



กทปส

## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนา  
กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์  
สาธารณะ

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรน  
เพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

Research and Development of Radar Detecting Drone for  
Counter-Unauthorized Drone Flying

เอกอัครราชทูต บัญญา และคณะ

กันยายน พ.ศ. 2565

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ  
(สำนักงาน กสทช.)

แบบ กทปส. ME-003

## รายงานฉบับสมบูรณ์

### ทุนส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา สัญญารับทุนเลขที่ A62-1-(2)-008

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต  
Research and Development of Radar Detecting Drone for Counter-Unauthorized Drone Flying

#### คณะนักวิจัย

- |                                |                 |
|--------------------------------|-----------------|
| 1. รศ.ดร.เอกรัฐ บุญภูงา        | หัวหน้าโครงการ  |
| 2. ผศ.ดร. กิตติศักดิ์ แพบัว    | นักวิจัย        |
| 3. อาจารย์ลักขณา บรรณวัฒน์     | นักวิจัย        |
| 4. ดร.บัญชา เหลือแดง           | นักวิจัย        |
| 5. นายพงศธร ชมดี               | ผู้ช่วยนักวิจัย |
| 6. นายก่อเกียรติ บุญยี่        | ผู้ช่วยนักวิจัย |
| 7. นางสาวมณฑนา เตียววงศ์สุวรรณ | ผู้ช่วยนักวิจัย |
| 8. นายพงศ์พล โล่ห์สถาพรพิพิธ   | ผู้ช่วยนักวิจัย |

ได้รับทุนอุดหนุนจาก

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ  
(สำนักงาน กสทช.)

# การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

กันยายน พ.ศ. 2565

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โดรนเพื่อป้องกันการบิน โดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

## บทสรุปผู้บริหาร

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โดรนเพื่อป้องกันการบิน โดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

กันยายน พ.ศ. 2565

โครงการวิจัยนี้พัฒนาต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน เพื่อตรวจจับโดรนที่เข้ามาบริเวณที่กำหนดโดยไม่ได้รับอนุญาตแบบอัตโนมัติ โดยผู้วิจัยออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนแบบ FMCW ที่ความถี่ 10 GHz ย่าน X-band ออกแบบระบบประมวลผล ระบบแสดงผล และออกแบบระบบหมุนสแกน 360 องศา โดยผลลัพธ์ที่ได้จากระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับที่สร้างขึ้น พบว่าเรดาร์สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับได้ในระยะที่สูงสุดประมาณ 152 เมตร ที่กำลังส่งไม่เกิน 10 W โดยที่สายอากาศที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 1. สายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) และ 2. สายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array horn antenna) 3. สายอากาศแถวลำดับช่องเปิด (Slotted array antenna) ข้อดีข้อเสียของสายอากาศทั้ง 3 ชนิด จะให้ระยะตรวจจับจากการคำนวณที่ต่างกัน เนื่องจากอัตราการขยายของสายอากาศมีค่าต่างกัน อย่างไรก็ตามพบว่าจากการทดสอบ มีสายอากาศที่เหมาะสม 2 ชนิด คือสายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) และสายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array horn antenna) สำหรับการทดสอบสายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) ในกรณีที่ไม้เปิดระบบหมุนและให้โดรนบินอยู่ในลำคลื่นของสายอากาศพบว่าให้ระยะสูงสุดที่ 152 เมตร อย่างไรก็ตามในกรณีที่เปิดระบบหมุนและให้โดรนบินอิสระพบว่าการค้นหาตรวจจับโดรนนั้นช้ากว่า และค้นหาโดรนได้ยากกว่าสายอากาศแบบ แถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) เนื่องจากสายอากาศ แบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 3.5 องศา แคบกว่าสายอากาศ แบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) ที่มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 16 องศา มาก ดังแสดงในตามารงผลการทดสอบที่ 10.1 เมื่อใช้สายอากาศแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) จะให้ผลในการค้นหาโดรนได้ดีกว่า ความถี่วิทยุที่ขออนุญาตทดลองมี 2 ช่วงคือ 9.876 – 9.985 GHz และ 10.566 – 10.689 GHz อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้นทั้งสองย่านความถี่ พบว่าได้ผลรับไม่แตกต่างกัน เพราะความถี่ทั้งสองย่านมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเลือกความถี่ย่าน 9.876 – 9.985 GHz เป็นหลัก เนื่องจากมีความถี่ต่ำกว่าเล็กน้อย ในทางทฤษฎีจะให้ค่าการสูญเสียตามระยะทางน้อยกว่าย่านความถี่สูงเล็กน้อย แต่ไม่มีนัยสำคัญ

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

รศ.ดร.เอกรัฐ บุญญา

กันยายน พ.ศ. 2565

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยทำการออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนแบบคลื่นต่อเนื่องที่มีการมอดูเลตทางความถี่ (Frequency modulated continuous wave: FMCW) ที่ความถี่ 10 GHz ย่าน X-band โดยออกแบบระบบประมวลผล ระบบแสดงผล ระบบสายอากาศ และระบบหมุนค้นหาเป้าหมาย ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับที่สร้างขึ้น พบว่าระบบเรดาร์สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับได้ในระยะสูงสุดประมาณ 152 เมตร ที่กำลังส่งไม่เกิน 10 W โดยที่สายอากาศที่ทำการศึกษาประกอบด้วย สายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) และสายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) ซึ่งจะให้ระยะตรวจจับที่ต่างกัน เนื่องจากอัตราการขยายของสายอากาศมีค่าต่างกัน อย่างไรก็ตามจากการทดสอบพบว่า สายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) ค้นหาตรวจจับโดรนได้ช้ากว่าสายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) เนื่องจากสายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) มีความกว้างลำคลื่นครั้งกำลัง แคบกว่าสายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna)

Research and Development of Radar Detecting Drone  
for Counter-Unauthorized Drone Flying

Assoc. Prof. Dr. Akkarat Boonpoonga

Sep 2022

This research project presents the research and development of a radar drone detection system for Unauthorized Drone. The frequency modulated continuous wave (FMCW) drone detection radar system at 10 GHz in the X-band is employed. The proposed system consists signal processing unit, display unit, antenna system unit, and radar turntable unit in order to find the targets. It is found that the proposed radar system is able to detect the drone at a maximum distance of 152 meters at a power of less than 10 W. The antenna system consists of a parabolic reflector antenna and array horn antenna, which provides different detection distances because the antenna gains are different. However, it was found that the detection speed of a parabolic reflector antenna is slower than the array horn antenna due to the half-power beamwidth of the parabolic reflector antenna being narrow than the array horn antenna.

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 แผนการดำเนินงาน	1
1.2 ความร่วมมือการทำวิจัย	3
<b>2. รายงานการทบทวนวรรณกรรม</b>	<b>9</b>
2.1 ภัยคุกคามจากอากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicle หรือ UAV)	9
2.2 ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน	11
<b>3. รายงานทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>18</b>
3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบเรดาร์	18
3.2 Pulse radar หรือระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นพัลส์	26
3.3 ระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (Continuous wave radar) ชนิดไม่ผสมสัญญาณ (Un-modulated CW) และชนิดผสมสัญญาณ (FMCW)	28
<b>4. การออกแบบและทดสอบ ระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (Continuous Wave radar) ชนิดผสมสัญญาณ (FMCW)</b>	<b>47</b>
4.1 การพัฒนาภาครับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์สำหรับการตรวจจับโดรน	47
4.2 ผลการพัฒนาภาครับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์สำหรับการตรวจจับโดรน	48
<b>5. รายงานผลการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน</b>	<b>59</b>
5.1 การการคำนวณหาระยะทางตรวจจับสูงสุด	59
5.2 บทนำสายอากาศ	60
5.3 การออกแบบและผลการทดสอบสายอากาศปากแตร (Horn antenna)	66
5.4 การออกแบบและผลการทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา (parabolic reflector antenna)	73
5.5 การออกแบบและผลการทดสอบสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ	80
[สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008]	ง

6. บทสรุปความก้าวหน้าครั้งที่ 2	86
7. รายงานผลการพัฒนาซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์	89
7.1 การประมวลผลสัญญาณโดย FFT อัลกอริทึม	90
7.2 การประมวลผลสัญญาณโดยการลบผลกระทบของสัญญาณแทรกข้ามระหว่าง สายอากาศ	93
7.3 การประมวลผลสัญญาณโดยใช้วิธีการนอร์มัลไลเซชัน(Normalization)	94
7.4 ส่วนแสดงผลการตรวจจับโดรน	96
8. รายงานผลการพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน	102
9. รายงานผลการทดสอบการตรวจจับวัตถุ (เป้าหมายสมมติ) โดยใช้เรดาร์ตรวจจับโดรน ที่ได้จากงานวิจัยและพัฒนา	112
9.1 การทดสอบการตรวจจับวัตถุในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน	112
9.2 การทดสอบการตรวจจับวัตถุทางภาคสนามที่วิศวกรรมศาสตร์ KMUTNB	119
10. รายงานผลการทดสอบและสาธิตระบบเรดาร์ที่พัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจจับโดรน	128
10.1 ทดสอบเรดาร์โดยเพิ่มระดับความสูงของโดรน	131
10.2 ทดสอบเรดาร์โดยให้โดรนบินตามเรดาร์ที่กำลังหมุน	137
10.3 สรุปผล	140
11. รายงานการส่งมอบต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน จำนวน ๑ ชุด และต้นแบบซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลการตรวจจับโดรน จำนวน ๑ ชุด ให้แก่หน่วยงานผู้ใช้งานด้านความมั่นคงหรืออุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เช่น กรมการทหารสื่อสาร หรือ หน่วยบัญชาการป้องกันภัยทางอากาศกองทัพก	141
12. รายงานผลการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อนำผลงานวิจัยไปใช้ ให้เกิดประโยชน์ต่อไป	144
เอกสารอ้างอิง	152
ความเห็นคณะกรรมการพิจารณาผลงานการดำเนินงานโครงการ	154
ภาคผนวก ก วารสารตีพิมพ์ของ กสทช.	162
ภาคผนวก ข เอกสารแสดงการขออนุญาตใช้คลื่นความถี่	177
จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	
ภาคผนวก ค คู่มือการใช้งานระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน	185
ประวัตินักวิจัย	189



## สารบัญตาราง

เรื่อง	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน (Project Plan)	1
ตารางที่ 3.1 ค่าการประเมินต่าง ๆ ของระบบ	34
ตารางที่ 3.2 กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณหลังจากทำการ FFT ในงานวิจัยต่าง ๆ	41
ตารางที่ 4.1 การคำนวณเปรียบเทียบระยะของสายอากาศที่วัดจริงกับการคำนวณ	58
ตารางที่ 5.1 การประมาณระบบเรดาร์	59
ตารางที่ 5.2 Antenna parameters	61
ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างสายอากาศชนิดต่าง ๆ	63
ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบที่ออกแบบและสามารถสร้างขึ้น	70
ตารางที่ 5.5 การประมาณระบบเรดาร์ใช้สายอากาศแบบปากแตร	72
ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศของบริษัท LANBOWAN รุ่น 4.9-6.5 GHz MIMODish Antenna ANT4965D30P6-MIMO แบบสองตัวสะท้อน (Dual Reflector) โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 65 cm ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz	75
ตารางที่ 5.7 การประมาณระยะทางระบบเรดาร์ใช้สายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา	79
ตารางที่ 5.8 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ใช้งานที่ความถี่ 10 GHz	80
ตารางที่ 6.1 การประมาณระบบเรดาร์	87
ตารางที่ 9.1 ระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์ที่เรดาร์โดรนตรวจจับได้ในกรณีไม่เปิดใช้งานระบบหมุน	124
ตารางที่ 9.2 ระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์ที่เรดาร์โดรนตรวจจับได้ในกรณีเปิดใช้งานระบบหมุน	126
ตารางที่ 10.1 ตารางการเปรียบเทียบระยะของโดรนระหว่างเรดาร์กับกล้องตรวจวัดระยะ	136
ตารางที่ 12.1 รายชื่อผู้เข้าร่วม workshop ในหัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้”	144

## สารบัญญรูปภาพ

เรื่อง	หน้า
รูปที่ 2.1 ผู้โดยสารที่ติดค้างอยู่ที่สนามบิน อันเนื่องมาจากโดรนที่บินเข้ามาในบริเวณรันเวย์	9
รูปที่ 2.2 ภาพโดรนที่บินเข้าไปใกล้เฮลิคอปเตอร์ลำเลียงที่มหมูป่า	10
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างหน้าจอแสดงผลของระบบเรดาร์	11
รูปที่ 2.4 ระบบเรดาร์ ELVIRA พร้อมติดตั้งกล้อง	12
รูปที่ 2.5 ระบบเรดาร์ SKYLOCK	13
รูปที่ 2.6 สายอากาศระบบค้นหาตรวจจับ 360 องศา	14
รูปที่ 2.7 Laser Burner	15
รูปที่ 2.8 ระบบการป้องกันโดรนของ Aeronia	15
รูปที่ 2.9 ระบบการป้องกันโดรนของ SharpEye	16
รูปที่ 3.1 ระบบเรดาร์พื้นฐาน	19
รูปที่ 3.2 ช่วงคลื่นและความถี่	20
รูปที่ 3.3 การวัดทดสอบมุมเงยของเรดาร์	21
รูปที่ 3.4 ประเภทของเรดาร์ตามเทคโนโลยี	22
รูปที่ 3.5 ประเภทของเรดาร์ ตามการใช้งาน	22
รูปที่ 3.6 ระบบเรดาร์ (ก) Monostatic และ (ข) Bistatic Radar	23
รูปที่ 3.7 Mono pulse radar	24
รูปที่ 3.8 Passive radar	24
รูปที่ 3.9 การแสดงภาพของ Weather radars	25
รูปที่ 3.10 Mapping radar	25
รูปที่ 3.11 Pulse-repetition time (PRT)	27
รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมของ Pulse Radar	27
รูปที่ 3.13 (ก) บล็อกไดอะแกรมโดยทั่วไปของ unmodulated CW radar (ข) บล็อกไดอะแกรมที่ได้รับความนิยมของ unmodulated CW radar	29
รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการใช้งานในการวัดความเร็วรถยนต์	30
รูปที่ 3.15 (ก) บล็อกไดอะแกรมโดยทั่วไปของ FMCW radar (ข) บล็อกไดอะแกรมที่ได้รับความนิยมของ FMCW radar	31
รูปที่ 3.16 (ก) ข้อดีของระบบ FMCW (แถบกำลังงานสี่เหลี่ยม) (ข) และ (ค) บล็อกไดอะแกรมที่ได้รับความนิยมของ FMCW radar	36

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

รูปที่ 3.17 สัญญาณ ส่ง-รับ ที่ความถี่เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณควบคุมแบบสามเหลี่ยม (modulation pattern) และสัญญาณ IF	37
รูปที่ 3.18 (ก) แผนผังความถี่ที่เปลี่ยนไปตามเวลา (ข) การประมวลผลในแต่ละช่วงเวลา	40
รูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) บล็อกไดอะแกรมที่ได้รับความนิยมของ FMCW radar	47
รูปที่ 4.2 ระบบเรดาร์ FMCW ที่สร้างขึ้น	48
รูปที่ 4.3 การตั้งค่าเป้าหมาย	51
รูปที่ 4.4 การตั้งค่าการตรวจจับเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม	51
รูปที่ 4.5 การตั้งค่าการตรวจจับแท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลม	51
รูปที่ 4.6 การตั้งค่าการตรวจจับแผ่นโลหะสี่เหลี่ยม	52
รูปที่ 4.7 การตรวจจับไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม	52
รูปที่ 4.8 การตรวจจับแท่งโลหะหน้าตัดแบบวงกลม	53
รูปที่ 4.9 การตรวจจับแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัส	54
รูปที่ 4.10 พล็อตพื้นผิวของสเปกตรัมความถี่เทียบกับเวลา	55
รูปที่ 4.11 (ก) - (ง) แสดงการทดสอบวัฏจักรการใช้งานของสายอากาศปากแตร	57
รูปที่ 5.1 หน้าที่ของสายอากาศ	60
รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของสายอากาศในระบบส่ง	60
รูปที่ 5.3 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	61
รูปที่ 5.4 โพลาริซชันของสายอากาศ	62
รูปที่ 5.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น	63
รูปที่ 5.6 ตัวอย่างห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน (anechoic chamber) ในประเทศไทย (KMITL: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand)	65
รูปที่ 5.7 ห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน (Anechoic Chamber ) ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	65
รูปที่ 5.8 ระยะทดสอบสายอากาศ $\frac{2D^2}{\lambda}$	66
รูปที่ 5.9 การทดสอบสายอากาศ	66
รูปที่ 5.10 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน	67
รูปที่ 5.11 สายอากาศปากแตรต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้น	69
รูปที่ 5.12 การออกแบบสายอากาศ (ก) ขนาดของสายอากาศ (ข) สายอากาศแบบปากแตร (ค) รูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลอง	71
รูปที่ 5.13 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน   S11	71

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

รูปที่ 5.14	รูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศในระนาบ E	72
รูปที่ 5.15	รูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศในระนาบ H	72
รูปที่ 5.16	ตัวอย่างการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา (parabolic reflector antenna)	73
รูปที่ 5.17	ตัวอย่างการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา (parabolic reflector antenna)	73
รูปที่ 5.18	สายอากาศของบริษัท LANBOWAN รุ่น 4.9-6.5GHz MIMO Dish Antenna ANT4965D30P6-MIMO แบบสองตัวสะท้อน (Dual Reflector) โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 65 cm ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz	74
รูปที่ 5.19	(ก) โครงสร้างสายอากาศของบริษัท LANBOWAN (ข) ไม่ได้ทำการปรับปรุง (ค) นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz ให้อัตราการขยายที่ดีที่สุดได้ 33.8 dBi	76
รูปที่ 5.20	(ก) การติดตั้งทดสอบ (ข) การทดสอบ (ค) ค่าการทดสอบ $ S_{11} (\text{dB}) < -10 \text{ dB}$ ที่ 10GHz ของสายอากาศของบริษัท LANBOWAN ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz ให้อัตราการขยายที่ดีที่สุดได้ 33.8 dBi	78
รูปที่ 5.21	ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระนาบ yz ที่มุม $\phi=90$ ของสายอากาศของบริษัท LANBOWAN ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz ให้อัตราการขยายที่ดีที่สุดได้ 33.8 dBi	78
รูปที่ 5.22	ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระนาบ xz ที่มุม $\phi=90$ ของสายอากาศของบริษัท LANBOWAN ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz ให้อัตราการขยายที่ดีที่สุดได้ 33.8 dBi	79
รูปที่ 5.23	สายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (Slotted Array Antenna)	81
รูปที่ 5.24	(ก) ขนาดที่ออกแบบของสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ออกแบบร่วมกับตัวสะท้อน (ข) แบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	82
รูปที่ 5.25	(ก) การสร้างสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) (ข) การติดตั้งตัวสะท้อนเพื่อเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศ	82
รูปที่ 5.26	(ก) การทดสอบ $ S_{11} (\text{dB}) < -10 \text{ dB}$ ที่ 10GHz (ข) การติดตั้ง (ค) การทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน	84
รูปที่ 5.27	(ก) ค่าการทดสอบ $ S_{11} (\text{dB}) < -10 \text{ dB}$ ที่ 10GHz (ข) ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระนาบ xz ที่มุม $\phi=0$	85
รูปที่ 7.1	แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณ	89

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

รูปที่ 7.2	ส่วนต่อประสานผู้ใช้งานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์	90
รูปที่ 7.3	แสดงเมทริกซ์ข้อมูลสัญญาณ IF signal ที่ได้รับจากตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล	91
รูปที่ 7.4	แสดงขั้นตอนย่อในการคำนวณการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่อง	91
รูปที่ 7.5	แสดงแผนภาพการคำนวณของอัลกอริทึม fft (n) แผนภาพการคำนวณในกรณีที่มีจำนวนข้อมูล 8 จุด (ข) การสลับ bit ลำดับของ $a_n$ และ $A_k$	92
รูปที่ 7.6	สัญญาณ IF ในโดเมนความถี่	93
รูปที่ 7.7	แบบจำลองการวัดผลตอบสนองของเป้าหมายในอากาศว่าง	93
รูปที่ 7.8	สัญญาณ IF ในโดเมนความถี่หลังจากทำการลบผลกระทบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศและนอร์มัลไลเซชัน	95
รูปที่ 7.9	แผนภาพสัญญาณเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ถูกกล่าวความถี่พื้นฐาน	97
รูปที่ 7.10	แสดงแผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณปีทที่ได้จากเรดาร์ตรวจจับโดรน	100
รูปที่ 7.11	แสดงแผนภาพหน้าจอเรดาร์ในแผนภาพวงกลมขณะตรวจจับโดรน	101
รูปที่ 8.1	(ก) การติดตั้งระบบเรดาร์บนระบบชุดหมุนสองแกน (ข) ระบบชุดหมุนสองแกนที่ติดตั้งบนฐานรับน้ำหนัก (ค) องค์ประกอบต่างๆแบบสามมิติของระบบชุดหมุนสองแกน	105
รูปที่ 8.2	ภาพรวมโครงสร้างทางกลของชุดหมุนสองแกน	105
รูปที่ 8.3	(ก) ภาพรวมระบบควบคุมการทำงานของชุดหมุนสองแกน (ข) คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก	108
รูปที่ 8.4	ส่วนติดต่อผู้ใช้งานของระบบควบคุมการหมุนของระบบเรดาร์สองแกน	108
รูปที่ 8.5	ภาพรวมการติดตั้งระบบเรดาร์เข้ากับระบบชุดหมุนสองแกน	111
รูปที่ 9.1	การตั้งค่าการตรวจจับผนังของห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน	113
รูปที่ 9.2	การตั้งค่าการตรวจจับแทนติดตั้งเป้าหมายวัสดุท่อ PVC	114
รูปที่ 9.3	การตั้งค่าการตรวจจับแผ่นโลหะบนแทนติดตั้งเป้าหมายวัสดุท่อ PVC	114
รูปที่ 9.4	การตั้งค่าการตรวจจับแผ่นโลหะบนแทนติดตั้งเป้าหมายวัสดุท่อ PVC	115
รูปที่ 9.5	การตั้งค่าการตรวจจับโดรนการเกษตร	115
รูปที่ 9.6	การตั้งค่าการตรวจจับโดรนการเกษตร	116
รูปที่ 9.7	การตั้งค่าการตรวจจับโดรนการเกษตร	116
รูปที่ 9.8	สัญญาณปีทในโดเมนความถี่จากการตรวจจับผนังของห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน	117
รูปที่ 9.9	สัญญาณปีทในโดเมนความถี่จากการตรวจจับแทนติดตั้งเป้าหมาย	117
รูปที่ 9.10	สัญญาณปีทในโดเมนความถี่จากการตรวจจับแผ่นโลหะ	118
รูปที่ 9.11	สัญญาณปีทในโดเมนความถี่จากการตรวจจับโดรนการเกษตร	119

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

รูปที่ 9.12	พื้นที่ใช้สำหรับการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนและพิกัดของสถานที่ทดสอบ	120
รูปที่ 9.13	สถานที่จริงของดาวฟ้าตีวิศวกรรมศาสตร์สำหรับการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน	120
รูปที่ 9.14	โดรนการเกษตรที่ใช้ในการทดสอบ	120
รูปที่ 9.15	ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในกรณีที่เราไม่หมุน	121
รูปที่ 9.16	ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในกรณีที่เรดาร์หมุน	121
รูปที่ 9.17	ภาพการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน	122
รูปที่ 9.18	แผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณก่อนการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีไม่เปิดใช้ระบบหมุนสายอากาศ	123
รูปที่ 9.19	แผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณหลังการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีไม่เปิดใช้ระบบหมุนสายอากาศ	124
รูปที่ 9.20	แผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณก่อนการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีเปิดใช้ระบบหมุนสายอากาศ	125
รูปที่ 9.21	แผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณหลังการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีเปิดใช้ระบบหมุนสายอากาศ	125
รูปที่ 10.1	ตำแหน่งจีพีเอสบนพื้นที่ใช้ในการทดสอบ สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	128
รูปที่ 10.2	สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	129
รูปที่ 10.3	เรดาร์ตรวจจับโดรนโดยใช้สายอากาศ Horn antenna	129
รูปที่ 10.4	โดรนการเกษตรใช้ในการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน	130
รูปที่ 10.5	กล้องวัดระยะ	130
รูปที่ 10.6	ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์โดรนที่กำลังหมุนโดยให้โดรนเพิ่มระดับความสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ	131
รูปที่ 10.7	ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 1	131
รูปที่ 10.8	ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 2	132
รูปที่ 10.9	ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 3	133
รูปที่ 10.10	ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 4	133
รูปที่ 10.11	ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 5	134
รูปที่ 10.12	ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนเรียงต่อกันในแต่ละรอบ	135
รูปที่ 10.13	ส่วนติดต่อผู้ใช้งานใช้งานร่วมกับเรดาร์ตรวจจับโดรน	136

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

รูปที่ 10.14 การทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน สนามกีฬามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	138
รูปที่ 10.15 ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนโดยให้โดรนบินตามการหมุนของเรดาร์	139
รูปที่ 10.16 ส่วนติดต่อผู้ใช้งานใช้งานร่วมกับเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีโดรนบินตามเรดาร์	139
รูปที่ 12.1 บรรยายภาพการ work shop และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	148
รูปที่ 12.2 บรรยายภาพการ work shop และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	148
รูปที่ 12.3 บรรยายภาพการ work shop และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	149
รูปที่ 12.4 บรรยายภาพการ work shop และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	149

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แผนการดำเนินงาน (Project Plan)

คณะนักวิจัยได้จัดทำแผนการดำเนินงาน (Project Plan) ของโครงการวิจัยเป็นไปตามตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน (Project Plan)

ลำดับ	รายละเอียดแผนงาน	เดือนที่																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	จัดทำแผนการดำเนินงาน (Project Plan)	■																							
2	จัดทำความร่วมมือนำการดำเนินงานวิจัยกับหน่วยงานความมั่นคงหรืออุตสาหกรรมป้องกันประเทศ (MOU หรือที่ปรึกษา)	■																							
3	ทบทวนวรรณกรรม		■	■	■	■	■																		
4	ศึกษาเทคโนโลยีเรดาร์ที่ใช้ในการตรวจจับโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต		■	■	■	■	■																		
5	พัฒนาภาครับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์สำหรับการตรวจจับโดรน							■	■	■	■	■	■												
6	พัฒนาส่วนประมวลผลสัญญาณเพื่อการตรวจจับโดรนและสิ่งแปลกปลอมโดยการใช้เรดาร์							■	■	■	■	■	■												
7	พัฒนาสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน							■	■	■	■	■	■												
8	พัฒนาซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์														■	■	■	■	■	■					





## 1.2 ความร่วมมือการทำงานวิจัย

- เอกสารแสดงความร่วมมือการดำเนินงานวิจัยกับหน่วยงานความมั่นคงหรืออุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เช่น กรมการทหารสื่อสาร หรือ หน่วยบัญชาการป้องกันภัยทางอากาศกองทัพบก หรือ สำนักงานวิจัยและพัฒนาการทางทหาร กองทัพอากาศ หรือ สถาบันป้องกันประเทศ เป็นต้น โดยมีรูปแบบความร่วมมือ เช่น การเป็นที่ปรึกษาโครงการหรือให้คำแนะนำในการดำเนินโครงการ หรือ การแลกเปลี่ยนความรู้ในการทำวิจัย เป็นต้น

- โครงการวิจัยนี้ได้ร่วมมือการดำเนินงานวิจัยกับหน่วยงานความมั่นคง โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก พล.ต. ชุมพร อินทร์ทองน้อย ตำแหน่ง ที่ปรึกษาเจ้ากรมการทหารสื่อสาร สังกัด กรมการทหารสื่อสาร เป็นที่ปรึกษาโครงการ (ตามเอกสารที่ส่งมาด้วย) และร่วมมือการดำเนินงานวิจัยกับอุตสาหกรรมป้องกันประเทศ โดยได้มีบันทึกข้อตกลงความร่วมมือทางวิชาการและการวิจัยระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือกับสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (ตามเอกสารที่ส่งมาด้วย) นอกจากนี้ยังได้ร่วมมือการดำเนินงานวิจัยกับหน่วยงานมหาวิทยาลัย โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นที่ปรึกษาโครงการ (ตามเอกสารที่ส่งมาด้วย)

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

### หนังสือรับรองการเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัย

ข้าพเจ้า พล.ต. ชุมพร อินทร์ทองน้อย ตำแหน่ง ที่ปรึกษาเจ้ากรมการทหารสื่อสาร สังกัด กรมการทหารสื่อสาร ขอยืนยันว่า ข้าพเจ้าได้รับเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัย เรื่อง การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจาก กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.) โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญญา สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย ตลอดระยะเวลาดำเนินการวิจัย ทั้งนี้จะให้คำปรึกษาในด้านการใช้งานความถี่ การใช้งานและพื้นที่การใช้งานเรดาร์ตรวจจับโดรน และการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน

(ลงชื่อ) 

(พล.ต. ชุมพร อินทร์ทองน้อย)

วันที่ 14 เดือน ๑๐ พ.ศ. ๒๕๖๓

# การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



บันทึกข้อตกลงความร่วมมือทางวิชาการและการวิจัย  
ระหว่าง  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
กับ  
สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ



บันทึกข้อตกลงฉบับนี้ทำขึ้น ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตั้งอยู่เลขที่ ๑๕๓๘ ถนนประชาชื่น ๑ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางเขน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ๑๐๘๐๐ เมื่อวันที่ ๙ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๖๒ โดย ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทร์อัมพร ตำแหน่ง รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ ผู้มีอำนาจลงนามผูกพันมหาวิทยาลัยตามประกาศสำนักนายกรัฐมนตรี เมื่อวันที่ ๑๖ มกราคม พ.ศ. ๒๕๖๐ เรื่อง แต่งตั้งอธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประกอบคำสั่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อวันที่ ๒๑ พฤศจิกายน ๒๕๕๙ เรื่อง มอบอำนาจให้รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศปฏิบัติกรแทนอธิการบดี ซึ่งต่อไปในบันทึกข้อตกลงนี้จะเรียกว่า “มจพ.” กับ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ตั้งอยู่เลขที่ ๔๗/๔๓๓ ชั้น ๕ อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ) หมู่ ๓ ตำบลบ้านใหม่ อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ๑๑๑๒๐ โดย พลอากาศเอก ดร.ปรีชา ประดับมุข ตำแหน่ง ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ตามคำสั่งคณะกรรมการสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ที่ ๑๐/๒๕๖๐ เรื่อง แต่งตั้งผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ลงวันที่ ๒๙ มกราคม ๒๕๖๐ ซึ่งต่อไปในบันทึกข้อตกลงนี้จะเรียกว่า “สทป.” อีกฝ่ายหนึ่ง และในบันทึกข้อตกลงนี้จะเรียกว่า “หน่วยงานทั้งสอง” โดยที่ หน่วยงานทั้งสองได้ตระหนักถึงความสำคัญในการประสานความร่วมมือทางวิชาการและการวิจัย เพื่อพัฒนาองค์ความรู้และผลิตุบุคลากรด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

ทั้งสองฝ่ายได้จัดทำบันทึกข้อตกลงนี้ขึ้น โดยมีสาระสำคัญดังนี้

ข้อ ๑ บันทึกข้อตกลงนี้ เป็นพื้นฐานความร่วมมือทางวิชาการและการวิจัยเพื่อพัฒนาองค์ความรู้และผลิตุบุคลากรด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีป้องกันประเทศ ระหว่างหน่วยงานทั้งสอง

ข้อ ๒ หน่วยงานทั้งสองจะร่วมกันจัดให้มีกิจกรรมการฝึกอบรม การสัมมนา เพื่อแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ เพื่อพัฒนาความสามารถในการปฏิบัติงานของบุคลากรทั้งสองฝ่าย

ข้อ ๓ การบริหารเงินทุนวิจัยไม่ว่าจะมาจากภาครัฐหรือภาคเอกชน เพื่อให้บรรลุเป็นไปตามเป้าหมายและวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้แต่ละโครงการแต่ละกิจกรรม หน่วยงานทั้งสองจะร่วมกันจัดสรรงบประมาณเป็นคราวๆ ไป

ข้อ ๔ กรรมสิทธิ์หรือสิทธิความเป็นเจ้าของในทรัพย์สินทางปัญญา ในผลงานวิจัย พัฒนา และนวัตกรรม ที่ได้วิจัยร่วมกัน ถือเป็นสิทธิร่วมทั้งสองฝ่าย เว้นแต่จะได้ตกลงกันเป็นอย่างอื่น หรือก่อนที่จะมีการร่วมมือในการดำเนินการโครงการใด ๆ เห็นควรที่จะต้องมีการตกลงกันระหว่างหน่วยงานทั้งสองให้ชัดเจนก่อนว่าให้ทรัพย์สินทางปัญญาที่เกิดขึ้นให้ถือเป็นสิทธิร่วมกัน

ข้อ ๕ ข้อมูลที่เป็นความลับ การรักษาความลับ หน่วยงานทั้งสองจะร่วมกันพิจารณาและตัดสินใจเกี่ยวกับข้อมูลที่เกิดเป็นความลับและการเปิดเผยข้อมูลดังกล่าวจะต้องได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากทั้งสองฝ่าย

๒๐๒๗



/ ข้อ ๖ บันทึก ...

# การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

๒

ข้อ ๖ บันทึกข้อตกลงนี้ เป็นบันทึกข้อตกลงความร่วมมือทั่วไป ในการดำเนินการขึ้นไป หน่วยงานทั้งสองจะร่วมกันกำหนดรายละเอียดของข้อตกลงเฉพาะเรื่อง ภายใต้ขอบเขตและวัตถุประสงค์ แห่งบันทึกข้อตกลงความร่วมมือนี้ โดยให้สอดคล้องกับกฎหมาย ระเบียบและข้อบังคับของแต่ละหน่วยงาน

ข้อ ๗ บันทึกข้อตกลงนี้ มีผลใช้บังคับเป็นเวลา ๓ (สาม) ปี นับตั้งแต่วันที่ ๙ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๖๒ ถึง วันที่ ๙ กรกฎาคม พ.ศ. ๒๕๖๕

เมื่อครบระยะเวลาบันทึกข้อตกลงฯ ตามวรรคหนึ่งแล้ว ทั้งสองฝ่ายอาจตกลงเพื่อให้ขยายระยะเวลา บันทึกข้อตกลง ออกไปอีกไม่เกิน ๓ (สาม) ปี ก็ได้

ข้อ ๘ บันทึกข้อตกลงนี้ อาจมีการแก้ไขปรับปรุงเพื่อให้เกิดความเหมาะสมได้ โดยความเห็นชอบร่วมกัน ของทั้งสองฝ่าย และจัดให้ทำเป็นบันทึกแนบท้ายบันทึกข้อตกลงนี้

หากฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งประสงค์ที่จะยกเลิกบันทึกข้อตกลงนี้ ให้สามารถทำได้โดยแจ้งความจำนง เป็นลายลักษณ์อักษรให้อีกฝ่ายหนึ่งทราบล่วงหน้าไม่น้อยกว่า ๙๐ (เก้าสิบ) วัน

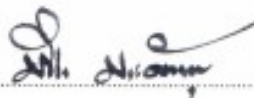
การยกเลิกบันทึกข้อตกลงตามวรรคสอง จะไม่ส่งผลกระทบต่อ การดำเนินโครงการความร่วมมือ ทางวิชาการและการวิจัย รวมทั้งกิจกรรมใด ๆ ตามบันทึกข้อตกลงฉบับนี้ที่ได้เริ่มดำเนินการไปแล้ว ก่อนการยกเลิกบันทึกข้อตกลงนี้ และให้ดำเนินการต่อไปจนกว่าโครงการหรือกิจกรรมดังกล่าวจะแล้วเสร็จ

บันทึกข้อตกลงนี้ ทำขึ้นเป็นสองฉบับ มีข้อความถูกต้องตรงกัน ทั้งสองฝ่ายได้อ่านข้อความ โดยละเอียดตลอดแล้ว เห็นว่าตรงตามเจตนารมณ์ทุกประการ จึงได้ลงลายมือชื่อไว้เป็นหลักฐานต่อหน้าพยาน และต่างฝ่ายต่างยึดถือไว้ฝ่ายละฉบับ

สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ลงชื่อ พลอากาศเอก.....



(ดร.ปรีชา ประดับมุข)

ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

ลงชื่อ.....



(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทน์อัมพร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปฏิบัติการแทนอธิการบดี

ลงชื่อ นาวาอากาศเอก.....



(คมสันต์ ประพันธ์กาญจน์)

รองผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

ลงชื่อ.....



(ศาสตราจารย์ ดร.ปฎิพัทธ์ ทวนทอง)

ผู้อำนวยการสำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

น.อ.ดร. 

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

### หนังสือรับรองการเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัย

ข้าพเจ้า รองศาสตราจารย์ ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอยืนยันว่า ข้าพเจ้าได้รับเป็นที่ปรึกษาโครงการวิจัย เรื่อง การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต ได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจาก กองทุนวิจัยและพัฒนาโครงการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.) โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญอุษา สังกัด ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย ตลอดระยะเวลาดำเนินการวิจัย ทั้งนี้จะให้คำปรึกษาในด้าน การออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ การทดสอบระบบเรดาร์

(ลงชื่อ).....



(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

วันที่ 10 เดือน ก.ก. พ.ศ. 67

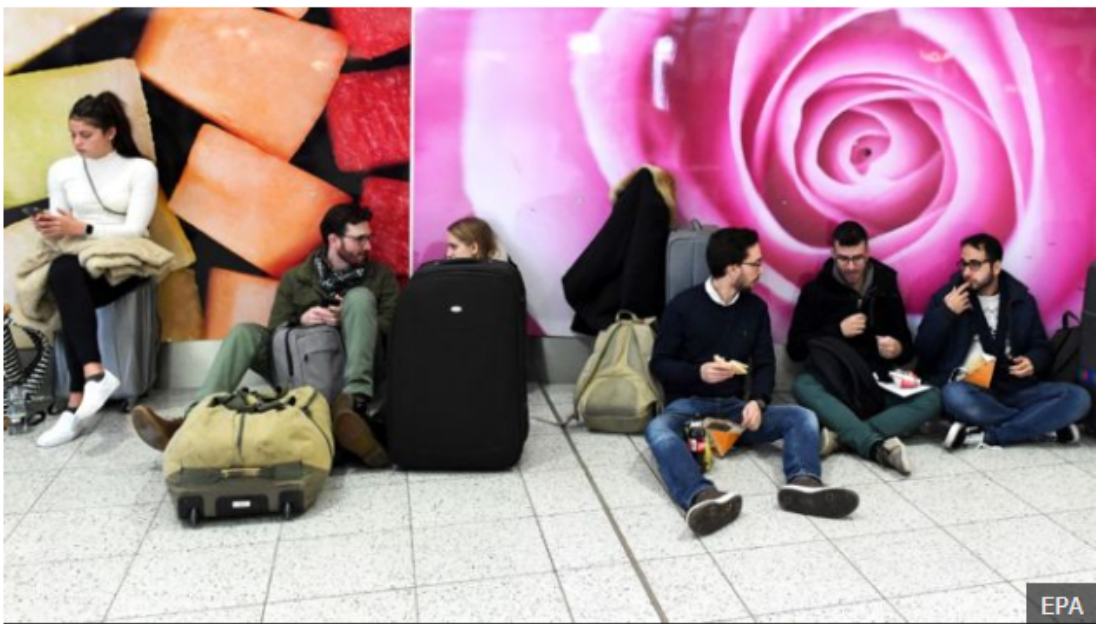
# รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 1

## บทที่ 2

### รายงานการทบทวนวรรณกรรม

#### 2.1 ภัยคุกคามจากอากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicle หรือ UAV)

โดรน (Drone) หรือ อากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicle หรือ UAV) เป็นอากาศยานที่สามารถควบคุมการบินจากทางไกลโดยใช้การควบคุมผ่านสัญญาณวิทยุจากผู้ควบคุมภาคพื้นดิน ดังนั้นคนทั่วไปก็สามารถหาซื้อมาใช้เป็นของตนเองได้ง่าย ปัจจุบันจึงมีการใช้งานโดรนกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใคร ๆ ก็สามารถเป็นเจ้าของโดรนได้ ทำให้ในหลาย ๆ ครั้งเกิดเหตุการณ์ที่อาจเป็นอันตรายด้านความปลอดภัยของสถานที่สำคัญได้ ดังเช่นข่าวที่สำนักข่าว BBC รายงานว่า สนามบินแกตวิกของอังกฤษจำเป็นต้องปิดทำการเป็นเวลาถึง 2 วัน เนื่องจากพบโดรนลำหนึ่งบินอยู่เหนือสนามบิน ซึ่งตำรวจสามารถควบคุมตัวผู้ต้องสงสัย 2 คนที่คาดว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับการบินโดรนใกล้กับรันเวย์ได้แล้ว และกำลังดำเนินการสอบสวนบุคคลทั้งสองด้วยข้อหาการใช้โดรนก่ออาชญากรรม จากเหตุการณ์นี้ส่งผลกระทบต่อเที่ยวบินทั้งหมด 757 เที่ยวบินและผู้โดยสารอีกกว่า 1.2 แสนคนต้องออกเดินทางล่าช้าและยกเลิกในบางเที่ยวบินดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ผู้โดยสารที่ติดค้างอยู่ที่สนามบิน อันเนื่องมาจากโดรนที่บินเข้ามาในบริเวณรันเวย์

หรือจะเป็นเหตุการณ์ในภารกิจปฏิบัติการช่วยเหลือนักฟุตบอลเยาวชนทีมหมูป่าและผู้ฝึกสอนรวม 13 ชีวิต ที่ติดอยู่ภายในถ้ำหลวง วนอุทยานถ้ำหลวง ขุนน้ำนางนอน จ.เชียงราย ซึ่งในระหว่างภารกิจลำเลียงทีมหมูป่ามุ่งหน้าสู่โรงพยาบาลเชียงรายประชานุเคราะห์ พบภาพโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาตบินใน



## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

บริเวณที่ใกล้กับเฮลิคอปเตอร์ลำเลียง ซึ่งมาจากทีวีช่องหนึ่งของไทยที่ต้องการถ่ายภาพภารกิจอย่างใกล้ชิดดังรูปที่ 2.2 ซึ่งอาจเกิดอันตรายขึ้นในระหว่างการลำเลียงได้

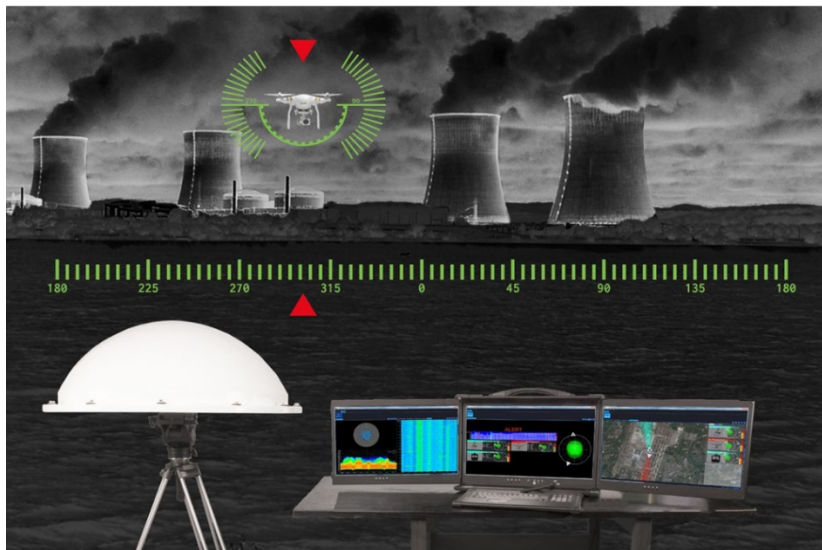


รูปที่ 2.2 ภาพโดรนที่บินเข้าไปใกล้เฮลิคอปเตอร์ลำเลียงที่มทพ

นอกจากนี้จากรายงานทางเว็บไซต์ของบีบีซีไทย วันที่ 12 ต.ค. 2560 นายฐากร ตัณฑสิทธิ์ เลขาธิการ กสทช. กล่าวว่า “ปัจจุบันประเทศไทยมีโดรนมากกว่า 50,000 ลำ แต่ได้มีการขึ้นทะเบียนกับสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทยเพียง 350 ลำ จึงได้มีข้อกำหนดห้ามบินโดรนโดยไม่ได้รับอนุญาต จุดประสงค์หลักเพื่อรักษาความปลอดภัยและเป็นระเบียบในช่วงพระราชพิธีฯ และเพื่อความปลอดภัยของประชาชน เพราะปัจจุบันมีการใช้โดรน อย่างหลากหลาย รวมทั้งใช้ในทางผิดกฎหมายอย่างเช่นใช้หาข้อมูล ใช้ขโมยภาพถ่าย ซึ่งทางหน่วยงานด้านความมั่นคงก็แสดงความเป็นห่วงมาตั้งนั้นในห้วงเวลาของพระราชพิธีจึงน่าจะเป็นโอกาสอันสมควรที่จะมีระเบียบควบคุมโดรนออกมา” ทำให้ กสทช. และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเช่น สถาบันการบินพลเรือน จำเป็นที่จะต้องมีระบบหรือกระบวนการในการตรวจจับโดรนที่บินในบริเวณที่ไม่ได้รับอนุญาต ซึ่งคณะนักวิจัยจะนำเสนอระบบตรวจจับโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยการใช้เรดาร์ ซึ่งเรดาร์มีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีตรวจจับอื่น ๆ คือ สามารถตรวจจับโดรนและวัตถุแปลกปลอม รวมถึงสามารถระบุตำแหน่งของเป้าหมายได้ ได้ตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน รวมถึงในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดีด้วย ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเดียวกับการตรวจจับเครื่องบินทางการทหาร (แต่ย่านความถี่ต่างกันเพื่อการตรวจจับขนาดของวัตถุต่างกัน)

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ขณะที่การใช้เทคโนโลยีอื่นเพื่อการตรวจจับโดรนจะมีข้อจำกัดที่มากกว่า เช่น การใช้กล้องตรวจจับจะไม่สามารถตรวจจับในภาพทัศนวิสัยไม่ดีหรือในช่วงกลางคืนได้ (ปกติระบบกล้องจะใช้หลังจากที่เรดาร์ตรวจพบโดรนแล้ว) การใช้เครื่องตัดสัญญาณโดรนจะมีข้อจำกัดที่ต้องรู้สถานะและทิศของโดรนก่อนที่จะทำการตัดสัญญาณโดยการใช้พนักงานตรวจด้วยสายตาก็ไม่สามารถตรวจได้ตลอดเวลา (ปกติระบบตัดสัญญาณโดรนถูกใช้หลังจากที่เรดาร์ตรวจพบโดรนแล้ว) และการใช้ระบบหาทิศ (หรือระบบ passive) จากสัญญาณควบคุมของโดรน ในทางปฏิบัติก็ไม่สามารถใช้งานได้อย่างแม่นยำเนื่องจากในสภาพแวดล้อมที่ทำงานจริงจะมีสัญญาณที่ความถี่เดียวกันหรือความถี่ต่างกันมาจากแหล่งกำเนิดอื่นเป็นจำนวนมาก การใช้ระบบหาทิศจึงอาจจะทำให้เกิดการระบุทิศที่ผิดพลาดได้ เป็นต้น รูปที่ 2.3 แสดงหน้าจอตัวอย่างของการแสดงผลของระบบเรดาร์ ที่มีลักษณะคล้ายกับเรดาร์ทางการทหาร (สามารถปรับปรุงการแสดงผลให้ง่าย เช่น การบอกตำแหน่ง และระยะได้)



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างหน้าจอแสดงผลของระบบเรดาร์

### 2.2 ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน

ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนเริ่มมีการผลิตและขายในต่างประเทศ เนื่องจากทั้งผู้ผลิตและผู้เริ่มเล็งเห็นถึงความจำเป็นของระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนดังกล่าวมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนที่ขายในใช้ท้องตลาด (ต่างประเทศ) ยังมีราคาที่สูงมาก ประมาณเกือบ 100 ล้านบาทต่อชุด และยังไม่มีการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนของประเทศไทยอย่างจริงจัง สำหรับรายงานนี้จะพัฒนาระบบตรวจจับโดรนนอกจากเพื่อป้องกันการลักลอบบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต อาจจะทำให้เกิดอันตรายได้ เช่น ในบริเวณที่ประกาศพื้นที่ภัยพิบัติ ในบริเวณเขตการบินของสนามบิน

## การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคโรนาเพื่อป้องกันการบิ่นโคโรนาที่ไม่ได้รับอนุญาต

ในบริเวณพระราชฐาน รวมถึงการบิ่นโคโรนาที่ใช้ในการลักลอบการขนยาเสพติด เช่นในเรือนจำ เป็นต้น ยังสามารถช่วยลดการนำเข้ายาเสพติดทางอากาศที่มีมูลค่ามหาศาลอีกด้วย ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ระบบตรวจจับโคโรนาที่ขายในต่างประเทศมีดังนี้

### 1 ผลิตภัณฑ์ชื่อ ELVIRA โดย robin radar systems



รูปที่ 2.4 ระบบเรดาร์ ELVIRA พร้อมติดตั้งกล้อง

#### รายละเอียดการทำงาน

เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้โคโรนาเป็นวงกว้างมากขึ้น เพราะสามารถหาซื้อได้ง่ายและสามารถบิ่นได้ง่าย ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาในด้านความปลอดภัยของสถานที่สำคัญได้ ระบบเรดาร์จึงต้องสามารถตรวจจับได้ในระยะหลายกิโลเมตรรวมถึงต้องสามารถคงประสิทธิภาพการตรวจจับภายใต้เงื่อนไขทัศนวิสัยที่ต่ำหรือในสภาพแวดล้อมที่เต็มไปด้วยวัตถุเคลื่อนที่และอุปสรรคต่าง ๆ ซึ่งโคโรนาสามารถตั้งโปรแกรมให้บิ่นได้อย่างอิสระรวมถึงบิ่นรวมกลุ่มกันเป็นฝูง ระบบเรดาร์จึงต้องสามารถตรวจจับหลายเป้าหมายพร้อม ๆ กันในเวลาเดียวกันได้ด้วย “ELVIRA” ถูกออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการข้างต้นเหล่านี้ ELVIRA เป็นส่วนผสมระหว่างซอฟต์แวร์ที่เฉลียวฉลาดกับเรดาร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อการตรวจจับโคโรนาโดยเฉพาะ ดังรูปที่ 2.4 โดยกล้องที่ติดอยู่บนเรดาร์เป็นอุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยในการยืนยันเป้าหมาย ซึ่งโดยปกติมักจะใช้รูปภาพในการยืนยันเป้าหมาย เรดาร์นี้สามารถต่อกับกล้องความละเอียดสูงเพื่อใช้ในการยืนยันเป้าหมายได้ด้วย เมื่อตรวจพบโคโรนา กล้องจะทำการซูมกล้องไปยังตำแหน่งเป้าหมาย เพื่อถ่ายภาพและส่งข้อมูลไปยังผู้ใช้งาน

การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

### ประสิทธิภาพของระบบ

- ระยะตรวจจับ 3,000 – 9,000 เมตร ตามขนาดของวัตถุ
- ระยะการจำแนกประเภท 1,100 เมตร
- ความกว้างของ빔  $10^{\circ} \times 10^{\circ}$
- ความละเอียดมุมตำแหน่ง  $1^{\circ}$
- ความละเอียดพิสัย 1.5 เมตร
- เทคโนโลยีที่ใช้ FMCW
- ย่านความถี่ X Band 9650 MHz
- พลังงาน (EIRP) 4 วัตต์
- ความเร็วในการหมุน 60 RPM
- สามารถเชื่อมต่อผ่าน Wifi 3G 4G

### 2. ผลิตภัณฑ์ชื่อ SKYLOCK



รูปที่ 2.5 ระบบเรดาร์ SKYLOCK

#### รายละเอียดการทำงาน

ช่วยในการตรวจจับได้อย่างรวดเร็ว และระยะทำการกว่า 20 กิโลเมตรสำหรับวัตถุขนาดใหญ่ และระยะทำการ 2.5 กิโลเมตรสำหรับตรวจจับโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต เซนเซอร์สำหรับตรวจจับมีลักษณะดังรูปที่ 2.5 ซึ่งได้ถูกนำไปใช้จริงแล้วในหลายประเทศ Skylock ได้ถูกออกแบบและพัฒนา

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โดรนเพื่อป้องกันการบิน โดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

โดยเป็นการผสมผสานระบบ 3 ระบบให้เป็นหนึ่งเดียว ผู้ใช้งานสามารถใช้งานระบบได้อย่างง่ายดาย และมีเวลาในการตอบสนองที่รวดเร็วในการตรวจจับหาตำแหน่งที่ตั้งเพื่อตัดสินใจว่าจะทำการทำลาย โดรนลำนั้น ๆ หรือไม่

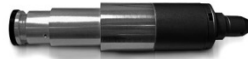
### ประสิทธิภาพของระบบ

ระบบของ SKYLOCK ประกอบด้วยระบบย่อย 4 ระบบ คือ



รูปที่ 2.6 สายอากาศระบบค้นหาตรวจจับ 360 องศา

- ระบบเรดาร์ ตรวจจับในความสูงระดับต่ำ โดยมีเป้าหมายบนฟ้าเป็นวัตถุขนาดเล็กและเคลื่อนที่ช้า ระบบสามารถหมุนได้รอบ 360 องศา (360° RF detector directional finder) และยังสามารถตรวจจับเป้าหมายกว่า 200 เป้าหมายในเวลาเดียวกัน โดยสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศแบบ 8 Omni-directional สำหรับการตรวจจับและสายอากาศ 3 Panel-Directional สำหรับการ Jamming โดยระบบค้นหาตรวจจับ 360 องศา แสดงดังรูปที่ 2.6
- ตัวติดตาม EO/IR ระบบติดตามระยะใกล้ที่มีประสิทธิภาพสูง ความน่าเชื่อถือสูง และใช้ระบบทางแสงในการสังเกตการณ์ ตรวจจับ แยกแยะโดรนในระยะ 2.5 กิโลเมตร
- RF Jammer ใช้ในการรบกวนสัญญาณ RF/GPS ของเป้าหมายเพื่อสั่งปิดการทำงาน



รูปที่ 2.7 Laser Burner

- เครื่องเผาเลเซอร์ (Laser burner) อุปกรณ์ยิงเลเซอร์ความแม่นยำสูงสำหรับโดรนเป้าหมายที่ระยะ 800 เมตรดังรูปที่ 2.7 โดยที่เลเซอร์มีความยาวคลื่นเท่ากับ 1064 nm และพลังงานที่ยิงออกไปสูงถึง 1000 W

### 3. ผลิตภัณฑ์ชื่อ Aironia Drone Detection System

จากการเติบโตอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมเกี่ยวกับโดรนขนาดเล็ก จึงมีแนวโน้มที่จะส่งผลกระทบต่อระบบการรักษาความปลอดภัยของทั้งภาคอุตสาหกรรมและในระดับประเทศ เนื่องจากสามารถผลิตได้ง่าย มีราคาถูก ควบคุมง่ายและยากต่อการตรวจจับ ซึ่งโดรนแบบที่มีวงจำหน่ายทั่วไปนั้นมียุทธการพัฒนารวดเร็วมากและอาจสร้างปัญหาให้กับทั้งทางการทหารและพลเรือนได้



รูปที่ 2.8 ระบบการป้องกันโดรนของ Aironia

การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ระบบการตรวจจับโดรนของ Aeronia ดังรูปที่ 2.8 สามารถใช้งานได้อย่างรวดเร็ว ปรับเปลี่ยนสเกลได้ โดยสามารถตรวจจับและแยกแยะวัตถุต้องสงสัยโดยใช้เซนเซอร์ไมโครเวฟและการวิเคราะห์สัญญาณ โดยที่สายอากาศแต่ละตัวจะทำงานเป็นแบบเวลาจริงแยกเป็นของตัวเอง ซึ่งข้อมูลของสายอากาศแต่ละตัวจะถูกรวมเข้าด้วยกัน ทำให้ได้ภาพในมุมมองทั้ง 360 องศาของบริเวณรอบ ๆ

#### ประสิทธิภาพของระบบ

- ครอบคลุมพื้นที่รอบ ๆ ในระยะไม่น้อยกว่า 1 กิโลเมตร
- สามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เช่น กลางคืน ช่วงมีหมอกปกคลุมหรือช่วงที่มีมรสุม
- ความแม่นยำในการตรวจจับสูง
- อาจจะสามารถตรวจจับได้ว่าใครเป็นผู้ควบคุมโดรนลำนั้น ๆ
- สามารถใช้งานได้อย่างรวดเร็วในเวลาไม่ก่นาที
- ระยะเวลาตรวจจับ 360 องศา
- ซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการแยกแยะโดรน

#### 4. เรดาร์ Kelvin Hughes SharpEye



รูปที่ 2.9 ระบบการป้องกันโดรนของ SharpEye

ระบบเรดาร์ของ Sharpeye เป็นระบบที่มีความไวสูงและถูกพัฒนาสำหรับการตรวจจับโดรนและยานพาหนะทางอากาศต่างๆ ได้ ซึ่งสามารถตรวจจับเป้าหมายทางอากาศขนาดเล็กภายใต้สภาพ

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

อากาศ ต่าง ๆ ได้ด้วย รวมถึงสามารถแจ้งเตือนล่วงหน้าเมื่อตรวจจับพบโครนในบริเวณ ดังรูปที่ 2.9 โดยที่ระบบการป้องกันประกอบไปด้วยระบบต่าง ๆ ดังนี้

1) **ระบบเรดาร์** มีพื้นที่การแสดงผลของเรดาร์ขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถแสดงบนแผนที่ได้ สามารถรองรับอินพุตได้ถึง 4 ตัวพร้อมกัน

2) **กล้องและการควบคุม** สามารถควบคุมกล้องได้โดยการใช้จอยควบคุม หรือผ่านทาง การทัชสกรีน สามารถปรับระดับการซูมของกล้องตามที่ต้องการได้

3) **วิดีโอ** เป็นการรวมกันของวิดีโอจากกล้องหลายตัว สามารถถ่ายภาพเป้าหมายได้

### ประสิทธิภาพของระบบเรดาร์

- สายอากาศ : แบบอาเรย์หมุนได้ขนาด 522 มม.
- ระยะตรวจจับ : 5 กม.
- ย่านความถี่ : 9.22 – 9.38 GHz
- การเลือกความถี่ : ผู้ใช้งานเลือกได้สูงสุด 9 ความถี่
- การตรวจจับเป้าหมาย : มากถึง 128 เป้าหมาย
- Azimuth Beam Width :  $<4.0^\circ$  @ -3dB
- Elevation Beam Width :  $25^\circ$



## บทที่ 3

### รายงานทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

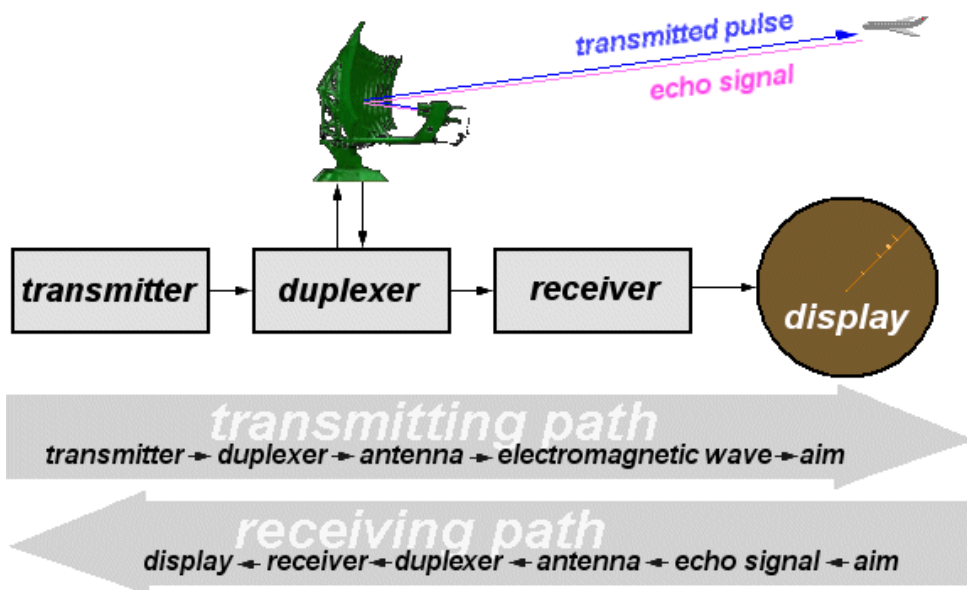
#### 3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบเรดาร์

เรดาร์ (radar) ย่อมาจากคำว่า Radio Detection and Ranging เป็นระบบที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตรวจสอบหรือค้นหาวัตถุ สามารถระบุระยะ (range) ความสูง (altitude) และทิศทางหรือความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุนั้น ๆ ได้ ซึ่งเรดาร์นั้นเริ่มมีตั้งแต่การค้นพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในปี ค.ศ. 1886 โดยเฮนริช เฮอร์ตซ์ ได้ทำการทดสอบการสะท้อนของคลื่นวิทยุ ต่อมาในปี ค.ศ. 1904 วิศวกรชาวเยอรมัน Hülsmeyer ได้ทำการทดลองค้นหาเรือที่อยู่ท่ามกลางหมอกที่หน้าทึบโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการค้นหาได้สำเร็จเป็นครั้งแรก และในปี ค.ศ. 1917 นิโคลา เทสลา ได้ทำการอธิบายหลักการการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อตรวจจับ และหาความเร็วของวัตถุ ซึ่งต่อมาในปี ค.ศ. 1922 Albert H. Taylor และ Leo C. Young ได้ทำการสาธิตการตรวจจับตำแหน่งของเรือโดยใช้เรดาร์ และในปี ค.ศ. 1930 Lawrence A. Hyland ซึ่งเป็นคนแรกที่สามารถตรวจจับเครื่องบิน โดยใช้เรดาร์ได้สำเร็จ ต่อมาในปี ค.ศ. 1936 ระบบ Pulsed radar ก็ถูกพัฒนาโดย R.M. Page จาก NRL LAB และตั้งแต่นั้นปี ค.ศ. 1938 เรดาร์ถูกนำมาใช้ในการสงครามเป็นครั้งแรกซึ่ง SCR-268 เป็นระบบที่ใช้ตรวจจับและทำลายเครื่องบินรบ (Antiaircraft fire control system) และอีกหนึ่งปีต่อมาคือปี ค.ศ. 1939 ระบบ SCR-270 ก็ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นระบบเตือนภัย (Early warning system) โดยระบบเรดาร์เดิมหรือช่วงก่อนปี ค.ศ. 1940 ได้ใช้ความถี่ย่าน HF และ VHF เป็นหลัก ซึ่งต่อมาได้มีการแลกเปลี่ยนเทคโนโลยีเรดาร์ของแต่ละประเทศทำให้มีการพัฒนาระบบเรดาร์ที่สามารถทำงานได้ความถี่ไมโครเวฟ และในปัจจุบันระบบเรดาร์ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นเรดาร์ใช้นำทางเครื่องบิน เรดาร์ตรวจจับความเร็วรถยนต์ และอื่น ๆ อีกมากมาย

หลักการของเรดาร์นั้นทำงานคล้ายกับหลักการของการสะท้อนคลื่นเสียง หากตะโกนไปในทิศทางของวัตถุที่สะท้อนเสียง เช่น หุบเขาหินหรือในถ้ำ ก็จะได้ยินเสียงสะท้อน หากทราบความเร็วของเสียงในอากาศก็สามารถประมาณระยะทาง และทิศทางของวัตถุนั้นได้ เรดาร์ก็เช่นกัน แต่เรดาร์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการส่งและรับข้อมูลแทน ซึ่งทำให้ระบบเรดาร์สามารถวัดทิศทาง ความสูง ระยะทาง เส้นทาง และความเร็วของวัตถุเหล่านี้ได้ หลักการนี้สามารถนำไปใช้ในเรดาร์ได้โดยทั่วไป ทำให้เรดาร์มีข้อดีหลายประการเมื่อเทียบกับความพยายามในการสังเกตด้วยสายตา เช่น เรดาร์สามารถทำงานได้ทั้งกลางวันและกลางคืนในความสว่างหรือความมืด เรดาร์สามารถทำงานได้ในทุกสภาพอากาศไม่ว่าจะเป็นกลางแดด หมอก ฝน และหิมะได้ เรดาร์มีการรายงานหรือส่งข้อมูลตลอดเวลา เรดาร์สามารถตรวจจับและติดตามวัตถุที่เคลื่อนไหวได้หลาย ๆ วัตถุ เรดาร์สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง เป็นต้น

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ซึ่งหากกล่าวถึงระบบเรดาร์พื้นฐาน จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงหลักการทำงานของชุดเรดาร์หลัก สายอากาศเรดาร์ เป้าหมาย โดยใช้สัญญาณหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งออกไป ซึ่งจะถูกระท้อนกับวัตถุ และสะท้อนกลับเข้ามา โดยสัญญาณหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนกลับมาเรียกว่า echo หรือ return

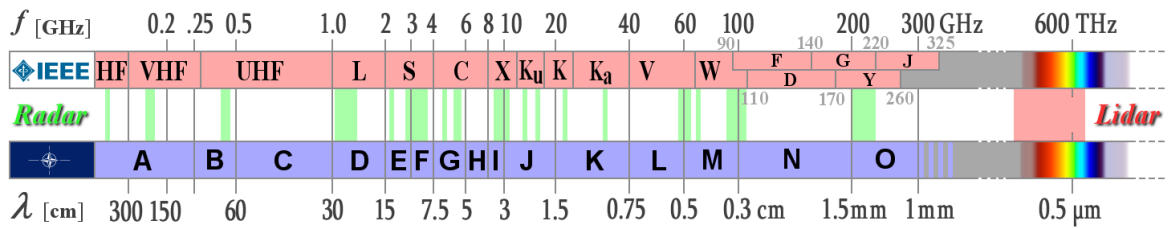


รูปที่ 3.1 ระบบเรดาร์พื้นฐาน

โดยระบบเรดาร์พื้นฐานส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย ตัวส่ง (transmitter) ซึ่งจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุพลังงานสูงในระยะเวลาสั้น ๆ duplexer อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สลับการทำงานสายอากาศระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณเพื่อให้ใช้สายอากาศเพียงสายใดสายหนึ่ง การสลับนี้จำเป็นเนื่องจากพัลส์กำลังสูงของตัวส่งอาจทำลายสัญญาณที่รับเข้ามาได้ ตัวรับ (receiver) จะทำหน้าที่รับสัญญาณแล้วทำการขยายและกำจัดสัญญาณรบกวนที่รับเข้ามา และส่งข้อมูลไปยังจอแสดงผล สายอากาศเรดาร์ (antenna) ทำหน้าที่แพร่กระจายสัญญาณและรับสัญญาณ โดยควรมีอัตราการขยายที่เหมาะสมในการใช้งานแบบต่างๆ

การทำงานของเรดาร์นั้นจะถูกแบ่งช่วงความถี่ไว้ หรือเรียกว่า ช่วงคลื่นและความถี่เรดาร์ (waves and frequency ranges) เป็นช่วงความถี่ที่ถูกนำมาใช้งานในระบบเรดาร์ ตามรูปที่ 3.2

การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 3.2 ช่วงคลื่นและความถี่

โดยการวัดทดสอบระยะทางของเรดาร์ (range or distance measurement) นั้นระบบเรดาร์จะส่งสัญญาณพัลส์ที่มีกำลังสูงไปในทิศทางที่กำหนดด้วยความเร็วแสง หากทิศทางที่ส่งมีสิ่งกีดขวาง เช่น เครื่องบิน สัญญาณที่ส่งออกไปส่วนหนึ่งจะกระจายไปทุกทิศทุกทาง และจะสะท้อนกลับมายังระบบเรดาร์ และระบบเรดาร์เมื่อได้รับสัญญาณก็จะประเมินข้อมูลที่ได้รับ สัญญาณดังกล่าวนี้สามารถวัดได้ด้วยออสซิลโลสโคปแบบง่าย ๆ ซึ่งจะมีสูตรการคำนวณดังนี้

$$R = \frac{c_0 \times t}{2} \quad (3.1-ก)$$

โดยที่  $c_0$  คือ ความเร็วแสง  $3 \times 10^8$  m/s (เมตรต่อวินาที)

$t$  คือ ระยะเวลาที่ทดสอบ (s หรือ วินาที)

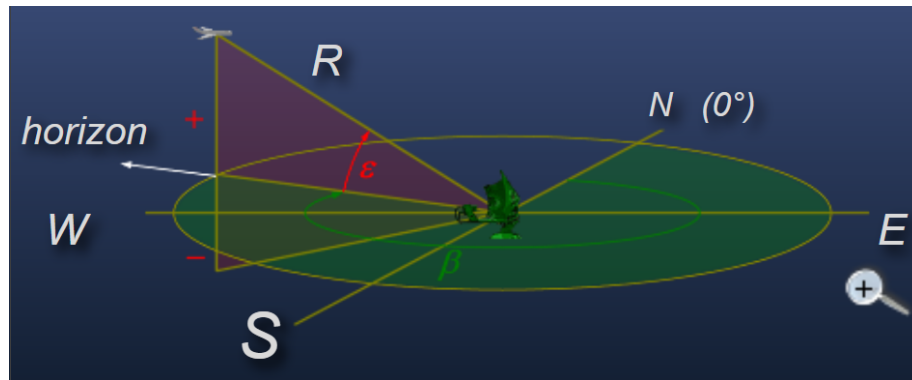
$R$  คือ ระยะทาง (m หรือ เมตร)

สำหรับสมการหาระยะทางเรดาร์ (Radar Range Equation) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1-ก ดังนี้

$$R = \left( \frac{P_T \sigma c^2 G_{R,T}^2}{(4\pi)^3 f^2 P_{R,\min}} \right)^{1/4} \quad (3.1-ข)$$

เมื่อ  $P_T$  คือกำลังส่ง โดย  $f$  คือความถี่  $\sigma$  คือหน้าตัดเรดาร์ของเป้าหมายที่  $P_{R,\min}$  คือกำลังงานต่ำสุดที่ระบบรับได้  $G_{R,T}$  คืออัตราการขยายของสายอากาศรับ-ส่ง

ในส่วนการวัดทดสอบมุมเงยของเรดาร์ (measurement of the elevation angle) นั้นมุมเงยคือมุมระหว่างระนาบแนวนอนและแนวสายตาที่วัดในระนาบแนวตั้ง ทิศทางอ้างอิง (เช่นมุมเงยของศูนย์องศา) เป็นเส้นแนวนอนในทิศทางไปยังขอบฟ้าเริ่มต้นจากสายอากาศ มุมเงยจะแสดงโดย  $\epsilon$  (epsilon) ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การวัดทดสอบมุมเงยของเรดาร์

