

ระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก
เพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร



นายปฐวิน แจ่มนาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

RADAR SYSTEM FOR SMALL UAV DETECTION TO
DEFEND THREATS FOR MILITARY SECURITY



PATTAWIN CHANGNAM

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2024

ระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....
(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)
ประธานกรรมการ


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสหา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลนัย)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิริ จงกล)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปฐ्वิน แจ้งนาม : ระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เพื่อป้องกันภัยความ
มั่นคงทางทหาร (RADAR SYSTEM FOR SMALL UAV DETECTION TO DEFEND THREATS
FOR MILITARY SECURITY)

อาจารย์ที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ , 83 หน้า.

คำสำคัญ : ระบบเรดาร์แบบ เอฟเอ็มซีดับเบิลยู/ระบบตรวจจับยูเอวี/การป้องกันภัยคุกคามทางอากาศ

โดรนหรืออากาศยานไร้คนขับได้รับการใช้งานอย่างแพร่หลายในด้านต่างๆ ในทางพาณิชย์ และการทหาร แต่การตรวจจับและติดตามโดรนที่มีขนาดเล็กและพื้นที่หน้าตัดการสะท้อนต่ำ เช่น แพนธอม 3 และ แพนธอม 4 โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ต้องการการรักษาความปลอดภัยสูง งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นพัฒนาเรดาร์ต้นแบบที่สามารถตรวจจับโดรนขนาดเล็กได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ สร้างระบบเรดาร์ต้นแบบในระยะตรวจจับสูงสุด 1 กิโลเมตร โดยใช้เรดาร์แบบ เอฟเอ็มซีดับเบิลยู เป็นระบบที่ใช้การกวาดความถี่เชิงเส้นแบบขึ้นและแบบลง ในการส่งสัญญาณ เพื่อตรวจจับและวัด ระยะทางกับความเร็วของเป้าหมาย งานวิจัยนี้จะอธิบายหลักการทำงานของระบบ เอฟเอ็มซีดับเบิลยู รวมถึงการสร้างสัญญาณจาก ยูเอสอาร์พี บี 210 ที่เป็นเทคโนโลยีการสร้างสัญญาณยุคใหม่และการประมวลผลสัญญาณแบบเรียลไทม์ผ่านซอฟต์แวร์ จีเอ็นยู เรดิโอ บนคอมพิวเตอร์หรือแล็ปท็อป การทดสอบจะเน้นการตรวจจับโดรน แพนธอม 3 และ แพนธอม 4 ที่ระยะทำการ 1 กิโลเมตร โดยประเมินผลการตรวจจับทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีสิ่งรบกวน ผลการทดลองจะเปรียบเทียบกับ การคำนวณทางทฤษฎี เพื่อยืนยันความแม่นยำและประสิทธิภาพของระบบเรดาร์

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

PATTAWIN CHANGNAM: RADAR SYSTEM FOR SMALL UAV DETECTION TO DEFEND
THREATS FOR MILITARY SECURITY

THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHANCHAI THONGSOPA, Ph.D., 83 PP.

Keyword: FMCW radar system, UAV detection system, Air defense protection

Drones or unmanned aerial vehicles (UAVs) have been widely used in various fields, both in commercial and military applications. However, detecting and tracking small drones with a low radar cross-section (RCS), such as the Phantom 3 and Phantom 4, is particularly challenging in high-security areas. This research focuses on developing a prototype radar system capable of accurately and efficiently detecting small drones. The prototype radar system is designed with a maximum detection range of 1 kilometer. utilizing Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) radar. This system employs linear up-chirp and down-chirp frequency modulation for signal transmission to detect and measure the target's distance and velocity. The study will explain the operating principles of FMCW radar, including signal generation using the USRP B210, a modern signal generation technology, and real-time signal processing through GNU Radio on a computer or laptop. The testing phase will focus on detecting Phantom 3 and Phantom 4 drones at a 1 kilometer operational range. evaluating detection performance under normal conditions and in the presence of interference. Experimental results will be compared with theoretical calculations to validate the radar system's accuracy and efficiency.

School of Electronic Engineering
Academic Year 2024

Student's Signature
Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดรวมทั้งให้โอกาสได้เข้ารับการศึกษาค้นคว้าตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

นักวิจัยอาวุโส ดร.อภิชาติ อินทรพาณิชย์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาทางวิชาการมาโดยตลอดมา

แผนกเรดาร์ภาคพื้น กองซ่อมอุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ภาคพื้น กองโรงงาน กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ ที่อนุเคราะห์ช่วยเหลือด้านเครื่องวัดการทดสอบสัญญาณและข้อมูลเรดาร์ประเภทต่างๆ เพื่อใช้ปรับแต่งในการทดสอบให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สั่งสอนทุกท่าน บิดา มารดา ญาติมิตร พี่น้อง บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบันที่คอยให้ความช่วยเหลือประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ คอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ให้การสนับสนุนในศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยถูกทอดทิ้ง ท้อแท้ ทุกข์ใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบผลสำเร็จทำให้เกิดวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้

ปฐวิน แจ้งนาม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.4.1 แนวทางการดำเนินงาน	3
1.4.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	3
1.4.3 สถานที่ทำการวิจัย	4
1.4.4 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 ปรัชญาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	9
2.1 บทนำ.....	9
2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรดาร์.....	9
2.2.1 สมการเรดาร์ (Radar Equation).....	9
2.2.2 ประเภทของเรดาร์ ทัวไปที่ใช้งานอยู่แบ่งได้ 3 แบบ	10
2.2.3 รูปแบบของสัญญาณ FMCW	12
2.2.4 Linear Frequency Modulation (LFM).....	14

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรกำเนิดความถี่.....	16
2.4	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของวงจรขยายสัญญาณภาคส่งและภาครับ	18
2.4.1	วงจรขยายสัญญาณภาคส่ง (RF Power Amplifier)	18
2.4.2	วงจรขยายสัญญาณภาครับ Low Noise Amplifier (LNA)	21
2.5	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ.....	22
2.5.1	จานดาวเทียมแบบออฟเซตแบบพาราโบลอยด์ (Offset paraboloid).....	22
2.5.2	การสูญเสียในอากาศ (Free Space Path Loss)	24
2.6	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชุดกรองสัญญาณความถี่	25
2.6.1	วงจรกรองความถี่.....	25
2.7	ซอฟต์แวร์และระบบประมวลผลสัญญาณ.....	29
2.7.1	GNU Radio.....	29
2.7.2	Doppler Processing	30
2.7.3	สรุป	31
3	ออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ	32
3.1	กล่าวนำ	32
3.2	การคำนวณและจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ทั้งระบบ	32
3.3	การออกแบบชุดกำเนิดสัญญาณ.....	35
3.4	การออกแบบและสร้างชุดขยายสัญญาณภาคส่งและภาครับ	38
3.4.1	การออกแบบและสร้างชุดขยายสัญญาณภาคส่ง (Amplifier).....	38
3.4.2	การออกแบบและสร้างชุดขยายสัญญาณภาครับ Low Noise Amplifier ...	40
3.5	การออกแบบและสร้างชุดสายอากาศ.....	40
3.6	การออกแบบและสร้างชุดกรองสัญญาณความถี่.....	43
3.7	การออกแบบเขียนโปรแกรมการตรวจจับแสดงผล	43
3.7.1	Linear FM Source.....	45
3.7.2	Waveform Controller.....	46
3.7.3	UHD: USRP Radar.....	46
3.7.4	Pulse to CPI	47
3.7.5	Matched Filter.....	47

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7.6	Doppler Processing	48
3.7.7	CFAR Detector	48
3.7.8	Range Doppler Sink.....	49
3.8	การออกแบบเรดาร์ทั้งระบบ.....	50
4	ผลการทดสอบระบบเรดาร์.....	52
4.1	บทนำ.....	52
4.2	การทดสอบสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณ	52
4.3	การทดสอบชุดเครื่องส่งและชุดเครื่องรับ.....	53
4.3.1	การทดสอบชุดเครื่องส่ง	53
4.3.2	การทดสอบชุดเครื่องรับ	55
4.4	การทดสอบชุดสายอากาศ.....	59
4.5	การทดสอบใช้งาน.....	63
4.6	สรุป	75
5	สรุปผลการดำเนินการ.....	76
5.1	สรุปผลการทดสอบ.....	76
5.2	ปัญหาและอุปสรรค.....	77
5.3	ข้อเสนอแนะ.....	77
	เอกสารอ้างอิง	78
	ภาคผนวก.....	81
	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	82
	ประวัติผู้เขียน	83

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
1.1	มาตรการตอบโต้ภัยคุกคามในรูปแบบต่างๆ ของอากาศยานไร้คนขับ	7
2.1	เปรียบเทียบความแตกต่างของ FMCW แต่ละแบบ	13
3.1	พารามิเตอร์การทำงานของเรดาร์	49



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับภาคการเกษตรและปศุสัตว์	2
1.2 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับในเชิงพาณิชย์และการสำรวจ	2
1.3 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับทางการทหาร	2
1.4 บล็อกแสดงขั้นตอนการตรวจการณ์และค้นหา (Search and Surveillance)	5
1.5 บล็อกแสดงขั้นตอนการติดตามและระบุภัยคุกคาม (Tracking and Threat System)	6
1.6 แผนผังการทำงานของเรดาร์จาก USRP	8
1.7 การออกแบบเรดาร์สำหรับ USRP B210	8
2.1 รูปแบบของสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟเรดาร์แบบ Pulse modulator, Continuous wave และ Frequency modulation continuous wave radar	10
2.2 บล็อกไดอะแกรม รูปแบบของสัญญาณพัลส์คลื่นความถี่ไมโครเวฟและสัญญาณที่สะท้อนเป้าหมายกลับมาของเรดาร์แบบ Pulse modulator radar	11
2.3 รูปแบบการส่งสัญญาณคลื่นของเรดาร์แบบ Continuous wave radar (CW Radar)	11
2.4 รูปแบบการส่งสัญญาณของเรดาร์แบบ Frequency modulation continuous wave radar (FMCW Radar)	12
2.5 คลื่น LFM ทัวไป (ก) up-chirp และ (ข) down-chirp	15
2.6 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ซึ่งมีการป้อนกลับแบบบวก	17
2.7 หลักการขยายสัญญาณของ RF Power Amplifier	18
2.8 องค์ประกอบหลักของ Power Amplifier	19
2.9 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพ (Efficiency)	20
2.10 Low Noise amplifiers เพิ่มระดับสัญญาณทั้งอินพุตและสัญญาณรบกวน	21
2.11 งานแบบออฟเซตพาราโบลา	22
2.12 โครงสร้างงานแบบพาราโบลา	23
2.13 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ แบบ Active Filter	26
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่ของสัญญาณ	26
2.15 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่แบบอนุกรม	28
2.16 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่แบบขนาน	28
2.17 การใช้งาน GNU Radio	29
2.18 การเปลี่ยนมุมการประมวลผลแบบ Doppler	30
3.1 การคำนวณและจำลองแบบทางคณิตศาสตร์เรดาร์ทั้งระบบ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 บอร์ด Universal Software Radio Peripheral (USRP™) รุ่น B210	36
3.3 รูปคลื่น LFM ทัวไปส่วนจริงและส่วนจินตภาพที่มี $B = 25 \text{ MHz}$ และ $T = 30 \mu s$	37
3.4 สเปกตรัมทัวไปสำหรับรูปคลื่น LFM สำหรับแบนด์วิดท์ 25 MHz	37
3.5 ทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF6G27S-45K และเบอร์ BLF7G24LS-140	39
3.6 ชุดขยายสัญญาณใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF6G27S-45K สำหรับออกแบบ Pre- Amplifier	39
3.7 ชุดขยายสัญญาณใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF7G24LS-140 สำหรับออกแบบ Power- Amplifier	39
3.8 Low Noise Amplifier รุ่น ZX60-83LN-S+	40
3.9 การออกแบบสายอากาศ Vivaldi	41
3.10 การจำลองและการออกแบบสายอากาศ Vivaldi ร่วมกับ Parabolic	42
3.11 ตัวกรองสัญญาณความถี่ผ่าน (Band Pass Filter - BPF)	43
3.12 แผนภาพแสดงการประมวลผลเรดาร์ Pulse-Doppler	44
3.13 บล็อก Linear FM Source	45
3.14 บล็อก Waveform Controller	46
3.15 บล็อก UHD: USRP Radar	46
3.16 บล็อก Pulse to CPI	47
3.17 บล็อก Matched Filter	47
3.18 บล็อก Doppler Processing	48
3.19 บล็อก CFAR Detector	48
3.20 บล็อก Range Doppler Sink	49
3.21 ชุดประมวลผล	49
3.22 แสดงการออกแบบเรดาร์ทั้งระบบ	50
4.1 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ FMCW จาก USRP-B210	52
4.2 การทดสอบชุดเครื่องส่ง	53
4.3 ผลการทดสอบ ($ S_{21} $) ของวงจรขยายสัญญาณ Transmitter Amplifiers	54
4.4 แสดงผลการทดสอบสัญญาณชุดเครื่องส่ง	55
4.5 การทดสอบสัญญาณของ ZX60-83LN-S+ ที่แรงดัน +5 Vdc	56
4.6 ผลการทดสอบ ($ S_{21} $) ตัวกรองสัญญาณความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)	57
4.7 การทดสอบสัญญาณชุดเครื่องรับ	58
4.8 ผลการออกแบบเทียบกับการวัดทดสอบสายอากาศของ Vivaldi	59
4.9 ผลการออกแบบเทียบกับการวัดทดสอบสายอากาศของ Parabolic	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แสดงการประกอบเครื่องเรดาร์	63
4.11 การทดสอบภายในอาคาร	64
4.12 การตั้งค่าเตรียมทดสอบ	65
4.13 แผนที่การทดสอบ	66
4.14 Range-Doppler Map ของโดรนเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์	67
4.15 Range-Doppler Map ของโดรนเคลื่อนที่เข้าหาเรดาร์	71
4.16 กราฟแสดงการสะท้อนเป้าหมาย	75



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

RCS = Radar cross section

AI = Artificial Intelligence

FMCW = Frequency-Modulated Continuous Wave

UAV = Unmanned Aerial Vehicle

GPS = Global Positioning System

ISM Band = (Industrial, Scientific, and Medical) bands

NI = National Instruments

USRP = Universal Software Radio Peripheral

UHD = USRP Hardware Driver

LNA = Low Noise Amplifier

BPF = Band Pass Filter

CPI = coherent processing interval

PLL = Phase Locked Loop

PRF = Pulse-repetition frequency

DDR3 = Double Data Rate 3

IC = integrated circuit

FPGA = Field-Programmable Gate Array

Wi-Fi = Wireless fidelity

LFM = Linear Frequency Modulation

LDMOS = Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor

SNR = Signal-to-Noise Rat

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

CUDA = Compute Unified Device Architecture

OpenCL = Open Computing Language

CPU = Graphics Processing unit

GPU = Graphic Processing Unit

RF = Radio Frequency

IF = Intermediate Frequency

ADC = Analog to Digital Converter

DAC = Digital to Analog Converter

FFT = Fast Fourier Transform

CFAR = Constant False Alarm Rate

A = amplitude

C = capacitor

R = resistance

S-parameter = scattering parameter

S_{11} = Input Reflection Coefficient

f = frequency

λ = wavelength

บทที่ 1

บทนำ

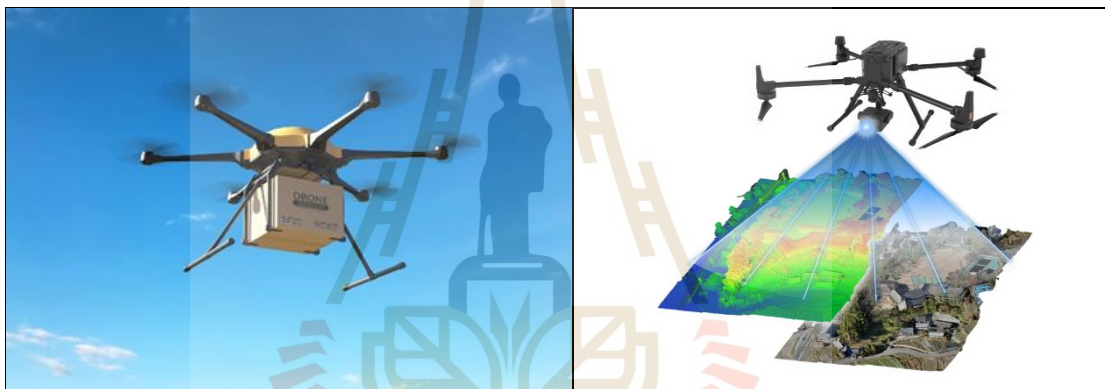
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) หรือเรียกกันทั่วไปว่า “โดรน (Drone)” คืออากาศยานที่ไม่มีนักบินแต่สามารถสั่งงานได้จากภาคพื้นโดยรีโมทคอนโทรล จึงมีรูปร่างและขนาดที่แตกต่างกันมีเอกลักษณ์เฉพาะตัวกับการใช้งาน เป็นอากาศยานที่สามารถใช้รูปแบบการป้อนคำสั่งแบบอัตโนมัติในตัว ซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในภาคเกษตรกรรมได้ถูกนำไปใช้ในการรดน้ำรักษาพืชผัก พ่นสารเคมี หรือใช้ตรวจสอบผลผลิต ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งสามารถช่วยให้การทำงานหรือกระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพมากขึ้นแม้กระทั่งภาคอุตสาหกรรมใช้สำหรับการเลี้ยงดู หรือใช้เฝ้าระวังพฤติกรรมฝูงสัตว์เลี้ยง ยิ่งไปกว่านี้ได้นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น การส่งสินค้าต่างๆ ได้กลายเป็นที่รู้จักกันดีมากขึ้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดความทันสมัยต่อการใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น หรือนำมาใช้ในการสำรวจที่พื้นเสี่ยงอันตรายที่มนุษย์เข้าถึงได้ยาก การถ่ายภาพออร์โธรอฟของสายไฟฟ้าแรงสูง พื้นที่หน้าผาสูง ช่วยเหลือภัยพิบัติต่างๆ ดังรูปที่ 1.2 และที่มีการนำมาใช้อย่างมากในสงครามยุคใหม่คือ ใช้ทางการทหาร การโจมตีทางอากาศ หรือทิ้งระเบิด ดังในรูปที่ 1.3 ซึ่งประเทศไทยก็ได้มีการนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ดังนั้น อากาศยานไร้คนขับจึงมีบทบาทสำหรับการใช้งานในประเทศมากขึ้นทุกวัน มีระบบการบินอยู่ 2 แบบในปัจจุบัน คือแบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเอง และแบบการควบคุมโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งระบบการบินด้วยตนเองต้องอาศัยโปรแกรมติดตั้งไว้ในอากาศยาน และส่วนของภาคการบังคับเส้นทางการบินนั้นจะมีระบบควบคุม (Control System) ส่วนมากจะเป็นแบบการบังคับแบบใช้วิทยุจากภาคพื้นดิน สำหรับการใส่โปรแกรมควบคุมการบินด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ในตัวเครื่องนำร่องและนำวิถี (Navigation and Guidance System) ติดตั้งอยู่จะเป็นส่วนที่สำคัญของโดรน ระบบนำร่องและนำวิถี ส่วนใหญ่จะใช้ระบบจีพีเอส (GPS) เป็นตัวช่วย ซึ่งใช้คลื่นความถี่ย่าน ISM Band ในการสั่งการทำงาน โดยเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนและราคาถูกคุ้มค่าต่อการลงทุน จึงทำให้มีการใช้งานโดรนจำนวนมากขึ้น โดยปัจจุบันหลายบริษัทได้ทำซอฟต์แวร์จำกัดเขตห้ามบิน แต่โดรนที่ประกอบขึ้นนั้นก็สามารถขึ้นบินได้ทุกพื้นที่ จึงไม่มีทางรู้ได้เลยว่าประสงค์ดีหรือไม่อาจจะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงที่จะตามมานั้น การใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อการก่อการร้ายหรือการสอดแนมสถานที่สำคัญต่าง ๆ เช่น หน่วยงานราชการที่มีสำคัญต่อความมั่นคงของประเทศ หน่วยงานกองทัพ และพระบรมมหาราชวัง เป็นต้น ซึ่งผู้ก่อการร้ายอาจจะใช้วิธีนี้สำหรับก่อความวุ่นวาย เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมได้แบบอัตโนมัติและระยะไกลมีที่กล้องถ่ายภาพความละเอียดสูง และในโครงการวิจัยสร้างนวัตกรรมนี้ ได้ออกแบบสร้างระบบเรดาร์ตรวจจ้ออากาศ

ยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหารและแจ้งเตือนได้ในเวลาเดียวกันเพื่อป้องกันภัยคุกคามที่จะเกิดขึ้น



รูปที่ 1.1 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับภาคการเกษตรและปศุสัตว์



รูปที่ 1.2 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับในเชิงพาณิชย์และการสำรวจ



รูปที่ 1.3 การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับทางการทหาร

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อให้ได้เครื่องต้นแบบและระบบตรวจจับภัยคุกคามจากอากาศยานไร้คนขับเพดานบินต่ำด้วยระบบเรดาร์เคลื่อนที่ระยะทำการ 1 กิโลเมตร จำนวน 1 ชุด สามารถตรวจจับอากาศยานไร้คนขับที่มีค่า Radar cross-section (RCS) = 0.01 ตารางเมตร (DJI Phantom 3, 4) ย่านความถี่ 2.0 - 6.0 GHz

1.2.2 ได้องค์ความรู้และสามารถนำไปใช้งานในกองทัพ ทำให้ได้เทคโนโลยีใหม่ที่มีการตรวจจับด้วยความแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 การวิจัยนี้ มุ่งหวังประดิษฐ์เรดาร์ที่ตรวจจับโดรน (DJI Phantom 3, 4) สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่กว้าง 2.0 - 6.0 GHz มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทางตรง ที่ระยะทำการไม่เกิน 1 กิโลเมตร

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 แนวทางการดำเนินงาน

ศึกษาและสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเรดาร์รูปแบบต่างๆ ที่มีในปัจจุบัน เพื่อเป็นตัวเลือกประกอบการออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เพื่อทำการออกแบบและสร้างระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร เมื่อระบบพร้อมใช้งานจึงทำการทดสอบการทำงานของระบบเรดาร์และเก็บค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.4.2 ระเบียบวิธีวิจัย

1.4.2.1 ศึกษาค้นคว้าเก็บข้อมูลและปัญหาต่างๆ โดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.4.2.2 วิเคราะห์ ออกแบบ และศึกษาถึงความเป็นไปได้ด้วยข้อมูลต่างๆ ทางคณิตศาสตร์หรือข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการเกี่ยวกับระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร

1.4.2.3 สร้างเครื่องต้นแบบเพื่อทำการวัดและทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ พร้อมทั้งเก็บผลการทดสอบ

1.4.3 สถานที่ทำการวิจัย

1.4.3.1 ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเครื่องมือ 3 (F3) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.4.3.2 ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ อาคารสิรินธรวิศวกรรม (F11) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.4.3.3 ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ อาคารเกษตรวิวัฒน์ (F14) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เลขที่ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.4.4 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (laptop)
- 2) เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (spectrum analyzer)
- 3) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer)
- 4) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal analyzer)
- 5) กล้องถ่ายภาพความร้อน
- 6) แหล่งจ่ายไฟ (power supply)
- 7) ตัวลดทอนสัญญาณ (attenuator)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ต้นแบบระบบเรดาร์ FMCW ที่สามารถพัฒนาต่อยอดเป็นให้เกิดประโยชน์ต่อหน่วยงานทางทหารที่ใช้งานระบบเรดาร์ป้องกันภัยคุกคามต่อ่านฟ้าและเป็นทางเลือกในป้องกันพื้นที่เสี่ยงต่อการโจมตี นอกจากนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ

1.5.2 ได้องค์ความรู้ในเรื่องของการออกแบบระบบเรดาร์ ซึ่งเป็นแนวทางให้กับหน่วยงานหรือสถาบันต่าง ๆ ที่สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ เพื่อยกระดับและต่อยอดให้มีประโยชน์ต่อหน่วยงานเพิ่มมากยิ่งขึ้น

1.5.3 รู้และเข้าใจในเรื่อง UAV มากขึ้นนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานหลายด้านเพื่อนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ในการต่อยอดไปในงานวิจัยอื่นได้

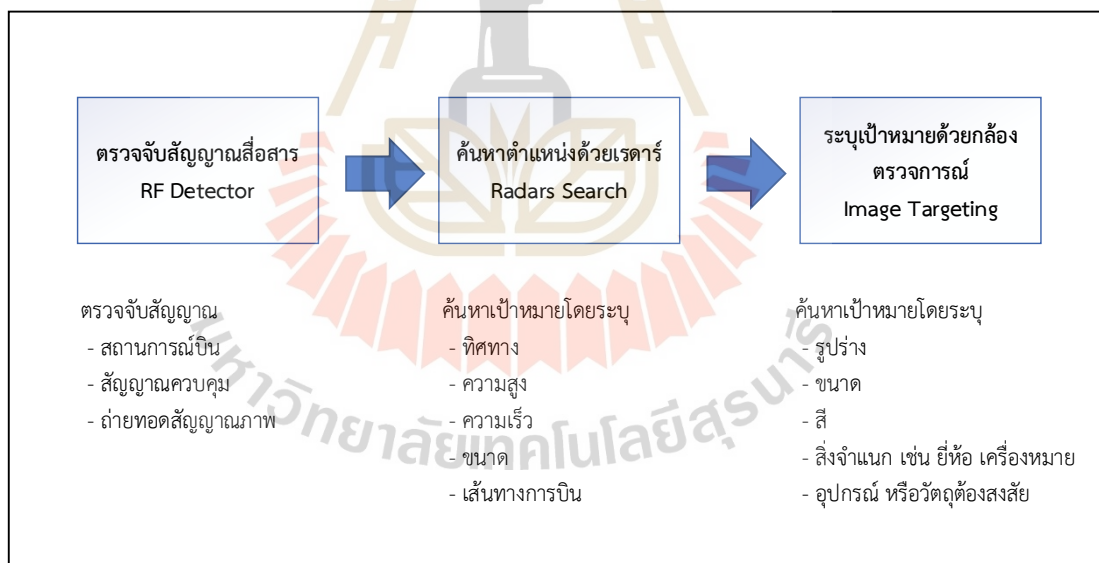
1.6 บริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือ การออกแบบสร้างระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร หรือ โดรน ที่เริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลายเป็นจำนวนมากมีการใช้งานเพิ่มมากขึ้นทุกวัน ส่วนมากจะเป็นอากาศยานขนาดเล็กกว่าอากาศยานแบบปกติทั่วไป จึงมีพื้นที่ RCS ที่สัญญาณเรดาร์จะไปกระทบนั้นน้อยมาก การตรวจการณ์ด้วยเรดาร์

แบบปกติ ซึ่งใช้ตรวจจับอากาศยานทั่วไปจะทำได้ยาก จำเป็นต้องใช้เรดาร์ที่มีความละเอียดมากกว่าปกติประกอบกับซอฟต์แวร์ในการประมวลผลที่มีลักษณะเฉพาะสำหรับการตรวจจับวัตถุที่มีพื้นที่ RCS ขนาดเล็กมาก อากาศยานไร้คนขับในภารกิจบินสอดแนม ตรวจการณ์และหาข่าว มักจะมีรูปแบบการบินที่ถูกโปรแกรมเอาไว้ค่อนข้างตายตัว (ยกเว้นมีการควบคุมระยะไกลจากนักบินภายนอก) จึงมักถูกตรวจจับได้ด้วยระบบปัญญาประดิษฐ์ (AI) ที่มีอยู่ในระบบตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ

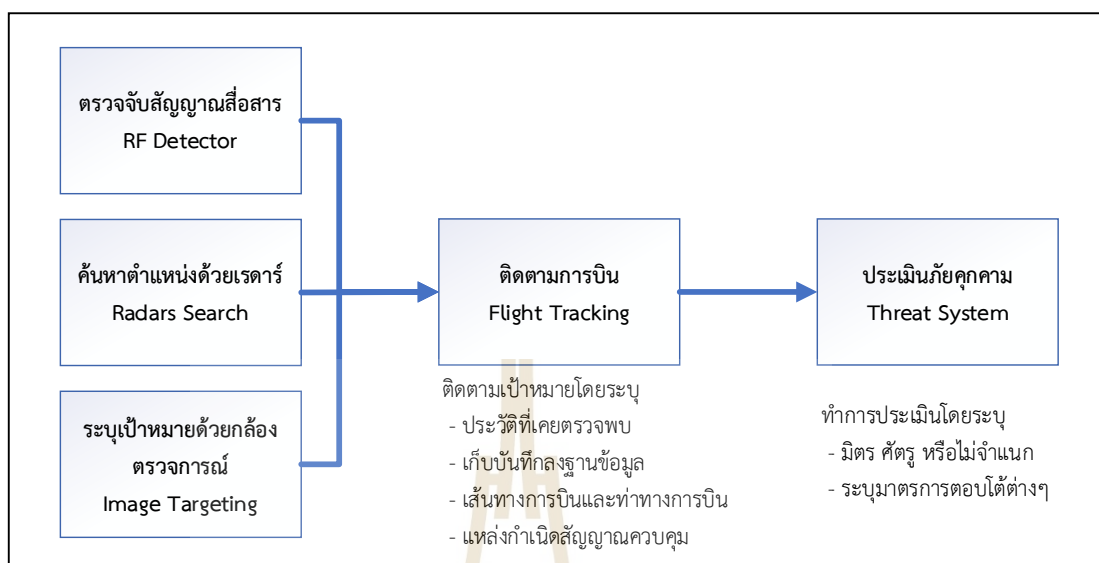
อากาศยานไร้คนขับทุกแบบมีการปล่อยสัญญาณอย่างน้อยที่สุดคือ สัญญาณสถานะการบิน (Flight Telemetry) ซึ่งจะทำให้ถูกตรวจจับได้ ยกเว้นอากาศยานไร้คนขับที่จงใจปฏิบัติการแบบ “พลีชีพ” (Suicide UAV) ที่ไม่มีการปล่อยสัญญาณใดๆ ออกมาและใช้ระบบนำร่องภายใน (Internal Navigation System) เท่านั้น ทำให้มีการนำอากาศยานไร้คนขับลักษณะนี้ของผิดกฎหมายตามเขตชายแดน ใช้เป็นอาวุธบรรทุกระเบิด หรือการกระทำการอื่นที่ผิดต่อกฎหมาย จึงมีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายได้ ระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้น ปัจจุบันนี้มีรูปแบบการตอบโต้ภัยคุกคามจากอากาศยานไร้คนขับเพดานบินต่ำ 3 ขั้นตอน ต่อไปนี้

1) การตรวจการณ์และค้นหา (Search and Surveillance)



รูปที่ 1.4 บล็อกแสดงขั้นตอนการตรวจการณ์และค้นหา (Search and Surveillance)

2) ติดตามและระบุภัยคุกคาม (Tracking and Threat System)



รูปที่ 1.5 บล็อกแสดงขั้นตอนการติดตามและระบุภัยคุกคาม (Tracking and Threat System)

ปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับถูกใช้งานทั้งในกิจการทางทหารและพลเรือนเป็นจำนวนมาก การจำแนกว่าเป็นภัยคุกคามนั้นจำเป็นต้องอาศัยการติดตาม เฝ้าระวังและตรวจจับประวัติการใช้งาน รูปลักษณ์และข้อมูลจากข่าวกรองเป็นสำคัญ ถ้าถูกผลิตมาเพื่อวัตถุประสงค์ทางทหาร รวมถึงอากาศยานไร้คนขับแบบสำเร็จรูปจากผู้ผลิตที่มีชื่อเสียงหรือระบุที่มาได้นั้นจะมีรูปแบบตายตัว ทำให้จำแนกได้ง่ายขึ้นกว่าที่ประกอบเองจากชิ้นส่วนที่มีขายในท้องตลาด (Custom Mode)

การติดตามจะมีการติดตามเส้นทางการบิน ท่าทางการบินนับตั้งแต่เริ่มตรวจจับได้ตลอดจนติดตามตำแหน่งต้นกำเนิดสัญญาณควบคุมด้วยเช่นกัน ระบบปัญญาประดิษฐ์ในซอฟต์แวร์ติดตามและประเมินภัยคุกคามจะจำแนก มิตร หรือ ศัตรู (Friend or Foe) จากปัจจัยต่างๆ เช่น รูปลักษณ์ภายนอก อุปกรณ์ที่ติดตั้ง คลื่นความถี่ใช้งาน เจ้าของหรือผู้ใช้งาน ประวัติจากฐานข้อมูลผู้ก่อเหตุ และท่าทางการบินว่ามีลักษณะคุกคามหรือไม่

3) การสกัดกั้นและทำลาย (Interception and Destruction) อากาศยานไร้คนขับเป็นวัตถุที่บิน (Flying Object) ที่ไร้นักบิน ไม่มีสิ่งมีชีวิตอยู่ภายใน จึงไม่จำเป็นที่จะต้องประนีประนอม หรือแจ้งเตือนล่วงหน้าเมื่อมีการละเมิดกฎหมาย หรือความมั่นคงอย่างใดอย่างหนึ่ง การจัดการเพื่อป้องกันภัยคุกคามจากอากาศยานไร้คนขับคือการทำให้หมดสภาพการใช้งาน นั่นคือการทำให้ร่วงหล่นจากฟ้า จึงกำหนดไว้ดังนี้

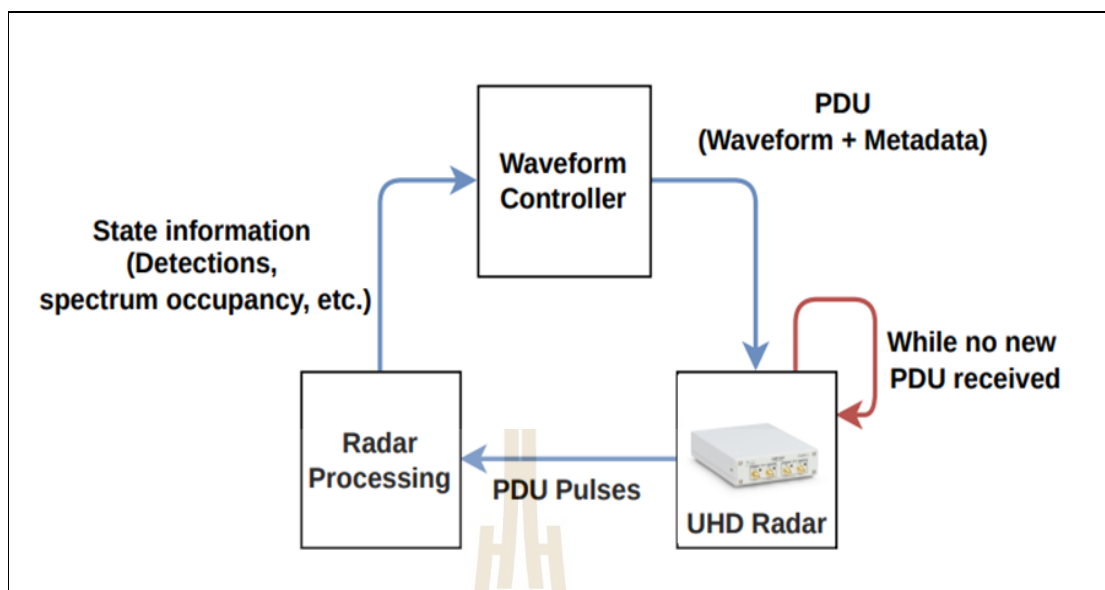
- 1) แทรกแซงเพื่อบังคับให้ลงจอด (Jam for Ditching)
- 2) แทรกแซงเพื่อให้ตก (Jam for Falling)
- 3) การล่าจับ (Hunt for Arresting)
- 4) ยิงทำลาย (Fire for Destroy)

