

ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่  
GNSS INTERFERENCE DETECTOR FOR MOBILE STATION



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่  
GNSS INTERFERENCE DETECTOR FOR MOBILE STATION



ปฏิญานินพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2567

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่

GNSS INTERFERENCE DETECTOR FOR MOBILE STATION

ผู้จัดทำ

- |                |           |          |
|----------------|-----------|----------|
| 1. นายนราธิป   | กิจประยูร | 64010412 |
| 2. นายธัญธร    | บรรจงเส้น | 64011146 |
| 3. นายอนุรักษ์ | ผ่องแผ้ว  | 64011318 |

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร.จิรภูมิ บุตรโท)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เรื่อง “ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่” ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา ทางผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ ดร.จิรภูมิ บุตรโท อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์นี้ และศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ อาจารย์ที่ปรึกษาาร่วม ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวคิด และแนวทางวิธีการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงผู้จัดทำขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาเอก ปริญญาโทที่คอยให้คำแนะนำ คอยช่วยเหลือ และสนับสนุนเครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้การทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ ความรู้ต่าง ๆ ให้แก่คณะผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความหวังใยเสมอ และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่อาจจะไม่ได้กล่าวถึงในข้างต้นที่ให้การสนับสนุน และให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำเสมอมา



นายนราธิป กิจประยูร  
 นายธัญธร บรรจงเส้น  
 นายอนุรักษ์ ผ่องแผ้ว  
 ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่  
GNSS INTERFERENCE DETECTOR FOR MOBILE STATION

โดย นายนราธิป กิจประยูร	64010412
นายธัญธร บรรจงเส้น	64011146
นายอนุรักษ์ ผ่องแผ้ว	64011318

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.จิรภูมิ บุตรโท  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

**บทคัดย่อ**

ระบบนำทางด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (GNSS) เป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในการระบุตำแหน่งและอ้างอิงเวลา โดยย่านความถี่ L1 (1575.42 MHz) เป็นช่วงความถี่ที่ได้รับความนิยมและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม สัญญาณในย่านนี้มีพลังงานต่ำและมีความเสี่ยงสูงต่อการถูกรบกวนจากแหล่งสัญญาณความถี่ใกล้เคียง หรือจากอุปกรณ์รบกวน (Jammer) ที่จงใจปล่อยสัญญาณรบกวนเพื่อขัดขวางการทำงานของเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส การรบกวนเหล่านี้อาจทำให้ระบบนำทางเกิดข้อผิดพลาดในการระบุตำแหน่ง หรือส่งผลกระทบต่อระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ระบบช่วยนำทางการลงจอดของเครื่องบิน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงด้านความปลอดภัย ดังนั้น การตรวจจับและแจ้งเตือนการรบกวนได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็น โครงการนี้มุ่งพัฒนาระบบที่สามารถตรวจจับและวิเคราะห์สัญญาณรบกวนภายในบริเวณที่อุปกรณ์ทำงาน โดยระบบสามารถประเมินระดับพลังงานของสัญญาณเพื่อวัดความรุนแรงของการรบกวน รวมถึงใช้เทคนิคการวัดความเข้มของสัญญาณในแต่ละทิศทางเพื่อระบุแหล่งที่มาของสัญญาณรบกวน ข้อมูลทั้งหมดจะแสดงผลผ่านหน้าจอของอุปกรณ์ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามและวิเคราะห์ตำแหน่งของเครื่องส่งสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ABSTRACT

Global Navigation Satellite System (GNSS) is a critical infrastructure for positioning and time referencing, with the L1 frequency band (1575.42 MHz) being widely used. However, signals in this band are fundamentally weak and highly sensitive to interference from nearby frequencies or intentional jamming devices designed to disrupt GNSS operations. Such interference can lead to positioning errors in navigation systems or disruption of high-precision applications such as aircraft landing guidance, presenting significant safety risks. Therefore, fast and accurate interference detection and alerting are essential. This project aims to develop a system capable of detecting and analyzing interference signals within its operational range. The system assesses signal power levels to evaluate the severity of interference and utilizes signal strength measurements in multiple directions to determine the source of interference. All data is displayed on the device's screen, enabling users to track and analyze the location of jamming sources effectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญรูป .....	VIII
สารบัญตาราง.....	XVI
ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่ .....	I
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริิณญานิพนธ์ .....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>3</b>
2.1 ระบบสัญญาณจีเอ็นเอสเอส .....	3
2.2 สัญญาณรบกวน .....	4
2.3 เทคนิคการตรวจจับสัญญาณรบกวนในระบบจีเอ็นเอสเอส.....	6
2.4 อุปกรณ์รับสัญญาณ RTL-SDR BLOG V3 R860 RTL2832U .....	7
2.5 อุปกรณ์รับสัญญาณ USRP B210 SDR .....	9
2.6 อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม U-BOX NEO-M8T .....	10
2.7 สายอากาศ DIRECTIONAL 800 – 2700 เมกะเฮิรตซ์.....	11
2.8 สายอากาศ AN-105L-GNSS.....	11
2.9 สายนำสัญญาณ PR-SMA PLUG TO N-TYPE PLUG.....	12
2.10 การค้นหาทิศทาง (DIRECTION FINDING).....	13
2.11 ซอฟต์แวร์ GNU RADIO .....	18
2.12 โพรโตคอล NMEA 0183 .....	19
<b>บทที่ 3 การออกแบบและการจัดทำปริิณญานิพนธ์ .....</b>	<b>22</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 การออกแบบ.....	22
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	45
3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง.....	45
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>47</b>
4.1 การทดสอบรูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง.....	47
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนในระยะเวลาที่กำหนด.....	51
4.3 การทดสอบผลกระทบของอัตราขยายต่อการตรวจจับสัญญาณรบกวน.....	55
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม MUSIC.....	59
4.5 การทดสอบการแสดงผลระบบส่วนติดต่อผู้ใช้.....	60
4.6 ผลการทดสอบโปรแกรมตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการ MUSIC.....	68
4.7 ผลการทดสอบการรบกวนสัญญาณ (RFI) ต่อการรับสัญญาณ GPS.....	70
4.8 การทดสอบการทำงานระบบตรวจจับสัญญาณรบกวน.....	73
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>80</b>
5.1 สรุปผล.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>84</b>
<b>ภาคผนวก ก.....</b>	<b>87</b>
<b>ภาคผนวก ข.....</b>	<b>93</b>
<b>ภาคผนวก ค.....</b>	<b>101</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

หน้า

## รูปที่

2.1 อุปกรณ์รับกวนสัญญาณแบบ SMA - BATTERY .....	5
2.2 อุปกรณ์รับกวนสัญญาณ USB .....	6
2.3 RTL-SDR BLOG V3 R860 RTL2832U .....	7
2.4 ภาพรวมการทำงานของ RTL-SDR .....	9
2.5 USRP B210 SDR .....	9
2.6 รูปอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม U-BLOX NEO-M8T .....	10
2.7 รูปสายอากาศ DIRECTIONAL 800 – 2700 เมกะเฮิรตซ์ .....	11
2.8 รูปสายอากาศ AN-105L-GNSS .....	12
2.9 รูปสายนำสัญญาณ PR-SMA PLUG TO N-TYPE PLUG .....	12
2.10 หน้าต่างหลักของ GNU RADIO .....	18
2.11 หน้าต่างหลักของ GNU RADIO .....	18
2.12 รูปแบบของ GGA MESSAGE .....	19
2.13 รูปแบบของ GSA MESSAGE 1 .....	20
2.14 รูปแบบของ GSA MESSAGE 2 [20] .....	20
2.15 รูปแบบของ GSV MESSAGE 1 .....	21
2.16 รูปแบบของ GSV MESSAGE 2 .....	21
3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่ได้ .....	22
3.2 สถานการณ์ในการตรวจจับสัญญาณรบกวน .....	23
3.3 การจำลองเหตุการณ์การทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน .....	24
3.4 แผนผังงานการทำงานโปรแกรม OPEN_DISPLAY ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน .....	24
3.5 แผนผังงานการทำงานโปรแกรม MODE 1 ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน .....	25
3.6 การทำงานสำหรับบอกทิศทางสัญญาณรบกวนบน GUI .....	26
3.7 แผนผังงานการทำงานโปรแกรม MODE 2 ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน .....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 การถอดรหัสข้อความ NMEA โปรแกรม MODE 2 ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รบกวน.....	29
3.9 หน้าต่างการแสดงผลที่บันทึก .....	29
3.10 แผนผังงานการทำงานโปรแกรม MODE 3 ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน .....	30
3.11 การออกแบบโครงสร้างและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวน .....	31
3.12 การวางอุปกรณ์ทั้งหมดของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานี เคลื่อนที่.....	31
3.13 หน้าจอหลักสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน.....	32
3.14 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิด สัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์.....	33
3.15 กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ.....	34
3.16 กราฟพิกัดเชิงขั้ว.....	36
3.17 แลปแสดงค่าพารามิเตอร์.....	36
3.18 ปุ่มปรับอัตราขยาย.....	37
3.19 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับสถานีเคลื่อนที่.....	38
3.20 ระบบแสดงแผนที่แบบเรียลไทม์.....	39
3.21 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับโหมดอัลกอริทึม MUSIC .....	40
3.22 กราฟสเปกตรัม MUSIC.....	41
3.23 หน้าต่างหลักของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึก ข้อมูล DATALOGS.....	42
3.24 หน้าต่างแสดงเนื้อหาไฟล์ของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์ บันทึกข้อมูล DATALOGS.....	43
3.26 ข้อมูลที่บันทึกในไฟล์ EXCEL .....	44
4.1 ผลการทดสอบสายอากาศทางฝั่งรับสัญญาณ .....	47
4.2 ผลการทดสอบสายอากาศทางฝั่งรับสัญญาณ .....	47
4.3 ผลการปรับตั้งค่าเครื่อง NETWORK ANALYZER (1).....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 ผลการปรับตั้งค่าเครื่อง NETWORK ANALYZER (2).....	48
4.5 การพล็อตแบบ POLAR ของรูปแบบสายอากาศ.....	51
4.6 ปุ่มควบคุมหลักในหน้าจอหลัก.....	60
4.7 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ระบบแบบเรียลไทม์ในสภาวะปกติ.....	61
4.8 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ ระบบแบบเรียลไทม์ในภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ.....	62
4.9 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับสถานีเคลื่อนที่ในสภาวะปกติ.....	63
4.10 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับสถานีเคลื่อนที่ภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ.....	64
4.11 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับโหมค้อลกอริทึม MUSIC ในสภาวะปกติ.....	65
4.12 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับโหมค้อลกอริทึม MUSIC ภายใต้สภาวะการรบกวน สัญญาณ.....	66
4.13 หน้าต่างหลักของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึก ข้อมูล DATALOGS เมื่อมีไฟล์ LOG.....	67
4.14 หน้าต่างหลักของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึก ข้อมูล DATALOGS เมื่อไม่มีไฟล์ LOG.....	68
4.15 ฟังก์ชันของโปรแกรม MUSIC โดยใช้ GNU RADIO.....	68
4.16 สเปกตรัม MUSIC ในกรณีที่เครื่องส่งสัญญาณอยู่ด้านขวาตามระนาบของสายอากาศ.....	69
4.17 สเปกตรัม MUSIC ในกรณีที่เครื่องส่งสัญญาณอยู่ด้านขวาตามระนาบของสายอากาศ.....	69
4.18 สถานการณ์การจำลองที่ 1.....	76
4.19 สถานการณ์การจำลองที่ 2.....	77
4.20 สถานการณ์การจำลองที่ 3.....	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของอุปกรณ์ RTL-SDR BLOG V3 R860 RTL2832U.....	7
2.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์ USRP B210 SDR.....	9
2.3 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม U-BLOX NEO-M8T.....	10
2.4 คุณสมบัติของสายอากาศกลางแจ้ง 800 – 2700 เมกะเฮิรตซ์.....	11
2.5 คุณสมบัติของสายอากาศ AN-105L-GNSS.....	12
2.6 คุณสมบัติสายนำสัญญาณ PR-SMA PLUG TO N-TYPE PLUG.....	13
4.1 ผลการทดสอบการวัดกำลังสัญญาณของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง.....	49
4.2 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 5 เมตร.....	52
4.3 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 10 เมตร.....	52
4.4 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 15 เมตร.....	53
4.5 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 20 เมตร.....	53
4.6 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 25 เมตร.....	54
4.7 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 30 เมตร.....	54
4.8 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 0 เดซิเบล.....	56
4.9 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 5 เดซิเบล.....	56
4.10 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 10 เดซิเบล.....	57
4.11 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 20 เดซิเบล.....	57
4.12 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 30 เดซิเบล.....	58
4.13 ผลการทดสอบหาหาความแม่นยำของโปรแกรมตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้ หลักการ MUSIC โดยใช้ USRP.....	71
4.14 ผลการทดสอบระดับ RFI ต่อจำนวนดาวเทียมที่รับได้และค่า CNR ในระยะทางต่าง ๆ.....	72
4.15 ผลการทดสอบความถูกต้องของการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะในสภาวะปกติ.....	74
4.16 ผลการทดสอบความถูกต้องของการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะภายใต้สัญญาณ รบกวน.....	74
4.17 ผลการทดสอบการแจ้งเตือนของระบบเมื่อระดับสัญญาณรบกวนสูงกว่าค่าขีดจำกัด.....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สารบัญตาราง (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ผลการทดสอบการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส และความแม่นยำในการระบุทิศทาง ภายใต้สภาวะรบกวนสัญญาณ ในสถานการณ์ที่ 1 .....	76
4.19 ผลการทดสอบการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส และความแม่นยำในการระบุทิศทาง ภายใต้สภาวะรบกวนสัญญาณ สถานการณ์ที่ 2 .....	77
4.20 ผลการทดสอบการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส และความแม่นยำในการระบุทิศทาง ภายใต้สภาวะรบกวนสัญญาณ สถานการณ์ที่ 3 .....	79



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบจีเอ็นเอสเอส (GNSS : Global Navigation Satellite System) คือระบบนำทางที่ให้บริการสำหรับระบุตำแหน่งหรือค่าพิกัดบนพื้นผิวโลกหรือใช้อ้างอิงมาตรฐานเวลาโดยอาศัยการรับสัญญาณมาจากดาวเทียมต่าง ๆ ที่โคจรรอบโลก ซึ่งระบบจีพีเอส (GPS : Global positioning system) เป็นส่วนหนึ่งของระบบจีเอ็นเอสเอส และเนื่องจากสัญญาณของระบบระบุพิกัดตำแหน่งจากดาวเทียมเป็นระบบแบบเปิด จึงอาจจะมีผู้ไม่หวังดี ใช้ตัวรบกวนสัญญาณหรือ jammer ที่สามารถปล่อยสัญญาณในย่านความถี่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบจีพีเอส ซึ่งจะส่งผลให้การระบุตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เกิดความผิดพลาด และในบางครั้งอาจส่งผลให้เครื่องรับสัญญาณนั้นไม่สามารถตรวจจับและติดตามดาวเทียมได้ โดยสร้างความถี่ข้างเคียงออกมาจึงทำให้เกิดการรบกวนระบบการทำงานการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกใช้งานในการตัดสัญญาณดาวเทียมเพื่อป้องกันการติดตาม มีการใช้งานในรถขนส่งสินค้าในการป้องกันการติดตามจากบริษัทขนส่งสินค้า เป็นต้น โดยในตัวรบกวนสัญญาณแบบ SMA - Battery Jammer จะสามารถรบกวนสัญญาณได้ถึงระยะ 110 เมตร และในตัวรบกวนสัญญาณแบบ USB - GPS Jammer จะสามารถรบกวนสัญญาณได้ถึงระยะ 90 เมตร ซึ่งส่งผลให้การรับค่าสัญญาณจากดาวเทียมนั้นเกิดปัญหาตามมาภายหลังได้ โดยในบางครั้งอาจรับจำนวนดาวเทียมได้ไม่เพียงพอต่อการใช้งานหรือไม่สามารถรับดาวเทียมได้เลย ซึ่งจากงานก่อนหน้า [1] ระบบตรวจจับรบกวนจีเอ็นเอสเอส ใช้วิธีการวัดค่ากำลังของสัญญาณรบกวนโดยมีเกณฑ์ตัดสินใจความรุนแรงของสัญญาณรบกวน แต่ด้วยเหตุนี้จึงไม่เพียงพอต่อการค้นหาแหล่งที่มาของสัญญาณรบกวน และการใช้งานระบบจำเป็นต้องใช้งานในรูปแบบสถานี (Station) ดังนั้นคณะผู้จัดทำจึงได้พัฒนาวิธีการที่สามารถตรวจจับแหล่งที่มาของสัญญาณมา 2 วิธีการนั้นคือ 1) Amplitude Comparison 2) อัลกอริทึม MUSIC มาเปรียบเทียบกัน และได้ออกแบบรวมถึงพัฒนาอุปกรณ์สำหรับการตรวจจับสัญญาณรบกวนแบบเจาะจงทิศทาง และสามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile) เนื่องจากต้องการให้อุปกรณ์นั้นสามารถตรวจจับการรบกวนแหล่งที่มาของการรบกวนสัญญาณได้อย่างชัดเจน โดยในการทำงานเมื่อรับสัญญาณมาอุปกรณ์นี้จะนำข้อมูลไปประมวลผลค่ากำลังสัญญาณเพื่อตรวจจับสัญญาณรบกวน พร้อมทั้งค้นหาแหล่งที่มาของสัญญาณรบกวนไปพร้อมกันและแสดงกราฟสเปกตรัมสัญญาณผ่านหน้าจอ จากนั้นจะนำข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดที่บันทึกได้ไปจัดเก็บและสำรองไว้ในคอมพิวเตอร์ เพื่อดึงข้อมูลดังกล่าวมาใช้เป็นหลักฐานหรือเป็นข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์สัญญาณต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการตรวจจับสัญญาณรบกวนต่อระบบจีเอ็นเอสเอสย่าน L1 (1575.42 เมกะเฮิรตซ์)
- 2) เพื่อพัฒนาระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนต่อระบบจีเอ็นเอสเอสให้สามารถระบุทิศทางได้
- 3) เพื่อพัฒนาการใช้งานสายอากาศร่วมกับ software defined radio
- 4) เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนต่อระบบจีเอ็นเอสเอสกับอุปกรณ์ที่ใช้งานในปัจจุบัน
- 5) เพื่อตรวจจับแหล่งที่มาแบบเจาะจงทิศทางของการรบกวนสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาบัตร

- 1) พัฒนาอุปกรณ์ร่วมกับสายอากาศ และโปรแกรมที่สามารถตรวจสอบสัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์ได้
- 2) ออกแบบและสร้างระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสที่เหมาะสมกับการใช้งานในสถานีเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับปริศยานิพนธ์เรื่อง “ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่” ประกอบด้วยหลักการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

#### 2.1 ระบบสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

GNSS (Global Navigation Satellite System) ระบบนำทางด้วยดาวเทียมที่โคจรรอบโลกซึ่งให้บริการสำหรับระบุตำแหน่งหรือค่าพิกัดบนพื้นผิวโลก ซึ่งปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาระบบนำทางด้วยดาวเทียมขึ้นมาหลายระบบเช่น GPS GLONASS Galileo BeiDou QZSS SBAS เป็นต้น โดยในปริศยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปยังระบบนำทางด้วยดาวเทียม GPS [2]

GPS (Global Positioning System) หรือเดิมที่เรียกว่า “Navstar GPS” ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการหาพิกัดตำแหน่งที่ถูกพัฒนาโดยสหรัฐอเมริกา โดยระบบพิกัดนี้ต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวงในการค้นหาตำแหน่งด้วยดาวเทียม เพื่อให้คนบนพื้นโลกสามารถทราบพิกัดและตำแหน่งที่อยู่ของตนเองได้ผ่านอุปกรณ์รับสัญญาณทั่วไป ซึ่งจะมีความแม่นยำของการระบุตำแหน่งอยู่ระหว่าง 10 ถึง 100 เมตร และสำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณชนิดพิเศษที่ใช้ในกองทัพอาจมีความแม่นยำอยู่ที่ระยะประมาณ 1 เมตร โดยส่วนใหญ่จะใช้กับงานด้านภูมิศาสตร์เป็นหลักและสัญญาณ GPS ประกอบไปด้วย 3 ส่วนดังนี้ [3], [4]

##### 2.1.1 ส่วนอวกาศ (Space Segment)

ซึ่งประกอบด้วยดาวเทียม 32 ดวงไว้ใช้งาน โดยดาวเทียมจะแบ่งเป็น 6 รอบวงโคจรที่ทำมุมเอียง 55 องศากับเส้นศูนย์สูตร ที่ระดับความสูงประมาณ 20,200 กิโลเมตร ซึ่งจะ ทำหน้าที่ในการส่งคลื่นสัญญาณจากดาวเทียม GPS ไปสู่เครื่องรับสัญญาณ โดยสัญญาณวิทยุที่ดาวเทียมจีพีเอสส่งออกมาซึ่งคลื่นช่วงที่เรียกว่า L - band มี 3 ความถี่ คือ แถบความถี่ L1 ความถี่กลางที่ 1575.42 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นย่านความถี่ที่เป็นที่ยอมรับที่สุด โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ Coarse/Acquisition Code (C/A) เป็นสัญญาณที่เปิดให้สาธารณชนใช้และ Precision Code (P - code) สงวนสำหรับการใช้ทางทหารและบางหน่วยงานของรัฐบาลเท่านั้น [4] แถบความถี่ L2 ความถี่กลางที่ 1227.6 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีความถี่ต่ำกว่า L1 โดยจะทำให้สัญญาณสามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางเช่น เมฆปกคลุม ต้นไม้ และอาคารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งความถี่ย่าน L2 ได้รับการออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อตอบสนองความต้องการเชิงพาณิชย์ เนื่องจากช่วยให้สามารถพัฒนาโซลูชันความถี่คู่ได้ด้วยรหัส P(Y) และ M - Code [4] แถบความถี่ L5 ความถี่กลางที่ 1176.45 เมกะเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นแถบความถี่ที่แบนด์วิดธ์ขนาดใหญ่เนื่องจากมีกำลังส่งสัญญาณสูงกว่าแถบความถี่ L1 และ L2 ซึ่งได้รับการออกแบบมาเพื่อตอบสนองความต้องการด้านการขนส่งที่ปลอดภัยในชีวิตและการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงอื่นๆ โดยได้สงวนไว้สำหรับบริการด้านความปลอดภัยในการบินโดยเฉพาะ [5]

### 2.1.2 ส่วนควบคุม (Control Segment)

ประกอบด้วยสถานีภาคพื้นดิน สถานีภาคพื้นหลักใหญ่อยู่ที่ Falcon Air Force Base สหรัฐอเมริกา และศูนย์ควบคุมย่อยกระจายไปยังภูมิภาคต่าง ๆ ทั่วโลกอีก 5 จุด

### 2.1.3 ส่วนผู้ใช้งาน (User Segment)

ในการใช้งานจำเป็นต้องมีเครื่องรับสัญญาณที่สามารถรับคลื่นและสามารถแปลรหัสจากดาวเทียมเพื่อนำมาประมวลผลให้เหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ ได้

## 2.2 สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนคือสัญญาณไม่พึงประสงค์ที่เข้ามารบกวนซึ่งอาจจะทำให้อุปกรณ์เกิดการดำเนินงานที่ผิดพลาดและเกิดข้อบกพร่องได้ หรือในบางครั้งอาจทำให้ผู้ใช้งานอุปกรณ์นั้นเกิดอันตรายได้ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือเกิดจากธรรมชาติเช่น พายุแลบ พายุร้อน และเกิดจากมนุษย์สร้างขึ้นเช่น อุปกรณ์รบกวนสัญญาณแบบ USB ตัวรบกวนสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายวิทยุสื่อสาร โดยหลักการคือเครื่องจะส่งสัญญาณรบกวนคลื่นความถี่เดียวกันกับดาวเทียม GPS ที่ใช้ส่งสัญญาณให้เครื่องรับจึงทำให้ไม่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้ จึงทำให้การระบุตำแหน่งคลาดเคลื่อนหรือไม่สามารถสามารถระบุตำแหน่งได้ [6] โดยเรานำตัวอย่างอุปกรณ์รบกวนสัญญาณที่ได้ มาใช้ทดสอบระบบโดยมีทั้งหมดสองแบบดังนี้

### 2.2.1 หลักการการรบกวนสัญญาณ

การรบกวนสัญญาณ (jamming) หมายถึงการรบกวนหรือการขัดขวางการสื่อสารอย่างตั้งใจ เทคนิคการรบกวนหลักมีอยู่สองประเภท คือ เทคนิคสัญญาณรบกวน (noise techniques) และเทคนิคการใช้เครื่องทวนสัญญาณ (repeater techniques) โดยแต่ละเทคนิคยังแบ่งเป็นการรบกวนดังนี้

#### 2.2.1.1 การรบกวนแบบเจาะจง (Spot jamming)

การรบกวนแบบเจาะจง เป็นการรบกวนด้วยเสียงรบกวนที่มุ่งเน้นพลังงานทั้งหมดของเครื่องกำเนิดสัญญาณรบกวนไปที่ความถี่เดียว ซึ่งทำให้เทคนิคนี้ไม่สามารถใช้งานได้ผลกับเรดาร์ที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ (frequency - agile radar)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.1 การรบกวนแบบกวาดความถี่ (Sweep jamming)

การรบกวนแบบกวาดความถี่ คือกระบวนการที่เครื่องกำเนิดสัญญาณรบกวน (jammer) ส่งพลังงานทั้งหมดจากความถี่หนึ่งไปยังอีกความถี่หนึ่งอย่างเป็นลำดับ ทำให้เกิดการรบกวนหลายความถี่อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว แต่ไม่ครอบคลุมทุกความถี่พร้อมกัน

### 2.2.1.2 การรบกวนแบบครอบคลุม (Barrage jamming)

การรบกวนแบบครอบคลุม เป็นการรบกวนหลายความถี่พร้อมกันโดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณรบกวน ข้อเสียหลักของเทคนิคนี้คือเครื่องกำเนิดสัญญาณรบกวนจะกระจายพลังงานไปทั่วหลายความถี่ ทำให้ประสิทธิภาพในการรบกวนความถี่เดียวลดลง

### 2.2.1.3 เทคนิคการใช้หน่วยความถี่วิทยุดิจิทัล (Digital frequency radio memory)

เทคนิคการใช้หน่วยความถี่วิทยุดิจิทัล (Digital frequency radio memory) เป็นเทคนิคเครื่องทวนสัญญาณที่สร้างความสับสนให้กับเรดาร์ โดยการปรับเปลี่ยนและส่งสัญญาณเรดาร์ที่รับมาใหม่ เช่น การปรับเปลี่ยนระยะเวลาของการส่งพัลส์ เครื่องกำเนิดสัญญาณรบกวนสามารถเปลี่ยนระยะทางที่เรดาร์ตรวจจับได้และสร้างเป้าหมายเทียมขึ้นมา

## 2.2.2 อุปกรณ์รบกวนสัญญาณแบบ SMA - Battery Jammer

ตัวรบกวนสัญญาณแบบ SMA - Battery Jammer เป็นอุปกรณ์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อรบกวนหรือบล็อกสัญญาณจีเอ็นเอสเอส โดยปล่อยสัญญาณรบกวนในย่านความถี่เดียวกัน มักจะมาพร้อมกับขั้วต่อแบบ SMA (Subminiature version A) ที่สามารถเชื่อมต่อกับเสาอากาศต่าง ๆ เพื่อเพิ่มระยะและประสิทธิภาพในการรบกวน อุปกรณ์นี้มักถูกใช้เพื่อป้องกันการติดตามในบางสถานการณ์ แต่การใช้งานอุปกรณ์นี้มีความผิดทางกฎหมายในหลายประเทศเนื่องจากการรบกวนระบบนำทาง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์รบกวนสัญญาณแบบ SMA - Battery

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์รบกวนสัญญาณแบบ USB คืออุปกรณ์ที่ใช้พอร์ต USB เพื่อปล่อยสัญญาณรบกวนในย่านความถี่จีเอ็นเอสเอส โดยตรง อุปกรณ์นี้มีขนาดเล็ก พกพาสะดวก สามารถเสียบเข้ากับช่อง USB บนอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์หรือที่ชาร์จในรถยนต์ เพื่อรบกวนสัญญาณ GPS และจีเอ็นเอสเอส การใช้งานอุปกรณ์รบกวนสัญญาณแบบ USB ผิดกฎหมายในหลายประเทศเนื่องจากอาจทำให้ระบบนำทางและการสื่อสารขัดข้อง อุปกรณ์ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์รบกวนสัญญาณ USB

### 2.3 เทคนิคการตรวจจับสัญญาณรบกวนในระบบจีเอ็นเอสเอส

ในปัจจุบันการตรวจจับสัญญาณรบกวนในระบบจีเอ็นเอสเอสมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง มีการใช้งานเทคนิคเพื่อตรวจจับสัญญาณรบกวนเช่น Power-based Detection [24], DOA Estimation [23] และ Real-time SDR Monitoring [25] เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบเทคนิคตรวจจับสัญญาณรบกวนในรูปแบบต่าง ๆ

