การออกแบบและพัฒนาระบบประมวลผลเรดาร์อัจฉริยะสำหรับการตรวจจับเป้าหมายในสภาพแวดล้อมเมือง

นายเสกสรร เอียดแก้ว

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การออกแบบและพัฒนาระบบประมวลผลเรดาร์อัจฉริยะสำหรับการตรวจจับเป้าหมายในสภาพแวดล้อมเมือง

นายเสกสรร เอียดแก้ว

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองดุษฎีนิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การออกแบบและพัฒนาระบบประมวลผลเรดาร์อัจฉริยะสำหรับการตรวจจับเป้าหมายในสภาพแวดล้อมเมือง

โดย นายเสกสรร เอียดแก้ว

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

..... รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ ดร.เสาวณิต สุขภารังษี)

คณะกรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์

..... ประธาน

(ศาสตราจารย์ ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญภูงา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ดร.กฤษณ์ อธิกุลวงศ์)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ อัครเอกฒาลิน)

..... กรรมการภายนอก

(ดร.กมล เขมะรังษี)

ชื่อ : นายเสกสรร เอียดแก้ว
ชื่อดุษฎีนิพนธ์ : การออกแบบและพัฒนาระบบประมวลผลเรดาร์อัจฉริยะ
สำหรับการตรวจจับเป้าหมายในสภาพแวดล้อมเมือง
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.เอกรัฐ บุญภูงา
อาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์ร่วม : ดร.กฤษณ์ อธิกุลวงศ์
ปีการศึกษา : 2568

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในสภาพแวดล้อมเมืองที่มีความซับซ้อนสูง โดยใช้เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (FMCW Radar) ย่านความถี่ X-band (9.95-10.026 GHz) แบบสแกนเชิงกล และแก้ไขข้อจำกัดของการประมวลผลดอปเปลอร์แบบดั้งเดิมที่เกิดจากการสแกนเป้าหมายที่บินด้วยความเร็วต่ำโดยการนำเสนอกรอบทำงานสองกรอบแบบไม่พึ่งพาดอปเปลอร์ ซึ่งวิเคราะห์การกระจายตัวผ่านแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map)

กรอบการทำงานแรกใช้อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) ร่วมกับคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) ในการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อมเพื่อแยกแยะสัญญาณสะท้อนรบกวน (Clutter) จากโครงสร้างอาคาร โดรนจะถูกตรวจจับเมื่อปรากฏอยู่นอกขอบเขตสภาพแวดล้อมที่ถูกขยายด้วยตัวประกอบ β=1.1 ผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงแสดงให้เห็นว่ากรอบการทำงานนี้บรรลุค่า F1-score สูงสุดที่ 0.8493 ซึ่งมีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธี Optical Flow และวิธี Range-Doppler แบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

เพื่อยกระดับความแม่นยำและลดอัตราการแจ้งเตือนเท็จ (False Alarm Rate: FAR) กรอบการทำงานที่สองได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้อัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) สำหรับการจัดกลุ่มข้อมูลที่มีความหนาแน่นแปรผันแบบพลวัต ผนวกกับการใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) แบบ 2 ชั้น โครงข่ายนี้ทำการวิเคราะห์เวกเตอร์คุณลักษณะทางจลนศาสตร์ 6 มิติ (ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง) เพื่อจำแนกโดรนจากสภาพแวดล้อมจากวิถีการบิน 10 รูปแบบ ผลการทดสอบเชิงปริมาณแบบข้ามสถานที่ (Cross-Site) พบว่า กรอบการทำงานที่สองสามารถเพิ่มค่า F1-score สูงสุดถึง 0.9469 ลดอัตราการแจ้งเตือนเท็จลงเหลือเพียง 1% และให้ความแม่นยำในการจำแนกโดรนจากสภาพแวดล้อมด้วยวิถีการบิน (Accuracy) โดยรวมสูงถึง 99.83%

ผลงานวิจัยนี้ยืนยันศักยภาพของการผสานแผนภาพ AR Map เข้ากับการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ในการก้าวข้ามข้อจำกัดของระบบเรดาร์แบบดั้งเดิม ซึ่งพร้อมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในระบบรักษาความปลอดภัยทางอากาศและการติดตามเป้าหมายในพื้นที่เขตเมืองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(มีจำนวนทั้งสิ้น 94 หน้า)

คำสำคัญ : เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตด้วยความถี่ การตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ
สภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน

อาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์หลัก

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

Name : Mr. Seksan Eiadkaew
Dissertation Title : Design and Development of an Intelligent Radar Processing System for Target Detection in Urban Environments
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Dissertation Advisor : Associate Professor Dr. Akkarat Boonpoonga
Co-Advisor : Dr. Krit Athikulwongse
Academic Year : 2025

ABSTRACT

This thesis presents the design and development of an intelligent radar processing system for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) detection in highly complex urban environments utilizing a mechanically scanned X-band (9.95–10.026 GHz) Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW) radar. The limitations of conventional Doppler processing resulting from scanning low-speed targets are addressed by proposing two successively developed, Doppler-independent frameworks that analyze scatterer distributions via Azimuth-Range Maps (AR Maps).

The first framework employs the Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) algorithm combined with the Convex Hull algorithm to estimate environmental boundaries, thereby distinguishing radar clutter caused by building structures. A drone is successfully detected when it appears outside the environmental boundary expanded by a scaling factor of β=1.1. Experimental results in real-world environments demonstrate that this framework achieves a maximum F1-score of 0.8493, significantly outperforming both the Optical Flow method and the conventional Range-Doppler approach.

To further enhance detection accuracy and suppress the False Alarm Rate (FAR), a second framework is developed by incorporating the Hierarchical DBSCAN (HDBSCAN) algorithm for clustering data with dynamically varying densities, integrated with a two-layer Long Short-Term Memory (LSTM) neural network. This

network analyzes a six-dimensional kinematic feature vector (comprising position, velocity, and acceleration) to distinguish drones from clutter by identifying 10 distinct flight trajectories. Quantitative cross-site evaluations reveal that the second framework elevates the maximum F1-score to 0.9469, reduces the FAR to merely 1%, and achieves an overall accuracy of 99.83% in classifying and distinguishing drones from environmental clutter based on flight trajectories.

This research confirms the potential of fusing AR Maps with machine learning to overcome the inherent limitations of conventional radar systems, rendering it highly viable for practical deployment in airspace security and target tracking within urban areas.

(Total 94 Pages)

Keywords: FMCW radar, UAV detection, Complex environment

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอใช้พื้นที่ตรงนี้ขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เอกรัฐ บุญภูงา อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ดร. กฤษณ์ อธิกุลวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย รวมถึงขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ศาสตราจารย์ ดร. ประยุทธ อัครเอกฒาลิน และ ดร. กมล เขมะรังษีที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการเพิ่มเติมและปรับปรุงแก้ไขเนื้อหาให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. กิตติศักดิ์ แพบัว ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ธีรวัจน์ แสงเพชร์ และทีมงาน ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนเป็นอย่างยิ่งในด้านการออกแบบและสร้างฮาร์ดแวร์ระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ ตลอดจนขอขอบคุณสมาชิกทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (GLAS) ที่คอยให้ความร่วมมือ แลกเปลี่ยนความรู้ และช่วยเหลือกันเสมอมา

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณแหล่งทุนการศึกษาระดับดุษฎีบัณฑิต ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตคุณภาพสูงจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) ภายใต้เลขที่สัญญา บ.007/2565 รวมถึงขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนจากโครงการ การพัฒนาเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่สำหรับตรวจจับเป้าหมายเพื่อการป้องกันภัยทางทะเลและอากาศ จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำหรับงบประมาณที่ใช้ในการพัฒนาเรดาร์ตรวจจับโดรน จนทำให้งานวิจัยนี้สามารถนำไปปฏิบัติจริงได้อย่างเป็นรูปธรรม

สุดท้ายนี้ กระผมขอระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยมอบความรัก ความเข้าใจและเป็นกำลังใจสำคัญที่ผลักดันให้การศึกษาและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามความมุ่งหมายทุกประการ

เสกสรร เอียดแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... **ข**

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... **ง**

กิตติกรรมประกาศ ..... **ฉ**

สารบัญตาราง ..... **ญ**

สารบัญภาพ ..... **ฎ**

บทที่ 1 บทนำ **1**

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 6

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 6

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 7

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ 7

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง **8**

2.1 เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (FMCW Radar) 8

2.1.1 การสแกนมุมแอซิมัทและแผนภาพจุดกระเจิง 11

2.1.2 การสกัดความเร็วดอปเปลอร์ (Doppler Velocity Extraction) 12

2.1.3 สมการเรดาร์และพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ (Radar Range Equation and RCS) 14

2.2 วิธีการประมวลผลหลังสัญญาณเรดาร์ 16

2.2.1 การตรวจจับสัญญาณด้วยอัตราการแจ้งเตือนผิดพลาดคงที่ (CA-CFAR) 17

2.2.2 อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) 18

2.2.3 อัลกอริทึมเอชดีบีสแกน (HDBSCAN) 20

2.2.4 อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) 22

2.2.5 โครงข่ายหน่วยความจำระยะสั้นและยาว (LSTM) สำหรับจำแนกวิถีการบิน 23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 สรุป 26

บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่มอดูเลตความถี่สำหรับตรวจจับเป้าหมายในสภาพแวดล้อมเมือง 27

3.1 บทนำ 27

3.2 การพัฒนาฮาร์ดแวร์เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ 28

3.2.1 สถาปัตยกรรมและภาพรวมของระบบ 29

3.2.2 ระบบย่อยสายอากาศ 30

3.2.3 ระบบย่อยภาคส่งและภาครับ 34

3.2.4 ชุดหมุนค้นหาเป้าหมาย 37

3.2.5 การรวมระบบ 38

3.3 การพัฒนาอัลกอริทึมตรวจจับโดรนด้วยการประมาณขอบเขต 41

3.3.1 กรอบวิธีการประมวลผลสัญญาณ 42

3.3.2 การจำลองเพื่อทดสอบกรอบวิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม 44

3.4 การพัฒนาอัลกอริทึมตรวจจับและจำแนกโดรนด้วยอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) และโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) 48

3.4.1 กรอบวิธีการสองขั้นตอนสำหรับตรวจจับและจำแนกโดรน 49

3.4.2 การจำลองเพื่อทดสอบกรอบวิธีการสองขั้นตอนสำหรับตรวจจับและจำแนกโดรน 51

3.5 สรุป 54

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ 56

4.1 บทนำ 56

4.2 ผลการตรวจจับโดรนด้วยวิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม 56

4.2.1 การตั้งค่าระบบและเงื่อนไขการทดสอบ 57

4.2.2 ผลการตรวจจับโดรนด้วยวิธีประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม 59

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 ผลการสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อมและการเลือกพารามิเตอร์ 61
4.2.4 ผลการตรวจจับโดรนในสี่กรณีทดสอบ 64
4.2.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพ 69
4.3 ผลการตรวจจับและจำแนกโดรนด้วยเทคนิค HDBSCAN และ LSTM 71
4.3.1 ผลการฝึกสอนโครงข่าย LSTM 73
4.3.2 ผลการตรวจจับและจำแนกวิถีการบิน 74
4.4 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 79
4.5 สรุป 81
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 83
5.1 สรุปผลการวิจัย 83
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข 84
5.2.1 ปัญหาการตรวจจับผิดพลาดจาก Transient Clutter 84
5.2.2 ข้อจำกัดด้านความเร็วสูงสุดของอากาศยานไร้คนขับที่ตรวจจับได้ 84
5.2.3 ปัญหาประสิทธิภาพในช่วงเริ่มต้นการตรวจจับ 85
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาในอนาคต 86
บรรณานุกรม 87
ภาคผนวก 92
ประวัติผู้เขียน 94

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ค่าหน้าตัดเรดาร์ของวัตถุเทียบกับขนาดจริงของวัตถุ	15
3-1	ข้อกำหนดสมรรถนะของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ย่านความถี่ X-band	28
4-1	ค่าพารามิเตอร์ดีบีสแกนที่ใช้ในการสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อมสำหรับแต่ละมุมเงย	62
4-2	พื้นที่ขอบเขตสภาพแวดล้อมที่ได้จากการขยาย Convex Hull ด้วยตัวประกอบ β ที่แตกต่างกัน	63
4-3	ค่า Recall ของขอบเขตสภาพแวดล้อมที่ค่าตัวประกอบ β ต่าง ๆ	64
4-4	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับโดรนระหว่างวิธีที่หนึ่งและวิธีอ้างอิง	70
4-5	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีที่สองกับวิธีอ้างอิง	78
4-6	การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวิธีการตรวจจับโดรนที่แตกต่างกัน	80
4-7	การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณระหว่างวิธีที่นำเสนอและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	80
5-1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการสแกน ความสามารถในการประมวลผล และความเร็วสูงสุดของโดรนที่ตรวจจับได้	85

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1-1	รายงานข่าวการตรวจพบโดรนปริศนาใกล้บริเวณสนามบินในต่างประเทศ	1
1-2	รายงานข่าวการตรวจพบโดรนปริศนาในประเทศไทย	2
1-3	การสร้างแผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ (Range-Doppler Map)ด้วยการสะสมสัญญาณเชิร์ปหลายสัญญาณ	5
2-1	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่	8
2-2	สัญญาณคลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่แสดงสัญญาณที่ส่งสัญญาณที่รับและสัญญาณความถี่กลางที่มีความถี่คงที่	9
2-3	ผลลัพธ์ของการแปลงฟูรีเยร์ตามแนวแกนระยะแสดงยอดสัญญาณสอดคล้องกับตำแหน่งของเป้าหมาย	11
2-4	ตัวอย่างแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ในสภาพแวดล้อมในเมือง	11
2-5	แผนภาพระยะ-ความเร็ว (RD map) ที่ได้จากการประมวลผลฟูรีเยร์สองมิติแสดงตำแหน่งเป้าหมายในโดเมนระยะและความเร็ว	14
2-6	ไดอะแกรมแสดงหลักการสมการเรดาร์ (Radar Range Equation)	14
2-7	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ (RCS) ของโดรนการเกษตรและมุมตกกระทบในย่านความถี่ X-band	16
2-8	โครงสร้างของ CA-CFAR แสดง Training Cells, Guard Cells และ Cell Under Test (CUT)	17
2-9	การจัดกลุ่มด้วยอัลกอริทึมดีบีสแกนบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ	18
2-10	ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน แสดงการสร้าง Minimum Spanning Tree และ Condensed Cluster Tree	21
2-11	การสร้างขอบเขต Convex Hull รอบกลุ่มจุดกระเจิงของสิ่งปลูกสร้าง และการขยายด้วยตัวประกอบ β สำหรับการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม	23
2-12	โครงสร้างภายในของ LSTM Cell แสดงเกตต่าง ๆ และการไหลของข้อมูลผ่าน Cell State และ Hidden State	24

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-1 แผนภาพบล็อกของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ที่ออกแบบเพื่อตรวจจับโดรน 30

3-2 ผลการจำลอง S11 ของสายอากาศตัวสะท้อนอสมมาตร 31

3-3 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสามมิติของสายอากาศ 31

3-4 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในแนวราบ (Azimuth Pattern) 32

3-5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในแนวดิ่ง (Elevation Pattern) 32

3-6 ผลการทดสอบ Isolation ระหว่างสายอากาศส่งและรับ 33

3-7 การตรวจวัดสายอากาศใน Anechoic Chamber (ก) มุมมองด้านซ้าย (ข) มุมมองด้านขวา 33

3-8 ผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจริงของสายอากาศ 34

3-9 ระบบย่อยภาคส่งและภาครับของเรดาร์ (ก) วงจรกำลังงานต่ำครอบคลุมทั้งภาคส่งและภาครับ (ข) วงจรกำลังงานสูงสำหรับภาคส่ง 35

3-10 ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล 36

3-11 โครงสร้าง 3 มิติของชุดหมุนค้นหาเป้าหมายแบบ 2 แกน 37

3-12 ต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน 38

3-13 สถาปัตยกรรมการประมวลผลสัญญาณของระบบ 39

3-14 ตัวอย่างผล FFT ที่ได้จากการทดสอบระบบรวม 40

3-15 ส่วนต่อประสานผู้ใช้ (GUI) สำหรับควบคุมและแสดงผลเรดาร์ 40

3-16 ระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ย่านความถี่ X-band ที่รวมระบบสมบูรณ์ 41

3-17 ภาพรวมของระบบตรวจจับโดรนด้วยการประมาณขอบเขต 42

3-18 ผังแสดงกรอบการทำงานการตรวจจับโดรนด้วยวิธีการประมาณขอบเขต 43

3-19 ผลการสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อมบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ 44

3-20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตรวจจับถูกต้องและอัตราการแจ้งเตือนเท็จเมื่อเปลี่ยนค่า β 45

3-21 ผลการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์อัลกอริทึมดีบีสแกนต่ออัตราการครอบคลุมขอบเขตสภาพแวดล้อม 46

3-22 ผลการทดสอบการตรวจจับโดรนในสภาวะตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 5 กรณี 47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3-23 กรอบวิธีการสองขั้นตอนเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) + โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) สำหรับตรวจจับและจำแนกโดรน 48

3-24 วิธีการบินโดรน 10 ประเภทที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) 50

3-25 ผลการจำแนกสัญญาณโดรนและสัญญาณรบกวนของโครงข่าย LSTM แสดงในรูปแบบเมทริกซ์ความสับสนและแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ 51

3-26 ผลการวิเคราะห์ความไวต่อขนาดหน้าต่างการสังเกตการณ์สำหรับความแม่นยำในการจำแนกประเภทและความหน่วงในการตรวจจับ 52

3-27 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกรอบวิธีการที่หนึ่งและกรอบวิธีการที่สองสำหรับค่าตัวประกอบการขยายขอบเขต β ที่แตกต่างกัน 53

4-1 การติดตั้งเพื่อทดสอบการตรวจจับโดรนสำหรับวิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม 57

4-2 โดรนการเกษตรสำหรับใช้เป็นเป้าตรวจจับของเรดาร์ 58

4-3 รูปแบบเส้นทางบินของโดรนที่ใช้ในการทดสอบสำหรับประเมินวิธีการประมาณขอบเขต 59

4-4 แผนภาพสเปกโตรแกรม (AR spectrogram) จากการสแกนสภาพแวดล้อมโดยไม่มีโดรน 1 รอบที่มุมเงย (ก) φ = 35° (ข) φ = 40° (ค) φ = 45° (ง) φ = 50° 60

4-5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ k-distance ของแต่ละมุมเงย 61

4-6 ขอบเขตสภาพแวดล้อมบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR map) ที่ได้จากการสแกนของเรดาร์ที่มุมเงย (ก) φ = 35° (ข) φ = 40° (ค) φ = 45° (ง) φ = 50° 62

4-7 ผลการตรวจจับโดรนกรณีที่หนึ่ง (φ = 35°) (ก) วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม (ข) วิธี Optical Flow เปรียบเทียบ 65

4-8 ผลการตรวจจับโดรนกรณีที่สอง (φ = 40°) (ก) วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม (ข) วิธี Optical Flow 66

4-9 ผลการตรวจจับโดรนกรณีที่สาม (φ = 45°) (ก) วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม (ข) วิธี Optical Flow 68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

4-10 ผลการตรวจจับโดรนกรณีที่สี่ (φ = 50°) (ก) วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม (ข) วิธี Optical Flow 69

4-11 สถานที่สำหรับทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนด้วยกรอบการทำงานที่สอง (ก) สถานที่ที่หนึ่ง: ดาดฟ้าตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มจพ. (ข) สถานที่ที่สอง: สนามกีฬา มจพ. 72

4-12 วิธีการบิน 10 ประเภทที่ใช้ในการทดสอบ 72

4-13 กราฟความแม่นยำและค่าความสูญเสียในกระบวนการฝึกสอนและตรวจสอบของโครงข่าย LSTM แสดงการลู่เข้าสู่ค่าเสถียรภายใน 200 epoch 74

4-14 แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ของสถานที่ที่ 1 โดรนบินวิธีที่ 1 (วิธีเข้าหาเรดาร์): ขอบเขต HDBSCAN+Convex Hull (เส้นสีดำ) ตำแหน่งโดรนที่ตรวจจับ (จุดแดง) และตำแหน่งของสัญญาณรบกวน (จุดสีน้ำเงิน) 75

4-15 แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ของสถานที่ที่ 2 โดรนบินวิธีที่ 6 (วิธีวงกลม): ขอบเขต HDBSCAN+Convex Hull (เส้นสีดำ) ตำแหน่งโดรนที่ตรวจจับ (จุดแดง) และตำแหน่งของสัญญาณรบกวน (จุดสีน้ำเงิน) 76

4-16 แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ของสถานที่ที่ 2 โดรนบินวิธีที่ 9 (วิธีบินซิกแซก): ขอบเขต HDBSCAN+Convex Hull (เส้นสีดำ) ตำแหน่งโดรนที่ตรวจจับ (จุดแดง) และตำแหน่งของสัญญาณรบกวน (จุดสีน้ำเงิน) 77

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) หรือที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อโดรน ได้รับความนิยมแพร่หลายอย่างรวดเร็วในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ทั้งในภาคพลเรือนและภาคการทหาร ด้านพลเรือน โดรนถูกประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในงานโลจิสติกส์ [1] การติดตามสภาพแวดล้อม [2] และการสื่อสาร [3] ส่วนในด้านการทหาร โดรนถูกใช้ในภารกิจลาดตระเวน เฝ้าระวัง และโจมตีเป้าหมาย ตลาดโดรนทั่วโลกมีมูลค่าสูงถึง 26.12 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี พ.ศ. 2567 และคาดการณ์ว่าจะเติบโตถึง 40.56 พันล้านดอลลาร์สหรัฐภายในปี พ.ศ. 2573 ด้วยอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปีร้อยละ 9.2 [4] การขยายตัวดังกล่าวส่งผลให้โดรนมีราคาถูกลงและเข้าถึงได้ง่ายขึ้น ซึ่งนอกจากจะก่อให้เกิดประโยชน์แล้ว ยังก่อให้เกิดความท้าทายด้านความปลอดภัยและความมั่นคงอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 1-1 รายงานข่าวการตรวจพบโดรนบริศนาใกล้บริเวณสนามบินในต่างประเทศ (อ้างอิง https://www.ctif.org)

ภัยคุกคามจากโดรนที่บินเข้ามาในพื้นที่หวงห้ามโดยไม่ได้รับอนุญาตได้รับการรายงานอย่างต่อเนื่องจากหลายประเทศทั่วโลก กรณีที่ได้รับความสนใจมากที่สุดคือเหตุการณ์ที่สนามบินแกตวิค (Gatwick Airport) ประเทศสหราชอาณาจักร เมื่อวันที่ 19-21 ธันวาคม พ.ศ. 2561 โดรนบินเข้ามาในเขตหวงห้ามบริเวณรันเวย์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้สนามบินต้องปิดรันเวย์นานถึง 33 ชั่วโมง มีเที่ยวบินถูกยกเลิกหรือเบี่ยงเส้นทางกว่า 1,000 เที่ยว ส่งผลกระทบต่อผู้โดยสารราว 140,000 คน และสร้างความเสียหายทางเศรษฐกิจรวมกว่า 55.8 ล้านยูโร [5] เหตุการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็น

ชัดเจนว่าแม้แต่โดรนขนาดเล็กที่ไม่มีอาวุธก็สามารถก่อความเสียหายทางเศรษฐกิจและความปลอดภัยได้อย่างมหาศาล

ในปี พ.ศ. 2568 ปัญหาโดรนบุกรุกพื้นที่หวงห้ามยังคงทวีความรุนแรงขึ้นทั่วโลก เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2568 สนามบินซาเวนเต็ม (Brussels Zaventem Airport) ศูนย์กลางการบินที่ใหญ่ที่สุดของประเทศเบลเยียม ต้องปิดให้บริการชั่วคราวหลังผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศตรวจพบโดรนบินเหนือพื้นที่สนามบิน ส่งผลให้ต้องยกเลิกเที่ยวบินขาออก 15 เที่ยว และเบี่ยงเส้นทางเที่ยวบินขาเข้าอีก 8 เที่ยวไปยังสนามบินทางเลือกดังแสดงในรายงานข่าวในภาพที่ 1-1 นอกจากนี้ สนามบินลิแยช (Liège Airport) ซึ่งเป็นศูนย์กลางขนส่งสินค้าทางอากาศสำคัญของยุโรปก็ต้องปิดตัวลงเช่นกัน ทางการเบลเยียมระบุว่าอาจเป็นความพยายามจงใจทำลายเสถียรภาพของโครงสร้างพื้นฐานสำคัญ [6] ก่อนหน้านั้นเพียงไม่กี่สัปดาห์ ในเดือนกันยายน พ.ศ. 2568 สนามบินอาร์ลันดา (Arlanda Airport) กรุงสตอกโฮล์ม ประเทศสวีเดน ก็ต้องระงับเที่ยวบินหลายชั่วโมงหลังตรวจพบโดรนไม่ทราบที่มาอย่างน้อย 4 ลำ บินในบริเวณสนามบิน ตำรวจสวีเดนเชื่อว่าเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นโดยเจตนา และกองทัพสวีเดนได้เข้าร่วมติดตามสถานการณ์เนื่องจากมีความกังวลเกี่ยวกับภัยคุกคามแบบผสมผสานจากภายนอกประเทศ [6]



ภาพที่ 1-2 รายงานข่าวการตรวจพบโดรนปริศนาในประเทศไทย

(อ้างอิง www.thaipbs.or.th)

สำหรับประเทศไทย ดังปรากฏในรายงานข่าวในภาพที่ 1-2 ภัยคุกคามจากโดรนได้เริ่มแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนเช่นกัน เมื่อวันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2568 เจ้าหน้าที่ตรวจพบโดรนรวมกว่า 12 ลำบินผ่านพื้นที่มหาวิทยาลัยในตำบลเนินหอม อำเภอเมืองปราจีนบุรี และเข้าไปในพื้นที่ความมั่นคงของทหาร 3 หน่วย โดยมีโดรน 1 ลำ ขนาดประมาณ 1.5 เมตร 4 ใบพัด บินต่ำจนชาวบ้านสามารถ

มองเห็นและบันทึกภาพไว้ได้ แม้เจ้าหน้าที่หลายหน่วยงานออกติดตามทันที แต่ไม่สามารถระบุผู้บังคับโดรนได้ จังหวัดปราจีนบุรีจึงต้องออกประกาศห้ามบินโดรนโดยเด็ดขาดทุกพื้นที่ ผู้ฝ่าฝืนมีโทษจำคุกไม่เกิน 1 ปี หรือปรับไม่เกิน 40,000 บาท หรือทั้งจำทั้งปรับ [7] ต่อมาเมื่อวันที่ 20 ธันวาคม พ.ศ. 2568 พบการเคลื่อนไหวของโดรนในพื้นที่ใกล้เขตการบินของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ 2 คืนติดต่อกัน บริเวณทิศตะวันออกของสนามบินในช่วงเวลา 19.00-21.00 น. ผู้อำนวยการท่าอากาศยานสุวรรณภูมิระบุว่าสถานการณ์ดังกล่าวส่งผลกระทบต่อความเชื่อมั่นและความปลอดภัยในการเดินอากาศอย่างมีนัยสำคัญ และอยู่ระหว่างการสืบสวนเพื่อระบุแรงจูงใจ [8]

จากเหตุการณ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ไม่ว่าจะเป็นการบุกรุกของโดรนในพื้นที่น่านฟ้าสนามบินแกตวิค สนามบินซาเวนเต็ม สนามบินอาร์ลันดา รวมถึงเหตุการณ์ในประเทศไทยทั้งที่จังหวัดปราจีนบุรีและท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ ล้วนแสดงให้เห็นถึงภัยคุกคามที่เกิดขึ้นจริงจากโดรนปริศนาที่บินเข้าสู่พื้นที่หวงห้ามและพื้นที่ยุทธศาสตร์สำคัญโดยไม่ได้รับอนุญาต ก่อให้เกิดความเสียหายทั้งในเชิงเศรษฐกิจ ความปลอดภัย และความมั่นคงของชาติ เหตุการณ์เหล่านี้เกิดขึ้นทั้งในระดับนานาชาติและในประเทศไทย และยังไม่มีแนวโน้มที่จะลดลงในอนาคต ทำให้เห็นได้ชัดว่าการพัฒนาระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับที่มีประสิทธิภาพสูงมีความจำเป็นอย่างเร่งด่วน

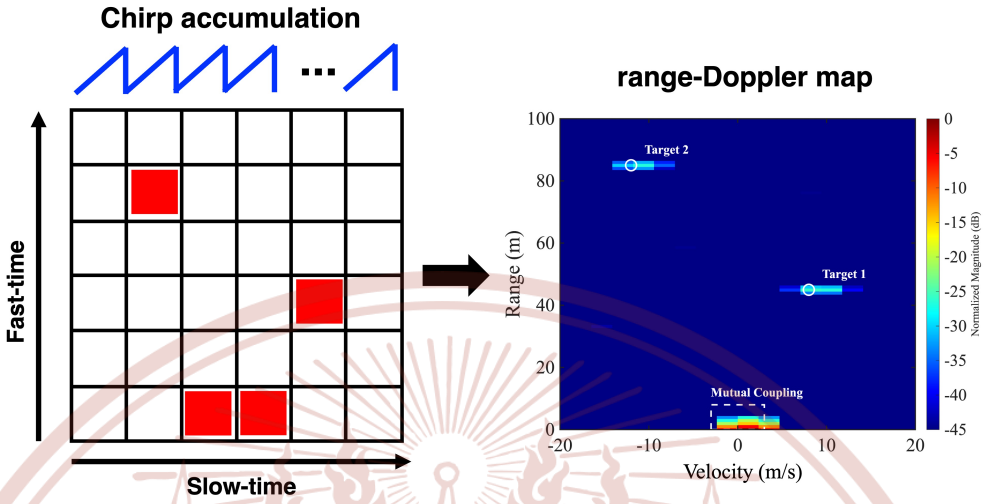
ในบรรดาเทคโนโลยีที่ใช้ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบกล้อง (Optical Camera) ระบบตรวจจับสัญญาณวิทยุ (Radio Frequency: RF) และระบบเซนเซอร์เสียง (Acoustic Sensor) แต่ละระบบล้วนมีข้อจำกัดสำคัญในสภาพแวดล้อมเมือง ระบบกล้องต้องพึ่งพาทัศนวิสัยที่ปลอดโปร่งและได้รับผลกระทบจากสภาพแสง ระบบตรวจจับสัญญาณวิทยุสามารถตรวจจับได้เฉพาะโดรนที่ส่งสัญญาณออกมา จึงไม่สามารถใช้กับโดรนที่บินในโหมดอัตโนมัติผ่าน GPS ส่วนระบบเซนเซอร์เสียงเผชิญกับความท้าทายในสภาพแวดล้อมที่มีเสียงรบกวนสูงและมีระยะตรวจจับจำกัด [9] จากข้อจำกัดของเทคโนโลยีอื่น ทำให้เรดาร์โดยเฉพาะเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (Frequency-Modulated Continuous-Wave: FMCW) มีข้อได้เปรียบเด่นชัดในการตรวจจับโดรนในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน คลื่นเรดาร์สามารถทำงานได้ตลอด 24 ชั่วโมงในทุกสภาพอากาศ สามารถตรวจจับโดรนได้แม้ขณะไม่มีการส่งสัญญาณออกมา และสามารถเลี้ยวเบนรอบสิ่งกีดขวางขนาดเล็กทำให้ตรวจจับได้แม้เป้าหมายถูกบดบังบางส่วน นอกจากนี้ เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ [10]–[13] ยังให้ความละเอียดสูงทั้งในด้านระยะและความเร็ว สามารถตรวจจับโดรนขนาดเล็กและแยกแยะออกจากสัญญาณรบกวนสิ่งแวดล้อมได้

แนวทางที่ได้รับความนิยมในการตรวจจับโดรนด้วยเรดาร์คือการใช้ข้อมูลดอปเปลอร์ (Doppler) เพื่อจำแนกเป้าหมายตามลักษณะการเคลื่อนที่ โดยวิเคราะห์การเลื่อนความถี่ที่สัมพันธ์กับความเร็วของวัตถุ งานวิจัยใน [14] ประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) กับแผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ (Range-Doppler Map) ซึ่งให้อัตราการแจ้งเตือนเท็จต่ำกว่าวิธีอัตราสัญญาณเตือนเท็จคงที่

(Constant False Alarm Rate: CFAR) แบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญในสถานการณ์ที่มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำ(Low SNR) ในทำนองเดียวกัน [15] สำรวจผลกระทบไมโครดอปเปลอร์ (Micro-Doppler) เพื่อตรวจจับโดรนขนาดเล็กจากลักษณะการหมุนของใบพัด แต่ประสบปัญหาในการแยกแยะโดรนออกจากวัตถุที่มีลักษณะดอปเปลอร์คล้ายกัน เช่น นก การศึกษาใน [16] เพิ่มความละเอียดดอปเปลอร์ด้วยเรดาร์อาร์เรย์ดิจิทัลเพื่อแก้ปัญหาโดรนขนาดเล็ก แต่ยังประสบปัญหากับโดรนที่มีความเร็วเชิงรัศมี (Radial Velocity) ใกล้ศูนย์ และ [17] นำเสนอสถาปัตยกรรมบนพื้นฐานทรานส์ฟอร์เมอร์ (Transformer) ที่แสดงศักยภาพในสถานการณ์ที่ซับซ้อน แต่ยังคงไวต่อสัญญาณรบกวนจากสิ่งแวดล้อม เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของวิธีดอปเปลอร์ในการตรวจจับโดรนที่มีค่าดอปเปลอร์ใกล้ศูนย์ งานวิจัยล่าสุดได้มุ่งสำรวจการใช้เรดาร์ย่านคลื่นมิลลิเมตร (Millimeter-Wave: mmWave) เพื่อดึงข้อมูลดอปเปลอร์ที่ละเอียดยิ่งขึ้น

การวิเคราะห์งานวิจัยที่ใช้เรดาร์ย่านคลื่นมิลลิเมตรในการตรวจจับโดรนเผยให้เห็นทั้งความก้าวหน้าและข้อจำกัด ระบบที่ทำงานในย่านคลื่นมิลลิเมตรสามารถดึงแผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ที่มีความละเอียดสูง ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับโดยเฉพาะในสภาวะดอปเปลอร์ใกล้ศูนย์ [18], [19] อย่างไรก็ตาม ระบบเรดาร์ย่านคลื่นมิลลิเมตรมีข้อจำกัดร่วมที่สำคัญคือระยะตรวจจับที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ความถี่ทำงานของเรดาร์ย่านนี้โดยทั่วไปไม่เหมาะสมสำหรับการตรวจจับโดรนในระยะ 2-3 กิโลเมตร งานวิจัยใน [20], [21] ชี้ให้เห็นว่าแม้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจะสูง แต่ระยะปฏิบัติการมักจำกัดอยู่ที่ระดับสิบเมตรเท่านั้น ซึ่งจำกัดการประยุกต์ใช้ในการเฝ้าระวังพื้นที่ขนาดใหญ่ นอกจากนี้ [22], [23] อภิปรายว่าระบบคลื่นมิลลิเมตรอาจเผชิญความท้าทายในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูง เนื่องจากความละเอียดที่เพิ่มขึ้นอาจขยายผลกระทบของสัญญาณรบกวนชั่วคราวและการสะท้อนใกล้โครงสร้างอาคาร

ข้อสังเกตที่สำคัญจากงานวิจัยที่ผ่านมาทั้งหมดข้างต้นคือ งานวิจัยเหล่านั้นล้วนใช้เรดาร์แบบติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed Radar) ซึ่งสามารถหันลำคลื่นไปยังทิศทางเดิมและสะสมสัญญาณเชิร์ป (Chirp Signal) จำนวนมากได้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาประมวลผลสัญญาณเชิงกลุ่ม (Coherent Processing Interval, CPI) ดังแสดงในภาพที่ 1-3 การสะสมสัญญาณเชิร์ปจำนวนเพียงพอจากทิศทางเดิมเป็นเงื่อนไขพื้นฐานในการสร้างแผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ที่มีความละเอียดสูง อย่างไรก็ตาม ในระบบเรดาร์แบบสแกนด้วยชุดหมุนเชิงกล ลำคลื่นจะเปลี่ยนทิศทางอย่างต่อเนื่องระหว่างกระบวนการสะสมสัญญาณ ทำให้ไม่สามารถรวบรวมสัญญาณเชิร์ปจากทิศทางเดิมได้เพียงพอ ส่งผลให้ไม่สามารถสร้างแผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ที่มีความละเอียดเพียงพอสำหรับการตรวจจับโดรนได้ ข้อจำกัดพื้นฐานนี้ทำให้วิธีการดอปเปลอร์ทั้งหมดที่กล่าวมาไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับระบบเรดาร์แบบสแกนค้นหาเป้าหมาย



ภาพที่ 1-3 การสร้างแผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ (Range-Doppler Map) ด้วยการสะสมสัญญาณเชิร์ปหลายสัญญาณ

เพื่อรับมือกับข้อจำกัดของวิธีดอปเปลอร์ นักวิจัยได้สำรวจวิธีการตรวจจับแบบไม่ใช้ดอปเปลอร์ โดยเฉพาะการประมวลผลภาพด้วยวิธีการไหลเชิงแสง (Optical Flow) [24], [25] วิธีนี้ประมวลผลข้อมูลเรดาร์โดยพล็อตสเปกโตรแกรม (Spectrogram) สำหรับแต่ละรอบการสแกนและซ้อนทับตามลำดับ จากนั้นใช้อัลกอริทึมการไหลเชิงแสงเพื่อระบุการเคลื่อนที่ของพิกเซล โดยสมมติว่าการตรวจจับโดรนจะแสดงการเคลื่อนที่อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่สำคัญของวิธีนี้คือความไวต่อสัญญาณรบกวนสิ่งแวดล้อม ลักษณะนิ่งอย่างอาคารอาจแสดงการเคลื่อนที่เท็จในสเปกโตรแกรมและแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ เนื่องจากความผันผวนของข้อมูลหรือการกระเจิงของคลื่น ซึ่งมักนำไปสู่การตรวจจับเท็จโดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมเมืองที่มีสัญญาณรบกวนสูง

จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้น เทคนิคการประมวลผลที่มีอยู่สำหรับการตรวจจับโดรนมักพึ่งพาข้อมูลดอปเปลอร์ในการแยกแยะโดรนออกจากสัญญาณรบกวนสิ่งแวดล้อม ซึ่งกลายเป็นปัญหาเมื่อโดรนเคลื่อนที่ช้าหรือบินอยู่กับที่เนื่องจากค่าดอปเปลอร์ใกล้ศูนย์ ยิ่งกว่านั้น งานวิจัยทั้งหมดที่ผ่านมาใช้เรดาร์แบบติดตั้งอยู่กับที่ซึ่งไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้โดยตรงกับระบบเรดาร์แบบสแกน ส่วนวิธีทางเลือกอย่างการไหลเชิงแสงก็ยังมีความไวต่อสัญญาณรบกวนสิ่งแวดล้อมสูง ทำให้เกิดการตรวจจับเท็จในสภาพแวดล้อมเมืองที่ซับซ้อน ข้อจำกัดเหล่านี้เน้นย้ำถึงความต้องการเทคนิคการตรวจจับที่แข็งแกร่งซึ่งสามารถรับมือกับการเคลื่อนที่ช้าของโดรนและสัญญาณรบกวนที่ซับซ้อนในระบบเรดาร์แบบสแกนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอกรอบการทำงานสำหรับการตรวจจับโดรนในสภาพแวดล้อมในเมืองด้วยระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่แบบสแกน โดยไม่พึ่งพาค่าดอปเปลอร์ แต่วิเคราะห์รูปแบบจุดกระเจิงในแผนภาพมุมแอซิมัท-ระยะ (Azimuth-Range Scattering Point Map: AR

Map) แทน กรอบการทำงานประกอบด้วยสองส่วนหลัก ส่วนแรกคือการตรวจจับวัตถุโดยใช้อัลกอริทึมดีบีสแกน (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise: DBSCAN) และอัลกอริทึมเอชดีบีสแกน (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise: HDBSCAN) สำหรับจัดกลุ่มจุดกระเจิงและค้นหาเป้าหมาย ควบคู่กับอัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex-Hull) สำหรับประมาณขอบเขตของสิ่งปลูกสร้างเพื่อแยกแยะสัญญาณโดรนออกจากสัญญาณรบกวนจากอาคาร [26] ส่วนที่สองคือการจำแนกประเภทโดรนโดยวิเคราะห์วิถีการบิน (Trajectory) ด้วยโครงข่ายหน่วยความจำระยะสั้นและยาว (Long Short-Term Memory: LSTM) ซึ่งสามารถจำแนกรูปแบบการบินของโดรนออกเป็น 10 ประเภท ด้วยความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 99.83 [27]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1) เพื่อพัฒนาวิธีการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในสภาพแวดล้อมในเมืองโดยใช้เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (FMCW radar) แบบสแกน ผ่านการวิเคราะห์รูปแบบจุดกระเจิงในแผนภาพมุมแอซิมัท-ระยะ โดยไม่พึ่งพาค่าดอปเปลอร์

2) เพื่อพัฒนาวิธีประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม (Environmental Boundary Estimation) โดยใช้อัลกอริทึมดีบีสแกน อัลกอริทึมเอชดีบีสแกน และอัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ สำหรับแยกแยะสัญญาณของโดรนออกจากสัญญาณรบกวนที่สะท้อนจากอาคารและสิ่งปลูกสร้างในพื้นที่

3) เพื่อพัฒนาระบบจำแนกประเภทวิถีการบินของอากาศยานไร้คนขับโดยใช้โครงข่ายหน่วยความจำระยะสั้นและยาว (LSTM) สำหรับรู้จำรูปแบบการบิน 10 ประเภทในสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1) ระบบเรดาร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ย่านความถี่ X ทำงานในช่วงความถี่ 9.95-10.026 GHz มีแบนด์วิดท์ 76 MHz ติดตั้งบนแท่นหมุน 360 องศา พัฒนาภายใต้โครงการวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

2) การทดสอบดำเนินการในสภาพแวดล้อมในเมือง ณ บริเวณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร ซึ่งมีอาคารสูงล้อมรอบ ประกอบด้วยอาคารสูง 50.8, 47.1 และ 20.3 เมตร

3) อากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการทดสอบคือ โดรนการเกษตร ซึ่งเป็นโดรนพาณิชย์ขนาดเล็กที่มีขนาดใกล้เคียงกับโดรนที่ก่อให้เกิดภัยคุกคามในสถานการณ์จริง

