



รายงานฉบับสมบูรณ์ (ฉบับแก้ไข)

การศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับ

และระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ด้วยอากาศยานไร้คนขับ

เสนอ



กทปส

กองทุนวิจัยและพัฒนาโครงการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์
และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

จัดทำโดย



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY NORTH BANGKOK

วันที่ 6 มิถุนายน 2567



กทปส

รายงานฉบับสมบูรณ์ (ฉบับแก้ไข)

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนา
กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

ประจำงวดที่ 4

โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ
ที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ได้รับทุนอุดหนุนจาก
กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ
(สำนักงาน กสทช.)



กทปส

คำนำ

รายงานฉบับสมบูรณ์ฉบับนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อรายงานผลการดำเนินโครงการการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.)

เนื้อหาของรายงานฉบับนี้ได้นำเสนอผลการดำเนินงาน การศึกษาเทคโนโลยีตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่มีอยู่ในปัจจุบัน การออกแบบและวิเคราะห์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ การทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation) การออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (hardware prototyping) และการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (software development)

คณะที่ปรึกษาขอขอบคุณคณะกรรมการจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.) ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะตลอดจนแนวทางการดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วง และหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานฉบับสมบูรณ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

คณะที่ปรึกษา

6 มิถุนายน 2567

แบบรายงานฉบับสมบูรณ์	1
ส่วนที่ 1 สารสำคัญของโครงการ (Project Hilight)	
1.1 วัตถุประสงค์	3
1.2 ขอบเขตของการดำเนินงาน	3
1.3 เป้าหมายของโครงการ	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 ผลผลิตสำคัญ	4
1.6 แผนการดำเนินงานโครงการฯ	5
ส่วนที่ 2 ความก้าวหน้าในการดำเนินโครงการ	
2.1 สรุปผลการดำเนินงานประจำงวด	7
2.2 สถานภาพการดำเนินโครงการรายกิจกรรม	7
2.3 สรุปปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการดำเนินโครงการ	9
ส่วนที่ 3 รายงานแบบแสดงรายละเอียดครุภัณฑ์	
รายงานแบบแสดงรายละเอียดครุภัณฑ์	10
ส่วนที่ 4 ผลการศึกษา	
4.1 ศึกษาเทคโนโลยีตรวจสอบและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่มีอยู่ในปัจจุบัน	33
4.2 ออกแบบและวิเคราะห์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ	46
4.3 ทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation)	60
4.4 การออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (hardware prototyping)	80
4.5 การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (software development)	98
4.6 ทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการปฏิบัติการจริง (actual deployment)	107
4.7 สรุปผลการดำเนินงานพร้อมทั้งปัญหา อุปสรรคและแนวทางแก้ไข	147
4.8 รายงานผลการศึกษาฉบับย่อสำหรับตีพิมพ์ในวารสารสำนักงาน กสทช.	148
เอกสารอ้างอิง (References)	152



กทปส



แบบรายงานฉบับสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.) ให้ดำเนินโครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

ชื่อโครงการ (ไทย) :	โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ			
ชื่อโครงการ (อังกฤษ) :	-			
สัญญาารับทุนเลขที่ :	BT2-02/1-61			
หน่วยงาน :	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ			
ชื่อ - นามสกุล (หัวหน้าโครงการ) :	รศ.ดร.ชาญชัย ทองประสิทธิ์ ตำแหน่ง ผู้อำนวยการสำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม			
เบอร์ติดต่อ :				
ระยะเวลาดำเนินการ (เริ่มต้น - สิ้นสุด) :	900 (6 ธันวาคม 2561 - 24 พฤษภาคม 2564)	วัน	-	เดือน
งบประมาณรวม :	จำนวน	7,737,564.00		บาท

1

สาระสำคัญของโครงการ (Project Hilight)

หนึ่งในภารกิจหลักที่สำคัญของสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) นอกเหนือจากการบริหารคลื่นความถี่ คือทำหน้าที่ตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ในกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ กิจการวิทยุคมนาคม และกิจการโทรคมนาคม ซึ่งรวมถึงการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ซึ่งในปัจจุบันสามารถใช้อุปกรณ์ภาคพื้นดิน เช่น รถตรวจหาแหล่งสัญญาณ หรือ เครื่องข่ายสื่อสารในพื้นที่ เช่น เสารับส่งสัญญาณของผู้ให้บริการต่างๆ อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ชัดว่า การตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยอุปกรณ์ภาคพื้นดินนั้นมีข้อจำกัดอยู่มาก ทั้งในแง่ของความยุ่งยากของการนำอุปกรณ์เข้าไปในพื้นที่และความรวดเร็วในการตรวจหาคำแหน่งของแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจหาคำแหน่งของแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยอาศัยโครงข่ายสื่อสารในพื้นที่ที่ไม่สามารถระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณโดยละเอียดได้เลยเนื่องจากข้อจำกัดของที่ตั้งของโครงข่ายสื่อสารในพื้นที่ซึ่งถูกออกแบบไว้ให้บริการสัญญาณ มิใช่ตรวจหาคำแหน่งแหล่งสัญญาณ

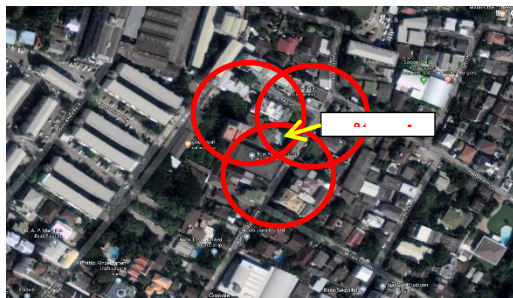
ในปัจจุบัน ปัญหาที่กล่าวข้างต้นได้ขยายออกในวงกว้างและทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างหนึ่งที่เป็นเชิงประจักษ์คือ ปัญหาการควบคุมอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่ห้ามบิน โดย กสทช. เองก็ได้ออกคำสั่งคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่องการขึ้นทะเบียนเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้ในอากาศยานซึ่งไม่มีนักบินประเภทอากาศยานที่ควบคุมการบินจากภายนอก (Drone) ซึ่งมีบทลงโทษค่อนข้างสูงหรือระบบต่อต้านอากาศยานไร้คนขับที่ถูกพัฒนาโดยกองทัพอากาศไทยที่สามารถโจมตีอากาศยานไร้คนขับทางคลื่นวิทยุ อย่างไรก็ตามที่กล่าวไปข้างต้นล้วนเป็นการแก้ไขปัญหาที่ปลายเหตุ กล่าวคือ แม้ว่าจะสามารถตรวจจับและครอบครองอากาศยานไร้คนขับที่ฝ่าฝืนได้ ก็ไม่มีทางระบุตัวผู้กระทำการได้หากอากาศยานไร้คนขับนั้นไม่ได้ถูกขึ้นทะเบียนกับ กสทช. หรือ สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย ซึ่งเป็นไปได้สูงในกรณีที่ผู้กระทำการใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อการก่อวินาศกรรม

ด้วยเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ทางผู้วิจัยจึงได้จัดทำโครงการการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยนำข้อได้เปรียบของอากาศยานไร้คนขับซึ่งสามารถปฏิบัติการได้คล่องตัวและไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน รวมถึงมุมมองในการตรวจจับที่กว้างและมีถึง 3 มิติ โดยสามารถที่จะตรวจจับแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตในพื้นที่ที่กว้างเมื่อทำการบินในระดับสูงและสามารถที่จะระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยละเอียดเมื่อทำการบินในระดับต่ำ จากรูปแสดงถึงขอบเขตการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำ ทำการบินในระดับสูงในการบินระดับสูงระบบจะสามารถกำหนดขอบเขตพื้นที่ต้องสงสัยว่ามีแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต เช่น ผู้บังคับอากาศยานไร้คนขับที่ไม่ได้รับอนุญาต จากนั้นระบบจะลดระดับเพดานบินลงเพื่อระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยละเอียด รูปที่ 2 แสดงถึงการระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยาน

ไร้คนขับ 3 ลำ ทำการบินในระดับต่ำเพื่อระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยละเอียด เส้นวงกลมแสดงถึงขอบเขตการตรวจจับของอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 1 ขอบเขตการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำ ทำการบินใน ระดับสูง



รูปที่ 2 การระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำ ทำการบินในระดับต่ำ

1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ
2. เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

1.2 ขอบเขต และกิจกรรมการดำเนินงาน

1. ศึกษาเทคโนโลยีตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่มีอยู่ในปัจจุบัน
2. ออกแบบและวิเคราะห์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ
3. ทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation)
4. ออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (hardware prototyping)
5. ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (software development)
6. ทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการปฏิบัติการณ์จริง (actual deployment) และปรับปรุงให้มีการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์เคลื่อนที่และอากาศยานไร้คนขับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุแหล่งสัญญาณ

7. จัดเก็บข้อมูลและรายงานผลการดำเนินงานทั้งหมดที่ใช้งานในโครงการ ที่ กทปส. สามารถดำเนินแก้ไข (Edit) ข้อมูล และสามารถสำเนาซ้ำ เพื่อใช้ในการเผยแพร่ต่อได้ และบันทึกข้อมูลทั้งหมดลงใน External Hard Disk และส่งมอบหลังเสร็จสิ้นโครงการให้กับ กทปส.

8. ส่งมอบต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับให้กับกองทัพอากาศหลังสิ้นสุดโครงการ

1.3 เป้าหมาย

1. ได้องค์ความรู้ในการออกแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

2. ได้ต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ จำนวน 1 ชุด

1.4 . ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. หน่วยงานตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่หรือหน่วยงานด้านความมั่นคง ได้องค์ความรู้และต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

2. หน่วยงานตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่หรือหน่วยงานด้านความมั่นคง สามารถปราบปรามผู้กระทำความผิด รวมถึงเฝ้าระวังอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้จากการก่อวินาศกรรมโดยการส่งการระยะไกลด้วยคลื่นวิทยุ

1.5 ผลผลิตสำคัญ

ลำดับ	ชื่อผลผลิต	หน่วยวัด	ตัวชี้วัด (เชิงคุณภาพ/เชิงคุณภาพ)
1	องค์ความรู้ในการออกแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ	-	ได้องค์ความรู้ในการออกแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ
2	ต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ	ชุด	ได้ต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ จำนวน 1 ชุด

1.6 แผนการดำเนินงานโครงการฯ

ลำดับ	กิจกรรมที่สำคัญ	ระยะเวลาการดำเนินงานกิจกรรม											น้ำหนัก (%)	
		ปี 2561	ปี 2562				ปี 2563				ปี 2564			
		Q1	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2		
1	แผนการดำเนินงาน (Project Plan)													1
2	ศึกษาเทคโนโลยีตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่มีอยู่ในปัจจุบัน													10
3	จัดทำรายงานเบื้องต้น													1
4	ออกแบบและวิเคราะห์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ													15
5	ทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation)													15
6	จัดทำรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1													1
7	ออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (hardware prototyping)													15
8	ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับ และระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยาน													15



กทปส



โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่ง

แหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

รายงานฉบับสมบูรณ์ (ฉบับแก้ไข)

ลำดับ	กิจกรรมที่สำคัญ	ระยะเวลาการดำเนินงานกิจกรรม											น้ำหนัก (%)	
		ปี 2561	ปี 2562				ปี 2563				ปี 2564			
		Q1	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2		
	ยานไร้คนขับ (software development)													
9	จัดทำรายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2													1
10	ทดสอบประสิทธิภาพระบบ ตรวจจับและระบุตำแหน่ง แหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับ อนุญาตด้วยอากาศยานไร้ คนขับด้วยวิธีการปฏิบัติการ จริง (actual deployment)													15
11	จัดเก็บข้อมูลและรายงานผล การดำเนินงานทั้งหมดที่ใช้ งานในโครงการ ที่ กทปส. สามารถดำเนินแก้ไข (Edit) ข้อมูล และสามารถสำเนาซ้ำ เพื่อใช้ในการเผยแพร่ต่อได้ และบันทึกข้อมูลทั้งหมดลงใน External Hard Disk และส่ง มอบหลังเสร็จสิ้นโครงการ ให้กับ กทปส													5
12	ส่งมอบต้นแบบระบบตรวจจับ และระบุตำแหน่งแหล่ง สัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ด้วยอากาศยานไร้คนขับให้กับ กองทัพอากาศหลังสิ้นสุด โครงการ													3
13	จัดทำสรุปรายงานฉบับ สมบูรณ์													2
รวม														100

2

ความก้าวหน้าในการดำเนินโครงการ

2.1 สรุปผลการดำเนินงานประจำงวด

มหาวิทยาลัยได้ดำเนินงานตามขอบเขตของโครงการฯ ได้แก่

1. รายงานการทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการปฏิบัติการจริง (actual deployment) และปรับปรุงให้มีการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์เคลื่อนที่และอากาศยานไร้คนขับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุแหล่งสัญญาณ
2. รายงานการจัดเก็บข้อมูลและรายงานผลการดำเนินงานทั้งหมดที่ใช้งานในโครงการ และบันทึกข้อมูลทั้งหมดลงใน External Hard Disk
3. รายงานสรุปผลการดำเนินงานพร้อมทั้งปัญหาอุปสรรคและแนวทางแก้ไข
4. รายงานผลการศึกษาระดับย่อสำหรับตีพิมพ์ในวารสารสำนักงาน กสทช.

2.2 สถานภาพการดำเนินโครงการรายกิจกรรม

กิจกรรม	ระยะเวลา (วัน)	สถานะกิจกรรม/ ผลดำเนินงาน			แผนปฏิบัติการ ณ วันลงนาม ในสัญญา		ความก้าวหน้า โปรดทำเครื่องหมาย (✓)			กรณีล่าช้าหรือเร็ว กว่าแผน	
		แล้ว เสร็จ	อยู่ระหว่าง ดำเนินการ	ยังไม่ ดำเนินการ	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ล่าช้า	ตาม แผน	เร็วกว่า แผน	เริ่มต้น	สิ้นสุด
1.จัดทำแผนการดำเนินงาน (Project Plan)	30	✓			7 ธ.ค. 61	5 ม.ค. 62		✓			
2.ศึกษาเทคโนโลยีตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่มีอยู่ในปัจจุบัน	30	✓			7 ธ.ค. 61	5 ม.ค. 62		✓			
3.ออกแบบและวิเคราะห์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ	335	✓			6 ม.ค. 62	6 ธ.ค. 62		✓			
4.ทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation)	335	✓			6 ม.ค. 62	6 ธ.ค. 62		✓			



กทปส



โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่ง

แหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

รายงานฉบับสมบูรณ์ (ฉบับแก้ไข)

กิจกรรม	ระยะเวลา (วัน)	สถานะกิจกรรม/ ผลดำเนินงาน			แผนปฏิบัติการ ณ วันลงนาม ในสัญญา		ความก้าวหน้า โปรดทำเครื่องหมาย (✓)			กรณีล่าช้าหรือเร็ว กว่าแผน	
		แล้ว เสร็จ	อยู่ระหว่าง ดำเนินการ	ยังไม่ ดำเนินการ	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ล่าช้า	ตาม แผน	เร็วกว่า แผน	เริ่มต้น	สิ้นสุด
5. ออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (hardware prototyping)	175		✓		7 ธ.ค. 62	29 พ.ค. 63		✓			
6. ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับ และระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (software development)	175		✓		7 ธ.ค. 62	29 พ.ค. 63		✓			
7. ทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการปฏิบัติการจริง (actual deployment)	180			✓	30 พ.ค. 63	25 พ.ย. 63	✓			30 พ.ค. 63	24 มี.ค. 64
8. จัดเก็บข้อมูลและรายงานผลการดำเนินงานทั้งหมดที่ใช้ในโครงการที่ กทปส. สามารถดำเนินการแก้ไข (Edit) ข้อมูล และสามารถสำเนาซ้ำ เพื่อใช้ในการเผยแพร่ต่อได้ และบันทึกข้อมูลทั้งหมดลงใน External Hard Disk และส่งมอบหลังเสร็จสิ้นโครงการให้กับ กทปส.	180			✓	30 พ.ค. 63	25 พ.ย. 63	✓			15 มี.ค. 64	24 พ.ค. 64
9. ส่งมอบต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับให้กับ กองทัพอากาศหลังสิ้นสุดโครงการ	180			✓	30 พ.ค. 63	25 พ.ย. 63	✓			15 มี.ค. 64	24 พ.ค. 64
10. สรุปผลการดำเนินงานรวมทั้งปัญหาอุปสรรคและแนวทางแก้ไข	180			✓	30 พ.ค. 63	25 พ.ย. 63	✓			15 มี.ค. 64	24 พ.ค. 64
11. รายงานเบื้องต้น	30	✓			7 ธ.ค. 61	5 ม.ค. 62		✓			

กิจกรรม	ระยะเวลา (วัน)	สถานะกิจกรรม/ ผลดำเนินงาน			แผนปฏิบัติการ ณ วันลงนาม ในสัญญา		ความก้าวหน้า โปรดทำเครื่องหมาย (✓)			กรณีล่าช้าหรือเร็ว กว่าแผน	
		แล้ว เสร็จ	อยู่ระหว่าง ดำเนินการ	ยังไม่ ดำเนินการ	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ล่าช้า	ตาม แผน	เร็วกว่า แผน	เริ่มต้น	สิ้นสุด
12. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1	335			✓	6 ม.ค. 62	6 ธ.ค. 62		✓			
13. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2	135			✓	7 ธ.ค. 62	29 พ.ค. 63		✓			
14. สรุปรายงานฉบับสมบูรณ์	360			✓	30 พ.ค. 63	25 พ.ย. 63	✓				24 พ.ค. 64

2.3 สรุปปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการดำเนินโครงการ

1. อุปกรณ์ส่วนใหญ่ต้องสั่งซื้อเป็นกรณีพิเศษ (pre order) โดยต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ผู้จำหน่ายในประเทศประสบปัญหาไม่สามารถกำหนดเวลาส่งมอบสินค้าได้เนื่องจากสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 (COVID-19)

2. กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ได้ประกาศมาตรการและการเฝ้าระวังการระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID 19) กำหนดแนวทางการใช้สถานที่และการปฏิบัติงานของบุคลากรในสังกัด โดยจำกัดการใช้พื้นที่และเข้าปฏิบัติงานในหน่วยงานของบุคลากรซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานโครงการให้บรรลุตามกรอบเวลาที่กำหนด

3

รายงานแบบแสดงรายละเอียดครุภัณฑ์

การดำเนินการจัดหาครุภัณฑ์ของโครงการ จำนวน 9 รายการ งบประมาณ 4,866,564.00 บาท (สี่ล้านแปดแสนหกหมื่นหกพันห้าร้อยหกสิบสี่บาทถ้วน) ดำเนินการตามพระราชบัญญัติ การจัดซื้อจัดจ้างและการบริหารพัสดุภาครัฐ พ.ศ. 2560 ด้วยวิธีการประกวดราคาอิเล็กทรอนิกส์ (e-bidding) รายการครุภัณฑ์ประกอบด้วย

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	คอมพิวเตอร์ Server	1	ชุด
2	อุปกรณ์ประกอบคอมพิวเตอร์ Server	1	ชุด
3	Software Defined Radio (SDR)	4	ชุด
4	อากาศยานไร้คนขับ (UAV)	4	ชุด
5	Antenna	4	ชุด
6	Peripherals (Radio)	4	ชุด
7	Communication module (Inter-UAV)	4	ชุด
8	Communication module (UAV-USRP)	4	ชุด
9	ค่าลิขสิทธิ์โปรแกรมที่ใช้ในการพัฒนาและใช้งานจริง ประกอบด้วย - LABVIEW - MATLAB - Simulink - Server OS	1	ชุด

กำหนดขอบเขตของงาน (TOR) จัดซื้อครุภัณฑ์เพื่อศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ จำนวน 1 งาน ดังนี้

ขอบเขตของงาน (TOR)

จัดซื้อครุภัณฑ์เพื่อศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับ

และระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ จำนวน 1 งาน

1. รายการและจำนวนที่ต้องการ

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วย
1	คอมพิวเตอร์ Server	1	ชุด
2	อุปกรณ์ประกอบคอมพิวเตอร์ Server	1	ชุด
3	Software Defined Radio (SDR)	4	ชุด
4	อากาศยานไร้คนขับ (UAV)	4	ชุด
5	Antenna	4	ชุด
6	Peripherals (Radio)	4	ชุด
7	Communication module (Inter-UAV)	4	ชุด
8	Communication module (UAV-USRP)	4	ชุด
9	ค่าลิขสิทธิ์โปรแกรมที่ใช้ในการพัฒนาและใช้งานจริง ประกอบด้วย - LABVIEW - MATLAB - Simulink - Server OS	1	ชุด

ข้อกำหนดคุณสมบัติ

1) คอมพิวเตอร์ Server จำนวน 1 ชุด

- 1.1. 1U, 2.5" Chassis with up to 10 Hard Drives, 3x16 LP PCI Slot + LCD Bezel, 8 x Standard Fans
- 1.2. มีหน่วยประมวลผลแบบ Intel Xeon Silver 4214 ความเร็ว 2.2GHZ จำนวนอย่างน้อย 2 หน่วย, 12C/24T, 9.6GT/s, 16.5M Cache, Turbo, HT (85W) DDR4-2400
- 1.3. มีหน่วยความจำ 156GB (16x16GB) RDIMM, 2933MT/s, Dual Rank
- 1.4. มี IDSDM and Combo Card Reader, 2x 32GB microSDHC/SDXC Card
- 1.5. มี BOSS controller card + with 2 M.2 Sticks 240G (RAID 1),LP
- 1.6. มี 1 x 800GB SSD SAS Mix Use 12Gbps 512e 2.5in Hot-plug AG Drive, 3 DWPD, 4380 TBW
- 1.7. มี 5 x 1.8TB 10K RPM SAS 12Gbps 512e 2.5in Hot-plug Hard Drive

- 1.8. มี HBA330 12Gbps SAS HBA Controller (NON-RAID), Minicard
- 1.9. มี Broadcom 57416 Dual Port 10GbE BASE-T
- 1.10. มี 5720 Dual Port 1GbE BASE-T, rNDC
- 1.11. มี Broadcom 57416 Dual Port 10GbE BASE-T Adapter, PCIe Low Profile
- 1.12. มี Dual, Hot-plug, Redundant Power Supply (1+1), 750W
- 1.13. มี iDRAC9 Enterprise with OpenManage Enterprise Advanced
- 1.14. มี Hypervisor : VMware ESXi 6.7 U2 Embedded Image (License Not Included)
- 1.15. มีจอแสดงผลแบบ IPS ขนาดไม่น้อยกว่า 23.8 นิ้ว เครื่องหมายการค้าเดียวกับเครื่องคอมพิวเตอร์
- 1.16. มี keyboard และ mouse เครื่องหมายการค้าเดียวกับเครื่องคอมพิวเตอร์
- 1.17. มีอุปกรณ์และสายสัญญาณเชื่อมต่อกับเครือข่ายและอุปกรณ์ต่อพ่วงตามพอร์ตข้างต้น
- 1.18. มีการสนับสนุนแบบ 3Yr ProSupport and Mission Critical: (7x24) 4-hour Onsite Service
- 1.19. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

2) อุปกรณ์ประกอบคอมพิวเตอร์ Server จำนวน 1 ชุด

- 2.1. ตู้ RACK 19 นิ้ว แบบปิด ขนาด 42U พร้อมระบบจ่ายไฟและระบายอากาศ
- 2.2. UPS ขนาด 2U
 - 2.2.1. ความจุไม่ต่ำกว่า 3000VA
 - 2.2.2. มีการสนับสนุนแบบ 3Yr Onsite Swap
- 2.3. L3 network switch
 - 2.3.1. สามารถทำงานได้ในระดับ L3 เป็นอย่างน้อย
 - 2.3.2. มี Port รองรับมาตรฐาน 10GbE BASE-T อย่างน้อย 16 port
 - 2.3.3. มี Port รองรับมาตรฐาน 1GbE BASE-T อย่างน้อย 16 port
- 2.4. มีอุปกรณ์และสายเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ Server ในข้อ (1) และ Peripherals (Server) ในข้อ (2) อย่างสมบูรณ์
- 2.5. อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ Server ในข้อ (1) และอุปกรณ์ Peripherals (Server) ในข้อ (2) ต้องติดตั้งรวมกันภายในตู้ RACK 19 นิ้ว แบบปิด ขนาด 42U อย่างสมบูรณ์
- 2.6. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

3) Software Defined Radio (SDR) จำนวน 4 ชุด

- 3.1. มีขั้วต่อช่องสัญญาณภาครับอย่างน้อย 2 ขั้ว (2 RX) และ ขั้วต่อช่องสัญญาณภาคส่ง อย่างน้อย 2 ขั้ว (2 TX)
- 3.2. มีช่องใส่ RF daughterboard 2 ช่อง
- 3.3. รองรับช่วงความถี่อย่างน้อย DC ถึง 6 GHz
- 3.4. มีหน่วยประมวลผล FPGA Xilinx Kintex-7 XC7K410T

- 3.5. มี instantaneous bandwidth 160 MHz หรือมากกว่า และสามารถทำงานแบบ MIMO 2Tx & 2Rx ได้
- 3.6. สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลสัญญาณผ่านพอร์ต USB 3.0 พอร์ต 1 GigE พอร์ต 10 GigE และพอร์ต PCIe
- 3.7. มี Digital I/O สำหรับเชื่อมต่อ FPGA
- 3.8. มีสายสัญญาณเพื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลสัญญาณในข้อ 3.7
- 3.9. รองรับการทำงานของ GNU Radio C++/Python API Amarisoft LTE 100 OpenBTS และ USRP Hardware Driver (UHD)
- 3.10. มีกล่องป้องกันแสงแดดและละอองน้ำแบบ half-wide 1U
- 3.11. ผู้ผลิต hardware และ software ต้องเป็นผู้ผลิตรายเดียวกัน
- 3.12. มีสายสัญญาณและสามารถเชื่อมต่อกับ antenna ในข้อ 5) ได้
- 3.13. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

4) อากาศยานไร้คนขับ (UAV) จำนวน 4 ชุด

- 4.1. เป็นอากาศยานไร้คนขับวิทยุบังคับแบบปีกหมุน (multi rotor) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 1,200 เซนติเมตร ติดตั้งใบพัดไม่น้อยกว่า 8 ใบพัดพร้อมมอเตอร์ตามจำนวนของใบพัด พร้อมติดตั้งภาครับสัญญาณ (receiver) กับตัวอากาศยานไร้คนขับ
- 4.2. ติดตั้งระบบนำทางแบบ Real-time Kinematic Global Positioning System (RTK GPS)
- 4.3. หน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับมีหน่วยประมวลผล 32-bit ARM Cortex M7 core with FPU ความเร็วไม่น้อยกว่า 400 Mhz และมีหน่วยความจำไม่น้อยกว่า 1 MB RAM/2 MB Flash
- 4.4. มี Inertial Measurement Units (IMU) 3 ชุด (accels, gyros and compass) ถูกออกแบบให้อยู่ในกล่อง
- 4.5. รองรับโปรแกรมควบคุม Ardupilot และ PX4
- 4.6. มีแบตเตอรี่เป็นแบบประจุไฟใหม่ได้ (rechargeable battery) ชนิด smart Lithium Polymer (Lipo) ขนาดความจุไม่น้อยกว่า 20,000 mAh อย่างน้อย 2 ก้อน
- 4.7. มีระบบป้องกันการชนแบบ LIDAR 360 องศา หรือ 360 degree LIDAR obstacle sensing system
- 4.8. มีระบบช่วยในการลงจอด
- 4.9. สามารถบรรทุก payload ได้ 8 กิโลกรัมหรือมากกว่า
- 4.10. สามารถบินได้ทั้งแบบอัตโนมัติและบังคับโดยชุดควบคุมภาคสนาม
- 4.11. มีชุดอุปกรณ์สื่อสาร Telemetry
 - 4.11.1. สามารถรับ-ส่งสัญญาณวิทยุที่ความถี่ช่วง 5.8 GHz ISM band หรือ 2.4 GHz ISM band หรือ 900 MHz ISM band หรือ 433 MHz ISM band
 - 4.11.2. มีอุปกรณ์ยึดเพื่อติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในข้อ 4.1

- 4.11.3. สามารถทำงานด้วย MAVLink protocol และ สนับสนุน MAVSDK เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สื่อสารและอุปกรณ์ควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ (UAV)
- 4.12. กล้องวิดีโอขนาดเล็กซึ่งติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อส่งภาพจากมุมมองปัจจุบันของอากาศยานไร้คนขับไปยังจอภาพที่ภาคพื้นดิน ความละเอียดตั้งแต่ 600-1200 TVL หรือ ความละเอียดไม่ต่ำกว่า 2 Megapixel
- 4.13. มีชุดควบคุมพร้อมหน้าจอแสดงผลระหว่างทำการบิน
 - 4.13.1. ชุดควบคุมมีคั่นบังคับไม่น้อยกว่า 4 ทิศทาง เพื่อควบคุมอากาศยานไร้คนขับ (UAV)
 - 4.13.2. จอแสดงผลแบบสัมผัสขนาดไม่น้อยกว่า 5 นิ้ว
 - 4.13.3. ความละเอียดของจอแสดงผลไม่น้อยกว่า 1080p
 - 4.13.4. มี software เพื่อควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) และสามารถพัฒนารูปแบบการใช้งาน (Function) เพิ่มเติม เพื่อใช้ควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ได้
 - 4.13.5. Software รองรับการทำงานในระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 10 และ Linux/Ubuntu
 - 4.13.6. สามารถทำงานด้วย MAVLink protocol และ สนับสนุน MAVSDK เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สื่อสารและอุปกรณ์ควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ (UAV)
- 4.14. รองรับการทำงานและทำงานร่วมกับ Software Defined Radio (SDR) ในข้อ 3) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณความถี่ ประมวลผล และควบคุมสั่งการให้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ทำภารกิจต่าง ๆ ได้
- 4.15. ทดสอบการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ให้สามารถใช้งานได้ทั้ง 4 ชุด
- 4.16. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

5) Antenna จำนวน 4 ชุด

- 5.1. เส้าอากาศรับ-ส่งสัญญาณวิทยุที่ความถี่ช่วง 2.4 GHz ISM band พร้อมสายสัญญาณต่อพ่วง
 - 5.1.1. มี gain ไม่น้อยกว่า 9 dBi
 - 5.1.2. มี impedance 50 Ohm
 - 5.1.3. มี lightning protection
 - 5.1.4. มีขั้วต่อช่องสัญญาณอย่างน้อย 1 ขั้วแบบ RP-SMA หรือ N-type
 - 5.1.5. มี -3dB Beamwidth เท่ากับ 60 องศาทั้ง vertical และ horizontal polarization
 - 5.1.6. มีขนาดความยาวไม่เกิน 6.5 นิ้วและความกว้างไม่เกิน 3.5 นิ้ว
 - 5.1.7. มีน้ำหนักไม่เกิน 300 กรัม
 - 5.1.8. ทำการติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในข้อ 4)

- 5.2. เส้าอากาศรับ-ส่งสัญญาณวิทยุที่ความถี่ช่วง 5.8 GHz ISM band พร้อมสายสัญญาณต่อพ่วง
 - 5.2.1. มี gain ไม่น้อยกว่า 8 dBi
 - 5.2.2. มี impedance 50 Ohm
 - 5.2.3. มี lightning protection
 - 5.2.4. มีขั้วต่อช่องสัญญาณอย่างน้อย 1 ขั้วแบบ RP-SMA หรือ N-type
 - 5.2.5. มี -3dB Beamwidth ระหว่าง 60-80 องศาทั้ง vertical และ horizontal polarization
 - 5.2.6. มีขนาดยาวไม่เกิน 6.5 นิ้วและกว้างไม่เกิน 4 นิ้ว
 - 5.2.7. มีน้ำหนักไม่เกิน 650 กรัม
 - 5.2.8. ทำการติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในข้อ 4)
- 5.3. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

6) Peripherals (Radio) จำนวน 4 ชุด

- 6.1. เป็น RF daughterboard รองรับช่วงความถี่อย่างน้อย 10 MHz ถึง 6 GHz
- 6.2. มี instantaneous bandwidth 160 MHz per channel หรือมากกว่า
- 6.3. สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์กับ Software Defined Radio (SDR) ในข้อ 3
- 6.4. สามารถทำงานแบบ full duplex แบบอิสระ (independent) ทั้ง Tx และ Rx
- 6.5. มี RF shielding
- 6.6. อุปกรณ์ 1 ชุดประกอบไปด้วย 2 RF daughterboard
- 6.7. สามารถทำงานแบบ phased aligned operation
- 6.8. ผู้ผลิต hardware และ software ต้องเป็นผู้ผลิตรายเดียวกัน
- 6.9. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

7) Communication module (Inter-UAV) จำนวน 4 ชุด

- 7.1. มีขั้วต่อช่องสัญญาณภาครับอย่างน้อย 1 ขั้ว (1 Rx) และ ขั้วต่อช่องสัญญาณภาคส่งอย่างน้อย 1 ขั้ว (1 Tx)
- 7.2. รองรับช่วงความถี่อย่างน้อย 70 MHz ถึง 6 GHz
- 7.3. มี instantaneous bandwidth 56 MHz หรือมากกว่า
- 7.4. มีหน่วยประมวลผลแบบ FPGA และสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลสัญญาณได้
- 7.5. รองรับการทำงานของ GNU Radio และ USRP Hardware Driver (UHD)
- 7.6. ผู้ผลิต hardware และ software ต้องเป็นผู้ผลิตรายเดียวกัน
- 7.7. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

8) Communication module (UAV-USRP) จำนวน 4 ชุด

- 8.1. อุปกรณ์ประมวลผลเพื่อใช้สื่อสารโดยติดตั้งอยู่กับอากาศยานไร้คนขับ (UAV)
 - 8.1.1. มีขนาดความยาวไม่เกิน 120 มิลลิเมตร ความกว้างไม่เกิน 115 มิลลิเมตร ความสูงไม่เกิน 40 มิลลิเมตร
 - 8.1.2. มีแบตเตอรี่ภายนอกสำหรับจ่ายไฟให้อุปกรณ์เป็นแบบประจุไฟใหม่ได้ (rechargeable battery) ชนิด Lithium Polymer (Lipo) ขนาดความจุไม่น้อยกว่า 50,000 mAh
 - 8.1.3. มี CPU intel core i7-10710U หรือสูงกว่า
 - 8.1.4. มี RAM DDR4 ขนาดไม่น้อยกว่า 16 GB
 - 8.1.5. มี SSD ขนาดไม่น้อยกว่า 256 GB
 - 8.1.6. มีระบบปฏิบัติการ windows 10 64-bit และรองรับระบบปฏิบัติการ Ubuntu 64-bit
 - 8.1.7. มี port USB จำนวนไม่ต่ำกว่า 6 port โดยมี USB 3.1 Gen2 Type-A และ Type-C อย่างละ 2 port เป็นอย่างน้อย
 - 8.1.8. มี Intel Wireless-AX MAC
 - 8.1.9. สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สื่อสารและอุปกรณ์ควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในข้อ 4) เพื่อรับ-ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ภาคพื้นดิน
- 8.2. อุปกรณ์คอมพิวเตอร์แบบพกพาเพื่อใช้สื่อสารที่ภาคพื้นดิน
 - 8.2.1. มี CPU intel Intel i7-10510U หรือสูงกว่า
 - 8.2.2. มี RAM DDR4 ขนาดไม่น้อยกว่า 16 GB
 - 8.2.3. มี M.2 PCIe NVMe Solid State Drive (SSD) ขนาดไม่น้อยกว่า 512 GB
 - 8.2.4. มีระบบปฏิบัติการ windows 10 64-bit และรองรับระบบปฏิบัติการ Ubuntu 64-bit
 - 8.2.5. มี port USB จำนวนไม่ต่ำกว่า 3 port โดยมี USB 3.1 Gen2 Type-A และ Type-C
 - 8.2.6. รองรับการใช้งาน Wireless IEEE 802.11ac
 - 8.2.7. มีขนาดจอแสดงผลอย่างน้อย 13 นิ้ว
- 8.3. รองรับการทำงานร่วมกับ Software Defined Radio (SDR) ในข้อ 3) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณความถี่ ประมวลผล และควบคุมสั่งการให้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในข้อ 4) ทำภารกิจต่างๆ ได้
- 8.4. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

9) ค่าลิขสิทธิ์โปรแกรมที่ใช้ในการพัฒนาและใช้งานจริง ประกอบด้วย

- 9.1. LABVIEW
 - 9.1.1. ปฏิบัติการ Microsoft Windows 10 64-bit
 - 9.1.2. มีกล่องเครื่องมือ (Toolbox) อย่างน้อยดังนี้
 - 9.1.2.1. LabVIEW
 - 9.1.2.2. LabVIEW MathScript RT Module
 - 9.1.3. เวอร์ชันไม่ต่ำกว่า LABVIEW 2019

9.1.4. ผู้เสนอราคาต้องเป็นผู้ได้รับมาตรฐาน ISO/IEC 29110:2018 เพื่อสามารถให้คำแนะนำและแก้ปัญหาในการใช้ซอฟต์แวร์แกมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือได้ตลอดระยะเวลารับประกัน

9.1.5. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบ

9.2. โปรแกรม MATLAB และ Simulink

9.2.1. โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์ MATLAB 1 ชุด โดยมีลิขสิทธิ์แบบ academic use

9.2.2. มีกล่องเครื่องมือ (Toolbox) อย่างน้อยดังนี้

9.2.2.1. MATLAB

9.2.2.2. Simulink

9.2.3. สามารถทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 10 64-bit และรองรับระบบปฏิบัติการ Ubuntu 64-bit

9.2.4. เวอร์ชันไม่ต่ำกว่า R2018b

9.2.5. ผู้เสนอราคาต้องเป็นผู้ได้รับมาตรฐาน ISO/IEC 29110:2018 เพื่อสามารถให้คำแนะนำและแก้ปัญหาในการใช้ซอฟต์แวร์แกมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือได้ตลอดระยะเวลารับประกัน

9.2.6. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

9.3. Server OS

9.3.1. เป็นระบบปฏิบัติการไม่ต่ำกว่า Microsoft Windows Server 2019

9.3.2. รองรับการสร้างเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายเสมือน เพื่อให้บริการระบบคอมพิวเตอร์แม่ข่ายแก่ระบบงานต่างๆ ซึ่งใช้งานบนคอมพิวเตอร์แม่ข่าย ตามข้อ 9.3.1

9.3.3. สามารถติดตั้ง ใช้งาน บำรุงรักษาเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่ายในข้อ 9.3.1 อย่างถูกต้อง

9.3.4. ผู้เสนอราคาต้องเป็นผู้ได้รับมาตรฐาน ISO/IEC 29110:2018 เพื่อสามารถให้คำแนะนำและแก้ปัญหาในการใช้ซอฟต์แวร์แกมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือได้ตลอดระยะเวลารับประกัน

9.3.5. รับประกันสินค้าพร้อมบริการและอะไหล่โดยไม่คิดค่าใช้จ่ายเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 ปี นับตั้งแต่วันส่งมอบพัสดุ

2. เงื่อนไขการส่งมอบครุภัณฑ์

ส่งมอบครุภัณฑ์ ณ สำนักพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ภายใน 60 วันนับถัดจากวันลงนามในสัญญา



กทปส



3. เจือไนไขทัวไป

3.1 ผู้เสนอราคาต้องแนบเอกสารข้อกำหนดคุณลักษณะ ซึ่งตรงหรือดีกว่าที่กำหนดไว้ในเอกสารนี้ โดยต้องแนบแคตตาล็อกซึ่งเป็นเอกสารจากผู้ผลิต โดยระบุเครื่องหมายการค้า และรุ่นที่เสนอราคา อย่างชัดเจนประกอบการเสนอราคา

3.2 ผู้เสนอราคาต้องจัดทำตารางเปรียบเทียบข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะครุภัณฑ์ของมหาวิทยาลัย กับครุภัณฑ์ที่เสนอ โดยอ้างอิงถึงหัวข้อและเลขหน้าของเอกสาร



กทปส



การพิจารณาคัดเลือกผู้ชนะการเสนอโดยใช้หลักเกณฑ์ (Price Performance)

รายการ จัดซื้อครุภัณฑ์เพื่อศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ จำนวน 1 งาน

ลำดับ	ชื่อตัวแปรที่ใช้ในการประเมิน	ประเภทตัวแปร	ตัวแปรที่เลือก	น้ำหนัก	คะแนน		
1	ราคาที่เสนอ	ตัวแปรหลัก	<input checked="" type="checkbox"/>	50	e-GP เป็นผู้กำหนด		
					100%	80%	60%
2	คุณภาพและคุณสมบัติของสินค้าดีกว่าข้อกำหนดเป็นประโยชน์ต่อโครงการ	ตัวแปรรอง		20	ดีกว่า ข้อกำหนด 5 รายการสินค้าขึ้นไป 20	ดีกว่าข้อกำหนด 3-4 รายการสินค้า 16	ดีกว่าข้อกำหนด 1-2 รายการสินค้า 12
3	ผู้เสนอราคาได้รับรองคุณภาพทางด้านซอฟต์แวร์เพื่อเป็นประโยชน์ในการให้คำปรึกษาด้านการให้บริการทางด้านซอฟต์แวร์หลังการส่งมอบ	ตัวแปรรอง		10	ได้รับมากกว่า 2 มาตรฐาน 10	ได้รับมากกว่า 1 มาตรฐาน 8	ได้รับ 1 มาตรฐาน 6
4	ระยะเวลารับประกัน	ตัวแปรรอง		5	มากกว่าที่กำหนด 12 เดือน 5	มากกว่าที่กำหนด 7-12 เดือน 4	เท่ากับที่กำหนด 12 เดือน 3
5	การเข้ามาทำการแก้ไข / ซ่อมแซม ณ ที่ติดตั้งเครื่อง (On-site Service)	ตัวแปรรอง		5	ภายในวันทำการถัดไป หรือเร็วกว่า 5	ภายใน 2 วันทำการถัดไป 4	ภายใน 3 วันทำการถัดไปหรือหลังจากนั้น 3
6	การทดสอบการทำงานของอากาศยานไร้คนขับ (UAV)	ตัวแปรรอง		5	มากกว่า 2 ครั้ง 5	จำนวน 2 ครั้ง 4	จำนวน 1 ครั้ง 3
7	ความถูกต้องครบถ้วนสมบูรณ์ของเอกสารที่ยื่นเสนอประกอบการพิจารณา	ตัวแปรรอง		5	ดีมาก 5	ดี 4	พอใช้ 3



กทปส



รายงานแบบแสดงรายละเอียดครุภัณฑ์

ลำดับ	รายละเอียดครุภัณฑ์	หมวดครุภัณฑ์	ชื่อ/ชนิดครุภัณฑ์	จัดซื้อเมื่อวันที่	ใช้ที่	การใช้ประโยชน์
1.	Dell รุ่น Powedge-r640 (SNSR640RN5) และอุปกรณ์ประกอบ	ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	คอมพิวเตอร์ Server	25 ก.ย.63	กสทช.	วิจัยต่อยอด
2.	- ตู้แร็ค 19 นิ้ว รุ่น Close Rack 42U CR-8042 - เครื่องสำรองไฟฟ้า APC รุ่น Smart-UPS 3000 VA RM 2U และอุปกรณ์ประกอบ	ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	อุปกรณ์ประกอบคอมพิวเตอร์ Server	25 ก.ย.63	กสทช.	วิจัยต่อยอด
3.	Eltus รุ่น USRP X310	ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	Software Defined Radio (SDR)	25 ก.ย.63	กสทช.	วิจัยต่อยอด
4.	TAROT รุ่น T-18 V 2.1 และอุปกรณ์ประกอบ	ครุภัณฑ์การศึกษา	อากาศยานไร้คนขับ (UAV)	25 ก.ย.63	กสทช.	วิจัยต่อยอด
5.	L-com รุ่น HG2409Y (2.4 GHz ISM Band) และ รุ่น HG2458-08LP (2.3 GHz to 6.5 GHz)	ครุภัณฑ์ไฟฟ้าและวิทยุ	Antenna	25 ก.ย.63	กสทช.	วิจัยต่อยอด
6.	Eltus รุ่น UBX 10-6000 MHz Rx /Tx (160 MHz, X	ครุภัณฑ์คอมพิวเตอร์	Peripherals (Radio)	25 ก.ย.63	กสทช.	วิจัยต่อยอด
7.	Eltus รุ่น B205mini-I (LX150 I-Grade FPGA)	ครุภัณฑ์ไฟฟ้าและวิทยุ	Communication module (Inter-UAV)	25 ก.ย.63	กสทช.	วิจัยต่อยอด
8.	- Mini PC Intel รุ่น NUC nuc10i7 fnk - Notebook MSI รุ่น Modern 15A11SB-067TH และอุปกรณ์ประกอบ	ครุภัณฑ์ไฟฟ้าและวิทยุ	Communication module (UAV-USRP)	25 ก.ย.63	กสทช.	วิจัยต่อยอด








กทปส







โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่ง
แหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ
รายงานฉบับสมบูรณ์ (ฉบับแก้ไข)





ลำดับ	รายละเอียดครุภัณฑ์	หมวดครุภัณฑ์	ชื่อ/ชนิดครุภัณฑ์	จัดซื้อเมื่อวันที่	ใช้ที่	การใช้ประโยชน์
9.	<ul style="list-style-type: none"> - LABVIEW รุ่นเวอร์ชัน LABVIEW 2020 - MATLAB รุ่นเวอร์ชันไม่ต่ำกว่า R2018b ลิขสิทธิ์ Standard Licence - Simulink รุ่นเวอร์ชันไม่ต่ำกว่า R2018b ลิขสิทธิ์ Standard Licence - Microsoft รุ่น Windows Server 2019 Datacenter Edition (2CPUs, 16 Cores) 	โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ครุภัณฑ์)	คำลิขสิทธิ์โปรแกรมที่ใช้ในการพัฒนาและใช้งานจริง ประกอบด้วย <ul style="list-style-type: none"> - LABVIEW - MATLAB - Simulink - Server OS 	25 ก.ย.63 25 ก.ย.63 25 ก.ย.63 25 ก.ย.63	กสทช. กสทช. กสทช. กสทช.	วิจัยต่อยอด วิจัยต่อยอด วิจัยต่อยอด วิจัยต่อยอด

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
1		 <p>คอมพิวเตอร์ Server S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 350,000.00 บาท</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">744000010008-20301-00004</p>	คอมพิวเตอร์ Server	1	ชุด	Dell	poweredge-r640 (SNSR64ORN5)+จอ Dell 27 นิ้ว
2	อุปกรณ์ประกอบคอมพิวเตอร์ Server						
2.1		 <p>อุปกรณ์ประกอบคอมพิวเตอร์ Sever S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 150,000.00 บาท</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">712500020017-20301-00001</p>	ตู้ RACK 19 นิ้ว แบบปิด ขนาด 42U	1	ชุด	-	Close Rack 42U CR-8042

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
2.2			UPS ขนาด 2U	1	ชุด	APC	Smart-UPS 3000 VA RM 2U
2.3			L3 network switch	1	ชุด	Mikrotik	CRS317-1G-16S+RM
3	Software Defined Radio (SDR)						
		 Software Defined Radio (SDR) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 270,000.00 บาท <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">744000090067-20301-00001</div>  Software Defined Radio (SDR) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 270,000.00 บาท <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">744000090067-20301-00002</div>	Software Defined Radio (SDR)	4	ชุด	Ettus	USRP X310

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
		 Software Defined Radio (SDR) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 270,000.00 บาท <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">744000090067-20301-00003</div>  Software Defined Radio (SDR) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 270,000.00 บาท <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">744000090067-20301-00004</div>					
4	อากาศยานไร้คนขับ (UAV)						
4.1		 อากาศยานไร้คนขับ (UAV) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 265,000.00 บาท <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">156000110008-20301-00001</div>	อากาศยานไร้คนขับวิทยุบังคับ	4	ชุด	TAROT	T-18V2.1

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
4.2		<p>อากาศยานไร้คนขับ (UAV) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 265,000.00 บาท</p> <p>156000110008-20301-00002</p>	RTKGPS	4	ชุด	Here+	V2 RTK GNSS (M8P)
4.3		<p>อากาศยานไร้คนขับ (UAV) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 265,000.00 บาท</p> <p>156000110008-20301-00003</p>	หน่วยควบคุม (4.3,4.4,4.5)	4	ชุด	HEX	pixhawk 2.1 + orange cube
4.4		<p>อากาศยานไร้คนขับ (UAV) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 265,000.00 บาท</p> <p>156000110008-20301-00004</p>	แบตเตอรี่ มาพร้อมชุดโดรน	8	ก้อน	-	Battery
4.5			เครื่องชาร์จ แบตเตอรี่ลิเธียม มาพร้อมชุดโดรน	4	ชุด		LiPro Balance Charger

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
4.6			แบตเตอรี่ 2 ก้อน ต่อชุด	8	ก้อน	Tattu	22.8V 25C 6S 23000mAh Lipo Battery
4.7			ระบบป้องกันการ ชนแบบ LIDAR 360 องศา	4	ชุด	slamtec	RPLIDAR A2
4.8			ระบบช่วยในการ ลงจอด	4	ชุด	TERABEE	TeraRanger One
4.9			ชุดอุปกรณ์สื่อสาร Telemetry	4	ชุด	mRo	SiK Telemetry Radio V2 915Mhz









ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
4.10			กล้อง	4	ชุด	GOPRO	Hero 7 black
4.11			ชุดควบคุมพร้อม หน้าจอแสดงผล	4	ชุด	HEX	Herelink
4.12			ชุดควบคุมมาพร้อม โดรน	4	ชุด	FrSKY	-

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
5	Antenna						
5.1		 Antenna S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 3,850.00 บาท <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">598500050354-20301-00001</div> Antenna S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 3,850.00 บาท <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">598500050354-20301-00002</div>	Antenna ความถี่ ช่วง 2.4 GHz ISM band	4	ชุด	L-com	HG2409Y (2.4 GHz ISM Band)
5.2		 Antenna S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 3,850.00 บาท <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">598500050354-20301-00003</div> Antenna S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 3,850.00 บาท <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">598500050354-20301-00004</div>	Antenna ความถี่ ช่วง 5.B GHz ISM band	4	ชุด	L-com	HG2458-08LP (2.3 GHz to 6.5 GHz)

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
6		<p> Peripherals (Radio) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 90,000.00 บาท 744000090067-20301-00005 </p> <p> Peripherals (Radio) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 90,000.00 บาท 744000090067-20301-00006 </p> <p> Peripherals (Radio) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 90,000.00 บาท 744000090067-20301-00007 </p> <p> Peripherals (Radio) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 90,000.00 บาท 744000090067-20301-00008 </p>	Peripherals (Radio)	4	ชุด	Ettus	UBX 10-6000 MHz Rx/Tx (160 MHz, X) (8 กล้อง)

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
7		<p> Communication module (Inter-UAV) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 189,500.00 บาท 744000090067-20301-00009 </p> <p> Communication module (Inter-UAV) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 189,500.00 บาท 744000090067-20301-00010 </p> <p> Communication module (Inter-UAV) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 189,500.00 บาท 744000090067-20301-00011 </p> <p> Communication module (Inter-UAV) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 189,500.00 บาท 744000090067-20301-00012 </p>	Communication module (Inter-UAV)	4	ชุด	Ettus	B205mini-i (LX150 I-Grade FPGA) (4 กล่อง)

