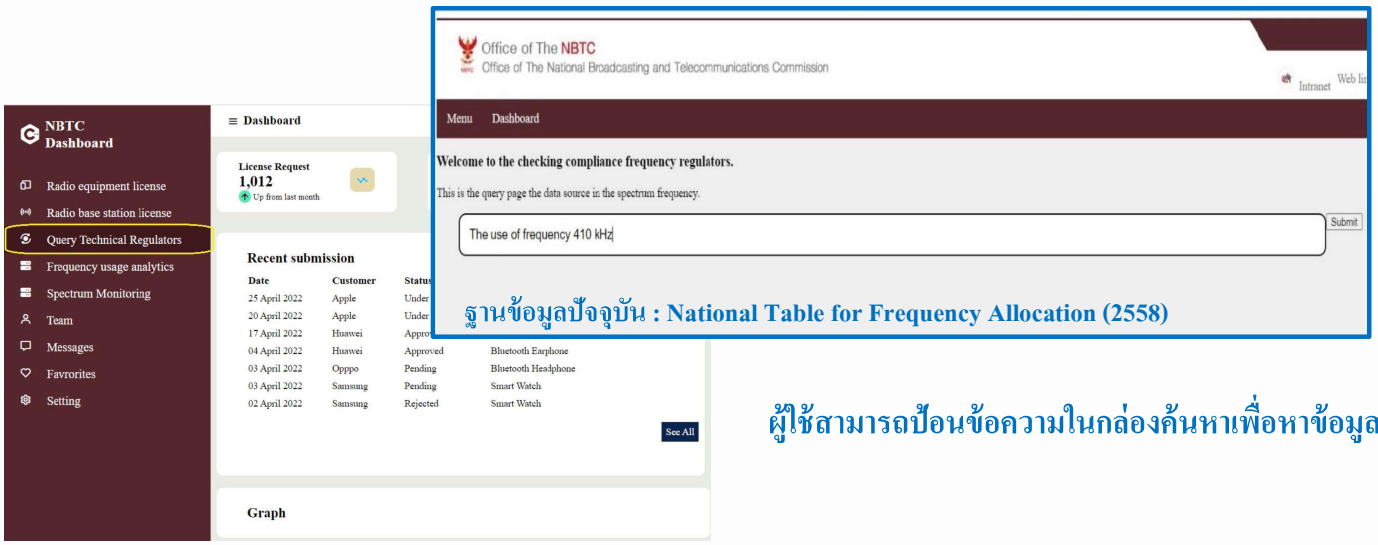


2 การทดสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค

หลักการทำงาน



2 การทดสอบความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค



ผู้ใช้สามารถป้อนข้อความในกล่องค้นหาเพื่อหาข้อมูลได้

Features สำหรับผู้ดูแลระบบ

Features สำหรับผู้ดูแลระบบ

1. การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่ (Interference & Frequency Assignment)
   - หลักการทำงาน
   - การเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)
2. การประสานงานคลื่นความถี่ชายแดน (การระบุตำแหน่งสัญญาณรบกวน)
   - หลักการทำงาน
   - การระบุตำแหน่งด้วยวิธี Time Difference of Arrival (TDOA)
     - ผลการทดสอบที่กรุงเทพฯ
     - ผลการทดสอบที่ จ.สระแก้ว

1. การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่

หลักการทำงาน – ชุดอุปกรณ์ Electrosense Sensors

Software Defined Radio Receiver – ***RTL-SDR***

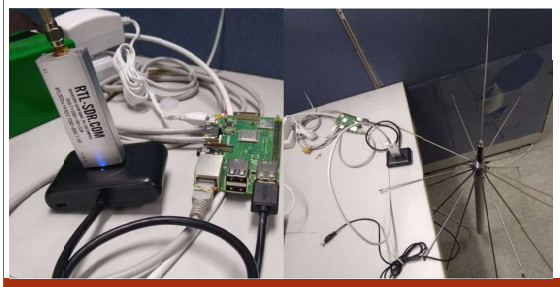
R820T2 *RTL2832U 1PPM TCXO SMA DONGLE*

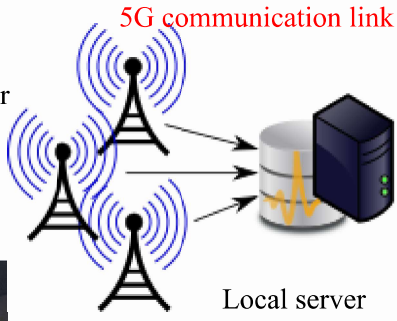
- Raspberry Pi V3
- Raspberry universal power supply with adapters for EU, UK, US and Australia
- SD Card 32 GB (with preinstalled software)
- Case with logo (includes heatsinks for R-Pi)
- Discone antenna 25 – 1300 MHz
- 15m low loss antenna cable

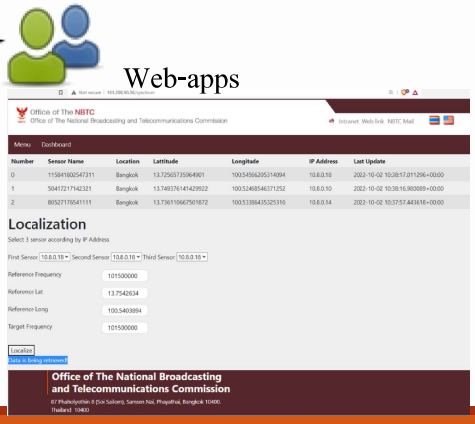
1. การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่

หลักการทำงาน- การติดตั้ง Electrosense Sensor Network

Electrosenser sensors

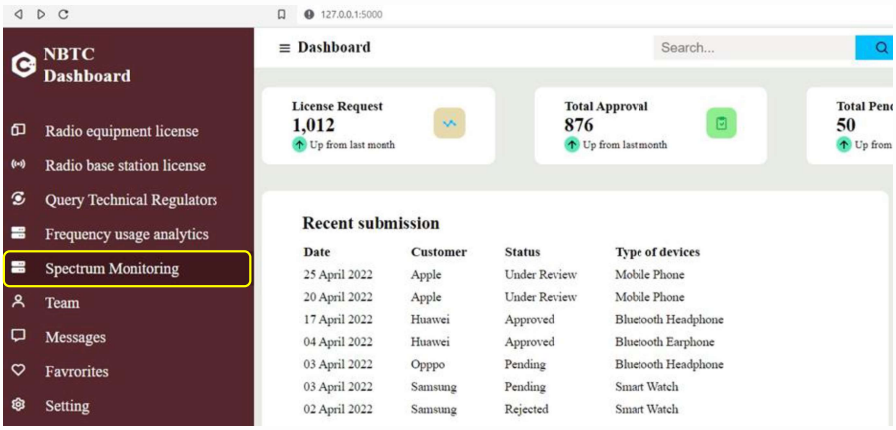






1. การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่

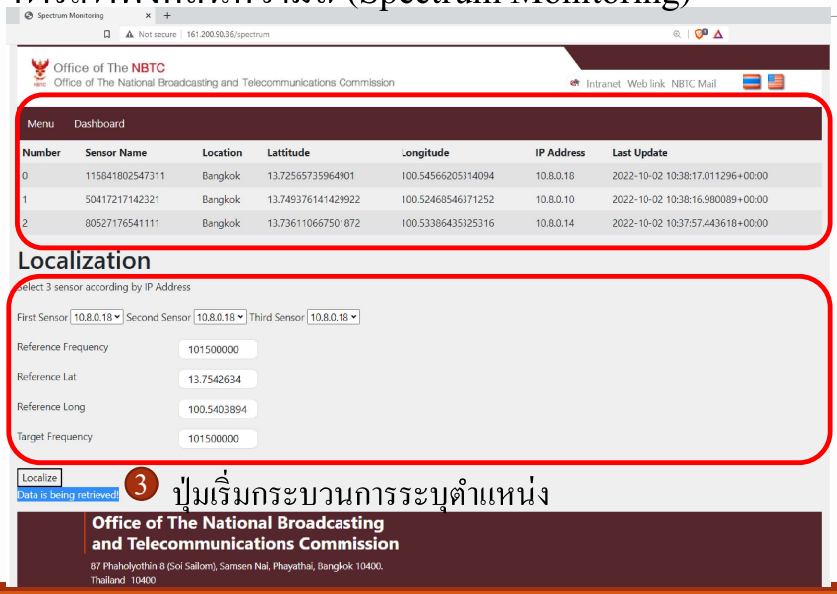
การเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)