4) ระบบจำแนกประเภทวิถีการบินจำแนกรูปแบบการบินของโดรน 10 ประเภท โดยใช้ข้อมูลวิถีการบินที่ได้จากผลการตรวจจับของเรดาร์เป็นอินพุต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้วิธีการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในสภาพแวดล้อมในเมืองที่มีสัญญาณรบกวนสูงโดยไม่พึ่งพาค่าดอปเปลอร์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการรักษาความปลอดภัยของสนามบิน ฐานทัพ และโครงสร้างพื้นฐานสำคัญของประเทศ ดังที่เหตุการณ์ที่สนามบินสุวรรณภูมิและจังหวัดปราจีนบุรีแสดงให้เห็นถึงความจำเป็นเร่งด่วน

2) ได้อัลกอริทึมประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อมสำหรับแยกแยะสัญญาณรบกวนจากอาคารออกจากสัญญาณของโดรน ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนได้

3) ได้ระบบจำแนกประเภทวิถีการบินของโดรนที่มีความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 99.83 อันเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบตอบโต้ภัยคุกคามโดรนอัตโนมัติในอนาคต

4) เป็นองค์ความรู้และเทคโนโลยีพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่เพื่อรักษาความปลอดภัยทางอากาศในเขตเมืองของประเทศไทย

1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 5 บท บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการตรวจจับโดรน รวมถึงเหตุการณ์จริงที่แสดงให้เห็นถึงภัยคุกคามทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์ ขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่อย่างละเอียด รวมถึงอัลกอริทึมดีบีสแกน อัลกอริทึมเอชดีบีสแกน อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ และโครงข่ายหน่วยความจำระยะสั้นและยาว

บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาระบบ แบ่งเป็น 3.1 การออกแบบฮาร์ดแวร์ระบบเรดาร์ และ 3.2 การออกแบบและพัฒนาส่วนประมวลผลสัญญาณ ซึ่งอธิบายพัฒนาการตั้งแต่วิธีดีบีสแกน สู่วิธีเอชดีบีสแกน อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ และระบบจำแนกประเภทด้วย LSTM

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ นำเสนอผลการทดสอบระบบทั้งหมดในสภาพแวดล้อมจริง ทั้งด้านประสิทธิภาพการตรวจจับโดรนและการจำแนกประเภทวิถีการบิน พร้อมวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

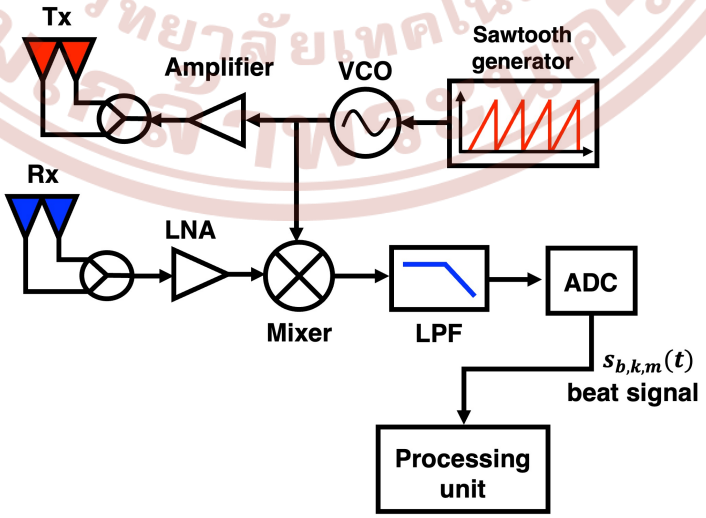
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และนำเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อยอดในอนาค

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการทำความเข้าใจวิธีการที่นำเสนอในบทถัดไป โดยครอบคลุมทฤษฎีหลักสองส่วน ส่วนแรกอธิบายหลักการทำงานของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (Frequency-Modulated Continuous Wave: FMCW) ตั้งแต่การสร้างและรับสัญญาณ การวัดระยะและความเร็วของเป้าหมาย การสแกนมุมแอซิมัท การสร้างแผนภาพจุดกระเจิง รวมถึงสมการเรดาร์และการคำนวณพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ของโดรน ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบและประเมินสมรรถนะของระบบ ส่วนที่สองนำเสนอวิธีการประมวลผลหลังสัญญาณเรดาร์ ได้แก่ การตรวจจับสัญญาณด้วยอัตราสัญญาณแจ้งเตือนเท็จคงที่ อัลกอริทึมดีบีสแกน อัลกอริทึมเอชดีบีสแกน และอัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์สำหรับแยกแยะสัญญาณของโดรนออกจากสัญญาณรบกวนที่สะท้อนจากอาคารและสิ่งปลูกสร้าง และโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับจำแนกวิถีการบินของโดรน

2.1 เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (FMCW Radar)

เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (Frequency-Modulated Continuous Wave: FMCW) เป็นเรดาร์แบบส่งสัญญาณต่อเนื่องที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณตามเวลาในลักษณะรูปคลื่นสามเหลี่ยม (Triangular Waveform) หรือเรียกว่าสัญญาณเชิร์ป เรดาร์ประเภทนี้มีข้อได้เปรียบเหนือเรดาร์แบบพัลส์ (Pulse Radar) ในหลายด้าน ได้แก่ ความสามารถในการวัดระยะได้อย่างแม่นยำ มีความละเอียดเชิงระยะสูง ใช้พลังงานในการส่งต่ำ และสามารถผลิตได้ด้วยต้นทุนที่ต่ำกว่า ทำให้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการตรวจจับโดรนขนาดเล็กในสภาพแวดล้อมในเมือง โครงสร้างพื้นฐานของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ แสดงไว้ในภาพที่ 2-1



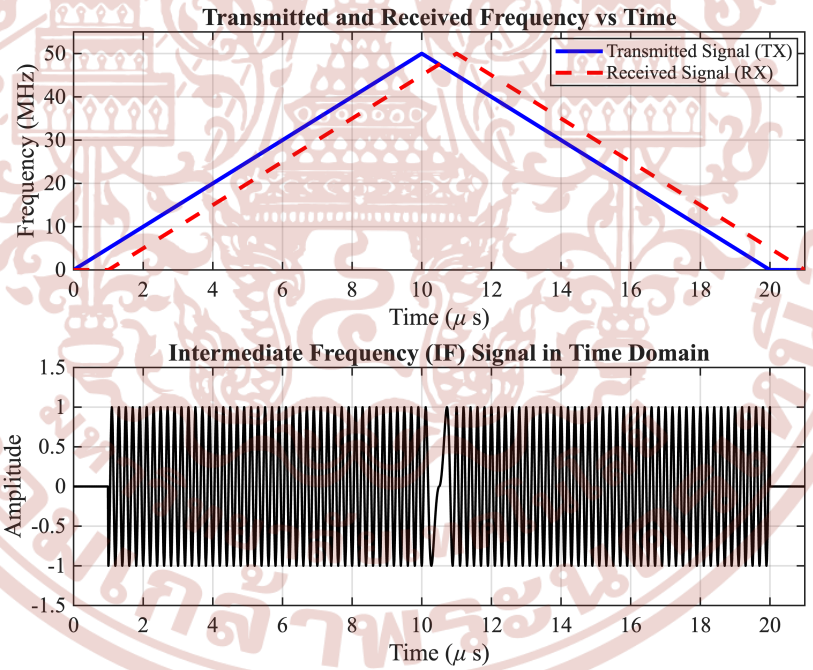
ภาพที่ 2-1 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่

สัญญาณที่ส่งออกของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (Transmitted Signal) มีความถี่เริ่มต้น f_s และแอมพลิจูด A_t โดยความถี่จะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรงตามเวลาในช่วงครึ่งคาบ แล้วลดลงในอีกครึ่งคาบ สร้างเป็นรูปสัญญาณสามเหลี่ยม

สัญญาณที่ส่ง (Transmitted Signal) สามารถเขียนในรูปแบบคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 2-1

$$s_{Tx}(t)=A_t \cos\left(2\pi\left(f_s+\frac{\mu t^2}{2}\right)\right) \tag{2-1}$$

โดยที่ μ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Frequency Slope) คำนวณได้จาก $\mu = BW/T_c$ เมื่อ BW คือแบนด์วิดท์ของสัญญาณ และ T_c คือช่วงเวลาของหนึ่งสัญญาณเชิร์ป ความถี่ทันที (Instantaneous Frequency) ของสัญญาณที่ส่งมีค่าเป็น $f_t(t)=f_s+\mu t$ รูปแบบของสัญญาณที่ส่งและสัญญาณที่รับ [28] แสดงไว้ในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2-2 สัญญาณคลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่แสดงสัญญาณที่ส่ง สัญญาณที่รับและสัญญาณความถี่กลางที่มีความถี่คงที่

เมื่อสัญญาณที่ส่งออกกระทบกับเป้าหมายที่ระยะ d สัญญาณที่สะท้อนกลับมายังสายอากาศรับจะมีการหน่วงเวลา (Time Delay) เป็น $\tau = 2d/c$ เมื่อ c คือความเร็วแสง สัญญาณที่รับ (Received Signal) สามารถเขียนได้ตามสมการที่ 2-2

$$s_{Rx}(t)=A_r \cos\left(2\pi\left(f_s(t-\tau)+\frac{\mu(t-\tau)^2}{2}\right)\right) \tag{2-2}$$

เมื่อสัญญาณที่รับกลับ (Received Signal) ถูกนำไปผสมกับสัญญาณที่ส่ง (Transmitted Signal) ในวงจรผสมสัญญาณ (RF Mixer) จะได้สัญญาณความถี่กลาง (Intermediate Frequency: IF) หรือเรียกอีกชื่อว่า สัญญาณบีท (Beat Signal) ซึ่งมีความถี่เป็นผลต่างระหว่างสัญญาณส่งและสัญญาณรับ สัญญาณความถี่กลางมีแอมพลิจูด A_b และเขียนในรูปสัญญาณเชิงซ้อน ดังสมการที่ 2-3

$$s_b(t) = A_b e^{-j(2\pi f_{IF} t + \varphi_{IF})} \tag{2-3}$$

โดยที่ f_{IF} คือความถี่ของสัญญาณความถี่กลาง ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาที่สัญญาณรับทับซ้อนกับสัญญาณส่ง โดยความถี่ของสัญญาณความถี่กลางมีความสัมพันธ์กับระยะของเป้าหมายเป็นไปตามสมการที่ 2-4

$$f_{IF} = \frac{2d \times BW}{c \times T_c} \tag{2-4}$$

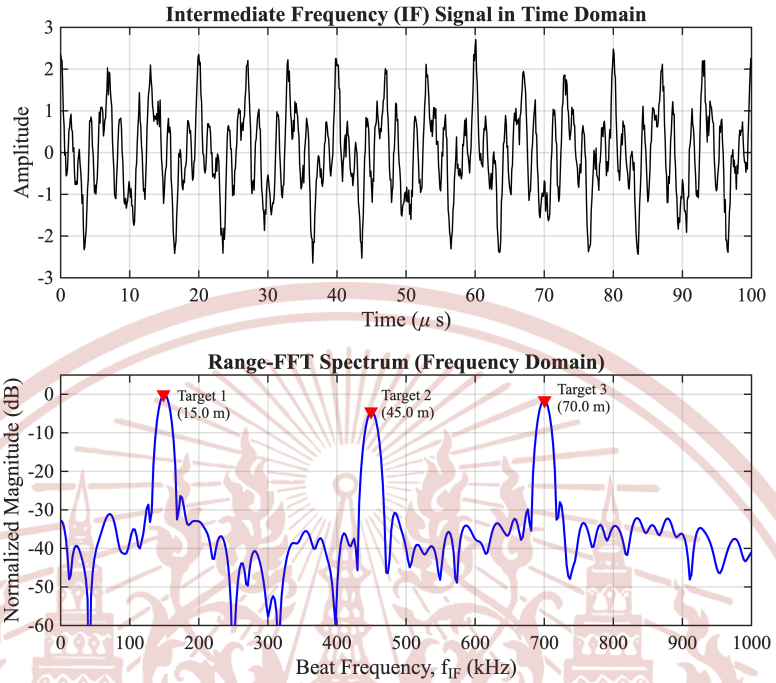
การประมาณระยะของเป้าหมายทำโดยแปลงสัญญาณความถี่กลาง ในโดเมนเวลาไปสู่โดเมนความถี่ด้วยการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) หรือเรียกว่า การแปลงฟูรีเยร์ตามแนวแกนระยะ (range-FFT) ซึ่งจะให้ผลลัพธ์เป็นสเปกตรัมที่มียอดสัญญาณ (Peak) ตรงกับความถี่ f_{IF} ของเป้าหมายแต่ละตัว ระยะของเป้าหมายคำนวณได้ [28] ดังสมการที่ 2-5

$$d = \frac{c \times f_{IF} \times T_c}{2BW} \tag{2-5}$$

ความละเอียดเชิงระยะ (Range Resolution: ΔR) ของระบบซึ่งกำหนดระยะห่างต่ำสุดระหว่างสองเป้าหมายที่ระบบสามารถแยกแยะออกจากกันได้ มีค่า ดังสมการที่ 2-6

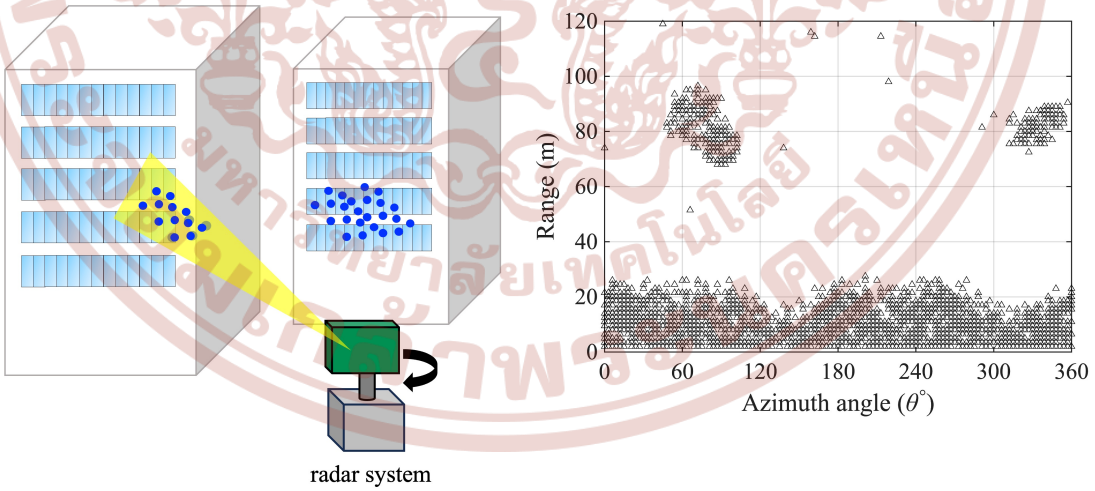
$$\Delta R = \frac{c}{2BW} \tag{2-6}$$

จากสมการที่ 2-6 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มแบนด์วิดท์ของสัญญาณจะส่งผลให้ความละเอียดเชิงระยะดีขึ้น ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ ในการแยกแยะเป้าหมายที่อยู่ใกล้กัน ตัวอย่างผลลัพธ์ของการแปลงฟูรีเยร์ตามแนวแกนระยะ (range-FFT) แสดงไว้ในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ผลลัพธ์ของการแปลงฟูรีเยร์ตามแนวแกนระยะแสดงยอดสัญญาณสอดคล้องกับตำแหน่งของเป้าหมาย

2.1.1 การสแกนมุมแอซิมัทและแผนภาพจุดกระเจิง



ภาพที่ 2-4 ตัวอย่างแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ในสภาพแวดล้อมในเมือง

เพื่อให้เรดาร์สามารถตรวจจับเป้าหมายในทุกทิศทาง ระบบเรดาร์จะติดตั้งสายอากาศทั้งส่งและรับพร้อมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดบนแท่นหมุนมอเตอร์ (Rotating Platform) ที่สามารถหมุนได้ครบ 360° ในแนวราบ (Azimuth Scanning) ในแต่ละตำแหน่งมุมแอซิมัท θ ระบบจะส่งและรับ

สัญญาณ แล้วประมวลผลด้วยการแปลงฟูรีเยร์ตามแนวแกนระยะ เพื่อหาระยะของเป้าหมาย ซึ่งสามารถแสดงผลในรูปแบบของจุดกระเจิงในแต่ละมุมแอซิมัทได้ หลังจากเรดาร์หมุนครบหนึ่งรอบ ข้อมูลจากทุกมุมแอซิมัทจะถูกนำมารวมกันสร้างเป็นแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (Azimuth-Range Scattering Point Diagram: AR Map) ที่แสดงตำแหน่งของเป้าหมายรอบตัวเรดาร์ในระนาบสองมิติ ดังแสดงในภาพที่ 2-4 โดยที่แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ มีขนาด $\alpha \times N_s$ โดยที่ α คือจำนวนตำแหน่งมุมแอซิมัทที่เก็บข้อมูลตลอด 360° ขึ้นอยู่กับความละเอียดเชิงมุม $\Delta\theta$ และ N_s คือจำนวนตัวอย่างสัญญาณ [27]

เพื่อให้ได้ข้อมูลตำแหน่งของเป้าหมายในสามมิติ ระบบเรดาร์สามารถขยายการทำงานโดยเพิ่มมิติของมุมเงย (Elevation Angle: φ) เข้าไปในการสแกน โดยหลังจากสแกนมุมแอซิมัทครบ 360° แล้ว ระบบเรดาร์จะปรับมุมเงยและสแกนซ้ำอีกครั้ง ทำซ้ำในหลายระดับมุมเงยจะทำให้สามารถพื้นที่ตรวจจับโดรนครอบคลุมในระนาบสามมิติ แต่ด้วยเหตุนี้ ข้อมูลของภาพแวดล้อมโดยรอบที่ตรวจจับได้จะแตกต่างกันออกไปในแต่ละมุมเงย ด้วยเหตุนี้หากต้องการตรวจจับโดรนในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนจำเป็นจะต้องระบุว่าเรดาร์ทำงานที่มุมเงยเท่าไหร่ เพื่อเชื่อมโยงโปรไฟล์ของสภาพแวดล้อมในแต่ละมุมเงยได้ถูกต้อง

2.1.2 การสกัดความเร็วดอปเปลอร์ (Doppler Velocity Extraction)

เรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่มอดูเลตความถี่ นอกจากจะสามารถประมาณระยะของเป้าหมายได้แล้ว ยังสามารถวัดความเร็ว (Velocity) ของเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ได้ด้วยปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (Doppler Effect) โดยอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณในมิติเวลาช้า (Slow-Time) ซึ่งเกิดจากการส่งสัญญาณเชิร์ปหลายชุดติดต่อกันในหนึ่งช่วงกรอบเวลาที่สนใจ (Frame) สัญญาณความถี่กลาง

เมื่อระบบส่งสัญญาณเชิร์ปจำนวน N_c ชุดติดต่อกัน สัญญาณความถี่กลางที่ได้จากเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v จะมีเฟสที่เปลี่ยนแปลงจากสัญญาณเชิร์ปหนึ่งไปยังสัญญาณเชิร์ปถัดไปอย่างสม่ำเสมอ อัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสดังกล่าวสัมพันธ์กับความถี่ดอปเปลอร์ f_d ดังสมการที่ 2-8

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \tag{2-8}$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของสัญญาณที่ส่ง หลังจากทำการแปลงฟูรีเยร์ตามแนวแกนระยะแล้ว สัญญาณ ณ ระยะที่ k_0 ที่สอดคล้องกับระยะเป้าหมายจะมีโครงสร้างสัญญาณตามแนวแกนเวลาช้า (Slow-Time) ที่เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลเชิงซ้อน (Complex Exponential) ดังสมการที่ 2-9

$$S_R[k_0, m] = Ae^{j(2\pi \cdot f_d \cdot m \cdot T_c)} \quad , \quad m = 0, 1, \ldots, N_c - 1 \tag{2-9}$$

โดยที่ A คือแอมพลิจูดเชิงซ้อนและ m คือลำดับการประมาณความถี่ดอปเปลอร์ f_d ทำได้โดยการทำแปลงฟูรีเยร์แบบเร็วตามแนวดอปเปลอร์ (Doppler-FFT) หรือตามแนวมิติเวลาช้า (Slow-Time) [28] ดังสมการที่ 2-10

$$\mathrm{V}[k_0,l]=\sum S_R[k_0,m]\cdot e^{-j\frac{2\pi lm}{N_c}},\ l=0,1,\ldots,N_c-1 \tag{2-10}$$

ยอดสัญญาณ (Peak) ในสเปกตรัม $\mathrm{V}[k_0, l]$ จะปรากฏที่ตำแหน่ง l ที่สอดคล้องกับ f_d ซึ่งแปลงเป็นความเร็วเชิงรัศมีได้ ดังสมการที่ 2-11

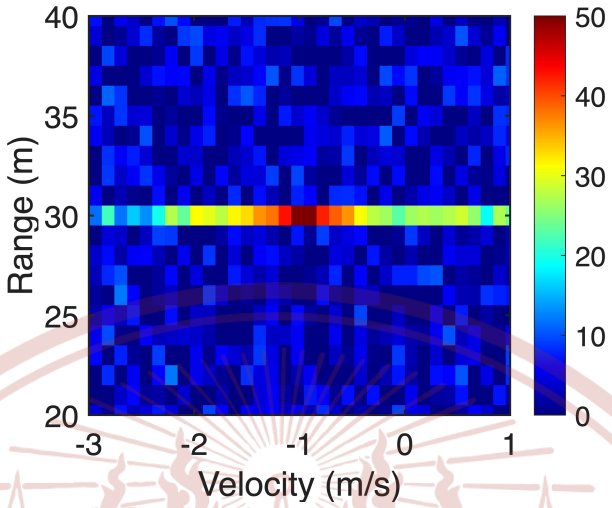
$$v=\frac{f_d\cdot\lambda}{2} \tag{2-11}$$

ความละเอียดเชิงความเร็ว (Velocity Resolution: Δv) ของระบบขึ้นอยู่กับจำนวนสัญญาณเชิร์ป (N_c) และช่วงเวลาของสัญญาณเชิร์ป (T_c) ดังสมการที่ 2-12

$$\Delta v=\frac{\lambda}{2\cdot N_c\cdot T_c} \tag{2-12}$$

จากสมการที่ 2-12 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนจำนวนสัญญาณเชิร์ป หรือช่วงเวลาของสัญญาณเชิร์ปจะทำให้ความละเอียดเชิงความเร็วดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มจำนวนจำนวนสัญญาณเชิร์ปส่งผลให้ความหน่วงเวลา (Latency) ของระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญสำหรับระบบที่ต้องการประมวลผลแบบเรียลไทม์ (Real-Time)

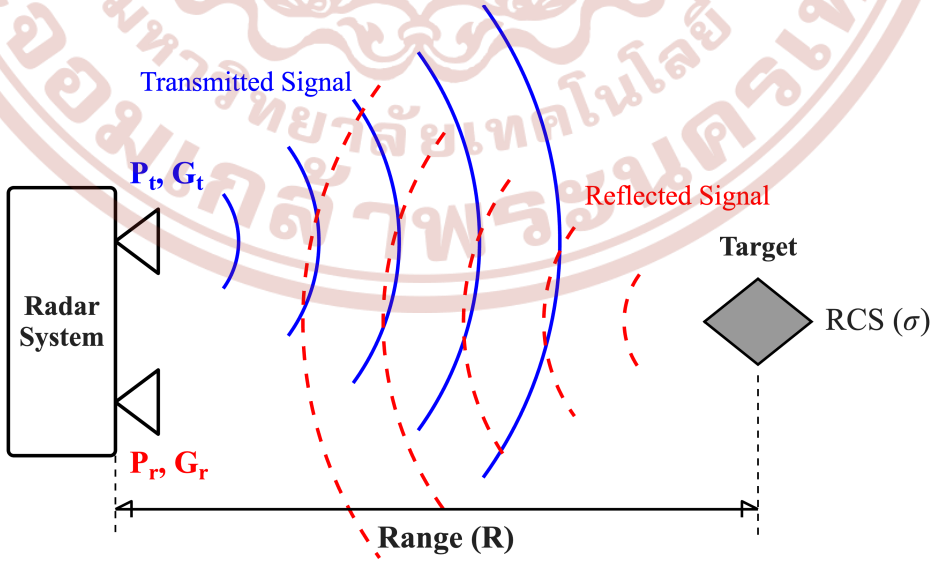
ในกรณีที่เป้าหมายเช่นอากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากเรดาร์ สัญญาณ Slow-Time จะมีการเลื่อนเฟสตามความเร็วดอปเปลอร์ของเป้าหมาย การประมวลผลฟูรีเยร์สองมิติตามแกนระยะและแกนเวลาช้าจะให้แผนภาพระยะ-ความเร็ว (Range-Doppler Map) ซึ่งแสดงตำแหน่งของเป้าหมายในโดเมนระยะและความเร็วพร้อมกัน ดังแสดงในภาพที่ 2-5 แผนภาพนี้เป็นพื้นฐานสำคัญของการตรวจจับและติดตามอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากช่วยแยกแยะเป้าหมายที่มีการเคลื่อนที่ออกจากสัญญาณสะท้อนแบบคงที่จากอาคารและสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมเมือง



ภาพที่ 2-5 แผนภาพระยะ-ความเร็ว (RD map) ที่ได้จากการประมวลผลฟูรีเยร์สองมิติแสดงตำแหน่งเป้าหมายในโดเมนระยะและความเร็ว

2.1.3 สมการเรดาร์และพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ (Radar Range Equation and RCS)

เพื่อประเมินสมรรถนะของระบบเรดาร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่กำหนดสมรรถนะของระบบคือระยะตรวจจับสูงสุดที่สามารถทำได้จริง สมการเรดาร์ (Radar Range Equation) เป็นสมการพื้นฐานที่ใช้ประเมินระยะตรวจจับสูงสุด (Maximum Detection Range: R_{max}) ของระบบเรดาร์ สมการดังกล่าวเชื่อมโยงพารามิเตอร์ของระบบทุกส่วน ตั้งแต่กำลังส่งสายอากาศ เป้าหมาย ไปจนถึงความไวของภาครับ เพื่อให้ได้กำลังงานที่ภาครับเพียงพอต่อการตรวจจับ ดังแสดงในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 ไดอะแกรมแสดงหลักการสมการเรดาร์ (Radar Range Equation)

กำลังงานที่ภาครับ P_r สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-13 ซึ่งเรียกว่าสมการเรดาร์ [29]

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \tag{2-13}$$

โดยที่ P_t คือกำลังส่ง (W) G_t และ G_r คืออัตราการขยายของสายอากาศส่งและรับ λ คือความยาวคลื่น (m) σ คือพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ของเป้าหมาย (m²) และ R คือระยะระหว่างเรดาร์และเป้าหมาย (m) จากสมการที่ 2-13 สามารถคำนวณระยะตรวจจับสูงสุดได้เมื่อ $P_r = P_{min}$ ซึ่งเป็นความไวสูงสุดของภาครับ ดังสมการที่ 2-14

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{min}} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{2-14}$$

พื้นที่หน้าตัดเรดาร์ (Radar Cross Section: RCS หรือ σ) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บอกว่าเป้าหมายสะท้อนพลังงานเรดาร์กลับมาได้มากน้อยเพียงใด สำหรับเป้าหมายที่มีพื้นผิวแบน (Flat Plate) ขนาดพื้นที่ A เมื่อคลื่นตกกระทบตั้งฉาก ค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์สามารถประมาณได้จากสมการที่ 2-15

$$\sigma = \frac{4\pi \cdot A^2}{\lambda^2} = \frac{4\pi \cdot A^2 \cdot f^2}{c^2} \tag{2-15}$$

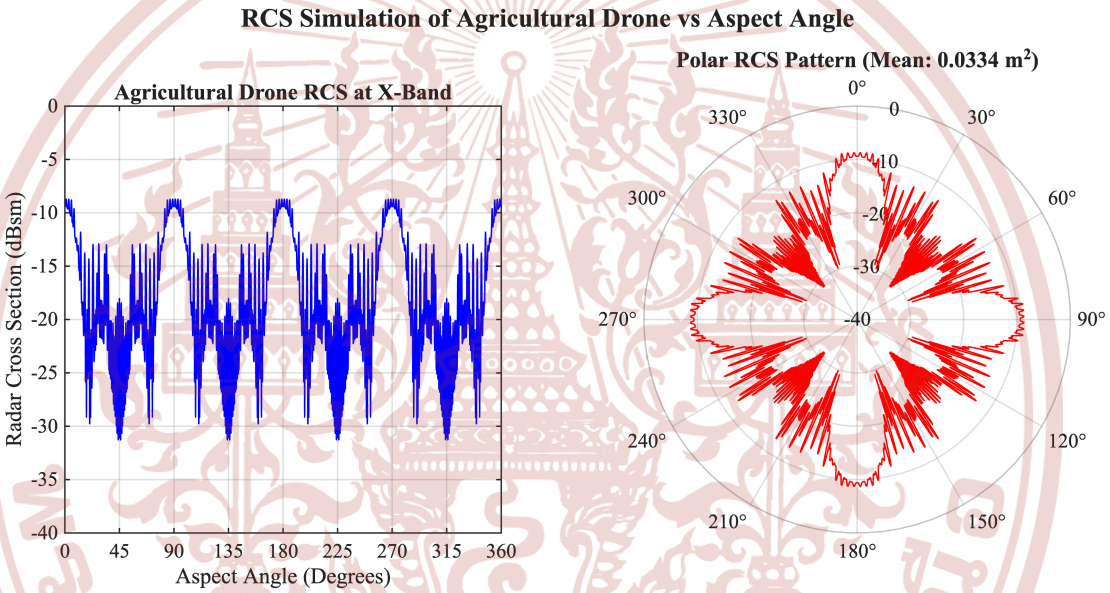
จากสมการที่ 2-15 พบว่าค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ของเป้าหมายขึ้นอยู่กับทั้งพื้นที่ผิว A และความถี่ f ความถี่ที่สูงขึ้นจะให้ค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์สูงขึ้นสำหรับเป้าหมายขนาดเดียวกัน ตัวอย่างเช่น เป้าหมายขนาดพื้นที่จริง 1 ตารางเมตร ที่ความถี่ X-band (10 GHz) จะมีค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์สูงถึง 13,962 m² ในขณะที่ที่ความถี่ S-band (3 GHz) จะมีค่า RCS เพียง 1,256 m² ดังแสดงในตารางที่ 2-1 [32]

ตารางที่ 2-1 ค่าหน้าตัดเรดาร์ของวัตถุเทียบกับขนาดจริงของวัตถุ [32]

Freq. (GHz)	ขนาดวัตถุจริง (m^2)	RCS (m^2) (σ)	ย่านความถี่
10	1	13,962	X band
3	1	1,256	S band

อย่างไรก็ตาม โดรนพาณิชย์ขนาดเล็กเช่น โดรนการเกษตร มีรูปร่างซับซ้อน ไม่ใช่แผ่นราบสมมาตร ดังนั้นค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์จึงไม่สามารถคำนวณด้วยสมการ 2-15 ได้โดยตรง แต่ขึ้นอยู่กับรูปร่าง วัสดุ มุมตกกระทบของคลื่น และความถี่ทำงาน ความซับซ้อนนี้สามารถสังเกตได้ชัดเจนจากผล

การจำลองในภาพที่ 2-7 ที่แสดงให้เห็นถึงความผันผวนของค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์เมื่อมุมตกกระทบเปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้ งานวิจัยที่ผ่านมาและการวัดในภาคสนามพบว่าโดรนขนาดเล็กมีค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์อยู่ในช่วงประมาณ 0.01–0.05 ตารางเมตร ในย่านความถี่ X-band ซึ่งต่ำกว่าเป้าหมายแบบแผ่นราบขนาดเดียวกันอย่างมาก เนื่องจากใบพัดและโครงสร้างที่มีผิวโค้งส่งผลให้มีการกระเจิงสัญญาณในหลายทิศทาง แทนที่จะสะท้อนกลับตรง ๆ ในทิศทางเดียว ค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ที่ต่ำและผันผวนตามมุมตกกระทบนี้เองที่ทำให้การตรวจจับโดรนขนาดเล็กด้วยเรดาร์ในสภาพแวดล้อมเมืองเป็นโจทย์ที่ท้าทาย และเป็นบริบทสำคัญที่กำหนดเงื่อนไขการออกแบบระบบในวิทยานิพนธ์นี้



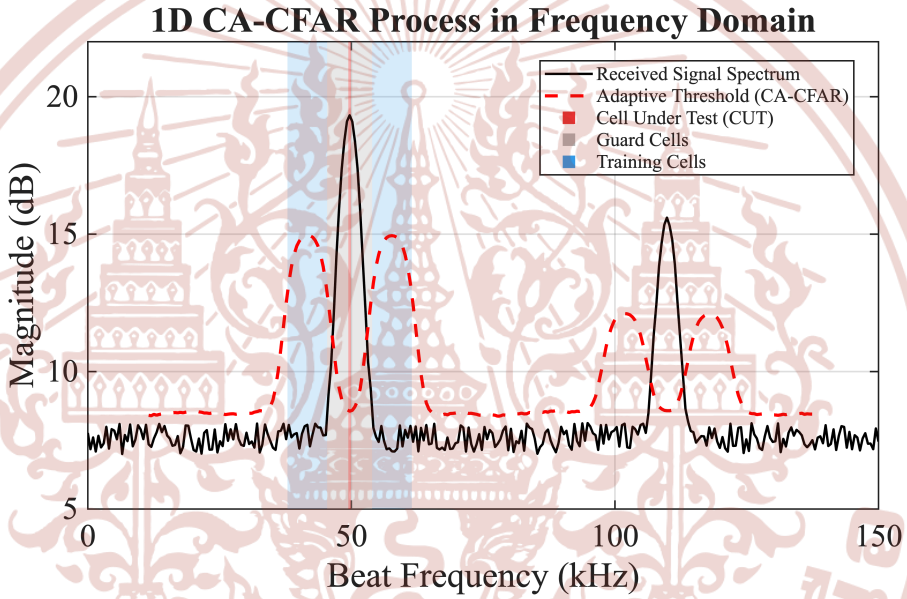
ภาพที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ (RCS) ของโดรนการเกษตรและมุมตกกระทบในย่านความถี่ X-band

2.2 วิธีการประมวลผลหลังสัญญาณเรดาร์

หลังจากระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตด้วยความถี่สร้างแผนภาพมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) แล้ว ข้อมูลจะถูกส่งผ่านกระบวนการประมวลผลต่อเนื่องเพื่อตรวจจับและจำแนกประเภทอากาศยานไร้คนขับ บทนี้นำเสนออัลกอริทึมที่ใช้ในกระบวนการดังกล่าว ได้แก่ CA-CFAR สำหรับตรวจจับจุดกระเจิง อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) และอัลกอริทึมเฮ็ชดีบีสแกน (HDBSCAN) สำหรับจัดกลุ่มจุดกระเจิงเพื่อค้นหาเป้าหมาย อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) สำหรับประมาณขอบเขตสิ่งปลูกสร้าง และโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) สำหรับจำแนกวิถีการบิน

2.2.1 การตรวจจับสัญญาณด้วยอัตราการแจ้งเตือนผิดพลาดคงที่ (CA-CFAR)

การตรวจจับสัญญาณด้วยอัตราสัญญาณแจ้งเตือนเท็จคงที่ (Constant False Alarm Rate: CFAR) เป็นเทคนิคพื้นฐานสำหรับการตรวจจับเป้าหมายในสัญญาณเรดาร์ที่มีระดับสัญญาณรบกวนแปรผันตามตำแหน่ง โดยประมาณระดับสัญญาณรบกวนเฉพาะที่จากช่วงระยะ (Range Bin) ข้างเคียงของแต่ละตำแหน่ง เพื่อกำหนดเกณฑ์การตัดสินใจที่รักษาอัตราการแจ้งเตือนเท็จ (False Alarm Rate: P_{fa}) ให้คงที่ตลอดการประมวลผล



ภาพที่ 2-8 โครงสร้างของ CA-CFAR แสดง Training Cells, Guard Cells และ Cell Under Test (CUT)

ในการตรวจจับสัญญาณแบบ Cell-Averaging CFAR (CA-CFAR) แต่ละตำแหน่งใน Range Profile จะถูกพิจารณาเป็นเซลล์ทดสอบ (Cell Under Test: CUT) รอบเซลล์ทดสอบจะมีกรอบป้องกันเซลล์ (Guard Cells) จำนวน N_g เซลล์ทั้งสองด้าน เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณของเซลล์ทดสอบมีอิทธิพลต่อการประมาณสัญญาณรบกวน และมีเซลล์อ้างอิง (Reference/Training Cells) จำนวน N_R เซลล์ทั้งสองด้าน [14] ดังแสดงในภาพที่ 2-8 ค่าประมาณสัญญาณรบกวน Z คำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของเซลล์อ้างอิงดังสมการที่ 2-16

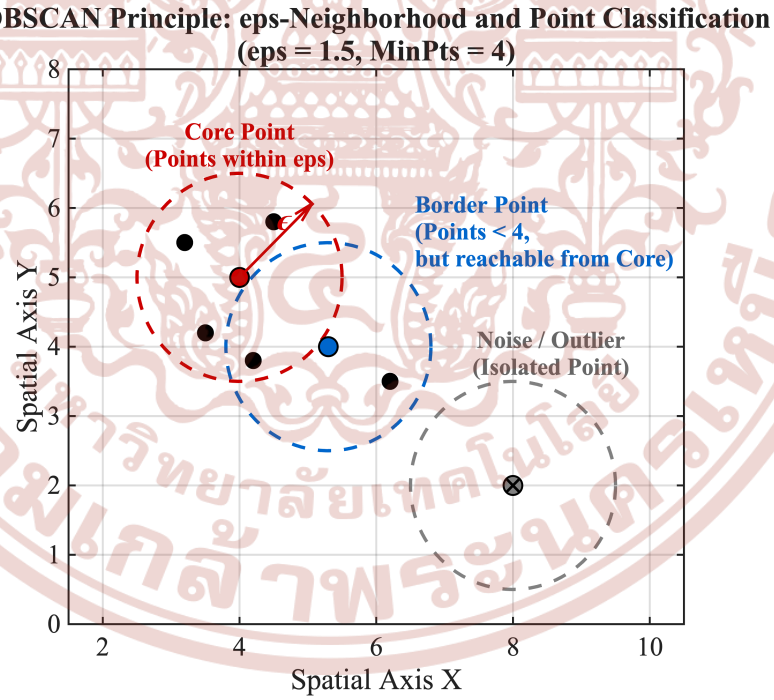
$$Z = \frac{1}{N_R}\sum x_i, \quad i = 1, 2, ..., N_R \tag{2-16}$$

จากนั้นเกณฑ์การตรวจจับ T คำนวณได้จาก $T = \alpha_c \times Z$ เมื่อ α_c คือตัวคูณเกณฑ์ที่กำหนดจากค่า P_{fa} ที่ต้องการ การตรวจจับเกิดขึ้นเมื่อแอมพลิจูดของเซลล์ทดสอบมีค่าเกิน T ข้อดีของ CA-CFAR

คือการปรับเกณฑ์อัตโนมัติตามระดับสัญญาณรบกวนที่แปรเปลี่ยนตามตำแหน่ง ทำให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมเมืองที่มีสัญญาณสะท้อนจากอาคารหนาแน่น

การคำนวณตัวคูณเกณฑ์ α_c สำหรับการแจ้งเตือนเท็จที่ต้องการสามารถหาได้จากการแจกแจงของสัญญาณรบกวน กรณีที่สัญญาณรบกวนมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential Distribution) ซึ่งเหมาะสมกับสัญญาณเรดาร์ภายหลังการตรวจจับกำลังงาน (Power Detection) ค่า α_c สามารถคำนวณจากสมการ $\alpha_c = N_R \times (P_{fa}{}^{(-1/N_R)} - 1)$ การเลือกค่า P_{fa} จำนวนเซลล์อ้างอิงและกรอบป้องกันเซลล์เป็นการแลกเปลี่ยน (Trade-off) ที่ต้องพิจารณาตามลักษณะการใช้งาน [14] หากกำหนด P_{fa} ให้ต่ำลง ค่า α_c จะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกณฑ์การตรวจจับสูงขึ้นและความไวในการตรวจจับเป้าหมายที่มีสัญญาณอ่อนลดลง ในทางกลับกัน การเพิ่มจำนวนเซลล์อ้างอิงช่วยให้การประมาณระดับสัญญาณรบกวนแม่นยำขึ้น แต่ลดความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณรบกวนในระยะใกล้

2.2.2 อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN)



ภาพที่ 2-9 การจัดกลุ่มด้วยอัลกอริทึมดีบีสแกนบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ

อัลกอริทึมดีบีสแกน (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise: DBSCAN) เป็นอัลกอริทึมการจัดกลุ่มข้อมูลแบบอิงความหนาแน่นที่ไม่จำเป็นต้องระบุจำนวนกลุ่มล่วงหน้า มีความสามารถในการระบุจุดสัญญาณรบกวน (Noise Point) ที่ไม่เป็นส่วนหนึ่งของกลุ่มใด และสามารถค้นหากลุ่มที่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอได้ คุณสมบัติเหล่านี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับ

การจัดกลุ่มจุดกระเจิงในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ที่มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ อัลกอริทึมดีบีสแกนกำหนดความหนาแน่นของข้อมูลด้วยพารามิเตอร์สองตัว ได้แก่ eps ซึ่งเป็นรัศมีของพื้นที่ละแวก (Neighborhood Radius) รอบแต่ละจุด และ $MinPts$ ซึ่งเป็นจำนวนจุดขั้นต่ำในรัศมี eps ที่ใช้จำแนกจุดออกเป็นสามประเภท ได้แก่ Core Point คือจุดที่มีเพื่อนบ้านไม่น้อยกว่า $MinPts$ จุดในรัศมี eps, Border Point คือจุดที่อยู่ในละแวก Core Point แต่มีเพื่อนบ้านน้อยกว่า $MinPts$ และ Noise Point คือจุดที่ไม่เข้าเกณฑ์ทั้งสองประเภท [26]

การสร้างกลุ่มเริ่มจาก Core Point และขยายออกตามเส้นทางความหนาแน่น (Density-Reachable) จนกว่าจะไม่มีจุดใหม่ที่สามารถรวมเข้ากลุ่มได้ ผลลัพธ์ของอัลกอริทึมดีบีสแกนบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะแสดงในภาพที่ 2-9

ในบริบทของวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้ชุดข้อมูลอินพุตคือแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ ซึ่งแทนด้วย

$$\mathbf{AR}=(r[k]_0, r[k]_{\Delta\theta},\ldots, r[k]_{2\pi}) \tag{2-17}$$

อัลกอริทึมดีบีสแกนดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

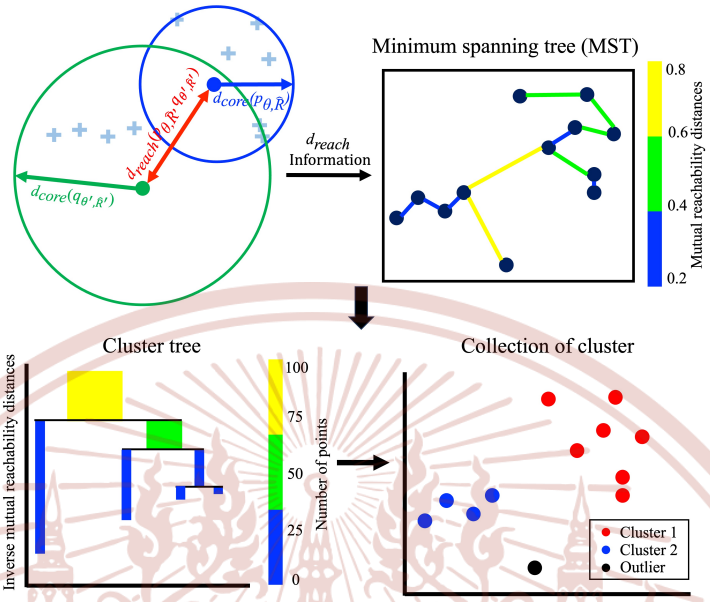
- **ขั้นตอนที่ 1** กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ eps และ $MinPts$
- **ขั้นตอนที่ 2** ค้นหา Core Point โดยคำนวณระยะทางจากจุดที่เลือก $\mathbf{r[k]}_{\Delta\theta}$ ไปยังจุดทุกจุดในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) เพื่อระบุ eps-Neighborhood ซึ่งนิยามเป็น $N_{eps}(r[k]_{\Delta\theta})=\{r^{'}\in AR|dis(r^{'},r[k]_{\Delta\theta})\le eps\}$ หาก $|(N_{eps}(r[k]_{\Delta\theta})|> MinPts$ จุดนั้นจะถูกเพิ่มเข้าสู่เซตของ Core Point โดย $(P = P\cup r[k]_{\Delta\theta})$
- **ขั้นตอนที่ 3** จำแนก Border Point และ Noise Point โดยพิจารณาสองเงื่อนไข ได้แก่ หากจุดที่พิจารณาอยู่ใน $N_{eps}(r[k]_{\Delta\theta})$ ของ Core Point แต่ตัวเองไม่มีจุดเพื่อนบ้านเพียงพอ จะถูกจำแนกเป็น Border Point และรวมเข้ากับกลุ่มของ Core Point นั้น และหากจุดนั้นไม่อยู่ใน $N_{eps}(r[k]_{\Delta\theta})$ ของ Core Point ใดเลย จะถูกจำแนกเป็น Noise Point และไม่ถูกรวมเข้ากับกลุ่มใด
- **ขั้นตอนที่ 4** เมื่อพบ Core Point จะเริ่มสร้างกลุ่มใหม่ $C_{\mathrm{i}}(\theta,r)$ โดยรวม Border Point ที่อยู่ใน $N_{eps}(r[k]_{\Delta\theta})$ เข้าด้วย จากนั้นขยายกลุ่มออกซ้ำ ๆ จนกว่าจะไม่มีจุดใหม่ที่สามารถเพิ่มได้
- **ขั้นตอนที่ 5** เมื่อกลุ่ม $C_{\mathrm{i}}(\theta,r)$ ไม่สามารถขยายได้อีก อัลกอริทึมจะเลือกจุดที่ยังไม่ได้รับการพิจารณาจากแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) และทำซ้ำกระบวนการ จนได้ผลลัพธ์การจัดกลุ่มทั้งหมดเป็น $C=\{C_1(\theta,r),C_2(\theta,r),\cdots, C_q(\theta,r)\}$

ในวิทยานิพนธ์นี้อัลกอริทึมดีบีสแกนถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ โดยจัดกลุ่มจุดกระเจิงบนแผนภาพมุมแอซิมัท-ระยะ เพื่อแยกแยะกลุ่มที่สอดคล้องกับสิ่งปลูกสร้างออกจากกลุ่มที่อาจเป็นเป้าหมาย โดยใช้ตำแหน่งและขนาดของกลุ่มเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ

ด้านความซับซ้อนเชิงเวลาอัลกอริทึมดีบีสแกนแบบดั้งเดิมมีความซับซ้อน $O(n^2)$ เนื่องจากต้องคำนวณระยะทางระหว่างทุกคู่จุด อย่างไรก็ตาม การใช้โครงสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่แบบ k-d Tree ในการค้นหาเพื่อนบ้านสามารถลดความซับซ้อนเฉลี่ยลงเหลือ $O(n\log n)$ สำหรับข้อมูลที่มีการกระจายสม่ำเสมอความไวของผลการจัดกลุ่มต่อการเลือกพารามิเตอร์ *eps* และ *MinPts* เป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณา หากค่า *eps* เล็กเกินไป กลุ่มจุดกระเจิงขนาดใหญ่จะถูกแบ่งแยกออกเป็นกลุ่มย่อย (Fragmentation) ส่งผลให้การระบุขอบเขตไม่ถูกต้อง ในทางกลับกัน หากค่า *eps* ใหญ่เกินไป กลุ่มที่อยู่ใกล้กันอาจถูกรวมเป็นกลุ่มเดียว วิธีที่นิยมใช้ในการหาค่า *eps* ที่เหมาะสมคือการวิเคราะห์กราฟระยะทางไปยังเพื่อนบ้านลำดับที่ *k* (k-NN Distance Plot) โดยจุดที่กราฟโค้งงออย่างชัดเจน (Knee Point) จะบงบอกค่า *eps* ที่เหมาะสมสำหรับชุดข้อมูลนั้น รายละเอียดการเลือกพารามิเตอร์สำหรับงานวิจัยนี้นำเสนอในบทที่ 3

2.2.3 อัลกอริทึมเอชดีบีสแกน (HDBSCAN)

อัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise: HDBSCAN) เป็นอัลกอริทึมการจัดกลุ่มแบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised) ที่อิงความหนาแน่น ออกแบบมาเพื่อระบุกลุ่มข้อมูลที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันและจัดการกับ Noise Point ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบริบทของแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ อัลกอริทึมนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการแยกคุณลักษณะสภาพแวดล้อมที่มีเสถียรภาพออกจากสัญญาณรบกวน โดยอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกนประเมินความหนาแน่นเฉพาะที่รอบแต่ละจุด จำแนกจุดออกเป็น Core Point ที่อยู่ในบริเวณความหนาแน่นสูง Border Point ที่อยู่ใกล้บริเวณดังกล่าว และ Noise Point ที่อยู่ไกลจาก Core point ของกลุ่มใด ๆ กระบวนการทำงานของอัลกอริทึมเริ่มจากการคำนวณ Mutual Reachability Distance ระหว่างจุดข้อมูล จากนั้นสร้าง Minimum Spanning Tree เพื่อเชื่อมโยงจุดทั้งหมด และแปลงเป็น Condensed Cluster Tree เพื่อคัดเลือกกลุ่มที่มีเสถียรภาพสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 2-10 คุณสมบัตินี้ทำให้อัลกอริทึมเฮ็ชดีบีสแกนสามารถระบุกลุ่มข้อมูลได้แบบพลวัต โดยไม่จำเป็นต้องกำหนดจำนวนกลุ่มล่วงหน้า [27]



ภาพที่ 2-10 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน แสดงการสร้าง Minimum Spanning Tree และ Condensed Cluster Tree

โดยหลักการ อัลกอริทึมเฮ็ชดีบีสแกนเริ่มต้นจากการประเมินความหนาแน่นเฉพาะที่ของแต่ละจุดใน แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ แล้วจึงสร้างโครงสร้างลำดับชั้นของกลุ่มข้อมูลจากความสัมพันธ์เชิงความหนาแน่นระหว่างจุดเหล่านั้น กำหนดให้ p และ q แทนจุดใดสองจุดแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ ขั้นตอนการทำงานมีดังนี้

- **ขั้นตอนที่ 1** คำนวณ Core Distance ของแต่ละจุด $p \in \mathbf{AR}$ ซึ่งนิยามเป็นระยะทางไปยังเพื่อนบ้านลำดับที่ k_{NN} ภายใน $\mathbf{AR}$ โดยที่ k_{NN} คือพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้กำหนด แทนจำนวนจุดขั้นต่ำที่จำเป็นสำหรับการก่อตัวของบริเวณความหนาแน่นสูง
- **ขั้นตอนที่ 2** คำนวณ Mutual Reachability Distance ระหว่างทุกคู่จุด $p,q \in \mathbf{AR}$ ซึ่งนิยามเป็น $d_{mreach}(p,q) = max\big(d_{core}(p),\, d_{core}(q),\, d(p,q)\big)$ โดยที่ $d(p,\, q)$ คือระยะทางแบบยูคลิดระหว่างสองจุด เมตริกนี้คำนึงถึงทั้งความหนาแน่นเฉพาะที่และระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างจุดกระเจิงในโดเมนมุมแอซิมัท-ระยะ
- **ขั้นตอนที่ 3** สร้าง Minimum Spanning Tree (MST) จาก Mutual Reachability Distance เพื่อเชื่อมจุดทุกจุดใน $\mathbf{AR}$ ด้วยน้ำหนักรวมของเส้นเชื่อมที่น้อยที่สุด โครงสร้าง MST นี้เป็นพื้นฐานสำหรับการสร้าง Condensed Cluster Tree ในขั้นตอนถัดไป
- **ขั้นตอนที่ 4** วิเคราะห์ Condensed Cluster Tree เพื่อระบุกลุ่มที่มีเสถียรภาพสูงสุด โดยจุดที่ไม่สามารถจัดเข้ากลุ่มใดได้จะถูกระบุเป็น Outlier ผลลัพธ์สุดท้ายคือเซตของกลุ่มข้อมูล

$\mathbb{C}=\{C_1, C_2, \ldots C_M\}$ โดยที่แต่ละ C_j สอดคล้องกับคุณลักษณะสภาพแวดล้อมในโดเมนมุมแอซิมัท-ระยะ

เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมดีบีสแกน ข้อได้เปรียบสำคัญของอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน อยู่ที่ความสามารถในการระบุกลุ่มที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันภายในแผนภาพเดียวกัน โดยไม่จำเป็นต้องกำหนดค่า *eps* ล่วงหน้า ซึ่งในอัลกอริทึมดีบีสแกนนั้น ค่า *eps* ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมการทดสอบและอาจต้องปรับค่าใหม่เมื่อเปลี่ยนสถานที่ติดตั้งอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกนจึงปรับตัวเข้ากับความหนาแน่นของจุดกระเจิงที่เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมได้โดยอัตโนมัติ ทำให้เหมาะสมกว่าสำหรับการนำไปใช้งานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายโดยไม่ต้องปรับพารามิเตอร์ใหม่ในแต่ละสถานที่

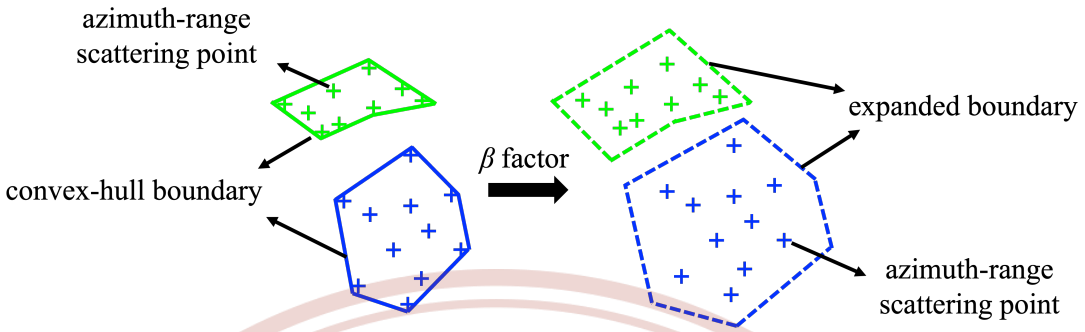
2.2.4 อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull)

หลังจากอัลกอริทึมดีบีสแกนหรืออัลกอริทึมเฮชดีบีสแกนจัดกลุ่มจุดกระเจิงบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะแล้ว อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) จะถูกนำมาใช้สร้างขอบเขตของแต่ละกลุ่มสำหรับระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในสภาพแวดล้อมเมือง อัลกอริทึมนี้ทำงานโดยครอบคลุมจุดที่อยู่ด้านนอกสุดของกลุ่มเพื่อสร้างขอบเขตรูปหลายเหลี่ยม ซึ่งช่วยกำหนดขอบเขตของสภาพแวดล้อมได้อย่างชัดเจน และอำนวยให้ระบบสามารถตัดสินใจตรวจจับอากาศยานไร้คนขับได้อย่างแม่นยำ สำหรับแต่ละกลุ่ม $C_j(\theta,r)\in \mathbb{C}$ อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์คำนวณขอบเขตด้วยวิธี Jarvis March [30] โดยเริ่มจากจุดที่มีค่าระยะ r ต่ำสุด จากนั้นในแต่ละขั้นจะเลือกจุดถัดไปที่ทำมุมโพลาร์บวกน้อยที่สุดกับแกนมุมแอซิมัท (θ) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา กระบวนการดำเนินต่อเนื่องจนกระทั่งกลับมาถึงจุดเริ่มต้น เพื่อรองรับความแปรปรวนของตำแหน่งจุดกระเจิงอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนเฟสของเรดาร์และการเลื่อนตำแหน่งเล็กน้อยระหว่างรอบสแกน ขอบเขตของแต่ละกลุ่มจะถูกขยายด้วยตัวประกอบ β [26] ดังแสดงในภาพที่ 2-11 โดยคำนวณจุดศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มก่อน ดังนี้

$$Center_r = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} r_j \quad , \tag{2-18}$$

$$Center_\theta = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} \theta_j \tag{2-19}$$

โดยที่ m คือจำนวนจุดในกลุ่ม จากนั้นนำตัวประกอบ β ไปใช้กับขอบเขตแต่ละจุด หากค่าขอบเขตมากกว่าค่าจุดศูนย์กลางจะคูณด้วย β และหากน้อยกว่าจะคูณด้วย (1–(β –1)) การขยายขอบเขตนี้ช่วยลดการแจ้งเตือนเท็จที่เกิดจากการเลื่อนตำแหน่งของจุดกระเจิงในแต่ละรอบสแกน



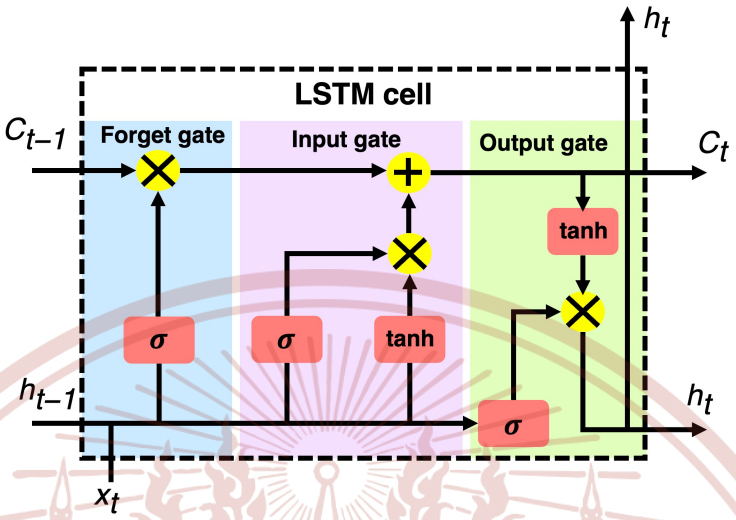
ภาพที่ 2-11 การสร้างขอบเขต Convex Hull รอบกลุ่มจุดกระเจิงของสิ่งปลูกสร้าง และการขยายด้วยตัวประกอบ β สำหรับการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม

การขยายขอบเขตด้วยตัวประกอบ β จึงทำให้ระบบสามารถรองรับความไม่แน่นอนของตำแหน่งจุดกระเจิงได้โดยไม่ต้องปรับพารามิเตอร์ใหม่ในแต่ละรอบสแกน และช่วยให้ขอบเขตสภาพแวดล้อมที่สร้างขึ้นมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินใจในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในสภาพแวดล้อมเมืองที่มีสัญญาณสะท้อนรบกวนจากสิ่งปลูกสร้าง

2.2.5 โครงข่ายหน่วยความจำระยะสั้นและยาว (LSTM) สำหรับจำแนกวิถีการบิน

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (Long Short-Term Memory: LSTM) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนซ้ำ (Recurrent Neural Network: RNN) ชนิดพิเศษที่ได้รับการพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหา Vanishing Gradient ของ RNN ทั่วไป โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว มีความสามารถในการเรียนรู้ความสัมพันธ์ในข้อมูลลำดับ (Sequential Data) ที่มีช่วงเวลายาวนาน ซึ่งเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์วิถีการบินของอากาศยานไร้คนขับในฐานะข้อมูลอนุกรมเวลา (Time-Series) [31]

โครงสร้างของเซลล์ LSTM ประกอบด้วยหน่วยควบคุมหลักสี่ส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2-12 ได้แก่ หน่วยความจำเซลล์ (Cell State: C_t) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลระยะยาวตลอดลำดับเวลา เกตลืม (Forget Gate: F_t) ควบคุมว่าข้อมูลใดในหน่วยความจำควรถูกละทิ้ง เกตป้อนเข้า (Input Gate: i_t) ควบคุมว่าข้อมูลใหม่ใดควรถูกบันทึกลงในหน่วยความจำ และเกตส่งออก (Output Gate: O_t) ควบคุมส่วนของหน่วยความจำที่จะส่งออกเป็นสถานะซ่อน (Hidden State: h_t)



ภาพที่ 2-12 โครงสร้างภายในของ LSTM Cell แสดงเกตต่าง ๆ และการไหลของข้อมูลผ่าน Cell State และ Hidden State

สมการควบคุมการทำงานของเซลล์ LSTM ในขั้นเวลา t มีดังสมการที่ 2-20 ถึง 2-25 ตามลำดับ

$$F_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (2\text{-}20)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2\text{-}21)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \quad (2\text{-}22)$$

$$\mathrm{C_t} = F_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t \quad (2\text{-}23)$$

$$o_t = \sigma(\mathrm{W_o} \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (2\text{-}24)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(\mathrm{C_t}) \quad (2\text{-}25)$$

โดยที่ σ คือฟังก์ชัน Sigmoid ที่มีช่วงค่า (0,1) สำหรับควบคุมเกตต่าง ๆ tanh คือฟังก์ชัน Hyperbolic Tangent ที่มีช่วงค่า (–1,1) สำหรับสร้างค่าที่จะเขียนลงหน่วยความจำ และ $\odot$ คือการคูณแบบ Element-wise (Hadamard Product) x_t คือ Feature Vector ที่ขั้นเวลา t และ W, b คือเมทริกซ์น้ำหนักและเวกเตอร์ Bias ที่เรียนรู้ได้

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับจำแนกวิถีการบินของอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้ข้อมูลตำแหน่งของเป้าหมายในแต่ละรอบการสแกนเป็นข้อมูลนำเข้า ความสามารถของโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว ในการเรียนรู้รูปแบบเชิงเวลาทำให้เหมาะสมสำหรับการแยกแยะวิถีการบินที่มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น การบินเป็นเส้นตรง วงกลม รูปสี่เหลี่ยม ซิกแซก หรือรูปแบบซับซ้อนอื่น ๆ ซึ่งมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะในโดเมนเวลา

การฝึกโครงข่าย LSTM ใช้วิธี Backpropagation Through Time (BPTT) ซึ่งคลี่โครงข่ายตามแกนเวลาแล้วปรับค่าน้ำหนักด้วยการลดค่าความชันย้อนกลับผ่านทุกขั้นเวลา โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวปรับค่าน้ำหนัก Adam Optimizer ซึ่งปรับอัตราการเรียนรู้เฉพาะแต่ละพารามิเตอร์โดยอัตโนมัติ และใช้ฟังก์ชันความสูญเสีย Categorical Cross-Entropy เป็นเกณฑ์วัดความแตกต่างระหว่างผลการทำนายและค่าจริงในโดเมนลอการิทึม ซึ่งเหมาะสมสำหรับปัญหาการจำแนกหลายคลาสและเพื่อป้องกันปัญหา Overfitting ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อขนาดชุดข้อมูลมีจำกัด นิยมใช้เทคนิค Dropout Regularization โดยเพิ่มชั้น Dropout หลังแต่ละชั้น LSTM กลไกของ Dropout คือในระหว่างการฝึก หน่วยประมวลผล (Neuron) แต่ละหน่วยจะถูกปิดการทำงานชั่วคราวด้วยความน่าจะเป็น ρ โดยอิสระจากกัน บังคับให้โครงข่ายเรียนรู้การนำเสนอข้อมูลแบบซ้ำซ้อน (Redundant Representations) และไม่พึ่งพาหน่วยใดหน่วยหนึ่งมากเกินไป ส่งผลให้โครงข่ายมีความสามารถในการ Generalization ที่ดีขึ้นเมื่อทดสอบกับข้อมูลที่ไม่เคยเห็นมาก่อน รายละเอียดของ Hyperparameter ที่ใช้ในงานวิจัยนี้นำเสนอในบทที่ 3

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่คำนวณจากเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) โดยพิจารณาจากผลลัพธ์การจำแนก 4 กรณี ในบริบทของการตรวจจับโดรน [26] ได้แก่ TP คือตรวจพบโดรนและเป็นโดรนจริง TN คือตรวจไม่พบโดรนและเป็นสัญญาณรบกวนจริง FP คือตรวจพบโดรนแต่ที่จริงเป็นสัญญาณรบกวน และ FN คือตรวจไม่พบโดรนทั้งที่มีโดรนอยู่จริง โดยสามารถนำค่าจากเมทริกซ์ความสับสนมาคำนวณตัวชี้วัดเพื่อบอกประสิทธิภาพด้านการจำแนกตามสมการดังต่อไปนี้

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{2-26}$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \tag{2-27}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \tag{2-28}$$

$$F1 - score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \tag{2-29}$$

ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประกอบด้วย 4 ค่า ได้แก่

Accuracy ตามสมการที่ (2-26) บอกว่าแบบจำลองตอบถูกโดยรวมกี่เปอร์เซ็นต์จากทุกกรณีที่ทดสอบ

Precision ตามสมการที่ (2-27) บอกว่าเมื่อแบบจำลองบอกว่า "นี่คือโดรน" มีความน่าเชื่อถือมากแค่ไหน ค่านี้ต่ำหมายความว่าแบบจำลองแจ้งเตือนผิดพลาดบ่อย

Recall ตามสมการที่ (2-28) บอกว่าในจำนวนโดรนที่มีอยู่จริงทั้งหมด แบบจำลองตรวจพบได้ครบมากแค่ไหน ค่านี้ต่ำหมายความว่าโดรนหลุดรอดการตรวจจับบ่อย

F1-score ตามสมการที่ (2-29) เป็นค่าเฉลี่ยเชิงฮาร์โมนิกระหว่าง Precision และ Recall ใช้เป็นตัวชี้วัดสรุปเมื่อต้องการสมดุลระหว่างการลดการแจ้งเตือนผิดพลาดและการลดการพลาดโดรน

ตัวชี้วัดเหล่านี้จะถูกประเมินประสิทธิภาพของกรอบการทำงานทั้งสองกรอบทั้งด้วยข้อมูลการจำลองในบทที่ 3 และข้อมูลการตรวจจับโดรนจริงในบทที่ 4

2.3 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบตรวจจับและจำแนกอากาศยานไร้คนขับจากสภาพแวดล้อมด้วยเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตด้วยความถี่แบบสแกน เริ่มจากหลักการทำงานของเรดาร์ตั้งแต่การสร้างสัญญาณเชิร์ป การประมวลผลสัญญาณความถี่กลาง การสร้างแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะผ่านการสแกนมุมแอซิมัท และหลักการสกัดความเร็วดอปเปลอร์ รวมถึงการนำเสนอสมการเรดาร์และพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กมีค่า RCS ต่ำและผันผวนตามมุมตกกระทบ อันเป็นบริบทสำคัญที่กำหนดเงื่อนไขการออกแบบระบบในบทที่ 3

ในส่วนของการประมวลผลหลังสัญญาณ (Post-Processing) ได้นำเสนออัลกอริทึมหลักสี่ชุด ได้แก่ CA-CFAR สำหรับการตรวจจับจุดกระเจิงด้วยการปรับเกณฑ์อัตโนมัติตามสัญญาณรบกวนเฉพาะที่ อัลกอริทึมดีบีสแกนและเฮชดีบีสแกนสำหรับการจัดกลุ่มจุดกระเจิง โดยอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกนมีข้อได้เปรียบในการจัดการข้อมูลที่มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอในสภาพแวดล้อมเมือง อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์สำหรับการประมาณขอบเขตสิ่งปลูกสร้างและขยายขอบเขตด้วยตัวประกอบ β เพื่อกรองสัญญาณรบกวน และโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาวสำหรับการจำแนกวิถีการบินในข้อมูลอนุกรมเ

บทที่ 3
การออกแบบและพัฒนาระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่มอดูเลตความถี่สำหรับตรวจจับเป้าหมายในสภาพแวดล้อมเมือง

3.1 บทนำ

บทนี้อธิบายการพัฒนาระบบตรวจจับและจำแนกโดรนจากสัญญาณของเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ในย่านความถี่ X-band ในสภาพแวดล้อมในเมือง โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ การพัฒนาฮาร์ดแวร์ และการพัฒนากระบวนการประมวลผลสัญญาณ

ในส่วนฮาร์ดแวร์ การออกแบบครอบคลุมตั้งแต่การกำหนดสมรรถนะระบบ การออกแบบสายอากาศ ระบบภาคส่ง-ภาครับ ชุดประมวลผลสัญญาณ จนถึงชุดหมุนค้นหาเป้าหมายและการรวมระบบ การเลือกใช้เทคโนโลยีเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ในย่านความถี่ X-band มาจากข้อได้เปรียบด้านความละเอียดในการวัดระยะจากแบนด์วิดท์กว้าง ความเหมาะสมกับการเฝ้าระวังต่อเนื่อง และขนาดสายอากาศที่กะทัดรัดพอสำหรับการติดตั้งบนยานพาหนะ รายละเอียดการออกแบบฮาร์ดแวร์แต่ละส่วนนำเสนอในหัวข้อ 3.2

ในส่วนการประมวลผลสัญญาณซึ่งเป็นจุดเน้นหลักของงานวิจัยนี้ ได้พัฒนากรอบการทำงานสองกรอบที่ต่อเนื่องกัน ได้แก่ กรอบการทำงานที่หนึ่ง ใช้อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) ร่วมกับอัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) สำหรับตรวจจับตำแหน่งโดรนในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) และกรอบการทำงานที่สอง ใช้อัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) สำหรับตรวจจับและจำแนกวิถีการบิน

ในกรอบการทำงานที่หนึ่ง อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) ถูกเลือกใช้เนื่องจากความสามารถในการจัดกลุ่มข้อมูลที่มีรูปร่างไม่แน่นอนและคัดแยกจุดรบกวนออกได้โดยอัตโนมัติโดยไม่ต้องกำหนดจำนวนกลุ่มล่วงหน้า อย่างไรก็ตาม จุดกระเจิงที่ปรากฏในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) แม้จะเกิดจากเป้าหมายเดิม ก็ยังคงมีการกระจัดตำแหน่งเล็กน้อยในแต่ละรอบการสแกน อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนในการวัด สัญญาณรบกวน และผลกระทบจากการหมุนของสายอากาศ ด้วยเหตุนี้ อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) จึงถูกนำมาใช้สร้างขอบเขตเชิงพื้นที่ที่ครอบคลุมกลุ่มจุดกระเจิงทั้งหมด และสามารถขยายขอบเขตออกได้ตามระยะขยายที่กำหนด เพื่อสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อม (Environment Boundary) ทำให้ลดการตรวจจับผิดพลาดของระบบ

ในกรอบการทำงานที่สอง อัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) ถูกนำมาใช้แทนอัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงกว่าในการจัดกลุ่มข้อมูลที่มีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ จากนั้นโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) จะรับลำดับข้อมูลตำแหน่งในเชิง

เวลาที่ได้จากการจัดกลุ่ม เพื่อเรียนรู้รูปแบบเฉพาะของวิถีการบินแต่ละประเภทและระบุตำแหน่งของโดรนในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนได้

3.2 การพัฒนาฮาร์ดแวร์เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่

ระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตถูกออกแบบโดยอ้างอิงจากสถานการณ์การใช้งานจริงโดยฮาร์ดแวร์เรดาร์ตรวจจับโดรนในวิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการการพัฒนาเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่สำหรับตรวจจับเป้าหมายเพื่อการป้องกันภัยทางทะเลและอากาศ จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ [32] ซึ่งกำหนดให้ระบบต้องสามารถตรวจจับโดรนพาณิชย์ขนาดกลางและขนาดเล็ก ที่มีค่าพื้นที่หน้าตัดเรดาร์ (RCS) ≈ 0.01–0.1 ตารางเมตร ในระยะสูงสุด 5 กิโลเมตร และต้องทำงานได้ในสภาพแวดล้อมในเมืองซึ่งอาจมีสัญญาณรบกวนจากพื้นดินและสิ่งก่อสร้างโดยรอบ (clutter) สูง การกำหนดข้อกำหนดเหล่านี้ใช้สมการเรดาร์ (2-13) เป็นเครื่องมือหลักในการคำนวณ

ระยะตรวจจับสูงสุดของเรดาร์สามารถคำนวณได้จากสมการเรดาร์พื้นฐาน ซึ่งสัมพันธ์กับกำลังส่ง อัตราขยายสายอากาศ ค่า RCS ของเป้าหมาย และค่าความไว (Sensitivity) ของภาครับ โดยกำหนดให้ SNR ขั้นต่ำอยู่ที่ 13 dB เพื่อรองรับการตรวจจับที่ความน่าจะเป็นในการตรวจจับ P_d = 0.9 และ ความน่าจะเป็นของ P_{fa} = 10^{-6} จากการคำนวณพบว่าต้องใช้กำลังส่งไม่น้อยกว่า 200 W ร่วมกับสายอากาศที่มีอัตราขยายไม่น้อยกว่า 27 dBi

ตารางที่ 3-1 ข้อกำหนดสมรรถนะของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ย่านความถี่ X-band

คุณลักษณะ	ค่าที่กำหนด
ย่านความถี่	X-band (8–12 GHz)
ความถี่ทำงาน	9.950–10.026 GHz
กำลังส่ง	260 W
อัตราขยายสายอากาศ	≥ 27 dBi
ขนาดลำคลื่น 3 dB (แนวราบ/แนวดิ่ง)	≤ 5°
ระยะตรวจจับสูงสุด (RCS = 0.1 ม.²)	≥ 5 กม.
ความละเอียดระยะ	≤ 2 ม. (BW = 76 MHz)
อัตราการหมุน	3–10 รอบต่อนาที
พิสัยมุมแอซิมัท	360°
พิสัยมุมเอเลเวชัน	0° ถึง +90°
SNR ขั้นต่ำ (P_d=0.9, P_f=10^{-6})	≥ 13 dB

ความละเอียดระยะ (Range Resolution) ถูกกำหนดจากข้อกำหนดในการแยกแยะเป้าหมายหลายตัวที่อยู่ใกล้กัน โดยคำนวณได้จากสมการ (2-6) การกำหนดความละเอียดเป้าหมายไว้

ที่ 2 เมตรนำไปสู่ข้อกำหนดแบนด์วิดท์ขั้นต่ำที่ 75 MHz จึงเลือกใช้แบนด์วิดท์ 76 MHz ตามข้อจำกัดของฮาร์ดแวร์ ซึ่งให้ความละเอียดเชิงทฤษฎีประมาณ 1.97 เมตร และอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

อัตราการหมุน (Scan Rate) กำหนดจากข้อพิจารณาด้านเวลาในการตรวจจับ (Detection Latency) ซึ่งต้องการให้ระบบสามารถอัปเดตตำแหน่งเป้าหมายได้ทุก 6–20 วินาที สอดคล้องกับอัตราการหมุน 3–10 รอบต่อนาที พิสัยมุมเอเลเวชัน 0° ถึง +90° ถูกกำหนดให้ครอบคลุมโดรนที่บินต่ำจนถึงระดับความสูงปานกลาง ดังสรุปในตารางที่ 3-1

3.2.1 สถาปัตยกรรมและภาพรวมของระบบ

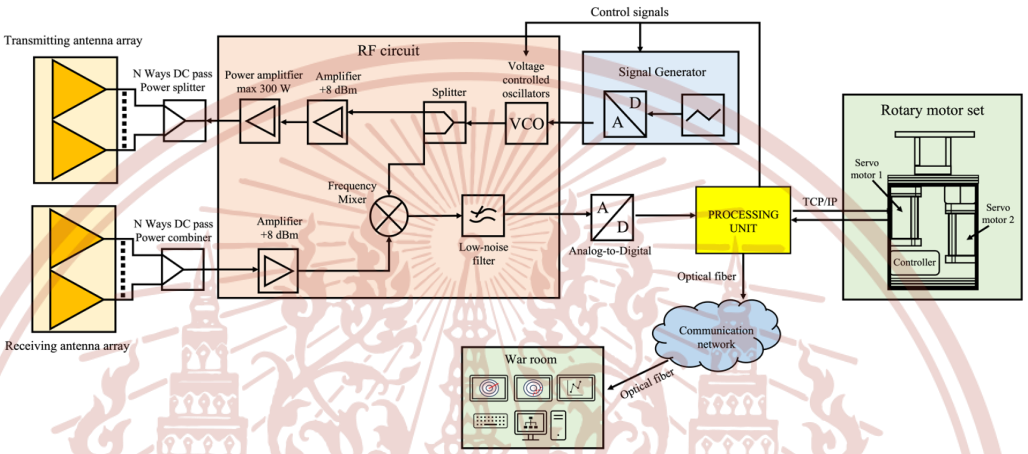
ระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ย่านความถี่ X-band ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบให้ ระบบทั้งหมดติดตั้งบนยานพาหนะที่สามารถเคลื่อนที่ไปยังพื้นที่ที่ต้องการเฝ้าระวังได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นติดตั้งระบบและเริ่มปฏิบัติการได้ภายในเวลาสั้น ซึ่งเหมาะสำหรับการป้องกันพื้นที่ชั่วคราว เช่น สนามบิน คลังน้ำมัน หรืองานชุมนุมสาธารณะ

สัญญาณส่ง (Transmitted signal) ของระบบเรดาร์เริ่มต้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ ที่ผลิตสัญญาณเชิร์ปในย่าน 9.95–10.026 GHz สัญญาณนี้ถูกขยายโดยวงจรขยายกำลังสูง ก่อนส่งออกทางสายอากาศส่ง สัญญาณสะท้อนจากเป้าหมายจะถูกรับโดยสายอากาศรับซึ่งแยกจากสายอากาศส่ง จากนั้นนำไปผสมกับสัญญาณส่ง เพื่อสร้างสัญญาณความถี่กลาง (IF Signal) ที่มีความถี่สัมพันธ์กับระยะห่างของเป้าหมาย สัญญาณความถี่กลางนี้จะถูกแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลโดย ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter, ADC) และส่งไปประมวลผลบนคอมพิวเตอร์

ผลการประมวลผลซอฟต์แวร์ประกอบด้วยตำแหน่งของเป้าหมาย (ระยะ, มุมแอซิมัท) และการจำแนก โดรนออกจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแสดงบนส่วนต่อประสานผู้ใช้ (GUI) แบบเรียลไทม์ (real-time) และสามารถส่งต่อไปยังระบบบัญชาการ (Command System) ผ่านเครือข่ายสื่อสารได้ด้วย

แผนภาพบล็อกในภาพที่ 3-1 แสดงสถาปัตยกรรมโดยรวมของระบบเรดาร์ ซึ่งประกอบด้วยห้าส่วนหลักที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระบบ ได้แก่ (1) ระบบย่อยสายอากาศ ประกอบด้วยสายอากาศส่งและรับแบบ Asymmetric Reflector ที่ติดตั้งบนชุดหมุน (2) ระบบย่อยภาคส่ง ประกอบด้วย Synthesizer, Power amplifier, และ Power Combiner (3) ระบบย่อยภาครับ ประกอบด้วย Low-noise amplifier, Mixer, และ ตัวกรองสัญญาณย่านความถี่กลาง (4) ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล และ (5) ชุดประมวลผลดิจิทัลซึ่งประมวลผล FFT, CFAR, ดีบีสแกน/เฮชดีบีสแกน , และ โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM)

การออกแบบให้ภาคส่งและภาครับใช้ Synthesizer ร่วมกันสร้างข้อได้เปรียบสำคัญในการตรวจจับระดับ Coherent ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถสกัดข้อมูล Doppler ได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ การแยกสายอากาศส่งและรับออกจากกัน ช่วยลดสัญญาณรั่วไหลจากภาคส่งสู่ภาครับ (Leakage) ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญในการออกแบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่



ภาพที่ 3-1 แผนภาพบล็อกของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ที่ออกแบบเพื่อตรวจจับโดรน

3.2.2 ระบบย่อยสายอากาศ

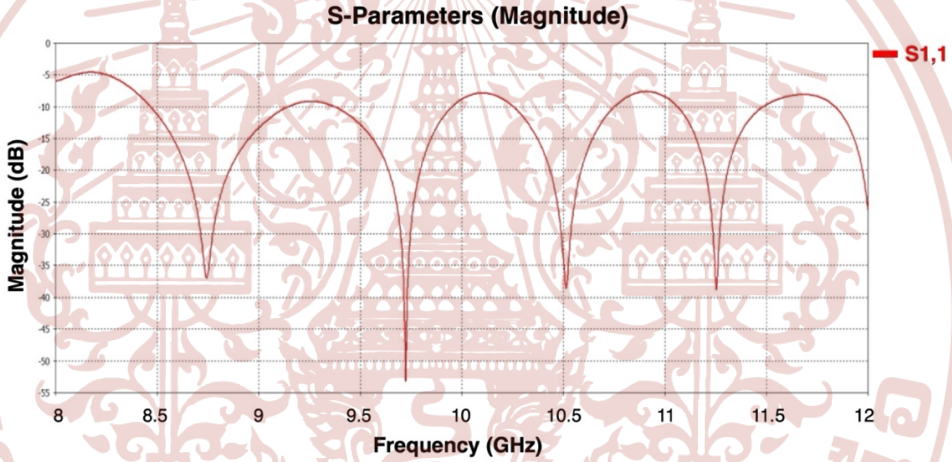
สายอากาศที่เลือกใช้เป็นชนิดตัวสะท้อนอสมมาตร (Asymmetric Reflector Antenna) ซึ่งออกแบบให้ทำงานที่ความถี่กลาง 10 GHz ในย่าน X-band การเลือกสายอากาศชนิดนี้มีเหตุผลหลักสามประการ ได้แก่ ประการแรก สามารถบรรลุอัตราขยายสูง (>27 dBi) ในขนาดพื้นที่ช่องเปิดที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งบนยานพาหนะ ประการที่สอง การออกแบบแบบอสมมาตรช่วยให้ควบคุมลักษณะลำคลื่นในแนวราบและแนวดิ่งได้เป็นอิสระ และประการที่สาม มีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนทานต่อการสั่นสะเทือนระหว่างการเดินทาง

อัตราขยายของสายอากาศสะท้อนแสงสัมพันธ์กับพื้นที่ช่องเปิด (Aperture Area) ตามสูตร $G = \eta \times (4\pi A/\lambda^2)$ เมื่อ η คือประสิทธิภาพของสายอากาศ, A คือพื้นที่ช่องเปิดประสิทธิผล และ λ คือความยาวคลื่น สำหรับอัตราขยายเป้าหมาย 27 dBi ที่ความถี่ 10 GHz (λ = 3 ซม.) พื้นที่ช่องเปิดที่ต้องการอยู่ที่ประมาณ 0.08 ตารางเมตร ซึ่งนำไปสู่ขนาด Reflector ประมาณ 28 ซม. × 28 ซม. [32]

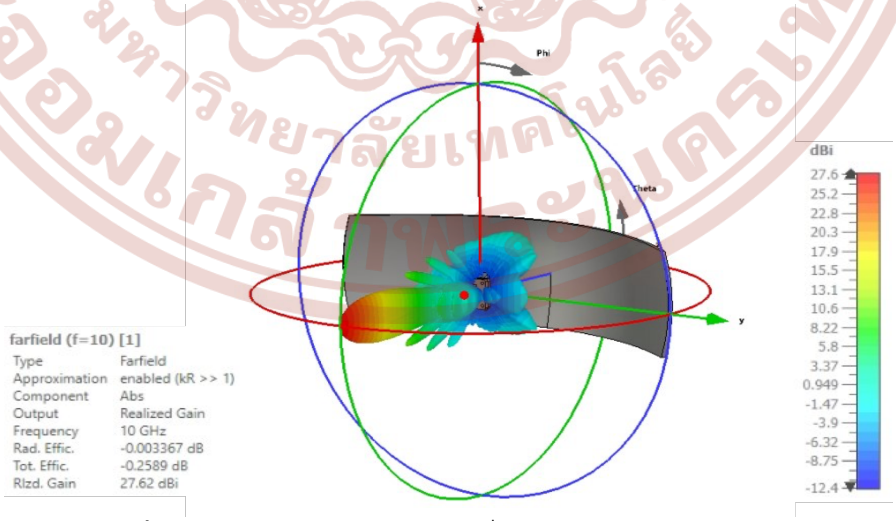
การออกแบบ Feed Horn สำหรับสายอากาศนี้ต้องพิจารณาการกระจายความเข้มสนามบนพื้นผิว Reflector อย่างระมัดระวัง โดยทั่วไปนิยมใช้ค่า Edge Taper ประมาณ -10 ถึง -12 dB เพื่อสมดุลระหว่างอัตราขยาย ระดับลำคลื่นด้านข้าง (Sidelobe Level) และประสิทธิภาพโดยรวม Feed Horn ถูกออกแบบให้มีค่า F/D Ratio ที่เหมาะสมกับ Reflector ที่เลือกใช้ [32]

ในการออกแบบ ยังต้องคำนึงถึง Isolation ระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ ซึ่งต้องมีค่าไม่น้อยกว่า -50 dB เพื่อป้องกัน Receiver Saturation และลด Self-Interference สายอากาศทั้งสองตัวถูกออกแบบให้มีการจัดวางเชิงพื้นที่ (Spatial Separation) และ Polarization Isolation ที่เหมาะสม ตลอดจนการติดตั้งแผ่นโลหะระหว่างสายอากาศทั้งสอง