และทิศทางของระบบสายอากาศเรดาร์ (direction-determination) และการกำหนดเชิงมุมของเป้าหมายนั้นพิจารณาจากทิศทางของสายอากาศ directivity บางครั้งเรียกว่า directive gain คือความสามารถของสายอากาศที่ส่งสัญญาณในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง โดยการวัดทิศทางที่สายอากาศชี้เมื่อได้รับสัญญาณสะท้อนทั้ง มุมราบและมุมสูงจากเรดาร์ไปยังวัตถุหรือเป้าหมายที่สามารถกำหนดได้ ความแม่นยำของการวัดเชิงมุมขึ้นอยู่กับทิศทางซึ่งเป็นฟังก์ชันของขนาดของเสาอากาศ และระบบเรดาร์นั้นมักจะทำงานด้วยความถี่สูงเนื่องจาก มีการส่งสัญญาณคลื่นที่เสมือนจริง ทันทีทันใด (real-time) มีความละเอียดในการค้นหาสูง (ความยาวคลื่นที่เล็กกว่าวัตถุที่เรดาร์สามารถตรวจจับได้ก็จะเล็กลง) ใช้ความถี่สูงขนาดของสายอากาศก็จะเล็กลง ดังนั้นสายอากาศของระบบเรดาร์ส่วนใหญ่จะมีการออกแบบมาเพื่อกระจายพลังงานในทิศทางเดียว แต่สามารถเปลี่ยนทิศได้ด้วยระบบหมุนทางกลและทางไฟฟ้า รูปร่างของคลื่นที่ส่งออกไปนั้นมีความแรงของสัญญาณแตกต่างกันไป เมื่อสัญญาณตกกระทบกับเป้าหมาย ก็จะสะท้อนกลับมายังสายอากาศแล้วระบบก็จะทำการประมวลผลต่อไป

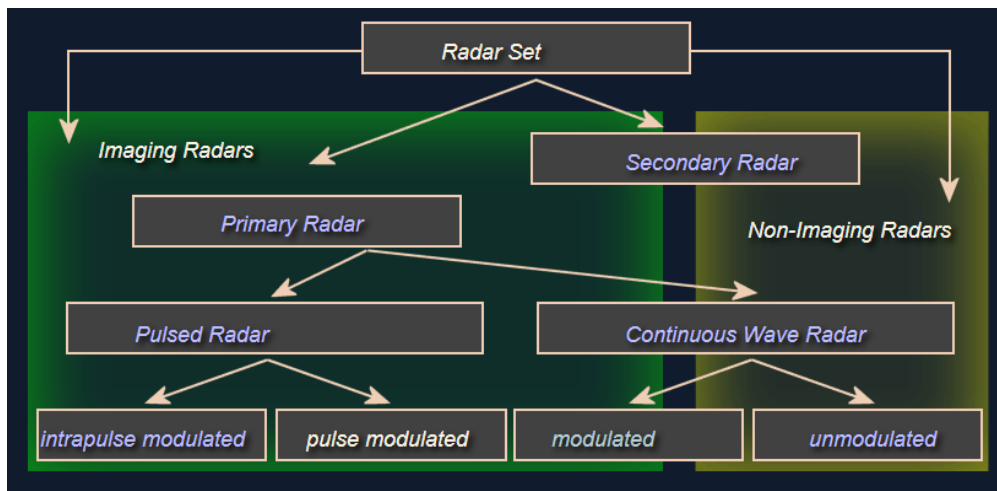
ในปัจจุบันสามารถจัดกลุ่มประเภทการใช้งานของเรดาร์ได้คร่าว ๆ เป็น 2 กลุ่ม คือ 1. Imaging radar techniques 2. Non-imaging radar techniques ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และยังสามารถแบ่งได้ตามการประยุกต์ใช้งาน คือ 1. ทางด้านการทหาร 2. ทางด้านพลเรือน ดังแสดงในรูปที่ 3.5

1. Imaging radar techniques จะคำนวณและแสดงผลในลักษณะแผนภาพเรดาร์ จากข้อมูลที่รับได้นิยมใช้ในงาน เรดาร์ตรวจสภาพอากาศ และทางทหาร ที่มีทั้งแผนที่และพิกัดของวัตถุที่ตรวจจับได้

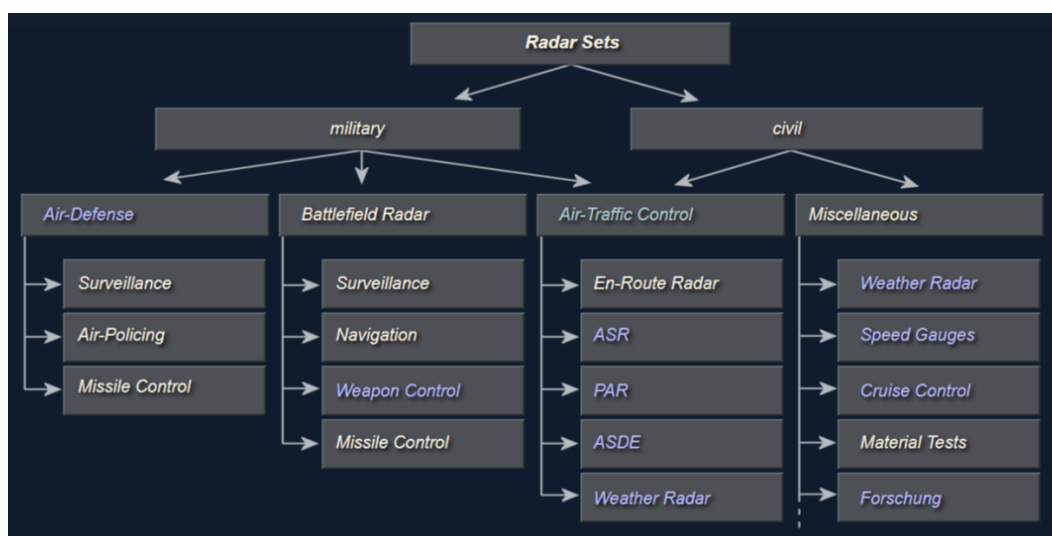
2. Non-imaging radar techniques จะให้ผลในรูปแบบตัวเลข เช่นความสูง ความเร็ว หรือตรวจจับเพียงตัวแปรเดียว ตัวอย่างเช่น ตัวตรวจจับแบบต่าง ๆ (Sensor)

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ในส่วน Imaging radar techniques จะถูกใช้เป็นระบบ เรดาร์หลัก (Primary Radar) ซึ่งจะส่งคลื่นและรับในตัวเดียวกัน จากนั้นทำการคำนวณระยะทางและตำแหน่ง อย่างไรก็ตาม ในส่วนเรดาร์รอง (Secondary Radar) จะมีการทำงานที่ต่างกัน โดยจะส่งคลื่นความถี่ออกไปยังอากาศ เมื่อตัวรับเช่นเครื่องบินรับสัญญาณได้จะตอบกลับมา โดยประกอบไปด้วยข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นเช่น ตำแหน่งความสูง ต่าง ๆ สำหรับ Pulse radars จะปล่อยสัญญาณพัลส์ (คีย์เปิด / ปิด) ที่มีกำลังสูงและความถี่สูงมาก และหยุดชั่วคราวเพื่อรับสัญญาณสะท้อน ก่อนที่จะส่งสัญญาณใหม่อีกครั้ง ระยะทาง ทิศทาง และความสูงของเป้าหมายสามารถหาได้จากตำแหน่งสายอากาศและระยะเวลาของสัญญาณสะท้อน

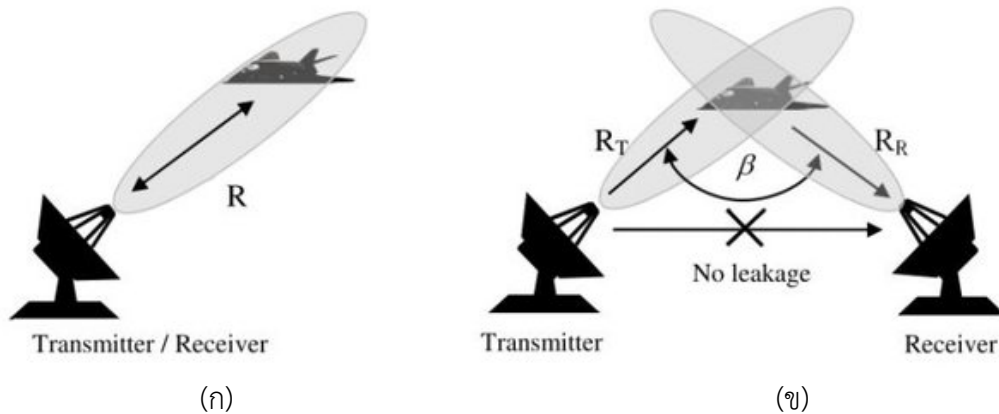


รูปที่ 3.4 ประเภทของเรดาร์ตามเทคโนโลยี



รูปที่ 3.5 ประเภทของเรดาร์ ตามการใช้งาน

เทคโนโลยีเรดาร์นั้นเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่สุดสำหรับการวัดระยะทางวัตถุ ด้วยเหตุนี้จึงมีระบบเรดาร์หลายแบบที่ใช้สำหรับวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ระบบเรดาร์ประเภทต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับหน้าที่และวัตถุประสงค์ ซึ่งในส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงบางส่วน ของระบบเรดาร์ที่พบมากที่สุด ที่ใช้ในฟังก์ชันที่แตกต่างกันและหน้าที่การใช้งาน โดยภาคต่าง ๆ ในระบบ เช่น ระบบ monostatic Radar เป็นเรดาร์ที่มีตัวส่งและตัวรับสัญญาณตัวเดียวกันดังรูปที่ 3.6 (ก) ซึ่งเป็นรูปแบบเรดาร์ดั้งเดิม อย่างไรก็ตามการทำงานจะคล้ายคลึงกัน แต่คำนี้ใช้เพื่อแยกความแตกต่างจากเรดาร์ bistatic ระบบ bistatic Radar เป็นระบบเรดาร์ที่ประกอบด้วยตัวส่งและตัวรับที่แยกจากกันด้วยระยะทางที่เท่ากับระยะทางของเป้าหมายที่คาดหวัง โดยที่เครื่องส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณตั้งอยู่ในสถานที่เดียวกันดังรูปที่ 3.6 (ข) เช่น วัดการปล่อยขีปนาวุธจากพื้นผิวโลกสู่อากาศ และจากอากาศสู่อากาศ และใช้ในระยะเวลาไกล ส่วนใหญ่ใช้เรดาร์ bistatic เป็นต้น

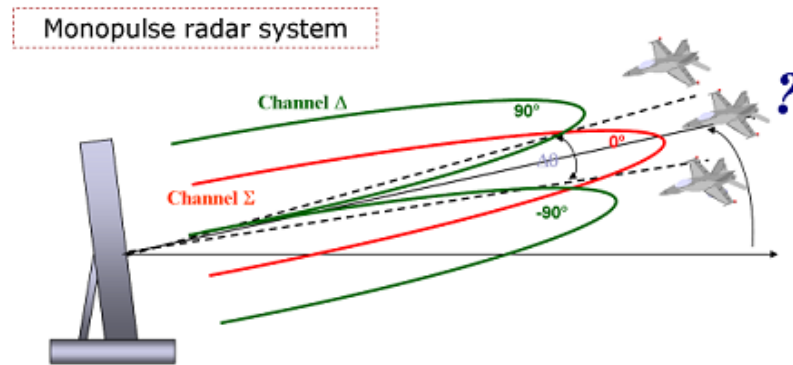


รูปที่ 3.6 ระบบเรดาร์ (ก) Monostatic และ (ข) Bistatic Radar

**ระบบ Continuous Wave radar** เป็นเรดาร์ชนิดหนึ่ง ที่ส่งและรับสัญญาณคลื่นอย่างต่อเนื่อง โดยระบบเรดาร์นี้จะใช้เทคโนโลยี doppler เข้ามาช่วยซึ่งหมายความว่าระบบเรดาร์นี้จะตรวจจับในรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็วัตถุขนาดใหญ่ที่เคลื่อนที่เร็วหรือเคลื่อนที่ช้า ระบบเรดาร์ doppler radar เป็นเรดาร์แบบพิเศษที่ใช้ doppler effect เพื่อสร้างข้อมูลความเร็วเกี่ยวกับวัตถุในระยะทางที่กำหนด ทำโดยการส่งสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังเป้าหมายแล้ววิเคราะห์ว่าการเคลื่อนที่ของวัตถุส่งผลกระทบต่อความถี่ของสัญญาณที่สะท้อนกลับคืนอย่างไร การแปรผันนี้ทำให้เกิดการวัดที่แม่นยำอย่างมาก ดังนั้น doppler radar จึงได้มีการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อีกมากมาย

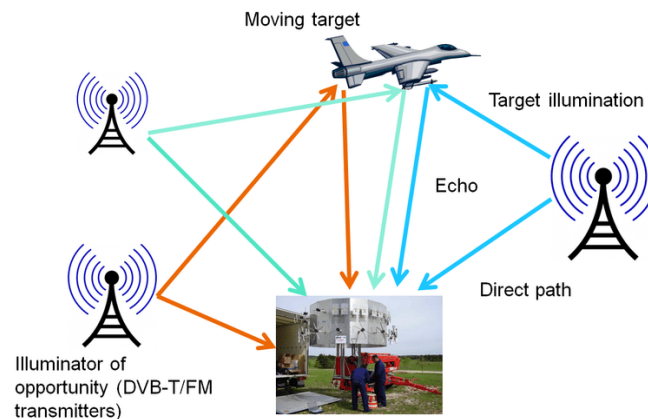
การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

**ระบบ Mono pulse radar** เป็นระบบเรดาร์ที่ใช้การเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้รับจากพัลส์เรดาร์ โดยการส่งแยกกัน 2 beam หรือ channel โดยมีจุดประสงค์ในการเปรียบเทียบสัญญาณที่เห็นในหลายทิศทาง



รูปที่ 3.7 Mono pulse radar

**ระบบ Passive radar** เป็นเรดาร์ชนิดหนึ่งที่ออกแบบมาเพื่อตรวจจับและติดตามวัตถุโดยการประมวลผลการสะท้อนจากแหล่งกำเนิดที่ไม่ได้ตั้งใจสร้างขึ้นเอง แต่มีอยู่ในสภาพแวดล้อม หรือแหล่งข้อมูลต่าง ๆ หรือสัญญาณการสื่อสารแบบต่างๆ เป็นต้น

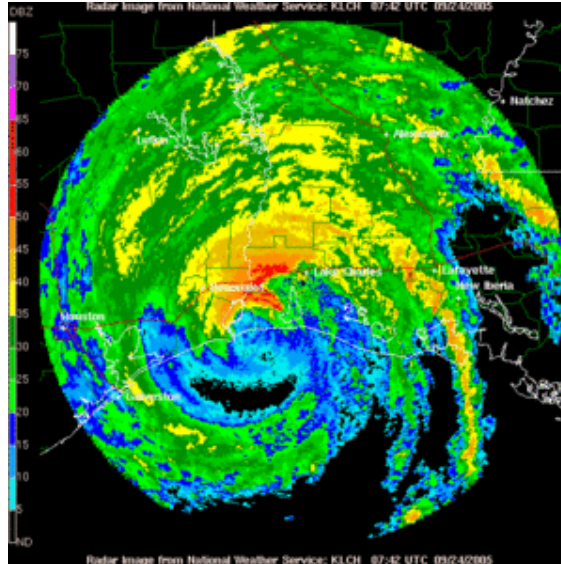


รูปที่ 3.8 Passive radar

**ระบบ Instrumentation radars** เป็นเรดาร์ที่ออกแบบมาเพื่อทดสอบจรวดขีปนาวุธ เครื่องบิน และอื่นๆ ระบบ Weather radars คือระบบเรดาร์ที่ใช้สำหรับการตรวจจับและตรวจสอบสภาพอากาศ เรดาร์นี้ใช้คลื่นวิทยุพร้อมกับโพลาไรซ์แนวนอนหรือวงกลม การเลือกความถี่ของเรดาร์

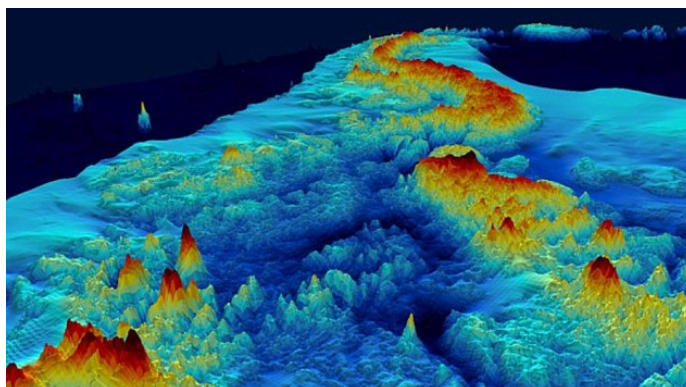
การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคโรนาเพื่อป้องกันการบินโคโรนาที่ไม่ได้รับอนุญาต

สภาพอากาศขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพ ใอน้ำในบรรยากาศ เรดาร์สภาพอากาศบางประเภทออกแบบมาเพื่อใช้ Doppler radar เพื่อวัดความเร็วของลม และโพลาริไซส์แบบคู่เพื่อระบุชนิดของการตกฝนหรือหิมะ



รูปที่ 3.9 การแสดงภาพของ Weather radars

ระบบ Mapping radars เป็นเรดาร์ที่ใช้ในการทำแผนที่ที่จะใช้ในการสแกนภูมิภาคทางภูมิศาสตร์ขนาดใหญ่สำหรับการใช้งานทางภูมิศาสตร์และการสำรวจระยะไกล



รูปที่ 3.10 Mapping radar

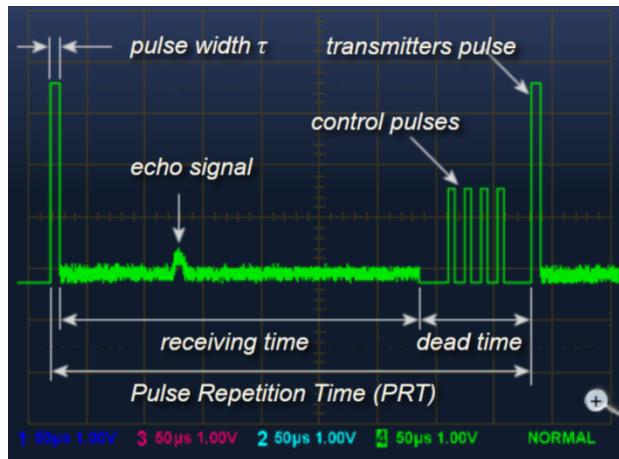


**ระบบ Navigational radars** เป็นเรดาร์นำทางโดยทั่วไปจะเหมือนกับเรดาร์ค้นหา อย่างไรก็ตามระบบเรดาร์นี้มาพร้อมกับความยาวคลื่นที่สั้น ซึ่งส่วนใหญ่มักจะใช้งานบนเรือพาณิชย์ และเครื่องบินพาณิชย์ รวมถึงใช้ในทางทะเลโดยทั่วไปติดตั้งบนเรือเพื่อหลีกเลี่ยงการชน และวัตถุประสงค์ในการนำทาง เป็นต้น ประเภทของเรดาร์ที่จะกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไปนี้จะกล่าวถึง 2 ประเภทหลักๆ คือ pulse radar และ continuous wave radar

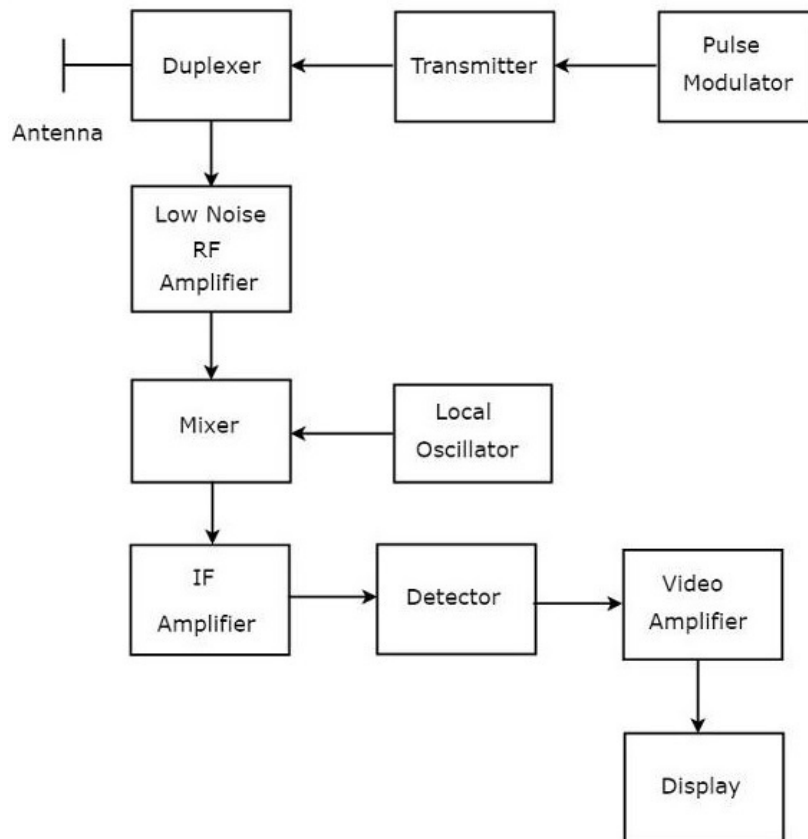
### 3.2 Pulse radar หรือระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นพัลส์

Pulse radar เป็นเรดาร์ที่ทำงานด้วยสัญญาณพัลส์ ซึ่งสามารถจำแนกตามประเภทการตรวจจับหรือตรวจค้นเป้าหมายได้สองประเภทดังต่อไปนี้ คือ basic pulse radar และ moving target indication radar สำหรับ basic pulse radar เป็นระบบที่ทำงานด้วยสัญญาณพัลส์สำหรับตรวจจับเป้าหมายที่หยุดนิ่ง โดยจะใช้ duplexer เป็นระบบช่วยในการทำงาน ซึ่งสายอากาศจะส่งสัญญาณพัลส์ตามคาบเวลาที่กำหนด โดยระบบจะเลือกระยะเวลาระหว่างสัญญาณพัลส์ที่ส่งไปและรับกลับด้วยวิธีการรับ echo ส่วน moving target indication radar เป็นระบบที่ทำงานด้วยสัญญาณพัลส์สำหรับตรวจจับเป้าหมายที่ไม่อยู่นิ่ง โดยจะใช้ duplexer เป็นระบบช่วยในการทำงาน ซึ่งใช้หลักการของ doppler effect เพื่อแยกแยะเป้าหมายที่เคลื่อนที่ออกจากวัตถุหรือเป้าหมายที่อยู่กับที่ สำหรับ pulse repetition frequency (PRF) ของระบบเรดาร์คือจำนวนสัญญาณพัลส์ที่ส่งต่อวินาที ระบบเรดาร์ส่งสัญญาณคลื่นพัลส์แต่ละครั้งที่มีความถี่พาหะระหว่างเวลาส่งสัญญาณ (หรือ PW pulse width) และรอการสะท้อนกลับ ในระหว่างนั้นจึงส่งสัญญาณพัลส์ถัดไป เวลาระหว่างจุดเริ่มต้นของหนึ่งพัลส์และจุดเริ่มต้นของพัลส์ถัดไปเรียกว่า pulse-repetition time (PRT) ตามรูป ที่ 4.11 และเท่ากับส่วนกลับของ PRF ดังต่อไปนี้

$$PRT = \frac{1}{PRF} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.11 Pulse-repetition time (PRT)



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมของ Pulse Radar

โดย Pulse radar จะมีรูปแบบของบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.12 ซึ่งในแต่ละส่วนของบล็อกไดอะแกรมจะมีหน้าที่การทำงานดังนี้ ภาค pulse modulator ทำหน้าที่สร้างสัญญาณและปรับสัญญาณพัลส์แล้วส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังภาคส่งสัญญาณ (transmitter) ภาค

## การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

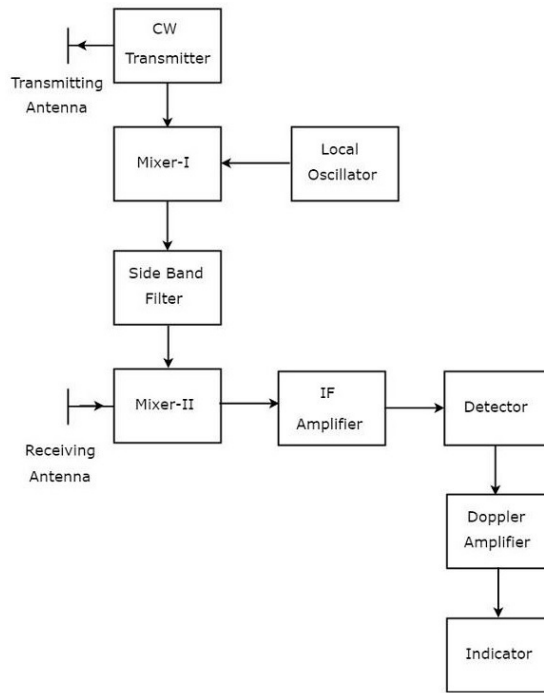
transmitter ก็จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณพัลส์ที่ทำการมอดูเลตแล้วไปยังภาค duplexer ภาค duplexer ก็จะทำหน้าที่เป็นสวิตช์สลับสัญญาณ ซึ่งจะเชื่อมต่อกับสายอากาศกับภาคส่งสัญญาณและภาครับสัญญาณโดยทำหน้าที่สลับกัน เมื่อสายอากาศส่งสัญญาณออกไปแล้ว สายอากาศก็จะรับสัญญาณเข้ามาแล้วสัญญาณที่ได้ก็จะถูกส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise RF amplifier) ภาค low noise RF amplifier ก็จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณ RF ที่มีสัญญาณอ่อนแล้วส่งสัญญาณไปยังภาคมิกเซอร์ (mixer) ภาค mixer ก็จะทำหน้าที่รวมสัญญาณที่ได้รับและเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณดังกล่าว ส่วนภาค local oscillator ก็จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณหรือความถี่ที่มีความคงที่ เพื่อส่งสัญญาณดังกล่าวไปผสมกับสัญญาณที่ได้รับเข้ามาในภาค mixer เมื่อภาค mixer ทำงานแล้วก็จะส่งสัญญาณไปยังภาค IF amplifier ซึ่งเป็นภาคขยายสัญญาณ intermediate frequency (IF) จะทำหน้าที่อนุญาตให้เฉพาะสัญญาณความถี่กลางผ่าน แล้วส่งสัญญาณไปยังภาค detector ภาค detector ก็จะทำหน้าที่เป็นตัวแยกสัญญาณที่ได้มาจากเอาต์พุตของภาคขยายสัญญาณ IF หลังจากนั้นก็จะส่งสัญญาณไปยังภาค video amplifier ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้รับมาเป็นสัญญาณภาพและขยายสัญญาณภาพดังกล่าวที่ได้จากภาคตรวจจับ (detector) ส่งไปยังภาคจอแสดงผล เพื่อแสดงผล

### 3.3 ระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (Continuous wave radar) ชนิดไม่ผสมสัญญาณ (Un-modulated CW) และชนิดผสมสัญญาณ (FMCW)

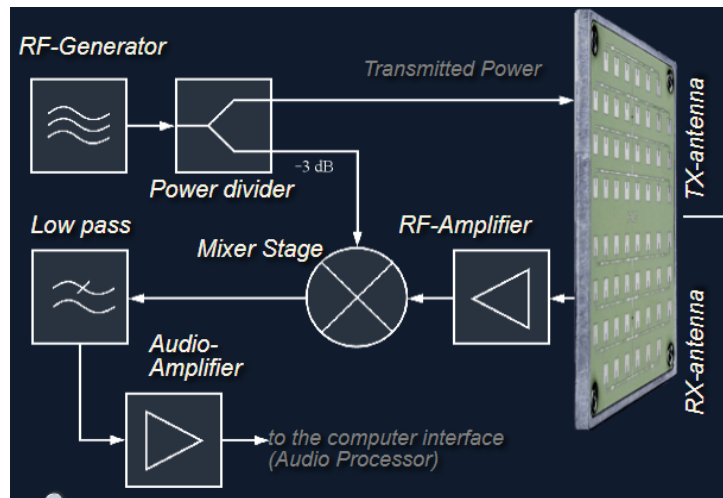
Continuous wave radar เป็นระบบเรดาร์ที่ทำงานด้วยสัญญาณหรือคลื่นแบบต่อเนื่อง เรียกว่าเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง โดยระบบจะใช้ doppler Effect เพื่อตรวจจับเป้าหมายที่ไม่อยู่นิ่ง ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นสองแบบดังต่อไปนี้ คือ unmodulated continuous wave radar และ frequency modulated continuous wave radar ในส่วนของ unmodulated continuous wave radar นั้นเป็นเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ไม่มีการปรับแต่งทางด้านความถี่ หรือเรียกได้ว่าไม่มีการผสมสัญญาณ (unmodulated) เป็นเรดาร์ที่ทำงานด้วยสัญญาณต่อเนื่อง สำหรับการตรวจจับเป้าหมายที่ไม่หยุดนิ่ง หรือเรียกอีกอย่างว่า CW radar หรือเรียกว่าเรดาร์ CW doppler เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว โดยสายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ โดยเรดาร์นี้จะวัดเฉพาะความเร็วของเป้าหมาย แต่ไม่สามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้

โดย unmodulated CW radar นั้นจะมีรูปแบบของบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.13

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.13 (ก) บล็อกไดอะแกรมโดยทั่วไปของ unmodulated CW radar (ข) บล็อกไดอะแกรมที่ได้รับความนิยมของ unmodulated CW radar

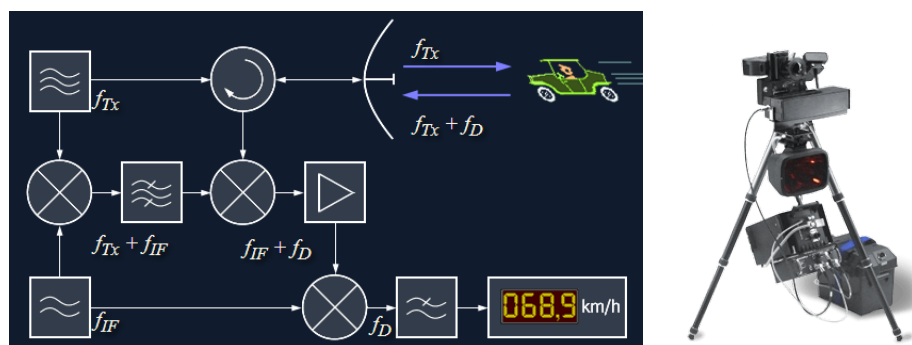
ซึ่งในแต่ละส่วนของบล็อกไดอะแกรมจะมีหน้าที่การทำงานดังนี้

ภาค CW transmitter ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณอนาล็อกที่มีความถี่สำหรับเอาต์พุตของ CW ส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับสายอากาศส่งสัญญาณ และมิกเซอร์ 1 (mixer-I) และภาค local oscillator ทำหน้าที่สร้างสัญญาณหรือความถี่ที่มีค่าคงที่ เพื่อส่งสัญญาณดังกล่าวไปผสมกับสัญญาณที่ได้รับเข้า [สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008]

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

มาในภาค mixer-I ส่วนภาค mixer-I ก็จะทำหน้าที่รวมสัญญาณที่ได้รับและเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณดังกล่าว สัญญาณที่มีความถี่  $f_o$  และ  $f_i$  จะถูกนำไปใช้กับ mixer-I ดังนั้น mixer-I จะสร้างเอาต์พุตที่มีความถี่สำหรับ  $f_o + f_i$  หรือ  $f_o - f_i$  แล้วส่งสัญญาณที่ได้ไปยังภาค side band filter ตัวกรองแถบด้านข้าง ซึ่งจะทำหน้าที่กำจัดสัญญาณ sideband ที่ไม่ต้องการออกไป ส่วนภาค mixer-II นั้นทำหน้าที่รวมสัญญาณที่ได้รับและเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณดังกล่าว สัญญาณที่มีความถี่  $f_o + f_i$  และ  $f_o \pm f_d$  จะถูกนำไปใช้กับ mixer-II ดังนั้น mixer-II จะสร้างเอาต์พุตที่มีความถี่  $2f_o + f_i \pm f_d$  หรือ  $f_i \pm f_d$  แล้วส่งไปยังภาค IF amplifier ภาคขยายสัญญาณ intermediate frequency (IF) จะทำหน้าที่อนุญาตให้เฉพาะสัญญาณความถี่กลางผ่าน แล้วส่งไปยังภาค detector ตัวตรวจจับ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแยกสัญญาณซึ่งได้มาจากเอาต์พุตของภาคขยายสัญญาณ IF หรือตรวจจับสัญญาณที่มีความถี่ doppler ( $f_d$ ) แล้วส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังภาค doppler amplifier ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่มีความถี่ doppler ( $f_d$ ) หลักจากนั้นก็ส่งสัญญาณไปยังภาค indicator ตัวบ่งชี้ ซึ่งทำหน้าที่บ่งชี้หรือบอกถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับความเร็วสัมพัทธ์ และไม่ว่าเป้าหมายจะเป็นเคลื่อนเข้าหาเรดาร์หรือออกห่างจากเรดาร์ โดยความเร็ว  $v$  ของวัตถุซึ่งหาได้จาก

$$v = \frac{\lambda f_d}{2} \tag{3.3}$$

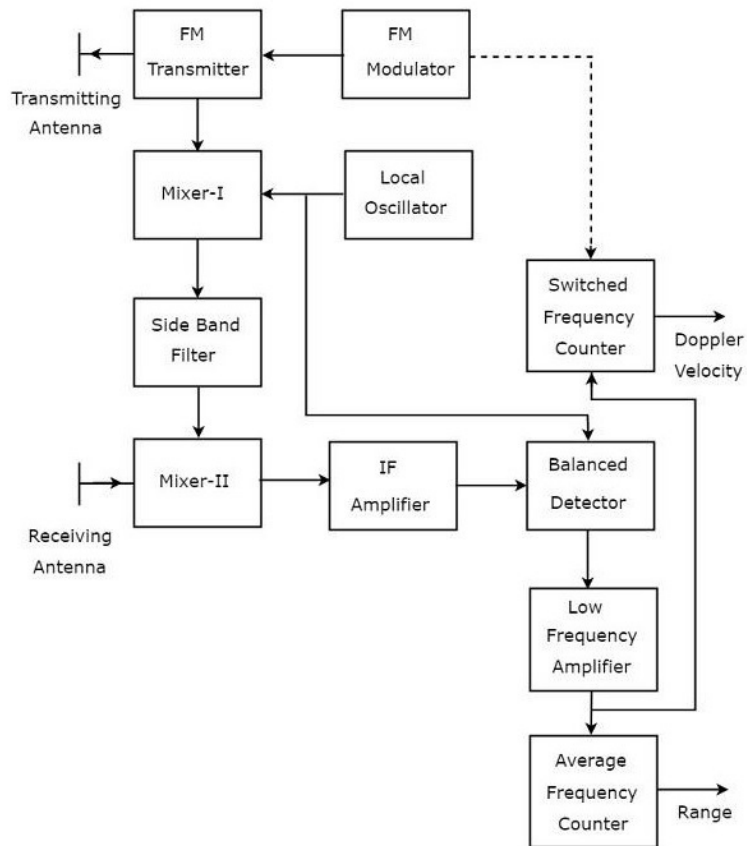


รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการใช้งานในการวัดความเร็วรถยนต์

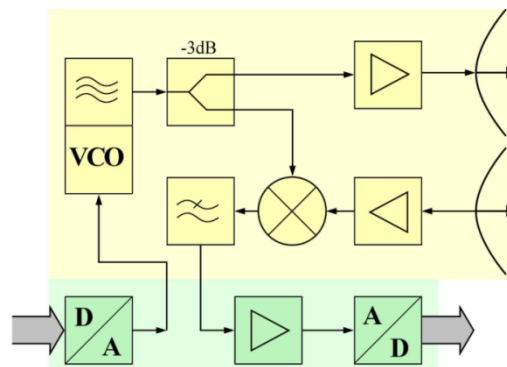
ในส่วนของ frequency modulated continuous wave radar นั้นเป็นเรดาร์คลื่นความถี่ต่อเนื่องแบบปรับความถี่ไปตามเวลา โดยถ้า CW doppler radar ถูกปรับความถี่ไปตามเวลาแล้วเรดาร์นั้นจะถูกเรียกว่า frequency modulated continuous wave (FMCW) หรือ FMCW doppler radar เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว สายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและ

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

สายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ โดยเรดาร์นี้จะวัดทั้งความเร็วของเป้าหมาย และสามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้อีกด้วย ซึ่ง frequency modulated continuous wave radar นั้นจะมีรูปแบบของบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.15



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.15 (ก) บล็อกไดอะแกรมโดยทั่วไปของ FMCW radar (ข) บล็อกไดอะแกรมที่ได้รับความนิยมของ FMCW radar

ซึ่งในแต่ละส่วนของบล็อกไดอะแกรมจะมีหน้าการทำงานดังนี้

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

บล็อกไดอะแกรมของเรดาร์ FMCW มีลักษณะคล้ายกับบล็อกไดอะแกรมของเรดาร์ CW แต่จะมีบาง พังก์ชันของแต่ละบล็อกของ FMCW radar ที่แตกต่างกันไป เช่น ภาค FM modulator นั้นทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่ modulated (FM) ที่มีความถี่ตัวแปร  $f_o(t)$  และจะถูกส่งไปยังภาคส่งสัญญาณ FM (FM transmitter) ภาค FM transmitter ก็จะทำหน้าที่ ส่งสัญญาณ FM ผ่านสายอากาศส่งสัญญาณ และสัญญาณ FM ไปยังภาค mixer-I ด้วย ส่วนภาค local oscillator นั้นโดยทั่วไปภาค local oscillator จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณหรือความถี่ที่มีค่าคงที่ ที่เป็นสัญญาณ RF แต่ในที่นี้จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณที่มีความถี่ระดับกลาง  $f_{IF}$  แล้วส่งสัญญาณดังกล่าวไปยังภาค mixer-I และ balanced detector ส่วนภาค mixer-I นั้นทำหน้าที่รวมสัญญาณที่ได้รับและเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณดังกล่าว สัญญาณที่มีความถี่  $f_o(t)$  และ  $f_{IF}$  ถูกนำไปใช้กับ mixer-I ดังนั้น mixer-I จะสร้างเอาต์พุตที่มีความถี่สำหรับ  $f_o(t) + f_{IF}$  หรือ  $f_o(t) - f_{IF}$  แล้วส่งสัญญาณไปยังภาค side band filter ตัวกรองแถบด้านข้าง ซึ่งทำหน้าที่กำจัดสัญญาณ sideband ที่ไม่ต้องการออกไป ส่วนภาค mixer-II นั้นทำหน้าที่รวมสัญญาณที่ได้รับและเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณดังกล่าว สัญญาณที่มีความถี่  $f_o(t) - f_{IF}$  และ  $f_o(t - T)$  จะถูกนำไปใช้กับ mixer-II ดังนั้น mixer-II จะสร้างเอาต์พุตที่มีความถี่  $f_o(t - T) + f_o(t) - f_{IF}$  หรือ  $f_o(t - T) - f_o(t) + f_{IF}$  แล้วส่งสัญญาณไปยังภาค IF amplifier ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณ intermediate frequency (IF) สำหรับ  $f_o(t - T) - f_o(t) + f_{IF}$  สัญญาณที่ถูกขยายนี้จะถูกส่งไปยังภาค balanced detector ภาค balanced detector ก็จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่สำหรับ  $(t - T) - f_o(t)$  จากสัญญาณอินพุตสองสัญญาณที่ใช้ซึ่งมีความถี่สำหรับ  $(t - T) - f_o(t) + f_{IF}$  และ  $f_{IF}$  เอาต์พุตของภาค balanced detector จะถูกนำไปใช้เป็นส่วนอินพุตไปยังภาคเครื่องขยายสัญญาณความถี่ต่ำ (low frequency amplifier) ซึ่งภาค low frequency amplifier ก็จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณเอาต์พุตของภาค balanced detector ให้อยู่ในระดับที่ต้องการ และเอาต์พุตของภาค low frequency amplifier จะถูกนำไปใช้กับภาค switched frequency counter และภาค average frequency counter ส่วนภาค switched frequency counter ก็จะทำหน้าที่ในการรับค่าความเร็ว doppler และภาค average frequency counter ก็จะทำหน้าที่ในการรับค่าระยะห่าง

### Doppler Effect ในระบบเรดาร์

หากเป้าหมายไม่หยุดนิ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณที่ส่งจากเรดาร์และเรดาร์ที่ได้รับ effect นี้เรียกว่า doppler effect

ผลที่ได้จาก doppler effect จะมีอยู่ 2 กรณีต่อไปนี้

1. ความถี่ของสัญญาณที่ได้รับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเป้าหมายเคลื่อนที่ไปสู่ทิศทางของเรดาร์
2. ความถี่ของสัญญาณที่ได้รับจะลดลงเมื่อเป้าหมายเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์

ซึ่ง doppler frequency ในระบบเรดาร์นั้นระยะห่างระหว่าง radar กับเป้าหมายนั้นไม่ต่างกัน นอกจาก range of the target หรือ range, R ดังนั้นระยะทางทั้งหมดระหว่าง radar และ target ในเส้นทางการสื่อสารแบบสองทางจะเท่ากับ  $2R$  เนื่องจาก radar จะส่งสัญญาณไปยังเป้าหมายและสะท้อนกลับมายังเรดาร์ หาก  $\lambda$  คือความยาวคลื่น ดังนั้นจำนวนของความยาวของคลื่น  $N$  จำนวน ที่มีอยู่ในเส้นทางการสื่อสารแบบสองทางระหว่าง radar และเป้าหมายจะเท่ากับ  $2R/\lambda$  เมื่อหนึ่งความยาวของคลื่น  $\lambda$  สอดคล้องกับการเคลื่อนที่เชิงมุมของ  $2\pi$  เรเดียน ดังนั้นมุมรวมของการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างเส้นทางการสื่อสารแบบสองทางระหว่าง radar กับเป้าหมายจะเท่ากับ  $4\pi R/\lambda$  เรเดียน

เมื่อ ความถี่เชิงมุม ( $\omega$ ) เท่ากับ

$$\omega = 2\pi f \quad (3.4)$$

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างความถี่เชิงมุม  $\omega$  และมุมเฟส  $\phi$

$$\omega = \frac{d\phi}{dt} \quad (3.5)$$

เปรียบเทียบทางด้านขวามือของสมการที่ 4.4 และสมการที่ 4.5 เนื่องจากเทอมทางด้านซ้ายของสมการทั้งสองนั้นเท่ากัน

$$2\pi f = \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} \quad (3.6)$$

กำหนดให้  $f = fd$  และ  $\phi = \frac{4\pi R}{\lambda}$  ในสมการ (3.6)

$$fd = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) \Rightarrow fd = \frac{1}{2\pi} \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dR}{dt} \Rightarrow fd = \frac{2Vr}{\lambda} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $fd$  คือ ความถี่ Doppler (Doppler Frequency)

$Vr$  คือ ความเร็วสัมพัทธ์ (Relative velocity)



การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

และเมื่อต้องการทราบค่าความถี่ Doppler ( $fd$ ) โดยการแทนค่าของ  $Vr$  และ  $\lambda$  ในสมการที่

(3.7) แทน  $\lambda = \frac{c}{f}$  ในสมการที่ (3.7)

$$fd = \frac{2Vr}{c/f}$$

$$fd = \frac{2Vrf}{c} \quad (3.8)$$

ดังนั้นความเร็วของวัตถุหาได้จาก

$$Vr = \frac{cfd}{2f} \quad (3.9)$$

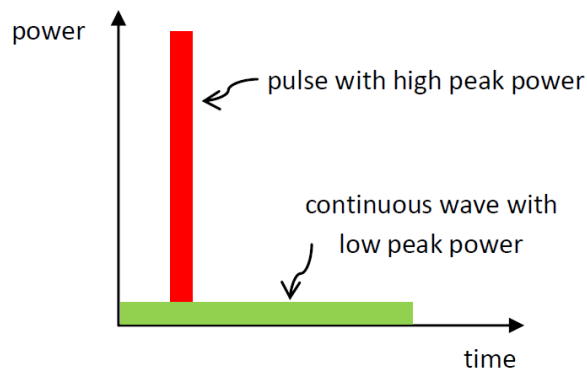
เมื่อ  $f$  คือความถี่ของสัญญาณที่ส่ง

$c$  คือความเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 3.1 ค่าการประเมินต่าง ๆ ของระบบ

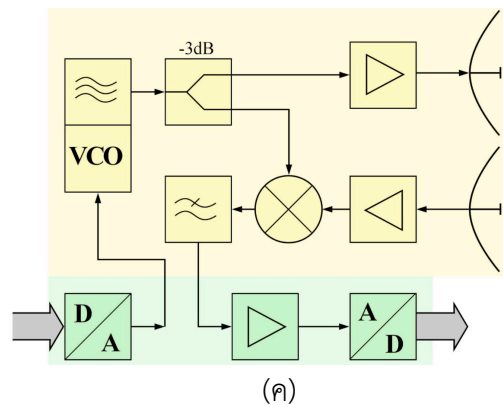
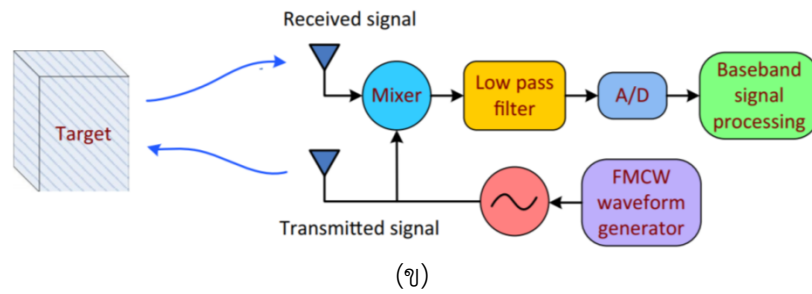
Bandwidth	Range Resolution	Maximum Range	approximately required tx power	Example given
400 kHz	4,000 m	120 km	1,4 kW	76N6 (“Clam Shell”)
50 ... 500 kHz	1,500 ... 100 m	15 ... 250 km	30 W	OTH oceanography radar WERA
1 MHz	150 m	75 km	1.4 ... 4 kW	Naval radar using a Magnetron
2 MHz	75 m	37.5 km	ไม่มีข้อมูลปรากฏ	ไม่มีข้อมูลปรากฏ
10 MHz	5 m	7,500 m	ไม่มีข้อมูลปรากฏ	ไม่มีข้อมูลปรากฏ
50 MHz	3 m	500 m	4 mW	DPR-886
65 MHz	2.5 m	1,200 m	100 mW	Broadband Radar™
250 MHz	0.6 m	500 m	4 mW	Skyradar Basic II
8 GHz	3.5 cm	9 m	4 mW	Skyradar PRO
7 GHz	2.1 mm	5 m	4 mW	Omniradar RIC60A

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรูปแบบของระบบเรดาร์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในระบบเรดาร์ตรวจจับโครน ซึ่งเรียกระบบดังกล่าวว่า continuous wave radar เป็นระบบเรดาร์ที่ทำงานด้วยสัญญาณหรือคลื่นแบบต่อเนื่อง เรียกว่าเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง [1-3] โดยระบบจะใช้ doppler effect เพื่อตรวจจับเป้าหมายที่ไม่อยู่นิ่ง ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็นสองแบบ คือ unmodulated continuous wave radar และ frequency modulated continuous wave radar ในส่วนของ unmodulated continuous wave radar นั้นเป็นเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ไม่มีการปรับแต่งทางด้านความถี่ หรือเรียกได้ว่าไม่มีการผสมสัญญาณ (unmodulated) เป็นเรดาร์ที่ทำงานด้วยสัญญาณต่อเนื่อง สำหรับการตรวจจับเป้าหมายที่ไม่หยุดนิ่ง หรือเรียกอีกอย่างว่า CW radar หรือเรียกว่าเรดาร์ CW doppler เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว โดยสายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ โดยเรดาร์นี้จะวัดเฉพาะความเร็วของเป้าหมาย แต่ไม่สามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้ ส่วน frequency modulated continuous wave radar นั้นเป็นเรดาร์คลื่นความถี่ต่อเนื่องถ้า CW doppler radar ถูกปรับความถี่ไปตามเวลาแล้ว หรือเรียกได้ว่าการผสมสัญญาณ (modulated) แล้ว เรดาร์นั้นจะถูกเรียกว่า radar modulated continuous wave (FMCW) หรือ FMCW doppler radar เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว สายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ โดยเรดาร์นี้จะวัดทั้งความเร็วของเป้าหมาย และยังสามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้ รูปแบบของบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.16



(ก)

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



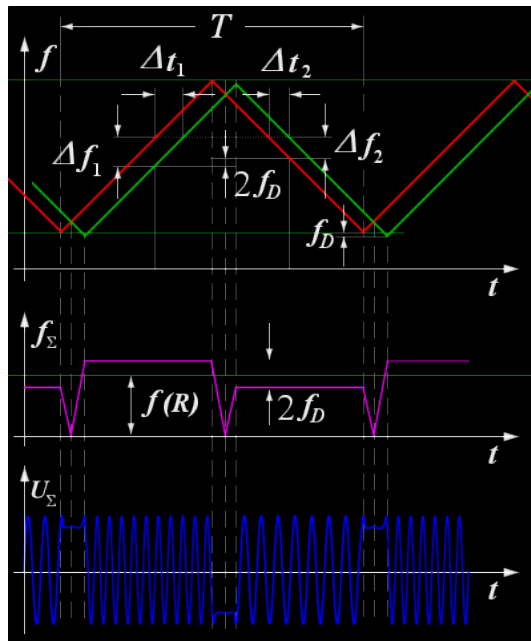
รูปที่ 3.16 (ก) ข้อดีของระบบ FMCW (แถบกำลังงานสี่เหลี่ยม) (ข) และ (ค) บล็อกไดอะแกรมที่ได้รับคามนิยมของ FMCW radar [1],[3] และ [4]

โดยที่ข้อดีของระบบ FMCW radar [1],[2] และ [3] ประกอบด้วย

1. ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีกำลังงานส่งต่ำกว่า ทำให้อุปกรณ์มีราคาที่ถูกลง ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ก) (แถบกำลังงานสี่เหลี่ยม)
2. ความละเอียดในการวัดระยะทางสูง
3. ความรวดเร็วในการวัดระยะทางสูง
4. สามารถทำงานได้ในหลายสภาพแวดล้อม และสภาพอากาศ
5. ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน เนื่องจากมีกำลังงานส่งต่ำดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ก) (แถบกำลังงานสี่เหลี่ยม)
6. ความแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับเทคนิคทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบอื่น ๆ
7. สามารถติดตั้ง radome ครอบไปเพราะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านได้
8. สามารถทะลุผ่านตัวกลางได้หลากหลาย

บล็อกไดอะแกรมของเรดาร์ FMCW ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ข) และ (ค) มีลักษณะคล้ายกับบล็อกไดอะแกรมของเรดาร์ CW แต่จะมีบางฟังก์ชันของแต่ละบล็อกของ FMCW radar ที่แตกต่างกันไป เช่น ภาค FM modulator นั้นทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่ modulated (FM) ที่มีความถี่ตัวแปร

$f_o(t)$  และจะถูกส่งไปยังภาคส่งสัญญาณ FM (FM transmitter) ภาค FM transmitter ก็จะทำหน้าที่ส่งสัญญาณ FM ผ่านสายอากาศส่งสัญญาณ และสัญญาณ FM ไปยังภาค mixer ด้วย รูปที่ 3.16 แสดงตัวอย่างระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่องชนิดผสมสัญญาณ (FMCW) ที่นิยมใช้ในช่วงความถี่ย่าน X band 8-12 GHz โดยวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็น แอนาล็อกจะปรับความถี่ในย่าน X-band ให้ขึ้น-ลง ตามลักษณะของสัญญาณสามเหลี่ยมหรือเรียกได้ว่าเป็น modulation pattern ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 สัญญาณ ส่ง-รับ ที่ความถี่เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณควบคุมแบบสามเหลี่ยม (modulation pattern) และสัญญาณ IF [2] และ [3]

จากรูปที่ 3.17 แสดงสัญญาณ ส่ง-รับ ที่ความถี่เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณควบคุมแบบสามเหลี่ยม (modulation pattern) และสัญญาณ IF โดยสีแดงคือความถี่ส่งที่เปลี่ยนไปตามสัญญาณสามเหลี่ยม และสีเขียวคือความถี่รับที่เปลี่ยนไปตามสัญญาณสามเหลี่ยม โดยที่สัญญาณความถี่รับจะมีการหน่วงเวลา ขึ้นกับระยะทางของวัตถุ เมื่อนำมาลบกันด้วยภาค RF mixer จะได้ความถี่สัญญาณ IF ซึ่งก็คือ  $\Delta f_1$  และ  $\Delta f_2$  ซึ่งมีสัญญาณ IF ดังแสดงในเส้นสีน้ำเงิน โดยสามารถคำนวณระยะทาง  $R$  ได้จากสมการ

$$R = \frac{cT}{4BW} (\Delta f_2 + \Delta f_1) \quad (3.10)$$

เมื่อ ความเร็วของวัตถุหาได้จาก

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

$$v = \frac{c}{4f_c} (\Delta f_1 - \Delta f_2) \quad (3.11)$$

สำหรับความละเอียด (resolution) ในการตอบสนองของระบบหาได้จาก

$$\Delta R = \frac{c}{2BW} \quad (3.12)$$

โมเดลทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณ FMCW [2] และ [4] มีดังนี้ กำหนดให้สัญญาณส่งทางเวลา FMCW เขียนเป็น  $s_T(t)$

$$s_T(t) = A_T \cos \left( 2\pi f_c t + 2\pi \int_0^t f_T(\tau) d\tau \right) \quad (3.13)$$

เมื่อ  $f_T(\tau) = \frac{B}{T} \tau$  คือ ความถี่ที่เปลี่ยนไปตามเวลาของสัญญาณควบคุมเช่นสัญญาณสามเหลี่ยม

$f_c$  คือสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่สูง

$B$  คือ ความกว้างแถบความถี่

$A_T$  คือ ความแรงของสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่สูง

$T$  คือช่วงเวลาของสัญญาณควบคุมเช่นสัญญาณสามเหลี่ยม

ดังนั้นเมื่อพิจารณาความล่าช้าของสัญญาณ  $t_d = 2 \frac{R_0 + vt}{c}$  และความถี่เลื่อน (doppler shift)

$f_D = -2 \frac{f_c v}{C}$  ดังนั้นความถี่ที่รับได้ที่สายอากาศรับจะเขียนได้เป็น

$$f_R(t) = \frac{B}{T} (t - t_d) + f_D \quad (3.14)$$

เมื่อ  $R_0$  คือ ระยะทางของเป้าหมาย ที่เวลา  $t = 0$

$v$  คือ ความเร็วของเป้าหมาย

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสัญญาณที่รับได้ทางเวลา  $s_R(t)$  จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} s_R(t) &= A_R \cos \left( 2\pi f_c (t - t_d) + 2\pi \int_0^t f_R(\tau) d\tau \right) \\ &= A_R \cos \left( 2\pi \left( f_c (t - t_d) + \frac{B}{T} \left( \frac{1}{2} t^2 - t_d \cdot t \right) + f_D \cdot t \right) \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

เพื่อให้ได้ความถี่เลื่อน (doppler shift) ดังนั้นสัญญาณ IF จาก RF mixer ในช่วงความถี่ไต่ขึ้น (up ramp) สามารถหาได้จากสัญญาณส่งทางเวลา FMCW  $s_T(t)$  และสัญญาณที่รับได้ทางเวลา  $s_R(t)$  ที่ RF Mixer โดยที่สัญญาณ IF เมื่อผ่าน low-pass filter แล้วหาได้ดังนี้

$$s_{IF}(t) = \frac{1}{2} \cos \left( 2\pi \left( f_c \cdot \frac{2R_0}{C} \right) + 2\pi \left( \frac{2R_0}{c} \cdot \frac{B}{T} + \frac{2f_c v}{c} \right) t \right) \quad (3.16)$$

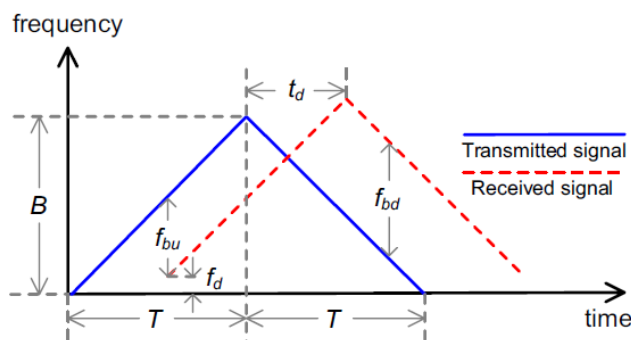
และความถี่ IF จาก RF mixer ในช่วงความถี่ไต่ลง (down ramp) สามารถหาได้จาก

$$s_{IF}(t) = \frac{1}{2} \cos \left( 2\pi \left( f_c \cdot \frac{2R_0}{C} \right) + 2\pi \left( -\frac{2R_0}{c} \cdot \frac{B}{T} + \frac{2f_c v}{c} \right) t \right) \quad (3.17)$$

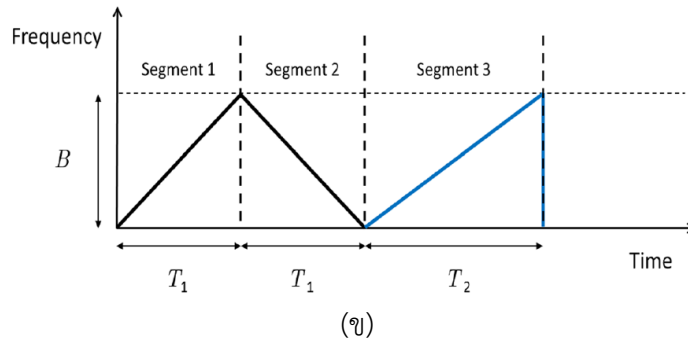
ดังนั้น 2 ค่าความถี่ที่ได้จากสัญญาณ IF เรียกว่า beat frequency (ซึ่งก็คือ  $\Delta f_1 = f_{bu}$  และ  $\Delta f_2 = f_{bd}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.18 สามารถหาได้จาก

$$f_{bu} = \frac{2R_0}{c} \cdot \frac{B}{T} + \frac{2f_c v}{c} \quad (3.18)$$

$$f_{bd} = -\frac{2R_0}{c} \cdot \frac{B}{T} + \frac{2f_c v}{c}$$



(ก)



รูปที่ 3.18 (ก) แผนผังความถี่ที่เปลี่ยนไปตามเวลา (ข) การประมวลผลในแต่ละช่วงเวลา

การประมวลผลทางความถี่ โดยทั่วไปจะใช้วิธี fast fourier transform (FFT) [1-6] ซึ่งจะประมวลผลในแต่ละช่วงเวลาเพื่อหา beat frequency ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งสามารถเขียนสมการในแต่ละช่วงเวลาแทนด้วยค่า  $k$  ดังนี้

$$f_{bu,k} = \frac{2R_{0,k}}{c} \cdot \frac{B}{T_k} + \frac{2f_c v_k}{c} \quad (3.19)$$

$$f_{bd,k} = -\frac{2R_{0,k}}{c} \cdot \frac{B}{T_k} + \frac{2f_c v_k}{c}$$

ดังนั้นระยะทาง  $R$  และความเร็ว  $v$  ของเป้าหมายที่คำนวณได้ที่ช่วงเวลา ความถี่ใต้ขึ้น up ramp และในช่วงความถี่ใต้ลง down ramp ในช่วงเวลา  $k$  ใดๆ สามารถเขียนได้เป็น

$$R_{0,ij} = \frac{cT_1(f_{bu,i} - f_{bd,j})}{4B} \quad (3.20)$$

$$v_{ij} = \frac{c(f_{bd,i} + f_{bu,j})}{4f_c}$$

โดยที่วิธี fast fourier transform (FFT) [1] ถึง [7] ซึ่งจะประมวลผลในแต่ละช่วงเวลาเพื่อหา beat frequency ดังนี้

$$f_{bu} = FFT(s_{IF}(t)_{T,up}) \quad (3.21)$$

และความถี่ IF จาก RF mixer ในช่วงความถี่ใต้ลง down ramp สามารถหาได้จาก

$$f_{bd} = FFT(s_{IF}(t)_{T,down}) \quad (3.22)$$

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

หลังจากนั้นกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณหลังจากทำการ FFT ในงานวิจัยต่าง ๆ สามารถสรุปได้ในตารางที่ 3.2 โดยกระบวนการ STFT spectrogram จะถูกใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 3.2 กระบวนการวิเคราะห์สัญญาณหลังจากทำการ FFT ในงานวิจัยต่าง ๆ [7]

Author (year)	Main objective / application	Time-frequency analysis for the m-DS extraction	Radar data
Kim et al. (2002)	Aircraft classification	Multiple signal classification (MUSIC)	CW
Stankovic et al. (2006a)	Separation of rigid body and micro-motion effects	STFT (Spectrogram) with order statistics	CW
Stankovic et al. (2006b)	Air target classification in heavy sea clutter	S-method by STFT with the Eigen decomposition	CW
Thayaparan et al. (2007)	Radar m-DS analysis	Wavelet transform & STFT (Spectrogram)	CW
Bai et al. (2008)	ISAR* imaging	Complex-valued EMD	CW
Björklund et al. (2012)	Gait classification	STFT (CVD)	CW
Du et al. (2013)	Aircraft classification	EMD with the CLEAN technique	CW
Molchanov et al. (2014a)	Aircraft classification	Bicoherence estimation based on STFT	CW
Harmanny et al. (2015)	UAV classification	STFT (Spectrogram, Ceprogram)	CW
Wang et al. (2016)	Radar m-DS analysis	EMD or EEMD* with SPWVD*	CW
Tan et al. (2016)	Radar m-DS analysis	SPWVD Pre-Window	CW
Kim et al. (2017)	UAV classification	STFT (Spectrogram+CVD)	CW
Ren & Jiang (2017)	UAV detection	2D Complex-log spectrum based on STFT	CW
Oh et al. (2018)	UAV classification	EMD	CW
Li et al. (2017, 2019)	Active shooter detection	STFT (Spectrogram)	CW
Oh et al. (2019)	Blade flash decomposition	Augmented EMD	CW
Sun et al. (2019)	UAV detection	Iterative adaptive approach	FMCW

ซึ่งได้มีการนำเอาระบบเรดาร์ FMCW ไปประยุกต์ใช้ รวมถึงนำไปพัฒนาและปรับปรุงในส่วนของการประมวลผลสัญญาณด้วยวิธีต่าง ๆ ทำให้สามารถตรวจจับโดรนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากบทความ [9] การตรวจจับโดรนที่มีขนาดเล็กโดยใช้ระบบเรดาร์ FMCW ที่ความถี่ 14.50 GHz ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นความท้าทายในการตรวจจับโดรนที่มีขนาดเล็กมาก 2 ขนาดด้วยกัน คือรุ่น DJI Spark ที่มีขนาด 14.3 cm x 14.3 cm และรุ่น CHEERSON CX-10A ที่มีขนาด 4 cm x 4 cm โดยเทคนิคที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณ คือ stationary point concentration (SPC) ซึ่งเทคนิคนี้ศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนทางเฟส (phase noise) ของการรบกวนที่จุดเริ่มต้นของฟังก์ชัน sinusoidal โดยกระบวนการนี้จะลดทอนแอมพลิจูดของสัญญาณรบกวนทางเฟสจากการรบกวน และลดค่า noise floor ที่บดบังเป้าหมายได้เป็นอย่างดี ซึ่งเทคนิคนี้จะสามารถตรวจจับโดรนได้ในขณะอยู่กับที่เท่านั้น ซึ่งถ้าโดรนมีการเคลื่อนที่จะไม่สามารถใช้วิธี SPC ได้ โดยการทดสอบจะใช้โดรน CHEERSON CX-10A ที่มีขนาดเล็กมากๆ ซึ่งไม่สามารถบินได้ไกล จะผูกเชือกติดกับ DJI spark โดยระยะห่างระหว่างโดรนคือ 5 m หลังจากนั้นให้โดรน DJI spark ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะบินขึ้นไประยะ 105 m ต่อมาโดรน CHEERSON CX-10A ที่ผูกเชือกติดกับโดรนอีกตัว จะลอยอยู่บนอากาศที่ระยะ 100 m ซึ่งผลลัพธ์ของการทดลองพบว่าสัญญาณ beat ที่ไม่ได้ใช้เทคนิค SPC ทำให้โดรนขนาดเล็ก



ทั้งสองถูกบดบังโดยการรบกวนและพื้นสัญญาณรบกวน (noise floor) ต่อมาหลังจากใช้เทคนิค SPC ทำให้ผลลัพธ์ของเป้าหมายมีความเด่นชัดมากยิ่งขึ้น และระยะห่างระหว่างโดรนคือ 5 m ซึ่งมั่นใจได้ว่าการใช้เทคนิค SPC มีประสิทธิภาพในการลดการรบกวนและพื้นสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างดี

จากบทความ [10] การตรวจจับโดรนและการวัด radar-cross-section (RCS) โดยใช้เรดาร์กับตัวรับที่เป็นอาร์เรย์แบบดิจิทัล (radar with digital array reception, RAD-DAR) ซึ่งถูกออกแบบขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้ระบบเรดาร์ FMCW ที่มีความถี่ 8.75 GHz (X-band) และออกแบบการรับสัญญาณดิจิทัลอาร์เรย์ 8 ช่องสัญญาณ และสร้างลำคลื่นจำนวน 5 ลำคลื่น โดยกระบวนการฟอร์มลำคลื่นแบบดิจิทัลในการรับสัญญาณสะท้อนกลับ ซึ่งช่วยให้ลำคลื่นที่สร้างทั้ง 5 ลำคลื่น ครอบคลุมมุมกวาด (azimuthal) ในแต่ละมุม โดยการเก็บข้อมูลจะเป็นแบบ 3 มิติ ซึ่งจะมีข้อมูลของระยะพิสัย (Nr), ความถี่ดอปเพลอร์ (doppler frequency) หรือความเร็ว (Nd) และมุมกวาด (Na) เมื่อมีการรับสัญญาณและจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบ 3 มิติแล้วหลังจากนั้นจึงเริ่มทำการประมวลผลสัญญาณ โดยแบ่งออกเป็น 8 ส่วนด้วยกัน คือ

**ส่วนที่ 1** ทำการ fast fourier transform (FFT) ครั้งแรกจากมิติ Nr หรือค่า beat frequency เพื่อหาระยะพิสัย

**ส่วนที่ 2** ทำการ fast fourier transform (FFT) ครั้งที่สองโดยใช้มิติ Nd หรือความถี่ doppler ซึ่งสามารถแปลงข้อมูลเป็นความเร็วได้

**ส่วนที่ 3** ทำการฟอร์มลำคลื่นเพื่อเป็นการชดเชยการเลื่อนของเฟสสำหรับแต่ละช่องสัญญาณ เพื่อให้มุมกวาดครอบคลุมตั้งแต่  $\theta = -40$  ถึง  $40$  องศา

**ส่วนที่ 4** ใช้เทคนิคโมโนพัลส์ (monopulse) เพื่อวัดมุมกวาดของเป้าหมายและปฏิเสธการตรวจจับที่ไม่สอดคล้องกันกับลำคลื่นที่ผ่านการประมวลผลแล้ว โดยจะแสดงถึงระยะมุมของลำคลื่นที่สามารถตรวจพบเป้าหมายได้

**ส่วนที่ 5** ในช่วงการตรวจจับของหน่วยประมวลผลสัญญาณจำเป็นต้องใช้เทคนิค cell-averaging constant false alarm rate (CA-CFAR) [11] เพื่อให้ได้ค่า binary cube จากการตรวจจับ ซึ่งขั้นตอนนี้จะเปรียบเทียบกำลังของสัญญาณในแต่ละเซลล์ของระยะพิสัย-ดอปเพลอร์กับค่าขีดกั๊กันแบบปรับค่าได้

**ส่วนที่ 6** ขั้นตอนการใช้ CA-CFAR เป็นการทำวินโดวส์แบบสองมิติ เพื่อนำไปใช้กับมิติระยะพิสัยและดอปเพลอร์ หน่วยประมวลผลจะทำการคำนวณขีดกั๊กันจากค่า 2 ค่า คือมิติดอปเพลอร์  $T_D$  (doppler dimension) และมิติระยะพิสัย  $T_R$  (range dimension) ซึ่งสามารถตั้งค่าเพื่อลดความน่าจะเป็นในการแจ้งเตือนผิดพลาด ( $P_{fa}$ ) จากการตรวจจับโดรนได้

**ส่วนที่ 7** ขั้นตอนการเขียนแผนผังของข้อมูล เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลสัญญาณมาเขียนแผนผังเพื่อแสดงผลในการตรวจจับโดรน

**ส่วนที่ 8** ขั้นตอนการติดตามเป้าหมาย อัลกอริทึมในการตรวจจับที่นำมาใช้ประกอบด้วยการวาดแผนผังที่สอดคล้องกับระยะทางจากจุดจริงไปถึงจุดที่ทำนายในแต่ละจุด โดยยึดตามอดีตของแต่ละจุด ณ จุดเวลาใดๆจุดหนึ่ง ซึ่งอัลกอริทึมดังกล่าวจะพิจารณามุมกวาด ระยะพิสัย ความเร็วเชิงรัศมี (radial speed) และข้อมูลเวลา ซึ่งผลลัพธ์ในการทดสอบประสิทธิภาพของ RAD-DAR สำหรับการตรวจจับโดรน DJI Phantom 4 สามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธีการบิน คือ

1) วิธีการบินแบบซุ่มรบ (attack maneuver) ซึ่งเป็นการบินแบบเส้นตรงโดยกำหนดให้โดรนบินจากระยะห่าง 3.1 km แล้วบินตรงไปยัง RAD-DAR โดยผู้ขับใช้โดรนใช้การควบคุมอัตโนมัติ (go to home mode) ที่ความเร็ว 30 km/h ซึ่งเป็นการทดสอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบความแม่นยำของเรดาร์และการคำนวณค่าความผิดพลาดของความเร็วระยะพิสัยและมุมกวาด ซึ่งผลลัพธ์จะแสดงเป้าหมายที่ถูกติดตามบนระนาบ X-Y (km) โดยการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลจาก GPS ของโดรนกับข้อมูลจากเรดาร์ที่ได้หลังจากการประมวลผลสัญญาณแล้ว พบว่าเกิดการกระจัดกระจายมากของข้อมูลจากเรดาร์ในระยะไกลเนื่องจากค่าความผิดพลาดของมุมกวาดจะเพิ่มขึ้นตามระยะพิสัย และผลลัพธ์ในการเปรียบเทียบความเร็วระยะพิสัยของเรดาร์กับข้อมูล GPS ของ โดรน พบว่ามีความเร็วโดยเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันอยู่ที่  $-34.44$  km/h รวมถึงแสดงระยะพิสัย-มุมกวาดของโดรน ซึ่งสามารถมองเห็นมุมกวาดโดยเฉลี่ยที่ตรวจพบได้ที่  $-7.89$  องศา

