

การศึกษาทดลองวัดของการหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยใช้สัญญาณ  
โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2  
ด้วยอัลกอริทึมแบบคลีน

EXPERIMENTAL STUDY OF OUTDOOR LOCALIZATION USING DTTV  
SIGNALS BASED DVB-T2 STANDARD WITH CLEAN ALGORITHM



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาทดลองวัดของการหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยใช้สัญญาณ  
โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2  
ด้วยอัลกอริทึมแบบคลีน

EXPERIMENTAL STUDY OF OUTDOOR LOCALIZATION USING DTTV  
SIGNALS BASED DVB-T2 STANDARD WITH CLEAN ALGORITHM



โดย  
นางสาวกมลชนก อินทสุวรรณ 61010015  
นางสาวกฤติมา ดวงสีเสน 61010034  
นางสาวจิตติมา ศรีสุภาพ 61010143

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ. ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล  
ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาทดลองวัดของการหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดิน  
ระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ด้วยอัลกอริทึมแบบคลีน

EXPERIMENTAL STUDY OF OUTDOOR LOCALIZATION USING DTTV SIGNALS  
BASED DVB-T2 STANDARD WITH CLEAN ALGORITHM

ผู้จัดทำ

- |                  |              |          |
|------------------|--------------|----------|
| 1. นางสาวกมลชนก  | อินทสรสวรรค์ | 61010015 |
| 2. นางสาวกฤติมา  | ดวงสีเสนา    | 61010034 |
| 3. นางสาวจิตติมา | ศรีสุภาพ     | 61010143 |



(ผศ. ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ ผศ. ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล และ ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา อนุญาตให้ใช้งานอุปกรณ์ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำงานรวมถึงประสบการณ์ที่ดี และฝึกฝนให้มีความสามารถในการทำปริญญาานิพนธ์ได้

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาเอกในห้องปฏิบัติการของ ผศ. ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ตลอดจนพี่ทุกท่านที่ให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และ ความช่วยเหลือต่าง ๆ และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการของภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และวัดปลุกศรีทธา ที่ให้สถานที่เอื้อเพื่อสำหรับการใช้อุปกรณ์และเครื่องวัดในการทำการทดลองจนกระทั่งโครงการสำเร็จไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา และเพื่อน ๆ ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้คอยให้กำลังใจและการสนับสนุนด้านงบประมาณในการทำงาน รวมถึงความห่วงใย ความเข้าใจและแรงบันดาลใจที่ช่วยผลักดันให้เราทำงานได้เป็นอย่างดีและขอขอบคุณคณาจารย์ในภาควิชาทุกท่านด้านการศึกษาและให้กำลังใจด้วยดี

นางสาวกมลชนก	อินทสรสวรรค์
นางสาวกฤติมา	ดวงสีเสณ
นางสาวจิตติมา	ศรียุภาพ
	ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาทดลองวัดของการหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์  
ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ด้วยอัลกอริทึมแบบคลื่น  
EXPERIMENTAL STUDY OF OUTDOOR LOCALIZATION USING DTTV  
SIGNALS BASED DVB-T2 STANDARD WITH CLEAN ALGORITHM

โดย	นางสาวกมลชนก	อินทสรสวรรค์	61010015
	นางสาวกฤติมา	ดวงสีเสณ	61010034
	นางสาวจิตติมา	ศรีสุภาพ	61010143

อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร.พิชญ	สุพรรณกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ. ดร.สถาพร	พรหมวงศ์

#### บทคัดย่อ

ปัจจุบันการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณคลื่นวิทยุ ซึ่งมีหลายประเภท เช่น สัญญาณวิทยุ เอเอ็ม สัญญาณวิทยุเอฟเอ็ม สัญญาณโทรทัศน์ สัญญาณไร้สาย เป็นต้น ได้มีการศึกษาวิจัยมาแล้วมากมาย สำหรับปริญญาานิพนธ์นี้ได้พิจารณาการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มาใช้ในการหาตำแหน่ง โดยได้ออกแบบจำลองการวัดที่จำนวน 121 ตำแหน่งครอบคลุมพื้นที่  $10 \times 10$  ตารางเมตร โดยติดตั้งสายอากาศรับสูง 1 เมตร สำหรับความสูงอ้างอิง และ 6 เมตร ตามกำหนดของ กสทช. ที่ระยะทางจากสายอากาศส่งมายังสายอากาศรับประมาณ 26 กิโลเมตร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อวัดและบันทึกผล นำผลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์ และประเมินผลเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถี และความผิดพลาดของระยะทาง โดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือและอัลกอริทึมแบบคลื่นเพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมที่สุด และสามารถหาตำแหน่งได้แม่นยำมากขึ้น จากการใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือและอัลกอริทึมแบบคลื่น เห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดทางระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยลง ดังนั้นก็จะมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น และจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาในอนาคตต่อไป  
ได้

## ABSTRACT

Currently, positioning uses radio waves such as AM radio signals, FM radio signals, telephone signals, and wireless signals. Which have been studied by many research for this thesis, consider finding positions using signals. The DVB-T2 standard digital terrestrial television signal was used for positioning by designing a measurement model of 121 positions covering an area of  $10 \times 10$  square meters. By installing antenna receiving height 1 meter for reference height and 6 meters as specified by the NBTC. At the distance from the transmit antenna to the receiving antenna is about 26 kilometers, using spectrum analyzers to measure and collect the results for analysis and compare the path loss and distance errors. By using a fingerprinting technique and clean algorithm and a clean algorithm to get the most suitable signal. and can locate more accurately by using digital terrestrial television signals, The DVB-T2 standard digital terrestrial television signal and fingerprinting technique and clean algorithm. It can be seen that the distance error is less. So, it will be more accurate and will be the basis for future studies.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	XIII
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	3
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	5
2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	8
2.3 ภาพรวมของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	10
2.4 การแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า	10
2.5 COFDM	12
2.6 รูปแบบการมอดูเลตและแถบป้องกัน	15
2.7 ระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินดิจิทัล	17
2.8 การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	20
2.9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกอากาศสำหรับประเทศไทย	22
2.10 ประโยชน์ของระบบโทรทัศน์ดิจิทัล	26
2.11 การประยุกต์ใช้ระบบดิจิทัล	29
2.12 ทฤษฎีการหาตำแหน่ง	37

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.13 การคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ	47
2.14 ลายนิ้วมือ	49
2.15 ทฤษฎีอัลกอริทึมแบบคลีน	50
2.16 ทฤษฎีการสูญเสียเชิงวิถึ	56
<b>บทที่ 3 การออกแบบและขั้นตอนการทดลอง</b>	<b>58</b>
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	58
3.2 การออกแบบจำลองการหาตำแหน่งในพื้นที่จริงภายนอกอาคาร	59
3.3 การทดลองการหาตำแหน่งในพื้นที่จริงภายนอกอาคาร	61
3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	66
3.5 กำลังส่งของเครื่องส่ง	67
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>68</b>
4.1 ความแรงของสัญญาณที่รับได้	69
4.2 ลายลักษณะของตำแหน่งอ้างอิงบนพื้นฐานค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้	71
4.3 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ	79
4.4 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม	81
4.5 ค่าสูญเสียเชิงวิถึ	82
4.6 ช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	83
4.7 ลายลักษณะของตำแหน่งอ้างอิงบนพื้นฐานค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีน	84
4.8 การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ	92
4.9 การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน	98

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.10 การเปรียบเทียบระหว่างการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกน ลายนิ้วมือกรณีไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและใช้อัลกอริทึมแบบ คลีน	105
<b>บทที่ 5   สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>113</b>
5.1   สรุปผล	113
5.2   ข้อเสนอแนะ	115
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>117</b>
<b>ภาคผนวก   ผลการวัดความแรงของสัญญาณที่ได้รับ</b>	<b>121</b>

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	บล็อกไดอะแกรมของการทดลองหาตำแหน่ง	3
2.1	ระบบโทรทัศน์ที่ใช้งานอยู่ทั่วโลก	6
2.2	โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ของประเทศไทย	7
2.3	การป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	11
2.4	โครงสร้างของการป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	12
2.5	ความกว้างของช่องสัญญาณในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	12
2.6	สัญลักษณ์และช่วงป้องกันในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	13
2.7	สเปกตรัมของแถบป้องกันของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	14
2.8	สเปกตรัมของ OFDM	15
2.9	แสดงรูปแบบการมอดูเลตที่สามารถใช้งานได้ในระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	15
2.10	แผนภาพคอนสเทลเลชันที่ถูกหมุน	17
2.11	การแมปปีงของการหมุนแผนภาพคอนสเทลเลชันและการดีเลย์ Q	17
2.12	การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล	18
2.13	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบรวมสัญญาณ	19
2.14	ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ	19
2.15	การเชื่อมต่อระบบเครื่องส่งโทรทัศน์ที่สถานีโครงข่าย	20
2.16	สายอากาศสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ชนิดติดตั้งบนหลังคา	21
2.17	ภาพเปรียบเทียบระหว่างความละเอียดสูงและความละเอียดปกติ	22
2.18	โครงสร้างของ MPEG-4/HE-AACV2	22
2.19	การใช้ความกว้างช่องสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพ	27
2.20	สัญญาณมีคุณภาพสูง	27

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.21	ความเป็นมาตรฐานของการเข้ารหัสแบบ MPEG-2	28
2.22	ขนาดของการมองภาพที่ให้ผู้ชมมองภาพที่ดีขึ้น	29
2.23	การประยุกต์ใช้ระบบดิจิทัล	29
2.24	คงทนต่อปรากฏการณ์พายุหิมะ	31
2.25	ช่วงเวลาป้องกัน	32
2.26	ผังรายการอิเล็กทรอนิกส์	33
2.27	บริการการเชื่อมต่อแบบออนไลน์	33
2.28	บริการคำบรรยาย	34
2.29	บริการการรับชมแบบหลายหลายมุมมอง	35
2.30	การเตือนภัยฉุกเฉิน	36
2.31	การปกป้องลิขสิทธิ์	36
2.32	ระยะทางระหว่างตำแหน่งในกรณีฉุกเฉิน	38
2.33	ระยะทางระหว่างตำแหน่งในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคาร	39
2.34	การพิจารณามุมของสัญญาณที่มาถึงระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่ง	39
2.35	การพิจารณามุมของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศอาร์เรย์แนวตรงแบบยูนิฟอร์ม	40
2.36	ไฮเปอร์โบล่าซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของตำแหน่ง	41
2.37	กระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะ	43
2.38	กระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีสามเส้า	44
2.39	กระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีไฮเปอร์โบล่า	45
2.40	กระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือ	46
2.41	กระบวนการสร้างฐานข้อมูลของเทคนิคสแกนลายนิ้วมือ	47
2.42	กระบวนการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือ	47
2.43	อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน $k$ ตัว	48
2.44	การใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์สัญญาณรบกวนแสดงให้เห็นสัญญาณที่ฝังรับ	50

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.45 ระบบเชิงเส้นไม่แปรผันตามเวลา	51
2.46 ความสัมพันธ์อินพุต-เอาต์พุตสำหรับสหสัมพันธ์ข้าม $R_{yx}(\tau)$	53
2.47 โครงสร้างของอัลกอริทึมแบบคลีน	55
3.1 สายอากาศยี่ห้อ EMCO MODEL รุ่น 3121C	58
3.2 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่	59
3.3 แบบจำลองและการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง	60
3.4 ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับด้วยเว็บไซต์ระบบ ตรวจสอบพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณที่วัดดิจิทัล	61
3.5 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองหาตำแหน่ง	62
3.6 ตำแหน่งที่กำหนดการวัด 121 ตำแหน่ง ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	63
3.7 ตำแหน่งที่กำหนดการวัด 121 ตำแหน่ง ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร	63
3.8 การตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่และวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ ได้รับ	65
3.9 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองการส่งสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินระบบ ดิจิทัลด้วยอัลกอริทึมแบบคลีนสำหรับระบบการหาตำแหน่งในกระบวนการ สร้างฐานข้อมูล	66
3.10 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองการส่งสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินระบบ ดิจิทัลด้วยอัลกอริทึมแบบคลีนสำหรับระบบการหาตำแหน่งในกระบวนการ หาตำแหน่ง	66
4.1 บล็อกไดอะแกรมของการประเมินผลการทดลอง	68
4.2 หน้าจอแสดงการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ แถบความถี่	69
4.3 ข้อมูลค่าความแรงของสนามไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง	69
4.4 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	70
4.5 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร	71

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	72
4.7 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร	73
4.8 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	74
4.9 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร	74
4.10 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	75
4.11 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร	76
4.12 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	77
4.13 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร	77
4.14 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	78
4.15 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร	79
4.16 เปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	80
4.17 เปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร	80
4.18 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	81
4.19 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร	81
4.20 ค่าสูญเสียเชิงวิถึทั้ง 5 MUX ที่ความสูงสายอากาศรับ 1 เมตร	82
4.21 ค่าสูญเสียเชิงวิถึทั้ง 5 MUX ที่ความสูงสายอากาศรับ 6 เมตร	82
4.22 ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ได้รับก่อนอัลกอริทึมแบบคลีนและหลังอัลกอริทึมแบบคลีน	83
4.23 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีนที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร	85

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ สายอากาศรับสูง 6 เมตร	85
4.25 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ สายอากาศรับสูง 1 เมตร	86
4.26 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ สายอากาศรับสูง 6 เมตร	87
4.27 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ สายอากาศรับสูง 1 เมตร	88
4.28 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ สายอากาศรับสูง 6 เมตร	88
4.29 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ สายอากาศรับสูง 1 เมตร	89
4.30 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ สายอากาศรับสูง 6 เมตร	90
4.31 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ สายอากาศรับสูง 1 เมตร	91
4.32 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่ สายอากาศรับสูง 6 เมตร	91
4.33 เปรียบเทียบความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่ สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร	95
4.34 เปรียบเทียบความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้าน ใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัวที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร	98
4.35 เปรียบเทียบความผิดพลาดระยะทางโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับ อัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร	101

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36	105
เปรียบเทียบความผิดพลาดระยะทางโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลิ่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร	
4.37	107
เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่น	
4.38	108
เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัวกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่น	
4.39	109
เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่น	
5.1	116
แบบจำลองในการทดลองสำหรับงานวิจัยในอนาคต	

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความจุช่องสัญญาณของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	10
2.2 ความกว้างของช่องสัญญาณในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2	13
2.3 พารามิเตอร์ที่ ITU แนะนำให้ใช้สำหรับการทดลองออกอากาศในระยะแรก	23
2.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ	25
2.5 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำหรับช่องรายการโทรทัศน์	26
3.1 คุณสมบัติของสายอากาศภาครับ	59
3.2 พารามิเตอร์ของการหาตำแหน่งในพื้นที่จริงภายนอกอาคาร	64
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	67
3.4 กำลังส่งของเครื่องส่ง	67
4.1 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด	94
4.2 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด	94
4.3 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัว	97
4.4 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัว	97
4.5 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัว	97
4.6 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน	101
4.7 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน	101

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.8	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน	103
4.9	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน	104
4.10	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และ 6 เมตร โดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน	104
4.11	เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน	106
4.12	เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัวกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน	108
5.1	การเปรียบเทียบความแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน	115

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล (DTTB) ได้รับการพัฒนาและใช้ในการออกอากาศรายการโทรทัศน์ ถือได้ว่ามีบทบาทและความสำคัญมากสำหรับการให้บริการข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ และทำให้ประชาชนได้รับข้อมูลข่าวสาร ความรู้ได้อย่างทันทั่วถึง เพื่อนำเอาข้อมูลข่าวสาร หรือสาระความรู้เหล่านั้น มาพัฒนาคุณภาพชีวิต สังคม และ ประเทศชาติต่อไป ไม่ว่าจะอยู่บริเวณไหนของเขตเมือง และ ชุมชน โดยสามารถนำมาใช้ในระบบการหาตำแหน่งด้วยการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 สำหรับระบบการหาตำแหน่งคือความครอบคลุมของสัญญาณในพื้นที่กว้างมากทั้งภายนอกอาคารและภายในอาคาร เพื่อแก้ไขความไม่ครอบคลุมของระบบหาตำแหน่งบนพื้นโลกหรือจีพีเอส (Global Positioning System: GPS) จีพีเอสนั้นไม่สามารถทำงานได้ดีมากนักภายในอาคารเนื่องจากไม่สามารถรับสัญญาณจากดาวเทียมได้

สำหรับระบบหาตำแหน่งภายในอาคารนั้นต้องการความแม่นยำในระดับเมตร มีเทคนิคในการหาตำแหน่งจำนวนมากถูกเสนอเพื่อทำการคาดคะเนตำแหน่ง เทคนิคเหล่านั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ เทคนิคทางเรขาคณิต และเทคนิคการจับคู่หรือเรียกว่าเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ สำหรับเทคนิคทางเรขาคณิตนั้นจะพิจารณาลักษณะทางเรขาคณิตจากพารามิเตอร์ของสัญญาณ แล้วนำมาคาดคะเนตำแหน่งเป้าหมาย เช่น วิธีสามเหลี่ยมระยะ วิธีสามเส้า และวิธีไฮเพอร์โบล่า เป็นต้น ในขณะที่เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือจะใช้เอกลักษณ์ของพารามิเตอร์ของสัญญาณในแต่ละตำแหน่งเป็นต้นแบบ แล้วนำเอาพารามิเตอร์ของสัญญาณชนิดเดียวกันมาคาดคะเนตำแหน่งเป้าหมาย ซึ่งวิธีนี้จะสามารถช่วยลดผลกระทบที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งจากสภาวะแวดล้อม ทั้งในเรื่องของการเกิดคลื่นหลายวิถี รวมไปถึงการแทรกสอดของสัญญาณที่ทำให้คุณลักษณะของช่องสัญญาณเปลี่ยนแปลงไป

การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือนั้นมีกระบวนการคิดคล้ายกับการสแกนลายนิ้วมือมนุษย์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะทำการเก็บรวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ที่สนใจไว้ในฐานข้อมูลเพื่อเก็บไว้เป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่ง หลังจากนั้นในขั้นตอนที่สอง จะทำการใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ของตำแหน่งเป้าหมายหรือตำแหน่งที่ต้องการทราบเปรียบเทียบกับข้อมูลในฐานข้อมูลที่เก็บไว้ในขั้นตอนแรกเพื่อทำการคาดคะเนตำแหน่งเป้าหมาย การหาตำแหน่งโดย

ใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือนั้นให้ความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงแต่ก็ยังมีข้อเสียคือใช้เวลาค่อนข้างมากในการคาดคะเนตำแหน่งเป้าหมาย

ปริญญาานิพนธ์นี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาระบบหาตำแหน่งด้วยวิธีการพิจารณาความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งบนเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาคือค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ โดยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือต้องการเพียงหนึ่งสถานีฐานเพื่อหาตำแหน่งเป้าหมาย นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงความเที่ยงตรงและความแม่นยำของระบบหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่นบนเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลอีกด้วย มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล ซึ่งอัลกอริทึมแบบคลื่นมีคุณสมบัติเพื่อขจัดช่องสัญญาณรบกวน การจางหาย (Fading) อันเป็นสาเหตุมาจากคลื่นหลายวิถี ทำให้สัญญาณส่งชัดเจนยิ่งขึ้นเพื่อความถูกต้องแม่นยำของระบบการหาตำแหน่ง เทคนิคนี้มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์หาตำแหน่งในเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2
- 2) ออกแบบและทำการทดลองวัดการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2
- 3) ประเมินผลเปรียบเทียบและวิเคราะห์การหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ด้วยอัลกอริทึมแบบคลื่น

## 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

- 1) ศึกษาทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2
- 2) ออกแบบและทำการทดลองวัดการหาตำแหน่งในพื้นที่ภายนอกอาคารโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐาน DVB-T2 ด้วยเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ
- 3) ประเมินผลเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการหาตำแหน่งเชิงสถิติ

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

สำหรับขั้นตอนการศึกษาในปริญญานิพนธ์นี้ ในขั้นแรกทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาแนวคิดและทฤษฎีต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ หลังจากได้แนวคิดแล้วในขั้นตอนต่อมาจึงได้ทำการออกแบบจำลองการหาตำแหน่ง จากนั้นทำการเตรียมอุปกรณ์สายอากาศและเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่สัญญาณโทรทัศน์ระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในขั้นถัดมาก็ทำติดตั้งอุปกรณ์และทดลองวัดหาตำแหน่งในพื้นที่จริงตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้ แล้วหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ และหาตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นร่วมกับเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือโดยพิจารณาจากค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ในขั้นตอนสุดท้ายทำการประเมินผลเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการหาตำแหน่งเชิงสถิติ ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวได้ทำการแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองหาตำแหน่ง

ปริญญาบัตรฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของปริญญาบัตรและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดิน ระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ทฤษฎีการหาตำแหน่ง พารามิเตอร์ของสัญญาณที่ใช้ในการหาตำแหน่ง เทคนิคการหาตำแหน่ง และเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและขั้นตอนการทดลอง ซึ่งได้แก่ การออกแบบจำลองการหาตำแหน่งในพื้นที่จริงภายนอกอาคาร เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง กำลังส่งของเครื่องส่ง และทดลองหาตำแหน่งในพื้นที่จริงภายนอกอาคาร

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลอง โดยจะแสดงผลของการสร้างลายลักษณ์ของค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ค่าสูญเสียเชิงวิถี ช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ลายลักษณ์ของค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น และการประเมินผลเปรียบเทียบการใช้อัลกอริทึมในการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะจากการศึกษาทดลองวัดของการหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ด้วยอัลกอริทึมแบบคลื่น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ทฤษฎีการหาตำแหน่ง เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ และอัลกอริทึมแบบคลื่น ในส่วนของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมาและพารามิเตอร์มาตรฐานการให้บริการที่สำนักงาน กสทช กำหนด จากนั้นในส่วนของทฤษฎีการหาตำแหน่งจะกล่าวถึงพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ใช้ในการหาตำแหน่งรวมถึงเทคนิคการหาตำแหน่ง ในส่วนของเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือจะกล่าวถึงกระบวนการที่ใช้ในขั้นตอนการฝึกฝนและขั้นตอนการทดสอบ ในส่วนของอัลกอริทึมแบบคลื่นจะกล่าวถึงขั้นตอนการทำงานของกระบวนการคลื่น

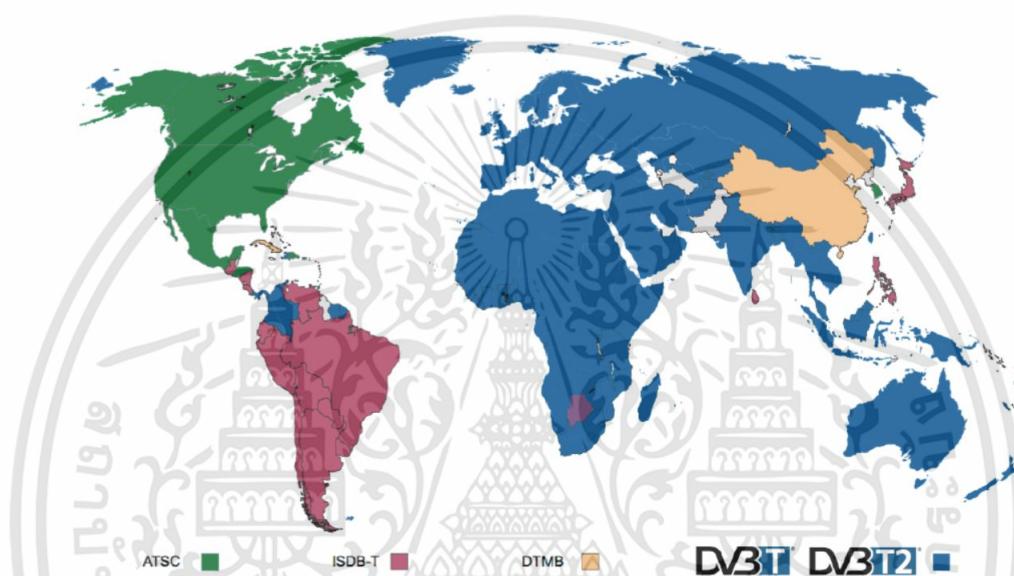
#### 2.1 เทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

เทคโนโลยีการส่งออกอากาศระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (DVB-T2) ที่ได้ถูกนำมาใช้ทดแทนระบบการออกอากาศโทรทัศน์ระบบอนาล็อกเดิม ซึ่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 1 (DVB-T) เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาโดย DVB Project ในปี 2006 จุดประสงค์หลักเพื่อที่จะเพิ่มความจุ (Capacity), และความยืดหยุ่น (Flexibility) ให้กับระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 1 ซึ่งในเวอร์ชันแรกของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลถูกประกาศโดย ETSI ในชื่อ EN 302 755 ในปี 2009 [1]

ระบบการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ถูกพัฒนาต่อจากโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 1 ซึ่งการกำเนิดขึ้นของระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นได้รับการผลักดันจากประสิทธิภาพสเปกตรัมที่สูงขึ้นเพื่อให้สามารถเปลี่ยนถ่ายจากระบบอนาล็อกเดิมได้เพื่อให้สามารถเปลี่ยนถ่ายจากระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 1 ได้ ประสิทธิภาพสเปกตรัมที่สูงขึ้น หมายถึง ด้วยจำนวนสเปกตรัมที่เท่ากันสามารถที่จะส่งออกอากาศช่องโทรทัศน์ได้มากกว่า หรือ สามารถที่จะส่งออกอากาศจำนวนช่องเท่าเดิมได้ ในคุณภาพของสัญญาณภาพและเสียงที่สูงกว่า และ คุณภาพของพื้นที่ให้บริการที่ดีกว่า

มาตรฐานของโทรทัศน์ภาคพื้นดินที่ถูกใช้งานอยู่ทั่วโลก ได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งมาตรฐานแรกเป็นมาตรฐาน Advance Television System Committee in USA (ATSC) ซึ่งถูกใช้งานอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา และ เกาหลีใต้ มาตรฐานต่อมาคือ Integrated

Services Digital Broadcasting (ISDB) ซึ่งถูกใช้งานอยู่ในประเทศญี่ปุ่น บราซิล และกลุ่มประเทศอเมริกาใต้ มาตรฐานถัดมาเป็น Digital Multimedia Broadcasting (DMB-T) ที่ถูกพัฒนาและใช้งานอยู่ในประเทศจีน และมาตรฐานสุดท้ายคือ Digital Video Broadcasting (DVB) เป็นมาตรฐานที่ถูกใช้งานอยู่เป็นจำนวนมากในหลายประเทศ รวมทั้งประเทศไทย



รูปที่ 2.1 ระบบโทรทัศน์ที่ใช้งานอยู่ทั่วโลก [2]

ในเงื่อนไขของการพัฒนา Source Coding (MPEG-4) ถูกนำมาใช้งาน อัตราขยายในการส่งออกอากาศนั้นเป็นที่น่าสังเกต ยกตัวอย่างเช่น สามารถที่จะส่งออกอากาศหลายโปรแกรมหรือ ช่องได้ภายใน 1 มัลติเพลกซ์ ดังรูปที่ 2.2 ในขณะที่ยังคงคุณภาพของสัญญาณเสียงและภาพอยู่เช่นเดิม หรือ สามารถที่จะส่งได้หลายช่องสัญญาณหรือโปรแกรมในคุณภาพแบบมาตรฐานความละเอียดสูง HD (High Definition) [3]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ของประเทศไทย [4]

และอีกประการหนึ่งคือ พื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณที่ถูกส่งออกจากเครื่องส่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สามารถที่จะเพิ่มขึ้นอย่างมาก ในขณะที่ยังคงคุณลักษณะของเครื่องส่ง เช่น รูปแบบการรับสัญญาณ คุณภาพของสัญญาณภาพ และ จำนวนของช่องสัญญาณ

### 2.1.1 ประวัติความเป็นมา

ในปี ค.ศ. 2006 การแพร่สัญญาณภาพดิจิทัลตัดสินใจที่จะศึกษาทางเลือกสำหรับการอัปเดตระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลมาตรฐานหรือรุ่นที่ 1 โดยตั้งชื่อกลุ่มการศึกษานี้อย่างเป็นทางการว่า TM-T2 (Technical Module on Next Generation DVB-T) เพื่อที่จะพัฒนาโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการในเชิงพาณิชย์และเทคโนโลยี ในเฟสแรกของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 2007 เพื่อที่จะทำให้การรับสัญญาณแบบประจำที่และแบบพกพาได้ดีที่สุด โดยใช้ระบบสายอากาศเดิมเนื่องจากในเฟสที่ 2 และ 3 จะทำการศึกษาเรื่องการให้บริการข้อมูลที่มีคุณภาพสูง (ด้วยโครงสร้างสายอากาศใหม่) และ การรับสัญญาณแบบเคลื่อนที่ โดยระบบใหม่นี้จะให้ความจุช่องสัญญาณที่เพิ่มขึ้นอย่างน้อย 30% เมื่อเทียบกับระบบเดิม ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานช่องสัญญาณที่โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 1 ใช้งานอยู่ [5]

สถานีโทรทัศน์ BBC ITV Channel 4 Channel 5 ได้บรรลุข้อตกลงร่วมกับหน่วยงานที่ออกข้อกำหนดคือ OFCOM ประเทศอังกฤษเพื่อที่จะเปลี่ยนผู้ให้บริการ Multiplexer 1 รายใน

ประเทศอังกฤษไปใช้งานระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เพื่อที่จะเพิ่มความจุช่องสัญญาณสำหรับโทรทัศน์ความละเอียดสูงผ่านทางอากาศภาคพื้นดิน โดยพวกเขาคาดหวังภูมิภาคแรกที่จะให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ Granada ในเดือน พ.ย. ปี ค.ศ. 2009 และ OFCOM ได้ประกาศใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในวันที่ 3 เม.ย. ค.ศ. 2008 [5]

## 2.2 ลักษณะโดยทั่วไปของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

ในระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลนั้นได้ใช้วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบ COFDM แต่ด้วยแผนภาพคอนสเทลเลชันที่เปลี่ยนแปลงและขยายออกไป การป้องกันข้อผิดพลาดที่ถูกนำมาใช้งานคือ วิธีแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า (Forward Error Correction: FEC) ถูกกำหนดอยู่ใน DVB-S2 เช่น การเข้ารหัส BCH ที่ส่วนนอกของการป้องกันข้อผิดพลาด และการเข้ารหัส LDPC ที่ส่วนในของการป้องกันข้อผิดพลาดการด้วยการสับเปลี่ยนบิต (Bit Interleaving) [5]

โครงสร้างของการแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้าทั้งหมดสอดคล้องกับโครงสร้างเฟรมของ DVB-S2 รหัส LDPC (Low Density Parity Check Codes) เป็นที่รู้จักตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 แต่ต้องใช้กำลังในการประมวลผลในเครื่องรับสัญญาณมาก และสามารถใช้งานได้ เนื่องจากเทคโนโลยีขีพประมวลผลที่พัฒนาขึ้นมา ตั้งแต่ช่วงฤดูใบไม้ผลิของปี ค.ศ. 2006 จนถึงเดือน มี.ค. ปี ค.ศ. 2008 มีการประชุมโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 จำนวน 7 ครั้ง นานหลายวัน การประชุมในเดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2008 ได้มีการนำเอกสารเบื้องต้นมาใช้ซึ่งได้รับการตีพิมพ์โดย ETSI เป็นฉบับร่างเมื่อเดือน พ.ค. ปี ค.ศ. 2008 และในฤดูใบไม้ร่วง ปี ค.ศ. 2008 ได้มีการนำแนวทางการดำเนินงานและ T2-MI (T2-Modulator Interface) มาใช้

โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 อาจจะมาช้าหรือเร็วเกินไปสำหรับหลายประเทศซึ่งขึ้นอยู่กับมุมมอง เนื่องจากโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลได้รับการแนะนำในประเทศเหล่านั้นแล้ว และการเปลี่ยนแปลงไปโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 อาจจะไม่เหมาะสมในช่วงเวลานั้นหรือไม่อาจยอมรับได้ โครงข่ายโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 1 ในประเทศอังกฤษเป็นโครงข่ายแรกที่ใช้กันตั้งแต่ปี ค.ศ.1998 การก้าวกระโดดของเทคโนโลยีจากโทรทัศน์มาตรฐานความละเอียดปกติไปสู่โทรทัศน์มาตรฐานความละเอียดสูง [3] อาจเป็นเหตุผลที่เหมาะสมในการนำเสนอคู่ขนานของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อการออกอากาศภาคพื้นดินเป็นสิ่งสำคัญที่นี่

ในประเทศต่าง ๆ เช่น เยอรมนีซึ่งพื้นที่ครอบคลุมของการให้บริการโทรศัพท์ภาคพื้นดินไม่ได้เป็นเส้นทางหลักมานานหลายปีแล้วโทรศัพท์มาตรฐานความละเอียดสูง [3] ภาคพื้นดิน และด้วยเหตุผลนี้โทรศัพท์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 จึงดูเหมือนจะไม่มีผล ในขณะนี้ โดยทางหลักการสถานการณ์ที่เหมาะสมสำหรับการนำโทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มาใช้งาน สามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

- เป็นประเทศที่ใช้โทรศัพท์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลอยู่แล้ว
- ประเทศที่ยังคงใช้งานระบบแอนะล็อกทั้งประเทศ
- ประเทศที่ต้องการใช้ระบบใหม่ที่ไม่สามารถใช้งานได้ในโทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล

### 2.2.1 ความจุช่องสัญญาณ

อย่างไรก็ตามก่อนที่จะกล่าวถึงโทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในรายละเอียด ขอบเขตทางทฤษฎีของช่องการส่งสัญญาณภาคพื้นดิน จะถูกนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรกบน พื้นฐานของช่องสัญญาณขนาด 8 เมกะเฮิร์ตซ์

เป้าหมายของโทรศัพท์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ให้การเพิ่มอัตราข้อมูลให้สูงกว่าเดิม 30% - 50% จึงสามารถคาดหวังว่าเมื่อได้รับเงื่อนไขที่เทียบเท่า อัตราข้อมูลต่อไปนี้จะสามารถที่จะทำได้

การป้องกันข้อผิดพลาดเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำให้ได้ความจุช่องสัญญาณเพิ่ม 30% และความสามารถเพิ่มเติม เช่น

- 16K และ 32K โหมด
- Extended carrier mode
- 256QAM Modulation
- The rotated Q-delayed constellation diagrams

โดยในระบบโทรศัพท์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นมีแบนด์วิดท์เพิ่มเข้ามาใหม่ เมื่อเปรียบเทียบกับโทรศัพท์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 1 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความจุช่องสัญญาณของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [5]

DVB-T	DVB-T2
-	1.7 MHz
-	5 MHz
6 MHz	6 MHz
7 MHz	7 MHz
8 MHz	8 MHz
-	10 MHz

### 2.3 ภาพรวมของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นสามารถที่จะรองรับสัญญาณขาเข้า MPEG-2 ได้หลายสัญญาณ หรือสัญญาณเบสแบนด์ทั่วไปไม่เกิน 255 และอัตราข้อมูลสูงขึ้นอย่างน้อย 30% เนื่องจากการพัฒนาการป้องกันข้อผิดพลาด BCH และ LDPC ซึ่งมีความเข้ากันได้กับแผนความถี่ Geneva ปีค.ศ. 2007 (8, 7, 6 MHz bandwidths) โดยมีแบนด์วิดท์เพิ่มเติม 1.7 เมกะเฮิรตซ์ และ 10 เมกะเฮิรตซ์ สามารถที่จะรับสัญญาณแบบประจำที่และแบบเคลื่อนที่ได้

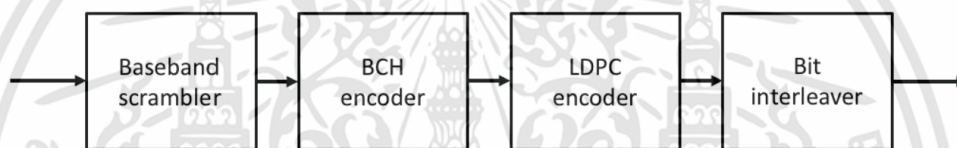
โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นใช้งานการมัลติเพล็กซ์สัญญาณแบบ COFDM ซึ่งมีขนาดของ FFT โหมดให้เลือกใช้งานมากเช่น 1K 2K 4K 16K และ 32K และ ช่วงเวลาป้องกัน 1/4 1/8 1/16 1/32 19/256 และ 1/128 และรูปแบบการมอดูเลตดังนี้ QPSK 16QAM 64QAM และ 256QAM โดยในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นได้เพิ่มคุณสมบัติการหมุนแผนภาพคอนสเทลเลชันเข้าไปเพื่อเพิ่มคุณภาพของสัญญาณ และมีการปรับใช้งานไพลอต (Pilot) ที่หลากหลายเพื่อความเหมาะสมของการรับสัญญาณในแต่ละรูปแบบ

### 2.4 การแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า

ในส่วนของการป้องกันข้อผิดพลาดที่ปรับเปลี่ยนที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 ที่นำไปสู่อัตราขยายของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N) ที่มากขึ้นจนเข้าใกล้ Shannon-Limit โดยรวม อัตราการส่งข้อมูลสุทธิถูกเพิ่มขึ้นถึง 30% เช่นเดียวกับในโทรทัศน์ผ่านดาวเทียมรุ่นที่ 2 การป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ประกอบด้วย baseband scrambler BCH-block encoder LDPC-block encoder และตามด้วย Bit Interleaver ในส่วน

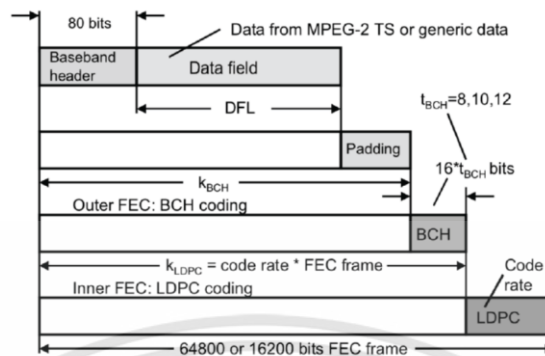
ของมอดูเลเตอร์ของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 โครงสร้างของเบสแบนด์ประกอบไปด้วย baseband header และ padding-block จะถูก scrambled แรก (baseband scrambler) และส่งไปยังบล็อกแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า ซึ่งจะมีการเพิ่มรหัส BCH (Bose Chaudhuri Hoquenghem) ไว้ก่อน และส่งต่อไปยังบล็อกแก้ไขข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า โดยจะมีการใส่ BCH เป็นอันดับแรก หลังจากนั้นการป้องกันข้อผิดพลาดเพิ่มเติม ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตรารหัส (Code rate) ที่สามารถเลือกได้จะถูกเพิ่มลงในตัวเข้ารหัส LDPC อัตราที่เป็นไปได้คือ 1/2 3/5 2/3 3/4 4/5 และ 5/6

โดยอัตรารหัส 1/2 หมายถึงการป้องกันข้อผิดพลาดสูงสุด และ อัตรารหัส 5/6 หมายถึงการป้องกันข้อผิดพลาดต่ำสุด



รูปที่ 2.3 การป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [5]

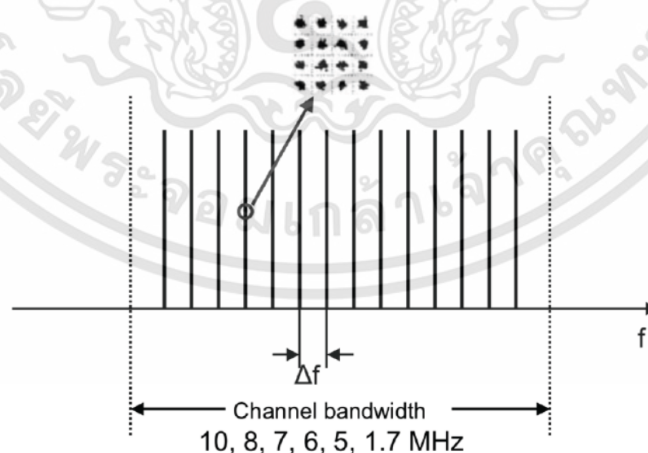
สามารถใช้โครงสร้างของการป้องกันข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้า ตั้งแต่ระยะสั้น 16K จนถึงระยะ 64K ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ความแตกต่างของสมรรถนะการทำงานด้วย LDPC encoder Bit interleaver เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวน (Carrier to Noise Ratio) ที่ต้องการอยู่ในระดับต่ำ โครงสร้างของการป้องกันข้อผิดพลาดแบบไปข้างหน้าแบบสั้นอาจเป็นประโยชน์สำหรับข้อมูลที่มีอัตราต่ำและแบบยาวจะดีกว่าสำหรับสตรีมข้อมูลที่มีอัตราสูงขึ้น อัตราข้อมูลที่เป็นไปได้ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 อยู่ระหว่าง 7.49 เมกะบิตต่อวินาที (QPSK, CR = 1/2) และ 50.32 เมกะบิตต่อวินาที (256QAM CR = 5/6) [5]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของการป้องกันข้อผิดพลาดในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [5]

## 2.5 COFDM

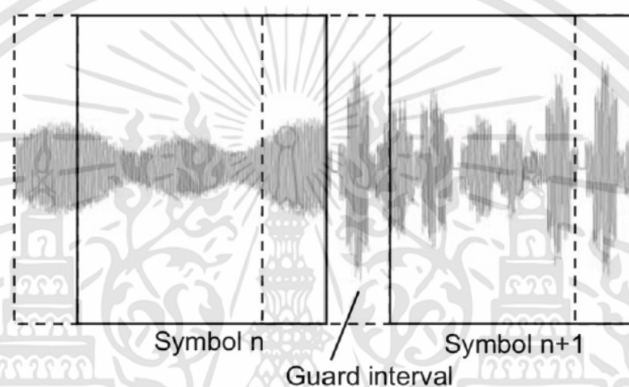
ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นสามารถรองรับแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่ 1.7 5 6 7 8 และ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แบนด์วิดท์สัญญาณที่แท้จริงจะแคบลงเล็กน้อยเนื่องจากแถบป้องกันที่ด้านบนและด้านล่างของช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ดังแสดงในตาราง 2.2 และที่นอกเหนือจากช้อยกเว้น (สัญลักษณ์ P1) ช่วงป้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ยังเป็น cyclic prefix (CP) ในสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั่นคือการทำซ้ำของสัญลักษณ์ปลายในความยาวที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 2.5 ความกว้างของช่องสัญญาณในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [5]

ตารางที่ 2.2 ความกว้างของช่องสัญญาณในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [5]