การจำลองแบบดำเนินการด้วยซอฟต์แวร์ Electromagnetic (EM) เชิงตัวเลข โดยใช้วิธี Method of Moments (MoM) สำหรับการจำลองสายอากาศและวิธี Physical Optics (PO) สำหรับการคำนวณแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น การจำลองดำเนินการในช่วงความถี่ 9.5–10.5 GHz เพื่อประเมินสมรรถนะทั้งในและนอกช่วงความถี่ทำงาน ผลการจำลองแสดงค่า S_{11} ที่ความถี่กลาง 10 GHz อยู่ที่ประมาณ -25 dB ดังแสดงในภาพที่ 3-2



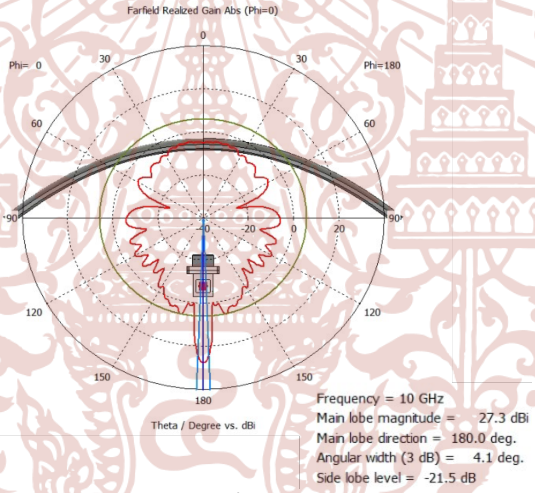
ภาพที่ 3-2 ผลการจำลอง S11 ของสายอากาศตัวสะท้อนอสมมาตร [32]



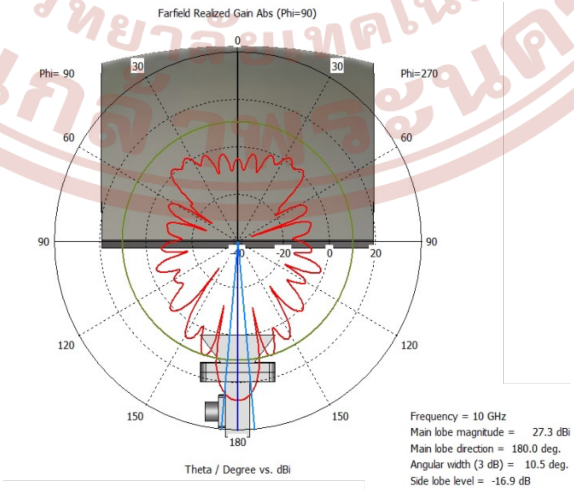
ภาพที่ 3-3 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นสามมิติของสายอากาศ [32]

รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นสามมิติที่แสดงในภาพที่ 3-3 ยืนยันลักษณะลำคลื่นหลักที่แคบและชัดเจน การจำลองพบว่าลำคลื่นด้านข้างสูงสุด (First Sidelobe Level: SLL) อยู่ที่ประมาณ -20 dB เมื่อเทียบกับลำคลื่นหลัก ซึ่งเป็นระดับที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานเรดาร์ตรวจจับเป้าหมาย เนื่องจากสัญญาณรบกวนจากทิศทางลำคลื่นด้านข้างจะถูกลดทอนอย่างมากเมื่อเทียบกับทิศทางลำคลื่นหลัก

ภาพที่ 3-4 และ 3-5 แสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในแนวราบและแนวดิ่งตามลำดับ ขนาดลำคลื่น 3 dB (Half-Power Beamwidth: HPBW) ในแนวราบวัดได้ประมาณ 4.8° ส่วนในแนวดิ่งวัดได้ประมาณ 5.2° ทั้งสองค่าสอดคล้องกับข้อกำหนดที่กำหนดไว้ที่ ≤5° ค่า Cross-Polarization Level อยู่ที่ต่ำกว่า -25 dB ซึ่งบ่งชี้ว่าสายอากาศมีความบริสุทธิ์ของ Polarization ที่ดี [32]



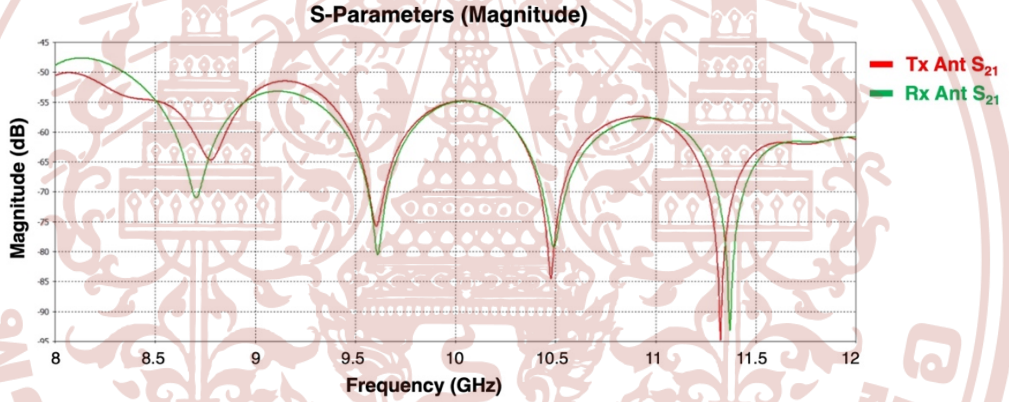
ภาพที่ 3-4 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในแนวราบ (Azimuth Pattern) [32]



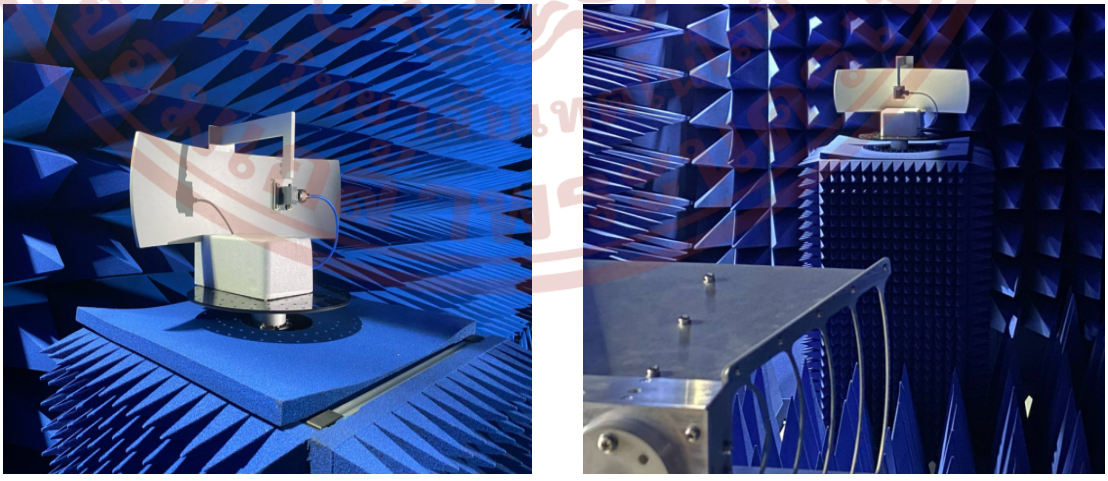
ภาพที่ 3-5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในแนวดิ่ง (Elevation Pattern) [32]

ผลการจำลองแบบพารามิเตอร์ (Parametric Study) ที่ดำเนินการโดยปรับค่า F/D Ratio และ Feed Offset แสดงให้เห็นว่าการออกแบบที่เลือกไว้ให้ความสมดุลที่ดีที่สุดระหว่างอัตราขยาย ระดับลำคลื่นด้านข้าง และ Spillover Efficiency โดยรวม ผลการจำลองทั้งหมดใช้เป็นพื้นฐานในการผลิตต้นแบบและทดสอบในขั้นถัดไป

การทดสอบ Isolation ระหว่างสายอากาศส่งและรับดำเนินการโดยใช้ Vector Network Analyzer (VNA) ในการวัดค่า S_{21} ระหว่างสายอากาศทั้งสอง โดยจัดวางสายอากาศในตำแหน่งการติดตั้งจริงบนชุดหมุน ดังแสดงในภาพที่ 3-6 การวัดครอบคลุมช่วงความถี่ 8–12 GHz เพื่อประเมินสมรรถนะ Isolation ในช่วงกว้าง ผลการวัดในภาพที่ 3-6 (ข) แสดงค่า Isolation ต่ำกว่า -50 dB ตลอดช่วงความถี่ทำงาน ซึ่งตรงตามข้อกำหนดและเพียงพอสำหรับการป้องกัน Receiver Saturation



ภาพที่ 3-6 ผลการทดสอบ Isolation ระหว่างสายอากาศส่งและรับ [32]

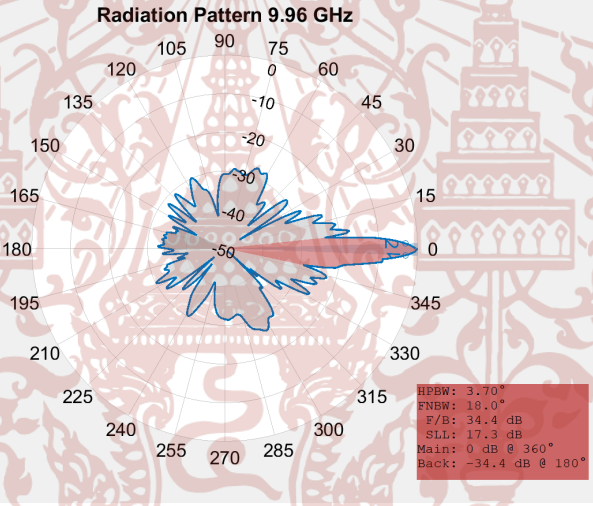


(ก) (ข)

ภาพที่ 3-7 การตรวจวัดสายอากาศใน Anechoic Chamber (ก) มุมมองด้านซ้าย (ข) มุมมองด้านขวา [32]

การวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจริงดำเนินการในห้องปราศจากเสียงสะท้อน (Anechoic Chamber) ซึ่งเป็นสิ่งแวดล้อมมาตรฐานสำหรับการวัดสายอากาศ โดยปราศจากสัญญาณสะท้อนจากสิ่งแวดล้อม ดังแสดงในภาพที่ 3-7 กระบวนการวัดเริ่มด้วยการสอบเทียบ (Calibration) โดยใช้สายอากาศมาตรฐาน (Standard Gain Horn) เพื่ออ้างอิงระดับสัญญาณ จากนั้นวัดสายอากาศทดสอบในทุกทิศทางด้วยขั้นมุม 1°

ผลการวัดในภาพที่ 3-8 แสดงอัตราขยายสูงสุดที่ 27.62 dBi ที่ความถี่ 10 GHz ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองแบบเป็นอย่างดี ค่า S11 ที่วัดได้อยู่ที่ -24.3 dB ที่ความถี่กลาง แสดงถึงการปรับจูนคลื่นที่ดี Bandwidth ที่ S11 < -10 dB ครอบคลุมตั้งแต่ 9.7–10.3 GHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ทำงาน 9.95–10.026 GHz ได้อย่างสมบูรณ์



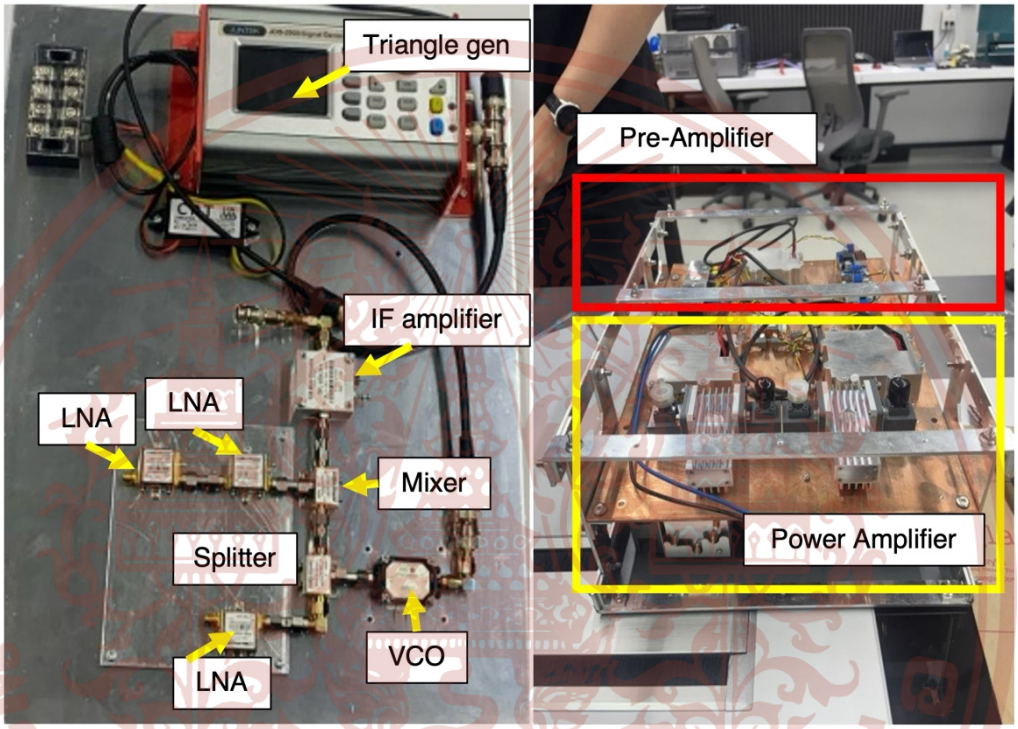
ภาพที่ 3-8 ผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจริงของสายอากาศ [32]

3.2.3 ระบบย่อยภาคส่งและภาครับ

ระบบย่อยภาคส่งและภาครับแบ่งออกเป็นสองส่วนตามระดับกำลังงาน ได้แก่ วงจรกำลังต่ำซึ่งครอบคลุมทั้งภาคส่งและภาครับ และวงจรกำลังสูงซึ่งอยู่เฉพาะในภาคส่ง ดังแสดงในภาพที่ 3-9

ในส่วนภาคส่ง วงจรกำลังสูงใช้ภาควงจรขยายกำลัง (Power Amplifier: PA) เทคโนโลยี Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor Monolithic Microwave Integrated Circuit (GaN HEMT MMIC) ซึ่งมีอัตราขยาย (Gain) ประมาณ 45 dB ทำงานครอบคลุมช่วงความถี่ 9–11 GHz และมีค่า P1dB (Power at 1 dB Gain Compression) ที่ 130 W [32] การเลือกใช้เทคโนโลยี GaN HEMT มีเหตุผลหลักสามประการ ได้แก่ แรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ที่สูงกว่า GaAs ทำให้สามารถส่งกำลังออกสูงได้ ความหนาแน่นกำลังงาน (Power Density) สูงถึง 5–10 W/mm ซึ่งนำไปสู่ขนาด Chip ที่กะทัดรัด และประสิทธิภาพเชิงกำลัง (Power-Added

Efficiency: PAE) ในย่าน X-band อยู่ที่ 30–50% ซึ่งดีกว่าเทคโนโลยีอื่น ระบบใช้โมดูลขยายกำลังงาน จำนวน 2 ตัวต่อขนานผ่าน Wilkinson Power Combiner เพื่อให้ได้กำลังส่งรวม 260 W โดยการออกแบบ Power Combiner ต้องคำนึงถึงความสมดุลของแอมพลิจูดและเฟสระหว่างเส้นทางสัญญาณทั้งสอง ซึ่งกำลังสูญเสียของ Power Combiner อยู่ที่ประมาณ 0.3–0.5 dB



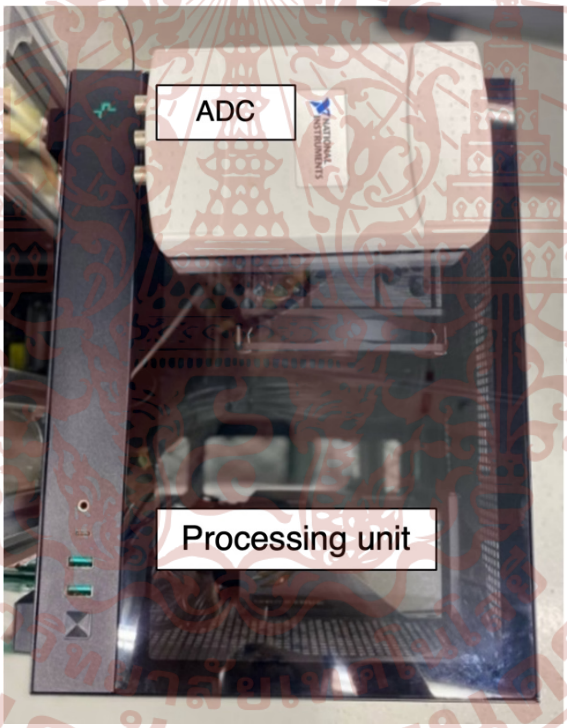
(ก) (ข)

ภาพที่ 3-9 ระบบย่อยภาคส่งและภาครับของเรดาร์ (ก) วงจรกำลังงานต่ำครอบคลุมทั้งภาคส่งและภาครับ (ข) วงจรกำลังงานสูงสำหรับภาคส่ง [32]

การจัดการความร้อน (Thermal Management) เป็นประเด็นสำคัญสำหรับวงจรขยายกำลังงาน เนื่องจาก GaN HEMT ทำงานที่อุณหภูมิจุดต่อ (Junction Temperature) สูงสุด 200°C ระบบระบายความร้อนออกแบบโดยใช้ Heat Sink อะลูมิเนียมร่วมกับ Thermal Interface Material (TIM) ที่มีค่า Thermal Conductivity สูง เพื่อรักษาอุณหภูมิจุดต่อให้ต่ำกว่า 150°C ในสภาวะปฏิบัติการต่อเนื่อง

ในส่วนภาครับ วงจรกำลังต่ำออกแบบตามหลัก Noise Figure Budget [32] เพื่อให้ระบบมีความไวเพียงพอสำหรับการตรวจจับสัญญาณสะท้อนจากโดรนที่อ่อนมาก ส่วนแรกของห่วงโซ่สัญญาณรับคือ Low Noise Amplifier (LNA) ที่ความถี่ 10 GHz ซึ่งมีค่า Noise Figure ประมาณ 2 dB และอัตราขยาย 20 dB ค่า Noise Figure ของ LNA มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากตามทฤษฎีของ Friis ค่า Noise Figure ของสเตจแรกจะกำหนด Noise Figure รวมของทั้งระบบเป็นส่วนใหญ่

หลัง LNA สัญญาณจะถูกส่งเข้า Band-Pass Filter เพื่อลดสัญญาณรบกวนนอกย่านความถี่ก่อนเข้าสู่ Mixer ซึ่งออกแบบแบบ Homodyne (Zero-IF) โดยผสมสัญญาณภาครับกับสัญญาณภาคส่ง เพื่อสร้างสัญญาณความถี่กลาง (IF signal) ที่มีความถี่ตรงกับความต่างความถี่ระหว่างสัญญาณส่งและรับ การใช้ LO ร่วมกับภาคส่งทำให้ระบบมีลักษณะ Coherent ซึ่งจำเป็นสำหรับการสกัดข้อมูลดอปเปลอร์ สัญญาณความถี่กลางหลัง Mixer จะผ่าน Low-Pass Filter ที่มีความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ประมาณ 50 MHz เพื่อจำกัดแบนด์วิดท์ของสัญญาณให้สอดคล้องกับระยะตรวจจับสูงสุดที่ไม่กำกวม (Maximum Unambiguous Range) และลด Aliasing ก่อนเข้าสู่ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ค่า Noise Figure รวมของระบบรับคำนวณได้ตามสูตรของ Friis ไม่เกิน 4 dB ซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนด SNR ขั้นต่ำ 13 dB ที่ระยะ 5 กิโลเมตร [32]

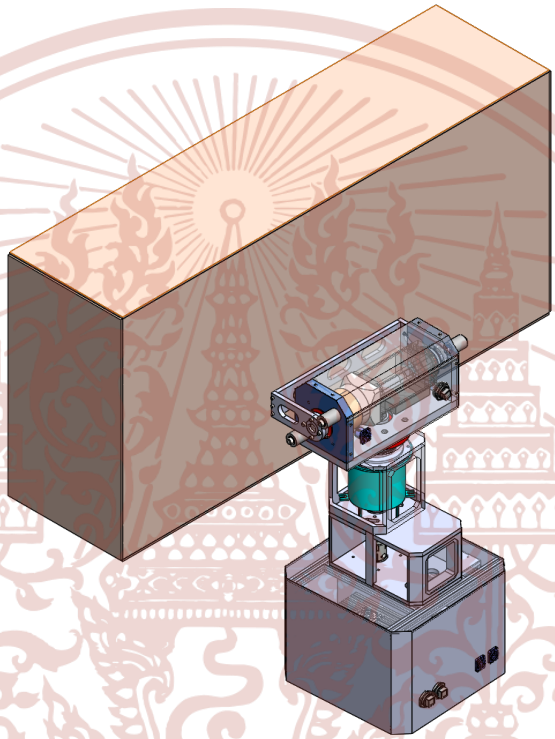


ภาพที่ 3-10 ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัล [32]

ชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลใช้ตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล ADC NI USB-5133 ที่มีอัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate) สูงสุด 100 Ms/s และแบนด์วิดท์อินพุต 50 MHz ซึ่งเพียงพอสำหรับสัญญาณ IF ที่มีความถี่สูงสุดประมาณ 50 MHz ตามทฤษฎีของ Nyquist การสื่อสารระหว่างตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลกับคอมพิวเตอร์ใช้ USB 3.0 ซึ่งมีแบนด์วิดท์เพียงพอสำหรับการส่งข้อมูล real-time ที่อัตราการสุ่มตัวอย่างที่กำหนด ดังแสดงในภาพที่ 3-10 ซอฟต์แวร์ควบคุมตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลและประมวลผลสัญญาณขั้นต้นพัฒนาบน MATLAB Program โดยใช้ Library ของ National Instruments (NI-DAQmx) ซึ่งรองรับการรับข้อมูลแบบ Continuous

และ Triggered Acquisition ข้อมูลตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่ได้รับจะถูกส่งต่อไปยัง Processing Pipeline ซึ่งประกอบด้วย Windowing Function, Range-FFT, Doppler-FFT และ CFAR ตามลำดับ

3.2.4 ชุดหมุนค้นหาเป้าหมาย



ภาพที่ 3-11 โครงสร้าง 3 มิติของชุดหมุนค้นหาเป้าหมายแบบ 2 แกน [32]

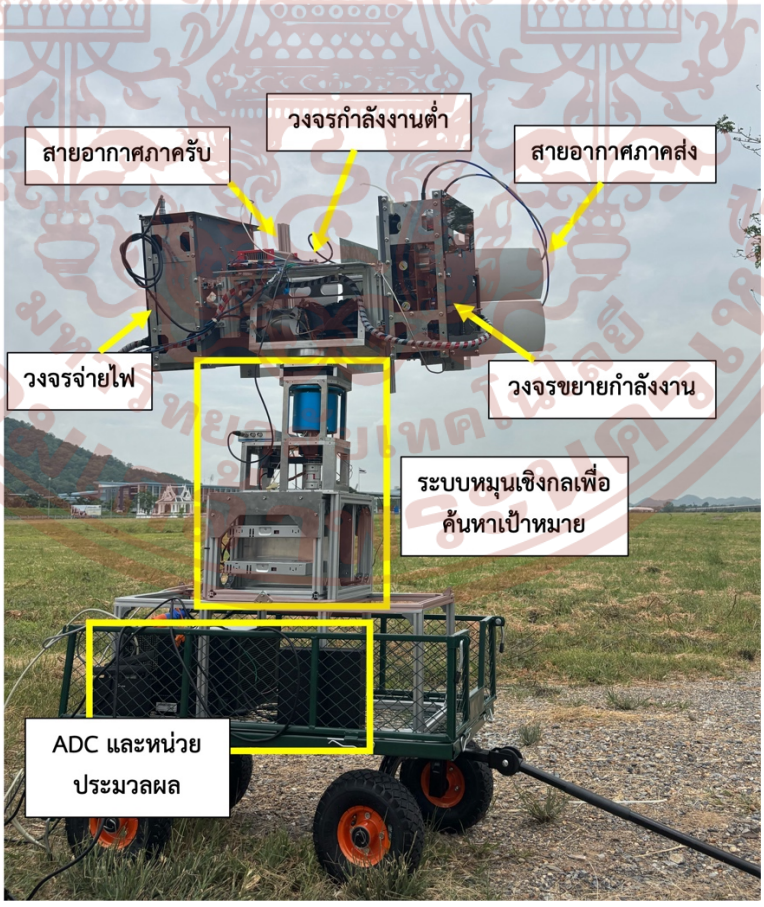
ชุดหมุนค้นหาเป้าหมาย (Scanning Pedestal) มีหน้าที่กำหนดทิศทางการส่องสายอากาศทั้งในแนวราบ (Azimuth) และแนวดิ่ง (Elevation) การออกแบบเป็นแบบ 2 แกน (2-Axis Gimbal) ที่ให้พิสัยการเคลื่อนที่ 360° ในแนวราบและ 0° ถึง +90° ในแนวดิ่ง ชุดหมุนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์สเต็ป (Stepper Motor) แบบ 2 เฟส ซึ่งให้ความแม่นยำเชิงมุมสูงและสามารถควบคุมความเร็วได้ในช่วงกว้าง [32]

มอเตอร์สเต็ปสำหรับแกน Azimuth ถูกเลือกให้มีแรงบิดเพียงพอสำหรับการขับเคลื่อนน้ำหนักรวมของสายอากาศและชุดหมุน Elevation ซึ่งมีน้ำหนักรวมประมาณ 15–20 กิโลกรัม ระบบ Gear Reduction ถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มแรงบิดและลดความเร็วให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ (3–10 รอบต่อนาที) ในขณะที่ยังคงความแม่นยำเชิงมุมที่ดี Slip Ring ติดตั้งที่แกนหมุน Azimuth เพื่อส่งผ่านสัญญาณ RF (ที่ความถี่ 10 GHz), สัญญาณ IF, สัญญาณควบคุม และพลังงานไฟฟ้าระหว่างส่วนที่หมุนและส่วนที่อยู่กับที่อย่างต่อเนื่อง Slip Ring ที่ใช้เป็นชนิด Broadband RF ที่มี Insertion Loss ต่ำในย่าน X-

band และมีอายุการใช้งานสูงสำหรับการหมุนต่อเนื่องระยะยาว Absolute Encoder ติดตั้งที่แกนทั้งสองเพื่อรายงานตำแหน่งเชิงมุมที่แม่นยำแก่ระบบควบคุม Encoder ที่เลือกใช้มีความละเอียด 12 บิต (4,096 ตำแหน่งต่อรอบ) ซึ่งให้ความแม่นยำเชิงมุมประมาณ 0.088° ค่านี้เพียงพอสำหรับการระบุตำแหน่ง Azimuth ของเป้าหมายเมื่อพิจารณาว่าขนาดลำคลื่น 3 dB ของสายอากาศอยู่ที่ประมาณ 5° ระบบควบคุมชุดหมุนพัฒนาบน Embedded Controller ที่สื่อสารกับคอมพิวเตอร์หลักผ่าน RS-485 [32]

3.2.5 การรวมระบบ

การรวมระบบ (System Integration) ดำเนินการตามลำดับขั้นตอนจากระบบย่อยสู่ระบบรวม โดยเริ่มจากการติดตั้งส่วนประกอบวงจรความถี่สูง ได้แก่ สายอากาศภาคส่ง สายอากาศภาครับ วงจรกำลังต่ำ และวงจรขยายกำลังงาน เข้ากับระบบหมุนเชิงกลเพื่อค้นหาเป้าหมาย จากนั้นจึงเชื่อมต่อวงจรจ่ายไฟ ชุดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล และหน่วยประมวลผลเข้าสู่ระบบรวม โดยมีการทดสอบสมรรถนะของแต่ละส่วนก่อนดำเนินการรวมส่วนประกอบถัดไป ดังแสดงในภาพที่ 3-12 [32]

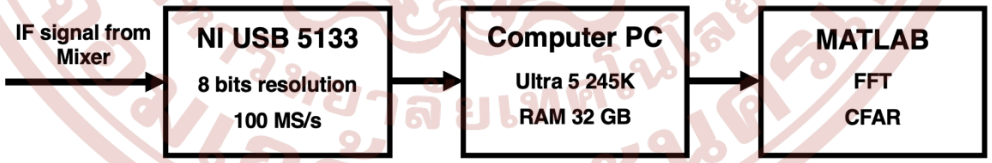


ภาพที่ 3-12 ต้นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับโดรน [32]

การเชื่อมต่อทางสัญญาณความถี่สูงระหว่างส่วนประกอบต่างๆ ใช้สายโคแอกเชียลชนิด Semi-Rigid และ Flexible ที่มีค่าลดทอนต่ำในย่านความถี่ X-band ข้อต่อ (Connector) ทุกจุดเลือกใช้ชนิด SMA หรือ 2.92 mm (K-Connector) ซึ่งรองรับความถี่สูงถึง 40 GHz การกระชับข้อต่อทุกจุดดำเนินการด้วย Torque Wrench เพื่อให้แน่ใจว่าค่า Insertion Loss และ Return Loss ของข้อต่ออยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดและไม่มีการรั่วไหลของสัญญาณความถี่สูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อภาครับ นอกจากนี้ยังติดตั้ง EMI Shielding สำหรับชุดควบคุมและชุดแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากวงจรดิจิทัลรั่วไหลเข้ามายังส่วนวงจรสัญญาณความถี่สูง

สถาปัตยกรรมการประมวลผลสัญญาณของระบบแสดงในภาพที่ 3-13 โดยสัญญาณความถี่กลางจาก Mixer จะถูกส่งเข้าการ์ด ADC NI USB-5133 ที่มีความละเอียด 8 บิต และอัตราการสุ่มตัวอย่าง 100 Ms/s จากนั้นข้อมูลดิจิทัลจะถูกส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ประมวลผลหลัก (Intel Ultra 5 245K RAM 32 GB) เพื่อประมวลผลด้วย MATLAB ซึ่งประกอบด้วยการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว สำหรับแปลงสัญญาณในโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ และ CFAR สำหรับตรวจจับเป้าหมายบนพื้นหลังของสัญญาณรบกวน [32]

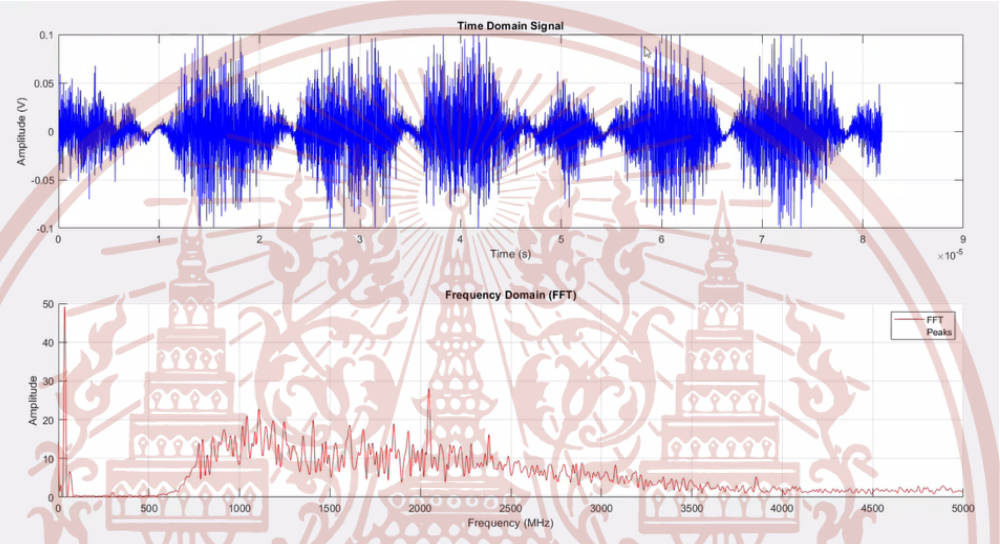
การทดสอบระบบรวมเบื้องต้นดำเนินการโดยชี้สายอากาศไปยังเป้าหมายทดสอบที่ทราบระยะแล้วตรวจสอบสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณความถี่กลางที่ได้รับ ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 3-14 โดยพบยอดสัญญาณ (Peak) ที่ตรงกับระยะของเป้าหมายทดสอบ ยืนยันว่าทั้งส่วนของวงจรสัญญาณความถี่สูงและส่วนสัญญาณความถี่กลางทำงานได้ถูกต้อง นอกจากนี้ยังพบว่าระดับ Noise Floor อยู่ในระดับที่คาดการณ์ไว้จาก Noise Figure Budget ที่ออกแบบไว้ [32]



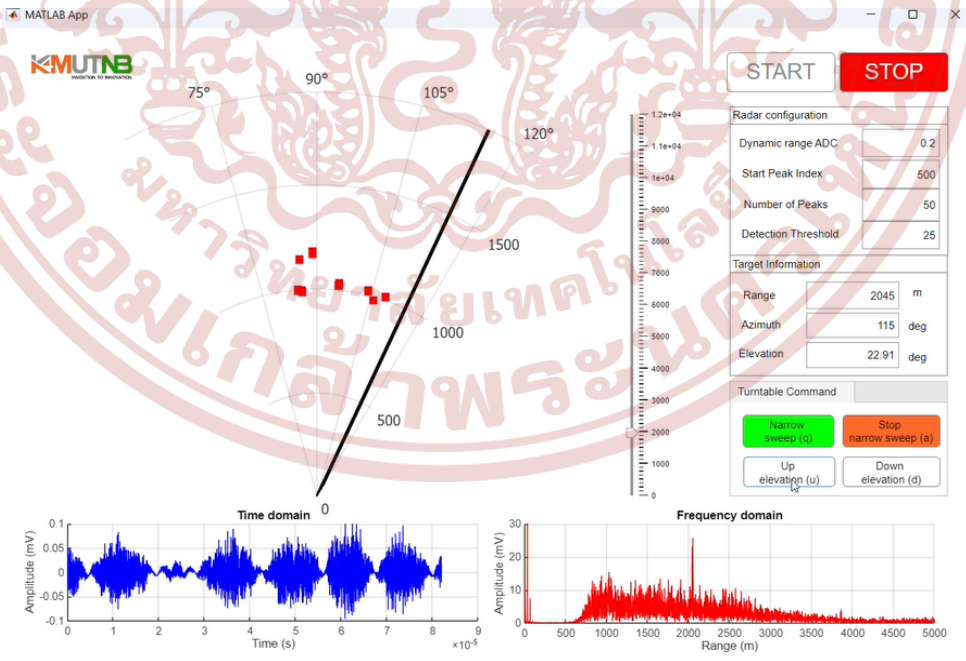
ภาพที่ 3-13 สถาปัตยกรรมการประมวลผลสัญญาณของระบบ [32]

ส่วนต่อประสานผู้ใช้ (GUI) พัฒนาขึ้นบน MATLAB App Designer สำหรับควบคุมและแสดงผลข้อมูลเรดาร์แบบ real-time ดังแสดงในภาพที่ 3-15 โดยแสดงแผนภาพเชิงขั้ว (Polar Plot) ของตำแหน่งเป้าหมาย สัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ พร้อมข้อมูลตำแหน่งเป้าหมาย ได้แก่ ระยะ มุมแอซิมัท และมุมเอลิเวชัน นอกจากนี้ยังมีส่วนควบคุมพารามิเตอร์เรดาร์และคำสั่งควบคุมชุดหมุนค้นหาเป้าหมาย

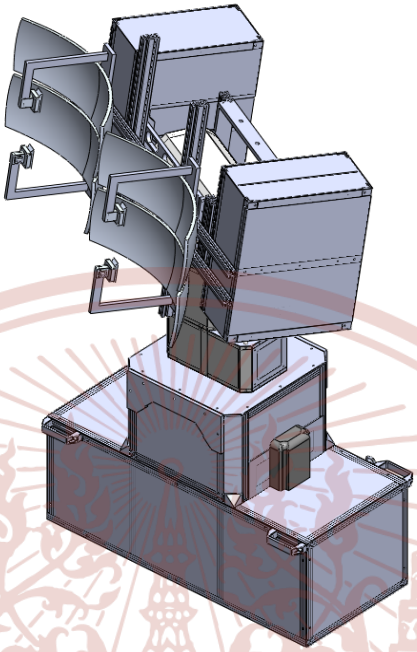
ภาพที่ 3-16 แสดงระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ย่านความถี่ X-band ที่รวมระบบสมบูรณ์ โดยส่วนประกอบทั้งหมดได้รับการบรรจุในกล่อง Enclosure ที่มีการป้องกันน้ำและฝุ่นระดับ IP54 เพื่อให้ทำงานได้ในสภาพแวดล้อมภาคสนาม ระบบสามารถเริ่มปฏิบัติการได้ภายใน 5 นาทีหลังติดตั้งบนยานพาหนะ [32]



ภาพที่ 3-14 ตัวอย่างผล FFT ที่ได้จากการทดสอบระบบรวม [32]



ภาพที่ 3-15 ส่วนต่อประสานผู้ใช้ (GUI) สำหรับควบคุมและแสดงผลเรดาร์ [32]

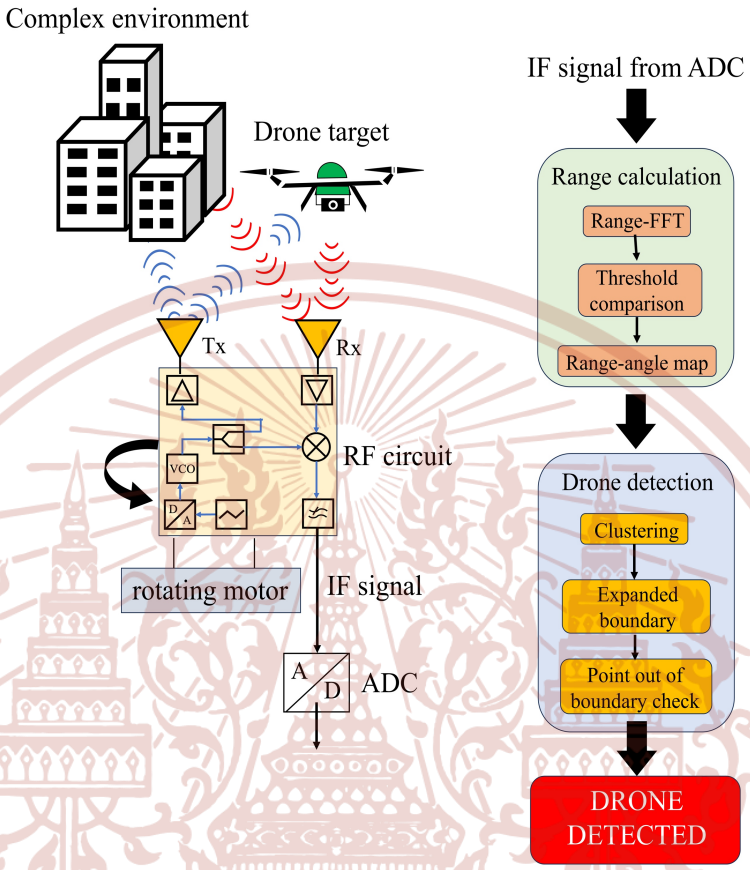


ภาพที่ 3-16 ระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ย่านความถี่ X-band ที่รวมระบบสมบูรณ์ [32]

3.3 การพัฒนาอัลกอริทึมตรวจจับโดรนด้วยการประมาณขอบเขต

การประมวลผลสัญญาณหลังการรับข้อมูลจากเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ ถูกออกแบบให้ครอบคลุมสองระดับของการวิเคราะห์ ระดับแรกคือการตรวจจับและระบุขอบเขตพื้นที่ของสภาพแวดล้อม และระดับที่สองคือการจำแนกโดรนออกจากสภาพแวดล้อม โดยหัวข้อนี้นำเสนอกรอบวิธีการระดับแรก ซึ่งมีแนวคิดหลักเป็นการตรวจจับความผิดปกติ (Anomaly Detection) บนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ที่นิยามตามสมการ (2-17) ว่าเป็นเซตของค่าสะท้อนกลับ $\mathbf{AR}=(r[k]_0, r[k]_{\Delta\theta},\ldots, r[k]_{2\pi})$ ในแต่ละรอบการสแกน

กรอบวิธีการทำงานในสองระยะ ระยะแรกคือการสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อม (Environment Modeling) โดยระบบสแกนพื้นที่เฝ้าระวังในสภาวะที่ไม่มีโดรนเป็นจำนวน N รอบ และนำข้อมูลจุดกระเจิงที่เกิดจากการตรวจพบเป้าหมายสภาพแวดล้อมมาซ้อนทับกัน จากนั้นใช้อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) จัดกลุ่มจุดสะท้อนของสิ่งแวดล้อม ตามด้วยอัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) สร้างขอบเขตที่ครอบคลุมกลุ่มจุดสะท้อนเหล่านั้น ระยะที่สองคือการตรวจจับโดรน (Drone Detection) โดยในรอบการสแกนถัดมา หากปรากฏจุดสะท้อนใดอยู่นอกขอบเขตของสภาพแวดล้อมที่สร้างไว้ จะถูกระบุว่าเป็นโดรน ภาพที่ 3-17 แสดงภาพรวมของกรอบวิธีการนี้

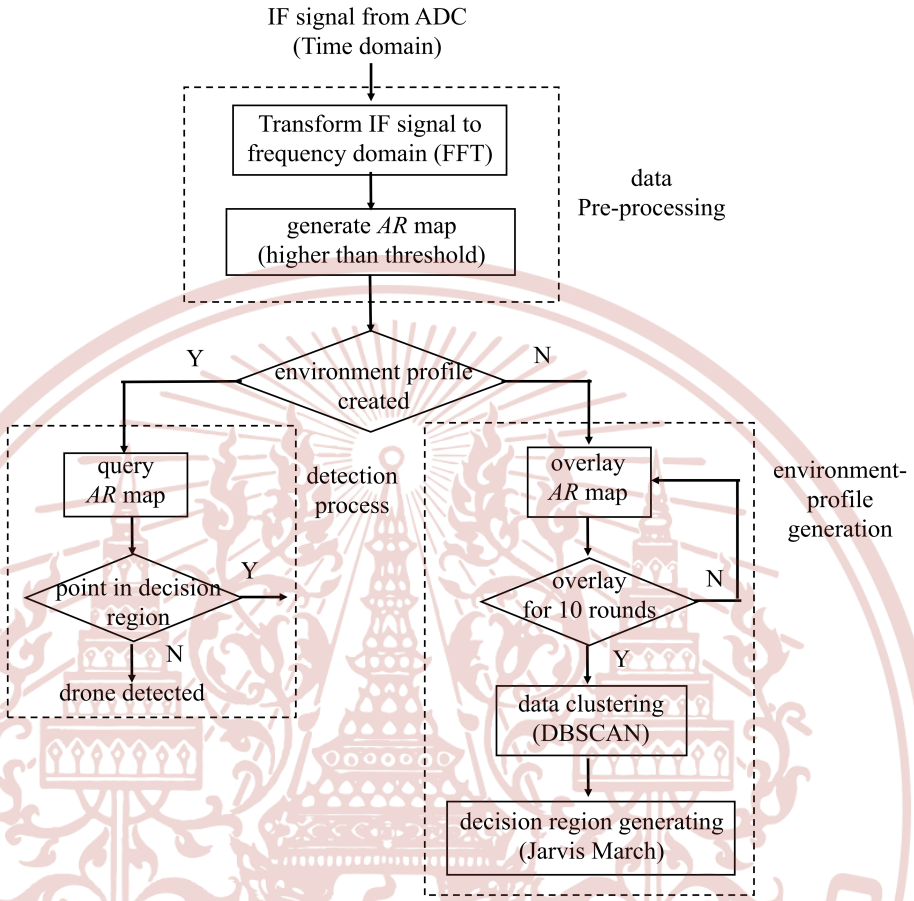


ภาพที่ 3-17 ภาพรวมของระบบตรวจจับโดรนด้วยการประมาณขอบเขต

3.3.1 กรอบวิธีการประมวลผลสัญญาณ

กรอบวิธีการประมวลผลที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 3-18 แบ่งเป็นสองระยะ ระยะแรก (ขั้นตอนที่ 1–4) สร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อมโดยรับข้อมูลแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ในสภาวะไม่มีโดรน ตามด้วยการคัดกรองด้วย CA-CFAR จัดกลุ่มจุดสะท้อนด้วยอัลกอริทึมดีบีสแกน และสร้างขอบเขตด้วยอัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) ระยะที่สอง (ขั้นตอนที่ 5) ตรวจจับโดรนจากจุดสะท้อนที่ปรากฏนอกขอบเขตสภาพแวดล้อมที่สร้างไว้

