เทคโนโลยี การสื่อสารยุค 5G

ผู้แต่ง

ศิรวิชญ์ กิตติวิชญกุล
ณัฏฐณรงค์ นิลจันทร์
จตุพร ด้วงทอง
อนุสรณ์ วงค์ษา
กฤติยาภรณ์ เหมือดขุนทด

กทปส.
กสทช.

สนับสนุนโดย
กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์
และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

เทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G

ผู้แต่ง

ศิรวิชญ์ กิตติวิชญกุล
ณัฏฐณรงค์ นิลจันทร์
จตุพร ด้วงทอง
อนุสรณ์ วงค์ษา
กฤติยาภรณ์ เหมือดขุนทด

กทปส.
กสทช.

สนับสนุนโดย
กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์
และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

เทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์
ห้ามลอกเลียนแบบไม่ว่าส่วนใดส่วนหนึ่งในหนังสือเล่มนี้ ไม่ว่ารูปแบบใด ๆ
นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนเท่านั้น

พิมพ์ครั้งที่ 1 (จำนวน 500 เล่ม)
กันยายน 2563
104 หน้า

ISBN : 978-616-338-1507

ผู้แต่ง : ศิรวิชญ์ กิตติวิชญกุล
ณัฏฐณรงค์ นิลจันทร์
จตุพร ด้วงทอง
อนุสรณ์ วงค์ษา
กฤติยาภรณ์ เหมือดขุนทด

ที่ปรึกษา : เวธิต ภาคย์พิสุทธิ์

จัดทำโดย : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้สนับสนุน : กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม
เพื่อประโยชน์สาธารณะ

ออกแบบปก : จันทกานต์ โพโต

พิมพ์ที่ : บริษัท สหมิตรพัฒนาการพิมพ์ (1992) จำกัด
2/1 ถ.เทอดไท บางหว้า ภาษีเจริญ กทม. 10160
โทรศัพท์ : 02 868 9571

คำนำ

ในอดีตมนุษย์ได้มีการคิดค้นวิธีการสื่อสารเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารระหว่างกันเริ่มจากการติดต่อสื่อสารระหว่างกลุ่มชุมชนเดียวกัน พัฒนาเป็นการสื่อสารข้ามกลุ่มชุมชน ข้ามประเทศ และทั่วโลก อย่างต่อเนื่องตามลำดับ จะเห็นได้ว่าจากอดีตจนถึงปัจจุบันมนุษย์ได้มีความพยายามคิดค้นวิธีการติดต่อสื่อสารเพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งในปัจจุบันโลกได้ก้าวเข้าสู่ยุคทองของการสื่อสารไร้สายซึ่งสามารถติดต่อสื่อสารถึงกันได้ทุกที่ทั่วโลก การสื่อสารไร้สายทำให้เกิดการสื่อสารระยะไกลที่เป็นไปได้ยากกับการสื่อสารแบบใช้สาย ตัวอย่างที่ชัดเจนที่สุด คือโทรศัพท์มือถือที่เข้ามาแทนที่โทรศัพท์บ้าน โดยหากสังเกตจากจำนวนยอดผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถือในประเทศไทยอัปเดตล่าสุด ณ ต้นเดือน มีนาคม 2562 มีจำนวนมากกว่า 90 ล้านเลขหมาย ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าการสื่อสารอยู่ใกล้ชิดกับการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ จากจุดเริ่มต้นเพียงเพื่อการสื่อสารด้วยเสียงในปัจจุบันสามารถดูวิดีโอและเล่นเกมออนไลน์แบบคมชัดสูงได้อย่างสะดวกสบาย เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งในด้าน คุณภาพ ราคา และความเร็ว ซึ่งสามารถเรียกการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในด้านการสื่อสารไร้สายออกเป็นยุค (Generation : G) เริ่มจากในยุคแรก 1G เป็นการสื่อสารกันด้วยเสียงผ่านมือถือระบบแอนะล็อก ต่อมามีการเริ่มส่งข้อความ SMS และ MMS หากันในยุค 2G จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนที่สำคัญคือ เมื่อเข้าสู่ยุค 3G ที่สามารถเชื่อมต่อและเล่นอินเทอร์เน็ตผ่านมือถือได้ จนเข้ามาถึงยุค 4G ที่สามารถดูภาพและเสียงหรือภาพยนตร์ออนไลน์ได้เนื่องจากมีความเร็วหลากหลายระดับให้เลือกใช้ ไม่ว่าจะเป็น 4G LTE (100 Mbps), LTE Advanced (1 Gbps) ในปัจจุบันมนุษย์กำลังเผชิญหน้ากับการเปลี่ยนผ่านที่สำคัญเข้าสู่ยุค 5G ที่อนาคตจะไม่ใช่แค่ใช้กับโทรศัพท์มือถือเป็นหลักเท่านั้น แต่จะรวมถึงใช้กับอุปกรณ์ทุกชนิดที่เชื่อมอินเทอร์เน็ตได้ (Internet of Things: IoT) นอกจากนี้ 5G จะทำให้เกิดการให้บริการใหม่ ๆ และกรณีการใช้งาน (Use Case) อีกมากมาย ในช่วง 1 – 2 ปีที่ผ่านมาจะสังเกตได้ว่าภาครัฐและเอกชนโดยเฉพาะผู้บริการด้านโครงข่ายโทรศัพท์ได้มีการประชาสัมพันธ์เกี่ยวกับ 5G และ use case เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ถึงแม้การใช้งานในเชิงพาณิชย์กำลังใกล้มาถึง แต่มักจะเกิดคำถามขึ้นมาเสมอว่า ความแตกต่างระหว่าง 5G และการสื่อสารในปัจจุบันคืออะไร คุ้มค่ากับการลงทุนหรือไม่ และเหมาะสมหรือไม่กับการใช้งานในประเทศไทย ดังนั้นในหนังสือ

เล่มนี้จะมีการอธิบายถึงหลักการและเหตุผลที่มีการผลักดันให้เกิดการเปลี่ยนผ่านไปสู่ 5G แนะนำถึงโจทย์อุตสาหกรรมและ use case ที่สำคัญของ 5G รวมถึงให้รายละเอียดเบื้องต้นเกี่ยวกับเทคโนโลยีด้านโครงข่ายและคลื่นวิทยุที่จะถูกนำมาใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารในยุค 5G ไม่ว่าจะเป็น Scalable OFDM-Based air interference, Flexible slot-based framework, Advance channel coding, Massive MIMO และ Mobile mmWave

ผู้เขียนคาดหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่นักศึกษาและกลุ่มผู้สนใจในเทคโนโลยีด้านการสื่อสาร เพื่อเตรียมพร้อมกับการเปลี่ยนผ่านเข้าสู่ยุค 5G ในไม่ช้านี้

ศิรวิชญ์ กิตติวิชญกุล

ณัฎฐณรงค์ นิลจันทร์

จตุพร ด้วงทอง

อนุสรณ์ วงค์ษา

กฤติยาภรณ์ เหมือดขุนทด

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 มาตรฐานการสื่อสารไร้สายยุค 3G – 5G **1**

1.1 IMT-2000 2

1.2 IMT-ADVANCED 4

1.3 IMT-2020 6

1.4 3GPP 9

1.5 บทสรุป 11

1.6 เอกสารอ้างอิง 11

บทที่ 2 กรณีการใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G **13**

2.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G 14

2.2 กรณีการใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G 18

2.3 การประยุกต์ใช้ระบบระบุตำแหน่งความแม่นยำสูงกับการพัฒนาประเทศไทย 27

2.4 แนวทางกรณีการใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G ที่สอดคล้องกับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบระบุตำแหน่งความแม่นยำภายในประเทศไทย 29

2.5 บทสรุป 32

2.6 เอกสารอ้างอิง 32

บทที่ 3 เทคโนโลยีโครงข่ายของการสื่อสารยุค 5G **34**

3.1 ความเป็นมาของสถาปัตยกรรมโครงข่าย 34

3.2 สถาปัตยกรรมโครงข่าย 5G 35

3.3 สถาปัตยกรรมโครงข่ายเดี่ยว และสถาปัตยกรรมโครงข่ายร่วม 47

3.4	การแบ่งโครงข่าย	51
3.5	บทสรุป	58
3.6	เอกสารอ้างอิง	59
บทที่ 4	**เทคโนโลยีไร้สายของการสื่อสารยุค 5G**	**60**
4.1	คลื่นมิลลิเมตร	61
4.2	MASSIVE MIMO	70
4.3	การเข้ารหัสช่องสัญญาณ	74
4.4	SCALABLE TIME-FREQUENCY DOMAIN RESOURCE BLOCK	79
4.5	บทสรุป	86
4.6	เอกสารอ้างอิง	87
บทที่ 5	**ความก้าวหน้าของเทคโนโลยี 5G ในประเทศไทย**	**90**
5.1	การประมูลคลื่นความถี่ 5G ในประเทศไทย	91
5.2	การทดสอบการใช้งาน 5G ในประเทศไทย	97
5.3	บทสรุป	103
5.4	เอกสารอ้างอิง	103

บทที่ 1

มาตรฐานการสื่อสารไร้สาย ยุค 3G – 5G

ศิรวิชญ์ กิตติวิชญกุล

IMT ย่อมาจาก International Mobile Telecommunications คือมาตรฐาน และกฎระเบียบสำหรับการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ และโทรคมนาคมระหว่างประเทศ ถูกกำหนดโดยสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International Telecommunication Union: ITU) อย่างไรก็ตาม ในส่วนการออกแบบมาตรฐานสำหรับการสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นจะอยู่ในส่วนรับผิดชอบของกลุ่มงานด้านการสื่อสารด้วยคลื่นวิทยุ (ITU-Radiocommunication) หรือ ITU-R ตัวอย่างมาตรฐานของการสื่อสารไร้สายที่ ITU-R เป็นผู้กำหนด ได้แก่ IMT-2000 IMT-advanced และ IMT-2020 [1] ซึ่งจะถูกกล่าวถึงในบทนี้

1.1 IMT-2000

IMT-2000 คือมาตรฐานที่ออกแบบมาเพื่อกำหนดแพลตฟอร์มการใช้งานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่สามหรือ 3G โดยทาง ITU-R ได้กำหนดกรอบนโยบายคร่าว ๆ ของ IMT-2000 ไว้ว่าเป็นระบบโทรคมนาคมที่สามารถให้บริการที่หลอมรวมกันได้อย่างหลากหลาย เช่น การบริการแบบประจำที่ (Fixed Service) การบริการแบบเคลื่อนที่ (Mobile Service) การบริการสื่อสารเสียง ข้อมูล อินเทอร์เน็ต และมัลติมีเดียที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ สามารถถ่ายเท ส่งต่อข้อมูลดิจิทัลไปยังอุปกรณ์โทรคมนาคมประเภทต่าง ๆ ให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ ผู้เขียนจะสรุปข้อเรียกร้องเบื้องต้นของ IMT-2000 ดังนี้

1) สามารถให้บริการการสื่อสารได้อย่างหลากหลายรูปแบบ เช่น เสียง ข้อมูล มัลติมีเดีย และอินเทอร์เน็ต ก่อให้เกิดความเฟื่องฟูของสมาร์ทโฟนและแอปพลิเคชัน

2) อัตราเร็วการรับส่งข้อมูล (Transmission Rate)

2.1) ในทุกสภาพการใช้งาน มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลสูงสุด 14.4 เมกะบิตต่อวินาที

2.2) ขณะหยุดนิ่งหรือมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าการเดิน สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างน้อย 2 เมกะบิตต่อวินาที

2.3) ขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วระดับยานพาหนะ สามารถรับส่งข้อมูลได้อย่างน้อย 384 กิโลบิตต่อวินาที

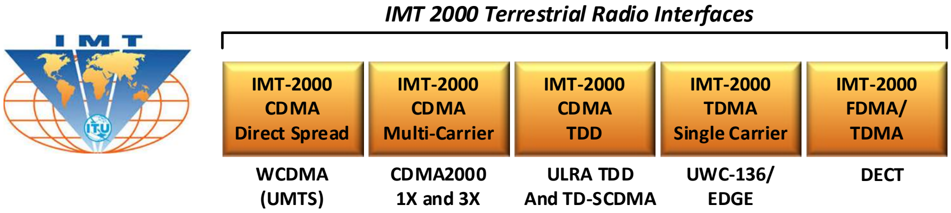
3) รองรับการสื่อสารข้อมูลทั้งแบบ circuit-switched (CS) (เสียง) และ packet-switched (PS) (ข้อมูลหรืออินเทอร์เน็ต)

4) สามารถทำงานร่วมกันกับโครงข่าย 2G ที่มีอยู่เดิมได้อย่างลงตัว สามารถใช้งานร่วมกับโครงข่ายทั่วโลก (Global Roaming) กล่าวคือ ผู้บริโภคสามารถพกพาอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ไปใช้ได้ทั่วโลก โดยไม่ต้องเปลี่ยนเครื่อง

5) ความต่อเนื่องการสื่อสาร (Seamless Delivery Service) สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องแม้จะมีการเคลื่อนที่แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงของสถานีรับส่งสัญญาณ

ITU-R ได้กำหนดมาตรฐานทางเทคนิคทั้งในส่วนของวิทยุและส่วนของโปรโทคอลโครงข่ายเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม ในบทนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะมาตรฐานเชิงเทคนิคการสำหรับอินเทอร์เฟซ

คลื่นวิทยุภาคพื้นดิน (Terrestrial Radio Interface) เท่านั้น โดยที่ ITU-R ได้กำหนดมาตรฐานทางเทคนิคในส่วนคลื่นวิทยุโดยละเอียดในเอกสาร Recommendation ITU-R M.1457 “Detailed specifications of the radio interfaces of International Mobile Telecommunications2000 (IMT-2000)” ซึ่งระบุมาตรฐานอินเทอร์เฟซคลื่นวิทยุที่ถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของ IMT-2000 อยู่ 5 แบบ ดังนี้



รูปที่ 1.1 แบบมาตรฐานอินเทอร์เฟซคลื่นวิทยุภาคพื้นดินที่ถูกกำหนดโดย ITU-R

1) WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) เป็นมาตรฐานที่จัดทำโดย 3GPP โดยพัฒนาจากพื้นฐานของโทรศัพท์ที่ใช้เทคโนโลยี GSM เป็นหลัก โดยมีข้อกำหนดที่สำคัญคือการใช้ความถี่ 2 กิกะเฮิรตซ์ โดยใช้ช่วงความถี่ 5 เมกะเฮิรตซ์ต่อช่องสัญญาณ มาตรฐานนี้ถูกใช้ในสหภาพยุโรป

2) CDMA2000 1x EV-DO (First Evolution Data Optimized) เป็นมาตรฐานที่ถูกนำเสนอโดยบริษัท Qualcomm โดยพัฒนาจากพื้นฐานของโทรศัพท์ที่ใช้เทคโนโลยี CDMA ข้อดีคือใช้ช่วงความถี่เพียง 1.25 เมกะเฮิรตซ์ต่อช่องสัญญาณ และสามารถนำไปใช้ได้ในคลื่นความถี่ย่านต่าง ๆ เช่น 800 1800 และ 1900 เมกะเฮิรตซ์ โดยเป็นระบบแรกของ IMT-2000 ที่ใช้งานได้จริงในปี 2543 ที่เกาหลีใต้

3) TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) เป็นมาตรฐานที่ถูกนำเสนอโดย China Wireless Telecommunication Standard Group โดยพัฒนาจากพื้นฐานของโทรศัพท์ที่ใช้เทคโนโลยี CDMA และการเข้าถึงแบบ TDMA มาตรฐานนี้ถูกใช้ในจีน

4) UWC136/EDGE เป็นมาตรฐานที่จัดทำร่วมกันระหว่าง Telecommunication Industry Association ของสหรัฐอเมริกา และ Universal Wireless Communications Consortium โดย

พัฒนาต่อยอดมาจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้เทคโนโลยี TDMA ตามมาตรฐาน TIA/EIA-136 โดยได้นำเทคโนโลยี GPRS และ EDGE มาร่วมใช้งานด้วย

5) DECT เป็นมาตรฐานที่จัดทำและเสนอโดย European Telecommunications Standards Institute (ETSI) โดยพัฒนา จากระบบโทรศัพท์ไร้สายแบบดิจิทัลที่ใช้เทคโนโลยี DECT

สรุปได้ว่าจากการที่ ITU-R มีการกำหนดให้ความเร็วของการสื่อสารยุค 3G มากขึ้นเป็นทวีคูณจากยุค 2G ทำให้การติดต่อสื่อสารเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว โดยรองรับการสื่อสารที่หลากหลายรูปแบบมากขึ้น ประกอบกับยุค 3G มีการถือกำเนิดขึ้นของสมาร์ทโฟนซึ่งสามารถให้บริการระบบเสียง และแอปพลิเคชันรูปแบบใหม่ เช่น จอแสดงภาพสี กล้องถ่ายรูปคุณภาพสูง เครื่องเล่นเพลง เครื่องเล่นวิดีโอ การดาวน์โหลดเกม แสดงกราฟิก และการแสดงแผนที่ต่าง ๆ ทำให้การสื่อสารเป็นแบบอินเทอร์แอคทีฟที่สร้างความสนุกสนานและสมจริงมากขึ้น [3] ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ 3G จึงช่วยให้ชีวิตประจำวันสะดวกสบายและคล่องตัวขึ้น โดยโทรศัพท์เคลื่อนที่จะเปรียบเสมือน คอมพิวเตอร์แบบพกพา วิทยุส่วนตัว และกล้องถ่ายรูป โดยผู้ใช้สามารถตรวจสอบข้อมูลในบัญชีส่วนตัว เพื่อใช้บริการต่าง ๆ ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่น self-care แก้ไขข้อมูลส่วนตัว และใช้บริการข้อมูลต่าง ๆ เช่น ข่าวเกาะติดสถานการณ์ ข่าวบันเทิง ข้อมูลด้านการเงิน ข้อมูลการท่องเที่ยว และตารางนัดหมายส่วนตัว

1.2 IMT-advanced

IMT-advanced ถูกพัฒนาเพื่อต่อยอดจากมาตรฐาน IMT-2000 เดิม เพื่อใช้เป็นมาตรฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 4 หรือ 4G โดยเป้าหมายหลักของ IMT-advanced คือเพื่อทำให้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่มีอัตราเร็วในการส่งข้อมูลมากขึ้นและ “เป็นแพลตฟอร์มระดับโลกที่จะสร้างการให้บริการมือถือใหม่ ๆ” 4G ที่เกิดขึ้นมีความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล เพิ่มขีดความสามารถในการโรมมิ่ง และบรอดแบนด์ มัลติมีเดีย โดยสามารถสนับสนุนการติดต่อสื่อสารในลักษณะดังต่อไปนี้ได้

1) สามารถรองรับผู้ใช้บริการพร้อมกันมากขึ้นต่อหนึ่งเซลล์

2) อัตราความเร็วการรับส่งข้อมูล

2.1) ขณะหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ความเร็วเท่าการเดิน สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุด 1 กิกะบิตต่อวินาที

2.2) ขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงระดับยานพาหนะ สามารถรับส่งข้อมูลสูงสุด 100 เมกะบิตต่อวินาที

3) สามารถเปลี่ยนผ่านระหว่างโครงข่ายใหม่ 4G และโครงข่ายเดิม 3G และ 2G ได้อย่างราบรื่น

4) รองรับการสื่อสารในรูปแบบโครงข่ายไอพี (IP-Based Network) และอีกทั้งยังต้องสามารถทำงานร่วมกับมาตรฐานการสื่อสารอื่น ๆ ที่มีอยู่ได้ เช่น

4.1) โครงข่ายโทรศัพท์สวิตช์สาธารณะ (Public Switched Telephone Networks: PSTN)

4.2) โครงข่ายท้องถิ่น (Local Area Network: LAN)

4.3) โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่อิงไอพี (IP Based Mobile Network)

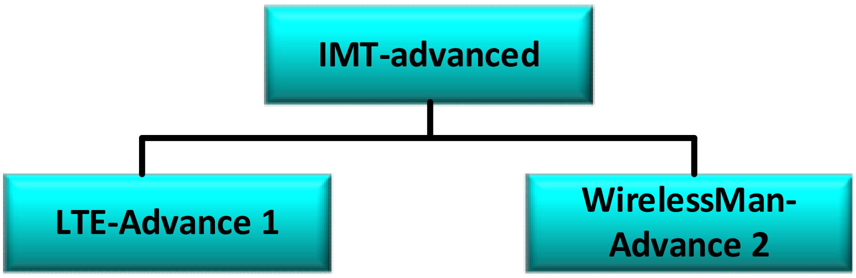
4.4) การเชื่อมต่อแบบกลุ่มส่วนตัว (Ad-Hoc)

4.5) การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย (Wireless/Wi-Fi)

4.6) โครงข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network)

5) รองรับการใช้มัลติมีเดียคุณภาพสูง เช่น การสนทนาผ่านโปรแกรม Video Conference ในระดับความคมชัดแบบ HD การรับชมภาพยนตร์ และการฟังเพลงแบบออนไลน์โดยไม่สะดุด อีกทั้งยังสามารถอัปโหลดหรือดาวน์โหลดข้อมูลที่เป็นไฟล์ขนาดใหญ่โดยใช้เวลาไม่นาน

จากการพิจารณาโครงข่าย 4G หลาย ๆ เทคโนโลยีที่ถูกส่งเข้าแข่งขันนั้น ทาง ITU-R ได้พิจารณาและตัดลงเหลือเพียง 2 เทคโนโลยี [4] คือ



รูปที่ 1.2 รูปแบบเทคโนโลยีภายใต้การพิจารณาของ ITU-R

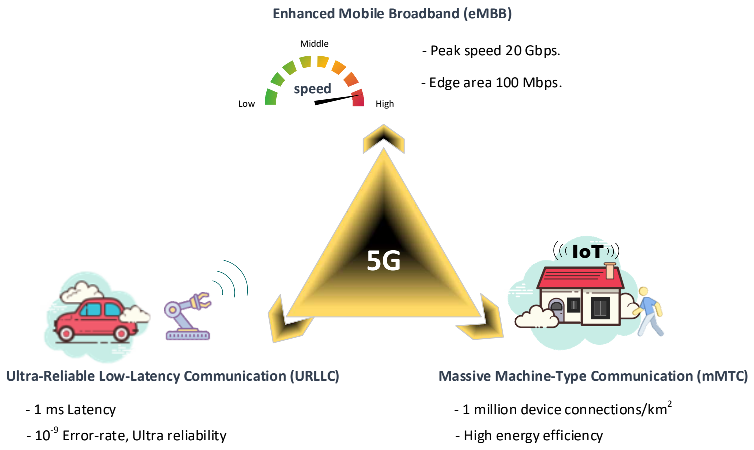
1) LTE Advance1 คือมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ในระบบ GSM

2) WirelessMan Advance2 คือมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง (Wimax) โดยพัฒนามาจากมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งเป็นมาตรฐานเดียวกันกับ Wi-Fi แต่มาตรฐาน Wimax สามารถส่งสัญญาณได้ไกลถึง 40 ไมล์ ด้วยความเร็ว 70 เมกะบิตต่อวินาที และมีความเร็วสูงสุด 100 เมกะบิตต่อวินาที

อย่างไรก็ตาม เกือบทุกประเทศทั่วโลกใช้เทคโนโลยี 4G LTE แต่มีเพียงบางประเทศเท่านั้นที่ใช้เทคโนโลยี 4G Wimax เช่น ประเทศญี่ปุ่น ไต้หวัน บังกลาเทศ เป็นต้น ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน IMT-advanced จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยี 4G สามารถขยายขีดจำกัดของสมาร์ทโฟนออกไปได้อีก ไม่ว่าจะเป็นในด้านการติดต่อสื่อสาร และมัลติมีเดีย ดังนั้นผู้เขียนจึงต้องการเปรียบเปรยว่า 4G คือสาธารณูปโภคอีกชนิดหนึ่งที่อยู่บนอากาศ เช่น อาจมองเป็นถนน High Way ที่ใช้สัญจรของข้อมูลผ่านคลื่นวิทยุ [5] โดยถนน High Way นี้จะมีพื้นถนนที่เรียบและแข็งแรง และมีขนาดเลนที่กว้าง ทำให้การสัญจรไปมา การทำการค้าขาย ตลอดจนการขนส่งสินค้า (ข้อมูล) เป็นไปได้อย่างรวดเร็วและราบรื่น

1.3 IMT-2020

IMT-2020 ถูกพัฒนาเพื่อเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับเทคโนโลยี 5G โดยมาตรฐาน IMT-2020 มีขีดความสามารถในด้านต่าง ๆ เพิ่มขึ้นจากมาตรฐาน IMT-Advanced ในเบื้องต้น ITU-R ได้สำรวจว่าผู้ใช้งาน 5G มีความต้องการใช้งาน 3 ด้านหลัก ๆ [6] ดังนี้



รูปที่ 1.3 กลุ่มผู้ใช้งานเทคโนโลยี 5G จากการสำรวจของ ITU-R

1) eMBB (enhanced Mobile Broadband) กลุ่มผู้ใช้งานที่ต้องการใช้งานในลักษณะที่ต้องการการส่งข้อมูลความเร็วสูง ในระดับกิกะบิตต่อวินาที

2) mMTC (massive Machine Type Communications) กลุ่มผู้ใช้งาน IoT ที่ต้องการใช้การเชื่อมต่อของอุปกรณ์จำนวนมากในพื้นที่เดียวกัน โดยจะเป็นการส่งข้อมูลปริมาณน้อย ๆ ที่ไม่ต้องการความเร็วสูง ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาถูก และมีอายุการใช้งานของแบตเตอรีที่มากกว่าอุปกรณ์ทั่วไป

3) URLLC (Ultra-reliable and Low Latency Communications) กลุ่มผู้ใช้งานที่ต้องการความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีความเสถียรมาก รวมทั้งมีความหน่วงในการส่งข้อมูลต่ำ

ข้อกำหนดต่าง ๆ ของ IMT-2020 ได้มาจากข้อสรุปการประชุม Mobile world congress ช่วงวันที่ 26 กุมภาพันธ์ – 1 มีนาคม 2561 ที่เมืองบาร์เซโลนา ประเทศสเปน โดยได้มีข้อสรุปว่าผู้ประกอบการที่สามารถตอบสนองความต้องการผู้ใช้งาน 5G ทั้งสามกลุ่ม และสามารถให้บริการตามข้อกำหนดดังกล่าวนี้ได้จึงจะเรียกว่าเป็นผู้ให้บริการโครงข่าย 5G ที่แท้จริง

1) อัตราการดาวน์โหลดและอัปโหลดสูงสุดอยู่ที่ 20 กิกะบิตต่อวินาที และ 10 กิกะบิตต่อวินาทีตามลำดับ

2) อัตราการดาวน์โหลดและอัปโหลดต่ำสุดสำหรับการใช้งานจริงตามสภาพแวดล้อมต่าง ๆ 100 เมกะบิตต่อวินาที และ 50 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ

3) อัตราการดาวน์โหลดและอัปโหลดที่ทำให้การสื่อสารปราศจากความผิดพลาดคือ 30 เมกะบิตต่อวินาที และ 15 เมกะบิตต่อวินาที ตามลำดับ

4) ความเร็วการเคลื่อนที่สูงสุดที่ยังคงใช้งานได้คือ 500 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยสามารถรองรับการสื่อสารบนรถไฟความเร็วสูง

5) ความหน่วงในระดับต่ำกว่า 1 มิลลิวินาที

6) สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้ไม่น้อยกว่า 1,000,000 เครื่องภายในรัศมี 1 ตารางกิโลเมตร

7) สามารถส่งผ่านข้อมูลได้มากกว่าระบบ 4G ดั้งเดิม 100 เท่า ต่อหนึ่งหน่วยพลังงาน (สายอากาศ/อุปกรณ์มือถือ/อุปกรณ์ IoT)

8) อัตราการส่งข้อมูลสูงสุดต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร เท่ากับ 10 เมกะบิตต่อวินาที

จากข้อกำหนดของมาตรฐาน IMT-2020 จะเห็นว่ามีความเกี่ยวข้องและให้ความสำคัญกับการใช้งานด้าน IoT ในภาคอุตสาหกรรมและครัวเรือน ดังนั้น 5G จึงเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญต่อเศรษฐกิจและสังคมของประเทศในงานสัมมนา “2020 ปีแห่งการลงทุน : ทางออกประเทศไทย” ที่จัดขึ้นโดย บมจ.มติชน “ฐากร ตัณฑสิทธิ์” เลขาธิการคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการ

โทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ได้ย้ำถึง “แสงสว่างของประเทศ” จากการลงทุน 5G [7] โดยได้เปิดเผยข้อมูลคร่าว ๆ ว่าการขับเคลื่อน 5G จะทำให้เกิดมูลค่าทางเศรษฐกิจในปี 2563 มูลค่า 177,039 ล้านบาท คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 1.02 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมประเทศ (GDP) ที่ 17,328,000 ล้านบาท จากมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจในปี 2563 ที่ 1,983 ล้านบาท จากระบบเศรษฐกิจรายภาค เช่น ภาคอุตสาหกรรมการผลิตร้อยละ 31.5 มูลค่า 624.62 ล้านบาท ภาคการค้าและการเงินร้อยละ 16 มูลค่า 317.86 ล้านบาท และภาคโทรคมนาคมร้อยละ 11.6 มูลค่า 229.03 ล้านบาท เป็นต้น ขณะที่ปี 2564 คาดว่า 5G จะทำให้เกิดมูลค่าทางเศรษฐกิจ 332,619 ล้านบาท และปี 2565 มูลค่า 476,062 ล้านบาท ดังจะเห็นได้ว่าการมาถึงของเทคโนโลยี 5G สามารถสร้างผลกระทบต่อภาคเศรษฐกิจต่าง ๆ รวมถึงสร้างเม็ดเงินมหาศาลในประเทศ [8] ตัวอย่างภาคส่วนที่ได้รับผลจากการมาถึงของ 5G เช่น

- <u>ภาคการเงินการธนาคาร</u> เกิดแอปพลิเคชันด้าน Mobile Banking ที่มีคุณภาพสูง ทำให้ระบบ Mobile Banking เข้ามาแทนที่ระบบบริการเดิม รวมถึงการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ในการอนุมัติหรือทำนายระยะเวลากู้ยืมที่เหมาะสมสำหรับผู้กู้ที่มีเครดิตแตกต่างกัน
- <u>ภาคอุตสาหกรรม</u> ในปัจจุบัน แรงงานคนยังจำเป็นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดกลางและใหญ่ ในบางครั้งอาจเกิดปัญหาจากความผิดพลาดของคน (Human Error) ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตและตรวจสอบมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อ 5G เข้ามา คาดว่าหุ่นยนต์อัตโนมัติที่มีเสถียรภาพสูงจะถูกนำมาใช้ในการผลิตและเชื่อมโยงหน้าที่ต่าง ๆ มากขึ้น ปัญหาที่เกิดจากความผิดพลาดของคนจะลดลงตามไปด้วย
- <u>ภาคการเกษตร</u> ในภาคการเกษตรนั้น อุปกรณ์ IoT ที่มีเสถียรภาพสูงและมีความหน่วงต่ำจะถูกนำมาใช้งานเพื่อช่วยในการจัดการสภาพแวดล้อม วิเคราะห์ดิน น้ำ และทรัพยากรให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นในอนาคตเกษตรกรจะต้องมีการเตรียมพร้อมสำหรับการทำการเกษตรอัฉริยะ (Smart Farming) ตามเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่เข้ามา
- <u>ภาคการขนส่งโลจิสติกส์</u> เนื่องจาก 5G สามารถทำให้ความหน่วงในการตอบสนองของอุปกรณ์ในละดับต่ำกว่า 1 มิลลิวินาที การเกิดขึ้นของรถยนต์ไร้คนขับ ระบบขนส่งผู้โดยสารอัฉริยะ การเชื่อมต่อระหว่างยานพาหนะและระบบควบคุมการจราจร อาจเกิดขึ้นได้ในไม่ช้า อย่างไรก็ตามการพัฒนาในภาคการขนส่งโลจิสติกส์ต้องเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป เนื่องจากสภาพการจราจรของแต่ละภูมิภาคและประเทศต่าง ๆ นั้นแตกต่างกัน
- <u>ภาคการแพทย์</u> ด้วยความหน่วงระดับต่ำกว่า 1 มิลลิวินาที ในอนาคตอันใกล้จะเกิด “เท็กซ์ไทล์อินเทอร์เน็ต” หรือการผ่าตัดระยะไกลโดยไม่ต้องให้แพทย์เดินทางไปผ่าตัดในสถานที่ห่างไกล

ช่วยให้ผู้ป่วยได้รับการรักษาที่รวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องเดินทางไปยังโรงพยาบาลใหญ่ ๆ ในเมืองหลวง ทั้งนี้การผ่าตัดทางไกลนั้น โรงพยาบาลในบาร์เซโลนาได้มีการสาธิตการผ่าตัดผู้ป่วยที่อยู่ห่างออกไป 5 กิโลเมตรด้วย 5G ไร้สายสำเร็จ รวมถึงจีนได้ทดลองกับสุกรระยะไกล 50 กิโลเมตร ได้สำเร็จเช่นกัน [9]

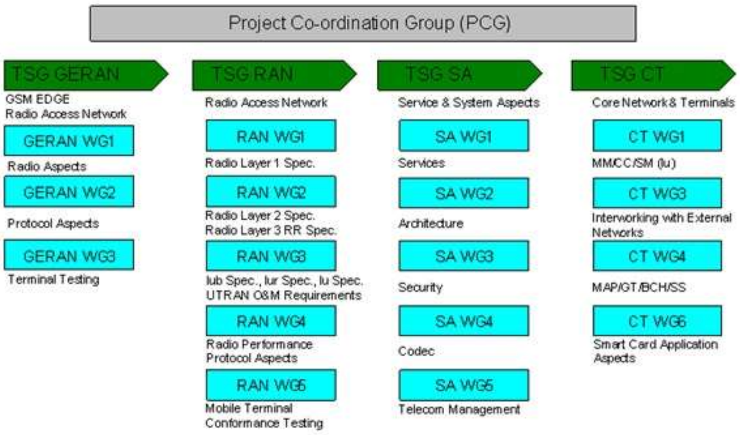
- <u>ภาคการค้า</u> จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสำหรับการค้าขายโดยเฉพาะผู้ค้าปลีก ทำเลการค้าขายจะมีความเท่าเทียมมากขึ้น เนื่องจากทำเลในรูปแบบที่ดินจะถูกย้ายมาเป็นแบบออนไลน์ การเช่าพื้นที่ค้าขายในรูปแบบการประมูลแบบสมยอมทั้งสองฝ่าย อีกทั้งยังมีนวัตกรรมที่ทำให้การซื้อสินค้าสะดวกสบาย ผู้ซื้อไม่ต้องเดินทางไปที่ร้าน

1.4 3GPP

ในหัวข้อที่ 1.1 – 1.3 ผู้เขียนได้มีการกล่าวถึงมาตรฐานการสื่อสารไร้สายในแต่ละยุค ซึ่งในแต่ละยุคได้มีการพัฒนาขีดความสามารถในการสื่อสารเพิ่มขึ้นตามลำดับ องค์กรที่เข้ามาเพื่อพัฒนามาตรฐานทางเทคนิค (Standards Development Organizations: SDOs) ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ ITU คือ 3rd Generation Partnership Project หรือ 3GPP ซึ่งเป็นการรวมกลุ่มอุตสาหกรรมโทรคมนาคมที่ประกอบไปด้วย 6 หน่วยงานได้แก่ สมาคมอุตสาหกรรมวิทยุและธุรกิจญี่ปุ่น (ARIB) สหพันธ์เพื่อทางออกอุตสาหกรรมโทรคมนาคมสหรัฐอเมริกา (ATIS) สมาคมมาตรฐานการสื่อสารจีน (CCSA) สถาบันมาตรฐานโทรคมนาคมยุโรป (ETSI) สมาคมเทคโนโลยีโทรคมนาคมเกาหลี (TTA) และคณะกรรมการเทคโนโลยีโทรคมนาคมญี่ปุ่น (TTC) สมาชิกองค์กรทั้ง 6 หน่วยงาน ทำหน้าที่ร่วมกันในการกำหนดและรับรองมาตรฐานรายละเอียดทางเทคนิคเกี่ยวกับเทคโนโลยีระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งกลุ่มรายละเอียดทางเทคนิค TSG (Technical Specification Groups) มีโครงสร้างหรือองค์ประกอบ 4 กลุ่ม ได้แก่

- กลุ่มโครงข่ายสายอากาศ TSG-RAN (Radio Access Networks) หรือ RAN มีหน้าที่กำหนดฟังก์ชันการเข้าถึงโครงข่าย และการเชื่อมต่อโครงข่ายแบบต่าง ๆ
- กลุ่มด้านบริการและระบบ TGS-SA (Service & Systems Aspects) หรือ SA มีหน้าที่กำหนดขอบเขตการใช้งาน และให้บริการระบบต่าง ๆ แก่ผู้ใช้งาน
- กลุ่มโครงข่ายหลักและสถานีปลายทาง TSG-CT (Core Network & Terminals) หรือ CN & CT มีหน้าที่ระบุอัลกอริทึมเพื่อเข้าถึงสถานีปลายทาง รวมถึงความสามารถในการเข้าถึงสถานีปลายทางภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ของสถานีปลายทาง

▪ กลุ่มโครงข่ายสายอากาศแบบ GSM/EDGE (GSM/EDGE Radio Access Networks) หรือ GERAN มีหน้าที่ในการกำหนดรายละเอียดการเข้าถึงวิทยุ ให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ RF Layer รวมถึงทดสอบรายละเอียดทุก ๆ ของสถานีฐานและสถานีปลายทางของโครงข่ายสายอากาศ



รูปที่ 1.4 แผนงานมาตรฐานทางเทคนิคระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ 3GPP [10]

ไม่นานมานี้ 3GPP ได้ประกาศโหวตรับรองมาตรฐาน 5G ฉบับแรกคือ 5G NR (New Radio) ซึ่งถือเป็นก้าวแรกของการผลักดัน 5G ในการใช้งานจริงในไม่ช้านี้ นอกจากนี้ได้มีการจัดตั้ง ฟีตเจอร์ ฟังก์ชันการทำงาน การบริการและมาตรฐานการเชื่อมต่อต่าง ๆ สำหรับหน่วยงานให้บริการโครงข่ายและผู้ผลิตมือถือเรียบร้อยแล้ว รวมทั้งผู้ผลิตชิ้นส่วนเกี่ยวกับสัญญาณก็สามารถผลิตอุปกรณ์ที่รองรับโครงข่าย 5G ได้แล้วทั่วโลก [11]

รูปที่ 1.5 งานประชุมเพื่อโหวตรับรองมาตรฐาน 5G ของกลุ่ม 3GPP [11]

1.5 บทสรุป

มาตรฐานการสื่อสารไร้สาย IMT-2000 IMT-advanced และ IMT-2020 ถูกออกแบบมาเพื่อกำหนดคุณสมบัติเบื้องต้นของการสื่อสารไร้สายในยุค 3G 4G และ 5G ตามลำดับ มาตรฐาน IMT-2000 ถูกออกแบบมาเพื่อให้ยุค 3G เป็นยุคของการสื่อสารที่ให้บริการได้อย่างหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็น เสียง ข้อมูล อินเทอร์เน็ต และมัลติมีเดีย เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่ายุค 3G เป็นยุคเริ่มต้นของการใช้งานสมาร์ทโฟนเพื่อสื่อสารด้วยเสียง สนทนาผ่านข้อความ เขียนอีเมล สร้างตารางนัดหมาย รวมถึงเข้าใช้งานอินเทอร์เน็ต เป็นต้น มาตรฐานอันถัดมาคือ IMT-advanced ถูกออกแบบมาเพื่อให้การสื่อสารในยุค 4G มีอัตราเร็วมากขึ้น และสร้างการให้บริการมือถือในรูปแบบใหม่ ดังจะเห็นได้ว่ายุค 4G เป็นยุคของการใช้งานวิดีโอสตรีมมิ่ง เช่น การใช้งาน Facebook Live หรือ Youtube Live เป็นต้น มาตรฐาน IMT-2020 คือมาตรฐานล่าสุดที่ถูกออกแบบมาเพื่อกำหนดคุณสมบัติของการสื่อสารไร้สายยุค 5G โดยเป้าหมายในการออกแบบมาตรฐานดังกล่าวคือ ต้องการให้ยุค 5G เป็นยุคของการใช้งาน IoT ดังจะเห็นได้จากคุณสมบัติทั้ง 3 ด้านของ 5G เช่น ด้าน eMBB URLLC และ mMTC ล้วนเป็นสิ่งที่เพิ่มขีดความสามารถของการใช้งาน IoT ทั้งสิ้น ปัจจุบันองค์กร 3GPP ได้มีการโหวตรับรองมาตรฐาน IMT-2020 เรียบร้อยแล้ว และคาดว่า 5G จะถูกนำมาใช้ในประเทศไทยไม่ช้านี้ อย่างไรก็ตาม รายละเอียดของมาตรฐาน IMT-2020 ที่ถูกกล่าวถึงในบทนี้เป็นเพียงรายละเอียดเบื้องต้นเท่านั้น โดยผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดเชิงเทคนิคของมาตรฐาน IMT-2020 ได้ในบทที่ 2 – 4 ของหนังสือเล่มนี้

1.6 เอกสารอ้างอิง

[1] โชคชัย แสงดาว. (2558). *วิวัฒนาการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตอนที่ 6.* ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, จาก http://www.mut.ac.th/research-detail-67

[2] คณะกรรมการมาตรฐาน กทช. (2548). *มาตรฐานและเทคโนโลยีของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3.* ฝ่ายเลขานุการคณะกรรมการมาตรฐาน กทช. สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ.