เลือกเมนูย่อย Spectrum Monitoring เพื่อเข้าถึงข้อมูลการเฝ้าฟังคลื่นความถี่จาก Electrosense Sensors

1. การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่

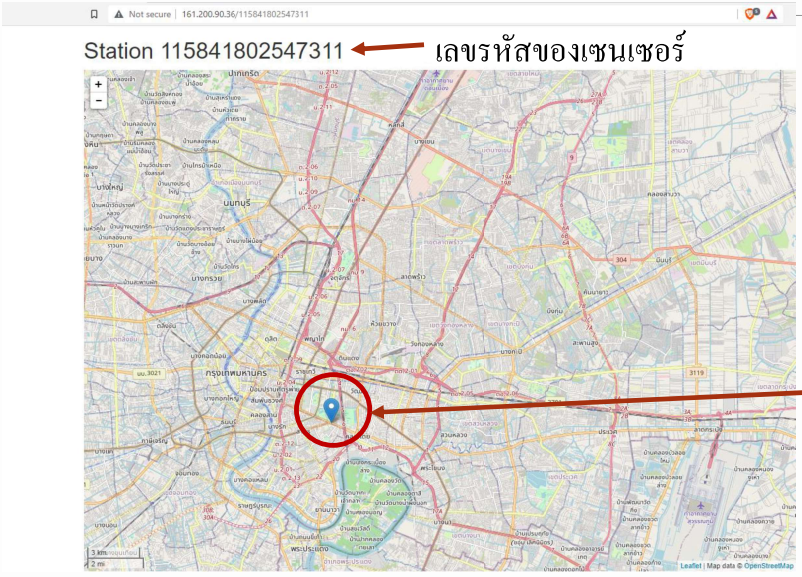
การเฝ้าฟังคลื่นความถี่ (Spectrum Monitoring)



1. รายการ (List) ของเซนเซอร์ที่เฝ้าฟังคลื่นความถี่

2. การป้อนข้อมูลเพื่อระบุตำแหน่งของสัญญาณรบกวน

1. การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่

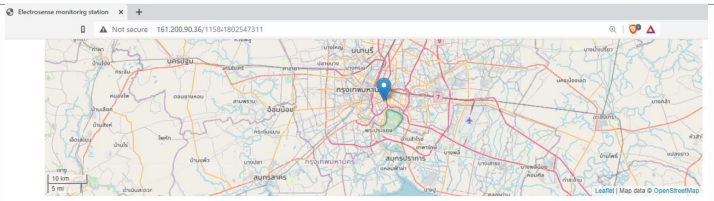


คลิ๊กเลือกเซนเซอร์จากรายการของเซนเซอร์ที่เฝ้าฟังคลื่นความถี่

ตำแหน่งของเซนเซอร์ใน Open StreetMap.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่



ตำแหน่งของเซนเซอร์ใน Open StreetMap.

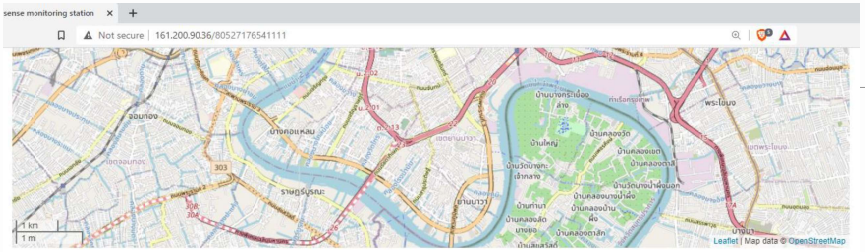
ปุ่ม Live Stream Data จากเซนเซอร์

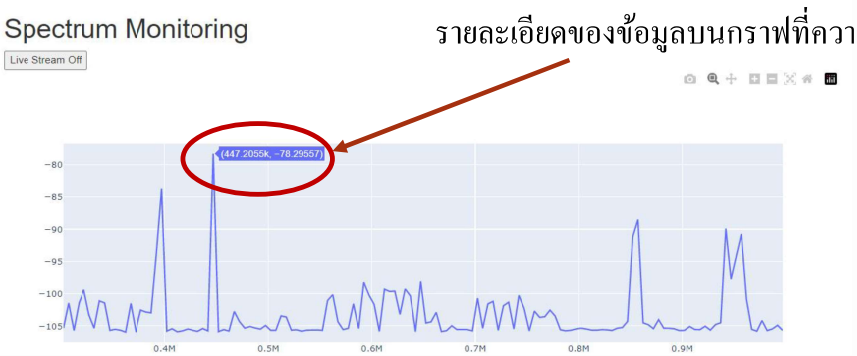
เมนูฟังก์ชั่นของกราฟ

กราฟ RSSI [dBm]* ของสัญญาณจากเซนเซอร์

*Received Signal Strength Indication

1. การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่

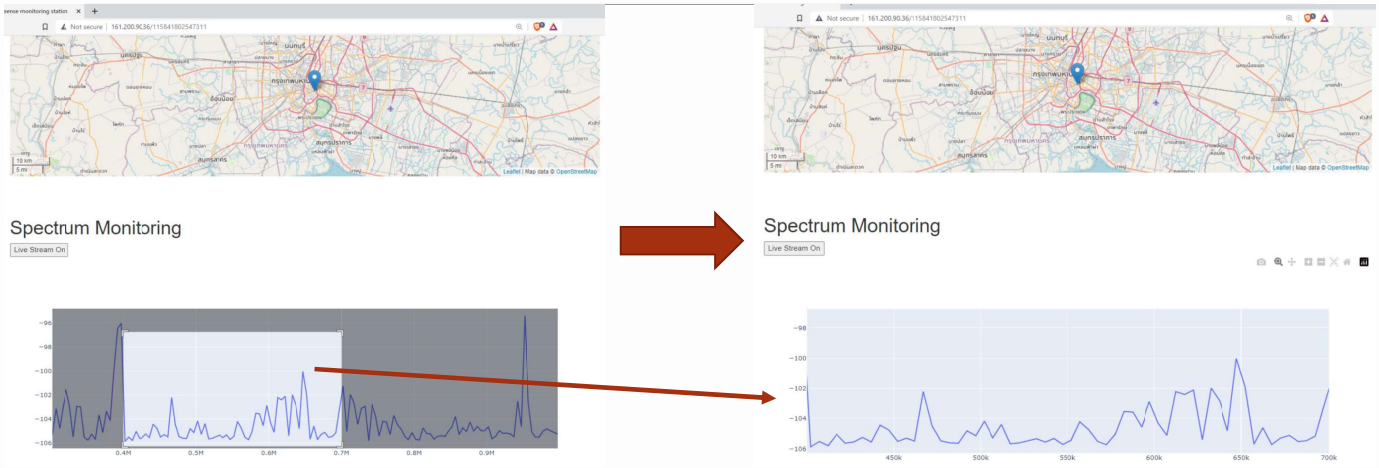




รายละเอียดของข้อมูลบนกราฟที่ความถี่ต่าง ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

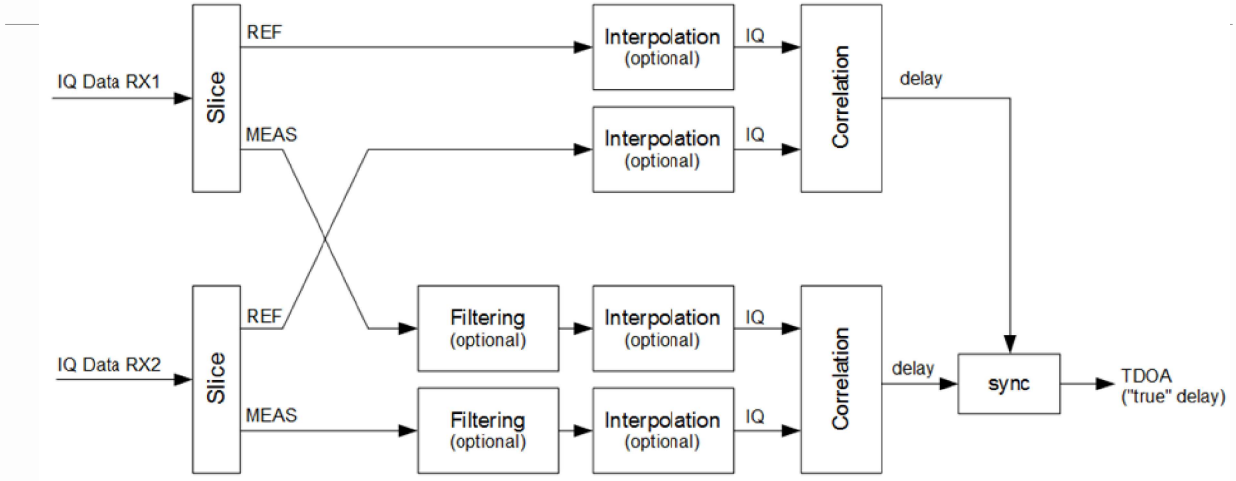
1. การประเมินสัญญาณรบกวนและการจัดสรรคลื่นความถี่