ในขั้นตอนการตรวจจับด้วย CA-CFAR แต่ละตำแหน่งในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map)จะถูกพิจารณาเป็น Cell Under Test (CUT) โดยประมาณระดับสัญญาณรบกวนเฉพาะที่ Z จากค่าเฉลี่ยของเซลล์อ้างอิง N_R เซลล์ ตามสมการ (2-16): $Z = (1/N_R)\Sigma x_i$ โดยมี Guard Cells N_G เซลล์แต่ละด้านเพื่อป้องกัน ไม่ให้สัญญาณเป้าหมายมีอิทธิพลต่อการประมาณ ข้อดีของ CA-CFAR คือปรับเกณฑ์ให้เข้ากับระดับสัญญาณรบกวนที่แปรเปลี่ยนตามตำแหน่งได้โดยอัตโนมัติ เหมาะกับสภาพแวดล้อมที่มี Ground Clutter สูงซึ่งเป็นเงื่อนไขปฏิบัติการจริงของระบบนี้



ภาพที่ 3-18 ผังแสดงกรอบการทำงานการตรวจจับโดรนด้วยวิธีการประมาณขอบเขต

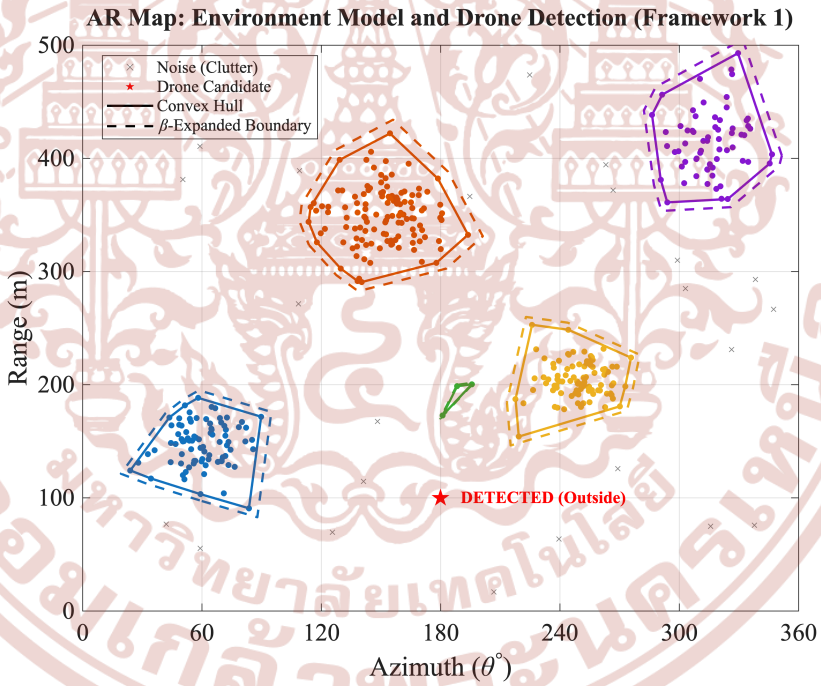
อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) ในกรอบวิธีการนี้ทำหน้าที่จัดกลุ่มจุดสะท้อนของ สภาพแวดล้อมไม่ใช่จุดสะท้อนของโดรน โดยดำเนินการบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ที่สแกนในสภาวะที่ไม่มีโดรน สำหรับแต่ละจุด คำนวณ eps-Neighborhood $N_{eps}\left(r[k]_{\Delta\theta}\right)=\left\{r^{'}\in AR\middle|dis(r^{'},r[k]_{\Delta\theta})\leq eps\right\}$ เพื่อกำหนดจุด Core Point และเริ่มขยายกลุ่มออกไป จุดที่ไม่ผ่านเกณฑ์จะถูกจัดเป็น Noise Point และละทิ้ง ผลลัพธ์คือเซตกลุ่มที่แทนคุณลักษณะของสภาพแวดล้อม $C=\{C_1(\theta,r),C_2(\theta,r),\cdots,C_q(\theta,r)\}$ เช่น อาคาร ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้างที่สะท้อนสัญญาณเรดาร์ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ eps = 3 เซลล์ และ $MinPts$ = 3 ซึ่งอ้างอิงจากความละเอียดระยะ 1.97 เมตร ตามสมการ (2-6)

อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) สร้างขอบเขตของสภาพแวดล้อมรอบแต่ละกลุ่ม $C_i(\theta,r)$ ผ่านวิธี Jarvis March จากนั้นคำนวณจุดศูนย์กลางตามสมการ (2-18) และ (2-19) แล้วขยายขอบเขตออกจากจุดศูนย์กลางด้วยตัวประกอบ β กล่าวคือ หากค่าพิกัดจุดขอบเขตมากกว่าจุดศูนย์กลางจะถูกคูณด้วย β และหากน้อยกว่าจะถูกคูณด้วย $(1-(\beta-1))$ ขอบเขตที่ขยายแล้วใช้เป็นแผน

ที่สภาพแวดล้อม กฎการตรวจจับโดรนคือ จุดสะท้อน ในรอบการสแกนใหม่ถือเป็นโดรน ก็ต่อเมื่อจุดนั้นไม่อยู่ใน β-expanded hull ของกลุ่มสภาพแวดล้อมใดเลย

3.3.2 การจำลองเพื่อทดสอบกรอบวิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม

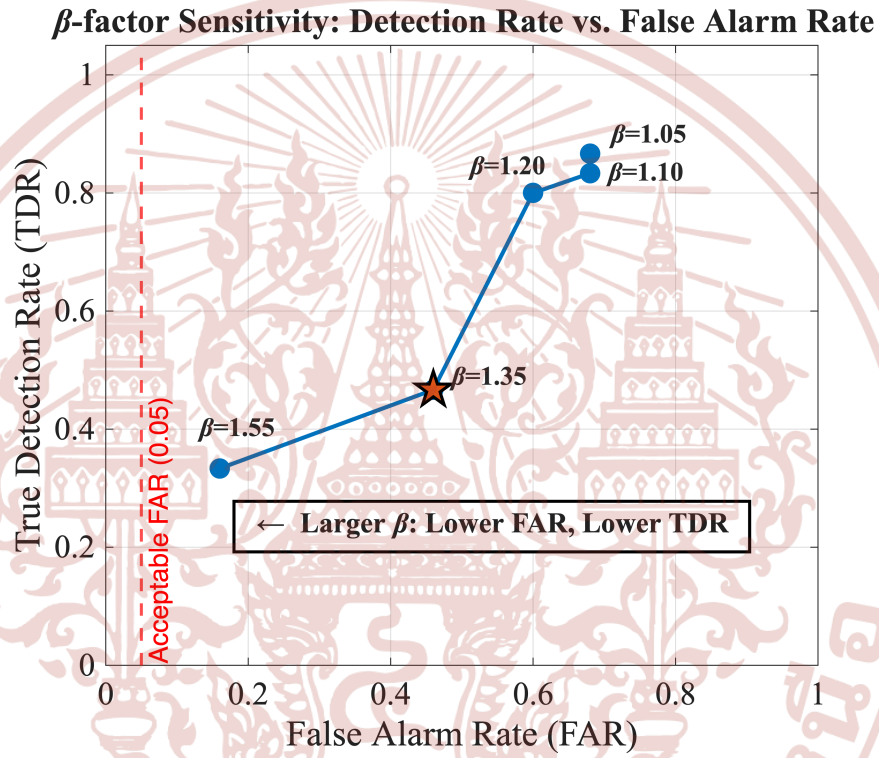
เพื่อทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของกรอบวิธีการที่หนึ่ง ได้จำลองสภาพแวดล้อมเรดาร์สังเคราะห์ บนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ขนาด 360° × 500 เมตร ประกอบด้วยกลุ่มจุดสะท้อนสภาพแวดล้อม 4–5 กลุ่ม ที่จำลองสิ่งปลูกสร้างและต้นไม้ มีการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian) รอบจุดศูนย์กลางแต่ละกลุ่ม พร้อมจุดรบกวนสุ่ม (Random Noise) กระจายทั่วแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) จำนวน 30–50 จุดเพื่อจำลอง Ground Clutter ใช้ค่าพารามิเตอร์อัลกอริทึมดีบีสแกน eps = 3 เซลล์ $MinPts$ = 3 และตัวประกอบ β = 1.15 เป็นค่าเริ่มต้น ผลการจำลองแสดงในภาพที่ 3-19 ถึงภาพที่ 3-22



ภาพที่ 3-19 ผลการสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อมบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ

เพื่อตรวจสอบว่ากรอบวิธีการสามารถสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อมและแยกโดรนออกจากสภาพแวดล้อมได้อย่างถูกต้อง จึงทดสอบด้วยข้อมูลจำลอง (Simulation test) ภาพที่ 3-19 แสดงผลการสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อมบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังนี้ สร้างกลุ่มสภาพแวดล้อม 4 กลุ่ม (สีน้ำเงิน ส้ม เหลือง ม่วง) แต่ละกลุ่มมีจุดสะท้อน 80–120 จุด กระจายแบบเกาส์เซียนรอบจุดศูนย์กลาง พร้อมจุดรบกวนสุ่ม 40 จุด (เครื่องหมาย ×) กระจายทั่วแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) และโดรนจำลอง (เครื่องหมาย ★ สี

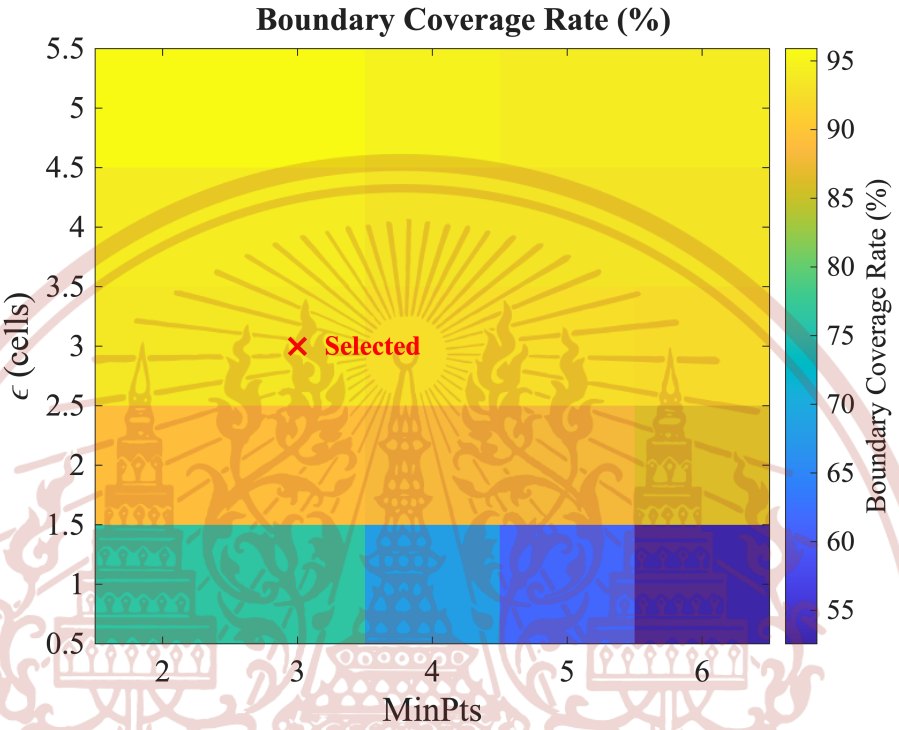
แดง) ที่ตำแหน่งซึ่งอยู่นอกขอบเขตทุกกลุ่ม ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า เส้นทึบแทนขอบเขต Convex Hull ดิบ และเส้นประแทนขอบเขตที่ขยายด้วย β-factor ครอบกลุ่มสภาพแวดล้อมได้อย่างแน่นหนา โดยโดรนที่ตำแหน่งพื้นที่เปิดโล่งถูกระบุว่า DETECTED (Outside) จุดสังเกต: กลุ่มขนาดเล็กที่มีจุดสะท้อนเพียง 3 จุด (เท่ากับ *MinPts*) แสดงให้เห็นว่า การเลือกค่า *MinPts* ที่เหมาะสมมีผลต่อการระบุกลุ่มสภาพแวดล้อม



ภาพที่ 3-20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตรวจจับถูกต้องและอัตราการแจ้งเตือนเท็จเมื่อเปลี่ยนค่า β

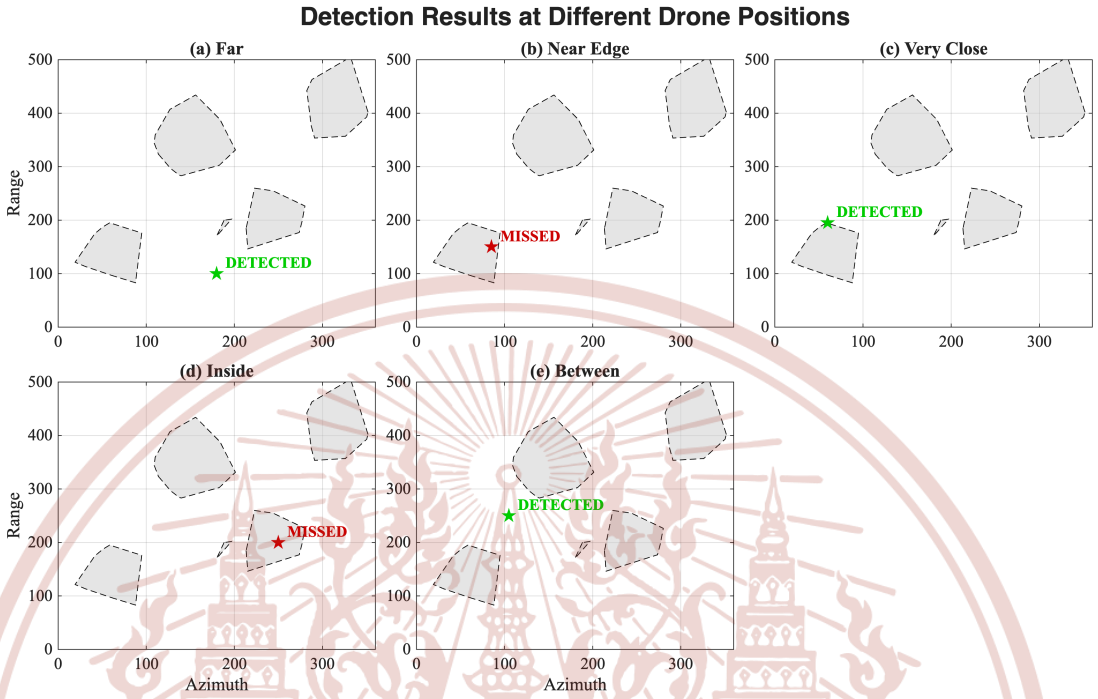
ตัวประกอบ β มีบทบาทสำคัญต่อ Trade-off ระหว่างความสามารถในการตรวจจับโดรนและอัตราการแจ้งเตือนเท็จ การเลือก β ที่เหมาะสมจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการปรับจูนระบบ ภาพที่ 3-20 แสดงผลการวิเคราะห์ความไวของตัวประกอบ β ต่อ Trade-off ระหว่าง True Detection Rate (TDR) และ False Alarm Rate (FAR) โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังนี้ วางจุดรบกวน 50 จุดที่ระยะห่างจากขอบเขต Convex Hull เป็นช่วง ๆ ตั้งแต่ 1.05R ถึง 2.0R และตำแหน่งโดรนทดสอบ 30 จุดที่ระยะ 1.05R ถึง 3.0R จากจุดศูนย์กลางกลุ่ม ทดสอบค่า $\beta \in \{1.05, 1.10, 1.20, 1.35, 1.55\}$ ผลลัพธ์แสดงเส้นโค้ง Trade-off ที่มีทิศทางชัดเจน: β มากขึ้น ขอบเขตขยายมากขึ้น FAR ลดลงจาก 0.70 เป็น 0.17 แต่ TDR ก็ลดลงจาก 0.87 เป็น 0.33 เนื่องจากตำแหน่งโดรนที่อยู่ใกล้ขอบเขตเริ่มอยู่ภายในขอบเขตที่ขยายแล้ว เลือก β = 1.35 (เครื่องหมาย ★) เป็นจุดปฏิบัติการ ซึ่งให้ TDR = 0.47 และ FAR = 0.45 จุดสังเกต: ค่า FAR ที่ยังค่อนข้างสูงในทุกค่า β สะท้อนข้อจำกัดของ

กรอบวิธีการที่หนึ่ง ซึ่งเป็นแรงจูงใจสำคัญในการพัฒนากรอบวิธีการที่สอง (HDBSCAN + LSTM) เพื่อกรอง False Alarm ที่เหลืออยู่ ด้วยการวิเคราะห์ Pattern การบินตามลำดับเวลา



ภาพที่ 3-21 ผลการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์อัลกอริทึมดีบีสแกนต่ออัตราการครอบคลุมขอบเขตสภาพแวดล้อม

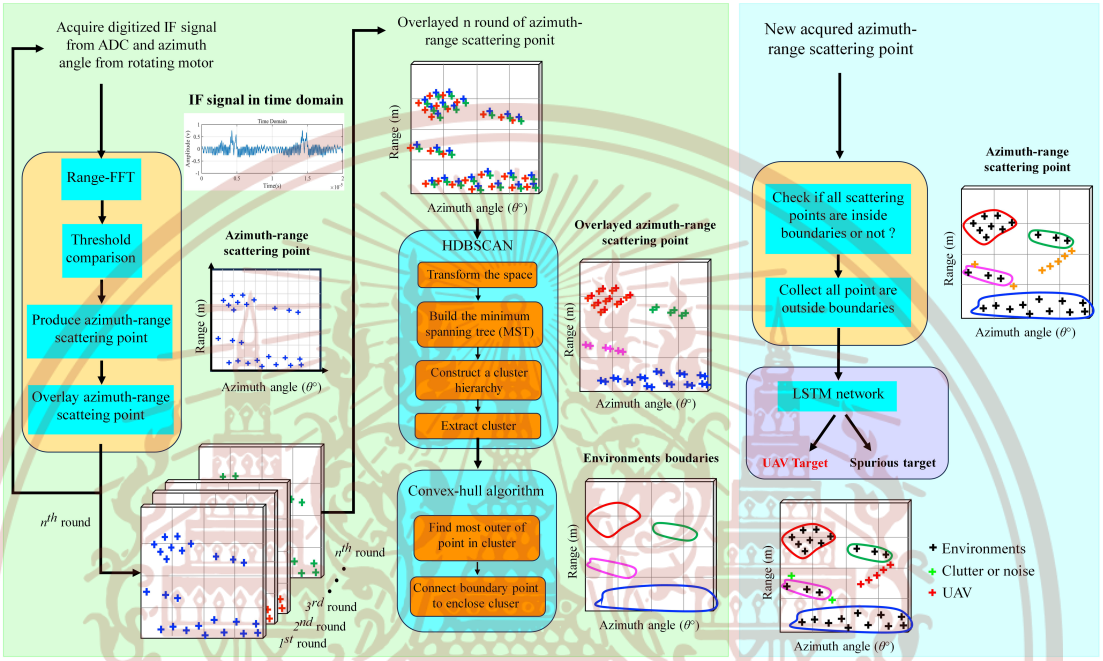
การเลือกพารามิเตอร์ *eps* และ *MinPts* ของอัลกอริทึมดีบีสแกนส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของแบบจำลองสภาพแวดล้อม หาก *eps* น้อยเกินไปกลุ่มจะแตกออก ทำให้การสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อมไม่ครอบคลุมจุดกระเจิงของสภาพแวดล้อมทุกจุด ภาพที่ 3-21 แสดงผลการวิเคราะห์ความไวของพารามิเตอร์อัลกอริทึมดีบีสแกน โดยทดสอบค่า $eps \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ เซลล์ และ $MinPts \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$ บนชุดข้อมูลเดียวกัน วัดประสิทธิภาพด้วย Boundary Coverage Rate ซึ่งคือสัดส่วนของจุดสะท้อนสภาพแวดล้อมทั้งหมด ที่อยู่ภายใน Convex Hull boundaries ที่สร้างขึ้น (ค่าสูง = แบบจำลองสภาพแวดล้อมดี) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า Coverage Rate สูงกว่า 90% เมื่อ $eps \geq 3$ เซลล์ และลดลงอย่างชัดเจน เมื่อ $eps \leq 2$ เซลล์ เนื่องจากค่า *eps* ต่ำทำให้กลุ่มสภาพแวดล้อมแตกออกเป็นกลุ่มย่อยมากเกินไป ส่งผลให้ Convex Hull ครอบไม่ครบ จุดที่เลือก ($eps = 3$, $MinPts = 3$) อยู่ในบริเวณที่มี Coverage Rate สูง ยืนยันว่าการเลือกพารามิเตอร์นี้มีความเหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อม



ภาพที่ 3-22 ผลการทดสอบการตรวจจับโดรนในสภาวะตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 5 กรณี

เพื่อประเมินพฤติกรรมของกรอบวิธีการในสถานการณ์ที่หลากหลาย จึงทดสอบด้วยตำแหน่งโดรนจำลอง 5 กรณีที่แตกต่างกันทั้งในด้านระยะห่างและตำแหน่งสัมพัทธ์กับกลุ่มสภาพแวดล้อม ภาพที่ 3-22 แสดงผลการทดสอบการตรวจจับโดรนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของกรอบวิธีการที่หนึ่ง โดยที่กรณี (a) โดรนอยู่ในพื้นที่เปิดโล่ง ห่างจากทุกกลุ่มสภาพแวดล้อม ผลคือ DETECTED กรณี (b) โดรนอยู่ใกล้ขอบกลุ่มสภาพแวดล้อมและอยู่ภายใน β-expanded boundary ผลคือ MISSED แสดงผลกระทบของ β-factor ที่ใหญ่เกินไป กรณี (c) โดรนอยู่ใกล้ขอบกลุ่ม แต่อยู่ในช่องว่างระหว่างกลุ่มจึงอยู่นอกขอบเขต ผลคือ DETECTED กรณี (d) โดรนอยู่ภายในขอบเขตของกลุ่มสภาพแวดล้อม (โดรนบินผ่านพื้นที่มีวัตถุสะท้อนสัญญาณสูง) ผลคือ MISSED นี่คือข้อจำกัดพื้นฐานของกรอบวิธีการนี้ กรณี (e) โดรนอยู่ระหว่างสองกลุ่ม ผลคือ DETECTED จุดสังเกต: กรณี (b) และ (d) ที่ตรวจจับไม่ได้แสดงให้เห็นว่า กรอบวิธีการที่หนึ่งมีข้อจำกัดเมื่อโดรนบินในบริเวณที่มีสัญญาณสะท้อนจากสภาพแวดล้อมหนาแน่น ซึ่งเป็นเหตุผลหลักในการพัฒนากรอบวิธีการที่สอง (HDBSCAN + LSTM) ต่อไป

3.4 การพัฒนาอัลกอริทึมตรวจจับและจำแนกโดรนด้วยอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) และโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM)



ภาพที่ 3-23 กรอบวิธีการสองขั้นตอนเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) + โครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) สำหรับตรวจจับและจำแนกโดรน

แม้กรอบวิธีการที่หนึ่งสามารถตรวจจับโดรนได้จากการเปรียบเทียบตำแหน่งกับขอบเขตสภาพแวดล้อม แต่ยังมีข้อจำกัดด้าน False Alarm เนื่องจากจุดรบกวนสุ่มที่ปรากฏนอกขอบเขตก็จะถูกระบุว่าเป็นโดรนด้วย กรอบวิธีการที่สองจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยยังคงแนวคิดการสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อม แต่เปลี่ยนมาใช้อัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) ซึ่งรองรับความหนาแน่นที่แปรผันได้ดีกว่า และเพิ่มโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) เพื่อวิเคราะห์รูปแบบวิถีการบินตามลำดับเวลา โดรนจริงจะแสดงวิถีที่ต่อเนื่องและมีรูปแบบชัดเจน ในขณะที่จุดรบกวนจะปรากฏแบบสุ่มไม่มีรูปแบบต่อเนื่อง กรอบวิธีการนี้จึงเป็นสถาปัตยกรรมสองขั้นตอน (Two-Stage Framework) ดังแสดงในภาพที่ 3-23

การเลือกใช้อัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) แทนดีบีสแกน (DBSCAN) ในกรอบวิธีการที่สองมีเหตุผลทางเทคนิค ที่สำคัญสองประการ ประการแรกคือความสามารถในการจัดกลุ่มข้อมูลที่มีความหนาแน่นต่างกัน (Varying Density) ซึ่งพบบ่อยในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ตามสมการ (2-17) เนื่องจากจำนวนจุดสะท้อนสภาพแวดล้อมจะลดลงเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นตามกฎกำลังสองผกผัน อัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) แก้ปัญหานี้ด้วยการแปลงระยะทางเป็น

Mutual Reachability Distance ก่อนสร้าง Minimum Spanning Tree ของข้อมูล จากนั้นตัดกิ่งที่มีน้ำหนักมากที่สุดออกทีละกิ่ง เพื่อสร้าง Cluster Hierarchy และเลือก Cluster ที่เสถียรที่สุด ประการที่สองคือพารามิเตอร์น้อยกว่า โดยต้องการเพียง min cluster size และ min samples เทียบกับ eps และ $MinPts$ ของดีบีสแกน (DBSCAN) ซึ่งทำให้ปรับจูนง่ายกว่าและมีความทนทาน (Robustness) ต่อการเลือกค่าพารามิเตอร์สูงกว่า

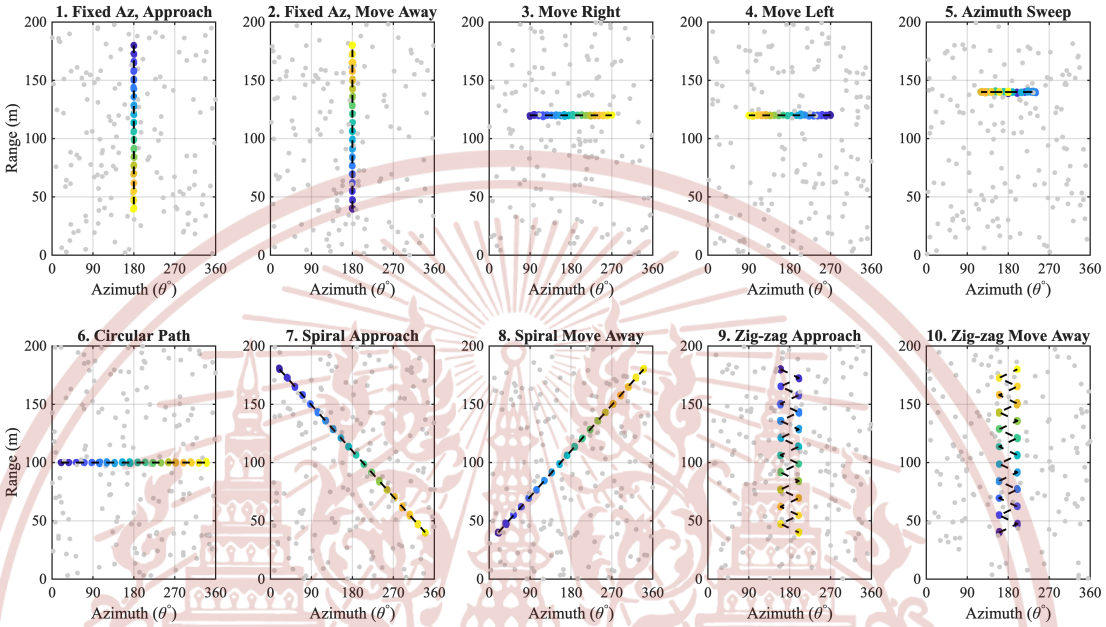
3.4.1 กรอบวิธีการสองขั้นตอนสำหรับตรวจจับและจำแนกโดรน

ขั้นตอนแรก (Stage 1: Creating Environmental Boundary) มีหน้าที่เดียวกับกรอบวิธีการที่หนึ่ง คือสแกนพื้นที่เฝ้าระวังในสภาวะที่ไม่มีโดรนเพื่อสร้างแบบจำลองสภาพแวดล้อม ข้อมูลแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ตามสมการ (2-17) จะถูกสะสมหลายรอบการสแกน จากนั้นผ่าน CA-CFAR ตามสมการ (2-16) เพื่อคัดกรองจุดสะท้อนที่มีนัยสำคัญ อัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) จะจัดกลุ่มจุดสะท้อนของสภาพแวดล้อมเหล่านั้น โดยใช้พารามิเตอร์ min cluster size = 3 และ min samples = 2 ซึ่งต่างจากดีบีสแกน (DBSCAN) ที่ต้องกำหนด eps และ $MinPts$ โดยตรง สุดท้ายอัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) สร้างขอบเขตล้อมรอบแต่ละกลุ่มและขยายด้วยตัวประกอบ β ได้แผนที่สภาพแวดล้อมที่พร้อมสำหรับขั้นตอนที่สอง

ขั้นตอนที่สอง (Stage 2: UAV Detection and Classification) รวมการตรวจจับและการจำแนกไว้ด้วยกัน ในแต่ละรอบการสแกนใหม่ จุดสะท้อนใดที่อยู่นอก β-expanded Convex Hull ของสภาพแวดล้อม จะถูกระบุว่าเป็น Drone Candidate ระบบจะติดตาม Candidate เหล่านั้นข้าม T รอบการสแกน บันทึกลำดับตำแหน่ง Centroid (x_t, y_t) ตลอดช่วงเวลาดังกล่าว จากนั้นลำดับนี้จะถูกส่งเข้าโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) เพื่อตัดสินว่าเป็นโดรนจริงหรือจุดรบกวนสุ่ม โดยอาศัยกลไก Gating ได้แก่ Forget Gate ตามสมการ (2-20) Input Gate ตามสมการ (2-21) และ (2-22) Cell State ตามสมการ (2-23) และ Output Gate ตามสมการ (2-24) และ (2-25) ซึ่งช่วยให้โครงข่ายฯ เรียนรู้ Temporal Pattern ระยะยาวของวิถีการบินได้ โดรนจริงจะมีวิถีที่สอดคล้องกับ 1 ใน 10 ประเภทที่ฝึกสอนไว้ ในขณะที่จุดรบกวนจะแสดงการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ซึ่งโครงข่ายฯ จะจำแนกออกได้

ลักษณะสำคัญ (Feature) ที่ป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) ไม่ใช่เพียงพิกัด (x_t, y_t) เท่านั้น แต่ยังรวมถึง Velocity Vector $(\Delta x/\Delta t, \Delta y/\Delta t)$ และ Acceleration $(\Delta^2 x/\Delta t^2, \Delta^2 y/\Delta t^2)$ ที่คำนวณจากลำดับ Centroid รวมเป็น Feature Vector ขนาด 6 มิติต่อ Time Step การเพิ่ม Kinematic Features เหล่านี้ทำให้โครงข่ายฯ สามารถแยกแยะวิถีประเภทต่าง ๆ ได้ชัดเจนขึ้น เนื่องจากวิถีแต่ละประเภทมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเร็วและทิศทางที่แตกต่างกัน

ตัวอย่างเช่น วิถีแบบ Spiral Approach จะมีทั้ง velocity และ acceleration ที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับการหมุน ในขณะที่วิถีแบบ Circular Path จะมี acceleration คงที่ชี้เข้าหาจุดศูนย์กลาง



ภาพที่ 3-24 วิถีการบินโดรน 10 ประเภทที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM)

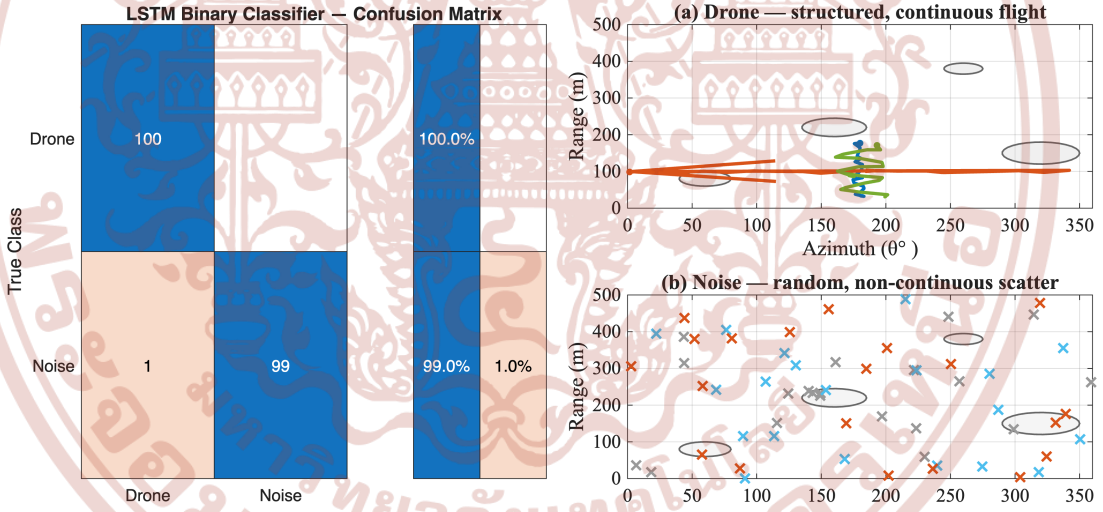
เพื่อครอบคลุมพฤติกรรมการบินของโดรนในสถานการณ์ที่หลากหลาย จึงกำหนดวิถีการบิน 10 ประเภท สำหรับการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) ดังแสดงในภาพที่ 3-24 แบ่งออกเป็นกลุ่มวิถีเชิงเส้น (Linear) ได้แก่ (1) Fixed Azimuth, Approach — บินเข้าหาเรดาร์ในแนวตรง (2) Fixed Azimuth, Move Away — บินออกจากเรดาร์ในแนวตรง (3) Move Right และ (4) Move Left — บินตัดขวางในแนวราบ (5) Azimuth Sweep — บินกวาดมุมแอซิมัท กลุ่มวิถีเชิงโค้ง (Curvilinear) ได้แก่ (6) Circular Path — บินวนรอบในวงกลม (7) Spiral Approach และ (8) Spiral Move Away — บินเป็นเกลียวเข้าหาและออกจากเรดาร์ และกลุ่มวิถีซิกแซก (Zigzag) ได้แก่ (9) Zig-zag Approach และ (10) Zig-zag Move Away — บินเป็นซิกแซกขณะเข้าหาและถอยออก ความหลากหลายของวิถีทั้ง 10 ประเภทนี้ช่วยให้โมเดลเรียนรู้ลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งในด้านรูปแบบระยะ ทิศทาง ความเร็ว และความเร่ง

สถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) ที่ใช้ประกอบด้วย 2 ชั้น จำนวน 128 หน่วยต่อชั้น (128 units/layer) รับ Sequence ความยาว T รอบการสแกน โดยแต่ละ Time Step มี Feature Vector ขนาด 6 มิติ (x, y, $\Delta x/\Delta t$, $\Delta y/\Delta t$, $\Delta^2 x/\Delta t^2$, $\Delta^2 y/\Delta t^2$) ฝึกสอนบนชุดข้อมูลจากสถานที่ที่ 1 (มจพ.) ซึ่งประกอบด้วยวิถีการบินจริงทั้ง 10 ประเภท เพื่อประเมิน

Generalization ของโมเดล ดำเนินการทดสอบแบบ Cross-Site บนชุดข้อมูลจากสถานที่ที่ 2 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่โมเดล ไม่เคยเห็นระหว่างการฝึกสอน การทดสอบ Cross-Site มีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากสภาพแวดล้อม Clutter ในสถานที่จริงแตกต่างจากสถานที่ฝึกสอนอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบจะแสดงและวิเคราะห์โดยละเอียดในบทที่ 4

3.4.2 การจำลองเพื่อทดสอบกรอบวิธีการสองขั้นตอนสำหรับตรวจจับและจำแนกโดรน

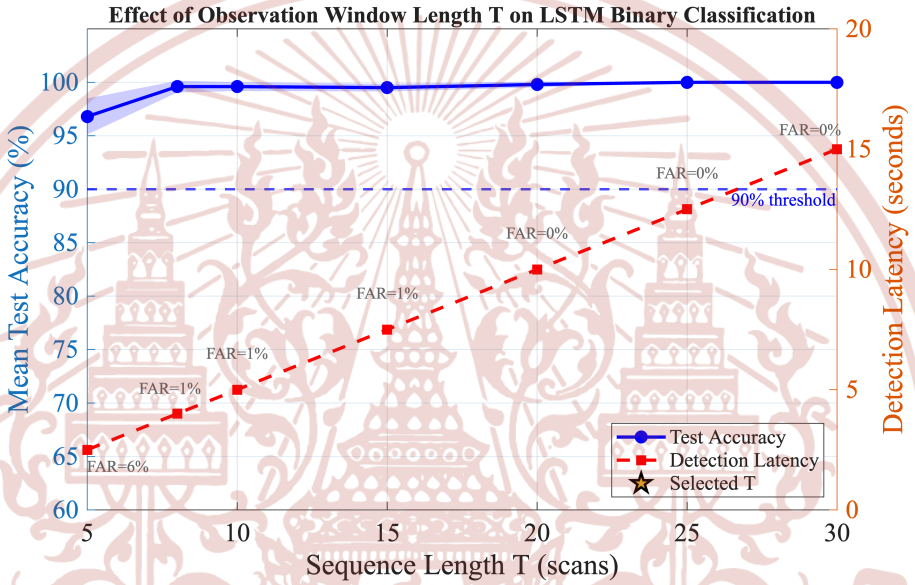
เพื่อประเมินประสิทธิภาพของกรอบวิธีการที่สองในเชิงปริมาณ ได้จำลองชุดข้อมูลทดสอบประกอบด้วยวิถีโดรน 500 ตัวอย่างจากรูปแบบการบิน 10 ประเภท และข้อมูลสัญญาณรบกวน 500 ตัวอย่าง โดยแบ่งชุดข้อมูลในอัตราส่วน 80:20 สำหรับการฝึกสอนและการทดสอบตามลำดับ เวกเตอร์คุณลักษณะประกอบด้วย 6 มิติต่อหนึ่งสแกน ได้แก่ มุมแอซิมัท ระยะทาง อัตราการเปลี่ยนแปลงอันดับหนึ่ง และอันดับสองของทั้งสองพิกัด การทดสอบทั้งหมดใช้ค่า PRI = 0.5 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับพารามิเตอร์ระบบเรดาร์ X-band ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้



ภาพที่ 3-25 ผลการจำแนกสัญญาณโดรนและสัญญาณรบกวนของโครงข่าย LSTM แสดงในรูปแบบเมทริกซ์ความสับสนและแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ

จากการฝึกสอนโครงข่าย LSTM ด้วยชุดข้อมูลที่กล่าวมา ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพในชุดทดสอบโดยรายงานผ่านเมทริกซ์ความสับสน (Confusion Matrix) และแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะเพื่อให้เห็นทั้งตัวเลขและลักษณะเชิงพื้นที่ของข้อมูลแต่ละคลาสควบคู่กัน ภาพที่ 3-25 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่าย LSTM โดยใช้หน้าต่างการสังเกตการณ์ T = 20 สแกน จากเมทริกซ์ความสับสนพบว่าโครงข่ายสามารถจำแนกโดรนได้ถูกต้อง 100 จาก 100 ตัวอย่าง และจำแนกสัญญาณรบกวนได้ถูกต้อง 99 จาก 100 ตัวอย่าง คิดเป็นความแม่นยำโดยรวม 99.5% อัตราการตรวจจับจริง (TDR) เท่ากับ 100% และอัตราการแจ้งเตือนเท็จ (FAR) เพียง 1% สำหรับ

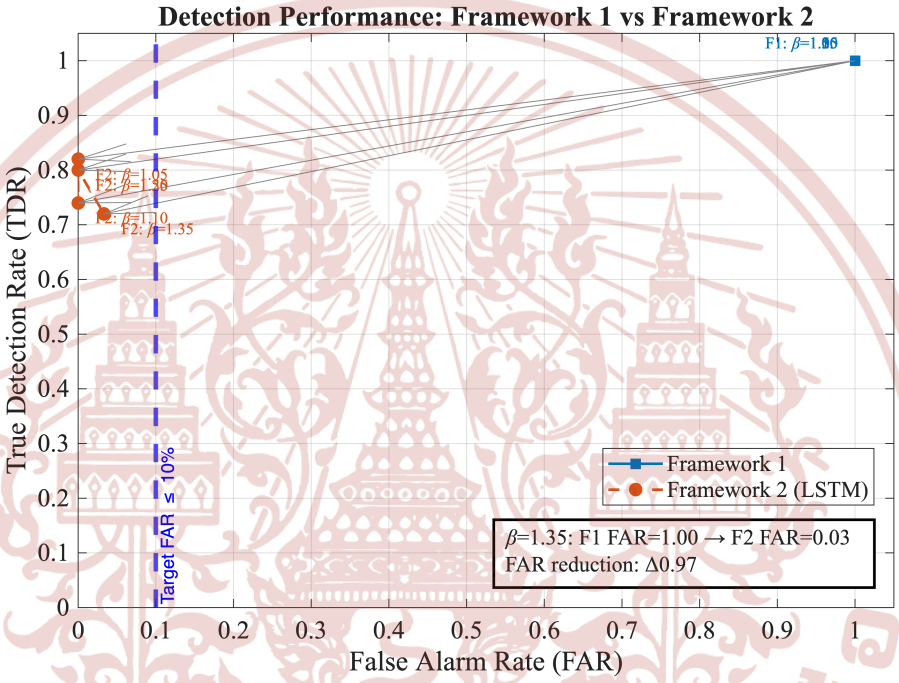
แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ ส่วน (a) แสดงตัวอย่างวิถีโดรนสามรูปแบบที่โครงข่ายจำแนกได้ถูกต้อง ได้แก่ วิถีเข้าหาตรง วิถีวนรอบ และวิถีซิกแซกเข้าหา ซึ่งมีลักษณะร่วมกันคือความต่อเนื่องและทิศทางที่ชัดเจน ส่วน (b) แสดงจุดสะท้อนสัญญาณรบกวนซึ่งกระจายแบบสุ่มโดยไม่มีความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งระหว่างสแกน ความแตกต่างเชิงโครงสร้างระหว่างทั้งสองคลาสดังกล่าวเป็นพื้นฐานที่โครงข่าย LSTM ใช้ในการเรียนรู้การแยกแยะผ่านกลไกเกต (2-20) ถึง (2-25)