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
8	Communication module (UAV-USRP)						
8.1		<p>Communication module (UAV-USRP) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 189,500.00 บาท</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">744000090067-20301-00015</p>	mini pc คีดี Drone	4	ชุด	Intel	NUC nucl0i7fnk
8.2		<p>Communication module (UAV-USRP) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 189,500.00 บาท</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">744000090067-20301-00014</p> <p>Communication module (UAV-USRP) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 189,500.00 บาท</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">744000090067-20301-00013</p>	Battery Lipo 50,000 mAh	4	ชุด	MAXOAK	Laptop Power Bank 185Wh/50000mAh
8.3		<p>Communication module (UAV-USRP) S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 189,500.00 บาท</p> <p style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">744000090067-20301-00016</p>	Notebook ประมวลผล ภาคสนาม	4	ชุด	LENOVO	GAMING 3 15IMH05- 81Y400PCTA

ลำดับ	รูปภาพ	รายละเอียดครุภัณฑ์	รายการ	จำนวน	หน่วย	Brand	รุ่น
9	คำลิขสิทธิ์โปรแกรมที่ใช้ในการพัฒนาและใช้งานจริง ประกอบด้วย						
9.1		 <p>คำลิขสิทธิ์โปรแกรมฯ LABVIEW S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 104,183.00 บาท</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">744000090006-20301-00055</div>	- LABVIEW	1	โปรแกรม	-	เวอร์ชันไม่ต่ำกว่า LABVIEW 2019
9.2		 <p>คำลิขสิทธิ์โปรแกรมฯ MATLAB S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 88,701.00 บาท</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">744000090006-20301-00056</div>	MATLAB	1	โปรแกรม	-	เวอร์ชันไม่ต่ำกว่า R2018b
9.3		 <p>คำลิขสิทธิ์โปรแกรมฯ Simulink S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 116,600.00 บาท</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">744000090006-20301-00057</div>	Simulink	1	โปรแกรม	-	เวอร์ชันไม่ต่ำกว่า R2018b
9.4		 <p>คำลิขสิทธิ์โปรแกรมฯ Server OS S20301-0001 ครุภัณฑ์โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณฯ 11 กุมภาพันธ์ 2564 เป็นจำนวนเงิน 25,680.00 บาท</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">744000090006-20301-00058</div>	Server OS	1	โปรแกรม	Microsoft	Windows Server 2019 Datacenter Edition (2CPUS, 16 Cores)

4

ผลการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) ได้ให้ความสนใจขอบเขตการดำเนินงาน โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ อย่างละเอียดแล้ว จึงได้ปฏิบัติงานตามข้อกำหนดโดยมีผลการดำเนินโครงการดังนี้

4.1 ศึกษาเทคโนโลยีตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่มีอยู่ในปัจจุบัน

การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณหมายถึงการใช้เครื่องมือสายอากาศและวิธีต่างๆ เพื่อที่ระบุตำแหน่งการแพร่สัญญาณวิทยุ โดยทั่วไปแล้วสามารถระบุความละเอียดได้ในระดับต่ำกว่า 100 เมตร แหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุ นั้นสามารถเป็นชนิดอยู่กับที่หรือเคลื่อนที่ก็ได้ โดยปกติแหล่งกำเนิดสัญญาณมักจะ ไม่ให้ความร่วมมือในการระบุตำแหน่งยกเว้นในกรณีพิเศษเช่นภารกิจค้นหาภัยพิบัติ การประยุกต์ใช้การค้นหาเส้นทางของคลื่นของแหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุ นั้นมีมากมายเช่นการกำกับและดูแลการใช้คลื่นวิทยุ การระบุตำแหน่งที่ตั้งของข้าศึกในการทหาร การติดตามยานพาหนะที่ถูกโจรกรรมและการตรวจสอบคลื่นสัญญาณรบกวนสำหรับวิทยุสื่อสาร

การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณนั้นจะอาศัยความแตกต่างของแอมพลิจูด ความถี่ เฟส หรือเวลาที่แตกต่างกันของสัญญาณที่ได้รับมาประมวลผลเพื่อหาทิศทาง โดยทั่วไปลักษณะของสัญญาณจะมีผลกระทบน้อยมากต่อความถูกต้องในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ หลักการทำงานในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณประกอบไปด้วย สายอากาศ ภาครับสัญญาณ ภาคประมวลผล และภาคแสดงผล

การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ และการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ความใกล้เคียงกันอย่างมาก อย่างไรก็ตามก็มีความแตกต่างกันกล่าวคือ การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณนั้นหมายถึงขบวนการที่สามารถชี้ชัดถึงตำแหน่งของแหล่งกำเนิดพลังงานวิทยุ แต่การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณนั้นเป็นขบวนการที่ใช้แบร์ริง (bearing) ในการระบุทิศทางของแหล่งกำเนิดพลังงานวิทยุ กล่าวโดยย่อได้ว่า การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณเกิดจากการนำทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ได้จากการวัดจากจุดต่างๆมาประมวลผล เพื่อให้ได้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ

แบร์ริงหมายถึงทิศทางที่ชี้ไปยังแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยมีหน่วยเป็นองศาเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่วัด โดยการวัดแบร์ริงนั้นต้องระบุทั้งทิศทางของแบร์ริงและตำแหน่งที่ทำการวัด ดังนั้นขบวนการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณก็คือการหาแบร์ริงนั่นเอง แบร์ริงเดี่ยวนั้นสามารถบอกทิศทางไปยังแหล่งกำเนิดสัญญาณหรือที่เรียกว่า Homing แต่หากนำแบร์ริงที่ได้จากการวัด ณตำแหน่งที่แตกต่างกันมาประมวลผล จะสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ ดังนั้นความถูกต้องของการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณจึง

ขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงและความถูกต้องของแบร์ริงที่วัดได้ นั้นหมายถึงขบวนการในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณมีความสำคัญ อย่างยิ่งยวด

ในการวัดทิศทางของ bearing นั้นสามารถทำได้ทั้งแบบ Manual และแบบ Automatic กล่าวคือแบบ Manual ผู้ที่ทำการวัดจะใช้สายอากาศทำการกวาดหาทิศทางที่ระดับสัญญาณสูงสุดเพื่อระบุแบร์ริง ในทางกลับกันแบบ Automatic อุปกรณ์จะทำการคำนวณหาแบร์ริงโดยใช้วิธีการต่างๆเช่น Doppler Watson-watt และ Interferometer เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการวัดทิศทางของแบร์ริงแบบ Manual นั้นต้องอาศัยความชำนาญของผู้วัดในขณะที่การวัดทิศทางแบบ Automatic นั้นมักมีราคาสูงกว่ามาก

ที่กล่าวไปข้างต้นว่าในการวัดแบร์ริงนั้นต้องระบุทั้งทิศทางของแบร์ริงและตำแหน่งที่ทำการวัด การระบุตำแหน่งที่สามารถทำได้ง่ายและถูกต้องที่สุดคือการอ้างอิงจาก Global Navigation Satellite System (GNSS) เช่น Global Positioning System (GPS) และ Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) ซึ่งปัญหาในการระบุตำแหน่งจาก GNSS นั้นสามารถกระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพในพื้นที่โล่งแต่หากพื้นที่ที่ทำการวัดแบร์ริงนั้นเป็นลักษณะพื้นที่ในเมืองเช่นมีตึกสูง การระบุตำแหน่งจาก GNSS นั้นอาจมีความผิดพลาด ซึ่งสุดท้ายความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการระบุตำแหน่งจาก GNSS จะทำให้แบร์ริงที่ได้มีความผิดพลาดไปด้วย

ความผิดพลาดในการหาแบร์ริงนั้นมีความเกี่ยวข้องกับระยะทางระหว่างตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณกับตำแหน่งที่ทำการวัดแบร์ริงตัวอย่าง เช่น หากแบร์ริงที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อน 5 องศาในกรณีที่ระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับตำแหน่งที่วัดห่างกัน 100 เมตรจะเกิดการผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณประมาณ 9 เมตร ในกรณีที่ระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับตำแหน่งที่วัดห่างกัน 5 กิโลเมตรจะเกิดการผิดพลาดในการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณถึง 440 เมตร ความผิดพลาดในการอ่านแบร์ริงจะยิ่งทวีความรุนแรงในกรณีที่จำนวนแบร์ริงที่ใช้ในการคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณมีขนาดมีจำนวนน้อย

Free Space Path Loss (FSPL) เป็นการคำนวณการสูญเสียของกำลังสัญญาณ ณ ตำแหน่งและความถี่ต่างๆ โดย Free Space Path Loss นั้นสันนิษฐานพื้นที่โล่งและแหล่งกำเนิดสัญญาณในอุดมคติดังสมการต่อไปนี้

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

เมื่อ A คือ Free Space Path Loss

d คือ ระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณและจุดที่ทำการวัด

λ คือ ความยาวคลื่น

Free Space Path Loss มีความสำคัญอย่างยิ่งในการระบุหาทิศทางเนื่องจากสามารถกำหนดระยะทางสูงสุดระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณและจุดที่ทำการวัด ซึ่งหากระยะทางเกินกว่าที่กำหนดแล้วสัญญาณที่ได้รับจะมีความแรงต่ำมากจนทำให้การระบุหาทิศทางมีความผิดพลาดสูง สมการข้างต้นจะเห็นได้ว่า Free Space Path Loss เพิ่มขึ้นเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นนอกจากนั้น ความถี่มีผลต่อ Free Space Path Loss กล่าวคือเมื่อความถี่สูงขึ้น Free Space Path Loss ก็จะสูงขึ้นด้วย

นอกจาก Free Space Path Loss ที่ทำการลดกำลังสัญญาณแล้วเมื่อสัญญาณตกกระทบวัตถุสัญญาณนั้นสามารถถูกดูดซับ (absorb) ได้เช่น ไม้ แก้วหรือพลาสติกจะมีอัตราการดูดซับสัญญาณต่ำ น้ำจะมีอัตราการดูดซับสัญญาณปานกลาง ส่วนคอนกรีตเหล็ก กระจกกรองแสงและพื้นดิน จะมีอัตราการดูดซับสัญญาณสูง ซึ่งนอกจากการดูดซับสัญญาณแล้ววัตถุเหล่านี้ยังสามารถสะท้อนสัญญาณ (reflect) ทำให้สัญญาณเกิดการแทรกสอด ทำให้การวัดแปรปรวนเกิดความผิดพลาด การสะท้อนของสัญญาณทำให้ผู้รับได้รับสัญญาณเดียวกันจากหลายๆแหล่ง (multipath) ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการหาแบบรับ

นอกจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดสัญญาณก็มีผลต่อการหาแบบรับ กล่าวคือแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ส่งสัญญาณอย่างต่อเนื่องหรือมีการหยุดส่งสัญญาณเป็นระยะเวลาสั้นๆ จะสามารถหาแบบรับได้ง่ายกว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณช่วงสั้น ๆ หรือนาน ๆ ครั้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การหาแบบรับแบบ Manual จะกระทำได้อย่างมากในกรณีที่แหล่งกำเนิดสัญญาณส่งสัญญาณออกมาเป็นระยะเวลาสั้นมาก นอกเหนือจากเรื่องของระยะเวลาแล้ว แหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนความถี่จะทำให้การหาแบบรับทำได้ยากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีการกระโดดของความถี่ (frequency hopping) อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ภาครับที่สามารถกวาดหาความถี่อย่างรวดเร็ว (fast scanning) สามารถลดความผิดพลาดของการหาแบบรับได้

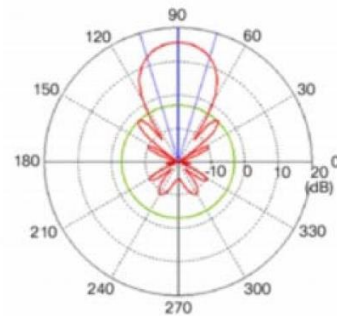
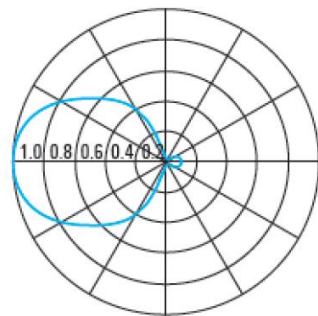
เทคโนโลยีตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1. การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Manual

การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Manual ผู้ทำการวัดจะกวาดสายอากาศไปมาเพื่อหาทิศทางที่ได้รับสัญญาณที่มีความเข้มสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งหมายถึงทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ดังนั้นความไวในการตรวจจับสัญญาณจึงมีผลกระทบอย่างมากต่อวิธีนี้ หนึ่งในวิธีที่สามารถเพิ่มความไวในการตรวจจับสัญญาณคือ การใช้สายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) อย่างไรก็ตามสายอากาศแบบมีทิศทางนั้นถึงแม้จะมีอัตราการขยาย (gain) ที่สูงอันเนื่องมาจาก beamwidth ที่แคบแต่ก็มีจำนวน side lobe ที่เพิ่มขึ้นเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 2

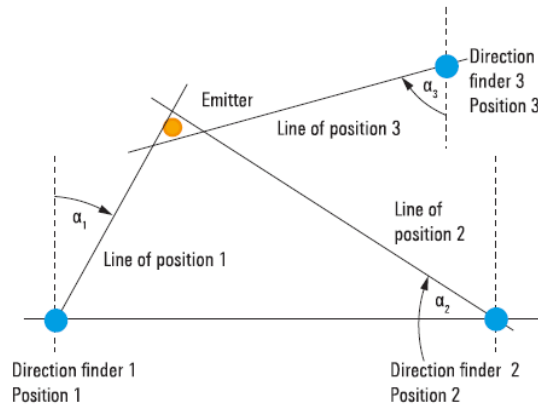


รูปที่ 1 การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Manual



รูปที่ 2 สายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna)

เครื่องที่ได้จากการวัดระยะจุดที่แตกต่างกันสามารถนำมาใช้คำนวณเพื่อระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้โดยใช้หลัก triangulation กล่าวคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณจะอยู่ในบริเวณพื้นที่ด้านในของจุดตัดของเครื่องทั้ง 3 ดังรูปที่ 3 ทั่วไปแล้วจะใช้เครื่องอย่างน้อยจาก 3 จุดวัดและการใช้เครื่องจากจุดวัดมากกว่า 6 ตำแหน่งเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้น้อยมาก ดังรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่าตำแหน่งที่ใช้ในการวัดเครื่องมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อความถูกต้องในการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ



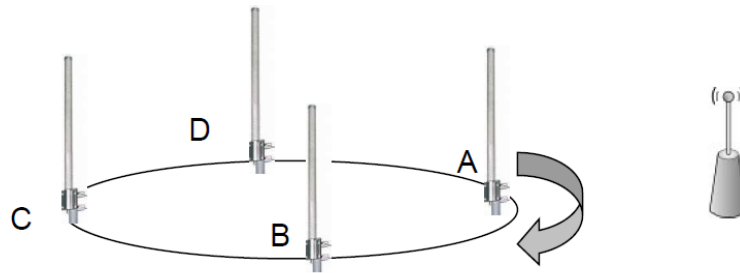
รูปที่ 3 การคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้โดยใช้หลัก triangulation

ข้อดีของการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Manual คือ ราคาถูก อุปกรณ์มีความซับซ้อนต่ำ มักมีขนาดเล็กจึงสามารถพกพาและทำการวัดในสถานที่ต่างๆได้ง่าย อย่างไรก็ตามข้อเสียของวิธีนี้คือ ความชำนาญของผู้ใช้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ มีความไวต่ำต่อแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ส่งสัญญาณเป็นช่วงสั้นหรือสามารถเปลี่ยนความถี่ได้ นอกจากนี้สายอากาศยังเป็นตัวแปรสำคัญ กล่าวคือต้องการสายอากาศที่มีทิศทางแคบและในขณะเดียวกันมีแถบความถี่ที่กว้าง

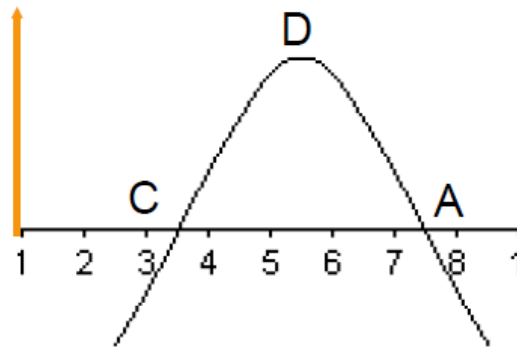
2. การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Doppler

การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Doppler ใช้หลักการของ Doppler shift กล่าวคือ หากแหล่งกำเนิดสัญญาณและจุดวัดสัญญาณเคลื่อนที่เข้าหากัน ความถี่ของสัญญาณที่วัดได้จะมีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกันหากแหล่งกำเนิดสัญญาณและจุดวัดสัญญาณเคลื่อนที่ออกจากกัน สัญญาณที่วัดได้จะมีความถี่ต่ำลง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้การเปลี่ยนแปลงของความถี่ในการตรวจสอบว่า ขณะนี้จุดวัดสัญญาณกำลังเคลื่อนที่เข้าหาหรือเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ

อุปกรณ์สำหรับการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Doppler สามารถสร้างได้โดยใช้สายอากาศจำนวน 4 ต้นยึดบนจานหมุน ดังรูปที่ 4 เมื่อจานเริ่มหมุนสายอากาศจะเคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิดสัญญาณจากนั้นจะเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดสัญญาณตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 5 ณ ตำแหน่ง A และ C สายอากาศทั้งสองต้นเสมือนว่าไม่มีการเคลื่อนที่เมื่อเทียบกับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ดังนั้น Doppler shift จึงเท่ากับศูนย์ ในทางกลับกัน ณ ตำแหน่ง B และ C เป็นตำแหน่งที่มี Doppler shift สูงสุดเนื่องจากสายอากาศ B เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดสัญญาณและสายอากาศ D เคลื่อนที่เข้าหาแหล่งกำเนิดสัญญาณ หากนำ Doppler shift มาพิมพ์จะได้ Doppler sine wave ดังรูป จะเห็นได้ว่า ณ ตำแหน่ง A และ C ซึ่งเป็นจุดตัดแกน x เป็นจุดที่ไม่มี Doppler shift และจุดตัดที่ 2 คือจุด A เป็นจุดที่ไกลแหล่งกำเนิดสัญญาณที่สุด



รูปที่ 4 อุปกรณ์สำหรับการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Doppler



รูปที่ 5 Doppler sine wave

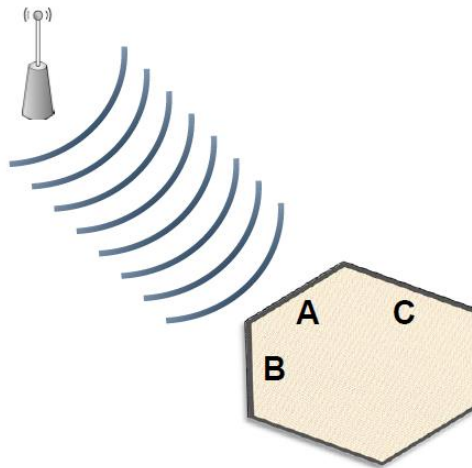
ในทางปฏิบัติ การยึดสายอากาศเข้ากับงานหมุนด้วยความเร็วสูงนั้นเป็นไปได้ยากและมีประสิทธิภาพต่ำ ดังนั้นจึงใช้ Doppler switch ในการเลือกรับสัญญาณจากสายอากาศทั้ง 4 ต้นอย่างต่อเนื่องกัน อย่างไรก็ตามนั่นหมายความว่า การ Switch ระหว่างการรับสัญญาณของสายอากาศแต่ละต้นนั้นต้องทำด้วยความเร็วสูงมากจากการศึกษา การเพิ่มจำนวนสายอากาศมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Doppler แต่หากเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้

ข้อดีของการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Doppler ได้แก่ ราคาถูก อุปกรณ์สามารถหาซื้อได้ง่ายสามารถทำงานได้ดีทั้งขณะอยู่กับที่และเคลื่อนไหวอย่างไรก็ดีวิธีนี้ต้องการสัญญาณที่มีลักษณะการส่งออกมาอย่างต่อเนื่อง (continous wave: CW) ไม่เหมาะกับสัญญาณที่มีการส่งเป็นช่วงสั้น ๆ นอกจากนั้นสายอากาศยังเป็นข้อจำกัดของวิธีนี้คือ มีประสิทธิภาพดีเฉพาะสัญญาณความถี่ต่ำกว่า 1 GHz. และเป็นสัญญาณที่มี polarization ในแนวตั้ง

3.การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Angle Of Arrival (AoA)

การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Angle Of Arrival เป็นการหามุมที่สัญญาณถูกตรวจพบโดยกลุ่มของสายอากาศ พูดอีกนัยหนึ่งคือ เป็นการวัดความเข้มของสัญญาณในตำแหน่งสายอากาศต่างๆ ที่ถูกติดตั้งด้วยกันเป็นกลุ่ม การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณนี้อาศัยการวัดความเข้มของสัญญาณเท่านั้น

หลักการหาทิศทางของสัญญาณแบบ Angle Of Arrival สามารถแสดงได้อย่างง่ายในรูปที่ 6 สมมุติว่าสายอากาศถูกติดตั้งโดยรอบพื้นผิวกล่องสี่เหลี่ยม และมีแหล่งกำเนิดสัญญาณ สัญญาณออกมาดั่งรูป หากวัดกำลังของสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่างๆ จะเห็นได้ว่ากำลังสัญญาณ ณ ตำแหน่ง A มีค่าสูงสุด ในขณะที่กำลังสัญญาณ ณ ตำแหน่ง B และ C มีค่าลดหลั่นไป ทั้งนี้เฉพาะความเข้มของสัญญาณ ณ ความถี่ที่กำหนดจะถูกตรวจสอบและนำมาหาทิศทางแท้จริง



รูปที่ 6 หลักการหาทิศทางของสัญญาณแบบ Angle Of Arrival



รูปที่ 7 กลุ่มสายอากาศถูกจัดเป็นกลุ่มและทำมุมแตกต่างกัน

เนื่องจากการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Angle Of Arrival อาศัยความเข้มของสัญญาณในการหาแบร์ริง สายอากาศจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพของวิธีนี้ สายอากาศที่ใช้จึงเป็นสายอากาศแบบมีทิศทางและมีลักษณะการกระจายสัญญาณ กว้างและราบเรียบเช่น flat panel โดยสายอากาศจะถูกจัดเป็นกลุ่มและทำมุมแตกต่างกัน โดยทั่วไปจะจัดกลุ่มเป็นจำนวน 4 และ 8 ต้น ดังรูปที่ 7 ความถูกต้องและแม่นยำในการหาทิศทางสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่ทำมุมต่างๆกัน อย่างไรก็ตามการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Angle Of Arrival สามารถทำได้ด้วยสายอากาศแบบมีทิศทางเพียงต้นเดียวเช่นกัน ตัวอย่างเช่น สายอากาศแบบฮอร์นหรือยาگیอู๊ด้า ซึ่งสามารถหมุนรอบตัวได้ ดังรูปที่ 8 ซึ่งในกรณีนี้สายอากาศควรมีลักษณะ beamwidth ที่แคบ

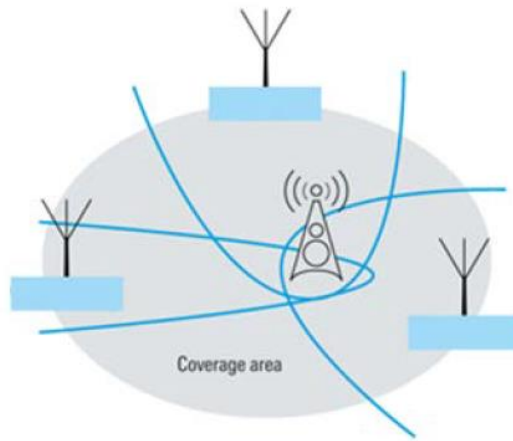


รูปที่ 8 สายอากาศแบบมีทิศทางเพียงต้นเดียวซึ่งสามารถหมุนรอบตัวได้

ข้อดีของการหาทิศทางแบบ Angle Of Arrival คืออุปกรณ์ที่ใช้มีความซับซ้อนต่ำเนื่องจากการวัดความเข้มของสัญญาณเท่านั้น ไม่มีการวัดเวลาเฟสความถี่ ประสิทธิภาพของการหาทิศทางสามารถเพิ่มด้วยการใช้สายอากาศที่มากขึ้น ในกรณีที่ใช้สายอากาศเดี่ยว อัตราการกวาดมุมที่ต่ำของสายอากาศสามารถเพิ่มความถูกต้องในการหาแบร์ริงได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าวิธีนี้จะสามารถนำไปใช้กับสัญญาณได้ทุกชนิด แต่ประสิทธิภาพในการหาทิศทางจะลดต่ำลงอย่างมากหากเกิด multipath ดังนั้นวิธีนี้จึงเหมาะกับพื้นที่โล่งหรือสัญญาณอยู่ในระดับแนวสายตา

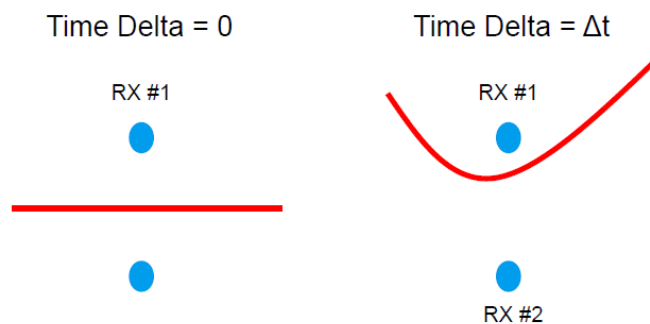
4.การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Time Difference of Arrival (TDoA)

การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Time Difference of Arrival อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางมาคำนวณหาตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ วิธีนี้จะใช้จุดอ้างอิงเพื่อทำการวัดสัญญาณตั้งแต่ 3 จุดขึ้นไป โดยทั่วไปแล้วจุดที่ทำการวัดสัญญาณจะอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดสัญญาณด้วยระยะทางที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณจึงเดินทางไปถึงแต่ละจุด ณ เวลาที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำความแตกต่างของเวลาที่สัญญาณถูกตรวจพบ ณ จุดต่าง ๆ มาคำนวณหาตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยความแตกต่างทางเวลาจะแสดงอยู่ในรูปของ hyperbola และจุดตัดของเส้น hyperbola แสดงถึงตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณ

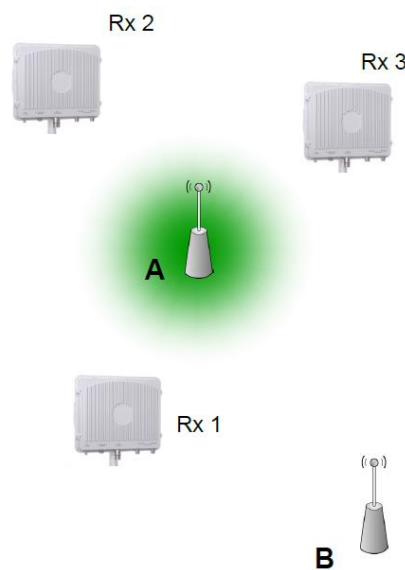
การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณชนิดนี้ต้องอาศัยศูนย์กลางการประมวลผลสัญญาณ โดยข้อมูลเชิงเวลาของสัญญาณที่ได้รับในแต่ละจุด จะถูกส่งไปยังศูนย์กลางซึ่งมีหน้าที่ประมวล correlation function บนสัญญาณที่ได้รับจากทุกๆจุด ผลที่ได้คือความแตกต่างทางเวลาซึ่งสามารถนำไปเขียนอยู่ในรูปของ hyperbola ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความแตกต่างทางเวลา ในรูปของ hyperbola

จะเห็นได้ว่า หากความแตกต่างเชิงเวลาของสัญญาณที่ได้รับ ณ จุดทั้งสองเป็นศูนย์ เส้น hyperbola จะอยู่กึ่งกลางระหว่างจุดรับสัญญาณทั้งสอง แต่หากความแตกต่างเชิงเวลาของสัญญาณที่รับ ณ จุดที่วัดมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เส้น hyperbola จะแสดงให้เห็นถึงระยะทางที่แตกต่างกันจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยทั้งนี้ การหาเส้น hyperbola จะกระทำระหว่างจุดวัด 2 จุด ตัวอย่างเช่นหากมีจุดวัดสัญญาณทั้งหมด 3 จุด ได้แก่ A B และ C การหา เส้น hyperbola จะถูกกระทำระหว่างจุด A และ B ก่อนจากนั้น จึงหาเส้น hyperbola ระหว่างจุด B และจุด C ท้ายสุดจึงหาเส้น hyperbola ระหว่างจุด C และจุด A ตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณจะอยู่บริเวณจุดตัดของเส้น hyperbola ทั้ง 3 เส้นดังรูปที่ 9

ดังที่กล่าวมาข้างต้น การหาเส้น hyperbola จะถูกกระทำ ณ จุด 2 จุดโดยแหล่งกำเนิดสัญญาณต้องอยู่ระหว่างจุดสองจุดนั้นด้วย รูปที่ 11 แสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของการระบุตำแหน่งด้วยวิธี Time Difference of Arrival แหล่งกำเนิดสัญญาณ A สามารถถูกระบุตำแหน่งได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจาก ถูกล้อมด้วยจุดวัดทั้ง 3 จุดในทางกลับกันแหล่งกำเนิดสัญญาณ B จะไม่สามารถถูกระบุตำแหน่งได้ เนื่องจากไม่ได้ถูกล้อมด้วยจุดวัดทั้ง 3 จุดด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งตำแหน่งที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ใช้วัดสัญญาณในแต่ละจุด



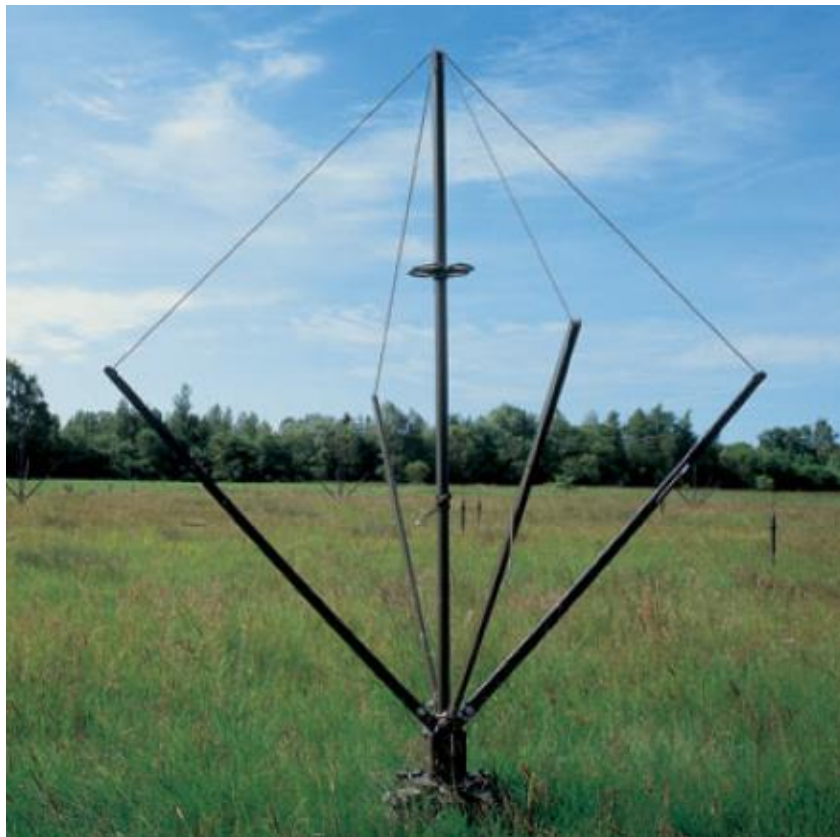
รูปที่ 11 ข้อจำกัดของการระบุตำแหน่งด้วยวิธี Time Difference of Arrival

นอกจากตำแหน่งของจุดวัดที่มีผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณแล้ว วิธีนี้ต้องการความถูกต้องและแม่นยำ ทั้งของตำแหน่งที่ตั้งของจุดที่ใช้วัดสัญญาณและเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ ในปัจจุบันสามารถใช้ GNSS เช่น GPS และ GLONASS ในการอ้างอิงตำแหน่งและเวลาได้อย่างแม่นยำ อย่างไรก็ตามหากสัญญาณ GNSS ถูกรบกวนแล้วประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณจะต่ำลงอย่างมาก

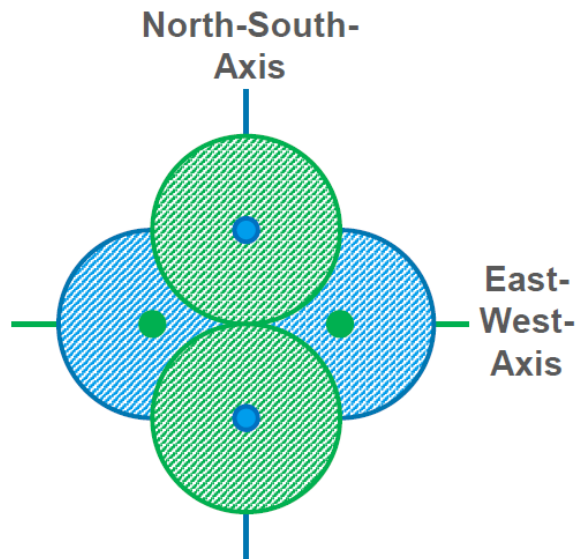
ข้อดีของวิธีนี้คือสามารถตรวจจับสัญญาณที่มีความแรงต่ำ มีประสิทธิภาพสูงหากแหล่งกำเนิดสัญญาณอยู่ในวงล้อมของจุดที่ใช้วัดสัญญาณ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ด้วยการเพิ่มตำแหน่งที่ใช้วัดสัญญาณ สามารถลดผลกระทบของ multipath ในการคำนวณได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องการการประมวลผล ศูนย์กลางซึ่งต้องใช้ทรัพยากรและเวลามากขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มตำแหน่งที่ใช้วัดสัญญาณ

5. การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Watson-Watt

การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Watson-Watt อาศัยการเปรียบเทียบความเข้มของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศ Adcock หรือสายอากาศแบบรูปปิด ดังรูปที่ 12 ณ ตำแหน่งต่าง ๆ กัน โดยสายอากาศแบบ Accord ประกอบไปด้วยสายอากาศจำนวน 4 ต้น วางในแนวตั้งด้วยระยะห่างที่เท่า ๆ กัน โดยสายอากาศจะทำการจับกลุ่มเป็น 2 กลุ่มได้แก่ สายอากาศกลุ่มเหนือใต้และสายอากาศกลุ่มตะวันออกและตะวันตก ดังแสดงในรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบ Adcock จะมีความไวสูงสุด ในทิศทางเหนือใต้และตะวันออกและตะวันตก รูปแบบของสายอากาศชนิดนี้อาจแตกต่างกันตามการออกแบบดังรูปที่ 14



รูปที่ 12 สายอากาศ Adcock



รูปที่ 13 สายอากาศกลุ่มเหนือใต้และสายอากาศกลุ่มตะวันออกและตะวันตก

Crossed loops



Crossed monopole



Crossed dipole



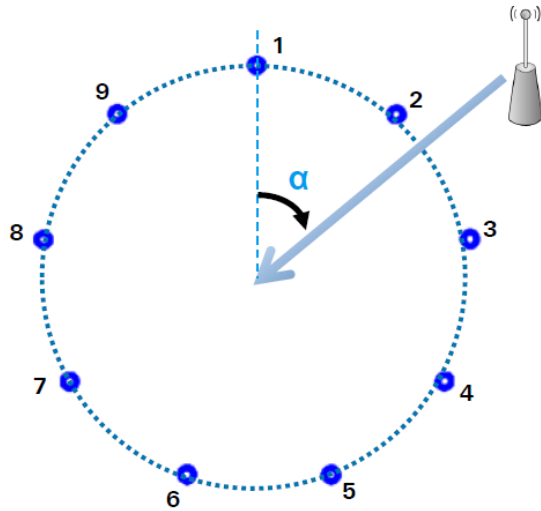
รูปที่ 14 รูปแบบของสายอากาศแตกต่างกันตามการออกแบบ

ข้อดีของการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ Watson-Watt ได้แก่ราคาถูก อุปกรณ์สามารถหาได้ง่าย ชุดสายอากาศมีขนาดเล็ก สามารถติดตั้งบนรถได้ง่าย อย่างไรก็ตามลักษณะเฉพาะของสายอากาศแบบ Adcock มี aperture ที่แคบทำให้ไม่เหมาะกับการวัดในเมืองที่มีผลกระทบจาก multipath รวมถึงข้อจำกัดของสายอากาศแบบ Adcock ทำให้ความถี่ของสัญญาณสูงสุดถูกจำกัดไม่เกิน 1 GHz.

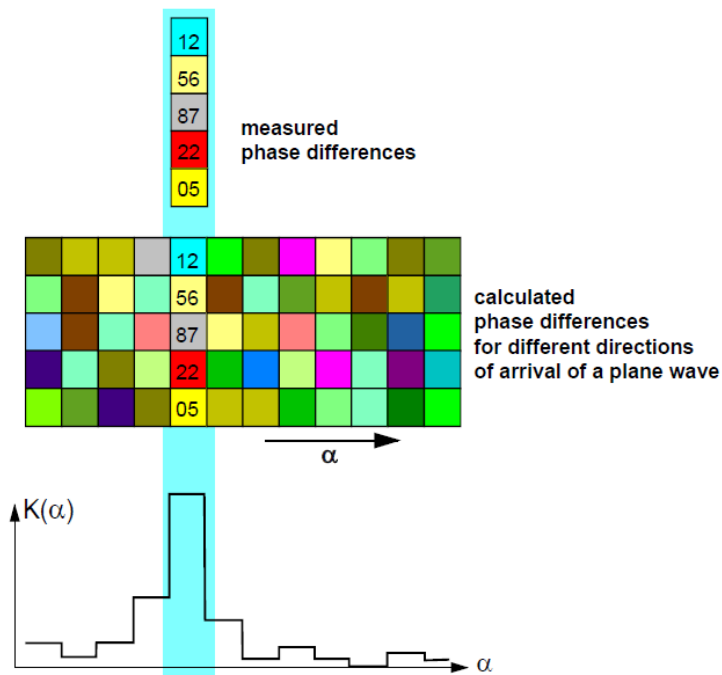
6. การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณแบบ correlative interferometry

การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณวิธีนี้อาศัย interferometer ในการคำนวณทิศทางโดยใช้ความแตกต่างของเฟสในสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศในจุดต่าง ๆ โดยทั่วไปแล้วกลุ่มสายอากาศเหล่านี้จะเรียงตัวกันเป็นวงกลมโดยมีระยะห่างเท่า ๆ กันและใช้สายอากาศเสาหนึ่งเป็นเสาอ้างอิงสัญญาณ รูปที่ 15

แสดงให้เห็นถึงการวางตำแหน่งของสายอากาศจะเห็นได้ว่า สัญญาณที่ได้รับ ณ ตำแหน่งต่างกันจะมีเฟสที่แตกต่างกัน โดยผลต่างของเฟสของสัญญาณที่วัดได้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลต่างของเฟสอ้างอิง เพื่อหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณดังรูปที่ 16



รูปที่ 15 กลุ่มสายอากาศเรียงตัวกันเป็นวงกลม



รูปที่ 16 การหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณจากการเปรียบเทียบเฟส

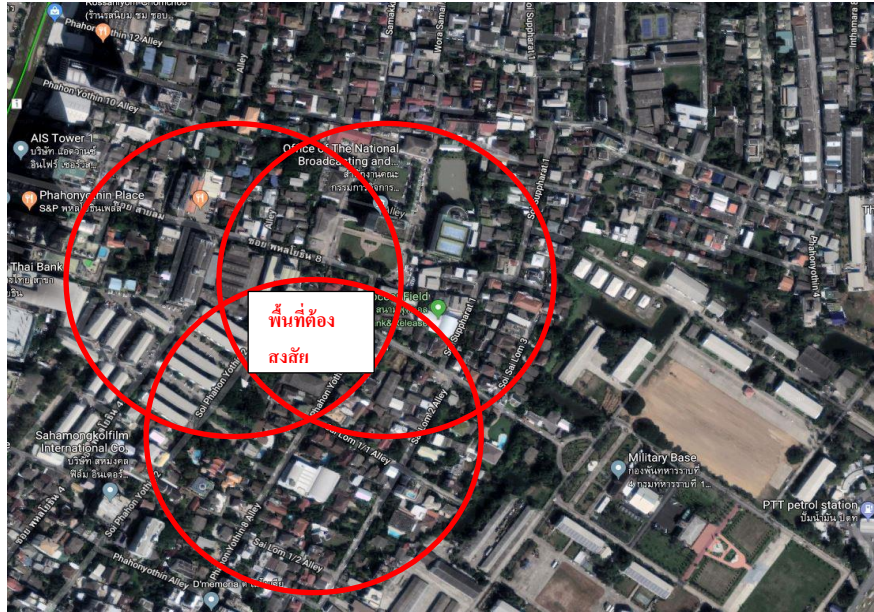
โดยทั่วไปแล้วสายอากาศที่ใช้จะมีจำนวนตั้งแต่ 5 ถึง 9 ชุดบรรจุอยู่ใน radome ดังรูปที่ 17 โดย correlative interferometer สามารถรองรับความถี่สัญญาณได้สูงกว่า 1 GHz. และสามารถทนทานต่อการสะท้อนของสัญญาณและ multipath จึงทำให้ระบบนี้มีความแม่นยำสูงมาก



รูปที่ 17 radome บรรจุสายอากาศ

4.2 ออกแบบและวิเคราะห์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

การออกแบบและวิเคราะห์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยนำข้อได้เปรียบของอากาศยานไร้คนขับซึ่งสามารถปฏิบัติการได้คล่องตัวและไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน รวมถึงมุมมองในการตรวจจับที่กว้างและมีถึง 3 มิติ โดยสามารถที่จะตรวจจับแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตในพื้นที่ที่กว้างเมื่อทำการบินในระดับสูงและสามารถที่จะระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยละเอียดเมื่อทำการบินในระดับต่ำ รูปที่ 18 แสดงถึงขอบเขตการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำ ทำการบินในระดับสูง ในการบินระดับสูงระบบจะสามารถกำหนดขอบเขตพื้นที่ที่ต้องสงสัยว่ามีแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต เช่น ผู้บังคับอากาศยานไร้คนขับที่ไม่ได้รับอนุญาต จากนั้นระบบจะลดระดับเพดานบินลงเพื่อระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยละเอียด รูปที่ 19 แสดงถึงการระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำ ทำการบินในระดับต่ำเพื่อระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยละเอียด เส้นวงกลมแสดงถึงขอบเขตการตรวจจับของอากาศยานไร้คนขับ

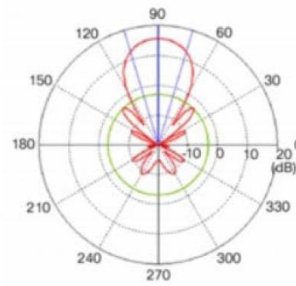
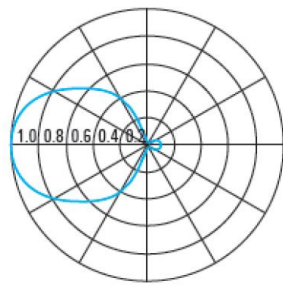


รูปที่ 18 ขอบเขตการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ
3 ลำทำการบินในระดับสูง



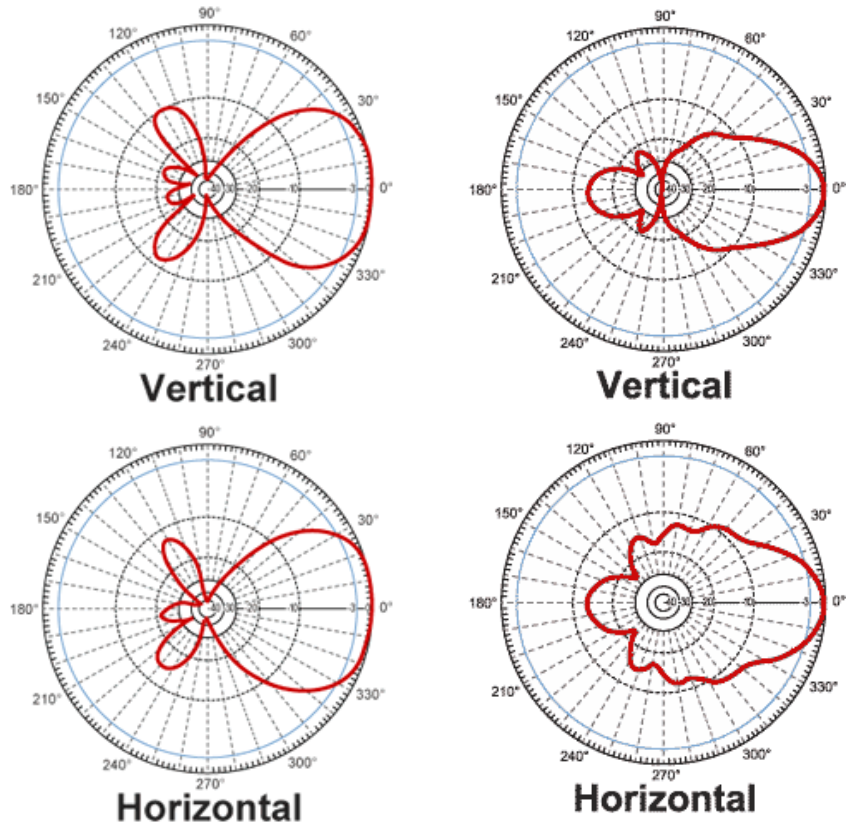
รูปที่ 19 การระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำบินในระดับต่ำ

สายอากาศเป็นส่วนประกอบสำคัญของการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยทั่วไปจะใช้สายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) ในการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ อย่างไรก็ตามสายอากาศแบบมีทิศทางนั้นถึงแม้จะมีอัตราการขยาย (gain) ที่สูงอันเนื่องมาจาก beamwidth ที่แคบแต่ก็มีจำนวน side lobe ที่เพิ่มขึ้นเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 20



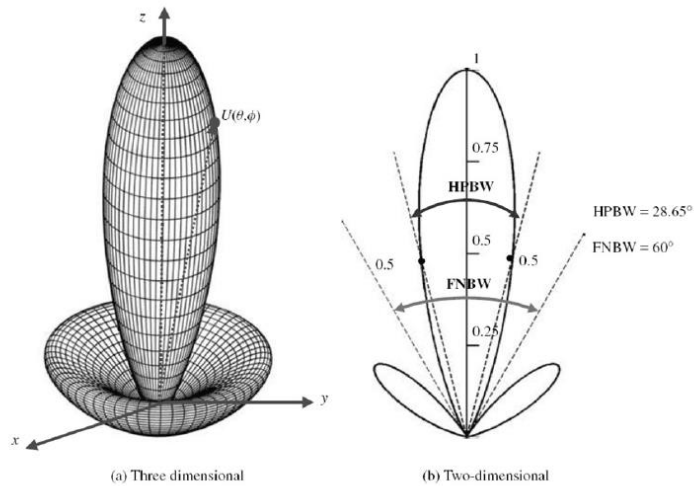
รูปที่ 20 สายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna)

จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบมีทิศทางเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ทั้งนี้สายอากาศแบบมีทิศทางยังมีความสามารถในการรับสัญญาณที่ต่างกันขึ้นอยู่กับการออกแบบลักษณะของการออกแบบ โดยหากสายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth ที่แคบก็จะมี ความสามารถในการรับสัญญาณได้เร็วกว่าสายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth ที่กว้าง รูปที่ 21 แสดงถึงสายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth ที่กว้าง (ซ้าย) มี main lobe ที่กว้างกว่าสายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth ที่แคบ (ขวา) ซึ่งทำให้สายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth ที่กว้างนั้นสามารถรับสัญญาณได้ในมุมที่กว้างกว่า สามารถครอบคลุมการตรวจจับสัญญาณในพื้นที่ที่มากกว่า อย่างไรก็ตาม สายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth ที่แคบนั้นสามารถให้กำลังขยายสัญญาณได้สูงกว่าสายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth ที่กว้าง นั่นหมายความว่าสายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth ที่แคบสามารถรับสัญญาณที่มีกำลังอ่อนกว่าได้หรือมีความไวต่อการรับสัญญาณกว่าสายอากาศแบบมีทิศทางที่มี beamwidth ที่กว้างนั่นเอง การเลือกใช้สายอากาศแบบมีทิศทางจึงต้องพิจารณาให้เหมาะสมตามลักษณะการใช้งาน



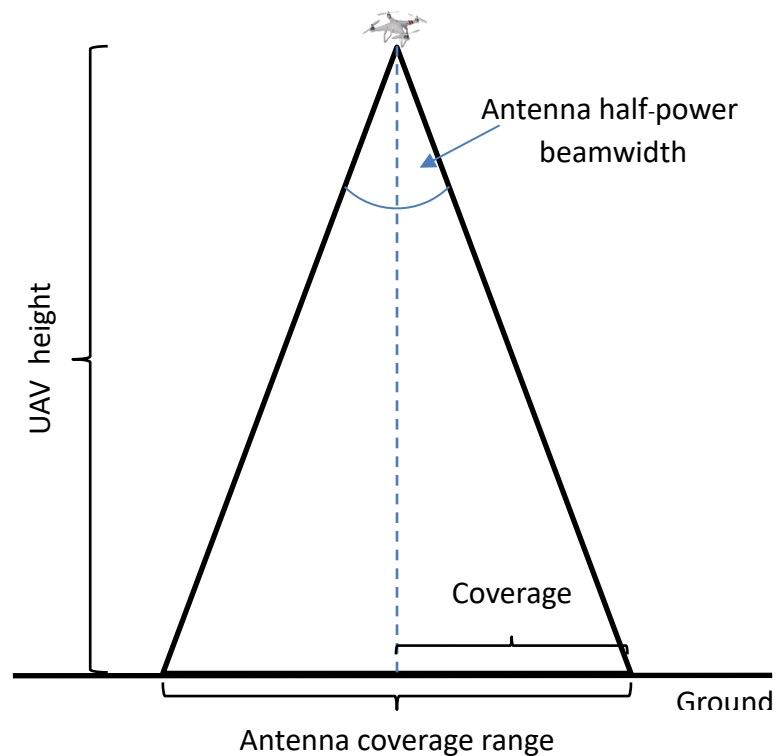
รูปที่ 21 สายอากาศแบบมีทิศทาง มี beamwidth ที่กว้าง (ซ้าย) และสายอากาศแบบมีทิศทาง มี beamwidth ที่แคบ (ขวา)