ซูม (Zoom) เพื่อดูในย่านความถี่ที่สนใจ

2. การประสานงานความถี่ชายแดน (Localization)

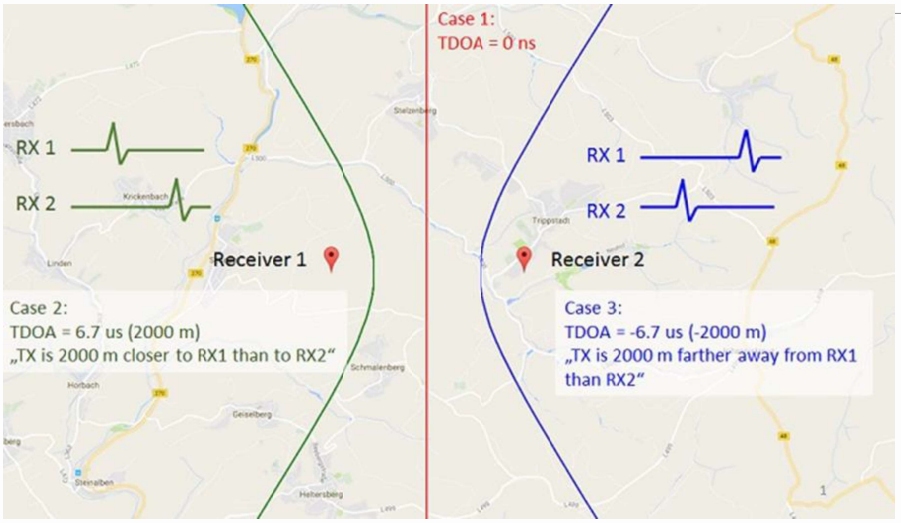
หลักการทำงาน



การประมวลผลสัญญาณเพื่อคำนวณค่า Time-Difference-of-Arrival (TDOA) ระหว่าง 2 เซนเซอร์ (โดยใช้สัญญาณอ้างอิง (REF) สำหรับ Synchronization)

2. การประสานงานความถี่ชายแดน (Localization)

หลักการทำงาน

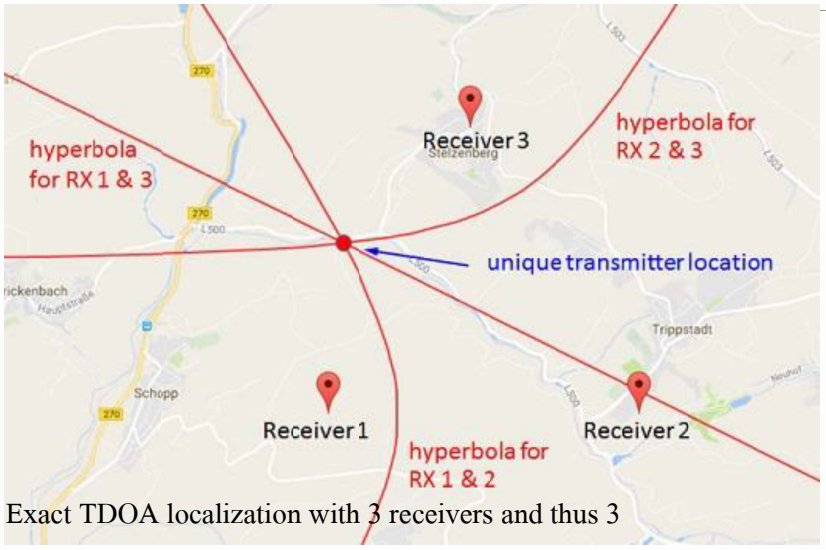


TDOA Localization (Simple Example)

- 2 เซนเซอร์ vs. 1 แหล่งสัญญาณรบกวน
- TDOA = 0 s แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอยู่บนเส้นตรงสีแดง
- TDOA > 0 s (สัญญาณรบกวนมาถึงเซนเซอร์ 1 ก่อนถึงเซนเซอร์ 2) แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอยู่บนเส้นไฮเปอร์โบลาสีเขียว (แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอยู่ใกล้เซนเซอร์ 1)
- TDOA < 0 s แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอยู่บนเส้นไฮเปอร์โบลาสีน้ำเงิน

2. การประสานงานความถี่ชายแดน (Localization)

หลักการทำงาน

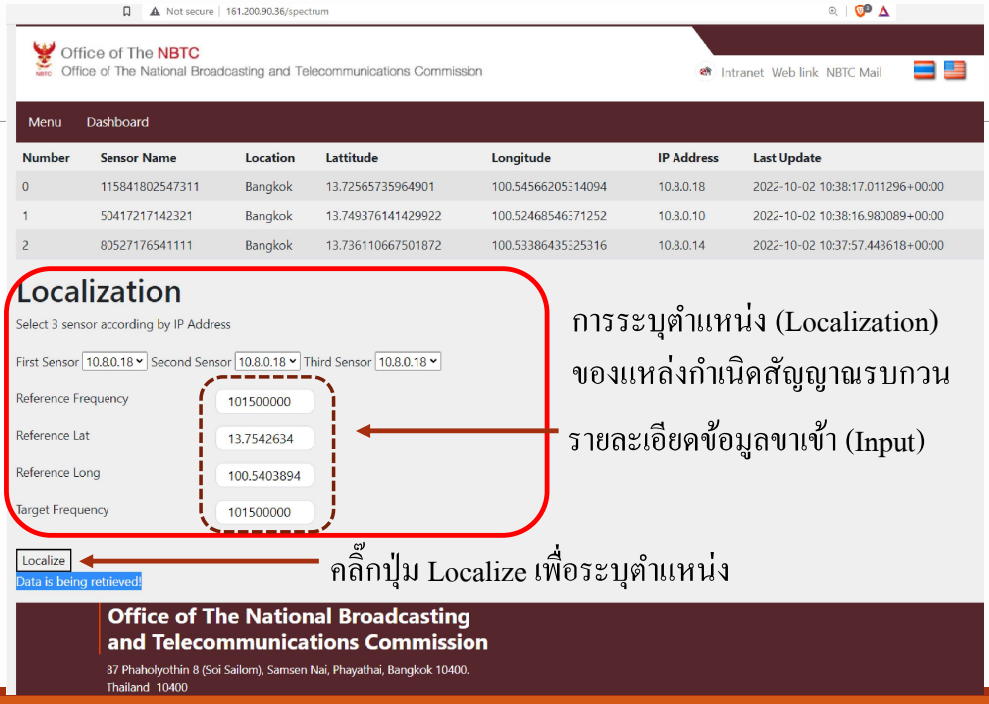


Exact TDOA localization with 3 receivers and thus 3 hyperbolas with mulitlateration.

- การระบุตำแหน่งใน 2 มิติ ต้องการข้อมูลการวัดสัญญาณจากอย่างน้อย 3 เซนเซอร์ : ได้ไฮเปอร์โบลาแสดงตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน 3 เส้น (4 เซนเซอร์จะได้ไฮเปอร์โบลา 10 เส้น)
- ในกรณีอุดมคติ ไฮเปอร์โบลาทุกเส้นจะตัดกันที่จุดเดียวซึ่งเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. การประสานงานความถี่ชายแดน (Localization)