ภาพที่ 3-26 ผลการวิเคราะห์ความไวต่อขนาดหน้าต่างการสังเกตการณ์ T สำหรับความแม่นยำในการจำแนกประเภทและความหน่วงในการตรวจจับ

เนื่องจากขนาดหน้าต่างการสังเกตการณ์ T มีผลโดยตรงต่อทั้งความแม่นยำในการจำแนกและความหน่วงในการตรวจจับ จึงได้ศึกษาความไวของตัวชี้วัดทั้งสองต่อค่า T ที่แตกต่างกันเพื่อหาจุดสมดุลที่เหมาะสม ภาพที่ 3-26 แสดงผลการวิเคราะห์ความไวต่อขนาดหน้าต่างการสังเกตการณ์ T โดยทดสอบในช่วง $T \in \{5, 8, 10, 15, 20, 25, 30\}$ สแกน รายงานค่าเฉลี่ยจาก 5 การทดลองอิสระพร้อมแถบความไม่แน่นอน ±1 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นแนวโน้มที่สอดคล้องกับหลักการทำงานของโครงข่าย LSTM กล่าวคือ เมื่อ T เพิ่มขึ้น ความแม่นยำในการจำแนกประเภทเพิ่มขึ้น จาก 96.7% ที่ T = 5 สแกน ไปจนถึง 99.8% ที่ T = 20 สแกน และ 100.0% ที่ T = 30 สแกน ขณะที่อัตราการแจ้งเตือนเท็จลดลงจาก 6% ที่ T = 5 เหลือ 1% ที่ T = 8–10 และลดลงเป็น 0% เมื่อ T ≥ 15 สแกน การปรับปรุงดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าโครงข่าย LSTM สามารถสกัดรูปแบบเชิงลำดับเวลา (Temporal Pattern) ในเวกเตอร์คุณลักษณะ 6 มิติได้ดีขึ้นเมื่อได้รับข้อมูลในหน้าต่างที่ยาวขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่ม T ส่งผลให้ความหน่วงในการตรวจจับเพิ่มขึ้นเชิง

เส้นตรงตามความสัมพันธ์ Latency = T × PRI โดยที่ T = 30 สแกน ความหน่วงอยู่ที่ 15 วินาที ซึ่งอาจไม่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง จากการวิเคราะห์ Trade-off ดังกล่าว จึงเลือก T = 20 สแกน เป็นจุดปฏิบัติการ (★) ซึ่งให้ความแม่นยำ 99.8% อัตราการแจ้งเตือนเท็จ 0% และความหน่วงในการตรวจจับ 10 วินาที อันเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับระบบเฝ้าระวังภาคพื้น



ภาพที่ 3-27 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกรอบวิธีการที่หนึ่งและกรอบวิธีการที่สอง สำหรับค่าตัวประกอบการขยายขอบเขต β ที่แตกต่างกัน

เพื่อประเมินว่าการเพิ่มขั้นตอน LSTM เข้าในกรอบวิธีการที่สองนั้นให้ประโยชน์ที่วัดได้จริงเพียงใดเมื่อเทียบกับการใช้ขอบเขต Convex Hull เพียงอย่างเดียวของกรอบวิธีการที่หนึ่ง จึงได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองกรอบวิธีการโดยตรงผ่านเส้นโค้ง ROC ที่แปรค่าตัวประกอบ β ภาพที่ 3-27 แสดงการเปรียบเทียบในรูปแบบเส้นโค้ง ROC โดยแกน x แทนอัตราการแจ้งเตือนเท็จ (FAR) และแกน y แทนอัตราการตรวจจับจริง (TDR) สำหรับค่า $\beta \in \{1.05, 1.10, 1.20, 1.35, 1.55\}$ สำหรับกรอบวิธีการที่หนึ่ง การเพิ่มค่า β ทำให้ขอบเขต Convex Hull ขยายออกและครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น ส่งผลให้จำนวนจุดที่ตกอยู่นอกขอบเขตลดลงทั้งสำหรับโดรนและสัญญาณรบกวน ดังเห็นได้จากเส้นโค้ง F1 ที่เลื่อนจาก FAR และ TDR สูงที่ β = 1.05 มาสู่ FAR และ TDR ต่ำกว่าที่ β = 1.55 ในทางตรงข้าม กรอบวิธีการที่สองใช้โครงข่าย LSTM กรองผลลัพธ์ในขั้นตอนที่สอง ทำให้จุดบนเส้นโค้ง F2 เลื่อนเข้าใกล้แกน y อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่ค่า β = 1.35 เป็นตัวอย่างที่ชัดเจน ซึ่ง FAR ถูกลดลงเหลือ 0.03 จุดของกรอบวิธีการที่สองทุกค่า β อยู่ภายในเกณฑ์ Target FAR ≤ 10% ในขณะที่

กรอบวิธีการที่หนึ่งต้องอาศัย β ที่สูงมากจึงจะบรรลุเกณฑ์เดียวกัน แต่จะแลกมาด้วย TDR ที่ลดต่ำลงตามไปด้วย ผลการเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นว่าการผนวก LSTM เป็นขั้นตอนที่สองในกรอบวิธีการที่สองมีบทบาทสำคัญในการกรองสัญญาณรบกวนออก ทำให้ระบบสามารถบรรลุ FAR ในระดับที่ยอมรับได้โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาการขยายค่า β มากเกินไปซึ่งจะทำให้ TDR ลดลง

3.5 สรุป

บทที่ 3 ได้นำเสนอระเบียบวิธีวิจัยสำหรับการพัฒนาระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ย่านความถี่ X-band เพื่อตรวจจับและจำแนกโดรนอย่างครอบคลุมในสองส่วนหลัก ส่วนที่หนึ่งครอบคลุมการพัฒนาฮาร์ดแวร์ และส่วนที่สองครอบคลุมการพัฒนาซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณ ในด้านการพัฒนาฮาร์ดแวร์ ข้อกำหนดสมรรถนะได้รับการกำหนดอย่างเป็นระบบโดยใช้สมการเรดาร์เป็นเครื่องมือหลัก ระบบย่อยสายอากาศใช้ Asymmetric Reflector Antenna ที่ออกแบบและจำลองด้วยซอฟต์แวร์ EM ก่อนผลิตและวัดจริงใน Anechoic Chamber เพื่อยืนยันสมรรถนะ ระบบย่อยภาคส่งใช้ PA เทคโนโลยี GaN HEMT MMIC จำนวน 2 ตัวเพื่อให้ได้กำลังส่งรวม 260 W ส่วนชุดหมุนค้นหาเป้าหมายแบบ 2 แกนให้ความยืดหยุ่นในการสแกนพื้นที่ 360° และการติดตามเป้าหมาย

ในด้านการพัฒนาซอฟต์แวร์ ได้พัฒนากรอบวิธีการสองกรอบที่ต่อเนื่องกัน กรอบวิธีการที่หนึ่งใช้อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) ร่วมกับคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) โดยสร้างแบบจำลองขอบเขตสภาพแวดล้อมจากการสแกนในสภาวะปกติ จากนั้นระบุจุดที่ตกอยู่นอก β -expanded Hull ว่าเป็นโดรน กรอบวิธีการนี้ใช้พารามิเตอร์ eps = 3, $MinPts$ = 3 สำหรับ DBSCAN และตัวประกอบ β สำหรับการขยายขอบเขต ซึ่งเป็นกลไกหลักในการปรับสมดุลระหว่างอัตราการตรวจจับจริงและอัตราการแจ้งเตือนเท็จ กรอบวิธีการที่สองพัฒนาต่อยอดโดยแทนที่ DBSCAN ด้วยอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) ในขั้นตอนที่หนึ่งเพื่อสร้างแบบจำลองขอบเขตสภาพแวดล้อมที่รองรับความหนาแน่นของข้อมูลที่ไม่สม่ำเสมอ และเพิ่มขั้นตอนที่สองซึ่งผนวกการตรวจจับเข้ากับการจำแนกประเภทด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิดความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) แบบเรียงซ้อน 2 ชั้น (128 และ 64 หน่วย) โดยโครงข่ายรับเวกเตอร์คุณลักษณะ 6 มิติต่อสแกน ประกอบด้วยมุมแอซิมัท ระยะทาง และอัตราการเปลี่ยนแปลงอันดับหนึ่งและอันดับสองของทั้งสองพิกัด และตัดสินจากหน้าต่างการสังเกตการณ์ T = 20 สแกน ว่าลำดับเวลาดังกล่าวเป็นวิถีโดรนหรือสัญญาณรบกวน

ผลการจำลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่ากรอบวิธีการที่หนึ่งสามารถตรวจจับโดรนได้ด้วยความแม่นยำสูง แต่ยังมีข้อจำกัดด้านอัตราการแจ้งเตือนเท็จจากสัญญาณรบกวนที่ปรากฏนอกขอบเขต ในขณะที่กรอบวิธีการที่สองสามารถลด FAR ได้อย่างมีนัยสำคัญผ่านการกรองด้วย LSTM โดยบรรลุความแม่นยำในการจำแนก 99.5% อัตราการแจ้งเตือนเท็จ 1% และรักษา TDR ไว้ที่ 100% ที่ T =

20 สแกน การประเมินสมรรถนะเชิงปริมาณอย่างละเอียดด้วยข้อมูลการทดสอบจริงจากทั้งสองสถานที่จะนำเสนอและวิเคราะห์ในบทที่ 4

บทที่ 4
ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการทดสอบระบบตรวจจับโดรนด้วยเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (FMCW radar) ย่านความถี่ X-Band ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นตามกรอบวิธีการที่อธิบายในบทที่ 3 การทดสอบครอบคลุมสภาพแวดล้อมจริงที่มีความซับซ้อนและหลากหลาย ทั้งสภาพแวดล้อมเมืองที่มีอาคารและสิ่งกีดขวางจำนวนมาก รวมถึงพื้นที่เปิดโล่งที่มีโครงสร้างเหล็กขนาดใหญ่ เพื่อประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับอย่างครอบคลุม การทดลองทั้งหมดใช้เมตริกสามตัวหลักได้แก่ ความแม่นยำเชิงบวก (Precision) ซึ่งวัดสัดส่วนของการตรวจจับที่ถูกต้องจากการตรวจจับทั้งหมด อัตราการตรวจพบ (Recall) ซึ่งวัดสัดส่วนของโดรนที่ตรวจพบได้จากโดรนทั้งหมด และ F1-score ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่าง Precision และ Recall เพื่อสะท้อนประสิทธิภาพโดยรวม

ผลการทดสอบแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักตามกรอบวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ส่วนแรกแสดงในหัวข้อที่ 4.2 นำเสนอผลการตรวจจับโดรนด้วยวิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อมโดยใช้อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) และคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) ทดสอบในสี่กรณีที่มีมุมเงยแตกต่างกัน ส่วนที่สองแสดงในหัวข้อที่ 4.3 นำเสนอผลการตรวจจับและจำแนกวิถีการบินโดรนด้วยกรอบวิธีการสองขั้นตอนที่ผสานอัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) และโครงข่ายประสาทเทียมแบบความจำสั้น-ยาว (LSTM)

ระบบทั้งสองได้รับการทดสอบกับเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ ที่ทำงานในย่านความถี่ 9.95–10.026 GHz มีแบนด์วิดท์ 76 MHz ให้ความละเอียดระยะ ΔR = 1.97 เมตร และถูกติดตั้งบนแพลตฟอร์มหมุนรอบ 360° ในแนวแกนมุมแอซิมัทที่ความเร็วหมุน 3 รอบต่อนาที การออกแบบนี้ทำให้ระบบสร้างแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ที่บันทึกข้อมูลสัญญาณสะท้อนจากทุกทิศทางในแต่ละรอบสแกน โดยไม่พึ่งพาข้อมูลดอปเปลอร์

หัวข้อ 4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเชิงเทคนิคและประสิทธิภาพ ในขณะที่หัวข้อ 4.5 สรุปผลการทดสอบโดยรวมพร้อมทั้งอภิปรายข้อจำกัดและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

4.2 ผลการตรวจจับโดรนด้วยวิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม

วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อมได้รับการทดสอบในพื้นที่เมืองจริงที่มีอาคารสามหลังล้อมรอบตำแหน่งติดตั้งเรดาร์ อาคารหลังแรกตั้งอยู่ในทิศทางมุมแอซิมัทประมาณ 45° ระยะห่างประมาณ 30 เมตร อาคารหลังที่สองอยู่ที่ประมาณ 150°ระยะห่างประมาณ 50–80 เมตร และอาคาร

หลังที่สามอยู่ที่ประมาณ 310° ระยะห่างประมาณ 60–100 เมตร สภาพแวดล้อมนี้ทำให้เกิดสัญญาณสะท้อนคลัตเตอร์ที่ซับซ้อนและแตกต่างกันตามมุมเงยที่ตั้งเรดาร์

โดรนที่ใช้ในการทดสอบเป็นโดรนการเกษตร ขนาด 1.2×1.2×0.8 m^3 บินในรูปแบบและทิศทางต่าง ๆ ในแต่ละกรณีทดสอบ การประเมินผลใช้ข้อมูล ค่าอ้างอิงจริง (Ground Truth) ที่ได้จากตำแหน่ง GPS ของโดรนซึ่งบันทึกพร้อมกับข้อมูลเรดาร์แบบซิงโครนัสโดยถือว่าการตรวจจับถูกต้องเมื่อตำแหน่งที่ตรวจจับได้อยู่ภายในรัศมีสองเท่าของความละเอียดระยะ (≈ 4 เมตร) จากตำแหน่ง GPS จริง

4.2.1 การตั้งค่าระบบและเงื่อนไขการทดสอบ

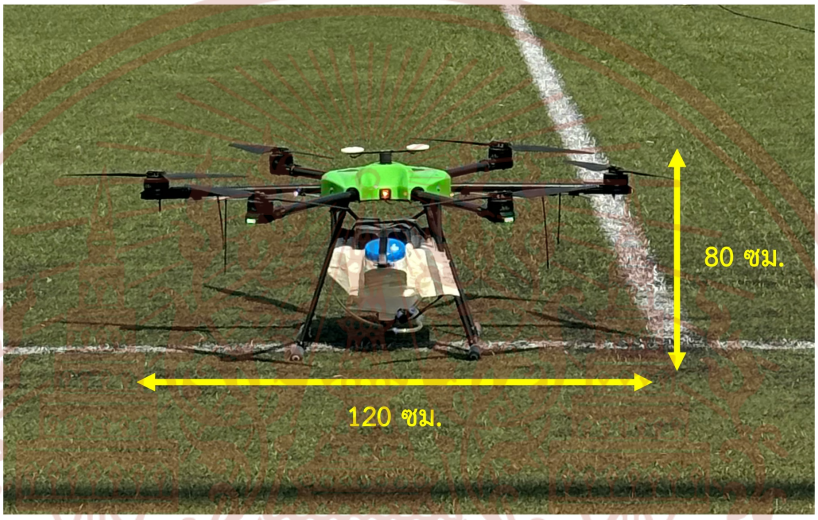
การทดสอบดำเนินการเพื่อยืนยันประสิทธิภาพของระบบเรดาร์ที่นำเสนอ ซึ่งออกแบบมาสำหรับการทำงานในสภาพแวดล้อมเมืองที่มีอาคารหลายหลังอยู่โดยรอบ โดยก่อนการติดตั้งระบบ ได้ดำเนินการขออนุญาตอย่างเป็นทางการจากสำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ซึ่งเป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบในการออกใบอนุญาตและกำกับดูแลการใช้คลื่นความถี่วิทยุและอุปกรณ์วิทยุคมนาคมในประเทศไทย สำหรับการนำระบบเรดาร์และย่านความถี่ที่ใช้งานไปติดตั้งภายในพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย



ภาพที่ 4-1 การติดตั้งเพื่อทดสอบการตรวจจับโดรนสำหรับวิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม

ระบบเรดาร์ถูกติดตั้งบนดาดฟ้าอาคารที่ความสูง 15.6 เมตรจากระดับพื้นดิน พื้นที่โดยรอบมีอาคารใกล้เคียงสามหลังที่มีความสูง 50.8, 47.1 และ 20.3 เมตร ตามลำดับ ซึ่งก่อให้เกิดการสะท้อน

หลายเส้นทาง (Multipath Reflection) และสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อม (Environmental Clutter) อันเป็นลักษณะเฉพาะของสภาพแวดล้อมเมือง อาคารทั้งสามหลังตั้งอยู่ที่มุมแอซิมัท 48°, 87° และ 329° ตามลำดับ เมื่อวัดจากทิศอ้างอิงของเรดาร์ นอกจากนี้ บริเวณโดยรอบยังมีวัตถุใกล้เคียงหลายชนิด เช่น ต้นไม้ ถังน้ำ และเสาไฟฟ้า ซึ่งเพิ่มความซับซ้อนของสภาพแวดล้อมในการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 4-1 โดยมุมแอซิมัทและมุมเงยเริ่มต้นของเรดาร์ถูกกำหนดไว้ที่ 0°

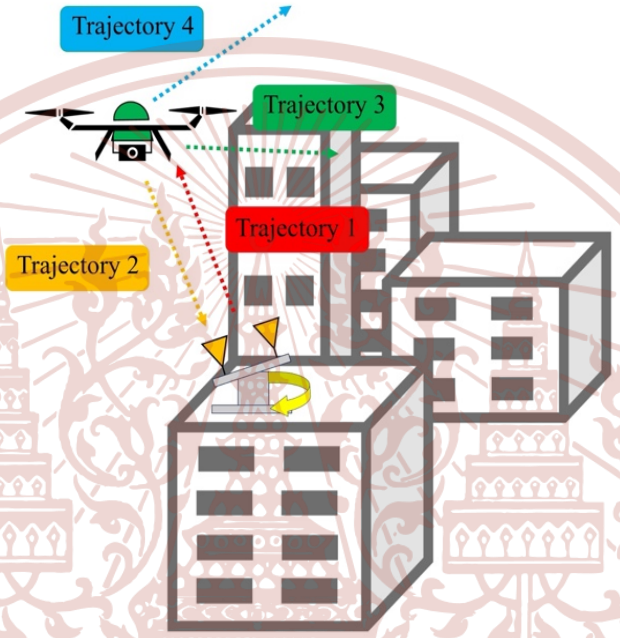


ภาพที่ 4-2 โดรนการเกษตรสำหรับใช้เป็นเป้าตรวจจับของเรดาร์

โดรนที่ใช้ในการทดสอบเป็นโดรนการเกษตร ขนาด 1.2×1.2×0.8 m^3 ดังแสดงตามภาพที่ 4-2 การทดสอบแบ่งออกเป็นสี่กรณีหลัก โดยแต่ละกรณีใช้มุมเงยในการสแกน (Scanning Elevation Angle) และวิถีการบินของโดรนที่แตกต่างกัน เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตรวจจับโดรนได้ในสภาพแวดล้อมเมืองที่หลากหลาย เนื่องจากการเปลี่ยนมุมเงยทำให้ได้ข้อมูล Clutter จากอาคารที่แตกต่างกัน วิถีการบินของโดรนในแต่ละกรณีแสดงไว้ในภาพที่ 4-3

- **ในกรณีที่หนึ่ง** มุมเงยของเรดาร์ถูกตั้งค่าที่ φ = 35° โดรนบินในทิศทางมุมแอซิมัท θ = 45° และเคลื่อนตัวออกห่างจากเรดาร์ ผู้ควบคุมโดรนพยายามรักษามุมการบินให้คงที่ตลอดการทดสอบ
- **ในกรณีที่สอง** มุมเงยปรับเป็น φ = 40° มุมแอซิมัทของโดรนถูกตั้งค่าที่ θ = 150° โดยโดรนบินเข้าหาเรดาร์ อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติผู้ควบคุมไม่สามารถควบคุมโดรนให้รักษาวิถีที่คงที่ได้อย่างแม่นยำ
- **ในกรณีที่สาม** มุมเงยของเรดาร์ถูกกำหนดที่ φ = 45° ผู้ควบคุมโดรนพยายามรักษาระยะห่างระหว่างโดรนและเรดาร์ให้คงที่ตลอดการทดสอบ ดังแสดงในวิถีการบินในภาพที่ 4-2

- **ในกรณีที่สี่** มุมเงยถูกตั้งค่าที่ φ = 50° เพื่อให้ได้ข้อมูลสภาพแวดล้อมที่หลากหลายจากอาคารโดยรอบ โดรนบินในทิศทางที่มีการปรับทั้งมุมแอซิมัทและระยะห่างตามที่แสดงในภาพที่ 4-2 เพื่อแสดงความสามารถของระบบในการตรวจจับโดรนภายใต้วิถีการบินที่ซับซ้อน



ภาพที่ 4-3 รูปแบบเส้นทางบินของโดรนที่ใช้ในการทดสอบสำหรับประเมินวิธีการประมาณขอบเขต

ในการทดสอบทุกกรณี วิถีการบินของโดรนถูกควบคุมด้วยมือโดยผู้ปฏิบัติงาน เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัยและกฎระเบียบสำหรับการบินในพื้นที่เมือง นอกจากนี้ สำหรับทุกกรณี ระบบเรดาร์ต้องดำเนินการสแกนพื้นที่เบื้องต้นโดยไม่มีโดรนในพื้นที่จำนวน 10 รอบ เพื่อสร้างขอบเขตของกลุ่มคลัสเตอร์ (Cluster) จากสภาพแวดล้อม ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

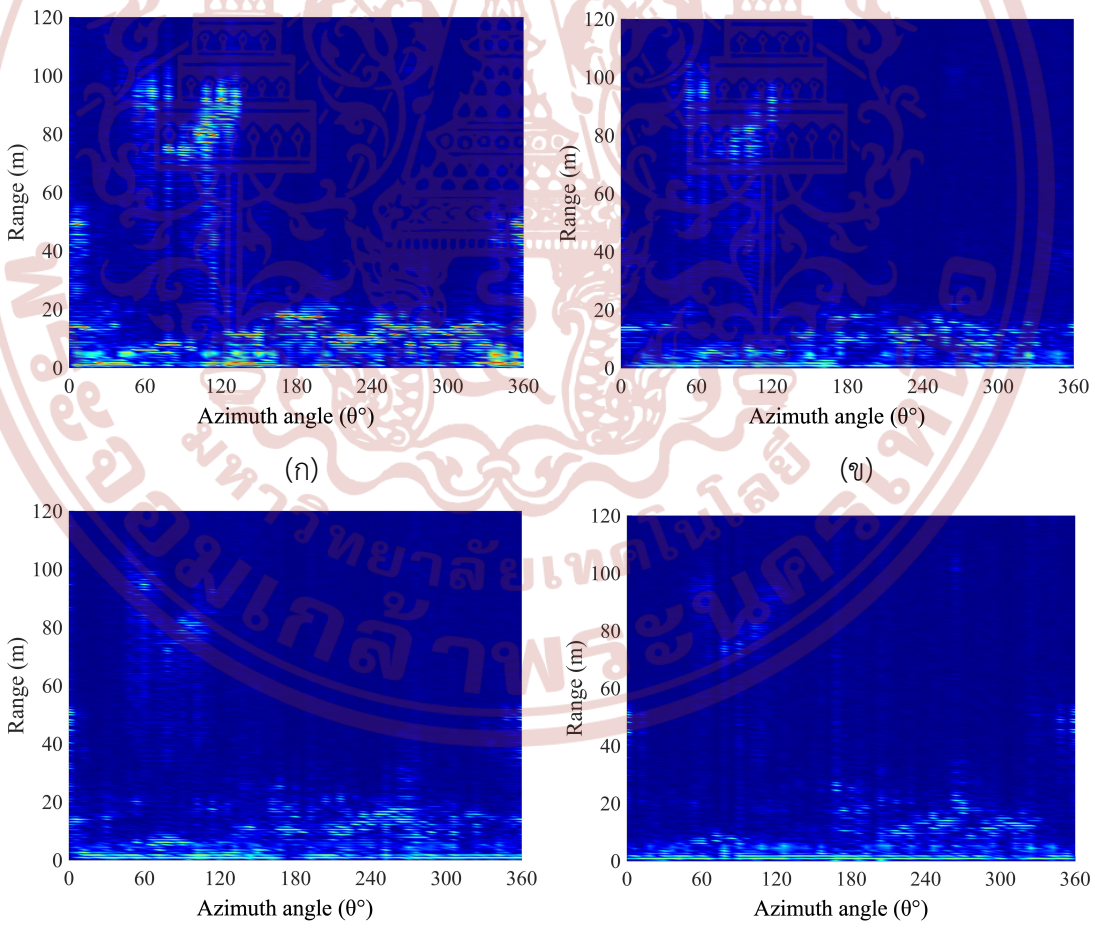
4.2.2 ผลการตรวจจับโดรนด้วยวิธีประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม

ในหัวข้อนี้ประสิทธิภาพของระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (FMCW radar) ที่นำเสนอ ซึ่งใช้อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) และคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) สำหรับการตรวจจับโดรนในสภาพแวดล้อมเมือง ได้รับการยืนยันผ่านผลการทดสอบ โดยก่อนดำเนินการตรวจจับโดรน ระบบเรดาร์ต้องสแกนพื้นที่ทดสอบจำนวน 10 รอบโดยไม่มีโดรนในพื้นที่ เพื่อสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อม (Environmental Boundary) ที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงและคอยตรวจจับสิ่งที่อยู่นอกเหนือจากขอบเขตเหล่านี้และระบุว่าเป็นโดรน

ระบบประมวลผลเริ่มต้นด้วยสัญญาณความถี่กลาง (IF signal) ที่ได้รับจากเรดาร์ถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นสัญญาณดิจิทัลในโดเมนเวลาถูกแปลงเป็นสัญญาณในโดเมนความถี่ ก่อน

คำนวณระยะห่างสำหรับทุกความถี่และมุมแอซิมัทตามสมการที่ (2-5) เพื่อให้เห็นถึงข้อมูลดิบของสัญญาณหลังจากการคำนวณระยะของเป้าหมายแล้วนั้น ผลที่ได้จากการทดสอบ 1 รอบจากทั้งหมด 10 รอบในสภาพแวดล้อมเมืองโดยไม่มีโดรน ถูกแสดงในรูปแบบแผนภาพสเปกโตรแกรมมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Spectrogram) ดังที่แสดงในภาพที่ 4-4 โดย ภาพที่ 4-4(ก), (ข), (ค) และ (ง) แสดงผลที่ได้จากการทดสอบในกรณีมุมเงย φ = 35°, φ = 40°, φ = 45° และ φ = 50° ตามลำดับ

ในแผนภาพสเปกโตรแกรมมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Spectrogram) ค่าพิกเซลมีความละเอียด 10 บิต โดยพิกเซลที่มีความสว่างสูงแสดงถึงสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอาคาร รวมถึงการรบกวนกันเองระหว่างสายอากาศ (Mutual Coupling) สังเกตได้ว่า สัญญาณสะท้อนเหล่านี้มีรูปแบบที่แตกต่างกันในแต่ละมุมเงย แม้การทดสอบทั้งหมดดำเนินการในสภาพแวดล้อมเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกจากเรดาร์กระทบกับ Clutter ในมุมที่แตกต่างกัน อันเป็นผลมาจากอาคารโดยรอบที่มีความสูงไม่เท่ากัน

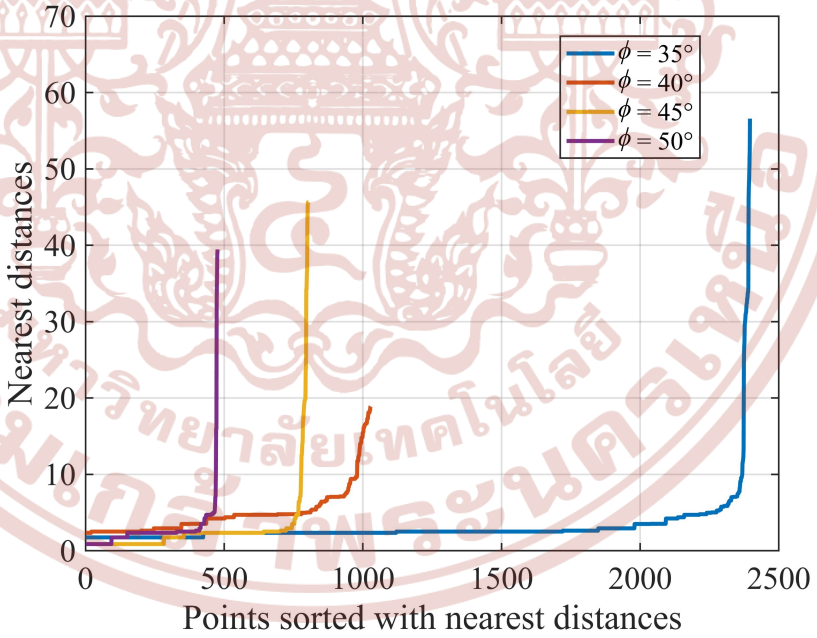


ภาพที่ 4-4 แผนภาพสเปกโตรแกรม (AR spectrogram) จากการสแกนสภาพแวดล้อมโดยไม่มีโดรน 1 รอบที่มุมเงย (ก) φ = 35° (ข) φ = 40° (ค) φ = 45° (ง) φ = 50°

4.2.3 ผลการสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อมและการเลือกพารามิเตอร์

ในหัวข้อนี้นำเสนอการสร้างขอบเขตของข้อมูลจุดกระเจิง (Scattering Point Data) ที่เกิดจากสภาพแวดล้อมโดยไม่มีโดรนในพื้นที่ ตามกระบวนการที่ได้อธิบายไว้ในแผนภาพการประมวลผลในบทที่ 3 ข้อมูลที่รวบรวมได้จากการทดสอบของระบบเรดาร์ที่นำเสนอถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนการประมวลผลเบื้องต้น (Pre-processing) โดยการกำหนดค่าขีดแบ่ง (Threshold) เพื่อให้ได้ข้อมูลจุดกระเจิง จากนั้นจุดกระเจิงเหล่านี้ถูกนำมาพล็อตในรูปแบบแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR map)

แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR map) ทั้งหมด 10 ชุด ที่ได้จากการสแกน 10 รอบในพื้นที่เมืองโดยไม่มีโดรน ถูกนำมาซ้อนทับกัน (Overlay) สำหรับแต่ละมุมเงยของเรดาร์ จากนั้นเลือกค่าพารามิเตอร์ k ของชุดข้อมูลแต่ละชุดที่ได้จากการสแกนในแต่ละมุมเงย ทั้งนี้ค่า k ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับจำนวนจุดในแนวระยะ (Range Points) ของชุดข้อมูลนั้น ๆ โดยค่า k ที่เลือกสะท้อนถึงจำนวนจุดที่สนใจ ในกระบวนการนี้ระยะทางระหว่างจุดที่พิจารณากับจุดเพื่อนบ้านโดยรอบถูกคำนวณและเรียงลำดับจากน้อยไปมาก



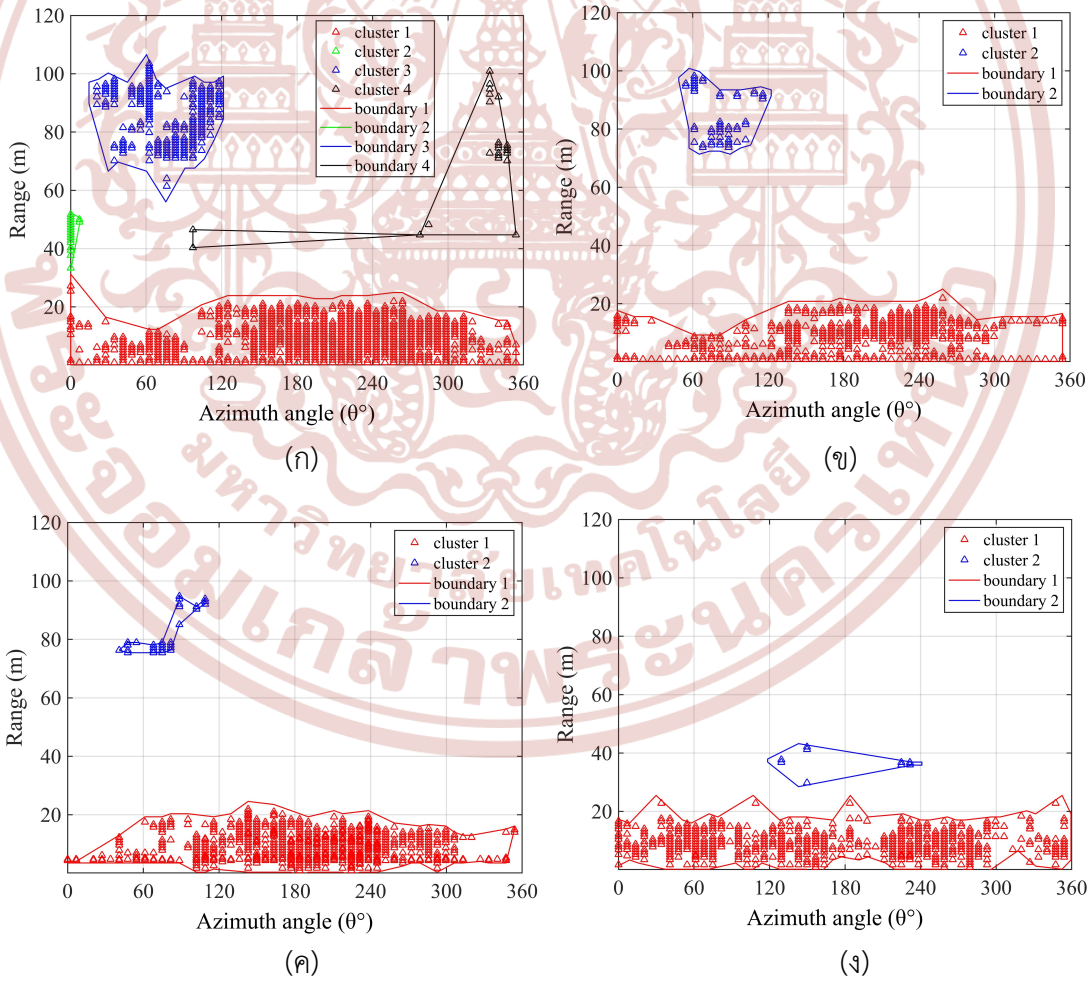
ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ k-distance ของแต่ละมุมเงย

ภาพที่ 4-5 แสดงกราฟ k-distance ของแต่ละมุมเงยในการสแกน จากกราฟพบว่าจำนวนจุดกระเจิง (Range Points) ที่มุมเงย φ = 35° มีค่ามากที่สุด และลดลงเมื่อมุมเงยเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริง จุดหักของกราฟ k-distance บ่งชี้ค่า *eps* ที่เหมาะสม [26] และนำไปใช้กำหนดค่า *MinPts* และ *eps* ในอัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) สำหรับชุดข้อมูลแต่ละชุด โดยสรุป

จำนวนกลุ่มคลัสเตอร์ที่ได้ในแต่ละกรณีไว้ในตารางที่ 4-1 ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกนำไปใช้ในขั้นตอนการจัดกลุ่มข้อมูลต่อไป

ตารางที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์ดีบีสแกนที่ใช้ในการสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อมสำหรับแต่ละมุมเงย

มุมเงย (φ)	จำนวนจุดกระเจิง	*eps*	*MinPts*	จำนวนคลัสเตอร์
35°	2396	10	15	4
40°	1028	7	10	2
45°	803	7	5	2
50°	476	5	5	2



ภาพที่ 4-6 ขอบเขตสภาพแวดล้อมบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR map) ที่ได้จากการสแกนของเรดาร์ที่มุมเงย (ก) φ = 35° (ข) φ = 40° (ค) φ = 45° (ง) φ = 50°

หลังจากดำเนินการจัดกลุ่มข้อมูลแล้ว จำเป็นต้องสร้างขอบเขตที่ครอบคลุมกลุ่มหลักของจุดกระเจิงที่เกิดจากสภาพแวดล้อม อัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดบริเวณการจัดกลุ่มที่ชัดเจน โดยขอบเขตที่ได้ครอบคลุมจุดที่อยู่ด้านนอกสุดของแต่ละคลัสเตอร์ (Cluster) ภาพที่ 4-6 แสดงขอบเขตสภาพแวดล้อมที่ได้จากระบบเรดาร์ที่นำเสนอที่มุมเงย φ = 35°, 40°, 45° และ 50° ตามลำดับ โดยสีสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันแทนขอบเขตสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

ดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้า ขอบเขต Cluster ถูกสร้างขึ้นจากข้อมูล 10 รอบการสแกน เพื่อคำนึงถึงการเลื่อนของข้อมูล (Data Shift) ที่อาจเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความเป็นไปได้ที่ข้อมูลจากการสแกนในรอบถัดไปอาจตกอยู่นอกขอบเขตที่กำหนดไว้เดิม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงขยายขอบเขตสภาพแวดล้อมด้วยตัวประกอบ β อย่างไรก็ตาม การขยายขอบเขตมีข้อเสียสำคัญดังที่เคยประเมินไว้ในบทที่ 3 คือ พื้นที่ในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR map) ที่สามารถใช้ตรวจจับโดรนได้จะลดลงตามไปด้วย โดยพื้นที่ตรวจจับโดรนแบบสมบูรณ์ (100%) มีค่าเท่ากับ 120 เมตร (ระยะสูงสุดของเรดาร์) คูณ 360° (มุมแอซิมัทต่อการสแกนหนึ่งรอบ) ค่าตัวประกอบ β ถูกปรับเปลี่ยนอย่างเป็นระบบตั้งแต่ β = 1.0 ถึง β = 1.2 ผลของการขยายขอบเขตสภาพแวดล้อมแสดงไว้ในตารางที่ 4-2 โดยพื้นที่ของขอบเขตสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้นเมื่อค่า β เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4-2 พื้นที่ขอบเขตสภาพแวดล้อมที่ได้จากการขยาย Convex Hull ด้วยตัวประกอบ β ที่แตกต่างกัน

มุมเงย (φ)	**เปอร์เซ็นพื้นที่ของคลัสเตอร์ในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ**			
	β = 1.0	**β = 1.05**	**β = 1.1**	**β = 1.2**
35°	26.50 %	33.49 %	41.38 %	59.90 %
40°	14.17 %	17.22 %	20.68 %	28.84 %
45°	13.41 %	16.35 %	19.65 %	27.33 %
50°	13.84 %	16.50 %	19.56 %	26.94 %

จากนั้นประเมินประสิทธิภาพของขอบเขตสภาพแวดล้อมที่สร้างขึ้นด้วยข้อมูลการสแกนรอบที่ 11 ถึง 15 ในสภาพแวดล้อมเมืองโดยไม่มีโดรน โดยใช้เมตริกตามสมการที่ (2-26-2-29) กระบวนการนี้มุ่งตรวจสอบความสอดคล้องและการจัดวางของข้อมูลคลัสเตอร์ในทุกรอบการสแกนที่อยู่ภายในขอบเขตที่สร้างขึ้น ผลการตรวจสอบที่มุมเงย φ = 35°, 40°, 45° และ 50° ร่วมกับค่า β = 1.0, 1.05, 1.1 และ 1.2 แสดงไว้ในตารางที่ 4-3 โดยมีนิยามของตัวชี้วัดดังนี้ TP หมายถึงกรณีที่ขอบเขตที่สร้างขึ้นระบุจุดคิวรีได้ถูกต้องว่าเป็นคลัสเตอร์ ซึ่งจุดเหล่านั้นเป็น Cluster จริง TN หมายถึงกรณีที่

ขอบเขตระบุจุดคิวรีได้ถูกต้องว่าเป็นโดรน ซึ่งจุดเหล่านั้นเป็นโดรนจริง FP หมายถึงกรณีที่ขอบเขตระบุจุดคิวรีผิดพลาดว่าเป็น Cluster ทั้งที่เกิดจากโดรน และ FN หมายถึงกรณีที่ขอบเขตระบุจุดคิวรีผิดพลาดว่าเป็นโดรน ทั้งที่เกิดจากคลัสเตอร์

ตารางที่ 4-3 ค่า Recall ของขอบเขตสภาพแวดล้อมที่ค่าตัวประกอบ β ต่าง ๆ

มุมเงย (φ)	β = 1.0	β = 1.05	β = 1.1	β = 1.2
35°	0.960	0.995	1.000	1.000
40°	0.985	1.000	1.000	1.000
45°	0.978	0.990	1.000	1.000
50°	0.967	1.000	1.000	1.000

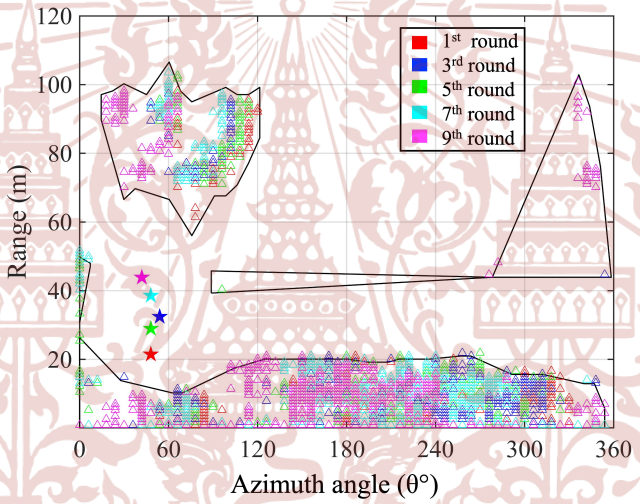
จากตารางที่ 4-3 พบว่าค่า β = 1.1 สามารถรองรับการเลื่อนของข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ค่า Recall เท่ากับ 1 ในทุกมุมเงยของการสแกน นอกจากนี้ขอบเขตสภาพแวดล้อม ที่ β = 1.1 ครอบคลุมพื้นที่ 41.38% สำหรับชุดข้อมูล φ = 35°, ครอบคลุม 20.68% สำหรับ φ = 40°, และครอบคลุม 19.56% สำหรับทั้ง φ = 45° และ φ = 50° ตามลำดับ สังเกตได้ว่าพื้นที่ของขอบเขตสภาพแวดล้อมลดลงเมื่อมุมเงยของการสแกนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า β = 1.1 เป็นค่ามาตรฐานในการทดสอบทั้งหมด