เทคนิค	รายละเอียด	ข้อดี	ข้อจำกัด
Power-based Detection	ตรวจสอบค่าพลังงาน เช่น C/N <sub>0</sub> , Received Power	ใช้ทรัพยากรต่ำ	อาจเกิด false alarm
DOA Estimation	ใช้สายอากาศหลายตัวหาทิศทางรบกวน	ระบุทิศทางได้ชัดเจน	ต้องใช้หลายเสาอากาศ
Real-time SDR Monitoring	ใช้ RTL-SDR วิเคราะห์สเปกตรัมแบบเรียลไทม์	ยืดหยุ่นสูง	ความแม่นยำขึ้นกับประเภท SDR ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 อุปกรณ์รับสัญญาณ RTL-SDR Blog V3 R860 RTL2832U

RTL-SDR Blog V3 R860 RTL2832U ดังรูปที่ 2.3 เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณไร้สายที่ใช้เทคโนโลยี Software Defined Radio (SDR) ซึ่งสามารถรับสัญญาณวิทยุได้ตั้งแต่ความถี่ต่ำสุด 24 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึงความถี่สูงสุด 1.766 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยสามารถใช้งานได้กับโปรแกรม SDR ต่าง ๆ เช่น SDR# (SDR Sharp) HDSDR SDR-Console CubicSDR และอื่น ๆ [7]



รูปที่ 2.3 RTL-SDR Blog V3 R860 RTL2832U

จาก RTL-SDR Blog V3 R860 RTL2832U สำหรับรับสัญญาณวิทยุแบบ All-Band โดยสามารถใช้งานได้ทั้ง HF VHF UHF โดยอุปกรณ์มี TCXO ความแม่นยำ 1 PPM เพื่อให้มีความแม่นยำในการรับสัญญาณวิทยุที่สูงขึ้น ทำให้สามารถรับสัญญาณวิทยุแบบ AM FM SSB CW ADS-B และอื่น ๆ ได้ตามต้องการ ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.2 [8]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของอุปกรณ์ RTL-SDR Blog V3 R860 RTL2832U

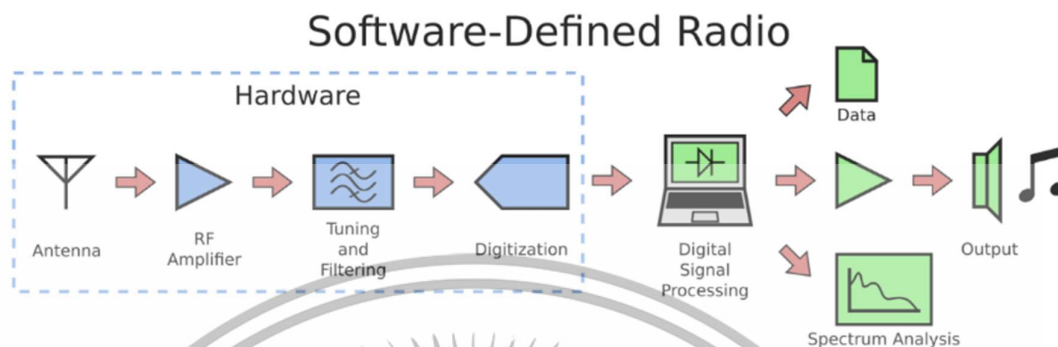
คุณสมบัติ	รายละเอียด
Bandwidth	Up to 2.4 MHz stable
ADC	RTL2832U 8-bits
Frequency Range	24 MHz – 1766 MHz
Typical Input Impedance	50 Ohms
Typical Current Draw	270 – 280 mA

ซึ่งหลักการทำงานของ RTL-SDR Blog V3 R860 RTL2832U รับสัญญาณด้วยสายอากาศ เริ่มต้นด้วยการรับสัญญาณคลื่นวิทยุจากสายอากาศ ซึ่งสัญญาณนี้อาจอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น FM AM HF หรือแม้แต่สัญญาณดิจิทัล จากนั้นนำมาขยายสัญญาณ (RF Amplifier) สัญญาณ ที่รับเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีความแรงต่ำ อุปกรณ์ขยายสัญญาณวิทยุจึงถูกใช้เพื่อเพิ่มกำลังสัญญาณให้เพียงพอสำหรับการประมวลผล ต่อมาทำการปรับและกรองสัญญาณ (Tuning and Filtering) หลังจากที่ยขยายสัญญาณแล้ว อุปกรณ์จะทำการปรับเลือกความถี่ที่ต้องการรับฟังพร้อมกับกรองสัญญาณรบกวนออก เพื่อให้ได้สัญญาณที่ชัดเจนยิ่งขึ้น จากนั้นแปลงสัญญาณเป็นดิจิทัล (Digitization) ในขั้นตอนนี้ สัญญาณอนาล็อกจะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัลผ่านตัวแปลง ADC (Analog-to-Digital Converter) ซึ่งในกรณีของ RTL-SDR Blog V3 จะใช้ชิป RTL2832U ในการแปลงสัญญาณให้เป็นข้อมูลดิจิทัล ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผล การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal Processing - DSP) ข้อมูลที่ถูกแปลงเป็นดิจิทัลจะถูกประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ SDR ในคอมพิวเตอร์ โดยขั้นตอนการรับสัญญาณ IQ เริ่มจากการแยกสัญญาณออกเป็น In-phase (I) และ Quadrature (Q) เมื่อสัญญาณอนาล็อกเข้าสู่ RTL-SDR จะถูกแยกออกเป็นสองส่วนคือสัญญาณ I และ Q ซึ่งมีเฟสห่างกัน 90 องศา เพื่อให้สามารถบันทึกข้อมูลของทั้งแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณได้ จากนั้นทำการสุ่มสัญญาณ (Sampling) I และ Q ในขั้นตอนนี้ สัญญาณ I และ Q ที่ถูกแยกออกมาจะถูกสุ่มตัวอย่าง (Sampling) ด้วยตัวแปลง ADC (Analog-to-Digital Converter) ซึ่งจะบันทึกความเข้มและทิศทางเฟสของสัญญาณ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัล การสุ่มสัญญาณนี้ทำให้สามารถแปลงสัญญาณ I และ Q เป็นข้อมูลดิจิทัลที่พร้อมสำหรับการประมวลผล แล้วส่งข้อมูล IQ ไปยังคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จากสัญญาณ I และ Q จะถูกส่งผ่านพอร์ต USB ไปยังคอมพิวเตอร์ ในรูปแบบของ "I/Q samples" หรือ "ตัวอย่าง I/Q" ซึ่งเป็นการเก็บข้อมูลของทั้งสัญญาณ I และ Q เพื่อให้ซอฟต์แวร์ SDR สามารถนำไปประมวลผลได้อย่างละเอียด ซึ่งการประมวลผลสัญญาณ I/Q ในซอฟต์แวร์ SDR ซอฟต์แวร์ SDR บนคอมพิวเตอร์จะใช้ข้อมูล I/Q เพื่อทำการวิเคราะห์และแสดงสัญญาณที่รับมา เช่น การแสดงผลสเปกตรัม การถอดรหัสสัญญาณ หรือการฟังเสียง โดยการใช้นสัญญาณ I/Q จะทำให้ซอฟต์แวร์สามารถคำนวณค่าความเข้มและเฟสของสัญญาณที่เปลี่ยนไปได้อย่างแม่นยำ ซอฟต์แวร์นี้สามารถปรับแต่งและวิเคราะห์สัญญาณได้ เช่น การแสดงผลความเข้มของสัญญาณ การฟังเสียงวิทยุ และการดูข้อมูลต่าง ๆ ของสัญญาณโดยจะนำไปวิเคราะห์สเปกตรัม ซอฟต์แวร์ SDR จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถดูภาพรวมของสัญญาณตามย่านความถี่ได้ในลักษณะของกราฟสเปกตรัม ทำให้สามารถเห็นข้อมูลว่ามีย่านความถี่ใดบ้างที่มีสัญญาณหรือการรบกวนอยู่ ซึ่งแสดงผลหลังจากประมวลผลแล้ว ข้อมูลที่ได้รับสามารถนำไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การฟังเสียง การวิเคราะห์ข้อมูล การเก็บข้อมูลความถี่คุณสมบัติของ RTL-SDR มีความสามารถในการรองรับสัญญาณหลากหลายชนิดแสดงดังรูปที่ 2.4 [9]

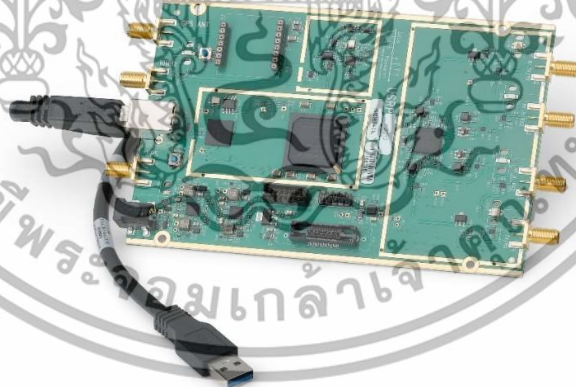
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ภาพรวมการทำงานของ RTL-SDR

#### 2.5 อุปกรณ์รับสัญญาณ USRP B210 SDR

USRP B210 SDR ดังรูปที่ 2.5 เป็นอุปกรณ์รับ - ส่งสัญญาณไร้สายที่สามารถปรับแต่งและควบคุมได้ผ่านซอฟต์แวร์ ซึ่งสามารถรับสัญญาณวิทยุได้ตั้งแต่ความถี่ต่ำสุด 70 เมกะเฮิรตซ์ ถึงความถี่สูงสุด 60 กิกะเฮิรตซ์ โดยสามารถใช้งานได้กับโปรแกรม GNU radio เป็นหลัก ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.3 [10]



รูปที่ 2.5 USRP B210 SDR

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของอุปกรณ์ USRP B210 SDR

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Bandwidth	Up to 56 MHz stable
ADC	12 - bits

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Frequency Range	70 MHz – 60 GHz
Typical Input Impedance	50 $\Omega$
Channel	2 TX & 2 RX

## 2.6 อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม U-blox NEO-M8T

U-blox NEO-M8T ดังรูปที่ 2.6 เป็นโมดูลรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสซึ่งโมดูลนี้ให้ค่าเวลาที่แม่นยำสูงในการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูง รองรับการใช้งานร่วมกับดาวเทียม GPS GLONASS Beidou Galileo และ QZSS ซึ่งจะแสดงรูปภาพตัวรับสัญญาณดังรูปที่ 2.6 [11] และข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ดังตารางที่ 2.4 [11]



รูปที่ 2.6 รูปอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม U-blox NEO-M8T

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม U-blox NEO-M8T

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Frequency Range	1.227 GHz – 1.575 GHz
Interface	SMA to USB
Oscillators	TCXO
Voltage	Up to 5.5 V
Current	< 45 mA
Temperature range	0 °C – 50 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 สายอากาศ Directional 800 – 2700 เมกะเฮิร์ตซ์

สายอากาศ Directional 800 – 2700 เมกะเฮิร์ตซ์ นี้สามารถรับสัญญาณจีพีเอสย่านความถี่ L1 (1575.42 เมกะเฮิร์ตซ์) ได้ ซึ่งจะแสดงรูปภาพของสายอากาศดังรูปที่ 2.7 และข้อมูลจำเพาะของสายอากาศดังตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.7 รูปสายอากาศ Directional 800 – 2700 เมกะเฮิร์ตซ์

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของสายอากาศกลางแจ้ง 800 – 2700 เมกะเฮิร์ตซ์

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Frequency Range (MHz)	800 MHz – 2700 MHz
Interface	N-Female
Gain (dBi)	8 – 9 dBi
Resistance	50 Ω
Temperature range	-40 °C - 55 °C
Radiation Pattern	Directional

## 2.8 สายอากาศ AN-105L-GNSS

สายอากาศ AN-105L-GNSS สายอากาศที่สามารถรับสัญญาณจีพีเอสย่านความถี่ L1 L2 และ L5 ได้ ซึ่งจะแสดงรูปภาพของสายอากาศดังรูปที่ 2.8 [12] และข้อมูลจำเพาะของสายอากาศดังตารางที่ 2.6 [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 รูปสายอากาศ AN-105L-GNSS

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของสายอากาศ AN-105L-GNSS

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Frequency Range (MHz)	1198 – 1615
Interface	TNC female
Gain (dBi)	36 dBi
Resistance	50 Ω
Temperature range	-40 °C – 70 °C
Radiation Pattern	Omnidirectional

### 2.9 สายนำสัญญาณ PR-SMA Plug to N-Type Plug

สายนำสัญญาณ PR-SMA Plug to N-Type Plug เป็นสายนำสัญญาณที่สามารถรับสัญญาณจากสายอากาศ Directional ส่งเข้า RTL-SDR Blog V3 R860 RTL2832 ดังรูปที่ 2.9 และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.7 [13]



รูปที่ 2.9 รูปสายนำสัญญาณ PR-SMA Plug to N-Type Plug

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติสายนำสัญญาณ PR-SMA Plug to N-Type Plug

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Type	Coaxial
Item	RG402 pigtail cable
Frequency	0-3GHz /0-6GHz
Input power	50 W
Impedance	50 $\Omega$
Connector1	SMA Male or customized
Connector 2	N Male or customized
Cable length	10cm/15cm/20cm or customized
Cable type	RG402/RG405/RG086/RG141 or customized

### 2.10 การค้นหาทิศทาง (Direction Finding)

การค้นหาทิศทาง (Direction Finding หรือ DF) คือกระบวนการที่ใช้ในการระบุทิศทางและตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ (RF) ที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบการสื่อสารไร้สาย เช่น วิทยุ สัญญาณเรดาร์ คอนโทรลเลอร์ของโดรน การตรวจจับสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จากเป้าหมาย (ELINT) หรือการสกัดข้อมูลสัญญาณ (SIGINT) สำหรับการใช้งานทางทหาร เป็นต้น การค้นหาทิศทางอาศัยการใช้งานของเครื่องรับสัญญาณตั้งแต่หนึ่งเครื่องขึ้นไปซึ่งสามารถใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อประมาณทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา แม้ว่าจะมีเทคนิคเฉพาะที่หลากหลายในการค้นหาทิศทาง แต่เป้าหมายหลักของการค้นหาทิศทางคือการระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณด้วยความแม่นยำสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ [14]

#### 2.10.1 Amplitude Comparison Direction Finding

Amplitude Comparison Direction Finding เป็นเทคนิคการค้นหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณวิทยุโดยการเปรียบเทียบความเข้มของสัญญาณ (Amplitude) ที่รับได้จากอาร์เรย์สายอากาศที่ตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ทราบพิกัด หลักการทำงานของวิธีนี้คือ สายอากาศอากาศแต่ละต้นจะถูกลงไว้ในตำแหน่งและมุมที่ทราบล่วงหน้า โดยสายอากาศเหล่านี้เป็นสายอากาศแบบทิศทาง (Directional Antennas) ที่มีความไวต่อสัญญาณจากทิศทางที่เฉพาะเจาะจง สายอากาศแต่ละต้นจะรับสัญญาณจากแหล่งกำเนิดและวัดความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ ความเข้มของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สายอากาศได้รับจะเปลี่ยนแปลงตามมุมและระยะทางจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ ความเข้มของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศแต่ละต้นจะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน โดยสายอากาศที่ได้รับสัญญาณที่มีความเข้มสูงสุดจะบ่งบอกทิศทางมาของสัญญาณ (DOA - Direction of Arrival) และจากการเปรียบเทียบความเข้มของสัญญาณและตำแหน่งของสายอากาศ สามารถประมาณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้ โดยใช้วิธีการคำนวณมุมเฉลี่ยจากความเข้มของสัญญาณของสายอากาศแต่ละต้น ดังสมการที่ 2.1 [15]

$$\theta = \arctan2(Y, X) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ มุมทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Angle of Arrival)

$X$  คือ ค่าพิสัยถ่วงน้ำหนักความเข้มของสัญญาณในแนวแกน x

$Y$  คือ ค่าพิสัยถ่วงน้ำหนักความเข้มของสัญญาณในแนวแกน y

สมการคำนวณค่าพิสัยถ่วงน้ำหนักความเข้มของสัญญาณเป็นน้ำหนักในแนวแกน X และ Y แสดงดังสมการที่ 2.2 และ 2.3 [15]

$$X = \sum_{i=1}^N S_i \cos(\theta_i) \quad (2.2)$$

$$Y = \sum_{i=1}^N S_i \sin(\theta_i) \quad (2.3)$$

เมื่อ  $X$  คือ ค่าพิสัยถ่วงน้ำหนักความเข้มของสัญญาณในแนวแกน x

$Y$  คือ ค่าพิสัยถ่วงน้ำหนักความเข้มของสัญญาณในแนวแกน y

$N$  คือ จำนวนของสายอากาศในอาเรย์

$S_i$  คือ ความเข้มของสัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศแต่ละต้น

$\theta_i$  คือ ตำแหน่งมุมของสายอากาศแต่ละต้น

### 2.10.2 อัลกอริทึม MUSIC (Multiple Signal Classification)

Multiple Signal Classification (MUSIC) เป็นอัลกอริทึมการหาทิศทางแบบความละเอียดสูง ที่อิงตามการแยกค่าเอกลักษณะ (eigenvalue decomposition) ของเมทริกซ์ความสัมพันธ์ร่วม (covariance matrix) ของอาเรย์สายอากาศ อัลกอริทึม MUSIC จัดอยู่ในกลุ่มของอัลกอริทึมการหาทิศทางที่ใช้พื้นฐานจากวิธีการแบ่งช่วง (subspace-based direction-finding)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[16] สัญญาณที่รับจากอานเรย์สายอากาศจะสัมพันธ์กับสัญญาณที่ปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดสัญญาณ แสดงดังสมการที่ 2.4 [17]

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\mathbf{x}(t)$  คือ เวกเตอร์ข้อมูลจากอานเรย์สายอากาศที่รับสัญญาณที่เวลา  $t$   
 $\mathbf{s}(t)$  คือ เวกเตอร์ของสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณแต่ละตัวที่เวลา  $t$   
 $\mathbf{A}$  คือ เมทริกซ์การกระจายสัญญาณ (Steering Matrix) ที่บอกถึงทิศทางการมาของสัญญาณจากแหล่งกำเนิด  
 $\mathbf{n}(t)$  คือ เวกเตอร์สัญญาณรบกวนที่เข้ามาปะปนกับสัญญาณจริงในระบบที่เวลา  $t$

เมทริกซ์การกระจายสัญญาณแสดงดังสมการที่ 2.5 [17]

$$\mathbf{A} = \mathbf{a}(\theta) = \left[ e^{jka \cos\left(\frac{2\pi i}{M} - \theta\right)} \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ  $k$  คือ ค่าคงที่ของคลื่น (Wave Number) คำนวณได้จาก  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  โดย  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของสัญญาณ  
 $a$  คือ รัศมีของอานเรย์สายอากาศที่มีการจัดเรียงในรูปแบบวงกลม  
 $M$  คือ จำนวนของสายอากาศในอานเรย์  
 $i$  คือ ดัชนี (Index) ของสายอากาศในอานเรย์  
 $\theta$  คือ มุมทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Angle of Arrival)

เมทริกซ์ความสัมพันธ์ร่วม ได้มาจากข้อมูลของสัญญาณที่รับมาเป็นวิธีการที่ใช้พื้นฐานจาก Subspace Method โดยเมทริกซ์ความสัมพันธ์ร่วมประกอบด้วยสององค์ประกอบหลักคือ Signal Covariance Matrix คือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ร่วมของสัญญาณที่แท้จริงและ Noise Covariance Matrix คือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ร่วมของสัญญาณรบกวนที่ปะปนเข้ามาในข้อมูลที่รับแสดงดังสมการที่ 2.6 [4]

$$\mathbf{R}_x = E\{|\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}|^2\} = E\{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^H\} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\mathbf{R}_x$  คือ เมทริกซ์ความสัมพันธ์ร่วมแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศในอานเรย์  
 $\mathbf{x}$  คือ เวกเตอร์สัญญาณที่รับจากสายอากาศในอานเรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\mathbf{x}^H$  คือ คอนจูเกตเชิงซ้อนและการทรานสโพอส (Conjugate Transpose) ของเวกเตอร์ สัญญาณ  $\mathbf{x}$

$\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของสัญญาณ  $\mathbf{x}$

Signal Subspace ประกอบด้วย eigenvectors ที่สัมพันธ์กับค่า eigenvalues ที่เป็นบวก ซึ่งแสดงถึงส่วนที่มีสัญญาณ (signal) อยู่จริง ในขณะที่ Null Subspace ประกอบด้วย eigenvectors ที่สัมพันธ์กับค่า eigenvalues ที่มีค่าเป็นศูนย์หรือใกล้เคียงศูนย์ ซึ่งแสดงถึงส่วนที่ไม่มีสัญญาณหรือมี noise เพียงอย่างเดียว Null Subspace นี้ จะตั้งฉากกับ Signal Subspace โดยธรรมชาติ ซึ่งเวกเตอร์ทิศทางมาถึงของสัญญาณ (Arrival Vectors) จะอยู่ใน Signal Subspace ทำให้ตั้งฉากกับ Null Subspace อัลกอริทึม MUSIC จึงอาศัยคุณสมบัตินี้ในการประมาณทิศทางมาถึงของสัญญาณ (DOA - Direction of Arrival) โดยทำการค้นหามุมที่ทำให้ Arrival Vectors ตั้งฉากกับ Noise Subspace ซึ่งเป็น Subspace ของส่วนที่ไม่มีสัญญาณ โดยเฉพาะในกรณีที่มี noise แล้วสร้างฟังก์ชันที่เรียกว่า MUSIC spectrum ซึ่งขึ้นกับมุมการมาถึงของสัญญาณ จุดสูงสุดของ spectrum จะแสดงถึงมุมที่ Arrival Vectors ตั้งฉากกับ Noise Subspace ซึ่งก็คือทิศทางมาถึงของสัญญาณนั้น ๆ โดย MUSIC pseudospectrum แสดงดังสมการที่ 2.7 [4]

$$P(\theta) = \frac{1}{|\mathbf{E} \mathbf{n} \mathbf{a}(\theta)|^2} = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{E} \mathbf{n} \mathbf{E} \mathbf{n}^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $P(\theta)$  คือ MUSIC spectrum ซึ่งเป็นฟังก์ชันพลังงานที่ขึ้นอยู่กับมุม  $\theta$  ที่ใช้ในการค้นหาทิศทางมาถึงของสัญญาณ

$\mathbf{E} \mathbf{n}$  คือ เมทริกซ์ Noise Eigenvectors

$\mathbf{a}(\theta)$  คือ เมทริกซ์การกระจายสัญญาณที่บอกถึงทิศทางมาของสัญญาณจากแหล่งกำเนิด

### 2.10.3 Time Difference of Arrival (TDOA)

Time Difference of Arrival (TDOA) เป็นวิธีการที่ใช้ในการระบุตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณแบบเรียลไทม์ (RTLS) เพื่อคำนวณตำแหน่งของวัตถุที่ติดตามอย่างแม่นยำ เช่น แท็กที่ติดอยู่กับบุคลากรหรือสินทรัพย์สำคัญต่าง ๆ ในแบบเรียลไทม์ โดยอาศัยความแตกต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงเครื่องรับหลายตัว หลักการคือสัญญาณเดินทางด้วยความเร็วที่จำกัด และวัดความแตกต่างของเวลาที่สัญญาณมาถึงที่เครื่องรับในตำแหน่งต่างกัน ทำให้สามารถหาตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณได้ TDOA สามารถใช้ในการระบุตำแหน่งและติดตามวัตถุหลายชิ้นพร้อมกัน วัดความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่ ตรวจสอบและระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้ การคำนวณความแตกต่างของเวลาที่มาถึง (TDOA) เพื่อหาตำแหน่งของตัวส่งสัญญาณ แสดงดังสมการที่ 2.8 [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_1 - d_2 = c(t_1 - t_2) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $d_1$  คือ ระยะทางจากเครื่องส่งสัญญาณถึงเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่ 1

$d_2$  คือ ระยะทางจากเครื่องส่งสัญญาณถึงเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่ 2

$c$  คือ ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$t_1$  คือ เวลาที่สัญญาณเดินทางไปถึงเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่ 1

$t_2$  คือ เวลาที่สัญญาณเดินทางไปถึงเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่ 2

ระยะทางจากเครื่องส่งสัญญาณถึงเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 2 แสดงดังสมการที่ 2.9 และ 2.10 ตามลำดับ [18]

$$d_1 = \sqrt{(X_t - X_1)^2 + (Y_t - Y_1)^2 + (Z_t - Z_1)^2} \quad (2.9)$$

$$d_2 = \sqrt{(X_t - X_2)^2 + (Y_t - Y_2)^2 + (Z_t - Z_1)^2} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $(X_t, Y_t, Z_t)$  คือ พิกัดของตัวส่งสัญญาณที่ต้องการหาตำแหน่ง

$(X_1, Y_1, Z_1)$  คือ พิกัดของเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่ 1

$(X_2, Y_2, Z_2)$  คือ พิกัดของเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่ 2

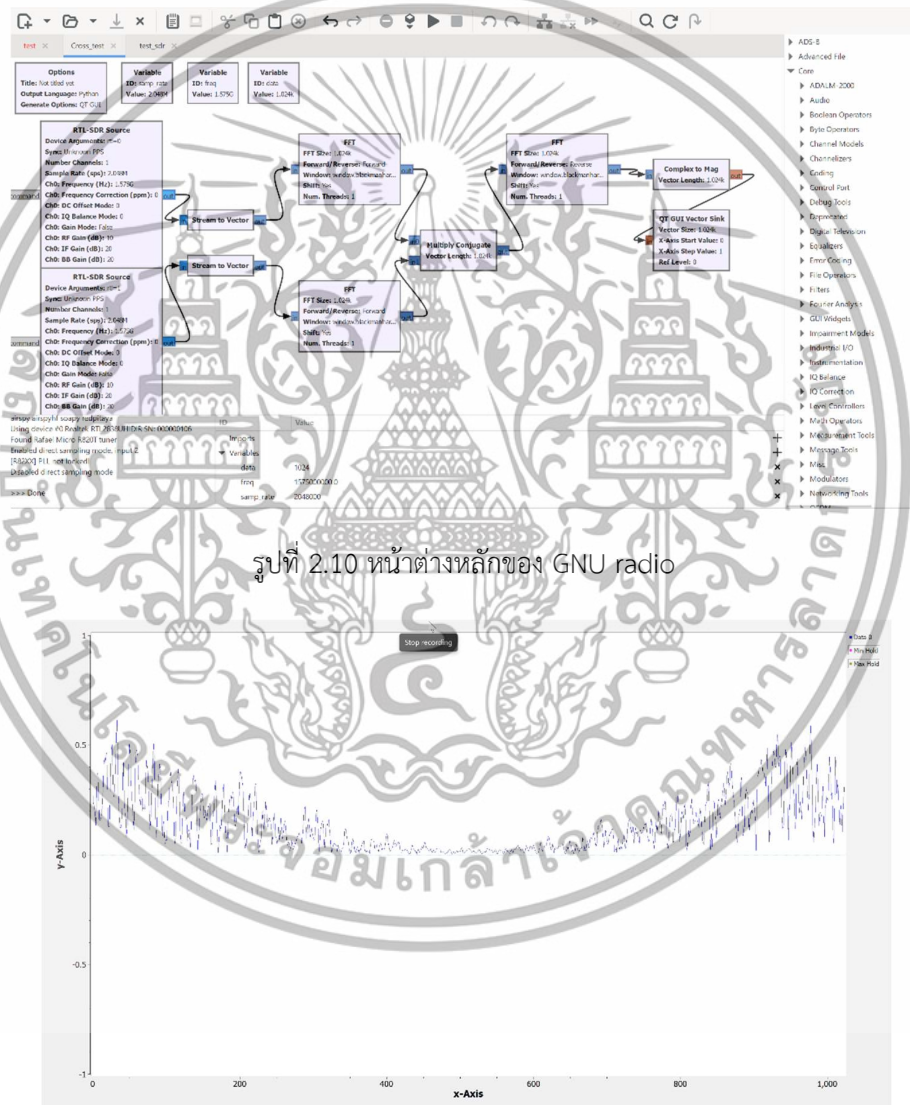
TDOA สามารถให้ข้อมูลตำแหน่งที่แม่นยำและเชื่อถือได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย แตกต่างจากระบบระบุตำแหน่งผ่านดาวเทียม (GPS) หรือระบบจีเอ็นเอสเอสอื่น ๆ ซึ่ง TDOA สามารถทำงานได้ทั้งภายในอาคารและในบริเวณที่สัญญาณจากดาวเทียมถูกกีดขวาง ทำให้เป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานที่ต้องการความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง และระบบ TDOA สามารถนำไปใช้กับโครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่ เช่น เครือข่าย Wi-Fi หรือเสาสัญญาณโทรศัพท์ โดยเฉพาะในอาคาร ทำให้ลดความจำเป็นในการลงทุนฮาร์ดแวร์และโครงสร้างพื้นฐานเพิ่มเติม