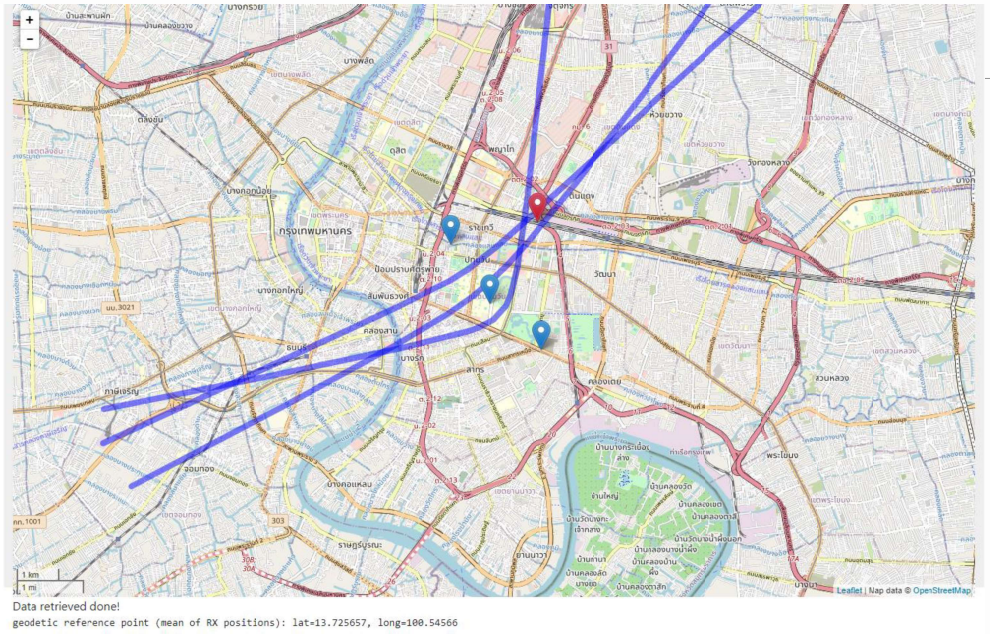


การระบุตำแหน่ง (Localization) ของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน

รายละเอียดข้อมูลขาเข้า (Input)

คลิ๊กปุ่ม Localize เพื่อระบุตำแหน่ง

2. การประสานงานความถี่ชายแดน (Localization)



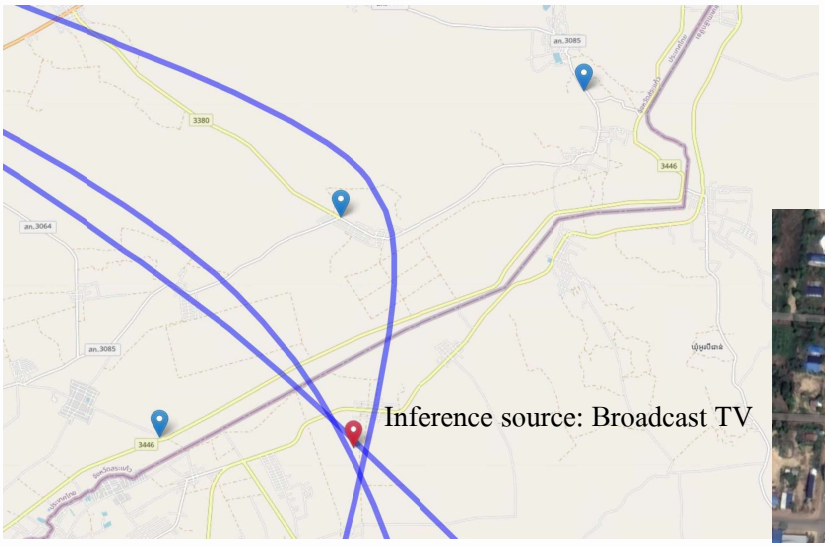
ผลการทดลอง (กรุงเทพฯ) :

- หมุดสีน้ำเงิน : Spectrum Sensors
- หมุดสีแดง : แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

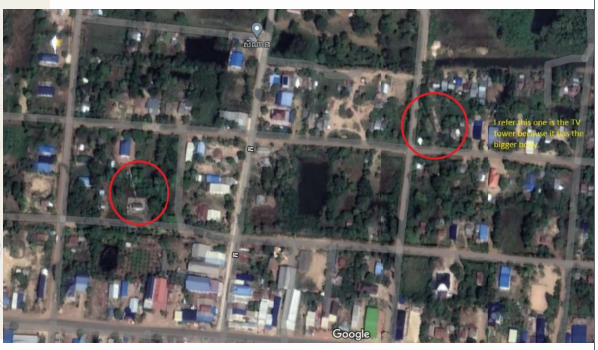
2. การประสานงานความถี่ชายแดน (Localization)

Localization : ผลการทดลองที่ จ.สระแก้ว (ชายแดนไทย – กัมพูชา)



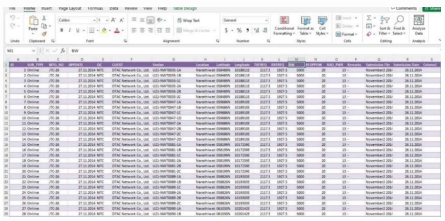
ผลการทดลอง (สระแก้ว) :

- หมุดสีน้ำเงิน : Spectrum Sensors

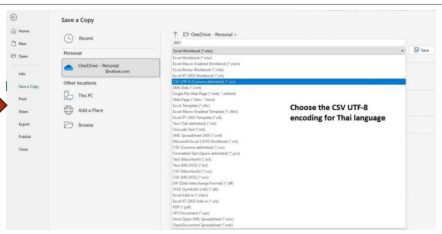


3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

หลักการทำงาน

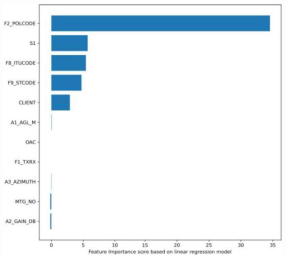


ไฟล์ excel



แปลงเป็นไฟล์ csv

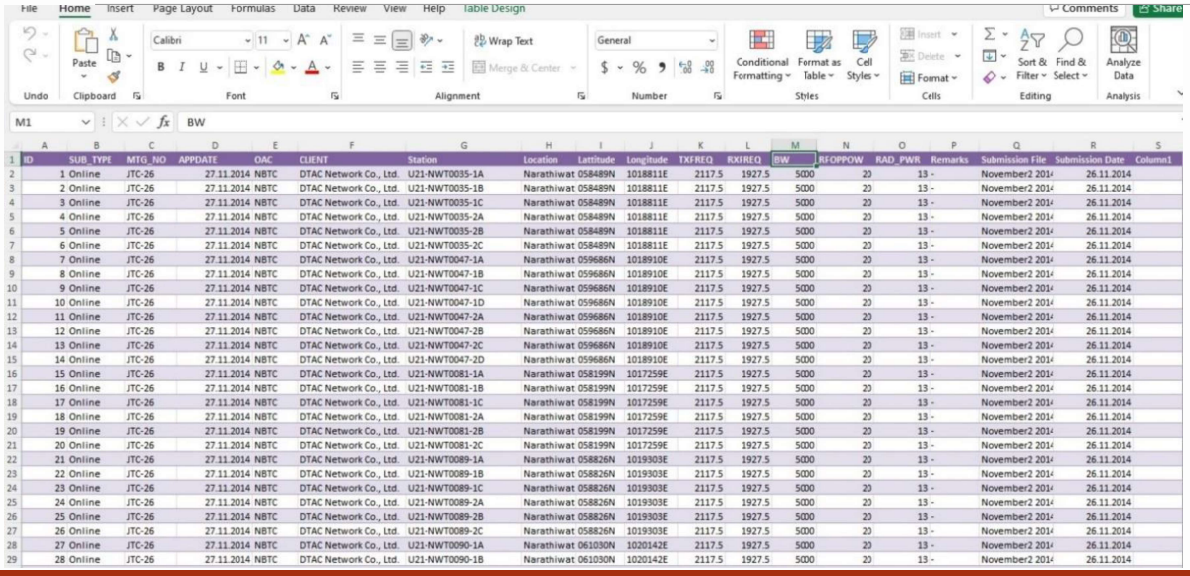
รัน (Run) Jupyter Notebook บน Visual Studio Code



Feature Important Analysis

3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การประมวลผลข้อมูล ข้อมูลความถี่ชายแดนไทย – มาเลเซีย ค.ศ. 2014 ถึง 2019