4.2.4 ผลการตรวจจับโดรนในสี่กรณีทดสอบ

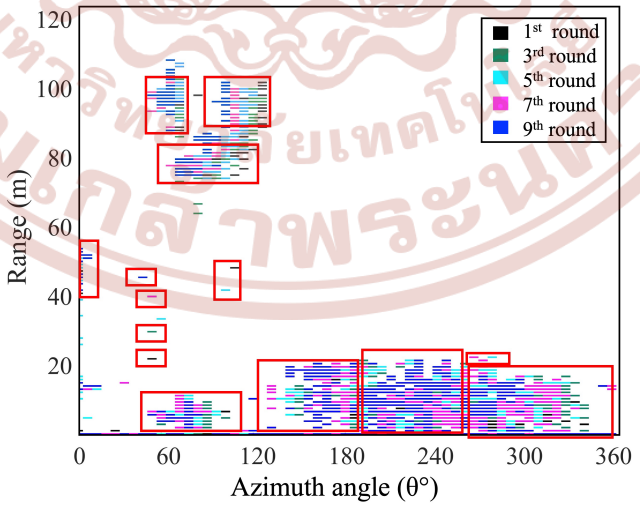
ในหัวข้อนี้นำเสนอการประเมินประสิทธิภาพของระบบเรดาร์ที่นำเสนอสำหรับการตรวจจับโดรน โดยใช้ผลการทดสอบจากทั้งสี่กรณีตามที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 เพื่อยืนยันข้อได้เปรียบของวิธีการที่นำเสนอ ผลการตรวจจับถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธี Optical Flow ซึ่งเป็นวิธีการที่อาศัยการประมวลผลภาพ [25] โดยในระหว่างที่เรดาร์หมุนสแกนแต่ละรอบ โดรนมีการเปลี่ยนตำแหน่งส่งผลให้เกิดการเลื่อนของพิกเซลบนแผนภาพสเปกโตรแกรม (Spectrogram) วิธี Optical Flow ตรวจจับโดรนโดยวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่าง เฟรมภาพปัจจุบันและ เฟรมภาพก่อนหน้า ผลการตรวจจับจากทั้ง 10 รอบถูกนำมาใช้ประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับ และเปรียบเทียบประสิทธิผลระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธี Optical Flow

ในกรณีที่หนึ่ง มุมเงยของเรดาร์ถูกตั้งค่าที่ φ = 35° โดรนบินตามทิศทางมุมแอซิมัท θ = 45° และเคลื่อนตัวออกห่างจากเรดาร์ ภาพที่ 4-7(ก) แสดงแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR map) สำหรับการตรวจจับโดรนด้วยระบบเรดาร์ที่นำเสนอภายใต้การกำหนดค่านี้ ในภาพสัญลักษณ์รูปดาวแทนตำแหน่งโดรนที่ระบบตรวจจับได้ โดยสีของสัญลักษณ์ที่แตกต่างกันสอดคล้องกับรอบการ

สแกนที่แตกต่างกัน สังเกตได้ว่ามีสัญลักษณ์รูปดาวห้าดวงที่ตกอยู่นอกขอบเขตสภาพแวดล้อมที่สร้างไว้ก่อนหน้า ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบสามารถตรวจจับโดรนได้อย่างสม่ำเสมอในทุกรอบการสแกน จากภาพพบว่าโดรนถูกตรวจจับที่บริเวณ $\theta \approx 45°$ ซึ่งใกล้เคียงกับทิศทางการเคลื่อนที่จริงของโดรน ความคลาดเคลื่อนบางส่วนเกิดขึ้นจากความไม่สามารถของผู้ควบคุมในการบังคับโดรนให้รักษาวิถีที่คงที่ได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ใกล้สิ้นสุดแต่ละรอบการสแกน พบจำนวนจุดเล็กน้อยที่เกิดจากการสะท้อนของสภาพแวดล้อมปรากฏอยู่นอกขอบเขตที่กำหนดไว้ แม้จุดเหล่านี้จะพบได้ในทุกมุมเงย แต่มีจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับจำนวนจุดตรวจจับทั้งหมด และมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนจุดตรวจจับโดรนเพิ่มขึ้น



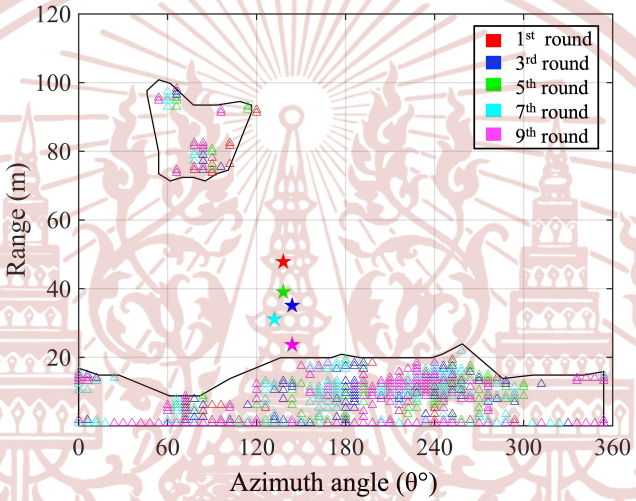
(ก)



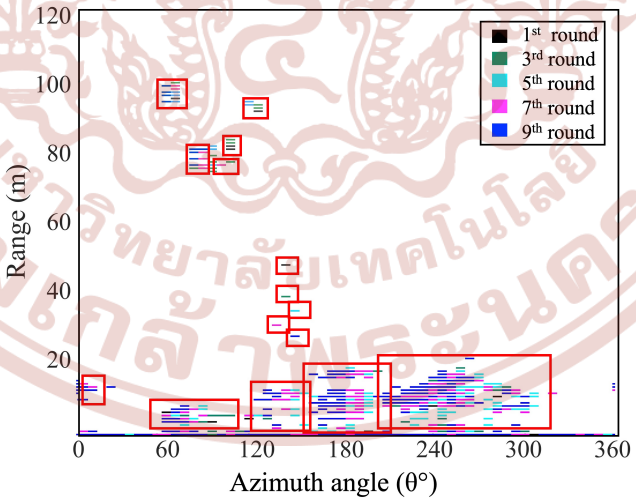
(ข)

ภาพที่ 4-7 ผลการตรวจจับโดรนกรณีที่หนึ่ง (φ = 35°) (ก) วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม (ข) วิธี Optical Flow เปรียบเทียบ

ภาพที่ 4-7(ข) แสดงผลการทดสอบการตรวจจับโดรนด้วยวิธี Optical Flow เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่นำเสนอ ในภาพกรอบการตรวจจับสี่เหลี่ยมสีแดงแสดงถึงตำแหน่งที่ระบบตรวจจับว่าเป็นโดรน แม้จะลดความละเอียดของแผนภาพสเปกโตรแกรม (AR spectrogram) เป็น 8 บิตเพื่อให้มองเห็นได้ชัดเจนขึ้น แต่ยังคงปรากฏกรอบการตรวจจับจำนวนมากในภาพ สิ่งที่น่าสังเกตคือวิธี Optical Flow ตรวจจับการเคลื่อนที่ของสภาพแวดล้อมที่เกิดจากการเลื่อนของข้อมูล ส่งผลให้วิธีนี้ไม่สามารถตรวจจับโดรนได้อย่างถูกต้อง



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-8 ผลการตรวจจับโดรนกรณีที่สอง (φ = 40°) (ก) วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม (ข) วิธี Optical Flow

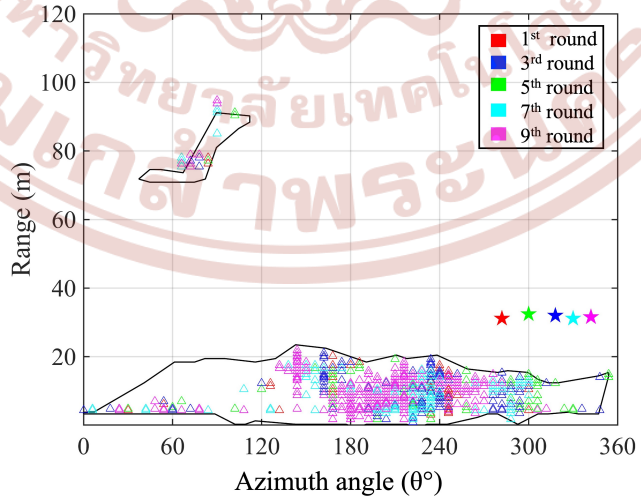
ในกรณีที่สอง มุมเงยของเรดาร์ถูกปรับเป็น φ = 40° โดรนอยู่ที่มุมแอซิมัท θ = 150° และบินเข้าหาเรดาร์ ภาพที่ 4-8(ก) แสดงแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR map) สำหรับการตรวจจับ

โดรนด้วยระบบเรดาร์ที่นำเสนอ จากภาพพบว่าโดรนที่บินเข้าหาเรดาร์ถูกตรวจจับได้ที่บริเวณ $\theta \approx 150°$ โดยสัญลักษณ์รูปดาวทั้งหมดที่แทนตำแหน่งโดรนตกอยู่นอกขอบเขตสภาพแวดล้อม

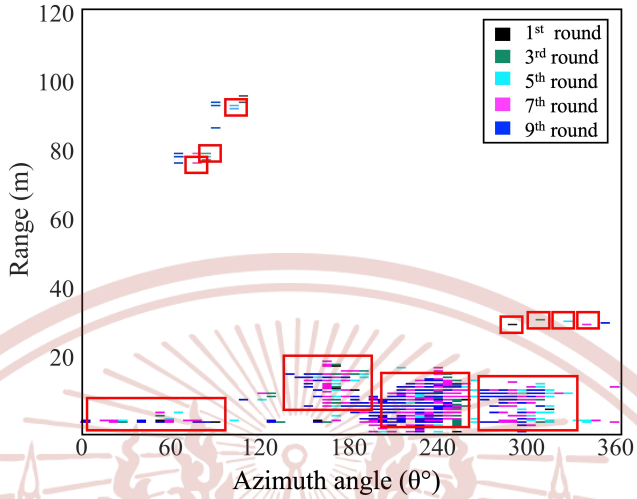
ภาพที่ 4-8(ข) แสดงแผนภาพสเปกโตรแกรม (AR spectrogram) จากการทดสอบตรวจจับโดรนด้วยวิธี Optical Flow แม้ว่าวิธี Optical Flow จะสามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ของโดรนได้บ้าง แต่ก็มีการตรวจจับผิดพลาดโดยระบุว่าคลัสเตอร์จากสภาพแวดล้อมว่าเป็นโดรนเช่นกัน ดังที่แสดงในภาพที่ 4-8(ข) กรอบการตรวจจับสีแดงจำนวนมากในภาพ ส่งผลให้วิธีนี้ไม่สามารถตรวจจับโดรนได้อย่างน่าเชื่อถือ

ในกรณีที่สาม มุมเงยของเรดาร์ถูกกำหนดที่ $\varphi = 45°$ ผู้ควบคุมโดรนพยายามควบคุมการเคลื่อนที่ของโดรนให้รักษาระยะห่างจากเรดาร์ให้คงที่ตลอดการทดสอบ ภาพที่ 4-9(ก) แสดงผลการทดสอบการตรวจจับโดรนด้วยระบบเรดาร์ที่นำเสนอ โดยพื้นที่ของขอบเขต Cluster ในกรณีนี้มีขนาดเล็กกว่าสองกรณีก่อนหน้า ระบบสามารถตรวจจับโดรนได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ ระยะ (r) = 31.14 เมตร ที่ $\theta = 282°$, ระยะ (r) = 32.46 เมตร ที่ $\theta = 300°$, ระยะ (r) = 32.02 เมตร ที่ $\theta = 318°$, ระยะ (r) = 31.14 เมตร ที่ $\theta = 330°$ และ ระยะ (r) = 31.58 เมตร ที่ $\theta = 342°$ ตามลำดับ ผลการตรวจจับเหล่านี้บ่งชี้ว่าโดรนรักษาระยะห่างจากเรดาร์ได้อย่างสม่ำเสมอตลอดการบิน สอดคล้องกับการออกแบบการทดสอบ

ภาพที่ 4-9(ข) แสดงแผนภาพสเปกโตรแกรม (AR spectrogram) จาก 10 รอบการทดสอบในกรณีที่สาม โดยใช้วิธี Optical Flow เพื่อเปรียบเทียบกับระบบที่นำเสนอ กรอบการตรวจจับสีแดงจำนวนมากแสดงถึงผลการตรวจจับโดรนของวิธีนี้ ซึ่งยังคงล้มเหลวในการตรวจจับโดรนได้อย่างน่าเชื่อถือ



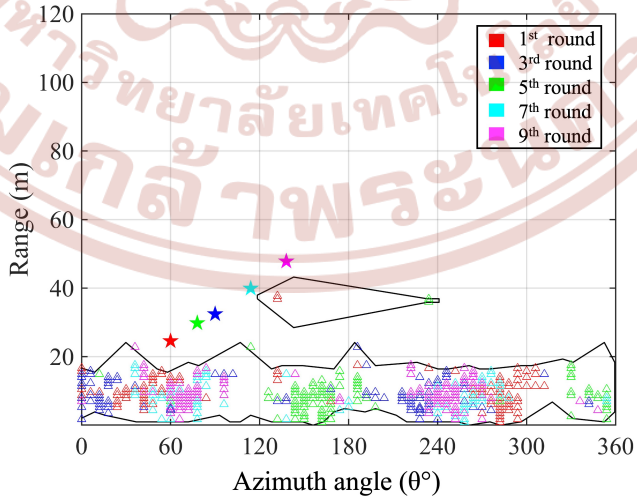
(ก)



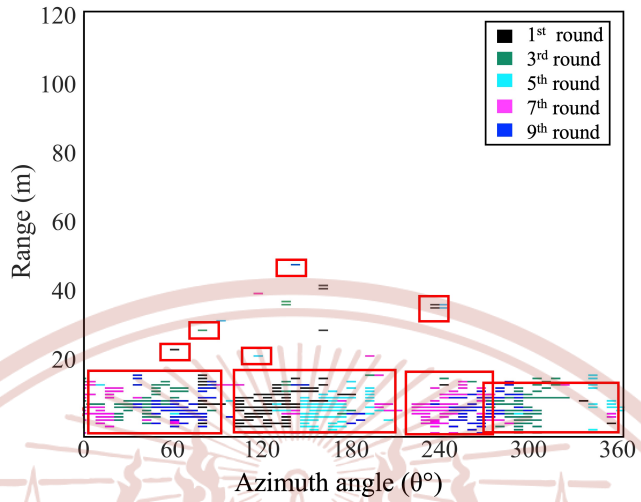
(ข)

ภาพที่ 4-9 ผลการตรวจจับโดรนกรณีที่สาม (φ = 45°) (ก) วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม (ข) วิธี Optical Flow

ในกรณีสุดท้าย มุมเงยของเรดาร์ถูกตั้งค่าที่ φ = 50° เพื่อรับสัญญาณจากสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ซึ่งส่วนใหญ่มาจากอาคาร ในการทดสอบนี้โดรนบินในทิศทางที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งระยะห่างและมุมแอซิมัทสัมพันธ์กับเรดาร์ ภาพที่ 4-10(ก) แสดงผลการทดสอบการตรวจจับโดรนด้วยระบบที่นำเสนอ จากภาพพบว่าระบบสามารถตรวจจับโดรนขณะบินได้ โดยสัญลักษณ์รูปดาวตกอยู่นอกขอบเขตสภาพแวดล้อม บ่งชี้ว่าระบบเรดาร์ที่นำเสนอสามารถตรวจจับและแยกแยะโดรนออกจากสภาพแวดล้อมโดยรอบได้อย่างแม่นยำ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-10 ผลการตรวจจับโดรนกรณีที่สี่ (φ = 50°) (ก) วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อม (ข) วิธี Optical Flow

ภาพที่ 4-10(ข) แสดงแผนภาพสเปกโตรแกรม (AR spectrogram) จากการทดสอบตรวจจับโดรนด้วยวิธี Optical Flow เพื่อเปรียบเทียบกับระบบที่นำเสนอ ดังจะเห็นได้จากภาพ วิธี Optical Flow ส่งผลให้เกิดการตรวจจับผิดพลาดจำนวนมาก ดังที่แสดงด้วยกล่องสีแดงจำนวนมากในภาพ แม้ว่าวิธีนี้จะสามารถตรวจจับการเคลื่อนที่ของโดรนได้ที่สามตำแหน่ง

4.2.5 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับโดรน วิธีการที่นำเสนอถูกนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการอ้างอิงสองประเภท ได้แก่ วิธีการที่อาศัยการประมวลผลภาพด้วย วิธี Optical Flow [25] และวิธีการตรวจจับด้วยเรดาร์แบบดั้งเดิมที่ใช้แผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ (Range-Doppler map) [14] วิธีการที่นำเสนอสามารถตรวจจับโดรนได้อย่างแม่นยำและแยกแยะออกจากสภาพแวดล้อมที่เกิดจากอาคารโดยรอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในทางตรงกันข้าม วิธี Optical Flow ไม่สามารถตรวจจับโดรนได้อย่างสม่ำเสมอและระบุคลัสเตอร์จากสภาพแวดล้อมว่าเป็น โดรนผิดพลาดในทุกการทดสอบ ในทำนองเดียวกัน วิธีการตรวจจับโดยใช้แผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ (Range-Doppler map) แสดงประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า โดยเฉพาะในการแยกแยะโดรนออกจากสภาพแวดล้อมที่หยุดนิ่ง (Static Clutter) ที่มีความเข้มสัญญาณสูง เนื่องจากโดรนที่บินด้วยความเร็วต่ำก่อให้เกิดความถี่ดอปเปลอร์เพียงเล็กน้อย ทำให้ตรวจจับได้ยากด้วยการประมวลผลดอปเปลอร์แบบดั้งเดิม

ตารางที่ 4-4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจจับโดรนระหว่างวิธีที่หนึ่งและวิธีอ้างอิง

มุมเงย (φ)	การประมาณขอบเขต			Optical Flow			Range-Doppler Map		
	Prec	Rec	F1	Prec	Rec	F1	Prec	Rec	F1
35°	0.6818	0.8277	0.7477	0.3372	0.8531	0.4833	0.2826	0.2802	0.2814
40°	0.7529	0.8806	0.8118	0.3667	0.8594	0.5141	0.3055	0.3218	0.3134
45°	0.7830	0.8789	0.8282	0.3729	0.8627	0.5207	0.3338	0.3574	0.3452
50°	0.7992	0.9060	0.8493	0.3884	0.8721	0.5374	0.3532	0.3694	0.3611

ค่า Precision, Recall และ F1-score ซึ่งนิยามตามสมการที่ (2-27), (2-28) และ (2-29) ตามลำดับ สรุปไว้ในตารางที่ 4-4 วิธีการที่นำเสนอแสดงประสิทธิภาพที่สูงกว่าอย่างสม่ำเสมอในทุกมุมเงยเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งวิธี Optical Flow และวิธี Range-Doppler Map โดยค่า Precision และ Recall ของวิธีการที่นำเสนออยู่ในช่วง 0.6818 ถึง 0.7992 และ 0.8277 ถึง 0.9060 ตามลำดับ ส่งผลให้ค่า F1-score อยู่ระหว่าง 0.7477 ถึง 0.8493

สาเหตุที่ค่า Precision มีค่าต่ำกว่า Recall เป็นผลมาจาก False Positive ที่เกิดขึ้นเมื่อจุดกระเจิงของสภาพแวดล้อมบางส่วนเลื่อนออกนอกขอบเขตสภาพแวดล้อมที่ขยายแล้วระหว่างรอบการสแกน ดังที่วิเคราะห์ไว้ในตารางที่ 4-3 การเพิ่มค่าตัวประกอบการขยายขอบเขต β สามารถลดการตรวจจับผิดพลาดดังกล่าวได้โดยชดเชยความแปรปรวนของตำแหน่งสภาพแวดล้อมที่หยุดนิ่ง อย่างไรก็ตาม ค่า β ที่สูงขึ้นยังขยายขอบเขตสภาพแวดล้อมให้ใหญ่ขึ้นด้วย ส่งผลให้พื้นที่ตรวจจับโดรนที่ใช้งานได้ลดลง ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า β = 1.1 เป็นค่าที่ให้สมดุลที่เหมาะสมที่สุดระหว่างการลดสัญญาณเตือนผิดพลาดและการครอบคลุมพื้นที่ตรวจจับ

ในส่วนของวิธี Optical Flow พบว่ามีค่า Precision ต่ำเช่นกันแม้ค่า Recall จะค่อนข้างสูง ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิด False Positive ในอัตราที่สูงอันเป็นผลมาจากการเลื่อนของข้อมูลสภาพแวดล้อม สำหรับวิธีการตรวจจับโดยใช้แผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ (Range-Doppler map) แสดงประสิทธิภาพโดยรวมต่ำที่สุด โดยค่า Precision และ Recall ต่ำกว่า 0.37 ในทุกกรณีทดสอบ ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันว่าวิธีการที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าสำหรับการตรวจจับโดรนที่บินด้วยความเร็วต่ำในสภาพแวดล้อมเมือง ซึ่งเป็นสภาวะที่เทคนิคที่อาศัยข้อมูลดรอปเปลอร์และการประมวลผลภาพมีความเสี่ยงสูงต่อความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม

แม้ว่าวิธีการที่นำเสนอจะแสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีเปรียบเทียบทั้งสองอย่างชัดเจน แต่ยังคงพบการตรวจจับผิดพลาดในอัตราที่ค่อนข้างสูง สาเหตุหลักเกิดจากจุดกระเจิงของสภาพแวดล้อม

ปรากฏอยู่นอกขอบเขต ที่กำหนดในรอบการสแกนท้าย ๆ ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่คงที่ในการอ่านค่ามุมระหว่างหน่วยประมวลผลและชุดหมุนเชิงกล ประกอบกับสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ปรากฏแบบสุ่มในระหว่างการสแกน ปัญหาดังกล่าวส่งผลให้ระบบไม่สามารถแยกแยะระหว่างจุดกระเจิงของสภาพแวดล้อมและโดรนได้อย่างสมบูรณ์เมื่อข้อมูลมีการเลื่อนออกนอกขอบเขตที่กำหนด ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาต่อยอดกรอบวิธีการประมวลผลเดิม โดยเพิ่มความสามารถในการจำแนกประเภทของสัญญาณที่ตรวจจับได้ว่าเป็นสัญญาณรบกวนจากสภาพแวดล้อมหรือโดรน ซึ่งจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.3 ผลการตรวจจับและจำแนกโดรนด้วยเทคนิค HDBSCAN และ LSTM

การทดสอบดำเนินการที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (มจพ.) กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย โดยใช้ระบบเรดาร์คลื่นต่อเนื่องที่มอดูเลตความถี่ (FMCW radar) สแกนที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3-12

ทำการทดสอบที่สถานที่สองแห่งภายใน มจพ. ดังแสดงในภาพที่ 4-11 เพื่อสะท้อนสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อนต่างกัน สถานที่ที่หนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 4-11(ก) ตั้งอยู่บนดาดฟ้าของอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ มจพ. ล้อมรอบด้วยอาคารใกล้เคียง เสา และต้นไม้ ทำให้เป็นสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อนสูง โดยอาคารที่หนึ่งและที่สองตั้งอยู่ในช่วงมุมแอซิมัทประมาณ 20°-125° สถานที่ที่สอง ดังแสดงในภาพที่ 4-11(ข) ตั้งอยู่ที่สนามกีฬาของ มจพ. ซึ่งมีสิ่งกีดขวางน้อยกว่าสถานที่ที่หนึ่ง แต่ล้อมรอบด้วยโครงสร้างเหล็กของอัฒจันทร์ที่สะท้อนสัญญาณเรดาร์ได้อย่างชัดเจน โดยอาคารที่หนึ่งตั้งอยู่ในช่วงมุมแอซิมัท 60°–120° อาคารที่สองอยู่ที่ 250°–300° และอาคารที่สามอยู่ที่ 300°–350°



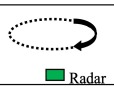
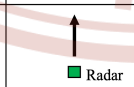
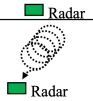
(ก)



(ข)

ภาพที่ 4-11 สถานที่สำหรับทดสอบเรดาร์ตรวจจับโดรนด้วยกรอบการทำงานที่สอง (ก) สถานที่ที่หนึ่ง: ดาดฟ้าตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มจพ. (ข) สถานที่ที่สอง: สนามกีฬา มจพ.

ก่อนเริ่มการทดสอบตรวจจับโดรน ดำเนินการสแกนเรดาร์ในสภาพแวดล้อมโดยไม่มีโดรนจำนวน 10 รอบ เพื่อนำแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะมาซ้อนทับกันและสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อม หลังจากนั้นจึงเริ่มการทดสอบการตรวจจับโดยประมวลผลข้อมูลทีละรอบสแกน โดรนที่ใช้เป็นเป้าหมายในการทดสอบเป็นโดรนการเกษตร ดังแสดงในภาพที่ 4-2 และวิถีการบินทั้ง 10 ประเภทที่ใช้ในการฝึกสอนและทดสอบแสดงในภาพที่ 4-12 วิถีการบินกรณีที่ 1–4 เป็นวิถีเส้นตรง กรณีที่ 5–6 เป็นวิถีแกว่งและวงกลม และกรณีที่ 7–10 เป็นวิถีซับซ้อนและไม่เชิงเส้น ซึ่งครอบคลุมรูปแบบการบินที่หลากหลายทั้งที่คาดเดาได้และที่ไม่แน่นอน

กรณี	เส้นทางการบิน	กรณี	เส้นทางการบิน
1. มุมแอซิมัทคงที่ โดยโดรนเคลื่อนที่เข้าใกล้เรดาร์		6. โดรนบินเป็นวงกลมรอบเรดาร์	
2. มุมแอซิมัทคงที่ โดยโดรนเคลื่อนที่ออกห่างจากเรดาร์		7. เส้นทางแบบเกลียว โดรนเคลื่อนที่เข้าใกล้เรดาร์	
3. โดรนเคลื่อนที่ไปทางด้านขวาของเรดาร์		8. เส้นทางแบบเกลียว โดรนเคลื่อนที่ออกห่างจากเรดาร์	
4. โดรนเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายของเรดาร์		9. เส้นทางแบบซิกแซ็ก โดรนเคลื่อนที่เข้าใกล้เรดาร์	
5. โดรนเคลื่อนที่ระหว่างมุมแอซิมัทสองค่า		10. เส้นทางแบบซิกแซ็ก โดรนเคลื่อนที่ออกห่างจากเรดาร์	

ภาพที่ 4-12 วิถีการบิน 10 ประเภทที่ใช้ในการทดสอบ

4.3.1 ผลการฝึกสอนโครงข่าย LSTM

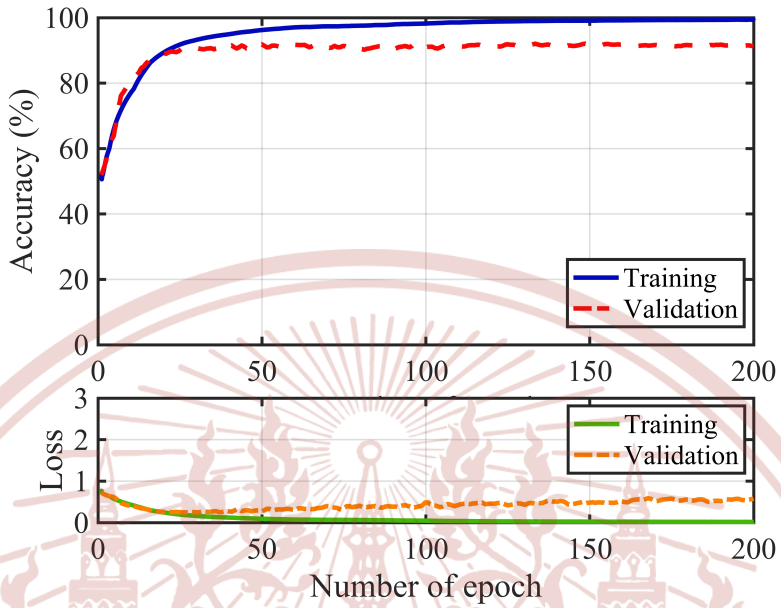
การฝึกสอนโครงข่ายแบบความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) ต้องการข้อมูลจำนวนมากและหลากหลาย ในการทดสอบจริง เก็บข้อมูลการสแกนเรดาร์ได้วิถีการบินละ 10 รอบ จาก 10 ประเภทวิถีการบิน รวมทั้งสิ้น 100 รอบสแกนที่เป็นข้อมูลเรดาร์จริง ซึ่งยังไม่เพียงพอสำหรับการฝึกสอน จึงใช้การจำลองเพื่อเพิ่มข้อมูลให้ครบ 1,100 รอบ โดยข้อมูลจำลองถูกสร้างขึ้นภายใต้เงื่อนไข 3 ประการ ได้แก่

(1) ในแต่ละรอบสแกนที่ตรวจพบโดรน โดยทั่วไปจะมีจุดปรากฏในแผนภาพจุดกระเจิง 2–3 จุด เนื่องจากลำคลื่นของสายอากาศเรดาร์มีความกว้างค่อนข้างมาก ทำให้โดรนถูกตรวจพบที่มุมแอซิมัทใกล้เคียงกันหลายค่าพร้อมกัน

(2) เพื่อจำลองพฤติกรรมการบินของโดรนที่สมจริง ต้องคำนึงถึงความเบี่ยงเบนตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นขณะโดรนบินตามวิถีที่กำหนด ในทางปฏิบัติ โดรนไม่ได้บินตามเส้นทางที่ตั้งใจไว้อย่างสมบูรณ์แบบ แต่จะมีการเบี่ยงเบนเล็กน้อยจากปัจจัยสภาพแวดล้อม ลม หรือความไม่แม่นยำของระบบควบคุม ความเบี่ยงเบนเหล่านี้ถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้ตัวแปรสุ่ม Gaussian ที่มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในทิศทางมุมแอซิมัทและระยะ ที่คำนวณจากข้อมูลการทดลองจริง 100 รอบ มีค่าเท่ากับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในทิศทางมุมแอซิมัท = 1.74° และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในทิศทางระยะ = 2.51 เมตร ตามลำดับ

(3) สภาพแวดล้อมจริงมักมีสัญญาณสะท้อนจากวัตถุรอบข้างที่ถูกตรวจจับเป็นเป้าหมายลวง การจำลองนี้จึงสร้างจุดสุ่มบริเวณขอบเขตสภาพแวดล้อม โดยกำหนดพิกัดจากการบวกค่า offset สุ่มแบบสม่ำเสมอในทิศทางมุมแอซิมัทและระยะรอบจุดบนขอบเขตนั้น

ชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนและตรวจสอบประกอบด้วยรอบสแกนทั้งหมด 1,100 รอบสแกน แบ่งเป็นข้อมูลจากการทดสอบจริง 100 รอบสแกน และข้อมูลที่สร้างจากการจำลอง 1,000 รอบสแกน โดยใช้ข้อมูล 880 รอบสแกนสำหรับการฝึกสอน และ 220 รอบสแกนสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของโครงข่าย ภาพที่ 4-13 แสดงกราฟความแม่นยำและค่าความสูญเสียในกระบวนการฝึกสอนและตรวจสอบ โครงข่ายแบบความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) ลู่เข้าสู่ค่าที่เสถียรที่ประมาณ 200 epochs โดยความแม่นยำในการฝึกสอนและตรวจสอบอยู่ที่ 99.14% และ 92.07% ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่า 200 epochs มีความเพียงพอสำหรับการฝึกสอนและเพิ่มประสิทธิภาพโครงข่ายแบบความจำระยะสั้น-ยาว (LSTM) ให้ได้ความแม่นยำสูงและค่าความสูญเสียต่ำ

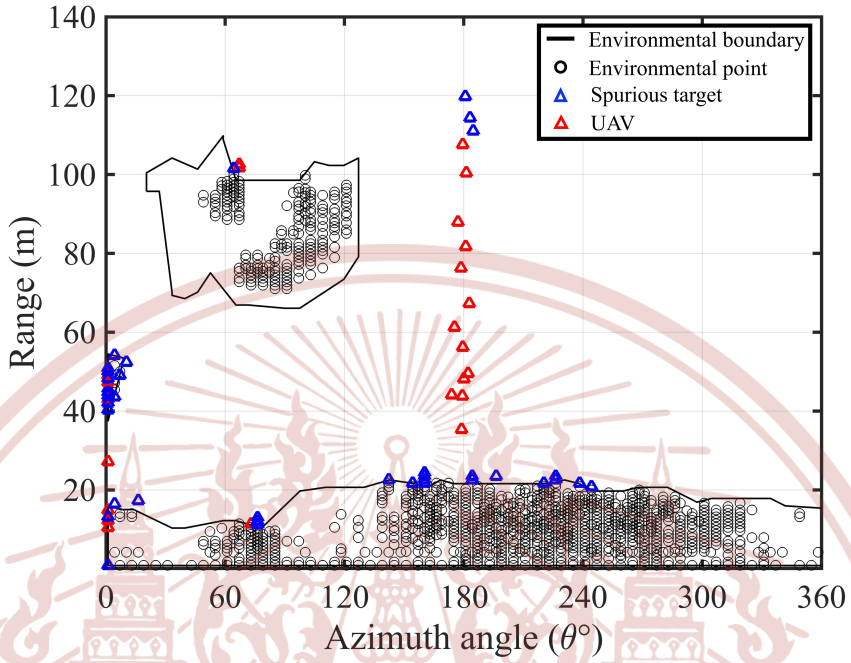


ภาพที่ 4-13 กราฟความแม่นยำและค่าความสูญเสียในกระบวนการฝึกสอนและตรวจสอบของโครงข่าย LSTM แสดงการลู่เข้าสู่ค่าเสถียรภายใน 200 epoch

4.3.2 ผลการตรวจจับและจำแนกวิถีการบิน

ในหัวข้อนี้แสดงผลการตรวจจับและจำแนกโดรนออกจากสัญญาณรบกวนด้วยวิธีการที่นำเสนอ ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้า ต้องใช้ข้อมูลการสแกนเรดาร์โดยไม่มีโดรน 10 รอบเพื่อสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อมในขั้นตอนแรก โดยนำข้อมูลจาก 10 รอบมาซ้อนทับกันและประมวลผลด้วยอัลกอริทึม HDBSCAN และ Convex Hull เพื่อสร้างขอบเขต หลังจากกำหนดขอบเขตสภาพแวดล้อมแล้ว จึงดำเนินการทดสอบโดยสแกนเรดาร์ 10 รอบสำหรับตรวจจับโดรนในวิถีการบินแต่ละประเภท ข้อมูลจุดกระเจิงที่รวบรวมได้นำมาซ้อนทับบนแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ที่มีขอบเขตสภาพแวดล้อมที่กำหนดไว้แล้ว จุดที่ตกอยู่ภายในขอบเขตจะถูกระบุเป็นสภาพแวดล้อม ส่วนจุดที่อยู่นอกขอบเขตจะถูกประมวลผลด้วยโครงข่าย LSTM ที่ฝึกสอนแล้วเพื่อจำแนกว่าเป็นโดรนหรือสัญญาณรบกวน

ภาพที่ 4-14 แสดงแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ที่ได้จากการทดสอบในสถานที่ที่หนึ่ง ขอบเขตสภาพแวดล้อมที่สร้างขึ้นแสดงด้วยเส้นสีดำ ประกอบด้วยสามคลัสเตอร์ ได้แก่ คลัสเตอร์ที่หนึ่งครอบคลุมมุมแอซิมัท 0°–360° ในระยะ 0–20 ม. เกิดจาก ground clutter อันเนื่องมาจาก mutual coupling ระหว่างสายอากาศส่งและรับ คลัสเตอร์ที่สองอยู่ในระยะ 40–60 ม. มุมแอซิมัท 0°–10° สอดคล้องกับเสาบนดาดฟ้าอาคารใกล้เคียง และคลัสเตอร์ที่สามอยู่ในระยะ



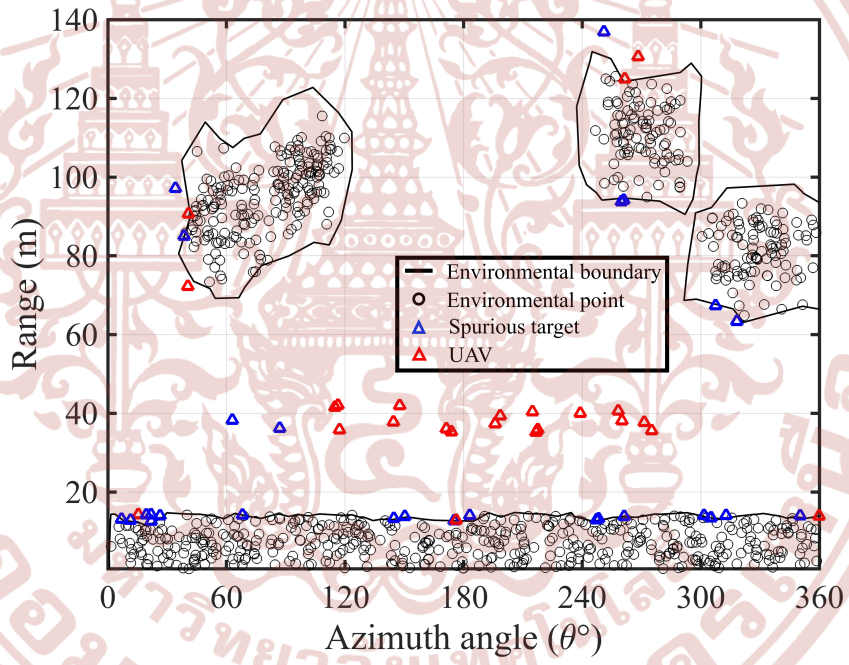
ภาพที่ 4-14 แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ของสถานที่ที่ 1 โดรนบินวิธีที่ 1 (วิถีเข้าหาเรดาร์): ขอบเขต HDBSCAN+Convex Hull (เส้นสีดำ) ตำแหน่งโดรนที่ตรวจจับ (จุดแดง) และตำแหน่งของสัญญาณรบกวน (จุดสีน้ำเงิน)

66–108 ม. มุมแอซิมัท 20°–127° สอดคล้องกับอาคารที่หนึ่งและที่สอง จุดที่อยู่ภายในขอบเขตถูกระบุเป็นจุดกระเจิงของสภาพแวดล้อมแสดงด้วยวงกลมสีดำ ส่วนจุดที่อยู่นอกขอบเขตถูกประมวลผลต่อด้วยโครงข่าย LSTM เพื่อวิเคราะห์ จุดที่ถูกจำแนกเป็นโดรนแสดงด้วยสามเหลี่ยมสีแดง ซึ่งในกรณีที่ 1 นี้โดรนบินเข้าหาเรดาร์ จุดสีแดงแสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ที่สม่ำเสมอโดยระยะลดลงอย่างต่อเนื่องในขณะที่มุมแอซิมัทคงที่ ส่วนจุดที่ถูกจำแนกเป็นสัญญาณรบกวนแสดงด้วยสามเหลี่ยมสีน้ำเงิน

จากผลการตรวจจับจะเห็นว่าในบางรอบสแกนอาจปรากฏจุดหลายจุดสำหรับโดรนเพียงตัวเดียว เนื่องจากความกว้างลำคลื่นของสายอากาศเรดาร์ทำให้โดรนถูกตรวจพบที่มุมแอซิมัทหลายตำแหน่งพร้อมกัน นอกจากนี้ การจำแนกผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรอบสแกนที่ 1 และ 2 มีส่วนทำให้เกิดจุดที่ถูกระบุผิดประเภท ในช่วงรอบแรก ๆ เมื่อวิถีการบินโดรนยังไม่ปรากฏชัดในแผนภาพ AR Map โครงข่าย LSTM อาจแยกแยะจุดโดรนออกจากเป้าหมายลวงได้ยาก นำไปสู่ false positive และ false negative อย่างไรก็ตาม ปัญหานี้จะดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในรอบสแกนต่อ ๆ ไปเมื่อวิถีการบินชัดเจนขึ้น

ต่อมาเป็นการทดสอบในกรณีโดรนบินแบบมีการเปลี่ยนมุมแอซิมัท ภาพที่ 4-15 แสดงแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ที่ได้จากการทดสอบในสถานที่ที่สอง สำหรับกรณีที่ 6 ที่โดรน

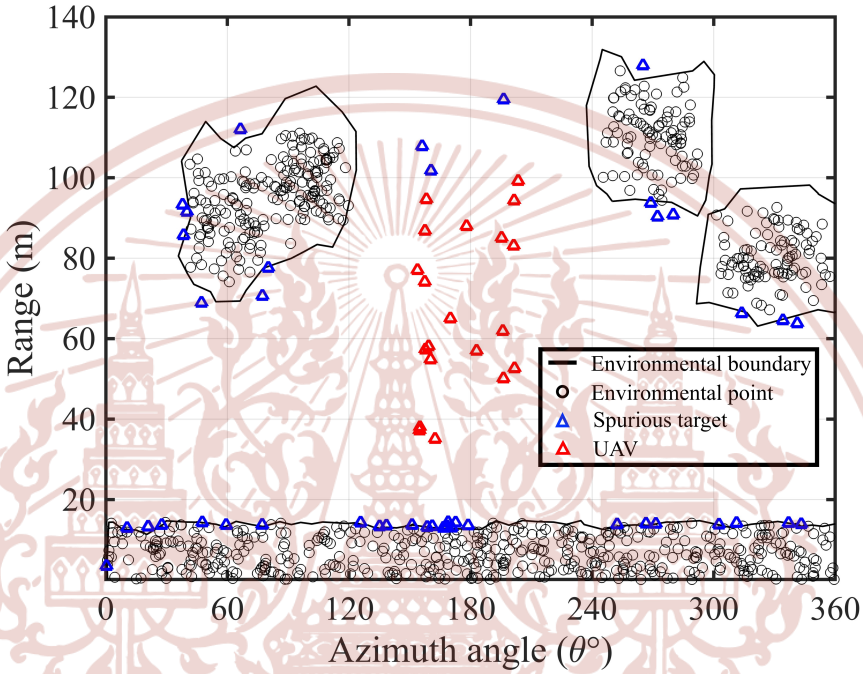
บินในวิถีวงกลมรอบเรดาร์ ขอบเขตสภาพแวดล้อมที่สร้างขึ้นแสดงด้วยเส้นสีดำ ประกอบด้วยสี่คลัสเตอร์ ได้แก่ คลัสเตอร์ที่หนึ่งในระยะ 1–17 ม. มุมแอซิมัท 0°–360° เกิดจาก mutual coupling คลัสเตอร์ที่สองอยู่ในระยะ 69–123 ม. มุมแอซิมัท 36°–123° สอดคล้องกับอาคารที่หนึ่ง คลัสเตอร์ที่สามอยู่ในระยะ 90–132 ม. มุมแอซิมัท 237°–300° สอดคล้องกับอาคารที่สอง และคลัสเตอร์ที่สี่อยู่ในระยะ 63–98 ม. มุมแอซิมัท 291°–358° สอดคล้องกับอาคารที่สาม วิถีวงกลมของโดรนแสดงด้วยสามเหลี่ยมสีแดง ซึ่งก่อตัวเป็นรูปแบบวงกลมชัดเจนในแผนภาพ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเรดาร์สแกนที่ความเร็ว 10 รอบต่อนาที การซิงโครไนซ์การเคลื่อนที่ของโดรนกับการสแกนเรดาร์เป็นเรื่องท้าทาย ด้วยเหตุนี้ระยะห่างระหว่างโดรนและเรดาร์จึงถูกรักษาให้คงที่ในขณะที่จำกัดการเคลื่อนที่โดรนไว้ในแนวมุมแอซิมัท