2) วิธีการบินแบบเชิงรัศมี (radial trajectories) เป็นการทดสอบความครอบคลุมมุมกวาดในลำดับแรก โดยการบินโดรนซึ่งประกอบไปด้วยวิธีการบินจำนวน 7 วิธีการบินที่มีรัศมีการบินแตกต่างกัน ในแต่ละวิธีการบินจะใช้ระบบอัตโนมัติในการบินกลับไปยังฐาน จากระยะ 1.2 km โดยมีมุมกวาดที่องศาต่างกัน 10 องศา ซึ่งเรดาร์สามารถแสดงผลการติดตามวิธีการบินทั้ง 7 วิธีได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

3) วิธีการบินแบบวงกลม (circular path) เป็นการทดสอบมุมกวาดในลำดับที่สอง ซึ่งจะครอบคลุมการบินโดรนเป็นวิถีแบบวงกลมโดยใช้โหมดการบินจุดที่สนใจ (point of interest) โดยเส้นรอบวงการบินมีรัศมีเท่ากับ 200 m ซึ่งมีจุดกึ่งกลางของวงกลมห่างออกไปจากเรดาร์เป็นระยะ 800 m และทำการบินด้วยความเร็วคงที่ 30 km/h ซึ่งผลลัพธ์สามารถแสดงในระนาบ X-Y (km) และระนาบระยะพิสัย-ความเร็ว ซึ่งวิธีการบินแบบวงกลมนี้ช่วยให้สามารถศึกษา RCS ของโดรนจากจุดสังเกตที่แตกต่างกันได้และค่าความผิดพลาดในมุมกวาดจะเกิดขึ้นเมื่อมุมการบินในขณะนั้นมี RCS ต่ำจากการทดสอบจะพบว่าเกิดการกระจัดกระจายของค่าที่เรดาร์วัดได้ เมื่อโดรนบินเข้ามาใกล้ RAD-DAR เนื่องจากกล้องโดรนสามารถตรวจจับคลื่นตกกระทบได้น้อย และเมื่อโดรนบินห่างออกไป จะทำให้คลื่นตกกระทบสามารถกระทบกับระบบกล้องที่โดรนได้อย่างเต็มที่ ซึ่งทำให้ค่า RCS ของโดรนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4) วิธีการบินแบบอิสระ (free flight) โดยการบินโดรนในช่วงครึ่งแรกของการทดสอบของวิธีการบินนี้ใช้โหมดควบคุมด้วยตนเอง (manual) และในช่วงครึ่งหลังจะเปลี่ยนการควบคุมเป็นแบบอัตโนมัติ (go to home mode) ซึ่งผลลัพธ์ของการทดสอบนั้น สามารถแยกแยะค่าความเร็วได้อย่างชัดเจน การทดสอบนี้เป็นวิธีการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะพิสัยกับความเร็ว ที่ RAD-DAR สามารถทำได้จากวิธีการบินทั้งสี่รูปแบบข้างต้นนั้น แสดงให้เห็นถึงความสามารถของ RAD-DAR ในการตรวจจับและติดตามโดรนโดยมีระยะไกลถึง 3.1 km ซึ่งเครื่องเรดาร์มีขนาดเล็ก สามารถติดตั้งได้อย่างรวดเร็วและใช้พลังงานต่ำ แต่ยังสามารถเฝ้าระวังได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือระบบสามารถแจ้งเตือนล่วงหน้า เมื่อพบเป้าหมายที่มีขนาดเล็ก (RCS ต่ำ) และบินด้วยความเร็วที่ต่ำได้อีกด้วย

เทคนิคการประมวลผลสัญญาณของระบบ FMCW ได้มีการนำเสนอใน [12] การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการประมวลผลสัญญาณที่ได้จากระบบเรดาร์ FMCW ในการตรวจจับสภาพอากาศในระยะใกล้และระยะไกล โดยการใช้เทคนิค Blackman, Hamming, Hanning และ Bartlet ซึ่งเป็นชนิดของวินโดวส์สำหรับการกรองสัญญาณในโดเมนเวลา แล้วจึงทำการแปลงฟาสต์ฟูริเยร์ (fast fourier transform) การใช้ฟังก์ชันวินโดวส์ สามารถทำให้ระยะของพิสัยมีความแม่นยำยิ่งขึ้นและใช้กำลังที่น้อยลง ซึ่งผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบการประมวลผลแต่ละวินโดวส์พบว่าวินโดวส์ชนิด Hamming สามารถตรวจจับเป้าหมายระยะไกลได้เป็นอย่างดีและมีแอมพลิจูดสูงสุดมากกว่าวินโดวส์ชนิดอื่น ๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้แนะนำให้เลือกใช้ 2 วินโดวส์ด้วยกัน คือ Hamming และ Hanning ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการประมวลผลสัญญาณได้ดีที่สุด

ใน [13] การจำลองประมวลผลสัญญาณบนระบบเรดาร์ FMCW ความถี่ 95 GHz สำหรับตรวจจับเป้าหมายระยะไกลหลายเป้าหมาย ซึ่งเงื่อนไขการจำลองสัญญาณคือมีเป้าหมายทั้งหมด 5 เป้าหมาย โดยให้ 2 เป้าหมายถูกบดบังจาก 3 เป้าหมายที่มีพีคที่เด่นชัด และใช้วิธีการประมวลผลแบบ 1T-process และ 2T-process ซึ่งวิธีการ 1T-process จะใช้สัญญาณในช่วงเวลา 1-PRI (pulse repetition interval) ในการประมวลผลและใช้วิธีการกรองสัญญาณแบบวินโดวส์ชนิด Hanning ที่สัญญาณส่งและสัญญาณรับในโดเมนเวลา เพื่อยับยั้งด้านข้างของพูสัญญาณ (sidelobes) และเฟสไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ ผลลัพธ์พบว่าสามารถตรวจจับเป้าหมายได้ทั้งหมด 5 เป้าหมาย แต่เมื่อเป้าหมายมีการจำลองการเคลื่อนที่ พบว่าเกิดการกล้ำแอมพลิจูดซ้อนกันของพูสัญญาณ (double-lobe amplitude modulation) ในช่วงกลางของเป้าหมาย ทำให้สัญญาณมีความละเอียดของช่วงที่ลดลง การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจะใช้วิธีการ 2T-process โดยการใช้สัญญาณในช่วงเวลา 2-PRI ในการทำการบีบอัดพัลส์ (pulse compression) คือการใช้การกรองแบบจับคู่ (match filter) โดยค่าความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างสัญญาณส่ง (1-PRI) กับสัญญาณรับ (2-PRI) แล้วจึงทำการ fast fourier transform ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้พบว่าสามารถตรวจจับเป้าหมายได้ทั้งหมด 5 เป้าหมาย และเมื่อ

เป้าหมายมีการจำลองการเคลื่อนที่สัญญาณไม่มีการเกิดการกล้ำแอมพลิจูดซ้อนกันของพหุสัญญาณขึ้นในช่วงกลางของเป้าหมาย ทำให้สัญญาณมีความชัดเจนยิ่งขึ้นและความละเอียดของช่วงก็สูงขึ้น โดยผลลัพธ์สำหรับการทดสอบในการตรวจจับเป้าหมายต่าง ๆ จะอยู่ใน [14] ซึ่งใช้การออกแบบระบบเรดาร์ doppler FMCW 95 GHz (W-band) กำลังการส่ง 1 Watt และเป็นเรดาร์สเปกโทรมิเตอร์น้ำแข็งและก๊าซ (gas and ice spectrometer radar, GAISR) ในส่วนของการทดสอบของเรดาร์จะทำการวัดเป้าหมายที่หลากหลาย คือ การวัดเนินเขา การวัดรถยนต์ที่เคลื่อนที่บนทางด่วน การวัดเมฆ และการวัดฝน เพื่อทดสอบความสามารถของ ระยะพิสัยและ doppler ในส่วนการประมวลผลสัญญาณจะใช้วิธี 1T-process และ 2T-process โดยที่วิธีการ 1T-process จะนำสัญญาณเซิร์ฟที่ได้รับคูณกับสัญญาณเซิร์ฟที่ส่งออกไป (สัญญาณอ้างอิง) และทำการ fast fourier transform โดยในโดเมนเวลาจะทำให้สัญญาณเรียวลง หรือก็คือการกรองสัญญาณโดยใช้วินโดวส์ชนิด Hanning กับการกรองในโดเมนความถี่ ซึ่งฟังก์ชัน 1T-process จะทำงานได้ดีเมื่อวัตถุหยุดนิ่ง ในขณะที่วิธีการ 2T-process ซึ่งใช้การกรองแบบจับคู่ (match filter) โดยการหาค่าความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างสัญญาณส่ง (1-PRI) กับสัญญาณรับ (2-PRI) แล้วจึงทำการ fast fourier transform ซึ่งวิธีนี้จะช่วยสามารถตรวจจับเป้าหมายได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ในกรณีที่เป้าหมายหลายเป้าหมายมีการเคลื่อนที่ที่พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของความละเอียดของระยะพิสัย (range resolution) และความละเอียดเชิงความเร็ว (velocity resolution) ที่มีความละเอียดในระดับ 10 m และ 0.1 m/s ตามลำดับ ระยะการตรวจจับของเรดาร์ที่ชัดเจนสูงสุดที่ 5 km และขีดจำกัดของความเร็วอยู่ที่ 46 m/s

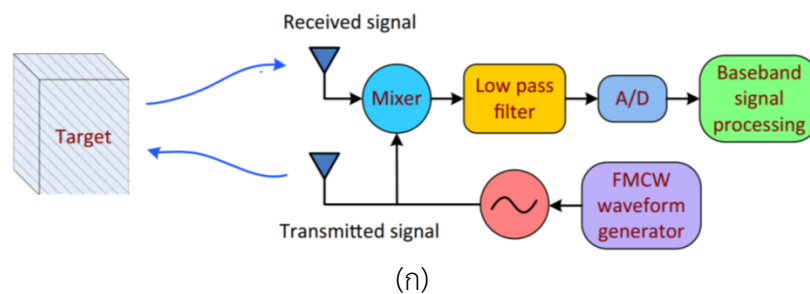
## รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2

## บทที่ 4

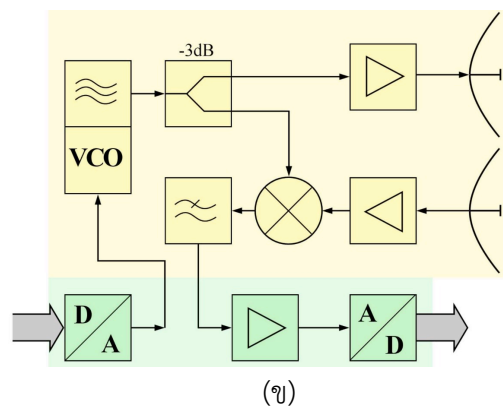
### รายงานผลพัฒนาภาครับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์ สำหรับการตรวจจับโดรน

#### 4.1 การพัฒนาภาครับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์สำหรับการตรวจจับโดรน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและทดสอบ ระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (continuous wave radar) ชนิดผสมสัญญาณ (FMCW) เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว โดยสายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ คลื่นความถี่ของสัญญาณถูกปรับความถี่ไปตามเวลาหรือเรียกได้ว่าการผสมสัญญาณ (modulated) เพื่อปรับความถี่ โดยเรดาร์นี้จะวัดทั้งความเร็วของเป้าหมาย และยังสามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้ รูปแบบของบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.1 การออกแบบสายอากาศจะกล่าวถึงในบทที่ 5 ต่อไป

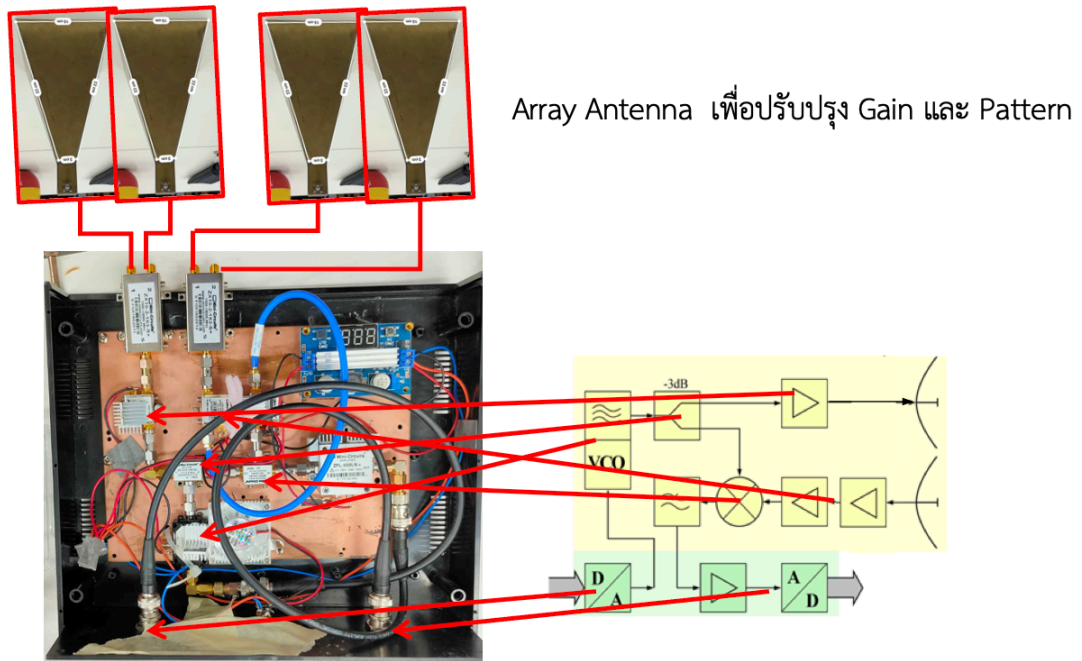


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.1 (ก) และ (ข) บล็อกไดอะแกรมที่ได้รับความนิยมของ FMCW radar [1],[3] และ [4]



รูปที่ 4.2 ระบบเรดาร์ FMCW ที่สร้างขึ้น

ในรูปที่ 4.2 แสดงระบบเรดาร์ FMCW ที่สร้างขึ้นตามแผนภาพในรูปที่ 4.1 (ข) ซึ่งประกอบไปด้วย

1. วงจรผสมสัญญาณ RF mixer
2. วงจรขยายสัญญาณการรบกวนต่ำ (low noise amplifier)
3. วงจรแบ่งกำลังงาน (power divider)
4. วงจรขยายสัญญาณความถี่กลาง (IF amplifier)
5. สายอากาศรับ-ส่ง (Tx, Rx antennas)
6. วงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณต่อเนื่องเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital converter)

#### 4.2 ผลการพัฒนาการรับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์สำหรับการตรวจจับโดรน

ในการออกแบบสัญญาณควบคุมแบบสามเหลี่ยมเพื่อใช้ควบคุมความถี่ของสัญญาณ FM จะต้องคำนึงถึงระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถตรวจจับวัตถุได้ เพราะเวลาที่คลื่นใช้เดินทางจากสายอากาศภาคส่งไปกระทบวัตถุและสะท้อนกลับมายังสายอากาศภาครับจะเป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณ IF โดยสามารถหาเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง ในกรณีที่เรดาร์ตรวจจับวัตถุที่ระยะสูงสุดได้ตามสมการ 4.1

$$t = \frac{2S_{max}}{c} \quad (4.1)$$

$t$  คือเวลาที่คลื่นใช้เดินทางไป-กลับสายอากาศ

$S_{max}$  คือระยะทางสูงสุดที่เรดาร์สามารถตรวจจับวัตถุได้

$c$  คือความเร็วที่คลื่นเดินทางในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

จากความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณภาคส่งและภาครับที่เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณควบคุมสามเหลี่ยมตามรูปที่ 3.17 พบว่าสัญญาณภาครับจะ delay หรือชิวไปด้านขวาตามเวลาในสมการที่ (4.1) เมื่อสัญญาณภาคส่งและภาครับมิกซ์กันแล้ว ในส่วนที่สัญญาณชิวกันจะมีการลบกันทางความถี่ โดยผลต่างของความถี่ที่ลบกันจะต้องสอดคล้องกับความถี่ในการชักตัวอย่างของวงจรแปลงสัญญาณ จากสัญญาณต่อเนื่องเป็นสัญญาณดิจิทัลนั้นคือ 100 MS/s และจากทฤษฎีของ Nyquist rate ความถี่ในการชักตัวอย่างต้องมีความถี่อย่างน้อยเป็นสองเท่าของสัญญาณ ดังนั้นผลต่างของความถี่ที่ลบกันมีค่าได้มากที่สุดคือ 50 MHz ซึ่งคิดเป็นหนึ่งในแปดของกราฟ จึงเขียนเป็นเป็นความสัมพันธ์ในการหาความถี่ของสัญญาณควบคุมสามเหลี่ยมที่มี bandwidth = 100 MHz ได้ตามสมการ (4.2)

$$f_{triangle} = \frac{1}{4t} \quad (4.2)$$

$f_{triangle}$  คือความถี่ของสัญญาณควบคุมสามเหลี่ยม

$t$  คือเวลาที่คลื่นใช้เดินทางไป-กลับสายอากาศ

ตัวอย่างเช่น ต้องการออกแบบให้เรดาร์ตรวจจับได้ระยะทางสูงสุด 1,000 m คำนวณตามสมการที่ 4.2 ได้เวลาที่คลื่นเดินทางไป-กลับ  $t = 6.7 \mu\text{s}$  จากนั้นคำนวณหาความถี่ของสัญญาณควบคุมสามเหลี่ยมจะได้ว่า  $f_{triangle} \approx 37.3 \text{ kHz}$  ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะเป็นค่าสูงสุดในการใช้งานจริง อาจเลือกใช้ที่ความถี่ต่ำกว่านี้ได้

ในการทดลองจะใช้สายอากาศปากแตร แบบตัวเดียวและแบบแถวลำดับคู่เพื่อเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.2 ในหัวข้อนี้จะแสดงผลลัพธ์ของการทดลองระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องความถี่ 10 GHz ที่ถูกออกแบบมาสำหรับการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดเล็กและสายอากาศแบบอาร์เรย์ทั้งหมด 4 ตัวสำหรับส่งและรับสัญญาณ ซึ่งในการทดลองจะอยู่ในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน โดยใช้เรดาร์ตรวจจับเป้าหมายแต่ละชนิดที่มีวัสดุที่แตกต่างกัน ดังนั้นการตั้งค่าเป้าหมายในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อนมีดังต่อไปนี้



## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ในการตั้งค่าการทดลองสำหรับการตรวจจับเป้าหมายที่มีขนาดเล็ก และส่วนของการทดลองของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ความถี่ จะดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน โดยที่การตั้งค่าการทดลองที่ได้นำเสนอแบ่งออกเป็น 4 กรณีดังต่อไปนี้

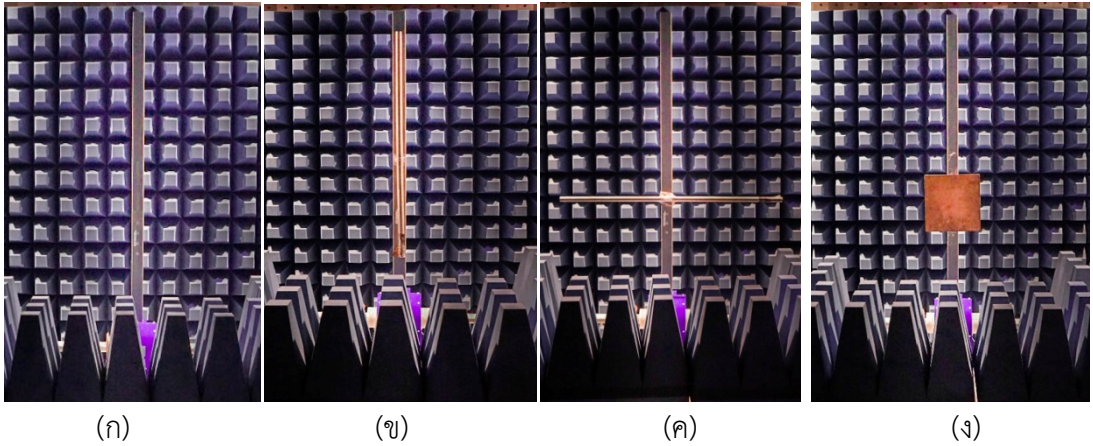
**กรณีที่ 1** เป้าหมาย คือเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างและความยาว  $3.5 \times 3.5$  cm x cm และความสูง 2 m ซึ่งจะรวมอยู่ในทุกกรณีของการวัดแสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) โดยให้เรดาร์ห่างจากเป้าหมาย 4 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.4

**กรณีที่ 2** เป้าหมาย คือแท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 cm และความยาว 120 cm ซึ่งจะติดตั้งในแนวตั้งติดอยู่บนเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.3 (ข) โดยให้เรดาร์ห่างจากเป้าหมาย 4 เมตร แสดงดังรูปที่ 4-3 (ก)

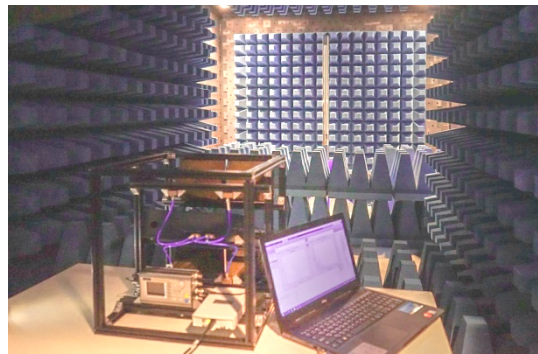
**กรณีที่ 3** เป้าหมาย คือแท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 cm และความยาว 120 cm เช่นเดียวกับกรณีที่ 2 แต่จะติดตั้งในแนวนอนติดอยู่บนเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.3 (ค) โดยให้เรดาร์ห่างจากเป้าหมาย 4 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.5 (ข)

**กรณีที่ 4** เป้าหมาย คือแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $30 \times 30$  cm x cm และติดตั้งบนเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.3 (ง) ในกรณีนี้ผลลัพธ์ของการเคลื่อนที่ของแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจะถูกรวมอยู่ในการวัดนี้ด้วย โดยให้เรดาร์ห่างจากเป้าหมาย 1.5 m และ 4 m แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

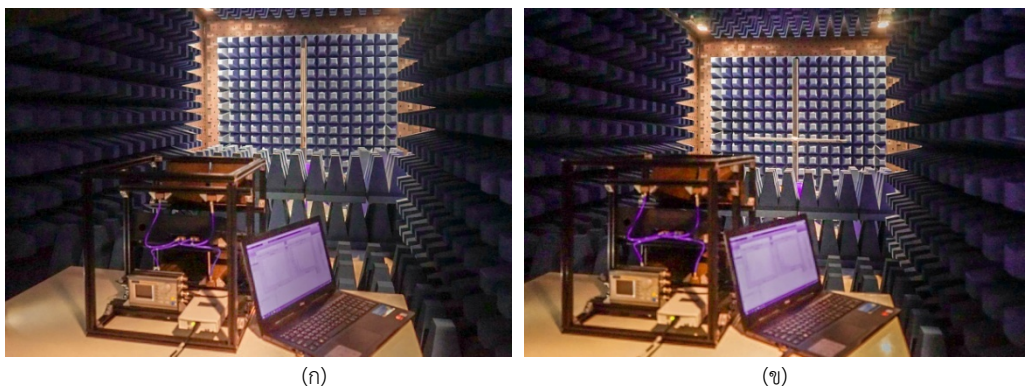
โดยการตั้งค่าการทดลองสำหรับการตรวจจับเป้าหมายที่มีวัสดุแต่ละชนิดและมีขนาดที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองจะแสดงให้เห็นถึงค่าแอมพลิจูดที่แตกต่างกันเกิดจากขนาดและชนิดของวัสดุทำให้ค่า RCS ไม่เท่ากัน โดยการติดตั้งวัสดุต่างๆ สำหรับการทดลองการตรวจจับของระบบเรดาร์ แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.3



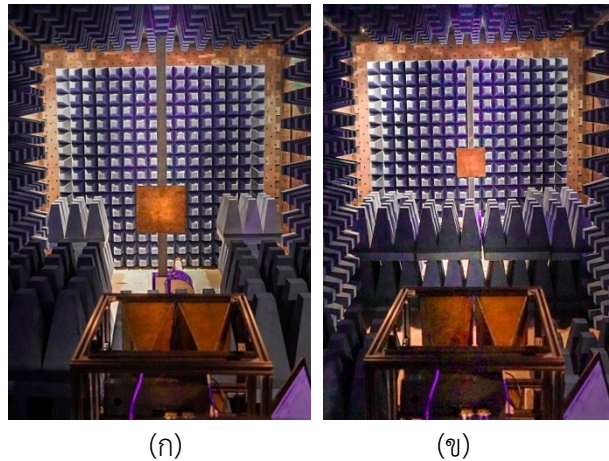
รูปที่ 4.3 การตั้งค่าเป้าหมาย (ก) เสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม (ข) แท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมแนวตั้งที่ติดกับเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม (ค) แท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมแนวนอนที่ติดกับเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม (ง) แผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัสติดกับเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.4 การตั้งค่าการตรวจจับเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม

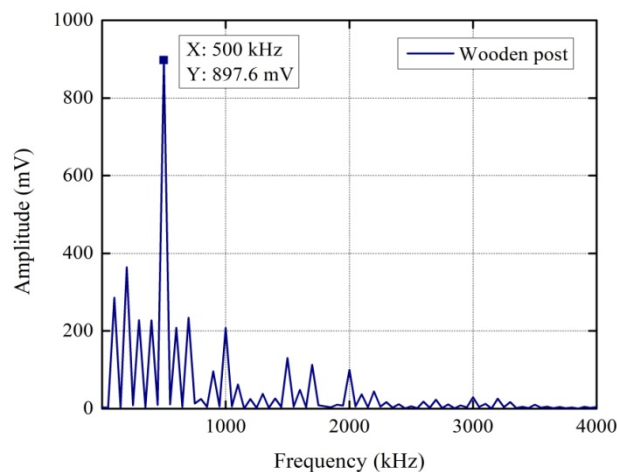


รูปที่ 4.5 การตั้งค่าการตรวจจับแท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลม (ก) แท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมที่ติดตั้งในแนวตั้งซึ่งติดอยู่บนเสาไม้ (ข) แท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมที่ติดตั้งในแนวนอนซึ่งติดอยู่บนเสาไม้



รูปที่ 4.6 การตั้งค่าการตรวจจับแผ่นโลหะสี่เหลี่ยม (ก) แผ่นโลหะสี่เหลี่ยมติดตั้งบนเสาไม้ห่างจากเรดาร์ 1.5 m (ข) แผ่นโลหะสี่เหลี่ยมติดตั้งบนเสาไม้ห่างจากเรดาร์ 4 m

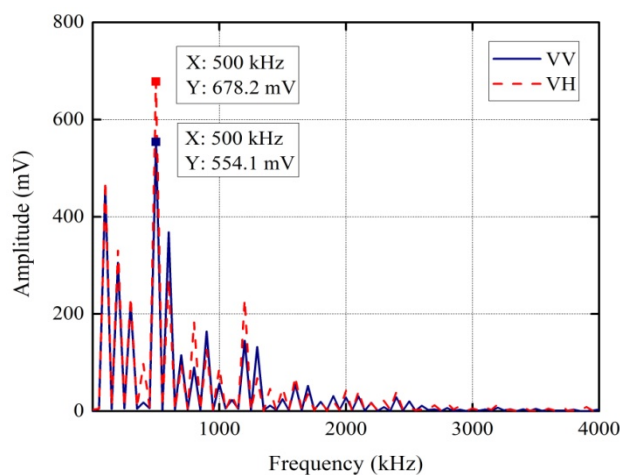
การตรวจจับเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม ในการตรวจจับเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมได้มีการตั้งค่าเป้าหมายแสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) โดยให้เรดาร์ห่างจากเป้าหมาย 4 m แสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งการทดลองจะอยู่ในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน ดังนั้นเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมถูกตรวจพบได้โดยเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง และผลลัพธ์ในการตรวจพบจะแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าเป้าหมายเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมให้ แอมพลิจูดของสัญญาณที่ 897.6 mV พร้อมกับความถี่ที่ 500 kHz โดยที่ระยะทาง ( $R$ ) จะเท่ากับ 3.9 m ซึ่งสามารถคำนวณได้อย่างง่ายจากความถี่ โดยสมการที่ (3.10)



รูปที่ 4.7 การตรวจจับไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม

การตรวจจับแท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลม ในการตรวจจับของแท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมถูกตั้งค่าในแนวตั้งและแนวนอนที่ติดกับเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.3 (ข) และ (ค) โดยให้เรดาร์ [สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008]

ห่างจากเป้าหมายประมาณ 4 m แสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งการทดลองจะอยู่ในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน ดังนั้นแท่งโลหะยาวหน้าตัดแบบวงกลมถูกตรวจจับได้โดยเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง และผลลัพธ์ในการตรวจจับจะแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าการวางเป้าหมายแท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมในแนวตั้งให้แอมพลิจูดของสัญญาณที่ 554.1 mV พร้อมกับความถี่พีชส์ที่ 500 kHz และการวางเป้าหมายแท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมในแนวนอนให้แอมพลิจูดของสัญญาณที่ 678.2 mV พร้อมกับความถี่พีชส์ที่ 500 kHz เช่นเดียวกัน โดยระยะทาง ( $R$ ) จะเท่ากับ 3.9 m ซึ่งสามารถคำนวณได้อย่างง่ายดายจากความถี่พีชส์โดยสมการที่ (3.10) ซึ่ง  $VV$  และ  $VH$  แสดงถึงโพลาไรเซชัน (polarization) ในแนวตั้งของสายอากาศส่งสัญญาณ (Tx) และการวางแท่งโลหะยาวหน้าตัดวงกลมในแนวตั้งและแนวนอนตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าแอมพลิจูดของสัญญาณในกรณีของ  $VH$  นั้นมีมากกว่ากรณีของ  $VV$  เล็กน้อย เนื่องจากผลกระทบของตัวเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยม ดังนั้นแอมพลิจูดในกรณีของเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมจะมีหน้าตัดมากกว่ากรณี  $VH$  และกรณี  $VV$  ทำให้แอมพลิจูดเรดาร์ต่ำสุด เนื่องจากขอบโค้งมนของแท่งโลหะหน้าตัดวงกลมส่งผลต่อค่า RCS

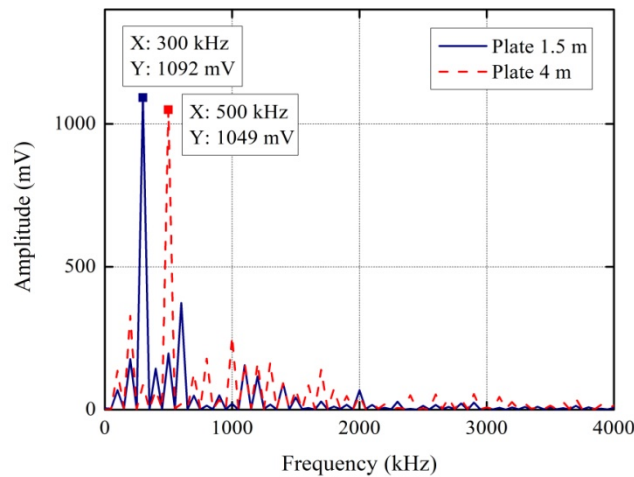


รูปที่ 4.8 การตรวจจับแท่งโลหะหน้าตัดแบบวงกลม

การตรวจจับแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในการตรวจจับของแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ติดกับเสาไม้ค้ำยันสี่เหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 4.3 (ง) ในกรณีนี้ผลลัพธ์ของการเคลื่อนที่แผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะรวมอยู่ในการวัดนี้ด้วย โดยให้เรดาร์ห่างจากเป้าหมาย 1.5 m และ 4 m แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับ ซึ่งการทดลองจะอยู่ในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน ดังนั้นแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัสถูกตรวจจับได้โดยเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง และผลลัพธ์ในการตรวจจับจะแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้รับของเป้าหมายในระยะที่ 1.5 m อยู่ที่ 1,092 mV พร้อมกับความถี่พีชส์ที่ 300

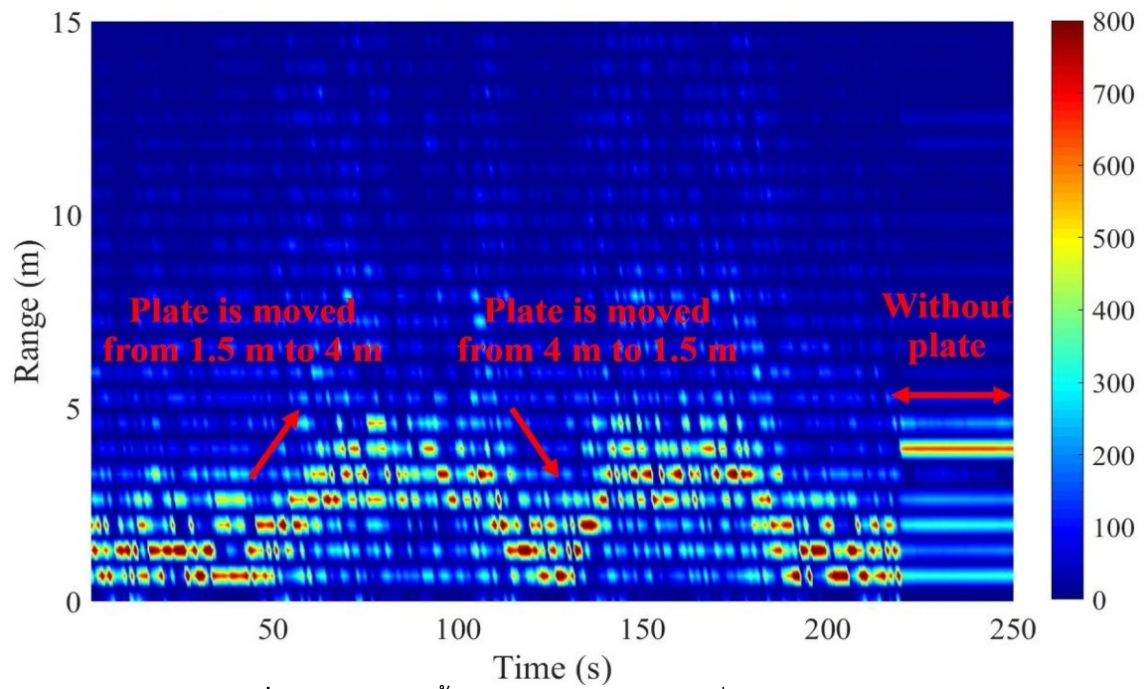
การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

kHz นอกจากนี้ที่ระยะ 4 m พบว่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้รับของเป้าหมายจะอยู่ที่ 1,049 mV พร้อมกับความถี่ที่ 500 kHz จากการวิเคราะห์ระยะที่ 1.5 m มีแอมพลิจูดของสัญญาณมากกว่าระยะที่ 4 m เนื่องจากระยะทางที่มากขึ้นจะส่งผลให้กำลังสูญเสียมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นระยะทางของเรดาร์ที่คำนวณได้สามารถหาได้จากสมการที่ (3.10) พบว่าระยะทางของเป้าหมายที่เรดาร์ตรวจจับสามารถคำนวณได้และเป็นระยะทางจริงที่อยู่ในความเหมาะสมที่ดี



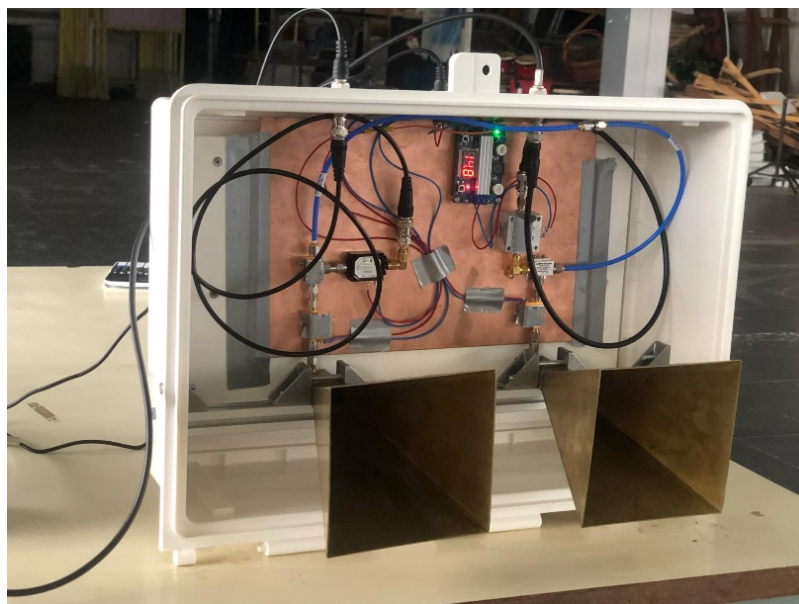
รูปที่ 4.9 การตรวจจับแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ในกรณีการวัดสุดท้าย แผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะถูกเคลื่อนที่จาก 1.5 m ไปยัง 4 m โดยการแสดงผลแบบพล็อตพื้นผิว (surface plot) ของสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณเทียบกับเวลาจะดำเนินการดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยที่แผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะเคลื่อนที่ไปมาเข้าหาและออกห่างจากเรดาร์ ซึ่งพบว่าพีคที่สูงสุดของสเปกตรัมความถี่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งของระยะทางของเป้าหมายแผ่นโลหะสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่เคลื่อนที่



รูปที่ 4.10 พล็อตพื้นผิวของสเปกตรัมความถี่เทียบกับเวลา

การทดสอบส่วนนี้จะประกอบด้วยสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ หนึ่งคู่ เชื่อมต่อสายนำสัญญาณจากสายอากาศส่งและสายอากาศรับเข้ากับเครื่องส่งและเครื่องรับสัญญาณตามลำดับ กำหนดความถี่ทดสอบจากนั้นบันทึกค่าระยะแต่ละเมตรที่ทำการกำหนดไว้ โดยใช้เป้าหมายเป็นตู้โลหะดังแสดงในรูปที่ 4.11

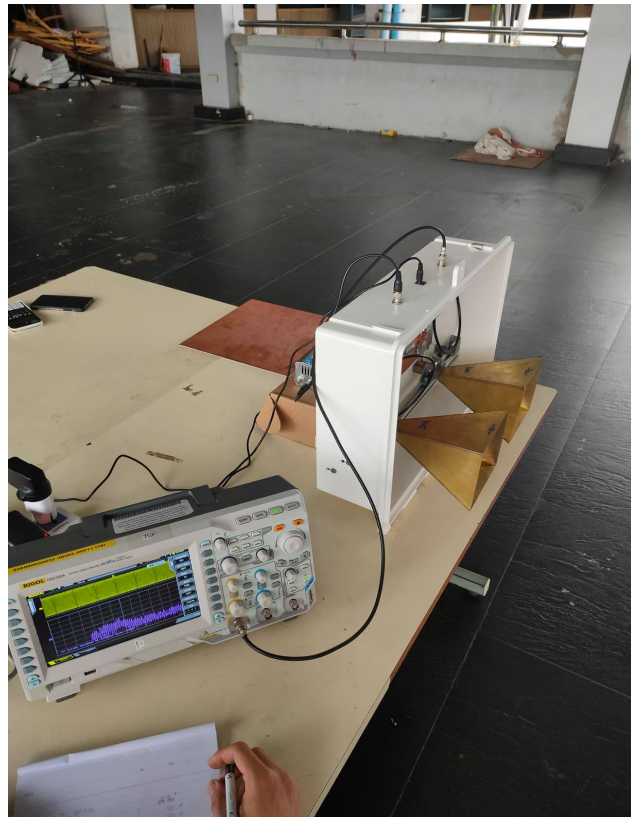


(ก)

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.11 (ก) - (ง) แสดงการทดสอบวัดระยะการใช้งานของสายอากาศปากแตร

การทดสอบวัดการใช้งานของสายอากาศปากแตรนั้นเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการทดสอบมากที่สุดจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการทดสอบ ที่โล่งแจ้ง ไม่มีสิ่งบดบัง เนื่องจากอาจเกิดข้อผิดพลาดทำให้การทดลองได้ค่าที่ผิดเพี้ยนได้ จากภาพจะเห็นว่า ทดสอบการวัดระยะของสายอากาศปากแตรด้วยตู้เหล็ก เพราะเราต้องการวัตถุที่มีขนาดใหญ่ สามารถสะท้อนคลื่นได้ดีกว่าวัตถุที่มีขนาดเล็ก โดยทำการเลื่อนวัตถุไปเรื่อย ๆ ตามระยะที่เรากำหนด จนกว่าจะสัญญาณที่ส่งออกไปจะหยุดนิ่งไม่สะท้อนกลับมา เพื่อทดสอบกำลังส่งของสายอากาศที่ส่งออกไป คำนวณหาระยะห่างเปรียบเทียบกับระยะจริงด้วยสมการที่ 3.10 เมื่อ;  $c = 3 \times 10^8$ ,  $BW = 150 \text{ MHz}$ ,  $f_{\text{triangle}} = 100 \text{ kHz}$  การวัดทดสอบสายอากาศปากแตรจะวัดโดยการแบ่งระยะตามที่กำหนดทุกระยะห่างกัน 2 m จะได้ผลการทดสอบดังนี้



**ตารางที่ 4.1** การคำนวณเปรียบเทียบระยะของสายอากาศที่วัดจริงกับการคำนวณ

ระยะที่วัดทดสอบจริง	ระยะที่ได้จากการคำนวณ	ความถี่ IF
1 m	1 m	100 kHz
3 m	3 m	300 kHz
5 m	5 m	500 kHz
7 m	7 m	700 kHz
9 m	9 m	900 kHz
11 m	11 m	1.1 MHz
13 m	13 m	1.3 MHz
15 m	15 m	1.5 MHz
17 m	17 m	1.7 MHz
19 m	19 m	1.99 MHz
21 m	21 m	2.1 MHz
23 m	23 m	2.3 MHz

จากการทดสอบวัดระยะของสายอากาศปากแตรทำให้พบว่า ระยะที่ได้จากการทดลองจริง และค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าตรงกัน แสดงให้เห็นความมีประสิทธิภาพของสายอากาศ และสามารถนำไปปรับใช้งานได้ในสภาพอากาศจริง โดยการทดสอบวัดการใช้งานของสายอากาศปากแตรที่ทำการวัดตั้งแต่ระยะ 1 m และสามารถทำการวัดระยะได้ สูงสุดอยู่ที่ 23 m และยังคงค่าที่ตรงไม่ผิดเพี้ยน หากทำการเพิ่มระยะให้มากขึ้นพบว่า กำลังคลื่นที่ส่งออกไป ไม่มีการสะท้อนกลับมา โดยจะขึ้นอยู่กับกำลังส่งของระบบเรดาร์หากต้องการให้ได้ระยะที่ไกลมากกว่า จำเป็นต้องมีเครื่องส่งที่มีกำลังส่งสูง

## บทที่ 5

### รายงานผลการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับโคจร

#### 5.1 การการคำนวณหาระยะทางตรวจจับสูงสุด

ในการทดสอบระบบของโครงการนี้จะใช้สายอากาศ 3 ชนิดในการทดสอบ โดยแบ่งเป็น

1. ส่วนการทดสอบเบื้องต้นในห้องทดลองจะใช้สายอากาศ horn antenna ที่มีอัตราการขยาย 20 dBi
2. สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา (parabolic reflector antenna) ที่มีอัตราการขยาย 33 dBi
3. สายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ที่มีอัตราการขยาย 28 dBi

โดยอัตราการขยายของสายอากาศมีผลมากต่อระยะทางการตรวจจับของระบบ การคำนวณหาระยะทางสูงสุดสามารถประมาณได้จากสมการที่ 5.1

$$R = \left( \frac{P_T \sigma c^2 G_{R,T}^2}{(4\pi)^3 f^2 P_{R,\min}} \right)^{1/4} \quad (5.1)$$

เมื่อ  $P_T$  คือกำลังส่ง  $f$  คือความถี่  $\sigma$  คือหน้าตัดเรดาร์ของเป้าหมาย  $P_{R,\min}$  คือกำลังงานต่ำสุดที่ระบบรับได้  $G_{R,T}$  คืออัตราการขยายของสายอากาศรับ-ส่ง

ตัวอย่างเมื่อกำหนดให้กำลังส่ง  $P_T = 60W$  ความถี่ที่ 10 GHz หน้าตัดเรดาร์ ( $\sigma$ ) ของเป้าหมายที่  $0.4 \text{ m}^2$  กำลังงานต่ำสุดที่ระบบรับได้ที่  $-90 \text{ dBm}$

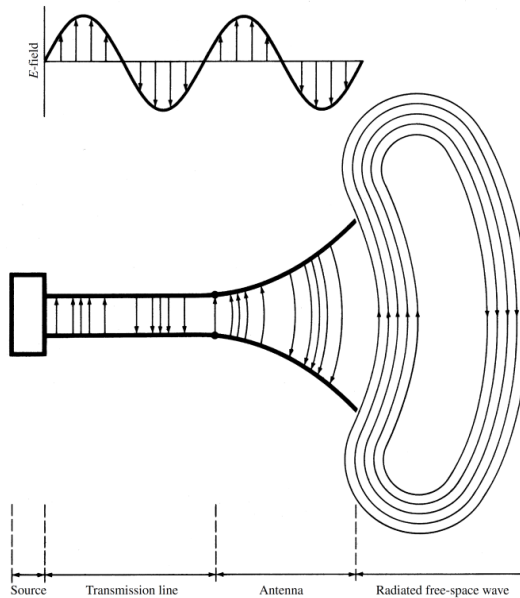
ตารางที่ 5.1 การประมาณระบบเรดาร์

Pt(W)	Gr,Gt(dB)	radar cross section	frequency (GHz)	Pmin (dBm)	R (m)
60	20	0.4	10	-90	574.39
60	33	0.4	10	-90	2565.70
60	28	0.4	10	-90	1442.80

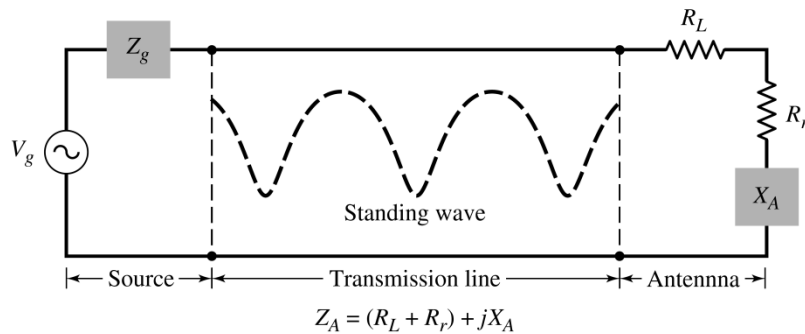
จากการประมาณการจะพบว่า เมื่อสายอากาศมีอัตราการขยายเพิ่มขึ้น จะได้ระยะสูงสุดในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กได้ไกลกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ต้องการด้วย

## 5.2 บทนำสายอากาศ

สายอากาศ คืออุปกรณ์หรือโครงสร้างใด ๆ ที่ใช้ในการการส่งผ่านหรือแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในอากาศ [15] ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 หน้าที่ของสายอากาศ [8]



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของสายอากาศในระบบส่ง (Transmitter) [8]

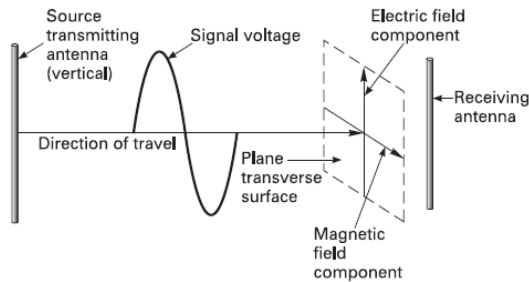
วงจรสมมูลของสายอากาศในระบบส่ง (transmitter) แสดงในรูปที่ 5.2 เมื่อกำหนดให้แหล่งกำเนิดคลื่นในอุดมคติมีค่าอิมพีแดนซ์  $Z_g$  ซึ่งต่อเชื่อมกับสายนำสัญญาณ (transmission line) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์  $Z_0$  และสายอากาศส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์  $Z_A$  โดยวงจรสมมูลของสายอากาศในอุดมคติประกอบด้วย  $Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$  เมื่อ  $R_L$  คือค่าความต้านทานโหลดของสายอากาศซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าการสูญเสียเนื่องจากความนำไฟฟ้า (conduction loss) และค่าการสูญเสียจากวัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric loss) ซึ่งทั้งสองเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับโครงสร้างสายอากาศและวัสดุที่นำมา

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

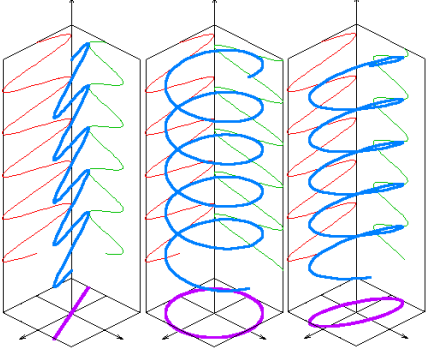
สร้างสายอากาศ ขณะที่  $R_r$  คือความต้านทานการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (radiation resistance) ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ขณะที่  $X_A$  คือค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเช่นกัน

ตารางที่ 5.2 Antenna parameters

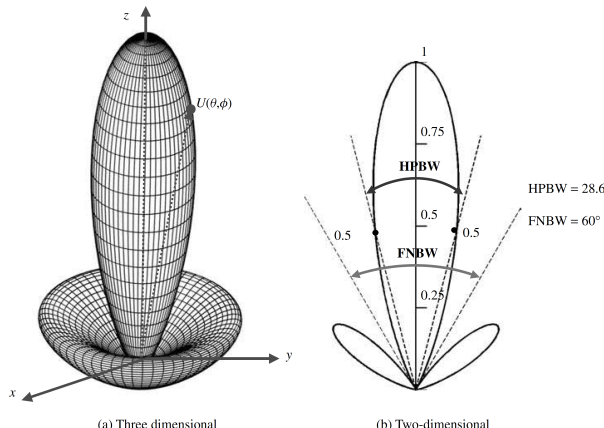
Antenna parameters	Descriptions
VSWR	Voltage standing wave ratio คือ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเมื่อทำการต่อเชื่อมกับสายนำสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์ $Z_o$ ณ จุดเชื่อมต่อสามารถหาได้จาก $VSWR = \frac{1+ \Gamma }{1- \Gamma }$ โดยที่ $\Gamma = \frac{Z_A - Z_o}{Z_A + Z_o}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน
$ S_{11} $ dB	คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนในรูปแบบของพารามิเตอร์การกระเจิง (scattering parameters) สามารถหาได้จาก $ S_{11}  = 10\log_{10}(\Gamma^2)$
Polarization	คือรูปแบบของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตามเวลา (เส้นสีฟ้าในรูปที่ 5.4) ที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศในทิศทางที่พิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 5.3 Polarization แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ในรูปที่ 5.4 คือ 1. โพลาริซ์เชิงเส้น(ก) 2. โพลาริซ์วงกลม(ข) 3. โพลาริซ์วงรี(ค)





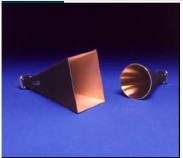
รูปที่ 5.3 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

	 <p>(ก) linear (ข) circular (ค) elliptical</p> <p>รูปที่ 5.4 โพลาริซชันของสายอากาศ</p>
Directivity	<p>ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ (directivity: <math>D(\theta, \phi)</math>) คือ อัตราส่วนความเข้มการแผ่กระจายคลื่น (<math>U(\theta, \phi)</math>) ในทิศทางที่พิจารณาหรือทิศทางที่กำหนดจากสายอากาศ ต่อความเข้มการแผ่กระจายคลื่นเฉลี่ยรวมทุกทิศทาง (<math>U_0</math>) โดยที่ความเข้มการแผ่กระจายคลื่นเฉลี่ยรวมทุกทิศทางคือกำลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งหมดที่แผ่กระจายจากสายอากาศ (<math>P_{rad.}</math>)หารด้วย <math>4\pi</math></p> $D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_0} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad.}}$
Gain and Efficiency	$G(\theta, \phi) = e_o D(\theta, \phi)$ เมื่อ $e_o = e_r e_c e_d$ <p>โดยที่ <math>e_o</math> คือ ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (Total efficiency)  <math>e_r</math> คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศเนื่องจากการสะท้อนที่ขั้วหรือรอยต่อ (Reflection efficiency) หาได้จาก <math>e_r =  1 - \Gamma^2 </math>  <math>e_c</math> คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศเนื่องจากความนำไฟฟ้า (Conduction efficiency)  <math>e_d</math> คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศเนื่องจากความเป็นไดอิเล็กตริก (Dielectric efficiency)</p>
Bandwidth	<p>แบนวิธของสายอากาศคือช่วงกว้างความถี่ของสายอากาศเมื่อพิจารณาร่วมกับคุณลักษณะบางอย่างของสายอากาศเช่น</p> <p>Impedance bandwidth คือช่วงกว้างความถี่ที่ค่านึงถึงค่า VSWR ที่ต้องการของระบบ (ระบบสื่อสารโดยทั่วไปแล้วค่ามีค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ <math>Z_o = 50</math> โอห์ม) โดยทั่วไปแล้วค่า <math>VSWR &lt; 2</math> หรือค่า <math> S_{11}  \approx -10</math> dB</p> <p>Polarization bandwidth คือช่วงกว้างความถี่ที่ค่านึงถึงค่า Polarization ของสายอากาศที่ต้องการของระบบ</p> <p>Gain bandwidth คือช่วงกว้างความถี่ที่ค่านึงถึงค่า gain ของสายอากาศที่ต้องการของระบบเป็นต้น</p>
Radiation pattern	<p>แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ หรือคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันเปลี่ยนไปตามตำแหน่งรอบสายอากาศ <math>F(\theta, \phi)</math></p>

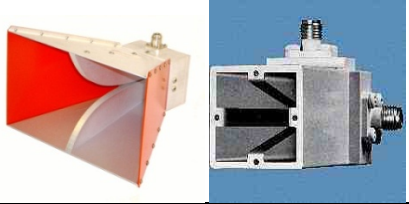
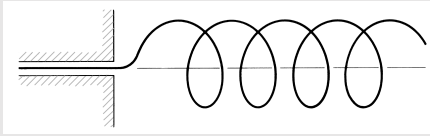


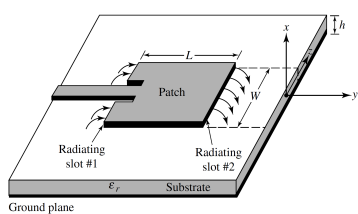
การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

<p>Beamwidth</p>	<p>คือความกว้างลำคลื่น หรือมุมระหว่างองศาสององศาตรงข้ามกันเมื่ออ้างอิงจากจุดสูงสุดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งความกว้างลำคลื่นที่นิยมใช้บอกคุณสมบัติของสายอากาศประกอบด้วย ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half power beamwidth: HPBW) และ ความกว้างลำคลื่นแรก (first null beamwidth: FNBW)</p>  <p>รูปที่ 5.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น</p>
<p>Sidelobe level</p>	<p>คือระดับสูงสุดลำดับที่สองของรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นหรือระดับสูงสุดข้างเคียง</p>

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างสายอากาศชนิดต่าง ๆ

<p><b>Half-Wavelength Dipoles</b></p>		
<p>Gain</p>	<p>~ 2.15 dB</p>	
<p>Radiation pattern</p>	<p>Omnidirectional</p>	
<p>Impedance bandwidth</p>	<p>Narrow</p>	
<p>Polarization</p>	<p>Linear polarization</p>	
<p><b>Standard Gain Horn</b></p>		
<p>Gain</p>	<p>10~25 dB</p>	
<p>Radiation pattern</p>	<p>Unidirectional</p>	
<p>Impedance Bandwidth</p>	<p>Wideband</p>	
<p>Polarization</p>	<p>Linear polarization</p>	
<p><b>Ridge Horn</b></p>		
<p>Gain</p>	<p>0 to 20 dB</p>	
<p>Radiation pattern</p>	<p>Unidirectional</p>	

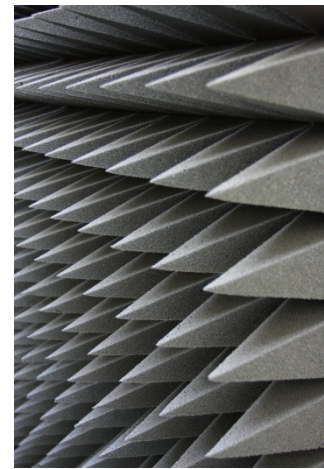
การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

Impedance Bandwidth	Broadband	
Polarization	Linear polarization	
<b>Helical antenna</b>		
Gain:	2 to 10 dB	
Radiation pattern	Omnidirectional, unidirectional	
Impedance Bandwidth	Wideband	
Polarization	circular polarization	
<b>Loop antenna</b>		
Gain	~2.2 dBi	
Radiation pattern	Omnidirectional	
Impedance Bandwidth	Narrow band	
Polarization	Linear polarization	
<b>Reflector antenna</b>		
Gain	High Gain (>10dBi)	
Radiation pattern	Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Wideband (depends on feed element)	
Polarization	Linear, circular polarization	
<b>Microstrip antenna</b>		
Gain	~0-8 dBi	
Radiation pattern	Unidirectional	
Impedance Bandwidth	Narrow band or wideband	
Polarization	Linear, circular, elliptical polarization	

คุณสมบัติของสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนนั้นจะต้องมีอัตราการขยายของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูง (high antenna gain) สายอากาศของระบบเรดาร์ที่ใช้การค้นหาเป้าหมายแบบการหมุนรอบตัวทางกลไกนั้นสายอากาศที่เหมาะสมจะอยู่ในกลุ่ม สายอากาศปากแตร [สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008]

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

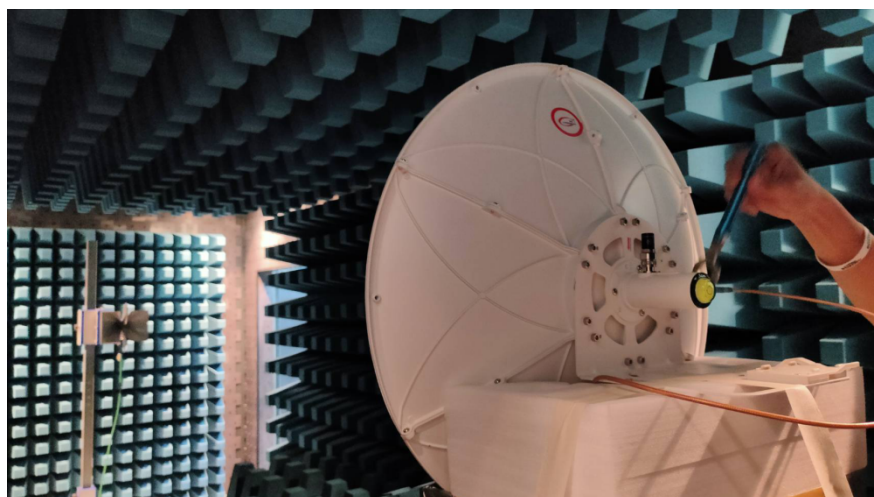
(horn antenna) สายอากาศตัวสะท้อน (reflector antenna) เป็นต้น ดังแสดงตัวอย่างสายอากาศในตารางที่ 5.3 ซึ่งในการออกแบบและผลจำลองในรายงานนี้จะนำเสนอสายอากาศ 2 รูปแบบคือ ปากแตร (horn antenna) ซึ่งจะให้อัตราการขยายที่สูงและให้แบบรูปแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบทิศทางเดียว (unidirectional radiation pattern) และสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา (parabolic reflector antenna) การทดสอบทำในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน (anechoic chamber) ดังแสดงในรูปที่ 5.6-5.9



(ก) ห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน

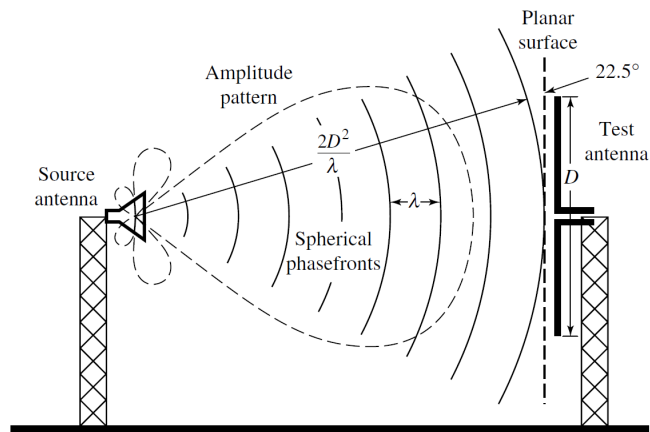
(ข) วัสดุดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 5.6 ตัวอย่างห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน (anechoic chamber) ในประเทศไทย (KMITL: King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand)

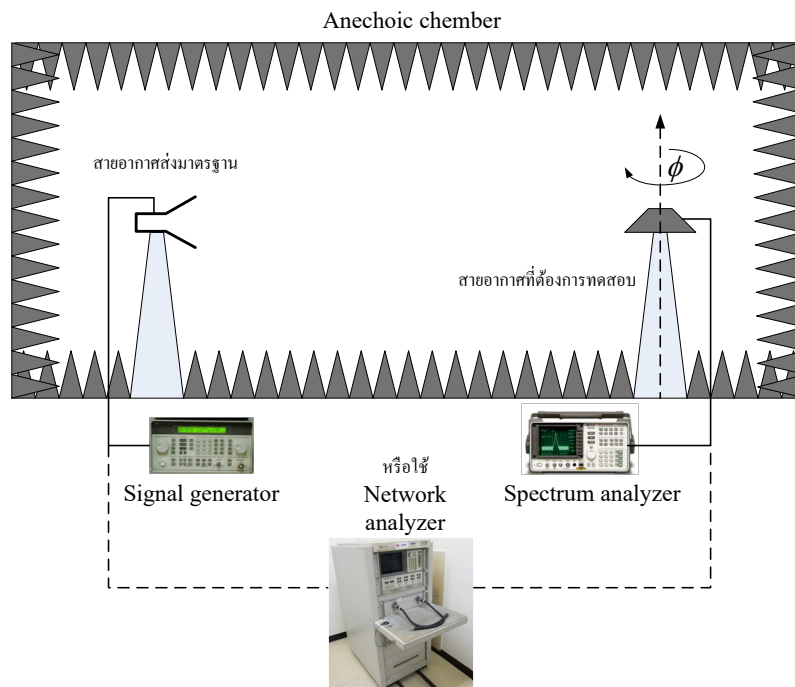


รูปที่ 5.7 ห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน (Anechoic Chamber) ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ





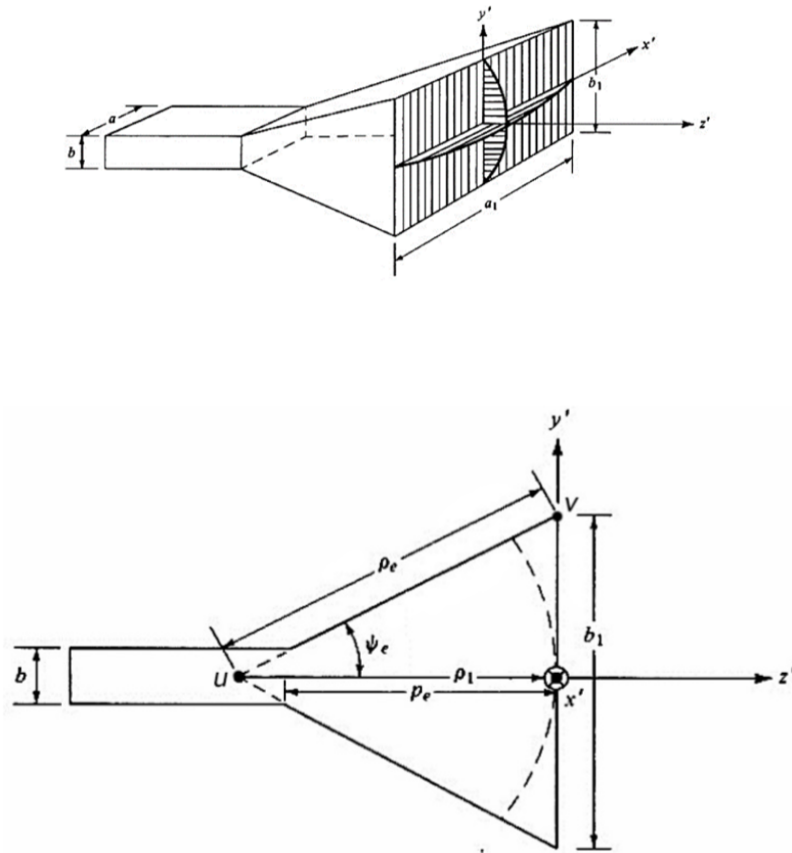
รูปที่ 5.8 ระยะทดสอบสายอากาศ  $\frac{2D^2}{\lambda}$



รูปที่ 5.9 การทดสอบสายอากาศ

### 5.3 การออกแบบและผลการทดสอบสายอากาศปากแตร (Horn antenna)

สายอากาศปากแตรแบบ (horn antenna) มีอัตราการขยายของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูง (high antenna gain) ถูกใช้ในสายอากาศของระบบเรดาร์ที่ใช้การค้นหาเป้าหมายแบบการหมุนรอบตัวทางกลไกล ซึ่งจะให้อัตราการขยายที่สูงและให้แบบรูปแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (radiation pattern) เป็นแบบ ทิศทางเดียว (unidirectional radiation pattern) โครงสร้างสายอากาศแสดงในรูปที่ 5.10 และการอากาศต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น รูปที่ 5.11 โดยใช้ขนาดตามตารางที่ 5.4 ออกแบบโดยโปรแกรม microwave studio ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ดีที่สุด



รูปที่ 5.10 ลักษณะโครงสร้างสายอากาศปากแตรขนาดมาตรฐาน [8]

ที่มา: Balanis, Constantine A. (2005). Antenna Theory Analysis and Design. p. 770.