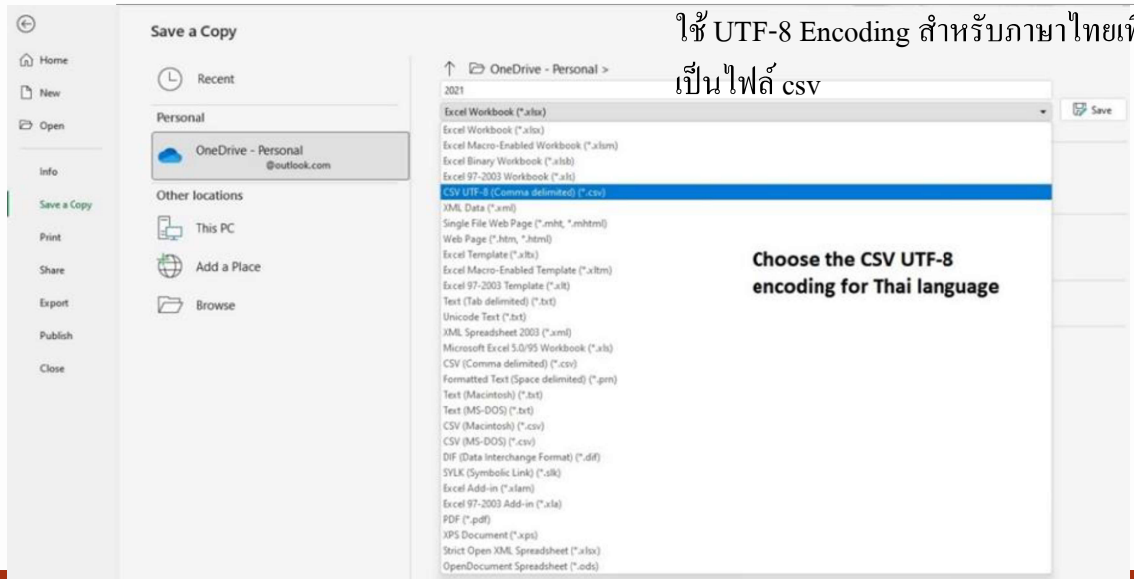


ID	SUB_TYPE	MTG_NO	APPDATE	OAC	CLIENT	Station	Location	Lattitude	Longitude	TXFREQ	RXIREQ	BW	RFOPPOW	RAD_PWR	Remarks	Submission File	Submission Date	Column1
1	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-1A	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
2	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-1B	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
3	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-1C	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
4	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-2A	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
5	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-2B	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
6	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0035-2C	Narathiwat	058489N	1018811E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
7	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-1A	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
8	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-1B	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
9	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-1C	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
10	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-1D	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
11	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-2A	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
12	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-2B	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
13	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-2C	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
14	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0047-2D	Narathiwat	059686N	1018910E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
15	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-1A	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
16	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-1B	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
17	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-1C	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
18	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-2A	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
19	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-2B	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
20	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0081-2C	Narathiwat	058199N	1017259E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
21	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-1A	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
22	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-1B	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
23	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-1C	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
24	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-2A	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
25	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-2B	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
26	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0089-2C	Narathiwat	058826N	1019303E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
27	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0090-1A	Narathiwat	061030N	1020142E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	
28	Online	JTC-26	27.11.2014	NBTC	DTAC Network Co., Ltd.	U21-NWT0090-1B	Narathiwat	061030N	1020142E	2117.5	1927.5	5000	20	13 -		November2 2014	26.11.2014	

3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การประมวลผลข้อมูล

ใช้ UTF-8 Encoding สำหรับภาษาไทยเพื่อแปลงจากไฟล์ excel เป็นไฟล์ csv



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การประมวลผลข้อมูล : การเลือกข้อมูล Output และ Input

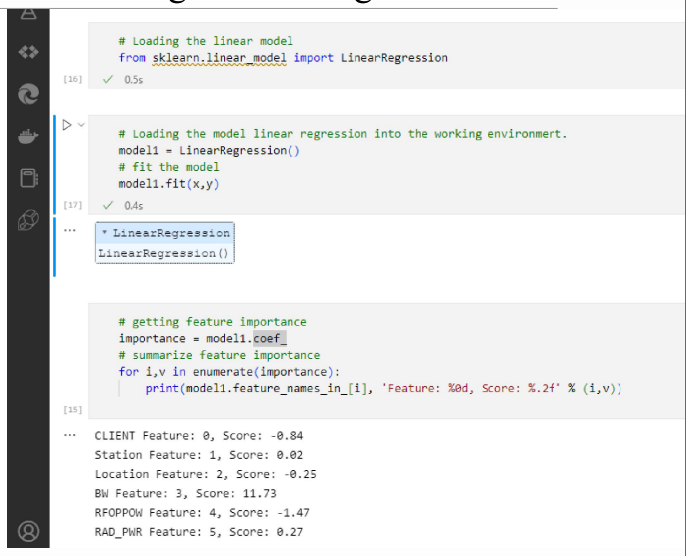
Independence Variables (Input)	Output of Feature Importance Analysis
CLIENT	
Station	
Location	
BW (Bandwidth)	
RFOPPOW (RF Operation Power)	
RAD_PWR (Radial Power)	
	TXFREQ (Transmission Frequency)
	RXFREQ (Receiver Frequency)

3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การวิเคราะห์ Feature Importance โดยใช้ Machine Learning: Linear Regression

- y = a1*x1 + a2*x2 + …. + aN*xN + constant
- ตัวแปรอิสระ (Independent Variable, x) หรือเรียกอีกชื่อว่า Feature ใดมีความสำคัญต่อ y มากกว่ากันโดยดูจากค่า Score

- y : Transmission frequency range (TXFREQ)
- x's : Client, station, Location, Bandwidth (BW), RF Operation Power (RFOPPOW), และ Radiance Power (RAD_PWR)



3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การวิเคราะห์ Feature Importance โดยใช้ Machine Learning: Linear Regression

Features

CLIENT: Score -0.84

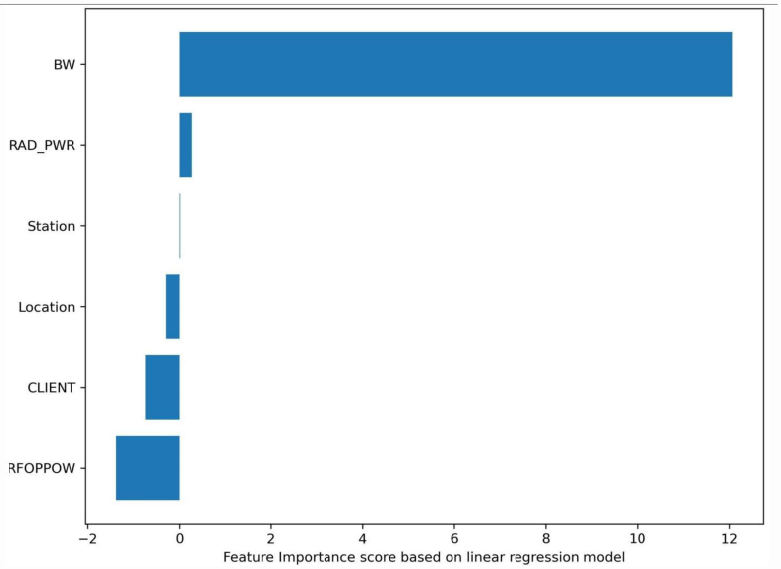
Station: Score 0.02

Location: Score -0.25

BW: Score 11.73

RFOPPOW: Score -1.47

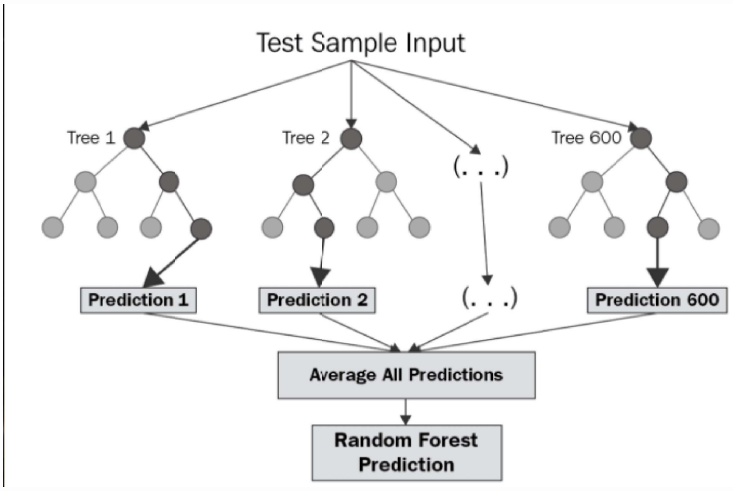
RAD_PWR: Score 0.27



3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การวิเคราะห์ Feature Importance โดยใช้ Machine Learning: Random Forest

Decision Tree Algorithm



2. Random Forest Regression Feature Importance

This model is a set of Decision Trees. Each Decision Tree is a set of internal nodes and features for internal nodes are selected with some criterion, which for classification ta feature with highest decrease is selected for internal node). For each feature we can

```
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
```

[22] ✓ 0.3s

```
# define the model
model2 = RandomForestRegressor()
# fit the model
model2.fit(x, y)
# get importance
importance = model2.feature_importances_
# summarize feature importance
for i,v in enumerate(importance):
    print(model2.feature_names_in_[i], 'Feature: %0d, Score: %.2f' % (i,v))
```

[23] ✓ 0.2s

```
CLIENT Feature: 0, Score: 0.41
Station Feature: 1, Score: 0.20
Location Feature: 2, Score: 0.28
BW Feature: 3, Score: 0.02
RFOPPOW Feature: 4, Score: 0.03
RAD_PWR Feature: 5, Score: 0.06
```