Bandwidth (MHz)	1.7	5	6	7	8	10
Elementary period [us]	71/131	7/40	7/48	1/8	7/64	7/80
Signal bandwidth [MHz]	1.54	4/76	5.71	6.66	7.61	9.51



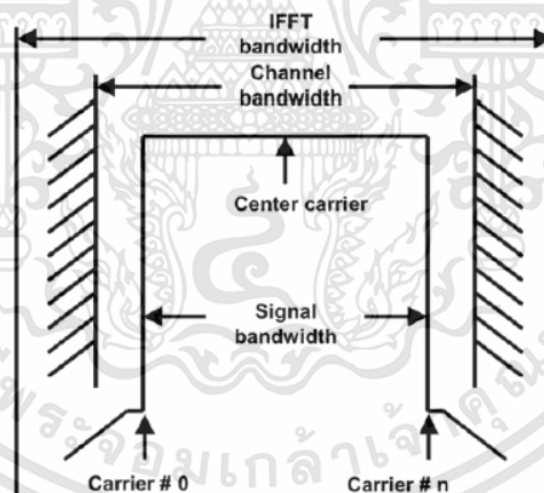
รูปที่ 2.6 สัญลักษณ์และช่วงป้องกันในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [5]

โหมด 16K และ 32K ถูกจัดเตรียมไว้เพื่อให้ได้ time overhead ที่น้อยลงและทำให้อัตราการรับส่งข้อมูลสูงขึ้น (Overhead 6% ในโหมด 32K, 25% ในโหมด 8K) โดยมีช่วงความปลอดภัยเท่ากันช่วงการป้องกันของโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลที่ยาวนานที่สุดอยู่ในช่วง 0.224 ms และมีค่าเท่ากับ 0.532 ms ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 32K,  $g = 19/128$  ให้ระยะห่างของเครื่องส่งสัญญาณสูงสุด 160 กิโลเมตร ดังแสดงในตารางที่ 2.1 แบนด์วิดท์สัญญาณแคบ (7 6 5 และ 1.7 เมกะเฮิร์ตซ์) นำไปสู่สัญลักษณ์ที่มีความยาวมากยิ่งขึ้น และยังนำไปสู่ช่วงการป้องกันที่ยาวขึ้นอีกด้วย และด้วยความสามารถในการรักษาความปลอดภัยเหล่านี้ ทำให้โทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สามารถใช้โครงข่ายความถี่เดี่ยว (Single Frequency Network: SFN) ทั่วประเทศได้โหมด 32K เป็นโหมดที่มีสัญลักษณ์ที่ยาวที่สุดและมี Overhead น้อยที่สุดในช่วงป้องกัน ในเวลาเดียวกันมันทำหน้าที่ในการใช้เครือข่ายความถี่เดี่ยวที่ใหญ่ที่สุดอย่างไรก็ตาม โหมด 32K นั้นเนื่องจากระยะห่างของคลื่นพาห่อย่อย (Sub Carrier) แคบมากดังนั้นโหมดที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานบนโทรศัพท์มือถือคือโหมด 1K ที่มีระยะห่างของคลื่นพาห่อย่อยที่กว้าง แต่ก็มี

สัญลักษณ์ที่สั้นที่สุดด้วยดังนั้นจึงเป็นหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโครงข่ายความถี่เดียวที่มีขนาดใหญ่

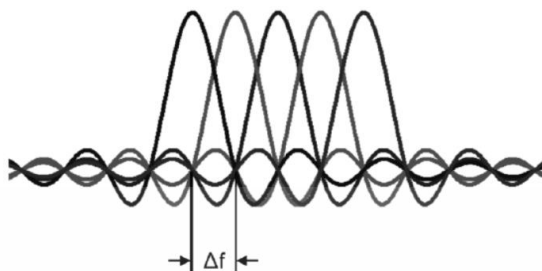
### 2.5.1 โหมดคลื่นพาห์ปกติ (Normal Carrier Mode)

ในโทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นโหมดคลื่นพาห์ปกติ แบบด์วิดท์ของสัญญาณที่ใช้งานจะสอดคล้องกับแบนด์วิดท์ของโทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 1 ระหว่างสเปกตรัมที่ใช้งาน และ จุดเริ่มต้นของช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน จะมีทั้งหน้าและหลังของช่องสัญญาณโทรศัพท์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ซึ่งเรียกว่าแถบป้องกัน (Guard Band) ซึ่งมีความกว้างประมาณ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ หน้าทีของแถบป้องกันนั้นมีอยู่หลายหลายหน้าที่ซึ่งหน้าที่ที่สำคัญที่สุดคือการป้องกันช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ขอบของสัญญาณ OFDM ต้องสลายตัวภายในแถบป้องกัน สาเหตุหนึ่งของการทับซ้อนกันของทางแต่ละคลื่นพาห์ที่ถูกมอดูเลตมา ในรูปที่ 2.8 สามารถแสดงให้เห็นว่าเมื่อการใช้งานคลื่นพาห์มากขึ้นก็จะมีผลของขอบที่ทับซ้อนมากขึ้น



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของแถบป้องกันของโทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



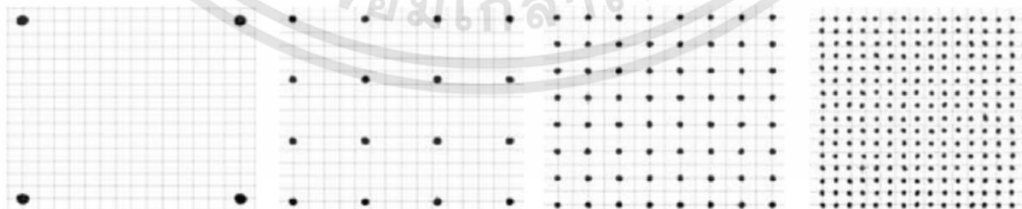
รูปที่ 2.8 สเปกตรัมของ OFDM [5]

### 2.5.2 โหมดขยายคลื่นพาห้ (Extended Carrier Mode)

ในโหมดนี้จะมีพาห้เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถให้ได้โดยโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เพื่อที่จะรองรับสเปกตรัมที่กว้างขึ้นมากกว่าโหมด 8K ในโหมดที่เรียกว่า โหมดขยายคลื่นพาห้ ข้อดีก็คือมันสามารถที่จะเพิ่มอัตราของข้อมูลภายในสัญญาณของโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 โดยผลของการใช้งานโหมดขยายคลื่นพาห้ ส่งผลให้มีอัตราข้อมูลที่เพิ่มขึ้น 1 เมกะบิตต่อวินาที ซึ่ง 32K โหมดคลื่นพาห้ปกติ ให้อัตราข้อมูลที่ 35.246 เมกะบิตต่อวินาที ส่วนใน 32K โหมดขยายคลื่นพาห้ ให้อัตราข้อมูลที่ 36.140 เมกะบิตต่อวินาที

### 2.6 รูปแบบการมอดูเลตและแถบป้องกัน

รูปแบบการมอดูเลตที่ถูกนำมาใช้งานในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.9 เป็นลำดับ QAM โดยตำแหน่งที่สามารถเป็นไปได้ในโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มีดังต่อไปนี้ QPSK 16QAM 64QAM และ 256QAM



รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบการมอดูเลตที่สามารถใช้งานได้ในระบบโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 (QPSK 16QAM 64QAM และ 256QAM ตามลำดับ) [5]

แบบรูปการมอดูเลชันที่แตกต่างจากนี้ ไม่ได้รับการรองรับการใช้งานในโทรศัพท์ศัณภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 การมอดูเลชัน QAM สามลำดับแรกนั้นสอดคล้องกับการใช้งานในระบบโทรศัพท์ศัณภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 1 และในโทรศัพท์ศัณภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 จะมีความสามารถพิเศษคือแผนภาพคอนสเทลเลชัน สามารถที่จะถูกกลับหรือหมุนได้ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.10 เศษส่วนช่วงเวลาป้องกันที่เพิ่มเติมเข้ามาในโทรศัพท์ศัณภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้น ทำให้สะดวกในการใช้งานการรวมกันของ Symbol Length เช่น FFT Mode และ เศษส่วนช่วงเวลาป้องกันทำให้เกิดการลดลงของ Overhead โดยแถบป้องกัน

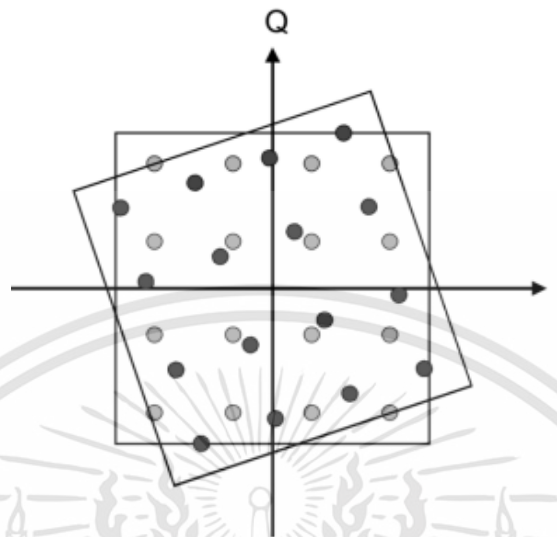
### 2.6.1 แผนภาพคอนสเทลเลชันแบบปกติ (Normal Constellation Diagrams)

ในกรณีของ QPSK 16QAM และ 64QAM นั้น กรณีปกติที่แผนภาพคอนสเทลเลชันไม่ถูกหมุนจะเหมือนกับกับรูปแบบของการมอดูเลชันของระบบโทรศัพท์ศัณภาคพื้นดินระบบดิจิทัลในส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาคือรูปแบบการมอดูเลชันลำดับที่ 256QAM เนื่องจาก 256QAM ได้ให้การป้องกันข้อผิดพลาดที่ดีขึ้น

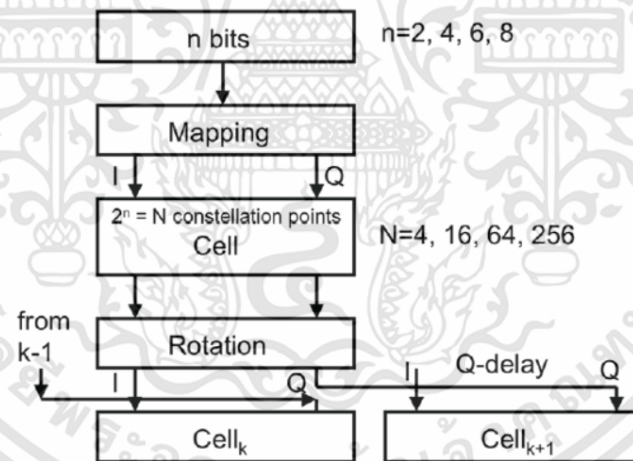
### 2.6.2 แผนภาพคอนสเทลเลชันแบบหมุน (Rotated Constellation Diagrams)

ถ้าการหมุนแผนภาพคอนสเทลเลชันถูกนำมาใช้งาน ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของคอนสเทลเลชันประกอบไปด้วยองค์ประกอบ I และ องค์ประกอบ Q ของสัญญาณ ดังรูปที่ 2.10 ในกรณีที่เกิดการรบกวนมันสามารถที่จะถูกนำมาใช้งานเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของคอนสเทลเลชัน และช่วยให้ถอดรหัสได้ดีขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามคอนสเทลเลชันที่ไม่ถูกหมุน ข้อมูลของตำแหน่ง I และ Q ที่ถูกแยกออกจากกัน สามารถที่จะใช้ในการตัดสินใจอย่างง่าย ถ้าจำเป็นในทางปฏิบัติจะแสดงให้เห็นว่าประโยชน์ที่ได้รับมากเพียงใด

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริง กระบวนการทั้งหมดนั้นมีความซับซ้อนกว่าเล็กน้อยด้วยแผนภาพคอนสเทลเลชันที่ถูกหมุนองค์ประกอบ Q จะไม่ถูกส่งออกไปยังคลื่นพาห์เดียวกันหรือไม่ตรงเซลล์เดียวกันแต่จะถูกหน่วงเวลาไปกับพาห์อื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.11



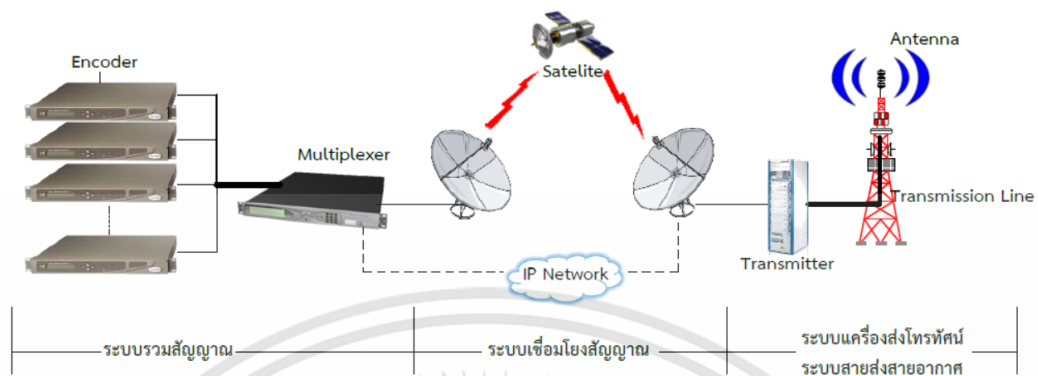
รูปที่ 2.10 แผนภาพคอนสเทลเลชันที่ถูกหมุน [5]



รูปที่ 2.11 การแมปบิตของการหมุนแผนภาพคอนสเทลเลชันและการดีเลย์ Q [5]

## 2.7 ระบบการส่งสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินดิจิทัล

ระบบส่งสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินดิจิทัล มีอุปกรณ์หลักประกอบด้วย ระบบรวมสัญญาณ ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ ระบบเครื่องส่งโทรทัศนภาคพื้นดินแสดงดังรูปที่ 2.12

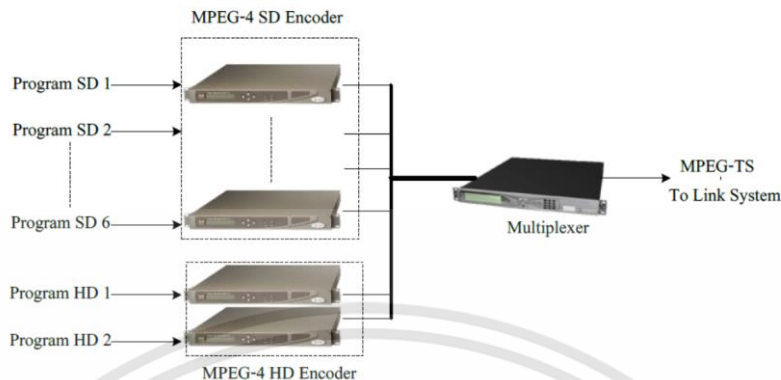


รูปที่ 2.12 การส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล [6]

### 2.7.1 ระบบรวมสัญญาณ

ระบบรวมสัญญาณถูกติดตั้งใช้งานที่สำนักงานส่วนกลาง (Office Center) มีรูปแบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.13 มีรายละเอียดการใช้งานดังนี้

- อุปกรณ์เข้ารหัส MPEG-4 แบบความละเอียดปกติ (Standard Definition: SD) ทำหน้าที่รับสัญญาณช่องรายการโทรทัศน์ความละเอียดปกติจากผู้ประกอบการช่องรายการโทรทัศน์และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปสัญญาณ MPEG-4 ป้อนเข้าสู่อุปกรณ์รวมสัญญาณ
- อุปกรณ์เข้ารหัส MPEG-4 แบบความละเอียดสูง (High Definition: HD) ทำหน้าที่รับสัญญาณช่องรายการโทรทัศน์ความละเอียดสูงจากผู้ประกอบการช่องรายการโทรทัศน์ และทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปสัญญาณ MPEG-4 ป้อนเข้าสู่อุปกรณ์รวมสัญญาณรวมสัญญาณ
- อุปกรณ์รวมสัญญาณ ทำหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์เข้ารหัส MPEG-4 แบบความละเอียดปกติ และ MPEG-4 แบบความละเอียดสูง และทำหน้าที่รวมสัญญาณทั้งหมดให้เป็นสัญญาณเดียวกันเรียกว่า MPEG-TS (MPEG - Transport Stream) ป้อนเข้าสู่ระบบเชื่อมโยงสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณไปยังสถานีโครงข่าย

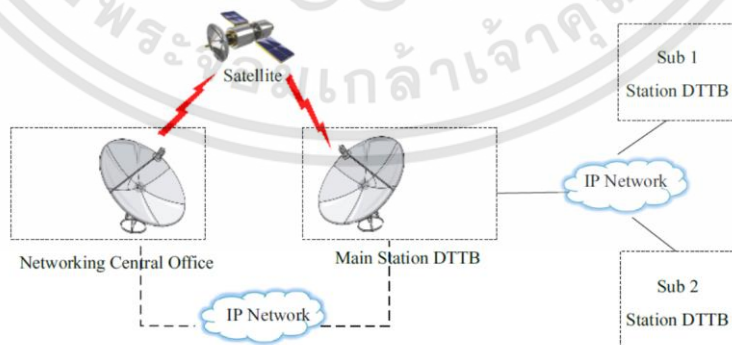


รูปที่ 2.13 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของระบบรวมสัญญาณ [6]

### 2.7.2 ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ

เทคโนโลยีระบบเชื่อมโยงสัญญาณในยุคปัจจุบันที่นิยมใช้งานส่งผ่านสัญญาณมี 2 รูปแบบ ได้แก่ การส่งผ่านช่องสัญญาณดาวเทียมและระบบอินเทอร์เน็ต หรือเรียกว่า ระบบไอพี (Internet Protocol: IP) มีรูปแบบการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 2.14 มีรายละเอียดดังนี้

- การส่งผ่านช่องสัญญาณระบบดาวเทียม ด้านส่งซึ่งเป็นต้นทางติดตั้งที่สำนักงานส่วนกลาง ประกอบด้วยอุปกรณ์ระบบแปลงสัญญาณส่ง หรือเรียกว่าระบบ Up Link ด้านรับปลายทางจะต้องมีจานรับสัญญาณและเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม หรือเรียกว่า IRD (Integrated Receiver Digital) ใช้งาน
- การส่งสัญญาณผ่านระบบ IP เป็นลักษณะการเช่าใช้งานเครือข่าย จากผู้ให้บริการสำหรับในประเทศไทยเช่น บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน)



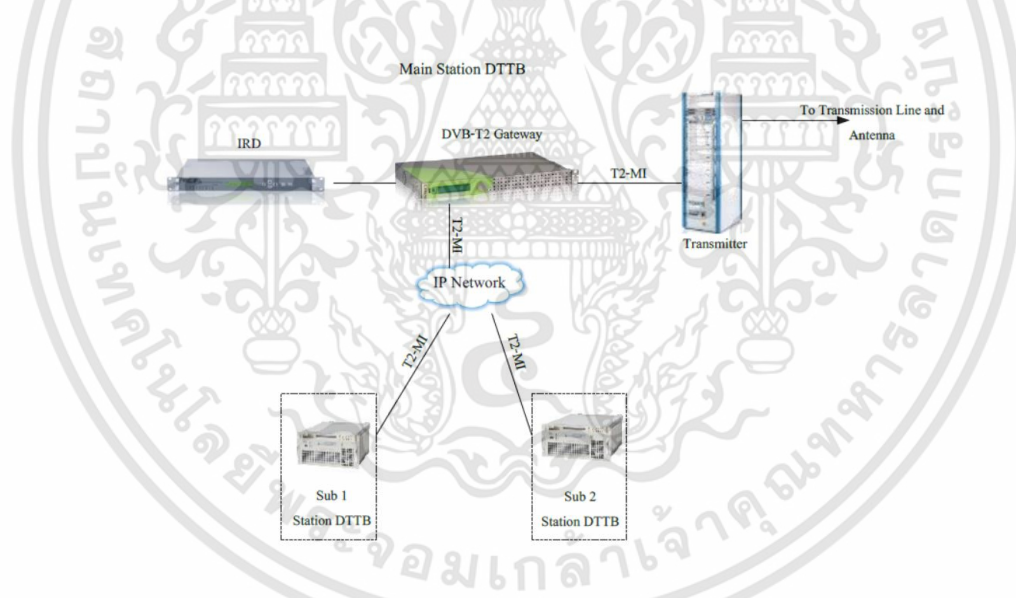
รูปที่ 2.14 ระบบเชื่อมโยงสัญญาณ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.3 ระบบเครื่องส่งโทรทัศน์

ระบบเครื่องส่งโทรทัศน์ติดตั้งใช้งานที่สถานีโครงข่ายทั่วประเทศ มีรูปแบบการเชื่อมต่อแสดงดังรูปที่ 2.15 มีรายละเอียดอุปกรณ์ดังนี้

- อุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม หรือเรียกว่า IRD ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่รับจากสัญญาณดาวเทียมให้กลับเป็นสัญญาณ MPEG-TS ป้อนเข้าสู่อุปกรณ์ DVB-T2 Gateway
- อุปกรณ์ DVB-T2 Gateway ทำหน้าที่รับสัญญาณ MPEG-TS จากอุปกรณ์ IRD แปลงเป็นสัญญาณ T2-MI ซึ่งเป็นสัญญาณสำหรับโครงข่ายแบบความถี่เดียว ป้อนเข้าสู่เครื่องส่งโทรทัศน์ของสถานีหลักและส่งสัญญาณ T2-MI ไปยังสถานีเสริม เพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องส่งโทรทัศน์ของสถานีเสริมด้วย
- เครื่องส่งโทรทัศน์ ทำหน้าที่รับสัญญาณ T2-MI จากอุปกรณ์ DVB-T2 Gateway และแปลงให้เป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังส่งสูง ส่งผ่านไปยังสายส่งสายอากาศแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในพื้นที่ครอบคลุม



รูปที่ 2.15 การเชื่อมต่อระบบเครื่องส่งโทรทัศน์ที่สถานีโครงข่าย [6]

## 2.8 การรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สามารถสามารถใช้สายอากาศแบบเดิมที่ใช้กับช่อง 3 5 7 9 11 และ TPBS ได้ ดังรูปที่ 2.16 หากสายอากาศนั้นรองรับย่านความถี่สูงยิ่งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สามารถใช้งานทั้งแบบภายในบ้านหรือภายนอกบ้าน

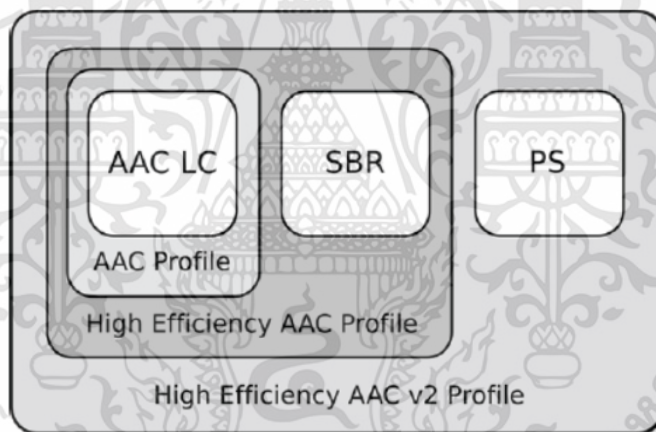


รูปที่ 2.16 สายอากาศสำหรับโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ชนิดติดตั้งบนหลังคา [7]

โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ใช้ในประเศไทยนั้น เป็นระบบ MPEG-4 ซึ่งที่โทรทัศน์ทุกระบบสามารถรับสัญญาณได้โดยใช้ร่วมกับกล่องรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และหากโทรทัศน์ที่ให้มีช่องรับสัญญาณ HDMI ภาพที่ได้จะมีความละเอียดสูง ซึ่งสูงกว่าการใช้ช่องรับสัญญาณชนิด AV อย่างที่ใช้กันในอดีตและมาตรฐานการบีบอัดสัญญาณภาพแบบ MPEG-4/H.264 AVC ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการบีบอัดที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยสามารถให้คุณภาพสูงสุดระดับ 4K UHD [8] และมาตรฐานการบีบอัดสัญญาณเสียงแบบ MPEG-4/HE-AACv2 [7] ที่ได้รับการพัฒนามาจาก AAC Profile และ HE-AACv1 ตามลำดับซึ่งประกอบไปด้วยคุณสมบัติที่หลากหลายในการเข้ารหัสสัญญาณเสียงทั้งในแบบโมนสเตอร์ไอและ multichannel ที่ให้ช่องสัญญาณได้สูงถึง 48 ช่องสัญญาณที่คุณภาพสูง โดยภาพเปรียบเทียบระหว่างความละเอียดสูงและความละเอียดปกติ แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ภาพเปรียบเทียบระหว่างความละเอียดสูงและความละเอียดปกติ [9]



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของ MPEG-4/HE-AACv2 [10]

## 2.9 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการออกอากาศสำหรับประเทศไทย

คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ หรือ กสทช. ซึ่งเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่กำกับดูแลการแพร่สัญญาณสัญญาณวิทยุโทรทัศน์ดิจิทัลในประเทศไทยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกอากาศ โดยสำนักงาน กสทช. ได้ร่วมดำเนินงานกับหน่วยงาน ITU (International Telecommunication Union) เพื่อทำการทดลองและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย [11] โดยได้ดำเนินการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.1 กำลังส่งที่ใช้ในการทดสอบ

เนื่องจากความต้องการที่จะแพร่สัญญาณสัญญาณครอบคลุมเทียบพื้นที่ให้ได้เทียบเท่ากับโทรทัศน์ระบบแอนะล็อกเดิมจึงเลือกใช้ค่าช่วงเวลาป้องกันเท่ากับ 19/128 ซึ่งจะได้ช่วงเวลาป้องกันเท่ากับ 266 ไมโครวินาทีโดยไม่มีการรบกวนภายในกันเองสำหรับใช้ในการออกอากาศในรูปแบบโครงข่ายความถี่เดียว โดยสถานีเครื่องส่งสามารถอยู่ห่างกันสูงสุดได้ที่ประมาณไม่เกิน 80 กิโลเมตรทำการทดสอบโดยใช้เครื่องส่งออกอากาศที่ 5.2 กิโลวัตต์ ด้วยการส่งที่กำลังเท่านี้ ที่ระยะทางประมาณ 92 กิโลเมตร (มากกว่า 80 กิโลเมตร) สามารถรับสัญญาณได้โดยระดับของ link margin อยู่ที่ 4 dB ถึง 5 dB ที่พื้นที่ครอบคลุมการออกอากาศเท่าเดิม สามารถลดกำลังส่งลงได้อีกโดยใช้วิธีการ ESR5 [12] โดยค่าที่ดีที่สุดสำหรับกำลังส่งออกอากาศคือ 3.5 กิโลวัตต์

### 2.9.2 พารามิเตอร์โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

วัตถุประสงค์ของการทดลองการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลสำหรับประเทศไทย คือ เพื่อต้องการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดสำหรับการออกอากาศ โดยที่สามารถลดอัตราการส่งข้อมูล (Data rate) ของสัญญาณวิดีโอลงให้ได้มากที่สุด รวมถึงยังสามารถส่งผังรายการ (Electronic Program Guide: EPG) ซอฟต์แวร์สำหรับการอัปเดตรายการ (System Software Update: SSU) และข้อมูลที่จำเป็นไปพร้อมกันได้ โดยที่ยังสามารถรักษาคุณภาพของสัญญาณวิดีโอสำหรับการรับสัญญาณแบบอยู่กับที่จากสายอากาศที่ติดตั้งบนหลังคาบ้าน การรับสัญญาณแบบใช้อากาศภายในและการรับแบบเคลื่อนที่ พารามิเตอร์เริ่มต้นได้มาจากคำแนะนำจากคณะทำงานจาก ITU โดยพารามิเตอร์ดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งสามารถส่งอัตราการส่งข้อมูลได้ 27.4 เมกกะบิตต่อวินาทีสำหรับการส่งด้วยหนึ่งเครื่องส่ง (Multiplex: MUX)

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ที่ ITU แนะนำให้ใช้สำหรับการทดลองออกอากาศในระยะแรก [11]

พารามิเตอร์	ค่า
FFT size	32K extended
Guard interval	19/256 (266 $\mu$ s)
Modulation scheme	64-QAM
Code rate	2/3
Pilot pattern	PP4

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ที่ ITU แนะนำให้ใช้สำหรับการทดลองออกอากาศในระยะแรก (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
Rotated constellation	Off
Max bit rate	27.4 Mbps

ค่าพารามิเตอร์นี้ได้จากการทดลองที่ประเทศเยอรมัน โดยสามารถส่งได้ทั้งหมด 8 ช่องรายการ ซึ่งจะได้ 2 ช่องรายการแบบความละเอียดสูงและ 6 ช่องรายการแบบความละเอียดปกติ โดยความต้องการสำหรับการส่งผ่านข้อมูลสำหรับช่องความละเอียดสูง อยู่ที่ประมาณ 5.92 เมกกะบิตต่อวินาที ถึง 7.2 เมกกะบิตต่อวินาทีในส่วนของความละเอียดปกติอยู่ที่ประมาณ 1.28 เมกกะบิตต่อวินาที ถึง 1.6 เมกกะบิตต่อวินาทีโดยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์เข้ารหัสสัญญาณ สำหรับการทดลองใช้เครื่องการมัลติเพล็กซ์แบบเชิงสถิติเพื่อให้แบนด์วิดท์ในการส่งผ่านสัญญาณมีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถลดอัตราการส่งผ่านข้อมูลของวิดีโอกลงได้เหลือ 22.5 เมกกะบิตต่อวินาที และหากรวมทั้งภาพและเสียงจะอยู่ที่ประมาณ 23.6 เมกกะบิตต่อวินาที โดยสำหรับช่องรายการความละเอียดสูงอัตราการส่งผ่านข้อมูลจะอยู่ที่ 5.2 เมกกะบิตต่อวินาที และช่องรายการความละเอียดปกติจะอยู่ที่ 2.3 เมกกะบิตต่อวินาทีการตรวจสอบคุณภาพ (Quality of experience: QoE) และประเมินคะแนนความคิดเห็นเฉลี่ย (Estimate mean opinion score: EMOS) อยู่ในเกณฑ์ดี แต่สำหรับการรับแบบสายอากาศภายในบ้านและแบบเคลื่อนที่ที่ยังไม่ดีเพียงพอ เพื่อแก้ปัญหาพารามิเตอร์ดังกล่าวข้างต้นจำเป็นต้องทำการปรับแต่งแก้ไข โดยการแก้ไขดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานที่ต้องสามารถส่งช่องรายการแบบความละเอียดสูงได้ 2 ช่องและช่องความละเอียดปกติได้ 6 ช่อง โดยท้ายสุดทางคณะทำงานได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการให้บริการออกอากาศโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทย โดยมีการกำหนดค่าอัตราส่วนคลื่นพาห์ต่อสัญญาณรบกวนต้องไม่ต่ำกว่า 15.17 dB ค่าอัตราความผิดพลาดของการมอดูเลตบนสถานีส่งต้องไม่ต่ำกว่า 33 dB ค่าความผิดพลาดของบิตหลังการแก้ไข LDPC (LBER) ไม่สูงกว่า  $10^{-7}$  โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศดังแสดงในตารางที่ 2.4 และจำนวนช่องรายการและอัตราการส่งผ่านข้อมูลแสดงให้เห็นในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการส่งออกอากาศ [13]

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
FFT size	16k extended
Guard Interval	19/128
Modulation	64QAM
Code Rate	5-Mar
Pilot Pattern	PP2
Rotated Constellation Off	MUX 1(NBT), 2(ARMY1), 4(TPBS), 5(ARMY2)
Rotated Constellation On	MUX 3(MCOT)
Physical Layer Pipe (PLP)	Single
L1-Post Constellation	BPSK
T2 Frame per Super Frame	2
Data Symbol per T2 Frame	84 symbol/T2 frame
Max FEC block per Interleaving Frame	99 block
Time Interleaving Block per Interleaving Frame	2 block
ความสูงสายอากาศเครื่องส่ง	328 เมตร
ความสูงสายอากาศเครื่องรับ	6 เมตร
ความถี่	514 594 626 658 และ 562 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

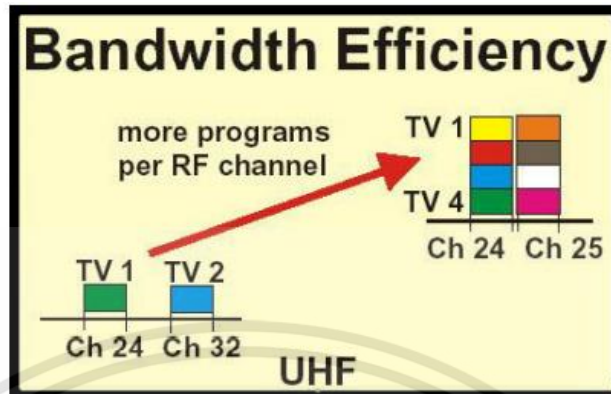
ตารางที่ 2.5 อัตราการส่งผ่านข้อมูลสำหรับช่องรายการโทรทัศน์ [11]

Data	Video data rate (Mbps)	
	min	max
SD	0.75	2.5
HD	2	7
Total 6SD+2HD	8.5	25.5
Video shaping	19	19.7

## 2.10 ประโยชน์ของระบบโทรทัศน์ดิจิทัล

### 2.10.1 ใช้ความกว้างช่องสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพ (Bandwidth Efficiency)

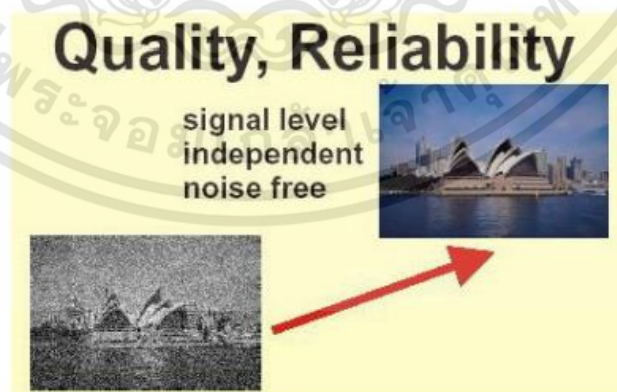
สามารถจัดสรรช่องสัญญาณความถี่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จากเดิมเป็นระบบแอนะล็อกใช้ช่องสัญญาณหนึ่งช่องต่อหนึ่งรายการและวางช่องสัญญาณคลื่นความถี่ติดกัน หรือสถานีส่งใกล้เคียงกัน ไม่สามารถใช้ช่องสัญญาณความถี่ที่อยู่ติดกันได้ แต่ในระบบดิจิทัลสามารถใช้ช่องสัญญาณความถี่ติดกัน ทำให้ใช้ช่องสัญญาณได้เต็มที่ครบทุกช่อง และสามารถออกอากาศในพื้นที่ใกล้เคียงกันได้โดยไม่รบกวนกันและในหนึ่งช่องสัญญาณสามารถออกอากาศได้หลายรายการพร้อมกัน (Multi Channel) ทำให้ส่งรายการได้มากขึ้นกว่าเดิม เช่น จากระบบแอนะล็อกใช้ช่องสัญญาณ CH21 ถึง CH69 (48 ช่อง) ใช้ออกอากาศหนึ่งช่องต่อหนึ่งรายการโทรทัศน์ซึ่งเท่ากับ 48 รายการเท่านั้น หากเปลี่ยนเป็นระบบดิจิทัลช่องหนึ่งสามารถส่งได้ 4 รายการ ทำให้สามารถออกอากาศรายการโทรทัศน์ได้จะเท่ากับ 192 รายการ สำหรับประเทศไทย หนึ่งช่องความถี่ได้โทรทัศน์ความละเอียดปกติ 6 ช่อง และโทรทัศน์ความละเอียดสูง 2 ช่อง สำหรับความถี่ 8 เมกะบิตต่อวินาที สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การใช้ความกว้างช่องสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพ [14]

### 2.10.2 สัญญาณมีคุณภาพที่ดีและไม่มีการรบกวน (Quality Reliability)

ระบบแอนะล็อกมีการผสมคลื่นแบบต่อเนื่อง สภาวะแวดล้อมมีผลกระทบทำให้เกิดการรบกวนและลดทอนสัญญาณลง สัญญาณภาพจะถูกรบกวนและถูกซึบซาบไปมาก ทำให้มีสัญญาณแปลกปลอมสอดแทรกเข้ามารบกวนได้ง่าย การรับชมภาพจึงไม่ชัดเจน สัญญาณภาพขาดหายและเกิดสโนว์เข้ามารบกวนได้ แต่ระบบดิจิทัลมีการผสมคลื่นแบบเข้ารหัสสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง มีการเข้ารหัส (Encode) ถอดรหัส (Decode) และมีระบบควบคุมเพื่อชดเชยสัญญาณได้ด้วย จึงทำให้สัญญาณไม่ถูกรบกวนได้ สัญญาณภาพมีความต่อเนื่อง ภาพที่รับได้มีความละเอียดมาก ดิจิทัลเป็นบิต คือมีแค่ 0 กับ 1 แสดงว่าสัญญาณที่ได้จะมีแค่ภาพคมชัดกับดูไม่ได้เลย แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.20

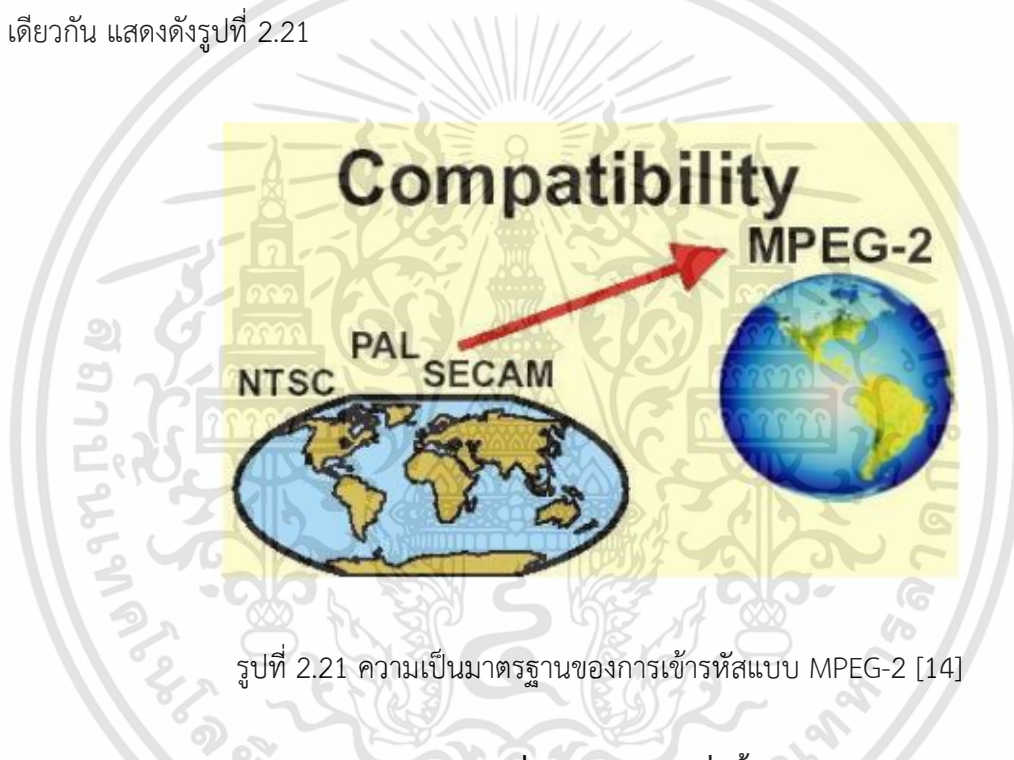


รูปที่ 2.20 สัญญาณมีคุณภาพสูง [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.3 รูปแบบสัญญาณเป็นมาตรฐานเดียวกัน (Compatibility)

ระบบแอนะล็อกแบบเดิมมีสัญญาณภาพหลายมาตรฐาน คือ PAL NTSC SECAM ทำให้การควบคุมคุณภาพ การตัดต่อภาพและตกแต่งภาพระหว่างมาตรฐานที่แตกต่างกันทำได้ยาก และยังทำให้คุณภาพด้อยลงเมื่อผ่านกระบวนการตัดต่อหลายครั้ง แต่ระบบดิจิทัลใช้มาตรฐานการเข้ารหัสภาพแบบเดียว คือ MPEG-2 ซึ่งให้คุณสมบัติของภาพที่หลากหลาย มีกระบวนการสร้างภาพที่ซับซ้อนกว่า แต่ให้คุณภาพที่ดีมากกว่า สามารถนำไปใช้งานในสื่อผสมอื่นที่หลากหลาย เป็นที่นิยมแพร่หลายที่สุดในขณะนี้ ทำให้การนำไปใช้งานได้ครอบคลุมทุกวงการการสื่อสารเป็นมาตรฐานเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ความเป็นมาตรฐานของการเข้ารหัสแบบ MPEG-2 [14]

### 2.10.4 ขนาดของการมองภาพที่ให้มุมมองภาพที่ดีขึ้น (Scalability)

ระบบแอนะล็อกมีขนาดของการมองภาพที่แคบ ( $758 \times 578$  - PAL อัตราส่วนภาพ 4:3) และภาพมีความละเอียดต่ำ การแสดงผลที่จอภาพไม่มีความชัดเจน ยิ่งจอภาพมีขนาดมากขึ้น ยิ่งให้รายละเอียดต่ำกว่า ซึ่งเป็นโทรทัศน์แบบความละเอียดปกติ ยิ่งนำไปแสดงผลบนจอโทรทัศน์ที่มีหน้าจอนขนาดใหญ่ทำให้ภาพขาดความชัดเจน แต่ระบบดิจิทัลสามารถเลือกการเข้ารหัสสัญญาณภาพได้หลายขนาด ( $1080 \times 720$   $1920 \times 1080$  ที่อัตราส่วนภาพ 16:9) ให้ความละเอียดสูง ทำให้การแสดงผลที่จอภาพมีความละเอียดสูง มีมุมมองภาพที่กว้างมากขึ้น (Width Screen) ภาพที่ได้ดูสมจริงและมองเห็นภาพได้กว้างขวางมากขึ้น แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ขนาดของการมองภาพที่ใหญ่มุมมองภาพที่ดีขึ้น [14]

## 2.11 การประยุกต์ใช้ระบบดิจิทัล

การเปลี่ยนมาใช้ระบบการแพร่สัญญาณแบบดิจิทัลยังมีประโยชน์อีกหลายด้าน โดยแบ่งเป็นแต่ละประเภทที่จะนำมากล่าวก็เพื่อแสดงถึงลักษณะที่สถานีโทรทัศน์สามารถพัฒนาระบบดิจิทัลนี้ไปประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับประเทศ ซึ่งที่ญี่ปุ่นได้ทำไปแล้ว อันเกิดจากความมุ่งมั่นที่จะนำมาพัฒนาเพื่อให้เกิดประโยชน์ การประยุกต์ใช้ระบบดิจิทัลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การประยุกต์ใช้ระบบดิจิทัล [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.11.1 โทรทัศน์ความละเอียดสูง