ลักษณะทั่วไปของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด ขนาด  $\rho_e$  ในรูปที่ 5.10 สามารถหาได้จาก

$$P_e = (b_1 - b) \left[ \left( \frac{\rho_e}{b_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

เมื่อ  $P_e$  คือ ระยะห่างระหว่างปลายท่อนำคลื่นกับปลายปากแตรในมุมมองระนาบสนามไฟฟ้า

$b$  คือ ความสูงของท่อนำคลื่น

$b_1$  คือ ความสูงของปลายสายอากาศปากแตร

$\rho_e$  คือ ระยะห่างจุด u และ v

ซึ่ง  $\rho_e$  ควรมีค่าเท่ากับ  $\rho_h$  ในรูปที่ 5.10 สามารถหาได้จากสมการ

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

$$P_h = (a_1 - a) \left[ \left( \frac{\rho_h}{a_1} \right)^2 - \frac{1}{4} \right]^{1/2} \quad (5.3)$$

เมื่อ  $P_h$  คือ ระยะห่างระหว่างปลายท่อนำคลื่นกับปลายปากแตรในมุมมองระนาบสนามแม่เหล็ก

$a$  คือ ความกว้างของท่อนำคลื่น

$a_1$  คือ ความกว้างของปลายสายอากาศปากแตร

$\rho_h$  คือ ระยะห่างจุด  $u$  และ  $v$

อัตราขยายของสายอากาศสามารถหาได้จากสมการ

$$G_0 = \frac{1}{2} \frac{4\pi}{\lambda^2} (a_1 b_1) = \frac{2\pi}{\lambda^2} \sqrt{3\lambda\rho_2} \sqrt{2\lambda\rho_1} \cong \sqrt{3\lambda\rho_h} \sqrt{2\lambda\rho_e} \quad (5.4)$$

โดยที่  $\rho_2 = \rho_h$  และ  $\rho_1 = \rho_e$  สำหรับลักษณะของสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด

$P_e$  และ  $\rho_h$  มีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$\left( \sqrt{2x} - \frac{b}{\lambda} \right)^2 (2x - 1) = \left( \frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{x}} - \frac{a}{\lambda} \right)^2 \left( \frac{G_0^2}{6\pi^3} \frac{1}{x} - 1 \right) \quad (5.5)$$

เมื่อ

$$\frac{\rho_e}{\lambda} = x \quad (5.6)$$

$$\frac{\rho_h}{\lambda} = \frac{G_0}{8\pi^3} \left( \frac{1}{x} \right) \quad (5.7)$$

จากนั้นทำการออกแบบสายอากาศปากแตรทรงพีระมิด โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกทำการหาขนาดของสายอากาศจากสมการ จากนั้นนำขนาดที่คำนวณได้ไปจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์และรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศ และปรับค่าที่เหมาะสมต่อไป

ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดจากการคำนวณ การหาขนาดของท่อนำคลื่น

$$a = \frac{a_1}{\lambda} \sqrt{\frac{50}{ph/\lambda}} \quad (5.8)$$

$$b = \frac{b_1}{\lambda} \sqrt{\frac{50}{pe/\lambda}} \quad (5.9)$$

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

1. หาค่า  $x$  สำหรับสายอากาศที่มีค่าอัตราขยาย  $G_0$  และขนาดท่อนำคลื่นกว้าง  $a$  สูง  $b$  ซึ่งสามารถหาค่า  $x$  ได้จาก

$$x(\text{trial}) = x_1 = \frac{G_0}{2\pi\sqrt{2\pi}} \quad (5.10)$$

2. เมื่อได้ค่า  $x$  ที่ถูกต้องแล้ว จะสามารถหาค่า  $\rho_e$  และ  $\rho_h$  โดยใช้สมการ (5.2) และ (5.3) ตามลำดับ

3. หา  $a_1$  และ  $b_1$  จาก

$$a_1 = \sqrt{3\lambda\rho_2} \cong \sqrt{3\lambda\rho_h} = \frac{G_0}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2\pi x}} \lambda \quad (5.11)$$

$$b_1 = \sqrt{2\lambda\rho_1} \cong \sqrt{2\lambda\rho_e} = \sqrt{2x}\lambda \quad (5.12)$$

4. หาค่า  $P_e$  และ  $P_h$  จากสมการ (5.2) และ (5.3) ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามการคำนวณที่กล่าวมาจะใช้เป็นค่าเริ่มต้น ทั้งนี้ในการออกแบบสายอากาศปากแตร คณะนักวิจัยได้ใช้ โปรแกรม CST Microwave studio ในการหาค่าที่ดีที่สุดจากค่าเริ่มต้นในตอนสุดท้าย

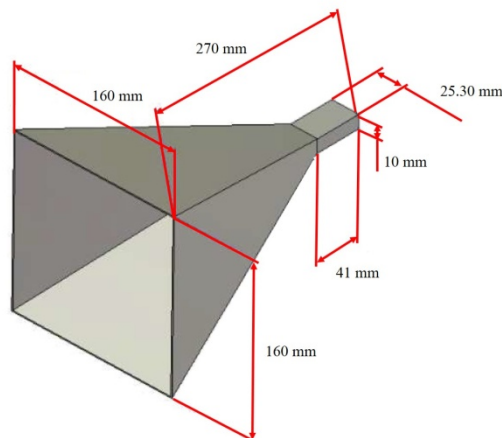


รูปที่ 5.11 สายอากาศปากแตรต้นแบบที่ออกแบบและสร้างขึ้น

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบที่ออกแบบและสามารถสร้างขึ้น

ค่าพารามิเตอร์	ความยาว (cm)
a	2.53
b	1.0
L	27
a1	160
b1	160

เรดาร์คลื่นต่อเนื่องดังกล่าวที่นำเสนอต้องการอัตราขยายของสายอากาศที่สูงสำหรับการตรวจจับเป้าหมายที่มีขนาดเล็ก โดยในการออกแบบสายอากาศจะใช้โครงสร้างสายอากาศแบบปากแตรที่มีขนาดดังรูปที่ 5-12 (ก) ในการส่งและรับสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง ดังนั้นวัสดุที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศเป็นแผ่นทองแดงที่ตัดด้วยเลเซอร์ และเชื่อมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างสายอากาศแบบปากแตรดังรูปที่ 5-12 (ข) โดยการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจะใช้สายอากาศแบบปากแตรทั้งหมด 4 ตัวด้วยกัน เพื่อสร้างสายอากาศแบบอาร์เรย์

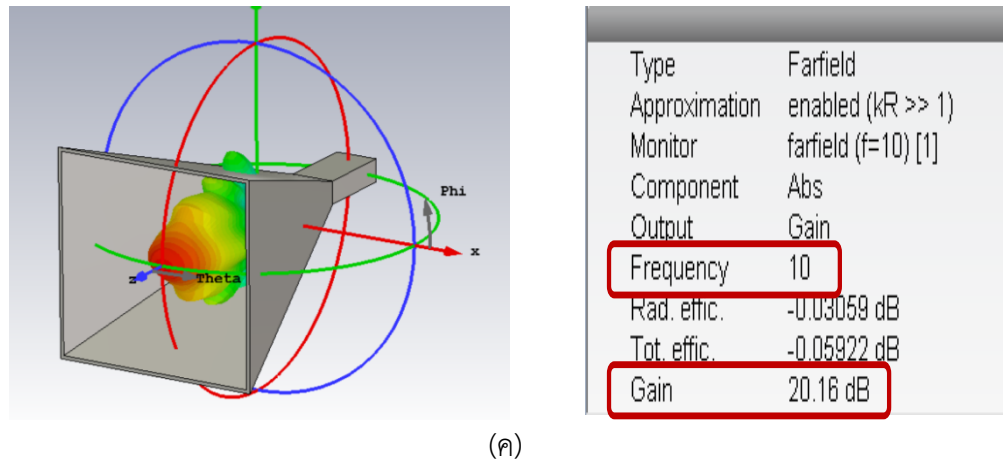


(ก)



(ข)

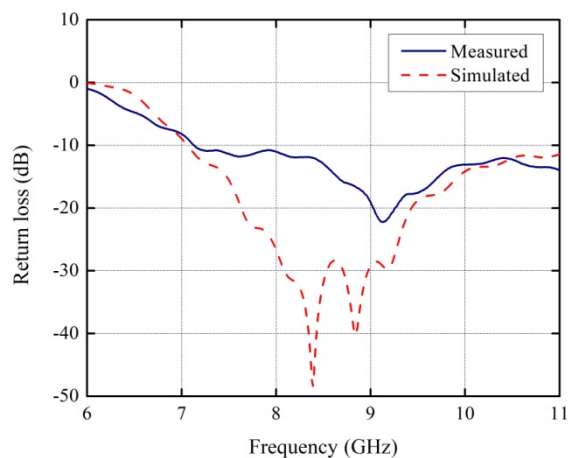
การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ค)

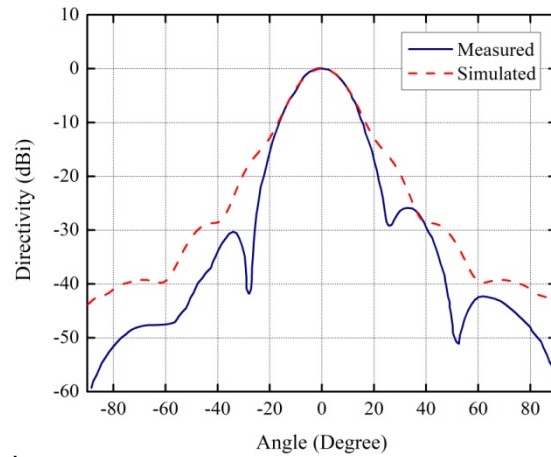
รูปที่ 5.12 การออกแบบสายอากาศ (ก) ขนาดของสายอากาศ (ข) สายอากาศแบบปากแตร (ค) รูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลอง

หลังจากการออกแบบและสร้างสายอากาศแบบปากแตรขึ้นมานั้น ถัดมาจะทำการวัดประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยการส่งสัญญาณความถี่วิทยุที่ผ่านสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งพบว่าสายอากาศมีลำคลื่น (Beam) ที่มุม 13 องศา โดยในรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)  $|S_{11}| < -10\text{dB}$  โดยสามารถใช้งานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ 8 ถึง 10 GHz ตรงตามย่านความถี่ X band ซึ่งในรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการแผ่รังสี (Radiation pattern) ของสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งสายอากาศต้นแบบให้อัตราขยาย ที่ 20 dB และในรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นถึงรูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งสายอากาศต้นแบบให้อัตราขยาย ที่ 23 dB ของการใช้งานสายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array antenna)

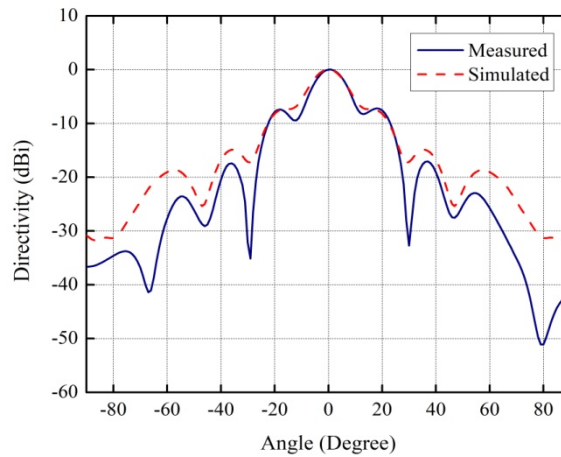


รูปที่ 5.13 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $|S_{11}|$

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 5.14 รูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศในระนาบ E



รูปที่ 5.15 รูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศในระนาบ H

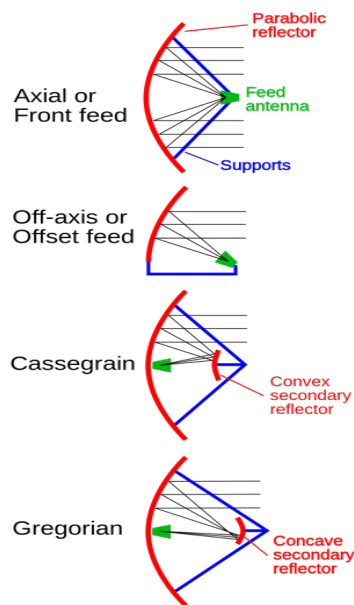
ตัวอย่างเมื่อกำหนดให้กำลังส่ง  $P_t = 60$  W ความถี่ที่ 10 GHz หน้าตัดเรดาร์ ( $\sigma$ ) ของเป้าหมายที่  $0.4$  m<sup>2</sup> กำลังงานต่ำสุดที่ระบบรับได้ที่ -90 dBm

ตารางที่ 5.5 การประมาณระบบเรดาร์ใช้สายอากาศแบบปากแตร

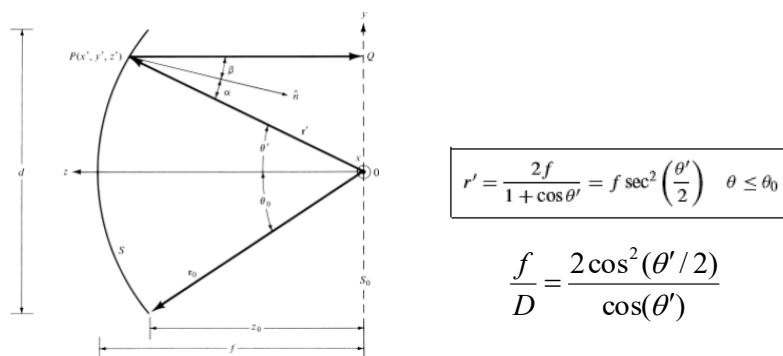
$P_t$ (W)	$G_r, G_t$ (dB)	radar cross section	frequency (GHz)	Pmin (dBm)	R (m)
60	20	0.4	10	-90	574.39

### 5.4 การออกแบบและผลการทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา (parabolic reflector antenna)

สายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา (parabolic reflector antenna) จะให้อัตราการขยายที่สูงมาก อย่างไรก็ตามรูปแบบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นลำคลื่นแบบชี้ทิศทางเดียว (pencil beam) ตัวอย่างการออกแบบแสดงในรูปที่ 5.16 ซึ่งมีหลายรูปแบบขึ้นกับวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยที่ ตัวสะท้อนทรงพาราโบลา สามารถคำนวณได้ตามสมการในรูปที่ 5.17 เมื่อ  $f$  คือระยะจุดโฟกัส  $d$  คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวสะท้อนทรงพาราโบลา และ  $r'$  คือ ระยะทางที่บอกพิกัดของเส้นพาราโบลา



รูปที่ 5.16 ตัวอย่างการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา (parabolic reflector antenna)

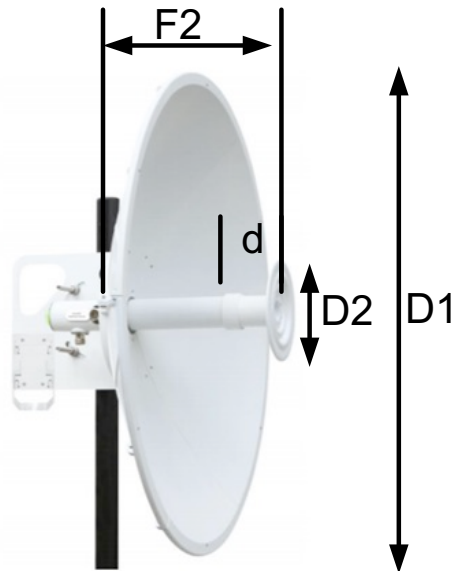


รูปที่ 5.17 ตัวอย่างการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา (parabolic reflector antenna) [8]



## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

คณะนักวิจัยพบว่าประสิทธิภาพของสายอากาศแต่ละแบบให้อัตราการขยายที่ใกล้เคียงกันเมื่อสายอากาศมีขนาดเท่าๆกัน อย่างไรก็ตามการสร้างสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลาโค่นข้างซับซ้อน ต้องการผู้ผลิตที่สามารถทำตามการออกแบบได้ จากปัญหานี้คณะนักวิจัยจึงมองหาสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลาที่มีในท้องตลาด ซึ่งพบว่ามีสายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลาที่เหมาะสมในการดัดแปลงมาใช้ในโครงการ ซึ่งเป็นสายอากาศของบริษัท LANBOWAN รุ่น 4.9-6.5 GHz MIMO Dish Antenna ANT4965D30P6-MIMO แบบสองตัวสะท้อน (dual reflector) ซึ่งให้ขนาดของระยะป้อนที่สั้น โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 65 cm ซึ่งทำงานที่ย่านความถี่ 4.9-6.5 GHz ดังแสดงในรูปที่ 5.18 อย่างไรก็ตามสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่สูงกว่าได้เมื่อเรามองคลื่นเป็นแบบลำแสง ตามทฤษฎีเส้นแสง (Ray Approximation) อีกทั้งระบบท่อนำคลื่นที่ป้อนเป็นแบบความถี่สูงผ่าน (High-Pass) แม้ว่าท่อนำคลื่นจะใหญ่กว่าความถี่มูลฐาน (Fundamental frequency) แต่อย่างไรก็ตามตัวสะท้อนที่ 1 จะเป็นตัวจัดการกำลังงานที่ฉายไปยังตัวสะท้อนที่ 2 อีกที ดังนั้นเราสามารถปรับปรุงการฉายกำลังคลื่นโดยการปรับระยะตัวสะท้อนที่ 1 ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้งานที่ความถี่ 10 GHz ได้ และคณะนักวิจัยได้ทำการจำลองแบบปรับค่าระยะตัวป้อน  $d$  จนได้อัตราการขยายสูงสุดที่ความถี่ 10 GHz เท่ากับ 33.8 dBi



**รูปที่ 5.18** สายอากาศของบริษัท LANBOWAN รุ่น 4.9-6.5GHz MIMO Dish Antenna ANT4965D30P6-MIMO แบบสองตัวสะท้อน (Dual Reflector) โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 65 cm ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

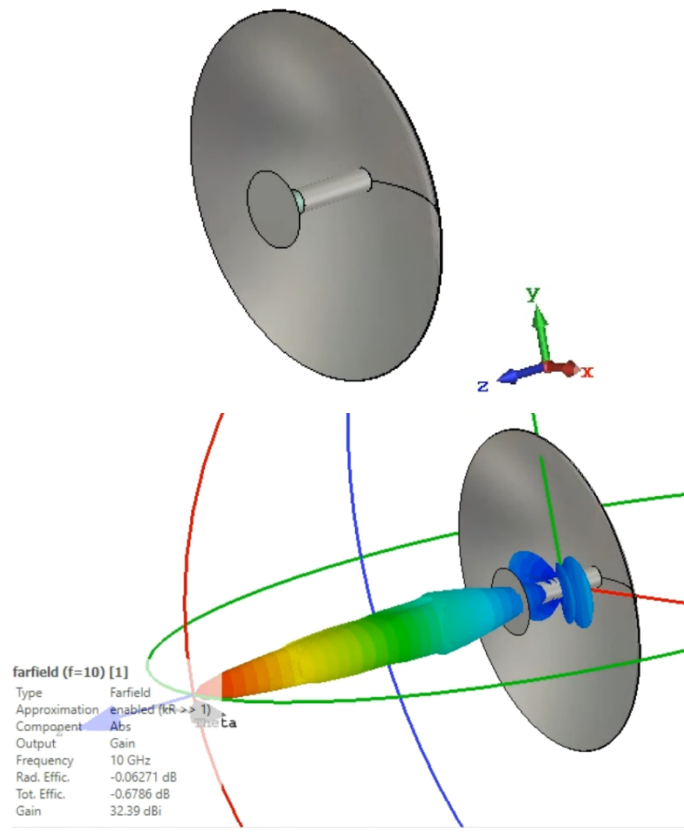
ขนาดต่างๆ ของสายอากาศแสดงใน ตารางที่ 5.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศของบริษัท LANBOWAN รุ่น 4.9-6.5GHz MIMO Dish Antenna ANT4965D30P6-MIMO แบบสองตัวสะท้อน (dual reflector) โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 65 cm ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz การจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST microwave studio แสดงในรูปที่ 5.19 พบว่าอัตราการขยายของสายอากาศก่อนการปรับปรุงระยะป้อนมีค่า 32.4 dBi อย่างไรก็ตามหลังปรับปรุงระยะป้อนพบว่า

อัตราการขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้นมีค่า 33.8 dBi ดังแสดงในรูปที่ 5.19 การทดสอบในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อนแสดงในรูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.20 (ค) แสดงค่าการทดสอบ  $|S_{11}|(dB) < -10$  dB ที่ 10GHz

**ตารางที่ 5.6** ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศของบริษัท LANBOWAN รุ่น 4.9-6.5 GHz MIMO Dish Antenna ANT4965D30P6-MIMO แบบสองตัวสะท้อน (Dual Reflector) โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 65 cm ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz

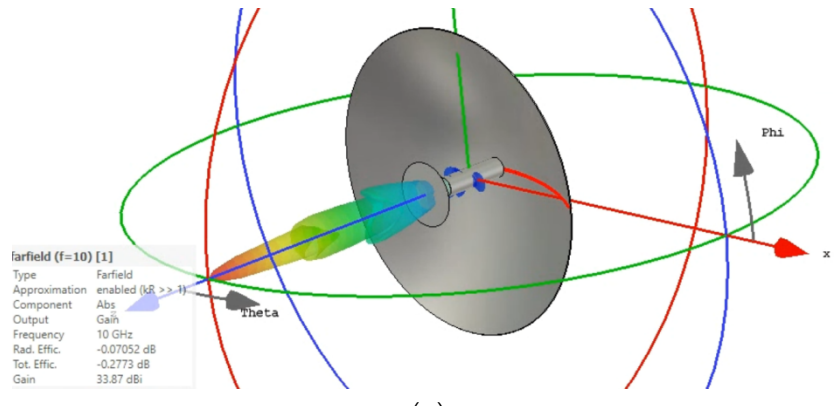
พารามิเตอร์	ค่า
เส้นผ่าศูนย์กลาง; D1	65 cm
F/D	0.35
เส้นผ่าศูนย์กลางตัวสะท้อนที่ 2; D2	13.6 cm
ระยะป้อนที่ 2; F2	18.7 cm
Polarization	เชิงเส้น
Gain at 10 GHz ก่อนการปรับปรุงระยะป้อน d=4cm	32.4 dBi
Gain at 10 GHz หลังปรับปรุงระยะป้อน d=5cm	33.8 dBi

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ก)

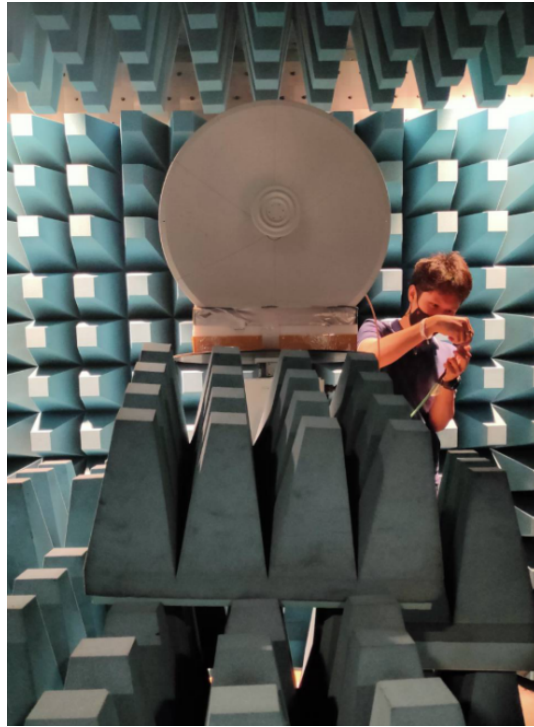
(ข)



(ค)

รูปที่ 5.19 (ก) โครงสร้างสายอากาศของบริษัท LANBOWAN (ข) ไม่ได้ทำการปรับปรุง (ค) นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz หาอัตราการขยายที่ดีที่สุดได้ 33.8 dBi

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

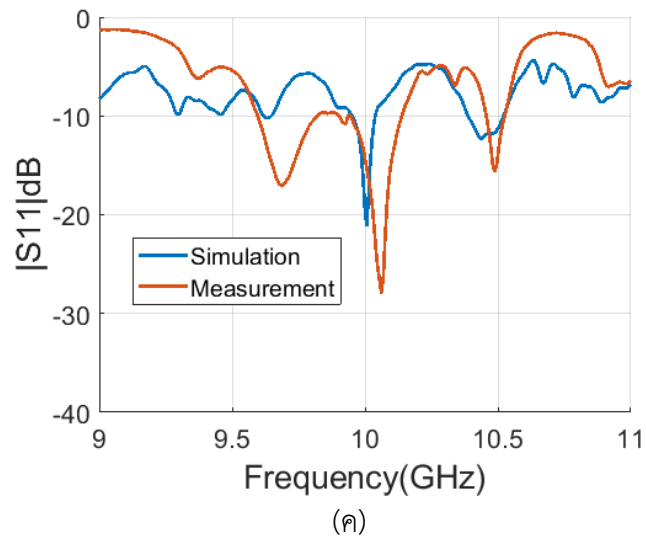


(ก)

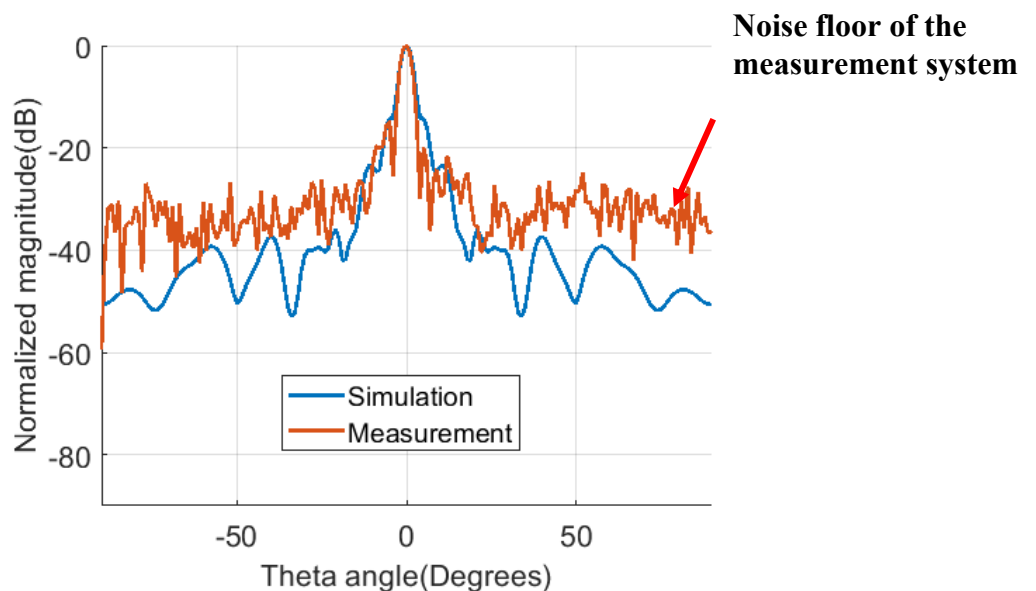


(ข)

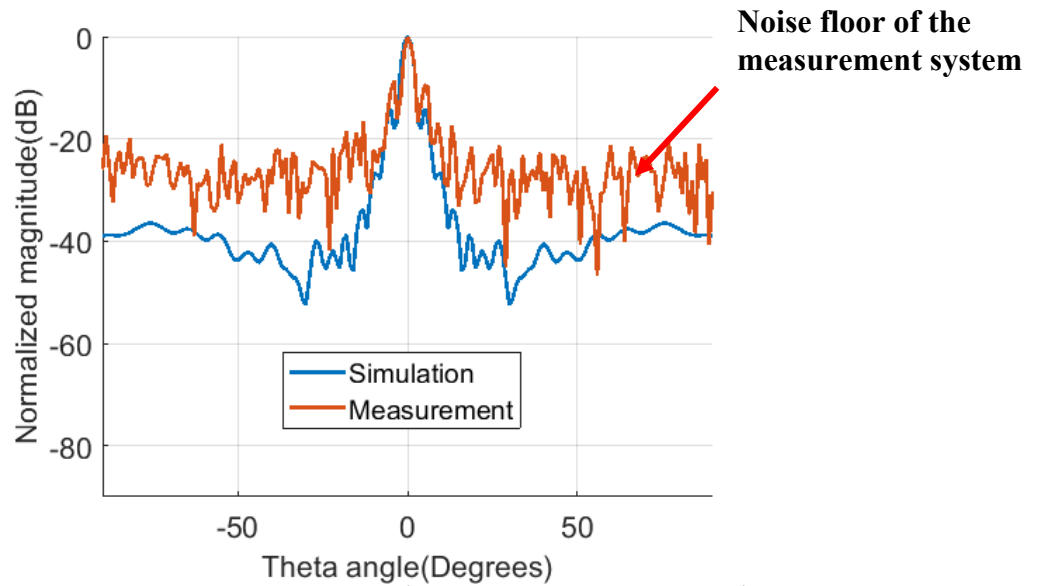
การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 5.20 (ก) การติดตั้งทดสอบ (ข) การทดสอบ (ค) ค่าการทดสอบ  $|S_{11}|(\text{dB}) < -10 \text{ dB}$  ที่ 10GHz ของสายอากาศของบริษัท LANBOWAN ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz หาอัตราขยายที่ดีที่สุดได้ 33.8 dBi



รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระนาบ yz ที่มุม  $\phi=90$  ของสายอากาศของบริษัท LANBOWAN ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz หาอัตราขยายที่ดีที่สุดได้ 33.8 dBi



รูปที่ 5.22 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระนาบ xz ที่มุม  $\phi=90$  ของสายอากาศของบริษัท LANBOWAN ที่นำมาปรับปรุงใช้งานที่ความถี่ 10 GHz หาอัตราการขยายที่ดีที่สุดได้ 33.8 dBi

ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระหว่างการจำลองและการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.21 และ 5.22 พบว่าที่ลำคลื่นหลักมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ที่ลำคลื่นด้านข้างพบว่าการทดสอบมีข้อจำกัดเรื่องระดับสัญญาณรบกวนของระบบทดสอบ เนื่องจากสายนำสัญญาณยาว 16 m ซึ่งมีค่าการลดทอนที่ความถี่ 10 GHz สูงมาก อีกทั้งเครื่องทดสอบมีกำลังส่งเพียง 20 dBm จึงทำให้สัญญาณทดสอบมีค่าต่ำ ทั้งนี้คณะนักวิจัยจะทำการเพิ่มวงจรรขยายสัญญาณในการทดสอบต่อไป

การคำนวณหาระยะทางสูงสุดสามารถประมาณได้จากสมการ 5.1 กำหนดให้กำลังส่ง  $P_t = 60 \text{ W}$  ความถี่ที่ 10 GHz หน้าตัดเรดาร์ ( $\sigma$ ) ของเป้าหมายที่  $0.4 \text{ m}^2$  กำลังงานต่ำสุดที่ระบบรับได้ที่  $-90 \text{ dBm}$

ตารางที่ 5.7 การประมาณระยะทางระบบเรดาร์ใช้สายอากาศตัวสะท้อนแบบพาราโบลา

$P_t$ (W)	$G_r, G_t$ (dB)	radar cross section	frequency (GHz)	Pmin (dBm)	R (m)
60	33	0.4	10	-90	2565.70

จากการประมาณการจะพบว่า เมื่อสายอากาศมีอัตราการขยายเพิ่มขึ้น จะได้ระยะสูงสุดในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กได้ไกลกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ต้องการด้วย

### 5.5 การออกแบบและผลการทดสอบสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna)

สายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) เป็นสายอากาศอัตรการขยายสูงได้รับความนิยมในการใช้งานทางเรดาร์และระบบความถี่สูงอื่น ๆ โครงสร้างง่าย มีค่าการสูญเสียต่ำ (ประสิทธิภาพของเสาอากาศสูง) และมีโพลาไรซ์เชิงเส้น ที่มีโพลาไรซ์ข้ามต่ำ เสาอากาศเหล่านี้มักใช้ในการใช้งานบนเครื่องบินเนื่องจากสามารถสร้างให้สอดคล้องกับพื้นผิวที่ติดตั้งได้ง่าย โดยทั่วไปร่องจะบาง (น้อยกว่า 0.1 ของความยาวคลื่น) และความยาวร่องประมาณ 0.5 เท่าของความยาวคลื่น (ที่ความถี่ศูนย์กลางของการทำงาน)

ตัวอย่างของสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) แสดงในรูปที่ 5.21 กำหนดขนาดโดยความยาว  $a$  และความกว้าง  $b$  การคำนวณขนาดของท่อนำคลื่นหาได้จากความถี่ตัด (cut off)

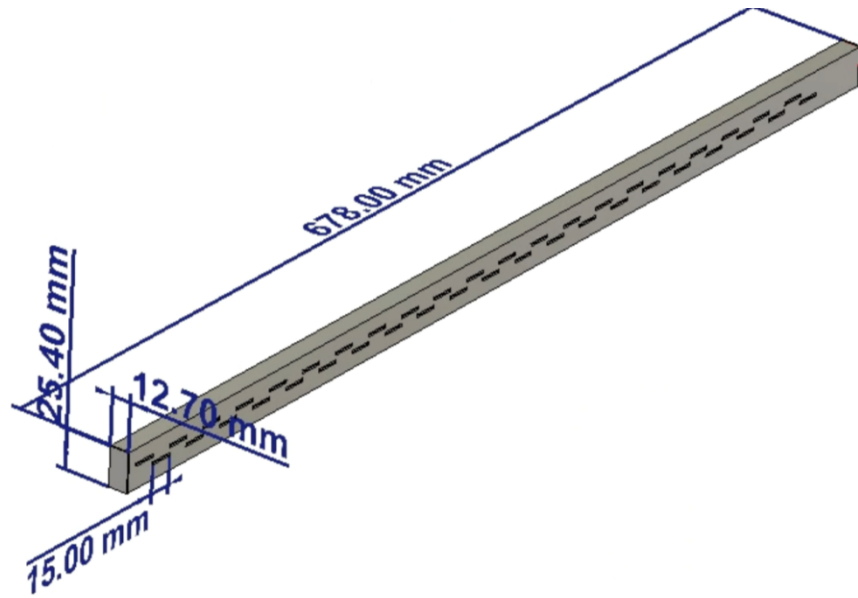
$$f_c = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{2a} \quad (5.2)$$

$$L \approx \frac{\lambda}{2} \quad (5.3)$$

**ตารางที่ 5.8** ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ใช้งานที่ความถี่ 10 GHz

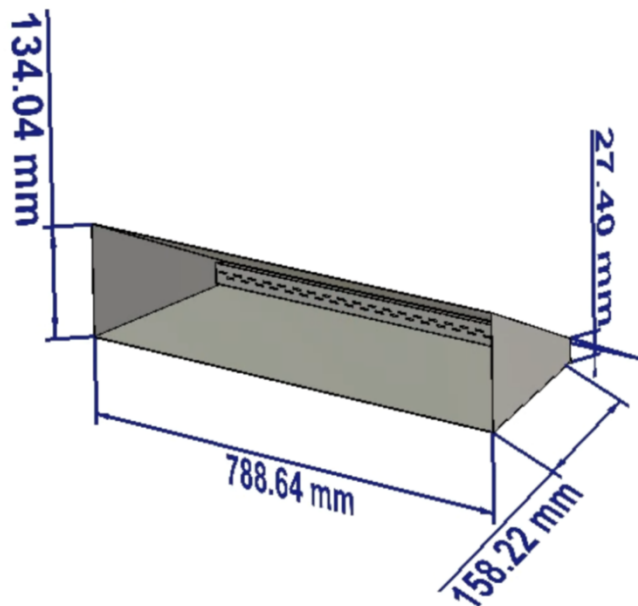
พารามิเตอร์	ค่า
ความยาวสูงสุด	68 cm
ความกว้างท่อนำคลื่น $a$	2.54 cm
ความยาวร่อง	1.5 cm
ความกว้างร่อง	2 mm
ระยะห่างร่อง	0.5 เท่าความยาวคลื่น

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 5.23 สายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (Slotted Array Antenna)

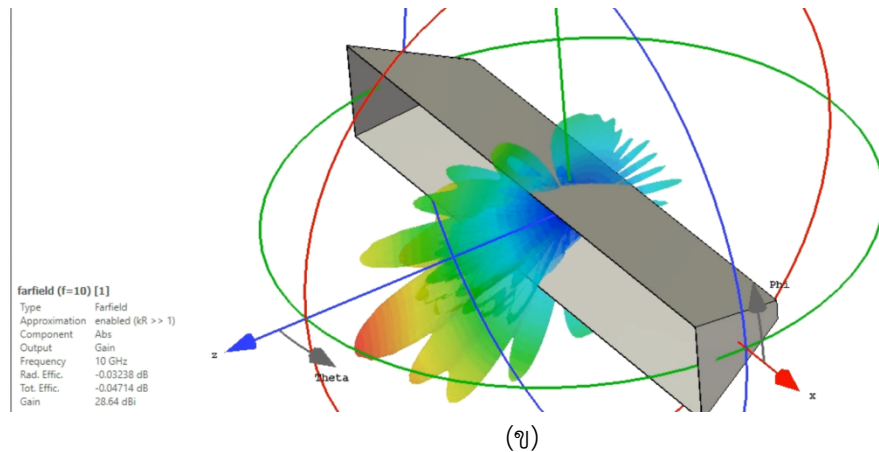
อย่างไรก็ตามสายอากาศยังมีอัตราการขยายที่ต่ำ จึงออกแบบตัวสะท้อนเพิ่มเติมดังแสดงในรูปที่ 5.24 ซึ่งพบว่าสามารถเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศได้มากขึ้นถึง 28 dBi การหาค่าที่ดีที่สุดทำโดยการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio



(ก)



## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 5.24 (ก) ขนาดที่ออกแบบของสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ออกแบบร่วมกับตัวสะท้อน (ข) แบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในรูปที่ 5.24 (ก) แสดงขนาดที่ออกแบบของสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ออกแบบร่วมกับตัวสะท้อน และ (ข) แบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งพบว่าลำคลื่นเอียงออกด้านข้างประมาณ 15 องศา เนื่องจากโครงสร้างสายอากาศไม่สามารถกันที่จุดบอด และเป็นไปโดยธรรมชาติ ดังนั้นในการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงทดสอบแต่เพียงระนาบแนวนอนเท่านั้น เพราะระนาบแนวตั้งมีความยากในการจัดวางสายอากาศในการทดสอบ



(ก)



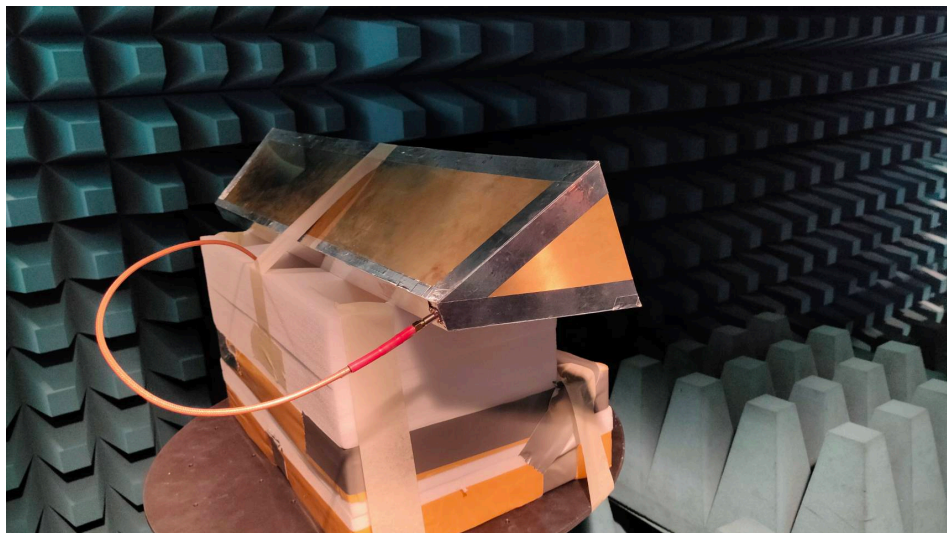
(ข)

รูปที่ 5.25 (ก) การสร้างสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) (ข) การติดตั้งตัวสะท้อนเพื่อเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศ

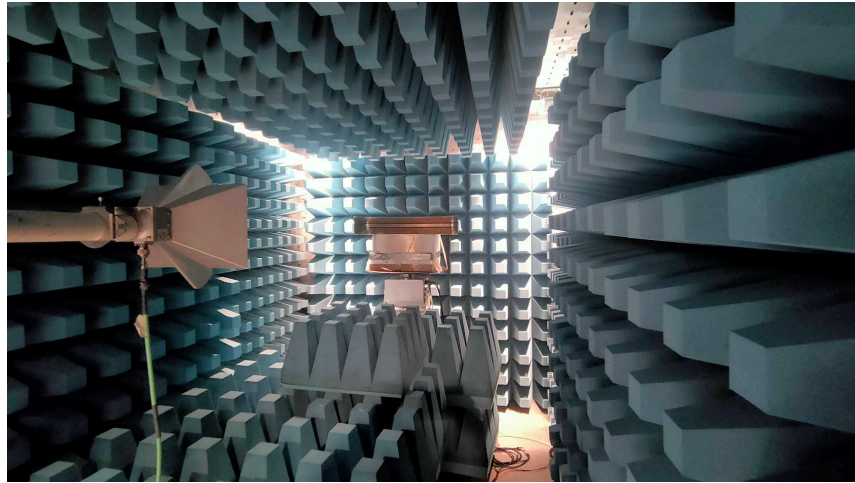
การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ก)



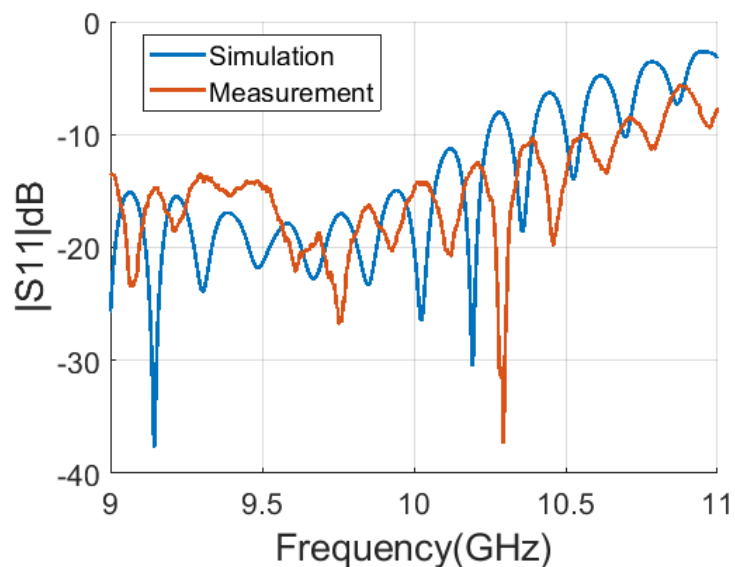
(ข)



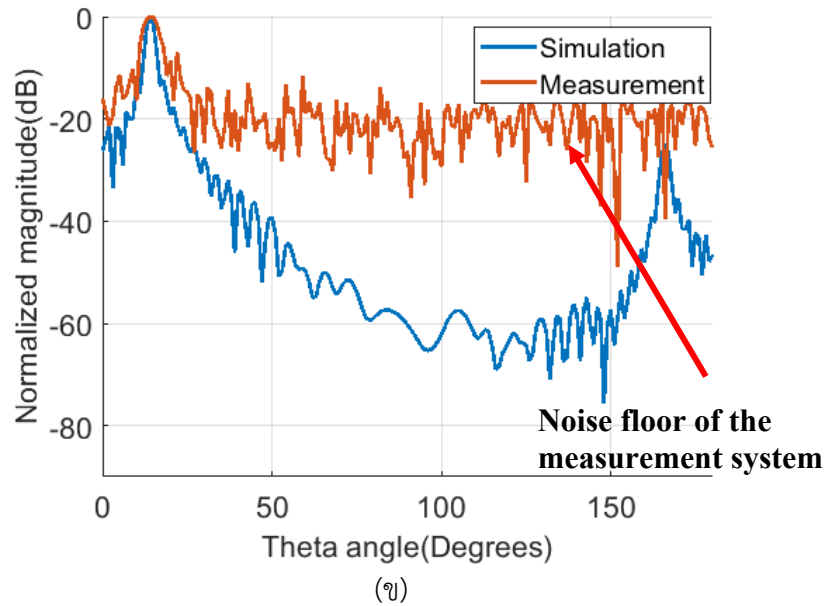
(ค)

รูปที่ 5.26 (ก) การทดสอบ  $|S_{11}|(\text{dB}) < -10 \text{ dB}$  ที่ 10GHz (ข) การติดตั้ง (ค) การทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน

ในรูปที่ 5.25 (ก) แสดงการสร้างสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) และ (ข) แสดงการติดตั้งตัวสะท้อนเพื่อเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศ โดยวัสดุทำมาจากทองเหลือง อย่างไรก็ตามพบว่ามีผลคลาดเคลื่อนในการสร้างด้วยมือ อาจมีผลเล็กน้อยต่อคุณสมบัติของสายอากาศ และรูปที่ 5.26 (ก) แสดงการทดสอบ  $|S_{11}|(\text{dB}) < -10 \text{ dB}$  ที่ 10GHz และ (ข) แสดงการติดตั้ง โดย (ค) แสดงการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน



(ก)



รูปที่ 5.27 (ก) ค่าการทดสอบ  $|S_{11}|(\text{dB}) < -10 \text{ dB}$  ที่ 10GHz (ข) ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระนาบ xz ที่มุม  $\phi=0$

ผลการทดสอบ  $|S_{11}|(\text{dB}) < -10 \text{ dB}$  ที่ 10GHz แสดงในรูปที่ 5.27 (ก) พบว่าผลการทดสอบและผลการจำลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดี และ ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างการจำลองและการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.27 (ข) พบว่าที่ลำคลื่นหลักมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ที่ลำคลื่นด้านข้างพบว่าการทดสอบมีข้อจำกัดเรื่องระดับสัญญาณรบกวนของระบบทดสอบ เนื่องจากสายนำสัญญาณยาว 16 m ซึ่งมีค่าการลดทอนที่ความถี่ 10 GHz สูงมาก อีกทั้งเครื่องทดสอบมีกำลังส่งเพียง 20 dBm จึงทำให้สัญญาณทดสอบมีค่าต่ำ ทั้งนี้คณะนักวิจัยจะทำการเพิ่มวงจรขยายสัญญาณในการทดสอบต่อไป

## บทที่ 6 บทสรุปความก้าวหน้า

### 6.1 รายละเอียดการแก้ไขและเพิ่มเติมจากรายงานครั้งที่ 1

1. แก้ไขตามความคิดเห็นของผู้ประเมิน
2. จัดเรียงเนื้อหาใหม่เป็นบท เพิ่มสารบัญ
3. เพิ่มเนื้อหาส่วนสายอากาศ การอ้างอิง
4. เพิ่มความก้าวหน้าเรื่องการออกแบบและ สร้าง ผลการทดสอบ ระบบวงจรถ่าย
5. เพิ่มความก้าวหน้าเรื่องการออกแบบและ สร้างสายอากาศ ผลการทดสอบ 3 ชนิด
  - สายอากาศ Horn antenna ที่มีอัตราขยาย 20 dBi
  - สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา (parabolic reflector antenna) ที่มีอัตราขยาย 33 dBi
  - สายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ที่มีอัตราขยาย 28 dBi

### 6.2 ความก้าวหน้าเรื่องการออกแบบและ สร้าง ผลการทดสอบ ระบบวงจรถ่าย

ได้ทำการออกแบบสร้าง ทดสอบระบบ วงจรถ่ายเสร็จสิ้น จากการทดสอบวัดระยะการตรวจจับวัตถุโดยใช้สายอากาศปากแตรพบว่า ระยะที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าตรงกัน การวัดระยะได้ สูงสุดอยู่ที่ 23 m และยังได้ค่าที่ตรงไม่ผิดเพี้ยน หากทำการเพิ่มระยะให้มากขึ้นพบว่า กำลังคลื่นที่ส่งออกไปเพียงพอ จะทำการจัดหาเครื่องขยายกำลังต่อไปและทดสอบใช้ร่วมกับสายอากาศที่ออกแบบใหม่คือสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลาและสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ เพื่อเพิ่มอัตราขยาย จะทำให้ระยะการทำงานของระบบเรดาร์ไกลมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะนำเสนอในรายงานความก้าวหน้าถัดๆไป

### 6.3 ความก้าวหน้าเรื่องการออกแบบและ สร้างสายอากาศ ผลการทดสอบ

ในการทดสอบระบบของโครงการนี้จะใช้สายอากาศ 3 ชนิดในการทดสอบ โดยแบ่งเป็น

1. ส่วนการทดสอบเบื้องต้นในห้องทดลองจะใช้สายอากาศ horn antenna ที่มีอัตราขยาย 20 dBi
  2. สายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา (parabolic reflector antenna) ที่มีอัตราขยาย 33 dBi
  3. สายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ที่มีอัตราขยาย 28 dBi
- โดยอัตราขยายของสายอากาศมีผลมากต่อระยะทางการตรวจจับของระบบ การคำนวณหา ระยะทางสูงสุดสามารถประมาณได้จากสมการที่ 6.1

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

$$R = \left( \frac{P_T \sigma c^2 G_{R,T}^2}{(4\pi)^3 f^2 P_{R,\min}} \right)^{1/4} \quad (6.1)$$

เมื่อ  $P_T$  คือกำลังส่ง โดย  $f$  คือความถี่  $\sigma$  คือหน้าตัดเรดาร์ของเป้าหมายที่  $P_{R,\min}$  คือกำลังงานต่ำสุดที่ระบบรับได้  $G_{R,T}$  คืออัตราขยายของสายอากาศรับ-ส่ง

ตัวอย่างเมื่อกำหนดให้กำลังส่ง  $P_T = 60$  W ความถี่ที่ 10 GHz หน้าตัดเรดาร์ ( $\sigma$ ) ของเป้าหมายที่  $0.4 \text{ m}^2$  กำลังงานต่ำสุดที่ระบบรับได้ที่ -90 dBm

ตารางที่ 6.1 การประมาณระบบเรดาร์

$P_t$ (W)	$G_r, G_t$ (dB)	radar cross section	frequency (GHz)	Pmin (dBm)	R (m)
60	20	0.4	10	-90	574.39
60	33	0.4	10	-90	2565.70
60	28	0.4	10	-90	1442.80

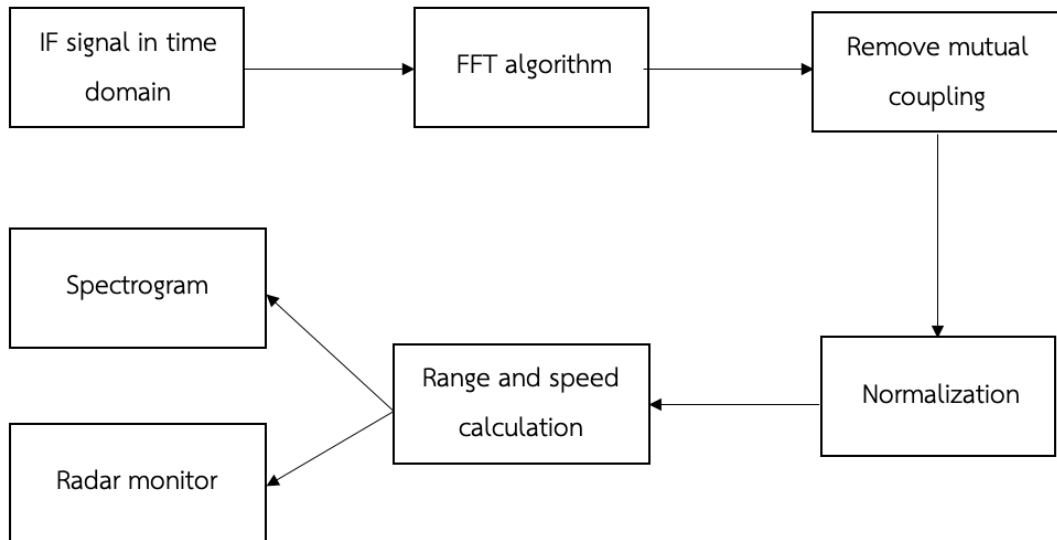
จากการประมาณการจะพบว่า เมื่อสายอากาศมีอัตราขยายเพิ่มขึ้น จะได้ระยะสูงสุดในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กได้ไกลกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ต้องการด้วย และกำลังส่ง

ผลการทดสอบสายอากาศที่ทำการออกแบบพบว่า ค่า  $|S_{11}|(\text{dB}) < -10$  dB ที่ 10GHz ผลการทดสอบและผลการจำลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดี สำหรับผลการทดสอบแบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระหว่างการจำลองและการทดสอบพบว่าที่ลำคลื่นหลักมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ที่ลำคลื่นด้านข้างพบว่าการทดสอบมีข้อจำกัดเรื่องระดับสัญญาณรบกวนของระบบทดสอบ เนื่องจากสายนำสัญญาณยาว 16 m ซึ่งมีค่าการลดทอนที่ความถี่ 10 GHz สูงมาก อีกทั้งเครื่องทดสอบมีกำลังส่งเพียง 20 dBm จึงทำให้สัญญาณทดสอบมีค่าต่ำ ทั้งนี้คณะนักวิจัยจะทำการเพิ่มวงจรรขยายสัญญาณในการทดสอบต่อไป

## รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3

## บทที่ 7

### รายงานผลการพัฒนาซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์



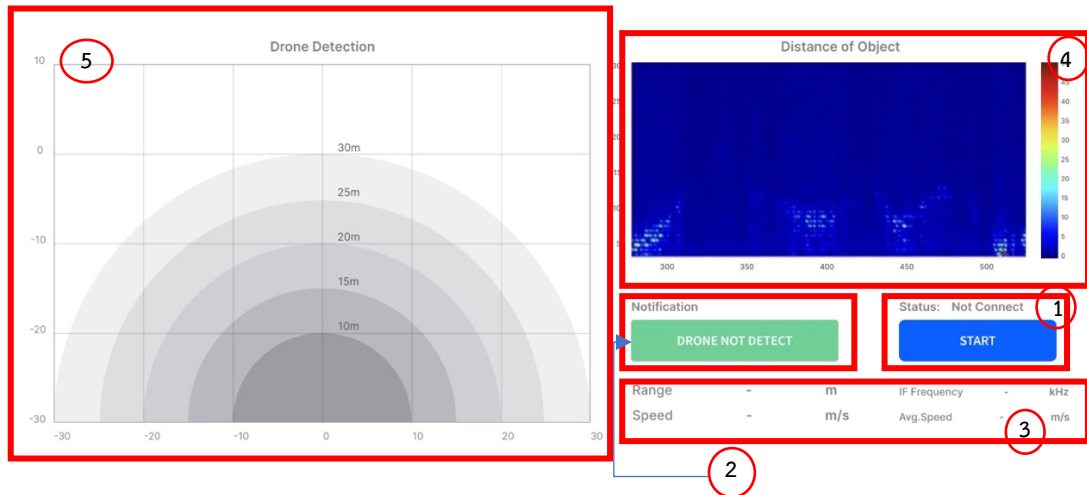
รูปที่ 7.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณ

การประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนที่เป็นประเภทคลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่จะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนหลัก ๆ ตามรูปที่ 7.1 โดยจะเริ่มจากรับค่าสัญญาณพีทในโดเมนเวลาที่เกิดจากการมิกซ์กันของสัญญาณภาครับและภาคส่ง จากนั้นแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่ด้วย FFT อัลกอริทึม เมื่อได้สัญญาณในโดเมนความถี่มาแล้วจะทำการลบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศภาครับและภาคส่งเพื่อให้เรดาร์ตรวจจับโดรนในระยะใกล้ได้ อีกทั้งยังทำให้ความถี่พีทที่ใช้คำนวณหาระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์เด่นชัดขึ้น แต่ยังมีสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่พีทจึงต้องทำการนอร์มัลไลเซชันเพื่อให้ความถี่พีทชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อทราบความถี่พีทที่แม่นยำแล้วจะนำความถี่พีทนั้นไปคำนวณหาระยะทางและความเร็วของโดรน ค่าที่คำนวณได้จะส่งไปยังหน้าจอประมวลผลโดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน ในส่วนแรกจะเป็นหน้าจอแสดงผลในรูปของสเปกโตรแกรมหรือก็คือการพล็อตค่าสัญญาณพีทในแกน 3 แกน ได้แก่ แกนเวลา, แกนแอมพลิจูด และแกนระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์ซึ่งได้มาจากการแปลงความถี่พีทเป็นระยะทาง การพล็อตสเปกโตรแกรมจะทำให้เห็นเส้นทางในการบินของโดรนในแผนภาพสองมิติ อีกหน้าจอแสดงผลหนึ่งคือ หน้าจอที่เป็นแผนภาพเรดาร์มีการกำหนดเป็นเส้นรัศมีห่างจากเรดาร์ทุก ๆ 5 เมตร ตำแหน่งของโดรนจะแสดงสัมพันธ์กับเส้นรัศมีที่กำหนดไว้ โดยบล็อกไดอะแกรมการทำงาน



## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ทั้งหมดนี้เป็นภาพรวมในการประมวลผลสัญญาณเรดาร์ตรวจจับโดรนทั้งหมด ในส่วนต่อไปจะนำบล็อกไดอะแกรมการทำงานนี้ไปเขียนเป็นส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน



รูปที่ 7.2 ส่วนต่อประสานผู้ใช้งานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์

ได้ทำการนำบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 7.1 แปลงให้อยู่ในรูปของโปรแกรมเพื่อง่ายต่อการใช้งานตามรูปที่ 2 ซึ่งจะแสดงส่วนต่อประสานผู้ใช้งานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์ (Graphic user interface, GUI) เขียนขึ้นบนโปรแกรม MATLAB ที่ทำงานร่วมกับชุดคำสั่งของเครื่องแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล GUI จะมีส่วนประกอบอยู่ 5 ส่วนด้วยกัน ในส่วนที่ 1 จะเป็นปุ่มสั่งการเพื่อให้โปรแกรมเริ่มรับค่าหรือหยุดรับค่าจากตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล ส่วนที่ 2 จะเป็นส่วนแสดงผลการตรวจจับโดรน โดยที่สีเขียวแสดงถึง ไม่มีโดรนที่ถูกตรวจจับ สีแดงแสดงถึงตรวจจับโดรนได้ ส่วนที่ 3 แสดงค่าระยะทางที่ตรวจจับโดรนได้ และความเร็ว ส่วนที่ 4 แสดงถึงกราฟ Spectrogram โดยแนวตั้งคือระยะทาง และแนวนอนคือเวลา ส่วนที่ 5 คือหน้าจอแสดงตำแหน่งของโดรนที่ถูกตรวจจับได้ ค่าที่ได้รับมาคือสัญญาณ IF signal จากการชักอย่างด้วยความถี่ 50 MHz และเก็บค่าสัญญาณข้อต่อละ 1,000 จุด หรือเทียบเท่าสัญญาณสามเหลี่ยมที่ใช้มอดูเลต 2 ลูกคลื่น ดังนั้นข้อมูลจากสัญญาณ IF signal ที่ได้มาจะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ที่มีขนาด  $N \times 1000$  โดยที่  $N$  คือจำนวนข้อต่อในการเก็บค่าสัญญาณทุก ๆ  $2 \times 10^{-5}$  วินาที ตามรูปที่ 7.3

### 7.1 การประมวลผลสัญญาณโดย FFT อัลกอริทึม

ข้อมูลของสัญญาณที่ได้รับมาจะอยู่ในรูปของโดเมนเวลา การที่จะระบุระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์และความเร็วของโดรนจำเป็นต้องวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ ดังนั้นซอฟต์แวร์จะนำข้อมูลในโดเมนเวลาแปลงเป็นโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูรีเย แต่เนื่องจากข้อมูลเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง [สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008]

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

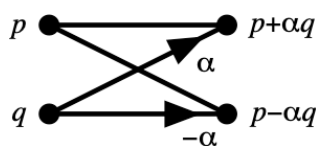
จึงต้องแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform) [16] ตามสมการที่ 7.1 โดยที่  $a_n$  คือ สัญญาณไม่ต่อเนื่องของ IF signal ในโดเมนเวลา

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} a_n \quad (7.1)$$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.1658	0.0824	0.1658	0.1658	0.1658	0.0824	0.1658	0.1658
2	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.0824	0.0824	0.1658
3	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.0824	0.1658	0.1658
4	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658
5	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658
6	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
7	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
8	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491
9	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
10	0.1658	0.1658	0.2491	0.1658	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
11	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
12	0.1658	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
13	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.2491
14	0.2491	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
15	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491
16	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658
17	0.2491	0.1658	0.2491	0.3324	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491
18	0.2491	0.1658	0.2491	0.3324	0.3324	0.2491	0.2491	0.2491
19	0.3324	0.1658	0.3324	0.3324	0.3324	0.1658	0.1658	0.2491
20	0.2491	0.3324	0.3324	0.3324	0.3324	0.2491	0.2491	0.2491

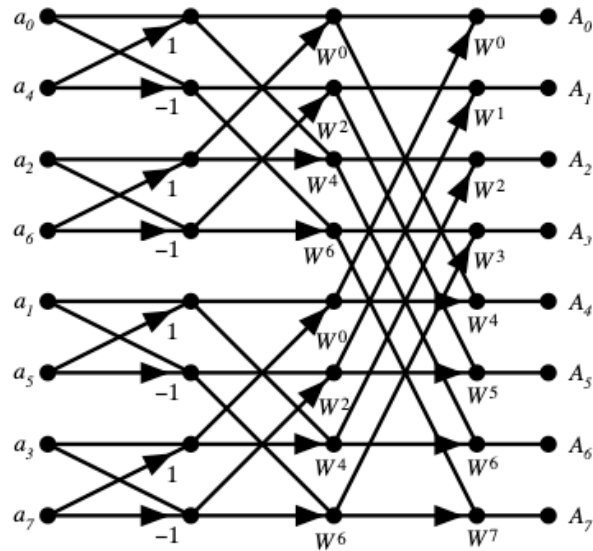
รูปที่ 7.3 แสดงเมทริกซ์ข้อมูลสัญญาณ IF signal ที่ได้รับจากตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล

ในกรณีที่จำนวนจุดของข้อมูลเยอะ จะทำให้การคำนวณใช้เวลาานจึงมีการใช้ The Fast Fourier Transform (FFT) Algorithm [16] เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผล fft อัลกอริทึมมีอยู่หลายรูปแบบ ในงานครั้งนี้ใช้ decimation in-time FFT algorithm หลักการ fft อัลกอริทึมนี้คือการแยกการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องให้กลายเป็น  $\log_2 N$  สถานะ และแต่ละสถานะจะประกอบด้วยจำนวน  $N/2$  butterfly ซึ่ง butterfly เป็นชื่อที่ใช้เรียกแทนขั้นตอนย่อยในการคำนวณการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องตามรูปที่ 7.4 โดย butterfly จะประกอบไปด้วยการคำนวณจำนวนเชิงซ้อน 2 ตัวนั่นคือ  $p$  และ  $q$



รูปที่ 7.4 แสดงขั้นตอนย่อยในการคำนวณการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องหรือเรียกว่า butterfly

ยกตัวอย่างแผนภาพในการคำนวณของอัลกอริทึม fft ตามรูปที่ 7.5 (ก) เป็นการคำนวณในกรณีที่มีจำนวนข้อมูล 8 จุด สังเกตเห็นว่าลำดับของ  $a_n$  และ  $A_k$  จะไม่ตรงกันเพราะอัลกอริทึมจะนำแต่ละ butterfly มาต่อกันและสลับ bit ของลำดับระหว่าง  $a_n$  กับ  $A_k$  ตามรูปที่ 7.5 (ข)



(ก)

$j$	0	1	2	3	4	5	6	7
$n_j$	0	4	2	6	1	5	3	7
$j$ base 2	000	001	010	011	100	101	110	111
$n_j$ base 2	000	100	010	110	001	101	011	111

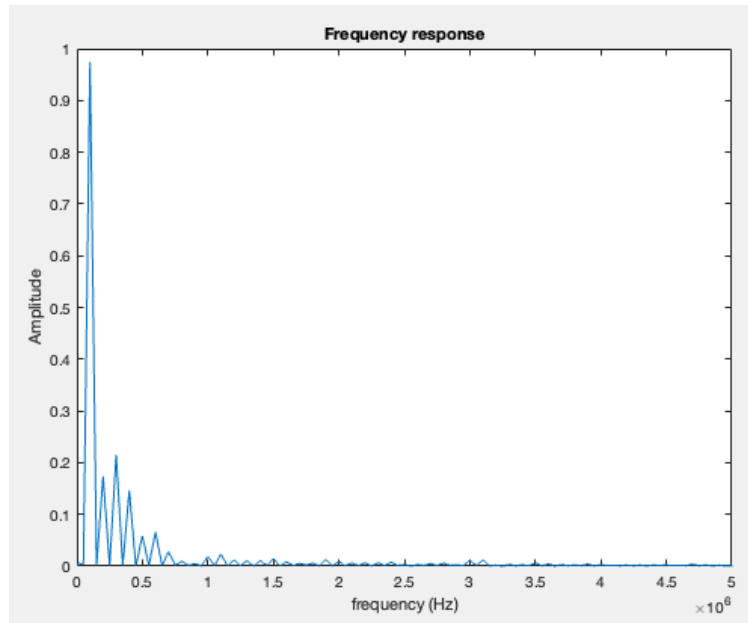
(ข)

รูปที่ 7.5 แสดงแผนภาพการคำนวณของอัลกอริทึม fft (ก) แผนภาพการคำนวณในกรณีที่มีจำนวนข้อมูล 8 จุด (ข) การสลับ bit ลำดับของ  $a_n$  และ  $A_k$

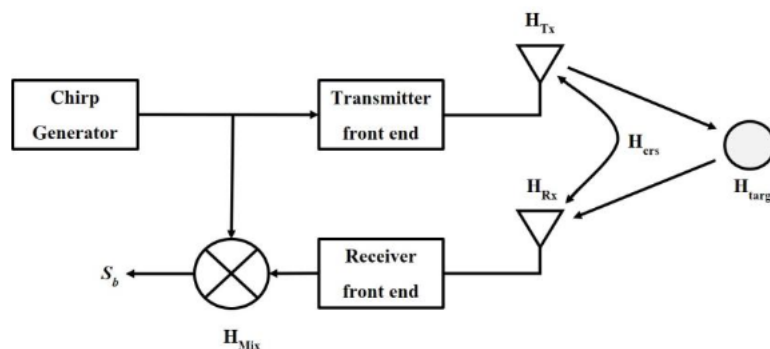
เมื่อทำการแปลงฟูรีเยด้วยอัลกอริทึม fft แล้ว จะได้ข้อมูลในโดเมนความถี่ เพื่อนำมาหาความถี่พีทและแปลงค่าความถี่พีทไปเป็นระยะห่างระหว่างเรดาร์กับโดรน โดยถ้าดึงข้อมูลในโดเมนความถี่มาพล็อต 1 ซีกต์หรือ 1000 จุด ผลลัพธ์จะเป็นไปตามรูปที่ 7.6 จะพบว่าแอมพลิจูดในช่วงความถี่ 0 – 100 kHz มีค่าสูงมากเป็นผลมาจากสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศภาคส่งกับสายอากาศภาครับ (Mutual coupling signal) ทำให้ถ้ามีโดรนบินในระยะไม่เกิน 5 เมตรจากเรดาร์เรดาร์จะไม่สามารถระบุตำแหน่งของโดรนได้ จึงต้องการการประมวลผลสัญญาณโดยใช้วิธีการลบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศ (Remove mutual coupling)

## 7.2 การประมวลผลสัญญาณโดยการลบผลกระทบของสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศ

วิธีการประมวลผลสัญญาณคือการลบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศรวมถึงอากาศออกไป เพื่อให้ระยะทางของเป้าหมายมีความแม่นยำและชัดเจนมากยิ่งขึ้นจากรูปที่ 7.7 แสดงแบบจำลอง การวัดผลตอบสนองของเป้าหมายในอากาศว่าง ซึ่งสามารถอธิบายถึงฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer Function) [17] ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.6 สัญญาณ IF ในโดเมนความถี่



รูปที่ 7.7 แบบจำลองการวัดผลตอบสนองของเป้าหมายในอากาศว่าง

จากรูปที่ 7.7 ในแต่ละแผนภาพบล็อกได้แสดงถึงการทำงานของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ถูกกล่าวความถี่ ซึ่งวิธีการลบสัญญาณปัดขณะไม่มีเป้าหมายจำเป็นต้องวัดถึง 2 ครั้ง คือ การวัดสัญญาณ [สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008]

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ปีทขณะมีเป้าหมาย และการวัดสัญญาณปีทขณะไม่มีเป้าหมาย [3] ซึ่งการวัดสัญญาณปีทขณะมีเป้าหมายในรูปแบบโดเมนความถี่สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$S_b(\omega) = H_{Tx}(\omega)H_{Rx}(\omega)H_{targ}(\omega)H_{mix}(\omega) + H_{Tx}(\omega)H_{Rx}(\omega)H_{crs}(\omega)H_{mix}(\omega) \quad (7.2)$$

เมื่อ  $H_{Tx}(\omega)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศตัวส่ง

$H_{Rx}(\omega)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของสายอากาศรับ

$H_{targ}(\omega)$  คือ ขนาดเชิงซ้อนที่กระเจิงออกจากเป้าหมาย

$H_{crs}(\omega)$  คือ ฟังก์ชันการถ่ายโอนของคลื่นที่ส่งระหว่างสายอากาศโดยตรง

$H_{mix}(\omega)$  คือ การผสมของสัญญาณระหว่างสัญญาณที่ส่งและรับ

ถัดมาในวิธีการประมวลผลสัญญาณจำเป็นต้องวัดสัญญาณปีทขณะไม่มีเป้าหมาย ( $S_{air}$ ) หรือในอากาศว่าง ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดัง (7.3)

$$S_{air}(\omega) = H_{Tx}(\omega)H_{Rx}(\omega)H_{crs}(\omega)H_{mix}(\omega) \quad (7.3)$$

ดังนั้นเมื่อนำสมการที่ (7.2) ลบกับสมการที่ (7.3) ผลลัพธ์จะได้ดังสมการที่ (7.4)

$$S_b(\omega) - S_{air}(\omega) = H_{Tx}(\omega)H_{Rx}(\omega)H_{targ}(\omega)H_{mix}(\omega) \quad (7.4)$$

### 7.3 การประมวลผลสัญญาณโดยใช้วิธีการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization)

โดยวิธีการนอร์มัลไลเซชันจะต้องใช้สัญญาณในโดเมนความถี่ที่ถูกลบสัญญาณปีทขณะไม่มีเป้าหมายจากสมการที่ (7.4) ซึ่งวิธีการนอร์มัลไลเซชันจำเป็นต้องหาค่าแอมพลิจูด ( $A_{max}$ ) สูงสุดของสัญญาณปีทสามารถคำนวณได้จากสมการ (7.5)

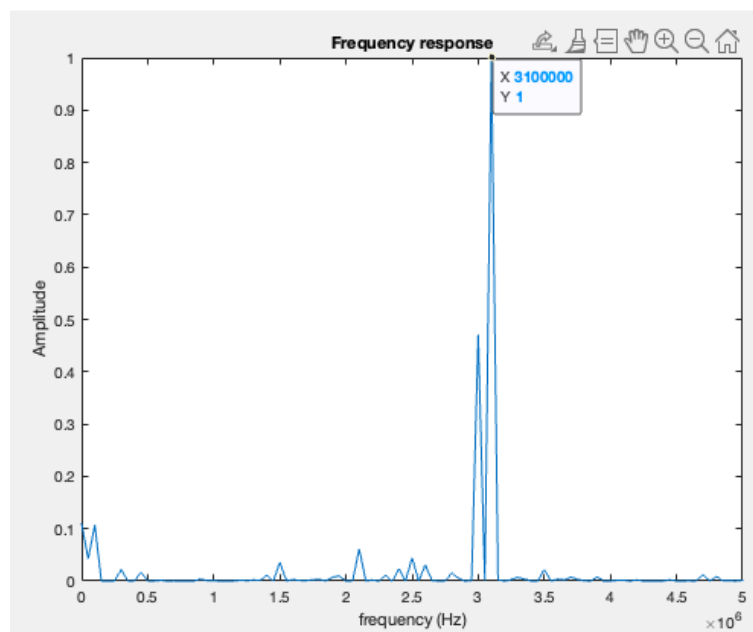
$$A_{max} = \max(S_b(\omega) - S_{air}(\omega)) \quad (7.5)$$

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

เมื่อได้ค่าแอมพลิจูดที่สูงสุดแล้ว หลังจากนั้น จะนำสัญญาณบีทในโดเมนความถี่ที่ถูกลบกับสัญญาณบีทขณะไม่มีเป้าหมายทั้งหมดเข้ากระบวนการนอร์มัลไลเซชัน ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7.6)

$$S_{Norm}(\omega) = \left| \frac{(S_b(\omega) - S_{air}(\omega))}{A_{max}} \right|^2 \quad (7.6)$$

หลังจากลบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศและทำการนอร์มัลไลเซชันแล้ว สัญญาณที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 7.8 จะเห็นว่าความถี่ที่เกิดจากสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศได้หายไป และความถี่บีทที่เกิดจากการสะท้อนกับโดรนชัดเจนขึ้น



รูปที่ 7.8 สัญญาณ IF ในโดเมนความถี่หลังจากทำการลบผลกระทบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศและนอร์มัลไลเซชัน

#### 7.4 ส่วนแสดงผลการตรวจจับโดรน

เมื่อได้ความถี่บีทที่แม่นยำโดยอาศัยการประมวลผลสัญญาณทั้งการลบผลกระทบของสัญญาณแทรกข้ามและการนอร์มัลไลเซชันแล้ว สามารถคำนวณระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์ โดยที่ระยะทาง ( $R$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ (7.7)

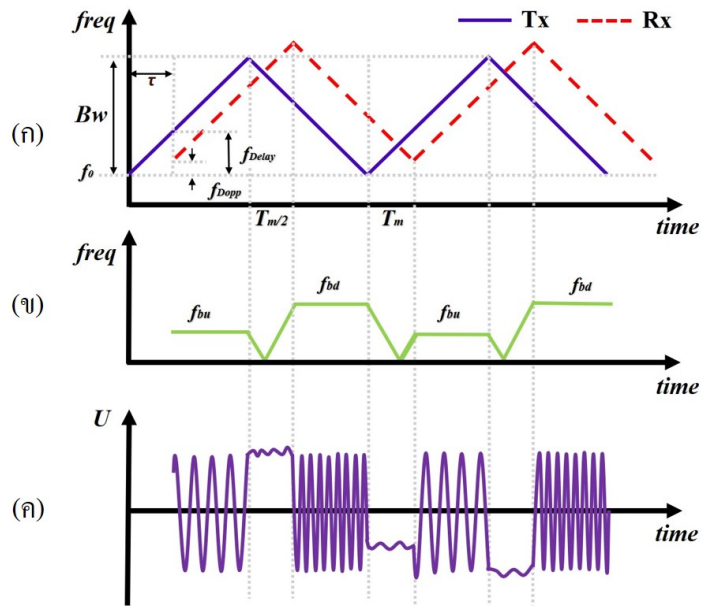
$$R = \frac{T_m c}{2Bw} f_b \quad (7.7)$$