ตารางที่ 1.1 มาตรการตอบโต้ภัยคุกคามในรูปแบบต่างๆ ของอากาศยานไร้คนขับ

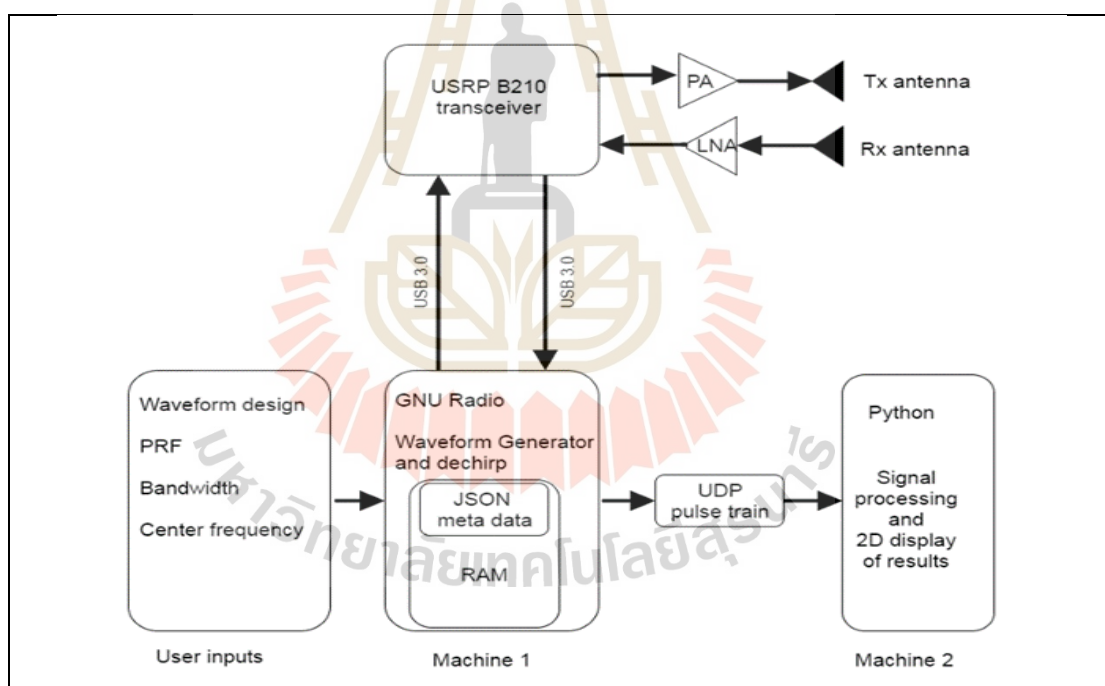
Concern	Jam for Ditching	Jam for Falling	Hunt for Arresting	Fire for Destroy
ต้องเก็บเป็นหลักฐาน	ใช้ Jammer และ Location Hacking	ใช้ Jammer อย่างเดียว	ใช้ Drone Hunter และตาข่าย	ไม่ควรใช้
เป็นอันตรายต่อพื้นที่ร่วหล่น	ใช้ Jammer และ Location Hacking	ไม่ควรใช้	ใช้ Drone Hunter และตาข่าย	ปืนต่อสู้อากาศยานและซีปนาวุธ
ติดตั้งอาวุธและวัตถุระเบิด	ไม่ควรใช้	ไม่ควรใช้	ใช้ Drone Hunter และตาข่าย	ปืนต่อสู้อากาศยานและซีปนาวุธ
ไร้การควบคุม	ไม่สามารถใช้งานได้	ไม่สามารถใช้งานได้	ใช้ Drone Hunter และตาข่าย	ปืนต่อสู้อากาศยานและซีปนาวุธ

จากงานวิจัยของ Shane Flandermeyer และคณะ ในปี ค.ศ 2016 ได้สร้างระบบเรดาร์ที่มีรูปแบบ FMCW โดยใช้ gr-plasma นำเสนอเป็นวิธีที่สะดวกในการทำเรดาร์โดยใช้ NI-USRP-2901 ในการสร้างสัญญาณ FMCW ใช้ย่านความถี่ 5.5 GHz แบนด์วิดท์ $B = 25$ MHz ใช้สายอากาศแบบ พาราโบลิกมีอัตราการขยายอากาศ 25 dBi ที่เข้ากันได้กับ UHD โมดูล ทำงานทั้งหมดผ่าน GNU Radio ในการตรวจจับรถยนต์ ระยะทาง 150 ฟุต และผลลัพธ์ของการประมวลผลใช้งาน Range-Doppler แสดงผลดังรูปที่ 1.6

จากงานวิจัยของ Themba W. Mathumo และคณะ ในปี ค.ศ 2017 ได้สร้างใช้เรดาร์ FMCW สำหรับการตรวจจับโดรนบน SDR โดยใช้ GNU Radio และ USRP B210 การออกแบบและใช้เรดาร์เฟ้าระวังแบบ FMCW เพื่อตรวจจับโดรนที่มีหน้าตัดเรดาร์ 0.1 ตร.ม. กำลังส่ง 13 dBm อัตราการขยายของ LNA 14 dB และระยะทางตรวจจับที่ 150 เมตร แสดงผลในรูปแบบแผนที่ Doppler โดยใช้การประมวลรูปแบบ Fast Fourier Transform แบบ 2 มิติ ในการทำ signal processor ดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.6 แผนผังการทำงานของเรดาร์จาก USRP



รูปที่ 1.7 การออกแบบเรดาร์สำหรับ USRP B210

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบสร้างระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร สำหรับป้องกันภัยคุกคาม เพื่อความมั่นคงของกองทัพ สามารถแบ่งเป็นส่วนที่สำคัญคือ หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบเรดาร์ วงจรกำเนิดความถี่ วงจรการขยายสัญญาณภาคส่งและภาครับ ชุดสายอากาศ ชุดวงจรกรองสัญญาณความถี่ และการใช้งานซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณ

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรดาร์

2.2.1 สมการเรดาร์ (Radar Equation)

ในการส่งสัญญาณออกไปและรับสัญญาณสะท้อนกลับมาจากเป้าหมายในอุดมคติ เป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ 2.1 ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังงานที่ส่งคลื่นความถี่ไมโครเวฟ ระยะทางของเป้าหมาย อัตราขยายการของสายอากาศทางด้านส่งและรับ รวมถึงประสิทธิภาพการกระจายคลื่นไมโครเวฟและขนาดพื้นที่การสะท้อนของเป้าหมาย เป็นต้น

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi^3) R^4 L} \quad (2.1)$$

หรือช่วงระยะทางสูงสุดถูกกำหนดโดยสมการที่ 2.2

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{r(\min)}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.2)$$

โดยที่

$R_{\max}$ = ช่วงระยะทางสูงสุด หน่วย เมตร (m)

$P_{r(\min)}$ = กำลังงานน้อยสุดที่รับได้ หน่วย วัตต์ (Watt)

P_r = กำลังงานทั้งหมดที่รับได้ (Total power received) หน่วย วัตต์ (Watt)

P_t = กำลังงานที่ส่ง (Power transmitted) หน่วย วัตต์ (Watt)

σ = สัมประสิทธิ์การกระจายต่อพื้นที่ (Radar cross section) ตารางเมตร (m^2)

G = อัตราการขยายจากสายอากาศ (Antenna gain) หน่วย (dBi)

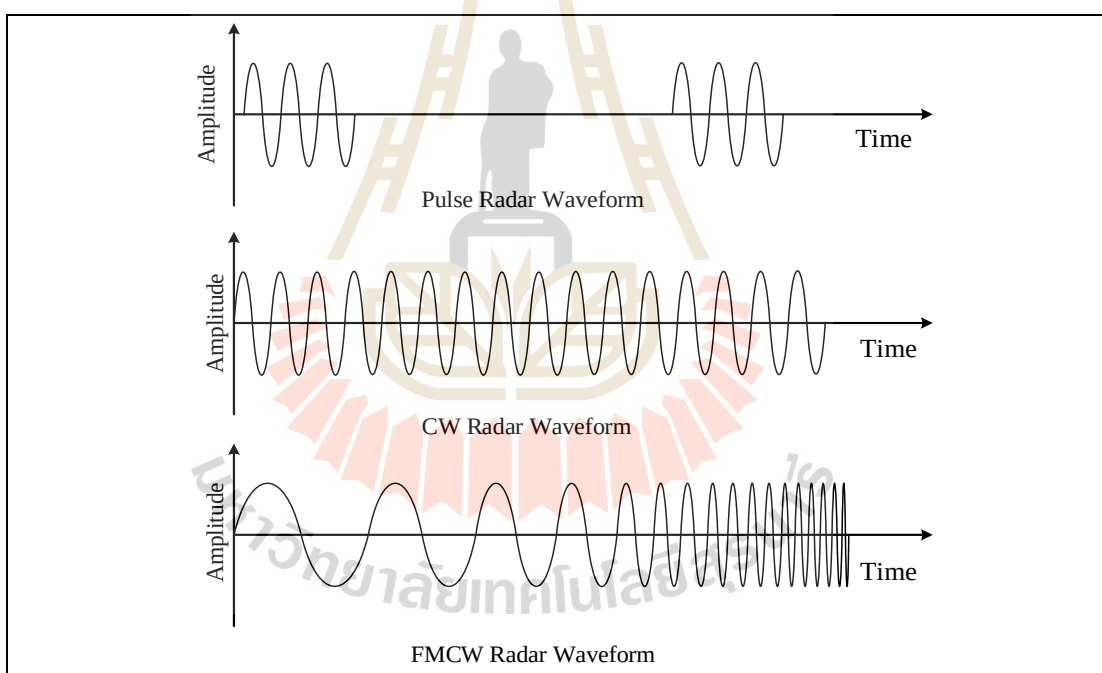
R = ระยะทางแนวพิสัย (Range) หน่วย เมตร (m)

λ = ช่วงความยาวคลื่น (Wavelength) หน่วย เมตร (m)

L = การสูญเสียทั่วไปที่คิดเป็นทั้งระบบและการสูญเสียการแพร่กระจาย (dB)

ดังนั้นจากสมการที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความเข้มของพลังงานที่กระจัดกระจาย คือ พลังงานที่ส่งออก ความยาวคลื่นความถี่ ขนาดของสายอากาศรับ-ส่ง สัญญาณ และมุมของการสะท้อนคลื่นความถี่ เช่น ความกว้างของลำคลื่น มุมตกกระทบ ระยะทาง และการหักเหของชั้นบรรยากาศ เป็นต้น

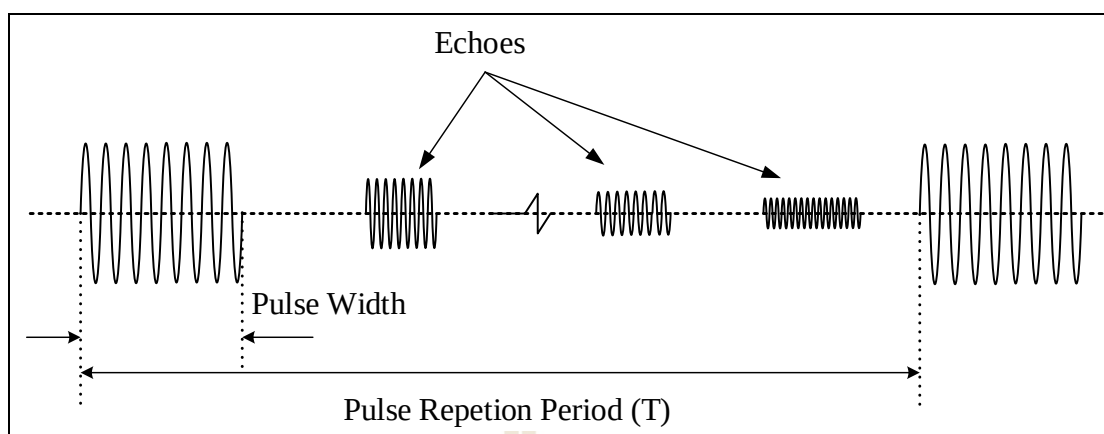
2.2.2 ประเภทของเรดาร์ ทั่วไปที่ใช้งานอยู่แบ่งได้ 3 แบบ



รูปที่ 2.1 รูปแบบของสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟเรดาร์แบบ Pulse modulator, Continuous wave และ Frequency modulation continuous wave radar

2.2.2.1 Pulse modulator radar

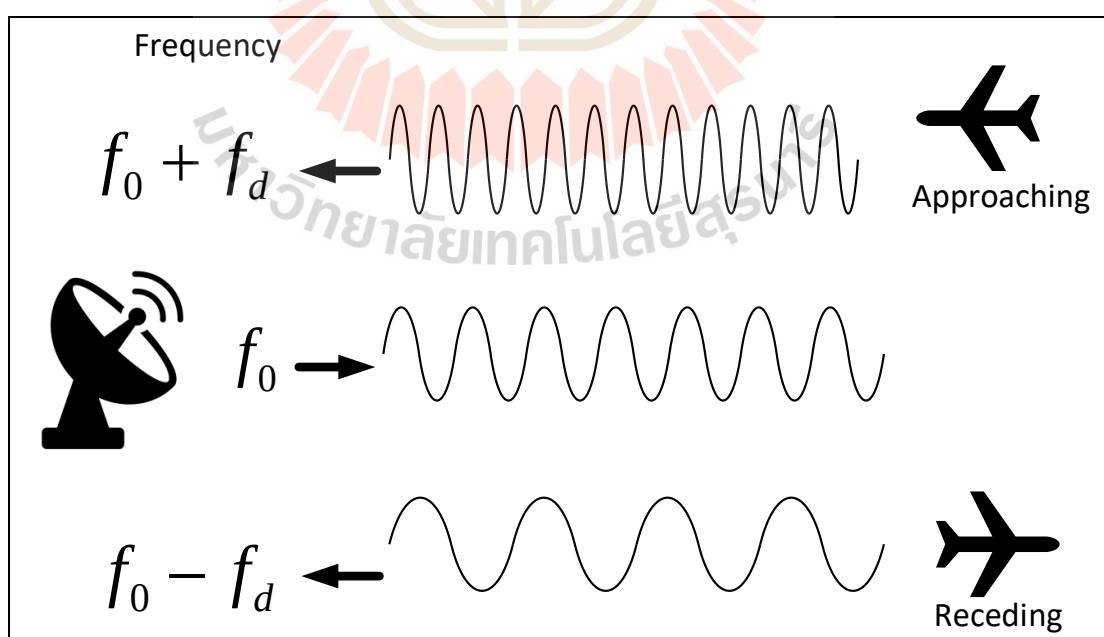
การทำงานของระบบจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟผ่านสายอากาศออกไปเป็นช่วงๆ แบบพัลส์ (Pulse) และในระหว่างช่วงของการที่ส่งสัญญาณจะหยุดเพื่อรับสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่สะท้อนเป้าหมายกลับมา ดังรูปที่ 2.2 ทำการวิเคราะห์ระยะเวลาของการสะท้อนกลับและความแรงของสัญญาณ ทำให้ทราบระยะห่างของเป้าหมาย ความเร็วและความสูงของเป้าหมายได้ ระบบมีขนาดใหญ่ วงจรมีความซับซ้อน เหมาะกับระบบการบินและทางการทหาร



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรม รูปแบบของสัญญาณพัลส์คลื่นความถี่ไมโครเวฟและสัญญาณที่สะท้อน
เป้าหมายกลับมาของเรดาร์แบบ Pulse modulator radar

2.2.2.2 Continuous wave radar (CW Radar)

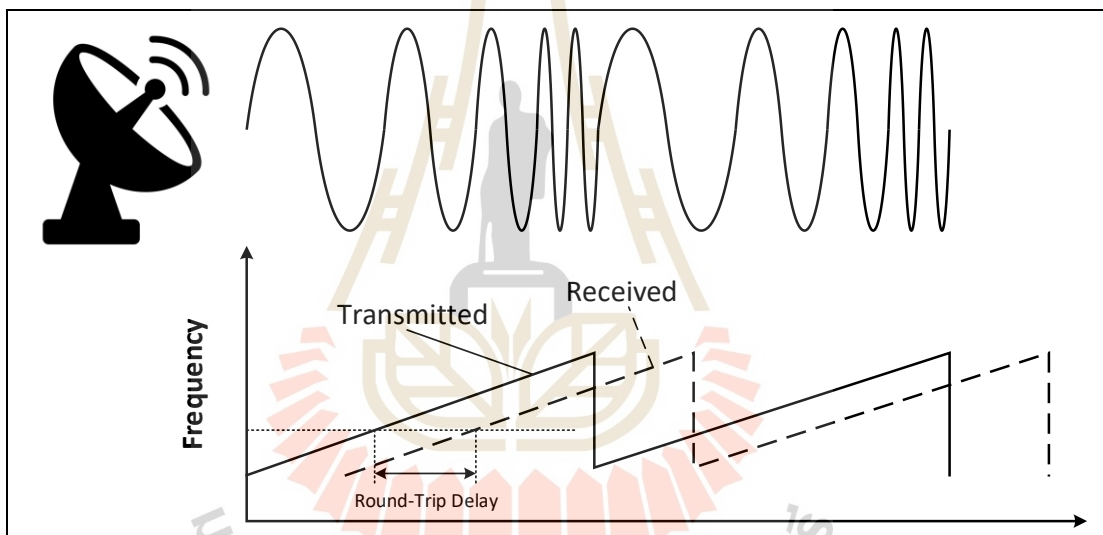
การทำงานของระบบจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟผ่านทางสายอากาศส่ง อย่างต่อเนื่องและในระหว่างที่ส่งสัญญาณ จะทำการรับสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่สะท้อนเป้าหมายกลับมาทางสายอากาศรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องเช่นกัน โดยสัญญาณคลื่นความถี่ที่รับเข้ามาจะทำการวิเคราะห์ สัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่เปลี่ยนแปลงไป จะทำให้ทราบความเร็วของเป้าหมาย และการเคลื่อนที่ของตัวเป้าหมายว่าเข้าหรือออกจากเรดาร์คลื่นสัญญาณความถี่ไมโครเวฟ หรือเรียกหลักการนี้ว่า ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (Doppler effect) ดังรูปที่ 2.3 ระบบมีขนาดเล็ก วงจรไม่ซับซ้อน เหมาะใช้งานทั่วไป เช่น ตรวจจับความเร็ว การเคลื่อนที่ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 รูปแบบการส่งสัญญาณคลื่นของเรดาร์แบบ Continuous wave radar (CW Radar)

2.2.2.3 Frequency modulation continuous wave radar (FMCW Radar)

การทำงานของระบบจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟผ่านทางสายอากาศส่ง อย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับระบบ Continuous wave radar แต่มีข้อแตกต่างกันคือ จะส่งในรูปของสัญญาณแบบ Frequency modulation (FM) และในระหว่างที่ส่งสัญญาณจะทำการรับสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่สะท้อนเป้าหมายกลับมาทางสายอากาศรับสัญญาณอย่างต่อเนื่องเช่นกัน โดยสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่รับเข้ามาจะทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่ส่งและเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปกับสัญญาณคลื่นความถี่แบบ FM ที่ส่งออกจากสายอากาศส่ง จะทำให้ทราบความเร็วของเป้าหมาย ระยะห่างและการเคลื่อนที่ของตัวเป้าหมายว่าเข้าหรือออก จากเครื่องส่งสัญญาณคลื่นความถี่เป็นต้น ดังรูปที่ 2.4 เป็นระบบที่มีขนาดเล็ก วงจรไม่ซับซ้อน สามารถติดตามเป้าหมายขนาดเล็กได้ทั้งความเร็ว ระยะทาง เป็นระบบที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน ติดตั้งเป็นระบบเรดาร์รถยนต์ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 รูปแบบการส่งสัญญาณของเรดาร์แบบ Frequency modulation continuous wave radar (FMCW Radar)

2.2.3 รูปแบบของสัญญาณ FMCW

รูปแบบของสัญญาณสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบหลักๆ แบ่งตามลักษณะของการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณที่ส่งออกไป ได้แก่

2.2.3.1 Up-Chirp FMCW (Linear Up-Sweep)

เป็นรูปแบบที่ความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้นตามเวลา ใช้ในการวัดระยะทางของเป้าหมายโดยพิจารณาความแตกต่างของความถี่ระหว่างสัญญาณที่ส่งและรับ นิยมใช้ในระบบเรดาร์ระยะสั้น เช่น เซ็นเซอร์กันชนในรถยนต์

2.2.3.2 Down-Chirp FMCW (Linear Down-Sweep)

เป็นรูปแบบที่ความถี่ของสัญญาณลดลงตามเวลา หลักการทำงานเหมือน Up-Chirp แต่ใช้ความถี่ลดลงแทนใช้ในบางระบบที่ต้องการลดผลกระทบจากการสะท้อนของรูปแบบสัญญาณ

2.2.3.3 Triangular FMCW (Up-Down Chirp)

ความถี่ของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นรูปสามเหลี่ยม (Up & Down Sweep) สามารถใช้วัดระยะทางและความเร็วของเป้าหมายได้ในเวลาเดียวกันใช้ในระบบที่ต้องการตรวจจับเป้าหมายที่มีความเร็วเปลี่ยนแปลง เช่น เรดาร์ตรวจจับยานพาหนะ

2.2.3.4 Sawtooth FMCW (Sawtooth Chirp)

ความถี่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแล้วรีเซ็ตกลับไปหาค่าเริ่มต้นใช้ในการวัดระยะทางเป็นหลัก เพราะช่วยลดผลกระทบจากการแปรปรวนของสัญญาณสะท้อนพบได้ในระบบเรดาร์ตรวจจับสิ่งกีดขวาง

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความแตกต่างของ FMCW แต่ละแบบ

ประเภท FMCW	รูปแบบของสัญญาณ	การใช้งานหลัก
Up-Chirp	เพิ่มความถี่ขึ้น	วัดระยะทาง
Down-Chirp	ลดความถี่ลง	ลดผลกระทบจากสัญญาณสะท้อน
Triangular Chirp	เพิ่มขึ้นแล้วลดลง	วัดระยะทางและความเร็ว
Sawtooth Chirp	เพิ่มต่อเนื่องแล้วรีเซ็ต	วัดระยะทางแม่นยำ

แต่ละประเภทมีจุดเด่นที่เหมาะสมกับการใช้งานในสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น Triangular FMCW เหมาะสำหรับการตรวจจับวัตถุเคลื่อนที่ ขณะที่ Sawtooth FMCW เหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความแม่นยำสูงในการวัดระยะทาง

ดังนั้น ทั้ง 4 รูปแบบนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ถ้าใช้ Up-Chirp อย่างเดียว ต้องการรีเซ็ตความถี่ทันทีกลายเป็น Sawtooth Chirp หากใช้ Up-Chirp ที่ไม่ต้องการรีเซ็ตทันทีค่อยๆลดลงต่อไปหรือ Down-Chirp จะกลายเป็น Triangular Chirp ซึ่ง FMCW Radar จึงนิยมใช้ Triangular Chirp เพราะช่วยให้วัดระยะทางและความเร็วได้แม่นยำขึ้น

2.2.4 Linear Frequency Modulation (LFM)

เป็น FMCW รูปแบบ Up-Chirp และ Down-Chirp รูปแบบของการมอดูเลตที่ทำให้ความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในลักษณะเชิงเส้น (Linear) ซึ่งหมายความว่าความถี่ของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงเวลาที่กำหนด สัญญาณกวาดในโดเมนเวลาถูกกำหนดโดยสมการ 2.3 โดยทั่วไปมีสัญญาณ LFM สองประเภทกว้างๆ ที่กำหนดโดยลักษณะการกวาดเชิงเส้น up-chirp และ down-chirp ของแบนด์วิดท์ ในรูปที่ 2.5 แสดงสัญญาณ LFM ทั้งสองแบบ แสดงเฟส LFM up-chirp เครื่องหมาย (+) ความถี่เพิ่มขึ้น และ down-chirp เครื่องหมาย (-) ความถี่ลดลง โดยสมการที่ 2.4 และ 2.5 ตามลำดับ

$$\phi(t) = 2\pi(f_0 t \pm \frac{\mu}{2} t^2) \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \quad (2.3)$$

สำหรับ up-chirp สมการที่ 2.4

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta(t) = f_0 + \mu t \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \quad (2.4)$$

สำหรับ down-chirp สมการที่ 2.5

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta(t) = f_0 - \mu t \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \quad (2.5)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

ถ้า $\mu > 0$, $f(t)$ จะเพิ่มขึ้น (Up-Chirp)

ถ้า $\mu < 0$, $f(t)$ จะลดลง (Down-Chirp)

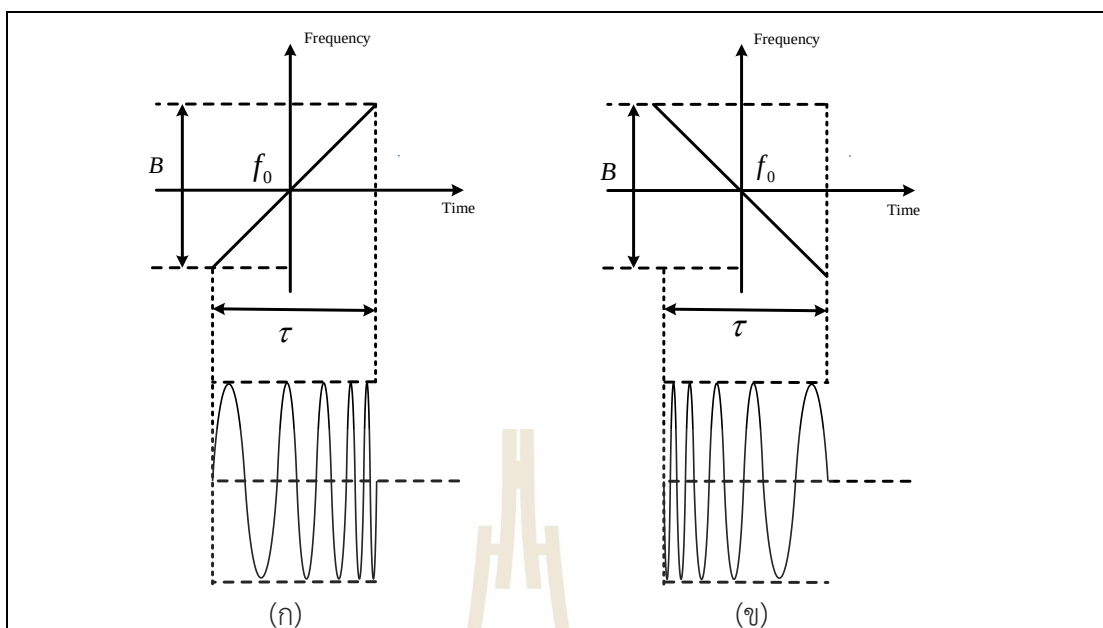
โดยที่

$\phi(t)$ = เฟสของสัญญาณ

f_0 = ความถี่ศูนย์กลาง

μ = chirp Rate ซึ่งกำหนดอัตราการเปลี่ยนแปลงของความถี่ $\mu = (2\pi B) / \tau$ หน่วย $(\text{rad} / \text{s}^2)$

τ = ความกว้างของพัลส์



รูปที่ 2.5 คลื่น LFM ทัวไป (ก) up-chirp และ (ข) down-chirp

LFM ถูกใช้ใน FMCW Radar และ Pulse Compression Radar โดยจะช่วยเพิ่ม Range Resolution และ SNR ผ่านเทคนิค Pulse Compression ซึ่งช่วยให้เรดาร์สามารถใช้สัญญาณพัลส์ที่ยาวขึ้นโดยไม่ลดความสามารถในการแยกเป้าหมายที่อยู่ใกล้กัน เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับระยะทางและวัตถุที่มีความเร็วสูง ส่วนสัญญาณ Chirp จะถูกสร้างขึ้นและความแตกต่างของเฟสหรือความถี่ (Beat Frequency: f_b) ผลต่างความถี่ระหว่างสัญญาณที่ส่งและสะท้อนกลับจะถูกใช้ในการคำนวณระยะทางของเป้าหมาย สามารถคำนวณระยะทางของวัตถุ (R) ได้จากสมการที่ 2.6

$$R = \frac{cT}{2B} f_b \quad (2.6)$$

โดยที่

c = ความเร็วแสง ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

T = ระยะเวลา chirp

B = Bandwidth แถบความถี่ของสัญญาณ chirp

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า (Bandwidth: B) ของสัญญาณมีผลโดยตรงต่อความสัมพันธ์ระหว่างระยะความละเอียดของเรดาร์ (Range Resolution: ΔR) ความละเอียดนั้นคำนวณจากสมการที่ 2.7

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (2.7)$$

ดังนั้น ถ้าวัตถุเคลื่อนที่ Beat Frequency จะมีส่วนกับ Doppler Shift (f_D) การเคลื่อนที่
สามารถใช้ Doppler Shift เพื่อตรวจจับความเร็วของวัตถุได้ใช้ในการคำนวณระยะห่างของวัตถุ
ดังสมการที่ 2.8

$$f_b = \frac{B}{T} \frac{2R}{c} + f_D \quad (2.8)$$

โดยที่ Doppler Shift (f_D) เกิดจากการเคลื่อนที่ของวัตถุหาได้จากสมการที่ 2.9

$$f_D = \frac{2vf_c}{c} \quad (2.9)$$

และสามารถใช้คำนวณอัตราเร็วของเป้าหมาย v ได้จากสมการที่ 2.10

$$v = \frac{cf_D}{2f_c} \quad (2.10)$$

โดยที่

v = ความเร็วของวัตถุ (m/s)

f_c = ความถี่พาหะ หรือ ความถี่ศูนย์กลางของสัญญาณ FMCW (Hz)

2.3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรกำเนิดความถี่

วงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator or Waveform Generator) เป็นวงจรที่มีความสำคัญ
ในทางอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร วงจรกำเนิดสัญญาณสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ ๆ
ด้วยกันคือ วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal waveform) และวงจรกำเนิดสัญญาณรูปอื่น ๆ
ที่ไม่ใช่สัญญาณไซน์ (Non-Sinusoidal Waveform) ซึ่งได้แก่ สัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular)
และสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square) เป็นต้น

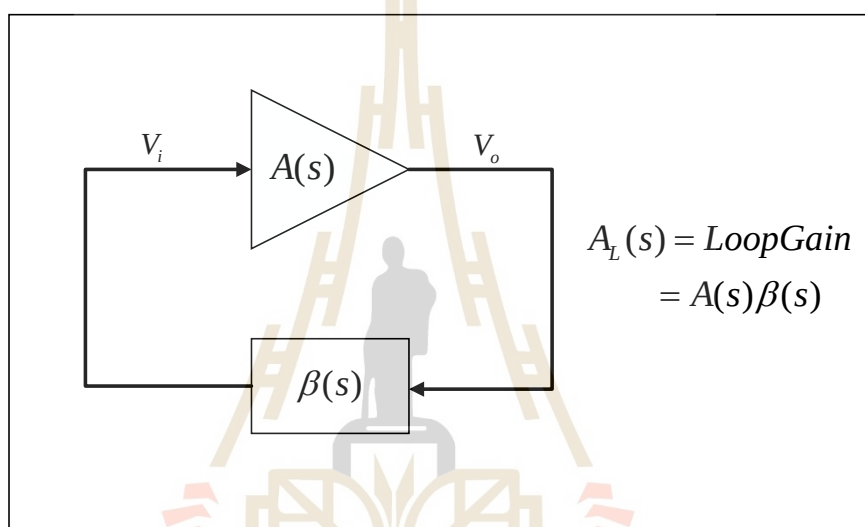
วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ (Sinusoidal Waveform Generator) เป็นการสร้างวงจร
กำเนิดสัญญาณรูปไซน์แบบที่เข้าใจง่าย ทำได้โดยใช้วงจรขยายที่มีอัตราขยายสูงเช่น Op Amp ต่อกับ
เครือข่าย RC หรือ LC ในลักษณะป้อนกลับแบบบวก (Positive Feedback) ความถี่ของวงจรกำเนิด
สัญญาณรูปไซน์ลักษณะนี้ควบคุมได้โดยการปรับค่าความต้านทาน (R) และค่าความเก็บประจุ (C)
บางตัวในวงจร ทั้งนี้จะต้องให้สอดคล้องกับเงื่อนไขเฉพาะที่จะทำให้เกิดการแกว่ง (Oscillation)
ขนาดของสัญญาณไซน์ที่ถูกสร้างขึ้นจะถูกจำกัดโดยย่านการทำงานเชิงเส้นของวงจรขยายที่ใช้
วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ลักษณะนี้ จึงถูกเรียกว่าเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบเชิงเส้น
(Linear Oscillators) เกณฑ์ของ Barkhausen (Barkhausen's Criteria)

วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ใดๆ จะต้องมีการสร้างพื้นฐาน จะแสดงในรูปที่ 2.6 จากรูป $A(s)$ และ $\beta(s)$ เป็นอัตราขยายเดินหน้า (Forward) และอัตราขยายป้อนกลับ (feedback) ตามลำดับเงื่อนไขสำคัญ ที่จะทำให้วงจรนี้เกิดการแกว่งได้เรียกว่า เกณฑ์ของ Barkhausen ซึ่งขึ้นกับอัตราขยายวงรอบ (Loop Gain) ของวงจรคือ $A_L(s) = A(s)\beta(s)$ เกณฑ์ของ Barkhausen

ประกอบด้วยเกณฑ์สำคัญ 2 ประการ คือ

เกณฑ์ของเฟส: $\angle A_L(j\omega_0) = 0 \pm 360^\circ$ (2.11)

เกณฑ์ของอัตราขยาย: $|A_L(j\omega_0)| \geq 1$ (2.12)



รูปที่ 2.6 วงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ซึ่งมีการป้อนกลับแบบบวก

ผลทางกายภาพที่เกิดขึ้นจากเกณฑ์ทั้งสองนี้ ก็คือ สัญญาณขาออก V_o ที่มีความถี่ f_0 จะมีเฟสตรงกับสัญญาณ V_o ที่ถูกป้อนเข้าที่ขาเข้าของวงจรขยาย A เมื่อวนกลับมาครบรอบแต่จะมีแอมพลิจูดที่ใหญ่กว่าเดิม กล่าวอีกอย่างหนึ่งก็คือวงจรนี้มีการป้อนกลับแบบบวกที่ความถี่ f_0 นั้นเอง ด้วยเกณฑ์ทั้งสองนี้วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์จึงสามารถกำเนิดและรักษาการแกว่งของสัญญาณได้