[3] โชคชัย แสงดาว. (2558). *วิวัฒนาการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตอนที่ 4.* ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, จาก http://www.mut.ac.th/research-detail-47

[4] หนุ่มดิจิตอล. (2553). *คลอดมาตรฐาน เครือข่าย 4G.* หนังสือพิมพ์ไทยรัฐออนไลน์, จาก https://www.thairath.co.th/content/123037

[5] IT Pro team. (2559). *4G: Everything you need to know.* From https://www.itpro.co.uk/mobile/22739/4g-everything-you-need-to-know/page/0/5

[6] H. Remmert. (2562). *5G Applications and Use Cases. Prachachat, Image from -- Today's 4G LTE puts you on the pathway to tomorrow's 5G.* Senior Director of Research and Innovation. from https://www.digi.com/blog/post/5g-applications-and-use-cases

[7] สำนักข่าวเศรษฐกิจ. (2563). *5G กระตุ้นเศรษฐกิจ 1.7 แสนล้าน กสทช.ปักธง "ไทย" ที่หนึ่งในอาเซียน.* Prachachat – ประชาชาติ ออนไลน์, จาก https://bit.ly/2N6JHAg

[8] เกียรติศักดิ์ คิดนุนาม (2563). *เทคโนโลยี 5G รุกคืบมาใกล้แล้ว: 5G คืออะไร? มีประโยชน์อย่างไร? ปี พ.ศ. 2563 พร้อมใช้หรือยัง?.* ISOCARE SYSTEMS นวัตกรรมใหม่ ไอทีสำหรับสหกรณ์, จาก https://bit.ly/2AJGRij

[9] ThaiQuote (2562). *ก้าวล้ำ! แพทย์ใช้ 5G ผ่าตัดระยะไกลสำเร็จ.* China Xinhua News, thairath, จาก https://www.thaiquote.org/content/217331.

[10] โชคชัย แสงดาว. (2558). *วิวัฒนาการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตอนที่ 5.* ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, จาก http://www.mut.ac.th/research-detail-57

[11] C. Sathornwet. (2560). *3GPP ประกาศข้อกำหนดฮาร์ดแวร์สำหรับ 5G แล้ว มีแววได้เห็นในปี 2018,* จาก https://bit.ly/2tVZVqa

บทที่ 2

กรณีการใช้งานของเทคโนโลยี การสื่อสารยุค 5G

ณัฏฐณรงค์ นิลจันทร์

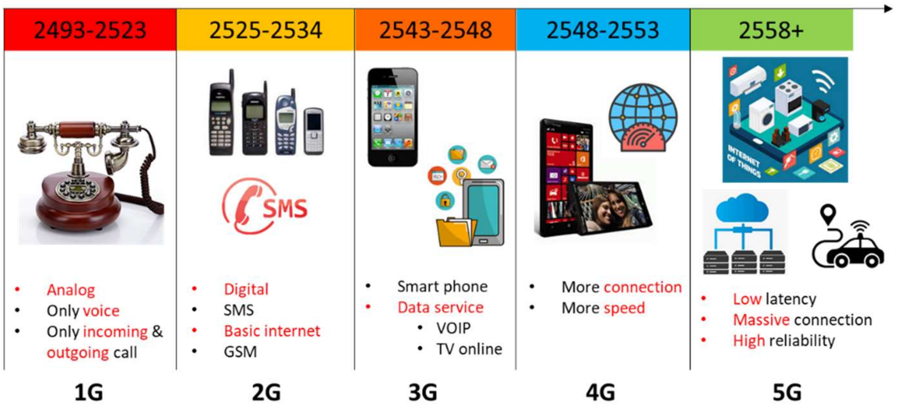
ในปัจจุบันได้มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีด้านการสื่อสารมากขึ้น และกลายมาเป็นส่วนหนึ่งของการใช้งานให้เกิดประโยชน์ในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก เช่น การนัดหมายหรือติดต่อทางจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ การผ่าตัดทางไกล การประชุมหรือสนทนาแบบทางไกลผ่านโครงข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูง และระบบควบคุมการใช้พลังงานแบบชาญฉลาด (Smart Grid) เป็นต้น โดยลำดับของวิวัฒนาการสื่อสารในแต่ละยุค และแนวทางการพัฒนาที่สำคัญสามารถสรุปได้ดังนี้

2.1 ความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G

สำหรับหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิวัฒนาการของการสื่อสารในแต่ละยุครวมทั้งมาตรฐานของการสื่อสารในยุค 5G ตามมาตรฐานของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ และองค์กรเอกชน 3GPP ดังต่อไปนี้

2.1.1 วิวัฒนาการของการสื่อสารในแต่ละยุค

สำหรับลำดับของวิวัฒนาการสื่อสารในแต่ละยุค สามารถแสดงภาพรวมได้ดังรูปที่ 2.1



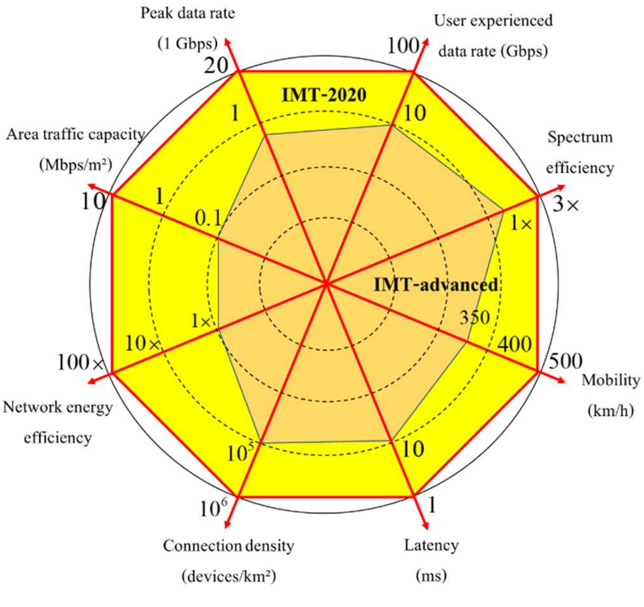
รูปที่ 2.1 วิวัฒนาการของการสื่อสารในแต่ละยุค

จากรูปที่ 2.1 การสื่อสารในยุคที่ 1 เริ่มต้นในปี พ.ศ. 2493 ซึ่งเป็นยุคที่มีการสื่อสารด้วยเสียงเพียงอย่างเดียว โดยเน้นให้มีการโทรเข้าและโทรออกได้เท่านั้น ต่อมาในปี พ.ศ. 2525 ได้มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีดิจิทัลมากขึ้น จึงมีการพัฒนาโทรศัพท์มือถือที่สามารถทำงานบนระบบดิจิทัลได้ โดยมีข้อดีในเรื่องของความทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าระบบแอนะล็อก รวมทั้งสามารถส่งข้อความที่เป็นตัวอักษรได้ จากนั้นในปี พ.ศ. 2543 เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีสมาร์ทโฟนขึ้น ทำให้ง่ายต่อการเข้าถึงอินเทอร์เน็ตกว่าในยุคก่อน นำมาซึ่งความต้องการทางด้านการบริการข้อมูล และการบริโภคสื่อที่สูงขึ้น จนกระทั่งปี พ.ศ. 2548 ได้มีการพัฒนาด้านความเร็วและความสามารถในการรองรับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์จำนวนมาก เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการเข้าถึงข้อมูลและความหลากหลายของสื่อจากยุคก่อนในระดับหนึ่ง และในยุคที่ 5 อันใกล้นี้ จะมีการพัฒนาระบบการสื่อสารให้มีความหน่วง (Latency) ลดลง มีความเร็วในการสื่อสารข้อมูลมากขึ้น รวมทั้งเพิ่มความน่าเชื่อถือและความสามารถในการใช้งานร่วมด้วย

ลักษณะของเทคโนโลยีการสื่อสารในยุคที่ 5 (5G) นี้ กำหนดขึ้นจากหน่วยงานหลัก 2 หน่วยงาน ได้แก่ สหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) ซึ่งมีหน้าที่กำหนดมาตรฐานในการสื่อสารของวงการโทรคมนาคม และอีกหน่วยงานหนึ่ง คือองค์กร 3GPP ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันบริษัทชั้นนำด้านกิจการโทรคมนาคม เพื่อกำหนดมาตรฐานกลางในการผลิต และพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสาร โดยจะอิงตามข้อกำหนดของ ITU อีกทอดหนึ่ง สำหรับรายละเอียดของมาตรฐานในแต่ละหน่วยงานจะอธิบายในหัวข้อที่ 2.1.2 และหัวข้อที่ 2.1.3 ต่อไป

2.1.2 มาตรฐานของเทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G สำหรับสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ

มาตรฐานการสื่อสารในยุคที่ 5 จากการสำรวจของ ITU จะแสดงในรูปแบบของแผนภาพใยแมงมุมดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนภาพใยแมงมุมของมาตรฐานการสื่อสารในยุคที่ 5

จากรูปที่ 2.2 จะแสดงถึงข้อกำหนดที่สำคัญในการสื่อสารของมาตรฐาน IMT-2020 ซึ่งจะมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

1) อัตราข้อมูลที่ผู้ใช้งานได้รับ (User Experienced Data Rate) : กำหนดให้มีความเร็วที่ 100 เมกะบิตต่อวินาที

2) อัตราข้อมูลที่จุดสูงสุด (Peak Data Rate) : กำหนดให้มีค่าสูงสุดที่ 20 กิกะบิตต่อวินาที

3) ประสิทธิภาพในการใช้คลื่นความถี่ (Spectrum Efficiency) : มีการพัฒนาให้สามารถใช้ได้ดีขึ้น 3 เท่าจากการสื่อสารในยุคที่ 4

4) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งาน (Mobility) : กำหนดให้รองรับการสื่อสารขณะที่ผู้ใช้งานเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงถึง 500 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

5) ความหน่วงการสื่อสาร (Latency) : กำหนดให้มีความหน่วงประมาณ 1 มิลลิวินาที

6) ความหนาแน่นในการเชื่อมต่อ (Connection Density) : กำหนดให้รองรับการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่อหนึ่งโครงข่ายสูงถึง 1,000,000 อุปกรณ์ต่อพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร

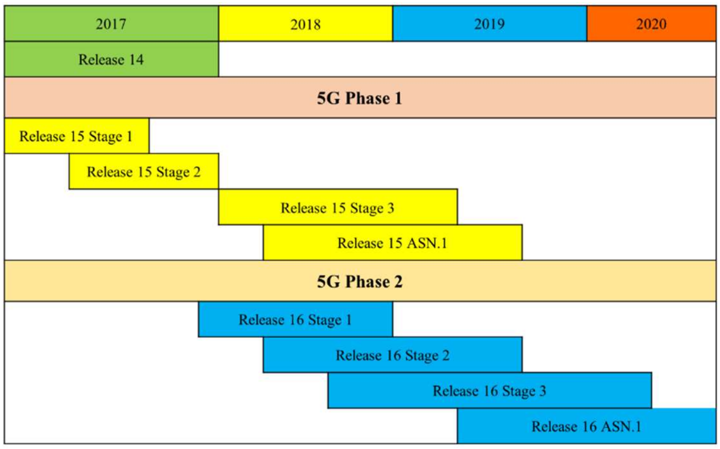
7) ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของโครงข่าย (Network Energy Efficiency) : กำหนดให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 100 เท่าจาก 4G

8) อัตราการส่งข้อมูลต่อพื้นที่ (Area Traffic Capacity) : กำหนดให้มีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดต่อพื้นที่เพิ่มขึ้นถึง 100 เท่าจาก 4G

จากความสามารถในแต่ละด้านข้างต้นนี้ จะนำไปสู่กรณีการใช้งานที่สำคัญ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มผู้ใช้งานที่ต้องการการส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง (eMBB) กลุ่มผู้ใช้งานที่ต้องการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในโครงข่ายจำนวนมาก และสื่อสารกันด้วยอัตราข้อมูลต่ำ (mMTC) และ กลุ่มผู้ใช้งานที่ต้องการการตอบสนองแบบเวลาจริง มีเสถียรภาพสูง และมีความหน่วงต่ำ (URLLC) โดยกรณีการใช้งานที่สอดคล้องกับทั้ง 3 กลุ่มนี้จะอธิบายต่อไปในหัวข้อที่ 2.2

2.1.3 มาตรฐานการสื่อสารยุค 5G สำหรับองค์กร 3GPP

สำหรับมาตรฐานกลางของการสื่อสารในยุคที่ 5 ตามนิยามขององค์กร 3GPP จะระบุไว้ในภายใต้ข้อกำหนด Release – 15 ที่เริ่มดำเนินการพัฒนาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 จนถึง พ.ศ. 2562 และภายใต้ข้อกำหนด Release – 16 ซึ่งเริ่มดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ตามขอบเขตเวลาดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขอบเขตเวลาของมาตรฐานในการพัฒนาการสื่อสารของ 3GPP [2]

จากรูปที่ 2.3 ในแต่ละข้อกำหนด Release มีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

1) ข้อกำหนด Release – 15 [2] การดำเนินตามข้อกำหนดนี้เป็นการพัฒนาการสื่อสารยุคที่ 5 ในระยะแรก ซึ่งจะประกอบไปด้วย

1.1) การพัฒนาเทคโนโลยีในด้านการใช้งาน mMTC และเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT)

1.2) การปรับปรุงเทคโนโลยี V2X (Vehicle to Everything Communication) ที่ใช้ขยายการสื่อสารระหว่างยานพาหนะกับโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ เช่น ระบบรายงานสภาพอากาศ หรือการจราจร เป็นต้น

1.3) การปรับปรุงเทคโนโลยี LTE เพื่อเพิ่มความแม่นยำทางตำแหน่งให้กับอุปกรณ์ของผู้ใช้งาน (UE) และเพิ่มการบีบอัดข้อมูล

1.4) การแบ่งโครงข่ายเพื่อการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ปลายทางด้วยกัน

1.5) การพัฒนาระบบการสื่อสารบนรถไฟฟ้าความเร็วสูง

2) ข้อกำหนด Release – 16 [2] ในข้อกำหนดนี้จะมีการพัฒนาตั้งแต่ปีต้นปี พ.ศ. 2561 โดยมีรายละเอียดที่สำคัญ ดังนี้

2.1) การพัฒนาเทคโนโลยี V2X ในด้านการขยายการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์ภายนอกการควบคุมและขับเคลื่อนยานพาหนะอัตโนมัติ

2.2) การพัฒนาเทคโนโลยี IoT สำหรับควบคุมการผลิตภายในโรงงานอุตสาหกรรม

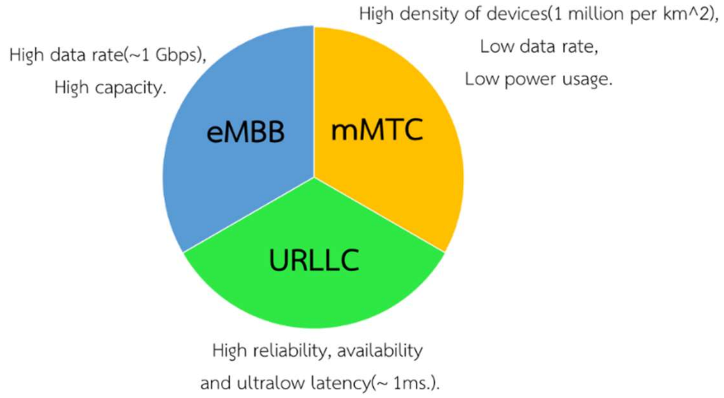
2.3) การพัฒนาการใช้ประโยชน์ในด้าน URLLC

2.4) การพัฒนาการเข้าถึงคลื่นวิทยุใหม่ (New Radio: NR) เพื่อการสื่อสารในแถบความถี่สาธารณะ

2.5) การลดความหน่วงในการสื่อสาร ลดปริมาณการใช้พลังงานและการรบกวนจากสัญญาณแทรกสอด การเพิ่มความจุในการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ และการเพิ่มความแม่นยำทางตำแหน่งให้แก่อุปกรณ์ของผู้ใช้งาน

2.2 กรณีการใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G

จากกรณีการใช้งานที่สำรวจโดย ITU ตามหัวข้อที่ 1.2 จะสามารถอธิบายกรณีการใช้งานแต่ละด้านได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กรณีการใช้งานสำหรับการสื่อสารในยุคที่ 5 ของ ITU

2.2.1 กรณีการใช้งานด้าน eMBB

สำหรับการใช้งานในด้าน eMBB จะเน้นการให้บริการส่งและรับข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงในระดับกิกะบิตต่อวินาที (Gbps) และมีความหน่วงต่ำ เพื่อให้การตอบสนองมีความใกล้เคียงความเป็นเวลาจริงมากที่สุด รวมทั้งรองรับการประมวลผลข้อมูลที่มีความมีการเปลี่ยนแปลงสูง สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการทำงานด้าน eMBB ที่สำคัญ จะมาจากการใช้คลื่นความถี่ที่สูงตั้งแต่ 6 กิกะเฮิรตซ์ขึ้นไป [13] เพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการส่งข้อมูลให้มากขึ้น ตัวอย่างของกรณีการใช้งานด้านดังกล่าวนี้ประกอบด้วย

1) การให้บริการด้านความบันเทิง

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของความบันเทิงที่ตรงกับการใช้งานด้าน eMBB

จากรูปที่ 2.5 ด้วยความสามารถของ eMBB ที่รองรับกับการใช้งานที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูงในด้านความบันเทิงสามารถนำไปปรับใช้กับการแสดงสื่อที่มีความละเอียดสูงได้ เช่น การรับชมวิดีทัศน์ที่มีความละเอียดสูงระดับ 4K และการเล่นเกมออนไลน์ที่ต้องมีการตอบสนองแบบเวลาจริงระหว่างผู้เล่นที่เชื่อมต่อโครงข่ายอยู่ เป็นต้น

2) การให้บริการด้านการศึกษา

จากคุณสมบัติของ eMBB [4] ที่ช่วยสนับสนุนการทำงานของเทคโนโลยี VR (Virtual Reality) และเทคโนโลยี AR (Augmented Reality) ในการจำลองโลกเสมือนจริง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนได้ ดังรูปที่ 2.6

รูปที่ 2.6 การฝึกสอนนักศึกษาแพทย์โดยใช้เทคโนโลยี VR [5]

จากรูปที่ 2.6 มีการโปรแกรมการฝึกศัลยกรรมผู้ป่วยลงใน VR เพื่อให้ความรู้เบื้องต้นและการฝึกปฏิบัติแก่นักศึกษาแพทย์ ด้วยความเสมือนจริงของเทคโนโลยี VR ที่ผสานเข้ากับการประมวลผลข้อมูลตามจุดเด่นในด้าน eMBB ของการสื่อสารในยุค 5G นี้ จะมีส่วนช่วยให้นักศึกษา เกิดความเคยชินและสามารถรับมือขณะทำการรักษาผู้ป่วยจริงได้

2.2.2 กรณีการใช้งานด้าน mMTC

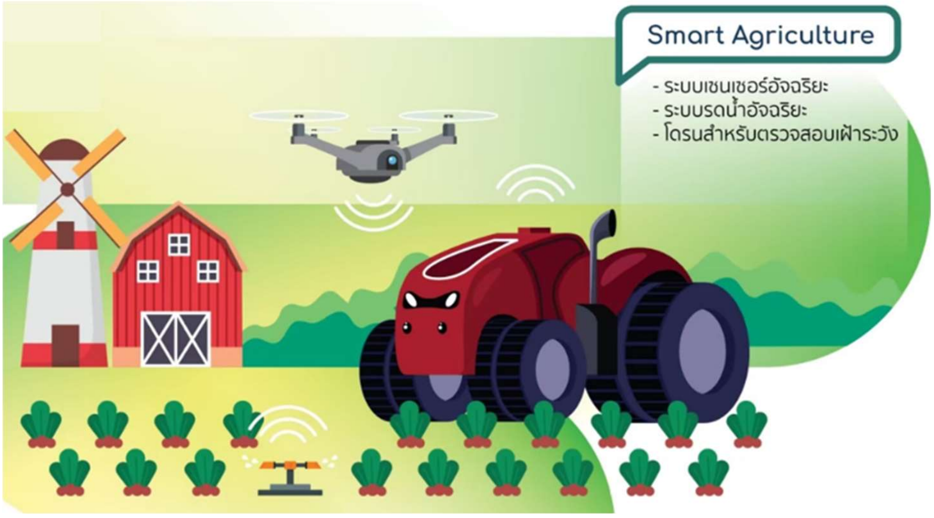
การใช้งานด้าน mMTC จะเน้นบริการที่รองรับกับการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในโครงข่ายจำนวนมาก (1 ล้านอุปกรณ์ต่อตารางกิโลเมตร) ซึ่งแต่ละอุปกรณ์มีการส่งข้อมูลด้วยปริมาณต่ำ และใช้พลังงานต่ำ โดยจะใช้ความถี่การสื่อสารอยู่ในช่วง 2 – 6 กิกะเฮิรตซ์ หรือน้อยกว่านั้น [3] ตัวอย่างของการใช้งานในด้านนี้ จะเกี่ยวกับแบบแผนของ IoT ที่รองรับข้อมูลจากเซนเซอร์จำนวนมาก สำหรับตัวอย่างการนำไปใช้งานในด้านนี้ประกอบด้วย

1) เทคโนโลยีบ้านอัจฉริยะ (Smart Home)

รูปที่ 2.7 องค์ประกอบภายในของเทคโนโลยีบ้านอัจฉริยะ

จากรูปที่ 2.7 เซนเซอร์หลายชนิดจะติดตั้งไว้ภายในตัวบ้าน เพื่อใช้เฝ้าสังเกตการณ์การทำงานสำหรับทำนายช่วงเวลาที่ต้องทำการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ และการดูแลรักษาความปลอดภัยให้แก่ผู้อยู่อาศัย [6] โดยระบบ 5G จะรองรับการเชื่อมต่อทางวิทยุไปยังอุปกรณ์ภายในบ้านซึ่งต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ และบูรณาการเข้ากับโครงข่ายที่มีอยู่ ทำให้สามารถเข้าถึงและควบคุมการทำงานอุปกรณ์ดังกล่าวจากระยะไกลได้

2) เทคโนโลยีการเกษตรอัจฉริยะ (Smart Agriculture)



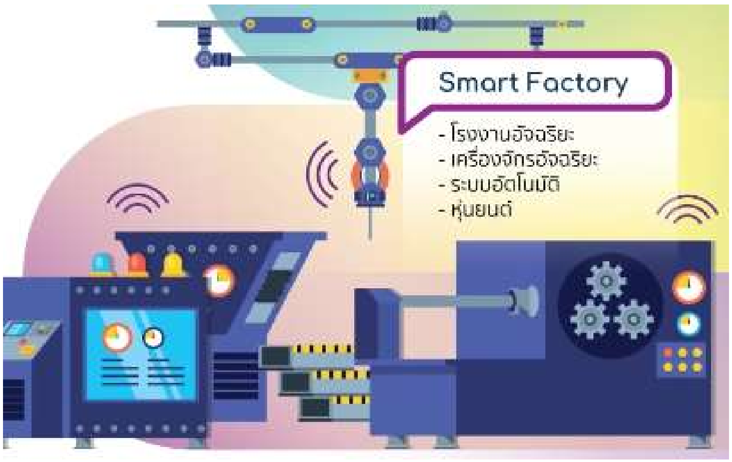
รูปที่ 2.8 องค์ประกอบของเทคโนโลยีการเกษตรอัฉริยะ

ในการทำเกษตรกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้โครงข่าย 5G จะอยู่ในขั้นตอนของการจัดการหน้าดินสำหรับเพาะปลูกโดยใช้เกษตรกรรมความแม่นยำสูงร่วมกับจีเอ็นเอสเอส การทำระบบชลประทาน (การควบคุมปริมาณความชื้นในพื้นที่เพาะปลูก โดยใช้เซนเซอร์ IoT) รวมทั้งการเพาะพันธุ์พืช และการเก็บเกี่ยว (ใช้รถจักรกลเกษตรกับ RTK) สำหรับกรณีที่ต้องการพ่นยาแก่พืชไร่ [7] จะมีการนำเซนเซอร์ระบุตำแหน่งและเซนเซอร์สำหรับพ่นยาไปติดกับโดรนแบบพิเศษ เพื่อควบคุมการพ่นยาได้ทั่วไร่โดยใช้แรงงานเพียงไม่กี่คนเท่านั้น

2.2.3 กรณีการใช้งานด้าน URLLC

สำหรับกรณีการใช้งานด้าน URLLC นั้น จะต้องมีความหน่วงในการสื่อสารที่ต่ำมาก (ในระดับ 1 มิลลิวินาที) มีความเสถียร รวมทั้งมีความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือสูง สำหรับย่านความถี่ที่ใช้งานจะอยู่ในช่วง 2 – 6 กิกะเฮิรตซ์ [13] เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการตอบสนองแบบเวลาจริง และต้องการความแม่นยำสูง เช่น

1) โรงงานอุตสาหกรรมอัจฉริยะ (Smart Industry Factory)



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบการทำงานของโรงงานอุตสาหกรรมอัจฉริยะ

จากรูปที่ 2.9 สำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมแบบดิจิทัล จะใช้เซนเซอร์จำนวนมากเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องจักรภายในโรงงาน สำหรับควบคุมและเฝ้าสังเกตการณ์ทำงาน การสร้างผลผลิต การจัดการพลังงาน รวมทั้งการบำรุงรักษาอย่างเป็นระบบ [9] จึงมีความจำเป็นที่ระบบการสื่อสารระหว่างเครื่องจักรภายในโรงงานและส่วนควบคุมจะต้องมีความน่าเชื่อถือสูง และมีความหน่วงต่ำ เพื่อลดความผิดพลาดในการควบคุม นอกจากนี้ ยังมีการบูรณาการ IoT เพื่อนำข้อมูลจากเซนเซอร์ภายในโรงงานเข้ามาช่วยในการจัดการภายในโรงงานอีกด้วย

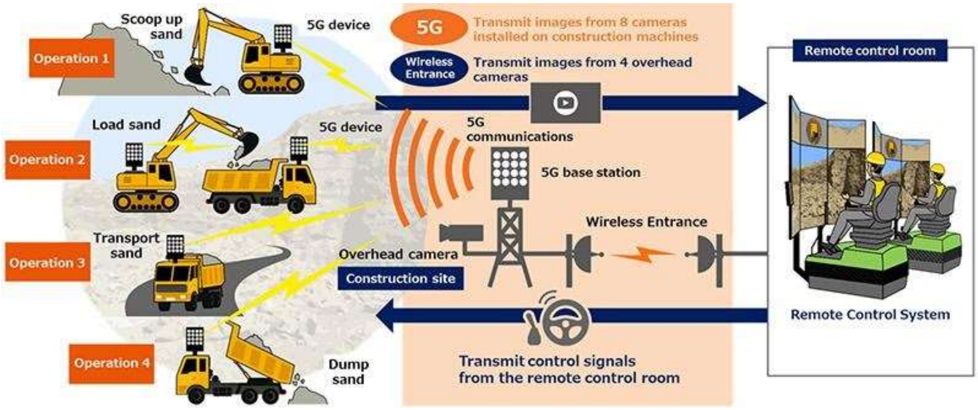
2) การใช้งานทางโทรเวชกรรม

คุณสมบัติของด้าน URLLC เป็นประโยชน์ต่อการแพทย์เป็นอย่างมาก เช่น การผ่าตัดทางไกล เนื่องจากกรณีการใช้งานดังกล่าว จะต้องมีความน่าเชื่อถือสูง รวมทั้งมีความแม่นยำในการตอบสนองแบบเวลาจริง ปัจจุบันนี้ ได้มีการผ่าตัดรักษาผู้ป่วยพาร์กินสันในจีนได้สำเร็จผ่านการเชื่อมต่อโครงข่ายการสื่อสารในยุคที่ 5 ไปยังหุ่นยนต์ผ่าตัด ดังรูปที่ 2.10

รูปที่ 2.10 การผ่าตัดทางไกลผ่านโครงข่าย 5G

จากรูปที่ 2.10 การผ่าตัดทางไกลในปัจจุบันสามารถเกิดขึ้นได้จริง โดยศัลยแพทย์ Ling Zhipei ได้ทำการผ่าตัดผู้ป่วยโรคพาร์กินสันที่อยู่ในปักกิ่งผ่านโครงข่าย 5G ขณะที่นายแพทย์นั้น อยู่ในมณฑลไหหนานซึ่งห่างกันถึง 3000 กิโลเมตรได้สำเร็จ [10] โดยแพทย์ผู้ผ่าตัดได้กล่าวว่า ในการผ่าตัดนั้นให้ความรู้สึกเหมือนอยู่ไม่ห่างจากผู้ป่วย เนื่องจากการควบคุมมีดผ่าตัดและการแสดงผลผู้ป่วยผ่านวีดิโอมีการตอบสนองแบบเวลาจริง ซึ่งในโครงข่าย 4G ไม่สามารถทำได้

3) การใช้งานด้านการก่อสร้างและโครงสร้างพื้นฐาน



รูปที่ 2.11 กรณีการใช้งานด้าน URLLC กับการก่อสร้างและโครงสร้างพื้นฐาน [10]

จากรูปที่ 2.11 ในกรณีที่ทำการก่อสร้างบนพื้นที่เสี่ยงภัย และไม่สามารถส่งแรงงานมนุษย์เข้าทำงานไปได้ จะมีการประยุกต์ใช้ด้าน URLLC ในการควบคุมเครื่องจักรกลให้ทำงานในพื้นที่ดังกล่าวแทน โดยมีการเชื่อมต่อกับหน่วยศูนย์ควบคุมจากระยะไกลด้วยความหน่วงที่ต่ำ รวมทั้งมีความแม่นยำสูงเพื่อให้สามารถทำงานได้ตามปกติ

2.2.4 สรุปตัวอย่างกรณีการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G

สำหรับทุกกรณีการใช้งานจะออกแบบให้มีความเหมาะสมกับทั้งทางภาคธุรกิจและบริการสาธารณประโยชน์ โดยจะแบ่งออกเป็น กรณีที่ใช้งานตามข้อกำหนดของ ITU ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กรณีการใช้งานการสื่อสารยุคที่ 5 ในแต่ละด้านตามข้อกำหนดของ ITU [3]

การประยุกต์ใช้งาน	กรณีการใช้งานตามข้อกำหนดของ ITU
e-Health	eMBB, mMTC, URLLC
Smart industry	mMTC, URLLC
Smart grid	mMTC
IoT and sensors	mMTC
City surveillance	eMBB
Virtual reality for cultural heritage	eMBB
Structural health monitoring	eMBB, mMTC
Agriculture 2.0	eMBB
Smart safety for smart city	eMBB
Smart mobility: High connected EV road monitoring	mMTC, URLLC
Smart mobility: advanced viability	mMTC, URLLC

1) e-Health

ตัวอย่างของการใช้งานด้านสุขภาพ จะเกี่ยวข้องกับโทรเวชกรรม เช่น การรับและส่งต่อข้อมูลด้านการแพทย์การติดตามการรักษาผู้ป่วยโรคเรื้อรังที่อยู่ห่างไกลจากโรงพยาบาล การนำเทคโนโลยีที่ช่วยให้ผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์สามารถพูดคุยตอบโต้กันได้ทันทีในเวลาเดียวกัน

2) Smart Industry

สำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมแบบดิจิทัล จะใช้สำหรับสร้างผลผลิต การจัดการพลังงาน รวมทั้งการบำรุงรักษาอย่างเป็นระบบ ร่วมกับการบูรณาการ IoT เพื่อนำข้อมูลจากเซนเซอร์ภายในโรงงานเข้ามาช่วยในการจัดการภายในโรงงาน

3) Smart Grids

เซนเซอร์หลายชนิดจะติดตั้งเพื่อใช้เฝ้าสังเกตการณ์โครงข่ายสำหรับทำนายช่วงเวลาที่ต้องทำการซ่อมบำรุง และการดูแลรักษาคาวมปลอดภัยของโครงสร้างพื้นฐาน โดยระบบ 5G จะรองรับการเชื่อมต่อผ่านคลื่นวิทยุไปยังอุปกรณ์ภายในโรงงานซึ่งต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ แล้วบูรณาการเข้ากับโครงข่ายที่มีอยู่ ทำให้สามารถเข้าถึงและควบคุมการทำงานได้

4) IoT and Sensors

เพื่อการนำเซนเซอร์แบบชาญฉลาดมาใช้ให้เกิดประโยชน์บนแพลตฟอร์มของ IoT โครงข่าย 5G จะช่วยสร้างการเชื่อมต่อไปยังอุปกรณ์เหล่านี้โดยตรง โดยจะมีข้อดีที่สำคัญดังนี้

4.1) สามารถควบคุมการทำงานอุปกรณ์ได้แบบเวลาจริง

4.2) สามารถควบคุมเครื่องจักรขนาดใหญ่ หรือเครื่องจักรที่ต้องทำงานบนพื้นที่เสี่ยงภัยได้ เช่น การส่งหุ่นยนต์ไปเก็บกู้ระเบิด การส่งหุ่นยนต์เข้าไปตรวจรังสีนิวเคลียร์ภายในโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นต้น

4.3) สามารถปรับปรุงการขนส่งให้มีความคุ้มค่าได้ เช่น การวัดความเร็วเพื่อนำไปช่วยลดความหนาแน่นรถยนต์บนถนน

4.4) สามารถติดตามการผลิต หรือสินค้าที่ส่งได้อย่างต่อเนื่อง

นอกจากนี้ ยังมีการประยุกต์ใช้กับด้านสุขภาพ เช่น สมาร์ทวอช การจัดการภายในเมืองอย่างชาญฉลาด ระบบตรวจสอบมาตรวัดก๊าซ มาตรวัดการประปา และมาตรวัดไฟฟ้า

5) Video Surveillance

การตรวจตราเมืองผ่านกล้องวงจรปิด หรือกล้องตรวจจับความร้อนที่ต้องการความละเอียดที่สูง รวมทั้งการจัดการและควบคุมจะต้องแนใจว่าสามารถทำได้แบบเวลาจริง เพื่อใช้แจ้งเตือนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละท้องที่ได้ตรงตามตำแหน่งเกิดเหตุจริง ซึ่งจะต้องใช้เทคโนโลยี eMBB และ URLLC

6) Augmented and Virtual Reality for Cultural Heritage

การขยายและจำลองเสมือนจริงสำหรับมรดกทางวัฒนธรรม จะใช้เทคโนโลยี eMBB ที่มีอัตราการรับและส่งข้อมูลที่สูง เพื่อใช้ในการจำลองสภาพแวดล้อมในอดีตตามข้อมูลที่ระบุไว้ พร้อมกับแสดงผลที่ได้ผ่าน VR ให้แก่ผู้เข้าชม เสมือนว่าผู้เข้าชมย้อนกลับไปอยู่ในสถานที่จริงในอดีตได้อีกครั้ง

7) Structural Monitoring of Buildings and Infrastructures

บริการเฝ้าสังเกตการณ์อาคารและโครงสร้างพื้นฐานของทั้งภาครัฐและภาคเอกชน เช่น การวัดระดับการทรุดตัวโครงสร้างตึก การเฝ้าสังเกตการณ์สภาพท่อประปา หรือท่อระบายน้ำ การวัดระดับน้ำในเขื่อน แม้กระทั่งการติดตามสภาพการจราจร จะต้องมีการรายงานสถานการณ์ในกรณีที่เกิดความฉุกเฉินได้อย่างทันท่วงที โดยโครงข่าย 5G จะมีข้อกำหนดที่ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการทำงานด้วยความละเอียดสูงและมีความแม่นยำ ซึ่งจะนำข้อมูลจากอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายมาประมวลผลโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent: AI) เพื่อระบุสภาพปัจจุบันของโครงสร้าง หรือสิ่งที่สนใจพร้อมกับเปรียบกับข้อมูลก่อนหน้าเพื่อระบุความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

8) Agriculture 2.0

ในการทำเกษตรกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้โครงข่าย 5G จะอยู่ในขั้นตอนของการจัดการหน้าดินสำหรับเพาะปลูกโดยใช้เกษตรกรรมความแม่นยำสูงร่วมกับจีเอ็นเอสเอส การทำระบบชลประทาน รวมทั้งการเพาะพันธุ์พืช และการเก็บเกี่ยว

9) Smart Safety for Smart Cities

ในการรักษาความปลอดภัยของเมืองจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีรักษาความปลอดภัยที่สามารถแจ้งเหตุร้ายได้ทันที โดยเทคโนโลยี 5G จะเข้ามารองรับการควบคุมโดรน หรือเครื่องบินตรวจการณ์ผ่านการสังเกตด้วยกล้องวงจรปิดในบริเวณที่เกิดเหตุ ซึ่งช่วยให้สามารถรับแจ้งเหตุร้ายที่อาจเกิดขึ้นได้ตลอดเวลา

10) Security Issues

เนื่องจากเทคโนโลยี 5G จะต้องรองรับการสื่อสารข้อมูลที่รวดเร็วและมีปริมาณมหาศาลจึงทำให้เกิดปัญหาด้านความปลอดภัยของข้อมูลขึ้น โดยปัจจัยที่เป็นความท้าทายของโครงข่าย 5G จะประกอบไปด้วย