3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การวิเคราะห์ Feature Importance โดยใช้ Machine Learning: Random Forest

Features

CLIENT: Score 0.41

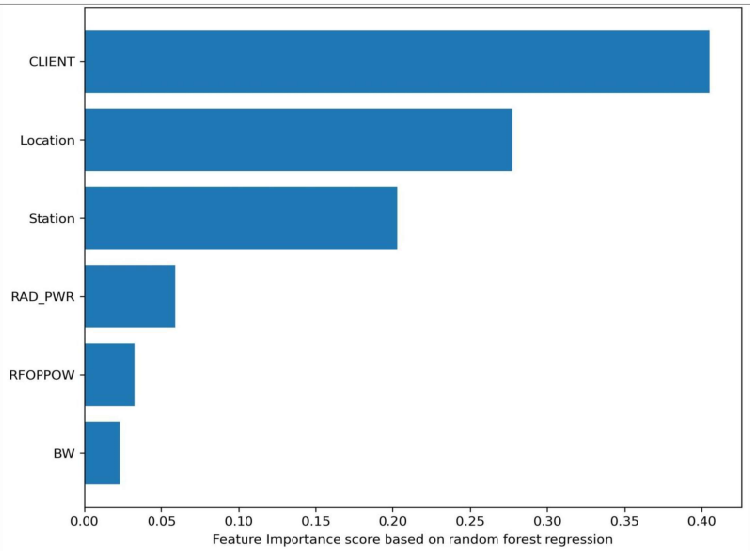
Station: Score 0.20

Location: Score 0.28

BW: Score 0.02

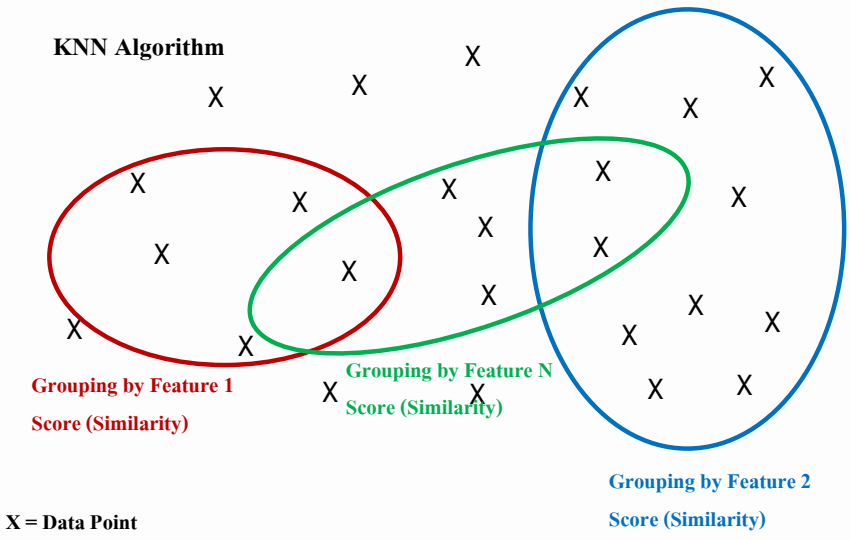
RFOPPOW: Score 0.03

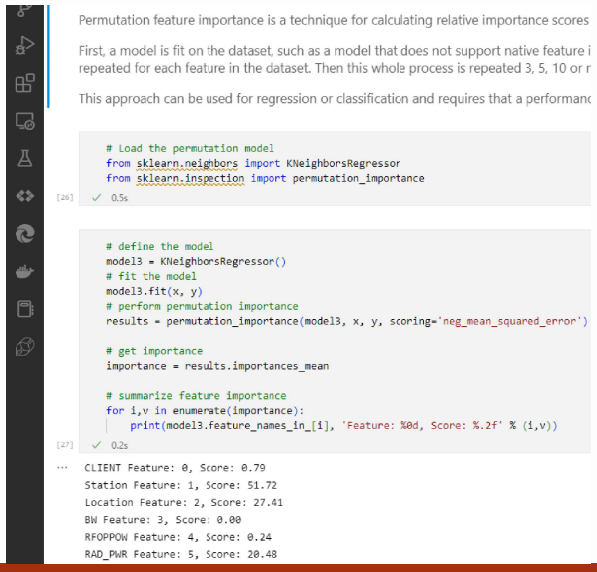
RAD_PWR: Score 0.06



3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การวิเคราะห์ Feature Importance โดยใช้ Machine Learning: K-Nearest Neighbors (KNN)





3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การวิเคราะห์ Feature Importance โดยใช้ Machine Learning: K-Nearest Neighbors

CLIENT: Score 0.79

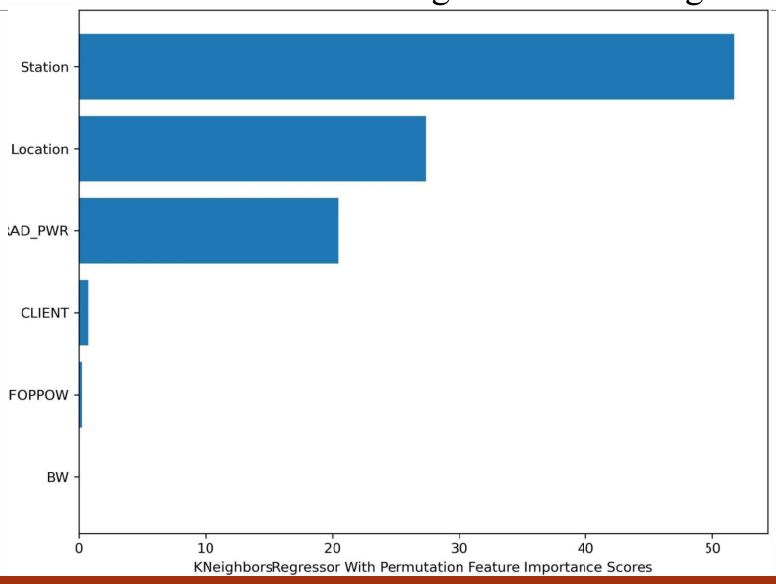
Station: Score 51.72

Location: Score 27.41

BW: Score 0.00

RFOPPOW: Score 0.24

RAD_PWR: Score 20.48



3. การวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่ (ด้วย Jupyter Notebook)

การวิเคราะห์ Feature Importance โดยใช้ Machine Learning

สรุป Performance ของการวิเคราะห์ Feature Importance แบบต่าง ๆ ด้วยข้อมูลความถี่ชายแดนไทย - มาเลเซีย

Model	Feature Importance	R-Squared
Random Forest Regression Model	Client, Station, Location	0.96 (96%)
Permutation K-NN Classification Model	Client, Station, Location	0.95 (95%)
Linear Regression Model	Client, Bandwidth, RFOPPOW	0.25 (25%)

- Best model (ชุดข้อมูลความถี่ชายแดนไทย - มาเลเซีย) : Random Forest Regression Model
  - สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลง (Variation) ของชุดข้อมูลได้ถึง 96% (R-Squared Value)
  - 3 Most Important Features : Client, Station และ Location

Q&A

ภาคผนวก ค

ผลการตอบคำถามในการอบรม
ระดับผู้ใช้งาน

ข้อมูลเชิงลึก

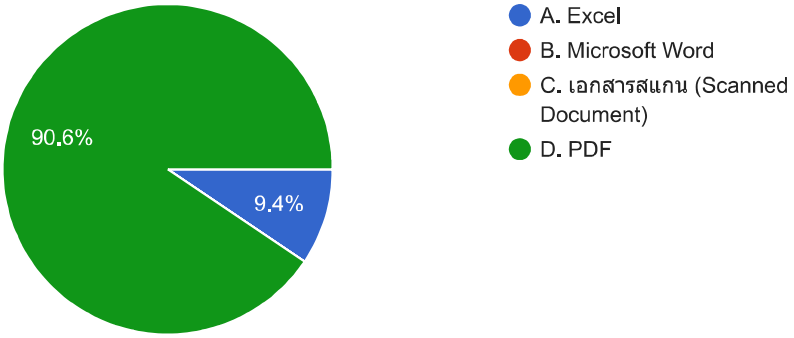
ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ช่วง
4.59 / 5 คะแนน	5 / 5 คะแนน	1 - 5 คะแนน

การแจกแจงคะแนนรวม

ข้อ 1 : ในการดึงข้อมูลตารางจากเอกสารทางเทคนิค เอกสารทางเทคนิคที่ผู้ใช้จะต้องอัพโหลด (Upload) เข้าระบบควรเป็นไฟล์ชนิด (Format) ใด?

