



กทปส

## รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการขอรับการส่งเสริมและสนับสนุนจากเงินกองทุนวิจัยและพัฒนา  
กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคม เพื่อประโยชน์สาธารณะ

### ประจำงวดที่ 7

การพัฒนาสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่สำหรับระบบวิทยุรู้คิดเพื่อแก้ปัญหา การ  
จัดสรรแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดอย่างมีประสิทธิภาพ

ผศ.ดร.อจลวิชญ์ ฉันทวีโรจน์ หัวหน้าโครงการและนักวิจัยในโครงการ  
ผศ.ดร.ธัญวัฒน์ ลิ้มปิติ นักวิจัยในโครงการ

ได้รับทุนอุดหนุนจาก

กองทุนวิจัยและพัฒนากิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคม  
เพื่อประโยชน์สาธารณะ (สำนักงาน กสทช.)

## สารบัญ

สารบัญรูป

สารบัญตาราง

บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	3
1.3 ขอบเขตและกิจกรรมการดำเนินงาน.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 กรอบแนวคิด .....	4
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	5
1.7 งบประมาณโครงการ .....	7
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 การมอดูเลตระหว่างกัน (Intermodulation) .....	9
2.1.1 ความสำคัญและนิยาม.....	9
2.1.2 สาเหตุการเกิดสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกัน.....	12
2.1.3 กรณีตัวอย่างของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน .....	13
2.1.4 วิธีการแก้ปัญหาการการมอดูเลตระหว่างกัน .....	14
2.2 แนวทางการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิด (Cognitive Radio).....	20
2.2.1 วิวัฒนาการของระบบวิทยุซอฟต์แวร์ (Software Radio Evolution).....	20
2.2.2 วิวัฒนาการของระบบจัดเก็บข้อมูลบริบทของระบบสื่อสาร (Environment-Aware Computing Evolution).....	23
2.2.3 ระบบวิทยุรู้คิด (Cognitive Radio) .....	24
2.3 แนวทางการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิด .....	29

2.4	คุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณ (Broadcasting Antenna System Specification).....	33
2.4.1	อัตราขยาย (Gain).....	33
2.4.2	ความต้านทานด้านเข้าของระบบสายอากาศ (Antenna Input Impedance) .....	35
2.4.3	ความเข้มของสนาม (Field Strength).....	37
2.4.4	ค่าพิกัดของแรงดันและกำลังไฟฟ้า (Voltage and Power Rating).....	39
2.5	สภาพปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบวิทยุกระจายเสียง.....	40
2.5.1	โครงสร้างการทำงานพื้นฐานของเครื่องส่งแบบเอฟเอ็ม.....	41
2.5.2	ปัญหาที่เกิดขึ้นภายในระบบการส่งคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม .....	45
2.5.3	แนวทางการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้ระบบวิทยุกระจายเสียงที่ดี.....	51
2.6	แนวทางของการใช้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด.....	61
2.6.1	วิธีการแก้ปัญหาการจัดสรรแถบความถี่.....	61
2.6.2	การทำงานของระบบ Cognitive Radio เพื่อการจัดสรรแถบความถี่ .....	63
บทที่ 3 ผลสำรวจข้อมูลเฉพาะของสายอากาศที่ใช้จริงในระบบวิทยุกระจายเสียง ระบบโทรทัศน์		
ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย ในจังหวัดนครศรีธรรมราช.....		
3.1	ผลการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของสถานีวิทยุกระจายเสียงและโทรทัศน์ดิจิทัล .....	66
3.1.1	ผลการรวบรวมข้อมูลสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล .....	67
3.1.1.1	ผลการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของสถานีวิทยุกระจายเสียง .....	67
3.1.1.2	ผลการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล .....	73
3.2	ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง	
	และสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลภายในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช.....	74
3.2.1	กระบวนการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน.....	74
3.2.2	ผลการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล.....	74
3.2.2.1	วิธีการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล	74

3.2.2.2 ผลการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียง .....	78
3.2.2.3 ผลการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล .....	80
3.2.3 ผลการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง.....	81
3.2.3.1 จุดสังเกตภายในบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช.....	81
3.2.3.2 จุดสังเกตภายในเขตชุมชนเมืองนครศรีธรรมราช .....	95
3.2.4 ผลการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล.....	124
3.2.5 ผลการวัดกำลังคลื่นวิทยุจากกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ระบบดิจิทัล และกิจการโทรคมนาคม .....	127
3.2.5.1 กระบวนการวัดกำลังคลื่นวิทยุ.....	127
3.2.5.2 ผลการวัดกำลังคลื่นภายในช่วงความถี่ที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกัน จากสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม .....	131
3.2.5.3 ผลการวัดกำลังคลื่นในช่วงความถี่ที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันของกิจการโทรทัศน์ระบบดิจิทัล และกิจการโทรคมนาคม.....	137
3.2.5.4 ผลการวัดกำลังคลื่นในช่วงความถี่ที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันของกิจการโทรคมนาคม .....	140
3.3 ผลการศึกษาข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณโดยใช้วิธีการลงสำรวจในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช .....	144
3.3.1 กระบวนการศึกษาข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศ.....	144
3.3.2 ผลการกำหนดแบบสำรวจข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะ .....	145
3.3.3 ผลการกำหนดสถานีส่งเพื่อเข้าสำรวจข้อมูล.....	147
3.3.4 ผลการลงสำรวจพื้นที่จริงในแต่ละสถานีกลุ่มเป้าหมาย.....	150
3.3.5 สรุปผลข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของสายอากาศแพร่กระจายสัญญาณ .....	161

บทที่ 4 ผลการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ .....	163
4.1 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศ.....	163
4.1.1 ผลการศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศสถานีฐานทั่วไป .....	163
4.1.2 ผลการศึกษาอุปกรณ์สวิตซ์ความถี่ที่มีต่อการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่. 165	
4.1.2.1 ผลการออกแบบสายอากาศไดโพลอย่างง่าย .....	166
4.1.2.2 ผลการจำลองการทำงานสายอากาศไดโพลอย่างง่าย เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ โครงสร้างของสายอากาศ.....	168
4.1.2.3 ผลการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศด้วยอุปกรณ์สวิตซ์ทางกลและทางไฟฟ้า .....	171
4.1.2.4 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยของอุปกรณ์สวิตซ์ที่ส่งผลต่อการทำงานของสายอากาศ	178
4.2 ผลการกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ (Reconfigurable Antenna System Specification) .....	180
4.2.1 การกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ .....	180
4.2.2 ผลการกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ (Reconfigurable Antenna System Specification).....	181
4.2.2.1 ผลการกำหนดช่วงความถี่ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ .....	181
4.2.2.2 ผลการกำหนดกำลังด้านเข้าของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่.....	187
4.2.2.3 ผลการกำหนดพารามิเตอร์ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่.....	187
4.3 ผลการออกแบบและจำลองโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ (A Frequency Reconfigurable Antenna Design and Simulation).....	193
4.3.1 การออกแบบและจำลองโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ .....	193
4.3.2 ผลการออกแบบและจำลองโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่.....	194
4.3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบ.....	195
4.3.2.2 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศ.....	197

4.3.2.3 ผลการสร้างและทดสอบสายอากาศ .....	203
4.3.2.4 สรุป.....	206
4.3.3 ผลการย่อขนาดของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ .....	207
4.3.3.1 ข้อจำกัดพื้นฐานในการย่อขนาดของสายอากาศ .....	207
4.3.3.2 เทคนิคการย่อขนาดของสายอากาศ.....	207
4.3.3.3 ผลการจำลองการย่อขนาดสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่.....	208
4.3.4 ผลการปรับโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ .....	219
4.3.5 ผลการสร้างและทดสอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้โพโลรูปโบว์.....	260
บทที่ 5 ผลการออกแบบและสร้างระบบวิทยุรู้คิดจำลอง .....	282
5.1 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิดจำลอง.....	282
5.2 ระบบสังเกตการณ์ (Observe System).....	283
5.2.1 สถาปัตยกรรมของระบบสังเกตการณ์ .....	283
5.2.2 กระบวนการสังเกตการณ์.....	290
5.2.3 ผลทดสอบระบบสังเกตการณ์ .....	294
5.3 ระบบตัดสินใจ .....	296
5.3.1 การสร้างเกณฑ์การตัดสินใจ.....	297
5.3.2 กระบวนการตัดสินใจ .....	304
5.3.3 ผลการทดสอบของระบบตัดสินใจ เพื่อเลือกใช้งานช่องสัญญาณ .....	307
5.4 ระบบดำเนินการ (Act System) .....	328
5.4.1 สถาปัตยกรรมของระบบ Act.....	328
5.4.2 กระบวนการทำงานของระบบ Act.....	332
5.4.3 ผลการทำงาน of ระบบดำเนินการ .....	336
5.5 ผลการทำงาน of ระบบวิทยุรู้คิดจำลอง .....	350

5.5.1 ระบบรู้คิดจำลอง .....	350
5.5.2 ผลการทำงานของระบบรู้คิดจำลอง .....	351
5.5.3 ผลการทำงานของระบบรู้คิดจำลองร่วมกับสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ .....	365
5.5.3.1 ผลการทดสอบระบบสำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล .....	367
5.5.3.2 ผลการทดสอบระบบสำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. ....	374
5.5.3.3 ผลการทดสอบระบบสำหรับกิจการโทรคมนาคม .....	383
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	391
6.1 บทสรุป.....	391
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	393
บรรณานุกรม.....	394

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 การมอดูเลตระหว่างกันในระบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	11
รูปที่ 2.2 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกันในช่องสัญญาณของสถานีส่งอื่น .....	11
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมวงจรมอดูเลตความถี่ในเครื่องส่งทั่วไป.....	14
รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมเครื่องส่งที่มอดูเลตแบบเวกเตอร์ .....	16
รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความคมของวงจรรองแต่ละแบบเมื่อจำนวนอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น [6] .....	16
รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ.....	17
รูปที่ 2.7 ระยะห่างต่อการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ [6] .....	18
รูปที่ 2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นต่อการเชื่อมต่อร่วม [6] .....	18
รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของระบบวิทยุซอฟต์แวร์ทางทหาร [8].....	21
รูปที่ 2.10 สถาปัตยกรรมของ SDR [9].....	22
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของระบบวิทยุรู้คิด [9] .....	24
รูปที่ 2.12 กระบวนการทำงานของระบบวิทยุรู้คิด [2] .....	25
รูปที่ 2.13 โครงสร้างการทำงานพื้นฐานของระบบกระจายเสียงแบบ FM .....	41
รูปที่ 2.14 สเปกตรัมของสัญญาณเบสแบนด์ของ FM แบบสเตอริโอ.....	43
รูปที่ 2.15 วงจรทรีควมความถี่ (ก) อาศัย Step Recovery Diode.....	44
รูปที่ 2.16 ค่าแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณสำหรับสถานีวิทยุแบบ FM .....	46
รูปที่ 2.17 คุณสมบัติของตัวกรองสัญญาณแบบความถี่กลางของภาครับ .....	51
รูปที่ 2.18 วงจร Pre-emphasis .....	53
รูปที่ 2.19 ผลการตอบสนองของวงจรรองในโดเมนความถี่.....	55
รูปที่ 2.20 หลักการทำงานของ Circulator .....	56
รูปที่ 2.21 แบนด์วิดท์ของสัญญาณโทรทัศน์.....	60
รูปที่ 2.22 การแก้ปัญหาการจัดสรรแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (Federal communications Commission: FCC) [43].....	62
รูปที่ 2.23 แบบจำลองเชิงลำดับชั้น (Hierarchical model) (a) วิธีการผสมผสานแถบความถี่.....	62
รูปที่ 2.24 ไดอะแกรมขั้นตอนการทำงานของวิทยุรู้คิด [43] .....	63



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model : DEM) .....	76
รูปที่ 3.2 กระบวนการระบุตำแหน่งสถานีวิทยุระบบเอฟเอ็มในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช .....	77
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งสถานีวิทยุกระจายเสียงภายในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช .....	78
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งหอบังคับการบินและสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ตั้งอยู่ใกล้เคียง .....	79
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งสถานีโทรทัศน์ดิจิตอลภายในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช .....	80
รูปที่ 3.6 ระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินกับสถานีวิทยุกระจายเสียงมีค่าไม่เกิน 10 กิโลเมตร .....	82
รูปที่ 3.7 สถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากหอบังคับการบินไม่เกิน 6 กิโลเมตร.....	85
รูปที่ 3.8 สถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากหอบังคับการบินไม่เกิน 10 กิโลเมตร.....	86
รูปที่ 3.9 สถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากหอบังคับระหว่าง 6-10 กิโลเมตร .....	87
รูปที่ 3.10 ระดับค่าน้ำหนักของความเข้มสนามของคลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ณ จุดสังเกตเป็น หอบังคับการบิน .....	93
รูปที่ 3.11 ระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz กับสถานีวิทยุกระจายเสียงอื่นๆ มีค่าไม่เกิน 10 กิโลเมตร .....	96
รูปที่ 3.12 กลุ่มสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ไม่เกิน 1 กิโลเมตร .....	99
รูปที่ 3.13 กลุ่มสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ไม่เกิน 2 กิโลเมตร .....	100
รูปที่ 3.14 กลุ่มสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ระหว่าง 1-2 กิโลเมตร.....	101
รูปที่ 3.15 ระดับค่าน้ำหนักของความเข้มสนามของคลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ณ จุดสังเกตบริเวณ สถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz.....	122
รูปที่ 3.16 ระดับค่าน้ำหนักของความเข้มสนามของคลื่นวิทยุจากสถานีโทรทัศน์ดิจิตอล ณ จุดสังเกตเป็น หอบังคับการบิน .....	126
รูปที่ 3.17 SpectrumAnalyzer Tektronix RSA3408A .....	128
รูปที่ 3.18 Handheld Spectrum Analyzer Key sight N3940B.....	128
รูปที่ 3.19 การจัดตั้งสายอากาศรับสำหรับวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ FM บริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช.	128
รูปที่ 3.20 ชุดสายอากาศโมโนโพล SA-7000.....	129
รูปที่ 3.21 สเปกตรัมที่วัดได้เมื่อปรับค่าความถี่ในช่วง 30.0 kHz ถึง 2.0 GHz.....	131

รูปที่ 3.22	สเปกตรัมที่วัดได้เมื่อปรับค่าความถี่ในช่วง เท่ากับ 535 kHz ถึง 1.60 MHz.....	132
รูปที่ 3.23	สเปกตรัมที่วัดได้เมื่อปรับค่า span เท่ากับ 86.0 MHz ถึง 111.0 MHz.....	134
รูปที่ 3.24	กำลังคลื่นแต่ละความถี่ในช่วงวิทยุเอฟเอ็มและความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน .....	135
รูปที่ 3.25	สเปกตรัมความถี่ 123 MHz ณ ช่วงเวลาที่กำลังคลื่นเพิ่มขึ้น.....	136
รูปที่ 3.26	สเปกตรัมความถี่ 123 MHz ณ ช่วงเวลาที่กำลังคลื่นลดลง .....	136
รูปที่ 3.27	สัญญาณที่ทำการตีมอดูเลต .....	137
รูปที่ 3.28	สเปกตรัมที่วัดได้เมื่อปรับค่าความถี่ในช่วง 450 MHz ถึง 800 MHz.....	138
รูปที่ 3.29	สเปกตรัมของกิจการโทรทัศน์ระบบดิจิทัลที่วัดได้เมื่อปรับการ Span เป็นช่วง.....	139
รูปที่ 3.30	สเปกตรัมของกิจการโทรคมนาคมที่วัดได้.....	141
รูปที่ 3.31	สเปกตรัมของกิจการโทรคมนาคมที่วัดได้เมื่อปรับการ Span เป็นช่วง .....	143
รูปที่ 3.32	ตารางเปรียบเทียบอัตราขยายสายอากาศ .....	146
รูปที่ 3.33	รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุ มวล .....	150
รูปที่ 3.34	รูปร่างของสายอากาศของสถานีโมคลานเรดิโอ .....	151
รูปที่ 3.35	รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด .....	153
รูปที่ 3.36	รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุ อ.ส.ม.ท. นครศรีธรรมราช.....	155
รูปที่ 3.37	รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุเทศบาลเมืองปากพูน.....	157
รูปที่ 3.38	รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุพิทักษ์สันติราษฎร์ (สวพ.) นครศรีธรรมราช .....	159
รูปที่ 4.1	ผลการจำลองสายอากาศด้วยขนาดความยาวที่ได้จากการคำนวณ .....	167
รูปที่ 4.2	ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับเปลี่ยนประเภทของโลหะตัวนำ.....	169
รูปที่ 4.3	ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ความหนาของสายอากาศ .....	170
รูปที่ 4.4	ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างจุดป้อนของสายอากาศ .....	170
รูปที่ 4.5	ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ความยาวของสายอากาศ.....	171
รูปที่ 4.6	ลักษณะโครงร่างของสายอากาศที่จะใช้สร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่.....	172
รูปที่ 4.7	ผลการทดสอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เมื่อสวิตซ์ที่ความถี่ 108 MHz .....	175
รูปที่ 4.8	ผลการทดสอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เมื่อสวิตซ์ที่ความถี่ 98 MHz.....	176
รูปที่ 4.9	ผลการทดสอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เมื่อสวิตซ์ที่ความถี่ 88 MHz.....	176
รูปที่ 4.10	ย่านความถี่ของคลื่นวิทยุสำหรับกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ (broadcasting service) และกิจการกระจายเสียงและโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม (broadcasting-satellite service).....	184

รูปที่ 4.11 ย่านความถี่ของคลื่นวิทยุสำหรับกิจการทั้งหมด ยกเว้น กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ (broadcasting service) และกิจการกระจายเสียงและโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม (broadcasting- satellite service).....	185
รูปที่ 4.12 โครงสร้างและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริก .....	195
รูปที่ 4.13 วงจรเสมือนของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกที่มีการป้อนด้วยตัว L.....	195
รูปที่ 4.14 โครงสร้างสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล .....	196
รูปที่ 4.15 ผลกระทบของขนาดความกว้างของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง $\Gamma$ ต่อค่า S11 .....	197
รูปที่ 4.16 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง $\Gamma$ กับไดโพลระนาบด้านใกล้.....	198
รูปที่ 4.17 ผลกระทบของความยาวของส่วนเชื่อมต่อสัญญาณของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง $\Gamma$ .....	199
รูปที่ 4.18 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง $\Gamma$ กับไดโพลระนาบด้านใกล้ต่อค่า S11 .....	200
รูปที่ 4.19 ผลกระทบของความยาวของสตัปปลายเปิดของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง $\Gamma$ ต่อค่า S11 .....	201
รูปที่ 4.20 ผลการจำลอง S11.....	202
รูปที่ 4.21 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น .....	203
รูปที่ 4.22 สายอากาศต้นแบบและโครงพลาสติกจับยึด .....	204
รูปที่ 4.23 ผลการวัด S11.....	205
รูปที่ 4.24 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น .....	205
รูปที่ 4.25 ผลการจำลองขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่ออะลูมิเนียมต่อค่า S11.....	209
รูปที่ 4.26 ผลการจำลองขนาดความยาวของท่ออะลูมิเนียมต่อค่า S11 .....	209
รูปที่ 4.27 ผลการจำลองระยะห่างของจุดป้อนสัญญาณต่อค่า S11.....	210
รูปที่ 4.28 การปรับโครงสร้างเป็นรูปตัว C.....	211
รูปที่ 4.29 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างรูปตัว C.....	211
รูปที่ 4.30 การปรับโครงสร้างเป็นรูปตัว L .....	212
รูปที่ 4.31 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างรูปตัว L .....	212
รูปที่ 4.32 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของโครงสร้างรูปตัว L.....	213
รูปที่ 4.33 การปรับโครงสร้างเป็นรูปตัว Z.....	213
รูปที่ 4.34 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างรูปตัว Z.....	214
รูปที่ 4.35 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของโครงสร้างรูปตัว Z .....	214

รูปที่ 4.36 การปรับโครงสร้างเป็นเส้นวงเวียนไปมา.....	215
รูปที่ 4.37 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างเส้นวงเวียนไปมาแบบสมมาตร.....	216
รูปที่ 4.38 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างเส้นวงเวียนไปมาแบบไม่สมมาตร.....	216
รูปที่ 4.39 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของโครงสร้างเส้นวงเวียนไปมาแบบสมมาตร .....	217
รูปที่ 4.40 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของโครงสร้างเส้นวงเวียนไปมาแบบไม่สมมาตร.....	217
รูปที่ 4.41 สายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่โครงสร้างใช้ท่ออะลูมิเนียม .....	219
รูปที่ 4.42 ผลการจำลอง S11 ของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่โครงสร้างใช้ท่ออะลูมิเนียม .....	219
รูปที่ 4.43 สายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่โครงสร้างใช้ท่ออะลูมิเนียมรูปทรง E.....	220
รูปที่ 4.44 ผลการจำลอง S11 ของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่โครงสร้างใช้ท่ออะลูมิเนียม .....	220
รูปที่ 4.45 สายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง.....	221
รูปที่ 4.46 ผลการจำลอง S11 ของสายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง .....	221
รูปที่ 4.47 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง .....	222
รูปที่ 4.48 ผลการจำลอง S11 ของสายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง .....	223
รูปที่ 4.49 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง .....	223
รูปที่ 4.50 โครงสร้างสายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์.....	225
รูปที่ 4.51 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-1 .....	226
รูปที่ 4.52 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-1 .....	226
รูปที่ 4.53 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-2 .....	227
รูปที่ 4.54 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-2 .....	227
รูปที่ 4.55 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-3 .....	228
รูปที่ 4.56 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-3 .....	228
รูปที่ 4.57 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-4 .....	229
รูปที่ 4.58 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-4 .....	229
รูปที่ 4.59 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-5 .....	230
รูปที่ 4.60 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-5 .....	230
รูปที่ 4.61 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-6 .....	231

รูปที่ 4.62 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-6 .....	231
รูปที่ 4.63 การจัดวางสายอากาศไดโพลรูปีโบว์ 6 อิลิเมนต์ ของกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. ....	232
รูปที่ 4.64 การจำลองโครงสร้างสายอากาศรูปีโบว์จำนวน 6 อิลิเมนต์ กิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. ....	233
รูปที่ 4.65 ผลการจำลอง S11 ของทั้ง 6 อิลิเมนต์.....	233
รูปที่ 4.66 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทั้ง 6 อิลิเมนต์ ของกิจการวิทยุกระจายเสียง เอฟ. เอ็ม. ....	235
รูปที่ 4.67 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-1.....	238
รูปที่ 4.68 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-1 .....	238
รูปที่ 4.69 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-2.....	239
รูปที่ 4.70 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-2 .....	239
รูปที่ 4.71 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-3.....	240
รูปที่ 4.72 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-3 .....	240
รูปที่ 4.73 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-4.....	241
รูปที่ 4.74 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-4 .....	241
รูปที่ 4.75 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-5.....	242
รูปที่ 4.76 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-5 .....	242
รูปที่ 4.77 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-6.....	243
รูปที่ 4.78 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-6 .....	243
รูปที่ 4.79 การจัดวางสายอากาศไดโพลรูปีโบว์ 6 อิลิเมนต์ ของกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล (มุมมองด้านข้าง)..	244
รูปที่ 4.80 การจำลองโครงสร้างสายอากาศไดโพลรูปีโบว์ 6 อิลิเมนต์ ของกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล.....	244
รูปที่ 4.81 ผลการจำลอง S11 ของทั้ง 6 อิลิเมนต์.....	245
รูปที่ 4.82 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทั้ง 6 อิลิเมนต์ .....	247
รูปที่ 4.83 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ Mb-1 .....	250
รูปที่ 4.84 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ Mb-1 .....	250
รูปที่ 4.85 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ Mb-2 .....	251
รูปที่ 4.86 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ Mb-2.....	251
รูปที่ 4.87 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ Mb-3 .....	252
รูปที่ 4.88 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ Mb-3.....	252

รูปที่ 4.89 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ Mb-4 .....	253
รูปที่ 4.90 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ Mb-4 .....	253
รูปที่ 4.91 การจัดวางสายอากาศไดโพล 4 อิลิเมนต์ ของกิจการโทรคมนาคม (มุมมองด้านข้าง) .....	254
รูปที่ 4.92 การจำลองโครงสร้างสายอากาศไดโพล 4 อิลิเมนต์ ของกิจการโทรคมนาคม .....	255
รูปที่ 4.93 ผลการจำลอง S11 ของทั้ง 4 อิลิเมนต์.....	255
รูปที่ 4.94 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทั้ง 4 อิลิเมนต์ .....	256
รูปที่ 4.95 อุปกรณ์สวิตซ์ทางกลที่ใช้สำหรับปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศไดโพลรูปโบว์.....	258
รูปที่ 4.96 วงจรควบคุมการทำงานสวิตซ์ทางกล .....	259
รูปที่ 4.97 โครงสร้างและการจัดตั้งระบบการวัดสายอากาศไดโพลรูปโบว์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ..	260
รูปที่ 4.98 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ FM-1.....	261
รูปที่ 4.99 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ FM-2.....	261
รูปที่ 4.100 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ FM-3 .....	262
รูปที่ 4.101 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ FM-4 .....	262
รูปที่ 4.102 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ FM-5 .....	263
รูปที่ 4.103 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ FM-6 .....	263
รูปที่ 4.104 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปโบว์ .....	267
รูปที่ 4.105 โครงสร้างและการจัดตั้งระบบการวัดสายอากาศไดโพลรูปโบว์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ สำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล.....	268
รูปที่ 4.106 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ DTV-1.....	269
รูปที่ 4.107 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ DTV-2.....	269
รูปที่ 4.108 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ DTV-3.....	270
รูปที่ 4.109 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ DTV-4.....	270
รูปที่ 4.110 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ DTV-5.....	271
รูปที่ 4.111 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ DTV-6.....	271
รูปที่ 4.112 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปโบว์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ ได้ สำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล เมื่อสวิตซ์ให้แต่ละอิลิเมนต์ทำงาน .....	275
รูปที่ 4.113 โครงสร้างสายอากาศไดโพลที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ สำหรับกิจการโทรคมนาคม.....	276
รูปที่ 4.114 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ Mb-1 .....	277

รูปที่ 4.115 ผลการวัด S11 ของอิมพีแดนซ์ Mb-2 .....	277
รูปที่ 4.116 ผลการวัด S11 ของอิมพีแดนซ์ Mb-3 .....	278
รูปที่ 4.117 ผลการวัด S11 ของอิมพีแดนซ์ Mb-4 .....	278
รูปที่ 4.118 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ สำหรับกิจการโทรคมนาคม เมื่อสวิตซ์ให้แต่ละอิมพีแดนซ์ทำงาน .....	281
รูปที่ 5.1 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิดจำลอง .....	283
รูปที่ 5.2 สถาปัตยกรรมของระบบสังเกตการณ์ .....	284
รูปที่ 5.3 การทำงานของตัวประมวล .....	286
รูปที่ 5.4 ผลการเชื่อมต่อระหว่าง MATLAB กับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ผ่านระบบ LAN .....	286
รูปที่ 5.5 การเชื่อมต่อ LabVIEW กับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ .....	287
รูปที่ 5.6 ผลการเชื่อมต่อระหว่าง LabVIEW กับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ผ่าน USB .....	288
รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการทำงานของระบบสังเกตการณ์ .....	290
รูปที่ 5.8 โปรแกรมการทำงานของระบบสังเกตการณ์ .....	291
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบชุดโปรแกรมคำสั่งของกระบวนการสังเกตการณ์ .....	295
รูปที่ 5.10 กระบวนการสังเกตการณ์เข้าใช้ช่องสัญญาณ .....	296
รูปที่ 5.11 การใช้งานเกณฑ์การตัดสินใจ .....	297
รูปที่ 5.12 ค่า MAX-HOLD ที่ใช้ระยะเวลาในการตรวจจับสัญญาณ 3,600 18,000 และ 36,000 มิลลิวินาที .....	299
รูปที่ 5.13 การทับซ้อนของค่ากำลังคลื่นในแต่ละระดับคุณภาพเสียง .....	302
รูปที่ 5.14 โปรแกรมการทำงานของระบบตัดสินใจด้วยเกณฑ์ .....	304
รูปที่ 5.15 RBW 1 kHz Reference value -105 .....	308
รูปที่ 5.16 RBW 1 kHz Reference value -106 .....	308
รูปที่ 5.17 RBW 3 kHz Reference value -102 .....	309
รูปที่ 5.18 RBW 3 kHz Reference value -103 .....	309
รูปที่ 5.19 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 1 .....	311
รูปที่ 5.20 RBW 1 kHz Reference value -105 .....	312
รูปที่ 5.21 RBW 1 kHz Reference value -106 .....	312
รูปที่ 5.22 RBW 3 kHz Reference value -102 .....	313

รูปที่ 5.23 RBW 3 kHz Reference value -103 .....	313
รูปที่ 5.24 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 2 .....	315
รูปที่ 5.25 RBW 1 kHz Reference value -105 .....	316
รูปที่ 5.26 RBW 1 kHz Reference value -106 .....	316
รูปที่ 5.27 RBW 3 kHz Reference value -102 .....	317
รูปที่ 5.28 RBW 3 kHz Reference value -103 .....	317
รูปที่ 5.29 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 3 .....	319
รูปที่ 5.30 RBW 1 kHz Reference value -105 .....	320
รูปที่ 5.31 RBW 1 kHz Reference value -106 .....	320
รูปที่ 5.32 RBW 3 kHz Reference value -102 .....	321
รูปที่ 5.33 RBW 3 kHz Reference value -103 .....	321
รูปที่ 5.34 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 4 .....	323
รูปที่ 5.35 RBW 1 kHz Reference value -105 .....	324
รูปที่ 5.36 RBW 1 kHz Reference value -106 .....	324
รูปที่ 5.37 RBW 3 kHz Reference value -102 .....	325
รูปที่ 5.38 RBW 3 kHz Reference value -103 .....	325
รูปที่ 5.39 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 5 .....	327
รูปที่ 5.40 สถาปัตยกรรมของระบบดำเนินการ .....	328
รูปที่ 5.41 Node Devkit MCU V3.....	329
รูปที่ 5.42 โครงสร้างของ ESP8266EX.....	330
รูปที่ 5.43 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) .....	331
รูปที่ 5.44 ฟังก์ชัน StateON.....	332
รูปที่ 5.45 ฟังก์ชัน STATeOFF .....	333
รูปที่ 5.46 ฟังก์ชัน SendFreq.....	333
รูปที่ 5.47 ฟังก์ชัน SendPower .....	333
รูปที่ 5.48 โปรแกรมการทำงานของระบบดำเนินการ .....	335
รูปที่ 5.49 ช่วงก่อนเริ่มการส่งงาน .....	338
รูปที่ 5.50 ภายใน 10 วินาที หลังจากเริ่มการส่งงาน .....	338



รูปที่ 5.51 ภายใน 15 วินาที หลังจากเสร็จสิ้นการทำงานช่วงที่ 1.....	339
รูปที่ 5.52 ภายใน 20 วินาที หลังจากเสร็จสิ้นการทำงานช่วงที่ 2.....	339
รูปที่ 5.53 หลังจากเสร็จสิ้นการทำงานช่วงที่ 3.....	340
รูปที่ 5.54 การทำงานของระบบ Act สำหรับการปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณของหอบังคับการบิน.....	343
รูปที่ 5.55 ขั้นตอนที่ 1 การติดตั้งระบบการสื่อสารภายในระบบ Act.....	344
รูปที่ 5.56 ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดชุดคำสั่งเริ่มต้นการทำงานของเครื่อง SG.....	344
รูปที่ 5.57 ขั้นตอนที่ 3 และ 4 การรับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียงครั้งที่ 1.....	345
รูปที่ 5.58 ขั้นตอนที่ 3 & 4 การรับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียงครั้งที่ 2.....	346
รูปที่ 5.59 ขั้นตอนที่ 3 & 4 การรับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียงครั้งที่ 3.....	347
รูปที่ 5.60 เปรียบเทียบกับสถานะการทำงาน .....	348
รูปที่ 5.61 แสดงสถานะเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ไม่สามารถควบคุมผ่านตัวเครื่องโดยตรง.....	349
รูปที่ 5.62 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิดจำลอง.....	350
รูปที่ 5.63 กำลังสัญญาณที่ความถี่ 88 MHz ที่เลือกใช้เป็นช่องสัญญาณที่ว่าง .....	351
รูปที่ 5.64 ผลการสังเกตการช่องสัญญาณ 88.00 MHz .....	352
รูปที่ 5.65 ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ 88.00 MHz ในระบบคลาวด์ .....	352
รูปที่ 5.66 ผลการรับข้อมูลช่องสัญญาณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	353
รูปที่ 5.67 ผลการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง -1.0 dBm .....	353
รูปที่ 5.68 ผลการติดตามการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ .....	354
รูปที่ 5.69 หน้าจอเครื่องกำเนิดสัญญาณ เลือกใช้ช่องสัญญาณที่ 2 ความถี่ 88 MHz กำลังส่งที่ -1 dBm .	354
รูปที่ 5.70 ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ 88.00 MHz ในระบบคลาวด์ .....	355
รูปที่ 5.71 ผลการรับข้อมูลช่องสัญญาณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	355
รูปที่ 5.72 ผลการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง 5 dBm .	356
รูปที่ 5.73 ผลการติดตามการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ .....	356
รูปที่ 5.74 การส่งกำลังที่ 5 dBm ความถี่ 88 MHz .....	357
รูปที่ 5.75 กำลังสัญญาณที่ความถี่ 108 MHz ที่เลือกใช้เป็นช่องสัญญาณที่ว่าง .....	358
รูปที่ 5.76 ผลการสังเกตการช่องสัญญาณ 108.00 MHz .....	359
รูปที่ 5.77 ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ 108.00 MHz ในระบบคลาวด์ .....	359

รูปที่ 5.78 ผลการรับข้อมูลช่องสัญญาณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	360
รูปที่ 5.79 ผลการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง -1.0 dBm .....	360
รูปที่ 5.80 ผลการติดตามการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ .....	361
รูปที่ 5.81 หน้าจอเครื่องกำเนิดสัญญาณ เลือกใช้ช่องสัญญาณที่ 2 ความถี่ 108 MHz กำลังส่งที่ -1 dBm	361
รูปที่ 5.82 ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ 108.00 MHz ในระบบคลาวด์.....	362
รูปที่ 5.83 ผลการรับข้อมูลช่องสัญญาณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ .....	362
รูปที่ 5.84 ผลการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง 5 dBm	363
รูปที่ 5.85 ผลการติดตามการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ .....	363
รูปที่ 5.86 การส่งกำลังที่ 5 dBm ความถี่ 108 MHz.....	364
รูปที่ 5.87 ผลการติดตั้งวิทยุร่วมกับสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่.....	366
รูปที่ 5.88 ผลการทำงานของระบบสังเกตการณ์กิจการโทรทัศน์ดิจิทัล .....	368
รูปที่ 5.89 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 1.....	369
รูปที่ 5.90 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 2.....	370
รูปที่ 5.91 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 3.....	371
รูปที่ 5.92 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 4.....	372
รูปที่ 5.93 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 5.....	373
รูปที่ 5.94 ผลการทำงานของระบบสังเกตการณ์สำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม.....	375
รูปที่ 5.95 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 1 .....	376
รูปที่ 5.96 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 2 .....	377
รูปที่ 5.97 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 3 .....	378
รูปที่ 5.98 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 4 .....	379
รูปที่ 5.99 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 5 .....	380
รูปที่ 5.100 ผลการทดสอบกิจการ M กรณีที่ 6 .....	381
รูปที่ 5.101 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 7 .....	382
รูปที่ 5.102 ผลการทำงานของระบบสังเกตการณ์สำหรับกิจการโทรคมนาคม.....	384
รูปที่ 5.103 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 1.....	385
รูปที่ 5.104 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 2.....	386

รูปที่ 5.105 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 3.....	387
รูปที่ 5.106 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 4.....	388
รูปที่ 5.107 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 5.....	389
รูปที่ 5.108 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 6.....	390

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยเทคนิคการสวิตช์ความถี่แบบต่างๆ.....	31
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างคุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณ [37].....	34
ตารางที่ 2.3 ค่าความเข้มของสนามที่กำหนดเพื่อการกระจายเสียงและโทรทัศน์ [38] .....	38
ตารางที่ 2.4 ระยะห่างต่ำสุดระหว่างเครื่องส่งกระจายเสียงเอฟเอ็ม .....	58
ตารางที่ 2.5 การแพร่ความถี่แปลกปลอมสูงสุด.....	59
ตารางที่ 2.6 มาตรฐานทางเทคนิค NTSC ของการออกอากาศโทรทัศน์แบบแอนะล็อก .....	59
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสถานีวิทยุกระจายเสียงหลัก ในเขตพื้นที่ จังหวัดนครศรีธรรมราช.....	68
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลกิจการวิทยุกระจายเสียงที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการฯ ในเขตพื้นที่ จังหวัด นครศรีธรรมราช .....	69
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลหลัก ในเขตพื้นที่ จังหวัดนครศรีธรรมราช.....	73
ตารางที่ 3.4 ระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุกระจายเสียงกับจุดสังเกต (หอบังคับการบิน) .....	83
ตารางที่ 3.5 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีระยะห่างไม่เกิน 6 กิโลเมตร จากจุดสังเกตบริเวณหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช .....	88
ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกันของสถานีวิทยุกระจายเสียง เอฟเอ็ม บริเวณหอบังคับการบิน ซึ่งมีระยะห่างไม่เกิน 10 กิโลเมตร .....	89
ตารางที่ 3.7 ผลการคำนวณหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกัน ของสถานีวิทยุกระจายเสียง เอฟเอ็ม บริเวณหอบังคับการบิน ซึ่งมีระยะห่างมากกว่า 6 กิโลเมตร แต่ไม่เกิน 10 กิโลเมตร .....	90
ตารางที่ 3.8 ผลการจัดลำดับค่าความถี่ที่มีความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานี วิทยุกระจายเสียง โดยกำหนดจุดสังเกต หอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช .....	94
ตารางที่ 3.9 ระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz กับสถานีวิทยุกระจายเสียง อื่นในเขตชุมชนเมือง .....	97
ตารางที่ 3.10 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีระยะห่างไม่ เกิน 1 กิโลเมตร จากจุดสังเกตบริเวณสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz .....	102
ตารางที่ 3.11 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีระยะห่างไม่ เกิน 2 กิโลเมตร จากจุดสังเกตบริเวณสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz .....	104

ตารางที่ 3.12 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีระยะห่างระหว่าง 1-2 กิโลเมตร จากจุดสังเกตบริเวณสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz....	111
ตารางที่ 3.13 ระยะห่างระหว่างสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ภายในเขตเมืองกับจุดสังเกต (หอบังคับการบิน) ....	124
ตารางที่ 3.14 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ภายในเขตเมือง จากจุดสังเกตบริเวณหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช.....	125
ตารางที่ 3.15 สรุปผลการสำรวจข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของสายอากาศแพร่สัญญาณ ณ สถานีวิทยุกระจายเสียงระบบ FM.....	161
ตารางที่ 3.16 คุณลักษณะสายอากาศสถานีฐานสำหรับกิจการโทรทัศน์ระบบดิจิทัล.....	162
ตารางที่ 3.17 คุณลักษณะสายอากาศสถานีฐานสำหรับกิจการโทรคมนาคม.....	162
ตารางที่ 4.1 สายอากาศสถานีฐานทั่วไปของระบบวิทยุ FM [62].....	164
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศสถานีฐานระบบวิทยุ FM.....	165
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณขนาดความยาวของสายอากาศไดโพลอย่างง่าย .....	167
ตารางที่ 4.4 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่.....	173
ตารางที่ 4.5 นิยามของคำย่อที่ใช้แสดงผลการทดลอง.....	174
ตารางที่ 4.6 ความยาวทางกายภาพและความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศที่แต่ละความถี่ .....	174
ตารางที่ 4.7 ผลการกำหนดช่วงความถี่ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่.....	186
ตารางที่ 4.8 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ ย่านความถี่ (47-68 MHz) Band I .....	188
ตารางที่ 4.9 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุกระจายเสียง ระบบ FM ย่านความถี่ (88-108 MHz).....	188
ตารางที่ 4.10 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ ย่านความถี่ (174-230 MHz) Band III.....	189
ตารางที่ 4.11 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ ย่านความถี่ (470-790 MHz) Band IV และ ย่านความถี่ (895-1164 MHz) Band V.....	190
ตารางที่ 4.12 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ (895-1164 MHz).....	191
ตารางที่ 4.13 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ (1920-2125 MHz).....	191

ตารางที่ 4.14 ค่าขนาดที่เหมาะสมของพารามิเตอร์โครงสร้างสายอากาศ .....	202
ตารางที่ 4.15 อีลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลรูปร่างแบนสำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม .....	224
ตารางที่ 4.16 ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลรูปร่างแบนสำหรับกิจการกระจายเสียงเอฟ.เอ็ม. .....	236
ตารางที่ 4.17 อีลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลรูปร่างแบนสำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล .....	237
ตารางที่ 4.18 ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลรูปร่างแบนสำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล .....	248
ตารางที่ 4.19 อีลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลสำหรับกิจการโทรคมนาคม (Mobile 4G).....	249
ตารางที่ 4.20 ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลสำหรับกิจการโทรคมนาคม .....	257
ตารางที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างรีเลย์และการควบคุมสวิตซ์ทางไกล .....	259
ตารางที่ 5.1 ระดับของคุณภาพเสียง.....	300
ตารางที่ 5.2 จำนวนของช่องสัญญาณในแต่ละกลุ่มคุณภาพเสียง .....	301
ตารางที่ 5.3 ค่าระดับกำลังคลื่นต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละระดับคุณภาพเสียง .....	302
ตารางที่ 5.4 เกณฑ์การประเมินสถานะการใช้ช่องสัญญาณ.....	303
ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ม.วลัยลักษณ์ .....	310
ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ม.วลัยลักษณ์ .....	314
ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ สนามบินนครศรีธรรมราช .....	318
ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ จุดทดสอบบริเวณใกล้สำนักงาน กสทช. เขต 12.....	322
ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ บริเวณชุมชนเมืองนครศรีธรรมราช .....	326
ตารางที่ 5.10 ตารางการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ .....	336
ตารางที่ 5.11 ค่าความถี่ของช่องสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ.....	342

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันระบบสื่อสารไร้สายภายในประเทศไทยเติบโตอย่างรวดเร็วแบบก้าวกระโดด จากเดิมที่สื่อสารโดยใช้เสียงเพียงอย่างเดียว มาเป็นการส่งข้อมูลมัลติมีเดียด้วยอัตราความเร็วสูง ทำให้ปริมาณความต้องการใช้แถบความถี่ (spectrum frequency) เพิ่มสูงขึ้น แต่จำนวนของแถบความถี่ที่กำหนดและอนุญาตให้ใช้งานสำหรับกิจการแต่ละประเภทมีอยู่จำกัด เช่น กิจการกระจายเสียงของวิทยุ กิจการโทรทัศน์ หรือ กิจการโทรคมนาคมที่รวมถึง โทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบจีเอสเอ็ม (GSM) อินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย (Wi-Fi) การสื่อสารข้อมูลดิจิทัลความเร็วสูงแบบไร้สาย (WiMAX) เทคโนโลยีบลูทูท (Bluetooth) เทคโนโลยีจีพีเอส (GPS) เทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra wideband technology) เทคโนโลยีการสื่อสารในยุคที่ 3 (3G) และเทคโนโลยีการสื่อสารในยุคที่ 4 (4G หรือ LTE) เป็นต้น ทำให้เกิดการขาดแคลนแถบความถี่สำหรับรองรับจำนวนผู้ให้บริการแต่ละกิจการ ซึ่งผู้ให้บริการบางกิจการอาจใช้งานแถบความถี่ที่เหลื่อมล้ำกับแถบความถี่ข้างเคียง ส่งผลให้เกิดปัญหาของการรบกวนกันของคลื่นสัญญาณแต่ละกิจการ หรือบางครั้งคลื่นสัญญาณของแต่ละกิจการที่ส่งออกมาเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน (Intermodulation) เกิดแถบความถี่ใหม่ที่รบกวนกิจการอื่น ยกตัวอย่างเช่น กิจการกระจายเสียงวิทยุที่อยู่ใกล้กันทำให้เกิดการมอดูเลตระหว่างกัน และผลิตแถบความถี่ที่ไปรบกวนแถบความถี่ของวิทยุการบิน ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเป็นเวลานานและยังคงต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน แม้จะมีหน่วยงานที่คอยกำกับดูแลและจัดสรรแถบความถี่อยู่ก็ตาม

วิธีการแก้ไขปัญหาของการบริหารจัดการสรรแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัด และปัญหาของการเกิดมอดูเลตระหว่างกัน ที่ส่งผลต่อการรบกวนแถบความถี่ข้างเคียง มีการทำวิจัยมาอย่างต่อเนื่องทั้งในส่วนของต่างประเทศและภายในประเทศเอง วิธีการที่นำมาใช้ ได้แก่ การปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันของการส่งรับคลื่นความถี่ การใช้สายอากาศระบบไดเวอร์ซิตี (Diversity) การเข้ารหัสสัญญาณ หรือ การใช้สายอากาศแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra wideband antenna) จะเห็นได้ว่า วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวมานั้น ล้วนแต่ตอบโจทย์ปัญหาเพียงแค่ปัญหาใดปัญหาหนึ่งเท่านั้น เช่น วิธีการใช้สายอากาศแถบความถี่กว้างยิ่งยวด เป็นการแก้ปัญหาในส่วนของการจัดสรรแถบความถี่ที่ไม่เพียงพอ จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ในกรณีที่สูงขึ้นไป แต่กลับไม่สามารถแก้ปัญหาของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันได้ เป็นต้น แต่ปัจจุบันมีการวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับวิทยุรู้คิด (Cognitive radio) อย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถตอบโจทย์ปัญหาที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในปัจจุบันได้ดี

เนื่องจากวิทยุรู้คิดมีหลักการใช้งานแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยการเข้าถึงแถบความถี่แบบไดนามิก (Dynamic spectrum access) นั่นคือ วิทยุรู้คิดจะทำการตรวจสอบข้อมูลก่อนว่า ณ บริเวณและช่วงเวลาดังกล่าว มีแถบความถี่ใดบ้างที่กำลังใช้งาน ประสิทธิภาพการส่งคลื่นเป็นเช่นไร ช่วงกว้างของแถบความถี่ที่กำลังใช้งาน กำลังส่งของแถบความถี่ที่กำลังใช้งาน การมอดูเลตของแถบความถี่ที่กำลังใช้งาน เป็นต้น แล้วจึงทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์สำหรับการส่งคลื่นไปใช้ในช่องแถบความถี่ที่ว่างและไม่มีการใช้งาน ณ บริเวณและช่วงเวลาดังกล่าว ดังนั้น ข้อดีของระบบวิทยุรู้คิด คือ สามารถใช้งานแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ลดการรบกวนกันของคลื่นความถี่ข้างเคียง และลดการเกิดมอดูเลตระหว่างกันได้

ระบบวิทยุรู้คิดมีองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนของการตรวจสอบข้อมูลบริเวณที่ใช้งาน และ ส่วนของการปรับเปลี่ยนรูปแบบพารามิเตอร์สำหรับการส่งคลื่น ในส่วนแรกมักใช้สายอากาศความถี่กว้างยิ่งยวด เพื่อให้ครอบคลุมช่วงความถี่กว้างในการตรวจสอบว่ามีช่วงความถี่ใดที่ไม่ถูกใช้งานในบริเวณดังกล่าว ณ ช่วงเวลานั้น ซึ่งสายอากาศความถี่กว้างยิ่งยวดมีการวิจัยและนำเสนออย่างแพร่หลายทั้งภายนอกและภายในประเทศ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในส่วนที่สองของระบบวิทยุรู้คิด ในส่วนของการออกแบบและพัฒนาสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ (Frequency reconfigurable antenna) ข้อดีของสายอากาศประเภทดังกล่าวคือ สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่กว้าง ซึ่งแต่ละช่วงความถี่ไม่ได้ทำงานพร้อมกัน สายอากาศจะปรับเปลี่ยนช่วงความถี่ด้วยการสวิตซ์สถานะเปิด-ปิดของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์จำพวก พินไดโอด (Pin diode) หรือ อุปกรณ์ไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro Electro Mechanical systems: MEMS) โดยที่ขนาดและโครงสร้างของสายอากาศยังคงเดิม ซึ่งสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ต้นแบบที่ได้จากการวิจัย คาดว่าจะนำไปใช้ร่วมกับสายอากาศความถี่กว้างยิ่งยวดที่ได้มีการวิจัยก่อนหน้านี้ เพื่อสร้างระบบวิทยุรู้คิดต่อไปในภายหน้า



## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. สํารวจและรวบรวมข้อมูลจำเพาะของสายอากาศที่มีการใช้งานจริงในระบบวิทยุกระจายเสียงระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย โดยลงพื้นที่ตัวอย่างในจังหวัดนครศรีธรรมราช
2. ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศ และนำเสนอวิธีการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ สำหรับใช้งานร่วมกับระบบวิทยุรู้คิดในช่วงความถี่ของระบบวิทยุกระจายเสียง ระบบดิจิทัลโทรทัศน์ และระบบการสื่อสารไร้สาย
3. สร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ต้นแบบ ทดสอบคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศต้นแบบ
4. ออกแบบการทดสอบและทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศต้นแบบ ถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด

## 1.3 ขอบเขตและกิจกรรมการดำเนินงาน

1. สํารวจข้อมูลจำเพาะของสายอากาศที่มีการใช้งานจริงในปัจจุบันของระบบวิทยุกระจายเสียงระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย ในพื้นที่ตัวอย่างของจังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อนำข้อมูลจำเพาะที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่
2. ศึกษาพารามิเตอร์หรือปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ สำหรับใช้ออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ให้สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ โดยที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังคงเดิมทุกความถี่ที่ปรับเปลี่ยนไป
3. สร้างสายอากาศต้นแบบที่ได้จากการออกแบบ ทดสอบคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศต้นแบบ ได้แก่ การสูญเสียย้อนกลับ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบความสอดคล้องระหว่างผลการทดสอบกับผลการออกแบบ
4. ออกแบบการทดสอบและทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศต้นแบบ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้และประสิทธิภาพของสายอากาศต้นแบบในการนำไปใช้ร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลทางเทคนิคซึ่งเป็นข้อมูลการใช้งานจริงที่สามารถนำไปใช้ศึกษาเป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนาสายอากาศปรับเปลี่ยนช่วงความถี่ให้เหมาะสม

2. แนวทางการวิจัยและพัฒนาสายอากาศปรับเปลี่ยนช่วงความถี่สำหรับการสร้างระบบวิทยุรู้คิดต้นแบบที่สามารถประยุกต์ใช้กับงานกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม
3. สายอากาศต้นแบบสำหรับการต่อยอดการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิดที่สามารถประยุกต์ใช้กับงานกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม

### 1.5 กรอบแนวคิด

1. สํารวจและรวบรวมข้อมูลจำเพาะของสายอากาศที่ใช้งานจริง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกับงานวิจัยจากการทบทวนวรรณกรรม สำหรับการสร้างแนวทางการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ให้สอดคล้องกับความต้องการจริงในปัจจุบัน
2. ออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ด้วยเทคนิคการออกแบบ ซึ่งอาจแบ่งเป็น 2 แนวทาง โดยแนวทางแรกเป็นการออกแบบด้วยแนวทางสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่แบบหลายช่วงความถี่ (Multiband reconfigurable antenna) และแนวทางที่สองเป็นการออกแบบด้วยแนวทางสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่แบบช่วงความถี่กว้าง (Wideband reconfigurable antenna) อย่างไรก็ตามแนวทางการออกแบบจะขึ้นอยู่กับผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสำรวจความต้องการก่อนหน้า
3. ศึกษาและออกแบบสายอากาศต้นแบบด้วยการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ให้สอดคล้องตามความต้องการ
4. สร้างสายอากาศต้นแบบด้วยโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า
5. ทดสอบคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศต้นแบบ ได้แก่ การสูญเสียย้อนกลับ แบนด์วิธ อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เพื่อปรับปรุงให้สอดคล้องตามความต้องการโดยเปรียบเทียบด้วยผลจากการจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์
6. ออกแบบการทดสอบและสร้างระบบทดสอบ สำหรับศึกษาประสิทธิภาพของสายอากาศต้นแบบที่มีความเป็นไปได้ในการใช้ร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด

### 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ปีที่ 1 เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. จัดทำแผนปฏิบัติงานตลอดโครงการและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง												
2. จัดซื้อครุภัณฑ์และวางแผนการลงสำรวจพื้นที่โดยการเข้าหาหรือกับหน่วยงาน กสทช. จังหวัดนครศรีธรรมราช												
3. ลงพื้นที่สำรวจข้อมูลจำเพาะของสายอากาศที่ใช้งานจริงปัจจุบันและศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศ												
4. ออกแบบและจำลองโครงสร้างของสายอากาศ												
5. ออกแบบวงจรไบอัส												
6. สร้างสายอากาศตามโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบ												
7. ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศเปรียบเทียบกับผลการจำลอง												

กิจกรรม	ปีที่ 2 เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
8. ปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศกรณีไม่เป็นไปตามผลการจำลอง												
9. สร้างระบบทดสอบและออกภาคสนามทดสอบประสิทธิภาพสายอากาศสำหรับใช้งานร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด												
10. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์พร้อมสายอากาศต้นแบบพร้อมทั้งเขียนบทความวิชาการหรือยื่นขอจดสิทธิบัตร												

### 1.7 งบประมาณโครงการ

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
ค่าตอบแทนบุคลากร	792,000
ค่าใช้สอยหรือค่าดำเนินการ	103,300
ค่าวัสดุ	200,000
ค่าครุภัณฑ์วิจัย	1,150,000
ค่าบริหารจัดการโครงการ (7%)	157,171
<b>รวมทั้งสิ้น</b>	<b>2,402,471</b>

## บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้ได้ถูกทบทวนและประมวลไว้ในบทนี้ ซึ่งครอบคลุมประเด็นปัญหาที่กำลังเกิดขึ้นในระบบวิทยุกระจายเสียง ระบบดิจิทัลโทรทัศน์ และระบบการสื่อสารไร้สาย ทั้งนี้จะมุ่งเน้นประเด็นที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแพร่สัญญาณบนสถานีฐานของระบบวิทยุกระจายเสียง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการออกแบบสายอากาศ รวมทั้งการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับหลักการออกแบบระบบวิทยุรู้คิด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจำลองการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ในระบบวิทยุรู้คิด ซึ่งได้วิเคราะห์ในแต่ละประเด็น ไว้ดังนี้

1. การมอดูเลตระหว่างกัน (Intermodulation) ซึ่งได้ศึกษานิยามและลักษณะของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน เพื่อเข้าใจและสามารถวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นบนสถานีฐานของระบบวิทยุกระจายเสียง ระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย
2. แนวทางการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิด ซึ่งได้ศึกษาและรวบรวมการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิดจากอดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่อเข้าใจถึงแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต ซึ่งทำให้ทราบว่า ยังคงมีความต้องการสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่
3. สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ซึ่งได้ศึกษาเทคนิคการออกแบบเพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานต่อไป
4. คุณลักษณะของสายอากาศแพร่สัญญาณสำหรับการใช้งานในระบบวิทยุกระจายเสียง ระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ของโครงการนี้

## 2.1 การมอดูเลตระหว่างกัน (Intermodulation)

### 2.1.1 ความสำคัญและนิยาม

ระบบวิทยุสื่อสาร (Radio communication) และระบบวิทยุกระจายเสียง (Radio broadcasting) จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สื่อสารจำนวนมาก ประสิทธิภาพของระบบจึงแปรตามคุณภาพของสัญญาณที่เกิดจากการประมวลผลของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สื่อสารเหล่านั้น สัญญาณขาออกของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นจึงแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มสัญญาณที่ต้องการให้เกิดขึ้น และกลุ่มสัญญาณที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นหรือเรียกกันว่า “สัญญาณรบกวน” คุณภาพของสัญญาณขาออกจึงแปรตามอัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าของสัญญาณที่ต้องการกับกำลังไฟฟ้าของสัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนมีด้วยกันหลายประเภท เช่น สัญญาณรบกวนร่วมช่อง (Co-channel interference) สัญญาณรบกวนช่องข้างเคียง (Adjacent channel interference) สัญญาณรบกวนที่เกิดจากมนุษย์ (Manmade interference) และสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกัน (Intermodulation interference) เป็นต้น ซึ่งแต่ละประเภทเกิดขึ้นจากสาเหตุที่แตกต่างกัน ดังนั้น จึงมีความพยายามพัฒนาวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนในแต่ละประเภทอย่างต่อเนื่อง

ด้วยระบบวิทยุสื่อสาร (Radio communication) และระบบวิทยุกระจายเสียง (Radio broadcasting) มีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของจำนวนแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุหรือสถานีออกอากาศ และจำนวนแถบความถี่ที่อนุญาตให้ใช้งาน จึงมีสถานีออกอากาศเพิ่มขึ้นจำนวนมากตามไปด้วย และล้วนแล้วจะตั้งอยู่อย่างหนาแน่นภายในบริเวณชุมชน จึงมักจะเกิดการรบกวนกันระหว่างสถานีออกอากาศในแต่ละกิจการ ซึ่งประเภทของสัญญาณรบกวนที่ส่งผลกระทบต่อรุนแรง คือ สัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกัน ด้วยเหตุนี้ โครงการนี้จึงมีความสนใจและศึกษาลักษณะของการเกิดสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกันในแต่ละช่วงความถี่ที่มีการใช้งานในแต่ละกิจการ

สัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกัน เป็นสัญญาณรบกวนสำคัญที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณสองสัญญาณที่มีความถี่ต่างกันภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear devices) เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ และวงจรรวม (Integrated circuits) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณขาออกของอุปกรณ์เหล่านี้จะมีค่าความถี่ฮาร์โมนิก (Harmonic) อื่นที่นอกเหนือไปจากสัญญาณขาเข้า และมีคุณสมบัติไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณขาเข้า [1] สัญญาณขาเข้าที่เกิดการรวมกันของสองสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน สามารถแสดงดังสมการ

$$x(t) = A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t \quad (2.1)$$

เมื่อสัญญาณนี้ถูกป้อนเข้าไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น จึงเกิดสัญญาณขาออก ซึ่งบรรยายด้วยสมการอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series)  $y(t) = \alpha_0 + \alpha_1 x(t) + \alpha_2 x^2(t) + \alpha_3 x^3(t) + \dots$  ดังแสดงในสมการ

$$y(t) = \alpha_0 + \alpha_1 (A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t) + \alpha_2 (A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t)^2 + \alpha_3 (A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \cos \omega_2 t)^3 + \dots \quad (2.2)$$

จากสมการ (2) สัญญาณขาออกสามารถแจกแจงให้อยู่ในเทอมของ  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  ดังแสดงในสมการ

$$y(t) = y_0(t) + y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) + \dots + y_n(t) \quad (2.3)$$

โดยกำหนดให้  $y_0(t)$  คือ เทอมที่ประกอบด้วยฮาร์โมนิกพื้นฐาน (Fundamental harmonic) ของสัญญาณขาเข้า ดังแสดงในสมการ

$$y_0(t) = \left( \alpha_1 A_1 + \frac{3}{4} \alpha_3 A_1^3 + \frac{3}{2} \alpha_3 A_1 A_2^2 \right) \cos(\omega_1 t) + \left( \alpha_1 A_2 + \frac{3}{4} \alpha_3 A_2^3 + \frac{3}{2} \alpha_3 A_2 A_1^2 \right) \cos(\omega_2 t) \quad (2.4)$$

และ  $y_1(t)$   $y_2(t)$  และ  $y_3(t)$  เป็นเทอมที่สัญญาณขาออกประกอบด้วยผลรวมของการมอดูเลตระหว่างกัน ซึ่งแสดงดังสมการ

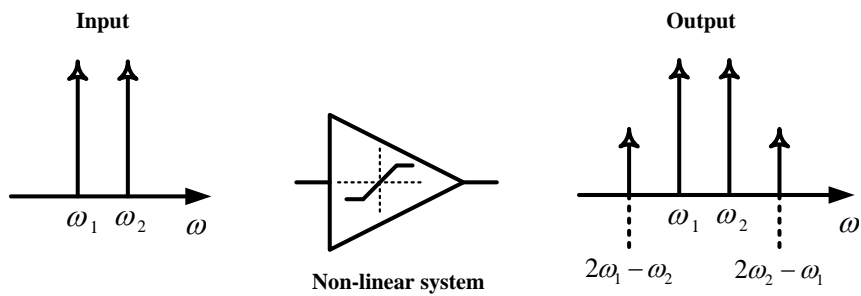
$$y_1(t) = \alpha_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \alpha_2 A_1 A_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t \quad (2.5)$$

$$y_2(t) = \frac{3\alpha_3 A_1^2 A_2}{4} \cos(2\omega_1 + \omega_2)t + \frac{3\alpha_3 A_1^2 A_2}{4} \cos(2\omega_1 - \omega_2)t \quad (2.6)$$

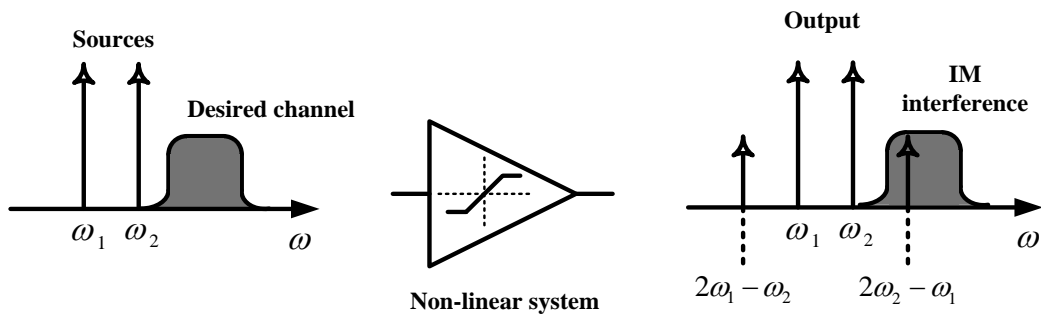
$$y_3(t) = \frac{3\alpha_3 A_2^2 A_1}{4} \cos(2\omega_2 + \omega_1)t + \frac{3\alpha_3 A_2^2 A_1}{4} \cos(2\omega_2 - \omega_1)t \quad (2.7)$$

จากสมการ (5) - (7) จะเห็นได้ว่า สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีความถี่แตกต่างกัน แต่มีส่วนหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อมากที่สุด คือ สัญญาณรบกวนที่มีค่าความถี่  $2\omega_1 - \omega_2$  และ  $2\omega_2 - \omega_1$  โดยมักจะนิยมเรียกว่า สัญญาณผลรวมลำดับที่สาม (The third-order products) ซึ่งค่าความถี่ของสัญญาณรบกวนทั้งสองนี้ จะเกิดขึ้นโดยที่สัญญาณหนึ่งมีค่าความถี่ต่ำกว่าสัญญาณความถี่  $\omega_1$  และอีกสัญญาณหนึ่งมีค่าความถี่สูงกว่าสัญญาณความถี่  $\omega_2$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1





รูปที่ 2.1 การมอดูเลตระหว่างกันในระบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.2 สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการการมอดูเลตระหว่างกันในช่วงสัญญาณของสถานีส่งอื่น

เมื่อสถานีออกอากาศให้กำเนิดสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกัน จึงทำให้ส่งผลกระทบต่อระบบความถี่วิทยุ (RF system) โดยเฉพาะผลรวมลำดับที่สาม (The third-order products) เนื่องจากค่าความถี่ใหม่ของสัญญาณรบกวนเหล่านี้ มีค่าอยู่ในช่วงความถี่ที่สถานีอื่นกำลังใช้เป็นช่องสัญญาณในการออกอากาศตามรูปที่ 2.2 ดังนั้น สัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกันที่เกิดขึ้นจึงกลายเป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการในช่องสัญญาณที่กำลังใช้งานอยู่นั่นเอง

### 2.1.2 สาเหตุการเกิดสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกัน

สัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกันพบได้ในระบบความถี่วิทยุทั่วไป ซึ่งมีด้วยกันหลายสาเหตุ โดยสามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่มหลักๆ ตามลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ [2], [3] ดังนี้

- ภาคส่ง (Transmitter generation)

การเกิดสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกันในกลุ่มนี้ มักเกิดขึ้นบนสถานีส่งที่ตั้งอยู่ใกล้กัน ยกตัวอย่างเช่น สถานีส่ง A และ B ทำการกระจายเสียงในเวลาเดียวกัน ซึ่งในขณะที่สถานีส่ง A กำลังส่งนั้น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสายอากาศภายในสถานีจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับ แต่ในขณะนั้นก็ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณจากสถานี B ด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้น ภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และสายอากาศบนสถานี A จะเกิดการรวมกันของสัญญาณทั้งสองความถี่ และให้กำเนิดสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกัน ดังนั้น บนขาออกของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงปรากฏทั้งสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณรบกวนในเวลาเดียวกัน ผลรวมของสัญญาณทั้งสองนี้จะมีกำลังไฟฟ้าสูงขึ้นหลังจากผ่านวงจรขยายภาคสุดท้ายก่อนออกอากาศ ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนนี้จะแปรตามระดับความแรงของสัญญาณ (Signal strength) จากสถานี B จึงมักจะพบสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกันในกลุ่มนี้ได้บ่อยในบริเวณที่สถานีอยู่หนาแน่น อย่างไรก็ตาม สัญญาณรบกวนนี้บนสถานีภาคส่งสามารถควบคุมและกำจัดได้โดยง่าย

- ภาครับ (Receiver generation)

การเกิดสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกันในกลุ่มนี้ มักเกิดขึ้นบนอุปกรณ์รับสัญญาณที่สามารถรับสัญญาณได้มากกว่าหนึ่งสัญญาณ สัญญาณเหล่านั้นจะเกิดการผสมกันภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น และได้รับการขยายกำลังไฟฟ้าไปด้วยกัน ดังนั้น กำลังไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะทำให้เครื่องรับมีระดับสัญญาณพื้นรบกวน (Noise floor) แ่ลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "Desensitization" ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอัตราขยายอัตโนมัติ (Automatic gain control) ให้มีอัตราขยายลดลง ทำให้ความสามารถในการรับสัญญาณที่ต้องการของเครื่องรับลดลงตามไปด้วย

- ปัจจัยภายนอก (External generation)

การเกิดสัญญาณรบกวนการมอดูเลตระหว่างกันในกลุ่มนี้ มักเกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อที่หลวม ขนาดที่ไม่เหมาะสม ผิวโลหะเสียรูปโดยถูกกัดกร่อน และตรงบริเวณรอยต่อทางไฟฟ้า เช่น น็อต จุดบัดกรีหรือจุดเชื่อมที่เสื่อมสภาพ เสาลโลหะติดตั้งสายอากาศ เป็นต้น ทำให้อุปกรณ์ตัวนั้นประพุดิตัวเสมือนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น เมื่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้รับสัญญาณมากกว่าหนึ่งสัญญาณที่มีความถี่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกลุ่มนี้ขึ้น ดังนั้น สัญญาณรบกวนกลุ่มนี้จึงค่อนข้างเป็นไปได้ยากที่จะวิเคราะห์หาสาเหตุ และทำนายผลกระทบที่จะเกิดขึ้น

### 2.1.3 กรณีตัวอย่างของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน

ปัญหาการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันที่พบมากและบ่อยครั้งในแทบทุกประเทศ คือ การมอดูเลตระหว่างกันที่กระทบกับการสื่อสารของระบบการบิน ระหว่างหอบังคับการที่ควบคุมการบินและเครื่องบินที่กำลังจะขึ้นบิน หรือลงจอด ณ บริเวณลานบิน ตัวอย่างกรณีศึกษา เช่น สนามบินลิสบอน ประเทศโปรตุเกส [4] ซึ่งใช้ความถี่ 118.1 เมกกะเฮิร์ตซ์ ในการสื่อสารระหว่างหอบังคับการและเครื่องบิน ถูกรบกวนโดยสถานีวิทยุเอฟเอ็ม 2 สถานี ที่ใช้ความถี่ 104.3 เมกกะเฮิร์ตซ์ และความถี่ 90.4 เมกกะเฮิร์ตซ์ จะเห็นได้ว่าความถี่ของสถานีวิทยุเอฟเอ็มไม่ได้ตรงกับความถี่ที่สนามบินใช้ แต่เกิดการรบกวนขึ้น เนื่องจากสถานีวิทยุทั้งสองสถานีใช้สายอากาศในการออกอากาศที่ติดตั้งบนหอกระจายสัญญาณเดียวกัน จากการวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้น สาเหตุอาจเกิดจากผลรวมลำดับที่สามของความถี่คลื่นวิทยุเอฟเอ็มทั้งสอง ทำให้เกิดการมอดูเลตระหว่างกันในย่านความถี่ที่สนามบินใช้ ดังความสัมพันธ์นี้

$$2\omega_2 - \omega_1 = (2 \times 104.3) - 90.4 = 118.2 \text{ MHz}$$

จะเห็นได้ว่า จากความสัมพันธ์ ความถี่ที่ได้ต่างจากความถี่ที่สนามบินใช้อยู่ 0.1 เมกกะเฮิร์ตซ์ (118.2-118.1=0.1) แต่เนื่องจากความกว้างช่วงความถี่ (Bandwidth) ที่สถานีวิทยุใช้งานมีค่า 300 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้น จึงมีสัญญาณบางส่วนเกิดการซ้อนทับในช่วงความถี่ดังกล่าว นอกจากนี้จากการสังเกตของวิศวกรยังพบว่า เมื่อสถานีวิทยุเอฟเอ็มหนึ่งสถานีหยุดออกอากาศ สัญญาณรบกวนที่เกิดกับคลื่นความถี่ของสนามบินจะหายไป การแก้ปัญหาเบื้องต้นทางสถานีได้ร้องขอให้สถานีวิทยุเอฟเอ็มทั้งสองสถานีลดกำลังงานส่ง ส่งผลให้สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกันมีขนาดลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสถานีวิทยุเอฟเอ็มเช่นกัน เนื่องจากระยะทางที่ครอบคลุมการให้บริการลดลง ดังนั้นในการแก้ปัญหาในระยะยาว สถานีวิทยุเอฟเอ็มทั้งสองสถานีตัดสินใจติดตั้งสายอากาศส่งสัญญาณให้มีระยะห่างกันเพิ่มขึ้น เพื่อป้องกันการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน

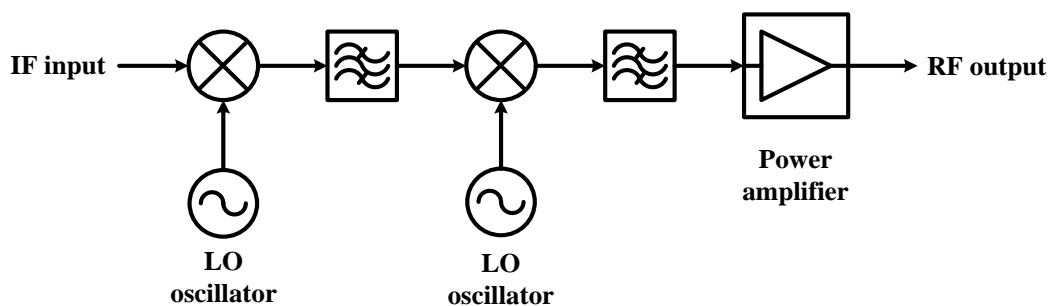
นอกจากนี้ยังมีปัญหาของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันอีกมากมาย [5] เช่น การรบกวนกันของสถานีวิทยุเอเอ็ม (AM) กับตัวทวนสัญญาณ (Repeater) ของบริการไปรษณีย์ ซึ่งสาเหตุเกิดจากการติดตั้งสายอากาศใกล้กัน การรบกวนกันของสัญญาณโทรศัพท์กับสัญญาณจีพีเอส (GPS) ซึ่งสาเหตุเกิดจากการมอดู

เลตระหว่างกันในวงจรส่วนหน้า (Front-end circuit) ของสถานีโทรทัศน์ และทำให้มีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นในตัวรับของจีพีเอส และการรบกวนกันของเพจเจอร์ (Pager) ที่ความถี่ 900 เมกกะเฮิร์ตซ์ กับโอเปอเรเตอร์มือถือย่าน B (B-band) ซึ่งสาเหตุเกิดจากสายอากาศส่งของทั้งเพจเจอร์และโอเปอเรเตอร์มือถือมีระยะห่างกันแค่เพียง 50 ฟุต

จากกรณีตัวอย่างที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าปัญหาการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันเกิดจากสาเหตุ 3 ประเด็นหลักๆ คือ ความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรขยายกำลังภาคสุดท้ายของสถานีส่ง ความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรผสมสัญญาณภาคแรกของสถานีรับ และอุปกรณ์ตัวนำที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น เช่น สายอากาศ ท่อนำคลื่น คอนเดนเซอร์ หรือโครงสร้างโลหะที่วางใกล้กัน ที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) ของสัญญาณ ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันสามารถทำได้ โดยการลดโอกาสที่จะก่อให้เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสาเหตุที่ได้กล่าวมา

#### 2.1.4 วิธีการแก้ปัญหาการการมอดูเลตระหว่างกัน

วิธีการแก้ปัญหาการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามสาเหตุของการเกิด คือ กลุ่มการมอดูเลตระหว่างกันแบบแอกทีฟ (Active intermodulation) และกลุ่มการมอดูเลตระหว่างกันแบบพาสซีฟ (Passive intermodulation) จึงขอบรรยายสรุปหลักการของการแก้ปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันของแต่ละกลุ่มดังนี้

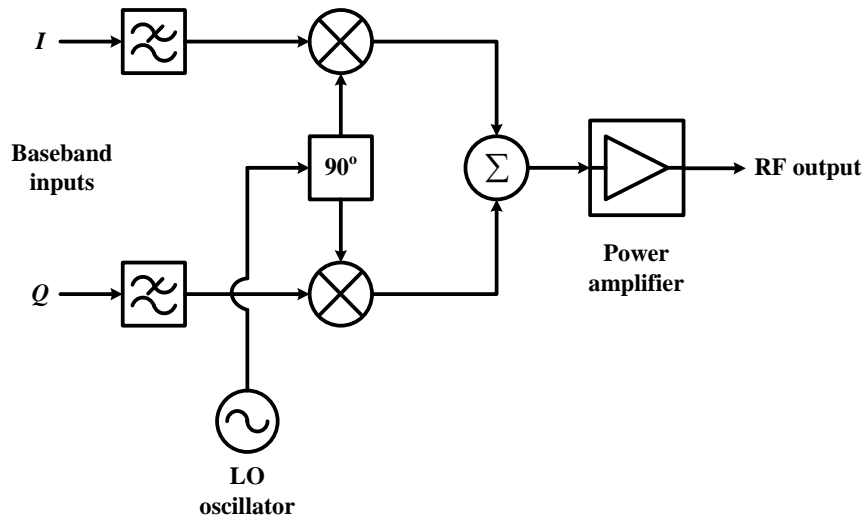


รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมวงจรระดับความถี่ในเครื่องส่งทั่วไป

- การมอดูเลตระหว่างกันแบบแอกทีฟ

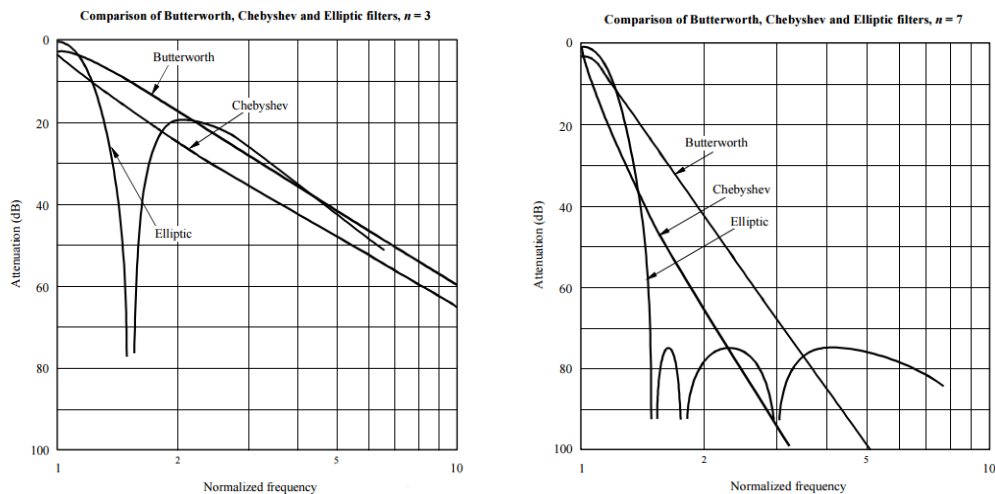
การเกิดปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันแบบแอกทีฟนั้น ส่วนใหญ่มักเกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรเครื่องส่ง เช่น ไดโอด หรือ ทรานซิสเตอร์ที่อยู่ในวงจรผสมสัญญาณ ดังแสดงในโครงสร้างของเครื่องส่งสัญญาณดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ภายในเครื่องส่งจะทำการผสมสัญญาณสองสัญญาณเข้าด้วยกัน คือ สัญญาณด้านเข้าที่มีค่าความถี่กลาง (Intermediate frequency) และสัญญาณที่สร้างขึ้นโดยวงจรกำเนิดความถี่ภายใน (Local oscillator) เพื่อยกระดับความถี่ของสัญญาณให้สูงขึ้น ซึ่งสัญญาณด้านออกจะมีค่าความถี่เป็นค่าความถี่วิทยุ (Radio frequency) ที่เหมาะสมกับระบบการสื่อสาร แต่ในขณะเดียวกันนั้น การผสมกันของสัญญาณในวงจรผสมสัญญาณก็ก่อให้เกิดปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันขึ้นด้วย คือ การผลิตสัญญาณความถี่แปลกปลอม (Spurious signals) ที่เป็นจำนวนฮาร์โมนิคลำดับที่  $n$  ของฮาร์โมนิคพื้นฐาน (Fundamental harmonic) ของสัญญาณความถี่กลางและความถี่ภายใน ด้วยเหตุนี้ จึงมีการใช้วิธีการแก้ปัญหาการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันกลุ่มนี้ ด้วยการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Bandpass filter) เพื่อกรองสัญญาณแปลกปลอม ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีในกรณีที่ผลต่างระหว่างค่าความถี่ของสัญญาณแปลกปลอมกับสัญญาณที่ต้องการนั้น มีค่าสูงมากพอ แต่ในกรณีที่ผลต่างมีค่าน้อย จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรมีผลลดลงเช่นเดียวกัน

ดังนั้น จึงมีการนำเสนอโครงสร้างเครื่องส่งแบบใหม่ ที่สามารถสร้างสัญญาณที่ต้องการ ณ ความถี่วิทยุโดยตรง ด้วยการใช้อุปกรณ์มอดูเลตแบบเวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่าสัญญาณเบสแบนด์ (Baseband signal) ที่มีเฟสตรงกันสามารถมอดูเลตโดยตรงกับคลื่นพาห้ที่ความถี่วิทยุ ทำให้สามารถลดผลกระทบของการผสมสัญญาณฮาร์โมนิกแปลกปลอมที่ก่อให้เกิดการมอดูเลตระหว่างกันได้ เนื่องจากใช้คลื่นพาห้เพียงแหล่งเดียวในการผสมสัญญาณ ต่อมาได้มีการพัฒนาโครงสร้างดังกล่าวให้มีความซับซ้อนขึ้น พร้อมทั้งการนำวิธีควบคุมด้วยระบบดิจิทัลเข้ามาใช้ เช่น ตัวลดทอนสัญญาณ (Attenuator) ตัวเลื่อนเฟส (Phase shifter) เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมเครื่องส่งที่มอดูเลตแบบเวกเตอร์

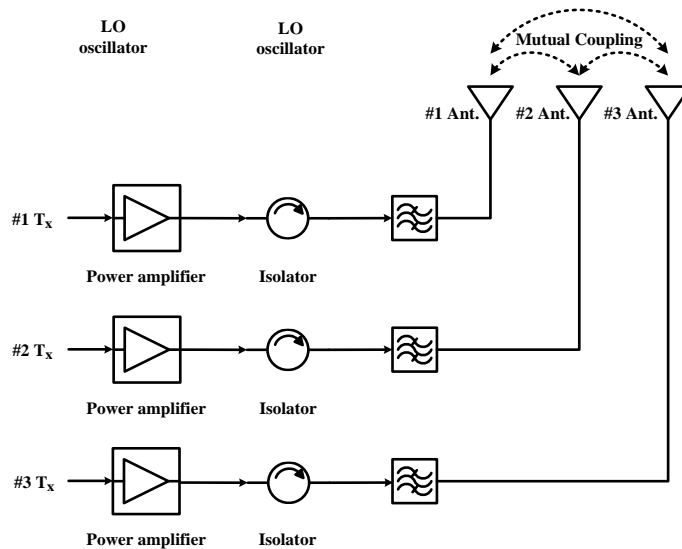
นอกจากวิธีการลดการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันโดยมุ่งเน้นการปรับปรุงโครงสร้างของระบบเครื่องส่ง ที่อาศัยเทคนิคการผสมสัญญาณให้น้อยลง ยังมีอีกวิธีการหนึ่งที่เกี่ยวข้องเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ คือ การพัฒนาประสิทธิภาพของวงจรกรองสัญญาณ ซึ่งวงจรกรองสำหรับเครื่องส่งมีด้วยกันหลายประเภท ได้แก่ วงจรกรองแบบบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth filter) วงจรกรองแบบเบสเซล (Bessel filter) วงจรกรองแบบเชบิเชฟ (Chebyshev filter) และวงจรกรองแบบอิลิปติก (Elliptic filter) การออกแบบวงจรกรองแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับความต้องการความเรียบของสัญญาณในช่วงความถี่ผ่านและความคมของวงจรกรองในการกีดสัญญาณนอกช่วงความถี่ผ่าน ให้เหมาะสมกับระบบที่ใช้มากที่สุด โดยพิจารณาจากจำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบความคมของวงจรกรองแต่ละแบบเมื่อจำนวนอิลิเมนต์เพิ่มขึ้น [6]

- การมอดูเลตระหว่างกันแบบพาสซีฟ

การเกิดปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันแบบพาสซีฟ ส่วนใหญ่มักเกิดที่ภาคสุดท้ายของเครื่องส่งบนสถานีส่ง โดยสถานีส่งดังกล่าวมีการติดตั้งสายอากาศบนหอส่งสัญญาณเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งหลักการเลือกใช้สายอากาศจะพิจารณาจากพารามิเตอร์พื้นฐานเท่านั้น เช่น อัตราขยาย (Gain) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-power beam width) และความทนต่อกำลังด้านเข้า (Tolerable input power) เป็นต้น แต่ไม่ได้ตระหนักถึงตำแหน่งของการติดตั้งสายอากาศมากนัก ดังนั้น วิธีการแก้ปัญหา นี้ สามารถทำได้โดยการลดการเชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) ของสัญญาณด้วยการเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศ และการจัดการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศของแต่ละสถานีส่ง



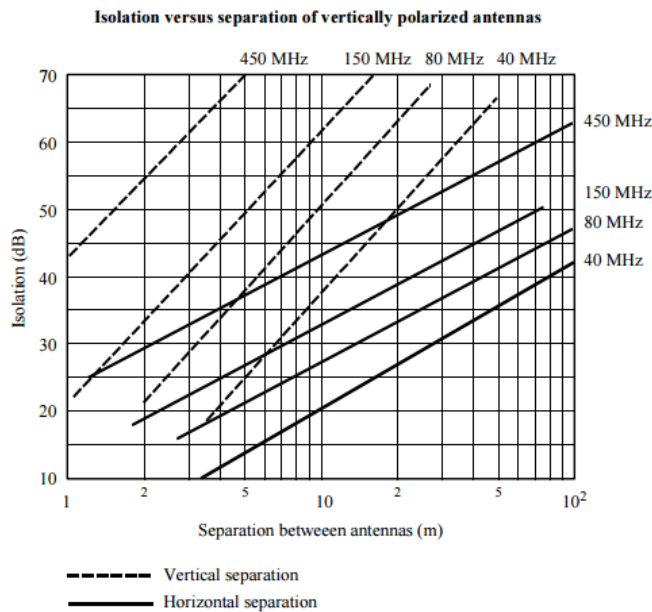
รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ

**วิธีการที่ 1 การเพิ่มระยะห่างของสายอากาศ** สามารถลดผลการเชื่อมต่อร่วมของสัญญาณได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการ

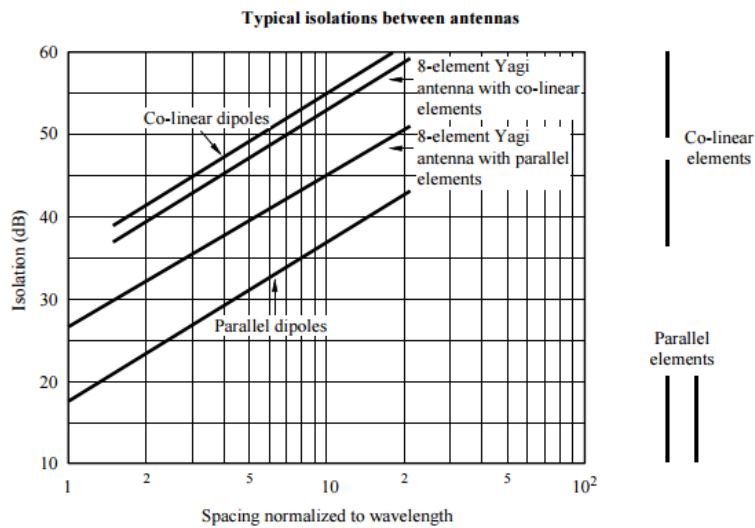
$$L = -27.5 + 20 \log d + 20 \log f - G_1(\phi, \theta) - G_2(\phi, \theta) \quad \text{dB} \quad (2.8)$$

โดย  $L$  คือ การลดทอนของสัญญาณ (เดซิเบล)  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ (เมตร)  $f$  คือ ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)  $G_1$  และ  $G_2$  คือ อัตราขยายของสายอากาศที่ขึ้นอยู่กับมุมในแนวระนาบ (Azimuth angle) และมุมเงย (Elevation angle) เทียบกับสายอากาศไอโซโทรปิก ผลกระทบของระยะห่างของ

สายอากาศต่อระดับสัญญาณการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศที่ใช้กระจายเสียงย่านความถี่สูงมาก (VHF) และ ความถี่สูงยิ่งยวด (UHF) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่าการลดทอนของการเชื่อมต่อร่วมของสัญญาณในกรณี ที่สายอากาศวางห่างกันในแนวตั้ง จะมีค่าสูงสุดที่แต่ละความถี่เมื่อเปรียบเทียบกับ การวางสายอากาศให้ห่างกัน ในแนวนอน นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความถี่ต่ำ สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ ดังนั้นสิ่งกีดขวาง เช่น ดึก หอส่ง สัญญาณ หรือวัสดุที่มีสภาพเป็นตัวนำ ที่วางในแนวลำคลื่นหลักของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะสะท้อน คลื่น และทำให้การเชื่อมต่อร่วมของสัญญาณเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.7 ระยะห่างต่อการเชื่อมต่อร่วมของสายอากาศ [6]



รูปที่ 2.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นต่อการเชื่อมต่อร่วม [6]



**วิธีการที่ 2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น** การลดการเชื่อมต่อร่วมของสัญญาณนอกจากจะขึ้นอยู่กับปรับระยะห่างของสายอากาศแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วย ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการปรับตำแหน่งของนัลล์ (Null) ของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศให้อยู่ตรงกับตำแหน่งสายอากาศข้างเคียง โดยวางสายอากาศแบบโคลิเนียร์ (Co-linear) และแบบขนาน (Parallel) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการปรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตามระยะห่างการวางเทียบกับความยาวคลื่น เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของการเชื่อมต่อร่วมสัญญาณ จะเห็นได้ว่าการวางสายอากาศแบบโคลิเนียร์จะให้การเชื่อมต่อร่วมของสัญญาณน้อยกว่าการวางสายอากาศแบบขนานที่ทุกระยะห่างของสายอากาศเทียบกับความยาวคลื่น

นอกจากการปรับระยะห่างและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแล้ว ยังมีวิธีอื่นๆ อีกหลายวิธี เช่น การใช้วงจรกรองในภาคส่วนหน้า (Front-end) ของเครื่องรับสัญญาณ เพื่อกรองแถบความถี่ข้างเคียง หรือ กรณีกำลังงานของสัญญาณที่ต้องการมีระดับสูงมากเพียงพอ การใช้ตัวลดทอนสัญญาณแบบปรับได้ (Variable RF attenuator) เชื่อมต่อระหว่างตัวป้อนและสายอากาศรับ สามารถลดระดับสัญญาณการมอดูเลตระหว่างกันได้ แต่จะทำให้ระดับกำลังงานของสัญญาณที่ต้องการถูกลดลงเช่นเดียวกัน หรือ การจัดสรรคลื่นความถี่ เพื่อให้ช่องสัญญาณวิทยุที่จัดสรรไม่อยู่ตรงกับความถี่ที่สามารถเกิดการการมอดูเลตระหว่างกันได้ แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัด คือ แถบความถี่ที่ใช้จัดสรรมีอยู่อย่างจำกัด อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ได้รับความสนใจและมีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ อย่างต่อเนื่องทั้งในประเทศและต่างประเทศ เช่น การปรับเปลี่ยนโพลาริเซชันของการส่งรับคลื่นความถี่ การใช้สายอากาศระบบไดเวอร์ซิตี (Diversity) การเข้ารหัสสัญญาณ หรือ การใช้สายอากาศแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra wideband antenna) เป็นต้น

## 2.2 แนวทางการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิด (Cognitive Radio)

ระบบการสื่อสารเข้ามามีบทบาทมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในการดำเนินงานของภาครัฐและภาคเอกชน และกำลังจะกลายเป็นปัจจัยพื้นฐานหนึ่งของมนุษย์ ซึ่งความต้องการที่สูงขึ้นนี้ ทำให้ช่วงความถี่ที่มีอย่างจำกัด สำหรับใช้เป็นช่องทางการสื่อสารนั้น กำลังลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน เช่น ในช่วงปี ค.ศ. 2010 ประเทศเยอรมัน ความกว้างของแถบความถี่ในช่วงความถี่ UHF (470-862 MHz) มีค่าลดลงถึง 18.4% เนื่องจากมีการใช้ช่องสัญญาณบางส่วน เพื่อดำเนินงานของระบบวิทยุโทรทัศน์ดิจิทัลจากภาคพื้นดิน และหลังจากนั้นไม่นานนัก ยังมีการจัดสรรช่วงความถี่ขนาดความกว้างของแถบความถี่ 60 เมกกะเฮิร์ตซ์ ภายในช่วงความถี่ 790-862 เมกกะเฮิร์ตซ์ ให้แก่ผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งประมูลเพื่อเพิ่มช่องสัญญาณและทำให้เพิ่มความเร็วในการรับส่งข้อมูลบนเครือข่าย การประมูลครั้งนี้มีมูลค่าสูงถึง 3,575 พันล้านยูโร เป็นต้น

จะเห็นได้ว่า ผู้ให้บริการการสื่อสารเริ่มมีการใช้งานระบบวิทยุมากกว่าหนึ่งช่วงความถี่ และในอนาคตจึงจำเป็นต้องมีการวางแผนเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณในแต่ละช่วงความถี่อย่างเป็นระบบ และเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการดำเนินงาน จึงทำให้มีการพัฒนาระบบการบริหารจัดการช่องสัญญาณ อาทิเช่น C-PMSE (Cognitive Program Making and Special Events) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิดที่สนับสนุนโดย German Federal Ministry of Economics and Technology [7] ผลการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิดทำให้ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นจากวิศวกรสื่อสาร เนื่องจากเป็นระบบบริหารจัดการช่องสัญญาณแบบไดนามิก และยังทำงานร่วมกับระบบสื่อสารเดิมได้

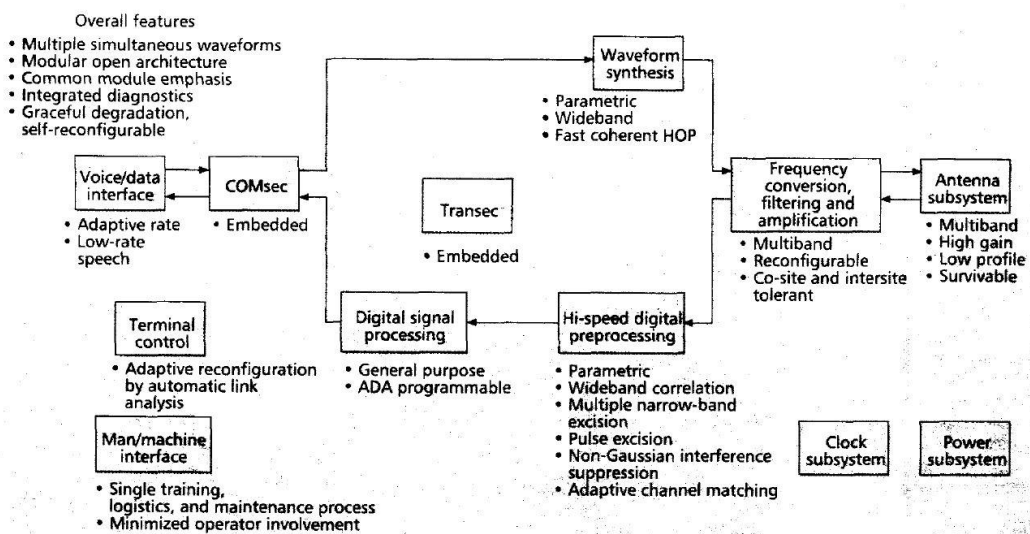
แนวทางการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิด ซึ่งมีการพัฒนาแบ่งเป็นระบบย่อยได้ 3 ส่วน คือ ระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณคลื่นวิทยุด้วยการโปรแกรม (Software Radio) ระบบจัดเก็บข้อมูลบริบทของระบบสื่อสาร (Environment-Aware Computing) และระบบประมวลผลข้อมูล ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

### 2.2.1 วิวัฒนาการของระบบวิทยุซอฟต์แวร์ (Software Radio Evolution)

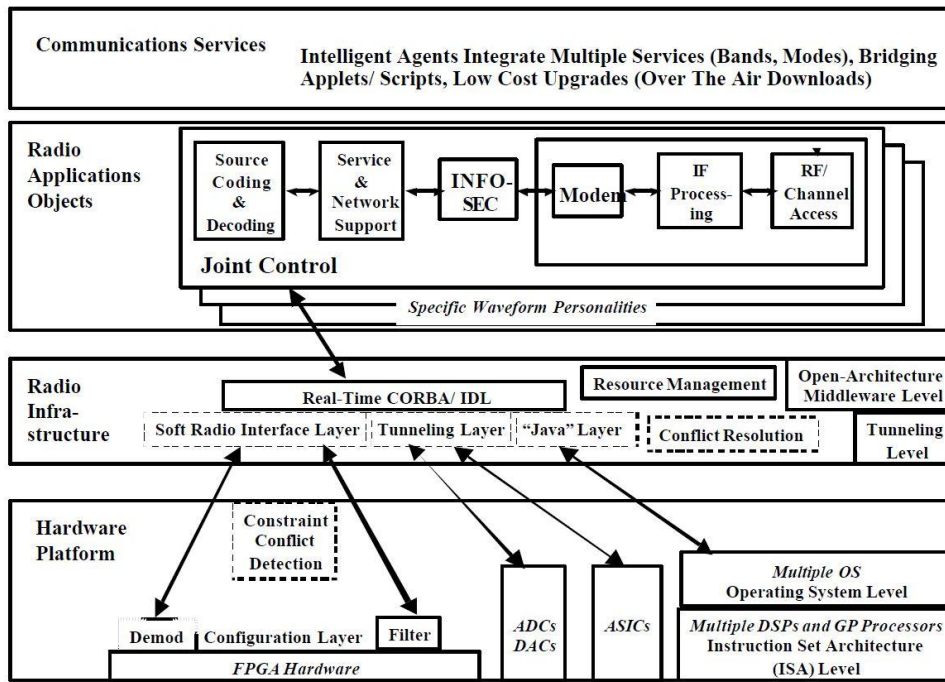
ระบบสื่อสารแบบดิจิทัลได้กลายเป็นระบบที่มีอิทธิพลต่อความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการสื่อสาร เนื่องจากประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับระบบแอนะล็อกแบบเดิม หนึ่งในระบบสื่อสารแบบดิจิทัลยุคแรก คือ ระบบวิทยุซอฟต์แวร์ทางทหาร (Military Software Radio) [8] ได้ใช้ซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของฮาร์ดแวร์หรืออุปกรณ์ต่างๆ ในระบบสื่อสาร ชุดโปรแกรมคำสั่งที่สร้างขึ้นนั้น จะควบคุมลำดับของการประมวลผลสัญญาณดิจิทัลและฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรกเป็นการควบคุมอุปกรณ์ในการแปลงข้อมูลดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกหรือรูปคลื่น (wave form) ให้เกิดความเหมาะสม ก่อนการป้อนสัญญาณให้กับอุปกรณ์ที่รองรับ และส่งผ่านสายอากาศ

และส่วนที่สองเป็นการควบคุมการทำงานของสายอากาศ เช่น การปรับเปลี่ยนชนิดของสายอากาศจากเดิมที่รองรับความถี่คลื่นพาห์ของสัญญาณรูปคลื่นจากช่วง 88–108 เมกกะเฮิร์ตซ์ ให้เป็นสายอากาศอีกชนิดหนึ่งสำหรับการใช้งานในช่วง 800–900 เมกกะเฮิร์ตซ์ หรือการปรับทิศทางการแผ่ของสายอากาศ เป็นต้น

การทำงานของระบบวิทยุซอฟต์แวร์ทางทหาร จะถูกควบคุมภายใต้ส่วน Terminal Control ซึ่งมีกระบวนการทำงานตามชุดโปรแกรมคำสั่ง และองค์ประกอบสำคัญดังแสดงในรูปที่ 2.9 กระบวนการส่งข้อมูลจะเริ่มด้วยการสร้างข้อมูลดิจิทัลที่เกิดจากการแปลงจากสัญญาณเสียงและข้อมูลทั่วไปด้วยเครื่องประมวลผลดิจิทัล (Digital Signal Processing Engine) และนำข้อมูลดิจิทัลเหล่านั้น มาทำการเข้ารหัสเพื่อรักษาความปลอดภัยในการสื่อสารโดยใช้ระบบ INFOSEC (ซึ่งประกอบด้วย COMsec: Communication Security และ Transec: Transmission Security) หลังจากนั้นข้อมูลดิจิทัลจะถูกแปลงเป็นสัญญาณรูปคลื่นก่อนการมอดูเลตกับคลื่นพาห์ให้มีความถี่เหมาะสมกับระบบสายอากาศ และส่วนสุดท้ายจึงเป็นการปรับเปลี่ยนสายอากาศให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น ช่วงความถี่ที่ต้องการส่ง อัตราขยายของคลื่น ขนาดพื้นที่ที่ครอบคลุมการส่งคลื่น เป็นต้น



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของระบบวิทยุซอฟต์แวร์ทางทหาร [8]



รูปที่ 2.10 สถาปัตยกรรมของ SDR [9]

ระบบวิทยุซอฟต์แวร์ทางทหารถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความสามารถในการรับส่งสัญญาณรูปคลื่นได้หลายโหมดการทำงาน เช่น โหมดการรับส่งสัญญาณจากโมเด็ม (Modem) โหมดการใช้สัญญาณเพื่อติดต่อระหว่างอุปกรณ์ (Protocol stack) และโหมดการใช้สัญญาณภายในโครงข่าย เป็นต้น และในเวลาต่อมานั้นระบบนี้ได้ถูกพัฒนาเป็นระบบวิทยุที่ถูกกำหนดด้วยซอฟต์แวร์ (Software-defined radio: SDR) เพื่อรองรับระบบสื่อสารแบบไร้สาย [9] ซึ่งมีสถาปัตยกรรมตามรูปที่ 2.10 ซึ่ง SDR ได้มีการพัฒนาในแต่ละชั้นของสถาปัตยกรรมระบบสื่อสารข้อมูล เช่น ชั้น Radio Application Objects ซึ่งเกี่ยวข้องกับการประมวลผลสัญญาณเพื่อการเข้ารหัส การมอดูเลชันและการเชื่อมต่อของระบบ RF ชั้น Radio Infrastructure ซึ่งเกี่ยวข้องกับการจัดการทรัพยากร และชั้น Hardware platform ซึ่งเกี่ยวข้องการปรับเปลี่ยนหน้าที่ของอุปกรณ์ให้สอดคล้องกับความต้องการ เช่น FPGA, A/D converter, OS เป็นต้น

การบริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ของระบบ GSM เป็นหนึ่งในตัวอย่างของการประยุกต์ใช้ SDR เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของ Modem เนื่องจาก SDR สามารถนำมาควบคุมการทำงานของ Modem ให้ปรับลักษณะการทำงานที่เป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของเทคนิค Channel coding เพื่อลดระยะเวลาในการส่งสัญญาณและการแก้ไขความผิดพลาดของสัญญาณนั้น นอกจากนี้ SDR ยังถูกพัฒนาให้รองรับเทคโนโลยีใหม่ของ Modem [10], [11]

ถึงแม้ว่าในอนาคตกระบวนการทำงานของระบบรับส่งคลื่นวิทยุมีความซับซ้อนมากขึ้น จึงส่งผลให้ระบบ SDR จำเป็นต้องประมวลผลชุดคำสั่งบนตัวประมวลผลที่มีความสามารถสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้อย่างมากที่ระบบ SDR จะมีอิทธิพลต่อระบบสื่อสาร เนื่องจากปัจจุบันนี้ระบบประมวลผลหรือเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีความก้าวหน้าไปมากแล้ว นอกจากนี้ การนำระบบ SDR ไปใช้งานร่วมกับระบบ Cognitive Radio ในอนาคต เพื่อพัฒนาเป็น Enhanced modem algorithms จึงเป็นไปได้อย่างไม่ยากนัก

## 2.2.2 วิวัฒนาการของระบบจัดเก็บข้อมูลบริบทของระบบสื่อสาร (Environment-Aware Computing Evolution)

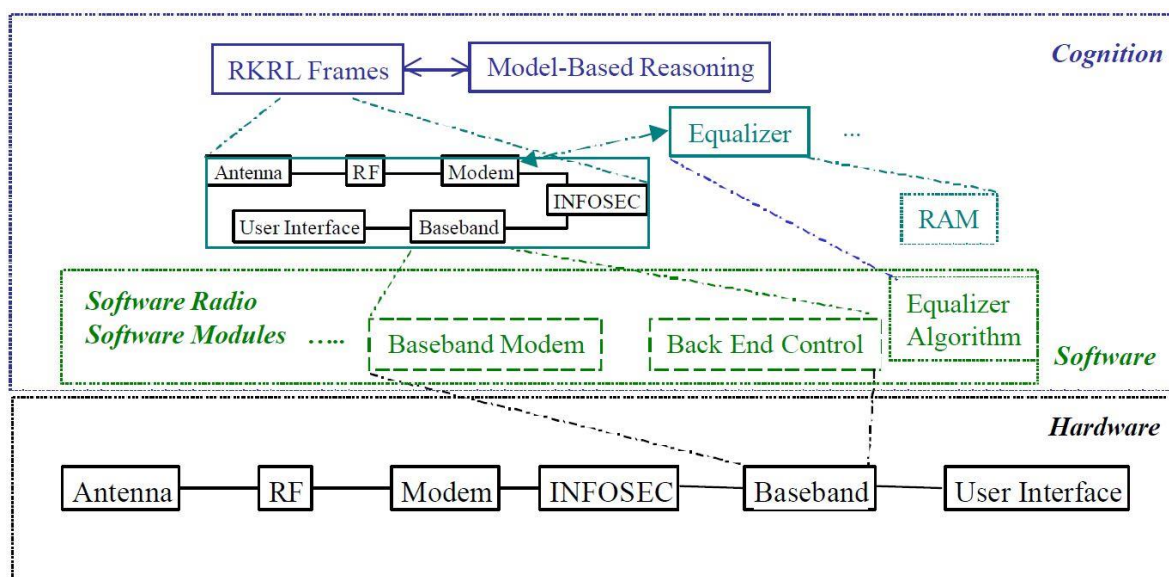
ระบบจัดเก็บข้อมูลบริบทของระบบสื่อสารถูกริเริ่มโดย ACTS (The European Community's Advanced Communications Technology and Services) ซึ่งเป็นระบบที่สามารถระบุตำแหน่งของอุปกรณ์สื่อสารได้ (Location-Aware Computing) โดยใช้ผลการประมวลของโปรแกรม MASE และข้อมูลการระบุตำแหน่งของอุปกรณ์จากระบบ GPS (Global Positioning Satellite System) [12] หลังจากนั้นได้มีการพยายามระบุข้อมูลแวดล้อมของอุปกรณ์สื่อสารด้วย [13] จึงมีการพัฒนาระบบ Environment-aware computing-communication systems ซึ่งสามารถระบุข้อมูลแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของระบบสื่อสาร เช่น ช่วงเวลา สถานที่ ค่าพลังงานความร้อน (Heating) ค่าสภาพอากาศ (Air-conditioning) ค่าความสว่าง (Lighting) ตำแหน่งอุปกรณ์สื่อสาร (Computers and telephones) และสถานะของผู้ใช้งาน เป็นต้น นอกจากนี้ ข้อมูลเหล่านี้ยังถูกนำมาประมวลผลบน Cognitive PDA (Personal Digital Assistant) เพื่อใช้ในการให้บริการข้อมูลมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ จึงมีความเป็นไปได้ในการนำระบบ Environment-aware-computing-communication systems มาใช้งานร่วมกับ Cognitive Radio ในอนาคต เนื่องจากเทคโนโลยีของการตรวจจับข้อมูลต่างๆ กำลังถูกพัฒนาโดยผู้เชี่ยวชาญอย่างแพร่หลาย

### 2.2.3 ระบบวิทยุรู้คิด (Cognitive Radio)

ในอนาคตแนวทางการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิด ขึ้นอยู่กับระบบวิทยุซอฟต์แวร์ และระบบจัดเก็บข้อมูล สิ่งแวดล้อม ซึ่งระบบทั้งสองจะทำงานเชื่อมโยงถึงกันตามโครงสร้างที่จะกล่าวถึงในหัวข้อนี้ รวมทั้งกระบวนการทำงานของระบบวิทยุรู้คิดภายใต้โครงสร้างดังกล่าวด้วย

- โครงสร้างของระบบวิทยุรู้คิด (Cognitive Radio Framework)

ด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารภายใต้ระบบ SDR ซึ่งมีแม่ข่ายที่ไม่สามารถควบคุมการทำงานของลูกข่ายในระยะไกลได้ และแม่ข่ายไม่สามารถเข้าถึงสถานการณ์ปัจจุบันที่เกิดขึ้นกับลูกข่าย จึงมีแนวทางการแก้ปัญหาเหล่านี้ โดยการนำระบบวิทยุรู้คิดมาสร้างภาษาเพื่อให้เกิดการรับส่งข่าวสารระหว่างแม่ข่ายและอุปกรณ์สื่อสารลูกข่ายได้ และนำไปสู่การเข้าถึงและติดตามสถานการณ์แวดล้อมของอุปกรณ์ลูกข่ายเพื่อนำมาใช้สร้างแนวทางการควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งระบบวิทยุรู้คิดจึงถูกริเริ่มขึ้นโดยมีโครงสร้างของระบบตามรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของระบบวิทยุรู้คิด [9]