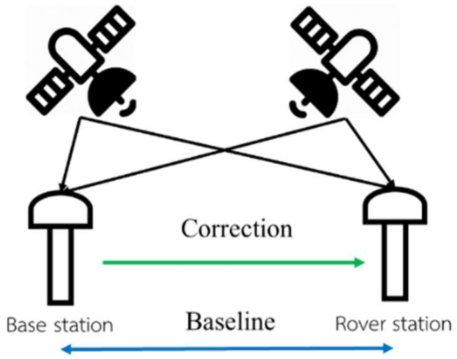
10.1) การให้บริการความปลอดภัยเข้ากับบริการใหม่ ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบ 5G เช่น การป้องกันการจารกรรมข้อมูลในคลาวด์ การป้องกันบุคคลภายนอกเข้าถึงระบบควบคุมเครื่องจักรในโรงงาน

10.2) การให้บริการระบบความปลอดภัยที่สมบูรณ์เพื่อสร้างรายได้ใหม่ การสร้างความสามารถในการแข่งขันและสร้างความน่าเชื่อถือให้แก่ลูกค้า

2.3 การประยุกต์ใช้ระบบระบุตำแหน่งความแม่นยำสูงกับการพัฒนาประเทศไทย

2.3.1 การระบุตำแหน่งความแม่นยำสูงที่ใช้เทคนิค RTK

เนื่องจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสที่ใช้งานกันโดยทั่วไปนั้นยังคงมีค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งอยู่ โดยที่ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจะมีค่าประมาณ 3 เมตร (rms) ในแนวราบและ 5 เมตร (rms) ในแนวดิ่ง ซึ่งความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ จำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้ การกระจายตัวของดาวเทียมในท้องฟ้า การรบกวนของปรากฏการณ์พหุวิถี (Multipath) และประสิทธิภาพในการลดสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ เป็นต้น วิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งคือวิธีการ RTK (Real-Time Kinematic) โดยจะอาศัยสถานีฐาน (Base Station) ในการช่วยแก้ไขค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลก โดยจะอาศัยการวัดเฟสคลื่นพาห์ซึ่งจะมีความแม่นยำกว่าการวัดระยะทางเทียมมาใช้ในการคำนวณตำแหน่งของเครื่องรับ โดยหลักการทำงานของวิธี RTK แสดงดังในรูปที่ 2.12



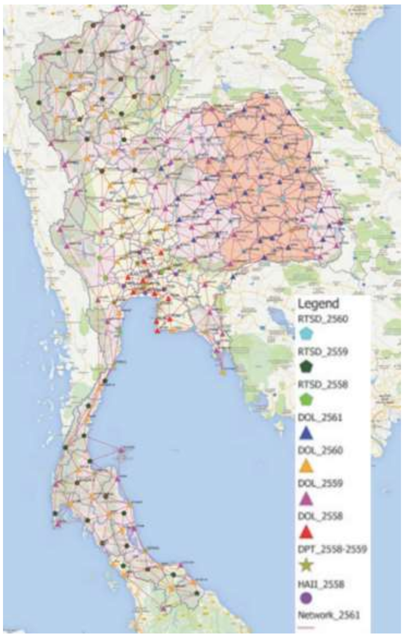
รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของการระบุตำแหน่งแบบ RTK

การคำนวณตำแหน่งของเครื่องรับจะอาศัยผลต่างของการวัดระยะทางของคู่ดาวเทียม (Double Difference) ซึ่งในกรณีที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับเครื่องรับอยู่ไม่ไกลจากกันจะพบว่าค่าดีเลย์ในเชิงระยะทางที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ทั้งสองจุดนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ลดผลกระทบดังกล่าวออกไปจากสมการการคำนวณหาตำแหน่งได้ นอกจากนี้ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกาดาวเทียมและเครื่องรับก็จะถูกหักล้างไปด้วย สำหรับความแม่นยำในการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK นั้น อยู่ที่ระดับเซนติเมตร (rms) ในแนวราบ โดยความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับเครื่องรับ ด้วยเหตุนี้เทคนิคการระบุตำแหน่งแบบ RTK จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น การสำรวจรังวัด การศึกษาการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก การเกษตรความแม่นยำสูง เป็นต้น โดยในทางปฏิบัติข้อมูลการวัดเฟสคลื่นพาห์ของสถานีฐานจะถูกส่งไปยังเครื่องรับผ่านระบบสื่อสารต่าง ๆ เช่น คลื่นวิทยุ โมเด็ม และอินเทอร์เน็ต เป็นต้น ดังรูปที่ 2.13

รูปที่ 2.13 การใช้งานระบบ RTK ในทางปฏิบัติ

2.3.2 ระบบระบุตำแหน่งความแม่นยำสูงภายในประเทศไทย

สำหรับโครงข่ายระบุตำแหน่งความแม่นยำสูงที่เปิดให้บริการสาธารณะภายในประเทศไทยมาจาก 2 หน่วยงานหลัก ได้แก่ กรมที่ดินแห่งประเทศไทย (Department of Land: DOL) จำนวน 121 สถานี และกรมโยธาธิการและผังเมือง (Department of Public Works and Town & Country Planning: DPT) จำนวน 15 สถานี โดยมีตำแหน่งที่ตั้งเป็นดังรูปที่ 2.14

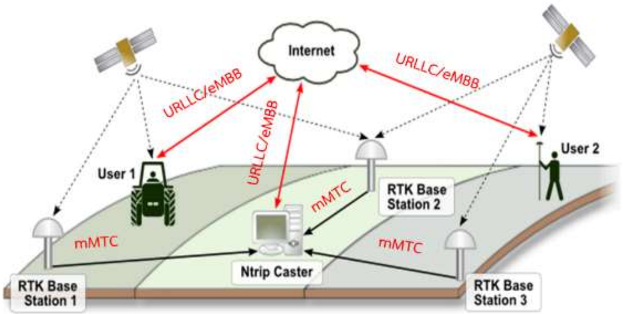


รูปที่ 2.14 โครงข่ายจีเอ็นเอสเอสสำหรับใช้งานการระบุตำแหน่งแบบ RTK ในประเทศไทย [11]

จากรูปที่ 2.14 สัญลักษณ์ที่มีอักษรย่อ DOL และ DPT จะใช้แทนสถานีฐานของกรมที่ดินรวมทั้งกรมโยธาธิการและผังเมืองตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโครงข่ายของสถานีฐานเหล่านี้ได้มีการติดตั้งไว้ทั่วประเทศ ซึ่งครอบคลุมต่อการใช้งานเป็นบริเวณกว้าง และเป็นประโยชน์ต่อการใช้เทคนิค RTK บนพื้นที่ทางเกษตรกรรมได้แทบทุกภูมิภาคของประเทศไทย แต่เนื่องจากความหน่วงในการสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับสถานีฐานเหล่านี้ จะมีผลโดยตรงต่อความต่อเนื่องในการใช้งานระบบ RTK ดังนั้น การมาถึงของโครงข่าย 5G จะสามารถเพิ่มความเสถียรในการใช้งานได้เป็นอย่างดี

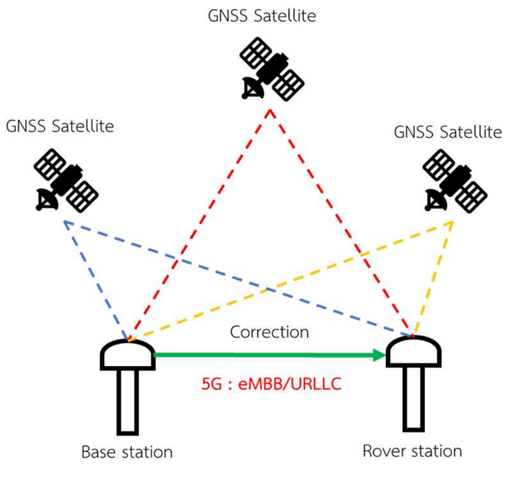
2.4 แนวทางกรณีการใช้งานของเทคโนโลยีการสื่อสารยุค 5G ที่สอดคล้องกับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ระบบระบุตำแหน่งความแม่นยำภายในประเทศไทย

จากหัวข้อที่ 2.3.2 รูปแบบของการส่งค่าแก้ไขตำแหน่งของสถานีฐานกรมที่ดินจะมีลักษณะแบบ VRS (Virtual Reference Station) ที่มีการทำงานเป็นดังรูปที่ 2.15



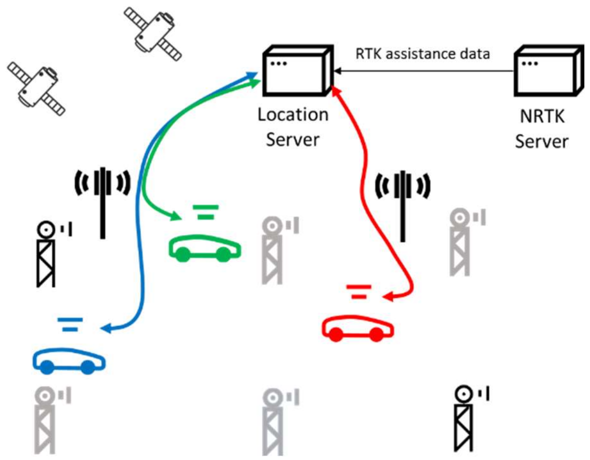
รูปที่ 2.15 การส่งค่าแก้ไขตำแหน่งแบบ VRS [11]

จากรูปที่ 2.15 ลักษณะการส่งค่าแก้ไขตำแหน่งของกรมที่ดิน (RTK Base 1, 2, 3) จะทำงานโดยเริ่มจากการที่ผู้ใช้งาน (User 1, 2) ส่งตำแหน่งโดยคร่าว ไปยังศูนย์ควบคุมกลาง (Ntrip Caster) ผ่านโครงข่ายสายอากาศที่มีความเสถียรสูง และมีความหน่วงต่ำ (มีการประยุกต์ใช้ในด้าน URLLC) จากนั้นศูนย์ควบคุมกลางจะดึงข้อมูลจากสถานีฐานหลายสถานีที่อยู่ในบริเวณผู้ใช้งานด้วยอัตราข้อมูลต่ำ (มีการประยุกต์ใช้ด้าน mMTC) แล้วนำมาประมวลผลร่วมกับตำแหน่งผู้ใช้เพื่อให้ได้ค่าแก้ไขตำแหน่งที่เหมาะสุด จากนั้นจึงส่งกลับไปยังผู้ใช้งานเพื่อคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK อีกครั้ง ในกรณีที่ใช้งานกับโดรนเกษตรที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะต้องเพิ่มการใช้งานด้าน eMBB เพื่อช่วยในการส่งข้อมูลค่าแก้ทางตำแหน่งและการควบคุมทิศทางให้เร็วขึ้นตามไปด้วย สำหรับการส่งค่าแก้ไขตำแหน่งของกรมโยธาธิการฯ มีลักษณะดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การส่งค่าแก้ไขตำแหน่งแบบ CORS

จากรูปที่ 2.16 ผู้ใช้งาน (Rover Station) สามารถเชื่อมต่อผ่านโครงข่ายไร้สายไปยังสถานีฐาน (Base Station) เพื่อรับค่าแก้ไขตำแหน่งได้โดยตรง (เป็นการเชื่อมต่อแบบ CORS) ซึ่งต้องการความเสถียรในการเชื่อมต่อ มีความน่าเชื่อถือสูง (เกี่ยวข้องกับด้าน URLLC) นอกจากนี้ ในกรณีที่ผู้ใช้งานต้องการระบุตำแหน่งขณะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จะต้องใช้อัตราการส่งค่าแก้ไขตำแหน่งที่รวดเร็วขึ้น เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถประมวลตำแหน่งของตนเองด้วยเทคนิค RTK ได้ทันเวลา สำหรับแนวคิดการประยุกต์ใช้เทคนิค RTK กับโครงข่าย 5G ในปัจจุบัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การส่งข้อมูลช่วยระบุตำแหน่งแบบ RTK บนโครงข่าย 5G [12]

จากรูปที่ 2.17 สถานีอ้างอิง (แทนด้วยเสาส่งสีดำ) ทำหน้าที่วัดข้อมูลสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier phase) พร้อมกับส่งข้อมูลไปยังโครงข่ายการระบุตำแหน่งแบบ RTK (NRTK Server) เพื่อช่วยในการลดความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งให้กับอุปกรณ์ผู้ใช้ (UE) ซึ่งอยู่ในบริเวณเดียวกัน โดยจะมีการประมวลผลร่วมกับตำแหน่งของผู้ใช้ เพื่อหาค่าแก้ทางตำแหน่งที่เหมาะสุดและส่งให้แก่ผู้ใช้ผ่านทางเซิร์ฟเวอร์สำหรับระบุตำแหน่ง (Location Server) สำหรับโปรโทคอลที่ใช้ส่งค่าแก้ดังกล่าว คือ LPP (LTE Positioning Protocol) ซึ่งระบุเอาไว้ในข้อกำหนด Release-15 ขององค์กร 3GPP

2.5 บทสรุป

ผลจากการพัฒนาเทคโนโลยีด้านสื่อสารจากอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะการมาถึงของเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G ทำให้เกิดการคิดค้นและสำรวจกรณีการใช้งานทั้ง 3 ด้าน เพื่อตอบสนองต่อความสะดวกสบาย ความปลอดภัย รวมทั้งการพัฒนาคุณภาพชีวิตมนุษย์ที่ดีขึ้น โดยในด้าน eMBB ที่มุ่งเน้นการใช้งานที่มีอัตราข้อมูลการรับส่งสูง จะช่วยให้ทั้งความบันเทิง และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการศึกษาผ่านช่องทางออนไลน์ได้ดีขึ้น สำหรับจุดเด่นด้าน mMTC จะเป็นประโยชน์ต่อการเพิ่มความหนาแน่นการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ด้าน IoT ในชีวิตประจำวัน เช่น อุปกรณ์ที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีบ้านอัจฉริยะ สำหรับควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน ไปจนถึงเทคโนโลยีโครงข่ายสำหรับส่งไฟฟ้าอัจฉริยะที่ช่วยควบคุมการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างเหมาะสม และสำหรับด้าน URLLC ที่มีจุดเด่นด้านการสื่อสารที่มีความหน่วงต่ำ และมีความเสถียรสูง ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานที่ต้องโต้ตอบแบบเวลาจริง โดยเฉพาะการผ่าตัดทางไกล และการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถยนต์อัตโนมัติ

นอกจากนี้ การมาถึงของเทคโนโลยีการสื่อสาร 5G จะสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการขยายช่องทางการเชื่อมต่อกับโครงข่ายสถานีฐานภายในประเทศไทย เพื่อใช้สำหรับระบุตำแหน่งแม่นยำสูงแบบ RTK ซึ่งจะสนับสนุนการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถยนต์อัตโนมัติ การควบคุมตำแหน่งของรถจักรกลทางเกษตรกรรม รวมไปถึงการให้บริการตำแหน่งของผู้ใช้งานมือถือแม่นยำสูงผ่านเครือข่าย 5G ในอนาคตอันใกล้

2.6 เอกสารอ้างอิง

[1] คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ. (2561). *5G: คลื่นและเทคโนโลยี.* ค้นเมื่อ 20 มกราคม 2563, จาก https://bit.ly/2GsZ0jv

[2] 3GPP. (2020). *3GPP-Release.* Retrieved January 20, 2020, from https://www.3gpp.org/specifications/67-releases

[3] D. Marabissi et al. *A Real Case of Implementation of the Future 5G City, future internet,* MDPI, 2018.

[4] Huawei. (2019). *Industries + 5G: 5G Transforms the Gaming Industry and Facilitates Cloud Gaming.* Retrieved January 20, 2020, from https://telecoms.com/intelligence/industries-5g-5g-transforms-the-gaming-industry-and-facilitates-cloud-gaming/

[5] Arch Virtual. *Virtual Medical Applications.* Retrieved January 20, 2020, from https://archvirtual.com/virtual-reality-medical/

[6] Visually. *Essential Smart Home Devices To Run Your Home.* Retrieved January 20, 2020, from https://visual.ly/community/Infographics/technology/essential-smart-home-devices-run-your-home

[7] Farmhughouse. *Smart farm.* Retrieved January 20, 2020, from https://www.farmhughouse.com/topic-1-view.html

[8] Analog Devices. *Accelerating the Path to Industry 4.0.* Retrieved January 20, 2020, from https://www.analog.com/en/applications/markets/industrial-automation- technology-pavilion-home/industry-4-pt-0.html#

[9] The Matter. (2019). *จีนผ่าตัดทางไกล ด้วยระบบ 5G เป็นครั้งแรก รักษาผู้ป่วยพาร์กินสันที่อยู่ห่างไป 3,000 กิโลเมตร สำเร็จ.* ค้นเมื่อ 20 มกราคม 2563, จาก https://thematter.co/brief/brief-1552982400/73192

[10] NEC Cooperation. (2019). *KDDI, Obayashi, and NEC use 5G to successfully remotely control construction machinery in a cooperative operation.* Retrieved January 20, 2020, from https://bit.ly/2TZSARa

[11] กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน. (2558). *คู่มือปฏิบัติงานระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK Network)ในงานรังวัดเฉพาะราย.* ค้นเมื่อ 20 มกราคม 2563, จาก https://www.dol.go.th/km2/Documents/book%20km%202558/rtk.pdf

[12] F. Gunnarsson F and S. M. Razavi. (2018). *LTE Positioning and RTK: Precision down to the centimeter*. Retrieved June 13, 2020, from https://www.ericsson.com/en/blog/2018/11/lte-positioning-and-rtk-precision-down-to-the-centimeter

[13] Huawei. (2017). *5G Spectrum Public Policy Position*. Retrieved June 13, 2020, from https://www-file.huawei.com/-/media/CORPORATE/PDF/public-policy/public_policy_position_5g_spectrum.pdf.

บทที่ 3

เทคโนโลยีโครงข่ายของการสื่อสารยุค 5G

จตุพร ด้วงทอง และอนุสรณ์ วงค์ษา

3.1 ความเป็นมาของสถาปัตยกรรมโครงข่าย

ในยุคก่อนที่จะมีเทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 5 (5G) การออกแบบสถาปัตยกรรมโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นจะยึดผู้ใช้ (User) เป็นศูนย์กลาง ผู้ใช้เปรียบเสมือนเป็นพลเมืองชั้นหนึ่งของโครงข่าย และผู้สร้างโครงข่ายโทรศัพท์แบบเคลื่อนที่พยายามที่จะเพิ่มจำนวนผู้ใช้อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงได้เปลี่ยนสถาปัตยกรรมโครงข่ายจากสวิตชิงแบบวงจร (Circuit Switching) ที่รองรับจำนวนผู้ใช้ได้น้อยเป็นสวิตชิงแบบไอพี (IP Switching) เต็มรูปแบบซึ่งสามารถรองรับผู้ใช้ได้ปริมาณมากกว่าในเทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 4 (4G)

ในสถาปัตยกรรมโครงข่ายของเทคโนโลยี 4G ประกอบด้วยโหนดต่าง ๆ เช่น eNB (Evolved Node B), SGW (Serving Gateway), PGW (Packet Data Network Gateway) และ MME (Mobility Management Entity) โดยแต่ละโหนดมักประกอบด้วยฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคู่กัน

สำหรับเทคโนโลยี 5G นับเป็นความก้าวหน้าครั้งยิ่งใหญ่ในรูปแบบของการออกแบบในช่วงเวลาสามสิบปีนี้ นอกเหนือจากการปรับปรุงความเร็วของการรับส่งข้อมูล และความหน่วงเวลาในการส่งข้อมูลผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศแล้ว สถาปัตยกรรมของเทคโนโลยี 5G ยังได้มีการเปลี่ยนแปลงจากการยึดผู้ใช้งานเป็นหลักมาเป็นยึดการบริการแนวดิ่ง (Vertical) เป็นหลัก ความหมายของ การบริการแนวดิ่ง คือ ผู้ขายเสนอสินค้าหรือบริการที่เฉพาะด้านให้กับอุตสาหกรรม หรือกลุ่มลูกค้าที่ต้องการเข้าถึงการบริการบางอย่างเป็นพิเศษ ในเทคโนโลยี 5G นั้น ได้ให้การบริการการสื่อสาร ไม่เพียงแค่สำหรับผู้ใช้เท่านั้น แต่ยังให้การบริการการสื่อสารสำหรับตลาดแนวดิ่ง (Vertical Market) ที่แตกต่างกัน เช่น ยานยนต์ พลังงาน การจัดการเมือง รัฐบาล การดูแลสุขภาพ การผลิต และระบบขนส่งอัจฉริยะ

ความแตกต่างดังกล่าวทำให้เกิดความต้องการเข้าถึงการบริการที่มีความคล่องตัวตามสภาพแวดล้อม ดังนั้นซอฟต์แวร์ที่มีความยืดหยุ่นในการใช้งานตามความต้องการที่แตกต่างกันจึงมีความสำคัญมากกว่าฮาร์ดแวร์ที่ปรับเปลี่ยนตามความต้องการได้ยาก ด้วยเหตุนี้สถาปัตยกรรมโครงข่าย 5G จึงได้รับการออกแบบมาเป็นซอฟต์แวร์ของฟังก์ชันโครงข่าย (Network Function: NF) ที่สามารถปรับเปลี่ยนไปตามความต้องการของกลุ่มผู้ใช้บริการได้เพื่อให้เกิดการใช้งานโครงข่ายอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นโครงข่ายที่ถูกกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (Software Defined Networking: SDN) ฟังก์ชันโครงข่ายเสมือนจริง (Network Function Virtualization: NFV) และการประมวลผลแบบคลาวด์ (Cloud Processing) จึงเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานเพื่อให้มีการใช้ประโยชน์โครงข่าย 5G ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

3.2 สถาปัตยกรรมโครงข่าย 5G

ในหัวข้อนี้จะเน้นไปที่สถาปัตยกรรมโครงข่ายของเทคโนโลยี 5G เป็นหลัก โครงข่ายของเทคโนโลยี 5G ประกอบด้วยโครงข่ายสายอากาศของ 5G หรือโครงข่ายการเข้าถึง (Access Network: AN) ในความหมายของการเข้าถึง คือผู้ใช้งานเชื่อมต่อกับสถานีฐานที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายโดยผ่าน

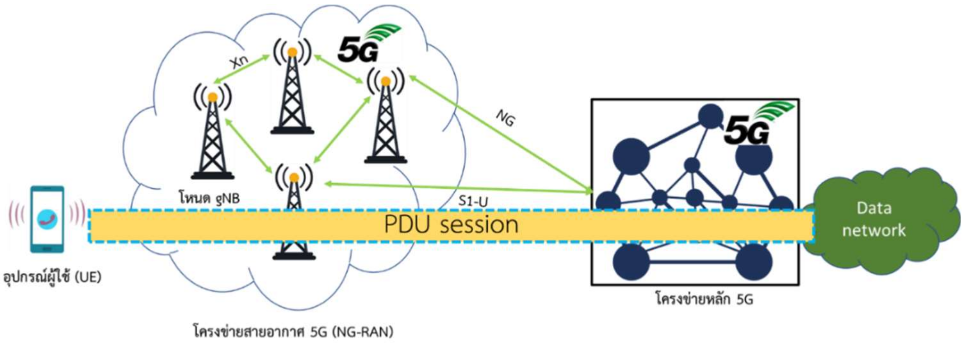
คลื่นวิทยุ และโครงข่ายหลัก 5G (5GC) [1] ดังรูปที่ 3.1 โครงข่ายสายอากาศนั้นประกอบด้วยโครงข่ายสายอากาศที่ใช้คลื่นวิทยุย่านความถี่ใหม่ (Next-Generation Radio Access Network: NG-RAN) [3] ที่ใช้อินเทอร์เฟซของคลื่นวิทยุความถี่ใหม่ 5G (New Radio: NR) [4] (ซึ่งไม่ใช่โครงข่ายสายอากาศใน 3GPP AN เช่น WiFi และ xDSL เป็นต้น) เชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก 5G เอนทิตี (Entity) หรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ในโครงข่ายเชื่อมต่อกันด้วยโครงข่ายการขนส่งข้อมูล TCP/IP พื้นฐานซึ่งรองรับ diff-serv QoS

โครงข่าย 5G เชื่อมต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ (User Equipment: UE) กับโครงข่ายข้อมูล (Data Network) ภายนอกเช่นเดียวกับการสื่อสารในยุคที่ผ่านมา การบริการการเชื่อมต่อ 5G มีชื่อเรียกว่าเซสชัน PDU (Protocol Data Unit) เมื่อพิจารณาจากมุมมองของการขนส่งข้อมูล เซสชัน PDU ถูกสร้างขึ้นจากอุโมงค์ (Tunnel) ขนส่งข้อมูล NG (Next Generation) ย่อยที่ต่อเนื่องกันเป็นลำดับ ซึ่งใช้ขนส่งข้อมูลใน 5GC โดยเริ่มจากตัวขนส่งที่เป็นคลื่นวิทยุ (Radio Bearer) 1 ตัวหรือมากกว่าบนอินเทอร์เฟซคลื่นวิทยุ และสุดท้ายชุดของ "ท่อขนส่งข้อมูล (Pipe)" นี้จะเชื่อมต่ออุปกรณ์ผู้ใช้กับฟังก์ชันการควบคุม และเชื่อมต่อกับโครงข่ายข้อมูลภายนอก (External Data Network) ในการแลกเปลี่ยนปริมาณข้อมูลผู้ใช้ (Traffic) ภารกิจสำคัญของโครงข่ายมือถือคือการสร้างอุโมงค์ขนส่งข้อมูล และตัวขนส่งข้อมูล (Bearer) แบบพลวัต (Dynamic) และติดตามการเคลื่อนไหวของผู้ใช้และสถานะ (เช่น ว่างหรือเชื่อมต่อ เป็นต้น) แสดงดังรูปที่ 3.2

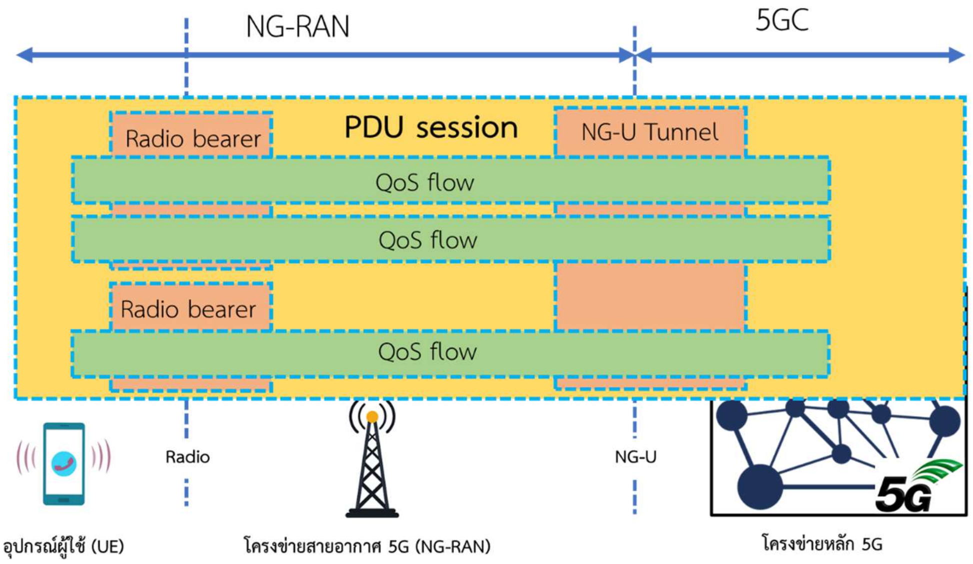
เซสชัน PDU นั้นคล้ายกับตัวขนส่งข้อมูล EPS (Evolved Packet System) ใน LTE (Long-Term Evolution) ยกเว้นแบบจำลอง QoS (Quality of Service) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้จัดการกับปริมาณข้อมูล (Data Traffic) เพื่อลดการสูญหายของแพ็กเกตข้อมูล ความหน่วงเวลา และจิตเตอร์ (Jitter) ในโครงข่าย และหน่วยข้อมูลผู้ใช้ที่รองรับ ที่จริงแล้วเซสชัน PDU นั้นสามารถขนส่งได้ทั้งแพ็กเกต IP ของผู้ใช้ และขนส่งอีเทอร์เน็ต หรือเฟรมที่ไม่มีโครงสร้าง ดังนั้นจึงสามารถสื่อสารแบบ 2 เลเยอร์ระหว่างกลุ่มอุปกรณ์ผู้ใช้ แบบจำลอง QoS ในเทคโนโลยี 5G เป็นแนวคิดใหม่ของการไหลของข้อมูลแบบ QoS [1] ซึ่งการไหลของข้อมูลของ QoS มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นการไหลข้อมูลของ QoS ที่แตกต่างกันเล็กน้อยอาจจะอยู่ใน PDU เพียงเซสชันเดียว

รูปที่ 3.3 มีการแยกระหว่างฟังก์ชันของเทคโนโลยี 5G ที่ดำเนินการในโครงข่ายสายอากาศ NG-RAN และในโครงข่ายหลัก 5G เมื่อพิจารณาในภาพรวม โครงข่ายสายอากาศ NG-RAN จะดูแลการสร้าง การบำรุงรักษา และนำส่วนต่าง ๆ ของเซสชัน PDU ออกมาให้ใช้ โดยผ่านอินเทอร์เฟซคลื่นวิทยุ โดยใน

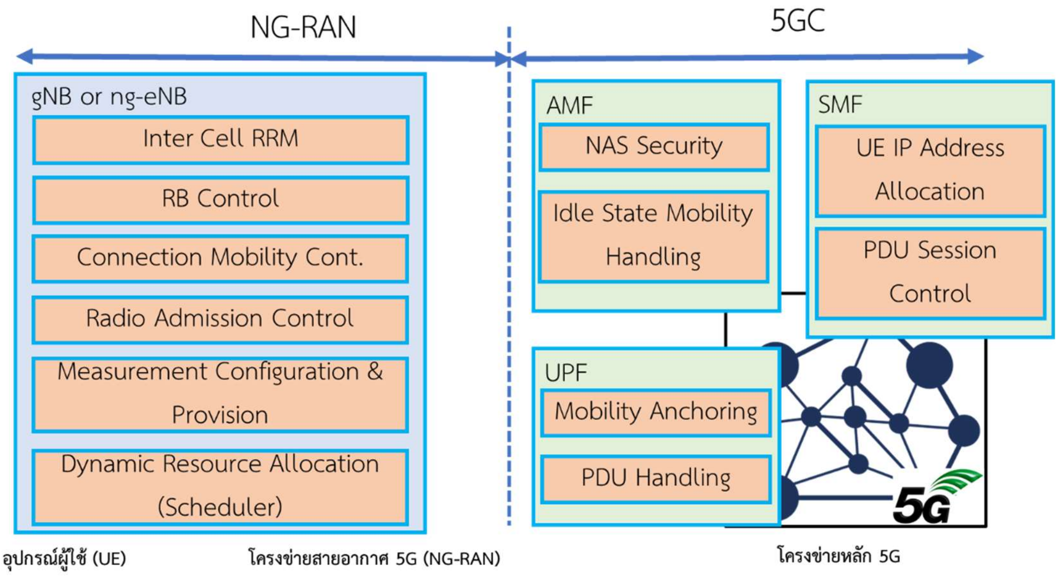
ส่วนนี้จะจัดการกับความบกพร่องทางกายภาพของสัญญาณ อย่างเช่น การจางหายของสัญญาณ (Fading) การแทรกสอดสัญญาณ (Interference) การลดทอนของกำลังของสัญญาณ (Attenuation) การส่งต่อ (Hand-over) ระหว่างสายอากาศ gNB และการมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) ส่วนฟังก์ชัน 5GC จะจัดการในส่วนที่เหลือของเซสชัน PDU และดูแลกระบวนการอื่น ๆ ทั้งหมดที่ไม่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายสายอากาศ อย่างเช่น การจัดการเมื่อผู้ใช้งานมีการเคลื่อนที่ การรักษาความปลอดภัย และการจัดสรรที่อยู่ IP เป็นต้น



รูปที่ 3.1 การสร้างเซสชัน PDU สำหรับการส่งข้อมูลในโครงข่าย 5G

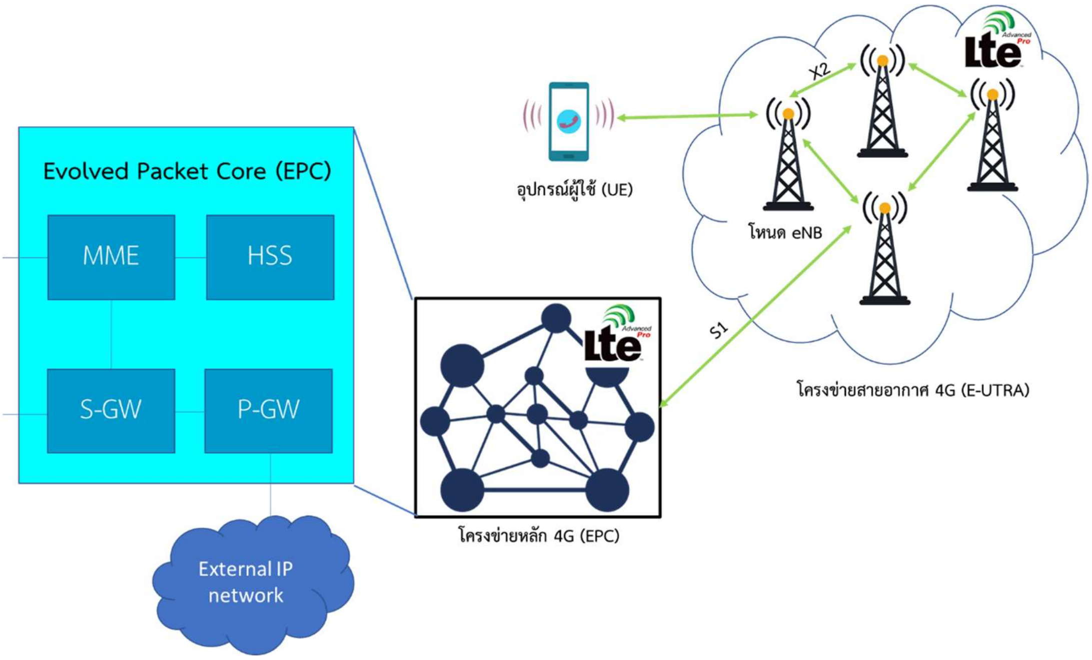


รูปที่ 3.2 การไหลของข้อมูลแบบ QoS



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันต่าง ๆ ของเอนทิตีในโครงข่าย 5G

3.2.1 ทบทวนสถาปัตยกรรมโครงข่าย 4G



รูปที่ 3.4 สถาปัตยกรรมโครงข่ายของเทคโนโลยี 4G

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของโครงข่ายสายอากาศ และโครงข่ายหลักของเทคโนโลยี 5G ในหัวข้อนี้จะมีการทบทวนโครงข่ายหลักของเทคโนโลยี 4G เพื่อให้เข้าใจการทำงานของแต่ละโหนดและเพื่อให้เห็นความแตกต่างของโครงข่ายหลักของเทคโนโลยี 4G และ 5G มากยิ่งขึ้น

ในเทคโนโลยี 4G นั้นประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ อุปกรณ์ผู้ใช้ ส่วนโครงข่ายสายอากาศ และส่วนโครงข่ายหลักในส่วนที่เป็นโครงข่ายหลักของ 4G จะเป็นฮาร์ดแวร์ และซอต์ฟแวร์ที่ใช้กับฮาร์ดแวร์นั้นโดยเฉพาะ ทำให้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนโครงข่ายหลักตามความต้องการได้ ส่วนของโครงข่ายหลัก 4G คืออุปกรณ์ที่อยู่ในส่วนของ EPC (Evolved Packet Core) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

LTE เป็นชื่อโครงข่ายการสื่อสารของเทคโนโลยี 4G ที่กำหนดมาตรฐานต่าง ๆ โดย Third Generation Partnership Project (3GPP) มีการพัฒนาต่อเนื่องจากเทคโนโลยี 3G ที่มีชื่อว่า Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) สถาปัตยกรรมโครงข่าย LTE มีชื่อว่า Evolved packet system (EPS)

EPS เป็นการส่งข้อมูลเป็นแบบแพ็กเกตทั้งหมดไม่มีส่วนที่เป็นสวิตชิงแบบวงจร โครงสร้างของ LTE ประกอบด้วยโครงข่ายหลักที่เรียกว่า Evolved Packet Core (EPC) และส่วนของโครงข่ายสายอากาศที่เรียกว่า Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) ส่วนของ E-UTRAN กับ EPC จะเรียกรวมกันว่า EPS

EPC ประกอบด้วยอุปกรณ์ MME S-GW และ P-GW ซึ่งมีหน้าที่หลักดังนี้

1) Mobility management entity (MME) เป็นอุปกรณ์สำหรับการจัดการส่วนการควบคุม (Control Plane) สำหรับการเข้าใช้งาน และการจัดการเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของผู้ใช้บริการ ฟังก์ชันหลักของ MME คือ การจัดการเซสชัน (Session Management) การจัดการการเคลื่อนที่ (Mobility) การเลือกเกตเวย์ (Gateway Selection) การติดตาม (Tracking) และทำกระบวนการเพจจิง (Paging)

2) Serving Gateway (S-GW) เป็นเกตเวย์เชื่อมกับโครงข่ายสายอากาศ E-UTRAN โดยจะสร้างตัวขนส่งข้อมูล (Bearer) สำหรับผู้ใช้บริการแต่ละราย ข้อมูลการใช้งานต่าง ๆ ของผู้ใช้บริการจะถูกขนส่งผ่าน S-GW แล้วส่งต่อไปที่ P-GW และส่งไปยังปลายทาง ตัวอย่างเช่น ไลน์ (Line) เฟซบุ๊ก (Facebook) หรือเว็บไซต์ต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนี้ S-GW ยังทำหน้าที่จัดการเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ในส่วนข้อมูลผู้ใช้ (User Plane) โดยทำหน้าที่เป็นจุดยึด (Anchor Point) ในกรณีที่ ผู้ใช้มีการเคลื่อนที่ภายในพื้นที่บริการเดียวกัน (Inter-eNodeB Handover) หรือผู้ใช้มีการเคลื่อนที่ระหว่างโครงข่าย 4G

LTE กับ 2G/3G (Inter-3GPP Mobility) รวมถึงทำหน้าที่สร้างไฟล์ข้อมูลรายละเอียดการใช้งาน (Call Detail Record: CDR)