ในการออกแบบสายอากาศแบบมีทิศทางนั้น มีค่าหนึ่งที่สำคัญมากซึ่งสามารถบ่งบอกลักษณะการแพร่สัญญาณและการรับสัญญาณได้คือความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth) โดยค่านี้จะบอกถึงพื้นที่การรับส่งสัญญาณของสายอากาศแบบมีทิศทางนั้น โดย half-power beamwidth หมายถึง มุมระหว่างจุดสองจุดของ main lobe ซึ่งมีกำลังงานลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด รูปที่ 22 แสดงถึง ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth)



รูปที่ 22 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth)

เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการแพร่สัญญาณและการรับสัญญาณของสายอากาศแบบมีทิศทางดังที่กล่าวไปข้างต้น จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบมีทิศทางจะมีมุมในการรับสัญญาณที่จำกัดขึ้นอยู่กับปริมาณ half-power beamwidth กล่าวคือ สายอากาศแบบมีทิศทางจะมีมุมในการรับสัญญาณแปรผันโดยตรงกับปริมาณ half-power beamwidth หากนำสายอากาศแบบมีทิศทางนี้ไปติดตั้งใต้อากาศยานไร้คนขับโดยให้ main lobe ของสายอากาศแบบมีทิศทางชี้ทำมุมตั้งฉากกับพื้นดิน สายอากาศแบบมีทิศทางสามารถรับสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ภาคพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 พื้นที่ภาคพื้นดินที่ครอบคลุมโดยสายอากาศแบบมีทิศทาง

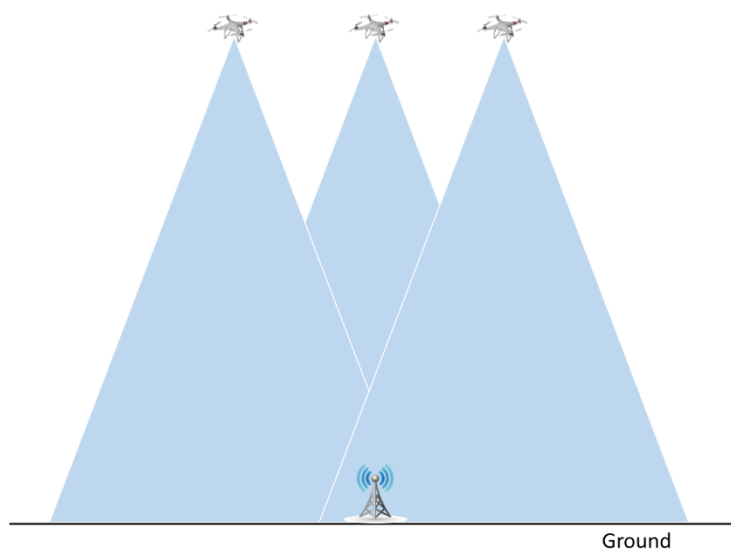
พื้นที่ภาคพื้นดินที่ครอบคลุมโดยสายอากาศแบบมีทิศทางนั้นแปรผันโดยตรงกับปริมาณ half-power beamwidth โดยหากต้องการเพิ่มพื้นที่ภาคพื้นดินที่ครอบคลุมจะสามารถทำได้โดยเพิ่มปริมาณ half-power beamwidth ของสายอากาศแบบมีทิศทาง อย่างไรก็ตาม ความไวต่อการรับสัญญาณของสายอากาศแบบมีทิศทางก็จะลดลงตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือจะต้องลดเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับลงเพื่อชดเชยความไวต่อการรับสัญญาณที่สูญเสียไป จากรูปที่ 23 เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเพดานบินของ UAV (UAV height) พื้นที่ภาคพื้นดินที่ครอบคลุม (Antenna coverage area) รัศมีครอบคลุม (Coverage radius) และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth: HPBW) ได้ดังนี้

$$\frac{\text{coverage radius}}{\text{uav height}} = \tan\left(\frac{\text{HPBW}}{2}\right) \quad (1)$$

$$\text{coverage radius} = \tan\left(\frac{\text{HPBW}}{2}\right) \times \text{uav height} \quad (2)$$

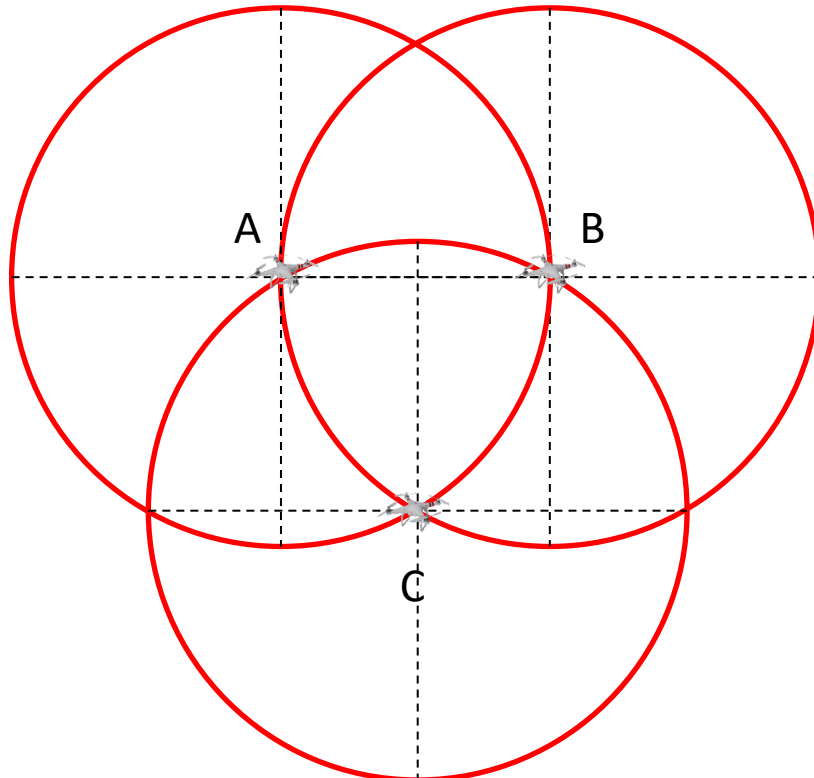
$$\text{antenna coverage range} = 2 \times \text{coverage radius} \quad (3)$$

ที่กล่าวไปข้างต้นเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ภาคพื้นดินที่ครอบคลุมโดยสายอากาศแบบมีทิศทางและเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับจำนวนหนึ่งลำ ในงานวิจัยนี้ ระบบจะสามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับจำนวน 3 ลำ ดังนั้น เมื่อนำอากาศยานไร้คนขับจำนวน 3 ลำ ทำการบินในระดับความสูงเดียวกันพร้อมกัน โดยด้านใต้อากาศยานไร้คนขับติดตั้งสายอากาศแบบมีทิศทางโดยให้ main lobe ของสายอากาศแบบมีทิศทางชี้ทำมุมตั้งฉากกับพื้นดิน อากาศยานไร้คนขับจำนวน 3 ลำนั้นจะสามารถรับสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ภาคพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 24



รูปที่ 24 พื้นที่ภาคพื้นดินที่ครอบคลุมโดยสายอากาศแบบมีทิศทางโดยอากาศยานไร้คนขับจำนวน 3 ลำ

หากพิจารณาพื้นที่ภาคพื้นดินที่ครอบคลุมโดยสายอากาศแบบมีทิศทางโดยอากาศยานไร้คนขับจำนวน 3 ลำจากมุมมองด้านบน อากาศยานไร้คนขับแต่ละลำจะสามารถตรวจจับสัญญาณภายในพื้นที่วงกลมที่มีรัศมีเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 8 โดย อากาศยานไร้คนขับ A B และ C มีรัศมีการตรวจจับสัญญาณภายในวงกลมรัศมี *coverage radius* นอกจากนั้น อากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำจะบินที่ระดับความสูงเท่ากันโดยมีระยะห่างจากอากาศยานลำอื่น ๆ เป็นระยะห่างเท่ากับ *coverage radius* กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ จุดศูนย์กลางของอากาศยานแต่ละลำจะอยู่ ณ จุดตัดของขอบเขตการตรวจจับสัญญาณของอากาศยานลำอื่น ๆ



รูปที่ 25 พื้นที่ภาคพื้นดินที่ครอบคลุมโดยสายอากาศแบบมีทิศทาง
โดยอากาศยานไร้คนขับจำนวน 3 ลำจากมุมมองด้านบน

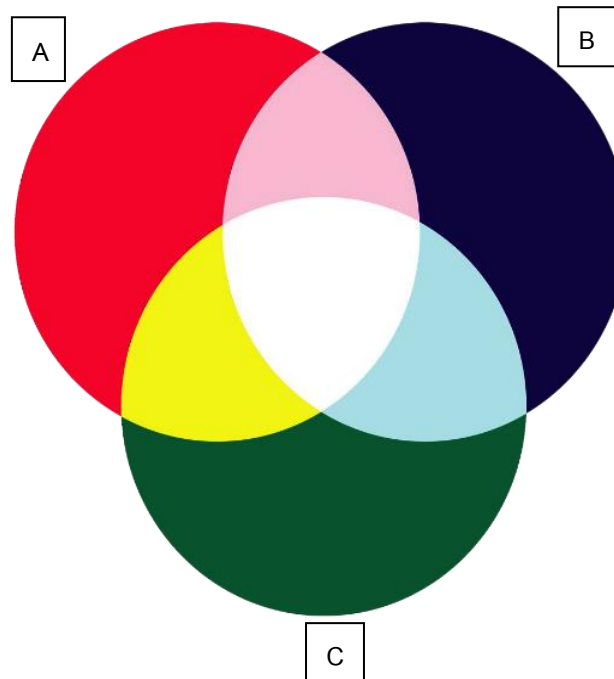
ลักษณะเด่นของการจัดเรียงของวงกลม 3 วง ที่มีรัศมีเท่ากันโดยจุดศูนย์กลางของวงกลมนั้นอยู่ ณ จุดตัดของเส้นรอบวงของวงกลมที่เหลือ คือ พื้นที่ทับซ้อนของวงกลมทั้ง 3 วงซึ่งอยู่ตรงกลาง พื้นที่ทับซ้อนของวงกลมทั้ง 3 วงนี้คือ Reuleaux triangle และแสดงถึงพื้นที่ที่เป็นไปได้ของตำแหน่งแหล่งแพร่สัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต หากแบ่งพื้นที่ของวงกลมทั้ง 3 วงตามลักษณะการทับซ้อนของวงกลม จะสามารถจัดแบ่งพื้นที่ออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 26

จากการจัดแบ่งพื้นที่ของวงกลมทั้ง 3 วงตามลักษณะการทับซ้อนของวงกลม จะเห็นว่าสามารถแบ่งพื้นที่ออกได้ทั้งหมด 7 ส่วน โดยแต่ละส่วนจะประกอบไปด้วยการซ้อนทับของพื้นที่วงกลมตั้งแต่ 1 วงถึง 3 วง พื้นที่ที่ประกอบไปด้วยการซ้อนทับของพื้นที่วงกลม 1 วงหมายถึง แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับเพียงลำเดียวเท่านั้น ตัวอย่างเช่น พื้นที่สีแดงในรูปที่ 9 แสดงถึงพื้นที่ที่เป็นไปได้ของ

แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตที่เพียงอากาศยานไร้คนขับ A เท่านั้นที่สามารถตรวจพบ เนื่องจากพื้นที่สีแดงอยู่ภายใต้รัศมีการตรวจจับของอากาศยานไร้คนขับ A แต่อยู่นอกรัศมีการตรวจจับของอากาศยานไร้คนขับ B และ อากาศยานไร้คนขับ C

พื้นที่ที่ประกอบไปด้วยการซ้อนทับของพื้นที่วงกลม 2 วงหมายถึง แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับจำนวน 2 ลำ ตัวอย่างเช่น พื้นที่สีฟ้าในรูปที่ 9 แสดงถึงพื้นที่ที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตที่อากาศยานไร้คนขับ B และ C เท่านั้นที่สามารถตรวจพบ เนื่องจากพื้นที่สีฟ้าอยู่ภายใต้รัศมีการตรวจจับของอากาศยานไร้คนขับ B และอากาศยานไร้คนขับ C แต่อยู่นอกรัศมีการตรวจจับของอากาศยานไร้คนขับ A

พื้นที่ที่ประกอบไปด้วยการซ้อนทับของพื้นที่วงกลม 3 วงหมายถึง แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับจำนวน 3 ลำ ตัวอย่างเช่น พื้นที่สีขาวในรูปที่ 9 แสดงถึงพื้นที่ที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตที่อากาศยานไร้คนขับ A B และ C สามารถตรวจพบ เนื่องจากพื้นที่สีขาวอยู่ภายใต้รัศมีการตรวจจับของอากาศยานไร้คนขับทุกลำ



รูปที่ 26 การจัดแบ่งพื้นที่ของวงกลมทั้ง 3 วงตามลักษณะการทับซ้อนของวงกลม



แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ A เท่านั้น

แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ B เท่านั้น

แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ C เท่านั้น

แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ A และ B เท่านั้น

แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ A และ C เท่านั้น

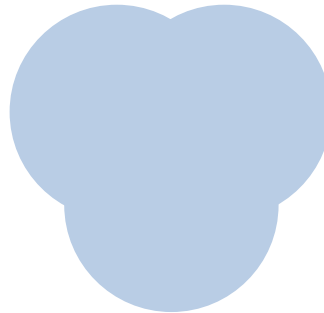
แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ B และ C เท่านั้น

แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ A B และ C

รูปที่ 26 การจัดแบ่งพื้นที่ของวงกลมทั้ง 3 วงตามลักษณะการทับซ้อนของวงกลม (ต่อ)

หากพิจารณาในเชิงของขนาดของพื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต กำหนดให้รัศมีการตรวจจับ (coverage radius) มีค่าเท่ากับ r เราสามารถจำแนกขนาดพื้นที่ออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

1. พื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับอย่างน้อยหนึ่งลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตในกรณีนี้จะหมายถึงพื้นที่ทั้งหมดที่อากาศยานไร้คนขับสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตซึ่งหมายถึงผลรวมของขนาดพื้นที่ทุกสี (Trefoil) โดยพื้นที่ครอบคลุมสามารถคำนวณได้ดังนี้

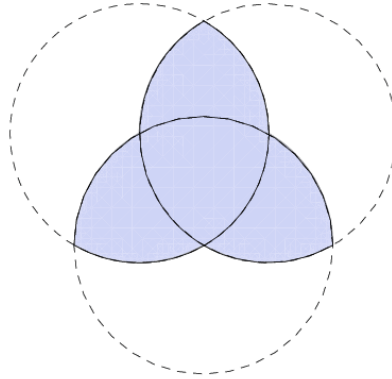


รูปที่ 27 พื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับอย่างน้อยหนึ่งลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต

$$\text{area trefoil} = 3\pi r^2 - 3r^2 \left(\frac{2\pi}{3} - \sqrt{\frac{3}{4}} \right) + \left(\frac{(\pi - \sqrt{3})r^2}{2} \right) \quad (4)$$

อีกนัยหนึ่ง พื้นที่ในสมการ (4) คือพื้นที่ที่ระบบสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตได้นั่นเอง

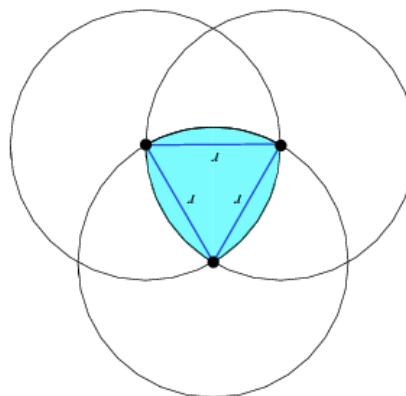
2. พื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับอย่างน้อย 2 ลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ในกรณีนี้จะหมายถึงผลรวมของขนาดพื้นที่สี่มุมปู สีเหลือง สีฟ้าและสีขาว (Triquetra) โดยพื้นที่ครอบคลุมสามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 28 พื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับอย่างน้อย 2 ลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต

$$area\ triquetra = 3r^2 \left(\frac{2\pi}{3} - \sqrt{\frac{3}{4}} \right) - 2 \left(\frac{(\pi - \sqrt{3})r^2}{2} \right) \quad (5)$$

3. พื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ในกรณีนี้จะหมายถึงขนาดพื้นที่สีขาวย (Reuleaux triangle) โดยพื้นที่ครอบคลุมสามารถคำนวณได้ดังนี้



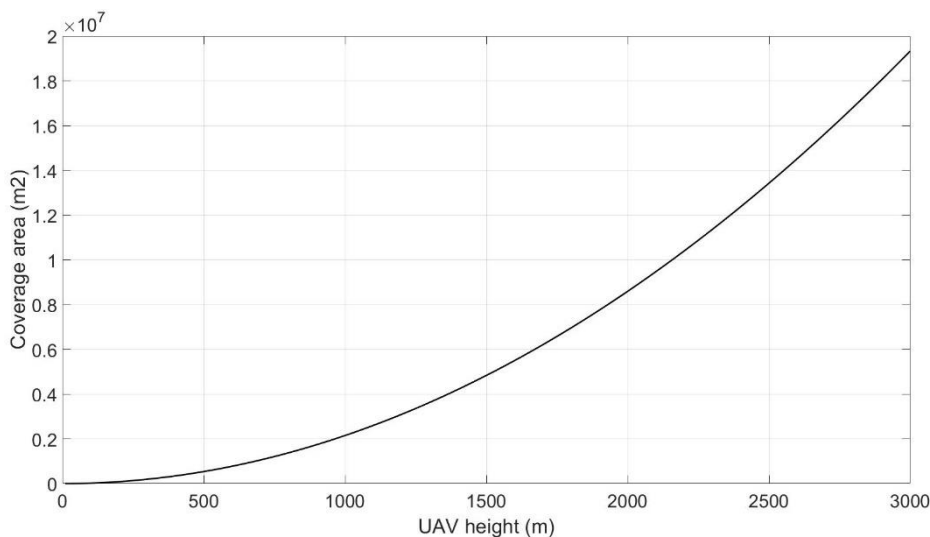
รูปที่ 29 พื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต

$$area\ Reuleaux\ triangle = \frac{(\pi - \sqrt{3})r^2}{2} \quad (6)$$

พื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับอย่างน้อยหนึ่งลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต หรือพื้นที่ในสมการ (4) มีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากเป็นปริมาณที่มีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพของ

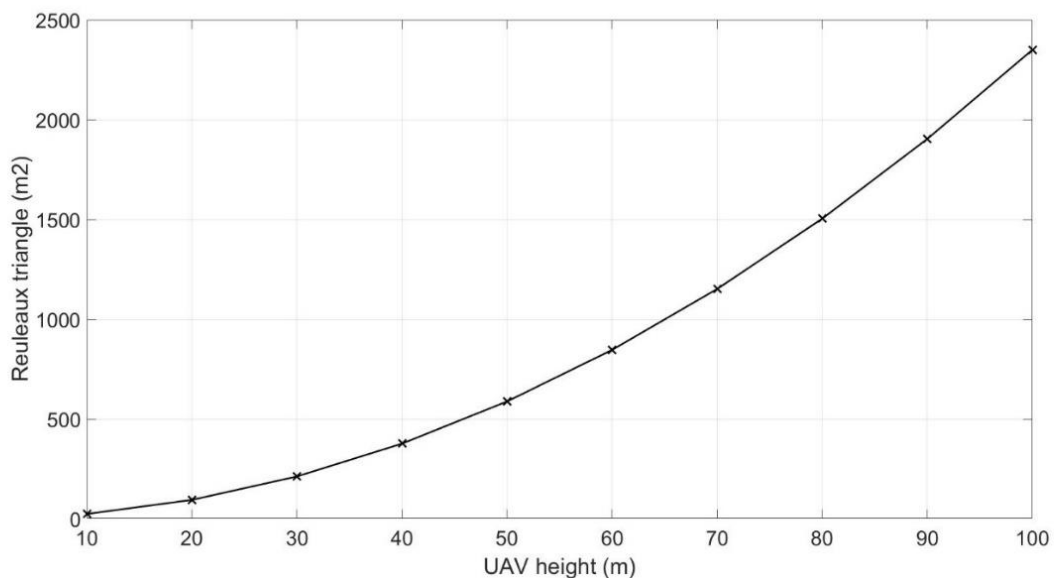
ระบบ กล่าวคือ ความสามารถของระบบในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตแปรผันโดยตรงกับพื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับอย่างน้อยหนึ่งลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ หากพื้นที่ครอบคลุมการตรวจจับสัญญาณมีขนาดเล็ก ระบบจะต้องใช้เวลานานในการบินเพื่อครอบคลุมบริเวณต้องสงสัยทั้งหมด ในทางกลับกัน หากพื้นที่ครอบคลุมการตรวจจับสัญญาณมีขนาดใหญ่ ระบบอาจครอบคลุมบริเวณต้องสงสัยเกือบทั้งหมด ทำให้การตรวจพบสัญญาณเกิดขึ้นแทบจะทันที รูปที่ 30 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับกับพื้นที่ที่ระบบสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยติดตั้งสายอากาศแบบมีทิศทางที่มี HPBW เท่ากับ 60 องศา จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าพื้นที่ที่ระบบครอบคลุมการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตนั้นไม่ได้เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นแต่กลับมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงสามารถลดเวลาที่ใช้ในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตได้ด้วยการเริ่มต้นการค้นหาที่ระดับเพดานบินสูงเพื่อสามารถครอบคลุมพื้นที่ต้องสงสัยให้มากที่สุด

รูปที่ 30 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงจุดเด่นของระบบนี้ หากเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับถูกกำหนดให้เริ่มต้นตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตที่ความสูง 3000 เมตร จะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่ระบบครอบคลุมการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตนั้นมีขนาดสูงถึง 19 ตารางกิโลเมตร



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับกับพื้นที่ที่ระบบสามารถตรวจพบ
แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต

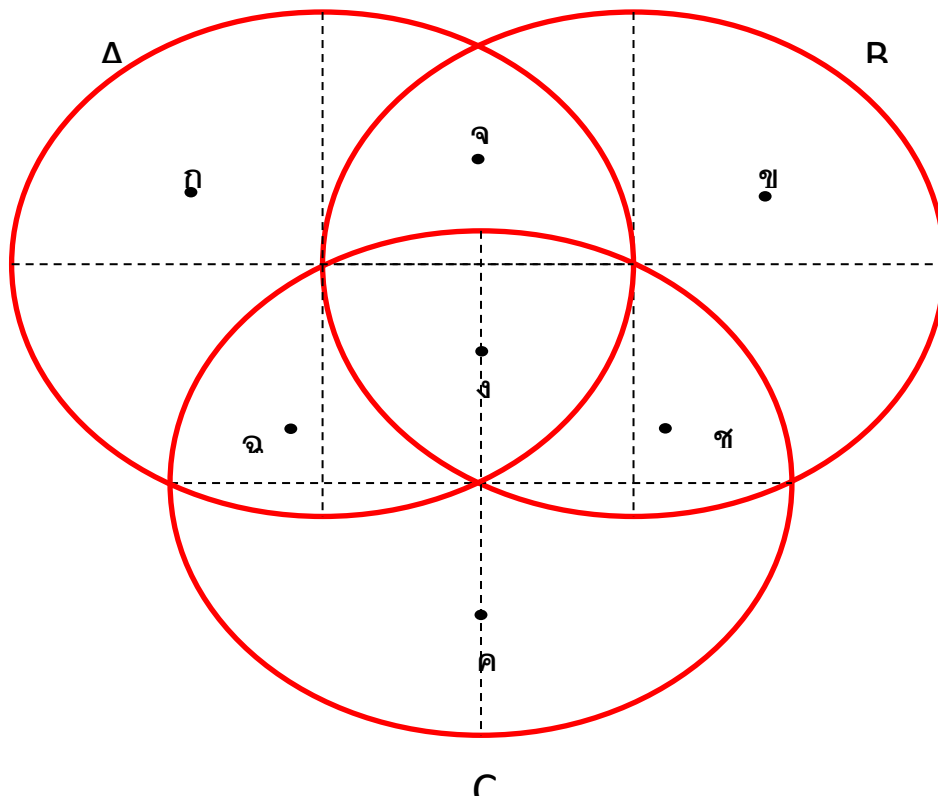
นอกจากความสามารถในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตอันรวดเร็วเนื่องจากพื้นที่ที่ระบบครอบคลุมการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณมีขนาดใหญ่แล้ว ระบบที่ดียังต้องสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตได้อย่างละเอียดด้วย โดยการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตได้อย่างละเอียดนั้นจะอยู่ในพื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตหรือพื้นที่ในสมการ (6) รูปที่ 31 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับกับพื้นที่ที่เป็นไปได้ของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตอย่างละเอียด จะเห็นว่าระบบสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตได้อย่างละเอียด เช่น หากเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับถูกลดระดับมาที่ความสูง 40 เมตร ระบบจะสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตได้ในขอบเขตพื้นที่เพียง 400 ตารางเมตรหรือเพียง 100 ตารางวา ทำให้การระบุตำแหน่งมีความแม่นยำมาก



รูปที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับกับพื้นที่ที่เป็นไปได้
ของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต

จากการจัดแบ่งพื้นที่ของวงกลมทั้ง 3 วงตามลักษณะการทับซ้อนของวงกลมที่กล่าวไปข้างต้น พื้นที่ทั้ง 7 ส่วนหมายถึงพื้นที่ที่แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตถูกตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับจำนวนต่างกันไป อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตถูกตรวจพบในพื้นที่นั้น ๆ แต่เราไม่สามารถระบุตำแหน่งที่ชัดเจนได้ ตัวอย่างเช่น ในพื้นที่สีแดงแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ A เท่านั้น แต่เราไม่สามารถระบุตำแหน่งได้อย่างชัดเจนว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตนั้นอยู่จุดไหนของพื้นที่สีแดง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกำหนดจุดกึ่งกลาง (centroid) ในแต่ละพื้นที่ เพื่อให้เป็นจุดอ้างอิงในการเริ่มต้นระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตในรอบ

การทำงานถัดไป รูปที่ 32 แสดงถึงจุด centroid ของแต่ละพื้นที่ที่ถูกจัดแบ่งข้างต้น ความสำคัญของจุด centroid คือ ในแต่ละรอบการทำงาน ระบบจะลดความสูงของเพดานบินลงเพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งของ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตได้ละเอียดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 31 นั่นคือ ระบบจะเริ่มค้นหาลง แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตในเพดานบินที่สูงที่สุดเพื่อให้มีพื้นที่ที่ระบบสามารถตรวจพบ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต (พื้นที่ในสมการ (4)) มากที่สุด เมื่อระบบตรวจพบแหล่งสัญญาณใน พื้นที่ใด ๆ ในพื้นที่ 7 ส่วน ก็จะถือว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตนั้นอยู่ ณ จุด centroid ของพื้นที่ นั้น จากนั้นอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำจะทำการปรับตำแหน่งใหม่โดยย้ายจุด centroid ของพื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต (พื้นที่สีขาว (Reuleaux triangle)) ไปยังจุด centroid ของพื้นที่ที่ตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต จากนั้นทำการลด ระดับเพดานบินลงแล้วเริ่มรอบการทำงานต่อไปของการตรวจหาแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ในแต่ละ รอบการทำงานของขบวนการ อากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ จะลดเพดานบินต่ำลงและตำแหน่งของ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะถูกระบุด้วยความละเอียดสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อสามารถระบุตำแหน่ง ถึงระดับความละเอียดที่กำหนด ระบบจะหยุดการค้นหาเนื่องจากสามารถกำหนดขอบเขตพื้นที่ที่ต้องสงสัยได้ โดยละเอียดแล้ว



รูปที่ 32 จุด centroid ของแต่ละพื้นที่ที่ถูกจัดแบ่ง

กำหนดให้รัศมีการตรวจจับ (coverage radius) มีค่าเท่ากับ r โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ (1) (2) และ (3) ตำแหน่งของ centroid ของแต่ละพื้นที่ในรูปที่ 32 สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

กำหนดให้อากาศยานไร้คนขับ A อยู่ ณ ตำแหน่ง (X_a, Y_a, Z_a) ดังนั้น

อากาศยานไร้คนขับ B อยู่ ณ ตำแหน่ง $(X_b, Y_b, Z_b) = (X_a + r, Y_a, Z_a)$

อากาศยานไร้คนขับ C อยู่ ณ ตำแหน่ง $(X_c, Y_c, Z_c) = (X_a + \frac{r}{2}, Y_a - \frac{\sqrt{3}r}{2}, Z_a)$

Centroid ก อยู่ ณ ตำแหน่ง $(X_a - \frac{2\sqrt{3}r}{3\pi}, Y_a + \frac{2r}{3\pi}, Z_a)$

Centroid ข อยู่ ณ ตำแหน่ง $(X_b + \frac{2\sqrt{3}r}{3\pi}, Y_b + \frac{2r}{3\pi}, Z_a)$

Centroid ค อยู่ ณ ตำแหน่ง $(X_c, Y_c - \frac{4r}{3\pi}, Z_a)$

Centroid ง อยู่ ณ ตำแหน่ง $(\frac{X_a+X_b+X_c}{3}, \frac{Y_a+Y_b+Y_c}{3}, Z_a)$

Centroid จ อยู่ ณ ตำแหน่ง $(\frac{X_a+X_b+(X_a+\frac{r}{2})}{3}, \frac{Y_a+Y_b+(Y_a+\frac{\sqrt{3}r}{2})}{3}, Z_a)$

Centroid ฉ อยู่ ณ ตำแหน่ง $(\frac{X_a+X_c+(X_c-r)}{3}, \frac{Y_a+Y_c+Y_c}{3}, Z_a)$

Centroid ช อยู่ ณ ตำแหน่ง $(\frac{X_b+X_c+(X_c+r)}{3}, \frac{Y_b+Y_c+Y_c}{3}, Z_a)$

เมื่อได้ตำแหน่ง centroid ในพื้นที่นั้น ๆ แล้ว รอบการทำงานต่อไปคือการเลื่อนตำแหน่ง centroid ง ไปอยู่ ณ ตำแหน่งของ centroid ในพื้นที่นั้น ๆ จากนั้นจะทำการลดระดับเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับ ทั้ง 3 ลำลงตาม step ที่ตั้งไว้ ตัวอย่างเช่น หากรอบการทำงานแรกตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยอากาศยานไร้คนขับ A เท่านั้น แสดงว่า centroid ก จะถูกใช้เป็นจุด centroid ของพื้นที่ที่อากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ สามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต (พื้นที่สีเขียว (Reuleaux triangle)) โดยหากตั้งความสูงของการลดระดับต่อรอบเท่ากับ 50 เมตร และ centroid ก อยู่ ณ ตำแหน่ง (X_n, Y_n, Z_n) รอบการทำงานต่อไปจะได้พิกัดดังต่อไปนี้

อากาศยานไร้คนขับ A อยู่ ณ ตำแหน่ง $(X_n - \frac{r}{2}, Y_n + \frac{\sqrt{3}r}{6}, Z_n - 50)$

อากาศยานไร้คนขับ B อยู่ ณ ตำแหน่ง $(X_n + \frac{r}{2}, Y_n + \frac{\sqrt{3}r}{6}, Z_n - 50)$

อากาศยานไร้คนขับ C อยู่ ณ ตำแหน่ง $(X_n, Y_n - \frac{\sqrt{3}r}{3}, Z_n - 50)$

จากนั้นจึงทำการตรวจหาแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตในรอบต่อไปจนเมื่อสามารถระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตถึงระดับความละเอียดที่กำหนด ระบบจะหยุดการค้นหา

4.3 ทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation)

จากการออกแบบและวิเคราะห์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับข้างต้น ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับโดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองขึ้นเอง (custom simulator) ภายใต้อสภาพแวดล้อมของโปรแกรม MATLAB version R2018b ผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. UAV creation and initialization module

Module นี้ทำหน้าที่กำหนดโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูล การสร้าง object UAV รวมถึงการกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆให้กับ UAV โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลของ UAV ประกอบด้วย

uav.position	เก็บตำแหน่งปัจจุบันของ UAV ได้แก่ พิกัดในแกน x แกน y และ แกน z ในหน่วยเมตร
uav.next_position	เก็บตำแหน่งถัดไปของ UAV ได้แก่ พิกัดในแกน x แกน y และ แกน z ในหน่วยเมตร โดยตำแหน่งถัดไปคือพิกัดที่คำนวณได้จาก UAV reposition module
uav.speed	เก็บค่าความเร็วของ UAV ในหน่วยเมตรต่อวินาที
uav.height	เก็บค่าความสูงปัจจุบันของ UAV ในหน่วยเมตร
uav.next_height	เก็บค่าความสูงถัดไปของ UAV ในหน่วยเมตร
uav.state	เก็บสถานะของ UAV โดย 1=stationary/hovering, 2=en route, 3=probing
uav.rx_watt	เก็บค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในหน่วยวัตต์
uav.rx_dbm	เก็บค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์
uav.time_to_dest	เก็บเวลาที่ UAV ต้องใช้ในการเดินทางไปยังตำแหน่งถัดไปในหน่วย วินาที
uav.dist_to_dest	เก็บระยะทางที่ UAV ต้องเดินทางไปยังตำแหน่งถัดไปในหน่วยเมตร

2. Signal source creation and initialization module

Module นี้ทำหน้าที่กำหนดโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูล การสร้าง แหล่งกำเนิดสัญญาณ รวมถึงการกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆให้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณ โครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลของแหล่งกำเนิดสัญญาณประกอบด้วย

source.position	เก็บตำแหน่งปัจจุบันของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ได้แก่ พิกัดในแกน x แกน y และ แกน z ในหน่วยเมตร
source.speed	เก็บค่าความเร็วของแหล่งกำเนิดสัญญาณในหน่วยเมตรต่อวินาที
source.height	เก็บค่าความสูงปัจจุบันของแหล่งกำเนิดสัญญาณในหน่วยเมตร
source.tx_watt	เก็บค่ากำลังส่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณในหน่วยวัตต์
source.tx_dbm	เก็บค่ากำลังส่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์

3. Simulation parameter initialization module

Module นี้ทำหน้าที่กำหนดค่าต่างๆที่ใช้สำหรับการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยประกอบไปด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้

P_tx	เก็บค่ากำลังงานที่แหล่งกำเนิดสัญญาณส่งออกมาก่อนเข้าสายอากาศในหน่วยวัตต์
G_tx	เก็บค่ากำลังขยายของสายอากาศของแหล่งกำเนิดสัญญาณในหน่วย dBi
G_rx	เก็บค่ากำลังขยายของสายอากาศของ UAV ในหน่วย dBi
freq	เก็บค่าความถี่ของแหล่งกำเนิดสัญญาณในหน่วย hertz
c	เก็บค่าความเร็วของแสง
Ant_HBW	เก็บค่า Half-power beamwidth ของสายอากาศ UAV ในหน่วยองศา
height	เก็บค่าความสูงเริ่มต้นของ UAV ที่ใช้สำหรับการค้นหาแหล่งกำเนิดสัญญาณในหน่วยเมตร
height_step_coarse	เก็บค่าระดับการลดเพดานบินอย่างหยาบสำหรับ UAV ในหน่วยเมตร
height_step_fine	เก็บค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดสำหรับ UAV ในหน่วยเมตร
speed	เก็บค่าความเร็วของ UAV ในหน่วยเมตรต่อวินาที

4. Distance estimation module

Module นี้ทำหน้าที่คำนวณหาระยะทางระหว่างพิกัดต้นทางและพิกัดปลายทางโดยจะรับตัวแปร 2 ตัวได้แก่พิกัดต้นทางและพิกัดปลายทาง จากนั้นจะทำการคำนวณระยะทางระหว่างพิกัดทั้ง 2 โดยใช้ Euclidean method กล่าวคือ หากกำหนดให้พิกัดต้นทางอยู่ ณ ตำแหน่ง (X_1, Y_1, Z_1) และพิกัดปลายทางอยู่ ณ ตำแหน่ง (X_2, Y_2, Z_2) ระยะทางระหว่างพิกัดทั้ง 2 สามารถหาได้จาก

$$\text{Euclidean distance} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (7)$$

5. Received power estimation module

Module นี้ทำหน้าที่คำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในหน่วยวัตต์และเดซิเบล-มิลลิวัตต์ โดยใช้ Friis transmission equation ดังต่อไปนี้

$$P_{receiver} = P_{transmitter} G_t G_r \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad (8)$$

โดย $P_{receiver}$ คือค่าความเข้มของสัญญาณที่ผู้รับวัดได้ในหน่วยวัตต์

$P_{transmitter}$ คือค่าความเข้มของสัญญาณที่ผู้ส่งส่งออกมาก่อนเข้าสายอากาศในหน่วยวัตต์

G_t คือค่ากำลังขยายของสายอากาศของผู้ส่งในหน่วย dBi

G_r คือค่ากำลังขยายของสายอากาศของผู้รับในหน่วย dBi

c คือค่าความเร็วของแสง ในที่นี้กำหนดเท่ากับ 3×10^8 m/s.

f คือค่าความถี่ของสัญญาณที่กำลังพิจารณาในหน่วย hertz

คือระยะทางระหว่างพิกัดของผู้ส่งและพิกัดของผู้รับในหน่วยเมตร

ค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ สามารถหาได้ดังนี้

$$P_{dBm} = 10 \log_{10}(P_{watt}) + 30 \quad (9)$$

6. Maximum likelihood sector estimation module

Module นี้ทำหน้าที่คำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยจะระบุเป็นพื้นที่ที่ถูกจัดแบ่ง (sector) ในรูปที่ 15 โดย module นี้จะรับค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV แต่ละลำวัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ จาก Received power estimation module จากนั้นจะนำไปคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด ดังนี้

คำนวณหาระยะทางที่ไกลที่สุดที่ UAV สามารถตรวจจับสัญญาณได้จาก

$$\text{dist_detect_max} = \text{uav.height} / \cosd(\text{Ant_HBW}/2) \quad (10)$$

คำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยวัตต์ได้จาก

$$P_{rx_detect_min} = P_{tx} * G_{tx} * G_{rx} * (c / (4 * \pi * \text{dist_detect_max} * \text{freq}))^2 \quad (11)$$

คำนวณหาค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ได้จาก

$$\text{dbm_detect_min} = 10 * \log_{10}(P_{rx_detect_min}) + 30 \quad (12)$$

จากนั้นนำค่า ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV แต่ละลำวัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ (uav.rx_dbm) มาเปรียบเทียบกับ ค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ (dbm_detect_min) เพื่อหา sector ดังนี้

```
if (uav(1).rx_dbm > dbm_detect_min) & (uav(2).rx_dbm < dbm_detect_min) & (uav(3).rx_dbm < dbm_detect_min)
```

```
sector = 1
```

```
centroid = round([uav(1).position(1)-(sqrt(3)*4*r)/(2*3*pi), uav(1).position(2)+(4*r)/(2*3*pi),  
uav(1).position(3)])
```

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 1 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 2 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ น้อยกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 3 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ น้อยกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ ลำที่ 1 เท่านั้น ดังนั้นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ sector 1 (พื้นที่ centroid ก) จากนั้นกำหนดพิกัด centroid ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

หากกรณีข้างต้นเป็นเท็จ ระบบจะทำการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยเปรียบเทียบในกรณีถัดไป

```
elseif (uav(1).rx_dbm < dbm_detect_min) & (uav(2).rx_dbm > dbm_detect_min) &  
(uav(3).rx_dbm < dbm_detect_min)
```

```
sector = 2
```

```
centroid = round([uav(2).position(1)+(sqrt(3)*4*r)/(2*3*pi),  
uav(2).position(2)+(4*r)/(2*3*pi), uav(1).position(3)])
```

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 1 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ น้อยกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 2 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 3 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ น้อยกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ

แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ ลำที่ 2 เท่านั้น ดังนั้นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ sector 2 (พื้นที่ centroid ข) จากนั้น กำหนดพิกัด centroid ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

หากกรณีข้างต้นเป็นเท็จ ระบบจะทำการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยเปรียบเทียบในกรณีถัดไป

```
elseif (uav(1).rx_dbm < dbm_detect_min) & (uav(2).rx_dbm < dbm_detect_min) &  
(uav(3).rx_dbm > dbm_detect_min)  
    sector = 3  
    centroid = round([uav(3).position(1), uav(3).position(2)-(4*r)/(3*pi), uav(1).position(3)])
```

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 1 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ น้อยกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 2 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ น้อยกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 3 วัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ ลำที่ 3 เท่านั้น ดังนั้นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ sector 3 (พื้นที่ centroid ค) จากนั้น กำหนดพิกัด centroid ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

หากกรณีข้างต้นเป็นเท็จ ระบบจะทำการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยเปรียบเทียบในกรณีถัดไป

```
elseif (uav(1).rx_dbm > dbm_detect_min) & (uav(2).rx_dbm > dbm_detect_min) &  
(uav(3).rx_dbm > dbm_detect_min)  
    sector = 4  
    centroid = round([(uav(1).position(1)+uav(2).position(1)+uav(3).position(1))/3,  
(uav(1).position(2)+uav(2).position(2)+uav(3).position(2))/3, uav(1).position(3)])
```

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 1 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 2 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 3 วัดได้ในหน่วย

เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ดังนั้น ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ sector 4 (พื้นที่ centroid ง) จากนั้น กำหนดพิกัด centroid ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

หากกรณีข้างต้นเป็นเท็จ ระบบจะทำการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยเปรียบเทียบในกรณีถัดไป

```
elseif (uav(1).rx_dbm > dbm_detect_min) & (uav(2).rx_dbm > dbm_detect_min) &
(uav(3).rx_dbm < dbm_detect_min)
    sector = 5
    centroid = round([(uav(1).position(1)+uav(2).position(1)+uav(3).position(1))/3,
    (uav(1).position(2)+uav(2).position(2)+uav(1).position(2)+sqrt(3)*r/2))/3,
uav(1).position(3)])
```

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 1 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 2 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 3 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ น้อยกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ ลำที่ 1 และ 2 เท่านั้น ดังนั้นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ sector 5 (พื้นที่ centroid จ) จากนั้น กำหนดพิกัด centroid ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

หากกรณีข้างต้นเป็นเท็จ ระบบจะทำการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยเปรียบเทียบในกรณีถัดไป

```
elseif (uav(1).rx_dbm < dbm_detect_min) & (uav(2).rx_dbm > dbm_detect_min) &
(uav(3).rx_dbm > dbm_detect_min)
    sector = 6
    centroid = round([(uav(3).position(1)+uav(3).position(1)+uav(2).position(1))/3,
    (uav(3).position(2)+uav(3).position(2)+uav(2).position(2))/3, uav(1).position(3)])
```

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 1 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ น้อยกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 2 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 3 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ ลำที่ 2 และ 3 เท่านั้น ดังนั้น ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ sector 6 (พื้นที่ centroid ช) จากนั้น กำหนดพิกัด centroid ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

หากกรณีข้างต้นเป็นเท็จ ระบบจะทำการคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยเปรียบเทียบในกรณีถัดไป

```
elseif (uav(1).rx_dbm > dbm_detect_min) & (uav(2).rx_dbm < dbm_detect_min) &  
(uav(3).rx_dbm > dbm_detect_min)
```

```
sector = 7
```

```
centroid = round([(uav(1).position(1)+uav(3).position(1)+uav(3).position(1)-r))/3,  
(uav(1).position(2)+uav(3).position(2)+uav(3).position(2))/3, uav(1).position(3)]);
```

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 1 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 2 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ น้อยกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ และ ค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 3 วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์ มากกว่าค่าความเข้มของสัญญาณต่ำสุดที่ UAV สามารถวัดได้ในหน่วยเดซิเบล-มิลลิวัตต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ แหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับ ลำที่ 1 และ 3 เท่านั้น ดังนั้น ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ sector 7 (พื้นที่ centroid ฉ) จากนั้น กำหนดพิกัด centroid ตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น

7. UAV reposition module

Module นี้ทำหน้าที่คำนวณหาตำแหน่งถัดไปที่ UAV จะต้องเคลื่อนที่ไป โดยจะรับข้อมูลเข้าเป็นพิกัดของ centroid ซึ่งคำนวณจาก Maximum likelihood sector estimation module ข้างต้น จากนั้น UAV reposition module จะคำนวณหาตำแหน่งถัดไปที่ UAV แต่ละลำจะต้องเคลื่อนที่ไป ดังนี้

กำหนดให้ centroid(1) คือพิกัด centroid ในแนวแกน X, centroid(2) คือพิกัด centroid ในแนวแกน Y และ centroid(1) คือพิกัด centroid ในแนวแกน Z

$$uav(1).next_position = round([centroid(1)-r/2, centroid(2)+(sqrt(3)*r/6), next_height])$$
$$uav(2).next_position = round([centroid(1)+r/2, centroid(2)+(sqrt(3)*r/6), next_height])$$
$$uav(3).next_position = round([centroid(1), centroid(2)-(sqrt(3)*r/3), next_height])$$

โดย $r = \tan(\text{Ant_HBW}/2) * \text{next_height}$

จากสมการข้างต้น สามารถอธิบายได้ว่า ตำแหน่งถัดไปที่ UAV หมายเลข 1 ต้องเคลื่อนที่ไปจะอยู่ที่ พิกัดของ centroid ใน sector ที่คำนวณได้จาก Maximum likelihood sector estimation module โดยจะมีพิกัดในแนวแกน X ลดลงเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของรัศมีการตรวจจับสัญญาณของสายอากาศที่ติดตั้งใน UAV มีพิกัดในแนวแกน Y เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน $\frac{\sqrt{3}}{6}$ ของรัศมีการตรวจจับสัญญาณของสายอากาศที่ติดตั้งใน UAV และ มีพิกัดในแนวแกน Z เป็นความสูงถัดไปของ UAV

เช่นเดียวกับข้างต้น ตำแหน่งถัดไปที่ UAV หมายเลข 2 ต้องเคลื่อนที่ไปจะอยู่ที่พิกัดของ centroid ใน sector ที่คำนวณได้จาก Maximum likelihood sector estimation module โดยจะมีพิกัดในแนวแกน X เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของรัศมีการตรวจจับสัญญาณของสายอากาศที่ติดตั้งใน UAV มีพิกัดในแนวแกน Y เพิ่มขึ้นเป็นจำนวน $\frac{\sqrt{3}}{6}$ ของรัศมีการตรวจจับสัญญาณของสายอากาศที่ติดตั้งใน UAV และ มีพิกัดในแนวแกน Z เป็นความสูงถัดไปของ UAV

ท้ายสุด ตำแหน่งถัดไปที่ UAV หมายเลข 3 ต้องเคลื่อนที่ไปจะอยู่ที่พิกัดของ centroid ใน sector ที่คำนวณได้จาก Maximum likelihood sector estimation module โดยจะมีพิกัดในแนวแกน X เท่าเดิม มี พิกัดในแนวแกน Y ลดลงเป็นจำนวน $\frac{\sqrt{3}}{3}$ ของรัศมีการตรวจจับสัญญาณของสายอากาศที่ติดตั้งใน UAV และ มีพิกัดในแนวแกน Z เป็นความสูงถัดไปของ UAV

ทั้งนี้ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ next_height หรือความสูงถัดไปของ UAV ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากเป็นค่าระดับความสูงที่ UAV ลดลงต่อหนึ่งรอบการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ หากตัวแปร next_height มีค่ามาก UAV ก็จะลดระดับความสูงอย่างรวดเร็ว ทำให้ใช้เวลาในการระบุตำแหน่งของ แหล่งกำเนิดสัญญาณน้อยลง อย่างไรก็ตามการลดระดับความสูงอย่างรวดเร็วต่อหนึ่งรอบการระบุตำแหน่งของ แหล่งกำเนิดสัญญาณก็มีข้อเสียอย่างมากคือทำให้การระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณมีความละเอียด ต่ำลง หรืออาจถึงขั้นไม่สามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้เนื่องจากแหล่งกำเนิดสัญญาณหลุด ออกจากพื้นที่การตรวจจับ ในทางกลับกัน หากตัวแปร next_height มีค่าน้อย UAV ก็จะลดระดับความสูง อย่างเชื่องช้า ทำให้ใช้เวลาในการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การลดระดับความ สูงอย่างเชื่องช้าต่อหนึ่งรอบการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณก็มีข้อเสียอย่างมากคือทำให้การระบุ ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณมีความละเอียดมากและแหล่งกำเนิดสัญญาณจะอยู่ในพื้นที่การตรวจจับ ตลอดเวลา

จากปัญหาข้างต้น จะเห็นได้ว่าการเลือกใช้ค่า `next_height` หรือ ค่าความสูงถัดไปของ UAV ซึ่งมีความสำคัญอย่างมาก หากเลือกใช้ค่าที่สูงไประบบตรวจจับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอาจจะทำงานรวดเร็วขึ้นแต่มีโอกาสผิดพลาดสูงขึ้นหรือ หากเลือกใช้ค่าที่ต่ำไประบบตรวจจับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอาจจะทำงานช้ามากแต่มีโอกาสผิดพลาดต่ำลง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบตรวจจับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณให้สามารถทำงานรวดเร็วและลดโอกาสความผิดพลาดโดยกำหนดให้ ค่าความสูงถัดไปของ UAV มี 2 ระดับ ได้แก่ `height_step_coarse` คือค่าระดับการลดเพดานบินอย่างหยาบสำหรับ UAV ซึ่งมีค่าสูงและ `height_step_fine` คือค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดสำหรับ UAV ซึ่งมีค่าต่ำ โดยเพิ่มเงื่อนไขการตรวจสอบการลดระดับเพดานบินของ UAV ดังนี้

```
if (uav.height > height_step_coarse)
    next_height = uav.height - height_step_coarse;
else
    next_height = uav.height - height_step_fine;
```

จากเงื่อนไขการตรวจสอบการลดระดับเพดานบินของ UAV ข้างต้น จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกซึ่ง UAV เริ่มต้นตรวจจับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณ จะมีเพดานบินที่สูงและสามารถครอบคลุมพื้นที่การตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ เป็นบริเวณกว้าง ในสถานการณ์นี้ระบบไม่จำเป็นต้องระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอย่างละเอียดแต่ควรลดพื้นที่ที่ตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณให้ลดลงอย่างรวดเร็ว ระบบจึงใช้ค่าระดับการลดเพดานบินอย่างหยาบสำหรับ UAV ซึ่งมีค่าสูง ในทางกลับกัน เมื่อระบบทำงานไประยะหนึ่งจน UAV บินลงอยู่ในระดับเพดานบินต่ำ ในสถานการณ์นี้ระบบไม่จำเป็นต้องลดพื้นที่ที่ตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณให้ลดลงอย่างรวดเร็วแต่หากต้องสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอย่างละเอียดได้ ระบบจึงใช้ค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดสำหรับ UAV ซึ่งมีค่าต่ำ

การออกแบบให้ UAV มีอัตราการลดระดับเพดานบินอย่างหยาบและอย่างละเอียดจะทำให้ระบบตรวจจับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ ระบบสามารถทำงานในช่วงประสิทธิภาพสูงสุดได้ (optimal operational state)