แม้ว่า TDOA จะมีข้อดีหลายประการ แต่ก็มีข้อจำกัดบางประการ การสะท้อนของสัญญาณและการกระจายตัวหลายเส้นทาง (multipath propagation) สามารถทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดเวลา ซึ่งนำไปสู่ความไม่แม่นยำในการระบุตำแหน่งด้วยความคลาดเคลื่อนในการซิงโครไนซ์เวลาส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของระบบ นอกจากนี้ยังต้องพัฒนาวิธีการคำนวณที่ซับซ้อนเพื่อใช้ในการประมวลผลสัญญาณ การซิงโครไนซ์เวลา และการคำนวณตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ซอฟต์แวร์ GNU radio

ซอฟต์แวร์ GNU radio คือโปรแกรมแบบโอเพนซอร์สที่ใช้ออกแบบและทดสอบการใช้ SDR ประเภทต่าง ๆ ที่ให้ไลบรารีและบล็อกประมวลสัญญาณหลากหลาย ซึ่งสามารถเข้ากันได้กับ USRP B210 แสดงตัวอย่างโปรแกรมดังรูปที่ 2.10 และตัวอย่างประมวลผลสัญญาณดังรูปที่ 2.11 [19]



รูปที่ 2.10 หน้าต่างหลักของ GNU radio

รูปที่ 2.11 หน้าต่างหลักของ GNU radio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



GNSS อื่น ๆ ) ตามด้วยฟิลด์ข้อมูลคั่นด้วยเครื่องหมายจุลภาค (,) รูปแบบที่แสดงรายละเอียดของข้อมูล Fix จำนวนดาวเทียมที่ใช้งานได้ รวมถึงค่าความคลาดเคลื่อน DOP (dilution of precision) ซึ่งตัวเลขน้อย ๆ จะเป็นค่าที่ดีมีความถูกต้องสูงโดยมีรูปแบบดังรูปที่ 2.13 - 2.14 [22]

```
$GNGSA,A,3,21,5,29,25,12,10,26,2,,,,,1.2,0.7,1.0*27
$GNGSA,A,3,65,67,80,81,82,88,66,,,,,1.2,0.7,1.0*20
```

รูปที่ 2.13 รูปแบบของ GSA message 1

GSA message fields	
Field	Meaning
0	Message ID SGNGSA
1	Mode 1: M = Manual A = Automatic
2	Mode 2: Fix type: 1 = not available 2 = 2D 3 = 3D
3	PRN number: 01 to 32 for GPS 33 to 64 for SBAS 64+ for GLONASS
4	PDOP: 0.5 to 99.9
5	HDOP: 0.5 to 99.9
6	VDOP: 0.5 to 99.9
7	The checksum data, always begins with *
If NMEA-0183 version 4.10 is selected, the 7th and 8th fields become:	
Field	Meaning
7	System ID based on: GPS 1 GLONASS 2 Galileo 3 BeiDou 4 QZSS 0
8	The checksum data, always begins with *

รูปที่ 2.14 รูปแบบของ GSA message 2 [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.12.3 GSV Message

GSV (GNSS Satellites in View) เป็นหนึ่งในประโยคของมาตรฐาน NMEA 0183 ที่รายงานข้อมูลเกี่ยวกับ “ดาวเทียมที่กำลังมองเห็น” ของเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส (GPS GLONASS Galileo และ ฯลฯ) โดยจะระบุจำนวนดาวเทียมทั้งหมดที่เครื่องรับสามารถตรวจจับได้ ณ ขณะนั้น รวมถึงข้อมูลรายดาวเทียม เช่น หมายเลขดาวเทียม (PRN) มุมเงย (Elevation) มุมกวาด (Azimuth) และความแรงสัญญาณ (SNR) โดยตำแหน่งการข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.15 - 2.16 [21]

```
$GPGSV,8,1,25,21,44,141,47,15,14,049,44,6,31,255,46,3,25,280,44*75
$GPGSV,8,2,25,18,61,057,48,22,68,320,52,27,34,268,47,24,32,076,45*76
```

รูปที่ 2.15 รูปแบบของ GSV message 1

GSV message fields	
Field	Meaning
0	Message ID
1	Total number of messages of this type in this cycle
2	Message number
3	Total number of SVs visible
4	SV PRN number
5	Elevation, in degrees, 90° maximum
6	Azimuth, degrees from True North, 000° through 359°
7	SNR, 00 through 99 dB (null when not tracking)
8-11	Information about second SV, same format as fields 4 through 7
12-15	Information about third SV, same format as fields 4 through 7
16-19	Information about fourth SV, same format as fields 4 through 7
20	The checksum data, always begins with *

รูปที่ 2.16 รูปแบบของ GSV message 2

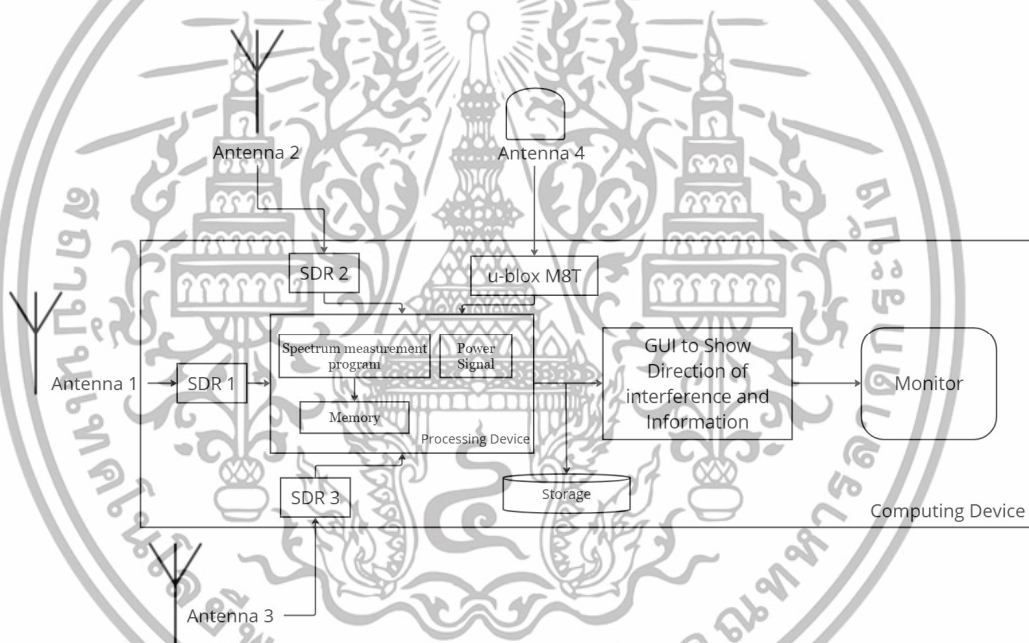
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## การออกแบบและการจัดทำปริญญาานิพนธ์

### 3.1 การออกแบบ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสที่ใช้สัญญาณที่รับมาจาก RTL-SDR Dongle เพื่อตรวจสอบและค้นหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีความถี่ในช่วง 1575.42 เมกะเฮิร์ตซ์ และแสดงผลผ่าน GUI ซึ่งในส่วนของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสทั้งหมดจะใช้สคริปต์ของไพธอนทำงานตลอดเวลา ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่ได้

จากรูปที่ 3.1 ในการทำงานจะมีการใช้ RTL-SDR Dongle เพื่อรับค่ากำลังสัญญาณและค่า I/Q ของสัญญาณของสายอากาศแต่ละตัว จากนั้นทำการวิเคราะห์การรบกวนสัญญาณ หากพบว่ามีกรบกวนสัญญาณจะทำการแสดงผลแจ้งเตือนบนจอแสดงผล และสามารถเก็บการตรวจจับสเปกตรัมเพื่อหาตำแหน่งของแหล่งที่มาการรบกวนสัญญาณ โดยรูปข้อมูลจะไปจัดเก็บที่เมมโมรี่การ์ดแล้วนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 การออกแบบโปรแกรมตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอส

3.1.1.1. การออกแบบโปรแกรมตรวจจับสัญญาณโดยใช้หลักการ Direction of Arrival ในช่วงย่านความถี่ 1575.42 เมกะเฮิรตซ์ ในการออกแบบระบบตรวจจับสัญญาณรบกวน จะสามารถพบสถานการณ์ที่เป็นไปได้ตามสถานการณ์ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สถานการณ์ในการตรวจจับสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 3.2 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยจำลองการเกิดสถานการณ์ไว้ 3 สถานการณ์

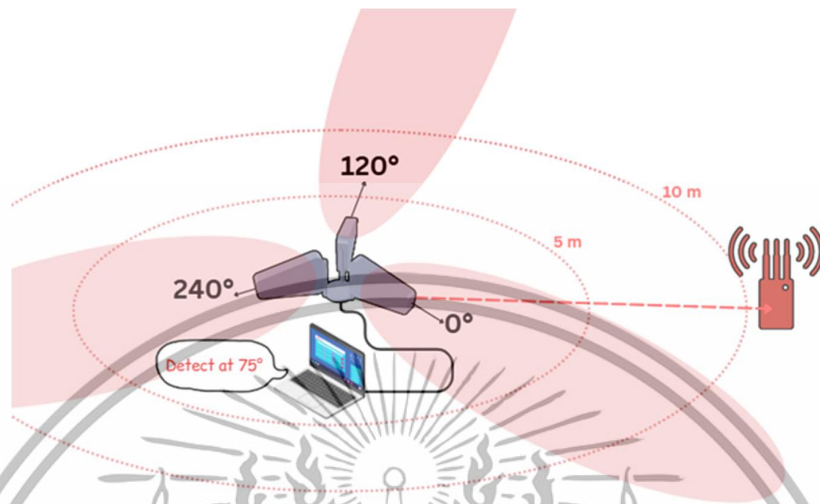
1) กรณีที่ตัวรบกวนสัญญาณอยู่ในระยะตรวจจับที่ตั้งค่าอัตราขยายไว้ที่ 50 เดซิเบล กำลังสัญญาณของอุปกรณ์รบกวนที่ตรวจจับได้มีกำลังเฉลี่ยไม่เกิน -30 เดซิเบล หรือระยะห่างโดยประมาณมากกว่า 10 เมตร จะแสดงผลตรวจพบการรบกวนสัญญาณในทิศทางที่อุปกรณ์ตรวจจับได้ และจะแสดงลูกศรชี้ทิศทางแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอยู่ดังรูปที่ 3.2

2) กรณีที่ตัวรบกวนสัญญาณอยู่ใกล้ หรือ น้อยกว่า 10 เมตรโดยประมาณกับอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนค่ากำลังสัญญาณของอุปกรณ์จะมีค่าที่สูงขึ้นให้ทำการปรับอัตราขยายบนอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนให้มีค่าลดลงเพื่อให้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่ตรวจจับได้พอที่จะสามารถสังเกตทิศทาง เพื่อหาตำแหน่งตัวรบกวนสัญญาณ

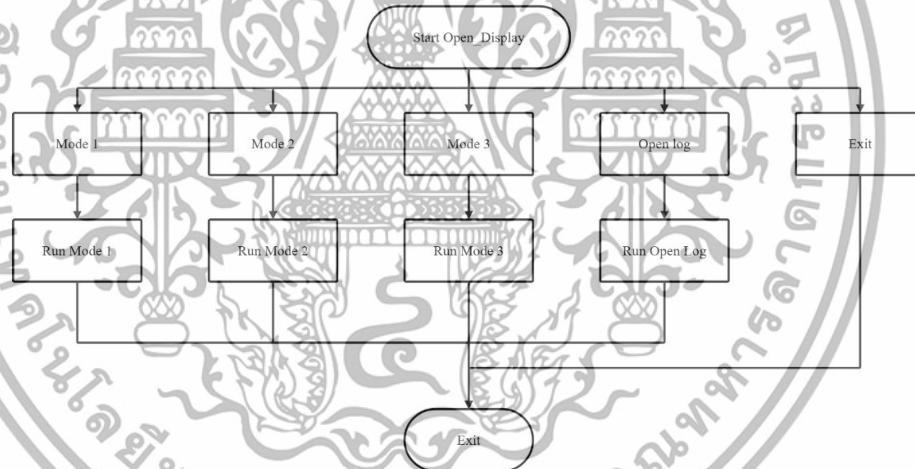
3) กรณีที่ตัวรบกวนสัญญาณไม่อยู่ในบริเวณที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนตรวจจับได้ หรือมีค่าเฉลี่ยกำลังสัญญาณโดยรอบไม่เกิน -35 เดซิเบล นั่นคือระบบไม่สามารถตรวจจับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้ จะให้อุปกรณ์แสดงการแจ้งเตือนในสถานะการณ์ปกติ

จากสถานการณ์ ทั้ง 3 สถานการณ์จะแสดงผลจะแสดงการแจ้งเตือนตามภาพจำลองเหตุการณ์ตามสถานะการณ์ ดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



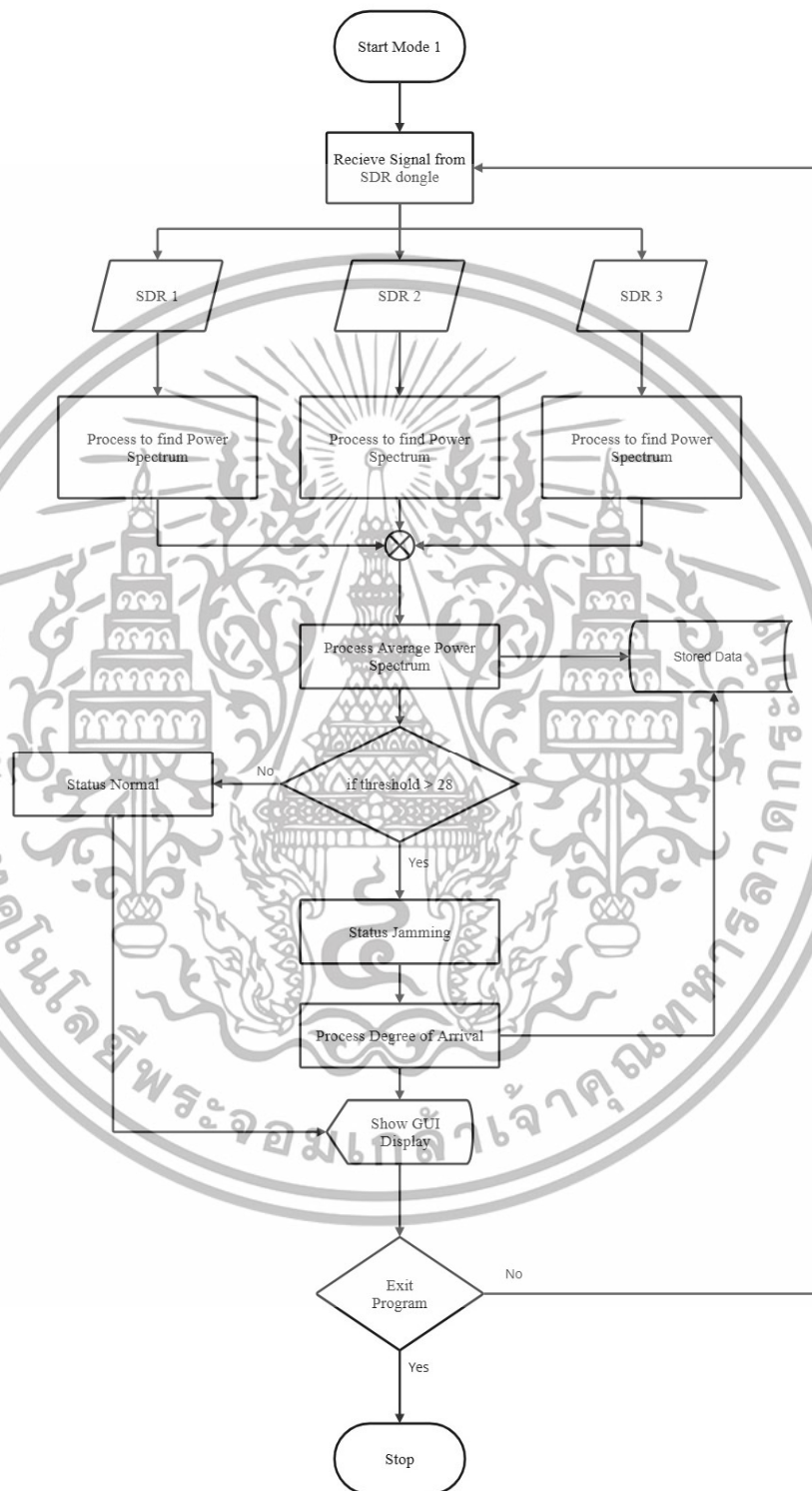
รูปที่ 3.3 การจำลองเหตุการณ์การทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน



รูปที่ 3.4 แผนผังการทำงานโปรแกรม Open Display ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน

จากสถานการณ์ที่เป็นไปได้ตามที่กล่าวมานั้น จะสามารถออกแบบแผนผังการทำงานของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนของย่านความถี่ L1 ดังรูปที่ 3.5

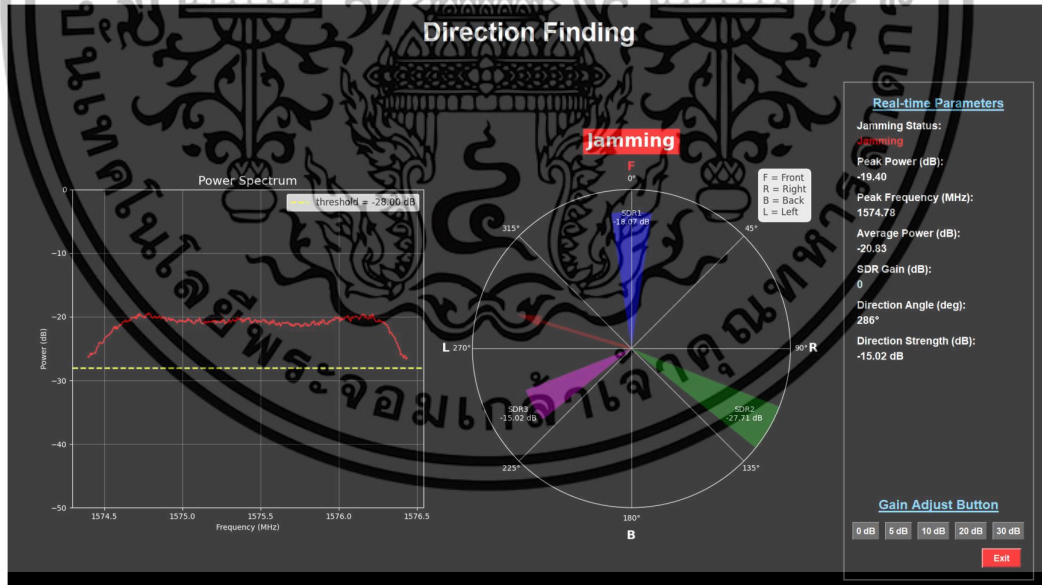
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แผนผังงานการทำงานของโปรแกรม Mode 1 ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน

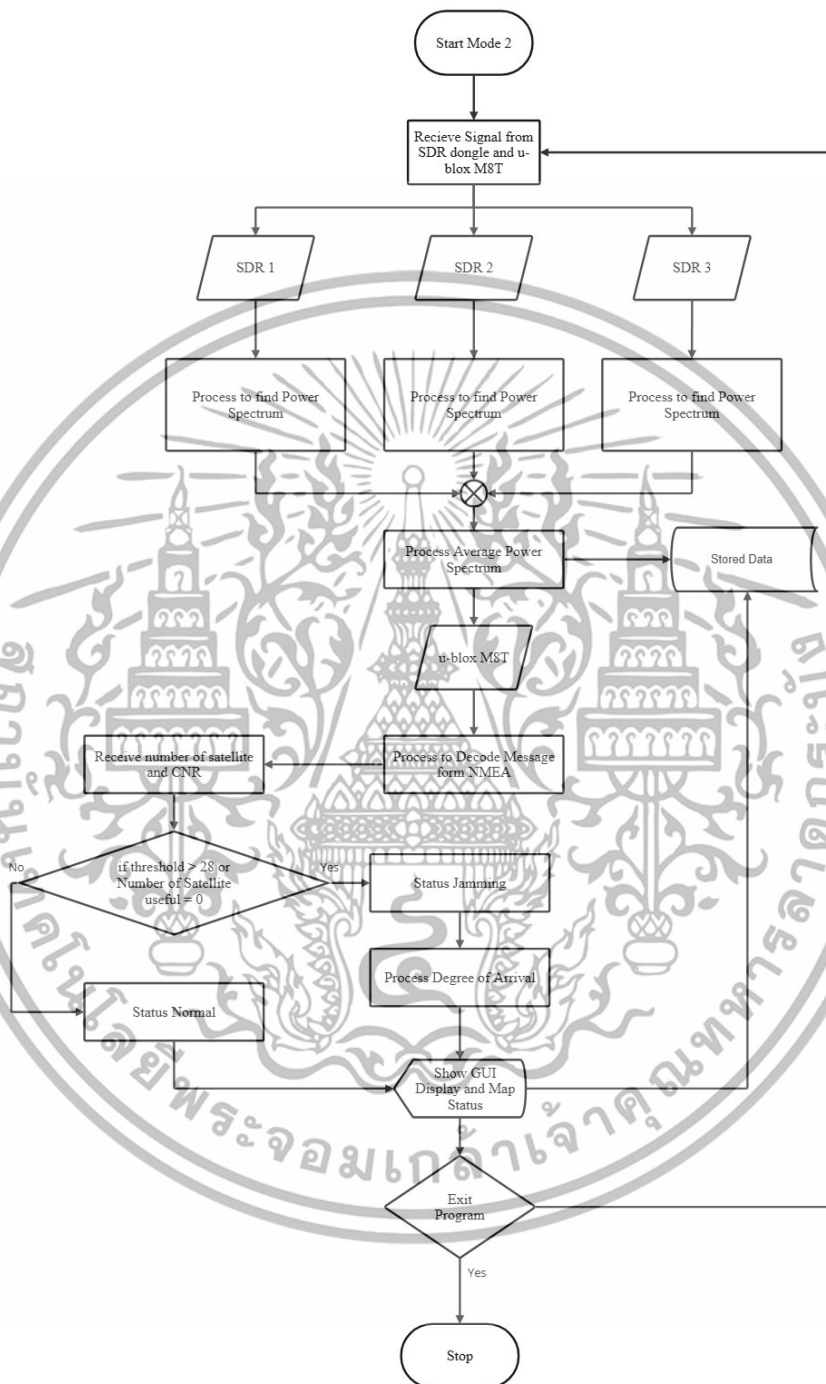
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 การทำงานของระบบเริ่มจากการรับค่ากำลังสัญญาณจากสายอากาศที่ทำงานร่วมกับ RTL-SDR Dongle มาปรับให้รับช่วงความถี่ในย่านความถี่ L1 และสัญญาณที่รับเข้ามาจะถูกส่งไปยัง SDR 1 (0 องศา) SDR 2 (120 องศา) และ SDR 3 (240 องศา) เพื่อทำการประมวลผลและทำการคำนวณค่ากำลังสัญญาณของสัญญาณในแต่ละทิศทาง เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณในแต่ละทิศทางแล้วนำทั้งหมดมารวมกันเพื่อนำค่ากำลังสัญญาณที่คำนวณได้จาก SDR ทั้งสามมาหาค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมกำลังสัญญาณ ซึ่งช่วยให้ข้อมูลมีความแม่นยำมากขึ้นและลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่ไม่เสถียร อีกทั้งยังช่วยในการวิเคราะห์ทิศทางและความแรงของสัญญาณ นำค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมกำลังสัญญาณที่ได้ไปประมวลผลเพื่อระบุมุมที่สัญญาณรบกวนส่งมาโดยหลักการ (Direction of Arrival หรือ DOA) ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถทราบทิศทาง จากนั้นจะทำการบันทึกข้อมูลลงบนฐานข้อมูลดังรูปที่ 3.9 และระบบจะแสดงข้อมูลที่ได้ผ่าน GUI (Graphical User Interface) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเห็นข้อมูลการตรวจจับทิศทางและความแรงของสัญญาณดังรูปที่ 3.5 เมื่อทำงานเสร็จแล้ว ระบบจะตรวจสอบว่าผู้ใช้ต้องการออกจากโปรแกรมหรือไม่ ถ้าไม่ ระบบจะวนกลับไปทำการรับสัญญาณจาก SDR dongle อีกครั้งเพื่อทำการประมวลผลใหม่ หากผู้ใช้เลือกที่จะออกจากโปรแกรม ระบบจะหยุดการทำงาน



รูปที่ 3.6 การทำงานสำหรับบอกทิศทางสัญญาณรบกวนบน GUI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แผนผังงานการทำงานโปรแกรม Mode 2 ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.2 การทำงานของระบบเริ่มจากการรับค่ากำลังสัญญาณจากสายอากาศ ที่ทำงานร่วมกับ RTL-SDR Dongle มาปรับให้รับช่วงความถี่ในย่านความถี่ L1 และสัญญาณที่รับเข้ามาจะถูกส่งไปยัง SDR 1 (0 องศา) SDR 2 (120 องศา) และ SDR 3 (240 องศา) เพื่อทำการประมวลผลและทำการคำนวณค่ากำลังสัญญาณของสัญญาณในแต่ละทิศทาง เมื่อได้ค่ากำลังสัญญาณในแต่ละทิศทางแล้วนำทั้งหมดมารวมกันเพื่อนำค่ากำลังไฟที่คำนวณได้จาก SDR ทั้งสามมาหาค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมกำลังสัญญาณ ซึ่งช่วยให้ข้อมูลมีความแม่นยำมากขึ้นและลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่ไม่เสถียร อีกทั้งยังช่วยในการวิเคราะห์ทิศทางและความแรงของสัญญาณ นำค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมกำลังสัญญาณที่ได้ไปประมวลผลเพื่อระบุมุมที่สัญญาณรบกวนส่งมาโดยหลักการ (Direction of Arrival หรือ DOA) จากนั้นรับข้อมูล NMEA จากตัวรับสัญญาณ u-blox M8T เพื่อรับข้อมูลต่าง ๆ จากดาวเทียมเช่น คุณภาพของดาวเทียมและจำนวนดาวเทียมที่ใช้ ซึ่งช่วยให้ระบบสามารถทราบทิศทางและคุณภาพการใช้งานของดาวเทียม จากนั้นจะทำการบันทึกข้อมูลลงบนฐานข้อมูลดังรูปที่ 3. และระบบจะแสดงข้อมูลที่ได้ผ่าน GUI (Graphical User Interface) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเห็นข้อมูลการตรวจจับทิศทางและความแรงของสัญญาณดังรูปที่ 3. เมื่อทำงานเสร็จแล้ว ระบบจะตรวจสอบว่าผู้ใช้ต้องการออกจากโปรแกรมหรือไม่ ถ้าไม่ ระบบจะวนกลับไปทำการรับสัญญาณจาก SDR dongle อีกครั้งเพื่อทำการประมวลผลใหม่ หากผู้ใช้เลือกที่จะออกจากโปรแกรม ระบบจะหยุดการทำงาน

3.1.1.3 การถอดรหัสข้อความ NMEA ที่รับสัญญาณจากตัวรับสัญญาณ u-blox M8T เพื่อนำข้อมูลและคุณภาพของดาวเทียมที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนนำมาเป็นส่วนในการตัดสินใจการแจ้งเตือนว่าระบบมีการรบกวนหรือไม่ โดยเริ่มจากเปิดตัวรับสัญญาณ u-blox M8T เชื่อมต่อกับสายอากาศ AN-105L-GNSS จากนั้นเขียนโปรแกรมสำหรับคัดกรองข้อความเฉพาะดาวเทียมที่เป็น GPS จากนั้นนำข้อความที่คัดกรองมาถอดรหัสตามประเภทข้อความโดยจะเลือกใช้เป็น \$GNGSA \$GNGSV และ \$GNGGA แสดงดังรูปที่ 3.8