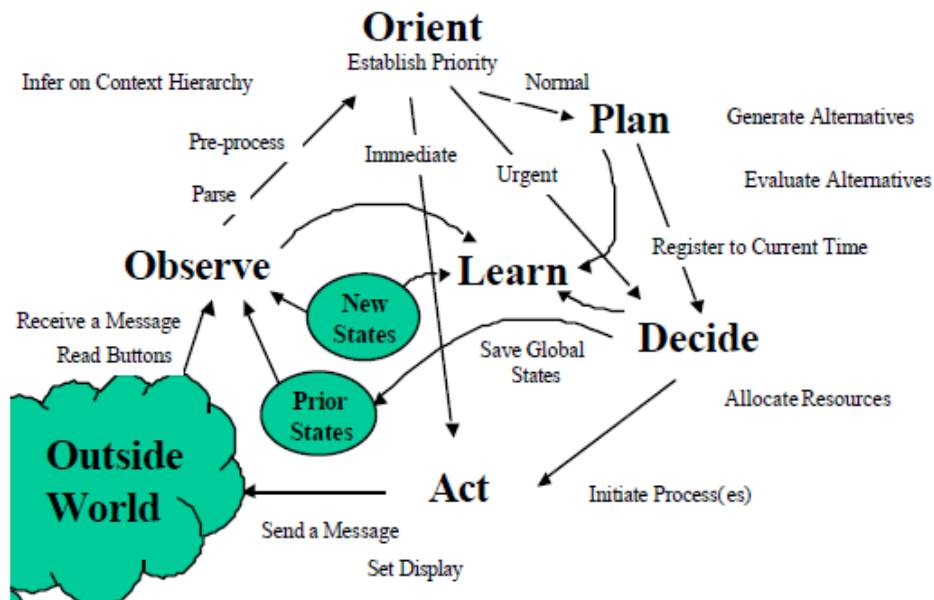
โครงสร้างของระบบวิทยุรู้คิด อาจแบ่งออกเป็น 2 ภาค คือ ภาคของฮาร์ดแวร์ของระบบวิทยุ (Radio Hardware) และภาควิทยุรู้คิด Cognitive Radio ในภาคของฮาร์ดแวร์ของระบบวิทยุ ประกอบด้วยสายอากาศ (Antenna) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับช่วงความถี่วิทยุ (Radio Frequency) อุปกรณ์มอดูเลต (Modem) ระบบรักษาความปลอดภัยของข้อมูล (INFOSEC) ตัวประมวลผล (Baseband processor) และการเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) ในภาคนี้ตัวประมวลผลจะทำงานตามชุดโปรแกรมคำสั่ง เพื่อควบคุมการทำงาน

ของอุปกรณ์มอดูเลต และภาคที่สอง คือ ระบบวิทยุรู้คิด ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลการทำงานของระบบ โดยการรับข้อมูลจากภาคฮาร์ดแวร์ของระบบวิทยุ ซึ่งนับเป็นภาคฮาร์ดแวร์อีกชุดหนึ่งที่ต้องทำงานร่วมกับระบบ model-based reasoning และ RKRL Frame

- **กระบวนการทำงานของระบบรู้คิด (The Cognitive Cycle)**

กระบวนการทำงานของระบบวิทยุรู้คิด จะมีลักษณะเป็นวงรอบตามรูปที่ 2.12 ซึ่งประกอบด้วย การเข้าถึงสิ่งแวดล้อมของระบบ โดยการสังเกตหรือเก็บข้อมูลที่สำคัญจากสภาพแวดล้อม (Observe its environment) หลังจากนั้น จึงจะทำการกำหนดเป้าหมาย (Orient itself) การวางแผนดำเนินการ (Create a plan) การตัดสินใจ (Decision) และการดำเนินงาน (Acts) นอกจากนั้นยังมีขั้นตอนสำคัญอีกขั้นตอนหนึ่ง คือ การจดจำผลการแก้ปัญหาที่ผ่านมาและการเรียนรู้ผลที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาในอนาคต ซึ่งต้องอาศัยระบบการเรียนรู้ที่สร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning techniques)

วงรอบการทำงานของระบบวิทยุรู้คิด เริ่มต้นจากการรับข้อความที่ส่งมาจากระบบโครงข่าย ซึ่งเป็นข้อความเกี่ยวกับการร้องขอใช้ช่องสัญญาณ หรือข้อมูลสภาพแวดล้อมของระบบในเวลานั้น จำนวนของข้อความจึงขึ้นอยู่กับสถานการณ์และขนาดของโครงข่าย และจากนั้นระบบจะรับข้อความนั้นมาวิเคราะห์และระบุบริบทของการสื่อสารข้อมูล ซึ่งแต่ละขั้นตอนของกระบวนการมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.12 กระบวนการทำงานของระบบวิทยุรู้คิด [2]

**ขั้นตอนที่ 1 การสังเกตการณ์ (Observation)** การสังเกตสิ่งแวดล้อมจัดเป็นขั้นตอนแรก เพื่อสร้างข้อมูลตั้งต้นป้อนให้แก่ระบบวิทยุรู้คิด เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการดำเนินงานในลำดับถัดไป ขั้นตอนนี้จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ในการสังเกตและตรวจจับสัญญาณที่ชาญฉลาด ระบบการตรวจจับสัญญาณจึงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัย [14] ได้ออกแบบและสร้างระบบค้นหาช่องสัญญาณสำหรับการใช้งานระบบไมโครโฟนไร้สายในช่วงความถี่ UHF โดยมุ่งเน้นการเพิ่มคุณภาพการเชื่อมต่อสัญญาณและความเชื่อถือได้ของสัญญาณ และมุ่งเน้นการเพิ่มความทนทานต่อความถี่แปลกปลอม เพื่อการนำไปใช้งานร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด เป็นต้น

งานวิจัย [14] ยังกล่าวอีกว่า วิธีการสร้างเครื่องค้นหาช่องสัญญาณที่ได้รับความนิยม คือ วิธีการ Channelized wideband mixed-domain receivers และวิธีการ Sub-Nyquist direct-sampling multichannel receivers และได้นำหลักการดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบและสร้างระบบ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็น analog front end คือ USRP (Universal Software Radio Peripheral) [15] มีหน้าที่ตรวจจับสัญญาณในระดับต่ำและบันทึกข้อมูล โดยที่ระบบการตรวจจับสัญญาณนั้น สามารถรองรับการปรับเปลี่ยนช่วงความถี่ ความกว้างแถบความถี่ และพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้องได้ ส่วนที่สองเป็น digital front end คือ Matchstiq (from EPIQ solution) [16] ทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณที่สามารถควบคุมการทำงานโดยใช้ชุดโปรแกรมคำสั่งด้วย FPGA ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลสัญญาณแบบดิจิทัล และส่วนที่สามเป็น baseband processor คือ USB-SA44B (from Signal Hound) [17] ซึ่งเป็นตัวรับที่มีสัญญาณด้านเข้าเป็นคลื่นความถี่วิทยุช่วงความถี่ 4.4 GHz จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ทั้งสามส่วนล้วนแล้วอาศัยหลักการของ SDR และเครื่องค้นหาช่องสัญญาณ (Spectrum sensing grids) ที่ออกแบบมานี้จะนำไปใช้ร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด เพื่อใช้ในการเข้าถึงแถบความถี่แบบไดนามิกและการค้นหาแถบความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ

**ขั้นตอนที่ 2 การจัดลำดับความสำคัญของความต้องการ (Orientation)** เป็นการจัดลำดับความสำคัญของความต้องการในข้อความนั้นๆ เนื่องจากมักจะเกิดปัญหาหรือความต้องการจำนวนมากในช่วงเวลาเดียวกัน โดยการแยกแยะความต้องการตามลักษณะของเป้าหมายนั้นๆ เป้าหมายได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) เป้าหมายฉับพลัน (“immediate” path in the figure) ซึ่งจะดำเนินการ (Act) ทันที โดยไม่ต้องรอการวางแผน (Plan) และการตัดสินใจ (Decide) เนื่องจากเกิดสถานการณ์ฉุกเฉิน เช่น การเกิดความผิดพลาดของระบบการจ่ายพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น 2) เป้าหมายเร่งด่วน (“urgent” path in figure) ซึ่งจะดำเนินการหลังจากการตัดสินใจ เนื่องจากเกิดความผิดพลาดระหว่างการส่งข้อมูลในเครือข่ายและต้องการให้มีการจัดส่งข้อมูลใหม่อีกครั้ง 3) เป้าหมายปกติ (“Normal” path in figure) ซึ่งจะดำเนินการหลังจากผ่านทั้งสองขั้นตอน คือ การวางแผนและการตัดสินใจ



**ขั้นตอนที่ 3 การวางแผนงาน (Plan)** เป็นกระบวนการวางแผน ซึ่งมักจะเริ่มต้นจากการสร้างแผนงาน (Plan Generation) ซึ่งแผนงานที่สร้างขึ้นจะถูกจัดเตรียมไว้ให้พร้อมการใช้งาน (Candidate Plan) จึงทำให้เกิดทางเลือกของแผนงานที่สามารถรองรับสถานการณ์ต่างๆได้ และในที่สุดแผนการต่างๆจะถูกส่งไปยังลูกข่ายโดยแม่ข่าย (เปรียบเทียบได้กับเลขานุการมีการแจ้งข้อความแก่ประธานในระหว่างการประชุมธุรกิจ) แผนงานและการกำหนดแนวทางการดำเนินงานระบบวิทยุ (radio etiquette) ถือเป็นหัวใจของระบบวิทยุรู้คิดเพื่อความเข้าใจโดยง่ายเกี่ยวกับแนวทางการกำหนดกลยุทธ์ของระบบ จึงได้บรรยายตัวอย่างการนำไปใช้ตามรายละเอียดของงานวิจัย [18]

งานวิจัย [18] ได้เสนอกระบวนการกำหนดแนวทางการดำเนินงานของระบบวิทยุรู้คิดสำหรับการสื่อสารข้อมูลมัลติมีเดียบนโทรศัพท์มือถือ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการเข้าใช้ช่วงความถี่ของการสื่อสารในระบบอื่น จึงมีการพิจารณาความเป็นไปได้ในการใช้งานแต่ละช่วงความถี่ ซึ่งพบว่า ช่วงความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ระบบ TDMA: 850/1900 MHz ระบบ AMPS (Analog Mobile Phone System): 850 MHz ระบบ CDPD (Cellular Digital Packet Data): 1900 MHz) รวมถึงช่วงความถี่ที่ใช้งานสาธารณะ เช่น สถานีตำรวจ สถานีดับเพลิง หน่วยกู้ภัย เป็นต้น ขณะเดียวกันนั้น ยังพบอีกว่า ช่วงความถี่ที่ใช้งานสำหรับ Satellites and aircraft นั้นเป็นไปได้ยากที่จะเลือกใช้ แต่สำหรับช่วงความถี่ที่ใช้งานสำหรับ broadcast television stations and 2 GHz microwave กลับมีความเป็นไปได้อย่างมาก โดยเฉพาะในบริเวณนอกเมือง เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการใช้แถบความถี่เบาบาง และคาดการณ์ว่า จะมีค่าใช้จ่ายต่ำมากเมื่อเทียบกับบริเวณในเมือง รวมทั้งบริเวณในเมืองนั้นมักจะเลือกใช้ระบบสายใยแก้วนำแสงและสายนำสัญญาณ ดังนั้น แนวทางการดำเนินการของระบบวิทยุรู้คิดจะเกี่ยวข้องกับหลายระบบสื่อสารที่มีโครงสร้างพื้นฐานแตกต่างกัน เช่น ความแตกต่างของช่วงความถี่ที่ใช้งาน ความแตกต่างของโหมดการทำงาน ความแตกต่างของระบบสื่อสารมัลติมีเดียไร้สาย เป็นต้น

นอกจากนั้น แนวทางการดำเนินการของระบบวิทยุรู้คิดต้องพิจารณาถึงค่าเช่าช่วงความถี่ที่ต้องจ่ายให้แก่เจ้าของแถบความถี่ด้วย เนื่องจากมีความจำเป็นต้องมีการเข้าใช้ช่วงความถี่ โดยทั่วไปอัตราการใช้เรียกเก็บค่าเช่าจะขึ้นอยู่กับชนิดของข้อมูลในการสื่อสารและหน่วยของเวลา เช่น หน่วยเป็นวินาทีสำหรับการเข้าใช้เพื่อส่งข้อความจดหมาย หน่วยเป็นนาที่สำหรับการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อรับส่งสัญญาณเสียง หน่วยเป็นชั่วโมงสำหรับการเข้าถึงช่องสัญญาณเพื่อการประชุมระยะไกล เป็นต้น และต้องพิจารณาค่าเช่าช่วงความถี่ให้สัมพันธ์กับบริเวณที่ใช้งาน เนื่องจากอัตราการใช้เรียกเก็บภาษีการใช้ช่วงความถี่ของแต่ละหน่วยงานกลางของภาครัฐในระดับท้องถิ่น ระดับจังหวัด หรือระดับประเทศ มีค่าแตกต่างกัน

แนวทางการดำเนินการของระบบวิทยุรู้คิดยังมีความเกี่ยวข้องกับการกำหนดกลยุทธ์การเข้าใช้ช่วงความถี่ (Pooling Strategy) กลยุทธ์ที่มักจะคงกล่าวถึง คือ กลยุทธ์อุดมคติของ Nick Negroponte [19] ซึ่งได้เสนอแนวทางในอนาคตไว้ว่า “If it moves, give it spectrum; if it doesn’t, give it fiber.” แต่ด้วยขีดความสามารถของระบบวิทยุรู้คิดภายใต้การทำงานของระบบ SDR ทำให้เกิดแนวทางใหม่ที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากขึ้น คือ “If it moves, give it spectrum pool precedence (choice); if it doesn’t, make it pay” ซึ่งกลยุทธ์นี้จะถูกใช้โดยผู้บริหารจัดการช่วงความถี่ ซึ่งดำเนินงานโดยการกำหนดเป็นแนวปฏิบัติและขอบเขตการใช้ช่องสัญญาณให้แก่ผู้เช่าช่องสัญญาณ แต่การกำหนดราคาจะเป็นไปตามกลไกทางการตลาด

**ขั้นตอนสุดท้าย คือ การตัดสินใจ (Decision) การดำเนินการ (Act) และการเรียนรู้ (Learn)** เป็นกระบวนการตัดสินใจเลือกแผนงาน (Decision) ให้เหมาะสมกับสถานการณ์นั้นๆ และนำไปสู่ขั้นตอนของการดำเนินงาน (Act) โดยในขั้นตอนนี้ระบบวิทยุรู้คิดจะประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบ SDR เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน ผลการดำเนินงานตามแผนงานที่คาดว่าจะทำให้เกิดสัมฤทธิ์ผลนั้น จะถูกนำมาประเมินและตรวจสอบ เพื่อใช้เป็นข้อมูลให้แก่ระบบรู้คิด เพื่อให้ระบบมีการศึกษาและเรียนรู้ ซึ่งจัดอยู่ในกระบวนการเรียนรู้ (Learn)

หลังจากทราบถึงวงรอบการทำงานของระบบวิทยุรู้คิด จะเห็นได้ว่า หลักการที่จะออกแบบและสร้างระบบวิทยุรู้คิด ยังคงมีความต้องการเทคโนโลยีที่สำคัญหลายอย่าง เช่น เทคโนโลยีการประมวลผลและการแปลความหมายของข้อความที่ได้รับจากระบบ เทคโนโลยีการประมวลผลคำพูดของมนุษย์ เทคโนโลยีการสังเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ เทคโนโลยีในการวางแผนให้รองรับสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ตารางการทำงานตามความสำคัญ การกำหนดภาระงาน เทคโนโลยีการสร้างระบบที่สามารถเรียนรู้ได้ด้วยตนเอง เป็นต้น รวมไปถึง การสร้างรูปแบบการเชื่อมต่อที่เป็นสากลสำหรับผู้ใช้งาน การพัฒนาอุปกรณ์วิทยุสื่อสารและโครงข่าย การระบุสาเหตุและผลกระทบของปัญหาที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา เป็นต้น

หนึ่งในเทคโนโลยีสำคัญที่กำลังพัฒนา เพื่อตอบสนองความต้องการของกลุ่มผู้สร้างระบบวิทยุรู้คิด คือ เทคโนโลยีสายอากาศ เนื่องจากเทคโนโลยีสายอากาศถูกนำมาใช้ในกระบวนการทำงานของระบบวิทยุรู้คิดถึง 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนของการสังเกตการณ์ (Observation) และขั้นตอนของการดำเนินการ (ACT) ขั้นตอนของการสังเกตการณ์นั้นจำเป็นต้องอาศัยสายอากาศที่สามารถเข้าถึงสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับความถี่วิทยุได้ดี นั่นคือ สายอากาศที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ครอบคลุมหลายช่วงความถี่ หรือนิยมเรียกกันว่า สายอากาศแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra-Wideband Antenna)

สำหรับขั้นตอนของการดำเนินการ (ACT) จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีของสายอากาศเช่นเดียวกัน แต่เป็นสายอากาศที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน คือ สายอากาศที่สามารถกระจายคลื่นวิทยุได้หลายช่วงความถี่ในขณะที่ยังคงประสิทธิภาพไว้ หรือนิยมเรียกว่า สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้

นอกจากนั้น ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับวิทยุรู้คิด (Cognitive radio) ที่กำลังดำเนินการและนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งสามารถแก้ปัญหาการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันในแถบความถี่ที่ใช้งานอย่างจำกัดได้ดี เนื่องจากวิทยุรู้คิดมีหลักการใช้งานแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยการเข้าถึงแถบความถี่แบบไดนามิก (Dynamic spectrum access) รวมทั้ง ระบบสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาการรบกวนกันของคลื่นความถี่ข้างเคียง และหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันได้

### 2.3 แนวทางการพัฒนาระบบวิทยุรู้คิด

สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่เป็นสายอากาศประเภทหนึ่งในกลุ่มสายอากาศปรับเปลี่ยน ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ สายอากาศปรับเปลี่ยนโพลาไรเซชัน และสายอากาศปรับเปลี่ยนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ปัจจุบันสายอากาศปรับเปลี่ยนกำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถปรับเปลี่ยนฟังก์ชันการทำงาน เช่น ความถี่ โพลาไรเซชัน หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ได้อย่างอิสระเพื่อนำไปใช้ตามจุดประสงค์ที่ต้องการ โดยไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนขนาดของโครงสร้างสายอากาศเดิม หลักการของสายอากาศปรับเปลี่ยนถูกเสนอขึ้นครั้งแรกโดย [20] และได้รับการพัฒนาเรื่อยมา [21]-[29] สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่มีข้อดีสำหรับการนำไปใช้ร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด คือ ระบบจะสามารถทำงานได้ที่ความถี่หลากหลาย ด้วยการใช้งานสายอากาศเพียงอันเดียว ทำให้สามารถลดขนาดและราคาของระบบได้

การออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่เป็นการเปลี่ยนสายอากาศที่สามารถใช้งานที่ความถี่เดียวให้สามารถใช้งานได้หลายความถี่ มีเทคนิคที่ใช้ออกแบบหลากหลาย ซึ่งแต่ละเทคนิคจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาพารามิเตอร์หลักอยู่ 2 ประการ คือ โครงสร้างโดยรวมของสายอากาศและวงจรแมตซ์ซิ่ง โดยเทคนิคหลักๆ ที่ใช้ในการออกแบบเพื่อปรับเปลี่ยนความถี่สามารถสรุปได้ดังนี้

- **เทคนิคการสวิตช์ด้วยการวางอุปกรณ์สวิตช์ภายในและภายนอกโครงสร้างสายอากาศ**

การสวิตช์ความถี่ด้วยเทคนิคนี้ มักอาศัยอุปกรณ์จำพวก พินไดโอด (PIN diode) GaAs FETs (Gallium Arsenide Field-Effect Transistors) หรือ MEMS (Microelectromechanical Systems) โดยที่ MEMS มีข้อดี คือ มีการสูญเสียน้อย แต่ข้อเสีย คือ ต้องใช้ความต่างศักย์สูงในการไบอัสให้อุปกรณ์ทำงาน และมีราคาแพง ขณะที่ GaAs FETs มักนิยมใช้ในโหมดซีโรไบอัส (Zero bias) เนื่องจากการใช้กำลังงานต่ำ แต่ข้อเสีย คือ อุปกรณ์ประเภทนี้มีความเป็นเชิงเส้นต่ำ และมีการสูญเสียสูง ส่วนอุปกรณ์พินไดโอด มีข้อดี คือ การสูญเสียต่ำ และราคาถูก แต่ข้อเสีย คือ การทำให้พินไดโอดทำงานที่สถานะปิดวงจร กระแสไฟตรงที่ใช้จะทำให้ประสิทธิภาพกำลังรวม (Overall power efficiency) ลดลง

- **เทคนิคการปรับโพลตของสายอากาศจากภายนอก**

เทคนิคนี้อาศัยอุปกรณ์ชนิด วาแรกเตอร์ (Varactors) ในการปรับจูนค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) ของสายอากาศอย่างต่อเนื่องแทนการสวิตช์ แต่มีข้อเสีย คือ ความไม่เป็นเชิงเส้นในการทำงานของอุปกรณ์

- **เทคนิคการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของแผ่นซับสเตรต (Substrate) ที่สร้างสายอากาศ**

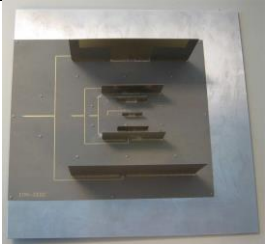
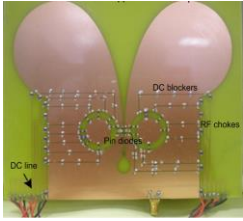
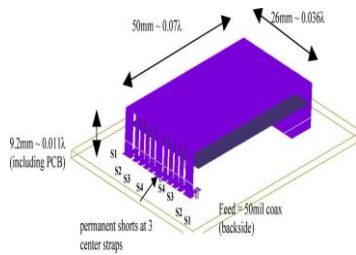
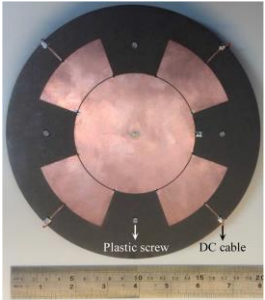
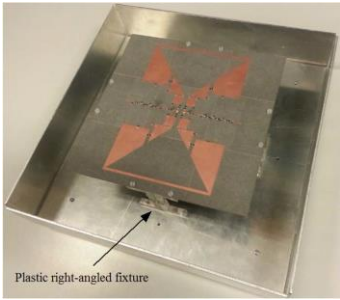
เทคนิคนี้อาศัยหลักการเปลี่ยนคุณสมบัติสภาพจ่ายอมไฟฟ้า (Permittivity) ของแผ่นซับสเตรต เพื่อเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant frequency) มีข้อเสีย คือ ราคาแพง

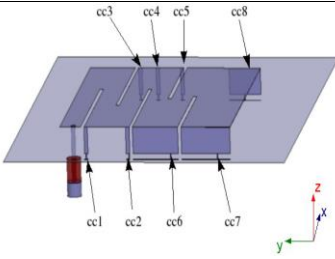
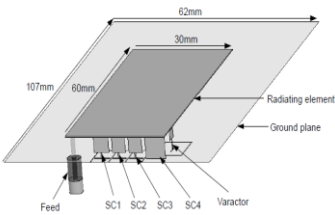
- **เทคนิคการปรับโครงสร้างของสายอากาศด้วยการเคลื่อนที่ทางกล (Mechanical movement)**

เทคนิคนี้อาศัยอุปกรณ์ทางกลในการเคลื่อนที่ เพื่อปรับโครงสร้างของสายอากาศ ส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศเปลี่ยน ข้อดี คือ มีความสูญเสียต่ำ และมีการทำงานค่อนข้างเป็นเชิงเส้น แต่ข้อเสีย คือ ใช้เวลานานในการปรับอุปกรณ์ทางกล เพื่อปรับเปลี่ยนย่านความถี่

จากเทคนิคการปรับเปลี่ยนความถี่ในสรุปข้างต้น สามารถจำแนกงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์และออกแบบให้สอดคล้องกับการใช้งานเป็นสายอากาศสถานีฐาน (Base station antenna) สำหรับการใช้งานเพื่อออกอากาศวิทยุเอเอ็ม วิทยุเอฟเอ็ม โทรทัศน์ดิจิทัล หรือ ระบบการสื่อสารไร้สาย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยเทคนิคการสวิตช์ความถี่แบบต่างๆ

รูปโครงสร้างสายอากาศ	โครงสร้างสายอากาศ	ความถี่ (กิกะเฮิรตซ์)	วิธีการปรับเปลี่ยน ความถี่	อ้างอิง
	สายอากาศไดโพลแบบ คู่สมมาตรจำนวน 7 อิลี เมนต์	0.8-0.9 1.7-2.5 3.3-3.6 5.1-5.9	ใช้ MEMs ในการ สวิตช์ระหว่างคู่ สายอากาศไดโพล ขนาดต่างๆ กัน	[30]
	สายอากาศแบบวีวัลดี (Vivaldi) ร่วมกับ วงจร กรองแบบร่องวงแหวน (Ring slot)	1-3.2	ใช้ PIN diode ในการ สวิตช์ร่องวงแหวน	[31]
	สายอากาศแบบฟิฟา (Planar inverted F antenna: PIFA)	0.4078-0.4631	ใช้ PIN diode หรือ GaAs FETs หรือ MEMs ในการลัดวงจร เส้นทางที่เชื่อมลง กราวนด์	[32]
	สายอากาศแพทช์วง กลมล้อมรอบด้วย สายอากาศแพทช์วง กลมที่แบ่งออกเป็น ส่วนๆ	1.64-2.12	ใช้ varactor diode เป็นตัวเชื่อมระหว่าง สายอากาศแพทช์วง กลมและสายอากาศ แพทช์วงกลมที่แบ่งเป็น ส่วนๆ	[33]
	สายอากาศไดโพลพับ รูปโบว์แบบแพทช์ (Folded bowtie) ถูก ป้อนด้วยสายอากาศได โพลผอมแบบแพทช์ แนวตั้ง	0.83-2.5	ใช้ PIN diode ในการ สวิตช์ตัดต่อความยาว ของสายอากาศผอม แบบแพทช์แนวตั้ง ใน การป้อนสายอากาศได โพลพับรูปโบว์	[34]

รูปโครงสร้างสายอากาศ	โครงสร้างสายอากาศ	ความถี่ (กิกะเฮิรตซ์)	วิธีการปรับเปลี่ยน ความถี่	อ้างอิง
	สายอากาศรูปทรงคด เคี้ยว (Meander antenna)	0.47-0.702	ใช้ PIN diode วาง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของ สายอากาศ เพื่อสวิตซ์ ลัดวงจร	[35]
	สายอากาศแบบพิฟา (Planar inverted F antenna: PIFA)	0.47-0.862	ใช้ varactor diode ร่วมกับ PIN diode เพื่อลัดวงจร	[36]

จากตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่จากงานวิจัยก่อนหน้า ที่จะใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์สำหรับการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ซึ่งพิจารณาเลือกจากโครงสร้างของสายอากาศที่จำเป็นต้องมีความสามารถในการทนกำลังส่งสูงได้ เนื่องจากความต้องการจะนำไปใช้เป็นสายอากาศสถานีฐาน แต่อย่างไรก็ตาม ก็จำเป็นต้องพิจารณาพารามิเตอร์อื่นๆ ประกอบด้วย เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย อัตราส่วนระหว่างอัตราขยายสูงสุดลำคลื่นหลักต่ออัตราขยายสูงสุดลำคลื่นด้านหลัง (Front-to-back ratio) เป็นต้น

## 2.4 คุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณ (Broadcasting Antenna System Specification)

เพื่อการดำเนินการสื่อสารในกิจการใดกิจการหนึ่งให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ระบบสายอากาศจึงถูกออกแบบให้มีคุณลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน ในหัวข้อนี้จะมุ่งเน้นการบรรยายถึงคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศแพร่สัญญาณ เช่น อัตราขยาย (Gain) ความต้านทานด้านเข้าของระบบสายอากาศ (Antenna Input Impedance) ความเข้มของสนาม (Field Strength) และค่าพิกัดของแรงดันและกำลังไฟฟ้า (Voltage and Power Rating)

### 2.4.1 อัตราขยาย (Gain)

- **นิยามและความสำคัญ**

อัตราขยาย เป็นคุณลักษณะพื้นฐานที่นำไปใช้วิเคราะห์ค่ากำลังไฟฟ้าด้านออกของเครื่องส่ง และใช้ในการระบุพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการรับคลื่นวิทยุของเครื่องรับ ดังนั้น อัตราขยายที่เหมาะสมในการใช้งาน จึงเป็นสิ่งที่จะต้องอย่างมากสำหรับผู้ออกแบบสายอากาศ นิยามอัตราขยายของสายอากาศนั้น จะเป็นการพิจารณากำลังคลื่นวิทยุที่แพร่จากสายอากาศหนึ่งเทียบกับกำลังคลื่นวิทยุที่แพร่จากอีกสายอากาศหนึ่ง ณ ตำแหน่งภายในบริเวณที่ห่างไกลจากสายอากาศทั้งสอง ซึ่งได้กำหนดนิยามไว้ คือ อัตราขยายของสายอากาศเป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังการแพร่ที่สูงที่สุดต่อหนึ่งมุมตัน (unit solid angle) ของคลื่นวิทยุที่กำลังแพร่จากสายอากาศที่กำลังพิจารณา กับกำลังการแพร่ต่อหนึ่งมุมตันของคลื่นวิทยุที่กำลังแพร่จากสายอากาศสมมุติแบบไอโซทรอปิก (Isotropic source) (ซึ่งมีกำลังการแพร่ในทุกทิศทางเท่ากัน) โดยสายอากาศทั้งสองนั้นได้รับการกระตุ้นด้วยกำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่มีค่าเท่ากัน และทำการวัดค่ากำลังการแพร่ทั้งสองในตำแหน่งเดียวกัน โดยที่ตำแหน่งที่วัดนั้นอยู่ในบริเวณระยะไกล (far-field region) โดยทั่วไปนิยามระบุค่าอัตราขยายในหน่วยเดซิเบล (dBi) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$G_{dBi} = 10 \cdot \log_{10}(G) \quad (2.9)$$

นอกจากนั้น สำหรับสายอากาศแพร่สัญญาณมักนิยามวัดอัตราขยายในหน่วย dBd ซึ่งเป็นการเทียบกับกำลังการแพร่ต่อหนึ่งมุมตันของคลื่นวิทยุที่กำลังแพร่จากสายอากาศชนิดไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่น (Half-Wave Dipole) แทนที่จะทำการเทียบกับกำลังการแพร่ต่อหนึ่งมุมตันของคลื่นวิทยุที่กำลังแพร่จากสายอากาศสมมุติแบบไอโซทรอปิก (Isotropic source) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$G_{dBd} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{G}{1.64}\right) \quad (2.10)$$

ดังนั้น อัตราขยายของสายอากาศในหน่วย dBd และ dBi จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$G_{dBd} = G_{dBi} - 2.15dB \quad (2.11)$$

จึงมีข้อสังเกตว่า อัตราขยายของสายอากาศควรมีค่ามากกว่าอัตราขยายของสายอากาศชนิดไดโพลแบบครึ่งความยาวคลื่น (Half-Wave Dipole) ซึ่งควรมีค่ามากกว่า 2.15 dBi หรือ 0.0 dBd

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างคุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณ [37]

Specification	Channels		
	2 to 6	7 to 13	14 to 83
Types	VHF	VHF	UHF
Frequency (MHz)	54-88	174-216	470-890
MAX to MIN Radiation in FCC standards	10	10	15
MAX E.R.P. (kW) @ 75% TL-EFF.	4-6	12-18	25-60
Gain	4-6	12-18	25-60

- ค่าประสิทธิผลกำลังการแพร่กระจายคลื่น (Effective Radiated Power: ERP)

อัตราขยายจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิผลกำลังการแพร่กระจายคลื่นสูงสุด (Max ERP) โดยค่า ERP มีค่าเท่ากับผลคูณของค่ากำลังไฟฟ้าของเครื่องส่งกับอัตราขยายของสายอากาศ (ERP = Transmitter Power x Antenna Gain) สำหรับกิจการกระจายเสียงคลื่นวิทยุและโทรทัศน์ให้ครอบคลุมพื้นที่บริการ ระบบสถานีส่งต้องมีค่า ERP ที่เหมาะสม บทความของ H.E. Gihring ได้ระบุว่า การลดการใช้กำลังไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องออกแบบให้สายอากาศมีอัตราขยายสูงที่มากพอ และได้ยกตัวอย่างการกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศเพื่อการกระจายสัญญาณโทรทัศน์จำนวน 83 ช่องสัญญาณ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 และพบว่า สายอากาศสำหรับการใช้งานในย่านความถี่ UHF ต้องการค่าอัตราขยายที่สูงกว่าย่านความถี่ VHF เนื่องจาก (1) ต้องการค่า ERP ที่สูงกว่าเพื่อการกระจายสัญญาณได้ครอบคลุมพื้นที่กว้างขึ้น (2) ต้องการเครื่องส่งที่มีกำลังไฟฟ้าสูงกว่า ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับอุปกรณ์สูงขึ้นตามไปด้วย (3) ต้องการประหยัดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเครื่องส่ง จึงเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าควบคู่กับการเลือกใช้สายอากาศที่มี Gain สูงมากพอ นั่นเอง



- **แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)**

การปรับเพิ่มค่า ERP ของระบบสายอากาศให้สูงขึ้น โดยการออกแบบให้สายอากาศมีค่าอัตราขยายเพิ่มขึ้นนั้น มีความจำเป็นต้องตระหนักถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้วย เนื่องจากการเพิ่มค่าอัตราขยาย จะส่งผลให้เกิดการลดลงของขนาดลำคลื่นหลัก (Main Beam) และขนาดพื้นที่ให้บริการ นอกจากนี้ ควรคำนึงถึงระดับความสูงของสายอากาศด้วย

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ นิยมพิจารณาจากแบบรูปการแพร่ตามแนวแอสิมัท (Azimuthal Pattern) และแบบรูปการแพร่ตามแนวตั้ง (Vertical Pattern) โดยที่แบบรูปการแพร่ตามแนวแอสิมัทเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของอัตราขยายกำลังของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่จากสายอากาศเทียบกับมุมใดๆตามแนวนอน ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการกระจายสัญญาณและการปรับความลาดเอียงของกำลังคลื่น (beam tilt) ให้เหมาะสม ในขณะที่แบบรูปการแพร่ตามแนวตั้งเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่จากสายอากาศ ณ ตำแหน่งที่อยู่ในบริเวณสนามระยะไกล (Far-Field region or Fraunhofer region) เทียบกับมุมใดๆตามแนวตั้ง ซึ่งใช้ในการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการสะท้อนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับพื้นผิวโลก

#### 2.4.2 ความต้านทานด้านเข้าของระบบสายอากาศ (Antenna Input Impedance)

การกำหนดคุณลักษณะของความต้านทานด้านเข้าของสายอากาศ เพื่อให้เข้ากันได้กับสายส่งที่นำกระแสไฟฟ้ามายังสายอากาศ และลดการสะท้อนกลับของคลื่นที่เดินทางจากสายอากาศไปยังเครื่องส่งในทางปฏิบัติ ภายในระบบสายอากาศจะเกิดการสะท้อนของคลื่นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่เชื่อมระหว่างกันภายในระบบ จึงนิยมตรวจจกระดับความไม่ต่อเนื่องด้วยการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR: Voltage Standing Wave Ratio) ของแต่ละช่องสัญญาณหรือแต่ละช่วงความถี่ ซึ่งค่า VSWR จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบวิธีการ Matching ให้เหมาะสม

เพื่อให้เกิดกำลังการแพร่ของความถี่พาห้สูงสุด ในทางทฤษฎีการออกแบบจะกำหนดให้ค่า VSWR ของระบบเท่ากับ 1.05 แต่ในทางปฏิบัตินั้น นิยมกำหนดคุณลักษณะของอุปกรณ์ด้วยค่าการสะท้อนของสัญญาณพัลส์ที่ทำการทดสอบ โดยกำหนดไว้ไม่ให้สูงกว่า 3% ดังนั้น การกำหนดคุณลักษณะจึงมีความจำเป็นอย่างมาก เพื่อให้ได้รับระบบที่มีประสิทธิภาพตามที่มุ่งหวังไว้

หลังจากการกำหนดคุณลักษณะของอุปกรณ์แล้ว ขั้นตอนต่อมา คือ การทดสอบระบบ โดยมีจุดประสงค์หลัก คือ (1) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการเชื่อมต่อของสายส่งสัญญาณกับอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบ (2) เพื่อตรวจวัดค่าการสะท้อนบริเวณรอยต่อที่เกิดจากการเชื่อมต่อสายส่งกับอุปกรณ์ที่อยู่ส่วนบนของเสาส่งสัญญาณ (3) เพื่อตรวจวัดค่าความต้านทานด้านเข้าของอุปกรณ์ตั้งแต่ตำแหน่งด้านเข้าของสายส่งจนถึงสายอากาศ โดยปกติแล้ว ถ้าการทดสอบในข้อ (1) และ (2) อยู่ในเกณฑ์ที่จะส่งผลให้การทดสอบข้อ (3) อยู่ในเกณฑ์ที่ดีตามไปด้วย

- **การทดสอบสายส่งสัญญาณและอุปกรณ์**

ด้วยคุณสมบัติของสายส่งสัญญาณถูกออกแบบเพื่อให้มีการส่งผ่านสัญญาณได้หลายช่วงความถี่ ดังนั้นการทดสอบการเชื่อมต่อของสายสัญญาณกับอุปกรณ์ จึงนิยมใช้สัญญาณที่มีแถบความถี่กว้าง คือ สัญญาณพัลส์กระแสตรง (DC Pulse) ซึ่งเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแต่ครอบคลุมหลายช่วงความถี่ โดยนิยมนำกำหนดช่วงคาบของสัญญาณไว้ประมาณ 20 นาโนวินาที และหน้าคลื่น (wave front) ต้องมีความชันมากพอเพื่อช่วยต่อการตรวจจับผลการสะท้อนของแต่ละรอยต่อของอุปกรณ์ด้วยเครื่องออสซิลอโคป เช่น การตรวจจับขนาดของสัญญาณพัลส์ว่ามีค่าเพิ่มขึ้นมากน้อยเพียงใด เพราะนั่นหมายถึง การเกิดรอยต่อที่ไม่สมบูรณ์หรือเกิดความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ นอกจากการใช้สัญญาณพัลส์กระแสตรงแล้ว ยังนิยมใช้สัญญาณพัลส์ความถี่วิทยุ (RF Pulse) เพื่อตรวจวัดความไวต่อความถี่ของอุปกรณ์ร่วมด้วย

- **การทดสอบการแมตซ์ของสายอากาศ**

วิธีการวิเคราะห์การจับคู่ (Matching) ของสายอากาศหลังจากการติดตั้งนั้น ในทางปฏิบัติของภาคอุตสาหกรรมมีด้วยกัน 2 วิธีการ คือ วิธีแรกเป็นวิธีการวัดผลตอบสนองของการกระตุ้นด้วยสัญญาณความถี่วิทยุในหลายช่วงความถี่ (RF sweep measurement method) มักถูกนำมาใช้ในงานสายอากาศช่วงความถี่ VHF เนื่องจากวิธีการนี้มักให้ข้อมูลในการวิเคราะห์ได้ดีกว่าวิธีการวัดค่า VSWR และวิธีการที่สอง เป็นวิธีการวัดผลตอบสนองของระบบด้วยการกระตุ้นด้วยพัลส์ความถี่วิทยุ (RF Pulse Test Method) ถูกนำมาใช้สำหรับงานสายอากาศช่วงความถี่ UHF โดยที่นิยมนำกำหนดให้ช่วงคาบประมาณ 0.25 ไมโครวินาที

- **ผลการตอบสนองของระบบสายอากาศ**

โดยทั่วไประบบสายอากาศสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ สายอากาศและอุปกรณ์เชื่อมต่อที่อยู่ส่วนบนของหอคอย (Far-End Components) สายส่งสัญญาณ (Transmission Line) และอุปกรณ์เชื่อมต่อที่อยู่ติดกับเครื่องส่ง (Close-in Components) ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณ จึงทำให้ค่าความถี่ของคลื่นแรงดันและคลื่นกระแสไฟฟ้าบนสายส่งเกิดการเปลี่ยนแปลง และส่งผลให้ความยาวทางไฟฟ้าของสายส่งสัญญาณมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่น เป็นเหตุให้ความต้านทานโดยรวมของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ค่าความถี่ของคลื่นแรงดันและคลื่นกระแสเพิ่มขึ้นหรือลดลงเพียงเล็กน้อยนั้น ความยาวทางไฟฟ้าของสายส่งสัญญาณอาจจะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น เป็นเหตุให้ความต้านทานโดยรวมของระบบมีค่าลดลง

ความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณ จะส่งผลกระทบต่อใน 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลาแรก ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่คลื่นแรงดันแพร่ผ่านรอยต่อระหว่างเครื่องส่งกับสายส่ง ซึ่งมักจะอยู่ในระยะไม่เกิน 100 ฟุตจากเครื่องส่ง และจะเกิดคลื่นแรงดันสะท้อนกลับมายังเครื่องส่งในช่วงระยะเวลาเพียง 0.1-0.2 ไมโครวินาที และช่วงที่สอง ซึ่งเป็นช่วงที่คลื่นแรงดันแพร่ผ่านรอยต่อระหว่างสายส่งกับสายอากาศ ซึ่งสัญญาณย้อนกลับเหล่านี้จะรวมกันจนกลายเป็นส่วนหนึ่งของสัญญาณด้านเข้า ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการระมัดระวังการเพิ่มขึ้นของระดับสัญญาณ ณ ตำแหน่งของเครื่องส่ง

อย่างไรก็ตาม เป็นไปไม่ได้ที่จะไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นแรงดัน ณ บริเวณรอยต่อ โดยทั่วไปจึงทำการทดสอบการเชื่อมต่อสายส่งกับเครื่องส่ง โดยค่า VSWR ที่ยอมรับได้ควรไม่เกิน 1.1 และทำการทดสอบการเชื่อมต่อสายส่งกับสายอากาศ โดยค่า VSWR ที่ยอมรับได้ควรไม่เกิน 1.1 เช่นเดียวกัน ดังนั้น เมื่อทำการเชื่อมต่อทั้งสองส่วนเข้าด้วยกัน และทดสอบวัดค่า VSWR อีกครั้ง ค่า VSWR ควรวัดได้อยู่ในช่วง 1.0-1.2 หรือกล่าวได้ว่า กำลังไฟฟ้ามักมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.8 dB ซึ่งจะเห็นได้ว่า เกิดผลกระทบขึ้นค่อนข้างน้อย แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นนี้ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า เครื่องส่งสัญญาณมีความต้านทานเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 20%

### **2.4.3 ความเข้มของสนาม (Field Strength)**

ความเข้มของสนามที่เครื่องรับวิทยุ จะใช้เป็นตัวชี้วัดว่า ระบบสถานีส่งมีเสถียรภาพในการส่งคลื่นวิทยุมากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถทำการวัดออกเป็นค่า SNR (Signal-to-Noise-Ratio) มีหน่วยเป็น dB เช่น ในกรณีที่เครื่องรับวิทยุสามารถรับคลื่นวิทยุที่มีค่าความเข้มของสนามสูงมากเมื่อเทียบกับความเข้มของสัญญาณรบกวน นั้นหมายถึง เครื่องรับจะได้รับสัญญาณที่ดี และมีค่า SNR ค่อนข้างสูง แต่ในทางกลับกัน กรณีที่เครื่องรับวิทยุสามารถรับคลื่นวิทยุที่มีค่าความเข้มของสนามใกล้เคียงกับความเข้มของสัญญาณรบกวน นั้น

หมายถึง เครื่องรับจะได้รับสัญญาณที่ไม่ดี และมีค่า SNR ค่อนข้างต่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น ความไวของตัวรับสัญญาณ การถูกรบกวนบนเส้นทางการแพร่ของสนาม สัญญาณรบกวนหลายทิศทาง (Multipath Interference) สัญญาณรบกวนร่วมช่อง (co-channel interference) เป็นต้น ดังนั้น จึงนิยามกำหนดค่าความเข้มของสนาม เพื่อให้เกิดประสิทธิผลในระหว่างการทำงานกระจายสัญญาณ เช่น การกำหนดค่าความเข้มของสนามสำหรับการกระจายเสียงและโทรทัศน์ของหน่วยงาน FCC และ CCIR ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าความเข้มของสนามที่กำหนดเพื่อการกระจายเสียงและโทรทัศน์ [38]

Television (FCC)			
Channel	2-6	7-13	14-83
Grade-A (dBm)	68	71	74
Grade-A ( $\mu V/m$ )	2510	3550	5010
Grade-B (dBm)	47	56	64
Grade-B ( $\mu V/m$ )	224	631	1585
Principal Community (dBm)	74	77	80
Principal Community ( $\mu V/m$ )	5010	7080	10000
FM Radio (CCIR)	Principal City	Urban	Rural
Mono (dBm)	69	60	48
Mono ( $\mu V/m$ )	3000	1000	250
Stereo (dBm)	74	66	54
Stereo ( $\mu V/m$ )	5000	2000	500

จะเห็นได้ว่า ความเข้มของสนามที่วัดได้จริง ณ จุดสังเกตใดๆ นั้น จะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่คลื่นแพร่ผ่าน (Propagation Conditions) จากตำแหน่งเครื่องรับสัญญาณจนถึงจุดสังเกต เช่น ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นของช่องอากาศ ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของพื้นผิว (ทะเล เนินเขา พื้นดิน) และสิ่งกีดขวาง เป็นต้น ดังนั้น การวางแผนเพื่อกำหนดค่าความเข้มของสนามให้เหมาะสมในแต่ละพื้นที่จึงเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างมาก และค่อนข้างยุ่งยากในการวิเคราะห์ เนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่มีความซับซ้อนอย่างมาก

#### 2.4.4 ค่าพิกัดของแรงดันและกำลังไฟฟ้า (Voltage and Power Rating)

การพิจารณาค่าพิกัดของแรงดันและกำลังไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการกระจายเสียงและโทรทัศน์นั้นเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญ โดยทั่วไปมักกำหนดพิกัดของกำลังไฟฟ้าไว้สูง เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่า การกระจายสัญญาณได้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องบริการอย่างทั่วถึง แต่ในขณะเดียวกัน ต้องคำนึงถึงพลังงานความร้อนและค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นที่อุปกรณ์ด้วย ดังนั้น หลักของการคำนวณพิกัดแรงดันและกำลังจึงต้องดำเนินการอย่างระมัดระวัง นอกจากนี้ จำเป็นต้องตระหนักถึงความแตกต่างระหว่างการกระจายสัญญาณด้วยระบบแอนะล็อกและระบบดิจิทัล

สำหรับระบบโทรทัศน์แบบแอนะล็อก การคำนวณค่าพิกัดแรงดันของหนึ่งช่องสัญญาณ ต้องทราบถึงจำนวนของคลื่นพาห์ที่อยู่ในหนึ่งช่องสัญญาณ เช่น ถ้าช่องสัญญาณประกอบสัญญาณภาพและสัญญาณเสียง เมื่อทำการพิจารณาจำนวนของสัญญาณ จำเป็นต้องพิจารณาสัญญาณคลื่นพาห์ของสัญญาณภาพและสัญญาณคลื่นพาห์ของสัญญาณเสียง เป็นต้น ดังนั้น ค่าพิกัดแรงดันที่กระตุ้นเครื่องส่งนั้นต้องคำนวณจากพิกัดแรงดันทุกคลื่นพาห์ในระบบ ซึ่งอาจจะเป็นระบบช่องสัญญาณเดี่ยวหรือระบบหลายช่องสัญญาณ ค่าระดับแรงดันในขณะที่ทำการส่งนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงแรกเป็นช่วงเวลาเริ่มต้นของการส่งสัญญาณ มักจะเกิดระดับแรงดันสูงสุด และช่วงเวลาต่อมาเป็นช่วงของการดำเนินการส่งสัญญาณต่อเนื่อง ทั้งนี้มักพิจารณาระดับแรงดันด้วยค่าเฉลี่ย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$V = \sqrt{P \times Z_{in}} \times \sqrt{2} \quad (2.12)$$

โดยที่  $P$  เป็นค่าพิกัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องส่งและ  $Z_{in}$  เป็นค่าความต้านทานด้านเข้าของระบบสายอากาศ

สำหรับระบบโทรทัศน์แบบดิจิทัล รูปแบบของสัญญาณจะมีความแตกต่างจากรูปแบบสัญญาณในระบบแอนะล็อก เนื่องจากระบบดิจิทัลจะมีการมอดูเลตให้สัญญาณภาพและสัญญาณเสียงอยู่ในสัญญาณเดียวกัน ทำให้ค่าพิกัดของกำลังเฉลี่ยและกำลังสูงสุดจะแตกต่างกันมาก เช่น ระบบ COFDM ของสหราชอาณาจักร ซึ่งจะมีค่ากำลังสูงสุดเป็น 10 เท่าของกำลังเฉลี่ย และระบบ ATV ของประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งจะมีค่ากำลังสูงสุดเป็น 5 เท่าของกำลังเฉลี่ย ดังนั้น การคำนวณพิกัดกำลังไฟฟ้าในระบบโทรทัศน์แบบดิจิทัล จำเป็นต้องทราบถึงชนิดของระบบเสียก่อน เนื่องจากในแต่ละระบบมีความแตกต่างกัน

## 2.5 สภาพปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบวิทยุกระจายเสียง

ระบบวิทยุกระจายเสียงถือเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการส่งข้อมูลข่าวสารจากภาครัฐและภาคเอกชนไปยังประชาชนจำนวนมากในเวลาเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ระบบวิทยุกระจายเสียงจึงได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีการริเริ่มการสร้างระบบต้นแบบโดย Edwin Armstrong ในช่วงปี ค.ศ. 1920-1930 ด้วยอาศัยหลักการมอดูเลชันทางความถี่ (Frequency Modulation: FM) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของการส่งข้อมูลแบบไร้สาย ข้อมูลที่ข่าวสารจะถูกเข้ารหัสและใช้เป็นตัวกำหนดการปรับเปลี่ยนค่าความถี่ของคลื่นพาห์ เมื่อระบบใช้งานได้ดีจึงถูกนำไปทดลองใช้งานจริงในปี ค.ศ. 1940 โดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร FCC (Federal Communication Commission) ซึ่งเป็นหน่วยงานของรัฐบาลสหรัฐอเมริกา หลังจากนั้น ภาคเอกชนจึงนำไปพัฒนาและนำมาใช้เพื่องานธุรกิจการกระจายเสียงในปี ค.ศ. 1945 [39] ซึ่งได้มีการใช้งานในช่วงความถี่ตั้งแต่ 88 – 108 MHz

ในประเทศไทยพระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัว (รัชกาลที่ 7) ได้โปรดเกล้าฯ ให้มีการก่อตั้งสถานีวิทยุแห่งแรก คือ “สถานีวิทยุกรุงเทพฯ ที่พญาไท” ณ พญาไท เมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2473 (ปี ค.ศ. 1930) ซึ่งตรงกับวันพระราชพิธีฉัตรมงคล จึงทำให้ประเทศไทยมีการริเริ่มใช้งานระบบวิทยุกระจายเสียง (Radio Broadcasting) [40] ในกาลนั้นได้อัญเชิญกระแสพระราชดำรัสของพระบาทสมเด็จพระปกเกล้าเจ้าอยู่หัว จากพระที่นั่งอมรินทรวินิจฉัย ถ่ายทอดสดผ่านสายเข้าเครื่องส่งกระจายเสียงสู่พสกนิกรด้วยกำลังส่ง 2.5 กิโลวัตต์ โดยมีใจความตอนหนึ่งว่า “การวิทยุกระจายเสียงที่เตรียมจัดตั้งขึ้นและทำการทดลองตลอดมานั้นก็ด้วยความมุ่งหมายที่จะส่งเสริมการศึกษา การค้าขาย และการบันเทิงแก่พสกนิกรประชาชน” และได้มีพัฒนาการแพร่หลายเรื่อยมาจนถึงปัจจุบันและได้กำหนดเป็นวันวิทยุกระจายเสียงแห่งชาติ ตรงกับวันที่ 25 กุมภาพันธ์ของทุกปี เป็นวันที่กำหนดขึ้นเพื่อรำลึกถึงสถานีวิทยุกระจายเสียงอย่างเป็นทางการแห่งแรกของไทย

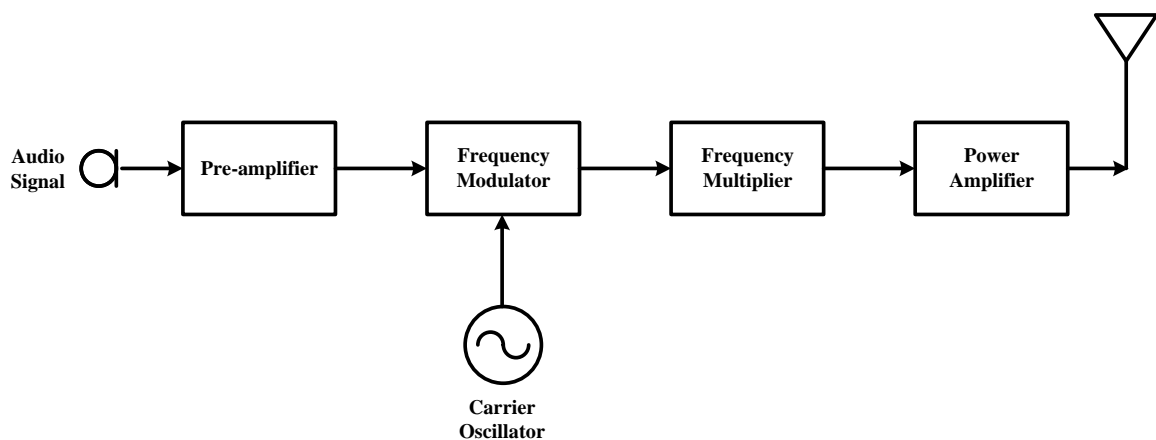
กระบวนการทำงานของระบบการส่งวิทยุกระจายเสียงในช่วงเวลาที่ผ่านมา จะเริ่มจากการเปลี่ยนเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้าในระบบแอนะล็อก แล้วนำสัญญาณเสียงผสมกับคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อให้เหมาะสมในการส่งในช่องอากาศ ซึ่งเทคนิคการผสมสัญญาณนั้น คือ การมอดูเลตแอมพลิจูด (Amplitude Modulation) ซึ่งส่งกระจายเสียงในย่านความถี่ปานกลาง (Medium frequency) ต่อมาได้้นำการมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation) มาใช้งานร่วมด้วย ซึ่งเป็นการผสมสัญญาณเสียงกับคลื่นวิทยุโดยใช้เทคนิคเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นวิทยุ ทำให้คุณภาพเสียงในการรับฟังจากเครื่องรับวิทยุดีขึ้นกว่าเทคนิคเดิม

ปัจจุบันการส่งวิทยุกระจายเสียงได้กำลังปรับเปลี่ยนจากการใช้งานระบบแอนะล็อกให้เป็นระบบดิจิทัล (Digital) จึงมีการนำสัญญาณเสียงแบบแอนะล็อกมาทำการเข้ารหัสให้เป็นสัญญาณดิจิทัล และผสม

กับคลื่นวิทยุ ดังนั้น อุปกรณ์การส่งวิทยุกระจายเสียงจึงถูกแทนที่ด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อการจัดผังรายการวิทยุ การผลิตรายการวิทยุ การควบคุมการทำงานออกอากาศ การสั่งงานด้วยระบบการควบคุมจากระยะไกล (Remote Control) อีกด้วย

### 2.5.1 โครงสร้างการทำงานพื้นฐานของเครื่องส่งแบบเอฟเอ็ม

โครงสร้างการทำงานพื้นฐานของเครื่องส่งแบบเอฟเอ็ม ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น ส่วนหลักๆ ดังนี้



รูปที่ 2.13 โครงสร้างการทำงานพื้นฐานของระบบกระจายเสียงแบบ FM

ส่วนที่หนึ่ง คือ วงจรขยายภาคต้น (Preamplifier) ทำหน้าที่ขยายแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงที่ออกจากไมโครโฟนให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ก่อนการป้อนเข้าสู่วงจรมอดูเลต เพื่อการมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นพาห้จากแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ โดยทั่วไปจะเพิ่มวงจรกรองเข้าไประหว่างวงจรขยายสัญญาณเสียงและวงจรมอดูเลต เพื่อทำหน้าที่ปรับปรุงค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio: SNR) ที่ความถี่สูง ในการส่งสัญญาณก็จะมี การเน้นล่วงหน้า (pre-emphasis) เพื่อลดการรบกวนของสัญญาณความถี่สูง

ปัจจุบันสัญญาณเข้า (input signal) ของระบบ คือ สัญญาณเสียง ซึ่งอาจเกิดจากอุปกรณ์กำเนิดเสียงหลายรูปแบบ เพื่อพัฒนาคุณภาพของสัญญาณเสียง เช่น แผงหน้าปัดคอนโซลการกระจายเสียง (Broadcast Console) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ปรับแต่งให้การมอดูเลตได้ดุล (Balanced modulation) ระบบประมวลผลสัญญาณ (Signal-processing system) ซึ่งเป็นระบบสำหรับปรับแต่งสัญญาณหรือหน่วงสัญญาณให้ต่างไปจากรูปแบบเดิมตามความต้องการของผู้ควบคุมเสียง โดยมักจะประกอบด้วย ตัวปรับเท่า (Equalizer) วงจร

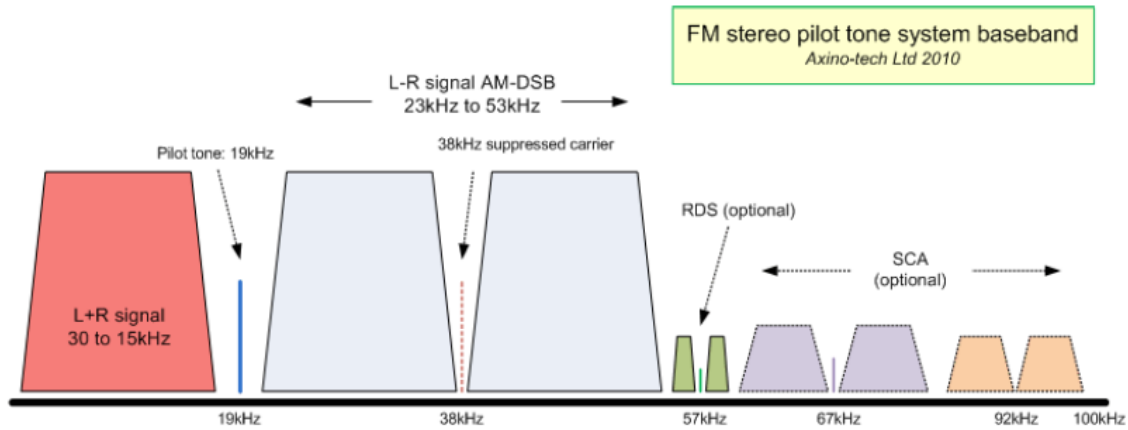
จำกัดค่า (Limiter) ตัวอัดแอมพลิฟายด์ (Compressors) ตัวกลับทิศการหมุน (Reverser) การปรับเสียงสะท้อน และเครื่องเล่นจาน เป็นต้น

**ส่วนที่สอง คือ วงจรกำเนิดสัญญาณ (Oscillator)** ทำหน้าที่ผลิตคลื่นพาห์ ซึ่งวงจรที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการกำเนิดค่าความถี่ของสัญญาณที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและมีความเป็นเสถียรภาพสูง เนื่องจากวงจรที่ขาดเสถียรภาพนั้น จะทำให้สัญญาณมีค่าความถี่ผิดเพี้ยนไปจากค่าที่ต้องการได้โดยง่าย และเป็นต้นเหตุให้เกิดการรบกวนกับช่องสัญญาณข้างเคียงได้ โดยทั่วไปวงจรกำเนิดสัญญาณจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่อาศัยออสซิลเลเตอร์ผลึก (Crystal oscillator) และประเภทที่อาศัยวงจรสังเคราะห์ความถี่ (Frequency synthesizer) ข้อดีของประเภทแรก คือ ให้ความถี่คงที่แน่นอน แต่มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าความถี่ได้โดยง่าย ด้วยข้อเสียดังกล่าว จึงมีการพัฒนางจรให้ปรับความถี่ได้ โดยสามารถมีค่าความถี่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของของฮาร์โมนิคพื้นฐาน อย่างไรก็ตาม ยังเกิดจุดที่ควรพัฒนา คือ การลดความคลาดเคลื่อนของค่าความถี่ และการลดสัญญาณที่เกิดขึ้นจากความร้อนที่เพิ่มขึ้นภายในวงจร

สำหรับประเภทที่สอง คือ การกำเนิดสัญญาณโดยอาศัยวงจรสังเคราะห์ความถี่นั้น มีข้อดี คือ วงจรมีความเสถียรภาพสูง และสามารถปรับช่วงความถี่ได้แม่นยำ ทั้งวิธีการสร้างคลื่นพาห์โดยตรงได้ในช่วงความถี่ 88-108 MHz หรือการสร้างคลื่นพาห์โดยอ้อม โดยเริ่มจากค่าความถี่ต่ำแล้วเพิ่มความถี่ขึ้นด้วยตัวพหุคูณความถี่ (Frequency multiplier)

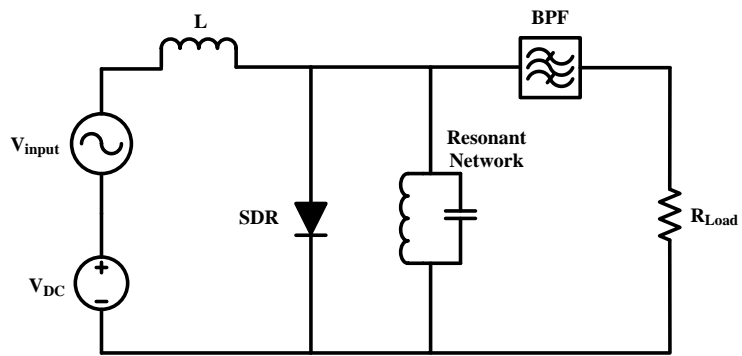
**ส่วนที่สาม คือ ส่วนของการมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation: FM)** เป็นการทำให้ค่าความถี่ของคลื่นพาห์มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสัญญาณเสียงที่ต้องการส่ง ซึ่งรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงของช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นจะครอบคลุมหลายค่าความถี่ เช่น ในรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงถึงสเปกตรัมของคลื่นเอฟเอ็ม แบบสเตอริโอ จะเห็นได้ว่า สัญญาณเสียงจะถูกมอดูเลตภายในช่วงความถี่ 30 Hz ถึง 15 kHz ซึ่งจัดเป็นช่วงแรกของสเปกตรัมของสัญญาณเบสแบนด์ เป็นต้น



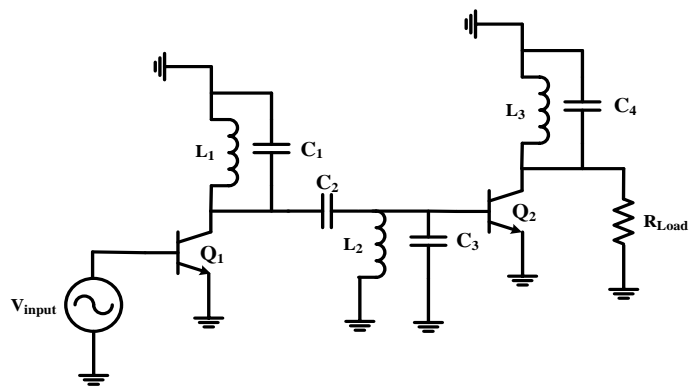


รูปที่ 2.14 สเปกตรัมของสัญญาณเบสแบนด์ของ FM แบบสเตอริโอ

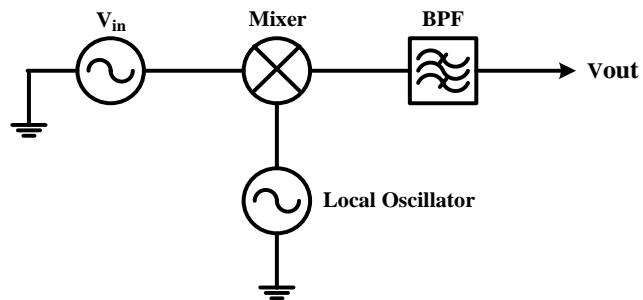
สเปกตรัมของสัญญาณเบสแบนด์จะขยายได้ถึง 100 kHz ถ้ามีความต้องการใช้งานทางเลือก ดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยมีรายละเอียดช่วงความถี่ที่สำคัญของแต่ละองค์ประกอบ (ระดับขนาดในแนวตั้งไม่ได้แสดงถึงค่ากำลังของสัญญาณ เนื่องจากระดับกำลังของสัญญาณเสียงมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา) ช่องแรกของสเปกตรัมของสัญญาณเบสแบนด์ คือ ช่วงความถี่ 30 Hz – 15 kHz เป็นช่วงความถี่ของสัญญาณเสียงที่ถูกเข้ารหัสไว้ ซึ่งสัญญาณเสียงอาจจะเป็นสัญญาณเสียงของลำโพงแบบสเตอริโอ หรืออาจเป็นสัญญาณเสียงแบบโมนอช่วงความถี่ 23 kHz – 53 kHz ช่องที่สองของสเปกตรัม คือ การเว้นช่วงความถี่ที่ 19 kHz เพื่อใช้สำหรับเสียงสัญญาณนำ (Pilot tone) และช่องที่สามของสเปกตรัม คือ สัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลตแบบ AM-DSB โดยที่จะเว้นช่วงความถี่ที่ 38 kHz ไว้เพื่อถอดรหัสสัญญาณในการตีมอดูเลต (demodulation) ดังนั้นสเปกตรัมของสัญญาณเบสแบนด์จะสิ้นสุดเพียงช่วงความถี่กว้างความถี่ 53 kHz และช่วงความถี่ที่เหลือนั้นจะถูกใช้งานสำหรับ RDS (ระบบข้อมูลวิทยุ) และ SCA (Subsidiary Carrier Authorizations) ในกรณีที่มีการใช้งานโหมดของ RDS และ SCA อาจจะนำไปสู่การลดลงของประสิทธิภาพของการมอดูเลต เนื่องจากจะส่งผลต่อการเบี่ยงเบนค่าความถี่ และนำไปสู่การลดลงของค่า SNR



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.15 วงจรทวีคูณความถี่ (ก) อาศัย Step Recovery Diode

(ข) อาศัยทรานซิสเตอร์ (ค) อาศัย Mixer

**ส่วนที่สี่ คือ วงจรคูณ (Multiplier)** เป็นวงจรที่มีการมอดูเลตให้สัญญาณมีความถี่สูงขึ้นเป็นจำนวนเท่า เช่น 2 เท่า 3 เท่า และ 4 เท่า เป็นต้น โดยอาศัยการทำงานอุปกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ไดโอด (Diode) และทรานซิสเตอร์ (Transistor) ร่วมกับวงจรเรโซแนนซ์ความถี่หรือมิเซอร์ (Mixer) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่า ส่วนของวงจรคูณ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน นอกเหนือจากความไม่แม่นยำและความไม่เป็นเสถียรภาพของวงจรถ้าเนตสัญญาณ การรับสัญญาณจากสถานีข้างเคียงเข้ามาทำให้เกิดการมอดูเลตระหว่างกันแบบกลับทาง (Reverse intermodulation: RIM) และวงจรกรองที่ไม่มีคุณภาพเพียงพอที่จะกรองสัญญาณแปลกปลอมที่เข้ามา

**ส่วนที่ห้า คือ วงจรขยายกำลัง** เป็นอุปกรณ์ส่วนท้ายสุดที่ทำหน้าที่ขยายกำลังของคลื่นเอฟเอ็ม เพื่อให้มีการแพร่กระจายสัญญาณครอบคลุมรัศมีที่ต้องการ โดยทั่วไปวงจรขยายกำลังจะอาศัยอุปกรณ์ที่มีความไม่เป็นเชิงเส้น เช่น ทรานซิสเตอร์ (Transistor) และเฟท (FET) ดังนั้น ในส่วนนี้จึงมีโอกาสที่จะก่อให้เกิดการมอดูเลตระหว่างกันได้เช่นกัน

## 2.5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นภายในระบบการส่งคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม

ระบบการส่งคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม มักจะเกิดปัญหาเกี่ยวกับการรบกวนของสัญญาณแปลกปลอม ซึ่งส่วนใหญ่สัญญาณแปลกปลอม จะมีค่าความถี่ใกล้เคียงกับสัญญาณคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม เนื่องจากสัญญาณทั้งสองเกิดขึ้นจากการมอดูเลตด้วยอุปกรณ์ภายในสถานีส่งเดียวกัน หรือสัญญาณที่มาจากสถานีส่งที่ตั้งอยู่ใกล้เคียงกัน สัญญาณแปลกปลอมเหล่านี้จึงมีอิทธิพลต่อความมีเสถียรภาพในการทำงานของระบบ โดยเฉพาะในกรณีที่สัญญาณรบกวนมีระดับกำลังงานที่สูงและอุปกรณ์กรองสัญญาณมีประสิทธิภาพการทำงานต่ำ

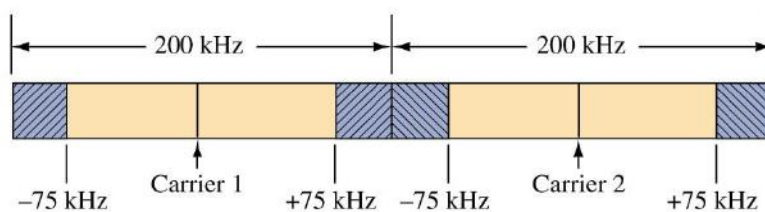
- **แบนด์วิดท์ของสัญญาณคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม**

ผลของการมอดูเลตความถี่ จะได้รับสัญญาณคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็มที่มีค่าความถี่เบี่ยงเบนตามขนาดของสัญญาณเสียง เช่น ถ้าสัญญาณเสียงมีแอมพลิจูดเท่ากับศูนย์ สเปกตรัมจะเกิดขึ้นที่ค่าความถี่คลื่นพาห์เท่านั้น แต่ถ้าสัญญาณเสียงมีแอมพลิจูดไม่เท่ากับศูนย์ สเปกตรัม ณ ค่าความถี่ของคลื่นพาห์จะมีค่าลดลงจากเดิม และมีสเปกตรัมเกิดขึ้นโดยกระจายตัวครอบคลุมโดยรอบค่าความถี่คลื่นพาห์ หรือมักเรียกว่า “ช่วงความถี่แถบข้าง (sideband)” เป็นต้น

ในทางทฤษฎีนั้น เมื่อมีการมอดูเลตสัญญาณที่สถานีส่ง โดยพิจารณาให้ช่วงความถี่แถบข้างของสัญญาณคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็มให้มีความกว้างเป็นอนันต์ และทำการส่งสัญญาณดังกล่าว จะพบว่า ผลรวมของสเปกตรัมในกรณีที่แอมพลิจูดของสัญญาณเสียงมีค่าเป็นศูนย์ จะมีค่าเท่ากับผลรวมของสเปกตรัมในกรณีที่แอม

พลิจูดของสัญญาณเสียงมีค่าไม่เป็นศูนย์ นอกจากนั้น เมื่อมีการดีมอดูเลตสัญญาณที่เครื่องรับ โดยพิจารณาให้ช่วงความถี่แถบข้างของสัญญาณคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็มให้มีความกว้างเป็นอนันต์เช่นเดียวกัน เครื่องรับจะได้รับสัญญาณเสียงที่สมบูรณ์แบบ หรือเรียกได้ว่าเป็นสัญญาณเสียงรูปแบบเดียวกับสัญญาณที่จะทำการมอดูเลตที่สถานีส่ง

การใช้ช่วงความถี่แถบข้างที่มีความกว้างเป็นอนันต์นั้น เป็นไปไม่ได้เพราะจะทำการส่งสัญญาณลักษณะนี้จะมีช่องสัญญาณที่ใช้งานได้เพียงช่องสัญญาณเดียวเท่านั้น แต่ในความเป็นจริง ช่องสัญญาณจำนวนมากกำลังเป็นที่ต้องการจากผู้ใช้งาน จึงจำเป็นต้องกำหนดขนาดของแบนด์วิดท์เพื่อให้มีช่องสัญญาณมากขึ้น ซึ่งตามมาตรฐานได้กำหนดค่าแบนด์วิดท์ไว้เท่ากับ 150 kHz โดยพิจารณาให้มีช่วงความถี่แถบข้างที่สูงกว่าและต่ำกว่าค่าความถี่คลื่นพาห์ไม่เกิน 75 kHz ตามรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ค่าแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณสำหรับสถานีวิทยุแบบ FM

- **แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่ถูกกำหนดเพื่อใช้ในการส่งคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม**

เพื่อการกระจายเสียงของแต่ละสถานีวิทยุภายในบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกัน แต่ละสถานีส่งคลื่นวิทยุเอฟเอ็ม จึงมีการกำหนดแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณไว้อย่างชัดเจน คือ 200 kHz ตามรูปที่ 2.16 ซึ่งครอบคลุมสเปกตรัมส่วนใหญ่ของสัญญาณคลื่นวิทยุเอฟเอ็มที่ต้องการส่งไปยังเครื่องรับวิทยุ แบนด์วิดท์ที่กำหนดขึ้นนั้นแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ส่วนแรกมีขนาดแบนด์วิดท์ 150 kHz เพื่อรองรับแบนด์วิดท์ของสัญญาณคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม ซึ่งมีการเบี่ยงเบนของสัญญาณแถบข้างด้านสูงกว่าและด้านต่ำกว่าค่าความถี่คลื่นพาห์ และส่วนที่สองมีขนาดแบนด์วิดท์ 50 kHz เรียกกันว่า แถบกัน (Guard Band) ถูกใช้เพื่อรักษาความปลอดภัยจากการรบกวนกันของช่องสัญญาณที่มีสเปกตรัมชิดกัน เนื่องจากสเปกตรัมบางส่วนของสัญญาณคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม ซึ่งมักจะเกิดสเปกตรัมภายนอกช่วงแบนด์วิดท์ในส่วนแรก เพราะไม่สามารถถูกกำจัดได้หมดโดยตัวกรอง ดังนั้น

ค่าแบนด์วิดท์ที่กำหนดขึ้นของช่องสัญญาณจึงเป็นกลไกสำคัญของกระบวนการการแยกแยะระหว่างสเปกตรัมของสัญญาณคลื่นวิทยุที่ต้องการส่งกับสเปกตรัมของสัญญาณแปลกปลอม

ปัญหาของการใช้ช่องสัญญาณในการส่งกระจายเสียงด้วยคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม มักจะเกิดขึ้นจากการปรับค่าขนาดของสัญญาณเบสแบนด์จนทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของสัญญาณมอดูเลตความถี่ สูงเกินกว่า 100% หรือมากกว่า 75 kHz ซึ่งนั่นหมายถึงการเกิดสเปกตรัมของสัญญาณแถบข้างในส่วนของแถบกัน จึงนำไปสู่การรบกวนช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน ดังนั้น กระบวนการมอดูเลตและการใช้งานตัวกรองสัญญาณ จึงเป็นกลไกสำคัญอย่างมากสำหรับการลดปัญหาการดังกล่าว

บทความวิชาการ [41] ได้พบว่า การกำหนดดัชนีการมอดูเลต (Modulation Index) จะส่งผลต่อการเกิดสเปกตรัมของสัญญาณ จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการคงอยู่ของสเปกตรัมที่มีนัยสำคัญภายในช่องสัญญาณ และการเกิดขึ้นของสเปกตรัมนอกช่องสัญญาณด้วย เนื่องจากอาจจะทำให้สเปกตรัมที่มีนัยสำคัญเกิดขึ้นภายนอกช่องสัญญาณได้ และนำไปสู่การส่งสัญญาณที่ผิดพลาดได้ ซึ่งสอดคล้องกับบทความวิจัย [42] เป็นงานวิจัยหนึ่งที่พยายามวิเคราะห์ความผิดเพี้ยนของสัญญาณแถบข้างจากการมอดูเลต โดยได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความผิดเพี้ยนของสัญญาณมอดูเลตและความผิดเพี้ยนของสเปกตรัมของคลื่นวิทยุ ในกรณีที่ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบเชิงเส้น ซึ่งพบว่า ความผิดเพี้ยนของการเบี่ยงเบนค่าความถี่ของสัญญาณมอดูเลตมักเกิดขึ้นจากคุณลักษณะของตัวกรองสัญญาณ แต่อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้รับดังกล่าวเป็นเพียงผลการคำนวณที่ทำการทดสอบร่วมกับอุปกรณ์เรโซเนเตอร์แบบหนึ่งโพลเท่านั้น

นอกจากนั้น ผลการทดสอบของ [42] ทำให้พบสิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับแบนด์วิดท์ คือ สำหรับการกระจายเสียงแบบสเตอริโอ ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณเบสแบนด์ที่มีการทำ SCA จะเกิดความเสื่อมลง ถ้ามีการใช้งานด้วยช่องสัญญาณที่มีค่าแบนด์วิดท์ขนาดต่ำกว่า 600 kHz และเมื่อใช้แบนด์วิดท์ขนาด 800 kHz จะทำให้เกิดประสิทธิภาพของเสียงที่ดีมากพอ ในกรณีที่ไม่มีการทำ SCA ผลตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณเบสแบนด์จะไม่เกิดความเสื่อมลง ถ้าขนาดของแบนด์วิดท์อยู่ระหว่าง 400 – 600 kHz อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบดังกล่าวอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า ค่าแบนด์วิดท์ของตัวกรองในภาครับมีแบนด์วิดท์ขนาดครอบคลุมทั้งหมด เพื่อเป็นการยืนยันว่า สัญญาณที่รับได้นั้นไม่เป็นสัญญาณที่มาจากช่องสัญญาณใกล้เคียง

บทความวิชาการ [41] ยังบรรยายถึงหลักการกำหนดช่วงแบนด์วิดท์ที่เหมาะสมในการใช้งานช่องสัญญาณตามกฎของ thumb long ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม หรือมักเรียกกันว่า “Carsons Rule” ซึ่งมีนิยาม คือ แบนด์วิดท์ที่สำหรับการส่งคลื่นแบบเอฟเอ็ม ต้องมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของการเบี่ยงเบนความถี่สูงสุด

จากการมอดูเลต ( $BW = 2 \times (\text{deviation} + \text{Maximum Modulating frequency})$ ) ซึ่งเมื่อพิจารณาตามลักษณะการใช้งานในแต่ละแบบ จะมีขนาดของแบนด์วิดท์ดังนี้

สำหรับการส่งคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็มแบบโมโน แบนด์วิดท์ที่ถูกครอบครองตามตามกฎของ Carsons Rule จึงมีค่าเท่ากับ 180 kHz ( $= 2 \times (75 \text{ kHz} + 15 \text{ kHz})$ ) โดยที่มีค่าเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดของสัญญาณมอดูเลตความถี่เท่ากับ 75 kHz และค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณเสียงสูงสุดเท่ากับ 15 kHz

สำหรับการส่งคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็มแบบสเตอริโอ แบนด์วิดท์ที่ถูกครอบครองตามตามกฎของ Carsons Rule จึงมีค่าเท่ากับ 256 kHz ( $= 2 \times (75 \text{ kHz} + 53 \text{ kHz})$ ) โดยที่มีค่าเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดของสัญญาณมอดูเลตความถี่เท่ากับ 75 kHz และค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณเสียงสูงสุดเท่ากับ 53 kHz

สำหรับการส่งคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็มแบบ SCA ค่าแบนด์วิดท์ที่ถูกครอบครองตามตามกฎของ Carsons Rule มีค่าสูงถึง 350 kHz ( $= 2 \times (75 \text{ kHz} + 100 \text{ kHz})$ ) โดยที่มีค่าเบี่ยงเบนความถี่สูงสุดของสัญญาณมอดูเลตความถี่เท่ากับ 75 kHz และค่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณเสียงสูงสุดเท่ากับ 100 kHz

- **แบนด์วิดท์ที่เหมาะสมสำหรับตัวกรองสัญญาณทางภาคส่ง**

ตัวกรองสัญญาณถือเป็นอุปกรณ์ที่ขาดเสียมิได้ในระบบการส่งสัญญาณ ซึ่งมีหน้าที่คอยป้องกันการเกิดปฏิสัมพันธ์ต่อกันระหว่างสัญญาณของแต่ละช่องสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณจึงเป็นอุปกรณ์ที่ถูกต้องการอย่างมากในระบบการส่งสัญญาณที่มีการใช้สายอากาศร่วมกัน ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถลดการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันภายในเครื่องส่งแต่ละตัว

การกำหนดแบนด์วิดท์ของตัวกรองสัญญาณให้มีความเหมาะสมสำหรับระบบการส่งคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็มที่มีการใช้งานโหมด SCA ได้ถูกบรรยายไว้ในบทความวิชาการ [41] โดยได้กล่าวถึง การวางแผนดำเนินการส่งคลื่นวิทยุของหน่วยงาน BCL (ภายหลังเรียกว่า Kordia) ซึ่งเป็นหน่วยงานหนึ่งในประเทศนิวซีแลนด์ ระบบดังกล่าวซึ่งประกอบด้วย เครื่องส่งคลื่นวิทยุขนาด 500 วัตต์ จำนวนมากกว่า 10 เครื่อง ซึ่งทำการส่งคลื่นไปยังสายอากาศภาคส่งอันเดียวกัน จึงทำให้ผลรวมของกำลังส่งเกิดขึ้นบนสายอากาศมีค่าสูงสุด 5 kW และมีขนาดแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณรวมทั้งสิ้น 1600 kHz เพื่อป้องกันการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน จึงมีการออกแบบและติดตั้งตัวกรองสัญญาณทางด้านขาออกของเครื่องส่ง โดยใช้อุปกรณ์รวมสัญญาณแบบ T-Combiner หรือแบบอินพีแดนซ์คงที่ (Lorenz) ซึ่งค่าแบนด์วิดท์ของตัวกรองสัญญาณที่นิยมใช้มีค่าเท่ากับ 256 kHz เนื่องจากการใช้งานโหมด SCA จะทำให้ฮาร์โมนิกของสัญญาณมีการเบี่ยงเบนเกินกว่าค่าแบนด์วิดท์

ค่อนข้างน้อย ซึ่งได้อ้างอิงตามกฎของ Carsons Rule (ระดับกำลังงานประมาณ 98% จะอยู่ภายในค่าแบนด์วิดท์ 256 kHz)

อย่างไรก็ตาม E. J. Anthony ได้ตั้งข้อสังเกตว่า การกำหนดแบนด์วิดท์ของตัวกรองสัญญาณไว้ 256 kHz เป็นค่าที่ต่ำเกินไป และเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดการบิดเบือนและสัญญาณไขว้แทรก (crosstalk) Anthony ได้กล่าวถึงคุณลักษณะของตัวกรองสัญญาณอันดับแรกและอันดับที่สาม โดยระบุว่า ตัวกรองสัญญาณแบบอันดับที่สามมักจะถูกเลือกใช้ใช้งาน เนื่องจากตัวกรองสัญญาณดังกล่าวสามารถตอบสนองต่อความถี่ได้ตลอดช่วงแบนด์วิดท์ แต่ผลการทดสอบกลับพบว่า ตัวกรองสัญญาณอันดับที่สูงขึ้นไม่ได้ให้ผลดีเสมอไป แต่อาจจะเกิดข้อเสียติดตามมาด้วย เช่น ตัวกรองสัญญาณใช้เวลานานในการประมวลผล จึงทำให้เกิดการหน่วงเวลาของสัญญาณที่เพิ่มขึ้น เป็นต้น ดังนั้น ในปัจจุบันการใช้ค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 256 kHz ยังไม่มีหลักฐานที่ชัดเจนว่า เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน รวมทั้งยังไม่มีการวิจัยที่เปรียบเทียบประสิทธิภาพที่จะเกิดขึ้นระหว่างการใช้งานด้วยขนาดแบนด์วิดท์เท่ากับ 256 kHz กับค่าแบนด์วิดท์ที่มากขึ้น

ในทางทฤษฎีนั้นการใช้ตัวกรองสัญญาณที่มีขนาดแบนด์วิดท์ 256 kHz สำหรับการส่งคลื่นวิทยุเอฟเอ็มแบบสเตอริโอ จะเกิดผลกระทบแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์ของสัญญาณและดรอปเปอร์ของการมอดูเลต เช่น ถ้าสัญญาณเสียงที่มีแบนด์วิดท์ 1 kHz ถูกมอดูเลตในช่องสัญญาณที่มีค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 75 kHz จะทำให้มีค่าดรอปเปอร์ของการมอดูเลตเท่ากับ 75 ( $M=75$ ) แต่ถ้าสัญญาณเสียงที่มีแบนด์วิดท์เพิ่มขึ้นเป็น 15 kHz จะทำให้มีค่าดรอปเปอร์ของการมอดูเลตลดลงและมีค่าเท่ากับ 5 ( $M=5$ )

สัญญาณเสียงที่มีแบนด์วิดท์ 1 kHz จะมีฮาร์โมนิกสัญญาณเพิ่มขึ้นทุกๆ 1 kHz แต่ระดับกำลังเหล่านั้นจะลดลง ซึ่งแถบที่ 100 จะมีค่าลดลงต่ำกว่า 60 dB จึงนิยมวิเคราะห์ว่า ระดับกำลังในแถบถัดจากแถบที่ 100 มีค่าน้อยมาก และไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการตีมอดูเลต จึงได้กำหนดตัวกรองสัญญาณให้มีค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 200 kHz (หมายถึง 100 kHz ของช่วงความถี่ด้านข้างหนึ่งของคลื่นพาห์ และเมื่อพิจารณาทั้งสองข้างจึงเท่ากับ 200 kHz) ซึ่งต่ำกว่าค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้งาน

สัญญาณเสียงที่มีแบนด์วิดท์ 5 kHz จะมีฮาร์โมนิกสัญญาณเพิ่มขึ้นทุกๆ 5 kHz แต่ระดับกำลังเหล่านั้นจะลดลง ซึ่งแถบที่ 15 จะมีค่าลดลงต่ำกว่า 60 dB จึงนิยมวิเคราะห์ว่า ระดับกำลังในแถบถัดจากแถบที่ 15 มีค่าน้อยมาก และไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการตีมอดูเลต จึงได้กำหนดตัวกรองสัญญาณให้มีค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 150 kHz (หมายถึง 75 kHz ของช่วงความถี่ด้านข้างหนึ่งของคลื่นพาห์ และเมื่อพิจารณาทั้งสองข้างจึงเท่ากับ 150 kHz) ซึ่งต่ำกว่าค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้งาน

สเปกตรัมของสัญญาณเสียงแบบสเตอริโอ ประกอบด้วยสองช่วงความถี่ คือ ช่วงแรกภายใน 23 kHz และช่วงที่สองภายใน 53 kHz ซึ่งในช่วงแรกนั้น ค่าครรชนิการมอดูเลตเท่ากับ 1.63 ระดับกำลังหลังจากแถบที่ 9 จะมีค่าต่ำกว่า 60 dB จึงควรกำหนดตัวกรองสัญญาณให้มีค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 414 kHz ซึ่งสูงกว่าค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้งาน และช่วงที่สอง ค่าครรชนิการมอดูเลตเท่ากับ 0.71 ระดับกำลังหลังจากแถบที่ 7 จะมีค่าต่ำกว่า 60 dB จึงควรกำหนดตัวกรองสัญญาณให้มีค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 742 kHz ซึ่งสูงกว่าค่าแบนด์วิดท์ที่ใช้งาน

จะเห็นว่า ในแต่ละกรณีที่กล่าวมานั้น การกำหนดค่าแบนด์วิดท์ของตัวกรองสัญญาณจะพิจารณาจากระดับกำลังที่ต่ำกว่า 60 dB ซึ่งค่าแบนด์วิดท์ที่เหมาะสมมีทั้งสูงกว่าและต่ำกว่า 256 kHz แต่ในทางปฏิบัตินั้น ได้มีการใช้งานค่าแบนด์วิดท์เท่ากันทั้งหมด ดังนั้น จึงเกิดข้อสังเกตว่า การส่งคลื่นวิทยุเอเอ็มแบบสเตอริโอ นั้น มีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใดที่มีการกำหนดให้ตัวกรองสัญญาณมีค่าแบนด์วิดท์เท่ากับ 256 kHz นอกจากนี้ ยังคงต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นร่วมด้วย เช่น ผลตอบสนองของการประวิงกลุ่ม (group delay) ของตัวกรองสัญญาณ ซึ่งมักเป็นสาเหตุของการเกิดความผิดเพี้ยนและการเกิดสัญญาณไขว้ ผลกระทบเหล่านี้จะส่งผลมากขึ้นขึ้นอยู่กับความสมมาตรของคุณลักษณะของตัวกรองสัญญาณ เป็นต้น

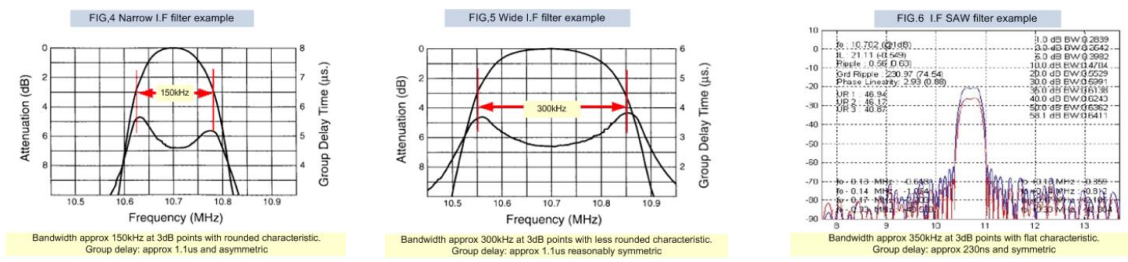
- **การสะท้อนของคลื่นที่ส่งผลให้เกิดการประวิงเวลา**

การสะท้อนของคลื่นภายในสายส่งของระบบการส่งคลื่น FM จะก่อให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงและการเกิดสัญญาณไขว้ ซึ่งส่วนหนึ่งของการสะท้อนนี้มักเกิดจากคุณสมบัติของสายอากาศภาคส่งที่มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ต่ำเกินไป สัญญาณที่ผิดเพี้ยนดังกล่าวสามารถสัมผัสได้จากการฟัง เช่น เสียงก้อง (splatter sounds) เป็นต้น ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้น คือ เมื่อคลื่นวิทยุเอเอ็มผ่านบริเวณผิวรอยต่อบนเส้นทางระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ จะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นคลื่นวิทยุเอเอ็มที่มีขนาดลดลง แต่ยังคงแพร่ผ่านไปยังสายอากาศ และเดินทางไปถึงอุปกรณ์ของผู้รับ ซึ่งทำให้คลื่นส่วนแรกเดินทางไปถึงผู้รับก่อนส่วนที่สอง และส่วนที่สองจะเป็นคลื่นวิทยุเอเอ็มที่ย้อนกลับไปยังเครื่องส่ง และเมื่อเดินทางถึงเครื่องส่งก็จะถูกส่งอีกครั้งไปยังสายอากาศ และเดินทางไปถึงอุปกรณ์ของผู้รับในเวลาต่อมา จึงเห็นได้ว่า คลื่นส่วนแรกและคลื่นส่วนที่สองใช้เวลาในการเดินทางไปยังอุปกรณ์ผู้รับไม่เท่ากัน โดยคลื่นส่วนที่สองจะใช้เวลามากกว่าคลื่นส่วนแรก จึงเป็นเหตุให้ผู้รับสัญญาณเสียงเสมือนรับฟังเสียงจำนวนสองครั้งในเวลาติดกัน



- ตัวกรองสัญญาณทางภาครับ (Receiving filters)

ตัวกรองสัญญาณถือเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างของภาครับสัญญาณจากคลื่นวิทยุเอฟเอ็ม เพราะจะทำหน้าที่เลือกรับสัญญาณ โดยทั่วไปมักเลือกใช้งานตัวกรองสัญญาณแบบความถี่กลาง (Intermediate Frequency Filter: IF-Filter) สำหรับช่วงความถี่ 10.7 MHz มักเลือกใช้ตัวกรองสัญญาณชนิด ceramic หรือรู้จักกันในชื่อ “high end receivers” เพราะมีราคาไม่สูงมากนัก แต่คุณลักษณะของตัวกรองสัญญาณชนิดนี้ มักมีแบนด์วิดท์ที่ไม่กว้างมากพอ และให้ค่าการประวิงกลุ่มไม่สมมาตรตลอดช่วงแบนด์วิดท์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17



(ก) แบบแคบ

(ข) แบบกว้าง

(ค) SAW I.F. Filter

รูปที่ 2.17 คุณลักษณะของตัวกรองสัญญาณแบบความถี่กลางของภาครับ

จึงขอสรุปในหัวข้อนี้ว่า ปัญหาที่เกิดขึ้นภายในระบบการส่งคลื่นวิทยุแบบเอฟเอ็ม สามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ 1) ตัวกำเนิดคลื่นพาห้สร้างสัญญาณมอดดูเลตที่มีความแม่นยำน้อยเกินไป และทำให้เกิดสัญญาณแปลกปลอมปนออกมาด้วย 2) การกำหนดขนาดแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณไม่สอดคล้องกับตรรกะนี้ การมอดดูเลต 3) คุณสมบัติของตัวกรองสัญญาณทางภาคส่ง 4) คุณสมบัติของสายส่งที่มีการลดทอนสัญญาณย้อนกลับน้อยเกินไป และ 5) คุณสมบัติของตัวกรองสัญญาณทางภาครับ

### 2.5.3 แนวทางการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้ระบบวิทยุกระจายเสียงที่ดี

ระบบวิทยุกระจายเสียงที่ดีที่สุด อาจเป็นระบบที่ถูกสร้างขึ้นในทางทฤษฎี เนื่องจากยากต่อการนำมาใช้จริงได้ในทางปฏิบัติ เพราะบางส่วนอาจเกิดค่าใช้จ่ายที่สูงเกินไป อย่างไรก็ตามคุณสมบัติที่ดีที่สุดของระบบวิทยุกระจายเสียงที่จะกล่าวถึงในที่นี่ เพื่อต้องการให้ตระหนักถึงแนวทางการออกแบบและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นภายในระบบ โดยจะได้อธิบายแยกแต่ละองค์ประกอบ

- ข้อมูลเสียง

สัญญาณเสียงถือเป็นข้อมูลตั้งต้นที่สำคัญ ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากแผ่นบันทึกเสียงหรือไฟล์ข้อมูลเสียงที่ถูกบันทึกไว้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ และอีกส่วนหนึ่งอาจเกิดจากข้อมูลที่ส่งผ่านเครือข่ายที่เชื่อมต่อกันระหว่างห้องบันทึกข้อมูลเสียงและสถานีส่งสัญญาณ ค่าใช้จ่ายของการสร้างเครือข่ายการเชื่อมต่อจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างห้องบันทึกข้อมูลเสียงและสถานีส่งสัญญาณ การเชื่อมต่อมีด้วยกัน 2 วิธีการ คือ วิธีการแบบแอนะล็อก ซึ่งนิยมใช้เทคนิคของการรวม (composite) มากกว่าการใช้เทคนิค dual-mono เนื่องจากการใช้เทคนิค dual-mono จำเป็นต้องดำเนินงานด้วย 2 ช่องสัญญาณ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง แต่เมื่อใดก็ตามที่ต้องการคุณภาพของสัญญาณระดับสูง ไม่ควรเลือกใช้เทคนิค dual-mono เนื่องจากมักเกิดสัญญาณรบกวนในระหว่างการเชื่อมต่อที่ยากต่อการหลีกเลี่ยง อีกวิธีการ คือ แบบดิจิทัล ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก แต่มีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน ภายในพื้นที่บริการหนึ่งจึงมักเลือกใช้วิธีการเชื่อมต่อแบบดิจิทัลบนโครงข่ายคลื่นความถี่เดียว

- **เครื่องส่ง (transmitter)**

ด้านเครื่องส่ง ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลสัญญาณเสียงและจัดแต่งให้พร้อมต่อการกระจายเสียงไปยังเครื่องรับภายในพื้นที่ที่บริการ ซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ 4 ส่วน คือ

*ส่วนแรก เป็นส่วนของการเข้ารหัส (stereo coder) ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเข้ารหัสด้วยระบบดิจิทัล ซึ่งเป็นการผสมผสานสัญญาณเสียงแบบโมโน แบบสเตอริโอ รวมทั้งการใช้ SCA/RDS บนแถบความถี่ต่างๆ ภายในช่องสัญญาณเดียวกัน สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ ผลการเข้ารหัสของ SCA/RDS ในช่องสัญญาณ จะทำให้ได้รับค่า SNR ที่ดีขึ้น แต่อาจจะนำไปสู่ผลเสีย คือ การเกิด สัญญาณไขว้ที่สูงขึ้นด้วย*

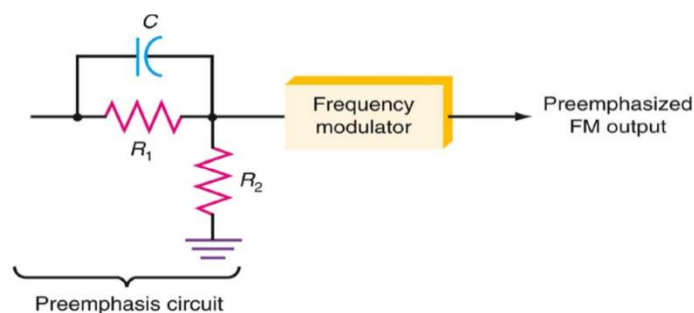
*ส่วนที่สอง เป็นเครื่องมอดูเลตและขยายสัญญาณ ทำหน้าที่เพิ่มกำลังของคลื่นวิทยุให้สูงขึ้นมากพอที่จะเดินทางไปยังเครื่องรับ การมอดูเลตแบบ DDS (Direct Digital Synthesis) ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีการมอดูเลตเชิงความถี่ ที่มีความแม่นยำมากกว่าการมอดูเลตแบบแอนะล็อก จึงทำให้มีเสถียรภาพสูงขึ้นและเกิดสัญญาณผิดเพี้ยนลดลง ดังนั้น จึงมีการเลือกใช้เครื่องขยายที่มีการมอดูเลตแบบดิจิทัลมากกว่าแบบอะนาล็อก*

ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งของเครื่องส่งสัญญาณที่มีคุณภาพ คือ การไม่เกิดการ over-modulation ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นมีหลายอย่าง เช่น การเกิด over-modulation ถือเป็นการละเมิดกฎข้อบังคับของหน่วยงานผู้รับผิดชอบและดูแลการกระจายเสียง เนื่องจากการเข้าบุกรุกช่องสัญญาณของผู้อื่น ถัดมา คือ ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าเครื่องส่งสัญญาณกำลังสร้างสัญญาณที่ผิดเพี้ยน อย่างที่สาม แสดงถึงขีด

ความสามารถของตัวกรองสัญญาณ เพราะการเกิดสัญญาณบนแถบความถี่ภายนอกช่องสัญญาณที่กำหนด แสดงถึงการทำงานของตัวกรองสัญญาณที่ผิดพลาด อย่างที่สี่ แสดงถึง การยอมให้สัญญาณที่เกิดจากช่องสัญญาณข้างเคียงเข้ามาพร้อมกับสัญญาณในช่องสัญญาณ อย่างที่ห้า ผลการเกิดนี้จะทำให้เครื่องรับสัญญาณทำการดีมอดูเลชันผิดพลาด เนื่องจากค่าแบนด์วิดธ์ของเครื่องรับที่กำเนิดไว้น้อยกว่าค่าการเบี่ยงเบนความถี่ของสัญญาณที่เกิดจากการ over-modulation และทำให้เครื่องรับประมวลผลผิดพลาด อย่างไรก็ตาม ผลการเกิด over-modulation นี้ จะไม่ถูกตรวจพบโดยผู้ดำเนินรายการวิทยุกระจายเสียง เพราะในเวลานั้นพวกเขา กำลังฟังเสียงของพวกเขา

ระดับกำลังส่งของคลื่นวิทยุถูกกำหนดขึ้นให้สามารถแพร่ได้ครอบคลุมและทั่วถึงพื้นที่ให้บริการ เช่น ถ้าค่ากำลัง EIRP จำนวน 1 วัตต์ จะครอบคลุมรัศมี 11 กิโลเมตร ภายในบริเวณพื้นที่นอกเมือง แต่จะครอบคลุมรัศมีเพียง 4-5 กิโลเมตร ภายในบริเวณพื้นที่เขตเมือง และถ้าค่ากำลัง EIRP เพิ่มขึ้นถึง 4 เท้า จะทำให้เพิ่มรัศมีได้เพียง 2 เท้า ดังนั้นระดับกำลังส่งไม่ได้บ่งบอกถึงค่าความดังของสถานีส่ง

การใช้งานในวงจำกัดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมาก ซึ่งควรถูกกำหนดไว้ได้ภายในเครื่องส่งสัญญาณ เพื่อง่ายต่อการควบคุมขนาดของสัญญาณ ซึ่งในทางทฤษฎีขนาดของสัญญาณมอดูเลชันจะต้องมีขนาดคงที่ แต่ในทางปฏิบัติ อาจจะมีการแกว่งของสัญญาณได้ จึงจำเป็นต้องมีวงจรถัดสัญญาณ (Limiter) ไว้ การเปลี่ยนแปลงของขนาดสัญญาณจะไม่ส่งผลกระทบต่อเนื้อหาของข้อความที่จะทำการส่ง เนื่องจากข้อมูลเนื้อหาของข้อความจะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณคลื่นพาหุ สัญญาณรบกวนจะแทรกซึมร่วมกับสัญญาณมอดูเลชัน โดยเฉพาะสัญญาณคลื่นพาหุ เพราะมีความถี่สูง ซึ่งสัญญาณรบกวนความถี่สูงมี 12 ช่วงความถี่ จึงจำเป็นต้องใช้วงจรร pre-emphasis สำหรับเครื่องส่งสัญญาณ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจร Pre-emphasis

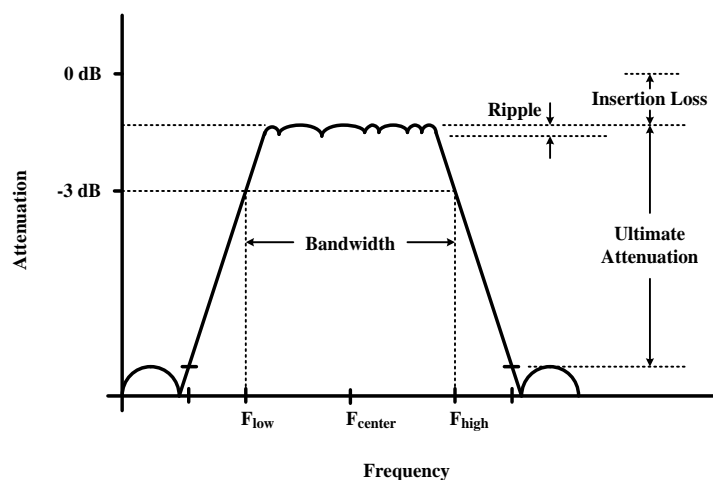
ระบบเฟสล็อกคูล (Phase Locked Loop System: PLL) เป็นระบบควบคุมความถี่โดยใช้ข้อมูลป้อนกลับแบบวงปิด มีหน้าที่หลักคือ ตรวจสอบผลต่างระหว่างมุมเฟสของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นกับตัวกำเนิดสัญญาณความถี่คลื่นพาห์ ผลการตรวจจับนี้นำไปสู่การควบคุมการทำงานของระบบภาคส่ง ให้กำเนิดคลื่นพาห์อย่างมีเสถียรภาพ ระบบเฟสล็อกคูลมีองค์ประกอบพื้นฐาน 3 ส่วนคือ (1) ตัวเปรียบเทียบมุมเฟส (Phase Comparator) ทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตมา มาเปรียบเทียบมุมเฟสของสัญญาณทั้งสอง และทำการแปลงค่าความต่างของมุมเฟสให้เป็นค่าระดับแรงดัน (2) ตัวกรองสัญญาณแบบลูป (Loop Filter) จะรับสัญญาณจากตัวเปรียบเทียบมุมเฟส ทำหน้าที่กรองส่วนประกอบของสัญญาณที่ถูกเปรียบเทียบมุมเฟสกับระดับ VCO และเป็นตัวกำหนดคุณลักษณะของลูปและเสถียรภาพของระบบ (3) ตัวกำเนิดสัญญาณที่ถูกควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage controlled oscillator: VCO) ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ โดยควบคุมค่าความถี่ของสัญญาณด้วยระดับแรงดัน เพื่อปรับเปลี่ยนค่าความถี่ของสัญญาณให้อยู่ภายในช่วงแถบความถี่ที่กำหนด

*ส่วนที่สาม เป็นตัวกรองสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ เป็นอีกส่วนที่สำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะในกรณีที่มีการใช้ตัวกรองสัญญาณร่วมกับเครื่องส่งสัญญาณ โดยเครื่องส่งสัญญาณเหล่านั้นมีจำนวนมากว่าหนึ่งเครื่อง และกำลังป้อนสัญญาณเข้าสู่สายอากาศตัวเดียวกัน ดังนั้นประสิทธิภาพของตัวกรองสัญญาณจะมีอิทธิพลต่อระบบการส่งสัญญาณอย่างมาก อีกคุณสมบัติของตัวกรองสัญญาณที่ต้องพิจารณา คือ ผลตอบสนองเชิงความถี่ และการหน่วงเวลา*

*ส่วนที่สี่ เป็นส่วนสุดท้าย ซึ่งกำลังของคลื่นกระแสไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะแพร่ผ่านอากาศ โดยทั่วไปสายอากาศสำหรับการแพร่กระจายเสียง เมื่อพิจารณาในเชิงของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายเป็นหลัก สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกเป็นสายอากาศไดโพลเดี่ยว ซึ่งให้มีอัตราขยายต่ำ และชนิดที่สองเป็นแบบสายอากาศแถวลำดับ ซึ่งมีอัตราขยายสูงกว่าชนิดแรก อย่างไรก็ตามสายอากาศทั้งสองชนิดต้องมีคุณลักษณะของสายอากาศที่ดี คือ ต้องมีแบนด์วิธที่รองรับการเบนเบี่ยงค่าความถี่ของสัญญาณ และต้องมีค่าสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า  $-20$  dB สำหรับสถานีส่งกำลังต่ำนั้น กำลังของคลื่นย้อนกลับจะถูกจำกัดด้วยตัวลดทอนกำลัง (Attenuator) และการใช้สายป้อนที่มีการเกิดความสูญเสียในสายราคาของเครื่องส่งสัญญาณจะแปรตามขนาดพิกัดของกำลังส่ง การกำหนดพิกัดของกำลังส่งสามารถคำนวณได้จากการระบุกำลังคลื่นที่แพร่ออกจากสายอากาศ เช่น เมื่อต้องการให้กำลังคลื่นวิทยุแพร่ออกจากสายอากาศมีค่าเท่ากับ 1 วัตต์ จึงจำเป็นต้องป้อนสัญญาณที่มีกำลังอย่างน้อย 2 วัตต์ เนื่องจากสายป้อนที่เหมาะสมจะดูดกลืนกำลังงานอย่างน้อย 1 วัตต์ หรือมักจะเกิดการสูญเสียภายในสายประมาณ 3 dB*

- วิธีการลดโอกาสการเกิดรีเวิร์สการมอดูเลตระหว่างกัน (Reverse Intermodulation: RIM)

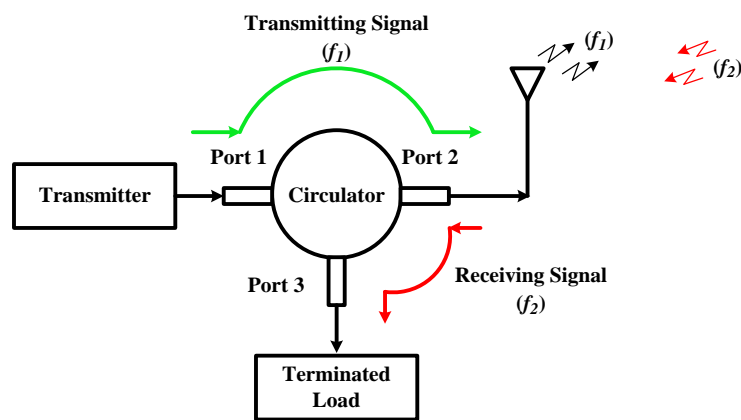
การเกิด RIM มีสาเหตุจากการที่เครื่องส่งหรือสถานีส่งจำนวนสองความถี่ขึ้นไป ส่งคลื่นความถี่ในบริเวณใกล้เคียงกัน ทำให้เครื่องส่งเครื่องใดเครื่องหนึ่งหรือทั้งสองเครื่อง รับสัญญาณคลื่นจากอีกความถี่เข้าไปในเครื่อง เกิดการผสมสัญญาณในวงจรของเครื่องส่ง แล้วส่งความถี่ออกมา ซึ่งประกอบด้วยความถี่ดั้งเดิมของสถานีและความถี่แปลกปลอม ที่เกิดจากความถี่ที่รับเข้ามาของสถานีข้างเคียงและความถี่ที่เกิดจากการผสมด้วยอุปกรณ์ที่ทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ปัญหาดังกล่าวได้มีการนำเสนอวิธีการแก้ไขด้วยการกำหนดระยะห่างและกำลังส่งของแต่ละสถานี นอกจากนี้มีการวิจัยและพัฒนาเทคนิคต่างๆ โดยอาศัยอุปกรณ์จำพวก วงจรกรอง (Filter) และ ตัวหมุนเวียน (Circulator) เข้ามาช่วย เพื่อลดโอกาสที่จะเกิด RIM อุปกรณ์ดังกล่าวจะถูกนำมาต่อเพิ่มเข้าไปในส่วนหน้า (Front-end) ก่อนที่จะส่งคลื่นความถี่ออกอากาศ ซึ่งหลักการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าว มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.19 ผลการตอบสนองของวงจรกรองในโดเมนความถี่