ซึ่งโทรทัศน์ความละเอียดสูงเป็นเหตุผลแรกที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบดิจิทัล มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า "โทรทัศน์ความคมชัดสูง" หรือ "โทรทัศน์ความละเอียดสูง" ซึ่งระบบดิจิทัล สามารถแสดงภาพที่มีขนาดความละเอียดที่ดีกว่าโทรทัศน์ระบบแอนะล็อก ดังนั้นโทรทัศน์ความละเอียดสูงจึงเป็นโทรทัศน์ที่มีคุณภาพทั้งภาพและเสียงสูงกว่าโทรทัศน์ทั่วไป มีระดับความละเอียดสูงสุด มีมุมมองภาพที่กว้างขึ้น มีจอแสดงภาพที่กว้างมากขึ้น ระบบเสียงเป็นแบบรอบทิศทางเหมือนกับการรับชมภาพจากจอภาพยนตร์ที่ผู้ชมจะได้รับชมภาพที่สมจริงมากยิ่งขึ้น

### 2.11.2 บริการช่องสัญญาณที่หลากหลาย

เพิ่มการให้บริการช่องสัญญาณที่หลากหลายในระบบดิจิทัลสามารถส่งสัญญาณภาพเรียกว่า โปรแกรมหรือรายการไปได้มากขึ้น รายการโทรทัศน์ความละเอียดปกติจะถูกส่งสัญญาณไปได้พร้อมกันหลายรายการ โดยผ่านช่องสัญญาณเพียงช่องเดียว ซึ่งมีความกว้าง 8 เมกะเฮิรตซ์

### 2.11.3 บริการระบบตอบสนอง

การแพร่คลื่นระบบดิจิทัลสามารถทำเป็นระบบตอบสนองรับและส่งข้อมูลระหว่างสถานีกับผู้ชมรายการได้ เป็นบริการเสริมสำหรับการจัดรายการโทรทัศน์ที่ผู้รับชมสามารถเลือกข้อมูลสำหรับตอบโต้กับรายการโทรทัศน์ได้ผ่านอุปกรณ์เชื่อมโยงสัญญาณอื่น ๆ ที่ติดตั้งเสริมขึ้นมา

### 2.11.4 การส่งข้อมูลไปพร้อมสัญญาณภาพ

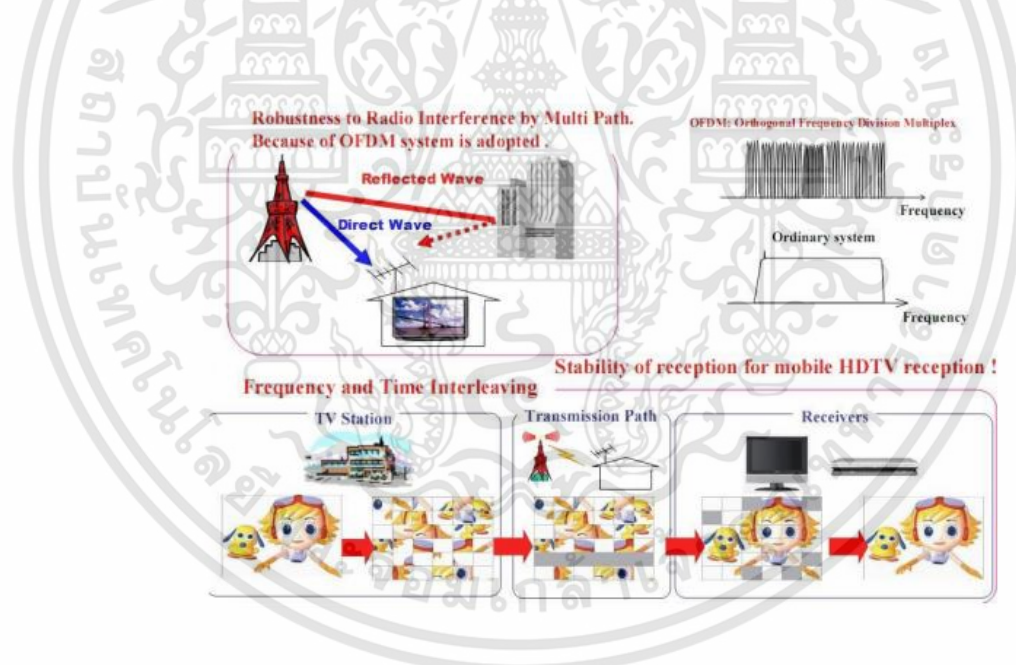
การให้บริการข้อมูลที่ส่งไปพร้อมสัญญาณภาพ (Video) ในระบบดิจิทัลสามารถใส่รายละเอียดข้อมูลไปพร้อมสัญญาณภาพ เพื่อให้ผู้รับบริการเลือกเปิดดู หรือใช้ค้นหาข้อมูลเสริมหรือเปิดดูรายการโทรทัศน์ เป็นการให้บริการข้อมูลที่หลากหลายผ่านช่องรายการโทรทัศน์

### 2.11.5 รองรับโทรศัพท์มือถือ

การแพร่กระจายคลื่นด้วยระบบดิจิทัลรองรับการส่งสัญญาณผ่านอุปกรณ์พกพาประเภทต่าง ๆ ได้ โดยผู้รับบริการสามารถรับสัญญาณภาพและเสียงด้วยโทรศัพท์มือถือและอุปกรณ์เคลื่อนที่ได้ทุกสถานที่และทุกเวลาที่มีสัญญาณส่งไปถึง

### 2.11.6 คงทนต่อปรากฏการณ์พหุวิถี

สัญญาณดิจิทัลมีความคงทนต่อความผิดพลาดเมื่อระบบผิดพลาด เมื่อเกิดการปะทะหรือสอดแทรกจากสัญญาณเดียวกันสะท้อนมาจากหลายทิศทาง (Multipath) โดยใช้กรรมวิธีการผสมคลื่นแบบ QPSK ทำให้สัญญาณมีอัตราส่วนของสัญญาณรบกวนต่ำ และสร้างคลื่นพาหะย่อยด้วยกระบวนการ OFDM ในแต่ละสัญญาณพาหะย่อยจะถูกทำให้รูปร่างมีความตั้งฉากซึ่งกันและกันกับสัญญาณพาหะย่อยอื่น ๆ ดังรูปที่ 2.24 ด้วยวิธีการจัดการสัญญาณในลักษณะนี้ทำให้แม้แต่สัญญาณพาหะย่อยที่อยู่ใกล้กันซ้อนทับกันก็ไม่ก่อให้เกิดการรบกวนซึ่งกันละกัน และเสริมกระบวนการสลับข้อมูลอีก 2 ลักษณะคือการสลับข้อมูลทางด้านแกนเวลาและทางด้านความถี่ของสัญญาณ (Frequency and Time Interleaving) เพื่อป้องกันการผิดพลาดจากการรบกวนแถบสัญญาณข้อมูล (รายการภาพและเสียง) และข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบความผิดพลาดจะถูกส่งไปพร้อมกับสัญญาณพาหะย่อยที่แยกจากกันด้วย ดังนั้นการแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลในแต่ละสัญญาณพาหะย่อยจะใช้วิธีการตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดที่ปลายทาง

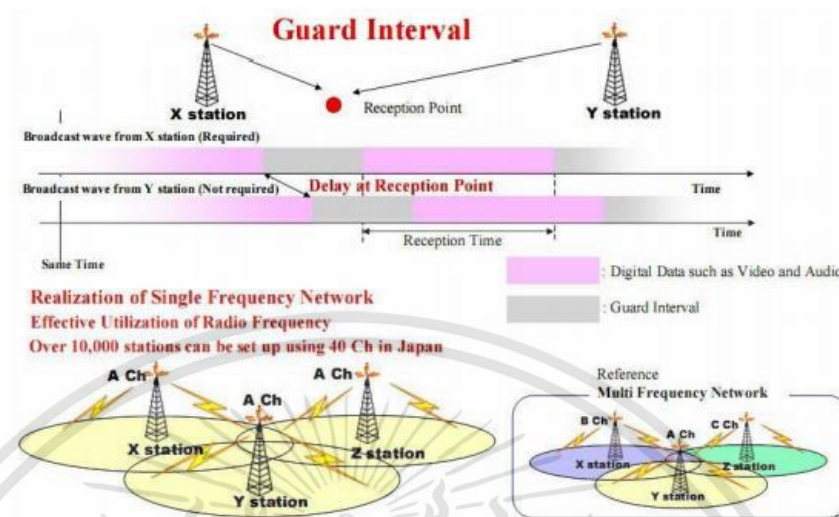


รูปที่ 2.24 คงทนต่อปรากฏการณ์พหุวิถี [14]

### 2.11.7 ช่วงเวลาป้องกัน

ป้องกันการสอดแทรกการรบกวนของสัญญาณเงาและสัญญาณสะท้อน แสดงดังรูปที่

2.17



รูปที่ 2.25 ช่วงเวลาป้องกัน [14]

### 2.11.8 เครือข่ายความถี่เดียว

รายการเดียวกันออกอากาศความถี่เดียวกันอยู่ในสถานที่ใกล้เคียงกัน สามารถออกอากาศได้โดยคลื่นสัญญาณไม่ทับซ้อนกัน

### 2.11.9 ผังรายการอิเล็กทรอนิกส์

ถือเป็นบริการส่งข้อมูลไปพร้อมสัญญาณภาพประเภทหนึ่ง เป็นเสมือนแผนผังของรายการที่เป็นข้อความบอกถึงรายละเอียดต่าง ทำให้ผู้รับบริการสามารถเปิดเลือกชมรายละเอียดการออกอากาศ อาทิ ค้นหาผังรายการ เวลาเริ่มและเวลาจบของรายการ ข้อมูลสั้น ๆ ประกอบรายการ ตรวจสอบสภาพภูมิอากาศ พยากรณ์อากาศ ค้นหารายการท้องถิ่น บอกรายละเอียดบริการเสริมอื่น ๆ เป็นต้น ดังรูปที่ 2.26 ในประเทศญี่ปุ่นจะแสดงรายการโทรทัศน์ล่วงหน้าได้ 8 วัน ผู้ชมสามารถใช้รีโมทกดปุ่มเลือกค้นหารายการที่กำหนดไว้ หรือเลือกแสดงข้อมูลต่าง ๆ ได้สะดวกด้วยตนเองและสามารถตั้งเวลาเพื่อบันทึกรายการตามที่ผังรายการกำหนดไว้ได้ โดยผ่านตัวรีโมทควบคุมผ่านกล่องรับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับ Recorder ได้โดยตรง หากต่ออุปกรณ์บันทึกร่วมกับกล่องรับสัญญาณ

บริการผังรายการอิเล็กทรอนิกส์มี 2 ลักษณะ คือ Present Program และ Following Program ใช้โปรแกรมภาษา BML (Broadcast Markup Language)

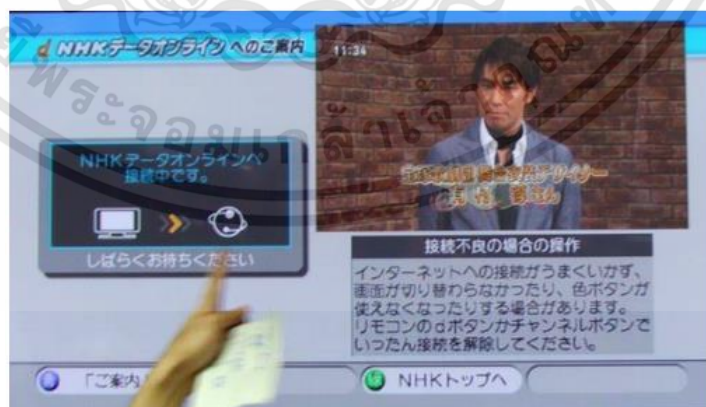
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ผังรายการอิเล็กทรอนิกส์ [14]

### 2.11.10 บริการการเชื่อมต่อแบบออนไลน์

เป็นบริการเสริมเช่นเดียวกับการส่งข้อมูลไปพร้อมสัญญาณ ดังรูปที่ 2.27 สามารถเปิดเชื่อมข้อมูลเข้ากับเครือข่ายระบบอินเทอร์เน็ตและบริการออนไลน์ได้พร้อมกับเลือกชมรายการโทรทัศน์ ค้นหา และเชื่อมต่อข้อมูลได้ตลอดเวลา คล้ายโปรแกรม WAP ผ่านระบบมือถือ โดยต้องต่อสายเครือข่ายผ่าน ADSL หรือ IP Internet อื่น ๆ เช่น เปิดอีเมล, ค้นหาข้อมูล หรือใช้สำหรับผู้รับบริการสามารถทำธุรกรรมต่าง ๆ ผ่านรายการโทรทัศน์ได้หลากหลาย เช่น อาจทำเป็นระบบ E-Commerce มีการสั่งซื้อสินค้าผ่านรายการโทรทัศน์ ขึ้นอยู่กับว่าสถานีโทรทัศน์ทำขึ้นมาให้บริการ



รูปที่ 2.27 บริการการเชื่อมต่อแบบออนไลน์ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.11.11 บริการคำบรรยาย

บริการนี้เกิดขึ้นก็เพื่อวัตถุประสงค์ในการช่วยเหลือคนหูหนวกหรือผู้มีปัญหาทางการได้ยิน ไม่ให้มีอุปสรรคในการรับชมรายการ ดังรูปที่ 2.28 คุณสมบัติบริการคำบรรยายนี้จะคล้ายคลึงกับคำบรรยายแทนเสียงที่มีในเครื่องรับทีวีแอนะล็อกชนิดสนับสนุนฟังก์ชัน Teletext โดยลักษณะของบริการคำบรรยาย โดยทั่วไปจะเป็นกรอบสี่เหลี่ยมสีดำปรากฏอยู่ด้านล่างของจอภาพภายในแสดงข้อความที่ตัวละครกำลังพูดอยู่ในขณะนั้น



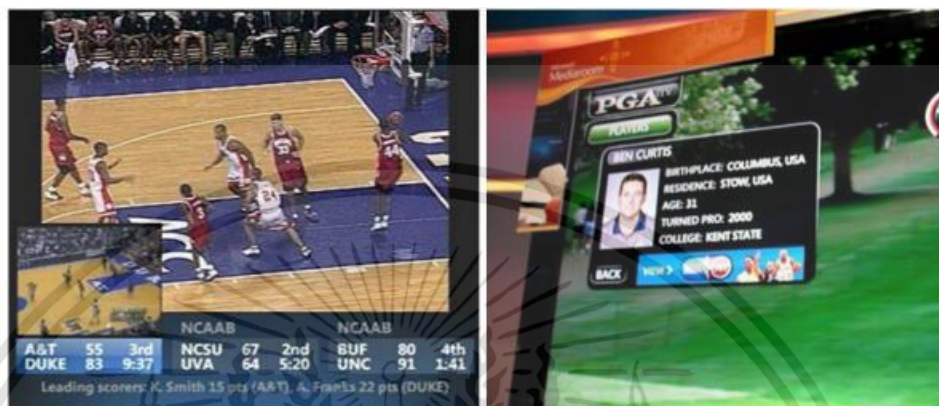
รูปที่ 2.28 บริการคำบรรยาย [14]

### 2.11.12 บริการการรับชมแบบหลายหลายมุมมอง

เป็นบริการเสริมอย่างหนึ่งที่ทำให้บรรณารักษ์ในการรับชมรายการมีมากขึ้นด้วยบริการการรับชมแบบหลายหลายมุมมอง จะทำให้ผู้รับชมรายการหลักสามารถเลือกดูภาพจากมุมกล้องอื่นนอกเหนือจากที่ปรากฏอยู่บนหน้าจอในเวลานั้นได้ รวมถึงการได้รับข้อมูลซึ่งเกี่ยวข้องกับรายการขณะนั้นเพิ่มเติม ประเภทของรายการหลักที่จะได้ประโยชน์อย่างชัดเจนก็คือรายการกีฬา เช่น รายการแข่งขันเทนนิส แข่งรถยนต์ เป็นต้น ทั้งนี้การส่งบริการการรับชมแบบหลายหลายมุมมองจะใช้ช่องสัญญาณเพิ่มเติมสำหรับส่งผ่านบริการไปยังผู้ชมปลายทาง เช่น ใช้ 1 ช่องเป็นช่องหลัก ออกอากาศรายการกีฬาพร้อมกับอีก 2 ช่องเพิ่มเติมเป็นบริการการรับชมแบบหลายหลายมุมมอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยช่องหนึ่งใช้ส่งข้อคิดเห็นเพิ่มเติมต่อเกมการแข่งขัน ขณะที่ช่องที่สองจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับสถิติการเล่นในเกม แสดงได้ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 บริการการรับชมแบบหลายหลายมุมมอง [14]

### 2.11.13 การเตือนภัยฉุกเฉิน (Emergency Warning)

ระบบเตือนภัยแผ่นดินไหว สึนามิ อุทกภัย เป็นการแจ้งข่าวเตือนภัย เมื่อเกิดภัยพิบัติจะแจ้งข่าวการเกิดเหตุทันทีโดยอัตโนมัติ ดังรูปที่ 2.30 เป็นระบบ EWBS (Emergency Warning Broadcasting System) เริ่มดำเนินการตั้งแต่ 1 ก.ย. 1985 ในญี่ปุ่น ปัจจุบันมีการศึกษาการเตือนภัยผ่านโทรศัพท์ แต่มีข้อเสียคือสายไม่ว่าง เนื่องจากการใช้งานฉุกเฉิน หรือต้องแจ้งที่ละเครื่องทำให้เสียเวลา แต่กรณีแจ้งผ่านสถานีโทรทัศน์สามารถทำได้พร้อมกัน เพราะมีผู้รับชมโทรทัศน์อยู่จำนวนมาก สามารถแจ้งเตือนภัยได้ทันที และสามารถแจ้งข่าวและประเมินความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นแบ่งเป็นแต่ละเขตได้ทันที

ระบบเตือนภัยจะถูกเชื่อมกับศูนย์ตรวจสอบแผ่นดินไหวตลอดเวลา หากมีแผ่นดินไหวเกิดขึ้นข้อมูลจะถูกส่งมาที่สถานีโทรทัศน์และระบบแจ้งเตือนภัยจะทำการตัดภาพโทรทัศน์แสดงข้อมูลการเกิดแผ่นดินไหว และแสดงข้อมูลต่าง ๆ แจ้งเตือนได้ทันทีเป็นอัตโนมัติบนหน้าจอโทรทัศน์



รูปที่ 2.30 การเตือนภัยฉุกเฉิน [14]

### 2.11.14 การปกป้องลิขสิทธิ์

ปกป้องลิขสิทธิ์ของสัญญาณที่แพร่ภาพได้ด้วยการเข้ารหัสสัญญาณ Scramble ได้ หรือทำระบบป้องกันการบันทึกภาพ DRM (Copyright Protection) หรือการสมัครสมาชิกโดยออกบัตร B-CAS เพื่อควบคุมการใช้งานผ่านกล่องรับสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 การปกป้องลิขสิทธิ์ [14]

### 2.11.15 การส่งสัญญาณแบบมีลำดับชั้น

การส่งสัญญาณแบบมีลำดับชั้น สามารถจัดลำดับการนำเข้าของข้อมูลหรือรายการ โดยสามารถเลือกเข้ารหัสสัญญาณที่ต้องการในการส่งสัญญาณขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของผู้รับบริการที่มีผลกระทบต่อสัญญาณที่ส่งออกไป ว่าสภาพแวดล้อมเป็นเมืองใหญ่มีตึกสูง หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในอาคารชั้นใต้ดิน ขานเมืองเป็นที่โล่ง หรือบริเวณที่มีภูเขา หรือการส่งสัญญาณให้กับยานพาหนะความเร็วสูง เป็นต้น สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันนี้เองทำให้สภาพสัญญาณที่ต้องการส่งมีการปรับเปลี่ยนไปตามลักษณะภูมิประเทศ จะให้รายการใดมีความทนทานต่อการรบกวนมากแต่ได้คุณภาพน้อย หรือต้องการให้สัญญาณมีคุณภาพมากแต่มีความทนทานต่ำก็สามารถทำได้ตามลักษณะภูมิประเทศและสภาพแวดล้อม

## 2.12 ทฤษฎีการหาตำแหน่ง

ในปัจจุบันมีการใช้งานการหาตำแหน่งกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการหาตำแหน่งมีประโยชน์ในหาพิกัด หรือติดตามสิ่งที่เราต้องการทราบ เมื่อก้าวถึงการหาตำแหน่งภายในอาคารก็พบว่ามีการนำเอาเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้งานมากมาย ยกตัวอย่างการใช้งานเช่น การหาพิกัดของรถยนต์ การหาตำแหน่งของสินค้าภายในโกดัง และการหาตำแหน่งของนักผจญเพลิง [15] เป็นต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ และเทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

### 2.12.1 พารามิเตอร์ของสัญญาณที่ใช้ในการหาตำแหน่ง

ขั้นตอนแรกของการหาตำแหน่งเป้าหมายนั้น ต้องทำการวัดเพื่อพิจารณาถึงพารามิเตอร์ของสัญญาณโดยจะขึ้นอยู่กับความต้องการในด้านความแม่นยำ รวมไปถึงข้อจำกัดในด้านการออกแบบอุปกรณ์ภาคส่งและภาครับ โดยทั่วไปแล้วการหาตำแหน่งนั้นจะใช้พารามิเตอร์เพียง 1 พารามิเตอร์ในแต่ละสัญญาณที่รับได้ อย่างไรก็ตามในการหาตำแหน่งนั้นก็สามารถใช้พารามิเตอร์หลายพารามิเตอร์ร่วมกันเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคาดคะเนตำแหน่ง พารามิเตอร์ของสัญญาณที่นิยมใช้ในการคาดคะเนตำแหน่งมีดังต่อไปนี้

#### 2.12.1.1 ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ (Received signal strength: RSS) [15]

ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจะแสดงถึงระดับกำลังงานที่ถูกรับได้ซึ่งเป็นสัญญาณรับที่อยู่หลังสายอากาศและรวมเอาค่าความสูญเสียที่เกิดจากสายนำสัญญาณไปด้วย สำหรับการหาตำแหน่ง การพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับนั้นมีแนวความคิดหลักคือเมื่อทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและกำลังที่สูญเสีย การวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับตำแหน่งเป้าหมาย สามารถคาดคะเนระยะทางระหว่างตำแหน่งเป้าหมายกับตำแหน่งที่ส่งสัญญาณได้ ระยะทางระหว่างตำแหน่งจะทำให้ได้วงกลม ซึ่งบอกถึงตำแหน่งเป้าหมายแสดงได้ดังรูปที่ 2.32

ในทางอุดมคติค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับเฉลี่ยสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีแบบระยะทางลอการิทึม (Log-Distance path loss model) ดังสมการที่ 2.1

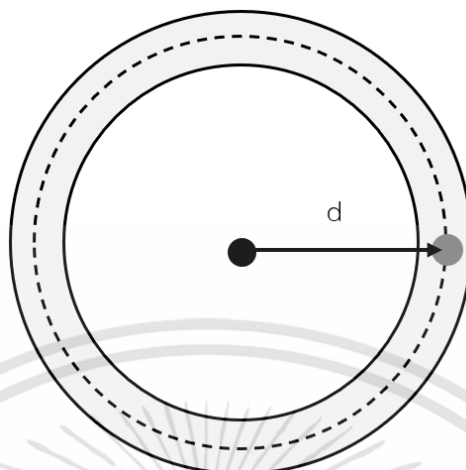
$$\bar{P}(d) = P_0 - 10n \log(d/d_0) \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\bar{P}(d)$	คือ	ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับเฉลี่ย (dB) ที่ระยะทาง $d$
	$P_0$	คือ	ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ (dB) ที่ระยะอ้างอิง $d_0$
	$n$	คือ	เลขชี้กำลังการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss Exponent)

อย่างไรก็ตามเนื่องจากความไม่เที่ยงตรงในการวัดและระยะทางที่ได้จากความสัมพันธ์ของค่าการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) ระยะทางที่คาดคะเนได้จึงทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น รวมไปถึงสัญญาณที่ส่งผ่านระหว่างตำแหน่งอาจถูกผลกระทบจากการเกิดการจางหายหลายวิถี (Multipath Fading) การบดบัง (Shadowing) และการสูญเสียเชิงวิถี ดังนั้นในความเป็นจริงแล้วการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะแสดงได้ดังรูปที่ 2.33



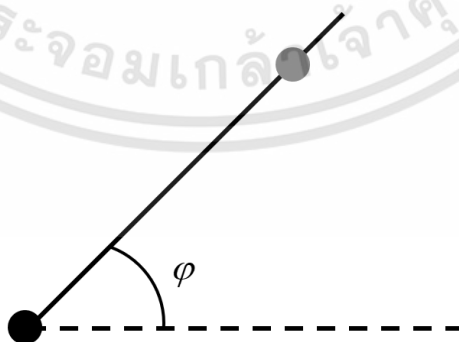
รูปที่ 2.32 ระยะทางระหว่างตำแหน่งในกรณีอุดมคติ [16]



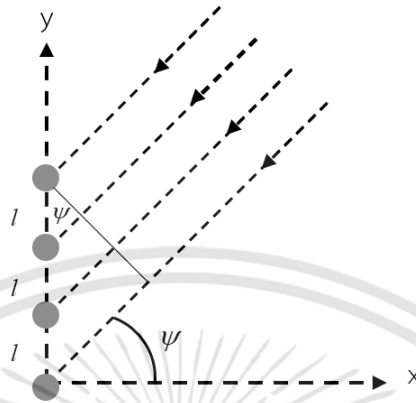
รูปที่ 2.33 ระยะทางระหว่างตำแหน่งในสถานะแวดล้อมภายนอกอาคาร [16]

#### 2.12.1.2 มุมของสัญญาณที่มาถึง (Angle of Arrival: AOA)

สำหรับการพิจารณามุมของสัญญาณที่มาถึงนั้น จะเป็นพิจารณาทิศทางของสัญญาณระหว่างตำแหน่ง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.34 กำหนดให้  $\varphi$  แทนมุมของสัญญาณที่มาถึงระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่ง โดยทั่วไปแล้วสายอากาศแถวลำดับ (Array Antenna) จะถูกใช้เพื่อทำการวัดมุมของสัญญาณที่มาถึง ซึ่งพิจารณาจากการวัดความต่างเวลาของสัญญาณที่มาถึง สำหรับการคาดคะเนมุมของสัญญาณที่มาถึงสำหรับการใช้สายอากาศแถวลำดับแนวตรงแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Linear Array: ULA) แสดงได้ดังรูปที่ 2.35 กำหนดให้  $\psi$  แทนมุมของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศอาร์เรย์แนวตรงแบบยูนิฟอร์ม



รูปที่ 2.34 การพิจารณามุมของสัญญาณที่มาถึงระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่ง [16]



รูปที่ 2.35 การพิจารณามุมของสัญญาณที่มาถึงสายอากาศอาร์เรย์แนวตรงแบบยูนิฟอร์ม [16]

### 2.12.1.3 เวลาของสัญญาณที่มาถึง (Time of Arrival: TOA)

สำหรับการพิจารณาเวลาของสัญญาณที่มาถึงนั้น ทำให้สามารถคาดคะเนระยะทางระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งได้ โดยคาดคะเนจากเวลาของสัญญาณจากตำแหน่งที่ส่งสัญญาณเดินทางไปยังตำแหน่งเป้าหมาย ดังนั้นการพิจารณาเวลาสัญญาณที่มาถึง จะได้ระยะทางที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในการวัดเวลาของสัญญาณที่มาถึง ในแต่ละตำแหน่งจำเป็นต้องมีสัญญาณนาฬิกาหรือต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลของเวลาผ่านโพรโทคอลที่มีความเชื่อถือ เช่นโพรโทคอลการรับส่งแบบสองทาง (Two-way ranging protocol)

เทคนิคการคาดคะเนเวลาของสัญญาณที่มาถึง นิยมใช้กระบวนการของวงจรกรองแมตช์ (Matched filter) รวมไปถึงกระบวนการสหสัมพันธ์ กำหนดให้สัญญาณที่รับได้แสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$r(t) = \alpha s(t - \tau) + n(t) \quad (2.2)$$

เมื่อ	$r(t)$	คือ	สัญญาณรับ
	$s(t)$	คือ	สัญญาณส่ง
	$\tau$	คือ	เวลาของสัญญาณที่มาถึง
	$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ (Channel Coefficient)

$n(t)$  คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนขาว (White Gaussian Noise) ซึ่งมี ค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และความหนาแน่นสเปกตรัมมีค่าเป็น  $N_0/2$

2.12.1.4 ความต่างเวลาของสัญญาณที่มาถึง (Time Difference of Arrival: TDOA) [17-18]

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น การพิจารณาเวลาของสัญญาณที่มาถึงนั้น จำเป็นต้องทำการประสานเวลา (Synchronize) ระหว่างตำแหน่งเป้าหมายและตำแหน่งที่ส่งสัญญาณ อย่างไรก็ตามการวัดความต่างเวลาของสัญญาณที่มาถึงนั้นสามารถหาได้ โดยไม่จำเป็นต้องทำการประมาณเวลาระหว่างตำแหน่งเป้าหมายและตำแหน่งที่ส่งสัญญาณ ในกรณีความต่างของเวลาที่สัญญาณสองสัญญาณเดินทางมาถึงระหว่างตำแหน่งเป้าหมายไปยังตำแหน่งที่ส่งสัญญาณจำนวน 2 ตำแหน่งจะถูกคาดคะเน ดังนั้นในการหาตำแหน่งของตำแหน่งเป้าหมายนั้นจะมีลักษณะเป็นไฮเพอร์โบลา (Hyperbola) แสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ไฮเพอร์โบลาซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของตำแหน่งเป้าหมาย [16]

การพิจารณาความต่างเวลาของสัญญาณที่มาถึงนี้วิธีการหนึ่งคือการประมาณค่าเวลาของสัญญาณที่มาถึงในแต่ละตำแหน่งที่ส่งสัญญาณ จากสมการที่ 2.3 หากกำหนดให้สัญญาณที่รับได้ที่ตำแหน่งที่ส่งสัญญาณที่ 1 เป็น  $r_1(t)$  และสัญญาณที่รับได้ที่ตำแหน่งที่ส่งสัญญาณที่ 2 เป็น  $r_2(t)$  ดังนั้นจะสามารถหาค่าเวลาสัญญาณที่มาถึง  $\tau_1$  สำหรับ  $r_1(t)$  และ  $\tau_2$

สำหรับ  $r_2(t)$  ได้ ดังนั้นค่าความต่างของเวลาของสัญญาณที่มาถึงนั้นสามารถแสดงเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\tau_{TDOA} = \tau_1 - \tau_2 \quad (2.3)$$

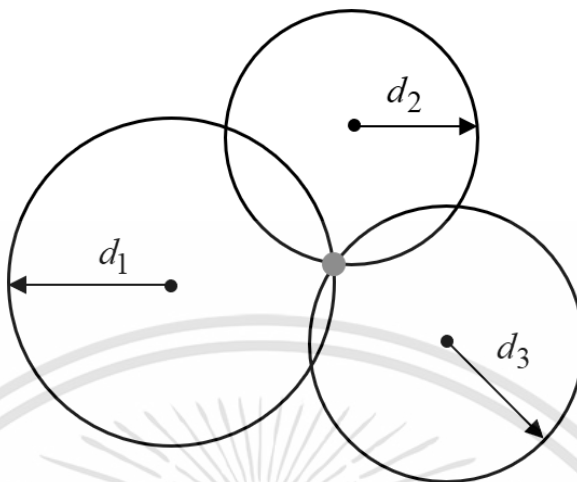
เมื่อ  $\tau_{TDOA}$  คือ ความต่างของเวลาของสัญญาณที่มาถึง  
 $\tau_1$  คือ เวลาสัญญาณที่  $r_1(t)$  มาถึง  
 $\tau_2$  คือ เวลาสัญญาณที่  $r_2(t)$  มาถึง

### 2.12.2 เทคนิคการหาตำแหน่ง (Positioning Technique)

เทคนิคที่ใช้ในการหาตำแหน่งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ เทคนิคการจับคู่หรือเรียกอีกอย่างว่าเทคนิคสแกนลายนิ้วมือ (Mapping Technique or Fingerprinting Technique) และเทคนิคทางเรขาคณิต (Geometric Techniques) โดยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือนั้นจะใช้ฐานข้อมูล (Database) ซึ่งได้จากการเก็บรวบรวมพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ต้องการพิจารณาในขั้นตอนออฟไลน์หรือเรียกว่าขั้นตอนฝึกฝน (Offline Phase or Training Phase) ก่อนที่จะเริ่มกระบวนการในการหาตำแหน่งในขั้นตอนออนไลน์หรือเรียกว่าขั้นตอนทดสอบ (Online Phase or Testing Phase) ในขณะที่เทคนิคทางเรขาคณิตไม่จำเป็นต้องใช้ฐานข้อมูลในการประมวลผล โดยตำแหน่งจะถูกหาโดยใช้พารามิเตอร์ของสัญญาณที่วัดได้จริงในขณะนั้น

#### 2.12.2.1 เทคนิคทางเรขาคณิต

สำหรับการหาตำแหน่งในเทคนิคทางเรขาคณิตนั้น สามารถหาตำแหน่งได้โดยตรงจากพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ต้องการพิจารณาโดยไม่จำเป็นต้องใช้ฐานข้อมูล การหาตำแหน่งเป้าหมายโดยใช้เทคนิคทางเรขาคณิตนั้นสามารถหาได้จากการซ้อนทับกัน (Intersection) ของระยะทางที่หาได้จากพารามิเตอร์ที่ต้องการพิจารณาระหว่างตำแหน่งเป้าหมายและตำแหน่งที่ส่งสัญญาณ ยกตัวอย่างเช่นการหาตำแหน่งโดยพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณหรือเวลาที่มาถึงของสัญญาณนั้น จะสามารถหาระยะทางระหว่างตำแหน่งเป้าหมายและตำแหน่งที่ส่งสัญญาณได้ โดยมีลักษณะเป็นวงกลม ในการหาตำแหน่งโดยใช้วงกลมนั้นจำเป็นต้องใช้ตำแหน่งที่ส่งสัญญาณอย่างน้อย 3 ตำแหน่งดังแสดงในรูป 2.37 ซึ่งการหาตำแหน่งโดยวิธีการนี้จะถูกเรียกว่าวิธีสามเหลี่ยมระยะ (Trilateration) [19]



รูปที่ 2.37 กระบวนการหาค่าตำแหน่งโดยใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะ [16]

กำหนดให้  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$  แสดงถึงระยะทางที่ได้จากการพิจารณาค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้หรือเวลาของสัญญาณที่มาถึง สมการวงกลมสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 = d_i^2 \quad (2.4)$$

เมื่อ  $(x_i, y_i)$  คือตำแหน่งที่ส่งสัญญาณ โดยที่  $i=1,2,\dots,n$  เมื่อ  $n$  คือจำนวนตำแหน่งที่ส่งสัญญาณ  $(x, y)$  คือตำแหน่งเป้าหมาย จากสมการที่ 2.4 สามารถหาค่าตำแหน่งของจุดอ้างอิง  $(x, y)$  ได้ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6

$$x = \frac{(y_2 - y_1)\gamma_1 + (y_2 - y_3)\gamma_2}{2[(x_2 - x_3)(y_2 - y_1) + (x_1 - x_2)(y_2 - y_3)]} \quad (2.5)$$

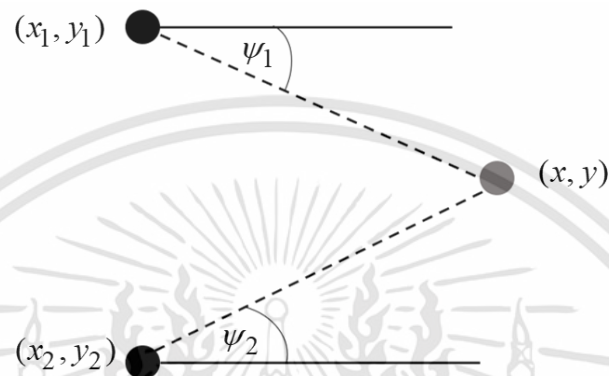
$$y = \frac{(x_2 - x_1)\gamma_1 + (x_2 - x_3)\gamma_2}{2[(x_2 - x_1)(y_2 - y_3) + (x_2 - x_3)(y_1 - y_2)]} \quad (2.6)$$

เมื่อ

$$\gamma_1 = x_2^2 - x_3^2 + y_2^2 - y_3^2 + d_3^2 - d_2^2 \quad (2.7)$$

$$\gamma_2 = x_1^2 - x_2^2 + y_1^2 - y_2^2 + d_2^2 - d_1^2 \quad (2.8)$$

นอกจากการใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะแล้ว การหาตำแหน่งโดยใช้มุมของสัญญาณที่มาถึงนั้นจะใช้สัญญาณอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง โดยพิจารณาการตัดกันของเส้นตรง ซึ่งเรียกวิธีนี้ว่า วิธีสามเส้า (Triangulation) แสดงในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 กระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีสามเส้า [17]

กำหนดให้  $\psi_1$  และ  $\psi_2$  แทนมุมที่วัดได้จากตำแหน่งส่งสัญญาณที่ 1 และตำแหน่งส่งสัญญาณที่ 2 ตามลำดับ สามารถแสดงสมการสำหรับการหาตำแหน่งเป้าหมายได้ดังสมการที่ 2.9

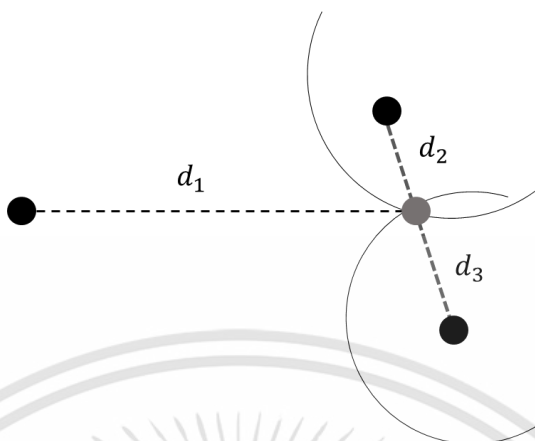
$$\tan \psi_1 = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad \text{และ} \quad \tan \psi_2 = \frac{y - y_2}{x - x_2} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 สามารถหาตำแหน่งเป้าหมาย  $(x, y)$  ได้ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$x = \frac{x_2 \tan \psi_2 - x_1 \tan \psi_1 + y_1 - y_2}{\tan \psi_2 - \tan \psi_1} \quad (2.10)$$

$$y = \frac{(x_1 - x_2) \tan \psi_1 \tan \psi_2 - y_1 \tan \psi_2 + y_2 \tan \psi_1}{\tan \psi_2 - \tan \psi_1} \quad (2.11)$$

ในกรณีของการหาตำแหน่งโดยใช้พารามิเตอร์ความต่างเวลาของสัญญาณที่มาถึงจะใช้หลักการของไฮเพอร์โบลา ดังแสดงในรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 กระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีไฮเปอร์โบล่า [16]

จากรูปที่ 2.39 ในการหาตำแหน่งเป้าหมาย จะต้องใช้ตำแหน่งส่งสัญญาณอย่างน้อย 3 ตำแหน่ง ซึ่งสามารถแสดงดังสมการที่ 2.12

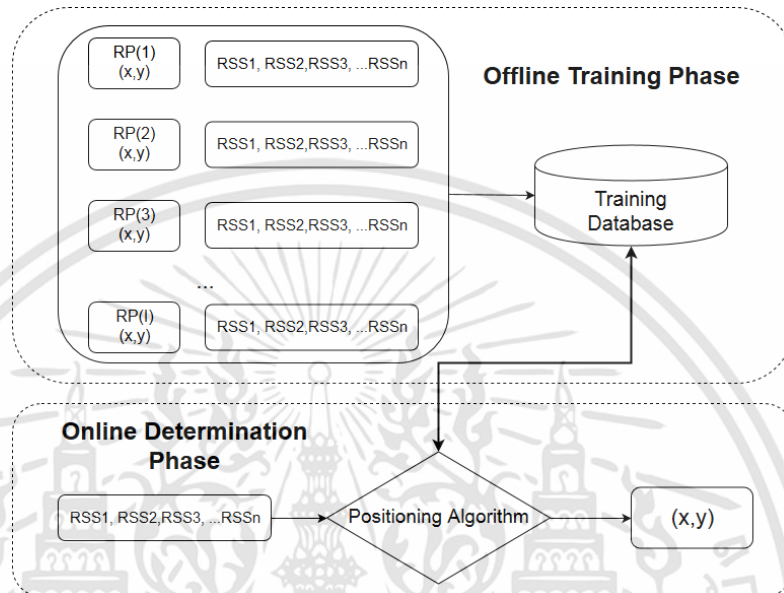
$$d_i - d_1 = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $i = 2, 3$

#### 2.12.2.2 เทคนิคสแกนลายนิ้วมือ

เทคนิคสแกนลายนิ้วมือจะใช้ฐานข้อมูลเพื่อหาตำแหน่ง โดยมีแนวความคิดคล้ายกับวิธีการสแกนลายนิ้วมือของมนุษย์ ในขั้นตอนแรกนั้นจะเก็บพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ต้องการนำมาพิจารณาไว้ในฐานข้อมูล จากนั้นทำการหาตำแหน่งเป้าหมายโดยนำค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณมาเปรียบเทียบกับความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งที่ได้ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณนั้นไว้ในฐานข้อมูลก่อนหน้าแล้ว ตำแหน่งเป้าหมายที่ได้คือตำแหน่งที่เมื่อทำเปรียบเทียบแล้วมีความใกล้เคียงที่สุด [19] วิธีการนี้สามารถใช้อุปกรณ์ภาคส่งอย่างน้อย 1 ตัวก็สามารถหาตำแหน่งได้ อย่างไรก็ตาม ข้อด้อยของการใช้วิธีนี้ในการหาตำแหน่งคือต้องใช้เวลามากในการเก็บพารามิเตอร์ที่ต้องการพิจารณาไว้ในฐานข้อมูลสำหรับกรณีที่มีบริเวณที่ต้องการหาตำแหน่งมีขนาด

ใหญ่ รวมไปถึงต้องมีอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลที่สามารถรองรับข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณได้ สำหรับกระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือ แสดงดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 กระบวนการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือ [18]