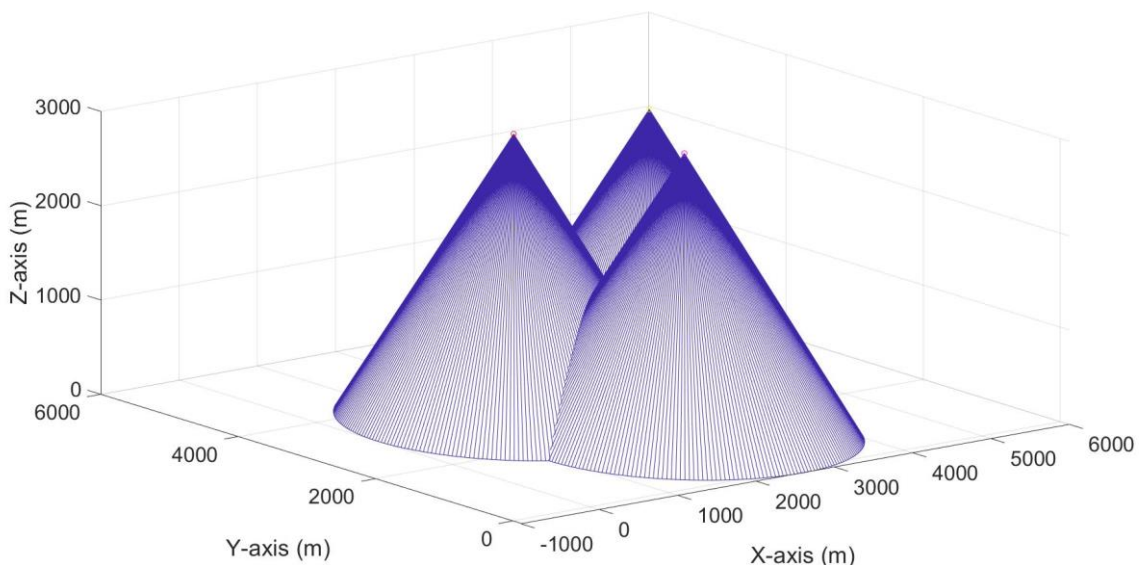
8. Global time keeper module

Module นี้ทำหน้าที่ควบคุมเวลาของวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้หลักการ fixed-increment time progression หรือการแบ่งเวลาการจำลองทางคอมพิวเตอร์ทั้งหมดเป็นหน่วยย่อยขนาดเท่าๆกัน เรียกว่า time step เมื่อการจำลองทางคอมพิวเตอร์ดำเนินไป ในแต่ละ time step จะมีการตรวจสอบเงื่อนไขต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อดูว่ามีเหตุการณ์ใดบ้างที่จะต้องเกิดขึ้น เมื่อจัดการกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นใน time step นั้นเรียบร้อยแล้วเวลาของจำลองทางคอมพิวเตอร์จะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน time step หน่วย และจะมีการตรวจสอบ

เงื่อนไขต่างๆที่เกี่ยวข้องต่อไปจนกว่าเวลาการจำลองทางคอมพิวเตอร์จะสิ้นสุด ผู้วิจัยใช้ time step เท่ากับ 1 วินาทีซึ่งมีความละเอียดเพียงพอที่จะทำให้ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีความถูกต้องและแม่นยำ

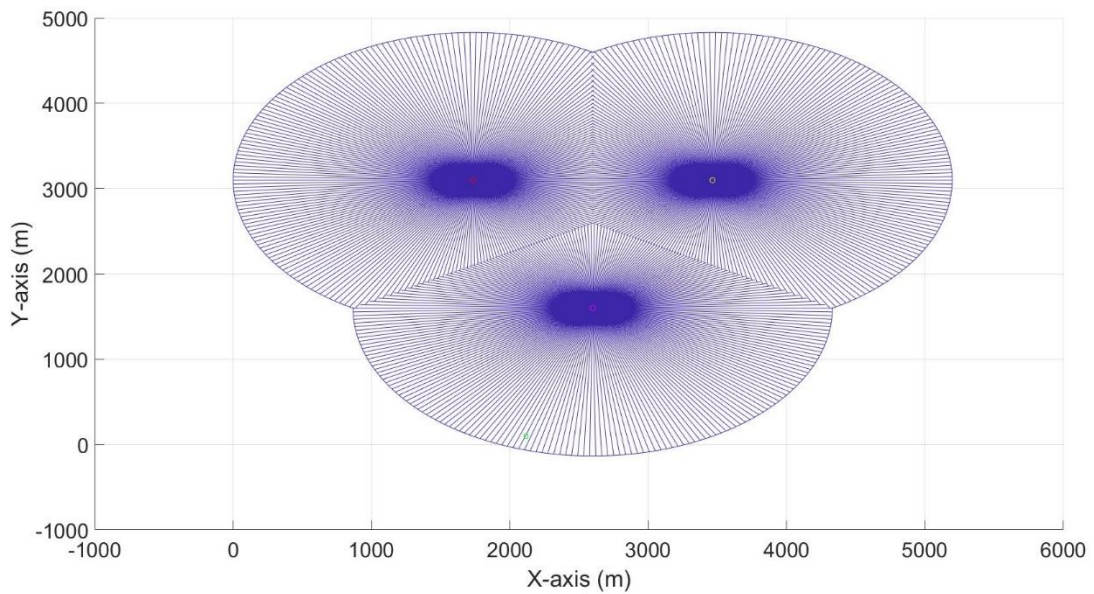
ตัวอย่างการทำงานของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในตัวอย่างนี้เป็นการอธิบายหลักการทำงานของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น โดยกำหนดให้ UAV ทั้ง 3 ลำอยู่ที่พิกัดเริ่มต้น (0,0,0) และ ทำการสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยวิธีการสุ่มจาก Signal source creation and initialization module จากนั้นกำหนดพิกัดบินเริ่มต้นของ UAV ทั้ง 3 ลำ ที่ระดับความสูง 3000 เมตร รูปที่ 33 แสดงถึงตำแหน่งของ UAV ทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 3000 เมตร โดยพิกัดของ UAV ทั้ง 3 ลำ คำนวณจาก centroid เริ่มต้นใน UAV creation and initialization module รูปทรงกรวยคว่ำ แสดงถึงขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณของ UAV แต่ละลำ ในตัวอย่างนี้ UAV ถูกติดตั้งด้วยสายอากาศซึ่งมี half-power beamwidth เท่ากับ 60 องศา



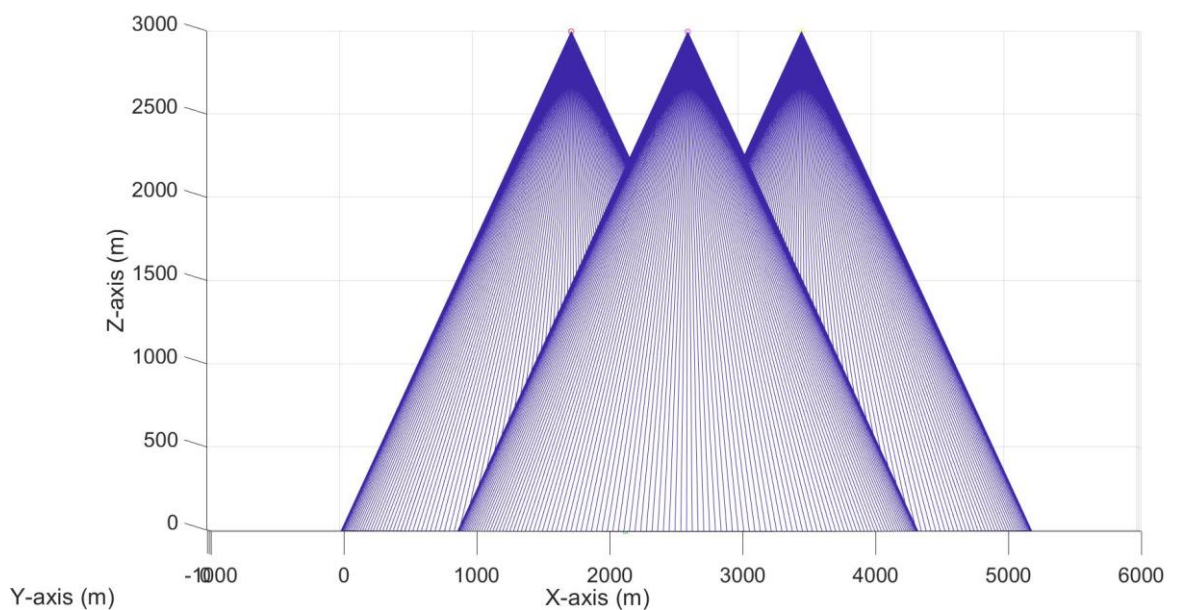
รูปที่ 33 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

หากพิจารณาจากมุมมองด้านบน (top view) จะสามารถเห็นขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ชัดเจนขึ้น รูปที่ 34 แสดงถึง UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยพิจารณาจากมุมมองด้านบน จุดวงกลมแสดงถึงพิกัดของ UAV แต่ละลำและจุดสี่เหลี่ยมแสดงถึงแหล่งกำเนิดสัญญาณที่สุ่มขึ้นในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ จะเห็นได้ว่าในกรณีนี้ แหล่งกำเนิดสัญญาณอยู่ในขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณและถูกตรวจพบโดย UAV หมายเลข 3 เท่านั้น ดังนั้น Maximum likelihood sector estimation module จะคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด ซึ่งในกรณีนี้ได้แก่ sector 3 จากนั้น UAV reposition module จะทำการคำนวณพิกัดถัดไปของ UAV ทั้ง 3 ลำ จาก centroid ของ sector 3 นั้นเอง

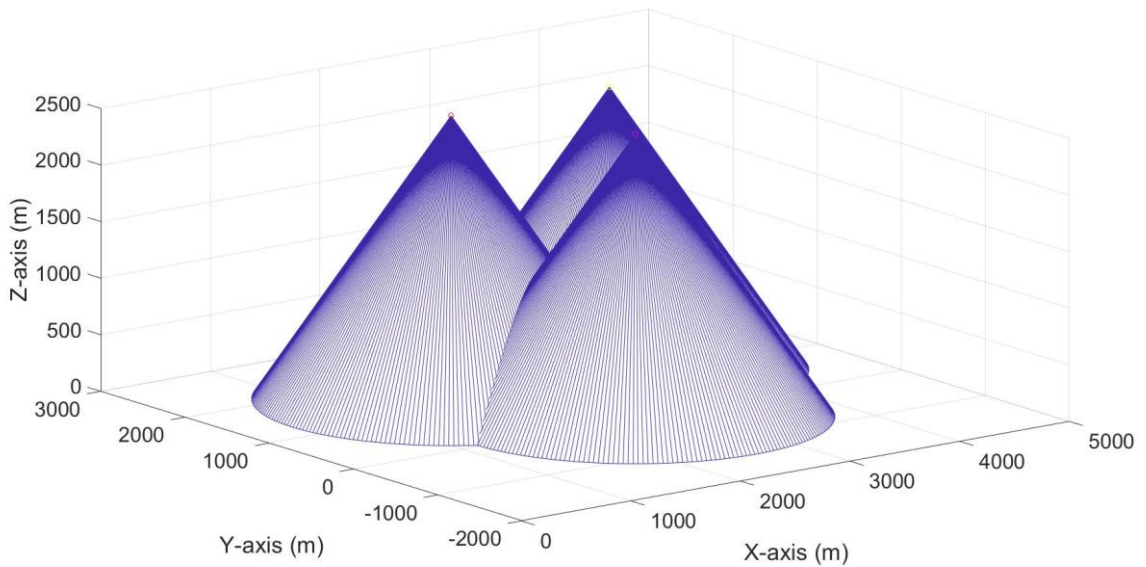


รูปที่ 34 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

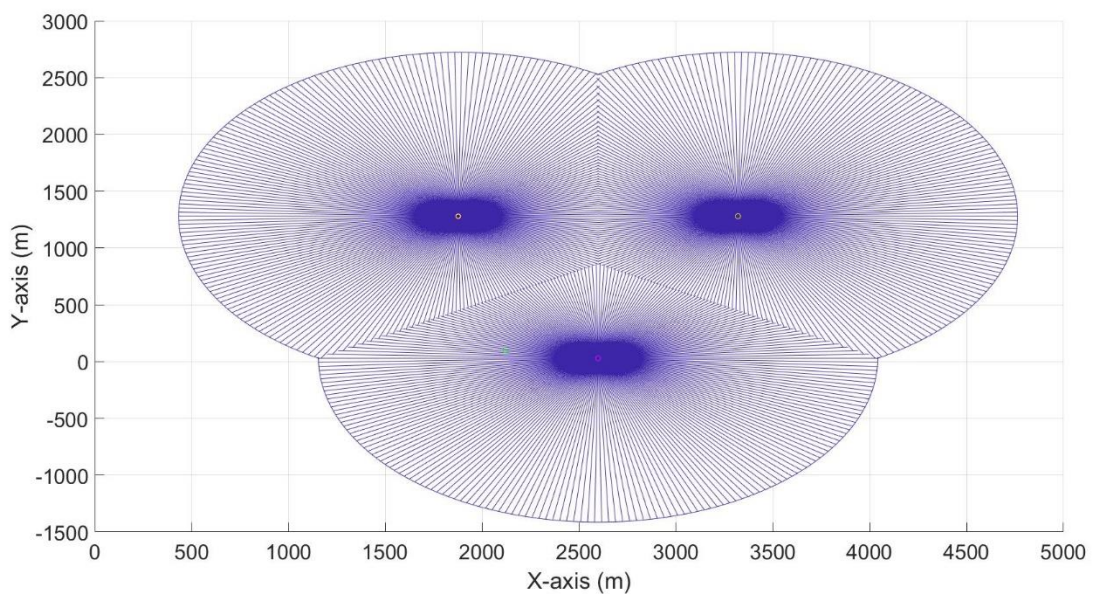
นอกจากนี้ รูปที่ 35 แสดงถึง UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณในมุมมองด้านข้าง จะเห็นได้ว่า UAV ทั้ง 3 ลำ บินที่ระดับความสูงเท่ากันคือ 3000 เมตร เมื่อ UAV reposition module ทำการคำนวณพิกัดถัดไปของ UAV ทั้ง 3 ลำแล้วเสร็จ UAV ทั้ง 3 ลำ จะบินไปยังพิกัดต่างๆของตนเอง ณ ความสูงที่กำหนดไว้ซึ่งในตัวอย่างนี้ กำหนดให้ค่าระดับการลดเพดานบินอย่างหยาบสำหรับ UAV (height_step_coarse) เท่ากับ 500 เมตร และ ค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดสำหรับ UAV (height_step_fine) เท่ากับ 10 เมตร ดังนั้น การตรวจจับสัญญาณรอบต่อไปโดย Received power estimation module จะถูกกระทำที่ความสูง 2500 เมตร ดังรูปที่ 19-21



รูปที่ 35 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

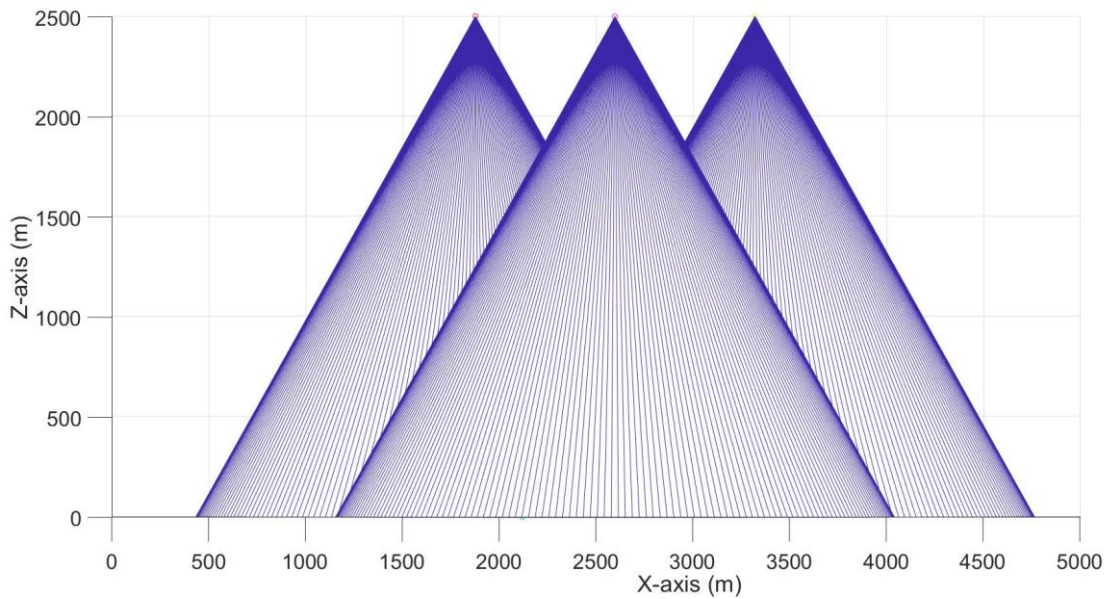


รูปที่ 36 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ณ ความสูง 2500 เมตร



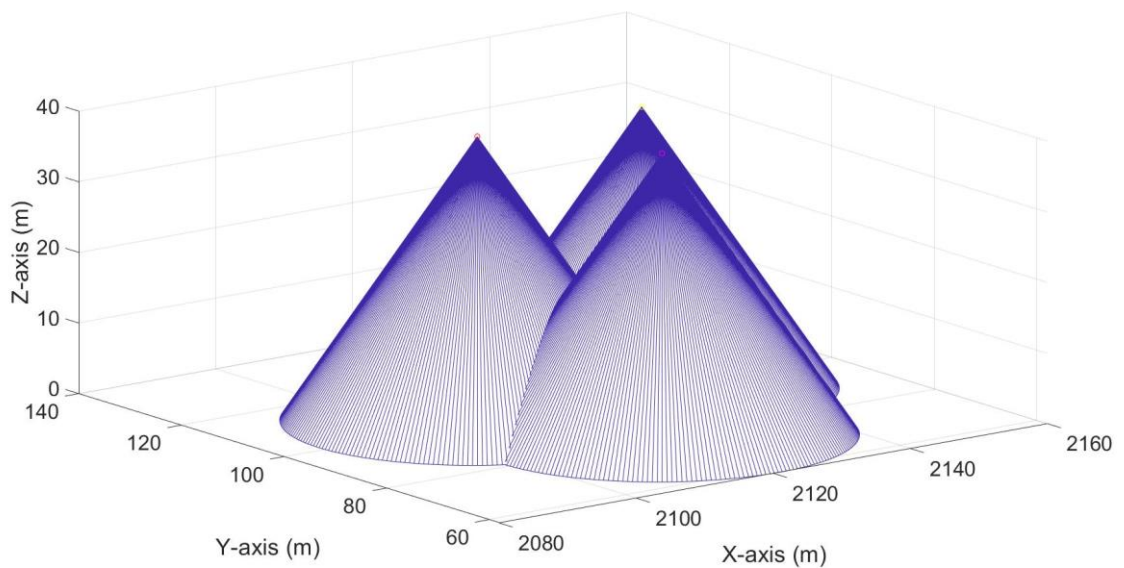
รูปที่ 37 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ณ ความสูง 2500 เมตร

จากรูปที่ 37 จะเห็นว่าในกรณีนี้ แหล่งกำเนิดสัญญาณอยู่ในขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณและถูกตรวจพบโดย UAV หมายเลข 3 เท่านั้น ดังนั้น Maximum likelihood sector estimation module จะคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด ซึ่งในกรณีนี้ได้แก่ sector 3 จากนั้น UAV reposition module จะทำการคำนวณพิกัดถัดไปของ UAV ทั้ง 3 ลำ จาก centroid ของ sector 3

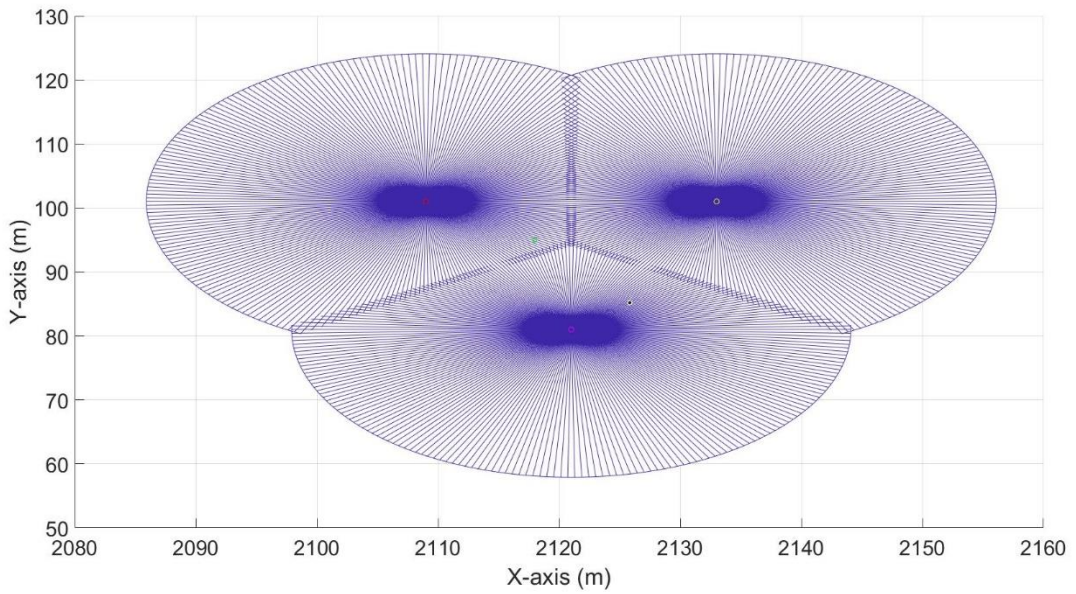


รูปที่ 38 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ณ ความสูง 2500 เมตร

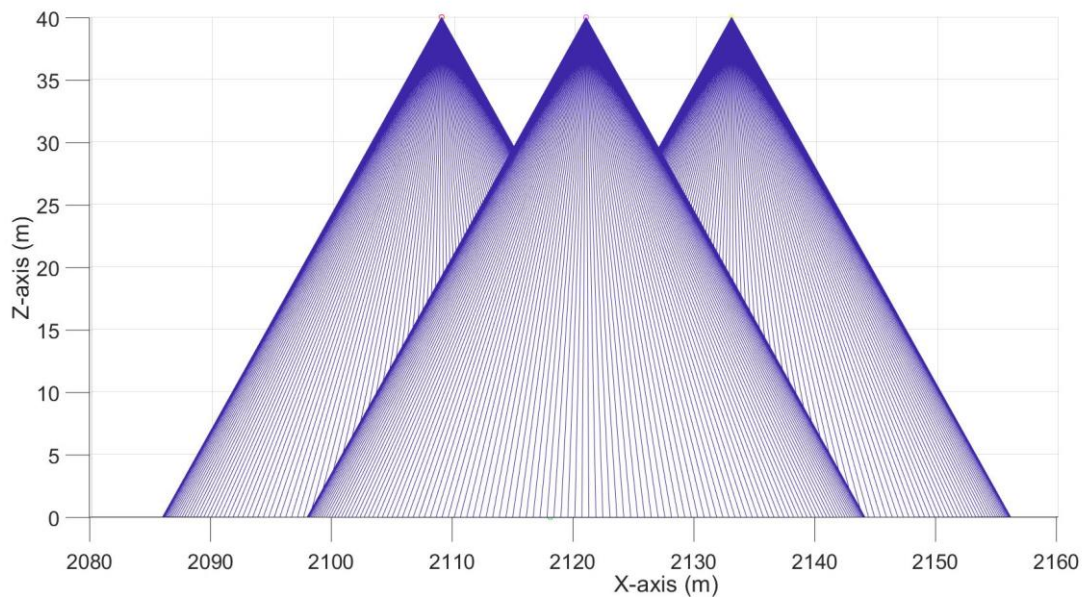
เมื่อ UAV reposition module ทำการคำนวณพิกัดถัดไปของ UAV ทั้ง 3 ลำแล้วเสร็จ UAV ทั้ง 3 ลำ จะบินไปยังพิกัดต่าง ๆ ของตนเอง ณ ความสูงที่กำหนดไว้ ดังนั้น การตรวจจับสัญญาณรอบต่อไปโดย Received power estimation module จะถูกกระทำที่ความสูง 2000 1500 1000 500 เมตร ตามลำดับ และเมื่อ UAV อยู่ ณ ความสูงต่ำกว่า 500 เมตร ระดับความสูงของ UAV จะถูกลดลงรอบการทำงานละ 10 เมตร ตามที่กำหนดจากค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียด จนกระทั่งถึงความสูงต่ำสุดที่กำหนด ซึ่งในกรณีนี้เท่ากับ 40 เมตร



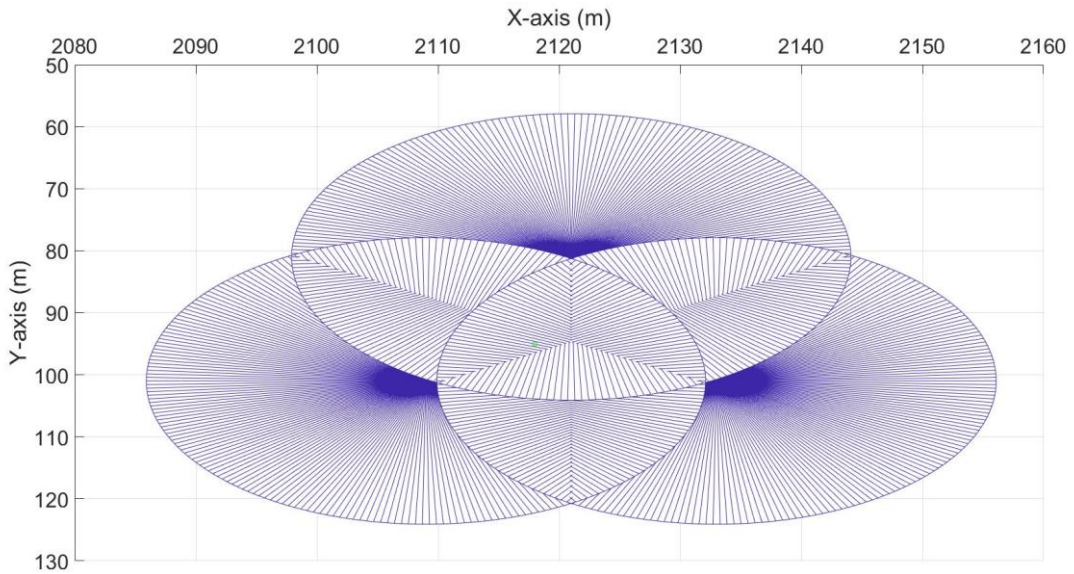
รูปที่ 39 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ณ ความสูง 40 เมตร



รูปที่ 40 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ณ ความสูง 40 เมตร



รูปที่ 41 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ณ ความสูง 40 เมตร



รูปที่ 42 UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ณ ความสูง 40 เมตร

UAV จำนวน 3 ลำและขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ ณ ความสูง 40 เมตรถูกแสดงในรูปที่ 39-41 นอกจากนี้ ในรูปที่ 42 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแหล่งกำเนิดสัญญาณถูกตรวจพบและอยู่ใน sector ที่ 4

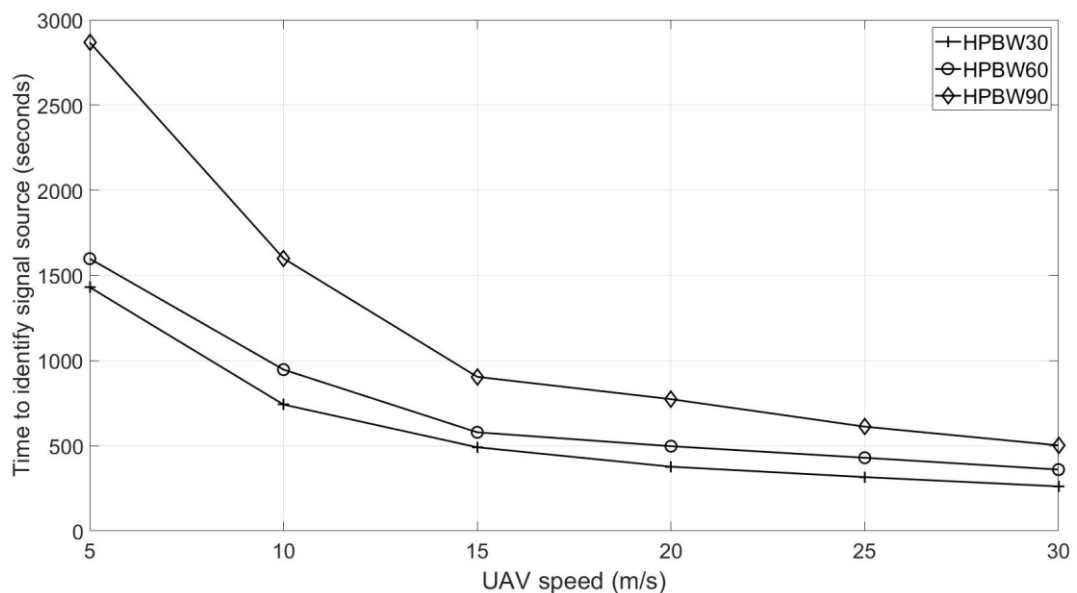
ผลกระทบของสายอากาศและความเร็วของ UAV ต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

ความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ หากระบบสามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณได้อย่างรวดเร็ว หน่วยงานอื่นที่ปฏิบัติการเกี่ยวเนื่องก็จะสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน องค์ประกอบหลักของระบบนี้ประกอบไปด้วยสายอากาศซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่อากาศยานไร้คนขับ สายอากาศนี้เองที่กำหนดขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ นอกจากนั้นแล้ว UAV ยังสามารถบินด้วยความเร็วแตกต่างกัน ผู้วิจัยศึกษาผลกระทบของสายอากาศและความเร็วของ UAV ต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยเปรียบเทียบสายอากาศที่มีค่า half-power beamwidth เท่ากับ 30 60 และ 90 องศา ในขณะที่ความเร็วของ UAV ถูกปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 5 เมตร/วินาที ถึง 30 เมตร/วินาที

รูปที่ 43 แสดงถึงผลกระทบของสายอากาศและความเร็วของ UAV ต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยแกน X แสดงถึงความเร็วของ UAV ที่แตกต่างกันและแกน Y แสดงถึงเวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณ ในกรณีนี้ระบบถูกกำหนดให้หยุดการทำงานเมื่อ UAV มีความสูง 40 เมตร ซึ่งระบบจะสามารถระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตได้ในขอบเขตพื้นที่เพียง 400 ตารางเมตร หรือเพียง 100 ตารางวา ทำให้การระบุตำแหน่งมีความแม่นยำมาก เป็นที่ชัดเจนว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของ UAV ระบบจะสามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่ง

สัญญาณได้รวดเร็วขึ้น กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณแปรผันตรงต่อความเร็วของ UAV อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าอัตราการลดลงของเวลาที่ใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณไม่ได้ลดลงอย่างคงที่แต่กลับมีอัตราที่แตกต่างกัน โดยช่วงความเร็วของ UAV มีค่าระหว่าง 5-15 เมตร/วินาที อัตราการลดลงของเวลาที่ใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณจะค่อนข้างสูง ในขณะที่ ช่วงความเร็วของ UAV มีค่าระหว่าง 15-30 เมตร/วินาที อัตราการลดลงของเวลาที่ใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณจะค่อนข้างต่ำ

เมื่อพิจารณาผลกระทบของสายอากาศที่มีค่า half-power beamwidth ต่างๆกันต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ เป็นที่ประจักษ์ว่าสายอากาศที่มีค่า half-power beamwidth น้อยสามารถลดเวลาที่ใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณได้ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณแปรผันตรงต่อ half-power beamwidth ของสายอากาศ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าอัตราการลดลงของเวลาที่ใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณไม่ได้ลดลงอย่างคงที่แต่กลับมีอัตราที่แตกต่างกัน โดยผลต่างของเวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณจะมีค่าสูงกว่าเมื่อเปลี่ยนจากสายอากาศที่มี half-power beamwidth เท่ากับ 90 องศาเป็นสายอากาศที่มี half-power beamwidth เท่ากับ 60 องศา ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนจากสายอากาศที่มี half-power beamwidth เท่ากับ 60 องศาเป็นสายอากาศที่มี half-power beamwidth เท่ากับ 30 องศา จะเห็นความแตกต่างของการลดลงของเวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณ ทั้งนี้จะเห็นผลอย่างเด่นชัดมากขึ้นในช่วงความเร็วของ UAV มีค่าระหว่าง 5-15 เมตร/วินาที



รูปที่ 43 ผลกระทบของสายอากาศและความเร็วของ UAV ต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

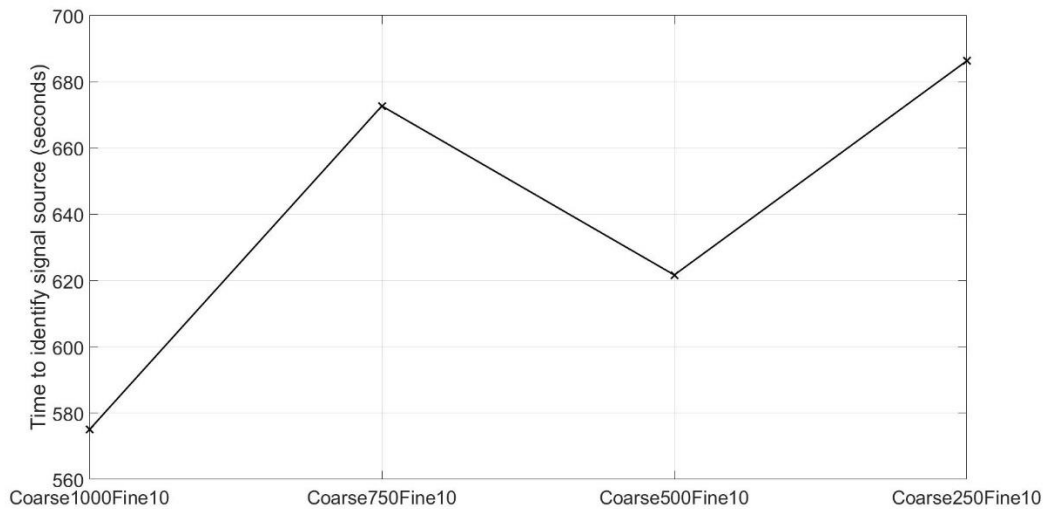
หากพิจารณาโดยผิวเผินจากรูปที่ 26 การเลือกใช้สายอากาศที่มี half-power beamwidth เท่ากับ 30 องศาและความเร็วของ UAV เท่ากับ 15 เมตร/วินาที ดูเหมือนจะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดเนื่องจากเวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณมีค่าต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามอย่างไรก็ดี สายอากาศที่มี half-power beamwidth น้อยย่อมหมายถึงขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่แคบกว่า ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อ การตรวจจับตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณในช่วงเริ่มต้น นอกจากนั้นแล้ว การใช้ความเร็วของ UAV ที่สูงขึ้นยังหมายถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่สูงขึ้น ซึ่งมีผลกระทบต่อเวลาที่ UAV สามารถปฏิบัติการได้ จากเหตุ ข้างต้น ผู้วิจัยเลือกใช้สายอากาศที่มี half-power beamwidth เท่ากับ 60 องศาและความเร็วของ UAV เท่ากับ 15 เมตร/วินาที เพื่อให้ระบบมีขอบเขตการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่กว้างพอและ UAV มี เวลาเหมาะสมในการปฏิบัติการ

ผลกระทบของค่าระดับการลดเพดานบินอย่างหยาบและค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดต่อ

ความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าการเลือกใช้ค่าการลดระดับความสูงของ UAV ในแต่ละรอบการมีความสำคัญอย่างมาก หากเลือกใช้ค่าที่สูงไประบบตรวจจับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอาจจะทำงานรวดเร็วขึ้นแต่มีโอกาสผิดพลาดสูงขึ้น หรือหากเลือกใช้ค่าที่ต่ำไประบบตรวจจับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอาจจะทำงานช้ามากแต่มีโอกาสผิดพลาดต่ำลง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบตรวจจับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณให้สามารถทำงานรวดเร็วและลดโอกาสความผิดพลาดโดยกำหนดให้ค่าความสูงถัดไปของ UAV มี 2 ระดับ ได้แก่ height_step_coarse คือค่าระดับการลดเพดานบินอย่างหยาบสำหรับ UAV ซึ่งมีค่าสูงและ height_step_fine คือค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดสำหรับ UAV ซึ่งมีค่าต่ำ

ในกรณีนี้ ผู้วิจัยศึกษาผลกระทบของค่าระดับการลดเพดานบินอย่างหยาบและค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยปรับเปลี่ยนค่าระดับการลดเพดานบินอย่างหยาบสำหรับ UAV ระหว่าง 1000 750 500 และ 250 เมตร ในขณะที่ค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดสำหรับ UAV มีค่าคงที่เท่ากับ 10 เมตร รูปที่ 44 แสดงถึงผลกระทบของค่าระดับการลดเพดานบินของ UAV ต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ เป็นที่น่าสนใจว่าการเพิ่มค่าระดับการลดเพดานบินของ UAV ไม่ได้ทำให้เวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณต่ำลงเสมอไป อย่างไรก็ตาม ค่าระดับการลดเพดานบินของ UAV ที่สูงมักใช้เวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณต่ำกว่าค่าระดับการลดเพดานบินของ UAV ที่ต่ำ แต่นั่นหมายถึงความละเอียดในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณต้องน้อยลงไปด้วย จากเหตุข้างต้น ผู้วิจัยเลือกใช้ค่าระดับการลดเพดานบินอย่างหยาบสำหรับ UAV เท่ากับ 500 เมตรและค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดสำหรับ UAV เท่ากับ 10 เมตร

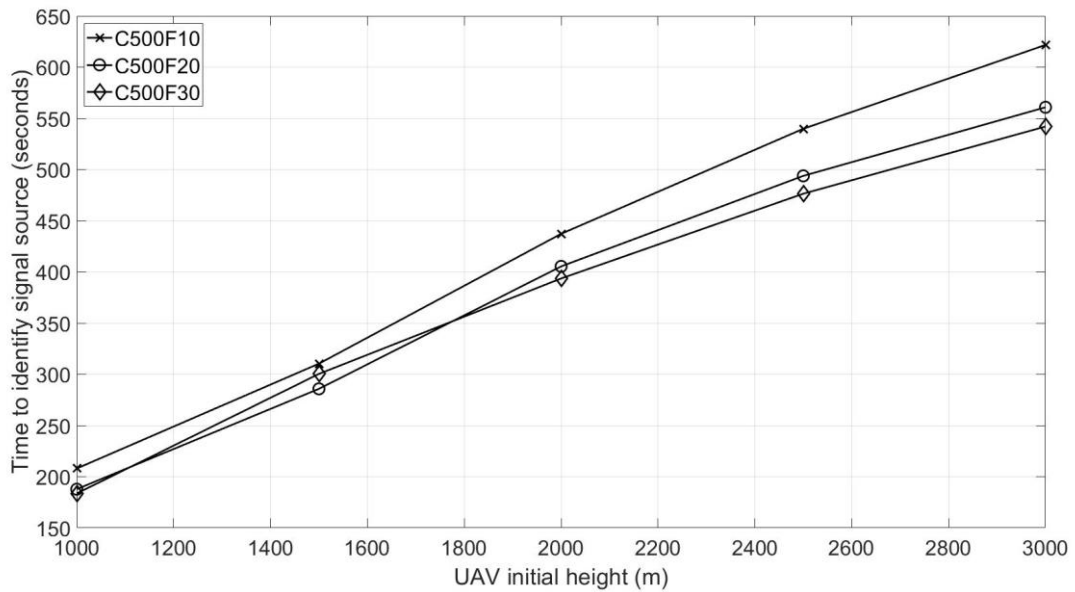


รูปที่ 44 ผลกระทบของค่าระดับการลดเพดานบินของ UAV ต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

ผลกระทบของเพดานบินตั้งต้นของ UAV และค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

ความสัมพันธ์ระหว่างเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับกับพื้นที่ที่ระบบสามารถตรวจพบแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตถูกแสดงไว้อย่างชัดเจนในรูปที่ 30 จะเห็นได้ว่าหากต้องการให้ระบบครอบคลุมพื้นที่ตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่กว้าง เพดานบินตั้งต้นของ UAV จะต้องมีความสูงขึ้นไปด้วย ตัวอย่างเช่น หากเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับถูกกำหนดให้เริ่มต้นตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตที่ความสูง 3000 เมตร จะเห็นได้ว่าพื้นที่ที่ระบบครอบคลุมการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตนั้นมีขนาดสูงถึง 19 ตารางกิโลเมตร

ผลกระทบของเพดานบินตั้งต้นของ UAV และค่าระดับการลดเพดานบินของ UAV ต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณถูกแสดงในรูปที่ 45 เป็นที่น่าสังเกตว่าเวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณแปรผันตรงกับเพดานบินตั้งต้นของ UAV และอัตราการเปลี่ยนแปลงคงที่ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือระบบมีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นต่อความสูงที่เปลี่ยนไปของ UAV เพดานบินตั้งต้นของ UAV ที่สูงจะส่งผลให้เวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณมีค่าสูงเช่นกัน



รูปที่ 45 ผลกระทบของเพดานบินตั้งต้นของ UAV และระดับการลดเพดานบินของ UAV ต่อความเร็วในการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

ค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดมีผลต่อเวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยการแปรผกผัน กล่าวคือ หากเพิ่มค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดแล้วเวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณจะมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดที่ 20 และ 30 เมตร มีผลต่อเวลาที่ระบบใช้ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงเพดานบินตั้งต้นของ UAV ที่ระดับไม่สูงนัก ผู้วิจัยเลือกใช้ค่าระดับการลดเพดานบินอย่างละเอียดเท่ากับ 20 เมตร ด้วยเหตุผลข้างต้น

รายละเอียดเพิ่มเติม

จากผลการศึกษาเทคโนโลยีที่ได้กล่าวไปข้างต้น ผู้วิจัยเลือกใช้ทฤษฎีใหม่ที่เสนอขึ้นโดยผู้วิจัย โดยเป็นการบูรณาการระหว่าง energy detection spectrum sensing และ 3-dimentional Multilateration technique โดยมีอุปกรณ์ที่สำคัญคือสายอากาศแบบมีทิศทางซึ่งสามารถรู้ขอบเขตของการรับสัญญาณได้จาก radiation pattern ของสายอากาศแบบมีทิศทางนั้น จากนั้นเป็นหน้าที่ของอากาศยานไร้คนขับแต่ละลำที่ต้องประมวลผลสัญญาณแล้วส่งผลที่ได้ในรูปแบบของ Boolean (ตรวจสอบพบหรือไม่พบแหล่งกำเนิดสัญญาณต้องสงสัย) มายังสถานีควบคุมภาคพื้นดินเพื่อประมวลผลต่อไปว่า แหล่งกำเนิดสัญญาณต้องสงสัยนั้นถูกตรวจพบโดยอากาศยานไร้คนขับลำใดบ้าง จากนั้นจึงตีกรอบพื้นที่ต้องสงสัยให้แคบลง ขั้นตอนการทำงานนี้รวมถึงการคำนวณหา minimum detectable signal strength (min RSSI) และ coverage ได้ถูกอธิบายโดยละเอียดในหัวข้อ การทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation) โดยการทำงานส่วนใหญ่ของ

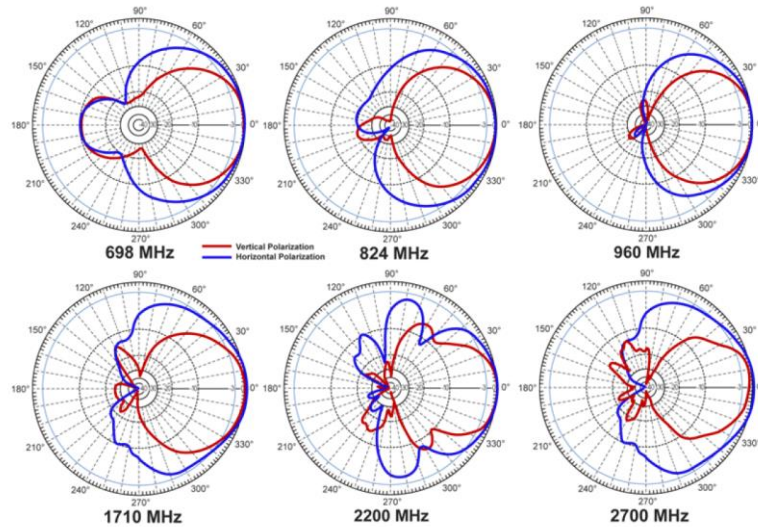
energy detection spectrum sensing และ 3-dimensional Multilateration technique ถูก implement ใน Maximum likelihood sector estimation module

สายอากาศโดยทั่วไปถูกออกแบบมาให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วงความถี่แคบ ความสัมพันธ์ระหว่าง gain ของสายอากาศ Antenna pattern (radiation pattern) MIN RSSI และ coverage ที่ใช้ในการคำนวณ มีดังนี้

จากสมการ	$G = \frac{4\pi\eta A}{\left(\frac{c}{f}\right)^2}$	
โดย	G	= Antenna gain
	η	= Antenna efficiency
	A	= Aperture area
	c	= speed of light
	f	= frequency

จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Antenna gain มีความสัมพันธ์กับ frequency ซึ่งนั่นหมายถึงหากความถี่เปลี่ยนแปลงไป Antenna gain ย่อมเปลี่ยนแปลงไปด้วย ยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นได้ยิ่งกว่าความสัมพันธ์นั้นไม่ได้เป็นลักษณะเชิงเส้น (linear) โดยทั่วไปหน่วยวัด Antenna gain จะถูกเปรียบเทียบกับ isotropic antenna ในหน่วย dBi

Radiation pattern บ่งบอกถึงทิศทางความเข้มของสัญญาณที่สายอากาศรับและส่งสัญญาณวิทยุ รูปที่ 46 แสดงให้เห็นถึง Radiation pattern ของสายอากาศในช่วงความถี่ต่างๆ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า radiation pattern ของสายอากาศไม่คงที่แต่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความถี่เปลี่ยนไป ที่สำคัญลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ Radiation pattern ของสายอากาศไม่สามารถอธิบายได้โดยง่ายเนื่องจากการออกแบบของสายอากาศ วิธีที่เหมาะสมที่สุดเพื่อทดสอบ Radiation pattern ของสายอากาศคือการทดสอบจริง (bench test)



รูปที่ 46 Radiation pattern ของสายอากาศในช่วงความถี่ต่างๆ

4.4 การออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (hardware prototyping)

การออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับในมุมมองของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (hardware prototyping) ซึ่งถือว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากการวางเค้าโครงและขอบเขตความสามารถของระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ ทั้งนี้จากการศึกษาที่ผ่านมาได้แก่ การออกแบบและวิเคราะห์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับและการทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (computer simulation) ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ (feasibility) ในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงเป็นการวางเค้าโครงและขอบเขตความสามารถของระบบด้วยการเลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสม (component mapping) ภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ ที่มีอยู่

ในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับในมุมมองของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ (hardware prototyping) นี้ ผู้วิจัยได้แบ่งการทำงานของระบบในเชิงของอุปกรณ์ออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนอากาศยานไร้คนขับ ส่วนตรวจจับแหล่งสัญญาณ และส่วนประมวลผลสัญญาณ โดยทั้ง 3 ส่วนนี้จะต้องทำงานสอดประสานกันเพื่อประกอบเป็นระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

1. ส่วนอากาศยานไร้คนขับ

การออกแบบอากาศยานไร้คนขับเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักในการกำหนดสมรรถนะและประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ อากาศยานไร้คนขับนั้นต้องสามารถตอบสนองน้ำหนักบรรทุก (payload) พิสัยการบิน (flying range) เพดานบิน (flying altitude) ระยะเวลาบิน (flying time) ความเสถียร (stability) และอุปกรณ์ต่อพ่วง (peripherals) โดยองค์ประกอบที่สำคัญของอากาศยานไร้คนขับ ได้แก่

1.1 โครงสร้างอากาศยานไร้คนขับ (UAV frame)

การเลือกใช้โครงสร้างอากาศยานไร้คนขับให้เหมาะสมมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดน้ำหนักบรรทุก (payload) ที่จะต้องติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับ นอกจากนั้นแล้วน้ำหนักรวม (gross weight) ของอากาศยานไร้คนขับจะต้องไม่สูงหรือต่ำเกินไปเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อเสถียรภาพ (stability) และความคล่องตัว (agility) ในการบิน ในการนี้ผู้วิจัยได้ตีกรอบโครงสร้างอากาศยานไร้คนขับที่เหมาะสมได้แก่ อากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 6 แขน 6 ใบพัด และอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 8 แขน 8 ใบพัด สำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 4 แขน 4 ใบพัด ซึ่งเป็นที่นิยมและสามารถหาซื้อได้ทั่วไปนั้นไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม ดังนั้นจึงไม่สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นในโครงการนี้ได้ ตัวอย่างเช่น อากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 4 แขน 4 ใบพัด ยี่ห้อ Dji รุ่น Phantom 4 สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นได้ถึง 300 กรัมโดยมีประสิทธิภาพที่ลดลงในขอบเขตที่ยอมรับได้ ประสิทธิภาพที่ลดลงนั้นได้แก่ ระยะเวลาการบินที่ลดลงเนื่องจากต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการขับเคลื่อนเพื่อยกตัวอากาศยานไร้คนขับที่มีน้ำหนักมากขึ้น รวมถึงเสถียรภาพ (stability) และความคล่องตัว (agility) ในการบินที่ลดลง ซึ่งนั่นหมายถึงความปลอดภัยที่ลดลงด้วยเช่นกัน

เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปว่าการออกแบบต้องไม่กระทำที่สภาวะการใช้งานเต็มที่ (Full load) หากต้องออกแบบระบบที่สภาวะการใช้งานประมาณ 50-60% จะสามารถทำให้อากาศยานไร้คนขับมีความเสถียรและความคล่องตัวโดยใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เราสามารถใช้งานอากาศยานไร้คนขับ ณ ชีตความสามารถสูงสุดที่อากาศยานไร้คนขับสามารถรับได้ แต่อากาศยานไร้คนขับนั้นจะไม่สามารถตอบสนองและปฏิบัติการกิจได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 47 อากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 6 แขน 6 ใบพัด Tarot X6 V 2.1

รูปที่ 47 แสดงถึงอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 6 แขน 6 ใบพัด Tarot X6 V 2.1 โครงสร้างหลักประกอบด้วย carbon fiber และ aluminum โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 960 mm และสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 5 กิโลกรัม มีพิสัยการบินประมาณ 3.2 กิโลเมตรและบินได้ประมาณ 20 นาที โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ lithium polymer (lipo) ขนาด 10,000 mAH จำนวน 2 ก้อน ทั้งนี้ยังไม่รวมการต่อพ่วงอุปกรณ์อื่นๆ (peripheral) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการบินลดลง ซึ่งผลกระทบหลักอยู่ที่เวลาบินที่ลดลงอย่างมาก เนื่องจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในขณะที่มีการต่อพ่วงอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้พลังงานเพิ่ม