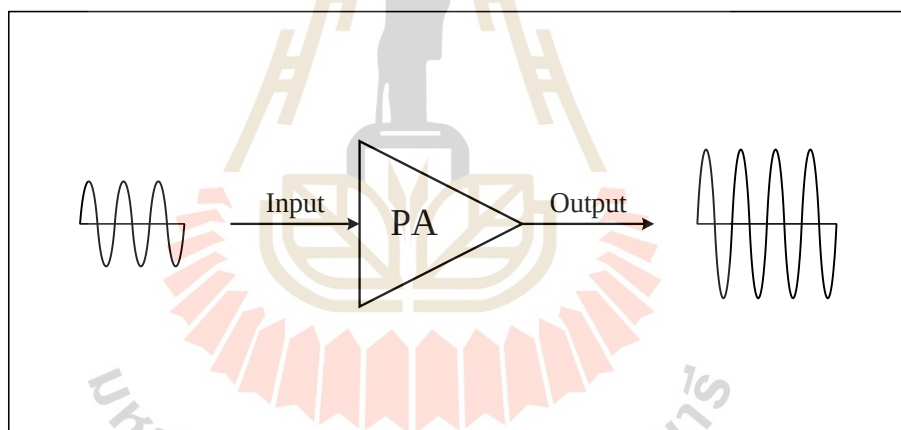
วงจรกำเนิดสัญญาณที่ไม่ใช่รูปไซน์ (Non-Sinusoidal Waveform Generator) วงจรกำเนิดสัญญาณแบบอื่นๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณรูปไซน์ซึ่งพบได้บ่อย ก็คือวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (Square waveform generators) และวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (Triangular waveform generators) วงจรกำเนิดสัญญาณเหล่านี้ใช้วงจรพื้นฐานที่เรียกว่าวงจร Multi-vibrator เป็นส่วนประกอบหลักสามารถสร้างวงจร Multivibrator ขึ้นได้โดยใช้เพียง Op Amp หรือ IC กำเนิดเวลา เช่น IC 555 เป็นต้น ประกอบเข้ากับเครือข่าย RC วงจรกำเนิดสัญญาณที่ไม่ใช่รูปไซน์มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วงจรกำเนิดสัญญาณแบบผ่อนคลาย (Relaxation Oscillator) ทั้งนี้เพราะอุปกรณ์ขยายทำงานในวงจรจะทำงานอยู่ในย่าน cut-off หรืออิ่มตัว (saturation) เท่านั้นในระหว่างที่อุปกรณ์ขยายทำงานอยู่ในย่าน cut-off จะไม่มีกระแสไหลผ่านตัวอุปกรณ์เสมือนกับว่าอุปกรณ์นั้นอยู่ใน

ลักษณะผ่อนคลาย (Relaxing) จึงเป็นที่มาของชื่อเรียกวงจรนี้สังเกตว่าวงจรแบบนี้จะต่างจากวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ ซึ่งอุปกรณ์ขยายทำงานอยู่ในย่านเชิงเส้น (Linear mode)

2.4 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของวงจรขยายสัญญาณภาคส่งและภาครับ

2.4.1 วงจรขยายสัญญาณภาคส่ง (Power Amplifier)

หากส่งกำลังงานออกไปด้วยความแรงมากจะทำให้สามารถส่งได้ระยะทางที่ไกล ส่งผลให้ได้พื้นที่การตรวจจับเป้าหมายครอบคลุมไกลยิ่งขึ้น วงจรขยายกำลังงานความถี่สูงหรือ Power Amplifier เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายกำลังงานของสัญญาณอินพุตที่มีกำลังงานต่ำให้มีขนาดเพิ่มมากขึ้นก่อนที่จะส่งออกไปสู่สายอากาศ ข้อกำหนดหรือคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดคือ Gain, Linearity, Output Power สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กเพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร ใช้งานในย่านความถี่ 2 - 6 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) และมีขนาดกำลังส่งที่สูงดังนั้นวงจรขยายกำลังงานความถี่สูงจึงต้องทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้แรงขึ้น นั้นรวมไปถึงจะต้องมีการตอบสนองต่อความถี่ที่ใช้งานด้วย



รูปที่ 2.7 หลักการขยายสัญญาณของ Power Amplifier

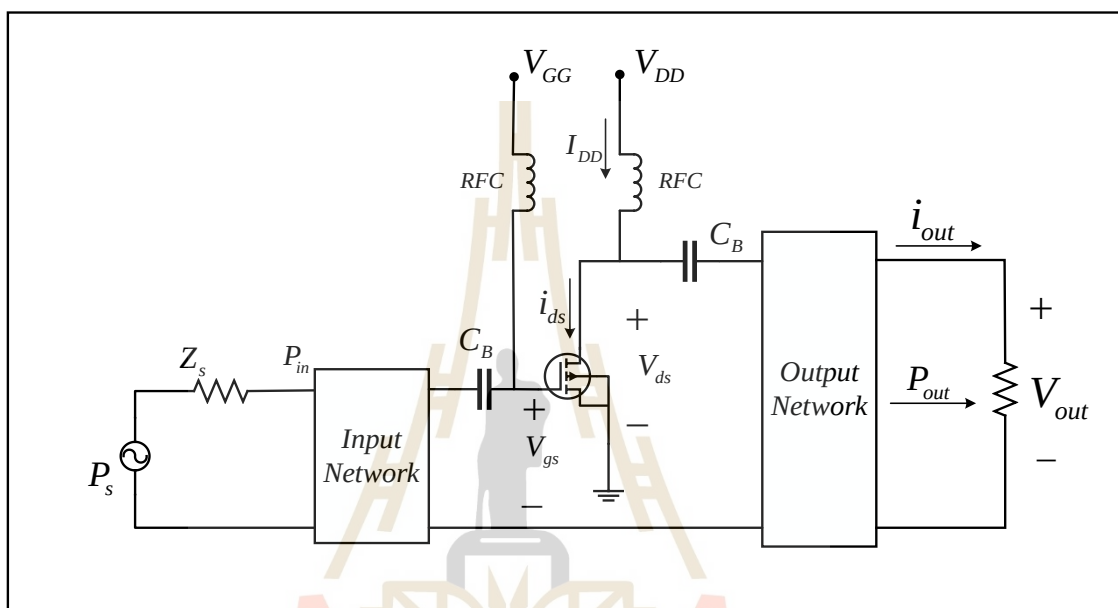
จากรูปที่ 2.7 เป็นการขยายสัญญาณในอุดมคติ คือ เมื่อมีสัญญาณที่มีกำลังงานต่ำเข้ามาที่ด้านขาเข้า (Input) Power Amplifier จะทำการขยายสัญญาณทางด้านขาออก (Output) ให้มีขนาดกำลังงานที่สูงขึ้นมากกว่าเดิมและไม่เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถเป็นไปได้เพราะ มีปัจจัยด้านอื่นที่ทำให้สัญญาณที่ด้าน output เปลี่ยนไป

2.4.1.1 กำลังเอาต์พุต (Output Power)

กำลังเอาต์พุต คือ กำลังไฟฟ้าที่วงจรขยายกำลังความถี่สูงสามารถโอนถ่ายไปยังโหลดได้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณหากวงจรขยายสัญญาณให้กำลังต่ำก็จะทำให้สัญญาณที่ส่งให้สายอากาศส่งน้อย ส่งผลให้การกระจายสัญญาณได้ระยะทางที่ใกล้และสัญญาณสะท้อนกลับมายังสายอากาศรับน้อยตามไปด้วย ตามรูปที่ 2.8 เมื่อให้แหล่งจ่ายพลังงาน

(Power Supply) กับวงจรขยายสัญญาณ มีค่าคงที่ วงจรขยายสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงกระแส i_{out} ที่โหลด R_L ตามอินพุตที่ป้อนเข้ามาในวงจรจึงทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด V_{out} และกำลังเอาต์พุตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$P_{out} = \frac{1}{2} (V_{out} \times i_{out}) \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.8 องค์ประกอบหลักของ Power Amplifier

2.4.1.2 อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยาย คือ หน่วยวัดความสามารถในการเพิ่มความแรงสัญญาณ Power Amplifier มีหน่วยเป็น dB ใช้เปรียบกำลังงานออกและกำลังงานเข้า โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.14 โดยที่กำลังงานในหน่วย dB สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.15

$$Gain[dB] = \frac{P_{out}[dB]}{P_{in}[dB]} \quad (2.14)$$

โดยที่

P_{in} คือ กำลังงานสัญญาณทางด้านขาเข้า (Input)

P_{out} คือ กำลังงานสัญญาณทางด้านขาออก (Output)

$$P[\text{dB}] = 10 \log_{10} \frac{\text{Power}[\text{Watt}]}{1[\text{Watt}]} \quad (2.15)$$

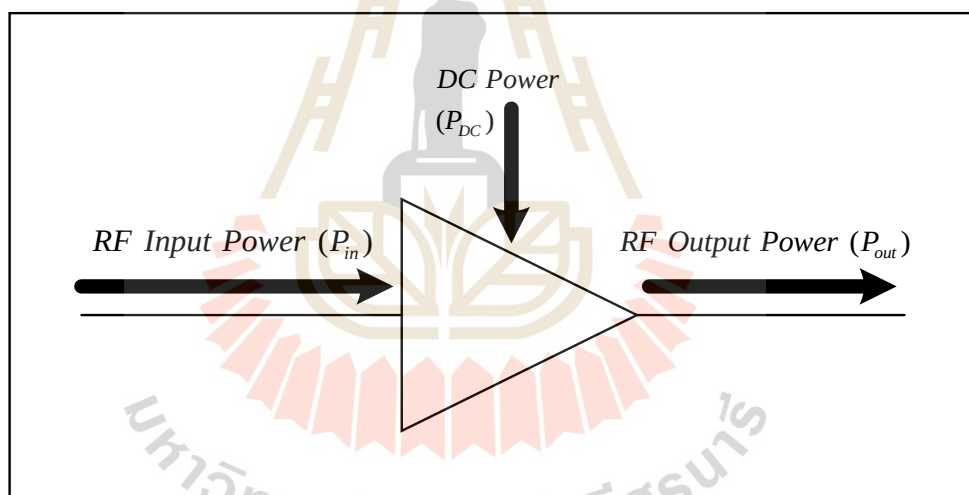
หรือ

$$P[\text{dBm}] = 10 \log_{10} \frac{\text{Power}[\text{mWatt}]}{1[\text{mWatt}]} \quad (2.16)$$

เมื่อ Power คือ กำลังงานของสัญญาณ มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)

2.4.1.3 ประสิทธิภาพ (Efficiency)

ประสิทธิภาพ (Efficiency) ของวงจรขยายสัญญาณเป็นพารามิเตอร์แสดงในรูปที่ 2.9 ที่มีความสำคัญในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเป็นอย่างมาก หากวงจรขยายสัญญาณมีประสิทธิภาพต่ำจะทำให้ได้อัตราขยายที่ต่ำในขณะที่ยังคงใช้พลังงานเท่าเดิมทำให้สูญเสียพลังงานไปในรูปแบบของพลังงานความร้อนแทน ในการประมาณค่าประสิทธิภาพของวงจรขยายสัญญาณโดยทั่วไปแล้วจะพิจารณา 2 รูปแบบคือ



รูปที่ 2.9 พารามิเตอร์สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพ (Efficiency)

Power Efficiency (PE)

$$PE = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad (2.17)$$

Power Added Efficiency (PAE)

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (2.18)$$

เมื่อ P_{DC} คือ

$$P_{DC} = V_{DC} I_{DC} \quad (2.19)$$

2.4.2 วงจรขยายสัญญาณภาครับ Low Noise Amplifier (LNA)

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ขยายสัญญาณอ่อนที่อินพุตโดยไม่เพิ่มสัญญาณรบกวนที่สำคัญให้กับสัญญาณเอาต์พุต โดยทั่วไปแล้วแอมพลิฟายเออร์ดังกล่าวจะใช้ในเครื่องรับเพื่อปรับปรุงการรับสัญญาณ จะพูดถึงแง่มุมในทางปฏิบัติของข้อกำหนด LNA สำหรับข้อกำหนดหรือคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดคือ Gain, Linearity, Noise Figure, Maximum RF Input

1) Gain อัตราขยายของ LNA หมายถึง ความสามารถในการขยายระดับของสัญญาณอินพุตให้อยู่ในระดับที่เครื่องรับสามารถประมวลผลได้

2) Linearity ความเป็นเชิงเส้นของ LNA เป็นตัววัดความสามารถในการขยายสัญญาณโดยไม่ผิดเพี้ยน เมื่อ LNA ทำงานเชิงเส้น กำลังขยายเป็น dB คือ ผลรวมของสัญญาณอินพุตและอัตราขยาย เมื่อระดับสัญญาณอินพุตเพิ่มขึ้นเกินจุดหนึ่งเอาต์พุตจะเริ่มปรับระดับขึ้น

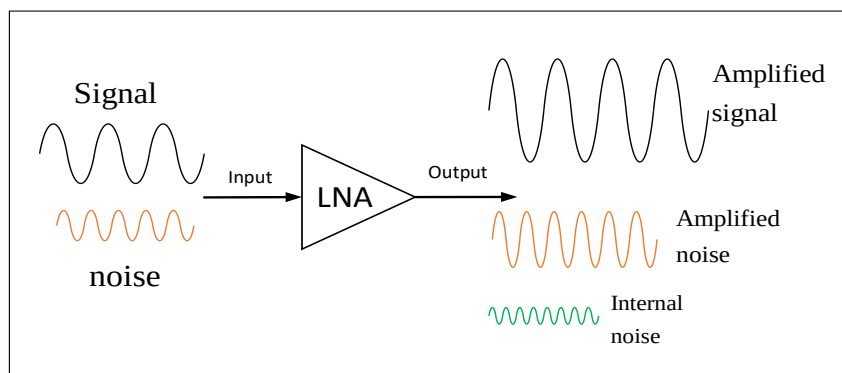
3) Maximum RF Input เป็นระดับสัญญาณสูงสุดที่ Low Noise Amplifier สามารถทนได้ที่ระดับสัญญาณอินพุตนี้ LNA จะอิ่มตัวและการทำงานไม่เป็นเชิงเส้น ผู้ผลิตบางรายระบุระดับความเสียหายซึ่งเป็นการจำกัดระดับสัญญาณอินพุต LNA

4) Noise Figure เป็นการวัดการมีส่วนร่วมของสัญญาณรบกวนเนื่องจาก LNA เอง ดังรูปที่ 2.10 LNA ขยายทั้งสัญญาณและสัญญาณรบกวนที่อินพุตอย่างเท่าเทียมกัน นอกจากนี้ เอาต์พุตยังรวมถึงสัญญาณรบกวนด้วย เนื่องจาก LNA สิ่งนี้จะช่วยลดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ดังสมการที่ 2.18

$$F = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}} \quad (2.20)$$

Noise figure ไม่ขึ้นอยู่กับระดับสัญญาณอินพุต Noise figure ที่แสดงในระดับเชิงเส้นเรียกว่า noise factor (NF) หาได้จากสมการที่ 2.19

$$Noise Factor = 10 \log F \quad (2.21)$$

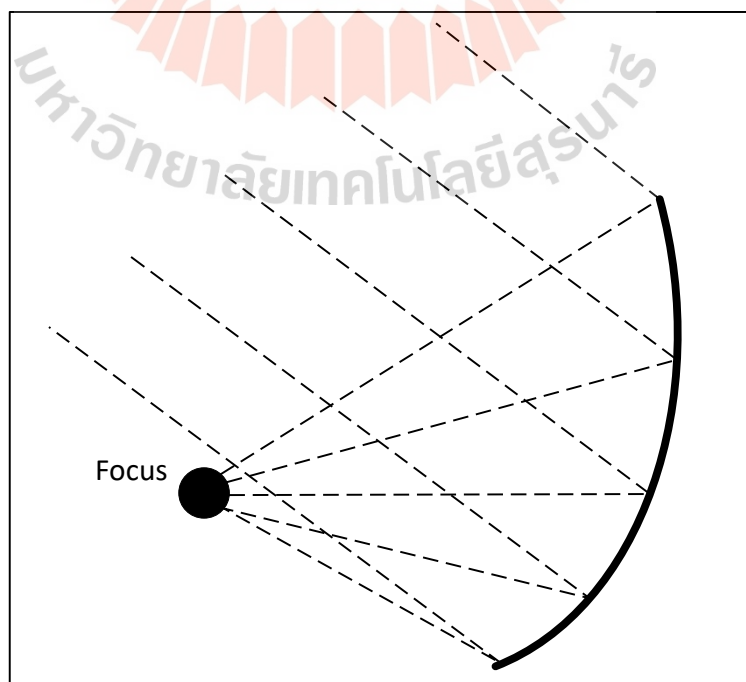


รูปที่ 2.10 Low Noise amplifiers เพิ่มระดับสัญญาณทั้งอินพุตและสัญญาณรบกวน

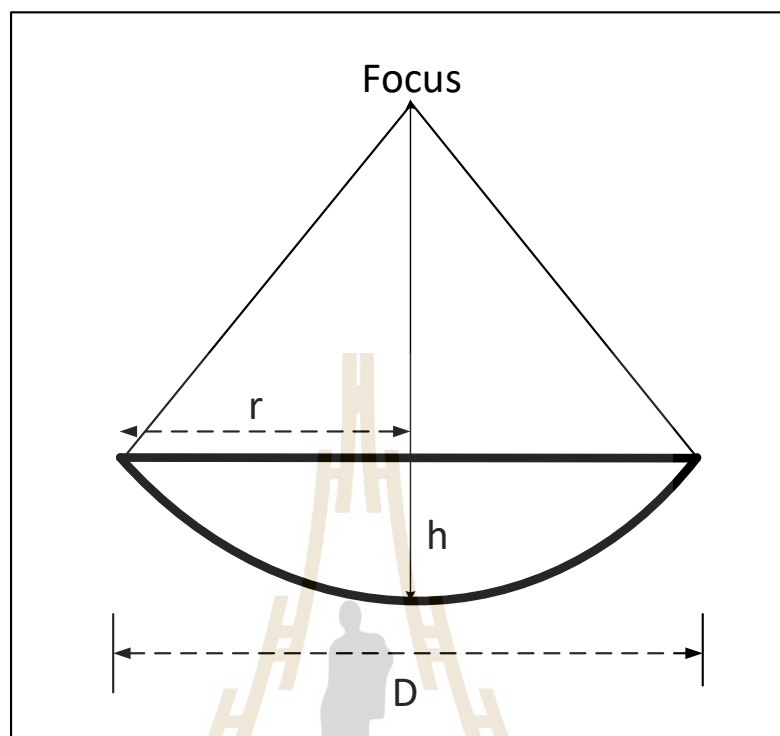
2.5 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ

2.5.1 จานดาวเทียมแบบออฟเซตแบบพาราโบลอยด์ (Offset paraboloid)

จานสะท้อนเป็นส่วนหนึ่งของพาราโบลอยด์ และฟีดฮอร์น (Feedhorn) จะวางอยู่ที่จุดโฟกัสของพาราโบลอยด์ ลักษณะเฉพาะของจานแบบนี้คือ ตัวฟีดฮอร์นจะไม่อยู่ตรงกลางจาน ส่วนใหญ่จะอยู่นอกบริเวณของทางผ่านคลื่น จานแบบนี้มีข้อดีคือมีพื้นที่ประสิทธิภาพสูง เพราะไม่มีส่วนใดที่บังเส้นทางผ่านของคลื่น แต่มีข้อเสียตรงที่โครงสร้างแบบไม่สมมาตรจะทำให้มี cross polarization ในทิศทางที่ไม่ใช่ด้านหน้ามีสูงไปด้วย โครงสร้างจานแบบพาราโบลิกมีจุดเด่นคือสามารถทำอัตราขยายสัญญาณได้มาก เพราะโครงสร้างจานแบบพาราโบลิกใช้หลักการสะท้อนคลื่นวิทยุที่ตกกระทบหน้าจาน (Reflector) ออกแบบเป็นส่วนโค้ง ทำให้การรวมคลื่นวิทยุที่เข้ามารวมอยู่จุดเดียว (Focus Point) ทำให้คลื่นที่สะท้อนเข้ามาที่ตัวรับสัญญาณได้มากเหมาะกับการสื่อสารทางไกล เรดาร์ค้นหาระยะไกล เป็นต้น



รูปที่ 2.11 จานแบบออฟเซ็ทพาราโบลอยด์



รูปที่ 2.12 โครงสร้างจานแบบพาราโบลิค

สายอากาศจะสามารถคำนวณหารูปแบบการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศจะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (far field region) โดยสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.22

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.22)$$

โดยที่

R คือ ระยะของสนามระยะไกล (เมตร)

D คือ ความยาวของสายอากาศสูงสุด (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

จากรูปที่ 2.12 สามารถพิจารณาหาระยะของจุดโฟกัสได้จากโครงสร้างจานแบบพาราโบลิค ดังสมการที่ 2.23

$$\text{Focal length } (F) = D^2 / 16h \quad (2.23)$$

โดยที่

F คือ ระยะของจุดโฟกัส (สำหรับติดตั้งตัวรวมสัญญาณ)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของจาน (มีหน่วยเป็นเมตร)

h คือ ความลึกของจาน จากท้องถึงปากขอบจานในแนวตั้ง (มีหน่วยเป็นเมตร)

2.5.2 การสูญเสียในอากาศ (Free Space Path Loss)

การแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศความแรงของสัญญาณจะแปรผกผันกับระยะทางทำให้ถูกกลทอนความแรงของสัญญาณที่ระยะมากจากสายอากาศจะมีความแรงลดลงอย่างมาก โดยการวัดค่าการสูญเสียสัญญาณในอากาศ (free space path loss : FSPL) หรืออาจเรียกการอีกอย่างว่า Line of Sight Loss หาได้จากสมการ 2.24 และ 2.25

ส่วนของความยาวคลื่น

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2.24)$$

ส่วนของความถี่

$$FSPL = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (2.25)$$

โดยที่

$FSPL$ คือ การสูญเสียในอากาศ (Free space path loss)

λ คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ (m)

d คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (m)

f คือ ความถี่คลื่น (Hz)

c คือ ความเร็วแสง เท่ากับ 3×10^8 (m/s)

ดังนั้น Free Space Loss ขึ้นอยู่กับตัวแปรสองตัวคือระยะทาง (Distance) กับ ความถี่ (Frequencies) ซึ่งระยะทางที่ไกลยิ่งเกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้นและที่ความถี่สูงจะสูญเสียพลังงานมากกว่าความถี่ต่ำ เช่นกัน

ในกรณีที่ต้องการทำเป็นหน่วย dB เพื่อง่ายต่อการคำนวณ สามารถทำได้โดย

$$\begin{aligned} FSPL &= 10 \log \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \\ &= 10 \log \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \\ FSPL(dB) &= 20 \log(d) + 20 \log(f) + 20 \log \left(\frac{4\pi}{c} \right) \end{aligned} \quad (2.26)$$

โดยที่

d คือ ระยะห่างระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับ (m)

f คือ ความถี่ (Hz)

เป็นที่น่าสังเกตว่าสมการข้างต้น ไม่ได้รวมถึงการเพิ่มขึ้นของสายอากาศและการสูญเสียของตัวป้อนมันมีไว้สำหรับสายอากาศแบบไอโซโทรปิกสองตัว คือที่แผ่ออกไปทุกทิศทางอย่างเท่าเทียมกันมันเป็นไปได้ที่จะเพิ่มสายอากาศที่ได้รับลงในสมการ 2.27

$$F = 20\log(d) + 20\log(f) + \left(\frac{4\pi}{c}\right) - G_{Tx} - G_{Rx} \quad (2.27)$$

โดยที่

GT_x คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านส่ง

GR_x คือ อัตราขยายของสายอากาศด้านรับ

เมื่ออัตราขยายของกำลังงานภาคส่ง (G_{Tx} , G_{Rx}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.28

$$G(dBi) = 10\log\left(k\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2\right) \quad (2.28)$$

โดยที่

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจานพาราโบลา

k คือ efficiency factor มีค่าประมาณ 70 เปอร์เซนต์

λ คือ ความยาวคลื่น เท่ากับ c/f

2.6 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับชุดกรองสัญญาณความถี่

2.6.1 วงจรกรองความถี่

วงจรที่ยอมให้ความถี่ในช่วงที่ต้องการผ่าน ส่วนความถี่อื่นก็ไม่สามารถผ่านได้ และจะทำการลดทอนสัญญาณความถี่อื่นที่นอกเหนือ วงจรกรองความถี่ที่พบการใช้งานบ่อย สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ วงจรกรองความถี่แบบ Passive Filter เช่น วงจรที่ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน และวงจรกรองความถี่แบบ Active Filter เช่น วงจรที่ใช้ ทรานซิสเตอร์ หรือ ออปแอมป์ ต่อร่วมกับ ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน วงจรกรองความถี่ สามารถแยกประเภทตามลักษณะการใช้งานออกเป็น 4 แบบ คือ

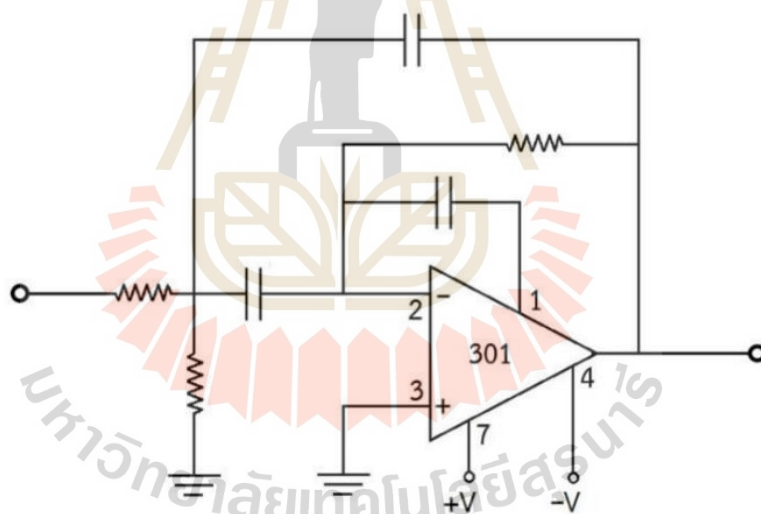
1) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter Circuit : LPF) วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน คือ วงจรกรองที่ให้สัญญาณขาเข้าความถี่ตั้งแต่ศูนย์เฮิรตซ์ขึ้นไปจนถึงค่าๆ หนึ่งที่เรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cut-off frequency) หรือ f_c ผ่านไปได้ และทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณที่มีความถี่มากกว่านั้น

2) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High pass Filter Circuit) วงจรกรองที่ให้สัญญาณขาเข้าความถี่ตั้งแต่ความถี่คัทออฟ (cut-off frequency) หรือ f_c ขึ้นไปผ่านไปได้ และโดยทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่านั้น

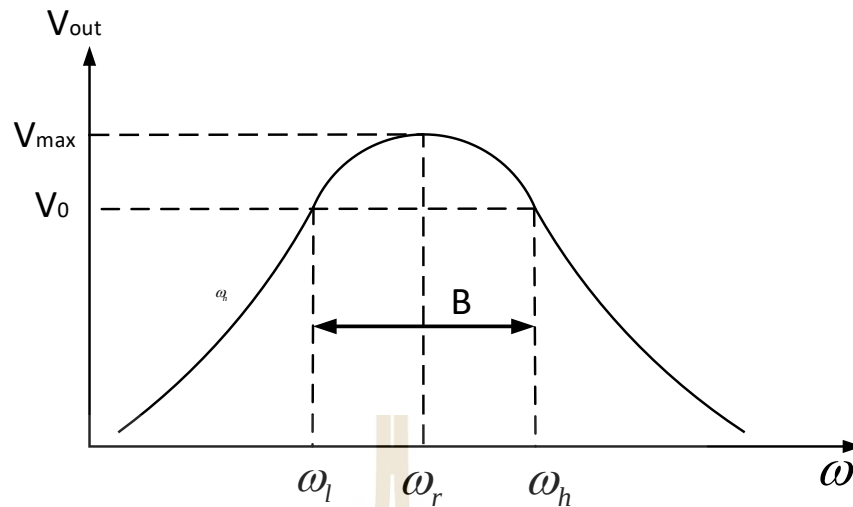
3) วงจรลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Band reject Filter Circuit) เป็นวงจรที่กำจัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการบางช่วงออกไป

4) วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band pass Filter Circuit) เป็นวงจรที่ยอมให้ความถี่ช่วงใดช่วงหนึ่งหรือช่วงที่ต้องการผ่านไปได้ ความถี่ที่ไม่ต้องการหรือไม่อยู่ในย่านจะถูกตัดออกจนหมด เหมือนกับการที่นำวงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรกรองความถี่สูงมาต่อใช้งานร่วมกัน

แบบวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่แบบ Active Filter วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่การออกแบบการใช้งานโดย ใช้โอปแอมป์ ทำงานร่วมกับ R, C จากวงจรดังรูปที่ 2.13 ทำการป้อนสัญญาณความถี่เข้าด้าน Input แล้วทำการวัดสัญญาณความถี่ทางด้าน Output จะปรากฏเป็นกราฟความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่ แบบ Active Filter



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับความถี่ของสัญญาณ

ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ($V_{\max}$) จะเกิดขึ้นเฉพาะช่วงความถี่เท่านั้น เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ และตำแหน่งที่มีแรงดันไฟฟ้าลดลง (V_0) มี 2 ความถี่คือ ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์เรียกว่า (higher cutoff frequency) และความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์เรียกว่า (lower cutoff frequency) ส่วนช่วงผลต่างระหว่างความถี่สูงกว่าความถี่เรโซแนนซ์และความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์ เรียกว่า แบนด์วิดท์ (Bandwidth: B) โดยใช้สมการที่ 2.29

$$B = \omega_h - \omega_l \quad (2.29)$$

โดยที่

B = Bandwidth

ω_h = Higher cutoff frequency

ω_l = Lower cutoff frequency

อัตราส่วนระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับแบนด์วิดท์เรียกว่าตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor: Q) บางครั้งนิยมเรียกสั้นๆ ว่า (Q -Factor) ใช้เป็นตัวบ่งชี้ให้เห็นความสามารถในการเลือกความถี่ค่าตัวประกอบคุณภาพนี้ไม่มีหน่วย ถ้ามีค่าสูงหมายความว่าวงจรจะสามารถเลือกความถี่ได้ดีมากยิ่งขึ้นหาได้จากสมการที่ 2.30

1) วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงแคบ (Narrow band pass filter circuit)

มีค่า $B < 0.01$ และค่า $Q > 10$

2) วงจรกรองความถี่เฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (Wide band pass filter circuit)

มีค่า $B > 0.01$ และค่า $Q < 10$

$$Q = \frac{\omega_r}{B} \quad (2.30)$$

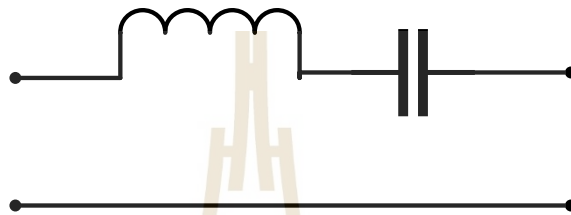
โดยที่

Q = quality factor

ω_r = resonant frequency

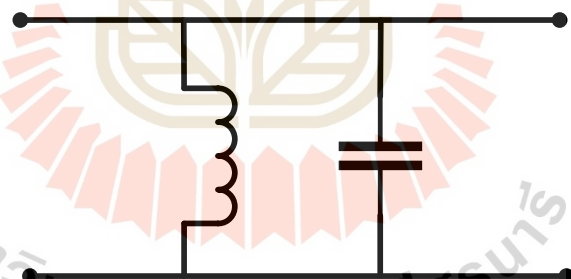
B = Bandwidth

ส่วนวงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่แบบ Passive Filter วงจรรูปแบบนี้จะใช้การนำเอา ขดลวด (L) และตัวเก็บประจุ (C) มาอนุกรมกัน ซึ่ง L ให้ช่วงความถี่สูงที่ถูกระงับผ่าน แต่ความถี่ที่ต่ำกว่าจะไม่สามารถผ่านไปได้ และ C จะให้ช่วงความถี่ต่ำที่ถูกระงับผ่าน ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่าจะไม่สามารถผ่านไปได้ การหาค่า L กับ ค่า C ที่อนุกรม หาได้จากสมการที่ 2.31 และ 2.32



รูปที่ 2.15 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่แบบอนุกรม

ส่วนวงจรขนาน การทำงานของวงจรนี้ ใช้หลักการเดียวกันกับวงจรอนุกรม ซึ่ง L จะให้ความถี่สูงที่ถูกระงับผ่าน ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่าจะผ่านลงกราวด์ ส่วน C จะให้ความถี่ต่ำที่ถูกระงับผ่าน ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่าจะผ่านลงกราวด์ซึ่ง L กับ C จะเป็นตัวกำหนดช่วงความถี่ที่จะให้ผ่านวงจรนี้ได้เท่านั้น การหาค่า L, C ที่ขนาน หาได้จากสมการที่ 2.33 และ 2.34



รูปที่ 2.16 วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่แบบขนาน

สำหรับองค์ประกอบเรโซแนนซ์ส่วนอนุกรม (Series)

$$C_s = \frac{BW_c}{2\pi(f_0)^2 C_N R} \quad (2.31)$$

$$L_s = \frac{R \times L_N}{2\pi \times BW_c} \quad (2.32)$$

สำหรับองค์ประกอบเรโซแนนซ์ส่วนขนาน (Parallel)

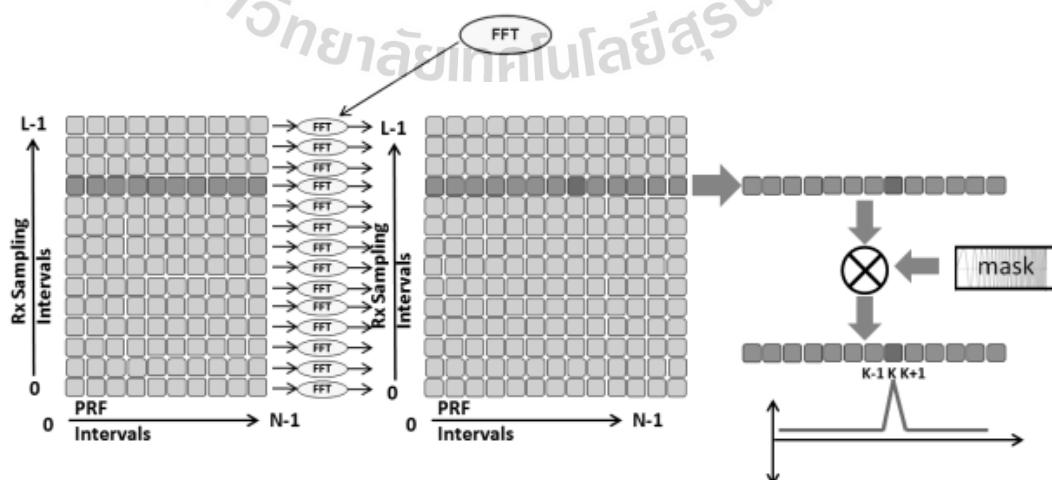
$$C_p = \frac{C_N}{2\pi R \times BW_c} \quad (2.33)$$

รูปที่ 2.17 การใช้งาน GNU Radio

วิทยุซอฟต์แวร์เป็นระบบวิทยุที่ทำการประมวลผลสัญญาณที่จำเป็นในซอฟต์แวร์ แทนการใช้วงจรเฉพาะในฮาร์ดแวร์ ประโยชน์คือเนื่องจากสามารถเปลี่ยนซอฟต์แวร์ในระบบวิทยุ ได้อย่างง่ายดาย จึงสามารถใช้ฮาร์ดแวร์เดียวกันเพื่อสร้างวิทยุหลายประเภทสำหรับมาตรฐานการ สื่อสารที่แตกต่างกันมากมาย ดังนั้นวิทยุซอฟต์แวร์หนึ่งเครื่องจึงสามารถใช้กับแอปพลิเคชันที่ หลากหลายที่ใช้งานในการควบคุมฮาร์ดแวร์แอนะล็อก (เช่น mixers, filters, amplifiers, modulators/ demodulators, detectors, และอื่นๆ) จะถูกนำไปใช้สร้างบนคอมพิวเตอร์หรือระบบในตัวได้