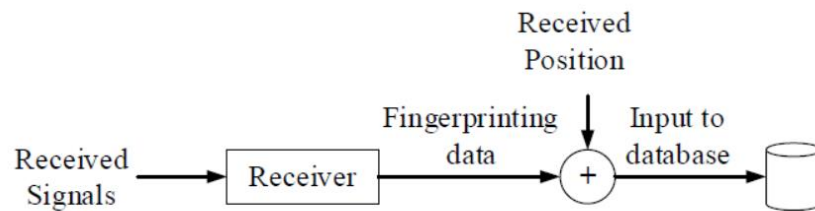
### 1) ขั้นตอนการฝึกฝน

สำหรับในขั้นตอนการฝึกฝนนั้น เป็นการเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณซึ่งแสดงถึงเอกลักษณ์เฉพาะของตำแหน่งซึ่งเรียกว่าชุดข้อมูลฝึกฝน ( $S$ ) โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ 2.13 ขั้นตอนการฝึกฝนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.41

$$S = \{(m_1, p_1), (m_2, p_2), \dots, (m_n, p_n)\} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $m_i$  คือ พารามิเตอร์ของสัญญาณในตำแหน่งที่  $i^{\text{th}}$   
 $n$  คือ คือจำนวนข้อมูลฝึกฝนทั้งหมด  
 $p_i = (x_i, y_i)$  คือ คือตำแหน่งสำหรับในปริภูมิ 2 มิติของพิกัดในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$

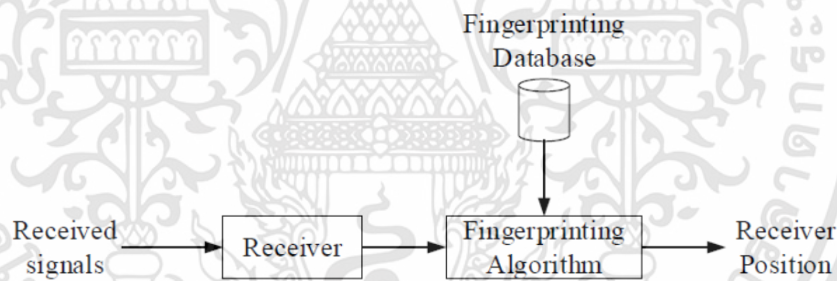
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.41 กระบวนการสร้างฐานข้อมูลของเทคนิคสแกนลายนิ้วมือ [20]

## 2) ขั้นตอนทดสอบ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเก็บพารามิเตอร์ของสัญญาณชนิดเดียวกันกับที่เก็บไว้ในฐานข้อมูลและทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในฐานข้อมูล แสดงดังรูปที่ 2.42 ซึ่งการเปรียบเทียบโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดและอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัวนี้จะอธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 2.13



รูปที่ 2.42 กระบวนการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือ [20]

## 2.13 การคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ

สำหรับเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือนั้น หลังจากทำการสร้างลายลักษณ์ต้นแบบแล้ว ก็ จะคาดคะเนตำแหน่งโดยนำพารามิเตอร์ของลายลักษณ์ทดสอบไปเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ของลายลักษณ์ต้นแบบในทุกตำแหน่ง โดยคำนวณหาความแตกต่างของพารามิเตอร์ระหว่างลายลักษณ์ต้นแบบและลายลักษณ์ทดสอบในแต่ละตำแหน่ง ขั้นตอนในการคาดคะเนตำแหน่งจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดและอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัว

### 2.13.1 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square: LS)

ในการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด [21] นั้น เมื่อกำหนดให้ลายลักษณ์ต้นแบบ ( $S_i$ ) ซึ่งมีจำนวน  $m$  จุด และลายลักษณ์ทดสอบเป็น ( $s$ ) สามารถคำนวณค่าความแตกต่างของลายลักษณ์ ( $d_i$ ) โดยใช้ระยะทางยุคลิดแสดงได้ดังสมการที่ 2.14

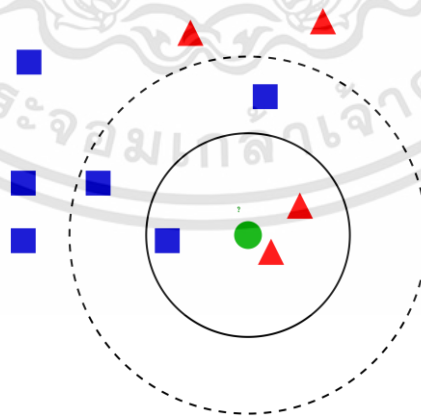
$$d_i = \sqrt{\sum_{i=1}^m (S_i - s)^2} \quad (2.14)$$

พิกัดตำแหน่งที่คาดคะเนได้จากเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ ( $x_e, y_e$ ) สามารถนิยามได้จากพิกัดตำแหน่งที่มีค่าความแตกต่างของลายลักษณ์ที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.15

$$(x_e, y_e) = \arg_{x,y} \min d_i(x, y) \quad (2.15)$$

### 2.13.2 อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน $k$ ตัว (k-Nearest Neighbor Algorithm: kNN)

อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัว เป็นวิธีในการตัดสินใจวิธีหนึ่งที่ต่างจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่สามารถขยายขอบเขตของการตัดสินใจให้มากขึ้น โดยการตรวจสอบ  $k$  จำนวนที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด แสดงได้ดังรูปที่ 2.43



รูปที่ 2.43 อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัว [22]

เทคนิคนี้จะเป็นการหาผลรวม (Count Up) ของจำนวนเงื่อนไข หรือกรณีต่าง ๆ สำหรับแต่ละการตัดสินใจ การนำอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัวไปใช้นั้นเป็นการหา ระยะห่างระหว่างแต่ละตัวแปร (Attribute) ในข้อมูล ซึ่งเหมาะสำหรับข้อมูลเชิงปริมาณ สำหรับ ขั้นตอนวิธีของอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัวนั้นเริ่มต้นต้องทำการกำหนดขนาดของ  $k$  ก่อนโดยทั่วไปนิยมกำหนดให้เป็นเลขคี่ หลังจากนั้นทำการคำนวณความแตกต่างระหว่างข้อมูล เป้าหมายกับกลุ่มข้อมูลตัวอย่าง ข้อมูลเป้าหมายจะถูกตัดสินใจโดยพิจารณาข้อมูลตัวอย่างที่มีความแตกต่างน้อยที่สุดจำนวน  $k$  ข้อมูล โดยขั้นตอนวิธีการเพื่อนบ้านใกล้ที่สุดจำนวน  $k$  ตัวมีขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดค่า  $k$  ที่ต้องการพิจารณา สิ่งสำคัญที่ควรคำนึงถึงคือในการ กำหนดค่า  $k$  ควรกำหนดให้เป็นเลขคี่สำหรับกรณีข้อมูลเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ เนื่องจากหาก กำหนดเป็นเลขคู่อาจจะทำให้ตัดสินใจไม่ได้ว่าข้อมูลนั้นควรจะเป็นข้อมูลใด

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณค่าความแตกต่างของลายลักษณะ ( $d_i$ ) โดยส่วนใหญ่แล้วนิยมใช้ การคำนวณความแตกต่างโดยใช้ระยะทางยูคลิดियดดังสมการที่ 2.14

ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาความแตกต่างของข้อมูลที่มีค่าน้อยที่สุดจำนวน  $k$  ตัวตามที่ได้ กำหนดไว้ เพื่อวิเคราะห์ถึงความน่าจะเป็นของข้อมูลที่สนใจโดยในที่นี้สำหรับการหาตำแหน่ง เมื่อ พิจารณาข้อมูลแล้วผลลัพธ์ของข้อมูลจะอยู่ในรูปพิกัดของตำแหน่ง  $(x, y)$  ซึ่งเกิดจากการหา ค่าเฉลี่ยจากผลลัพธ์ที่ได้จำนวน  $k$  ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.16

$$(x_e, y_e) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i, y_i) \quad (2.16)$$

## 2.14 การวิเคราะห์ความแม่นยำของเทคนิคสแกนลายนิ้วมือ

ในการวิเคราะห์หาความแม่นยำของเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือบนพื้นฐานเทคโนโลยี โทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นั้นจะพิจารณาในเทอมของค่าความผิดพลาดระยะทาง โดย กำหนดให้พิกัดตำแหน่ง  $(x_e, y_e)$  เป็นพิกัดตำแหน่งที่ได้จากเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ และ กำหนดให้พิกัดตำแหน่ง  $(x_c, y_c)$  เป็นพิกัดที่ถูกต้อง ค่าความผิดพลาดของระยะทาง  $e_d$  จะ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.17

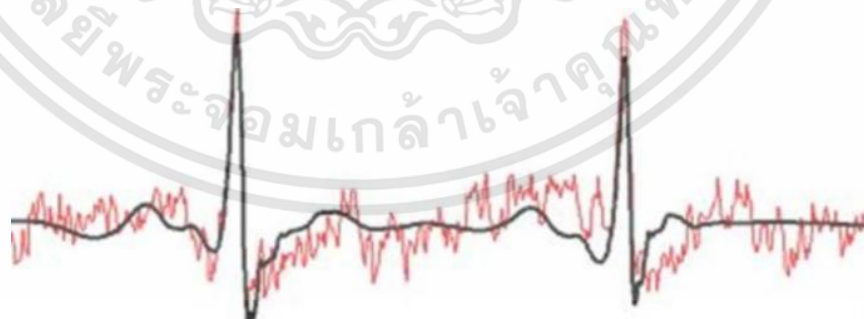
$$e_d = \sqrt{(x_c - x_e)^2 + (y_c - y_e)^2} \quad (2.17)$$

ค่าความผิดพลาดของระยะทางนี้จะเป็พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ถึงความแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือบนพื้นฐานเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ซึ่งจะมีความแม่นยำมากเมื่อมีค่าความผิดพลาดของระยะทางน้อย

## 2.15 ทฤษฎีอัลกอริทึมแบบคลื่น

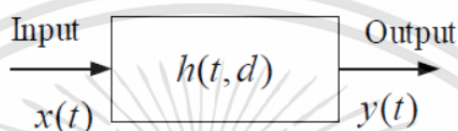
เริ่มใช้ในปี 1974 โดยนักวิทยาศาสตร์ Jan Hogbom โดยมีวัตถุประสงค์การใช้เทคนิคเพื่อใช้ในการปรับปรุงความคมชัดของภาพถ่ายทางอวกาศโดยเทคนิค CLEAN จะสมมุติว่าข้อมูลของภาพที่ได้มาจะเรียกว่า “Dirty map” โดยที่อัลกอริทึมนี้จะสมมุติข้อมูลที่ได้มาเป็นลักษณะของจุดข้อมูล (point source) และจะทำการสร้าง “ลำคลื่นสังเคราะห์ (Synthesis Beam)” และทำการหาค่าสูงสุดของข้อมูลในภาพและนำลำคลื่นสังเคราะห์ไปลบออกโดยที่จะทำไปจนข้อมูลทั้งหมดต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้อัลกอริทึมก็จะหยุดการทำงานทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดขึ้น [23]

ซึ่งอัลกอริทึมแบบคลื่นจะทำการปรับปรุงในโดเมนของเวลา วัตถุประสงค์หลักก็เพื่อลดสัญญาณรบกวนในระบบการสื่อสาร และได้มีการนำมาใช้ในด้านของการหาตำแหน่ง (Localization) โดยมีการนำอัลกอริทึมแบบคลื่นมาใช้ในเพราะกระบวนการ CLEAN มีข้อดีที่สามารถที่จะขจัดสัญญาณรบกวนได้จึงสามารถทำให้เห็นสัญญาณในฝั่งรับในแต่ละช่วงเวลาได้ชัดเจนยิ่งขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 การใช้อัลกอริทึมแบบคลื่นลดสัญญาณรบกวนแสดงให้เห็นสัญญาณที่ฝั่งรับ [24]

อัลกอริทึมแบบคลื่นใช้ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์เพื่อคลื่น ในกระบวนการนี้ ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์แสดงได้ดังรูปที่ 2.45 สามารถกำหนดคุณลักษณะโดย ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ในโดเมนเวลาแสดงได้ดังสมการที่ 2.18 หรือฟังก์ชันการถ่ายโอน ในโดเมนความถี่แสดงได้ดังสมการที่ 2.19 การแปลงรูปคลื่นของโดเมนเวลาแสดงได้ดังสมการที่ 2.20 สามารถใช้เพื่อกำหนดการตอบสนองอิมพัลส์



รูปที่ 2.45 ระบบเชิงเส้นไม่แปรผันตามเวลา [25]

$$y(t) = x(t) * h(t, d) \quad (2.18)$$

$$Y(f) = X(f)H(f, d) \quad (2.19)$$

$$y(t) = F^{-1}\{Y(f)\} \quad (2.20)$$

เมื่อ \* หมายถึงคอนโวลูชันทางเวลา สัญญาณรับอยู่ในโดเมนความถี่ที่สามารถแปลงเป็นโดเมนเวลาได้โดยใช้การแปลงกลับของฟูเรียร์

ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์แสดงดังสมการที่ 2.21

$$h(t, d) = \sum_{i=1}^N a_i x_i(\tau) \delta(\tau - \tau_i) x_i(\tau) \quad (2.21)$$

โดยที่  $\delta$  คือฟังก์ชันดิแรกเดลตา  $N$  คือจำนวนขององค์ประกอบคลื่นหลายวิถี  $\alpha_i$  คือแอมพลิจูดลำดับที่  $i$  ขององค์ประกอบคลื่นหลายวิถี  $\tau_i$  คือความล่าช้าสัมพันธ์ลำดับที่  $i$  ขององค์ประกอบคลื่นหลายวิถีและ  $x_i(\tau)$  คือการบิดเบือนที่ขึ้นกับความถี่บนลำดับที่  $i$  หลังจากผ่าน

สิ่งแวดล้อม สัญญาณที่ได้รับอยู่ในโดเมนความถี่สามารถแปลงเป็นโดเมนเวลาได้โดยใช้การแปลงกลับของฟูเรียร์

โดยสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างอินพุตและเอาต์พุตสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.22 และสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างอินพุตและเอาต์พุตในโดเมนความถี่คำนวณได้ดังสมการที่ 2.23

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t-\tau) \quad (2.22)$$

$$S_{xy}(f) = H(f,d)S_{xx}(f) \quad (2.23)$$

โดยที่  $R_{xy}(\tau)$  คือสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างอินพุตและเอาต์พุต  $h(t)$  คือช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์  $H(f)$  คือช่องสัญญาณการตอบสนองของความถี่  $R_{xx}(\tau)$  คือสหสัมพันธ์ของอินพุต  $S_{xx}(f)$  คือ สหสัมพันธ์ข้ามระหว่างอินพุต  $X(f)$  และเอาต์พุต  $Y(f)$  ในโดเมนความถี่ และ  $S_{xx}(f)$  คือ สหสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตในโดเมนความถี่ สามารถคำนวณสหสัมพันธ์ข้ามได้โดยสมการที่ 2.24 และสหสัมพันธ์ของอินพุตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.26

$$R_{xy}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau) dt}{\sqrt{E_y E_x}} \quad (2.24)$$

$$|R_{yx}(\tau)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau) dt \right|^2 = E_y E_x \quad (2.25)$$

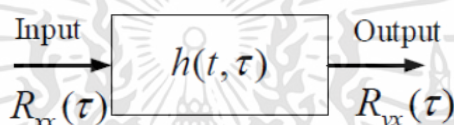
$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t+\tau) dt \quad (2.26)$$

ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์สามารถประมาณได้โดยเทคนิคสหสัมพันธ์ข้าม โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณอินพุต  $x(t)$  และเอาต์พุต  $y(t)$  และสำหรับฟังก์ชันสหสัมพันธ์อัตโนมัติ สมมติว่าสัญญาณ  $x(t)$  พร้อมสหสัมพันธ์อัตโนมัติที่รู้จัก  $R_{xx}(t)$  ถูกนำไปใช้

กับช่องสัญญาณ  $h(t)$  ทำให้เกิดสัญญาณเอาต์พุตในโดเมนเวลาที่ไม่ต่อเนื่องแสดงได้ดังสมการที่ 2.27 [24]

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau)x(t - \tau) \quad (2.27)$$

สหสัมพันธ์ข้ามระหว่างเอาต์พุตและสัญญาณอินพุตแสดงได้รูปที่ 2.46 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.28



รูปที่ 2.46 ความสัมพันธ์อินพุต-เอาต์พุตสำหรับสหสัมพันธ์ข้าม  $R_{yx}(\tau)$  [25]

$$R_{yx}(\tau) = h(\tau) * R_{xx}(\tau) \quad (2.28)$$

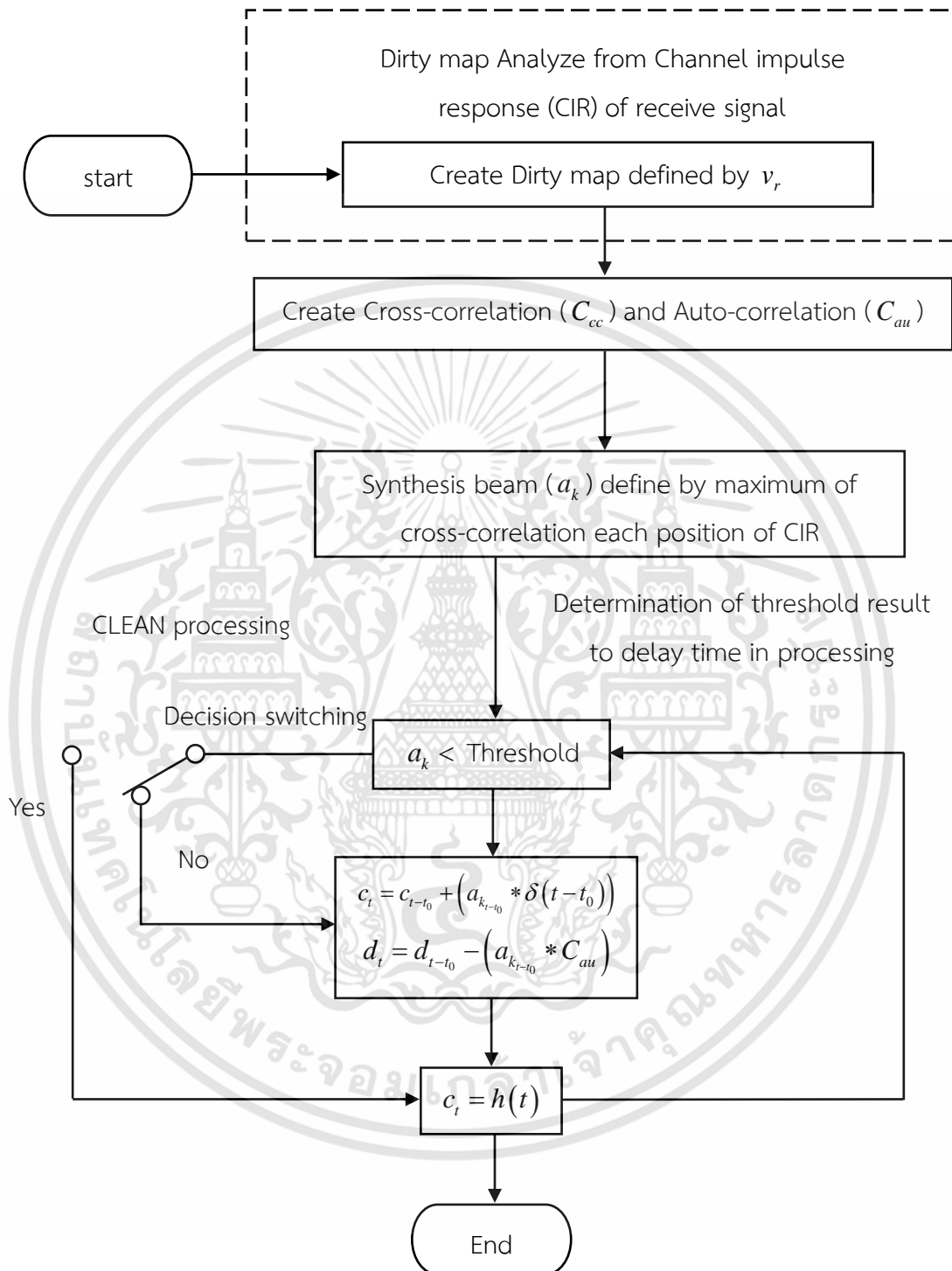
โดยที่  $h(\tau)$  คือช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ และ  $R_{xx}(\tau)$  คือสหสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุต ดังนั้น สหสัมพันธ์ข้ามระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของระบบคือคอนโวลูชันของการตอบสนองอิมพัลส์ สหสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตสามารถดูได้ว่าเป็นเอาต์พุตของช่องสัญญาณ  $h(\tau)$  [25] และ [26]

อัลกอริทึมแบบคลินเป็นขั้นตอนตีคอนโวลูชัน การลบที่มีความละเอียดสูงแบบวนซ้ำ ซึ่งสามารถในการแก้ไขขององค์ประกอบคลื่นหลายวิถีที่มีความหนาแน่นสูง มักจะไม่สามารถแก้ไขได้โดยการกรองผกผันธรรมดา ข้อดีของอัลกอริทึมแบบคลินคือจำลอง CIR โดยประมาณ ( $h_{clean}(t)$ ) คือช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ ซึ่งง่ายต่อการใช้อธิบายคุณลักษณะและแบบจำลองการแพร่กระจายที่ล่าช้า การสูญเสียเชิงวิถี และการแพร่กระจายของช่องสัญญาณ เป็นต้น ในปริภูมิตวินพจน์เล่มนี้นำเสนออัลกอริทึมแบบคลินสำหรับการกำหนดคุณลักษณะช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ของการหาตำแหน่งโทรศัพท์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล มีการใช้อัลกอริทึมแบบคลินในการหา

ตำแหน่งแถบกว้างยิ่ง [27] อย่างไรก็ตาม ปริมาณนี้แนะนำให้เสนอถึงขั้นตอนวิธีการของอัลกอริทึมแบบคลื่นโดยได้มีการประยุกต์ใช้ในการหาตำแหน่งโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัล โดยได้มีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบที่มีอยู่เดิมเพื่อสามารถนำมาใช้ในลักษณะช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อที่จะลดสัญญาณรบกวน, การจางหาย (Fading) อันเป็นสาเหตุมาจากคลื่นหลายวิถีและให้เห็นถึงสัญญาณส่งที่ชัดเจนยิ่งขึ้นโดยขั้นตอนการทำงานสามารถอธิบายได้ในรายละเอียดดังรูปที่ 2.47 และมีขั้นตอนวิธีการดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.47 โครงสร้างของอัลกอริทึมแบบคลีน [28]

ขั้นตอนการทำงานของกระบวนการ CLEAN

- (1) ทำการหา “dirty map” ซึ่งในที่นี้คือสัญญาณรับ ( $v_r$ ) ในโดเมนเวลา (Channel Impulse response; CIR)
- (2) ทำการหา auto-correlation ( $C_{au}$ ) ระหว่างสัญญาณส่ง ( $v_t$ ) ในโดเมนเวลา ดังสมการที่ 2.29 และทำการหา Cross-correlation ( $C_{cc}$ ) ระหว่างสัญญาณส่ง ( $v_t$ ) และสัญญาณรับ ( $v_r$ ) ได้ดังสมการที่ 2.30

$$C_{au}(\tau) = v_t(t) \otimes v_t(t) \quad (2.29)$$

$$C_{cc}(\tau) = v_r(t) \otimes v_t(t) \quad (2.30)$$

- (3) ทำการสร้างพีคสังเคราะห์ ( $a_k$ ) โดยการหาค่าสูงสุดของ  $C_{cc}$  ที่แต่ละตำแหน่งของแต่ละข้อมูล ดังสมการที่ 2.31

$$a_k = \max |C_{cc}(\tau)| \quad (2.31)$$

- (4) ทำการกำหนดเกณฑ์โดยที่ถ้าค่าของพีคสังเคราะห์น้อยกว่าเกณฑ์ที่ตั้งไว้จะกลับไปทำข้อที่ (3)
- (5) ถ้าค่าของพีคสังเคราะห์มากกว่าเกณฑ์จะเป็นไปตามสมการที่ 2.32 และ 2.33

$$d_t = d_{t-t_0} - (a_{k_r-t_0} * C_{au}) \quad (2.32)$$

เมื่อ  $a_k$  คือ พีคสังเคราะห์ซึ่งขั้นตอนนี้จะเรียกว่าการ “CLEAN Dirty map”

$$c_t = c_{t-t_0} + (a_{k_r-t_0} * \delta(t-t_0)) \quad (2.33)$$

ซึ่งจะได้  $C_t = h(t)$  โดยเรียก  $C_t$  ที่เป็นช่องสัญญาณอิมพัลส์ (CIR) ใหม่ ว่า “CLEAN map” หรือ “CLEAN Component”

- (6) สุดท้ายก็จะได้ช่องสัญญาณอิมพัลส์ใหม่ซึ่งจะเรียกว่า “CLEAN map”

## 2.16 ทฤษฎีการสูญเสียเชิงวิถี [29]

การสูญเสียเชิงวิถี เป็นอัตราส่วนระหว่างการสูญเสียของกำลังงานทางด้านส่ง (Power of Transmitter) เทียบกับกำลังงานทางด้านรับ (Power of Receiver) เพื่อแสดงว่าระบบที่ใช้งานอยู่นั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าของระดับสัญญาณเป็นอย่างไร แสดงดังสมการที่ 2.34

$$P(\text{dB}) = 20 \log \left[ \max \frac{|v_t(t)|}{|v_r(t)|} \right] \quad (2.34)$$

เมื่อ  $P(\text{dB})$  คือ การสูญเสียเชิงวิถี  
 $v_t(t)$  คือ สัญญาณทางด้านส่ง  
 $v_r(t)$  คือ สัญญาณทางด้านรับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและขั้นตอนการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดและขั้นตอนการทดลองสำหรับระบบหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและแบบจำลองการวัดสำหรับการทดลอง สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้น อุปกรณ์ภาครับใช้สายอากาศรับไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่น ยี่ห้อ EMCO Model รุ่น 3121C และเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ อุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณใช้สถานีส่งไบหยก สำหรับแบบจำลองการวัดสำหรับการทดลองนั้นจะทำการทดลองบริเวณวัดปลูกศรัทธา กรุงเทพมหานคร โดยทดสอบเก็บลายลักษณ์ต้นแบบทั้งหมด 121 ตำแหน่ง เช่นเดียวกับกับลายลักษณ์ทดสอบ ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด 100 ตารางเมตร

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สายอากาศ

พิจารณาสายอากาศที่เหมาะสมกับการทดลองและวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.1 ยี่ห้อ EMCO Model รุ่น 3121C เป็นสายอากาศไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่น สามารถรองรับความถี่ในช่วง 28 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1000 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่ใช้งานโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มาพร้อมกับสายนำสัญญาณความยาว 10 เมตร ติดตั้งบนขาตั้งที่สามารถปรับระดับความสูงได้ โดยคุณสมบัติสายอากาศดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สายอากาศยี่ห้อ EMCO Model รุ่น 3121C [30]

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของสายอากาศภาครับ [30]

คุณสมบัติของสายอากาศภาครับ	
ชนิดของสายอากาศ	สายอากาศไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่น
รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	รอบทิศทาง
ความกว้างแถบจากค่าอิมพีแดนซ์	แคบ
โพลาริเซชัน	เชิงเส้น (แนวนอน)
ช่วงความถี่	28 – 1000 เมกะเฮิรตซ์
อิมพีแดนซ์	50 โอห์ม
ความยาวสายอากาศสูงสุด	17 ฟุต (518.16 เซนติเมตร)
Maximum Power Handling Capability	50 วัตต์

### 3.1.2 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่สัญญาณโทรทัศน์

ในการศึกษาทดลองในครั้งนี้ได้พิจารณาใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (Spectrum Analyzer) ยี่ห้อ Rover รุ่น HD Protab ดังรูปที่ 3.2



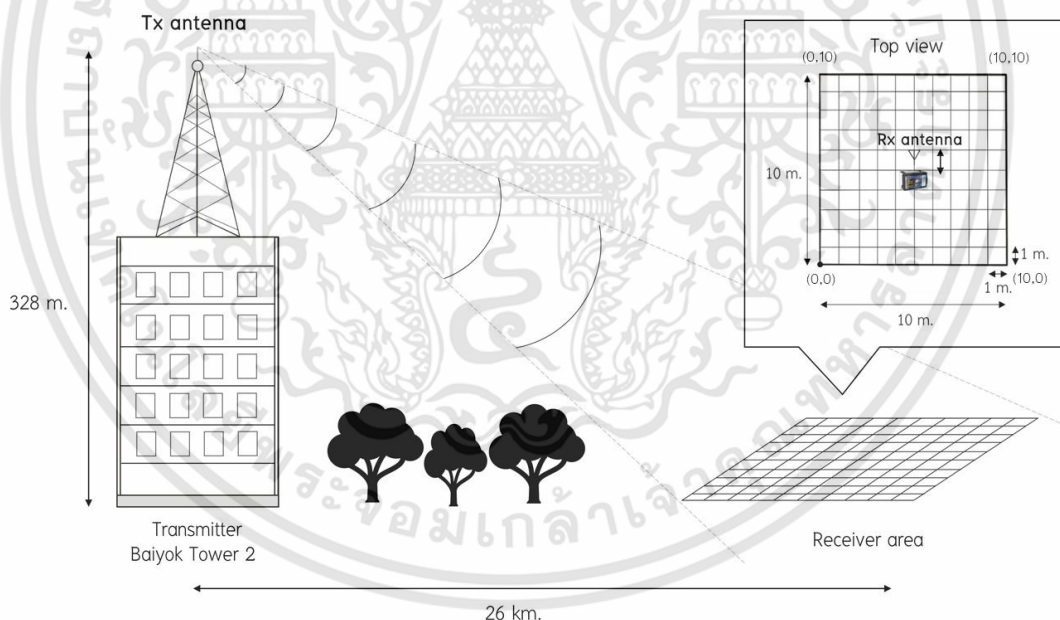
รูปที่ 3.2 เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ [31]

## 3.2 การออกแบบจำลองการหาดำแหน่งในพื้นที่จริงภายนอกอาคาร

สำหรับแบบจำลองการวัดในการทดลองนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการฝึกฝนและขั้นตอนการทดสอบ ในขั้นตอนการฝึกฝนนั้น อุปกรณ์ภาครับจะทำการสำรวจเพื่อเก็บ

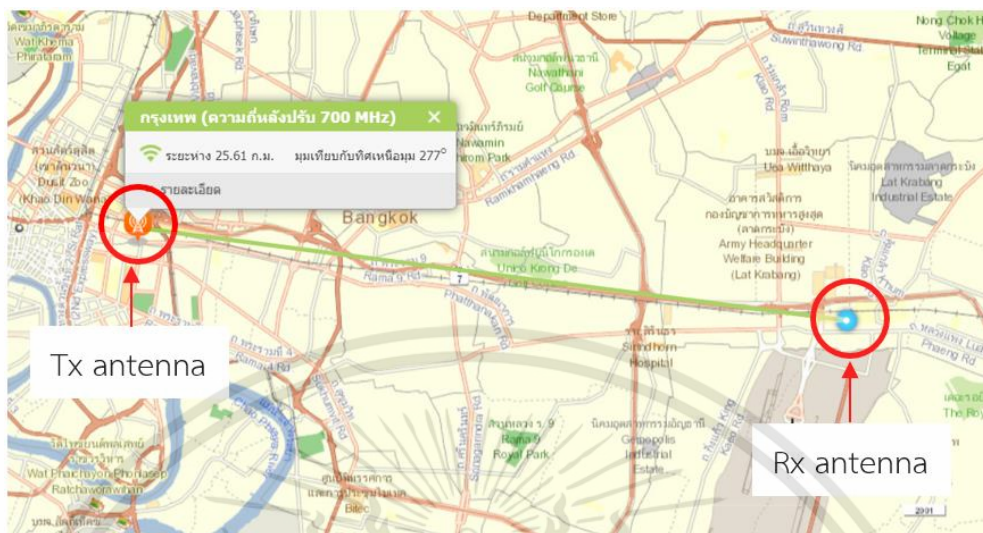
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ทั้ง 5 MUX ตามตำแหน่งอ้างอิงทั้งหมด 121 ตำแหน่ง ซึ่งมีระยะห่างตำแหน่งละ 1 เมตร โดยแต่ละตำแหน่งจะเก็บค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จำนวน 10 ครั้ง สำหรับในขั้นตอนการทดสอบนั้น อุปกรณ์ภาครับจะทำการทดสอบทั้งหมด 121 ตำแหน่ง เช่นเดียวกันเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของระบบการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่นบนพื้นฐานเทคโนโลยีโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 แบบจำลองและการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ทำการทดลองที่วัดปลูกศรียา กรุงเทพมหานคร ชุดเครื่องมือวัดประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 กับสายอากาศไดโพลและขาตั้งที่ใช้ติดตั้งสายอากาศไดโพล โดยการติดตั้งสายอากาศรับสูงจากระดับพื้นดิน 1 เมตร และ 6 เมตร โดยที่รูปแบบการรับสัญญาณเป็นการรับแบบประจำที่ภายนอกอาคาร ไม่มีการเคลื่อนที่ โดยวัดสัญญาณในทิศทาง Line of Sight ระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ ซึ่งปราศจากสิ่งกีดขวางใด ๆ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งกับพื้นที่ทดลองเป็นระยะทางประมาณ 26 กิโลเมตร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แบบจำลองและการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

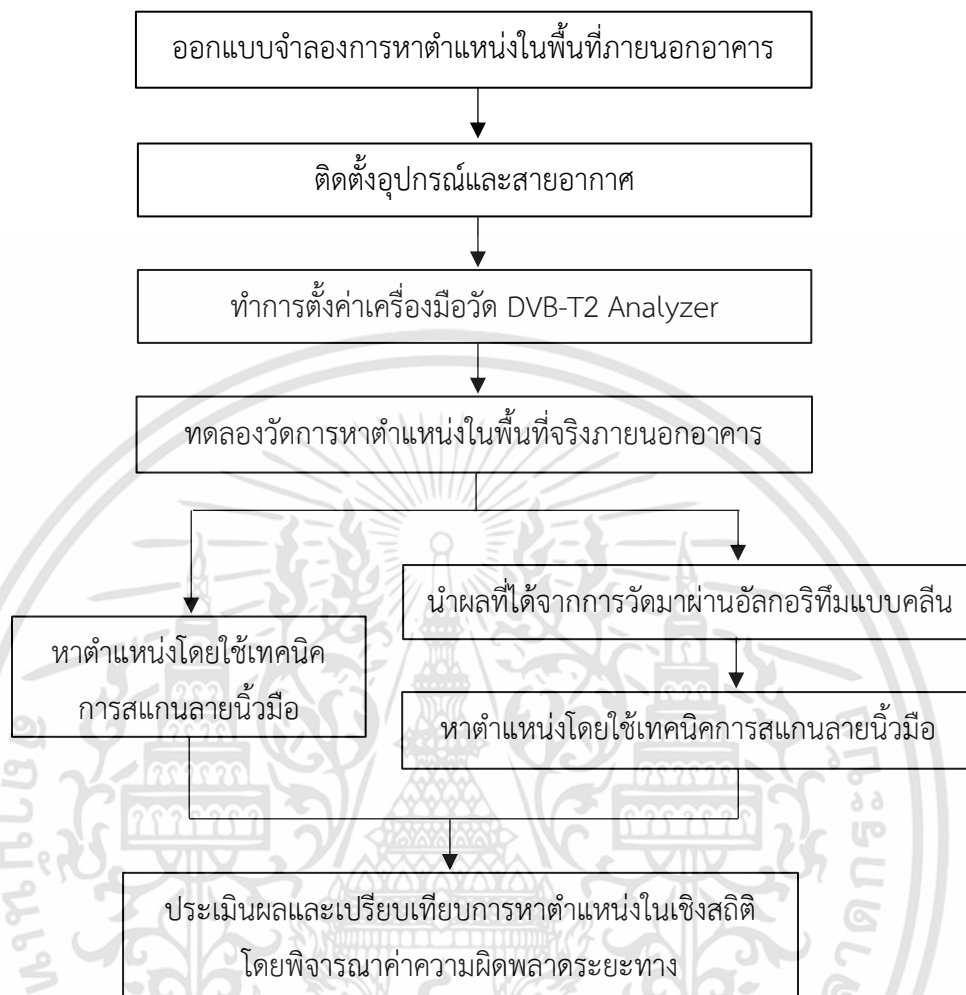
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับด้วยเว็บไซต์ระบบตรวจสอบพื้นที่  
ครอบคลุมสัญญาณทีวีดิจิทัล

### 3.3 การทดลองการหาตำแหน่งในพื้นที่จริงภายนอกอาคาร

ขั้นตอนในการทดลองหาตำแหน่ง แสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรมของการทดลองหา  
ตำแหน่งรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของการทดลองหาตำแหน่ง

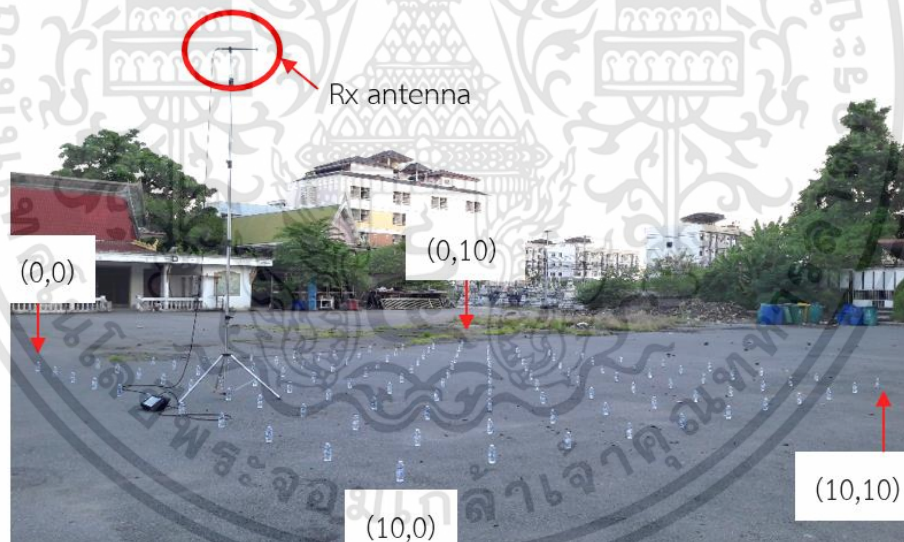
#### วิธีการทดลอง

1. ออกแบบจำลองการหาตำแหน่ง

2. ติดตั้งสายอากาศรับสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 เข้ากับขาตั้ง และทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่างหัวของสายอากาศรับเข้ากับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ ในการทดลองจะติดตั้งสายอากาศรับที่ความสูง 1 เมตร และ 6 เมตร ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งที่กำหนดการวัด 121 ตำแหน่ง ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งที่กำหนดการวัด 121 ตำแหน่ง ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ตามตารางพารามิเตอร์สำหรับโครงข่ายโทรทัศนภาคพื้นดินในระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และพารามิเตอร์ของการทดลองหาตำแหน่งได้ดังตารางที่ 3.2 หน้าจอบันทึกผลของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ที่ทำการตั้งค่าแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ของการหาดำแหน่งในพื้นที่จริงภายนอกอาคาร [32]

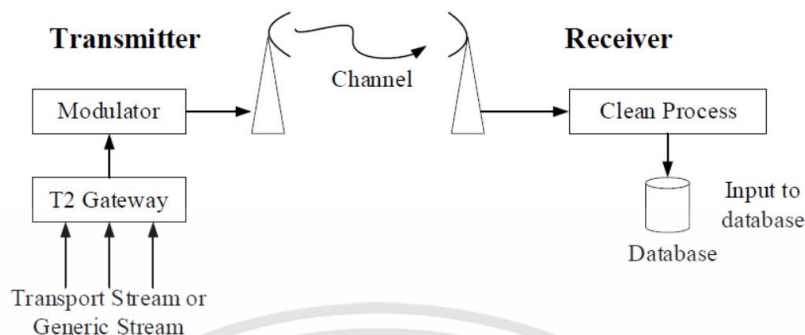
พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
ขนาดของ FFT (FFT Size)	16k extended
สัดส่วนช่วงเวลาป้องกัน (Guard Interval Fraction)	19/128
การมอดูเลตสัญญาณ (Modulation)	64QAM
อัตราการเข้ารหัส (Code Rate)	3/5
แบบรูปสัญญาณไพลอต (Pilot Pattern)	PP2
Physical Layer Pipe (PLP)	Single
L1 Post Constellation	BPSK
ช่องความถี่	470 - 694 เมกะเฮิรตซ์
จำนวนตำแหน่งวัดสัญญาณที่รับได้	121 ตำแหน่ง
ระยะห่างระหว่างตำแหน่ง	1 เมตร
ความสูงสายอากาศด้านส่ง	328 เมตร
ความสูงสายอากาศด้านรับ	1 เมตรและ 6 เมตร
ทิศทางการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศด้านส่งและด้านรับ	รอบทิศทาง



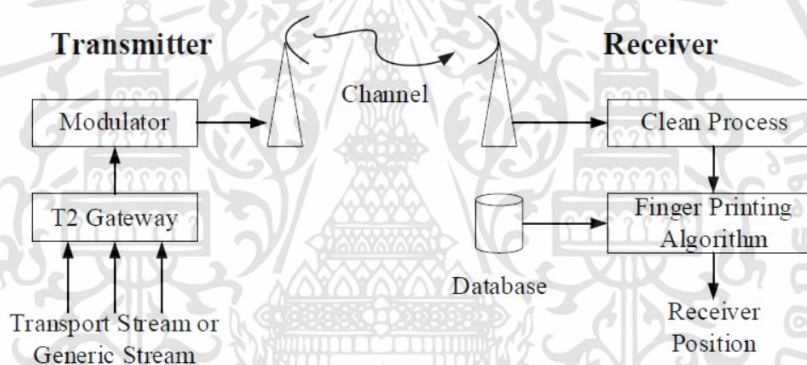
รูปที่ 3.8 การตั้งค่าเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่และวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ

4. เชื่อมต่ออุปกรณ์บันทึกข้อมูลเข้ากับเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่
5. ปรับทิศทางของสายอากาศรับในแนวแกนที่ต้องการทดสอบ
6. ทำการทดลองวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการฝึกฝนและขั้นตอนการทดสอบ ในขั้นตอนการฝึกฝน อุปกรณ์ภาครับจะทำการสำรวจเพื่อเก็บค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ทั้ง 5 MUX ตามตำแหน่งในแบบจำลองทั้งหมด 121 ตำแหน่ง โดยแต่ละตำแหน่งจะเก็บค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จำนวน 10 ครั้ง สำหรับในขั้นตอนการทดสอบนั้น อุปกรณ์ภาครับจะทำการทดสอบทั้งหมด 121 ตำแหน่งเช่นเดียวกันเพื่อใช้ในการหาตำแหน่งโดยวิธีการสแกนลายนิ้วมือ ซึ่งในการทดลองนี้อุปกรณ์ภาครับจะทำการทดลองทั้ง 2 ความสูงของสายอากาศรับคือ 1 เมตร และ 6 เมตร
7. บันทึกผลการทดลองที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่
8. คำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ
9. ใช้โปรแกรม MATLAB ในกระบวนการอัลกอริทึมแบบคลิ่น เพื่อคลิ่นพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ
10. คำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลิ่น โดยจะคลิ่นค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในขั้นตอนฝึกฝนแสดงได้ดังรูปที่ 3.9 และคลิ่นจะคลิ่นค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในขั้นตอนทดสอบและหาตำแหน่งใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลด้วย อัลกอริทึมแบบคลื่นสำหรับระบบการหาตำแหน่งในกระบวนการสร้างฐานข้อมูล [33]



รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองการส่งสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลด้วย อัลกอริทึมแบบคลื่นสำหรับระบบการหาตำแหน่งในกระบวนการหาตำแหน่ง [33]

11. ประเมินผลและเปรียบเทียบการหาตำแหน่งในเชิงสถิติโดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดระยะทางในกรณีที่ไม้อัลกอริทึมแบบคลื่นและใช้อัลกอริทึมแบบคลื่น

### 3.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการทดลองซึ่งสอดคล้องกับข้อกำหนดวิธีการวัดของสำนักงานกสทช. ที่ได้กำหนดพารามิเตอร์สำหรับการวัดสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในประเทศไทยไว้ดังแสดงในตารางที่ 3.3 โดยกำหนดให้ความสูงสายอากาศส่งอยู่ที่ระดับความ

สูง 328 เมตร และความสูงสายอากาศรับอยู่ที่ระดับความสูง 6 เมตร ที่ความถี่ 514 594 626 658 และ 562 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งเป็นของโครงข่าย กรมประชามสัมพันธ, ททบ. 5 เครื่องส่งที่ 1 อสมท ไทย พีบีเอส และ ททบ. 5 เครื่องส่งที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง [34]

พารามิเตอร์	ค่าของพารามิเตอร์
ความสูงสายอากาศส่ง	328 เมตร
ความสูงสายอากาศรับ	6 เมตร
ความถี่	514 594 626 658 และ 562 เมกะเฮิรตซ์

### 3.5 กำลังส่งของเครื่องส่ง

เนื่องจากในประเทศไทยผู้ให้บริการโครงข่ายโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 มีอยู่ 4 รายและ 5 เครื่องส่ง กำลังส่งของเครื่องส่งในการตรวจวัดสัญญาณในครั้งนี้จะแตกต่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

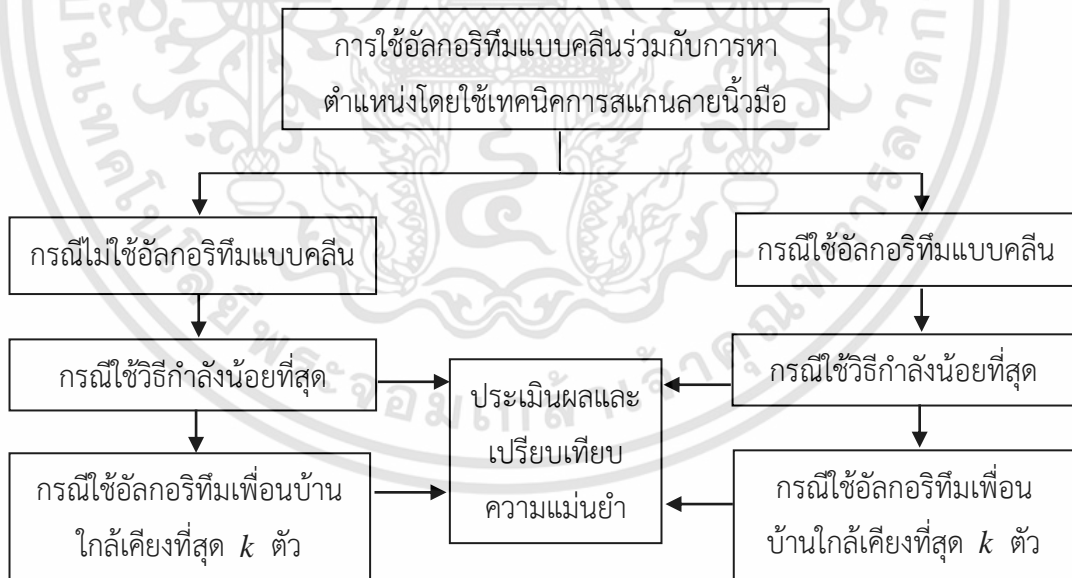
ตารางที่ 3.4 กำลังส่งของเครื่องส่ง [34]

หมายเลขมัลติเพล็กซ์	ช่องสัญญาณ	ความถี่ในการส่งสัญญาณ (MHz)	กำลังส่ง (kW)
1	26	514	4.00
2	36	594	4.30
3	40	626	4.00
4	44	658	3.91
5	32	562	4.30

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

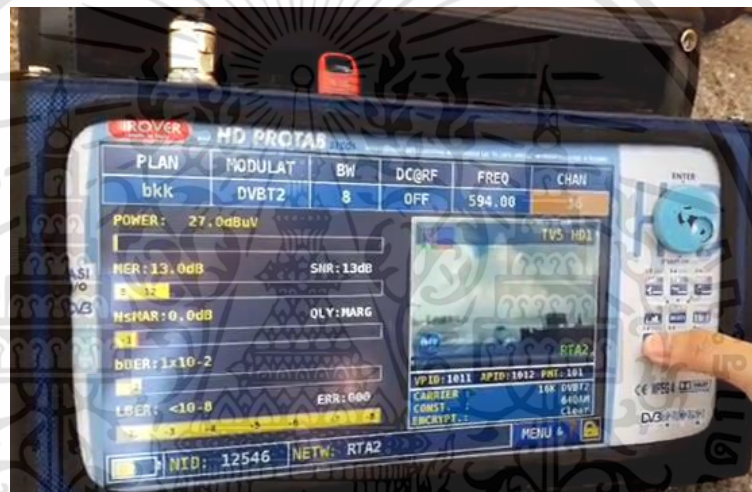
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองซึ่งได้แก่ ความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากการวัด ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ค่าสูญเสียเชิงวิถีสองสัญญาณ โทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบ คลื่น การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกน ลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น และเปรียบเทียบการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกน ลายนิ้วมือกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลื่นและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลื่น สำหรับการประเมินผล ทดลองในการศึกษาใช้อัลกอริทึมในการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ โดยจะทำการ วัดที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และสายอากาศรับสูง 6 เมตร ผลการทดลองจะแสดงผลในรูปแบบของ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม โดยจะประเมินผลและเปรียบเทียบความแม่นยำ ในการประเมินผลการ หาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่นนั้น สามารถแสดงในรูปแบบของ บล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของการประเมินผลการทดลอง

#### 4.1 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับ

ในการทดลองจะวัดค่าความแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่วัดปลุกศรีทธา ลาดกระบัง ตามแบบจำลองการวัดหาตำแหน่งทั้งหมด 121 ตำแหน่ง จะทำการวัดค่าทั้ง 5 MUX ของแต่ละความสูงของสายอากาศรับที่สามารถอ่านได้จากเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่สำหรับโครงข่ายโทรทัศน์ระบบดิจิทัล ดังรูปที่ 4.2 สำหรับแต่ละเครื่องส่ง ในการสร้างฐานข้อมูลในขั้นตอนฝึกฝนของเทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ ได้ทำการบันทึกค่าความแรงของสนามไฟฟ้าที่รับได้ของความถี่กลางของแต่ละ MUX ลงในฐานข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 หน้าจอการวัดค่าความแรงของสนามไฟฟ้าที่รับได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่

STANDARD = DVB-T2	FREQUENCY = 514.000MHz	BW = 8MHz	DC@RF = OFF	MEAS_TYPE = FULL	Column1	1	2
Field strength (dBuV/m)	MER (dB)	Noise Margin (dB)	bBER	aBER	ITU Quality	Cell ID	Network Name
31.0	14.7	1.7	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.0	14.3	1.3	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.0	15.0	2.0	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.0	13.8	0.8	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.0	13.7	0.7	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.0	14.3	1.3	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.0	14.1	1.1	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.0	14.2	1.2	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.0	13.9	0.9	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.0	14.6	1.6	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.7	13.6	0.6	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.2	14.6	1.6	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.1	13.8	0.8	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.4	13.6	0.6	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.1	14.5	1.5	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.1	13.3	0.3	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.1	14.1	1.1	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.1	13.8	0.8	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.1	13.6	0.6	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.1	14.2	1.2	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.1	14.4	1.4	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--
31.1	13.8	0.8	1.0E-02	2.0E-09	--	10100	--

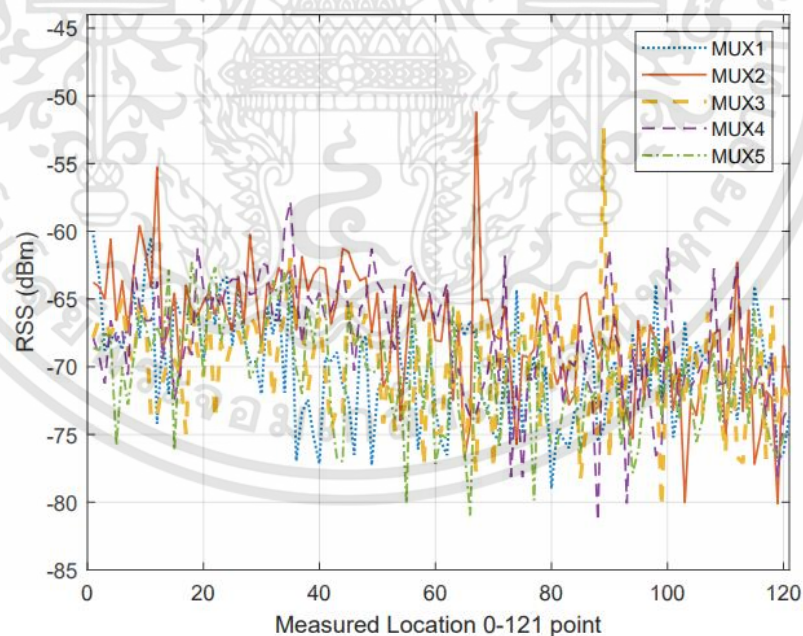
รูปที่ 4.3 ข้อมูลค่าความแรงของสนามไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

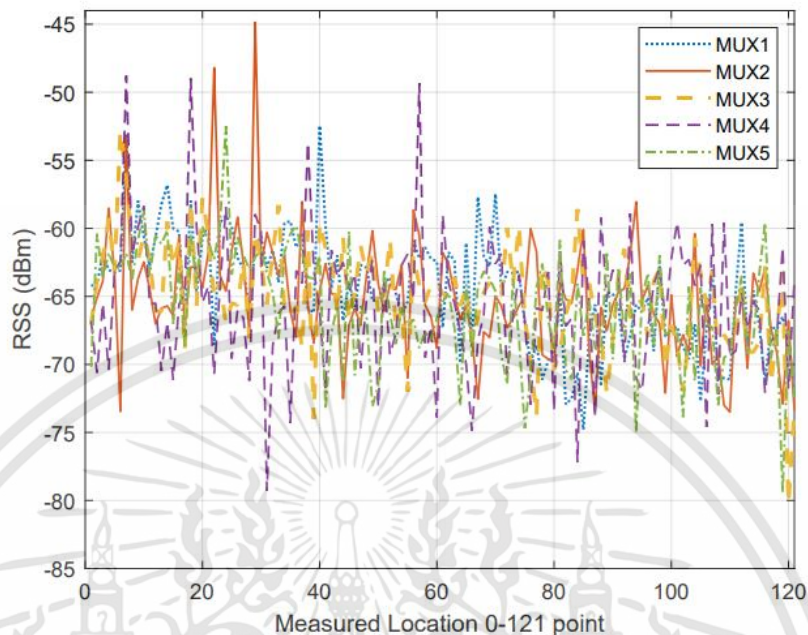
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าความแรงของสนามไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่งที่บันทึกได้ จากเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่สำหรับโครงข่ายโทรทัศน์ระบบดิจิทัลมีหน่วยเป็น  $dB\mu V/m$  สามารถแปลงเป็นค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับหน่วย dBm ดังสมการที่ 4.1 เพื่อนำพารามิเตอร์ ความแรงของสัญญาณที่ได้รับมาวิเคราะห์ในการหาตำแหน่ง

$$P_{(dBm)} = E_{(dB\mu V/m)} - 95.2 \quad (4.1)$$

ดังนั้นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้อยู่ระหว่าง -51.19 dBm ถึง -81.40 dBm แสดงดังรูปที่ 4.4 และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้อยู่ระหว่าง -44.86 dBm ถึง -79.30 dBm แสดงดังรูปที่ 4.5 จากรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 จะเห็นถึงความผันผวนของความแรงสัญญาณที่ได้รับทั้ง 121 ตำแหน่งตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ จะพบว่าที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีความแรงของสัญญาณที่ได้รับมากกว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



รูปที่ 4.4 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



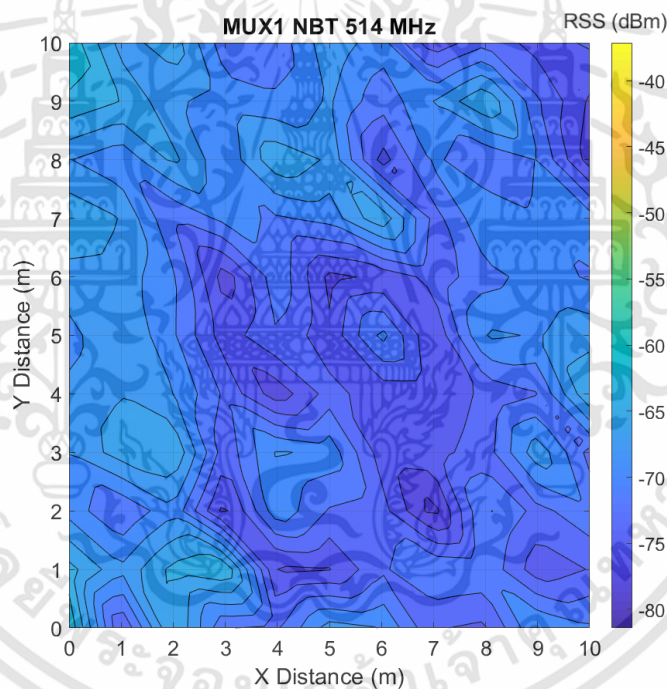
รูปที่ 4.5 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

#### 4.2 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงบนพื้นฐานค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ

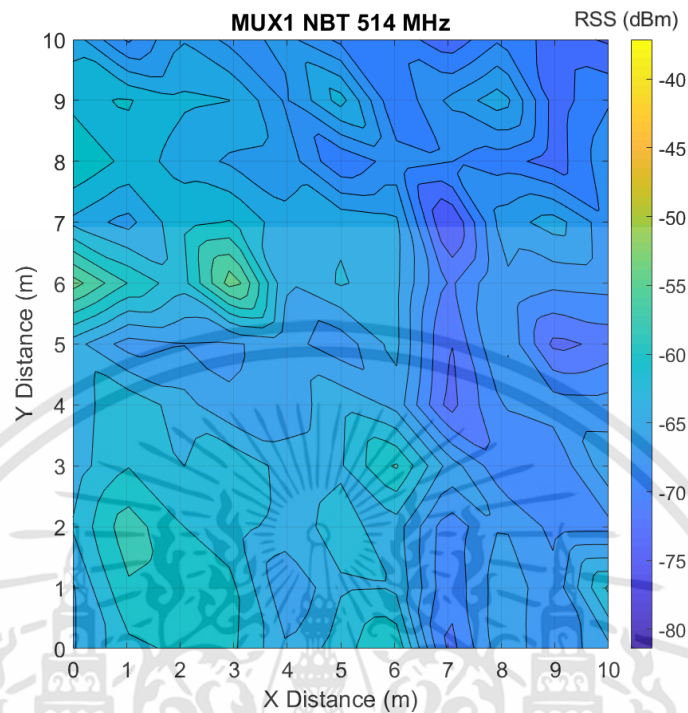
ในการสร้างลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงนั้นจะใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจากเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ ในการสร้างลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงนั้นจะทำการใช้ค่าเฉลี่ยของการวัดในแต่ละตำแหน่งจำนวน 10 ครั้ง โดยลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 1 ถึง MUX 5 สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้จากค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับสามารถพล็อตในรูปแบบ 2 มิติ แสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่ได้รับในหน่วย dBm ซึ่งจะแสดงในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามระยะทางของแบบจำลองการวัดหาตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับเครื่องส่งสัญญาณแต่ละตัว ซึ่งได้แก่ NBT ARMY1 MCOT TPBS ARMY2 ตามลำดับ ซึ่งความแรงของสัญญาณที่ได้รับที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และสายอากาศรับสูง 6 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.15 โดยมีแถบสีแสดงความแรงของสัญญาณที่ได้รับดังนี้ สีเหลืองอ่อนจนถึงสีน้ำเงินเข้ม สีเหลืองอ่อนหมายถึงค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับมีค่ามากที่สุด จนถึงสีน้ำเงินเข้มหมายถึงค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับมีค่าน้อยที่สุด

#### 4.2.1 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 1

ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร ดังรูปที่ 4.6 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -60.28 dBm ถึง -78.99 dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (0, 0) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (7, 2) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ดังรูปที่ 4.7 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -52.45 dBm ถึง -74.8 dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (3, 6) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (7, 7) เมื่อระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเพิ่มขึ้นค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจะลดลง



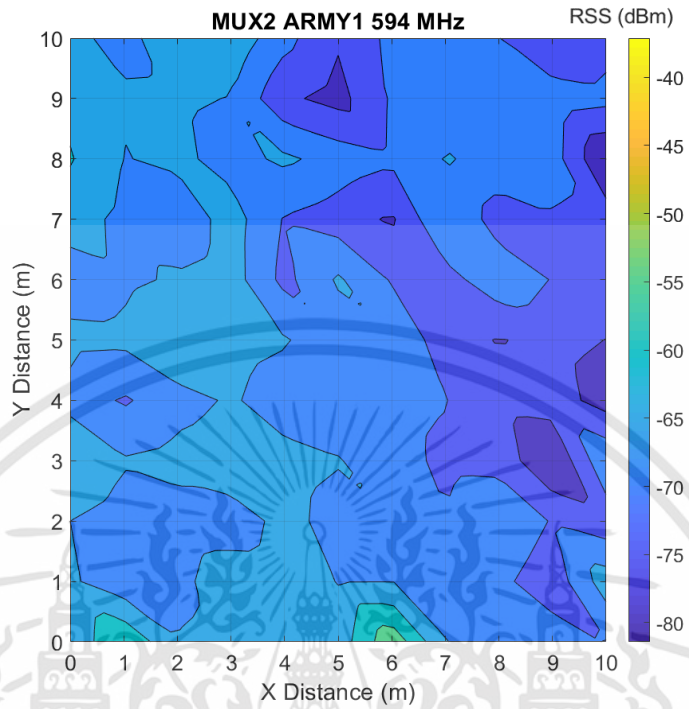
รูปที่ 4.6 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



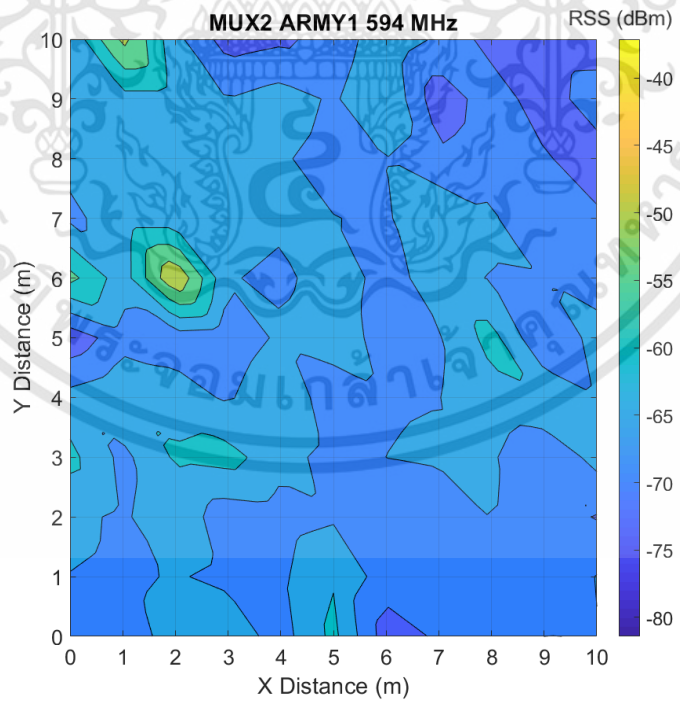
รูปที่ 4.7 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

#### 4.2.2 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 2

ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร ดังรูปที่ 4.8 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง  $-51.19$  dBm ถึง  $-80.10$  dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (6, 0) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (10, 8) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ดังรูปที่ 4.9 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง  $-44.86$  dBm ถึง  $-73.50$  dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (2, 6) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (7, 9)



รูปที่ 4.8 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

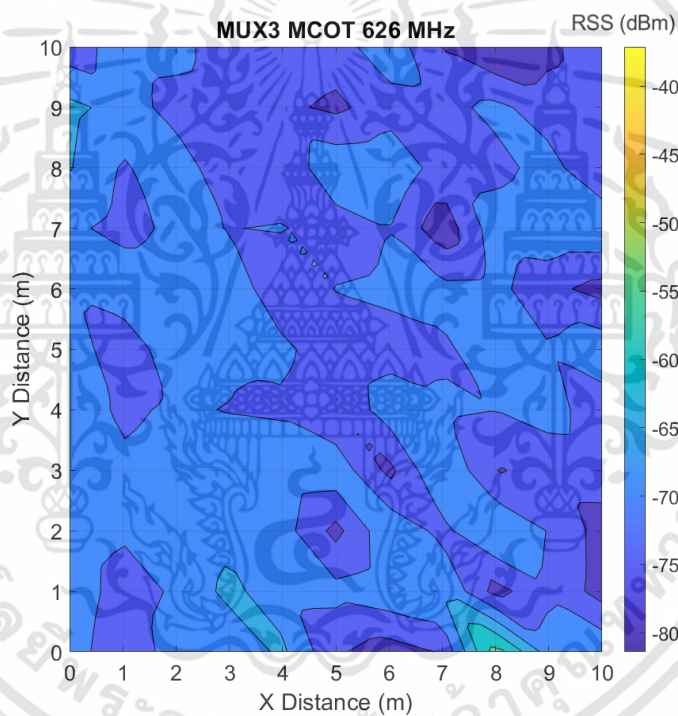


รูปที่ 4.9 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

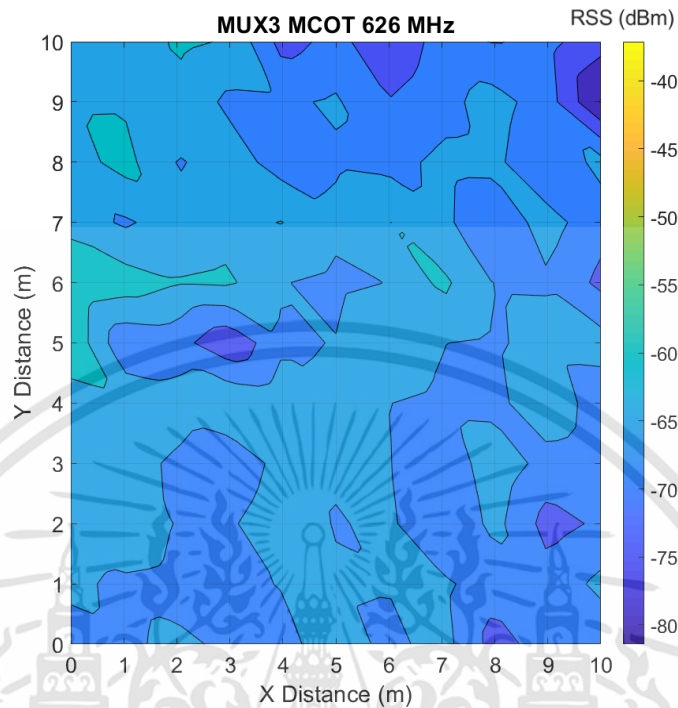
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.3 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 3

ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร ดังรูปที่ 4.10 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -52.25 dBm ถึง -80.20 dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (8, 0) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (8, 10) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ดังรูปที่ 4.11 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -55.58 dBm ถึง -80.30 dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (0, 6) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (10, 9)



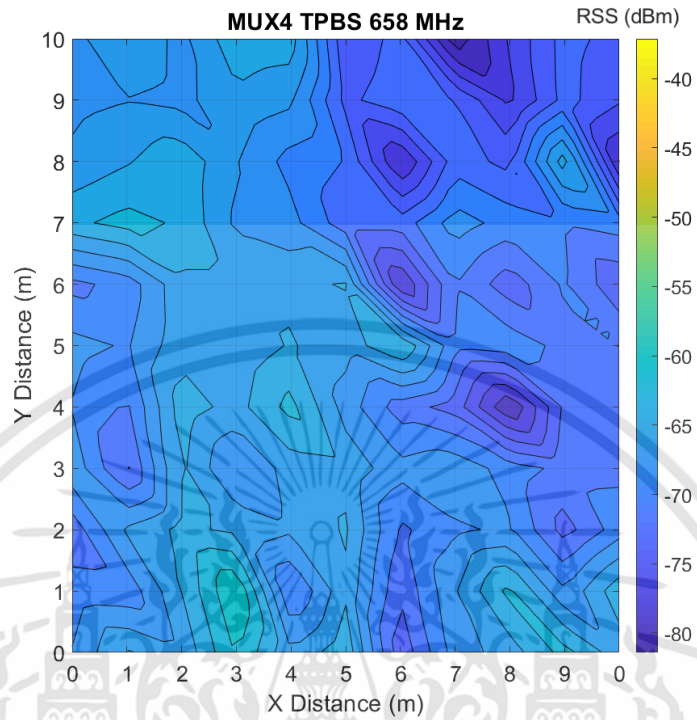
รูปที่ 4.10 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



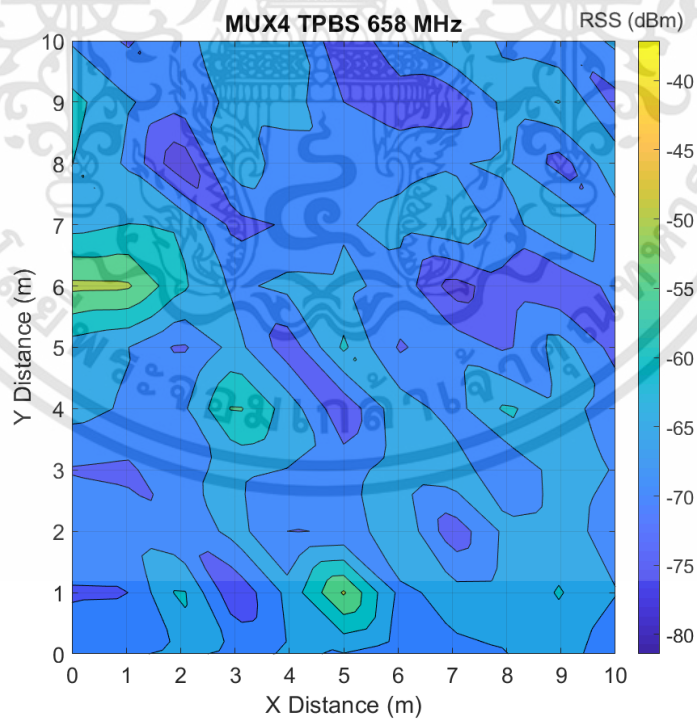
รูปที่ 4.11 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

#### 4.2.4 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 4

ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร ดังรูปที่ 4.12 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -57.78 dBm ถึง -81.40 dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (3, 1) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (7, 10) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ดังรูปที่ 4.13 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -48.78 dBm ถึง -79.30 dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (0, 6) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (2, 8)



รูปที่ 4.12 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

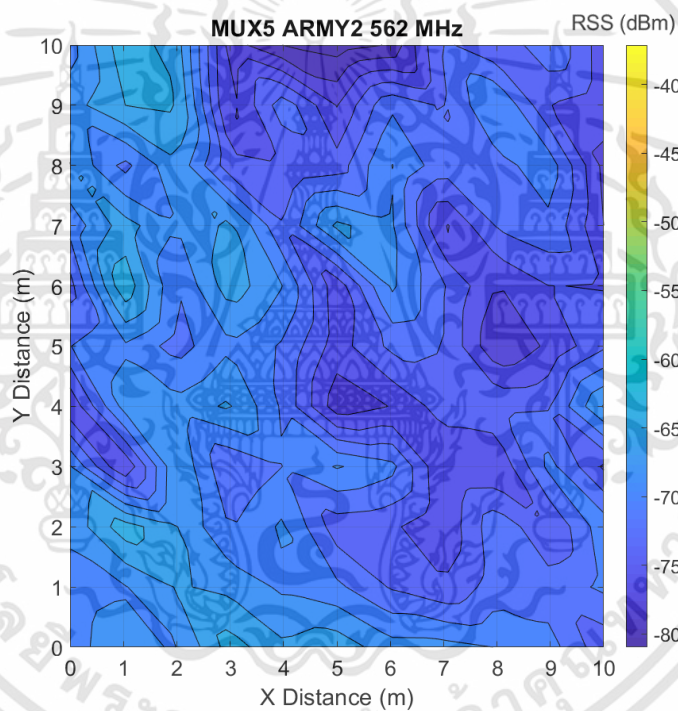


รูปที่ 4.13 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

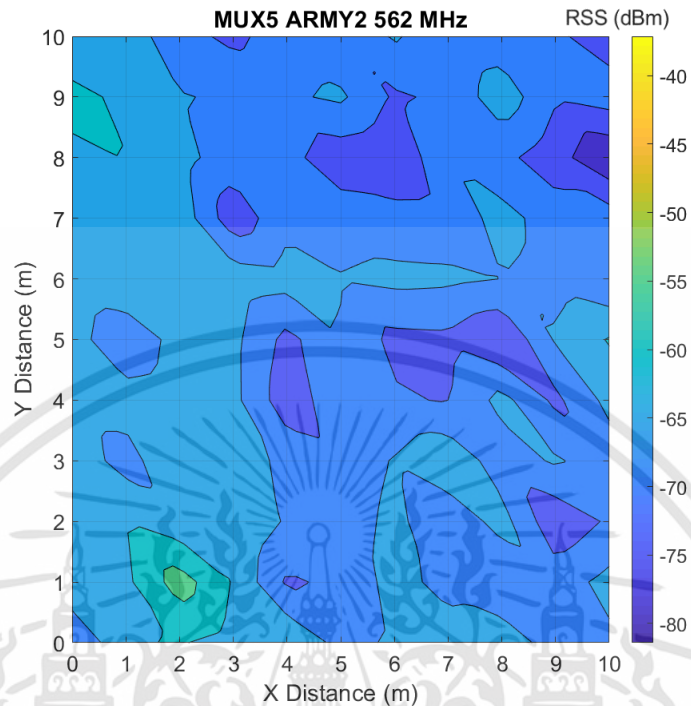
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 5

ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร ดังรูปที่ 4.14 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -62.30 dBm ถึง -80.96 dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (1, 6) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (5, 10) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ดังรูปที่ 4.15 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -52.50 dBm ถึง -79.40 dBm ตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (2, 1) ส่วนตำแหน่งที่วัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (10, 8)



รูปที่ 4.14 ความแรงของสัญญาณที่รับของ MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

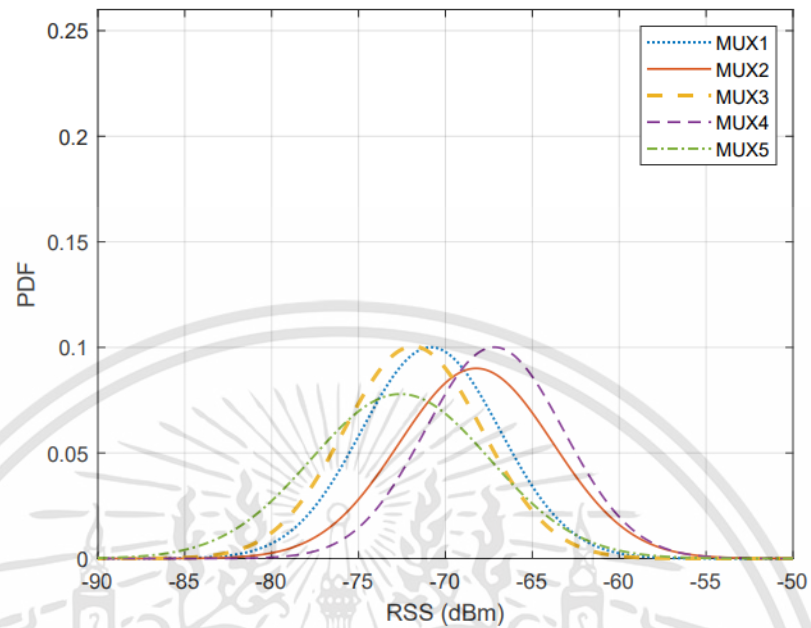


รูปที่ 4.15 ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

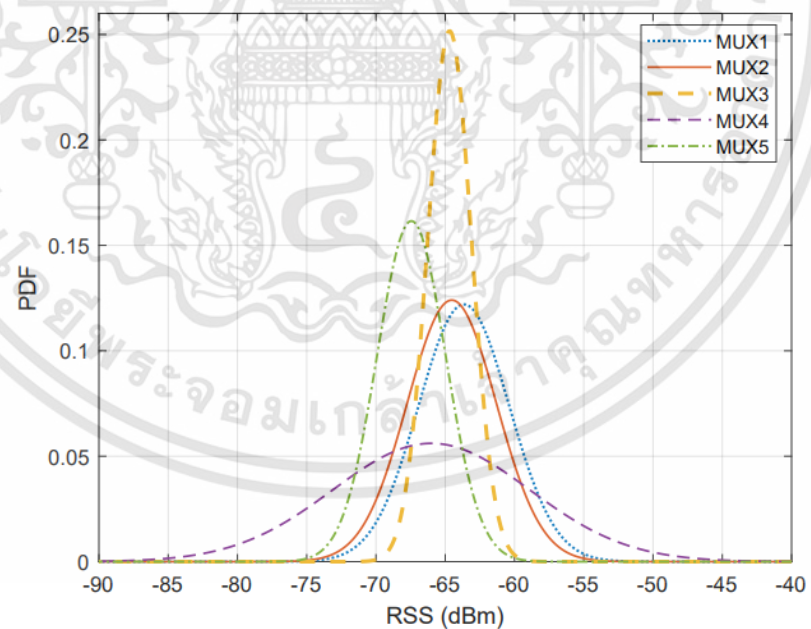
#### 4.3 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ

จากการเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่ได้รับสำหรับเครื่องส่ง 5 เครื่อง ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร ดังรูปที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ได้รับของแต่ละเครื่องส่งคือ -70.84 dBm -68.23 dBm -71.86 dBm -67.18 dBm และ -72.59 dBm สำหรับ MUX 1 MUX 2 MUX 3 MUX 4 และ MUX 5 ตามลำดับ พบว่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับสูงสุดคือ MUX 4 และความแรงของสัญญาณที่ได้รับต่ำสุดคือ MUX 5

ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ความแรงของสัญญาณที่ได้รับสำหรับเครื่องส่ง 5 เครื่อง ดังรูปที่ 4.17 ค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ได้รับของแต่ละเครื่องส่งคือ -63.65 dBm -64.53 dBm -64.69 dBm -66.01 dBm และ -67.44 dBm สำหรับ MUX 1 MUX 2 MUX 3 MUX 4 และ MUX 5 ตามลำดับ พบว่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับสูงสุดคือ MUX 1 และความแรงของสัญญาณที่ได้รับต่ำสุดคือ MUX 5



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง  
1 เมตร



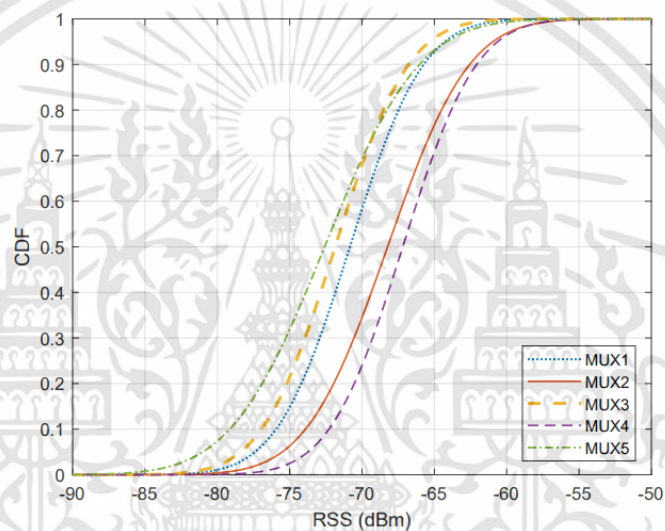
รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง  
6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

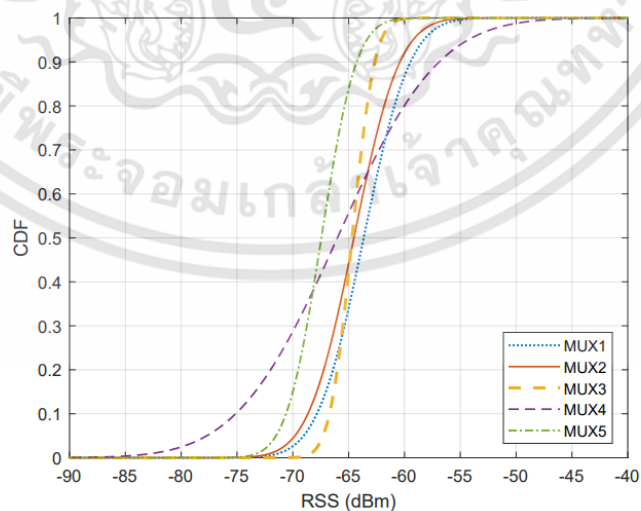
#### 4.4 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function : CDF)

ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function : CDF) ทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร ดังรูปที่ 4.18 พบว่าความน่าจะเป็นสะสมสูงสุดของความแรงของสัญญาณที่ได้รับคือ MUX 3 MUX 1 MUX 5 MUX 2 และ MUX 4 ตามลำดับ

ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ดังรูปที่ 4.19 พบว่าความน่าจะเป็นสะสมสูงสุดของความแรงของสัญญาณที่ได้รับคือ MUX 5 MUX 3 MUX 2 MUX 1 และ MUX 4 ตามลำดับ



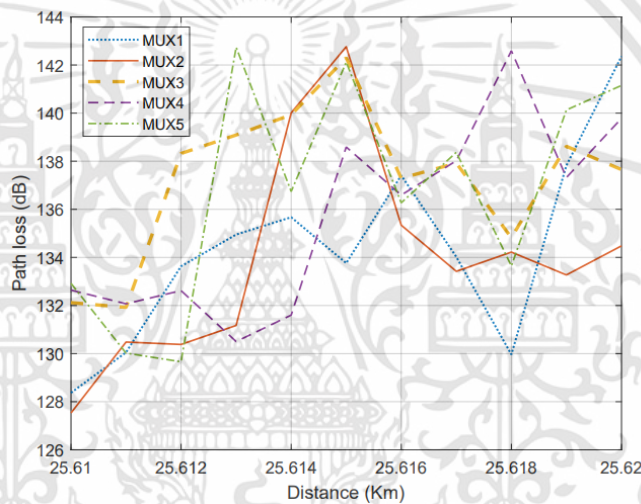
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



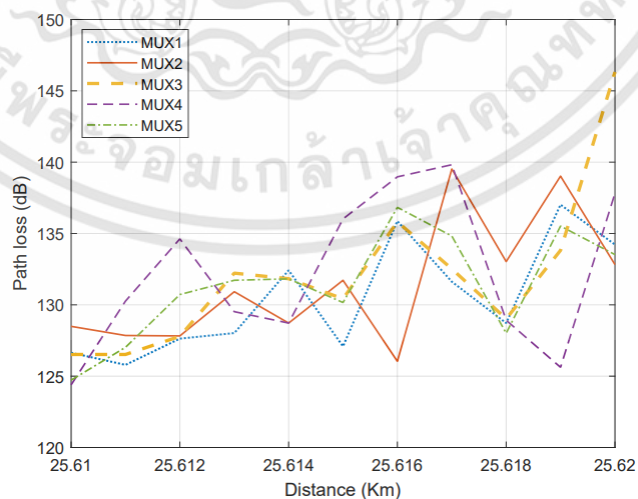
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

#### 4.5 ค่าสูญเสียเชิงวิถี

ค่าสูญเสียเชิงวิถีของสัญญาณเนื่องจากการแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณ ค่าสูญเสียเชิงวิถีทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และสายอากาศรับสูง 6 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ พบว่าสายอากาศรับสูง 6 เมตรค่าสูญเสียเชิงวิถีเป็นไปตามทฤษฎีคือค่าสูญเสียเชิงวิถีจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับที่เพิ่มขึ้น แต่ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร ค่าสูญเสียเชิงวิถีมีความแปรปรวนมากเกิดจากคลื่นสะท้อนพื้นเพราะสายอากาศรับสูง 1 เมตรอยู่ใกล้พื้นดินทำให้เกิดการแทรกสอดมีความเป็นไปได้สูงที่ทำให้สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนเยอะ



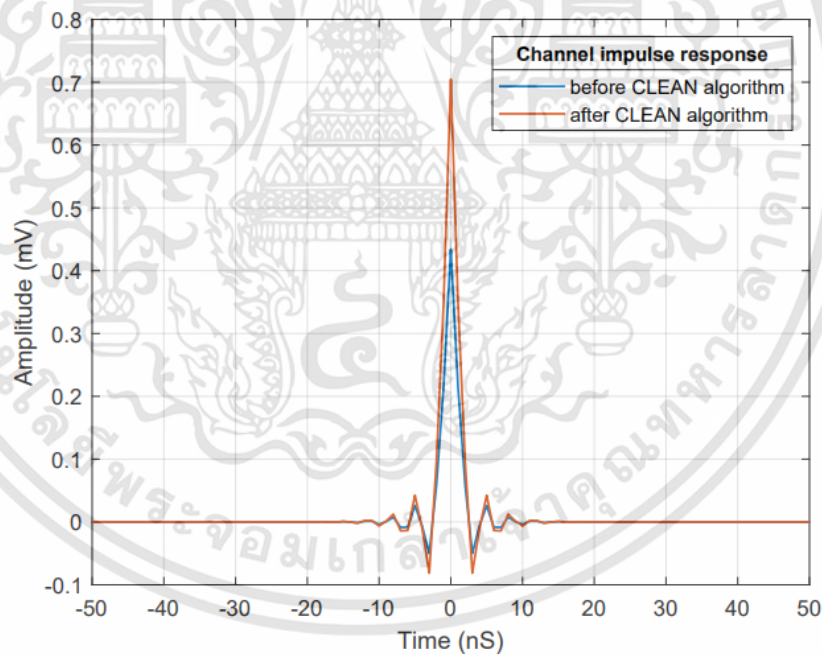
รูปที่ 4.20 ค่าสูญเสียเชิงวิถีทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