**ส่วนที่ 1 วงจรกรอง** เป็นอุปกรณ์ประเภทพาสซีส (Passive device) ทำหน้าที่เลือกให้ความถี่ในช่วงใดช่วงหนึ่งผ่านได้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High-pass filter) วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band-pass filter) และวงจรตัดแถบความถี่ (Band-reject filter) โดยวงจรกรองที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการลดการเกิด RIM คือ วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน และวงจรตัดแถบความถี่ การเลือกใช้งานวงจรกรองต้องคำนึงถึงปัจจัย 2 ประการ คือ ความกว้างช่วงความถี่ (Frequency bandwidth) และ ความคม (Selectivity) ซึ่งความกว้างของช่วงความถี่ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่

กำหนดไว้แต่ละกิจการ เช่น กิจการกระจายเสียงวิทยุเอฟเอ็มที่แต่ละช่องสัญญาณมีความกว้าง 256 kHz และการออกอากาศระบบโทรทัศน์แบบแอนะล็อกมีความกว้างช่องสัญญาณ 6 MHz เป็นต้น ขณะที่ความคมของวงจรกรองที่ขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่กำหนดไว้ ต้องมีความคมมากกว่า 20-30 dB ซึ่งความคมยิ่งมากจะยิ่งมีความสามารถในการลดการเกิด RIM ได้ดียิ่งขึ้น แต่ในทางปฏิบัติ ความคมของวงจรกรองขึ้นอยู่กับลำดับ (Order) ของวงจรกรอง นั่นคือ ยิ่งวงจรกรองมีลำดับสูงๆ จะยิ่งมีความคมเพิ่มขึ้น แต่ก็ต้องใช้จำนวนอิลิเมนต์ของอุปกรณ์มากขึ้น ทำให้วงจรกรองมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นกัน นิยามความกว้างช่วงความถี่และความคมของวงจรกรองดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.20 หลักการทำงานของ Circulator

**ส่วนที่ 2 ตัวหมุนเวียน** เป็นอุปกรณ์พาสซีสที่มีโครงสร้างเป็นท่อนำคลื่น (Waveguide) ประกอบด้วยพอร์ต (Port) จำนวน 3 หรือ 4 พอร์ต มีคุณสมบัติสำคัญ คือ คลื่นสามารถเดินทางเข้าจากพอร์ตหนึ่ง ผ่านตัวหมุนเวียน แล้วไปออกพอร์ตที่อยู่ถัดไป ในรูปที่ 2.20 ได้แสดงถึงตัวหมุนเวียนแบบ 3 พอร์ต ซึ่งจะนำมาใช้บังคับทิศทางของคลื่น ด้วยการต่อตัวหมุนเวียนกับเครื่องส่งกับพอร์ต 1 และต่อสายอากาศส่งกับพอร์ต 2 เพื่อให้สัญญาณที่ต้องการส่งเดินทางจากพอร์ต 1 ไปออกที่พอร์ต 2 ขณะที่สายอากาศของเครื่องส่งสามารถรับสัญญาณจากอีกสถานีส่งที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน สัญญาณที่รับได้จะเข้ามาทางพอร์ต 2 และจะถูกบังคับผ่านตัวหมุนเวียนให้ไปออกที่พอร์ต 3 ซึ่งต่ออยู่กับโหลด (Load) ดังนั้น สัญญาณที่รับเข้ามาได้จากอีกสถานีส่งจะไม่กวนกับเครื่องส่ง จึงหลีกเลี่ยงโอกาสที่จะเกิดสัญญาณ RIM ได้

- **มาตรฐานทางเทคนิคสำหรับบริการกระจายเสียง**

มาตรฐานทางเทคนิคสำหรับบริการกระจายเสียงนี้ ได้รับการปรับปรุงภายใต้ความรับผิดชอบของ คณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (The National Telecommunication Regulatory Commission: NTRC) เพื่อกำหนดแนวทางมาตรฐานทางเทคนิคขั้นต่ำสำหรับการรับส่งสัญญาณภายใต้บริการกระจายเสียงที่กำหนด ซึ่งได้กำหนดนิยามของการกระจายเสียง คือ การส่งวิทยุหรือรายการวิดีโอแก่สาธารณะแบบคิดและไม่คิดค่าใช้จ่ายหรือเพื่อประโยชน์อื่น โดยทั่วไปการกระจายเสียงจะประกอบด้วยสัญญาณเสียง ภาพ และสัญญาณควบคุม มาตรฐานที่กำหนดนี้รวมถึงระบบที่ใช้ส่งและรับสัญญาณแบบแอนะล็อกและดิจิทัล ซึ่งเจาะจงไปที่การกระจายเสียงเอเอ็ม (AM Broadcasting) การกระจายเสียงเอฟเอ็ม (FM Broadcasting) และบริการโทรทัศน์ (Television Service)

**ส่วนที่ 1 ระบบการกระจายเสียงที่อาศัยการมอดูเลตแอมพลิจูด (Amplitude Modulation: AM)**

ย่านความถี่การกระจายเสียงเอเอ็มอาศัยคลื่นพาห์ทั้งด้านสูง (Upper sideband) และด้านต่ำ (Lower sideband) ที่มีสัญญาณข้อมูลอยู่ตรงกลาง ช่องสัญญาณถูกกำหนดโดยความถี่คลื่นพาห์ ซึ่งมีจำนวน 117 ความถี่คลื่นพาห์ที่ถูกกำหนดให้สามารถใช้งานได้ เริ่มต้นที่ความถี่ 540 ถึง 1700 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยกำหนดสเตปความถี่ครั้งละ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ สถานีการกระจายเสียงแบบเอเอ็มสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ ดังนี้ (1) สถานีประเภท A เป็นสถานีที่ไม่จำกัดระยะเวลาของการกระจายเสียง (24 ชั่วโมง/วัน) โดยใช้กำลังส่งไม่น้อยกว่า 10 ถึง 50 กิโลวัตต์ (2) สถานีประเภท B เป็นสถานีที่ไม่จำกัดระยะเวลาของการกระจายเสียง (24 ชั่วโมง/วัน) ซึ่งถูกกำหนดให้ใช้กำลังส่งในช่วง 250 วัตต์ ถึง 50 กิโลวัตต์ (3) สถานีประเภท C เป็นสถานีที่ไม่จำกัดระยะเวลาของการกระจายเสียง (24 ชั่วโมง/วัน) ซึ่งถูกกำหนดให้ใช้กำลังส่งในช่วง 250 วัตต์ ถึง 1 กิโลวัตต์ (4) สถานีประเภท D เป็นสถานีที่ถูกกำหนดให้กระจายเสียงแบบจำกัดระยะเวลาในเวลากลางวัน หรือกระจายเสียงแบบไม่จำกัดเวลาในเวลากลางคืน โดยใช้กำลังส่งต่ำกว่า 250 วัตต์

ขณะที่ความสูงของสายอากาศสถานีฐานที่ใช้สำหรับการกระจายเสียงเอเอ็ม ถูกกำหนดด้วยปัจจัย 2 ปัจจัย ดังนี้ (1) สำหรับสถานีบริการหลัก ความสูงต่ำสุดของสายอากาศต้องสามารถให้ความเข้มสนาม (Field strength) เท่ากับ 2 mV/m ที่ระยะห่างจากสายอากาศของสถานีส่งสัญญาณ 1 กิโลเมตร เมื่อกระจายเสียงด้วยกำลังงานส่ง 1 กิโลวัตต์ (2) ความแรงของสัญญาณคลื่นดิน (Ground wave) ของสถานีบริการหลักต้องคงไว้ที่ 2 mV/m สำหรับบริเวณที่มีประชากรอาศัยอยู่มากกว่า 2500 คน แต่บริเวณที่มีประชากรอาศัยต่ำกว่า 2500 คน ระดับความเข้มสัญญาณควรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 mV/m

## ส่วนที่ 2 ระบบการกระจายเสียงที่อาศัยการมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation: FM)

การกระจายเสียงแบบเอฟเอ็มอาศัยอุปกรณ์และเครื่องมือสำคัญที่สามารถแปลงสัญญาณอินพุตให้อยู่ในรูปการมอดูเลตความถี่ของคลื่นพาห้ในช่วงความถี่ 88 ถึง 108 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยเครื่องส่งได้รับอนุญาตให้ส่งด้วยกำลังไม่เกิน 500 วัตต์ หรือมีความเข้มสนามต่ำสุด 70 dB $\mu$ V/m หรือ 3.16 mV/m และมีค่า ERP เท่ากับ 30 dBW และเครื่องส่งไม่ควรต่อโดยตรงกับระบบสายอากาศ แต่ควรต่อผ่านอุปกรณ์กรอง (Filter device) เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนกันระหว่างแต่ละสถานี ซึ่งระยะห่างต่ำสุดระหว่างเครื่องส่งที่กำหนดไว้ แสดงดัง ตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ระยะห่างต่ำสุดระหว่างเครื่องส่งกระจายเสียงเอฟเอ็ม

ระยะห่างช่องสัญญาณของเครื่องส่ง (กิโลเฮิร์ตซ์)	ระยะทางของระยะห่าง (กิโลเมตร)
0	40
200	27
400	13
600	<13

ตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องส่งถูกเลือกบนพื้นฐานของประสิทธิภาพกำลังคลื่นแพร่กระจาย (Effective radiated power) และความสูงของสายอากาศเหนือภูมิประเทศเฉลี่ย (HAAT) โดยกำหนดให้มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 70 dB และ 1 $\mu$ V/m หรือ 3.16 mV/m ตามลำดับ ซึ่งกำหนดให้ตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องส่งต้องมั่นใจว่าสามารถครอบคลุมรัศมีการให้บริการที่ระดับความเข้มสนามเท่ากับ 1 mV/m แต่มีข้อห้ามสำคัญ คือ ห้ามอยู่ในรัศมีของตำแหน่งเครื่องส่งของวิทยุการบิน

การกระจายเสียงเอฟเอ็มถูกกำหนดให้อยู่ในช่วงความถี่ 88 ถึง 108 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยช่วงความถี่ 88.1 ถึง 89.5 เมกกะเฮิร์ตซ์ จะสำรองไว้ให้บริการกระจายเสียงเพื่อชุมชน ช่องสัญญาณของการกระจายเสียงเอฟเอ็มมีความกว้างเท่ากับ 200 กิโลเฮิร์ตซ์ และมีความเบี่ยงเบนของความถี่เท่ากับ  $\pm 75$  กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อมีการมอดูเลต 100% นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องการแพร่ความถี่แปลกปลอม (Spurious emission) ดังแสดงในตารางที่ 2.5



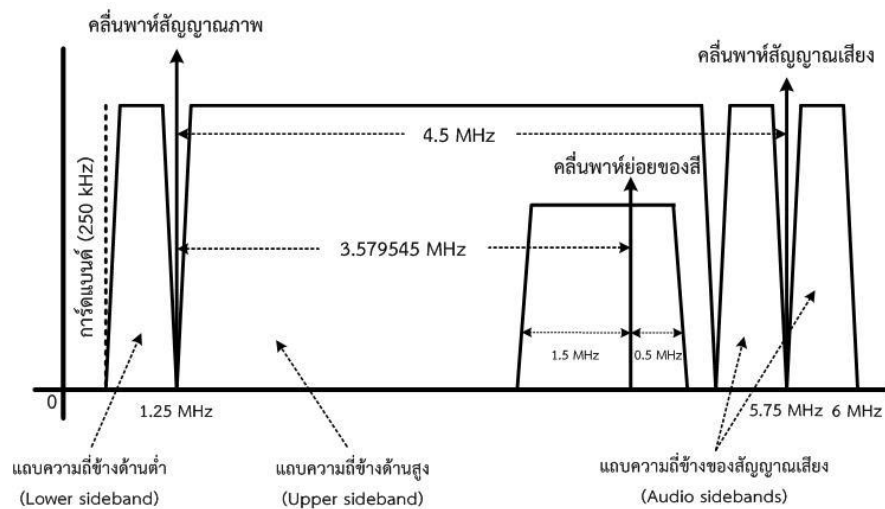
ตารางที่ 2.5 การแพร่ความถี่แปลงปลอมสูงสุด

การแพร่แปลงปลอม	ค่าสูงสุด
120 กิโลเฮิร์ตซ์ < ความถี่คลื่นพาห์ < 240 กิโลเฮิร์ตซ์	-25 dBc
240 กิโลเฮิร์ตซ์ < ความถี่คลื่นพาห์ < 600 กิโลเฮิร์ตซ์	-35 dBc
ความถี่คลื่นพาห์ > 600 กิโลเฮิร์ตซ์	$-(43+10\log P)$ หรือ -80 dBc (P คือ กำลังในหน่วยวัตต์)

ตารางที่ 2.6 มาตรฐานทางเทคนิค NTSC ของการออกอากาศโทรทัศน์แบบแอนะล็อก

ความกว้างของช่องสัญญาณ	6 เมกกะเฮิร์ตซ์ ต่อ ช่องสัญญาณ
โครงสร้างของช่องสัญญาณ	มาตรฐาน 4.5 เมกกะเฮิร์ตซ์ สัญญาณภาพ/สัญญาณเสียง : สัญญาณเสียง 15-17 dB ต่ำกว่าคลื่นพาห์
ระดับสัญญาณต่ำสุด ณ ด้านเข้าของโทรทัศน์	2 dBmV เมื่อมีการเทอร์มินเนต 75 โอห์ม
คลื่นพาห์/สัญญาณรบกวน ต่ำสุด	30 dBc (ต่ำกว่าคลื่นพาห์)
ความถี่คลื่นพาห์ของสัญญาณภาพ	1.256 เมกกะเฮิร์ตซ์ (นับจากลิมิตด้านต่ำของ ช่องสัญญาณ)
ระดับสัญญาณคลื่นพาห์ของภาพกรณี ออกอากาศ 24 ชั่วโมง	12 dB (สูงสุด)
ระดับสัญญาณคลื่นพาห์ระหว่างสอง ช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน	3 dB (สูงสุด)
ระดับสัญญาณคลื่นพาห์ระหว่างสอง ช่องสัญญาณใดๆ	12 dB (สูงสุด)
ระดับสัญญาณคลื่นพาห์ของผลตอบสนอง ความถี่	+2 dB ตั้งแต่ 0.75 ถึง 4 กิโลเฮิร์ตซ์
ความถี่เบี่ยงเบนของเสียงที่ยอมรับได้	25 กิโลเฮิร์ตซ์
อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน	45 dB (ต่ำสุด)
ระดับของการแพร่กระจายสัญญาณ	< 15 $\mu\text{V}/\text{m}$ ที่ระยะห่าง 30 เมตร

**ส่วนที่ 3 ระบบการออกอากาศโทรทัศน์แบบแอนะล็อก** มาตรฐานของการออกอากาศสัญญาณภาพและเสียงแบบแอนะล็อกตามที่คณะกรรมการกิจการโทรทัศน์แห่งชาติ (The National Television System Committer: NTSC) กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 คือ ช่องสัญญาณโทรทัศน์มีแบนด์วิธทั้งสิ้น 6 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยมีความกว้างการด์แบนด์ต่ำสุดเท่ากับ 250 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนระหว่างสัญญาณภาพของช่องสัญญาณหนึ่ง กับสัญญาณเสียงของช่องสัญญาณข้างเคียง สัญญาณภาพมีการมอดูเลตแบบเอเอ็ม และถูกส่งในช่วงความถี่ 500 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 5.45 เมกะเฮิร์ตซ์ เหนือขอบด้านต่ำของช่องสัญญาณ ซึ่งความถี่ของคลื่นพาห้ของสัญญาณภาพเท่ากับ 1.25 เมกะเฮิร์ตซ์ เหนือขอบด้านต่ำของช่องสัญญาณเช่นกัน สัญญาณภาพของโทรทัศน์จะเหมือนสัญญาณที่มีการมอดูเลตแบบเอเอ็ม ที่จะมีการสร้างแถบความถี่ข้าง (Sideband) ที่อยู่สูงและต่ำของความถี่คลื่นพาห้ แต่ละแถบความถี่ข้างจะมีความกว้างเท่ากับ 4.2 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยแถบความถี่ข้างที่อยู่สูงกว่าความถี่คลื่นพาห้เกือบทั้งหมดจะถูกนำมาใช้ส่งสัญญาณ แต่แถบความถี่ข้างที่ต่ำกว่าความถี่คลื่นพาห้จะถูกใช้ส่งสัญญาณเพียงแค่ 750 กิโลเฮิร์ตซ์ ส่วนสัญญาณเสียงของโทรทัศน์มีการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม ซึ่งแต่ละช่องสัญญาณจะมีความกว้างสูงสุดเท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ แบนด์วิธของสัญญาณโทรทัศน์และช่องดังแสดงในรูปที่ 2.21



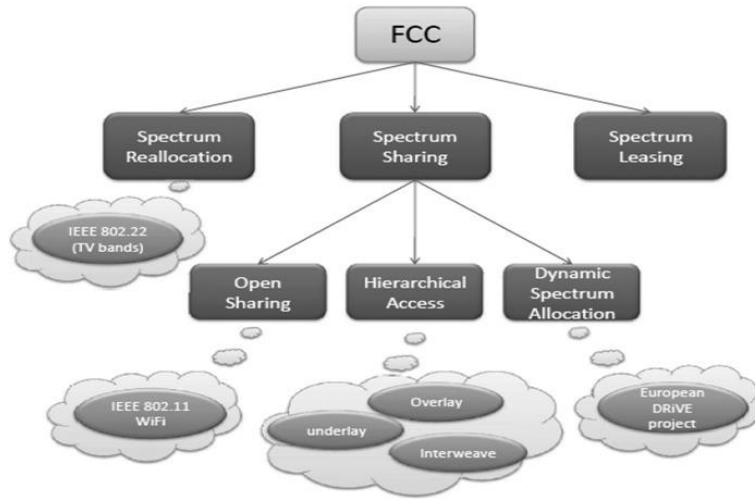
รูปที่ 2.21 แบนด์วิธของสัญญาณโทรทัศน์

## 2.6 แนวทางการใช้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด

ด้วยปัญหาการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน (Intermodulation) ระหว่างสถานีวิทยุกระจายเสียง มักเกิดขึ้นบ่อยในบริเวณที่มีสถานีวิทยุตั้งอยู่ใกล้กันอย่างหนาแน่น บริเวณดังกล่าวจึงถือเป็นบริเวณที่มีการแย่งชิงแถบความถี่สูง ในปัจจุบันส่วนใหญ่สถานีวิทยุที่ประสบปัญหานี้มักจะหาทางออกโดยการเพิ่มกำลังส่งให้มากขึ้น เพื่อให้สถานีของตนเองสามารถกระจายเสียงได้อย่างทั่วถึง แต่หารู้ไม่ว่าการแก้ปัญหาด้วยวิธีเหล่านี้จะนำไปสู่ปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันที่รุนแรงขึ้น ดังนั้น การแก้ไขปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันในระยะยาวนั้น คือ การเพิ่มช่องสัญญาณให้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยลดการแย่งชิงแถบความถี่ และนำไปสู่การลดปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันได้

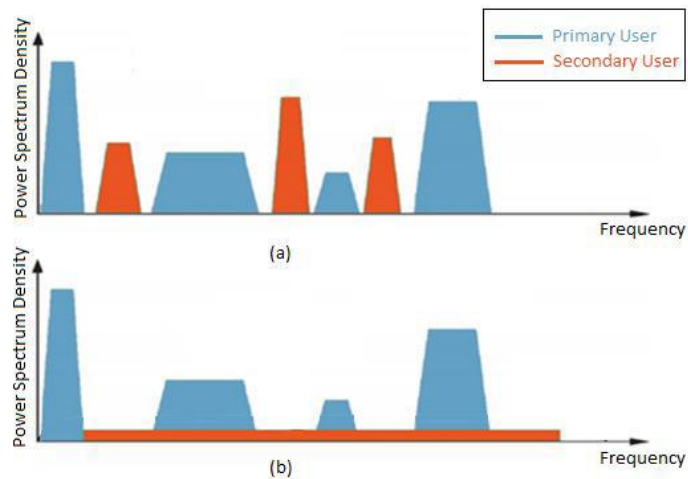
### 2.6.1 วิธีการแก้ปัญหการจัดสรรแถบความถี่

วิธีการแก้ปัญหการจัดสรรแถบความถี่ที่ได้รับการรับรองจากคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (Federal communications Commission: FCC) มีอยู่ 3 วิธี คือ วิธีการย้ายตำแหน่งแถบความถี่ (Spectrum relocation) วิธีการให้เช่าแถบความถี่ (Spectrum leasing) และวิธีการแบ่งปันแถบความถี่ (Spectrum sharing) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 วิธีการแรกเป็นการแก้ปัญหาในระยะยาว โดยมีการนำระบบวิทยุรู้คิดมาใช้กับช่วงแถบความถี่ของโทรทัศน์ วิธีการที่สองเป็นการแก้ปัญหาโดยอนุญาตให้ผู้ได้รับใบอนุญาตในช่วงความถี่ดังกล่าวสามารถขายช่องสัญญาณให้กับบุคคลที่สามได้ วิธีการที่สามเป็นวิธีการที่นักวิจัยให้ความสนใจ รู้จักกันในชื่อการเข้าถึงแถบความถี่แบบไดนามิก (Dynamic spectrum access) การเข้าถึงแถบความถี่แบบไดนามิกสามารถแยกย่อยเป็น 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองการแบ่งปันแบบเปิด (Open sharing model) อนุญาตให้ผู้ใช้งานเข้าถึงแถบความถี่ได้ทันทีทันใดภายใต้ข้อจำกัดทางกำลังงานส่งแบบจำลองการจัดสรรแถบความถี่แบบไดนามิก (Dynamic spectrum allocation) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แถบความถี่ ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ในช่วงเวลาที่แน่นอน โดยกำหนดช่วงแถบความถี่ให้รองรับบริการไร้สายด้วยข้อมูลทางสถิติของจำนวนช่องสัญญาณ และแบบจำลองเชิงลำดับชั้น (Hierarchical model) อนุญาตให้ผู้ใช้อำนาจสามารถเข้าถึงแถบความถี่ที่ผู้ใช้หลักไม่ได้ใช้งานอยู่ขณะนั้นได้ ข้อจำกัดเพียงอย่างเดียวของแบบจำลองดังกล่าว คือ ต้องไม่ลดคุณภาพของสัญญาณของผู้ใช้หลัก ซึ่งวิธีการสำหรับแบบจำลองนี้สามารถแบ่งย่อยเป็น 2 วิธี คือ วิธีการผสมผสานแถบความถี่ (Spectrum interweave) และวิธีการรองข้างใต้แถบความถี่ (Spectrum underlay)



รูปที่ 2.22 การแก้ปัญหาการจัดสรรแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (Federal communications Commission: FCC) [43]

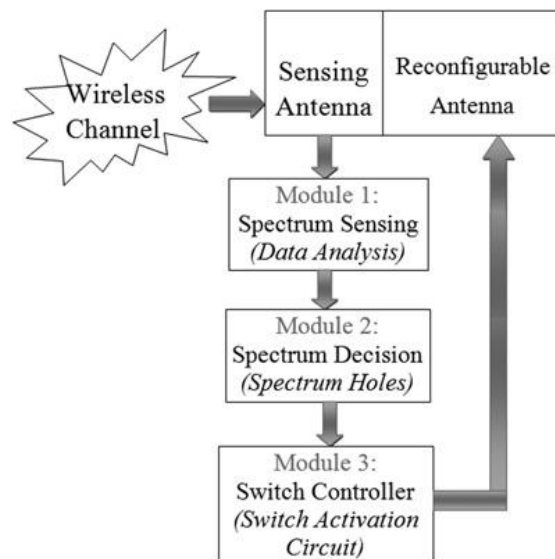
วิธีการผสมผสานแถบความถี่ ผู้ใช้ลำดับรองหลีกเลี่ยงการใช้แถบความถี่ซ้ำซ้อนกับผู้ใช้หลักด้วยการตรวจสอบและปรับเปลี่ยนช่วงความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (a) ขณะที่วิธีการรองข้างใต้แถบความถี่ ผู้ใช้ลำดับรองใช้งานแถบความถี่เดียวกับผู้ใช้งานหลักที่ระดับสัญญาณรบกวน (Noise floor) ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (b)



รูปที่ 2.23 แบบจำลองเชิงลำดับชั้น (Hierarchical model) (a) วิธีการผสมผสานแถบความถี่ (b) วิธีการรองข้างใต้แถบความถี่ [43]

## 2.6.2 การทำงานของระบบ Cognitive Radio เพื่อการจัดสรรแถบความถี่

ระบบวิทยุรู้คิดเป็นวิธีการเข้าถึงแถบความถี่แบบไดนามิก จัดเป็นระบบสื่อสารที่ชาญฉลาด ซึ่งสามารถเรียนรู้จากบริเวณโดยรอบและปรับตัวตามตัวแปรจากการเรียนรู้ ระบบวิทยุรู้คิดมีองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนของการตรวจสอบข้อมูลบริเวณที่ใช้งาน และส่วนของการปรับเปลี่ยนรูปแบบพารามิเตอร์สำหรับการส่งคลื่น ในส่วนแรกจะมีสายอากาศสำหรับตรวจจับช่องสัญญาณไร้สายและช่วงความถี่ที่ไม่ใช้งาน ส่วนที่สองจะมีสายอากาศที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ให้ทำงานในช่วงความถี่ที่ได้จากการตรวจสอบและประมวลผล [44] ขั้นตอนการทำงานของระบบวิทยุรู้คิดดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ไตอะแกรมขั้นตอนการทำงานของวิทยุรู้คิด [43]

จากไตอะแกรมขั้นตอนการทำงานของระบบวิทยุรู้คิด ส่วนของสายอากาศที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่นับเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ สายอากาศปรับเปลี่ยน (Reconfigurable antenna) คือ สายอากาศที่สามารถเปลี่ยนฟังก์ชันการทำงาน โดยที่ขนาดของโครงสร้างสายอากาศยังคงเดิม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ (Frequency reconfigurable antenna) สายอากาศปรับเปลี่ยนโพลาไรเซชัน (Polarization reconfigurable antenna) และสายอากาศปรับเปลี่ยนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Pattern reconfigurable antenna) โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรม มีหลายงานวิจัยที่น่าสนใจ [45]-[53] สำหรับนำมาเป็น

แนวทางในการศึกษาถึงพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ในการปรับเปลี่ยนความถี่จะใช้อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น พินไดโอด (PIN diode) [54]-[57] อุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องกลจุลภาค (Micro Electro Mechanical systems: MEMS) [58], [59] หรือทรานซิสเตอร์ [60] เชื่อมต่อกับโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อทำหน้าที่สวิตช์สถานะเปิด-ปิด เส้นทางนำคลื่นของกระแสนบน โครงสร้างสายอากาศ การจะเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทใด ต้องคำนึงถึงปัจจัยดังนี้ คือ ความเร็วของการสวิตช์ ความสามารถในการทนกำลังงานไฟฟ้า คุณสมบัติทางด้านอิมพีแดนซ์ของตัวอุปกรณ์ วงจรไบอัส สถานะของการทำงาน รูปร่างของแพ็คเกจ และราคาของอุปกรณ์ที่เลือกใช้ เพื่อให้สายอากาศที่ออกแบบมี ประสิทธิภาพสูงสุด โดยเกิดการสูญเสียที่ช่วงรอยต่อของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยที่สุด

### บทที่ 3 ผลสำรวจข้อมูลเฉพาะของสายอากาศที่ใช้จริงในระบบวิทยุกระจายเสียง ระบบโทรทัศน์ ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย ในจังหวัดนครศรีธรรมราช

ผลการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศของระบบวิทยุกระจายเสียงและโทรทัศน์ดิจิทัล ทำให้ทราบว่า สำนักงาน คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กสทช.) ได้ดำเนินการกำกับและควบคุมคุณสมบัติเฉพาะของสายอากาศแพร่สัญญาณ เพื่อให้ระบบวิทยุกระจายเสียงและระบบโทรทัศน์ดิจิทัลเป็นไปตามมาตรฐานสากล และนำไปสู่การได้รับข้อมูลที่เป็นประโยชน์ของประชาชนในท้องถิ่นนั้นๆ ทั้งนี้สำนักงาน กสทช. ได้เปิดโอกาสให้ผู้บริหารจัดการระบบเหล่านั้นสามารถเลือกใช้งานสายอากาศแพร่สัญญาณตามความเหมาะสม ด้วยเหตุนี้ สายอากาศแพร่สัญญาณที่กำลังใช้งานอยู่นั้นจึงมีด้วยกันหลายชนิดตามการออกแบบระบบ ยิ่งไปกว่านั้น ยังพบว่า ฐานข้อมูลเกี่ยวกับสายอากาศแพร่สัญญาณของระบบวิทยุกระจายเสียงและระบบโทรทัศน์ดิจิทัลยังมีอยู่ค่อนข้างน้อยมากและไม่ชัดเจน ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงเห็นว่า การศึกษาคุณสมบัติเฉพาะของสายอากาศที่ใช้งานอยู่จริง โดยการลงสำรวจเพื่อสู่มรับข้อมูลในพื้นที่จริง จึงเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ นอกจากนั้น ยังเป็นโอกาสที่ดีในการเข้าศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบวิทยุกระจายเสียงและโทรทัศน์ดิจิทัล

ผลการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสถานีวิทยุกระจายเสียงและโทรทัศน์ดิจิทัลในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราชทำให้ทราบว่า มีสถานีเป็นจำนวนมาก ซึ่งการเข้าสำรวจสถานีทั้งหมดเป็นไปได้ยากและใช้งบประมาณสูง อีกทั้งคณะผู้วิจัยยังมีความต้องการเข้าถึงปัญหาสำคัญต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับสถานีส่ง เช่น การเกิดมอดูเลตระหว่างกัน เป็นต้น คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบวิธีการสำรวจ โดยจะมุ่งเน้นข้อมูลที่จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ให้ใช้งานร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด ซึ่งมีกระบวนการสำรวจ 3 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของสถานีวิทยุกระจายเสียงและโทรทัศน์ดิจิทัลภายในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช ขั้นตอนที่ 2 เป็นการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวนี้ จะทำให้ทราบถึงกลุ่มสถานีส่งที่มีโอกาสทำให้เกิดปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันมากที่สุด ซึ่งมีจำนวนไม่มากนัก เพื่อใช้กำหนดเป็นกลุ่มเป้าหมายในการลงสำรวจพื้นที่จริง และขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล โดยใช้วิธีลงสำรวจพื้นที่จริงภายในเขต

จังหวัดนครศรีธรรมราช รวมทั้ง การเข้ารับฟังปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นกับสถานีส่ง เช่น การเกิดมอดูเลตระหว่างกัน เป็นต้น

### 3.1 ผลการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของสถานีวิทยุกระจายเสียงและโทรทัศน์ดิจิทัล

ด้วยความต้องการรับข่าวสารที่เพิ่มขึ้นของประชาชน ส่งผลให้กิจการวิทยุกระจายเสียงและกิจการโทรทัศน์มีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้มีผู้ประกอบการสถานีวิทยุจำนวนมากเข้าขอรับอนุญาตทดลองประกอบกิจการฯจากสำนักงาน กสทช. เพื่อขอใช้งานแถบความถี่ของคลื่นวิทยุและจัดตั้งสถานีส่งในเขตพื้นที่ชุมชน ทั้งนี้ ช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการใช้งานและตำแหน่งการจัดตั้งสถานีส่ง จะถูกเลือกใช้โดยผู้ประกอบการกิจการ ตามความสอดคล้องกับการกระจายตัวของประชากรและภูมิประเทศ จึงทำให้ช่วงความถี่และตำแหน่งการจัดตั้งสถานีส่งมีความแตกต่างกันในแต่ละท้องที่ ด้วยเหตุนี้ สำนักงาน กสทช. ในแต่ละเขตพื้นที่ จึงจำเป็นต้องทำหน้าที่คอยกำกับและดูแลการใช้งานแถบความถี่ ตลอดจนการดำเนินกิจการของผู้ประกอบกิจการฯ

เพื่อความเชื่อถือได้ของข้อมูลในการดำเนินโครงการวิจัย ผู้วิจัยจึงได้เข้าขอความอนุเคราะห์ข้อมูลสถานีวิทยุกระจายเสียงและโทรทัศน์ดิจิทัลในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราชจากสำนักงาน กสทช. เขต 12 จังหวัดนครศรีธรรมราช และนำมาสู่การได้รับข้อมูลอันประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการฯ ซึ่งได้บรรยายถึงวิธีการ ผลการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของสถานีวิทยุกระจายเสียง และผลการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของสถานีวิทยุโทรทัศน์ไว้ในหัวข้อนี้

คณะผู้วิจัยได้มีดำเนินการรวบรวมข้อมูล โดยมีวิธีการ ดังนี้

1. ทบทวนวัตถุประสงค์ตามที่ระบุไว้ในข้อเสนอโครงการ คือ “สำรวจและรวบรวมข้อมูลจำเพาะของสายอากาศที่ใช้งานจริงในระบบวิทยุกระจายเสียง ระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย โดยลงพื้นที่ตัวอย่างในจังหวัดนครศรีธรรมราช”
2. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของสถานีวิทยุกระจายเสียงและโทรทัศน์ในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช จากฐานข้อมูลในระบบอินเทอร์เน็ต เพื่อกำหนดขอบเขตของชนิดของข้อมูลที่จะใช้ในการเข้าพบและการขออนุเคราะห์ข้อมูลจากสำนักงาน กสทช. เขต 12 จังหวัดนครศรีธรรมราช
3. เข้าพบสำนักงาน กสทช. เขต 12 จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อแนะนำรายละเอียดของโครงการวิจัย และขออนุเคราะห์ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงาน เช่น ชื่อสถานี ประเภทของการให้บริการ ค่าความถี่ที่ใช้งาน ค่าพิกัดที่ตั้งของสถานี เป็นต้น



4. รวบรวมข้อมูลที่ได้รับจากสำนักงาน กสทช. เขต 12 จังหวัดนครศรีธรรมราช และทำรายงานสรุปเพื่อนำไปใช้ในดำเนินงานในขั้นตอนถัดไป

### 3.1.1 ผลการรวบรวมข้อมูลสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล

ผลการรวบรวมข้อมูลสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ที่ได้รับอนุญาตจากสำนักงาน กสทช. [61] ทำให้ตระหนักว่า สถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ถือเป็นช่องทางในการส่งข่าวสารที่สำคัญในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช เนื่องจากจังหวัดนครศรีธรรมราชครอบคลุมเนื้อที่มากถึง 9,942.502 ตร.กม. หรือประมาณ 6,214,064 ไร่ โดยมีการแบ่งพื้นที่การปกครองออกเป็น 23 อำเภอ 165 ตำบล และ 1,428 หมู่บ้าน และมีประชากรประมาณ 1,552,530 คน ทั้งนี้ ยังไม่รวมถึงประชากรที่เป็นนักท่องเที่ยวอีกเป็นจำนวนมาก และทำให้ทราบว่า ตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นในเขตชุมชนเมืองและสถานที่ท่องเที่ยว คณะผู้วิจัยได้บรรยายผลการรวบรวมข้อมูลภายในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นข้อมูลเบื้องต้นของสถานีวิทยุกระจายเสียง และส่วนที่สองเป็นข้อมูลเบื้องต้นของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล

#### 3.1.1.1 ผลการรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นของสถานีวิทยุกระจายเสียง

ปัจจุบันสถานีวิทยุกระจายเสียงในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช มีจำนวนทั้งสิ้น 94 สถานี โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มสถานี คือ กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มสถานีวิทยุกระจายเสียงหลัก ซึ่งมีทั้งระบบเอเอ็มและระบบเอฟเอ็ม ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 3.1 และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการ ถูกจำแนกการให้บริการออกเป็น 3 ประเภท คือ ประเภทชุมชน ประเภทสาธารณะ และประเภทธุรกิจ ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลสถานีวิทยุกระจายเสียงหลัก ในเขตพื้นที่ จังหวัดนครศรีธรรมราช

สถานีวิทยุกระจายเสียงหลัก ระบบ AM				
ชื่อสถานี	ความถี่ (kHz)	ลองจิจูด	ละติจูด	อำเภอ
สวท.จ.นครศรีธรรมราช เอ.เอ็ม	639	99.54521	8.211613	พระพรหม
สวส.ทภ.4 นครศรีธรรมราช	684	99.57248	8.292782	เมือง
สวส.วปถ.4 ทุ่งสง	828	99.39038	8.015984	ทุ่งสง
สวส.มทบ.5 ทภ.4 นครศรีธรรมราช	1044	99.57248	8.292782	เมือง
สถานีวิทยุกระจายเสียงหลัก ระบบ FM				
ชื่อสถานี	ความถี่ (MHz)	ลองจิจูด	ละติจูด	อำเภอ
สวส.ตชด. ค่ายนครินทร์รา (นครศรีธรรมราช)	92.50	99.56889	8.21759	ทุ่งสง
สวส.พิทักษ์สันติราษฎร์ (สวพ.) นครศรีธรรมราช	91.50	99.991508	8.445319	เมือง
สวท. นครศรีธรรมราช	93.50	99.977442	8.365927	เมือง
สวส. อ.ส.ม.ท. นครศรีธรรมราช	104.50	99.803978	8.236767	ร่อนพิบูลย์

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลกิจการวิทยุกระจายเสียงที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการฯ ในเขตพื้นที่ จังหวัด นครศรีธรรมราช

ประเภทบริการ : ชุมชน				
ชื่อสถานี	ความถี่ ( MHz)	ลองจิจูด	ละติจูด	อำเภอ
ชัยชุมพลพัฒนา	91.25	99.67933	8.16395	ทุ่งสง
ประเภทบริการ : สาธารณะ				
เทศบาลนครนครศรีธรรมราช	88.50	99.96289	8.43629	เมือง
เพื่อบริการเทศบาลตำบลพรหมโลก	89.50	99.82383	8.52675	พรหมคีรี
เพื่อสุขภาพ โรงพยาบาลสิชล	90.75	99.90343	9.00848	สิชล
ตำบลกลาย	97.75	99.92229	8.79414	ท่าศาลา
เพื่อการศึกษาพัฒนาท้องถิ่น	100.25	99.90167	8.88521	สิชล
เพื่อการศึกษาและเผยแพร่พระพุทธศาสนา	102.00	99.96362	8.39783	เมือง
พระพุทธศาสนาและสังคม	103.25	99.95964	8.44282	เมือง
เทศบาลเมืองปากพูน	104.00	99.97144	8.53932	เมือง
เพื่อการศึกษาและพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยการอาชีพพรหมคีรี	106.25	99.84874	8.55669	พรหมคีรี
พระพุทธศาสนาแห่งชาติประจำจังหวัด นครศรีธรรมราช	106.50	99.68155	8.17425	ทุ่งสง
เพื่อการศึกษาและพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช	107.00	99.96004	8.45352	เมือง
สถานีวิทยุกระจายเสียงท้องถิ่นสมาคมป้องกัน	107.25	99.89203	8.99850	สิชล
พีทหลวงเอฟเอ็ม	87.75	99.84066	8.09328	จุฬาภรณ์

ประเภทบริการ : ธุรกิจ				
ชื่อสถานี	ความถี่ ( MHz)	ลองจิจูด	ละติจูด	อำเภอ
นครมิวสิค เรดิโอ	88.25	99.90495	8.05081	จุฬาภรณ์
สะท้อนเรดิโอ	88.50	99.67417	8.14360	ทุ่งสง
มุ่มป้อมซิติเรดิโอ	89.00	99.97627	8.43016	เมือง
วิทยุครอบครัวข่าว	89.25	99.82542	9.11814	ขนอม
ลักซูลี	90.00	99.96967	8.44172	เมือง
สตาร์ เอฟเอ็ม	90.25	99.67504	8.15035	ทุ่งสง
เสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม	90.25	99.97260	8.43892	เมือง
RESCUE RADIO	91.00	99.98664	8.31775	เมือง
ฉวางวไรตี้	91.00	99.52647	8.43591	ฉวาง
ซันฤทัยในธรรม	91.25	99.99413	8.49088	เมือง
เฟรช เอฟ เอ็ม	91.75	99.98815	7.96269	ชะอวด
คนรักบ้านเกิด	92.00	99.90288	8.56673	ท่าศาลา
ไฮโซต์เรดิโอ	93.00	99.64818	8.15142	ทุ่งสง
มายเวย์เรดิโอ	93.25	99.88909	8.96829	ลิชล
สตาร์ลูกทุ่ง	93.25	99.94459	8.41513	เมือง
กรีด เวฟ	94.00	99.67671	8.16563	ทุ่งสง
พัฒนาและส่งเสริมการเรียนรู้ชุมชนตำบลทุ่ง ปรังและตำบลเสาเภา	94.00	99.89606	8.96548	ลิชล
เขาปูนเรดิโอ	94.25	99.83144	8.51435	พรหมคีรี
สามวังเรดิโอ	94.75	99.87390	8.07675	จุฬาภรณ์
โมคลาน	95.00	99.92573	8.59197	ท่าศาลา

ชื่อสถานี	ความถี่ ( MHz)	ลองจิจูด	ละติจูด	อำเภอ
KISS FM	95.25	99.97294	8.43763	เมือง
เอเชียซิติ้ เรดิโอ	95.75	99.61284	8.19230	ทุ่งสง
ขอนแก่น เรดิโอ	96.00	100.02672	7.87607	ชะอวด
CHAT RADIO	96.25	99.97260	8.43892	เมือง
เพื่อความมั่นคง อัมรินทร์สมายล์เรดิโอ	96.50	99.36261	8.29344	ทุ่งใหญ่
my love FM	96.75	99.97627	8.43016	เมือง
แสงจันทร์ เรดิโอ	96.50	99.97212	8.44016	เมือง
นากะชะ เรดิโอ	97.50	99.44814	8.42947	ฉวาง
คลื่นลูกทุ่งไทย	97.50	99.98743	8.37430	เมือง
กองปราบอาสา	98.00	99.98926	8.41927	เมือง
SASSY FM	98.25	99.96524	8.42622	เมือง
ท้องถิ่นไทย (ววท.) OK เรดิโอ	98.50	99.96801	8.45344	เมือง
รีแล็กซ์ เรดิโอ	98.75	99.82242	8.49825	พรหมคีรี
ร่อนพิบูลย์สัมพันธ์	97.75	99.84056	8.16944	ร่อนพิบูลย์
MYFMRADIO	99.00	99.70428	8.16801	ทุ่งสง
พิปูนเรดิโอ	99.75	8.55960	99.60805	พิปูน
สิชลสเตชั่น	99.75	9.03945	99.84435	สิชล
วิทยุครอบครัวข่าว	100.00	8.23852	99.80559	ร่อนพิบูลย์
คนเขาเหมน	100.25	8.33045	99.64247	ช้างกลาง
หัวไทรเรดิโอ	100.75	8.03862	100.27479	หัวไทร
สบาย เรดิโอ	100.75	9.11814	99.82542	ขนอม
นครทุเดย์	101.00	8.00501	99.79070	ชะอวด
คลื่นอ่าวไทย	101.25	8.27214	100.14659	เมือง
นครเรดิโอ	101.50	8.38871	99.97161	เมือง
แสงจันทร์เรดิโอ	102.25	8.44016	99.97212	เมือง

ประเภทบริการ : ธุรกิจ				
ชื่อสถานี	ความถี่ ( MHz)	ลองจิจูด	ละติจูด	อำเภอ
วิทยุครอบครัวข่าว	102.50	8.92910	99.84773	ลือชล
สตาร์ เอฟเอ็ม	102.50	8.43330	99.96999	เมือง
เพื่อความมั่นคง แมจิก เรดิโอ	102.75	8.44143	99.97274	เมือง
ศูนย์การเรียนรู้ลุ่มน้ำปากพนัง	103.00	8.10955	100.27136	หัวไทร
เหมมณีแฟมิลี่ เรดิโอ	103.25	8.29712	99.36505	ทุ่งใหญ่
หจก.ซาทอง เรดิโอ	103.50	8.17313	99.85091	ร่อนพิบูลย์
เพื่อความมั่นคง	103.50	8.16073	99.66285	ทุ่งสง
ท่าข้าม เรดิโอ	103.75	8.00501	99.79070	ชะอวด
Happinessradio	104.75	8.43769	99.97321	เมือง
พิปูนเรดิโอ	104.75	8.57455	99.46829	ฉวาง
โลมาสเตชั่น	104.75	9.18228	99.85345	ขนอม
วิทยุครอบครัวข่าว	105.25	8.23852	99.80559	ร่อนพิบูลย์
วิทยุครอบครัวข่าว	105.50	8.66447	99.92292	ท่าศาลา
เมืองทุ่งสง	105.50	8.16666	99.67492	ทุ่งสง
คลื่นขนอม	105.75	9.11814	99.82542	ขนอม
ทุ่งใหญ่ซิติ้ เรดิโอ คลื่นสุขภาพ (HEALTHY RADIO)	106.00	8.30070	99.36524	ทุ่งใหญ่
ฮิตสนั่นเมือง	106.50	8.44522	99.98604	อ.เมือง
วิเศษสุขมีเดีย	106.75	8.34218	100.23991	ปากพนัง
ท่าม้า เรดิโอ – โอเคลูกทุ่ง	107.25	8.42194	99.96583	เมือง
ควนพลองเรดิโอ	107.50	8.37451	99.55991	ช้างกลาง
คลื่นมหาชนม POPPULA WAVE	107.75	8.42836	99.97149	เมือง

### 3.1.1.2 ผลการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล

ปัจจุบันสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช มีจำนวนทั้งหมด 10 สถานี ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลหลัก ซึ่งตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมือง และกลุ่มที่ 2 กลุ่มสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลหลัก ซึ่งตั้งอยู่ในเขตอำเภอทุ่งสง และได้แสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลหลัก ในเขตพื้นที่ จังหวัดนครศรีธรรมราช

สถานีโทรทัศน์ดิจิทัลหลัก อำเภอเมือง				
ช่องความถี่	เจ้าของสายส่ง	ความถี่ (MHz)	ลองจิจูด	ละติจูด
30	กรมประชาสัมพันธ์	546	99.977198	8.366755
33	กองทัพบก	570	99.977198	8.366755
37	อ.ส.ม.ท.	602	99.977198	8.366755
41	Thai PBS	634	99.977198	8.366755
49	กองทัพบก	698	99.977198	8.366755
สถานีโทรทัศน์ดิจิทัลหลัก อำเภอทุ่งสง				
30	กรมประชาสัมพันธ์	546	ไม่ออกอากาศ	
33	กองทัพบก	570	99.4901	8.21036
37	อ.ส.ม.ท.	602	ไม่ออกอากาศ	
41	Thai PBS	634	99.4901	8.21036
49	กองทัพบก	698	99.4901	8.21036

## 3.2 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลภายในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช

### 3.2.1 กระบวนการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน

ด้วยสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลภายในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราชมีจำนวนมาก จึงไม่น่ายากที่จะเข้าถึงสถานีส่งที่กำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับการมอดูเลตระหว่างกัน อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาปัญหาในเบื้องต้นทำให้ทราบถึงบริเวณที่มักเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน คือ บริเวณพื้นที่เขตชุมชนเมือง และบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช คณะผู้วิจัย จึงใช้ข้อมูลเหล่านี้ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน โดยแบ่งกระบวนการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. ระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีส่งบนแผนที่ โดยใช้ผลการรวบรวมข้อมูลสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลภายในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช จากหัวข้อที่ผ่านมา
2. จัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีส่งที่ได้ระบุตำแหน่งพิกัดไว้บนแผนที่ โดยการคำนวณค่าความถี่
3. วัดกำลังคลื่นวิทยุในแต่ละช่วงความถี่ใช้ในการดำเนินกิจการวิทยุกระจายเสียง ระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย
4. กำหนดกลุ่มสถานีส่งที่เป็นเป้าหมายในการเข้าศึกษาข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล โดยใช้ข้อมูลการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีส่งและข้อมูลผลการวัดกำลังคลื่นวิทยุ

### 3.2.2 ผลการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล

หัวข้อนี้ได้บรรยายถึงวิธีการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล โดยใช้ข้อมูลที่เชื่อถือได้ตามที่รวบรวมไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา และได้บรรยายผลของการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียง และผลของการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุโทรทัศน์ดิจิทัล

#### 3.2.2.1 วิธีการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล

ปัจจัยหนึ่งของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน คือ ระยะห่างระหว่างสถานีส่ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูลแสดงตำแหน่งพิกัด คณะผู้วิจัยนี้ จึงเลือกใช้การคำนวณระยะห่างระหว่างสถานีโดยอาศัยข้อมูลตำแหน่งพิกัดของสถานีส่งที่รวบรวมไว้ในหัวข้อก่อนหน้า ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลจากสำนักงาน กสทช. เขต 12 จังหวัดนครศรีธรรมราช และข้อมูลความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (DEM: Digital Elevation Model)

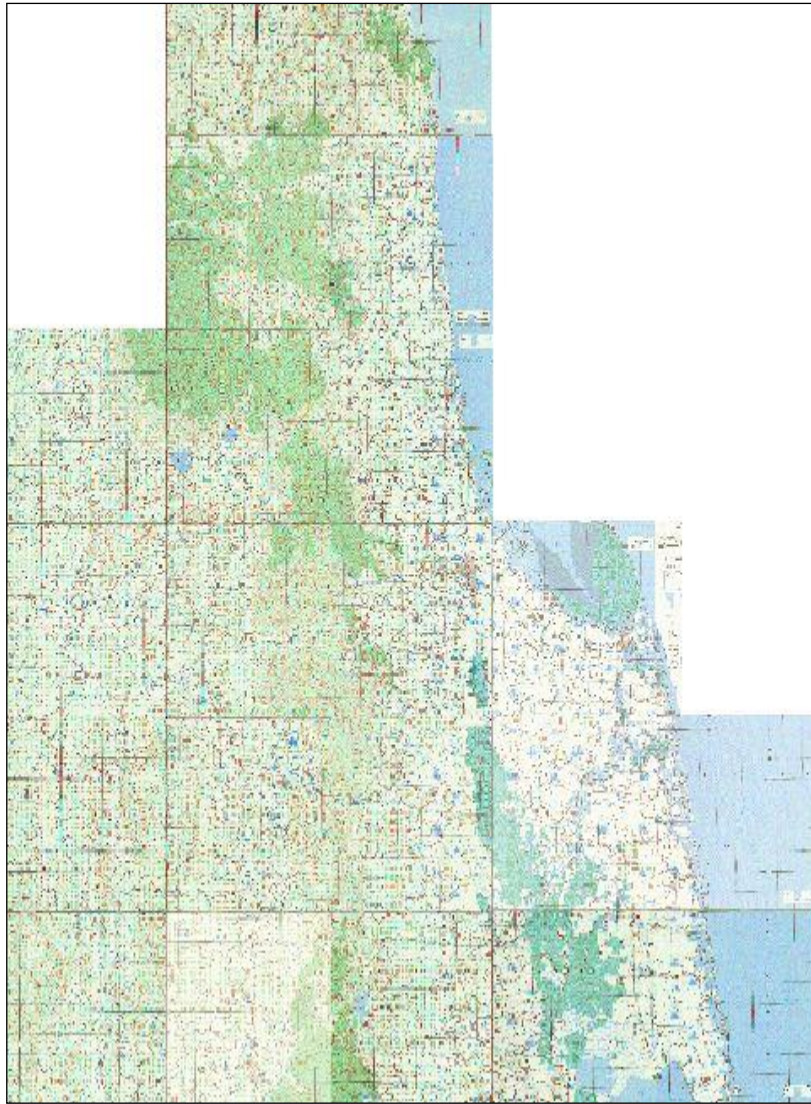


[67] ซึ่งได้รับการอนุเคราะห์ข้อมูลจากหน่วยวิจัยการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์

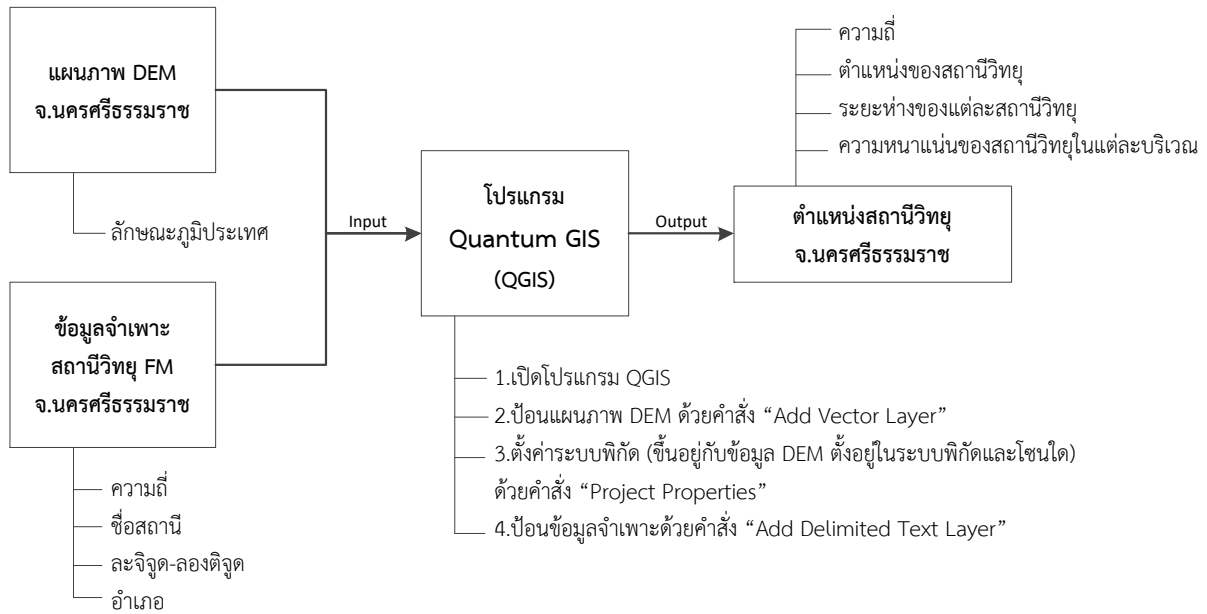
ข้อมูล DEM ที่นำมาใช้งานนั้น เป็นข้อมูลความสูงภูมิประเทศเชิงเลข ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยเทคนิคการถ่ายภาพแบบดิจิตอลจากระยะไกลโดยใช้เครื่องบินหรือดาวเทียม จึงทำให้มีความละเอียดสูงและครอบคลุมภูมิประเทศในวงกว้าง ในปัจจุบันข้อมูล DEM จึงได้รับการยอมรับและนิยมนำมาใช้ในการจำลองภูมิศาสตร์สำหรับงานวิศวกรรม เช่น การวางระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง การระบุตำแหน่งเสาไฟฟ้าของการไฟฟ้า (กฟภ.) เป็นต้น โดยทั่วไปข้อมูล DEM สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ข้อมูลประเภท vector data และข้อมูลประเภท raster data คณะวิจัยได้เลือกใช้ข้อมูล DEM ซึ่งเป็นข้อมูลประเภท raster data ที่มีขนาดความละเอียด 25 ตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และจัดอยู่ในระบบพิกัดฉากขอบเขตครอบคลุมพื้นที่โซน 47 ( UTM Zone 47N)

การระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีส่งบนข้อมูล DEM จำเป็นต้องอาศัยโปรแกรมที่สามารถเข้าถึงข้อมูล DEM และสามารถแสดงตำแหน่งของสถานีส่งบนข้อมูล DEM ได้ ซึ่งคณะวิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม QGIS [67] : ซึ่งเป็นโปรแกรม Quantum GIS (QGIS – version 1.8.0 Lisboa บนระบบปฏิบัติการ windows) จัดอยู่ในกลุ่มซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Free and Open Source Software: FOSS)

การระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีส่งบนข้อมูล DEM จำเป็นต้องอาศัยโปรแกรมที่สามารถเข้าถึงข้อมูล DEM และสามารถแสดงตำแหน่งของสถานีส่งบนข้อมูล DEM ได้ ซึ่งคณะวิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม QGIS [67] : ซึ่งเป็นโปรแกรม Quantum GIS (QGIS – version 1.8.0 Lisboa บนระบบปฏิบัติการ windows) จัดอยู่ในกลุ่มซอฟต์แวร์รหัสเปิด (Free and Open Source Software: FOSS)



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model : DEM)



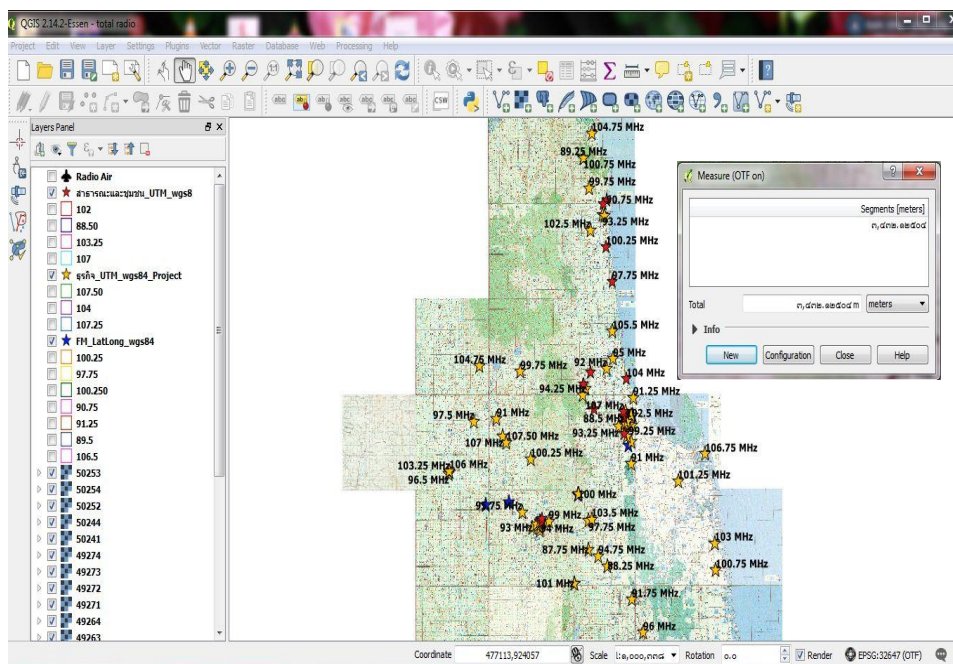
รูปที่ 3.2 กระบวนการระบุตำแหน่งสถานีวิทยุระบบเอฟเอ็มในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช

วิธีการระบุตำแหน่งพิกัด มีแนวทางดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของโปรแกรม QGIS เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลแผนที่ดิจิทัลที่ต้องการเข้าถึงข้อมูล โดยเฉพาะการกำหนดโซนของพื้นที่ที่ต้องการแสดงข้อมูล ซึ่งแต่ละโซนจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน จึงต้องมีการระบุข้อมูลตำแหน่งพิกัดสถานีวิทยุจากในรูปแบบของละติจูดและลองจิจูดบนระบบ Universal Transverse Mercator coordinate system (UTM) ซึ่งจะบันทึกข้อมูลในไฟล์นามสกุล .shp
2. ป้อนข้อมูลจำเพาะและข้อมูลภาพ DEM ลงบนโปรแกรม QGIS
3. ตั้งค่าข้อมูลความสูงภูมิประเทศเชิงเลข ให้ตรงกับระบบพิกัดฉากขอบเขตครอบคลุมพื้นที่โซนของพื้นที่ ซึ่งจังหวัดนครศรีธรรมราชถูกกำหนดให้อยู่ในโซน 47 ( UTM Zone 47N)
4. ระบุค่าพิกัดที่ตั้งสถานีส่ง เพื่อให้โปรแกรม QGIS แสดงตำแหน่งของสถานีส่งบนข้อมูล DEM

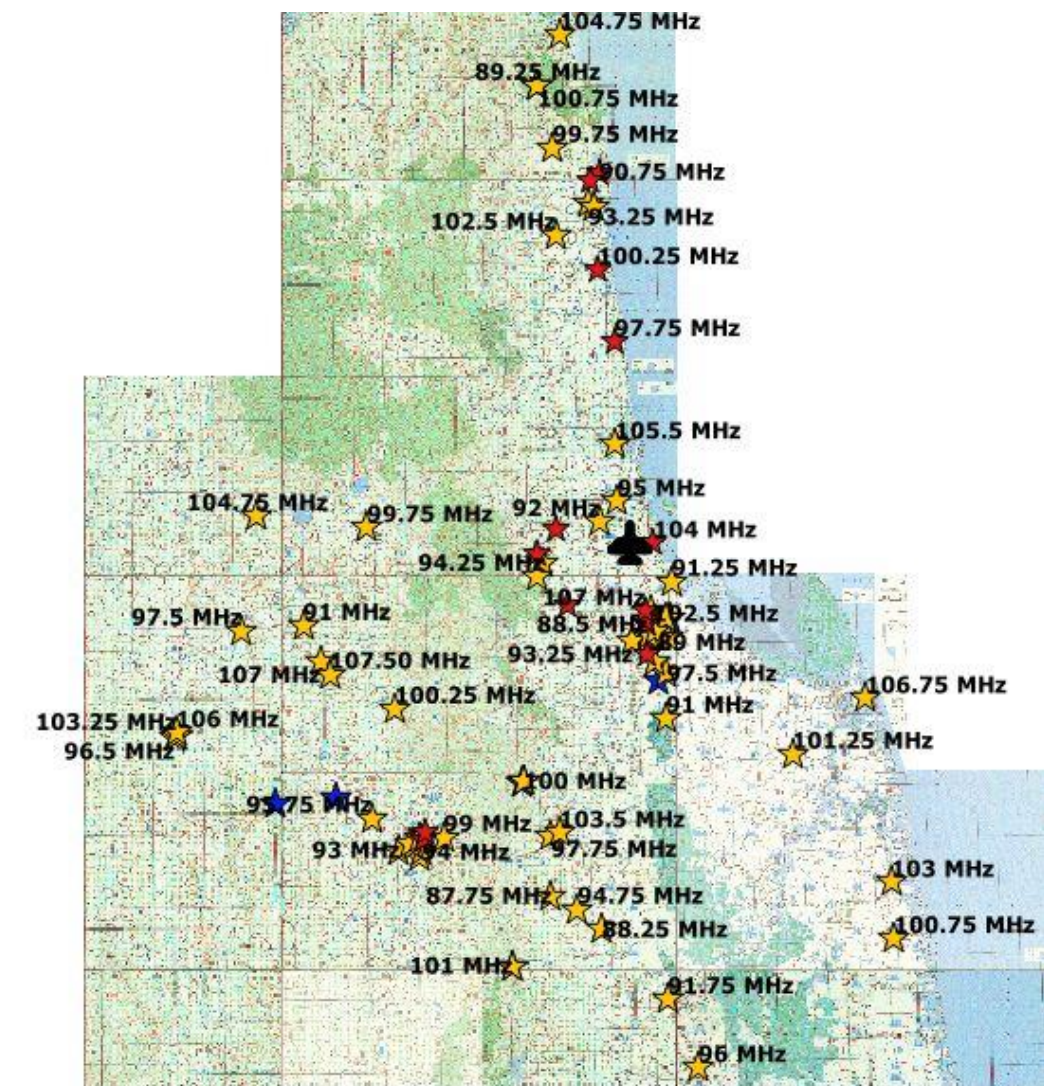
### 3.2.2.2 ผลการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียง

ผลการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีวิทยุกระจายเสียงทั้งหมดได้แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งได้จำแนกกลุ่มสถานีวิทยุกระจายเสียงด้วยสัญลักษณ์รูปดาว คือ กลุ่มที่ 1 สถานีวิทยุกระจายเสียงระบบ FM หลัก ถูกแสดงแทนด้วยสัญลักษณ์รูปดาวสีน้ำเงิน และกลุ่มที่ 2 สถานีวิทยุกระจายเสียงที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการ โดยแสดงด้วยสัญลักษณ์รูปดาวสีเขียว สีแดง และเหลือง โดยที่สีเขียวแสดงถึงประเภทชุมชน สีแดงแสดงถึงประเภทสาธารณะ และสีเหลืองแสดงถึงประเภทธุรกิจ



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งสถานีวิทยุกระจายเสียงภายในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช

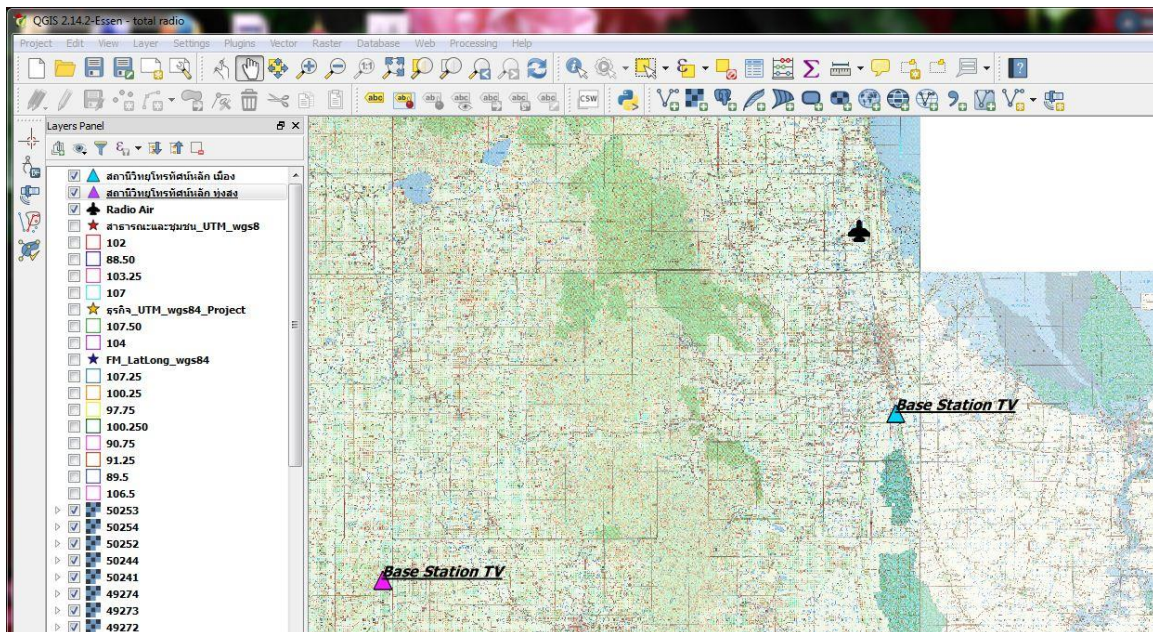
ตำแหน่งสถานีวิทยุกระจายเสียงในรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่า สถานีส่งได้ถูกจัดตั้งขึ้นในบริเวณเขตชุมชนเมืองอย่างหนาแน่น ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน และสถานีส่งจำนวนหนึ่ง ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากหอบังคับการบินไม่เกิน 10 กิโลเมตร เช่น สถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด สถานีโมคลาน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกันและก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนในช่องทางสื่อสารสำหรับการควบคุมการบิน ณ หอบังคับการบิน ภายในสนามบินนครศรีธรรมราช



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งหอบังคับการบินและสถานีวิทยุกระจายเสียงภายใต้ที่อยู่ใกล้เคียง

### 3.2.2.3 ผลการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล

ผลการระบุตำแหน่งพิกัดของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลทั้งหมดได้แสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งได้จำแนกกลุ่มสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลด้วยสัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยม คือ กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลหลัก ซึ่งตั้งอยู่ในเขตอำเภอเมือง ถูกแสดงแทนด้วยสัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยมสีฟ้า และกลุ่มที่ 2 กลุ่มสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลหลัก ซึ่งตั้งอยู่ในเขตอำเภอทุ่งสง ถูกแสดงแทนด้วยสัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยมสีชมพู



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลภายในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช

### 3.2.3 ผลการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง จึงต้องกำหนดตำแหน่งของจุดสังเกต คณะผู้วิจัย จึงได้พิจารณาจุดสังเกตที่มีโอกาสเกิดปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันคือ จุดสังเกตภายในบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช และจุดสังเกตภายในบริเวณที่มีสถานีวิทยุกระจายเสียงตั้งอยู่อย่างหนาแน่นในเขตชุมชนของอำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช

#### 3.2.3.1 จุดสังเกตภายในบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช

กระบวนการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียงบนช่วงความถี่ที่กำลังใช้งาน โดยกำหนดให้หอบังคับการบินเป็นจุดสังเกตภายในบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช มีรายละเอียด ดังนี้

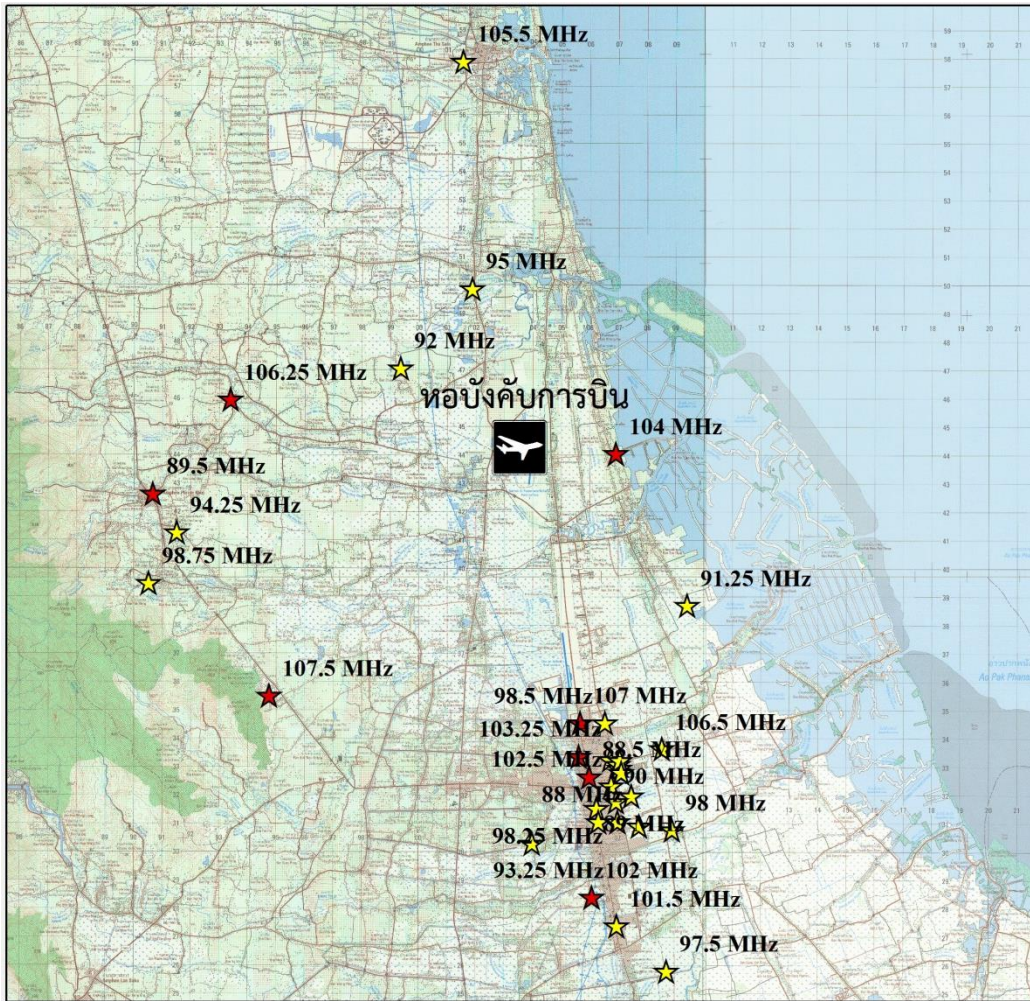
1. คำนวณระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินกับสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยใช้ผลการระบุตำแหน่งของสถานีวิทยุกระจายเสียงบนข้อมูล DEM จากหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งสถานีวิทยุกระจายเสียงที่จะนำมาพิจารณานั้น เป็นสถานที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 20 กิโลเมตร
2. จัดกลุ่มของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยแบ่งตามระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุกระจายเสียงกับหอบังคับการบิน ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มสถานีที่มีระยะห่างไม่เกิน 6 กิโลเมตร กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสถานีที่มีระยะห่างไม่เกิน 10 กิโลเมตร กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มสถานีที่มีระยะห่างระหว่าง 6-10 กิโลเมตร และกลุ่มที่ 4 เป็นกลุ่มสถานีที่มีระยะห่างตั้งแต่ 10 กิโลเมตรขึ้นไป ซึ่งเป็นกลุ่มที่นำมาพิจารณา เนื่องจากมีความเป็นไปได้น้อยที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน หอบังคับการบิน ซึ่งได้แสดงการแบ่งกลุ่มตามระยะห่างจากหอบังคับการบินไว้ตามในรูปที่ 3.6
3. คำนวณค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ตามสมการ

$$f_x = 2f_1 - f_2 \quad (3.1)$$

$$f_y = 2f_2 - f_1 \quad (3.2)$$

โดยที่  $f_1$  และ  $f_2$  เป็นค่าความถี่ของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ 1 และสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ 2 ตามลำดับ และ  $f_x$  และ  $f_y$  เป็นคู่ความถี่ของผลรวมลำดับที่สามของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน

4. จัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน โดยพิจารณาจากคู่ความถี่ของผลรวมลำดับที่สามของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันและระยะทางระหว่างสถานีวิทยุกระจายเสียงกับหอบังคับการบิน



รูปที่ 3.6 ระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินกับสถานีวิทยุกระจายเสียงมีค่าไม่เกิน 10 กิโลเมตร

- ผลของการคำนวณระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินกับสถานีวิทยุกระจายเสียง

ผลการระบุตำแหน่งของสถานีวิทยุกระจายเสียงในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่า ในระยะรัศมีไม่เกิน 20 กิโลเมตร จากหอบังคับการบินนั้น จะประกอบด้วยสถานีวิทยุกระจายเสียง จำนวน 31 สถานี การคำนวณระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินกับสถานีวิทยุกระจายเสียง ได้ใช้ผลการระบุตำแหน่งของสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณไว้ในตารางที่ 3.4 โดยเรียงลำดับตามระยะห่างน้อยไปมาก ด้วยเหตุนี้ จึงพบว่า สถานีวิทยุเทศบาลเมืองปากพูน มีระยะห่างจากจุดสังเกตน้อยที่สุด คือ 3.175 km. และสถานีวิทยุคลื่นลูกทุ่งไทย มีระยะห่างจากจุดสังเกตมากที่สุด คือ 18.867 km. ทั้งนี้ จึงคาดการณ์ว่า เมื่อทำการวัดค่าความเข้มของสัญญาณที่แพร่จากสถานีวิทยุเทศบาลเมืองปากพูน น่าจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสัญญาณที่แพร่จากสถานีวิทยุอื่น



ตารางที่ 3.4 ระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุกระจายเสียงกับจุดสังเกต (หอบังคับการบิน)

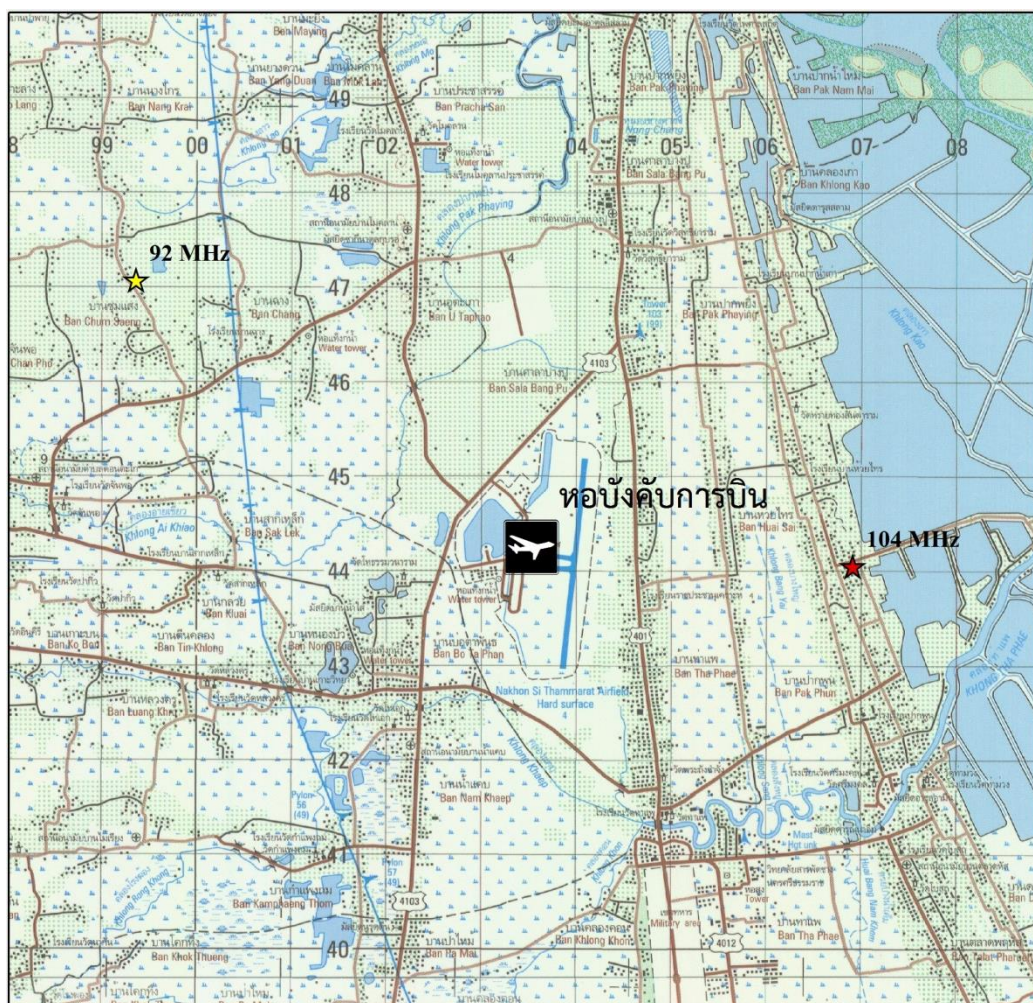
ชื่อสถานี	ความถี่ (MHz)	ระยะห่าง (km)	ประเภทบริการ
เทศบาลเมืองปากพูน	104.00	3.175	สาธารณะ
คนรักบ้านเกิด	92.00	5.449	ธุรกิจ
โมคลาน	95.00	6.321	ธุรกิจ
ชื่นฤทัยในธรรม	91.25	7.808	ธุรกิจ
ท้องถิ่นไทย (ววท.) OK เรดิโอ	98.50	9.651	ธุรกิจ
เพื่อการศึกษาและพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช	107.00	9.715	สาธารณะ
เพื่อการศึกษาและพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยการอาชีพพรหมคีรี	106.25	10.546	สาธารณะ
พระพุทธศาสนาและสังคม	103.25	10.812	สาธารณะ
ลักขุลี	90.00	11.127	ธุรกิจ
เพื่อความมั่นคง แมจิก เรดิโอ	102.75	11.277	ธุรกิจ
ฮิตสนั่นเมือง	106.50	11.295	ธุรกิจ
แสงจันทร์เรดิโอ	102.25	11.407	ธุรกิจ
เสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม	90.25	11.549	ธุรกิจ

ชื่อสถานี	ความถี่ (MHz)	ระยะห่าง (km)	ประเภทบริการ
เทศบาลนครนครศรีธรรมราช	88.50	11.583	สาธารณะ
KISS FM	95.25	11.713	ธุรกิจ
Happinessradio	104.75	11.715	ธุรกิจ
สตาร์ เอฟเอ็ม	102.50	12.074	ธุรกิจ
สถานีวิทยุมหาวิทยาลัยราชภัฏ นครศรีธรรมราช (เสียงมหาชัย)	107.50	12.363	สาธารณะ
เขาปูนเรดิโอ	94.25	12.553	ธุรกิจ
มุ่มบ่อมซิติ้เรดิโอ	89.00	12.602	ธุรกิจ
คลื่นมหานิยม POPPULAWAVE	107.75	12.654	ธุรกิจ
เพื่อบริการเทศบาลตำบลพรหมโลก	89.50	13.145	สาธารณะ
ท่าม้า เรดิโอ - โอเคลูกทุ่ง	107.25	13.203	ธุรกิจ
ท่าม้าเรดิโอ	88.00	13.344	ธุรกิจ
ประชาคมนครศรีธรรมราช	99.25	13.696	ธุรกิจ
สตาร์ลูกทุ่ง	93.25	13.703	ธุรกิจ
รีแล็กซ์ เรดิโอ	98.75	13.918	ธุรกิจ
กองปราบอาสา	98.00	14.206	ธุรกิจ
เพื่อการศึกษาและเผยแพร่พระพุทธศาสนา	102.00	15.762	สาธารณะ
นครเรดิโอ	101.50	16.939	ธุรกิจ
คลื่นลูกทุ่งไทย	97.50	18.867	ธุรกิจ

- ผลการจัดกลุ่มสถานีวิทยุโดยพิจารณาจากระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุกระจายเสียงกับหอบังคับการบิน

ผลของการคำนวณระยะห่างจากจุดสังเกตไปยังสถานีวิทยุกระจายเสียง ได้ถูกนำมาใช้จัดกลุ่มสถานีวิทยุ ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน ทำให้สามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยจำนวน 3 กลุ่ม ตามระยะห่างจากหอบังคับการบิน โดยมีผลของการจัดกลุ่มดังนี้

**กลุ่มที่ 1** ซึ่งเป็นกลุ่มของสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากหอบังคับการบินไม่เกิน 6 กิโลเมตร ซึ่งประกอบด้วยสถานีวิทยุ จำนวน 2 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 สถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากหอบังคับการบินไม่เกิน 6 กิโลเมตร

กลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นกลุ่มของสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากหอบังคับการบินไม่เกิน 10 กิโลเมตร ซึ่งประกอบด้วยสถานีวิทยุ จำนวน 6 สถานี ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 สถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากหอบังคับการบินไม่เกิน 10 กิโลเมตร

กลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นกลุ่มของสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากหอบังคับการบินระหว่าง 6-10 กิโลเมตร ซึ่งประกอบด้วยสถานีวิทยุ จำนวน 4 สถานี ดังแสดงในรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 สถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากหอบังคับระหว่าง 6-10 กิโลเมตร

- ผลการคำนวณค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งพิจารณาให้จุดสังเกตอยู่ที่หอบังคับการบินภายในบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช ถูกคำนวณโดยใช้ข้อมูลของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากจุดสังเกต ตามที่ได้จำแนกไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

**กลุ่มที่ 1** เป็นกลุ่มของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินไม่เกิน 6 กิโลเมตร ซึ่งค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง มีรายละเอียดตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีระยะห่างไม่เกิน 6 กิโลเมตร จากจุดสังเกตบริเวณหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
104.00 MHz สถานีวิทยุเทศบาล เมืองปากพูน	92.00 MHz สถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด	116.00 MHz	80.00 MHz

**กลุ่มที่ 2** เป็นกลุ่มของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินไม่เกิน 10 กิโลเมตร ซึ่งค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ได้คำนวณขึ้นโดยกำหนดให้ค่า  $f_1$  เป็นค่าความถี่ของคลื่นวิทยุที่แพร่จากสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากหอบังคับการบินไม่เกิน 6 กิโลเมตร และค่า  $f_2$  เป็นค่าความถี่ของคลื่นวิทยุที่แพร่จากสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากหอบังคับการบินมากกว่า 6 กิโลเมตร แต่ไม่เกิน 10 กิโลเมตร และมีรายละเอียด ตามตารางที่ 3.6

โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงที่ค่าความถี่ต่ำกว่า 88.0 MHz มีจำนวน 4 ค่าความถี่
2. ช่วงที่ค่าความถี่อยู่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการกระจายเสียงด้วยระบบเอฟเอ็ม มีจำนวน 7 ค่าความถี่
3. ช่วงที่ค่าความถี่สูงกว่า 108 MHz ซึ่งเป็นค่าความถี่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน มีจำนวน 5 ค่าความถี่

ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกันของสถานีวิทยุกระจายเสียง เอฟเอ็ม บริเวณหอบังคับการบิน ซึ่งมีระยะห่างไม่เกิน 10 กิโลเมตร

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
104.00 MHz สถานีวิทยุ เทศบาลเมืองปากพูน	91.25 MHz สถานีวิทยุขึ้นฤทัยในธรรม	116.75 MHz	78.50 MHz
	95.00 MHz สถานีวิทยุโมคลาน	113.00 MHz	86.00 MHz
	98.50 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	109.50 MHz	93.00 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัยเทคนิค นครศรีธรรมราช	101.00 MHz	110.00 MHz
92.00 MHz สถานีวิทยุ คนรักบ้านเกิด	91.25 MHz สถานีวิทยุขึ้นฤทัยในธรรม	92.75 MHz	90.50 MHz
	95.00 MHz สถานีวิทยุโมคลาน	89.00 MHz สถานีวิทยุ มุ่มป้อมซิดีเรดิโอ	98.00 MHz สถานีวิทยุ กองปราบอาสา
	98.50 MHz สถานีวิทยุ ท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	85.50 MHz	105.00 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัยเทคนิค นครศรีธรรมราช	77.00 MHz	122.00 MHz

กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินอยู่ในช่วง 6-10 กิโลเมตร :ซึ่งค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง มีรายละเอียดตามตารางที่ 3.7 โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงที่ค่าความถี่ต่ำกว่า 88.0 MHz มีจำนวน 4 ค่าความถี่
2. ช่วงที่ค่าความถี่อยู่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการกระจายเสียงด้วยระบบเอฟเอ็ม มีจำนวน 5 ค่าความถี่
3. ช่วงที่ค่าความถี่สูงกว่า 108 MHz ซึ่งเป็นค่าความถี่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน มีจำนวน 3 ค่าความถี่

ตารางที่ 3.7 ผลการคำนวณหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกัน ของสถานีวิทยุกระจายเสียง เอฟเอ็ม บริเวณหอบังคับการบิน ซึ่งมีระยะห่างมากกว่า 6 กิโลเมตร แต่ไม่เกิน 10 กิโลเมตร

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
95.00 MHz สถานีวิทยุโมคคลาน	91.25 MHz สถานีวิทยุขึ้นฤทัยในธรรม	98.75 MHz	87.50 MHz
	98.50 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	91.50 MHz	102.00 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัยเทคนิค นครศรีธรรมราช	83.00 MHz	119.00 MHz



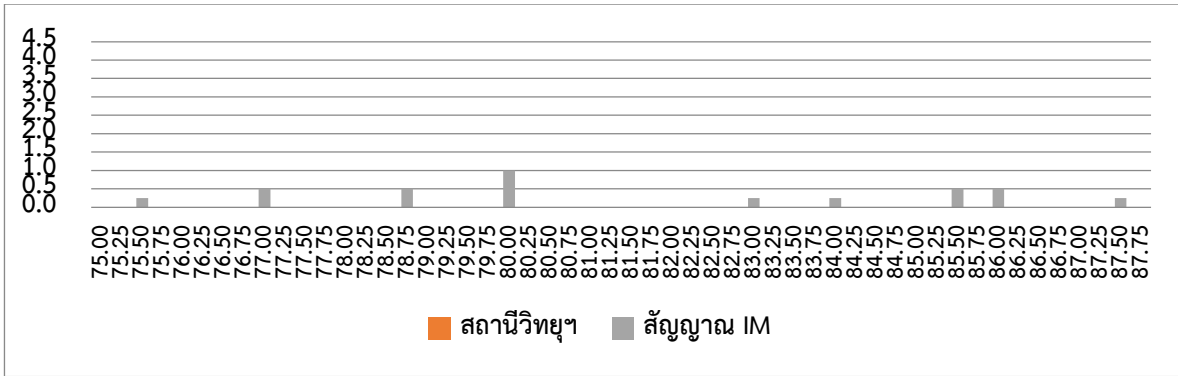
$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
91.25 MHz สถานีวิทยุขึ้นฤทัย ในธรรม	98.50 MHz สถานีวิทยุ ท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	84.00 MHz	105.75 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัยเทคนิค นครศรีธรรมราช	75.50 MHz	122.75 MHz
98.50 MHz สถานีวิทยุ ท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัยเทคนิค นครศรีธรรมราช	90.00 MHz	115.50 MHz

- ผลการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีส่ง โดยกำหนดให้หอบังคับการบินเป็นจุดสังเกต

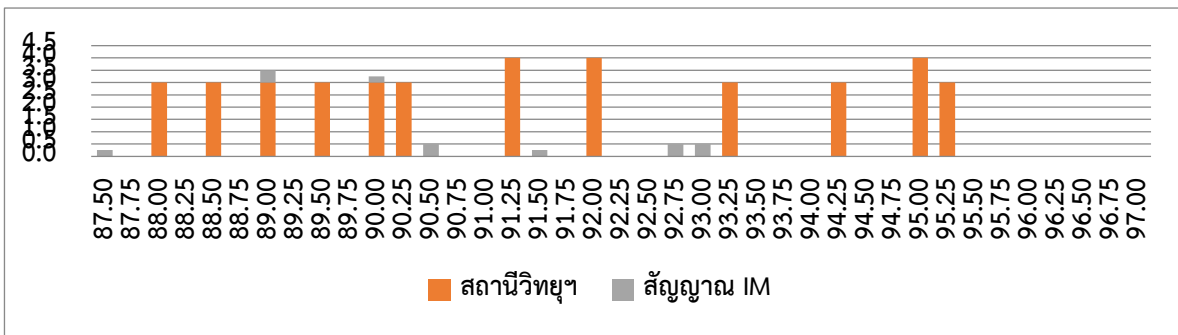
ความเป็นไปได้ของการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง จะถูกจัดลำดับโดยพิจารณาจากผลการคำนวณค่าความถี่ที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียงและผลการคำนวณระยะห่างจากหอบังคับการบินรูปที่ 3.10 ได้แสดงถึงค่าความถี่ของคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้น ทั้งหมด 61 ค่าความถี่ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคลื่นวิทยุ ชนิดที่ 1 เป็นคลื่นวิทยุที่ถูกส่งจากสถานีวิทยุฯ มีจำนวน 31 สถานีวิทยุฯ ซึ่งสถานีวิทยุฯเหล่านี้ ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 20 กิโลเมตร จากจุดสังเกต และชนิดที่ 2 เป็นสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกัน ซึ่งเกิดจากสถานีวิทยุฯที่อยู่ภายในรัศมีไม่เกิน 10 กิโลเมตร

ด้วยคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้นทั้งสองชนิด จะมีกำลังการแพร่คลื่นแปรผกผันกับระยะทาง ดังนั้น ค่าความเข้มสนามจึงมีค่าแตกต่างกัน ณ จุดสังเกตที่บริเวณหอบังคับการบิน จึงได้กำหนดค่าน้ำหนักของความเข้มของคลื่นวิทยุเพื่อแบ่งระดับของผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยพิจารณาจากระยะทางที่คลื่นวิทยุแพร่จากแหล่งกำเนิด ซึ่งค่าน้ำหนักของความเข้มของคลื่นวิทยุที่คาดว่าจะเกิดขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

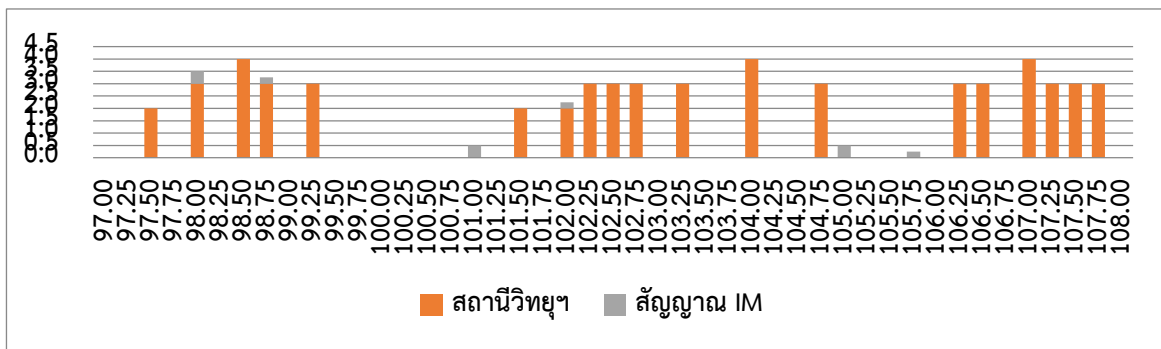
ชนิดของคลื่นวิทยุ	ค่าน้ำหนัก
คลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุฯที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 10 กิโลเมตร	4.0
คลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุฯที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 15 กิโลเมตร	3.0
คลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุฯที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 20 กิโลเมตร	2.0
คลื่นวิทยุจากการเกิดมอดูเลตระหว่างกันของสถานีวิทยุฯทั้งสองที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 6 กิโลเมตร	1.0
คลื่นวิทยุจากการเกิดมอดูเลตระหว่างกันของสถานีวิทยุฯที่หนึ่งที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 6 กิโลเมตร และสถานีวิทยุฯที่สองที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีมากกว่า 6 กิโลเมตร แต่ไม่เกิน 10 กิโลเมตร	0.5
คลื่นวิทยุจากการเกิดมอดูเลตระหว่างกันของสถานีวิทยุฯทั้งสองที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีมากกว่า 6 กิโลเมตรแต่ไม่เกิน 10 กิโลเมตร	0.25



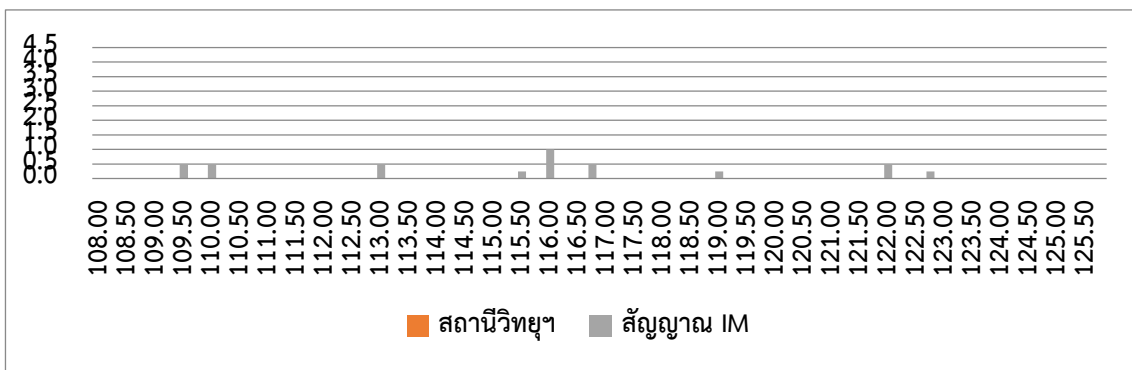
(ก) ค่าความถี่ตั้งแต่ 75.0 – 87.75 MHz



(ข) ค่าความถี่ตั้งแต่ 87.75-97.00 MHz



(ค) ค่าความถี่ตั้งแต่ 97.00-108.0 MHz



(ง) ค่าความถี่ตั้งแต่ 108.0-125.50 MHz

รูปที่ 3.10 ระดับค่านำหนักของความเข้มสนามของคลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ณ จุดสังเกตเป็น  
ห้องบังคับการบิน

ผลของการสังเกตการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกิจการกระจายเสียง ณ หอบังคับการบิน สนามบิน นครศรีธรรมราช ทำให้ทราบว่า ภายในบริเวณระยะรัศมีไม่เกิน 20 กิโลเมตร จากจุดสังเกตนั้น จะพบว่า คลื่นวิทยุที่ใช้เพื่อกิจการกระจายเสียงของสถานีวิทยุมีจำนวนทั้งสิ้น 31 ค่าความถี่ (อยู่ระหว่าง 88.00-108.00 MHz) และคลื่นวิทยุที่มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากการมอดูเลตระหว่างกัน มีจำนวนทั้งสิ้น 30 ค่าความถี่ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงความถี่ต่ำกว่า 88.00 MHz ช่วงความถี่ระหว่าง 88.00-108.00 MHz และ ช่วงความถี่สูงกว่า 108.00 MHz โดยมีจำนวน 8 13 และ 9 ค่าความถี่ ตามลำดับ ดังนั้น จึงขอจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีส่ง โดยกำหนดให้หอบังคับการบินเป็นจุดสังเกต ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.8 ผลการจัดลำดับค่าความถี่ที่มีความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยกำหนดจุดสังเกต หอบังคับการบิน สนามบิน นครศรีธรรมราช

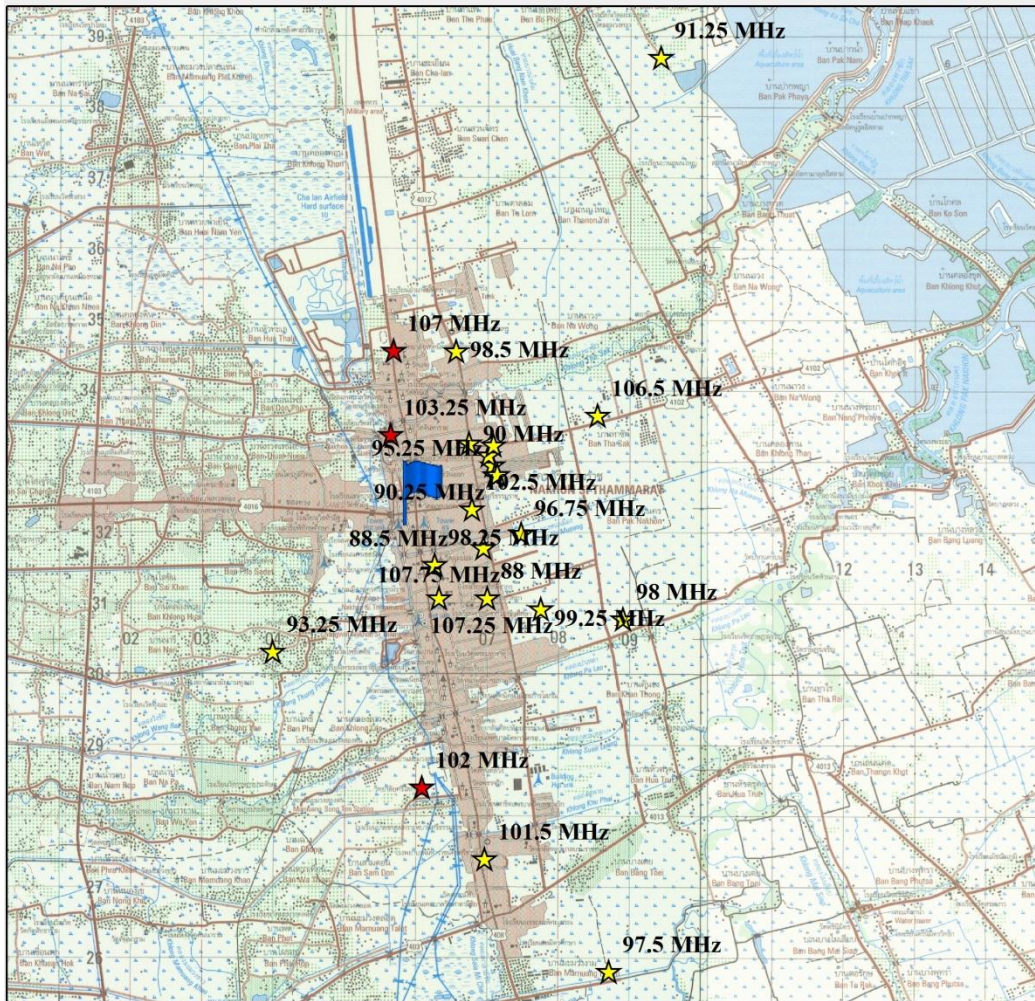
ลำดับ	ระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินกับ ความถี่หลัก ( $f_1$ หรือ $f_2$ )	ผลการคำนวณ ความถี่หลัก ( $f_1, f_2$ )
1	(3.18, 5.45) km.	(104.00, 92.00) MHz
2	(3.18, 6.15) km.	(104.00, 95.00) MHz
3	(3.18, 7.81) km.	(104.00, 91.25) MHz
4	(3.18, 9.57) km.	(104.00, 98.50) MHz

สัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกัน ซึ่งมีค่าความถี่สูงกว่า 108.00 MHz นั้น มีจำนวนสูงถึง 9 ค่าความถี่ จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะมีการรบกวนกับกิจการวิทยุนำทางการบินและกิจการเคลื่อนที่ทางการบิน ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกันที่ค่าความถี่ 116 MHz ซึ่งมีค่าน้ำหนักของความเข้มสนามของคลื่นวิทยุ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน เท่ากับ 1.0 เนื่องจากเป็นสัญญาณที่เกิดจากสถานีวิทยุที่แพร่สัญญาณคลื่นวิทยุความถี่ 92.00 MHz และ 104.00 MHz ซึ่งตั้งอยู่ในรัศมีไม่เกิน 6 กิโลเมตร เป็นต้น และด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ คณะผู้วิจัยจึงเล็งว่า การเลือกใช้ความถี่คลื่นวิทยุเพื่อกิจการกระจายเสียงบริเวณที่ใกล้สนามบินนั้น ควรคำนึงถึงผลกระทบจากการเกิดขึ้นของสัญญาณการมอดูเลตระหว่างกันที่มีความถี่สูงกว่า 108.00 MHz

### 3.2.3.2 จุดสังเกตภายในเขตชุมชนเมืองนครศรีธรรมราช

กระบวนการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียงบนช่วงความถี่ที่กำลังใช้งาน โดยกำหนดจุดสังเกตเป็นสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz โดยแสดงด้วยสัญลักษณ์รูปธงสีน้ำเงิน ซึ่งตั้งอยู่บริเวณชุมชนเมืองนครศรีธรรมราชที่มีสถานีวิทยุตั้งอยู่อย่างหนาแน่น มีรายละเอียด ดังนี้

1. คำนวณระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz กับสถานีวิทยุกระจายเสียงอื่นๆ โดยใช้ผลการระบุตำแหน่งของสถานีวิทยุกระจายเสียงบนข้อมูล DEM จากหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งสถานีวิทยุกระจายเสียงที่จะนำมาพิจารณานั้น เป็นสถานีที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 10 กิโลเมตร
2. จัดกลุ่มของสถานีวิทยุกระจายเสียง โดยแบ่งตามระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุกระจายเสียงกับสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มสถานีที่มีระยะห่างไม่เกิน 1 กิโลเมตร กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มสถานีที่มีระยะห่างไม่เกิน 2 กิโลเมตร กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มสถานีที่มีระยะห่างระหว่าง 1-2 กิโลเมตร และกลุ่มที่ 4 เป็นกลุ่มสถานีที่มีระยะห่างตั้งแต่ 2 กิโลเมตรขึ้นไป ซึ่งเป็นกลุ่มที่นำมาพิจารณา เนื่องจากมีความเป็นไปได้น้อยที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน ณ บริเวณชุมชนเมือง ซึ่งได้แสดงการแบ่งกลุ่มตามระยะห่างจากสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz ไว้ตามในรูปที่ 3.11
3. คำนวณค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ตามสมการ (3.1) และ (3.2)
4. จัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน โดยพิจารณาจากคู่ความถี่ของผลรวมลำดับที่สามของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันและระยะทางระหว่างสถานีวิทยุกระจายเสียงกับสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz



รูปที่ 3.11 ระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz กับสถานีวิทยุกระจายเสียงอื่นๆ มีค่าไม่เกิน 10 กิโลเมตร

- ผลของการคำนวณระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz กับสถานีวิทยุกระจายเสียงอื่น

ผลการระบุตำแหน่งของสถานีวิทยุกระจายเสียงในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่า ในระยะรัศมีไม่เกิน 10 กิโลเมตรจากสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz นั้น จะประกอบด้วยสถานีวิทยุกระจายเสียงจำนวน 23 สถานี การคำนวณระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz กับสถานีวิทยุกระจายเสียงอื่นๆ ได้ใช้ผลการระบุตำแหน่งของสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณไว้ในตารางที่ 3.9 โดยเรียงลำดับตามระยะห่างน้อยไปมาก ด้วยเหตุนี้ จึงพบว่า สถานีวิทยุพระพุทธศาสนาและสังคม มีระยะห่างจากจุดสังเกตน้อยที่สุด ด้วยระยะห่าง 0.81 km. และสถานีวิทยุขึ้นฤทัยในธรรม มีระยะห่างจากจุดสังเกตมากที่สุด ด้วยระยะห่าง 7.34 km. ทั้งนี้ จึงคาดการณ์ว่า เมื่อทำการวัดค่าความเข้มของสัญญาณ

ที่แพร่จากสถานีวิทยุพระพุทธศาสนาและสังคม น่าจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับสัญญาณที่แพร่จากสถานีวิทยุอื่น

ตารางที่ 3.9 ระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุทดลองใช้คลื่นความถี่วิทยุ 88.50 MHz กับสถานีวิทยุกระจายเสียงอื่นในเขตชุมชนเมือง

ชื่อสถานี	ความถี่ (MHz)	ระยะห่าง (km)	ประเภทบริการ
พระพุทธศาสนาและสังคม	103.25	0.81	สาธารณะ
สตาร์ เอฟเอ็ม	102.50	0.84	ธุรกิจ
ลักซูลี	90.00	0.98	ธุรกิจ
แสงจันทร์เรดิโอ	102.25	1.11	ธุรกิจ
เสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม	90.25	1.12	ธุรกิจ
KISS FM	95.25	1.13	ธุรกิจ
SASSY FM	98.25	1.15	ธุรกิจ
Happinessradio	104.75	1.16	ธุรกิจ
เพื่อความมั่นคง แมจิค เรดิโอ	102.75	1.23	ธุรกิจ

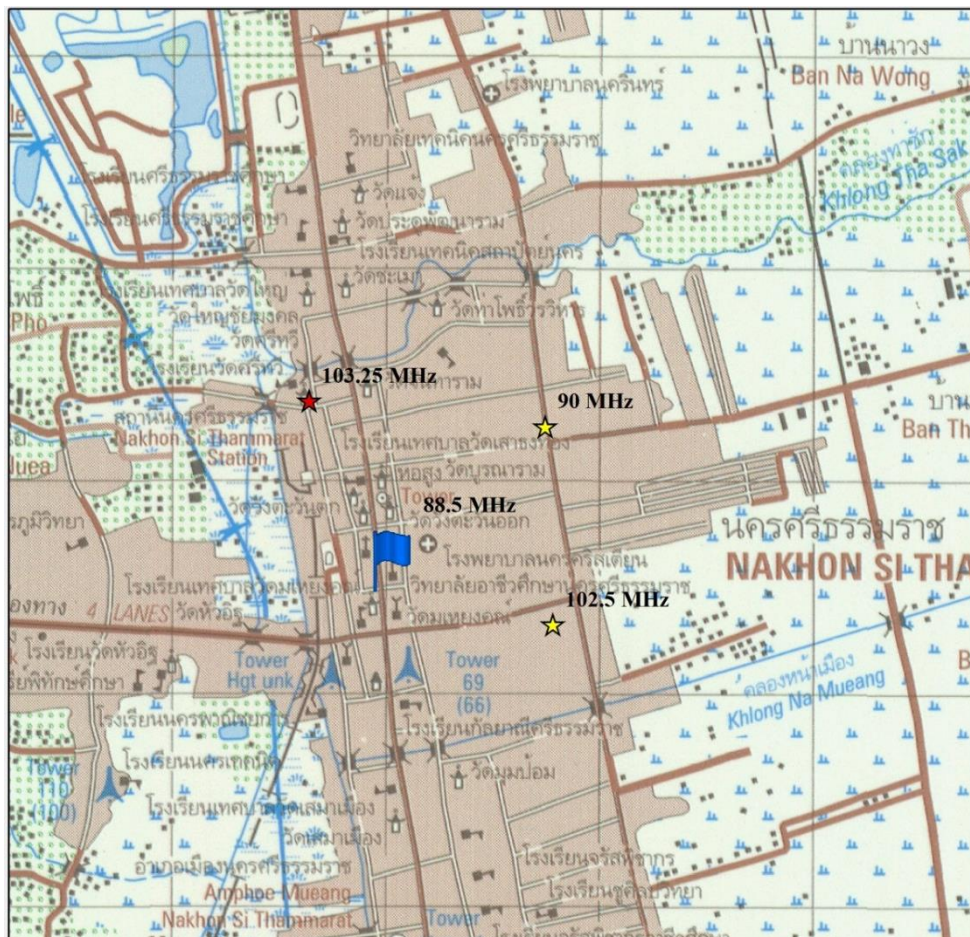
ชื่อสถานี	ความถี่ (MHz)	ระยะห่าง (km)	ประเภทบริการ
คลื่นมหานคร POPPULAWAVE	107.75	1.30	ธุรกิจ
my love FM	96.75	1.63	ธุรกิจ
ท่าม้า เรดิโอ - โอเคลูกทุ่ง	107.25	1.63	ธุรกิจ
ท่าม้าเรดิโอ	88.00	1.87	ธุรกิจ
เพื่อการศึกษาและพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิคนครศรีธรรมราช	107.00	1.89	สาธารณะ
ท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	98.50	1.98	ธุรกิจ
ประชาคมนครศรีธรรมราช	99.25	2.47	ธุรกิจ
ฮิตสนั่นเมือง	106.50	2.73	ธุรกิจ
สตาร์ลูกทุ่ง	93.25	3.1	ธุรกิจ
กองปราบอาสา	98.00	3.46	ธุรกิจ
เพื่อการศึกษาและเผยแพร่พระพุทธศาสนา	102.00	4.26	สาธารณะ
นครเรดิโอ	101.50	5.39	ธุรกิจ
ซันนทัยในธรรม	91.25	6.96	ธุรกิจ
คลื่นลูกทุ่งไทย	97.50	7.34	ธุรกิจ