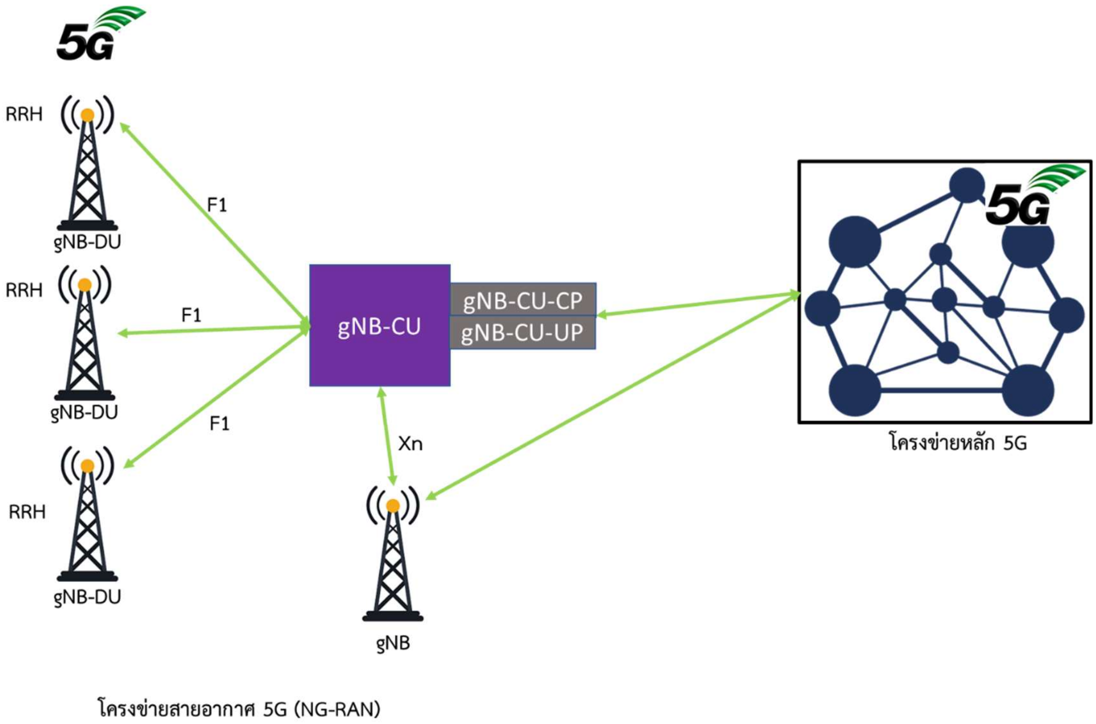
3) Packet Data Network Gateway (P-GW) เป็นเกตเวย์เชื่อมกับโครงข่าย IP ภายนอกทั่วไป เช่น โครงข่ายภายในองค์กร โครงข่ายอินเทอร์เน็ต เป็นต้น โดยข้อมูลการใช้งานของผู้ใช้บริการแต่ละรายจะถูกส่งถ่ายผ่านตัวขนส่งข้อมูลจาก S-GW มาที่ P-GW และออกไปยังปลายทาง นอกจากนี้ P-GW ยังมีฟังก์ชันอื่น ๆ ดังนี้

- จัดสรร IP Address แจกจ่ายให้กับอุปกรณ์ผู้ใช้ (User Equipment)
- ตรวจสอบและคัดกรองแพ็กเก็ตของผู้ใช้แต่ละรายเพื่อจัดสรร หรือควบคุมแบนด์วิดธ์ที่ใช้งาน และสำหรับการคิดค่าบริการ
- สร้างไฟล์ข้อมูลรายละเอียดการใช้งาน (Call Detail Record: CDR)

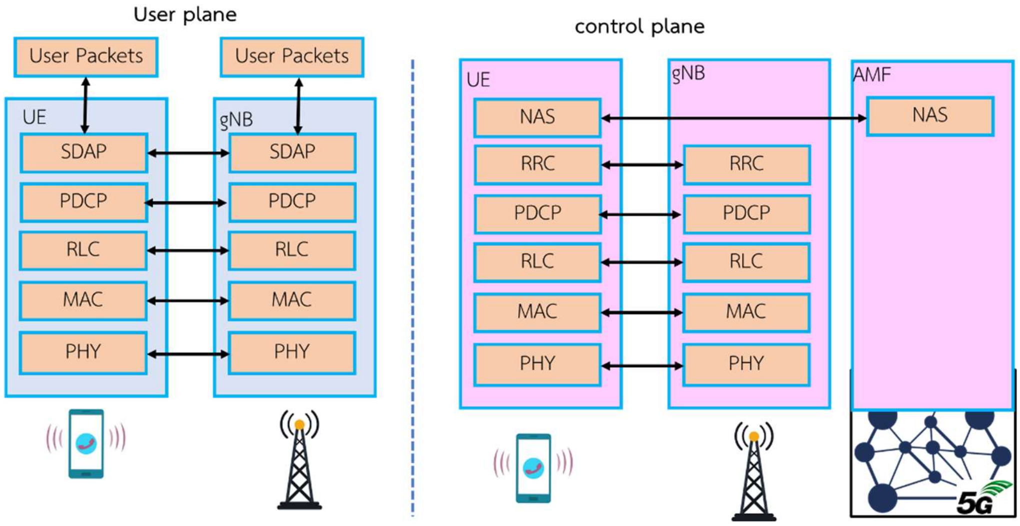
นอกจากนี้ในโครงข่ายหลักยังมีอุปกรณ์ประกอบที่จำเป็นเพื่อทำหน้าที่ต่าง ๆ เพื่อให้ให้ทำงานได้อย่างสมบูรณ์ นั่นคือ Home Subscriber Server (HSS) ซึ่งเป็นเซิร์ฟเวอร์ฐานข้อมูลสำหรับการจัดเก็บข้อมูลการลงทะเบียนผู้ใช้บริการ และมีฟังก์ชันที่รองรับการจัดการการเคลื่อนที่ การพิสูจน์ตัวตน (Authentication) และการรับรองการเข้าใช้งานของผู้ใช้บริการ HSS พัฒนาต่อมาจาก HLR (Home Location Register) และ AuC (Authentication Centre)

3.2.2 โครงข่ายสายอากาศ

โครงข่ายสายอากาศ NG-RAN ประกอบด้วยเซตของสถานีฐาน 5G ที่เรียกว่า gNB ซึ่งเชื่อมต่อกับ 5GC ผ่านชุดอินเทอร์เฟซแบบลอจิคัลดังแสดงในรูปที่ 3.5 สายอากาศ gNB สามารถเชื่อมต่อผ่านอินเทอร์เฟซ Xn เพื่อทำให้การสื่อสารขณะที่มีการเคลื่อนที่ดีขึ้น (เช่น การส่งต่อ (handover)) และฟังก์ชันการจัดการ (เช่น การแทรกสอดระหว่างสถานีฐานที่มีสัญญาณแรงเท่ากัน) เช่นเดียวกับในสถาปัตยกรรม LTE



รูปที่ 3.5 โครงข่ายสายอากาศ



รูปที่ 3.6 แบบจำลองโครงข่าย 5G

ฟังก์ชันการทำงานของสายอากาศ gNB บางครั้งมีการกระจายตัวอยู่ โดยมีหน่วยส่วนกลาง (gNB-CU) ทำหน้าที่ควบคุมสายอากาศ gNB ที่กระจายอยู่ผ่านอินเทอร์เฟซ F1 หน่วยที่กระจายจะเชื่อมต่อกับสายอากาศคลื่นวิทยุระยะไกล (Remote Radio Head: RRH) ที่เป็นตัวรับส่งสัญญาณวิทยุ หน่วยส่วนกลางจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งสำหรับฟังก์ชันของสัญญาณควบคุม (gNB-CU-CP) และส่วนหนึ่งสำหรับฟังก์ชันข้อมูลผู้ใช้ (gNB-CU-UP) ที่อิงตามวิธีการแบ่งข้อมูลเป็นส่วนข้อมูลผู้ใช้ (User Plane) และส่วนควบคุม (Control Plane)

รูปที่ 3.6 แสดงชั้นของโปรโทคอลที่ผ่านอินเทอร์เฟซคลื่นวิทยุทั้งในส่วนข้อมูลผู้ใช้ และส่วนการควบคุม ในส่วนข้อมูลผู้ใช้ อุปกรณ์ผู้ใช้ (UE) และสถานีฐาน (gNB) มีการจัดเรียงโปรโทคอล 5 ชั้นได้แก่

- ชั้น Service Data Adaptation Protocol (SDAP)
- ชั้น Packet Data Convergence Protocol (PDCP)
- ชั้น Radio Link Control (RLC)
- ชั้น Media Access Control (MAC)
- ชั้น Physical (PHY)

ในส่วนการควบคุม อุปกรณ์ผู้ใช้ (UE) และสถานีฐาน (gNB) มีการจัดเรียงโปรโทคอล 5 ชั้นได้แก่

- ชั้น Radio Resource Control (RRC)
- ชั้น Packet Data Convergence Protocol (PDCP)
- ชั้น Radio Link Control (RLC)
- ชั้น Media Access Control (MAC)
- ชั้น Physical (PHY)

นอกจากนี้ ในส่วนการควบคุมยังมีโปรโทคอลชั้น Non-Access-Stratum (NAS) ที่อุปกรณ์ผู้ใช้จะใช้สื่อสารกับ AMF (Mobility management function) ในโครงข่ายหลัก 5G

จากรูปที่ 3.6 การจัดเรียงชั้นโปรโทคอลของ 5GC จะมีความคล้ายคลึงกับใน 4G LTE โดยใน 5GC มีการเพิ่มเติมโปรโทคอล SDAP ในส่วนข้อมูลผู้ใช้ ฟังก์ชันหลักของแต่ละชั้นมีความแตกต่างกันดังนี้

1) ชั้นกายภาพ (PHY) ประกอบด้วยฟังก์ชันการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและแอนะล็อกที่อุปกรณ์ผู้ใช้ และสถานีฐาน (gNB) ใช้ในการส่งและรับข้อมูล ซึ่งจะใช้การมอดูเลชันแบบ OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) ที่มีระยะห่างระหว่างคลื่นพาห์แบบปรับเปลี่ยนได้ในช่วง 15 30 60 120 และ 240 กิโลเฮิรตซ์ และรูปแบบการมอดูเลชัน/การเข้ารหัสแบบปรับเปลี่ยนได้ เช่น เปลี่ยนจากการมอดูเลชันแบบ BPSK เป็นการมอดูเลชันแบบ 256 QAM [2]

2) โปรโทคอล MAC (Medium Access Control) เป็นสื่อกลางให้การควบคุมชั้นฟิสิคัลในระดับล่าง โดยการกำหนดช่วงเวลาในการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ผู้ใช้และสถานีฐาน (gNB)

3) โปรโทคอล RLC (Radio Link Control) จะช่วยทำให้มั่นใจว่าการส่งสตรีมข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งข้อมูลที่มาถึงต้องครบถ้วนโดยใช้รูปแบบการส่งข้อมูลที่มีการร้องขอการส่งซ้ำโดยอัตโนมัติแบบไฮบริด (Hybrid Automatic Repeat Request: HARQ) นอกจากนี้ยังจัดการการแบ่งข้อมูลเป็นบล็อกย่อย

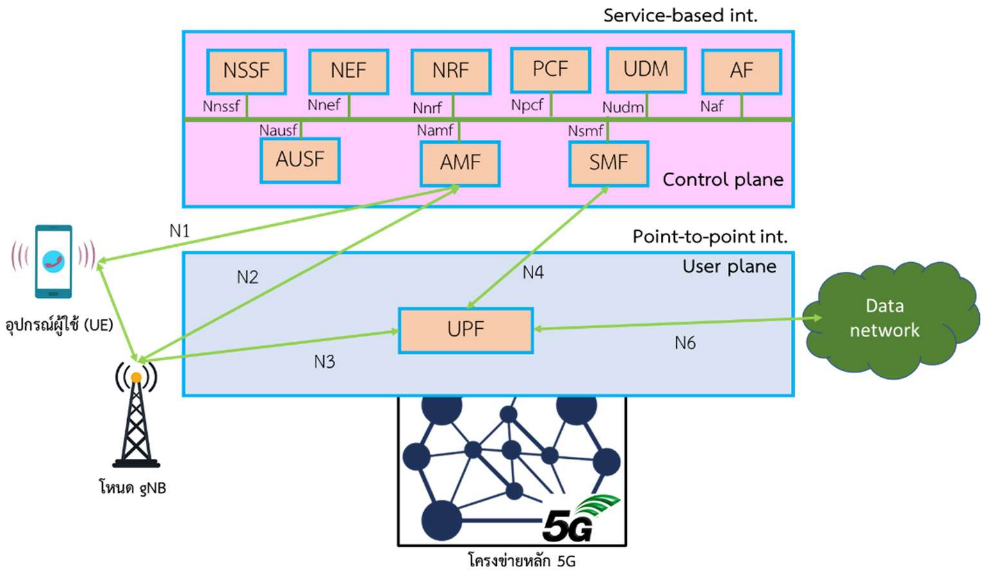
4) โปรโทคอล PDCP (Packet Data Convergence) ดำเนินการขนส่งข้อมูลในระดับสูงซึ่งเกี่ยวข้องกับการบีบอัดส่วนหัว (Header) และความปลอดภัย

5) โปรโทคอล SDAP (Service Data Adaptation) จัดการเกี่ยวกับการโต้ตอบระหว่างแพ็กเกตของการไหล QoS และตัวขนส่งข้อมูลด้วยคลื่นวิทยุ (Radio Bearer) โดยการทำเครื่องหมายแพ็คเกตข้อมูลผู้ใช้อย่างถูกต้อง

6) โปรโทคอล RRC (Radio Resource Control) เป็นโปรโทคอลการส่งสัญญาณที่ใช้ในขั้นตอน "Access Stratum" ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ผู้ใช้และสถานีฐาน (gNB) นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันการสร้างการเชื่อมต่อและนำออกมาให้ใช้งาน การบรอดแคสต์ข้อมูลระบบ การสร้างตัวขนส่งด้วยคลื่นวิทยุ การคอนฟิกระบบ และนำระบบที่คอนฟิกแล้วมาใช้งาน วิธีการในการเชื่อมต่อในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ การเพจจิง และการควบคุมกำลังงานที่ใช้

7) โปรโทคอล NAS (Non-Access Stratum) เป็นโปรโทคอลการส่งสัญญาณที่ใช้ระหว่างอุปกรณ์ผู้ใช้ และโครงข่ายหลัก 5GC สำหรับการจัดการเซสชัน PDU ความปลอดภัย การจัดการกรณีมีการเคลื่อนที่ เป็นต้น เอนทิตี 5GC ที่ดูแลการควบคุมอุปกรณ์ผู้ใช้เป็นฟังก์ชันการจัดการการเข้าถึง และการเคลื่อนที่ (Mobility Management Function: AMF) ซึ่งคล้ายกับ MME ใน LTE

3.2.3 โครงข่ายหลัก 5G



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของโครงข่ายหลัก 5G

สถาปัตยกรรมโครงข่ายสายอากาศ NG-RAN และลำดับชั้นโปรโทคอลคล้ายกับ LTE ในระดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามสถาปัตยกรรมของโครงข่ายหลัก 5G นั้นมีความโดดเด่นในหลาย ๆ ด้าน

การแยกฟังก์ชันที่ดำเนินการโดยโหนดโครงข่ายของเทคโนโลยีการสื่อสารในการสื่อสาร 4G นำไปสู่สถาปัตยกรรมโครงข่าย 5G ที่กำหนดไว้อย่างสมบูรณ์ในแง่ของฟังก์ชันโครงข่าย (Network Function: NF) ที่จะถูกเลือกใช้ให้เหมาะสมตามการบริการ ในรูป 3.7 ชื่อบล็อกที่ลงท้ายด้วยตัวอักษร "F” หมายถึงฟังก์ชัน

ในสถาปัตยกรรมโครงข่าย 5G มีการแยกส่วนข้อมูลผู้ใช้และส่วนควบคุม เช่นเดียวกับในโครงข่ายสายอากาศ NG-RAN ในส่วนของข้อมูลผู้ใช้จะมีฟังก์ชันส่วนผู้ใช้ (User Plane Function: UP) หนึ่งฟังก์ชันหรือมากกว่าหนึ่งฟังก์ชัน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เพื่อดำเนินการส่งต่อแพ็กเกตระหว่างอุโมงค์ขนส่งข้อมูล NG-U ที่แตกต่างกันซึ่งสร้างเซสชัน PDU ส่วนฟังก์ชันโครงข่ายอื่น ๆ ที่เหลือจะเป็นของส่วนควบคุมทั้งหมด

การเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดอีกประการจากเทคโนโลยีการสื่อสาร 4G คือการสร้างแบบจำลองอินเทอร์เฟซซึ่งเปลี่ยนจาก "แบบจุดต่อจุด" ไปเป็น "แบบจุดบริการ" ซึ่งส่งผลให้โครงข่ายมีความยืดหยุ่นในการใช้งานขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการกล่าวกันว่าโครงข่ายหลัก 5G มีสถาปัตยกรรมที่อิงตามการบริการ

ความแตกต่างของ “แบบจุดต่อจุด" และ "แบบจุดบริการ" คืออินเทอร์เฟซแบบจุดต่อจุดจะมีการเชื่อมต่อกับเอนทิตีที่กำหนดไว้ได้เพียง 1 เอนทิตีเท่านั้น (เช่น ใน LTE อินเทอร์เฟซ S6a เชื่อมต่อเอนทิตี MME และ HSS) แต่อินเทอร์เฟซแบบจุดบริการจะสามารถเชื่อมต่อกับเอนทิตีได้ทั้งหมด

การสร้างแบบจำลองของโครงข่ายหลักที่อิงตามการบริการช่วยเพิ่มความคล่องตัวในการพัฒนาหรือปรับโครงข่ายให้เข้ากับความต้องการบางอย่างของผู้ใช้งานที่อาจจะคาดไม่ถึง ในแบบจำลองอินเทอร์เฟซแบบจุดต่อจุด หากผู้ออกแบบระบบต้องการเพิ่มเอนทิตีโครงข่ายใหม่และเชื่อมต่อกับชุดของเอนทิตีโครงข่ายเดิมจำนวน N เอนทิตี จำเป็นต้องสร้างอินเทอร์เฟซใหม่ที่มีจำนวน N มาตรฐานและต้องสร้างโปรโทคอลที่เกี่ยวข้อง ทำให้เกิดโครงข่ายใหม่ที่ใหญ่ขึ้น ตัวอย่างเช่น สมมติว่ามีฟังก์ชันโครงข่ายแบบลูกโซ่ของฟังก์ชันโครงข่าย a และฟังก์ชันโครงข่าย b นั่นคือ NFa-NFb ถ้าผู้ออกแบบต้องการที่จะเพิ่มฟังก์ชันโครงข่าย c เข้ามาระหว่าง NFa และ NFb จะได้เป็น NFa-NFc-NFb ผู้ออกแบบจะต้องสร้างอินเทอร์เฟซใหม่จำนวน 2 มาตรฐาน ได้แก่ NFa-NFc และ NFc-NFb ด้วยรูปแบบจุดต่อจุด ถ้าเป็นอินเทอร์เฟซแบบจุดบริการจะมีเพียงแค่มาตรฐาน API (Application Programming Interface) ของ NFc เท่านั้น ในกรณีที่ NFc เป็นเอนทิตีใหม่ โดยใช้แบบจำลองที่อิงตามการบริการ ถ้า NFc มีมาตรฐานแล้ว ผู้ออกแบบเพียงแค่กำหนดลำดับของฟังก์ชันโครงข่ายใหม่

รูปที่ 3.7 ส่วนบนแสดงชุดของฟังก์ชันโครงข่ายในส่วนการควบคุม 5G ที่เป็นอินเทอร์เฟซแบบจุดบริการ ด้วยเหตุนี้ เอนทิตีเหล่านั้นจึงถูกเชื่อมต่อโครงข่ายแบบบัสแทนที่จะเชื่อมโยงแบบจุดต่อจุด ชื่ออินเทอร์เฟซจะเป็น "N" แล้วตามด้วยชื่อฟังก์ชันโครงข่าย การเชื่อมต่อโครงข่ายแบบนี้ ฟังก์ชันโครงข่ายจะสอบถามฟังก์ชันที่เก็บข้อมูลโครงข่าย (Network Repository Function: NRF) เพื่อค้นหาและเปิดใช้งานการสื่อสารกับฟังก์ชันโครงข่ายอื่น ๆ การแทรกฟังก์ชันโครงข่ายอันใหม่เข้ามาในโครงข่ายจะเป็นเพียงการแทรกบันทึกลงในฐานข้อมูล NRF เท่านั้น

รูปที่ 3.7 ส่วนล่างจะมีชุดของฟังก์ชันโครงข่ายที่อยู่ในส่วนข้อมูลผู้ใช้นั่ นคือ UPF ในส่วนนี้จะยังเป็นอินเทอร์เฟซแบบจุดต่อจุดอยู่ โดยชื่ออินเทอร์เฟซจะเป็น "N" แล้วตามด้วยตัวเลข เอนทิตีต่าง ๆ ในโครงข่ายหลัก 5G มีหน้าที่ต่างโดยสรุปดังนี้

1) ฟังก์ชันส่วนข้อมูลผู้ใช้ (User Plane Function: UPF) ทำหน้าที่จัดการการส่งต่อข้อมูลในอุโมงค์ขนส่งข้อมูล NG-U และการบริการเกี่ยวกับเส้นทางขนส่งข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น เป็นจุดยึด (Anchor Point) สำหรับการส่งต่อ QoS และการบังคับใช้นโยบายของปริมาณข้อมูล (Traffic) สามารถมี UPF หลายตัวที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผู้ใช้ UPF เหล่านี้สามารถอยู่ในสไลด์โครงข่าย (network slice) เดียวหรือต่างสไลด์โครงข่ายกัน UPF ประกอบด้วยส่วนของฟังก์ชัน S-GW และ P-GW ของเทคโนโลยี 4G

2) ฟังก์ชันการจัดการเซสชัน (Session Management Function: SMF) เป็นส่วนควบคุมของเซสชัน PDU นั่นคือกำหนดค่าอุโมงค์ขนส่งข้อมูล NG จัดสรรที่อยู่ IP ด้วย DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) และกำหนดค่าการบังคับทิศทางในการส่งข้อมูล (เช่น ไปยังผู้ให้บริการโครงข่าย หรือ edge cloud) สามารถมี SMF หลายอันที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผู้ใช้ แม้ว่าจะมีเอนทิตี SMF เพียง 1 ตัวต่อ 1 สไลด์โครงข่ายเท่านั้น เอนทิตี SMF ประกอบด้วยส่วนของฟังก์ชัน MME และ PGW ของเหมือนกันกับในเทคโนโลยี 4G

3) ฟังก์ชันการจัดการการเข้าถึงและการเคลื่อนที่ (Access and Mobility Management Function: AMF) ทำหน้าที่ในการจัดการสัญญาณ 5GC ทั้งหมดที่ออกจากอุปกรณ์ผู้ใช้และสัญญาณที่เข้ามายังอุปกรณ์ผู้ใช้ ซึ่งแตกต่างจากเอนทิตี SMF ตรงที่มีอยู่ในหลายสไลด์โครงข่าย โดยทำหน้าที่รองรับการเข้าถึงของผู้ใช้ในโครงข่ายและจัดการการเคลื่อที่ด้วยการโต้ตอบกับอุปกรณ์ผู้ใช้ และโต้ตอบกับฟังก์ชันโครงข่ายอื่น ๆ เช่น SMF AUSF และอื่น ๆ โดย AMF ประกอบด้วยส่วนของฟังก์ชัน MME ของเทคโนโลยี 4G

4) ฟังก์ชันเซิร์ฟเวอร์การพิสูจน์ตัวตน (Authentication Server Function: AUSF) โดยจะทำหน้าที่รองรับการพิสูจน์ตัวตน (Authentication) สำหรับการเข้าถึง 3GPP และ non-3GPP (เช่น WiFi) เอนทิตี AUSF มีส่วนของฟังก์ชัน HSS ของเทคโนโลยี 4G

5) ฟังก์ชันการจัดการข้อมูลแบบครบวงจร (Unified Data Management: UDM) ทำหน้าที่เป็นพื้นที่เก็บข้อมูลสำหรับข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ผู้ใช้ เช่น ข้อมูลการพิสูจน์ตัวตน การระบุตัวตน รายละเอียดของ AMF และการมอบหมาย SMF ในเซสชันปัจจุบัน แนวคิดพื้นฐานของ UDM คือการสร้างฐานข้อมูลส่วนกลางสำหรับเก็บข้อมูลการกำหนดค่าของอุปกรณ์ผู้ใช้ นั่นคือสามารถออกแบบ

ฟังก์ชันโครงข่ายเป็นบริการแบบไร้สถานะ (เช่น ว่าง หรือไม่พร้อมใช้งาน) เพื่อปรับปรุงความคล่องตัวทางสถาปัตยกรรม UDM ประกอบด้วยส่วนของฟังก์ชัน HSS ของเทคโนโลยี 4G

6) ฟังก์ชันการควบคุมนโยบาย (Policy Charging Function: PCF) ทำหน้าที่เป็นนิติบุคคลแบบครบวงจรที่ให้กฎนโยบาย (QoS การกรอง การเก็บค่าบริการ และอื่น ๆ) กับฟังก์ชันส่วนควบคุมอื่น ๆ เช่น SMF PCF โดยเอนทิตี PCF ประกอบด้วยส่วนของฟังก์ชัน PCRF ของเทคโนโลยี 4G

7) ฟังก์ชันการเลือกสไลด์โครงข่าย (Network Slice Selection Function: NSSF) จะทำหน้าที่เลือกชุดอินสแตนซ์สไลด์โครงข่ายที่ให้บริการอุปกรณ์ผู้ใช้พร้อมกับเอนทิตี AMF ที่ดีที่สุดสำหรับวัตถุประสงค์ในการใช้งานนั้น ๆ เอนทิตีนี้ไม่มีในเทคโนโลยี 4G มาก่อน

8) ฟังก์ชันการเปิดรับโครงข่าย (Network Exposure Function: NEF) ทำหน้าที่แสดงความสามารถของโครงข่ายและกิจกรรมโครงข่าย/อุปกรณ์ผู้ใช้งานให้กับบุคคลที่สาม ฟังก์ชันแอปพลิเคชันการคำนวณแบบขอบ (Edge Computing) และวัตถุประสงค์ในการใช้งานอื่น ๆ ยังไม่มีในเทคโนโลยี 4G

9) ฟังก์ชันที่เก็บโครงข่าย (Network Repository Function: NRF) ทำหน้าที่ค้นหาอินสแตนซ์ของฟังก์ชันโครงข่าย เมื่อได้รับการร้องขอการค้นหาฟังก์ชันโครงข่ายจากอินสแตนซ์ ฟังก์ชันโครงข่ายจะให้อินสแตนซ์ที่ค้นพบ โดยเอนทิตีนี้ไม่มีในเทคโนโลยี 4G

10) ฟังก์ชันประยุกต์ (Application Function: AF) มีลักษณะคล้ายกับแอปพลิเคชันเซิร์ฟเวอร์ที่สามารถโต้ตอบกับฟังก์ชันโครงข่ายของส่วนการควบคุมอื่น ๆ เอนทิตี AF มีอยู่ในบริการแอปพลิเคชันที่แตกต่างกัน และโดยมีผู้ให้บริการโครงข่ายหรือบุคคลที่สามที่เชื่อถือได้เป็นเจ้าของ ตัวอย่างเช่น AF ของผู้ให้บริการแอปพลิเคชันแบบ over-the-top สามารถมีอิทธิพลในการกำหนดเส้นทางการส่งข้อมูล และควบคุมการรับส่งข้อมูลไปยังเซิร์ฟเวอร์ภายนอกที่ใกล้ที่สุด (Edge Server)

3.3 สถาปัตยกรรมโครงข่ายเดี่ยว และสถาปัตยกรรมโครงข่ายร่วม

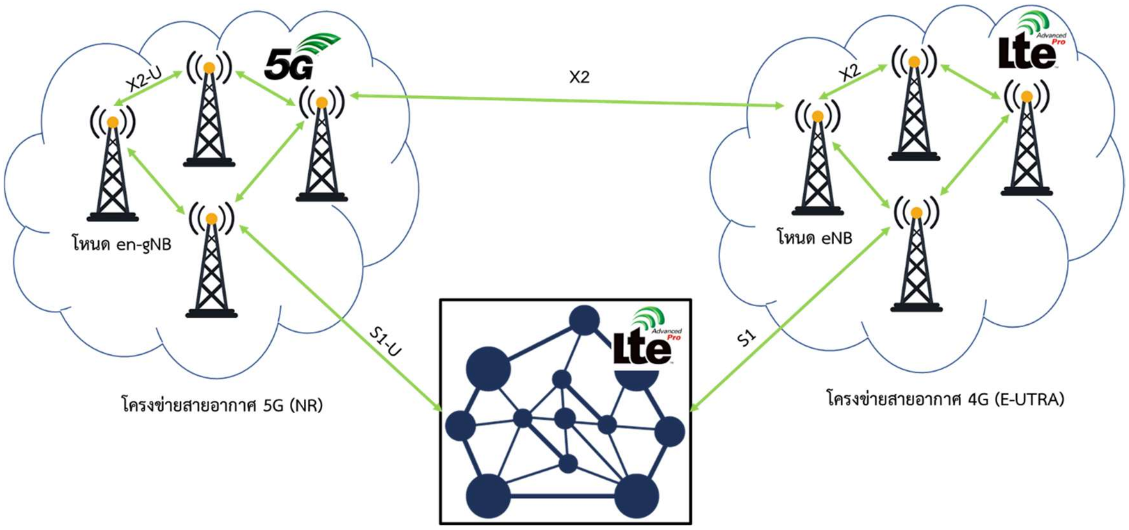
เทคโนโลยีการสื่อสาร 5G ได้ถูกออกแบบให้รองรับบริการหลากหลายรูปแบบที่มีปริมาณการใช้งานข้อมูลแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น บริการที่ต้องการความเร็วสูง บริการที่ต้องการความหน่วงเวลาต่ำ หรือบริการที่ต้องมีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์จำนวนมาก

คุณสมบัติหลักของ 5G คือการใช้คลื่นวิทยุความถี่ใหม่ ซึ่งมีความยืดหยุ่นเพื่อให้รองรับบริการที่หลากหลาย ส่วนคุณสมบัติอื่น ๆ คือโครงข่ายสายอากาศ 5G คือนอกจากจะเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก (Core Network) ของ 5G แล้วยังต้องสามารถเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักของ 4G ได้อีกด้วยดังรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในนามของสถาปัตยกรรมร่วม (Non-Standalone: NSA) ในขณะเดียวกันโครงข่ายสายอากาศ 5G ที่เชื่อมต่อเพียงแค่โครงข่ายหลัก 5G จะถูกเรียกว่าสถาปัตยกรรมเดี่ยว (Standalone: SA) ดังรูปที่ 3.9

ในฝั่งของโครงข่ายหลักนั้น ระบบ 5G ยังมีคุณสมบัติใหม่ เช่น การแบ่งโครงข่าย (Network Slicing) การคำนวณที่ขอบโครงข่ายแบบเคลื่อนที่ (Mobile Edge Computing) หรือการแสดงความสามารถของโครงข่าย (Network Capability Exposure) แนวความคิดทั้งหมดนี้จะอธิบายในรายละเอียดต่อไป

- สถาปัตยกรรมร่วม (NSA) เกิดขึ้นในระยะแรกของการเปลี่ยนผ่านจากเทคโนโลยี 4G ไปเป็น 5G โดยการนำเอาโครงข่ายสายอากาศ (Radio Access Network: RAN) และคลื่นวิทยุความถี่ใหม่ (NR) ของ 5G ไปใช้ร่วมกับโครงข่ายสายอากาศและโครงข่ายหลักของเทคโนโลยี 4G ดังนั้นจึงสามารถสร้างเทคโนโลยีคลื่นวิทยุความถี่ใหม่โดยที่ยังไม่นำโครงข่ายหลักของ 5G เข้ามาแทนที่ ทำให้รองรับได้เพียงแค่บริการของ 4G เท่านั้น แต่จะมีข้อดีเพิ่มขึ้นมาคือสามารถรองรับปริมาณการเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้เพิ่มขึ้นและมีความหน่วงเวลาต่ำลง ในบางครั้ง สถาปัตยกรรมร่วมรู้จักกันในนาม การเชื่อมต่อแบบควบคู่ E-UTRA และ NR (E-UTRA-NR Dual Connectivity: EN-DC) หรือสถาปัตยกรรมทางเลือกที่ 3
- สถาปัตยกรรมเดี่ยว (SA) เป็นการใช้งานโครงข่ายสายอากาศ และคลื่นวิทยุความถี่ใหม่ของเทคโนโลยี 5G มาใช้งานกับโครงข่ายหลักของ 5G เท่านั้น ทำให้สามารถรองรับบริการของ 5G ในระยะแรกได้

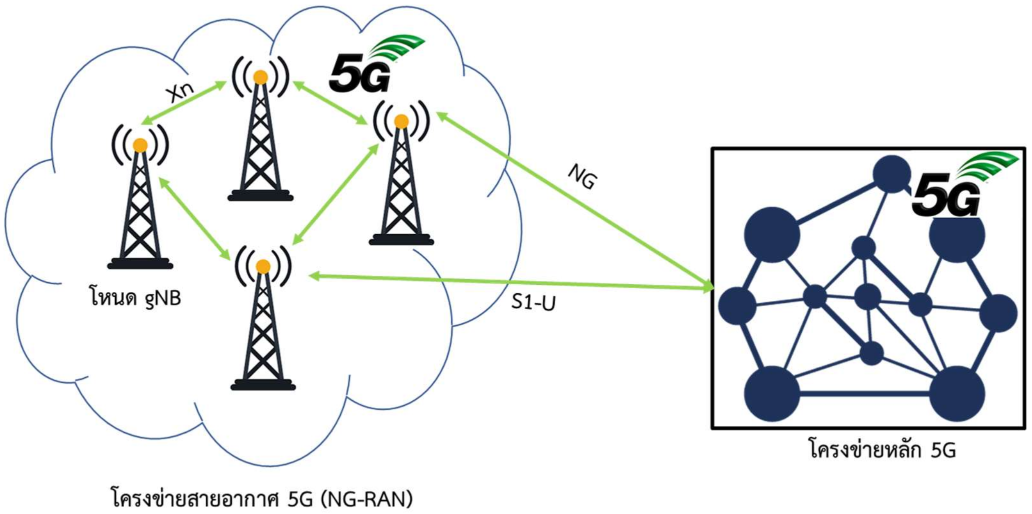
สถาปัตยกรรมร่วม (NSA) แสดงในรูปที่ 3.8 สามารถพิจารณาเป็นขั้นตอนชั่วคราวก่อนจะเข้าสู่การใช้งาน 5G เต็มรูปแบบ เมื่อโครงข่ายสายอากาศของ 5G ได้ถูกเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักของ 4G ในสถาปัตยกรรมร่วม (NSA) สถานีฐานที่ใช้งานคลื่นวิทยุความถี่ใหม่ (NR) หรือเรียกว่าโหนด en-gNB เชื่อมต่อกับสถานีฐานของ 4G หรือเรียกว่าโหนด eNB โดยใช้อินเทอร์เฟซ X2 ซึ่งอินเทอร์เฟซ X2 แต่เดิมใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างโหนด eNB ใน 4G



รูปที่ 3.8 สถาปัตยกรรมร่วม (NSA)

สถาปัตยกรรมร่วม (NSA) ให้การเชื่อมต่อแบบคู่ (Dual Connectivity) ผ่านทางโครงข่ายสายอากาศ 4G และ 5G หรือเรียกว่า EN-DC สำหรับการเชื่อมต่อคู่ของโครงข่ายสายอากาศ 4G (E-UTRAN) และโครงข่ายสายอากาศ 5G (NR) ในโครงข่ายสายอากาศ 4G (E-UTRAN) นั้น โหนด eNB ของเทคโนโลยี 4G เป็นโหนดที่ใช้งานหลักและโหนด en-gNB ของเทคโนโลยี 5G เป็นโหนดที่ใช้งานรองลงมา

สถาปัตยกรรมเดี่ยว (SA) แสดงในรูปที่ 3.9 ถูกพิจารณาเป็นการใช้งาน 5G แบบเต็มรูปแบบซึ่งจะไม่มีส่วนของ 4G ในระบบ สถานีฐานของ 5G หรือโหนด gNB เชื่อมต่อกันด้วยอินเทอร์เฟซ Xn และโครงข่ายสายอากาศ 5G หรือที่เรียกว่า NG-RAN เชื่อมต่อกับโครงข่ายหลัก 5G ด้วยอินเทอร์เฟซ NG



รูปที่ 3.9 สถาปัตยกรรมเดี่ยว (SA)

ในสถาปัตยกรรมเดี่ยว 5G NR หรือคลื่น LTE ที่ถูกพัฒนาใหม่ (Evolved LTE Radio) และโครงข่ายหลัก 5G จะใช้คลื่นความถี่ 5G NR หรือคลื่น LTE ที่ถูกพัฒนาใหม่กับส่วนข้อมูล (Data Plane) และส่วนการควบคุม (Control Plane) ตัวเลือกในการใช้งานสถาปัตยกรรมเดี่ยวเป็นวิธีการง่าย ๆ ที่ผู้ให้บริการโครงข่าย (Operator) ใช้เพื่อจัดการการใช้งาน โดยอาจจะใช้เป็นโครงข่ายที่ไม่เกี่ยวข้องกัน (Independent Network) มาใช้ในการส่งต่อจากเทคโนโลยี 4G ไปยัง 5G เพื่อให้การบริการมีความต่อเนื่องในระหว่างช่วงเปลี่ยนยุค

ความแตกต่างของตัวเลือกของสถาปัตยกรรมเดี่ยว 3 อย่างซึ่งกำลังอยู่ในช่วงที่ 3GPP กำหนด ได้แก่

- ตัวเลือกที่ 1 การใช้โครงข่ายหลัก EPC ของเทคโนโลยี 4G และคลื่น LTE eNB ของเทคโนโลยี 4G
- ตัวเลือกที่ 2 การใช้โครงข่ายหลัก 5GC และคลื่น NR gNB
- ตัวเลือกที่ 5 การใช้โครงข่ายหลัก 5GC และคลื่น LTE ng-eNB

ในสถาปัตยกรรมร่วมเซลล์ไซต์ (Cell Site) จะรวมเอา คลื่น NR และ LTE มาไว้ด้วยกันโดยใช้การเชื่อมต่อแบบเป็นคู่ (Dual-Connectivity) เพื่อใช้ส่งข้อมูลด้วยคลื่นวิทยุที่สถานีฐาน และโครงข่ายหลักที่อาจจะเป็น EPC ของเทคโนโลยี 4G หรือ 5GC ของเทคโนโลยี 5G ขึ้นอยู่กับผู้ให้บริการโครงข่าย

แต่ละราย สถาปัตยกรรมนี้ผู้ให้บริการอาจจะเป็นผู้เลือกเองโดยจะใช้ประโยชน์จากอุปกรณ์ 4G ที่มีอยู่แล้ว การนำคลื่น NR และ LTE มาใช้ร่วมกันกับโครงข่ายหลัก EPC ของเทคโนโลยี 4G ที่มีอยู่เดิม หรือ 5GC อันใหม่เพื่อบริการ 5G

ความแตกต่างของตัวเลือกของสถาปัตยกรรมร่วม 3 อย่างที่ 3GPP กำหนด ได้แก่

- ตัวเลือกที่ 3 การใช้โครงข่ายหลัก EPC ของเทคโนโลยี 4G และคลื่น LTE eNB ของเทคโนโลยี 4G ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นหลัก และคลื่น NR en-gNB ของเทคโนโลยี 5G ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นรอง
- ตัวเลือกที่ 4 การใช้โครงข่ายหลัก 5GC ของเทคโนโลยี 5G และคลื่น NR gNB ของเทคโนโลยี 5G ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นหลัก และ LTE ng-eNB ของเทคโนโลยี 4G ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นรอง
- ตัวเลือกที่ 7 การใช้โครงข่ายหลัก 5GC ของเทคโนโลยี 5G และคลื่น LTE ng-eNB ของเทคโนโลยี 4G ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นหลัก และ NR gNB ของเทคโนโลยี 5G ที่ทำหน้าที่เป็นคลื่นรอง