3.1.1.4 การบันทึกข้อมูลและแสดงผล การแสดงรายละเอียดข้อมูลที่บันทึกไว้ โดยเมื่อเริ่มต้นโปรแกรมจะทำการสร้างไฟล์เตอร์สำหรับเก็บไฟล์หากพบว่ามีอยู่แล้วจะเริ่มบันทึกต่อโดยจะมีการกำหนดชื่อและเวลาโดยเมื่อทำการเปิดโปรแกรมเพื่อดูข้อมูลจากแสดงดังรูปที่ 3.9

```

Number of SVs used for Navigation: 8 HDOP: 1.61 VDOP: 0.83 PDOP: 1.38
$GNGSA,A,3,82,69,67,81,,,,,,,,,1.61,0.83,1.38*16
$GPGSV,4,1,13,05,20,050,26,10,01,277,,11,11,123,09,12,06,168,09*70
Satellite CNR Data:
Satellite ID: 05, Elevation: 20°, Azimuth: 050°, CNR: 26 dB
Satellite ID: 10, Elevation: 01°, Azimuth: 277°, CNR: 0 dB
Satellite ID: 11, Elevation: 11°, Azimuth: 123°, CNR: 09 dB
$GPGSV,4,2,13,13,25,033,24,15,56,008,18,18,36,339,28,20,04,079,*7F
Satellite ID: 13, Elevation: 25°, Azimuth: 033°, CNR: 24 dB
Satellite ID: 15, Elevation: 56°, Azimuth: 008°, CNR: 18 dB
Satellite ID: 18, Elevation: 36°, Azimuth: 339°, CNR: 28 dB
$GPGSV,4,3,13,23,24,308,25,24,47,143,07,25,08,203,10,29,59,235,*7F
Satellite ID: 23, Elevation: 24°, Azimuth: 308°, CNR: 25 dB
Satellite ID: 24, Elevation: 47°, Azimuth: 143°, CNR: 07 dB
Satellite ID: 25, Elevation: 08°, Azimuth: 203°, CNR: 10 dB
$GPGSV,4,4,13,32,00,223,*49
$GLGSV,2,1,07,67,23,010,25,68,51,309,03,69,26,248,23,78,04,134,*6D
$GLGSV,2,2,07,81,41,141,14,82,76,038,18,83,37,344,*5A
$GNGLL,1,343.65324,N,10046.55360,E,171542.00,A,A*76
$GNZDA,171542.00,03,02,2025,00,00*78
$GNRMC,171543.00,A,1343.65324,N,10046.55357,E,0.023,,030225,,A*6D
$GNWTG,,T,,M,0.023,N,0.043,K,A*3B
$GNGGA,171543.00,1343.65324,N,10046.55357,E,1,12,0.97,-25.0,M,-27.0,M,*79
$GNGSA,A,3,11,25,18,05,12,13,15,23,,,,,,,,,1.93,0.97,1.67*16
    
```

รูปที่ 3.8 การถอดรหัสข้อความ NMEA โปรแกรม Mode 2 ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน

Date	Time	Jamming Status	Peak Power (dB)	Peak Frequency (Mh)	Average Power (dB)	±DR Gain (dB)	Direction Angle (deg)	Direction Strength (c)
2025-02-22	01:49:40	Normal	-31.11	1575.42	-33.64	0	-	-
2025-02-22	01:49:42	Normal	-30.98	1575.42	-33.62	0	-	-
2025-02-22	01:49:43	Normal	-31.22	1575.42	-33.64	0	-	-
2025-02-22	01:49:44	Normal	-30.63	1575.42	-33.63	0	-	-
2025-02-22	01:49:45	Normal	-30.82	1575.42	-33.64	0	-	-
2025-02-22	01:49:47	Normal	-31.03	1575.42	-33.62	0	-	-
2025-02-22	01:49:48	Normal	-30.66	1575.42	-33.65	0	-	-
2025-02-22	01:49:49	Normal	-31.33	1575.42	-33.66	0	-	-
2025-02-22	01:49:51	Jamming	-28.82	1576.21	-30.42	0	247°	-19.58 dB
2025-02-22	01:49:52	Jamming	-27.96	1576.14	-29.47	0	234°	-7.68 dB
2025-02-22	01:49:53	Jamming	-30.84	1575.42	-33.42	0	273°	-27.30 dB
2025-02-22	01:49:54	Normal	-31.09	1575.42	-33.65	0	-	-
2025-02-22	01:49:56	Jamming	-30.81	1575.42	-33.63	0	236°	-12.30 dB
2025-02-22	01:49:57	Jamming	-25.60	1574.80	-26.97	0	320°	-24.42 dB
2025-02-22	01:49:58	Jamming	-22.15	1574.75	-23.54	0	256°	-17.14 dB
2025-02-22	01:49:59	Jamming	-19.30	1574.76	-20.90	0	293°	-15.70 dB
2025-02-22	01:50:01	Jamming	-19.40	1574.78	-20.83	0	286°	-15.02 dB
2025-02-22	01:50:02	Jamming	-17.77	1574.75	-19.28	0	352°	-16.76 dB
2025-02-22	01:50:03	Normal	-30.87	1575.42	-33.29	0	-	-
2025-02-22	01:50:05	Normal	-30.94	1575.42	-33.64	0	-	-

รูปที่ 3.9 หน้าต่างการแสดงผลข้อมูลที่บันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1.5 การออกแบบโปรแกรมตรวจจับสัญญาณโดยใช้หลักการ Multiple Signal Classification ในช่วงย่านความถี่ 1575.42 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 3.10 แผนผังงานการทำงานของโปรแกรม Mode 3 ของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 3.10 แสดงการทำงานของโปรแกรมตรวจจับสัญญาณโดยใช้หลักการ Multiple Signal Classification โดยเริ่มต้นตั้งค่าตัวแปรในบล็อก Variable ที่จำเป็นใช้คำนวณได้แก่ ความถี่ จำนวนของสายอากาศ ความเร็วแสง ความยาวคลื่น มุมที่ต้องการสแกน ระยะห่างแต่ละสายอากาศ จำนวนสัญญาณที่คาดว่าจะรับได้ และจำนวนตัวอย่างข้อมูลจาก USRP จากนั้นเริ่มต้นเก็บข้อมูลจาก USRP เพื่อนำไปสร้าง Covariance Matrix และเข้าบล็อกเพื่อนำไปคำนวณ Music spectrum เพื่อประมาณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณจากจุดที่สูงที่สุดจาก Music spectrum

### 3.1.2 การออกแบบอุปกรณ์ตรวจจ็บบรรณสัญญาณ

การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์และการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบตรวจจ็บบรรณสัญญาณรบกวน คณะผู้จัดทำได้ทำการออกแบบออกแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบตรวจจ็บบรรณสัญญาณรบกวนซึ่งจะเป็นการจำลองการติดตั้งของสายอากาศให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การออกแบบโครงสร้างและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบตรวจจ็บบรรณสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้จะประกอบไปด้วย สายอากาศ Directional ที่มีการจัดทิศทางสำหรับการค้นหาสัญญาณสร้างมีการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส RTL-SDR กับอุปกรณ์ประมวลผลด้วย SMA Plug to N-Type Plug และได้ทำการสร้างตัวต้นแบบอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.12



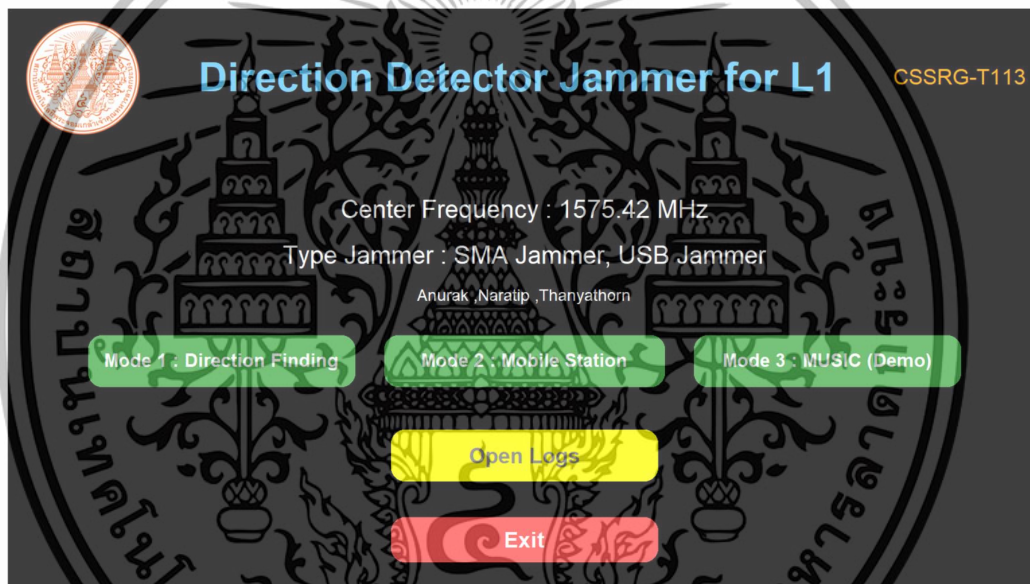
รูปที่ 3.12 การวางอุปกรณ์ทั้งหมดของระบบตรวจจ็บบรรณสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 การออกแบบ GUI สำหรับการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในการควบคุมระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนที่ทำงานบนย่านความถี่ L1 (1575.42 MHz) โดยตัวโปรแกรมรองรับโหมดการทำงานที่แตกต่างกัน รวมถึงการแสดงผลข้อมูลที่ได้จากการตรวจจับ

หน้าจอหลักสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนถูกออกแบบมาเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกโหมดการทำงานของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนได้อย่างสะดวก โดยมีการแสดงผลข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับระบบ และรองรับการเข้าถึง log file เพื่อตรวจสอบข้อมูลการทำงานย้อนหลัง แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 หน้าจอหลักสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 3.13 โครงสร้างของหน้าจอหลักประกอบด้วย

- ส่วนกลาง (Content Area) แสดงข้อมูลพื้นฐานของระบบ ได้แก่ ความถี่กลาง (Center Frequency) ของระบบ ชนิดของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Type of Jammer) ที่รองรับ และรายชื่อผู้พัฒนา

- ส่วนหัว (Header) แสดงโลโก้สถาบันทางด้านซ้ายของหน้าจอ ตรงกลางเป็นชื่อของระบบ และมุมขวาของหน้าจอแสดงชื่อหน่วยงาน

- ปุ่มควบคุมหลัก ระบบมีการออกแบบปุ่มควบคุมที่เป็นมิตรต่อผู้ใช้งาน

- 1) แถวที่ 1 ปุ่มโหมดการทำงาน ประกอบด้วยปุ่ม 3 ปุ่ม รองรับ 3 โหมดการทำงาน ได้แก่ Mode 1: Direction Finding ใช้สำหรับตรวจจับทิศทางของสัญญาณรบกวน Mode 2

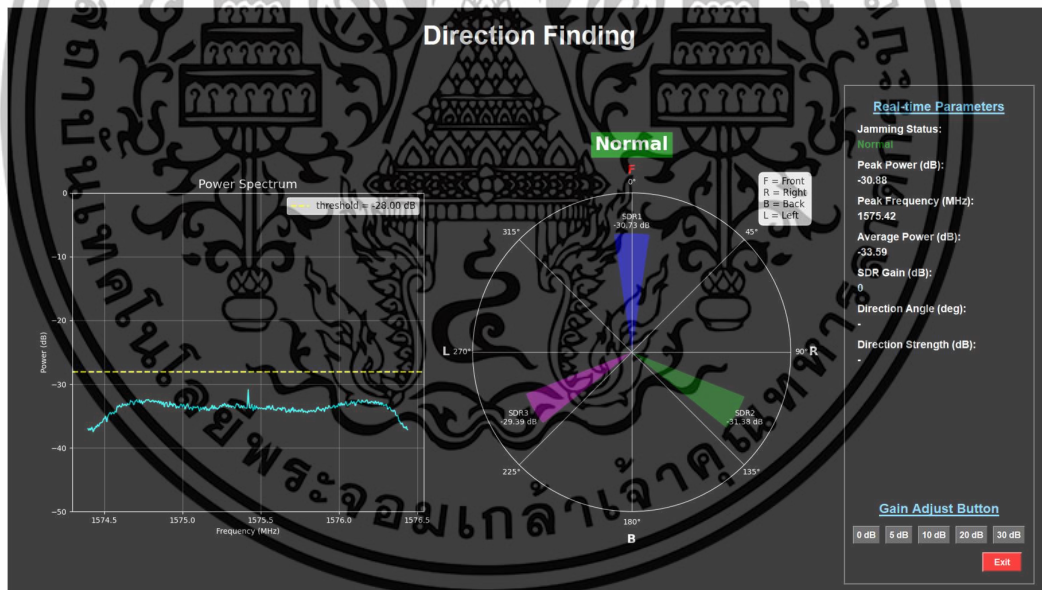
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

: Mobile Station ใช้สำหรับโหมดสถานีเคลื่อนที่ Mode 3 : MUSIC (Demo) ใช้สำหรับทดสอบและ  
 สาธิตการทำงานของอัลกอริทึม MUSIC ในการตรวจจับทิศทาง

2) แลวที่ 2 ปุ่ม Open Logs ปุ่มนี้ใช้สำหรับเปิดดูบันทึกข้อมูลหรือ log file  
 ของระบบ

3) แลวที่ 3 ปุ่ม Exit ปุ่มนี้ใช้สำหรับออกจากโปรแกรม

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิด  
 สัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์ (Mode 1: Direction Finding) ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์  
 และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ L1 (1575.42 MHz) โดยรองรับ  
 การใช้งาน RTL-SDR จำนวน 3 ตัว เพื่อวิเคราะห์ชนิดของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนด้วยกราฟ  
 สเปกตรัมกำลังของสัญญาณ และคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนด้วยกราฟพิกัดเชิง  
 ขั้ว โดยระบบสามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับการวิเคราะห์และ  
 ตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ  
 รบกวนแบบเรียลไทม์

จากรูปที่ 3.14 โครงสร้างของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับ  
 ทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์ ประกอบด้วย

- ส่วนหัวของหน้าจอ (Title Section) อยู่ด้านบนสุดของหน้าจอ แสดงชื่อโหมดการ  
 ทำงาน

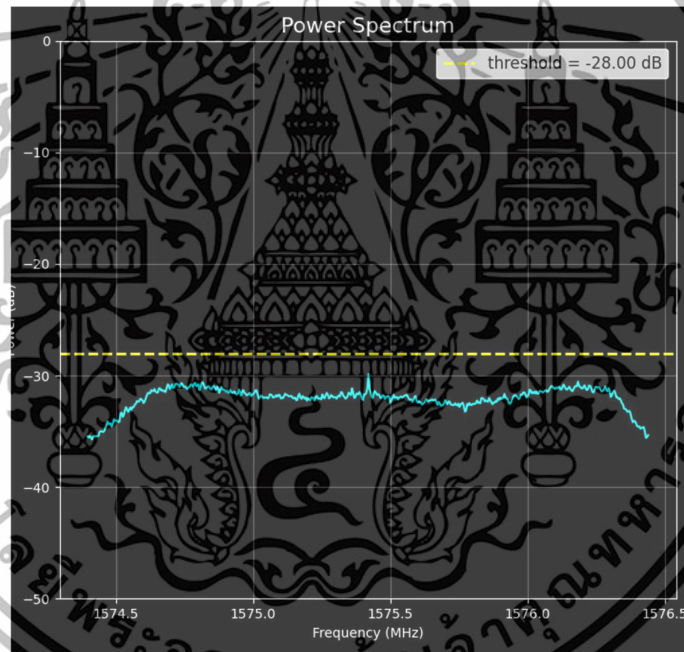
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนกลางของหน้าจอ (Main Display Area) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแสดงกราฟ และ แถบแสดงค่าพารามิเตอร์

1) ส่วนที่ 1 ส่วนแสดงกราฟ ประกอบด้วยกราฟหลัก 2 ประเภท ได้แก่ กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณและกราฟพิกัดเชิงขั้ว

2) ส่วนที่ 2 แถบแสดงค่าพารามิเตอร์ แถบนี้ใช้สำหรับแสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญของระบบ และมีปุ่มควบคุมเพื่อปรับอัตราขยาย

กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณเป็นกราฟที่ใช้ในการแสดงการกระจายของพลังงานของสัญญาณในแต่ละความถี่ ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณที่ได้รับและระบุประเภทของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ

จากรูปที่ 3.15 กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ ประกอบด้วย

- แกนนอนและแกนตั้งของกราฟ กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณแสดงข้อมูลในระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate System) โดยมี แกนนอน (X-axis) เป็นความถี่ (Frequency) แสดงช่วงความถี่ที่ถูกวิเคราะห์ โดยในระบบนี้ความถี่ที่สนใจคือ 1575.42 MHz ซึ่งเป็นความถี่ของระบบ GPS L1 หน่วยที่ใช้แสดงค่าความถี่คือ เมกะเฮิรตซ์ (MHz) และแกนตั้ง (Y-axis) เป็นกำลังของสัญญาณในหน่วยเดซิเบล (Power in dB) แสดงกำลังของสัญญาณที่ได้รับจากตัวรับสัญญาณ RTL-SDR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เส้นกราฟสเปกตรัม เป็นเส้นที่แสดงค่ากำลังของสัญญาณในแต่ละความถี่
- เส้นค่าขีดจำกัด (Threshold) เป็นเส้นประสีเหลืองที่ใช้เป็นค่าขีดจำกัด

(Threshold) ในการตัดสินใจสถานะการรบกวนสัญญาณ

กราฟพิกัดเชิงขั้วเป็นกราฟที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ทิศทางและค่ากำลังของสัญญาณ โดยมีลักษณะเป็นกราฟวงกลมที่แบ่งออกเป็นมุมต่าง ๆ ซึ่งช่วยให้สามารถระบุแหล่งที่มาของสัญญาณรบกวนได้อย่างแม่นยำ กราฟพิกัดเชิงขั้วแสดงดังรูปที่ 3.16

จากรูปที่ 3.16 กราฟพิกัดเชิงขั้ว ประกอบด้วย

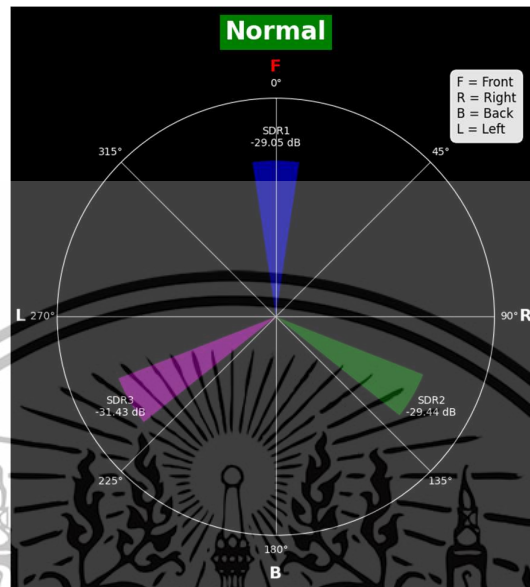
- แกนรัศมีและแกนมุม กราฟพิกัดเชิงขั้วใช้ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinate System) โดยมีแกนรัศมี (Radial Axis) แสดงระดับกำลังของสัญญาณที่ตรวจพบในหน่วยเดซิเบล (dB) และแกนมุม (Angular Axis) ใช้สำหรับกำหนดทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน โดยมี 4 ตำแหน่งหลักที่แสดงไว้เพื่อช่วยในการระบุทิศทาง ได้แก่ 0 องศา แสดงถึงทิศทางด้านหน้าของยานพาหนะ 90 องศา แสดงถึงทิศทางด้านขวาของยานพาหนะ 180 องศา แสดงถึงทิศทางด้านหลังของยานพาหนะ และ 270 องศา แสดงถึงทิศทางด้านซ้ายของยานพาหนะ

- ลูกศรชี้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน หากตรวจพบสัญญาณรบกวน ระบบจะคำนวณทิศทางแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่ตรวจพบและแสดงเป็นลูกศรสีแดงบนกราฟ

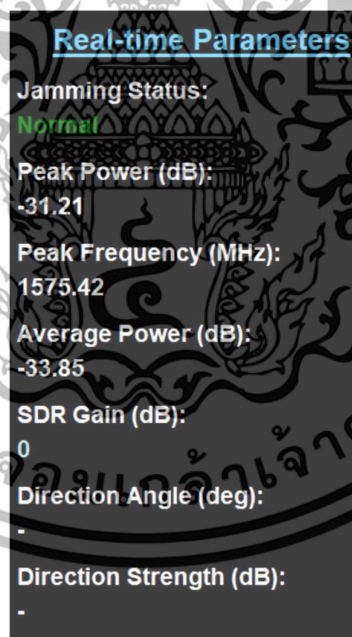
- แถบแจ้งสถานะการรบกวนสัญญาณ แสดงสถานะ 2 รูปแบบ ได้แก่ สถานะ Normal คือสถานะปกติ ไม่มีสัญญาณรบกวน และสถานะ Jamming คือระบบตรวจพบสัญญาณรบกวน

แถบแสดงค่าพารามิเตอร์เป็นส่วนที่ใช้แสดงข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณแบบเรียลไทม์ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณที่ตรวจพบได้อย่างสะดวก ข้อมูลทั้งหมดจะถูกอัปเดตอย่างต่อเนื่องเพื่อให้การติดตามสัญญาณเป็นไปอย่างแม่นยำ แถบแสดงค่าพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



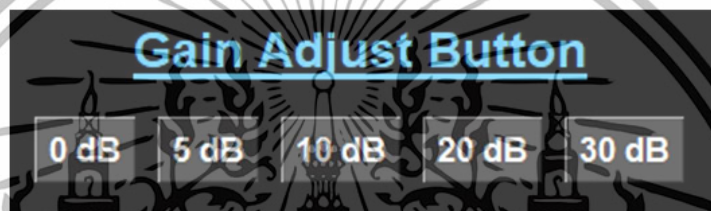
รูปที่ 3.16 กราฟพิกัดเชิงขั้ว



รูปที่ 3.17 แถบแสดงค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ รูปที่ 3.17 แถบแสดงค่าพารามิเตอร์ มีรายละเอียดดังนี้ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการวิเคราะห์สัญญาณรบกวน ได้แก่ สถานะการรบกวนสัญญาณ ค่ากำลังสัญญาณสูงสุด ความถี่ ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณ อัตราขยายของ SDR ทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ ปุ่มปรับอัตราขยายเป็นองค์ประกอบหนึ่งในแถบพารามิเตอร์ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถ ควบคุมค่าการขยายสัญญาณของตัวรับสัญญาณ RTL-SDR โดยการปรับอัตราขยาย (Gain) จะมีผลต่อความแรงของสัญญาณที่ตรวจจับได้ ปุ่มปรับอัตราขยายแสดงดังรูปที่ 3.18

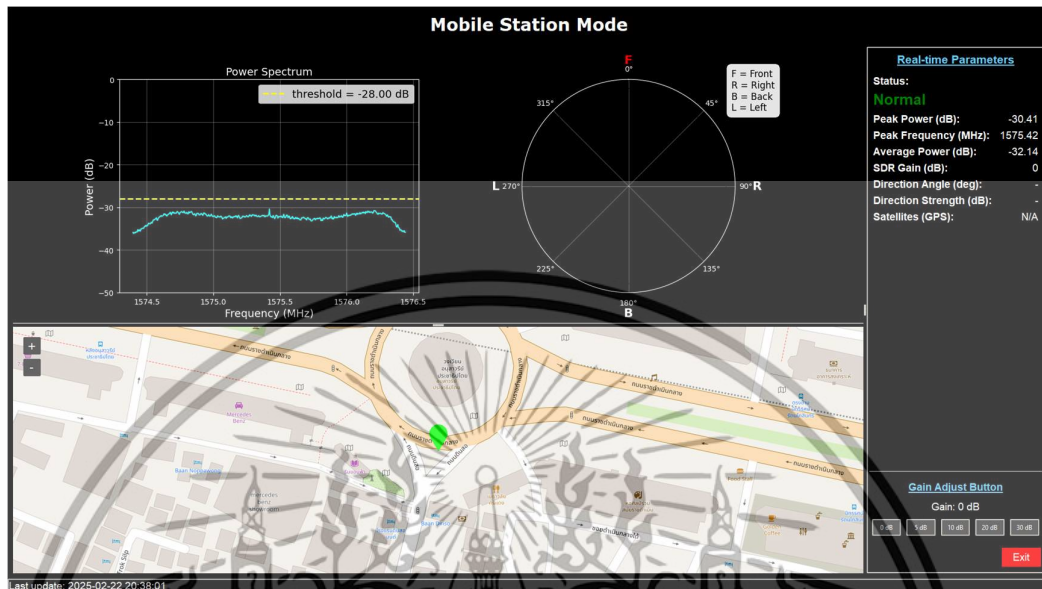


รูปที่ 3.18 ปุ่มปรับอัตราขยาย

จากรูปที่ 3.18 ปุ่มปรับอัตราขยาย มีรายละเอียดปุ่มปรับอัตราขยายแต่ละปุ่มมีค่าอัตราขยายที่กำหนดไว้ ได้แก่ 0 5 10 20 และ 30 เดซิเบล ตามลำดับ

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Mode 2: Mobile Station Mode) ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการตรวจจับสัญญาณรบกวนและติดตามพิกัดตำแหน่ง GPS แบบเรียลไทม์ โดยรองรับการใช้งาน RTL-SDR จำนวน 3 ตัว ในการวิเคราะห์และตรวจจับแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนผ่านกราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณและกราฟพิกัดเชิงขั้ว นอกจากนี้ยังมีการแสดงข้อมูลพิกัดตำแหน่งบนแผนที่แบบเรียลไทม์ เพื่อให้สามารถติดตามตำแหน่งของอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำ ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับสถานีเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับสถานีเคลื่อนที่  
จากรูปที่ 3.19 โครงสร้างของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับสถานีเคลื่อนที่ ประกอบด้วย  
ส่วนหัวของหน้าจอ (Title Section) อยู่ด้านบนสุดของหน้าจอ แสดงชื่อ  
โหมดการทำงาน

- ส่วนกลางของหน้าจอ (Main Display Area) แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก  
ได้แก่ ส่วนแสดงกราฟ ระบบแสดงแผนที่แบบเรียลไทม์ และแถบแสดงค่าพารามิเตอร์

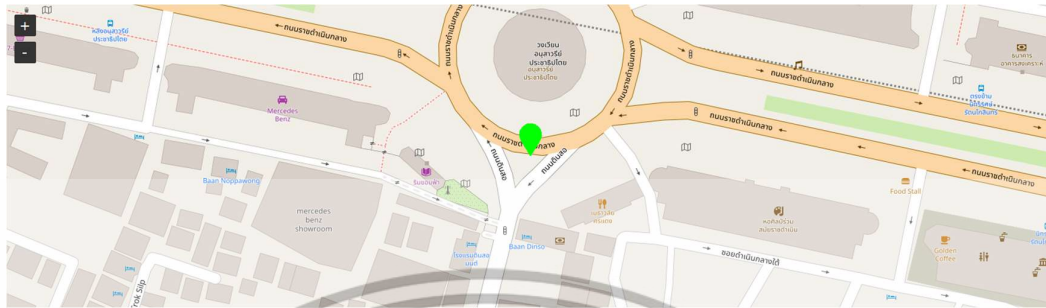
1) ส่วนที่ 1 ส่วนแสดงกราฟ ประกอบด้วยกราฟหลัก 2 ประเภท  
ได้แก่ กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ และกราฟพิกัดเชิงขั้ว

2) ส่วนที่ 2 ระบบแสดงแผนที่แบบเรียลไทม์

3) ส่วนที่ 3 แถบแสดงค่าพารามิเตอร์ แถบนี้ใช้สำหรับแสดง  
ค่าพารามิเตอร์สำคัญของระบบ และมีปุ่มควบคุมเพื่อปรับอัตราขยาย

ระบบแสดงแผนที่แบบเรียลไทม์ (Real-time Map View) ในโหมดสถานีเคลื่อนที่  
(Mobile Station Mode) ถูกออกแบบมาเพื่อติดตามพิกัดตำแหน่งของอุปกรณ์แบบเรียลไทม์ โดย  
อาศัยข้อมูลจากโมดูล GPS ระบบพิกัดที่ได้รับจะถูกนำมาแสดงผลบนแผนที่ในรูปของ มาร์กเกอร์ ซึ่ง  
สามารถเปลี่ยนสีตามระดับกำลังของสัญญาณที่ตรวจพบ ระบบแสดงแผนที่แบบเรียลไทม์แสดงดังรูป  
ที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ระบบแสดงแผนที่แบบเรียลไทม์

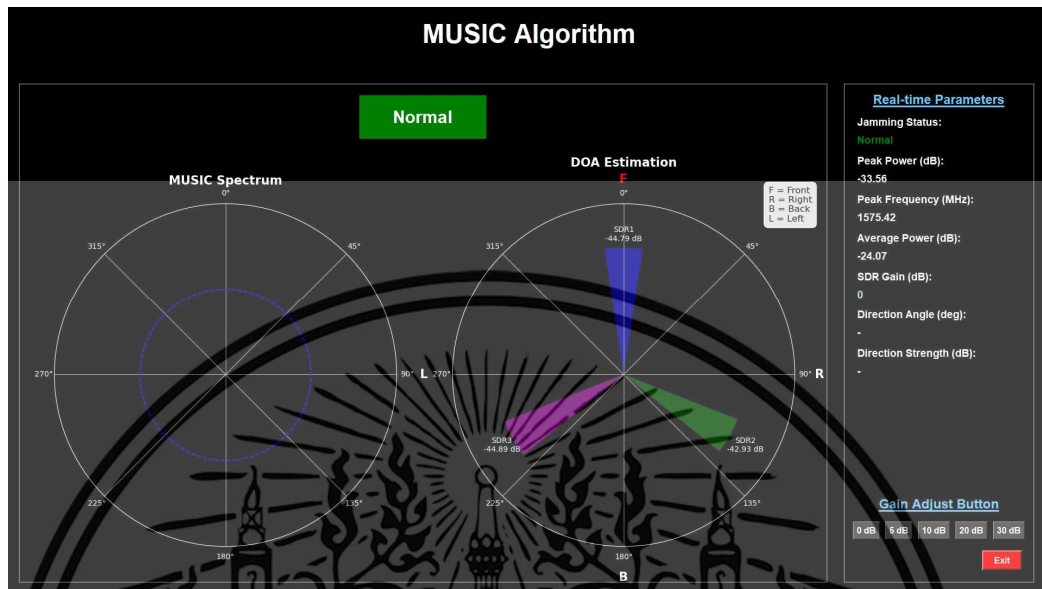
จากรูปที่ 3.20 โครงสร้างของระบบแสดงแผนที่แบบเรียลไทม์ ประกอบด้วย