- ผลการจัดกลุ่มสถานีวิทยุโดยพิจารณาจากระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz กับสถานีวิทยุกระจายเสียงอื่น

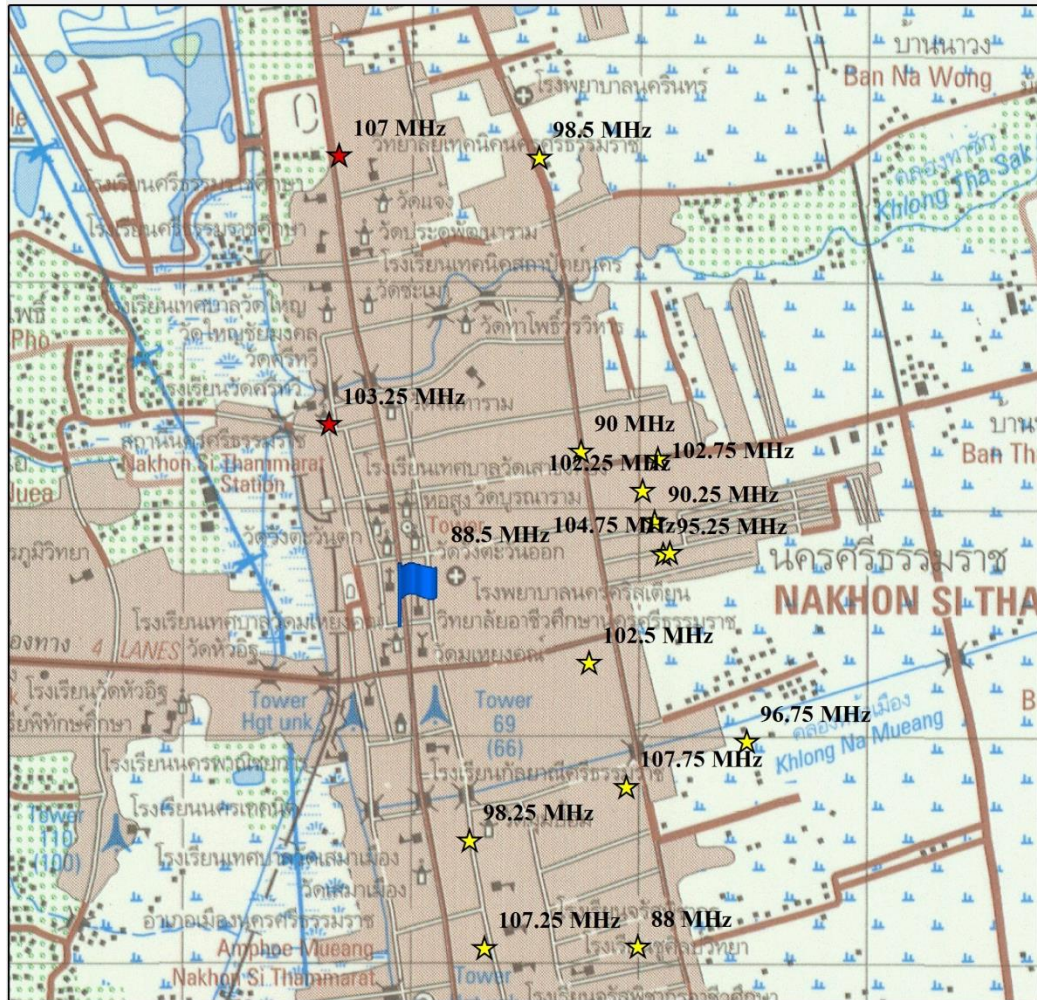
ผลของการคำนวณระยะห่างจากจุดสังเกตไปยังสถานีวิทยุกระจายเสียง ได้ถูกนำมาใช้จัดกลุ่มสถานีวิทยุ ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์หาความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน ทำให้สามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยจำนวน 3 กลุ่ม ตามระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz โดยมีผลของการจัดกลุ่มดังนี้

**กลุ่มที่ 1** ซึ่งเป็นกลุ่มของสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ไม่เกิน 1 กิโลเมตร ซึ่งประกอบด้วยสถานีวิทยุ จำนวน 3 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3.12



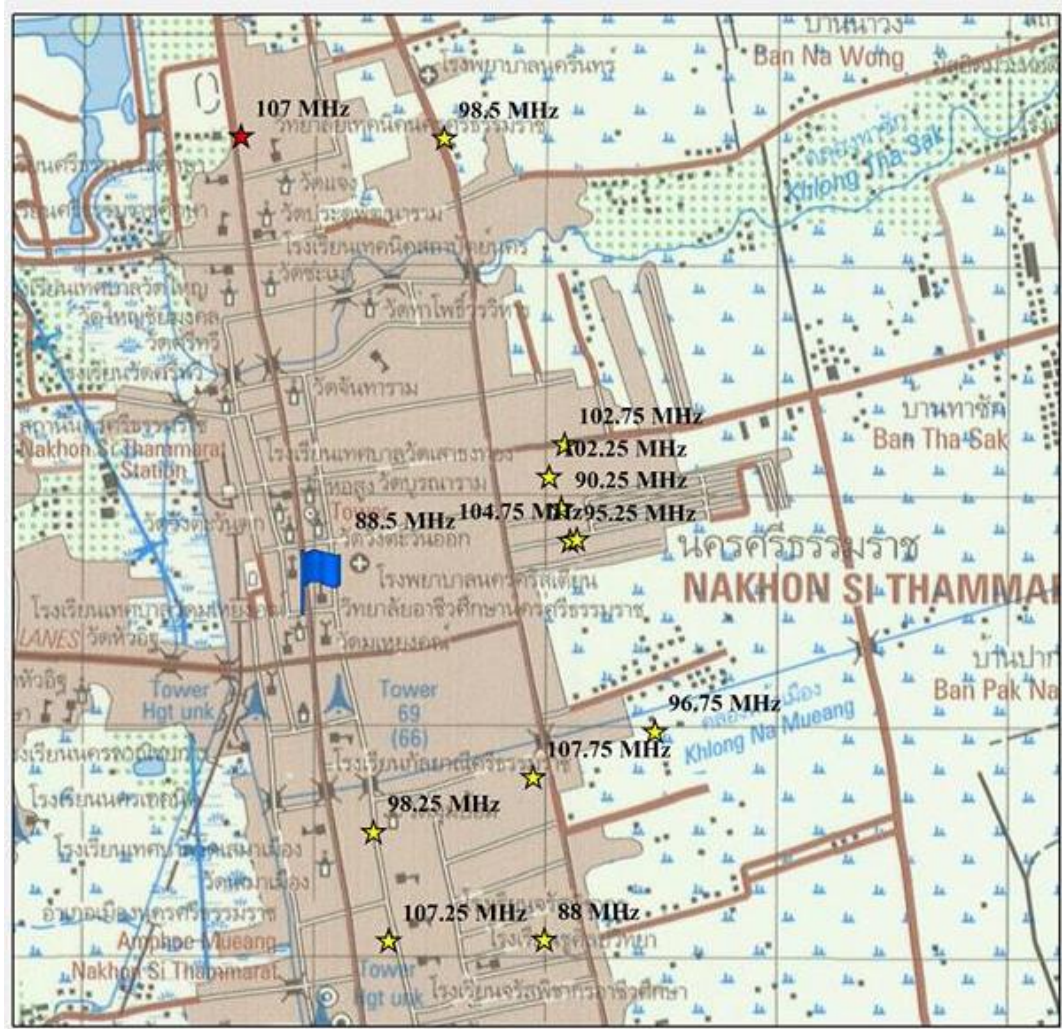
รูปที่ 3.12 กลุ่มสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ไม่เกิน 1 กิโลเมตร

กลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นกลุ่มของสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ไม่เกิน 2 กิโลเมตร ซึ่งประกอบด้วยสถานีวิทยุ จำนวน 15 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กลุ่มสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ไม่เกิน 2 กิโลเมตร

กลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นกลุ่มของสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ระหว่าง 1-2 กิโลเมตร ซึ่งประกอบด้วยสถานีวิทยุ จำนวน 12 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กลุ่มสถานีวิทยุที่มีระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ระหว่าง 1-2 กิโลเมตร

● ผลการคำนวณค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง

ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งพิจารณาให้จุดสังเกตอยู่ที่สถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ถูกคำนวณโดยใช้ข้อมูลของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างจากจุดสังเกต ตามที่ได้จำแนกไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

**กลุ่มที่ 1** เป็นกลุ่มของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ไม่เกิน 1 กิโลเมตร ซึ่งค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง มีรายละเอียด ตามตารางที่ 3.10 โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงที่ค่าความถี่ต่ำกว่า 88.0 MHz มีจำนวน 5 ค่าความถี่
2. ช่วงที่ค่าความถี่อยู่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการกระจายเสียงด้วยระบบเอฟเอ็ม มีจำนวน 3 ค่าความถี่
3. ช่วงที่ค่าความถี่สูงกว่า 108 MHz ซึ่งเป็นค่าความถี่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน มีจำนวน 4 ค่าความถี่

ตารางที่ 3.10 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีระยะห่างไม่เกิน 1 กิโลเมตร จากจุดสังเกตบริเวณสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
88.50 MHz สถานีวิทยุเทศบาลนคร นครศรีธรรมราช	103.25 MHz สถานีวิทยุพระพุทธศาสนาและสังคม	73.75 MHz	118.00 MHz
	102.50 MHz สถานีวิทยุสตาร์ เอฟเอ็ม	74.50 MHz	116.50 MHz
	90.00 MHz สถานีวิทยุหลักซูลี	87.00 MHz	91.50 MHz สถานีวิทยุ สวส. พัทธกษัตริราชฎร์

f1 (ความถี่หลัก)	f2 (ความถี่หลัก)	fx (ผลรวมอันดับสาม)	fy (ผลรวมอันดับสาม)
103.25 MHz สถานีวิทยุพระพุทธ ศาสนาและสังคม	102.50 MHz สถานีวิทยุสตาร์ เอฟเอ็ม	104.00 MHz สถานีวิทยุ เทศบาลเมืองปากพูน	101.75 MHz
	90.00 MHz สถานีวิทยุหลักชูลี	116.50 MHz	76.75 MHz
102.50 MHz สถานีวิทยุสตาร์ เอฟเอ็ม	90.00 MHz สถานีวิทยุหลักชูลี	115.00 MHz	77.50 MHz

**กลุ่มที่ 2** เป็นกลุ่มของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ไม่เกิน 2 กิโลเมตร ซึ่งค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง มีรายละเอียด ตามตารางที่ 3.11 โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงที่ค่าความถี่ต่ำกว่า 88.0 MHz มีจำนวน 28 ค่าความถี่
2. ช่วงที่ค่าความถี่อยู่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการกระจายเสียงด้วยระบบเอฟเอ็ม มีจำนวน 40 ช่วงความถี่
3. ช่วงที่ค่าความถี่สูงกว่า 108 MHz ซึ่งเป็นค่าความถี่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน มีจำนวน 28 ช่วงความถี่

ตารางที่ 3.11 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีระยะห่างไม่เกิน 2 กิโลเมตร จากจุดสังเกตบริเวณสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
88.50 MHz สถานีวิทยุเทศบาล นคร นครศรีธรรมราช	102.25 MHz สถานีวิทยุแสงจันทร์ เรดิโอ	74.75 MHz	116.00 MHz
	90.25 MHz สถานีวิทยุเสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม	86.75 MHz	92.00 MHz สถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด
	95.25 MHz สถานีวิทยุ Kiss FM	81.75 MHz	102.00 MHz สถานีวิทยุ เพื่อการศึกษา และเผยแผ่พระพุทธศาสนา ประเภทบริการสาธารณะ
	98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM	78.75 MHz	108.00 MHz

f1 (ความถี่หลัก)	f2 (ความถี่หลัก)	fx (ผลรวมอันดับสาม)	fy (ผลรวมอันดับสาม)
88.50 MHz สถานีวิทยุเทศบาล นคร นครศรีธรรมราช	104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	72.25 MHz	121.00 MHz
	102.75 MHz สถานีวิทยุ เพื่อความมั่นคง แมจิก เรดิโอ	74.25 MHz	117.00 MHz
	107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหาชน POPPULAWAVE	69.25 MHz	127.00 MHz
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	80.25 MHz	105.00 MHz
	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ – โอเคลูกทุ่ง	69.75 MHz	126.00 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	89.00 MHz สถานีวิทยุ มูมป้อมซิติ้ เรดิโอ	87.50 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	70.00 MHz	125.50 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	78.50 MHz	108.50 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
103.25 MHz สถานีวิทยุพระพุทธร ศาสนาและสังคม	102.25 MHz สถานีวิทยุแสงจันทร์ เรดิโอ	104.25 MHz	101.25 MHz สถานีวิทยุคลื่นอ่าวไทย
	90.25 MHz สถานีวิทยุเสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม	116.25 MHz	77.25 MHz
	95.25 MHz สถานีวิทยุ Kiss FM	111.25 MHz	87.25 MHz
	98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM	108.25 MHz	93.25 MHz สถานีวิทยุสตาร์ลูกทุ่ง
	104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	101.75 MHz	106.25 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัย การอาชีพพรหมคีรี
	102.75 MHz สถานีวิทยุ เพื่อความมั่นคง แมจิค เรดิโอ	103.75 MHz สถานีวิทยุท่าข้าม เรดิโอ	102.25 MHz สถานีวิทยุแสงจันทร์ เรดิโอ
	107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหาชน POPPULAWAVE	98.75 MHz สถานีวิทยุรีแล็กซ์ เรดิโอ	112.25 MHz
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	109.75 MHz	90.25 MHz สถานีวิทยุเสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม



$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
103.25 MHz สถานีวิทยุพระพุทธศาสนาและสังคม	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	99.25 MHz สถานีวิทยุประชาคม นครศรีธรรมราช	111.25 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้าเรดิโอ	118.50 MHz	72.75 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	99.50 MHz สถานีวิทยุพีค FM	110.75 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	108.00 MHz	93.75 MHz
102.50 MHz สถานีวิทยุสตาร์ เอฟเอ็ม	102.25 MHz สถานีวิทยุแสงจันทร์ เรดิโอ	102.75 MHz สถานีวิทยุเพื่อความ มั่นคง แมจิค เรดิโอ	102.00 MHz สถานีวิทยุ เพื่อการศึกษาและเผยแพร่ พระพุทธศาสนา
	90.25 MHz สถานีวิทยุเสียงจากเวหา เปี่ยมเมืองพระ เอฟเอ็ม	114.75 MHz	78.00 MHz
	95.25 MHz สถานีวิทยุ Kiss FM	109.75 MHz	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ
	98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM	106.75 MHz สถานีวิทยุพิเศษสุข มีเดีย	94.00 MHz สถานีวิทยุพัฒนาและส่งเสริม การเรียนรู้ชุมชน

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
102.50 MHz สถานีวิทยุสตาร์ เอฟเอ็ม	104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	100.25 MHz สถานีวิทยุ เพื่อการศึกษาพัฒนา ท้องถิ่น	107.00 MHz สถานีวิทยุ เพื่อการศึกษาและพัฒนา อาชีววิทยาลัยเทคนิค
	102.75 MHz สถานีวิทยุ เพื่อความมั่นคง แมจิก เรดิโอ	102.25 MHz สถานีวิทยุ แสงจันทร์ เรดิโอ	103.00 MHz สถานีวิทยุศูนย์การเรียนรู้ ลุ่มน้ำปากพอง
	107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหาชน POPPULAWAVE	97.25 MHz	113.00 MHz
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	108.25 MHz	91.00 MHz สถานีวิทยุ Rescue Radio
	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	97.75 MHz สถานีวิทยุตำบลกลาย	112.00 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	117.00 MHz	73.50 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	98.00 MHz สถานีวิทยุ กองปราบอาสา	111.50 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	106.50 MHz สถานีวิทยุฮิตสนั่นเมือง	94.50 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
90.00 MHz สถานีวิทยุหลักชูลี	102.25 MHz สถานีวิทยุแสงจันทร์ เรดิโอ	77.75 MHz	114.50 MHz
	90.25 MHz สถานีวิทยุเสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม	89.75 MHz	90.50 MHz
	95.25 MHz สถานีวิทยุ Kiss FM	84.75 MHz	100.50 MHz
	98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM	81.75 MHz	106.50 MHz สถานีวิทยุฮิตสนั่นเมือง
	104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	75.25 MHz	119.50 MHz
	102.75 MHz สถานีวิทยุ เพื่อความมั่นคง แมจิค เรดิโอ	77.25 MHz	115.50 MHz
	107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหาชน POPPULAWAVE	72.25 MHz	125.50 MHz
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	83.25 MHz	103.50 MHz สถานีวิทยุ หจก.ชาทอง เรดิโอ
	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	72.75 MHz	124.50 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
90.00 MHz สถานีวิทยุหลักชลบุรี	88.00 MHz สถานีวิทยุท่ามา เรดิโอ	92.00 MHz สถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด	86.00 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	73.00 MHz	124.00MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วทท.) OK เรดิโอ	81.50 MHz	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัยเทคนิค

**กลุ่มที่ 3** เป็นกลุ่มของสถานีวิทยุกระจายเสียงที่มีระยะห่างระหว่างสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ระหว่าง 1-2 กิโลเมตร ซึ่งค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง มีรายละเอียด ตามตารางที่ 3.12 โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงที่ค่าความถี่ต่ำกว่า 88.0 MHz มีจำนวน 29 ค่าความถี่
2. ช่วงที่ค่าความถี่อยู่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการกระจายเสียงด้วยระบบเอฟเอ็ม มีจำนวน 59 สถานี
3. ช่วงที่ค่าความถี่สูงกว่า 108 MHz ซึ่งเป็นค่าความถี่บนย่านความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน มีจำนวน 44 ช่วงความถี่

ตารางที่ 3.12 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ซึ่งมีระยะห่างระหว่าง 1-2 กิโลเมตร จากจุดสังเกตบริเวณสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
102.25 MHz สถานีวิทยุ แสงจันทร์เรดิโอ	90.25 MHz สถานีวิทยุเสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม	114.25 MHz	78.25 MHz
	95.25 MHz สถานีวิทยุ Kiss FM	109.25 MHz	88.25 MHz สถานีวิทยุ นครมิวสิค เรดิโอ
	98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM	106.25 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนา วิทยาลัยการ อาชีพพรหมคีรี	94.25 MHz สถานีวิทยุเขาปูน เรดิโอ
	104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	99.75 MHz สถานีวิทยุสิชลสเตชั่น	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง
	102.75 MHz สถานีวิทยุเพื่อความมั่นคง แมจิค เรดิโอ	101.75 MHz	103.25 MHz สถานีวิทยุ พระพุทธศาสนาและสังคม
	107.75 MHz สถานีวิทยุคลื่นมหานิยม POPPULAWAVE	96.75 สถานีวิทยุ My love FM	113.25
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	107.75 MHz สถานีวิทยุคลื่นมหานิยม POPPULAWAVE	91.25 MHz สถานีวิทยุขึ้นฤทัยในธรรม

f1 (ความถี่หลัก)	f2 (ความถี่หลัก)	fx (ผลรวมอันดับสาม)	fy (ผลรวมอันดับสาม)
102.25 MHz สถานีวิทยุ แสงจันทร์เรดิโอ	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	97.25 MHz	112.25 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	116.50 MHz	73.75 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	97.50 MHz สถานีวิทยุคลื่นลูกทุ่งไทย	111.75MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	106.00 MHz สถานีวิทยุทุ่งใหญ่ซิติ้ เรดิ โอ คลื่นสุภาพ	94.75 MHz สถานีวิทยุสามวัง เรดิโอ
90.25 MHz สถานีวิทยุเสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม	95.25 MHz สถานีวิทยุ KISS FM	85.25 MHz	100.25 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา พัฒนาท้องถิ่น
	98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM	82.25 MHz	106.25 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัย การอาชีพพรหมคีรี
	104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	75.75 MHz	119.25 MHz
	102.75 MHz สถานีวิทยุเพื่อความมั่นคง แมจิค เรดิโอ	77.75 MHz	115.25 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
90.25 MHz สถานีวิทยุเสียงจากเวหา เป็ยกเมืองพระ เอฟเอ็ม	107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหานิยม POPPULAWAVE	72.75 MHz	125.25 MHz
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	83.75 MHz	103.25 MHz สถานีวิทยุ พระพุทธศาสนาและสังคม
	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	73.25 MHz	124.25 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	92.50 MHz	85.75 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	73.50 MHz	123.75 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วทท.) OK เรดิโอ	82.00 MHz	106.75 MHz สถานีวิทยุพิเศษสุข มีเดีย
95.25 MHz สถานีวิทยุ KISS FM	98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM	92.25 MHz	101.25 MHz สถานีวิทยุคลื่นอ่าวไทย
	104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	85.75 MHz	114.25 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
95.25 MHz สถานีวิทยุ KISS FM	102.75 MHz สถานีวิทยุเพื่อความมั่นคง แมจิค เรดิโอ	87.75 MHz สถานีวิทยุ พีทลวงเอฟเอ็ม	110.25 MHz
	107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหาชน POPPULAWAVE	82.75 MHz	120.25 MHz
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	93.75 MHz	98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM
	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	83.50 MHz	119.25 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	102.50 MHz สถานีวิทยุสตาร์ เอฟเอ็ม	80.75 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	83.50 MHz	118.75 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	92.00 MHz สถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด	101.75 MHz



f1 (ความถี่หลัก)	f2 (ความถี่หลัก)	fx (ผลรวมอันดับสาม)	fy (ผลรวมอันดับสาม)
98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM	104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	91.75 MHz สถานีวิทยุเฟรช เอฟเอ็ม	111.25 MHz
	102.75 MHz สถานีวิทยุเพื่อความมั่นคง แมจิก เรดิโอ	93.75 MHz	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง
	107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหาชน POPPULAWAVE	88.75 MHz	117.25 MHz
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	99.75 MHz สถานีวิทยุสีชล สเตชั่น	95.25 MHz สถานีวิทยุ KISS FM
	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	89.25 MHz สถานีวิทยุครอบครัวข่าว	116.25 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	108.50 MHz	77.75 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
98.25 MHz สถานีวิทยุ SASSY FM	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	89.50 MHz สถานีวิทยุ เพื่อบริการเทศบาล ตำบลพรหมโลก	115.75 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	98.00 MHz สถานีวิทยุ กองปราบอาสา	98.75 MHz สถานีวิทยุรีแลกซ์ เรดิโอ
104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	102.75 MHz สถานีวิทยุเพื่อความมั่นคง แมจิก เรดิโอ	106.75 MHz สถานีวิทยุ วิเศษสุข มีเดีย	100.75 MHz สถานีวิทยุ หัวไทร เรดิโอ
	107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหาชน POPPULAWAVE	101.75 MHz	110.75 MHz
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	112.75 MHz	88.75 MHz
	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	102.25 MHz สถานีวิทยุ แสงจันทร์เรดิโอ	109.75 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	121.50 MHz	71.25 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
104.75 MHz สถานีวิทยุ happinessradio	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	102.50 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	109.25 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	111.00 MHz	92.25 MHz
102.75 MHz สถานีวิทยุ เพื่อความมั่นคง แมจิก เรดิโอ	107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหานิยม POPPULAWAVE	97.75 MHz สถานีวิทยุตำบลกลาย	112.75 MHz
	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	108.75 MHz	90.75 MHz สถานีวิทยุเพื่อสุขภาพ โรงพยาบาลสิชล
	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	98.25 MHz สถานีวิทยุ Sassy FM	111.75 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	117.50 MHz	73.25 MHz

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
102.75 MHz สถานีวิทยุ เพื่อความมั่นคง แมจิก เรดิโอ	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	98.50 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	111.25 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัยเทคนิค	94.25 MHz สถานีวิทยุเขาปูนเรดิโอ
107.75 MHz สถานีวิทยุ คลื่นมหาชน POPPULAWAVE	96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	118.75 MHz	85.75 MHz
	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	108.25 MHz	106.75 MHz สถานีวิทยุพิเศษสุข มีเดีย
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	127.50 MHz	68.25 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	108.50 MHz	106.25 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ วิทยาลัย การอาชีพพรหมคีรี
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	117.00 MHz	89.25 MHz สถานีวิทยุครอบครัวข่าว

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
96.75 MHz สถานีวิทยุ my love FM	107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	86.25 MHz	117.75 MHz
	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	105.50 MHz สถานีวิทยุครอบครัวข่าว	79.25 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	86.50 MHz	117.25 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	95.00 MHz สถานีวิทยุโมคลาน	100.25 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา พัฒนาท้องถิ่น
107.25 MHz สถานีวิทยุ ท่าม้า เรดิโอ โอเคลูกทุ่ง	88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เรดิโอ	126.50 MHz	68.75 MHz
	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	107.50 MHz สถานีวิทยุมหาวิทยาลัย ราชภัฏนครศรีธรรมราช	106.75 MHz สถานีวิทยุพิเศษสุข มีเดีย
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เรดิโอ	116.00 MHz	89.75 MHz

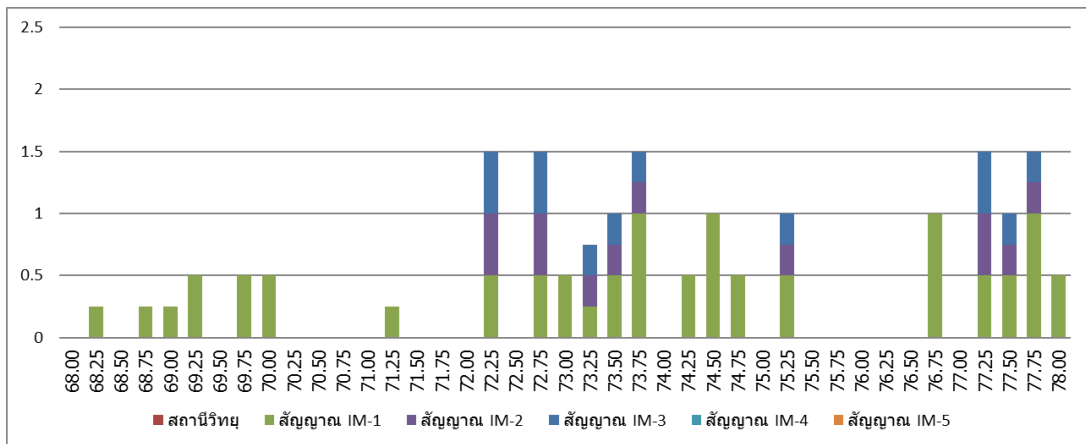
$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
88.00 MHz สถานีวิทยุท่าม้า เเรดิโอ	107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	69.00 MHz	126.00 MHz
	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เเรดิโอ	77.50 MHz	109.00 MHz
107.00 MHz สถานีวิทยุเพื่อการศึกษา และพัฒนาอาชีพ (R-Radio Network) วิทยาลัยเทคนิค	98.5 MHz สถานีวิทยุท้องถิ่นไทย (วท.) OK เเรดิโอ	115.50 MHz	90.00 MHz สถานีวิทยุหลักชลบุรี

- ผลการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีส่ง โดยกำหนดให้สถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz

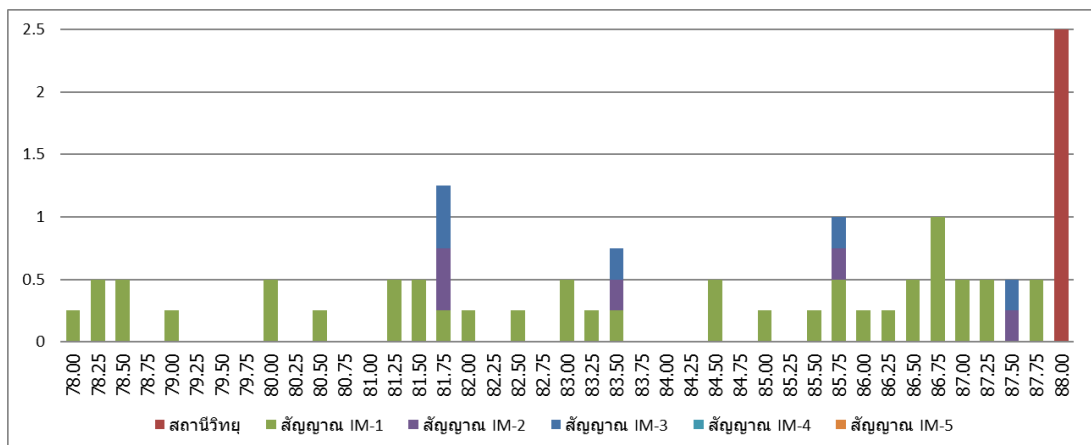
ความเป็นไปได้ของการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง จะถูกจัดลำดับโดยพิจารณาจากผลการคำนวณค่าความถี่ที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียงและผลการคำนวณระยะห่างจากสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz รูปที่ 3.15 ได้แสดงถึงค่าความถี่ของคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้น ทั้งหมด 255 ค่าความถี่ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคลื่นวิทยุ ชนิดที่ 1 เป็นคลื่นวิทยุที่ถูกส่งจากสถานีวิทยุฯ มีจำนวน 15 สถานีวิทยุฯ ซึ่งสถานีวิทยุฯเหล่านี้ ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 2 กิโลเมตร จากจุดสังเกต และชนิดที่ 2 เป็นสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกัน ซึ่งเกิดจากสถานีวิทยุฯที่อยู่ภายในรัศมีไม่เกิน 2 กิโลเมตร

ด้วยคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้นทั้งสองชนิด จะมีกำลังการแพร่คลื่นแปรผกผันกับระยะทาง ดังนั้น ค่าความเข้มสนามจึงมีค่าแตกต่างกัน ณ จุดสังเกตที่บริเวณสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz จึงได้กำหนดค่าน้ำหนักของความเข้มของคลื่นวิทยุ เพื่อแบ่งระดับของผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น โดยพิจารณาจากระยะทางที่คลื่นวิทยุแพร่จากแหล่งกำเนิด ซึ่งค่าน้ำหนักของความเข้มของคลื่นวิทยุที่คาดว่าจะเกิดขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

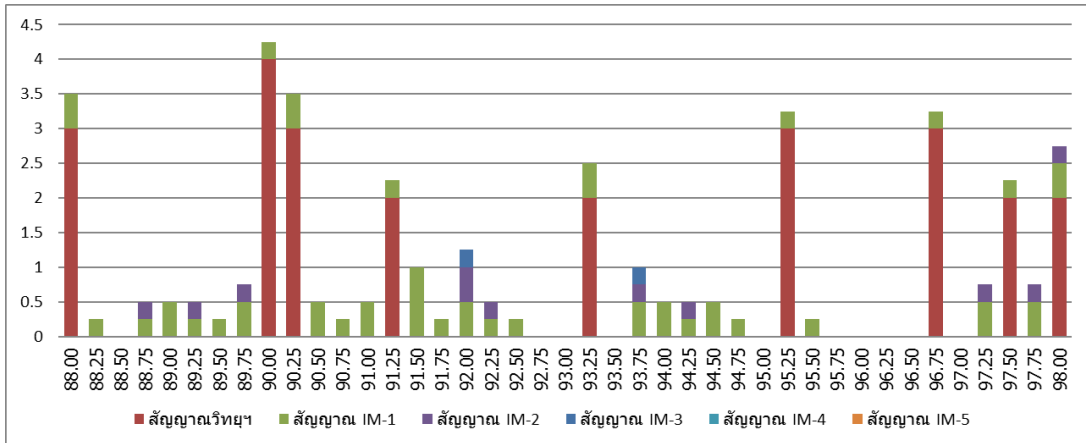
ชนิดของคลื่นวิทยุ	ค่าน้ำหนัก
คลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 1 กิโลเมตร	4.0
คลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีมากกว่า 1 กิโลเมตร แต่ไม่เกิน 2 กิโลเมตร	3.0
คลื่นวิทยุจากการเกิดมอดูเลตระหว่างกันของสถานีวิทยุที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 1 กิโลเมตร	1.0
คลื่นวิทยุจากการเกิดมอดูเลตระหว่างกันของสถานีวิทยุที่หนึ่งที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 1 กิโลเมตร และสถานีวิทยุที่สองที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีมากกว่า 1 กิโลเมตร แต่ไม่เกิน 2 กิโลเมตร	0.5
คลื่นวิทยุจากการเกิดมอดูเลตระหว่างกันของสถานีวิทยุทั้งสองที่ตั้งอยู่ในระยะรัศมีมากกว่า 1 กิโลเมตร แต่ไม่เกิน 2 กิโลเมตร	0.25



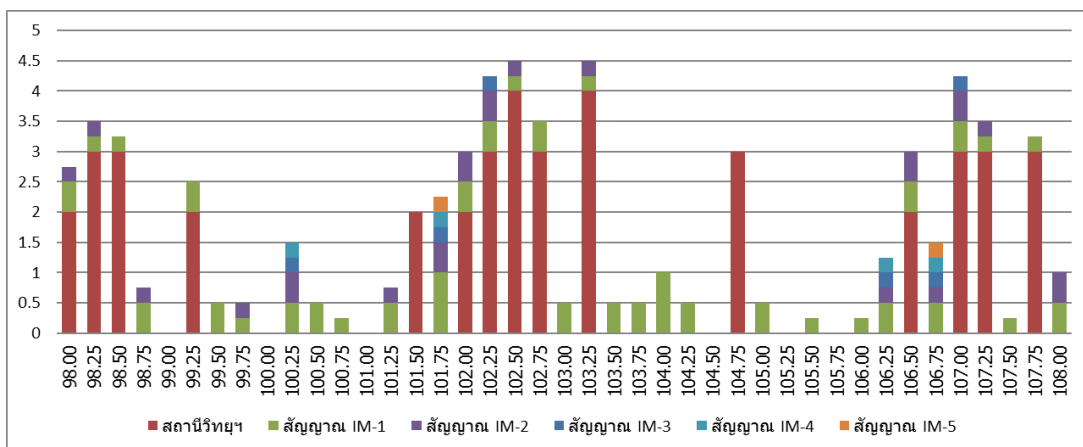
(ก) ค่าความถี่ตั้งแต่ 68.00 – 78.00 MHz



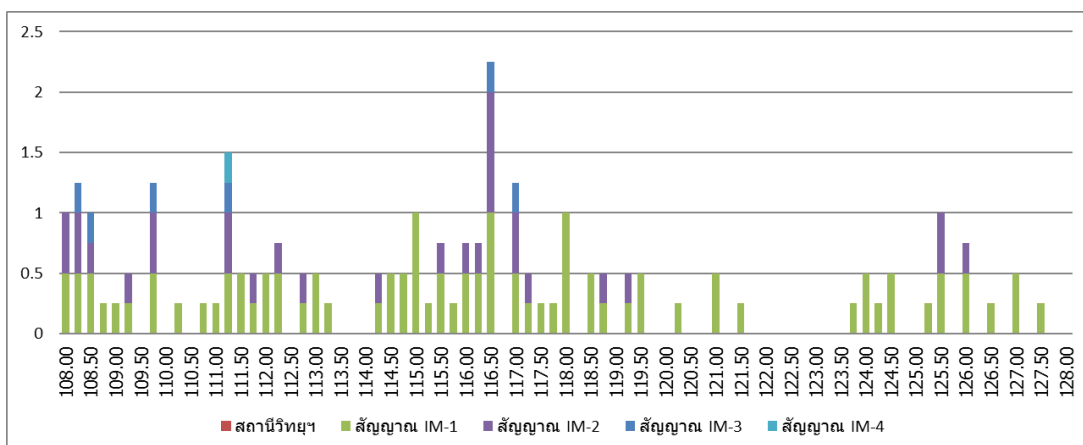
(ข) ค่าความถี่ตั้งแต่ 78.00 – 88.00 MHz



(ค) ค่าความถี่ตั้งแต่ 88.00 – 98.00 MHz



(ง) ค่าความถี่ตั้งแต่ 98.00 – 108.00 MHz



(จ) ค่าความถี่ตั้งแต่ 108.00 – 128.00 MHz

รูปที่ 3.15 ระดับค่านำหนักของความเข้มสนามของคลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุกระจายเสียง ณ จุดสังเกตบริเวณสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz



ผลของการสังเกตการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อกิจการกระจายเสียง ณ บริเวณสถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz ทำให้ทราบว่า ภายในบริเวณระยะรัศมีไม่เกิน 10 กิโลเมตร จากจุดสังเกตนั้น จะพบว่า คลื่นวิทยุที่ใช้เพื่อกิจการกระจายเสียงของสถานีวิทยุมีจำนวนทั้งสิ้น 23 ค่าความถี่ (อยู่ระหว่าง 88.00 – 108.00 MHz) และคลื่นวิทยุที่มีความเป็นไปได้ของการเกิดจากการมอดูเลตระหว่างกัน มีจำนวนทั้งสิ้น มีจำนวน 240 ค่าความถี่ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงความถี่ต่ำกว่า 88.00 MHz ช่วงความถี่ระหว่าง 88.00 – 108.00 MHz และช่วงความถี่สูงกว่า 108.00 MHz โดยมีจำนวน 62 102 และ 76 ค่าความถี่ตามลำดับ ดังนั้น จึงขอจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดจากการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีส่ง โดยกำหนดให้สถานีวิทยุที่ทดลองใช้ความถี่คลื่นวิทยุ 88.50 MHz เป็นจุดสังเกต

### 3.2.4 ผลการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล

เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียง จึงต้องกำหนดตำแหน่งของจุดสังเกต คณะผู้วิจัย จึงได้พิจารณาจุดสังเกตที่มีโอกาสเกิดปัญหาการมอดูเลตระหว่างกันคือ จุดสังเกตภายในบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช

การจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลบนช่วงความถี่ที่กำลังใช้งาน โดยกำหนดให้หอบังคับการบินเป็นจุดสังเกตภายในบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช มีกระบวนการทำนองเดียวกับกระบวนการการของสถานีวิทยุกระจายเสียง แต่มีการกำหนดระยะรัศมี เพื่อพิจารณาสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล เป็นระยะไม่เกิน 20 กิโลเมตร

#### ● ผลของการคำนวณระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินกับสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล

ผลการระบุตำแหน่งของสถานีวิทยุกระจายเสียงในหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่า ในระยะรัศมีไม่เกิน 20 กิโลเมตรจากหอบังคับการบินนั้น จะประกอบด้วยสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล จำนวน 1 สถานี ซึ่งทำแพร่สัญญาณจำนวน 5 ช่องความถี่ การคำนวณระยะห่างระหว่างหอบังคับการบินกับสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ได้ใช้ผลการระบุตำแหน่งของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณไว้ในตารางที่ 3.13 ด้วยเหตุนี้ จึงพบว่า สถานีโทรทัศน์ดิจิทัลทั้งหมด มีระยะห่างจากจุดสังเกตเท่ากัน คือ 19.60 กิโลเมตร ทั้งนี้ จึงคาดการณ์ว่า มีความเป็นไปได้สูงในการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน

ตารางที่ 3.13 ระยะห่างระหว่างสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ภายในเขตเมืองกับจุดสังเกต (หอบังคับการบิน)

ช่องความถี่	เจ้าของสายส่ง	ความถี่ ( MHz)	ระยะห่าง (km)
30	กรมประชาสัมพันธ์	546	19.60
33	กองทัพบก	570	
37	อ.ส.ม.ท.	602	
41	Thai PBS	634	
49	กองทัพบก	698	

● ผลการคำนวณค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล

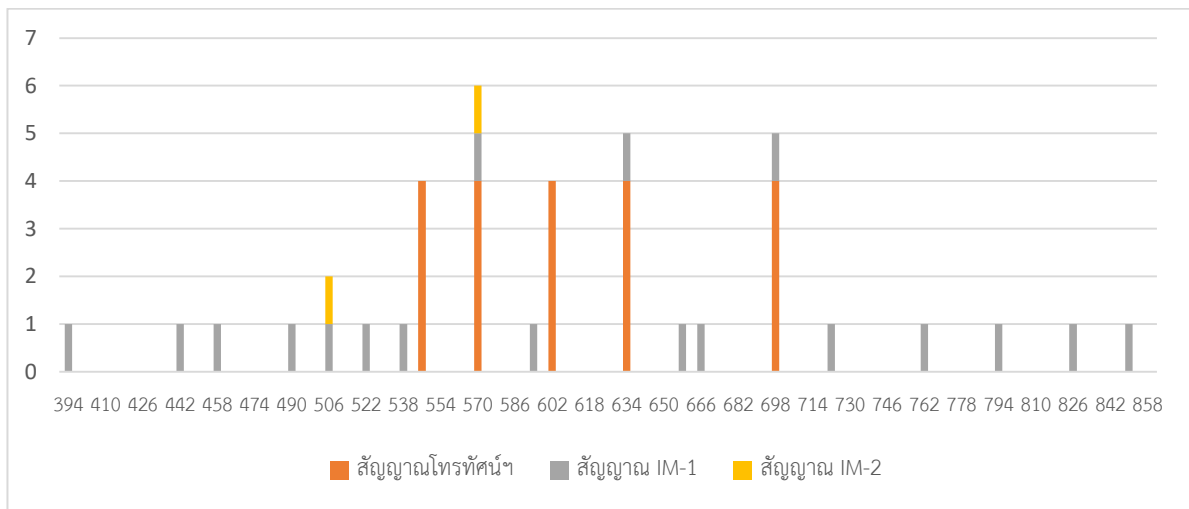
ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ซึ่งพิจารณาให้จุดสังเกตอยู่ที่หอบังคับการบินภายในบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช ถูกคำนวณโดยใช้ข้อมูลของสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลที่มีระยะห่างจากจุดสังเกต มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.14

ตารางที่ 3.14 ค่าความถี่คลื่นวิทยุที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ภายในเขตเมืองจากจุดสังเกตบริเวณหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช

$f_1$ (ความถี่หลัก)	$f_2$ (ความถี่หลัก)	$f_x$ (ผลรวมอันดับสาม)	$f_y$ (ผลรวมอันดับสาม)
546.00 MHz ช่องความถี่ 30	570.00 MHz ช่องความถี่ 33	522.00 MHz	594.00 MHz
	602.00 MHz ช่องความถี่ 37	490.00 MHz	658.00 MHz
	634.00 MHz ช่องความถี่ 41	458.00 MHz	722.00 MHz
	698.00 MHz ช่องความถี่ 49	394.00 MHz	850.00 MHz
570.00 MHz ช่องความถี่ 33	602.00 MHz ช่องความถี่ 37	538.00 MHz	634.00 MHz
	634.00 MHz ช่องความถี่ 41	506.00 MHz	698.00 MHz
	698.00 MHz ช่องความถี่ 49	442.00 MHz	826.00 MHz
602.00 MHz ช่องความถี่ 37	634.00 MHz ช่องความถี่ 41	570.00 MHz	666.00 MHz
	698.00 MHz ช่องความถี่ 49	506.00 MHz	794.00 MHz
634.00 MHz ช่องความถี่ 41	698.00 MHz ช่องความถี่ 49	570.00 MHz	762.00 MHz

- ผลการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีส่ง โดยกำหนดให้หอบังคับการบินเป็นจุดสังเกต

ความเป็นไปได้ของการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล จะถูกจัดลำดับโดยพิจารณาจากผลการคำนวณค่าความถี่ที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลและผลการคำนวณระยะห่างจากหอบังคับการบินรูปที่ 3.16 ได้แสดงถึงค่าความถี่ของคลื่นวิทยุที่เกิดขึ้น ทั้งหมด 24 ค่าความถี่ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคลื่นวิทยุ ชนิดที่ 1 เป็นคลื่นวิทยุที่ถูกส่งจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล มีจำนวน 4 สถานี ซึ่งสถานีเหล่านี้ ตั้งอยู่ในระยะรัศมีไม่เกิน 20 กิโลเมตร จากจุดสังเกต และชนิดที่ 2 เป็นสัญญาณรบกวนคลื่นวิทยุที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกัน



รูปที่ 3.16 ระดับค่าน้ำหนักของความเข้มสนามของคลื่นวิทยุจากสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล ณ จุดสังเกตเป็นหอบังคับการบิน

### 3.2.5 ผลการวัดกำลังคลื่นวิทยุจากกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ระบบดิจิทัล และกิจการ

#### โทรคมนาคม

#### 3.2.5.1 กระบวนการวัดกำลังคลื่นวิทยุ

จากการจัดลำดับคลื่นความถี่วิทยุที่มีโอกาสเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน ถัดมาจึงวางแผนสำหรับการลงพื้นที่วัดกำลังคลื่นวิทยุ เพื่อทดสอบผลการจัดลำดับดังกล่าว โดยมีกระบวนการตามขั้นตอนดัง

1. ทบทวนเป้าหมายการออกแบบสายอากาศตามที่ระบุไว้ในข้อเสนอโครงการ ซึ่งได้วางแผนที่จะใช้ข้อมูลจากการวัดกำลังคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดการมอดูเลตระหว่างกัน สำหรับประกอบการกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศที่ต้องการ
2. เตรียมเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม แบบตั้งโต๊ะ รุ่น Tektronix RSA3408A และแบบพกพา รุ่น Keysight N3940B สำหรับใช้วัดกำลังคลื่นวิทยุดังแสดงในรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 ตามลำดับ
3. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของการเกิดมอดูเลตระหว่างกันในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราชจากงานวิจัยก่อนหน้า เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินงาน
4. ทดสอบวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ ในแต่ละช่วงเวลา ณ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร ตำบลไทยบุรี อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงบ่าย (13.00 - 17.00 น.) และช่วงกลางคืน (19.00 - 00.00 น.)
5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ และนำผลการวิเคราะห์มาจัดทำเอกสารประกอบการปฏิบัติการวัดกำลังคลื่น เพื่อใช้ในการออกพื้นที่วัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุฯ
6. เข้าพบสำนักงาน กสทช. เขต 12 จังหวัดนครศรีธรรมราช เพื่อนำเสนอแนวทางการวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ และขออนุญาตดำเนินงาน พร้อมทั้งขอคำแนะนำในการดำเนินงาน
7. ทบทวนและหารือ เพื่อกำหนดจุดสังเกตที่จะทำการวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ โดยใช้ผลการคำนวณค่าความถี่ที่มีการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันของวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม เป็นข้อมูลประกอบ
8. ลงพื้นที่วัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ ณ จุดสังเกตที่กำหนดไว้ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3.17 SpectrumAnalyzer Tektronix RSA3408A



รูปที่ 3.18 Handheld Spectrum Analyzer Key sight N3940B



รูปที่ 3.19 การจัดตั้งสายอากาศรับสำหรับวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ FM บริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช

จากผลการจัดลำดับคลื่นความถี่วิทยุที่มีโอกาสเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน และแผนการทดสอบวัดกำลังคลื่นวิทยุเบื้องต้น ได้กำหนดพื้นที่สำหรับการสำรวจวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ ณ บริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช โดยใช้สายอากาศโมโนโพล SA-7000 เป็นสายอากาศรับสัญญาณ ติดตั้งด้วยอุปกรณ์ยึดจับที่ความสูง 160 เซนติเมตร จากพื้นดิน และมีระยะห่างจากหอบังคับการบินประมาณ 300 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ช่วงเวลาที่ใช้ในการวัดจะเลือก 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงบ่าย (12.00 - 15.00 น.) และช่วงเย็น (16.00 -

20.00 น.) เนื่องจากการขึ้นลงของเครื่องบินจำนวนมากหลายเที่ยวบิน โดยทำการวัดหลายวัน วันละหลายครั้ง  
แล้วนำค่าที่ได้มาพิจารณาความซ้ำของการเกิดแถบความถี่ และขนาดกำลังของแต่ละความถี่ ซึ่งการตั้งค่า  
เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมสำหรับการวัดจะแบ่งเป็น 3 ตอน ดังนี้



รูปที่ 3.20 ชุดสายอากาศโมโนโพล SA-7000

- **ตอนที่ 1** การวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ ในโหมด Full Span มีขั้นตอนดังนี้
1. ประกอบสายอากาศโมโนโพล SA-7000 ดังรูปที่ 3.20
  2. เปิดเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมก่อนเริ่มการทดลอง เพื่อ Warm up เครื่อง
  3. ตั้ง Span เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมในโหมด Full Span เพื่อค้นหาสเปกตรัมของคลื่นความถี่ทั้งหมดในช่วงความถี่ที่เครื่องสามารถรับได้ ซึ่งปรากฏ ณ บริเวณทดสอบ
  4. สังเกตสเปกตรัมของสัญญาณทั้งหมดที่ปรากฏบนหน้าจอ แล้วใช้ฟังก์ชัน Peak search ร่วมกับ Marker ในการระบุขนาดความแรงของสเปกตรัม
  5. บันทึกข้อมูลสัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

- **ตอนที่ 2 การวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุในช่วงความถี่เอเอ็ม เอฟเอ็ม ช่วงความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน ช่วงความถี่โทรทัศน์ดิจิทัล และช่วงความถี่กิจการโทรคมนาคม**

1. ตั้งค่า Span เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมให้ครอบคลุมย่านความถี่เอเอ็ม เอฟเอ็ม และช่วงความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน
2. สังเกตสเปกตรัมของสัญญาณทั้งหมดที่ปรากฏบนหน้าจอ แล้วใช้ฟังก์ชัน Peak search ร่วมกับ Marker ในการระบุขนาดความแรงของสเปกตรัม
3. บันทึกรูปสัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอของ Spectrum Analyzer

- **ตอนที่ 3 การวัดกำลังคลื่นวิทยุของแต่ละสถานีวิทยุกระจายเสียงตามข้อมูลการใช้ช่องสัญญาณ**

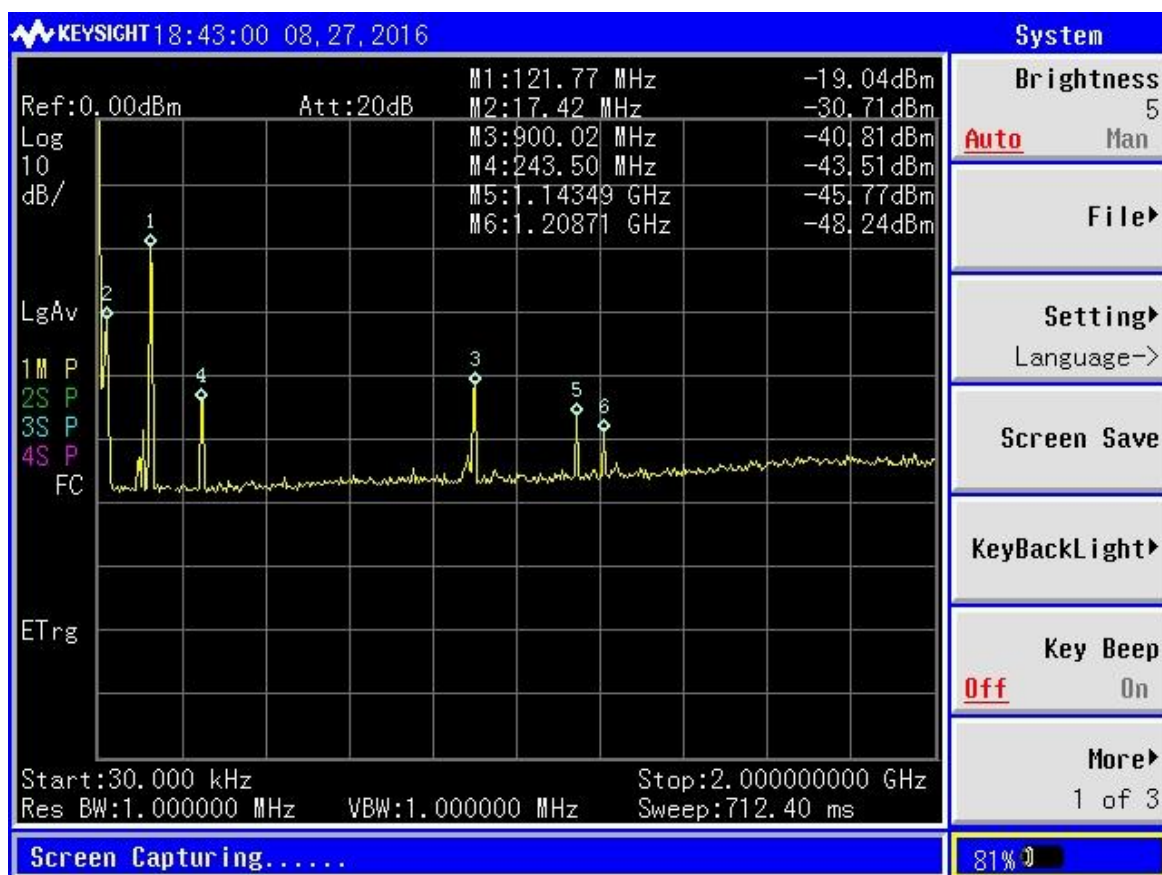
1. ตั้งค่า center frequency ที่ค่าความถี่ที่สนใจ
2. ตั้งค่า Span เท่ากับ 1 MHz ครอบคลุมย่านความถี่ที่สนใจ
3. สังเกตสเปกตรัมของสัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอ แล้วใช้ฟังก์ชัน Peak search ร่วมกับ Marker ในการระบุขนาดความแรงของสเปกตรัม
4. บันทึกรูปสัญญาณที่ปรากฏบนหน้าจอของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม



### 3.2.5.2 ผลการวัดกำลังคลื่นภายในช่วงความถี่ที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกัน จากสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม

ตอนที่ 1 ผลการวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ ในโหมด Full Span

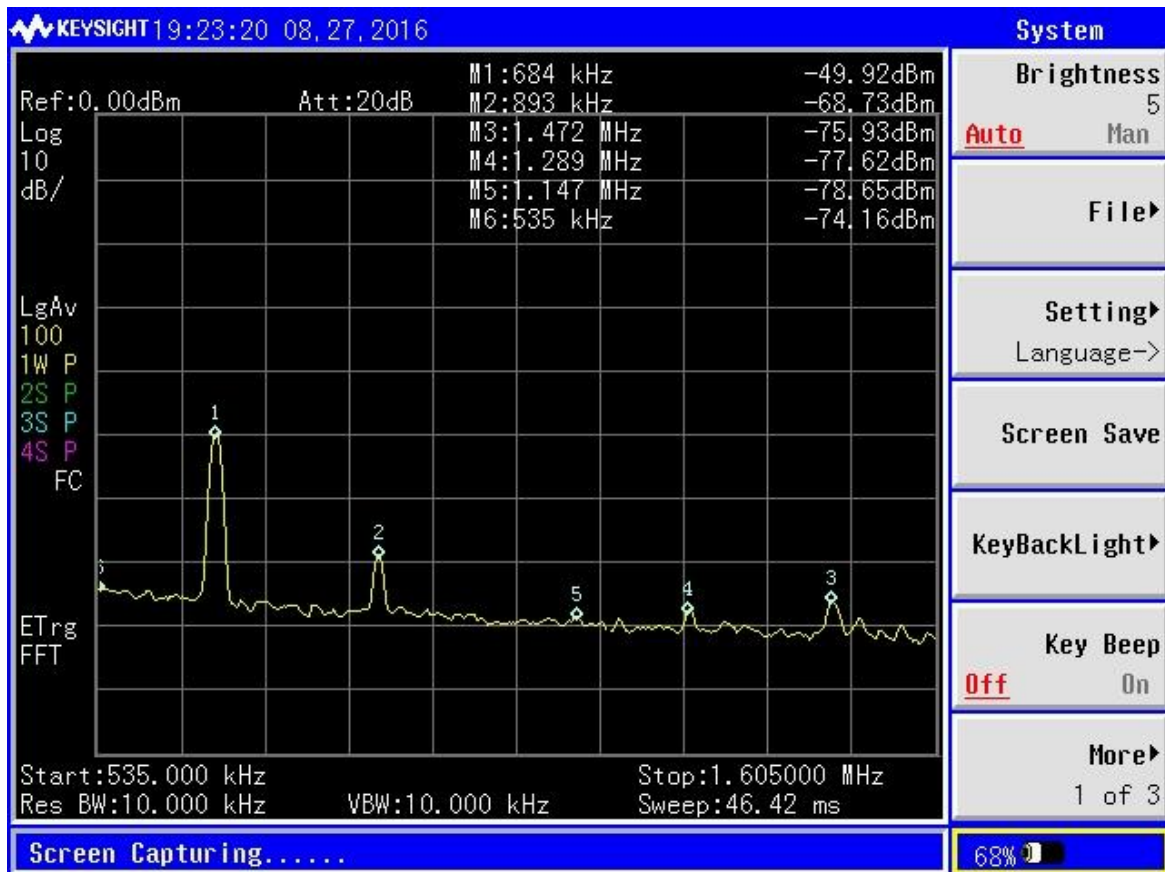
ปรับตั้งช่วงความถี่ตั้งแต่ 30.0 kHz ถึง 2.00 GHz ตามคุณลักษณะของสายอากาศโมโนโพลที่ใช้งาน และปรับค่า Attenuation ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เท่ากับ 20 dB จะพบว่า มี 6 แถบความถี่สูงสุดที่เครื่องสามารถวัดได้ โดยเรียงลำดับตามขนาดของสเปกตรัมจากมากไปน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 สเปกตรัมที่วัดได้เมื่อปรับค่าความถี่ในช่วง 30.0 kHz ถึง 2.0 GHz

## ตอนที่ 2-1 ผลการวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุในช่วงความถี่เอเอ็ม

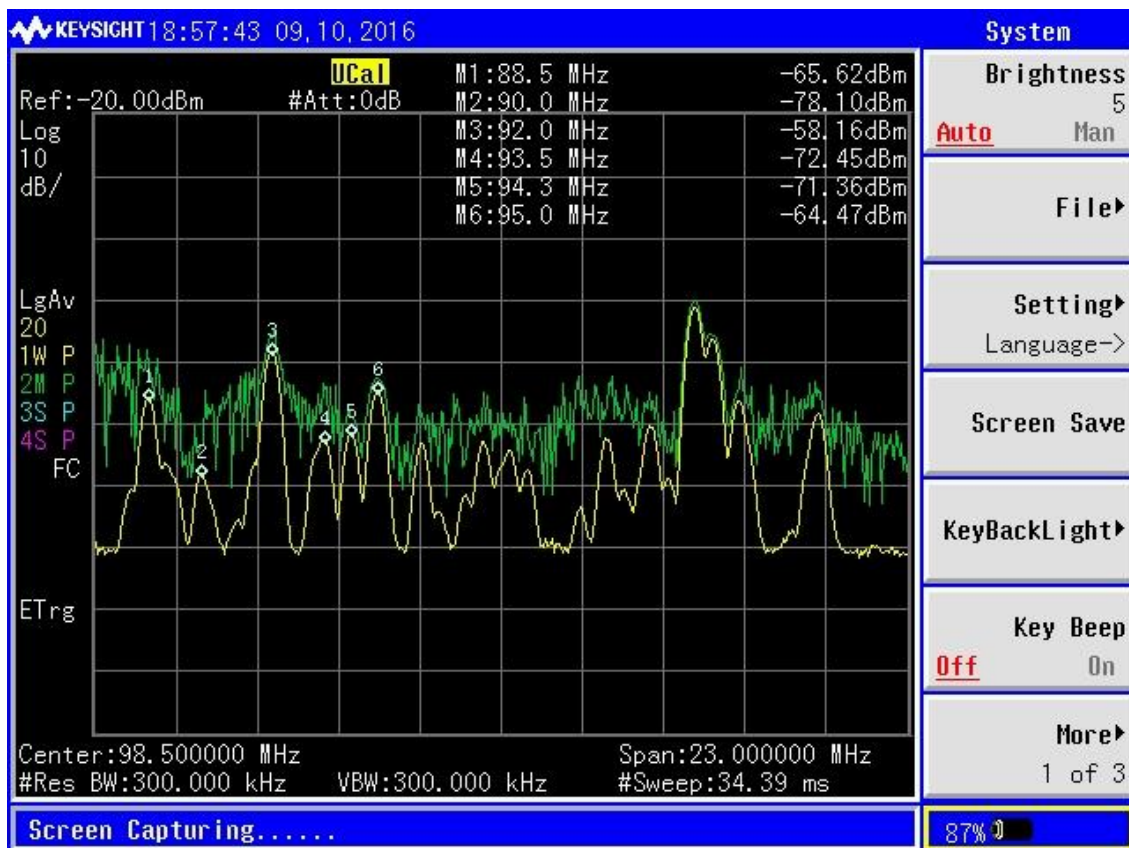
ปรับตั้งช่วงความถี่ตั้งแต่ 535 kHz ถึง 1.60 MHz และปรับค่า Attenuation ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เท่ากับ 20 dB จะพบว่า มี 5 แถบความถี่สูงสุดที่เครื่องสามารถวัดได้ โดยเรียงลำดับตามขนาดของสเปกตรัมจากมากไปน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.22



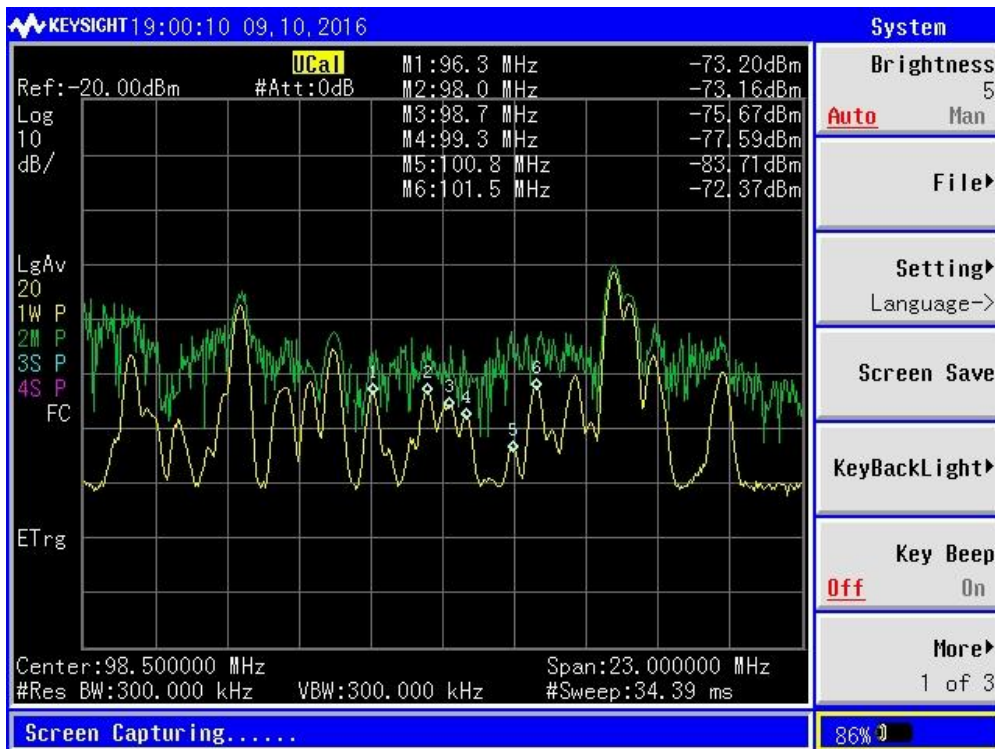
รูปที่ 3.22 สเปกตรัมที่วัดได้เมื่อปรับค่าความถี่ในช่วง เท่ากับ 535 kHz ถึง 1.60 MHz

ตอนที่ 2-2 ผลการวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุในช่วงความถี่เอฟเอ็มและช่วงความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน

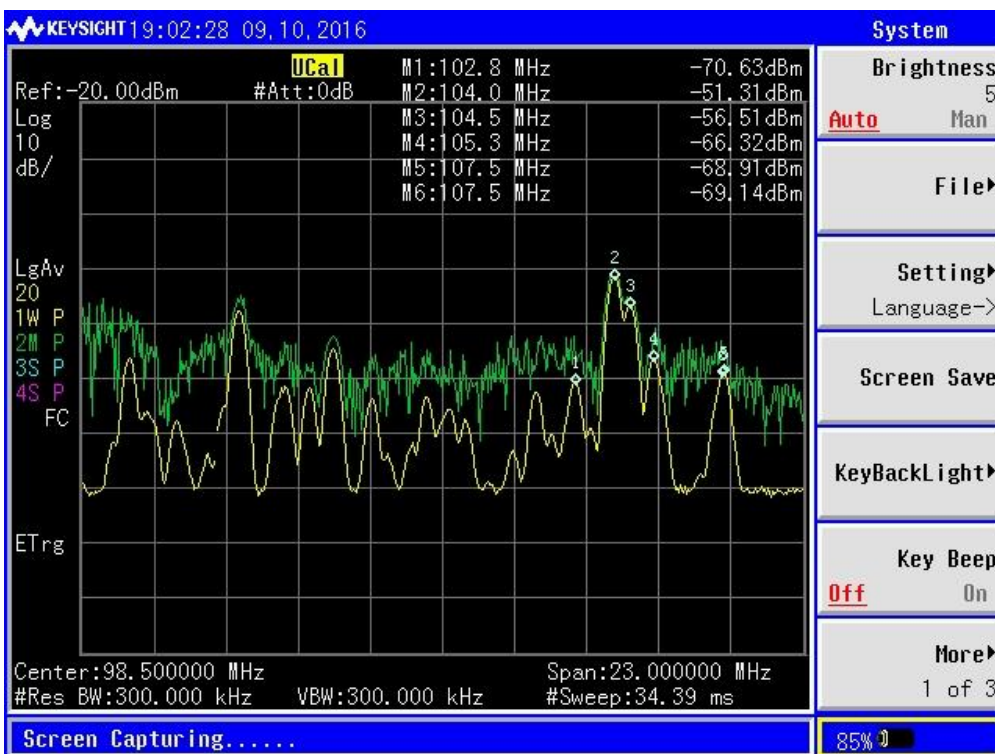
ปรับตั้งค่าช่วงความถี่ตั้งแต่ 86.0 MHz ถึง 111.0 MHz และปรับค่า Attenuation ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เท่ากับ 0 dB จะพบว่า มี 17 แถบความถี่สูงสุดที่เครื่องวัดได้ โดยเรียงลำดับตามขนาดของสเปกตรัมจากมากไปน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.23



(ก) ส่วนแรก



(จ) ส่วนที่สอง

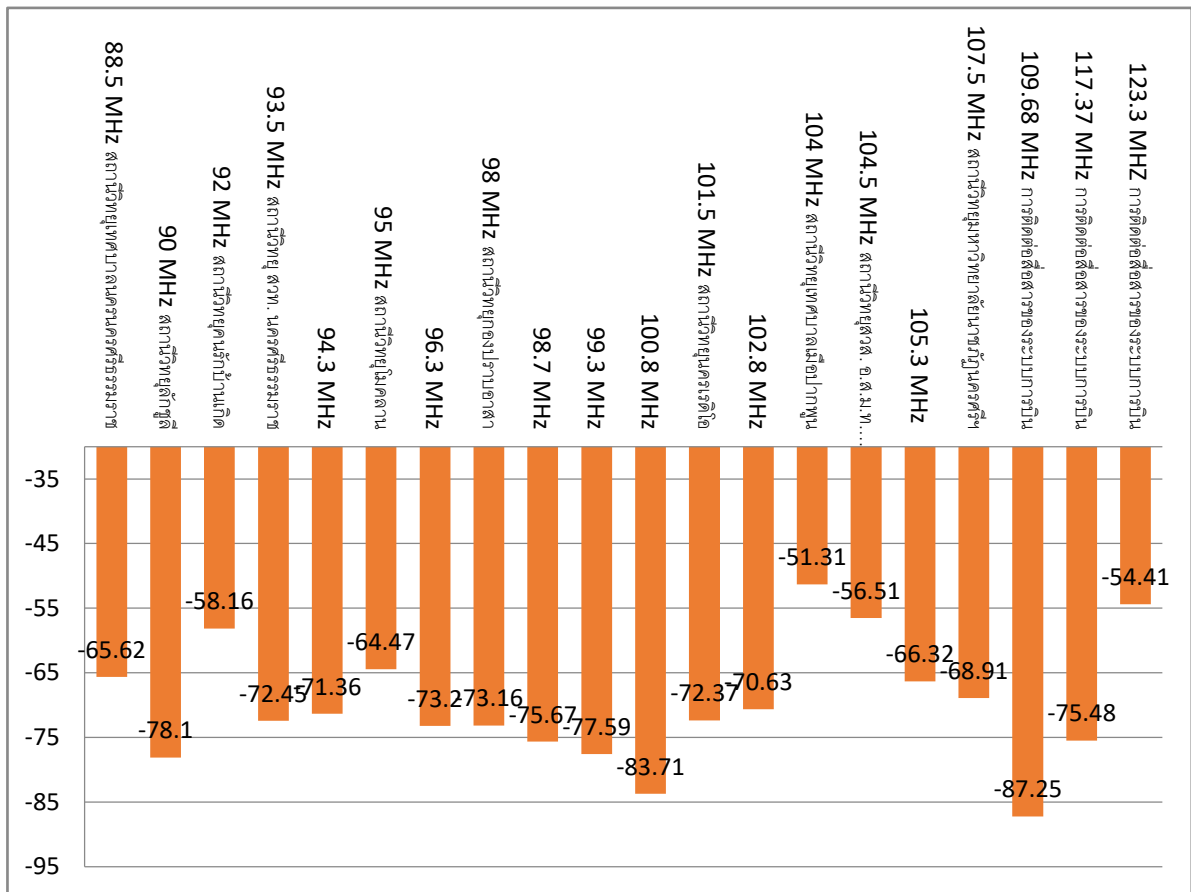


(ค) ส่วนที่สาม

รูปที่ 3.23 สเปกตรัมที่วัดได้เมื่อปรับค่า span เท่ากับ 86.0 MHz ถึง 111.0 MHz

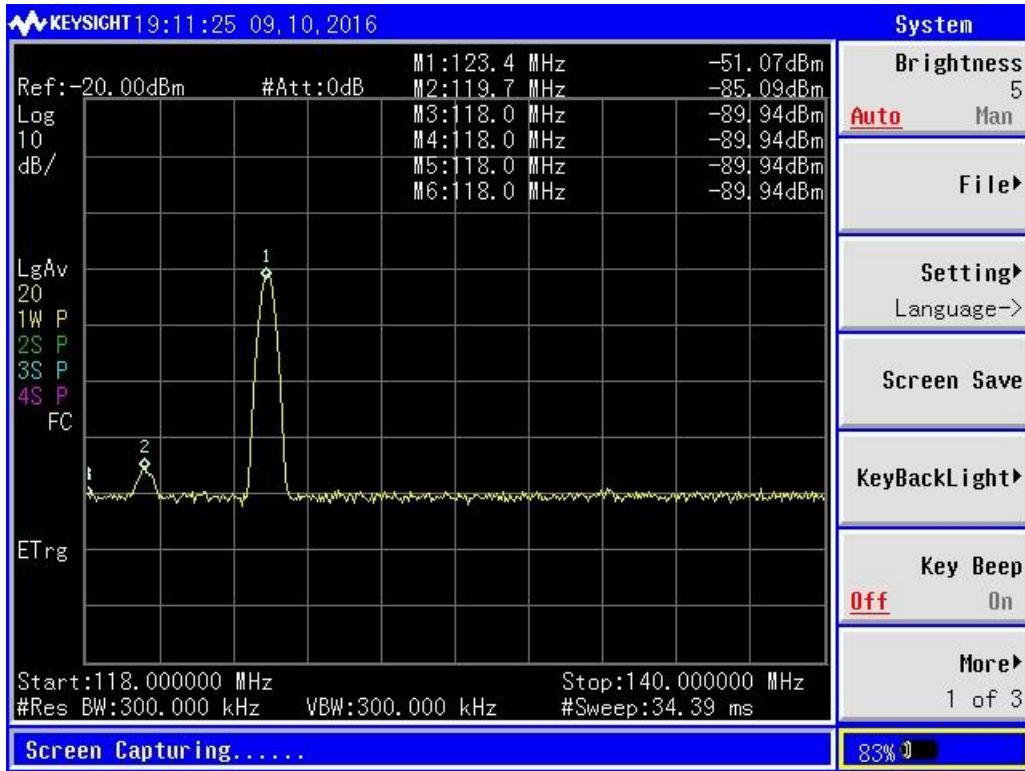
**ตอนที่ 3 ผลการวัดกำลังคลื่นวิทยุของแต่ละสถานีวิทยุกระจายเสียงตามข้อมูลการใช้ช่องสัญญาณ**

ปรับตั้งค่าช่วงความถี่กลางตามข้อมูลสถานีวิทยุที่แสดงในหัวข้อ 4.1 และปรับค่า Attenuation ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เท่ากับ 0 dB วัดกำลังคลื่นแต่ละค่าความถี่ ในช่วงเวลา 17.00 - 19.00 น. บริเวณหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.24

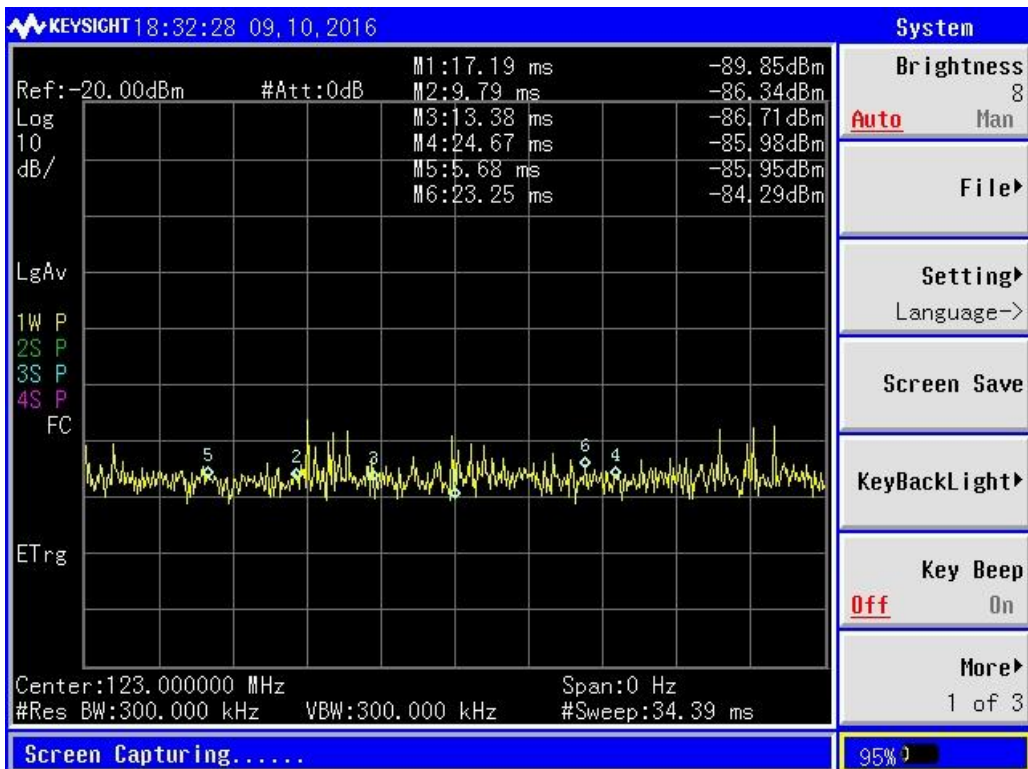


รูปที่ 3.24 กำลังคลื่นแต่ละความถี่ในช่วงวิทยุเอฟเอ็มและความถี่ที่ใช้ในกิจการทางการบิน

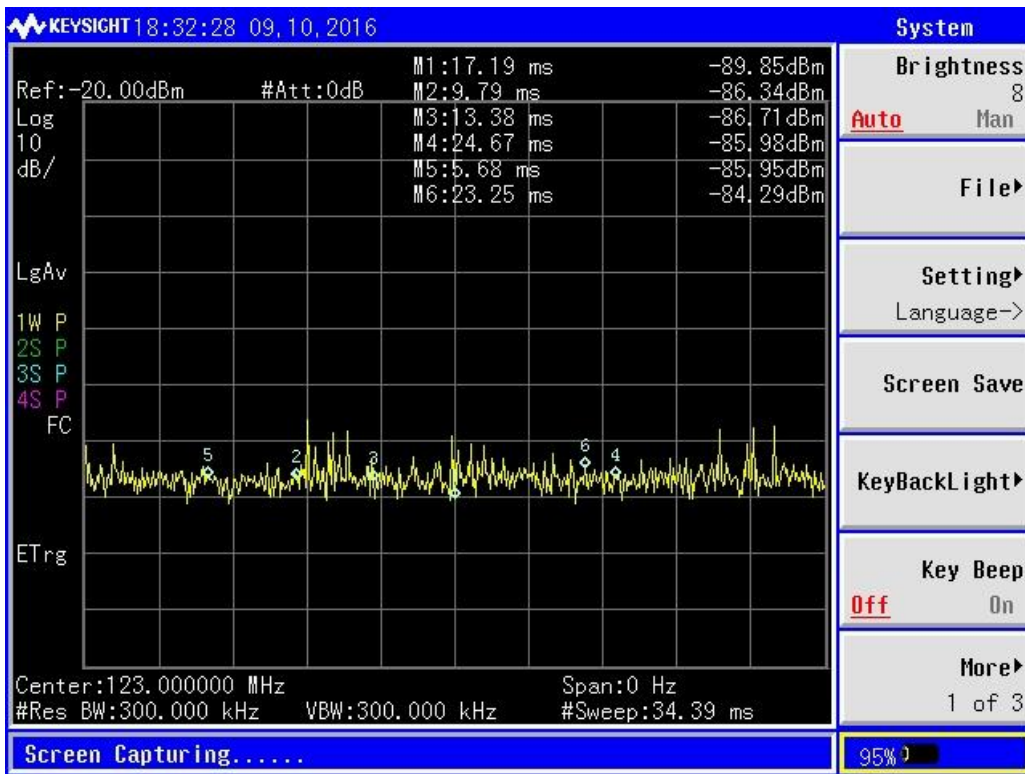
ในระหว่างดำเนินการวัดสัญญาณในตอน 3 พบว่า กำลังของคลื่นความถี่วิทยุที่ความถี่ 123 MHz มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นช่วงๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และ รูปที่ 3.26 ตามลำดับ ซึ่งความถี่ดังกล่าวไม่ได้อยู่ในช่วงความถี่ในกิจการกระจายเสียงวิทยุ จากการสังเกตพบว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงของกำลังคลื่น จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาเดียวกันกับเครื่องบินกำลังลงจอด เมื่อทำการตีมอดูเลตสัญญาณดังกล่าว จะเป็นสัญญาณเสียง และดังแสดงในรูปที่ 3.27 จึงเป็นไปได้ว่า ช่วงความถี่ดังกล่าวถูกใช้งานโดยหอบังคับการบิน นอกจากนี้ ยังพบพฤติกรรมที่คล้ายกันที่ความถี่ 119.7MHz ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.25 สเปกตรัมความถี่ 123 MHz ณ ช่วงเวลาที่กำลังคลื่นเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.26 สเปกตรัมความถี่ 123 MHz ณ ช่วงเวลาที่กำลังคลื่นลดลง

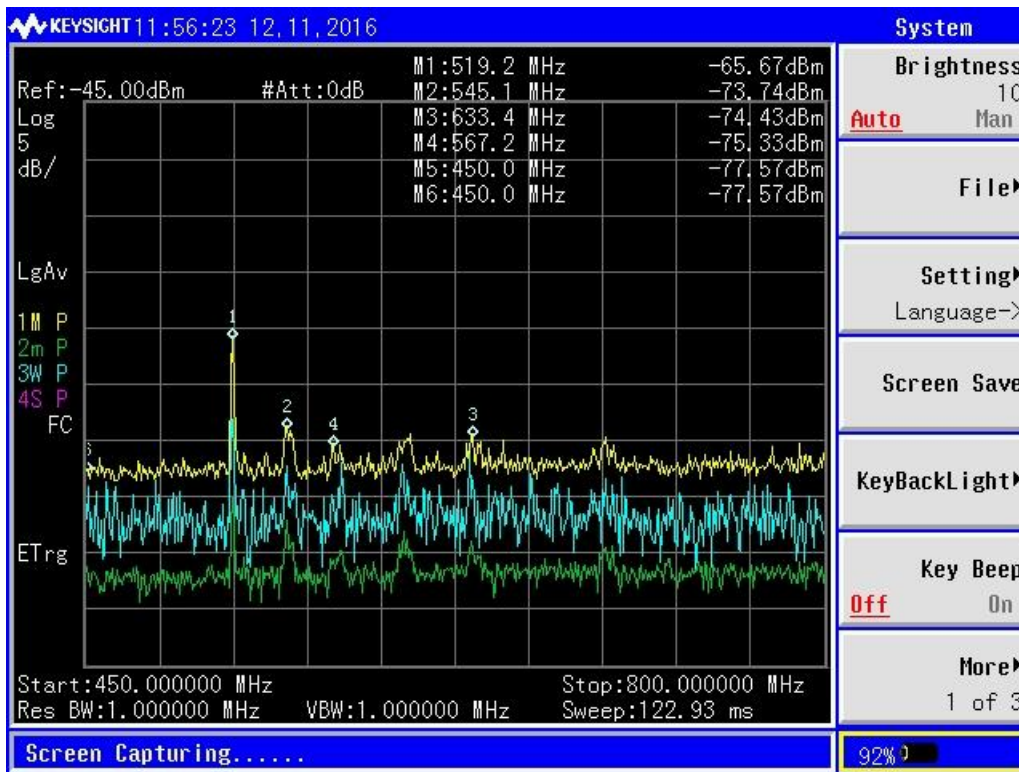


รูปที่ 3.27 สัญญาณที่ทำการตีמודูเลต

### 3.2.5.3 ผลการวัดกำลังคลื่นในช่วงความถี่ที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันของกิจการโทรศัพท์ระบบดิจิทัล และกิจการโทรคมนาคม

**ตอนที่ 1** ผลการวัดกำลังคลื่นความถี่ ในโหมด Span ครอบคลุมช่วงความถี่กิจการโทรศัพท์ระบบดิจิทัล

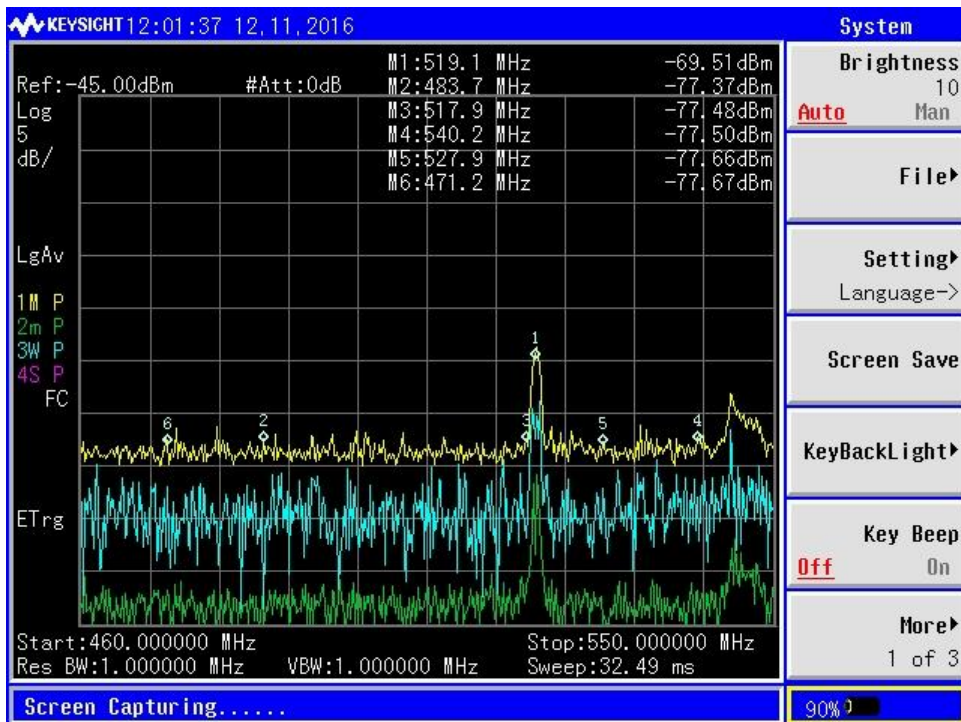
ปรับตั้งช่วงความถี่ตั้งแต่ 450 MHz ถึง 800 MHz ครอบคลุมช่วงความถี่สำหรับกิจการโทรศัพท์ระบบดิจิทัล และปรับค่า Attenuation ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เท่ากับ 0 dB จะพบว่า มี 4 แถบความถี่สูงสุดที่เครื่องสามารถวัดได้ โดยเรียงลำดับตามขนาดของสเปกตรัมจากมากไปน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.28 ทั้งนี้ จากข้อมูลของการใช้คลื่นวิทยุสำหรับกิจการโทรศัพท์ระบบดิจิทัล มีการใช้งานทั้งหมด 5 ช่วงความถี่ แต่สามารถวัดสัญญาณได้เพียง 3 ช่วงความถี่ คือ ช่วงความถี่ 546 MHz 570 MHz 634 MHz และไม่สามารถวัดได้ 2 ช่วงความถี่ คือ ช่วงความถี่ 602 MHz และ 698 MHz นอกจากนี้ ยังพบแถบความถี่ที่ 519 MHz ซึ่งมีระดับกำลังคลื่นสูงสุด เท่ากับ -65.67 dBm



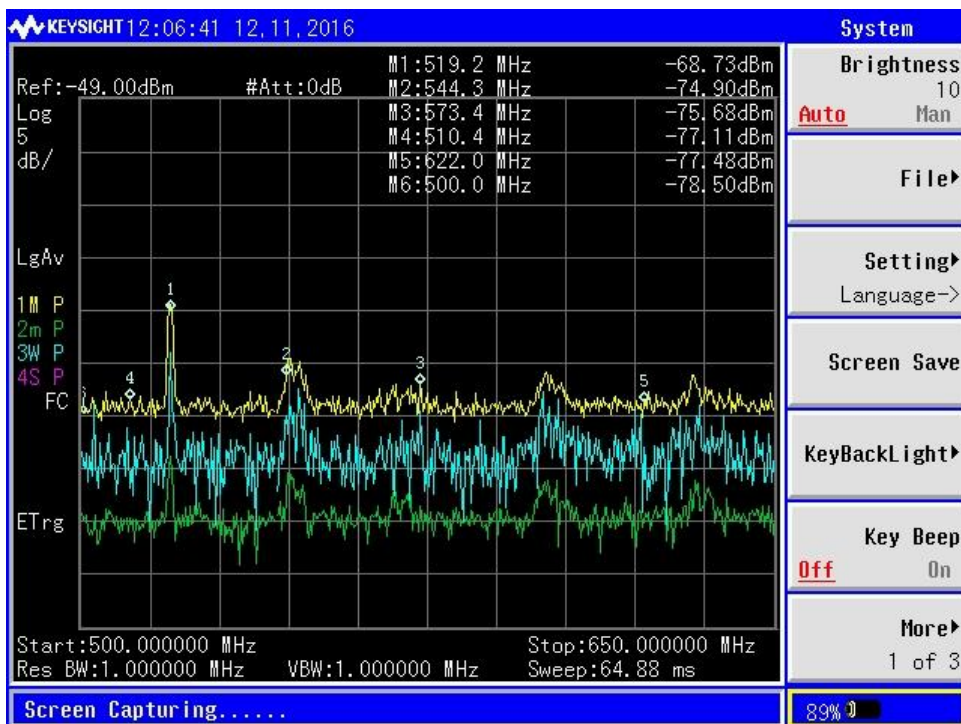
รูปที่ 3.28 สเปกตรัมที่วัดได้เมื่อปรับค่าความถี่ในช่วง 450 MHz ถึง 800 MHz

**ตอนที่ 2** ผลการวัดกำลังคลื่นความถี่ของกิจการโทรทัศน์ระบบดิจิทัล โดย Span เป็นช่วง  
 ปรับตั้งช่วงความถี่ครอบคลุมกิจการโทรทัศน์ระบบดิจิทัล โดยแบ่งช่วงการ Span 2 ช่วง คือ ช่วงแรก  
 ตั้งแต่ 460 MHz ถึง 500 MHz และช่วงที่สอง ตั้งแต่ 500 MHz ถึง 650 MHz และปรับค่า Attenuation ของ  
 เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เท่ากับ 0 dB จะพบว่า มีแถบความถี่สูงสุดที่เครื่องสามารถวัดได้ โดยเรียงลำดับตาม  
 ขนาดของสเปกตรัมจากมากไปน้อย ในช่วง -68 dBm ถึง -79 dBm ดังแสดงในรูปที่ 3.29





(ก) ผลการ Span ในช่วงความถี่ 460 MHz ถึง 550 MHz



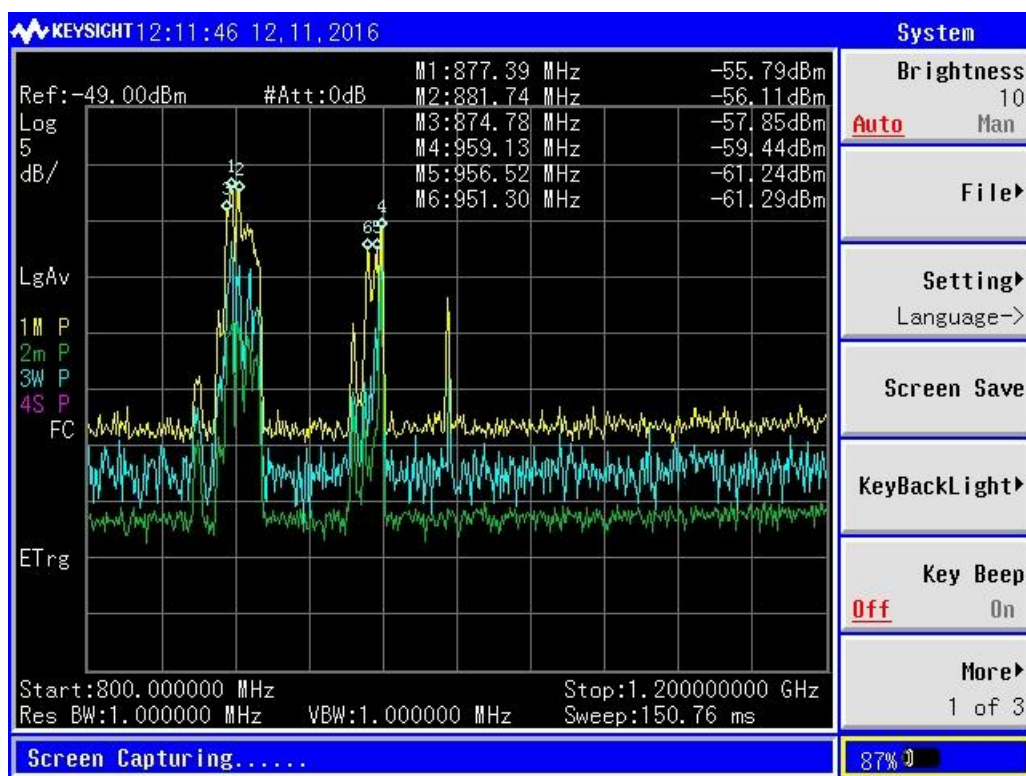
(ข) ผลการ Span ในช่วงความถี่ 500 MHz ถึง 650 MHz

รูปที่ 3.29 สเปกตรัมของกิจการโทรทัศน์ระบบดิจิทัลที่วัดได้เมื่อปรับการ Span เป็นช่วง

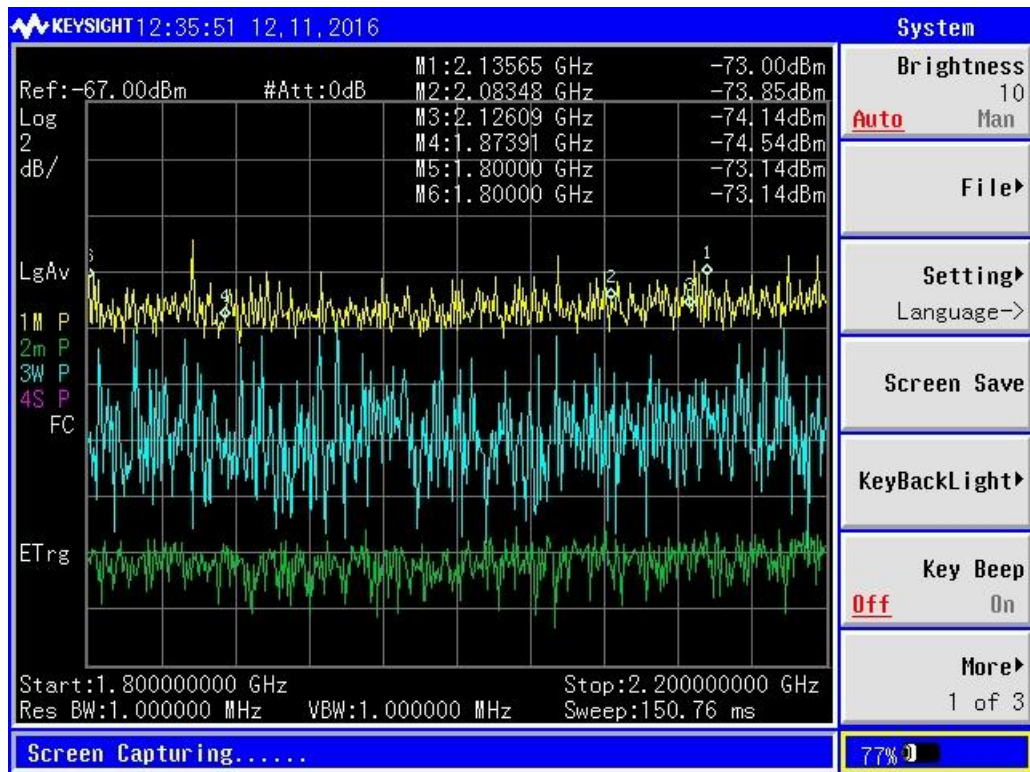
### 3.2.5.4 ผลการวัดกำลังคลื่นในช่วงความถี่ที่เกิดการมอดูเลตระหว่างกันของกิจการโทรคมนาคม

**ตอนที่ 1** ผลการวัดกำลังคลื่นความถี่ ในโหมด Span ครอบคลุมช่วงความถี่กิจการโทรคมนาคม

ปรับตั้งช่วงความถี่ครอบคลุม 2 ช่วงความถี่ คือ ช่วงแรก ตั้งแต่ 800 MHz ถึง 1200 MHz และช่วงที่สอง ตั้งแต่ 1800 MHz ถึง 2200 MHz ครอบคลุมช่วงความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคม และปรับค่า Attenuation ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เท่ากับ 0 dB จะพบว่า ในช่วงความถี่ 800 MHz ถึง 1200 MHz มี 3 ช่วงความถี่สูงสุดที่เครื่องสามารถวัดได้ ขณะที่ช่วงความถี่ 1800 MHz ถึง 2200 MHz แถบสเปกตรัมมีระดับกำลังงานที่ใกล้เคียงกันและอยู่ในระดับสัญญาณรบกวน ดังแสดงในรูปที่ 3.30



(ก) ผลการ Span ในช่วงความถี่ 800 MHz ถึง 1200 MHz

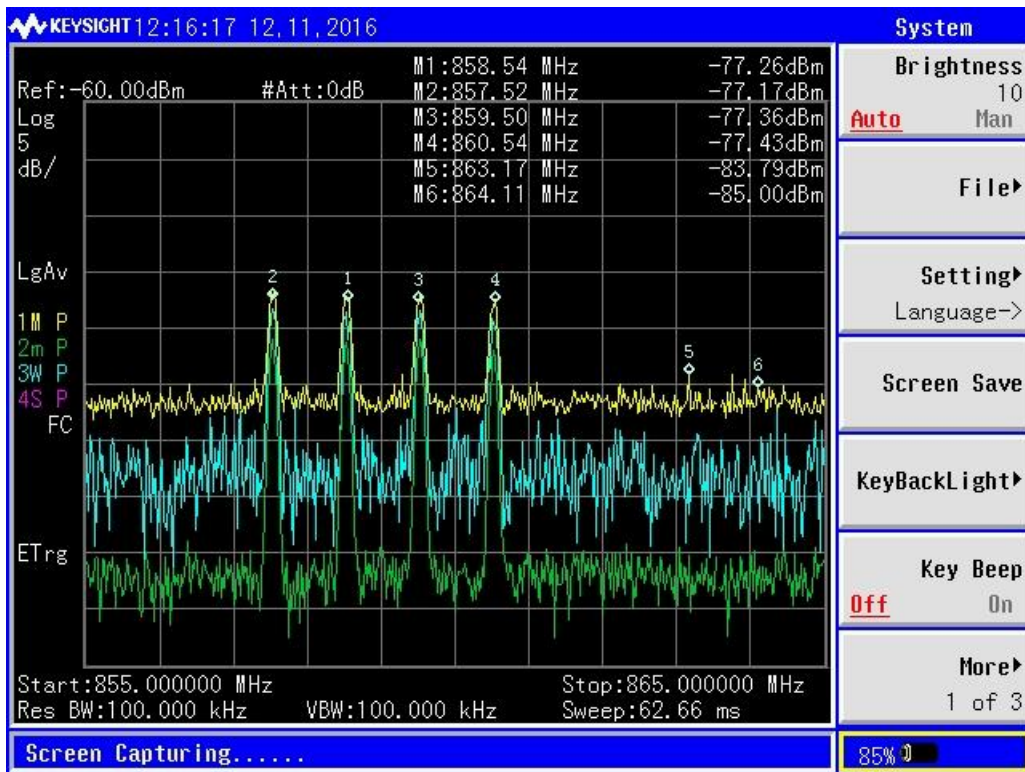


(ข) ผลการ Span ในช่วงความถี่ 1800 MHz ถึง 2200 MHz

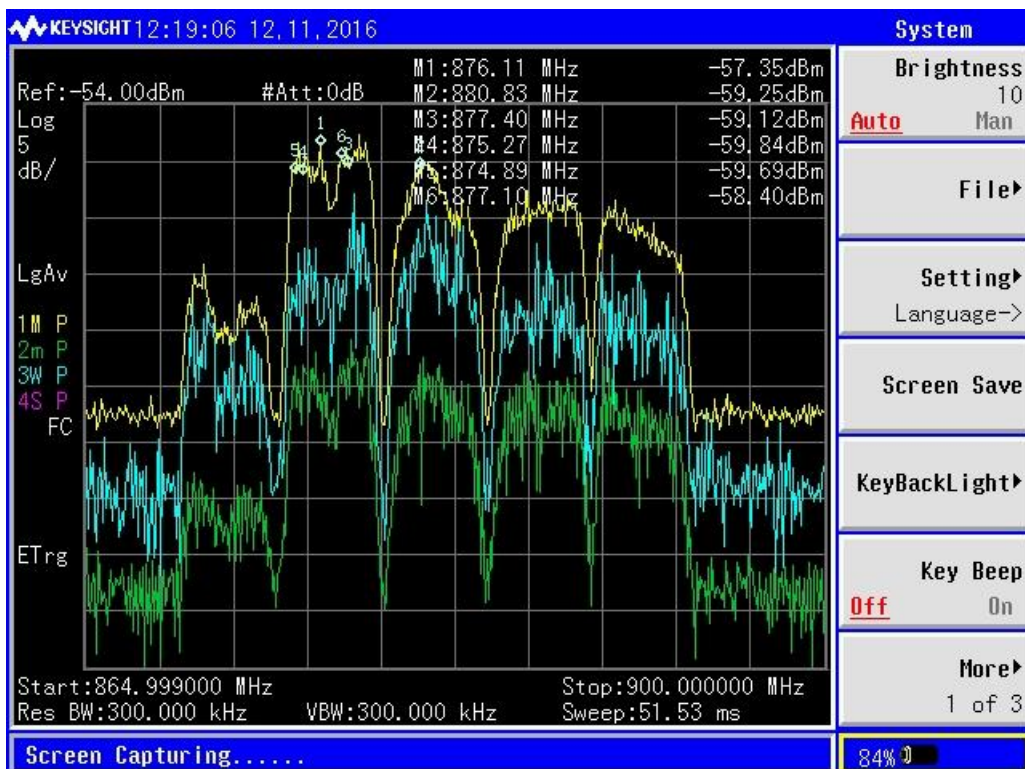
รูปที่ 3.30 สเปกตรัมของกิจการโทรคมนาคมที่วัดได้

**ตอนที่ 2** ผลการวัดกำลังคลื่นความถี่ของกิจการโทรคมนาคม โดย Span เป็นช่วง

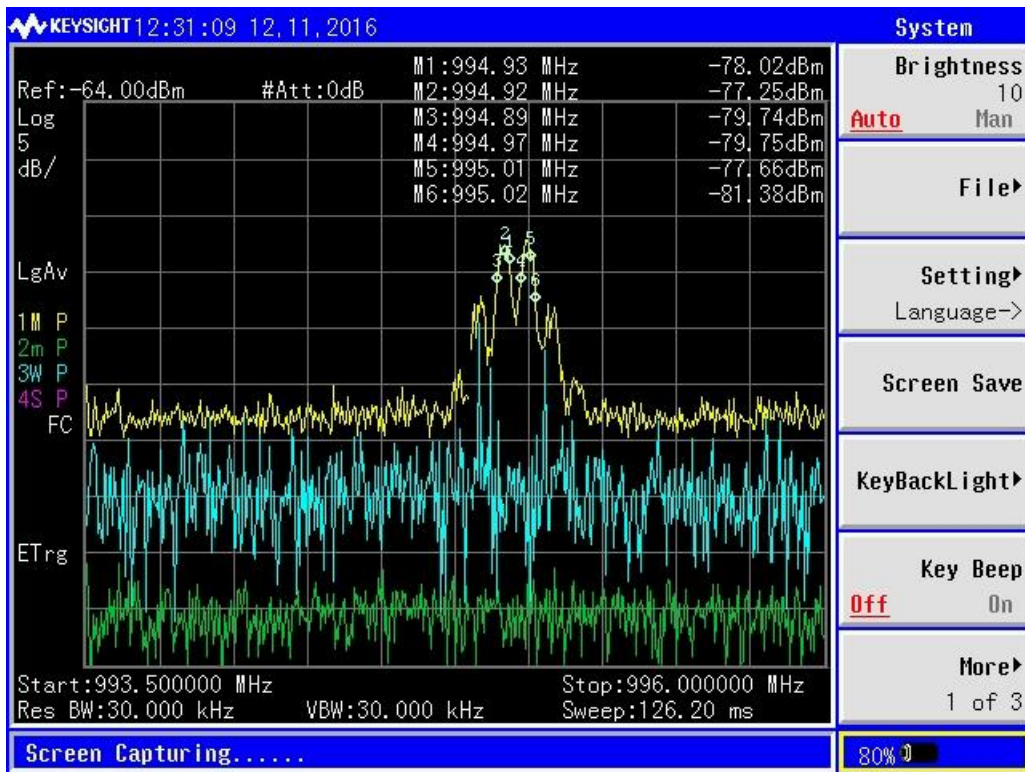
ปรับตั้งช่วงความถี่ครอบคลุมกิจการโทรคมนาคม โดยแบ่งช่วงการ Span 3 ช่วง คือ ช่วงแรก ตั้งแต่ 855 MHz ถึง 865 MHz ช่วงที่สอง ตั้งแต่ 865 MHz ถึง 900 MHz และช่วงที่สาม ตั้งแต่ 993.5 MHz ถึง 996 MHz และปรับค่า Attenuation ของเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เท่ากับ 0 dB จะพบว่า มีแถบความถี่สูงสุดที่เครื่องสามารถวัดได้ โดยเรียงลำดับตามขนาดของสเปกตรัมจากมากไปน้อย ในช่วง -57 dBm ถึง -83 dBm ดังแสดงในรูปที่ 3.31



(ก) ผลการ Span ในช่วงความถี่ 855 MHz ถึง 865 MHz



(ข) ผลการ Span ในช่วงความถี่ 865 MHz ถึง 900 MHz



(ค) ผลการ Span ในช่วงความถี่ 993.5 MHz ถึง 996 MHz  
รูปที่ 3.31 สเปกตรัมของกิจการโทรคมนาคมที่วัดได้เมื่อปรับการ Span เป็นช่วง

### 3.3 ผลการศึกษาข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณโดยใช้วิธีการลงสำรวจในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช

#### 3.3.1 กระบวนการศึกษาข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศ

จากผลการศึกษาที่ผ่านมา ทำให้ทราบว่า กิจกรรมวิทยุกระจายเสียงมักจะประสบปัญหาการเกิดสัญญาณรบกวนซึ่งกันละกัน โดยเฉพาะสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม เพื่อเข้าถึงปัญหาดังกล่าวได้อย่างง่าย จึงใช้ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันของสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม ในการวางแผนเพื่อลงพื้นที่สำรวจสุมเก็บสาเหตุของปัญหาและศึกษาข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณในสถานีวิทยุกระจายเสียงในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยมีกระบวนการดังต่อไปนี้






1. ทบทวนเป้าหมายในส่วนของการออกแบบสายอากาศตามที่ระบุไว้ในข้อเสนอโครงการ
2. ศึกษาข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณที่ใช้จริงในปัจจุบันจากอินเทอร์เน็ตและงานวิจัยอื่นๆ เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างแบบสำรวจข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศแพร่สัญญาณ
3. กำหนดสถานีกระจายเสียงและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัล เพื่อเข้าสำรวจปัญหา โดยการพิจารณาจากผลการจัดลำดับความเป็นได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันในหัวข้อก่อนหน้า
4. ลงพื้นที่สำรวจข้อมูลจากผู้ใช้งานสายอากาศแพร่สัญญาณของสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช โดยใช้แบบสำรวจข้อมูลที่ออกแบบไว้
5. รวบรวมข้อมูลจากผู้ใช้งานสายอากาศแพร่สัญญาณในปัจจุบันของสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช
6. สรุปและสังเคราะห์จากผลการศึกษาสายอากาศแพร่สัญญาณร่วมกับผลการสำรวจข้อมูลจากผู้ใช้งานสายอากาศแพร่สัญญาณของสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มและสถานีโทรทัศน์ดิจิทัลในเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช

### 3.3.2 ผลการกำหนดแบบสำรวจข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะ

เพื่อให้ง่ายต่อการสำรวจและได้รับข้อมูลคุณลักษณะตามที่ เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบสายอากาศ จึงได้กำหนดแบบสำรวจข้อมูล ซึ่งมีหัวข้อสำคัญ ดังนี้

1. ชื่อสถานีวิจัย
2. ประเภทการขอรับอนุญาต
3. ตำแหน่งที่ตั้ง
4. ช่วงความถี่ที่ใช้คลื่นวิทยุกระจายเสียง
5. รุ่นของสายอากาศ
6. อินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance)
7. แถบความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศ (Bandwidth)
8. อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)
9. กำลังส่งสัญญาณสูงสุด (Maximum Input Power)
10. อัตราขยาย (Forward Gain)
11. ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width)
12. ชิ้นประกอบ (Element)
13. ขนาดและน้ำหนัก
14. ชนิดของสายอากาศแพร่สัญญาณ
15. ช่วงเวลาที่ใช้งาน

อย่างไรก็ตาม จากการเข้าพบสถานีวิจัยในช่วงแรก ทำให้ทราบว่า ข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคหาได้ โดยยาก เนื่องจากระบบสายอากาศส่วนใหญ่ มีการติดตั้งมาเป็นเวลานานแล้ว ทำให้ข้อมูลดังกล่าวสูญหาย ดังนั้น คณะผู้วิจัย จึงมีแผนการระบุชนิดตามข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคด้วยวิธีการเทียบเคียงจากข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคจากมาตรฐานของ กสทช. ดังแสดงในรูปที่ 3.32

จำนวนของ สายอากาศ (เบย์)	อัตราขยายสายอากาศ (dBd)				
	สายอากาศ ชนิดไดโพล แบบปลายเปิด (Dipole Antenna) <sup>a)</sup> 	สายอากาศ ชนิดไดโพล แบบปลายปิด (Folded Dipole Antenna) <sup>b)</sup> 	สายอากาศ ชนิดวงกลม แบบที่ ๑ (Circular Antenna Type 1) <sup>b)</sup> 	สายอากาศ ชนิดวงกลม แบบที่ ๒ (Circular Antenna Type 2) <sup>b)</sup> 	สายอากาศ ชนิดวงกลม แบบที่ ๓ (Circular Antenna Type 3) <sup>b)</sup> 
<b>1</b>	3	3	-3	-3	-3
<b>2</b>	5	5	0	0	0
<b>4</b>	9	9	3	3	3
<b>6</b>	10	10	5	5	5
<b>8</b>	12	12	6	6	6

รูปที่ 3.32 ตารางเปรียบเทียบอัตราขยายสายอากาศ



### 3.3.3 ผลการกำหนดสถานีส่งเพื่อเข้าสำรวจข้อมูล

เพื่อบรรลุเป้าหมายในการสำรวจข้อมูลจำเพาะของสายอากาศที่มีการใช้งานจริงในปัจจุบันของระบบวิทยุกระจายเสียง ระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย ในพื้นที่ตัวอย่างของจังหวัดนครศรีธรรมราช จึงต้องกำหนดสถานีกลุ่มเป้าหมายในการสำรวจ ซึ่งครอบคลุมสถานีวิทยุกระจายเสียง สถานีโทรทัศน์ดิจิทัล และสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งในการพิจารณานั้น จะใช้ข้อมูลจากผลการจัดลำดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน ซึ่งมีรายละเอียดตามตารางที่ 3.8 และตารางที่ 3.14 และผลการวัดความเข้มสนาม ซึ่งมีรายละเอียดตามหัวข้อ 0 ทั้งนี้ได้กำหนดสถานีเป้าหมายที่จะเข้าสำรวจมีจำนวน 8 สถานี คือ

**สถานีที่ 1** เป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม ซึ่งตั้งอยู่บริเวณภายในบริเวณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ปัจจุบันเป็นสถานีที่ไม่ได้รับใบอนุญาตในการใช้คลื่นวิทยุกระจายเสียงในระบบเอฟเอ็ม จึงได้หยุดการออกอากาศ แต่ยังคงมีสายอากาศแพร่สัญญาณพร้อมใช้งาน

**สถานีที่ 2** เป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม โดยใช้ชื่อว่า “สถานีวิทยุโมคลานเรดิโอ” ได้ขออนุญาตทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง ประเภทธุรกิจ โดยใช้คลื่นความถี่ 95.00 MHz ซึ่งตั้งอยู่บริเวณ ตำบลโพธิ์ทอง อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ทั้งนี้ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช ซึ่งผลวิเคราะห์เบื้องต้นนั้น สถานีดังกล่าวนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน เนื่องจากตั้งอยู่ห่างจากจุดสังเกตประมาณ 6.32 กิโลเมตร และผลการตรวจวัดค่าความเข้มสนาม พบว่า มีค่าความเข้มสนามเท่ากับ -64.47 dBm ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสถานีใกล้เคียง ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นสถานีที่คณะวิจัยจะเข้าทำการสำรวจข้อมูลสายอากาศ และปัญหาที่พบในการดำเนินการ

**สถานีที่ 3** เป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม โดยใช้ชื่อว่า “สถานีวิทยุคุณรักบ้านเกิด” ได้ขออนุญาตทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง ประเภทธุรกิจ โดยใช้คลื่นความถี่ 92.00 MHz ซึ่งตั้งอยู่บริเวณ ตำบลดอนตะโก อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ทั้งนี้ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช ซึ่งผลวิเคราะห์เบื้องต้นนั้น สถานีดังกล่าวนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน เนื่องจากตั้งอยู่ห่างจากจุดสังเกตประมาณ 5.45 กิโลเมตร และผลการตรวจวัดค่าความเข้มสนาม พบว่า มีค่าความเข้มสนามเท่ากับ -58.16 dBm ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับสถานีใกล้เคียง ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นสถานีที่คณะวิจัยจะเข้าทำการสำรวจข้อมูลสายอากาศ และปัญหาที่พบในการดำเนินการ

**สถานีที่ 4** เป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงหลักระบบเอฟเอ็ม โดยใช้ชื่อว่า “สถานีวิทยุ สวส. อ.ส.ม.ท. นครศรีธรรมราช” โดยใช้คลื่นความถี่ 104.50 MHz ซึ่งตั้งอยู่บริเวณ ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ทั้งนี้ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช ซึ่งผลวิเคราะห์เบื้องต้น สถานีดังกล่าวนี้มีความเป็นไปได้ต่ำที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน เนื่องจากตั้งอยู่ห่างจากจุดสังเกต ประมาณ 36.75 กิโลเมตร ซึ่งถือได้ว่ามีระยะห่างมากเมื่อเทียบกับสถานีอื่น แต่ผลการตรวจวัดค่าความเข้มสนาม กลับพบว่า มีค่าความเข้มสนามเท่ากับ -56.51 dBm ซึ่งถือได้ว่า เป็นสถานีที่ใช้กำลังส่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับสถานีใกล้เคียง ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นสถานีที่คณะวิจัยจะเข้าทำการสำรวจข้อมูลสายอากาศ และปัญหาที่พบในการดำเนินการ

**สถานีที่ 5** เป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม โดยใช้ชื่อว่า “สถานีวิทยุเทศบาลเมืองปากพูน” ได้ขออนุญาตทดลองประกอบกิจการวิทยุกระจายเสียง ประเภทธุรกิจ โดยใช้คลื่นความถี่ 104.00 MHz ซึ่งตั้งอยู่บริเวณ ตำบลปากพูน อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ทั้งนี้ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช ซึ่งผลวิเคราะห์เบื้องต้น สถานีดังกล่าวนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน เนื่องจากตั้งอยู่ห่างจากจุดสังเกตประมาณ 3.18 กิโลเมตร และผลการตรวจวัดค่าความเข้มสนาม พบว่า มีค่าความเข้มสนามเท่ากับ -51.31 dBm ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับสถานีใกล้เคียง ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นสถานีที่คณะวิจัยจะเข้าทำการสำรวจข้อมูลสายอากาศ และปัญหาที่พบในการดำเนินการ

**สถานีที่ 6** เป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงหลักระบบเอฟเอ็ม โดยใช้ชื่อว่า “สถานีวิทยุพิทักษ์สันติราษฎร์ (สวพ.) นครศรีธรรมราช” โดยใช้คลื่นความถี่ 91.50 MHz ซึ่งตั้งอยู่บริเวณ ตำบลท่าซัก อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ทั้งนี้ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช ซึ่งผลวิเคราะห์เบื้องต้น สถานีดังกล่าวนี้มีความเป็นไปได้ต่ำที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน เนื่องจากตั้งอยู่ห่างจากจุดสังเกตประมาณ 11.7 กิโลเมตร และผลการตรวจวัดค่าความเข้มสนาม พบว่า มีค่าความเข้มสนามเท่ากับ -69.23 dBm ซึ่งถือได้ว่า เป็นสถานีหลักที่ใช้กำลังส่งมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับสถานีหลักอื่น ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นสถานีที่คณะวิจัยจะเข้าทำการสำรวจข้อมูลสายอากาศ และปัญหาที่พบในการดำเนินการ

**สถานีที่ 7** เป็นสถานีโทรทัศน์ดิจิตอลหลัก ซึ่งมีการแพร่สัญญาณผ่านหลายช่องความถี่ตามรายละเอียดในตารางที่ 3.3 ซึ่งมีการใช้คลื่นวิทยุจำนวน 5 ช่วงความถี่ คือ ค่าความถี่ 546 570 602 634 และ 698 MHz ซึ่งตั้งอยู่ที่ตำบลท่าเรือ อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ทั้งนี้ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช ซึ่งผลวิเคราะห์เบื้องต้น สถานีดังกล่าวนี้มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดการมอดูเลตระหว่างกัน เนื่องจากสายอากาศเพียงอันเดียวถูกใช้ในการแพร่สัญญาณหลายช่วงความถี่ในเวลาเดียวกัน และ

ผลการตรวจวัดค่าความเข้มสนาม พบว่า มีค่าความเข้มสนามอยู่ในช่วง -76 ถึง -73 dBm ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นสถานที่ที่คณะวิจัยจะเข้าทำการสำรวจข้อมูลสายอากาศแพร่สัญญาณสำหรับกิจการโทรศัพท์ระบบดิจิทัล และปัญหาที่พบในการดำเนินกิจการ

**สถานีที่ 8** เป็นสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ของบริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด โดยใช้คลื่นวิทยุในช่วงความถี่ 800-960 MHz และ 1800-2100 MHz :มีจำนวน 716 สถานี ครอบคลุมเขตจังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งถือว่ามีจำนวนสถานีฐานสูงมาก ทั้งนี้ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช มีความเป็นไปได้น้อยในการเกิดมอดูเลตระหว่างกัน เนื่องจากช่วงความถี่ของสัญญาณจากการมอดูเลตระหว่างกันมีค่าไม่ตรงกับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการทางการบิน และผลการตรวจวัดค่าความเข้มสนาม พบว่า มีความเข้มสนามเท่ากับ -62 ถึง -54 dBm ซึ่งถือได้ว่า เป็นสถานีที่ใช้กำลังส่งมีค่าสูงเมื่อเทียบกับสถานีอื่นๆ ด้วยเหตุนี้ จึงเป็นสถานที่ที่คณะวิจัยจะเข้าทำการสำรวจข้อมูลสายอากาศ และปัญหาที่พบในการดำเนินกิจการ

### 3.3.4 ผลการลงสำรวจพื้นที่จริงในแต่ละสถานีกลุ่มเป้าหมาย

#### สถานีที่ 1

สถานีวิทยุ มวล. เป็นชื่อที่เรียกกันในอดีต ซึ่งเป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม ตั้งอยู่บริเวณภายในมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ตำบลไทยบุรี อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเดิมที่เป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการ ช่วงความถี่ 100.75 MHz แต่ในปัจจุบันเป็นสถานีที่ไม่ได้รับใบอนุญาตในการใช้คลื่นวิทยุกระจายเสียงในระบบเอฟเอ็ม จึงได้หยุดการออกอากาศ แต่ยังคงมีสายอากาศแพร่สัญญาณพร้อมใช้งาน สายอากาศแพร่สัญญาณที่ใช้งาน คือ สายอากาศชนิดไดโพล แบบปลายเปิด (Dipole Antenna) อยู่เหนือพื้นดินประมาณ 60 เมตร ประกอบด้วยสายอากาศจำนวน 4 ชั้น และมีกำลังส่งไม่เกิน 500 Watts ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.33 ผู้ดูแลสถานีได้พยายามค้นหาข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศ แต่ไม่สามารถหาได้ เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวถูกเก็บไว้โดยผู้เชี่ยวชาญทางเทคนิคในช่วง 7-8 ปีที่แล้ว อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจึงขอระบุนอัตรายายของสายอากาศตามรูปที่ 3.32 โดยการเทียบเคียงกับข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคตามมาตรฐานของ กสทช. ซึ่งขอระบุให้ค่าอัตรายายเท่ากับ 9 dBd



รูปที่ 3.33 รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุ มวล.