ภาพที่ 4-15 แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ของสถานที่ที่ 2 โดรนบินวิธีที่ 6 (วิถีวงกลม): ขอบเขต HDBSCAN+Convex Hull (เส้นสีดำ) ตำแหน่งโดรนที่ตรวจจับ (จุดแดง) และตำแหน่งของสัญญาณรบกวน (จุดสีน้ำเงิน)

จากนั้นทำการทดสอบตรวจจับโดรนโดยโดรนมีการบินที่เปลี่ยนทั้งระยะและมุมแอซิมัท ภาพที่ 4-16 แสดงผลการตรวจจับและจำแนกวิถีการบินในกรณีที่ 9 ซึ่งเป็นวิถีซิกแซก โดรนบินเปลี่ยนมุมแอซิมัทอย่างรวดเร็วในขณะที่ค่อย ๆ เคลื่อนเข้าหาเรดาร์ ทำให้ปรากฏเป็นรูปแบบซิกแซกที่ชัดเจนในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ขอบเขตสภาพแวดล้อมที่นำมาใช้ซ้ำจากการทดสอบก่อนหน้ายังคงมีประสิทธิภาพในการแยกลักษณะสภาพแวดล้อมคงที่ออกจากจุดกระเจิงที่มีการขยับ วิถีซิกแซกของโดรนแสดงด้วยสามเหลี่ยมสีแดง ซึ่งแสดงตำแหน่งมุมแอซิมัทที่สลับกันโดยมีระยะลดลง

อย่างต่อเนื่อง ผลนี้แสดงถึงความสามารถของวิธีที่นำเสนอในการตรวจจับและจำแนกการเคลื่อนที่ของโดรนที่ผิดปกติและไม่เชิงเส้น แม้จะมีการจำแนกผิดพลาดบ้างเป็นบางส่วน แต่วิถีซิกแซกของโดรนยังคงแยกแยะได้ชัดเจนจากเป้าหมายลวง



ภาพที่ 4-16 แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) ของสถานที่ที่ 2 โดรนบินวิธีที่ 9 (วิถีบินซิกแซก): ขอบเขต HDBSCAN+Convex Hull (เส้นสีดำ) ตำแหน่งโดรนที่ตรวจจับ (จุดแดง) และตำแหน่งของสัญญาณรบกวน (จุดสีน้ำเงิน)

จากนั้นศึกษาผลการตรวจจับโดรนสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนด้วยชุดข้อมูลเดียวกันแต่ใช้วิธีการประมวลผลต่างกัน ตารางที่ 4-5 แสดงผลการเปรียบเทียบเชิงปริมาณของวิธีการที่นำเสนอกับวิธีอ้างอิงสองวิธี ได้แก่ วิธี range-Doppler map และวิธี optical flow โดยใช้ข้อมูลการสแกนเรดาร์ 100 รอบ และประเมินด้วยสี่เมตริก ได้แก่ ความแม่นยำ (Accuracy) ความแม่นยำเชิงบวก (Precision) ความไว (Recall) และ F1-score ตามสมการที่ (2-26) ถึง (2-29) ตามลำดับ ผลลัพธ์ของวิธีที่นำเสนอแสดงสองคอลัมน์ คือ ผลเมื่อรวมข้อมูลครบ 10 รอบสแกน และผลหลังยกเว้นรอบที่ 1 และ 2 ซึ่งถือเป็นรอบเตือนภัย

วิธีการที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพสูงสุดในทุกเมตริกและทุกกลุ่มวิถีการบินเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองวิธีที่ยกมาเปรียบเทียบ และจากการสังเกตผลการตรวจจับผิดพลาดนั้น การยกเว้นรอบสแกนที่ 1 และ 2 ช่วยปรับปรุงผลการวัดประเมินได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า F1-score ของวิถีเส้นตรง (กรณีที่ 1–4) เพิ่มขึ้นจาก 0.7589 เป็น 0.9469 เช่นเดียวกัน วิถีแกว่ง (กรณีที่ 5–6) มี F1-score เพิ่มขึ้นจาก

0.7223 เป็น 0.9423 และวิถีซับซ้อน (กรณีที่ 7–10) เพิ่มขึ้นจาก 0.7033 เป็น 0.9382 ผลเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีความน่าเชื่อถือสูงเมื่อวิถีการบินโดรนเริ่มปรากฏชัดเจนในแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map)

ตารางที่ 4-5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการที่สองกับวิธีอ้างอิง

กลุ่มวิถี	วิธีการ	Acc.	Acc.*	Prec.	Prec.*	Rec.	Rec.*	F1	F1*
กรณีที่ 1–4 (เส้นตรง)	Range-Doppler	0.3882	—	0.3169	—	0.3397	—	0.3279	—
	Optical Flow	0.9128	—	0.3367	—	0.8587	—	0.4837	—
	วิธีที่นำเสนอ	0.9874	0.9983	0.6795	0.9378	0.8595	0.9561	0.7589	0.9469
กรณีที่ 5–6 (วงกลม)	Range-Doppler	0.3294	—	0.3062	—	0.3181	—	0.3120	—
	Optical Flow	0.9205	—	0.3611	—	0.8914	—	0.5140	—
	วิธีที่นำเสนอ	0.9848	0.9952	0.6996	0.9278	0.7564	0.9573	0.7223	0.9423
กรณีที่ 7–10 (ซับซ้อน)	Range-Doppler	0.3564	—	0.3117	—	0.3177	—	0.3147	—
	Optical Flow	0.9084	—	0.3246	—	0.8329	—	0.4671	—
	วิธีที่นำเสนอ	0.9812	0.9930	0.6607	0.9213	0.7518	0.9557	0.7033	0.9382

(หมายเหตุ: *ไม่รวมข้อมูลในรอบสแกนที่ 1–2)

วิธีตรวจจับโดยใช้ range-Doppler map แสดงประสิทธิภาพต่ำอย่างสม่ำเสมอในทุกเมตริกและทุกกลุ่มวิถีการบิน สาเหตุหลักมาจากข้อจำกัดด้านความละเอียดในการวัดความเร็ว (velocity resolution) ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนเชิร์ป (chirp) ที่รวบรวมได้ ในการตั้งค่าทดสอบนี้ ระบบเรดาร์ที่ทำงานที่ความเร็ว 10 รอบต่อนาทีสามารถรวบรวมได้เพียง 2 chirp ต่อตำแหน่งแอซิมัท ส่งผลให้ความละเอียดของ range-Doppler map หยาบเกินไปที่จะแยกแยะโดรนออกจากวัตถุคงที่ โดยเฉพาะเมื่อโดรนบินช้าซึ่งการเกิดความถี่ดอปเปลอร์มีค่าน้อยมากและแยกไม่ออกจากสัญญาณที่สภาพแวดล้อม

วิธี optical flow ให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าวิธีที่นำเสนออย่างมีนัยสำคัญในทุกกลุ่มวิถีการบิน เช่น วิถีเส้นตรง (กรณีที่ 1–4) ได้ค่า F1-score เพียง 0.4837 เทียบกับ 0.9469 ของวิธีที่นำเสนอ (หลังยกเว้นรอบที่ 1–2) ข้อจำกัดหลักของวิธี optical flow คือความไวต่อสัญญาณรบกวนสภาพแวดล้อม เนื่องจากวิธีนี้ติดตามการเคลื่อนที่ของพิกเซลในข้อมูลแผนภาพเปกโตรแกรม (AR spectrogram) ลักษณะคงที่ของสภาพแวดล้อม เช่น อาคารหรือเสา อาจปรากฏเป็นการเคลื่อนที่เท็จเนื่องจากสัญญาณรบกวนหรือการอ่านค่ามุมจากชุดหมุนเชิงกลที่ผิดพลาด จุดกระเจิงที่เกิดจากสภาพแวดล้อมจึงไม่ปรากฏที่ตำแหน่งเดิมในรอบการสแกนถัดไป ทำให้ค่า Recall และ Precision ลดลง โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน

วิธีที่นำเสนอแสดงประสิทธิภาพสูงสุดในทุกกลุ่มวิถีการบิน โดยเฉพาะหลังจากยกเว้นรอบสแกนแรก ๆ ที่วิถีการบินโดรนยังไม่ปรากฏชัด การผสานระหว่างการสร้างขอบเขตสภาพแวดล้อมและการจำแนกตามวิถีช่วยให้ตรวจจับโดรนได้อย่างแม่นยำและเชื่อถือได้ในขณะที่ลด false positive อย่างไรก็ตาม ค่า Recall ของวิธีที่นำเสนอต่ำกว่าวิธีอ้างอิงเล็กน้อยเมื่อรวมข้อมูลครบ 10 รอบ เนื่องจากในรอบที่ 1 และ 2 วิถีการบินยังไม่ชัดเจน ทำให้โดรนบางจุดถูกจำแนกผิดเป็นสัญญาณรบกวน ส่งผลให้ค่า Recall ลดลงในช่วงนั้น อย่างไรก็ตาม เมื่อวิถีการบินชัดเจนขึ้น ค่า Recall ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังที่เห็นจากผลหลังยกเว้นรอบที่ 1–2 ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการตรวจจับโดรนได้อย่างน่าเชื่อถือเมื่อมีบริบทวิถีการบินเพียงพอ

4.4 การเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้เปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องใน 2 ระดับ ระดับแรกเป็นการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพในด้านคุณสมบัติของวิธีการ ได้แก่ การพึ่งพาข้อมูลดอปเปลอร์ ความสามารถในการจัดการ clutter การปรับตัวกับสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน และการวิเคราะห์วิถีการบิน แสดงไว้ในตารางที่ 4-6 ระดับที่สองเป็นการเปรียบเทียบทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณกับงานวิจัยอ้างอิง ที่ใช้เทคนิค Range-Doppler และ Optical Flow แสดงไว้ในตารางที่ 4-7

วิธีที่ไม่พึ่งพา Doppler เช่น [22] เป็นทางเลือกที่หลีกเลี่ยงข้อจำกัดของดอปเปลอร์ อย่างไรก็ตาม [22] มีความสามารถในการจัดการ clutter ต่ำเนื่องจากความไวต่อสัญญาณรบกวน ในทางตรงกันข้าม วิธีที่นำเสนอไม่ต้องพึ่งพาข้อมูล Doppler และแสดงประสิทธิภาพเหนือกว่าในการจัดการ clutter ด้วยเทคนิค adaptive clustering ความสามารถในการปรับตัวนี้ครอบคลุมถึงสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน และยังสามารถจำแนกการเคลื่อนที่ของโดรนออกจากเป้าหมายลวงได้ด้วยการวิเคราะห์ตามวิถีการบิน ความสามารถในการจำแนกโดรนแบบพลวัตโดยไม่ต้องพึ่งพาข้อมูลดอปเปลอร์ ถือเป็นข้อได้เปรียบสำคัญของวิธีที่นำเสนอเหนือวิธีดั้งเดิม

ตารางที่ 4-6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของวิธีการตรวจจับโดรนที่แตกต่างกัน

เทคนิคการตรวจจับ	ต้องการข้อมูลดอปเปลอร์	ความสามารถจัดการ clutter	ปรับตัวกับสภาพแวดล้อมซับซ้อน	วิเคราะห์ตามวิถีการบิน
[14]	ใช่	ปานกลาง; ขึ้นกับความชัดเจนของ Doppler	ปานกลาง; ไวต่อ Doppler artifacts	ไม่มี
[20]	ใช่	ปานกลาง	ปานกลาง	ไม่มี
[21]	ใช่	สูง; ใช้ความแม่นยำของเอกลักษณ์ RCS	ปานกลาง	ไม่มี
[25]	ไม่	ต่ำ; ไวต่อสัญญาณรบกวน	ต่ำ	ไม่มี
วิธีที่นำเสนอ	ไม่	สูง; adaptive clustering	สูง	มี

ตารางที่ 4-7 การเปรียบเทียบเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณระหว่างวิธีที่นำเสนอและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คุณลักษณะ	Range-Doppler [14]	Optical Flow [25]	วิธีประมาณขอบเขต [หัวข้อ 4.2]	HDBSCAN+LSTM [หัวข้อ 4.3]
ประเภทเรดาร์	FMCW / Pulse	FMCW	FMCW X-Band สแกน 360°	FMCW X-Band สแกน 360°
พึ่งพาดอปเปลอร์	ใช่	ไม่	ไม่	ไม่
ตรวจจับโดรนช้า / วงกลม	จำกัด	จำกัด	ได้	ได้
จำแนกวิถีการบิน	ไม่	ไม่	ไม่	ได้ (10 ประเภท)
สภาพแวดล้อมทดสอบ	ควบคุม	เมือง	เมือง 1 พื้นที่	เมือง 2 พื้นที่
F1-score สูงสุด	~0.37	~0.54	0.8493	0.9469*

จากตารางที่ 4-7 วิธีการที่นำเสนอทั้งสองบทความให้ค่า F1-score สูงกว่าวิธีอ้างอิงอย่างชัดเจน และทั้งสองวิธีไม่พึ่งพาข้อมูลดอปเปลอร์ ทำให้สามารถตรวจจับโดรนที่บินช้าหรือเคลื่อนที่เป็นวงกลมได้ ซึ่งเป็นกรณีที่วิธี Range-Doppler มีข้อจำกัดอย่างมาก

วิธีการประมาณขอบเขต (หัวที่ 4.2) เป็นวิธีแบบ rule-based ที่ไม่ต้องการข้อมูลฝึกสอน แต่ยังคงให้ค่า F1-score สูงสุดที่ 0.8493 ซึ่งสูงกว่า Optical Flow (0.5374) และ Range-Doppler (~ 0.37) อย่างมีนัยสำคัญ ข้อได้เปรียบของวิธีนี้คือความเรียบง่ายในการติดตั้ง เนื่องจากต้องการเพียงการสอบเทียบสภาพแวดล้อมเริ่มต้น โดยไม่ต้องเก็บข้อมูลฝึกสอนล่วงหน้า

วิธี HDBSCAN+LSTM (หัวข้อที่ 4.3) เป็นวิธีแบบ learning-based ที่ให้ค่า F1-score สูงสุดที่ 0.9469 ซึ่งสูงกว่าวิธีการประมาณขอบเขต (หัวที่ 4.2) และสูงกว่าวิธีอ้างอิงทั้งสองอย่างชัดเจน ข้อแลกเปลี่ยนของวิธีนี้คือต้องการข้อมูลฝึกสอนและขั้นตอนการเตรียมข้อมูลล่วงหน้า อย่างไรก็ตาม เมื่อฝึกสอนเสร็จแล้ว โมเดลสามารถจำแนกสัญญาณโดรนออกจากสัญญาณรบกวนได้อย่างแม่นยำสูง

เมื่อพิจารณาความซับซ้อนในการติดตั้งและการใช้งาน วิธีการทั้งสองต้องการขั้นตอนการสอบเทียบ (Calibration) ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีโดรน (10 รอบสแกน) ก่อนเริ่มการตรวจจับ ซึ่งเป็นข้อจำกัดเล็กน้อยเมื่อเทียบกับข้อได้เปรียบด้านประสิทธิภาพที่ได้รับ ในการติดตั้งถาวร ขั้นตอนการสอบเทียบนี้ดำเนินการเพียงครั้งเดียวหรือเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ

4.5 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอและวิเคราะห์ผลการทดสอบระบบตรวจจับโดรนด้วยเรดาร์ FMCWที่พัฒนาขึ้นในสภาพแวดล้อมจริงที่มีความซับซ้อนสูง ครอบคลุมทั้งสองกรอบวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ผลการทดสอบยืนยันว่าแนวทางการใช้แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) แทนแผนภาพ Range-Dopplerเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าสำหรับการตรวจจับโดรนในสภาพแวดล้อมเมือง

วิธีการประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อมด้วย DBSCAN และ Convex Hull (บทความที่ 1)ให้ค่า F1-score สูงสุดที่ 0.8493 ที่มุมเงย φ = 50° ซึ่งสูงกว่าวิธี Optical Flowอย่างมีนัยสำคัญ (F1 = 0.5374) และสูงกว่าวิธี Range-Doppler Map ที่F1 ≈ 0.37 อย่างชัดเจน ระบบสามารถตรวจจับโดรนที่บินในรูปแบบต่าง ๆในระยะสูงสุดถึงประมาณ 500 เมตร โดยไม่พึ่งพาข้อมูลความเร็วดอปเปลอร์

กรอบวิธีการสองขั้นตอนที่ใช้ HDBSCAN และ LSTM (บทความที่ 2)ให้ค่า F1-score* สูงสุดที่ 0.9469 สำหรับกลุ่มวิถีเส้นตรงและสามารถจำแนกวิถีการบินโดรนได้ถึง 10 ประเภทซึ่งไม่มีในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องความสามารถ Cross-Site ที่ประสิทธิภาพลดลงน้อยกว่า 3%บ่งชี้ถึงความสามารถในการ Generalize ของโมเดลที่ฝึกสอนไว้

ข้อจำกัดสำคัญที่พบในการทดสอบได้แก่ ค่า Precision ของวิธีการประมาณขอบเขตยังอยู่ในระดับ 0.68–0.80 เนื่องจากการรบกวนจาก Transient Clutterและประสิทธิภาพของกรอบ

HDBSCAN+LSTM จะลดลงอย่างมากในรอบสแกนที่ 1–2เนื่องจากข้อมูลลำดับตำแหน่งไม่เพียงพอ สำหรับการจำแนกประเภทวิถีข้อจำกัดเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการติดตาม Multi-Frameและการออกแบบกลยุทธ์การจำแนกที่ชาญฉลาดขึ้นในงานวิจัยต่อไป

โดยรวมแล้ว ผลการทดสอบยืนยันความเป็นไปได้ของการนำวิธีการที่นำเสนอไปใช้งานจริงสำหรับระบบตรวจจับโดรนในสภาพแวดล้อมเมือง และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ AR Map ร่วมกับอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องในการแก้ปัญหาการตรวจจับโดรนในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน ซึ่งเป็นความท้าทายสำคัญสำหรับระบบรักษาความปลอดภัยทางอากาศในยุคที่โดรนมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ในสภาพแวดล้อมเมืองที่มีความซับซ้อนสูง โดยใช้เรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulated Continuous Wave: FMCW) แบบ X-Band ที่พัฒนาขึ้น ร่วมกับแผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR Map) เป็นตัวแทนข้อมูลแทนที่แผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์แบบดั้งเดิม ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องพึ่งพาข้อมูลดอปเปลอร์ กรอบงานที่หนึ่งใช้อัลกอริทึมดีบีสแกน (DBSCAN) ร่วมกับอัลกอริทึมคอนเวกซ์ฮัลล์ (Convex Hull) สำหรับประมาณขอบเขตสภาพแวดล้อมและตรวจจับโดรนจากจุดกระเจิง ที่อยู่นอกขอบเขต โดยค่าตัวประกอบการขยายขอบเขต β =1.1 ผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมเมืองที่มุมเงย φ=50° ได้ค่า F1-score สูงสุด 0.8493 ซึ่งสูงกว่าวิธีตรวจจับด้วย Optical Flow (F1=0.5374) และวิธีแผนภาพระยะ-ดอปเปลอร์ (F1≈0.37) อย่างมีนัยสำคัญ วิธีนี้เป็นแบบ rule-based ที่ไม่ต้องการข้อมูลฝึกสอนล่วงหน้า และต้องการเพียงการสแกนสภาพแวดล้อมเริ่มต้นจำนวน 10 รอบเพื่อสร้างขอบเขตอ้างอิง

กรอบงานที่สองพัฒนาต่อยอดด้วยการใช้อัลกอริทึมเฮชดีบีสแกน (HDBSCAN) ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียมแบบความจำสั้น-ยาว (LSTM) 2 ชั้น ขนาด 128 หน่วย และหน้าต่างเวลา T=20 รอบสแกน สำหรับการวิเคราะห์ลำดับข้อมูลเชิงเวลา เพื่อจำแนกสัญญาณโดรนออกจากสัญญาณรบกวน ผลการทดสอบใน 2 สถานที่ที่มีความซับซ้อนแตกต่างกัน ด้วย 10 วิธีการบิน ได้ค่า F1-score* สูงสุด 0.9469 สำหรับวิธีบินเส้นตรง 0.9423 สำหรับวิธีบินวงกลม และ 0.9382 สำหรับวิธีบินแบบซับซ้อน โดยมีความแม่นยำรวมสูงสุดถึง 99.83% และประสิทธิภาพลดลงน้อยกว่า 3% เมื่อทดสอบข้ามสถานที่ แสดงถึงความสามารถในการ Generalize ของโมเดล

ผลการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยืนยันว่า แนวทางการใช้ แผนภาพจุดกระเจิงมุมแอซิมัท-ระยะ (AR map) ร่วมกับอัลกอริทึมการสร้างของเขตสภาพแวดล้อมและจำแนกพิกัดของโดรนภายในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนด้วยโครงข่ายประสาทเทียมแบบความจำสั้น-ยาว (LSTM) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีอ้างอิงทั้งสองที่ใช้ ข้อมูลดอปเปลอร์และ Optical Flow สำหรับการตรวจจับโดรนในสภาพแวดล้อมเมืองที่ซับซ้อน โดยไม่ต้องพึ่งพาข้อมูลดอปเปลอร์ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญสำหรับระบบเรดาร์ที่มีข้อจำกัดด้านความละเอียดดอปเปลอร์เมื่อโดรนบินด้วยความเร็วต่ำ

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

ในระหว่างการดำเนินงานวิจัยพบปัญหาและข้อจำกัดหลายด้าน ทั้งในส่วนของการประมวลผลสัญญาณ การเก็บรวบรวมข้อมูล และข้อจำกัดเชิงฮาร์ดแวร์ที่ส่งผลต่อขอบเขตการใช้งานของระบบ รวมถึงแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวมีดังนี้

5.2.1 ปัญหาการตรวจจับผิดพลาดจาก Transient Clutter

ปัญหาสำคัญที่พบในการทดสอบกรอบงานที่หนึ่งคือการรบกวนจาก Transient Clutter อันได้แก่จุดกระเจิงของสภาพแวดล้อมบางส่วนที่เลื่อนออกนอกขอบเขตที่กำหนด ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติของสิ่งรอบข้าง เช่น ต้นไม้ที่แกว่งตามลม หรือการสะท้อนสัญญาณแบบ multipath จากยานพาหนะที่เคลื่อนที่ ส่งผลให้ค่า Precision ของกรอบงานที่หนึ่งยังอยู่ในระดับ 0.68–0.80 แนวทางแก้ไขที่เหมาะสมคือการพัฒนาตัวกรอง Clutter Map แบบปรับตัว ที่สามารถอัปเดตขอบเขตสภาพแวดล้อมแบบออนไลน์ได้ ร่วมกับการใช้เทคนิค การติดตามเป้าหมายหลายเฟรม (Multi-Frame Tracking) เพื่อแยกแยะระหว่างจุดกระเจิงชั่วคราวกับโดรนที่มีการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง

5.2.2 ข้อจำกัดด้านความเร็วสูงสุดของอากาศยานไร้คนขับที่ตรวจจับได้

ข้อจำกัดสำคัญของกรอบงานที่สองคือข้อกำหนดความต่อเนื่องของลำดับข้อมูล (Track Continuity) ของโครงข่าย LSTM ซึ่งอาศัยการรวบรวมการตรวจจับจาก T รอบสแกนต่อเนื่องกัน เพื่อสร้างลำดับ (Track) ระบบจะจับคู่การตรวจจับในรอบสแกนหนึ่งกับการตรวจจับที่ใกล้ที่สุด ในรอบสแกนถัดไป โดยต้องอยู่ภายในระยะ d_{max} = 8 เมตร ค่า d_{max} นี้ถูกเลือกให้รองรับการเคลื่อนที่ของโดรนต่อรอบสแกนที่ความเร็วใช้งานทั่วไปในเมือง ขณะที่ยังคงรัดกุมพอที่จะป้องกันการเชื่อมโยงผิดพลาดกับ Ghost Target จาก multipath propagation

ที่ความเร็วสแกนปัจจุบัน 10 รอบต่อนาที (RPM) การสแกน 360° หนึ่งรอบใช้เวลา Tscan = 6 วินาที ดังนั้นความเร็วสูงสุดของโดรนที่ระบบสามารถติดตามได้คือ vmax = dmax / Tscan = 7.5 ม. / 6 วินาที = 1.25 ม./วินาที (4.5 กม./ชม.) ในการทดสอบจริง โดรนถูกควบคุมให้บินด้วยความเร็วประมาณ 0.5–1 ม./วินาที ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตนี้และเป็นตัวแทนของการบินเพื่อเฝ้าระวังในเมืองระดับความสูงต่ำ

ในทางทฤษฎี ความเร็วสูงสุดที่ติดตามได้สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการเพิ่มความเร็วในการสแกน เนื่องจาก RPM ที่สูงขึ้นจะลด T_{scan} ลง ท่อประมวลผลต่อรอบสแกนรวมทั้งหมด ประกอบด้วยการรับข้อมูล (~18 มิลลิวินาที) การสกัด Point Cloud (~484.5 มิลลิวินาที) และการอนุมาน LSTM (~5 มิลลิวินาที) รวมประมาณ 508 มิลลิวินาที ซึ่งที่ 10 RPM คิดเป็นเพียง 8.5% ของหน้าต่างเวลา 6 วินาที ดังนั้นความสามารถในการประมวลผลจึงไม่เป็นอุปสรรคที่ความเร็วสแกนปัจจุบัน ความสัมพันธ์

ระหว่างความเร็วสแกน ความสามารถในการประมวลผล และความเร็วสูงสุดที่ติดตามได้แสดงไว้ในตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการสแกน ความสามารถในการประมวลผล และความเร็วสูงสุดของโดรนที่ตรวจจับได้

ความเร็วรอบสแกน	เวลาต่อรอบสแกน	ความสามารถประมวลผล	ความเร็วสูงสุด	หมายเหตุ
10 RPM	6.00 s	8.5 %	4.5 km/h	ค่าที่ตรวจสอบแล้ว
20 RPM	3.00 s	16.9 %	9 km/h	—
30 RPM	2.00 s	25.4 %	13.5 km/h	—
60 RPM	1.00 s	50.8 %	27 km/h	ขีดจำกัดฮาร์ดแวร์
118 RPM	0.51 s	~100 %	53.1 km/h	ขีดจำกัดการประมวลผล

เครื่องสแกนเชิงกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเร็วสูงสุดที่ระบุไว้ที่ 60 RPM ซึ่งเป็นขีดจำกัดเชิงฮาร์ดแวร์ที่แท้จริง ที่ความเร็วสแกนนี้ T_{scan} = 1 วินาที และความเร็วสูงสุดที่ติดตามได้จะเพิ่มขึ้นเป็น V_{max} = 7.5 m/s (27 km/h) โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนอัลกอริทึมแต่อย่างใด หากต้องการเพิ่มความเร็วสแกนเกินกว่า 60 RPM จำเป็นต้องอัปเกรดฮาร์ดแวร์เชิงกล

การลดลงของประสิทธิภาพการจำแนกเมื่อความเร็วของโดรนเพิ่มขึ้นเป็นแบบ threshold มากกว่าการลดลงแบบค่อยเป็นค่อยไป สำหรับความเร็วโดรนที่หรือต่ำกว่า 1.25 m/s ความต่อเนื่องของลำดับข้อมูลจะถูกรักษาไว้ในทุกรอบสแกน และ LSTM Recall จะคงที่ เมื่อความเร็วของโดรนเกินขีดจำกัดนี้ ระยะห่างระหว่างรอบสแกนจะเกิน d_{max} ทำให้ขาดความต่อเนื่องของลำดับข้อมูล และ LSTM จะได้รับลำดับที่ขาดหายซึ่งไม่มี รูปแบบการเคลื่อนที่ที่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ UAV Recall ลดลง ส่วน Precision ได้รับผลกระทบน้อยกว่า เนื่องจาก Ghost Target Track ที่เกิดจากการสะท้อนแบบ multipath คงที่ยังคงต่อเนื่องโดยไม่ขึ้นกับความเร็วโดรน

5.2.3 ปัญหาประสิทธิภาพในช่วงเริ่มต้นการตรวจจับ

กรอบงานที่สองมีปัญหาประสิทธิภาพลดลงในรอบสแกนที่ 1–2 เนื่องจากข้อมูลลำดับเวลาในหน้าต่าง ยังมีจำนวนไม่เพียงพอสำหรับการตัดสินใจของโครงข่าย LSTM ทำให้เกิดการจำแนกผิดพลาดและนำไปสู่ False Positive หรือ False Negative ในช่วงแรกของการตรวจจับ แนวทางแก้ไขคือการออกแบบกลยุทธ์การเริ่มต้น (Initialization Strategy) สำหรับช่วงเวลาที่ข้อมูลยังไม่ครบ เช่น การใช้ค่า padding ด้วยข้อมูลสภาพแวดล้อมอ้างอิง หรือการพัฒนาสถาปัตยกรรมโมเดลที่สามารถจัดการกับลำดับเวลาที่มีความยาวแปรผันได้

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาในอนาคต

จากผลการวิจัยและข้อจำกัดที่พบ มีข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาต่อยอดในอนาคตดังนี้

เพื่อรองรับการตรวจจับโดรนที่บินด้วยความเร็วสูงกว่าปัจจุบัน ควรพัฒนาระบบสแกนด้วยความเร็วสูงขึ้น โดยการใช้สายอากาศแบบ Phased Array ที่ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหวและสามารถสแกน ได้เร็วกว่าเครื่องสแกนเชิงกล นอกจากนี้ควรศึกษาการปรับเพิ่มค่า d_{max} ร่วมกับการพัฒนาวิธีการแยกแยะ Ghost Target ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพื่อให้สามารถติดตามโดรนที่มีการเคลื่อนที่เร็วขึ้นได้โดยไม่ลด Precision

ระบบปัจจุบันทำงานในระนาบสองมิติ (มุมแอซิมัท-ระยะ) การพัฒนาให้รองรับการตรวจจับ ในสามมิติโดยเพิ่มมิติมุมเงย (Elevation) จะช่วยให้สามารถระบุตำแหน่งโดรนในอวกาศ ได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น และลดความกำกวมในการแยกแยะโดรนกับสิ่งกีดขวาง ในสภาพแวดล้อมแนวตั้ง ซึ่งต้องการการออกแบบสายอากาศ MIMO แบบสองมิติ และการพัฒนาอัลกอริทึมประมวลผลสัญญาณสามมิติ

ปัจจุบันระบบทำการประมวลผลแบบ offline แนวทางสำคัญสำหรับการนำไปใช้งานจริงคือ การพัฒนาระบบประมวลผลแบบเรียลไทม์บนแพลตฟอร์มฮาร์ดแวร์ที่เหมาะสม เช่น Field Programmable Gate Array (FPGA) หรือ GPU แบบพกพา เพื่อลดเวลาแฝงในการตรวจจับและรองรับการทำงานอย่างต่อเนื่องในระบบรักษาความปลอดภัย

งานวิจัยนี้ทดสอบในพื้นที่มหาวิทยาลัยในเขตเมือง งานวิจัยในอนาคตควรขยาย การทดสอบไปยังสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น สนามบิน ท่าเรือ หรือพื้นที่อุตสาหกรรม เพื่อยืนยันความสามารถในการ Generalize ของระบบ รวมถึงการทดสอบกับโดรนหลายประเภทและในสภาพอากาศที่หลากหลาย เช่น ฝนตกหรือลมแรง

ควรศึกษาความเป็นไปได้ในการบูรณาการระบบเรดาร์ FMCW ที่พัฒนาขึ้นกับระบบตรวจจับอื่น เช่น กล้องออปติกหรืออินฟราเรด ระบบตรวจจับสัญญาณวิทยุ (RF Detection) และระบบ ADS-B เพื่อสร้างระบบรักษาความปลอดภัยทางอากาศแบบ Multi-Sensor Fusion ที่มีความน่าเชื่อถือสูง การผสมผสานข้อมูลจากหลายเซ็นเซอร์จะช่วยลดจำนวน False Positive และเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งและจำแนกประเภทของโดรน โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน

บรรณานุกรม

1. P. Du, Y. Shi, H. Cao, S. Garg, M. Alrashoud and P. K. Shukla, "AI-Enabled Trajectory Optimization of Logistics UAVs With Wind Impacts in Smart Cities," in IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 70, no. 1, pp. 3885-3897, Feb. 2024, doi: 10.1109/TCE.2024.3355061.

2. X. Wu, W. Li, D. Hong, R. Tao and Q. Du, "Deep Learning for Unmanned Aerial Vehicle-Based Object Detection and Tracking: A survey," in IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 10, no. 1, pp. 91-124, March 2022, doi: 10.1109/MGRS.2021.3115137.

3. L. Zhang et al., "A Survey on 5G Millimeter Wave Communications for UAV-Assisted Wireless Networks," in IEEE Access, vol. 7, pp. 117460-117504, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929241.

4. MarketsandMarkets, "UAV (Drone) Market Report 2025-2030," MarketsandMarkets, 2024. [Online]. Available:https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/unmanned-aerial-vehicles-uav-market-662.html

5. The Conversation, "Gatwick drone drama shows how even unarmed UAVs can cause economic chaos and risk to life," The Conversation, Dec. 2018. [Online]. Available: https://theconversation.com/gatwick-drone-drama-shows-how-even-unarmed-uavs-can-cause-economic-chaos-and-risk-to-life-109187

6. CTIF, "Drone sightings at Brussels and Stockholm airports start questions about airport safety across Europe," CTIF, Nov. 2025. [Online]. Available: https://www.ctif.org/news/drone-sightings-brussels-and-stockholm-airports-start-questions-about-airport-safety-across

7. ไทยรัฐออนไลน์, "โดรนลึกลับบินข้ามพื้นที่ทหาร ปราจีนบุรีห้ามบินโดยเด็ดขาด," ไทยรัฐออนไลน์, 4 สิงหาคม 2568.[Online]. Available: https://www.thairath.co.th/news/governmentpolicy/2903509

8. Thai PBS, "ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ แถลงมาตรการรับมือโดรนใกล้เขตการบิน," Thai PBS, 22 ธันวาคม 2568. [Online]. Available: https://www.thaipbs.or.th/news/content/355030

9. M. A. Khan et al., "On the Detection of Unauthorized Drones: Techniques and Future Perspectives," in IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 11, pp. 10439-10468, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3171293.

10. L. Piotrowsky, T. Jaeschke, S. Kueppers, J. Siska and N. Pohl, "Enabling High Accuracy Distance Measurements With FMCW Radar Sensors," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 67, no. 12, pp. 5360-5371, Dec. 2019, doi: 10.1109/TMTT.2019.2930504.

11. J. Zhang, Z. Zhang, Y. Li, C. Gu and J. Mao, "Target Detection With Short-Range FMCW Radar Based on Time-Frequency Characteristic-Based Leakage Cancellation Technique," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 72, no. 4, pp. 2318-2331, April 2024, doi: 10.1109/TMTT.2024.3360324.

12. B. Welp et al., "Versatile Dual-Receiver 94-GHz FMCW Radar System With High Output Power and 26-GHz Tuning Range for High Distance Applications," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 68, no. 3, pp. 1195-1211, March 2020, doi: 10.1109/TMTT.2019.2955127.

13. S.-Y. Jeon et al., "W-Band MIMO FMCW Radar System With Simultaneous Transmission of Orthogonal Waveforms for High-Resolution Imaging," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 66, no. 11, pp. 5051-5064, Nov. 2018, doi: 10.1109/TMTT.2018.2867003.

14. C. Wang, J. Tian, J. Cao and X. Wang, "Deep Learning-Based UAV Detection in Pulse-Doppler Radar," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-12, 2022, Art no. 5105612, doi: 10.1109/TGRS.2021.3104907.

15. K.-B. Kang, J.-H. Choi, B.-L. Cho, J.-S. Lee and K.-T. Kim, "Analysis of Micro-Doppler Signatures of Small UAVs Based on Doppler Spectrum," in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 57, no. 5, pp. 3252-3267, Oct. 2021, doi: 10.1109/TAES.2021.3074208.

16. A. Aldowesh, T. Alnuaim and A. Alzogaiby, "Slow-Moving Micro-UAV detection with a small scale Digital Array Radar," 2019 IEEE Radar Conference (RadarConf), Boston, MA, USA, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/RADAR.2019.8835567.

17. Y. Yang, F. Yang, L. Sun, T. Xiang and P. Lv, "Echoformer: Transformer Architecture Based on Radar Echo Characteristics for UAV Detection," in IEEE Sensors Journal, vol. 23, no. 8, pp. 8639-8653, 15 April 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3254525.

18. A. N. Wilson, A. Kumar, A. Jha and L. R. Cenkeramaddi, "Multitarget Angle of Arrival Estimation Using Rotating mmWave FMCW Radar and Yolov3," in IEEE Sensors Journal, vol. 23, no. 3, pp. 3173-3182, 1 Feb. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2022.3231790.

19. A. N. Sayed, H. Abedi, O. M. Ramahi and G. Shaker, "Enhanced UAV Detection and Classification Using Machine Learning and MIMO Radars," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 72, no. 11, pp. 6716-6727, Nov. 2024, doi: 10.1109/TMTT.2024.3400889.

20. P. K. Rai et al., "Localization and Activity Classification of Unmanned Aerial Vehicle Using mmWave FMCW Radars," in IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 14, pp. 16043-16053, 15 July 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3075909.

21. R. Fu, M. A. Al-Absi, K.-H. Kim, Y.-S. Lee, A. A. Al-Absi and H.-J. Lee, "Deep Learning-Based Drone Classification Using Radar Cross Section Signatures at mmWave Frequencies," in IEEE Access, vol. 9, pp. 161431-161444, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3115805.

22. S. Wagner, W. Johannes, D. Qosja and S. Brüggenwirth, "Small Target Detection in a Radar Surveillance System Using Contractive Autoencoders," in IEEE

Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 60, no. 1, pp. 51-67, Feb. 2024, doi: 10.1109/TAES.2023.3253469.

23. A. N. Sayed, O. M. Ramahi and G. Shaker, "RDIwS: An Efficient Beamforming-Based Method for UAV Detection and Classification," in IEEE Sensors Journal, vol. 24, no. 9, pp. 15230-15240, 1 May 2024, doi: 10.1109/JSEN.2024.3375862.

24. I. Ishii, T. Taniguchi, K. Yamamoto and T. Takaki, "High-Frame-Rate Optical Flow System," in IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, vol. 22, no. 1, pp. 105-112, Jan. 2012, doi: 10.1109/TCSVT.2011.2158340.

25. M. Mueller, P. Karasev, I. Kolesov and A. Tannenbaum, "Optical Flow Estimation for Flame Detection in Videos," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 22, no. 7, pp. 2786-2797, July 2013, doi: 10.1109/TIP.2013.2258353.

26. S. Eiadkaew, A. Boonpoonga, L. Bannawat, K. Athikulwongse and D. Torrungrueng, "Environmental boundary estimation of urban areas using FMCW radar with data clustering for UAV detection," Radio Science, vol. 61, p. e2025RS008392, 2026, doi: 10.1029/2025RS008392.

27. S. Eiadkaew, A. Boonpoonga, K. Athikulwongse, K. Kaemarungsi and D. Torrungrueng, "UAV Detection and Classification in Complex Environments Using Radar and Combined Machine-Learning Approaches," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 73, no. 8, pp. 5457-5470, Aug. 2025, doi: 10.1109/TMTT.2025.3551626.

28. C. Iovescu and S. Rao, "The fundamentals of millimeter wave sensors," Texas Instruments, Dallas, TX, USA, White Paper SPYY005A, Jul. 2016.

29. 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, Sep. 2019, doi: 10.1049/iet-rsn.2018.5646.

30. R. A. Jarvis, "On the identification of the convex hull of a finite set of points in the plane," Information Processing Letters, vol. 2, no. 1, pp. 18-21, 1973.

31. W.-L. Hsu, J.-X. Liu, C.-C. Yang and J.-S. Leu, "A Fall Detection System Based on FMCW Radar Range-Doppler Image and Bi-LSTM Deep Learning," in IEEE Sensors Journal, vol. 23, no. 18, pp. 22031-22039, 15 Sept. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3300994.

32. เอกรัฐ บุญภูงา. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการการพัฒนาเรดาร์คลื่นต่อเนื่องมอดูเลตความถี่สำหรับตรวจจับเป้าหมายเพื่อการป้องกันภัยทางทะเลและอากาศ. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2567.

ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการนานาชาติ

1. S. Eiadkaew, N. Shutimarrungson, K. Athikulwongse and A. Boonpoonga, "A Study on the Motion Analysis of Indoor Moving Object Using mmWave-FMCW Radar," 2025 22nd International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Bangkok, Thailand, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/ECTI-CON64996.2025.11100381.

วารสารวิชาการนานาชาติ

1. S. Eiadkaew, A. Boonpoonga, L. Bannawat, K. Athikulwongse and D. Torrungrueng, "Environmental boundary estimation of urban areas using FMCW radar with data clustering for UAV detection," Radio Science, vol. 61, p. e2025RS008392, 2026, doi: 10.1029/2025RS008392.

2. S. Eiadkaew, A. Boonpoonga, K. Athikulwongse, K. Kaemarungsi and D. Torrungrueng, "UAV Detection and Classification in Complex Environments Using Radar and Combined Machine-Learning Approaches," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 73, no. 8, pp. 5457-5470, Aug. 2025, doi: 10.1109/TMTT.2025.3551626.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายเสกสรร เอียดแก้ว

ชื่อดุษฎีนิพนธ์ การออกแบบและพัฒนาระบบประมวลผลเรดาร์อัจฉริยะสำหรับการตรวจจับเป้าหมายในสภาพแวดล้อมเมือง

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ.2540 ปัจจุบันอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 3/1 ถนนควนขนุน ตำบล ทับเที่ยง อำเภอเมือง จังหวัดตรัง รหัสไปรษณีย์ 92000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2553-2558 : ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสภาราชินี จังหวัดตรัง

พ.ศ. 2558-2562 : ระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2563-2565 : ระดับมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