คัดลอก

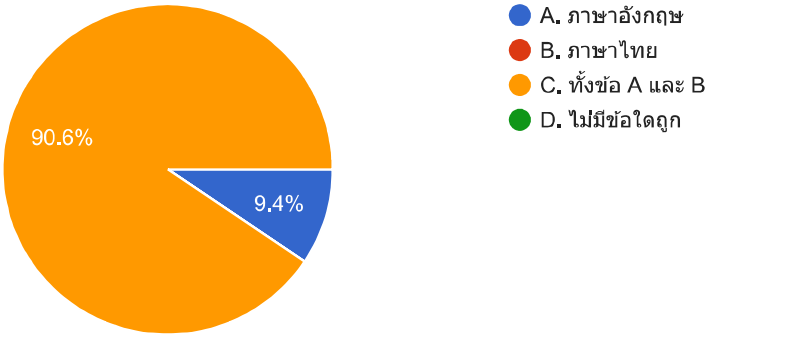
คำตอบ 53 ข้อ



ข้อ 2 : ในการสอบถาม (Query) ข้อมูลทางเทคนิค ผู้ใช้สามารถสอบถามได้ด้วยภาษาใด?

คัดลอก

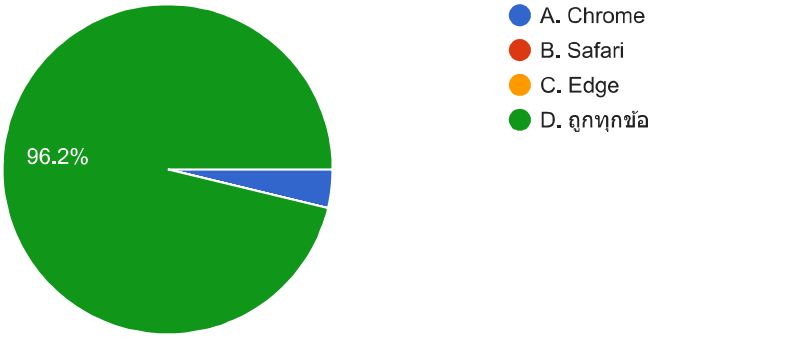
คำตอบ 53 ข้อ



ข้อ 3 : ผู้ใช้สามารถเข้าถึงและใช้เว็บแอปพลิเคชั่น (Webapp) นี้ด้วย Browser ใดได้บ้าง?

คัดลอก

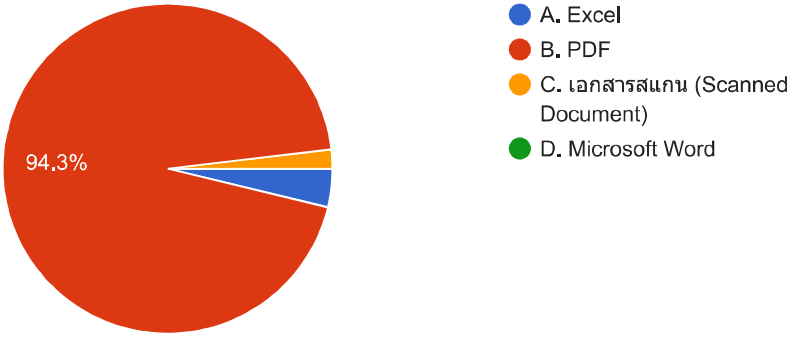
คำตอบ 53 ข้อ



ข้อ 4 : ในการดึง (Extract) รูปภาพจากเอกสารทางเทคนิค เอกสารที่ผู้ใช้ควรอัพโหลด (Upload) ควรอยู่รูปแบบใด?

คัดลอก

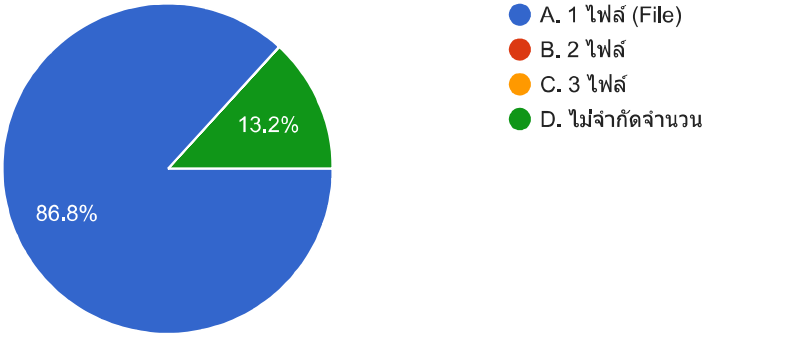
ค่าตอบ 53 ข้อ



ข้อ 5 : จำนวนเอกสารที่ผู้ใช้สามารถอัพโหลด (Upload) เพื่อทำการดึง (Extract) ตารางหรือรูปภาพได้ในแต่ละครั้งคือเท่าไร?

คัดลอก

ค่าตอบ 53 ข้อ



เนื้อหานี้มิได้ถูกสร้างขึ้นหรือรับรองโดย Google รายงานการละเมิด - ข้อกำหนดในการให้บริการ - นโยบายความเป็นส่วนตัว

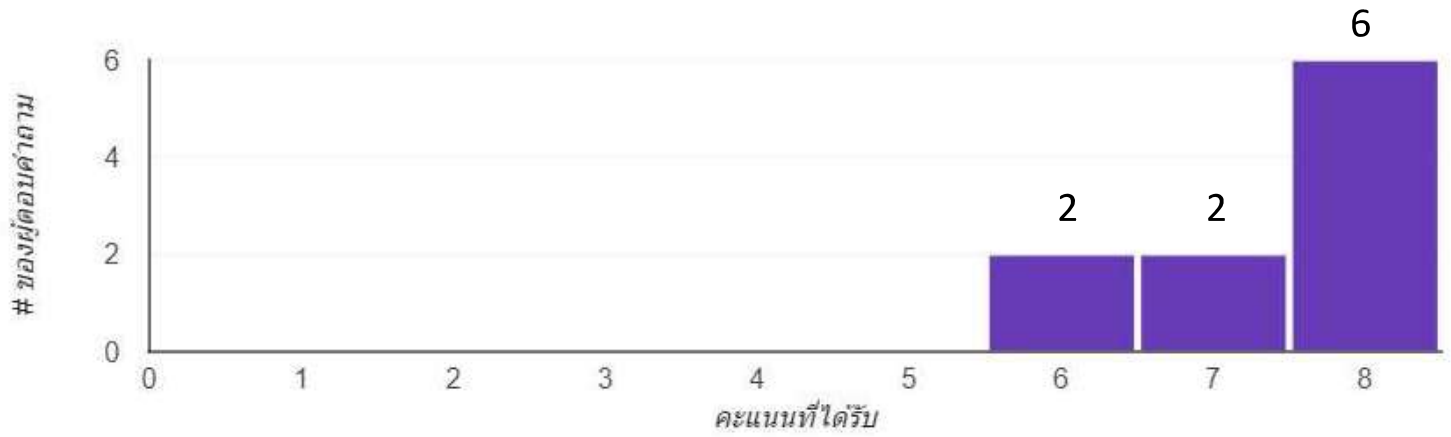
Google ฟอร์ม

ผลการตอบคำถามในการอบรม
ระดับผู้ดูแลระบบ

ข้อมูลเชิงลึก

ค่าเฉลี่ย	ค่ามัธยฐาน	ช่วง
7.4 / 8 คะแนน	8 / 8 คะแนน	6 - 8 คะแนน

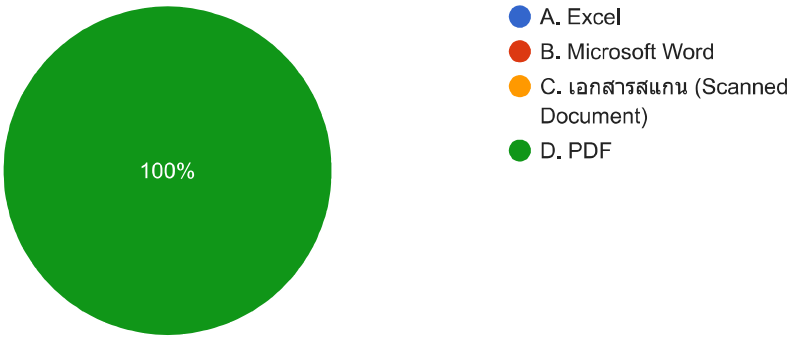
การแจกแจงคะแนนรวม



ข้อ 1 : ในการดึงข้อมูลตารางจากเอกสารทางเทคนิค เอกสารทางเทคนิคที่ผู้ใช้จะต้องอัพโหลด (Upload) เข้าระบบควรเป็นไฟล์ชนิด (Format) ใด?