## สถานีที่ 2

สถานีวิทยุโมคลานเรดิโอ ซึ่งเป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม ตั้งอยู่ตำบลโพธิ์ทอง อำเภอบ้านคา จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นสถานีวิทยุที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการ ช่วงความถี่ 95.0 MHz โดยมีสายอากาศแพร่สัญญาณที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน คือ สายอากาศชนิดวงกลม (Circular Antenna) อยู่เหนือพื้นดินประมาณ 60 เมตร ประกอบด้วยสายอากาศจำนวน 4 ชั้น ด้วยกำลังส่งไม่เกิน 500 Watts ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.34 ผู้ดูแลสถานีได้พยายามค้นหาข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศ แต่ไม่สามารถหาได้ อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจึงขอระบุนอัตรายายของสายอากาศตามรูปที่ 3.32 โดยการเทียบเคียงกับข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคจากมาตรฐานของ กสทช. ซึ่งขอระบุให้มีค่าอัตรายายเท่ากับ 3 dBd



รูปที่ 3.34 รูปร่างของสายอากาศของสถานีโมคลานเรดิโอ

### สถานีที่ 3

สถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด ซึ่งเป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม ตั้งอยู่ตำบลดอนตะโก อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นสถานีวิทยุที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการ ช่วงความถี่ 92.0 MHz โดยมีสายอากาศแพร่สัญญาณที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน คือ สายอากาศชนิดไดโพล (Dipole Antenna) อยู่เหนือพื้นดินประมาณ 60 เมตร ประกอบด้วยสายอากาศจำนวน 8 ชั้น ด้วยกำลังส่งไม่เกิน 500 Watts ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.35 ผู้ดูแลสถานีได้พยายามค้นหาข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศ แต่ไม่สามารถหาได้ อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจึงขอระบุอัตราขยายของสายอากาศตามรูปที่ 3.32 โดยการเทียบเคียงกับข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคจากมาตรฐานของ กสทช. ซึ่งขอระบุให้มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 12 dBd

ผลจากการสัมภาษณ์ผู้ดำเนินงานของสถานีที่ 2 (สถานีวิทยุโมคลานเรดิโอ) และสถานีที่ 3 (สถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด) เพื่อศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกิจการกระจายเสียงในอดีตที่ผ่านมา พบว่า การใช้งานช่วงความถี่ 95.0 MHz และ 92.0 MHz ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกับเครื่องรับสัญญาณคลื่นวิทยุในระบบเอฟเอ็ม ณ บริเวณพื้นที่ภายในรัศมี 500-1000 เมตรจากตำแหน่งที่ตั้งของสายอากาศ โดยมักจะเกิดการรบกวนกับสัญญาณคลื่นวิทยุในช่วงความถี่ 89.00 MHz ซึ่งดำเนินการโดยสถานีวิทยุมุมป้อมซิติ้เรดิโอ และช่วงความถี่ 98.00 MHz ซึ่งดำเนินการโดยสถานีวิทยุกองปราบอาสา

เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุกระจายเสียงในระบบเอฟเอ็ม ภายในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช และผลการวัดกำลังคลื่นวิทยุ ณ บริเวณหอบังคับการบิน ซึ่งตำแหน่งที่ทำการวัดนั้นอยู่ห่างจากสถานีวิทยุโมคลานเรดิโอและสถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด เป็นระยะทาง 6.32 กิโลเมตรและ 5.45 กิโลเมตร ตามลำดับ จึงเป็นเหตุให้ คณะผู้วิจัยตั้งสมมุติฐานถึงสาเหตุของการเกิดสัญญาณรบกวน คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้น มีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากการมอดูเลตระหว่างกัน เนื่องจากช่วงความถี่ที่ถูกรบกวน คือ ช่วงความถี่ 89.00 MHz และ 98.00 MHz เป็นช่วงความถี่ผลรวมลำดับที่สามของการเกิดการมอดูเลตเลตระหว่างกันของคลื่นวิทยุที่ช่วงความถี่ 95.00 MHz และช่วงความถี่ 92.00 MHz และผลการวัดกำลังคลื่นวิทยุ ณ บริเวณหอบังคับการบิน มีค่าเท่ากับ -64.47 dBm ณ ช่วงความถี่ 95.00 MHz และมีค่าเท่ากับ -58.16 dBm ณ ช่วงความถี่ 92.00 MHz ซึ่งนับว่ายังมีกำลังสูงมากพอสมควร



รูปที่ 3.35 รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุคนรักบ้านเกิด

#### สถานีที่ 4

สถานีวิทยุ อ.ส.ม.ท. นครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มและเป็นสถานีวิทยุหลัก ตั้งอยู่ตำบลร่อนพิบูลย์ อำเภอร่อนพิบูลย์ จังหวัดนครศรีธรรมราช ช่วงความถี่ 104.50 MHz โดยมีสายอากาศแพร่สัญญาณที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน คือ สายอากาศชนิดวงกลม (Circular Antenna) อยู่เหนือพื้นดินประมาณ 60 เมตร ประกอบด้วยสายอากาศจำนวน 8 ชั้น ด้วยกำลังส่งไม่เกิน 2000 Watts ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.36 ผู้ดูแลสถานีได้พยายามค้นหาข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศ แต่ไม่สามารถหาได้ อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจึงขอระบุดัชนีชี้วัดของสายอากาศตามรูปที่ 3.32 โดยการเทียบเคียงกับข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคจากมาตรฐานของ กสทช. ซึ่งขอระบุให้มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 6 dBd

ด้วยผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันที่เกิดขึ้นจากสถานีวิทยุ อ.ส.ม.ท. นครศรีธรรมราช นั้น ไม่มีความเป็นไปได้ เนื่องจากสถานีตั้งอยู่ในระยะห่างจากจุดสังเกตมาก คือ 36.75 กิโลเมตร เมื่อเทียบกับสถานีวิทยุอื่นในบริเวณจุดสังเกตหอบังคับการบิน อย่างไรก็ตาม กลับมีความขัดแย้งกับผลการวัดกำลังคลื่นวิทยุ ณ บริเวณหอบังคับการบิน เนื่องจากเมื่อทำการวัดกำลังคลื่นวิทยุจากสถานีดังกล่าวพบว่า กำลังคลื่นสูงมีระดับสูงถึง  $-56.51$  dBm จัดว่ามีระดับสูงเป็นอันดับที่ 2 เมื่อเทียบกับกำลังคลื่นจากสถานีทั้งหมดที่วัดได้ และมีระดับกำลังคลื่นวิทยุใกล้เคียงกับคลื่นวิทยุสำหรับกิจการทางการบินในช่วงความถี่ 123.00 MHz คือ  $-51.07$  dBm

ด้วยเหตุผลข้างต้นที่ได้กล่าวมานั้น เป็นเหตุให้คณะผู้วิจัยได้เข้าสัมภาษณ์ผู้ดำเนินงานของสถานีที่ 4 สถานีวิทยุ อ.ส.ม.ท. นครศรีธรรมราช ซึ่งผลการสัมภาษณ์จากผู้ดำเนินงานของสถานี ทำให้ทราบว่า ในบางช่วงเวลาขณะที่สถานีวิทยุมีการเปิดให้บริการนั้น มักจะเกิดสัญญาณรบกวนแก่สถานีอื่นในบริเวณใกล้เคียง เช่น สถานีวิทยุกระจายเสียงที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการ บริเวณชุมชนเขตอำเภอเมือง โดยเฉพาะบริเวณใกล้กับห้างสรรพสินค้าโรบินสันและหมู่บ้านราชพฤกษ์ 2 จนเป็นเหตุให้สำนักงาน กสทช. เขต 12 จังหวัดนครศรีธรรมราช ต้องเข้าแจ้งเตือนเพื่อให้สถานีปรับแก้ไขปัญหาดังกล่าว





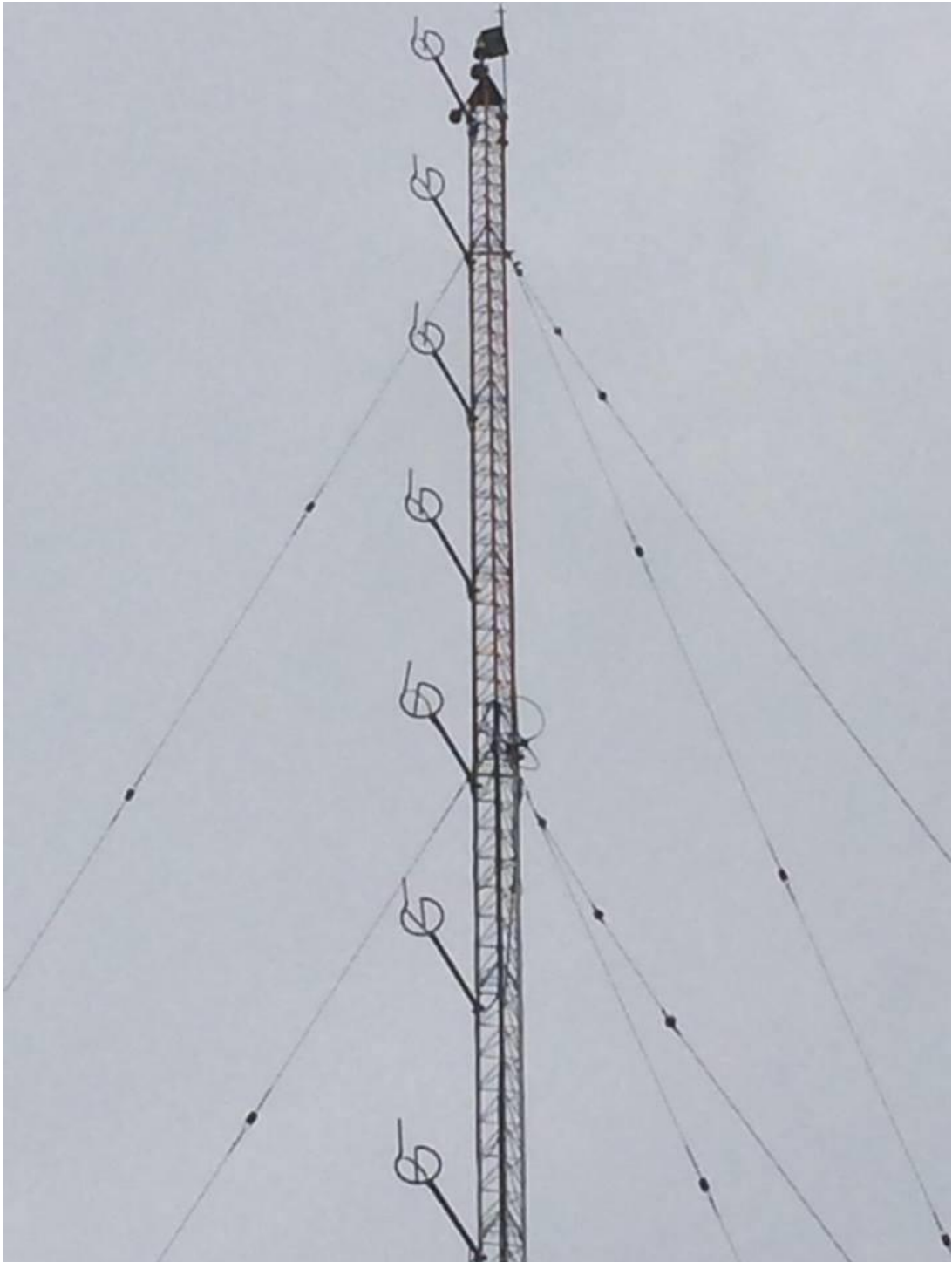
รูปที่ 3.36 รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุ อ.ส.ม.ท. นครศรีธรรมราช

## สถานีที่ 5

สถานีวิทยุเทศบาลเมืองปากพูน ซึ่งเป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็ม ตั้งอยู่ที่ตำบลปากพูน อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นสถานีวิทยุที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการ ช่วงความถี่ 104.00 MHz โดยมีสายอากาศแพร่สัญญาณที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน คือ สายอากาศชนิดวงกลม (Circular Antenna) อยู่เหนือพื้นดินประมาณ 60 เมตร ประกอบด้วยสายอากาศจำนวน 8 ชั้น ด้วยกำลังส่งไม่เกิน 500 Watts ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.37 ผู้ดูแลสถานีได้พยายามค้นหาข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศ แต่ไม่สามารถหาได้ อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจึงขอระบุนอัตรายายของสายอากาศตามรูปที่ 3.32 โดยการเทียบเคียงกับข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคจากมาตรฐานของ กสทช. ซึ่งขอระบุให้มีค่าอัตรายายเท่ากับ 6 dBd

ด้วยผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุเทศบาลเมืองปากพูนนั้นมีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากสถานีตั้งอยู่ในระยะห่างจากจุดสังเกตน้อยที่สุด คือ 3.18 กิโลเมตร เมื่อเทียบกับสถานีวิทยุอื่นในบริเวณใกล้เคียงกับหอบังคับการบิน และมีความสอดคล้องกับผลการวัดกำลังคลื่นวิทยุ ณ บริเวณหอบังคับการบิน เนื่องจากเมื่อทำการวัดกำลังคลื่นวิทยุจากสถานีดังกล่าว พบว่า มีค่าสูงถึง  $-51.31$  dBm ซึ่งเป็นระดับกำลังสูงสุด

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเข้าสำรวจข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศ และร่วมรับฟังปัญหาที่เกิดขึ้นกับสถานีวิทยุเทศบาลเมืองปากพูน ซึ่งผลการสัมภาษณ์จากผู้ดำเนินงานของสถานี ทำให้ทราบว่า ในบางช่วงเวลาที่ผ่านมา ระหว่างการเปิดให้บริการนั้นจะเกิดสัญญาณรบกวนแกกกิจการทางการบิน จนเป็นเหตุให้สำนักงาน กสทช. เขต 12 จังหวัดนครศรีธรรมราช ต้องเข้าแจ้งเตือนเพื่อให้สถานีปรับแก้ไขปัญหาดังกล่าว



รูปที่ 3.37 รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุเทศบาลเมืองปากพูน

## สถานีที่ 6

สถานีวิทยุพิทักษ์สันติราษฎร์ (สวพ.) นครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นสถานีวิทยุกระจายเสียงระบบเอฟเอ็มและเป็นสถานีวิทยุหลัก ตั้งอยู่ที่ตำบลท่าซัก อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งเป็นสถานีวิทยุที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการ ช่วงความถี่ 91.50 MHz โดยมีสายอากาศแพร่สัญญาณที่ใช้งานอยู่ปัจจุบัน คือสายอากาศชนิดวงกลม (Circular Antenna) อยู่เหนือพื้นดินประมาณ 60 เมตร ประกอบด้วยสายอากาศจำนวน 8 ชั้น ด้วยกำลังส่งไม่เกิน 500 Watts ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.38 ผู้ดูแลสถานีได้พยายามค้นหาข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศ แต่ไม่สามารถหาได้ อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจึงขอระบุอัตราขยายของสายอากาศตามรูปที่ 3.32 โดยการเทียบเคียงกับข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคจากมาตรฐานของ กสทช. ซึ่งขอระบุให้มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 6 dBd

ด้วยผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันจากสถานีวิทยุพิทักษ์สันติราษฎร์ (สวพ.) นครศรีธรรมราชนั้นมีความเป็นไปได้้น้อยมาก เนื่องจากสถานีตั้งอยู่ในระยะห่างจากจุดสังเกตค่อนข้างมาก คือ 11.76 กิโลเมตร เมื่อเทียบกับสถานีวิทยุอื่นในบริเวณใกล้เคียงกับหอบังคับการบิน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการวัดกำลังคลื่นวิทยุ ณ บริเวณหอบังคับการบิน พบว่า มีค่าสูงถึง  $-69.23$  dBm ซึ่งเป็นระดับที่ใกล้เคียงกับกำลังคลื่นวิทยุจากสถานีวิทยุกระจายเสียงที่ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการ ชื่อสถานีขึ้นฤทัย ในธรรม ช่วงความถี่ 91.25 MHz ซึ่งทำการวัดกำลังคลื่นได้มีค่าเท่ากับ  $-64.85$  dBm โดยที่ตั้งอยู่มีระยะห่างจากหอบังคับการบิน คือ 7.81 กิโลเมตร



รูปที่ 3.38 รูปร่างของสายอากาศของสถานีวิทยุพิทักษ์สันติราษฎร์ (สวพ.) นครศรีธรรมราช

## สถานีที่ 7

สถานีโทรทัศน์ดิจิทัลหลัก นครศรีธรรมราช ซึ่งมีการแพร่กระจายสัญญาณ 5 ค่าความถี่ คือ ค่าความถี่ 546 570 602 634 และ 698 MHz ผ่านสายอากาศเดียวกัน ซึ่งตั้งอยู่ที่ตำบลท่าเรือ อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช ทั้งนี้ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช ซึ่งผลการจัดอันดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันนั้น มีโอกาสเป็นไปได้ และผลการตรวจวัดค่าความเข้มสนาม พบว่า มีค่าความเข้มสนามเท่ากับ -76 ถึง -73 dBm ซึ่งถือได้ว่า เป็นสถานีหลักที่ใช้กำลังส่งมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับสถานีหลักอื่น และผลจากการสัมภาษณ์ผู้ดูแลสถานี จึงพบว่า ข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศไม่สามารถหาได้ แต่ผู้ดูแลสถานีได้ให้คำแนะนำในการสืบค้นข้อมูลของคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศที่ได้รับการยอมรับตามมาตรฐานและมีจำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป

## สถานีที่ 8

สถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ของบริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด โดยใช้คลื่นวิทยุ ช่วงความถี่ 800-960 MHz และ 1800-2100 MHz :มีจำนวน 716 สถานี ครอบคลุมเขตจังหวัด นครศรีธรรมราช ทั้งนี้ ณ จุดสังเกตหอบังคับการบิน สนามบินนครศรีธรรมราช ซึ่งผลการจัดอันดับความเป็นไปได้ของการเกิดการมอดูเลตระหว่างกันนั้น สถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีความเป็นไปได้ต่ำ และผลการตรวจวัดค่าความเข้มสนาม พบว่า มีความเข้มสนามเท่ากับ -62 ถึง -54 dBm ซึ่งถือได้ว่า เป็นสถานีหลักที่ใช้กำลังส่งมีค่าสูงเมื่อเทียบกับสถานีหลักอื่น และผลจากการสัมภาษณ์พนักงานผู้รับผิดชอบของบริษัทผู้ให้บริการ ทำให้ได้รับข้อมูลคุณสมบัติทางเทคนิคของสายอากาศที่กำลังใช้งานอยู่จริง

นอกจากนี้ ยังได้รับฟังปัญหาเกี่ยวกับแพร่สัญญาณ ซึ่งมีด้วยกัน 2 ประเด็น คือ ประเด็นแรก เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสถานีของผู้ให้บริการต่างเครือข่ายที่มีแถบความถี่ติดกัน และประเด็นที่สอง เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งอุปกรณ์ทวนสัญญาณกำลังสูงโดยไม่ได้รับอนุญาตของผู้บริโภคในบางเขตพื้นที่ห่างไกลจากสถานีฐาน

### 3.3.5 สรุปผลข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของสายอากาศแพร่กระจายสัญญาณ

คณะผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศแพร่สัญญาณจากการสำรวจข้อมูลแต่ละสถานี ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางที่ 3.15

ตารางที่ 3.15 สรุปผลการสำรวจข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของสายอากาศแพร่สัญญาณ ณ สถานีวิทยุกระจายเสียงระบบ FM

ชื่อสถานี	ช่วงความถี่ (MHz)	ชนิดของสายอากาศ	จำนวนของสายอากาศ (เบย์)	อัตราขยายสายอากาศ (dBd)
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์	100.75	ไดโพลแบบปลายเปิด (Dipole Antenna)	4	9
โมคลาน	95.00	วงกลมแบบที่ 3 (Circular Antenna Type 3)	4	3
คนรักบ้านเกิด	92.00	ไดโพลแบบปลายปิด (Folder Dipole Antenna Tpye)	8	12
สวส. อ.ส.ม.ท. นครศรีธรรมราช	104.50	End Feed Dipole Antenna	8	6
เทศบาลเมืองปากพูน	104.00	วงกลมแบบที่ 1 (Circular Antenna Type 1)	8	6
สวส.พิทักษ์สันติราษฎร์ (สวพ.) นครศรีธรรมราช	91.50	วงกลมแบบที่ 2 (Circular Antenna Type 2)	8	6

ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสถานีฐานสำหรับกิจการโทรศัพท์ระบบดิจิทัลจากการสืบค้นจากข้อมูลสายอากาศสถานีฐานที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด สามารถสรุปดังแสดงในตารางที่ 3.16

ตารางที่ 3.16 คุณลักษณะสายอากาศสถานีฐานสำหรับกิจการโทรศัพท์ระบบดิจิทัล

ชนิด	ชื่อรุ่น	Polarization	VSWR	จำนวนชั้นประกอบ (Bays)		อัตราขยายของสายอากาศ (dBd)	
				Min	Max	Min	Max
UHF PANEL	JUHD	Horizontal	1.1	~	~	~	~
	JCD-U	Circular	1.22	4	8	3	6
super turnstile	JAT-U	Horizontal	1.1	2	8	5	11
LOG-PERIODIC	JLPU	Horizontal	1.5	-	-	8	8

ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสถานีฐานสำหรับกิจการโทรคมนาคม จากการสำรวจจากบริษัทผู้ให้บริการ สามารถสรุปดังแสดงในตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3.17 คุณลักษณะสายอากาศสถานีฐานสำหรับกิจการโทรคมนาคม

ชื่อรุ่น	พิกัดกำลังด้านเข้า (kW)	Polarization (degrees)	VSWR	3dB Beam width (degrees)		Gain (dBi)
				Horizontal	Vertical	
DX-806-960-65-18i	500	±45	1.45	65	7.5	17.6
DX-1710-2170-33-18i			1.40	65	6.8	17.8



## บทที่ 4 ผลการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้

ผลการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้จะถูกบรรยายในบทนี้ ซึ่งจะเริ่มจากผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศ และผลการกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ โดยการดำเนินงานทั้งสองนี้ได้อาศัยผลการศึกษาก่อนหน้า และจะถูกนำไปใช้ออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในลำดับถัดไป

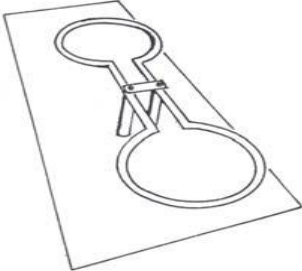
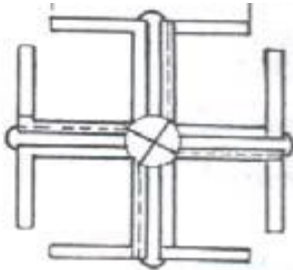
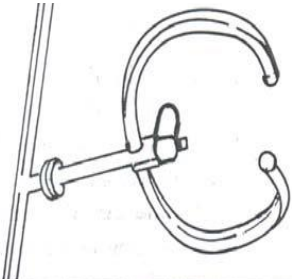
### 4.1 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศ

#### 4.1.1 ผลการศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศสถานีฐานทั่วไป

พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศสถานีฐาน ที่มักนำมาใช้พิจารณาในการเลือกใช้ ได้แก่ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) อิมพีแดนซ์แบนด์วิธ (Impedance bandwidth) อัตราขยาย (Gain) โพลาริเซชัน (Polarization) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ความทนกำลังของสัญญาณอินพุท (Power handling) เป็นต้น โดยการศึกษาพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศสถานีฐานเหล่านี้ จะทำโดยการรวบรวมข้อมูลจากทางทฤษฎีและข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากของตัวแทนจำหน่ายและข้อมูลจากการลงพื้นที่สำรวจจริง ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะรวบรวมและศึกษา เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ต่อไป

จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศสถานีฐานของระบบวิทยุ FM ที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งสามารถจำแนกตามโครงสร้างหลักๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยรายละเอียดของพารามิเตอร์พื้นฐาน ได้แก่ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) อิมพีแดนซ์แบนด์วิธ (Impedance bandwidth) อัตราขยาย (Gain) โพลาริเซชัน (Polarization) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) ความทนกำลังของสัญญาณอินพุท (Power handling) เป็นต้น แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 สายอากาศสถานีฐานทั่วไปของระบบวิทยุ FM [62]

ชนิดสายอากาศ	คุณลักษณะเด่น	รูปโครงสร้างของสายอากาศ
แบบบรอดไซด์ลูป	อัตราขยายสูง ช่วงความถี่กว้าง	
ไดโพลกรอบสี่เหลี่ยม	อัตราขยายสูง (ขึ้นอยู่กับระยะส่ง)	
แบบโพลาริเซชันวงกลม	อัตราขยายต่ำ (ติดตั้งซ้อนกันในแนวตั้ง เพื่อเพิ่มอัตราขยายได้)	

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศสถานีฐานระบบวิทยุ FM

พารามิเตอร์พื้นฐาน	ค่าที่กำหนด
อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)	1.5 : 1
อิมพีแดนซ์แบนด์วิธ	ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งาน (88 - 108 MHz)
อัตราขยาย (Gain)	6-8 dBi
โพลาไรเซชัน (Polarization)	แนวตั้ง (Vertical polarization)
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern)	รอบทิศทาง (Omnidirectional)
ความทนกำลังสัญญาณอินพุท (Power handling)	500 วัตต์

#### 4.1.2 ผลการศึกษาอุปกรณ์สวิตช์ความถี่ที่มีต่อการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

ข้อมูลคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศสถานีฐานจากบริษัทที่จัดจำหน่ายทั่วไป และที่รับรองโดย กสทช. จะถูกนำมาใช้เป็นแนวทางประกอบการพิจารณาในการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ โดยการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ อุปกรณ์สวิตช์ที่ใช้ปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศมีบทบาทสำคัญ และส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศโดยตรง ซึ่งผลกระทบนี้ ได้แก่ การสูญเสียย้อนกลับ (Return loss) การสูญเสียจากการสอดแทรกอุปกรณ์สวิตช์ (Insertion loss) การแยกโดดเดี่ยวระหว่างความถี่ที่ปรับเปลี่ยน (Isolation) อัตราขยายของสายอากาศ (Gain) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation pattern) เป็นต้น ดังนั้นในเบื้องต้นจะทำการศึกษาผลกระทบจากอุปกรณ์สวิตช์ด้วยการออกแบบสายอากาศไดโพล ซึ่งมีโครงสร้างอย่างง่าย ไม่ซับซ้อน เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์สาเหตุจากอุปกรณ์สวิตช์โดยตรง โดยออกแบบสายอากาศให้สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่วิทยุเอฟเอ็ม (88 - 108 MHz) ซึ่งสายอากาศไดโพลปกติทั่วไป สามารถทำงานครอบคลุมทั้งช่วงความถี่ 20 MHz ของวิทยุเอฟเอ็มได้อยู่แล้ว แต่ในการศึกษานี้จะออกแบบสายอากาศไดโพล โดยพิจารณาให้ค่าอิมพีแดนซ์แมตซ์ซึ่งดีที่สุด 3 ความถี่ คือ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz เพื่อกำหนดความยาวของโครงสร้างสายอากาศดังกล่าว ไปใช้ในการต่อร่วมกับอุปกรณ์สวิตช์ และให้สายอากาศสามารถสวิตช์ได้ 3 ความถี่ ดังกล่าวข้างต้น แล้วศึกษาผลกระทบจากสวิตช์ ระหว่างการเลือกใช้สวิตช์ทางไฟฟ้า (Electrical switch) และสวิตช์ทางกล (Mechanical switch) โดยที่นี้จะละทิ้งการสนใจเงื่อนไขของการทนกำลังงานของอุปกรณ์สวิตช์ (Power handling) ก่อนด้วยการทดสอบที่กำลังงานต่ำ ขณะที่ผลกระทบของอุปกรณ์สวิตช์ที่ส่งผลต่อการทำงานของสายอากาศสำหรับ

ใช้รองรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล และกิจการโทรคมนาคม จะไม่กล่าวถึงในที่นี้ เนื่องจากการเลือกศึกษาผ่านตัวอย่างสายอากาศที่ความถี่วิทยุเอฟเอ็ม เป็นกรณีศึกษาที่สายอากาศมีโครงสร้างขนาดใหญ่ตามขนาดของความยาวคลื่น ซึ่งได้รับผลกระทบจากอุปกรณ์สวิตช์มากกว่าอีกสองกิจการที่มีความถี่สูงกว่าความถี่วิทยุเอฟเอ็ม โดยผลการศึกษานำมาปรับใช้กับสายอากาศอีกสองกิจการที่มีขนาดเล็กลงตามความยาวคลื่นได้ต่อไป

#### 4.1.2.1 ผลการออกแบบสายอากาศไดโพลอย่างง่าย

ในการออกแบบสายอากาศไดโพลอย่างง่าย มีขั้นตอนการออกแบบ 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. ระบุความถี่ที่ใช้งานของสายอากาศ ซึ่งในการศึกษานี้ความถี่อยู่ในช่วง 88 - 108 MHz
2. คำนวณหาขนาดความยาวของสายอากาศ ด้วยความถี่กลาง 3 ค่า คือ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad (4.1)$$

โดย  $\lambda$  เป็นค่าความยาวคลื่น ( $\lambda = c/f$ ) มีหน่วยเป็นเมตร  $c$  เป็นค่าความเร็วคลื่นวิทยุในอากาศ มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที และ  $f$  เป็นค่าความถี่ที่ใช้งาน มีหน่วยเป็นเฮิรต

3. นำค่าขนาดความยาวที่ได้จากการคำนวณ ไปจำลองด้วยโปรแกรมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทดสอบค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยพิจารณาการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) น้อยที่สุด ณ ค่าความถี่ทั้งสาม คือ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz
4. วิเคราะห์ผลการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์จากค่า  $S_{11}$  กับความถี่

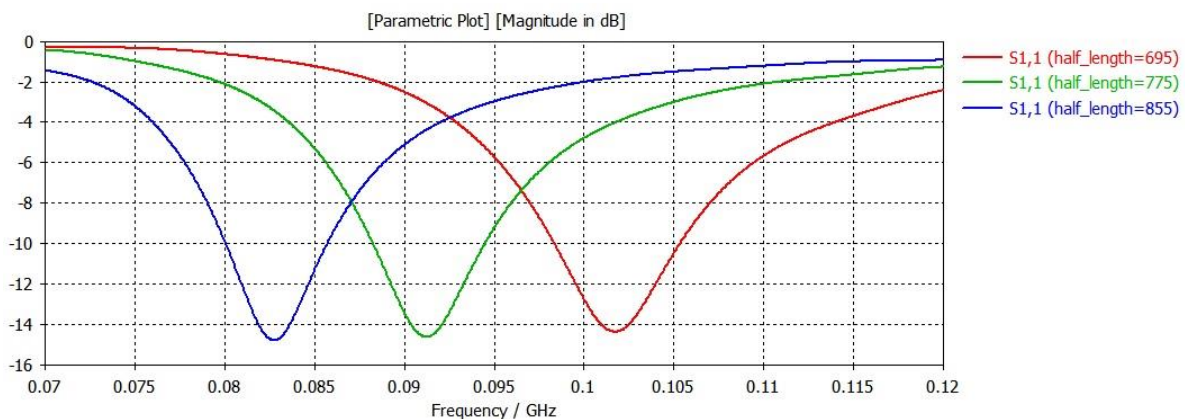
ผลการคำนวณหาความยาวของสายอากาศ โดยกำหนดความถี่ที่ใช้ในการคำนวณ 3 ความถี่ คือ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณขนาดความยาวของสายอากาศไดโพลอย่างง่าย

ความถี่กลาง (MHz)	ความยาวคลื่น (เมตร)	ความยาวสายอากาศ (เมตร)
88 MHz	3.41	1.71
98 MHz	3.06	1.53
108 MHz	2.78	1.39

ค่าขนาดความยาวของสายอากาศที่ความถี่ทั้งสาม ถูกนำไปใช้ในการจำลองสายอากาศในโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทดสอบค่าที่ได้จากการคำนวณ ด้วยการพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับที่แต่ละความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าค่าขนาดที่ได้จากการคำนวณ ทั้งสามความถี่มีความคลาดเคลื่อนไปจากที่คำนวณเล็กน้อย นั่นคือ

ที่ความถี่ 108 MHz ความยาวสายอากาศที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 1.39 เมตร เมื่อนำไปจำลอง ผลที่ได้ปรากฏว่า ค่า  $S_{11} < -10$  dB ที่มีค่าต่ำที่สุด เกิดที่ความถี่ 101.7 MHz มีค่าเท่ากับ -14.38 dB ขณะที่ความถี่ 98 MHz ค่า  $S_{11} < -10$  dB ที่มีค่าต่ำที่สุด เกิดที่ความถี่ 91.25 MHz มีค่าเท่ากับ -14.63 dB และที่ความถี่ 88 MHz ค่า  $S_{11} < -10$  dB ที่มีค่าต่ำที่สุด เกิดที่ความถี่ 82.75 MHz มีค่าเท่ากับ -14.81 dB ซึ่งจะสังเกตได้ว่า ค่า  $S_{11}$  ทั้งสามความถี่เลื่อนไปทางด้านความถี่ต่ำกว่าที่ออกแบบ หมายความว่า ขนาดของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณมีความยาวมากเกินไป



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองสายอากาศด้วยขนาดความยาวที่ได้จากการคำนวณ

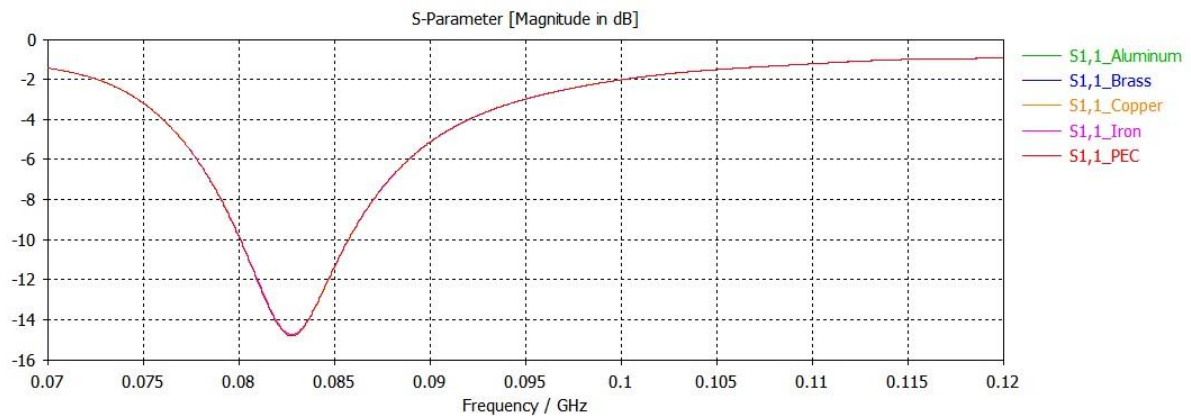
#### 4.1.2.2 ผลการจำลองการทำงานสายอากาศไดโพลอย่างง่าย เพื่อศึกษาพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ

การจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อศึกษาพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศ ด้วยการพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ซึ่งเริ่มต้นจากการนำค่าขนาดความยาวสายอากาศเบื้องต้นที่ได้จากการคำนวณมาจำลอง แล้วปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของสายอากาศ 4 พารามิเตอร์ คือ คุณสมบัติของวัสดุที่สร้างสายอากาศ (Antenna's material) ความหนาของสายอากาศ (Antenna's thickness) ระยะห่างระหว่างจุดป้อนสายอากาศ (Feeding separation) และความยาวของสายอากาศ (Antenna's length) โดยแต่ละพารามิเตอร์มีรายละเอียดการศึกษา ดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติของวัสดุที่สร้างสายอากาศ เป็นการศึกษาการปรับเปลี่ยนความนำ (Conductivity) ของวัสดุที่จะใช้สร้างสายอากาศที่ส่งผลต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) โดยกำหนดให้ความยาวของสายอากาศเป็นตัวแปรคงที่ การศึกษานี้เป็นตัวกำหนดวัสดุที่จะใช้สร้างสายอากาศ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนระหว่าง เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง และทองเหลือง คุณสมบัติของวัสดุที่สร้างสายอากาศนี้ จะสัมพันธ์กับราคาและน้ำหนักของสายอากาศด้วยเช่นกัน
2. ความหนาของสายอากาศ เป็นการศึกษาการปรับเปลี่ยนความหนาของสายอากาศที่ส่งผลต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) โดยกำหนดให้ความยาวของสายอากาศเป็นตัวแปรคงที่ การศึกษานี้พิจารณาความแตกต่างระหว่างท่อที่ความหนาต่างๆ สอดคล้องกับขนาดของท่อที่มีขายตามท้องตลาด
3. ระยะห่างระหว่างจุดป้อนสายอากาศ เป็นการศึกษาการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างจุดป้อนของสายอากาศที่ส่งผลต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) โดยกำหนดให้ความยาวและความหนาของสายอากาศเป็นตัวแปรคงที่
4. ความยาวของสายอากาศ เป็นการศึกษาการปรับเปลี่ยนความยาวของสายอากาศที่ส่งผลต่อค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศ ( $S_{11}$ ) โดยกำหนดให้ความหนาและระยะห่างระหว่างจุดป้อนของสายอากาศเป็นตัวแปรคงที่

ผลการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่สร้างสายอากาศ เมื่อปรับเปลี่ยนความนำของวัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศ โดยเปลี่ยนประเภทของโลหะตัวนำในแบบจำลอง ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของโลหะตัวนำที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด การเปลี่ยนประเภทโลหะตัวนำ แบ่งออกเป็น 4 ชนิด คือ เหล็ก อลูมิเนียม ทองเหลือง

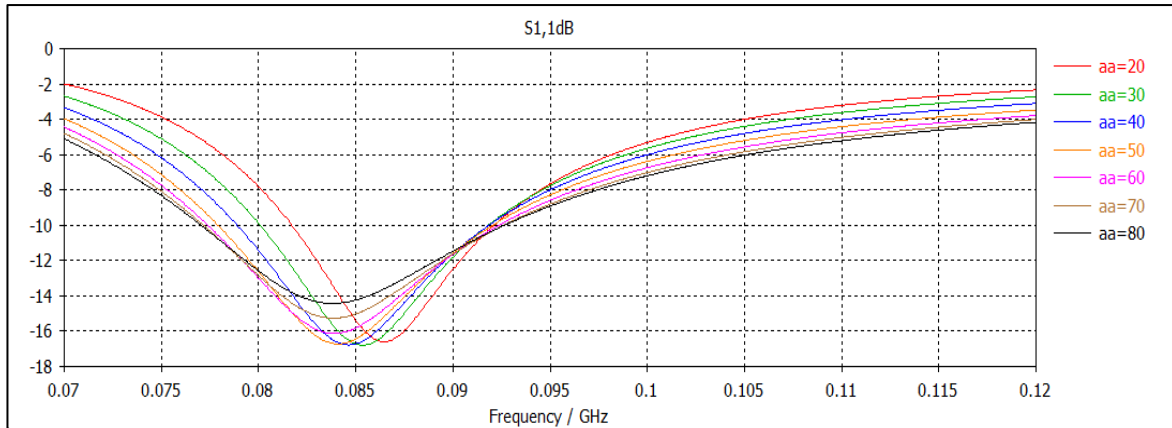
และทองแดง เปรียบเทียบกับตัวนำสมบูรณ์ (Perfect electric conductance: PEC) ผลการเปรียบเทียบดัง  
แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับเปลี่ยนประเภทของโลหะตัวนำ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าการเปลี่ยนประเภทของโลหะตัวนำ โดยกำหนดให้ขนาดของสายอากาศคงที่ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ  $S_{11} < -10$  dB เกิดขึ้น ณ ความถี่เดียวกันทุกประเภทของโลหะตัวนำและมีค่าเท่ากัน ดังนั้นการเลือกใช้วัสดุในการสร้างสายอากาศ จึงต้องอาศัยปัจจัยอื่นมาร่วมพิจารณาในการเลือกใช้วัสดุที่จะสร้างสายอากาศ เช่น ราคา การทนทานต่อสภาพแวดล้อม และน้ำหนัก เป็นต้น

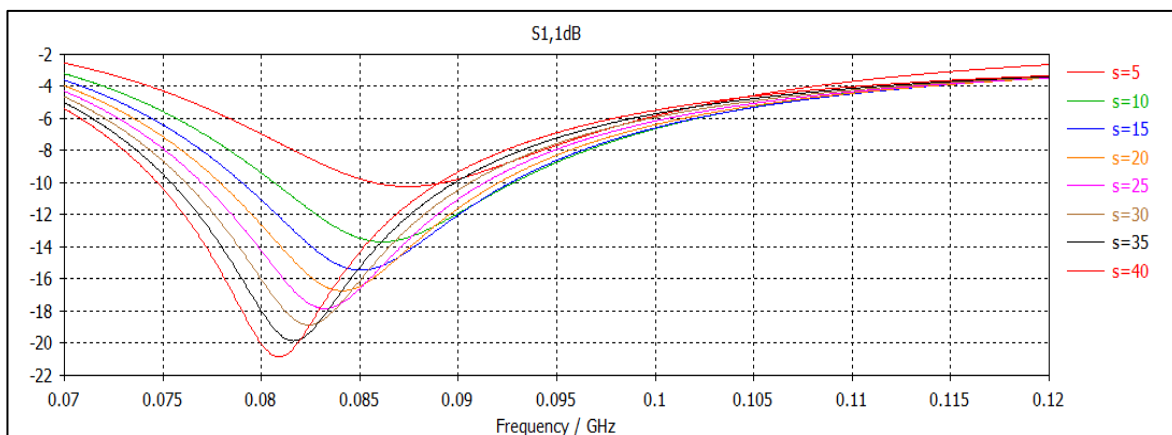
ผลการศึกษาความหนาของสายอากาศ เมื่อปรับความหนาของสายอากาศในช่วงความหนา 20-80 มิลลิเมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 มิลลิเมตร และกำหนดให้ความยาวของสายอากาศเป็นตัวแปรคงที่ ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ความหนาของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.3 พบว่า ค่า  $S_{11}$  เปลี่ยนแปลงไป 1-2 dBm ในช่วงความหนา 20-80 มิลลิเมตร โดยมีแนวโน้มของการเลื่อนของความถี่ไปยังความถี่ต่ำ เมื่อความหนาของสายอากาศเพิ่มขึ้น โดยการเลื่อนของความถี่มีการเปลี่ยนแปลงในระดับของเมกกะเฮิรตซ์

ผลการศึกษาระยะห่างระหว่างจุดป้อนของสายอากาศ เมื่อปรับระยะห่างระหว่างจุดป้อนของสายอากาศ ในช่วง 5-40 มิลลิเมตร โดยเพิ่มระยะห่างครั้งละ 5 มิลลิเมตร และกำหนดให้ความยาวและความหนาของสายอากาศคงที่ ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.4

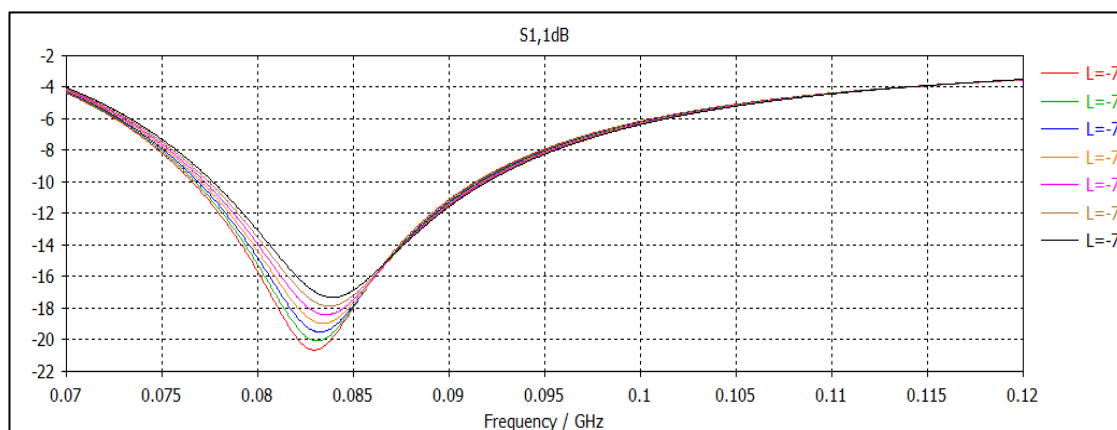


รูปที่ 4.4 ผลการจำลอง S11 เมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างจุดป้อนของสายอากาศ



จากรูปที่ 4.4 พบว่าค่า  $S_{11}$  ที่ต่ำสุดที่ได้จากแต่ละระยะห่างของจุดบ่อนของสายอากาศ จะมีการเลื่อนของความถี่ไปยังความถี่ต่ำกว่า และค่า  $S_{11}$  ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน

ผลการศึกษาความยาวของสายอากาศ เมื่อปรับความยาวของสายอากาศ ในช่วง 757.5-772.5 มิลลิเมตร โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 2.5 มิลลิเมตร เพื่อดูแนวโน้มค่า  $S_{11}$  ในกรณีความยาวของสายอากาศมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย โดยกำหนดให้ความหนาและระยะห่างระหว่างจุดบ่อนของสายอากาศเป็นตัวแปรคงที่ ผลการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการจำลอง  $S_{11}$  เมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ความยาวของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.5 พบว่า การเปลี่ยนความยาวของสายอากาศในระดับเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของสายอากาศ จะส่งผลให้  $S_{11}$  มีการเลื่อนของความถี่น้อยมาก แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงของขนาด  $S_{11}$

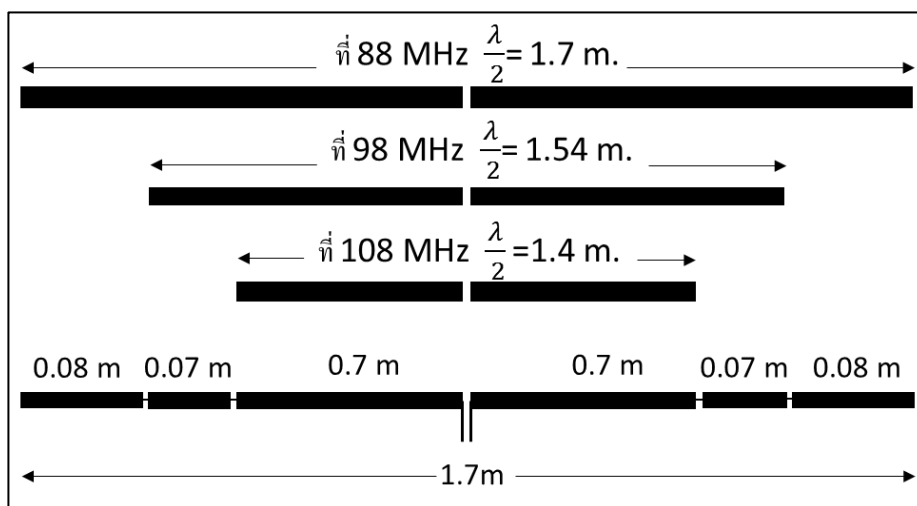
#### 4.1.2.3 ผลการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศด้วยอุปกรณ์สวิตซ์ทางกลและทางไฟฟ้า

สายอากาศที่ได้จากการจำลองจะถูกนำมาสร้างและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ วิธีการสร้างและการทดสอบสายอากาศ มีรายละเอียดแสดงเป็นลำดับขั้นตอน

การสร้างสายอากาศ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือกใช้วัสดุที่ใช้สร้างสายอากาศที่ได้จากการจำลอง ซึ่งในที่นี้เลือกใช้โลหะทองเหลือง
2. ตัดท่อทองเหลืองตามขนาดความยาวที่ได้จากจำลองมาคือ 70 cm 2 ท่อน 7 cm 2 ท่อน 8 cm 2 ท่อน
3. สร้างฐานยึดสายอากาศด้วยท่อพีวีซี สูง 50 cm ยาว 200 cm
4. นำท่อทองเหลืองที่ตัดไว้มายึดติดกับฐานด้วยสายเอ็น เพื่อให้รูปร่างของสายอากาศคงที่
5. ต่อสายนำสัญญาณแกนร่วม (Coaxial cable) เข้ากับท่อทองเหลือง โดยให้ตัวนำภายใน (Inner conductor) และตัวนำภายนอก (Outer conductor) ต่ออยู่คนละด้านของแกนสายอากาศไดโพล โดยระยะห่างระหว่างจุดบ่อนกำหนดตามผลที่ได้จากการจำลอง
6. เชื่อมต่อสายอากาศ โดยแบ่งการเชื่อมต่อเป็น 2 แบบ คือ การเชื่อมต่อด้วยอุปกรณ์สวิตซ์ทางไฟฟ้า (ไดโอด) และการเชื่อมต่อด้วยอุปกรณ์สวิตซ์เชิงกล

ในการสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ที่ 3 ความถี่ คือ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz จะตัดแบ่งความยาวของสายอากาศออกเป็น 3 ช่วงความยาว ที่สอดคล้องกับความถี่ใช้งาน แล้วใช้อุปกรณ์สวิตซ์เป็นตัวเชื่อม โดยแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ การเชื่อมต่อด้วยสวิตซ์เชิงกลและสวิตซ์ทางไฟฟ้า ซึ่งการสร้างสายอากาศ อาศัยโครงสร้างความยาวของแต่ละส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปขั้นตอนการสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ดังแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.6 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศที่จะใช้สร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

ตารางที่ 4.4 ขั้นตอนการสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

	
<p>ขนาดสายอากาศที่จำลองในโปรแกรม</p>	<p>ฐานยึดสายอากาศ</p>
	
<p>จุดป้อนสัญญาณของสายนำสัญญาณแกนร่วม</p>	<p>เชื่อมต่อด้วยสวิตซ์ทางไฟฟ้า</p>
	
<p>สายป้อนสัญญาณไฟตรงให้ไดโอด</p>	<p>การเชื่อมต่อด้วยสวิตซ์ทางกล</p>

ในการสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ได้ทำการสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ 2 สายอากาศ คือ สายอากาศที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์สวิทช์เชิงกลและสายอากาศที่เชื่อมต่อกับสวิทช์ทางไฟฟ้า ขณะเดียวกัน ก็ได้สร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่แบบ Manual เพื่อใช้เป็นสายอากาศเปรียบเทียบ สายอากาศประเภทนี้ จะใช้การบัดกรีรอยต่อโดยตรงเมื่อต้องการเพิ่มความยาว ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจผลการทดลอง ในที่นี้ จะได้แสดงนิยามของของคำย่อที่แสดงในกราฟผลการทดลองในหัวข้อถัดไป ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 นิยามของคำย่อที่ใช้แสดงผลการทดลอง

Type	Junction	Abbreviation
Continuous	None	C
Fractional Direct with Lead	Lead	FL
Fractional Direct with Diode	Diode	RE
Fractional Direct with Mechanic	Mechanic Switch	RM

ความยาวของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่แต่ละความถี่ สามารถพิจารณาได้เป็น 2 ความยาว คือ ความยาวทางกายภาพ (Physical Length) และความยาวทางไฟฟ้า (Electrical Length) ซึ่งความยาวของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่แต่ละความถี่ แสดงในตารางที่ 4.6

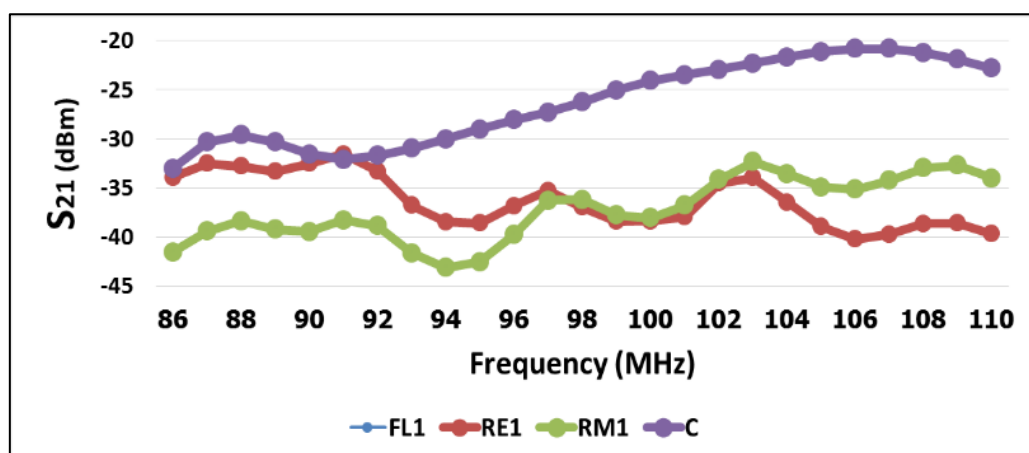
ตารางที่ 4.6 ความยาวทางกายภาพและความยาวทางไฟฟ้าของสายอากาศที่แต่ละความถี่

ความถี่ (MHz)	ความยาวทางกายภาพ (m)	ความยาวทางไฟฟ้า (m)
88	1.70	1.70
98	1.70	1.37
108	1.70	1.17

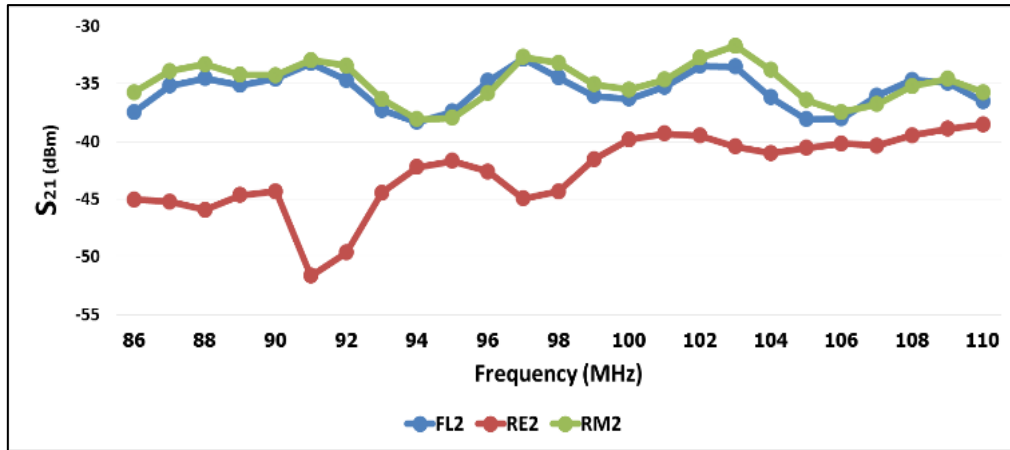
## การทดสอบ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เตรียมอุปกรณ์ทดสอบ ได้แก่ สายอากาศมาตรฐาน สายอากาศที่ต้องการทดสอบ เครื่องสเปกตรัมแอนาไลเซอร์ (Spectrum analyzer) และเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator)
2. จัดตั้งระบบการวัด กำหนดให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่ได้จากการออกแบบเป็นสายอากาศรับ วางอยู่ในแนวระดับเดียวกับสายอากาศมาตรฐานที่เป็นสายอากาศส่ง เพื่อให้รับกำลังสูงสุด โดยสายอากาศทั้งสองวางห่างกันเป็นระยะมากกว่าระยะสนามระยะไกล (Far-field region) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก สนามระยะไกล =  $2d^2/\lambda$  ทางด้านรับ สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ต่อกับสเปกตรัมแอนาไลเซอร์ ส่วนทางด้านส่ง สายอากาศมาตรฐานต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยกำหนดให้กำลังส่งสูงสุดเท่ากับ 0 dBm ทำการส่งคลื่นความถี่ 3 ความถี่ คือ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz แล้วทำการวัดในช่วงความถี่ 75 - 115 MHz โดยสวิตช์สายอากาศรับเป็น 3 กรณี คือ 1.) ที่ความถี่ 108 MHz ( $\lambda/2 = 140$  cm) 2.) ที่ความถี่ 98 MHz ( $\lambda/2 = 154$  cm) 3.) ความถี่ 88 MHz ( $\lambda/2 = 170$  cm) ด้วยการใช้สวิตช์ทางไฟฟ้าและทางกล
3. บันทึกค่าผลการทดลองที่ได้ และวิเคราะห์ความแตกต่างผลการการวัดที่ได้ระหว่างการใชสวิตช์เชิงไฟฟ้าและสวิตช์เชิงกล

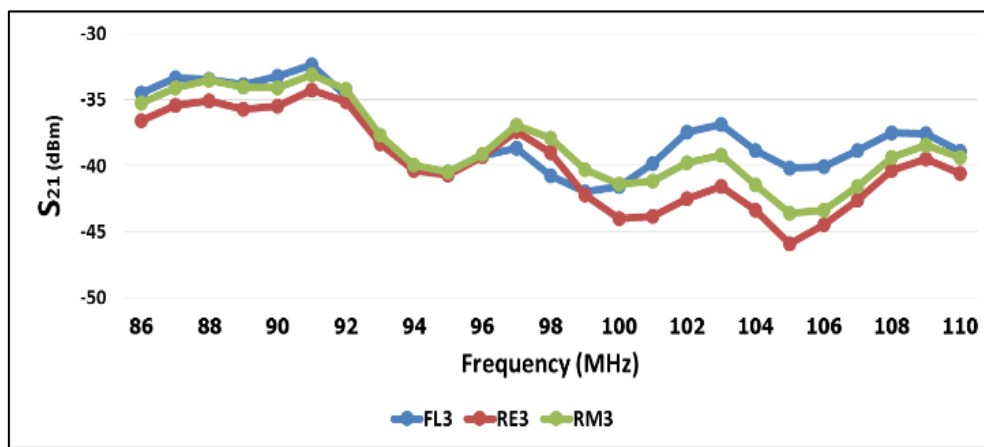
ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ที่ส่งผลการการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เมื่อจัดตั้งระบบการทดลองเรียบร้อยแล้ว จะทำการปรับเปลี่ยนความถี่ 3 ความถี่ คือ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้จากสายอากาศแต่ละประเภท ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เมื่อสวิตช์ที่ความถี่ 108 MHz



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เมื่อสวิตซ์ที่ความถี่ 98 MHz



รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เมื่อสวิตซ์ที่ความถี่ 88 MHz

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.7 เมื่อสวิตซ์ที่ความถี่ 108 MHz พบว่าค่า  $S_{21}$  ที่วัดได้จากสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ FL1 กับ C มีค่าเท่ากัน เนื่องจากรูปร่างทางกายภาพและทางไฟฟ้าเหมือนกัน โดยค่า  $S_{21}$  มากสุดเท่ากับ  $-20.83$  dBm ที่ความถี่ 107 MHz ขณะที่สายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ RE1 ให้ค่า  $S_{21}$  ที่มากที่สุดเท่ากับ  $-31.55$  dBm ที่ความถี่ 91 MHz ส่วนสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ RM1 ให้ค่า  $S_{21}$  ที่มากที่สุดเท่ากับ  $-32.32$  dBm ที่ความถี่ 103 MHz ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ 108 MHz การเชื่อมต่อแบบ FL1 C และ RM1 ทำงานได้ดีในช่วงความถี่นี้ ประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อทั้งสามแบบ มีลำดับดังนี้  $FL1 = C > RM1 > RE1$

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 เมื่อสวิตช์ที่ความถี่ 98 MHz พบว่าค่า  $S_{21}$  ที่วัดได้จากสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ FL2 ให้ค่า  $S_{21}$  ที่มากที่สุดเท่ากับ -32.83 dBm ที่ความถี่ 97 MHz ขณะที่สายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ RE2 ให้ค่า  $S_{21}$  ที่มากที่สุดเท่ากับ -36.54 dBm ที่ความถี่ 110 MHz ส่วนสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ RM2 ให้ค่า  $S_{21}$  ที่มากที่สุดเท่ากับ -31.72 dBm ที่ความถี่ 103 MHz โดยการเชื่อมต่อแบบ FL2 กับ RM2 มีผลคล้ายกัน ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ 98 MHz การเชื่อมต่อแบบ FL2 และ RM2 ทำงานได้ดีในช่วงความถี่นี้ ประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อทั้งสามแบบ มีลำดับดัง FL2 = RM2 > RE2

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.9 เมื่อสวิตช์ที่ความถี่ 88 MHz พบว่าค่า  $S_{21}$  ที่วัดได้จากสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ FL3 ให้ค่า  $S_{21}$  ที่มากที่สุดเท่ากับ -32.32 dBm ที่ความถี่ 91 MHz ขณะที่สายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ RE3 ให้ค่า  $S_{21}$  ที่มากที่สุดเท่ากับ -34.25 dBm ที่ความถี่ 91 MHz ส่วนสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ RM3 ให้ค่า  $S_{21}$  ที่มากที่สุดเท่ากับ -33.12 dBm ที่ความถี่ 91 MHz ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ 88 MHz การเชื่อมต่อแบบ FL3 RE3 และ RM3 ทำงานได้ใกล้เคียงกันในช่วงความถี่นี้

จากผลการทดสอบการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ พบว่าสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ FL มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่า สายอากาศที่มีการเชื่อมต่อแบบ RM และ RE แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยพิจารณาสวิตช์เชิงกลและทางไฟฟ้า พบว่าการเชื่อมต่อด้วยการใช้สวิตช์เชิงกล RM จะมีประสิทธิภาพของสายอากาศที่ดีกว่าการใช้สวิตช์ทางไฟฟ้า RE ซึ่งสาเหตุหลักน่าจะเกิดจากระยะห่างระหว่างรอยต่อ และการสูญเสียบริเวณรอยต่อทำให้กระแสหรือคลื่นเดินทางไม่ต่อเนื่องทำให้คลื่นสะท้อนกลับหรือเบี่ยงเบนที่บริเวณรอยต่อ

#### 4.1.2.4 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยของอุปกรณ์สวิตช์ที่ส่งผลต่อการทำงานของสายอากาศ

วิเคราะห์ผลกระทบของอุปกรณ์สวิตช์ที่มีต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศจากผลการทดลองในหัวข้อ 0 โดยพิจารณาค่า  $S_{21}$  ที่สัมพันธ์กับความถี่ แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการใช้สวิตช์ทางไฟฟ้าและสวิตช์เชิงกล เพื่อประเมินสวิตช์แต่ละแบบ สำหรับใช้เป็นตัวเลือก ข้อควรระวัง หรือแนวทางสำหรับการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ให้สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ

จากผลการทดสอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ในหัวข้อก่อนหน้า เพื่อศึกษาการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศ โดยสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่มีการเชื่อมต่อ 3 แบบ คือ สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่แบบ Manual สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่เชื่อมต่อกับสวิตช์ทางไฟฟ้า (ไดโอด) และสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่เชื่อมต่อกับสวิตช์เชิงกล พบว่าที่ความถี่ 88 MHz การเชื่อมต่อทั้ง 3 แบบ มีประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกัน โดยผลต่างของค่าขนาด  $S_{21}$  ระหว่างการเชื่อมต่อแบบ Manual กับการเชื่อมต่อกับสวิตช์เชิงกลและสวิตช์เชิงไฟฟ้า เท่ากับ 0.04 และ 1.6 dB ตามลำดับ ที่ความถี่ 98 MHz การเชื่อมต่อแบบ Manual และการเชื่อมต่อกับสวิตช์ทางกล มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยผลต่างของค่าขนาด  $S_{21}$  ระหว่างการเชื่อมต่อแบบ Manual กับการเชื่อมต่อกับสวิตช์เชิงกลและสวิตช์เชิงไฟฟ้า เท่ากับ 1.27 และ 9.85 dB ตามลำดับ ที่ความถี่ 108 MHz การเชื่อมต่อกับสวิตช์เชิงกลมีประสิทธิภาพดีกว่าการเชื่อมต่อกับสวิตช์ทางไฟฟ้าประมาณ 5.6 dB ซึ่งจากการทดสอบทั้ง 3 กรณี พบว่าการใช้สวิตช์เชิงกลให้ประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่ดีกว่าการใช้สวิตช์ทางไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์สาเหตุความแตกต่างของประสิทธิภาพการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่เมื่อใช้สวิตช์ทางกลและสวิตช์ทางไฟฟ้า โดยพิจารณาในแง่ของความสูญเสีย (Insertion loss) ที่เกิดจากตัวอุปกรณ์สวิตช์ที่แตกต่างกัน สันนิษฐานเบื้องต้น คาดว่าเพราะการใช้สวิตช์ทางไฟฟ้า อาจเป็นเหตุให้เกิดปัญหา 4 ประการ คือ

1. การไบอัสไฟกระแสดตรง เพื่อให้ไดโอดทำงาน ทำให้ต้องมีการออกแบบวงจรป้องกันไฟกระแสดตรงไม่ให้รบกวนกับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ
2. ขนาดของไดโอดที่จะเลือกใช้ อาจทำให้เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อที่เพิ่มขึ้น
3. อิมพีแดนซ์ของไดโอด อาจก่อให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างสายอากาศและอุปกรณ์สวิตช์ ขณะเดียวกัน สวิตช์ทางกลอาจเป็นเหตุให้เกิดความสูญเสียจากบริเวณรอยต่อของการเชื่อมอุปกรณ์สวิตช์และสายอากาศ ดังนั้นอุปกรณ์สวิตช์เชิงกลน่าจะเป็น



เหตุให้เกิดการสูญเสียน้อยกว่าการใช้อุปกรณ์สวิตซ์ทางไฟฟ้า แต่อุปกรณ์สวิตซ์ทางไฟฟ้าช่วยให้การปรับเปลี่ยนความถี่ ทำได้ง่ายกว่าการสวิตซ์เชิงกล

4. ควรคำนึงถึงบาลัันที่จะส่งผลต่อการแมตซ์ซึ่งระหว่างสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมและสายอากาศไดโพล

## 4.2 ผลการกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ (Reconfigurable Antenna System Specification)

### 4.2.1 การกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้

การกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ถือได้ว่าเป็นการกำหนดเป้าหมายในการออกแบบระบบสายอากาศสำหรับใช้งานร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด ซึ่งคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับการส่งคลื่นวิทยุ ประกอบด้วย ช่วงความถี่ (Bandwidth) กำลังด้านเข้า (Input Power) อัตราขยาย (Gain) น้ำหนัก (Weight) ขนาด (Size) การโพลาไรเซชัน (Polarization) อัตราการเกิดคลื่นนิ่ง (VSWR) โดยมีกระบวนการกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศ ดังต่อไปนี้

1. การกำหนดช่วงความถี่ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ สำหรับการใช้งานร่วมกับระบบรู้คิด เพื่อดำเนินกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคม ซึ่งต้องคำนึงถึงสถานะการใช้คลื่นความถี่วิทยุในปัจจุบัน และแผนการกำหนดและจัดสรรคลื่นความถี่ของสำนักงาน กสทช. เป็นสำคัญ ดังนั้น คณะผู้วิจัย จึงต้องศึกษาผลของการกำหนดและจัดสรรคลื่นความถี่ โดยใช้ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ (พ.ศ. 2558) ตามประกาศของสำนักงาน กสทช.
2. กำลังด้านเข้าของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ จัดเป็นตัวแปรที่คณะผู้วิจัยกำลังศึกษาอยู่ และถือเป็นข้อจำกัดของในการออกแบบสายอากาศชนิดนี้ เนื่องจากผลการวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับวิธีการออกแบบและสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่สำหรับการใช้งานในสถานีส่งยังคงมีน้อยมาก อย่างไรก็ตาม คณะผู้วิจัยจะออกแบบให้ระบบสายอากาศมีกำลังด้านเข้า โดยที่สามารถดำเนินการส่งคลื่นในระบะรัศมีที่เหมาะสมในการทำงานร่วมกับระบบวิทยุรู้คิดสำหรับสถานีส่งได้
3. การกำหนดค่าอัตราการเกิดคลื่นนิ่ง (VSWR) ค่าอัตราขยาย (Gain) น้ำหนัก (Weight) ขนาด (Size) และการโพลาไรเซชัน (Polarization) ให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานของสายอากาศ โดยพิจารณาจากผลการสำรวจและศึกษาข้อมูลคุณลักษณะของระบบสายอากาศที่ใช้อยู่จริง

## 4.2.2 ผลการกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ (Reconfigurable Antenna System Specification)

ผลการกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ (1) ผลการกำหนดช่วงความถี่ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ (2) ผลการกำหนดกำลังด้านเข้าของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ และ (3) ผลการกำหนดพารามิเตอร์ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

### 4.2.2.1 ผลการกำหนดช่วงความถี่ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

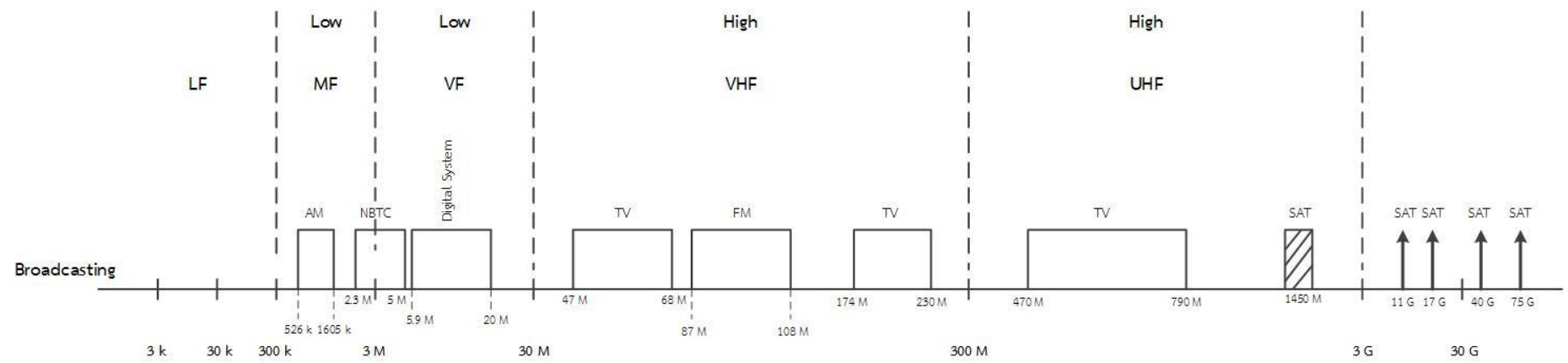
คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสถานะการใช้คลื่นความถี่วิทยุในปัจจุบัน และได้ศึกษาแผนการกำหนดและจัดสรรคลื่นความถี่ จึงตระหนักได้ว่า สำนักงาน กสทช. ซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบหลักในการกำกับและดูแลการใช้งานคลื่นความถี่วิทยุทั้งภายในและการติดต่อระหว่างประเทศ โดยครอบคลุมการดำเนินงานของกิจการจำนวนมาก คณะผู้วิจัยได้รวบรวมกิจการต่างๆที่ปรากฏในตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ (พ.ศ. 2558) ตามประกาศของสำนักงาน กสทช. [63] ซึ่งมีกิจการต่างๆ ดังนี้

1. กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ broadcasting service
2. กิจการกระจายเสียงและโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม broadcasting-satellite service
3. กิจการเคลื่อนที่ mobile service
4. กิจการเคลื่อนที่ทางการบิน aeronautical mobile service
5. กิจการเคลื่อนที่ทางการบินนอกเส้นทางบินพาณิชย์ aeronautical mobile (OR) service
6. กิจการเคลื่อนที่ทางการบินในเส้นทางบินพาณิชย์ aeronautical mobile (R) service
7. กิจการเคลื่อนที่ทางการบินในเส้นทางบินพาณิชย์ ผ่านดาวเทียม aeronautical mobile-satellite (R) service
8. กิจการเคลื่อนที่ทางการบินผ่านดาวเทียม aeronautical mobile-satellite service
9. กิจการเคลื่อนที่ทางทะเล maritime mobile service
10. กิจการเคลื่อนที่ทางทะเลผ่านดาวเทียม maritime mobile-satellite service
11. กิจการเคลื่อนที่ทางบก land mobile service
12. กิจการเคลื่อนที่ทางบกผ่านดาวเทียม land mobile-satellite service
13. กิจการเคลื่อนที่ผ่านดาวเทียม mobile-satellite service
14. กิจการความถี่มาตรฐานและสัญญาณเวลา standard frequency and time signal service

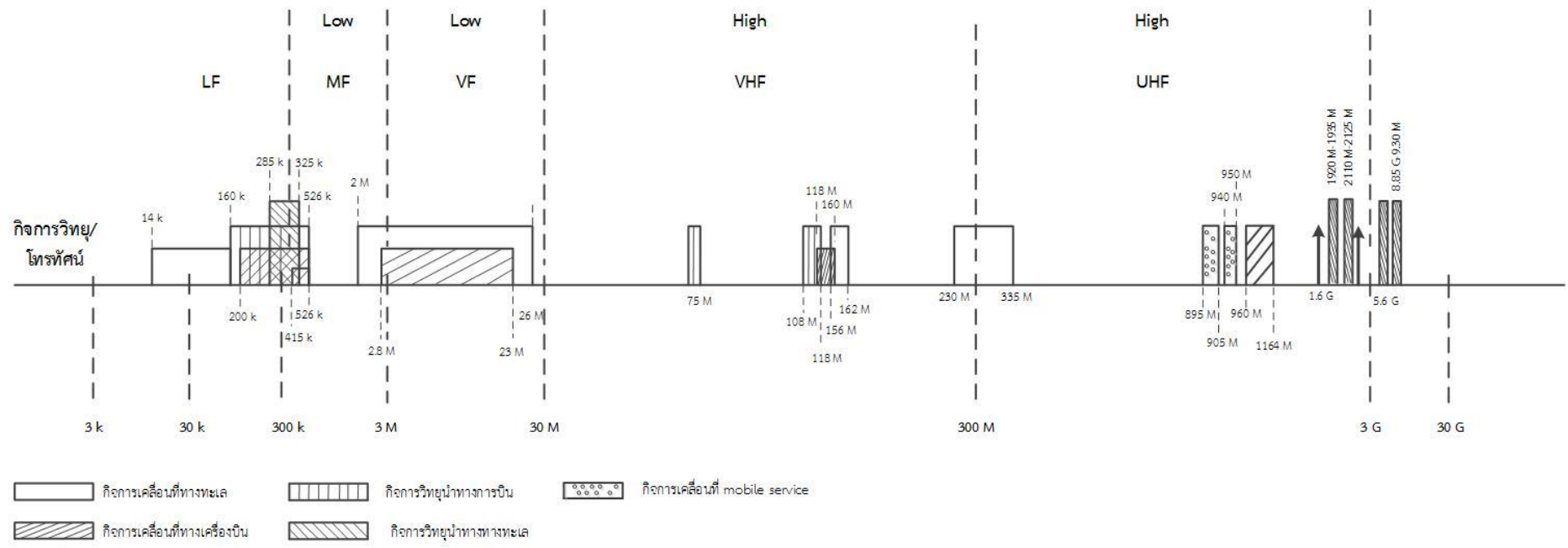
15. กิจการความถี่มาตรฐานและสัญญาณเวลาผ่าน ดาวเทียม standard frequency and time signal satellite service
16. กิจการช่วยอุตุนิยมวิทยา meteorological aids service
17. กิจการปฏิบัติการอวกาศ space operation service
18. กิจการประจำที่ fixed service
19. กิจการประจำที่ผ่านดาวเทียม fixed-satellite service
20. กิจการเพื่อความปลอดภัย safety service
21. กิจการติดต่อระหว่างดาวเทียม inter-satellite service
22. กิจการวิจัยอวกาศ space research service
23. กิจการวิทยดาราศาสตร์ radio astronomy service
24. กิจการวิทยุตรวจการณ์และตรวจค้นหา radiodetermination service
25. กิจการวิทยุตรวจการณ์และตรวจค้นหาผ่าน ดาวเทียม radiodetermination-satellite service
26. กิจการวิทยุนำทาง radionavigation service
27. กิจการวิทยุนำทางผ่านดาวเทียม radionavigation-satellite service
28. กิจการวิทยุนำทางทางการบิน aeronautical radionavigation service
29. กิจการวิทยุนำทางทางการบินผ่านดาวเทียม aeronautical radionavigation-satellite service
30. กิจการวิทยุนำทางทางทะเล maritime radionavigation service
31. กิจการวิทยุนำทางทางทะเลผ่านดาวเทียม maritime radionavigation- satellite service
32. กิจการวิทยุสมัครเล่น amateur service
33. กิจการวิทยุสมัครเล่นผ่านดาวเทียม amateur-satellite service
34. กิจการวิทยุหาตำแหน่ง radiolocation service
35. กิจการวิทยุหาตำแหน่งผ่านดาวเทียม radiolocation-satellite service
36. กิจการสำรวจพิภพผ่านดาวเทียม Earth exploration-satellite service
37. กิจการอุตุนิยมวิทยาผ่านดาวเทียม meteorological-satellite service

การปรับปรุงตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ (2558) มีเป้าหมายหลัก คือ การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจัดสรรคลื่นความถี่เดิม ซึ่งใช้รูปแบบมาก่อนได้ก่อน (First Come, First Serves) [64] และส่งผลกระทบให้ผู้ครอบครองหรือผู้มีสิทธิการใช้คลื่นความถี่วิทยุอื่นๆ แต่เพียงผู้เดียว และมีได้กำหนดเวลาสิ้นสุดไว้ คณะผู้วิจัยได้สรุปเนื้อหาในตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ (พ.ศ. 2558) [63] โดยการจัดเป็นกลุ่มของ

กิจการสำคัญ ซึ่งสามารถสรุปได้แยกเป็น 2 ส่วน คือ ย่านความถี่ของคลื่นวิทยุสำหรับกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ (broadcasting service) และกิจการกระจายเสียงและโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม (broadcasting-satellite service) แสดงในรูปที่ 4.10 และย่านความถี่ของคลื่นวิทยุสำหรับกิจการอื่นๆแสดง ในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.10 ย่านความถี่ของคลื่นวิทยุสำหรับกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ (broadcasting service) และกิจการกระจายเสียงและโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม (broadcasting-satellite service)



รูปที่ 4.11 ย่านความถี่ของคลื่นวิทยุสำหรับกิจการทั้งหมด ยกเว้น กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ (broadcasting service) และกิจการกระจายเสียงและโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม (broadcasting-satellite service)

ผลการสรุปการจัดสรรคลื่นความถี่วิทยุในแต่กิจการตามตารางข้างต้น ทำให้สามารถสรุปอุปสงค์ในแต่ละย่านความถี่ในการดำเนินกิจการ ได้ดังต่อไปนี้

**ย่านความถี่ LF (30-300 kHz) ย่านความถี่ MF (300-3000 kHz) และย่านความถี่ HF (3-30 MHz)** มีการดำเนินกิจการหลายรูปแบบ คือ กิจการทางด้านการสื่อสาร (กิจการเคลื่อนที่ทางทะเล กิจการวิทยุนำทางทางการบิน กิจการเคลื่อนที่ทางการบิน กิจการวิทยุนำทางทางทะเล) และกิจการกระจายเสียงในระบบ AM ถึงแม้ว่าจะมีการใช้งานครอบคลุมหลายกิจการ แต่สถานะการใช้งานในปัจจุบันยังคงมีอุปสงค์ค่อนข้างน้อย

**ย่านความถี่ VHF (30-300 MHz)** มีการดำเนินกิจการหลักๆ คือ กิจการกระจายเสียงในระบบ FM และกิจการโทรทัศน์ รวมทั้งมีการดำเนินกิจการด้านการสื่อสารร่วมด้วย คือ กิจการเคลื่อนที่ทางทะเล กิจการวิทยุนำทางทางการบิน และกิจการเคลื่อนที่ทางการบิน จึงเป็นเหตุให้มีอุปสงค์สูง

**ย่านความถี่ UHF (300-3000 MHz)** มีการดำเนินกิจการหลักๆ คือ กิจการด้านการสื่อสาร ประกอบด้วย กิจการเคลื่อนที่ทางการบิน กิจการวิทยุนำทางทางการบิน กิจการโทรคมนาคม รวมทั้งมีการดำเนินกิจการโทรทัศน์ร่วมด้วย จึงเป็นเหตุให้มีอุปสงค์สูงที่สุด

คณะผู้วิจัยได้ตระหนักถึงย่านความถี่ที่มีอุปสงค์สูง คือ ย่านความถี่ VHF และ UHF จึงขอกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ในส่วนของช่วงความถี่ เพื่อดำเนินกิจการหลัก คือ กิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ (broadcasting service) กิจการเคลื่อนที่ (mobile service) ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.7 ผลการกำหนดช่วงความถี่ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

ลำดับช่วงความถี่	ค่าความถี่ (MHz)	รองรับการใช้งานกิจการ	หมายเหตุ
1	47 – 68	กิจการวิทยุโทรทัศน์	B1
2	87 – 108	กิจการวิทยุกระจายเสียง	B2
3	174 – 230	กิจการวิทยุโทรทัศน์	B3
4	470 – 790	กิจการวิทยุโทรทัศน์	B4
5	895 – 1164	กิจการเคลื่อนที่	C1
6	1920 – 2125	กิจการเคลื่อนที่	C2



#### 4.2.2.2 ผลการกำหนดกำลังด้านเข้าของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

กำลังด้านเข้าของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ นับเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องคำนึงและนำมาพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ ซึ่งโดยปกติแล้วสายอากาศสถานีฐานต้องมีความสามารถในการทนกำลังด้านเข้าได้ไม่ต่ำกว่า 500 วัตต์ ตามข้อกำหนดกำลังส่งของเครื่องส่งวิทยุเอฟเอ็มของ กสทช. ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์สวิตช์ที่จะนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เพื่อปรับเปลี่ยนความถี่จะต้องสามารถทนกำลังได้มากกว่า 500 วัตต์ แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการประยุกต์สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ร่วมกับระบบวิทยุรู้คิด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะกำหนดกำลังที่ใช้ทดสอบ ที่กำลังวัตต์ต่ำกว่าก่อน โดยเลือกทดสอบที่กำลังส่ง 5 วัตต์ (ตามกำลังของเครื่องส่งวิทยุสมัครเล่น) และมุ่งสนใจพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศด้านอื่นเป็นหลัก ได้แก่ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) อัตราขยาย (Gain) โพลาริเซชัน (Polarization) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) เป็นต้น

#### 4.2.2.3 ผลการกำหนดพารามิเตอร์ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

ด้วยผลการกำหนดย่านความถี่ของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ในตารางที่ 4.7 ในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มกิจการกระจายเสียงและโทรทัศน์ และกิจการเคลื่อนที่ จึงจำเป็นต้องศึกษาคุณลักษณะทางเทคนิคของสายอากาศจากผู้ดำเนินกิจการในแต่ละกลุ่มด้วย โดยครอบคลุมพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศ คือ ค่าอัตราการเกิดคลื่นนิ่ง (VSWR) ค่าอัตราขยาย (Gain) น้ำหนัก (Weight) ขนาด (Size) และการโพลาริเซชัน (Polarization)

- **กลุ่มกิจการกระจายเสียงและโทรทัศน์**

ด้วยผลการลงสำรวจพื้นที่จริง เพื่อต้องการศึกษาข้อมูลทางเทคนิคเกี่ยวกับคุณลักษณะของสายอากาศ ทำให้ทราบว่า ส่วนใหญ่ผู้ดำเนินกิจการไม่ได้เก็บข้อมูลทางเทคนิคไว้ หรือไม่ก็หาข้อมูลที่เก็บไว้ได้ยาก เนื่องจากการติดตั้งสายอากาศได้ทำขึ้นเป็นเวลานานมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตาม ผู้ดำเนินกิจการได้ให้คำแนะนำและชี้แจงวิธีการระบุคุณลักษณะของสายอากาศเบื้องต้น ซึ่งสามารถพิจารณาจากลักษณะภายนอกของสายอากาศแล้วนำไปเทียบเคียงกับข้อมูลคุณลักษณะทางเทคนิคจากมาตรฐานของ กสทช. หรือนำไปเทียบเคียงจากข้อมูลจากผู้ผลิตของบริษัท Jampro Antennas [65]

ย่านความถี่ที่ 1 เป็นช่วงความถี่ (47-68 MHz) ซึ่งเป็นข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ Band I มีผลการศึกษาดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ ย่านความถี่ (47-68 MHz) Band I

ชนิด	ชื่อรุ่น	พิกัดกำลังด้านเข้า (kW)	Polarization	VSWR	จำนวนชั้นประกอบ (Bays)		อัตราขยายของสายอากาศ (dB)	
					Min	Max	Min	Max
Dipole Flat Panel	JHD-LV2	~	Horizontal	1.10	1	12	2.0	16.0
	JCPD	~	Circular	1.10	1	12	-1.0	12.96
Batwing	JAT	~	~	~	~	~	~	~

ย่านความถี่ที่ 2 เป็นช่วงความถี่ (88-108 MHz) ซึ่งเป็นข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุกระจายเสียง มีผลการศึกษาดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุกระจายเสียง ระบบ FM ย่านความถี่ (88-108 MHz)

ชนิด	ชื่อรุ่น	พิกัดกำลังด้านเข้า (kW)	Polarization	VSWR	จำนวนชั้นประกอบ (Bays)		อัตราขยายของสายอากาศ (dB)	
					Min	Max	Min	Max
Dipole	JBVP	1.0	Vertical	1.25	1	16	-0.37	12.45
	JLVP	10.0	Vertical	~1.0	1	12	-0.20	11.20
	JLHP	10.0	Horizontal	~1.0	1	12	-0.37	11.20
Circular	JLCP	2.0	Circular	1.50	1	8	-3.37	6.12
	JLLP	4.0	~	~1.0	1	4	-3.23	3.12
	JLCP	4.0	Circular	~1.0	1	12	-3.37	8.20

ย่านความถี่ที่ 3 เป็นช่วงความถี่ (174-230 MHz) ซึ่งเป็นข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ Band I มีผลการศึกษาดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ ย่านความถี่ (174-230 MHz)

Band III

ชนิด	ชื่อรุ่น	พิกัดกำลังด้านเข้า (kW)	Polarization	VSWR	จำนวนชั้นประกอบ (Bays)		อัตราขยายของสายอากาศ (dB)	
					Min	Max	Min	Max
Dipole Flat Panel	JHD-HV2	~	Horizontal	1.1	1	8	0.0	14.2
	JHD-HV4	~	Horizontal		1	8	5.2	17.4
	JHD-HV2	~	Horizontal		1	8	0.97	11.25
	JHD-HV4	~	Horizontal		1	8	3.97	19
	JCPD	~	Circular	1.1	1	12	-1.0	12.96
BATWING	JAT	~	~	~	~	~	~	~
SIDE MOUNT	JVD	20	Vertical	~			0	7.9
SLOT	JSL-V	90	Horizontal Vertical Elliptical	~	~	~	~	~

ย่านความถี่ที่ 4 เป็นช่วงความถี่ (470-790 MHz) และ (895-1164 MHz) ซึ่งเป็นข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ Band IV และ Band V มีผลการศึกษาดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุโทรทัศน์ ย่านความถี่ (470-790 MHz) Band IV และ ย่านความถี่ (895-1164 MHz) Band V

ชนิด	ชื่อรุ่น	พิกัดกำลังด้านเข้า (kW)	Polarization	VSWR	จำนวนชั้นประกอบ (Bays)		อัตราขยายของสายอากาศ (dBd)	
					Min	Max	Min	Max
UHF PANEL	JUED	2.3	Elliptical	1.1	~	~	~	~
	JUHD	2.5	Horizontal	1.1	~	~	~	~
	JVD-U	4.0	Vertical	1.22	4	8	6	9
	JCD-U	4	Circular	1.22	4	8	3	6
SLOT	JL-SS	1.0	~	1.1	~	~	~	7.79
	JA-SS	2.0	Circular	1.1	8	16	9.09	9.09
super turnstile	JAT-U	10.0	Horizontal	1.1	2	8	5	11
LOG- PERIODI C	JLPU	0.2	Horizontal	1.5	-	-	8	8

ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศตามในหัวข้อ 4.1 และด้วยผลการศึกษาข้อมูลทางเทคนิคข้างต้น ทำให้คณะผู้วิจัยกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้กลุ่มย่านความถี่สำหรับกิจการกระจายเสียง คือ สายอากาศที่มีการโพลาริเซชันเป็นแบบ Horizontal มีค่า VSWR ไม่เกิน 1.5 และอัตราขยายไม่น้อยกว่า 6 dBi

● **กลุ่มกิจการเคลื่อนที่**

ด้วยผลการลงสำรวจพื้นที่จริงในหัวข้อ 0 เพื่อต้องการศึกษาข้อมูลทางเทคนิคเกี่ยวกับคุณลักษณะของสายอากาศ ทำให้ทราบว่า ผู้ดำเนินกิจการมีการเก็บข้อมูลทางเทคนิคไว้เป็นอย่างดี จึงง่ายต่อการศึกษาข้อมูล โดยอ้างอิงจาก [66] ซึ่งสามารถสรุปได้เป็น 2 ย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ (895-1164 MHz) และ (1920-2125 MHz) ดังตารางที่ 4.12 และตารางที่ 4.13 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ (895-1164 MHz)

ชื่อรุ่น	พิกัดกำลังด้านเข้า (kW)	Polarization (degrees)	VSWR	3dB Beam width (degrees)		Gain (dBi)
				Horizontal	Vertical	
DX-806-960-65-15i	500	±45	1.40	65	16.0	14.8
DX-806-960-65-15.3i			1.40	65	15.4	15.0
DX-806-960-65-15.5i			1.45	65	14.0	15.2
DX-806-960-65-18i			1.45	65	7.5	17.6
DX-806-960-65-18.2i			1.40	65	7.8	17.7

ตารางที่ 4.13 ข้อมูลคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ (1920-2125 MHz)

ชื่อรุ่น	พิกัดกำลังด้านเข้า (kW)	Polarization (degrees)	VSWR	3dB Beam width (degrees)		Gain (dBi)
				Horizontal	Vertical	
DX-1710-2170-33-21i	300	±45	1.45	33	6.8	20.0
DX-1710-2170-33-18i	500		1.40	65	6.8	17.8
DX-1710-2170-33-19.5i	300		1.45	65	4.6	19.2
DX-1710-2170-33-21i	300		1.45	65	3.7	20.5
DX-1710-2170-90-17i	200		1.50	87	7.5	16.9

ผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศ ตามหัวข้อ 0 และด้วยผลการศึกษาข้อมูลทางเทคนิคข้างต้น ทำให้คณะผู้วิจัยกำหนดคุณลักษณะของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้กลุ่มย่านความถี่สำหรับกิจการเคลื่อนที่ คือ สายอากาศที่มีการโพลาไลเซชันเป็นแบบ  $\pm 45$  องศา มีค่า VSWR ไม่เกิน 1.5 และอัตราขยายไม่น้อยกว่า 10 dBi

### 4.3 ผลการออกแบบและจำลองโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ (A Frequency Reconfigurable Antenna Design and Simulation)

จากข้อมูลการกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่ได้กำหนดในหัวข้อก่อนหน้า เมื่อนำพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศดังกล่าว ได้แก่ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) อิมพีแดนซ์แบนด์วิธ (Impedance bandwidth) อัตราขยาย (Gain) โพลาริเซชัน (Polarization) และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation pattern) มาพิจารณา พบว่าสายอากาศที่สามารถทำงานได้ตรงตามคุณลักษณะที่กำหนดมาข้างต้นอย่างครบถ้วน ต้องอาศัยหลักการหรือเทคนิค 2 หลักการ คือ หลักการสายอากาศเติมเต็ม (Complementary antenna concept) และเทคนิคช่องความถี่แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Band Gap) หลักการแรกมีข้อดี คือ สายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมช่วงความถี่กว้าง มีอัตราขยายสูง มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่คงที่ และสมมาตรทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ขณะที่เทคนิคที่สอง จะถูกนำมาสร้างเป็นระนาบกราวด์ชนิดพิเศษ ที่ใช้สำหรับการสะท้อนคลื่น เพื่อให้สายอากาศสามารถทำงานในโหมดเรโซแนนซ์ที่สูงขึ้น (Higher resonance mode) เพื่อครอบคลุมย่านความถี่ที่มากขึ้น

#### 4.3.1 การออกแบบและจำลองโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

ขั้นตอนการออกแบบและการจำลองสายอากาศจะมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

1. ออกแบบสายอากาศอิลิเมนต์เดี่ยวที่ทำงานครอบคลุมเฉพาะช่วงความถี่สำหรับแต่ละกิจการก่อน
2. จำลองการทำงานของสายอากาศ เพื่อดูค่า VSWR อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
3. นำโครงสร้างสายอากาศหลายอิลิเมนต์ ซึ่งแต่ละอิลิเมนต์ทำงานคนละช่วงความถี่ มาจำลองการทำงานร่วมกัน
4. ออกแบบรูปแบบการสวิตช์ปรับความถี่ จากพารามิเตอร์โครงสร้างร่วมกันของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ เพื่อสวิตช์เลือกย่านความถี่ ด้วยการสวิตช์เลือกอิลิเมนต์ที่ต้องการให้ทำงาน
5. จำลองการทำงานของสายอากาศสวิตช์ความถี่ โดยพิจารณาการสูญเสียจาก (Insertion loss) ของตัวอุปกรณ์สวิตช์ที่ส่งผลกระทบต่อ ค่า VSWR อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
6. ออกแบบวงจรสวิตช์ควบคุมการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่
7. ประกอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ร่วมกับวงจรควบคุมสวิตช์ เพื่อทดสอบการทำงาน

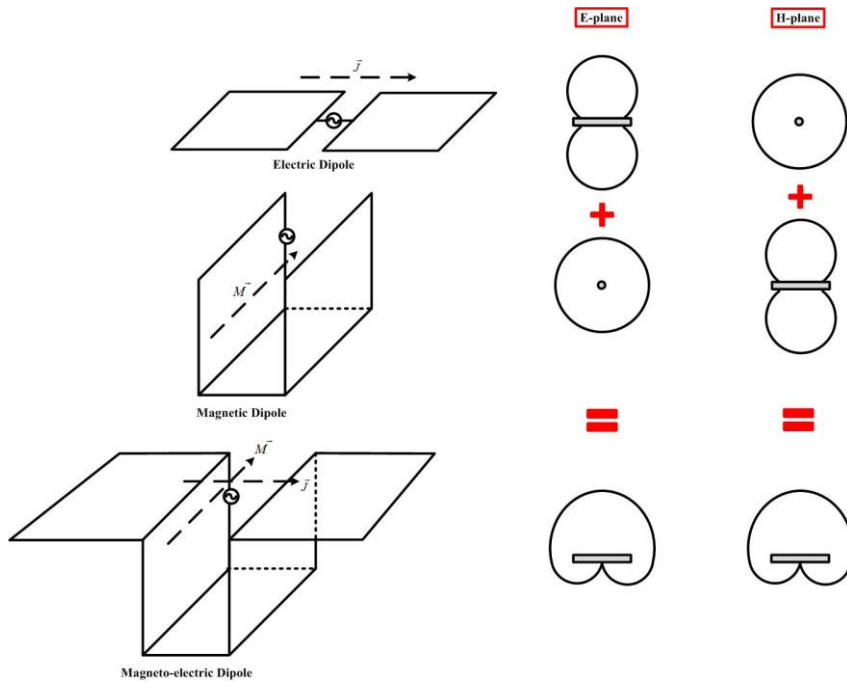
#### 4.3.2 ผลการออกแบบและจำลองโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

การออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่อาศัยหลักการของสายอากาศแบบคอมพลิเมนทารี (Complementary antenna) ซึ่งมีการนำเสนอครั้งแรกโดย Clavin [68], [69] ข้อดีของสายอากาศประเภทนี้คือ มีความสมมาตรของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีอัตราขยายคงที่ตลอดย่านความถี่ใช้งาน และมีลำคลื่นหลังต่ำ โดยหลักการของสายอากาศแบบคอมพลิเมนทารีได้รับการพัฒนาต่อมาให้มีโครงสร้างที่ง่าย ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศไดโพลไฟฟ้า (electric dipole) และสายอากาศไดโพลแม่เหล็ก (magnetic dipole) ที่ทำงานพร้อมกันในเวลาเดียวกัน โครงสร้างดังกล่าวเรียกว่าสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล (Magneto-electric dipole antenna) นำเสนอโดย Luk และคณะ [70], [71] ต่อมาได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องสำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ [72]-[77] รวมทั้งประยุกต์ใช้สำหรับสายอากาศสถานีฐาน [78], [79]

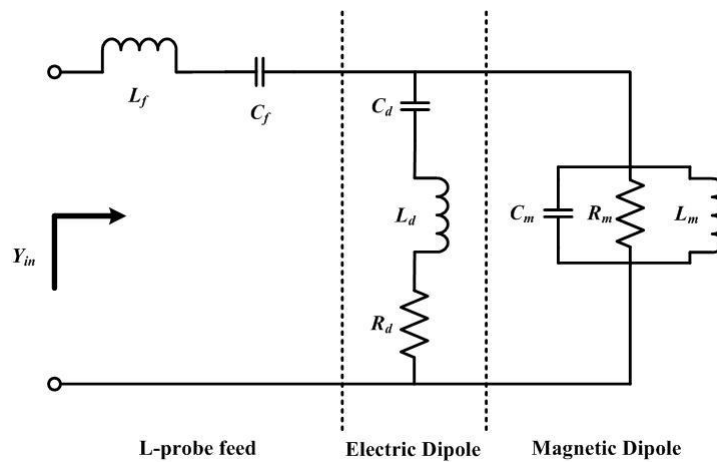
โครงสร้างของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งประกอบด้วยไดโพลระนาบ (planar dipole) ที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศไดโพลไฟฟ้า และแผ่นแพทช์แนวตั้งขนาดหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น (vertical quarter wavelength shorted patch) ที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศไดโพลแม่เหล็ก โดยสายอากาศไดโพลสนามไฟฟ้ามีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลักษณะเป็นรูป 8 และ 0 ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลสนามแม่เหล็กจะมีลักษณะเป็นรูป 0 และ 8 ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ ซึ่งเมื่อโครงสร้างทั้งสองส่วนทำงานร่วมกันจะให้แบบรูปที่สมมาตรกันทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.12 วงจรเสมือน (equivalent circuit) ที่อธิบายการทำงานของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลแสดงในรูปที่ 4.13 โดยที่ตัวป้อนรูปทรงตัว L สามารถอธิบายการทำงานได้ด้วยตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  และตัวเก็บประจุ  $C_f$  วงจรเสมือนของสายอากาศไดโพลไฟฟ้าประกอบด้วย ความต้านทาน  $R_d$  ตัวเหนี่ยวนำ  $L_d$  และตัวเก็บประจุ  $C_d$  เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ขณะที่ตัวต้านทาน  $R_m$  ตัวเหนี่ยวนำ  $L_m$  และตัวเก็บประจุ  $C_m$  เชื่อมต่อกันแบบขนานอธิบายการทำงานของสายอากาศไดโพลแม่เหล็ก จากวงจรเสมือนสามารถคำนวณหาแอดมิตแตนซ์ด้านเข้า (input admittance) ได้จากสมการ

$$Y_{in} = \left[ \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_m} \right] - j \left[ \left( \omega L_d - \frac{1}{\omega C_d} \right) \frac{1}{R_d^2} - \left( \omega C_m - \frac{1}{\omega L_m} \right) \right]. \quad (4.1)$$





รูปที่ 4.12 โครงสร้างและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริก



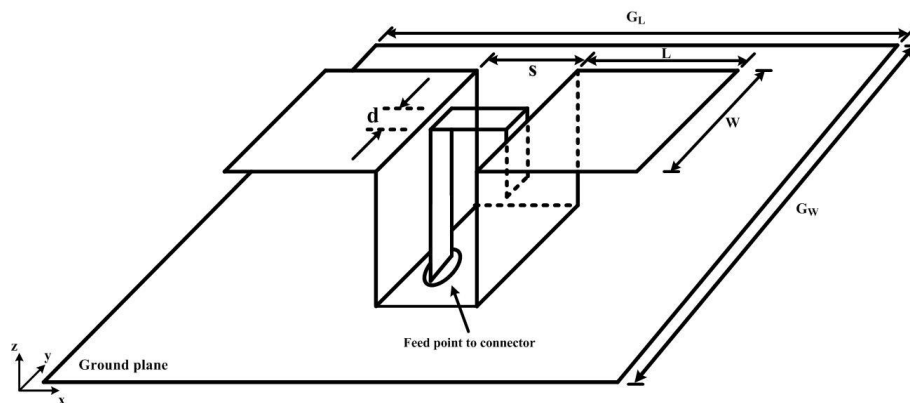
รูปที่ 4.13 วงจรเสมือนของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกที่มีการป้อนด้วยตัว L