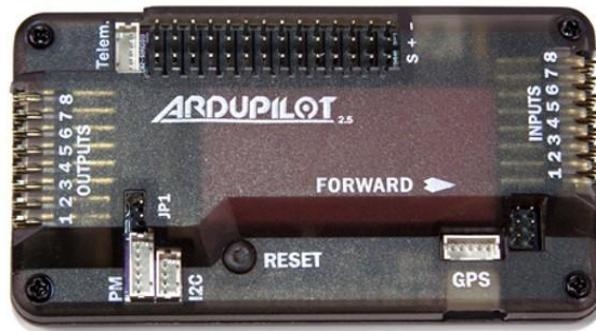


รูปที่ 48 แสดงถึงอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 8 แขน 8 ใบพัด Tarot T-18 V 2.1

รูปที่ 48 แสดงถึงอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 8 แขน 8 ใบพัด Tarot T-18 V 2.1 โครงสร้างหลักประกอบด้วย carbon fiber และ aluminum โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1250 mm และสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้ประมาณ 8 กิโลกรัม มีพิสัยการบินประมาณ 3.2 กิโลเมตรและบินได้ประมาณ 20 นาที โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ lithium polymer (lipo) ขนาด 10,000 mAH จำนวน 2 ก้อน ทั้งนี้ยังไม่รวมการต่อพ่วงอุปกรณ์อื่นๆ (peripheral) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการบินลดลง เช่นเดียวกับข้างต้น ผลกระทบหลักอยู่ที่เวลาบินที่จะลดลงอย่างมาก เนื่องจากน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในขณะที่มีการต่อพ่วงอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้พลังงานเพิ่ม

1.2 Flight control module

Flight control module หรือ หน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ มีหน้าที่ควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับทั้งในโหมดการบินอัตโนมัติและการบินด้วยเครื่องบังคับวิทยุ (Radio Controller) โดยการบินด้วยเครื่องบังคับวิทยุจะเป็นการรับคำสั่งมาจากผู้บังคับการบินแล้วแปลคำสั่งนั้นไปยังมอเตอร์เพื่อให้ทำการเพิ่มหรือลดรอบการหมุน ทำให้อากาศยานไร้คนขับนั้นเคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่ต้องการ หน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับที่เป็นที่นิยมแรกเริ่มคือ หน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ APM หรือ ArduPilot Mega โดยใช้ Microcontroller ยี่ห้อ ATMEGA รุ่น ATmega2560 เป็นมันสมองหลักของหน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ ดังรูปที่ 49



รูปที่ 49 หน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ APM

จากนั้น APM ก็ถูกพัฒนาขีดความสามารถให้สูงขึ้นเป็นหน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ Pixhawk โดยเปลี่ยน microcontroller เป็น 32-bit ARM Cortex M4 core with FPU เพิ่มจำนวน Input/Output ports สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก มีเซนเซอร์ตรวจวัดต่างๆในตัว เช่น MPU6000 accelerometer and gyroscope ST Micro 16-bit gyroscope ST Micro 14-bit accelerometer/compass (magnetometer) และ MEAS barometer ดังแสดงในรูปที่ 50



รูปที่ 50 หน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ Pixhawk

หน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ Pixhawk ได้รับความนิยมนอย่างสูงมาก ทั้งนี้มิใช่เป็นเพราะขีดความสามารถในหน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับเพียงอย่างเดียว แต่หากเป็นเพราะว่าโปรแกรมที่ใช้ควบคุมหน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ (source code) นั้นถูกพัฒนาขึ้นและเปิดเผยให้บุคคลทั่วไปได้ใช้งาน (open source) และมีการสงวนลิขสิทธิ์ให้บุคคลทั่วไปสามารถทำซ้ำเผยแพร่หรือดัดแปลงซอฟต์แวร์นั้น ได้อย่างถูกต้องตามกฎหมายและโดยเสรี (General Public License) ด้วยเหตุนี้เอง จึงทำให้มีผู้ใช้งานและพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเป็นจำนวนมากและมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว โดยโปรแกรมที่ใช้ควบคุมหน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับที่เป็นที่นิยมได้แก่ Ardupilot และ PX4 ในโครงการนี้ผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรมที่ใช้ควบคุมหน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ Ardupilot เนื่องจากมีเอกสารอ้างอิงในการใช้พัฒนาโปรแกรมที่ค่อนข้างสมบูรณ์ สังคมผู้ใช้ที่กว้างขวางกว่า รวมถึงประสบการณ์ของผู้วิจัยด้วย

ในปัจจุบันหน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วและล่าสุด หน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ Pixhawk ได้ถูกพัฒนาเป็นหน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ Pixhawk 2.1 ในรูปที่ 51 โดยมีส่วนเพิ่มจาก Pixhawk รุ่นเดิมดังนี้

- มีหน่วย Inertial Measurement Units (IMU) 3 ชุดเพื่อป้องกันความล้มเหลวของอุปกรณ์
- หน่วย IMU 2 ชุด ถูกแยกออกมาและป้องกันแรงสะเทือนเพื่อเพิ่มความแม่นยำ
- หน่วย IMU ถูกควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเพื่อให้ทำงานได้ถูกต้อง
- Flight Management Unit(FMU) และ IMU ถูกออกแบบให้อยู่ในกล่องและแยก Input/Output ออกมาอย่างชัดเจน



รูปที่ 51 หน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ Pixhawk 2.1

สำหรับรายละเอียดของ Pixhawk 2.1 มีดังต่อไปนี้

ส่วนประมวลผล (processor)

- 32-bit ARM Cortex M4 core with FPU
- 168 Mhz/256 KB RAM/2 MB Flash
- 32-bit failsafe co-processor

ส่วนเซ็นเซอร์ (sensors)

- Three redundant IMUs (accels, gyros and compass)
- InvenSense MPU9250, ICM20948 and/or ICM20648 as first and third IMU (accel and gyro)
- ST Micro L3GD20+LSM303D or InvenSense ICM2076xx as backup IMU (accel and gyro)
- Two redundant MS5611 barometers

ส่วนภาคกำลัง (power)

- Redundant power supply with automatic failover
- Servo rail high-power (7 V) and high-current ready
- All peripheral outputs over-current protected, all inputs ESD protected

ส่วนเชื่อมต่อ (interfaces)

- 14x PWM servo outputs (8 from IO, 6 from FMU)
- S.Bus servo output
- R/C inputs for CPPM, Spektrum / DSM and S.Bus
- Analogue / PWM RSSI input
- 5x general purpose serial ports, 2 with full flow control
- 2x I2C ports
- SPI port (un-buffered, for short cables only not recommended for use)
- 2x CAN Bus interface
- 3x Analogue inputs (3.3V and 6.6V)
- High-powered piezo buzzer driver (on expansion board)

- High-power RGB LED (I2C driver compatible connected externally only)
- Safety switch / LED
- Optional carrier board for Intel Edison

ส่วนเชื่อมต่อของ Pixhawk 2.1 แสดงดังรูปที่ 52



รูปที่ 52 ส่วนเชื่อมต่อของ Pixhawk 2.1

1.3 Obstacle Avoidance LIDAR

ปัจจัยที่สำคัญของการบินอากาศยานไร้คนขับคือเรื่องความปลอดภัย ไม่ว่าจะอากาศยานไร้คนขับจะถูกควบคุมด้วยการบินอัตโนมัติหรือมีบุคคลบังคับ อาจเกิดความผิดพลาดได้ ด้วยเหตุนี้การป้องกันมิให้อากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ชนสิ่งกีดขวางต่างๆจึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่ง อุปกรณ์ Light Detection and Ranging (LIDAR) สามารถติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจสอบสภาพโดยรอบว่ามีสิ่งกีดขวางหรือไม่ ทำให้อากาศยานไร้คนขับมีความปลอดภัยสูงขึ้น รูปที่ 52 แสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์ RPLidar A2 ซึ่งสามารถตรวจสอบสิ่งกีดขวางได้ 360 องศา ภายในรัศมีสูงสุดถึง 18 เมตร โดยสามารถติดตั้งเข้ากับ Pixhawk 2.1 ผ่านทาง port TELEM 1 หรือ serial port ที่สามารถจ่ายไฟได้ 1.5 ampere ดังรูปที่ 53



RPLidar A2

รูปที่ 53 การเชื่อมต่อ RPLidar A2



รูปที่ 53 การเชื่อมต่อ RPLidar A2 (ต่อ)

รายละเอียดของอุปกรณ์ RPLidar A2 มีดังนี้

- rotation rate: 10hz / 600 RPM
- sample rate: 4000 to 8000 samples/s
- range: 6m to 18m
- resolution: 0.9 degrees
- voltage/current requirement: 5V / 1.5A

1.4 Brushless Motors

มอเตอร์เป็นส่วนสำคัญอย่างมากสำหรับอากาศยานไร้คนขับเนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่กำหนดพิสัยบิน โดยทั่วไปพิสัยบินของอากาศยานไร้คนขับจะแปรผันโดยตรงกับขนาดของมอเตอร์ อีกนัยหนึ่งคือมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะสามารถยกอากาศยานไร้คนขับที่มีน้ำหนักมากขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ขนาดของมอเตอร์ที่ใหญ่ขึ้นหมายถึงพลังงานที่ต้องใช้มากขึ้นและน้ำหนักของมอเตอร์ที่มากขึ้น ซึ่งทั้ง 2 ปัจจัยนี้มีผลกระทบโดยตรงต่อระยะเวลาที่อากาศยานไร้คนขับสามารถบินได้และความคล่องตัวของอากาศยานไร้คนขับ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากที่ต้องเลือกใช้มอเตอร์ให้เหมาะสมกับน้ำหนักบรรทุกและขนาดของอากาศยานไร้คนขับ

ดังที่กล่าวไปข้างต้น การออกแบบต้องไม่กระทำที่สภาวะการใช้งานเต็มที่ (Full load) หากต้องออกแบบระบบที่สภาวะการใช้งานประมาณ 50-60% จะสามารถทำให้อากาศยานไร้คนขับมีความเสถียรและความคล่องตัวโดยใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ มอเตอร์ Tarot 5008 High Power Brushless Motor (340kv) ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่และถูกออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 8 แขน 8 ใบพัดที่มีขนาดใบพัดขนาด 18 นิ้ว โดยมอเตอร์ชนิดนี้สามารถยกน้ำหนัก 2 กิโลกรัม ด้วยสภาวะการใช้งานประมาณ 50% (50% throttle)

เมื่อนำมอเตอร์ Tarot 5008 High Power Brushless Motor (340kv) จำนวน 8 ตัวมาติดตั้งอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน 8 แขน 8 ใบพัดที่มีขนาดใบพัดขนาด 18 นิ้ว จึงสามารถยกน้ำหนักได้ประมาณ 16 กิโลกรัม ด้วยสถานะการใช้งานประมาณ 50% รายละเอียดการทดสอบกำลังยกของมอเตอร์ Tarot 5008 High Power Brushless Motor (340kv) เมื่อติดตั้งใบพัดที่มีขนาดใบพัดขนาด 18 นิ้ว แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กำลังยกของมอเตอร์ Tarot 5008 High Power Brushless Motor (340kv)

กำลังยก (กิโลกรัม)	ความต่างศักย์ (volt)	กระแส (ampere)	รอบ (rpm)	วัตต์/กิโลกรัม
1.0	25.0	4.1	3369	102.50
1.5	25.0	6.6	4004	110.00
2.0	25.0	10.1	4604	126.25
2.5	25.0	13.6	5075	136.00
3.0	25.0	18.8	5518	156.67
3.5	25.0	24.4	6051	174.29

รายละเอียดของอุปกรณ์ Tarot 5008 High Power Brushless Motor (340kv) มีดังนี้

- Stator diameter : 50mm
- Stator height : 8mm
- Stator : 12N
- Poles : 14P
- Motor shaft : 4mm
- Dimension : 58.5x35mm
- Weight : 168 g
- Idle current (A)@25.2V : 1.1A
- LiPo battery : 6S
- Max continuous current (A) : 26.5
- Mounting : 25mm x 25mm

1.5 ใบพัดอากาศยานไร้คนขับ

ใบพัดอากาศยานไร้คนขับมีส่วนสำคัญอย่างมากสำหรับการยกตัวของอากาศยานไร้คนขับ ใบพัดที่อากาศยานไร้คนขับดีต้องถูกออกแบบให้มีต้านลมต่ำและมีแรงยกสูง ที่สำคัญต้องเลือกใช้ขนาดของใบพัดอากาศยานไร้คนขับให้เหมาะสมกับมอเตอร์ ผู้วิจัยเลือกใช้ ใบพัดอากาศยานไร้คนขับ Tarot 1855 Carbon Propellers ซึ่งถูกออกแบบมาสำหรับ มอเตอร์ Tarot 5008 High Power Brushless Motor (340kv) โดยทำด้วยวัสดุ carbon fiber และถ่วงน้ำหนักสมดุล รูปที่ 54 แสดงถึง Tarot 1855 Carbon Propellers



รูปที่ 54 Tarot 1855 Carbon Propellers

รายละเอียดของ Tarot 1855 Carbon Propellers มีดังนี้

- Diameter : 18 inch
- Pitch : 5.5 inch
- Weight: 36.6 g
- Center hole : 4mm (for motor shaft)
- Two holes mounting : M3 screw, 12mm eye-to-eye

1.6 Electronic Speed Controller (ESC)

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มรอบของมอเตอร์อากาศยานไร้คนขับให้สูงขึ้น อากาศยานไร้คนขับจะสามารถบรรทุกน้ำหนักได้มากขึ้น การเพิ่มหรือลดรอบมอเตอร์อากาศยานไร้คนขับเป็นหน้าที่ของ Electronic Speed Controller (ESC) ซึ่งจะแปลสัญญาณที่ได้รับมาจาก Flight Control module เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมแก่มอเตอร์อากาศยานไร้คนขับเพื่อปรับความเร็วรอบ โดยทั่วไป ESC 1 ตัวจะสามารถควบคุมมอเตอร์อากาศยานไร้คนขับ 1 ตัว ดังนั้นในโครงการนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ Hobbywing XRotor 40A OPTO ESC จำนวน 8 ตัว ดังรูปที่ 55



รูปที่ 55 Hobbywing XRotor 40A OPTO ESC

รายละเอียดของ Tarot 1855 Carbon Propellers มีดังนี้

- Output : Continuous 40A, Burst 60A up to 10 seconds
- Input Voltage : 2-6 cells lithium battery
- BEC : NO BEC
- Refresh rate of the throttle signal : at least 400Mhz
- Timing : High or Intermediate
- Red Black cable length : 120 mm
- Signal cable length : 260 mm
- Bullet Connector : 3.5 mm
- Size : 68 x 25 x 8.7 mm
- Weight : 26 g

1.7 Radio Control (RC) set

Radio Control (RC) set หรือชุดควบคุมอากาศยานไร้คนขับด้วยคลื่นวิทยุ ในที่นี้หมายถึงการควบคุมอากาศยานไร้คนขับด้วยบุคคลจากภาคพื้นดิน RC set ถือเป็นช่องทางหลักในการควบคุมอากาศยานไร้คนขับ ดังนั้นจึงมีความสำคัญมากที่ต้องเลือกใช้ RC set ที่มีคุณภาพสูง เพราะหากอากาศยานไร้คนขับไม่สามารถถูกควบคุมบุคคลจากภาคพื้นดินแล้ว อากาศยานไร้คนขับนั้นอาจตกลงในลักษณะไม่พึงประสงค์ ก่อให้เกิดความเสียหายทางทรัพย์สินหรือเลวร้ายกว่านั้นก่อให้เกิดความสูญเสียชีวิตได้ RC set ประกอบไปด้วย Transmitter และ Receiver โดย Transmitter จะถูกควบคุมโดยบุคคลภาคพื้นดินและ Receiver จะถูกติดตั้งไว้บนอากาศยานไร้คนขับ

รูปที่ 56 แสดงถึง Transmitter ยี่ห้อ FrSky รุ่น Taranis X9D Plus ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้ในโครงการนี้ ความพิเศษของ FrSky รุ่น Taranis X9D Plus คือสามารถแสดงค่าต่างๆของอากาศยานไร้คนขับ เช่น สถานะ GPS สถานะแบตเตอรี่ ผ่าน FrSky telemetry โดยสามารถรับข้อมูลเหล่านี้ได้จาก FrSky XSR receiver



รูปที่56 Taranis X9D Plus และ FrSky XSR receiver

1.8 Telemetry radio

นอกจากการควบคุมอากาศยานไร้คนขับด้วยบุคคลจากภาคพื้นดินด้วย RC set แล้ว การควบคุมอากาศยานไร้คนขับยังสามารถทำได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ภาคพื้นดิน ในกรณีนี้อากาศยานไร้คนขับอาจทำการบินโดยอัตโนมัติตามแผนการบินที่กำหนดไว้ล่วงหน้าโดยปราศจากการบังคับโดยมนุษย์ นอกจากนั้นแล้ว Telemetry radio ยังเสริมความปลอดภัยของการบินอากาศยานไร้คนขับ โดยทำหน้าที่เป็นช่องทางควบคุมสำรองในกรณีสูญเสียการควบคุมอากาศยานไร้คนขับจากช่องทางควบคุมหลัก ผู้วิจัยเลือกใช้ SiK Telemetry Radio V.2 ซึ่งเป็นวิทย์ที่ใช้มาตรฐานในการส่งข้อมูล MAVLink และสามารถสื่อสารได้กับโปรแกรมควบคุมภาคพื้นดินเช่น Mission planner และ Qgroundcontrol

SiK Telemetry Radio V.2 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์รับส่งสัญญาณวิทยุซึ่งถูกติดตั้งไว้ทั้งบนอากาศยานไร้คนขับและอุปกรณ์หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ภาคพื้นดิน ดังรูปที่ 57



รูปที่ 57 SiK Telemetry Radio V.2

คุณลักษณะของ SiK Telemetry Radio V.2 มีดังนี้

- Light weight (under 4 grams without antenna)
- Available in 900 MHz or 433 MHz (v2 only) variants
- Receiver sensitivity to -121 dBm
- Transmit power up to 20 dBm (100mW)
- Transparent serial link
- Air data rates up to 250kbps
- MAVLink protocol framing and status reporting
- Frequency hopping spread spectrum (FHSS)
- Adaptive time division multiplexing (TDM)
- Open source firmware
- AT commands for radio configuration
- RT commands for remote radio configuration

1.9 Real-time Kinematic Global Positioning System (RTK GPS)

Global Positioning System (GPS) เป็นระบบดาวเทียมที่สามารถใช้ในการระบุพิกัดของเครื่องรับสัญญาณบนโลก อุปกรณ์รับสัญญาณจะมีระบบคอมพิวเตอร์ที่สามารถคำนวณได้แบบ 3 มุม โดยจะสามารถบอกพิกัดได้จากการรับข้อมูลจากดาวเทียม 3 ใน 4 ดวง ซึ่งจะได้ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ เป็นค่าของละติจูดและลองจิจูด ดังนั้น GPS จึงมีความสำคัญอย่างมากในการควบคุมอากาศยานไร้คนขับ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การควบคุมอากาศยานไร้คนขับจากภาคพื้นดินระยะไกลซึ่งไม่สามารถมองเห็นอากาศยานไร้คนขับได้ การรู้ตำแหน่งอย่างแม่นยำของอากาศยานไร้คนขับ ณ เวลาใดๆ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งยวด โดยปัจจุบัน Ublox NEO-M8N High Precision GPS Module สามารถระบุตำแหน่งโดยมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2 เมตร อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโครงการนี้อากาศยานไร้คนขับมีขนาดใหญ่และต้องติดตั้งอุปกรณ์ราคาสูง ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ RTK GPS ยี่ห้อ HEX รุ่น Here 2 ซึ่งสามารถระบุตำแหน่งโดยมีความคลาดเคลื่อนระดับเซนติเมตรโดยอาศัยการติดตั้ง GPS module อีกหน่วยหนึ่งไว้ที่อุปกรณ์ควบคุมภาคพื้นดิน RTK GPS ยี่ห้อ HEX รุ่น Here 2 แสดงในรูปที่ 58



รูปที่ 58 RTK GPS ยี่ห้อ HEX รุ่น Here 2

1.10 แบตเตอรี่อากาศยานไร้คนขับ

แบตเตอรี่อากาศยานไร้คนขับเป็นส่วนสำคัญมากทั้งในแง่ของปัจจัยหลักที่กำหนดระยะเวลาการบินของอากาศยานไร้คนขับและอาจเป็นส่วนที่มีน้ำหนักที่สุดของอากาศยานไร้คนขับ ด้วยเหตุนี้แบตเตอรี่อากาศยานไร้คนขับที่มีอัตราส่วนพลังงานต่อน้ำหนักที่สูงจึงจำเป็นอย่างยิ่ง ตัวอย่างเช่น Lithium Polymer (Lipo) อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนพลังงานต่อน้ำหนักไม่ใช่ปัจจัยเดียวในการเลือกใช้แบตเตอรี่อากาศยานไร้คนขับที่เหมาะสม หากมีปัจจัยอื่นเช่น

- จำนวนเซลล์ของแบตเตอรี่ (S) โดยทั่วไปแบตเตอรี่ Lipo 1 เซลล์จะมีความต่างศักย์ 3.7 โวลต์ เมื่อนำแบตเตอรี่ Lipo มาต่อกันแบบอนุกรมจะเพิ่มความต่างศักย์ เช่น แบตเตอรี่ Lipo 1 เซลล์ (1S) จะมีความต่างศักย์ 3.7 โวลต์ แบตเตอรี่ Lipo 2 เซลล์ (2S) จะมีความต่างศักย์ 7.4 โวลต์ แบตเตอรี่ Lipo 6 เซลล์ (6S) จะมีความต่างศักย์ 22.2 โวลต์
- ความจุแบตเตอรี่ (capacity) มีหน่วยวัดเป็น milli-ampere hour (mAh) หมายถึงระยะเวลาที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแสเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง
- อัตราการปล่อยประจุ (C-rating) เป็นค่าที่บอกปริมาณกระแสสูงสุดที่แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้อย่างปลอดภัย เช่นแบตเตอรี่ Lipo 1000mAh 50C หมายถึง แบตเตอรี่สามารถจ่ายได้กระแสสูงสุด 50 A อย่างปลอดภัย

ผู้วิจัยเลือกใช้ Tattu Plus 2200mAh 22.2V 25C 6S1P Lipo Smart Battery Pack จำนวน 2 ก้อน โดยมีน้ำหนัก 2650 กรัมต่อก้อน สามารถทำการบินได้เป็นระยะเวลาประมาณ 35-40 นาที ซึ่งแสดงในรูปที่ 59



รูปที่ 59 Tattu Plus 22000mAh 22.2V 25C 6S1P Lipo Smart Battery Pack

1.11 First Person View (FPV)

First Person View (FPV) คือการส่งภาพจากมุมมองปัจจุบันของอากาศยานไร้คนขับไปยังจอภาพที่ภาคพื้นดิน FPV สามารถทำให้ผู้บังคับอากาศยานไร้คนขับที่ภาคพื้นดินเห็นมุมมองและตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับแม้จะไม่อยู่ในวิสัยการมองเห็นของผู้บังคับ ด้วยเหตุนี้ FPV จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะเสริมความปลอดภัย อำนวยความสะดวกและเพิ่มพิสัยการบินของอากาศยานไร้คนขับ ส่วนประกอบหลักของ FPV มีดังนี้

- กล้องวิดีโอขนาดเล็ก ความละเอียดตั้งแต่ 600-1200 TVL ซึ่งติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ
- 5.8 GHz ความแรง 25 mw ถึง 200mw video transmitter ซึ่งติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ
- จอแสดงผลพร้อม 5.8 GHz video receiver ซึ่งติดตั้งที่ภาคพื้นดิน

2. ส่วนตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ

ส่วนตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ สายอากาศและอุปกรณ์วิทยุภาครับ (RF frontend) โดยมีรายละเอียดดังนี้

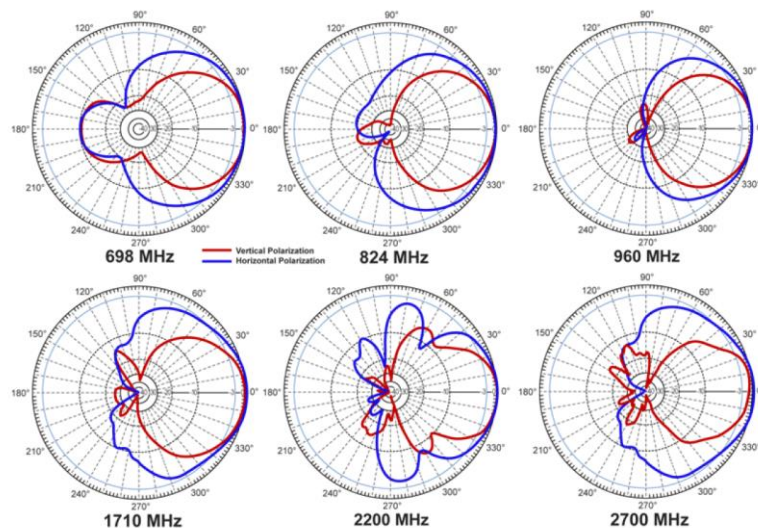
2.1 สายอากาศ

สายอากาศเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในระบบตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณ สายอากาศที่ใช้ในระบบตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณเป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) ในโครงการนี้ผู้วิจัยใช้สายอากาศแบบมีทิศทางจำนวน 2 ชุด โดยสายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 1 ใช้สำหรับรับความถี่ในช่วง 900 MHz และสายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 2 ใช้สำหรับรับความถี่ในช่วง 2.4 GHz สาเหตุที่เลือกใช้ 2 ความถี่นี้เนื่องจาก Sik Telemetry radio ของอากาศยานไร้คนขับใช้ความถี่ 915 MHz และ RC set ของอากาศยานไร้คนขับใช้ความถี่ 2.4 GHz ดังนั้นหากต้องการตรวจจับแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เกิดจากการบังคับอากาศยานไร้คนขับแล้ว จึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาสัญญาณใน 2 ช่วงความถี่นี้

สายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 1 ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG72710LP-NF ใช้สำหรับรับความถี่ในช่วง 900 MHz แสดงในรูปที่ 60 โดยมี radiation pattern แสดงดังรูปที่ 61 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าในช่วง 900 MHz ทั้ง vertical และ horizontal beamwidth มีขนาดประมาณ 60 องศา มีน้ำหนักประมาณ 0.91 กิโลกรัม และมีขนาด 295 มิลลิเมตร x 207 มิลลิเมตร x 60 มิลลิเมตร



รูปที่ 60 สายอากาศแบบมีทิศทางยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG72710LP-NF

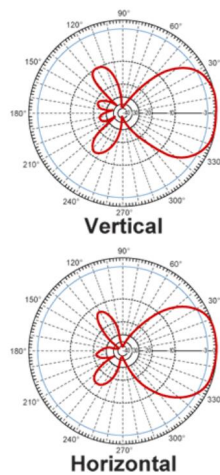


รูปที่ 61 radiation pattern ของสายอากาศแบบมีทิศทางยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG72710LP-NF

สายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 2 ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y ใช้สำหรับรับความถี่ในช่วง 2.4 GHz แสดงในรูปที่ 62 โดยมี radiation pattern แสดงดังรูปที่ 63 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าในช่วง 2.4 GHz ทั้ง vertical และ horizontal beamwidth มีขนาดประมาณ 60 องศาเช่นกัน มีน้ำหนักประมาณ 210 กรัม และมีขนาดทรงกระบอกยาว 152 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร



รูปที่ 62 สายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 2 ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y



รูปที่ 63 radiation pattern ของสายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 2 ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y

2.2 อุปกรณ์วิทยุภาครับ (RF frontend)

สัญญาณที่รับได้จากสายอากาศแบบมีทิศทางทั้ง 2 ชุด จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยอุปกรณ์วิทยุภาครับ (RF frontend) ในโครงการนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ Software Defined Radio (SDR) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของอุปกรณ์ได้ด้วย software โดย SDR ที่เลือกใช้นำไปติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับต้องมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ผู้วิจัยเลือกใช้ SDR ยี่ห้อ USRP รุ่น B210 ซึ่งมีขนาด 97 มิลลิเมตร x 155 มิลลิเมตร x 15 มิลลิเมตร น้ำหนัก 350 กรัม จำนวน 2 ชุด ต่ออากาศยานไร้คนขับ 1 ลำ

คุณลักษณะของ SDR ยี่ห้อ USRP รุ่น B210 มีดังนี้

- RF coverage from 70 MHz – 6 GHz
- GNU Radio, C++ and Python APIs
- USB 3.0 SuperSpeed interface
- Flexible rate 12 bit ADC/DAC
- 2 TX & 2 RX, Half or Full Duplex
- Fully-coherent 2x2 MIMO capability
- Xilinx Spartan 6 XC6SLX150 FPGA
- Up to 56 MHz of instantaneous bandwidth in 1x1
- Up to 30.72 MHz of instantaneous bandwidth in 2x2
- GPIO capability

3. ส่วนประมวลผลสัญญาณ

สัญญาณดิจิทัลโดยอุปกรณ์ SDR ข้างต้นยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันทีเนื่องจากเป็นเพียงข้อมูลดิบ (data) ซึ่งต้องผ่านการประมวลผลสัญญาณ (processing) เพื่อให้ได้มาซึ่งสารสนเทศ (information) การประมวลผลสัญญาณจึงมีความสำคัญมากเพื่อให้สามารถแปลผลของข้อมูลที่ได้รับมาได้ โดยทั่วไปการประมวลผลสัญญาณต้องการพลังงานและทรัพยากรในการประมวลผลสูง โดยทั่วไปจะใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลแบบ X86 เนื่องด้วยประสิทธิภาพและความเข้ากันได้ของซอฟต์แวร์ ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลแบบ X86 โดยมีข้อจำกัดเรื่องขนาดและน้ำหนักที่ต้องมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เนื่องจากต้องติดตั้งคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลแบบ X86 นี้ไว้บนอากาศยานไร้คนขับ Intel NUC nuc10i7fnkpa ซึ่งมีหน่วยประมวลผล intel core i7-10710U โดยมีน้ำหนักประมาณ 600 กรัม ดังรูปที่ 64



รูปที่ 64 Intel NUC nuc10i7fnkpa

คุณลักษณะของ Intel NUC nuc10i7fnkpa มีดังนี้

- มีขนาดยาว 117 มิลลิเมตร กว้าง 112 มิลลิเมตร สูง 38 มิลลิเมตร
- มีแบตเตอรี่เป็นแบบประจุไฟใหม่ได้ (rechargeable battery) ชนิด Lithium Polymer (Lipo) และสามารถจ่ายพลังงานให้สามารถทำงานได้ไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง
- มี CPU intel core i7-10710U
- มี RAM DDR4 ขนาด 16 GB
- มี SSD ขนาด 256 GB
- มีระบบปฏิบัติการ windows 10 64-bit และรองรับระบบปฏิบัติการ Ubuntu 64-bit
- มี port USB จำนวนไม่ต่ำกว่า 6 port โดย มี USB 3.1 Gen2 Type-A และ Type-C อย่างละ 2 port เป็นอย่างน้อย
- มีวงจรและสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สื่อสารและอุปกรณ์ควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในข้อ 1 เพื่อรับ-ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ภาคพื้นดิน
- สามารถเชื่อมต่อโดยตรงและทำงานร่วมกับ Software Defined Radio (SDR) เพื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณความถี่ ประมวลผล และควบคุมสั่งการให้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ทำภารกิจต่างๆได้

4.5 การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ (software development)

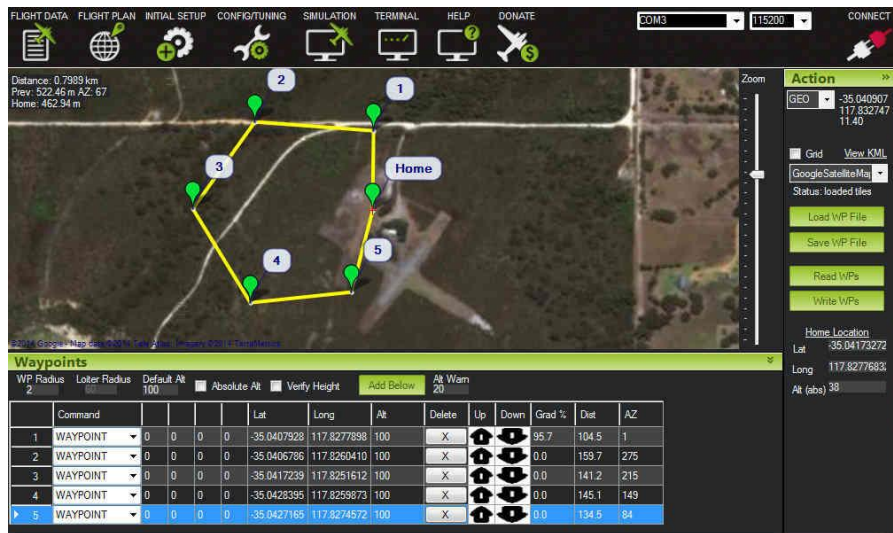
ในส่วนของการออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนควบคุมอากาศยานไร้คนขับและส่วนประมวลผลสัญญาณ เช่นเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น ทั้ง 2 ส่วนนี้จะต้องทำงานสอดประสานกันเพื่อประกอบเป็นระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

1. ส่วนควบคุมอากาศยานไร้คนขับ

ดังที่กล่าวไปข้างต้นในหัวข้อการออกแบบและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับในมุมมองของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ การควบคุมอากาศยานไร้คนขับยังสามารถทำได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ภาคพื้นดิน ในกรณีนี้อากาศยานไร้คนขับอาจทำการบินโดยอัตโนมัติตามแผนการบินที่กำหนดไว้ล่วงหน้าโดยปราศจากการบังคับโดยมนุษย์ โดยอาศัยการสื่อสารผ่าน Sik Telemetry Radio V.2 ซึ่งเป็นวิทย์ที่ใช้มาตรฐานในการส่งข้อมูล (Micro Air Vehicle Communication Protocol: MAVLink) และสามารถสื่อสารได้กับโปรแกรมควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Station: GCS) เช่น Mission planner และ Qgroundcontrol โดยทั้ง 2 โปรแกรมสามารถแสดงสถานะต่างๆ

ของอากาศยานไร้คนขับในลักษณะ virtual cockpit นอกจากนั้นแล้ว โปรแกรมควบคุมภาคพื้นดินยังสามารถควบคุมอากาศยานไร้คนขับขณะทำการบิน แสดงภาพจากมุมมองปัจจุบันของอากาศยานไร้คนขับ (FPV) หากมีการติดตั้งระบบไว้บนอากาศยานไร้คนขับ

Mission planner GCS สามารถทำงานได้บนระบบ platform desktop โดยใช้ปฏิบัติการ windows และ Mac OS X ในขณะที่ Qgroundcontrol GCS สามารถทำงานได้บนระบบระบบ platform desktop และ mobile Mission planner GCS และ Qgroundcontrol GCS แสดงดังรูปที่ 65 และรูปที่ 66 ตามลำดับ



รูปที่ 65 Mission planner GCS

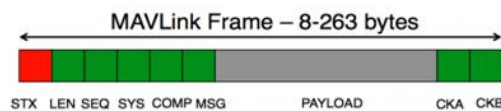


รูปที่ 66 Qgroundcontrol GCS

ในโครงการนี้ผู้วิจัยเลือกใช้ Mission planner GCS ในการควบคุมอากาศยานไร้คนขับเนื่องจากมีเอกสารอ้างอิงในการใช้พัฒนาโปรแกรมที่ค่อนข้างสมบูรณ์ สังคมผู้ใช้ที่กว้างขวางกว่า รวมถึงประสบการณ์ของผู้วิจัยด้วย นอกจากนี้ Mission planner GCS ยังถูกพัฒนาเพื่อรองรับโปรแกรมที่ใช้ควบคุมหน่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ Ardupilot โดยเฉพาะ ทำให้ลดโอกาสเสี่ยงในกรณีเกิดข้อผิดพลาดของความไม่เข้ากันของซอฟต์แวร์ (software incompatibility)

Mission planner GCS ใช้มาตรฐานในการส่งข้อมูล (Micro Air Vehicle Communication Protocol: MAVLink) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้ในการสื่อสารและควบคุมอากาศยานไร้คนขับโดยใช้สถาปัตยกรรมแบบ publish-subscribe และ point-to-point ดังแสดงในรูปที่ 67 โดยประกอบไปด้วย 2 sub-protocol ได้แก่

- mission sub-protocol ทำหน้าที่เกี่ยวกับ flight plan โดย GCS สามารถสั่งการให้อากาศยานไร้คนขับทำการบิน mission มาตรฐาน 3 แบบ ได้แก่ flight plans geofences และ rally points
- parameter sub-protocol ทำหน้าที่เกี่ยวกับการแลกเปลี่ยน ปรับแต่ง ค่าต่างๆ ระหว่างอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับ MAVLink

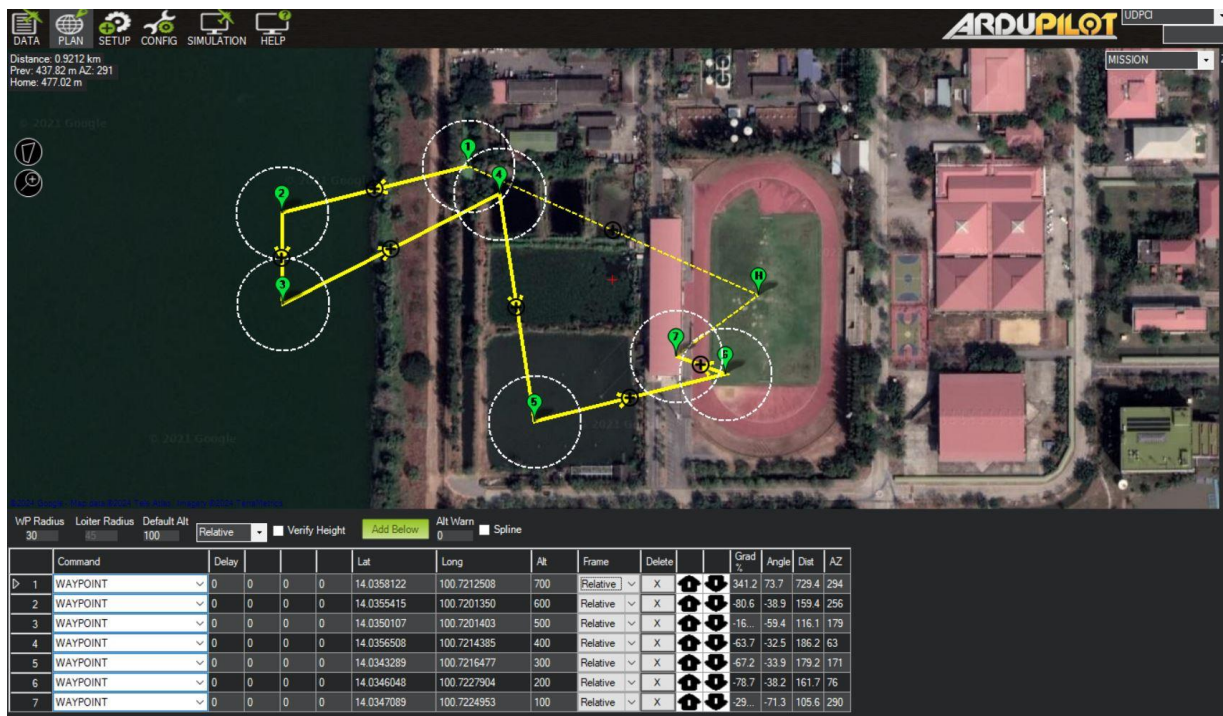


Byte Index	Content	Value	Explanation
0	Packet start sign	v1.0: 0xFE (v0.9: 0x55)	Indicates the start of a new packet.
1	Payload length	0 - 255	Indicates length of the following payload.
2	Packet sequence	0 - 255	Each component counts up his send sequence. Allows to detect packet loss
3	System ID	1 - 255	ID of the SENDING system. Allows to differentiate different MAVs on the same network.
4	Component ID	0 - 255	ID of the SENDING component. Allows to differentiate different components of the same system, e.g. the IMU and the autopilot.
5	Message ID	0 - 255	ID of the message - the id defines what the payload "means" and how it should be correctly decoded.
6 to (n+6)	Data	(0 - 255) bytes	Data of the message, depends on the message id.
(n+7) to (n+8)	Checksum (low byte, high byte)	ITU X.25/SAE AS-4 hash, excluding packet start sign, so bytes 1..(n+6) Note: The checksum also includes MAVLINK_CRC_EXTRA (Number computed from message fields. Protects the packet from decoding a different version of the same packet but with different variables).	

รูปที่ 67 MAVLink frame

โครงสร้างนอกจากนั้นแล้ว Mission planner GCS ยังสามารถเชื่อมต่อกับ python script เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของโปรแกรมควบคุมอากาศยานไร้คนขับได้ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการควบคุมอากาศยานไร้คนขับจะสามารถทำการได้โดยอัตโนมัติโดยการป้อนข้อมูลพิกัดและความสูงของตำแหน่งที่ต้องการให้อากาศยานไร้คนขับเดินทางไปในแต่ละรอบการทำงาน (waypoint) แต่ผู้ผลิต flight controller และ ผู้พัฒนา operating system สำหรับอากาศยานไร้คนขับไม่แนะนำ เนื่องจากระบบทั้งหมดดังกล่าวเป็นระบบ opensource ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระบบควบคุมโดยมนุษย์ในการทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ

รูปที่ 67.1 แสดงถึงแผนการบินของอากาศยานไร้คนขับโดยการควบคุมอากาศยานแบบอัตโนมัติโดยการป้อนข้อมูลพิกัด (Lat, Long) และความสูง (Alt) ของตำแหน่งที่ต้องการให้อากาศยานไร้คนขับเดินทางไปในแต่ละรอบการทำงาน (waypoint) โดยอากาศยานไร้คนขับเริ่มการทำงานตรวจจับสัญญาณที่ waypoint หมายเลข 1 ที่ความสูง 700 เมตร จากนั้นเดินทางไปยัง waypoint หมายเลข 2 ที่ความสูง 600 เมตร และสิ้นสุดการทำงานตรวจจับสัญญาณที่ waypoint หมายเลข 7 ที่ความสูง 100 เมตร จากนั้นอากาศยานไร้คนขับจึงเดินทางกลับไปยังจุดเริ่มต้น (home)

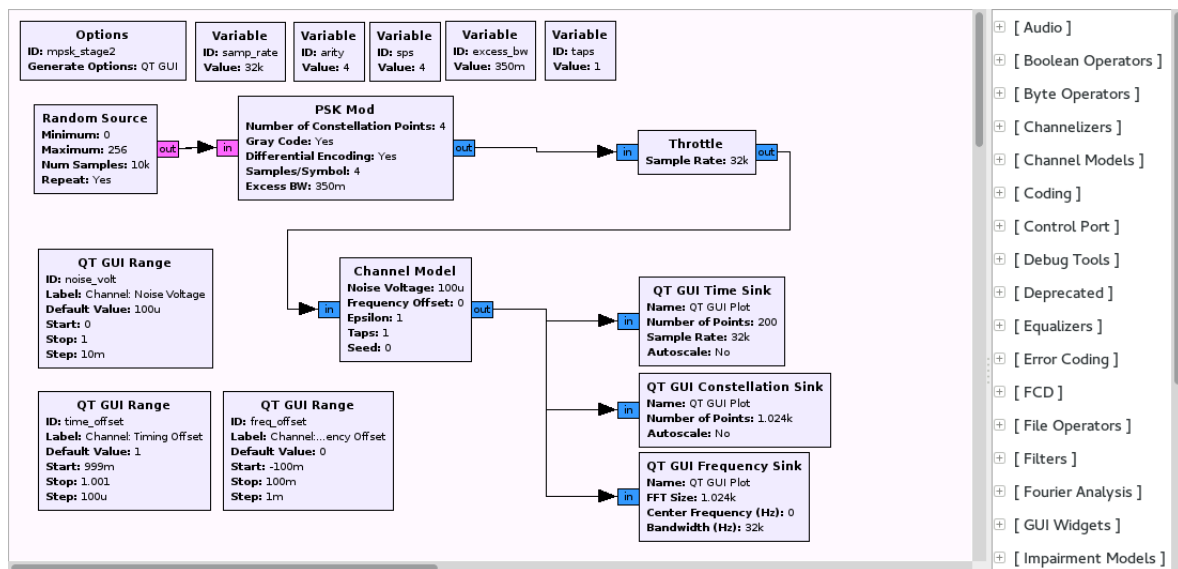


รูปที่ 67.1 แสดงการบินของอากาศยานไร้คนขับโดยการควบคุมอากาศยานแบบอัตโนมัติ

2. ส่วนประมวลผลสัญญาณ

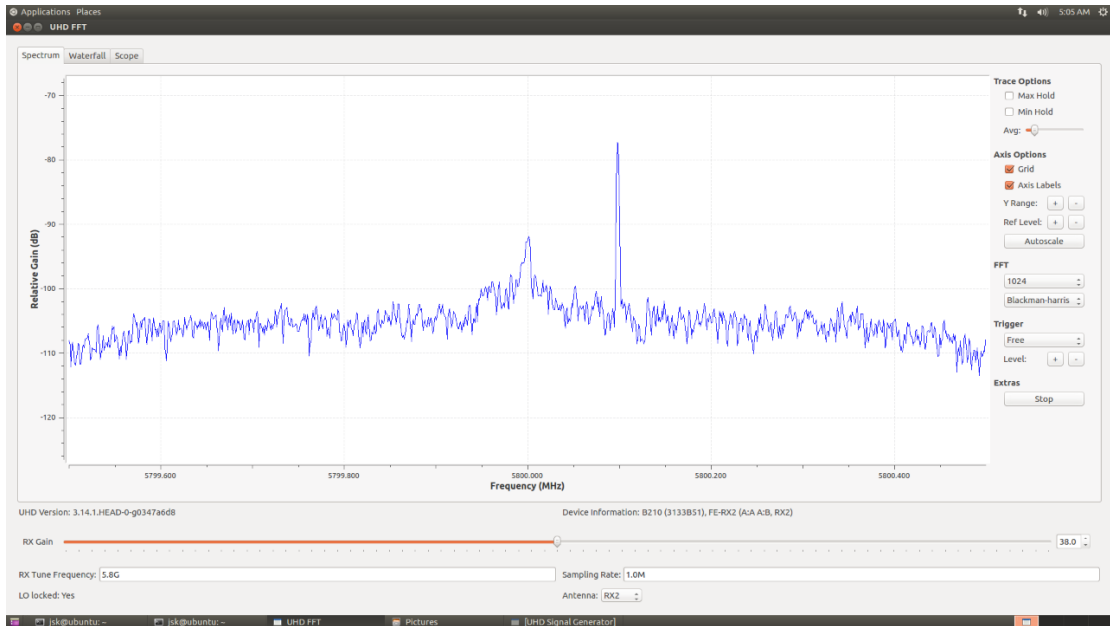
ในส่วนของซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับประมวลผลสัญญาณนั้น ผู้วิจัยใช้ gnuradio และ Matlab ในการประมวลผล gnuradio เป็น free software ที่ใช้ในวงกรวิจัยเพื่อพัฒนาวิทยุที่สามารถควบคุมพฤติกรรมด้วยซอฟต์แวร์ (Software Defined Radio: SDR) โดยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ปี 2001 บนพื้นฐานภาษา C++ และ python gnuradio สามารถทำงานได้กับ SDR หลายรุ่น โดยสามารถทำงานได้กับ USRP B210 ด้วย USRP Hardware Driver (UDH) อีกทั้งยังสามารถใช้งานกับ MATLAB และ LabVIEW ได้อีกด้วย

รูปที่ 68 แสดงถึง gnuradio companion ซึ่งเป็น graphical user interface ของ gnuradio ที่พัฒนาขึ้นในรูปแบบของ flowgraph สามารถทำให้ผู้ใช้สามารถสร้าง python code เพื่อปรับเปลี่ยนพฤติกรรม SDR ตามที่ต้องการได้อย่างง่ายและรวดเร็ว

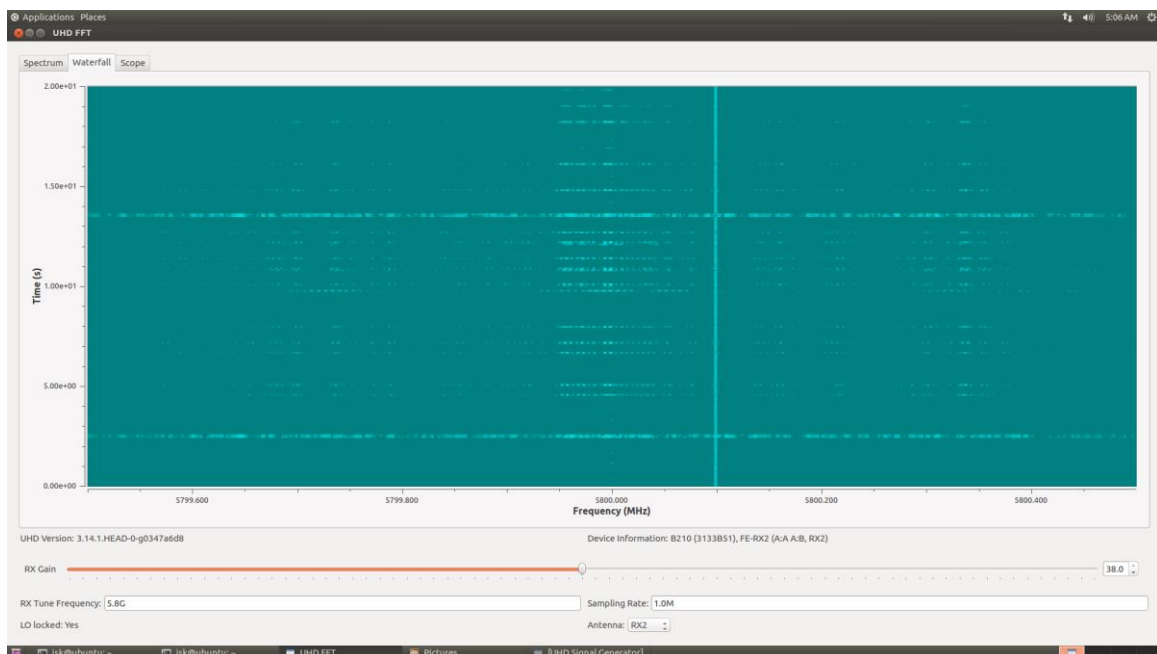


รูปที่ 68 gnuradio companion

ส่วนตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับจะอาศัย USRP B210 ร่วมกับ gnuradio และ UHD ในการตรวจหา spectrum ของคลื่นวิทยุในช่วงต่างๆเพื่อหาสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยวิธี energy detection spectrum sensing รูปที่ 69 แสดงให้เห็นถึง spectrum ในช่วงความถี่ 5.8 GHz ซึ่งผู้วิจัยทำการวัดด้วยอุปกรณ์ USRP B210 จะเห็นได้ว่ามีความถี่ที่แสดงอย่างชัดเจนที่ 5.8 GHz และ 5.8001 GHz ความถี่ที่ 5.8 GHz คือความถี่จาก wireless router และ ความถี่ที่ 5.8001 GHz เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นจากอุปกรณ์ USRP B210 อีกเครื่องหนึ่ง อย่างไรก็ตามหากทำการพิจารณาสัญญาณในเชิงเวลาด้วย waterfall spectrogram ดังรูปที่ 70 จะเห็นได้ว่าสามารถมองเห็นสัญญาณและรูปแบบ (pattern) ได้ชัดเจนขึ้นมาก ผู้วิจัยได้นำ waterfall spectrogram มาช่วยในการตรวจจับแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 69 spectrum ในช่วงความถี่ 5.8 GHz