3.4 การแบ่งโครงข่าย

การแบ่งโครงข่าย (Network Slicing) ในระบบ 5G คือ โครงสร้างของโครงข่าย 5G ที่สามารถหรือรองรับโครงข่ายจำลองแยกตัวออกมาสำหรับการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งจะแบ่งโครงข่ายส่วนต่าง ๆ ออกเป็นสไลด์ โดยแต่ละสไลด์จะแสดงการจำลองโครงข่ายต้นทางถึงปลายทาง (End-to-End Network) จำลองที่ผู้ให้บริการสามารถให้บริการรูปแบบต่าง ๆ บนหลากหลายโครงสร้างขนานกันได้ ดังนั้น สไลด์โครงข่ายจะแสดงถึงโครงข่ายเชิงตรรกะ (Logical Network) ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น [6]

เนื่องจากโครงข่าย 5G ได้เพิ่มการรองรับบริการอย่างหลากหลายทั้งการใช้งานในรูปแบบ massive machine-type communication (mMTC) และ ultra-reliable low latency communication (URLLC) ที่ไม่เคยมีมาก่อนหรือ enhanced mobile broadband (eMBB) ที่มีความสามารถมากขึ้นจากเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ผ่านมา จึงมีความจำเป็นที่ต้องสร้างโครงข่ายที่สามารถรองรับบริการได้ทุกอย่าง ดังนั้นการแบ่งโครงข่ายจึงมีบทบาทสำคัญในโครงข่าย 5G ทำให้สามารถปรับรูปแบบโครงข่ายได้อย่างมากมาย

สไลด์โครงข่ายในมุมมองของโครงข่ายเชิงตรรกะถือว่าเป็นโครงข่ายที่สมบูรณ์ในตัวเอง (Self-Contained) ซึ่งจะประกอบด้วยฟังก์ชันต่าง ๆ รวมถึงอุปกรณ์ผู้ใช้งาน (User Equipment: UE) และใช้

งานการเชื่อมโยงฟังก์ชันโครงข่าย (Network Function Chain) สำหรับการให้บริการแก่อุปกรณ์ต่าง ๆ ในโครงข่ายนั้น การให้บริการการแบ่งโครงข่ายใน 5G ก่อให้เกิดความท้าทายในด้านต่าง ๆ ทั้งในส่วนของการจำลองและการจัดสรรโครงข่ายสายอากาศ (Radio Access Network: RAN) ในสไสด์ต่าง ๆ การแบ่งโครงข่ายจะถูกสร้างขึ้นมาให้รองรับข้อกำหนดที่หลากหลายของโครงข่าย 5G โดยประกอบด้วยเทคนิคหลักดังนี้ [7]

1) ฟังก์ชันโครงข่าย (Network Functions) แสดงถึงฟังก์ชันย่อยพื้นฐานที่จะเป็นฐานในการสร้างโครงข่ายสไลด์ต่าง ๆ ขึ้นมา

2) การจำลองเสมือน (Virtualization) แสดงถึงอุปกรณ์จริงที่ทำงานร่วมกันภาย ซึ่งสามารถรองรับขยายความสามารถของอุปกรณ์ภายใต้ฟังก์ชันโครงข่ายเสมือน (Network Function Virtualization: NFV) ที่สามารถจัดสรรฟังก์ชันโครงข่ายจากอุปกรณ์ที่ทำงานอยู่ได้

3) Orchestration คือกระบวนการประสานอุปกรณ์ต่าง ๆ ในโครงข่ายที่ทำงานร่วมกันในแต่ละสไลด์โครงข่าย ซึ่งในโครงข่าย 5G จะเป็นโครงข่ายที่ถูกกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (SDN) ในการประสานได้อย่างรวดเร็วและยืดหยุ่น

3.4.1 การแบ่งโครงข่ายตามมาตรฐานของ 3GPP

นิยามตาม 3GPP สไลด์ของโคครงข่ายถูกมองเป็นโครงข่ายต้นทางถึงปลายทางเชิงตรรกะที่สามารถสร้างขึ้นได้อย่างรวดเร็วและยืดหยุ่น โดยอาจมีผู้ใช้งานติดต่อสื่อสารผ่านหลายสไลด์ผ่านทางโครงข่ายการเข้าถึงที่เหมือนกัน เช่น เชื่อมต่อหลายโครงข่ายสไลด์ผ่านโครงข่ายสายอากาศเหมือนกัน แต่ละสไลด์จะให้บริการรูปแบบต่าง ๆ ตาม Service-Level Agreement (SLA)

เนื้อหาดังกล่าวจะอ้างอิงจะมาตรฐาน Network Slicing ของ 3GPP TS 23.501 ใน SA2 [8] โดยสไลด์โครงข่ายนิยามไว้ใน PLMN (Public Land Mobile Network) รวมถึงส่วนการควบคุมของโครงข่ายหลัก และส่วนข้อมูลของฟังก์ชันโครงข่าย รวมถึงการเข้าถึงโครงข่าย 5G (access network: AN) ซึ่งนิยามความหมายของฟังก์ชันโครงข่าย สไลด์ และอินสแตนซ์สไลด์โครงข่าย ดังนี้

1) ฟังก์ชันโครงข่าย (Network Functions) คือฟังก์ชันการทำงานที่กำหนดโดย 3GPP ซึ่งถูกกำหนดการให้บริการและอินเทอร์เฟซไว้ โดยฟังก์ชันโครงข่ายสามารถเป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนอุปกรณ์เฉพาะทาง หรือเป็นฟังก์ชันเสมือนที่ถูกจำลองบนคลาวด์

2) สไลด์โครงข่าย (Network Slice) คือโครงข่ายเชิงตรรกะที่มีคุณสมบัติและลักษณะการทำงานโดยเฉพาะ

3) อินสแตนซ์สไลด์โครงข่าย (Network Slice Instance) คือสไลด์โครงข่ายที่ต้องมีทรัพยากร เช่น หน่วยประมวลผล หน่วยความจำ และโครงข่ายอื่น ๆ ในการทำงานซึ่งรวมกันเป็นสไลด์โครงข่าย

3.4.2 การระบุและการคัดเลือกสไลด์โครงข่าย

S-NSSAI (Single network slice selection assistance information) มีหน้าที่ระบุและคัดเลือกสไลด์โครงข่าย โดยที่ S-NSSAI หลายตัวจะรวมกันเป็น NSSAI (network slice selection assistance information)

S-NSSAI ประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำแนกสไลด์โครงข่ายดังนี้

1) ประเภทของสไลด์หรือบริการ (slice/service type: SST) บ่งบอกถึงลักษณะการใช้งานของสไลด์โครงข่าย ได้แก่ eMBB URLLC mMTC หรือ V2X เป็นต้น

2) ตัวคัดแยกสไลด์ (Slice Differentiator: SD) เป็นส่วนเสริมของ SST ที่ช่วยแบ่งประเภทเพิ่มเติมของสไลด์ที่มี SST เดียวกัน

การกำหนดค่า S-NSSAI ของแต่ละสไลด์เป็นการบ่งบอกถึงลักษณะการใช้งานของสไลด์นั้น ๆ โดย S-NSSAI สามารถสร้างสไลด์ที่เป็นไปตามมาตรฐานและไม่เป็นไปตามมาตรฐานได้ผ่านการกำหนดค่าของ SST และ SD

- กรณีตามมาตรฐาน: S-NSSAI ที่มีค่า SST ตามมาตรฐานและไม่มีค่า SD
- กรณีไม่เป็นไปตามมาตรฐาน: S-NSSAI ที่มีค่า SST และ SD ตามมาตรฐาน หรือที่มีค่า SST นอกเหนือจากมาตรฐานแต่ไม่มีค่า SD

นอกจากนั้น S-NSSAI จะถูกใช้งานโดย UE ในโครงข่ายสายอากาศใน PLMN ที่มี S-NSSAI เกี่ยวข้อง ซึ่ง S-NSSAI สามารถมีส่วนเกี่ยวข้องกับ PLMN (เช่น PLMN ID)

สำหรับ NSSAI จะทำงานในระดับขั้นตอนของการติดตาม (Tracking Area) สำหรับ RAN และในระดับ ขั้นตอนของการลงทะเบียน (Registration Area) สำหรับ 5GC ซึ่งประกอบด้วยหลายชนิดดังนี้

1) Subscribed S-NSSAI จะถูกเก็บไว้ในฟังก์ชันการจัดการข้อมูลแบบครบวงจร (UDM) โดยโครงข่ายจะสร้าง subscribed S-NSSAI เป็นค่าเริ่มต้นหาก UE ไม่ทำการส่ง requested S-NSSAI

2) Configured NSSAI สามารถตั้งค่าให้แก่ UE ได้มากกว่าหนึ่ง configured NSSAI โดย UE จะใช้ configured NSSAI เป็น NSSAI เริ่มต้น

3) Allowed NSSAI ถูกกำหนดค่าโดยโครงข่ายและใช้งานในขั้นตอนของการลงทะเบียน หรือ PLMN ตามประเภทบริการต่าง ๆ

4) Requested NSSAI จะส่งสัญญาณควบคุมจาก UE ไปสู่โครงข่าย เพื่อให้ RAN ทำการเลือก AMF และเพื่อให้โครงข่ายทำการเลือกสไลด์โครงข่าย และสไลด์โครงข่ายกรณีตัวอย่าง ยืนยันการใช้งาน และส่ง allowed NSSAI กลับไปสำหรับ UE นั้น ๆ

5) Rejected NSSAI สามารถปฏิเสธ requested NSSAI จาก UE ได้ทั้งช่วงขั้นตอนของการลงทะเบียน หรือในช่วง PLMN (ในโครงข่าย)

3GPP กำหนดให้จำนวนของ S-NSSAI อยู่ใน allowed หรือ requested NSSAI ได้สูงสุด 8 S-NSSAI ที่สามารถส่งสัญญาณควบคุม (signaling message) ระหว่าง UE กับโครงข่าย ซึ่งหมายความว่าหนึ่ง UE สามารถใช้บริการได้กว่า 8 สไลด์โครงข่าย

อินสแตนซ์สไลด์โครงข่ายสามารถมี S-NSSAI มากกว่าหนึ่ง S-NSSAI และหนึ่ง S-NSSAI สามารถอยู่ได้มากกว่าหนึ่งอินสแตนซ์สไลด์โครงข่าย อินสแตนซ์สไลด์โครงข่ายมากกว่าหนึ่งสไลด์ที่เกี่ยวข้องกับหนึ่ง S-NSSAI สามารถให้บริการได้ในขั้นตอนของการติดตามเดียวกันหรือหลากหลายขั้นตอนของการติดตาม และเมื่อสไลด์โครงข่ายมากกว่าหนึ่งสไลด์ที่เกี่ยวข้องกับหนึ่ง S-NSSAI ซึ่งให้บริการในขั้นตอนของการติดตามเดียวกัน นอกจากนี้ อาจมี AMF ที่ให้บริการแก่ UE ได้จากทุก ๆ อินสแตนซ์สไลด์โครงข่าย

3.4.3 ค่า SST ตามมาตรฐาน

SA2 ได้กำหนดมาตรฐานค่า SST ใน TS 23.501 ค่า SST เหล่านี้จะแสดงถึง SST ที่จะใช้งานในสไลด์ ในมาตรฐาน SA2 ปัจจุบันได้นิยามคุณสมบัติของ SST ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.1 โดยที่ PLMN ไม่จำเป็นต้องรองรับ SST ตามมาตรฐานทุกค่า

ตารางที่ 3.1 ค่า SST ตามมาตรฐาน

ชนิดของสไลด์หรือบริการ	**ค่า SST**	**คุณสมบัติ**
eMBB	1	เหมาะกับการใช้งานข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น การรับชมวิดีโอความละเอียด 4K การใช้งาน AR หรือ VR เป็นต้น
URLLC	2	เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความหน่วงต่ำ ความน่าเชื่อถือสูง เช่น ปฏิบัติการทางการแพทย์ หรือการกู้ภัย เป็นต้น
mMTC	3	เหมาะกับการใช้งานอุปกรณ์จำนวนมาก เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม บ้านอัจฉริยะ หรือเมืองอัจฉริยะ เป็นต้น
V2X	4	เหมาะกับการใช้งานการบริการ V2X (Vehicle to Everything)

3.4.4 ลักษณะทั่วไปของสไลด์โครงข่าย

AMF ที่ให้บริการแก่ UE จะรวมอยู่ในทุกสไลด์โครงข่ายที่ให้บริการแก่ UE เช่นเดียวกัน ฟังก์ชันโครงข่ายอื่น เช่น SMF หรือ UPF อาจมีอยู่เพียงบางสไลด์โครงข่าย

การเลือกสไลด์โครงข่ายของ UE อยู่ในขั้นตอนของการลงทะเบียน โดยที่ AMF จะรับข้อมูลการขอลงทะเบียนจาก UE ซึ่งจะรับข้อมูลของสไลด์ที่ถูกยอมรับโดย user subscription จากนั้น AMF จะทำงานร่วมกับ network slice selection function (NSSF) เพื่อที่จะเลือกสไลด์โครงข่ายที่เหมาะสม เช่น สามารถให้บริการได้จาก S-NSSAI หรือ PLMN ID เป็นต้น ส่งผลให้ AMF อาจถูกเปลี่ยนแปลงได้หากจำเป็น

เซสชัน PDU จะถูกสร้างใน S-NSSAI และ data network name (DNN) อย่างละ 1 สไลด์เท่านั้น การสร้างเซสชัน PDU ภายใน NSSAI ที่ถูกเลือกจะถูกสร้างเมื่อ AMF ได้รับข้อความคำร้องการจัดการเซสชันจาก UE แล้ว AMF จะได้รับ SMF หลายตัวเลือกที่มีพารามิเตอร์หลายรูปแบบรวมถึง S-NSSAI มาในข้อความคำร้องของ UE จากนั้นจึงเลือก SMF ที่เหมาะสม ซึ่ง UPF จะถูกเลือกโดย SMF และใช้งาน S-NSSAI ในการให้บริการ

ฟังก์ชันที่เก็บข้อมูลโครงข่าย (NRF) มีหน้าที่ค้นหาฟังก์ชันโครงข่ายที่ใช้งานในแต่ละสไลด์โครงข่าย ซึ่งกระบวนการค้นหาได้ระบุไว้ในมาตรฐาน 3GPP TS 23.502 การสื่อสารข้อมูลจะสามารถทำ

ได้หลังจากการสร้างเซสชัน PDU ในสไลด์โครงข่ายสำเร็จ โดยเซสชัน PDU จะให้บริการแก่โครงข่ายสายอากาศและยังคอยกำหนดเงื่อนไข ข้อตกลง หรือการเรียกเก็บค่าบริการสไลด์นั้น ๆ

สำหรับการใช้งานข้ามเขตแดน (Roaming) ค่า S-NSSAI ถูกใช้งานใน visited PLMN (VPLMN) เพื่อค้นหา SMF ใน VPLMN และการเชื่อมต่อเส้นทางไปยังประเทศผู้ใช้งาน ค่า S-NSSAI ยังถูกใช้งานใน home PLMN (HPLMN) เพื่อค้นหา SMF ใน HPLMN

3.4.5 การจัดการและการ orchestration ของการแบ่งโครงข่าย

เนื้อหาต่อไปนี้จะแสดงถึงการจัดการและการ orchestration ของการแบ่งโครงข่ายในมาตรฐาน 3GPP SA5 TR 28.801 ซึ่งอาจมีการปรับปรุงมาตรฐานดังกล่าวใน SA5 ในอนาคตจากมาตรฐาน SA2 ที่กำลังพัฒนาอยู่

3.4.5.1 การจัดการทั่วไปและการ orchestration ในมุมมองของการแบ่งโครงข่ายตามมาตรฐาน TR 28.801

SA5 ได้กำหนดมาตรฐานการจัดการสำหรับการแบ่งโครงข่ายไว้ดังนี้

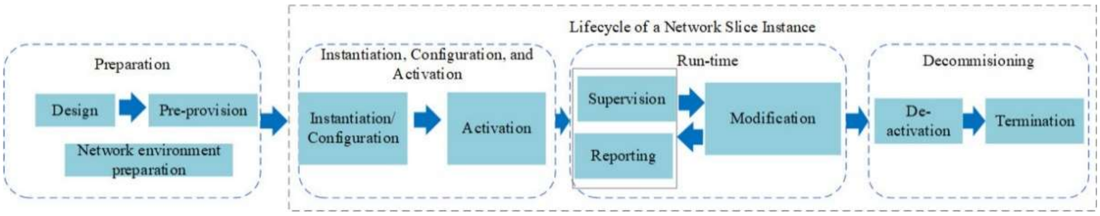
1) การจัดการสไลด์โครงข่ายกรณีตัวอย่างอย่างสมบูรณ์ ไม่เพียงแค่จัดการการทำงานของฟังก์ชันโครงข่ายทั้งหมด แต่ต้องดูแลการจัดการทรัพยากรที่ทำให้สามารถรองรับการให้บริการการสื่อสารต่าง ๆ ได้

2) สไลด์โครงข่ายกรณีตัวอย่างไม่เพียงแค่ประกอบไปด้วยฟังก์ชันโครงข่าย แต่ต้องรวมถึงการเชื่อมต่อระหว่างฟังก์ชันโครงข่ายต่าง ๆ หากฟังก์ชันโครงข่ายมีการเชื่อมต่อภายใน ระบบการจัดการของ 3GPP จะเก็บข้อมูลที่สำคัญสำหรับการเชื่อมต่อของฟังก์ชันโครงข่าย เช่น ข้อมูลรูปแบบการเชื่อมต่อ (Topology) หรือข้อมูลควบคุม (QoS) เป็นต้น สำหรับโครงข่ายการขนส่ง (Transport Network: TN) ที่รองรับการเชื่อมต่อระหว่างฟังก์ชันโครงข่าย ระบบการจัดการของ 3GPP ให้ข้อมูลควบคุมแก่ระบบการจัดการที่ดูแลส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายขนส่งกับฟังก์ชันโครงข่ายอื่น ๆ

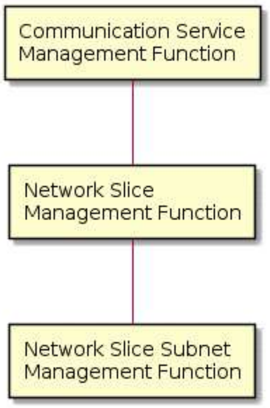
3) สไลด์โครงข่ายกรณีตัวอย่างสามารถประกอบขึ้นจากสไลด์โครงข่ายย่อยของฟังก์ชันโครงข่ายทั้งจากอุปกรณ์จริงหรือจากการจำลองฟังก์ชันโครงข่ายได้

3.4.5.2 การจัดการวงจรชีวิต (lifecycleอินสแตนซ์สไลด์โครงข่าย

3GPP TR 28.801 ได้นำเสนอการจัดการวงจรชีวิตอินสแตนซ์สไลด์โครงข่ายแสดงดังรูปที่ 3.10 โดยทั่วไปสไลด์โครงข่ายถูกออกแบบในช่วงเตรียมการ (Preparation Phase) และถูกสร้างกรณีตัวอย่างขึ้นในช่วงการสร้าง ตั้งค่า และเปิดใช้งาน (Instantiation Phase Configuration Phase และ Activation Phase) จากนั้นทำงานในช่วงเวลางาน (Run Time Phase) สุดท้ายสไลด์อาจถูกเลิกใช้งานเมื่อไม่ต้องการใช้งานแล้วในช่วงรื้อถอน (Decommissioning Phase) ซึ่งช่วงต่าง ๆ ถือเป็นส่วนหนึ่งของฟังก์ชันการจัดการสไลด์โครงข่าย แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 วงจรชีวิตอินสแตนซ์สไลด์โครงข่าย



รูปที่ 3.11 ฟังก์ชันการจัดการสไลด์โครงข่าย

จากรูปที่ 3.11 ฟังก์ชันการจัดการสไลด์โครงข่ายประกอบด้วย

1) ฟังก์ชันการจัดการบริการการสื่อสาร (Communication Service Management Function: CSMF) รับผิดชอบส่วนการเปลี่ยนแปลงการบริการการสื่อสารตามความต้องการสไลด์โครงข่าย

2) ฟังก์ชันการจัดการสไลด์โครงข่าย (Network Slice Management Function: NSMF) รับผิดชอบต่อการจัดการและการ orchestration ของสไลด์โครงข่ายกรณีตัวอย่างและสร้างสไลด์โครงข่ายย่อยตามความต้องการของสไลด์โครงข่าย

3) ฟังก์ชันการจัดการสไลด์โครงข่ายย่อย (Network Slice Subnet Management Function: NSSMF) รับผิดชอบต่อการจัดการและการ orchestration ของอินสแตนซ์สไลด์โครงข่าย

3.4.6 อุปสรรคในสไลด์โครงข่าย

1) ความซับซ้อนในมาตรฐาน และการที่ให้หลายภาคส่วนทำงานร่วมกันได้

2) การรองรับกับระบบคลาวด์ที่มีอยู่

3) ความเป็นไปได้ในโครงสร้างพื้นฐานของการใช้งานสไลด์โครงข่าย

4) ความปลอดภัย

3.5 บทสรุป

โครงข่ายในระบบการสื่อสารมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นการเชื่อมโยงผู้ใช้งานจำนวนมากเข้าไว้ด้วยกัน โครงข่ายในเทคโนโลยีการสื่อสารช่วงเริ่มแรกจะเป็นการสวิตชิงแบบวงจรซึ่งเป็นการจองเส้นทางการใช้งานตลอดช่วงเวลาที่ใช้งานเพียงผู้เดียว จนมาถึงยุคที่มีการสื่อสารด้วยข้อมูลแบบดิจิทัล โครงข่ายจึงได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบมาเป็นสวิตชิงแบบแพ็คเกต ซึ่งทำให้สามารถรองรับการใช้งานของผู้ใช้ได้จำนวนมาก สถาปัตยกรรมโครงข่ายของยุค 4G มีรูปแบบที่ไม่มีความยืดหยุ่น กล่าวคือจะมีการกำหนดอุปกรณ์โครงข่ายและซอฟต์แวร์ที่ใช้คู่กันกับฮาร์ดแวร์ดังกล่าวโดยเฉพาะและผู้ใช้จะใช้อุปกรณ์โครงข่ายเดียวกัน แต่ในยุค 5G อุปกรณ์โครงข่ายสามารถปรับเปลี่ยนไปตามความต้องการของผู้ใช้งานแต่ละกลุ่ม โดยการปรับเพียงซอฟต์แวร์ของฟังก์ชันโครงข่ายซึ่งไม่ต้องเปลี่ยนอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ใหม่ นับว่าเป็นการจัดการโครงข่ายที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงเกิดแนวคิดของการแบ่งโครงข่าย เพื่อจำลองฟังก์ชันการใช้งานรูปแบบที่หลากหลายบนฮาร์ดแวร์เดิม ด้วยเทคนิคการจำลองเสมือนและเทคนิคการประสานอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ทำให้แนวคิดดังกล่าวเป็นไปได้ ส่งผลให้สามารถจัดการโครงข่ายที่ยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามในช่วงระหว่างที่มีการเปลี่ยนผ่านจากยุค 4G เป็น 5G นั้นจะเริ่มเฟสแรกด้วยการใช้โครงข่ายของสายอากาศของ 4G และ 5G แต่โครงข่ายหลักยังเป็น

ของ 4G ซึ่งเรียกว่าสถาปัตยกรรมโครงข่ายร่วม และในเฟสต่อมาจะมีการใช้โครงข่ายสายอากาศ 5G กับโครงข่ายหลัก 5G ซึ่งจะเรียกว่าสถาปัตยกรรมโครงข่ายเดี่ยว ทั้งนี้เพื่อให้การเปลี่ยนผ่านของยุคเป็นไปด้วยความราบรื่น และผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถือที่รองรับ 4G และ 5G ยังสามารถใช้งานได้ตามปกติ

3.6 เอกสารอ้างอิง

[1] 3GPP TS 23.501: "System Architecture for the 5G System; Stage 2", version 15.3.0 Release 15

[2] 3GPP TS 38.221: "NR; Physical channels and modulation ", version 15.3.0 Release 15

[3] 3GPP TS 38.401: "NG-RAN; Architecture description",version 15.3.0 Release 15

[4] 3GPP TS 38.300: "NR; Overall description; Stage-2", version 15.3.1 Release 15

[5] F. Mademann, "System architecture milestone of 5G Phase 1 is achieved", 3GPP news, available at http://www.3gpp.org/NEWS-EVENTS/3GPP-NEWS/1930-SYS_ARCHITECTURE

[6] P. Rost et al., "Network Slicing to Enable Scalability and Flexibility in 5G Mobile Networks," in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 5, pp. 72-79, May 2017.

[7] F. Z. Yousaf, M. Bredel, S. Schaller and F. Schneider, "NFV and SDN - Key Technology Enablers for 5G Networks," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 11, pp. 2468 - 2478, Nov. 2017

[8] T. Saboorian and A. Xiang, “Network Slicing and 3GPP Service and Systems Aspects (SA) Standard”, IEEE Softwarization, available at https://sdn.ieee.org/newsletter/december-2017/network-slicing-and-3gpp-service-and-systems-aspects-sa-standard, December 2017

บทที่ 4

เทคโนโลยีไร้สายของ การสื่อสารยุค 5G

กฤติยาภรณ์ เหมือดขุนทด และอนุสรณ์ วงค์ษา

คุณสมบัติและประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5 (5G) ที่กำหนดขึ้นโดยสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (ITU) ส่งผลให้จำเป็นต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ในการสื่อสารให้มีประสิทธิภาพและมีความสามารถเหนือกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สารในยุคก่อน โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีที่สำคัญและมีความแตกต่างจากในยุคก่อน 4G ได้แก่ การใช้คลื่นในย่านความถี่ใหม่ที่เรียกว่า คลื่นมิลลิเมตร การใช้เทคโนโลยีสายอากาศแบบ Massive MIMO การเข้ารหัสช่องสัญญาณและการใช้บล็อกทรัพยากรในโดเมนเวลาและความถี่แบบปรับได้ (Scalable Time-Frequency Domain Resource Block) เป็นต้น

4.1 คลื่นมิลลิเมตร

ในปัจจุบันความต้องการในการสื่อสารข้อมูลไร้สายมีปริมาณเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 50 ในแต่ละปี [1] เนื่องจากการใช้วิดีโอแบบต่อเนื่องและการมาของ IoT (Internet of Things) ประกอบกับแถบคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่าซึ่งใช้สำหรับการสื่อสารเซลลูลาร์และการสื่อสารประเภทอื่น ๆ มีการใช้งานที่หนาแน่นมาก จากงานวิจัยที่มีมาชี้ให้เห็นว่าคลื่นความถี่ระหว่าง 28 – 73 กิกะเฮิรตซ์ที่มีความกว้างแถบความถี่ 1 กิกะเฮิรตซ์สามารถส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้นในระดับหลายกิกะบิตต่อวินาที และสามารถเพิ่มความเร็วสูงสุดถึง 15 กิกะบิตต่อวินาทีด้วยการใช้สายอากาศส่ง 4 ตัวและสายอากาศรับ 4 ตัว สำหรับระยะทาง 200 เมตร [1] และจากคุณสมบัติของคลื่นมิลลิเมตรที่มีความถี่อยู่ในช่วง 30-300 กิกะเฮิรตซ์จึงทำให้คลื่นนี้ได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5 (5th Generation: 5G) [2]–[5]

4.1.1 คุณสมบัติของคลื่นมิลลิเมตร

4.1.1.1 การแพร่กระจายคลื่น (Propagation)

คลื่นมิลลิเมตรเป็นคลื่นที่มีความถี่สูงและมีความยาวคลื่นสั้นในระดับ 1 – 10 มิลลิเมตร จึงทำให้เกิดการลดทอนในชั้นบรรยากาศจากการดูดซับของก๊าซออกซิเจนและความชื้น นอกจากนี้ความยาวคลื่นของคลื่นมิลลิเมตรยังมีขนาดใกล้เคียงกับหยดน้ำฝน ทำให้พลังงานของคลื่นถูกดูดซับไปกับน้ำฝน และไม่สามารถใช้งานในระบบสื่อสารได้ ดังนั้นคลื่นมิลลิเมตรจึงเหมาะสำหรับการสื่อสารระยะใกล้ หรือการสื่อสารบนภาคพื้นดินในระยะประมาณไม่เกินหนึ่งกิโลเมตร อย่างไรก็ตาม คลื่นที่มีความถี่สูงจะมีพื้นที่ครอบคลุม (Coverage Area) ไม่มากทำให้สามารถนำคลื่นย่านนี้มาใช้งานซ้ำ (Frequency Reuse) ในพื้นที่ต่าง ๆ ได้มากกว่าคลื่นความถี่ที่ต่ำกว่า และด้วยเหตุที่คลื่นมิลลิเมตรมีความยาวคลื่นน้อยมากจึงทำให้สามารถออกแบบให้สายอากาศมีขนาดเล็กและมีขนาดของลำคลื่นแคบมาก ส่งผลให้สามารถใช้งานความถี่ซ้ำได้เพิ่มขึ้นและช่วยชดเชยปัญหาการลดทอนของคลื่นมิลลิเมตรได้เป็นอย่างดี

4.1.1.2 สภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

คลื่นมิลลิเมตรเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้นทำให้สามารถสร้างเป็นสายอากาศแบบอาร์เรย์ที่มีสภาพเจาะจงทิศทางได้ โดยการควบคุมเฟสของสัญญาณที่ถูกส่งในองค์ประกอบของสายอากาศแต่ละตัว ซึ่งจะส่งผลให้อัตราขยายในที่ทิศทางที่ต้องการสูงขึ้น และลดอัตราขยายในทิศทางอื่น ๆ

4.1.1.3 ความไวต่อสิ่งกีดขวาง (Sensitivity to Blockage)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการความสามารถในการสะท้อนน้อย เมื่อกระทบกับสิ่งกีดขวางที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่น และด้วยเหตุที่คลื่นมิลลิเมตรมีความยาวคลื่นสั้น ทำให้ถูกปิดกั้นจากสิ่งกีดขวางได้ง่าย ตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 60 กิกะเฮิรตซ์ หากให้มนุษย์เป็นสิ่งกีดขวางในการเคลื่อนที่ของคลื่นจะพบว่าสามารถทำให้ link budget ลดลงได้ประมาณ 20-30 dB [6]

4.1.2 การประยุกต์ใช้ในระบบสื่อสาร

4.1.2.1 การเข้าถึงเซลล์ขนาดเล็ก (Small Cell Access)

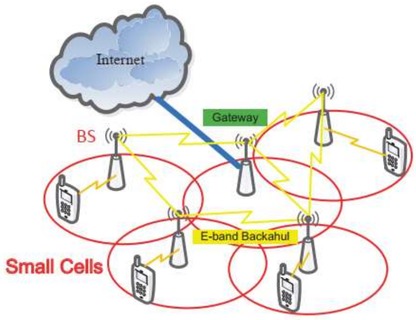
ปัจจุบันปริมาณการใช้งานโครงข่ายผ่านโทรศัพท์มือกำลังเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการเพิ่มความจุของโครงข่ายให้ทันต่อความต้องการของผู้ใช้งานจึงเป็นเรื่องที่สำคัญมาก การใช้เซลล์ขนาดเล็กจำนวนมากเป็นระบบโครงข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) หรือระบบโครงข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network: WPAN) เป็นวิธีการหนึ่งที่ถูกนำเสนอเพื่อเพิ่มความจุของโครงข่าย 5G เนื่องจากคลื่นมิลลิเมตรมีแถบความถี่กว้าง ทำให้การสร้างเซลล์ขนาดเล็กด้วยคลื่นมิลลิเมตรสามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลได้หลายกิกะบิตต่อวินาที และสามารถใช้งานมัลติมิเดียในแถบความถี่กว้างได้ เช่น การถ่ายโอนข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ด้วยความเร็วสูง และการชมการถ่ายทอดสดแบบ real-time ที่มีความละเอียดสูง เป็นต้น [7]

4.1.2.2 การเข้าถึงด้วยโทรศัพท์มือถือ (Cellular Access)

คลื่นมิลลิเมตรได้ถูกนำเสนอให้ใช้กับการเข้าถึงด้วยโทรศัพท์มือถือในระบบ 5G โดยโครงข่ายโทรศัพท์มือถือที่ใช้คลื่นมิลลิเมตรจะมีศักยภาพในการครอบคลุมพื้นที่ที่เหมาะสมและมีความจุสูงที่สุดที่โครงข่ายจะสามารถให้บริการได้

4.1.2.3 แบ็คฮอล์แบบไร้สาย (Wireless Backhaul)

ในระบบการสื่อสารไร้สาย 5G ที่มีการใช้งานเซลล์ขนาดเล็กอย่างหนาแน่น ส่งผลให้การเชื่อมสถานีฐาน 5G ไปยังอีกสถานีฐานหนึ่ง และการเชื่อมต่อไปยังโครงข่ายโดยใช้แบ็คฮอล์แบบไฟเบอร์ (Fiber-Based Backhaul) มีค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการเลือกใช้แบล็คฮอล์แบบไร้สาย (Wireless Backhaul) ที่มีความเร็วสูงจึงเป็นทางเลือกที่คุ้มค่ากว่า อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นและง่ายต่อการใช้งานจากคุณสมบัติของคลื่นมิลลิเมตรที่มีแถบความถี่กว้าง การประยุกต์ใช้แบ็คฮอล์แบบไร้สายจึงสามารถให้อัตราการส่งข้อมูลหลายกิกะบิตต่อวินาที ตัวอย่างเช่น ในช่วงความถี่ E-band แบ็คฮอล์จะให้ความเร็วสูงในการส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานที่เป็นเซลล์ขนาดเล็กด้วยกันเอง หรือระหว่างสถานีฐานกับเกตเวย์ (Gateway) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบ็คฮอล์ E-band สำหรับเซลล์ขนาดเล็กที่มีการใช้งานอย่างหนาแน่น [7]

4.1.3 ปัญหาการนำมาใช้งาน

ปัญหาที่สำคัญในการนำคลื่นมิลลิเมตรใช้งานเกิดจากคุณสมบัติในการเดินทางของคลื่น ซึ่งมีการสูญเสียพลังงานในการเดินทาง เนื่องจากการลดทอนและสิ่งกีดขวาง รวมทั้งความยาวคลื่นของคลื่นมิลลิเมตรมีขนาดเล็กกว่าสิ่งกีดขวางมาก ทำให้แทบจะไม่มีการเลี้ยวเบน นอกจากกนี้ในการออกแบบอุปกรณ์สำหรับคลื่นมิลลิเมตรต้องมีแถบความถี่ (Bandwidth) กว้างและกำลังงานส่งของอุปกรณ์ที่มีค่าต่ำมาก ทำให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio: SNR) ที่ภาครับมีค่าต่ำมาก แม้ว่าจะทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ของสายอากาศมีค่าสูงก็ตาม ดังนั้นหากไม่มีเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่สามารถเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการส่งออกคลื่นมิลลิเมตรเป็นอย่างมาก

ในปัจจุบันการเพิ่มอัตราส่วนของสัญญาณส่งต่อสัญญาณรบกวน สามารถทำได้โดยการใช้สายอากาศส่งและสายอากาศรับที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูง โดยนำสายอากาศหลายตัวมาทำงานร่วมกัน ซึ่งเรียกว่าสายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array Antenna) และเนื่องจากสายอากาศสำหรับคลื่นมิลลิเมตรมีขนาดเล็กมาก จึงสามารถเพิ่มจำนวนสายอากาศส่งและสายอากาศรับได้อย่างมากมาย ซึ่งเรียกเทคโนโลยีนี้ว่า massive MIMO โดยในการรวบรวมสัญญาณจากสายอากาศส่งหรือรับแต่ละตัวนั้นจำเป็นต้องใช้ตัวเลื่อนเฟสแถบความถี่กว้าง (Wideband Phase Shifter) ที่ใช้เทคโนโลยี MEMs (Micro Electro Mechanical Systems) แทนการใช้ตัวเลื่อนเฟสแบบเฟอร์ไรต์ (Ferrite-Based Phase Shifter) ซึ่งทำงานในช่วงความถี่แคบ

4.1.4 คลื่นมิลลิเมตรกับการใช้งานในการสื่อสารยุคที่ 5

การสื่อสารในระบบ 5G ต้องมีความยืดหยุ่นในการรองรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ใช้โปรโทคอลไอพี (IP Protocol) สถาปัตยกรรมเซลล์ขนาดเล็ก (Small Cell Architecture) และบริเวณที่มีการเชื่อมต่ออย่างหนาแน่น (Dense Coverage Area) ทั้งนี้เพื่อรองรับการใช้งานอินเทอร์เน็ต (Internet) การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและยานพาหนะ (Vehicle-to-Vehicle Communication) การสื่อสารระหว่างยานพาหนะและระบบพื้นฐาน (Vehicle-to-Infrastructure Communication) และการสื่อสารระหว่างเครื่องจักรและเครื่องจักร (Machine-to-Machine Communication) เป็นต้น จะเห็นว่าระบบจะต้องรองรับการส่งข้อมูลความเร็วสูงได้อย่างต่อเนื่อง และมีความหน่วงที่น้อย ซึ่งระบบ 4G LTE และ WiFi ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีความล่าช้าในการส่งข้อมูลไปกลับประมาณ 20 – 60 มิลลิวินาที แต่ระบบ 5G จะต้องมีความล่าช้าต่ำได้ถึงในระดับมิลลิวินาที

ในปี พ.ศ. 2558 สมาพันธ์โครงข่ายโทรศัพท์มือถือยุคหน้า (Next Generation Mobile Network: NGMN) ได้กำหนดความต้องการของระบบสื่อสารไร้สายในยุคที่ 5 ไว้ดังนี้ [12]

- อัตราการส่งข้อมูลอย่างน้อย 50 เมกะบิตต่อวินาทีในทุกที่ และในบางกรณี 1 กิกะบิตต่อวินาที แต่ในปัจจุบันโครงข่ายโทรศัพท์มือถือยุคหน้า (Next Generation Mobile Network: NGMN) คาดหวังว่าอัตราการส่งข้อมูลจะสูงมากกว่า 20 กิกะบิตต่อวินาทีด้วยการใช้เทคโนโลยี Massive MIMO และ adaptive beamforming เพื่อรองรับการส่งข้อมูลขนาดใหญ่ เช่น ฟอร์แมตสามมิติ และออฟฟิศเสมือน เป็นต้น

▪ ความล่าช้าจากจุดต่อจุด (End-to-End Latency) น้อยกว่า 10 มิลลิวินาที สำหรับกรณีทั่วไป และอาจต่ำเพียง 1 มิลลิวินาที ในกรณีที่จำเป็น เช่น ความปลอดภัยด้านการจราจร

▪ จำนวนของการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ได้มากกว่า 1,000,000 อุปกรณ์ต่อตารางกิโลเมตร สำหรับรองรับเซนเซอร์จำนวนมหาศาล

▪ ความน่าเชื่อถือได้สูง (High Reliability) ไม่น้อยกว่า 99.999% หรืออาจสูงกว่า สำหรับกรณีที่ต้องการความน่าเชื่อถือสูงเป็นพิเศษ เช่น การป้องกันทางไกลผ่านโครงข่ายกริดอัจฉริยะ (Smart Grid Network)

จากความต้องการดังกล่าว จะเห็นได้ว่าความต้องการที่สำคัญ คืออัตราการส่งข้อมูลที่สูงและความล่าช้าที่ต่ำ ดังนั้นจึงได้มีความพยายามกำหนดกรอบการจัดสรรความถี่คลื่นมิลลิเมตรมาใช้งานสำหรับมาตรฐาน 5G โดยเริ่มจากการพิจารณากรอบการจัดสรรความถี่คลื่นมิลลิเมตรจากการประชุม WRC (World Radiocommunication Conference) ในปี พ.ศ. 2558 ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงย่านความถี่ที่ได้รับความสนใจในการนำมาใช้กับมาตรฐาน 5G ในสหภาพยุโรปและสหรัฐอเมริกา โดย FCC ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้เสนอให้คลื่นมิลลิเมตรขนาดแบนด์วิดธ์รวม 10.85 กิกะเฮิรตซ์ใช้สำหรับมาตรฐาน 5G ในปี พ.ศ. 2559 [4] โดยแบนด์วิดธ์ของคลื่นมิลลิเมตรที่เสนอนี้จะกว้างกว่าแถบความถี่ของ 4G LTE (Long-Term Evolution) ซึ่งใช้แบนด์วิดท์ 20 เมกะเฮิรตซ์ ถึง 10 เท่า [1]