2.7.2 Doppler Processing

รูปที่ 2.18 แสดงการประมวลผล Doppler ทั้งทั้งอาร์เรย์ข้อมูลเรดาร์คอลัมน์ของ ข้อมูลสอดคล้องกับการกรองการบีบอัดพัลส์ของบัฟเฟอร์ข้อมูลที่ได้รับ PRF แต่ละรายการจำนวน คอลัมน์ N คือ จำนวนพัลส์ที่ส่งใน coherent processing interval (CPI) จำได้ว่าข้อมูลเรดาร์ ทั้งหมดมีความซับซ้อน มีขนาดและเฟส CPI เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของเฟสระหว่างข้อมูลทั้งทั้ง อาร์เรย์ เมื่อเวลาผ่านไป เวลาจะเบี่ยงเบนเล็กน้อยและสอดคล้องกันในสัญญาณ Clock ตัวแปลง ข้อมูล และ (PLLs) Phase Locked Loop ที่ใช้ในวงจร RF และดิจิตอลอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟส สัมพัทธ์ระหว่างการ samples สำหรับเรดาร์ในอากาศหรือติดบนรถยนต์ การเคลื่อนที่ของเรดาร์ยัง สามารถรบกวนความสัมพันธ์ของเฟสได้ ยิ่งเวลาที่ผ่านไปในตัวอย่างข้อมูลที่ได้รับนานเท่าใด โอกาสที่ เฟสสัมพัทธ์จะต่ำก็มีมากขึ้น นอกจากนี้ การเปลี่ยนความถี่เรดาร์กับการเปลี่ยน PRF อาจมีการเกิดขึ้น ของความไม่ต่อเนื่องในเฟสได้ CPI เป็นการวัดช่วงเวลาที่มีความแตกต่างของเฟส มีข้อมูลที่เป็น ประโยชน์หรือสอดคล้องกัน จึงถูกใช้กับการประมวลผลโดเมนความถี่ เช่น การประมวลผล Doppler โดยปกติจะขยายไปในช่วงเวลา PRF หลายช่วงเวลา โปรดสังเกตว่าเอาต์พุตตัวอย่างที่ได้รับจากการ ประมวลผลการบีบอัดพัลส์จะถูกโหลดในคอลัมน์สำหรับ PRF แต่ละรายการ



รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนมุมการประมวลผลแบบ Doppler

การประมวลผล Doppler เกิดขึ้นข้ามแถวหรือข้าม (N PRFs) ต้องรวบรวมข้อมูลในช่วงเวลาที่ข้อมูลสามารถพิจารณาได้ว่าสอดคล้องกันหรือภายใน CPI การไหลของข้อมูลนี้เรียกว่าการเปลี่ยนมุม เนื่องจากข้อมูลเข้าในแนวตั้งและออกมาในแนวนอนหรือหมุนมุม การประมวลผลนี้กำหนดให้ข้อมูลทั้งหมดมีอยู่ในอาร์เรย์ก่อนจึงจะสามารถดำเนินการประมวลผล Doppler ได้ ปริมาณข้อมูลอาจค่อนข้างมาก และสำหรับการประมวลผลเรดาร์ประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้องเข้าถึงด้วยเวลาที่น้อยมาก สิ่งนี้ต้องใช้ทรัพยากรหน่วยความจำบนชิปที่สูงมากหรืออาร์เรย์หน่วยความจำภายนอกที่เข้าถึงได้อย่างรวดเร็วและมีเวลาเข้าถึงที่น้อยมากควบคู่ไปกับตัวที่ควบคุมการเข้าถึงหน่วยความจำประสิทธิภาพสูง เนื่องจากข้อมูลมาในคอลัมน์และอ่านเป็นแบบแถว การเข้าถึงการอ่านและเขียนไม่สามารถเป็นแบบต่อเนื่องได้ ทำให้ยากต่อการตอบสนองในเวลาต่ำได้ด้วยแคชแบบดั้งเดิมและชิปหน่วยความจำ DDR3

ข้อกำหนดในการประมวลผลเรดาร์อาจค่อนข้างสูง ผู้ใช้จำเป็นต้องประมวลผลข้อมูลอินพุตอย่างต่อเนื่องแบบเรียลไทม์ สิ่งนี้ส่วนใหญ่สามารถนำไปใช้ได้โดยใช้โครงสร้างการประมวลผลแบบขนาน บีมฟอร์มมิง (Beamforming) เป็นตัวอย่าง อาจมีหน่วยรับ/ส่งสัญญาณแยกกันหลายร้อยหรือหลายพันหน่วยในสายอากาศ active electronically scanned array (AESA) สายอากาศอาจจะติดตามเป้าหมายในหลายทิศทาง ซึ่งต้องมีการประมวลผลแยกต่างหากสำหรับแต่ละทิศทาง การประมวลผลต้องดำเนินการในสองมิติ ทั้งเวลา (การบีบอัดพัลส์) และความถี่ Doppler

2.8 สรุป

บทที่ 2 นี้กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบสร้างระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร ระยะที่ทำการ 1 กิโลเมตร ได้ถูกแบ่งเป็นส่วนสำคัญคือ หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรดาร์ วงจรกำเนิดความถี่ วงจรขยายสัญญาณภาคส่งและภาครับ ชุดสายอากาศ ชุดกรองความถี่ และการใช้งานซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณ เพื่อนำไปออกแบบสร้างระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร ที่จะเสนอในบทถัดไป

บทที่ 3

ออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ

3.1 กล่าวนำ

บทนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบสร้างระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก เพื่อป้องกันภัยความมั่นคงทางทหาร เพื่อความมั่นคงของกองทัพ สำหรับป้องกันภัยคุกคามระยะ 1 กิโลเมตร โดยใช้คลื่นความถี่รูปแบบของเรดาร์ Frequency modulation continuous wave radar หรือ FMCW Radar ซึ่งตัวเครื่องตรวจจับอากาศยานไร้คนขับแบ่งการออกแบบเป็น 6 ส่วน ได้แก่

- 1) การคำนวณและจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ของเรดาร์ทั้งระบบ
- 2) การออกแบบและสร้างชุดกำเนิดสัญญาณ FMCW
- 3) การออกแบบและสร้างชุดขยายสัญญาณภาคส่ง (Power amplifier) และภาครับ (LNA)
- 4) การออกแบบและสร้างชุดสายอากาศ
- 5) การออกแบบและสร้างชุดกรองสัญญาณความถี่
- 6) การออกแบบเขียนโปรแกรมการตรวจจับแสดงผล

3.2 การคำนวณและจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ทั้งระบบ

ขั้นตอนการออกแบบเรดาร์โดยเริ่มต้นจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อหาประสิทธิภาพที่ต้องการของตัวรับสัญญาณเรดาร์ จากการคำนวณจากสมการเรดาร์ทั่วไปต่อไปนี้

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3.1)$$

โดยที่

P_r = กำลังงานทั้งหมดที่รับได้ (Total power received) หน่วย Watt

P_t = กำลังงานที่ส่งออก (Power transmitted) หน่วย Watt

σ = สัมประสิทธิ์การกระจายต่อพื้นที่ (Radar cross section) หน่วย m^2

G = อัตราการขยายของสายอากาศ (Antenna gain) หน่วย (dBi)

R = ระยะทางแนวพิสัย (Range) หน่วย meter

λ = ช่วงความยาวคลื่น (Wavelength) หน่วย meter

จากสมการได้ทำการคำนวณหาค่ากำลังงานด้านรับโดยได้กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

$$P_T = 100 \text{ Watt หรือ } 50 \text{ dBm}$$

$$\sigma = 0.01 \text{ m}^2, 0.1 \text{ m}^2, 1.0 \text{ m}^2$$

$$G = 16 \text{ dBi (ทั้ง } G_t \text{ และ } G_r)$$

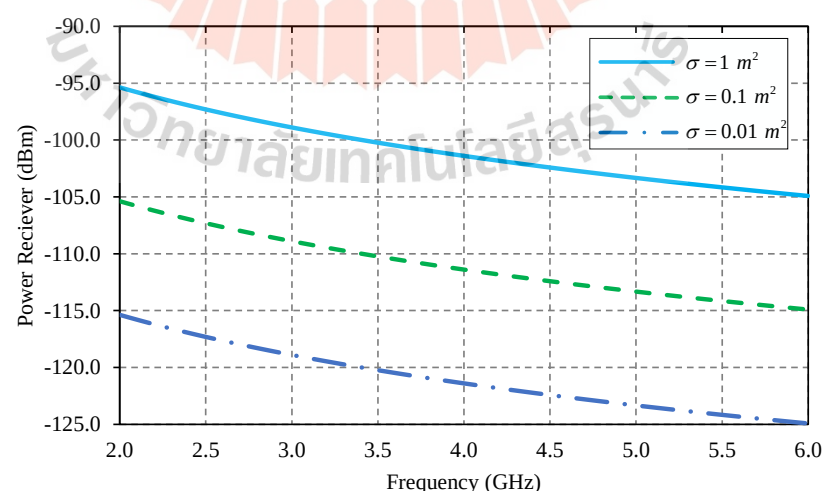
$$R = 1000 \text{ m}$$

$$\lambda = c / f ; \text{ โดย } f = 2 \text{ GHz ถึง } 6 \text{ GHz}$$

ในการส่งสัญญาณและรับสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายในอุดมคติเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการที่ 3.1

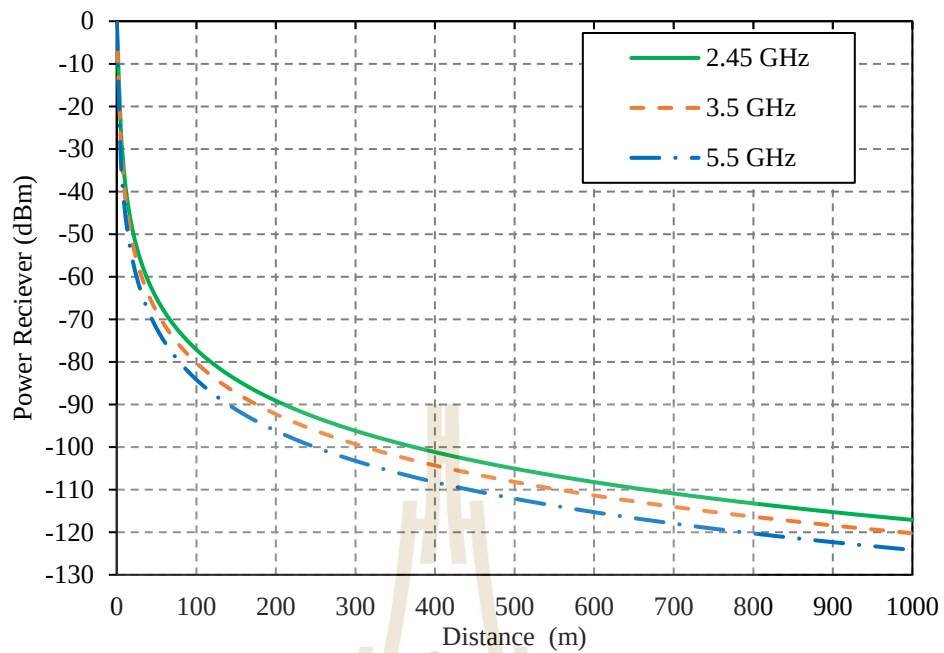
$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 p_{r(\max)}}} \quad (3.2)$$

สำหรับวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ ในสมการที่ 3.2 จะเป็นประโยชน์สำหรับการคำนวณระยะการตรวจจับ หากทราบ $R_{\max}$ และค่าสำหรับเป้าหมายที่แน่นอนก็สามารถคำนวณค่า $R_{\max}$ ใหม่สำหรับเป้าหมายอื่นได้ด้วย เนื่องจากพารามิเตอร์สำหรับเรดาร์ที่กำหนดเราใช้สมการง่ายๆ ต่อไปนี้ดังสมการที่ 3.2 มันไม่ใช่เรื่องง่ายที่จะระบุลักษณะของเป้าหมายเรดาร์ในระยะทางที่กำหนดโดยเพียงแค่นำค่า RCS สำหรับเงื่อนไขที่เป็นไปได้ทั้งหมด เนื่องจาก RCS เป็นตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ซึ่งค่าของมันขึ้นอยู่กับ ความถี่ และโพลาริซเมชันสายอากาศตลอดจนวัสดุที่ทำเป้าหมาย ด้วยเหตุนี้ เมื่อกำหนดค่า RCS ค่าเดียวสำหรับเป้าหมาย เช่น เครื่องบินไร้คนขับเพดานต่ำ ค่า RCS นี้มักจะเป็นค่า RCS เฉลี่ย ซึ่งคำนวณโดยใช้วิธีการบางอย่างในแต่ละครั้ง เครื่องบินไร้คนขับเพดานต่ำแต่ละรุ่นก็จะมีมุมสะท้อนสัญญาณที่แตกต่างกันไปตามลักษณะที่ได้การออกแบบมา

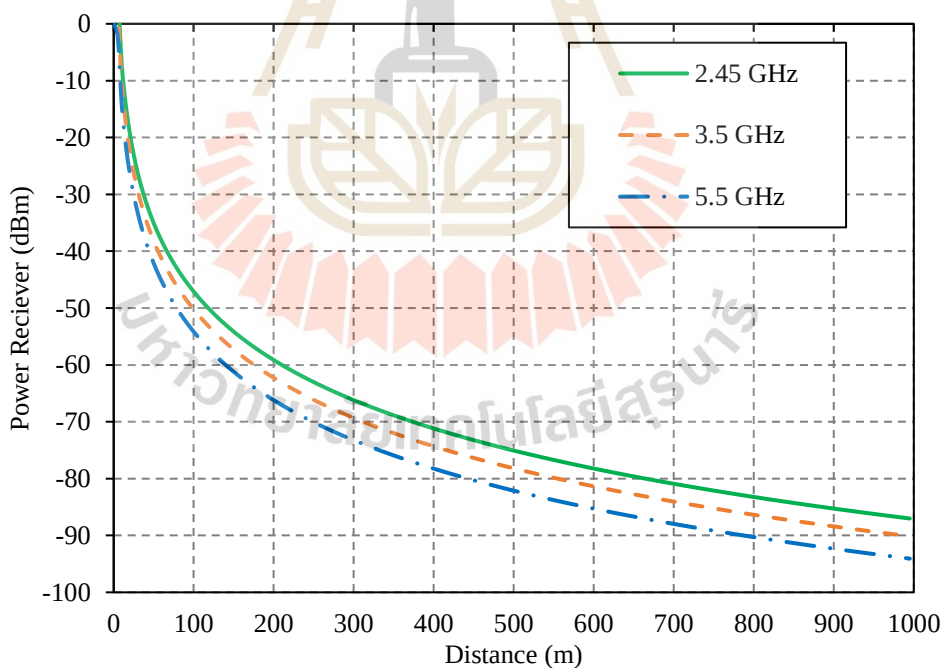


(ก) กราฟคำนวณค่ากำลังงานที่รับได้ต่อความถี่จากการสะท้อนอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบ $\sigma = 0.01 \text{ m}^2, 0.1 \text{ m}^2, 1 \text{ m}^2$ ตามลำดับ ค่าการตรวจจับที่ระยะทาง 1 km.

รูปที่ 3.1 การคำนวณและจำลองแบบทางคณิตศาสตร์เรดาร์ทั้งระบบ



(ข) กราฟคำนวณค่ากำลังงานที่รับได้ต่อระยะทางการสะท้อนจากอากาศยานไร้คนขับที่ความถี่ 2.45 GHz, 3.5 GHz และ 5.5 GHz



(ค) กราฟคำนวณค่ากำลังงานที่รับได้ต่อระยะทางการสะท้อนจากอากาศยานไร้คนขับที่ความถี่ 2.45 GHz, 3.5 GHz และ 5.5 GHz (เพิ่มภาคขยายสัญญาณความถี่สูงทางด้านรับ กำลังขยาย +30 dBm)

รูปที่ 3.1 การคำนวณและจำลองแบบทางคณิตศาสตร์เรดาร์ทั้งระบบ (ต่อ)

จากรูปที่ 3.1 (ก) แสดงกราฟการคำนวณค่ากำลังงานที่รับได้ต่อความถี่จากการสะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟจากตัวอากาศยานไร้คนขับ ที่ระยะการตรวจจับ 1000 เมตร จากสายอากาศส่งพบว่าหากค่า RCS ของวัตถุที่อยู่ในอากาศมีค่าที่ต่ำ ค่าสัญญาณที่สะท้อนกลับมาก็จะมีค่าที่น้อยตาม และเพื่อพิจารณาความถี่ที่ใช้ในการตรวจจับก็จะมีระดับกำลังงานที่สะท้อนกลับแตกต่างกัน จากกราฟหากใช้ย่านความถี่ต่ำ 2.45 GHz เปรียบเทียบกับ 5.5 GHz ค่ากำลังงานที่รับได้คือ -117.10 dBm และ -124.12 dBm ลำดับ มีความต่างกันถึง 7.02 dBm (ระดับกำลังงานต่างกัน 7 เท่า) ถึงแม้ความถี่ต่ำจะมีกำลังงานที่ลดทอนน้อยกว่าความถี่สูง แต่การตรวจจับวัตถุขนาดเล็กอย่างโดรน DJI Phantom 3, 4 ก็ยังจำเป็นต้องใช้ย่านความถี่สูงในการตรวจจับอยู่ แต่สามารถแก้ปัญหาได้จากการเพิ่มวงจรรขยายสัญญาณเข้าไปยังภาครับ หรือเพิ่มยังภาคส่งก็ได้

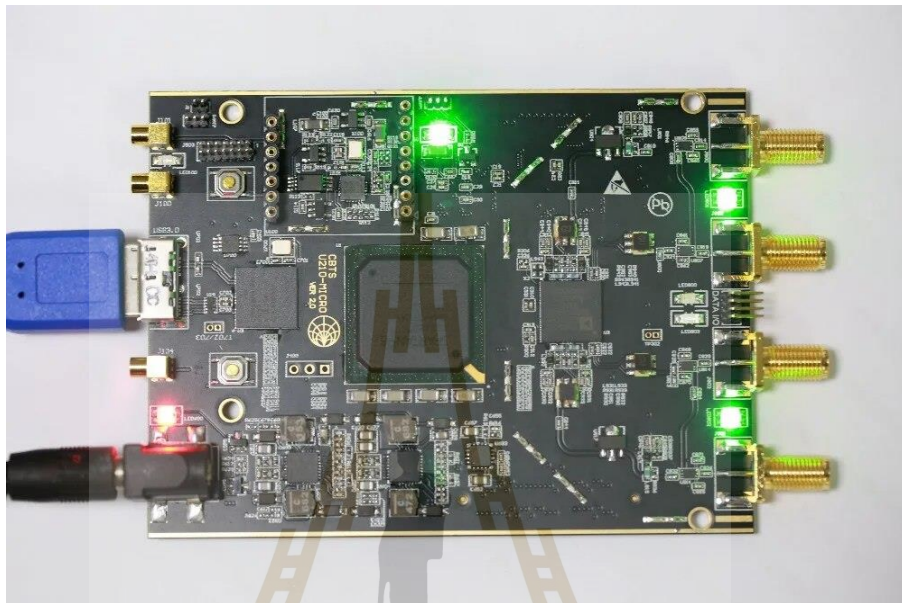
จากรูปที่ 3.1 (ข) แสดงค่ากำลังงานที่รับได้ต่อระยะทางต่าง ๆ ที่สะท้อนจากอากาศยานไร้คนขับ โดยที่ความถี่ที่ใช้ตรวจจับคือ 2.45 GHz, 3.5 GHz และ 5.5 GHz จากกราฟหาเครื่องรับสัญญาณมีค่าความไวในการตรวจจับต่ำสุดที่ -100 dBm ที่ความถี่ 2.45 GHz จะทำการตรวจจับได้ระยะทางไกลมากที่สุดคือ 375 m สำหรับความถี่ 3.5 GHz และ 5.5 GHz จะทำการตรวจจับได้ระยะทางไกลมากที่สุดคือ 315 m และ 250 m ตามลำดับ หากต้องการระยะทางที่ไกลมากขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มกำลังงานวงจรรขยายสัญญาณทั้งภาคส่ง-รับ และอัตราขยายสายอากาศให้มากยิ่งขึ้น

จากรูปที่ 3.1 (ค) แสดงค่ากำลังงานที่รับได้ต่อระยะทางต่าง ๆ ที่สะท้อนจากอากาศยานไร้คนขับที่ระยะทาง 1000 เมตร โดยเพิ่มภาคขยายสัญญาณความถี่สูงทางด้านรับ กำลังงานขยายที่ +30 dBm ใช้ความถี่ตรวจจับคือ 2.45 GHz, 3.5 GHz และ 5.5 GHz จากกราฟเครื่องรับสัญญาณมีค่าความไวในการตรวจจับต่ำสุดที่คือ -87.10 dBm, -90.13 dBm, -94.16 dBm ตามลำดับ เท่านี้กำลังสะท้อนก็มากเพียงพอที่จะทำการตรวจจับได้ระยะทางตามที่ตั้งไว้

3.3 การออกแบบชุดกำเนิดสัญญาณ

วงจรมกำเนิดสัญญาณและส่วนควบคุมจะใช้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์รุ่น B210 ซึ่งครอบคลุมความถี่วิทยุตั้งแต่ช่วงย่านความถี่ 70 MHz ถึง 6 GHz ในตัวบอร์ดจะมี FPGA คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสามารถในการโปรแกรมหรือกำหนดความสามารถของมันเองในระดับของเบิร์ต (ชิป) โดยผู้ใช้เป็นอุปกรณ์เชิงดิจิทัลที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลแบบดิจิทัล) รุ่น Spartan 6 และสามารถเชื่อมต่อผ่าน USB 3.0 แพลตฟอร์มนี้ช่วยให้สามารถทดลองการใช้งานกับสัญญาณหลากหลายรูปแบบ เช่น สัญญาณการกระจายวิทยุ FM และ TV, สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่, Wi-Fi, เรดาร์ และอื่นๆ โดย USRP B210 มีช่องรับ 2 ช่องและช่องส่ง 2 ช่อง รวมทั้งอุปกรณ์จ่ายไฟภายนอก ใช้ RFIC จาก Analog Devices เพื่อให้เป็นแพลตฟอร์มทดลองสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ และสามารถสตรีมข้อมูลแบบดิจิทัลกว้างสูงสุดถึง 56 MHz ได้รับการเปิดใช้งานด้วย UHD (USRP Hardware Driver™) ผู้ใช้สามารถพัฒนาแอปพลิเคชันของตนเองและโยกย้ายการออกแบบของตนไปยัง USRP ที่มี

ประสิทธิภาพสูง เป็นไดรเวอร์โอเพนซอร์ซที่รองรับหลายแพลตฟอร์มและสามารถทำงานบน Windows, Linux, และ MacOS โดยมี API ร่วมที่ถูกใช้โดยโครงสร้างซอฟต์แวร์หลายรูปแบบ เช่น GNU Radio, C++, และ Python Phys ด้วยการสนับสนุนซอฟต์แวร์นี้ การพัฒนาของเหล่านักวิจัยสามารถพัฒนาแอปพลิเคชันด้านเทคโนโลยี SDR ได้



รูปที่ 3.2 บอร์ด Universal Software Radio Peripheral (USRP™) รุ่น B210

กระบวนการในการใช้ USRP B210 สำหรับการกำเนิด LFM ก่อนที่จะเริ่มใช้งาน USRP B210 ในการกำเนิด LFM สัญญาณต้องมั่นใจว่าได้ติดตั้ง GNU Radio และไดรเวอร์ที่เกี่ยวข้องสำหรับ USRP B210 เช่น UHD (USRP Hardware Driver) ให้เรียบร้อยบนเครื่องคอมพิวเตอร์สามารถติดตั้งผ่านคำสั่งใน Ubuntu สร้าง Flowgraph ใน GNU Radio Companion ด้วยเพิ่มบล็อก Linear FM Source หรือหากไม่สามารถใช้ Python Block ทำการเขียนโค้ดเพื่อสร้างบล็อกใช้งานเองจากฟังก์ชันสมการที่ 3.3

$$x(t) = \exp \left[j\pi \left(-Bt + \frac{B}{T_p} t^2 \right) + \theta_0 \right] \quad (3.3)$$

โดยที่

$x(t)$ = เป็นสัญญาณเชิงซ้อน (Complex Exponential) ของคลื่น Chirp

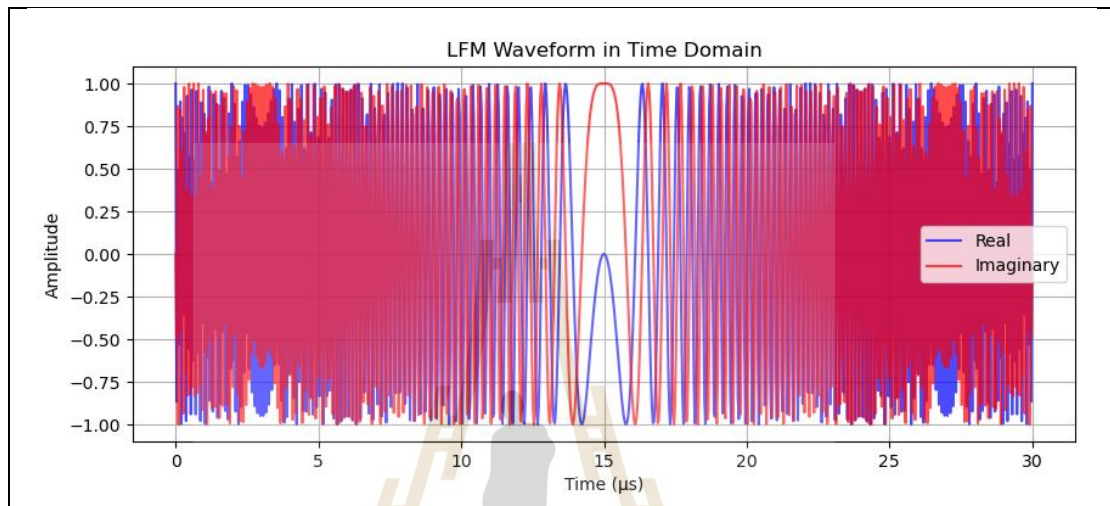
j = แทนหน่วยเชิงซ้อน ($j^2 = -1$)

B = แบนด์วิดท์ของสัญญาณ (MHz)

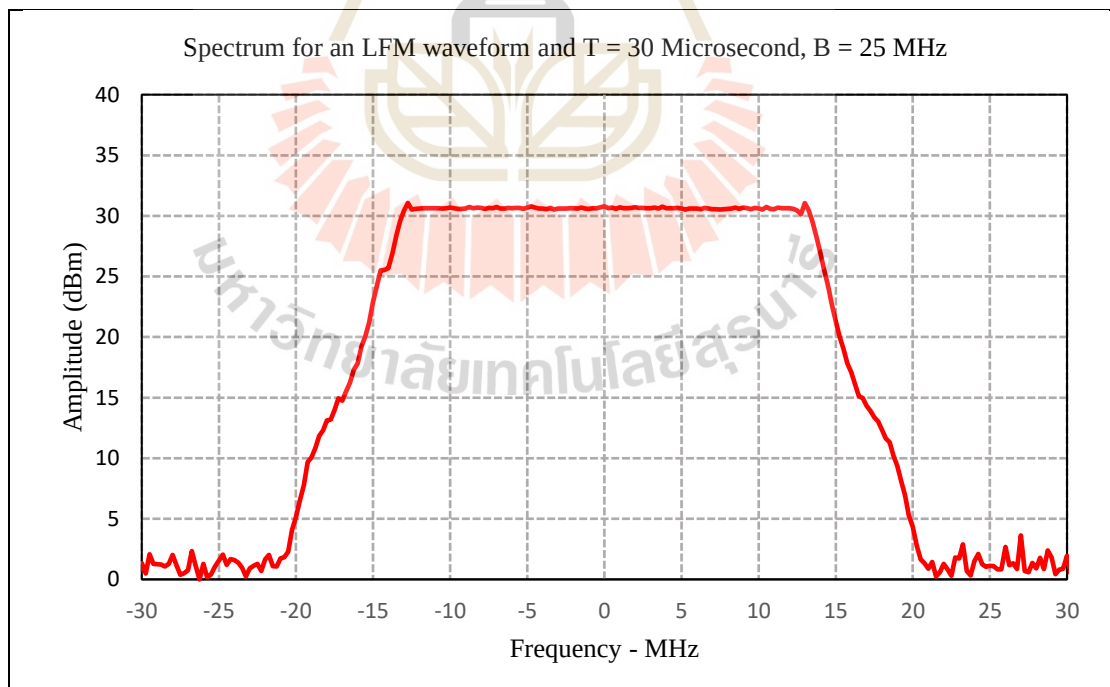
T_p = Pulse Duration (s) หรือระยะเวลาของพัลส์

θ_0 = เฟสเริ่มต้นของสัญญาณ

ซึ่งจะใช้ในการสร้างสัญญาณ chirp ที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในลักษณะเส้นตรง กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ เช่น Sweep Time, Center Frequency, Sample Rate และ Bandwidth ของสัญญาณ การตรวจสอบสัญญาณที่ส่งออกนั้นใช้ทดสอบด้วย Scope Sink หรือ QT GUI Sink สามารถเรียกดูผ่าน Gnu radio ทำการทดสอบและปรับแต่งเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 รูปคลื่น LFM ทั่วไปส่วนจริงและส่วนจินตภาพที่มี $B = 25$ MHz และ $T = 30 \mu s$



รูปที่ 3.4 สเปกตรัมทั่วไปสำหรับรูปคลื่น LFM สำหรับแบนด์วิดท์ 25 MHz

รูปที่ 3.3 ในรูปคลื่นที่เกิดจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Waveform Generators) ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญดังนี้ ทั้งสองเส้นแสดงถึงองค์ประกอบของสัญญาณเชิงซ้อน (Complex Signal) สัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงความถี่อย่างต่อเนื่องโดยมีการแสดง ค่าจริง (Real - สีน้ำเงิน) และค่าจินตภาพ (Imag - สีแดง) ในโดเมนเวลา (Time Domain) คือ แกน X แสดงช่วงเวลาที่สัญญาณถูกสร้างขึ้นมีช่วงเวลาดังตั้ง 0 ถึง 30 μs (Amplitude) คือ แกน Y มีค่าของช่วงตั้งตั้งแต่ -1 ถึง 1 กราฟนี้ได้จาก GNU Radio แสดง FMCW Radar แบบ Triangular Chirp ซึ่งเป็นการเพิ่มและลดความถี่สลับกันต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถคำนวณทั้ง ระยะทาง (Range) และ อัตราเร็ว (Velocity) ของเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ

รูปที่ 3.4 แสดงสเปกตรัมความถี่ (Frequency Spectrum) ของสัญญาณ LFM Waveform โดยมีข้อมูลที่สำคัญแกน X คือความถี่ของสัญญาณในหน่วยเมกะเฮิรตซ์ (MHz) แกน Y คือ ค่าความแรงของสัญญาณในหน่วย (dBm) $T = 30$ ไมโครวินาที (μs) เป็นระยะเวลาของสัญญาณแบนด์วิดท์ของสัญญาณมีผลโดยตรงต่อความสัมพันธ์ระหว่างระยะความละเอียดของเรดาร์ดังสมการที่ (2.7) หาก B มากทำให้ ΔR จะต่ำทำให้เรดาร์มีความละเอียดสูงแยกวัตถุที่อยู่ใกล้กันได้ดี และหาก B น้อยทำให้ ΔR จะสูงเรดาร์มีความละเอียดต่ำจะแยกแยะวัตถุที่อยู่ใกล้กันไม่ได้ ซึ่งจะ Sweep Start Frequency เริ่มต้นจากการกวาดจาก -12.5 MHz ถึง +12.5 MHz โดยอ้างอิงจาก frequency center: f_0 จะได้ Bandwidth = 25 MHz พอดี

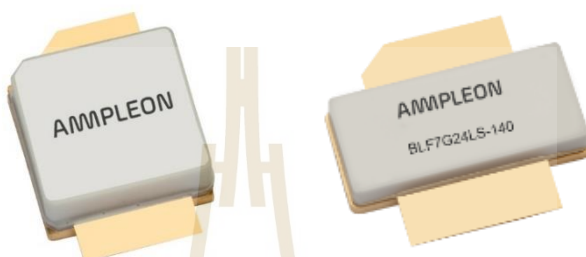
ปัจจุบัน Gnu Radio ได้พัฒนาให้มีหลาย version โดยหนึ่งในรูปแบบที่ได้รับความนิยมคือการใช้งานสัญญาณ LFM "chirp" ซึ่งจะกวาดความถี่เป็นเส้นตรงในช่วงเวลาที่จำกัด ในระบบนี้บล็อก Linear FM Source ทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณ LFM ที่อยู่ในรูปแบบแบนด์วิดท์ซับซ้อนซึ่งมีการกำหนดความถี่ศูนย์กลางล่วงหน้า จากนั้นทำการกวาดความถี่จากต่ำไปสูงตามแบนด์วิดท์ที่ต้องการ โดยพารามิเตอร์ทั้งหมดสามารถกำหนดได้ผ่านซอฟต์แวร์ GNU Radio ส่งต่อคำสั่งให้ USRP-B210 เพื่อสร้างสัญญาณ การสร้างบล็อกและการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบจะถูกอธิบายในหัวข้อ 3.7 การออกแบบเขียนโปรแกรมการตรวจจับแสดงผล

3.4 การออกแบบและสร้างชุดขยายสัญญาณภาคส่งและภาครับ

3.4.1 การออกแบบและสร้างชุดขยายสัญญาณภาคส่ง (Amplifier)

ประกอบไปด้วย Pre-Amplifier และ Power Amplifier สำหรับการออกแบบขยายสัญญาณกำลังสูงมักใช้ Class AB ที่มีความเชิงเส้นสูงพอสสมควรและประสิทธิภาพที่ดี โดยเฉพาะสำหรับการสื่อสารไร้สายที่ต้องการการบิดเบือนของสัญญาณให้น้อยที่สุด เพื่อให้ได้กำลังงานที่มากพอในการส่ง โดย Pre-Amplifier ใช้ทรานซิสเตอร์ BLF6G27S-45K เป็นชนิด LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) ความถี่ใช้งาน 2.4 - 2.7 GHz กำลังขับสูงสุด 45 watt แรงดันใช้งาน 12 Vdc เกณฑ์การขยาย (Gain) 18 dB ประสิทธิภาพการแปลงกำลัง (Efficiency) สูงถึง 50% และ Power Amplifier ทรานซิสเตอร์ BLF7G24LS-140 เป็นชนิด LDMOS ความถี่