- แผนที่หลัก (Main Map View) แสดงตำแหน่งปัจจุบันของสถานีเคลื่อนที่ โดยใช้ข้อมูลจากโมดูล GPS ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่จะถูกอัปเดตอย่างต่อเนื่องตามข้อมูลที่ได้รับจากโมดูล GPS

- มาร์กเกอร์ตำแหน่งปัจจุบัน (Location Marker) ระบบแสดง มาร์กเกอร์ (Marker) บนแผนที่เพื่อบ่งชี้ตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ ตำแหน่งของมาร์กเกอร์จะถูกปรับเปลี่ยนตามค่าพิกัดที่ได้รับจาก โมดูล GPS

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับโหมดอัลกอริทึม MUSIC (Mode 3 : MUSIC (Demo)) ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์กำลังของสัญญาณที่กระจายออกในแต่ละทิศทางและตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ผ่านอัลกอริทึม MUSIC (Multiple Signal Classification Algorithm) ในย่านความถี่ L1 (1575.42 MHz) โดยรองรับการใช้งาน RTL-SDR จำนวน 3 ตัว เพื่อรับข้อมูลสัญญาณ และคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน รวมถึงช่วยให้สามารถมองเห็นรูปแบบการแผ่รังสีในลักษณะวงกลมรอบสายอากาศ ระบบสามารถแสดงผลแบบเรียลไทม์ ผ่านกราฟสเปกตรัม MUSIC Spectrum และกราฟพิกัดเชิงขั้ว ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับโหมดอัลกอริทึม MUSIC แสดงดังรูปที่ 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับโหมคัลกอริทึม MUSIC

จากรูปที่ 3.21 โครงสร้างของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับโหมคัลกอริทึม MUSIC ประกอบด้วย

- ส่วนหัวของหน้าจอ (Title Section) อยู่ด้านบนสุดของหน้าจอ แสดงชื่อโหมคการทำงาน

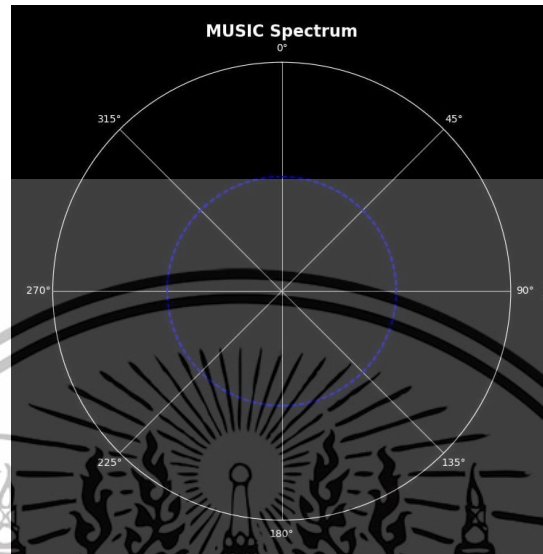
- ส่วนกลางของหน้าจอ (Main Display Area) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแสดงกราฟ และแถบแสดงค่าพารามิเตอร์

1) ส่วนที่ 1 ส่วนแสดงกราฟ ประกอบด้วยกราฟหลัก 2 ประเภท ได้แก่ กราฟสเปกตรัม MUSIC และกราฟพิกัดเชิงขั้ว

2) ส่วนที่ 2 แถบแสดงค่าพารามิเตอร์ แถบนี้ใช้สำหรับแสดงค่าพารามิเตอร์สำคัญของระบบ และมีปุ่มควบคุมเพื่อปรับอัตราขยาย

กราฟสเปกตรัม MUSIC เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้แสดงผลลัพธ์ของอัลกอริทึม MUSIC (Multiple Signal Classification Algorithm) ซึ่งใช้ในการระบุทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนที่ตรวจพบ โดยข้อมูล MUSIC ทำงานโดยการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงพื้นที่ของสัญญาณที่ได้รับจาก USRP จัดเรียงในรูปแบบ เพื่อคำนวณค่ามุมของแหล่งกำเนิดสัญญาณ กราฟสเปกตรัม MUSIC แสดงดังรูปที่ 3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

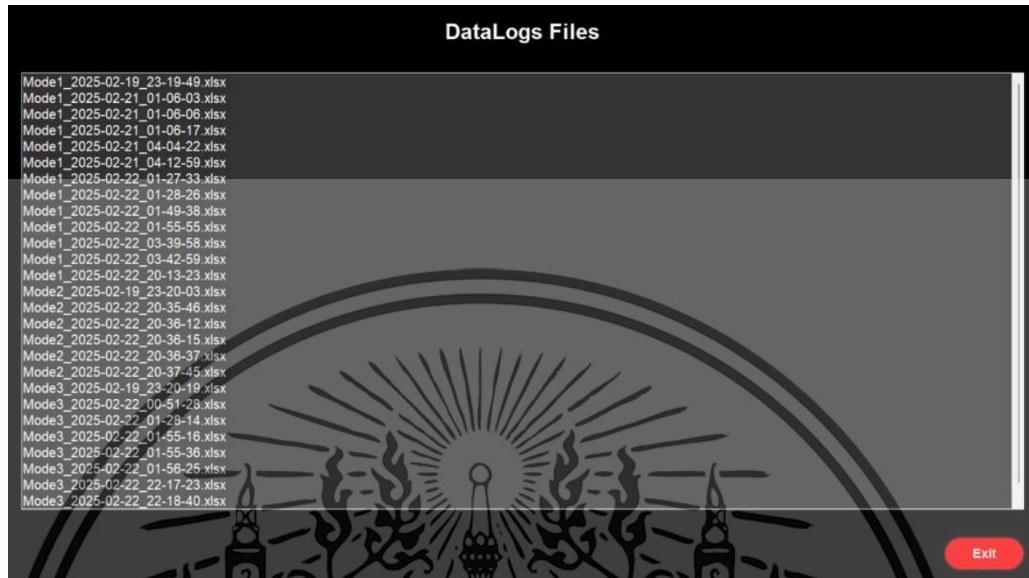


รูปที่ 3.22 กราฟสเปกตรัม MUSIC

จากรูปที่ 3.22 โครงสร้างของกราฟสเปกตรัม MUSIC ประกอบด้วย แกนรัศมีและแกนมุม กราฟสเปกตรัม MUSIC ใช้ระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinate System) โดยมีแกนรัศมี (Radial Axis) เป็นค่ากำลังของสัญญาณที่ได้รับในแต่ละทิศทางในหน่วยเดซิเบล (dB) และแกนมุม (Angular Axis) ใช้สำหรับกำหนดทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน โดยมี 4 ตำแหน่งหลักที่แสดงไว้เพื่อช่วยในการระบุทิศทาง ได้แก่ 0 องศา แสดงถึงทิศทางด้านหน้าของยานพาหนะ 90 องศา แสดงถึงทิศทางด้านขวาของยานพาหนะ 180 องศา แสดงถึงทิศทางด้านหลังของยานพาหนะ และ 270 องศา แสดงถึงทิศทางด้านซ้ายของยานพาหนะ

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล DataLogs ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยให้ผู้ใช้สามารถเรียกดูไฟล์บันทึกข้อมูล ที่เก็บอยู่ในรูปแบบไฟล์ Excel ได้อย่างสะดวก โดยระบบสามารถแสดงรายการไฟล์ที่บันทึกไว้ในโฟลเดอร์ DataLogs และเปิดดูข้อมูลภายในไฟล์ Excel ได้โดยตรง ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล แสดงดังรูปที่ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 หน้าต่างหลักของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล DataLogs

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล DataLogs ประกอบด้วย 2 หน้าต่าง ได้แก่

- หน้าต่างหลัก (Main Window) ใช้สำหรับแสดงรายการไฟล์บันทึกข้อมูลที่อยู่ในโฟลเดอร์ DataLogs แสดงดังรูปที่ 3.23

- หน้าต่างแสดงเนื้อหาของไฟล์ (Excel File Viewer) ใช้แสดงข้อมูลภายในไฟล์ Excel ในรูปแบบตาราง แสดงดังรูปที่ 3.23

จากรูปที่ 3.23 หน้าต่างหลักของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล DataLogs ประกอบด้วย

1) กล้องแสดงรายการ เพื่อแสดงรายการไฟล์ Excel ที่อยู่ในโฟลเดอร์ DataLogs โดยไฟล์บันทึกข้อมูลใช้รูปแบบชื่อไฟล์ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถค้นหาได้ง่ายด้วยการระบุวันที่และเวลาที่บันทึก

2) ส่วนหัวของหน้าจอ (Title Section) อยู่ด้านบนสุดของหน้าจอ แสดงชื่อโหมมคการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างชื่อไฟล์บันทึกข้อมูล ประกอบด้วย 3 Mode คือ โหมดที่ใช้บันทึกข้อมูล ได้แก่ Mode 1 (Direction Finding Mode) Mode 2 (Mobile Station) Mode 3 (MUSIC (Demo)) ซึ่ง YYYY-MM-DD คือ วันที่บันทึกข้อมูล (ปี-เดือน-วัน) และ HH-MM-SS คือ เวลาที่บันทึกข้อมูล (ชั่วโมง-นาที-วินาที)

Date	Time	Jamming Statu	Peak Power (d)	Peak Frequenc	Average Power	SDR Gain (dB)	Direction Angl	Direction Stren	Satellites (GPS)	Latitude	Longitude
2025-02-22	20:36:42	Normal	-29.89	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:43	Normal	-30.36	1575.42	-32.18	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:44	Normal	-29.91	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:46	Normal	-30.12	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:47	Normal	-30.09	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:48	Normal	-30.21	1575.42	-32.16	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:50	Normal	-30.06	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:51	Normal	-30.20	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:52	Normal	-29.94	1575.42	-32.13	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:53	Normal	-30.19	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:55	Normal	-29.98	1575.42	-32.16	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:56	Normal	-30.23	1575.42	-32.13	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:57	Normal	-30.55	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:59	Normal	-30.04	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:00	Normal	-30.23	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:01	Normal	-29.83	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:02	Normal	-30.30	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:04	Normal	-30.37	1575.42	-32.17	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:05	Normal	-30.10	1575.42	-32.16	0	-	-	8	13.7563	100.5018

รูปที่ 3.24 หน้าต่างแสดงเนื้อหาไฟล์ของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล DataLogs

จากรูปที่ 3.24 หน้าต่างแสดงเนื้อหาไฟล์ของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล DataLogs ประกอบด้วย หัวตาราง สถานะการรบกวนสัญญาณ ค่ากำลังสัญญาณสูงสุด ความถี่ ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณ อัตราขยายของ SDR ทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ จำนวนดาวเทียมที่ตรวจจับได้ ค่าละติจูด และค่าลองจิจูด

ตารางแสดงข้อมูล ใช้เพื่อแสดงข้อมูลที่บันทึกจาก Excel ในรูปแบบตาราง ข้อมูลค่าพารามิเตอร์ที่ทำการบันทึก ได้แก่ สถานะการรบกวนสัญญาณ ค่ากำลังสัญญาณสูงสุด ความถี่ ค่าเฉลี่ยกำลังของสัญญาณ อัตราขยายของ SDR ทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ จำนวนดาวเทียมที่ตรวจจับได้ ค่าละติจูด และค่าลองจิจูด ข้อมูลที่บันทึกในไฟล์ Excel แสดงดังรูปที่ 3.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Date	Time	Jamming Status	Peak Power (dB)	Peak Frequency (MHz)	Average Power (dB)	SDR Gain (dB)	Direction Angle (deg)	Direction Strength (dB)	Satellites (GPS)	Latitude	Longitude
2025-02-22	20:36:42	Normal	-29.89	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:43	Normal	-30.36	1575.42	-32.18	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:44	Normal	-29.91	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:46	Normal	-30.12	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:47	Normal	-30.09	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:48	Normal	-30.21	1575.42	-32.16	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:50	Normal	-30.06	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:51	Normal	-30.20	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:52	Normal	-29.94	1575.42	-32.13	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:53	Normal	-30.19	1575.42	-32.16	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:55	Normal	-29.98	1575.42	-32.16	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:56	Normal	-30.23	1575.42	-32.13	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:57	Normal	-30.55	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:36:59	Normal	-30.04	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:00	Normal	-30.23	1575.42	-32.15	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:01	Normal	-29.83	1575.42	-32.16	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:02	Normal	-30.30	1575.42	-32.14	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:04	Normal	-30.37	1575.42	-32.17	0	-	-	8	13.7563	100.5018
2025-02-22	20:37:05	Normal	-30.10	1575.42	-32.16	0	-	-	8	13.7563	100.5018

รูปที่ 3.25 ข้อมูลที่บันทึกในไฟล์ Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ในการจัดทำปฏิญานีพจนานุกรมนี้มีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองดังนี้

- 1) RTL-SDR Dongle
- 2) อุปกรณ์ประมวลผลสัญญาณ
- 3) สายอากาศ Directional Antenna 800 – 2700 เมกะเฮิร์ตซ์
- 4) ตลับเมตร
- 5) สกริปต์ไพธอน
- 6) ตัวรับกวนสัญญาณชนิด SMA Type Jammer
- 7) ตัวรับกวนสัญญาณชนิด USB GPS Jammer
- 8) Micro USB to USB Cable
- 9) สายนำสัญญาณ PR - SMA Plug to N-Type Plug

### 3.3 การจัดเก็บผลการทดลอง

#### 3.3.1 การทดสอบรูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง

- 1) ขั้นตอนการทดสอบรูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางความถี่ 800 – 2700 เมกะเฮิร์ตซ์
- 2) ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางความถี่ 800 – 2700 เมกะเฮิร์ตซ์

#### 3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนในระบะที่กำหนด

- 1) วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนในระบะที่กำหนด
- 2) ผลทดสอบวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนในระบะที่กำหนด

#### 3.3.3 การทดสอบผลกระทบของอัตราขยายต่อการตรวจจับสัญญาณรบกวน

- 1) วิธีการทดสอบผลกระทบของอัตราขยายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณรบกวนในระบะทางที่กำหนด
- 2) ผลการทดสอบอัตราขยายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณรบกวนในระบะทางที่กำหนด การทดสอบเพื่อหาตำแหน่งและทิศทางของตัวรับกวนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การทดสอบการแสดงผลของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้

1) การทดสอบการแสดงผลของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับระบุทิศทางของสัญญาณ

### 3.3.5 ผลการทดสอบโปรแกรมจำลองตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการ MUSIC

1) การทดสอบโปรแกรมจำลองการตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการ MUSIC โดยใช้ USRP

2) การทดสอบหาความแม่นยำของโปรแกรมจำลองการตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการ MUSIC โดยใช้ USRP

### 3.3.6 ผลการทดสอบการรบกวนสัญญาณ (RFI) ต่อการรับสัญญาณ GPS

1) การทดสอบระดับ RFI ต่อจำนวนดาวเทียมที่รับได้และค่า CNR ในระยะทางต่าง ๆ

2) ผลสรุปการทดสอบระดับ RFI ต่อการตัดสินใจในการแจ้งเตือนการรบกวนของอุปกรณ์รบกวนสัญญาณ

### 3.3.7 การทดสอบการทำงานระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนสำหรับสถานีเคลื่อนที่

1) การทดสอบการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ

2) การทดสอบการแจ้งเตือนเมื่อระดับสัญญาณรบกวนเกินเกณฑ์ที่กำหนด ระบบจะแสดงแจ้งเตือนบน GUI เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบทันที พร้อมทั้งประมาณทิศทางของแหล่งรบกวน

3) การทดสอบความต่อเนื่องในการรับสัญญาณ หากมีการเปลี่ยนทิศทางของยานพาหนะอย่างรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 การทดสอบรูปแบบการแผ่รังสีของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง

รูปแบบการแผ่รังสีเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติการทำงานของสายอากาศ การทดสอบเพื่อศึกษารูปแบบการแผ่รังสี ของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง จึงมีบทบาทสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศและความสามารถในการการรับ - ส่งสัญญาณ

##### 4.1.1 ขั้นตอนการทดสอบ

1) จัดเตรียมสายอากาศที่เจาะจงเพื่อใช้ในการรับหรือส่งสัญญาณ โดยติดตั้งให้สายอากาศอยู่ในแนวที่กำหนดและสามารถหมุนรอบทิศทางได้



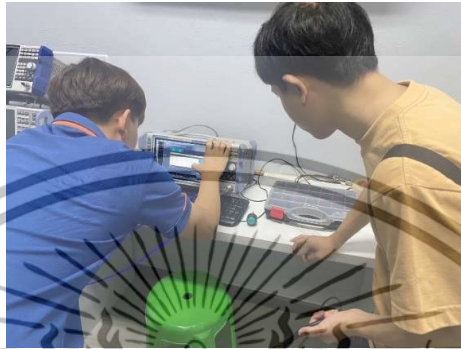
รูปที่ 4.1 ผลการทดสอบสายอากาศทางฝั่งรับสัญญาณ



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบสายอากาศทางฝั่งรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

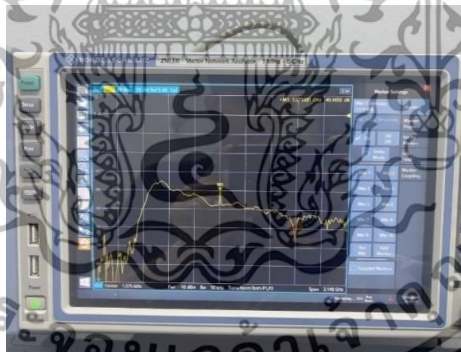
ตั้งค่า Network Analyzer และเชื่อมต่อเข้ากับระบบเพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ S21 ซึ่งจะแสดงพลังงานที่แผ่ออกในแต่ละทิศทาง



รูปที่ 4.3 ผลการปรับตั้งค่าเครื่อง Network Analyzer (1)

2) หมุนสายอากาศไปรอบ ๆ ทุก 10 องศาในแนวมุมกวาดเพื่อวัดการกระจายของพลังงานในทิศทางต่าง ๆ

3) บันทึกค่ากำลังสัญญาณ ที่ได้จากการวัดในแต่ละมุมเพื่อใช้ในการสร้างรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น



รูปที่ 4.4 ผลการปรับตั้งค่าเครื่อง Network Analyzer (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

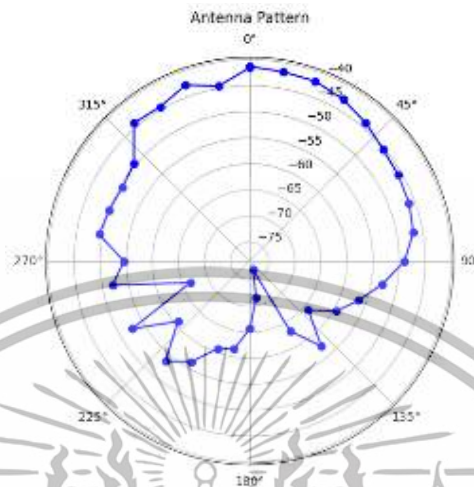
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดกำลังสัญญาณของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง

Azimuth (degrees)	Power (dB)
0	-41.3095
10	-41.7845
20	-41.9244
30	-42.835
40	-44.0534
50	-45.3138
60	-45.7527
70	-46.1651
80	-46.8283
90	-48.9651
100	-52.8579
110	-56.4916
120	-59.4394
130	-63.9884
140	-57.3378
150	-63.1398
160	-76.8762
170	-71.4852
180	-65.6378

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Azimuth (degrees)	Power (dB)
190	-61.5036
200	-60.785
210	-56.3481
220	-53.5236
230	-60.627
240	-52.6206
250	-66.5117
260	-51.9388
270	-54.5281
280	-49.3345
290	-49.9675
300	-50.461
310	-49.6339
320	-44.096
330	-44.4236
340	-42.7159
350	-44.5349
360	-41.5304

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การพล็อตแบบ Polar ของรูปแบบสายอากาศ

#### 4.1.2 ผลลัพธ์ของการทดสอบสายอากาศ

สายอากาศแม่พลังงานในทิศทาง 0 องศาอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่ากำลังสัญญาณเท่ากับ  $-41.3095$  เดซิเบลซึ่งเป็นค่าพลังงานสูงสุดเมื่อเทียบกับทิศทางอื่น ๆ และทิศทาง 160 องศา มีค่ากำลังสัญญาณต่ำสุดที่  $-76.8762$  เดซิเบล แสดงให้เห็นว่าสายอากาศสามารถส่งพลังงานได้มากในทิศทางด้านหน้าตรง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของสายอากาศแบบเจาะจงทิศทาง ที่ออกแบบมาเพื่อเน้นส่งสัญญาณในทิศทางที่เฉพาะเจาะจง แสดงดังตารางที่ 4.1

#### 4.2 การทดสอบประสิทธิภาพระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนในระยะเวลาที่กำหนด

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนในระยะเวลาที่กำหนด มีความสำคัญเนื่องจากการทราบระยะเวลาที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการตรวจจับสัญญาณรบกวน ช่วยให้สามารถระบุระยะสูงสุดที่ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวน

##### 4.2.1 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนในระยะเวลาที่กำหนด

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนในระยะเวลาที่กำหนดเริ่มต้นจากติดตั้งสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางที่มีอัตราขยาย 5 เดซิเบล จากนั้นตรวจจับสัญญาณรบกวนที่ส่งมาจากมุม 0 องศา วัดค่ากำลังสัญญาณที่ระยะต่าง ๆ ที่กำหนด ได้แก่ 5 10 15 20 25 และ 30 เมตร บันทึกค่ากำลังสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละระยะเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบสำหรับมุม 0 องศา แล้ว ทำการปรับแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังมุมถัดไปที่ 60 องศา 120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศา 180 องศา 240 องศา และ 300 องศา ตามลำดับ แล้วทำการทดสอบในแต่ละมุมตามขั้นตอน  
เดิม

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 5 เมตร

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	2	0	1	1	0	0	0	3	0	4	1.375
60	61	61	62	61	61	63	58	61	59	58	1.565
120	119	123	122	123	119	123	117	124	117	125	2.786
180	183	184	181	184	182	182	182	180	181	181	1.265
240	240	243	241	242	242	243	243	244	240	244	1.400
300	299	298	297	298	299	300	298	299	299	303	1.549

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 10 เมตร

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	10	-14	-14	10	10	-3	-9	12	-8	12	10.63
60	71	57	48	51	47	61	64	75	48	52	9.521
120	115	131	120	122	107	113	132	126	144	114	10.50
180	169	167	188	189	179	176	188	168	194	174	9.411
240	243	241	239	250	250	254	245	229	255	243	7.395
300	315	294	295	314	315	303	291	308	309	311	8.721

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 15 เมตร

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	-23	-21	-5	10	22	5	20	12	22	-13	16.48
60	49	79	73	43	44	71	81	68	82	39	16.32
120	142	141	109	107	108	131	137	134	110	112	14.26
180	167	161	179	198	203	174	159	196	199	202	16.79
240	226	258	219	217	259	261	224	224	252	229	17.24
300	323	316	292	294	323	284	285	315	277	317	16.94

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 20 เมตร

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	17	25	23	-7	-23	-25	-6	28	27	27	20.46
60	33	39	78	43	79	87	87	78	76	35	21.64
120	145	148	93	139	147	147	139	98	95	101	23.49
180	207	153	165	163	196	164	195	198	162	197	19.09
240	267	257	222	260	256	258	220	224	213	223	19.99
300	319	281	317	284	327	273	316	285	315	283	19.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 25 เมตร

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	33	28	-32	30	-25	22	-18	10	20	-33	24.56
60	27	31	47	33	41	92	76	88	90	84	25.92
120	88	90	153	151	92	147	98	142	133	108	26.01
180	147	151	165	149	198	205	190	212	210	208	25.98
240	207	220	265	216	240	209	269	267	272	270	26.50
300	270	276	267	272	320	315	332	327	325	331	26.82

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่ระยะ 30 เมตร

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	-40	-30	-38	39	32	-35	37	34	31	36	34.73
60	80	26	91	20	24	98	23	27	95	99	34.69
120	157	81	148	90	160	85	158	88	84	147	34.48
180	218	147	211	144	217	148	210	219	146	145	34.62
240	275	200	279	206	273	202	268	208	203	270	34.77
300	330	261	338	264	325	279	323	268	333	263	36.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนในระยะเวลาที่กำหนด

จากตารางที่ 4.2 - 4.7 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาทางระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนกับระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนมีค่าเพิ่มขึ้น ความแม่นยำในการระบุทิศทางของสัญญาณรบกวนจะลดลง เพราะมีการลดทอนของสัญญาณตามระยะทางและการกระจายของคลื่นสัญญาณที่กว้างขึ้น ส่งผลให้ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนมีความสามารถในการระบุทิศทางลดลง โดยค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง ที่ระยะ 30 เมตร มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 40 ซึ่งเป็นระดับความคลาดเคลื่อนที่สามารถจำแนกทิศทางของสัญญาณรบกวนได้ใน 8 ทิศ ได้แก่ ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้าย ด้านขวา และแนวเฉียงทั้งสี่ทิศทาง อันได้แก่ หน้าซ้าย หน้าขวา หลังซ้าย และหลังขวา จึงสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.3 การทดสอบผลกระทบของอัตราขยายต่อการตรวจจับสัญญาณรบกวน

การทดสอบผลกระทบของอัตราขยายต่อประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณรบกวนในระยะเวลาที่กำหนด มีความสำคัญเนื่องจากช่วยให้เข้าใจถึงผลกระทบของอัตราขยายต่อความสามารถของระบบในการตรวจจับสัญญาณรบกวน เพื่อวิเคราะห์หาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมในการเพิ่มความแม่นยำของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวน

##### 4.3.1 วิธีการทดสอบผลกระทบของอัตราขยายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณรบกวนในระยะเวลาที่กำหนด

การทดสอบผลกระทบของอัตราขยายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณรบกวนในระยะเวลาที่กำหนดเริ่มต้นจากการติดตั้งสายอากาศแบบเจาะจงทิศทางโดยกำหนดระยะที่ 10 เมตร จากนั้นปรับค่าอัตราขยายเริ่มต้นที่ 0 เดซิเบล แล้วตรวจจับสัญญาณรบกวนที่ส่งมาจากมุม 0 องศา วัดค่ากำลังสัญญาณที่ตรวจจับได้ในแต่ละระดับอัตราขยาย ได้แก่ 0 5 10 20 และ 30 เดซิเบล บันทึกค่ากำลังสัญญาณที่วัดได้ในแต่ละอัตราขยาย เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบสำหรับมุม 0 องศา แล้วทำการปรับแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังมุมถัดไปที่ 60 องศา 120 องศา 180 องศา 240 องศา และ 300 องศา ตามลำดับ แล้วทำการทดสอบในแต่ละมุมตามขั้นตอนเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 0 เดซิเบล

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	2	-1	0	2	0	2	-1	0	2	-1	1.285
60	61	58	60	61	58	61	61	60	58	61	1.300
120	122	120	119	122	120	122	120	119	122	121	1.187
180	181	178	180	181	178	181	180	181	180	178	1.249
240	242	240	239	242	239	242	240	242	239	240	1.285
300	301	298	301	300	301	298	301	298	300	301	1.300

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 5 เดซิเบล

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	-10	10	3	-8	5	-7	0	4	9	-5	6.848
60	65	69	52	63	67	50	59	66	56	62	6.139
120	125	111	130	117	124	126	120	127	112	118	6.116
180	178	170	187	174	181	189	176	172	183	185	6.185
240	235	250	244	232	237	231	247	238	241	246	6.204
300	307	293	309	290	305	308	296	299	300	302	6.172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 10 เดซิเบล

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	10	-15	11	-5	8	-14	2	13	12	-3	10.10
60	67	73	50	75	55	60	71	46	63	52	9.714
120	133	105	132	127	135	117	131	121	110	115	10.00
180	186	165	194	172	190	183	167	192	178	180	9.706
240	248	225	254	245	233	250	242	253	236	229	9.729
300	308	285	314	293	310	306	300	312	289	297	9.615

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 20 เดซิเบล

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	15	-10	18	12	-17	12	9	-13	10	-15	13.25
60	44	53	78	68	41	71	50	47	80	75	14.37
120	135	139	100	138	120	115	137	122	106	130	13.22
180	167	173	188	161	175	200	163	196	170	191	13.45
240	225	253	235	257	220	256	230	238	256	258	14.34
300	309	280	316	293	319	305	283	314	297	289	13.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบวัดค่ากำลังสัญญาณรบกวนที่อัตราขยาย 30 เดซิเบล