ตารางที่ 4.1 กรอบการจัดสรรคลื่นความถี่ในย่านคลื่นมิลลิเมตรจากการประชุม WRC-15 [8] ที่ได้รับความสนใจสำหรับมาตรฐาน 5G [3]–[5]

WRC-15	สภาพยุโรป (CEPT)	สหรัฐอเมริกา (FCC)
24.25-27.5 กิกะเฮิรตซ์	24.5-27.5 กิกะเฮิรตซ์ ⊙	❋
-	-	27.5-28.35 กิกะเฮิรตซ์
31.8-33.4 กิกะเฮิรตซ์ ●	31.8-33.4 กิกะเฮิรตซ์	❋
37-40.5 กิกะเฮิรตซ์	-	37-38.6 กิกะเฮิรตซ์
		38.6-40 กิกะเฮิรตซ์
40.5-42.5 กิกะเฮิรตซ์ ●	40.5-43.5 กิกะเฮิรตซ์ ○	❋
42.5-43.5 กิกะเฮิรตซ์		-
45.5-47 กิกะเฮิรตซ์	45.5-48.9 กิกะเฮิรตซ์	-
47-47.2 กิกะเฮิรตซ์ ●		

WRC-15	สภาพยุโรป (CEPT)	สหรัฐอเมริกา (FCC)
47.2-50.2 กิกะเฮิรตซ์		❋
50.4-52.6 กิกะเฮิรตซ์	-	❋
66-76 กิกะเฮิรตซ์	66-71 กิกะเฮิรตซ์ ○	64-71 กิกะเฮิรตซ์
	71-76 กิกะเฮิรตซ์	❋
81-86 กิกะเฮิรตซ์	81-86 กิกะเฮิรตซ์	❋
-	-	95 กิกะเฮิรตซ์ ❋

● ย่านความถี่ที่ได้รับการจัดสรรเพิ่มเติมสำหรับบริการเคลื่อนที่ (mobile service) เป็นบริการหลัก

⦿ ความสำคัญอันดับแรกสำหรับ 5G

○ ความสำคัญอันดับรองสำหรับ 5G (แก้ไขใหม่ตาม ECC Plenary Meeting ครั้งที่ 46)

❋ FFC เสนอเป็นย่านความถี่เพิ่มเติมสำหรับ 5G

ตารางที่ 4.2 คลื่นมิลลิเมตรที่ได้รับการศึกษาสำหรับ 5G ในสหภาพยุโรป โดย CEPT [3]

ความถี่ (Frequency band)	แบนด์วิดท์ (Bandwidth)	บริการที่มีใช้อยู่
24.5-27.5 กิกะเฮิรตซ์	3 กิกะเฮิรตซ์	ดาวเทียมถ่ายทอดสัญญาณ (Data Relay Satellite) Copernicus สัญญาณขาขึ้นของดาวเทียม (Satellite Uplink) และข่ายเชื่อมโยงไม่เคลื่อนที่ (Fixed Link)
31.8-33.4 กิกะเฮิรตซ์	1.6 กิกะเฮิรตซ์	ย่าน HDFS (High Density Application in the Fixed Service) ซึ่งกำหนดโดย Radionavigation (RR 5.547)
40.5-43.5 กิกะเฮิรตซ์	3 กิกะเฮิรตซ์	ดาวเทียมและดาราศาสตร์คลื่นวิทยุ (radio astronomy)
45.5-48.9 กิกะเฮิรตซ์	3.4 กิกะเฮิรตซ์	ดาวเทียม
66-71 กิกะเฮิรตซ์	5 กิกะเฮิรตซ์	ดาวเทียม
71-76 กิกะเฮิรตซ์	5 กิกะเฮิรตซ์	การสื่อสารไม่เคลื่อนที่ และดาวเทียม
81-86 กิกะเฮิรตซ์	5 กิกะเฮิรตซ์	การสื่อสารไม่เคลื่อนที่ ดาวเทียม และดารา-ศาสตร์คลื่นวิทยุ

ตารางที่ 4.2 แสดงย่านความถี่มิลลิเมตรที่ได้รับการศึกษาสำหรับ 5G ในสหภาพยุโรป ที่กำหนดโดย CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations) ซึ่งแสดงรายละเอียดของบริการที่มีใช้อยู่ ดังนั้นในการใช้คลื่นความถี่อาจมีการให้ใบอนุญาตแบบแบ่งกันใช้งาน (Shared License) และนำเทคนิคการรู้จำคลื่นวิทยุ (Cognitive Radio) มาช่วยในการใช้งานคลื่นความถี่ร่วมกันกับบริการที่มีอยู่เดิม

จากการประชุม ECC Plenary Meeting ครั้งที่ 46 เมื่อเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2560 ได้มีการแก้ไขลำดับความสำคัญของรายการของคลื่นความถี่ใน CEPT Roadmap [3] โดยให้คลื่น 24.25 – 27.5 กิกะเฮิรตซ์ (ย่านความถี่ 26 กิกะเฮิรตซ์) เป็นตัวนำร่องสำหรับการสื่อสาร 5G ก่อนให้เสร็จภายในปี พ.ศ. 2562 จากนั้นจะพัฒนาให้คลื่น 40.5 – 43.5 กิกะเฮิรตซ์ (ย่านความถี่ 42 กิกะเฮิรตซ์) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่จะทำการใช้คลื่นเป็นไปอย่างกลมกลืน (Harmonization) ในอนาคตในสหภาพยุโรป [13] และใช้คลื่น 66 – 71 กิกะเฮิรตซ์ (ย่านความถี่ 68 กิกะเฮิรตซ์) เป็นย่านความถี่สำหรับการสื่อสาร 5G ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 คลื่นมิลลิเมตรที่ได้รับการเสนอสำหรับ 5G ในสหรัฐอเมริกา โดย FCC [4]

ประเภท	ความถี่	ขนาดบล็อก (block size)	ข้อกำหนดที่เสนอ
ความถี่ที่ต้องขออนุญาต (แบนด์วิดท์ 3.85 กิกะเฮิรตซ์)	28 กิกะเฮิรตซ์ (27.5–28.35 กิกะเฮิรตซ์)	425 เมกะเฮิรตซ์	ใบอนุญาตตามพื้นที่ในเชิงภูมิศาสตร์และขนาดของประเทศ
	37 กิกะเฮิรตซ์ (37–38.6 กิกะเฮิรตซ์)	200 เมกะเฮิรตซ์	เพื่อทำให้เกิดความต่อเนื่องในการดำเนินการทางการค้า เพื่อปกป้องสถานีของทหารรัฐบาลกลางซึ่งมีจำนวนจำกัดตลอดแบนด์วิดธ์ 37 กิกะเฮิรตซ์ ให้คงไว้ซึ่งการจัดสรรความถี่ให้กับการบริการเคลื่อนที่และไม่เคลื่อนที่ของรัฐบาลกลาง

ประเภท	ความถี่	ขนาดบล็อก (block size)	ข้อกำหนดที่เสนอ
	ย่านความถี่ต่ำ (37–37.6 กิกะเฮิรตซ์)	200 เมกะเฮิรตซ์	เพื่อสร้างย่านความถี่สำหรับการเข้าใช้คลื่นความถี่แบบแบ่งกันใช้งานโดยมีการประสานงานกันระหว่างรัฐบาลกลางและผู้ให้บริการที่ไม่ได้มาจากรัฐบาลกลาง
	ย่านความถี่สูง (37.6–38.6 กิกะเฮิรตซ์)	200 เมกะเฮิรตซ์	ใบอนุญาตสำหรับพื้นที่เศรษฐกิจบางส่วน (Partial Economic Area (PEA) license) จำนวน 416 พื้นที่
	39 กิกะเฮิรตซ์ (38.6–40 กิกะเฮิรตซ์)	200 เมกะเฮิรตซ์	ใบอนุญาต PEA ให้คงไว้ซึ่งการจัดสรรคลื่นความถี่ให้แก่รัฐบาลกลางในย่านความถี่ 39.5-40 กิกะเฮิรตซ์โดยให้จำกัดแก่ระบบทางทหาร
ความถี่ที่ไม่ต้องขออนุญาต (แบนด์วิดท์ 7 กิกะเฮิรตซ์)	64–71 กิกะเฮิรตซ์	-	เพื่อการดำเนินงานในย่านความถี่ 64-71 กิกะเฮิรตซ์ ภายใต้ส่วนที่ 15 ของข้อกำหนดของ FCC (§15.255) ซึ่งที่ผ่านมานี้ยังได้นำเอาไปใช้สำหรับย่านความถี่ข้างเคียง 57-64 กิกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดคลื่นมิลลิเมตรที่ได้รับการเสนอสำหรับมาตรฐาน 5G โดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสารของสหรัฐอเมริกา (Federal Communication Commission: FCC) โดยจะแบ่งคลื่นออกเป็นย่านความถี่ที่ต้องขออนุญาตซึ่งมีความถี่ในช่วง 28 – 40 กิกะเฮิรตซ์ และย่านความถี่ที่ไม่ต้องขออนุญาตซึ่งมีความถี่ในช่วง 64 – 71 กิกะเฮิรตซ์ นอกจากนี้จากเอกสารของ FCC ชื่อ “Spectrum Frontiers R&O and FNPRM” วันที่ 14 เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2559 ยังมีการเสนอคลื่นมิลลิเมตรเพิ่มเติมสำหรับมาตรฐาน 5G เพื่อการบริการเคลื่อนที่และไม่เคลื่อนที่สำหรับ UMFUS (Upper Microwave Flexible Use Service) ซึ่งเป็นการบริการที่มีความหยืดหยุ่นที่ใช้คลื่นความถี่สูงกว่าคลื่นไมโครเวฟ ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 คลื่นความถี่มิลลิเมตรเพิ่มเติมสำหรับมาตรฐาน 5G เพื่อการบริการ UMFUS [5]

ชื่อย่านความถี่	ความถี่ (Frequency band)
ย่านความถี่ 24 กิกะเฮิรตซ์	24.25 – 24.45 กิกะเฮิรตซ์และ / 24.75 – 25.25 กิกะเฮิรตซ์
ย่านความถี่ 32 กิกะเฮิรตซ์	31.8 – 33 กิกะเฮิรตซ์
ย่านความถี่ 42 กิกะเฮิรตซ์	42 – 42.5 กิกะเฮิรตซ์
ย่านความถี่ 47 กิกะเฮิรตซ์	47.2 – 50.2 กิกะเฮิรตซ์
ย่านความถี่ 50 กิกะเฮิรตซ์	50.4 – 52.6 กิกะเฮิรตซ์
ย่านความถี่ 70/80 กิกะเฮิรตซ์	71 – 76 กิกะเฮิรตซ์ / 81 - 86 กิกะเฮิรตซ์
ความถี่สูงกว่า 95 กิกะเฮิรตซ์	> 95 กิกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.5 ความถี่ที่ผู้ให้บริการสื่อสารในสหรัฐอเมริกาเลือกใช้สำหรับการบริการ 5G

ผู้ให้บริการ	ความถี่ (Frequency band)
Verizon	28 กิกะเฮิรตซ์ 39 กิกะเฮิรตซ์
AT&T	28 กิกะเฮิรตซ์ 39 กิกะเฮิรตซ์
T-Mobile	600 เมกะเฮิรตซ์ 28 กิกะเฮิรตซ์ 38 กิกะเฮิรตซ์
Sprint	2.5 กิกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.5 แสดงความถี่ที่ผู้ให้บริการสื่อสารในสหรัฐอเมริกาเลือกใช้สำหรับการบริการ 5G จากข้อมูลในตารางจะเห็นว่าคลื่นมิลลิเมตรที่ความถี่ 28 กิกะเฮิรตซ์ ได้ถูกนำมาเลือกใช้โดยผู้ให้บริการหลายราย และคลื่นความถี่ 39 กิกะเฮิรตซ์ มีผู้ให้บริการใช้สองราย ในขณะที่สหราชอาณาจักรได้ประกาศรับข้อเสนอในการจัดทำแผนการใช้คลื่นมิลลิเมตร 26 กิกะเฮิรตซ์ (24.25–27.5 กิกะเฮิรตซ์)

เมื่อเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562 หน่วยงาน 5G Americas (ซึ่งเป็นองค์กรที่ประกอบด้วยผู้ประกอบกิจการสื่อสารโทรคมนาคมในอเมริกา) ได้ออกเอกสารชื่อ 5G Spectrum Vision [13] ซึ่งได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับทิศทางของเทคโนโลยี 5G และคลื่นความถี่ที่มีแนวโน้มที่จะเอามาใช้สำหรับการสื่อสาร 5G ในประเทศต่าง ๆ โดยสามารถสรุปข้อมูลการใช้คลื่นมิลลิเมตรในประเทศอื่น ๆ ที่สำคัญได้

ดังตารางที่ 4.6 จากข้อมูลข้างต้นทั้งหมดอาจสรุปได้ว่าคลื่นความถี่ย่าน 26 และ 28 กิกะเฮิรตซ์เป็นย่านความถี่ของคลื่นมิลลิเมตรที่ได้รับความสนใจมากที่สุดที่จะนำเอามาใช้ในการสื่อสาร 5G

ตารางที่ 4.6 คลื่นมิลลิเมตรที่ได้รับความสนใจหรือมีการศึกษาเพื่อนำมาใช้ใน 5G สำหรับประเทศต่าง ๆ

ประเทศ	ความถี่ (Frequency band)
สหราชอาณาจักร	26 กิกะเฮิรตซ์ (24.25–27.5 กิกะเฮิรตซ์)
สาธารณรัฐประชาชนจีน	24.75-27.5 กิกะเฮิรตซ์ 37-42.5 กิกะเฮิรตซ์
ญี่ปุ่น	24.25-29.5 เมกะเฮิรตซ์ 37.0-40 กิกะเฮิรตซ์ 40.5-43.5 กิกะเฮิรตซ์
เกาหลีใต้	26.5-29.5 กิกะเฮิรตซ์
ไต้หวัน	28 กิกะเฮิรตซ์ (27.5-28.35 กิกะเฮิรตซ์)
ออสเตรเลีย	26 กิกะเฮิรตซ์ (24.25–27.5 กิกะเฮิรตซ์)
ฮ่องกง	26 กิกะเฮิรตซ์ (24.25–27.5 กิกะเฮิรตซ์) 28 กิกะเฮิรตซ์ (27.5-28.35 กิกะเฮิรตซ์)

หมายเหตุ ข้อมูลในรายงานนี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ตามการเปลี่ยนแปลงในประเทศเหล่านั้น

4.2 Massive MIMO

การใช้สายอากาศจำนวนมากในการรับและส่งสัญญาณเป็นประโยชน์อย่างมากในระบบการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ (Mobile Communication) ซึ่งสายอากาศเหล่านี้สามารถนำมาใช้ในการส่งสัญญาณที่ทนทานต่อการลดทอน ภายใต้หลักการที่ว่าช่องสัญญาณที่ได้จากสายอากาศที่แตกต่างกันอาจทำให้สัญญาณที่ได้รับมีความแตกต่างกัน เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศ หรือการโพลาไรซ์ของสายอากาศ นอกจากนี้ จากการปรับเฟสและแอมพลิจูดของแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ ทำให้สามารถกำหนดทิศทางในการส่งสัญญาณได้ซึ่งเป็นการกำหนดให้พลังงานในการส่งทั้งหมดพุ่งไปยังทิศทางที่แน่นอน หรือเรียกกระบวนการนี้ว่า beamforming การกำหนดทิศทางของสายอากาศจะช่วยลดการรบกวนของสัญญาณและทำให้อัตราการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน หากทางฝั่งเครื่องรับ

ใช้สายอากาศจำนวนมากจะสามารถกำหนดทิศทางให้มุ่งเน้นไปที่ยังสัญญาณเป้าหมายได้ และป้องกันการรบกวนของสัญญาณที่มาจากทิศทางอื่นได้เช่นกัน [14]

จากประโยชน์ของการใช้สายอากาศจำนวนมากจึงทำให้เกิดการคิดค้นเทคโนโลยีสายกาศที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในระบบสื่อสาร ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยี Massive MIMO เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจที่สุดในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยมีแนวความคิดหลักคือ การใช้เสาอากาศแบบอาร์เรย์จำนวนมากที่สถานีฐาน (Base Station) เพื่อให้ผู้ใช้งานจำนวนมากสามารถรับและส่งข้อมูลได้ในเวลาเดียวกัน ภายใต้ช่องสัญญาณวิทยุเดียวกัน ซึ่งเสาอากาศเหล่านี้จะเชื่อมโยงถึงกัน เพื่อลดการเกิดความผิดพลาดและเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่าย [15] สำหรับการใช้งาน 5G Massive MIMO จะช่วยเพิ่มขีดความสามารถของโครงข่าย โดยให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้น และรองรับมัลติมีเดียแบบเวลาจริง (Real-Time) โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความถี่เพิ่มเติม

4.2.1 ลักษณะสำคัญทางเทคโนโลยีของ Massive MIMO

1) มีการประมวลผลแบบดิจิทัลทั้งหมด โดยเสาอากาศแต่ละต้นจะมีความถี่วิทยุและการเชื่อมต่อเบสแบนด์แบบดิจิทัล (Digital Baseband) ของตัวเอง ซึ่งเสาอากาศทั้งหมดของแต่ละสถานีจะประมวลผลร่วมกัน ทำให้สามารถวัดความน่าจะเป็นในการตอบสนองของช่องสัญญาณบนอัปลิงก์ได้ และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในช่องสัญญาณอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การประมวลผลแบบดิจิทัลยังช่วยให้สามารถใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2) มีการแลกเปลี่ยนการแพร่กระจายสัญญาณ และการทำงานของการส่งสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Duplexing: TDD) ทำให้ช่องสัญญาณดาวน์ลิงก์ถูกประเมินจากอัปลิงก์ไพลอต และจำเป็นต้องรู้โครงสร้างของช่องสัญญาณที่ใช้แพร่กระจาย

3) ฟังก์ชัน conjugate beamfoming หรือ zero-forcing processing ของ Massive MIMO สามารถทำงานได้ดีใกล้เคียงกับการส่งข้อมูลแบบ single-carrier

4) การเพิ่มขึ้นของอาร์เรย์ทำให้เกิดการเพิ่ม closed-loop link budget ตามจำนวนเสาอากาศของสถานีฐาน

5) ช่องสัญญาณมีความคงทน ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดผลกระทบของการลดทอนอย่างรวดเร็ว รวมทั้งการเชื่อมต่อของสถานีฐานปลายทางแต่ละสถานีจะกลายเป็นช่องสัญญาณแบบสเกลาร์ที่เพิ่มเสถียรภาพในการกำหนดช่องสัญญาณ ซึ่งช่วยลดปัญหาในการจัดสรรทรัพยากรโครงข่าย

6) มีการเพิ่มอาร์เรย์เพื่อปรับปรุง link budget ให้มีคุณภาพการให้บริการที่ดีและสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งเหมาะแก่ผู้ใช้งานทั้งหมดที่อยู่ภายในขอบเขตการให้บริการ นอกจากนี้ยังมีอัลกอริทึมที่ควบคุมพลังงานพื้นฐานของผู้ใช้งานแต่ละรายให้เท่าเทียมกัน

7) สถานีฐานทำงานแบบอัตโนมัติ โดยไม่มีการใช้ข้อมูล payload หรือข้อมูลสถานะช่องสัญญาณร่วมกับขอบเขตการให้บริการอื่น ๆ และไม่มีข้อกำหนดของ time synchronization

8) มีความเป็นไปได้ที่จะลดความแม่นยำและความละเอียดของ transceiver front-end รวมถึงการประมวลผลแบบดิจิทัลและการแทนจำนวนในการคำนวณ

4.2.2 ประโยชน์ของ Massive MIMO

การประยุกต์ใช้งาน Massive MIMO ในระบบ 5G สามารถช่วยเพิ่มขีดความสามารถของโครงข่ายได้ในหลาย ๆ ด้าน ดังนี้

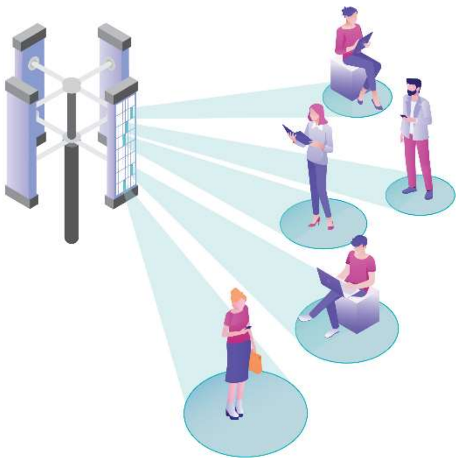
1) ความจุ (Capacity) ของโครงข่ายข่ายเพิ่มขึ้น ความจุของโครงข่ายถูกกำหนดจากปริมาณข้อมูลทั้งหมดที่สามารถให้บริการแก่ผู้ใช้และจำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดที่สามารถให้บริการได้ ซึ่งการใช้ Massive MIMO จะช่วยเพิ่มความจุของโครงข่ายโดยการปรับใช้ 5G New radio (NR) ในช่วงความถี่สูง sub-6 GHz และใช้ MU-MIMO ที่ให้ผู้ใช้งานจำนวนมากได้รับบริการในเวลาเดียวกันและใช้ทรัพยากรความถี่เดียวกัน

2) มีการครอบคลุมพื้นที่ (Coverage) ที่ดีขึ้น การใช้งาน Massive MIMO จะช่วยให้ผู้ใช้ได้รับประสบการณ์การใช้งานบนโครงข่ายที่เหมือนกันทั่วทั้งโครงข่าย แม้จะอยู่ที่บริเวณขอบของพื้นที่ให้บริการ ดังนั้นผู้ใช้บริการจึงสามารถคาดหวังบริการในอัตราการส่งข้อมูลสูงได้เกือบทุกที่ นอกจากนี้ Massive MIMO ยังรองรับ 3D beamforming ซึ่งช่วยให้สามารถครอบคลุมผู้ใช้งานที่กำลังเคลื่อนที่และปรับความครอบคลุมเพื่อให้เหมาะกับตำแหน่งของผู้ใช้ได้

3) มีการใช้สเปกตรัมอย่างมีประสิทธิภาพ ใน Massive MIMO จะใช้วิธี Spatial Multiplexing ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการส่งข้อมูลหลายชุดออกไปพร้อมกันในช่องสัญญาณเดียวกัน รวมทั้งมีการขยาย

จำนวนของช่องสัญญาณเสมือนให้เพียงพอแก่ผู้ใช้งาน ทำให้เพิ่มขีดความสามารถและความเร็วในการรับส่งข้อมูลโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มสถานีฐานและความถี่

4) มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ การขยายอาร์เรย์ของสายอากาศแบบ Massive MIMO ทำให้สามารถลดใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง และมีประสิทธิภาพดีเมื่อใช้งานกับสัญญาณที่มีความแม่นยำต่ำ นอกจากนี้ การประมวลผลเชิงเส้น (linear processing) ยังช่วยให้ประหยัดพลังงานได้มากขึ้น



รูปที่ 4.2 ประโยชน์ของ Massive MIMO

จากรูปที่ 4.2 การใช้สายอากาศแบบอาร์เรย์จำนวนมากช่วยเพิ่มความจุของโครงข่าย โดยใช้กระบวนการ beamforming ในการจำกัดลำคลื่นให้มีเซลล์ครอบคลุมเพียงหนึ่งผู้ใช้งานต่อหนึ่งเซลล์ จำนวนสายอากาศที่มากขึ้น ทำให้สามารถรองรับผู้ใช้งานได้มากขึ้น ซึ่งนอกจากวิธีการนี้จะช่วยเพิ่มความจุของโครงข่ายแล้ว ยังช่วยผู้ใช้งานแต่ละรายสามารถใช้งานบนโครงข่ายได้ด้วยอัตราการส่งข้อมูลสูงสุด และยังช่วยลดการใช้พลังงานในการแผ่ลำคลื่น

4.2.3 ข้อจำกัดในการทำงานของ Massive MIMO

Massive MIMO สามารถปรับขนาดได้ตามเสาอากาศ ดังนั้นการเพิ่มเสาอากาศจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่าย แต่ข้อจำกัดสูงสุดจะถูกกำหนดจากการเคลื่อนที่ โดยทุกช่วงที่เชื่อมโยงกัน (เวลาที่เชื่อมโยงกันคูณด้วยแบนด์วิดธ์ที่เชื่อมโยงกัน) จำเป็นต้องรองรับอัปลิงก์ไพลอต รวมถึง payload

ในอัปลิงก์และดาวน์ลิงก์ เมื่อมีการเคลื่อนที่มากขึ้นการเชื่อมโยงกันของช่องสัญญาณจะน้อยลงและมีไพลอตที่สามารถรองรับได้น้อยลง ในสภาพแวดล้อมแบบ macro-cellular ที่มีการเคลื่อนที่จำนวนมาก (Highway) จะจำกัดอัตราขยายการมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing Gain) ไปยังผู้ใช้ปลายทางจำนวนหนึ่ง แต่ในสภาพแวดล้อมที่มีการเคลื่อนที่น้อยหรือไม่มีการเคลื่อนที่ผู้ใช้งานจำนวนมากจะสามารถใช้งานการมัลติเพล็กซ์แบบปกติได้ [14]

4.3 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ

เทคโนโลยี 5G New radio (NR) เป็นเทคโนโลยีที่มีวัตุประสงค์หลักแตกต่างจากระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในยุคที่ผ่านมา โดยไม่ได้มีวัตถุประสงค์เพียงเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยง การรองรับการติดต่อสื่อสาร และการเข้าถึงข้อมูลของบุคคลเท่านั้น แต่ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อรองรับความต้องการในการติดต่อสื่อสารของสรรพสิ่งในภาคส่วนต่างๆ ของเศรษฐกิจซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ การใช้งานในลักษณะที่ต้องการการส่งข้อมูลความเร็วสูง (enhanced Mobile Broadband: eMBB) การใช้งานที่มีเชื่อมต่อของอุปกรณ์จำนวนมากในพื้นที่เดียวกัน (massive Machine Type Communications: mMTC) และการใช้งานที่ต้องการความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีความเสถียรมากและมีความหน่วงเวลาต่ำ (Ultra-reliable and Low Latency Communications: URLLC) [16] ดังนั้นรูปแบบการเข้ารหัสช่องสัญญาณที่นำมาใช้ในเทคโนโลยี 5G จึงต้องรองรับเป็นความต้องการในการใช้งานดังกล่าว โดยในมาตรฐานของ 3GPP ได้แนะนำให้ใช้รูปแบบการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบรหัสแอลดีพีซีสำหรับช่องสัญญาณข้อมูล (data channel) และใช้รหัสโพลาร์สำหรับช่องสัญญาณควบคุม (control channel) แทนรหัสเทอร์โบและรหัสคอนโวลูชันในยุค 4G [17]

4.3.1 รหัสแอลดีพีซีสำหรับช่องสัญญาณข้อมูล

รหัสแอลดีพีซีถูกคิดค้นในปี พ.ศ.2505 โดยโรเบิร์ต เกรย์ แกลลาเจอร์ (Robert Gray Gallager) ซึ่งเป็นรหัสแก้ไขความผิดพลาดข้างหน้า (Forward Error Codes: FEC) ที่มีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากให้สมรรถนะการแก้ไขความผิดพลาดที่เข้าใกล้ขีดจำกัดของแชนนอน [18] โดยระบบสามารถใช้ประโยชน์จากช่องสัญญาณสื่อสารได้ถึงศักยภาพสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ รหัสแอลดีพีซีจัดเป็นรหัส

บล็อกเชิงเส้น (Linear Block Code) ชนิดหนึ่งที่สามารถนิยามได้อย่างสมบูรณ์ในรูปของเมทริกซ์พาริตีเช็ก (Parity Check Matrix) $\mathbf{H}$ ที่มีขนาด $M \times N$ โดย M เป็นจำนวนแถวของเมทริกซ์ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดจำนวนบิตพาริตี (Parity Bit) ของคำรหัส และ N เป็นจำนวนคอลัมน์ของเมทริกซ์ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดจำนวนบิตทั้งหมดของคำรหัส สมาชิกแต่ละตัวในเมทริกซ์ h_{ij} มีค่าได้ 2 แบบคือ 0 หรือ 1 โดยโครงสร้างของเมทริกซ์แสดงดังสมการที่ (4.1) คุณลักษณะสำคัญของรหัสแอลดีพีซี คือเมทริกซ์พาริตีเช็กที่มีจำนวนตัวเลข 1 น้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าเมทริกซ์ $\mathbf{H}$ ที่มีความหนาแน่นต่ำ (Sparse Matrix) จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยให้กระบวนการถอดรหัสแบบวนซ้ำมีความซับซ้อนลดลง

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1j} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i1} & h_{i2} & \cdots & h_{ij} \end{bmatrix}_{M \times N} \qquad (4.1)$$

ในระบบ 5G ได้มีการประยุกต์รหัสแอลดีพีซีแบบ quasi-cyclic (QC-LDPC) ที่มีการเข้ารหัสและถอดรหัสแบบขนานทำให้มีปริมาณการส่งผ่านข้อมูลสูงและมีความหน่วงเวลาต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในด้าน eMBB และ URLLC นอกจากนี้ รหัสช่องสัญญาณ 5G สำหรับช่องสัญญาณข้อมูลควรรองรับการสื่อสารแบบที่มีการร้องขอการส่งซ้ำโดยอัตโนมัติ (HARQ) ซึ่งรหัสแอลดีพีซีได้มีการออกแบบเพื่อรองรับรูปแบบการสื่อสารดังกล่าวอย่างมีประสิทธิภาพ ข้อดีของรหัสแอลดีพีซีในระบบ 5G เมื่อเทียบกับรหัสเทอร์โบที่ใช้งานในระบบ 4G สามารถอธิบายได้ดังนี้

- รหัสแอลดีพีซีจะมีประสิทธิภาพของปริมาณการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) ต่อพื้นที่ดีกว่าและมีปริมาณการส่งผ่านข้อมูลสูงสุดที่สามารถใช้งานได้สูงกว่าในรหัสเทอร์โบ
- รหัสแอลดีพีซีสามารถลดความซับซ้อน และความหน่วงเวลา (Latency) ในการถอดรหัสได้โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้งานกับรหัสที่มีอัตรารหัสสูง
- ในรหัสแอลดีพีซีได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพสำหรับทุกความยาวรหัสและทุกอัตรารหัสโดยให้ระดับความผิดพลาด (Error Floor) ที่อัตรารหัสต่ำกว่า 10^{-5}

จากข้อดีดังกล่าวจึงส่งผลให้รหัสแอลดีพีซีเหมาะสำหรับใช้งานในการส่งข้อมูลปริมาณมากความเสถียรมาก และมีความหน่วงเวลาต่ำ ซึ่งถือเป็นเป้าหมายหลักในระบบ 5G [19]

4.3.2 รหัสโพลาร์สำหรับช่องสัญญาณควบคุม

รหัสโพลาร์ถูกคิดค้นในปี พ.ศ.2552 โดยเออร์ดัล อริกาน (Erdal Arikan) [20] ซึ่งเป็นรหัสช่องสัญญาณแบบมีโครงสร้างรหัสแรกที่สามารถพิสูจน์ได้ว่ามีสมรรถนะเข้าใกล้ทฤษฎีความจุช่องสัญญาณของแชนนอน โดยใช้การถอดรหัสที่มีความซับซ้อนต่ำ แนวคิดหลักของการเข้ารหัสโพลาร์คือการแปลงคู่ของช่องสัญญาณที่มีอินพุตแบบไบนารีที่เหมือนกันไปเป็นช่องสัญญาณ 2 ช่องที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยช่องสัญญาณหนึ่งจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าช่องสัญญาณเดิม (มีสัญญาณรบกวนน้อย) และอีกช่องสัญญาณหนึ่งจะมีคุณสมบัติแย่กว่าช่องสัญญาณเดิม (มีสัญญาณรบกวนมาก) หลักการดังกล่าวเรียกว่าการโพลาไรซ์ของช่องสัญญาณ โดยช่องสัญญาณแต่ละช่องที่ผ่านการโพลาไรซ์จะถูกนำมาใช้สำหรับส่งบิตข้อมูลแต่ละบิต ซึ่งบิตข้อมูลที่ผู้ใช้งานต้องการส่งไปยังเครื่องรับจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีคุณภาพดีหรือมีสัญญาณรบกวนน้อยมาก และช่องสัญญาณที่เหลือจะถูกใช้สำหรับส่งบิตข้อมูลที่ถูกกำหนดหรือที่เรียกว่า บิตแช่แข็ง (frozen bit) ตัวอย่างเช่น ต้องการเข้ารหัสข้อมูลที่มีความยาวรหัส N บิต โดยมีบิตข้อมูลที่ต้องการส่งจำนวน K บิต เมื่อทำการโพลาไรซ์ช่องสัญญาณแล้วจะทำการเลือกช่องสัญญาณที่มีคุณภาพดีที่สุดจำนวน K ช่อง เพื่อใช้สำหรับส่งบิตข้อมูล และช่องสัญญาณ $N-K$ ช่อง จะถูกใช้สำหรับส่งบิตแช่แข็ง

ข้อดีของรหัสโพลาร์เมื่อเทียบกับรหัสเทอร์โบที่ใช้งานในระบบ 4G คือ รหัสโพลาร์สามารถที่มีการใช้งานร่วมการตรวจสอบความผิดพลาดแบบ Cyclic Redundancy Check (CRC) และมีการถอดรหัสแบบ Successive Cancellation List (SCL) จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ารหัสเทอร์โบ เมื่อใช้สำหรับการส่งข้อมูลที่มีความยาวไม่เกิน 250 บิต ซึ่งเป็นขนาดข้อมูลที่เพียงพอสำหรับข้อมูลควบคุมการสื่อสาร อย่างไรก็ตามรหัสโพลาร์ยังคงมีความซับซ้อนมากกว่ารหัสเทอร์โบที่ใช้งานระบบ 4G [19]

4.3.3 รูปแบบการส่งข้อมูลที่มีการร้องขอการส่งซ้ำโดยอัตโนมัติ

การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณไร้สายในรูปแบบการส่งข้อมูลที่มีการร้องขอการส่งซ้ำแบบอัตโนมัติ (Automatic Repeat Request: ARQ) เครื่องรับจะใช้รหัสตรวจจับความผิดพลาด (error-correction code) ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้กันคือการใช้รหัส CRC เพื่อตรวจสอบว่าแพ็กเกตที่ได้รับนั้นมีความผิดพลาดหรือไม่ หากไม่พบความผิดพลาดในแพ็กเกตข้อมูลที่ได้รับ เครื่องส่งจะได้รับการตอบกลับเป็น positive acknowledgement (ACK) ในทางกลับกัน ถ้าตรวจพบความผิดพลาด เครื่องรับจะทิ้ง

ข้อมูลที่ได้รับและแจ้งไปยังเครื่องส่งโดยการส่ง negative acknowledgement (NACK) เมื่อทางฝั่งเครื่องส่งได้รับ NACK จะตอบสนองกลับโดยการส่งข้อมูลเดิมไปยังเครื่องรับอีกครั้ง [21]

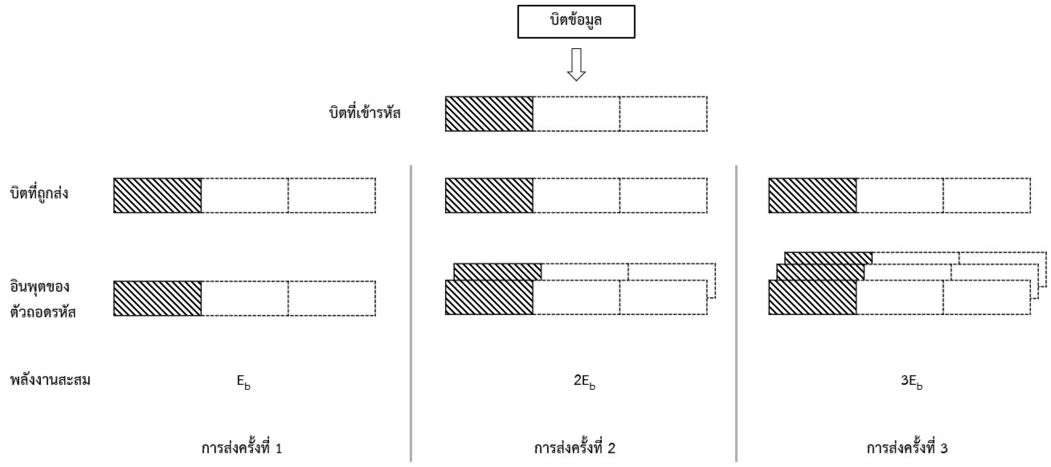
ระบบสื่อสารในปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้การเข้ารหัส FEC ร่วมกับ ARQ ที่เรียกว่า Hybrid ARQ โดยวิธีการดังกล่าวจะใช้รหัส FEC เพื่อแก้ไขความผิดพลาดทั้งหมดและใช้การตรวจจับความผิดพลาดเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดที่ไม่สามารถแก้ไขได้ ซึ่งหากยังตรวจพบความผิดพลาดแพ็กเกตดังกล่าวจะถูกทิ้ง และเครื่องรับจะร้องขอให้มีการส่งแพ็กเกตดังกล่าวอีกครั้ง การประยุกต์ใช้รูปแบบ hybrid ARQ ใน 5G สามารถทำได้โดยใช้รหัส CRC ในการตรวจจับความผิดพลาดและใช้รหัสแอลดีพีซีในการแก้ไขความผิดพลาด [22]

การทำงานของ Hybrid ARQ ที่อธิบายไว้ข้างต้นจะเป็นการทิ้งแพ็กเกตที่ได้รับผิดพลาดและร้องขอการส่งข้อมูลซ้ำ อย่างไรก็ตาม แม้จะไม่สามารถถอดรหัสแพ็กเกตดังกล่าวได้ แต่สัญญาณที่ได้รับยังคงมีข้อมูลอยู่ ข้อมูลดังกล่าวจะสูญหายไปเมื่อเครื่องรับทิ้งแพ็กเกตนั้น ข้อบกพร่องนี้ได้รับการแก้ไขโดยใช้ Hybrid ARQ ร่วมกับการทำ soft combining ในวิธีการดังกล่าวแพ็กเกตที่ได้รับผิดพลาดจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำบัฟเฟอร์และจะนำมารวมกับการส่งข้อมูลซ้ำในภายหลัง ซึ่งแพ็กเกตที่รวมขึ้นใหม่จะมีความน่าเชื่อมากขึ้น รหัสแก้ไขความผิดพลาดจะทำการถอดรหัสสัญญาณรวมที่เกิดขึ้น ซึ่งหากการถอดรหัสล้มเหลวจะมีการร้องขอให้ส่งข้อมูลซ้ำ การส่งข้อมูลในรูปแบบ Hybrid ARQ ที่มีการทำ soft combining สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ Chase Combining และ Incremental Redundancy

- Chase Combining Hybrid ARQ (CC-HARQ)