ใช้งาน 2.4 - 2.5 GHz กำลังขับสูงสุด 140 watt แรงดันใช้งาน 28 Vdc เกณฑ์การขยาย (Gain) 17 dB ประสิทธิภาพการแปลงกำลัง (Efficiency) สูงถึง 55% ดังรูปที่ 3.5 ต้องพิจารณาหลายปัจจัยการจับคู่สัญญาณอินพุต-เอาต์พุต ความเสถียรเนื่องจากเป็นอุปกรณ์กำลังสูงสำหรับความถี่ไมโครเวฟ ใช้ LC (Inductor-Capacitor) Matching Network ให้เกิดความแม่นยำของ impedance ที่ต้องการ ($50\ \Omega$) ออกแบบให้ทำงานได้ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 GHz ดังรูปที่ 3.6 - 3.7 และการระบายความร้อนต้องใช้ Heatsink ขนาดใหญ่พร้อมพัดลมระบายอากาศ



รูปที่ 3.5 ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF6G27S-45K และเบอร์ BLF7G24LS-140



รูปที่ 3.6 ชุดขยายสัญญาณใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF6G27S-45K สำหรับออกแบบ Pre-Amplifier



รูปที่ 3.7 ชุดขยายสัญญาณใช้ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BLF7G24LS-140 สำหรับออกแบบ Power Amplifier

3.4.2 การออกแบบและสร้างชุดขยายสัญญาณภาครับ Low Noise Amplifier (LNA)

โดยใช้ ZX60-83LN-S+ เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาความถี่ การลดสัญญาณรบกวนและการขยายสัญญาณให้มีคุณภาพสูงในภาคการรับสัญญาณ RF ในการออกแบบภาครับนั้น เป้าหมายหลักคือการเพิ่มกำลังขยายของสัญญาณที่มีค่า Noise Figure (NF) ต่ำที่สุดเพื่อให้สัญญาณที่ได้รับยังคงมีคุณภาพดี เพื่อลดการสูญเสียจากสายส่ง (Transmission Line Loss) และรักษา Signal-to-Noise Ratio (SNR) ของระบบให้อยู่ในระดับที่ดี สำหรับ LNA รุ่น ZX60-83LN-S+ ความถี่ใช้งาน 0.5 ถึง 8 GHz, เกณฑ์การขยาย (Gain) 22 dB Noise Figure (NF) 1.4 dB (ที่ความถี่ 2.45 GHz) กำลังขับสูงสุด (P1dB) 20.7 dBm แรงดันไฟฟ้าใช้งาน (Supply Voltage) +5 Vdc ดังรูปที่ 3.8 ใช้การระบายความร้อนแบบ Heatsink ขนาดเล็กสามารถช่วยลดความร้อนได้ เหมาะสำหรับงานนี้



รูปที่ 3.8 Low Noise Amplifier รุ่น ZX60-83LN-S+

3.5 การออกแบบและสร้างชุดสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศรับ-ส่ง การออกแบบและสร้างชุดสายอากาศแบบพาราโบลิค (Parabolic Antenna) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณและการสร้างทางกายภาพที่ต้องใช้ความรู้ด้านฟิสิกส์และวิศวกรรม โดยการออกแบบชุดสายอากาศพาราโบลิคเน้นไปที่การรวมสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปที่จุดโฟกัส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับหรือส่งสัญญาณ การออกแบบจะพิจารณาปัจจัยหลักดังนี้

- 1) ความไวในการส่งและรับสัญญาณ สายอากาศ (Antenna) ในระบบเรดาร์ต้องมีความสามารถในการส่งสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟไปยังเป้าหมายและรับสัญญาณที่ส่งกลับมามีประสิทธิภาพ ความไวนี้เป็นสิ่งสำคัญในการตรวจจับวัตถุหรือเป้าหมายที่เคลื่อนที่ในเวลาที่รวดเร็ว

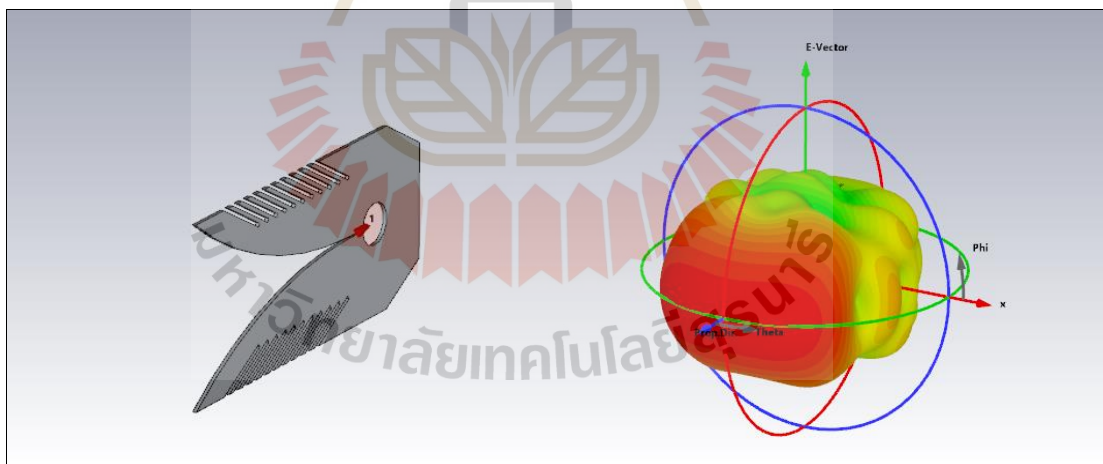
2) ความแม่นยำในทิศทาง (Directionality) สายอากาศในระบบเรดาร์จะต้องมีความสามารถในการส่งและรับสัญญาณในทิศทางที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งช่วยให้ระบบเรดาร์สามารถกำหนดทิศทางและระยะทางของวัตถุหรือเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ

3) ความแม่นยำในการตรวจจับ (Sensitivity) สายอากาศในระบบเรดาร์ต้องมีความสามารถในการรับสัญญาณกำลังงานที่ต่ำ เพื่อให้ระบบเรดาร์สามารถตรวจจับวัตถุหรือเป้าหมายที่อยู่ในระยะทางไกลและมีสัญญาณที่น้อยได้

4) ความยืดหยุ่นในการปรับแต่ง (Adaptability) สายอากาศสำหรับระบบเรดาร์จะต้องสามารถปรับแต่งคุณสมบัติการส่งและรับสัญญาณให้เหมาะสมกับสัญญาณคลื่นความถี่ไมโครเวฟที่แตกต่างกัน เพื่อให้ระบบเรดาร์สามารถทำงานในช่วงย่านความถี่ต่าง ๆ และในลักษณะสัญญาณที่หลากหลายแบบได้

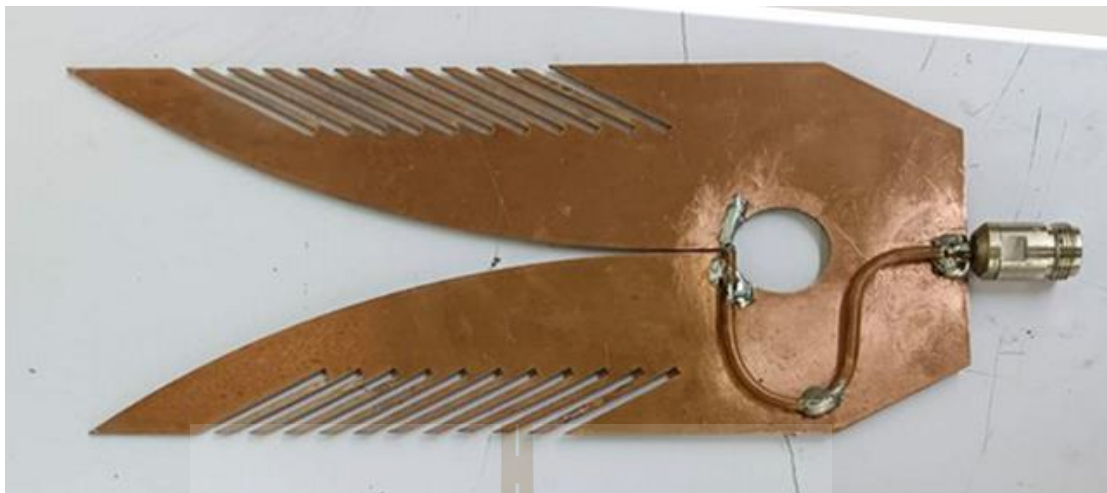
5) ความทนทานต่อการรบกวน (Resistance to Interference) สายอากาศในระบบเรดาร์ควรมีความสามารถในการทนต่อสัญญาณรบกวนและบางครั้งควรใช้เทคโนโลยีการกรองสัญญาณ (signal filtering) เพื่อลดสัญญาณรบกวนในระบบเรดาร์

6) ความทนทานต่อกำลังงานสัญญาณที่สูง (High-Power Handling) สายอากาศจะต้องสามารถรับสัญญาณที่มีความเข้มกำลังงานสูงและสามารถรับมาโดยไม่สูญเสียความแม่นยำ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการรับสัญญาณที่ส่งกลับมาจากเป้าหมายที่อยู่ใกล้สัญญาณส่งออกและมีความเข้มสูง

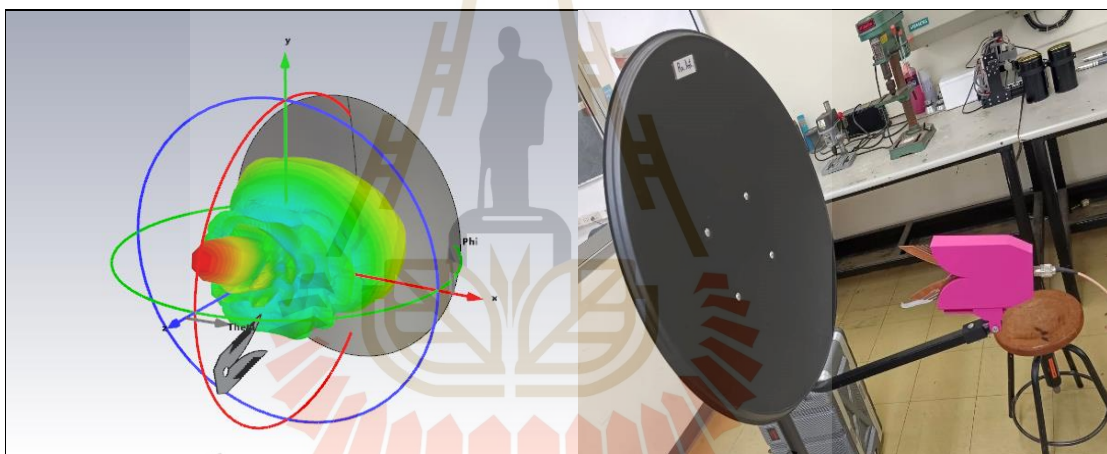


(ก) การจำลองสายอากาศ Vivaldi และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 3D

รูปที่ 3.9 การออกแบบสายสายอากาศ Vivaldi



(ข) ผลการออกแบบสายอากาศ Vivaldi ต้นแบบ
รูปที่ 3.9 การออกแบบสายอากาศ Vivaldi (ต่อ)



รูปที่ 3.10 การจำลองและการออกแบบสายอากาศ Vivaldi ร่วมกับ Parabolic

จากผลการจำลองและทดสอบพบว่าสายอากาศที่ออกแบบที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบเรดาร์ที่นำเสนอ นั้นมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีดังนี้

- 1) มีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน ($S_{11} \leq -10$ dB = 2.0 - 6 GHz)
- 2) มีอัตราขยายของสายอากาศสูง (>16 dBi)
- 3) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว
- 4) มีระดับกำลังงาน Side Lobe Level (SLL) ต่ำกว่า -10 dB
- 5) มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังงานแคบพอที่จะสามารถระบุทิศทางได้
- 6) สามารถทนกำลังงานที่สูงได้
- 7) มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น
- 8) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Pencil Beam

จากคุณสมบัติของสายอากาศต้นแบบดังที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่าสามารถนำไปใช้งานร่วมกับระบบเรดาร์แบบพกพาได้เนื่องจากมีขนาดที่ไม่ใหญ่มากเกินไป มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี และทนทานต่อการนำไปใช้งานในภาคสนามได้

3.6 การออกแบบและสร้างชุดกรองสัญญาณความถี่

การออกแบบและสร้างชุดกรองสัญญาณความถี่ผ่าน (Band Pass Filter - BPF) เนื่องจากตัวกรองนี้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานกับคลื่นความถี่เฉพาะเจาะจง โดยกรองเฉพาะช่วงความถี่ที่ต้องการผ่านและป้องกันความถี่อื่นๆ ที่รบกวน ได้นำตัวกรองรุ่น VBFZ-2575-S+ (Mini-Circuits.com) ดังรูปที่ 3.11 ช่วงความถี่ 2350 MHz ถึง 2800 MHz ขนาดเล็กกะทัดรัดเหมาะสำหรับใช้งานในระบบต่างๆ ที่ต้องการความละเอียดในการกรองสัญญาณ และค่าการลดทอนในช่วงนอกความถี่ที่กรองสูง ช่วยลดการรบกวนจากสัญญาณนอกช่วง



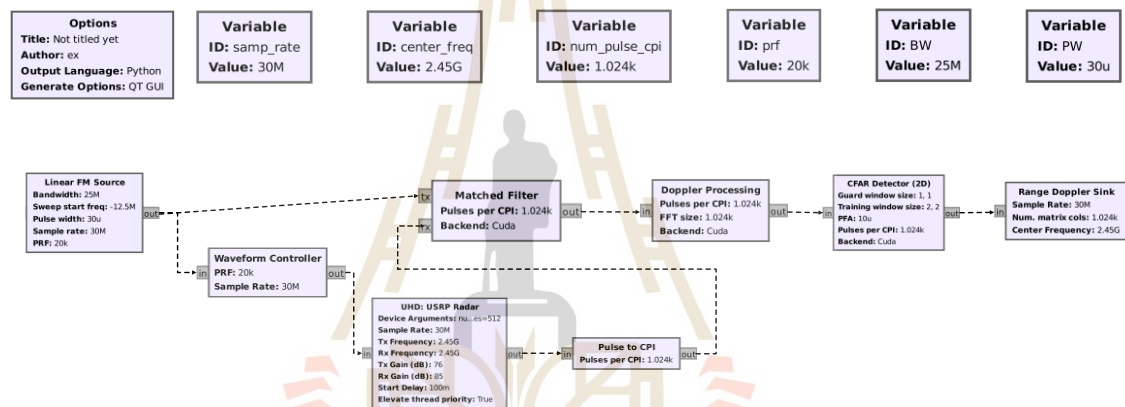
รูปที่ 3.11 ตัวกรองสัญญาณความถี่ผ่าน (Band Pass Filter - BPF)

3.7 การออกแบบเขียนโปรแกรมการตรวจจับแสดงผล

การออกแบบเขียนโปรแกรมในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับสำหรับระบบเรดาร์แบบ FMCW ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Gnu radio ซึ่งเป็นโปรแกรมซอฟต์แวร์ (software) ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบและการพัฒนาระบบสื่อสารแบบไร้สาย (software-defined radio: SDR) และระบบการรับส่งสัญญาณดิจิทัล ระบบนี้ใช้คอมพิวเตอร์เป็นแพลตฟอร์มหลักในการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งทำให้ผู้ใช้สามารถปรับแต่งและปรับการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายโดยใช้ซอฟต์แวร์เท่านั้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้ฮาร์ดแวร์พิเศษเพิ่มเติม นี่เป็นสิ่งสำคัญในการทดสอบและพัฒนาระบบสื่อสารในงานวิจัยและการพัฒนาสื่อสารไร้สายที่ต้องการความยืดหยุ่นในการปรับแต่ง

และทดสอบการทำงานของระบบ Gnu radio เป็นโครงการซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ส (open-source software) ซึ่งมีรายละเอียดและความยืดหยุ่นในการใช้งาน ผู้ใช้สามารถใช้ Gnu radio เพื่อสร้างและปรับแต่งอุปกรณ์ SDR และระบบสื่อสารไร้สายตามความต้องการ นอกจากนี้ Gnu radio ยังมีการพัฒนา วิจัย และปรับปรุงโปรแกรมอยู่อย่างต่อเนื่อง

ดังนั้นจะใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณเรดาร์แบบ FMCW ซึ่งใช้ Gnu radio software ในการออกแบบระบบเรดาร์รับ-ส่งสัญญาณ ผ่านบอร์ด USRP-B210 ในการรับคำสั่งตามโปรแกรมประมวลผลการส่งและรับสัญญาณ ก่อนส่งข้อมูลไปยังจอแสดงผล การเขียนโปรแกรม Gnu radio software จะใช้ flow base diagram ในการดำเนินการและยังสามารถ export python code จาก flow diagram เพื่อไปพัฒนา software โดยใช้ python ได้ ซึ่ง User interface ของ Gnu radio จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.12

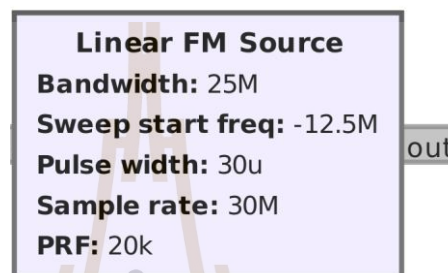


รูปที่ 3.12 แผนภาพแสดงการประมวลผลเรดาร์ Pulse-Doppler

ในการทำงานของเรดาร์นี้ แต่ละบล็อกมีหน้าที่สำคัญและเชื่อมโยงกันเพื่อสร้างระบบที่มีประสิทธิภาพ เริ่มต้นจาก Linear FM Source block ซึ่งทำหน้าที่สร้างสัญญาณ LFM chirp โดยสัญญาณนี้จะมีการกวาดความถี่ขึ้นหรือลงตามแบนด์วิดท์ที่กำหนด จากนั้น Waveform Controller block จะควบคุมช่วงพัลส์ของสัญญาณ chirp ให้สอดคล้องกับการทำงานของระบบ USRP Radar block จะทำหน้าที่ส่งและรับสัญญาณวิทยุผ่านฮาร์ดแวร์ USRP B210 โดยสัญญาณพัลส์ที่ถูกส่งออกไปและรับกลับมาจะถูกแบ่งเป็นช่วงเพื่อทำการ FFT (Fast Fourier Transform) โดยใช้บล็อก Pulse to CPI block ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลขั้นถัดไป จากนั้นสัญญาณที่ได้รับจะถูกส่งไปยัง Matched Filter block ซึ่งทำการ Correlation ระหว่างสัญญาณที่ส่งออกไปกับสัญญาณที่รับกลับมา เพื่อหาค่าความล่าช้า (Time Delay) และการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่เกิดจาก Doppler Effect ในขั้นตอนต่อมา Doppler Processing block จะนำข้อมูลที่ได้จากการ Correlation มาสร้างเป็น Range-Doppler Map ซึ่งแสดงข้อมูลระยะทางและความเร็วของเป้าหมาย สัญญาณที่แสดงถึงเป้าหมายที่ตรวจจับได้จะถูกส่งไปยังบล็อก CFAR (Constant False Alarm Rate) block ซึ่งจะทำการตรวจจับเป้าหมาย

ที่แท้จริง การประมวลผลเหล่านี้ดำเนินการโดยใช้ ArrayFire (Yalamanchili et al., 2015) ซึ่งรองรับการประมวลผลแบบคู่ขนานบน CUDA, OpenCL, หรือ CPU ตามที่ผู้ใช้เลือก และในขั้นสุดท้าย Range-Doppler Sink block จะสร้างแผนที่ Doppler บนหน้าจอแสดงผล โดยป้อนพารามิเตอร์การทำงานของเรดาร์ ดังตารางที่ 3.1 แสดงผลลัพธ์ที่เป็นระยะทางและความเร็วของเป้าหมายที่ตรวจจับได้ โดยอธิบายรายละเอียดแต่ละบล็อกไว้ดังนี้

3.7.1 Linear FM Source ในรูปที่ 3.13 ใช้สำหรับสร้างสัญญาณ Linear Frequency Modulation (LFM) ซึ่งเป็นพื้นฐานของ FMCW Radar โดยแต่ละพารามิเตอร์มีความหมายดังนี้



รูปที่ 3.13 บล็อก Linear FM Source

Bandwidth: B ของสัญญาณ LFM เท่ากับ 25 MHz ส่งผลโดยตรงต่อความละเอียดของระยะทางเรดาร์ (Range Resolution: ΔR) ความละเอียดนั้นคำนวณจากสมการที่ (2.7) หาก (B) มาก (ΔR) จะต่ำทำให้เรดาร์มีความละเอียดสูงแยกวัตถุที่อยู่ใกล้กันได้ดี และหาก (B) น้อย (ΔR) จะสูงเรดาร์มีความละเอียดต่ำ ส่วนเรดาร์นี้มี Range Resolution ประมาณ 6 เมตร เรดาร์นี้จะสามารถแยกวัตถุที่อยู่ห่างกันอย่างน้อย 6 เมตร ออกจากกันได้

Sweep Start Frequency เริ่มต้นจากการสแกนจาก -12.5 MHz ถึง +12.5 MHz โดยอ้างอิงจาก frequency center: f_0 จะได้ Bandwidth = 25 MHz พอดี

ความกว้างของพัลส์ (Pulse width) เท่ากับ 30 ไมโครวินาที ค่าพารามิเตอร์นี้กำหนดระยะเวลาที่สัญญาณ LFM ส่งออกมาต่อหนึ่ง chirp ส่งผลต่อระยะไกลสุดที่เรดาร์สามารถวัดระยะเป้าหมายได้โดยไม่มีความคลุมเครือของเรดาร์

Sample Rate อัตราการสุ่มตัวอย่างของระบบเท่ากับ 30 Msps (30 ล้านตัวอย่างต่อวินาที) ส่งผลต่อความละเอียดของการประมวลผลสัญญาณต้องเลือกค่าให้เพียงพอกับแบนด์วิดท์ของสัญญาณควรเป็นอย่างน้อย 2 เท่าของแบนด์วิดท์ตาม Nyquist Theorem ในกรณีนี้ Sample Rate 30 MHz เพียงพอสำหรับการสุ่มสัญญาณแบนด์วิดท์ 25 MHz

PRF ความถี่การเกิดซ้ำของพัลส์อยู่ที่ 20 kHz มีผลต่อ Maximum Unambiguous Range: $R_{\max}$ ตามสมการที่ (3.4) เรดาร์นี้สามารถตรวจจับระยะไกลสุดที่ 7.5 กิโลเมตร จากการคำนวณ

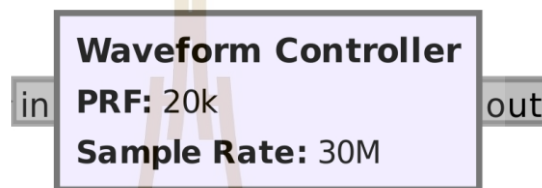
$$R_{\max} = \frac{c}{2 \times PRF} \quad (3.4)$$

$R_{\max}$ เป็นค่าที่กำหนดขีดจำกัดสูงสุดในการวัดระยะโดยไม่มีความคลุมเครือ และสัมพันธ์โดยตรงกับ PRF หรือ CRI ของเรดาร์

PRF สูง $R_{\max}$ จะลดลงใช้ในเรดาร์ตรวจจับเป้าหมายใกล้ เช่น เรดาร์อากาศยาน

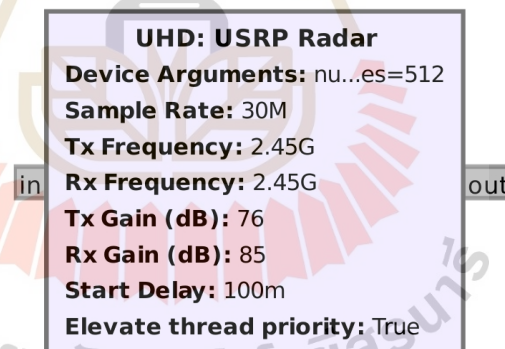
PRF ต่ำ $R_{\max}$ จะเพิ่มขึ้นใช้ในเรดาร์ระยะไกล เช่น เรดาร์ตรวจการณ์

3.7.2 Waveform Controller ใน GNU Radio หรือซอฟต์แวร์ประมวลผลสัญญาณเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบเรดาร์หรือระบบส่งสัญญาณ LFM หรือ FMCW Radar โดยทำหน้าที่ควบคุมพารามิเตอร์ของคลื่นที่ถูกสร้างขึ้นจากบล็อก Linear FM Source



รูปที่ 3.14 บล็อก Waveform Controller

2.7.3 UHD: USRP Radar เป็นส่วนหนึ่งของระบบเรดาร์ที่ใช้ USRP สำหรับการส่ง (Tx) และรับ (Rx) สัญญาณเรดาร์ โดยควบคุมผ่าน UHD บน GNU Radio



รูปที่ 3.15 บล็อก UHD: USRP Radar

Device Arguments: nu...es=512 ใช้ระบุการตั้งค่าหรือออพชันพิเศษสำหรับ USRP เช่น หมายเลขซีเรียล, ค่าการบัพเฟอร์, หรือการตั้งค่าต่าง ๆ ของ FPGA ค่า 512 เป็นจำนวนของตัวอย่างที่ถูกใช้ในแต่ละบัพเฟอร์

Sample Rate 30 MHz อัตราการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณ (Sampling Rate)

ความถี่ของสัญญาณส่งและความถี่ของสัญญาณรับเรดาร์นี้ทำงานที่ 2.45 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของ ISM Band (Industrial, Scientific, and Medical)

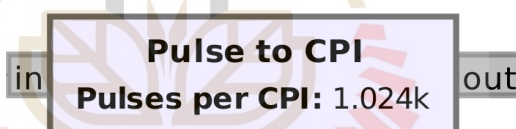
Tx Gain (dB) กำลังขยายของภาคส่ง (Transmit Gain) ค่า 76 dB หมายถึง กำลังขยายของภาคส่งที่สูง ซึ่งจะเพิ่มพลังงานของสัญญาณเรดาร์

Rx Gain (dB) กำลังขยายของภาครับ (Receive Gain) ค่า 85 dB หมายถึง กำลังขยายสูงของภาครับ ซึ่งช่วยให้สามารถรับสัญญาณที่อ่อนมาก ๆ จากเป้าหมายต้องการตรวจจับวัตถุที่อยู่ไกลหรือมี RCS ต่ำมาก

Start Delay 100 milliseconds ค่า Start Delay ควบคุมระยะเวลาหน่วงก่อนเริ่มการทำงานในเรดาร์ อาจต้องมีการหน่วงเวลาเพื่อให้แน่ใจว่าอุปกรณ์พร้อมทำงานก่อนเริ่มส่งหรือรับสัญญาณ

Elevate thread priority: True ตั้งค่าให้ เพิ่มลำดับความสำคัญของเธรด (Thread Priority) เพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการนี้ได้รับทรัพยากร CPU เพียงพอสำหรับการประมวลผลสัญญาณแบบเรียลไทม์

2.7.4 Pulse to CPI บล็อกนี้ทำหน้าที่รวบรวมจำนวนพัลส์ภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่เราเรียกว่า CPI ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ใช้รวบรวมพัลส์เพื่อประมวลผล เช่น การวิเคราะห์ Doppler หรือ Range-Doppler Map Pulses per CPI: 1024 ค่าที่แสดงหมายความว่าในหนึ่ง CPI มีการรวม 1,024 พัลส์ สำหรับการประมวลผล



รูปที่ 3.16 บล็อก Pulse to CPI

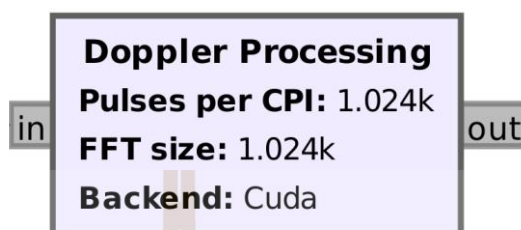
2.7.5 Matched Filter เป็นส่วนหนึ่งของระบบเรดาร์ที่ใช้สำหรับการประมวลผลสัญญาณสะท้อนกลับ (Rx Signal) โดยการทำ Matched Filtering เพื่อเพิ่มอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR - Signal-to-Noise Ratio) และเพิ่มความสามารถในการตรวจจับเป้าหมาย

Backend: Cuda ใช้ CUDA ของ NVIDIA เพื่อเร่งการประมวลผลการใช้ GPU ผ่าน CUDA สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ Matched Filter ได้อย่างมาก เนื่องจากการคำนวณต้องใช้ FIR Filtering และ Cross-Correlation ซึ่งเป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับ GPU



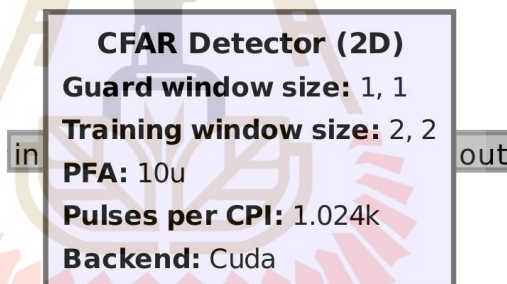
รูปที่ 3.17 บล็อก Matched Filter

2.7.6 Doppler Processing เป็นส่วนหนึ่งของ ระบบเรดาร์ ที่ใช้วิเคราะห์ความเร็วของ เป้าหมาย โดยการประมวลผล Doppler Effect ผ่านการคำนวณ FFT เพื่อเปลี่ยนสัญญาณเวลาเป็น สเปกตรัมความถี่ของสัญญาณสะท้อนเพื่อคำนวณความเร็วของเป้าหมาย



รูปที่ 3.18 บล็อก Doppler Processing

2.7.7 CFAR Detector เป็นโมดูลสำหรับ ตรวจจับเป้าหมาย ในเรดาร์โดยใช้ Constant False Alarm Rate (CFAR) ซึ่งเป็น อัลกอริทึมที่ช่วยรักษาระดับอัตราการเตือนผิดพลาด (False Alarm Rate) คงที่ โดยการปรับ Threshold ตามสภาพแวดล้อมของสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.19 บล็อก CFAR Detector

Guard window size: (1, 1) กำหนดขนาดของ Guard Cells ซึ่งเป็นเซลล์รอบ ๆ Cell Under Test (CUT) ที่ไม่ถูกใช้ในการคำนวณค่าเฉลี่ยของ Noise ค่า (1,1) หมายถึง Guard Window มี 1 จุดในแนวแกน X และ 1 จุดในแนวแกน Y รอบ ๆ CUT ป้องกันไม่ให้พลังงานของเป้าหมาย รั่วไหลเข้ามามีอิทธิพลต่อค่าประมาณของ Noise

Training window size: (2, 2) ขนาดของ Training Cells ซึ่งเป็นเซลล์ที่ใช้คำนวณระดับ สัญญาณรบกวน (Noise Level) ค่า (2, 2) หมายถึงใช้ 2 จุดในแนวแกน X และ 2 จุดในแนวแกน Y รอบ ๆ CUT ดังนั้น Training Cells ใช้คำนวณค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนเพื่อนำไปตั้ง Threshold

PFA (Probability of False Alarm): 10u อัตราความน่าจะเป็นของการแจ้งเตือนผิดพลาด (False Alarm) ค่า 10u (10^{-6}) หมายถึงโอกาสที่จะตรวจพบเป้าหมายผิดพลาดอยู่ที่ 1 ใน 1,000,000 ค่า PFA ต่ำ ทำให้การตรวจจับแม่นยำขึ้น แต่ถ้าต่ำเกินไปอาจพลาดการตรวจจับเป้าหมายที่แท้จริง

Range Doppler Sink
Sample Rate: 30M
Num. matrix cols: 1.024k
Center Frequency: 2.45G

รูปที่ 3.20 บล็อก Range Doppler Sink

2.7.8 Range Doppler Sink เป็นโมดูลสำหรับแสดงผล ข้อมูลช่วงระยะทาง (Range) และ อัตราเร็วเชิง Doppler ในระบบเรดาร์ใช้แสดงผลข้อมูลในรูปของ Range-Doppler Map ซึ่งช่วยให้ สามารถเห็น ตำแหน่งและความเร็วของเป้าหมาย ประมวลผลข้อมูล FFT ตามจำนวนคอลัมน์ที่ กำหนด เพื่อแปลงสัญญาณจาก Time Domain เป็น Frequency Domain ใช้ Sample Rate 30 Msps เพื่อให้ได้ความละเอียดสูง

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์การทำงานของเรดาร์

Parameter	Value
Sample rate	30 MS/s
Center Frequency	2.45 GHz
Bandwidth	25 MHz
Pulse width	30 μ s
PRF	20 kHz
Pulses per CPI	1024
PFA	10 μ



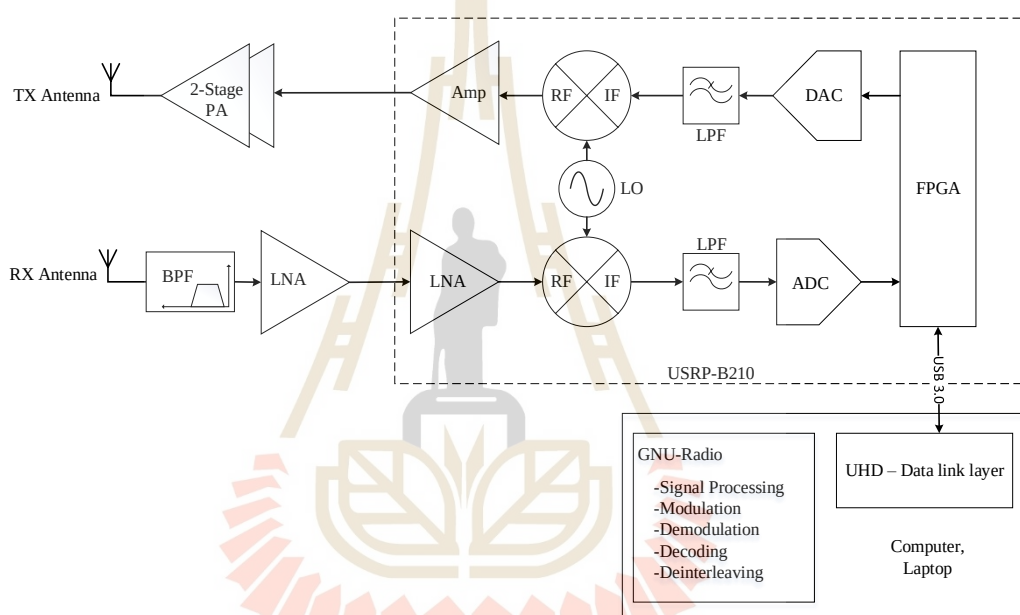
รูปที่ 3.21 ชุดประมวลผล

ระบบเรดาร์นี้ได้แนะนำการใช้ gr-plasma ในการสร้างบล็อกสัญญาณและประมวลผล โดย ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Ubuntu 22.04 ใช้กับ Single Board Computer Server LattePanda Sigma ซึ่งมีประสิทธิภาพสูง ด้วย CPU Intel i5-1340P, RAM 32 GB, และกราฟิกการ์ด NVIDIA

Quadro K6000 ที่มาพร้อม RAM 12 GB ด้วยสเปกดังกล่าว ทำให้ระบบนี้สามารถประมวลผลผลลัพธ์ตอบเลอร์ดแบบเรียลไทม์ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

3.8 การออกแบบเรดาร์ทั้งระบบ

สถาปัตยกรรมเรดาร์นี้เริ่มต้นจากการใช้งานบอร์ด USRP B210 เพื่อพัฒนาเป็นระบบเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ โดยในส่วนนี้จะอธิบายการทำงานของแต่ละองค์ประกอบสำคัญในระบบเรดาร์ ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับในระยะไกลและการประมวลผลสัญญาณที่แม่นยำ จะนำเสนอต่อไปนี้