#### 4.3.2.1 ขั้นตอนการออกแบบ

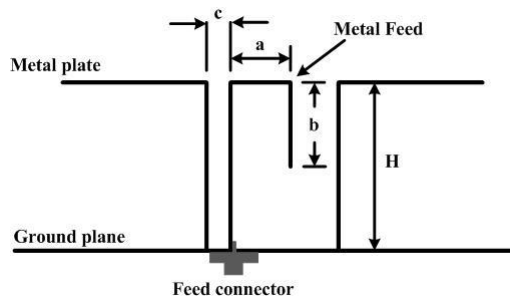
เนื่องจากสายอากาศมีโครงสร้างประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนไดโพลระนาบ ส่วนแผ่นแพทช์ แนวตั้งขนาดหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น และตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  ที่เชื่อมต่อกับคอนเน็กเตอร์ชนิด N-type ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ขั้นตอนการออกแบบ เบื้องต้นจะกำหนดให้สายอากาศดังกล่าวสามารถทำงานครอบคลุม

ย่านความถี่วิทยุกระจายเสียง FM (88 - 108 MHz) ซึ่งขนาดประมาณเบื้องต้นของพารามิเตอร์ 3 พารามิเตอร์ที่คำนวณได้ ประกอบด้วย ความยาว  $L$  ของไดโพลระนาบ ความกว้าง  $W$  ของไดโพลระนาบ และความสูง  $H$  แผ่นแพทช์แนวตั้งขนาดหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 มีขนาดประมาณ  $0.5\lambda_0$  ( $W = 1530$  มิลลิเมตร)  $0.25\lambda_0$  ( $L = 765$  มิลลิเมตร) และ  $0.25\lambda_0$  ( $H = 765$  มิลลิเมตร) ตามลำดับ โดย  $\lambda_0$  เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศ ที่คำนวณจากความถี่กลางที่เลือกใช้ คือ 98 MHz และกำหนดให้ขนาดของระนาบกราวด์ (ground plane) เท่ากับ  $\lambda_0 \times \lambda_0$  ขณะที่โครงสร้างของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  ประกอบด้วย 3 ส่วนตามกลไกการทำงาน คือ ส่วนของสายส่งที่มีคุณลักษณะอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50 \Omega$  ที่ทำหน้าที่เหมือนสายส่งไมโครสตริป ส่วนของตัวเชื่อมต่อสัญญาณที่ตั้งอยู่ในแนวขนานกับระนาบกราวด์ซึ่งเชื่อมต่อกับส่วนแรก และ ส่วนของสตัปปลายเปิด (open stub) เชื่อมต่อกับส่วนที่สอง ทำหน้าที่ปรับจูนค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ค่าขนาดโดยประมาณเบื้องต้นของพารามิเตอร์สายอากาศที่ได้จากการคำนวณ จะถูกนำไปใช้จำลองในโปรแกรมจำลองทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า [80]



(ก) มุมมอง 3 มิติ



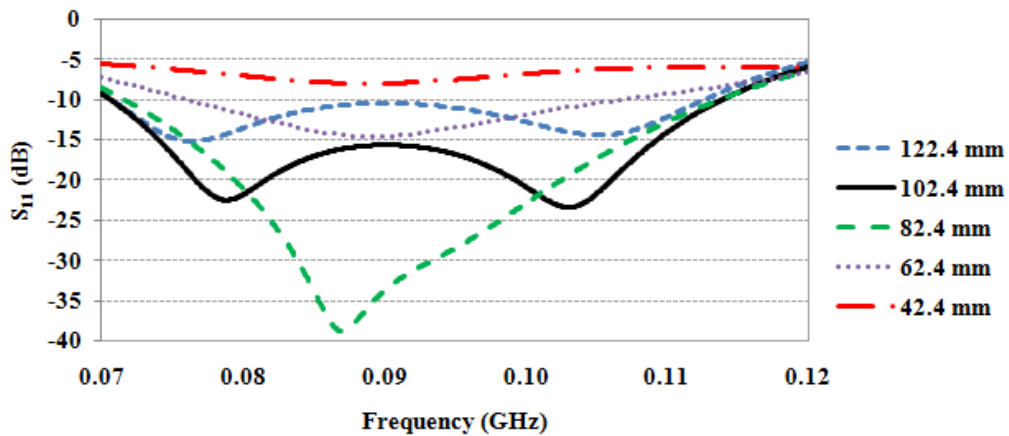
(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 4.14 โครงสร้างสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล

#### 4.3.2.2 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศ

- ความกว้างของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  (d)

พารามิเตอร์แรกที่ทำการศึกษา คือ ขนาดความกว้างของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  ซึ่งโดยปกติแล้ว ความกว้างของตัวป้อนสัญญาณจะเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ส่งผลต่อคุณลักษณะอิมพีแดนซ์โดยตรง ใน การศึกษาจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างในช่วง 42.4 - 122.4 มิลลิเมตร แล้วสังเกตแนวโน้มการ เปลี่ยนแปลงของค่า  $S_{11}$  โดยกำหนดให้คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ที่ต้องการเท่ากับ  $50\Omega$  ผลการศึกษาดังแสดงใน รูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดความกว้างลดลงจาก 122.4 มิลลิเมตร เป็น 102.4 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ค่า  $S_{11}$  ลดลงและความกว้างช่วงความถี่ (frequency bandwidth) เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ที่ความกว้างเท่ากับ 82.4 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ค่า  $S_{11}$  ต่ำกว่า -25 dB มาก อย่างไรก็ตามความกว้างช่วงความถี่ที่ได้จะยิ่งแคบขึ้น ขณะที่ เมื่อความกว้างลดลงต่ำกว่า 82.4 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ค่า  $S_{11}$  เพิ่มขึ้น และค่า  $S_{11}$  จะมากกว่า -10 dB ที่ ขนาดความกว้างเท่ากับ 42.4 มิลลิเมตร

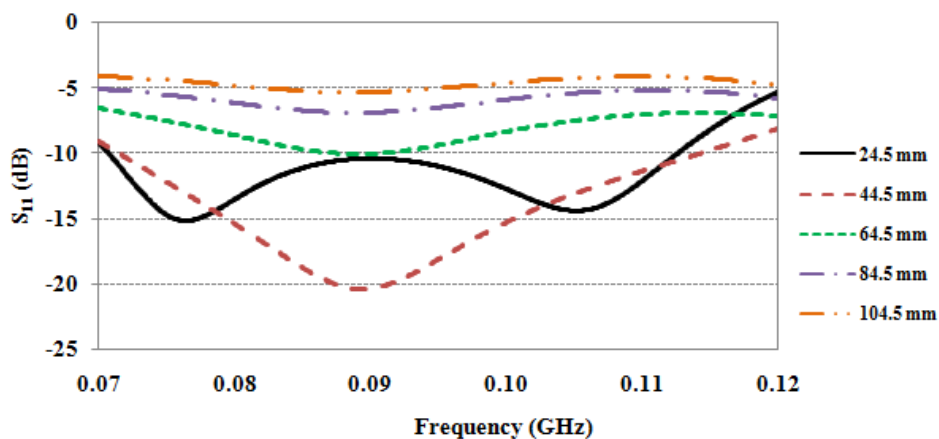


รูปที่ 4.15 ผลกระทบของขนาดความกว้างของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  ต่อค่า  $S_{11}$

- ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านใกล้ (c)

พารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านใกล้ เป็นพารามิเตอร์ที่ กำหนดขนาดความแรงของการเชื่อมต่อร่วมของสัญญาณจากตัวป้อนสัญญาณไปยังไดโพลระนาบด้านใกล้ ใน การศึกษาจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างในช่วง 24.5 - 104.5 มิลลิเมตร แล้วสังเกตแนวโน้มการ เปลี่ยนแปลงของค่า  $S_{11}$  โดยกำหนดให้ความกว้างของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  เท่ากับ 102.4 มิลลิเมตร ผล

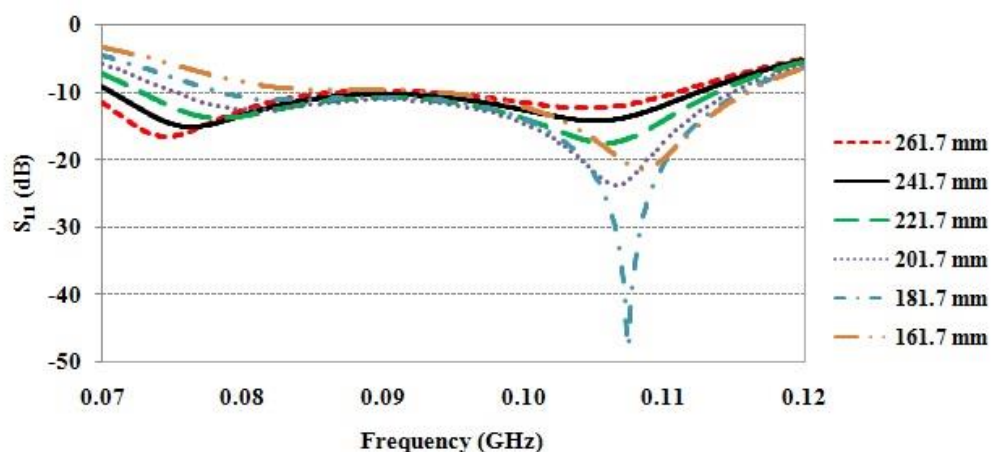
การศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ที่ระยะห่างเท่ากับ 24.5 มิลลิเมตร และ 44.5 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ค่า  $S_{11} < -10$  dB ตลอดช่วงความถี่ 88 - 108 MHz โดยที่ระยะห่างเท่ากับ 2.45 มิลลิเมตร มีความกว้างช่วงความถี่เท่ากับ 41.9 MHz (70.75 - 112.65 MHz) ขณะที่ความกว้างช่วงความถี่เท่ากับ 43 MHz (71.45 - 114.45 MHz) ในกรณีที่มีระยะห่างเท่ากับ 44.5 มิลลิเมตร แต่เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นมากกว่า 44.5 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ค่า  $S_{11} > -10$  dB ตลอดช่วงความถี่ที่ต้องการ



รูปที่ 4.16 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านใกล้ ต่อค่า  $S_{11}$

- ความยาวของส่วนเชื่อมต่อสัญญาณของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  (a)

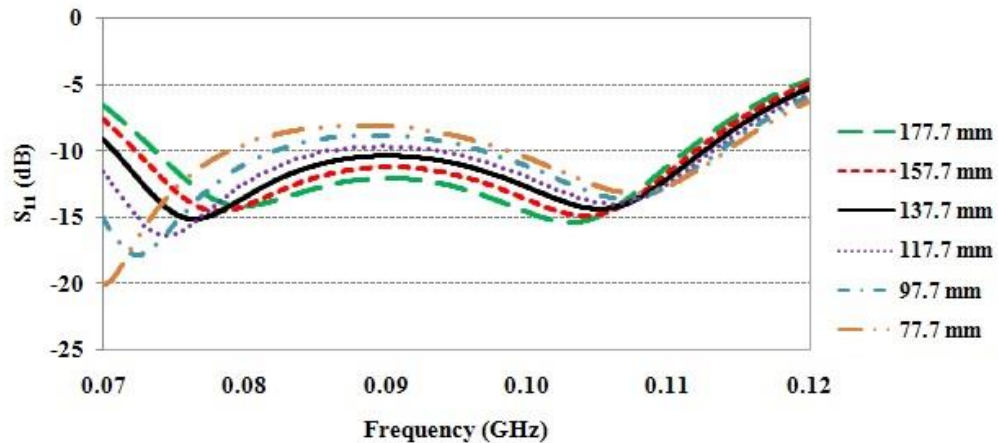
พารามิเตอร์ความยาวของส่วนเชื่อมต่อสัญญาณของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  จะส่งผลโดยตรงต่ออิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วระยะห่างระหว่างจุดป้อนของสายอากาศไดโพลจำเป็นต้องมีขนาดที่ใกล้เคียงกันมากๆ ในการศึกษาจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวในช่วง 161.7 - 261.7 มิลลิเมตร แล้วสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า  $S_{11}$  โดยกำหนดให้ความกว้างของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  เท่ากับ 102.4 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านใกล้ เท่ากับ 24.5 มิลลิเมตร ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่า เมื่อความยาวมีค่าลดลง จะส่งผลให้ค่า  $S_{11}$  ลดลง และขณะเดียวกันก็ทำให้ความกว้างช่วงความถี่เลื่อนไปยังความถี่ที่ต่ำกว่า ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์นี้ เท่ากับ 241.7 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.17 ผลกระทบของความยาวของส่วนเชื่อมต่อสัญญาณของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  ต่อค่า  $S_{11}$

- ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านไกล ( $s-(a+c)$ )

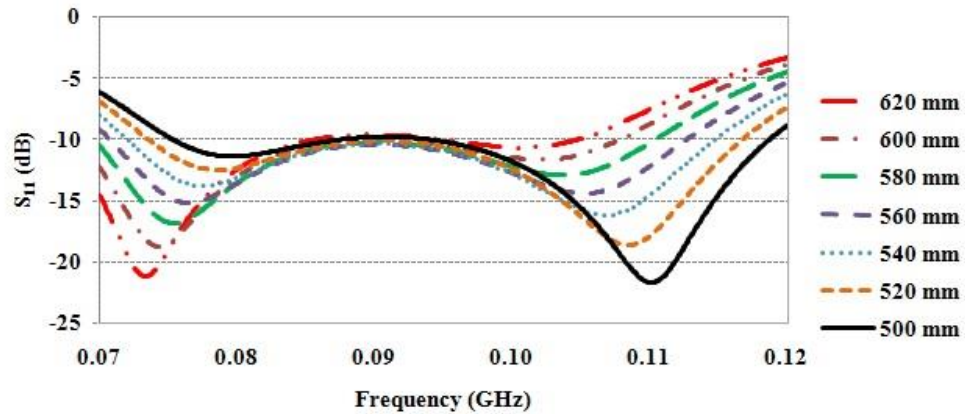
พารามิเตอร์ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านไกล เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดขนาดความแรงของการเชื่อมต่อร่วมของสัญญาณจากตัวป้อนสัญญาณไปยังไดโพลระนาบด้านไกล ในการศึกษาจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างในช่วง 77.7 - 177.7 มิลลิเมตร แล้วสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า  $S_{11}$  โดยกำหนดให้ความกว้างของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  เท่ากับ 102.4 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านไกล เท่ากับ 24.5 มิลลิเมตร และความยาวของส่วนเชื่อมต่อสัญญาณของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  เท่ากับ 241.7 มิลลิเมตร ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า ค่า  $S_{11}$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างลดลง โดยค่าระยะห่างที่เหมาะสมเท่ากับ 137.7 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านไกลต่อค่า  $S_{11}$

- ความยาวของสตัปปลายเปิดของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$

พารามิเตอร์ความยาวของสตัปปลายเปิดของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการปรับจูนเพื่อแมตช์ซึ่งสายอากาศ ในการศึกษาจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างในช่วง 500 - 620 มิลลิเมตร แล้วสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่า  $S_{11}$  โดยกำหนดให้ความกว้างของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  เท่ากับ 102.4 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านใกล้ เท่ากับ 24.5 มิลลิเมตร ความยาวของส่วนเชื่อมต่อสัญญาณของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  เท่ากับ 241.7 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  กับไดโพลระนาบด้านไกล เท่ากับ 137.7 มิลลิเมตร ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่า เมื่อความยาวของสตัปปลายเปิดเท่ากับ 500 มิลลิเมตร จะให้ช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 43.35MHz (75.3 - 118.65 MHz) โดยความถี่มีแนวโน้มเลื่อนไปยังความถี่ต่ำ เมื่อความยาวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าทุกความยาวของสตัปปลายเปิดที่ศึกษา ค่า  $S_{11}$  มีค่าใกล้เคียง -10 dB ในช่วงกลางของช่วงกว้างความถี่

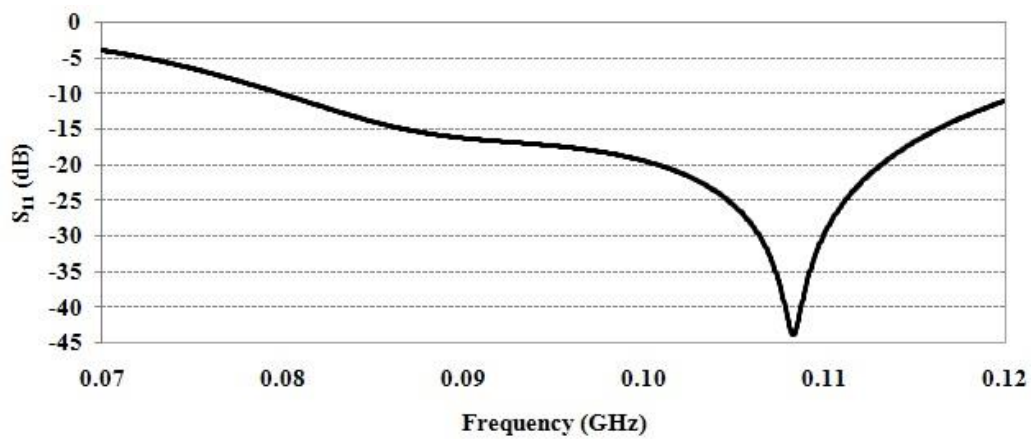


รูปที่ 4.19 ผลกระทบของความยาวของสตัปปลายเปิดของตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  ต่อค่า  $S_{11}$

จากการศึกษาพารามิเตอร์ จะได้ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศดังแสดงในตารางที่ 4.14 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ดังรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าสายอากาศมีความกว้างอิมพีแดนซ์เท่ากับ 40.3 MHz ครอบคลุมช่วงความถี่ 79.7 - 120 MHz. ขณะที่ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $yz$  ที่ความถี่ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz ดังรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าลำคลื่นหลักทั้งสองระนาบมีทิศทางที่มุม  $0^\circ$  ความกว้างครึ่งลำคลื่น (Half power Beamwidth) ในระนาบ  $xz$  ที่ความถี่ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz เท่ากับ  $71.9^\circ$   $73.8^\circ$  และ  $75.4^\circ$  ตามลำดับ ความกว้างครึ่งลำคลื่นในระนาบ  $yz$  ที่ความถี่ 88 MHz 98 MHz และ 108 MHz เท่ากับ  $84.3^\circ$   $85.7^\circ$  และ  $84.3^\circ$  ตามลำดับ และอัตราขยายของสายอากาศตลอดช่วงความถี่ประมาณ 7.7 dBi

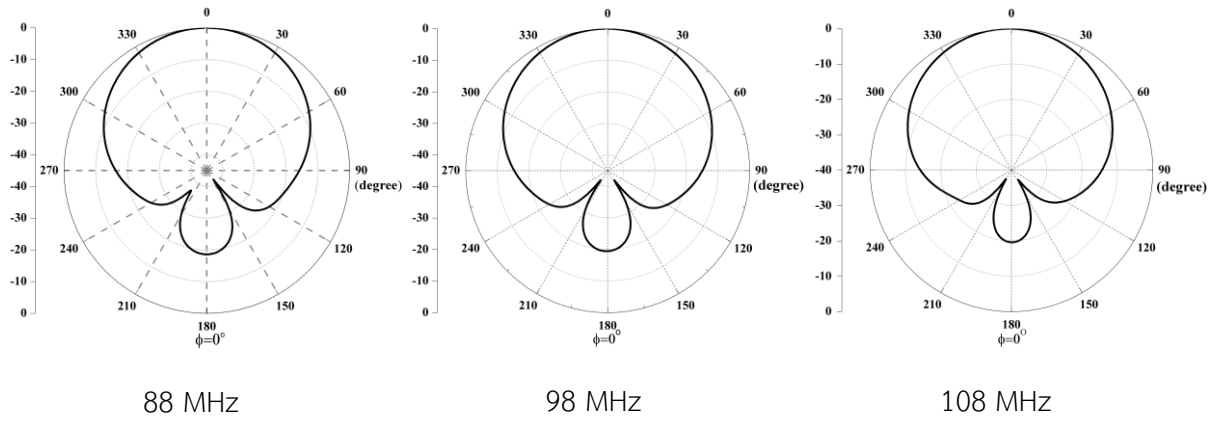
ตารางที่ 4.14 ค่าขนาดที่เหมาะสมของพารามิเตอร์โครงสร้างสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
<i>A</i>	241.7 ( $0.08 \lambda_0$ )	<i>H</i>	765 ( $0.25 \lambda_0$ )
<i>B</i>	500 ( $0.16 \lambda_0$ )	<i>W</i>	1440 ( $0.47 \lambda_0$ )
<i>C</i>	24.5 ( $0.008 \lambda_0$ )	<i>L</i>	645 ( $0.21 \lambda_0$ )
<i>D</i>	102.4 ( $0.03 \lambda_0$ )	$G_W$	3410 ( $\lambda_0$ )
$s-(c+a)$	137.7 ( $0.045 \lambda_0$ )	$G_L$	3410 ( $\lambda_0$ )

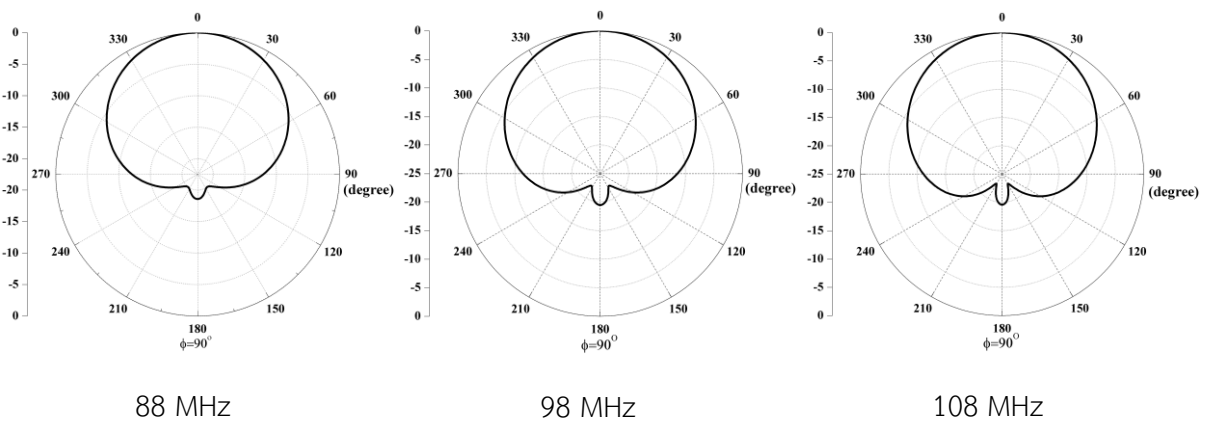


รูปที่ 4.20 ผลการจำลอง  $S_{11}$





(ก) ระนาบ xz



(ข) ระนาบ yz

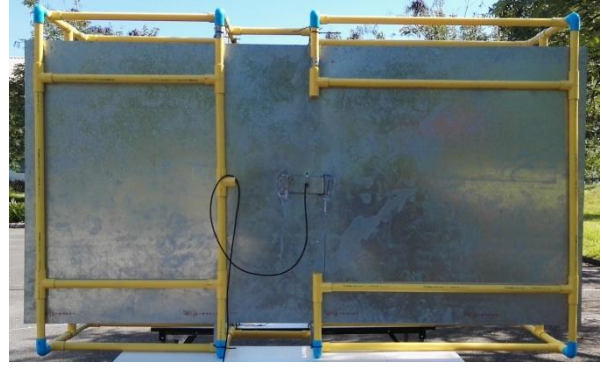
รูปที่ 4.21 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

#### 4.3.2.3 ผลการสร้างและทดสอบสายอากาศ

สายอากาศที่ได้จากการออกแบบจะถูกนำมาสร้างด้วยแผ่นโลหะสังกะสีความหนา 1 มิลลิเมตร ตามขนาดเหมาะสมที่ได้จากการจำลอง โดยตัวป้อนสัญญาณรูปทรง  $\Gamma$  จะถูกป้อนผ่านคอนเนกเตอร์ชนิด N-type และทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Keysight E5063A ENA series network analyzer) ผลการสร้างสายอากาศต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 4.22 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  แสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า สายอากาศมีค่าความกว้างอิมพีแดนซ์เท่ากับ 34 MHz ครอบคลุมช่วงความถี่ 84.4 - 118.4 MHz. ซึ่งมีความกว้างช่วงความถี่น้อยกว่าผลการจำลอง 6.3 MHz



มุมมองด้านหน้า



มุมมองด้านหลัง

(ก) การจัดวางในแนวนอน



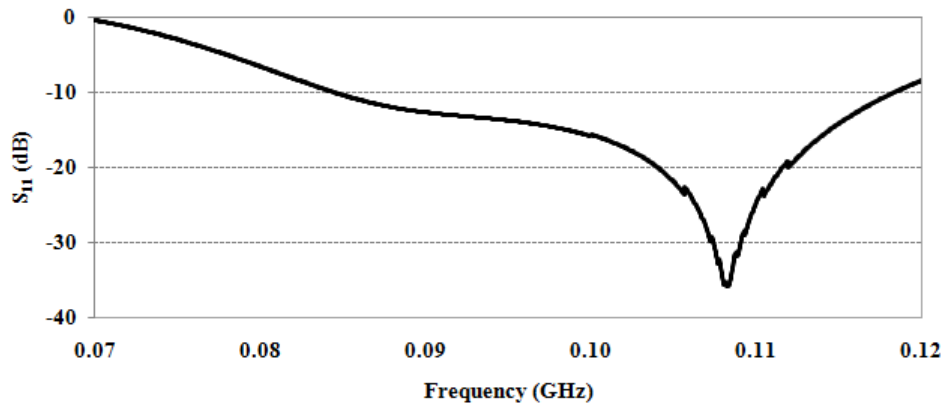
มุมมองด้านหน้า



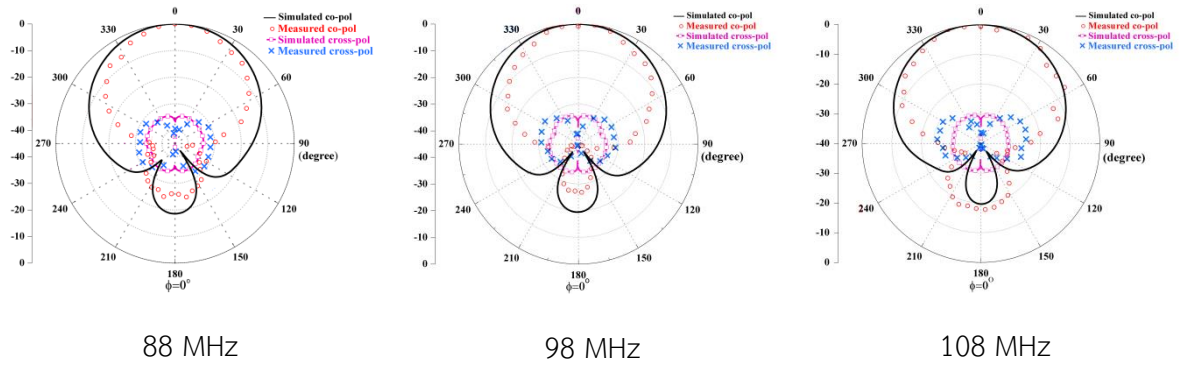
มุมมองด้านหลัง

(ข) การจัดวางในแนวตั้ง

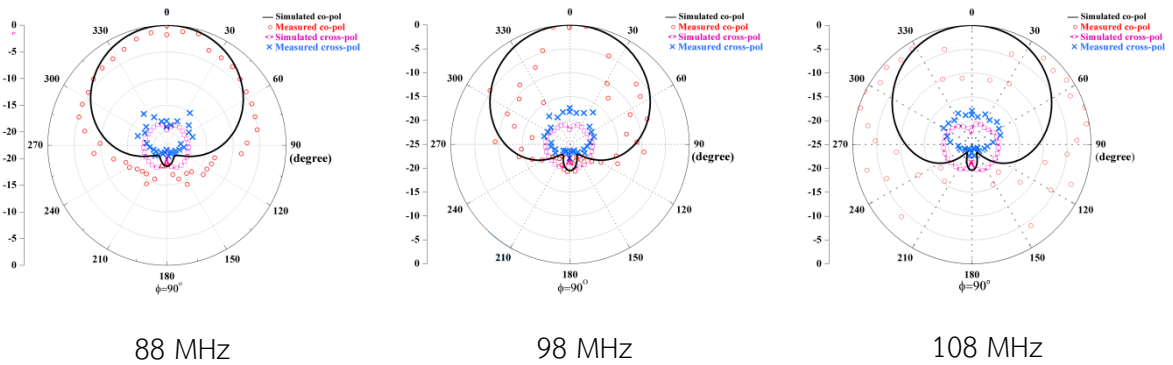
รูปที่ 4.22 สายอากาศต้นแบบและโครงพลาสติกจับยึด



รูปที่ 4.23 ผลการวัด S11



(ก) ระนาบ xz



(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 4.24 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

#### 4.3.2.4 สรุป

จากการออกแบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยหลักการของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล ในเบื้องต้นออกแบบให้สายอากาศรองรับการใช้งานสำหรับกิจการกระจายเสียงระบบ FM นั้น ผลการออกแบบและศึกษาพารามิเตอร์โครงสร้างของสายอากาศที่ส่งผลต่อการทำงานของสายอากาศ ทำให้ได้ขนาดของสายอากาศที่เหมาะสมที่สุด โดยผลการจำลองระบุว่าสายอากาศที่ออกแบบมีค่าความกว้างอิมพีแดนซ์ (Impedance bandwidth) 40.3 MHz ครอบคลุมช่วงความถี่ 79.7 - 120 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ตลอดช่วงความถี่ทั้งในระนาบ xz และระนาบ yz และอัตราขยายของสายอากาศตลอดช่วงความถี่ประมาณ 7.7 dBi จากนั้นได้สร้างสายอากาศต้นแบบและทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศพบว่าสายอากาศมีค่าความกว้างอิมพีแดนซ์เท่ากับ 34 MHz ครอบคลุมช่วงความถี่ 84.4 - 118.4 MHz. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผลการจำลอง 6.3 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเหมือนกับผลการจำลองทั้งระนาบ xz และ yz แต่ในระนาบ xz มีความกว้างลำคลื่นหลักกว้างกว่าผลการจำลองตลอดช่วงความถี่ ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz มีลำคลื่นหลังที่สูงกว่าผลการจำลองตลอดช่วงความถี่

ผลการออกแบบ การสร้าง และทดสอบสายอากาศ เพื่อทดสอบแนวความคิดและหลักการของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล ถึงความเหมาะสมและเป็นไปได้สำหรับการนำมาใช้เป็นสายอากาศสถานีฐาน ซึ่งในเบื้องต้นพบว่า ข้อดีของสายอากาศ คือ อัตราขยายสูง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่คงที่และสมมาตรทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แต่ก็ทำให้ทราบถึงปัญหาที่ต้องปรับปรุง เพื่อให้สายอากาศมีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานเป็นสายอากาศสถานีฐานจริง คือ ที่ความถี่ต่ำ (88 - 98 MHz) สายอากาศมีขนาดใหญ่ และมีโครงสร้างค่อนข้างทะอะทะ ทำให้ยากต่อการนำไปติดตั้งเพื่อใช้งานจริง ดังนั้นในการปรับปรุงประสิทธิภาพของสายอากาศจึงมุ่งเน้นการทำให้สายอากาศมีขนาดเล็กลงด้วยการอาศัยหลักการย่อขนาดสายอากาศ (Miniaturization)

### 4.3.3 ผลการย่อขนาดของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยหลักการแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่ได้จากการออกแบบในหัวข้อก่อนหน้า พบว่ามีขนาดของโครงสร้างค่อนข้างใหญ่และเทอะทะ และขณะที่ทำการทดสอบคุณลักษณะพื้นฐานด้านแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ยังพบว่าโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นทึบ ทำให้เกิดการต้านแรงลม ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการนำไปติดตั้งเพื่อใช้งานจริง ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงสายอากาศให้มีขนาดของโครงสร้างที่เล็ก กะทัดรัด และไม่ต้านทานแรงลม โดยการปรับลดขนาดของสายอากาศสามารถทำได้ด้วยการอาศัยหลักการย่อขนาด (Miniaturization) ของสายอากาศ

#### 4.3.3.1 ข้อจำกัดพื้นฐานในการย่อขนาดของสายอากาศ

การย่อขนาดของสายอากาศได้ถูกศึกษาเป็นเวลานานและได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง อันเป็นผลมาจากการพัฒนาของเทคโนโลยีและความต้องการให้ระบบหรืออุปกรณ์สื่อสารมีขนาดกะทัดรัด ดังนั้นสายอากาศจึงต้องมีขนาดเล็กตามไปด้วย ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยสำคัญที่เป็นข้อจำกัดพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการย่อขนาดของสายอากาศ ประกอบด้วย 4 ปัจจัย คือ 1) ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ (Directivity) 2) ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น (Radiation efficiency) 3) ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) และ 4) อิมพีแดนซ์ด้านเข้าและแมตซ์ซิง (Input impedance and matching)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะลดลงเมื่อสายอากาศมีขนาดลดลง ขณะที่ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น ตัวประกอบคุณภาพ และอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศจะเป็นปัจจัยที่สัมพันธ์กัน คือโดยทั่วไปแล้วอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศขนาดเล็ก จะมีค่ารีซิสแตนซ์ต่ำ แต่จะมีค่ารีแอกแตนซ์สูง ซึ่งเมื่อขนาดของสายอากาศเล็กลง จะยิ่งทำให้ค่ารีแอกแตนซ์สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นลดลง และตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศมีค่าต่ำลงเช่นเดียวกัน

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ในการย่อขนาดของสายอากาศ จำเป็นต้องพิจารณาประสิทธิภาพของสายอากาศให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น ตัวประกอบคุณภาพ และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมน้อยที่สุด

#### 4.3.3.2 เทคนิคการย่อขนาดของสายอากาศ

หลักการย่อขนาดของสายอากาศจะเกี่ยวข้องกับการลดความเร็วเฟส (phase velocity) ของคลื่นที่เดินทางบนโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อทำให้เกิดการเรโซแนนซ์หรือการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเทคนิคหลักๆของการย่อขนาดสายอากาศสามารถแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ดัง

- 1) การโหลดยอดอากาศด้วยวัสดุที่มีค่าความต่างของค่าสภาพยอมไฟฟ้า (permittivity) และค่าสภาพยอมแม่เหล็ก (permeability) สูง ซึ่งอัตราส่วนของขนาดของสายอากาศที่ลดลงจะสัมพันธ์กับ  $\sqrt{\mu_r \epsilon_r}$  และโครงสร้างของสารที่โหลด
- 2) การปรับรูปแบบโครงสร้างของสายอากาศ เช่น การดัดโค้งสายอากาศ (bending) การพับสลับไปมา (meander) การทำให้เป็นโครงสร้างเรขาคณิต (fractal) และการเจาะช่อง (slot loading)
- 3) การใส่อุปกรณ์ลัมปีในโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อหักล้างค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศที่สูงขึ้น
- 4) การใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติเสมือนเป็นฐานรอง (artificial electromagnetic metamaterial) เช่น วัสดุที่มีโครงสร้างแบบช่องแถบความถี่ (frequency bandgap structure) และตัวนำแม่เหล็กเสมือน (artificial magnetic conductor) เป็นต้น
- 5) การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization method) สำหรับการออกแบบที่มีสามารถกำหนดวัตถุประสงค์หลากหลาย ซึ่งใช้กับสายอากาศที่มีโครงสร้างซับซ้อน

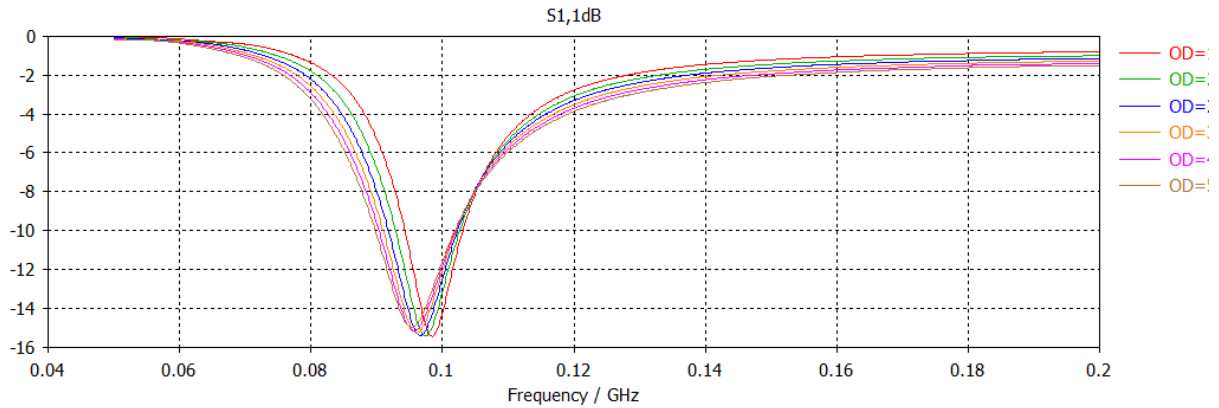
จากเทคนิคทั้ง 5 กลุ่มที่กล่าวมาข้างต้น เทคนิคที่น่าสนใจสำหรับการนำมาประยุกต์เพื่อย่อขนาดสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ คือ เทคนิคการปรับเปลี่ยนค่าความเหนี่ยวนำและค่าคาปาซิแตนซ์ของสายอากาศ ด้วยการอาศัยเทคนิคการโหลดยอดอากาศด้วยวัสดุที่มีค่า  $\epsilon_r > 1$  หรือ  $\mu_r > 1$  เพื่อปรับค่ารีแอคทีฟซึ่งเทคนิคดังกล่าวนิยมนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศ อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ไม่เหมาะสมกับความถี่ของสายอากาศน้ำหนักเบา เพราะจะเกิดการสูญเสียเนื่องจากวัสดุที่โหลด ซึ่งไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับการประยุกต์ใช้ที่ความถี่ย่าน VHF เทคนิคที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้ที่ย่านความถี่ VHF คือ เทคนิคการปรับรูปแบบโครงสร้างของสายอากาศ ซึ่งสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่จะนำเทคนิคการปรับรูปแบบโครงสร้างมาใช้สำหรับย่อขนาดสายอากาศ

#### 4.3.3.3 ผลการจำลองการย่อขนาดสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

การย่อขนาดโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ จะยึดโครงสร้างเดิมของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยหลักการแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลเป็นหลัก เพื่อคงหลักการทำงานเดิมของสายอากาศ แต่จะใช้การเปลี่ยนวัสดุโครงสร้างจากแบบแผ่นโลหะสังกะสีขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร เป็นโครงสร้างที่ใช้ท่ออะลูมิเนียม เพื่อให้โครงสร้างลดการต้านทานแรงลมและมีน้ำหนักเบามากขึ้น ในส่วนของการย่อขนาดจะอาศัยเทคนิคการดัดโค้งสายอากาศ แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$

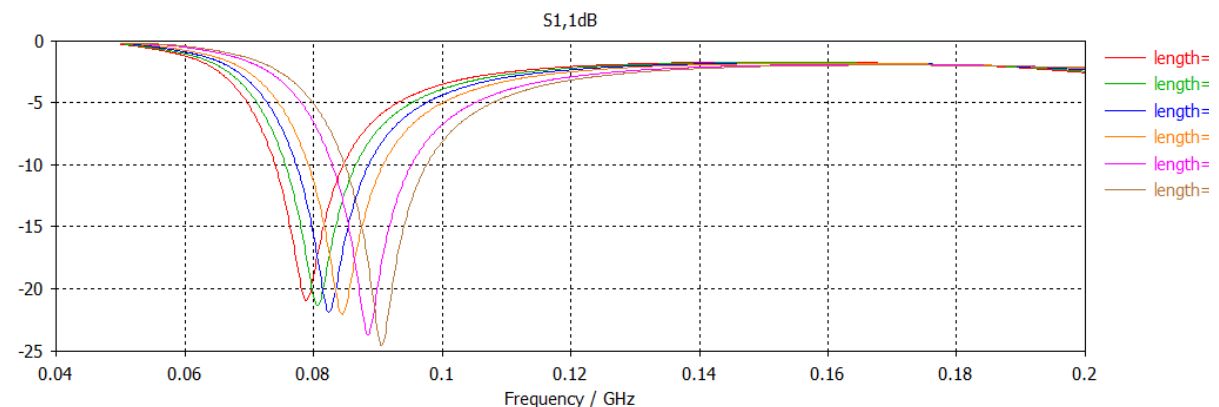
กระบวนการย่อขนาดเริ่มต้นด้วยการศึกษาตัวแปรขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่ออะลูมิเนียมที่ส่งผลต่อค่า  $S_{11}$  เมื่อกำหนดให้ความยาวของสายอากาศคงที่ ซึ่งขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่ออะลูมิเนียมถูกกำหนดจากขนาด

ที่มีจำหน่ายจริงตามท้องตลาด ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดท่ออะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ต่ำกว่าเล็กน้อย และค่า  $S_{11}$  มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 dB ในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดท่ออะลูมิเนียมเปลี่ยนจาก 52.7 มิลลิเมตร เป็น 12.7 มิลลิเมตร



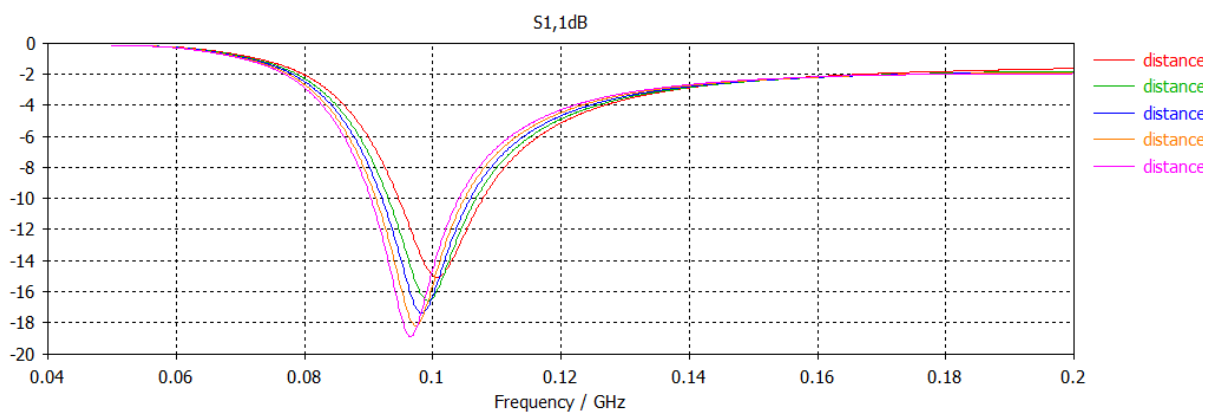
รูปที่ 4.25 ผลการจำลองขนาดพื้นที่หน้าตัดของท่ออะลูมิเนียมต่อค่า  $S_{11}$

จากนั้นกำหนดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดท่ออะลูมิเนียมให้เท่ากับ 52.7 มิลลิเมตร แล้วปรับเปลี่ยนความยาวเพื่อศึกษาผลของความยาวที่มีต่อค่า  $S_{11}$  โดยปรับเปลี่ยนความยาวในช่วง 665-785 มิลลิเมตร ครั้งละ 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งจากการจำลองพบว่า เมื่อความยาวของท่ออะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นครั้งละ 20 มิลลิเมตร จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์เดิม 2.1 MHz



รูปที่ 4.26 ผลการจำลองขนาดความยาวของท่ออะลูมิเนียมต่อค่า  $S_{11}$

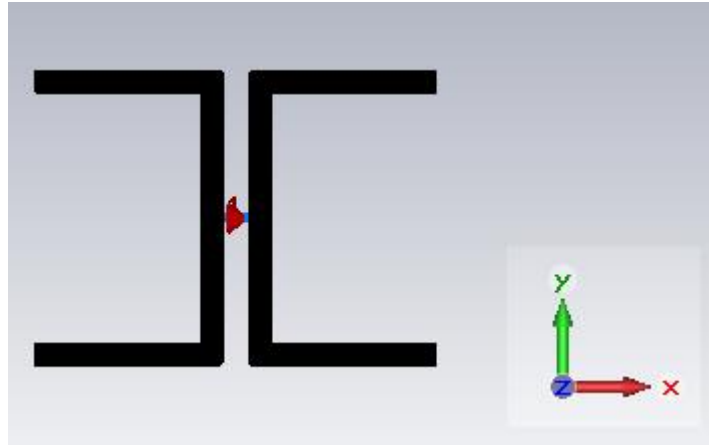
ถัดมากำหนดให้เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดท่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 52.7 มิลลิเมตร และให้ความยาวของท่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 685 มิลลิเมตร แล้วทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างของจุดบ่อนสัญญาณ เพื่อศึกษาผลของระยะห่างจุดบ่อนสัญญาณที่มีผลต่อค่า  $S_{11}$  โดยปรับเปลี่ยนระยะห่างในช่วง 2-22 มิลลิเมตร ครึ่งละ 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่า เมื่อระยะห่างของจุดบ่อนสัญญาณเพิ่มขึ้นครึ่งละ 5 มิลลิเมตร จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปยังความถี่ต่ำกว่าความถี่เรโซแนนซ์เดิม 0.9 MHz และทำให้ค่า  $S_{11}$  ลดลง



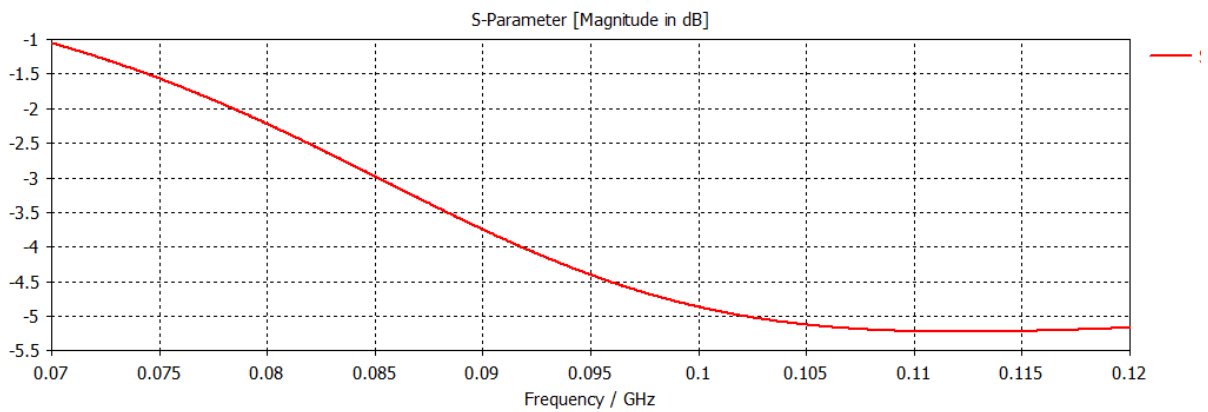
รูปที่ 4.27 ผลการจำลองระยะห่างของจุดบ่อนสัญญาณต่อค่า  $S_{11}$

หลังจากนั้นได้ดำเนินการย่อขนาดของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ โดยในเบื้องต้นจะเริ่มจากการปรับย่อในส่วนของโครงสร้างไดโพลระนาบก่อน ซึ่งในที่นี้จะปรับโครงสร้างจากแผ่นโลหะเป็นท่ออะลูมิเนียม โดยเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดท่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 52.7 มิลลิเมตร และความยาวของแต่ละอิลิเมนต์ของไดโพลเท่ากับ 685 มิลลิเมตร เพื่อพิสูจน์ว่าเมื่อกำหนดให้สายอากาศมีขนาดความยาวเท่ากับครึ่งความคลื่น ณ ความถี่ที่ต้องการให้เกิดเรโซแนนซ์ (88 MHz) คงเดิม แล้วใช้เทคนิคการย่อขนาดด้วยการตัดโค้งสายอากาศ สายอากาศนั้นยังสามารถเกิดเรโซแนนซ์ ณ ความถี่เดิม โดยการพิจารณาจากค่า  $S_{11}$  ซึ่งในที่นี้ได้แบ่งลักษณะการตัดโค้งโครงสร้างของสายอากาศออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ตัดโค้งเป็นรูปตัว C และตัดโค้งเป็นรูปตัว L ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศในส่วนของไดโพลระนาบที่ถูกตัดเป็นรูปตัว C แสดงในรูปที่ 4.28 และผลการจำลอง  $S_{11}$  แสดงในรูปที่ 4.29 จากผลการจำลองพบว่าด้วยโครงสร้างดังกล่าว ไม่เกิดความถี่เรโซแนนซ์ในช่วง 70-120 MHz



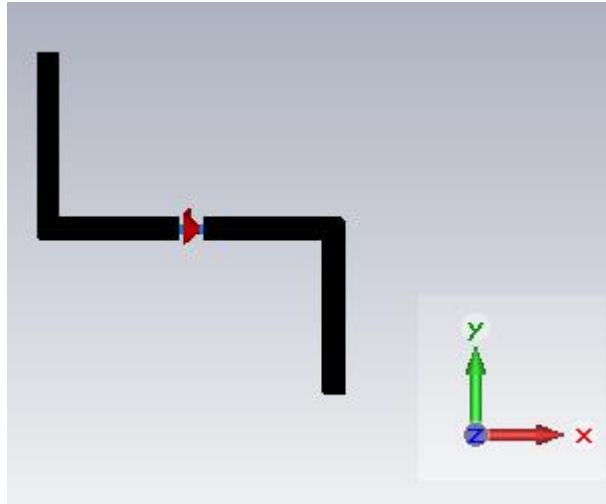


รูปที่ 4.28 การปรับโครงสร้างเป็นรูปตัว C

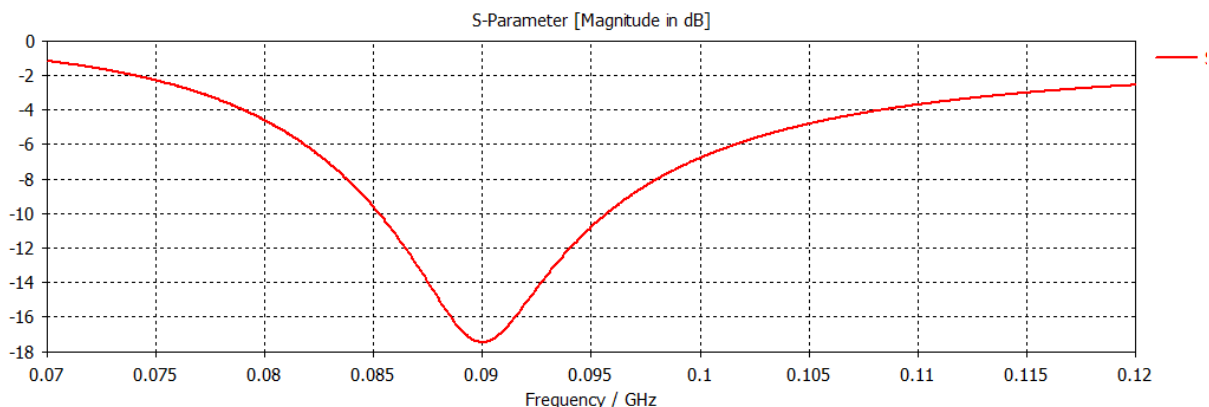


รูปที่ 4.29 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างรูปตัว C

ขณะที่การตัดโค้งโครงสร้างสายอากาศเป็นรูปตัว L แสดงดังรูปที่ 4.30 และผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.31 พบว่าลักษณะของการตัดโค้งโครงสร้างดังกล่าว เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 90 MHz ซึ่งมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -17.47 dB จะเห็นได้ว่าความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปที่ความถี่สูงขึ้น 2 MHz ซึ่งจากการตัดโค้งเป็นรูปตัว L ความยาวของโครงสร้างส่วนของไดโพลจะลดลงจากเดิมถึง 50%

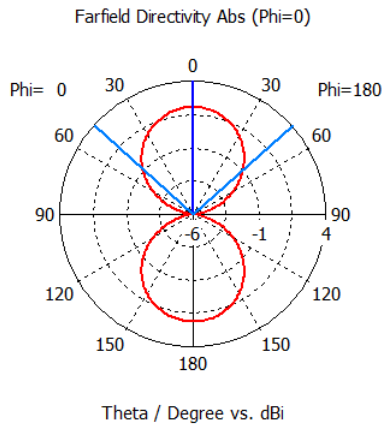


รูปที่ 4.30 การปรับโครงสร้างเป็นรูปตัว L

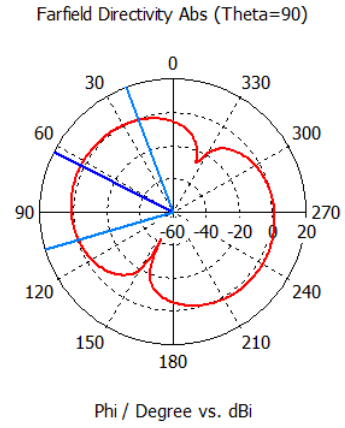


รูปที่ 4.31 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างรูปตัว L

จากการศึกษาเบื้องต้นในการย่อขนาดโครงสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยหลักการแมกนิโตอิเล็กทริกไดโพล ได้ทำการย่อขนาดของโครงสร้างส่วนแรก คือ ไดโพลระนาบ พบว่า สามารถลดขนาดความยาวได้ถึง 50% แต่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้ เลื่อนไปจากความถี่เดิม 2 MHz ซึ่งจากการจำลองคาดว่า ด้วยการตัดโค้งสายอากาศสามารถ สามารถทำให้ขนาดของสายอากาศลดลงจากเดิมได้ แต่เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบในระนาบ xz และระนาบ xy ดังแสดงในรูปที่ 4.32 พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy มีการเอียงไปจากเดิม ซึ่งมีการชี้ทิศทางของลำคลื่นหลักที่มุม 63 องศา



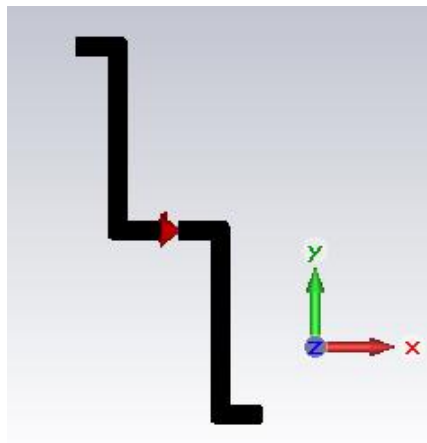
(ก) ระนาบ xz



(ข) ระนาบ xy

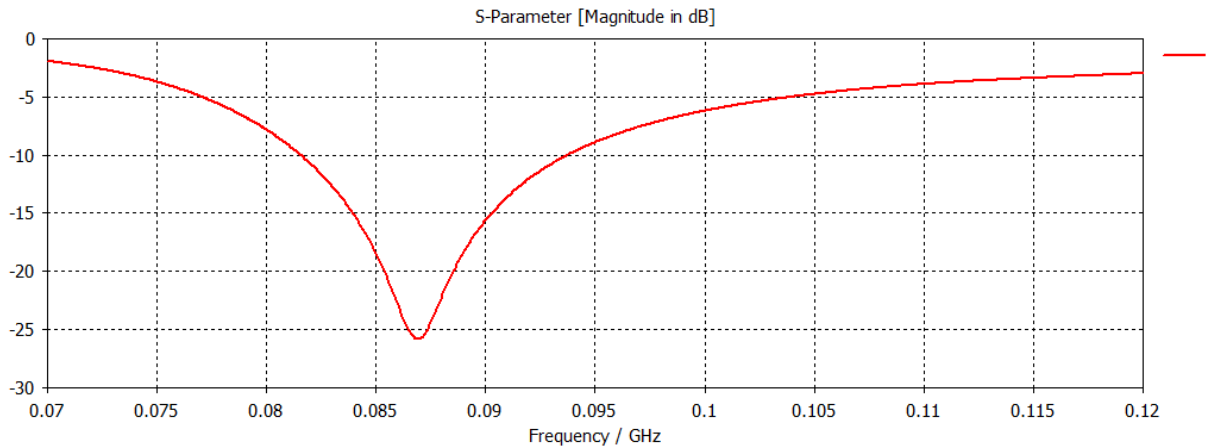
รูปที่ 4.32 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของโครงสร้างรูปตัว L

ดังนั้น เพื่อให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy มีทิศทางของลำคลื่นหลักชี้ไปในทิศทาง 90 องศา จึงได้ปรับการย่อขนาดของโครงสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยหลักการแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล ด้วยการตัดโค้งเป็นรูปตัว Z ที่มีความยาวในแนวแกน Y เทียบกับแนวแกน X ในอัตราส่วน 75 : 25 ดังแสดงในรูปที่ 4.33

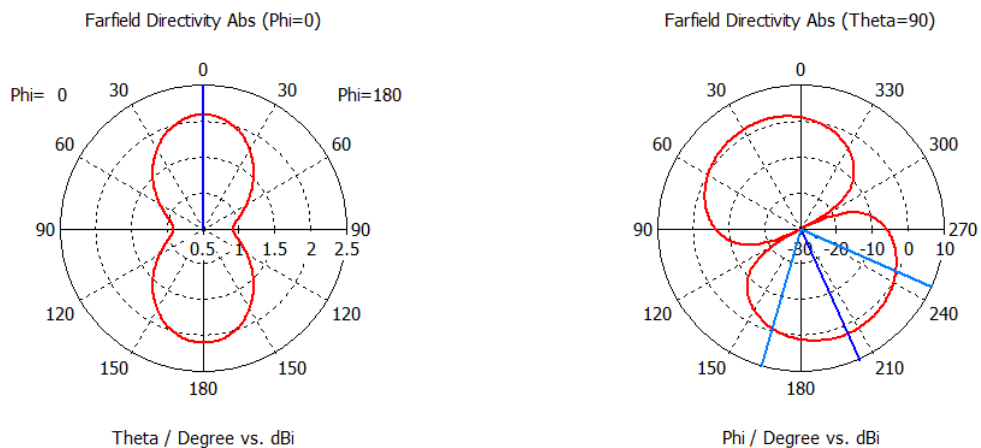


รูปที่ 4.33 การปรับโครงสร้างเป็นรูปตัว Z

ผลการจำลอง  $S_{11}$  และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น แสดงในรูปที่ 4.34 และ 4.35 ตามลำดับ จากผลการจำลอง พบว่า ด้วยขนาดความยาวที่เท่ากับกับโครงสร้างก่อนหน้า (โครงสร้างรูปตัว L) จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 86.9 MHz มีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -25.88 dB ซึ่งเกิดความถี่เรโซแนนซ์ ณ ความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่เดิม แต่ค่า  $S_{11}$  ที่ดีขึ้นกว่าเดิม ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy มีการเบี่ยงไปมากกว่าเดิม โดยมีการชี้ทิศทางของลำคลื่นหลักที่มุม 24 องศา



รูปที่ 4.34 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างรูปตัว Z

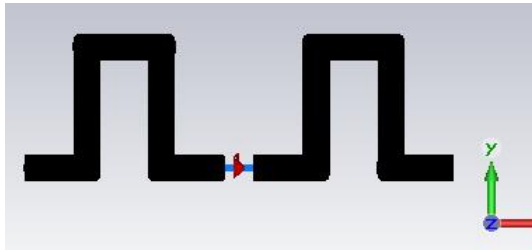


(ก) ระนาบ xz

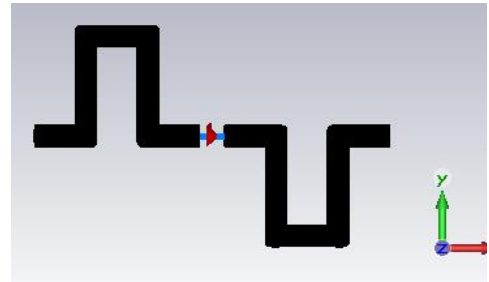
(ข) ระนาบ xy

รูปที่ 4.35 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของโครงสร้างรูปตัว Z

ถัดมาได้ปรับโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยหลักการแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล ด้วยการตัดโค้งเป็นเส้นวกเวียนไปมา (meander line) ซึ่งสามารถแบ่งโครงสร้างออกเป็น 2 แบบ คือ แบบสมมาตร และไม่สมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.36 โดยกำหนดให้แต่ละขั้วของไดโพลประกอบด้วยเส้นวกเวียนไปมา 5 ท่อน เพื่อลดขนาดของโครงสร้างเพิ่มขึ้นและพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ให้ทิศทางของลำคลื่นหลักชี้ไปในทิศ 90 องศา



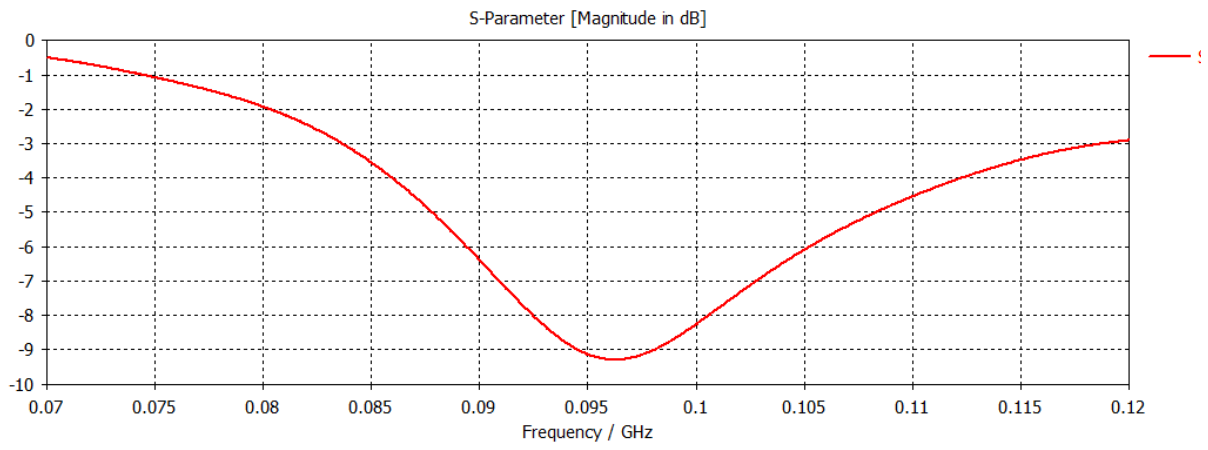
(ก) แบบสมมาตร



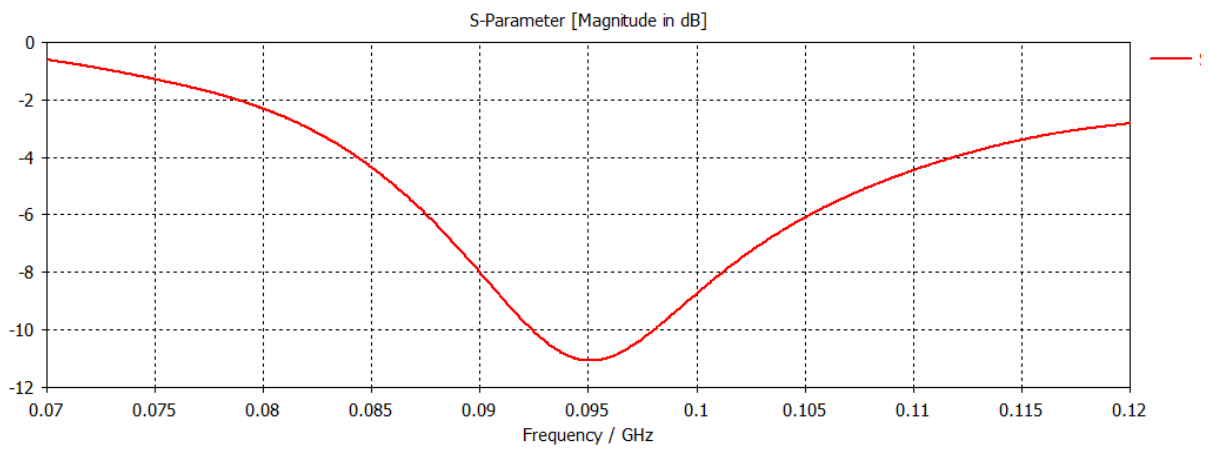
(ข) แบบไม่สมมาตร

รูปที่ 4.36 การปรับโครงสร้างเป็นเส้นวกเวียนไปมา

ผลการจำลอง  $S_{11}$  ของโครงสร้างเส้นวกเวียนไปมาทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตรแสดงในรูปที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ จากผลการจำลอง พบว่า  $S_{11}$  ที่ได้จากโครงสร้างแบบสมมาตรมีค่าสูงกว่า  $-10$  dB ตลอดย่านความถี่ 88-108 MHz ขณะที่โครงสร้างแบบไม่สมมาตรทำให้เกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 95.1 MHz มีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ  $-11.09$  dB ซึ่งเกิดความถี่เรโซแนนซ์ ณ ความถี่ที่สูงกว่าความถี่เดิม เมื่อกำหนดให้ความยาวเท่ากับโครงสร้างรูปตัว L

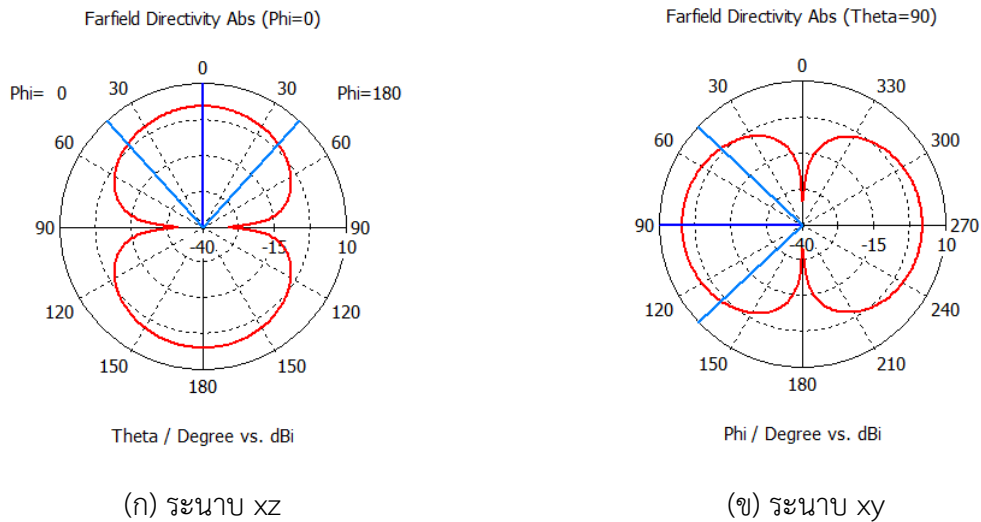


รูปที่ 4.37 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างเส้นทวิเวียนไปมาแบบสมมาตร

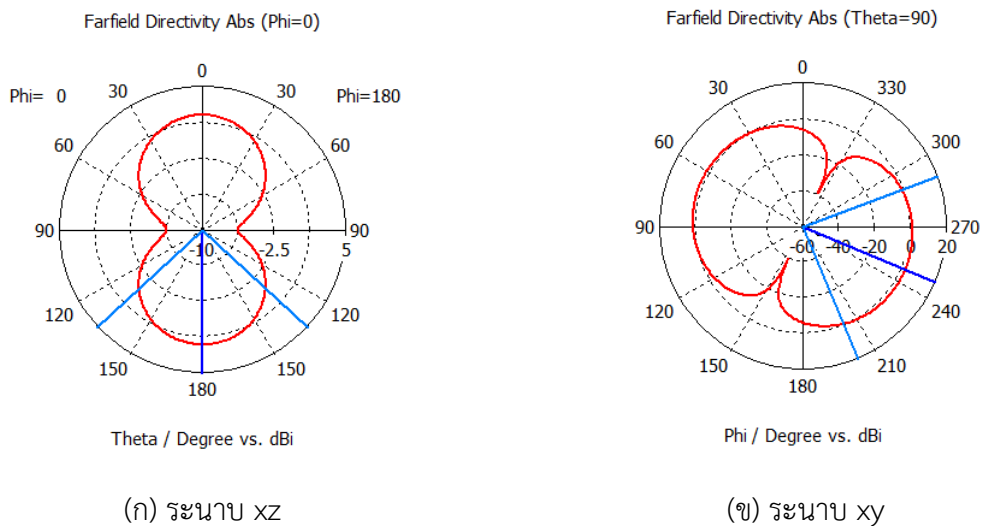


รูปที่ 4.38 ผลการจำลอง S11 ของโครงสร้างเส้นทวิเวียนไปมาแบบไม่สมมาตร

ผลการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  และระนาบ  $xy$  ของโครงสร้างเส้นวงเวียนไปมาทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตรแสดงในรูปที่ 4.39 และรูปที่ 4.40 ตามลำดับ จากผลการจำลอง พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xz$  ของโครงสร้างทั้งสองแบบมีการชี้ทิศทางของลำคลื่นหลักเหมือนกัน แตกต่างกันที่ความกว้างลำคลื่นหลักของโครงสร้างแบบสมมาตรครอบคลุมมุมได้มากกว่า ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $xy$  ของโครงสร้างแบบสมมาตรมีการชี้ทิศทางของลำคลื่นหลักที่มุม 90 องศา แต่โครงสร้างแบบไม่สมมาตรมีการชี้ทิศทางของลำคลื่นหลักที่มุม 67 องศา



รูปที่ 4.39 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของโครงสร้างเส้นวงเวียนไปมาแบบสมมาตร



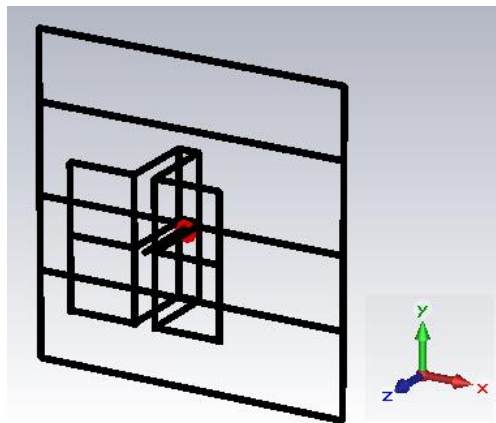
รูปที่ 4.40 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของโครงสร้างเส้นวงเวียนไปมาแบบไม่สมมาตร

จากผลการย่อขนาดโครงสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยหลักการแมกนิตออิเล็กทรอนิกส์ไดโพล ด้วยการตัดโค้งโครงสร้างส่วนแรก คือ ส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ไดโพล โดยแบ่งกรณีการตัดโค้งออกเป็น โครงสร้างที่มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น โครงสร้างรูปตัว C โครงสร้างรูปตัว L โครงสร้างรูปตัว Z โครงสร้างเส้นวงเวียนไปมาแบบสมมาตร และโครงสร้างเส้นวงเวียนไปมาแบบไม่สมมาตร พบว่าการย่อขนาดของสายอากาศส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเปลี่ยนแปลง โดยยิ่งสายอากาศถูกย่อให้มีขนาดเล็กมากๆ ส่งผลให้การแมตซ์ซิ่งของสายอากาศ (S11) แย่ลง นอกจากนี้การปรับโครงสร้างยังต้องคำนึงถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีการชี้ทิศของลำคลื่นหลักเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเดิม (90 องศา) ขณะที่การย่อขนาดในส่วนของแมกนิติกไดโพล ซึ่งกำลังดำเนินการ เป็นการย่อขนาดที่พิจารณาการติดตั้งใช้งานจริงที่ต้องสามารถลดแรงปะทะของลม โดยอาศัยการเจาะช่อง (Slot) เป็นซี่ๆ ซึ่งระยะห่างที่ได้จากการจำลองขณะนี้ ยังมีคลื่นบางความถี่สามารถหลุดลอดได้ส่งผลต่อค่าอิมพีแดนซ์และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

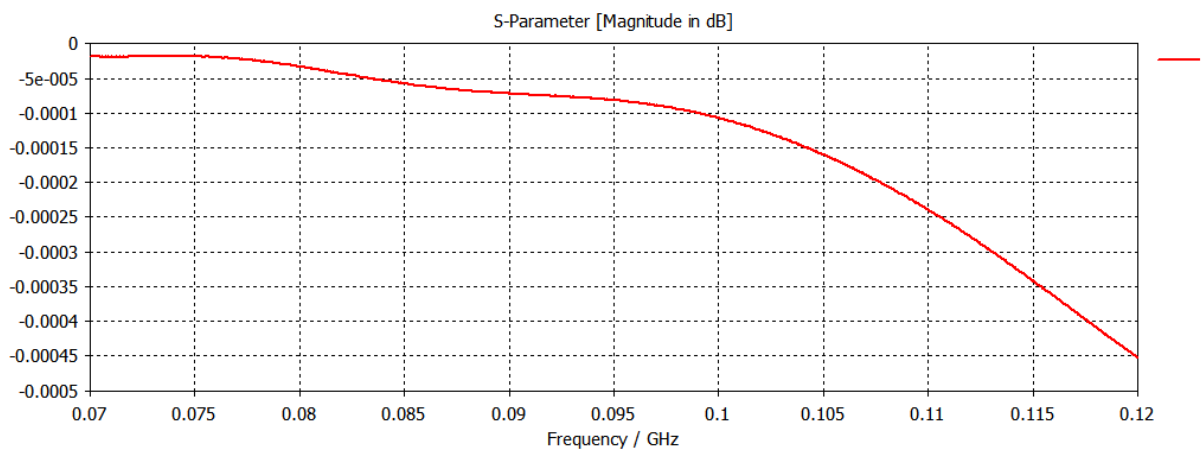


#### 4.3.4 ผลการปรับโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

การศึกษาการปรับโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่แบบแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล ด้วยการเปลี่ยนวัสดุโครงสร้างจากแบบแผ่นโลหะสังกะสีขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร เป็นโครงสร้างที่ใช้ท่ออะลูมิเนียม โดยขนาดของโครงสร้างต่างๆ ยังคงเดิม เพื่อให้โครงสร้างลดการต้านทานแรงลมและมีน้ำหนักเบาขึ้น แล้วพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.41 จากผลการจำลอง  $S_{11}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.42 พบว่าไม่เกิดเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ 70-120 MHz



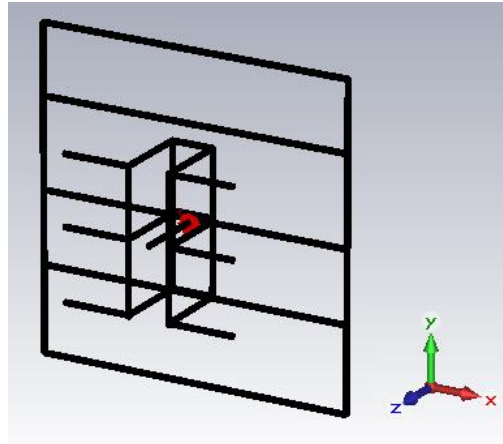
รูปที่ 4.41 สายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่โครงสร้างใช้ท่ออะลูมิเนียม



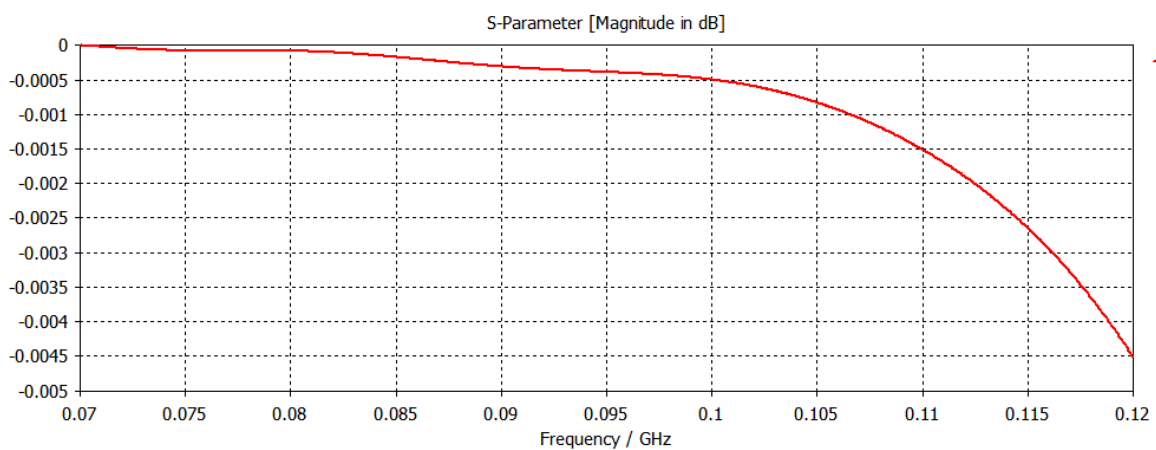
รูปที่ 4.42 ผลการจำลอง  $S_{11}$  ของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่โครงสร้างใช้ท่ออะลูมิเนียม

ถัดมาได้ปรับโครงสร้างของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยหลักการแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล ด้วยการปรับโครงสร้างของส่วนอิเล็กทริกไดโพลเป็นรูปทรง E เพื่อลดขนาดของโครงสร้างเพิ่มขึ้นและพิจารณา

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.43 ซึ่งผลการจำลอง  $S_{11}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.44 พบว่าไม่เกิดเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ 70-120 MHz



รูปที่ 4.43 สายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่โครงสร้างใช้ท่ออะลูมิเนียมรูปทรง E

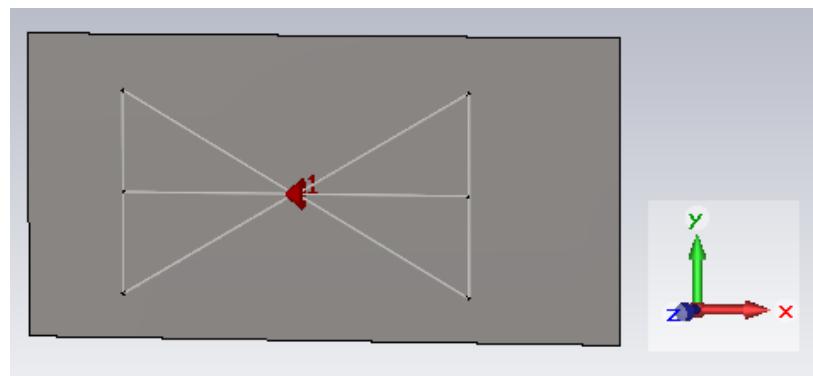


รูปที่ 4.44 ผลการจำลอง  $S_{11}$  ของสายอากาศแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่โครงสร้างใช้ท่ออะลูมิเนียมรูปทรง E

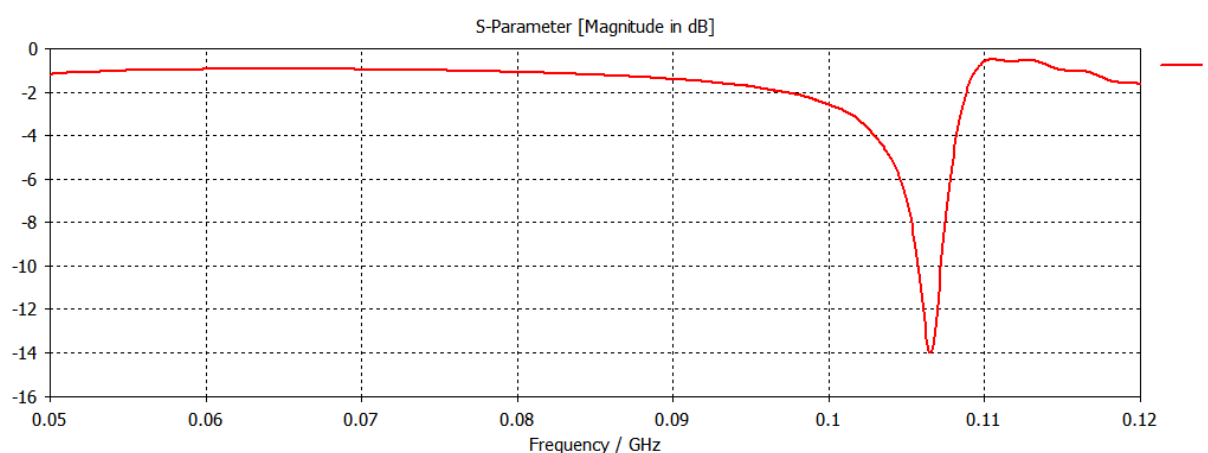
จากการศึกษาการปรับโครงสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่แบบแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล เพื่อลดความต้านทานแรงลมและลดน้ำหนักของสายอากาศด้วยการใช้ท่ออะลูมิเนียมเป็นโครงสร้างแทนการใช้แผ่นโลหะสังกะสีขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ทั้งสองกรณี เมื่อพิจารณาจากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  พบว่าสายอากาศไม่สามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ 88-108 MHz ซึ่งสาเหตุเกิดจากพื้นที่ผิวสัมผัสในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ลดลงจากโครงสร้างเดิม ดังนั้นด้วยโครงสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยน

ความถี่แบบแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพลที่สร้างจากแผ่นโลหะสังกะสีขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ไม่สามารถลดขนาดให้เล็กได้

จึงได้ปรับโครงสร้างสายอากาศเป็นแบบสายอากาศไดโพลรูปร่างแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง (Bow tie antenna with back reflector) สายอากาศแบบนี้มีข้อดี คือ โครงสร้างเบา ครอบคลุมความถี่กว้าง และมีอัตราขยายสูง โดยการออกแบบสายอากาศไดโพลแบบรูปร่างแบบโบว์ สามารถคำนวณได้จากการออกแบบสายอากาศไดโพลทั่วไป ที่มีขนาดความยาวเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ณ ความถี่ที่ต้องการ ขนาดของสายอากาศไดโพลเบื้องต้นที่ได้จากการคำนวณจะถูกใช้ในการจำลองเพื่อหาขนาดที่เหมาะสม โครงสร้างสายอากาศไดโพลแบบรูปร่างแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลังในการจำลองดังแสดงในรูปที่ 4.45 ในเบื้องต้นได้จำลองให้สายอากาศทำงานที่ความถี่ 108 MHz ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.46 จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 107.9 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -13.29 dB

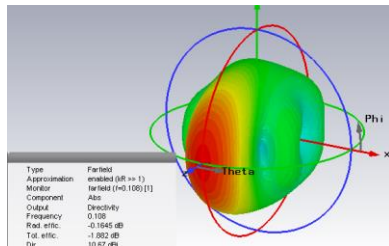


รูปที่ 4.45 สายอากาศไดโพลรูปร่างแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง

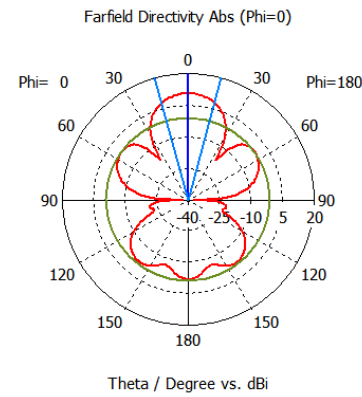


รูปที่ 4.46 ผลการจำลอง S11 ของสายอากาศไดโพลรูปร่างแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง

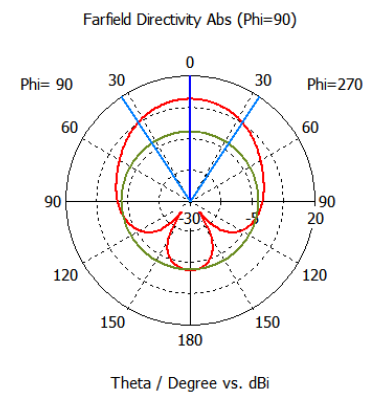
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง แสดงในรูปที่ 4.47 พบว่าสายอากาศมีลำคลื่นหลักทั้งในระนาบ xz และ yz ชี้ไปยังทิศทาง 0 องศา มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 31.1 องศา และ 67.5 องศา ตามลำดับ และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 10.83 dBi



(ก) 3 มิติ



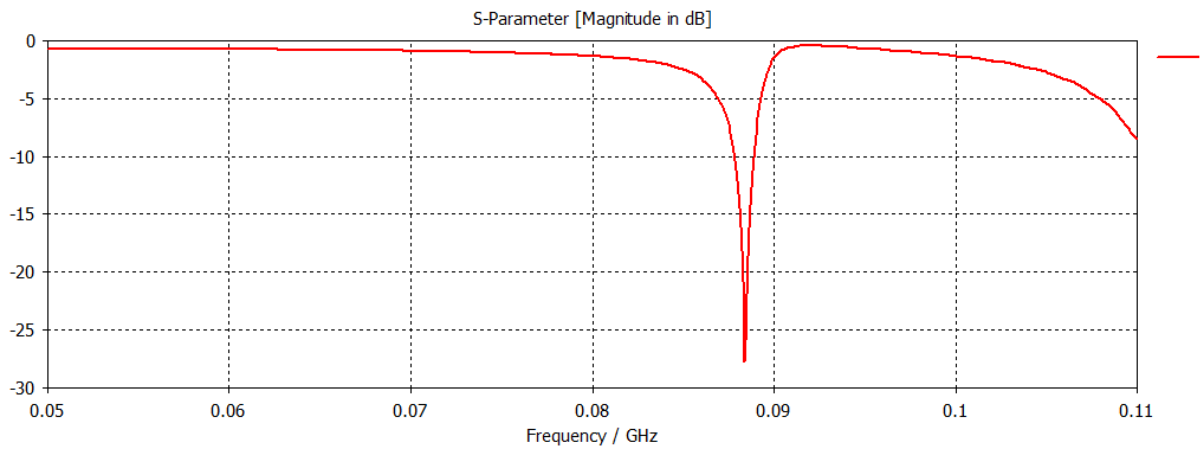
(ข) ระนาบ xz



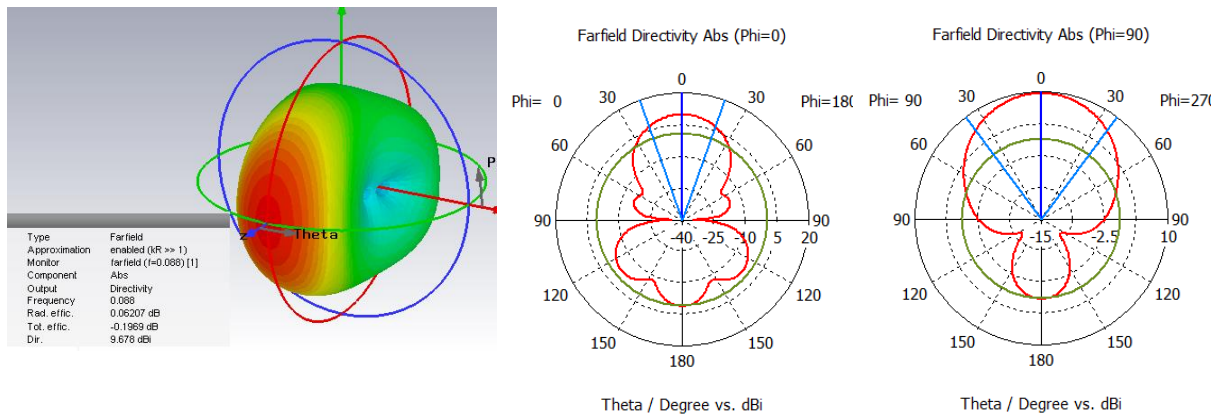
(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.47 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง

จากนั้นได้ปรับจูนขนาดของสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง เพื่อให้สามารถทำงานได้ที่ความถี่ 88 MHz เพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศสำหรับการนำไปออกแบบสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลังที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ซึ่งผลของการปรับจูนขนาดพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  และค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.48 และ รูปที่ 4.49 ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าสายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ 88 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -24.41 dB ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีลำคลื่นหลักทั้งในระนาบ xz และ yz ชี้ไปยังทิศทาง 0 องศา มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz และ yz เท่ากับ 39.3 องศา และ 73.4 องศา ตามลำดับ และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 9.67 dBi



รูปที่ 4.48 ผลการจำลอง S11 ของสายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง



(ก) 3 มิติ

(ข) ระนาบ xz

(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.49 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง

อย่างไรก็ตามแม้สายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์ที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลังจะให้อัตราขยายสูง แต่เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นด้านหลังที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้ขนาดรวมของสายอากาศยังประสบปัญหาการต้านลม ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานงาน ดังนั้นในขั้นถัดไป การออกแบบสายอากาศจึงจะเลือกใช้โครงสร้างแบบสายอากาศไดโพลรูปแบบโบว์ที่ครอบคลุมแต่ละช่องสัญญาณแบด์วิธต่ำ แล้ววางซ้อนกันเป็นจำนวนหลายอิลิเมนต์ เพื่อครอบคลุมตลอดย่านความถี่ใช้งานทั้งหมด ซึ่งสายอากาศที่ความถี่ต่ำกว่าจะทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นด้านหลังไปในตัว แทนการใช้ตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง

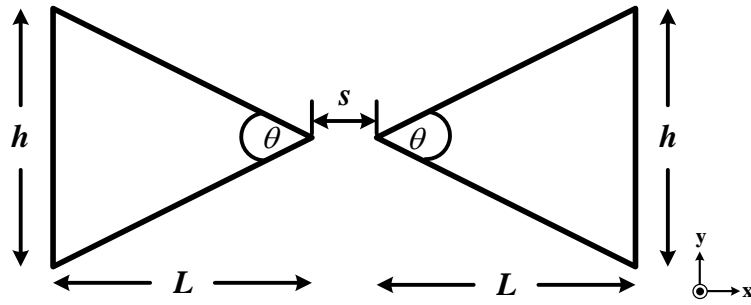
**ก) สายอากาศไดโพลรูปร่างสำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม.**

จากประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่องแผนความถี่วิทยุกิจการกระจายเสียงระบบ เอฟ.เอ็ม. ที่กำหนดย่านความถี่สำหรับใช้งานที่ 87 - 108 MHz โดยแบ่งออกเป็น 82 ช่องสัญญาณ และแต่ละช่องสัญญาณมีแบนด์วิธ 250 kHz ในการออกแบบเพื่อกำหนดจำนวนของสายอากาศไดโพลรูปร่างให้ครอบคลุมย่านความถี่ดังกล่าว ได้พิจารณาถึงแบนด์วิธของสายอากาศไดโพลรูปร่างจากผลการจำลองในหัวข้อก่อนหน้า ดังนั้นจะมีสายอากาศทั้งหมด 6 อิลิเมนต์ สำหรับกิจการกระจายเสียง ดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 อิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลรูปร่างสำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม

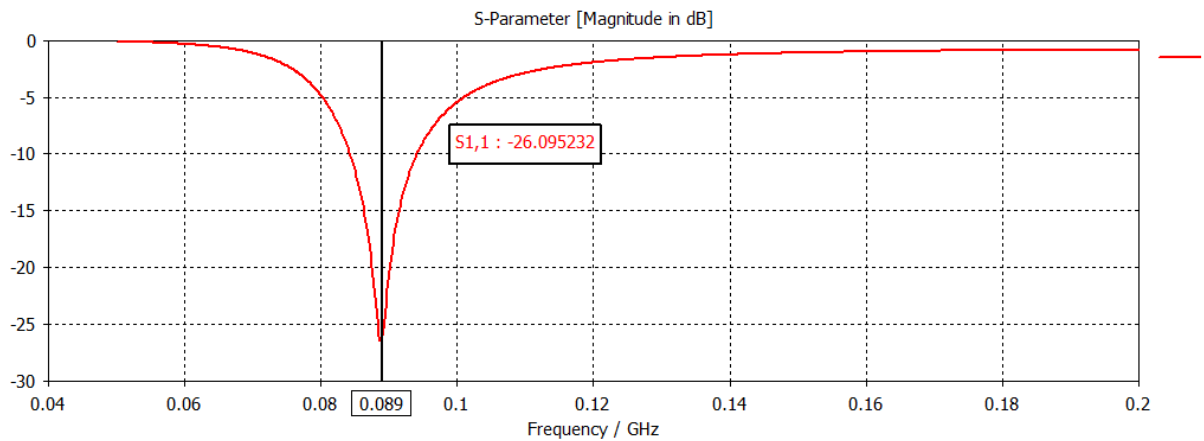
อิลิเมนต์ที่	ช่องสัญญาณใช้งาน	ย่านความถี่ (MHz)	ความถี่กลาง (MHz)	แบนด์วิธ (MHz)
FM-1	1 - 14	87.50 - 90.75	89.125	3.25
FM-2	15 - 28	91.00 - 94.25	92.625	3.25
FM-3	29 - 42	94.50 - 97.75	96.125	3.25
FM-4	43 - 56	98.00 - 101.25	99.625	3.25
FM-5	57 - 70	101.25 - 104.75	103.125	3.25
FM-6	71 - 82	105.00 - 107.75	106.375	2.75

ในการออกแบบขั้นต้น ได้คำนวณขนาดของโครงสร้างของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ ก่อนนำไปจำลองการทำงานในโปรแกรมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อกำหนดให้ความยาวรวมของสามเหลี่ยมรูปโบว์แต่ละด้านเท่ากับ  $0.48\lambda$  และความสูงของสายอากาศรูปโบว์เท่ากับ  $0.15\lambda$  โดยโครงสร้างสายอากาศไดโพลรูปโบว์แสดงในรูปที่ 4.50 ซึ่งมีพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบ 4 พารามิเตอร์ คือ  $h$   $L$   $s$  และ  $\theta$  พารามิเตอร์ทั้ง 4 แทน ความสูง ความยาว ระยะห่าง และมุม ตามลำดับ

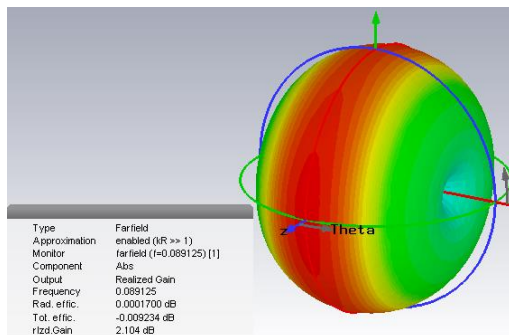


รูปที่ 4.50 โครงสร้างสายอากาศไดโพลรูปโบว์

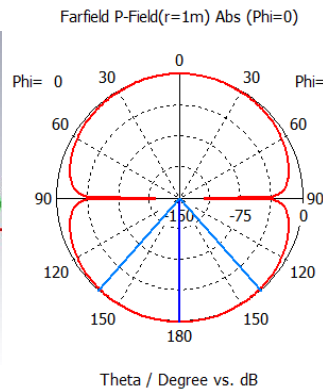
ผลการจำลองอิลิเมนต์ FM-1 ดังแสดงในรูปที่ 4.51 และ รูปที่ 4.52 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 89 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -26.095 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 84.35 - 93.95 MHz (แบนด์วิธ 9.6 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz  $82.8^\circ$  ตามลำดับ และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.104 dBi



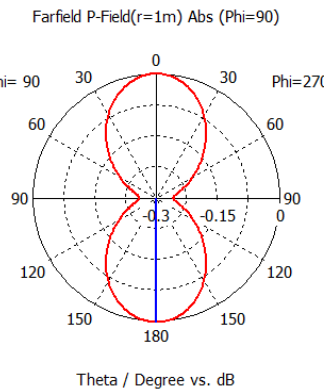
รูปที่ 4.51 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-1



(ก) 3 มิติ



(ข) ระนาบ xz

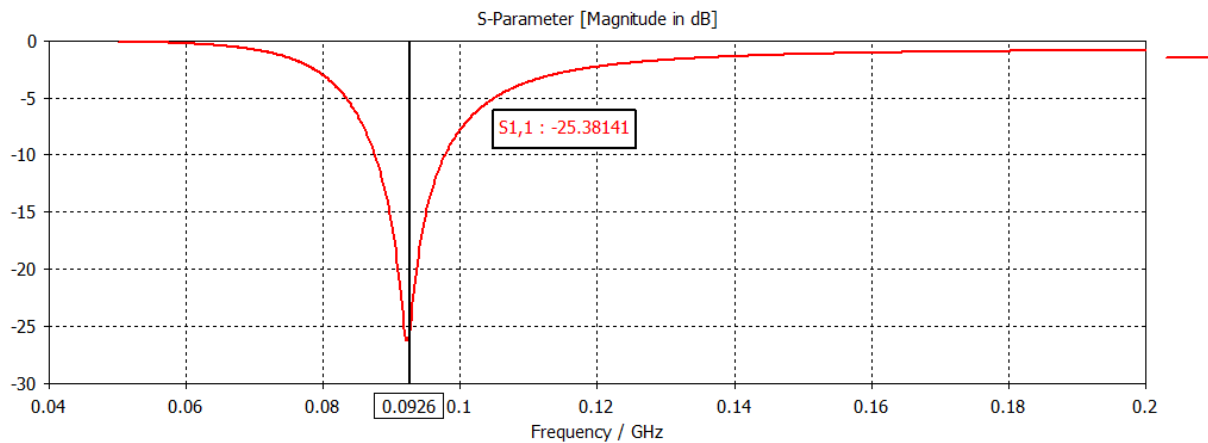


(ค) ระนาบ yz

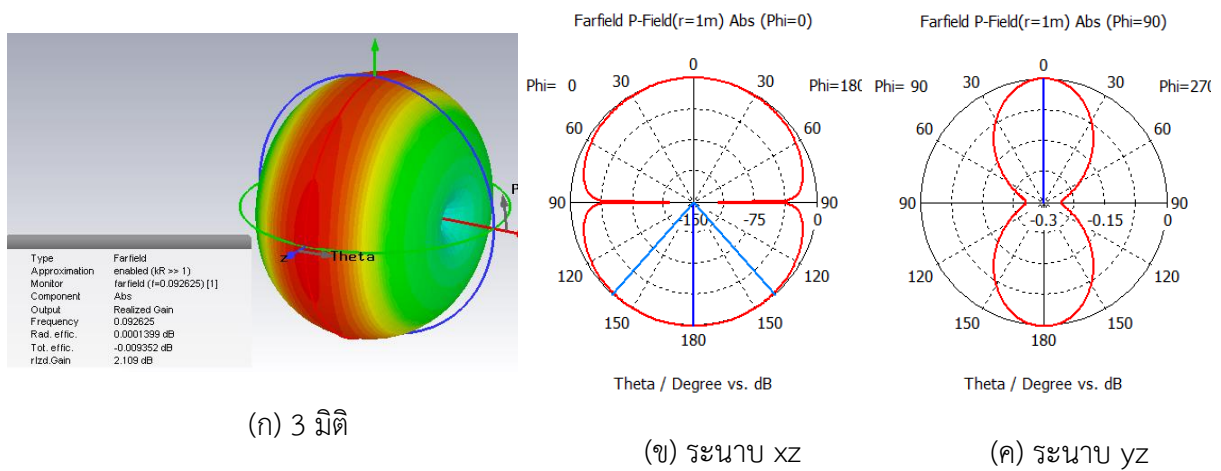
รูปที่ 4.52 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-1



ผลการจำลองอิลิเมนต์ FM-2 ดังแสดงในรูปที่ 4.53 และ รูปที่ 4.54 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 92.6 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -25.381 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 87.65- 97.70 MHz (แบนด์วิธ 10.05 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz  $82.8^\circ$  ตามลำดับ และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.109 dBi

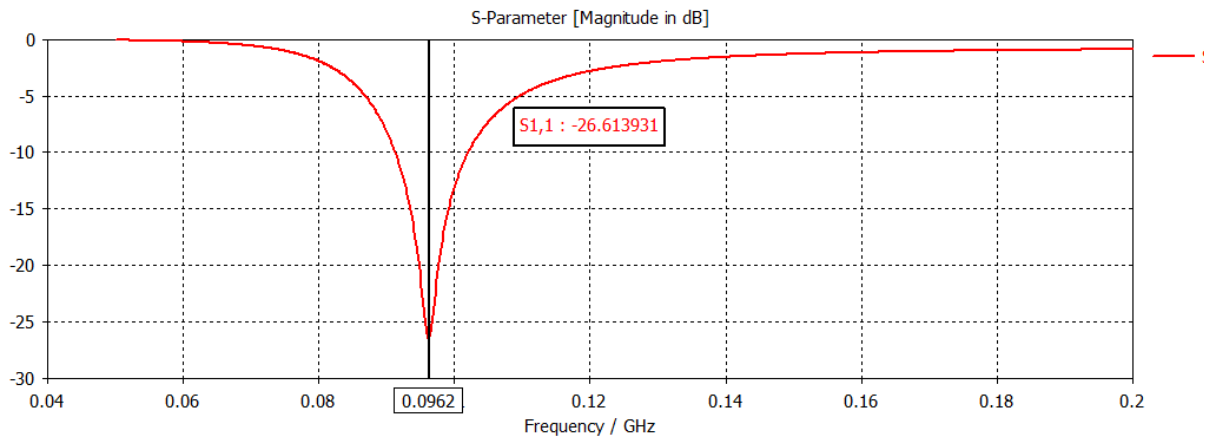


รูปที่ 4.53 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-2

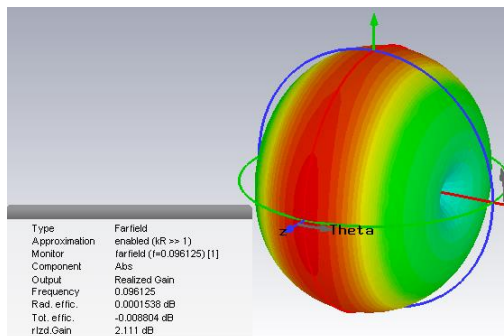


รูปที่ 4.54 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-2

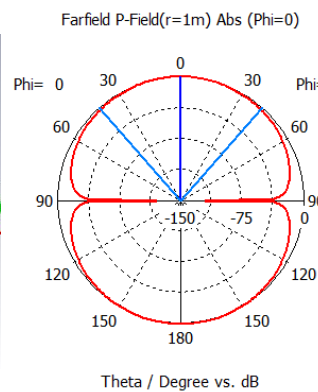
ผลการจำลองอิลิเมนต์ FM-3 ดังแสดงในรูปที่ 4.55 และ รูปที่ 4.56 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 96.2 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -26.614 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 91.40 - 101.90 MHz (แบนด์วิธ 10.5 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz  $82.7^\circ$  ตามลำดับ และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.111 dBi



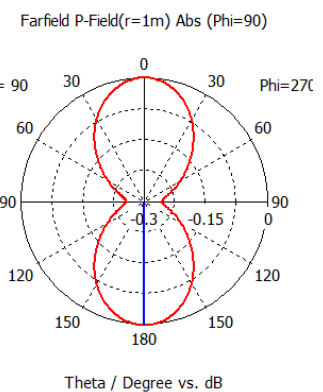
รูปที่ 4.55 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-3



(ก) 3 มิติ



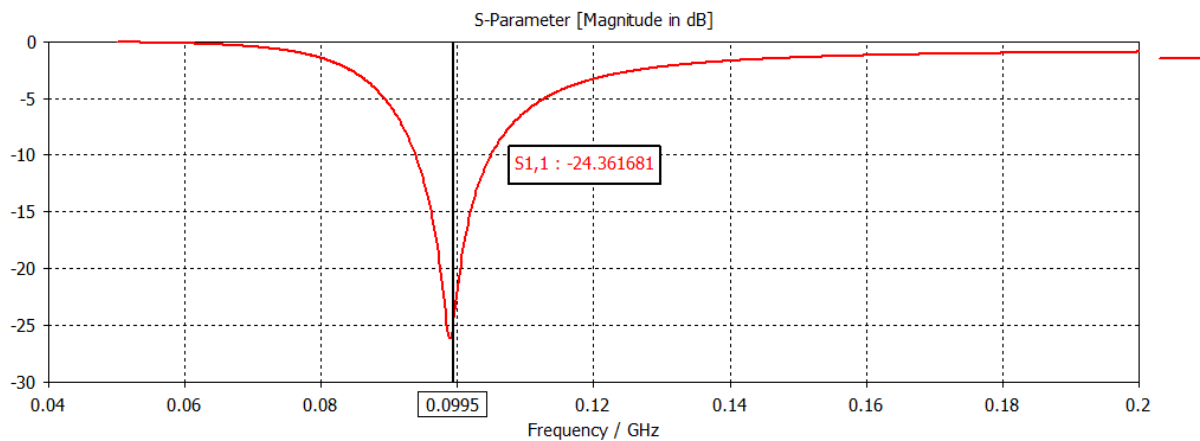
(ข) ระนาบ xz



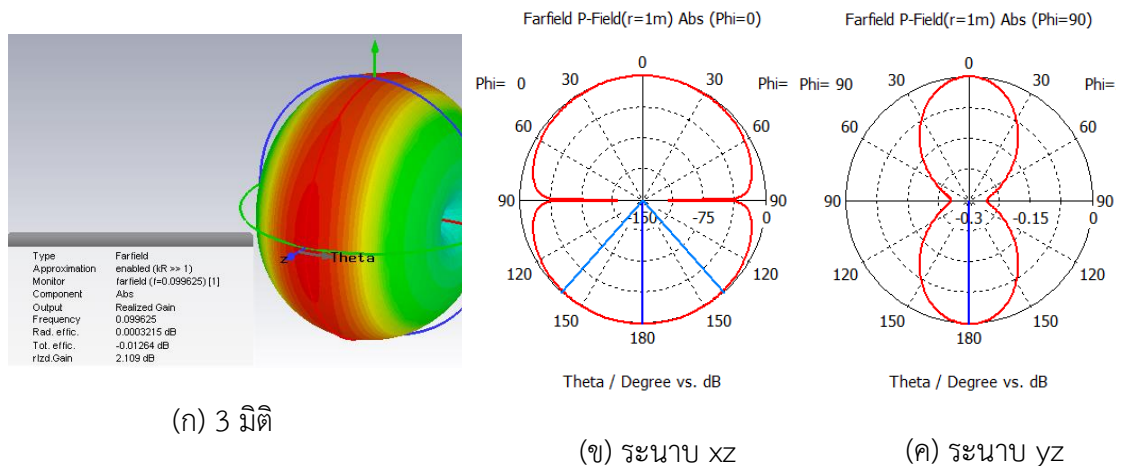
(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.56 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-3

ผลการจำลองอิลิเมนต์ FM-4 ดังแสดงในรูปที่ 4.57 และ รูปที่ 4.58 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 99.5 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -24.362 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 93.95 - 104.90 MHz (แบนด์วิธ 10.95 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz  $82.7^\circ$  ตามลำดับ และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.109 dBi

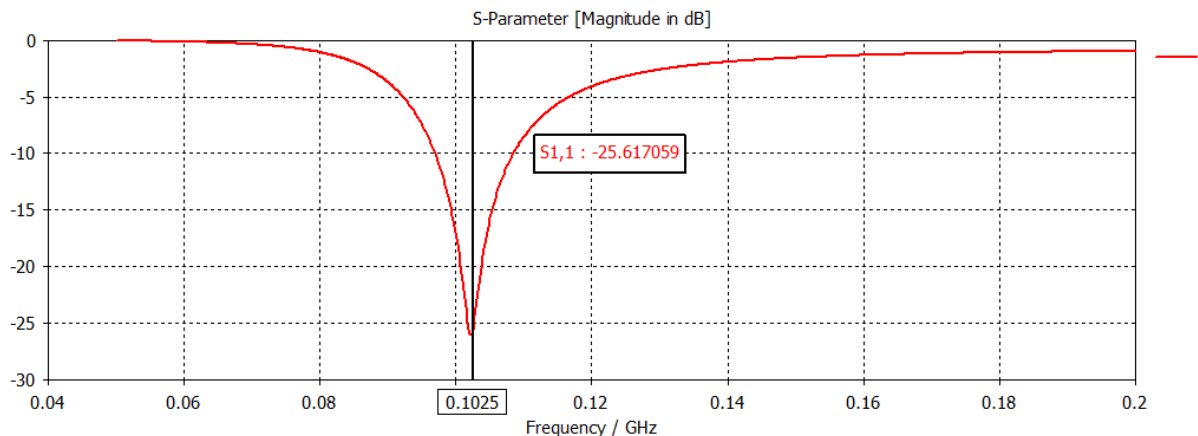


รูปที่ 4.57 ผลการจำลอง  $S_{11}$  ของอิลิเมนต์ FM-4

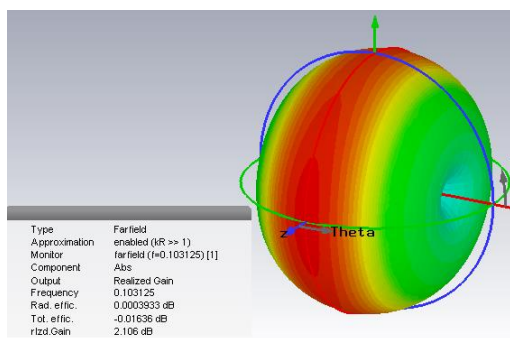


รูปที่ 4.58 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-4

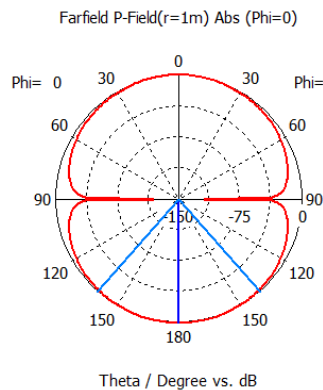
ผลการจำลองอิลิเมนต์ FM-5 ดังแสดงในรูปที่ 4.59 และ รูปที่ 4.60 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 102.5 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -25.617 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 97.10 - 108.35 MHz (แบนด์วิธ 11.25 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz  $82.6^\circ$  ตามลำดับ และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.106 dBi



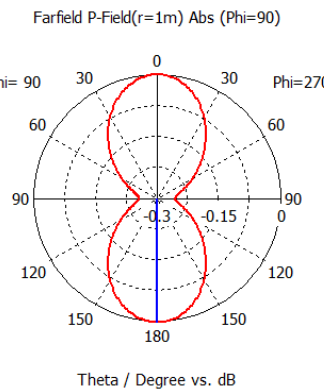
รูปที่ 4.59 ผลการจำลอง  $S_{11}$  ของอิลิเมนต์ FM-5



(ก) 3 มิติ



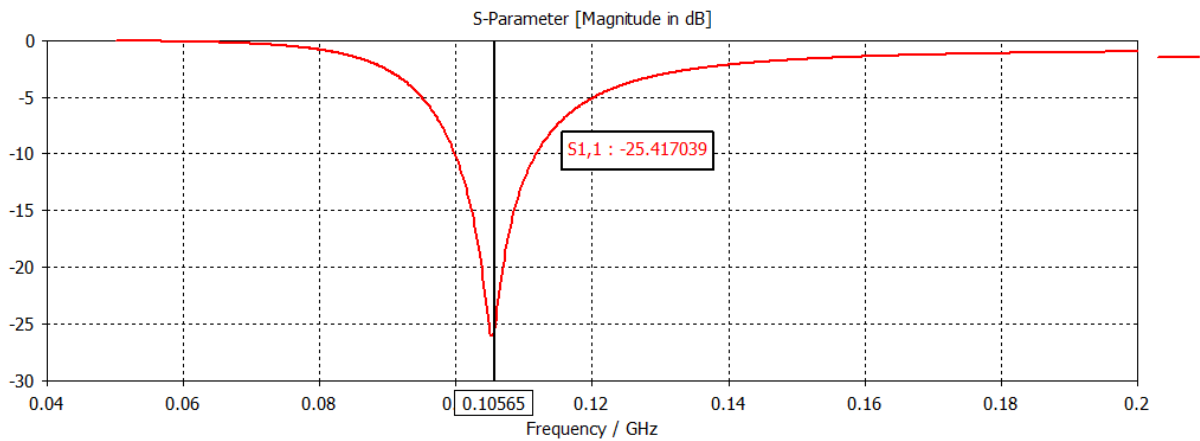
(ข) ระนาบ xz



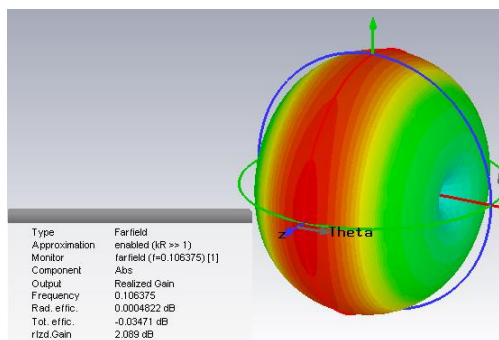
(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.60 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-5

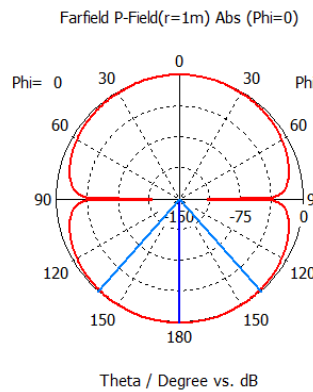
ผลการจำลองอิลิเมนต์ FM-6 ดังแสดงในรูปที่ 4.61 และ รูปที่ 4.62 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 105.65 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -25.417 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 99.95 - 111.65 MHz (แบนด์วิธ 11.7 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz  $82.6^\circ$  ตามลำดับ และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.089 dBi



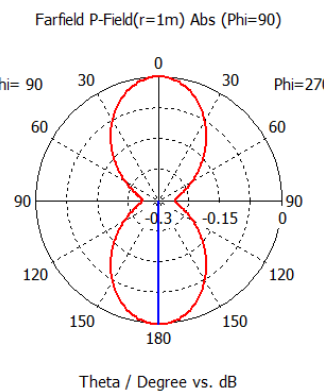
รูปที่ 4.61 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ FM-6



(ก) 3 มิติ



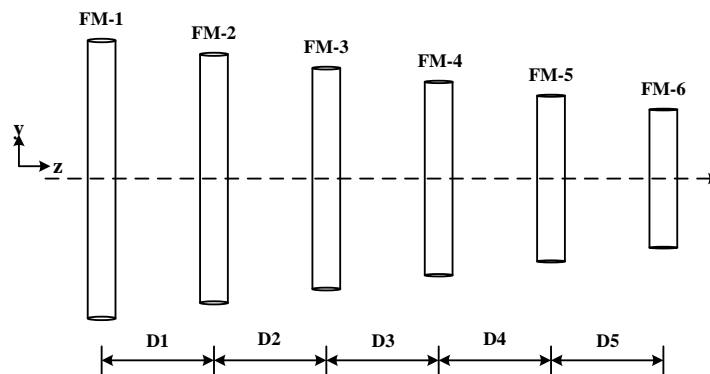
(ข) ระนาบ xz



(ค) ระนาบ yz

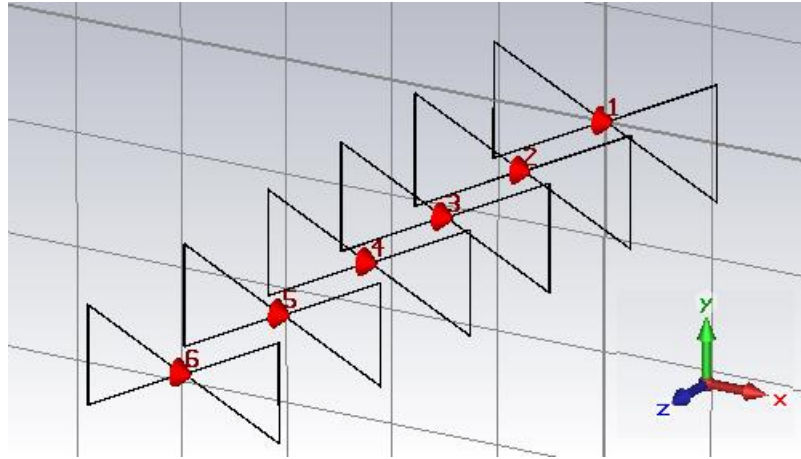
รูปที่ 4.62 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ FM-6

จากผลการจำลองขนาดของสายอากาศไดโพลรูปโบริวแต่ละอิลิเมนต์ เมื่อขนาดของสายอากาศที่เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่ได้กำหนดในการออกแบบ ในขั้นถัดมาเป็นการนำสายอากาศไดโพลรูปโบริวจำนวนทั้งสิ้น 6 อิลิเมนต์ มาออกแบบสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ด้วยการสวิตช์เลือกการทำงานของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ โดยจำลองการวางเรียงซ้อนกันของแต่ละอิลิเมนต์ เพื่อหาระยะห่าง ( $D$ ) ที่เหมาะสมของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.63

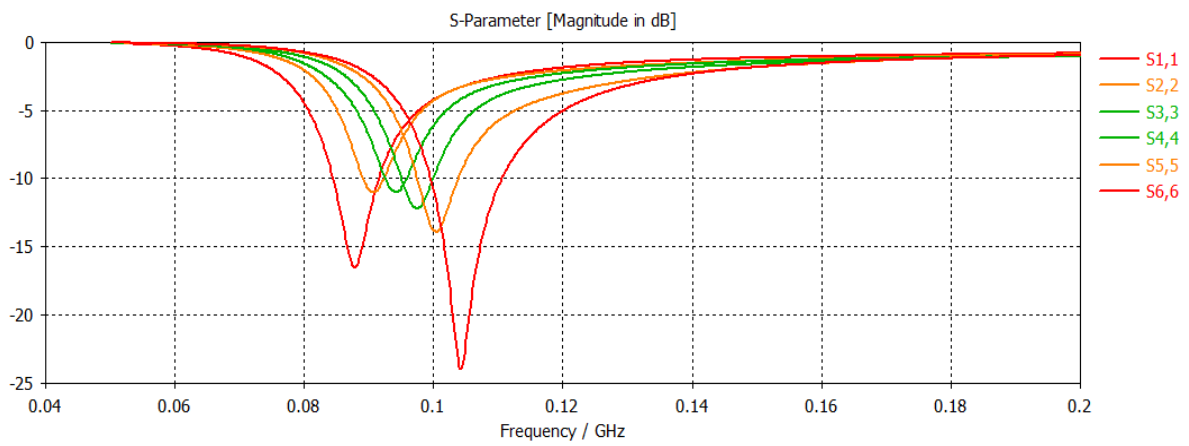


รูปที่ 4.63 การจัดวางสายอากาศไดโพลรูปโบริว 6 อิลิเมนต์ ของกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. (มุมมองด้านข้าง)

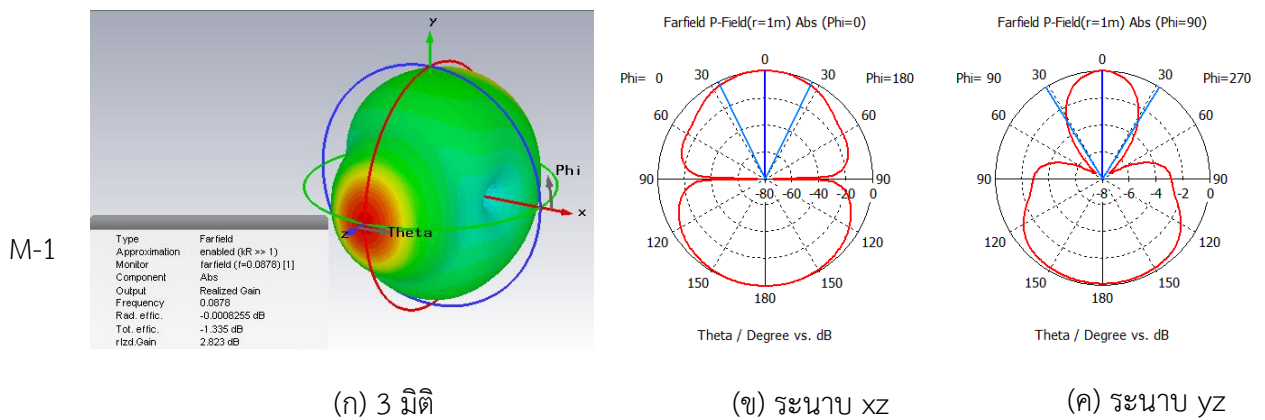
ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไดโพลรูปโบริวทั้ง 6 อิลิเมนต์ ที่ใช้ในการจำลองและผลการจำลอง  $|S_{11}|$  แสดงในรูปที่ 4.64 และรูปที่ 4.65 จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  พบว่า สายอากาศทั้ง 6 อิลิเมนต์ สามารถมาทดแทนครอบคลุมย่านความถี่กิจการ เอฟ.เอ็ม. โดยสายอากาศอิลิเมนต์ FM-2 FM-3 FM-4 และ FM-5 มีระดับการแมตต์ซึ่งที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับการทำงานเป็นสายอากาศเดี่ยวในผลการจำลองก่อนหน้า เนื่องจากสายอากาศข้างเคียงทำหน้าที่เป็นพาราซิติกอิลิเมนต์



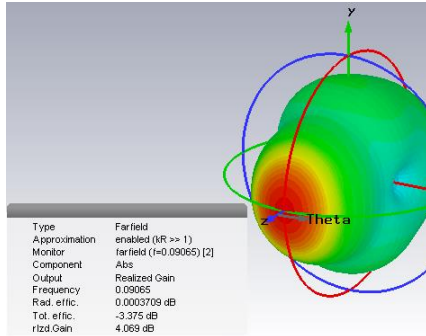
รูปที่ 4.64 การจำลองโครงสร้างสายอากาศรูปโบว์จำนวน 6 อิลิเมนต์ กิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม.