รูปที่ 70 waterfall spectrogram ในช่วงความถี่ 5.8 GHz

การตรวจหา spectrum ของคลื่นวิทยุในช่วงต่างๆเพื่อหาสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยวิธี energy detection spectrum sensing นั้น ความแรงของสัญญาณที่อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับสามารถตรวจจับได้ถูกประมวลผลโดยโปรแกรม usrp_spectrum_sense.py โดยมีรายละเอียดการใช้งานของโปรแกรมดังต่อไปนี้

```
usrp_spectrum_sense.py [options] min_freq max_freq
```

Options:

- h, --help show this help message and exit
- a ARGS, --args=ARGS UHD device device address args [default=]
- spec=SPEC Subdevice of UHD device where appropriate
- A ANTENNA, --antenna=ANTENNA select Rx Antenna where appropriate
- s SAMP_RATE, --samp-rate=SAMP_RATE set sample rate [default=1000000.0]
- g GAIN, --gain=GAIN set gain in dB (default is midpoint)
- tune-delay=SECS time to delay (in seconds) after changing frequency
[default=0.25]
- dwell-delay=SECS time to dwell (in seconds) at a given frequency
[default=0.25]
- b Hz, --channel-bandwidth=Hz channel bandwidth of fft bins in Hz
[default=6250.0]
- l Hz, --lo-offset=Hz lo_offset in Hz [default=0]
- q dB, --squelch-threshold=dB squelch threshold in dB [default=none]
- F FFT_SIZE, --fft-size=FFT_SIZE specify number of FFT bins
[default=samp_rate/channel_bw]
- real-time Attempt to enable real-time scheduling

ตัวอย่างเช่น หากต้องการตรวจหา spectrum ของคลื่นวิทยุในช่วง 5.6 GHz – 5.9GHz สามารถใช้คำสั่ง `usrp_spectrum_sense.py 5.6G 5.9G` จากนั้น ความแรงของสัญญาณที่อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับสามารถตรวจจับได้ถูกประมวลผลและส่งข้อมูลความแรงของสัญญาณในช่วงความถี่ดังกล่าวมายังอุปกรณ์ภาคพื้นดินผ่านทาง Sik Telemetry radio

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองขึ้นเอง (custom simulator) ภายใต้สภาพแวดล้อมของโปรแกรม MATLAB version R2018b ผู้วิจัยได้ออกแบบโครงสร้างของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. UAV creation and initialization module

Module นี้ทำหน้าที่กำหนดโครงสร้างการเก็บข้อมูล การสร้าง object UAV รวมถึงการกำหนดค่าเริ่มต้นต่างๆ ให้กับ UAV โครงสร้างการเก็บข้อมูลของ UAV ประกอบด้วย

uav.position	เก็บตำแหน่งปัจจุบันของ UAV ได้แก่ พิกัดในแกน x แกน y และ แกน z ในหน่วยเมตร
uav.next_position	เก็บตำแหน่งถัดไปของ UAV ได้แก่ พิกัดในแกน x แกน y และ แกน z ในหน่วยเมตร โดยตำแหน่งถัดไปคือพิกัดที่คำนวณได้จาก UAV reposition module
uav.speed	เก็บค่าความเร็วของ UAV ในหน่วยเมตรต่อวินาที
uav.height	เก็บค่าความสูงปัจจุบันของ UAV ในหน่วยเมตร
uav.next_height	เก็บค่าความสูงถัดไปของ UAV ในหน่วยเมตร
uav.state	เก็บสถานะของ UAV โดย 1=stationary/hovering, 2=en route, 3=probing
uav.rx_watt	เก็บค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในหน่วยวัตต์
uav.rx_dbm	เก็บค่าความเข้มของสัญญาณที่วัดได้ในหน่วย เดซิเบล-มิลลิวัตต์
uav.time_to_dest	เก็บเวลาที่ UAV ต้องใช้ในการเดินทางไปยังตำแหน่งถัดไปในหน่วย วินาที
uav.dist_to_dest	เก็บระยะทางที่ UAV ต้องเดินทางไปยังตำแหน่งถัดไปในหน่วยเมตร
uav.gps_position	เก็บตำแหน่ง GPS ของพิกัดเป้าหมายในรอบการทำงานปัจจุบัน
uav.next_gps_position	เก็บตำแหน่ง GPS ของพิกัดเป้าหมายในรอบการทำงานถัดไป

2. Centroid keeper and initialization module

Module นี้ทำหน้าที่รับพิกัดเริ่มต้นของ centroid จากผู้ใช้งานรวมถึงที่เก็บค่า centroid ของ UAV ทั้ง 3 ลำ ในแต่ละรอบการทำงาน โดยประกอบไปด้วยตัวแปรสำคัญดังต่อไปนี้

centroid.gps	เก็บค่าพิกัด centroid ในรูปแบบ GPS coordinate
centroid.local	เก็บค่าพิกัด centroid ในรูปแบบ local coordinate

3. Maximum likelihood decision module

Module นี้ทำหน้าที่คำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด โดยจะระบุเป็นพื้นที่ที่ถูกจัดแบ่งตามอากาศยานไร้คนขับ โดย module นี้จะรับค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV แต่ละลำ วัดได้ในหน่วย relative decibel จาก USRP b205-mini SDR จากนั้นจะนำไปคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุด ดังนี้

นำค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV แต่ละลำวัดได้ในหน่วย relative decibel (uav.rx_watt) มาเปรียบเทียบกันเพื่อหาค่าความเข้มของสัญญาณสูงสุด โดยหาก

$$(uav(1).rx_watt > uav(2).rx_watt) \& (uav(1).rx_watt > uav(3).rx_watt)$$

sector = 1

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 1 ตรวจจับได้มีขนาดสูงที่สุดในบรรดา UAV ทั้ง 3 ลำ ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ ภายในขอบเขตของ UAV ลำที่ 1 จากนั้น กำหนดพิกัด centroid ในรอบถัดไป รวมถึงพิกัดและความสูงของ UAV ทั้ง 3 ลำในรอบถัดไป ดังนี้

centroid.next_local = uav(1).position

centroid.next_local(1,3) = next_height

หรือหาก (uav(2).rx_watt > uav(1).rx_watt)&(uav(2).rx_watt > uav(3).rx_watt)

sector = 2

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 2 ตรวจจับได้มีขนาดสูงที่สุดในบรรดา UAV ทั้ง 3 ลำ ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ ภายในขอบเขตของ UAV ลำที่ 2 จากนั้น กำหนดพิกัด centroid ในรอบถัดไป รวมถึงพิกัดและความสูงของ UAV ทั้ง 3 ลำในรอบถัดไป ดังนี้

centroid.next_local = uav(2).position

centroid.next_local(1,3) = next_height

หรือหาก (uav(3).rx_watt > uav(1).rx_watt)&(uav(3).rx_watt > uav(2).rx_watt)

sector = 3

หมายถึง หากค่าความเข้มของสัญญาณที่ UAV ลำที่ 3 ตรวจจับได้มีขนาดสูงที่สุดในบรรดา UAV ทั้ง 3 ลำ ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดคือ ภายในขอบเขตของ UAV ลำที่ 3 จากนั้น กำหนดพิกัด centroid ในรอบถัดไป รวมถึงพิกัดและความสูงของ UAV ทั้ง 3 ลำในรอบถัดไป ดังนี้

centroid.next_local = uav(3).position

centroid.next_local(1,3) = next_height

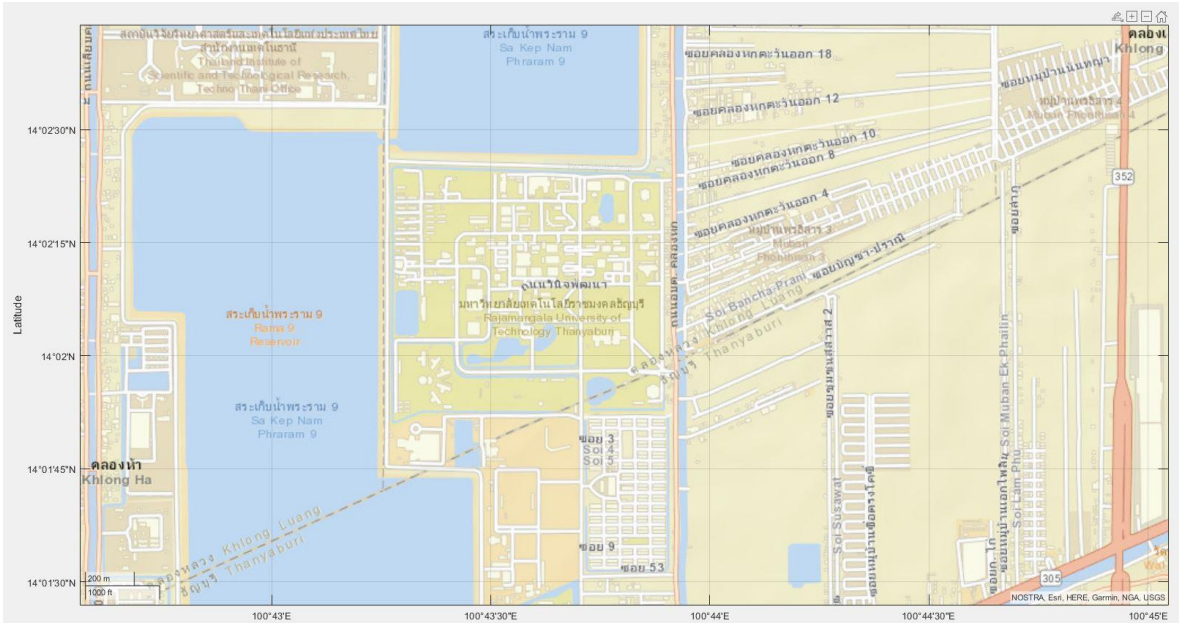
เมื่อพิจารณาจะเห็นได้ว่า การคำนวณหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่เป็นไปได้มากที่สุดไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเที่ยงตรงของความเข้มของสัญญาณที่ตรวจจับในหน่วยใดๆ แต่หากเป็นการเปรียบเทียบระดับความเข้มของสัญญาณที่ตรวจจับได้ระหว่างอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ดังนั้น อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับสัญญาณ จึง จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องสอบเทียบความแม่นยำของหน่วยวัดความเข้มของสัญญาณ เช่น dBm หรือ mW ให้ตรงตามมาตรฐานเครื่องมือวัด แต่หากเป็นการปรับแต่งให้อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจจับสัญญาณบนอากาศยานไร้คนขับ ทั้ง 3 ลำ สามารถรายงานระดับความเข้มสัญญาณให้ตรงกันก็เพียงพอแล้ว

4. UAV reposition module

Module นี้ทำหน้าที่คำนวณหาตำแหน่งถัดไปที่ UAV จะต้องเคลื่อนที่ไป โดยจะรับข้อมูลเข้าเป็นพิกัดของ centroid ซึ่งคำนวณจาก Maximum likelihood decision module ข้างต้น จากนั้น UAV reposition module จะคำนวณหาตำแหน่งถัดไปที่ UAV แต่ละลำจะต้องเคลื่อนที่ไปตามพิกัด GPS

4.6 ทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการปฏิบัติการจริง (actual deployment)

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยทำการพัฒนาบน MATLAB และได้แบ่งแยกการทำงานระหว่างระบบควบคุมอากาศยานไร้คนขับและระบบระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตออกจากกัน เนื่องจากจะสามารถทดสอบและแก้ไขปัญหา (trouble shooting) ได้อย่างตรงจุด นอกจากนี้ ในการทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการปฏิบัติการจริงนั้น ถึงแม้ว่าจะสามารถทำการควบคุมอากาศยานไร้คนขับได้โดยอัตโนมัติ แต่ผู้ผลิต flight controller และ ผู้พัฒนา operating system สำหรับอากาศยานไร้คนขับไม่แนะนำเนื่องจากระบบทั้งหมดดังกล่าวเป็นระบบ opensource ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ระบบควบคุมโดยมนุษย์ในการทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการปฏิบัติการจริง โดยได้ติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณบริเวณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นสัญญาณ single tone ณ ความถี่ 2.4GHz และ กำหนดกำลังส่งที่ 20dBm EIRP จากนั้นจึงทำการทดสอบการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยอากาศยานไร้คนขับติดตั้งอุปกรณ์ USRP b205-mini SDR ปรับ Rx gain ที่ 38dB และสายอากาศแบบมีทิศทาง ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้



รูปที่ 71 แผนที่บริเวณที่ต้องการการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต

ในขั้นตอนแรกระบบจะแสดงแผนที่ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลือกบริเวณที่จะทำการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ ดังรูปที่ 71 เมื่อได้บริเวณโดยประมาณแล้วผู้ใช้งานสามารถเลือกจุดที่สงสัยว่าเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต แสดงดังรูปที่ 72 ทั้งนี้ตำแหน่งดังกล่าวอาจเป็นตำแหน่งที่แท้จริงของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตหรือไม่ก็ได้เนื่องจากระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับจะทำการลดการกวนการค้นหาโดยอัตโนมัติเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 72 การเลือกจุดที่สงสัยว่าเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต

เมื่อผู้ใช้ได้ทำการเลือกจุดที่สงสัยว่าเป็นตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตแล้ว ระบบจะถามระดับความสูงที่ต้องการให้อากาศยานไร้คนขับเริ่มทำการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยในที่นี้ผู้วิจัยกำหนดให้อากาศยานไร้คนขับเริ่มทำการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตที่ความสูง 700 เมตร จากนั้นระบบจะแสดงตำแหน่งต่อไปของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 700 เมตร ดังรูปที่ 73 โดยวงกลมรอบอากาศยานไร้คนขับของแต่ละลำ หมายถึงขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับนั้น



รูปที่ 73 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 700 เมตร

รูปที่ 74 แสดงถึงตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 700 เมตร โดยจะเห็นว่าอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036870 lon: 100.723842 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036870 lon: 100.727582 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.033708 lon: 100.725712

```
Input initial altitude: 700
-----
Antenna radius: 404.145188 m.
Antenna coverage: 808.290377 m.
Centroid of all UAVs lat: 14.035821 lon: 100.725709
UAV 1 lat: 14.036870 lon: 100.723842
UAV 2 lat: 14.036870 lon: 100.727582
UAV 3 lat: 14.033708 lon: 100.725712
All UAVs have coverage radius of 404.145188 m. at the height of 700.000000 m.
UAV 1 is at lat: 14.036870 lon: 100.723842 alt: 700.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) :
```

รูปที่ 74 ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 700 เมตร

เมื่ออากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ประจำตำแหน่งดังกล่าว ณ ความสูง 700 เมตรแล้ว ระบบจะทำการวัดระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ โดยในรูปที่ 75 แสดงถึง อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036870 lon: 100.723842 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -97 dB (relative gain dB ซึ่งเป็นหน่วยของอุปกรณ์ USRP SDR) อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036870 lon: 100.727582 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -102 dB และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.033708 lon: 100.725712 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -105 dB

```
UAV 1 is at lat: 14.036870 lon: 100.723842 alt: 700.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) : -97
UAV 2 is at lat: 14.036870 lon: 100.727582 alt: 700.000000
Input UAV 2 signal reading (dB) : -102
UAV 3 is at lat: 14.033708 lon: 100.725712 alt: 700.000000
Input UAV 3 signal reading (dB) : -105
SIGNAL DETECTED IN SECTOR 1

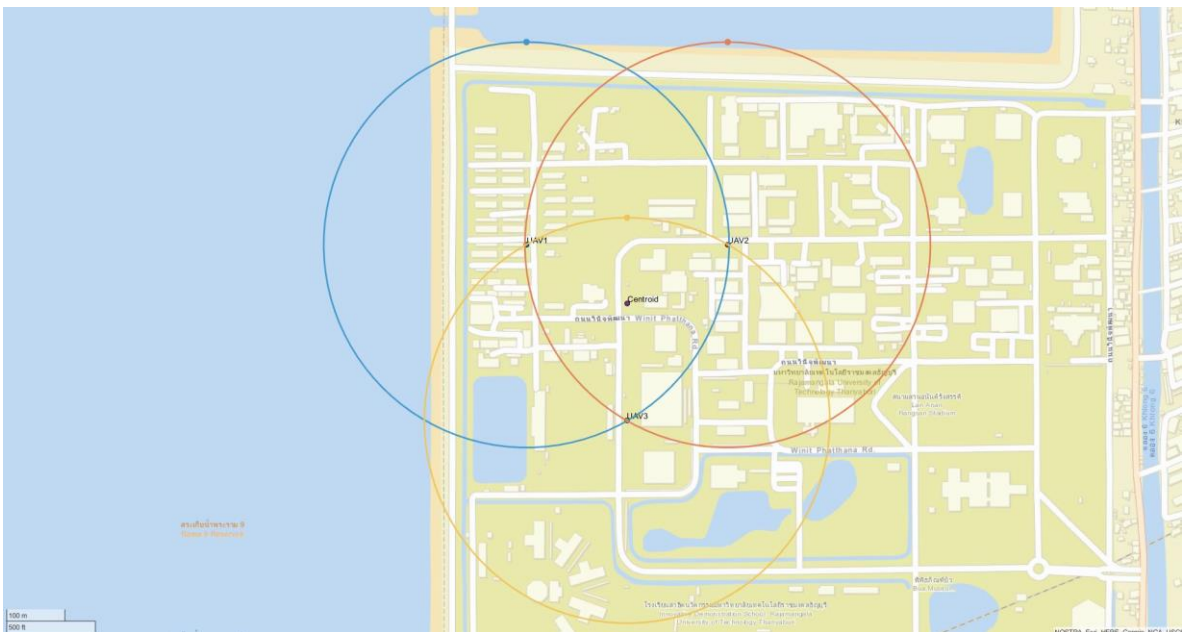
NEXT Centroid of all UAVs lat: 14.036871 lon: 100.723842
NEXT UAV 1 lat: 14.037774 lon: 100.722241
NEXT UAV 2 lat: 14.037774 lon: 100.725444
NEXT UAV 3 lat: 14.035063 lon: 100.723842
NEXT All UAVs have coverage radius of 346.410162 m. at the height of 600.000000 m.
----- NEXT ROUND -----
```

รูปที่ 75 ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 700 เมตร

รูปที่ 75 ระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ ณ ความสูง 700 เมตรและตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (600 เมตร)

จากนั้นระบบจะทำการประมวลผลโดยสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดถูกตรวจจับโดยอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะอยู่ภายใน

ขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 ด้วยเหตุนี้ ระบบจึงแสดงเส้น centroid มายังตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 แล้วทำการคำนวณตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (300 เมตร ในตัวอย่างนี้) โดยจะเห็นว่า อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037774 lon: 100.722241 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037774 lon: 100.725444 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.035063 lon: 100.723842 จากนั้นระบบจะแสดงตำแหน่งต่อไปของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (600 เมตร) ดังรูปที่ 76 โดยวงกลมรอบอากาศยานไร้คนขับของแต่ละลำ หมายถึงขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับนั้น



รูปที่ 76 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 600 เมตร

รูปที่ 77 แสดงถึงตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 600 เมตร โดยจะเห็นว่า อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037777 lon: 100.722238 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037776 lon: 100.725441 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.035066 lon: 100.723840

```
Antenna radius: 346.410162 m.  
Antenna coverage: 692.820323 m.  
Centroid of all UAVs lat: 14.036871 lon: 100.723842  
UAV 1 lat: 14.037777 lon: 100.722238  
UAV 2 lat: 14.037776 lon: 100.725441  
UAV 3 lat: 14.035066 lon: 100.723840  
All UAVs have coverage radius of 346.410162 m. at the height of 600.000000 m.  
  
UAV 1 is at lat: 14.037777 lon: 100.722238 alt: 600.000000  
Input UAV 1 signal reading (dB) :
```

รูปที่ 77 ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 600 เมตร

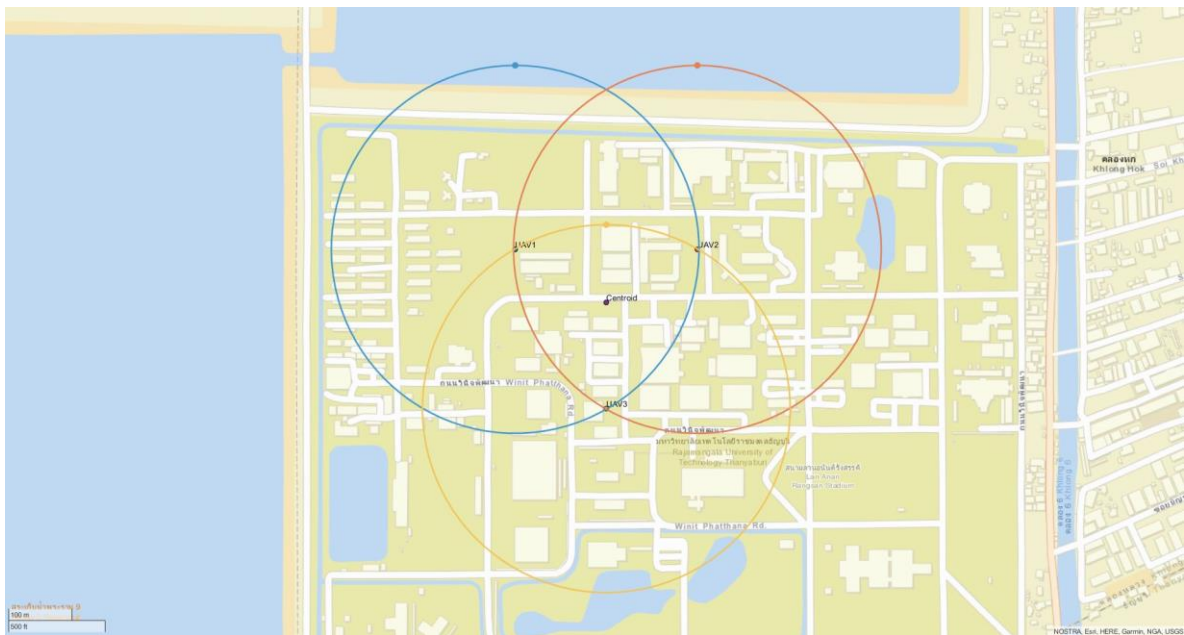
เมื่ออากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ประจำตำแหน่งดังกล่าว ณ ความสูง 600 เมตรแล้ว ระบบจะทำการวัดระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ โดยในรูปที่ 78 แสดงถึง อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037777 lon: 100.722238 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -93 dB อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037776 lon: 100.725441 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -90 dB และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.035066 lon: 100.723840 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -97 dB

จากนั้นระบบจะทำการประมวลผลโดยสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดถูกตรวจจับโดยอากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะอยู่ภายในขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 ด้วยเหตุนี้ ระบบจึงแสดงเลื่อน centroid มายังตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 แล้วทำการคำนวณตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (600 เมตร ในตัวอย่างนี้) โดยจะเห็นว่า อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ lat: 14.038527 lon: 100.724108 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.038527 lon: 100.726774 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036267 lon: 100.725441 จากนั้นระบบจะแสดงตำแหน่งต่อไปของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (500 เมตร) ดังรูปที่ 79 โดยวงกลมรอบอากาศยานไร้คนขับของแต่ละลำ หมายถึงขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับนั้น


```
UAV 1 is at lat: 14.037777 lon: 100.722238 alt: 600.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) : -93
UAV 2 is at lat: 14.037776 lon: 100.725441 alt: 600.000000
Input UAV 2 signal reading (dB) : -90
UAV 3 is at lat: 14.035066 lon: 100.723840 alt: 600.000000
Input UAV 3 signal reading (dB) : -97
SIGNAL DETECTED IN SECTOR 2
```

```
NEXT Centroid of all UAVs lat: 14.037777 lon: 100.725441
NEXT UAV 1 lat: 14.038527 lon: 100.724108
NEXT UAV 2 lat: 14.038527 lon: 100.726774
NEXT UAV 3 lat: 14.036267 lon: 100.725441
NEXT All UAVs have coverage radius of 288.675135 m. at the height of 500.000000 m.
----- NEXT ROUND -----
```

รูปที่ 78 ระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ ณ ความสูง 600 เมตร และตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (500 เมตร)



รูปที่ 79 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 500 เมตร

รูปที่ 80 แสดงถึงตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 500 เมตร โดยจะเห็นว่าอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.038530 lon: 100.724109 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง 14.038530 lon: 100.726775 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง 14.036271 lon: 100.725442

```
Antenna radius: 288.675135 m.  
Antenna coverage: 577.350269 m.  
Centroid of all UAVs lat: 14.037777 lon: 100.725441  
UAV 1 lat: 14.038530 lon: 100.724109  
UAV 2 lat: 14.038530 lon: 100.726775  
UAV 3 lat: 14.036271 lon: 100.725442  
All UAVs have coverage radius of 288.675135 m. at the height of 500.000000 m.  
  
UAV 1 is at lat: 14.038530 lon: 100.724109 alt: 500.000000  
Input UAV 1 signal reading (dB) :
```

รูปที่ 80 ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 500 เมตร

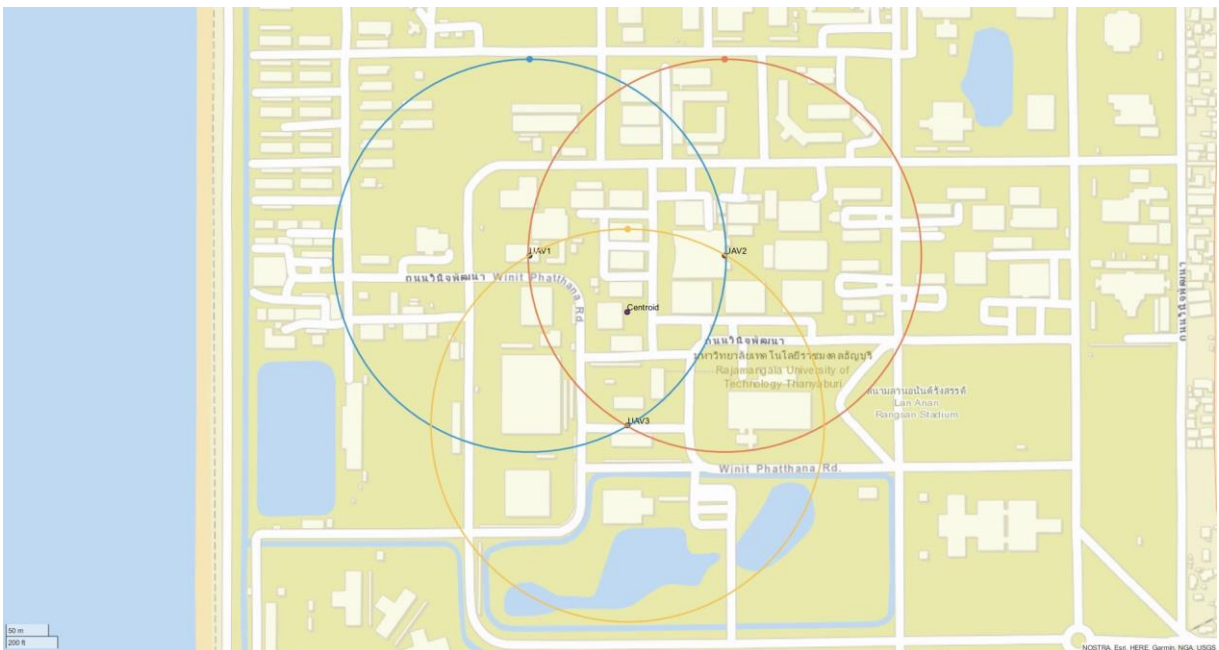
เมื่ออากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ประจำตำแหน่งดังกล่าว ณ ความสูง 500 เมตรแล้ว ระบบจะทำการวัดระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ โดยในรูปที่ 81 แสดงถึง อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.038527 lon: 100.724108 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -90 dB อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.038527 lon: 100.726774 ตรวจจับระดับสัญญาณได้ -94 dB และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036267 lon: 100.725441 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -87 dB

จากนั้นระบบจะทำการประมวลผลโดยสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดถูกตรวจจับโดยอากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะอยู่ภายในขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 ด้วยเหตุนี้ ระบบจึงแสดงเลื่อน centroid มายังตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 แล้วทำการคำนวณตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (400 เมตร ในตัวอย่างนี้) โดยจะเห็นว่า อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ lat: 14.038527 lon: 100.724108 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.038527 lon: 100.726774 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036267 lon: 100.725441 จากนั้นระบบจะแสดงตำแหน่งต่อไปของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (4500 เมตร) ดังรูปที่ 82 โดยวงกลมรอบอากาศยานไร้คนขับของแต่ละลำ หมายถึงขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับนั้น


```
UAV 1 is at lat: 14.038530 lon: 100.724109 alt: 500.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) : -90
UAV 2 is at lat: 14.038530 lon: 100.726775 alt: 500.000000
Input UAV 2 signal reading (dB) : -94
UAV 3 is at lat: 14.036271 lon: 100.725442 alt: 500.000000
Input UAV 3 signal reading (dB) : -87
SIGNAL DETECTED IN SECTOR 3
```

```
NEXT Centroid of all UAVs lat: 14.036271 lon: 100.725442
NEXT UAV 1 lat: 14.036876 lon: 100.724377
NEXT UAV 2 lat: 14.036876 lon: 100.726506
NEXT UAV 3 lat: 14.035069 lon: 100.725442
NEXT All UAVs have coverage radius of 230.940108 m. at the height of 400.000000 m.
----- NEXT ROUND -----
```

รูปที่ 81 ระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ ณ ความสูง 500 เมตรและตำแหน่ง และขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (400 เมตร)



รูปที่ 82 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 400 เมตร

รูปที่ 83 แสดงถึงตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 400 เมตร โดยจะเห็นว่าอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036871 lon: 100.724372 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036871 lon: 100.726510 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.035064 lon: 100.725446



กทปส



```

Antenna radius: 230.940108 m.
Antenna coverage: 461.880215 m.
Centroid of all UAVs lat: 14.036271 lon: 100.725442
UAV 1 lat: 14.036871 lon: 100.724372
UAV 2 lat: 14.036871 lon: 100.726510
UAV 3 lat: 14.035064 lon: 100.725446
All UAVs have coverage radius of 230.940108 m. at the height of 400.000000 m.

UAV 1 is at lat: 14.036871 lon: 100.724372 alt: 400.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) :

```

รูปที่ 83 ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 400 เมตร

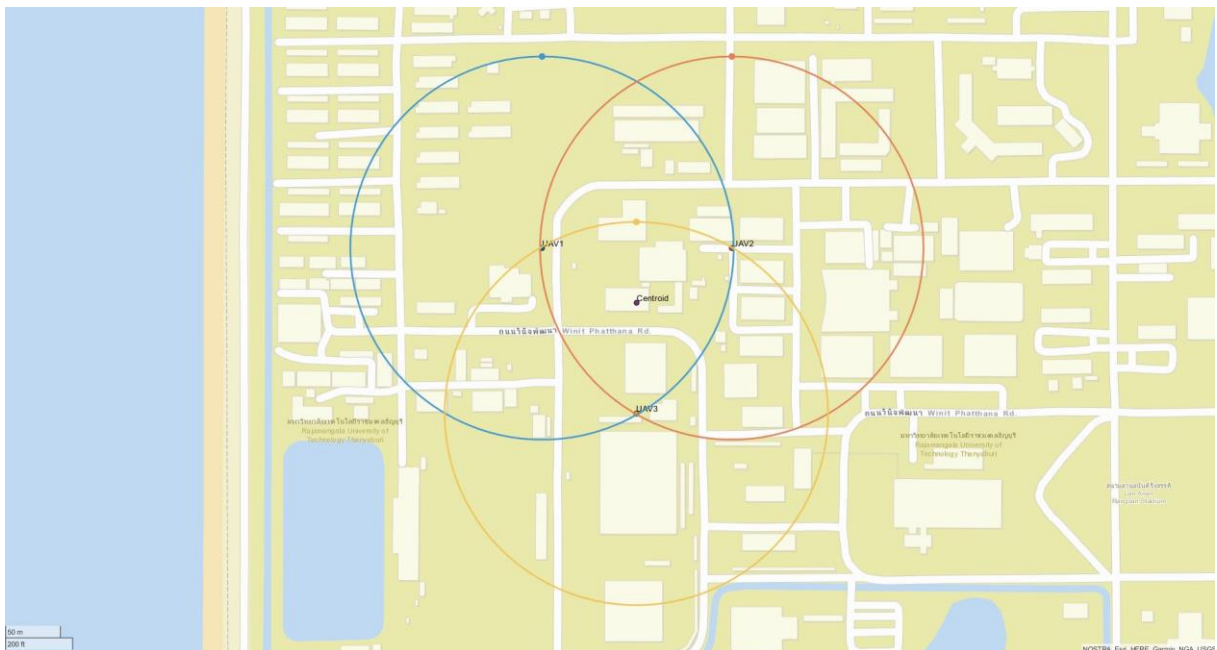
เมื่ออากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ประจำตำแหน่งดังกล่าว ณ ความสูง 400 เมตรแล้ว ระบบจะทำการวัดระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ โดยในรูปที่ 84 แสดงถึง อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง ตำแหน่ง lat: 14.036871 lon: 100.724372 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -80 dB อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036871 lon: 100.726510 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -86 dB และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.035064 lon: 100.725446 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -85 dB

จากนั้นระบบจะทำการประมวลผลโดยสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดถูกตรวจจับโดยอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะอยู่ภายในขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 ด้วยเหตุนี้ ระบบจึงแสดงเลื่อน centroid มายังตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 แล้วทำการคำนวณตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (300 เมตร ในตัวอย่างนี้) โดยจะเห็นว่า อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ lat: 14.037323 lon: 100.723567 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037323 lon: 100.725177 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.035968 lon: 100.724372 จากนั้นระบบจะแสดงตำแหน่งต่อไปของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (300 เมตร) ดังรูปที่ 85 โดยวงกลมรอบอากาศยานไร้คนขับของแต่ละลำ หมายถึงขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับนั้น

```
UAV 1 is at lat: 14.036871 lon: 100.724372 alt: 400.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) : -80
UAV 2 is at lat: 14.036871 lon: 100.726510 alt: 400.000000
Input UAV 2 signal reading (dB) : -86
UAV 3 is at lat: 14.035064 lon: 100.725446 alt: 400.000000
Input UAV 3 signal reading (dB) : -85
SIGNAL DETECTED IN SECTOR 1
```

```
NEXT Centroid of all UAVs lat: 14.036871 lon: 100.724372
NEXT UAV 1 lat: 14.037323 lon: 100.723567
NEXT UAV 2 lat: 14.037323 lon: 100.725177
NEXT UAV 3 lat: 14.035968 lon: 100.724372
NEXT All UAVs have coverage radius of 173.205081 m. at the height of 300.000000 m.
----- NEXT ROUND -----
```

รูปที่ 84 ระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ ณ ความสูง 400 เมตรและตำแหน่ง และขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (300 เมตร)



รูปที่ 85 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 300 เมตร

รูปที่ 86 แสดงถึงตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 300 เมตร โดยจะเห็นว่าอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037319 lon: 100.723574 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ lat: 14.037319 lon: 100.725175 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ lat: 14.035964 lon: 100.724370

```
Antenna radius: 173.205081 m.  
Antenna coverage: 346.410162 m.  
Centroid of all UAVs lat: 14.036871 lon: 100.724372  
UAV 1 lat: 14.037319 lon: 100.723574  
UAV 2 lat: 14.037319 lon: 100.725175  
UAV 3 lat: 14.035964 lon: 100.724370  
All UAVs have coverage radius of 173.205081 m. at the height of 300.000000 m.  
  
UAV 1 is at lat: 14.037319 lon: 100.723574 alt: 300.000000  
Input UAV 1 signal reading (dB) : |
```

รูปที่ 86 ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 300 เมตร

เมื่ออากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ประจำตำแหน่งดังกล่าว ณ ความสูง 300 เมตรแล้ว ระบบจะทำการวัดระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ โดยในรูปที่ 87 แสดงถึง อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037319 lon: 100.723574 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -74 dB อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ lat: 14.037319 lon: 100.725175 และ โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -69 dB อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ lat: 14.035964 lon: 100.724370 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -71 dB

จากนั้นระบบจะทำการประมวลผลโดยสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดถูกตรวจจับโดยอากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะอยู่ภายในขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 ด้วยเหตุนี้ ระบบจึงแสดงเลื่อน centroid มายังตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 แล้วทำการคำนวณตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (200 เมตร ในตัวอย่างนี้) โดยจะเห็นว่าอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ lat: 14.037618 lon: 100.724639 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037623 lon: 100.725714 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036720 lon: 100.725177 จากนั้นระบบจะแสดงตำแหน่งต่อไปของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (200 เมตร) ดังรูปที่ 88 โดยวงกลมรอบอากาศยานไร้คนขับของแต่ละลำ หมายถึงขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับนั้น

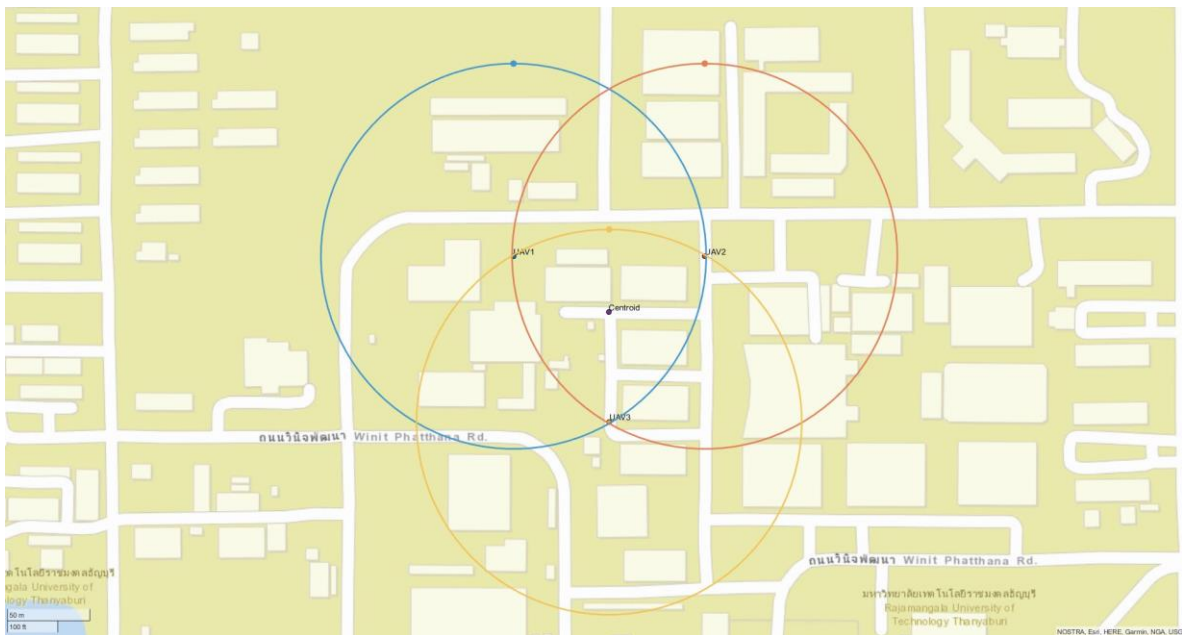

```

UAV 1 is at lat: 14.037319 lon: 100.723574 alt: 300.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) : -74
UAV 2 is at lat: 14.037319 lon: 100.725175 alt: 300.000000
Input UAV 2 signal reading (dB) : -69
UAV 3 is at lat: 14.035964 lon: 100.724370 alt: 300.000000
Input UAV 3 signal reading (dB) : -71
SIGNAL DETECTED IN SECTOR 2

NEXT Centroid of all UAVs lat: 14.037319 lon: 100.725175
NEXT UAV 1 lat: 14.037618 lon: 100.724639
NEXT UAV 2 lat: 14.037618 lon: 100.725712
NEXT UAV 3 lat: 14.036714 lon: 100.725175
NEXT All UAVs have coverage radius of 115.470054 m. at the height of 200.000000 m.
----- NEXT ROUND -----

```

รูปที่ 87 ระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ ณ ความสูง 300 เมตรและตำแหน่ง และขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (200 เมตร)



รูปที่ 88 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 200 เมตร

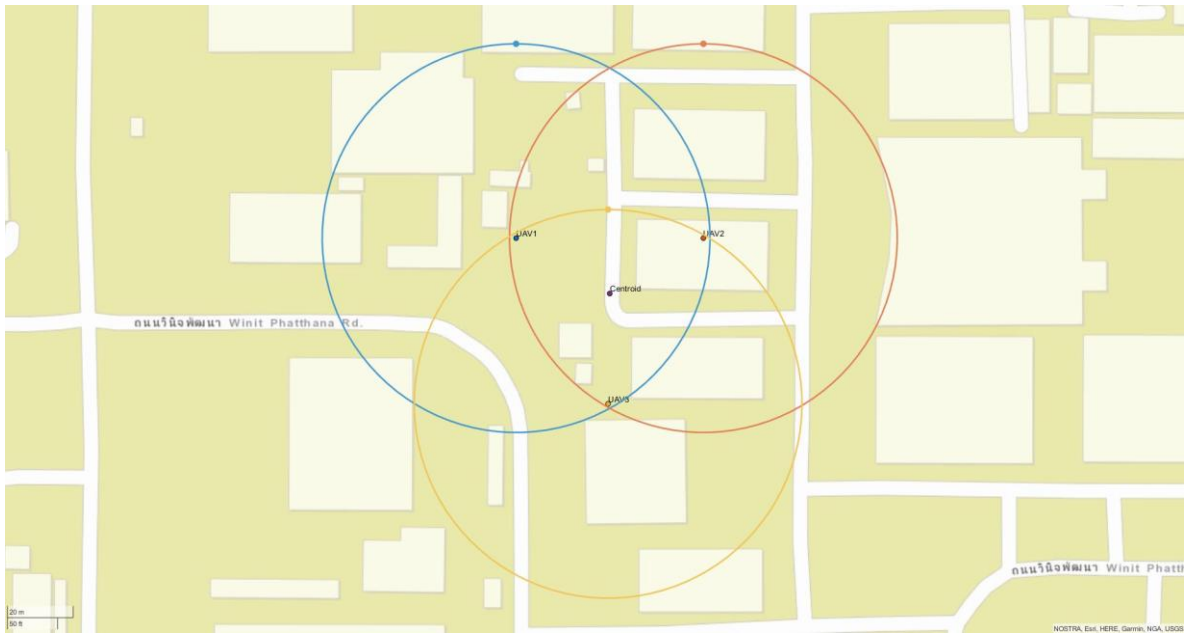
```
UAV 1 is at lat: 14.037623 lon: 100.724640 alt: 200.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) : -66
UAV 2 is at lat: 14.037623 lon: 100.725714 alt: 200.000000
Input UAV 2 signal reading (dB) : -67
UAV 3 is at lat: 14.036720 lon: 100.725177 alt: 200.000000
Input UAV 3 signal reading (dB) : -63
SIGNAL DETECTED IN SECTOR 3

NEXT Centroid of all UAVs lat: 14.036720 lon: 100.725177
NEXT UAV 1 lat: 14.036873 lon: 100.724908
NEXT UAV 2 lat: 14.036873 lon: 100.725445
NEXT UAV 3 lat: 14.036421 lon: 100.725177
NEXT All UAVs have coverage radius of 57.735027 m. at the height of 100.000000 m.
----- NEXT ROUND -----
```

รูปที่ 89 ระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ ณ ความสูง 200 เมตรและตำแหน่ง และขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (100 เมตร)

เมื่ออากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ประจำตำแหน่งดังกล่าว ณ ความสูง 200 เมตรแล้ว ระบบจะทำการวัดระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ โดยในรูปที่ 89 แสดงถึง อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.037623 lon: 100.724640 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -66 dB อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ lat: 14.037623 lon: 100.725714 และ โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -67 dB อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ lat: 14.036720 lon: 100.725177 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -63 dB

จากนั้นระบบจะทำการประมวลผลโดยสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดถูกตรวจจับโดยอากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะอยู่ภายในขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 ด้วยเหตุนี้ ระบบจึงแสดงเลื่อน centroid มายังตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 แล้วทำการคำนวณตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (100 เมตร ในตัวอย่างนี้) โดยจะเห็นว่า อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ lat: 14.036873 lon: 100.724908 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036873 lon: 100.725445 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036421 lon: 100.725177 จากนั้นระบบจะแสดงตำแหน่งต่อไปของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (100 เมตร) ดังรูปที่ 90 โดยวงกลมรอบอากาศยานไร้คนขับของแต่ละลำ หมายถึงขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับนั้น



รูปที่ 90 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 100 เมตร

```
Antenna radius: 57.735027 m.  
Antenna coverage: 115.470054 m.  
Centroid of all UAVs lat: 14.036720 lon: 100.725177  
UAV 1 lat: 14.036871 lon: 100.724913  
UAV 2 lat: 14.036871 lon: 100.725441  
UAV 3 lat: 14.036419 lon: 100.725172  
All UAVs have coverage radius of 57.735027 m. at the height of 100.000000 m.  
  
UAV 1 is at lat: 14.036871 lon: 100.724913 alt: 100.000000  
Input UAV 1 signal reading (dB) : |
```

รูปที่ 91 ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 100 เมตร

รูปที่ 91 แสดงถึงตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 100 เมตร โดยจะเห็นว่า
อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036871 lon: 100.724913 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2
อยู่ ณ lat: 14.036871 lon: 100.725441 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ lat: 14.036419 lon:
100.725172

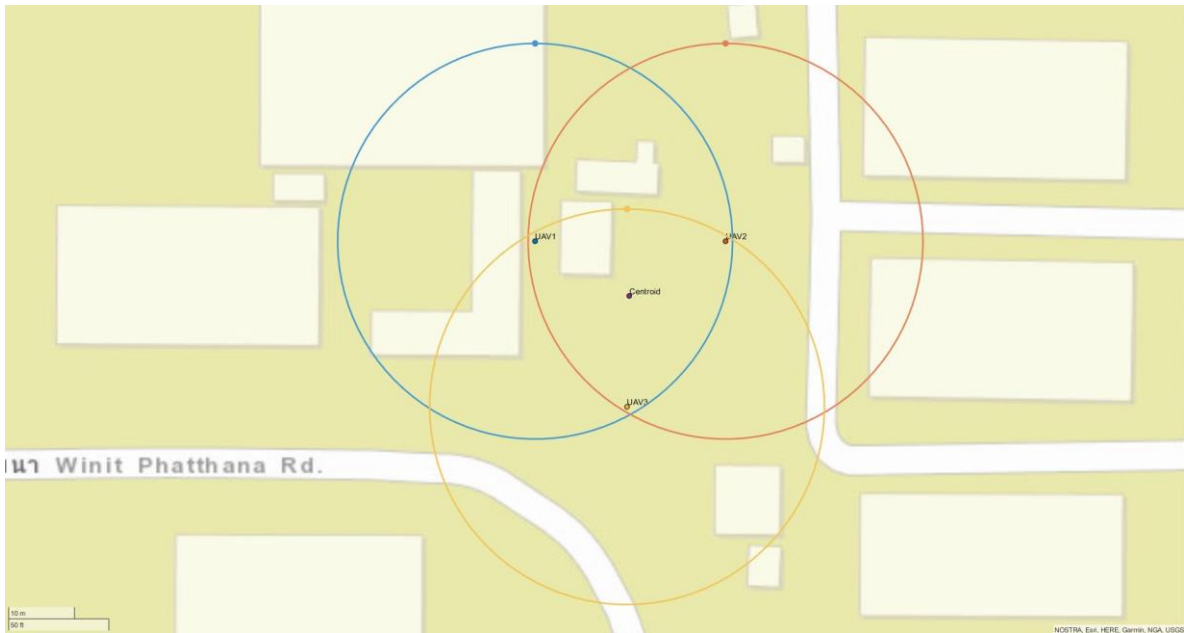
```
UAV 1 is at lat: 14.036871 lon: 100.724913 alt: 100.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) : -46
UAV 2 is at lat: 14.036871 lon: 100.725441 alt: 100.000000
Input UAV 2 signal reading (dB) : -50
UAV 3 is at lat: 14.036419 lon: 100.725172 alt: 100.000000
Input UAV 3 signal reading (dB) : -51
SIGNAL DETECTED IN SECTOR 1
```

```
NEXT Centroid of all UAVs lat: 14.036871 lon: 100.724913
NEXT UAV 1 lat: 14.036943 lon: 100.724783
NEXT UAV 2 lat: 14.036943 lon: 100.725043
NEXT UAV 3 lat: 14.036717 lon: 100.724913
NEXT All UAVs have coverage radius of 28.867513 m. at the height of 50.000000 m.
----- NEXT ROUND -----
```

รูปที่ 92 ระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ ณ ความสูง 100 เมตรและตำแหน่ง และขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (50 เมตร)

เมื่ออากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ประจำตำแหน่งดังกล่าว ณ ความสูง 100 เมตรแล้ว ระบบจะทำการ วัดระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ โดยในรูปที่ 92 แสดงถึง อากาศยานไร้ คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036871 lon: 100.724913 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -46 dB อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ lat: 14.036871 lon: 100.725441 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -50 dB และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ lat: 14.036419 lon: 100.725172 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -51 dB

จากนั้นระบบจะทำการประมวลผลโดยสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดถูกตรวจจับโดยอากาศยานไร้คนขับลำ ที่ 1 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะอยู่ภายใน ขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 ด้วย เหตุนี้ ระบบจึงแสดงเลื่อน centroid มายังตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 แล้วทำการคำนวณ ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (50 เมตร ในตัวอย่างนี้) โดยจะเห็นว่า อากาศยาน ไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ lat: 14.036943 lon: 100.724783 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036943 lon: 100.725043 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036717 lon: 100.724913 จากนั้นระบบจะแสดงตำแหน่งต่อไปของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูงถัดไป (50 เมตร) ดังรูปที่ 93 โดยวงกลมรอบอากาศยานไร้คนขับของแต่ละลำ หมายถึงขอบเขตในการตรวจจับและระบุ ตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับนั้น



รูปที่ 93 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 50 เมตร

รูปที่ 94 แสดงถึงตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 50 เมตร โดยจะเห็นว่า
อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036945 lon: 100.724780 อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2
อยู่ ณ lat: 14.036945 lon: 100.725049 และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ lat: 14.036719 lon:
100.724910

```
Antenna radius: 28.867513 m.  
Antenna coverage: 57.735027 m.  
Centroid of all UAVs lat: 14.036871 lon: 100.724913  
UAV 1 lat: 14.036945 lon: 100.724780  
UAV 2 lat: 14.036945 lon: 100.725049  
UAV 3 lat: 14.036719 lon: 100.724910  
All UAVs have coverage radius of 28.867513 m. at the height of 50.000000 m.  
  
UAV 1 is at lat: 14.036945 lon: 100.724780 alt: 50.000000  
Input UAV 1 signal reading (dB) :
```