เมื่อ  $T_m$  คือ คาบเวลาของความถี่สามเหลี่ยม

$Bw$  คือ แบนด์วิธของสัญญาณที่ถูกกล้ำความถี่

นอกจากนี้, สัญญาณเรดาร์ระบบคลื่นต่อเนื่องที่ถูกกล้ำความถี่เป็นสัญญาณที่ถูกกล้ำความถี่ที่ทำให้มีความถี่เพิ่มขึ้นตามสัญญาณที่ถูกควบคุม หลังจากนั้นส่งไปยังเป้าหมายและส่งสัญญาณอ้างอิงไปยังเครื่องผสมสัญญาณ หลังจากนั้นเครื่องผสมก็รับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายเช่นกัน เมื่อถึงกระบวนการผสม (Mixing) จะดำเนินผ่านเครื่องผสมสัญญาณ ซึ่งจะทำการลบกันของระหว่างสัญญาณส่ง (Tx) และสัญญาณรับ (Rx) กลับมาจากการสะท้อนของเป้าหมาย แสดงดังภาพที่ 7.9 (ก) ซึ่ง  $Bw$  และ  $T_m$  แสดงถึงแบนด์วิธของสัญญาณที่ถูกกล้ำความถี่และคาบเวลาของความถี่สามเหลี่ยมตามลำดับ  $\tau$  และ  $f_0$  คือเวลาหน่วงที่เกิดจากระยะทางของเป้าหมายและความถี่เริ่มต้นตามลำดับ ซึ่งการผสมสัญญาณของความแตกต่างของความถี่ระหว่าง 2 สัญญาณ เรียกว่าความถี่บีทหรือความถี่กลางแสดงดังภาพที่ 7.9 (ข)-(ค) ซึ่งเป็นสัดส่วนกับระยะห่างระหว่างเรดาร์ถึงเป้าหมาย [6]

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 7.9 แผนภาพสัญญาณเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ถูกล่าความถี่พื้นฐาน [6] (ก) ความถี่ที่ส่งและรับเทียบกับเวลา (ข) ความถี่บีท (ค) สัญญาณบีท

นอกจากนี้  $f_{bu}$  และ  $f_{bd}$  เป็นความถี่กลางที่แตกต่างกัน ในเวลาเดียวกันระหว่างสัญญาณส่งและสัญญาณรับ ซึ่งสามารถเขียนสมการเป็น

$$\begin{aligned} f_{bu} &= f_{delay} - f_{dopp} \\ f_{bd} &= f_{delay} + f_{dopp} \end{aligned} \quad (7.8)$$

เมื่อ  $f_{delay}$  คือ ความถี่ที่แตกต่างกันของสัญญาณส่งและรับที่จุดเริ่มต้นความถี่  
 $f_{dopp}$  คือ ความถี่ดอปเพลอร์ (Doppler frequency) ที่ได้จากเวลาเดียวกัน

จากสมการที่ (7.8) จะเกี่ยวข้องกับความเร็วของเป้าหมาย ( $v_r$ ) ซึ่งสามารถเขียนสมการเป็น

$$f_{dopp} = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (7.9)$$

เมื่อ  $\lambda = f_0 / c$   
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น  
 $f_0$  คือ ความถี่เริ่มต้น



การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

$c$  คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

โดยที่ความเร็วสัมพันธ์มีค่าเป็นบวก หมายถึง เป้าหมายกำลังเคลื่อนที่เข้าหาเรดาร์ ในขณะที่ความเร็วสัมพันธ์มีค่าเป็นลบ หมายถึง เป้าหมายกำลังเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ซึ่งตามความคล้ายคลึงกันของความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตในภาพที่ 7.9 (ก) การไล่ระดับความถี่ของคลื่นสามเหลี่ยมคือ

$$\mu = \frac{Bw}{T_m / 2} = \frac{f_{Delay}}{\tau} \quad (7.10)$$

เมื่อ  $\tau = 2R/c$

$\tau$  คือ การหน่วงเวลาที่เกิดจากระยะทางของเป้าหมาย

$R$  คือ ระยะทางระหว่างเป้าหมายและเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่ถูกกล้าความถี่

ซึ่งสมการที่ (7.8) (7.9) และ (7.10) สามารถแทนได้ในสมการที่ (7.11) คือระยะทางของเป้าหมาย ( $R$ ) และความเร็วสัมพันธ์ของเป้าหมาย ( $v_r$ ) สามารถเขียนเป็น

$$R = \frac{cT_m}{4Bw}(f_{bd} + f_{bu}) \quad (7.11)$$
$$v_r = \frac{\lambda}{4}(f_{bd} - f_{bu})$$

เมื่อ  $f_{bu}$  คือ ความถี่ปีสซ์ของขอบขาขึ้นของความถี่สามเหลี่ยม

$f_{bd}$  คือ ความถี่ปีสซ์ของขอบขาลงของความถี่สามเหลี่ยม

$Bw$  คือ แบนด์วิธของสัญญาณที่ถูกกล้าความถี่

$T_m$  คือ คาบเวลาของความถี่สามเหลี่ยม

หลังจากที่รับสัญญาณในโดเมนเวลาและประมวลผลสัญญาณด้วย fft อัลกอริทึม, การลบผลกระทบสัญญาณแทรกระหว่างสายอากาศและวิธีนอร์มัลไรเซชันแล้ว จะได้ความถี่ปีสซ์มา จากนั้นนำความถี่ปีสซ์ไปคำนวณหาระยะทางตามสมการที่ (7.11) แต่เนื่องจากความเร็วของโคจรมีค่าต่ำมากทำให้เกิดความถี่ดอปเพลอร์ที่มีค่าต่ำและความละเอียดในการแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่ด้วย fft อัลกอริทึมของซอฟต์แวร์ Matlab ไม่สามารถแยกความต่างระหว่าง  $f_{bu}$  และ  $f_{bd}$  ได้ ทำให้ไม่สามารถคำนวณความเร็วของโคจรจากสมการที่ (7.11) ได้ การคำนวณความเร็วของโคจรจึงใช้วิธีการนำความต่างของระยะทางของสองช่วงเวลามาลบกันหารด้วยความต่างของเวลาตาม

สมการที่ (7.12) จากนั้นนำความเร็วที่คำนวณได้ไปแสดงบนในส่วนที่ 3 ของส่วนต่อประสานผู้ใช้งานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์

$$v_{avg} = \frac{R_2 - R_1}{t_2 - t_1} \quad (12)$$

- เมื่อ  $v_{avg}$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของโดรน  
 $R_1$  คือ ระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์ตรวจจับโดรนที่เวลาก่อนหน้า  
 $R_2$  คือ ระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์ตรวจจับโดรนที่เวลาปัจจุบัน  
 $t_1$  คือ เวลาขณะที่โดรนอยู่ในตำแหน่งก่อนหน้า  
 $t_2$  คือ เวลาขณะที่โดรนอยู่ในตำแหน่งปัจจุบัน

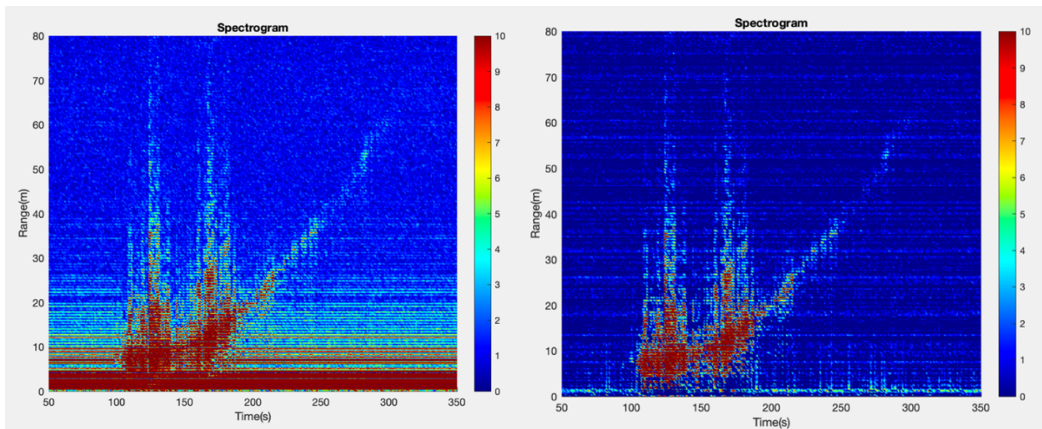
#### 7.4.1 แผนภาพสเปกโตรแกรม

เมื่อสามารถระบุระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์ได้แล้วนั้น จะนำข้อมูลของโดรนในแต่ละตำแหน่งมาเรียงต่อกันหรือที่เรียกว่า “สเปกโตรแกรม” สเปกโตรแกรมคือ ภาพที่แสดงถึงความแรงของสัญญาณในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ความถี่ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในรูปคลื่นเฉพาะ ไม่เพียงแต่จะเห็นว่ามีความถี่มากหรือน้อย แต่ยังเห็นระดับพลังงานที่แปรผันตามช่วงเวลาอีกด้วย สเปกโตรแกรมนั้นเป็นกราฟสองมิติโดยมีมิติที่สามแสดงด้วยสี เวลาวิ่งจากซ้าย (จุดที่เริ่มเก็บค่าสัญญาณ) ไปขวา (จุดที่เก็บค่าสัญญาณปัจจุบัน) ตามแนวแกนนอน แกนตั้งแสดงถึงระยะห่างระหว่างโดรน กับเรดาร์ แอมพลิจูด (หรือพลังงานหรือ “ความแรงของสัญญาณ”) ของความถี่เฉพาะ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งจะแสดงด้วยมิติที่สาม โดยมีสีน้ำเงินเข้มที่สัมพันธ์กับแอมพลิจูดต่ำและสีที่สว่างกว่าขึ้นเป็นสีแดงซึ่งสอดคล้องกับแอมพลิจูดที่แรงกว่ามากขึ้นเรื่อย ๆ

เมื่อนำสัญญาณการตรวจจับการเคลื่อนที่ของโดรนในโดเมนเวลา มาแปลงให้เป็นโดเมนความถี่โดยใช้ fft อัลกอริทึมและนำสัญญาณในโดเมนความถี่มาเรียงต่อกัน จะได้แผนภาพสเปกโตรแกรมที่แสดงเส้นทางการบินของโดรนตามรูปที่ 7.10 จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ยังไม่ผ่านการประมวลผลด้วยการลบผลกระทบของสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศและนอร์มัลไรเซชันตามรูปที่ 7.10 (ก) ระบุตำแหน่งของโดรนได้ยากเพราะมีสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำและที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ปีท แต่เมื่อประมวลผลสัญญาณด้วยการลบกำจัดสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศ จะพบว่าสัญญาณรบกวนที่ความถี่ต่ำจะหายไป ตามรูปที่ 7.10 (ข) หลังจากนั้นทำการประมวลผลสัญญาณด้วยวิธีการนอร์มัลไรเซชันเพื่อลบผลกระทบจากสัญญาณรบกวนความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ปีท จะทำให้

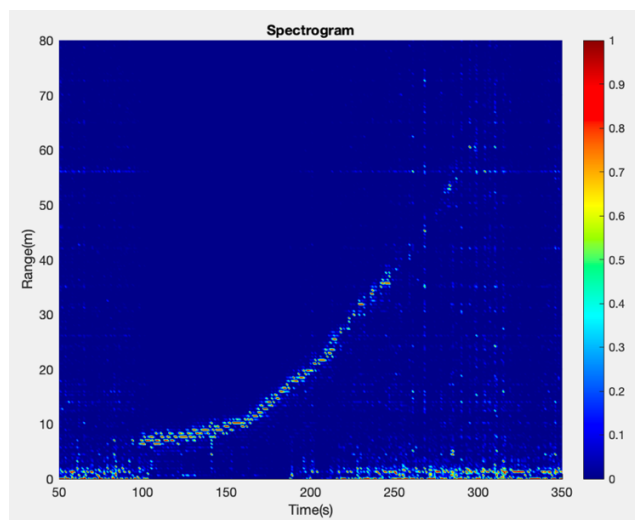
## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ระบุตำแหน่งของโดรนและแสดงเส้นทางการบินของโดรนได้อย่างแม่นยำมากขึ้นตามรูปที่ 7.10 (ค) โดยแผนภาพสเปกโตรแกรมจะแสดงในส่วนที่ 4 ของส่วนต่อประสานผู้ใช้งานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์ เพื่อให้ผู้ใช้งานเห็นเส้นทางการบินของโดรน



(ก)

(ข)

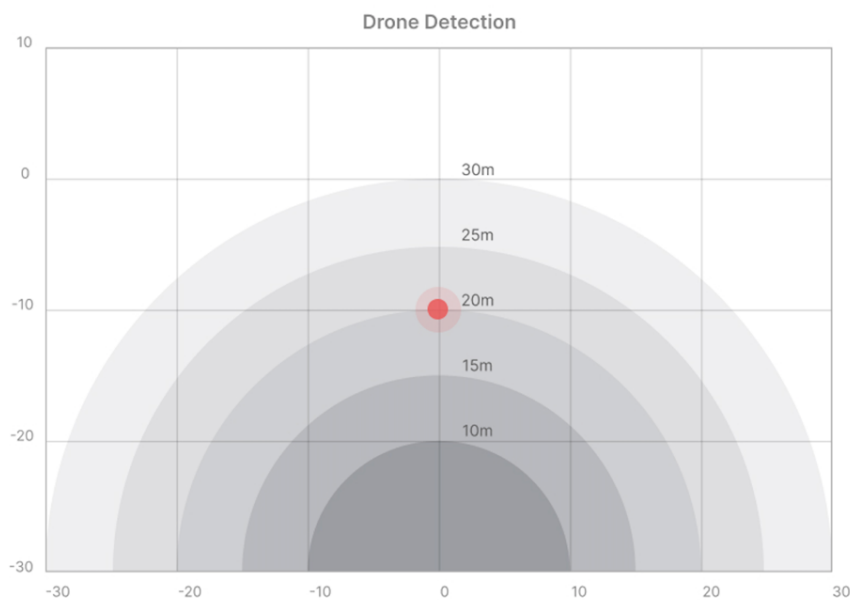


(ค)

รูปที่ 7.10 แสดงแผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณปีทที่ได้จากเรดาร์ตรวจจับโดรน (ก) แผนภาพสเปกโตรแกรมก่อนการประมวลผลสัญญาณ (ข) แผนภาพสเปกโตรแกรมหลังจากลบผลกระทบของสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศ (ค) แผนภาพสเปกโตรแกรมหลังจากลบผลกระทบของสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศและนอร์มัลไรเซชัน

#### 7.4.2 หน้าจอเรดาร์แสดงตำแหน่งของโดรน

ส่วนสุดท้ายของส่วนต่อประสานผู้ใช้งานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์คือหน้าจอเรดาร์ระบุตำแหน่งของโดรน โดยสร้างจากวงกลมที่มีรัศมีตามระยะห่างจากตัวเรดาร์ เริ่มจากรัศมี 5 เมตรไปจนถึง 50 เมตร เมื่อสัญญาณผ่านการประมวลผลทั้ง fft อัลกอริทึม, ลบผลกระทบของสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศและนอร์มัลไรเซชันแล้ว จะได้ความถี่พีทเพื่อนำไปคำนวณหาระยะห่างของโดรนกับเรดาร์และนำมาพล็อตในหน้าจอเรดาร์ซึ่งอยู่ในรูปของแผนภาพวงกลม โดยมีรัศมีของวงกลมสอดคล้องกับระยะห่างจากตัวเรดาร์ตามจริง โดยจะแสดงผลเป็นจุดสีแดงตามรูปที่ 7.11



รูปที่ 7.11 แสดงแผนภาพหน้าจอเรดาร์ในแผนภาพวงกลมขณะตรวจจับโดรน

## บทที่ 8

### รายงานผลการพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน

อ้างอิงถึงรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 ก่อนหน้านี้ ซึ่งในบทที่ 4 ของรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 ก่อนหน้านี้ ได้กล่าวถึงผลพัฒนาภาครับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์สำหรับการตรวจจับโดรน ได้อธิบายถึงการออกแบบและทดสอบ ระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (continuous wave radar) ชนิดผสมสัญญาณ (FMCW) เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว โดยสายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ คลื่นความถี่ของสัญญาณถูกปรับความถี่ ไปตามเวลาหรือเรียกได้ว่าการผสมสัญญาณ (modulated) เพื่อปรับความถี่ และในบทที่ 5 ของรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 2 ก่อนหน้านี้ได้กล่าวถึงผลการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนซึ่งประกอบด้วยสายอากาศ horn antenna ที่มีอัตราการขยาย 20 dBi ซึ่งพบว่าได้ระดับสัญญาณที่รับได้ต่ำ ซึ่งจะได้ระยะการตรวจจับที่สั้นเนื่องจากสายอากาศมีอัตราการขยายต่ำ และสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา (parabolic reflector antenna) ที่มีอัตราการขยาย 33 dBi พบว่าซึ่งพบว่าได้ระดับสัญญาณที่รับได้สูงกว่าจะสามารถให้ระยะการตรวจจับได้สูงกว่าเช่นเดียวกับสายอากาศร่องแบบแถวลำดับ (slotted array antenna) ที่มีอัตราการขยาย 28 dBi ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการทดสอบสายอากาศ 2 ชนิดโดยในรายงานความก้าวหน้านี้จะนำเสนอผลการทดสอบเบื้องต้นคือสายอากาศตัวสะท้อนพาราโบลา (parabolic reflector antenna) ที่มีอัตราการขยาย 33 dBi

สำหรับรายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 3 ในครั้งนี้ ในส่วนของผลการพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน จะนำเสนอระบบหมุนค้นหาเป้าหมายในรูปแบบหมุนสองแกน โดยระบบเรดาร์ที่ทำการออกแบบจะถูกติดตั้งเข้ากับระบบหมุนแบบสองแกนที่สามารถหมุนในแนวมุมกวาดและแนวมุมยกแบบอิสระต่อกันดังแสดงในรูปที่ 8.1 โดยที่ชุดหมุนสองแกนที่ทำการออกแบบนี้ประกอบไปด้วย ชุดโครงสร้างทางกลที่ออกแบบให้มีการขับเคลื่อนแบบ Differential Drive ซึ่งเซอร์โวมอเตอร์ต้นกำลังของทั้งสองแกนถูกติดตั้งอยู่ด้านล่างและส่งกำลังขึ้นไปยังชุดหมุนสองแกน ดังแสดงในรูปที่ 8.2 โดยใช้เฟืองที่ออกแบบให้มีการขับเคลื่อนแบบ Differential เพื่อให้ให้น้ำหนักที่บริเวณของชุดหมุนที่มีการเคลื่อนที่นั้นมีน้ำหนักเบา และสามารถออกแบบให้ติดตั้งชุด Slip-Ring เพื่อใช้ในการ รับ-ส่ง สัญญาณเรดาร์จากสายอากาศที่ตั้งอยู่บนชุดหมุนสองแกน ดังรูปที่ 8.2 โดยโครงสร้างส่วนใหญ่จะใช้วัสดุอลูมิเนียมเพื่อลดน้ำหนัก โดยออกแบบให้รองรับน้ำหนักของชุดสายอากาศในระบบเรดาร์สูงสุดที่ 14 กิโลกรัม โดยมีความเร็วในการหมุนที่สามารถกำหนดได้ อยู่ในช่วงระหว่าง 1 รอบต่อ 10 วินาที และความเร็วสูงสุดที่ 1 รอบต่อ 4 วินาที โดยมีค่าความผิดพลาดที่รับได้ที่ 5% ออกแบบโดยใช้วัสดุที่

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

แข็งแรงและเบา สามารถขนย้ายได้ง่าย การทำงานของชุดหมุนเรดาร์ตรวจจับโดรน แบ่งออกเป็น 3 โหมด โดยสามารถตั้งค่าผ่าน GUI ตามข้อดังนี้

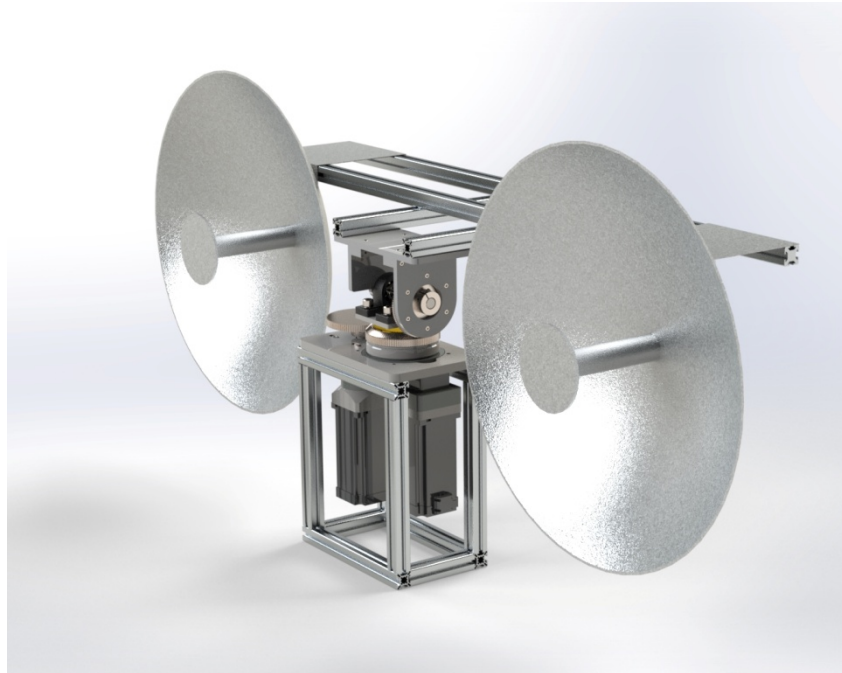
โหมดที่ 1 เป็นโหมดพิกัดของเรดาร์จุดเดียว โดยสามารถกำหนดองศาของมุมกวาด (Azimuth) (A) และมุมยก (Elevation) (E) ได้

โดยความละเอียดที่มุมกวาด (Azimuth) (A) เพิ่มลดได้ที่ละ 1 องศา และมุมยก (Elevation) (E) เพิ่มลดได้ที่ละ 5 องศา ซึ่ง GUI เป็นแบบกรอกตัวเลข และสามารถกำหนดช่วงเวลาที่จะส่งข้อมูลพิกัดไปยังโปรแกรม Matlab ได้ เช่น ส่งข้อมูลทุกๆ 1 วินาที

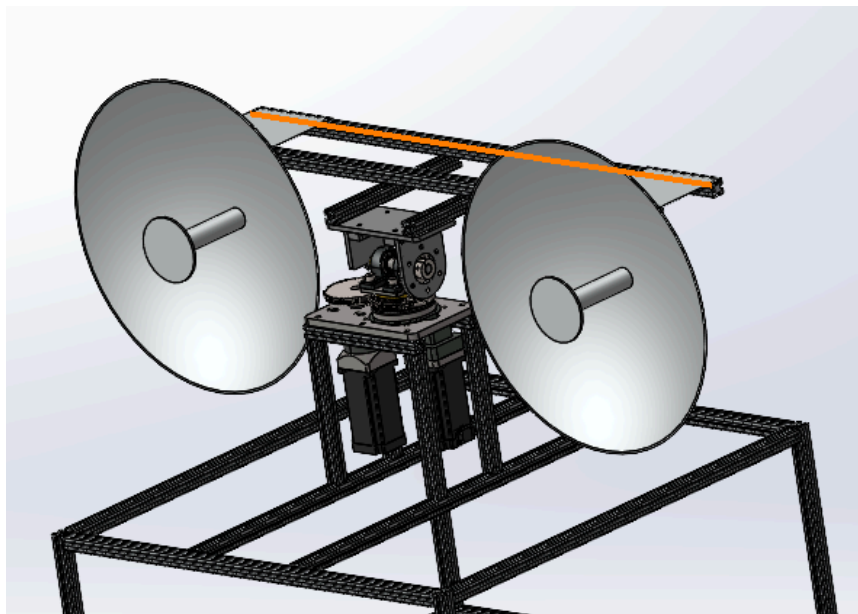
โหมดที่ 2 เป็นโหมดเรดาร์หมุนรอบตัว โดยการกำหนดมุมยก (Elevation) (E) คงที่ และสามารถกำหนดมุมยก (Elevation) (E) ได้ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 90 องศา สามารถเพิ่มลดได้ละเอียดที่ละไม่เกิน 5 องศา โดยสามารถกำหนดขั้นการหมุนของมุมกวาด (Azimuth) (A) ได้ (หมุน 0 องศา ถึง 360 องศา) โดยมีความละเอียดระหว่าง 1 องศา ถึง 15 องศา

โหมดที่ 3 เป็นโหมดเรดาร์หมุนรอบตัวทั้งตามแนวมุมกวาด (Azimuth) (A) และมุมยก (Elevation) (E) โดยสามารถกำหนดมุม start และ stop ของมุมยก (Elevation) (E) ได้ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 90 องศา และสามารถเพิ่มลดได้ละเอียดที่ละไม่เกิน 5 องศา โดยสามารถกำหนดขั้นการหมุนของมุมกวาด (Azimuth) (A) ได้ (หมุน 0 องศา ถึง 360 องศา) โดยมีความละเอียดระหว่าง 1 องศา ถึง 15 องศา ลักษณะการหมุนเช่น หมุนมุม A จาก 0 องศา ถึง 360 องศา เมื่อ E = 0 องศา (มุม start) และรอบต่อไปหมุนมุม A จาก 0 องศา ถึง 360 องศา เมื่อ E = 5 องศา เพิ่มไปจนถึงมุม stop เช่น 90 องศา และรอบถัดไปหมุนมุม A จาก 0 องศา ถึง 360 องศา เมื่อ มุม E ลดลงเป็น E = 85 องศา ลดลงไปแบบนี้เรื่อย ๆ แล้วก็กลับมาเพิ่มอีก

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

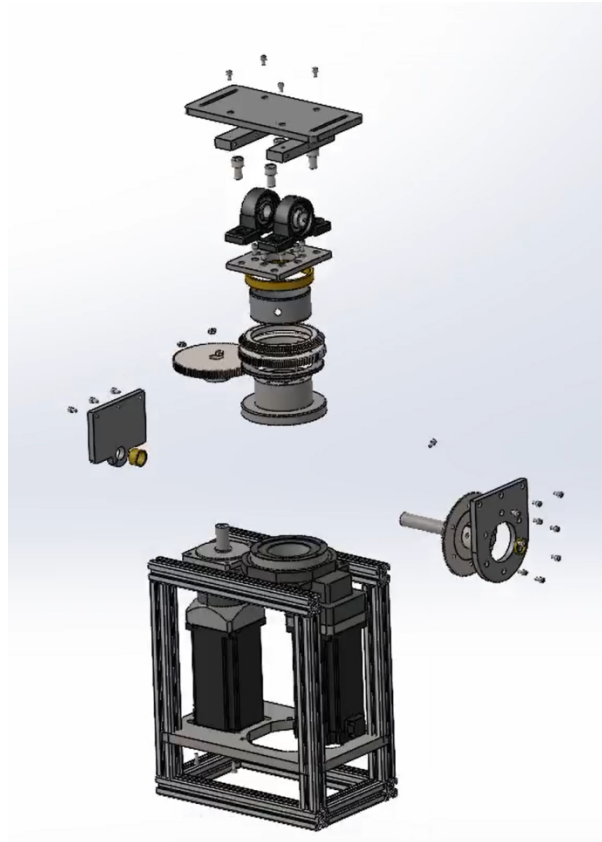


(ก)



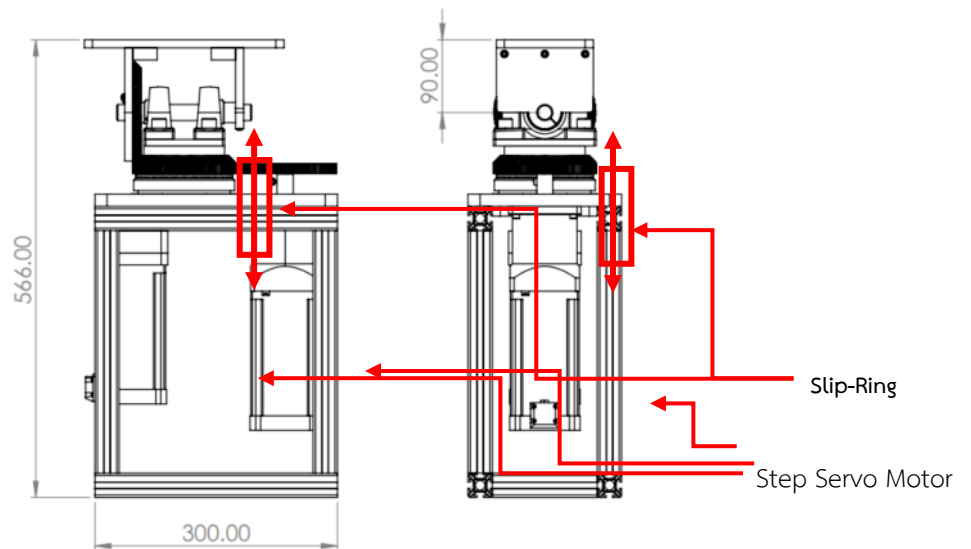
(ข)

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ค)

รูปที่ 8.1 (ก) การติดตั้งระบบเรดาร์บนระบบชุดหมุนสองแกน (ข) ระบบชุดหมุนสองแกนที่ติดตั้งบนฐานรับน้ำหนัก (ค) องค์ประกอบต่างๆแบบสามมิติของระบบชุดหมุนสองแกน



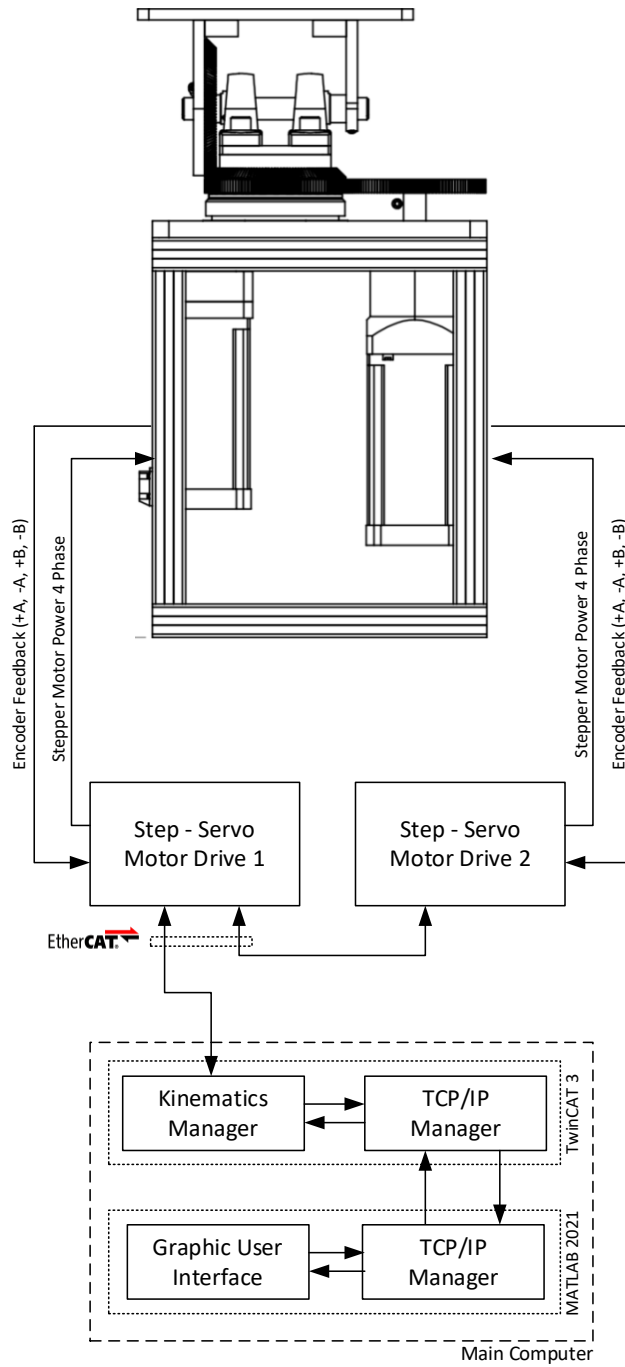
รูปที่ 8.2 ภาพรวมโครงสร้างทางกลของชุดหมุนสองแกน



## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ในส่วนของระบบควบคุมการทำงานของชุดหมุนสองแกนนั้นถูกออกแบบให้ผู้ใช้สามารถควบคุมการทำงานของชุดหมุนสองแกนผ่านโปรแกรม MATLAB โดยออกแบบส่วนควบคุมเป็นลักษณะส่วนติดต่อผู้ใช้ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้งานได้ง่าย โดยผู้ใช้สามารถกำหนดค่ามุมต่าง ๆ และความเร็วในการหมุนผ่านหน้าต่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ MATLAB จากนั้นโปรแกรมจะทำการส่งค่าต่าง ๆ ที่ถูกกำหนดโดยผู้ใช้งานผ่านระบบ TCP/IP ภายในเครื่อง เพื่อส่งค่าต่อไปยังโปรแกรม TwinCAT จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณกลศาสตร์ของชุดหมุนสองแกนโดย (Kinematics Manager) ก่อนส่งค่าตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวไปยังชุดไดรฟ์มอเตอร์ (Step Servo Drive) ผ่านการติดต่อสื่อสารแบบ EtherCAT เพื่อสั่งให้มอเตอร์ทำงานตามที่ผู้ใช้งานกำหนดค่า ดังรูปที่ 8.3 โดยใช้เฟืองที่ออกแบบให้มีการขับเคลื่อนแบบ Differential ร่วมกับติดตั้งชุด Slip-Ring เพื่อใช้ในการ รับ-ส่ง สัญญาณเรดาร์จากสายอากาศที่ตั้งตั้งอยู่บนชุดหมุนสองแกน และส่งไฟฟ้ากระแสตรงไปยังระบบเรดาร์ด้านบนของชุดหมุน ระบบชุดหมุนสองแกนจะมีมอเตอร์สองตัว พร้อมด้วยชุดวงจรถูกขับ (Servo motor drive) สองชุดด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 8.3 สำหรับคอมพิวเตอร์สั่งการควบคุมจะมีสื่อนของโปรแกรมคือ โปรแกรม kinematics manager และส่วนโปรแกรม TCP/IP Manager และส่วน MATLAB user interface ซึ่งออกแบบและติดตั้งในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Mini PC) ดังแสดงคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Mini PC) (INTEL NUC MINI PC 11PAHI7 Intel Core i7) ในรูปที่ 8.3

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



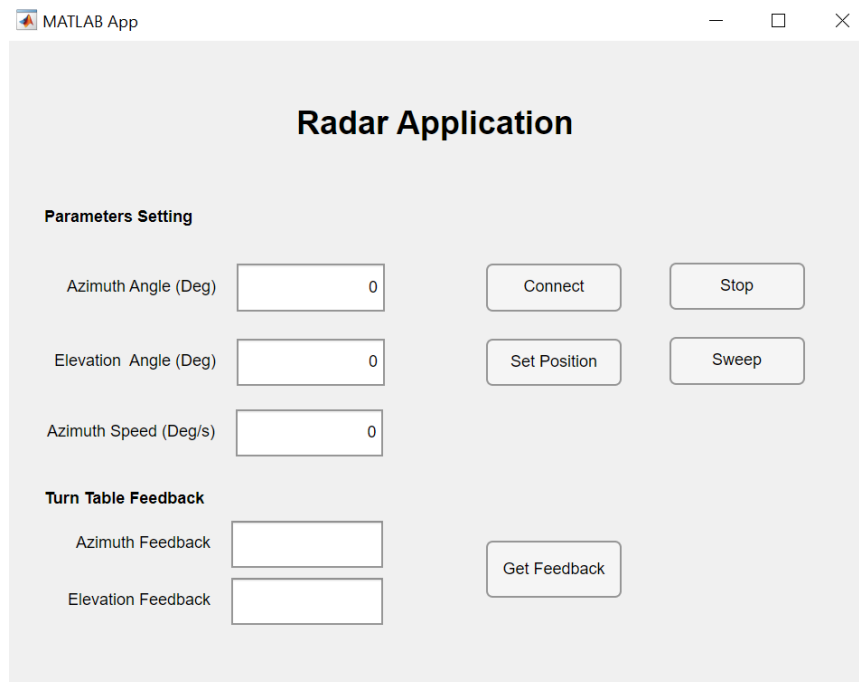
(ก)

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ข)

รูปที่ 8.3 (ก) ภาพรวมระบบควบคุมการทำงานของชุดหมุนสองแกน (ข) คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Mini PC) (INTEL NUC MINI PC 11PAHI7 Intel Core i7)



รูปที่ 8.4 ส่วนติดต่อผู้ใช้งานของระบบควบคุมการหมุนของระบบเรดาร์สองแกน (GUI: Graphic user interface)

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ในรูปที่ 8.4 แสดงส่วนติดต่อผู้ใช้งานในโปรแกรม MATLAB ของระบบควบคุมการหมุนของระบบเรดาร์สองแกน (GUI: Graphic user interface) โดยมีช่องสำหรับกรอกมุมกวาด (Azimuth) มีช่องสำหรับกรอกมุมยก (Elevation) และมีช่องสำหรับกรอกความเร็วของการหมุนมุมกวาด (Azimuth) มีปุ่มควบคุมการเชื่อมต่อของคอมพิวเตอร์และชุดหมุน ปุ่มหยุดการทำงาน ช่องแสดงมุมจริงที่มอเตอร์หมุนไปทั้งมุมกวาด (Azimuth) และมุมยก (Elevation) ดังแสดงในรูปที่ 8.4 จากการทดสอบการทำงานในเบื้องต้น พบว่าการทำงานเป็นไปอย่างที่ต้องการตามการออกแบบ

สำหรับภาพรวมการติดตั้งระบบเรดาร์เข้ากับระบบชุดหมุนสองแกนดังแสดงในรูปที่ 8.5 โดยที่ชุด RF Slip-Ring ถูกใช้เพื่อ รับ-ส่ง สัญญาณเรดาร์จากสายอากาศที่ตั้งอยู่บนชุดหมุนสองแกน และส่งไฟฟ้ากระแสตรงไปยังระบบเรดาร์ด้านบนของชุดหมุน อ้างอิงรายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1 ได้อธิบายถึงบล็อกไดอะแกรมของเรดาร์ FMCW โดยที่ภาค FM modulator นั้นทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่ modulated (FM) ที่มีความถี่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาขึ้นกับสัญญาณควบคุม สัญญาณควบคุมจะปรับความถี่ในย่าน X-band ให้ขึ้น-ลง ตามลักษณะของสัญญาณสามเหลี่ยมหรือเรียกได้ว่าเป็น modulation pattern และจะถูกส่งไปยังภาคส่งสัญญาณ FM (FM transmitter) ภาค FM transmitter ก็จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณและส่งสัญญาณ FM ผ่านสายอากาศส่งสัญญาณ และสัญญาณ FM ไปยังภาค mixer ด้วย และเมื่อสัญญาณเรดาร์กระทบวัตถุเป้าหมายจะเกิดการสะท้อนกลับทั้งนี้ขนาดความแรงสัญญาณสะท้อนกลับจะขึ้นกับขนาดของเป้าหมายและวัสดุของเป้าหมายด้วย โดยที่สัญญาณความถี่ที่รับได้จะมีการหน่วงเวลา ขึ้นกับระยะทางของวัตถุ เมื่อนำมาลบกันด้วยภาค RF mixer จะได้ความถี่สัญญาณ IF ซึ่งก็คือความถี่ย่านต่ำและนำสัญญาณ IF ไปคำนวณระยะทาง R ได้ โดยส่วนวงจรแปลง Analog ไปเป็นสัญญาณ digital ในโครงการนี้จะใช้เครื่องมือวัดสัญญาณในรูปแบบทางเวลา ออสซิลอสโคป รุ่น National Instruments USB-5133 High-Speed Digitizer w/ Extended Memory ดังแสดงในรูปที่ 8.5 และการต่อใช้งานรูปที่ 8.3 (ก) คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Mini PC) (INTEL NUC MINI PC 11PAHI7 Intel Core i7) ดังแสดงในรูปที่ 8.5

เมื่อได้สัญญาณ IF จากออสซิลอสโคปและจะนำไปคำนวณแกนระยะทางจากนั้นจะนำข้อมูลของโครนในแต่ละตำแหน่งมาเรียงต่อกันหรือที่เรียกว่า “สเปกโตรแกรม” สเปกโตรแกรมคือ ภาพที่แสดงถึงความแรงของสัญญาณในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ความถี่ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในรูปคลื่นเฉพาะ ไม่เพียงแต่จะเห็นว่ามีความถี่สูงหรือต่ำ แต่ยังเห็นระดับพลังงานที่แปรผันตามช่วงเวลาอีกด้วย สเปกโตรแกรมนั้นเป็นกราฟสองมิติโดยมีมิติที่สามแสดงด้วยสี เวลาวิ่งจากซ้าย (จุดที่เริ่มเก็บค่าสัญญาณ) ไปขวา (จุดที่เก็บค่าสัญญาณปัจจุบัน) ตามแนวแกนนอน แกนตั้งแสดงถึงระยะห่างระหว่างโครน กับเรดาร์ แอมพลิจูด (หรือพลังงานหรือ "ความแรงของสัญญาณ") ของความถี่เฉพาะ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งจะ

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

แสดงด้วยมิติที่สาม โดยมีสีน้ำเงินเข้มที่สัมพันธ์กับแอมพลิจูดต่ำและสีที่สว่างกว่าขึ้นเป็นสีแดงซึ่งสอดคล้องกับแอมพลิจูดที่แรงกว่ามากขึ้นเรื่อย ๆ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8.5 ภาพรวมการติดตั้งระบบเรดาร์เข้ากับระบบชุดหมุนสองแกน (ก) การติดตั้งสายอากาศและระบบเรดาร์ (ข) การเชื่อมต่อเครื่องมือวัดสัญญาณในรูปแบบทางเวลาออสซิลอสโคปเข้ากับคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Mini PC) (INTEL NUC MINI PC 11PAHI7 Intel Core i7) (ค) ออสซิลอสโคป รุ่น National Instruments USB-5133 High-Speed Digitizer w/ Extended Memory

## บทที่ 9

### รายงานผลการทดสอบการตรวจจับวัตถุ (เป้าหมายสมมติ) โดยใช้เรดาร์ตรวจจับโดรน ที่ได้จากงานวิจัยและพัฒนา

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนโดย ในหัวข้อนี้วัตถุ (เป้าหมายสมมติ) จะใช้โดรนการเกษตรเป็นเป้าหมายจริง สถานที่ใช้ทดสอบมี 2 ที่คือ 1. ทดสอบในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน 2. ทดสอบบนดาดฟ้าตึก 81 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การทดสอบในครั้งนี้ใช้สายอากาศพาราโบลาทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเนื่องจากการตรวจจับวัตถุซึ่งในที่นี้เป้าหมายสมมติจะใช้โดรนจริง แต่การทดสอบจะยังไม่ได้พิจารณาระยะทางไกลของโดรน การทดสอบการตรวจจับโดรนในระยะไกลจะแสดงการทดสอบในสนามฟุตบอลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และจะรายงานผลในรายงานความก้าวหน้าฉบับถัดไป

#### 9.1 การทดสอบการตรวจจับวัตถุในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลลัพธ์ของการทดลองระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องความถี่ 10 GHz การทดลองจะอยู่ในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน โดยใช้เรดาร์ตรวจจับเป้าหมายสมมติประกอบไปด้วยแผ่นเพลตขนาด กว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และโดรนการเกษตร ดังนั้นการตั้งค่าเป้าหมายในห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน ได้นำเสนอแบ่งออกเป็น 7 กรณีดังต่อไปนี้

**กรณีที่ 1** เป้าหมาย คือผนังห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน โดยให้เรดาร์วางห่างจากตัวผนังเป็นระยะ 5 เมตรตามรูปที่ 9.1 เพื่อเก็บสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศ

**กรณีที่ 2** เป้าหมาย คือแท่นติดตั้งเป้าหมายวัสดุท่อ PVC ขนาดกว้าง 95 เซนติเมตร และสูง 170 เซนติเมตร ตามรูปที่ 9.2 (ก) โดยวางเรดาร์ห่างจากแท่นติดตั้งเป้าหมายเป็นระยะ 4.5 เมตรตามรูปที่ 9.2 (ข)

**กรณีที่ 3** เป้าหมาย คือแผ่นโลหะขนาด กว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร ติดตั้งในแนวนอนอยู่บนแท่นติดตั้งเป้าหมายตามรูปที่ 9.3 (ก) โดยวางเรดาร์ห่างจากจากวัตถุเป้าหมายเป็นระยะ 4.5 เมตร ตามรูปที่ 9.3 (ข)

**กรณีที่ 4** เป้าหมาย คือแผ่นโลหะขนาด กว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร ติดตั้งในแนวตั้งอยู่บนแท่นติดตั้งเป้าหมายตามรูปที่ 9.4 (ก) โดยวางเรดาร์ห่างจากจากวัตถุเป้าหมายเป็นระยะ 4.5 เมตร ตามรูปที่ 9.4 (ข)

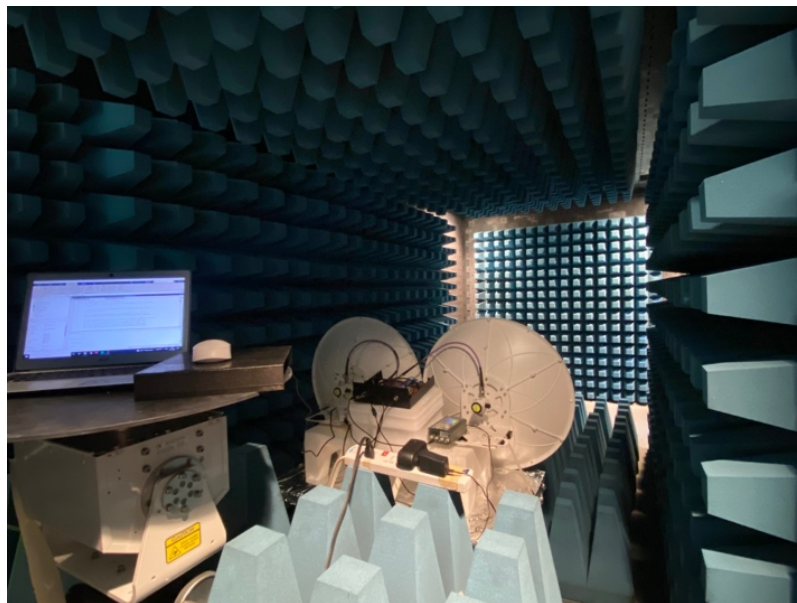
## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

**กรณีศึกษาที่ 5** เป้าหมาย คือโดรนการเกษตรขนาด กว้าง 135 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตร วางในแนวขนานอยู่บนโต๊ะที่มีความสูง 70 เซนติเมตร ตามรูปที่ 9.5 (ก) โดยวางเรดาร์ห่างจากจากวัตถุเป้าหมายเป็นระยะ 4.5 เมตร ตามรูปที่ 9.5 (ข)

**กรณีศึกษาที่ 6** เป้าหมาย คือโดรนการเกษตรขนาด กว้าง 135 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตร วางในแนวตั้งหันด้านข้างของโดรนเข้าหาเรดาร์อยู่บนโต๊ะที่มีความสูง 70 เซนติเมตร ตามรูปที่ 9.6 (ก) โดยวางเรดาร์ห่างจากจากวัตถุเป้าหมายเป็นระยะ 4.5 เมตร ตามรูปที่ 9.6 (ข)

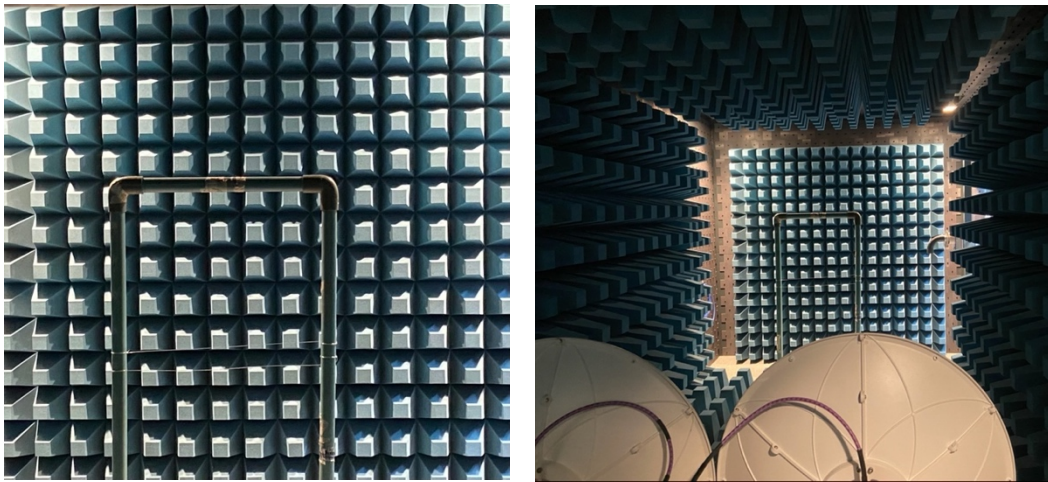
**กรณีศึกษาที่ 7** เป้าหมาย คือโดรนการเกษตรขนาด กว้าง 135 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตร วางในแนวตั้งหันด้านใต้ของโดรนเข้าหาเรดาร์อยู่บนโต๊ะที่มีความสูง 70 เซนติเมตร ตามรูปที่ 9.7 (ก) โดยวางเรดาร์ห่างจากจากวัตถุเป้าหมายเป็นระยะ 4.5 เมตร ตามรูปที่ 9.7 (ข)

โดยการตั้งค่าการทดลองสำหรับการตรวจจับเป้าหมายที่มีวัสดุแต่ละชนิดและมีขนาดที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดลองจะแสดงให้เห็นถึงค่าแอมพลิจูดที่แตกต่างกันเกิดจากขนาดและชนิดของวัสดุทำให้ค่า RCS ไม่เท่ากัน โดยการติดตั้งวัสดุต่างๆ



**รูปที่ 9.1** การตั้งค่าการตรวจจับผนังของห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน

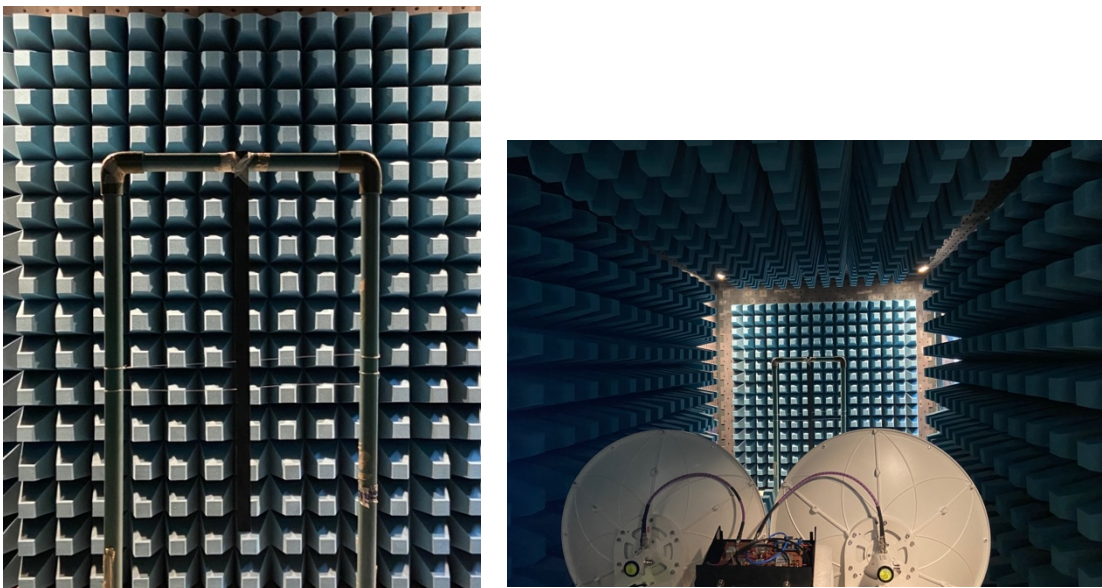




(ก)

(ข)

รูปที่ 9.2 การตั้งค่าการตรวจจับแท่นติดตั้งเป้าหมายวัสดุท่อ PVC (ก) แท่นติดตั้งเป้าหมาย (ข) แสดงตำแหน่งของเรดาร์และวัตถุเป้าหมาย

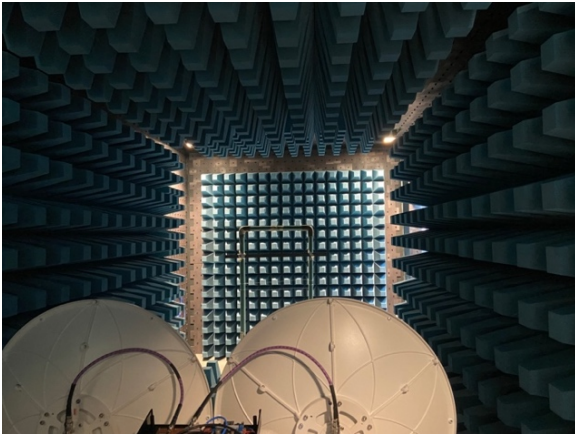


(ก)

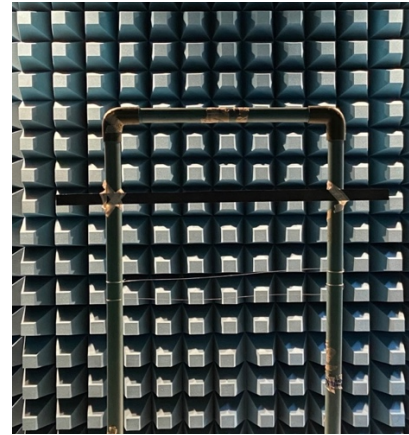
(ข)

รูปที่ 9.3 การตั้งค่าการตรวจจับแผ่นโลหะบนแท่นติดตั้งเป้าหมายวัสดุท่อ PVC (ก) แผ่นเหล็กติดตั้งในแนวตั้งบนแท่นติดตั้ง (ข) แสดงตำแหน่งของเรดาร์และวัตถุเป้าหมาย

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ก)

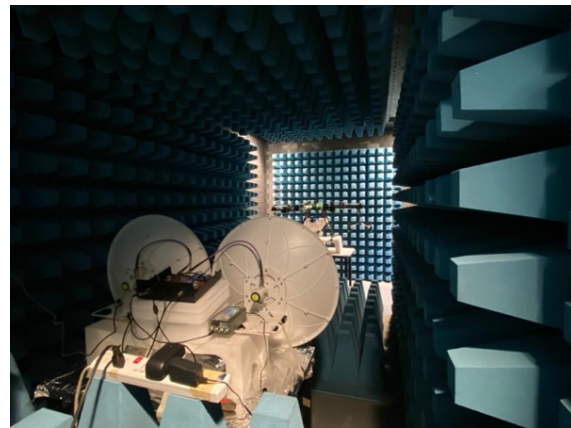


(ข)

รูปที่ 9.4 การตั้งค่าการตรวจจับแผ่นโลหะบนแท่นติดตั้งเป้าหมายวัสดุท่อ PVC (ก) แผ่นเหล็กติดตั้งในแนวนอนบนแท่นติดตั้ง (ข) แสดงตำแหน่งของเรดาร์และวัตถุเป้าหมาย



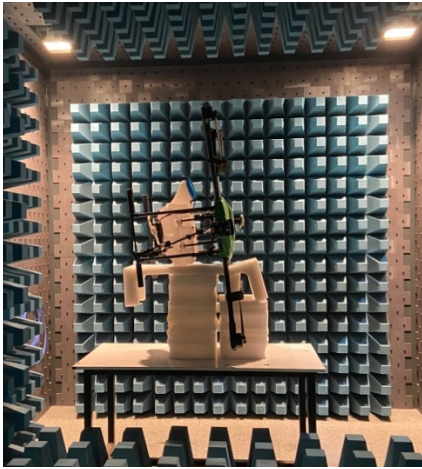
(ก)



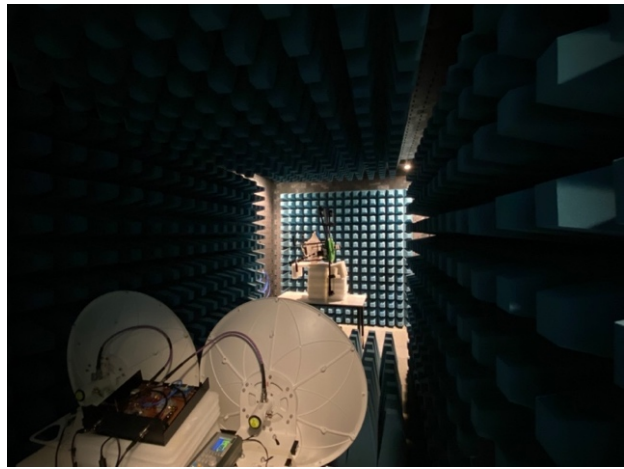
(ข)

รูปที่ 9.5 การตั้งค่าการตรวจจับโดรนการเกษตร (ก) โดรนการเกษตรวางในแนวนอนบนโต๊ะ (ข) แสดงตำแหน่งของเรดาร์และวัตถุเป้าหมาย

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

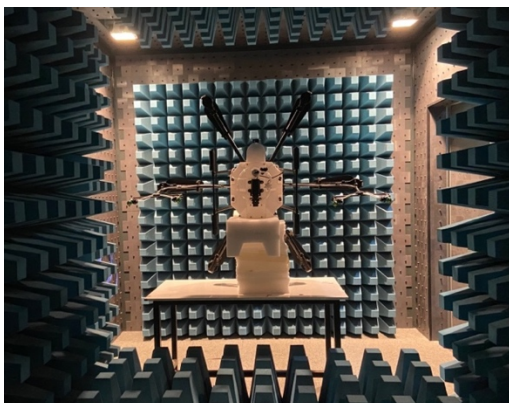


(ก)

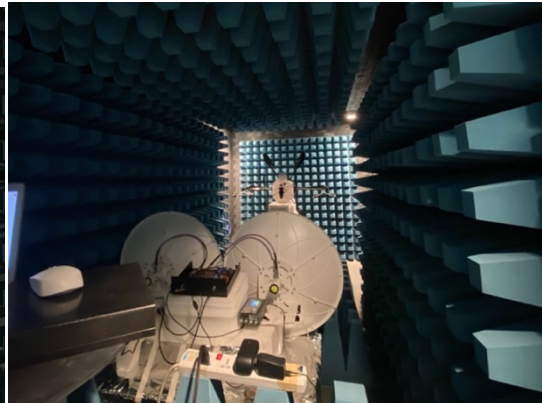


(ข)

รูปที่ 9.6 การตั้งค่าการตรวจจับโดรนการเกษตร (ก) โดรนการเกษตรวางในแนวตั้งบนโต๊ะ (ข) แสดงตำแหน่งของเรดาร์และวัตถุเป้าหมาย



(ก)

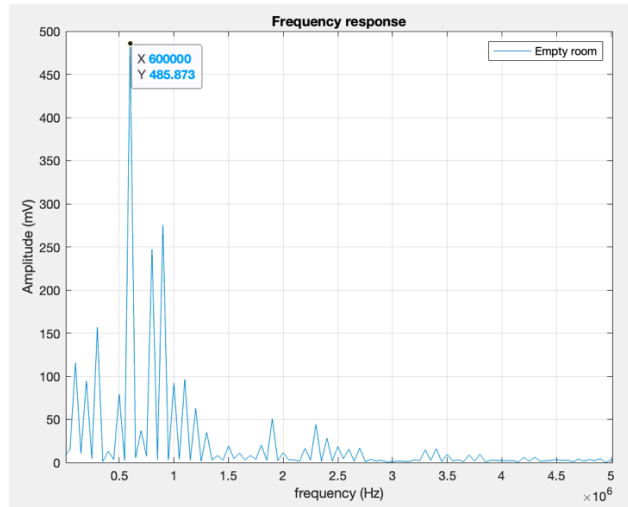


(ข)

รูปที่ 9.7 การตั้งค่าการตรวจจับโดรนการเกษตร (ก) โดรนการเกษตรวางในแนวตั้งหันด้านล่างของโดรนเข้าหาเรดาร์ (ข) แสดงตำแหน่งของเรดาร์และวัตถุเป้าหมาย

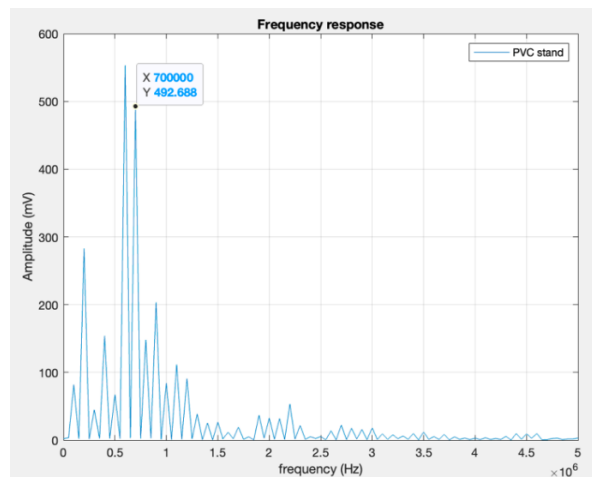
จากผลการตรวจจับผนังของห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อนด้วยเรดาร์คลื่นต่อเนื่องตามรูปที่ 1 แต่เนื่องจากไม่เกิดคลื่นสะท้อนจากผนังของห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน สัญญาณปีที่เกิดขึ้นเกิดมาจากสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศ (Mutual coupling) สัญญาณปีที่เกิดขึ้นเกิดตามรูปที่ 9.8 จะเห็นว่าสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศมีความถี่อยู่ที่ 600 kHz และแอมพลิจูดเท่ากับ 485.873 mV

## การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 9.8 สัญญาณพีทในโดเมนความถี่จากการตรวจจับผนังของห้องปฏิบัติการไร้คลื่นสะท้อน

ทำการตรวจจับแท่นติดตั้งเป้าหมายวัสดุ PVC ด้วยเรดาร์คลื่นต่อเนื่องตามรูปที่ 2 โดยตั้งค่าให้เป้าหมายอยู่ห่างจากเรดาร์ 4.5 m สัญญาณพีทในโดเมนความถี่ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามรูปที่ 9.9 สามารถหาความถี่พีทได้จากคำนวณระยะทางของวัตถุเป้าหมายเทียบกับสัญญาณในโดเมนความถี่ตามสมการที่ 7.11 ทำให้ได้ความถี่พีทเท่ากับ 700 kHz และมีแอมพลิจูดเท่ากับ 492.688 mV

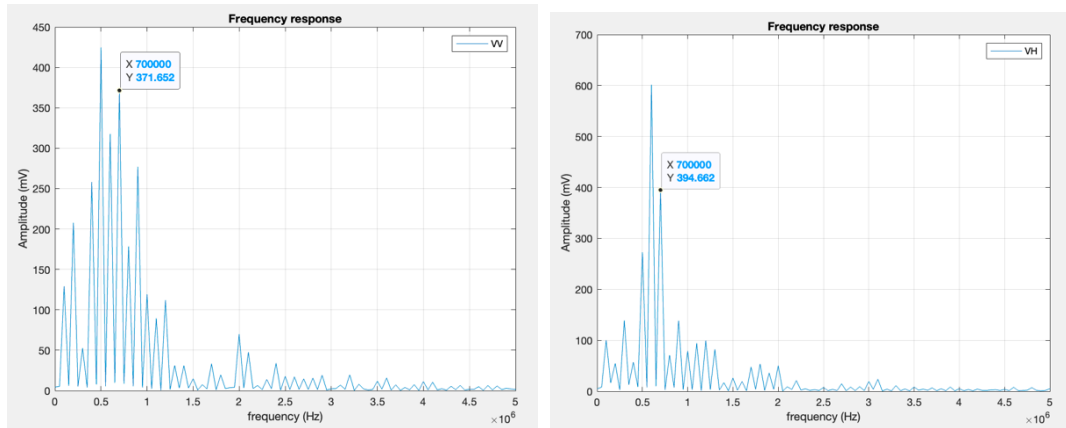


รูปที่ 9.9 สัญญาณพีทในโดเมนความถี่จากการตรวจจับแท่นติดตั้งเป้าหมาย

หลังจากนั้นติดตั้งแผ่นโลหะขนาด กว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร บนแท่นติดตั้งวัตถุวัสดุ PVC เพื่อดูความต่างของเป้าหมายที่มีโพลาริเซชันที่ต่างกัน (polarization) โดยจะติดตั้งแผ่นโลหะใน 2 กรณีด้วยกันคือ 1. ติดตั้งในแนวตั้ง (VV) 2. ติดตั้งในแนวนอน (VH) ผลจากการ

## การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

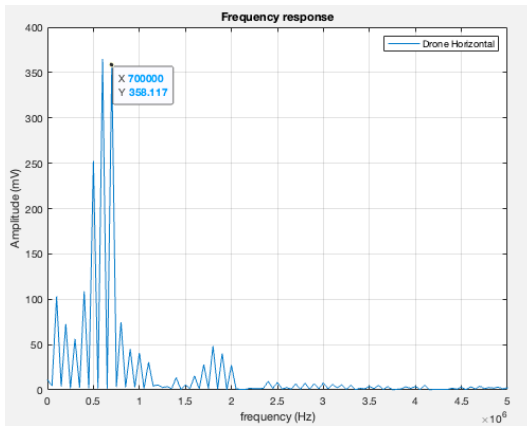
ทดสอบวัตถุเป้าหมายที่เป็นแผ่นโลหะเป็นไปตามรูปที่ 9.10 จากการวิเคราะห์พบว่าแอมพลิจูดของสัญญาณในกรณีของ VH นั้นมีมากกว่ากรณีของ WV เล็กน้อย



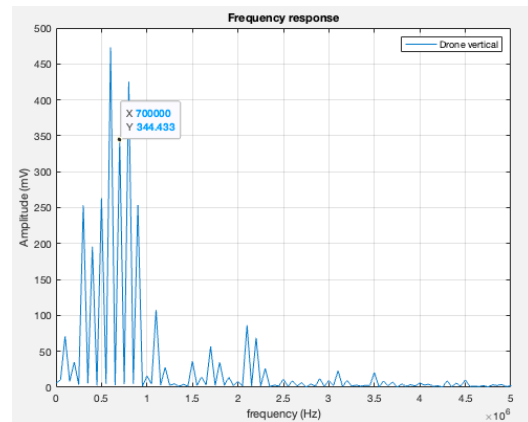
รูปที่ 9.10 สัญญาณบิตในโดเมนความถี่จากการตรวจจับแผ่นโลหะ (ก) ติดตั้งแผ่นโลหะในแนวตั้ง (ข) ติดตั้งแผ่นโลหะในแนวนอน

ทำการเปลี่ยนวัตถุเป้าหมายจากแผ่นโลหะขนาด กว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร เป็นโดรนการเกษตรที่วางบนโต๊ะสูงจากพื้น 70 เซนติเมตร โดยแบ่งการวางโดรนเป็น 3 กรณีด้วยกันคือ 1. วางในแนวนอนอยู่บนโต๊ะ 2. วางในแนวตั้งหันด้านข้างของโดรนเข้าหาเรดาร์ 3. วางในแนวตั้งหันด้านใต้ของโดรนเข้าหาเรดาร์ สัญญาณบิตในโดเมนความถี่ที่ได้จากการตรวจจับโดรน ที่ได้จากการตรวจจับโดรนการเกษตรทั้ง 3 กรณีเป็นไปตามรูปที่ 9.11 จากผลการทดสอบพบว่าโดรนในแนวนอนจะมีแอมพลิจูดที่ความถี่เท่ากับ 700 kHz เป็น 358.117 mV ตามรูปที่ 9.11 (ก) ซึ่งมากกว่าโดรนที่วางในแนวตั้งมีแอมพลิจูดที่ความถี่เท่ากับ 700 kHz เป็น 344.433 mV ตามรูปที่ 9.11 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบตรวจจับแผ่นโลหะที่ติดตั้งแผ่นโลหะในแนวนอนจะมีแอมพลิจูดสูงกว่าในแนวตั้ง ส่วนการตรวจจับโดรนโดยวางโดรนในแนวตั้งและหันด้านใต้ของโดรนเข้าหาเรดาร์จะมีแอมพลิจูดสูงสุดคือ 450.272 mV ตามรูปที่ 9.11 (ค)

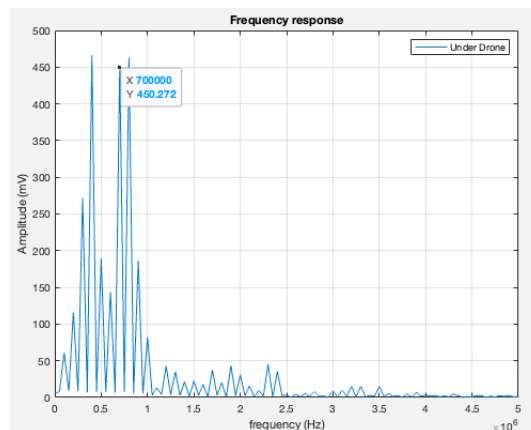
## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 9.11 สัญญาณบัพทในโดเมนความถี่จากการตรวจจับโดรนการเกษตร (ก) วางในแนวนอนอยู่บนโต๊ะ (ข) วางในแนวตั้งหันด้านข้างของโดรนเข้าหาเรดาร์ (ค) วางในแนวตั้งหันด้านใต้ของโดรนเข้าหาเรดาร์

### 9.2 การทดสอบการตรวจจับวัตถุขาดฟ้าตีวิศวกรรมศาสตร์ KMUTNB

ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบการตรวจจับเป้าหมายสมมติของเรดาร์ตรวจจับโดรนสถานที่ทดสอบคือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (KMUTNB) ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ดาดฟ้าตีวิศวกรรมศาสตร์ดังรูปที่ 9.12 และดังแสดงภาพจริงในรูปที่ 9.13 โดยเป้าหมายสมมติในการทดสอบคือโดรนการเกษตรตามรูปที่ 9.14 มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) แบบอากาศยาน/ยี่ห้อ: BA5L
- 2) จำนวนเครื่องยนต์/จำนวนใบพัด: 6 ใบพัด ขนาดโดยประมาณ 80 cm

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

- 3) หมายเลขเครื่อง: AIR20190027BA5LTH
- 4) น้ำหนัก(ก.ก): 2.8 kg
- 5) เพดานบินสูงสุด : 200 m
- 6) คลื่นความถี่ที่ใช้ควบคุม: 2.4/5.8 GHz



รูปที่ 9.12 พื้นที่ใช้สำหรับการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนและพิกัดของสถานที่ทดสอบ



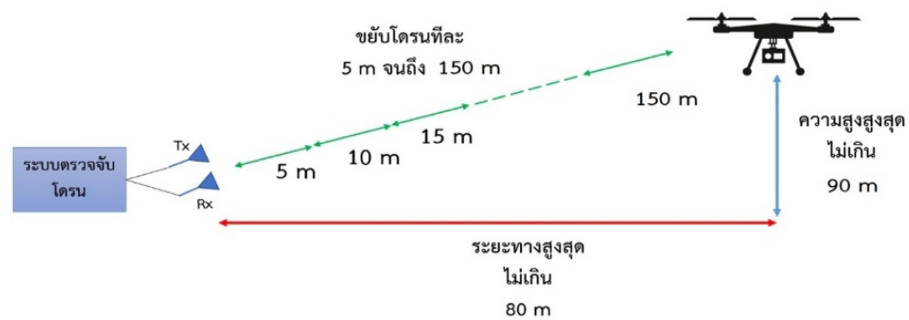
รูปที่ 9.13 สถานที่จริงของตึกฟ้าตีวิศวกรรมศาสตร์สำหรับการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน



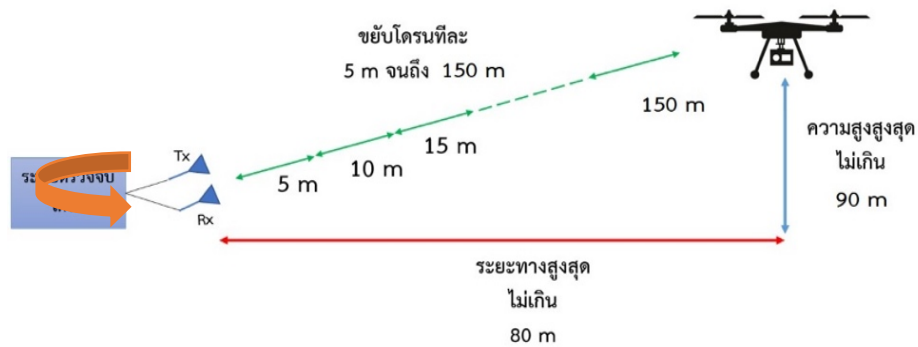
รูปที่ 9.14 โดรนการเกษตรที่ใช้ในการทดสอบ

### 9.2.1 ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์ตรวจโดรน

ขั้นตอนการทดสอบของการบินโดรนได้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การทดสอบแบบแนวเฉียง โดยไม่หมุนสายอากาศ โดยมีมุมยก 50 องศา วัดจากพื้น ส่วนโดรนจะบินไต่ระดับไปเรื่อย ๆ จากพื้นดินขึ้นไปจนถึง 150 m เป็นไปตามรูปที่ 9.15 และการทดสอบแบบแนวเฉียงโดยเปิดใช้งานชุด หมุนหมุนสายอากาศ ส่วนโดรนจะบินไต่ระดับไปเรื่อย ๆ จากพื้นดินขึ้นไปจนถึง 150 m เป็นไปตามรูปที่ 9.16 ภาพบรรยากาศการทดสอบแสดงดังรูปที่ 9.17



รูปที่ 9.15 ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในกรณีที่เรดาร์ไม่หมุน



รูปที่ 9.16 ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในกรณีที่เรดาร์หมุน



การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ก)



(ข)

รูปที่ 9.17 ภาพการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน (ก) ภาพการตั้งค่าก่อนการบินทดสอบโดรน  
(ข) ภาพขณะบินโดรนทดสอบ

## 9.2.2 ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีแรกคือ ไม่เปิดการใช้งานของชุดหมุนโดยให้สายอากาศอยู่นิ่งและโดรนค่อยบินไต่ระดับขึ้นจากพื้นดินขึ้นไปจนถึงมีระยะห่างจากตัวเรดาร์ 150 m สัญญาณก่อนผ่านการประมวลผลแสดงในรูปแบบภาพสเปกโตรแกรมตามรูปที่ 9.18 จะเห็นว่าจากแผนภาพสเปกโตรแกรมสามารถบอกถึงเส้นทางการบินของโดรนแต่ยากต่อการระบุตำแหน่งที่แม่นยำ

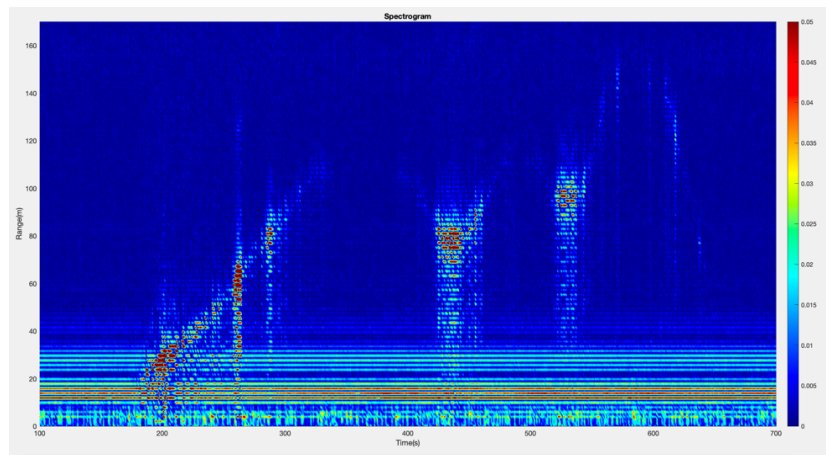
[สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008]

122

แบบ กทปส. ME-003

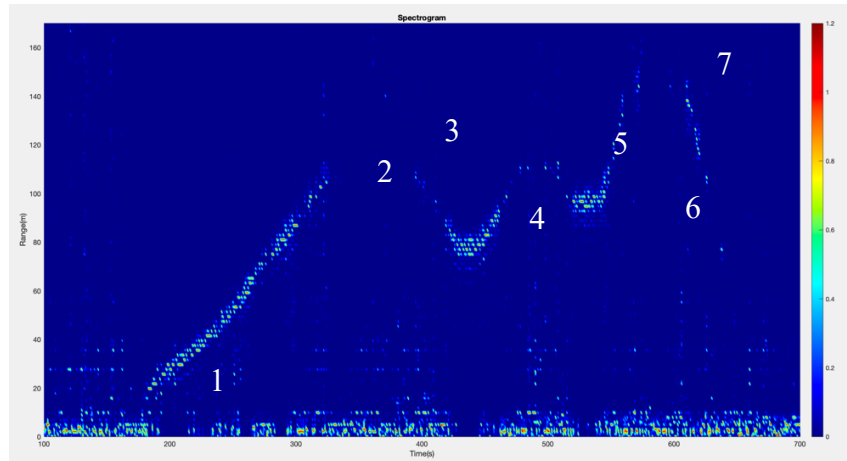
## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ของโดรนเพราะสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศและสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่เป้าหมาย อย่างไรก็ตาม รูปที่ 9.19 แสดงถึงแผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณหลังการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีไม่เปิดใช้ระบบหมุนสายอากาศ เมื่อทำการประมวลผลสัญญาณด้วยวิธีการลบผลกระทบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศและนอร์มัลไรเซชันตามบทที่ 7 พบว่าแผนภาพสเปกโตรแกรมสามารถบอกเส้นทางการบินของโดรนได้ชัดเจนพร้อมทั้งระบุตำแหน่งของโดรนได้แม่นยำมากขึ้นตามรูปที่ 9.19 โดยหมายเลข 1 คือระยะของโดรนที่กำลังบินขึ้น เมื่อแกนตั้งคือระยะทางและซึ่งแกนนอนคือค่าเวลาที่ตรวจจับ ซึ่งสามารถสรุปเส้นทางการบินของโดรนได้ตามตารางที่ 9.1 จะมีบางช่วงเวลาที่ไม่สามารถระบุตำแหน่งของโดรนตัวอย่างเช่นตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 9.19 เป็นเพราะโดรนไม่ได้อยู่ภายใต้การตรวจจับของเรดาร์ และระยะทางไกลขึ้นจะบังคับโดรนได้ยากขึ้น และเนื่องจากต้องการให้โดรนอยู่ในองศาการตรวจจับที่ถูกต้องจึงมีการบังคับโดรนขึ้นและลงเป็นช่วงๆทำให้ผลการตรวจจับในจุดที่ 4 และจุดที่ 6 มีระยะน้อยกว่าจุดที่ 5 และจุดที่ 7 เนื่องจากโดรนมีการบินขึ้นลงเพื่อทดสอบ



รูปที่ 9.18 แผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณก่อนการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีไม่เปิดใช้ระบบหมุนสายอากาศ

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 9.19 แผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณหลังการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีไม่เปิดใช้ระบบหมุนสายอากาศ

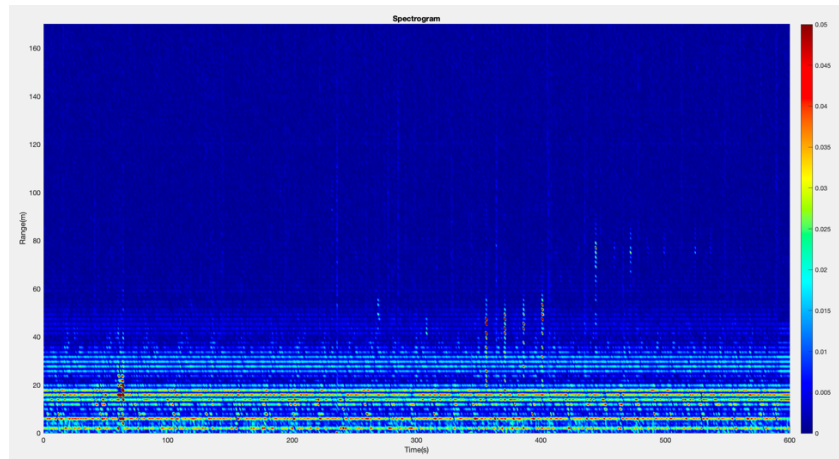
ผลการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีที่ 2 คือ เปิดการใช้งานชุดหมุนสายอากาศอยู่นิ่ง และโดรน ค่อย ๆ บินไต่ระดับขึ้นจากพื้นดินขึ้นไปจนถึงมีระยะห่างจากตัวเรดาร์ 150 m สัญญาณการตรวจจับโดรนก่อนการประมวลผลแสดงในแผนภาพสเปกโตรแกรมตามรูปที่ 9.20 ในกรณีนี้การระบุตำแหน่งและเส้นทางการบินของโดรนค่อนข้างยากเพราะสายอากาศหมุนทำให้สัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศรวมถึงอากาศที่เรดาร์ตรวจจับได้เปลี่ยนไปเรื่อย ๆ หลังจากการประมวลสัญญาณด้วยการลบผลกระทบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศและนอร์มัลไรเซชัน ทำให้การระบุตำแหน่งขณะที่โดรนมีระยะห่างจากเรดาร์มากกว่า 40 m ทำได้ดีมากขึ้นดังแสดงในแผนภาพสเปกโตรแกรมตามรูปที่ 9.21 ซึ่งสามารถสรุปเส้นทางการบินของโดรนได้ตามตารางที่ 9.2 จะมีบางช่วงเวลาที่ไม่สามารถระบุตำแหน่งของโดรนยกตัวเช่นตำแหน่งที่ 2 ในรูปที่ 9.21 เป็นเพราะโดรนไม่ได้อยู่อยู่รัศมีการตรวจจับของเรดาร์

ตารางที่ 9.1 ระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์ที่เรดาร์โดรนตรวจจับได้ในกรณีไม่เปิดใช้งานระบบหมุน

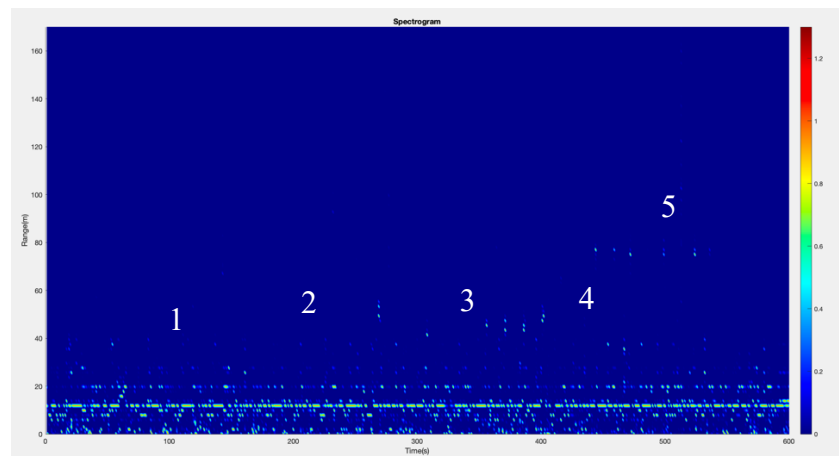
ตำแหน่ง	ระยะทาง	ความถี่ IF	ระยะที่เรดาร์ตรวจจับ
1	20 m	2 MHz	21.43 m
2	100 m	10 MHz	102.04 m
3	Not detected	Not detected	Not detected

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

4	80 m	8 MHz	81.63 m
5	110 m	11 MHz	112.24 m
6	90 m	9 MHz	91.84 m
7	150 m	15 MHz	152.03 m



รูปที่ 9.20 แผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณก่อนการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีเปิดใช้ระบบหมุนสายอากาศ



รูปที่ 9.21 แผนภาพสเปกโตรแกรมสัญญาณหลังการประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีเปิดใช้ระบบหมุนสายอากาศ

การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ตารางที่ 9.2 ระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์ที่เรดาร์โดรนตรวจจับได้ในกรณีเปิดใช้งานระบบหมุน

ตำแหน่ง	ระยะทาง	ความถี่ IF	ระยะที่เรดาร์ตรวจจับ
1	40 m	4 MHz	40.54 m
2	Not detected	Not detected	Not detected
3	50 m	5 MHz	50.68 m
4	45 m	4.5 MHz	45.61 m
5	80 m	8 MHz	81.08 m

# รายงานความก้าวหน้าฉบับที่ 4

## บทที่ 10

### รายงานผลการทดสอบและสาธิตระบบเรดาร์ที่พัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจจับโดรน

จากบทที่ 9 จะเห็นว่าการทดสอบเรดาร์ในขณะที่เรดาร์ทำการหมุนเพื่อสแกนหาโดรนนั้น ควรทดสอบในสถานที่โล่ง การทดสอบประสิทธิภาพของเรดาร์ตรวจจับโดรน ที่มิวิจัยได้เลือกสถานที่ทดสอบเป็นที่สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เพราะมีสภาพแวดล้อมที่เป็นที่โล่งและกว้างเพียงพอที่จะทดสอบประสิทธิภาพของเรดาร์โดยสนามมีเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวแวง 128.5 เมตร

โดยรูปที่ 1 แสดงตำแหน่งของจีพีเอสบนพื้นที่ในการทดสอบและรูปที่ 2 แสดงสถานที่จริงของสนามกีฬามหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ทดสอบเรดาร์ในโหมดการทำงานแบบหมุนโดยใช้สายอากาศแบบ Horn antenna เนื่องจากมี beam angle ที่กว้างกว่าสายอากาศแบบ Parabolic reflector antenna ทำให้เรดาร์ตรวจจับโดรนได้แม่นยำขึ้นในโหมดการหมุน ซึ่งจะติดตั้งเรดาร์ไว้บริเวณกลางสนามกีฬาตามรูปที่ 10.3 โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 กรณี คือ

1. โดรนเพิ่มระดับความสูง
2. โดรนบินตามเรดาร์ที่กำลังหมุน

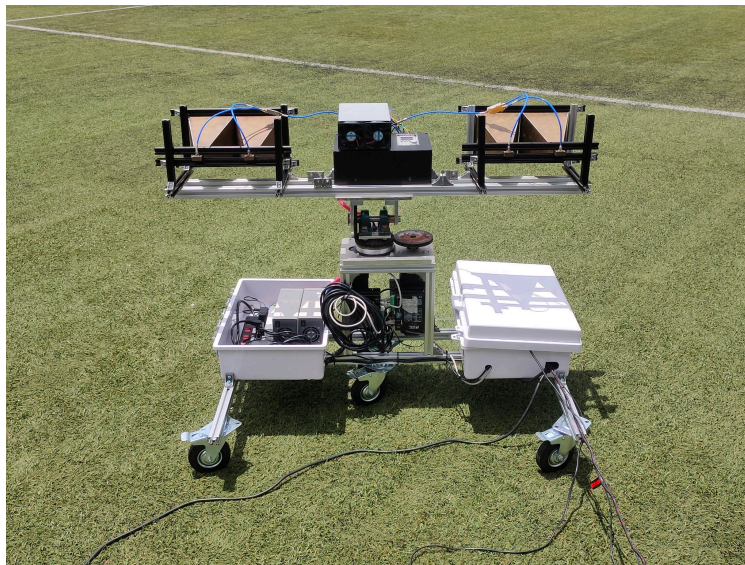


รูปที่ 10.1 ตำแหน่งจีพีเอสบนพื้นที่ใช้ในการทดสอบ สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 10.2 สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รูปที่ 10.3 เรดาร์ตรวจจับโดรนโดยใช้สายอากาศ Horn antenna

โดรนที่ใช้ในการทดสอบคือโดรนการเกษตรตามรูปที่ 10.4 มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. แบบอากาศยาน/ยี่ห่อ: BA5L
2. จำนวนเครื่องยนต์/จำนวนใบพัด: 6 ใบพัด ขนาดโดยประมาณ 80 cm
3. หมายเลขเครื่อง: AIR20190027BA5LTH
4. น้ำหนัก(ก.ก): 2.8 kg

[สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008]



การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

5. เพดานบินสูงสุด : 200 m
6. คลื่นความถี่ที่ใช้ควบคุม: 2.4/5.8 GHz



รูปที่ 10.4 โดรนการเกษตรใช้ในการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน

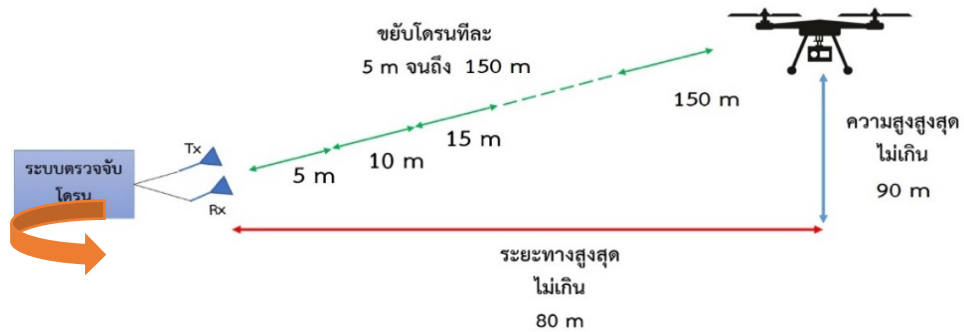
ในการทดสอบจะใช้กล้องวัดระยะเพื่อเป็นการเปรียบเทียบระยะที่เรดาร์วัดได้กับกล้องวัดระยะเพื่อประเมินความแม่นยำของเรดาร์ในการบอกระยะทาง โดยกล้องที่เลือกใช้มีชื่อรุ่นว่า **SNDWAY SW-600A Laser Rangefinder** คุณสมบัติของกล้องสามารถวัดระยะทางได้ไกลสูงสุด 600 เมตรและมี resolution อยู่ที่  $\pm 1$  m



รูปที่ 10.5 กล้องวัดระยะ

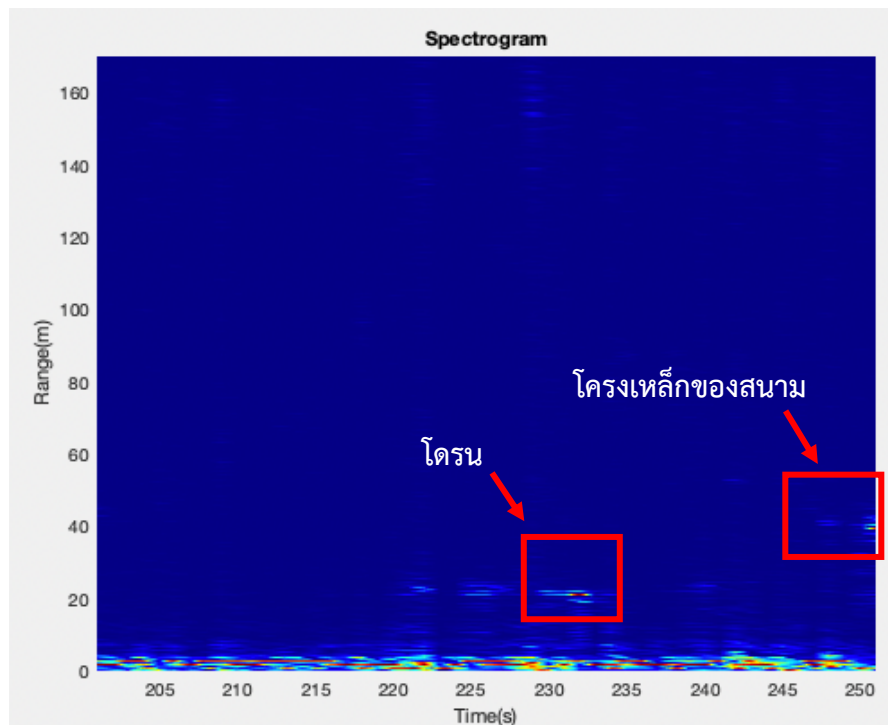
### 10.1 ทดสอบเรดาร์โดยเพิ่มระดับความสูงของโดรน

จากรูปที่ 10.2 จะเห็นว่าสนามกีฬาที่มีโครงเหล็กล้อมรอบสนามอยู่ ดังนั้นการทดสอบเรดาร์ในแบบหมุนจะตั้งค่าให้มุม elevation อยู่ที่ 60 องศาเพื่อให้เรดาร์ไม่เจอโครงเหล็ก รูปแบบในการทดสอบจะเป็นไปตามรูปที่ 10.6 โดรนจะค่อย ๆ ขยับเพดานบินสูงขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละรอบที่เรดาร์หมุน

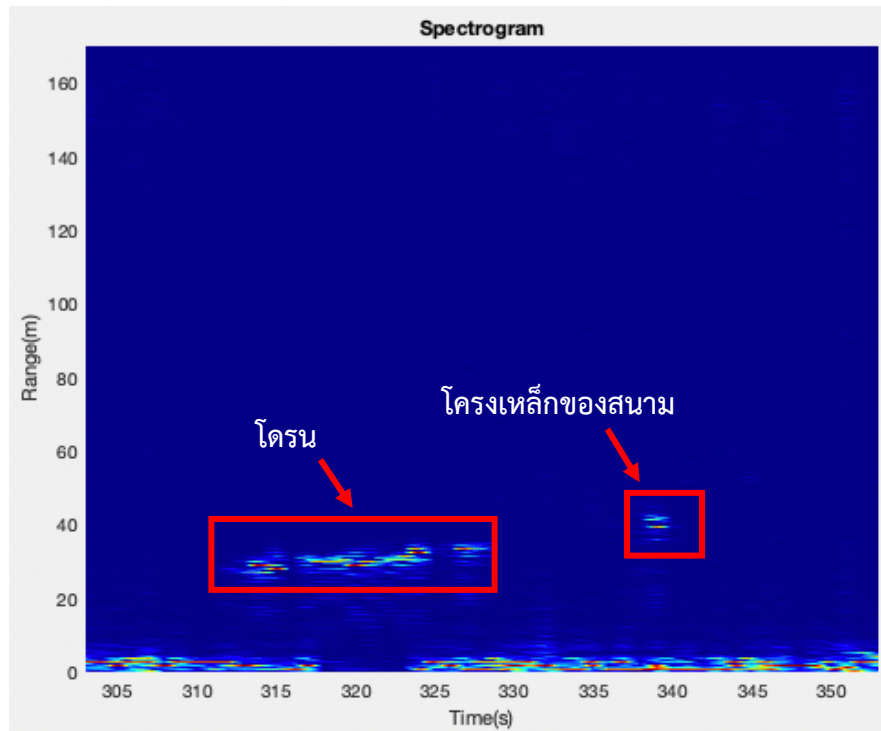


รูปที่ 10.6 ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์โดรนที่กำลังหมุนโดยให้โดรนเพิ่มระดับความสูงขึ้นไปเรื่อยๆ

ในรอบที่ 1 เรดาร์สามารถตรวจจับโดรนได้ที่ระยะ 21 เมตร ตามรูปที่ 10.7 แต่เรดาร์ยังสามารถตรวจจับเหล็กได้ที่ระยะ 40 เมตร จากนั้นเพิ่มระยะของโดรนให้สูงขึ้นในรอบที่ 2 spectrogram ที่ได้จากการทดสอบเป็นไปตามรูปที่ 10.8



รูปที่ 10.7 ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 1

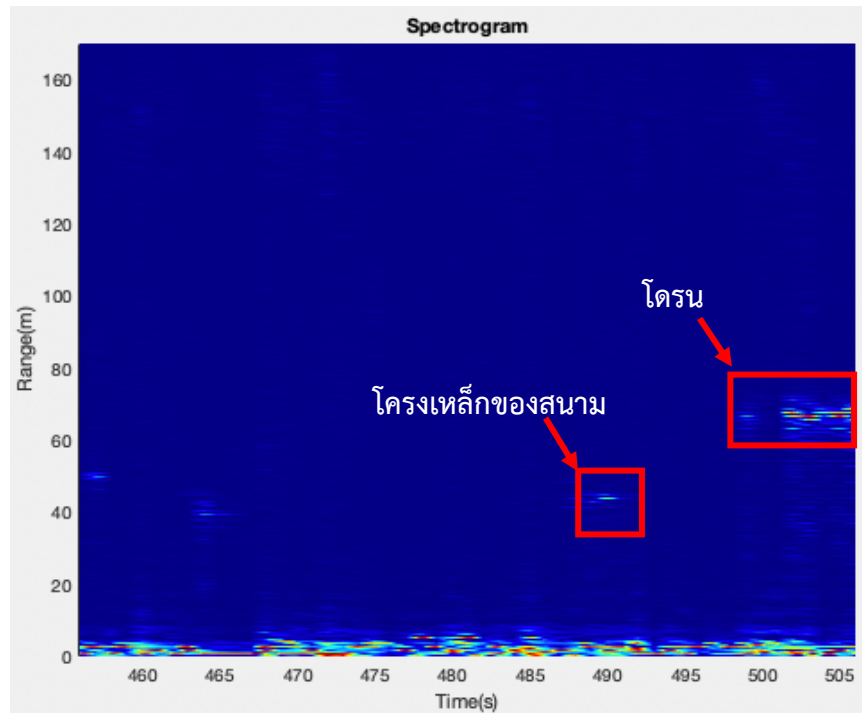


รูปที่ 10.8 ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 2

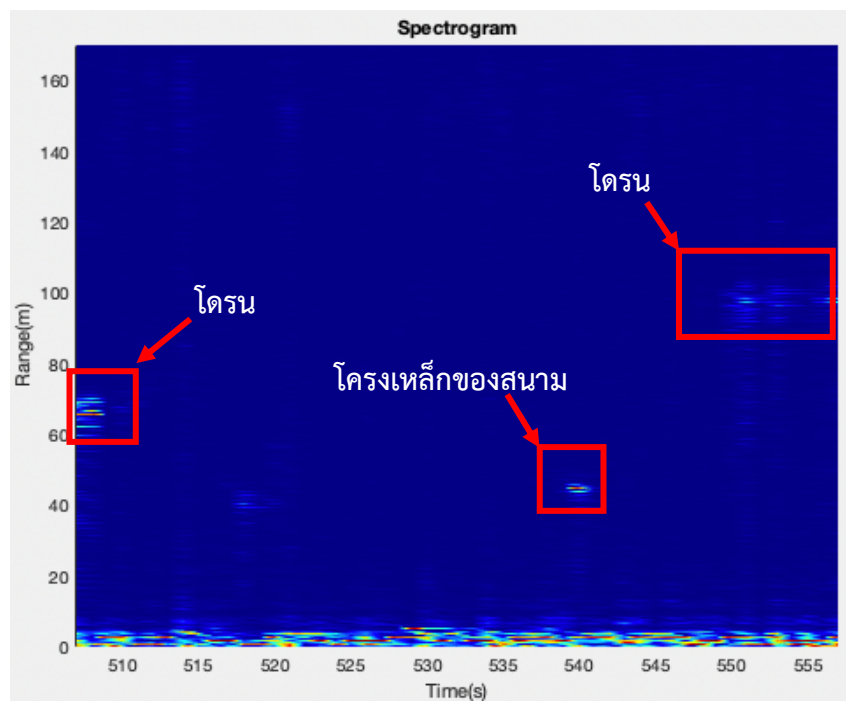
ในรอบที่ 2 เจอโดรนค่อยเพิ่มความสูงจากประมาณ 30 เมตรขึ้นไปและจาก spectrogram ในรูปที่ 10.8 ยังเจอโครงเหล็กของสนามที่ระยะ 40 เมตร ในรอบที่ 3 จะทำการเพิ่มระยะของโดรนขึ้นไปอีกครั้ง ซึ่งได้ spectrogram เป็นไปตามรูปที่ 10.9

ในรอบที่ 3 เจอโดรนอยู่ที่ระยะประมาณ 65 เมตรจากเรดาร์และ spectrogram ในรูปที่ 10.9 ยังเจอโครงเหล็กของสนามที่ระยะ 40 เมตร ในรอบที่ 4 จะทำการเพิ่มระยะของโดรนขึ้นไปอีกครั้ง ซึ่งได้ spectrogram เป็นไปตามรูปที่ 10.10

การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

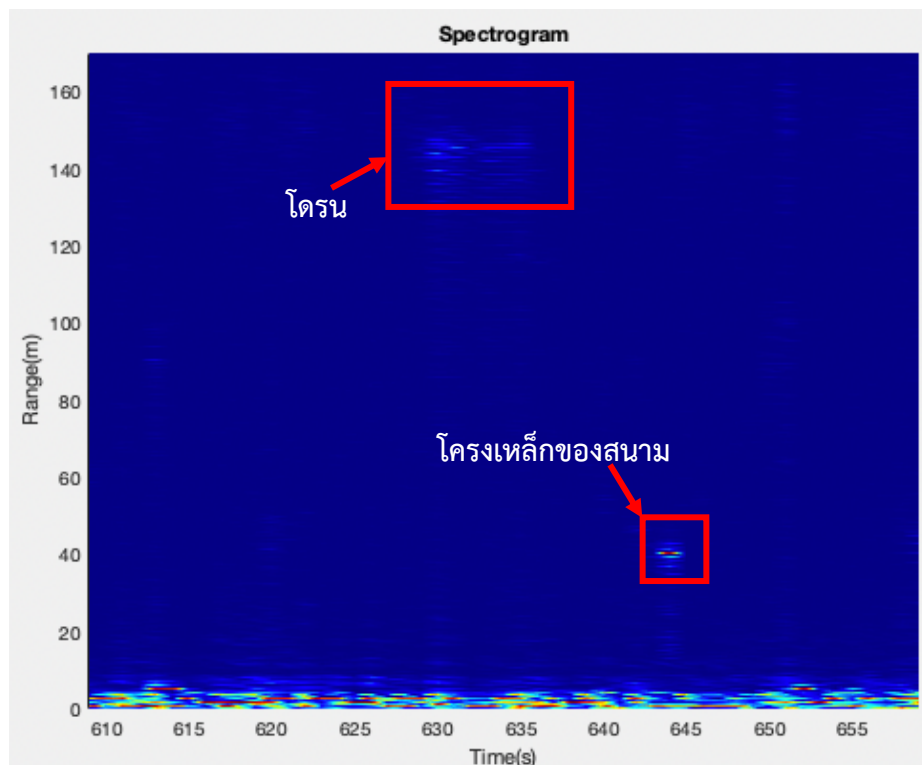


รูปที่ 10.9 ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 3



รูปที่ 10.10 ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 4

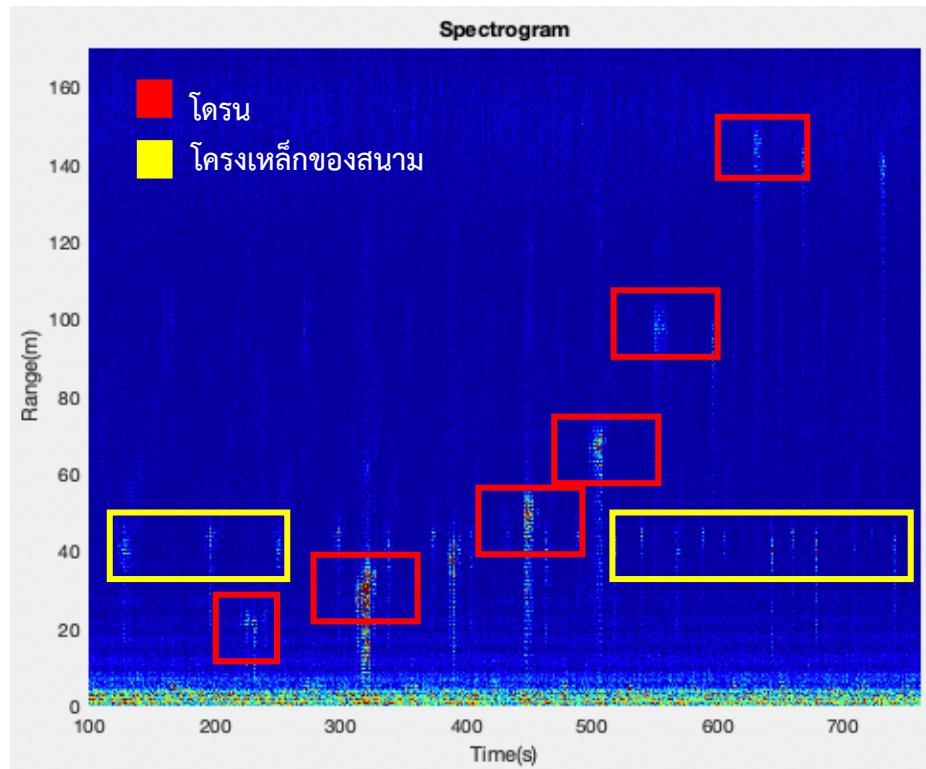
ข้อมูล spectrogram ของการหมุนเรดาร์รอบที่ 4 ตามรูปที่ 10.10 พบว่าเจอโดรนในตำแหน่งเริ่มต้นหมุนที่ระยะประมาณ 65 เมตร จากนั้นขณะที่เรดาร์กำลังหมุน โดรนได้เพิ่มระยะความสูงขึ้นไปอีกและเรดาร์หมุนไปเจอโดรนอีกครั้งที่ระยะห่างประมาณ 100 เมตรจากเรดาร์ ถัดไปจะเป็นการหมุนเรดาร์ในรอบที่ 5 ซึ่งเป็นรอบสุดท้าย ข้อมูล spectrogram ที่ได้จะเป็นไปตามรูปที่ 10.11



รูปที่ 10.11 ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรอบที่ 5

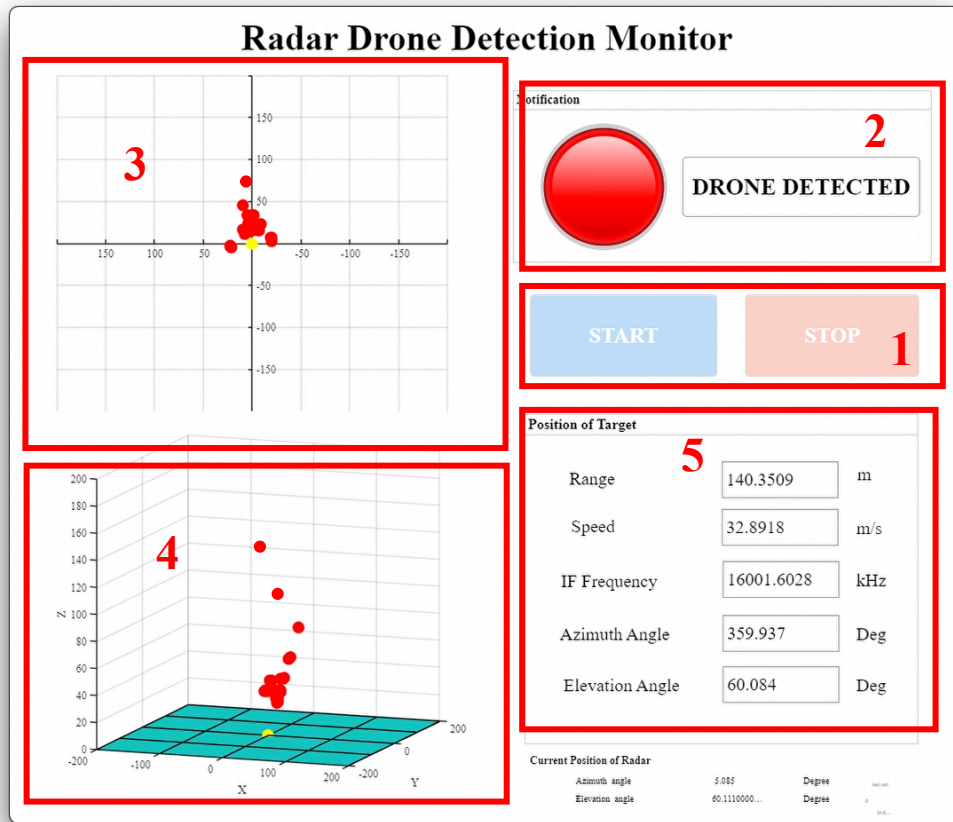
จาก spectrogram ในรูปที่ 10.11 จะพบว่าโดรนบินห่างจากเรดาร์เป็นระยะประมาณ 140 เมตร และพบโครงเหล็กของสนามกีฬาในตำแหน่งเดิมที่ระยะประมาณ 40 เมตร

เมื่อนำข้อมูล spectrogram ในแต่ละรอบมาเรียงต่อกันจะเห็นภาพรวมของข้อมูลและแนวทางการบินของโดรนที่ค่อย ๆ บินห่างจากเรดาร์ รวมถึงโครงเหล็กของสนามกีฬาที่เรดาร์ตรวจเจอในทุก ๆ รอบที่ระยะห่างจากเรดาร์ 40 เมตร ตามรูปที่ 10.12



รูปที่ 10.12 ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนเรียงต่อกันในแต่ละรอบ

ระบบหมุนที่ติดตั้งกับเรดาร์มีการบอกมุม azimuth และ elevation และส่งค่ามายังคอมพิวเตอร์ได้ ทางคณะผู้วิจัยจึงออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานใหม่ (Graphic User Interface) ตามรูปที่ 10.13 โดยปุ่มเริ่มทำงาน (ส่วนที่ 1) และการแจ้งเตือนเมื่อเจอโดรน (ส่วนที่ 2) จะเหมือนกับส่วนติดต่อผู้ใช้งานเวอร์ชันเดิม ข้อมูลระยะห่างของโดรนที่ตรวจจับได้และข้อมูลมุมของชุดหมุนมาพล็อตตำแหน่งทั้งแบบ 2 มิติ (ระนาบ xy : ส่วนที่ 3) และแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz : ส่วนที่ 4) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถทราบถึงตำแหน่งของโดรนได้ง่ายขึ้น รายละเอียดตำแหน่งของโดรนทั้งระยะห่างของเป้าหมายกับเรดาร์ ความเร็วเฉลี่ยของโดรน ตำแหน่งมุม azimuth ของโดรนเมื่อเทียบกับเรดาร์และตำแหน่งมุม elevation ของโดรนเมื่อเทียบกับเรดาร์จะแสดงอยู่ในส่วนที่ 5 และตำแหน่งล่างขวาของตัวโปรแกรมจะแสดงตำแหน่งมุมปัจจุบันของเรดาร์เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบตำแหน่งของเรดาร์ จากการทดสอบด้านบนหากแสดงข้อมูลต่าง ๆ ในรูปแบบของส่วนติดต่อผู้ใช้งาน จะเป็นไปตามรูปที่ 10.13 ทำการเปรียบเทียบระยะที่เรดาร์วัดได้กับกล้องตรวจวัดระยะเป็นไปตามตารางที่ 10.1 จะพบว่าค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดจะอยู่ที่ -2.28 % ซึ่งอาจเกิดจากขณะวัดระยะด้วยกล้องวัดระยะ โดรนมีการเคลื่อนที่ออกทำให้ระยะที่บันทึกกับระยะที่เรดาร์ตรวจจับได้คลาดเคลื่อนกัน



รูปที่ 10.13 ส่วนติดต่อผู้ใช้งานใช้งานร่วมกับเรดาร์ตรวจจับโดรน

ตารางที่ 10.1 ตารางการเปรียบระยะของโดรนระหว่างเรดาร์กับกล้องตรวจวัดระยะ

ตำแหน่งที่	ระยะที่เรดาร์วัดได้	ระยะที่กล้องวัดระยะวัดได้	Error (%)
1	21.714 m	21.5 m	-0.99 %
2	36.190 m	36.0 m	-0.52 %
3	65.174 m	65.5 m	+0.49 %
4	65.800 m	65.5 m	-0.45 %
5	103.306 m	101.0 m	-2.28 %
6	140.351 m	140.0 m	-0.25 %

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

## 10.2 การสาธิตและการทดสอบเรดาร์โดยให้โดรนบินตามเรดาร์ที่กำลังหมุน

การทดสอบเรดาร์โดยให้โดรนบินตามวงตามเรดาร์ที่กำลังหมุน มีหน่วยงาน กทปส. และผู้ทรงคุณวุฒิเข้าร่วมรับชมการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนที่สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือและได้มีการอธิบายหลักการทำงานของเรดาร์ ส่วนประมวลผลของเรดาร์และส่วนติดต่อผู้ใช้งานโปรแกรมเรดาร์ตรวจจับโดรนตามรูปที่ 10.14





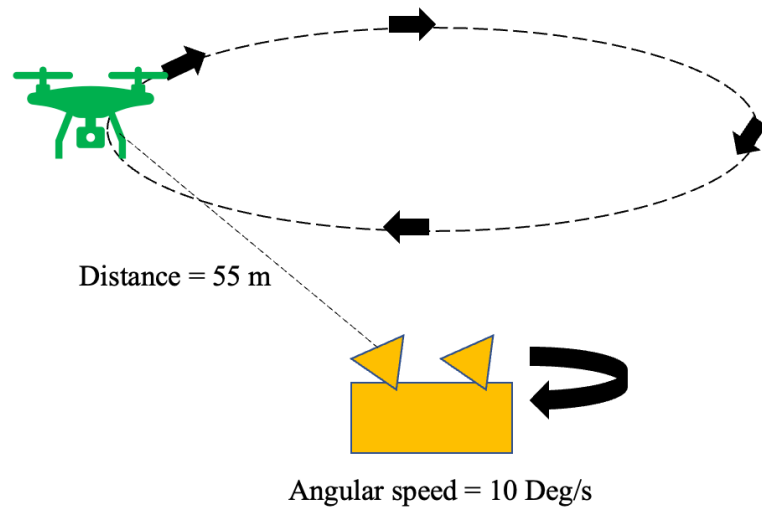
## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



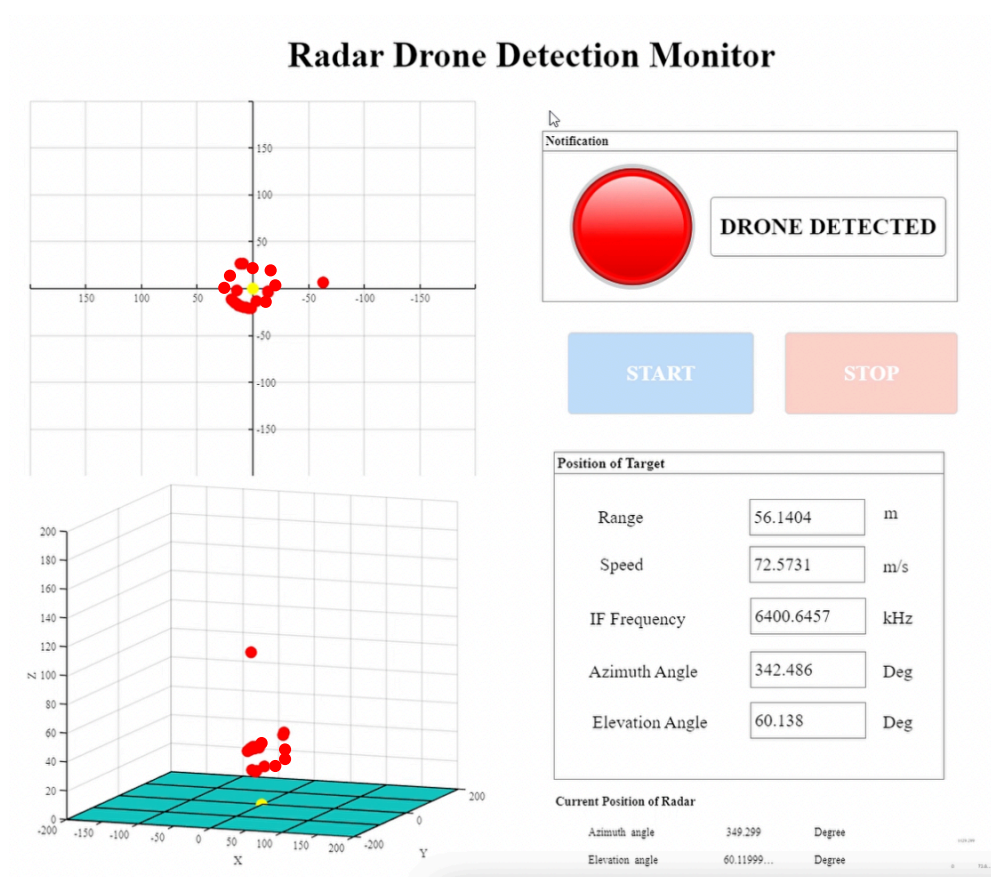
รูปที่ 10.14 การทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน สนามกีฬามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขั้นตอนในการทดสอบคือ ให้คนควบคุมโดรนบินโดรนที่ระยะห่างจากเรดาร์ประมาณ 50-60 เมตรและให้บินหมุนวนตามเรดาร์ที่กำลังหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $10 \text{ Deg/s}$  เพื่อทดสอบความเร็วในการตรวจจับของเรดาร์และความเร็วในการพล็อตของโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น โดยมีขั้นตอนการทดสอบเป็นไปตามรูปที่ 10.15 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบแสดงอยู่ในหน้าต่างส่วนติดต่อผู้ใช้งานตามรูปที่ 10.16 จะพบว่า การเคลื่อนของโดรนในระนาบ  $xy$  จะเป็นรูปแบบคล้ายวงกลมซึ่งตรงกับรูปแบบการบินโดรนจึงสรุปได้ว่าเรดาร์และโปรแกรมตรวจจับสามารถทำงานตรวจจับโดรนที่กำลังเคลื่อนที่และพล็อตรูปแบบการบินของโดรนได้ทั้งแบบ 2 มิติ (ระนาบ  $xy$ ) และ 3 มิติ (ระนาบ  $xyz$ )

การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 10.15 ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนโดยให้โดรนบินตามการหมุนของเรดาร์



รูปที่ 10.16 ส่วนติดต่อผู้ใช้งานใช้งานร่วมกับเรดาร์ตรวจจับโดรนในกรณีโดรนบินตามเรดาร์

### 10.3 สรุปผล

โครงการวิจัยนี้พัฒนาต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน เพื่อตรวจจับโดรนที่เข้ามาบริเวณที่กำหนดโดยไม่ได้รับอนุญาตแบบอัตโนมัติ โดยผู้วิจัยออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนแบบ FMCW ที่ความถี่ 10 GHz ย่าน X-band ออกแบบระบบประมวลผล ระบบแสดงผล และออกแบบระบบหมุนสแกน 360 องศา โดยผลลัพธ์ที่ได้จากระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับที่สร้างขึ้น พบว่าเรดาร์สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับได้ในระยะที่สูงสุดประมาณ 150 เมตร ที่กำลังส่งไม่เกิน 10 W โดยที่สายอากาศที่ทำการศึกษประกอบด้วย 1. สายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) และ 2. สายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array horn antenna) 3. สายอากาศแถวลำดับช่องเปิด (Slotted array antenna) ข้อดีข้อเสียของสายอากาศทั้ง 3 ชนิด จะให้ระยะตรวจจับจากการคำนวณที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6.1 เนื่องจากอัตราการขยายของสายอากาศมีค่าต่างกัน อย่างไรก็ตามพบว่าสายอากาศแถวลำดับช่องเปิด (Slotted array antenna) ให้แบบรูปการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีลำคลื่นด้านข้าง (side-lobe) สูง และมีจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 5.24 และทิศทางลำคลื่นหลักเอียงไปจากจุดกึ่งกลาง ดังนั้น ในขั้นตอนการทดสอบจึงทำการเลือกสายอากาศ 2 ชนิดมาทดสอบคือสายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) และสายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array horn antenna) สำหรับการทดสอบสายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) ในกรณีที่ไม่เปิดระบบหมุนและให้โดรนบินอยู่ในลำคลื่นของสายอากาศพบว่าให้ระยะสูงสุดที่ 152 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 9.1 อย่างไรก็ตามในกรณีที่เปิดระบบหมุนและให้โดรนบินอิสระพบว่าการค้นหาตรวจจับโดรนนั้นช้ากว่า และค้นหาโดรนได้ยากกว่า สายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) เนื่องจากสายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 3.5 องศา แคบกว่าสายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) ที่มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 16 องศา มาก ดังแสดงในตามตารางผลการทดสอบที่ 10.1 เมื่อใช้สายอากาศแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) จะให้ผลในการค้นหาโดรนได้ดีกว่า

ความถี่วิทยุที่ขออนุญาตทดลองมี 2 ช่วงคือ 9.876 – 9.985 GHz และ 10.566 – 10.689 GHz อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้นทั้งสองย่านความถี่ พบว่าได้ผลรับไม่แตกต่างกัน เพราะความถี่ทั้งสองย่านมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเลือกความถี่ย่าน 9.876 – 9.985 GHz เป็นหลัก เนื่องจากมีความถี่ต่ำกว่าเล็กน้อย ในทางทฤษฎีจะให้ค่าการสูญเสียตามระยะทางน้อยกว่าย่านความถี่สูงเล็กน้อย แต่ไม่มีนัยสำคัญ

## บทที่ 11

รายงานการส่งมอบต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน จำนวน ๑ ชุดและต้นแบบซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลการตรวจจับโดรน จำนวน ๑ ชุด ให้แก่หน่วยงานผู้ใช้งานด้านความมั่นคงหรืออุตสาหกรรมป้องกันประเทศ เช่น กรมการทหารสื่อสาร หรือ หน่วยบัญชาการป้องกันภัยทางอากาศกองทัพก

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

ที่ อว 7100/3476



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชาชื่น 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ  
กรุงเทพฯ 10800

20 กันยายน 2565

เรื่อง ขอส่งมอบต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโคจรและต้นแบบซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลการตรวจจับโคจร

เรียน เลขาธิการ กสทช.

อ้างถึง สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2563

- สิ่งที่ส่งมาด้วย 1. ต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโคจร จำนวน 1 ชุด  
2. ต้นแบบซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลการตรวจจับโคจร จำนวน 1 ชุด

ตามสัญญาที่อ้างถึง คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ได้สนับสนุนเงินจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ ประเภทที่ 1 ประจำปี 2562 ตามวัตถุประสงค์มาตรา 52 (2) แห่งพระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่ พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติม ให้ดำเนินงานวิจัยเรื่องการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.เอกวิบูลย์ บุญญา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นหัวหน้าโครงการ นั้น

บัดนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยคณะผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยและพัฒนาต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโคจรและต้นแบบซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลการตรวจจับโคจรเสร็จสิ้นแล้ว จึงมีความประสงค์จะส่งมอบต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโคจร จำนวน 1 ชุด และต้นแบบซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลการตรวจจับโคจรจำนวน 1 ชุด ให้แก่สำนักงาน กสทช. ซึ่งเป็นหน่วยงานผู้ใช้เพื่อใช้ประโยชน์ และสามารถส่งมอบต่อให้หน่วยงานผู้ใช้อื่นตามแต่ กสทช. จะเห็นควร โดยให้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือจะเป็นผู้เก็บรักษาต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโคจร จำนวน 1 ชุด และต้นแบบซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลการตรวจจับโคจรจำนวน 1 ชุด ไว้ให้ก่อน จนกว่า กสทช. จะนำไปใช้ประโยชน์หรือมอบต่อให้หน่วยงานผู้ใช้ประโยชน์ต่อไป

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและพิจารณา จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทรัมย์พร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ  
ปฏิบัติการแทนอธิการบดี

ฝ่ายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือ สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

โทรศัพท์ 0 2556 2000 ต่อ 1506, 1512 - 1513

โทรสาร 0 2556 1306

## บทที่ 12

### รายงานผลการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อนำผลงานวิจัยไปใช้ให้ เกิดประโยชน์ต่อไป

ทางคณะผู้วิจัยได้จัดอบรม Work shop และขอความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนในหัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้” จัดขึ้นในวันที่ 12 กันยายน พ.ศ. 2565 เวลา 9.00 – 16.30 น. แบบออนไลน์ รายละเอียดเป็นไปตามเอกสารที่แนบมา

ทางคณะวิจัยได้มีการเชิญหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเข้าร่วม workshop ดังนี้

1. ศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม
  2. สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
  3. ฝ่ายวิจัยและพัฒนากองทัพอากาศ
  4. กสทช.
  5. กรมการทหารสื่อสาร
- และมีผู้สนใจเข้าร่วมลงทะเบียนทั้งสิ้น 14 คน รายชื่อและสังกัดของผู้เข้าร่วมเป็นไปตามตารางที่ 12.1


**ตารางที่ 12.1** รายชื่อผู้เข้าร่วม workshop ในหัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้”

ลำดับ	คำนำหน้า	ชื่อ-นามสกุล	หน่วยงาน
1	ว่าที่ เรือตรี	พิชัย อัจจงเจตน์	ศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม
2	จ.ส.ท.	กชกร วิชัย	ศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร
3	นาวาตรี	ทัศนพล งามเถื่อน	ศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม
4	พันตรี	ฐานิช สุขเกษม	ศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร กรมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีกลาโหม
5	ส.ท.	เมธัส นาคละมัย	ศวพท.วท.กท.
6	ส.ท.	วัชรชัย แหยมศรีใส	ศวพท.วท.กท.
7	พันจ่าอากาศเอก	กำพล เขตแดน	ศวพท.วท.กท.
8	พ.อ.อ.	วันชัยย์ คงเลิศ	ศวพท.วท.กท.
9	นาย	กัมปนาท อ่วมกุล	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

10	นาย	เสรี อรวัฒนานนท์	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
11	นางสาว	มาลินดา หงษ์ทอง	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
12	นาย	ปัทพงษ์ ศรีโพธิ์	สทป.
13	นาวาอากาศโท	พีระยุทธ สารตายน	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ
14	ร.ท.	เกรียงไกร วิภาดาพิสุทธิ์	สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



ที่ อว 7100/3135

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชากรบุรี 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ  
กรุงเทพฯ 10800

30 สิงหาคม 2565

เรื่อง ขอเชิญเข้าร่วมการจัด Workshop และความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน

เรียน ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร

อ้างถึง สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2563


สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการจัด Workshop หัวข้อ "เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้"

ตามสัญญาที่อ้างถึง คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ได้สนับสนุนเงินจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ ประเภทที่ 1 ประจำปี 2562 ตามวัตถุประสงค์มาตรา 52 (2) แห่งพระราชบัญญัติองค์การจัดสรรคลื่นความถี่ฯ พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติม ให้ดำเนินงานวิจัยเรื่องการพัฒนาและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญฤงา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นหัวหน้าโครงการ นั้น

บัดนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยคณะผู้วิจัยกำหนดจัด Workshop หัวข้อ "เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้" ในวันที่ 12 กันยายน 2565 เวลา 9.00 - 16.00 น. โดยมีรายละเอียดตามกำหนดการที่ส่งมาพร้อมกันนี้ จึงขอเรียนเชิญผู้แทนจากหน่วยงานของท่าน เข้าร่วม Workshop ในวันและเวลาดังกล่าวข้างต้น

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและพิจารณา จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ



(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จินทรอัมพร)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ  
ปฏิบัติการแทนอธิการบดี

ฝ่ายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือ สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 1506, 1512 - 1513  
โทรสาร 0 2556 1306





## บันทึกข้อความ

ส่วนราชการ... ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรมดิจิทัลและแม่เหล็กไฟฟ้า โทร. 1564

ที่... ศวม. 25 /2565 ..... วันที่... 5 กันยายน 2565

เรื่อง... ขออนุญาตเชิญเข้าร่วมการ workshop และความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน.....

เรียน รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ

ด้วยข้าพเจ้า รองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญอุษา อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก กองทุนวิจัยและพัฒนาโครงการกระจายเสียงกิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.) เพื่อดำเนินโครงการวิจัย เรื่อง การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2563 ระยะเวลาดำเนินการตั้งแต่วันที่ 26 มิถุนายน 2563 ถึงวันที่ 24 กันยายน 2565 งบประมาณทั้งสิ้น 9,969,190.00 บาท (เก้าล้านเก้าแสนหกหมื่นเก้าพันหนึ่งร้อยเก้าสิบบาทถ้วน) นั้น

คณะผู้วิจัยมีความประสงค์จะจัดงาน workshop หัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้” ในวันที่ 12 กันยายน 2565 เวลา 9.00 – 16.30 น. โดยมีรายละเอียดกำหนดการตามเอกสารแนบมา โดยมีความประสงค์จะเรียนเชิญตัวแทนจากหน่วยงานดังต่อไปนี้เข้าร่วม

1. เรียนผู้บัญชาการทหารอากาศ

จึงขอความอนุเคราะห์ออกหนังสือเชิญตัวแทนจากหน่วยงานดังกล่าวเข้าร่วม workshop ด้วย

จึงเรียนมาเพื่อโปรดดำเนินการจัดทำหนังสือดังกล่าวด้วย

(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญอุษา)  
หัวหน้าโครงการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติพงษ์ เลิศวิริยะประภา)  
หัวหน้าศูนย์วิจัยเทคโนโลยีนวัตกรรมดิจิทัลและแม่เหล็กไฟฟ้า

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ที่ อว 7100/3132



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ  
กรุงเทพฯ 10800

30 สิงหาคม 2565

เรื่อง ขอเชิญเข้าร่วมการจัด Workshop และความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน

เรียน เลขาธิการ กสทช.

อ้างถึง สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2563

สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการจัด Workshop หัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้”

ตามสัญญาที่อ้างถึง คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ได้สนับสนุนเงินจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ ประเภทที่ 1 ประจำปี 2562 ตามวัตถุประสงค์มาตรา 52 (2) แห่งพระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่ฯ พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติม ให้ดำเนินงานวิจัยเรื่องการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญญา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นหัวหน้าโครงการ นั้น

บัดนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยคณะผู้วิจัยกำหนดจัด Workshop หัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้” ในวันที่ 12 กันยายน 2565 เวลา 9.00 – 16.00 น. โดยมีรายละเอียดตามกำหนดการที่ส่งมาพร้อมกันนี้ จึงขอเรียนเชิญผู้แทนจากหน่วยงานของท่านเข้าร่วม Workshop ในวันที่เวลาดังกล่าวข้างต้น

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและพิจารณา จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทรัมย์พร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ

ปฏิบัติการแทนอธิการบดี

ฝ่ายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือ สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 1506, 1512 - 1513

โทรสาร 0 2556 1306

# การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



ที่ อว 7100/3133

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ  
กรุงเทพฯ 10800

30 สิงหาคม 2565

เรื่อง ขอเชิญเข้าร่วมการจัด Workshop และความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน

เรียน ผู้อำนวยการสถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (สทป.)

อ้างถึง สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2563

สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการจัด Workshop หัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้”

ตามสัญญาที่อ้างถึง คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ได้สนับสนุนเงินจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ ประเภทที่ 1 ประจำปี 2562 ตามวัตถุประสงค์มาตรา 52 (2) แห่งพระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่ฯ พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติม ให้ดำเนินงานวิจัยเรื่องการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญญา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นหัวหน้าโครงการ นั้น

บัดนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยคณะผู้วิจัยกำหนดจัด Workshop หัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้” ในวันที่ 12 กันยายน 2565 เวลา 9.00 – 16.00 น. โดยมีรายละเอียดตามกำหนดการที่ส่งมาพร้อมกันนี้ จึงขอเรียนเชิญผู้แทนจากหน่วยงานของท่าน เข้าร่วม Workshop ในวันที่และเวลาดังกล่าวข้างต้น

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและพิจารณา จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทน์อัมพร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ

ปฏิบัติการแทนอธิการบดี

ฝ่ายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือ สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 1506, 1512 - 1513

โทรสาร 0 2556 1306

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



ที่ อว 7100/3134

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ  
กรุงเทพฯ 10800

30 สิงหาคม 2565

เรื่อง ขอเชิญเข้าร่วมการจัด Workshop และความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน

เรียน เจ้ากรมการทหารสื่อสาร

อ้างถึง สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2563

สิ่งที่ส่งมาด้วย กำหนดการจัด Workshop หัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้”

ตามสัญญาที่อ้างถึง คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ได้สนับสนุนเงินจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมเพื่อประโยชน์สาธารณะ ประเภทที่ 1 ประจำปี 2562 ตามวัตถุประสงค์มาตรา 52 (2) แห่งพระราชบัญญัติองค์การจัดสรรคลื่นความถี่ฯ พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติม ให้ดำเนินงานวิจัยเรื่องการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญญา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นหัวหน้าโครงการ นั้น

บัดนี้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยคณะผู้วิจัยกำหนดจัด Workshop หัวข้อ “เทคโนโลยีเรดาร์ตรวจจับโดรนและความร่วมมือกับหน่วยงานผู้ใช้” ในวันที่ 12 กันยายน 2565 เวลา 9.00 – 16.00 น. โดยมีรายละเอียดตามกำหนดการที่ส่งมาพร้อมกันนี้ จึงขอเรียนเชิญผู้แทนจากหน่วยงานของท่านเข้าร่วม Workshop ในวันและเวลาดังกล่าวข้างต้น

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบและพิจารณา จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

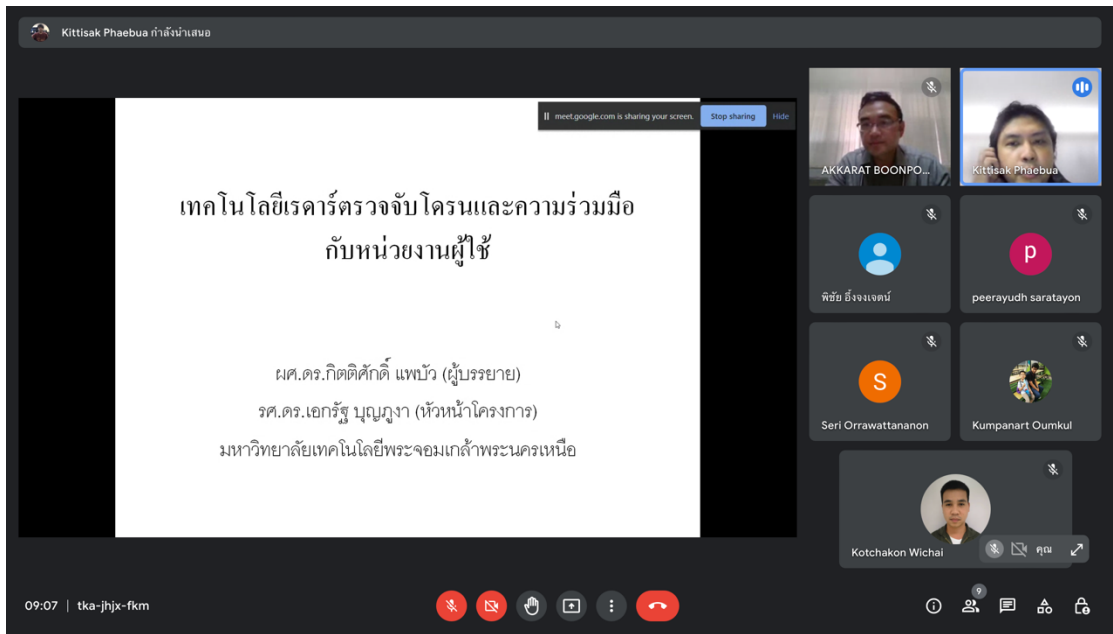
(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ

ปฏิบัติการแทนอธิการบดี

ฝ่ายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือ สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 1506, 1512 - 1513  
โทรสาร 0 2556 1306

# การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



รูปที่ 12.1 บรรยากาศการ work shop และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

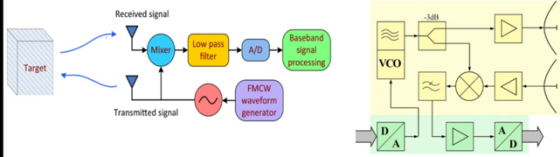


รูปที่ 12.2 บรรยากาศการ work shop และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

# การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

การออกแบบระบบเรดาร์ **FMCW Radar**

• **FMCW Radar**



แสดงระบบเรดาร์ FMCW ที่สร้างขึ้นซึ่งประกอบไปด้วย

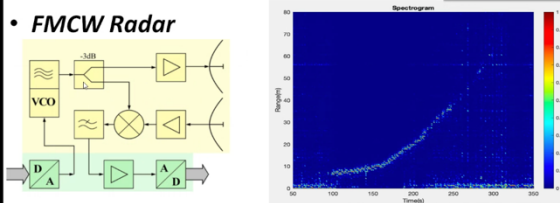
1. วงจรผสมสัญญาณ RF mixer
2. วงจรขยายสัญญาณการรบกวนต่ำ (low noise amplifier)
3. วงจรแบ่งกำลังงาน (power divider)
4. วงจรขยายสัญญาณความถี่กลาง (IF amplifier)
5. สายอากาศรับ-ส่ง (Tx, Rx antennas)
6. วงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณต่อเนื่องเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital converter)

11:27 | tka-jhix-fkm

รูปที่ 12.3 บรรยากาศการ work shop และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

การประมวลผลสัญญาณ

• **FMCW Radar**



IF signal in time domain → FFT algorithm → Remove mutual coupling → Normalization → Range and speed calculation → Radar monitor

Spectrogram

11:45 | tka-jhix-fkm

รูปที่ 12.4 บรรยากาศการ work shop และการสร้างความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.radartutorial.eu/01.basics/!rb02.en.html>
- [2] "FMCW radar sensors application notes," [www.siversima.com](http://www.siversima.com)
- [3] Kurt Peek, "An Analysis of the Effects of Digital Phase Errors on the Performance of a FMCW-Doppler Radar," A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE in APPLIED PHYSICS, The University of Twente, September 2011.
- [4] Jau-Jr Lin, Yuan-Ping Li, Wei-Chiang Hsu and Ta-Sung Lee, "Design of an FMCW radar baseband signal processing system for automotive application," SpringerPlus (2016) 5:42 DOI 10.1186/s40064-015-1583-5
- [5] Michael G.K. Raymond, "Multiple Target Tracking using FMCW Radar", University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy
- [6] Johan Svensson, "High Resolution Frequency Estimation in an FMCW Radar Application," Master of Science Thesis in Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, Linköping University, 2018.
- [7] Beom-Seok Oh, Xin Guo, Zhiping Lin, "A UAV Classification System based on FMCW Radar Micro-Doppler Signature Analysis," Expert Systems with Applications, October 2019, DOI: 10.1016/j.eswa.2019.05.007
- [8] Balanis, Constantine A. (2005). Antenna Theory Analysis and Design.
- [9] J. Park, K. Bae, D. Jung and S. Park, "Micro-Drone Detection with FMCW Radar Based on Stationary Point Concentration Technique," 2019 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Xi'an, China, 2019, pp. 1-3.
- [10] Á. D. de Quevedo, F. I. Urzaiz, J. G. Menoyo and A. A. López, "Drone detection and radar-cross-section measurements by RAD-DAR," in IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 13, no. 9, pp. 1437-1447, 9 2019, doi: 10.1049/iet-rsn.2018.5646.
- [11] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situations", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-19, no. 4, pp. 608-621, 1983.
- [12] F. D. Enggar, A. M. Muthiah, O. D. Winarko, O. N. Samijayani and S. Rahmatia, "Performance comparison of various windowing On FMCW radar signal processing,"

2016 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), Bandung, 2016, pp. 326-330, doi: 10.1109/ISESD.2016.7886743.

[13] K. B. Cooper, S. L. Durden, C. J. Cochrane, R. Rodriguez Monje, R. J. Dengler and C. Baldi, "Using FMCW Doppler Radar to Detect Targets up to the Maximum Unambiguous Range," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 14, no. 3, pp. 339-343, March 2017, doi: 10.1109/LGRS.2016.2640954.

[14] R. R. Monje et al., "Long range-Doppler Demonstration of a 95 GHz FMCW Radar," 2018 15th European Radar Conference (EuRAD), Madrid, 2018, pp. 409-412, doi: 10.23919/EuRAD.2018.8546670.

[15] CST Microwave studio, User manual, 2019.

[16] Heckbert, P.S. (1998). Fourier Transforms and the Fast Fourier Transform ( FFT ) Algorithm.

[17] T. Hauschild and R. Knochel, "Calibration of short range FMCW-radars with network analyzer calibration techniques," 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.98CH36192), 1998, pp. 969-972 vol.2, doi: 10.1109/MWSYM.1998.705153.



การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

ความเห็นคณะกรรมการพิจารณาผลงานการดำเนินงานโครงการ

ลำดับ	รายละเอียดผลงาน งวดที่ ๔	ข้อสังเกตคณะกรรมการพิจารณา ผลงาน (ถ้ามี)	คำชี้แจง
๑	เอกสารแสดงการ ขออนุญาตใช้คลื่น ความถี่จาก หน่วยงานที่ เกี่ยวข้อง		
๒	รายงานผลการ พัฒนาซอฟต์แวร์การ ประมวลผล สัญญาณดิจิทัลของ ระบบเรดาร์	- ขอให้แสดงภาพการทำงานจริงของ โปรแกรมที่ปรากฏบนหน้าจอ ในรูปที่ ๗.๒ หน้า ๘๘ - ตรวจสอบตัวสะกด - ปรับข้อมูลให้เป็นปัจจุบันตามจริง ในข้อ ๖.๒ หน้า ๘๔	- ภาพการทำงานของโปรแกรม ได้ปรับปรุงแก้ไขในรายงานฉบับ ที่ 4 ในรูปที่ 10.7 ถึง รูปที่ 10.12 และ ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน แสดงในรูปที่ 10.13 และ 10.16 - ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบแก้ไข ตามคำแนะนำของ คณะกรรมการ - ได้ทำการปรับปรุงรายงานเป็น ปัจจุบันดังแสดงในรายงานครั้ง ที่ 4 นี้
๓	รายงานผลการ พัฒนาซอฟต์แวร์การ ประมวลผล สัญญาณดิจิทัลของ ระบบเรดาร์	- ขอให้เพิ่มเติมส่วนผนวกเกี่ยวกับ คู่มือการใช้งานโปรแกรม รวมถึง บริหารจัดการข้อมูลที่ได้จากการซัก ตัวอย่าง - แก่หน่วยวัดในหน้า ๑๐๘ ข้อ ๙.๑	- ผู้วิจัยทำการสร้างคู่มือการใช้ งานระบบในภาคผนวก ค - ได้ทำการแก้ไขหน่วยวัดให้ สอดคล้องกัน
๔	รายงานผลการ พัฒนาระบบเรดาร์ ตรวจจับโคจร	- ปรับปรุงการเรียงลำดับรูปแบบที่ อ้างอิง	- ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบแก้ไข ตามคำแนะนำของ คณะกรรมการ
๕	รายงานผลการ ทดสอบการ ตรวจจับวัตถุ (เป้าหมายสมมติ) โดยใช้เรดาร์	- ขอคำอธิบายเพิ่มเติม สำหรับผลการ ทดสอบรูปที่ ๙.๑๙	ได้เพิ่มคำอธิบายในหัวข้อที่ 9.2.2

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคโรนเพื่อป้องกันการบินโคโรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ตรวจจับโคโรนที่ได้ จากงานวิจัยและ พัฒนา		
---	--	--

ความคิดเห็นเพิ่มเติม

1. ขอให้ทดสอบเพิ่มเติมจุดเด่นและด้อยของสายอากาศแต่ละแบบ โดยเฉพาะเมื่อทำการทดสอบโดยหมุนตัวแทนจับยึดสายอากาศ เนื่องจากอาจจะมีปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานได้ ผู้วิจัยจึงควรทดสอบเพิ่มเติม

ผู้วิจัยได้เพิ่มข้อดีข้อเสียของสายอากาศทั้ง 3 ชนิด จะให้ระยะตรวจจับจากการประมาณที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 6.1 สำหรับผลการทดสอบสายอากาศแสดงในหัวข้อที่ 10.2

ลำดับ	รายละเอียด ผลงานงวดที่ ๔	ข้อสังเกตคณะกรรมการพิจารณา ผลงาน (ถ้ามี)	คำชี้แจง
๑	เอกสารแสดงการ ขออนุญาตใช้คลื่น ความถี่จาก หน่วยงานที่ เกี่ยวข้อง	มีเอกสารถูกต้อง	
๒	รายงานผลการ พัฒนาซอฟต์แวร์ การประมวลผล สัญญาณดิจิทัล ของระบบเรดาร์	หน้าที่ 88 รูปที่ 7.2 ได้ภาพได้ อธิบายถึงการทำงานของส่วนต่อ ประสาน กรรมการขอให้แสดงภาพ การทำงานจริงของโปรแกรมที่ ปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ รวมถึงการอธิบายแต่ละ องค์ประกอบ (1-5) ให้ครบถ้วน	-ภาพการทำงานของโปรแกรม ได้ปรับปรุงแก้ไขในรายงาน ฉบับที่ 4 ในรูปที่ 10.7 ถึง รูป ที่ 10.12 และ ส่วนติดต่อกับ ผู้ใช้งานแสดงในรูปที่ 10.13 และ 10.16 และทำการ อธิบายเพิ่มเติมให้ครบถ้วน
๓	รายงานผลการ พัฒนาซอฟต์แวร์ การประมวลผล สัญญาณดิจิทัล ของระบบเรดาร์	อาจจะเพิ่มเติมเป็นส่วนผนวก เกี่ยวกับ คู่มือการใช้งานโปรแกรม รวมถึงการบริหารจัดการข้อมูลที่ได้ จากการซั๊กตัวอย่าง (บันทึก, ลบ, การทำงานวนลูปเป็นวงรอบ)	-ผู้วิจัยได้เพิ่มคู่มือการใช้งาน ระบบในภาคผนวก ค

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

๔	รายงานผลการพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน	ควรปรับปรุงการจัดเรียงลำดับของรูปภาพและการอ้างอิง เช่น หน้าที่ 115 จะเป็นรูปที่ 9.14 และ 9.13 ซึ่งในข้อความด้านบนจะเป็น รูปที่ 6.12 แสดงพื้นที่ทำการทดลอง	-ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขตามความเห็นคณะกรรมการดังกล่าวในหัวข้อ 9.2
๕	รายงานผลการทดสอบการตรวจจับวัตถุ (เป้าหมายสมมติ) โดยใช้เรดาร์ตรวจจับโดรนที่ได้จากงานวิจัยและพัฒนา	ขอคำอธิบายเพิ่มเติม สำหรับผลการทดสอบรูปที่ 9.19 หน้าที่ 118 ว่าทำไม ในตำแหน่งแสดงผลที่ 4 และตำแหน่งแสดงผลที่ 6 จึงมีระยะ range ในแนวแกน y ที่ปรับลดลงจากตำแหน่งแสดงผลที่ 2 ในขณะที่โดรน เคลื่อนที่ห่างออกไปจากตำแหน่งของอุปกรณ์เรดาร์	-ผู้วิจัยได้อธิบายเพิ่มในหัวข้อที่ 9.2.2

ความคิดเห็นเพิ่มเติม

ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาสายอากาศขึ้นมา 3 แบบ เมื่อนำมาทำการทดสอบทั้ง 3 แบบอาจจะสามารถเปรียบเทียบจุดเด่นจุดด้อยของสายอากาศแต่ละแบบได้ นอกจากอัตราขยายที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะเมื่อทำการทดสอบโดยการหมุนตัวแท่นจับยึดสายอากาศ เนื่องจากขนาดความกว้างครึ่งกำลัง (half Power Beam width) ของสายอากาศ รวมถึงความเร็วในการหมุน และองศาในการปรับ อาจจะเป็ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของระบบได้ ถ้าผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเพิ่มเติม จะสามารถแสดงผลลัพธ์ที่น่าสนใจได้

ผู้วิจัยได้อธิบายเพิ่มในหัวข้อที่ 10.3

ลำดับ	รายละเอียดผลงานงวดที่ ๔	ข้อสังเกตคณะกรรมการพิจารณาผลงาน (ถ้ามี)	คำชี้แจง
๑	เอกสารแสดงการขออนุญาตใช้	-	

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

	คลื่นความถี่ จากหน่วยงาน ที่เกี่ยวข้อง		
๒	รายงานผล การพัฒนา ซอฟต์แวร์การ ประมวลผล สัญญาณ ดิจิทัลของ ระบบเรดาร์	-	
๓	รายงานผล การพัฒนา ซอฟต์แวร์การ ประมวลผล สัญญาณ ดิจิทัลของ ระบบเรดาร์	-	
๔	รายงานผล การพัฒนา ระบบเรดาร์ ตรวจจับโดรน	<p>- หน้าที่ 62 หัวข้อ VSWR มีคำ ภาษาไทยผิดนิดหน่อย</p> <p>- หน้าที่ 84 ข้อ 6.2 เมื่อพิจารณา จากรายงานผลการทดสอบในบทที่ 9 พบว่ามี การเพิ่มกำลังส่งและใช้ สายอากาศแบบ Parabolic Dish แล้ว จึงน่าจะปรับข้อความให้เป็น ปัจจุบันตามจริง</p> <p>- หน้า 100 โหมดที่ 3 ของการหมุน ทางกล มีการอธิบายเรื่องของ สเต็ปมอเตอร์ที่ควบคุมได้และเวลาที่ ใช้ในต่อรอบการหมุน ให้ผู้วิจัยแสดง ให้เห็นถึงความสอดคล้องกับความเร็ว สูงสุดของโดรนเป้าหมายด้วยเพื่อ</p>	<p>-ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขแล้วตาม คำแนะนำคณะกรรมการ</p> <p>- ได้ทำการปรับปรุงรายงานเป็น ปัจจุบันดังแสดงในรายงานครั้งที่ 4 นี้</p> <p>- ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยออกแบบไม่ ครอบคลุมถึงระบบตรวจติดตาม เป้าหมาย จะสามารถบอกแค่ ตำแหน่งของโดรนที่ตรวจเจอ</p>

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

		ยืนยันถึงความเป็นไปได้ในความสามารถตรวจจับเป้าได้โดยไม่หลุดเป้าหมายในแต่ละช่วงเวลาที่มีการหมุนสายอากาศไปในทิศทางอื่นๆ	โดยมีความเร็วในการหมุนที่สามารถกำหนดได้ อยู่ในช่วงระหว่าง 1 รอบ ต่อ 10 วินาที และความเร็วยุติที่ 1 รอบต่อ 4 วินาที ถ้าโดรนยังคงอยู่ในองศาตรวจจับของสายอากาศ ระบบจะสามารถบอกตำแหน่งและทิศทางได้
๕	รายงานผลการทดสอบการตรวจจับวัตถุ (เป้าหมายสมมติ) โดยใช้เรดาร์ตรวจจับโดรนที่ได้จากงานวิจัยและพัฒนา	<p>- หน้าที่ 108 ข้อที่ 9.1 ให้ปรับแก้หน่วยวัดขนาดของเป้าที่เป็นเชิงพื้นที่และเชิงปริมาตรให้ถูกต้องเป็นทางการด้วย</p> <p>- หน้าที่ 116 ข้อ 9.2.1 ควรรายงาน Elevation Angle ของสายอากาศด้วยจะเป็นประโยชน์มากเมื่อนำเปรียบเทียบกับ HPBW ของ Parabolic Dish ที่ใช้งาน อาจนำมาวิเคราะห์ถึงตำแหน่งของโดรนที่เรดาร์ของผู้วิจัยมีการจับเป้าหมายผิดพลาด ตามที่รายงานไว้ในตารางที่ 9.1 และ 9.2 เนื่องจากการรายงานผลการทดสอบในบทนี้มีอธิบายผลที่เกิดขึ้นไม่ชัดเจนว่าเพราะเหตุใดมีเพียงอธิบายว่า “เป็นเพราะโดรนไม่ได้อยู่ในรัศมีตรวจจับ” ทั้งที่มีการกำหนดให้ทิศทางเคลื่อนที่ของโดรนยกตัวขึ้นในแนวตั้งเท่านั้น แต่ระยะความสูงที่สุดที่ตำแหน่ง 7 ซึ่งมีรัศมีการตรวจจับไกลสุดยังสามารถตรวจจับได้ ซึ่งตำแหน่งที่ตรวจจับไม่ได้อาจจะเกิดขึ้นในจังหวะที่โดรนอ</p>	<p>- ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขแล้วตามคำแนะนำคณะกรรมการ</p> <p>- ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขแล้วตามคำแนะนำคณะกรรมการ ในหัวข้อ 10.3</p>

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

	<p>อยู่ในตำแหน่ง Null-field ของ Radiation Pattern ของสายอากาศ</p> <p>ในขณะที่ส่งคลื่นออกไปหรือขณะรับคลื่นเข้ามา ก็อาจเป็นไปได้ดังนั้นคงต้องรอดูผลการทดสอบในรายงานครั้งต่อไปที่มีผลสำเร็จจากการปรับแก้ไขต่อจากนี้ได้</p> <p>-หน้าที่ 116 รูปที่ 9.15 และ 9.16</p> <p>ควรแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของโครน ทั้ง 7 ตำแหน่ง และ 5 ตำแหน่งเพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในตารางที่ 9.1 และ 9.2 ให้ชัดเจน</p> <p>เพื่อให้คณะกรรมการพิจารณาผลการทดสอบในรูปแบบที่กำหนดนี้ได้ง่ายขึ้นว่ามีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้หรือไม่</p>	
--	---	--

ลำดับ	รายละเอียดผลงานงวดที่ ๔	ข้อสังเกตคณะกรรมการพิจารณาผลงาน (ถ้ามี)	คำชี้แจง
๑	เอกสารแสดงการขออนุญาตใช้คลื่นความถี่จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง	ความถี่วิทยุที่ขออนุญาตทดลองทดสอบมี 2 ช่วงคือ 9.876 – 9.985 GHz และ 10.566 – 10.689 GHz	ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขแล้วตามคำแนะนำ คณะกรรมการ ในหัวข้อ 10.3 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้นทั้งสองย่านความถี่ พบว่าได้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน เพราะความถี่ทั้งสองย่านมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยเลือกความถี่ย่าน 9.876 – 9.985 GHz

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โดรนเพื่อป้องกันการบิน โดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

			เป็นหลัก เนื่องจากมีความถี่ต่ำกว่าเล็กน้อย ในทางทฤษฎีจะให้ค่าการสูญเสียตามระยะทางน้อยกว่าย่านความถี่สูงเล็กน้อย
๒	รายงานผลการพัฒนาซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์	-	
๓	รายงานผลการพัฒนาซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์	-	
๔	รายงานผลการพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน	-	
๕	รายงานผลการทดสอบการตรวจจับวัตถุ (เป้าหมายสมมติ) โดยใช้เรดาร์ตรวจจับโดรนที่ได้จากงานวิจัยและพัฒนา	ผลการรายงานมีช่วงความถี่เดียว	ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขแล้วตามคำแนะนำ คณะกรรมการ ในหัวข้อ 10.3 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้นทั้งสองย่านความถี่ พบว่าได้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน เพราะความถี่ทั้งสองย่านมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยเลือกความถี่ย่าน 9.876 – 9.985 GHz เป็นหลัก เนื่องจากมีความถี่ต่ำกว่าเล็กน้อย ในทางทฤษฎีจะให้ค่าการ

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

			สูญเสียตามระยะทางน้อยกว่าย่านความถี่สูงเล็กน้อย
--	--	--	---

**ความคิดเห็นเพิ่มเติม**

เห็นควรเพิ่มข้อมูลผลการทดสอบการตรวจจับวัตถุของเรดาร์โดยทดลองใช้ช่วงความถี่ 2 ช่วง และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของแต่ละช่วง

ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขแล้วตามคำแนะนำคณะกรรมการ ในหัวข้อ 10.3 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเบื้องต้นทั้งสองย่านความถี่ พบว่าได้ผลลัพธ์ไม่แตกต่างกัน เพราะความถี่ทั้งสองย่านมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเลือกความถี่ย่าน 9.876 – 9.985 GHz เป็นหลัก เนื่องจากมีความถี่ต่ำกว่าเล็กน้อย ในทางทฤษฎีจะให้ค่าการสูญเสียตามระยะทางน้อยกว่าย่านความถี่สูงเล็กน้อย



การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ภาคผนวก ก

รายงานผลการดำเนินงานฉบับย่อ  
สำหรับตีพิมพ์ในวารสาร สำนักงาน กสทช.

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต  
Research and Development of Radar Drone Detection system  
for Unauthorized Drone

**บทคัดย่อ**

โครงการวิจัยนี้นำเสนอการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยทำการออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนแบบคลื่นต่อเนื่องที่มีการมอดูเลตทางความถี่ (Frequency modulated continuous wave: FMCW) ที่ความถี่ 10 GHz ย่าน X-band โดยออกแบบระบบประมวลผล ระบบแสดงผล ระบบสายอากาศ และระบบหมุนค้นหาเป้าหมาย ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับที่สร้างขึ้น พบว่าระบบเรดาร์สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับได้ในระยะสูงสุดประมาณ 152 เมตร ที่กำลังส่งไม่เกิน 10 W โดยที่สายอากาศที่ทำการศึกษาประกอบด้วย สายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) และ สายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) ซึ่งจะให้ระยะตรวจจับที่ต่างกัน เนื่องจากอัตราการขยายของสายอากาศมีค่าต่างกัน อย่างไรก็ตามจากการทดสอบพบว่า สายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) ค้นหาตรวจจับโดรนได้ช้ากว่าสายอากาศแบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna) เนื่องจากสายอากาศแบบจานสะท้อน (Parabolic reflector antenna) มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง แคบกว่าสายอากาศ แบบแถวลำดับปากแตร (Array Horn antenna)

**Abstract**

This research project presents the research and development of a radar drone detection system for Unauthorized Drone. The frequency modulated continuous wave (FMCW) drone detection radar system at 10 GHz in the X-band is employed. The proposed system consists signal processing unit, display unit, antenna system unit, and radar turntable unit in order to find the targets. It is found that the proposed radar system is able to detect the drone at a maximum distance of 152 meters at a power of less than 10 W. The antenna system consists of a parabolic reflector antenna and array horn antenna, which provides different detection distances because the antenna gains are different. However, it was found that the detection speed of a parabolic reflector antenna is slower than the array horn antenna due to the half-power beamwidth of the parabolic reflector antenna being narrow than the array horn antenna.

**คำสำคัญ (Keywords)** เรดาร์คลื่นต่อเนื่อง; ตรวจจับโดรน; แถบความถี่เอ็กซ์; ความมั่นคง;

## 1. บทนำ

โดรน (Drone) หรือ อากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicle หรือ UAV) เป็นอากาศยานที่สามารถควบคุมการบินจากทางไกลโดยใช้การควบคุมผ่านสัญญาณวิทยุจากผู้ควบคุมภาคพื้นดิน ดังนั้นคนทั่วไปก็สามารถหาซื้อมาใช้เป็นของตนเองได้ง่าย ปัจจุบันจึงมีการใช้งานโดรนกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใคร ๆ ก็สามารถเป็นเจ้าของโดรนได้ ทำให้ในหลาย ๆ ครั้งเกิดเหตุการณ์ที่อาจเป็นอันตรายด้านความปลอดภัยของสถานที่สำคัญได้ ดังเช่นข่าวที่สำนักข่าว BBC รายงานว่า สนามบินแกตวิกของอังกฤษจำเป็นต้องปิดทำการเป็นเวลาถึง 2 วัน เนื่องจากพบโดรนลำหนึ่งบินอยู่เหนือสนามบิน ซึ่งตำรวจสามารถควบคุมตัวผู้ต้องสงสัย 2 คนที่คาดว่ามีส่วนเกี่ยวข้องกับการบินโดรนใกล้กับรันเวย์ได้แล้ว และกำลังดำเนินการสอบสวนบุคคลทั้งสองด้วยข้อหาการใช้โดรนก่ออาชญากรรม จากเหตุการณ์นี้ส่งผลกระทบต่อเที่ยวบินทั้งหมด 757 เที่ยวบินและผู้โดยสารอีกกว่า 1.2 แสนคนต้องออกเดินทางล่าช้าและยกเลิกในบางเที่ยวบิน ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาระบบหรือกระบวนการในการตรวจจับโดรนที่บินในบริเวณที่ไม่ได้รับอนุญาต

ระบบตรวจจับโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาตโดยการใช้เรดาร์ มีข้อได้เปรียบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีตรวจจับอื่น ๆ คือ สามารถตรวจจับโดรนและวัตถุแปลกปลอม รวมถึงสามารถระบุตำแหน่งของเป้าหมายได้ ได้ตลอดทั้งกลางวันและกลางคืน รวมถึงในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดีด้วย ซึ่งเป็นเทคโนโลยีเดียวกับการตรวจจับเครื่องบินทางการทหาร (แต่ย่านความถี่ต่างกันเพื่อการตรวจจับขนาดของวัตถุต่างกัน)

ระบบเรดาร์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน ซึ่งเรียกระบบดังกล่าวว่า continuous wave radar เป็นระบบเรดาร์ที่ทำงานด้วยสัญญาณหรือคลื่นแบบต่อเนื่อง เรียกว่าเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง [1-3] โดยระบบจะใช้ doppler effect เพื่อตรวจจับเป้าหมายที่ไม่อยู่นิ่ง frequency modulated continuous wave radar นั้นเป็นเรดาร์คลื่นความถี่ต่อเนื่องถ้า CW doppler radar ถูกปรับความถี่ไปตามเวลาแล้ว หรือเรียกได้ว่าการผสมสัญญาณ (modulated) แล้ว เรดาร์นั้นจะถูกเรียกว่า radar modulated continuous wave (FMCW) หรือ FMCW doppler radar เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว สายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ โดยเรดาร์นี้จะวัดทั้งความเร็วของเป้าหมาย และยังสามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้

งานวิจัยนี้จะพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนและสิ่งแปลกปลอมบริเวณฐานปฏิบัติการในพื้นที่เสี่ยงภัยเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในบริเวณโดยรอบของฐานปฏิบัติการ เนื่องจากปัจจุบันมีการใช้งานโดรนกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งทำให้มีความเสี่ยงสูง อาจเกิดการใช้โดรนในการสอดแนมหรือโจมตี

## การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ฐานปฏิบัติการ นำมาซึ่งความสูญเสียทั้งทรัพย์สินและอาจอันตรายถึงชีวิตต่อเจ้าหน้าที่และผู้เกี่ยวข้องได้ การวิจัยและพัฒนาเรดาร์ตรวจจับโครนจึงเป็นที่จำเป็นในการรักษาความมั่นคงของฐานปฏิบัติการในพื้นที่เสี่ยงภัยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยที่งานวิจัยจะสามารถแบ่งส่วนประกอบต่างๆ ที่จำเป็นต้องพัฒนาของระบบเรดาร์เป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังแสดงด้านล่างคือ

- 1) **สายอากาศ** การออกแบบสายอากาศต้องออกแบบสายอากาศเป็นสายอากาศที่อัตราขยายสูงและมีลำคลื่นทางเดียว และทำงานในย่านความถี่กว้างครอบคลุมย่าน X-band ของระบบเรดาร์
- 2) **เครื่องรับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** โดยเครื่องรับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำหน้าที่กำหนดและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติแบบ FMCW กล่าวคือมีการมอดูเลตทางความถี่ที่ความถี่ย่าน X-band ความถี่มีการเปลี่ยนตามหลักการของ FMCW ตามที่ได้กล่าวข้างต้น และจะทำหน้าที่รับสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างวดด้วย เมื่อสัญญาณที่ส่งไปสะท้อนกับเป้าหมายกลับมายังสถานีของเรดาร์
- 3) **ระบบประมวลผลเรดาร์** โดยระบบประมวลผลเรดาร์จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบเรดาร์ทั้งหมด รวมถึงควบคุมการทำงานของเครื่องรับ-ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย และสัญญาณที่สะท้อนกลับมายังสถานีเรดาร์จะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและทำการประมวลผลสัญญาณ เช่น การกรองสัญญาณรบกวน การตรวจจับสิ่งแปลกปลอม การระบุเป้าหมายและระยะของสิ่งแปลกปลอม เป็นต้น

## 2. วิธีการศึกษา

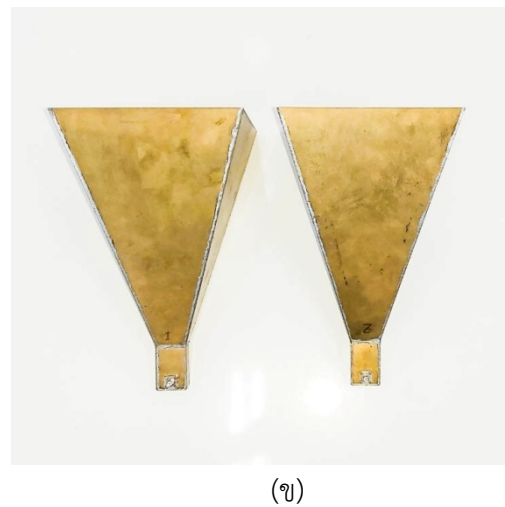
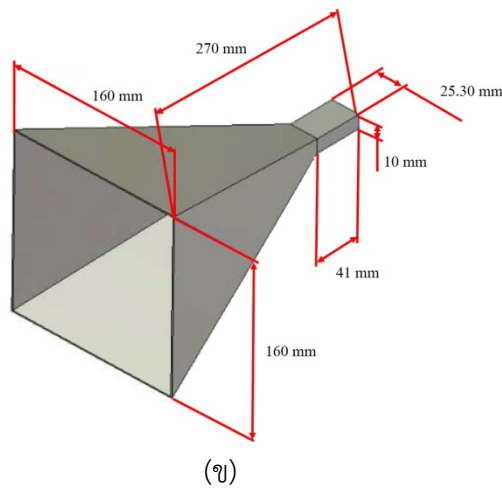
### 2.1 การออกแบบและผลการทดสอบสายอากาศปากแตร (Horn antenna)

สายอากาศปากแตรแบบ (horn antenna) มีอัตราการขยายของการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูง (high antenna gain) ถูกใช้ในสายอากาศของระบบเรดาร์ที่ใช้การค้นหาเป้าหมายแบบการหมุนรอบตัวทางกลไกล ซึ่งจะให้อัตราการขยายที่สูงและให้รูปแบบแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (radiation pattern) เป็นแบบ ทิศทางเดียว (unidirectional radiation pattern) ซึ่งการออกแบบสายอากาศปากแตรทรงพีระมิดจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกทำการหาขนาดของสายอากาศจากสมการ จากนั้นนำขนาดที่คำนวณได้ไปจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์และรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศและปรับหาค่าที่เหมาะสมต่อไป

เรดาร์คลื่นต่อเนื่องต้องการอัตราการขยายของสายอากาศที่สูงสำหรับการตรวจจับเป้าหมายที่มีขนาดเล็ก โดยในการออกแบบสายอากาศจะใช้โครงสร้างสายอากาศแบบปากแตรที่มีขนาดตั้งรูปที่ 1 (ก) ในการส่งและรับสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง ดังนั้นวัสดุที่ใช้สำหรับสร้างสายอากาศเป็นแผ่นทองแดงที่ตัดด้วยเลเซอร์ และเชื่อมเข้าด้วยกันเพื่อสร้างสายอากาศแบบปากแตรตั้งรูปที่ 1 (ข) โดยการเพิ่ม

อัตราขยายของสายอากาศจะใช้สายอากาศแบบปากแตรทั้งหมด 4 ตัวด้วยกัน เพื่อสร้างสายอากาศแบบอาร์เรย์

ทำการวัดประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยการส่งสัญญาณความถี่วิทยุที่ผ่านสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งพบว่าสายอากาศมีลำคลื่น (Beam) ที่มุม 13 องศา แสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)  $|S_{11}| < -10\text{dB}$  โดยสามารถใช้งานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ 8 ถึง 10 GHz ตรงตามย่านความถี่ X band การแผ่รังสี (Radiation pattern) ของสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งสายอากาศต้นแบบให้อัตราขยาย ที่ 20 dB และให้อัตราขยาย ที่ 23 dB ของการใช้งานสายอากาศแบบอาร์เรย์ (Array antenna)



รูปที่ 1 การออกแบบสายอากาศ (ก) ขนาดของสายอากาศ (ข) สายอากาศแบบปากแตร

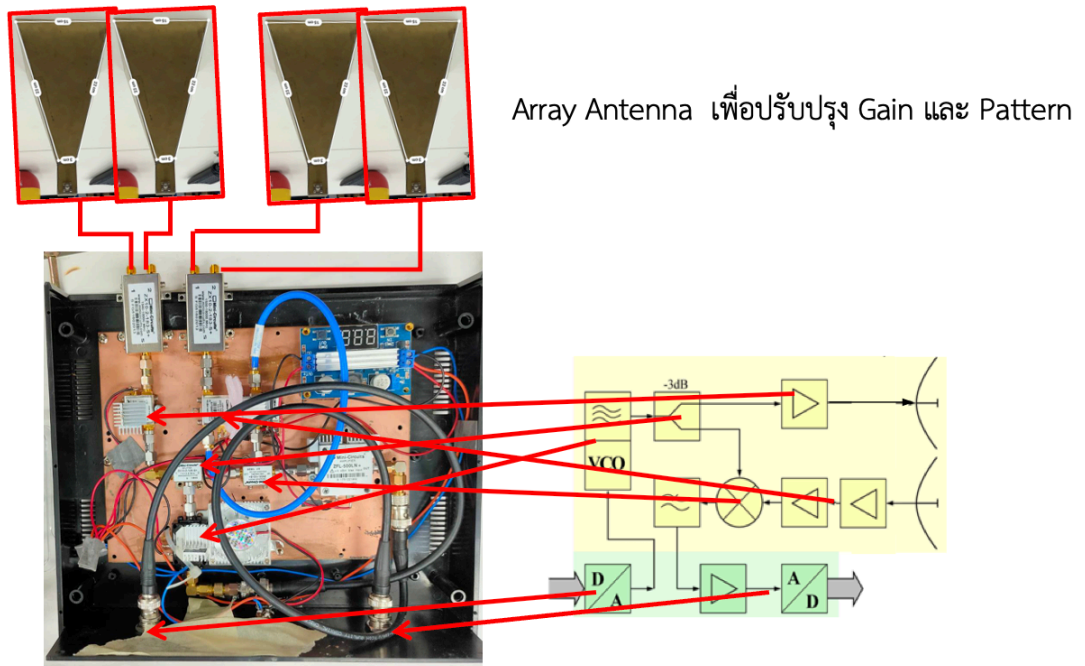
## 2.2 การพัฒนาภาครับและส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของระบบเรดาร์สำหรับการตรวจจับโครน

ระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (continuous wave radar) ชนิดผสมสัญญาณ (FMCW) เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว โดยสายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ คลื่นความถี่ของสัญญาณถูกปรับความถี่ ไปตามเวลาหรือเรียกได้ว่าการผสมสัญญาณ (modulated) เพื่อปรับความถี่ โดยเรดาร์นี้จะวัดทั้งความเร็วของเป้าหมายและยังสามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้ ในรูปที่ 2 แสดงระบบเรดาร์ FMCW ที่สร้างขึ้น ซึ่งประกอบไปด้วย

1. วงจรผสมสัญญาณ RF mixer
2. วงจรขยายสัญญาณการรบกวนต่ำ (low noise amplifier)

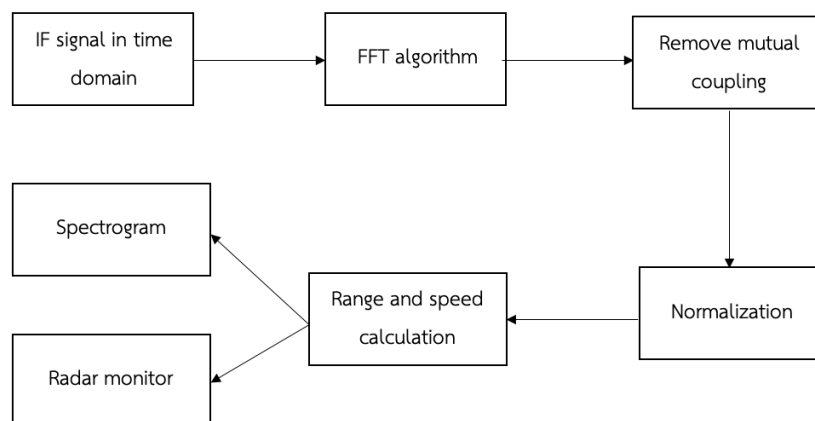
การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

3. วงจรแบ่งกำลังงาน (power divider)
4. วงจรขยายสัญญาณความถี่กลาง (IF amplifier)
5. สายอากาศรับ-ส่ง (Tx, Rx antennas)
6. วงจรแปลงสัญญาณจากสัญญาณต่อเนื่องเป็นสัญญาณดิจิทัล (analog to digital converter)



รูปที่ 2 ระบบเรดาร์ FMCW ที่สร้างขึ้น

### 2.3 การพัฒนาซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของระบบเรดาร์



รูปที่ 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณ

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โครนเพื่อป้องกันการบิน โครนที่ไม่ได้รับอนุญาต

การประมวลผลสัญญาณของเรดาร์ตรวจจับโครนที่เป็นประเภทคลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ จะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอนหลัก ๆ ตามรูปที่ 3 โดยจะเริ่มจากรับค่าสัญญาณพีทในโดเมนเวลาที่เกิดจากการมิกซ์กันของสัญญาณภาครับและภาคส่ง จากนั้นแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่ด้วย FFT อัลกอริทึม [4]

ข้อมูลของสัญญาณที่ได้รับมาจะอยู่ในรูปของโดเมนเวลา การที่จะระบุระยะห่างระหว่างโครนกับเรดาร์และความเร็วของโครนจำเป็นต้องวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ ดังนั้นซอฟต์แวร์จะนำข้อมูลในโดเมนเวลาแปลงเป็นโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูรีเย แต่เนื่องจากข้อมูลเป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่อง จึงต้องแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform) ตามสมการที่ 4 โดยที่  $a_n$  คือสัญญาณไม่ต่อเนื่องของ IF signal ในโดเมนเวลา

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} a_n \quad (2.1)$$

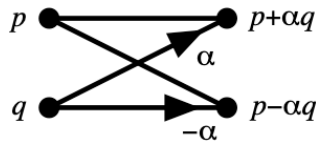
N

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.1658	0.0824	0.1658	0.1658	0.1658	0.0824	0.1658	0.1658
2	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.0824	0.0824	0.1658
3	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.0824	0.1658	0.1658
4	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658
5	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658
6	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
7	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
8	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491
9	0.1658	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
10	0.1658	0.1658	0.2491	0.1658	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
11	0.1658	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
12	0.1658	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
13	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.2491
14	0.2491	0.1658	0.1658	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658	0.1658
15	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491	0.2491	0.1658	0.2491	0.2491
16	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491	0.1658	0.1658
17	0.2491	0.1658	0.2491	0.3324	0.2491	0.2491	0.2491	0.2491
18	0.2491	0.1658	0.2491	0.3324	0.3324	0.2491	0.2491	0.2491
19	0.3324	0.1658	0.3324	0.3324	0.3324	0.1658	0.1658	0.2491
20	0.2491	0.3324	0.3324	0.3324	0.3324	0.2491	0.2491	0.2491

รูปที่ 4 แสดงเมทริกซ์ข้อมูลสัญญาณ IF signal ที่ได้รับจากตัวแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัล

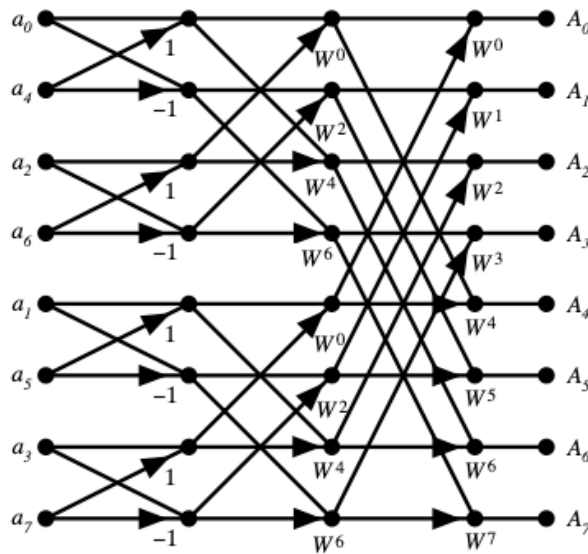
ในกรณีที่จำนวนจุดของข้อมูลเยอะ จะทำให้การคำนวณใช้เวลานานจึงมีการใช้ The Fast Fourier Transform (FFT) Algorithm เพื่อลดระยะเวลาในการประมวลผล fft อัลกอริทึมมีอยู่หลายรูปแบบ ในงานครั้งนี้ใช้ decimation in-time FFT algorithm หลักการ fft อัลกอริทึมนี้คือ การแยกการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องให้กลายเป็น  $\log_2 N$  สถานะ และแต่ละสถานะจะประกอบด้วย การ [สัญญาณเลขที่ A62-1-(2)-008]

จำนวน  $N/2$  butterfly ซึ่ง butterfly เป็นชื่อที่ใช้เรียกแทนขั้นตอนย่อยในการคำนวณการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องตามรูปที่ 5 โดย butterfly จะประกอบไปด้วยการคำนวณจำนวนเชิงซ้อน 2 ตัวนั้น คือ  $p$  และ  $q$



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนย่อยในการคำนวณการแปลงฟูรีเยแบบไม่ต่อเนื่องหรือเรียกว่า butterfly

ยกตัวอย่างแผนภาพในการคำนวณของอัลกอริทึม fft ตามรูปที่ 6 (ก) เป็นการคำนวณในกรณีที่มีจำนวนข้อมูล 8 จุด สังเกตเห็นว่าลำดับของ  $a_n$  และ  $A_k$  จะไม่ตรงกันเพราะอัลกอริทึมจะนำแต่ละ butterfly มาต่อกันและสลับ bit ของลำดับระหว่าง  $a_n$  กับ  $A_k$  ตามรูปที่ 6 (ข)



(ก)

$j$	0	1	2	3	4	5	6	7
$n_j$	0	4	2	6	1	5	3	7
$j$ base 2	000	001	010	011	100	101	110	111
$n_j$ base 2	000	100	010	110	001	101	011	111

(ข)

รูปที่ 6 แสดงแผนภาพการคำนวณของอัลกอริทึม fft (ก) แผนภาพการคำนวณในกรณีที่มีจำนวนข้อมูล 8 จุด (ข) การสลับ bit ลำดับของ  $a_n$  และ  $A_k$



เมื่อได้สัญญาณในโดเมนความถี่มาแล้วจะทำการลบสัญญาณแทรกข้ามระหว่างสายอากาศภาครับและภาคส่งเพื่อให้เรดาร์ตรวจจับโดรนในระยะไกลได้ [5] อีกทั้งยังทำให้ความถี่บีที่ใช้คำนวณหาระยะห่างระหว่างโดรนกับเรดาร์เด่นชัดขึ้น แต่ยังมีสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นที่ความถี่ใกล้เคียงกับความถี่บีจึงต้องทำการนอร์มัลไลเซชัน เพื่อให้ความถี่บีชัดเจนยิ่งขึ้น เมื่อทราบความถี่บีที่แม่นยำแล้วจะนำความถี่บีนั้นไปคำนวณหาระยะทางและความเร็วของโดรน [6] ตามสมการด้านล่าง

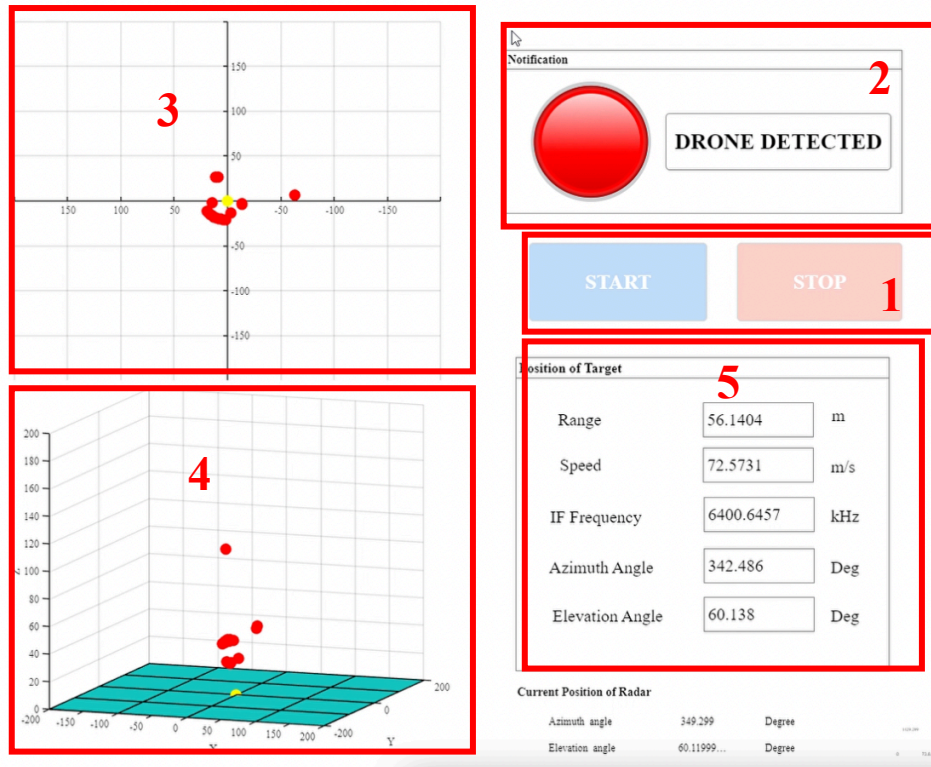
$$R = \frac{T_m c}{2Bw} f_b \quad (2.2)$$

เมื่อ  $T_m$  คือ คาบเวลาของความถี่สามเหลี่ยม

$Bw$  คือ แบนด์วิธของสัญญาณที่ถูกกล่าวความถี่

ค่าที่คำนวณได้จะส่งไปยังหน้าจอประมวลผลตามรูปที่ 7 โดยส่วนที่ 1 จะเป็นปุ่มเริ่ม/หยุดทำงานโปรแกรม ส่วนที่ 2 การแจ้งเตือนสถานะเมื่อเจอโดรน ข้อมูลระยะห่างของโดรนที่ตรวจจับได้ และข้อมูลมุมของชุดหมุนมาพล็อตตำแหน่งทั้งแบบ 2 มิติ (ระนาบ xy : ส่วนที่ 3) และแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz : ส่วนที่ 4) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถทราบถึงตำแหน่งของโดรนได้ง่ายขึ้น รายละเอียดตำแหน่งของโดรนทั้งระยะห่างของเป้าหมายกับเรดาร์ ความเร็วเฉลี่ยของโดรน ตำแหน่งมุม azimuth ของโดรนเมื่อเทียบกับเรดาร์และตำแหน่งมุม elevation ของโดรนเมื่อเทียบกับเรดาร์จะแสดงอยู่ในส่วนที่ 5 และตำแหน่งล่างขวาของตัวโปรแกรมจะแสดงตำแหน่งมุมปัจจุบันของเรดาร์เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบตำแหน่งของเรดาร์

### Radar Drone Detection Monitor

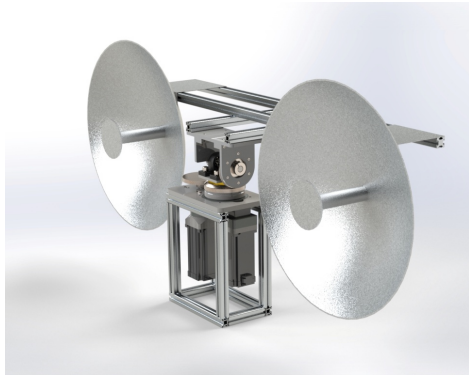


รูปที่ 7 ส่วนติดต่อผู้ใช้งานใช้งานร่วมกับเรดาร์ตรวจจับโดรน

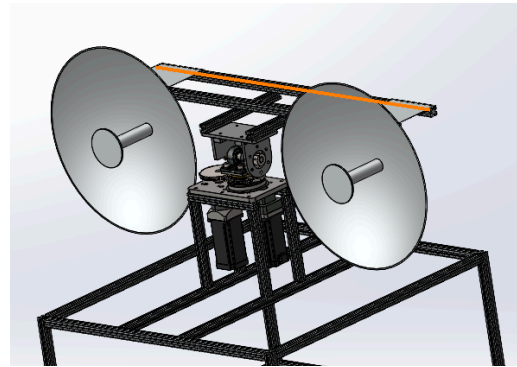
#### 2.4 การพัฒนาระบบหมุนค้นหาเป้าหมาย

ในส่วนของผลการพัฒนาระบบหมุนค้นหาเป้าหมายในรูปแบบหมุนสองแกน โดยระบบเรดาร์ ที่ทำการออกแบบจะถูกติดตั้งเข้ากับระบบหมุนแบบสองแกนที่สามารถหมุนในแนวมุมกวาดและแนว มุมยกแบบอิสระต่อกันดังแสดงในรูปที่ 8 โดยที่ชุดหมุนสองแกนที่ทำการออกแบบนี้ประกอบไปด้วย ชุดโครงสร้างทางกลที่ออกแบบให้มีการขับเคลื่อนแบบ Differential Drive ซึ่งเซอร์โวมอเตอร์ต้น กำลังของทั้งสองแกนถูกติดตั้งอยู่ด้านล่างและส่งกำลังขึ้นไปยังชุดหมุนสองแกน โดยใช้เฟืองที่ ออกแบบให้มีการขับเคลื่อนแบบ Differential เพื่อให้มีน้ำหนักที่บริเวณของชุดหมุนที่มีการเคลื่อนที่นั้น มีน้ำหนักเบา และสามารถออกแบบให้ติดตั้งชุด Slip-Ring เพื่อใช้ในการ รับ-ส่ง สัญญาณเรดาร์จาก สายอากาศที่ตั้งอยู่บนชุดหมุนสอง โดยโครงสร้างส่วนใหญ่จะใช้วัสดุอลูมิเนียมเพื่อลดน้ำหนัก โดย ออกแบบให้รองรับน้ำหนักของชุดสายอากาศในระบบเรดาร์สูงสุดที่ 14 กิโลกรัม โดยมีความเร็วใน การหมุนที่สามารถกำหนดได้ อยู่ในช่วงระหว่าง 1 รอบต่อ 10 วินาที และความเร็วสูงสุดที่ 1 รอบต่อ 4 วินาที โดยมีค่าความผิดพลาดที่รับได้ที่ 5% ออกแบบโดยใช้วัสดุที่แข็งแรงและเบา สามารถขนย้าย ได้ง่าย

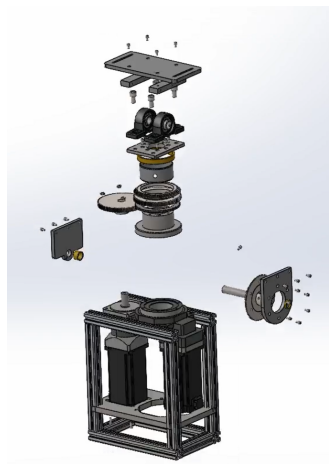
การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 8 (ก) การติดตั้งระบบเรดาร์บนระบบชุดหมุนสองแกน (ข) ระบบชุดหมุนสองแกนที่ติดตั้งบนฐานรับน้ำหนัก (ค) องค์ประกอบต่างๆแบบสามมิติของระบบชุดหมุนสองแกน

### 3. ผลการศึกษา

#### ทดสอบระบบเรดาร์ที่พัฒนาเพื่อใช้ในการตรวจจับโดรน

การทดสอบประสิทธิภาพของเรดาร์ตรวจจับโดรน ที่วิจัยได้เลือกสถานที่ทดสอบเป็นที่สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือเพราะมีสภาพแวดล้อมที่เป็นที่โล่งและกว้างเพียงพอที่จะทดสอบประสิทธิภาพของเรดาร์โดยสนามมีเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวทแยง 128.5 เมตร ตามรูปที่ 9 (ก,ข) และจะติดตั้งเรดาร์ไว้บริเวณกลางสนามกีฬาตามรูปที่ 9 (ค)

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



(ก)



(ข)



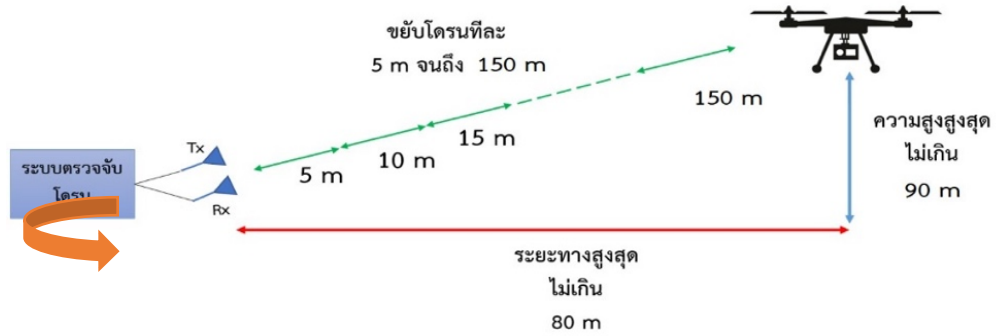
(ค)

รูปที่ 9 สถานที่ทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรน (ก) ตำแหน่งจีพีเอสบนพื้นที่ใช้ในการทดสอบ (ข) สนามกีฬาของมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (ค) เรดาร์ตรวจจับโดรนโดยใช้สายอากาศ Horn antenna

### 3.1 ทดสอบเรดาร์โดยเพิ่มระดับความสูงของโดรน

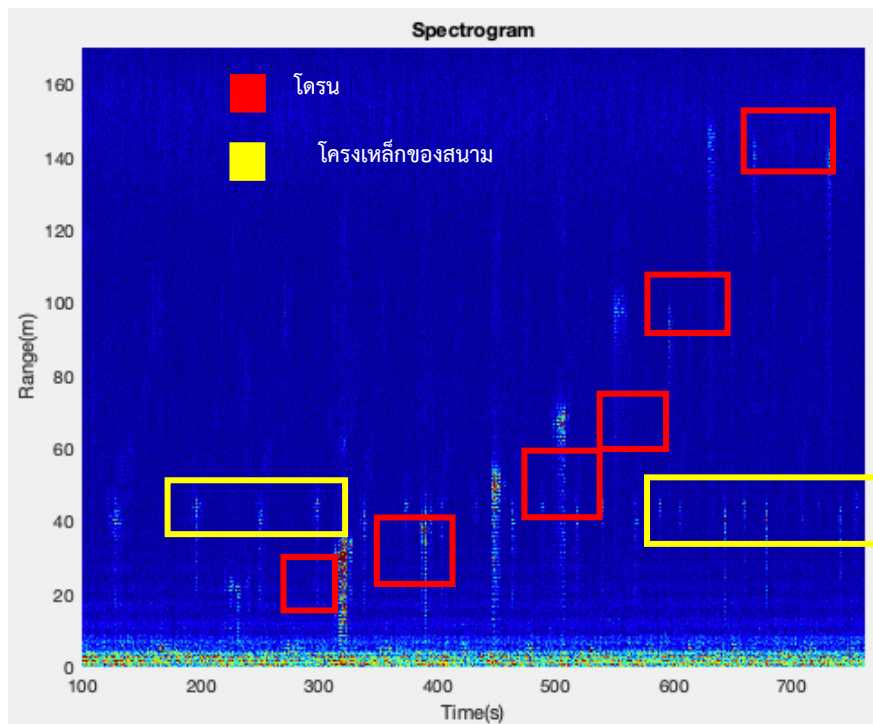
จากรูปที่ 9 (ข) จะเห็นว่าสนามกีฬามีโครงเหล็กล้อมรอบสนามอยู่ ดังนั้นการทดสอบเรดาร์ ในแบบหมุนจะตั้งค่าให้มุม elevation อยู่ที่ 60 องศาเพื่อให้เรดาร์ไม่เจอโครงเหล็ก รูปแบบในการทดสอบจะเป็นไปตามรูปที่ 10 โดรนจะค่อย ๆ ขยับเพดานบินสูงขึ้นเรื่อยๆ ในแต่ละรอบที่เรดาร์ หมุน

การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับ โดรนเพื่อป้องกันการบิน โดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



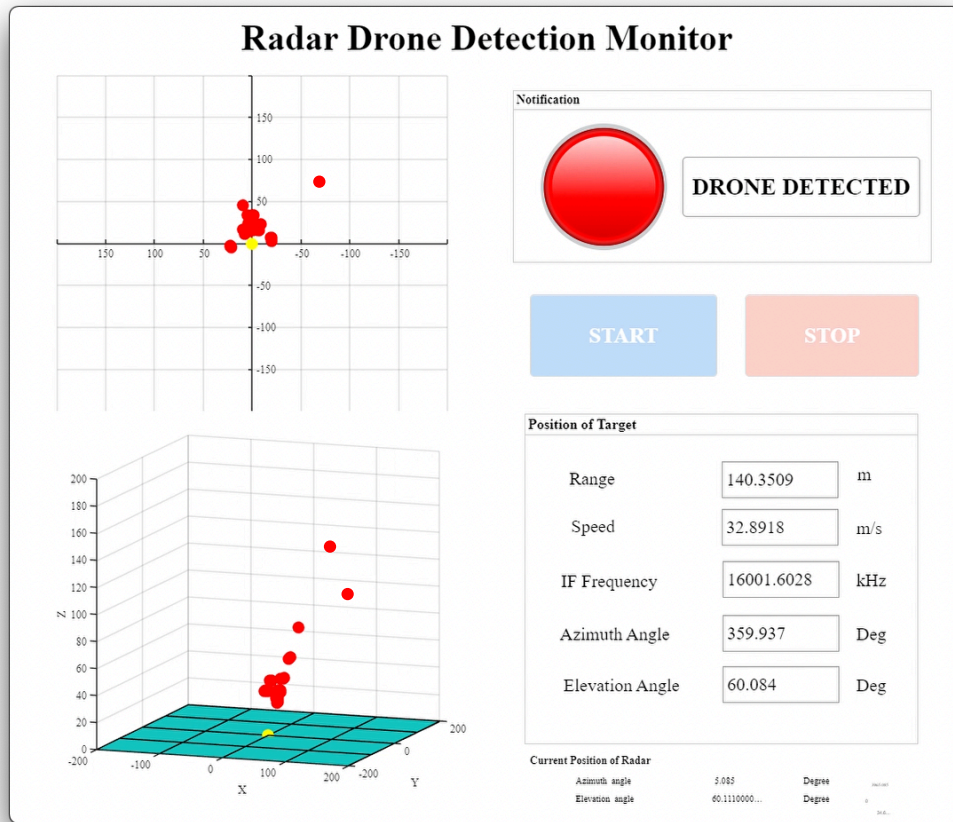
รูปที่ 10 ขั้นตอนการทดสอบเรดาร์โดรนที่กำลังหมุนโดยให้โดรนเพิ่มระดับความสูงขึ้นไปเรื่อย ๆ

นำข้อมูลสัญญาณที่ได้จากเรดาร์มาพล็อตในรูปของแผนภาพ spectrogram จะเห็นภาพรวมของข้อมูลและแนวทางการบินของโดรนที่ค่อย ๆ บินห่างจากเรดาร์ รวมถึงโครงเหล็กของสนามกีฬาที่เรดาร์ตรวจเจอในทุก ๆ รอบที่ระยะห่างจากเรดาร์ 40 เมตร ตามรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลการทดสอบเรดาร์แบบหมุนในรูปของแผนภาพ spectrogram

หากแสดงข้อมูลต่าง ๆ ในรูปแบบของส่วนติดต่อผู้ใช้งานจะเป็นไปตามรูปที่ 12 ทำการเปรียบเทียบที่เรดาร์วัดได้กับกล้องตรวจวัดระยะเป็นไปตามตารางที่ 3.1 จะพบว่าค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดจะอยู่ที่ -2.28 % ซึ่งอาจเกิดจากขณะวัดระยะด้วยกล้องวัดระยะ โดรนมีการเคลื่อนที่ออกทำให้ระยะที่บันทึกกับระยะที่เรดาร์ตรวจจับได้คลาดเคลื่อนกัน



รูปที่ 12 ส่วนติดต่อผู้ใช้งานใช้งานร่วมกับเรดาร์ตรวจจับโดรน

ตารางที่ 3.1 ตารางการเปรียบเทียบระยะของโดรนระหว่างเรดาร์กับกล้องตรวจวัดระยะ

ตำแหน่งที่	ระยะที่เรดาร์วัดได้	ระยะที่กล้องวัดระยะวัดได้	Error (%)
1	21.714 m	21.5 m	-0.99 %
2	36.190 m	36.0 m	-0.52 %
3	65.174 m	65.5 m	+0.49 %
4	65.800 m	65.5 m	-0.45 %
5	103.306 m	101.0 m	-2.28 %
6	140.351 m	140.0 m	-0.25 %

#### 4. สรุป

ระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนได้ถูกพัฒนาขึ้นทั้งในส่วนฮาร์ดแวร์ที่ใช้สายอากาศปากแตรแบบ (horn antenna) รูปแบบแผ่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นแบบทิศทางเดียว โดยสามารถใช้งานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ 8 ถึง 10 GHz ตรงตามย่านความถี่ X band ซึ่งสายอากาศต้นแบบให้อัตราขยาย ที่ 23 dB ใช้งานในระบบเรดาร์แบบสัญญาณคลื่นต่อเนื่อง (continuous wave radar) ชนิดผสมสัญญาณ (FMCW) เรดาร์นี้ต้องใช้สายอากาศสองตัว โดยสายอากาศตัวแรกจะมีหน้าที่ส่งสัญญาณและสายอากาศตัวที่สองมีหน้าที่รับสัญญาณ คลื่นความถี่ของสัญญาณถูกปรับความถี่ ไปตามเวลาหรือเรียกได้ว่าการผสมสัญญาณ (modulated) เพื่อปรับความถี่ โดยเรดาร์นี้จะวัดทั้งความเร็วของเป้าหมายและยังสามารถวัดระยะห่างของเป้าหมายกับที่ตั้งระบบเรดาร์ได้ และส่วนซอฟต์แวร์การประมวลผลสัญญาณใช้วิธีการแปลง FFT เพื่อหาความถี่ที่นำไปคำนวณระยะของวัตถุ จากนั้นมีค่าระยะที่คำนวณได้มาพล็อตกับส่วนติดต่อผู้ใช้งานทั้งในแบบ 2 มิติและ 3 มิติ รวมถึงระบบเรดาร์ที่พัฒนาขึ้นถูกติดตั้งไว้กับระบบหมุนเพื่อค้นหาเป้าหมายทำให้การค้นหาโดรนทำได้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้มีการทดสอบประสิทธิภาพของเรดาร์ ผลลัพธ์ที่ได้คือเรดาร์สามารถตรวจพบโดรนได้ถึงระยะ 140 m ที่กำลังส่ง 10W อีกทั้งสามารถพล็อตเส้นทางการบินของโดรนได้

#### 5. อ้างอิง

- [1] <http://www.radartutorial.eu/01.basics/!rb02.en.html>
- [2] "FMCW radar sensors application notes," [www.siversima.com](http://www.siversima.com)
- [3] Kurt Peek, "An Analysis of the Effects of Digital Phase Errors on the Performance of a FMCW-Doppler Radar," A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE in APPLIED PHYSICS, The University of Twente, September 2011.
- [4] Heckbert, P.S. (1998). Fourier Transforms and the Fast Fourier Transform ( FFT ) Algorithm.
- [5] T. Hauschild and R. Knochel, "Calibration of short range FMCW-radar with network analyzer calibration techniques," 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.98CH36192), 1998, pp. 969-972 vol.2, doi: 10.1109/MWSYM.1998.705153.
- [6] Johan Svensson, "High Resolution Frequency Estimation in an FMCW Radar Application," Master of Science Thesis in Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering, Linköping University, 2018.

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

ภาคผนวก ข

เอกสารแสดงการขออนุญาตใช้คลื่นความถี่จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

เอกสารขอทำ มี และใช้ เครื่องวิทยุคมนาคม



การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



ที่ อว 7100/1450

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ  
กรุงเทพฯ 10800

14 มิถุนายน 2564

เรื่อง ขอให้ความถี่เพื่อดำเนินงานโครงการการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

เรียน เลขาธิการ กสทช.

อ้างถึง สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2563

ตามสัญญาที่อ้างถึง คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ได้สนับสนุนเงินจากกองทุนวิจัยและพัฒนาโครงการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ ประเภทที่ 1 ประจำปี 2562 ตามวัตถุประสงค์มาตรา 52 (2) แห่งพระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่ฯ พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติม ให้ดำเนินงานวิจัยเรื่องการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร.เอกกรัฐ บุญญา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นหัวหน้าโครงการงบประมาณ 9,969,190.00 บาท (เก้าล้านเก้าแสนหกหมื่นเก้าพันหนึ่งร้อยเก้าสิบบาทถ้วน) ระยะเวลาดำเนินโครงการ 24 เดือน นั้น

ในการดำเนินงานวิจัยดังกล่าว จำเป็นต้องทำการทดสอบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรน โดยการทดสอบต้องส่งและรับสัญญาณในย่านความถี่ 9.876 GHz – 9.985 GHz และ 10.566 GHz – 10.689 GHz ด้วยกำลังส่งไม่เกิน 60 วัตต์ การทดสอบจะดำเนินการทดสอบบริเวณภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน) จึงขออนุญาตใช้ความถี่ในย่านความถี่ 9.876 GHz – 9.985 GHz และ 10.566 GHz – 10.689 GHz เพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาอนุญาต จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทรอัมพร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ

ปฏิบัติการแทนอธิการบดี

ฝ่ายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือ สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 1506, 1512 - 1513

โทรสาร 0 2556 1306

# การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ที่ อว 7100/3152



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ  
กรุงเทพฯ 10800

8 พฤศจิกายน 2564

เรื่อง ขออนุญาตทำ มีและใช้เครื่องวิทยุคมนาคมเพื่องานวิจัยและพัฒนา

เรียน เลขาธิการคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ

ตามที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือได้รับเงินสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.) เพื่อดำเนินโครงการวิจัยเรื่อง การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2563 โดยมีรองศาสตราจารย์ ดร. เอกรัฐ บุญภูงา อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นหัวหน้าโครงการวิจัย นั้น

เพื่อให้การดำเนินโครงการวิจัยสำเร็จลุล่วง จำเป็นต้องทำ มีและใช้เครื่องวิทยุคมนาคม สำหรับการทดลอง ค้นคว้า วิจัย พัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวิทยุคมนาคม ดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการและในพื้นที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยการทำให้เครื่องวิทยุคมนาคมนั้นจะทำการประกอบเครื่องวิทยุคมนาคมเองจากวัสดุที่ได้ภายในประเทศ ดังนั้นมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ จึงขออนุญาตทำ มีและใช้เครื่องวิทยุคมนาคมเพื่องานวิจัยและพัฒนาของโครงการวิจัยดังกล่าว

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาอนุมัติการขออนุญาตทำ มีและใช้เครื่องวิทยุคมนาคมเพื่องานวิจัยและพัฒนา เป็นระยะเวลา 180 วันนับจากวันที่อนุมัติ จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทรมรร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ

ปฏิบัติการแทนอธิการบดี

ฝ่ายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือ สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 1506, 1512 – 1513 (ชลิตา/ สุรีย์พงศ์/ ธนพล/ จิตติมา)  
โทรสาร 0 2556 1306

# การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต



ที่ สทช ๒๔๐๙/๔๐๑๙๘

ถึง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ตามหนังสือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ อว ๗๑๐๐/๑๗๕๐ ลงวันที่ ๑๔ มิถุนายน ๒๕๖๔ ขออนุญาตใช้คลื่นความถี่ ๙.๘๗๖ - ๙.๙๘๕ GHz และ ๑๐.๕๖๖ - ๑๐.๖๘๙ GHz ในการดำเนินงานวิจัย เรื่อง การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนและป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยมีระยะเวลาดำเนินโครงการ ๒๔ เดือน นั้น

สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ขอเรียนว่า เพื่อพิจารณาอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่และเครื่องวิทยุคมนาคมในการดำเนินงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในครั้งนี้ จึงขอให้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือส่งเอกสารเพื่อประกอบการพิจารณาเพิ่มเติม ดังนี้

๑. เหตุผลความจำเป็นของการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และใช้เครื่องวิทยุคมนาคม
๒. ความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และภารกิจของหน่วยงาน
๓. รายละเอียดประกอบคำขออนุญาตใช้ความถี่วิทยุ (แบบ คท. ๒๐)
๔. ข่ายสื่อสารการใช้เครื่องวิทยุคมนาคม (รายละเอียดโครงการวิจัย)

อนึ่ง หากมีข้อสงสัยประการใด ขอให้ประสานงานกับนายพลวัต สุขมพันธ์ โทรศัพท์หมายเลข ๐ ๒๖๗๐ ๘๘๘๘ ต่อ ๗๘๒๕



สำนักงานอนุญาตวิทยุคมนาคม ๑  
โทร. ๐ ๒๖๗๐ ๘๘๘๘ ต่อ ๗๘๒๕  
โทรสาร ๐ ๒๖๙๐ ๕๒๓๓  
ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ saraban\_2409@nbtc.go.th

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ที่ อว 7100/3362



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
1518 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ  
กรุงเทพฯ 10800

26 พฤศจิกายน 2564

เรื่อง ขอส่งเอกสารเพื่อประกอบการพิจารณาเพิ่มเติม

เรียน เลขาธิการ กสทช.

- อ้างถึง 1. สัญญาเลขที่ A62-1-(2)-008 ลงวันที่ 26 มิถุนายน 2563  
2. หนังสือที่ อว 7100/1750 ลงวันที่ 14 มิถุนายน 2564  
3. หนังสือที่ สทช 2409/40198 ลงวันที่ 28 กันยายน 2564

- สิ่งที่ส่งมาด้วย 1. เหตุผลความจำเป็นของการขอรับการจัดสรรคลื่นความถี่และใช้เครื่องวิทยุคมนาคม  
2. ความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และภารกิจของหน่วยงาน  
3. รายละเอียดประกอบคำขออนุญาตใช้ความถี่วิทยุ (แบบ คท. 20)  
4. ข่ายสื่อสารการใช้เครื่องวิทยุคมนาคม (รายละเอียดโครงการวิจัย)

ตามสัญญาที่อ้างถึง คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ ได้สนับสนุนเงินจากกองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ ประเภทที่ 1 ประจำปี 2562 ตามวัตถุประสงค์มาตรา 52 (2) แห่งพระราชบัญญัติองค์กรจัดสรรคลื่นความถี่ฯ พ.ศ. 2553 และที่แก้ไขเพิ่มเติม ให้ดำเนินงานวิจัยเรื่องการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยมี รองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญญา อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นหัวหน้าโครงการงบประมาณ 9,969,190.00 บาท (เก้าล้านเก้าแสนหกหมื่นเก้าพันหนึ่งร้อยเก้าสิบบาทถ้วน) ระยะเวลาดำเนินโครงการ 24 เดือน และตามหนังสือที่อ้างถึงหมายเลข 2 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือได้ขออนุญาตใช้ความถี่จากสำนักงาน กสทช. และหนังสือที่อ้างถึงหมายเลข 3 สำนักงาน กสทช. ขอให้ส่งเอกสารเพื่อประกอบการพิจารณาเพิ่มเติม นั้น

บัดนี้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยคณะผู้วิจัยได้จัดทำเอกสารเพื่อประกอบการพิจารณาเพิ่มเติมเสร็จสิ้นแล้ว จึงขอส่งเอกสารเพื่อประกอบการพิจารณาเพิ่มเติม รายละเอียดตามสิ่งที่ส่งมาด้วย หมายเลข 1 – 4 เพื่อพิจารณาอนุมัติการขออนุญาตใช้ความถี่ 9.876-9.985 GHz และ 10.566-10.689 GHz

จึงเรียนมาเพื่อโปรดพิจารณาอนุญาต จักขอบคุณยิ่ง

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทอัมพร)


รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ

ปฏิบัติการแทนอธิการบดี

ฝ่ายส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือ สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 1506, 1512 - 1513 โทรสาร 0 2556 1306

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

 สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ	รายละเอียดประกอบคำขออนุญาตใช้ความถี่วิทยุ	แบบ คท.20
		สำหรับเจ้าหน้าที่ เอกสารเลขที่..... ลงวันที่.....

ก. โปรดกรอกข้อมูลและทำเครื่องหมาย  ลงใน  ให้ถูกต้องครบถ้วน หากข้อความใดไม่ใช่ให้ขีดฆ่า เช่น ชื่อกำกับ

รายละเอียดของผู้ขออนุญาต

1. ย่านความถี่ที่ขออนุญาตให้จัดสรร  LF  MF  HF  VHF  UHF  SHF (ในกรณีขออนุญาตใหม่)
2. ความถี่จัดสรร (Assigned Frequency) ..... 9.876-9.985 GHz และ 10.566-10.689 GHz .....  
 KHz  MHz  GHz (ในกรณีขออนุญาตขยายขยาย, ทดแทนหรือสำรองเครื่อง)
3. ความถี่มูล (Fundamental) ..... 9.876 .....  KHz  MHz  GHz
4. วันเริ่มใช้งาน..... 1 ธันวาคม 2564 .....
5. สัญญาณเรียกขาน.....เรดาร์ตรวจจับโคจร.....
6. ที่ตั้งเลขที่ 1518 ..... ถนน ประชาราษฎร์.1 ..... ตำบล/แขวง ..... วงศ์สว่าง  
 อำเภอ/เขต..... บางซื่อ..... จังหวัด..... กรุงเทพมหานคร  
 Latitude..... 13.8191° N ..... Longitude..... 100.5143° E
7. ติดต่อกับ (ชื่อสถานี)..... มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
 เลขที่..... 1518 ..... ถนน..... ประชาราษฎร์.1 ..... ตำบล/แขวง..... วงศ์สว่าง  
 อำเภอ/เขต..... บางซื่อ..... จังหวัด..... กรุงเทพมหานคร  
 Latitude..... 13.8191° N ..... Longitude..... 100.5143° E
8. รัศมีทำการ..... 1 ..... กิโลเมตร
9. จำนวนเครื่องที่ขออนุญาต..... 1 ..... เครื่อง
10. ชนิด  มือถือ  ประจำที่  เคลื่อนที่
11. กำลังส่ง..... 10mW-35W  mW  W  kW
12. ความกว้างของแถบคลื่น (Necessary Bandwidth) ..... 80 .....  KHz  MHz
13. ระบบการส่ง  AM  FM  DSB  LSB  CW  FDW  PCM  TDM  อื่น ๆ.....
14. ระบบการติดต่อ  Simplex  Duplex  Semi-Duplex  Simplex two Frequency  
 Frequency Diversity  Space Diversity  อื่น ๆ (ระบุ) .....
15. ประเภทการส่ง..... สัญญาณเรดาร์คลื่นต่อเนื่อง.....
16. ใช้งานตั้งแต่..... 9:00 ..... น. ถึง..... 15:00 ..... น.
17. ลักษณะและชนิดของการกระจายคลื่นของสายอากาศ
  - 17.1 ทิศทางกระจายคลื่นแรงที่สุดในระนาบ (Azimuth of MAX. radiation) ของสถานีส่ง..... 0-360 องศา (เทียบจากทิศเหนือ) และสถานีรับ..... 0-360..... องศา (เทียบจากทิศเหนือ)
  - 17.2 มุมกว้างของ Main lobe ของสายอากาศสถานีส่ง..... 10..... องศา และของสถานีรับ..... 10..... องศา
  - 17.3 ค่าทวีกำลังสายอากาศ (Antenna Gain) ของสถานีส่ง..... 28..... dB และของสถานีรับ..... 28dB
  - 17.4 ชนิดของสายอากาศของสถานีส่ง..... Parabolic reflector ..... และของสถานีรับ..... Parabolic reflector
  - 17.5 ความสูงของสายอากาศจากระดับน้ำทะเลพื้นดินของสถานีส่ง..... 2..... เมตร และของสถานีรับ..... 2..... เมตร
  - 17.6 ความสูงของสายอากาศจากพื้นดินของสถานีส่ง..... 2..... เมตร และของสถานีรับ..... 2..... เมตร

- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
18. หน่วยงานที่ใช้ความถี่.....อยู่ในความรับผิดชอบของ.....
19. วัตถุประสงค์ของการอนุญาต
- 19.1  ทดแทนเครื่องเดิม ตามที่ได้รับอนุญาตจากกรมไปรษณีย์โทรเลข/กทช./กสทช.  
ตามหนังสือที่.....ลงวันที่.....
- 19.2  สำรองเครื่อง ตามที่ได้รับอนุญาตจากกรมไปรษณีย์โทรเลข/กทช./กสทช.  
ตามหนังสือที่.....ลงวันที่.....
- 19.3  เพิ่มเครื่องใหม่ในข่ายสื่อสารเดิมที่ได้รับอนุญาตจากกรมไปรษณีย์โทรเลข/กทช./กสทช.  
ตามหนังสือที่.....ลงวันที่.....
- 19.4  ย้ายเครื่องเพื่อติดตั้งใหม่ซึ่งเครื่องเดิมได้รับอนุญาตจากกรมไปรษณีย์โทรเลข/กทช./กสทช.  
ตามหนังสือที่.....ลงวันที่.....
- 19.5  เพิ่มความถี่ใหม่ในข่ายสื่อสารเดิมซึ่งข่ายเดิมได้รับอนุญาตจากกรมไปรษณีย์โทรเลข/กทช./  
กสทช. ตามหนังสือที่.....ลงวันที่.....
- 19.6  ตั้งข่ายใหม่ (ยังไม่เคยได้รับอนุญาตจากกรมไปรษณีย์โทรเลข/กทช./กสทช.)
20. เหตุผลความจำเป็นในการขออนุญาตใช้ความถี่วิทยุ.....มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.....  
ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก กทปส. เพื่อกำเนินการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน โดยในการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์  
ตรวจจับโดรนนั้นจำเป็นต้องดำเนินการพัฒนาภาครับภาคส่งและทดสอบระบบเรดาร์ที่ใช้งานความถี่ 9.876-9.985 GHzหรือ10.566-10.689 GHz
21. ความสอดคล้องกับแผนแม่บทการบริหารคลื่นความถี่ ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ แผนแม่บท  
กิจการกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์ แผนแม่บทกิจการโทรคมนาคม แผนความถี่วิทยุ หรือประกาศ  
กสทช. ที่เกี่ยวข้อง.....ประกาศ กสทช. เรื่องหลักเกณฑ์การอนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่เพื่อการทดลองหรือการทดสอบเป็นการชั่วคราวในกิจการวิทยุคมนาคม  
และกิจการโทรคมนาคม และ ประกาศ กสทช. เรื่อง เครื่องวิทยุคมนาคมและสถานีวิทยุคมนาคมที่ได้รับยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาตตามพระราชบัญญัติวิทยุ  
คมนาคม พ.ศ. 2498 ข้อ 3 (4) เครื่องวิทยุคมนาคมประเภทเรดาร์.....
22. ความสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และภารกิจของหน่วยงาน หนึ่งในวัตถุประสงค์และภารกิจของมหาวิทยาลัยคือให้การศึกษา  
วิจัย พัฒนา ส่งเสริมและให้บริการทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี โดยการวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนที่จำเป็นต้องใช้  
ความถี่ดังกล่าว จะสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และภารกิจของมหาวิทยาลัย โดยจะช่วยเหลือส่งเสริมภารกิจด้านความมั่นคงของประเทศไทยด้วย
23. ความสอดคล้องกับเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์ที่จะใช้ร่วมกับประกาศว่าด้วยมาตรฐานทางเทคนิค  
และการตรวจสอบและรับรองมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....สอดคล้องกับ.....ประกาศ กสทช. เรื่อง เครื่องวิทยุคมนาคมและสถานีวิทยุคมนาคม  
ที่ได้รับการยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาต ตามพระราชบัญญัติวิทยุคมนาคม พ.ศ. ๒๕๕๙ ข้อ ๑๕ เครื่องวิทยุคมนาคมที่ใช้เพื่อการทดลอง  
ค้นคว้า วิจัย พัฒนาเทคโนโลยีทางด้านวิทยุคมนาคม.....ได้รับการยกเว้นไม่ต้องได้รับใบอนุญาตฯ มี ใช้ซึ่งเครื่องวิทยุคมนาคม และตั้งสถานีวิทยุคมนาคม  
เป็นการชั่วคราวเป็นระยะเวลาไม่เกิน ๑๘๐ วัน
24. ความสอดคล้องกับข้อตกลงการประสานและจัดสรรคลื่นความถี่ตามบริเวณชายแดน.....  
ไม่ได้ติดตั้งใช้งานบริเวณชายแดน.....
25. ความมีประสิทธิภาพและความคุ้มค่าในการใช้ประโยชน์คลื่นความถี่..... การใช้คลื่นความถี่เป็นการใช้เพื่อการทดลอง  
ค้นคว้า วิจัย ในพื้นที่ของมหาวิทยาลัย โดยใช้งานเป็นครั้งคราว ช่วงการทดลองไม่เกิน 180 วัน โดยการทดลองจะไม่รบกวนเครือข่ายวิทยุอื่น  
ผลจากการทดลองวิจัยนั้น มีประโยชน์ต่อความมั่นคงของประเทศ และสามารถลดการนำเข้าอุปกรณ์ป้องกันภัยโดรนจากต่างประเทศได้
26. ให้แนบแผนผังข่ายสื่อสารเดิมหรือข่ายสื่อสารใหม่ใบกรณีขออนุญาตตั้งข่ายสื่อสารใหม่มาโดยละเอียด  
เพื่อประกอบการพิจารณา

- 3 -

27. ข่ายสื่อสารเดิมที่ใช้ความถี่ขนาดข้างต้นปัจจุบัน มีเครื่องวิทยุคมนาคมชนิดมือถือ.....เครื่อง  
ชนิดเคลื่อนที่.....เครื่อง ชนิดประจำที่.....เครื่อง อื่น ๆ (ระบุ).....เครื่อง

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ข้อความทั้งหมดและเอกสารประกอบในคำขอนี้เป็นความจริงทุกประการและ  
จะปฏิบัติตามกฎ ระเบียบ ข้อบังคับ หรือคำสั่งใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ความถี่วิทยุ และเครื่องวิทยุคมนาคม  
ดังกล่าวทุกประการ

ลงชื่อ.....  
ศาสตราจารย์ ดร.สมฤกษ์ จันทรัมย์พร  
ตำแหน่ง.....รองอธิการบดีฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศ  
ปฏิบัติการแทนอธิการบดี  
ผู้มีอำนาจลงนาม

วันที่..... 26 พ.ย. 2564 .....