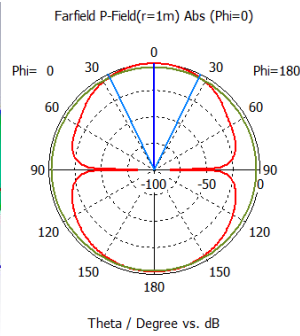
รูปที่ 4.65 ผลการจำลอง S11 ของทั้ง 6 อิลิเมนต์



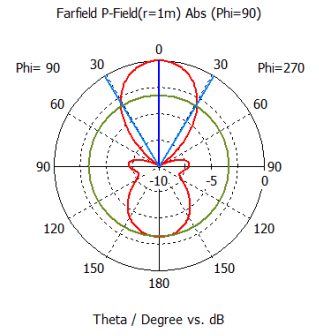
M-2



(ก) 3 มิติ

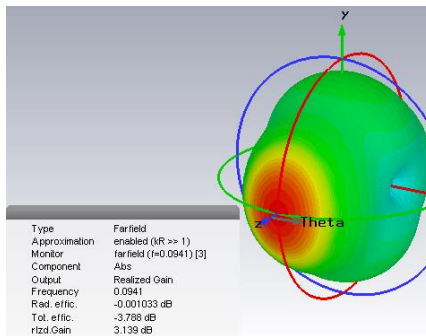


(ข) ระนาบ xz

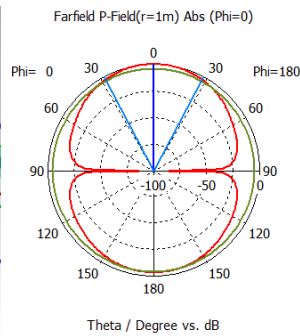


(ค) ระนาบ yz

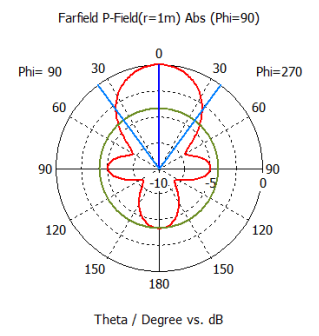
M-3



(ก) 3 มิติ

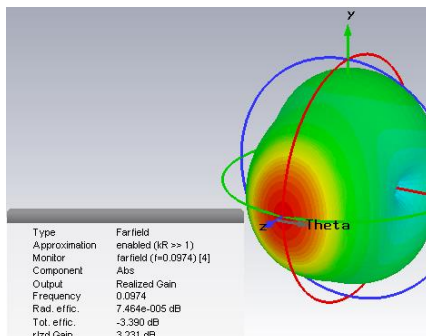


(ข) ระนาบ xz

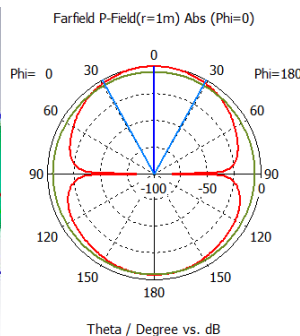


(ค) ระนาบ yz

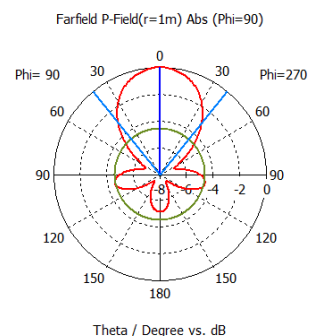
M-4



(ก) 3 มิติ

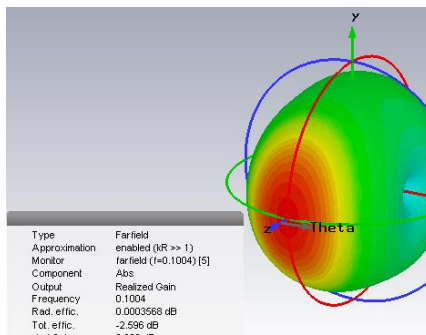


(ข) ระนาบ xz

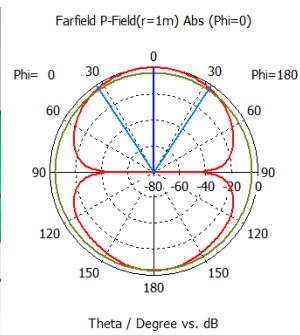


(ค) ระนาบ yz

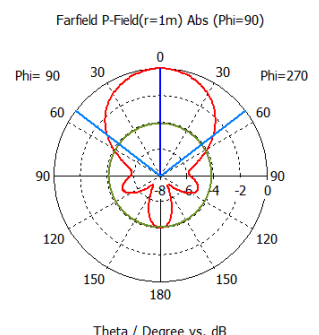
M-5



(ก) 3 มิติ



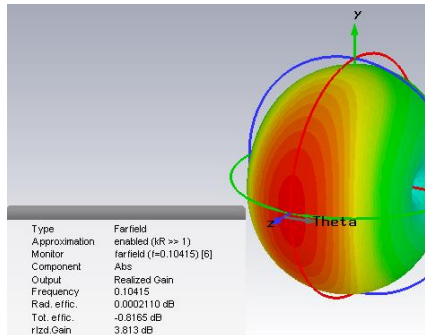
(ข) ระนาบ xz



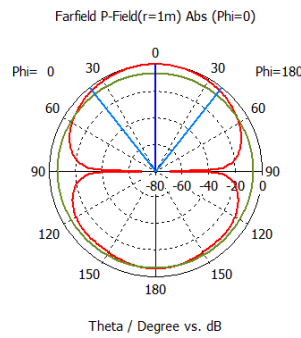
(ค) ระนาบ yz



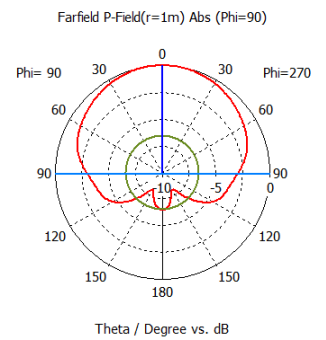
M-6



(ก) 3 มิติ



(ข) ระนาบ xz



(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.66 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทั้ง 6 อิลิเมนต์ ของกิจการวิทยุกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม.

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแต่ละอิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลรูบิโรว์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ แสดงในรูปที่ 4.66 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ของสายอากาศไดโพลรูบิโรว์ทั้ง 6 อิลิเมนต์ ค่อนข้างเหมือนกันและมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ  $52^{\circ}$   $51.3^{\circ}$   $56.2^{\circ}$   $58^{\circ}$   $66.8^{\circ}$  และ  $76.6^{\circ}$  ตามลำดับ ขณะที่ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ yz เท่ากับ  $63.8^{\circ}$   $62.5^{\circ}$   $72.8^{\circ}$   $77.9^{\circ}$   $105.2^{\circ}$  และ  $181^{\circ}$  ตามลำดับ นอกจากนี้อัตราขยายของสายอากาศรูบิโรว์แต่ละอิลิเมนต์จะมีค่าเท่ากับ 2.82 dBi 4.07 dBi 3.14 dBi 3.23 dBi 3.26 dBi และ 3.81 dBi ตามลำดับ

ดังนั้นขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้สำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. ที่แจกแจงตามพารามิเตอร์ของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์แสดงในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลรูปโบริวสำหรับกิจการกระจายเสียงเอฟ.เอ็ม.

อิลิเมนต์ที่	$h$ (cm.)	$L$ (cm.)	$\theta$ (deg.)	ระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ ( $D_i - D_{i+1}$ ) (cm.)
FM-1	50.50	50.44	53.2	57.65
FM-2	48.50	48.47	53.2	53.06
FM-3	47.00	46.71	53.2	51.20
FM-4	45.00	45.07	53.2	59.45
FM-5	43.50	43.54	53.2	67.94
FM-6	42.00	42.20	53.2	-

## ข) สายอากาศไดโพลรูปีโบว์สำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล

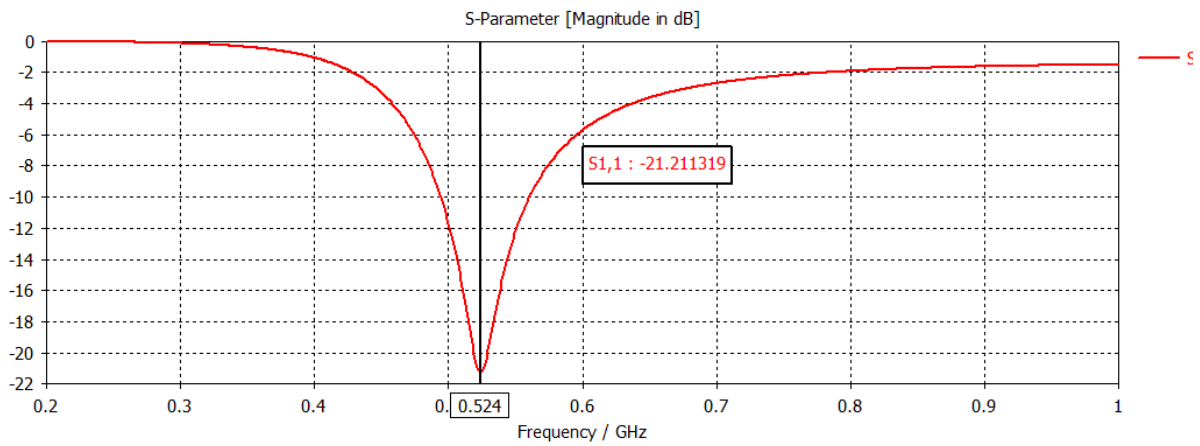
จากประกาศคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่องแผนความถี่วิทยุสำหรับกิจการโทรทัศน์ภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล ที่กำหนดกลุ่มช่องความถี่วิทยุสำหรับจังหวัดนครศรีธรรมราชไว้ที่ Dc ซึ่งมีจำนวนช่องความถี่วิทยุเท่ากับ 6 ช่องความถี่ ประกอบด้วยหมายเลขช่องความถี่วิทยุ ดังนี้ คือ 27 30 33 37 41 และ 49 แต่ละช่องความถี่วิทยุมีแบนด์วิธ 8 MHz ในการออกแบบเพื่อกำหนดจำนวนของสายอากาศไดโพลรูปีโบว์ให้ครอบคลุมย่านความถี่ดังกล่าว ได้พิจารณาถึงแบนด์วิธของสายอากาศไดโพลรูปีโบว์จากผลการจำลองในหัวข้อก่อนหน้า ดังนั้นจะมีสายอากาศทั้งหมด 6 อิลิเมนต์ สำหรับแต่ละช่องความถี่วิทยุ ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 อิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลรูปีโบว์สำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล

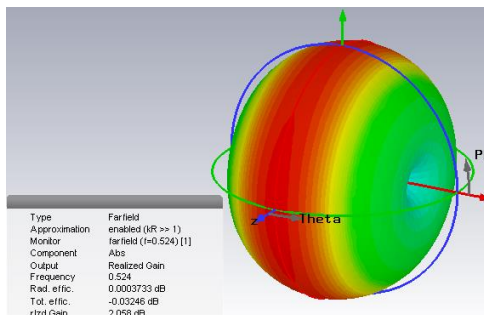
อิลิเมนต์ที่	หมายเลขช่องความถี่วิทยุ	ย่านความถี่ (MHz)	ความถี่กลาง (MHz)	แบนด์วิธ (MHz)
DTV-1	27	518 - 526	522	8
DTV-2	30	542 - 550	546	8
DTV-3	33	566 - 574	570	8
DTV-4	37	598 - 606	602	8
DTV-5	41	630 - 638	634	8
DTV-6	49	694 - 702	698	8

ในการออกแบบขั้นต้น ได้คำนวณขนาดของโครงสร้างของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ ก่อนนำไปจำลองการทำงานในโปรแกรมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเดียวกับการออกแบบสายอากาศไดโพลรูปีโบว์สำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. ต่างกันตรงที่ความยาวรวมของสามเหลี่ยมรูปีโบว์แต่ละด้านเท่ากับ  $0.37 \lambda$  และความสูงของสายอากาศไดโพลรูปีโบว์เท่ากับ  $0.1 \lambda$

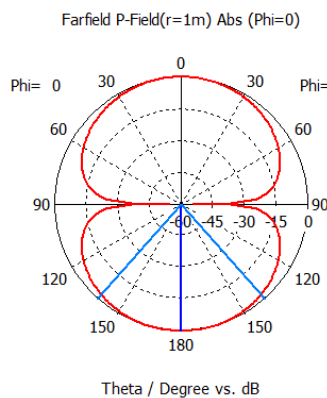
ผลการจำลองอิลิเมนต์ DTV-1 ดังแสดงในรูปที่ 4.67 และ รูปที่ 4.68 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 524 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -21.211 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 494.40 - 560.00 MHz (แบนด์วิธ 65.6 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $82.9^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.058 dBi



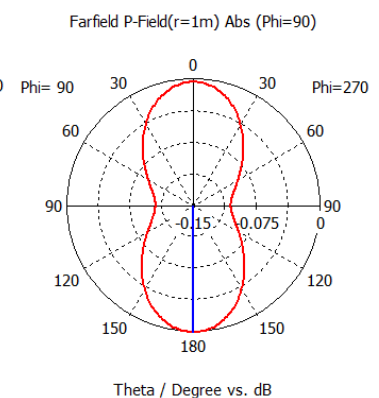
รูปที่ 4.67 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-1



(ก) 3 มิติ



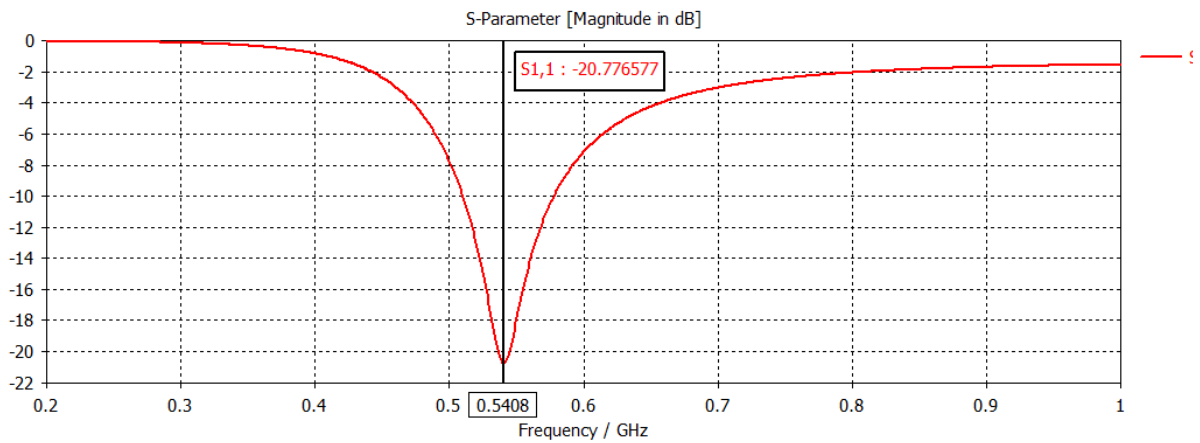
(ข) ระนาบ xz



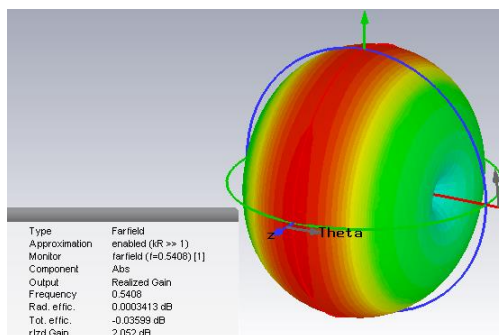
(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.68 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-1

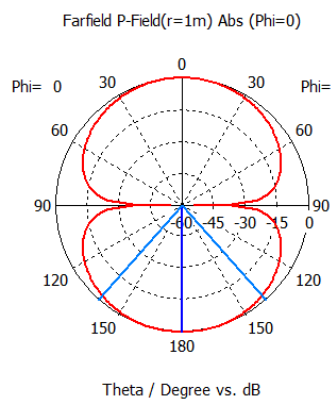
ผลการจำลองอิลิเมนต์ DTV-2 ดังแสดงในรูปที่ 4.69 และ รูปที่ 4.70 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 540.80 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -20.777 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 510.40 - 577.60 MHz (แบนด์วิธ 67.2 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $82.9^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.052 dBi



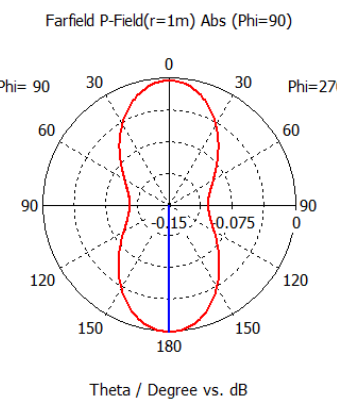
รูปที่ 4.69 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-2



(ก) 3 มิติ



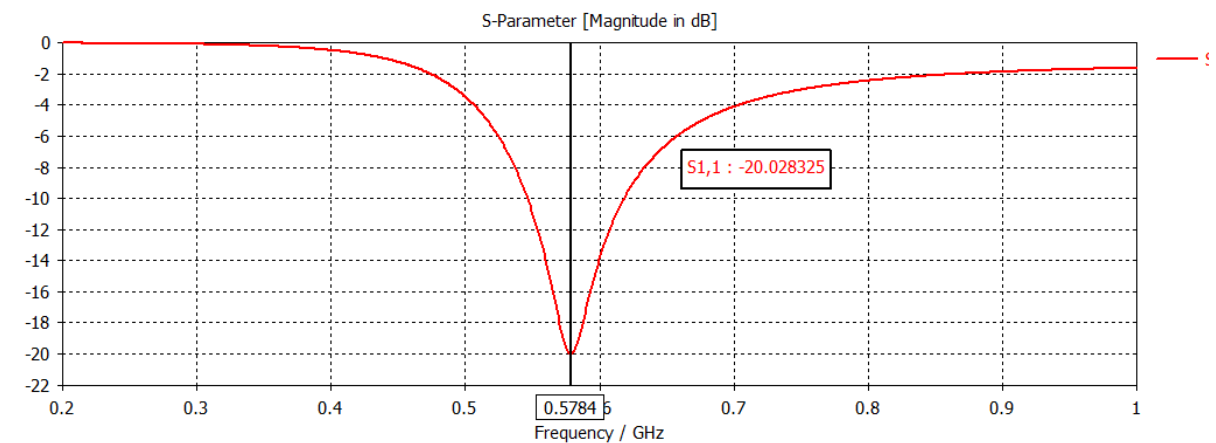
(ข) ระนาบ xz



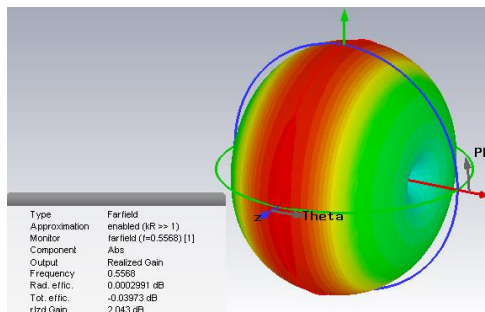
(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.70 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-2

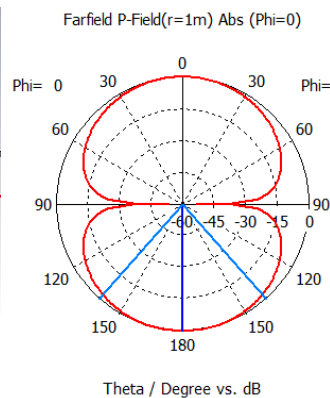
ผลการจำลองอิลิเมนต์ DTV-3 ดังแสดงในรูปที่ 4.71 และ รูปที่ 4.72 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 578.40 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -20.028 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 547.20 - 617.60 MHz (แบนด์วิธ 70.4 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $83.0^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.043 dBi



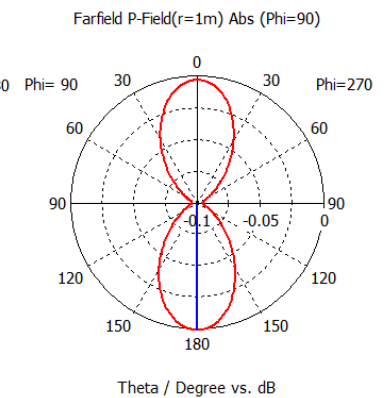
รูปที่ 4.71 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-3



(ก) 3 มิติ



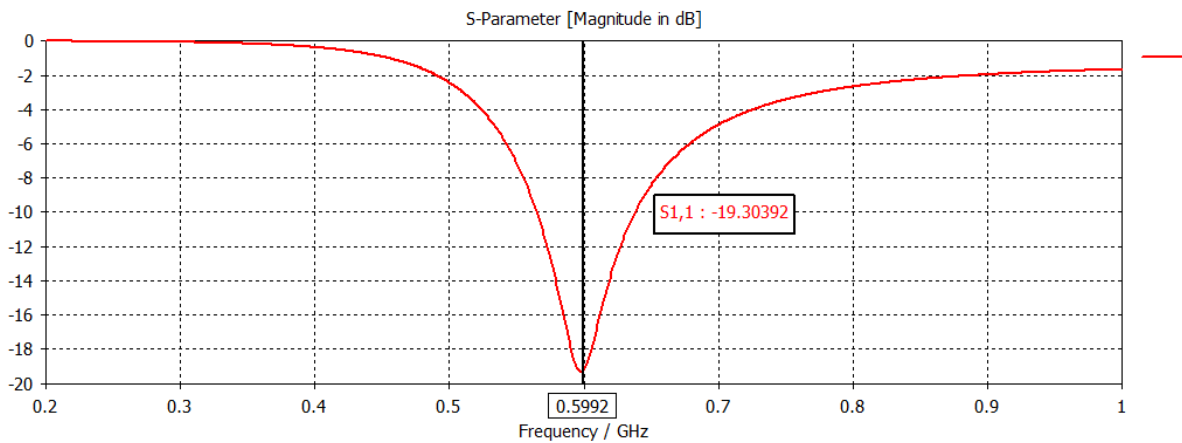
(ข) ระนาบ xz



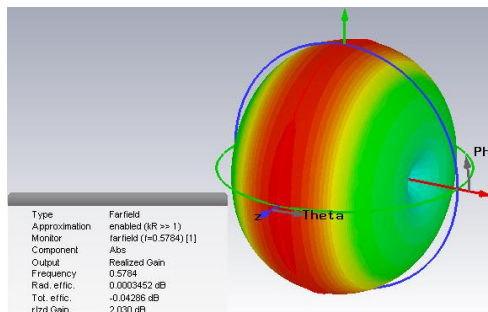
(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.72 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-3

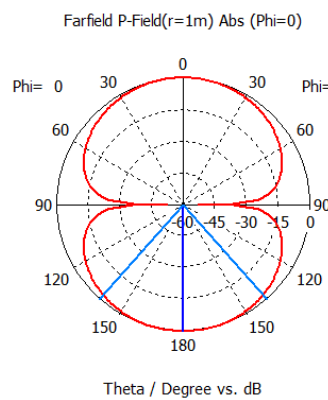
ผลการจำลองอิลิเมนต์ DTV-4 ดังแสดงในรูปที่ 4.73 และ รูปที่ 4.74 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 599.20 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -19.304 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 565.60 - 637.60 MHz (แบนด์วิธ 72 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $83.0^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.03 dBi



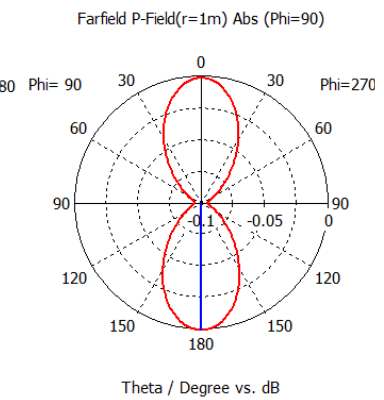
รูปที่ 4.73 ผลการจำลอง  $S_{11}$  ของอิลิเมนต์ DTV-4



(ก) 3 มิติ



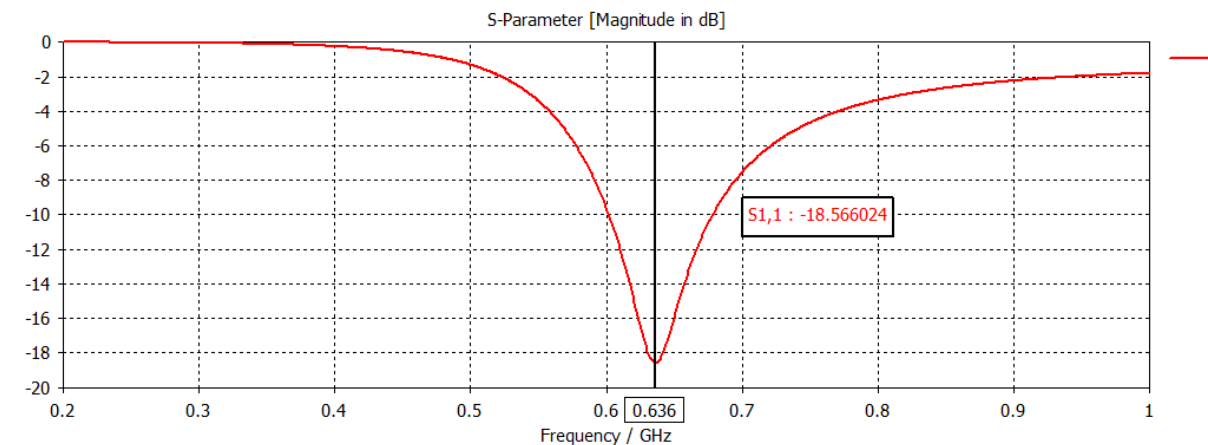
(ข) ระนาบ xz



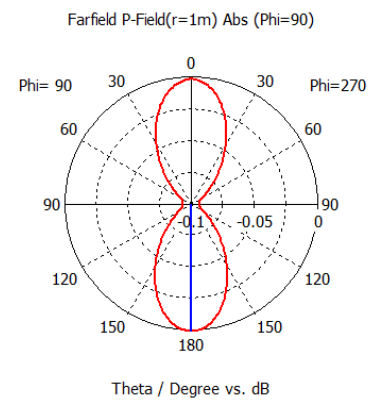
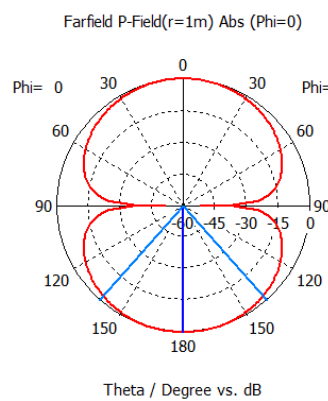
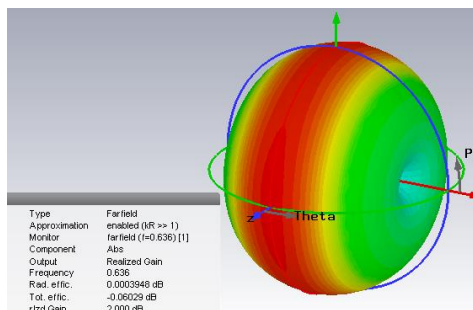
(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.74 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-4

ผลการจำลองอิลิเมนต์ DTV-5 ดังแสดงในรูปที่ 4.75 และ รูปที่ 4.76 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 636 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -18.566 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 602.40 - 677.60 MHz (แบนด์วิธ 75.2 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $83.1^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 2.0 dBi



รูปที่ 4.75 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-5



(ก) 3 มิติ

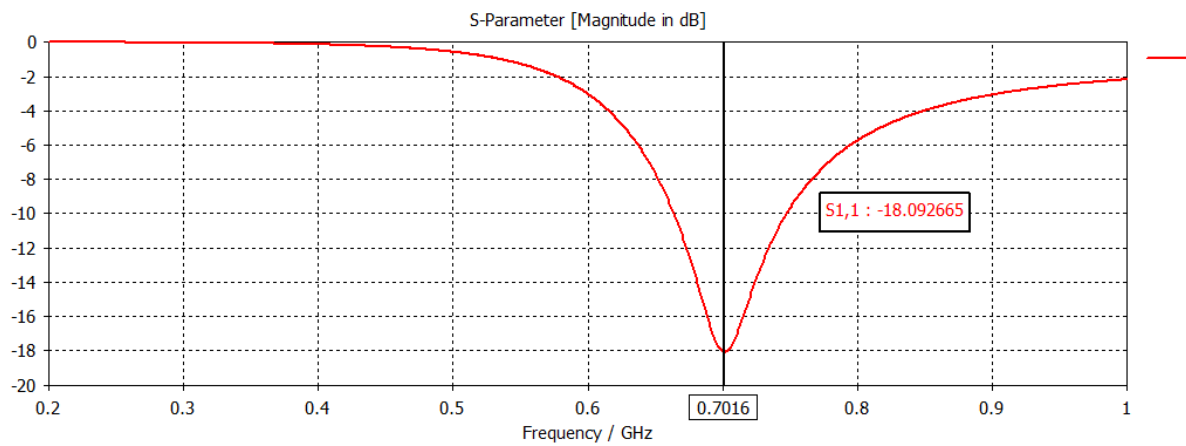
(ข) ระนาบ xz

(ค) ระนาบ yz

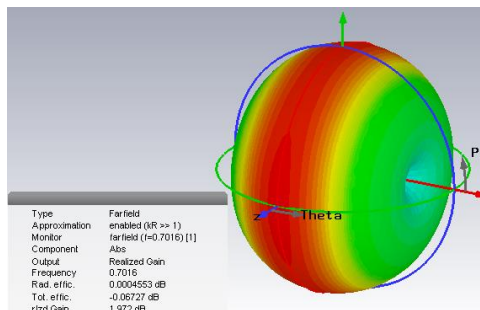
รูปที่ 4.76 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-5



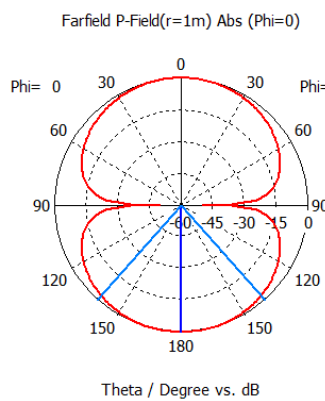
ผลการจำลองอิลิเมนต์ DTV-6 ดังแสดงในรูปที่ 4.77 และ รูปที่ 4.78 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 701.60 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -18.093 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 664.80 - 747.20 MHz (แบนด์วิธ 82.4 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $83.0^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 1.98 dBi



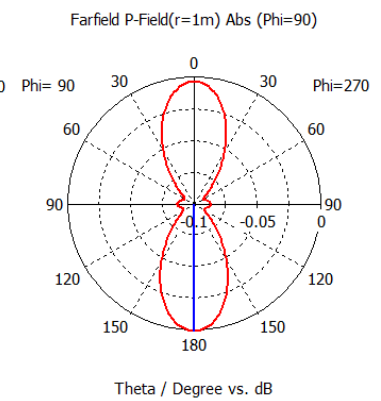
รูปที่ 4.77 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ DTV-6



(ก) 3 มิติ



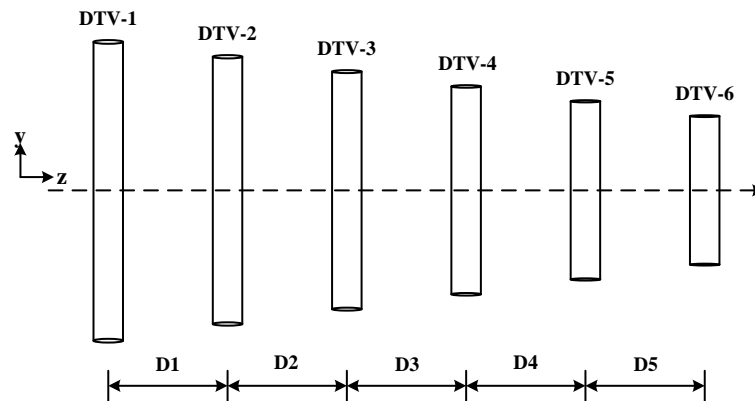
(ข) ระนาบ xz



(ค) ระนาบ yz

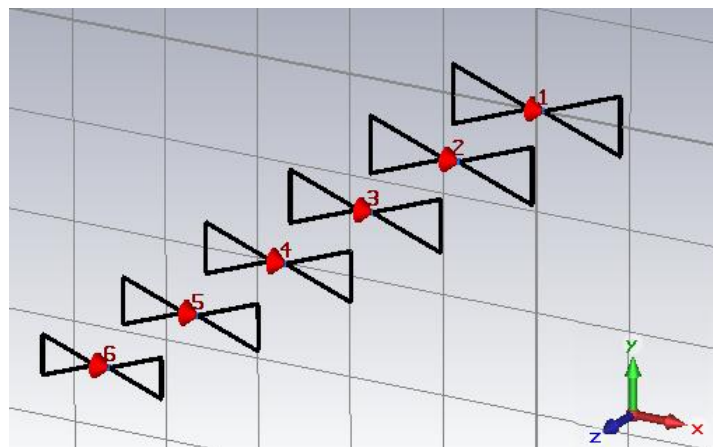
รูปที่ 4.78 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ DTV-6

จากผลการจำลองขนาดของสายอากาศไดโพลรูปร่างแต่ละอิลิเมนต์ เมื่อได้ขนาดของสายอากาศที่เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่กำหนดในการออกแบบ ถัดมาจึงนำสายอากาศไดโพลรูปร่างจำนวนทั้งสิ้น 6 อิลิเมนต์ มาออกแบบเป็นสายอากาศไดโพลรูปร่างที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ด้วยการสวิตซ์เลือกการทำงานของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ โดยจำลองการวางเรียงซ้อนกันของแต่ละอิลิเมนต์ เพื่อหาระยะห่าง ( $D$ ) ที่เหมาะสมของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.79

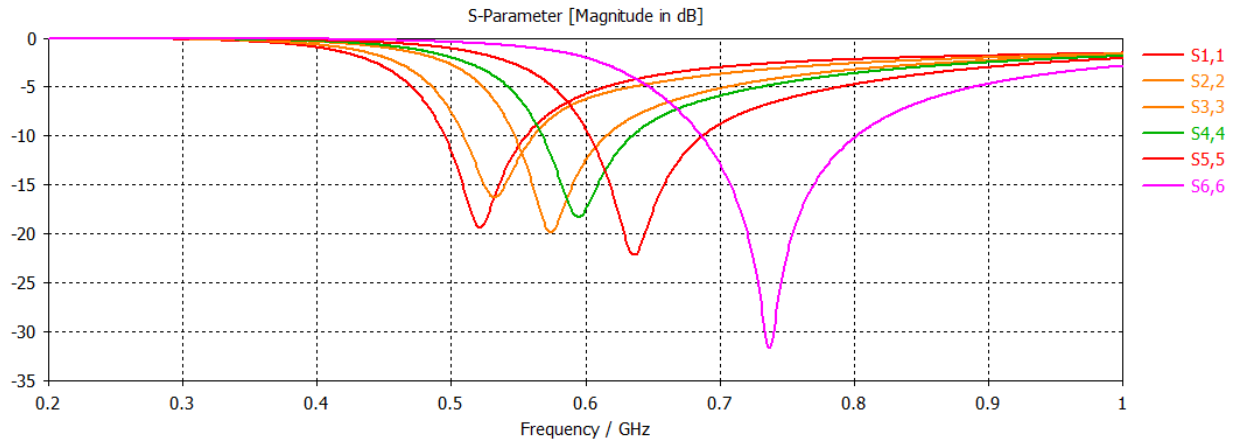


รูปที่ 4.79 การจัดวางสายอากาศไดโพลรูปร่าง 6 อิลิเมนต์ ของกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล (มุมมองด้านข้าง)

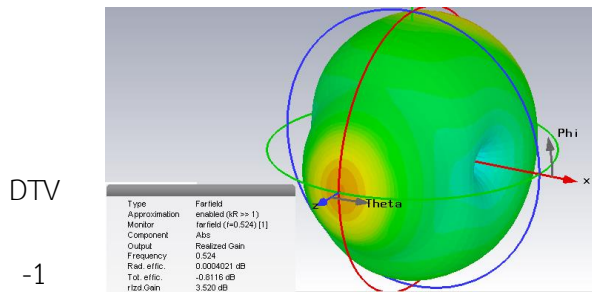
ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไดโพลรูปร่างทั้ง 6 อิลิเมนต์ ที่ใช้ในการจำลองและผลการจำลอง  $|S_{11}|$  แสดงในรูปที่ 4.80 และรูปที่ 4.81 จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  พบว่า สายอากาศทั้ง 6 อิลิเมนต์ สามารถมากรทำงานครอบคลุมย่านความถี่กิจการโทรทัศน์ดิจิทัล



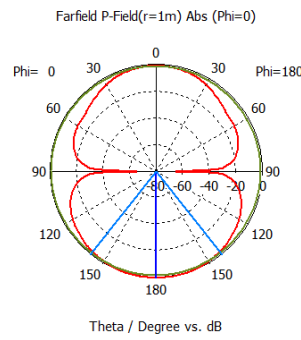
รูปที่ 4.80 การจำลองโครงสร้างสายอากาศไดโพลรูปร่าง 6 อิลิเมนต์ ของกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล



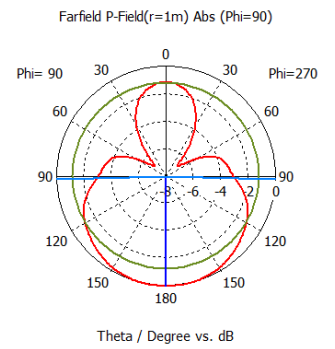
รูปที่ 4.81 ผลการจำลอง S11 ของทั้ง 6 อิลิเมนต์



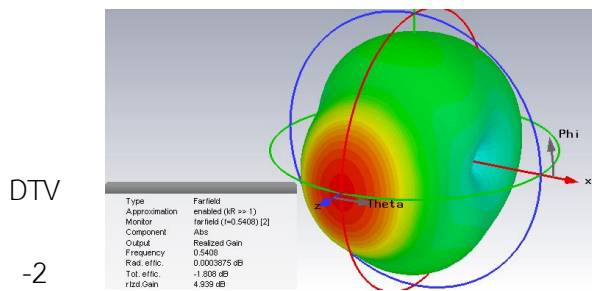
(ก) 3 มิติ



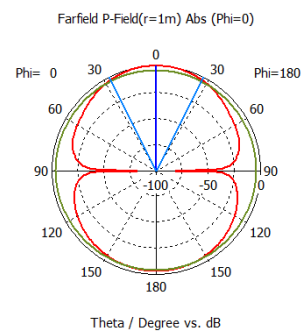
(ข) ระนาบ xz



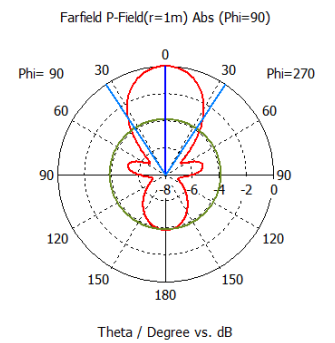
(ค) ระนาบ yz



(ก) 3 มิติ



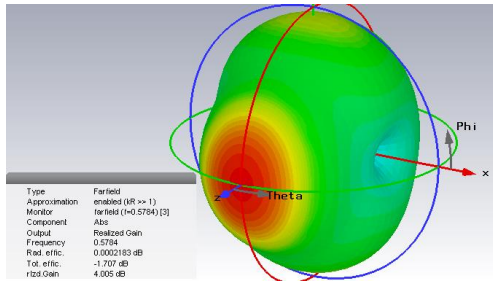
(ข) ระนาบ xz



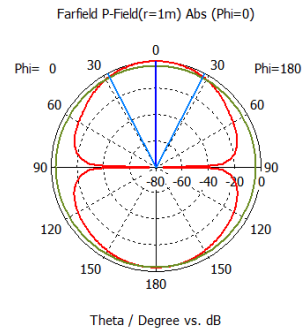
(ค) ระนาบ yz

DTV

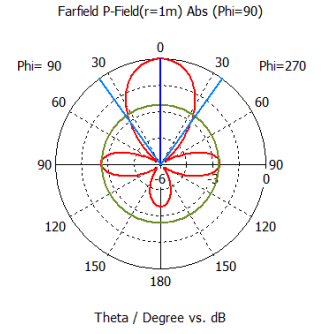
-3



(ก) 3 มิติ



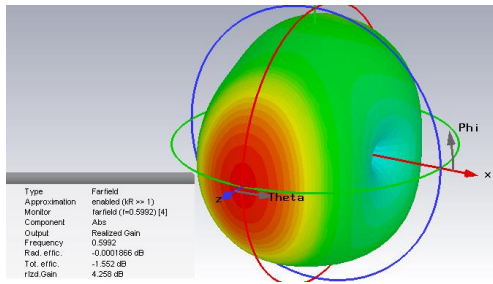
(ข) ระนาบ xz



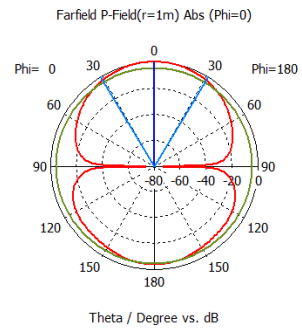
(ค) ระนาบ yz

DTV

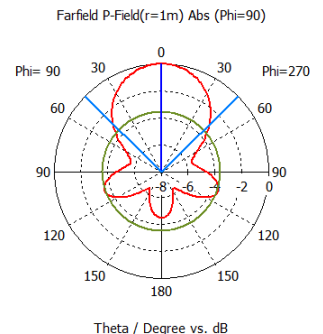
-4



(ก) 3 มิติ



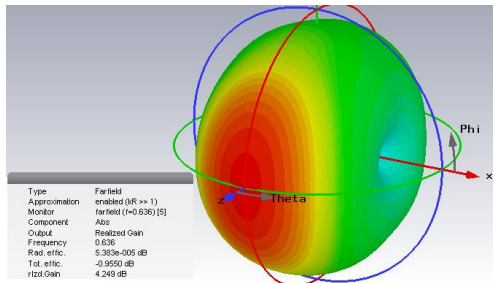
(ข) ระนาบ xz



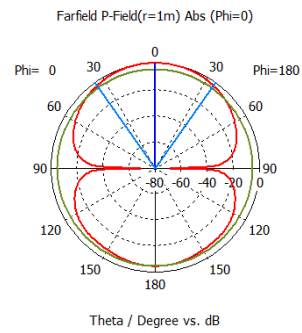
(ค) ระนาบ yz

DTV

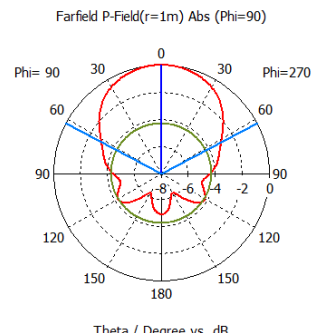
-5



(ก) 3 มิติ



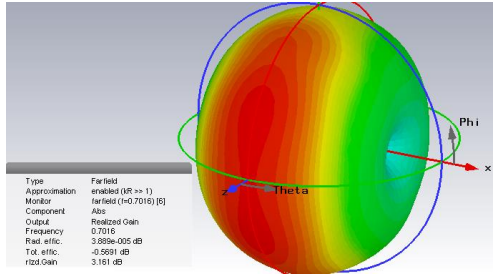
(ข) ระนาบ xz



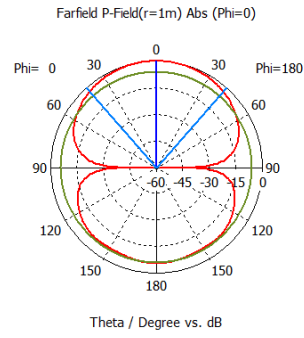
(ค) ระนาบ yz

DTV

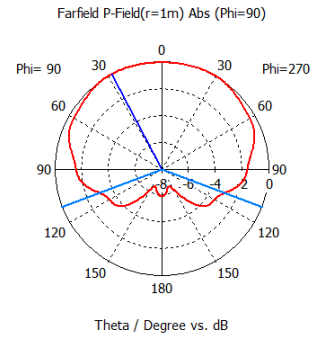
-6



(ก) 3 มิติ



(ข) ระนาบ xz



(ค) ระนาบ yz

### รูปที่ 4.82 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทั้ง 6 อีลิเมนต์

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแต่ละอีลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่แสดงในรูปที่ 4.82 จะเห็นได้ว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ของสายอากาศไดโพลรูปโบริวทั้ง 6 อีลิเมนต์ ค่อนข้างเหมือนกันและมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ  $76.7^\circ$   $53.6^\circ$   $55^\circ$   $62.4^\circ$   $70.7^\circ$  และ  $83.2^\circ$  ตามลำดับ ขณะที่ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ yz เท่ากับ  $177.1^\circ$   $67.3^\circ$   $71.3^\circ$   $91.1^\circ$   $124.4^\circ$  และ  $221.6^\circ$  ตามลำดับ นอกจากนี้อัตราขยายของสายอากาศรูปโบริวแต่ละอีลิเมนต์จะมีค่าเท่ากับ 3.52 dBi 4.94 dBi 4.0 dBi 4.26 dBi 4.25 dBi และ 3.16 dBi ตามลำดับ

ดังนั้น ขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้สำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล ที่แจกแจงตามพารามิเตอร์ของสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์แสดงในตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลรูปโบริวสำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล

อิลิเมนต์ที่	$h$ (cm.)	$L$ (cm.)	$\theta$ (deg.)	ระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ ( $D_i - D_{i+1}$ ) (cm.)
DTV-1	5.80	7.20	43.4	15.8
DTV-2	5.50	6.90	43.4	15.8
DTV-3	5.00	6.25	43.4	15.8
DTV-4	4.70	5.93	43.4	15.8
DTV-5	4.30	5.40	43.4	15.8
DTV-6	3.60	4.70	43.4	-

### ค) สายอากาศไดโพลสำหรับกิจการโทรคมนาคม (Mobile 4G)

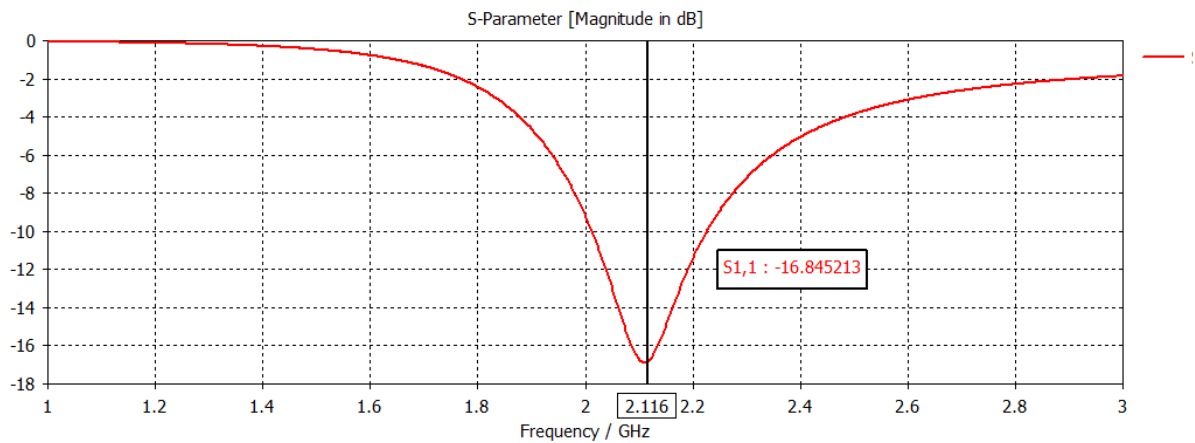
จากแผนการใช้งานสเปกตรัมความถี่ในประเทศไทยสำหรับกิจการโทรคมนาคม (Mobile 4G) ตาม IMT-2000 Terrestrial (Thailand) ที่กำหนดช่องความถี่ไว้ 4 ช่อง ในย่านความถี่ 2110 - 2170 MHz แต่ละช่องความถี่วิทยุมีแบนด์วิธ 15 MHz ในการออกแบบเพื่อกำหนดจำนวนของสายอากาศไดโพลให้ครอบคลุมย่านความถี่ดังกล่าว ได้พิจารณาถึงแบนด์วิธของสายอากาศไดโพลจากผลการจำลองในหัวข้อก่อนหน้า ดังนั้นจะมีสายอากาศทั้งหมด 4 อิลิเมนต์ สำหรับแต่ละช่องความถี่วิทยุ ดังแสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 อิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลสำหรับกิจการโทรคมนาคม (Mobile 4G)

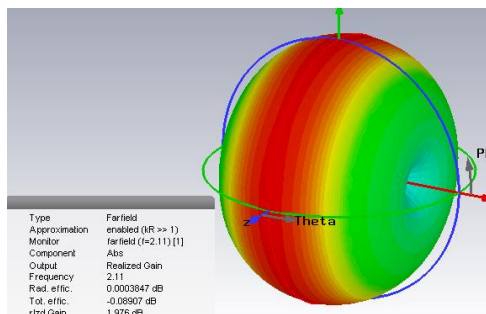
อิลิเมนต์ที่	ช่องความถี่วิทยุ	ย่านความถี่ (MHz)	ความถี่กลาง (MHz)	แบนด์วิธ (MHz)
Mb-1	1	2110 - 2125	2117.5	15
Mb-2	2	2125 - 2140	2132.5	15
Mb-3	3	2140 - 2155	2147.5	15
Mb-4	4	2155 - 2170	2162.5	15

ในการออกแบบขั้นต้น ได้คำนวณขนาดของโครงสร้างของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ ก่อนนำไปจำลองการทำงานในโปรแกรมทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการเดียวกับการออกแบบสายอากาศไดโพลรูปโบริวสำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. และกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล แต่เนื่องจากขนาดความยาวของสายอากาศที่คำนวณมีขนาดที่สั้นมาก จนไม่สามารถสร้างเป็นโครงสร้างรูปโบริวได้จริง ดังนั้นสำหรับกิจการโทรคมนาคม จึงได้ออกแบบสายอากาศไดโพลแบบตรงแทน

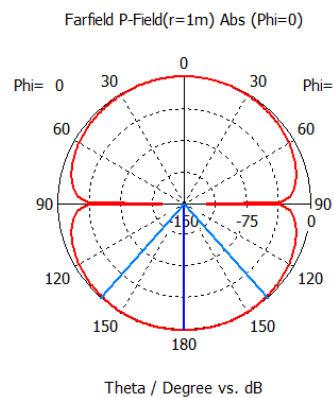
ผลการจำลองอิลิเมนต์ Mb-1 ดังแสดงในรูปที่ 4.83 และ รูปที่ 4.84 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2116 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -16.845 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 2014 - 2226 MHz (แบนด์วิธ 212 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $82.9^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 1.976 dBi



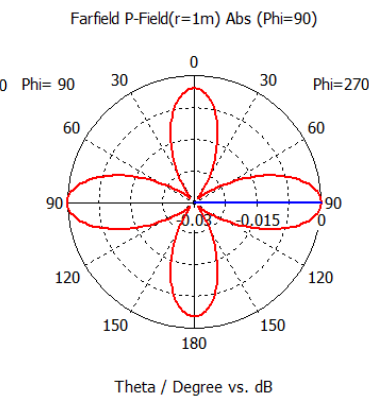
รูปที่ 4.83 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ Mb-1



(ก) 3 มิติ



(ข) ระนาบ xz

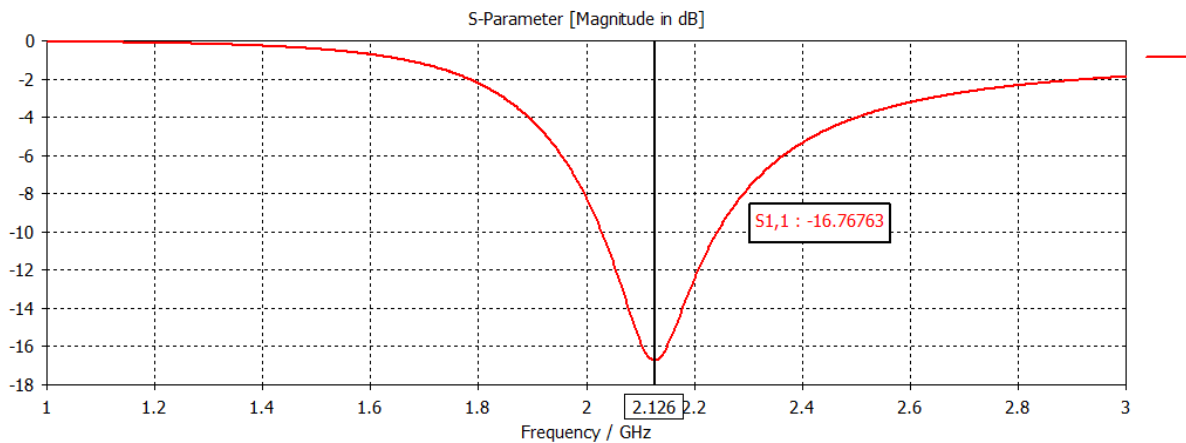


(ค) ระนาบ yz

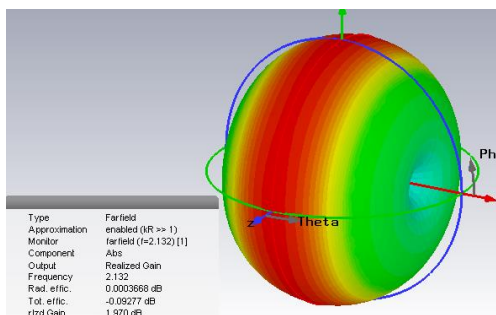
รูปที่ 4.84 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ Mb-1



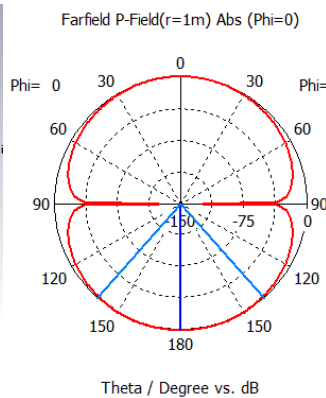
ผลการจำลองอิลิเมนต์ Mb-2 ดังแสดงในรูปที่ 4.85 และ รูปที่ 4.86 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2126 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -16.767 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 2030 - 2242 MHz (แบนด์วิธ 212 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $82.9^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 1.970 dBi



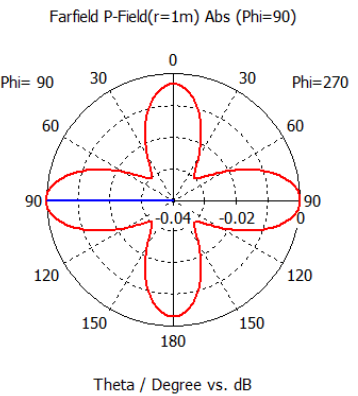
รูปที่ 4.85 ผลการจำลอง  $S_{11}$  ของอิลิเมนต์ Mb-2



(ก) 3 มิติ



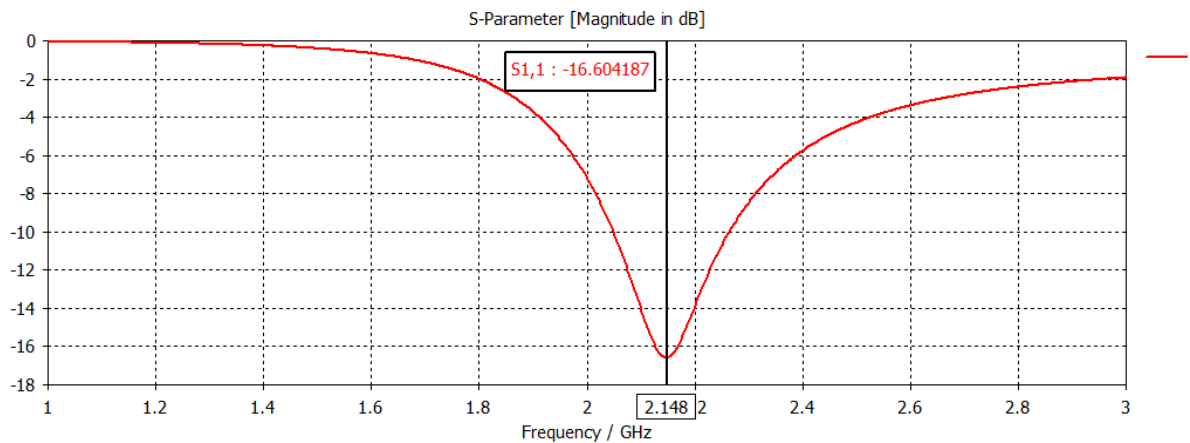
(ข) ระนาบ xz



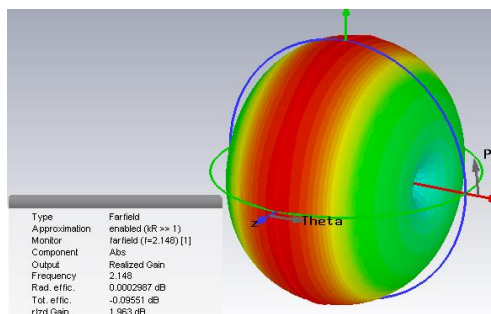
(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.86 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ Mb-2

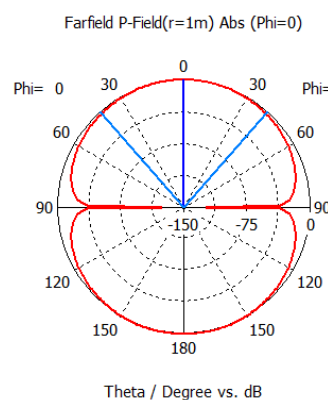
ผลการจำลองอิลิเมนต์ Mb-3 ดังแสดงในรูปที่ 4.87 และ รูปที่ 4.88 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2148 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -16.604 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 2050 - 2262 MHz (แบนด์วิธ 212 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $82.9^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 1.963 dBi



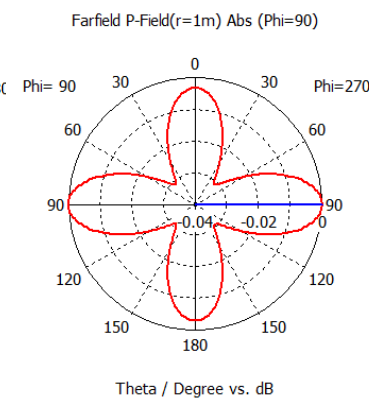
รูปที่ 4.87 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ Mb-3



(ก) 3 มิติ



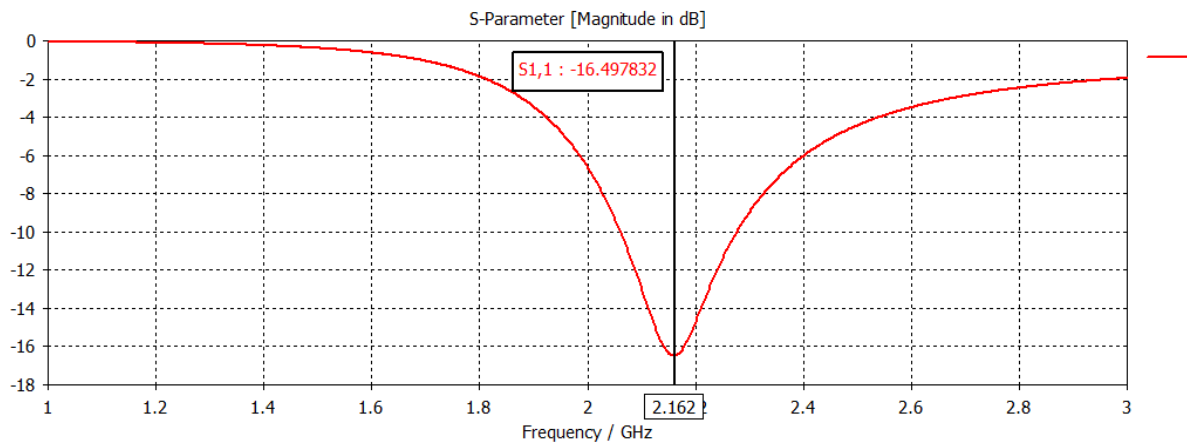
(ข) ระนาบ xz



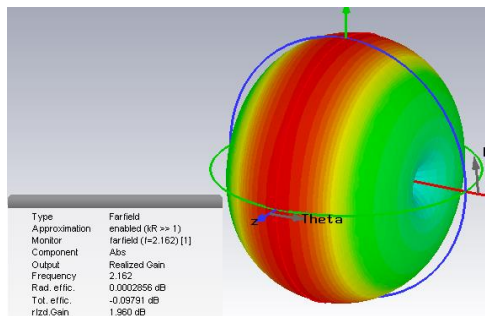
(ค) ระนาบ yz

รูปที่ 4.88 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ Mb-3

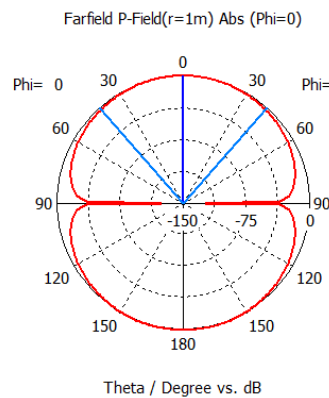
ผลการจำลองอิลิเมนต์ Mb-4 ดังแสดงในรูปที่ 4.89 และ รูปที่ 4.90 ซึ่งจากผลการจำลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  จะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 2162 MHz โดยมีค่า  $S_{11}$  เท่ากับ -16.498 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ 2062 - 2276 MHz (แบนด์วิธ 214 MHz) ขณะที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ  $82.9^\circ$  และสายอากาศมีอัตราขยายเท่ากับ 1.960 dBi



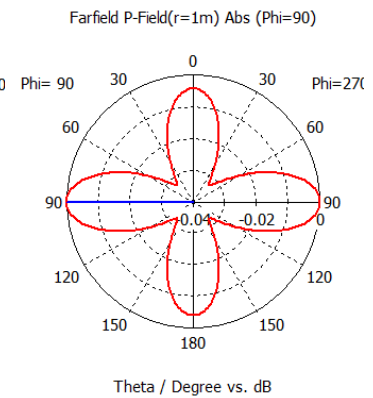
รูปที่ 4.89 ผลการจำลอง S11 ของอิลิเมนต์ Mb-4



(ก) 3 มิติ



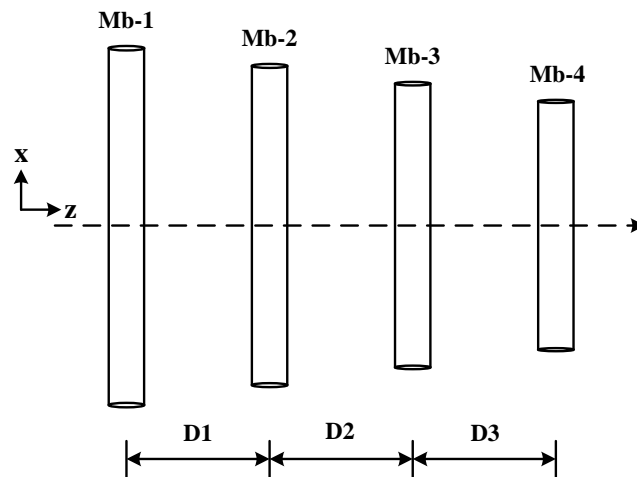
(ข) ระนาบ xz



(ค) ระนาบ yz

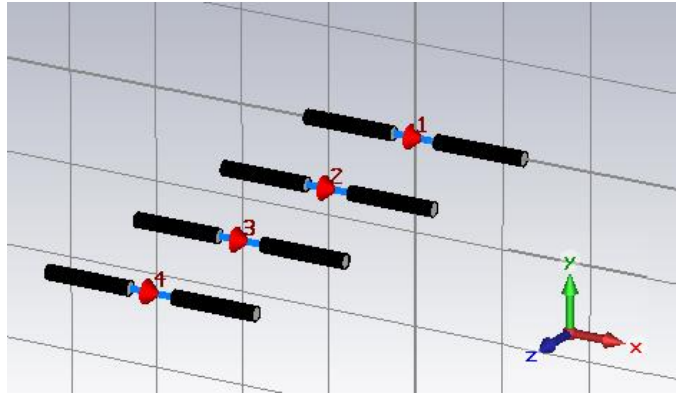
รูปที่ 4.90 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของอิลิเมนต์ Mb-4

จากผลการจำลองขนาดของสายอากาศไดโพลแต่ละอีลิเมนต์ เมื่อได้ขนาดของสายอากาศที่เหมาะสมกับช่วงความถี่ที่กำหนดในการออกแบบ ถัดมาจึงนำสายอากาศไดโพลจำนวนทั้งสิ้น 4 อีลิเมนต์ มาออกแบบเป็นสายอากาศไดโพลที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ด้วยการสวิตช์เลือกการทำงานของสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์ โดยจำลองการวางเรียงซ้อนกันของแต่ละอีลิเมนต์ เพื่อหาระยะห่าง ( $D$ ) ที่เหมาะสมของสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.91

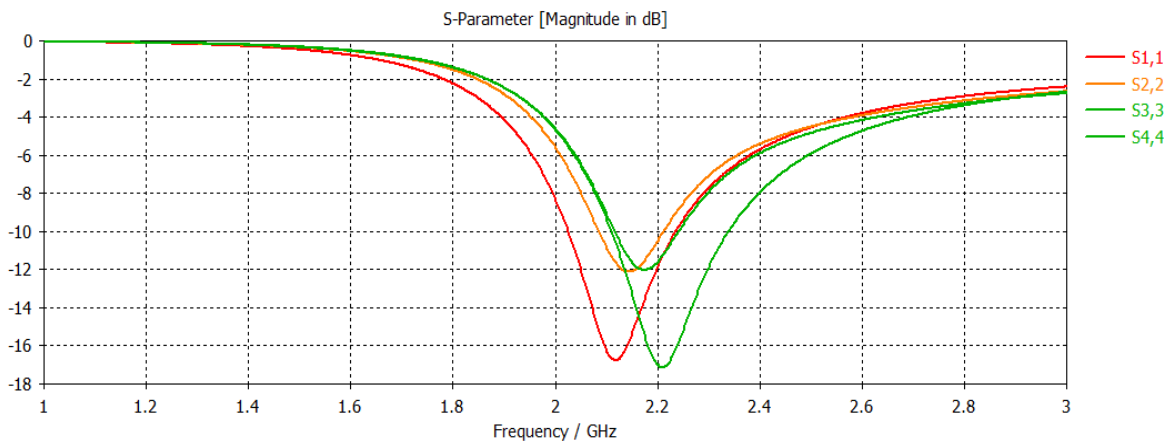


รูปที่ 4.91 การจัดวางสายอากาศไดโพล 4 อีลิเมนต์ ของกิจการโทรคมนาคม (มุมมองด้านข้าง)

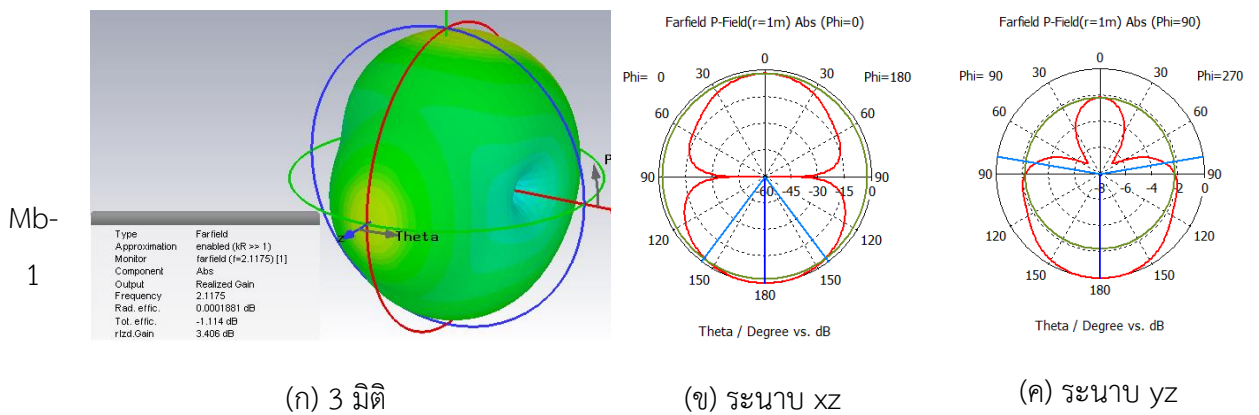
ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศไดโพลทั้ง 4 อีลิเมนต์ ที่ใช้ในการจำลองและผลการจำลอง  $|S_{11}|$  แสดงในรูปที่ 4.92 และรูปที่ 4.93 จากผลการจำลอง  $|S_{11}|$  พบว่า สายอากาศทั้ง 4 อีลิเมนต์ สามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่กิจการโทรคมนาคม (Mobile 4G) โดยสายอากาศอีลิเมนต์ Mb-2 และ Mb-3 มีระดับการแมตต์ซึ่งที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับการทำงานเป็นสายอากาศเดี่ยวในผลการจำลองก่อนหน้า เนื่องจากสายอากาศข้างเคียงทำหน้าที่เป็นพาราซิติกอีลิเมนต์



รูปที่ 4.92 การจำลองโครงสร้างสายอากาศไดโพล 4 อีลิเมนต์ ของกิจการโทรคมนาคม



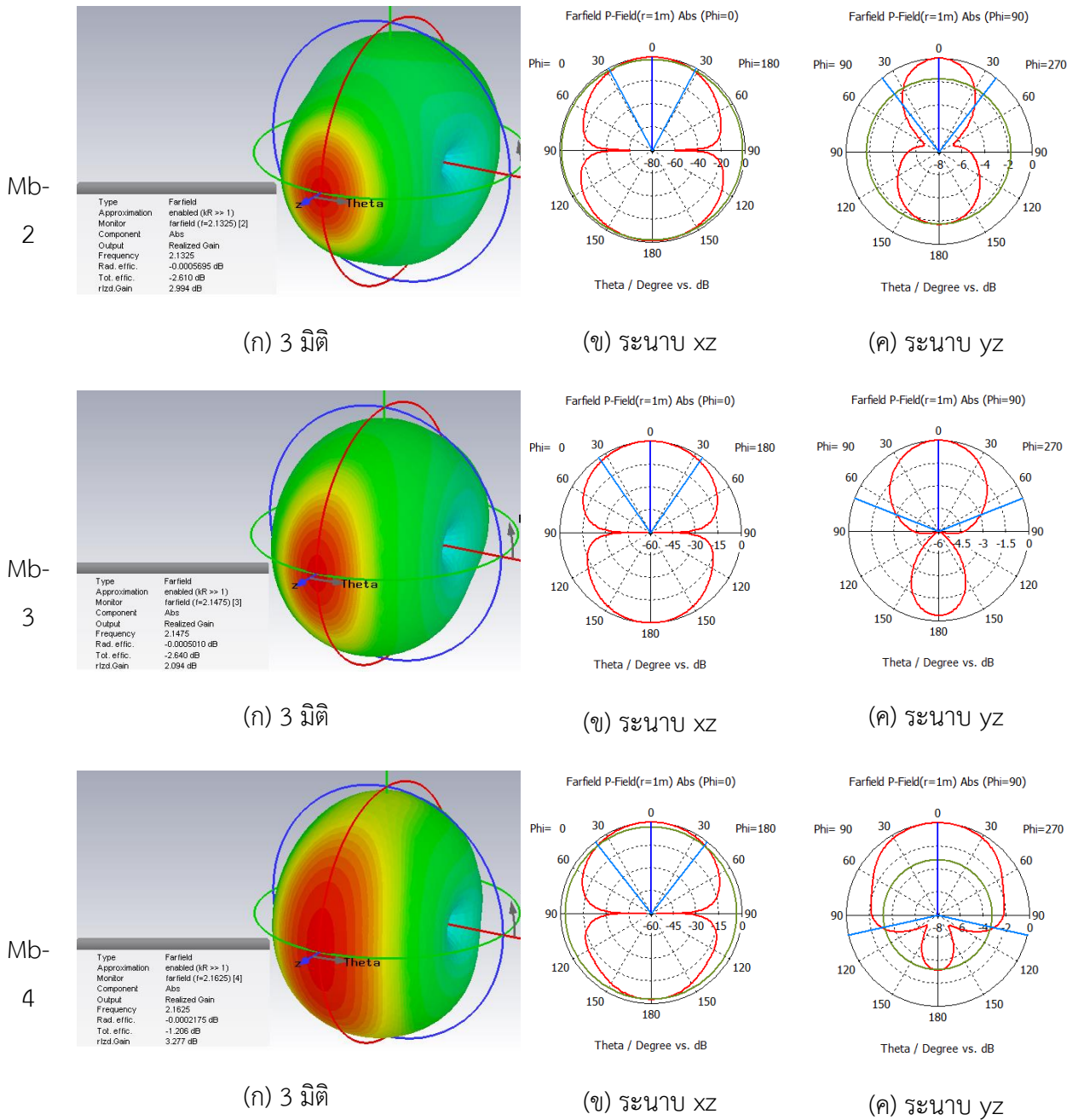
รูปที่ 4.93 ผลการจำลอง S11 ของทั้ง 4 อีลิเมนต์



(ก) 3 มิติ

(ข) ระนาบ xz

(ค) ระนาบ yz



รูปที่ 4.94 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทั้ง 4 อิลิเมนต์

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแต่ละอิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ แสดงในรูปที่ 4.94 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ของสายอากาศไดโพลทั้ง 4 อิลิเมนต์ค่อนข้างเหมือนกันและมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ  $73.6^{\circ}$   $56.6^{\circ}$   $69.4^{\circ}$  และ  $76.1^{\circ}$  ตามลำดับ ขณะที่ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ yz เท่ากับ  $199^{\circ}$   $75.9^{\circ}$   $137.5^{\circ}$  และ  $205.6^{\circ}$  ตามลำดับ นอกจากนี้

อัตราขยายของสายอากาศรูปโบริวแต่ละอิลิเมนต์จะมีค่าเท่ากับ 3.41 dBi 2.99 dBi 2.09 dBi และ 3.28 dBi ตามลำดับ

ดังนั้นขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้สำหรับกิจการโทรทัศน์ ที่แจกแจงตามพารามิเตอร์ของสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์แสดงในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลสำหรับกิจการโทรทัศน์

อิลิเมนต์ที่	$L$ (cm.)	ระยะห่างระหว่างอิลิเมนต์ ( $D_i - D_{i+1}$ ) (cm.)
Mb-1	1.99	3.4
Mb-2	1.89	3.4
Mb-3	1.87	3.4
Mb-4	1.85	-

### ง) อุปกรณ์สวิตช์ทางกล (Mechanic switch)

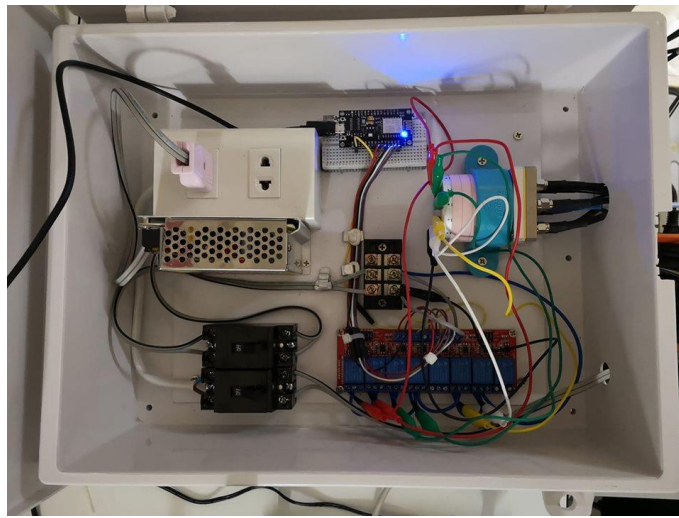
จากการออกแบบสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ในหัวซ็อกก่อนหน้าทั้ง 3 กิจการ ซึ่งกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. กิจการโทรทัศน์ดิจิทัล และกิจการโทรคมนาคม (Mobile 4G) จะใช้สายอากาศรูปโบริวจำนวน 6 อิลิเมนต์ 6 อิลิเมนต์ และ 4 อิลิเมนต์ ตามลำดับ ในการวางซ้อนห่างกันด้วยระยะทางที่เหมาะสม โดยสายอากาศที่ทำงานในช่องความถี่วิทยุที่ต่ำกว่าจะอยู่ด้านหลัง ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนคลื่นให้สายอากาศที่ทำงานในช่องความถี่วิทยุที่สูงกว่า ซึ่งการสวิตช์ความถี่จะใช้อุปกรณ์สวิตช์ทางกล ทำหน้าที่ปรับเลือกสายอากาศให้แต่ละอิลิเมนต์ทำงาน อุปกรณ์สวิตช์ทางกลที่เลือกใช้เป็นสวิตช์ทางกล MSP6TA-12+12 (Mini-Circuits) ซึ่งสามารถใช้งานในช่วงความถี่ DC-12 GHz ให้ค่า Insertion loss ต่ำ ที่ 0.25 dB และมีค่า Isolation ค่อนข้างสูงที่ 90 dB และสามารถทนกำลังได้ถึง 20 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.95



รูปที่ 4.95 อุปกรณ์สวิตช์ทางกลที่ใช้สำหรับปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศไดโพลรูปโบริว



โดยอุปกรณ์สวิตช์ทางกลประกอบด้วยพอร์ตทั้งหมด 7 พอร์ต เป็นพอร์ตอินพุตจำนวน 1 พอร์ต สำหรับรับสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) และเป็นพอร์ตเอาต์พุตจำนวน 6 พอร์ต เชื่อมต่อกับสายอากาศไดโพลรูปโบว์สำหรับเลือกให้แต่ละอิลิเมนต์ทำงาน ซึ่งจะถูกควบคุมการทำงานด้วย Node MCU สำหรับการเลือกพอร์ตเอาต์พุต ผ่านการเปิด-ปิดรีเลย์ จำนวน 6 ตัว รีเลย์แต่ละตัวควบคุมแต่ละพอร์ต ดังแสดงในรูปที่ 4.96 และความสัมพันธ์ระหว่างรีเลย์ที่ควบคุมการทำงานอุปกรณ์สวิตช์ทางกลแต่ละพอร์ตแสดงในตารางที่ 4.21



รูปที่ 4.96 วงจรควบคุมการทำงานสวิตช์ทางกล

ตารางที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างรีเลย์และการควบคุมสวิตช์ทางกล

อิลิเมนต์ของสายอากาศไดโพลรูปโบว์			ลำดับช่องรีเลย์	พอร์ตของสวิตช์ทางกล
กิจการกระจายเสียง FM	กิจการโทรทัศน์ดิจิตอล	กิจการโทรคมนาคม		
FM-1	DTV-1	Mb-1	IN2	J1
FM-2	DTV-2	Mb-2	IN3	J2
FM-3	DTV-3	Mb-3	IN5	J3
FM-4	DTV-4	Mb-4	IN6	J4
FM-5	DTV-5	-	IN7	J5
FM-6	DTV-6	-	IN8	J6

#### 4.3.5 ผลการสร้างและทดสอบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ไดโพลรูปโบว์

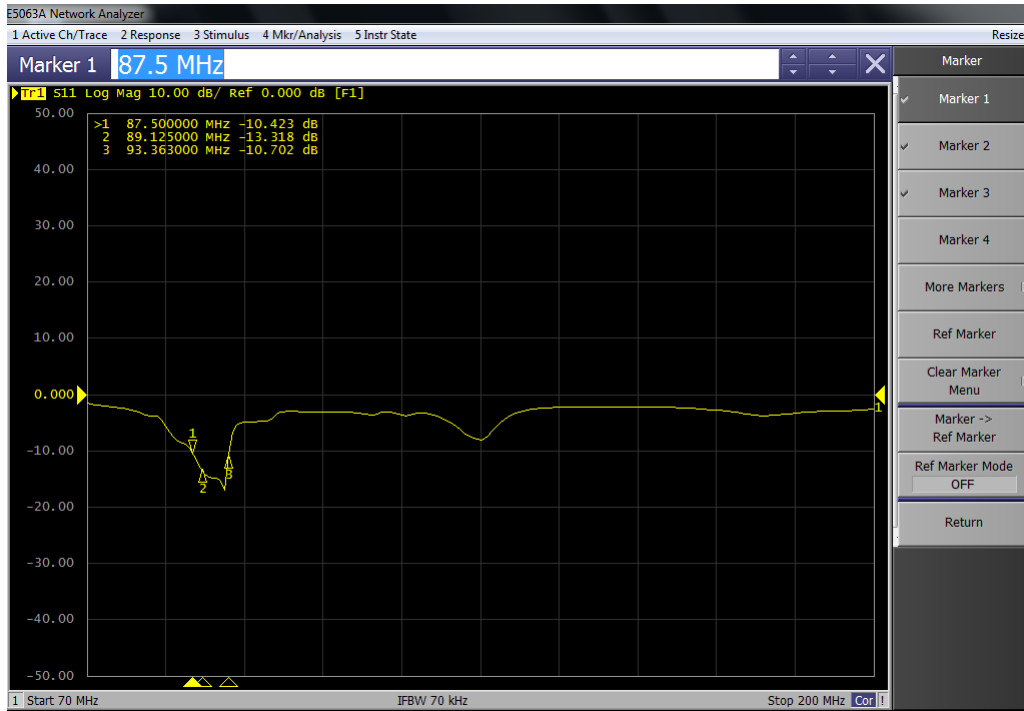
##### ก) กิจกรรมกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม.

สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ไดโพลรูปโบว์ที่ได้จากการออกแบบ ประกอบด้วยอิลิเมนต์ที่มีโครงสร้างรูปโบว์จำนวน 6 อิลิเมนต์ ที่วางเรียงซ้อนกันในระยะห่างของแต่ละอิลิเมนต์ที่เหมาะสม จะถูกสร้างด้วยทองแดงตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร โดยสายอากาศทั้ง 6 อิลิเมนต์ จะถูกยึดด้วยแกน (boom) ที่เป็นวัสดุพลาสติก และสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์จะเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณ RG-58 ซึ่งมีการสูญเสียสัญญาณต่ำ 0.11 dB ที่ความถี่ 50 Hz ถึง 1.4 dB ที่ความถี่ 2 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.97

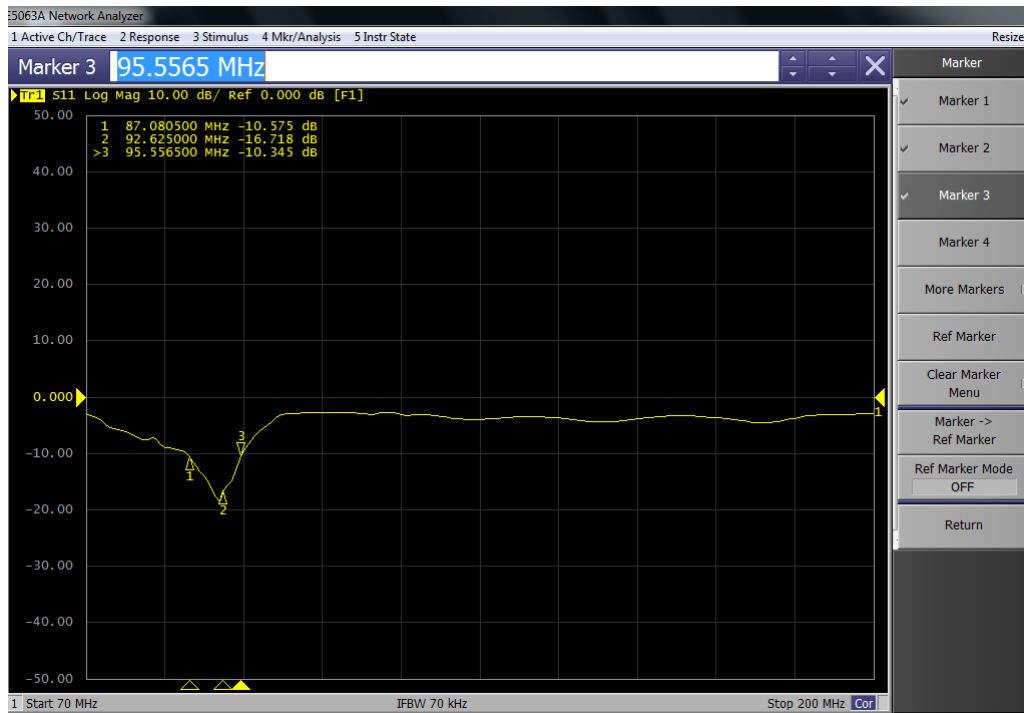


รูปที่ 4.97 โครงสร้างและการจัดตั้งระบบการวัดสายอากาศไดโพลรูปโบว์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ สำหรับกิจกรรมกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม.