รูปที่ 3.22 แสดงการออกแบบเรดาร์ทั้งระบบ

ในรูปที่ 3.22 ระบบเรดาร์ที่ออกแบบนี้ ใช้สายอากาศแบบ parabolic ซึ่งมีอัตราขยายของสายอากาศ (Gain) ที่ 18 dBm โดยเพื่อเพิ่มระยะตรวจจับได้ตามเป้าหมาย จึงได้มีการเพิ่มภาคขยายสัญญาณทั้งทางด้านส่งและด้านรับตามรูปที่ 3.1 (ค) เนื่องจากภาคขยายสัญญาณของ USRP B210 มีกำลังขับที่ต่ำเกินไปสำหรับการใช้งานนี้ ซึ่งภาคส่งได้รับการปรับปรุงด้วยการเพิ่มชุดขยายสัญญาณ 2 ชั้น เพื่อให้ได้กำลังเอาต์พุตถึง 50 dBm ทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ในระยะไกลและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเรดาร์ในการตรวจจับวัตถุ สำหรับภาครับ ได้ใช้ LNA ZX60-83LN-S+ ซึ่งมีอัตราขยายถึง 20 dB และมี Noise Figure ที่ต่ำเพียง 1.4 dB เพื่อปรับปรุงอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) ให้ดีขึ้น โดย LNA ช่วยขยายสัญญาณที่มีกำลังต่ำ ทำให้การตรวจจับวัตถุที่อยู่ไกลมีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ Band Pass Filter (BPF) VBFZ-2575-S+ เพื่อกรองสัญญาณในช่วงความถี่ที่ต้องการ โดยสามารถกรองสัญญาณรบกวนที่อยู่นอกย่านความถี่การส่งได้ ทำให้การตอบสนองของเรดาร์มีความคมชัดและแม่นยำมากขึ้น

ในส่วนบล็อก USRP -B210 เป็นอุปกรณ์ Software Defined Radio (SDR) ที่ชุดฮาร์ดแวร์สำเร็จหาได้ทั่วไป ง่ายต่อการใช้งานสะดวกต่อนักวิจัยที่จะนำไปปรับใช้งานในด้านอื่นๆ ประกอบไปด้วยทุกองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการประมวลผลสัญญาณวิทยุ ตั้งแต่การขยายสัญญาณ (Amplifier) ไปจนถึงการแปลงสัญญาณระหว่าง Radio Frequency (RF) และ Intermediate Frequency (IF) โดยสามารถใช้งานทั้งการส่งและรับสัญญาณ (full-duplex) ได้ โดยมีวงจร Local oscillator (LO) ทำหน้าที่ผสมสัญญาณเพื่อตั้งค่าความถี่ที่ต้องการ เปลี่ยนสัญญาณ RF ให้เป็น IF หรือจาก IF กลับมาเป็น RF เพื่อการประมวลผลและส่งออกข้อมูลมี Low Pass Filter (LPF) ช่วยกรองสัญญาณความถี่ต่ำในช่วง IF ที่ต้องการ นำมาใช้เพื่อแยกความถี่ที่สำคัญและลดสัญญาณรบกวนจากความถี่ที่ไม่ต้องการ มีภาค Analog to Digital Converter (ADC) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณแอนะล็อกให้เป็นดิจิทัล ขณะที่ Digital to Analog Converter (DAC) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลกลับมาเป็นแอนะล็อก ทำให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบของสัญญาณวิทยุได้อย่างแม่นยำ USRP B210 ใช้ Field-Programmable Gate Array (FPGA) ในการควบคุมและจัดการการประมวลผลสัญญาณ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบได้อย่างยืดหยุ่น รวมถึงการควบคุมเวลาและความถี่รองรับการเชื่อมต่อผ่าน USB 3.0 อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งช่วยให้การส่งถ่ายข้อมูลระหว่างฮาร์ดแวร์และคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและเสถียร สามารถใช้งานร่วมกับซอฟต์แวร์ GNU Radio ที่เป็นแพลตฟอร์มโอเพ่นซอร์สสำหรับการออกแบบและประมวลผลสัญญาณได้อย่างสะดวก โดยผ่าน USRP Hardware Driver (UHD) ที่ช่วยในการสื่อสารระหว่างฮาร์ดแวร์กับซอฟต์แวร์

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์และออกแบบ ในการจำลองทางคณิตศาสตร์จะช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนของเป้าหมายและสถานะแวดล้อมต่าง ๆ การสร้างสัญญาณ FMCW ที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ตามเวลา (frequency modulation) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของเรดาร์ FMCW ความถี่ของสัญญาณจะถูกสวิตช์ขึ้นและลงในช่วงเวลา (chirp) การออกแบบชุดขยายสัญญาณสำหรับภาคส่งเป็นการขยายกำลังส่งสัญญาณที่ปล่อยออกไปเพื่อเพิ่มระยะในการตรวจจับ ในขณะที่การออกแบบ LNA สำหรับภาครับจะช่วยขยายสัญญาณสะท้อนที่มีขนาดเล็กจากเป้าหมายโดยไม่เพิ่มสัญญาณรบกวนมากเกินไป ชุดสายอากาศจะถูกออกแบบให้ตรงกับความถี่ที่ใช้งานในระบบ FMCW และต้องมีการกระจายพลังงานและการรับสัญญาณที่เหมาะสม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งและรับสัญญาณ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการเพิ่มระยะตรวจจับและการลดสัญญาณรบกวนจากทิศทางอื่น ชุดกรองสัญญาณจะใช้สำหรับกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการหรือสัญญาณรบกวนออกจากระบบ การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากสัญญาณเรดาร์ เช่น การคำนวณระยะทาง ความเร็ว และทิศทางของเป้าหมาย ซอฟต์แวร์จะต้องมีอินเทอร์เฟซที่ใช้งานง่ายสำหรับการแสดงผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ รวมทั้ง 6 ส่วนนี้เข้าด้วยกันจะทำให้เกิดระบบเรดาร์ FMCW ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับอากาศยานไร้คนขับได้

บทที่ 4

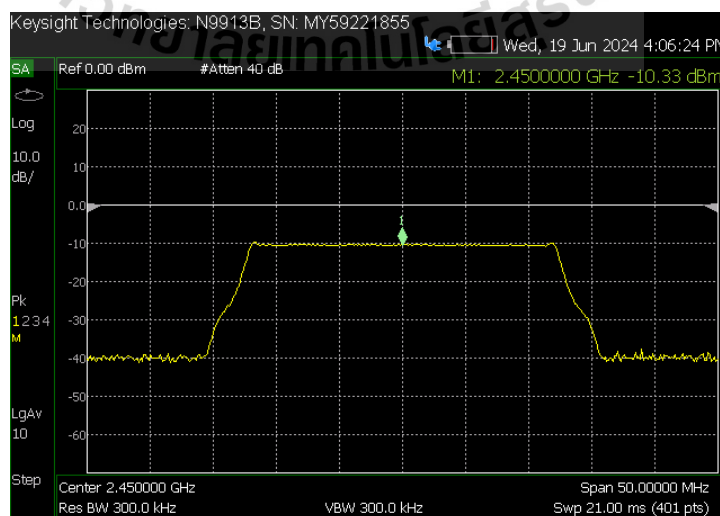
ผลการทดสอบระบบเรดาร์

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบระบบเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ ในบทที่ผ่านมาโดยมีการใช้ทฤษฎีและวิเคราะห์เชิงตัวเลขนั้น นำมาสร้างระบบจำลอง เพื่อแสดงให้เห็นว่าการออกแบบและการวิเคราะห์ที่ได้นั้นสอดคล้องกับทฤษฎี ในบทนี้จะได้นำผลการออกแบบดังกล่าวมาสร้างและวัดทดสอบจริงเพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบและการจำลองแบบที่ได้ในบทก่อนหน้านี้ ดังนั้นได้ทำการวัดทดสอบเพื่อให้เกิดความมั่นใจที่จะสามารถจับเป็นได้ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม Keysight รุ่น N9913B และ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) Keysight รุ่น E5063A ในการวัดสัญญาณของชุดวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่รูปแบบ FMCW ชุดเครื่องส่ง ชุดเครื่องรับ ชุดสายอากาศ และสุดท้ายทำการบินโดรนทดสอบด้วย DJI Phantom 4 Pro โดยผลการทดสอบเทียบกับการวิเคราะห์และออกแบบ เพื่อเก็บผลสรุปการวิจัยแสดงในหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.2 การทดสอบสัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณ

การทดสอบสัญญาณรูปแบบ FMCW นั้น เมื่อเขียนโปรแกรม Gnu radio software ดังรูปที่ 3.12 จะป้อนพารามิเตอร์ในรูปแบบ LFM โดยมีพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.1 ให้บอร์ด USRP-B210 กำเนิดสัญญาณและนำเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม วัดกำลังงานเออร์พุด (Tx) ในตัวบอร์ด USRP-B210 ด้วยโหมด channel power (ป้อนอัตราการขยายของ Tx Gain ในโปรแกรมที่ 76 dB)



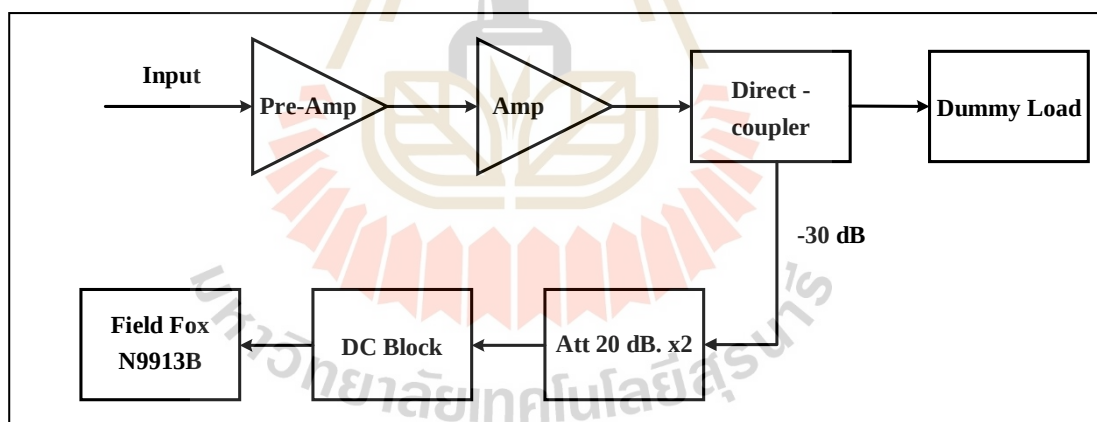
รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ FMCW จาก USRP-B210

จากรูปที่ 4.1 ผลการวัดสัญญาณการกำเนิดสัญญาณของ FMCW ด้วยบอร์ด USRP B210 ที่ Bandwidth 25 MHz และ Amplitude -10.33 dBm จากการตั้งค่าบน GNU Radio สามารถสร้างสัญญาณความถี่สูงที่มีความละเอียดสูงสำหรับการใช้งานในระบบเรดาร์ได้

4.3 การทดสอบชุดเครื่องส่งและชุดเครื่องรับ

4.3.1 การทดสอบชุดเครื่องส่ง

ในส่วน Transmitter Amplifiers จะเป็นการทดสอบวงจรขยายสัญญาณความถี่สูง 2 ชุด คือ ชุด Pre-Amplifiers และชุด Power Amplifiers ใช้เครื่องมือทำการทดสอบ คือ Field Fox ยี่ห้อ Keysight Technology รุ่น N9913B โดยใช้โหมด Network Analyzer ในการทดสอบแบบการส่งผ่าน (S-parameters) และใช้เครื่องมือการทดสอบ Spectrum Analyzer มาวัดกำลังงานที่ได้ โดยใช้ Mode Channel Power เนื่องจากสัญญาณเป็นการ Modulation แบบ FMCW ดังรูปที่ 4.1 และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Power Supply Unit) ในการป้อนแรงดัน +12 Vdc และ +28 Vdc ให้กับตัวขยายสัญญาณ ตามลำดับ โดยต่อดังรูปที่ 4.2 (ก) ค่าที่ทดสอบได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าจริงอยู่ -70 dB สาเหตุที่มีการต่อตัวลดทอนสัญญาณ เนื่องจากลดความเสี่ยงที่จะเกิดแรงดันวิกฤติต่อเครื่องมือวัดทดสอบ



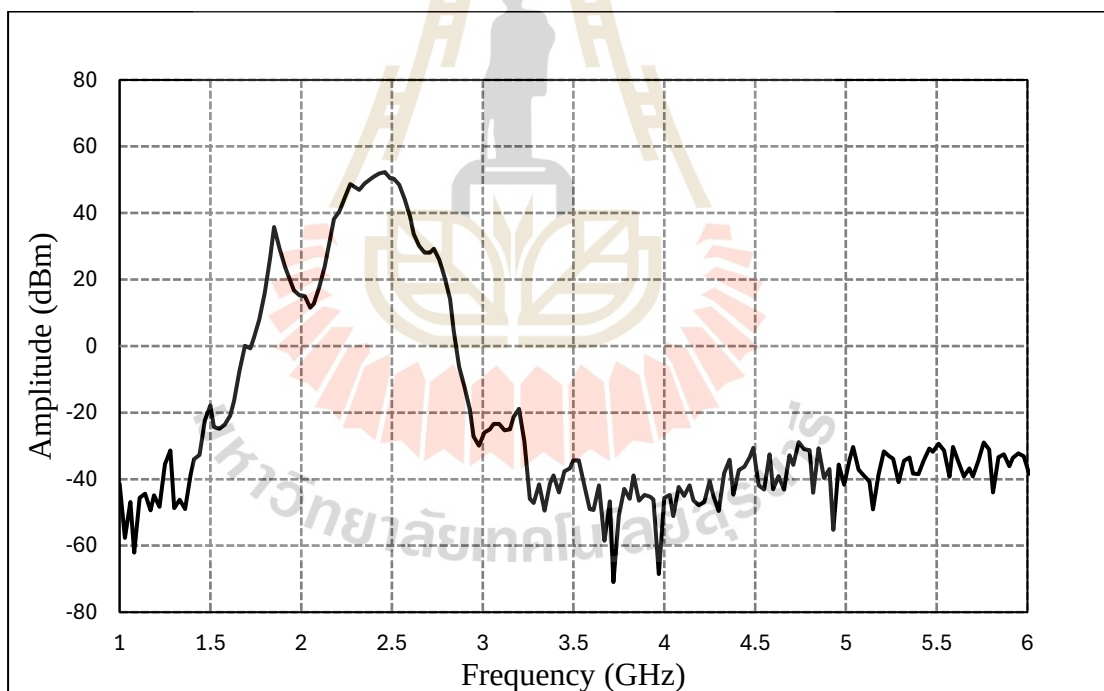
(ก) แสดงบล็อกการทดสอบชุด Transmitter Amplifiers

รูปที่ 4.2 การทดสอบชุดเครื่องส่ง



(ข) แสดงการทดสอบชุด Transmitter Amplifiers

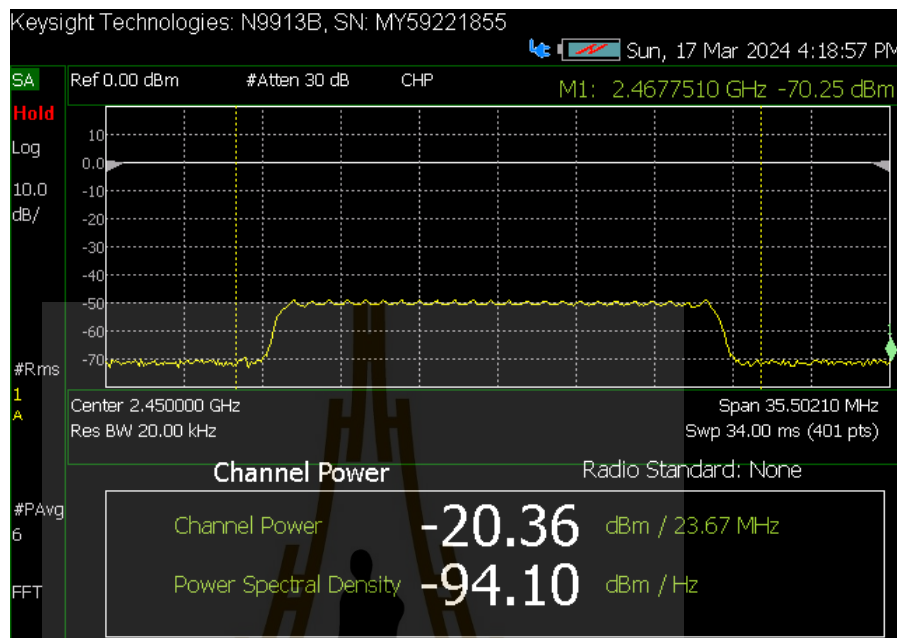
รูปที่ 4.2 การทดสอบชุดเครื่องส่ง (ต่อ)



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบ ($|S_{21}|$) ของวงจรขยายสัญญาณ Transmitter Amplifiers

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบ (S-parameters) วงจรขยายสัญญาณความถี่สูงจะได้ค่าอัตราการขยายที่ทดสอบได้ในย่านความถี่ 2.45 GHz ผลลัพธ์คือ 51.7 dB ที่คำนวณค่าอัตราลดทอนจากอุปกรณ์ Attenuator ออกแล้ว (-70 dB) จะทราบอัตราขยายจริงของวงจรขยายสัญญาณ ที่ป้อนกำลังงานด้าน input 0 dBm และผลการวัดค่ากำลังเครื่องส่ง จากรูปที่ 4.4 นั้นค่าที่วัดได้จากเครื่อง

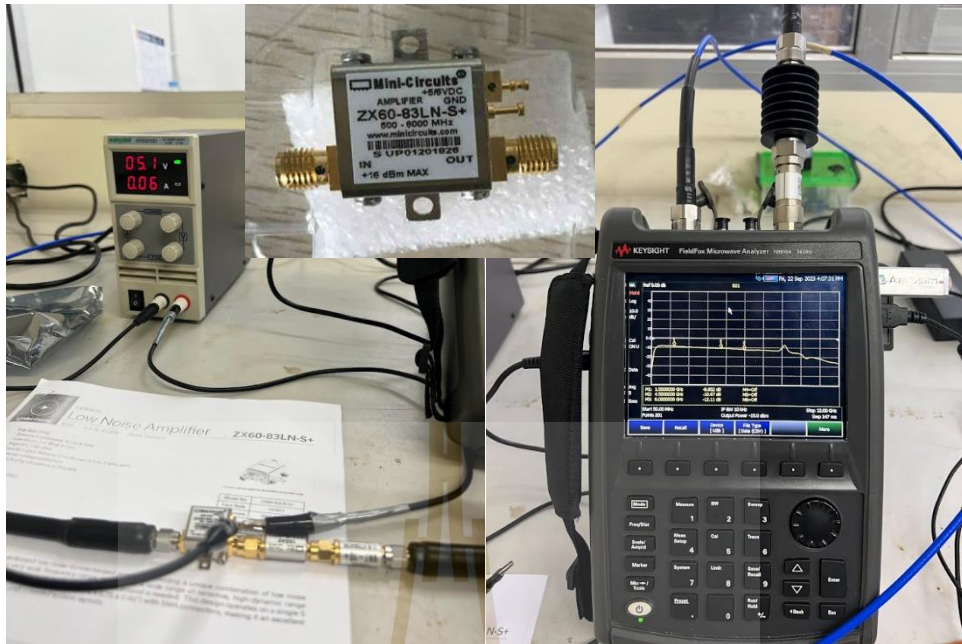
สเปกตรัมด้วยโหมด channel power ทำการวัดได้ -20.36 dBm นำมาคำนวณโดยคิดค่าการลดทอนสัญญาณออกที่ 70 dB จะได้ค่าจริงอยู่ที่ 49.64 dBm หรือ ~92.045 Watt



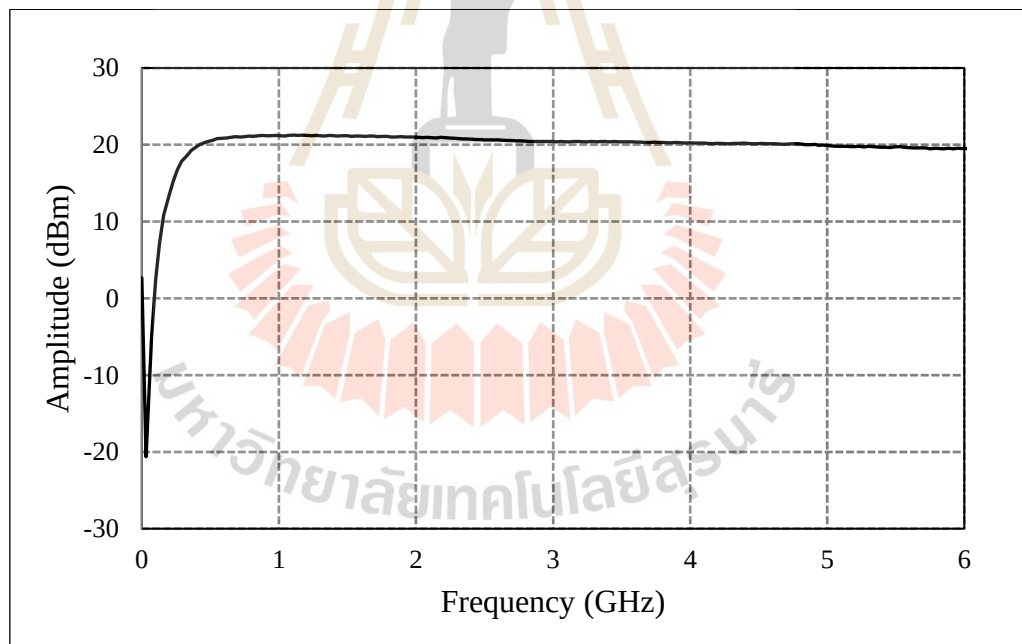
รูปที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบสัญญาณชุดเครื่องส่ง

4.3.2 การทดสอบชุดเครื่องรับ

เครื่องรับเป็นการทดสอบวงจรขยายสัญญาณความถี่สูงคือรุ่น ZX60-83LN-S+ และตัวกรองสัญญาณความถี่ผ่าน VBFZ-2575-S+ โดยใช้เครื่องมือที่ทำการทดสอบ คือ Field Fox ยี่ห้อ Keysight Technology รุ่น N9916A และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (Power Supply Unit) ในการป้อนแรงดันที่ +5 Vdc ให้กับตัวขยายสัญญาณแสดงการทดสอบมีการใช้ตัวป้องกันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Block) ที่มีการลดทอน (Attenuator) -30 นั้นหมายความว่าค่าที่ทดสอบได้จะมีค่าน้อยกว่าค่าจริงอยู่ -30 dB สาเหตุที่มีการต่อตัวลดทอนสัญญาณ เนื่องจากลดความเสี่ยงที่จะเกิดแรงดันวิกฤตต่อเครื่องมือวัดทดสอบ ดังรูปที่ 4.5 (ก)



(ก) การทดสอบวงจรขยายสัญญาณความถี่สูงคือรุ่น ZX60-83LN-S+

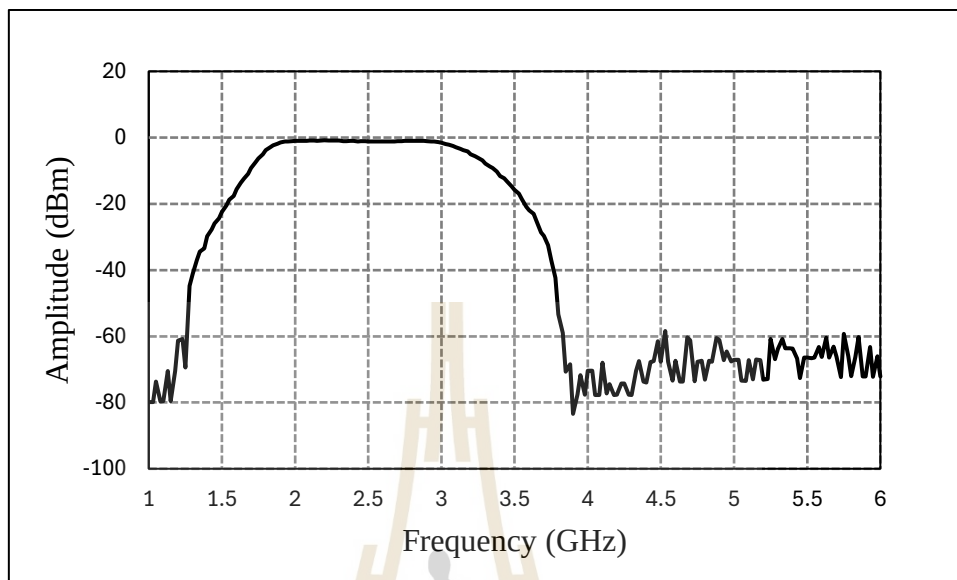


(ข) ผลการทดสอบ ($|S_{21}|$) วงจรขยายสัญญาณความถี่สูงที่แรงดัน +5 Vdc

รูปที่ 4.5 การทดสอบสัญญาณของ ZX60-83LN-S+ ที่แรงดัน +5 Vdc

จากรูปที่ 4.5 (ข) แสดงผลการทดสอบ (S-parameters) วงจรขยายสัญญาณความถี่สูงรุ่น ZX60-83LN-S+ จะได้ค่ากำลังงานที่ทดสอบได้ในย่านความถี่ 2.45 GHz 3.5 GHz และ 5.5 GHz คือ 20.70 dB 20.42 dB และ 19.71 dB ตามลำดับ โดยทำการป้อนแรงดันให้แก่วงจรขยายสัญญาณความถี่สูงที่แรงดันอินพุต +5 Vdc ที่นำมาคำนวณค่าอัตราลดทอนจากอุปกรณ์ Attenuator ออกที่

(-30 dB) ทราบอัตราขยายจริงของวงจรขยายสัญญาณ นำมาใช้ขยายสัญญาณด้านรับ (Receiver) ในงานระบบเรดาร์ในช่วงความถี่ 2 GHz ถึง 6.0 GHz ได้



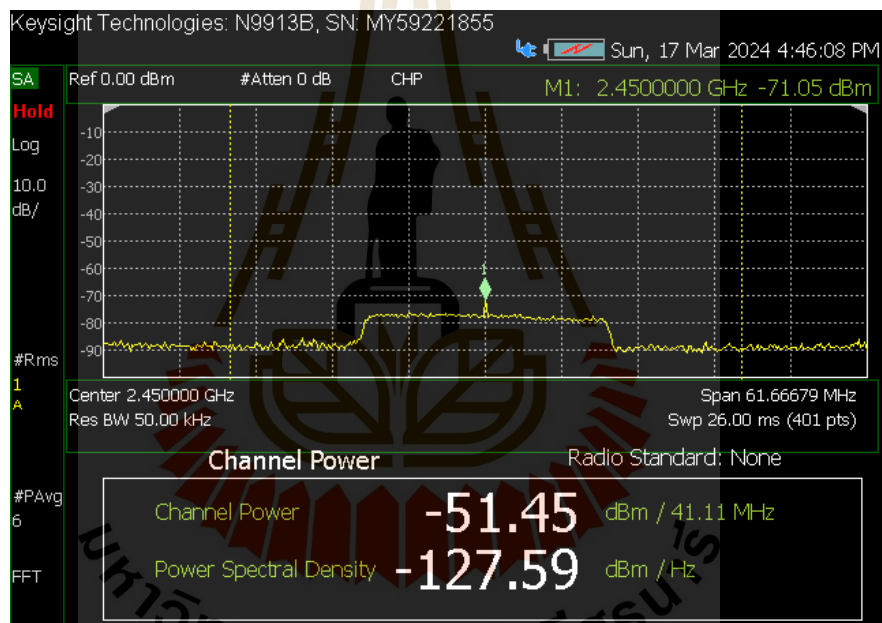
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบ ($|S_{21}|$) ตัวกรองสัญญาณความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)

การทดสอบวงจรกรองความถี่ผ่าน ซึ่งจะทำการทดสอบโดยใช้ Field Fox ยี่ห้อ Keysight Technology รุ่น N9916A ในการทดสอบ โดยใช้โหมด Network Analyzer ในการทดสอบแบบการส่งผ่าน (S-parameters) ในการทดสอบทำการส่งกำลังงานด้านเข้าที่ 0 dBm ช่วงความถี่ 1 GHz ถึง 6 GHz พบว่าเมื่อสัญญาณผ่านวงจรกรองความถี่ผ่านแล้วจะได้รูปสัญญาณทางด้านออกดังรูปที่ 4.6 โดยสัญญาณมีช่วงย่านความถี่ที่ผ่าน (Passband) ประมาณ 2 ถึง 2.8 GHz และเกิดการสูญเสียพลังงานที่ผ่าน BPF อยู่ที่ -1.13 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานเรดาร์ได้

ในส่วนชุดเครื่องรับการทดสอบใช้ Signal Generators ป้อนสัญญาณรูปแบบ FMCW ที่มีค่าน้อยเข้ามาด้านสายอากาศรับความถี่เดียวกันกับชุดเครื่องส่งเพียงแต่ป้อนกำลังงานที่ -70.0 dBm หรือต่ำกว่าผ่าน BPF และ LNA ดังรูปที่ 4.7 (ก) ใช้ Spectrum Analyzer มาทำการวัดกำลังงานที่ขาออกโดยใช้ Mode Channel Power เพื่อวัดผลการทดสอบ sensitivity ของเครื่องรับ



(ก) ชุดเครื่องรับ Receiver



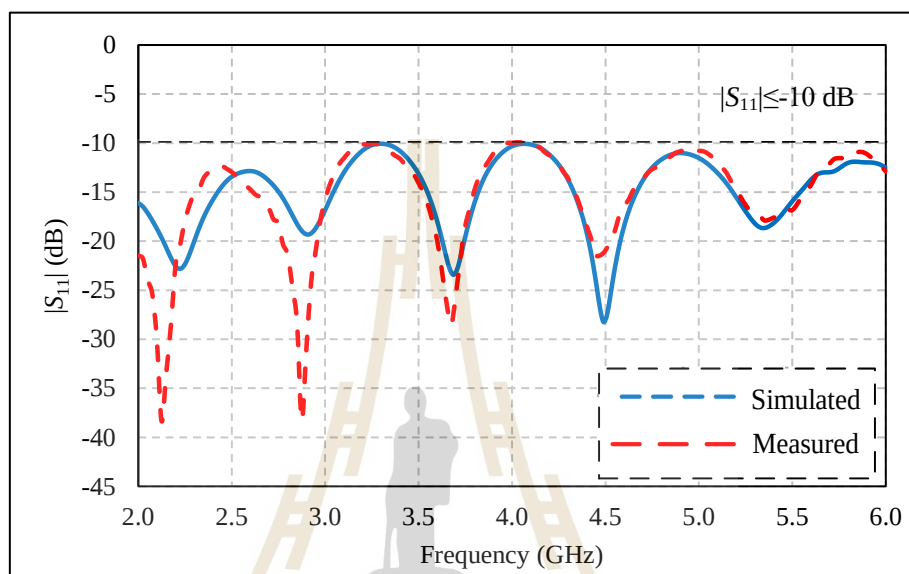
(ข) แสดงผลการทดสอบสัญญาณชุดเครื่องรับ

รูปที่ 4.7 การทดสอบสัญญาณชุดเครื่องรับ

จากรูปที่ 4.7 (ข) ผลที่วัดได้คือ -51.45 dBm นำค่าที่มากัดกับค่าที่ป้อนจาก Signal generators แสดงว่าเกิดการขยายสัญญาณประมาณอยู่ ~ 18.55 dBm เนื่องจากมีค่าการลดทอนสัญญาณในตัว ของ LNA ที่นำมาใช้เกิด NF 1.08 dB และตัว BPF เกิดการสูญเสียพลังงานในตัวอยู่ที่ 1.07 dB รวม ประมาณ 2.15 dB (ไม่รวมค่าสูญเสียพลังงานจากสายสัญญาณในระบบ)

4.4 การทดสอบชุดสายอากาศ

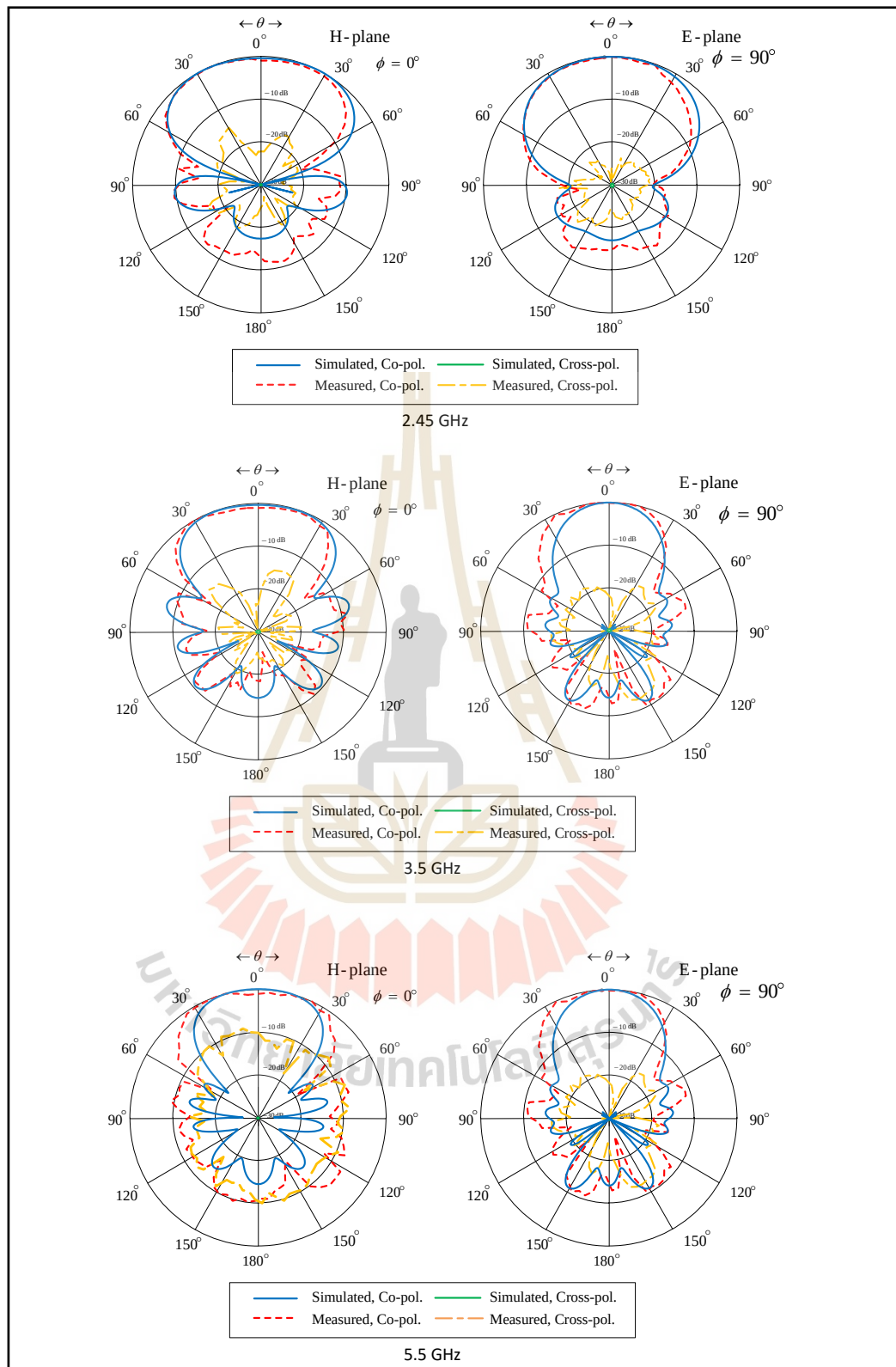
การทดสอบสายอากาศแบบพาราโบลา (Parabolic Antenna) เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการตรวจสอบประสิทธิภาพและคุณสมบัติทางคลื่นวิทยุของสายอากาศ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อยืนยันว่าการออกแบบสามารถทำงานได้ตามที่คาดหวังในด้านการแผ่กระจายสัญญาณ (radiation) อัตราการขยาย (gain) และการจับคู่ impedance



(ก) ผลการทดสอบเทียบกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ($|S_{11}|$) ของ Vivaldi

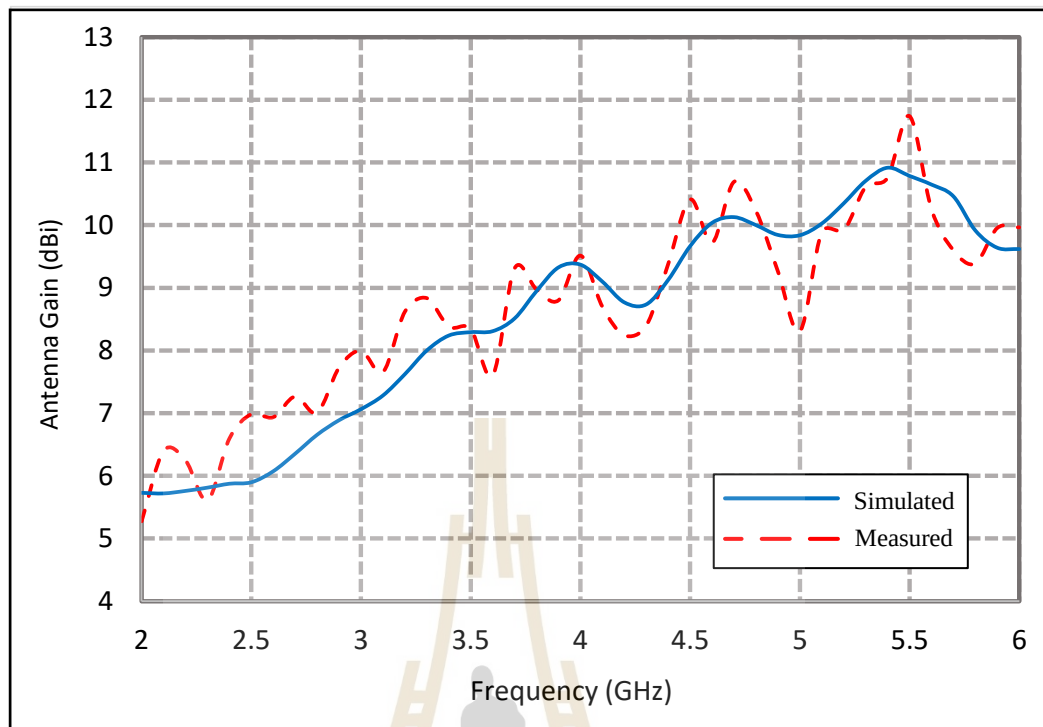
รูปที่ 4.8 ผลการออกแบบเทียบกับการวัดทดสอบสายอากาศของ Vivaldi

จากผลการจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของสายอากาศ Vivaldi จะสังเกตได้ว่า $|S_{11}|$ ยังคงต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ในการทำงาน 2-6 GHz การจำลองและวัดค่า $|S_{11}|$ แสดงแนวโน้มที่สอดคล้องกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าเสาอากาศมีแบนด์วิดท์กว้างและครอบคลุมช่วงความถี่ที่ระบุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เสาอากาศ Vivaldi เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งาน



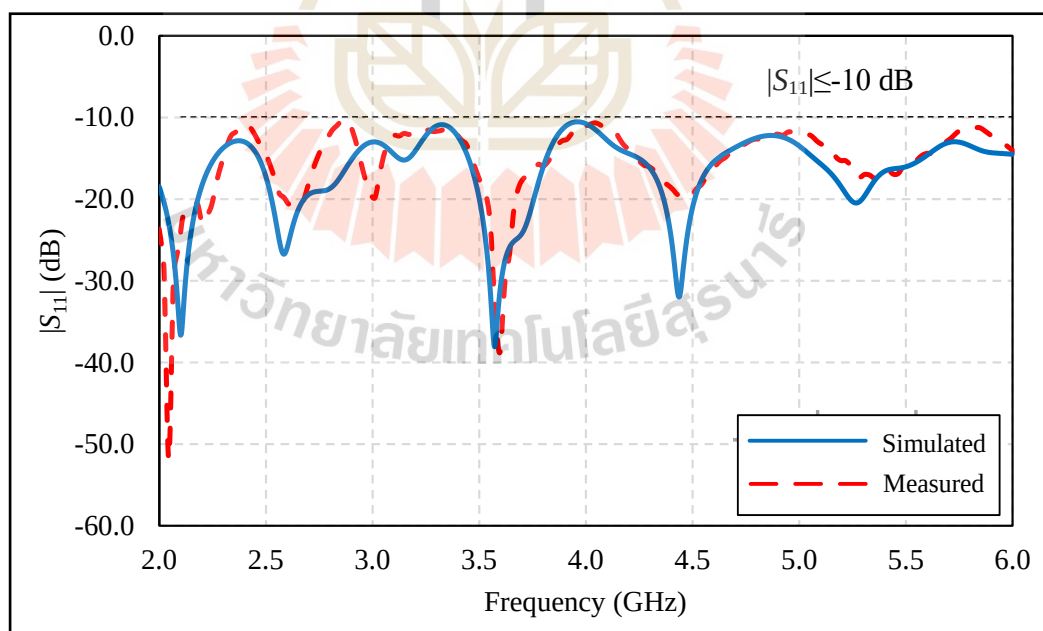
(ข) ผลการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น E-Plane และ H-Plane ที่ความถี่ 2.45, 3.5, 5.5 GHz ของสายอากาศ Vivaldi

รูปที่ 4.8 ผลการออกแบบเทียบกับการวัดทดสอบสายอากาศของ Vivaldi (ต่อ)



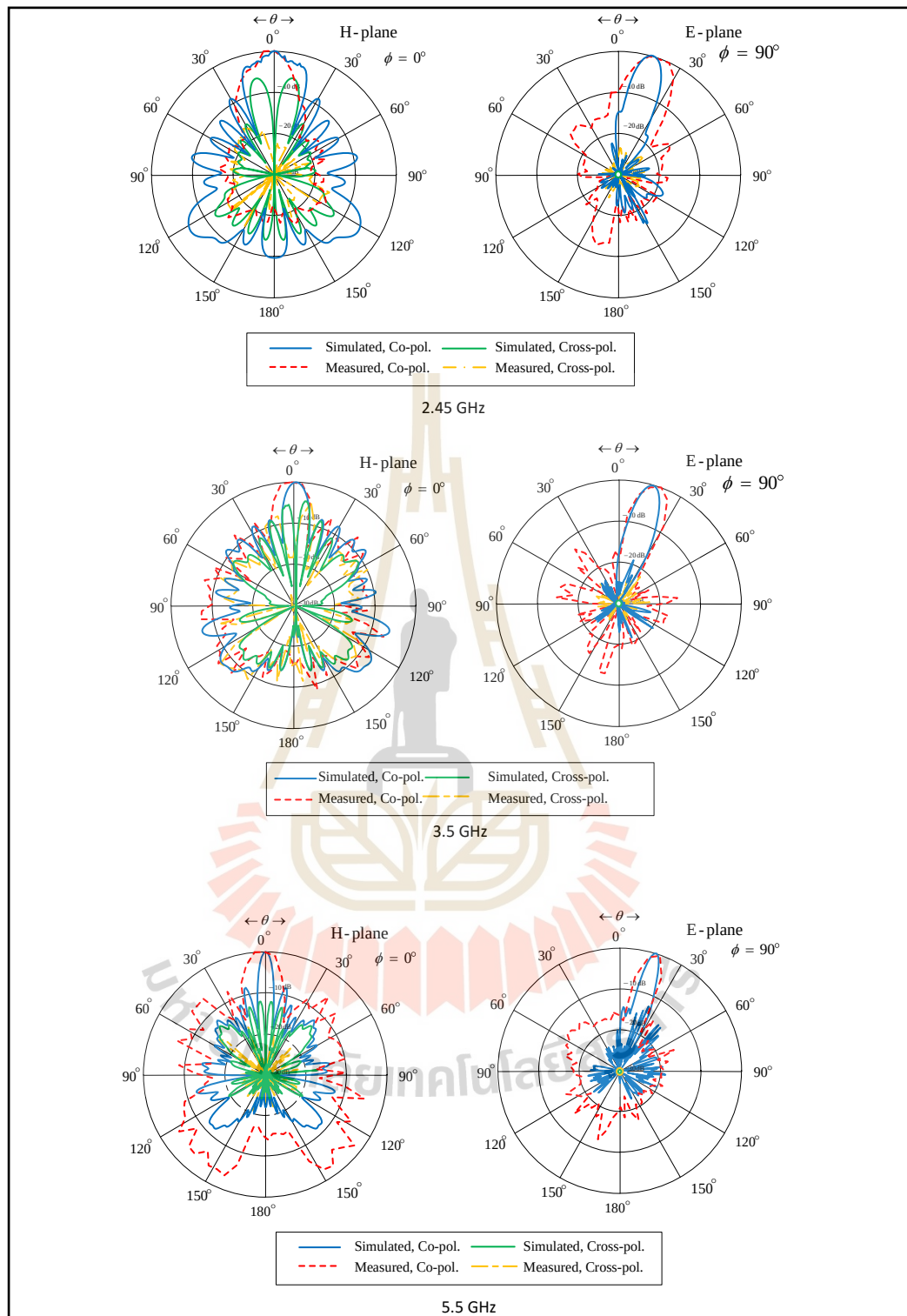
(ค) ผลการทดสอบ Gain Antenna สายอากาศ Vivaldi

รูปที่ 4.8 ผลการออกแบบเทียบกับการวัดทดสอบสายอากาศของ Vivaldi (ต่อ)



(ก) ผลการทดสอบเทียบกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ($|S_{11}| \leq -10$ dB) ของ Parabolic

รูปที่ 4.9 ผลการออกแบบเทียบกับการวัดทดสอบสายอากาศของ Parabolic



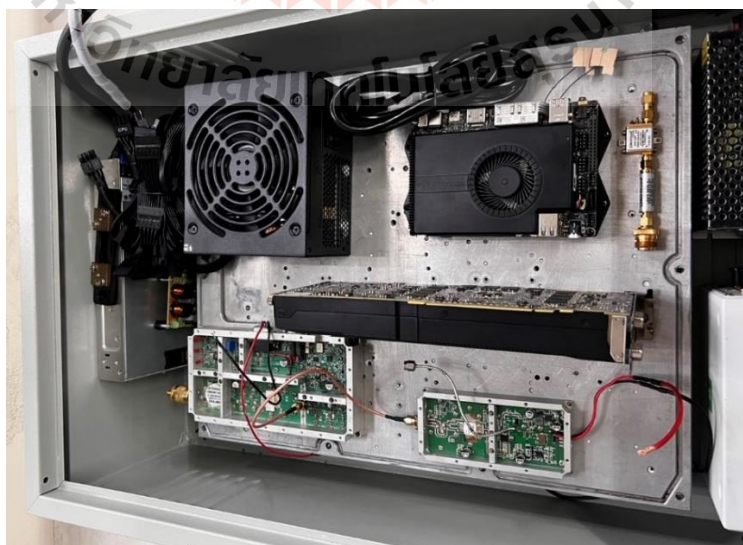
(ข) ผลการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น E-Plane และ H-Plane ที่ความถี่ 2.45, 3.5, 5.5 GHz ของสายอากาศ Parabolic

รูปที่ 4.9 ผลการออกแบบเทียบกับการวัดทดสอบสายอากาศของ Parabolic (ต่อ)

สายอากาศ Vivaldi ที่ใช้ทำ Feed Horn ได้สร้างแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.9 จากการออกแบบและทดสอบสรุปได้ว่า S-parameters ผลการทดลองที่ได้จากการจำลองแสดงให้เห็นว่า S_{11} มีค่าสูงสุดที่ -10 dB ที่ความถี่ 2-6 GHz ดังรูปที่ 4.8 (ก) ซึ่งหมายความว่าสายอากาศมีการจับคู่สัญญาณที่ดี (impedance matching) ที่ความถี่ดังกล่าว Radiation Pattern รูปแบบการแผ่คลื่นของสายอากาศ Vivaldi ที่ความถี่ 2.45, 3.5, 5.5 GHz แสดงให้เห็นว่าเป็นลำคลื่นแบบทิศทาง (directive) ที่มีกำลังแผ่ไปในทิศทางที่ต้องการเป็นหลัก ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการเน้นพลังงานไปยังทิศทางที่เหมาะสม ดังรูปที่ 4.8 (ข) มีอัตราการขยายของสายอากาศสูง ดังรูปที่ 4.8 (ค) ตามที่ได้ออกแบบไว้และการใช้งานสายอากาศ Vivaldi ร่วมกับ Parabolic Reflector ได้สร้างแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.10 จากการออกแบบและทดสอบสรุปได้ว่า S-parameters สายอากาศมีการจับคู่สัญญาณที่ดีและมีการสะท้อนกลับของสัญญาณบ้างช่วงสูงสุดที่ -10 dB ดังรูปที่ 4.9 (ก) Radiation Pattern การใช้งานร่วมกับ Parabolic Reflector สามารถเพิ่มอัตราการขยายและควบคุมทิศทางการแผ่คลื่นได้ดี ส่งผลให้ระบบสามารถใช้ในงานที่ต้องการการแผ่คลื่นแบบทิศทางสูง ผลการทดลองแสดงถึงความสามารถของระบบสายอากาศ Vivaldi ร่วมกับ Parabolic Reflector ในการทำงานที่ความถี่ 2.45, 3.5, 5.5 GHz ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตรงตามการออกแบบตามรูปที่ 4.9 (ข)

4.5 การทดสอบใช้งาน

ก่อนการทดสอบเพื่อลดความยุ่งยากในการติดตั้งและเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ในระหว่างการทดสอบ ระบบเรดาร์ทั้งหมดจะถูกประกอบเข้ากับกล่องหรือเคสที่ออกแบบมาเพื่อเก็บอุปกรณ์ทุกชิ้นในที่เดียวกล่องจะช่วยปกป้องอุปกรณ์ไม่ให้เกิดความเสียหายขณะเคลื่อนย้ายและในระหว่างการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่อาจมีความเสี่ยง เช่น ฝุ่นหรือความชื้น การจัดการสายนำสัญญาณและพอร์ตต่างๆ ได้ง่ายมากขึ้น ลดความเสียหายในระหว่างการใช้งาน ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงการประกอบเครื่องเรดาร์

ส่วนการทดสอบนั้น เริ่มการทดสอบภายในอาคารเป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบความถูกต้องของระบบก่อนนำไปทดสอบภาคสนาม โดยระบบเรดาร์ทั้งหมดถูกติดตั้งและเชื่อมต่อกันตามรูปแบบที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.22 ซึ่งทำให้เกิดความมั่นใจได้ว่าทุกส่วนของระบบทำงานร่วมกันได้ดี การทดสอบในสภาพแวดล้อมนี้ให้เคลื่อนวัตถุเข้าหรือออกจากตัวเรดาร์ เพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาหรือปรับปรุงพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ง่ายขึ้นหากเกิดข้อผิดพลาดในระบบ แสดงการติดตั้งเตรียมทดสอบก่อนทำการทดสอบจริงในภาคสนาม ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การทดสอบภายในอาคาร

สำหรับการทดสอบให้ทำการเชื่อมต่อสายอากาศส่งและสายอากาศรับและจอแสดงผลเข้ากับ Radar Machine กระบวนการต่อมาตั้งค่าพารามิเตอร์การประมวลผลเรดาร์ที่เกี่ยวข้องบน GNU Radio จะสรุปไว้ใน ตารางที่ 3.1 โดยจะใช้โดรน DJI Phantom 4 Pro เป็นเป้าหมายในการบินเตรียมทดสอบในภาคสนาม ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การตั้งค่าเตรียมทดสอบ

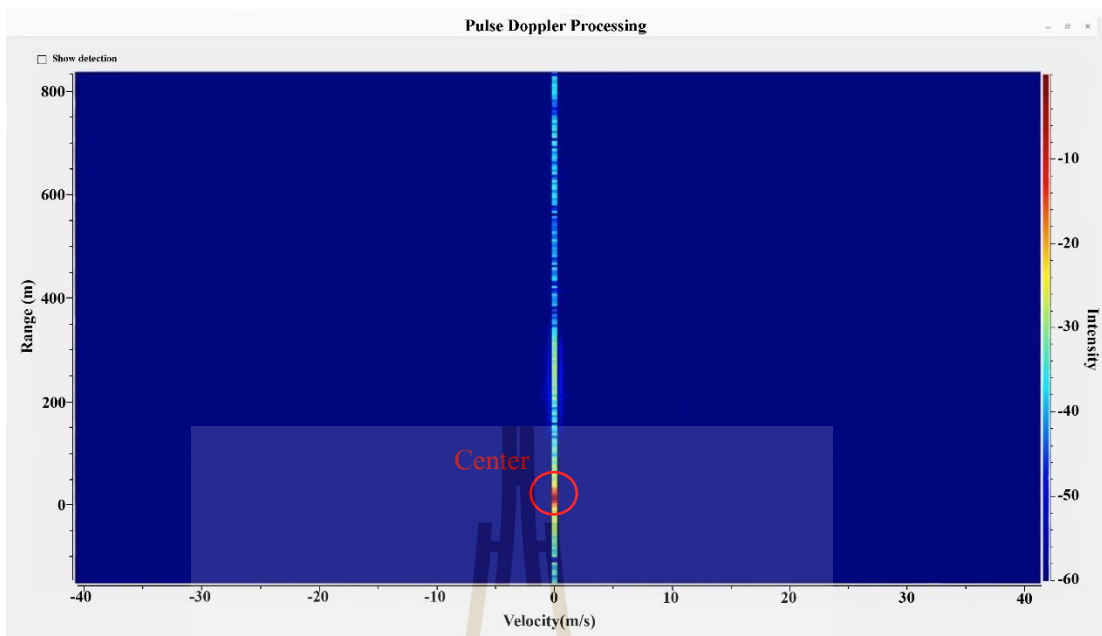
รูปที่ 4.13 พื้นที่ภูมิศาสตร์ใช้ในการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Suranaree University of Technology) โดยมีเป้าหมายหลักคือการทดสอบความสามารถในการบินของโดรน DJI Phantom 4 Pro ในสภาวะแวดล้อมที่มีการควบคุมและจำกัดระยะทางในการเคลื่อนที่ ให้เร่งความเร็วไปในทิศทางที่เคลื่อนที่แสดงจนกว่าจะถึงขีดจำกัดที่ระยะทางประมาณ 1000 เมตร แล้วบินกลับมาที่ตั้งเรดาร์หรือใช้การบินแบบ Return To Home บินกลับมาก็ได้ ความสูงในการบินของโดรนถูกตั้งไว้ที่ 50 เมตร เพื่อให้สามารถบินได้ในระดับที่เหมาะสมกับการทดสอบในพื้นที่เปิด โดรนจะบินไปในทิศทางของปมสายอากาศที่กำหนด ซึ่งต้องคำนึงถึงปัจจัยการสะท้อนและการควบคุมเพื่อให้การทดสอบมีประสิทธิภาพสูงสุด



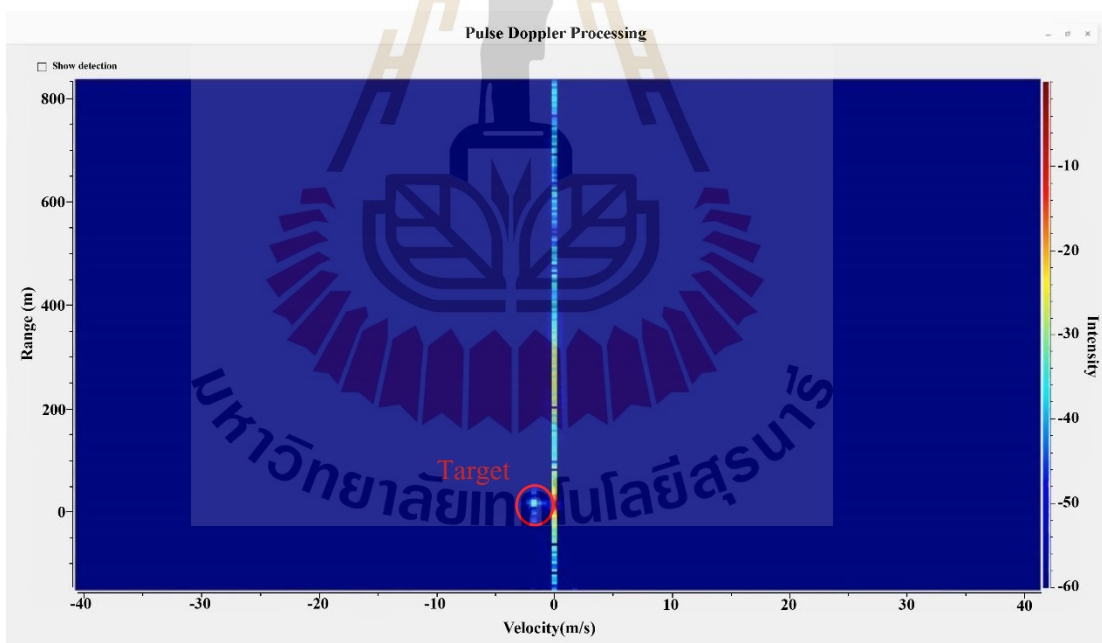
รูปที่ 4.13 แผนที่การทดสอบ

รูปที่ 4.14 และ 4.15 เป็นภาพที่แสดงผลของ Pulse Doppler Processing โดยใช้กราฟ Range-Doppler Map ซึ่งแสดงข้อมูลของเป้าหมายที่ถูกตรวจจับโดยเรดาร์ในแง่ของระยะทางและความเร็ว องค์ประกอบของภาพมีดังนี้

- 1) แกนแนวตั้ง (Range) แสดงระยะของเป้าหมายจากเรดาร์
- 2) แกนแนวนอน (Velocity) แสดงความเร็วของเป้าหมายโดยอ้างอิงจากเอฟเฟกต์ดอปเปลอร์
- 3) แถบสี (Intensity) แสดงความเข้มของสัญญาณสะท้อน โดยสีแดงและเหลืองหมายถึงค่าความเข้มสูง ส่วนสีน้ำเงินหมายถึงสัญญาณอ่อน
- 4) เส้นแนวตั้งตรงกลาง หมายถึงเป้าหมายที่มีความเร็วต่ำหรือคงที่
- 5) กล่อง Show detection เป็นตัวเลือกเปิด/ปิดการแสดงผลของเป้าหมายที่ตรวจจับได้ของ CFER

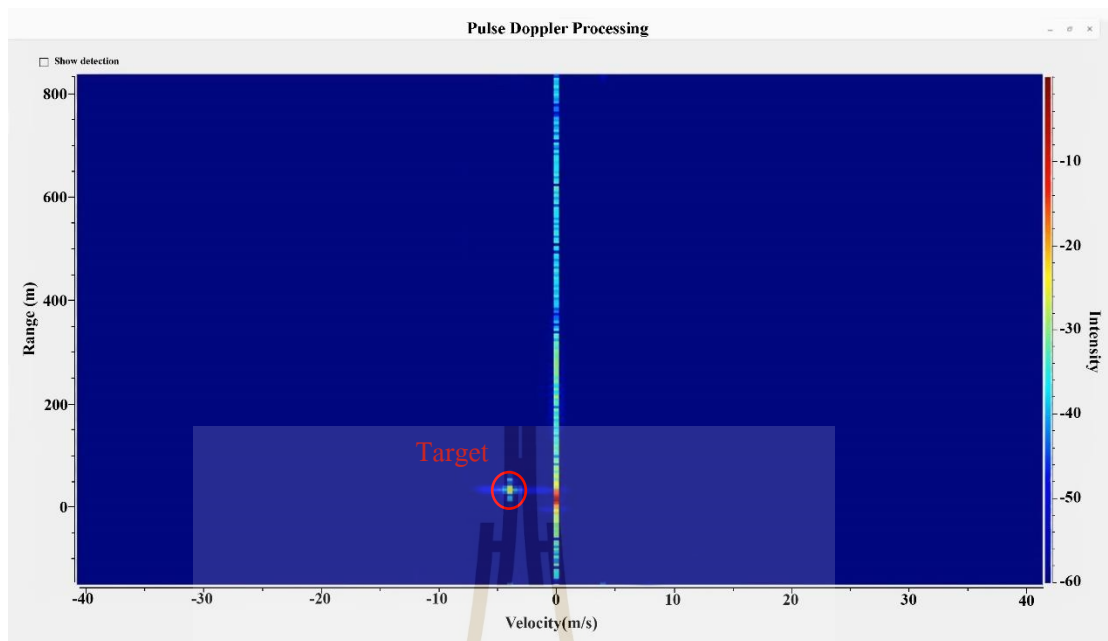


(ก) โดรนอยู่ที่ระยะ 0 เมตร ความเร็ว 0 m/s

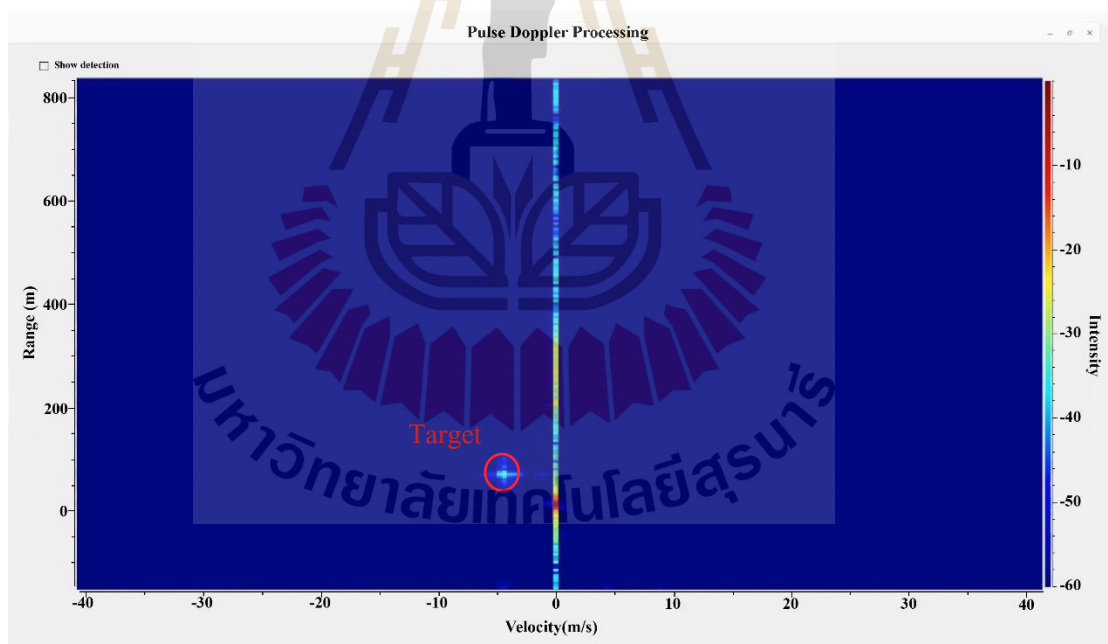


(ข) โดรนอยู่ที่ระยะ 20 เมตร ความเร็ว 2 m/s

รูปที่ 4.14 Range-Doppler Map ของโดรนเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์

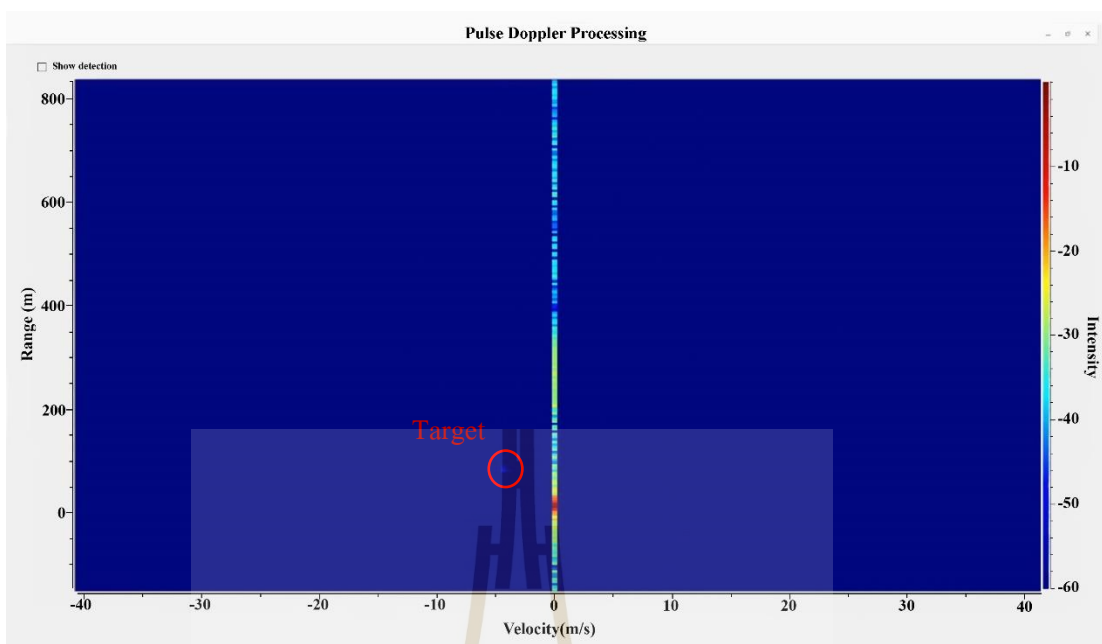


(ค) โดรนอยู่ที่ระยะ 40 เมตร ความเร็ว 4 m/s

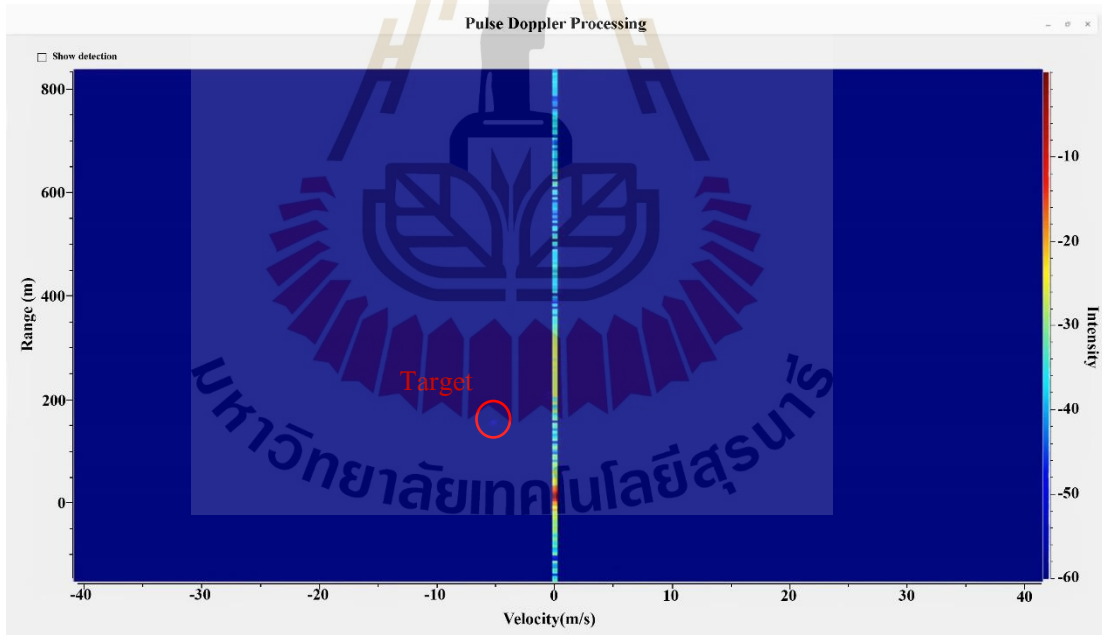


(ง) โดรนอยู่ที่ระยะ 80 เมตร ความเร็ว 5 m/s

รูปที่ 4.14 Range-Doppler Map ของโดรนเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ (ต่อ)



(จ) โดรนอยู่ที่ระยะ 100 เมตร ความเร็ว 5 m/s



(ฉ) โดรนอยู่ที่ระยะ 150 เมตร ความเร็ว 5 m/s

รูปที่ 4.14 Range-Doppler Map ของโดรนเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ (ต่อ)

Range-Doppler Map เป็นผลลัพธ์จากการประมวลผลข้อมูลเรดาร์ ซึ่งใช้ในการตรวจจับวัตถุและวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเป้าหมาย โดยอิงจากช่วงระยะทางและความเร็วของสัญญาณสะท้อนกลับ ในกรณีที่ไม่มี การเคลื่อนที่ของเป้าหมายสัญญาณสะท้อนจากสภาพแวดล้อมทั่วไป เช่น ต้นไม้ หรือสิ่งปลูกสร้าง จะปรากฏที่ $\text{Doppler} = 0 \text{ m/s}$ ที่ไม่มีความเร็วสัมพันธ์กับเรดาร์บนแผนที่ Range-Doppler ในระยะต่าง ๆ ตามตำแหน่งของวัตถุจุดสัญญาณสะท้อนหลักอยู่ 0 m/s และกระจายตัวตามระยะไปจนถึง 800 เมตร สาเหตุที่ตั้งระยะนี้เนื่องจากโดรนมี RCS เล็ก ทำให้สัญญาณสะท้อนอ่อนต้องใช้เทคนิคการซูมเข้าเพื่อความชัดเจน และสิ่งปลูกสร้างกับต้นไม้ในบริเวณที่ทดสอบสามารถทำให้เกิดสัญญาณรบกวน โดรนเริ่มเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์จะเกิดดอปเพลอร์เชิงลบอยู่ด้านซ้ายของจุดศูนย์ที่ระยะ 0 เมตร (Center) และเคลื่อนที่เข้าใกล้เรดาร์ดอปเพลอร์จะเป็นเชิงบวกอยู่ด้านขวาของจุดศูนย์ที่ระยะ 0 เมตร จึงสามารถบอกได้ว่าวัตถุเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากเรดาร์

รูปที่ 4.14 (ก) สัญญาณสะท้อนไม่มีจุดเด่นชัดไม่มีการเคลื่อนที่ของโดรนหมายถึงวัตถุอยู่นิ่งไม่มีจุดที่มีความเข้มสูงในบริเวณอื่นของกราฟ