รูปที่ 94 ตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 50 เมตร

```
UAV 1 is at lat: 14.036945 lon: 100.724780 alt: 50.000000
Input UAV 1 signal reading (dB) : -40
UAV 2 is at lat: 14.036945 lon: 100.725049 alt: 50.000000
Input UAV 2 signal reading (dB) : -43
UAV 3 is at lat: 14.036719 lon: 100.724910 alt: 50.000000
Input UAV 3 signal reading (dB) : -44
SIGNAL DETECTED IN SECTOR 1

NEXT Centroid of all UAVs lat: 14.036945 lon: 100.724780
NEXT UAV 1 lat: 14.036945 lon: 100.724780
NEXT UAV 2 lat: 14.036945 lon: 100.724780
NEXT UAV 3 lat: 14.036945 lon: 100.724780
NEXT All UAVs have coverage radius of 0.000000 m. at the height of 0.000000 m.
----- NEXT ROUND -----
```

รูปที่ 95 ระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ ณ ความสูง 50 เมตรและสิ้นสุดการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ

เมื่ออากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ประจำตำแหน่งดังกล่าว ณ ความสูง 50 เมตรแล้ว ระบบจะทำการวัดระดับสัญญาณที่ได้ตรวจจับจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละลำ โดยในรูปที่ 95 แสดงถึง อากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง lat: 14.036945 lon: 100.724780 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -40 dB อากาศยานไร้คนขับลำที่ 2 อยู่ ณ lat: 14.036945 lon: 100.725049 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -43 dB และ อากาศยานไร้คนขับลำที่ 3 อยู่ ณ lat: 14.036719 lon: 100.724910 โดยตรวจจับระดับสัญญาณได้ -44 dB

จากนั้นระบบจะทำการประมวลผลโดยสัญญาณที่มีขนาดสูงสุดถูกตรวจจับโดยอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะอยู่ภายในขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1 และสิ้นสุดการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ โดยตำแหน่งของแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตจะอยู่ในรัศมีการตรวจจับของอากาศยานไร้คนขับลำที่ 1

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับเพิ่มเติม โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้

- ทดสอบที่ระยะความสูง 700 เมตร 600 เมตร 500 เมตร 400 เมตร 300 เมตร 200 เมตร และ 100 เมตร พร้อมระบุความแรงของสัญญาณที่ตรวจพบ
- ทดสอบช่วงความถี่ 1.5GHz 2.4GHz และ 5.8GHz พร้อมแสดงผลในรูปแบบ spectrum และ waterfall

ผู้วิจัยได้ทำการจำลองแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ณ ช่วงความถี่ 1.5GHz 2.4GHz และ 5.8GHz โดยใช้สัญญาณ single tone และ กำหนดกำลังส่ง 20dBm EIRP ในทุกช่วงความถี่ ภายใต้ขอบเขตของประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ด้วยอุปกรณ์ USRP b205-mini SDR โดยมีรายละเอียดดังนี้

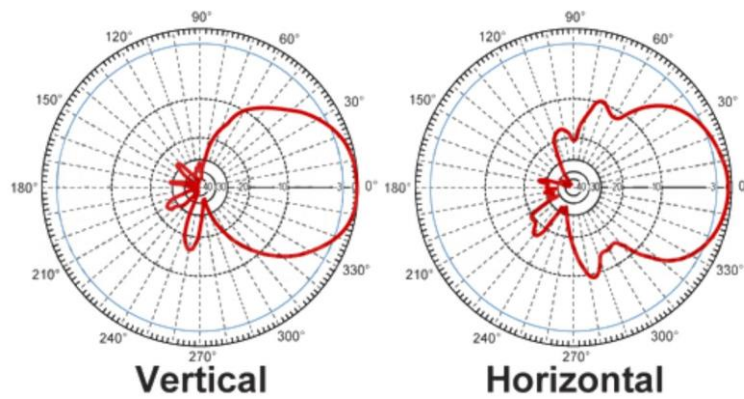
- Xilinx Spartan-6 XC6SLX150 FPGA
- Frequency range: 70 MHz - 6 GHz
- 76 dB Rx gain
- 89.8 dB Tx gain
- หน่วยวัดความเข้มของสัญญาณ relative gain dB ซึ่งเป็นหน่วยของอุปกรณ์ USRP SDR

สายอากาศที่ถูกติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณเป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง (directional antenna) ในโครงการนี้ผู้วิจัยใช้สายอากาศแบบมีทิศทางจำนวน 2 ชุด โดยสายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 1 ใช้สำหรับรับความถี่ในช่วง 5.8 GHz ชุดที่ 2 ใช้สำหรับรับความถี่ในช่วง 2.4 GHz และสายอากาศแบบมีทิศทาง

สายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 1 ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2458-08LP-NF 8dBi log periodic ใช้สำหรับรับความถี่ในช่วง 5.8 GHz แสดงในรูปแบบที่ 96 โดยมี radiation pattern แสดงดังรูปที่ 97 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าในช่วง 5.8 GHz มี vertical beamwidth มีขนาดประมาณ 60 องศา และ horizontal beamwidth มีขนาดประมาณ 80 องศา มีน้ำหนักประมาณ 0.6 กิโลกรัม และมีขนาด 162 มิลลิเมตร x 90 มิลลิเมตร x 33 มิลลิเมตร



รูปที่ 96 สายอากาศแบบมีทิศทางยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2458-08LP-NF

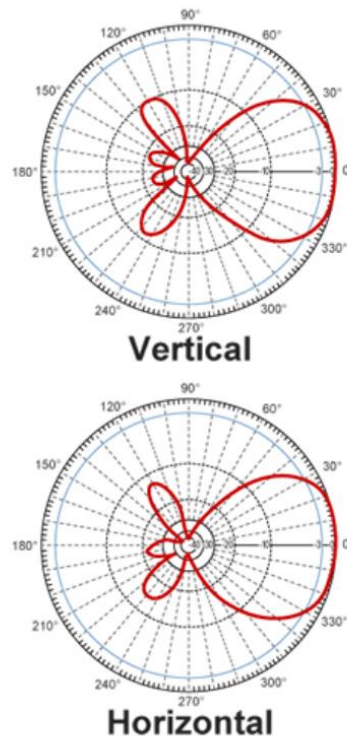


รูปที่ 97 radiation pattern ของสายอากาศแบบมีทิศทางยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2458-08LP-NF

สายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 2 ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y ใช้สำหรับรับความถี่ ในช่วง 2.4 GHz แสดงในรูปที่ 98 โดยมี radiation pattern แสดงดังรูปที่ 99 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าในช่วง 2.4 GHz ทั้ง vertical และ horizontal beamwidth มีขนาดประมาณ 60 องศาเช่นกัน มีน้ำหนักประมาณ 210 กรัม และมีขนาดทรงกระบอกยาว 152 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร



รูปที่ 98 สายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 2 ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y



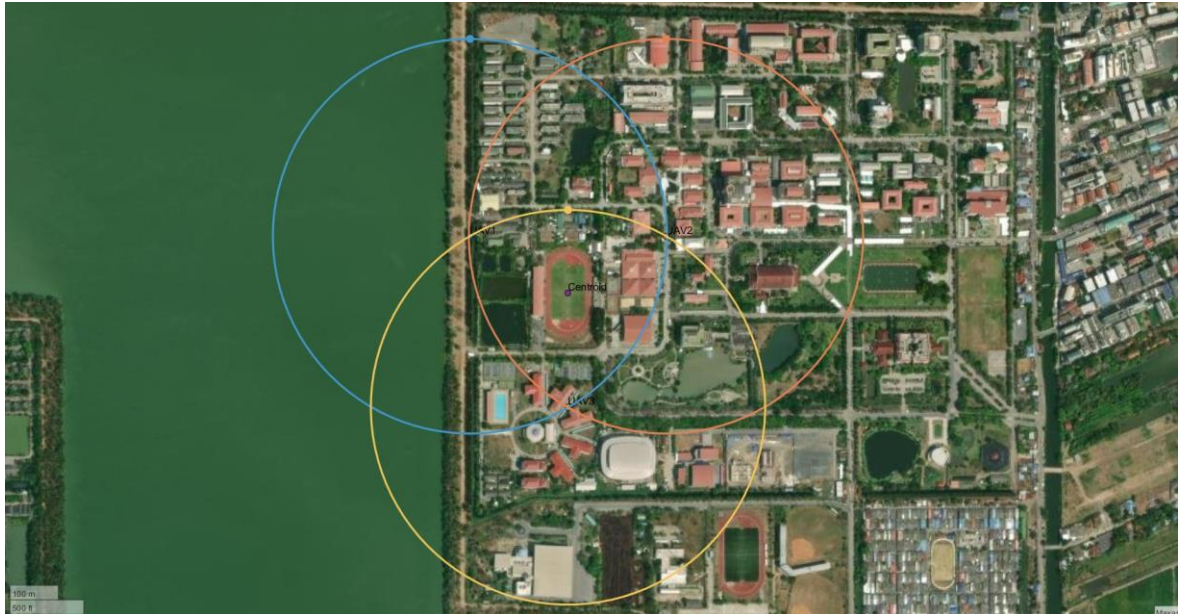
รูปที่ 99 radiation pattern ของสายอากาศแบบมีทิศทาง ชุดที่ 2 ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y

4.6.1 การทดลองระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ ช่วงความถี่ 2.4GHz

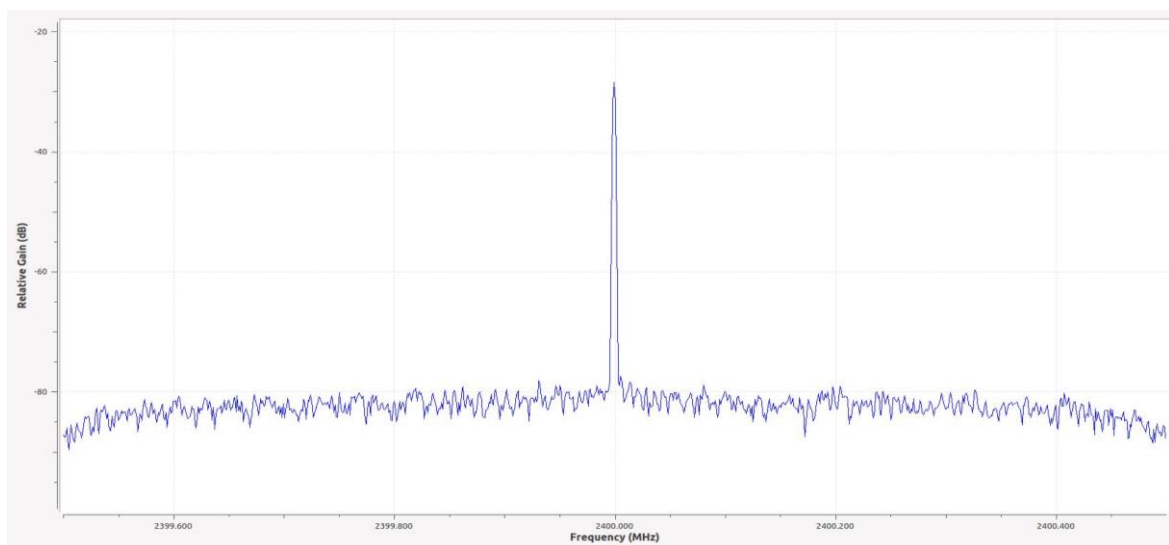
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยได้ติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณบริเวณตรงกลางสนามฟุตบอล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นสัญญาณ single tone ณ ความถี่ 2.4GHz และ กำหนดกำลังส่งที่ 20dBm EIRP จากนั้นจึงทำการทดสอบการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยอากาศยานไร้คนขับติดตั้งอุปกรณ์ USRP b205-mini SDR ปรับ Rx gain ที่ 76dB และสายอากาศแบบมีทิศทาง ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y ณ ความสูงต่อไปนี้

ความสูง 700 เมตร

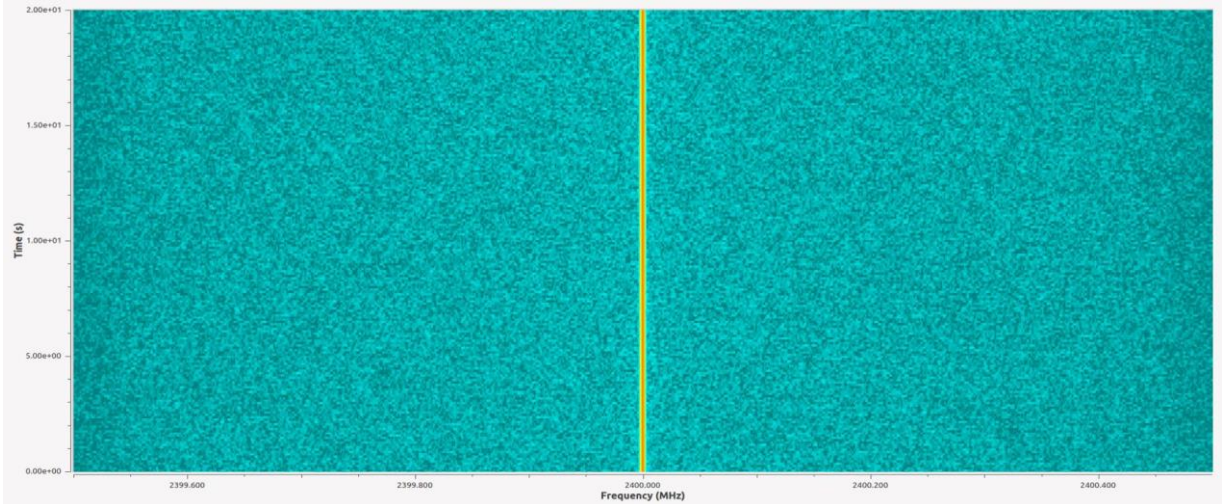
Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-28.5	-29	-29	UAV1	ถูกต้อง



รูปที่ 100 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 700 เมตร



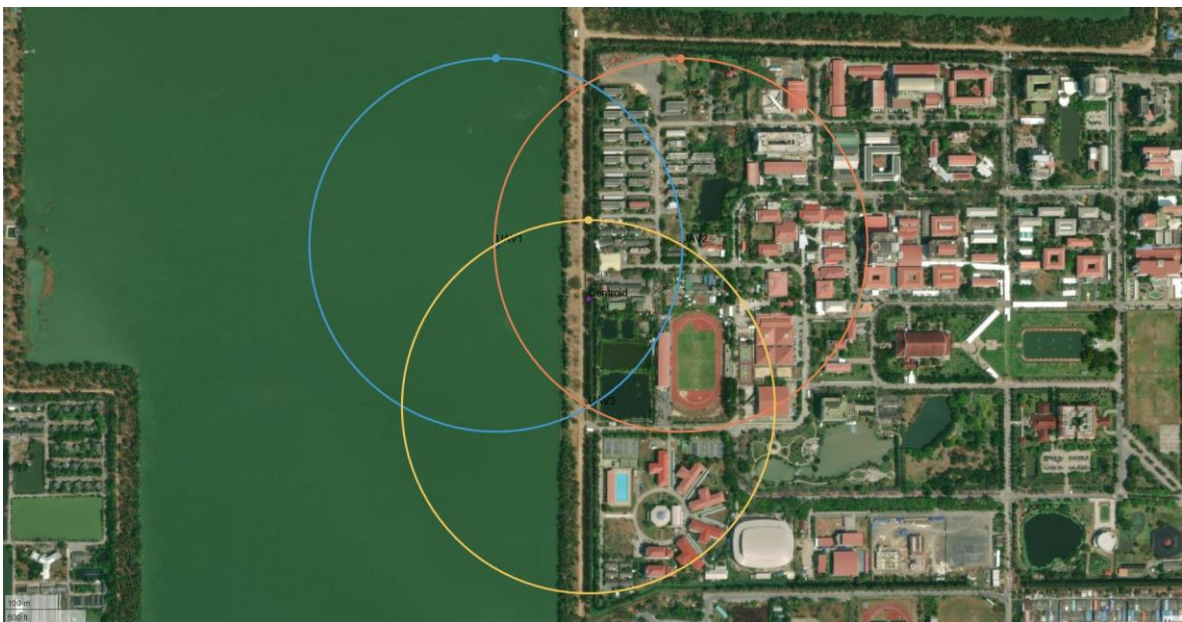
รูปที่ 101 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 700 เมตร



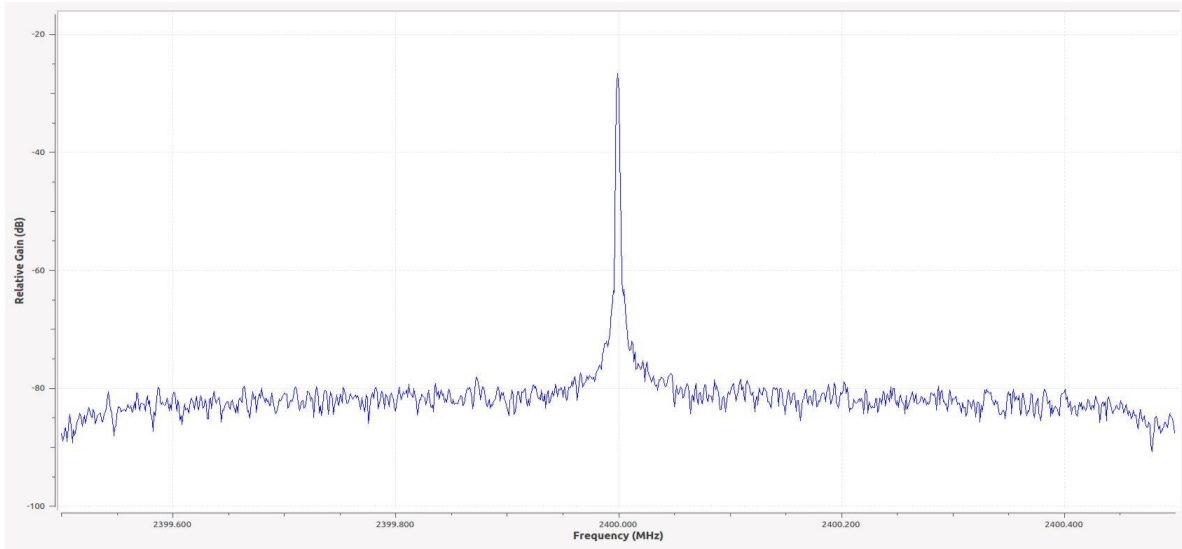
รูปที่ 102 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 700 เมตร

ความสูง 600 เมตร

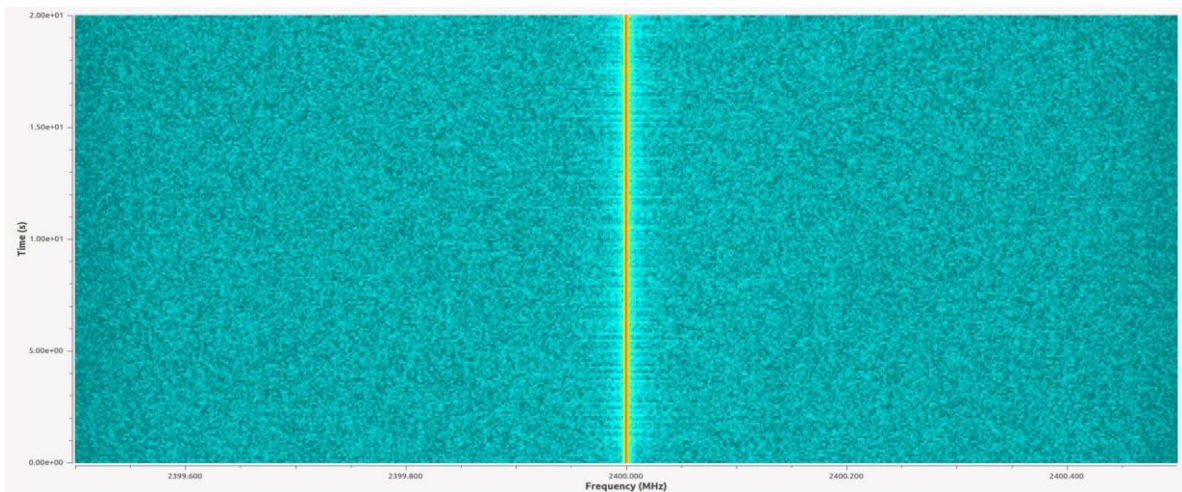
Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-57	-27.5	-26.5	UAV3	ถูกต้อง



รูปที่ 103 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 600 เมตร



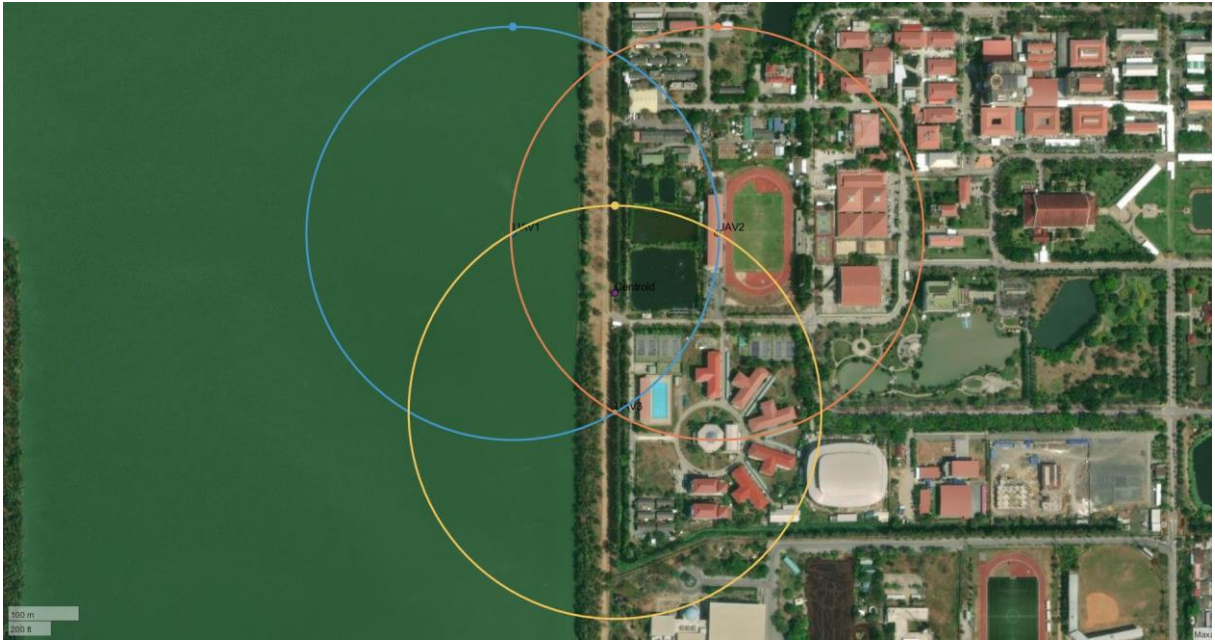
รูปที่ 104 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV3 ณ ความสูง 600 เมตร



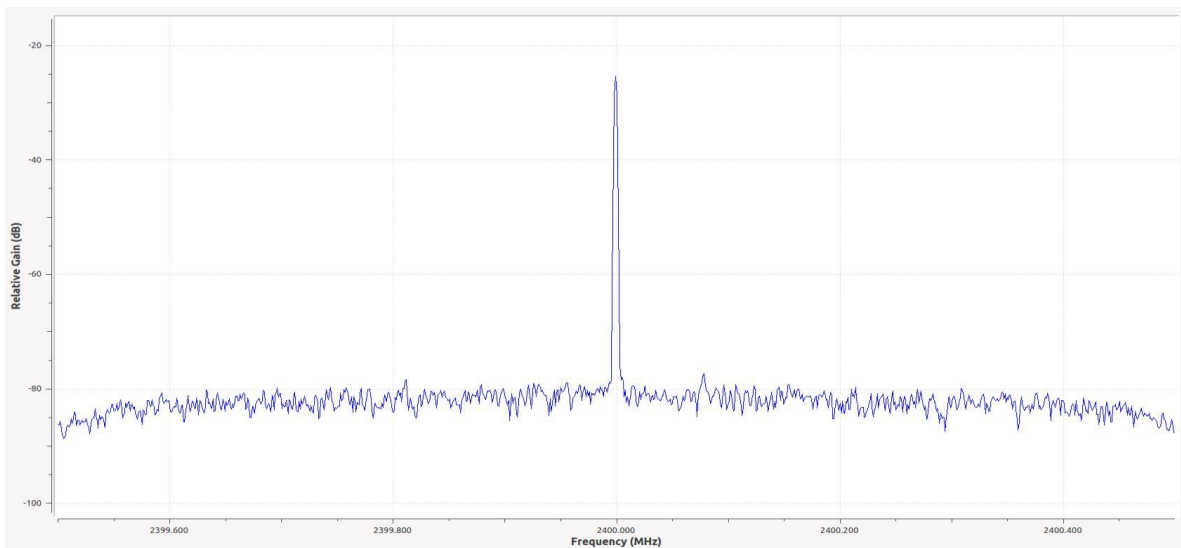
รูปที่ 105 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 600 เมตร

ความสูง 500 เมตร

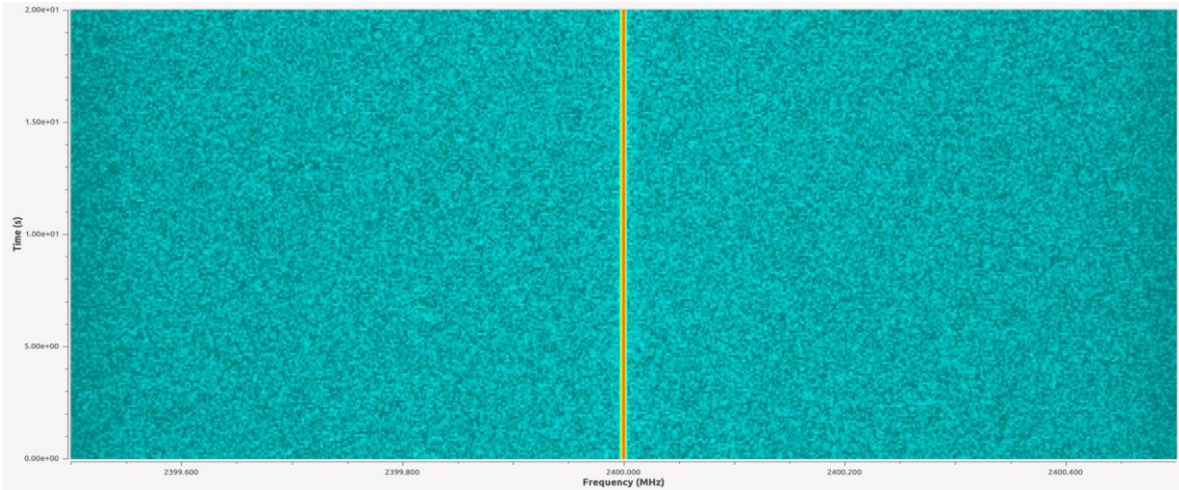
Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-48	-25.5	-49	UAV2	ถูกต้อง



รูปที่ 106 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 500 เมตร



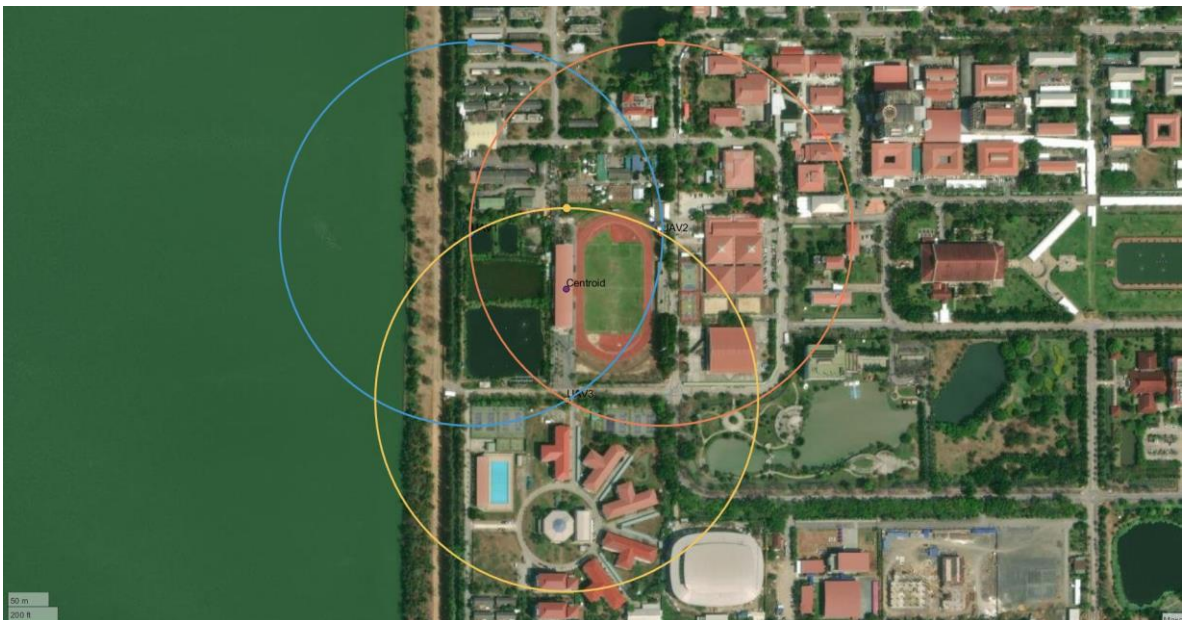
รูปที่ 107 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 500 เมตร



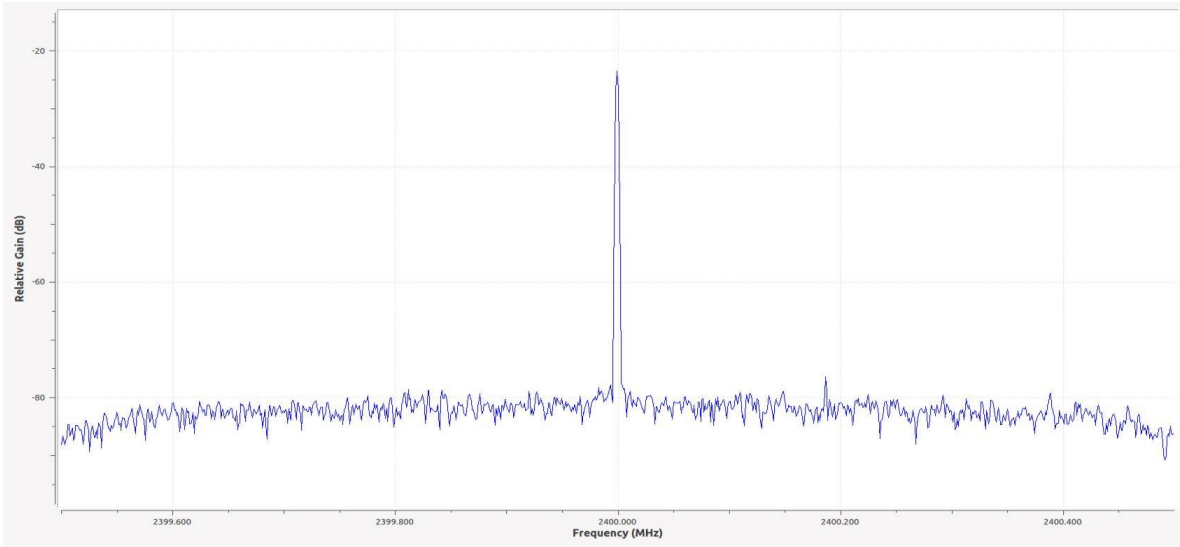
รูปที่ 108 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 500 เมตร

ความสูง 400 เมตร

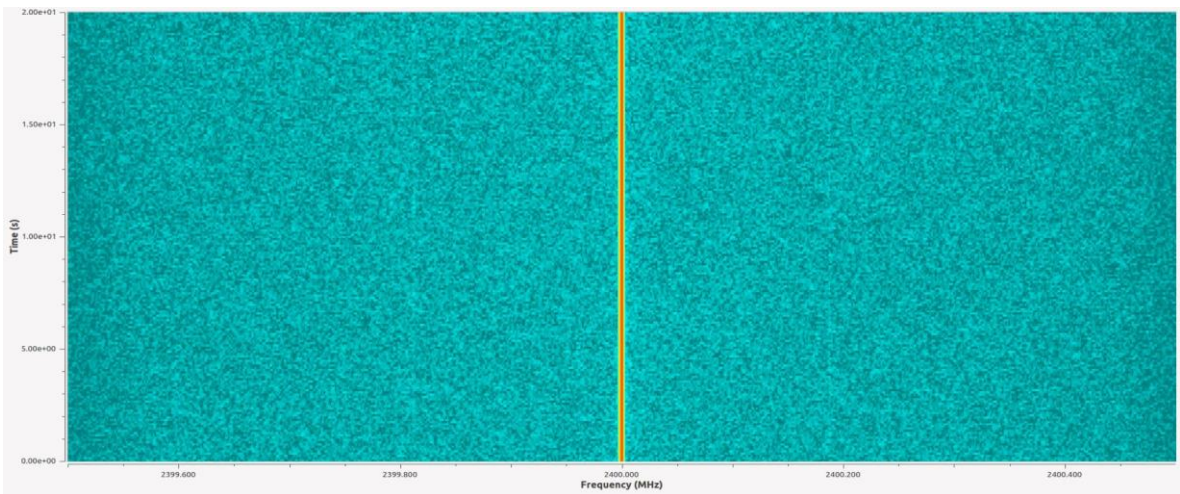
Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-24.5	-24.5	-23.5	UAV3	ถูกต้อง



รูปที่ 109 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 400 เมตร



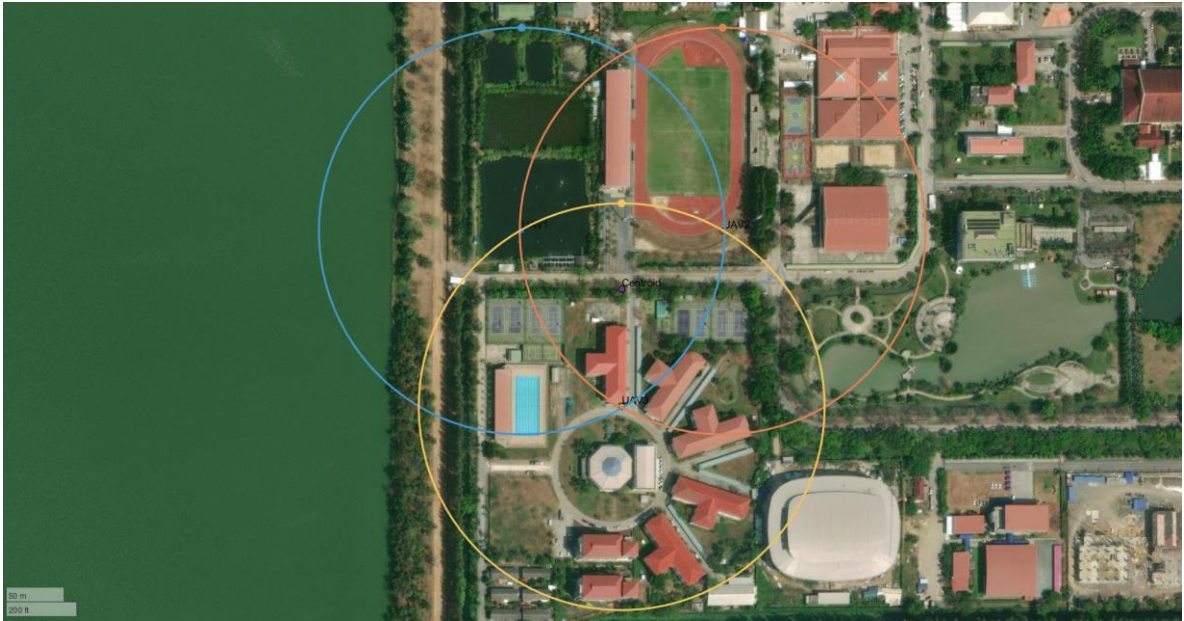
รูปที่ 110 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV3 ณ ความสูง 400 เมตร



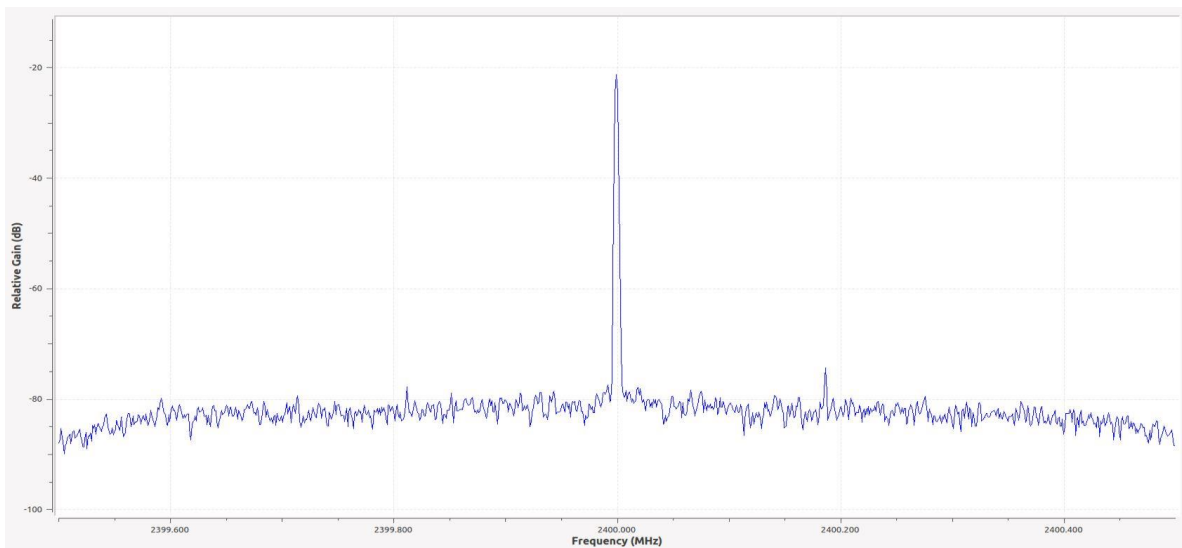
รูปที่ 111 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV3 ณ ความสูง 400 เมตร

ความสูง 300 เมตร

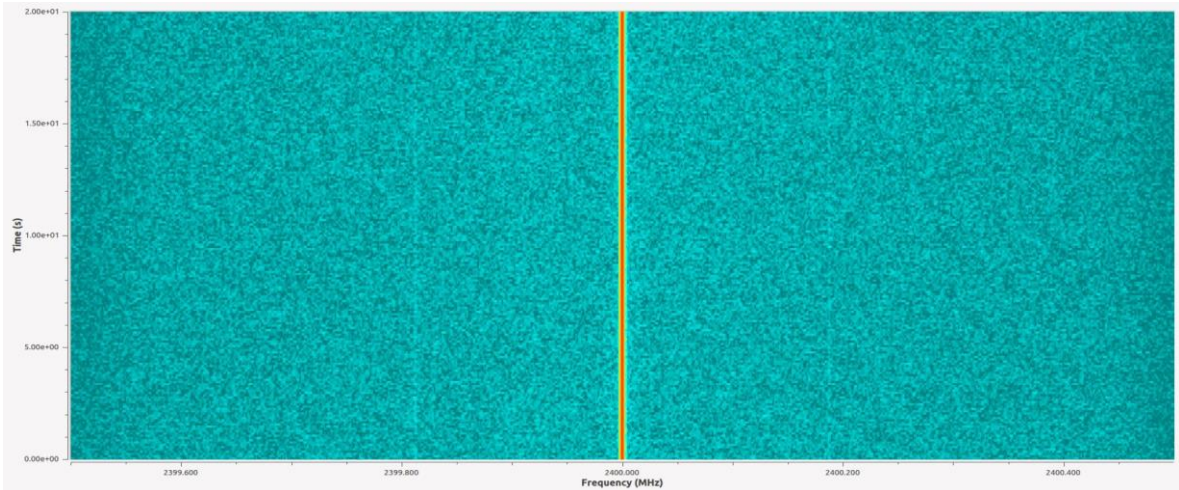
Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-23	-21.5	-43	UAV2	ถูกต้อง



รูปที่ 112 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 300 เมตร



รูปที่ 113 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 300 เมตร



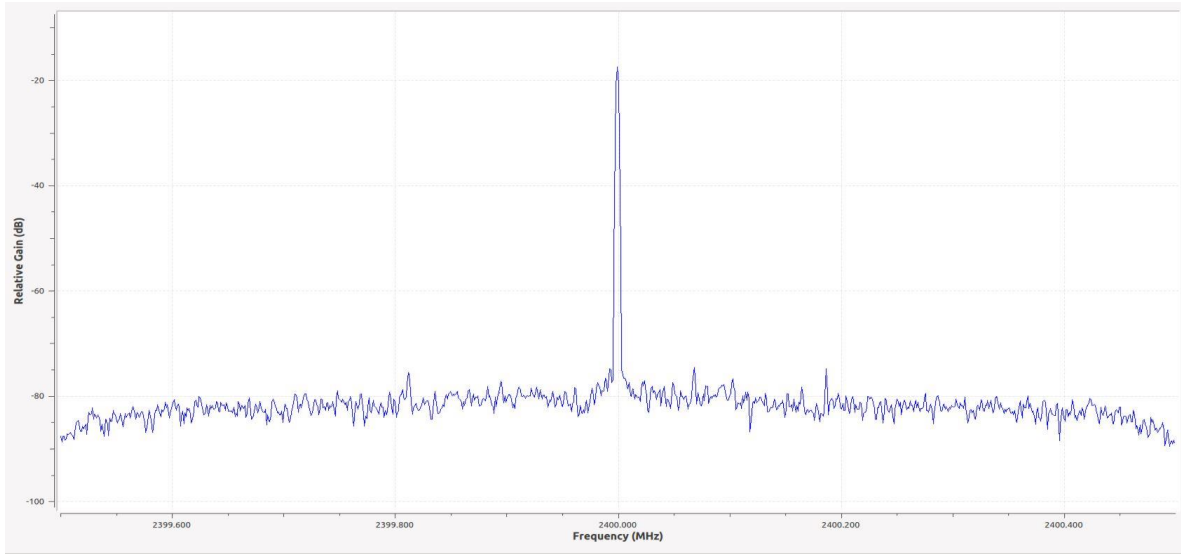
รูปที่ 114 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 300 เมตร

ความสูง 200 เมตร

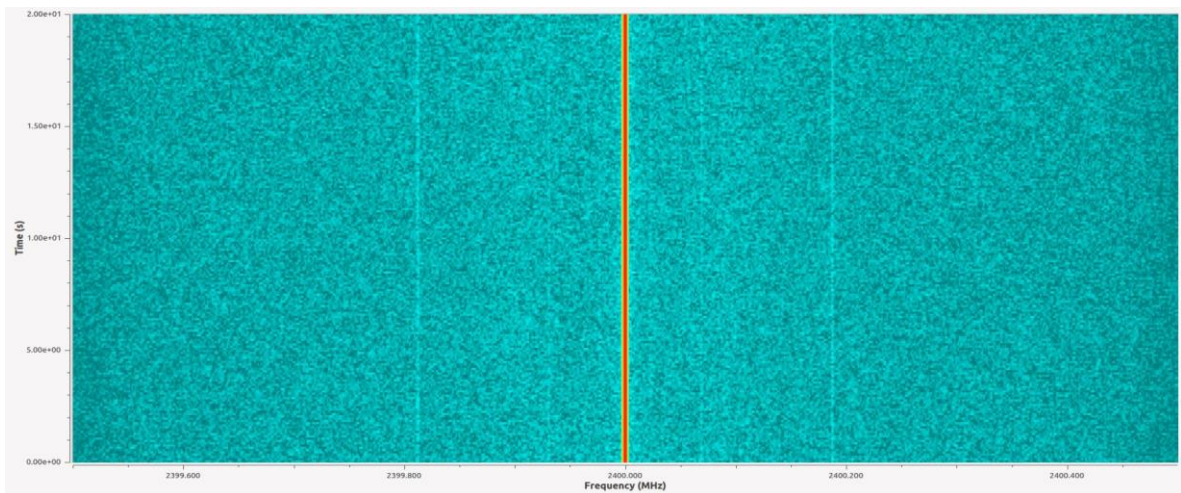
Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-17.5	-18.5	-37	UAV1	ถูกต้อง



รูปที่ 115 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 200 เมตร



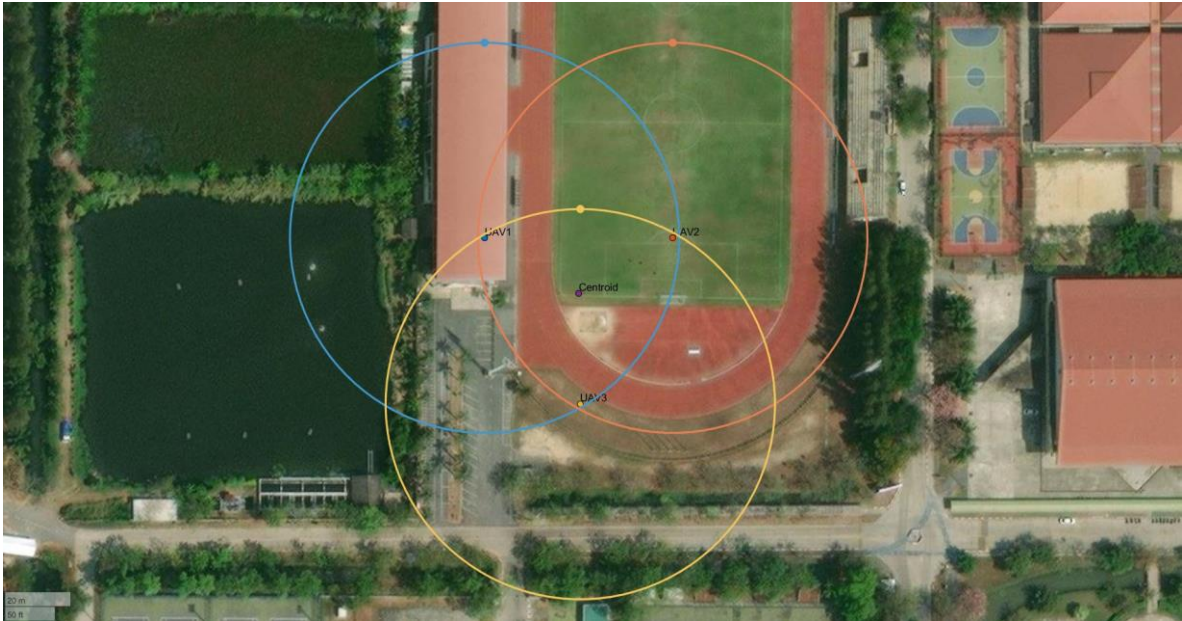
รูปที่ 116 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 200 เมตร



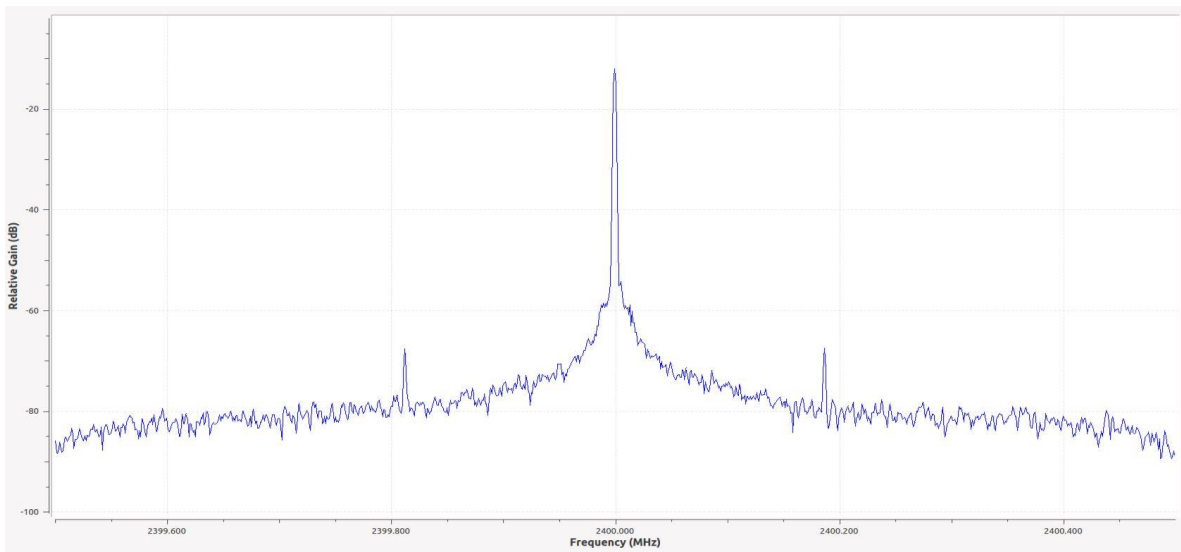
รูปที่ 117 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 200 เมตร

ความสูง 100 เมตร

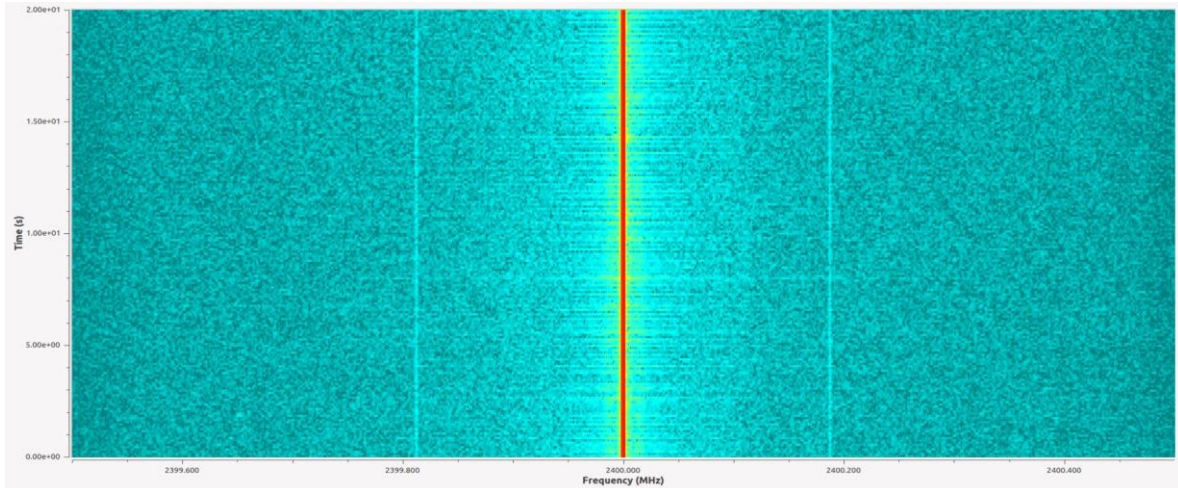
Uav1	Uav2	Uav3	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
Relative Gain (dB)	Relative Gain (dB)	Relative Gain (dB)		
-13	-12	-15	UAV2	ถูกต้อง