รูปที่ 4.21 ค่าสูญเสียเชิงวิถีทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

#### 4.6 ช่องสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2

การศึกษานี้สัญญาณอยู่บนพื้นฐานของการวัดจริง ซึ่งได้รับการดำเนินการจากการวัดภาคสนามที่วัดปลุกศรีธา ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร โดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อเพิ่มอัลกอริทึมแบบคลื่นและคลื่นสัญญาณที่ได้รับ เพื่อตรวจสอบว่าอัลกอริทึมแบบคลื่นนี้สามารถใช้คลื่นสัญญาณได้ กระบวนการแรกของอัลกอริทึมคลื่น ซึ่งเป็นกระบวนการสหสัมพันธ์ข้าม กำหนดโดย  $c_{cc}(\tau)$  ระหว่างสัญญาณส่ง  $v_t(t)$  และสัญญาณรับ  $v_r(t)$  และผลลัพธ์จะถือว่าเป็นช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังอัลกอริทึมแบบคลื่น ของช่องสัญญาณพบว่าแอมพลิจูดเพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.4 เป็น 0.7 เนื่องจากอัลกอริทึมแบบคลื่นเป็นกระบวนการคลื่นสัญญาณรบกวน ความล่าช้าจึงถูกลบออกไป โดยจะทำให้ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์เพิ่มขึ้น พบว่าการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดเป็นข้อได้เปรียบของอัลกอริทึมแบบคลื่น



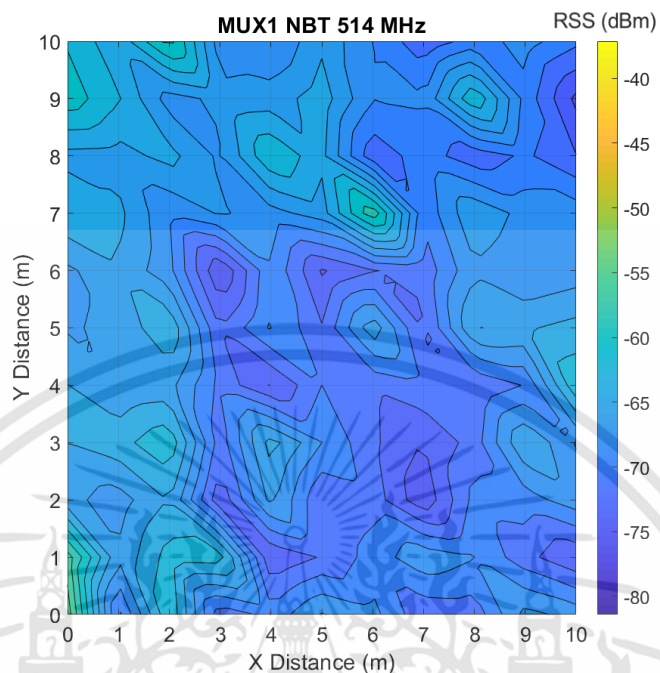
รูปที่ 4.2 ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ของสัญญาณโทรทัศนภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ได้รับก่อนอัลกอริทึมแบบคลื่นและหลังอัลกอริทึมแบบคลื่น

## 4.7 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงบนพื้นฐานค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีน

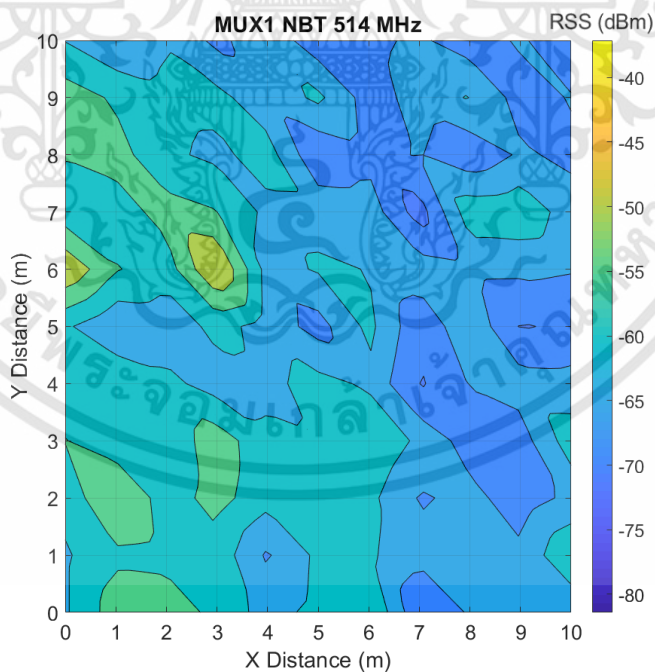
ปริณญาณินพณ์นี้จะใช้สัญญาณโทรศัพท์ศนภาคพื้นดินระบบดิจิตัลรุ่นที่ 2 ในการหาตำแหน่งร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน จะใช้ข้อมูลดิบที่วัดได้เพื่อกำหนดกระบวนการคลีนในซอฟต์แวร์ MATLAB โดยใช้เทคนิคสหสัมพันธ์ที่ใช้ในการประมาณช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์และคลีนช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ ซึ่งดำเนินการโดยสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างสัญญาณส่งและสัญญาณรับ ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ที่ถูกคลีนซึ่งเวลาหน่วงได้ถูกลบออกไปแล้วสามารถใช้เพื่อคอนโวลูชันกับสัญญาณส่ง เพื่อให้ได้สัญญาณรับที่คลีนแล้ว เมื่อคำนวณค่าสูงสุดของสหสัมพันธ์ข้ามของ  $x(t)$  และสัญญาณรับ  $y(t)$  เสร็จแล้ว ให้เปรียบเทียบค่าทั้งหมดของ  $a_k$  กับระดับเกณฑ์ ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของค่า  $a_k$  หากค่า  $a_k$  ยังมากกว่าค่าเกณฑ์ ให้ทำซ้ำอัลกอริทึมใหม่อีกครั้งจนกว่า  $a_k$  จะน้อยกว่าค่าเกณฑ์ ซึ่งความแรงของสัญญาณที่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลีนสามารถแสดงในรูปของค่ากำลังงานของสัญญาณที่ได้รับในหน่วย dBm ซึ่งจะแสดงในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ตามระยะทางในแบบจำลองการวัดหาตำแหน่งที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับเครื่องส่งสัญญาณแต่ละตัว ซึ่งได้แก่ NBT ARMY1 MCOT TPBS และ ARMY2 ตามลำดับ ซึ่งค่าความแรงของสัญญาณที่ผ่านอัลกอริทึมแบบคลีนของสายอากาศรับสูง 1 เมตร และสายอากาศรับสูง 6 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.32 โดยมีแถบสีแสดงความแรงของสัญญาณที่ได้รับ สีเหลืองอ่อนจนถึงสีน้ำเงินเข้ม สีเหลืองอ่อนแสดงถึงค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับมีค่ามากที่สุด จนถึงสีน้ำเงินเข้มแสดงถึงค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับมีค่าน้อยที่สุด

### 4.7.1 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 1 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีน

ทำการคลีนลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.23 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -52.90 dBm ถึง -76.04 dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (0, 0) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (3, 6) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.24 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีนจะมีค่าแรงของสัญญาณที่รับได้มีค่าอยู่ในช่วง -44.21 dBm ถึง -72.53 dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (3, 6) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (7, 7)



รูปที่ 4.23 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับ  
สูง 1 เมตร

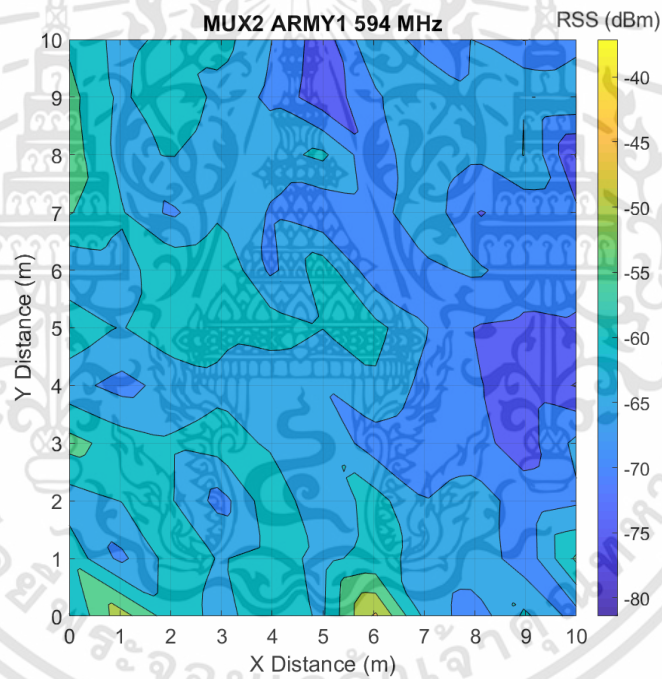


รูปที่ 4.24 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับ  
สูง 6 เมตร

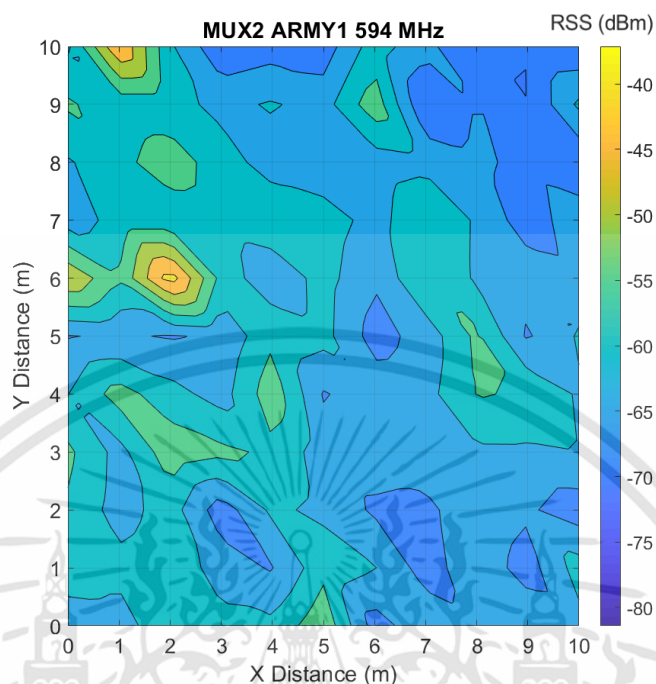
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.2 ลายลักษณะของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 2 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีน

ทำการคลีนลายลักษณะของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -43.34 dBm ถึง -75.52 dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (6, 0) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (10, 8) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.26 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีนจะมีค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -37.13 dBm ถึง -70.09 dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (2, 6) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (9, 9)



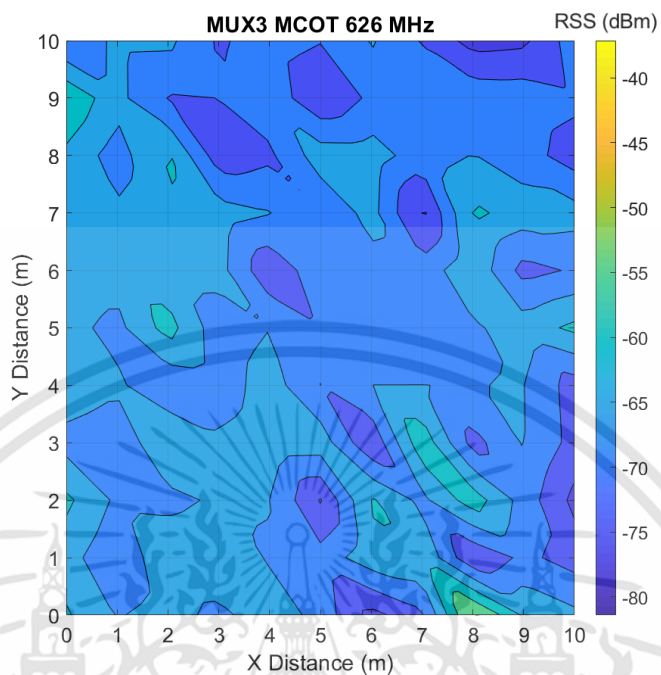
รูปที่ 4.25 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลีนที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



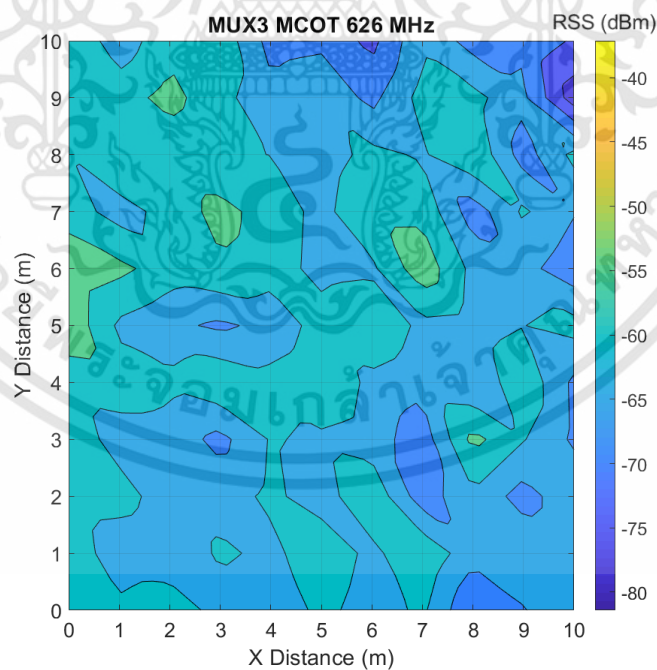
รูปที่ 4.26 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

#### 4.7.3 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 3 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

ทำการคลื่นลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.27 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -48.32 dBm ถึง -77.00 dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (8, 0) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (8, 10) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.28 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นจะมีค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -51.00 dBm ถึง -77.77 dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (0, 6) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (10, 9)



รูปที่ 4.27 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับ  
สูง 1 เมตร

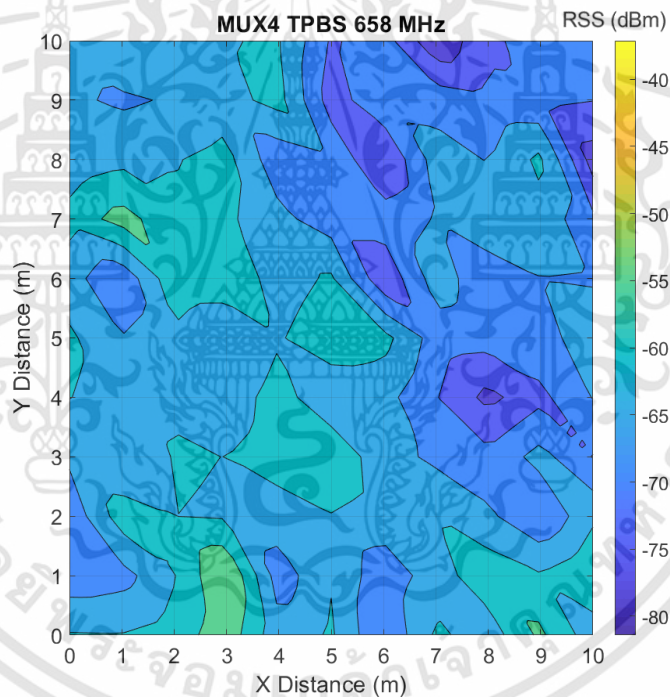


รูปที่ 4.28 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับ  
สูง 6 เมตร

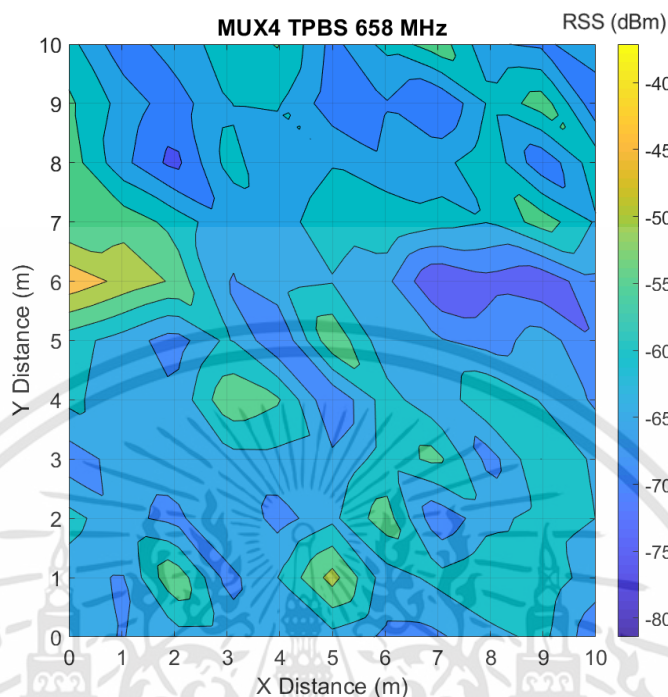
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7.4 ลายลักษณะของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 4 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

ทำการคลื่นลายลักษณะของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.29 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -49.54 dBm ถึง -79.11 dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (3, 1) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (7, 10) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.30 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นจะมีค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง -41.33 dBm ถึง -75.28 dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (0, 6) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (7, 6)



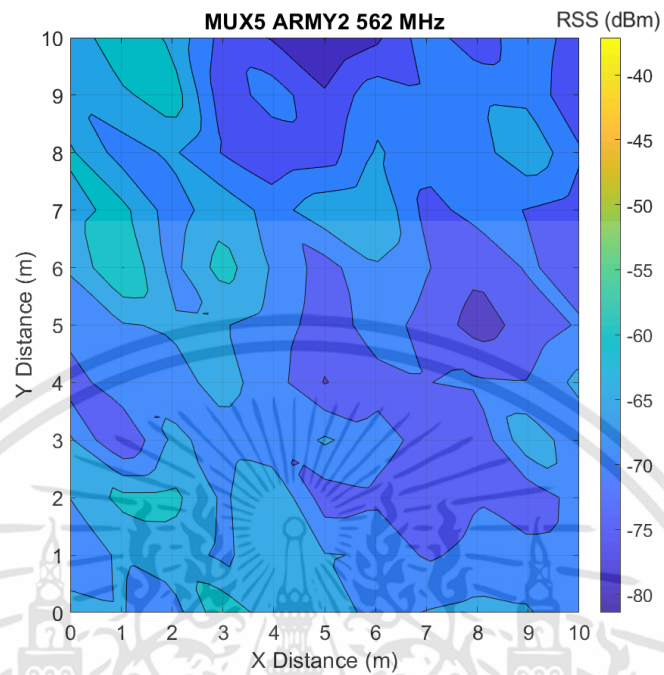
รูปที่ 4.29 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



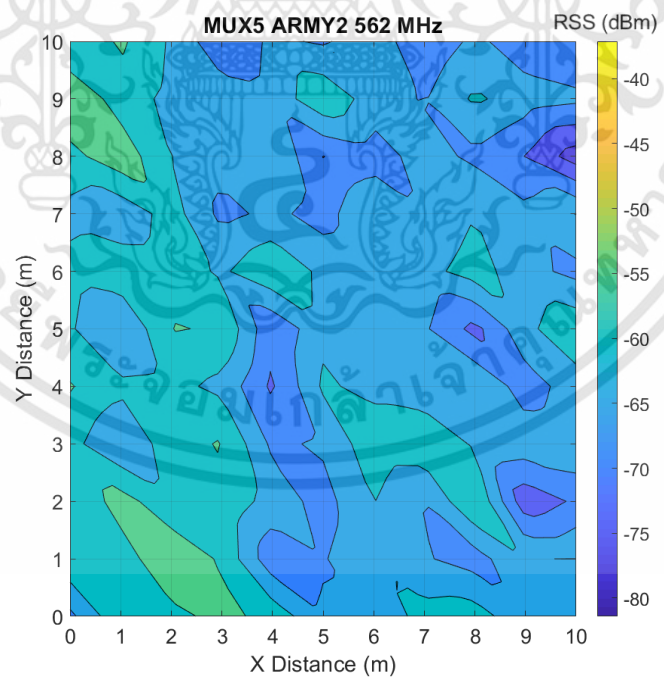
รูปที่ 4.30 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

#### 4.7.5 ลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงจาก MUX 5 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

ทำการคลื่นลายลักษณ์ของตำแหน่งอ้างอิงที่ใช้ข้อมูลค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จาก MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.31 ความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง  $-54.45$  dBm ถึง  $-80.16$  dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (1, 6) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (5, 10) และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.32 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นจะมีค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้จะมีค่าอยู่ในช่วง  $-50.46$  dBm ถึง  $-77.56$  dBm ตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้สูงสุดคือ ตำแหน่ง (0, 9) ส่วนตำแหน่งที่ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ต่ำสุดคือ ตำแหน่ง (10, 8)



รูปที่ 4.31 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับ  
สูง 1 เมตร



รูปที่ 4.32 ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับ  
สูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับผ่านกระบวนการอัลกอริทึมแบบคลื่นแล้ว จะเห็นว่าค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นหรือสัญญาณที่ได้รับมีความแรงขึ้นนั่นเอง เนื่องจากกระบวนการอัลกอริทึมแบบคลื่นเป็นกระบวนการลดสัญญาณรบกวนในโดเมนเวลา ทำให้เมื่อผ่านกระบวนการคลื่นแล้วสัญญาณที่ได้รับจะมีค่าแอมพลิจูดที่เพิ่มขึ้น

#### 4.8 การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ

สำหรับการศึกษาการใช้อัลกอริทึมในการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือนั้น จะทำการวิเคราะห์ใน 2 กรณีด้วยกันคือ กรณีที่ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดและกรณีใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว

##### 4.8.1 การคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

สำหรับการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดจากทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยทั้งหมดสามารถแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมดังรูปที่ 4.33 หลังจากทำการคาดคะเนตำแหน่งแล้ว สามารถสรุปได้ดังนี้

MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.33 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 14 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 11.57% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (10, 7) มีค่าเป็น 11.18 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.68 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 14 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 11.57% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 4 ตำแหน่ง คิดเป็น 3.31% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (0, 4) มีค่าเป็น 10.05 เมตร

MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.02 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 15 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 12.40% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 7 ตำแหน่ง คิดเป็น 5.79% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (0, 4) มีค่าเป็น 10.05 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.41 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 20 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 16.53% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่

เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 4 ตำแหน่ง คิดเป็น 3.31% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (1, 0) มีค่าเป็น 10.82 เมตร

MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.48 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 15 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 12.40% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.13% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (0, 9) มีค่าเป็น 13.45 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.58 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 31 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 25.62% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 3 ตำแหน่ง คิดเป็น 2.48% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (1, 3) มีค่าเป็น 9.22 เมตร

MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.40 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 12 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 9.92% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 8 ตำแหน่ง คิดเป็น 6.61% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (2, 8) มีค่าเป็น 10.63 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.94 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 16 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 13.22% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 3 ตำแหน่ง คิดเป็น 2.48% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (2, 9) มีค่าเป็น 12.04 เมตร

MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.77 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 26 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 21.49% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (3, 0) มีค่าเป็น 10.20 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.12 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 28 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 23.14% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 2 ตำแหน่ง คิดเป็น 1.65% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (1, 3) มีค่าเป็น 9.85 เมตร

จากตารางที่ 4.1 พบว่ากรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ดีที่สุดเท่ากับ 3.77 เมตร ที่ MUX5 กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 26 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 21.49% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่

เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (3, 0) มีค่าเป็น 10.20 เมตร และพบว่ากรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ดีที่สุดเท่ากับ 3.12 เมตร ที่ MUX5 กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 28 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 23.14% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 2 ตำแหน่ง คิดเป็น 1.65% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (1, 3) มีค่าเป็น 9.85 เมตร

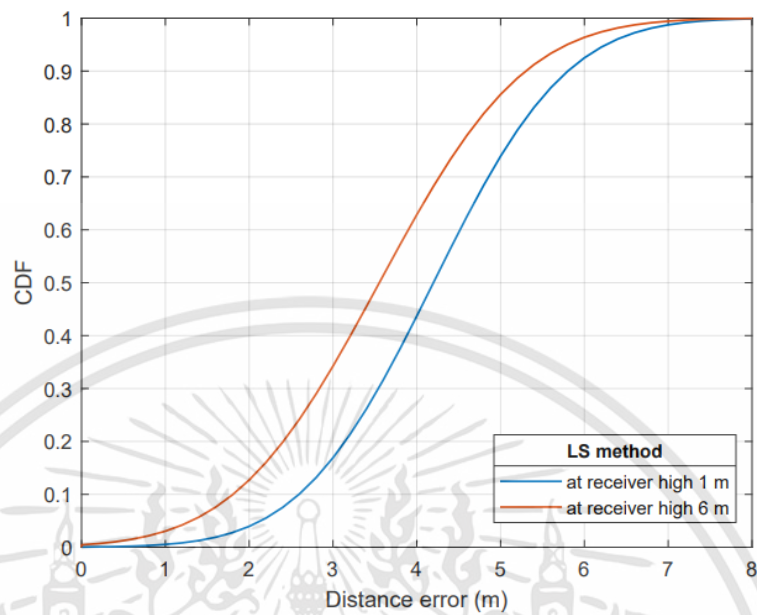
จากตารางที่ 4.2 พบว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด มีความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.20 เมตร และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.55 เมตร ซึ่งดีกว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร เนื่องจากที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร คลื่นมีการสะท้อนพื้นจึงทำให้เกิดความผิดพลาดระยะทางมากกว่าที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

ตารางที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

ความสูงสายอากาศรับ	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)				
	MUX 1	MUX 2	MUX 3	MUX 4	MUX 5
1 เมตร	4.33	4.02	4.48	4.40	3.77
6 เมตร	3.68	3.41	3.58	3.94	3.12

ตารางที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด

ความสูงสายอากาศรับ	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)
1 เมตร	4.20
6 เมตร	3.55



รูปที่ 4.33 เปรียบเทียบความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร

#### 4.8.2 การคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัว

จะทำการวิเคราะห์กรณีที่ใช้ค่า  $k$  เป็นเลขคี่ตั้งแต่ 3 ถึง 9 หลังจากทำการคาดคะเนตำแหน่งพบว่าค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ตามลำดับ

MUX 1 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.18 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.27 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.13%

MUX 2 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.95 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.13% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทาง

เฉลี่ยเท่ากับ 3.88 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 8 ตำแหน่ง คิดเป็น 6.61%

MUX 3 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 5 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.22 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.41 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.13%

MUX 4 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.06 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.13% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.63 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.13%

MUX 5 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.00 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 7 ตำแหน่ง คิดเป็น 5.79% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.41 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.13%

จากตารางที่ 4.5 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.34 การคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.10 เมตร และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.44 เมตร พบว่าที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยดีกว่าค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

ตารางที่ 4.3 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว

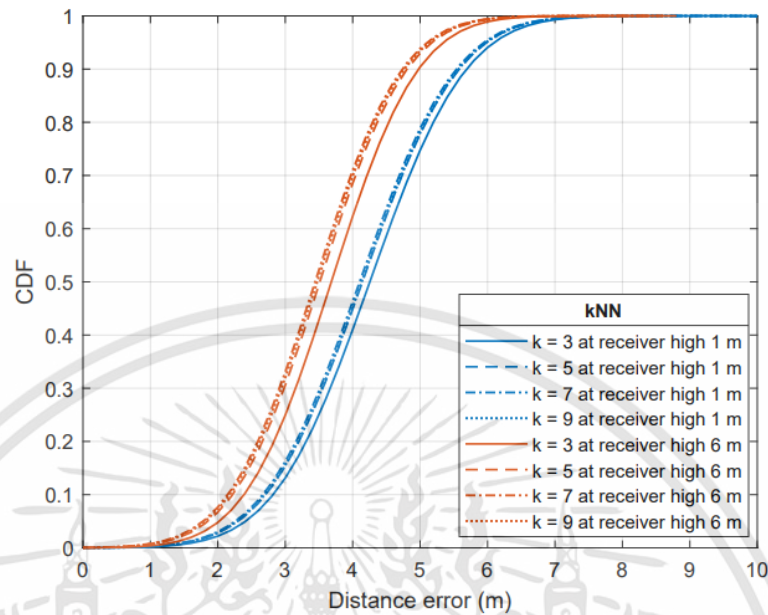
จำนวน $k$	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)				
	MUX 1	MUX 2	MUX 3	MUX 4	MUX 5
3	4.34	4.13	4.33	4.42	4.04
5	4.25	3.98	4.22	4.21	4.05
7	4.18	3.95	4.23	4.13	4.00
9	4.20	4.02	4.30	4.06	4.07

ตารางที่ 4.4 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว

จำนวน $k$	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)				
	MUX 1	MUX 2	MUX 3	MUX 4	MUX 5
3	3.40	3.64	3.47	4.08	3.81
5	3.31	3.48	3.47	3.72	3.57
7	3.28	3.45	3.41	3.63	3.41
9	3.27	3.55	3.47	3.64	3.43

ตารางที่ 4.5 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว

จำนวน $k$	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศรับสูง 1 เมตร	สายอากาศรับสูง 6 เมตร
3	4.25	3.68
5	4.14	3.51
7	4.10	3.44
9	4.13	3.47



รูปที่ 4.34 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร

#### 4.9 การหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน

สำหรับการศึกษาการใช้อัลกอริทึมในการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีนนั้น จะทำการวิเคราะห์ใน 2 กรณีด้วยกันคือ กรณีที่ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดและกรณีใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว

##### 4.9.1 การคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน

สำหรับการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีนของทั้ง 5 MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยทั้งหมดสามารถแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมดังรูปที่ 4.35 หลังจากทำการคาดคะเนตำแหน่งดังตารางที่ 4.6 สามารถอธิบายได้ดังนี้

MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.44 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 17 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 14.05% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่า มีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.13% ในขณะที่

ที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (10, 7) มีค่าเป็น 11.18 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 17 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 14.05% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (0, 4) มีค่าเป็น 10.05 เมตร

MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.18 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 18 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 14.88% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 25.62% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (0, 0) มีค่าเป็น 11.66 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.92 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 21 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 17.36% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 4 ตำแหน่ง คิดเป็น 3.31% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (1, 0) มีค่าเป็น 10.82 เมตร

MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.61 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 17 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 14.05% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 4 ตำแหน่ง คิดเป็น 3.31% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (0, 9) มีค่าเป็น 13.45 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.99 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 35 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 28.93% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (1, 3) มีค่าเป็น 9.22 เมตร

MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.50 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 14 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 11.57% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 11 ตำแหน่ง คิดเป็น 9.09% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (9, 1) มีค่าเป็น 10.82 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.12 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 17 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 14.05% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 2 ตำแหน่ง คิดเป็น 1.65% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (1, 9) มีค่าเป็น 10.82 เมตร

MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.02 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 31 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 25.62% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (1, 9) มีค่าเป็น 9.85 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.77 เมตร กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 28 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 23.14% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 4 ตำแหน่ง คิดเป็น 3.31% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (6, 1) มีค่าเป็น 9.22 เมตร

จากตารางที่ 4.6 การคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับคลื่นอัลกอริทึม พบว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ดีที่สุดเท่ากับ 3.02 เมตร ที่ MUX5 กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 31 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 25.62% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (1, 9) มีค่าเป็น 9.85 เมตร และพบว่าที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ดีที่สุดเท่ากับ 2.77 เมตร ที่ MUX5 กรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดมีทั้งสิ้น 28 ตำแหน่ง จาก 121 ตำแหน่ง คิดเป็น 23.14% เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตรพบว่ามีทั้งสิ้น 4 ตำแหน่ง คิดเป็น 3.31% ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (6, 1) มีค่าเป็น 9.22 เมตร

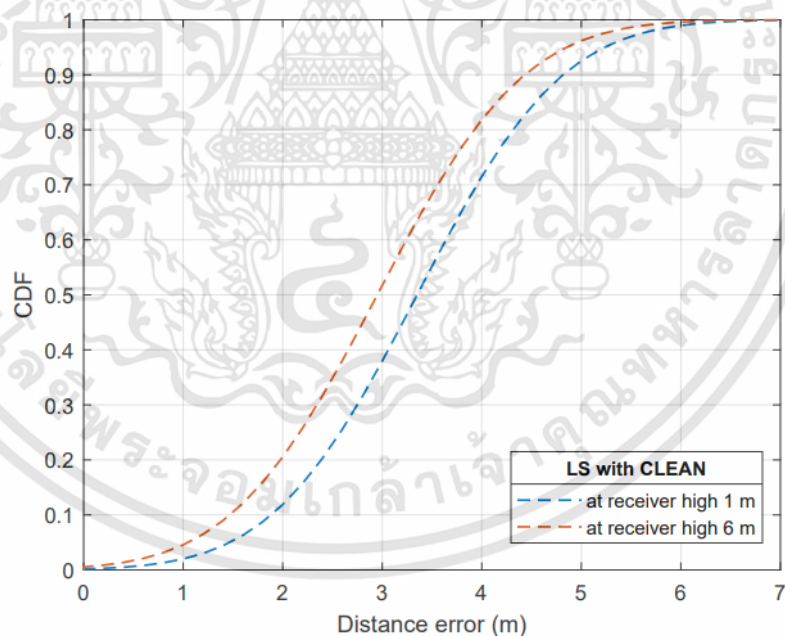
จากตารางที่ 4.7 การหาตำแหน่งใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีนพบว่าสายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.35 เมตร และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.95 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรมีความแม่นยำของระยะทางดีกว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร เนื่องจากที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร คลื่นมีการสะท้อนพื้นจึงทำให้เกิดความผิดพลาดระยะทางมากกว่าที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

ตารางที่ 4.6 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และ 6 เมตรโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น

ความสูงสายอากาศรับ	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)				
	MUX 1	MUX 2	MUX 3	MUX 4	MUX 5
1 เมตร	3.44	3.18	3.61	3.50	3.02
6 เมตร	2.96	2.92	2.99	3.12	2.77

ตารางที่ 4.7 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น

ความสูงสายอากาศรับ	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)
1 เมตร	3.35
6 เมตร	2.95



รูปที่ 4.35 เปรียบเทียบความผิดพลาดระยะทางโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร

#### 4.9.2 การคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัว ร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน

จะทำการวิเคราะห์กรณีที่ใช้ค่า  $k$  เป็นเลขคี่ตั้งแต่ 3 ถึง 9 หลังจากทำการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีนพบว่าค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร สามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 ตามลำดับ

MUX 1 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.45 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.72 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 8 ตำแหน่ง คิดเป็น 6.61%

MUX 2 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 5 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.21 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 4 ตำแหน่ง คิดเป็น 3.31% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 7 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.92 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 13 ตำแหน่ง คิดเป็น 10.74%

MUX 3 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.35 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 6 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.96% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.88 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 10 ตำแหน่ง คิดเป็น 8.26%

MUX 4 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.27 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 5 ตำแหน่ง คิดเป็น 4.13% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทาง

เฉลี่ยเท่ากับ 3.02 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 7 ตำแหน่ง คิดเป็น 5.79%

MUX 5 กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.17 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 8 ตำแหน่ง คิดเป็น 6.61% ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.85 เมตร เมื่อพิจารณากรณีที่เกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 เมตร พบว่ามีทั้งสิ้น 8 ตำแหน่ง คิดเป็น 6.61%

จากตารางที่ 4.10 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.36 พบว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และ 6 เมตรโดยใช้วิธีอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น พบว่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยจะลดลงเมื่อค่า  $k$  เพิ่มขึ้น กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร คือมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.88 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยดีกว่าค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.30 เมตร ซึ่งมีความแม่นยำของระยะทางที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร ดีกว่าเมื่อเทียบกับความแม่นยำของระยะทางที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

ตารางที่ 4.8 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น

จำนวน $k$	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)				
	MUX 1	MUX 2	MUX 3	MUX 4	MUX 5
3	3.49	3.25	3.44	3.45	3.20
5	3.51	3.21	3.41	3.42	3.27
7	3.51	3.25	3.37	3.39	3.19
9	3.45	3.23	3.35	3.27	3.17

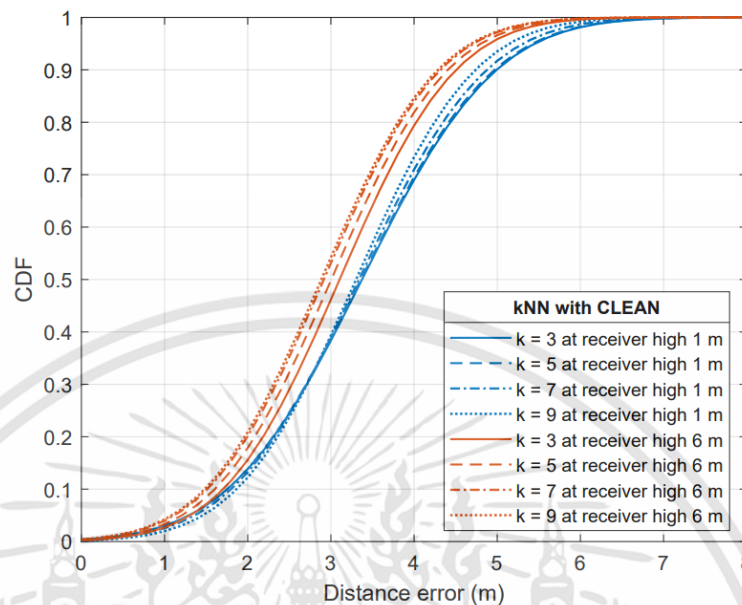
ตารางที่ 4.9 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยของแต่ละ MUX ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น

จำนวน $k$	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)				
	MUX 1	MUX 2	MUX 3	MUX 4	MUX 5
3	2.86	3.07	2.92	3.44	3.21
5	2.83	2.98	2.97	3.18	3.05
7	2.78	2.92	2.89	3.08	2.89
9	2.72	2.95	2.88	3.02	2.85

ตารางที่ 4.10 ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลื่น

จำนวน $k$	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)	
	สายอากาศรับสูง 1 เมตร	สายอากาศรับสูง 6 เมตร
3	3.37	3.10
5	3.36	3.00
7	3.34	2.91
9	3.30	2.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 เปรียบเทียบความผิดพลาดระยะทางโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว ร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีนที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร

#### 4.10 การเปรียบเทียบระหว่างการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือกรณีไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและใช้อัลกอริทึมแบบคลีน

ในการทดลองวัดการหาตำแหน่งโดยใช้สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 นี้จะพิจารณาพารามิเตอร์ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับมาใช้ในการหาตำแหน่งและประเมินผลเปรียบเทียบความแม่นยำในการหาตำแหน่งของกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้คลีนอัลกอริทึม โดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB ในกระบวนการอัลกอริทึมแบบคลีน

##### 4.10.1 การเปรียบเทียบการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน

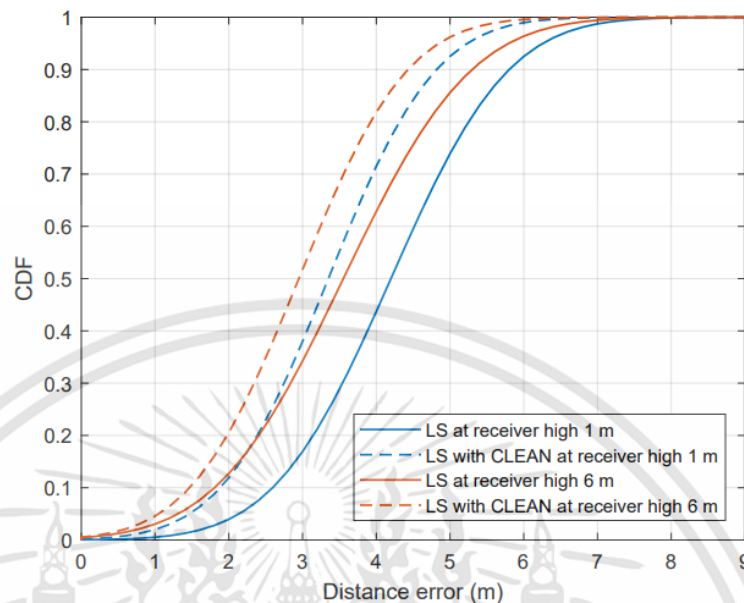
เมื่อทำการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแล้ว ค่าความผิดพลาดระยะทางทั้งหมดของกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน สามารถแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมดังรูปที่ 4.37 และแสดงดังตารางที่ 4.11 สำหรับกรณีที่ไม่ใช้คลีนอัลกอริทึมที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.20 เมตร ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (0, 10) มีค่าเป็น 7.96 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.55 เมตร ในขณะที่ค่าความ

ผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (9, 0) มีค่าเป็น 7.94 เมตร สำหรับกรณีที่ใช้ อัลกอริทึมแบบคลิ่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.35 เมตร ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (9, 0) มีค่าเป็น 7.42 เมตร ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.95 เมตร ในขณะที่ค่าความผิดพลาดระยะทางมากที่สุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง (0, 10) มีค่าเป็น 6.58 เมตร

จากตารางที่ 4.11 พบว่าการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร จากการใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำขึ้นคิดเป็น 20.24% และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร จากการใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำขึ้นคิดเป็น 16.90% กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือกรณีใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.95 เมตร

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นและกรณีที่ใช้ัลกอริทึมแบบคลิ่น

ความสูงสายอากาศรับ	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)	
	กรณีไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่น	กรณีใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่น
1 เมตร	4.20	3.35
6 เมตร	3.55	2.95



รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้วิธีการข้าง  
สองน้อยที่สุดกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้ัลกอริทึมแบบคลีน

#### 4.10.2 การเปรียบเทียบการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียง ที่สุด $k$ ตัวที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้ัลกอริทึมแบบคลีน