การส่งข้อมูลซ้ำแบบ CC-HARQ จะประกอบด้วยชุดของบิตที่เข้ารหัสซึ่งเหมือนกับการส่งครั้งก่อนหน้า หลังจากการส่งข้อมูลซ้ำแต่ละครั้ง เครื่องรับจะใช้ maximum-ratio combining ในการรวมบิตช่องสัญญาณที่ได้รับกับการส่งของมูลครั้งก่อนหน้าของบิตเดียวกัน และสัญญาณที่รวมแล้วจะถูกป้อนเข้าสู่ตัวถอดรหัส เนื่องจากการส่งข้อมูลซ้ำแต่ละครั้งจะคัดลอกการส่งข้อมูลเดิม จึงสามารถกล่าวได้ว่าการส่งข้อมูลซ้ำที่ใช้ chase combining เป็น additional repetition coding เนื่องจากไม่มีการส่ง redundancy ใหม่ ทำให้ไม่มีการเพิ่มเกนรหัสแต่จะเพิ่ม E_b / N_0 ที่ได้รับสะสมจากการส่งข้อมูลซ้ำในแต่ละครั้ง ตัวอย่างการส่งข้อมูลซ้ำแบบ CC-HARQ แสดงดังรูปที่ 4.3 นอกจากนี้ การส่งข้อมูลซ้ำแบบ

CC-HARQ ยังสามารถทำได้หลายรูปแบบ ตัวอย่างเช่น การใช้บิตข้อมูลเพียงบางบิตมาเป็นชุดของบิตข้อมูลที่ใช้ในการส่งซ้ำ ซึ่งเรียกว่า Chase Combining แบบบางส่วน



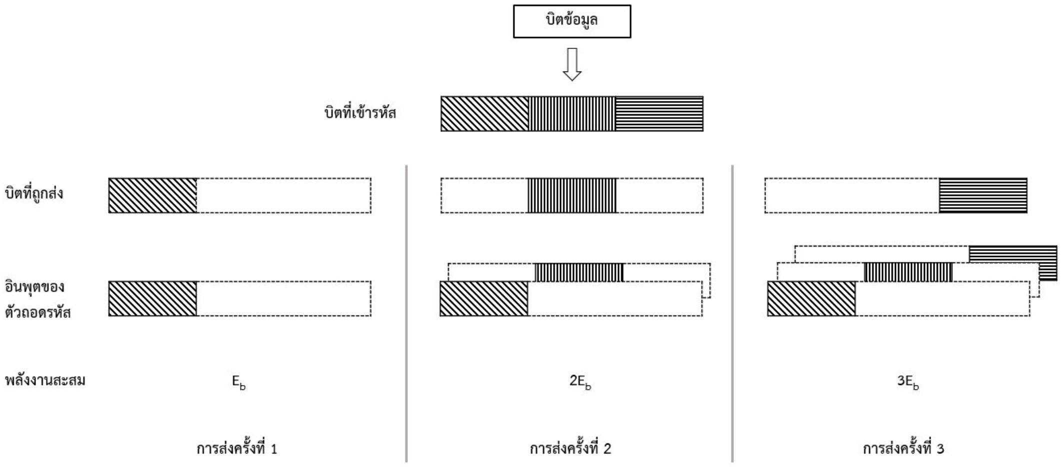
รูปที่ 4.3 การส่งข้อมูลซ้ำแบบ CC-HARQ

- Incremental Redundancy Hybrid ARQ (IR-HARQ)

การส่งข้อมูลซ้ำแบบ IR-HARQ ในการส่งซ้ำแต่ละครั้งไม่จำเป็นต้องเหมือนกับการส่งข้อมูลเดิม โดยจะสร้างบิตที่เข้ารหัสหลาย ๆ ชุด ซึ่งแต่ละบิตจะแทนชุดของบิตข้อมูลเดียวกัน เมื่อจำเป็นต้องมีการส่งข้อมูลซ้ำ โดยทั่วไปจะใช้ชุดของบิตที่เข้ารหัสที่แตกต่างจากการส่งครั้งก่อนหน้า ทางฝั่งเครื่องรับจะรวมการส่งข้อมูลซ้ำกับการส่งข้อมูลครั้งก่อนหน้าให้เป็นแพ็กเกตเดียวกัน เนื่องจากการส่งข้อมูลซ้ำอาจมีบิตตรวจสอบเพิ่มเติมซึ่งไม่อยู่ในการส่งข้อมูลครั้งก่อนหน้า นอกจากนี้การส่งข้อมูลซ้ำแต่ละครั้งไม่จำเป็นต้องประกอบด้วยบิตที่เข้ารหัสจำนวนเท่ากับบิตต้นฉบับ และในการส่งข้อมูลซ้ำที่แตกต่างกันอาจมีรูปแบบการมอดูเลตที่แตกต่างกัน

โดยทั่วไป Incremental Redundancy จะขึ้นอยู่กับรหัสที่มีอัตรารหัสต่ำ (Low-Rate Code) และ redundancy ที่แตกต่างกันจะถูกสร้างขึ้นจากการทำพังก์เจอร์ของเอาท์พุตของตัวเข้ารหัส ในการส่งข้อมูลครั้งแรกมีการส่งบิตที่เข้ารหัสจำนวนจำกัดเท่านั้น ทำให้ได้รหัสที่มีอัตรารหัสสูง (High-Rate Code) และในการส่งข้อมูลซ้ำจะส่งบิตที่เข้ารหัสเพิ่มเติม ตัวอย่างเช่น สมมติให้อัตรารหัสเริ่มต้นในการส่งครั้งแรกเป็น 3/4 ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดในการถอดรหัสและมีการร้องขอให้ส่งข้อมูลซ้ำ จะมีการส่งบิตเพิ่มเติมไปทำให้มีอัตรารหัสเป็น 3/8 หลังจากการส่งข้อมูลซ้ำครั้งที่ 2 จะได้อัตรารหัสเป็น 1/4

ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในกรณีที่มีการส่งข้อมูลซ้ำมากกว่า 2 ครั้ง จะเริ่มกลับไปส่งบิตที่เข้ารหัสของการส่งครั้งแรกใหม่ วิธีการนี้นอกจากจะได้รับ E_b / N_0 ที่เพิ่มขึ้นแล้ว ยังส่งผลให้ได้รับเกนรหัสสำหรับการส่งข้อมูลซ้ำแต่ละครั้ง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ CC-HARQ พบว่า IR-HARQ ในกรณีที่มีอัตรารหัสเริ่มต้นสูง การส่งข้อมูลในรูปแบบ IR-HARQ จะมีเกนรหัสที่สูงกว่า CC-HARQ และจะมีเกนรหัสที่ต่ำกว่าในกรณีที่มีอัตรารหัสเริ่มต้นต่ำ นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของสมรรถนะของ IR-HARQ เมื่อเปรียบเทียบกับ CC-HARQ ยังขึ้นอยู่กับความแตกต่างของกำลังสัมพัทธ์ (Relative Power) ระหว่างความพยายามในการส่ง



รูปที่ 4.4 การส่งข้อมูลซ้ำแบบ IR-HARQ

4.4 Scalable Time-Frequency Domain Resource Block

อินเทอร์เฟซทางอากาศ (Air Interface) แบบใหม่ในระบบ 5G มีความสามารถมากขึ้นกว่าเดิม ไม่เพียงแค่ช่วยปรับปรุงการใช้งานโทรศัพท์แถบความถี่กว้าง (Mobile Broadband) แต่ยังก่อให้เกิดบริการรูปแบบใหม่ขึ้น เช่น ภารกิจที่สำคัญหรืออุปกรณ์ Internet of Thing (IoT) จำนวนมาก 5G ได้นำเทคนิครูปคลื่น (waveform) และการเข้าถึงหลายช่องทาง (Multiple Access) บนพื้นฐานของ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) แบบปรับปรุง รวมถึงโครงสร้างที่ยืดหยุ่นที่สามารถให้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพและสร้างการรองรับสำหรับมาตรฐานในอนาคต แสดงดังรูปที่ 4.5

4.4.1 โครงสร้างบล็อกทรัพยากร เทคนิครูปคลื่นแบบใหม่ และการเข้าถึงหลายช่องทางบนเทคโนโลยีการสื่อสารยุคที่ 5

OFDM เป็นตัวเลือกของมาตรฐาน 5G ซึ่งข้อดีของ OFDM ประกอบด้วย [23]

1) ความซับซ้อนต่ำ สามารถใช้เครื่องรับสัญญาณที่มีความซับซ้อนต่ำแม้จะใช้งานกับสัญญาณที่มีความกว้างแถบความถี่กว้างขึ้น ซึ่งหมายถึงเครื่องรับสัญญาณที่ราคาถูกลง

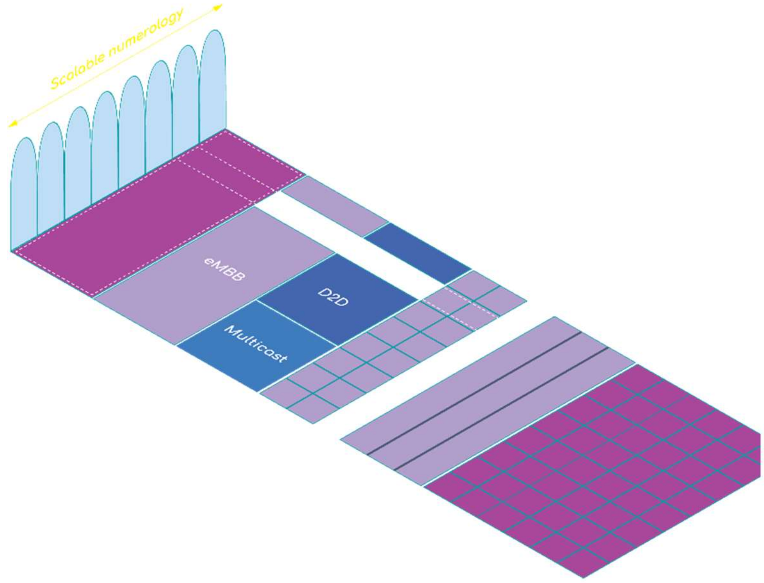
2) ประสิทธิภาพคลื่นความถี่สูง สามารถใช้เทคนิค MIMO ความซับซ้อนต่ำที่สามารถเพิ่มอัตราการส่งข้อมูลได้อย่างง่าย ส่งผลให้เข้าใกล้ขีดจำกัดของแชนนอนมากขึ้น

3) ใช้พลังงานต่ำ รองรับคลื่นพาห์เดียว (Single Carrier) ที่มีกำลังผันผวนต่ำ ส่งผลให้อัตราส่วนระหว่างกำลังสูงสุดกับกำลังเฉลี่ยต่ำ (Peak to Average Power Ratio: PAPR) เพื่อการส่งข้อมูลอัปลิงก์ที่ใช้พลังงานน้อยลง

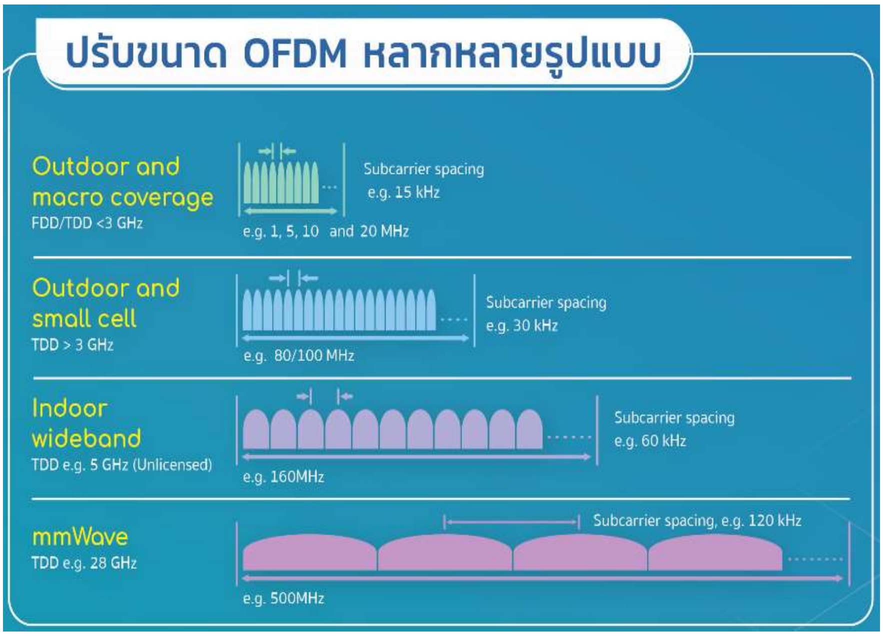
4) พื้นที่การใช้ความถี่ OFDM สามารถนำเทคนิคการปรับปรุงต่าง ๆ เช่น การกรอง (Windowing/Filtering) เพื่อที่ลดผลกระทบของการเปล่งสเปกตรัมในช่วงความถี่และนอกช่วงความถี่ (In-Band and Out-of-Band Emissions) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญต่อการมัลติเพล็กซ์บริการต่าง ๆ ใน 5G

4.4.2 ระบบตัวเลขของ OFDM แบบปรับขนาดได้โดยการปรับระยะของคลื่นพาห์ย่อย

ในระบบ LTE เดิมนั้นรองรับความกว้างแถบความถี่สูงสุด 20 เมกะเฮิรตซ์ และระยะระหว่างคลื่นพาห์ย่อยของ OFDM ขนาดเดียวคือ 15 กิโลเฮิรตซ์ ในระบบ 5G NR รองรับ OFDM แบบปรับขนาดได้ เพื่อที่รองรับการใช้งานในย่านความถี่ต่าง ๆ เช่น คลื่นมิลลิเมตรที่มีความกว้างแถบความถี่มากขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจำเป็นที่คลื่นพาห์ย่อยจะสามารถปรับขนาดตามความกว้างแถบความถี่เพื่อที่จะจำกัดการเพิ่มขึ้นของความซับซ้อนในการประมวลผลของการแปลงฟาสฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform) โดยระยะระหว่างคลื่นพาห์ย่อยของ OFDM แสดงดังตารางที่ 4.7 นอกจากนี้ 5G NR สามารถใช้งาน OFDM หลายขนาดได้พร้อมกันเพื่อให้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การใช้งานคลื่นพาห์ย่อยขนาดเล็กจะทำให้มีขนาดตัวเติมแบบวนใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้งานเป็นบริการการออกอากาศ (broadcast) ร่วมกันได้ และสุดท้าย 5G NR สามารถใช้งานคลื่นพาห์ร่วม (Carrier Aggregation) หลายขนาดพร้อม ๆ กัน เช่น การใช้ร่วมใช้คลื่นมิลลิเมตรกับคลื่นย่านความถี่ต่ำกว่า 6 กิกะเฮิรตซ์ ร่วมกันเพื่อความทนทานและมีประสิทธิภาพในการใช้งาน [24]



รูปที่ 4.5 โครงสร้างที่ยืดหยุ่นเพื่อการมัลติเพล็กซ์อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับบริการ 5G ในอนาคต



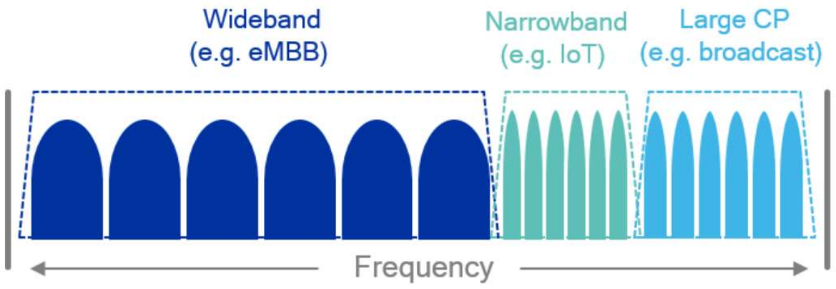
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างการใช้งานตามความกว้างแถบความถี่และระยะหว่างคลื่นพาห์ย่อย

ตารางที่ 4.7 ระบบตัวเลขของ OFDM ตามมาตรฐาน 5G [21]

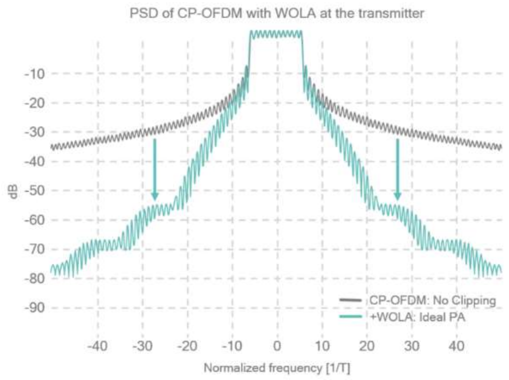
ระยะระหว่างคลื่นพาห์ย่อย	ความกว้างสัญลักษณ์	ตัวเติมแบบวน (Cyclic Prefix)	ความกว้างช่อง (Slot Duration)
15 กิโลเฮิรตซ์	66.67 ไมโครวินาที	4.76 ไมโครวินาที	500 ไมโครวินาที (7 ช่อง) หรือ 1000 ไมโครวินาที (14 ช่อง)
30 กิโลเฮิรตซ์	33.33 ไมโครวินาที	2.38 ไมโครวินาที	250 ไมโครวินาที (7 ช่อง) หรือ 500 ไมโครวินาที (14 ช่อง)
60 กิโลเฮิรตซ์	16.67 ไมโครวินาที	1.19 ไมโครวินาที	125 ไมโครวินาที (7 ช่อง) หรือ 250 ไมโครวินาที (14 ช่อง)
120 กิโลเฮิรตซ์	8.33 ไมโครวินาที	0.59 ไมโครวินาที	125 ไมโครวินาที (14 ช่อง)
240 กิโลเฮิรตซ์	4.17 ไมโครวินาที	0.30 ไมโครวินาที	63 ไมโครวินาที (14 ช่อง)

4.4.3 การมัลติเพล็กซ์บริการอย่างมีประสิทธิภาพด้วยการกรอง OFDM

ในการที่จะรองรับการมัลติเพล็กซ์ (Multiplex) บริการใน 5G อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งการเปล่งสเปกตรัมในช่วงความถี่และนอกช่วงความถี่ต้องทำให้ต่ำที่สุดเพื่อไม่ให้ไปรบกวนบริการอื่น ๆ ที่ความถี่ข้างเคียง OFDM สามารถทำการประมวลผลภายหลังได้ เช่น การกรองในโดเมนเวลาหรือในโดเมนความถี่เพื่อปรับปรุงการใช้งานพื้นที่ความถี่ รูปที่ 4.7 แสดงถึงการใช้งาน OFDM ที่ขนาดต่าง ๆ การมัลติเพล็กซ์ต่าง ๆ ในช่องสัญญาณความถี่เดียวกัน



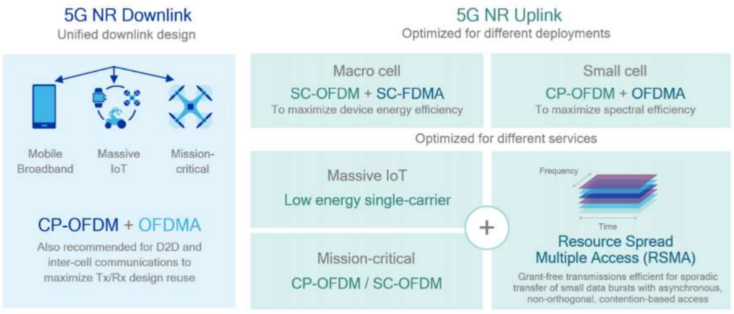
รูปที่ 4.7 การมัลติเพล็กซ์บริการต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพใน 5G [24]



รูปที่ 4.8 OFDM กับการกรองแบบบวกส่วนซ้อนเหลื่อมแบบถ่วงน้ำหนัก
ที่สามารถเพิ่มประสิทธิการใช้งานพื้นที่ความถี่ [24]

หนึ่งในเทคนิคที่ใช้งานคือเทคนิค OFDM แบบตัวเติมแบบวนกับการกรองแบบบวกส่วนซ้อนเหลื่อมแบบถ่วงน้ำหนัก (Cyclic-Prefix OFDM with Weighted Overlap Add: CP-OFDM with WOLA) ซึ่งช่วยในการลดการเปล่งสเปกตรัมในช่วงความถี่และนอกช่วงความถี่ แสดงดังรูปที่ 4.8 เทคนิคนี้เคยถูกใช้งานมาก่อนในระบบ LTE ก่อนนี้ ซึ่งยืนยันได้ถึงประสิทธิภาพที่ดีของเทคนิคดังกล่าว

4.4.4 การให้บริการ 5G อย่างหลากหลาย



รูปที่ 4.9 ข้อเสนอรูปแบบการเข้าถึงอย่างหลากหลายของ Qualcomm [24]

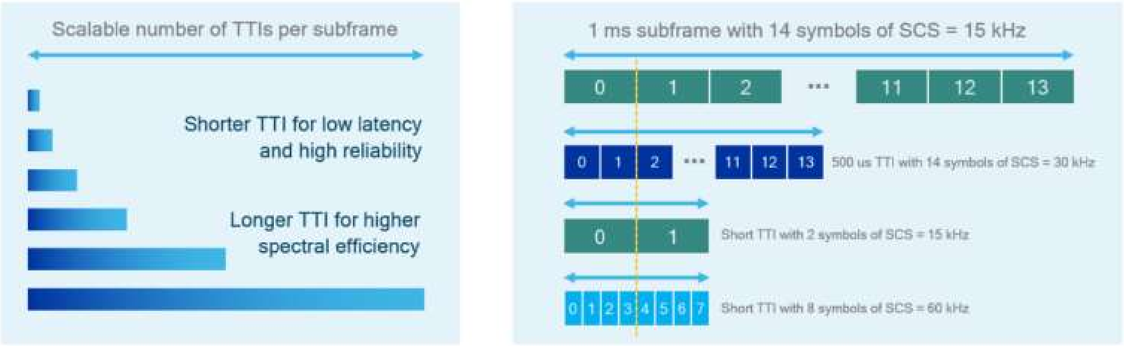
การรับรองบริการและอุปกรณ์ที่หลากหลายของ 5G ต้องการรูปคลื่นและการเข้าถึงอย่างหลากหลาย (Multiple Access) ที่เหมาะที่สุด 5G แสดงดังรูปที่ 4.9 ถูกออกแบบโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นเพื่อให้มีประสิทธิภาพการมัลติเพล็กซ์บริการที่หลากหลายและให้การรองรับสำหรับอนาคต

ความยืดหยุ่นดังกล่าวอยู่ในโดเมนความถี่และโดเมนเวลา เช่น RSMA (Resource Spread Multiple Access) ที่จะช่วยลดเวลาการเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้กับสถานีรับ-ส่ง [26]

4.4.5 คาบเวลาการส่งแบบปรับได้

ในโดเมนเวลา 5G สามารถทำการปรับโครงสร้างเพื่อให้ได้ความหน่วงที่ต่ำกว่าเทคโนโลยีในปัจจุบันอย่างมาก เทียบกับ LTE ที่รองรับคาบเวลาการส่งแบบคงที่ที่ 1 มิลลิวินาที 5G ถูกออกแบบเพื่อสามารถปรับขนาดของคาบเวลาการส่งให้ปรับขึ้นลงได้ตามความต้องการของบริการนั้น ๆ ความยืดหยุ่นนี้สามารถทำให้อินเทอร์เฟซทางอากาศมีความเหมาะสมในการใช้งานความหน่วงต่ำโดยการใช้คาบเวลาการส่งสั้น (หลักร้อยไมโครวินาที) หรือการใช้งานที่ทนต่ำปัญหาการหน่วงเวลาของสัญญาณโดยใช้คาบเวลาการส่งยาว

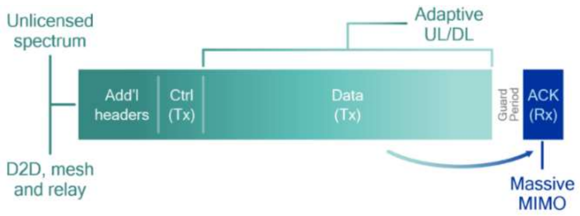
นอกจากนั้น 5G ยังรองรับการมัลติเพล็กซ์ของคาบเวลาการส่งที่ขึ้นอยู่กับการบริการ (Service-Aware Transmission Time Interval Multiplexing) ในย่านความถี่เดียวกัน เพื่อที่จะสามารถส่งข้อมูลโดยใช้คาบเวลาการส่งที่แตกต่างกันในระดับสัญลักษณ์แทนที่การใช้คาบเวลาที่แตกต่างกันในระดับเฟรมย่อย (ซึ่งมีขนาดใหญ่ถึง 1 มิลลิวินาที) เช่น การบริการที่ต้องการความหน่วงต่ำสามารถส่งข้อมูลเพียงเฟรมย่อยละ 2 สัญลักษณ์ (ประมาณ 140 ไมโครวินาที) ซึ่งจะสามารถประมวลผลเฟรมย่อยนั้นได้อย่างรวดเร็วต่างจากปัจจุบันที่ต้องรอการประมวลผลจากเฟรมย่อยถัดไปถึงประมาณ 500 ไมโครวินาที รูปที่ 4.10 แสดงถึงรูปแบบสัญลักษณ์ต่าง ๆ ใน 5G



รูปที่ 4.7 คาบเวลาการส่งแบบปรับได้สำหรับบริการที่ต้องการข้อกำหนดหลายอย่างที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [24]

4.4.6 การบรรจุเฟรมย่อยเองแบบรวม

การบรรจุเฟรมย่อยเองแบบรวมเป็นอีกหนึ่งเทคนิคที่สามารถลดความหน่วงได้ โดยการรวมข้อมูลที่ส่งกับการตอบรับ (Acknowledgement) ในเฟรมย่อยเดียวกัน รูปที่ 4.11 แสดงถึงการสื่อสารขาลงแบบการส่งสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Duplexing: TDD) โดยที่ข้อมูลที่ส่งจากโครงข่ายถึงอุปกรณ์และการตอบรับจากอุปกรณ์ถึงโครงข่ายเฟรมย่อยเดียวกัน โดยในคาบเวลาการส่งเดียวสามารถมีการสื่อสารทั้ง การอนุญาตส่งข้อมูลดาวน์ลิงก์ การส่งข้อมูลดาวน์ลิงก์ คาบเวลาคุม (Guard Period) การตอบรับอัปลิงก์ ภายในคาบเวลาการส่งเดียว



รูปที่ 4.11 การบรรจุเฟรมย่อยเองแบบรวม [25]

การบรรจุเฟรมย่อยเองแบบรวมยังสามารถมัลติเพล็กซ์สำหรับบริการที่จะเกิดขึ้นใหม่ในอนาคต โดยหนึ่งในเทคนิคนั้นคือการรองรับเฟรมย่อยเปล่าและย่านความถี่เปล่า เพื่อที่สามารถเพิ่มบริการใหม่ ๆ เข้ามาในระบบ 5G ได้

เฟรมย่อยยังสามารถบรรจุส่วนหัวเพิ่มเติมเพื่อบ่งบอกข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการส่งข้อมูล เช่น ในย่านความถี่ที่ไม่ได้จดทะเบียนจำเป็นต้องรองรับการฟังก่อนพูดคุย (Listen-Before-Talk) เพื่อการใช้งานที่เท่าเทียมกันระหว่างผู้ใช้ โดยส่วนหัวของการฟังก่อนพูดคุยจะถูกส่งโดยโครงข่ายจะถูกใช้งานโดยอุปกรณ์การสื่อสารขาลงเพื่อขาถึงช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสาร และเมื่อการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่ออุปกรณ์ (Device to Device: D2D) ส่วนหัวสามารถกำหนดทิศทางการสื่อสารและข้อมูลจัดลำดับการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์

การบรรจุเฟรมย่อยเองแบบรวมยังเป็นส่วนสำคัญในเทคนิคสายอากาศ เช่น massive MIMO ในการสื่อสารขาลง ในการที่จะส่งข้อมูลระหว่างเซลล์ส่งกับอุปกรณ์ การส่งข้อมูลต้องประเมินช่องสัญญาณและต้องปรับลำคลื่นการส่งข้อมูลตลอดเวลา กลไกการตอบกลับได้มาจากการสื่อสารขาขึ้น เช่น ข้อมูลช่องสัญญาณของการสื่อสารขาขึ้นและสัญญาณอ้างอิงขาขึ้น ข้อมูลช่องสัญญาณขาลง

สามารถประมาณได้อย่างแม่นยำจากคุณสมบัติ channel reciprocal ที่สามารถใช้สัญญาณอ้างอิงขาขึ้นในการประมาณช่องสัญญาณขาลงในระบบการส่งสัญญาณแบบแบ่งเวลา

เฟรมย่อยแบบข้อมูลขาลงเป็นหลักมี 3 ส่วนหลัก ส่วนการควบคุมดาวน์ลิงก์แบบต่อเนื่อง ส่วนข้อมูลดาวน์ลิงก์แบบต่อเนื่อง คาบเวลาคุม และส่วนควบคุมอัปลิงก์แบบต่อเนื่อง เฟรมย่อยแบบข้อมูลอัปลิงก์มีโครงสร้างที่คล้ายแบบข้อมูลดาวน์ลิงก์ ต่างกันที่มีคาบเวลาควบคุมก่อนส่วนข้อมูลอัปลิงก์แบบต่อเนื่อง โครงสร้างดังกล่าวช่วยลดการรบกวนกันของส่วนควบคุมอัปลิงก์และดาวน์ลิงก์ แสดงดังรูปที่ 4.11 โดยจำเป็นต้องส่งสัญญาณควบคุมในทิศทางเดียวกันทุก ๆ เซลล์รอบข้าง ทำให้สามารถสับเปลี่ยนทิศทางอย่างมั่นคง เฟรมย่อยแบบต่าง ๆ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายและความจุช่องสัญญาณโดยสับเปลี่ยนทิศทางการสื่อสารได้อย่างรวดเร็วในโครงข่าย

4.5 บทสรุป

การสื่อสารผ่านระบบไร้สายเป็นการสื่อสารที่มีโอกาสเกิดความผิดพลาดได้ง่าย เนื่องจากข้อมูลที่ส่งผ่านอากาศถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีที่เข้ามาช่วยให้การสื่อสารเป็นไปได้อย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ สำหรับในการสื่อสารยุค 5G ได้มีการนำเทคโนโลยีไร้สายมาประยุกต์ใช้มากมาย โดยในบทนี้ได้อธิบายเทคโนโลยีไร้สายที่สำคัญไว้ 4 เทคโนโลยี ได้แก่ การส่งข้อมูลโดยใช้คลื่นมิลลิเมตร ซึ่งเป็นคลื่นที่มีความถี่สูงทำให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราเร็วสูง การใช้สายอากาศแบบ Massive MIMO ที่ช่วยเพิ่มความจุของโครงข่ายและเพิ่มอัตราการส่งข้อมูล การเข้ารหัสช่องสัญญาณโดยใช้รหัสแอลดีพีซี และรหัสโพลาร์ ซึ่งทำให้สามารถแก้ไขความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลดีได้ยิ่งขึ้น และการใช้เทคนิค Scalable OFDM ที่ช่วยให้สามารถจัดสรรทรัพยากรให้มีความยืดหยุ่นเพื่อรองรับความต้องการที่หลากหลายของผู้ใช้ ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้ล้วนมีส่วนสำคัญในการเพิ่มขีดความสามารถของการสื่อสารในยุค 5G ที่กำลังจะเข้ามามีบทบาทสำคัญกับชีวิตประจำวันของมนุษย์ในอนาคตอันใกล้

4.6 เอกสารอ้างอิง

[1] T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney, Jr., A. F. Molisch, E. Mellios, and J. Zhang, *"Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-with a Focus on Propagation Models,"* in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Special Issue on 5G, Nov. 2017.

[2] GSMA, *"ROAD TO 5G: Introduction and Migration,"* April 2018.

[3] CEPT. (2019) *"Spectrum for wireless broadband – 5G"*. from https://www.cept.org/ecc/topics/spectrum-for-wireless-broadband-5g

[4] FCC. (2016). *"Spectrum Frontiers Proposal To Identify, Open Up Vast Amounts Of New High-Band Spectrum For Next Generation (5g) Wireless Broadband".* from https://www.fcc.gov/document/fact-sheet-spectrum-frontiers-item

[5] FCC. (2016). *"Spectrum Frontiers R&O and FNPRM".* from https://www.fcc.gov/document/spectrum-frontiers-ro-and-fnprm

[6] S. Singh, F. Ziliotto, U. Madhow, E. M. Belding, and M. Rodwell, "Blockage and directivity in 60 GHz wireless personal area networks: From cross-layer model to multi hop MAC design," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 8, pp. 1400–1413, Oct. 2009.

[7] Y. Niu, Y. Li, D. Jin, L. Su, and A. V. Vasilakos, "A survey of millimeter wave (mmWave) Communications for 5G: Opportunities and challenges," arXiv:1502.07228v1 [cs.NI], Feb. 2015.

[8] ITU, World Radiocommunication Conference 2015 (WRC-15), Geneva, Switzerland, 2-27 November 2015.

[9] FCC. (2018). *"FCC Begins Process for Spectrum Frontiers Auctions".* from https://www.fcc.gov/document/fcc-opens-inquiry-new-opportunities-mid-band-spectrum-0

[10] FCC. (2018). *"Auction 101: Spectrum Frontiers – 28 GHz".* from https://www.fcc.gov/auction/101

[11] FCC. (2019). *"Auction 102: Spectrum Frontiers – 24 GHz".* from https://www.fcc.gov/auction/102/factsheet

[12] NGMN Alliance, *"NGMN 5G White Paper".* from https://www.ngmn.org/5g-white-paper.html

[13] 5G Americas. (2019) *"5G Spectrum Vision".* from https://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/5g_americas_ntia_national_spectrum_strategy_comments.pdf

[14] E.G. Larsson, and Liesbet Van der Perre. (2017). Massive MIMO for 5G. *IEEE 5G Tech Focus,* vol. 1, No. 1.

[15] S. Kapilavai. (2019). *Best Practices to Accelerate 5G Base Station Deployment: Your RF Front-End Massive MIMO Primer.* from https://www.qorvo.com/design-hub/blog/best-practices-to-accelerate-5g-base-station-deployment

[16] กสทช. (2561). *5G: คลื่นและเทคโลโลยี.* ค้นหาเมื่อ 17 ธันวาคม 2562, จาก https://bit.ly/2EqTSeT

[17] J. H. Bae, A. Abotabl, H. Lin, and K. Song. (2009). An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. *Industrial Technology Advances,* vol.4, 1-14.

[18] R. G. Gallager. (1962). Low-Density Parity-Check Codes. *IRE Transections on Information Theory,* vol.8, 21-28.

[19] D. Hui, S. Sandberg, Y. Blankenship, M. Andersson, and L. Grosjean. (2018) *Channel Coding in 5G New Radio. IEEE Verhicular Technology Magazine,* vol.13, 60-69.

[20] E. Arikan. (2009). Channel Polarization: A method for Constructing Capacity-Acheving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels. *IEEE Transactions on Theory,* vol.55, 3051-3073.

[21] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Shold (2557). LTE/LTE-Advanced for Mobile Broad band. Waltham: Elsevier.

[22] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Shold (2557). 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology. London: Academic press.