รูปที่ 118 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 100 เมตร



รูปที่ 119 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 100 เมตร



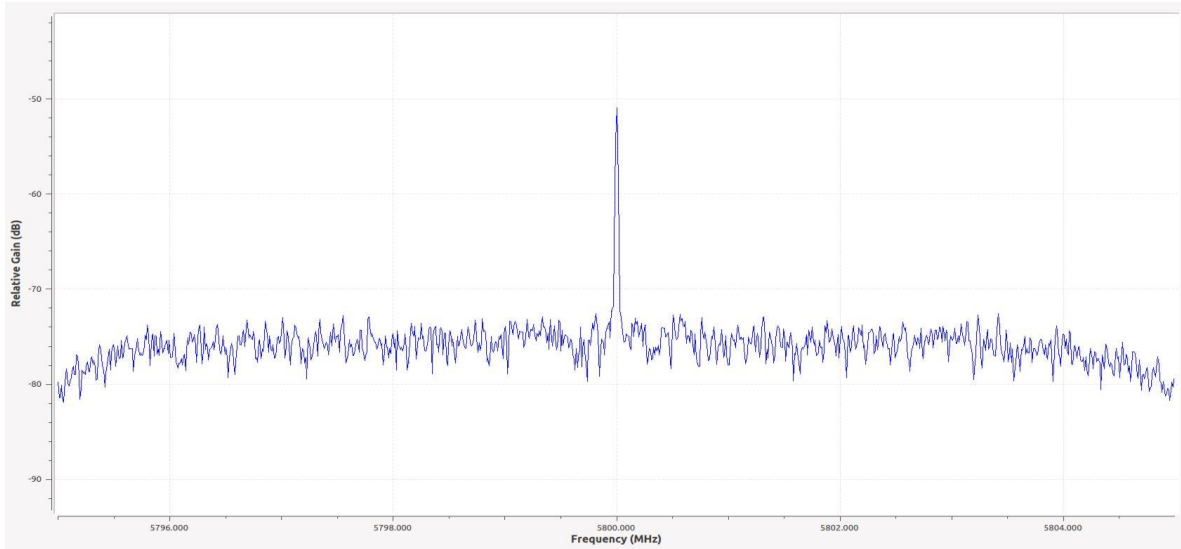
รูปที่ 120 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 100 เมตร

4.6.2 การทดลองระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ ช่วงความถี่ 5.8 GHz

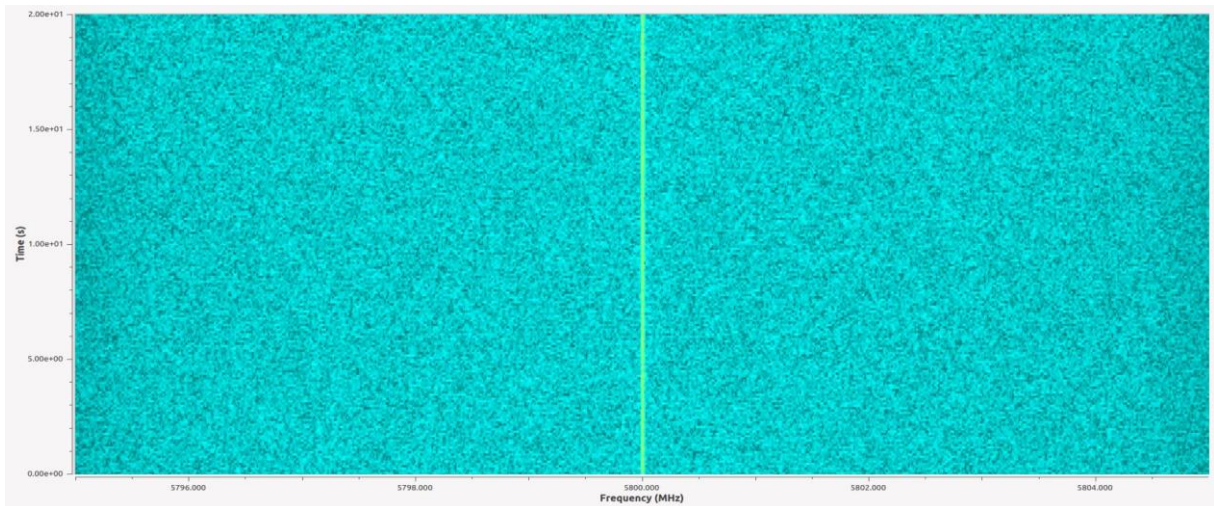
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยได้ติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณบริเวณตรงกลางสนามฟุตบอล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นสัญญาณ single tone ณ ความถี่ 5.8 GHz และ กำหนดกำลังส่งที่ 20 dBm EIRP จากนั้นจึงทำการทดสอบการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยอากาศยานไร้คนขับติดตั้งอุปกรณ์ USRP b205-mini SDR ปรับ Rx gain ที่ 76dB และสายอากาศแบบมีทิศทาง ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2458-08LP-NF ณ ความสูงต่อไปนี้

ความสูง 700 เมตร

Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-51	-53	-54	UAV1	ถูกต้อง



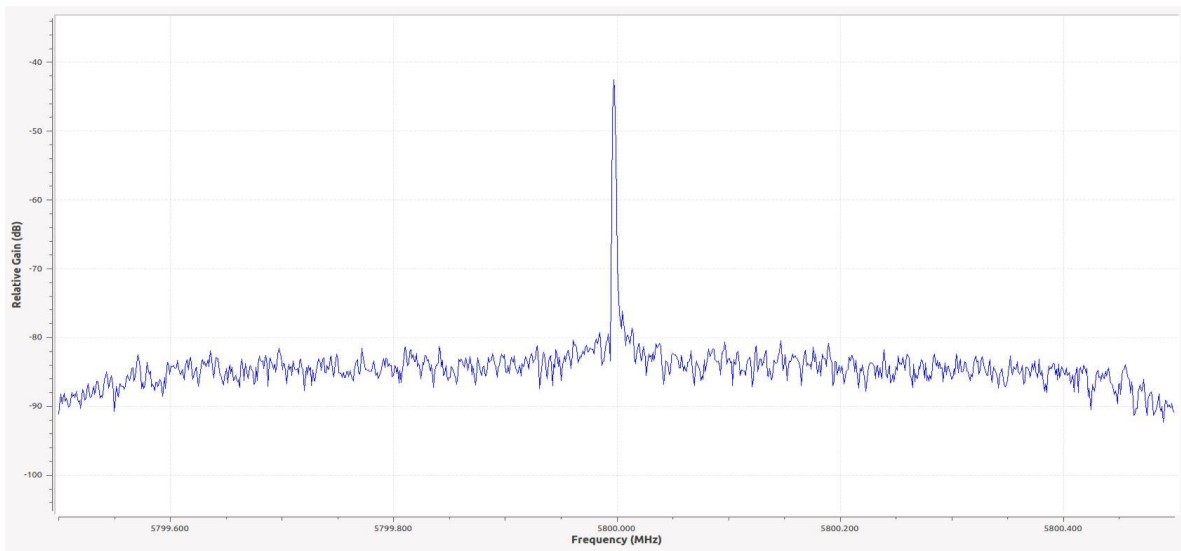
รูปที่ 121 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 700 เมตร



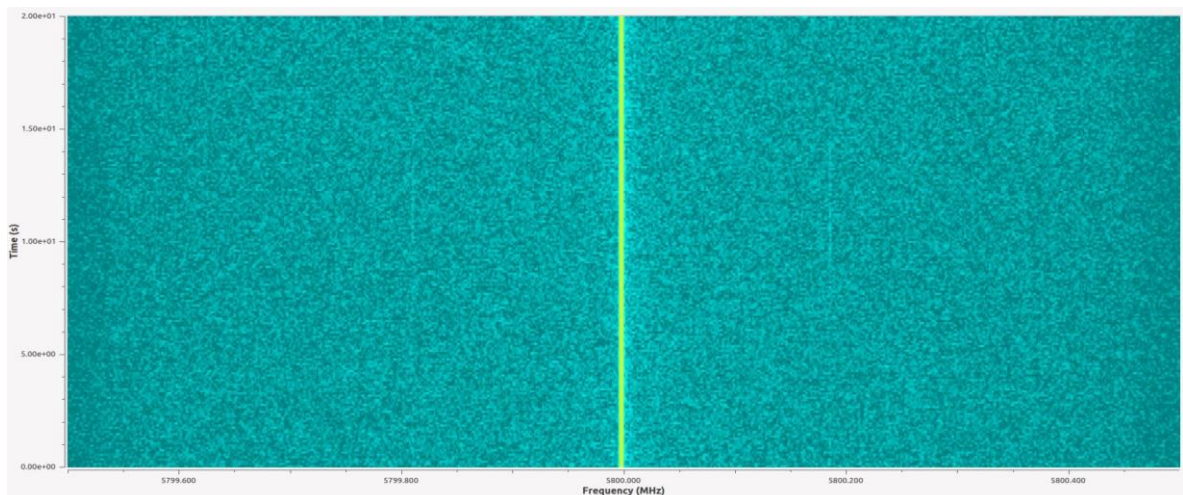
รูปที่ 122 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 700 เมตร

ความสูง 600 เมตร

Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-70	-43	-42.5	UAV3	ถูกต้อง



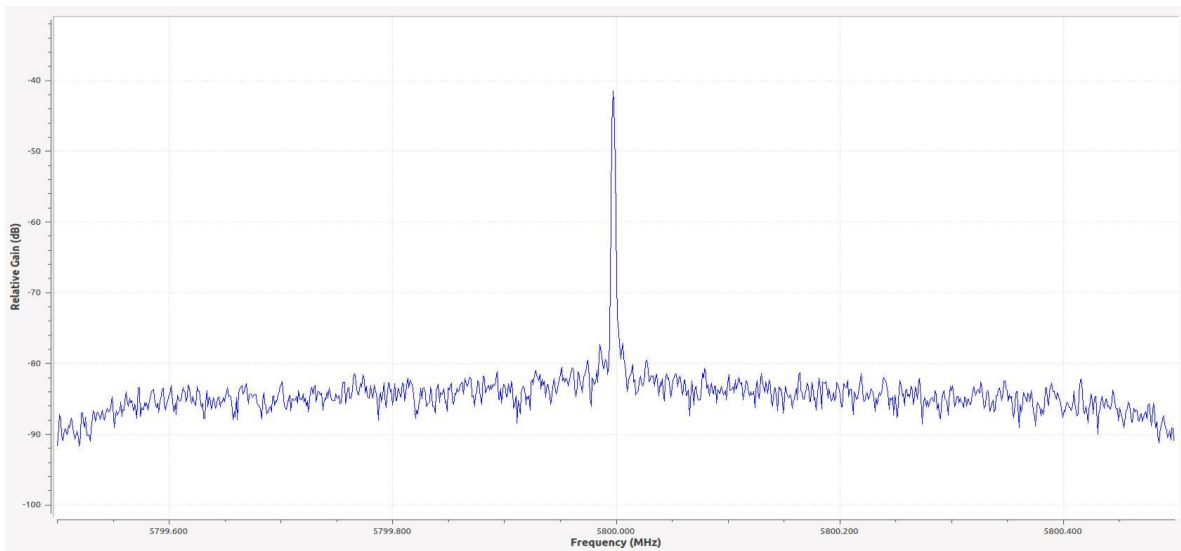
รูปที่ 123 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV3 ณ ความสูง 600 เมตร



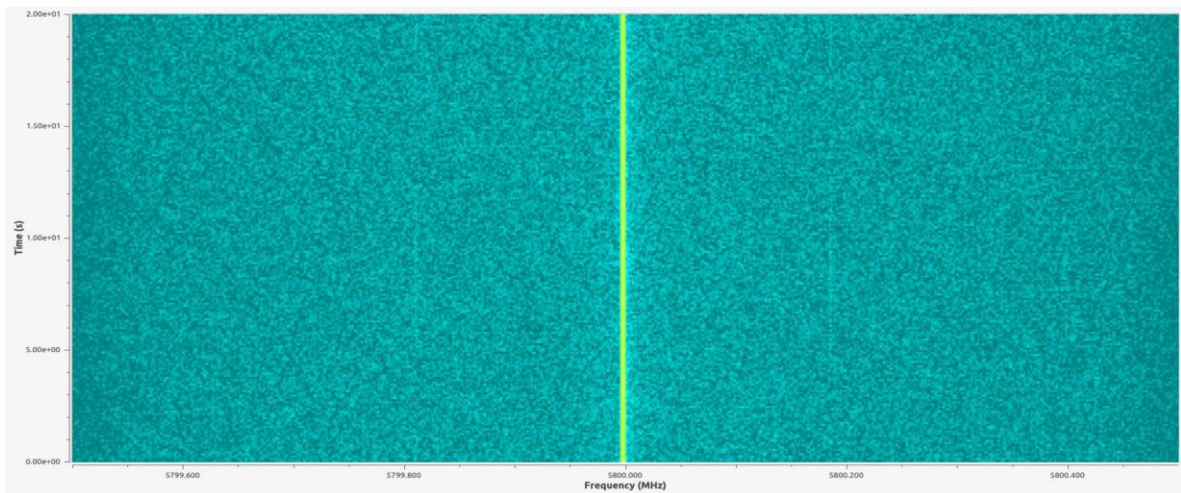
รูปที่ 124 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV3 ณ ความสูง 600 เมตร

ความสูง 500 เมตร

Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-63	-41.5	-61	UAV2	ถูกต้อง



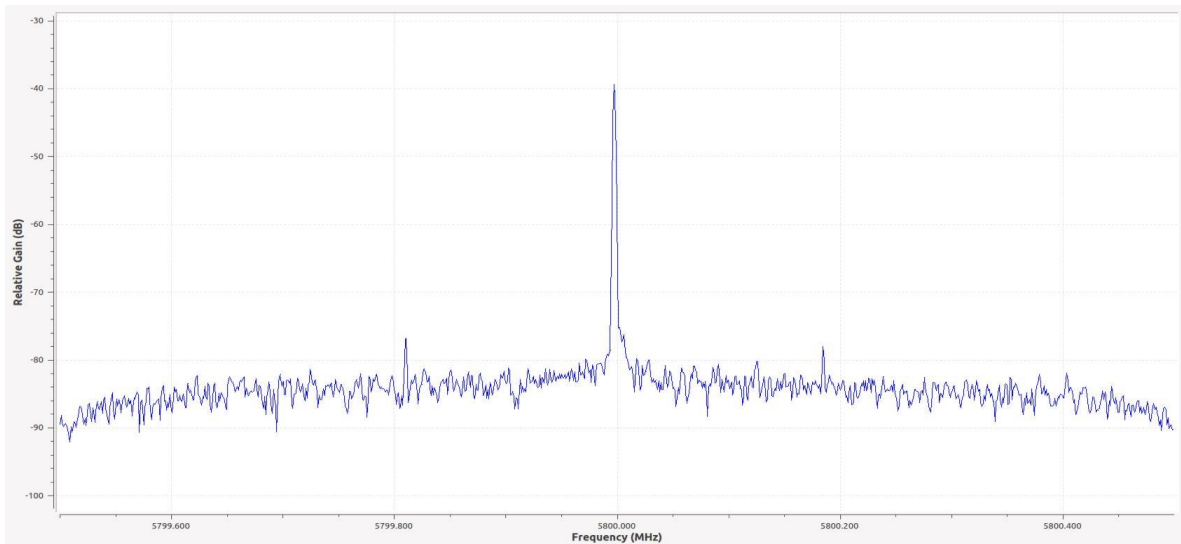
รูปที่ 125 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 500 เมตร



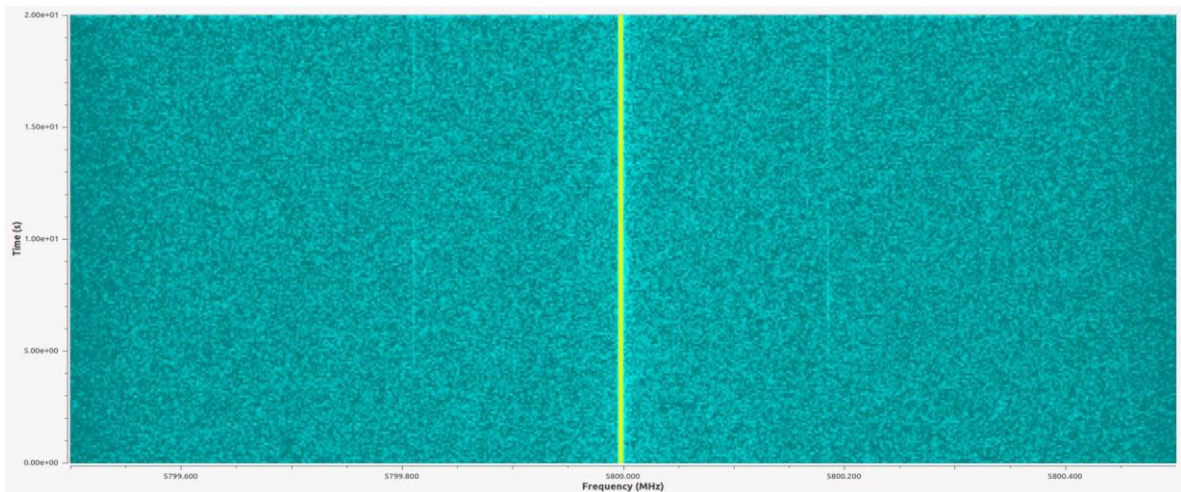
รูปที่ 126 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 500 เมตร

ความสูง 400 เมตร

Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-41.5	-41	-39.5	UAV3	ถูกต้อง



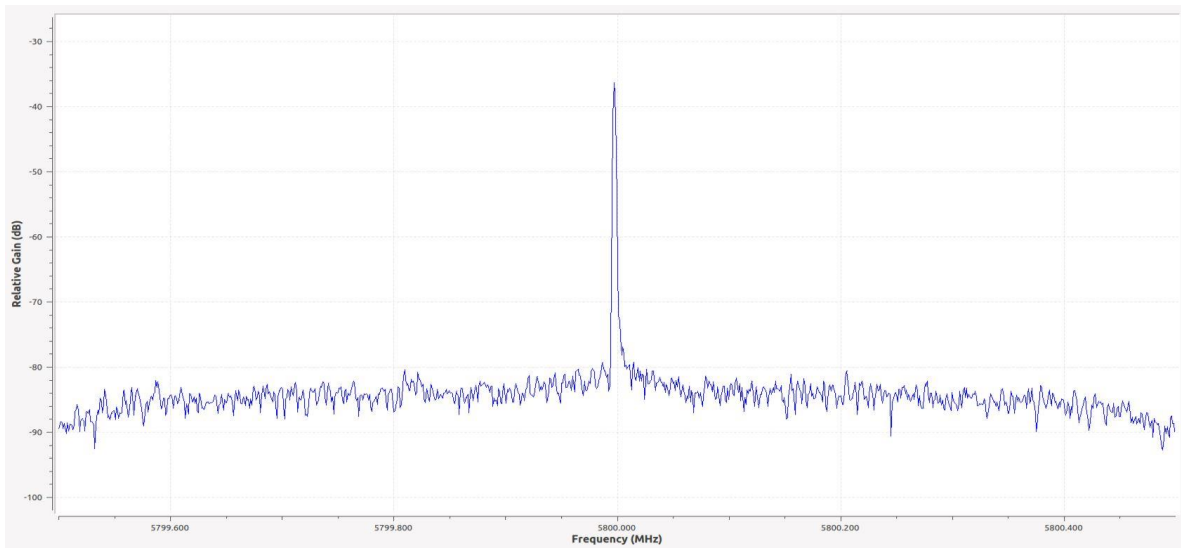
รูปที่ 127 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV3 ณ ความสูง 400 เมตร



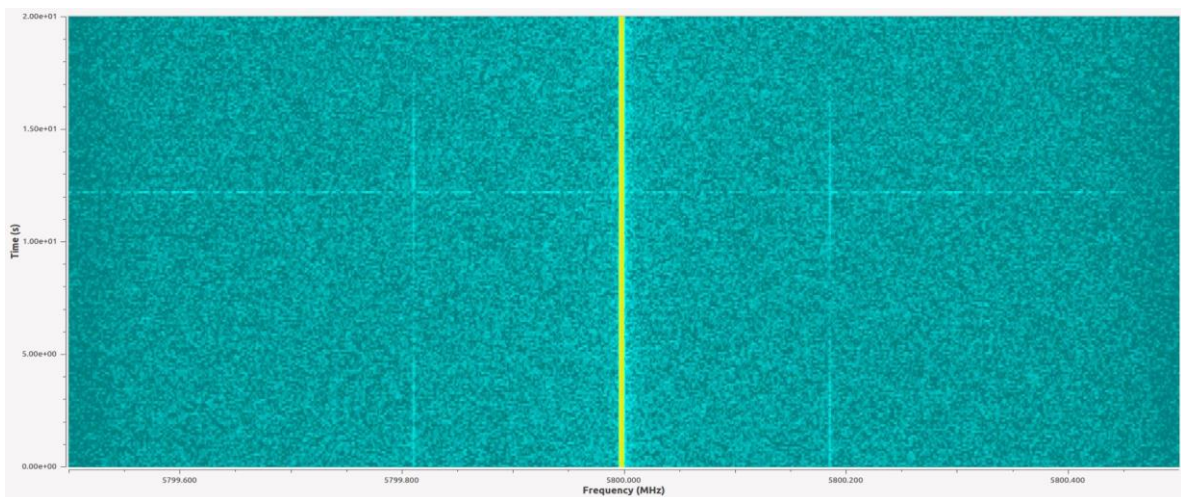
รูปที่ 128 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV3 ณ ความสูง 400 เมตร

ความสูง 300 เมตร

Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-39	-36.5	-47	UAV2	ถูกต้อง



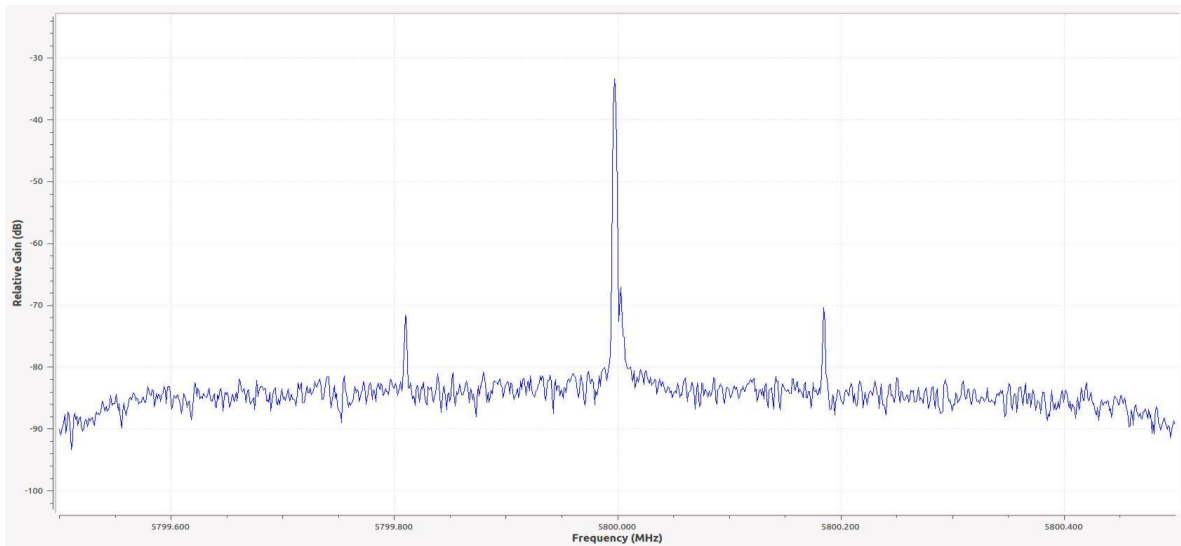
รูปที่ 129 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 300 เมตร



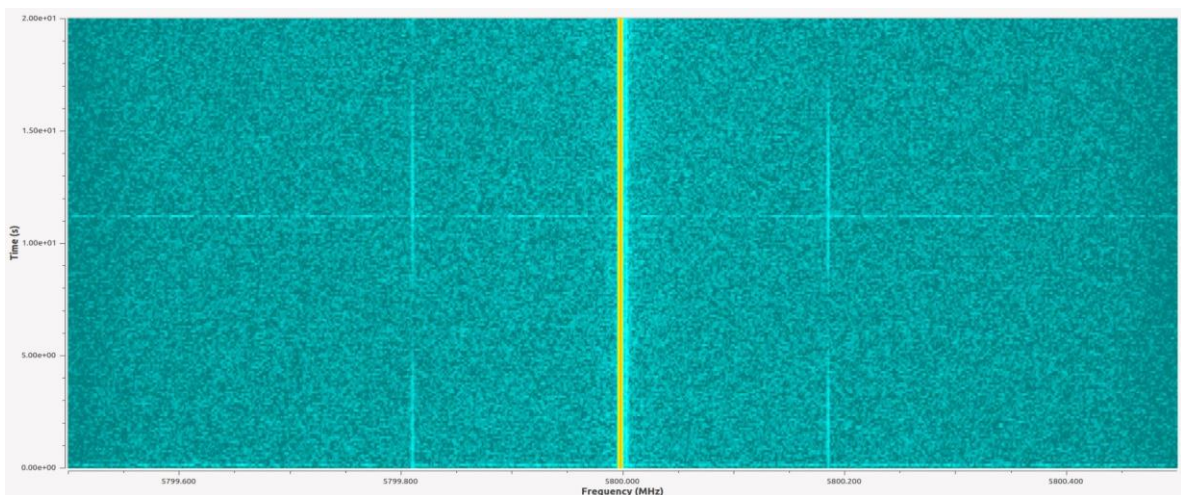
รูปที่ 130 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 300 เมตร

ความสูง 200 เมตร

Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-33.5	-35	-44.5	UAV1	ถูกต้อง



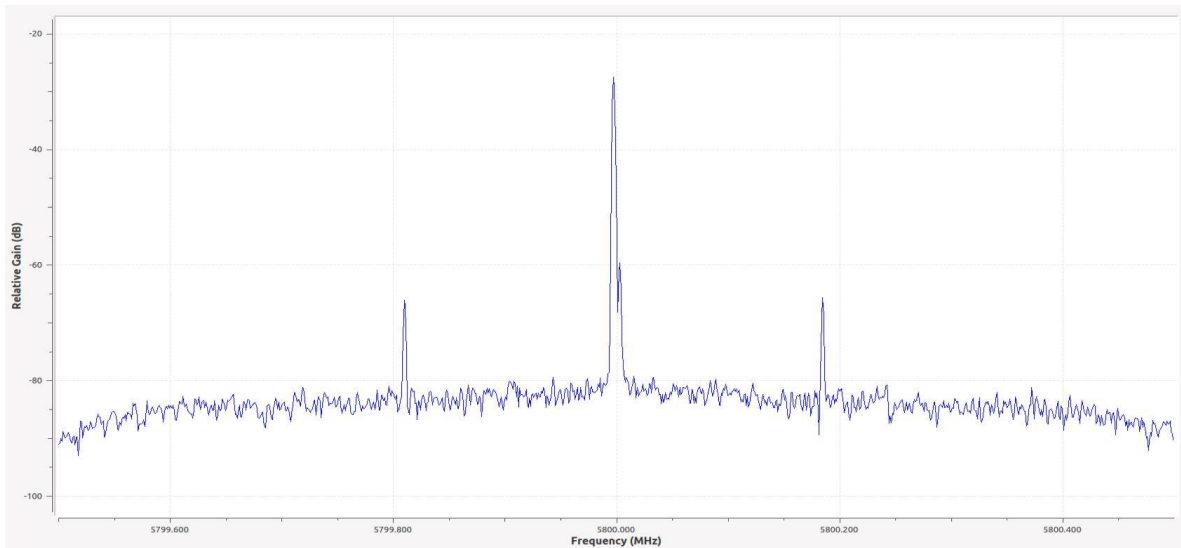
รูปที่ 131 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 200 เมตร



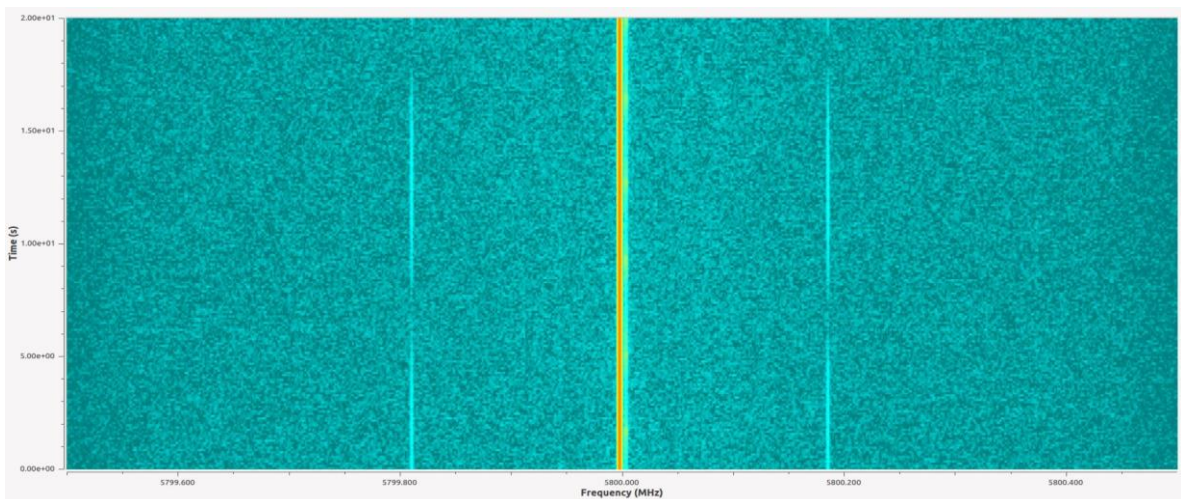
รูปที่ 132 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 200 เมตร

ความสูง 100 เมตร

Uav1 Relative Gain (dB)	Uav2 Relative Gain (dB)	Uav3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่งสัญญาณ	ความถูกต้องในการ ค้นหาสัญญาณ
-30.5	-27.5	-34	UAV2	ถูกต้อง



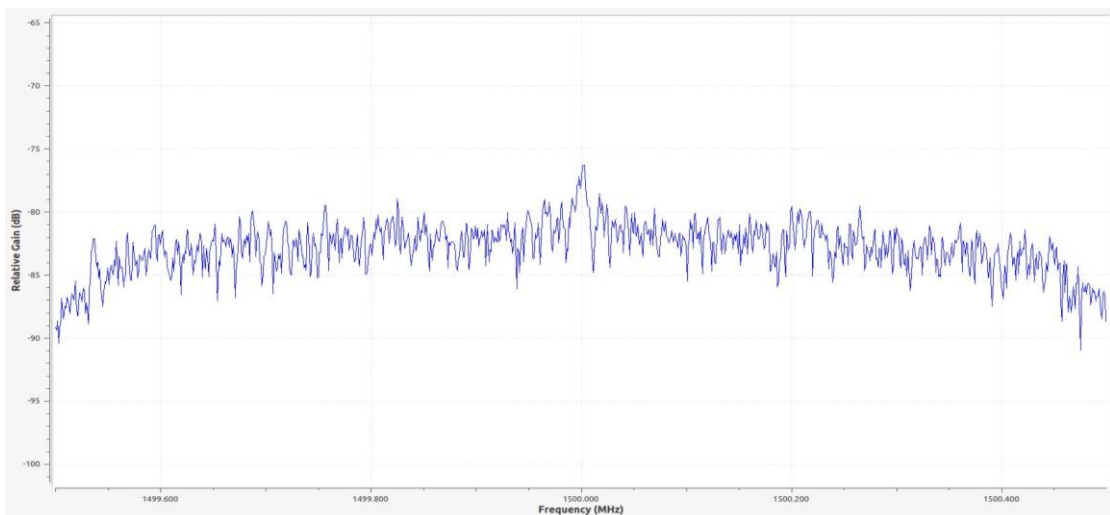
รูปที่ 133 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 100 เมตร



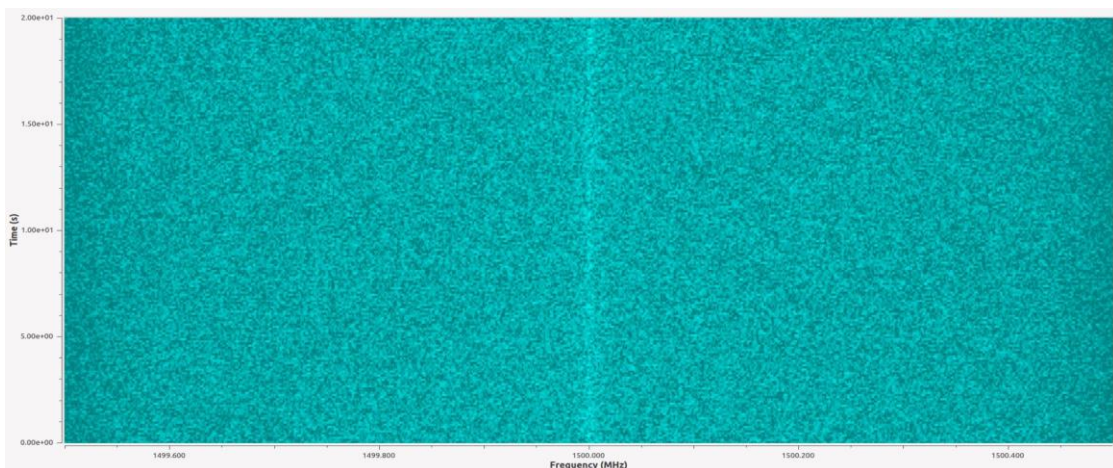
รูปที่ 134 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV2 ณ ความสูง 100 เมตร

4.6.3 การทดลองระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ ช่วงความถี่ 1.5 GHz

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยได้ติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณบริเวณตรงกลางสนามฟุตบอล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นสัญญาณ single tone ณ ความถี่ 1.5 GHz และ กำหนดกำลังส่งที่ 20 dBm EIRP จากนั้นจึงทำการทดสอบการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ณ ความสูงต่างๆ โดยอากาศยานไร้คนขับติดตั้งอุปกรณ์ USRP b205-mini SDR ปรับ Rx gain ที่ 76dB และสายอากาศแบบมีทิศทาง ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y ปรากฏว่า ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้ในทุกช่วงความสูง สาเหตุเนื่องมาจากสายอากาศที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับนั้นไม่ได้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานในช่วงความถี่ 1.5 GHz ดังนั้นลักษณะ radiation pattern และช่วงความถี่ของสายอากาศจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่อประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 135 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 700 เมตร



รูปที่ 136 waterfall spectrogram ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 700 เมตร

4.7 สรุปผลการดำเนินงานพร้อมทั้งปัญหา อุปสรรคและแนวทางแก้ไข

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) ได้ดำเนินงาน โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับอย่างสมบูรณ์แล้ว โดยสรุปผลการดำเนินงานพร้อมทั้งปัญหา อุปสรรคและแนวทางแก้ไขดังนี้

1. การขอใช้งานอากาศยานไร้คนขับอย่างถูกกฎหมาย ต้องขึ้นทะเบียนกับ 2 หน่วยงาน คือ กรมการบินพลเรือน (CAAT) และ กสทช. โดยการขึ้นทะเบียนกับ CAAT เป็นการขึ้นทะเบียนผู้บังคับอากาศยานไร้คนขับ ส่วนการขึ้นทะเบียนกับ กสทช. เป็นการขึ้นทะเบียนการขออนุญาตใช้คลื่นความถี่ โดยการขึ้นทะเบียนผู้บังคับอากาศยานไร้คนขับจะได้รับหนังสือการขึ้นทะเบียนผู้บังคับอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบกับใบขับขี่รถยนต์ส่วนบุคคลนั่นเอง จึงจะใช้งานอากาศยานไร้คนขับอย่างถูกกฎหมายได้ อย่างไรก็ตาม อากาศยานไร้คนขับใด ๆ ที่มีน้ำหนักไม่เกิน 2 กิโลกรัมและไม่ได้ติดตั้งกล้องบันทึกภาพ ได้รับการยกเว้นไม่ต้องขึ้นทะเบียนอากาศยานไร้คนขับ นอกเหนือจากนั้นต้องขึ้นทะเบียนทุกกรณี โดยหนังสือการขึ้นทะเบียนอากาศยานไร้คนขับมีอายุ 2 ปี ตั้งแต่วันที่ออกหนังสือ

ส่วนข้อกำหนดเกี่ยวกับคลื่นความถี่และกำลังส่งของอากาศยานไร้คนขับเป็นไปตามประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่อง มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์ สำหรับเครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้คลื่นความถี่ย่าน 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ/หรือ 5 กิกะเฮิรตซ์

2. ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับอาศัยคุณลักษณะของสายอากาศและความแรงของสัญญาณอย่างยิ่งยวด จะเห็นได้อย่างชัดเจนจากผลการวิจัยว่า หากอากาศยานไร้คนขับไม่ได้ถูกติดตั้งสายอากาศที่ถูกออกแบบให้ทำงานในช่วงความถี่ที่ต้องการตรวจจับ ประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับจะลดลงเป็นอย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจากระดับความแรงของสัญญาณที่อากาศยานไร้คนขับตรวจจับได้แปรผกผันกับระยะทางอย่างรวดเร็ว ประกอบกับสัญญาณรบกวนที่มีอยู่โดยทั่วไป ทำให้ระดับความแรงของสัญญาณที่อากาศยานไร้คนขับตรวจจับได้มีความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณและอากาศยานไร้คนขับมีระยะไกลหรือถูกบดบังโดยอาคาร รายละเอียดของคุณลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการสามารถอ้างอิงได้จากเอกสารของยี่ห้อและรุ่นของอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ

ด้วยเหตุข้างต้น ผู้วิจัยเสนอระบบการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับโดยอาศัยแนวคิดที่ว่า อากาศยานไร้คนขับแต่ละแบบจะมีอัตลักษณ์ที่ต่างกัน ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ใช้หลักการ Radar-based Techniques, Vision-based Techniques, Sound-based Techniques และ RF fingerprinting โดยผู้วิจัยเลือกใช้ RF fingerprinting ซึ่งผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถระบุตัวตนของอากาศยานไร้คนขับได้แม่นยำกว่า นอกจากนั้นแล้ว การระบุตัวตนของอากาศยานไร้คนขับจะอาศัยแนวคิดของวิธีเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning)

ซึ่งเป็น Artificial Intelligence ที่สามารถใช้งานได้ในหลากหลาย โดยมีจุดเด่นคือสามารถเรียนรู้ลักษณะเด่นของข้อมูลได้เองโดยปราศจากการสอน ด้วยเหตุนี้ วิธีเรียนรู้เชิงลึกจึงเป็นงานวิจัยที่นิยมมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องทำงานด้วยตนเอง ผู้วิจัยมั่นใจว่าข้อเสนอข้างต้นจะเป็นทิศทางการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับ ในอนาคตอันใกล้อย่างแน่นอน

4.8 รายงานผลการศึกษาระดับย่อสำหรับตีพิมพ์ในวารสารสำนักงาน กสทช.

รายงานผลการศึกษาระดับย่อ

โครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ด้วยอากาศยานไร้คนขับ

หนึ่งในภารกิจหลักที่สำคัญของสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) นอกเหนือจากการบริหารคลื่นความถี่ คือทำหน้าที่ตรวจสอบและติดตามการใช้คลื่นความถี่ในกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ กิจการวิทยุคมนาคม และกิจการโทรคมนาคม ซึ่งรวมถึงการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต ซึ่งในปัจจุบันสามารถใช้อุปกรณ์ภาคพื้นดิน เช่น รถตรวจหาแหล่งสัญญาณ หรือโครงข่ายสื่อสารในพื้นที่ เช่น เสาร์บ่งส่งสัญญาณของผู้ให้บริการต่าง ๆ อย่างไรก็ตามก็สังเกตเห็นได้ชัดว่า การตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยอุปกรณ์ภาคพื้นดินนั้นมีข้อจำกัดอยู่มาก ทั้งในแง่ของความยุ่งยากของการนำอุปกรณ์เข้าไปในพื้นที่และความรวดเร็วในการตรวจหาตำแหน่งของแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจหาตำแหน่งของแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยอาศัยโครงข่ายสื่อสารในพื้นที่จะไม่สามารถระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณโดยละเอียดได้เลยเนื่องจากข้อจำกัดของที่ตั้งของโครงข่ายสื่อสารในพื้นที่ซึ่งถูกออกแบบไว้ให้บริการสัญญาณ มิใช่ตรวจหาตำแหน่งแหล่งสัญญาณ

ด้วยเหตุที่กล่าวมาข้างต้น ทางผู้วิจัยจึงได้จัดทำโครงการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยนำข้อได้เปรียบของอากาศยานไร้คนขับซึ่งสามารถปฏิบัติการได้คล่องตัวและไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน รวมถึงมุมมองในการตรวจจับที่กว้างและมีถึง 3 มิติ โดยสามารถที่จะตรวจจับแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตในพื้นที่ที่กว้างเมื่อทำการบินในระดับสูง และสามารถที่จะระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยละเอียดเมื่อทำการบินในระดับต่ำ จากรูปที่ 1 แสดงถึงขอบเขตการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำ ทำการบินในระดับสูง ในการบินระดับสูงระบบจะสามารถกำหนดขอบเขตพื้นที่ที่ต้องสงสัยว่ามีแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต เช่น ผู้บังคับอากาศยานไร้คนขับที่ไม่ได้รับอนุญาต จากนั้นระบบจะลดระดับเพดานบินลงเพื่อระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยละเอียด ดังรูปที่ 2 แสดงถึงการระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำ ทำการบินในระดับต่ำเพื่อระบุตำแหน่งแหล่ง

สัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยละเอียด เส้นวงกลมแสดงถึงขอบเขตการตรวจจับของอากาศยานไร้คนขับ



รูปที่ 1 ขอบเขตการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้
อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำ ทำการบินใน ระดับสูง

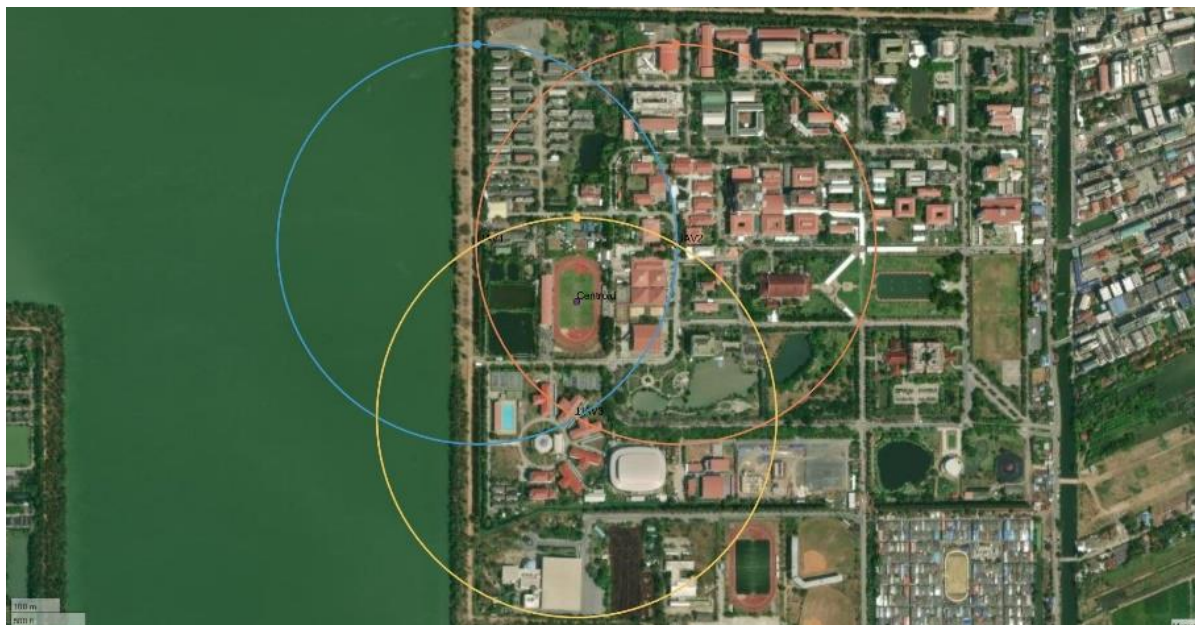


รูปที่ 2 การระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ 3 ลำ
ทำการบินในระดับต่ำ

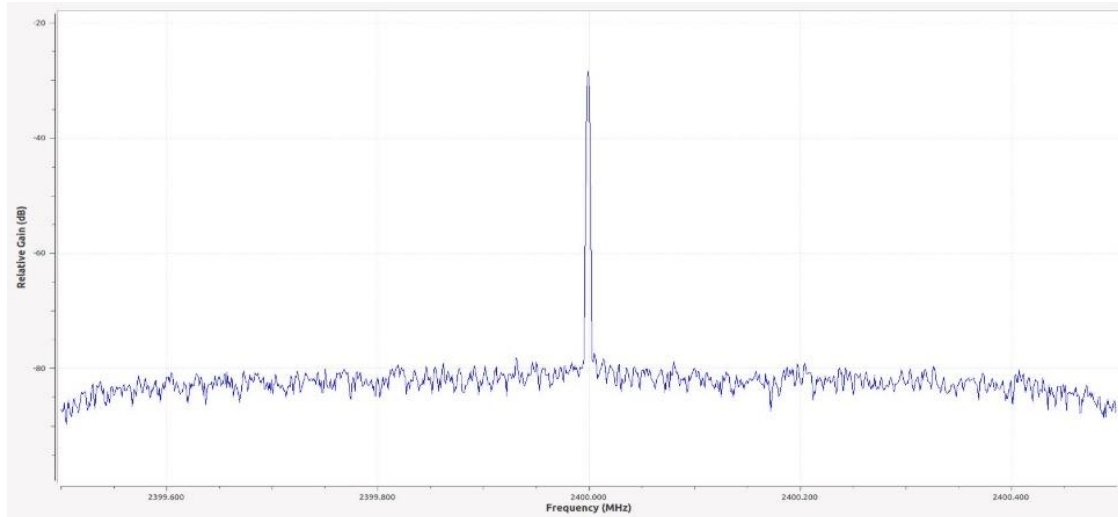
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยได้ติดตั้งแหล่งกำเนิดสัญญาณบริเวณตรงกลางสนามฟุตบอล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เป็นสัญญาณ single tone ณ ความถี่ 2.4 GHz และ กำหนดกำลังส่งที่ 20 dBm EIRP จากนั้นจึงทำการทดสอบการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยอากาศยานไร้คนขับติดตั้งอุปกรณ์ USRP b205-mini SDR ปรับ Rx gain ที่ 76dB และสายอากาศแบบมีทิศทาง ยี่ห้อ Hyperlink Wireless รุ่น HG2409Y

ตารางแสดงผลการตรวจหาตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ระดับความสูงต่าง ๆ

ความสูง (เมตร)	UAV1 Relative Gain (dB)	UAV2 Relative Gain (dB)	UAV3 Relative Gain (dB)	ตำแหน่ง สัญญาณ	ความถูกต้องใน การค้นหา สัญญาณ
700	-28.5	-29	-29	UAV1	ถูกต้อง
600	-57	-27.5	-26.5	UAV3	ถูกต้อง
500	-48	-25.5	-49	UAV2	ถูกต้อง
400	-24.5	-24.5	-23.5	UAV3	ถูกต้อง
300	-23	-21.5	-43	UAV2	ถูกต้อง
200	-17.5	-18.5	-37	UAV1	ถูกต้อง
100	-13	-12	-15	UAV2	ถูกต้อง



รูปที่ 3 ตำแหน่งและขอบเขตในการตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาต
ของอากาศยานไร้คนขับทั้ง 3 ลำ ณ ความสูง 700 เมตร



รูปที่ 4 spectrum ของสัญญาณที่ตรวจจับได้โดย UAV1 ณ ความสูง 700 เมตร

จากการทดลองพบว่า ระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสายอากาศและความแรงของสัญญาณอย่างมาก กล่าวคือ หากอากาศยานไร้คนขับไม่ได้ถูกติดตั้งสายอากาศที่ถูกออกแบบให้ทำงานในช่วงความถี่ที่ต้องการตรวจจับ ประสิทธิภาพของระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งแหล่งสัญญาณที่ไม่ได้รับอนุญาตด้วยอากาศยานไร้คนขับจะลดลงเป็นอย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจากระดับความแรงของสัญญาณที่อากาศยานไร้คนขับตรวจจับได้แปรผกผันกับระยะทางอย่างรวดเร็ว ประกอบกับสัญญาณรบกวนที่มีอยู่โดยทั่วไป ทำให้ระดับความแรงของสัญญาณที่อากาศยานไร้คนขับตรวจจับได้มีความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากระยะทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณและอากาศยานไร้คนขับมีระยะไกลหรือถูกบดบังโดยอาคาร ด้วยเหตุข้างต้น ผู้วิจัยเสนอระบบการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับโดยอาศัยแนวคิดที่ว่า อากาศยานไร้คนขับแต่ละแบบจะมีอัตลักษณ์ที่ต่างกัน โดยผู้วิจัยเลือกใช้หลักการ RF fingerprinting ซึ่งผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าสามารถระบุตัวตนของอากาศยานไร้คนขับได้แม่นยำ นอกจากนั้นแล้ว การระบุตัวตนของอากาศยานไร้คนขับสามารถใช้แนวคิดของวิธีเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) ซึ่งเป็น Artificial Intelligence ที่สามารถใช้งานได้หลากหลาย โดยมีจุดเด่นคือสามารถเรียนรู้ลักษณะเด่นของข้อมูลได้เองโดยปราศจากการสอน ผู้วิจัยมั่นใจว่าข้อเสนอข้างต้นจะเป็นทิศทางการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับในอนาคตอันใกล้อย่างแน่นอน

เอกสารอ้างอิง (References)

1. Balanis, C.A. (1982). **Antenna Theory**. New York: Harper & Row.
2. David, M. P. (2011). **Microwave Engineering**. 4th edition. Wiley.
3. Rohde, Schwarz. (2011). **Introduction into Theory of Direction Finding**. (n.p.).
4. L-com. (2020). <https://www.l-com.com/wireless-antenna>.
5. Kildal, Per-Simon. (2015). **Foundations of Antenna Engineering: A Unified Approach for Line-of-Sight and Multipath**, Kildal Antenn AB.
6. MATLAB, The MathWorks, Inc.
7. DJI Community. (2020). **Dji phantom 4**, <https://www.dji.com/phantom-4>
8. Tarot UAV Octocopter. (2020). <http://www.tarotrc.com/>
9. Ardupilot APM. (2020). <https://ardupilot.org/copter/docs/common-apm25-and-26-overview.html>
10. Pixhawk. (2021). <https://pixhawk.org/>
11. RPLidar, <https://www.slamtec.com/en/Lidar>
12. Hobbywing ESC, <https://www.hobbywing.com>
13. FrSKY Taranis, <https://www.frsky-rc.com/>
14. Sik Telemetry radio, <https://ardupilot.org/copter/docs/common-sik-telemetry-radio.html>
15. Here RTK GPS, <http://www.proficnc.com/gps/77-gps-module.html>
16. Lipo Smart Battery, <https://www.genstattu.com/>
17. Hyperlink Wireless Antenna, <https://www.l-com.com/>
18. USRP B210, <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>
19. GNU radio, <https://www.gnuradio.org/>
20. Intel NUC, <https://intel.com>
21. Mission Planner, <https://ardupilot.org/planner/>
22. QGroundControl, <http://qgroundcontrol.com/>