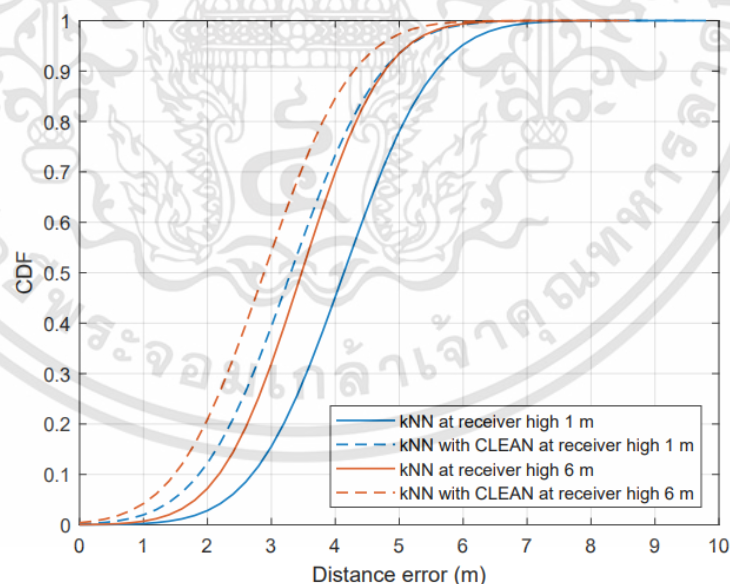
เมื่อทำการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว เมื่อทำ  
การเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้ัลกอริทึมแบบคลีน แสดงได้  
ดังตารางที่ 4.12 พบว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่า  
เท่ากับ 9 คือกรณีที่ใช้ัลกอริทึมแบบคลีนมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.30 เมตร เมื่อ  
เทียบกับกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.13 เมตร จาก  
การใช้ัลกอริทึมแบบคลีนส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำเพิ่มขึ้นคิดเป็น 20.10%  
และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 คือกรณี  
ที่ใช้ัลกอริทึมแบบคลีนมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.88 เมตร เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่  
ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.47 เมตร จากการใช้ัลกอริทึม  
แบบคลีนส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำเพิ่มขึ้นคิดเป็น 17.00%

จากค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรพบว่า  
กรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรกรณีใช้อัลกอริทึมแบบคลีนที่  $k$  มี

ค่าเท่ากับ 9 มีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 2.88 เมตร เมื่อทำการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน สามารถแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงสะสมดังรูปที่ 4.38 โดยจะแสดงในกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน

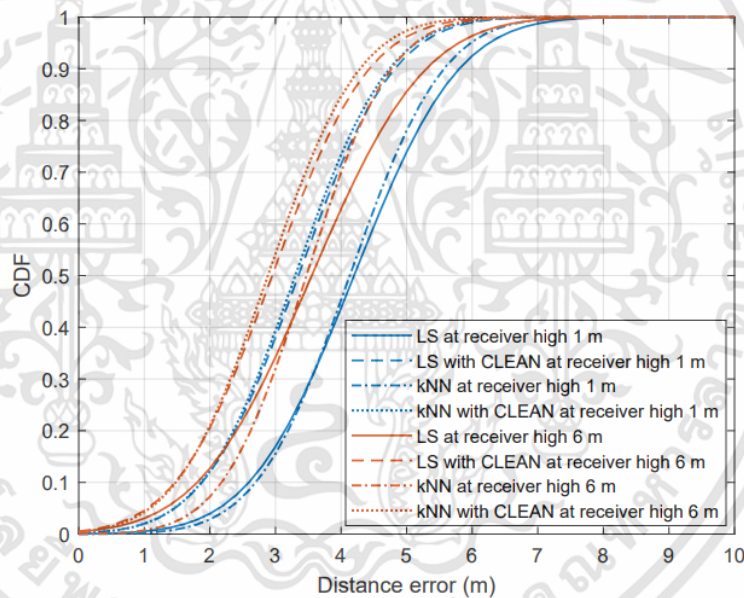
จำนวน $k$	ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ย (เมตร)			
	สายอากาศรับสูง 1 เมตร		สายอากาศรับสูง 6 เมตร	
	ก่อนคลีน	หลังคลีน	ก่อนคลีน	หลังคลีน
$k=3$	4.25	3.37	3.68	3.10
$k=5$	4.14	3.36	3.51	3.00
$k=7$	4.10	3.34	3.44	2.91
$k=9$	4.13	3.30	3.47	2.88



รูปที่ 4.38 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน

#### 4.10.3 การเปรียบเทียบการคาดคะเนตำแหน่งโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดและอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัวกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลินและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิน

ค่าความผิดพลาดระยะทางเป็นค่าที่พิจารณาถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมแบบคลิน เมื่อนำมาใช้ในการหาตำแหน่งได้โดยมีการเปรียบเทียบถึงผลการทดลองกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลินและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลินในการนำมาช่วยปรับปรุงช่องสัญญาณ ค่าความผิดพลาดของระยะทางเฉลี่ยในที่นี้ได้ยกตัวอย่างกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดดังรูปที่ 4.39 โดยมีการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทางกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลินและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลินเพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระยะทาง



รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลินและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิน

การศึกษานี้สัญญาณอยู่บนพื้นฐานของการวัดจริง ซึ่งได้รับการดำเนินการวัดภาคสนามที่วัดปลูกศรัทธา กรุงเทพมหานคร จากนั้นใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อเพิ่มอัลกอริทึมแบบคลินและสัญญาณที่คลิน กระบวนการแรกของอัลกอริทึมแบบคลินซึ่งเป็นกระบวนการสหสัมพันธ์ข้าม กำหนดโดย  $c_{cc}(\tau)$  ระหว่างสัญญาณส่งและสัญญาณรับซึ่งผลลัพธ์จะถือว่าเป็น

ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ โดยช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ที่ถูกคลืนซึ่งความหน่วงเวลาได้ถูกลบออกไป เพื่อให้ได้สัญญาณรับที่คลืนแล้วจะใช้ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ที่ถูกคลืนคอนโวลูชันกับสัญญาณส่ง นำไปสู่สัญญาณที่ได้รับการคลืนเรียกว่าการคลืนสัญญาณที่ได้รับ สหสัมพันธ์ของสัญญาณส่งถูกกำหนดเป็น  $c_{au}(\tau)$  หลังจากนั้นกำหนดแผนที่ยังไม่คลืนและแผนยที่คลืนแล้วเป็น  $d_0(\tau) = c_{cc}(\tau)$  และ  $c_0(\tau) = 0$  ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าสูงสุดของสหสัมพันธ์ข้ามของสัญญาณส่งและสัญญาณรับเสร็จแล้วให้เปรียบเทียบค่าทั้งหมดของ  $a_k$  กับระดับเกณฑ์ ซึ่งในการศึกษานี้เท่ากับ 10 เพอร์เซ็นต์ของค่า  $a_k$  หากค่า  $a_k$  ยังมากกว่าค่าเกณฑ์ ให้ทำซ้ำอัลกอริทึมใหม่อีกครั้งจนกว่า  $a_k$  จะน้อยกว่าค่าเกณฑ์ เนื่องจากการเปรียบเทียบระหว่างกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลืนและกรณีที่ใช้ัลกอริทึมแบบคลืน พบว่าความล่าช้าจึงถูกลบออกไปและพบการเพิ่มขึ้นของแอมพลิจูดเป็นข้อได้เปรียบของอัลกอริทึมแบบคลืน จากการทดลองค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับจะเห็นได้ว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตรกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลืน จะเห็นได้ว่าสัญญาณมีความผิดเพี้ยนเยอะเนื่องจากเกิดการสะท้อนตามสภาวะแวดล้อมในพื้นที่จริง จากนั้นเมื่อผ่านกระบวนการคลืนจะเห็นได้ว่าค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับดีขึ้นเนื่องจากกระบวนการคลืนเป็นกระบวนการทำซ้ำเพื่อลดสัญญาณรบกวน

ในการหาตำแหน่งจะทำการหาตำแหน่งด้วยเทคนิคสแกนลายนิ้วมือโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยมีแนวความคิดคล้ายกับวิธีการสแกนลายนิ้วมือของมนุษย์ ในขั้นตอนแรกนั้นจะเก็บพารามิเตอร์ของสัญญาณที่ต้องการนำมาพิจารณาไว้ในฐานข้อมูล จากนั้นทำการหาตำแหน่งเป้าหมายโดยนำค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณมาเปรียบเทียบความเป็นเอกลักษณ์ของตำแหน่งที่ได้ทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ของสัญญาณนั้นไว้ในฐานข้อมูลก่อนหน้าแล้ว ตำแหน่งเป้าหมายที่ได้คือตำแหน่งที่เมื่อทำเปรียบเทียบแล้วมีความใกล้เคียงที่สุด จากการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือพบว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรมีค่าความผิดพลาดระยะทางมากกว่าที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร เนื่องจากที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร สัญญาณมีความแปรปรวนมากเกิดจากคลืนสะท้อนพื้น เพราะสายอากาศรับสูง 1 เมตรอยู่ใกล้พื้นดินทำให้เกิดการแทรกสอดมีความเป็นไปได้สูงที่ทำให้สัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนเยอะ จึงทำให้เกิดความผิดพลาดระยะทางมากกว่าความผิดพลาดระยะทางที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร เมื่อพิจารณาจากค่าความผิดพลาดของระยะทางที่ทราบได้ตั้งตารางแล้วเมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้วจะสังเกตเห็นได้เลยว่าที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด สำหรับกรณีที่ไม่ใช้คลืนมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.20 เมตร กรณีที่ใช้ัลกอริทึมแบบคลืนมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.35 เมตร ค่าความผิดพลาด

ของระยะทางแม่นยำขึ้น 20.24% ซึ่งเป็นกรณีที่ดีที่สุดของการใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นในการลดค่าความผิดพลาดของระยะทางในศึกษาทดลองการหาตำแหน่งนี้

ในส่วนการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว เป็นวิธีการตัดสินใจวิธีหนึ่งที่ต่างจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ที่สามารถขยายขอบเขตของการตัดสินใจให้มากขึ้น โดยการตรวจสอบ  $k$  จำนวนที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เทคนิคนี้จะเป็นการหาผลรวมของจำนวนเงื่อนไข หรือกรณีต่าง ๆ สำหรับแต่ละการตัดสินใจ การนำอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุดจำนวน  $k$  ตัวไปใช้นั้นเป็นการหาระยะห่างระหว่างแต่ละตัวแปรในข้อมูล สำหรับขั้นตอนวิธีของอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุดจำนวน  $k$  ตัวนั้นเริ่มต้นต้องทำการกำหนดขนาดของ  $k$  ก่อน โดยทั่วไปนิยมกำหนดให้เป็นเลขคี่ หลังจากนั้นทำการคำนวณความแตกต่างระหว่างข้อมูลเป้าหมายกับกลุ่มข้อมูลตัวอย่าง ข้อมูลเป้าหมายจะถูกตัดสินใจโดยพิจารณาข้อมูลตัวอย่างที่มีความแตกต่างน้อยที่สุดจำนวน  $k$  ข้อมูล จากการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 กรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 4.13 เมตร กรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 3.30 เมตร จากการใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำเพิ่มขึ้นคิดเป็น 20.19% ซึ่งเป็นกรณีที่ดีที่สุดของการใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นรวมกับการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว พบว่าการหาตำแหน่งโดยใช้วิธีอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวให้ความแม่นยำของระยะทางดีกว่าวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเพราะวิธีอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวสามารถขยายขอบเขตของการตัดสินใจให้มากขึ้น โดยการตรวจสอบ  $k$  จำนวนที่เหมือนกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ทำให้การหาตำแหน่งแม่นยำมากยิ่งขึ้น การหาตำแหน่งทั้งกรณีใช้วิธีกำลังน้อยที่สุดกรณีใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่น และกรณีใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว กรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่น จะเห็นได้ว่ากรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นจะเห็นได้ว่าสัญญาณเกิดความผิดพลาดเนื่องมาจากเกิดการสะท้อนตามสภาวะแวดล้อมในพื้นที่จริงจึงทำให้ความแม่นยำในการหาตำแหน่งน้อยลง จากนั้นพอมานกระบวนกรคลิ่นแล้วจะเห็นได้ว่าค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับดีขึ้นแล้วการหาตำแหน่งก็มีความผิดพลาดน้อยลงด้วย จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าการนำอัลกอริทึมแบบคลิ่นมาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของช่องสัญญาณนั้นสามารถจัดสัญญาณรบกวนออกได้จริง จะเห็นได้ชัดเจนว่าความแตกต่างระหว่างกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลิ่นและ

กรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลื่นมีความไม่แตกต่างกันมากแต่ประสิทธิภาพโดยรวมหลังจากการใช้  
อัลกอริทึมแบบคลื่นจะให้ค่าความแม่นยำของระยะทางที่ดีกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ปฏิญยานิพนธ์ได้นำเสนอการหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ด้วยอัลกอริทึมแบบคลีน โดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ ซึ่งข้อได้เปรียบของเทคโนโลยีโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 สำหรับระบบการหาตำแหน่งคือ ความครอบคลุมของสัญญาณในพื้นที่กว้างมากทั้งภายนอกอาคารและภายในอาคาร สำหรับการทดลองนั้นใช้อุปกรณ์ภาคส่งสัญญาณคือสถานีส่งไบหยก ซึ่งทำงานบนย่านความถี่ 470 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 694 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามมาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในขณะที่อุปกรณ์ภาครับ จะใช้สายอากาศรับไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่น ยี่ห้อ EMCO Model รุ่น 3121C และเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานบนมาตรฐานโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ได้ สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการหาตำแหน่งคือค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ ซึ่งในปฏิญยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร และสายอากาศรับสูง 6 เมตร ทำการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ทั้ง 5 MUX โดยทำการวัดบริเวณวัดปลูกศรฐธา กรุงเทพมหานคร จากนั้นทำการวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือ และการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือวิธีกำลังสองน้อยที่สุดและอัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีนเพื่อทำให้เกิดความผิดพลาดระยะทางน้อยที่สุด

#### 5.1 สรุปผล

ปฏิญยานิพนธ์นี้ได้ใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ในการหาตำแหน่งร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลีน ในการคลีนสัญญาณรบกวน การหน่วงเวลาของสัญญาณโดยจะทำให้ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์เพิ่มขึ้น เพื่อปรับปรุงช่องสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 และใช้ข้อมูลดิบที่วัดได้เพื่อคำนวณกระบวนการอัลกอริทึมแบบคลีนในซอฟต์แวร์ MATLAB โดยใช้เทคนิคสหสัมพันธ์ที่ใช้ในการประมาณช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์และคลีนช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ ซึ่งดำเนินการโดยสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างสัญญาณส่งและสัญญาณรับ ช่องสัญญาณการตอบสนองอิมพัลส์ที่คลีนแล้วสามารถใช้เพื่อคอนโวลูชันกับสัญญาณส่ง เพื่อให้ได้สัญญาณรับที่คลีนแล้ว สำหรับการประเมินผลของการหาตำแหน่งโดยใช้

เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือนั้น จะใช้ค่าความแรงของสัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ที่ได้รับที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรและ 6 เมตร โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดและการใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัว และทำการประเมินผลทั้งกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์และกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์ ผลการทดลองของการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือแสดงได้ดังตารางที่ 5.1 จากผลการทดลองพบว่า สำหรับกรณีการเปรียบเทียบโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดนั้น เมื่อใช้ร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรจะมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 3.35 เมตร ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์จะมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 4.20 เมตร จากการใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำขึ้นคิดเป็น 20.24% และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์จะมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 2.95 เมตร ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์จะมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 3.55 เมตร จากการใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำขึ้นคิดเป็น 16.90%

ในส่วนการใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์ ดังตารางที่ 5.1 จะแสดงผลกรณีที่ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดที่  $k$  มีค่าเท่ากับ 9 สามารถอธิบายได้ดังนี้ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตรจะมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 3.30 เมตร ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์จะมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 4.13 เมตร จากการใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำขึ้นคิดเป็น 20.10% และที่สายอากาศรับสูง 6 เมตรกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์จะมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 2.88 เมตร ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์จะมีค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยที่ 3.47 เมตร จากการใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำขึ้นคิดเป็น 17.00%

เมื่อพิจารณาโดยละเอียดแล้วจะสังเกตเห็นได้เลยว่าการหาตำแหน่งโดยใช้อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด  $k$  ตัวร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์เป็นกรณีที่ดีที่สุดในการศึกษาการหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยใช้สัญญาณโทรทัศน์ภาคพื้นดินระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ด้วยอัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์ จากตารางที่ 5.1 สามารถสรุปได้ว่าการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคสแกนลายนิ้วมือนั้นร่วมกับอัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์ให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางแม่นยำขึ้นประมาณ 18.56% จะเห็นได้ว่ากรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์จะเห็นได้ว่าสัญญาณเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการสะท้อนตามสภาวะแวดล้อมในพื้นที่จริงจึงทำให้ความแม่นยำในการหาตำแหน่งน้อยลง จากนั้นพอผ่านกระบวนการคลัสเตอร์แล้วจะเห็นได้ว่าค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับดีขึ้นแล้วการหาตำแหน่งก็มีความผิดพลาดน้อยลงด้วย จึงสามารถที่จะสรุปได้ว่าการนำอัลกอริทึมแบบคลัสเตอร์มาใช้เพื่อปรับปรุง

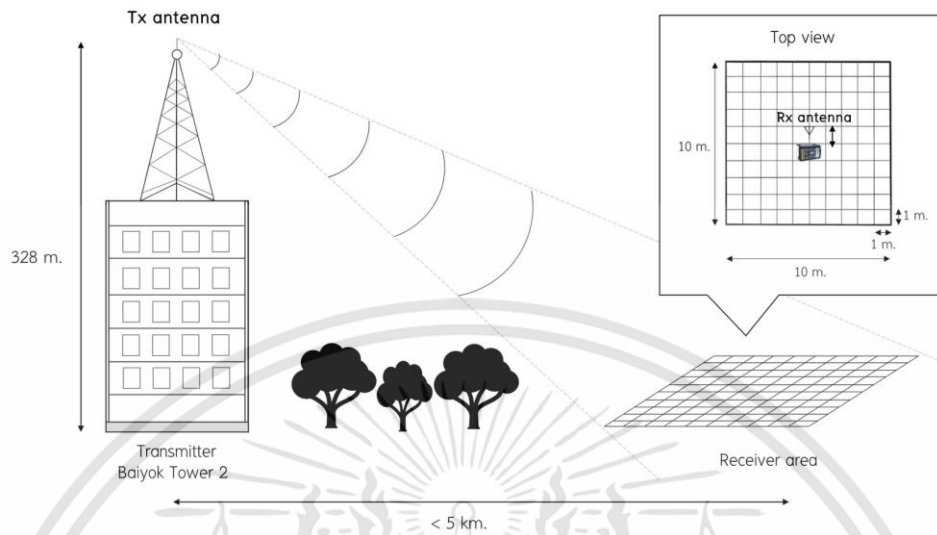
ประสิทธิภาพของช่องสัญญาณนั้นสามารถจัดสัญญาณรบกวนออกได้จริง จะเห็นได้ชัดเจนว่าความแตกต่างระหว่างกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนมีความไม่แตกต่างกันมากแต่ประสิทธิภาพโดยรวมหลังจากจากการใช้อัลกอริทึมแบบคลีนจะให้ค่าความแม่นยำของระยะทางที่ดีกว่า

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบความแม่นยำของการหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคการสแกนลายนิ้วมือกรณีที่ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีนและกรณีที่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน

ความสูงสายอากาศรับ	ความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ย (เมตร)			
	วิธีกำลังสองน้อยที่สุด		อัลกอริทึมเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด $k$ ตัว	
	ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน	ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน	ไม่ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน	ใช้อัลกอริทึมแบบคลีน
1 เมตร	4.20	3.35	4.13	3.30
6 เมตร	3.55	2.95	3.47	2.88

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการสรุปผลการทดลองข้างต้น พบว่า ยังมีข้อผิดพลาดเนื่องจากผู้ทดลองขาดประสบการณ์ในการใช้เครื่องมือและการวัดผลการทดลอง อุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงสถานที่ในการทำการทดลอง ทำให้การหาตำแหน่งยังมีความผิดพลาดระยะทางอยู่มาก แบบจำลองการศึกษาการหาตำแหน่งภายนอกอาคารโดยใช้สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบดิจิทัลรุ่นที่ 2 ด้วยอัลกอริทึมแบบคลีนที่ได้ออกแบบและจัดทำขึ้น มีประโยชน์อย่างยิ่งในการหาตำแหน่งภายในอาคารและสามารถนำไปใช้งานได้จริง สำหรับในอนาคตต่อไปอาจเปลี่ยนสถานที่ที่ทำการทดลองให้มีระยะทางที่ใกล้เคียงมากขึ้นระหว่างสายอากาศส่งและพื้นที่ในการทดลองสำหรับการหาตำแหน่ง ดังรูปที่ 5.1 เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดอันเป็นผลมาจากการจางหายของสัญญาณจากระยะทางและเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการหาตำแหน่ง และสุดท้ายอาจเป็นเทคนิคในการหาตำแหน่ง ซึ่งสามารถพัฒนาต่อไปได้ขึ้นกับการประยุกต์ใช้งานในอนาคต



รูปที่ 5.1 แบบจำลองการทดลองหาตำแหน่งโดยปรับระยะทางระหว่างสายอากาศส่งและพื้นที่ในการทดลองให้ใกล้เคียง

## บรรณานุกรม

- [1] ETSI EN 302 755 : Digital Video Broadcasting (DVB) Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). V1.4.1, France. : ETSI, 2015.
- [2] ETSI TR 101 290 : Digital Video Broadcasting (DVB) Measurement Guidelines for DVB system. V1.2.1, France. : ETSI, 2001.
- [3] United States of America. “General viewing conditions for subjective assessment of quality of SDTV and HDTV television pictures on flat panel displays.” ITU-R BT.2022 (08/2012).
- [4] สำนักงาน กสทช. “มีอะไรในท่อนสัญญาณดิจิทัลทีวี. <http://www.nbtcrights.com/2015/10/5642>.
- [5] Walter, Fischer. Digital Video and Audio Broadcasting Technology. Third Edition : London Springer, 2009.
- [6] The Industry Association for Digital Television in the UK. UK Digital Terrestrial Television Requirements for Interoperability : Digital TV Group, 2010.
- [7] Digital Home. “Digital Home Helpful Information.” <http://www.digitalhome.ca/forum/186-antenna-research-development/147432-old-cm-4228a4248a-3023-hardware-hacks.html> 2018.
- [8] United States of America. “Parameter values for ultra high definition television and International program exchange.” ITU-R BT.2020-2 (10/2015).
- [9] POP CULTURE LAB. “4k’s marketing team gets replaced by that one neighbor who has a 60 inch.” <https://popculturelab.Wordpress.com/2015/03/13/4ks-marketing-team-gets-replaced-by-that-one-neighbor-who-has-a-60inch/>.
- [10] Wikipedia. “High-Efficiency Advanced Audio Coding.” [https://en.wikipedia.org/wiki/High-Efficiency\\_Advanced\\_Audio\\_Coding](https://en.wikipedia.org/wiki/High-Efficiency_Advanced_Audio_Coding) 2018.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] A. Ingun. “DVB-T2 field trial and optimized parameters in Thailand.” in Electrical Engineering Congress (iEECON) 2014 International. (March 2014)
- [12] United States of America. “The ESR5 Criterion for the Assessment of DVB- T Transmission Quality.” ITU- R. Document 6E/ 64E. (April 2004).
- [13] Bundit Ruckveratham, Sathaporn Promwong. Evaluation of SFN gain for DVB-T2. : International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT), 2017.
- [14] คณะเจ้าหน้าที่บริษัท อสมท จำกัด (มหาชน). “เทคโนโลยีการแพร่กระจายคลื่นดิจิทัล.” [http://dtv.mcot.net/techno\\_one.php?dateone=1247363871](http://dtv.mcot.net/techno_one.php?dateone=1247363871).
- [15] Y. Qi. “Wireless geolocation in a non-line-of-sight environment.” Ph.D. Dissertation, Princeton University, 2004.
- [16] Z. Sahinoglu, S. Gezici and I. Guvenc. Ultra-wideband Positioning Systems : Cambridge University Press, 2008.
- [17] S. Gezici. “A Survey on wireless position estimation.” Wireless Personal Communication. (2008) : 263–282.
- [18] H. Laitinen, J. Lahteenmaki, and T. Nordstrom. “Database Correlation Method for GSM Location.” IEEE Vehicular Technology Conference. (May 2001) : 2504-2508.
- [19] J. J. Caffery. Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems. Boston Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [20] E.C.L.Chan and G.Baciu. Introduction to wireless localization with iPhone sdk example. : John Wiley & Sons Singapore Pte.Ltd., 2012
- [21] R. Olyazadeh. Least Square Approach on Indoor Positioning Measurement Techniques : Geomundus, 2012.

### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] M. Choi and B. Jang. "An Accurate Fingerprinting based Indoor Positioning Algorithm." International Journal of Applied Engineering Research. (2017) : 86-90.
- [23] C. mark, B. Grill. "An Efficient Implementation of the Algorithm 'CLEAN'." Astron. Astrophys. (1980) : 377-378.
- [24] C. Buccella M. Feliziani and G. Manzi. "Detection and localization of defects in shielded cables by time-domain measurements with UWB pulse injection and clean algorithm postprocessing." IEEE Trans. Electromagn. Compat. (Nov. 2004) : 597-605.
- [25] J. G. Proakis, Manolakis, D.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. 4ed. New Jersey : Pearson Education Inc, 2007.
- [26] Z. Sharif and A. Z. Sha'ameri. "The Application of Cross Correlation Technique for Estimating Impulse Response and Frequency Response of Wireless Communication Channel.", 1-5. 2007 5th Student Conference on Research and Development. Malaysia : Selangor, 2007.
- [27] A. Muqaibel, A. Safaai-Jazi, B. Woerner and S. Riad. UWB channel impulse response characterization using deconvolution techniques. : The 2002 45th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2002. MWSCAS-2002, 2002.
- [28] Dissakan Arpasin and Sathaporn Promwong. Evaluation of UWB-Body Area Network by Using CLEAN Algorithm. Bangkok. : 2013 International Conference on Engineering, Applied Science, and Technology (ICEAST 2013), 2013.
- [29] K. Teplee, P. Supanakoon, S. Promwong and J. Takada. "A BER Performance of UWB Communications with Matched Filter and Correlation Receivers.": the 2007 ECTI International Conference. (2007) : 872-875.

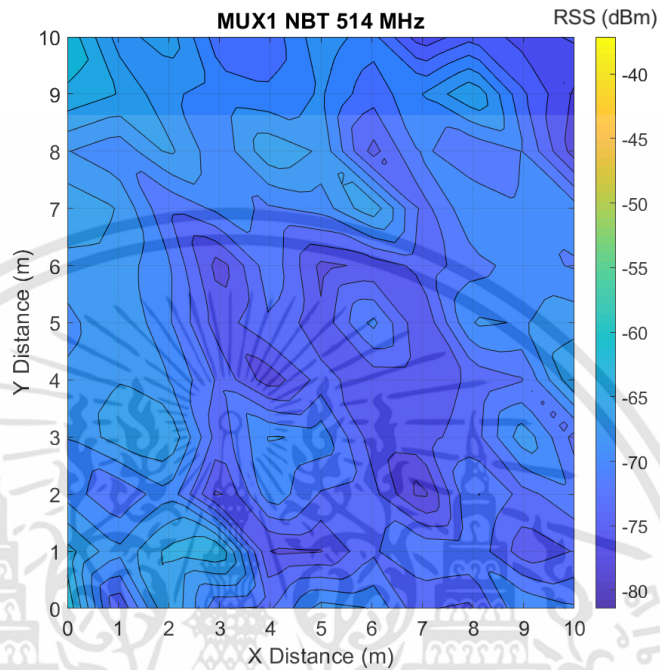
### บรรณานุกรม (ต่อ)

- [30] EMCO (The Electro-Mechanics Company). “Dipole Antenna EMCO Model 3121C.” <https://www.emchire.co.uk/product/emco-3121c-dipole-set-350>.
- [31] Rover instruments. “HD PROTAB.” [https://www.oreind.is/wp-content/uploads/2011/01/ROVER\\_HD\\_PROTAB\\_STCOI\\_Catalog\\_2012\\_V2\\_S-1](https://www.oreind.is/wp-content/uploads/2011/01/ROVER_HD_PROTAB_STCOI_Catalog_2012_V2_S-1).
- [32] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม (สำนักงาน กสทช.). แนวปฏิบัติทางเทคนิคสำหรับการให้บริการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบ ดิจิตอล (Technical Guidelines for Digital Terrestrial Television Broadcasting). กรุงเทพมหานคร, 2560.
- [33] K. Koonchiang, D. Arpasilp and S. Promwong. “Performance Evaluation of UWB-BAN with Friis’s Formula and CLEAN Algorithm.” Multimedia and Ubiquitous Engineering, Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 240, Springer, Dordrecht , 2013.
- [34] สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม (สำนักงาน กสทช.). (ร่าง) ประกาศ กสทช. เรื่อง แผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิตอล (ฉบับปรับปรุงเพื่อรองรับการใช้งานย่านความถี่ 470 – 694 MHz). กรุงเทพมหานคร, 2562.

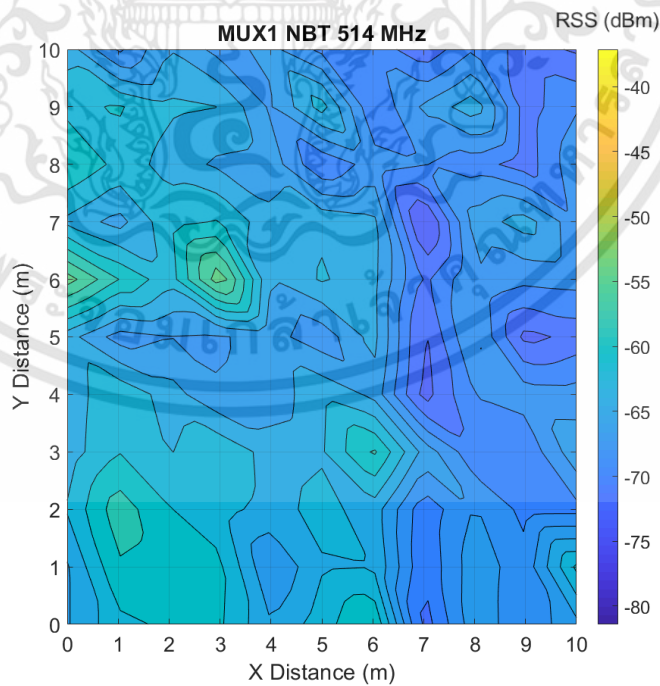


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในชั้นตอนฝึกฝน

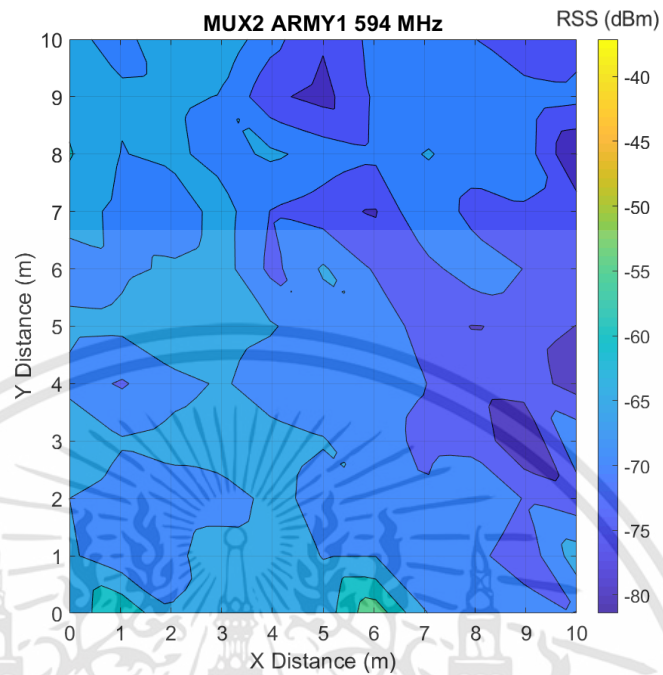


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

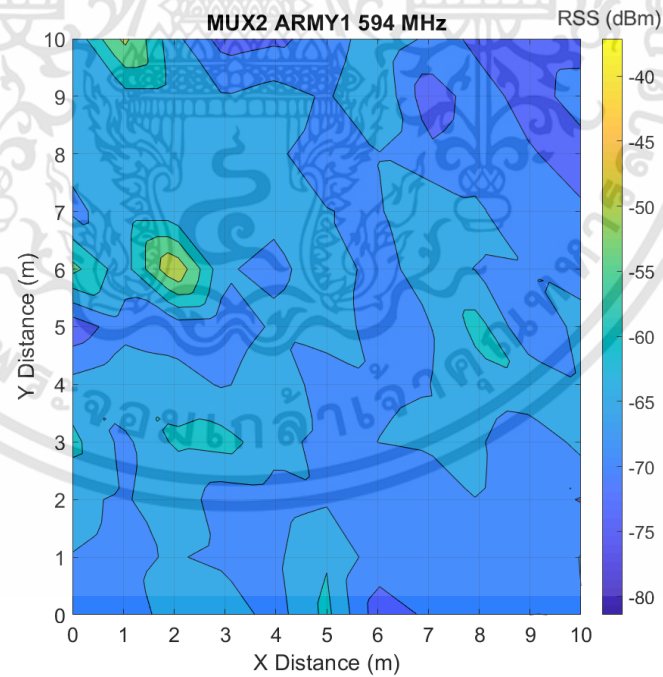


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

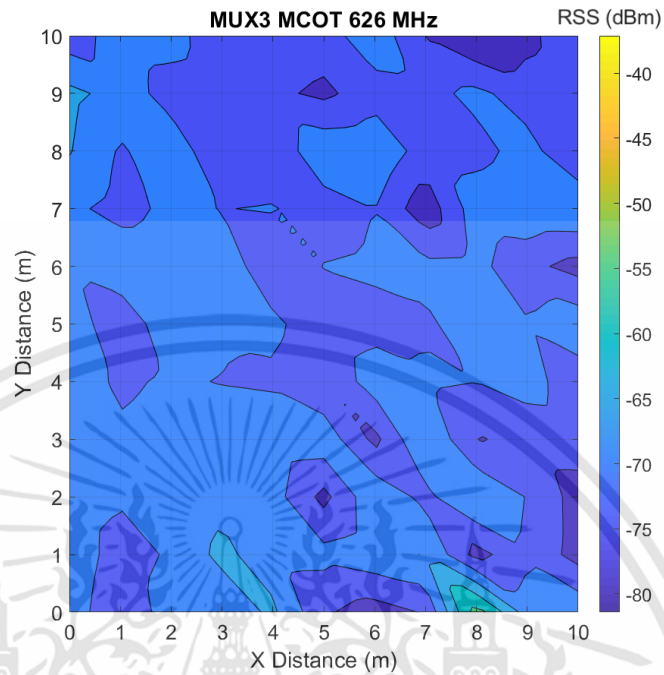


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

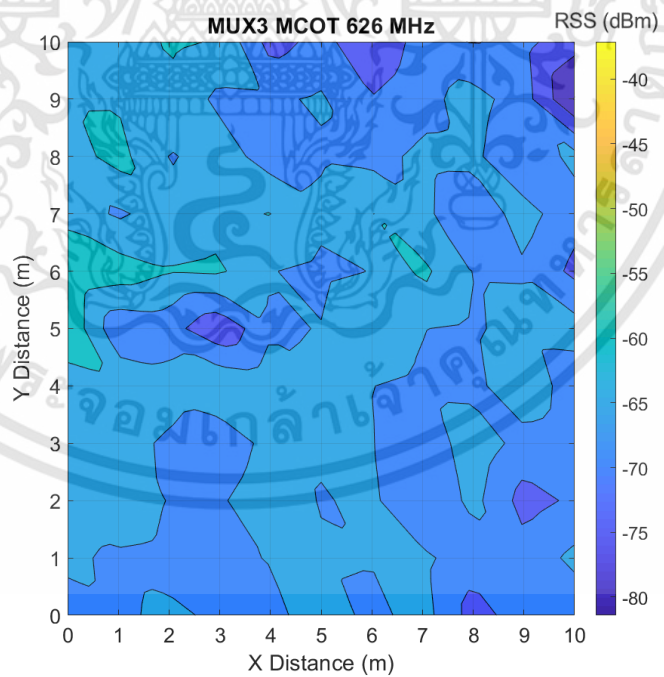


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

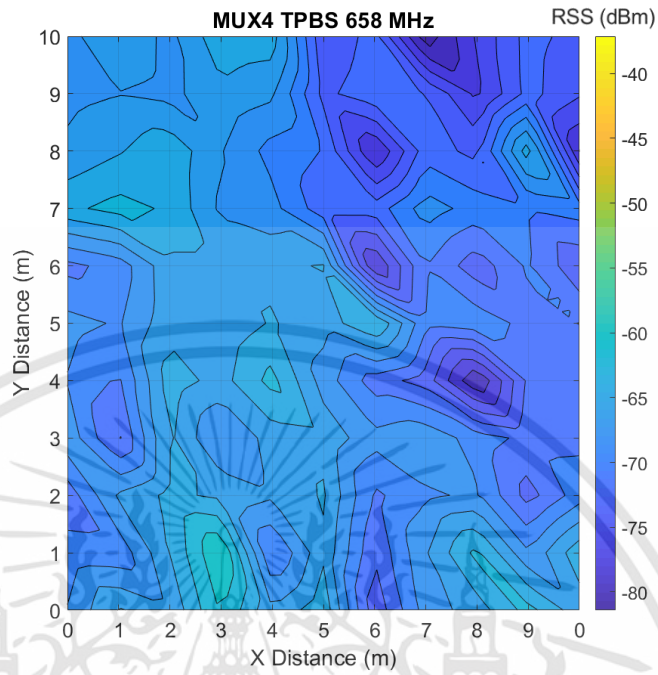


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

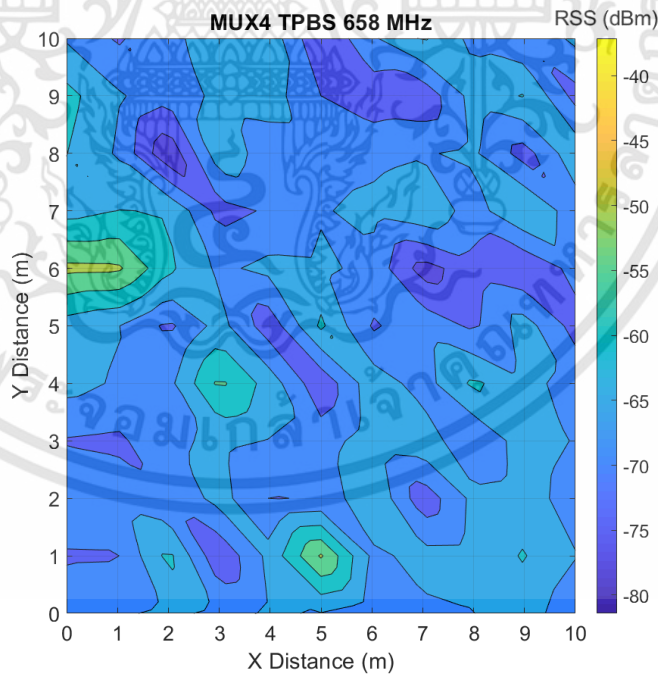


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

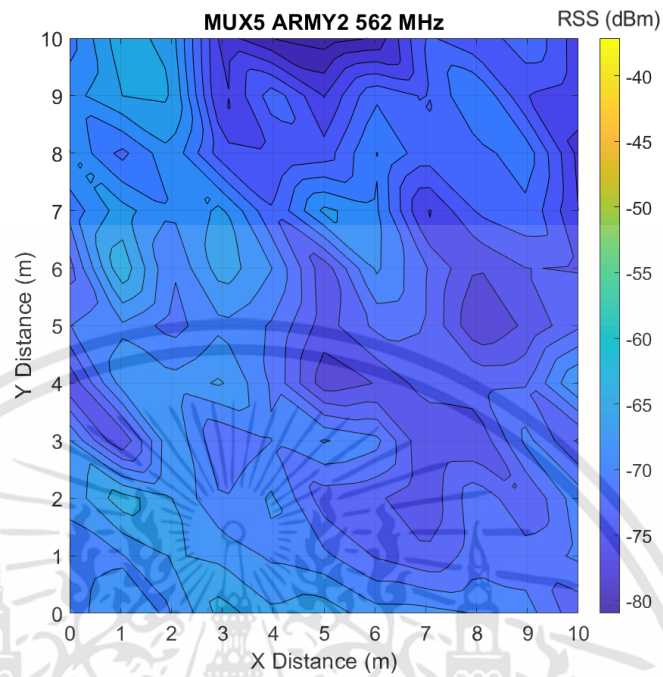


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

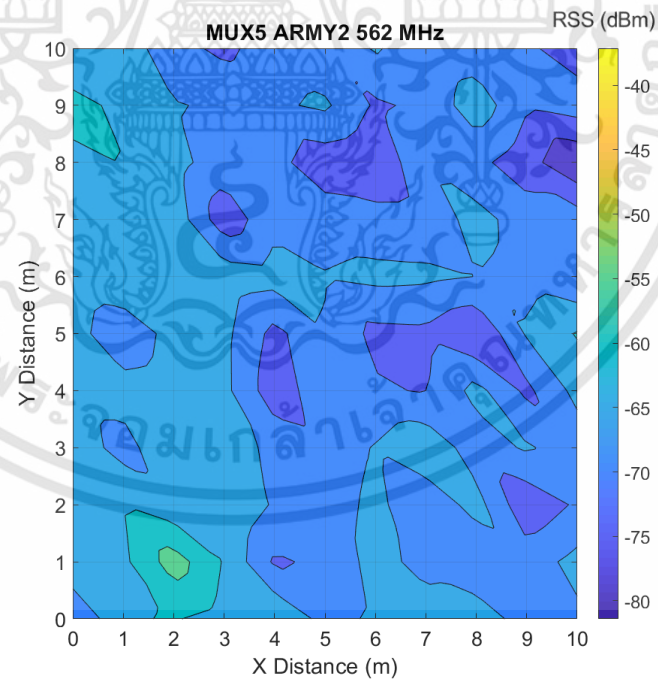


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



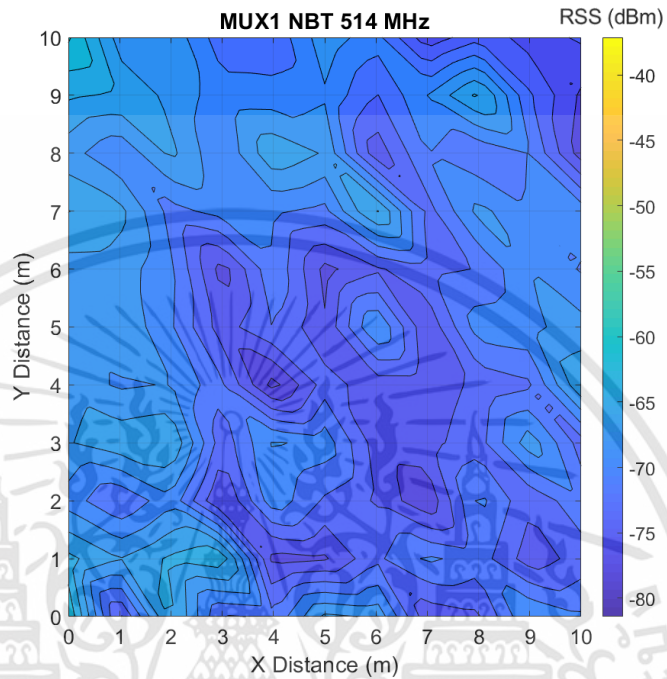
ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