[23] Qualcomm Technologies, inc. (2016). *5G Waveform & Multiple Access Techniques.* Retrieved October 24, 2019, from https://www.qualcomm.com/media/documents/files/whitepaper-making-5g-nr-a-reality.pdf

[24] Qualcomm Technologies, inc. (2015). *5G Waveform & Multiple Access Techniques.* Retrieved October 24, 2019, from https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5g-research-on-waveform-and-multiple-access-techniques.pdf

[25] 3GPP: TS 38.211 *"Physical channels and modulation (Release 15)",* 2017

[26] Y. Cao, H. Sun, J. Soriaga and T. Ji. (2017). *"Resource Spread Multiple Access - A Novel Transmission Scheme for 5G Uplink,"* 2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Toronto, ON, 2017, pp. 1-5

บทที่ 5

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยี 5G ในประเทศไทย

ศิรวิชญ์ กิตติวิชญกุล

บทที่ 1 ถึง 4 ของหนังสือเล่มนี้ ผู้เขียนได้อธิบายถึงการสื่อสารยุคที่ 5 หรือ 5G ในเชิงเทคนิคพอสังเขปแล้วว่าเทคโนโลยี 5G จะมีการใช้เทคโนโลยีด้านความถี่ (Radio frequency) ที่แตกต่างจาก 4G เดิม รวมถึงเกิด Use case ใหม่ ๆ ที่เป็นประโยชน์แก่ภาครัฐ อุตสาหกรรม และครัวเรือนอย่างมากมาย เมื่ออ่านมาถึงตรงนี้ ผู้อ่านอาจจะเกิดคำถามขึ้นมาบ้างแล้วว่าในประเทศไทยจะมีการนำ 5G มาใช้อย่างเต็มรูปแบบเมื่อใด รวมถึงภาครัฐ อุตสาหกรรม และมหาวิทยาลัยในประเทศไทยมีความตื่นตัวกับการมาถึงของ 5G มากน้อยเพียงใด ดังนั้นในบทนี้ผู้เขียนจะกล่าวถึงความก้าวหน้าของ 5G ในประเทศไทย เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเตรียมตัวได้ทันกับการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่การสื่อสารยุคใหม่ในไม่ช้านี้

5.1 การประมูลคลื่นความถี่ 5G ในประเทศไทย

ประเทศไทยนับว่าเป็นหนึ่งในประเทศที่มีการประมูลคลื่นความถี่อย่างดุเดือด และมีมูลค่าการประมูลคลื่นความถี่ที่สูงมาก โดยองค์กรที่ทำหน้าที่ในการจัดสรรคลื่นความถี่ในประเทศไทย คือ กสทช. หรือคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ที่ผ่านมา กสทช. จัดประมูลคลื่นความถี่มาแล้ว 2 รอบ นั่นคือการประมูลคลื่น 3G (ในปี 2555) และ 4G (ในปี 2558) หากพิจารณาการประมูลคลื่น 4G ที่ผ่านมา ประเทศไทยมีมูลค่าการประมูลคลื่นความถี่สูงเป็นอันดับที่ 2 ของโลก โดยมีราคาเฉลี่ยต่อหน่วยที่ 57 บาทต่อเมกะเฮิรตซ์ต่อประชากร เป็นรองฮ่องกงที่มีราคาเฉลี่ยต่อหน่วยที่ 64 บาทต่อเมกะเฮิรตซ์ต่อประชากร ด้วยเหตุดังกล่าว ก่อนมีการจัดการประมูลคลื่น 5G ขึ้น กสทช. ได้มีการประเมินว่ามูลค่าการประมูลคลื่น 5G จะยังคงสูงในระดับที่การประมูล 4G เคยทำได้ สำหรับการประมูลคลื่น 5G เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 16 กุมภาพันธ์ 2563 ที่ผ่านมา โดยใช้วิธีการประมูลแบบ Clock Auction เพื่อช่วยประหยัดเวลาในการประมูล ซึ่งนับเป็นครั้งแรกที่ประเทศไทยเลือกใช้วิธีการแบบนี้ การประมูลคลื่นความถี่ 5G ในครั้งนี้เรียกได้ว่าดุเดือดกว่าการประมูลคลื่นความถี่ในครั้งที่ผ่านมามาก เนื่องจากมีหลาย ๆ องค์กรทั้งภาครัฐวิสาหกิจและเอกชนเข้าร่วมประมูลถึง 5 บริษัทประกอบไปด้วย

- บริษัท ทรูมูฟ เอช ยูนิเวอร์แซล คอมมิวนิเคชั่น จำกัด (Truemove H)
- บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) (TOT)
- บริษัท ดีแทค ไตรเน็ต จำกัด (dtac)
- บริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) (CAT Telecom)
- บริษัท แอดวานซ์ ไวร์เลส เน็ทเวอร์ค จำกัด (AWN หรือ AIS)

การประมูลคลื่นความถี่โทรคมนาคม

7 18 26 MHz 26GHz	700 MHz	1800 MHz	2600 MHz	26 GHz
คลื่นความถี่	FDD 733 748 788 803 Lot 1-3 Lot 1-3 733-748 MHz/ 788-803 MHz	FDD 1750 1785 1845 1880 Lot 1-7 Lot 1-7 1750-1785 MHz/ 1845-1880 MHz	TDD 2500 2690 Lot 1-19 2500-2690 MHz	TDD 24.3 27 Lot 1-27 24.3-27 GHz
จำนวนชุดคลื่น	จำนวน 3 ชุด ชุดละ 2x5 MHz	จำนวน 7 ชุด ชุดละ 2x5 MHz	จำนวน 19 ชุด ชุดละ 10 MHz	จำนวน 27 ชุด ชุดละ 100 MHz
เพดานการประมูล	3 ชุด (2x15MHz)	4 ชุด (2x20MHz)	10 ชุด (100MHz)	12 ชุด (1200MHz)
ราคาขั้นต่ำต่อชุด	8,792 ลบ.	12,486 ลบ.	1,862 ลบ.	423 ลบ.
ขั้นราคา	440 ลบ.	25 ลบ.	93 ลบ.	22 ลบ.
หลักประกัน	2,637.6 ลบ.	4,994.4 ลบ.	1,862 ลบ.	507.6 ลบ.
การชำระเงิน	10 งวด งวดละ 10%	งวดที่ 1 : 50% งวดที่ 2 : 25% งวดที่ 3 : 25%	งวดที่ 1 : 10% งวดที่ 2-7 : 15% (ปีที่ 5-10)	1 งวด 100%
ค่าปรับต่อชุด	1,319 ลบ.	1,873 ลบ.	280 ลบ.	64 ลบ.
การขยายโครงข่าย	ไม่มี	4 ปี 40% ของประชากร 8 ปี 50% ของประชากร	1 ปี 50% ของพื้นที่ EEC 4 ปี 50% ของพื้นที่ Smart city	ไม่มี

รูปที่ 5.1 ผังแสดงชุดคลื่นความที่ที่ถูกนำมาประมูลโดย กสทช. [1]

กสทช. ได้ทำการจัดประมูลคลื่นความถี่ที่ใช้สำหรับ 5G ทั้งหมด 4 คลื่นความถี่ดังนี้

- <u>คลื่นความถี่ 700 เมกะเฮิรตซ์</u>

เป็นคลื่นความถี่ต่ำที่สุดที่ถูกนำมาใช้ใน 5G ซึ่งการใช้คลื่นความถี่ย่าน 700 เมกะเฮิรตซ์ จะทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ไกล แต่อำนาจในการทะลุทะลวงต่ำ เหมาะสำหรับใช้กับพื้นที่ห่างไกล และพื้นที่ชนบทที่มีผู้ใช้งานไม่แออัดมากนัก คลื่นความถี่ต่ำในย่านนี้เป็นที่นิยมสำหรับผู้ให้บริการ เนื่องจากสามารถลดต้นทุนในการติดตั้งเสาสัญญาณในการให้บริการ ทาง กสทช. ได้มีการวางกฎเกณฑ์ สำหรับการประมูลคลื่นย่าน 700 เมกะเฮิรตซ์ ไว้ว่าจะมีการนำคลื่นความถี่ออกมาประมูลทั้งสิ้น 15 เมกะเฮิรตซ์ แบ่งออกเป็น 3 ชุด โดยผู้เข้าร่วมการประมูลสามารถประมูลได้สูงสุด 3 ชุด ราคาการประมูลเริ่มต้นที่ 8,792 ล้านบาทต่อชุด ผู้ประมูลสามารถเคาะราคาเพิ่มขึ้นได้ครั้งละ 440 ล้านบาท การชำระเงินค่าประมูลแบ่งเป็น 10 งวด งวดละร้อยละ 10 ของราคาที่ชนะการประมูล โดยผู้เข้าร่วมการประมูลต้องวางหลักประกันการประมูล 2,637.60 ล้านบาท

- <u>คลื่นความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์</u>

สำหรับคลื่นย่าน 1800 เมกะเฮิรตซ์ เป็นคลื่นความถี่ปานกลางที่ถูกนำมาใช้ใน 5G โดย กสทช. จะมีการนำคลื่นความถี่ออกมาประมูล 35 เมกะเฮิรตซ์ แบ่งออกเป็น 7 ชุด โดยผู้เข้าร่วมการประมูลสามารถประมูลได้สูงสุดประมูล 4 ชุด โดยราคาเริ่มต้นที่ 12,486 ล้านบาทต่อชุด ผู้ประมูลสามารถเคาะราคาเพิ่มขึ้นได้ครั้งละ 25 ล้านบาท การชำระเงินค่าประมูลแบ่งเป็น 3 งวด งวดที่ 1 ชำระร้อยละ 50 ของราคาที่ชนะการประมูล งวดที่ 2 ชำระร้อยละ 25 ของราคาที่ชนะการประมูล งวดที่ 3 ชำระร้อยละ 25 ของราคาที่ชนะการประมูล โดยผู้เข้าร่วมการประมูลต้องวางหลักประกันการประมูล 4,994.40 ล้านบาท นอกจากนี้ กสทช. ได้มีการวางกฎเกณฑ์พิเศษสำหรับการประมูลคลื่นย่านนี้คือ ผู้ชนะการประมูลต้องมีการขยายโครงข่าย 5G ให้ครอบคลุมร้อยละ 50 ของจำนวนประชากรภายในระยะเวลา 8 ปี

- <u>คลื่นความถี่ 2,600 เมกะเฮิรตซ์</u>

เป็นคลื่นความถี่สูง มีประสิทธิภาพในการทะลุทะลวงได้ดี ทั้งในอาคาร ตึกสูง และอื่น ๆ รวมถึงความสามารถในการใช้งานได้หลายอุปกรณ์ในเวลาเดียวกันเป็นจำนวนมาก แต่มีข้อจำกัดที่สำคัญคือมีความสามารถในการส่งสัญญาณที่ค่อนข้างต่ำ คลื่นสัญญาณกระจายได้ไม่ไกลนัก เหมาะแก่การใช้งานในพื้นที่แออัด มีการกระจุกตัวของผู้ใช้งานอย่างหนาแน่น โดยเฉพาะบริเวณเมืองใหญ่ ๆ โดย กสทช. นำคลื่นความถี่ย่าน 2,600 เมกะเฮิรตซ์ ออกมาประมูล 190 เมกะเฮิรตซ์ แบ่งออกเป็น 19 ชุด

ผู้เข้าร่วมการประมูลสามารถประมูลได้สูงสุด 10 ชุด ราคาเริ่มต้นการประมูล 1,862 ล้านบาทต่อชุด โดยสามารถเคาะราคาเพิ่มขึ้นครั้งละ 93 ล้านบาท การชำระเงินค่าประมูลแบ่งเป็น 7 งวด โดยงวดที่ 1 ชำระร้อยละ 10 ของราคาที่ชนะการประมูล งวดที่ 2-7 (ปีที่ 5-10) ชำระร้อยละ 15 ของราคาที่ชนะการประมูล นอกจากนี้ กสทช. ได้มีการวางกฎเกณฑ์พิเศษสำหรับการประมูลคลื่นย่านนี้คือ ผู้ชนะการประมูลต้องมีการขยายโครงข่ายให้ครอบคลุมร้อยละ 50 ของพื้นที่เขตส่งเสริมระเบียงเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออก (Eastern Economic Corridor: EEC) ภายใน 1 ปี และครอบคลุมร้อยละ 50 ของจำนวนประชากรภายในเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ภายใน 4 ปี

- <u>คลื่นความถี่ 26 กิกะเฮิรตซ์</u>

เป็นคลื่นความถี่สูงมากในย่าน mmWave มีคุณลักษณะเหมือนกันกับคลื่นความถี่ย่าน 2600 เมกะเฮิรตซ์ โดยเป็นคลื่นที่เหมาะกับการทำ 5G มากที่สุด มีความเป็นสากลในด้านอุปกรณ์รองรับและเครื่องลูกข่าย ถึงแม้คลื่นย่านนี้เหมาะแก่การทำ 5G มากที่สุด แต่การลงทุนด้านโครงข่าย สถานีฐานและการนำเข้าอุปกรณ์ในประเทศไทยยังไม่พร้อมมากนัก อาจต้องรอถึง 2 ปี จึงจะสามารถใช้ประโยชน์ของคลื่นย่านนี้ได้เต็มที่ อย่างไรก็ตาม กสทช. คาดว่าคลื่นย่านนี้จะมีการแข่งขันกันดุเดือดมากที่สุด โดย กสทช. นำออกคลื่นมาประมูล 2700 เมกะเฮิรตซ์ แบ่งออกเป็น 27 ชุดคลื่นความถี่ ผู้เข้าร่วมการประมูลสามารถประมูลได้สูงสุดประมูล 12 ชุด ราคาเริ่มต้นการประมูล 423 ล้านบาทต่อชุด เคาะราคาเพิ่มขึ้นครั้งละ 22 ล้านบาท กำหนดการชำระเงินค่าประมูลงวดเดียว

ขณะที่คลื่นย่าน 3,500 เมกะเฮิรตซ์ ที่เอกชนต้องการและเคยเสนอเมื่อครั้งประชาพิจารณ์ปลายปีที่แล้วว่าให้เอามาประมูลด้วย สุดท้าย กสทช. ก็ยังไม่ได้เอามาบรรจุในการประมูลรอบนี้ อย่างไรก็ตาม สำหรับการประมูลคลื่นความถี่ 5G ในครั้งนี้ กสทช. และบริษัทเข้าร่วมประมูลได้วางเป้าหมายร่วมกันไว้ว่า 2 ปีแรกหลังจากการประมูลคลื่นเสร็จสิ้น จะเน้นการลงทุนไปที่โครงสร้างพื้นฐานด้านโทรคมนาคมในภาคอุตสาหกรรม สาธารณสุข การเกษตร และเทคโนโลยี มากกว่าเน้นให้บริการเพื่อใช้ในชีวิตของประชาชน โดยที่ กสทช. คาดการณ์ว่าจะได้เงินจากการประมูลกว่า 70,000 ล้านบาท แต่เมื่อสิ้นสุดการประมูลผลที่ได้คือ กสทช. สามารถสร้างมูลค่าการประมูลคลื่นความถี่ทั้งสิ้น 100,521 ล้านบาท มากกว่าที่คาดการณ์ไว้มาก โดยมีรายละเอียดดังนี้

▪ คลื่นความถี่ 700 เมกะเฮิรตซ์ มีบริษัทเข้าร่วมประมูล 3 ราย ได้แก่ AIS, Truemove H และ CAT Telecom แต่ผลสุดท้าย AIS ได้รับใบอนุญาต 1 ใบ และ CAT Telecom ได้รับใบอนุญาต 2 ใบ มูลค่า 51,460 ล้านบาท

▪ คลื่นความถี่ 1,800 เมกะเฮิรตซ์ "ไม่มี" บริษัทใดแสดงเจตจำนงในการขอเข้าร่วมประมูล ซึ่งนับเป็นครั้งแรกที่มีคลื่นที่ กสทช. เอามาประมูลแล้วบริษัทไม่สนใจ

▪ คลื่นความถี่ 2,600 เมกะเฮิรตซ์ มีบริษัทสนใจเข้าร่วมประมูล 3 รายเดิม ได้แก่ AIS, Truemove H และ CAT Telecom ผลคือ AIS ได้ใบอนุญาต ไป 10 ใบ และ Truemove H ได้ 9 ใบ รวมทั้งหมด 19 ใบอนุญาต มูลค่ารวมกว่า 37,434 ล้านบาท

▪ คลื่นความถี่ 26 กิกะเฮิรตซ์ หรือ เป็นคลื่นที่ กสทช. เป็นคลื่นความถี่ที่มีผู้ให้ความสนใจแสดงเจตจำนงเข้าร่วมประมูลมากที่สุดจำนวน 4 ราย ประกอบไปด้วย AIS, Truemove H, DTAC และ TOT โดย DTAC สามารเอาชนะการประมูลไปได้ที่ช่วงความถี่กว่า 200MHz จำนวน 2 ใบอนุญาต ส่วน AIS ได้มากสุดที่ 12 ใบอนุญาต รวมคลื่นกว่า 1,200 MHz และที่เหลือเป็นของ TOT ได้ไป 4 ใบอนุญาต และ Truemove H ได้ทั้งหมด 8 ใบอนุญาต รวมมูลค่ากว่า 11,628 ล้านบาท

รูปที่ 5.2 ผลการประมูลคลื่น 5G [2] [3]

ผู้เขียนจะขอสรุปผลการประมูลคลื่น 5G ในครั้งนี้ว่า บริษัทยักษ์ใหญ่ด้านโทรคมนาคมอย่าง AIS ถือเป็นบริษัทที่ประสบความสำเร็จในการประมูลมากที่สุด ซึ่งสามารถเอาชนะการประมูลทั้งสิ้น 3 คลื่นความถี่ (ชนะการประมูลคลื่นทั้งหมดที่บริษัทเข้าร่วม) ได้แก่ คลื่นความถี่ 700 เมกะเฮิรตซ์ คลื่นความถี่ 2,600 เมกะเฮิรตซ์ และคลื่นความถี่ 26 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยมูลค่าการประมูล 42,060 ล้านบาท ส่วนบริษัทคู่แข่งสำคัญอย่าง Truemove H สามารถเอาชนะการประมูลคลื่นความถี่ทั้งสิ้น 2 คลื่นความถี่ ได้แก่ คลื่นความถี่ 2,600 เมกะเฮิรตซ์ และคลื่นความถี่ 26 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยมูลค่าการประมูลที่ต่ำกว่าราว ๆ ครึ่งหนึ่งที่ 21,450 ล้านบาท สำหรับบริษัท DTAC สามารถเอาชนะการประมูลไปได้เพียงความถี่เดียว คือ 26 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยมูลค่าการประมูล 910 ล้านบาท หากพิจารณาไปที่รัฐวิสาหกิจ บริษัท กสท. โทรคมนาคม จำกัด หรือ CAT ที่เอาชนะการประมูลแค่คลื่น 700 เมกะเฮิรตซ์ เพียงคลื่นความถี่เดียวจากการประมูล 5G ครั้งนี้ ด้วยมูลค่าการประมูลรวมกว่า 34,306 ล้านบาท รวมถึงบริษัท ทีโอที จำกัด หรือ TOT ที่เอาชนะการประมูลแค่คลื่น 26 กิกะเฮิรตซ์ เพียงคลื่นความถี่เช่นกัน โดยมูลค่าการประมูล คือ 1,795 ล้านบาท โดยงบประมาณที่ทาง CAT และ TOT ใช้ในการประมูลในครั้งนี้ได้รับมาจากกรอบงบประมาณทางธุรกิจของตนเอง ซึ่งถึงแม้จะใช้เงินรวมกันสูงกว่า 36,101 ล้านบาท (CAT: 34,306 ล้านบาท + TOT: 1,795 ล้านบาท) แต่ผู้ประกอบการทั้งสองรายก็ได้วางแผนล่วงหน้าไว้อย่างรัดกุมแล้วว่ามีกำลังมากพอจะสามารถชำระค่าประมูลและให้บริการได้ ซึ่งผู้เขียนคาดว่าการตัดสินใจเข้าร่วมการประมูลของ CAT และ TOT สามารถแสดงได้ถึงศักยภาพขององค์กรที่สามารถเติบโตด้วยลำแข้งของตนเอง และพร้อมแข่งขันกับบริษัทเอกชนยักษ์ใหญ่ทั้งสาม ซึ่งเป็นการปรับตัวเองให้เข้ากับยุคสมัยและการพัฒนาการด้านโทรคมนาคม และเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานหลาย ๆ ภาคส่วน ที่จะได้รับการบริการที่ดีขึ้นอีกด้วย

ตามที่ได้กล่าวถึงในส่วนต้นของหนังสือเล่มนี้ว่าการสื่อสารยุค 5G ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการใช้งาน 3 ด้าน คือการเพิ่มความเร็ว การลดความหน่วง และเพิ่มปริมาณความจุโครงข่าย ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสามด้านล้วนสนับสนุนการใช้งาน IoT ที่เพิ่มมากขึ้นในอนาคต ทั้งนี้หากพิจารณาไปที่การประมูลคลื่นความถี่ 5G ในครั้งนี้ จะเห็นได้ว่าหลาย ๆ บริษัทเตรียมพัฒนาคลื่นความถี่เพื่อนำไปใช้กับกลุ่มธุรกิจ IoT มากขึ้น ผู้เขียนคาดว่าการให้บริการการสื่อสารจากผู้ให้บริการอาจไม่ใช่เพียงการโทรและการใช้อินเทอร์เน็ตอีกต่อไป แต่จะมีการให้บริการ IoT ด้าน Solution ให้กับองค์กรธุรกิจต่าง ๆ มากขึ้น โดยในอนาคต ผู้ใช้บริการมีโอกาสได้เห็นร้านค้าที่เป็น Unmaned Store หรือยานยนต์อัตโนมัติ

(ถ้ามีระบบถนนที่ดีและกฎหมายการจราจรที่เข้มงวด ถูกต้องกับพฤติกรรมผู้ใช้รถใช้ถนนในเมืองไทย) ที่ให้บริการโดยบริษัทโทรคมนาคมไม่ไกลเกินฝันแน่นอน ทั้งนี้ภายหลังจากการประมูล กสทช.จะเร่งผลักดันการประมูล 5G และการติดตั้งอุปกรณ์โครงข่ายให้เสร็จตามระยะเวลาที่วางไว้ โดยผู้รับอนุญาตสามารถเริ่มติดตั้งโครงข่ายได้ตั้งแต่เดือนมีนาคม 63 จะทำให้ประชาชนมีโอกาสได้ใช้บริการระบบ 5G ก่อนเดือนกรกฎาคม 63

5.2 การทดสอบการใช้งาน 5G ในประเทศไทย

เป็นที่ทราบกันดีว่าก่อนที่จะมีการใช้ 5G อย่างเต็มรูปแบบนั้น จำเป็นจะต้องมีการทดสอบความเป็นไปได้ในการใช้งานตามสภาพแวดล้อมจริง รวมไปถึงการศึกษาคุณลักษณะ และผลกระทบของอุปกรณ์สำหรับรองรับการใช้งานคลื่นความถี่สูงก่อนเสมอ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 จวบจนถึงปัจจุบัน บริษัทผู้ให้บริการโทรคมนาคมยักษ์ใหญ่ในประเทศไทยได้มีการทำงานร่วมกับมหาวิทยาลัยต่าง ๆ เพื่อดำเนินการทดสอบและทดลองการส่งสัญญาณคลื่น 5G รวมถึงการพัฒนาแบบจำลอง Use case ที่หลากหลายด้วยเช่นกัน ผู้เขียนจะขอสรุปรายละเอียดต่าง ๆ ของความร่วมมือระหว่างบริษัทและมหาวิทยาลัยดังนี้

รูปที่ 5.3 ศูนย์ทดสอบ 5G Garage Innovation LAB ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [4]

- <u>จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย</u>

นับเป็นครั้งแรกที่เกิดความร่วมมือระหว่างภาคเอกชนและมหาลัยเพื่อศึกษาถึงการสื่อสาร 5G ขึ้น บริษัท AIS และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้มีการตกลงร่วมมือกันเพื่อพัฒนาและทดสอบเทคโนโลยี 5G ซึ่งได้รับงบประมาณสนับสนุนจาก กสทช. โดยมีเป้าหมายเพื่อศึกษาถึงมาตรฐานและเทคนิคของการสื่อสารยุค 5G เพื่อให้นักศึกษาและนักวิจัยได้เตรียมพร้อมสำหรับการมาถึงของเทคโนโลยี 5G รวมถึงเทคโนโลยีที่จำเป็นสำหรับการสื่อสารยุค 5G เบื้องต้น นอกจากนี้ทาง AIS ได้เปิดศูนย์ 5G/AI/IoT innovation canter เพื่อให้นักศึกษาและนักวิจัยได้ลงมือศึกษาการใช้ 5G บนโครงข่ายจริงและร่วมกันพัฒนา Use case ด้านต่าง ๆ ในกลุ่มอุตสาหกรรมที่หลากหลาย โดยเฉพาะกลุ่มสาธารณสุขที่มีโอกาสนำไปใช้จริงในช่วงวิกฤตโควิด-19 ที่ผ่านมา นอกจากนี้ AIS ได้ทำการตั้งศูนย์ทดสอบ 5G ภายใต้ชื่อโครงการ 5G Garage Innovation LAB ที่อาคาร 100 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ เพื่อใช้เป็นสถานที่ทดลองการส่งสัญญาณ 5G แห่งแรกในประเทศไทย การจัดตั้งศูนย์ในครั้งนี้ได้มีการติดตั้งคลื่นความถี่ในช่วง 26.5-27.5 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะช่วยในการทดสอบอุปกรณ์เทคโนโลยีต่าง ๆ ภายในมหาวิทยาลัย โดยเฉพาะการทดสอบนวัตกรรมที่พัฒนาโดยนักศึกษาและบุคลากร ปัจจุบัน มีการทดสอบอุปกรณ์บนการใช้งาน 5G ในมหาวิทยาลัย เช่น รถยนต์อัตโนมัติ CU TOYOTA หุ่นยนต์ควบคุมระยะไกล เป็นต้น

นอกจากนี้บริษัท Truemove H ได้แสดงความร่วมมือกับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้วยเช่นกันในการเปิดศูนย์วิจัย TrueLab@ChulaEngineering 5G & Innovative Solution Center มีพื้นที่กว่า 600 ตารางเมตร โดยบริษัท Truemove H ตั้งเป้าไว้ว่าให้ศูนย์วิจัยดังกล่าวจะเป็นประโยชน์แก่บุคลากรในมหาวิทยาลัย เพื่อวิจัยพัฒนาและสร้างสรรค์นวัตกรรม Use case ใหม่ ๆ ด้วยเทคโนโลยี 5G ที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งด้านการศึกษา การแพทย์ การขนส่ง รวมถึงการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม นอกจากนี้ศูนย์วิจัยดังกล่าวยังถูกใช้เป็นพื้นที่แลกเปลี่ยน เรียนรู้ ฝึกอบรม และถ่ายทอดประสบการณ์ต่าง ๆ ในรูปแบบของ Open Innovation ซึ่งบริษัท Truemove H จะสนับสนุนทั้งทางด้านเทคโนโลยีอุปกรณ์เครื่องมือ และความเชี่ยวชาญของบุคลากร รวมทั้งการสนับสนุนทุนวิจัยให้แก่นักวิจัย และนักศึกษาอีกด้วย

รูปที่ 5.4 การพัฒนารถยกต้นแบบที่ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ [5]

- <u>มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์</u>

บริษัท AIS และ SCG ร่วมกับ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ ภายใต้การสนับสนุนของ กสทช. ได้พัฒนาต้นแบบ Use case ของ 5G ในภาคอุตสาหกรรม เพื่อยกระดับอุตสาหกรรม 4.0 ตามแผนยุทศาสตร์แห่งชาติของรัฐบาล โดย SCG และมหาวิทยาลัยได้เล็งเห็นถึงปัญหาเกี่ยวกับการทำงานของพนักงานผู้ควบคุมรถยกสินค้า ที่บางครั้งอาจจะอ่อนล้าจากการเข้ากะดึกสะสมมากเกินไป จึงได้พัฒนารถยกสินค้าอัตโนมัติ Forklift ในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งผู้ขับสามารถควบคุมรถยกระยะไกลบนโครงข่าย 5G จากเอสซีจี สำนักงานใหญ่บางซื่อ กรุงเทพฯ – โรงงานของ SCG จังหวัดสระบุรี โดยผู้ควบคุมรถไม่จำเป็นต้องอยู่ที่เดียวกับรถ แต่สามารถควบคุมรถให้เคลื่อนย้ายสิ่งของจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดที่ต้องการได้แบบเรียลไทม์และแม่นยำได้ ซึ่งถือเป็นต้นแบบให้อุตสาหกรรมต่าง ๆ ในประเทศไทยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ได้จริงกับธุรกิจทั้งในปัจจุบันและอนาคตอันใกล้ นอกจากนี้บริษัท AIS ได้จัดตั้งสถาบันวิจัยและนวัตกรรมดิจิทัล ที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อทดลองและทดสอบการใช้งานเทคโนโลยี 5G ครั้งแรกในภาคใต้ รวมถึงศึกษาการใช้งาน Use case ของ 5G ในมหาวิทยาลัย เพื่อจำลองให้เป็นเมืองอัจฉริยะ โดยมี Use Case เริ่มต้น ประกอบด้วย นวัตกรรม Mobile Surveillance เป็นนวัตกรรมเพื่อการตรวจตราและรักษาความปลอดภัยจาก Video Analytics และ AI ได้แบบเรียลไทม์ นวัตกรรม Object Detection: นวัตกรรมจับวัตถุที่เคลื่อนที่จาก

จุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งได้อย่างแม่นยำ โดยได้ทำการทดสอบที่หน้าประตูมหาวิทยาลัย เพื่อตรวจจับใบหน้าของบุคคลต้องสงสัยที่อาจจะมาก่อความไม่สงบภายในมหาวิทยาลัยผ่าน 5G โดยข้อมูลจะถูกแสดงผลเรียลไทม์ที่ War Room ของมหาวิทยาลัย และนวัตกรรมรถพลังงานไฟฟ้า (Electric Vehicle: EV): เป็นนวัตกรรมรถไฟฟ้าอัจฉริยะที่สามารถติดต่อสื่อสารระหว่างรถ EV ต่อรถ EV ผ่านโครงข่าย 5G โดยมีการใช้รถดังกล่าวในมหาวิทยาลัยได้จริงตามสภาพการจราจรจริงในมหาวิทยาลัย โดยสามารถรับ-ส่งข้อมูลความเร็วสูง มีความหน่วงต่ำ และระบบมีความเสถียรมาก ทำให้รถยนต์สามารถสื่อสารข้อมูลการขับขี่ ข้อมูลความปลอดภัยได้

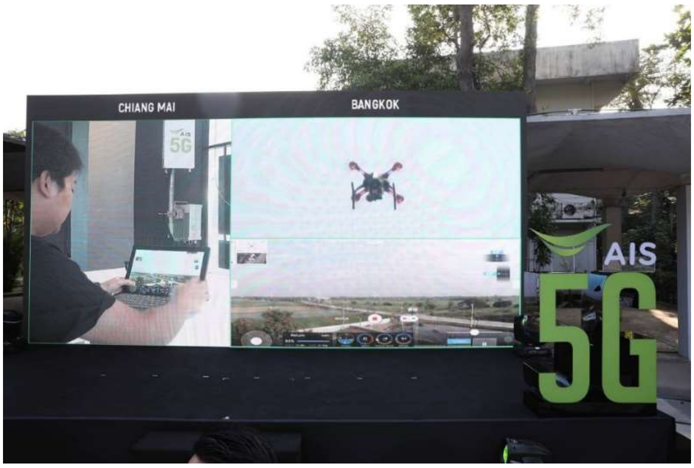
อีกหนึ่งบริษัทที่แสดงความร่วมมือกับมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์คือ บริษัท Truemove H และบริษัท ZTE โดยแสดงร่วมมือกับ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และหน่วยงานด้านสาธารณสุข เพื่อจำลองสถานการณ์ภัยพิบัติบนพื้นที่ทดสอบที่มีสัญญาณ 5G จริงเป็นครั้งแรกในประเทศ พร้อมทั้งนำเสนอถึง Use Case ด้านสารธารณสุขเพื่อช่วยเหลือผู้ประสบภัยพิบัติ และสร้างความปลอดภัยในอนาคต นอกจากนี้ ได้มีการทดสอบการเข้าช่วยเหลือผู้ประสบภัยจากการจำลองสถานการณ์ภัยพิบัติบนพื้นที่ที่มีสัญญาณ 5G จริง เพื่อแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของ Use case ด้านสารธารณสุข ไม่ว่าจะเป็น การโชว์โดรนบินสำรวจถ่ายวิดีโอรายงานสดมายังศูนย์ปฏิบัติการแบบเรียลไทม์ และรถพยาบาลฉุกเฉินอัจฉริยะ (Smart Ambulance) ที่สามารถเข้าถึงพื้นที่ช่วยเหลือผู้ประสบภัยและทำการปฐมพยาบาลเบื้องต้นได้อย่างรวดเร็ว พร้อมส่งข้อมูลผู้ประสบภัยขึ้น Health Cloud ทั้งนี้เพื่อแสดงถึงศักยภาพด้านความเร็วสูง ความหน่วงต่ำ และความสามารถในการเชื่อมต่ออุปกรณ์หลากหลายของเทคโนโลยี 5G ที่สามารถใช้งานได้จริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดสอบความสามารถในการใช้งานข้ามสถานีฐาน (base station) ได้ โดยไม่มีการหลุดของสัญญาณ

รูปที่ 5.5 การพัฒนาต้นแบบ smart farm มหาวิทยาลัยขอนแก่น [6]

- <u>มหาวิทยาลัยขอนแก่น</u>

สองบริษัทโทรคมนาคมยักษ์ใหญ่ของประเทศไทย ได้แก่ บริษัท Truemove H และ AIS ซึ่งได้รับการสนับสนุนจาก กสทช. ยังได้ร่วมมือกับ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ามีความเชี่ยวชาญในด้านการเกษตรอัจฉริยะ (Smart Agriculture) ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศแห่งเกษตรกรรม จึงทำให้บริษัททั้งสองได้เล็งเห็นความสำคัญของการเกษตรอัจฉริยะในอนาคต จึงได้นำเทคโนโลยี 5G เข้ามาพัฒนาและทดสอบการใช้งานในด้านเกษตรกรรมเพื่อเป็นต้นแบบของฟาร์มอัจฉริยะ (Smart Farm) การปลูกพืชอัจฉริยะ (Smart Crop) และเครื่องจักรกลทางการเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming Machines) การทดสอบในมหาวิทยาลัยขอนแก่นครั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงคุณภาพของการผลิต และลดต้นทุนของเกษตรกรไทย โครงการแรกคือ ฟาร์มไก่อัจฉริยะ ซึ่งได้พัฒนาจากของเดิมที่เคยร่วมมือกับบริษัทซีพีเอฟให้ดียิ่งขึ้น โดยการนำ 5G มาประยุกต์ใช้โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ IoT เพิ่มเติม อาทิ กล้อง AI เพื่อดูสุขภาพของไก่ และเพิ่มเซนเซอร์สำหรับโรงเรือนเพื่อทดสอบนวัตกรรมโรงเรือนไก่ที่ทันสมัย ประมวลผลผ่านแพลตฟอร์ม Smart Agriculture Solution และจัดเก็บบน Cloud โครงการที่สองคือ แปลงข้าวโพดอัจฉริยะ เป็นการนำเทคโนโลยี 5G มาทำงานร่วมกับ อุปกรณ์ IoT อาทิ ระบบ ตรวจจับสภาพอากาศ ระบบการควบคุมน้ำ และการใช้โดรน AI มาตรวจสุขภาพของพืช และการใส่ปุ๋ย เพื่อนำมาใช้บริหารจัดการแปลงข้าวโพด ตลอดจนการวัดคุณภาพ

ของเมล็ดพันธุ์จากการเก็บเกี่ยว และการจัดเก็บข้อมูล บน Cloud โครงการที่สามคือ เครื่องจักรกลทางการเกษตรอัจฉริยะ เป็นการนำเทคโนโลยี 5G Augmented Reality (AR) มาทดลองใช้ในการซ่อมเครื่องจักรกลเกษตรระยะไกล โดยช่างผู้ชำนาญ ลดปัญหาการการเสียเวลาจากการเดินทาง ซึ่งอาจทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตลดลง โดยสามารถที่จะเพิ่มความรวดเร็วทำให้เครื่องจักรกลมีสภาพพร้อมใช้งาน และทันต่อฤดูกาลเพาะปลูกผลผลิต โครงการทั้งสามดังกล่าวถือเป็นโครงการที่เป็นประโยชน์แก่ภาคเกษตรกรรมในประเทศไทย โดยเกษตรกรที่มีความรู้ความเข้าใจในเกษตรกรรมสมัยใหม่ จะสามารถลดต้นทุนการผลิต สร้างกำไรมากขึ้น พร้อมรับกับการเปลี่ยนแปลงทั้งสภาพภูมิอากาศ และการแข่งขันของโลก



รูปที่ 5.6 การบังคับโดรนระยะไกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [7]

- <u>มหาวิทยาลัยเชียงใหม่</u>

บริษัท AIS ร่วมกับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทดสอบการบังคับโดรนระยะทางไกล โดยสามารถบังคับโดรนจากกรุงเทพฯถึงเชียงใหม่ผ่านโครงข่าย 5G ในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อแสดงให้เป็นถึงประสิทธิภาพของโครงข่าย 5G ที่สามารถทำให้การบังคับโดรนระยะไกลมีความหน่วงต่ำ โดยคนควบคุมไม่จำเป็นต้องอยู่ที่เดียวกับโดรน และสามารถ Streaming Video ที่มีความละเอียดสูงผ่านโครงข่าย 5G กลับมาหาผู้ใช้งานได้ทันที การบังคับโดรนระยะไกลนับเป็นต้นแบบ Use case 5G พื้นฐานเบื้องต้นที่ทำการทดสอบ ซึ่งในอนาคตสามารถนำไปประยุกต์การใช้งานได้หลากหลาย ทั้งด้านการขนส่ง การเกษตร

ความปลอดภัยสาธารณะ การกู้ภัย รวมถึงการนำไปใช้ควบคุมโดรนภายในเมืองอัจฉริยะ เพื่อใช้ในการเข้าไปสำรวจพื้นที่ต่าง ๆ เป็นต้น นอกจากนี้ บริษัท AIS ยังได้เปิดศูนย์การทดสอบภายใต้ชื่อ AIS PLAYGROUND @ CMU LEARNING SPACE เพื่อให้เหล่านักศึกษา นักพัฒนา และผู้ประกอบการด้านดิจิทัลรุ่นใหม่ในภาคเหนือได้เข้ามาทดลอง และทดสอบสร้างสรรค์นวัตกรรมร่วมกับ AIS ไม่ว่าจะเป็น 5G, NB-IoT, VR, API Zone

5.3 บทสรุป

จากที่ผู้เขียนได้กล่าวถึงการประมูลคลื่นความถี่ 5G และความพร้อมของบริษัทโทรคมนาคมร่วมกับมหาวิทยาลัยในประเทศไทยมาพอสังเขปแล้ว จะพบว่าทุกภาคส่วนในประเทศไทยมีความตื่นตัวกับการมาถึงของเทคโนโลยี 5G อย่างมาก โดยเฉพาะ Use case ต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์แก่ภาคการศึกษา ภาคอุตสาหกรรม ภาคการขนส่ง และภาคเกษตรกรรม เป็นต้น ซึ่งผู้เขียนคาดว่าการมาถึงของ 5G จะช่วยพัฒนาคุณภาพชีวิตประชากรในประเทศไทยทุกภาคส่วนให้มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ลดความเหลื่อมล้ำทางสังคม ซึ่งจะมากหรือน้อย ผู้เขียนคาดว่าขึ้นอยู่กับความร่วมมือกันของรัฐบาลและเอกชนว่าสามารถให้บริการ 5G เพื่อสังคมได้ในราคาเป็นมิตรมากน้อยเพียงใด

5.4 เอกสารอ้างอิง

[1] ประชาชาติธุรกิจ. (10 ธันวาคม 2562). ประมูลคลื่น “5G” เป้า 1.2 แสนล้าน ถ้าขายออกคลื่นเดียว “กสทช.”จะได้เงินเท่าไร, https://www.prachachat.net/ict/news-399922.

[2] Chaiwat Sathornwet. (16 กุมภาพันธ์ 2020). กสทช. สรุปผลการ ประมูล 5G รวมมูลค่าการประมูลสูงถึง 100,521 ล้านบาท.https://www.whatphone.net/news/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A1%E0%B8%B9%E0%B8%A5-5g/

[3] THE REPORTER ASIA. (26 กุมภาพันธ์ 2020) สรุปประมูล 5G เงินเข้ารัฐกว่าแสนล้านบาท. https://www.thereporter.asia/th/2020/02/17/nbtc-5g-3/

[4] memine. (4 กุมภาพันธ์ 2562). AIS หนุน จุฬา – กสทช. พัฒนา “ศูนย์ 5G AI/IOT INNOVATION CENTER”, https://www.mxphone.com/ais-5g-ai-iot-innovation-center.

[5] Techsauce Team. (24 มกราคม 2563). AIS จับมือ SCG และ ม.อ. นำร่องใช้ 5G ในโรงงานอุตสาหกรรมจริง, https://techsauce.co/news/ais-scg-5g-industry.

[6] จิราพร ประทุมชัย. (3 กุมภาพันธ์ 2563). มข. ร่วมมือเครือข่ายโทรคมนาคม 2 ยักษ์ใหญ่ พัฒนา 5G หนุนวิจัยและการเรียนรู้ไม่สิ้นสุด. https://th.kku.ac.th/12399.

[7] Techsauce Team. (13 พฤศจิกายน 2562). AIS โชว์ทดสอบ 5G คุม Drone ที่กรุงเทพจากเชียงใหม่ พร้อมเปิด AIS Playground ที่ มช. https://techsauce.co/pr-news/ais-test-5g-at-chiangmai-and-open-ais-playground-at-cmu.

ประวัติผู้เขียน

นายศิรวิชญ์ กิตติวิชญกุล

นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารและการบันทึกข้อมูล

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา

- 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2558 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัย

- รหัสแก้ไขความผิดพลาด
- ระบบบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กความหนาแน่นสูง

นายณัฏฐณรงค์ นิลจันทร์

นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารและการบันทึกข้อมูล

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา

- 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัย

- การพัฒนาตัวกรองคาลมานสำหรับการผสานข้อมูล GNSS/IMU
- การพัฒนาระบบนำร่องรถจักรกลเกษตรต้นทุนต่ำสำหรับเพาะปลูกอ้อยในประเทศไทย

นายจตุพร ด้วงทอง

นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารและการบันทึกข้อมูล
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา

- 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2559 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัย

- การเข้ารหัสช่องสัญญาณในหน่วยความจำแบบแนนแฟลช (NAND flash memory)
- การออกแบบผังการเข้ารหัส (coding scheme) ในหน่วยความจำแคชแบบ STT-MRAM

นายอนุสรณ์ วงค์ษา

นักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารและการบันทึกข้อมูล
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา

- 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1) สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัย

- การถอดรหัสแบบแบ่งส่วนปรับปรุงสำหรับมาตรฐานการสื่อสารไร้สายยุค 5G
- การลดความซับซ้อนการถอดรหัสหักล้างต่อเนื่องสำหรับรหัสโพลาร์

นางสาวกฤติยาภรณ์ เหมือดขุนทด

นักวิจัยห้อง ปฏิบัติการวิจัยการสื่อสารและการบันทึกข้อมูล

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การศึกษา

- 2561 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 1)
  สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
  สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัย

- การออกแบบรหัสโพลาร์ที่มีการยกเลิกก่อนกำหนด (Early termination) สำหรับการส่งข้อมูลแบบ IR-HARQ
- ปรับปรุงสมรรถนะของรหัสโพลาร์ สำหรับการส่งข้อมูลแบบ IR-HARQ