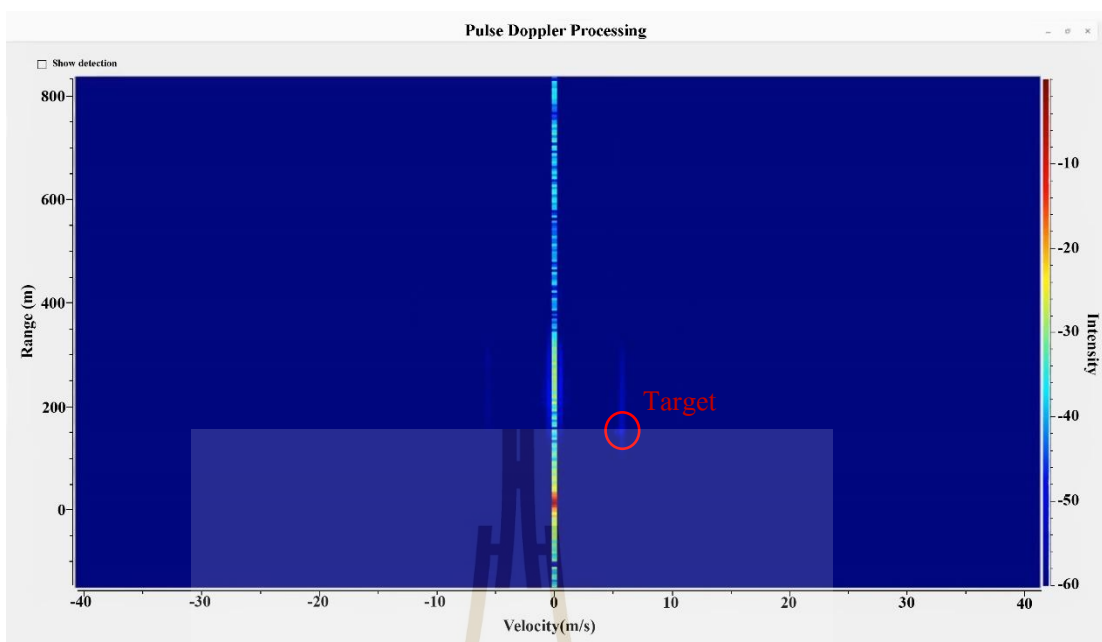
รูปที่ 4.14 (ข) สัญญาณสะท้อนจากโดรนมีความเด่นชัด โดยตรวจพบว่าค่าความเข้มของสัญญาณเกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 20 เมตร และความเร็ว 2 m/s นอกจากนี้ เมื่อโดรนเคลื่อนที่ช้าลงสัญญาณจะกระจายไปทางดอปเพลอร์เชิงลบ ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินออกห่างจากเรดาร์ด้วยความเร็วต่ำ

รูปที่ 4.14 (ค) สัญญาณสะท้อนมีจุดเด่นชัดมีการเคลื่อนที่ของโดรนเกิดค่าความเข้มของสัญญาณอยู่ที่ระยะประมาณ 40 เมตร และความเร็ว 4 m/s โดรนที่เคลื่อนที่เร็วขึ้นเป้าหมายกระจายไปทางดอปเพลอร์เชิงลบ ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินออกห่างจากเรดาร์ด้วยความเร็วสูงขึ้น

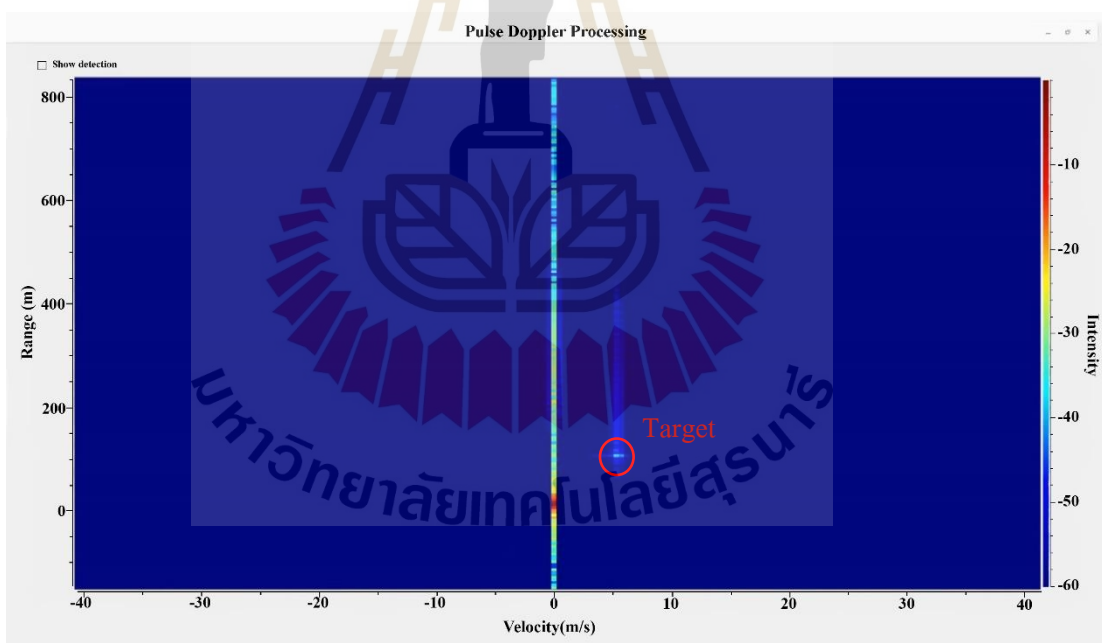
รูปที่ 4.14 (ง) สัญญาณสะท้อนมีความเด่นชัด แสดงให้เห็นการเคลื่อนที่ของโดรนที่ระยะประมาณ 80 เมตร ด้วยความเร็ว 5 m/s เมื่อโดรนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ สัญญาณกระจายห่างไปทางดอปเพลอร์เชิงลบ ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินออกห่างจากเรดาร์

รูปที่ 4.14 (จ) ความเข้มของสัญญาณสะท้อนเบา เนื่องจากโดรนอยู่ห่างจากเรดาร์ระยะประมาณ 100 เมตร ด้วยความเร็ว 5 m/s ความเร็วเริ่มคงที่สัญญาณกระจายห่างไปทางดอปเพลอร์เชิงลบ ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินออกห่างจากเรดาร์

รูปที่ 4.14 (ฉ) ความเข้มของสัญญาณสะท้อนค่อนข้างเบา เนื่องจากโดรนอยู่ห่างจากเรดาร์ระยะประมาณ 150 เมตร ด้วยความเร็ว 5 m/s ความเร็วคงที่สัญญาณกระจายห่างไปทางดอปเพลอร์เชิงลบ ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินออกห่างจากเรดาร์จนไม่สามารถตรวจจับได้

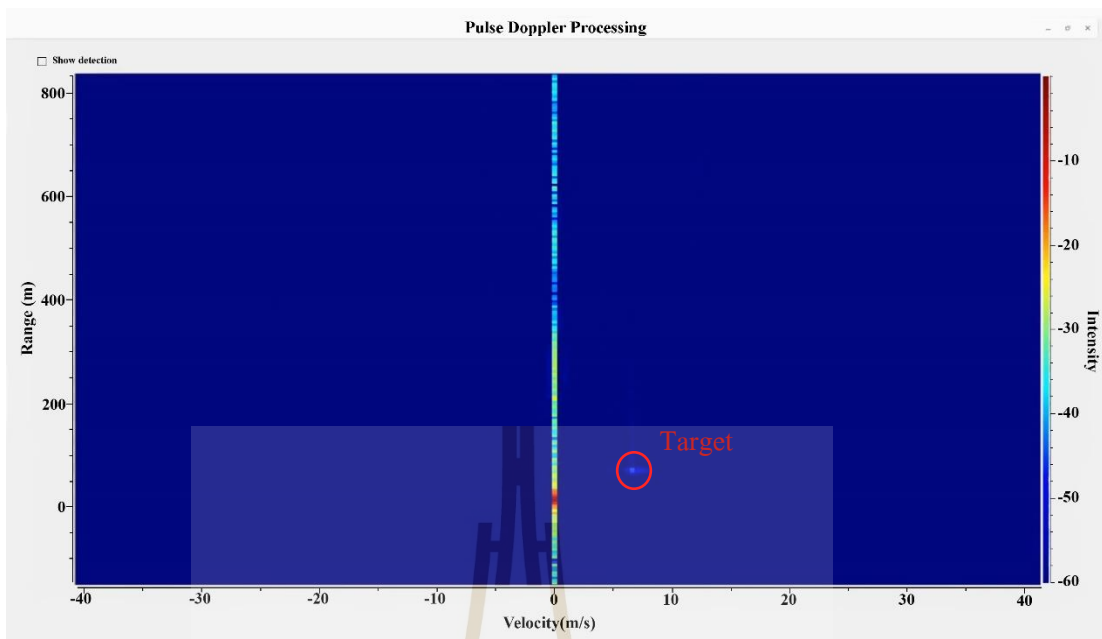


(ก) โดรนอยู่ที่ระยะ 150 เมตร ความเร็ว 6 m/s

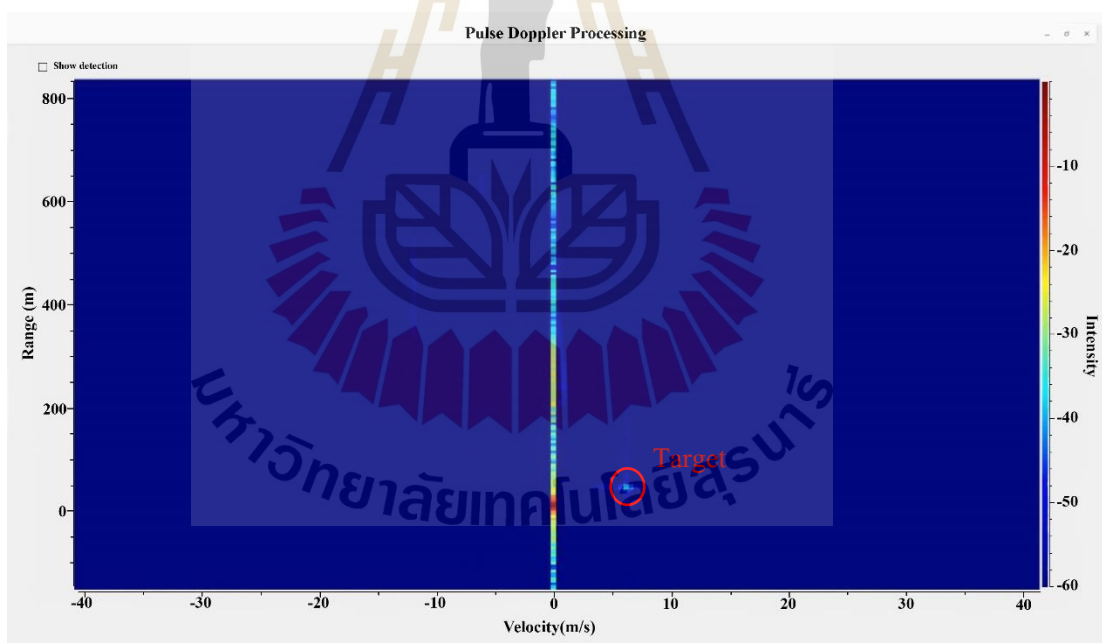


(ข) โดรนอยู่ที่ระยะ 100 เมตร ความเร็ว 6 m/s

รูปที่ 4.15 Range-Doppler Map ของโดรนเคลื่อนที่เข้าหาเรดาร์

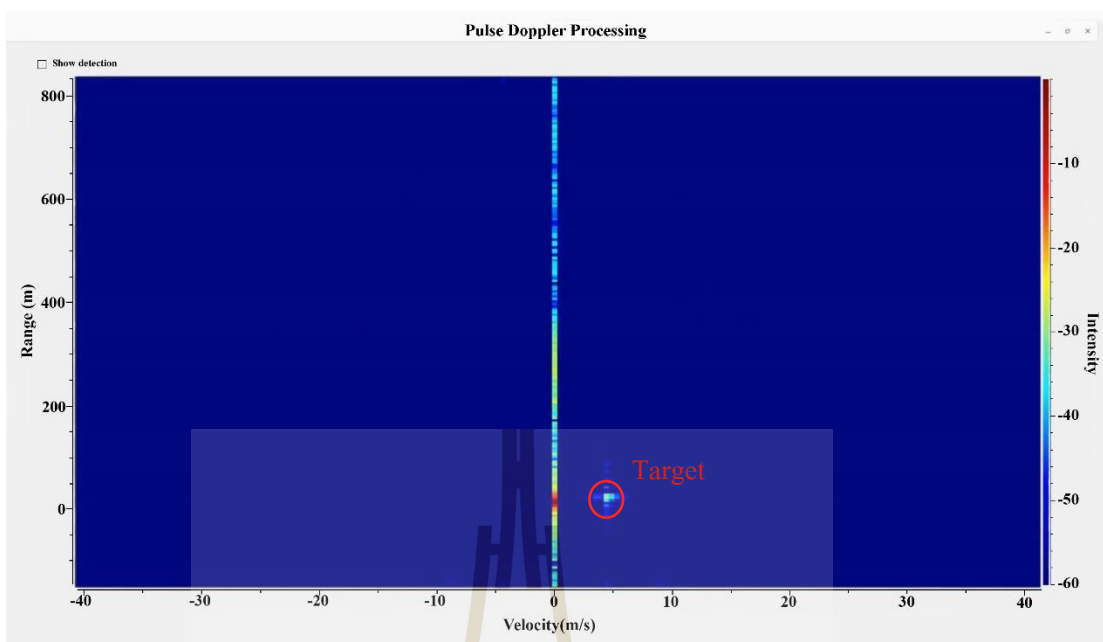


(ค) โดรนอยู่ที่ระยะ 80 เมตร ความเร็ว 6 m/s

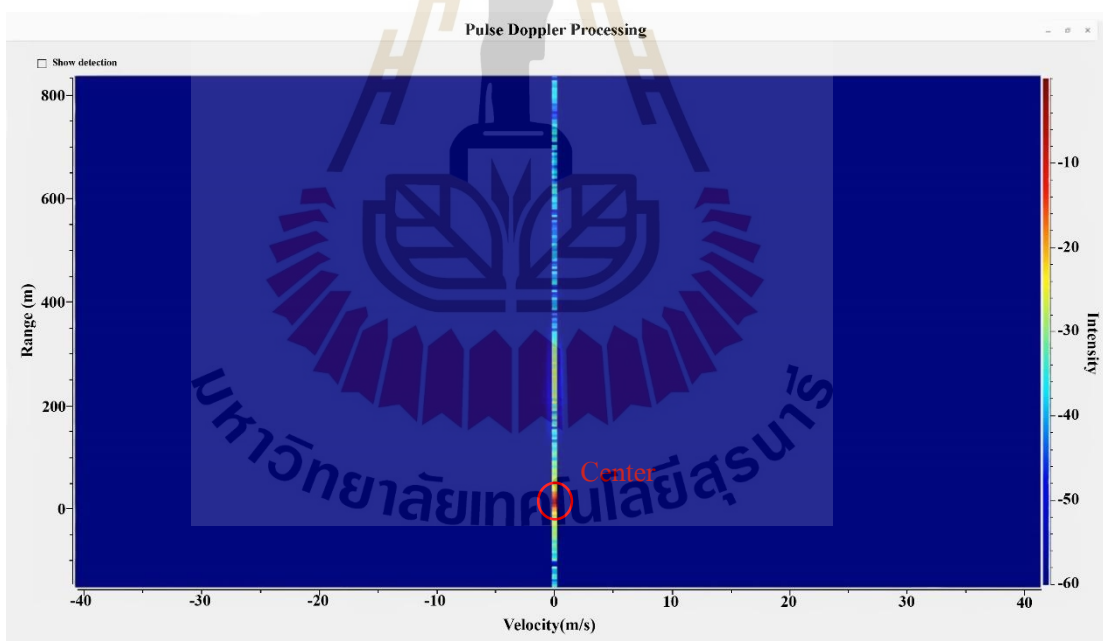


(ง) โดรนอยู่ที่ระยะ 50 เมตร ความเร็ว 6 m/s

รูปที่ 4.15 Range-Doppler Map ของโดรนเคลื่อนที่เข้าหาเรดาร์ (ต่อ)



(จ) โดรนอยู่ที่ระยะ 20 เมตร ความเร็ว 4 m/s



(ฉ) โดรนอยู่ที่ระยะ 0 เมตร ความเร็ว 0 m/s

รูปที่ 4.15 Range-Doppler Map ของโดรนเคลื่อนที่เข้าหาเรดาร์ (ต่อ)

รูปที่ 4.15 (ก) แสดงผลการประมวลผล Pulse Doppler พบสัญญาณสะท้อนเด่นชัดที่ 150 เมตร และความเร็วที่ 6 m/s ซึ่งเกิดจากการสะท้อนสัญญาณที่อ่อนมาก โดรนเคลื่อนที่เร็วสัญญาณจะกระจายไปทางดอปเพลอร์เชิงบวก ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินเข้าหาเรดาร์

รูปที่ 4.15 (ข) สัญญาณสะท้อนจากโดรนมีความเด่นชัด โดยตรวจพบว่าค่าความเข้มของสัญญาณเกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 100 เมตร และความเร็ว 6 m/s นอกจากนี้ยังเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นเมื่อโดรนเคลื่อนที่เข้าสัญญาณจะกระจายไปทางดอปเพลอร์เชิงบวก ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินเข้าหาเรดาร์

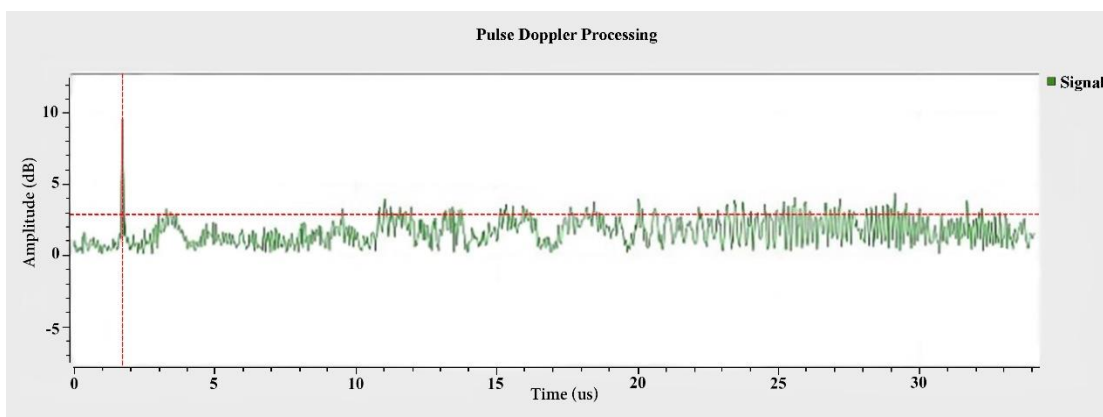
รูปที่ 4.15 (ค) สัญญาณสะท้อนจากโดรนมีความเด่นชัด โดยตรวจพบว่าค่าความเข้มของสัญญาณเกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 80 เมตร และความเร็ว 6 m/s เมื่อโดรนเคลื่อนที่เข้าสัญญาณจะกระจายไปทางดอปเพลอร์เชิงบวก ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินเข้าหาเรดาร์

รูปที่ 4.15 (ง) สัญญาณสะท้อนจากโดรนมีความเด่นชัด โดยตรวจพบว่าค่าความเข้มของสัญญาณเกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 50 เมตร และความเร็ว 6 m/s เมื่อโดรนเคลื่อนที่ถึงระยะใกล้เรดาร์มากขึ้นสัญญาณจะค่อยข้างแรงกระจายไปทางดอปเพลอร์เชิงบวก ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินเข้าหาเรดาร์

รูปที่ 4.15 (จ) สัญญาณสะท้อนจากโดรนมีความเด่นชัด โดยตรวจพบว่าค่าความเข้มของสัญญาณเกิดขึ้นที่ระยะประมาณ 20 เมตร และความเร็ว 4 m/s เมื่อโดรนเคลื่อนที่ถึงระยะใกล้เรดาร์มากขึ้นสัญญาณจะค่อยข้างแรงขึ้นกระจายไปทางดอปเพลอร์เชิงบวก ซึ่งบ่งบอกว่าเป้าหมายกำลังบินเข้าหาเรดาร์

รูปที่ 4.15 (ฉ) สัญญาณสะท้อนไม่มีจุดเด่นชัดไม่มีการเคลื่อนที่ของโดรนหมายถึงวัตถุอยู่นิ่งไม่มีจุดที่มีค่าความเข้มสูงในบริเวณอื่นของกราฟ

ในรูปที่ 4.16 กราฟแสดงการสะท้อนเป้าหมายสามารถเรียกดูกราฟได้จากโปรแกรม GNU Radio บล็อก QT GUI Time Sink การคำนวณระยะทางที่เกิดเป้าจากสมการ $S = C_0 (\Delta t / 2)$ โดยที่ S = ระยะทาง (m), C_0 = ความเร็วแสง (m/s) เวลาในการเดินทางของคลื่น Radar ทั้งขาไป-ขากลับ (s) ซึ่งจะได้ผลต่างของเวลา (Δt) ระหว่างคลื่นเรดาร์ที่ส่งและคลื่นที่สะท้อนกลับมา จากนั้นผลต่างของเวลาไปคำนวณที่ Time Calculator เพื่อคำนวณหาระยะทางส่งสัญญาณไปยัง Output



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการสะท้อนเป้าหมาย

4.6 สรุป

การพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบเรดาร์สำหรับตรวจจับอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้งานที่ความถี่ 2.45 GHz พร้อมกำลังส่งเอาต์พุตสูงถึง 100 วัตต์ และสายอากาศที่มีอัตราการขยาย (Gain) 18 dBi เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับเป้าหมาย การทดสอบครั้งนี้ใช้โดรนรุ่น Phantom 4 Pro เป็นเป้าหมายในการทดลอง โดยบินในระยะทาง 1,000 เมตร ผลการทดสอบพบว่า ระบบเรดาร์สามารถตรวจจับโดรนได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ระยะ 150 เมตร ซึ่งไม่ถึงศักยภาพของการตรวจจับที่ 1000 เมตร ในการใช้งานตรวจจับอากาศยานไร้คนขับในภาคสนาม



บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินการ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

ในบทความนี้ได้เสนอการสร้างเรดาร์ตรวจจับอากาศยานไร้คนขับที่มีค่า RCS=0.01 ตารางเมตร สามารถทำการได้ไกลสุดในระยะ 1000 เมตรใช้รูปแบบสัญญาณ FMCW โดยใช้ USRP B210 มาประยุกต์ใช้กับงานด้านเรดาร์ที่ออกแบบการตรวจจับผ่าน GNU Radio บนระบบปฏิบัติการ Linux และเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผล Range Doppler ได้ใช้การ์ดจอ NVIDIA Quadro K6000 ส่วนด้านฮาร์ดแวร์ได้เพิ่มชุดกรองความถี่ (BPF) และชุดขยายสัญญาณให้กับภาคส่งและภาครับ เพื่อตอบสนองต่อวัตถุให้ได้ระยะตามที่คำนวณทางคณิตศาสตร์ไว้ ผลลัพธ์ที่ได้ สามารถมองเห็นโดรนได้อย่างชัดเจนในระยะประมาณ 150 เมตร ขณะที่โดรนเคลื่อนที่ออกจากเรดาร์ที่ประมาณ 5 m/s ส่วนการเคลื่อนที่เข้าของ โดรนสามารถมองเห็นได้ระยะประมาณ 150 เมตร ที่ความเร็ว 6 m/s ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ระบบเรดาร์ได้รับการออกแบบและพัฒนาเป็นต้นแบบเพื่อทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพในการตรวจจับวัตถุในระยะทางที่กำหนด โดยผลการทดสอบชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของแนวคิดพื้นฐาน แม้จะมีข้อจำกัดบางอย่างในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก เช่น โดรนในระยะทางที่ไกลเกินกว่า 1000 เมตร อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ในครั้งนี้ยังเป็นแนวทางสำคัญในการปรับปรุงและต่อยอดงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตจะเน้นการพัฒนาหลายด้านเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเรดาร์ การปรับปรุงความถี่ใช้งาน จะเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมมากขึ้นสำหรับการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก โดยปรับแต่งตามค่าของ RCS (Radar Cross Section) เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับ การใช้แอมพลิฟายเออร์ (Amplifier) ที่ตอบสนองต่อความถี่สูง เพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องการตอบสนองของแอมพลิฟายเออร์ การนำเทคโนโลยี wide-band amplifier ที่มีประสิทธิภาพสูงในการส่งสัญญาณที่ความถี่สูงจะถูกนำมาใช้ในการพัฒนาเรดาร์ในรุ่นถัดไป การเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศ (Gain Antenna) เพื่อให้สามารถตรวจจับวัตถุในระยะไกลมากขึ้น จะทำการพัฒนาสายอากาศแบบ Antenna Array หรือ Phased Array ที่มีความสามารถในการปรับทิศทางของลำคลื่นได้อย่างแม่นยำ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการระบุทิศทางและระยะของวัตถุ การเพิ่มขีดความสามารถของคอมพิวเตอร์และระบบประมวลผล ในการพัฒนาอนาคต คอมพิวเตอร์และระบบประมวลผลที่ใช้ในการตรวจจับและวิเคราะห์ข้อมูลเรดาร์จะถูกอัปเดตเพื่อรองรับอัตรา sample rate ที่สูงขึ้น ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการตรวจจับวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น การปรับปรุงการออกแบบต้นแบบให้คุ้มค่ากับต้นทุน แม้ว่าจะมีข้อจำกัด

ทางด้านงบประมาณในการพัฒนาในครั้งนี้ แต่งานวิจัยในอนาคตจะเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่าง ๆ โดยคำนึงถึงการใช้ทรัพยากรที่มีความคุ้มค่ามากขึ้น เพื่อให้สามารถขยายขอบเขตการใช้งานของเรดาร์ได้กว้างขึ้น การวิจัยในอนาคตจะไม่เพียงแต่เน้นการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบเท่านั้น แต่ยังมุ่งเน้นการนำต้นแบบไปใช้ในสถานการณ์จริงและการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้งานในทางทหารได้ด้วย

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

5.2.1 เนื่องจาก Pre-Amplifier, Power Amplifier มีข้อจำกัดด้านการขยายกำลังงานจึงไม่สามารถใช้งานย่านความถี่ตั้งแต่ 2 – 6 GHz แบบ wide-band amplifier ได้

5.2.2 การ์ดจอ NVIDIA Quadro K6000 เป็นรุ่นเก่าไม่ตอบสนอง sample rate ที่สูงได้

5.2.3 สถานที่ใช้ทำการทดสอบไม่อำนวย ทำให้มีสัญญาณรบกวนมากเกินไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ระบบควรใช้สายอากาศแบบอาร์เรย์ (Antenna Array) เพราะต้องการความสามารถในการชี้ทิศที่สูง (Gain Antenna) ได้ปริมที่ส่งไกลขึ้น หรือ เฟสอาร์เรย์ (Phased Array) ที่สามารถควบคุมทิศทางปริมได้ เพื่อทิศทางที่แน่นอนของโดรน

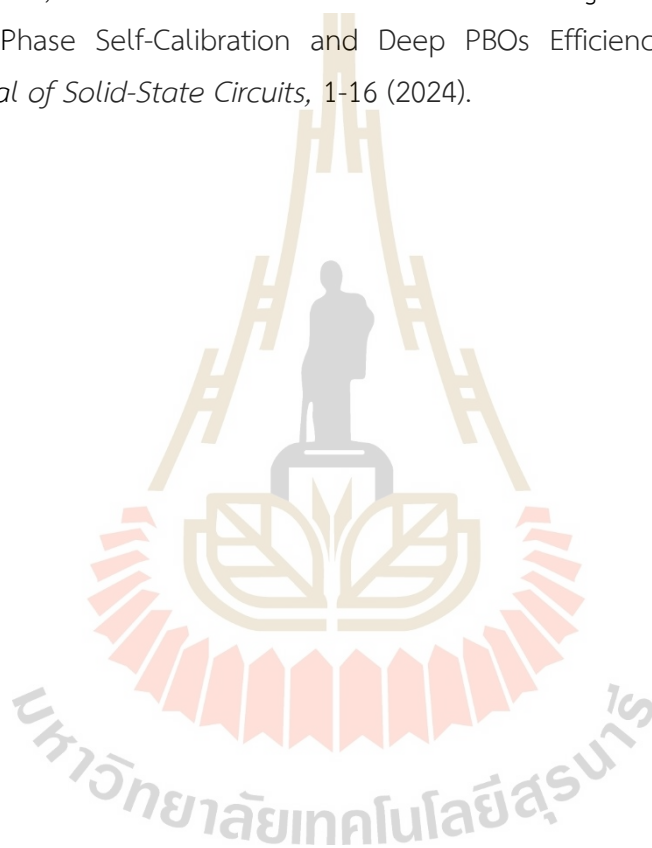
5.3.2 เนื่องจากระยะเวลาไม่พอทำวิจัย ระบบเรดาร์นี้ควรมีการแยก นกกับโดรน หรือวัตถุอื่นที่ไม่ใช่โดรน และสามารถแจ้งเตือนการบุกรุกผ่านสมาร์ตโฟนได้

เอกสารอ้างอิง

1. Jordan, J. et al. The future of unmanned combat aerial vehicles: An analysis using the Three Horizons framework, *Futures*, 134, 1-11 (2022).
2. Elmeseiry, N., Alshaer, N., & Ismail, T. A Detailed Survey and Future Directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Potential Applications, *Aerospace*, 8(12), 1-29 (2021).
3. Gong, Jiangkun, et al. Improved radar detection of small drones using doppler signal-to-clutter ratio (DSCR) detector. *Drones*, 7(5), 1-15 (2023).
4. Jiang, Wen, et al. Realizing Small UAV Targets Recognition via Multi-Dimensional Feature Fusion of High-Resolution Radar. *Remote Sensing* 16(15), 1-18 (2024).
5. Vanegas, Fernando, et al. A novel methodology for improving plant pest surveillance in vineyards and crops using UAV-based hyperspectral and spatial data. *Sensors*, 18(1), 1-21 (2018).
6. Chang, Yingxiu, et al. A review of UAV autonomous navigation in GPS-denied environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 1-24 (2023).
7. Mohsan, Syed Agha Hassnain, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, 16(1), 109-137. (2023).
8. Espedalen, Anton, Svante Lysmark, and Jurek Preisegger. Object detection using a software defined radio with FMCW RADAR technology, (2024).
9. Yen, Hoang Thi, et al. Non-contact estimation of cardiac inter-beat interval and heart rate variability using time-frequency domain analysis for cw radar. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, (2023).
10. Kim, W., Cho, H., Kim, J., Kim, B., & Lee, S., YOLO-based simultaneous target detection and classification in automotive FMCW radar systems, *Sensors*, 20(10), (2020).
11. Li, Yu-Jhe, et al. Azimuth super-resolution for fmcw radar in autonomous driving. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1-10 (2023). Park, J., Park, J. S., Bae, K. B., & Park, S. O. Advanced stationary point concentration technique for leakage mitigation and

12. small drone detection with FMCW radar. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 69(3), 1-13 (2021).
13. Coluccia, Angelo, Gianluca Parisi, & Alessio Fascista. Detection and classification of multirotor drones in radar sensor networks: A review. *Sensors* 20.(15) (2020).
14. Reitz, Philipp, et al. Evaluation of the interference performance of FMCW Radar sensors in dense indoor environments. *IEEE Access*, 1-17 (2024).
15. Ikari, T., Sasaki, Y. & Otani, C., 275–305 GHz FM-CW radar 3D imaging for walk-through security body scanner, *In Photonics*, 1-15 (2023).
16. Ciattaglia, G., Iadarola, G., Senigagliesi, L., Spinsante, S., & Gambi, E., UAV propeller rotational speed measurement through FMCW radars. *Remote Sensing*, 15(1), 1-20 (2023).
17. Qu, K., Wei, L., & Zhang, R., Noncontact Cardiac Activity Detection Based on Single-Channel ISM Band FMCW Radar. *Biosensors*, 13(11), 1-21 (2023).
18. Choi, J. W., Kim, D. H., Koo, D. L., Park, Y., Nam, H., Lee, J. H., ... & Kim, B., Automated detection of sleep apnea-hypopnea events based on 60 GHz frequency-modulated continuous-wave radar using convolutional recurrent neural networks: A preliminary report of a prospective cohort study. *Sensors*, 22(19), 1-15 (2022).
19. Choi, Byunggil, et al. Long-range drone detection of 24 g FMCW radar with e-plane sectoral horn array. *Sensors*, 18(12), 1-21 (2018).
20. Ogawa, K., Kurosaki, M., & Nakamura, R. Estimation of drone payloads using millimeter-wave fast-chirp-modulation MIMO radar. *IEEE Transactions on Communications*, 107(5), 1-10 (2024).
21. Skolnik, Merrill I. "Introduction to radar." *Radar handbook* 2 (1962).
22. Semkin, Vasilii, et al. Analyzing radar cross section signatures of diverse drone models at mmWave frequencies. *IEEE access* 8, 48958-48969 (2020).
23. Farlik, Jan, et al. Multispectral detection of commercial unmanned aerial vehicles. *Sensors*, 19(7), 1-28 (2019).
24. Jankiraman, M. *FMCW radar design*. Artech House, (2018).
25. Jacobs, Mitchell. *Next Generation Waveform Generation And Commercial Spectrum Utilization*. Diss. WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE, 2023.
26. ZX60-83LN-S+.pdf (minicircuits.com)
27. VBFZ-2575-S+.pdf (minicircuits.com)

28. A Deeper Look into the Ettus USRP B200 - ewf-engineering
29. Flandermeyer, S., Mattingly, R., & Metcalf, J. gr-plasma: A New GNU Radio-based Tool for Software-defined Radar. In *Proceedings of the GNU Radio Conference*, 1-8 (September 2022).
30. DJI PHANTOM 4 PRO USER MANUAL Pdf Download | ManualsLib
31. Mahafza, Bassem R. *Radar systems analysis and design using MATLAB*. Chapman and Hall/CRC, 9-10 (2005).
32. Zhou, Jie, et al. A Phase-Modulation Phase-Shifting Phased-Array Transmitter With Phase Self-Calibration and Deep PBOs Efficiency Enhancement. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1-16 (2024).



ภาคผนวก
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Pattawin C., Pisit J., Apichart I., Chanchai T., Nuchanart S., Samran S., “Broadband Unidirectional Vivaldi Antenna for Radar Application”, International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ECTI DAMT) held in Nan, Thailand on 29 January – 1 February 2025



ประวัติผู้เขียน

นาย ปฐวิน แฉ่งนาม เกิดเมื่อวันที่ 17 มิถุนายน พ.ศ. 2539 ที่ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 145 หมู่ 12 ตำบลคำผง อำเภอนโนนารายณ์ จังหวัดสุรินทร์ 32130 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนนารายณ์คำผงวิทยา จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาอิเล็กทรอนิกส์ จากโรงเรียนจำอากาศ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร สถาบันมหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครกรุงเทพมหานคร เมื่อ พ.ศ. 2565 ปัจจุบันทำงานอยู่ที่กรมสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ทหารอากาศ กองทัพอากาศไทย เป็นเวลา 7 ปี และเมื่อปี พ.ศ. 2566 ได้ศึกษาต่อใน ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา และขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ใน ระดับนานาชาติ 1 ฉบับงานชื่อ International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ECTI DAMT) held in Nan, Thailand on 29 January – 1 February 2025 ในหัวข้อ “Broadband Unidirectional Vivaldi Antenna for Radar Application” งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการทุน OROG