มุมของ แหล่งกำเนิด สัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	25	-15	30	-29	7	-27	12	18	-5	10	19.73
60	74	33	90	68	77	65	80	88	30	72	19.59
120	144	90	149	107	150	115	122	138	98	130	20.34
180	150	157	162	165	170	180	200	205	208	210	21.87
240	225	269	215	250	257	210	266	244	222	237	20.01
300	315	271	330	286	320	275	311	324	290	282	20.75

#### 4.3.2 ผลการทดสอบอัตราขยายที่มีผลต่อประสิทธิภาพการตรวจจับสัญญาณรบกวนใน ระยะทางที่กำหนด

จากตารางที่ 4.8 - 4.11 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราขยายต่ำมีความแม่นยำในการตรวจจับสัญญาณรบกวนดีกว่าเมื่อเทียบกับอัตราขยายที่สูง จากการทดสอบพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราขยายจาก 0 เดซิเบลเป็น 30 เดซิเบล ค่าความแม่นยำในการระบุทิศทางของสัญญาณรบกวนจะลดลง โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 25 องศา ซึ่งเป็นระดับความคลาดเคลื่อนที่สามารถจำแนกทิศทางของสัญญาณรบกวนได้ใน 8 ทิศ ได้แก่ ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้าย ด้านขวา และแนวเฉียงทั้งสี่ทิศทาง อันได้แก่ หน้าซ้าย หน้าขวา หลังซ้าย และหลังขวา จึงสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์และระบุตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเพิ่มอัตราขยายทำให้เกิดการรวมของสัญญาณรบกวนและสัญญาณพื้นหลังอื่น ๆ มากขึ้น จึงสรุปได้ว่าการคำนวณทิศทางมีค่าคลาดเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม MUSIC

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม MUSIC ในการประมาณทิศทางของสัญญาณรบกวน (Direction of Arrival: DOA) เมื่อแหล่งกำเนิดสัญญาณอยู่ในทิศทางที่แตกต่างกัน [23] โดยใช้การจำลองข้อมูลด้วยภาษาไพธอน ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมเงื่อนไขของสัญญาณได้อย่างแม่นยำ [24]

##### 4.4.1 วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม MUSIC

ในการทดลองได้กำหนดทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ได้แก่ 0 องศา 45 องศา 90 องศา 135 องศา 180 องศา 225 องศา 270 องศา และ 315 องศา ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้าย ด้านขวา และแนวเฉียงทั้งสี่ทิศทาง จากนั้นใช้การจำลองสัญญาณด้วยภาษาไพธอน เพื่อนำไปประมวลผลด้วยอัลกอริทึม MUSIC คำนวณมุมที่มาของสัญญาณ แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับมุมจริงในแต่ละกรณี [25]

ตารางที่ 4.13 ผลการคำนวณค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึงที่ระยะ 20 เมตร

มุมของแหล่งกำเนิดสัญญาณ (องศา)	ค่าประมาณมุมของสัญญาณที่มาถึง (องศา)										ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)
	การทดลองครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	44	-36	29	44	-20	-42	44	-18	-44	20	37.60
60	99	100	78	23	22	98	26	25	96	21	37.84
120	159	160	139	83	82	158	86	85	156	81	37.90
180	218	149	195	218	140	211	145	218	145	149	35.71
240	210	200	208	280	270	263	280	275	201	278	36.39
300	328	262	261	339	275	340	329	331	278	262	35.31

จากตารางที่ 4.13 จากผลการทดสอบอัลกอริทึม MUSIC ที่ระยะ 20 เมตร พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 40 องศา ซึ่งยังอยู่ในระดับที่สามารถจำแนกทิศทางของสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพใน 8 ทิศ ได้แก่ ด้านหน้า ด้านหลัง ด้านซ้าย ด้านขวา และแนวเฉียงทั้งสี่ทิศ (หน้าซ้าย

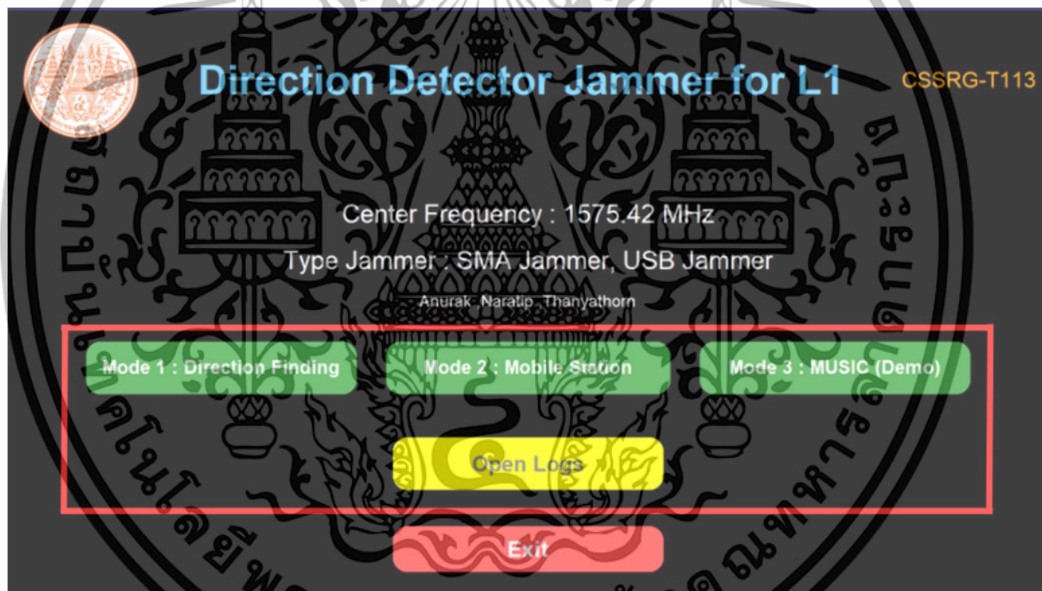
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าขวา หลังซ้าย และหลังขวา) แสดงให้เห็นว่าแม้จะอยู่ในระยะที่เริ่มมีการลดทอนของสัญญาณ ระบบยังสามารถประมวลผลและระบุทิศทางของสัญญาณรบกวนได้อย่างแม่นยำ

#### 4.5 การทดสอบการแสดงผลระบบส่วนติดต่อผู้ใช้

##### 4.5.1 การทดสอบการแสดงผลของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับระบุทิศทางของสัญญาณ

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับระบุทิศทางของสัญญาณ มีการออกแบบให้รองรับ 3 โหมดการทำงาน รวมถึงระบบการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล โดยเลือกใช้งานผ่านปุ่มควบคุมหลัก แสดงดังรูปที่ 4.6



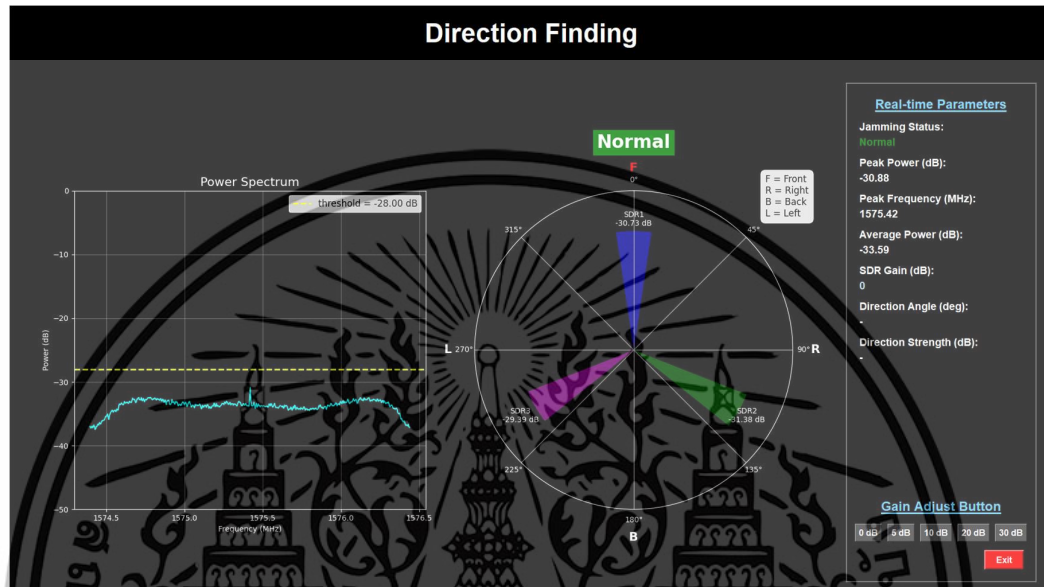
รูปที่ 4.6 ปุ่มควบคุมหลักในหน้าจอหลัก

เมื่อผู้ใช้เลือกโหมดใด GUI จะปรับการแสดงผลให้สอดคล้องกับโหมดที่เลือกโดยอัตโนมัติ

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์ (Mode 1: Direction Finding) ถูกออกแบบมาเพื่อแสดงผลข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจจับสัญญาณรบกวนและการคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน โดยระบบสามารถปรับเปลี่ยนการแสดงผลได้แบบเรียลไทม์ ตามสถานะของสัญญาณรบกวน ซึ่งในสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติกับภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ ระบบจะแสดงข้อมูลที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8



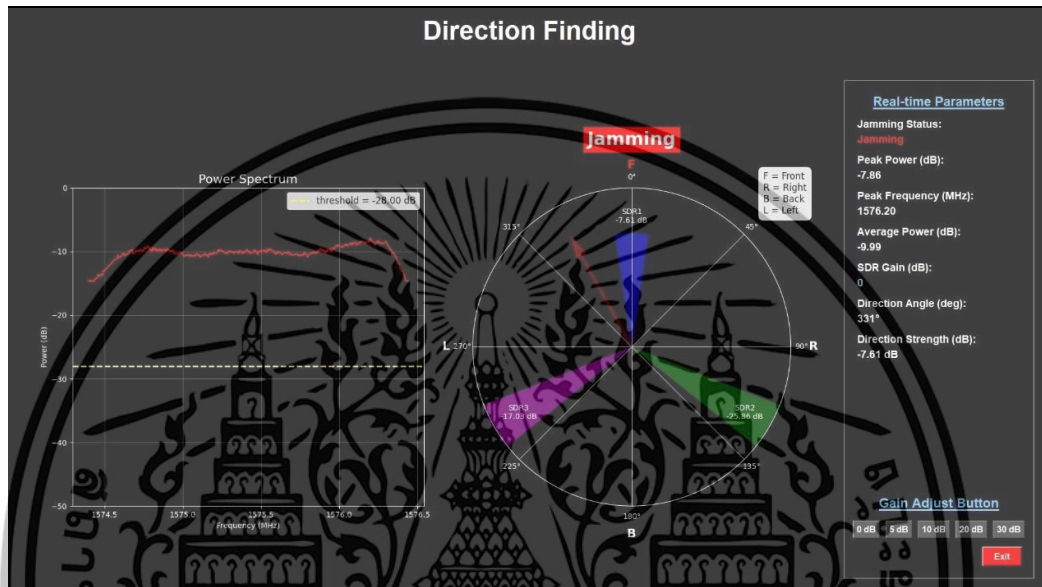
รูปที่ 4.7 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์ในสภาวะปกติ

จากรูปที่ 4.7 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์ในสภาวะปกติ มีรายละเอียดดังนี้

- สถานะการรบกวนสัญญาณ (Jamming Status) แสดงเป็น "Normal" โดยข้อความจะเป็นสีเขียว เพื่อบ่งบอกว่าสภาพแวดล้อมปัจจุบันไม่มีการรบกวนสัญญาณ
- กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ กราฟจะแสดงกำลังของสัญญาณที่ได้รับจาก SDR
  - กราฟพิกัดเชิงขั้ว จะไม่มีทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เนื่องจากไม่มีสัญญาณรบกวน ระบบจะแสดงเพียงเส้นแกนทิศทาง F(หน้า) R(ขวา) B(หลัง) และ L(ซ้าย) ไม่มีลูกศรชี้ทิศทางของสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Direction Angle) และค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ (Direction Strength) แสดงเป็น "-" เนื่องจากไม่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนให้คำนวณ



รูปที่ 4.8 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์ในภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ

จากรูปที่ 4.8 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์ภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ มีรายละเอียดดังนี้

- สถานะการรบกวนสัญญาณ (Jamming Status) เปลี่ยนเป็น "Jamming" และข้อความจะเปลี่ยนเป็นสีแดง เพื่อเตือนผู้ใช้งานว่ามีการรบกวนสัญญาณเกิดขึ้น

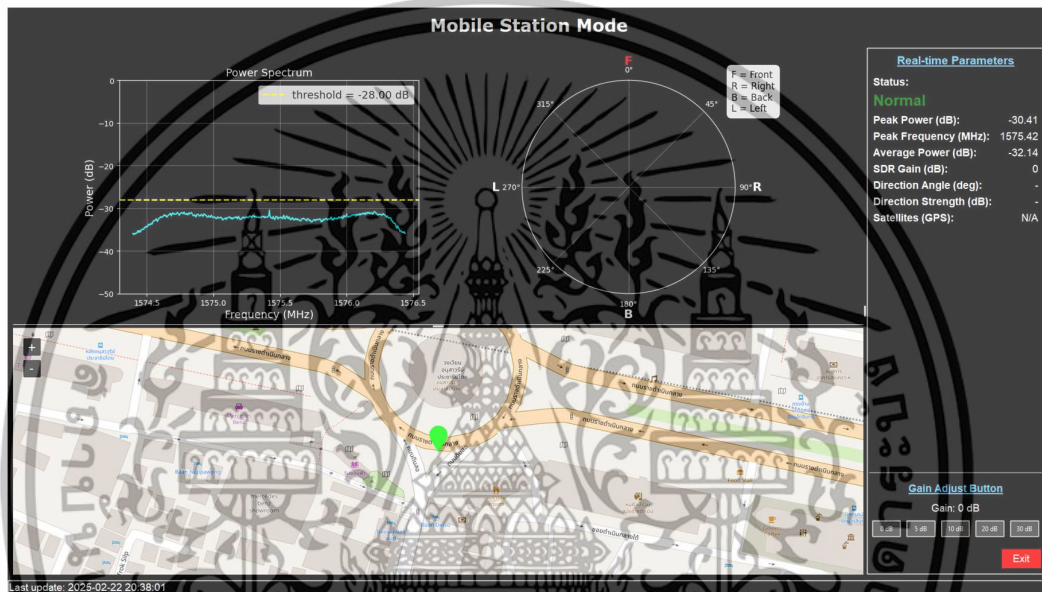
- กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณจะมีจุดพีค (Peak Power) ที่สูงกว่าปกติในช่วงความถี่ที่ตรวจจับได้ ซึ่งเป็นสัญญาณของการรบกวน

- กราฟพิกัดเชิงขั้ว ระบบจะคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนและแสดงลูกศรสีแดงชี้ไปยังทิศทางของแหล่งกำเนิดการรบกวน

- ค่าทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Direction Angle) และค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ (Direction Strength) ระบบจะแสดงค่ามุมทิศทางที่คำนวณได้ในหน่วยองศา (Direction Angle (deg)) และแสดงค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ (Direction Strength (dB)) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถระบุแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับสถานีเคลื่อนที่ (Mode 2: Mobile Station Mode) ออกแบบมาเพื่อ แสดงผลการติดตามตำแหน่ง GPS และวิเคราะห์ทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณ โดยระบบสามารถปรับเปลี่ยนการแสดงผลได้แบบเรียลไทม์ ตามสถานะของสัญญาณรบกวน ซึ่งในสถานะปกติกับภายใต้สถานะการรบกวนสัญญาณ ระบบจะแสดงข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังนี้แสดงดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับสถานีเคลื่อนที่ในสถานะปกติ

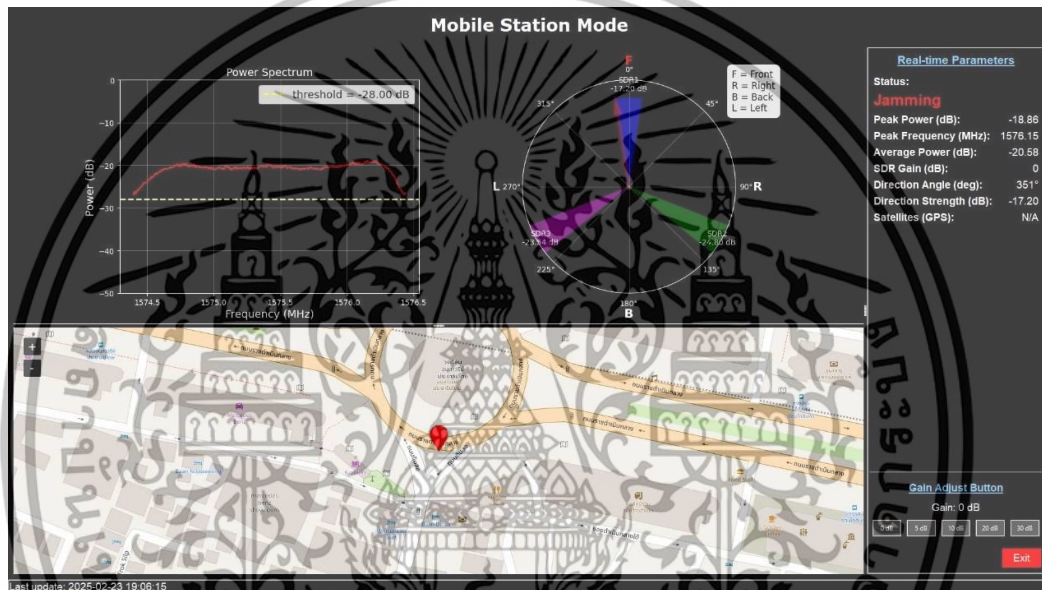
จากรูปที่ 4.9 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับสถานีเคลื่อนที่ในสถานะปกติ มีรายละเอียด ดังนี้

- กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณ กราฟจะแสดงกำลังของสัญญาณที่ได้รับจาก SDR
- สถานะการรบกวนสัญญาณ (Jamming Status) แสดงเป็น "Normal" โดยข้อความจะเป็นสีเขียว เพื่อบ่งบอกว่าสภาพแวดล้อมปัจจุบันไม่มีการรบกวนสัญญาณ
- กราฟพิกัดเชิงขั้ว จะไม่มีทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เนื่องจากไม่มีสัญญาณรบกวน ระบบจะแสดงเพียงเส้นแกนทิศทาง F(หน้า) R(ขวา) B(หลัง) L(ซ้าย) และไม่มีลูกศรชี้ทิศทางของสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Direction Angle) และค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ (Direction Strength) แสดงเป็น "-" เนื่องจากไม่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนให้คำนวณ

- ระบบแสดงแผนที่แบบเรียลไทม์ แสดงตำแหน่งของสถานีเคลื่อนที่ (Mobile Station) ตามค่าพิกัด GPS ปัจจุบัน และสีของจุดมาร์กเกอร์ (Marker Color) จะเป็นสีเขียว แสดงว่าสถานการณปกติ



รูปที่ 4.10 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับสถานีเคลื่อนที่ภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ

จากรูปที่ 4.10 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับสถานีเคลื่อนที่ภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ มีรายละเอียดดังนี้

- สถานะการรบกวนสัญญาณ (Jamming Status) เปลี่ยนเป็น "Jamming" และข้อความจะเปลี่ยนเป็นสีแดง เพื่อเตือนผู้ใช้งานว่ามีการรบกวนสัญญาณเกิดขึ้น

- กราฟสเปกตรัมกำลังของสัญญาณจะมีจุดพีค (Peak Power) ที่สูงกว่าปกติ ในช่วงความถี่ที่ตรวจจับได้ ซึ่งเป็นสัญญาณของการรบกวน

- กราฟพิกัดเชิงขั้ว ระบบจะคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และแสดงลูกศรสีแดงชี้ไปยังทิศทางของแหล่งกำเนิดการรบกวน

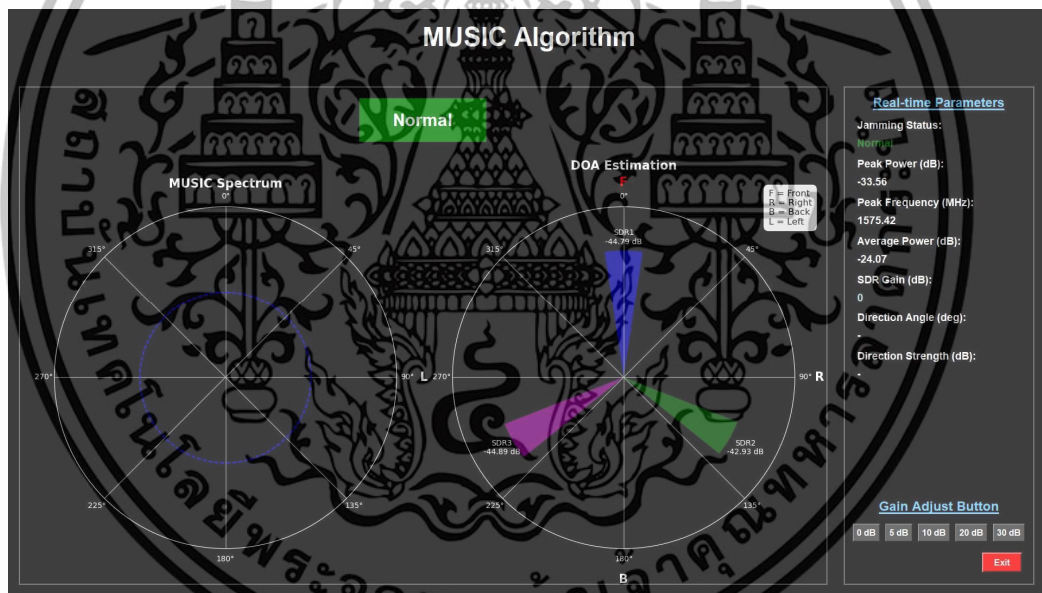
- ค่าทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Direction Angle) และค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ (Direction Strength) ระบบจะแสดงค่ามุมทิศทางที่คำนวณได้ในหน่วยองศา (Direction Angle (deg)) และแสดงค่ากำลังของสัญญาณรบกวนใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางที่ตรวจพบ (Direction Strength (dB)) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถระบุแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนได้

- ระบบแสดงแผนที่แบบเรียลไทม์ ระบบจะแสดงตำแหน่งปัจจุบันของสถานีเคลื่อนที่เหมือนเดิม แต่จุดมาร์กเกอร์จะเปลี่ยนสีเป็นสีแดง เพื่อระบุว่ามีการรบกวนเกิดขึ้นในบริเวณนั้น

ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับโหมกดัลกอริทึม MUSIC (Mode 3 : MUSIC (Demo)) ออกแบบมาเพื่อแสดงผลกราฟสเปกตรัม MUSIC และการระบุตำแหน่งแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน โดยระบบสามารถปรับเปลี่ยนการแสดงผลได้แบบเรียลไทม์ ตามสถานะของสัญญาณรบกวน ซึ่งในสถานะปกติกับภายใต้สถานะการรบกวนสัญญาณ ระบบจะแสดงข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังนี้แสดงดังรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับโหมกดัลกอริทึม MUSIC ในสถานะปกติ

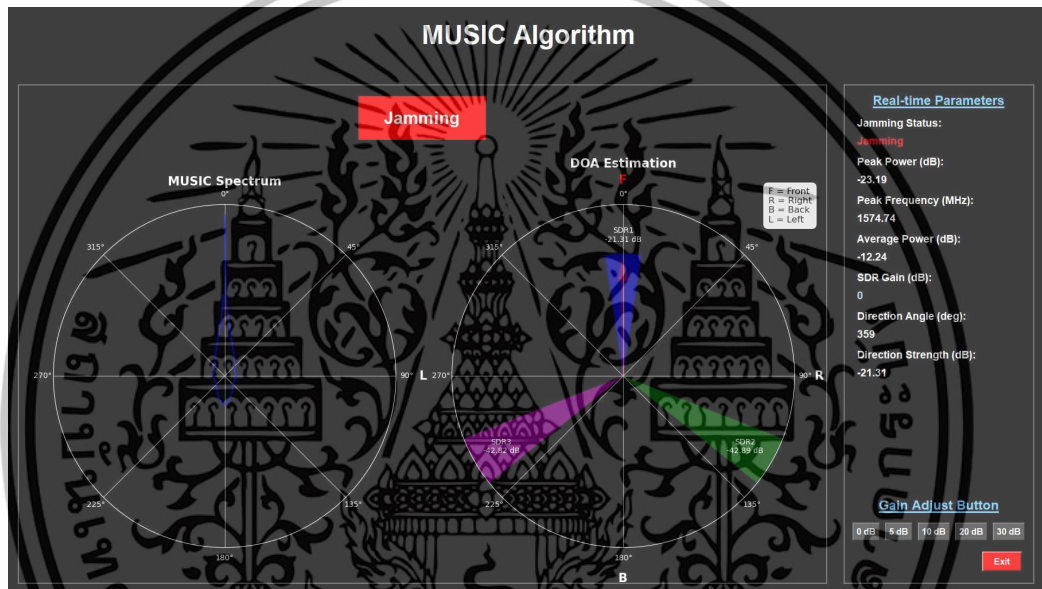
จากรูปที่ 4.11 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับโหมกดัลกอริทึม MUSIC ในสถานะปกติ มีรายละเอียดดังนี้

- สถานะการรบกวนสัญญาณ (Jamming Status) แสดงเป็น "Normal" โดยข้อความจะเป็นสีเขียว เพื่อบ่งบอกว่าสภาพแวดล้อมปัจจุบันไม่มีการรบกวนสัญญาณ
- กราฟสเปกตรัม MUSIC จะไม่แสดงผลเนื่องจากไม่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กราฟพิกัดเชิงขั้ว จะไม่มีทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน เนื่องจากไม่มีสัญญาณรบกวน ระบบจะแสดงเพียงเส้นแกนทิศทาง F(หน้า) R(ขวา) B(หลัง) L(ซ้าย) และไม่มีลูกศรชี้ทิศทางของสัญญาณรบกวน

- ค่าทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Direction Angle) และค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ (Direction Strength) แสดงเป็น "-" เนื่องจากไม่มีแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนให้คำนวณ



รูปที่ 4.12 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับโหมดอัลกอริทึม MUSIC ภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ

จากรูปที่ 4.12 ระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) สำหรับการวิเคราะห์และตรวจจับทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนแบบเรียลไทม์ภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ มีรายละเอียดดังนี้

- สถานะการรบกวนสัญญาณ (Jamming Status) เปลี่ยนเป็น "Jamming" และข้อความจะเปลี่ยนเป็นสีแดง เพื่อเตือนผู้ใช้งานว่ามีการรบกวนสัญญาณเกิดขึ้น

- กราฟสเปกตรัม MUSIC จะแสดงรูปแบบการแผ่รังสีในลักษณะวงกลมรอบสายอากาศ

- กราฟพิกัดเชิงขั้ว ระบบจะคำนวณทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน และแสดงลูกศรสีแดงชี้ไปยังทิศทางของแหล่งกำเนิดการรบกวน

- ค่าทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Direction Angle) และค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ (Direction Strength) ระบบจะแสดงค่ามุมทิศทางที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

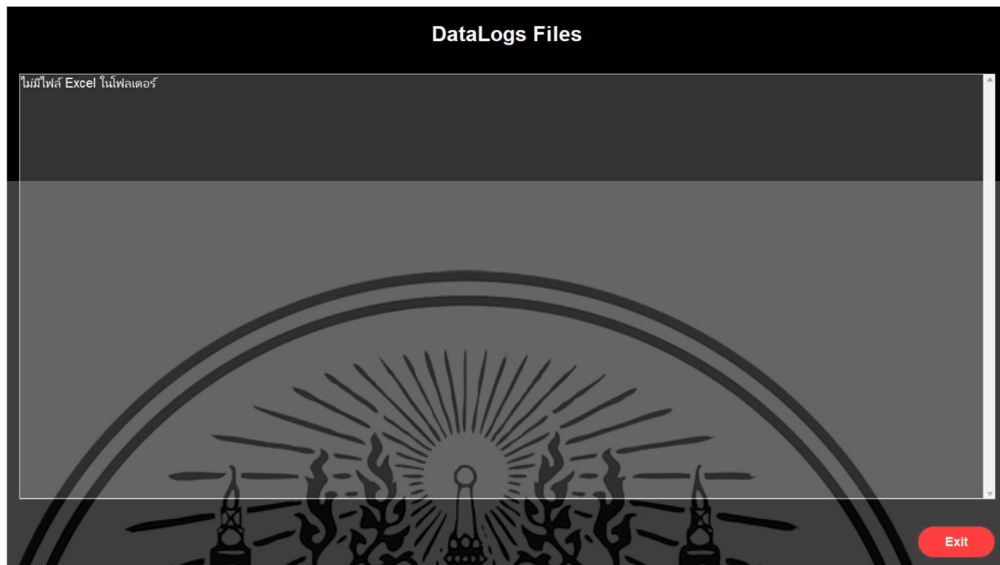
คำนวณได้ในหน่วยองศา (Direction Angle (deg)) และแสดงค่ากำลังของสัญญาณรบกวนในทิศทางที่ตรวจพบ (Direction Strength (dB)) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถระบุแหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนได้