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

ภาคผนวก ค

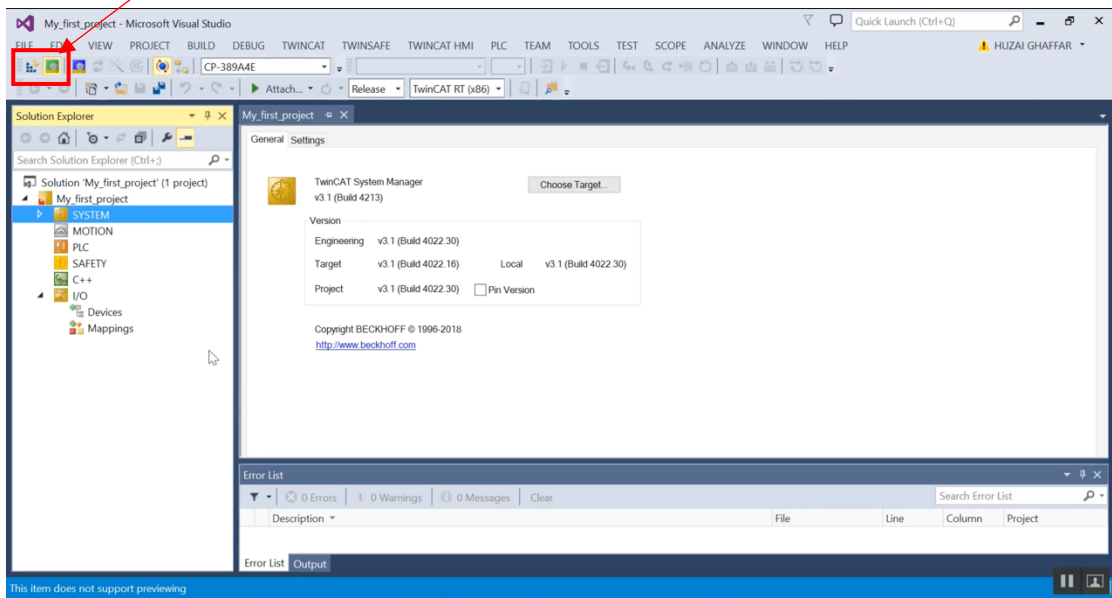
## คู่มือการใช้งานระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน



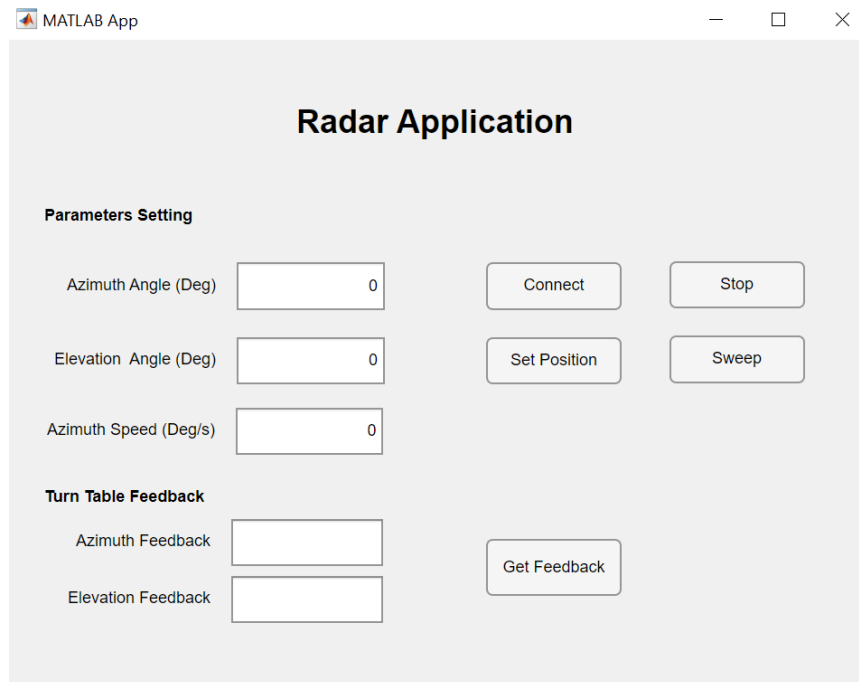
## คู่มือการใช้งานระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน

การใช้งานระบบเรดาร์ตรวจจับโดรนเริ่มต้นจากการเสียบปลั๊กชุดหมุนของระบบหมุนเรดาร์ตรวจจับโดรนเพื่อเปิดใช้งานมอเตอร์ หลังจากนั้นทำการเชื่อมต่อระบบหมุนกับคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม TwinCAT-3 ขั้นตอนเป็นไปตามรูปด้านล่าง

ปุ่ม connect



เมื่อกดเชื่อมต่อแล้วจะขึ้นหน้าต่างยืนยันให้กด OK เพื่อเชื่อมต่อ เมื่อเชื่อมต่อระบบหมุนกับคอมพิวเตอร์เรียบร้อยแล้ว ทำการเปิดระบบเรดาร์โดยการเปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณ 3 เหลี่ยมก่อน (เสียบ adaptor 5VDC) หลังจากนั้นจ่ายไฟให้กับวงจร RF โดยการเสียบ adaptor 12 VDC ขณะนี้เรดาร์กำลังทำงานแล้วแต่คอมพิวเตอร์ยังไม่รับค่าสัญญาณมาประมวลผล ต่อไปเปิดโปรแกรม MATLAB จากนั้นไปที่เมนู Design App และเปิดไฟล์ที่ชื่อว่า “TurnTableApp\_V2” จะแสดงหน้าต่างตามรูปด้านล่างนี้ ขั้นตอนแรกให้กดปุ่ม Connect เพื่อเชื่อมต่อโปรแกรม MATLAB กับ TwinCAT 3 ใช้สั่งการให้มอเตอร์หมุน



หากโปรแกรม MATLAB เชื่อมต่อกับโปรแกรม TwinCAT 3 แล้ว ปุ่ม Connect เปลี่ยนเป็นสีเขียว หรือเช็คสถานะได้อีกวิธีคือการกดปุ่ม Get Feedback หากมีการเชื่อมต่อ ในช่อง Azimuth Feedback และ Elevation Feedback จะแสดงค่ามุมของระบบหมุน ณ ปัจจุบัน

การทำงานของระบบหมุนจะแบ่งเป็น 2 โหมดคือ

1. โหมด Fix Position คือการหันเรดาร์ไปในทิศทางที่กำหนดเพียงทิศทางเดียว ขั้นตอนการสั่งการทำงานในโหมด Fix Position คือ

1. ตั้งค่ามุม Azimuth ในตำแหน่งที่ต้องการในช่อง **Azimuth Angle (Deg)**
2. ตั้งค่ามุม Elevation ในตำแหน่งที่ต้องการในช่อง **Elevation Angle (Deg)**
3. ตั้งค่าความเร็วในการหมุนเปลี่ยนตำแหน่งในช่อง **Azimuth Speed (Deg/s)**
4. กดปุ่ม **Set Position** เรดาร์จะหมุนไปตามทิศทางที่เรากรอกไว้

2. โหมด Sweep คือการหมุนเรดาร์มุม azimuth จาก 0-359 วนไปเรื่อย ๆ ขั้นตอนการสั่งการทำงานในโหมด Sweep คือ

1. ตั้งค่ามุม Elevation ในตำแหน่งที่ต้องการในช่อง **Elevation Angle (Deg)**
2. ตั้งค่าความเร็วในการหมุนของเรดาร์ในช่อง **Azimuth Speed (Deg/s)**

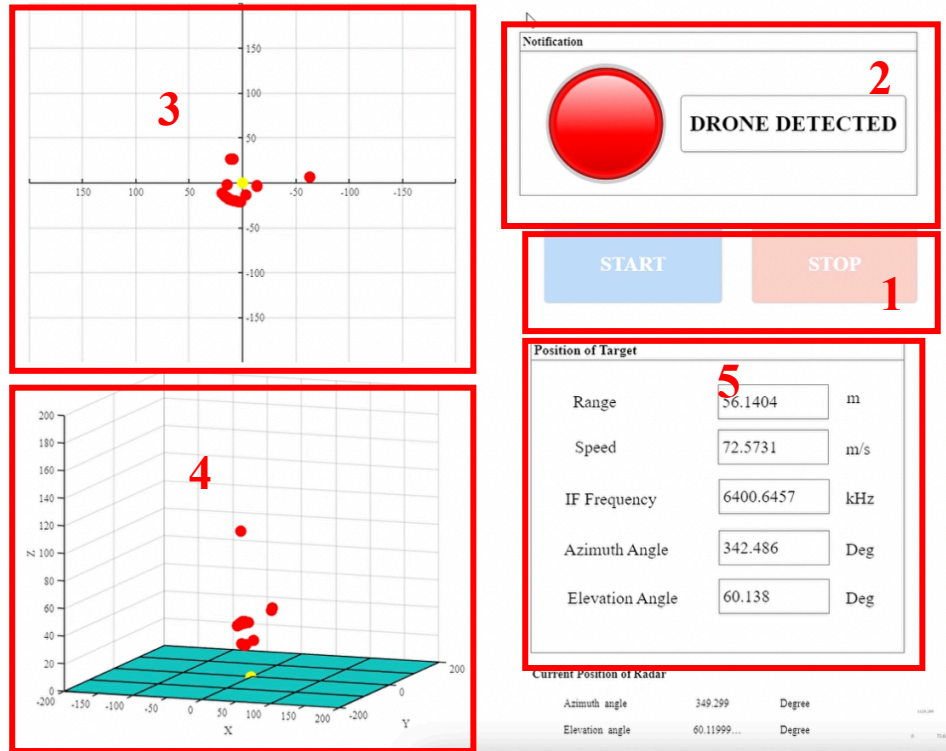
3. กดปุ่ม **Sweep** เรดาร์จะหมุนปรับเงยขึ้นตามมุม elevation ที่ตั้งไว้และจะหมุนในมุม azimuth ไปเรื่อย ๆ

หากต้องการให้เรดาร์หยุดหมุนสามารถกดปุ่ม **STOP**

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

เมื่อกดปุ่ม **Set Position** หรือ **Sweep** แล้ว MATLAB จะทำการเปิดหน้าต่าง GUI เรดาร์ ขึ้นมาอัตโนมัติตามรูปด้านล่าง และคอมพิวเตอร์จะเริ่มรับคำสั่งสัญญาณจากเรดาร์มาประมวลผลและทำการพล็อตตำแหน่งของเป้าหมาย

### Radar Drone Detection Monitor



โดยส่วนที่ 1 จะเป็นปุ่มเริ่ม/หยุดทำงานโปรแกรม ส่วนที่ 2 การแจ้งเตือนสถานะเมื่อเจอโดรน ข้อมูลระยะห่างของโดรนที่ตรวจจับได้และข้อมูลมุมของจุดหมุนมาพล็อตตำแหน่งทั้งแบบ 2 มิติ (ระนาบ xy : ส่วนที่ 3) และแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz : ส่วนที่ 4) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถทราบถึงตำแหน่งของโดรนได้ง่ายขึ้น รายละเอียดตำแหน่งของโดรนทั้งระยะห่างของเป้าหมายกับเรดาร์ ความเร็วเฉลี่ยของโดรน ตำแหน่งมุม azimuth ของโดรนเมื่อเทียบกับเรดาร์และตำแหน่งมุม elevation ของโดรนเมื่อเทียบกับเรดาร์จะแสดงอยู่ในส่วนที่ 5 และตำแหน่งล่างขวาของตัวโปรแกรมจะแสดงตำแหน่งมุมปัจจุบันของเรดาร์เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบตำแหน่งของเรดาร์

## ประวัตินักวิจัยในโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. เอกรัฐ บุญภูงา (หัวหน้าโครงการวิจัย)

### ประวัติส่วนตัว

1. ชื่อ-นามสกุล(ภาษาไทย) เอกรัฐ บุญภูงา

ชื่อ-นามสกุล(ภาษาอังกฤษ) Akkarat Boonpoonga

2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

3. หน่วยงานและสถานที่ติดต่อได้สะดวก

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

### โทรศัพท์มือถือ

email:

### 4. ประวัติการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Visiting scholarship, Syracuse University, NY

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

5. สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ เรดาร์ทะเลพื้นดิน ระบบเรดาร์ การประมวลผลสัญญาณสำหรับการประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศฉลวด ระบบเซ็นเซอร์

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

6.1 หัวหน้าโครงการวิจัย “การพัฒนาระบบเรดาร์ตรวจวัดระยะเปิดใต้ทางรถไฟเพื่อความมั่นคงในจังหวัดชายแดนภาคใต้” กองทุนวิจัยและพัฒนาโครงการกระจายเสียง กิจกรรมโทรทัศน์ และกิจกรรมโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคโรนเพื่อป้องกันการบิ่นโคโรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

- 6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย “การพัฒนาชุดเซนเซอร์เพื่อวัดระดับสารตกค้างในพื้นที่ดินทางการเกษตร” สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)
- 6.3 หัวหน้าโครงการวิจัย “การพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการจัดทำแผนที่ใต้ดินสำหรับการเกษตร” สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)
- 6.4 หัวหน้าโครงการวิจัย “การพัฒนาระบบเรดาร์ทะลุพื้นดินเพื่อค้นหาวัตถุและโพรงใต้พื้นดินในชายแดนภาคใต้ประเทศไทย” สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา
- 6.5 หัวหน้าโครงการวิจัย “การพัฒนาซอฟต์แวร์อ่านมิเตอร์ซื้อขายไฟฟ้าอัตโนมัติสำหรับ กฟผ.” การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- 6.6 ที่ปรึกษา “การพัฒนาห้องปฏิบัติการระบบควบคุมอัตโนมัติ” การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเทศไทย
- 6.7 หัวหน้าที่ปรึกษาโครงการ “Power Transformer Monitoring Systems” การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ประเทศไทย
- 6.8 หัวหน้าโครงการวิจัย “การพัฒนาหน่วยควบคุมเบย์สำหรับสถานีไฟฟ้าแรงสูงอัตโนมัติด้วยโปรโตคอล IEC 61850” การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย 2557-2558
- 6.9 หัวหน้าโครงการวิจัย “การศึกษาความเป็นเอกลักษณ์ของวัตถุใต้พื้นดินโดยใช้เรดาร์จีพีอาร์” สนับสนุนนักวิจัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- 6.10 นักวิจัยโครงการ “การประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนของอุตสาหกรรมไทย” ทูมเมธีวิจัยอาวุโส สกว. 2557-2560 หัวข้อย่อย “GPR image-based Detection of Buried Objects” และ “Target Classification of Buried Objects” เป็นต้น
- 6.11 นักวิจัยโครงการ “การประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนของอุตสาหกรรมไทย” ทูมเมธีวิจัยอาวุโส สกว. 2557-2560 หัวข้อย่อย “Microwave Radar Sensor for Detecting and Classifying Buried Objects ”

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

- 6.12 นักวิจัยโครงการ “วิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมขีดความสามารถเรดาร์ตรวจใต้ผิวดิน 3D – Radar เพื่อใช้สำหรับการป้องกันการโจมตีด้วยระเบิดแสงเครื่อง” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) 2555-2557
- 6.13 ที่ปรึกษา โครงการบริหารจัดการถ่านลอย โรงไฟฟ้าหงสา ประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว
- 6.14 คณะกรรมการศึกษาความต้องการและวางแผนแม่บทการใช้งานระบบเทคโนโลยีสารสนเทศ และการสื่อสารของอาคารรัฐสภาแห่งใหม่ สภานิติบัญญัติแห่งชาติ
- 6.15 คณะอนุกรรมการศึกษา รวบรวม ความต้องการใช้งานระบบเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารของอาคารรัฐสภาแห่งใหม่ สภานิติบัญญัติแห่งชาติ
- 6.16 2554-ปัจจุบัน หัวหน้าห้องปฏิบัติการการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- 6.17 นักวิจัยโครงการวิจัยการประยุกต์ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืนของอุตสาหกรรมไทย ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว. 2557-2559
- 6.18 2551-2554 อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และหัวหน้าห้องปฏิบัติการระบบสมองกลฝังตัว คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- 6.19 เป็นหัวหน้าโครงการ การศึกษาและพัฒนาระบบสร้างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ประสิทธิภาพสูง สำหรับระบบการสื่อสารหลายอินพุตหลายเอาต์พุต ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย 2552-2554
- 6.20 หัวหน้าทีมปรึกษาด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและด้านระบบรักษาความปลอดภัยตามนโยบายภาครัฐ กระทรวงพาณิชย์ ปี พ.ศ. 2558 และ 2559

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

- 6.21 เป็นหัวหน้าโครงการทุนวิจัยอุปกรณ์เก็บและแสดงข้อมูลที่สามารถพกพาได้โดยใช้ ARM สำหรับเครือข่ายการตรวจจับไร้สาย Zigbee โครงการวิจัย IRPUS 2552 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- 6.22 หัวหน้าโครงการ Prototype of Automated Guided Vehicle for Automatic Container Transport in WD factory ทุนสนับสนุนจาก บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด 2555
- 6.23 ผู้เชี่ยวชาญในโครงการ “พัฒนาระบบตรวจวัดและเตือนภัยคลื่นทางทะเลด้วยคลื่นความถี่วิทยุ” สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ(GISTDA) (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2557-2558
- 6.24 ที่ปรึกษาโครงการศึกษาความเป็นไปได้ในการวิจัยและพัฒนาระบบหาทิศทางสัญญาณวิทยุด้วยเทคโนโลยี Software Defined Radio ศูนย์วิจัยและพัฒนาการทหาร กระทรวงกลาโหม
- 6.25 นักวิจัยโครงการเทคโนโลยีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อเกษตรยั่งยืน ทุนเมธีวิจัยอาวุโส สกว. 2551-2554
- 6.26 visiting scholar ที่แล็บของ Prof. Tanpan K. Sarkar ที่ Syracuse University, NY, USA 2550
- 6.27 เป็นผู้ช่วยนักวิจัย โครงการเทคโนโลยีสายอากาศ เมธีวิจัยอาวุโส สกว. พ.ศ. 2548-2551
- 6.28 ได้รับทุนนักศึกษาปริญญาเอกกาญจนาภิเษก รุ่นที่ 8 พ.ศ. 2548-2550
- 6.29 ที่ปรึกษาทุนการศึกษามหาบัณฑิต โครงการการสร้างตัวประมวลผลประสิทธิภาพสูงของสายอากาศปรับตัวในระบบการสื่อสารไร้สาย WiMAX สถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม NTC Scholarship 2553
- 6.30 เป็นผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการวิจัยระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นที่ 3 จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
- 6.27 เป็นผู้ทรงคุณวุฒิ (reviewer) ตรวจสอบคุณสมบัติบทความวิจัยที่ลงพิมพ์ ในวารสารวิชาการนานาชาติ *IET Microwaves, Antennas and Propagation Trans.*

- 6.28 เป็นผู้ทรงคุณวุฒิ (reviewer) ตรวจสอบคุณสมบัติบทความวิจัยที่ลงพิมพ์ ในวารสารวิชาการนานาชาติ *IEEE Antennas and Propagation Trans.*
- 6.29 เป็นผู้ทรงคุณวุฒิ (reviewer) ตรวจสอบคุณสมบัติบทความวิจัยที่ลงพิมพ์ ในวารสาร วิชาการนานาชาติ *IEICE Trans. on Communications.*
- 6.30 เป็นผู้ทรงคุณวุฒิ (reviewer) ตรวจสอบคุณสมบัติบทความวิจัยที่ลงพิมพ์ ในวารสาร วิชาการนานาชาติ *ECTI.*
- 6.31 เป็นผู้ทรงคุณวุฒิ (reviewer) ตรวจสอบคุณสมบัติบทความวิจัยที่ลงพิมพ์ งานประชุมวิชาการนานาชาติ ITC-CSCC2009
- 6.32 เป็นผู้ทรงคุณวุฒิ (reviewer) ตรวจสอบคุณสมบัติบทความวิจัยที่ลงพิมพ์ งานประชุมวิชาการนานาชาติ ISAP2009
- 6.33 เป็นคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการนานาชาติ ISAP2009
- 6.34 เป็นคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการนานาชาติ ARC2010
- 6.35 เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 6.36 เป็นคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2011
- 6.37 2554- 2556 เป็นเลขานุการ *IEEE MTT/AP/ED Thailand Chapter*
- 6.38 เป็นผู้ทรงคุณวุฒิ (reviewer) ตรวจสอบคุณสมบัติบทความวิจัยที่ลงพิมพ์ งานประชุมวิชาการนานาชาติ ISAP2011
- 6.39 เป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- 6.40 เป็นคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการนานาชาติ APCAP2013
- 6.41 เป็นคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการนานาชาติ APCC 2014
- 6.42 เป็นคณะกรรมการจัดงานประชุมวิชาการนานาชาติ IEEE CAMA 2015

## 7. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารและการประชุมระดับชาติและนานาชาติ

[1] Nattawat Chantasen, **Akkarat Boonpoonga**, Santana Burintramart, Krit Athikulwongse, and Prayoot Akkaraekthalin, “Automatic Detection and Classification of Buried Objects using Ground Penetrating Radar for Counter-Improvised Explosive Devices,” *Radio Science*, 53, pp. 210-227.  
<https://doi.org/10.1002/2017RS006402>

[2] Lakkhana Bannawat, **Akkarat Boonpoonga**, Santana Burintramart, and Prayoot Akkaraekthalin, “On Resolution Improvement using Filtering Antenna Effects



for Target Identification,” *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2018, Article ID 3405908, 11 pages, 2018.

<https://doi.org/10.1155/2018/3405908>.

[3] **Akkarat Boonpoonga**, Pongsathorn Chomdee, Santana Burintramart, Prayoot Akkaraekthalin, "Simple Estimation of Late-Time Response for Radar Target Identification," *RadioScience*, 52, 743-756, doi:10.1002/2016RS006237

[4] N. Chantasen, **A. Boonpoonga**, P. Akkaraekthalin, L. Bannawat, K. Kaemarungsi, and K. Athikulwongse, "Investigation of the electrical property of multi-layer soil using short-time matrix pencil method, " *Proc. in International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2017)*, phuket.

[5] L. Bannawat, **A. Boonpoonga**, and S. Burintramart, "Resolution Improvement of GPR image using antenna calibration for object detection, " *Proc. in International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2017)*, phuket.

[6] F. Kheawprae, **A. Boonpoonga**, L. Bannawat, and Santana Burintramart, "Compensation of antenna effects for stepped-frequency radar identification systems, " *Proc. in International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2017)*, phuket.

[7] K. Yochanang, **A. Boonpoonga**, P. Akkaraekthalin, L. Bannawat, and C. Phongcharoenpanich, "Effect of antenna frequency bands on the resolution of GPR images, " *Proc. in International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2017)*, phuket.

[8] S. Burintramart and **A. Boonpoonga**, "Underground radar target classification based on Matrix Pencil Method, " *Proc. In The 4th Asian Conference on Defense Technology (4th ACDT)*.

- [9] **Akkarat Boonpoonga**, “Ground Penetrating Radar (GPR) for Counter Improvised-Explosive Devices in Thailand” Proc. In *IEEE CAMA 2015, Chiang Mai*.
- [10] Lakkhana Bannawat, Cheepchanok Yochanang, **Akkarat Boonpoonga**, Phaophak Sirisuk, and Prayoot akkaraekthalin, “Effect of Soil Perturbation on Radar Identification of Buried Object using Matrix Pencil Method” Proc. In *IEEE CAMA 2015, Chiang Mai*.
- [11] Nattawat Chantasen and **Akkarat Boonpoonga**, and Santana Burintramart, “Radar Target Identification of Coated Object Using Cauchy Method,” Proc. In *IEEE CAMA 2015, Chiang Mai*.
- [12] Pachara Srimuk, **Akkarat Boonpoonga**, and Nopdol Puttisan, “FPGA Implementation for GPR Signal Processing Based on HW/SW Co-Design Architecture,” Proc. In *IEEE CAMA 2015, Chiang Mai*.
- [13] Feaveya Kheawprae, **Akkarat Boonpoonga**, and Woranart Sangchai, “Measurement for Radar Target Identification using Short-Time Matrix Pencil Method,” Proc. In *IEEE CAMA 2015, Chiang Mai*.
- [14] P. Chomdee and **A. Boonpoonga**, “Ground Penetrating Radar (GPR): Theory and Simulations,” ECTI E-Magazine.
- [15] P Chomdee, **A. Boonpoonga**, and A. Prayote, “Fast and Efficient Detection of Buried Object for GPR Image,” Proc. In *The 20th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2014)*, Pattaya, Oct. 2014
- [16] C. Yochanang, and **A. Boonpoonga**, and S. Burintramart, " Analysis of Object Buried in Soil by using Matrix Pencil Method," Proc. In *The 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON2014)*, Pattaya, Mar. 2014.

- [17]L. Bannawat, and **A. Boonpoonga**, and S. Burintramart, " Performance Evaluation of Target Identification Using Matrix Pencil Method Operation in Different Frequency Range," *The 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON2014), Pattaya*, Mar. 2014.
- [18]N. Chantasan, and **A. Boonpoonga**, and S. Burintramart, " Radar Target Identification Using Cauchy Method," Proc. In *The 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON2014), Pattaya*, Mar. 2014.
- [19] K. Boonyi and J. Tagapanij and **A. Boonpoonga**, " FPGA-based Hardware/Software Implementation for MIMO Wireless Communications," Proc. In *The 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON2014), Pattaya*, Mar. 2014.
- [20]**A. Boonpoonga**, P. Sirisuk, and M. Krairiksh, " On FPGA Implementation of Blind Adaptive Antenna," Proc. In *The 2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON2014), Pattaya*, Mar. 2014.
- [21]**A. Boonpoonga**, P. Sirisuk, and M. Krairiksh, "Efficient Parallel Architecture for Implementation of the CMA Adaptive Antenna," *IETE Technical Review* , vol. 30, Issue 4, pp. 303-312, Aug. 2013.
- [22]C. Yochanang, and **A. Boonpoonga**, and S. Burintramart, "Effect of Selection of Frequency Range for Target Identification Using Matrix Pencil Method," Proc. In *Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP2013), Chiang Mai*, pp. 192-193, Aug. 2013.
- [23]T. Tantisoparak, **A. Boonpoonga**, C. Phongcharonpanich, P. Sirisuk, and Monai, "Adaptive Array Antenna using On-Off and CMA Algorithms for Microwave RFID Readers," *IEICE Trans. on Commu. Vol.E94-B,No.05*,pp.1153-1160, May. 2011.

- [24] **A. Boonpoonga**, “Adaptive Phased Array Antenna Using CMA ” ECTI E-Magazine, April-June, 2011.
- [25] **A. Boonpoonga**, S. Janyavilas, P. Sirisuk, M. Krairiksh, “FPGA Implementation of QR Decomposition Using MGS Algorithm,” [Lecture Notes in Computer Science](#), Springer Verlag LNCS 5992, pp. 394-399, March 2010.
- [26] **A. Boonpoonga**, P. Sirisuk, M. Chongcheawchamnan, S. Patisang, and M. Krairiksh, “Hardware-Assisted Initialization for CMA Adaptive Antenna,” IET Microwaves, Antennas and Propagation Trans. 2008, Vol. 2, No. 4, pp. 303–311, June 2008.
- [27] **Akkarat Boonpoonga**, “Adaptive Phased Array Antenna Using CMA,” ECTI E-magazine, Vo. 5 No. 2, April - June 2011 (in Thai).
- [28] **Akkarat Boonpoonga**, “Adaptive Array Antenna using LMS and CMA,” Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 29. No. 1, March 2012 (in Thai).
- [29] P. Nilswan, **A. Boonpoonga**, J. Tagapanij, P. Sirisuk, “Smart Antenna Using a Combination of D3LS and NCLS Algorithms,” Proc. In *the International Conference of Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology 2012 (ECTI-CON 2012)*, pp. 141-144, Hua Hin.
- [30] **Akkarat Boonpoonga**, Pichet Nilswan, Jukkrit Tagapanij, Phaophak Sirisuk, “Performance Evaluation of D3LS and NCLS Smart Antenna in Mobile Communications,” Proc. In *the 2012 [International Symposium on Antennas & Propagation \(ISAP2012\)](#)*, pp. 746-749, Nagoya, Japan.
- [31] **A. Boonpoonga**, P. Sirisuk and M. Krairiksh, “Initialization Scheme with Least Square Optimization based-DOA Estimation for CMA Adaptive Antenna,” Proc.

in *The 2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2011)*, pp. 1-4, Oct. Korea.

- [32] T. Tantisopharak, **A. Boonpoonga**, P. Sirisuk and M. Kririksh. "Combination between CMA and On-Off Algorithms for Adaptive Array Antenna," Proc. In *The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009)*, pp. 125-128, Bangkok, 2009.
- [33] S. Burintramart, **A. Boonpoonga**, and T. K. Sarkar, "Adaptive Interference Suppression in Communication Systems using Direct Data Domain Least Squares (D3LS) Approach," Proc. In *The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009)*, pp. 1123-1126, Bangkok, 2009.
- [34] **A. Boonpoonga**, T. Tantisopharak, P. Sirisuk and M. Kririksh, "Parallel Multistage CM array with Constrained Initialization of Digital Beam Synthesis," Proc. In *the 2008 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2008)*, Hongkong, Dec. 2008.
- [35] **A. Boonpoonga**, T. Tantisopharak, P. Sirisuk and M. Kririksh, "Wordlength Effect on CMA Adaptive Antenna with Digital Beam Synthesis Initialization," *Intelligent Transport System Telecommunicaitons (ITST2008)*, pp. 41-44, Oct. 2008.
- [36] T. Tantisopharak, **A. boonpoonga**, P. Sirisuk and M. Kririksh, "Simple Initialization Scheme for CMA Adaptive Antenna by Using Digital Beam Synthesis," *Proc. of the Fifth International Conference in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI2008)*, vol. 1, pp. 289-292, May 2008.
- [37] S. Srisuk, P. Sookvatana and **A. Boonpoonga**, "A Skin Smoothing Technique using Nonlinear Filtering," Proc. In *The 12th National Computer Science and Engineering Conference (NCSEC 2008)*, pp. 105-110, Pattaya, 2008.

- [38]S. Srisuk, K. Sunat and **A. Boonpoonga**, “A New Approach for Face Recognition under varying Conditions using TV and eHMM,” Proc. In *The 12th National Computer Science and Engineering Conference (NCSEC 2008)*, pp. 111-115, Pattaya, 2008.
- [39]**A. Boonpoonga**, S. Buritramart, P. Sirisuk, M. Krairiksh, T. K. Sarkar, “Adaptive Array Processing Unit Based on Direct Data Domain Least Square Approach Using Conjugate Gradient Method,” *Proc. of (APMC2007)*, Bangkok, pp. 171-174, Dec. 2007.
- [40]**A. Boonpoonga**, P. Sirisuk,C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh, “Performance of Switched-beam Element Phased Array for Handset Adaptive Antenna,” *Proc. of the 2007 European Conference on Wireless Technologies (ECWT)*,Munich, pp. 209-212, Oct. 2007.
- [41]**A. Boonpoonga**, P. Sirisuk,C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh, “Beam-switching-assisted CMA initialization for Handset Adaptive Antenna,” *Proc. of the 2007 IEEE Radio & Wireless Symposium (RWS)*, Californai, pp. 479-482, Jan. 2007 .
- [42] **A. Boonpoonga**, P. Sirisuk and M. Krairiksh, “A Switched-beam Element Phased Array Antenna for CMA Initialization,” *Proc. of the 36th European Microwave Conference (EuMC)*, Manchester, pp.772-775, Sept. 2006.
- [43]**A. Boonpoonga**, P. Sirisuk and M. Krairiksh, “Wordlength Effect on CMA Adaptive Phased Array Antenna Using Fixed-point Arithmetic,” *Proc. of the 2005 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2005)*, Suzhou, China, vol. 5, pp. 3024-3027, Dec. 2005.
- [44]**A. Boonpoonga**, P. Sirisuk and M. Krairiksh, “Improvement of CMA Adaptive Phased Array Antenna by using Switched-Beam Initialization,” *Proc. of the*

*2005 International Technical Conference on Circuits/System, Computers and Communications (ITC-CSCC 2005), Korea, pp. 221-222, July 2005.*

[45] **A. Boonpoonga**, P. Ngamjanyaporn, P. Sirisuk, C. Phongcharoenpanich, M. Krairiksh, “An Adaptive Phased Array Antenna Using CMA and Switched-Beam Initialization,” *ECTI 2004 Conference*, Pattaya, May 2004.

[46] **A. Boonpoonga**, P. Ngamjanyaporn, P. Sirisuk, V. Pakkamarp, C. Phongcharoen-panich, M. Krairiksh, “An adaptive phased array antenna Using CMA,” *Proc. 4<sup>th</sup> Information and Computer Engineering Postgraduate Workshop 2004*, Phuket, pp.15-18, Jan. 2004.

[47] T. Sooksai, P. Sirisuk, and A. Boonpoonga, “FPGA Implementation of Fast 2D-DCT for Image Compression,” *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 24. No. 4, Dec 2010 (in Thai).

[48] N. On-in, A. Boonpoonga, J. Takapanich, and P. Sirisuk, “Hardware Implementation of Skin Smoothing on FPGA,” *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 24. No. 4, Dec 2010 (in Thai).

[49] S. Janyavilas, A. Boonpoonga, and P. Sirisuk, “An Efficient FPGA Implementation of Matrix Inversion using QR Decomposition, ” *The 36<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-33)*, pp. 1349-1353, Dec. 2010 (in Thai).

#### ผู้ร่วมประดิษฐ์สิทธิบัตรนานาชาติ

PATCH ANTENNA ARRAY FOR WIRELESS COMMUNICATION: Patent Cooperation Treaty (PCT), Publication number: WO2009/108121

# การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

## นักวิจัยในโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ แพบัว

ชื่อ (นาย/นาง/นางสาว) .....ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ แพบัว.....

ตำแหน่ง .....ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร..... คุณวุฒิ .....ป เอก.....

หน่วยงานต้นสังกัด .....มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

คณะ/ฝ่าย วิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม ภาควิชา/แผนก วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สถานที่ติดต่อ

โทรศัพท์

โทรสาร

อีเมลล์

## การศึกษา

### King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 10520.

- Doctor of Engineering (D. Eng.), Electrical Engineering, 2012. His Ph.D. program was supported by the Thailand Research Fund (TRF) through the Royal Golden Jubilee, Ph.D. Program under Grant No. PHD/0177/2550.
  - Dissertation: “Analysis of Electromagnetic Wave Scattered from Curved Surface Using Uniform Geometrical Theory of Diffraction”.
- Master of Engineering (M. Eng.), Telecommunication Engineering, 2008.
  - Master thesis: “A Vertical Cylindrical Patch Antenna above the Reflector”.
- Bachelor of Engineering (B. Eng.), Telecommunication Engineering, 2006.
  - Thesis: “Duplexer for Mobile Communication”.

## Research of interests

The electromagnetic wave radiation, coupling and scattering by an impedance curved surface based on the Uniform Geometrical Theory of Diffraction (UTD) method and also the antenna design for mobile, RFID and other wireless communication systems.

## RELATED EXPERIENCE AND ACTIVITIES

### Researcher

- Visiting Scholars Student in ElectroScience Laboratory at The Ohio State University, Ohio, USA, During: February 2010 to August 2011.



การวิจัยและพัฒนาาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

- Researcher in ElectroScience Laboratory at The Ohio State University, Ohio, USA, During: February 2011 to August 2011.

Other

- Teacher assistant (TA) in Mathematic class (Calculus) at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, 2008.

●

RESEARCH PROJECTS

Project	Funded from	Years	Note
Antenna for Wireless Sensor Network at 433 MHz	National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC)	2550	Researcher
Propagation Modeling in an Orchard for Wireless Sensor Network	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	2555	Researcher
Design a based station antenna in 3G system and analysis of the electromagnetic wave propagation channel of the designed based station antenna in 3G system using the uniform geometrical theory of diffraction (UTD)	King Mongkut's University of Technology North Bangkok	2556	Researcher
โครงการวิจัยการจัดทำมาตรฐานอาชีพ และคุณวุฒิวิชาชีพ สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ระยะที่ 1	King Mongkut's University of Technology North Bangkok และ สถาบันคุณวุฒิวิชาชีพ	2556	Researcher

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

Antenna Design for Wireless Charging Applications	SILICON CRAFT TECHNOLOGY Bangkok, Thailand	2556	Researcher
โครงการวิจัยการจัดทำมาตรฐานอาชีพ และคุณวุฒิวิชาชีพ สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ระยะที่ 2	King Mongkut's University of Technology North Bangkok และ สถาบันคุณวุฒิวิชาชีพ	2558	Researcher
Reflector antenna Design for C-band applications	<b>Thaicom Public Company Limited</b>	2558	Researcher

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

การออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปสำหรับการแปลงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะใกล้พิสัยที่ตรงกระบอก ไปเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล (Electromagnetic Code for a Cylindrical Near Field to Far Field Transformations)	INNOVA Telecommunication Co., Ltd. Bangkok, Thailand	2558	Researcher
เทคนิคการแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสนามระยะใกล้แบบหลายระนาบไปเป็นสนาม ระยะไกลสำหรับระบบทดสอบสายอากาศขนาดใหญ่ในพื้นที่จำกัด	King Mongkut's University of Technology North Bangkok  (ทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่มหาวิทยาลัย)	2558	Researcher
การพัฒนาระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	King Mongkut's University of Technology North Bangkok  (ทุนมหาวิทยาลัย)	2558	Researcher
การพัฒนาระบบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	ทุนงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2555 สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ วช 58	2558	Researcher

SUBMITTED PATENTS

1. Thailand Patent : "The circularly polarized planar slot antenna", Submitted No. 0801005874, 14 Nov. 2551.

2. Thailand Patent : "The base station antenna for wireless sensor network (WSN)",  
Submitted No. 0801002192, 2 May 2551.
3. Thailand Patent : "The small antenna for wireless sensor network (WSN)",  
Submitted No. 0701006794, 28 Dec. 2550.
4. Thailand Patent : เรื่อง ระบบชาร์จแบตเตอรี่ไร้สายสำหรับอุปกรณ์พกพาขนาดเล็กโดยใช้  
สายอากาศทวนกำลังงานไฟฟ้า จดอนุสิทธิบัตร เลขที่คำขอ 1503001081

## PUBLICATIONS

---

### Journals

- [1] **K. Phaebua**, T. Lertwiriayaprapa, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, " Path-Loss Prediction of Radio Wave Propagation in an Orchard by using Modified UTD Method, " *Progress in Electromagnetics Research (PIER)*., vol. 128, pp. 347-363, 2012.
- [2] T. Lertwiriayaprapa, **K. Phaebua**, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, "Analysis of Electromagnetic Wave Scattering from a Curved Surface by Using the Uniform Geometrical Theory of Diffraction," *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol.20, no.1, pp.161-167, Jan-April 2010.
- [3] P.Wongsiritorn, C.Phongcharoenpanich, **K.Phaebua**, and T.Lertwieiyaprapa, "Radiation Analysis from Source on Cylindrical Curved Impedance Surface for UHF RFID Systems ," *The Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 1, March, 2015
- [4] P.Wongsiritorn, C.Phongcharoenpanich, **K.Phaebua**, and T.Lertwieiyaprapa, " Modified UTD-based UHF-RFID Tag Antenna with Two-pronged-fork Slot for Coated Metallic Cylindrical Surface." *The Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2016. (Accepted)

### Selected International Conference Papers (2010-2016)

- [1] T. Lertwiriayaprapa, **K. Phaebua**, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, "Electromagnetic Wave Scattering on 2D PEC Cylinders Using Complex Source Point Techniques and Uniform Geometrical Theory of Diffraction," *Proceedings of the 2010 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and*

*Information Technology International Conference (ECTI-CON2010)*, pp.1268-1271, Chiangmai, May 2010.

- [2] **K. Phaebua**, C.Phongcharoenpanich, D.Torrungrueng, N.Surittikul and W. Villarroel, “Dual-band Antenna System for SDARS and GPS Applications” *Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and CNC/USNC/URSI Radio Science Meeting (APS2010)*, Toronto, pp.508.5.1-4, July 2010.
- [3] N. Mhudthongon, **K. Phaebua** and C.Phongcharoenpanich, “Dual-band Microstrip Filter with Modified E-shape Resonator,” *Proceedings of the 2010 International Workshop on Information Communication Technology (ICT2010)*, Bangkok, pp. W1C-2-1-4, Aug.2010.
- [4] T. Lertwiriayapapa, **K. Phaebua**, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, “Application of UTD Ray Solution for Characterization of Propagation in Thai Commercial Orchard,” *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA'10)*, Sydney, pp.176-179, Sept.2010.
- [5] T. Lertwiriayapapa, **K. Phaebua**, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, “Application of the Complex Source Point Method for Analyzing the Diffraction of an Electromagnetic Gaussian Beam by a Cylinder Using UTD Concepts,” *Proceedings of the 2010 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2010)*, Macau, pp.TE1.1.1-4, Nov.2010.
- [6] N.Mhudthongon, **K. Phaebua** and C.Phongcharoenpanich, “Characteristics of Dual-band Microstrip Filter with Modified E-shape Resonator,” *Proceedings of the 2010 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2010)*, Macau, pp.FD2.1.1-4, Nov.2010.
- [7] **K. Phaebua**, T. Lertwiriayapapa, C. Phongcharoenpanich and P.H. Pathak, “A Modified UTD Solution for an Impedance Cylinder Surface,” *Proceedings of the 2011 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology International Conference (ECTI-CON2011)*, Khonkaen, pp.208-211, May 2011.
- [8] **K. Phaebua**, C.Phongcharoenpanich, D.Torrungrueng, N.Surittikul and W. Villarroel, “A Triangular Thin Strip On-Glass Antenna for a DAB Automotive Application,”

- Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting (APS2011)*, Washington, USA. pp.480-483, July 2011.
- [9] **K. Phaebua**, T. Lertwiriaprapa, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, "3D Path Loss Prediction in a Durian Orchard," *Proceedings of the 2011 Thailand-Japan Microwave, Bangkok*, pp.16-19, Aug. 2011.
- [10] **K. Phaebua**, T. Lertwiriaprapa, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, "2.45 GHz Path-Loss Prediction for Wireless Sensor Applications in an Orchard by using UTD method," *Proceedings of the 2011 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2011)*, Jeju, pp.[ThF2-1]C07\_1009, Oct.2011.
- [11] P. Charoenchue, C. Phongcharoenpanich, **K. Phaebua**, and K. Aunchaleevarapan, "Circularly Polarized Square Plate Antenna with Two Inclined Slots for UHF-RFID Reader," *Proceedings of The 2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2011)*, Chiangmai, pp.[TPM2-2]PID207, Dec.2011.
- [12] N. Mhudtongon, **K. Phaebua**, and C. Phongcharoenpanich, "Folded Arm H-Slot Antenna with Matching Rectangular Slot for UHF-RFID Tag," *accepted for presentation in The 1st International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS 2011)*, Bangkok.
- [13] P. H. Pathak, K. Phaebua, "A uniform geometrical theory of diffraction for radiation by antennas on a smooth convex impedance surface," *Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2011 International Conference on*, pp. 405-408, Torino, Italy, 12-16 Sept. 2011.
- [14] P. H. Pathak, K. Phaebua, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for Radiation and Coupling Associated with Antennas on a Smooth Convex Impedance Surface," *2012 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA2012)*, pp. ...., Cape town, South Africa, 2-7 Sept. 2012.
- [15] **K. Phaebua**, T. Lertwiriaprapa and C. Phongcharoenpanich, "On an Accuracy of the Modified UTD Solution for a Convex Impedance Cylinder Surface", *Proceedings of the 2012 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications*,

*and Information Technology International Conference (ECTI-CON2012), Hui Hin, Thailand.*

- [16] **K. Phaebua**, T.Lertwiryaprapa and C.Phongcharoenpanich, "Electromagnetic Wave Scattering from Multilayered Coated Cylinder using Modified UTD Method," *Proceedings of the Thailand-Japan MicroWave 2012 (TJMW2012)*, Bangkok, Thailand.
- [17] **K. Phaebua**, T. Lertwiryaprapa, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, "Application of the Complex Source Point Method for a Gaussian Beam Illumination of an Impedance Cylinder using UTD Concept, " *Proceedings of the 2010 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2012)*, Japan. 2012
- [18] P. Wongsiritorn, T. Lertwiryaprapa, C. Phongcharoenpanich and **K. Phaebua**, "Characteristics of RFID C-Slot Tag Antenna on a Coated Metallic Cylindrical Surface", *2012 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS 2012)*, Hawaii, USA. 2012
- [19] P. H. Pathak, K. Phaebua, "A Novel Reciprocity Based Development of the Green's Dyadic for Canonical Impedance Cylinders and Spheres- An Angularly Guided Wave Representation," *2013 International Symposium on Electromagnetic Theory (URSI-EMTS 2013)*, Hiroshima, Japan. 2013.
- [20] **K. Phaebua**, T. Lertwiryaprapa, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh "Propagation Modeling in a Durian Orchard by using UTD Solution" *Korea-Japan antennas and propagation workshop (KJAP 2013)*, Korea. 2013.
- [21] **K. Phaebua**, D. Torrungrueng and C. Phongcharoenpanich, " Design of planar rectangular spiral antennas for the wireless vehicle battery charging system", *2013 Asia Pacific Microwave Conference (APMC2013)*, Korea, 2013.
- [22] P. Wongsiritorn, C. Phongcharoenpanich, T. Pumpoung, T. Lertwiryaprapa and K. Phaebua, "Analysis of Electromagnetic Wave Radiation from C-Slot RFID Tag Mounted on an Impedance Curved Surface Using the UTD Solution", *The 2013 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APS2013)*, Florida, USA. 2013.

- [23] **K. Phaebua**, D. Torrungrueng and C. Phongcharoenphanich, "Planar rectangular spiral antennas for the portable device wireless battery charging system", APCAP2013, Thailand, 2013.
- [24] **K. Phaebua**, T. Lertwiriya-prapa, C. Phongcharoenpanich and P. H. Pathak, "Three dimensional (3-D) electromagnetic (EM) wave scattered from an impedance cylinder based on Green's function" APCAP2013, Thailand, 2013. 2013
- [25] **K. Phaebua**, T. Lertwiriya-prapa and C. Phongcharoenpanich, " Study of Radiation from an Array Antenna on Large Material Coated Curved Surface using UTD solution", 2013 Thailand-Japan Microwave (TJMW2013), Thailand, 2013
- [26] **K. Phaebua**, T. Lertwiriya-prapa and C. Phongcharoenpanich, " An Asymptotic Analysis of Electromagnetic (EM) Wave Radiated from antenna located on a Multilayered Coated Cylinder" The 66th Joint Conference of Electrical and Electronics Engineers in Kyushu : JCEEE2013, Kumamoto, Japan, 2013.
- [27] Kittisak PHAEBUA, Titipong LERTWIRIYAPRAPA Chuwong PHONGCHAROENPANICH, "Study of a Repeater Tx antenna concept of a Portable Device Wireless Battery Charging System", 20th Asia-Pacific Conference on Communications, Thailand, Chon Buri, 1 - 3 October 2014.
- [28] Kittisak PHAEBUA, Titipong LERTWIRIYAPRAPA Chuwong PHONGCHAROENPANICH, "Study of a Repeater Tx Antenna for a Portable Device Wireless Battery Charging System" 2014 Thailand-Japan Microwave (TJMW2013), Thailand, 2014
- [29] การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณที่มีกำลังงานขาออกสูงสำหรับระบบส่งผ่านกำลังงานแบบไร้สาย เพื่อเข้าร่วมการประชุมวิชาการประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2015 ณ ..โรงแรมธรรมรินทร์ จังหวัด ตรัง.. ระหว่างวันที่ .8 ถึง 10 กรกฎาคม 2558
- [30] การออกแบบสายอากาศทวนกำลังงานไฟฟ้าในระบบส่งผ่านกำลังงานไร้สายสำหรับการชาร์จแบตเตอรี่อุปกรณ์พกพาขนาดเล็ก เพื่อเข้าร่วมการประชุมวิชาการประชุมวิชาการ ECTI-CARD 2015 ณ ..โรงแรมธรรมรินทร์ จังหวัด ตรัง.. ระหว่างวันที่ .8 ถึง 10 กรกฎาคม 2558
- [31] P.Wongsiritor, C.Phongcharoenpanich, T.Pumpoung, T.Lertwieiyaprapa and **K.Phaebua**, "The Radiation Analysis for RFID Tag Mounted on Coated Metallic Cylinder Using UTD Solution", (Invited paper) IEICE General Conference 2015, 12 March 2015, Japan.



การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

AWARD

ชื่อผลงาน	ชื่อรางวัลและหน่วยงานที่มอบ	ปี
การวิเคราะห์การกระจัด กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จากโครงสร้างผิวโค้ง	รางวัลโครงการวิทยาศาสตร์สู่ความเป็นเลิศ/ คณะกรรมการการการวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี การ สื่อสารและโทรคมนาคม วุฒิสภา	2555

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

### นักวิจัยในโครงการ

ชื่อ - นามสกุล : นายบัญชา เหลือแดง

ตำแหน่งงานปัจจุบัน : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.

ที่อยู่ : |

อีเมลล์ :

โทรศัพท์ :

โทรศัพท์มือถือ :

โทรสาร :

สถานที่ทำงาน : สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประวัติการศึกษา :

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ด.	วิศวกรรมไฟฟ้า	สจล.	2558
วศ.ม.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	สจล.	2554
วศ.บ.	วิศวกรรมโทรคมนาคม	สจล.	2546

ประสบการณ์การทำงาน :

ปีที่ทำงาน	ชื่อหน่วยงาน	ประเภทธุรกิจ	ตำแหน่ง
พ.ศ. 2559 ถึง ปัจจุบัน	มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคล รัตนโกสินทร์	มหาวิทยาลัย	ผู้ช่วยศาสตรา อาจารย์
พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2559	ศูนย์เทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)	การวิจัย พัฒนา และ วิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง กับเทคโนโลยี อิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์	ผู้ช่วยนักวิจัย
พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2555	บริษัท ซิเลซติกา (ประเทศไทย) จำกัด	ออกแบบและประกอบ เกี่ยวกับอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์	Test/Process Analysis Engineer

### โครงการวิจัย

1. หัวหน้าโครงการ “โครงการทุนพัฒนาอาจารย์รุ่นใหม่ สกว. ปี 2560 - 2562
2. หัวหน้าโครงการชุด “โครงการเศรษฐกิจสร้างสรรค์เพื่อการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์ชุมชน (OTOP) จากสินค้าเกษตรพื้นถิ่นด้วยกลไกการขับเคลื่อนห่วงโซ่คุณค่าใหม่ จังหวัดนครปฐม และประจวบคีรีขันธ์,” หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ ปี 2563 - 2564
3. หัวหน้าโครงการ “โครงการการร่างระเบียบหลักเกณฑ์และวิธีการบริหารจัดการตู้สินค้าของการรถไฟแห่งประเทศไทย,” กองทุนวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปี 2564 – 2565
4. หัวหน้าโครงการ “โครงการทุนพัฒนาอาจารย์รุ่นใหม่ สกว. ปี 2563 - 2565
5. นักวิจัย “โครงการศึกษาความเป็นไปได้ระบบโครงข่ายเซ็นเซอร์สำหรับฝ้าตรวจสอบพื้นที่ระยะไกล,” กองทุนวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ยุทธโศภกรณ์) ปี 2563 – 2564
6. นักวิจัย “การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต” กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ (กทปส.) 2563-2565
7. นักวิจัย “การตรวจจับการหลัดของผู้สูงอายุและผู้ป่วยแบบไม่รบกวนด้วยเซ็นเซอร์อัจฉริยะแบบเรดาร์และแจ้งเตือนแบบเรียลไทม์ผ่านแอปพลิเคชันโทรศัพท์มือถือ” กองทุนพัฒนาดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม 2563
8. นักวิจัย “การพัฒนาระบบสารสนเทศและแบบจำลองอัจฉริยะเพื่อบริหารจัดการการผลิตข้าวครบวงจรที่มีความหลากหลายรูปแบบ” สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) 2563-2564
9. นักวิจัย “การจัดการพลังงานอัจฉริยะโดยใช้การตอบสนองด้านโหลดด้วยเทคโนโลยี IOT ตามมาตรฐานสมาร์ตกริด OpenADR,” สำนักงานบริหารกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน งบประมาณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ปี 2559 – 2564

ใบอนุญาต / ทะเบียน :

นักวิจัยด้าน : โทรคมนาคมและการสื่อสารไร้สาย

ความเชี่ยวชาญเฉพาะทาง : การประยุกต์ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เซ็นเซอร์ การวัดและระบบควบคุมแบบไม่สัมผัส

ผลงานที่ผ่านมา :

วารสารวิชาการนานาชาติ

1. B. Luadang and C. Phongcharoenpanich, "A unidirectional bow tie array antenna with incision gap for DVB-T2 base station," IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 9, pp. 1087-1095, 2015. (ISI, IF2014=0.91)
2. C. Phongcharoenpanich, W. Polkaew, B. Luadang and P. Akkaraekthalin, "A Horizontally polarized omnidirectional antenna using stacked curve dipoles for DTV reception," International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2015, pp. 1-9, 2015. (ISI, IF2014=0.66)
3. A. Kandwal, J.V. Chauhan, and B. Luadang, "Coupled C-band stacked antenna using different dielectric constant substrates for communication systems," Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016.
4. B. Luadang, R. Senathong, and C. Phongcharoenpanich, "Magneto dielectric-laden miniaturized wideband weander line antenna for mobile devices," International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2018, pp. 1-11, 2018. (ISI, IF2017=1.378)
5. S. Dentre and B. Luadang, "Design of wideband radome for antenna array for digital TV broadcasting," RMUTL. Eng. J, ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2561 (TCI)
6. M. Krairiksh, C. Kittiyapunya, T. Limpiti, Member, T. Tantisoparak, P. Leekul, P. Yoiyod, B. Luadang, A. Sakonkanapong, and C. Phongcharoenpanich, "Measurement of radiated field from transmitting antennas located in various environments," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL. 67, NO. 4, pp.2056-2062, APRIL 2019
7. B. Luadang, A. Sakonkanapong, S. Dentre, P. Rassamit, and C. Phongcharoenpanich, "NFC-enabled far-field antenna on PET flexible substrate for 3 G/4 G/LTE mobile devices," IEEE Access, VOL. 7, pp.171966-171973, November 2019
8. S. Dentre, K. Pookkapund, B. Luadang, P. Akkaraekthalin, and C. Phongcharoenpanich, "Single-fed broadband CP bidirectional antenna with double-layer diagonally aligned plates for universal UHF-RFID applications," International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2020, pp. 1-14, 2020.

การประชุมวิชาการนานาชาติ

1. B. Luadang and C. Phongcharoenpanich, "Bandwidth enhancement of unidirectional bow tie antenna using incision gap for terrestrial digital video broadcasting," Thailand-Japan MicroWave 2015 (TJMW2015), Bangkok, August 2015.
2. B. Luadang, C. Phongcharoenpanich, P. Boonsrimuang and T. Paungma "A printed micky mouse antenna on defected ground structure for UHF digital television reception," International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2012), Bangkok, pp.584-587, November 2012.
3. B. Luadang, C. Phongcharoenpanich, P. Boonsrimuang and T. Paungma "A CPW-Fed printed tulip antenna for UHF digital television reception," International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST2012), Bangkok, pp.364-367, November 2012.
4. B. Luadang, C. Phongcharoenpanich and S. Kawdungta "A parasitic printed monopole antenna for a VHF mobile communication," 2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP2012), Singapore, pp.245-246, August 2012.
5. B. Luadang and C. Phongcharoenpanich, "A printed bi-triangular monopole antenna for VHF mobile communication," Thailand-Japan MicroWave 2012 (TJMW2012), Bangkok, August 2012.
6. B. Luadang and C. Phongcharoenpanich, "A Walk-through gate antenna using paralleled spiral square loop for HF-RFID applications," Proceedings of the 2010 International Workshop on Information Communication Technology (ICT2010), Bangkok, pp. W1A-1, Aug 2010.
7. P. Bumrungkarn, B. Luadang and, C. Phongcharoenpanich, "Integrated antenna using a magneto-dielectric substrate for DVB-H application," Thailand-Japan MicroWave 2015 (TJMW2015), Bangkok, August 2015.
8. W. Polkaew, B. Luadang and C. Phongcharoenpanich, "Horizontally Polarized DTV Antenna for Vehicular Applications," Thailand-Japan MicroWave 2014 (TJMW2014), Bangkok, November 2014.
9. A. Romputtal, B. Luadang and, C. Phongcharoenpanich, "Characteristics of a multi-slotted PIFA for UHF RFID tag," IEEE TENCON-2014, Bangkok, October 2014.

10. P. Osklang, B. Luadang, C. Phongcharoenpanich and S. Lamultree “Horizontally polarized omnidirectional antenna using octagonal dipole array,” The 20th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2014), Pattaya, October 2014.
11. A. Romputtal, B. Luadang and, C. Phongcharoenpanich, “Slotted PIFA for UHF RFID sensing tag,” Thailand-Japan MicroWave 2013 (TJMW2013), Bangkok, December 2013.
12. W. Polkaew, B. Luadang and, C. Phongcharoenpanich, “Omnidirectional antenna using Stacked circular ring radiating horizontal polarization for DTV reception,” Thailand-Japan MicroWave 2013 (TJMW2013), Bangkok, December 2013.
13. S. Tantod, S. Phungtoneng, B. Luadang, C. Phongcharoenpanich and, T. Limpiti “A triple band CPW-fed inverted-S antenna for WiFi applications,” 2013 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP2013), Chaing Mai, Thailand, pp.169-170, August 2013.

#### การประชุมวิชาการระดับชาติ

1. สิทธิชัย เตนต์รี บัญชา เหลือแดง ลักขณา บรรณวัฒน์ และ ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์, “สายอากาศแพตช์พาราซีติกโพลาริซวงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดี่ยวร่วมกับแผ่นพับสำหรับประยุกต์ใช้งานอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล,” 8th ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand, pp. 745-746, July, 2016
2. บัญชา เหลือแดง และ อติศักดิ์ ร่มพุดตาล, “การควบคุมแขนกลไร้สายต้นทุนต่ำด้วยแพลตฟอร์มต้นแบบอาคูโนและแลบวิว,” 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016), Phuket, Thailand, pp. 429-432, May, 2016
3. บัญชา เหลือแดง และ อติศักดิ์ ร่มพุดตาล, “การพัฒนาและการประยุกต์ใช้บอร์ดดาต้าแอกควิซชันไร้สายต้นทุนต่ำด้วย LabVIEW,” 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017), Chanthaburi, Thailand, pp. 339-342, May, 2017
4. บัญชา เหลือแดง อติศักดิ์ ร่มพุดตาล และ ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์, “การพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศ,” 10th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2018 (EENET 2018), Kanchanaburi, Thailand, pp. 261-264, May, 2018

5. Bancha Luadang, Sitthichai Denti, and Chuwong Phongcharoenpanich, “Radiation properties of DTV transmitting antenna taken into account radome effect,” The 3rd National Conference on Informatics, Agriculture, Management, Business Administration, Engineering, Science and Technology, Chumphon, Thailand, May, 2018
6. Bancha Luadang, Lakkhana Bannawat, and Sitthichai Denti, “Application of Wireless Technology for Soil moisture Sensor,” The 10th Rajamangala University of Technology National Conference, Trang, Thailand, August, 2018

การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

นักวิจัยในโครงการ อาจารย์ลักษณ์ บรรณวัฒน์

ประวัติบุคลากรในโครงการ

ชื่อ – นามสกุล : นางสาวลักษณ์ บรรณวัฒน์

ตำแหน่งงานปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ตำแหน่งในโครงการ : นักวิจัย

ที่อยู่ :

อีเมล :

โทรศัพท์ :

สถานที่ทำงาน : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประวัติการศึกษา :

- ปีการศึกษา 2555 - 2557: วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต แขนงวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- ปีการศึกษา 2552 - 2554: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
- ปีการศึกษา 2549 - 2552: ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาสื่อสารการบิน สถาบันการบินพลเรือน ประเทศไทย
- ปีการศึกษา 2546 - 2549: ระดับมัธยมปลาย สายวิทย์-คณิต โรงเรียนอุทัยวิทยาคม จ.อุทัยธานี
- ปีการศึกษา 2546 - 2549: ระดับมัธยมต้น โรงเรียนอุทัยวิทยาคม จ.อุทัยธานี

ประสบการณ์การทำงาน :

- 2557- ปัจจุบัน : อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
- หัวหน้าโครงการ “การพัฒนารถขนส่งอัตโนมัติสำหรับขนส่งบรรจุภัณฑ์ในอุตสาหกรรม” ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
- หัวหน้าโครงการ “การศึกษาและพัฒนาเครื่องตรวจสอบและจำแนกสอปธนบัตรแบบพกพา สำหรับผู้พิการทางสายตาร่วมกับอิเล็กทรอนิกส์เซ็นเซอร์และชุดประมวลผลบนสมองกลแบบฝังตัวเพื่อช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาในการตรวจสอบธนบัตร” ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)



## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

- นักวิจัย หัวข้อวิจัยเรื่อง “การสร้างหน่วยควบคุมเบย์สำหรับสถานีไฟฟ้าย่อยอัตโนมัติด้วยมาตรฐาน IEC 61850” วิจัยงบประมาณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ปี 2556-2558
- นักวิจัย หัวข้อวิจัยเรื่อง “Prototype of Automated Guided Vehicle for Automatic Container Transport in WD Factory” วิจัยงบประมาณบริษัทเวสเทิร์นดีจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ปี 2556-2557
- นักวิจัย โครงการความร่วมมือทางวิชาการ Fachhochschule Sudwestfalen University of Applied Sciences ณ เมือง Soest ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี ปี 2556
- นักวิจัย หัวข้อวิจัยเรื่อง “[การวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมขีดความสามารถเรดาร์ตรวจใต้พื้นดิน](#)” วิจัยงบประมาณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ปี 2555-2557

ใบอนุญาต / ทะเบียน : -

นักวิจัยด้าน : วิศวกรรมโทรคมนาคม วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ความเชี่ยวชาญเฉพาะทาง :

- การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น C, C++, C#, VB, PLC, Database ฯลฯ
- การวิเคราะห์ระบบ (System analysis) และเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ (Hardware interface)
- RFID: Radio Frequency Identification
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

ผลงานที่ผ่านมา :

งานวิจัยตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

- Lakkhana Bannawat, Akkarat Boonpoonga, and Santana Burintramart. A Frequency-domain Technique of Chipless RFID Identification using Cauchy Method. In Proc. The Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2018), Kyoto, Japan.

- Lakkhana Bannawat, Akkarat Boonpoonga, and Santana Burintramart. Detection and Classification of Buried Improvised Explosive Devices using Cauchy Method. In Proc. The 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT 2018), Bangkok, Thailand.

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโดรนเพื่อป้องกันการบินโดรนที่ไม่ได้รับอนุญาต

- Lakkhana Bannawat, Akkarat Boonpoonga, Santana Burintramart, and Prayoot Akkaraekthalin, On the Resolution Improvement of Radar Target Identification with Filtering Antenna Effects. In Proc. International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2018, page 1-11.

- Lakkhana Bannawat, Yochanang, C., Akkarat Boonpoonga and Prayoot Akkaraekthalin, Effect of Soil Perturbation on Radar Identification of Buried Object using Matrix Pencil Method. In Proc. International Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA 2015), Phuket, Thailand.

- Lakkhana Bannawat, Kheawprae, F., and Akkarat Boonpoonga, Improvement of Radar Target Identification with Near-field Calibration Technique. In Proc. The Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP 2016), Busan, Korea.

- Lakkhana Bannawat, Yochanang, C., and Akkarat Boonpoonga, Analysis of Object Buried in Multi-layer Soil by using Matrix Pencil Method. In Proc. Thailand-Japan Microwave (TJMW 2015). Bangkok, Thailand.

-Lakkhana Bannawat, Akkarat Boonpoonga, and Santana Burintramart. "Performance Evaluation of Target Identification Using Matrix Pencil Method in Different Frequency Range." In Proc. International Electrical Engineering Congress, 2014 (IEECON 2014), Phataya, Thailand.

- Lakkhana Bannawat, Akkarat Boonpoonga, and Santana Burintramart. "Performance Evaluation of Target Identification Using Matrix Pencil Method in Different Frequency Range." In Proc. Thailand - Japan International Academic Conference, 2013 (TJIA 2013), Bangkok, Thailand.

### งานวิจัยตีพิมพ์ระดับชาติ

- ลักษณะ บรรณวัฒน์, อนุกร กิจเกริกกาญจน์, ธนศักดิ์ แยมบุรี และ ภัชดาพร แสงเพชร ระบบติดตามและดูแลการเจริญเติบโตแคนตาลูปไฮโดรโปนิคส์แบบอัตโนมัติ (Automatic Monitoring System for Growing Hydroponic Cantaloupe) การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10 วันที่ 1-3 พฤษภาคม 2561 (EENET 2018), กาญจนบุรี, ประเทศไทย

- รพีพัฒน์ ทรัพย์สุทธิ, ลักษณะ บรรณวัฒน์, บัญชา เหลือแดง และ ภัชดาพร แสงเพชร (Fire Warning System for Household on Mobile Application) ระบบแจ้งเตือนการเกิดอัคคีภัย

## การวิจัยและพัฒนาระบบเรดาร์เพื่อการตรวจจับโคจรเพื่อป้องกันการบินโคจรที่ไม่ได้รับอนุญาต

ภายในคร้วเรือนผ่านแอปพลิเคชันบนมือถือ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 10 วันที่ 1-3 พฤษภาคม 2561 (EENET 2018), กาญจนบุรี, ประเทศไทย

- จักรกฤษณ์ จันทร์กระจ่าง, สมิตเล่าโสภณภรณ์, บัญชา เหลือแดง และ ลักษณ์า บรรณวัฒน์ เทคโนโลยีระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุสำหรับระบบบริหารและการจัดการทรัพยากรบุคคล (Radio Frequency Identification for Human Resource Management) การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 40 วันที่ 15-17 พฤศจิกายน 2560 (EECON-40), พัทยา, ประเทศไทย

- ลักษณ์า บรรณวัฒน์ และ เอกรัฐ บุญภูงา. (2559). การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัตถุตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์โดยใช้วิธีเมทริกซ์เพิลซิลแบบช่วงเวลา (Analysis of Interactive the Electromagnetic with Perfect Electric Conductor Object by using Short-Time Matrix Pencil Method) เอกสารการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 วันที่ 25-27 พฤษภาคม ปีที่ 8 ฉบับที่ 8, (EENET 2016), ภูเก็ต, ประเทศไทย

- สิทธิชัย เตนต์รี, บัญชา เหลือแดง, ลักษณ์า บรรณวัฒน์ และ ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ (2559).

สายอากาศแพตช์พาราซีติกโพลาริซวงกลมแบนด์กว้างป้อนสัญญาณเดี่ยวร่วมกับแผ่นพับสำหรับประยุกต์ใช้งานอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟสากล การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 8 (ECTI-CARD 2016), ประจวบคีรีขันธ์, ประเทศไทย