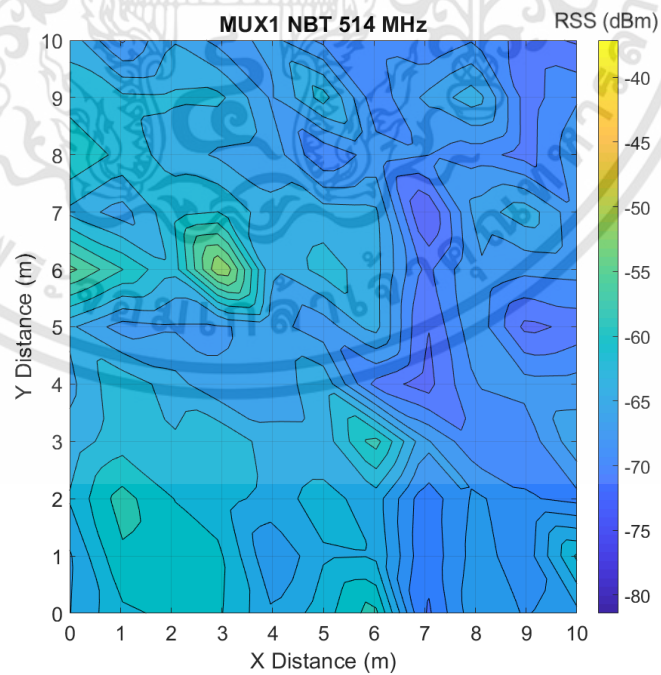
ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในชั้นตอนทดสอบ

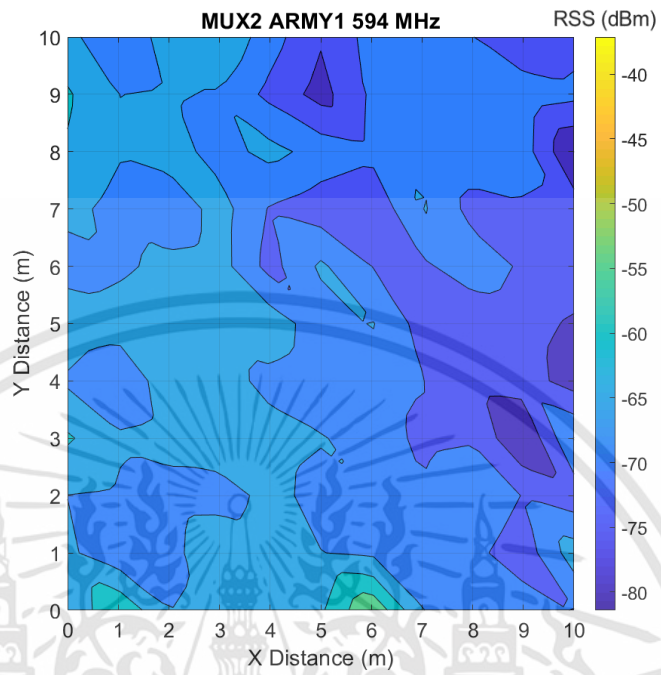


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

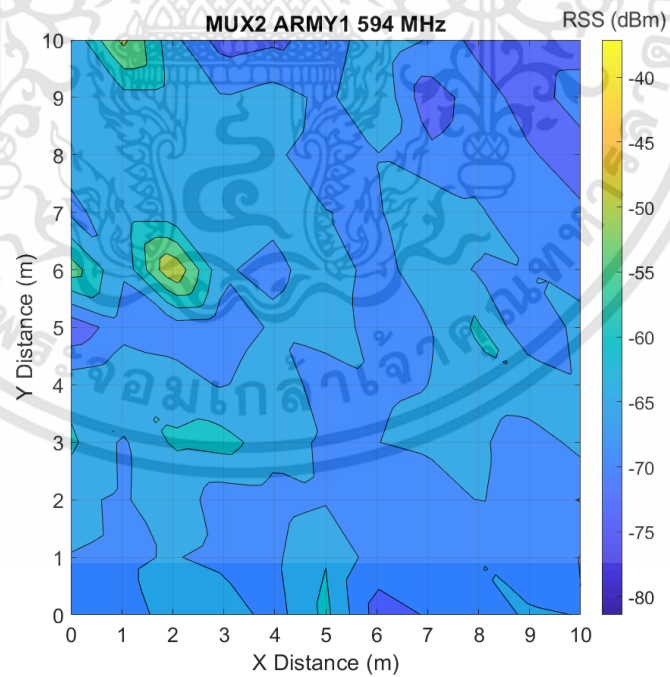


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

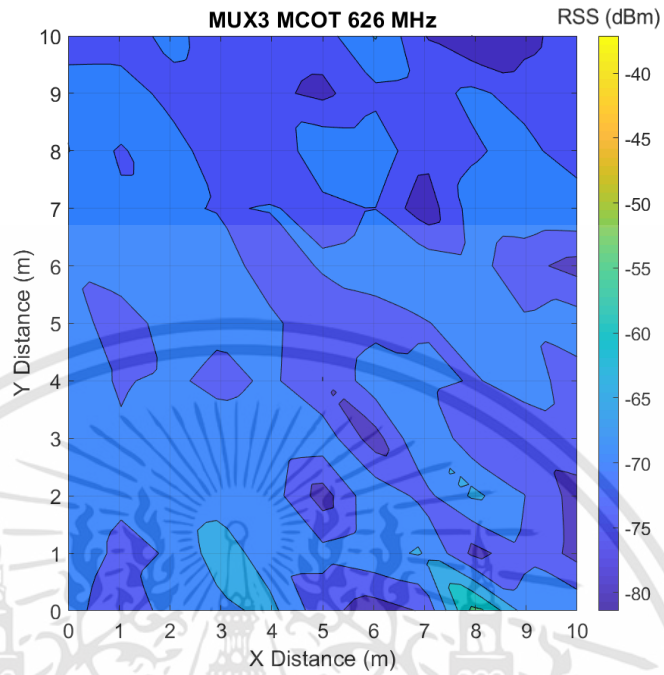


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

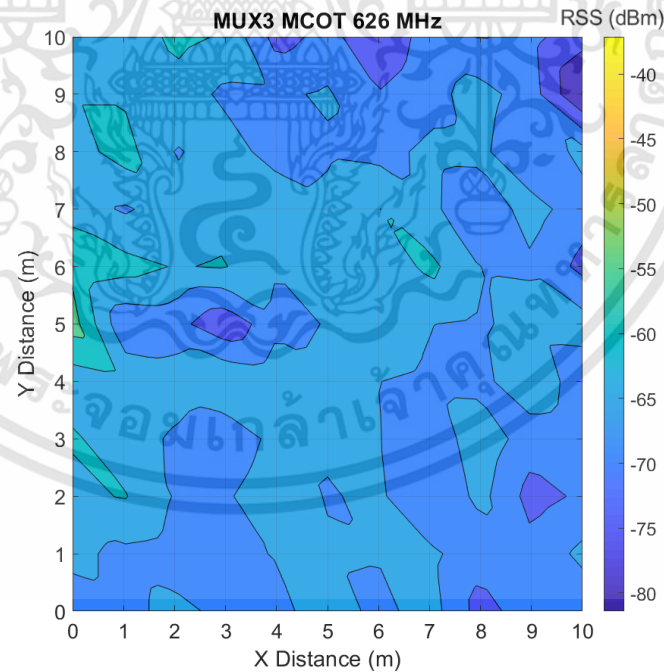


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

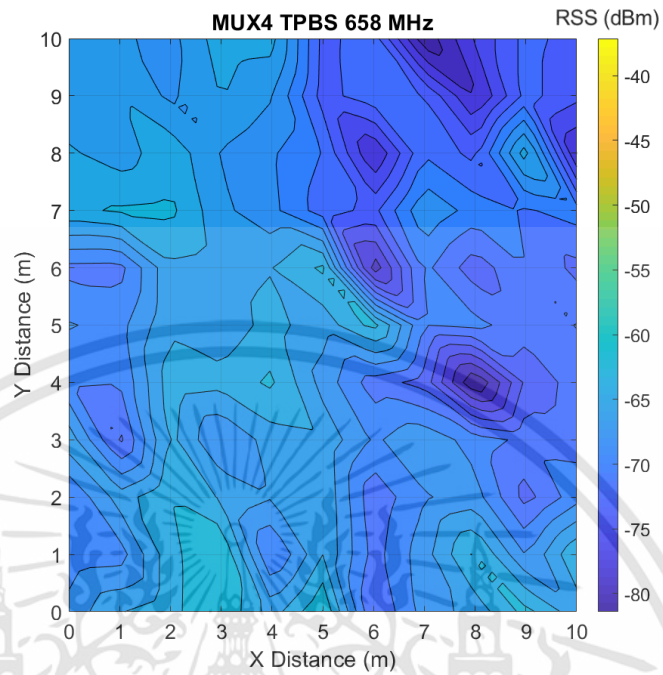


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

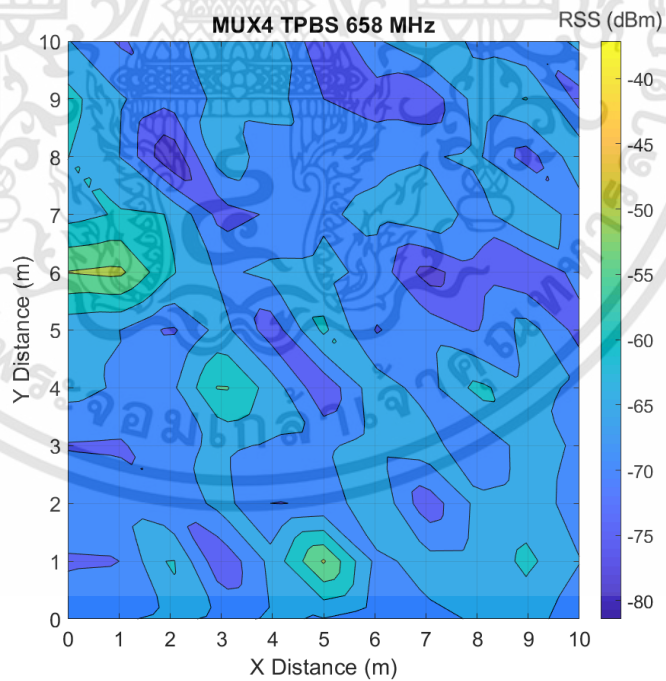


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

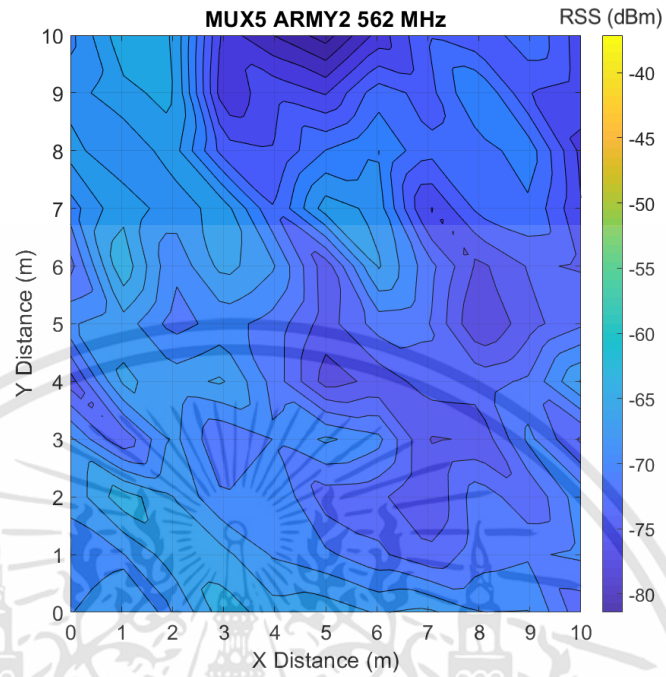


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

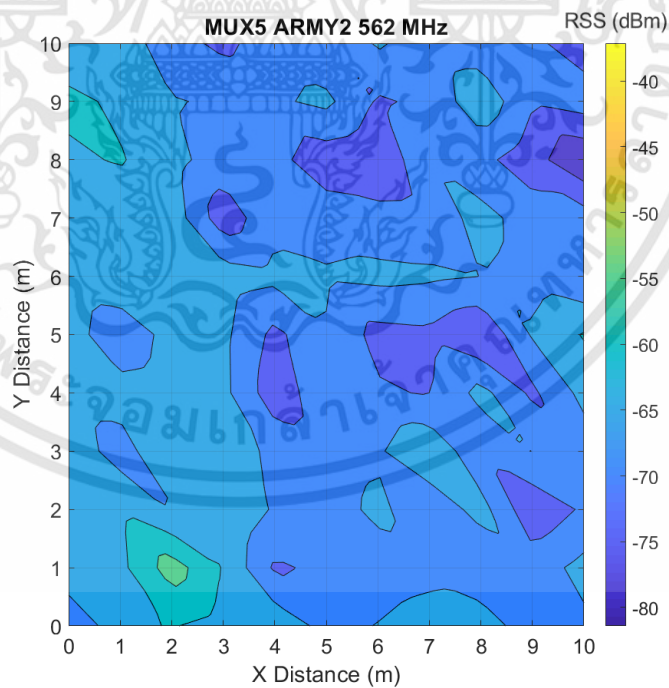


ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



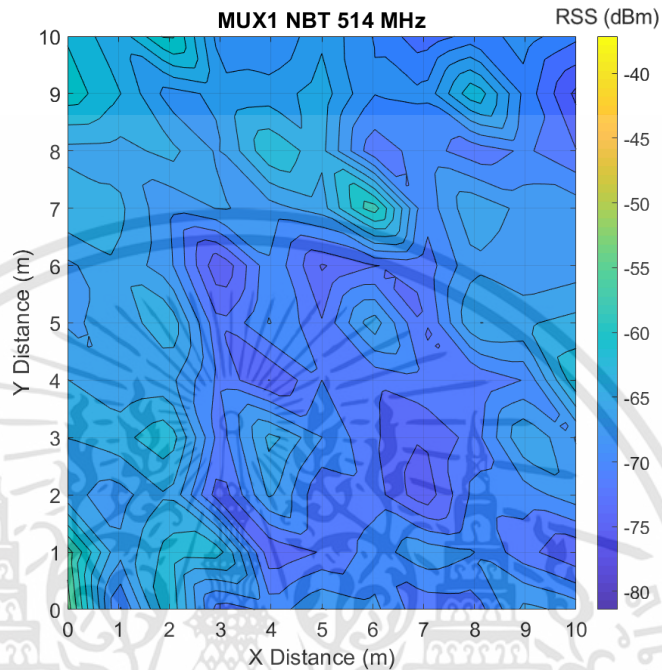
ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



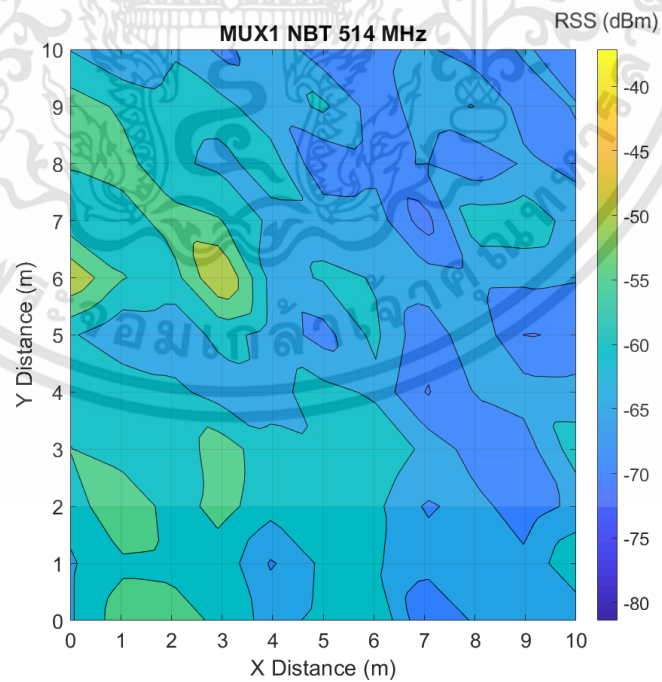
ความแรงของสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 ที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในชั้นตอนฝึกฝนเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

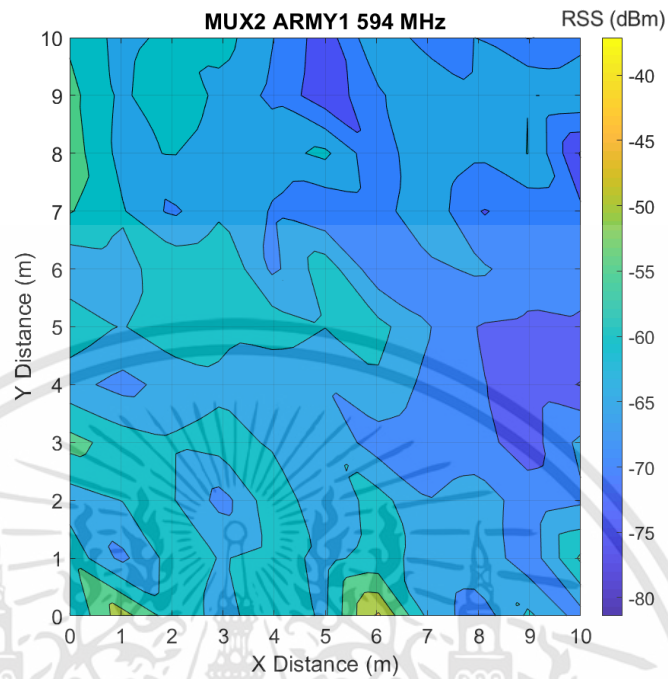


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

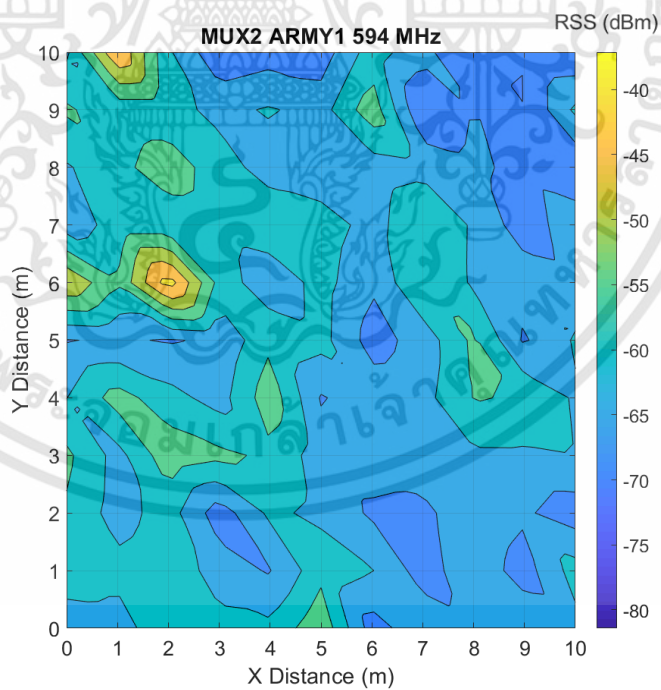


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

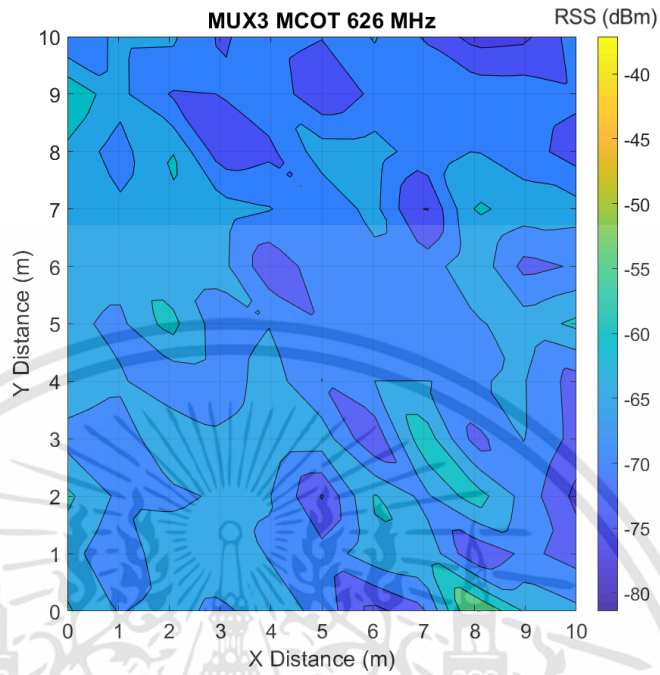


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

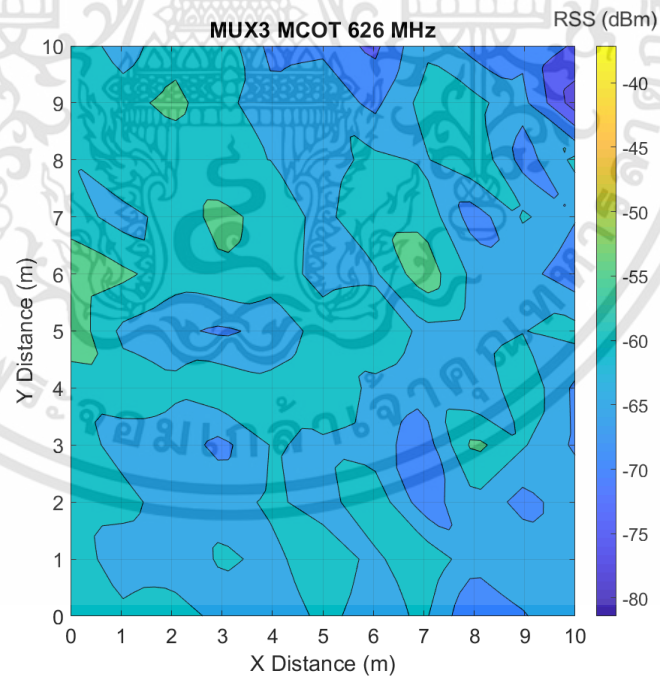


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

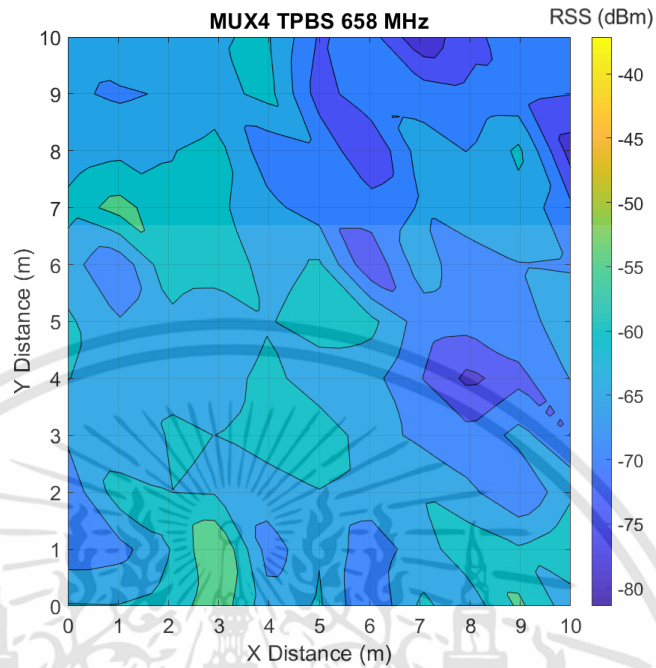


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

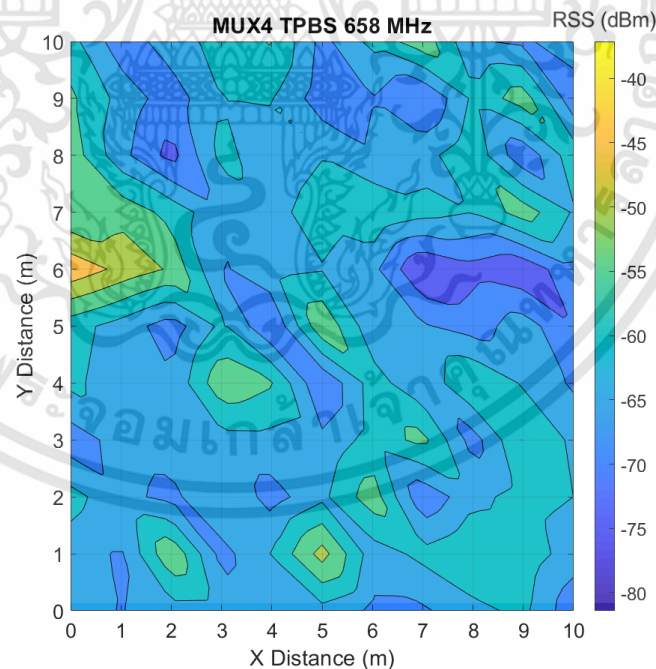


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

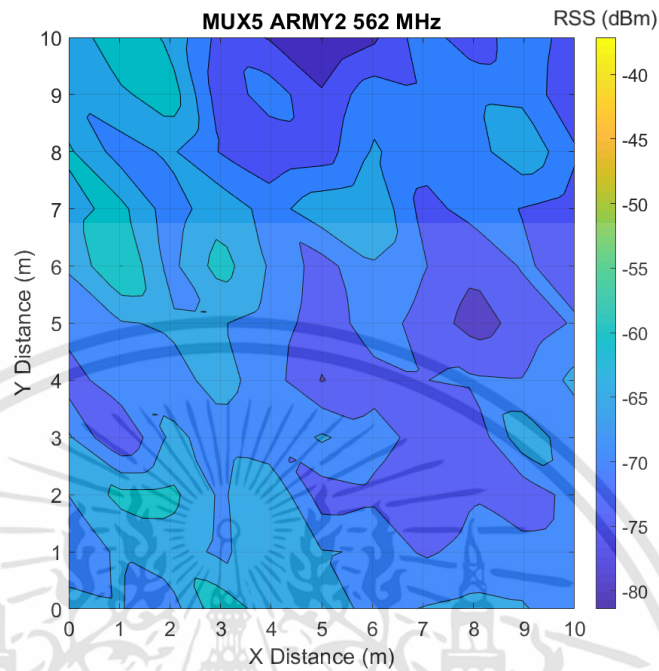


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

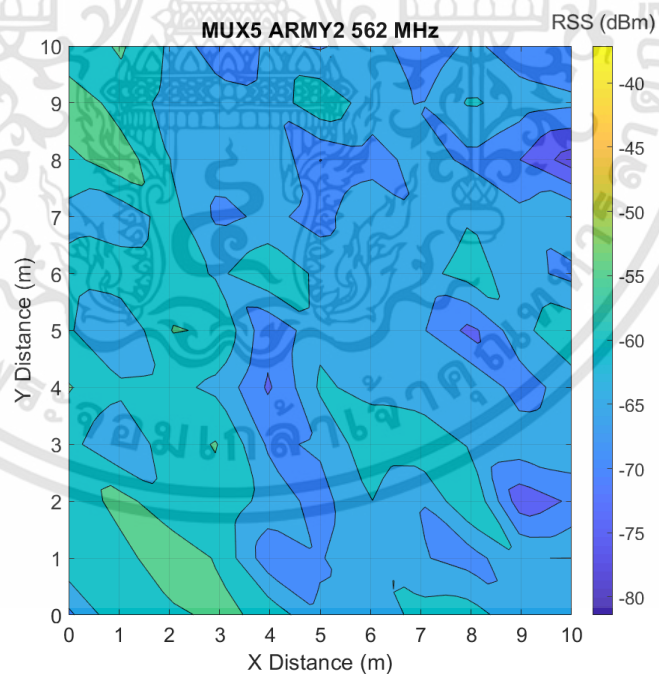


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



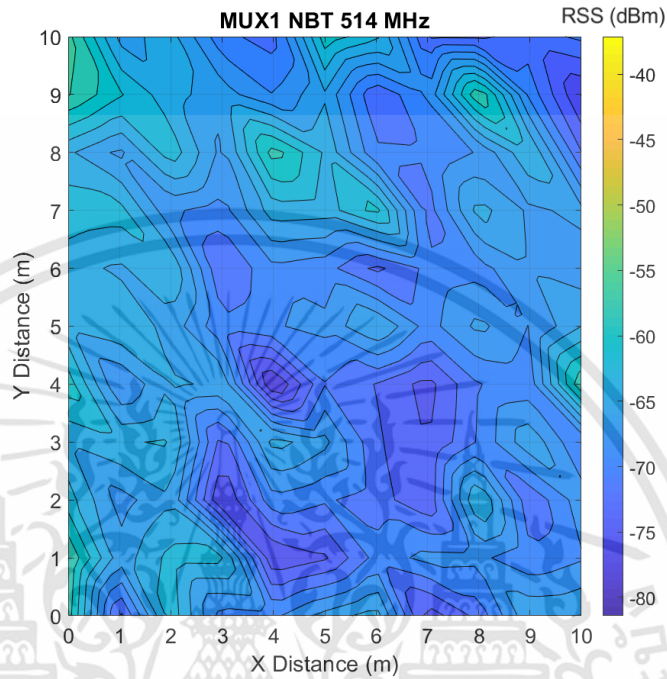
ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



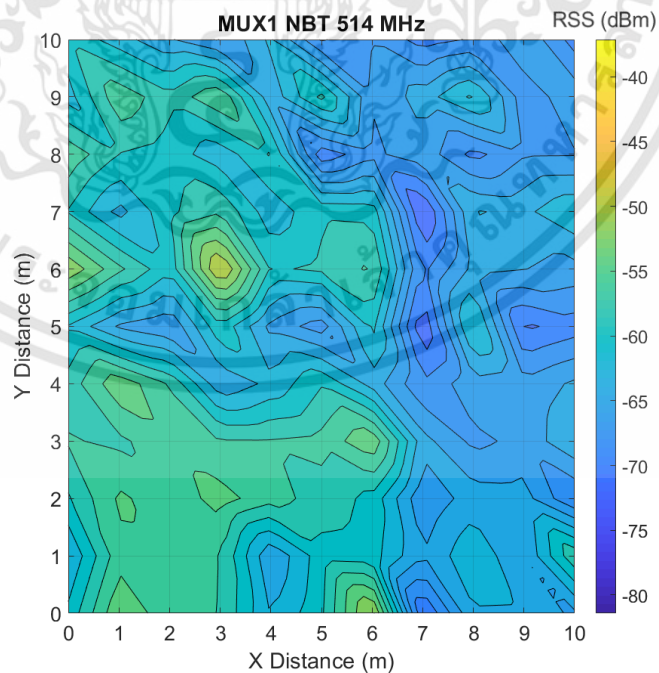
ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับในชั้นตอนทดสอบเมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่น

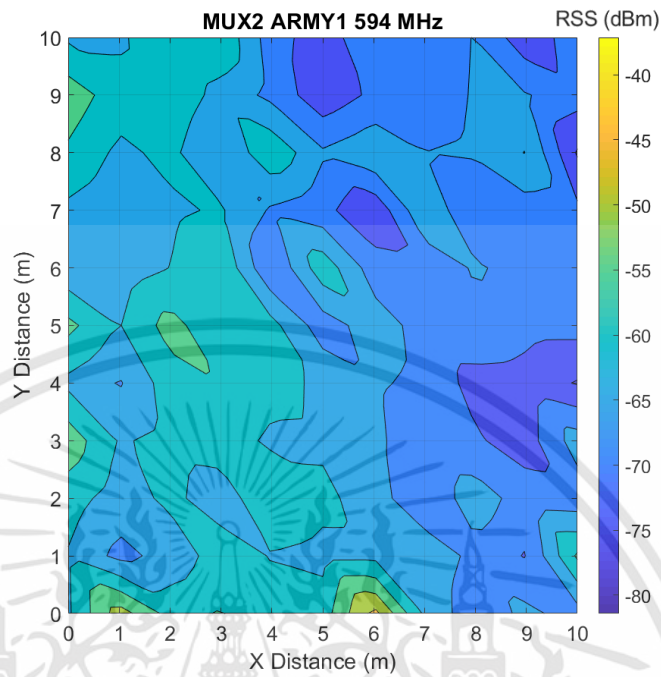


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

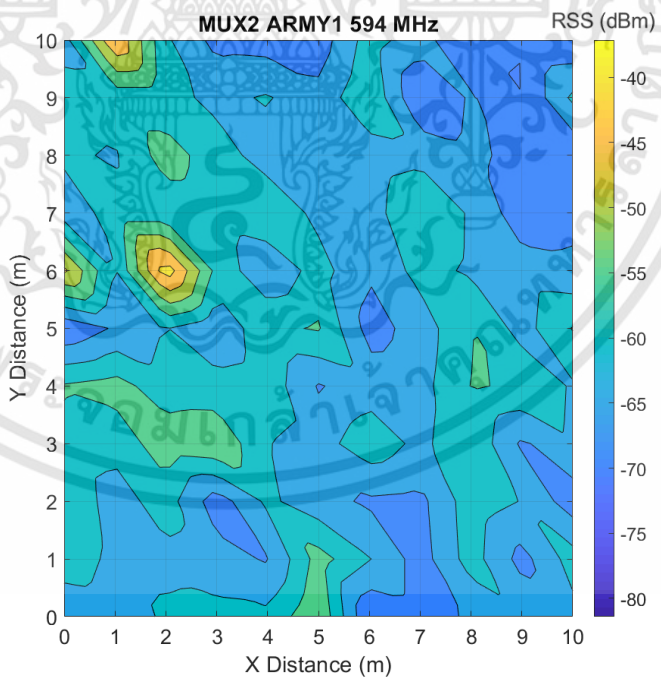


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 1 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

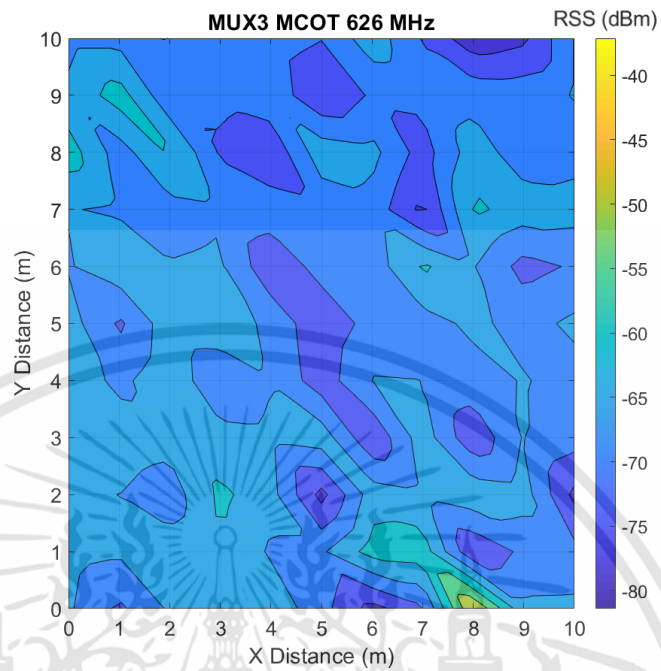


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

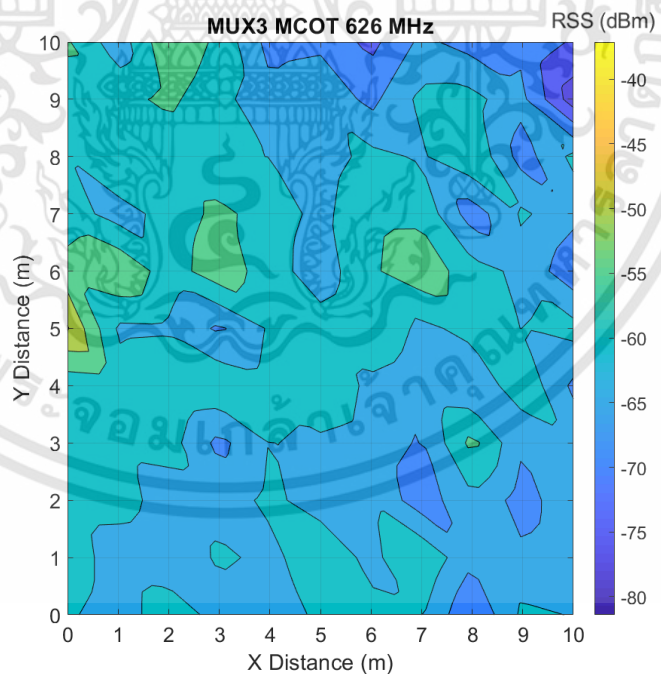


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 2 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

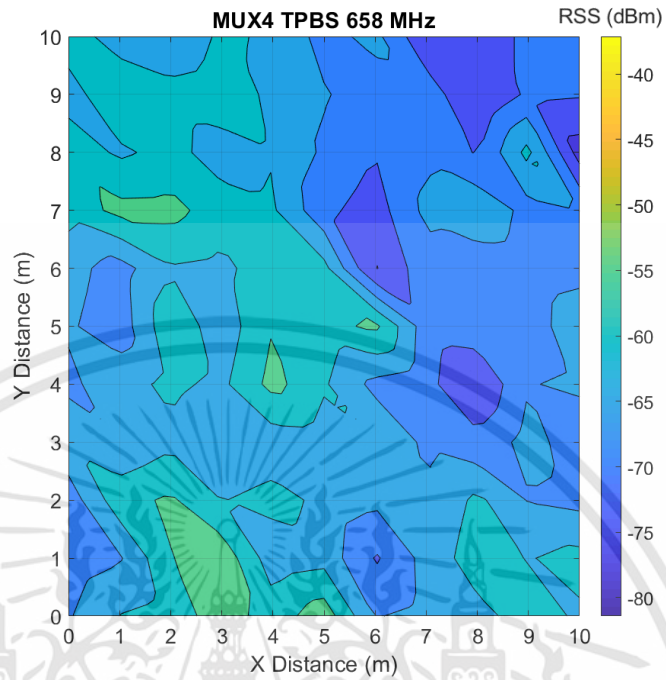


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

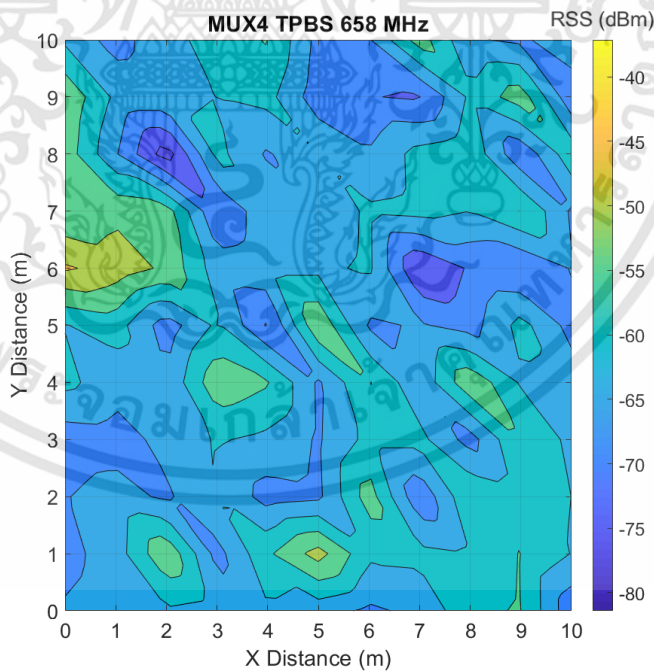


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 3 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

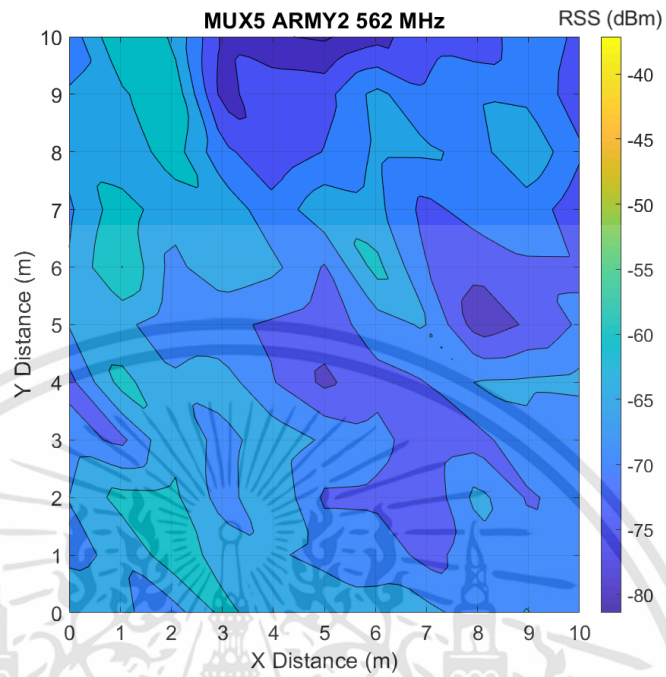


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร

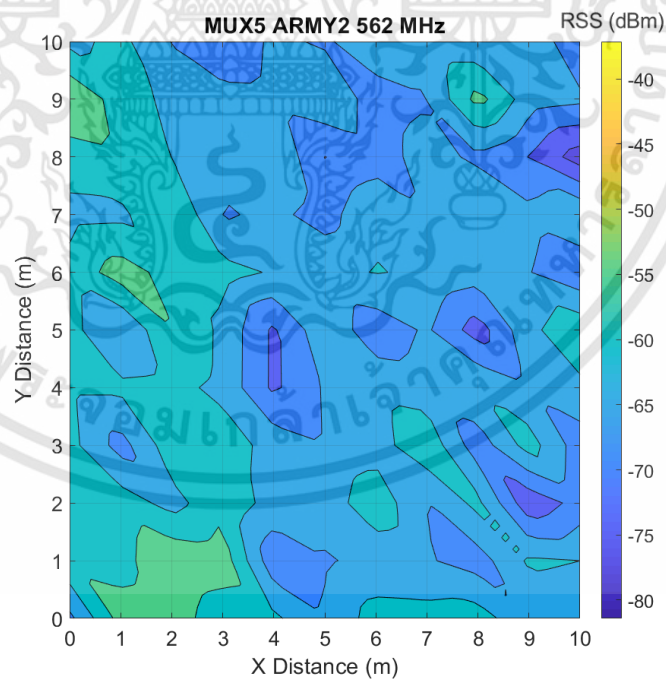


ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 4 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 1 เมตร



ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับของ MUX 5 เมื่อผ่านอัลกอริทึมแบบคลื่นที่สายอากาศรับสูง 6 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้