หน้าต่างหลักของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล DataLogs ออกแบบเพื่อใช้สำหรับแสดงรายการไฟล์ Excel (.xlsx) ที่ถูกบันทึกไว้ในโฟลเดอร์ "DataLogs" ภายในโฟลเดอร์ Downloads ของเครื่องผู้ใช้ โดยเมื่อมีหรือไม่มีไฟล์ Log อยู่ในโฟลเดอร์นี้ จะแสดงผลแตกต่างกัน ดังนี้แสดงดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 หน้าต่างหลักของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล DataLogs เมื่อมีไฟล์ log

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

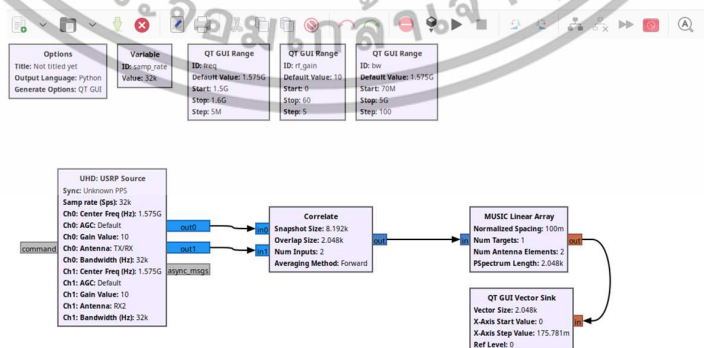


รูปที่ 4.14 หน้าต่างหลักของระบบส่วนติดต่อผู้ใช้สำหรับการจัดการและแสดงผลไฟล์บันทึกข้อมูล DataLogs เมื่อไม่มีไฟล์ log

#### 4.6 ผลการทดสอบโปรแกรมตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการ Music

##### 4.6.1 ทดสอบโปรแกรมการตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการ MUSIC โดยใช้ USRP

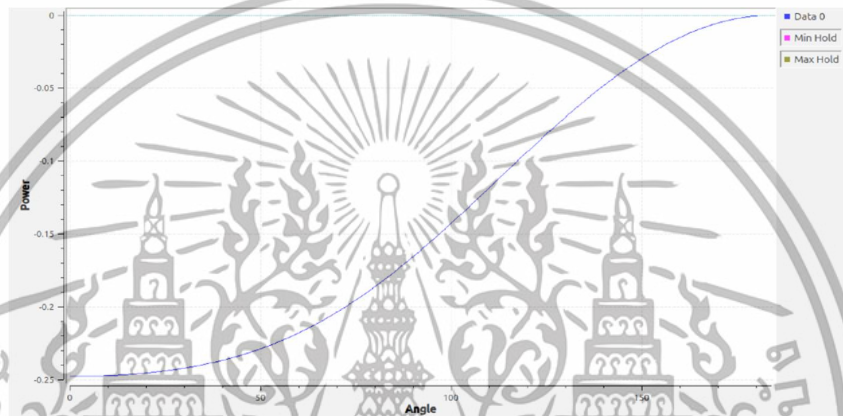
การทดสอบโปรแกรมตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการ MUSIC ทดสอบผ่านโปรแกรม GNU radio ซึ่ง USRP รุ่น B210 สามารถรับสัญญาณได้มากที่สุด 2 ช่องสัญญาณจึงทำให้ใช้งานสายอากาศได้มากที่สุด 2 สายอากาศ จึงออกแบบโปรแกรม GNU radio การทดสอบดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผังงานของโปรแกรม Music โดยใช้ GNU radio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการคำนวณและตั้งค่าช่องรับสัญญาณเป็น RX2 กับ TX/RX และวางสายอากาศเป็นรูปแบบ Linear โดยแสดงผลในรูปแบบสเปกตรัม เนื่องจากมีการใช้ช่องรับสัญญาณเพียง 2 ช่อง ทำให้สามารถคำนวณหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณได้เพียง 1 แหล่งเท่านั้น อย่างไรก็ตามการตรวจจับสัญญาณด้วยวิธี MUSIC สามารถระบุทิศทางได้ 2 ทิศทาง ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 สเปกตรัม MUSIC ในกรณีที่เครื่องส่งสัญญาณอยู่ด้านขวาตามระนาบของสายอากาศ



รูปที่ 4.17 สเปกตรัม MUSIC ในกรณีที่เครื่องส่งสัญญาณอยู่ด้านขวาตามระนาบของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 แสดงกราฟ MUSIC Spectrum ซึ่งใช้ระบุทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณโดยพิจารณาค่ากำลัง (Power) ตามแกนนอน (Angle) เมื่อมีแหล่งสัญญาณเข้ามามุมใดมุมหนึ่งจะเกิดจุดสูงสุดบนกราฟ ณ มุมนั้น ซึ่งบ่งบอกถึงทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณที่ระบบตรวจจับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6.2 การทดสอบหาความแม่นยำของโปรแกรมตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการ MUSIC โดยใช้ USRP

จาก 4.6.1 ทำการทดลองซ้ำเพื่อหาความแม่นยำของโปรแกรมตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้หลักการ MUSIC โดยใช้ USRP เป็นจำนวน 20 ครั้งแสดงผลดังตารางที่ 4.14

จากตารางที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบความแม่นยำโดยกำหนดให้ทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณสัญญาณมาจาก 3 ทิศทางได้แก่ ด้านซ้าย ด้านขวา และตรงกลาง และระบุผลลัพธ์เป็นถูกต้องกับไม่ถูกต้อง จากผลการทดสอบในกรณีที่เครื่องส่งสัญญาณอยู่ตำแหน่งตรงกลางตัวโปรแกรมไม่สามารถระบุถูกต้องเลยสักครั้ง แต่ในกรณีที่ด้านซ้ายและด้านขวาตัวโปรแกรมเองสามารถระบุความถูกต้องได้โดยคิดเป็นด้านซ้าย 85 เปอร์เซ็นต์ ด้านขวา 85 เปอร์เซ็นต์ และตรงกลาง 0 เปอร์เซ็นต์

#### 4.7 ผลการทดสอบการรบกวนสัญญาณ (RFI) ต่อการรับสัญญาณ GPS

##### 4.7.1 การทดสอบระดับ RFI ต่อจำนวนดาวเทียมที่รับได้และค่า CNR ในระยะทางต่าง ๆ

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบในตารางนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของการรบกวนสัญญาณ (Radio Frequency Interference: RFI) ต่อการรับสัญญาณ GPS โดยวัดทั้งจำนวนดาวเทียมที่เครื่องรับสามารถติดตามได้ (Tracking) และคุณภาพสัญญาณ ในระยะทางต่าง ๆ จากแหล่งกำเนิดการรบกวน ซึ่งมีจุดประสงค์หลัก ๆ ประเมินประสิทธิภาพการรับสัญญาณ ตรวจสอบว่าเมื่ออยู่ใกล้แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ระดับการรบกวนจะแรงจนทำให้จำนวนดาวเทียมที่เครื่องรับจับได้ลดลงหรือไม่ และ CNR จะตกลงมากเพียงใดเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของสัญญาณรบกวนจะลดลง ทำให้จำนวนดาวเทียมที่รับได้และค่า CNR กลับมาสูงขึ้นเพื่อหาขีดจำกัดการทำงานของเครื่องรับ GPS แสดงดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบหาความแม่นยำของโปรแกรมตรวจจับสัญญาณรบกวน โดยใช้หลักการ MUSIC โดยใช้ USRP

ครั้งที่	ตำแหน่งของ เครื่องส่งสัญญาณ รบกวน	การระบุทิศทาง (ตามระนาบของ สายอากาศ)	ความถูกต้องของ การระบุทิศทาง
1	ด้านซ้าย(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
2	ด้านซ้าย(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
3	ด้านซ้าย(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
4	ด้านซ้าย(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
5	ด้านซ้าย(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
6	ด้านขวา(สายอากาศ)	ด้านขวา	ถูกต้อง
7	ด้านขวา(สายอากาศ)	ด้านขวา	ถูกต้อง
8	ด้านขวา(สายอากาศ)	ด้านขวา	ถูกต้อง
9	ด้านขวา(สายอากาศ)	ด้านขวา	ถูกต้อง
10	ด้านขวา(สายอากาศ)	ด้านขวา	ถูกต้อง
11	ตรงกลาง(สายอากาศ)	ด้านขวา	ไม่ถูกต้อง
12	ตรงกลาง(สายอากาศ)	ด้านขวา	ไม่ถูกต้อง
13	ตรงกลาง(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ไม่ถูกต้อง
14	ตรงกลาง(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ไม่ถูกต้อง
15	ตรงกลาง(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ไม่ถูกต้อง
16	ด้านซ้าย(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
17	ด้านขวา(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ไม่ถูกต้อง
18	ด้านซ้าย(สายอากาศ)	ด้านขวา	ไม่ถูกต้อง
19	ด้านขวา(สายอากาศ)	ด้านขวา	ถูกต้อง
20	ตรงกลาง(สายอากาศ)	ด้านซ้าย	ไม่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบระดับ RFI ต่อจำนวนดาวเทียมที่รับได้และค่า CNR ในระยะทางต่าง ๆ

ระยะทาง (เมตร)	จำนวนดาวเทียมที่รับได้ (ดวง)	ระดับ RFI
5	0	รุนแรงมาก (รับค่า CNR ไม่ได้)
10	0	รุนแรงมาก (รับค่า CNR ไม่ได้)
15	3	รุนแรงมาก (CNR 9.85 เดซิเบล)
20	4	มีผลกระทบต่อระบบ (CNR เหลือ 11.87 เดซิเบล)
25	5	มีผลกระทบต่อระบบ (CNR เหลือ 11.87 เดซิเบล)
30	4	มีผลกระทบต่อระบบ (CNR เหลือ 11.87 เดซิเบล)
35	7	มีผลกระทบต่อระบบ (CNR เหลือ 11.87 เดซิเบล)
40	9	มีผลกระทบต่อระบบ (CNR เหลือ 11.87 เดซิเบล)
45	9	มีผลกระทบต่อระบบ (CNR เหลือ 11.87 เดซิเบล)
50	11	มีผลกระทบต่อระบบ (CNR เหลือ 11.87 เดซิเบล)

#### 4.7.2 ผลสรุปการทดสอบระดับ RFI ต่อการตัดสินใจในการแจ้งเตือนการรบกวนของอุปกรณ์รบกวนสัญญาณ

จากตารางที่ 4.15 รูปแนวโน้มผลการทดสอบและการนำไปใช้หาตำแหน่งตัวรบกวนสัญญาณ จากข้อมูลตารางที่วัดค่าจำนวนดาวเทียมที่รับได้ รวมถึงค่า CNR ในระยะทางต่าง ๆ เมื่อมีการปล่อยสัญญาณรบกวนสามารถสรุปแนวโน้มได้ดังนี้ บริเวณใกล้แหล่งรบกวน (ระยะสั้น) เมื่อระยะห่างจากตัวรบกวนมีค่าน้อย เช่น 0 – 10 เมตร เครื่องรับอาจสูญเสียการรับสัญญาณทั้งหมดหรือแทบไม่สามารถติดตามดาวเทียมได้ เนื่องจากกำลังสัญญาณรบกวนสูงกว่าเกณฑ์ที่เครื่องรับจะประมวลผลสัญญาณดาวเทียมได้ค่า CNR ในบริเวณนี้จะต่ำมากหรือวัดไม่ได้เลย ระยะกลางเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นมาสักช่วงหนึ่ง เช่น 15 – 30 เมตร จะเริ่มมีการรับสัญญาณดาวเทียมได้บ้าง แม้จำนวนดาวเทียมที่ติดตามได้อาจยังน้อยกว่าปกติ และค่า CNR จะยังค่อนข้างต่ำ แต่จะค่อย ๆ ดีขึ้นตามระยะทางที่เพิ่มขึ้นบางครั้งอาจมีช่วง “ขอบเขตการรบกวน” ที่เครื่องรับยังไม่สามารถรักษาการติดตามได้เสถียร จึงมีโอกาสสูญเสียความเสถียรที่ระยะไกลเมื่ออยู่ห่างออกไปมากขึ้น เช่น 30 – 50 เมตรหรือไกลกว่า สัญญาณรบกวนจะอ่อนลง ทำให้เครื่องรับสามารถติดตามดาวเทียมได้มากขึ้น และค่า CNR กลับมาสูงใกล้เคียงกับสภาวะปกติในระยะนี้การทำงานของเครื่องรับจะมีความเสถียรสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอกาสสูญเสียการติดตามตัวรบกวนสัญญาณจะลดลง ดังนั้นจึงควรให้การแจ้งเตือนการตัดสินใจว่ามี การรบกวนสัญญาณอยู่ในบริเวณควรอยู่ที่ระยะประมาณ 30 – 35 เมตร จึงเริ่มระบบตรวจจับแบบ เจาะจงทิศทางได้

#### 4.8 การทดสอบการทำงานระบบตรวจจับสัญญาณรบกวน

##### 4.8.1 การทดสอบการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ

การทดสอบนี้มุ่งเน้นไปที่การประเมินความสามารถของระบบในการระบุตำแหน่งของ ยานพาหนะ (Mobile Station) ที่ติดตั้งระบบรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ในสองสถานะ ได้แก่ สถานะ ปกติ (ไม่มีการรบกวน) และ สถานะที่มีการรบกวน เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อ ความแม่นยำของตำแหน่งที่ได้รับติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ (Mobile Station) ที่ติดตั้งระบบ ตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอส ทดลองบันทึกค่าพิกัดตำแหน่งในสถานะปกติที่ไม่มีการรบกวน ของสัญญาณ โดยให้เครื่องรับสัญญาณ คำนวณค่าพิกัดที่ได้รับจากดาวเทียม และเก็บบันทึกค่า หลังจากเก็บข้อมูลในสถานะปกติเรียบร้อยแล้ว จึงทำการทดลองภายใต้การรบกวนของสัญญาณ และ ดำเนินการเก็บข้อมูลในสถานะที่มีการรบกวน โดยให้เครื่องรับสัญญาณบันทึกค่าพิกัดที่ได้รับภายใต้ การรบกวนของสัญญาณเช่นเดียวกับการทดลองในสถานะปกติ เมื่อรวบรวมข้อมูลทั้งสองสถานะแล้ว จึงนำค่าพิกัดที่ได้รับจากเครื่องรับในแต่ละกรณีมาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง โดยใช้ ในการคำนวณระยะทางระหว่างพิกัดที่ได้รับกับพิกัดอ้างอิงที่กำหนดไว้ เพื่อนำไปวิเคราะห์ว่าการ รบกวนของสัญญาณส่งผลกระทบต่อค่าพิกัดที่ได้ โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.16 - 4.17

จากตารางที่ 4.16 - 4.17 แสดงผลลัพธ์การทดสอบการรับตำแหน่งของยานพาหนะ ภายใต้สองสถานะ ได้แก่ สถานะปกติ และ สถานะที่มีการรบกวนสัญญาณ พบว่าค่าพิกัดที่ได้รับจาก เครื่องรับในสถานะปกติสามารถให้ค่าพิกัดที่มีความแม่นยำสูง โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้มี ค่าไม่เกิน 5 เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง นอกจากนี้ค่าพิกัดที่ได้รับในสถานะปกติยังมี ความเสถียร โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยและสามารถระบุพิกัดได้อย่างต่อเนื่อง แต่ภายใต้สถานะการ รบกวนสัญญาณ พบว่าค่าพิกัดที่ได้รับจากเครื่องรับมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น โดยค่าความ คลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 6 - 10 เมตร ขึ้นอยู่กับระดับของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ในบางกรณี ตำแหน่งที่ได้รับอาจแสดงค่าที่ผิดพลาดไปจากตำแหน่งจริงมากกว่าปกติ ซึ่งบ่งชี้ว่าสัญญาณรบกวนมี ผลโดยตรงต่อความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่ง ผลการทดลองยืนยันว่าสัญญาณรบกวนส่งผล กระทบต่อความแม่นยำของค่าพิกัดที่ได้รับ โดยทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการระบุตำแหน่งมากกว่า สถานะปกติ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีการรบกวน ระบบยังคงสามารถคำนวณตำแหน่งได้ แต่มีค่า ความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบความถูกต้องของการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะใน  
สภาวะปกติ

การทดลอง ครั้งที่	ค่าตำแหน่งอ้างอิง (ละติจูด, ลองจิจูด)	ค่าตำแหน่งที่คำนวณได้ (ละติจูด, ลองจิจูด)	ค่าความคลาด เคลื่อน (เมตร)
1	13.730180, 100.778275	13.730192, 100.778283	1.6
2	13.730180, 100.778275	13.730165, 100.778265	2.0
3	13.730180, 100.778275	13.730165, 100.778265	2.3
4	13.730180, 100.778275	13.730172, 100.778287	1.6
5	13.730180, 100.778275	13.730190, 100.778285	1.5
6	13.730180, 100.778275	13.730205, 100.778260	3.2
7	13.730180, 100.778275	13.730170, 100.778280	1.2
8	13.730180, 100.778275	13.730198, 100.778283	2.2
9	13.730180, 100.778275	13.730168, 100.778263	1.9
10	13.730180, 100.778275	13.730210, 100.778295	4.0

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบความถูกต้องของการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ  
ภายใต้สัญญาณรบกวน

การทดลอง ครั้งที่	ค่าตำแหน่งอ้างอิง (ละติจูด, ลองจิจูด)	ค่าตำแหน่งที่คำนวณได้ (ละติจูด, ลองจิจูด)	ค่าความคลาด เคลื่อน (เมตร)
1	13.730180, 100.778275	13.730245, 100.778275	7.2
2	13.730180, 100.778275	13.730180, 100.778350	8.1
3	13.730180, 100.778275	13.730260, 100.778275	8.9
4	13.730180, 100.778275	13.730180, 100.778360	9.2
5	13.730180, 100.778275	13.730250, 100.778320	9.2
6	13.730180, 100.778275	13.730260, 100.778315	9.9
7	13.730180, 100.778275	13.730240, 100.778315	7.9
8	13.730180, 100.778275	13.730250, 100.778325	9.5
9	13.730180, 100.778275	13.730248, 100.778332	9.7
10	13.730180, 100.778275	13.730235, 100.778320	7.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8.2 การทดสอบการแจ้งเตือนเมื่อระดับสัญญาณรบกวนเกินเกณฑ์ที่กำหนด ระบบจะแสดงแจ้งเตือนบน GUI เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบทันที พร้อมทั้งประมาณทิศทางของแหล่งรบกวน

การทดสอบนี้จะตรวจสอบว่าระบบสามารถแจ้งเตือนผู้ใช้งานได้ทันทีเมื่อระดับสัญญาณรบกวนสูงเกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ โดยมีขั้นตอนหลักดังนี้ กำหนดค่าเกณฑ์สำหรับระดับสัญญาณรบกวน (Interference Level) เมื่อระบบตรวจจับพบว่าสัญญาณรบกวนเกินกว่าค่าที่กำหนด จะมีการแจ้งเตือนผ่าน GUI (Graphic User Interface) ระบบจะทำการประเมินทิศทางของแหล่งสัญญาณรบกวนจากการคำนวณ DOA และแจ้งผลบน GUI เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้การเกิดการรบกวนสัญญาณ โดยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบการแจ้งเตือนของระบบเมื่อระดับสัญญาณรบกวนสูงกว่าค่าขีดจำกัด

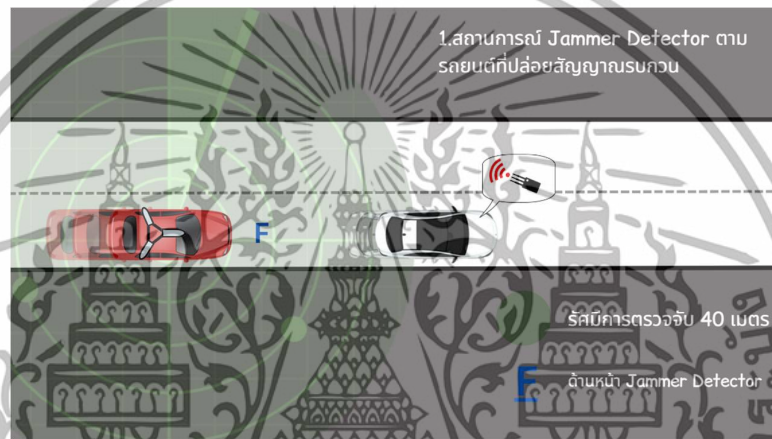
การทดลองครั้งที่	ค่าเกณฑ์ (เดซิเบล)	ค่ากำลังสูงสุดของสัญญาณ (เดซิเบล)	สถานะการแจ้งเตือน	ความถูกต้องของการแจ้งเตือน
1	-28.00	-20.07	แจ้งเตือน	ถูกต้อง
2	-28.00	-23.85	แจ้งเตือน	ถูกต้อง
3	-28.00	-26.49	แจ้งเตือน	ถูกต้อง
4	-28.00	-21.08	แจ้งเตือน	ถูกต้อง
5	-28.00	-20.82	แจ้งเตือน	ถูกต้อง
6	-28.00	-25.58	แจ้งเตือน	ถูกต้อง
7	-28.00	-24.64	แจ้งเตือน	ถูกต้อง
8	-28.00	-25.68	แจ้งเตือน	ถูกต้อง
9	-28.00	-26.04	แจ้งเตือน	ถูกต้อง
10	-28.00	-26.70	แจ้งเตือน	ถูกต้อง

จากการทดสอบการแจ้งเตือนของระบบเมื่อระดับสัญญาณรบกวนสูงเกินเกณฑ์ที่กำหนด โดยกำหนดค่าขีดจำกัดไว้ที่ - 28 เดซิเบล และค่ากำลังที่ได้รับในทุกการทดลองสูงกว่าระดับค่าขีดจำกัดพบว่าระบบสามารถตรวจจับและแจ้งเตือนการรบกวนได้อย่างถูกต้องทุกกรณี ดังนั้นการทดลองนี้ ยืนยันได้ว่าระบบสามารถแจ้งเตือนเมื่อระดับสัญญาณรบกวนสูงเกินเกณฑ์ที่กำหนดได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในการใช้งานระบบตรวจจับสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8.3 การทดสอบความต่อเนื่องในการรับสัญญาณ

การทดสอบนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความต่อเนื่องของการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส และความแม่นยำในการระบุทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ภายใต้สภาวะที่มีการรบกวนสัญญาณและการเคลื่อนที่ของสถานีเคลื่อนที่ โดยทำการวิเคราะห์จำนวนดาวเทียมที่สามารถรับได้ และ ความถูกต้องของการระบุทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน ตามการจำลองสถานการณ์ 3 รูปแบบ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.18 สถานการณ์การจำลองที่ 1

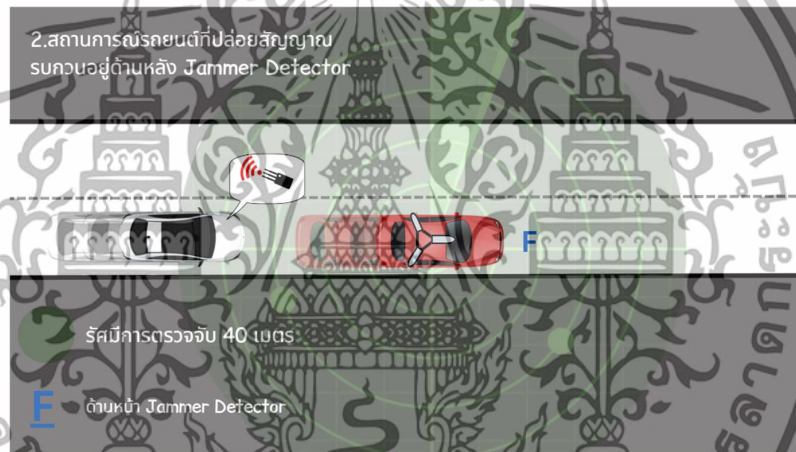
จากรูปที่ 4.18 จำลองสถานการณ์ที่ 1 โดยกำหนดให้รถยนต์ที่ปล่อยสัญญาณรบกวนอยู่ด้านหน้าเครื่องตรวจจับสัญญาณรบกวน และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เกิน 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส และความแม่นยำในการระบุทิศทางภายใต้สภาวะรบกวนสัญญาณ ในสถานการณ์ที่ 1

การบันทึกข้อมูลรอบที่	จำนวนดาวเทียมที่รับได้ (ดวง)	ความสามารถในการคำนวณตำแหน่ง	การระบุทิศทาง	ความถูกต้องของการระบุทิศทาง
1	6	คำนวณได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง
2	6	คำนวณได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง
3	5	คำนวณได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง
4	6	คำนวณได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง
5	5	คำนวณได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบันทึกข้อมูลรอบที่	จำนวนดาวเทียมที่รับได้ (ดวง)	ความสามารถในการคำนวณตำแหน่ง	การระบุทิศทาง	ความถูกต้องของการระบุทิศทาง
6	4	คำนวณได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง
7	3	คำนวณไม่ได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง
8	4	คำนวณได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง
9	5	คำนวณได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง
10	5	คำนวณได้	ด้านหน้า	ถูกต้อง



รูปที่ 4.19 สถานการณ์การจำลองที่ 2

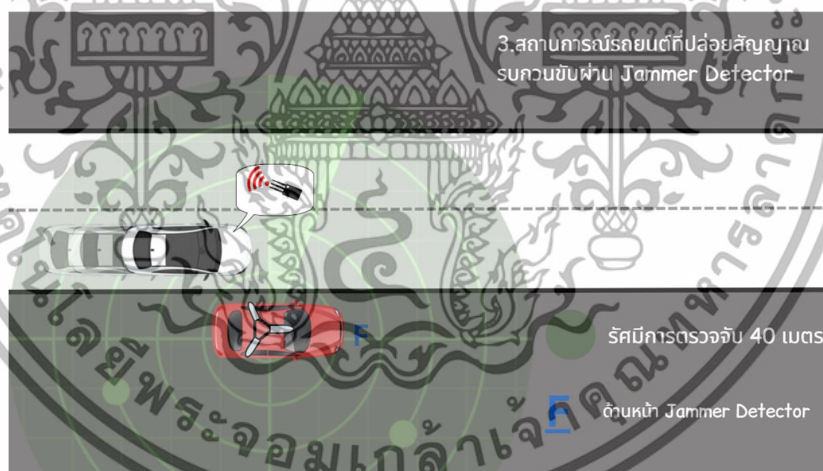
จากรูปที่ 4.19 จำลองสถานการณ์ที่ 2 โดยกำหนดให้รถยนต์ที่ปล่อยสัญญาณรบกวนอยู่ด้านหลังเครื่องตรวจจับสัญญาณรบกวน และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เกิน 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส และความแม่นยำในการระบุทิศทางภายใต้สภาวะรบกวนสัญญาณ สถานการณ์ที่ 2

การบันทึกข้อมูลรอบที่	จำนวนดาวเทียมที่รับได้ (ดวง)	ความสามารถในการคำนวณตำแหน่ง	การระบุทิศทาง	ความถูกต้องของการระบุทิศทาง
1	6	คำนวณได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง
2	5	คำนวณได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การบันทึก ข้อมูลรอบที่	จำนวนดาวเทียมที่ รับได้ (ดวง)	ความสามารถใน การคำนวณ ตำแหน่ง	การระบุ ทิศทาง	ความถูกต้อง ของการระบุ ทิศทาง
3	4	คำนวณได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง
4	4	คำนวณได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง
5	3	คำนวณไม่ได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง
6	3	คำนวณไม่ได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง
7	4	คำนวณได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง
8	4	คำนวณได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง
9	5	คำนวณได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง
10	5	คำนวณได้	ด้านหลัง	ถูกต้อง



รูปที่ 4.20 สถานการณ์การจำลองที่ 3

จากรูปที่ 4.20 จำลองสถานการณ์ที่ 3 โดยกำหนดให้รถยนต์ที่ปล่อยสัญญาณรบกวนอยู่ด้านซ้ายเครื่องตรวจจับสัญญาณรบกวน และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่เกิน 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส และความแม่นยำในการระบุทิศทางภายใต้สภาวะรบกวนสัญญาณ สถานการณ์ที่ 3

การบันทึกข้อมูลรอบที่	จำนวนดาวเทียมที่รับได้ (ดวง)	ความสามารถในการคำนวณตำแหน่ง	การระบุทิศทาง	ความถูกต้องของการระบุทิศทาง
1	5	คำนวณได้	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
2	5	คำนวณได้	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
3	5	คำนวณได้	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
4	4	คำนวณได้	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
5	4	คำนวณได้	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
6	4	คำนวณได้	ด้านขวา	ไม่ถูกต้อง
7	3	คำนวณไม่ได้	ด้านขวา	ไม่ถูกต้อง
8	3	คำนวณไม่ได้	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
9	3	คำนวณไม่ได้	ด้านซ้าย	ถูกต้อง
10	4	คำนวณได้	ด้านซ้าย	ถูกต้อง

จากผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ได้อย่างต่อเนื่องภายใต้สภาวะการรบกวนสัญญาณ โดยมีข้อผิดพลาดในการรับสัญญาณเกิดขึ้น 1 - 3 ครั้งตลอดช่วงการทดลอง ซึ่งบ่งชี้ว่าสัญญาณรบกวนส่งผลต่อการรับข้อมูลจีเอ็นเอสเอสในบางช่วงเวลา แต่ยังคงสามารถคำนวณตำแหน่งได้ในกรณีที่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมมากกว่า 4 ดวง สำหรับความแม่นยำในการระบุทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน พบว่าเมื่อมีสัญญาณรบกวนมาจากด้านหน้าและด้านหลังของระบบตรวจจับ ทิศทางที่คำนวณได้มีความแม่นยำ 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่พบข้อผิดพลาดในการประมาณทิศทาง อย่างไรก็ตามในกรณีที่แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอยู่ทางด้านซ้ายของระบบตรวจจับ พบว่ามีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น 2 ครั้ง ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดของอัลกอริทึมการประมาณมุมหรือการสะท้อนของสัญญาณรบกวนที่ส่งผลต่อการคำนวณทิศทาง โดยสรุประบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่งและระบุทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้แม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

ปริญญาานิพนธ์นี้ศึกษาวิธีการตรวจจับสัญญาณรบกวนจากระบบระบุพิกัดตำแหน่งจีเอ็นเอสเอส พัฒนาและต่อยอดระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสโดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสเพื่อรับค่ามาใช้ในการตรวจหาทิศทางและตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนสำหรับสถานีเคลื่อนที่ โดยปริญญาานิพนธ์นี้เลือกตัวอย่างสัญญาณจีเอ็นเอสเอสคือ จีพีเอส การทำงานของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่ ทางผู้จัดทำได้สร้างระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนโดยใช้ 2 หลักการได้แก่ 1) Amplitude Comparison 2) อัลกอริธึม MUSIC โดยที่ระบบตรวจจับสัญญาณจะทำการรับค่ากำลังสัญญาณมาประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ หากมีการรบกวนสัญญาณเกิดขึ้น จะทำการประมวลผลสัญญาณรอบทิศทางแล้วทำการหาทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนตามในแต่ละค่าอัตราขยายกำลังสัญญาณ จากนั้นจะมีการแจ้งเตือนผ่านหน้าจอแสดงผล และสามารถบันทึกค่าต่าง ๆ โดยทำการบันทึกเวลา ค่าความแรงสัญญาณ และมุมของแหล่งกำเนิดสัญญาณมาแสดงบนระบบส่วนติดต่อผู้ใช้ (GUI) เพื่อความสะดวกในการใช้งาน และวิเคราะห์ข้อมูลได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งการหาทิศทางของระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสสำหรับสถานีเคลื่อนที่ที่จะช่วยในการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้รอบทิศทาง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสโดยผู้จัดทำได้เสนอ 2 วิธีการได้แก่ 1) Amplitude Comparison 2) อัลกอริธึม MUSIC ซึ่งทั้ง 2 วิธีการมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน โดยที่วิธีการ Amplitude Comparison มีความแม่นยำที่สูงกว่า และใช้งานได้ง่ายกว่าแต่จำเป็นต้องใช้สายอากาศขนาดใหญ่ส่งผลให้การติดตั้งทำได้ยากขึ้น อีกวิธีการคืออัลกอริธึม MUSIC ใช้อุปกรณ์น้อยกว่า ขนาดเล็กกว่า แต่ความแม่นยำต่ำกว่าและความเร็วในการประมวลผลช้ากว่าอีกวิธี โดยรวมระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนยังพบว่าความเร็วในการประมวลผลนั้นช้า และในส่วนของ การตัดสินใจว่ามีการรบกวนหรือไม่มีการรบกวนอาจจะเกิดการตัดสินใจผิดพลาด เนื่องจากในกรณีที่เครื่องส่งสัญญาณรบกวนที่มีค่ากำลังส่งต่างกัน ทำให้การตัดสินใจว่าสัญญาณรบกวนนั้นเกิดความผิดพลาดได้ และการเลือกใช้งานอุปกรณ์ที่ยังไม่เหมาะสมกับการตั้งเป็นสถานีเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] พรนภัส งามพาณิชย์กิจ, พาณิภัทร คำของ, and พลอยนวล ชนะบุญ, “ระบบตรวจจับสัญญาณรบกวนจีเอ็นเอสเอสที่แสดงผลบนเว็บแอปพลิเคชัน,” 2023.
- [2] สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ, “ระบบนำทางด้วยดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite System).” Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.hii.or.th/%E0%B8%87%E0%B8%B2%E0%B8%99%E0%B8%82%E0%B8%AD%E0%B8%87%E0%B9%80%E0%B8%A3%E0%B8%B2/2019/10/02/%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%99%E0%B8%B3%E0%B8%97%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%94%E0%B9%89%E0%B8%A7%E0%B8%A2%E0%B8%94%E0%B8%B2%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B8%A2%E0%B8%A1-gnss-glob/>
- [3] สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), *ตำราเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศศาสตร์*, พิมพ์ครั้งที่ 3. บริษัท อมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน), 2556.
- [4] PROSOFTGPS, “What Is GPS?” Accessed: Nov. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.prosoftgps.com/Article/Detail/70661>
- [5] Equator, “L1, L2, and L5 GPS Signals.” Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://equatorstudios.com/l1-l2-and-l5-gps-signals-what-do-they-mean/>
- [6] J. Querol, G. F. Forté, and A. Camps, “Study of RFI signals in protected GNSS bands generated by common electronic devices: Effects on GNSS-R measurements,” in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2014. doi: 10.1109/IGARSS.2014.6947375.
- [7] A. B. Sergienko, “Software-defined radio in MATLAB Simulink with RTL-SDR hardware,” in *2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications, ICCTPEA 2014 - Proceedings*, 2014. doi: 10.1109/ICCTPEA.2014.6893337.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [8] Dr.Marc Lichtman, “PySDR: A Guide to SDR and DSP using Python.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: [https://pysdr.org/content/about\\_author.html](https://pysdr.org/content/about_author.html)
- [9] PropellerGraph, “RTL-SDR V3 Teardown and Analysis.” Accessed: Mar. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.onelectrontech.com/rtl-sdr-v3-teardown-and-analysis/>
- [10] Ettus, “USRP B210 (Board Only).” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>
- [11] u-blox., “NEO-M8 series Versatile u-blox M8 GNSS modules.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.u-blox.com/en/product/neo-m8-series>
- [12] TOPGNSS Store, “AN-105L.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/New-GNSS-L1-L2-L5-RTK\\_1600659701274.html](https://www.alibaba.com/product-detail/New-GNSS-L1-L2-L5-RTK_1600659701274.html)
- [13] TOPGNSS Professional GNSS Wireless Solution Provider, “AN105L RTK GPS.” Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://th.aliexpress.com/item/1005003390920840.html>
- [14] Mohammed Amine IHEDRANE and Seddik BRI, “Direction of Arrival Estimation using MUSIC, ESPRIT and Maximum-Likelihood Algorithms for Antenna Arrays,” 2015.
- [15] Dave Peterson, “Averaging Angles.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.themathdoctors.org/averaging-angles/>
- [16] Stewart Glegg and William Devenport, “Steering Vector.” Accessed: Aug. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/steering-vector>
- [17] Z. I. Khan, M. MD. Kamal, and N. Hamzah, “Analysis of performance for multiple signal classification (MUSIC) in estimating direction of arrival.”

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [18] Peng Wu, Shaojing Su, and Zhen Zuo, “Time Difference of Arrival (TDoA) Localization Combining Weighted Least Squares and Firefly Algorithm.” Accessed: Feb. 26, 2025. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6603714/>
- [19] Creative Commons Attribution-ShareAlike, “GNU Radio.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: [https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Main\\_Page](https://wiki.gnuradio.org/index.php?title=Main_Page)
- [20] Trimble, “NMEA-0183 message.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: [https://receiverhelp.trimble.com/alloy-gnss/en-us/NMEA-0183messages\\_MessageOverview.html](https://receiverhelp.trimble.com/alloy-gnss/en-us/NMEA-0183messages_MessageOverview.html)
- [21] Socorro Xovi, “Introduction to GPS Data Communications– NMEA and RTCM.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.slideserve.com/socorro/introduction-to-gps-data-nmea-rtcm>
- [22] whiterose, “Glossary used in AgopenGPS.” Accessed: Feb. 24, 2025. [Online]. Available: <https://discourse.agopengps.com/t/glossary-used-in-agopengps/10308>
- [23] A. Nehorai and E. Paldi, “Vector-sensor array processing for electromagnetic source localization.”
- [24] Paul Groves, “Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Second Edition.”
- [25] Fred Taylor, Evan Gattis, and Lucca Trapani, “Software Defined Radio for GNSS Radio Frequency Interference Localization.”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

class correlate_cc(gr.sync_block):

    def __init__(self, vec_size=1024):
        gr.sync_block.__init__(
            self,
            name="correlate_cc",
            in_sig=[np.complex64, np.complex64],
            out_sig=[(np.complex64, 4)]
        )
        self.vec_size = vec_size
        self.buffer_in0 = []
        self.buffer_in1 = []

    def work(self, input_items, output_items):
        in0 = input_items[0]
        in1 = input_items[1]

        self.buffer_in0.extend(in0)
        self.buffer_in1.extend(in1)
        num_output = 0
        out_data = output_items[0]

        while len(self.buffer_in0) >= self.vec_size:
            buf0 = np.array(self.buffer_in0[:self.vec_size], dtype=np.complex64)
            buf1 = np.array(self.buffer_in1[:self.vec_size], dtype=np.complex64)
            self.buffer_in0 = self.buffer_in0[self.vec_size:]
            self.buffer_in1 = self.buffer_in1[self.vec_size:]

            r00 = np.mean(buf0 * np.conjugate(buf0))
            r01 = np.mean(buf0 * np.conjugate(buf1))
            r10 = np.mean(buf1 * np.conjugate(buf0))
            r11 = np.mean(buf1 * np.conjugate(buf1))

            R = np.array([r00, r01, r10, r11], dtype=np.complex64)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

out_data[num_output] = R
num_output += 1
if num_output >= len(out_data):
    break

return num_output

class music_lin_array_fc(gr.sync_block):
    def __init__(self, d=0.1, wavelength=1.0, num_elements=2, num_angles=1024):
        gr.sync_block.__init__(
            self,
            name="music_lin_array_fc",
            in_sig=[(np.complex64, 4)], # รับอินพุต 2x2 (flatten 4 ช่อง)
            out_sig=[(np.float32, num_angles)] # ส่งเอาต์พุตขนาด num_angles
        )
        self.d = d
        self.wavelength = wavelength
        self.num_elements = num_elements
        self.num_angles = num_angles

        self.angles = np.linspace(-90, 90, self.num_angles, endpoint=True)

    def work(self, input_items, output_items):
        in_corr = input_items[0] # shape [N, 4]
        out_spec = output_items[0]

        noutput = 0
        for i in range(len(in_corr)):
            r00, r01, r10, r11 = in_corr[i]
            R = np.array([[r00, r01],
                          [r10, r11]], dtype=np.complex64)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

eigvals, eigvecs = np.linalg.eig(R)
idx = np.argmin(eigvals)
En = eigvecs[:, idx].reshape(-1, 1) # noise subspace vector
spec = np.zeros(self.num_angles, dtype=np.float32)
for j, angle in enumerate(self.angles):
    theta_rad = np.deg2rad(angle)
    a1 = 1.0
    a2 = np.exp(-1j * 2.0 * np.pi * (self.d / self.wavelength) * np.sin(theta_rad))
    a = np.array([a1, a2], dtype=np.complex64).reshape(-1, 1) # shape (2,1)
    denom = np.conjugate(a).T @ (En @ En.conjugate().T) @ a
    ps_val = 1.0 / np.abs(denom[0,0])
    spec[j] = ps_val.real # เก็บเป็นค่าจริง
    out_spec[noutput] = spec
    noutput += 1
return noutput
class test_sdr(gr.top_block, Qt.QWidget):
def __init__(self):
    gr.top_block.__init__(self, "Rewrite without gnuradio.aoa")
    Qt.QWidget.__init__(self)
    self.setWindowTitle("Rewrite without gnuradio.aoa")
    self.top_scroll_layout = Qt.QVBoxLayout()
    self.setLayout(self.top_scroll_layout)
    self.top_scroll = Qt.QScrollArea()
    self.top_scroll.setFrameStyle(Qt.QFrame.NoFrame)
    self.top_scroll_layout.addWidget(self.top_scroll)
    self.top_scroll.setWidgetResizable(True)
    self.top_widget = Qt.QWidget()
    self.top_scroll.setWidget(self.top_widget)
    self.top_layout = Qt.QVBoxLayout(self.top_widget)
    self.top_grid_layout = Qt.QGridLayout()

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

self.top_layout.addLayout(self.top_grid_layout)

self.samp_rate = 2e6

self.gain = 60

self.freq = 1.575e9

self.usrp_source = uhd.usrp_source(
    ", ".join((" ", "")),
    uhd.stream_args(
        cpu_format="fc32",
        args="",
        channels=list(range(0,2)),
    ),
)

self.usrp_source.set_samp_rate(self.samp_rate)
self.usrp_source.set_center_freq(self.freq, 0)
self.usrp_source.set_antenna("TX/RX", 0)
self.usrp_source.set_bandwidth(5e6, 0)
self.usrp_source.set_gain(self.gain, 0)
self.usrp_source.set_center_freq(self.freq, 1)
self.usrp_source.set_antenna("RX2", 1)
self.usrp_source.set_bandwidth(5e6, 1)
self.usrp_source.set_gain(self.gain, 1)

self.correlate_block = correlate_cc(vec_size=1024)

self.music_block = music_lin_array_fc(
    d=0.1,
    wavelength=1.0,
    num_elements=2,
    num_angles=1024
)

# Vector Sink วัสดุอุปกรณ์รูป P(θ)
self.qtgui_vector_sink_f_0 = qtgui.vector_sink_f(
    1024,          # vlen

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

-90.0,          # x_start
180.0/1023.0,   # x_step
"Angle (deg)",  # x_axis_label
"MUSIC Spectrum", # y_axis_label
"My MUSIC Plot", # name (string)
1              # nconnections (int)
)
self.qtgui_vector_sink_f_0.set_update_time(0.1)
self.qtgui_vector_sink_f_0.set_y_axis((-10), 50) # ตั้งค่าแกน Y ตามต้องการ
self.qtgui_vector_sink_f_0.enable_autoscale(True)
self.qtgui_vector_sink_f_0_win = sip.wrapinstance(
    self.qtgui_vector_sink_f_0.qwidget(), Qt.QWidget
)
self.top_layout.addWidget(self.qtgui_vector_sink_f_0_win)
self.connect((self.usrp_source, 0), (self.correlate_block, 0))
self.connect((self.usrp_source, 1), (self.correlate_block, 1))
self.connect((self.correlate_block, 0), (self.music_block, 0))
self.connect((self.music_block, 0), (self.qtgui_vector_sink_f_0, 0))

def closeEvent(self, event):
    self.stop()
    self.wait()

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

running = True
GPS_PORT = 'COM5'
GPS_BAUDRATE = 9600
gain = 0
gps_lock = threading.Lock()
latest_position = None
latest_sat_count = None
try:
    gps_serial = serial.Serial(GPS_PORT, GPS_BAUDRATE, timeout=0.5)
    print("เชื่อมต่อ GPS สำเร็จที่พอร์ต", GPS_PORT)
except Exception as e:
    print("ไม่สามารถเชื่อมต่อ GPS ได้:", e)
    gps_serial = None
def get_gps_location(serial_connection, timeout=1):
    start_time = time.time()
    while time.time() - start_time < timeout:
        try:
            with gps_lock:
                line = serial_connection.readline().decode('ascii', errors='replace').strip()
                if line.startswith('$GNGGA') or line.startswith('$GPGGA'):
                    try:
                        msg = pynmea2.parse(line)
                        if msg.latitude and msg.longitude:
                            return msg.latitude, msg.longitude
                    except pynmea2.ParseError as pe:
                        print("Parse Error:", pe)
        except Exception as ex:
            print("Error reading from serial:", ex)
    time.sleep(0.1)
    print("ไม่สามารถอ่านตำแหน่งจาก GPS ได้ภายในเวลา", timeout, "วินาที")
    return None
def apply_notch_filter(samples, notch_freq, sample_rate, quality_factor=30):

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

nyquist = sample_rate / 2.0
w0 = notch_freq / nyquist
b, a = iirnotch(w0, quality_factor)
filtered_samples = lfilter(b, a, samples)
return filtered_samples

def get_gps_data_from_line(line):
    if line.startswith('$GNGGA') or line.startswith('$GPGGA'):
        try:
            msg = pynmea2.parse(line)
            if msg.latitude and msg.longitude:
                return 'position', (msg.latitude, msg.longitude)
        except pynmea2.ParseError as pe:
            print("Parse Error:", pe)
    elif line.startswith('$GPGSA') or line.startswith('$GNGSA') or line.startswith('$GSGSA'):
        fields = line.split(',')
        satellites = fields[3:15]
        active_satellites = [sat for sat in satellites if sat.strip()]
        return 'satellite', len(active_satellites)
    return None, None

self.param_labels["Jamming Status"] = status_value
parameters = [
    "Peak Power (dB)", "Peak Frequency (MHz)",
    "Average Power (dB)", "SDR Gain (dB)",
    "Direction Angle (deg)", "Direction Strength (dB)",
    "Satellites (GPS)"
]

for i, param in enumerate(parameters):
    row_index = i + 3
    lbl = ttk.Label(self.frame_parameters, text=param + ":", font=("Helvetica", 14, "bold"))
    lbl.grid(row=row_index, column=0, sticky=tk.W, padx=5, pady=2)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        default_val = "0" if param == "SDR Gain (dB)" else "0" if param in ["Direction Angle (deg)",
"Direction Strength (dB)"] else "N/A"

```

```

    gain_values = [0, 5, 10, 20, 30]

```

```

    self.gain_buttons = {}

```

```

    for idx, val in enumerate(gain_values):

```

```

        btn = ttk.Button(self.frame_gain, text=f"{val} dB", command=lambda g=val: self.set_gain(g),
width=6)

```

```

    self.num_sdrs = 3

```

```

    self.sdr_labels = [f'SDR {i+1}' for i in range(self.num_sdrs)]

```

```

    self.center_freq = 1575.42e6

```

```

    self.sample_rate = 2.048e6

```

```

    self.num_samples = 256 * 1024

```

```

    self.notch_freq = 1576.064e6

```

```

    self.notch_freq_offset = self.notch_freq - self.center_freq

```

```

    self.quality_factor = 30

```

```

    self.sdrs = []

```

```

    for i in range(self.num_sdrs):

```

```

        try:

```

```

            sdr = RtlSdr(device_index=i)

```

```

            sdr.sample_rate = self.sample_rate

```

```

            sdr.center_freq = self.center_freq

```

```

            sdr.gain = gain

```

```

            self.sdrs.append(sdr)

```

```

        except Exception as e:

```

```

            print(f"Error initializing SDR {i}: {e}")

```

```

    self.current_lat, self.current_lng = 13.7563, 100.5018

```

```

    if gps_serial:

```

```

        pos = get_gps_location(gps_serial, timeout=1)

```

```

        if pos:

```

```

            self.current_lat, self.current_lng = pos

```

```

    self.update_map()

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

self.update_data()

def set_gain(self, new_gain):
    if hasattr(self, 'sdrs'):
        for sdr in self.sdrs:
            try:
                sdr.gain = new_gain
            except Exception as e:
                print("Error setting gain:", e)
    if hasattr(self, 'gain_value_label'):
        self.gain_value_label.config(text=f"Gain: {new_gain}")
    if "SDR Gain (dB)" in self.param_labels:
        self.param_labels["SDR Gain (dB)"].config(text=f"{new_gain}")

def init_logging(self):
    downloads_path = os.path.join(os.path.expanduser("~"), "Downloads")
    log_folder = os.path.join(downloads_path, "DataLogs")
    if not os.path.exists(log_folder):
        os.makedirs(log_folder)
    now = datetime.now()
    file_name = f"Mode2_{now.strftime('%Y-%m-%d_%H-%M-%S')}.xlsx"
    self.log_filename = os.path.join(log_folder, file_name)
    self.log_wb = Workbook()
    self.log_ws = self.log_wb.active
    self.log_ws.title = "Real-time Data"

    headers = ["Date", "Time", "Jamming Status", "Peak Power (dB)", "Peak Frequency (MHz)",
               "Average Power (dB)", "SDR Gain (dB)", "Direction Angle (deg)", "Direction Strength
(dB)",
               "Satellites (GPS)", "Latitude", "Longitude"]

    self.log_ws.append(headers)
    self.log_wb.save(self.log_filename)
    print(f"Logging initialized. Data will be saved to: {self.log_filename}")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

def log_parameters(self):
    if self.log_counter == 0:
        self.log_counter += 1
        return
    now = datetime.now()
    date_str = now.strftime("%Y-%m-%d")
    time_str = now.strftime("%H:%M:%S")
    jammer_status = self.param_labels["Jamming Status"].cget("text")
    peak_power = self.param_labels["Peak Power (dB)"].cget("text")
    peak_freq = self.param_labels["Peak Frequency (MHz)"].cget("text")
    avg_power = self.param_labels["Average Power (dB)"].cget("text")
    sdr_gain = self.param_labels["SDR Gain (dB)"].cget("text")
    direction_angle = self.param_labels["Direction Angle (deg)"].cget("text")
    direction_strength = self.param_labels["Direction Strength (dB)"].cget("text")
    satellites = self.param_labels["Satellites (GPS)"].cget("text")
    latitude = self.current_lat
    longitude = self.current_lng
    row = [date_str, time_str, jammer_status, peak_power, peak_freq, avg_power, sdr_gain,
           direction_angle, direction_strength, satellites, latitude, longitude]
    self.log_ws.append(row)
    self.log_counter += 1
    try:
        self.log_wb.save(self.log_filename)
    except Exception as e:
        print("Error saving log file:", e)

def update_data(self):
    try:
        samples_fft = self.sdrs[0].read_samples(self.num_samples)
        power, freqs = plt.psd(samples_fft, NFFT=512, Fs=self.sample_rate/1e6, visible=False)
        power_db = 10 * np.log10(power + 1e-12)
        peak_magnitude = np.max(power_db)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

peak_index = np.argmax(power_db)
peak_freq_mhz = freqs[peak_index] + (self.center_freq / 1e6)
avg_power_lin = np.mean(np.power(power, 2))
avg_power_db = 10 * np.log10(np.sqrt(avg_power_lin) + 1e-12)
self.param_labels["Peak Power (dB)"].config(text=f"{peak_magnitude:.2f}")
self.param_labels["Peak Frequency (MHz)"].config(text=f"{peak_freq_mhz:.2f}")
self.param_labels["Average Power (dB)"].config(text=f"{avg_power_db:.2f}")
self.latest_peak_magnitude = peak_magnitude
except Exception as e:
    print("Error reading from SDR1:", e)
jammer_threshold = -28
is_jammer = False
signal_strengths = []
for idx, sdr in enumerate(self.sdrs):
    try:
        samples = sdr.read_samples(self.num_samples)
        power_temp, _ = plt.psd(samples, NFFT=512, Fs=self.sample_rate/1e6, visible=False)
        power_db_temp = 10 * np.log10(power_temp + 1e-12)
        peak_val = np.max(power_db_temp)
        if peak_val > jammer_threshold:
            is_jammer = True
            filtered_samples = apply_notch_filter(samples, self.notch_freq_offset, self.sample_rate,
            self.quality_factor)
            spectrum = np.fft.ffshift(np.fft.fft(filtered_samples))
            power_spec = (np.abs(spectrum) ** 2) / self.num_samples
            signal_strength = 10 * np.log10(np.mean(power_spec) + 1e-12)
            if idx == 2:
                signal_strength -= 1
            signal_strengths.append(signal_strength)
    except Exception as e:
        print("Error processing SDR samples:", e)
        signal_strengths.append(-100)
if signal_strengths:

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

min_index = np.argmin(signal_strengths)
signal_strengths[min_index] += 2.0

if is_jammer:
    self.param_labels["Jamming Status"].config(text="Jamming", foreground="red",
font=("Helvetica", 20, "bold"))

    angles = np.linspace(0, 2 * np.pi, self.num_sdrs, endpoint=False)
    weighted_x = np.sum(np.cos(angles) * np.array(signal_strengths))
    weighted_y = np.sum(np.sin(angles) * np.array(signal_strengths))
    average_angle = np.arctan2(weighted_y, weighted_x)
    direction_deg = int(round(np.degrees(average_angle) % 360))
    direction_db = np.max(signal_strengths)
    self.param_labels["Direction Angle (deg)"].config(text=f"{direction_deg} องศา")
    self.param_labels["Direction Strength (dB)"].config(text=f"{direction_db:.2f}")

def gps_thread():
    global latest_position, latest_sat_count, running
    if gps_serial is None:
        print("GPS serial not available.")
        return
    print("Starting GPS reader thread...")
    while running:
        try:
            with gps_lock:
                line = gps_serial.readline().decode('ascii', errors='ignore').strip()
            if line:
                data_type, value = get_gps_data_from_line(line)
                if data_type == 'position':
                    latest_position = value
                elif data_type == 'satellite':
                    latest_sat_count = value
        except Exception as e:
            print("GPS thread error:", e)
        time.sleep(0.1)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวน

### 1. บทนำ

อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรบกวนนี้ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยในการระบุและวิเคราะห์แหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนที่ส่งผลกระทบต่อการใช้สาย ไร้สาย โดยรองรับย่านความถี่หลักที่ใช้งานทั่วไป เช่น 800 – 2700 MHz และสามารถบันทึกข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ย้อนหลัง

### 2. อุปกรณ์ที่ใช้

#### 2.1 ฮาร์ดแวร์ที่จำเป็น

- RTL-SDR Dongle (ตัวรับสัญญาณ)
- Directional Antenna (เสาอากาศแบบทิศทาง)
- คอมพิวเตอร์ หรือ อุปกรณ์ประมวลผล
- สาย Micro USB to USB (สำหรับจ่ายไฟ)

#### 2.2 ซอฟต์แวร์ที่จำเป็น

- โปรแกรม GUI ควบคุมอุปกรณ์
- GUI libraries และ RTL-SDR libraries

### 3. ขั้นตอนการติดตั้งและใช้งาน

#### 3.1 การติดตั้งซอฟต์แวร์

สำหรับ Windows

- ดาวน์โหลดและติดตั้ง RTL-SDR Driver
- ใช้ Zadig เพื่อติดตั้งไดรเวอร์
- ดาวน์โหลดโปรแกรม Direction Detector Jammer เก็บไว้ภายในโฟลเดอร์เดียวกัน

#### 3.2 การเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์

1. เชื่อมต่อ RTL-SDR Dongle กับคอมพิวเตอร์ผ่าน USB
2. ต่อเสาอากาศเข้ากับ RTL-SDR
3. เปิดโปรแกรม GUI เพื่อเริ่มต้นการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4. วิธีใช้งานอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ

### 4.1 เปิดใช้งานซอฟต์แวร์

1. เปิดโปรแกรม GUI ที่ติดตั้งไว้ดาวโหลดได้ที่

<https://drive.google.com/drive/folders/1HaOd16yaSpZppiAKSsCHYsLDR3SLaQouw?usp=sharing>

โดยติดตั้งที่ Desktop เริ่มการใช้งานด้วยเข้าโปรแกรม Jammer Detector.bat

2. เลือกโหมดที่ต้องการใช้งาน:
  - o Mode 1: ตรวจจับความถี่ที่กำหนด
  - o Mode 2: วิเคราะห์ทิศทางสัญญาณ
  - o Data Log: ข้อมูลที่บันทึกสำหรับการวิเคราะห์ย้อนหลัง

### 4.2 ตรวจจับและวิเคราะห์สัญญาณ

1. สามารถกำหนดค่าความถี่ที่ต้องการตรวจจับ (ตัวอย่าง: 1575.42 MHz สำหรับ L1 GPS)
2. เปิดการวิเคราะห์สัญญาณแบบเรียลไทม์
3. ปรับอัตราขยายของสัญญาณ (Gain) เพื่อให้ค่ากำลังสัญญาณอยู่ในระดับที่เหมาะสม
4. ระบบจะแสดงค่าความแรงของสัญญาณและทิศทางของแหล่งกำเนิด

### 4.3 บันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลย้อนหลัง

1. บันทึกข้อมูลอัตโนมัติ เพื่อเก็บค่าต่าง ๆ ลงไฟล์ Log หรือ CSV
2. สามารถนำข้อมูลไปเปิดดูและวิเคราะห์ในโปรแกรม Excel

## 5. ข้อควรระวัง

- การใช้อุปกรณ์ตรวจจับและรบกวนสัญญาณอาจผิดกฎหมายในบางพื้นที่ กรุณาตรวจสอบกฎระเบียบก่อนใช้งาน
- ควรใช้งานในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับโหมดการใช้งานเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้