คัดลอก

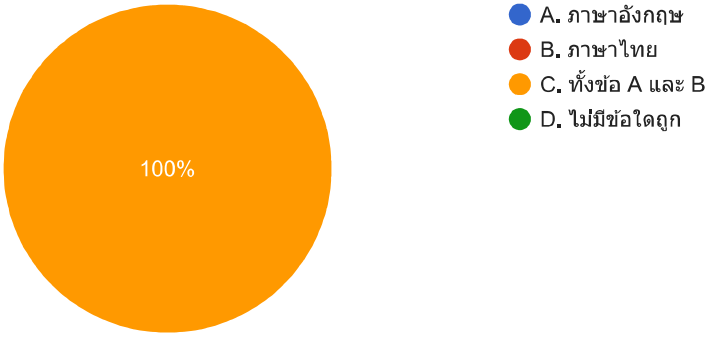
ค่าตอบ 10 ข้อ



ข้อ 2 : ในการสอบถาม (Query) ข้อมูลทางเทคนิค ผู้ใช้สามารถสอบถามได้ด้วยภาษาใด?

คัดลอก

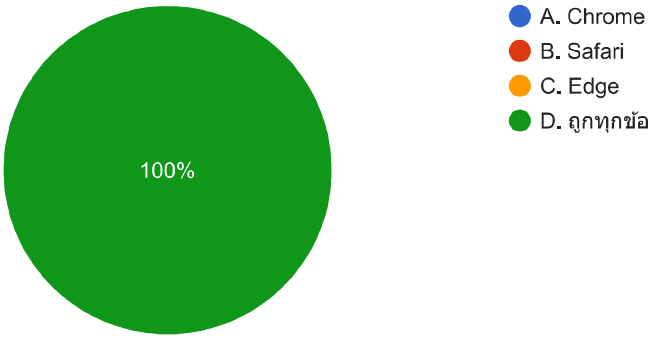
ค่าตอบ 10 ข้อ



ข้อ 3 : ผู้ใช้สามารถเข้าถึงและใช้เว็บแอปพลิเคชั่น (Webapp) นี้ด้วย Browser ใดได้บ้าง?

คัดลอก

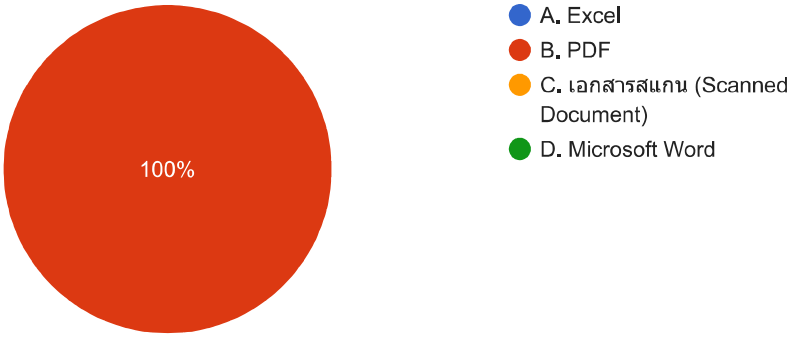
คำตอบ 10 ข้อ



ข้อ 4 : ในการดึง (Extract) รูปภาพจากเอกสารทางเทคนิค เอกสารที่ผู้ใช้ควรอัพโหลด (Upload) ควรอยู่รูปแบบใด?

คัดลอก

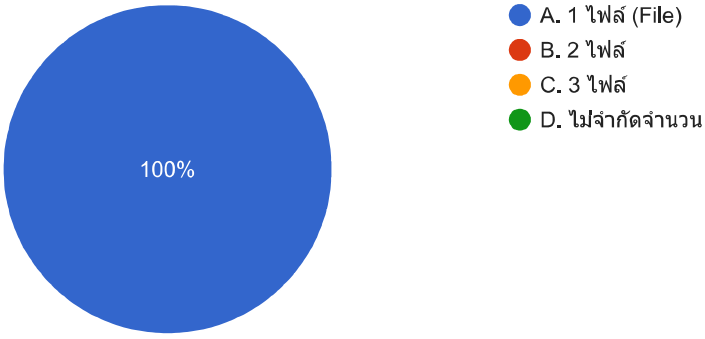
คำตอบ 10 ข้อ



ข้อ 5 : จำนวนเอกสารที่ผู้ใช้สามารถอัพโหลด (Upload) เพื่อทำการดึง (Extract) ตารางหรือรูปภาพได้ในแต่ละครั้งคือเท่าไร?

คัดลอก

คำตอบ 10 ข้อ



ข้อ 6 : กิจกรรมใดต่อไปนี้ของสำนักงาน กสทช. ที่สามารถนำปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) เข้ามาช่วยงานได้?

คัดลอก

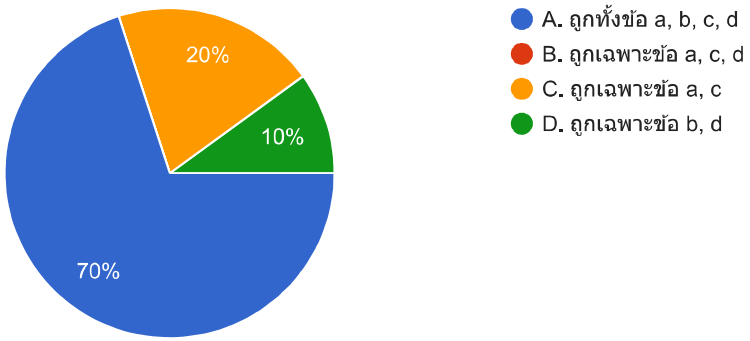
a. ดึงข้อมูลตารางจากเอกสารรายงานทางเทคนิค

b. เฝ้าฟัง (Monitor) การใช้คลื่นความถี่

c. การสอบถาม (Query) ข้อมูลทางเทคนิค

d. การระบุตำแหน่ง (Localizing) แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน

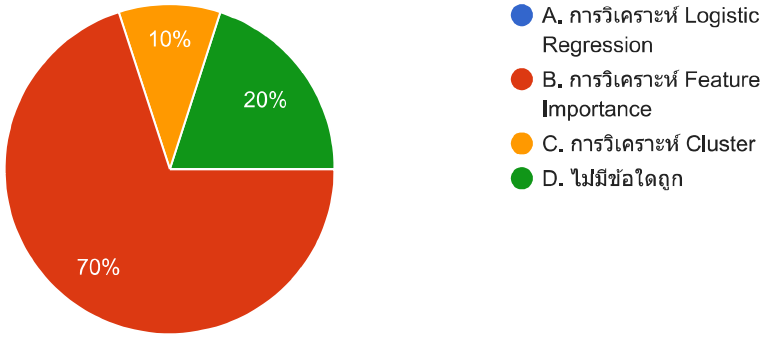
คำตอบ 10 ข้อ



ข้อ 7 : จากการอบรมในครั้งนี้ วิธีที่นำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การใช้งานคลื่นความถี่คือวิธีอะไร?

คัดลอก

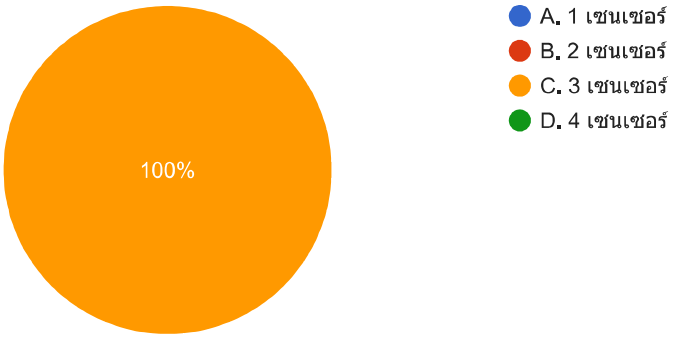
คำตอบ 10 ข้อ



ข้อ 8 : ในการระบุตำแหน่ง (Localization) แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ต้องใช้เซนเซอร์ (Sensors) อย่างน้อยกี่ตัว?

คัดลอก

คำตอบ 10 ข้อ



เนื้อหานี้มิได้ถูกสร้างขึ้นหรือรับรองโดย Google รายงานการละเมิด - ข้อกำหนดในการให้บริการ - นโยบายความเป็นส่วนตัว

Google ฟอร์ม