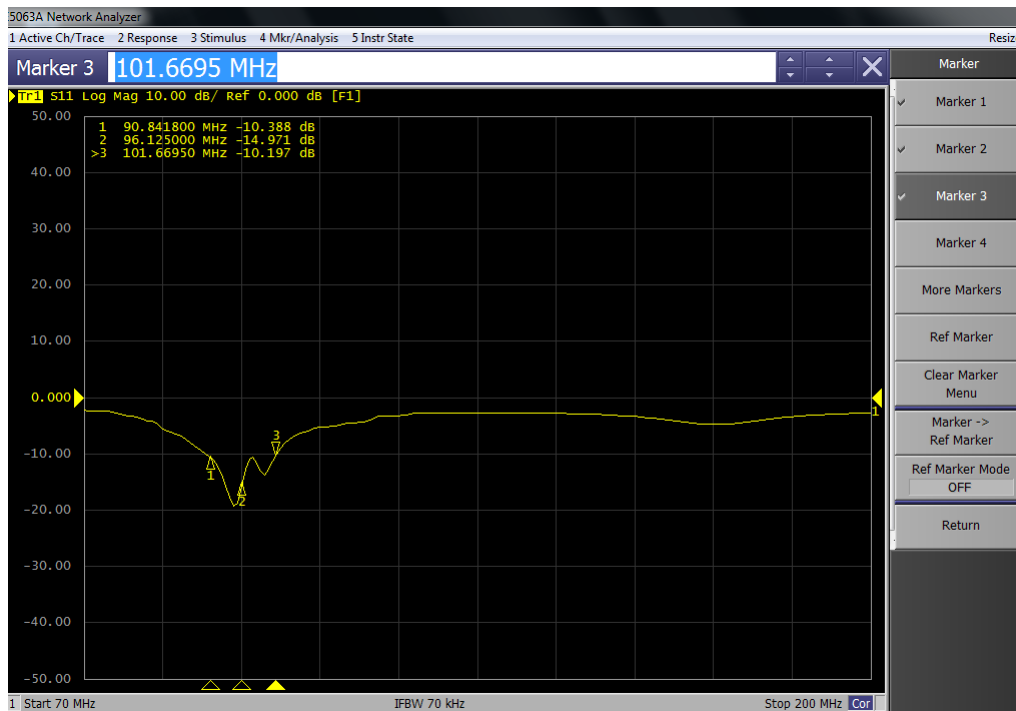
ในการทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ จะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย keysight รุ่น E5063A ENA ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ของแต่ละอิลิเมนต์ แสดงในรูปที่ 4.98 - 4.103 จากผลการวัดพบว่า เมื่อสวิตช์ปรับเลือกให้แต่ละอิลิเมนต์ทำงาน โดยเริ่มตั้งแต่อิลิเมนต์ที่ 1 ถึง อิลิเมนต์ที่ 6 พบกว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ของแต่ละอิลิเมนต์สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ได้มากกว่าที่ออกแบบไว้ และทั้ง 6 อิลิเมนต์สามารถใช้งานร่วมกันเพื่อสวิตช์ปรับเปลี่ยนความถี่ให้ครอบคลุมย่านความถี่กิจกรรมวิทยุกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. ตั้งแต่ความถี่ 87.5 - 108 MHz



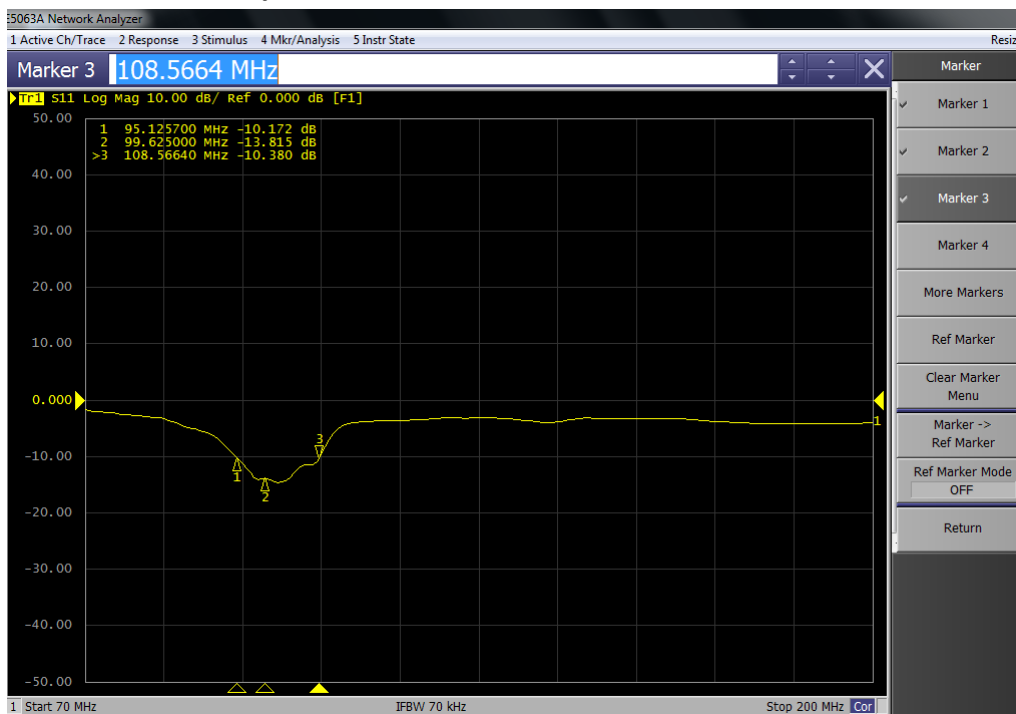
รูปที่ 4.98 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ FM-1



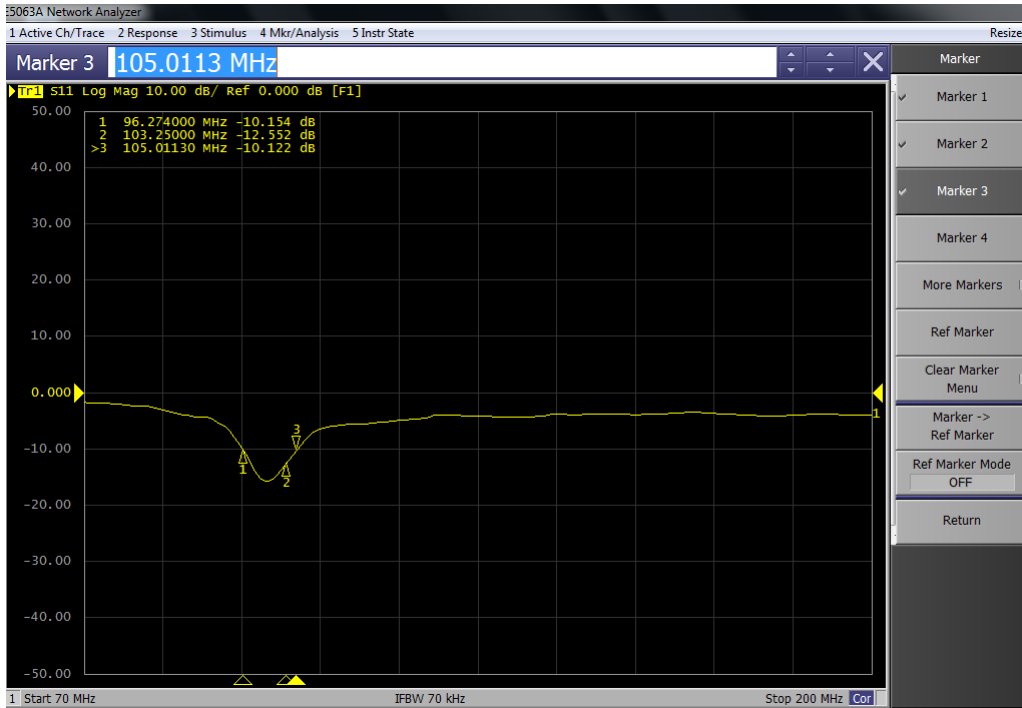
รูปที่ 4.99 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ FM-2



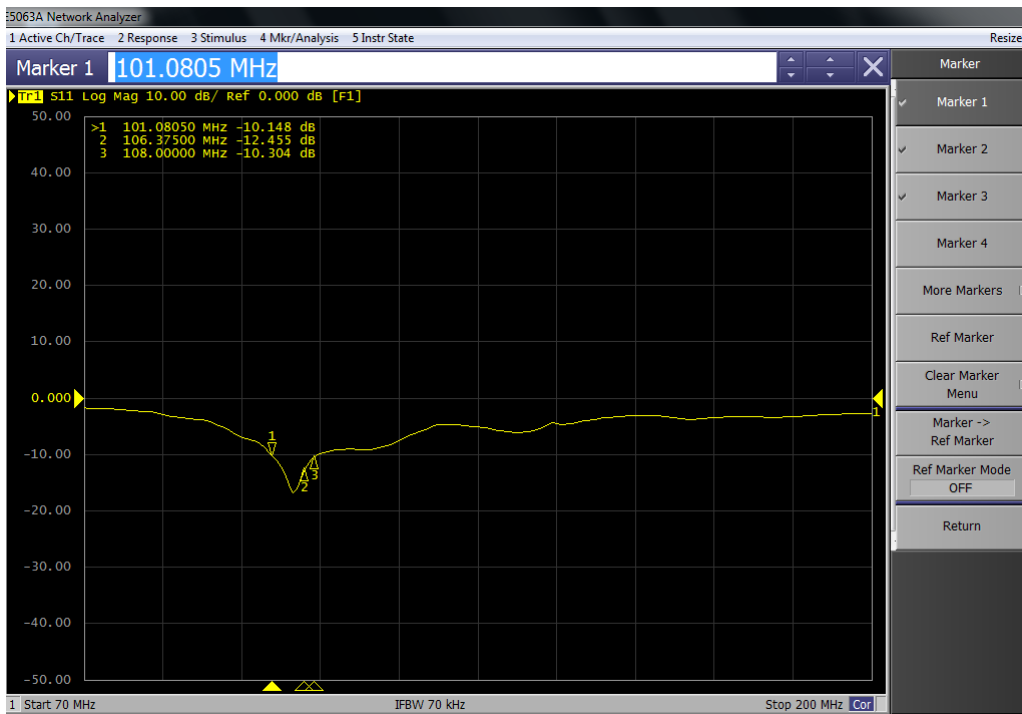
รูปที่ 4.100 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ FM-3



รูปที่ 4.101 ผลการวัด S11 ของอิลิเมนต์ FM-4



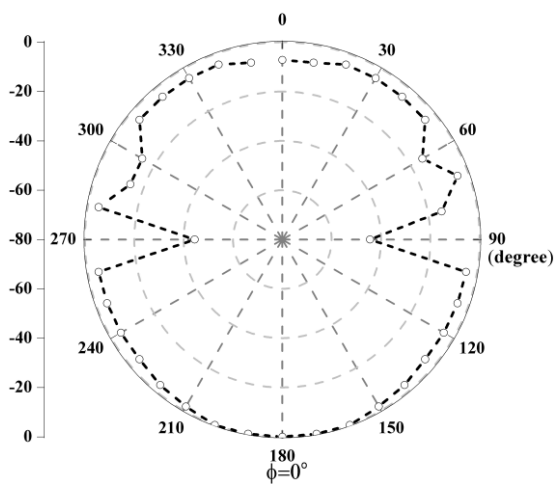
รูปที่ 4.102 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ FM-5



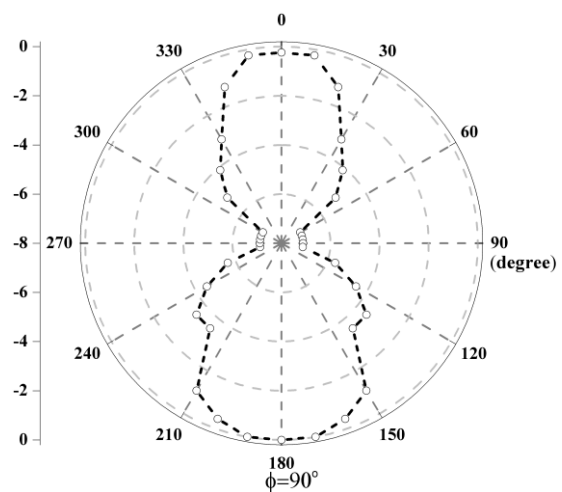
รูปที่ 4.103 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ FM-6

การทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแต่ละอิลิเมนต์ สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้โพโลรูปโบว์จะถูกผูกติดกับแผ่นโฟมและกรอบท่อพลาสติกในการรับน้ำหนักขณะเคลื่อนย้าย สายอากาศที่ต้องการทดสอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ เชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม Keysight N9340B ขณะที่สายอากาศมาตรฐานจะทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ Keysight N5173B โดยสายอากาศส่งและสายอากาศรับวางห่างกันในระยะ 5 เมตร ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้โพโลรูปโบว์ของแต่ละอิลิเมนต์ ในระนาบ xz และ yz แสดงในรูปที่ 4.104 จากผลการวัดพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ xz และ yz ทุกอิลิเมนต์ มีลักษณะคล้ายกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลอง แต่จะมีลำคลื่นหลังที่ค่อนข้างสูง ขณะที่อัตราขยายของแต่ละอิลิเมนต์เท่ากับ 1.84 dBi 3.09 dBi 2.18 dBi 2.3 dBi 2.32 dBi และ 2.9 dBi ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลอง

FM-1

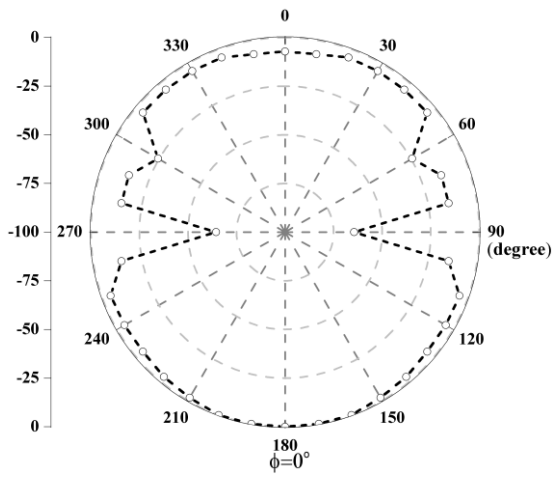


(ก) ระนาบ xz

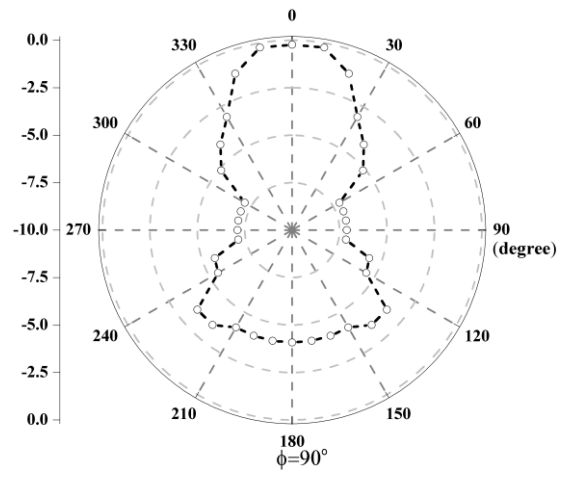


(ข) ระนาบ yz

FM-2

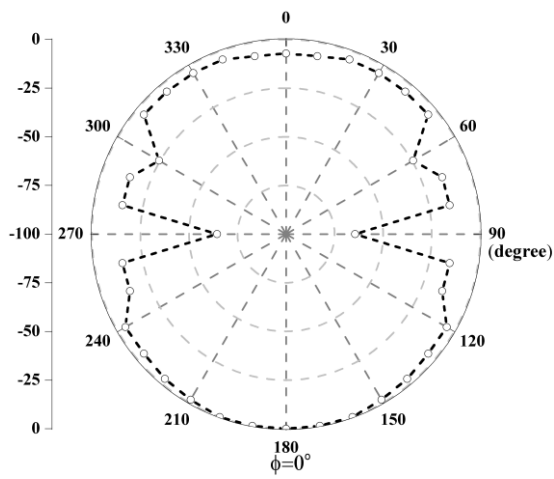


(ก) รัศนาใน xz

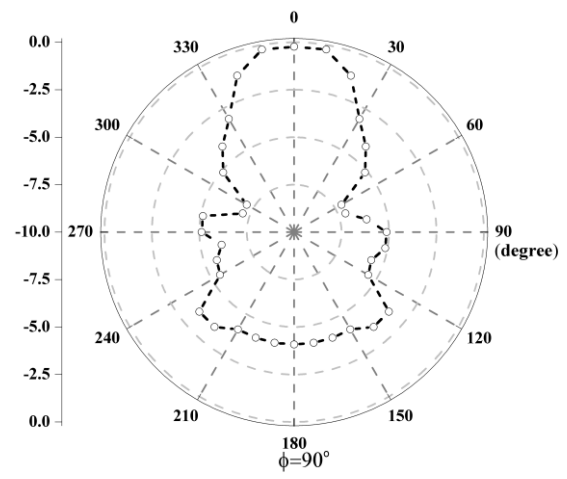


(ข) รัศนาใน yz

FM-3

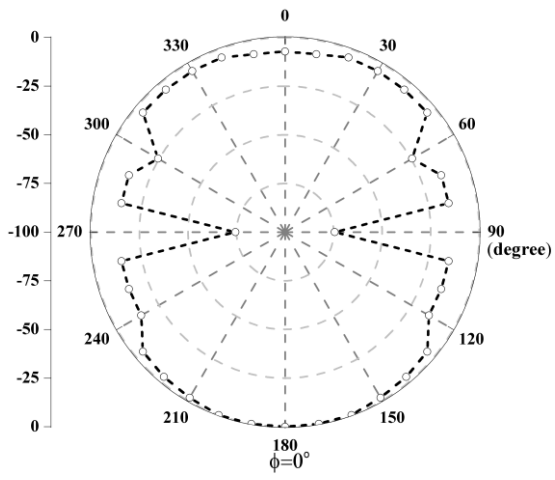


(ก) รัศนาใน xz

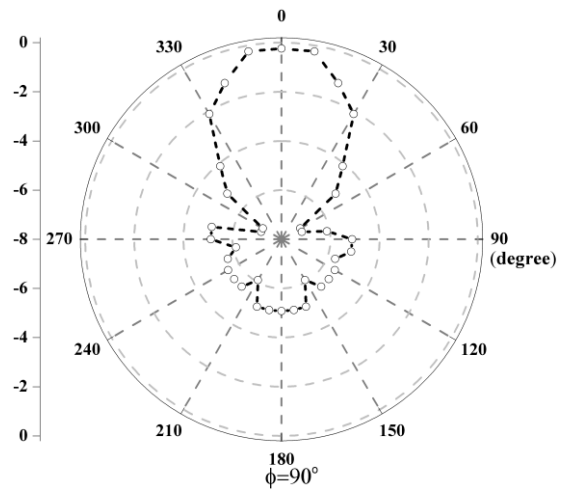


(ข) รัศนาใน yz

FM-4

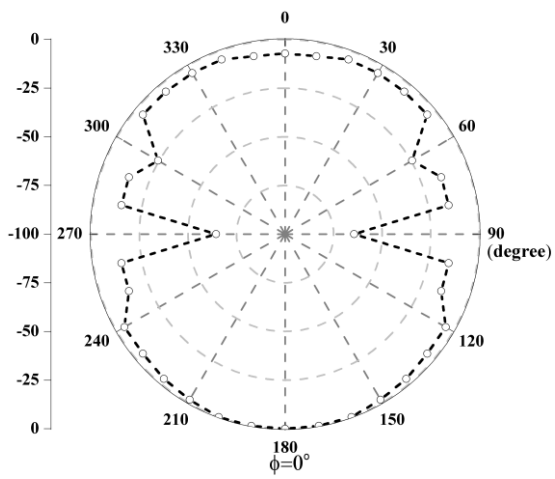


(ก) รัศนาบ xz

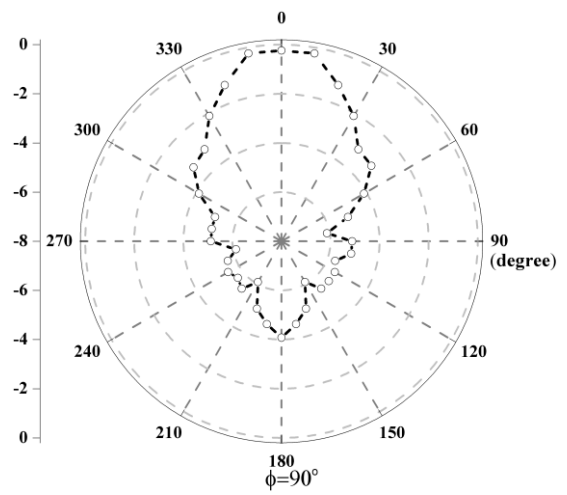


(ข) รัศนาบ yz

FM-5

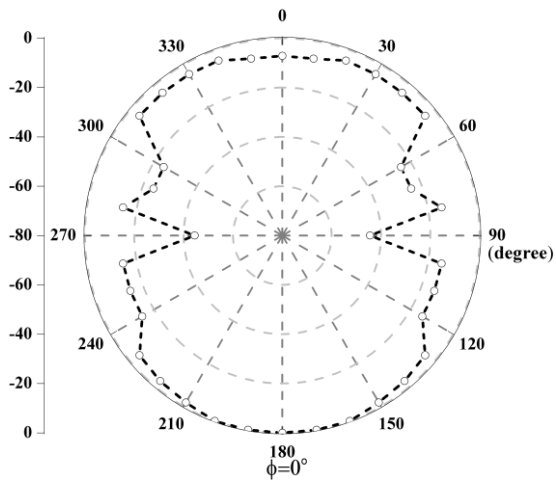


(ก) รัศนาบ xz

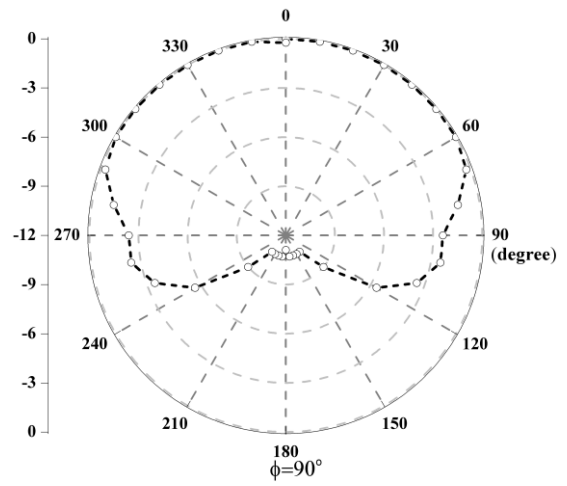


(ข) รัศนาบ yz





(ก) ระนาบ xz



(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 4.104 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปโบริว  
 ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ สำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม เมื่อสวิตซ์ให้แต่ละอิลิเมนต์ทำงาน

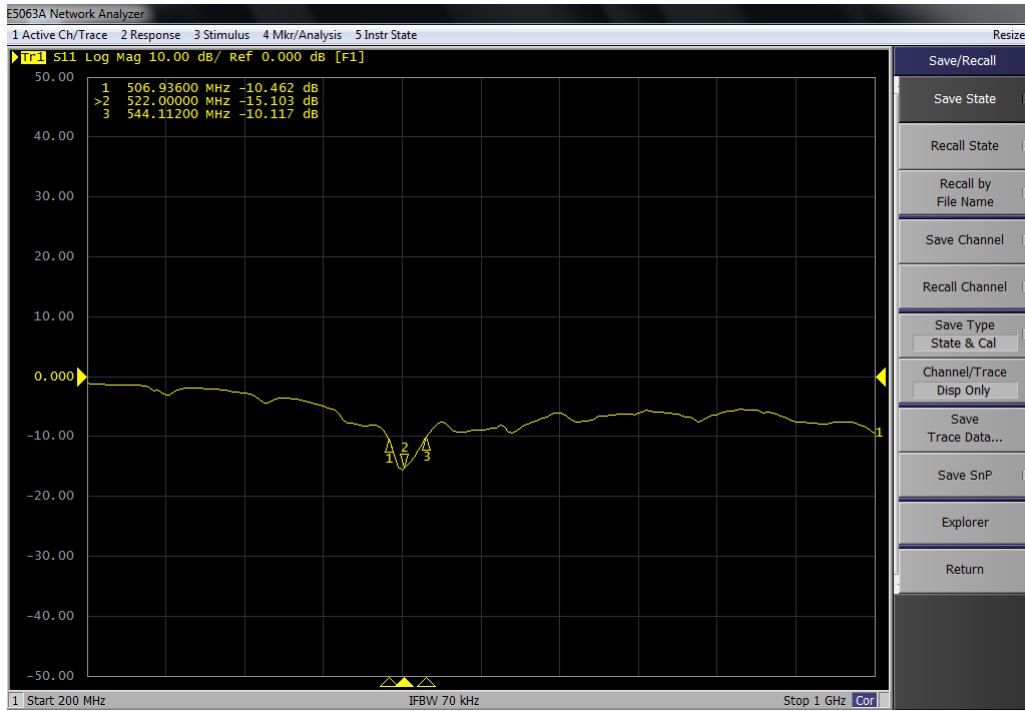
## ข) กิจกรรมโทรทัศน์ดิจิทัล

สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ไดโพลรูปโบว์ที่ได้จากการออกแบบ ประกอบด้วยอิลิเมนต์ที่มีโครงสร้างรูปโบว์จำนวน 6 อิลิเมนต์ ที่วางเรียงซ้อนกันในระยะห่างของแต่ละอิลิเมนต์ที่เหมาะสม จะถูกสร้างด้วยทองเหลืองตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร โดยสายอากาศทั้ง 6 อิลิเมนต์ จะถูกยึดด้วยแกน (boom) ที่เป็นวัสดุพลาสติกและสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์จะเชื่อมต่อด้วยสายนำสัญญาณ RG-58 ซึ่งมีการสูญเสียสัญญาณต่ำ 0.11 dB ที่ความถี่ 50 Hz ถึง 1.4 dB ที่ความถี่ 2 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.105

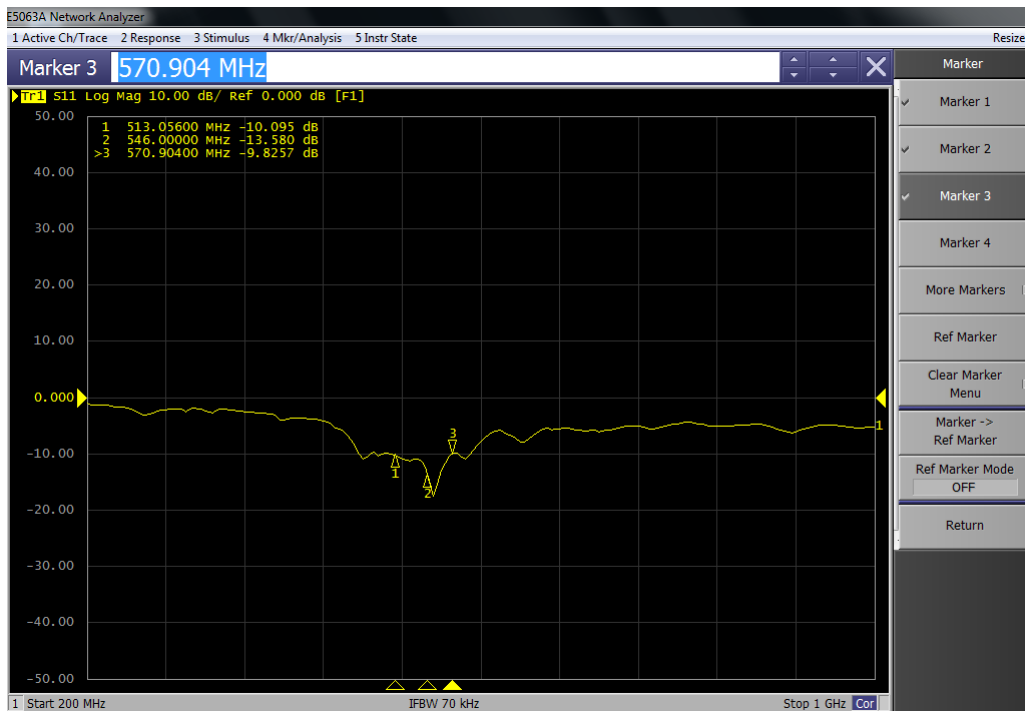


รูปที่ 4.105 โครงสร้างและการจัดตั้งระบบการวัดสายอากาศไดโพลรูปโบว์ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ สำหรับกิจกรรมโทรทัศน์ดิจิทัล

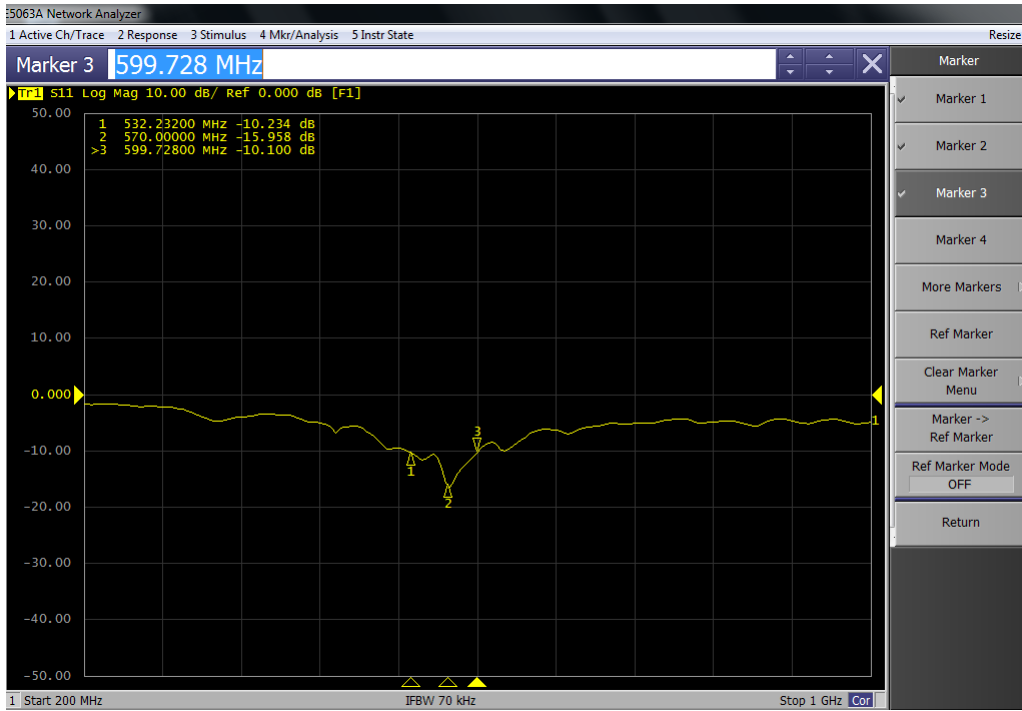
ในการทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ จะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย keysight รุ่น E5063A ENA ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ของแต่ละอิลิเมนต์ แสดงในรูปที่ 4.106 - 4.111 จากผลการวัดพบว่า เมื่อสวิตช์ปรับเลือกให้แต่ละอิลิเมนต์ทำงาน โดยเริ่มตั้งแต่อิลิเมนต์ที่ 1 ถึง อิลิเมนต์ที่ 6 พบกว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ของแต่ละอิลิเมนต์สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ได้มากกว่าที่ออกแบบไว้ และทั้ง 6 อิลิเมนต์สามารถใช้งานร่วมกันเพื่อสวิตช์ปรับเปลี่ยนความถี่ให้ครอบคลุมช่องความถี่วิทยุ 6 ช่องความถี่ ได้แก่ช่อง 27 30 33 37 41 และ 49 ซึ่งครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 518 - 702 MHz



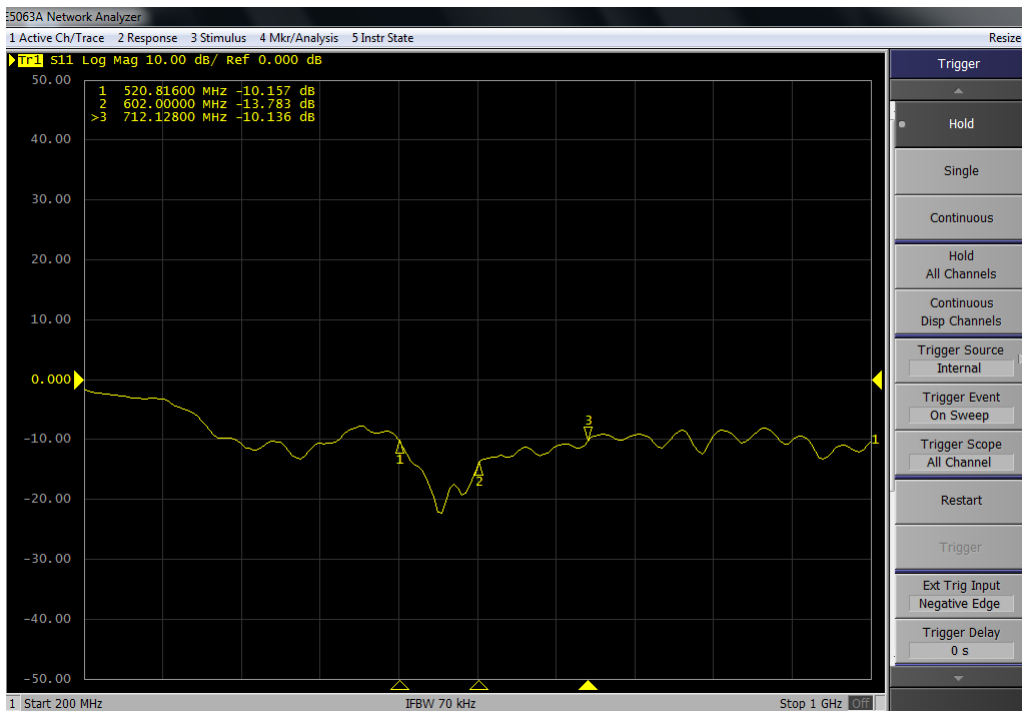
รูปที่ 4.106 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ DTV-1



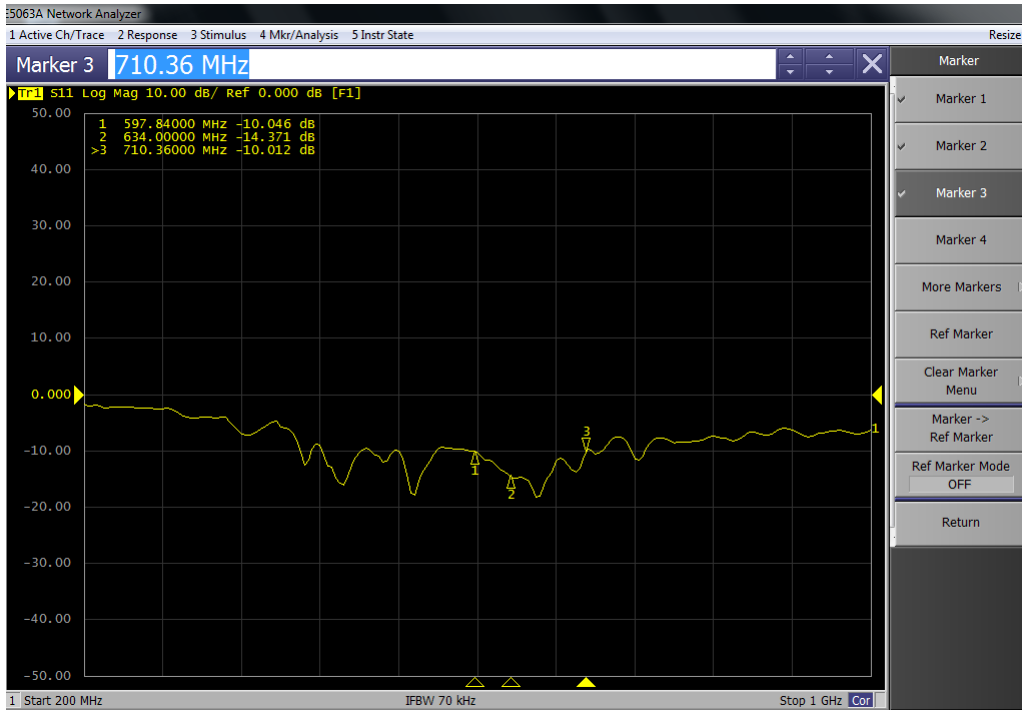
รูปที่ 4.107 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ DTV-2



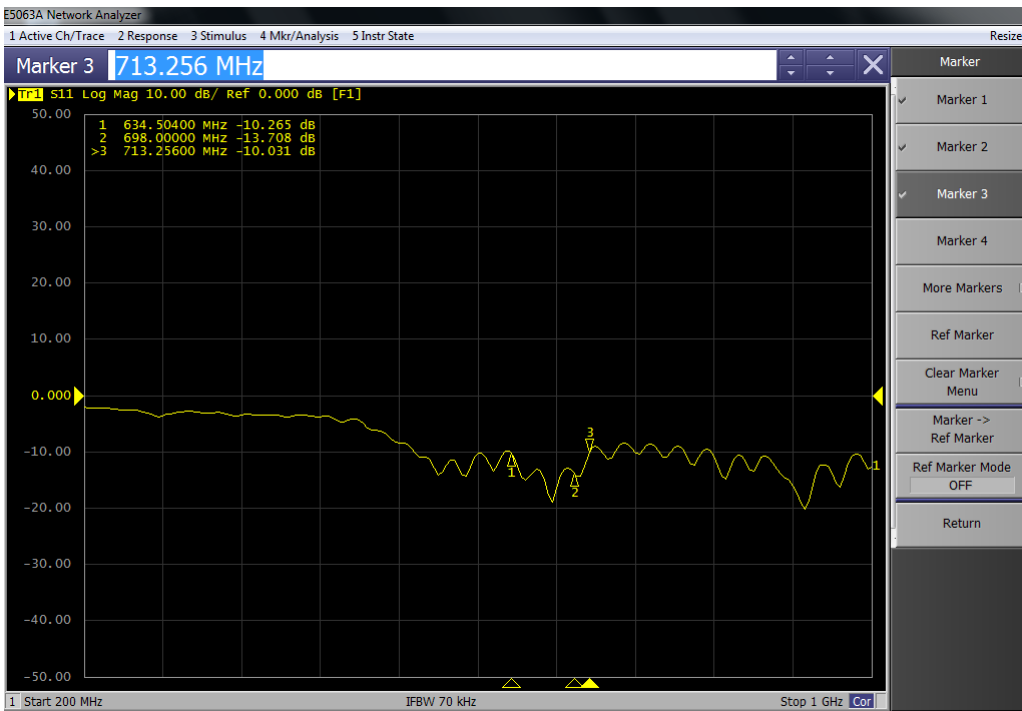
รูปที่ 4.108 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ DTV-3



รูปที่ 4.109 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ DTV-4



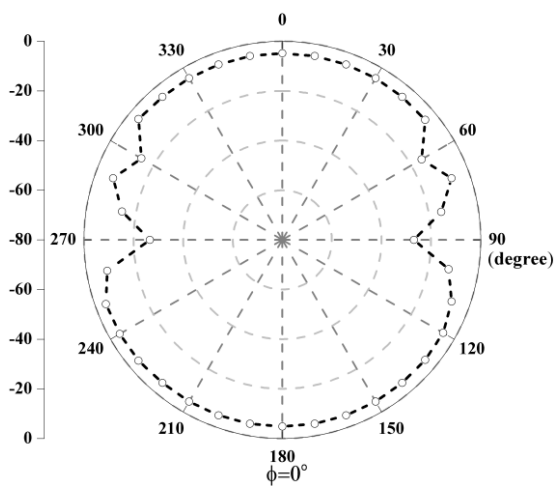
รูปที่ 4.110 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ DTV-5



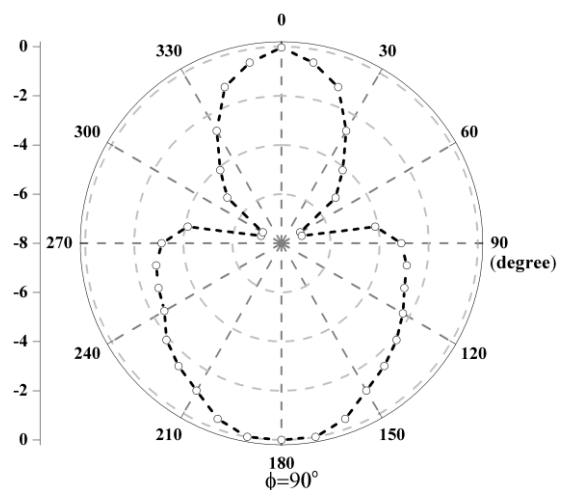
รูปที่ 4.111 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ DTV-6

การทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแต่ละอิมเมนต์ สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ไดโพลรูปโบริวทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ เชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม Keysight N9340B ขณะที่สายอากาศมาตรฐานจะทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ Keysight N5173B โดยสายอากาศส่งและสายอากาศรับวางห่างกันในระยะ 5 เมตร ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ไดโพลรูปโบริวของแต่ละอิมเมนต์ ในระนาบ xz และ yz แสดงในรูปที่ 4.112 จากผลการวัดพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ xz และ yz ทุกอิมเมนต์ มีลักษณะคล้ายกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลอง แต่จะมีค่าคลื่นหลังที่ค่อนข้างสูง ขณะที่อัตราขยายของแต่ละอิมเมนต์เท่ากับ 2.81 dBi 4.12 dBi 3.25 dBi 3.45 dBi 3.53 dBi และ 2.49 dBi ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลอง

DTV-1

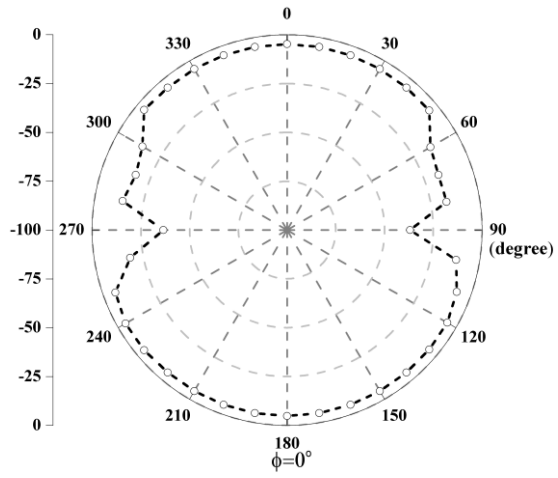


(ก) ระนาบ xz

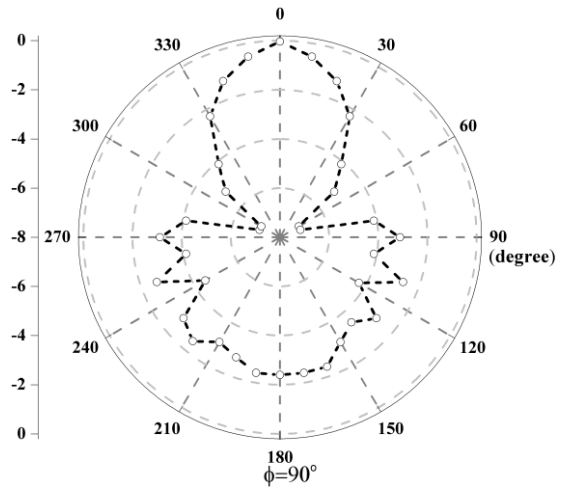


(ข) ระนาบ yz

DTV-2

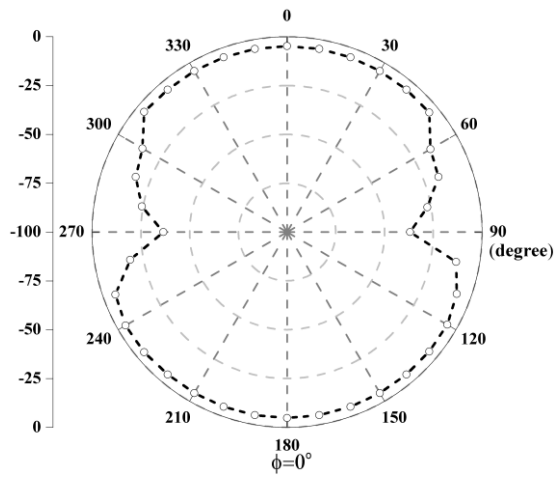


(ก) ระนาบ xz

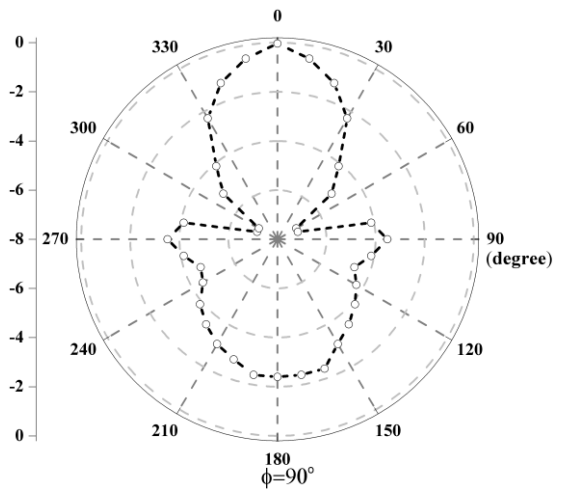


(ข) ระนาบ yz

DTV-3

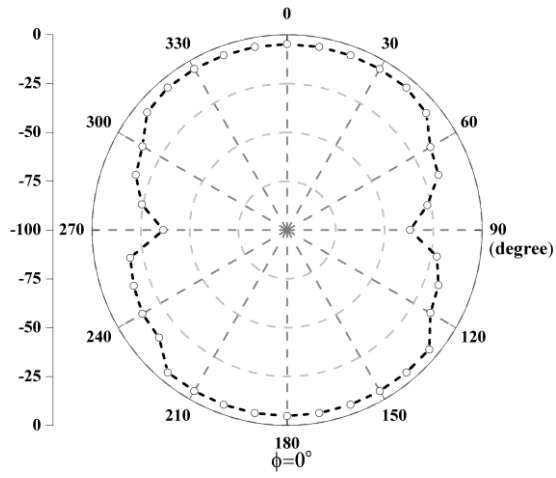


(ก) ระนาบ xz

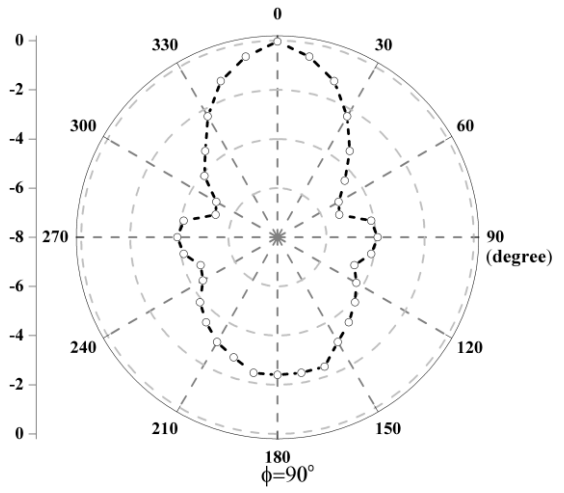


(ข) ระนาบ yz

DTV-4

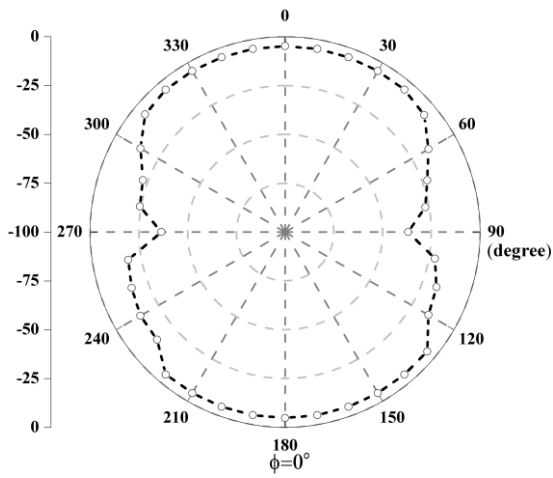


(ก) ระนาบ xz

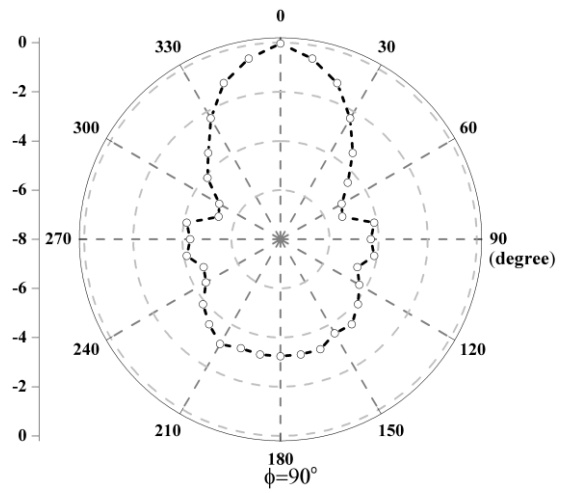


(ข) ระนาบ yz

DTV-5

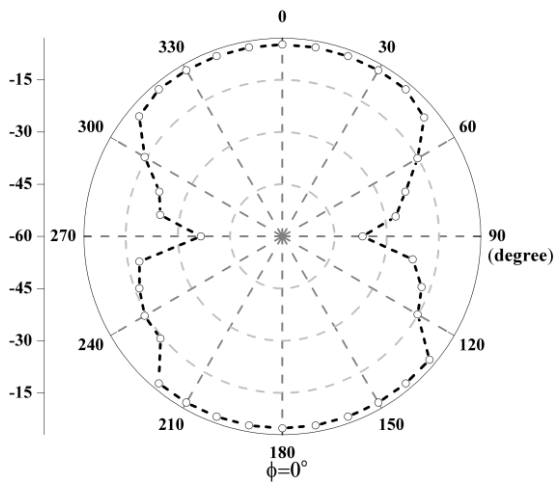


(ก) ระนาบ xz

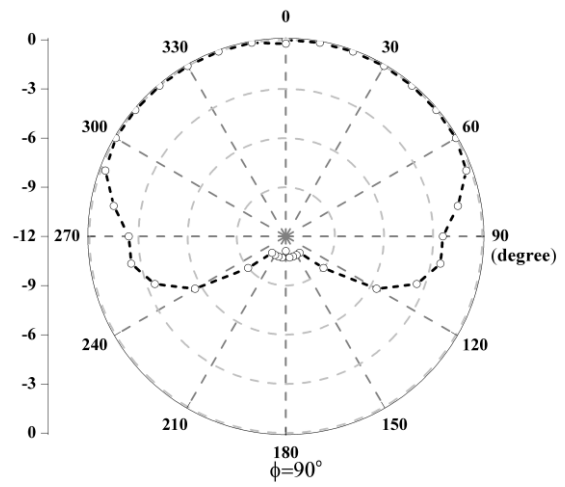


(ข) ระนาบ yz





(ก) ระนาบ xz



(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 4.112 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลรูปโบริวที่สามารถปรับเปลี่ยน  
ความถี่ได้ สำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล เมื่อสวิตซ์ให้แต่ละอิลิเมนต์ทำงาน

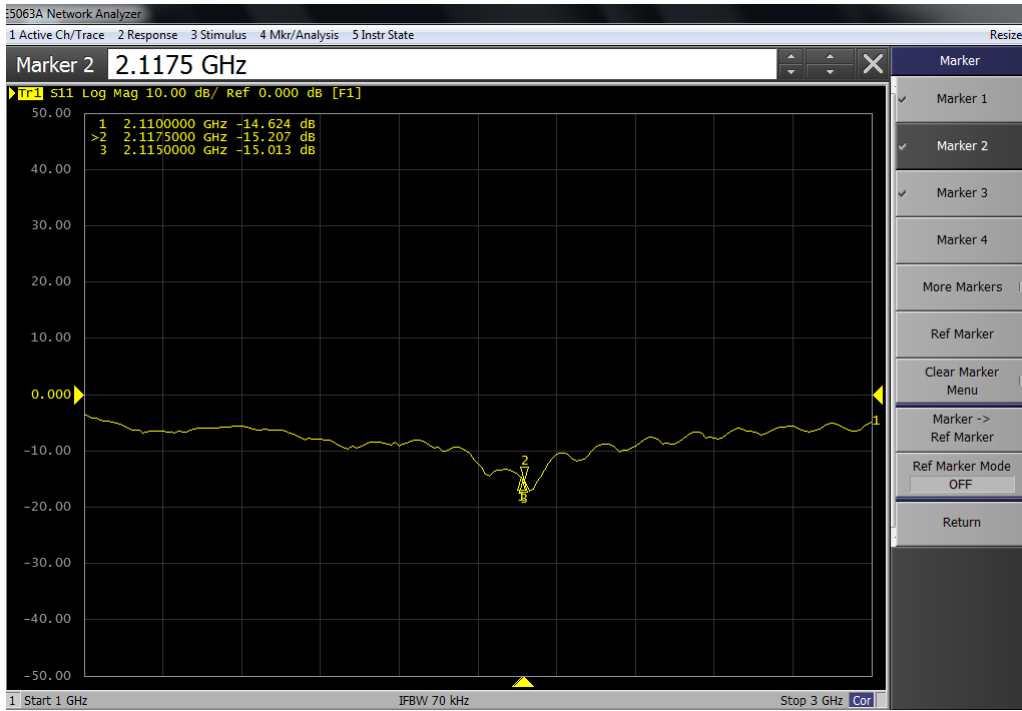
### ค) กิจการโทรคมนาคม (Mobile 4G)

สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ไดโพลรูปโบว์ที่ได้จากการออกแบบ ประกอบด้วยอิลิเมนต์ที่มีโครงสร้างรูปโบว์จำนวน 4 อิลิเมนต์ ที่วางเรียงซ้อนกันในระยะห่างของแต่ละอิลิเมนต์ที่เหมาะสม จะถูกสร้างด้วยทองเหลืองตันที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร โดยสายอากาศทั้ง 4 อิลิเมนต์ จะถูกยึดด้วยแกน (boom) ที่เป็นวัสดุพลาสติกและสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์จะเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณ RG-142 ซึ่งมีการสูญเสียสัญญาณต่ำ 0.23 dB ที่ความถี่ 3 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.113

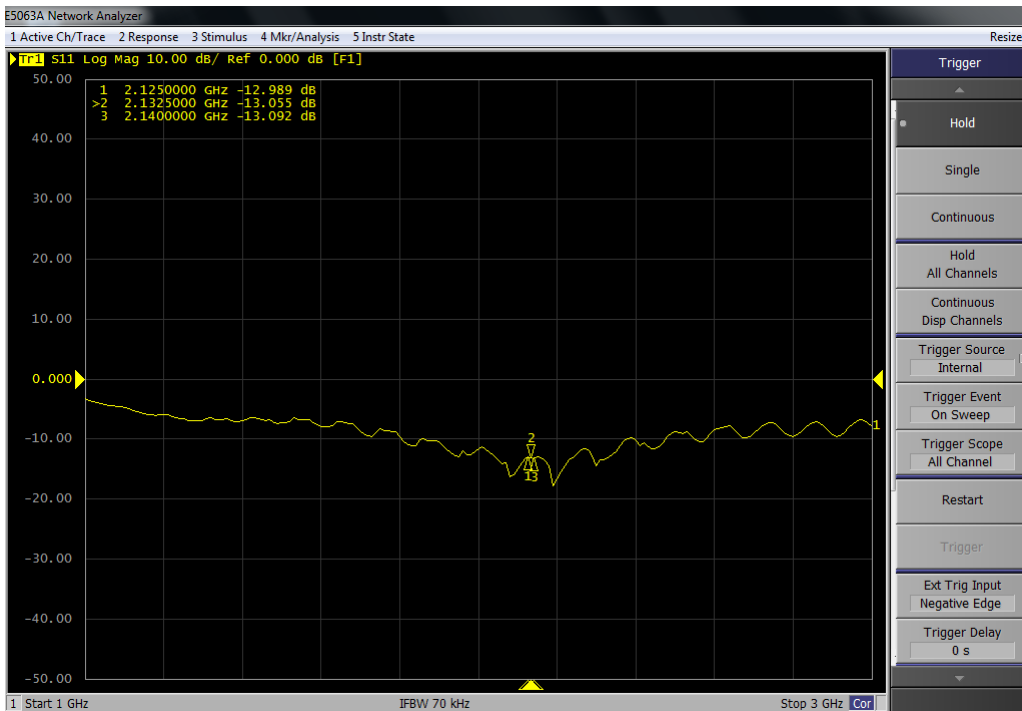


รูปที่ 4.113 โครงสร้างสายอากาศไดโพลที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ สำหรับกิจการโทรคมนาคม

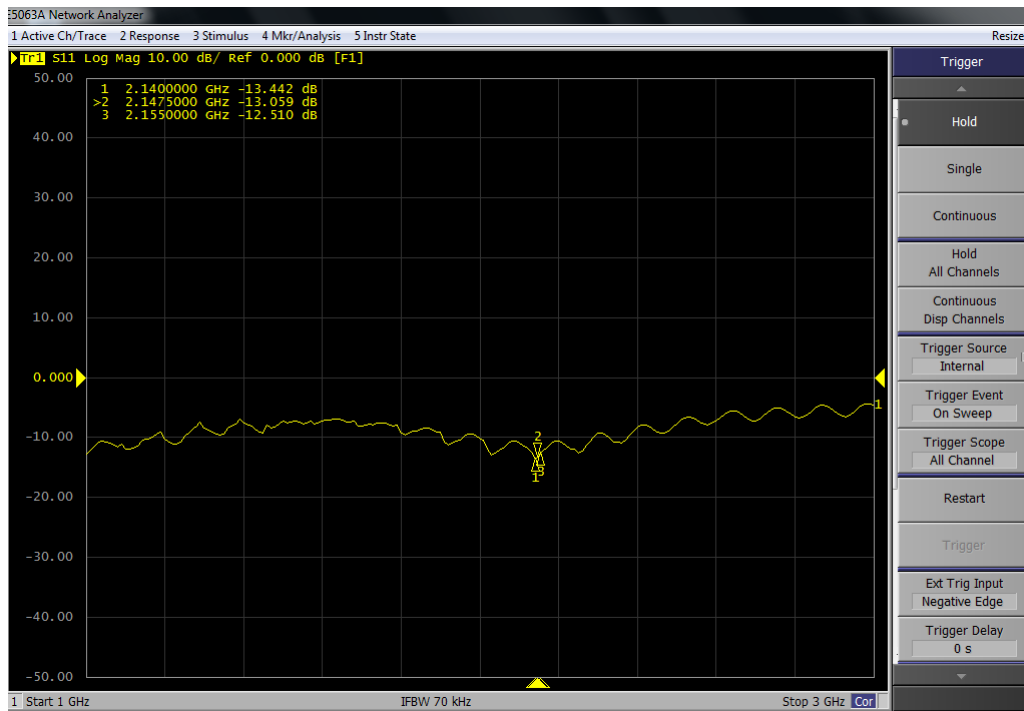
ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ของแต่ละอิลิเมนต์ แสดงในรูปที่ 4.114 - 4.117 จากผลการวัดพบว่า เมื่อสวิตช์ปรับเลือกให้แต่ละอิลิเมนต์ทำงาน โดยเริ่มตั้งแต่อิลิเมนต์ที่ 1 ถึง อิลิเมนต์ที่ 4 พบกว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $S_{11}$  ของแต่ละอิลิเมนต์สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ได้มากกว่าที่ออกแบบไว้ และทั้ง 4 อิลิเมนต์ สามารถใช้งานร่วมกันเพื่อสวิตช์ปรับเปลี่ยนความถี่ให้ครอบคลุมช่องความถี่ที่กำหนดไว้ 4 ช่อง ในย่านความถี่ 2110 - 2170 MHz



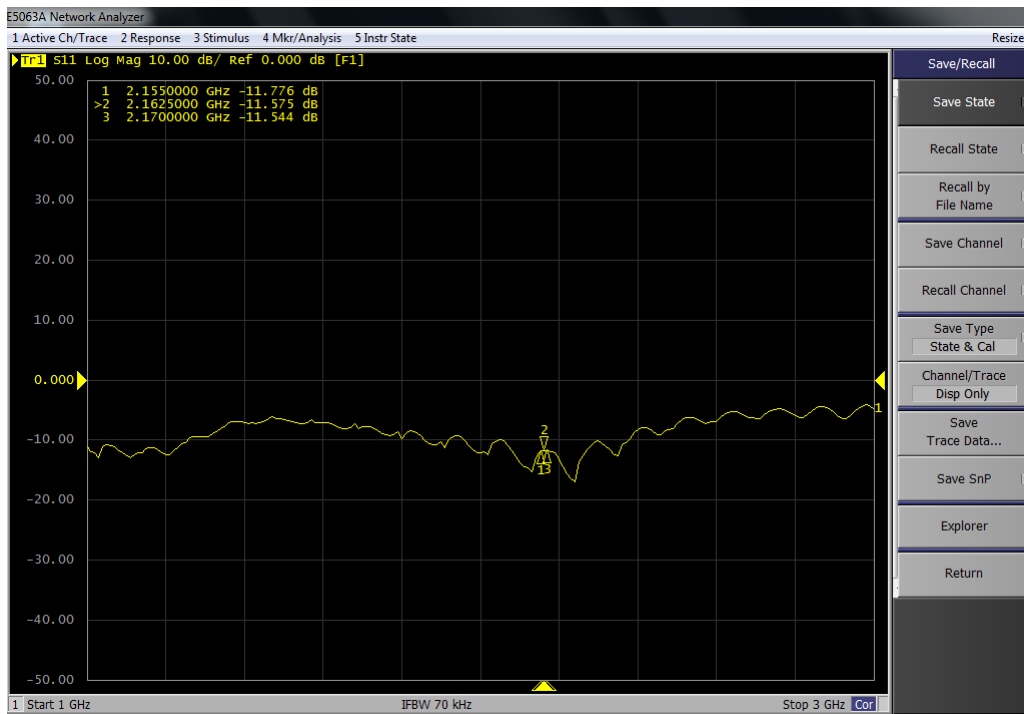
รูปที่ 4.114 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ Mb-1



รูปที่ 4.115 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ Mb-2



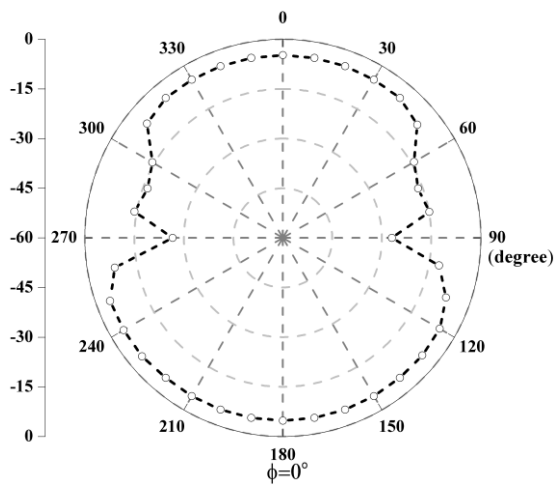
รูปที่ 4.116 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ Mb-3



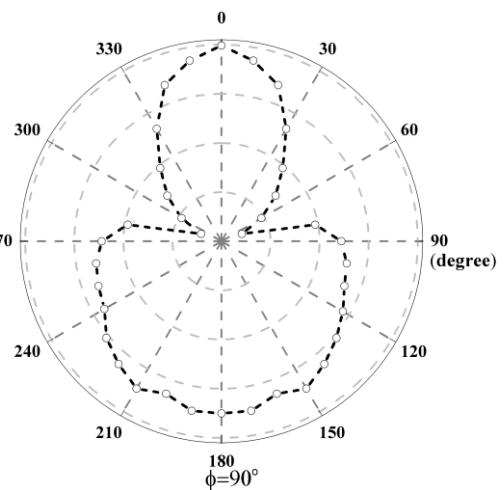
รูปที่ 4.117 ผลการวัด S11 ของอีลิเมนต์ Mb-4

การทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแต่ละอิมเมนต์ สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ไดโพลรูปโบริวทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับ เชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม Keysight N9340B ขณะที่สายอากาศมาตรฐานจะทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ Keysight N5173B โดยสายอากาศส่งและสายอากาศรับวางห่างกันในระยะ 3 เมตร ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ไดโพลรูปโบริวของแต่ละอิมเมนต์ ในระนาบ xz และ yz แสดงในรูปที่ 4.118 จากผลการวัดพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ xz และ yz ทุกอิมเมนต์ มีลักษณะคล้ายกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการจำลอง แต่จะมีลำคลื่นหลังที่ค่อนข้างสูง ขณะที่อัตราขยายของแต่ละอิมเมนต์เท่ากับ 3.02 dBi 2.62 dBi 1.71 dBi และ 2.92 dBi ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลอง

Mb-1

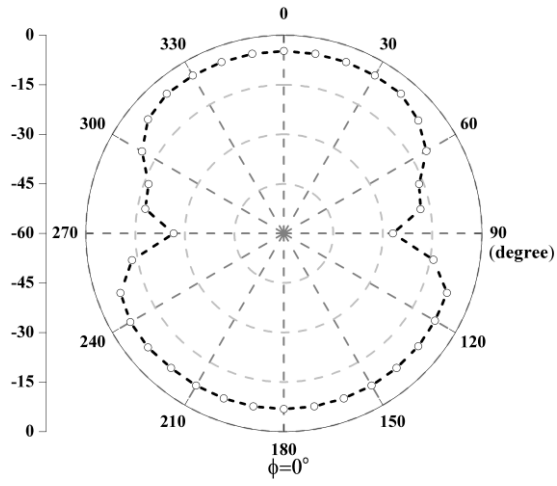


(ก) ระนาบ xz

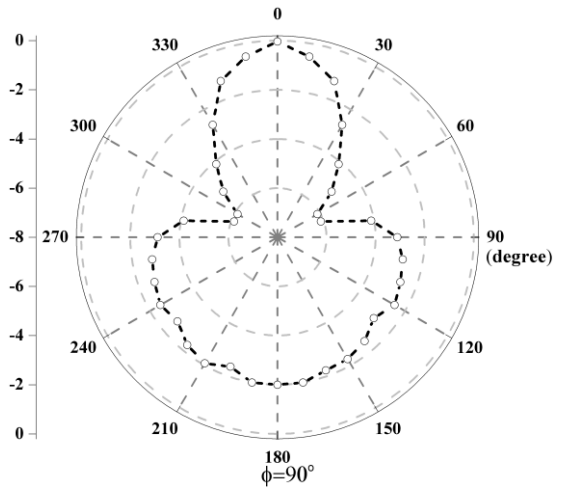


(ข) ระนาบ yz

Mb-2

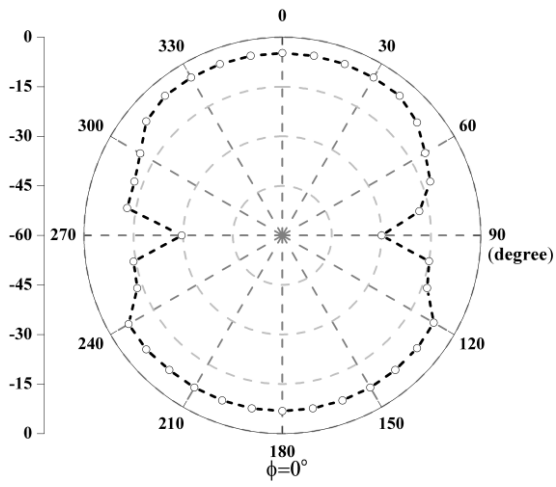


(ก) ระนาบ xz

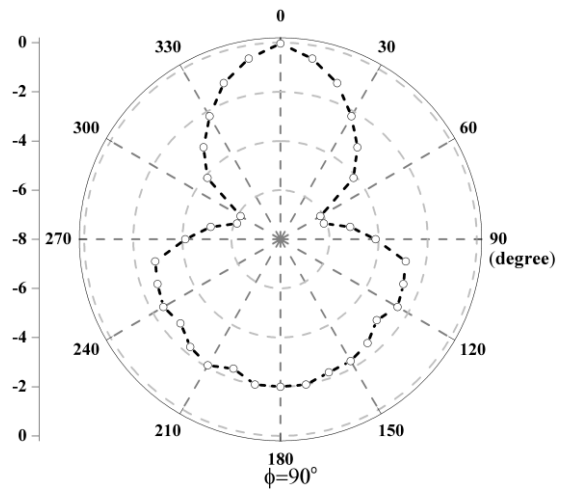


(ข) ระนาบ yz

Mb-3

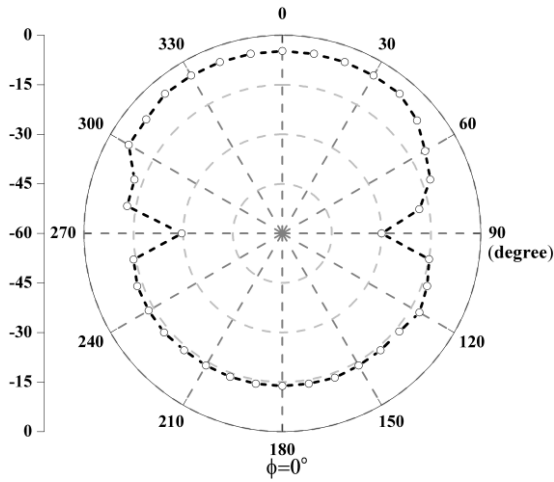


(ก) ระนาบ xz

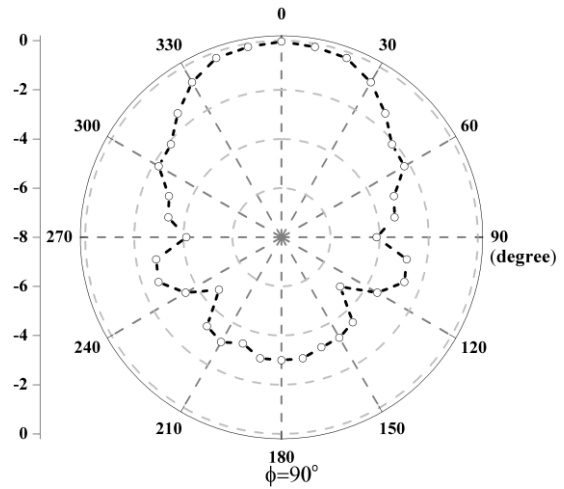


(ข) ระนาบ yz

Mb-4



(ก) ระนาบ xz



(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 4.118 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพลที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ สำหรับกิจการโทรคมนาคม เมื่อสวิตซ์ให้แต่ละอีลิเมนต์ทำงาน

จากผลการออกแบบ สร้าง และทดสอบ สายอากาศไดโพลรูปโบริวที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ด้วยการสวิตซ์ทางกลในการเลือกให้แต่ละอีลิเมนต์ของสายอากาศทำงาน สามารถสรุปได้ว่า สายอากาศมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนความถี่ได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และ อัตราขยายสอดคล้องกับผลการออกแบบ

## บทที่ 5 ผลการออกแบบและสร้างระบบวิทยุรู้คิดจำลอง

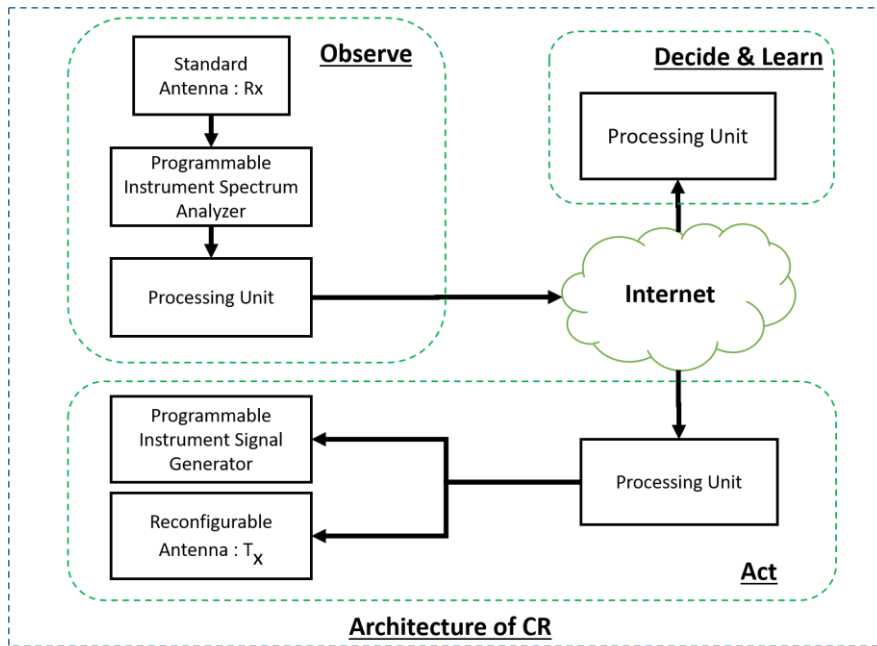
การจำลองระบบวิทยุรู้คิด (Cognitive Radio: CR) ของโครงการวิจัยนี้ มีเป้าหมายหลัก คือ ทดสอบการทำงานของระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ เพื่อประยุกต์ใช้ในระบบวิทยุรู้คิด และแสดงถึงการทำงานของระบบวิทยุที่มีการควบคุมแบบอัตโนมัติ ซึ่งคาดการณ์ว่า จะเป็นสิ่งที่ต้องการมากในอนาคต การออกแบบและสร้างระบบวิทยุรู้คิด จะแบ่งการบรรยายออกเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิดจำลอง ระบบการสังเกตการณ์ ระบบการตัดสินใจ ระบบการดำเนินการ และผลการทดสอบระบบวิทยุรู้คิดจำลอง

### 5.1 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิดจำลอง

ระบบวิทยุรู้คิด ต้องอาศัยช่องสัญญาณอย่างน้อย 2 ช่องสัญญาณในเวลาเดียวกัน โดยช่องสัญญาณแรก เป็นช่องสัญญาณที่ใช้สำหรับการให้บริการ เช่น กิจกรรมกระจายเสียงคลื่นวิทยุ กิจกรรมการสื่อสารข้อมูลทางการบิน เป็นต้น ซึ่งในโครงการวิจัยนี้ ได้จำลองการทำงานสำหรับระบบวิทยุกระจายเสียง จึงใช้ช่องสัญญาณแรกเป็นช่องสัญญาณที่มีช่วงความถี่ของระบบวิทยุ FM (88-108MHz) และช่องสัญญาณที่สอง เป็นช่องสัญญาณสำหรับการจัดการภายในระบบวิทยุรู้คิด เพื่อสื่อสารระหว่างระบบย่อยภายในระบบ CR ซึ่งในโครงการนี้ได้เลือกสร้างช่องสัญญาณบนระบบอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อให้สอดคล้องกับการขยายตัวของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ในอนาคต

รูปที่ 5.1 ได้แสดงสถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิดจำลอง ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ (1) ระบบสังเกตการณ์ (Observe System) ประกอบด้วย สายอากาศมาตรฐาน เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ ตัวประมวลผล (เครื่องคอมพิวเตอร์) และอุปกรณ์สื่อสารที่เชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (2) ระบบตัดสินใจ (Decision System) ในโครงการนี้ได้ถูกสร้างเป็นชุดโปรแกรมบนตัวประมวลผลเดียวกับระบบสังเกตการณ์ (3) ระบบดำเนินการ (Act System) ประกอบด้วย อุปกรณ์สื่อสารที่เชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตผ่านเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตัวประมวลผล (ไมโครคอนโทรลเลอร์) เครื่องกำเนิดสัญญาณ และระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้





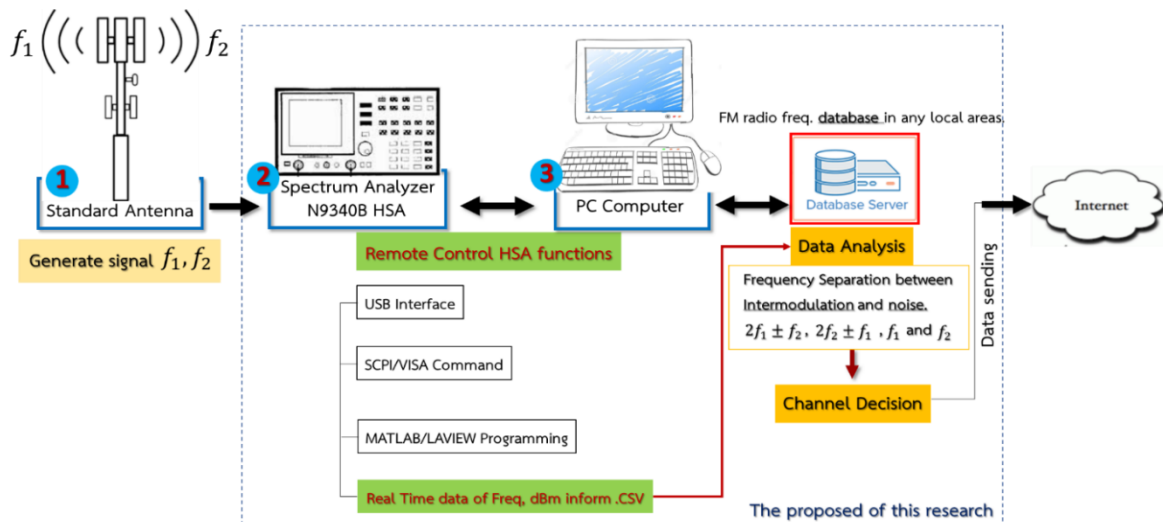
รูปที่ 5.1 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิดจำลอง

## 5.2 ระบบสังเกตการณ์ (Observe System)

ระบบสังเกตการณ์ ทำหน้าที่วัดค่าระดับกำลังคลื่นในแต่ละช่องสัญญาณ โดยการควบคุมการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ความถี่ด้วยชุดโปรแกรมคำสั่ง และประมวลผลข้อมูลในเบื้องต้น เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานของระบบตัดสินใจ ผลการออกแบบและสร้างระบบสังเกตการณ์ ได้ถูกบรรยายไว้ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ สถาปัตยกรรมของระบบ กระบวนการสังเกตการณ์ และผลการทดสอบระบบ

### 5.2.1 สถาปัตยกรรมของระบบสังเกตการณ์

สถาปัตยกรรมของระบบสังเกตการณ์ แสดงดังรูปที่ 5.2 ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ สายอากาศมาตรฐาน เครื่องมือวิเคราะห์ความถี่ คอมพิวเตอร์หรือตัวประมวลผล และระบบเชื่อมต่อสัญญาณกับระบบอินเทอร์เน็ต



รูปที่ 5.2 สถาปัตยกรรมของระบบสังเกตการณ์

- **สายอากาศมาตรฐาน (Standard Antenna)**

สายอากาศมาตรฐาน ทำหน้าที่แปลงคลื่นวิทยุเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อป้อนให้กับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ สายอากาศที่เลือกใช้สายอากาศรุ่น AOR SA7000 สามารถทำงานได้ตั้งแต่ช่วงความถี่ 30 kHz ถึง 2 GHz ชนิดพาสซีฟ มีความยาว 1.8 เมตร และมีแบบรูปการแพร่รอบทิศทาง

- **เครื่องวิเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analyzer)**

เครื่องวิเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analyzer) ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณคลื่นวิทยุที่ผ่านสายอากาศ และแสดงคุณลักษณะของสัญญาณในรูปแบบต่างๆ เช่น ค่ากำลังไฟฟ้า แบนด์วิธ เป็นต้น นอกจากนั้น ต้องมีคุณลักษณะที่สำคัญ คือ การตรวจจับสัญญาณในแต่ละช่วงเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสัญญาณจากคลื่นวิทยุ มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยความถี่ที่สูงมาก และสามารถโปรแกรมการทำงานได้ด้วยโปรแกรมชุดคำสั่ง โครงการนี้ จึงได้เลือกใช้เครื่องวิเคราะห์ความถี่ รุ่น N9340B Handheld Spectrum Analyzer (HSA) ของบริษัท Keysight Technologies ซึ่งสามารถวัดสัญญาณได้ดีในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz ถึง 3 GHz

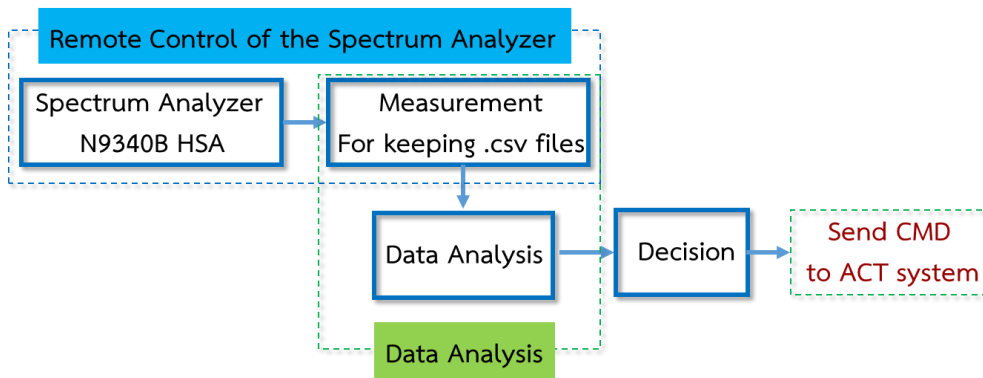
ผลการศึกษาเบื้องต้น ทำให้ทราบถึงฟังก์ชันที่จำเป็นสำหรับสร้างเป็นชุดคำสั่งควบคุมเครื่องวิเคราะห์ความถี่รุ่น N9340B ได้แก่

- ฟังก์ชัน INPUT ทำหน้าที่ เลือกรับสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ โดยมีด้วยกัน 2 ช่องทาง ได้แก่ การรับสัญญาณจากภายในและการรับสัญญาณโดยผ่านสายอากาศ

- พังก์ชัน FREQUENCY และ SPAN ทำหน้าที่ กำหนดย่านความถี่ที่ต้องการวิเคราะห์สัญญาณ อินพุตที่เข้ามา โดยการกำหนดค่าความถี่กลาง หรือกำหนดค่าความถี่เริ่มต้นและค่าความถี่ สุดท้าย
- พังก์ชัน AMPLITUDE ทำหน้าที่ กำหนดการลดทอนสัญญาณที่ได้รับ และใช้ยกระดับแถบ ความถี่ของ Floor Noise ตามต้องการ เพื่อต่อการวิเคราะห์สัญญาณ
- พังก์ชัน TRACE ทำหน้าที่ กำหนดรูปแบบการแสดงผลแถบความถี่ในโหมดต่างๆ เช่น แบบค่า จริงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แบบค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาใดๆ แบบแสดงค่ากำลังสูงสุดหรือต่ำสุด
- พังก์ชัน MARKER ทำหน้าที่ ระบุค่ายอดของกำลังคลื่น ซึ่งแสดงได้ถึง 6 ค่าความถี่ในเวลา เดียวกัน
- พังก์ชัน PRINT ทำหน้าที่ บันทึกรูปแบบความถี่ที่กำลังแสดงผลบนหน้าจอเครื่องวิเคราะห์ ความถี่
- พังก์ชัน RBW/VBW: เป็นพังก์ชันที่ใช้ประมวลผลสัญญาณที่วัดได้ โดยที่ RESOLUTION BANDWIDTH (RBW) ส่งผลต่อความสามารถในการแยกแยะสัญญาณและระดับของ Noise Floor เช่น ถ้าปรับค่า RBW ให้น้อยลง ทำให้แสดงผลของค่าระดับ Noise Floor ต่ำลง ซึ่งทำ ให้วิเคราะห์แบนด์วิธของสัญญาณได้โดยง่าย เป็นต้น และ VIDEO BANDWIDTH (VBW) ส่งผลต่อความเรียบของสัญญาณที่แสดงผล ซึ่งทำให้แบ่งระดับของสัญญาณในแต่ละช่วงความถี่ ได้โดยง่าย อย่างไรก็ตาม ถ้าปรับค่าของ VBW น้อยมากเกินไป ทำให้ไม่แสดงผลได้

#### ● ตัวประมวลผล

กระบวนการประมวลผล แสดงดังรูปที่ 5.3 โดยที่ตัวประมวลผล ทำหน้าที่ (1) ควบคุมพังก์ชันการใช้งานของเครื่องวิเคราะห์ความถี่ โดยเริ่มจากการสร้างการเชื่อมต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์ความถี่ผ่านทาง USB และหลังจากนั้น ควบคุมการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ความถี่โดยใช้ชุดคำสั่ง SCPI โครงการนี้ จึงเลือกใช้ คอมพิวเตอร์เป็นตัวประมวลผล เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ชุดคำสั่ง SCPI ผ่านโปรแกรม MATLAB หรือ LabVIEW เพื่อต่อการเขียนโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์ และการเก็บบันทึกข้อมูลจากการวัดสัญญาณ และ (2) วิเคราะห์ สัญญาณข้อมูลเบื้องต้น ให้เหมาะสมกับโปรแกรมของระบบตัดสินใจ ซึ่งจะเก็บไว้ในรูปแบบไฟล์ .csv file



รูปที่ 5.3 การทำงานของตัวประมวล

โครงการนี้ ได้ศึกษาการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องวิเคราะห์ความถี่กับคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยโปรแกรม MATLAB และ LabVIEW เพื่อทดสอบการสั่งงานและประเมินผลการใช้งานในเบื้องต้น จึงพบว่า

การเชื่อมต่อผ่านโปรแกรม MATLAB มีกระบวนการ ดังนี้ (1) หลังจากต่อสายสัญญาณเข้ากับคอมพิวเตอร์ โปรแกรม MATLAB สามารถตรวจจับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ดังกล่าวได้ (2) เลือกใช้แพลตฟอร์มในการเชื่อมต่อ ซึ่งโครงการนี้เลือกใช้ VISA และทำการสร้าง connection (3) ป้อนคำสั่ง SCPI: \*IDN? เพื่อรับชื่อของอุปกรณ์ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

```

data1 = query(obj1, '*IDN? ');% Communicating with instrument object, obj1.fprintf
                                ('%s',data1);
  
```

ผลการเชื่อมต่อ แสดงดังรูปต่อไปนี้

```

Communication Address
ManufacturerID: 0x0957
ModelCode: 0xFFEF
SerialNumber: cn0349a941

Communication State
Status: closed
RecordStatus: off

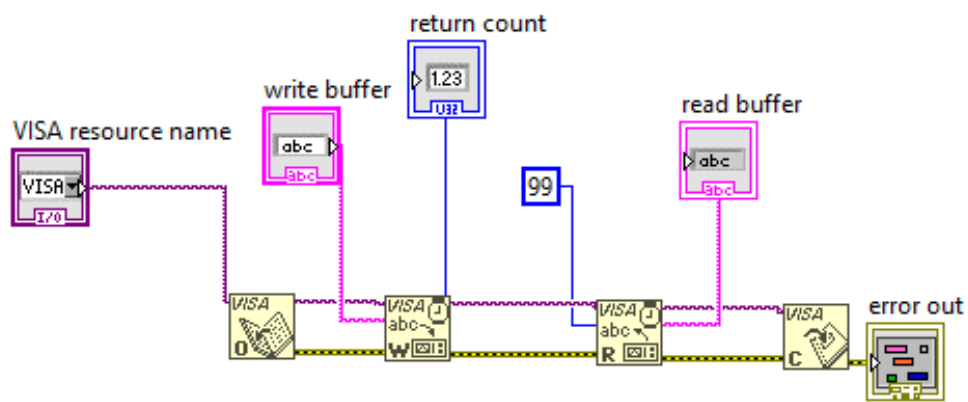
Read/Write State
TransferStatus: idle
BytesAvailable: 0
ValuesReceived: 34
ValuesSent: 51

Keysight Technologies,N9340B,CN0349A941,A.02.07
fx >> |
  
```

รูปที่ 5.4 ผลการเชื่อมต่อระหว่าง MATLAB กับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ผ่านระบบ LAN

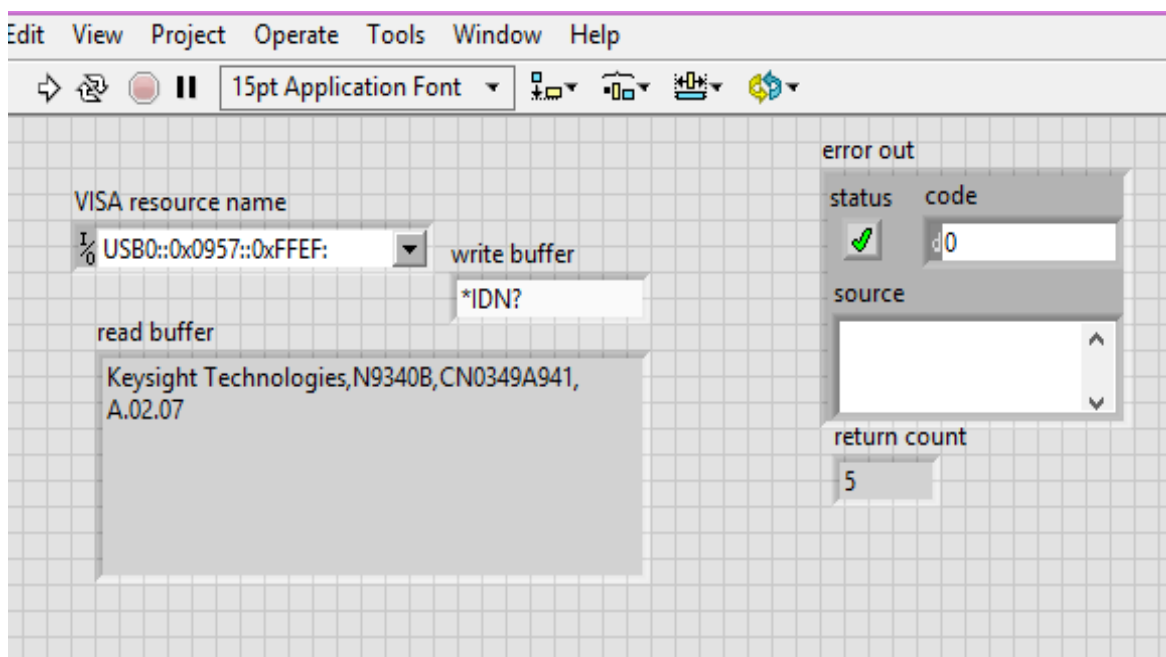
ผลการศึกษาเบื้องต้น พบว่า การประมวลผลผ่านโปรแกรม MATLAB สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เมื่อต้องการการประมวลผลที่ซับซ้อนมากขึ้น จำเป็นต้องใช้เวลานานขึ้นค่อนข้างมาก

การเชื่อมต่อผ่านโปรแกรม LabVIEW มีกระบวนการ ดังนี้ (1) หลังจากต่อสายสัญญาณเข้ากับคอมพิวเตอร์ จะเรียกใช้โปรแกรม VISA Interactive Control เพื่อสร้างการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่เข้ากับโปรแกรม LabVIEW (2) หลังจากเชื่อมต่อกับโปรแกรม LabVIEW ได้จะสามารถเลือกใช้แพลตฟอร์มในการเชื่อมต่อ ซึ่งโครงงานนี้เลือกใช้ VISA ดังแสดงในรูปที่ 5.5 และทำการสร้าง connection โดยสามารถสังเกตจากหน้าต่างแสดงผลของโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 5.5 การเชื่อมต่อ LabVIEW กับเครื่องวิเคราะห์ความถี่






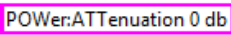





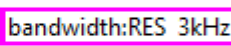




(3) ป้อนคำสั่ง SCPI: \*IDN? เพื่อรับชื่อของอุปกรณ์ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้



รูปที่ 5.6 ผลการเชื่อมต่อระหว่าง LabVIEW กับเครื่องวิเคราะห์ความถี่ผ่าน USB

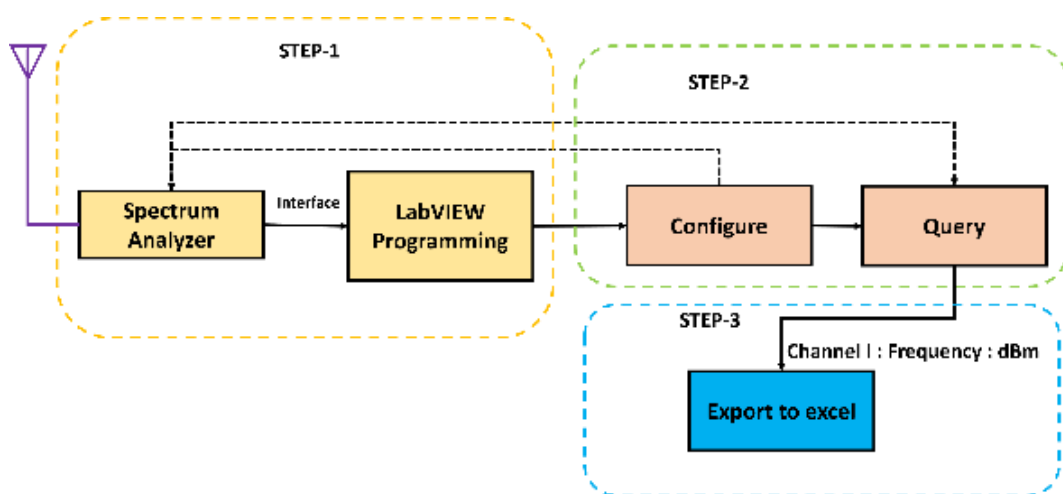
ผลการศึกษาเบื้องต้น พบว่า การประมวลผลด้วยโปรแกรม LabVIEW ใช้เวลาน้อยกว่าโปรแกรม MATLAB และการสร้างชุดโปรแกรมคำสั่งในโปรแกรม LabVIEW นั้น สามารถทำได้โดยการใช้ Block diagram โดยโครงการนี้เลือกใช้ Block Instrument ในไลบรารีของ VISA ซึ่งอยู่ในหมวด Function Instrument นอกจากนั้น จำเป็นต้องติดตั้งไลบรารี Agilent N9320 เพิ่มเติม เพื่อให้รองรับการใช้งานกับเครื่อง N9340B Handheld Spectrum Analyzer (HSA) โดยมี Block functions ดังต่อไปนี้

VISA Open Function	VISA Write Function
<p><b>VISA Open</b></p> <p>VISA resource name duplicate session (F) error in (no error)</p> <p>VISA resource name out error out</p>	<p><b>VISA Write</b></p> <p>VISA resource name write buffer error in (no error)</p> <p>VISA resource name out return count error out</p>
VISA Read Function	Configure Frequency
<p><b>VISA Read</b></p> <p>VISA resource name byte count error in (no error)</p> <p>VISA resource name out read buffer error out</p>	<p><b>Configure Frequency.vi</b></p> <p>VISA resource name Start Frequency (0 Hz) Stop Frequency (3E+9 Hz) error in (no error)</p> <p>VISA resource name out error out</p>

VISA Close	Close.vi
<p style="text-align: center;"><b>VISA Close</b></p> <p>VISA resource name  error in (no error)  error out</p>	<p style="text-align: center;"><b>Close.vi</b></p> <p>VISA resource name  error in (no error)  error out</p>
Block Function: Attenuation	
<p>VISA resource name 5   </p>	<p>VISA resource name 3   </p>
(n) VISA Library	(v) Agilent N9320B
Block Function: Resolution Bandwidth	
<p>VISA resource name 6   </p>	<p>VISA resource name 4   </p>
(n) VISA Library	(v) Agilent N9320B

### 5.2.2 กระบวนการสังเกตการณ์

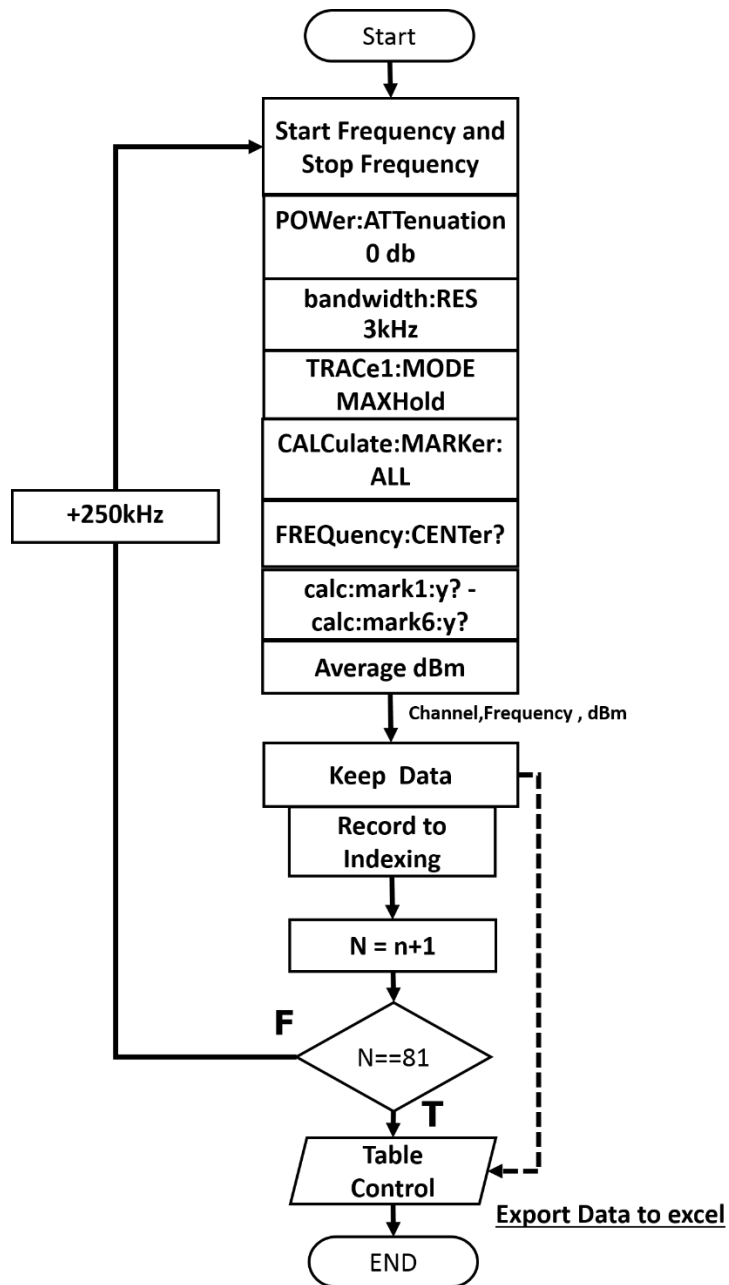
กระบวนการสังเกตการณ์ ได้ถูกออกแบบให้มี 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 5.7 โดยขั้นตอนแรก เป็นการส่งข้อมูลคำสั่งไปยังเครื่องวิเคราะห์ความถี่ เพื่อให้เริ่มตรวจวัดค่ากำลังคลื่นในช่องสัญญาณที่ 1 ด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้ ขั้นตอนที่สอง เป็นการรับข้อมูลจากเครื่องวิเคราะห์ความถี่ และนำมาประมวลผลตามที่ต้องการ เมื่อเสร็จสิ้นจะกลับไปดำเนินการในขั้นตอนแรก เพื่อตรวจวัดช่องสัญญาณถัดไป และวนซ้ำจนครบทั้งหมด 81 ช่องสัญญาณ (ครอบคลุม 87.875 – 108.125 MHz) และขั้นตอนที่ 3 เป็นการรวบรวมข้อมูลของแต่ละช่องสัญญาณในรูปแบบตาราง เพื่อส่งข้อมูลไปยังระบบตัดสินใจ ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการสังเกตการณ์



รูปที่ 5.7 ขั้นตอนการทำงานของระบบสังเกตการณ์

ได้ถูกออกแบบเป็นโปรแกรมการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.8





รูปที่ 5.8 โปรแกรมการทำงานของระบบสังเกตการณ์

หลังจากได้ออกแบบโปรแกรมการทำงานของระบบสังเกตการณ์ ทำให้ทราบถึงชุดคำสั่ง SCPI ที่จำเป็นต้องใช้งาน ซึ่งมีดังต่อไปนี้

POWer:ATTenuation 0 db เป็นการตั้งค่าการลดทอนสัญญาณขาเข้าไว้ที่ 0 dB

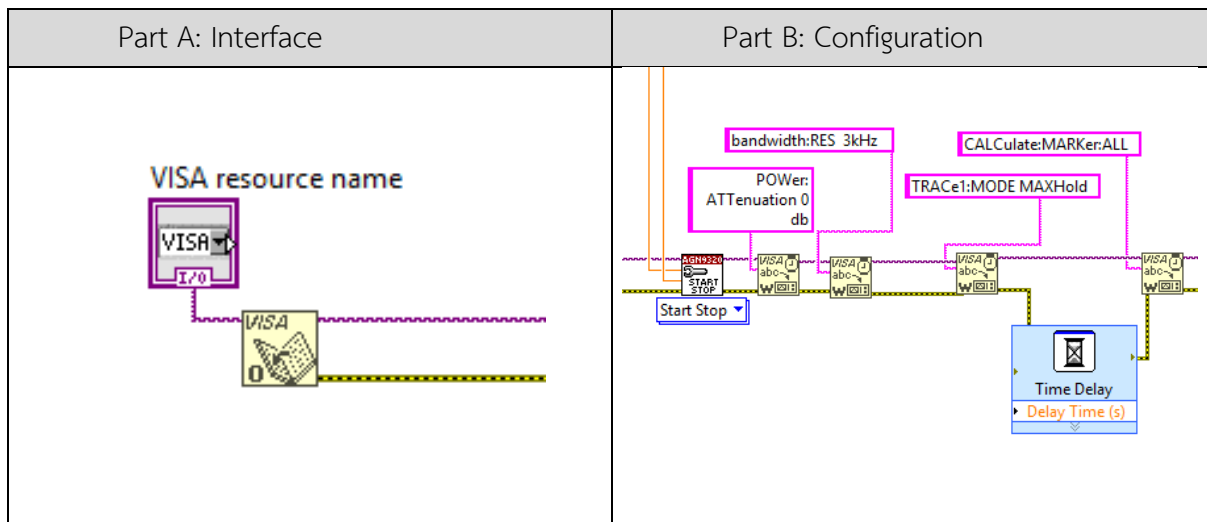
bandwidth:RES เป็นการระบุความละเอียดของแบนด์วิดท์ไว้ที่ 3 kHz

TRACe1:MODE MAXHold เป็นการตรวจจับค่ากำลังคลื่นสูงสุดในแต่ละช่วงเวลา

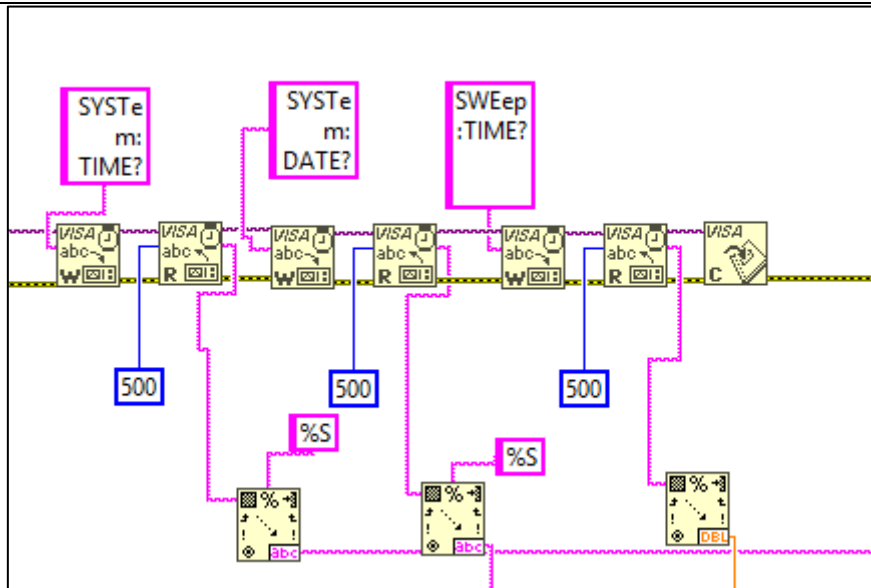
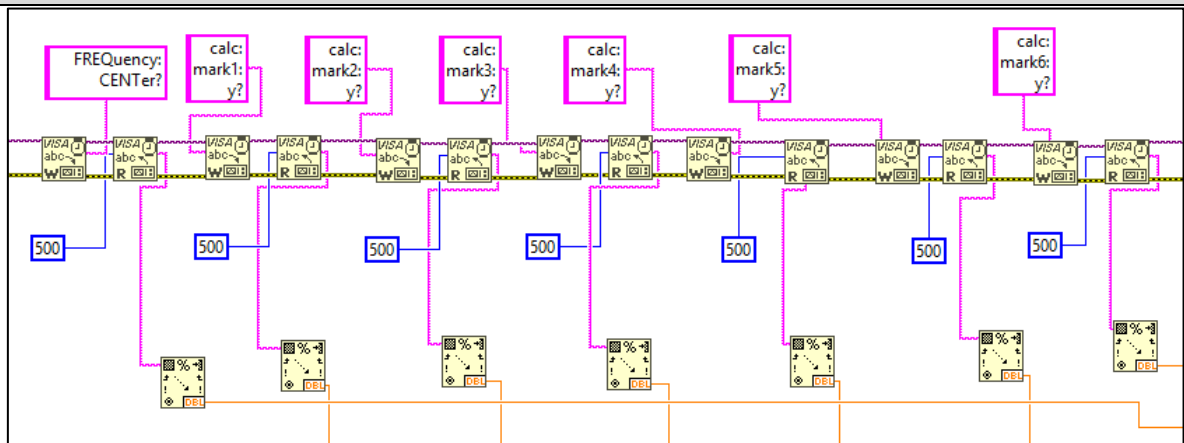
CALCulate:MARKer:ALL เป็นการกำหนดจำนวนของตัวระบุค่ายอดซึ่งมีจำนวน 6 จุด

FREQuency:CENTer? เป็นการตรวจจับค่าความถี่กลางของช่องสัญญาณนั้น

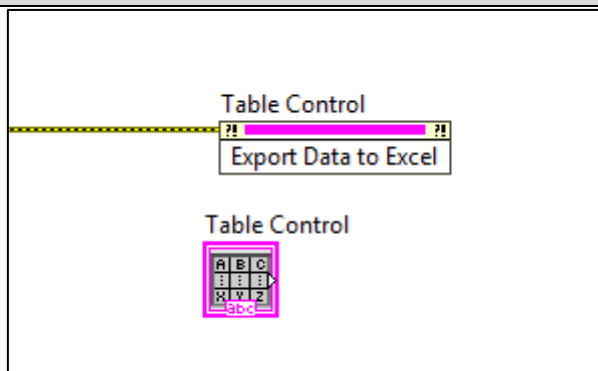
ชุดคำสั่ง SCPI เหล่านี้ได้ถูกนำไปสร้างเป็นชุดโปรแกรม LABView เพื่อประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้



### Part C: Query Data

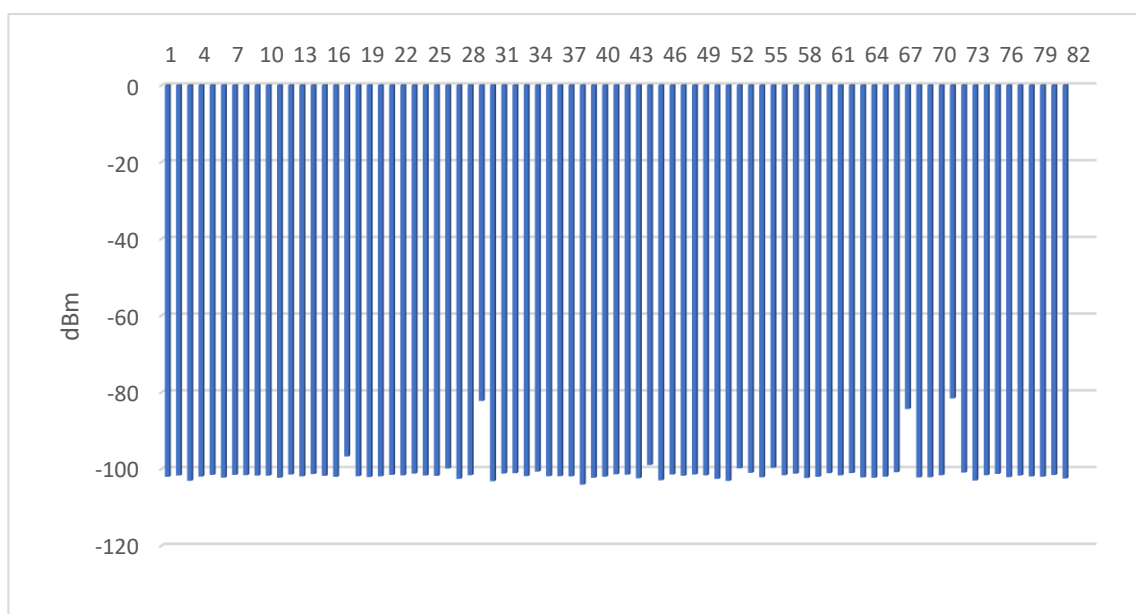


### Part D: Export Data

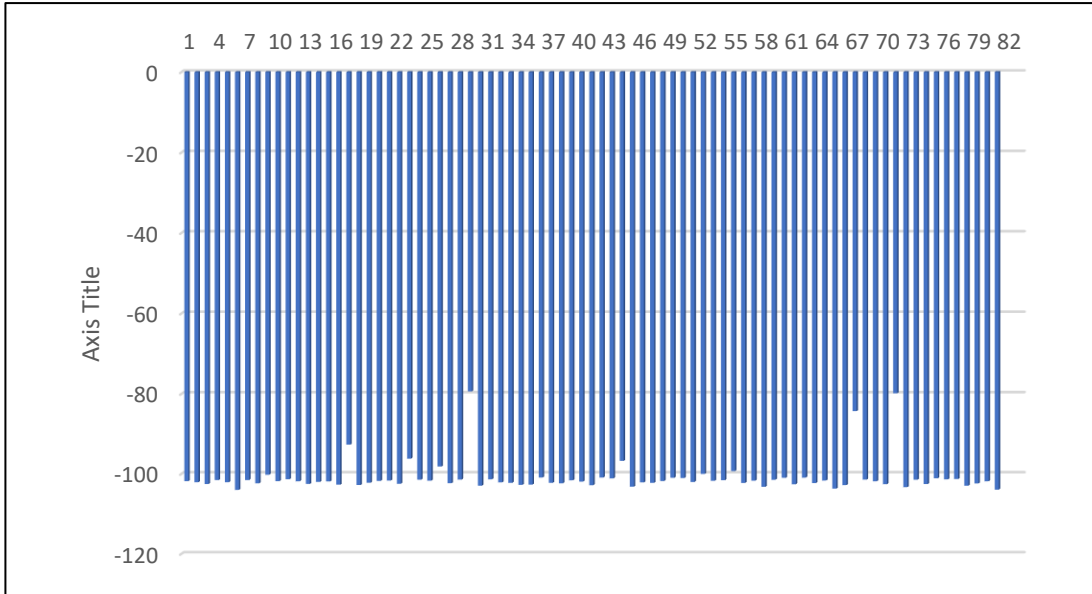


### 5.2.3 ผลทดสอบระบบสังเกตการณ์

โปรแกรมชุดคำสั่งได้ถูกทดสอบการทำงาน โดยการสังเกตการณ์ค่ากำลังคลื่นวิทยุของระบบ FM ณ ตำแหน่งพิกัด (8.642420,99.896571) ซึ่งอยู่ภายในบริเวณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในช่วงเวลา 19.00-21.00 น. ของวันที่ 21 เมษายน 2561 และวันที่ 22 เมษายน 2561 และได้ผลการตรวจวัด ดังแสดงในรูปที่ 5.9 (ก) และรูปที่ 5.9 (ข) ตามลำดับ พบว่า ผลการวัดทั้งสองช่วงเวลา มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลที่คาดการณ์ไว้ เนื่องจากเป็นสังเกตการณ์ในตำแหน่งเดียวกัน จึงควรมีการใช้ช่องสัญญาณที่ใกล้เคียงกันทั้งสองวัน ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมคำสั่ง สามารถวัดและเก็บข้อมูลได้ตามที่ต้องการ



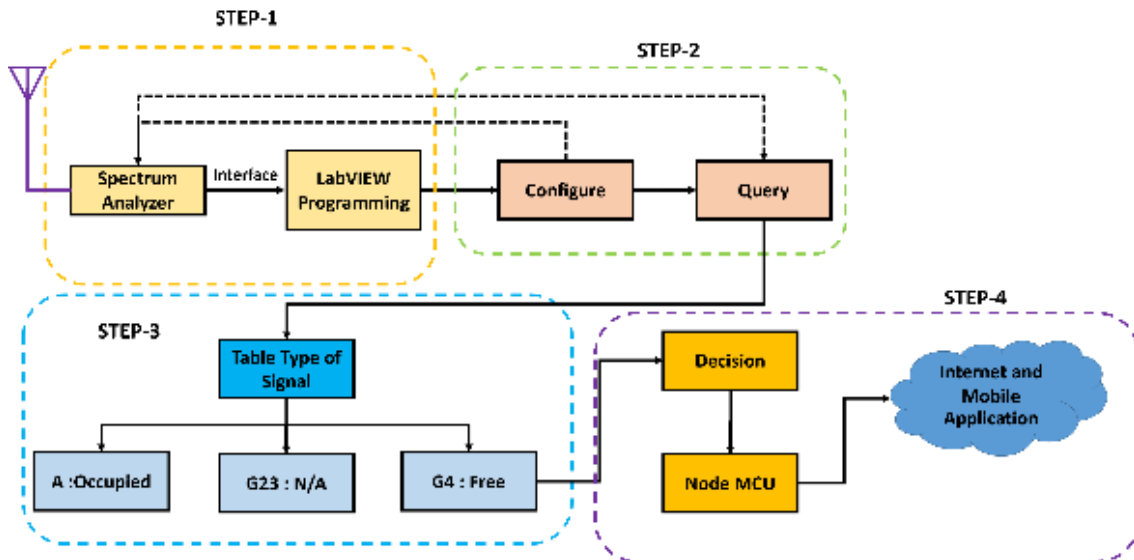
(ก) ทดสอบ ณ ช่วงเวลา 19.00-21.00 น. วันที่ 21 เมษายน 2561



(ข) ทดสอบ ณ ช่วงเวลา 19.00-21.00 น. ของวันที่ 22 เมษายน 2561  
 รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบชุดโปรแกรมคำสั่งของกระบวนการสังเกตการณ์

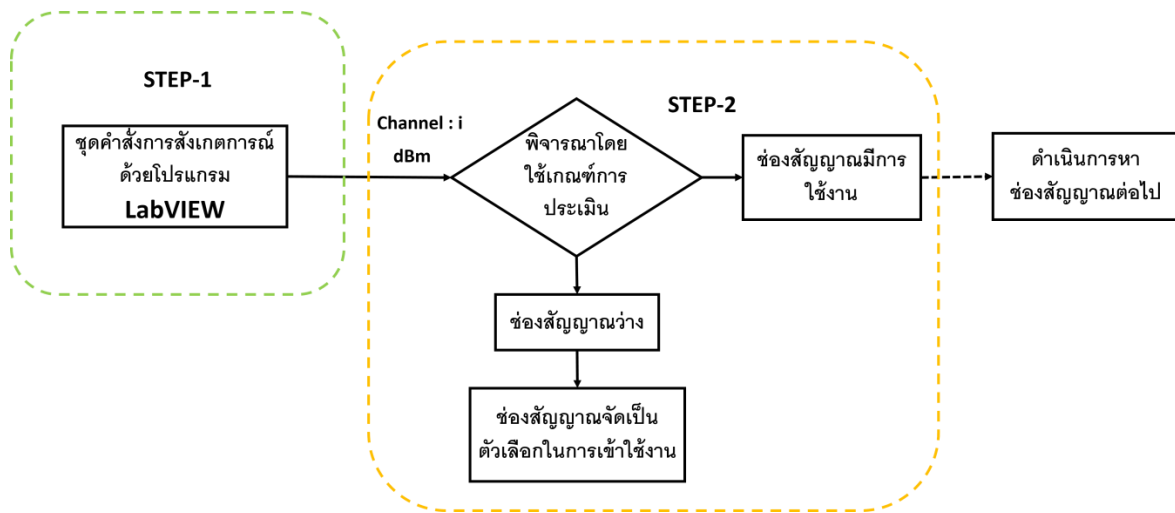
### 5.3 ระบบตัดสินใจ

ระบบตัดสินใจ ทำหน้าที่ประเมินผลจากข้อมูลการวัดสัญญาณของแต่ละช่องสัญญาณที่ได้รับจากระบบสังเกตการณ์ เพื่อพิจารณาการเข้าใช้ช่องสัญญาณ และส่งข้อมูลคำสั่งไปยังระบบดำเนินการ ซึ่งมีกระบวนการทำงานตามรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 กระบวนการสังเกตการณ์เข้าใช้ช่องสัญญาณ

โครงการนี้ได้จำลองการตัดสินใจเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณของระบบวิทยุ FM ด้วยการประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ และเขียนด้วยโปรแกรม LabVIEW ในรูปที่ 5.10 หลังจากระบบสังเกตการณ์ได้ส่งข้อมูลแก่ระบบตัดสินใจแล้ว ระบบจะเริ่มประเมินการเข้าใช้ช่องสัญญาณในช่วงเวลาดังกล่าว โดยจำแนกการเข้าใช้ช่องสัญญาณออกเป็น 3 กรณี คือ ช่องสัญญาณถูกใช้งาน ช่องสัญญาณไม่ได้ใช้งาน และช่องสัญญาณที่ระบุไม่ได้ จึงเห็นได้ว่าระบบจำเป็นต้องอาศัยเกณฑ์ในการจำแนกการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 การใช้งานเกณฑ์การตัดสินใจ

### 5.3.1 การสร้างเกณฑ์การตัดสินใจ

การสร้างเกณฑ์สำหรับใช้ประกอบการตัดสินใจเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณนั้น จำเป็นต้องแยกแยะให้ได้เสียก่อนว่า ช่องสัญญาณนั้นๆ มีการใช้งานอยู่หรือไม่ ซึ่งการแยกแยะนั้นจะพิจารณาจากระดับค่ากำลังคลื่นภายในช่องสัญญาณร่วมกับผลการได้รับอนุญาตใช้งาน ดังนั้น ประสิทธิภาพการวัดและประมวลผลของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ จึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของการแยกแยะสัญญาณ รวมทั้ง การปรับตั้งค่าของเครื่องวิเคราะห์ความถี่ให้เหมาะสมในการวัดและการประมวลผล เช่น การปรับค่า RBW ของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่แตกต่างกัน จะทำให้ผลการวัดระดับกำลังคลื่นแตกต่างกันด้วย เป็นต้น

ขั้นตอนของการสร้างเกณฑ์จึงแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก เป็นการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการควบคุมการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ความถี่ ขั้นตอนที่สอง เป็นการทดลองวัดสัญญาณจริงเพื่อให้ได้รับข้อมูลตัวอย่างที่มากเพียงพอในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับกำลังคลื่นกับคุณภาพสัญญาณเสียงที่ได้จากคิมมอดูเลต และขั้นตอนที่สาม เป็นการกำหนดเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน เพื่อแยกแยะสถานะการใช้งานช่องสัญญาณ

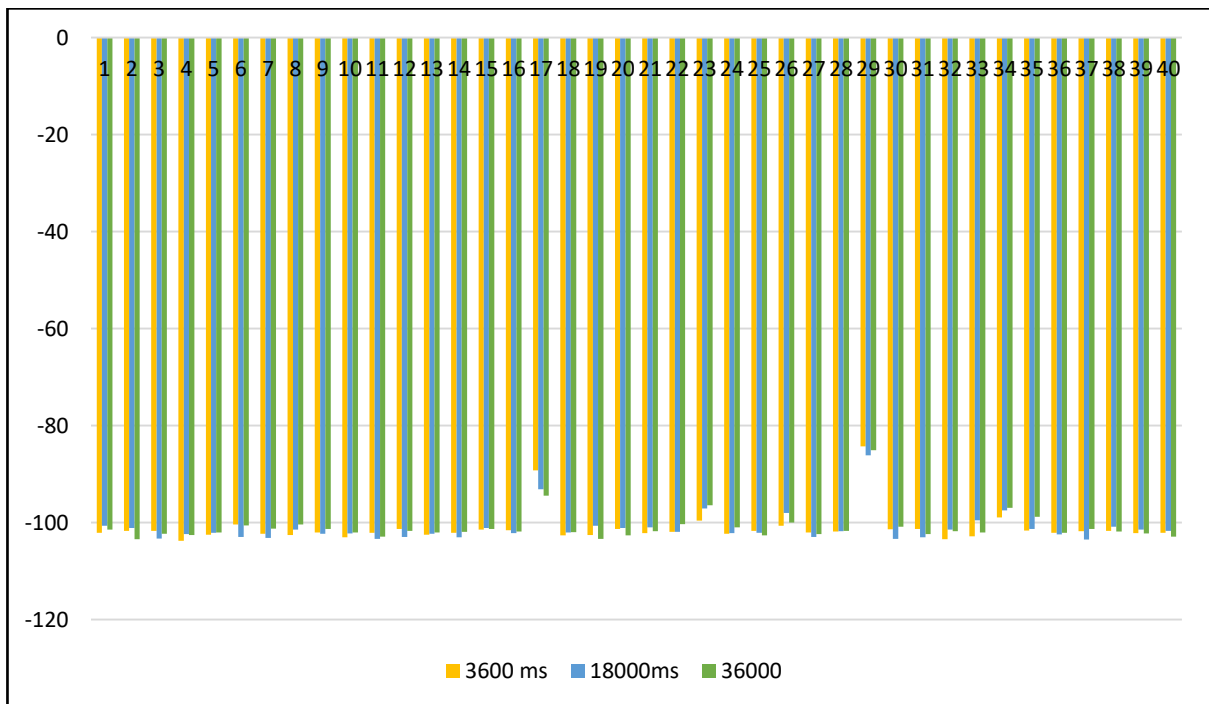
- **ขั้นตอนแรก การศึกษาพารามิเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่**

ผลการศึกษาเบื้องต้น ทำให้พบว่า มีพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการควบคุมเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ คือ ค่า MAX-HOLD และค่า Resolution Bandwidth (RBW)

การกำหนดค่า MAX-HOLD

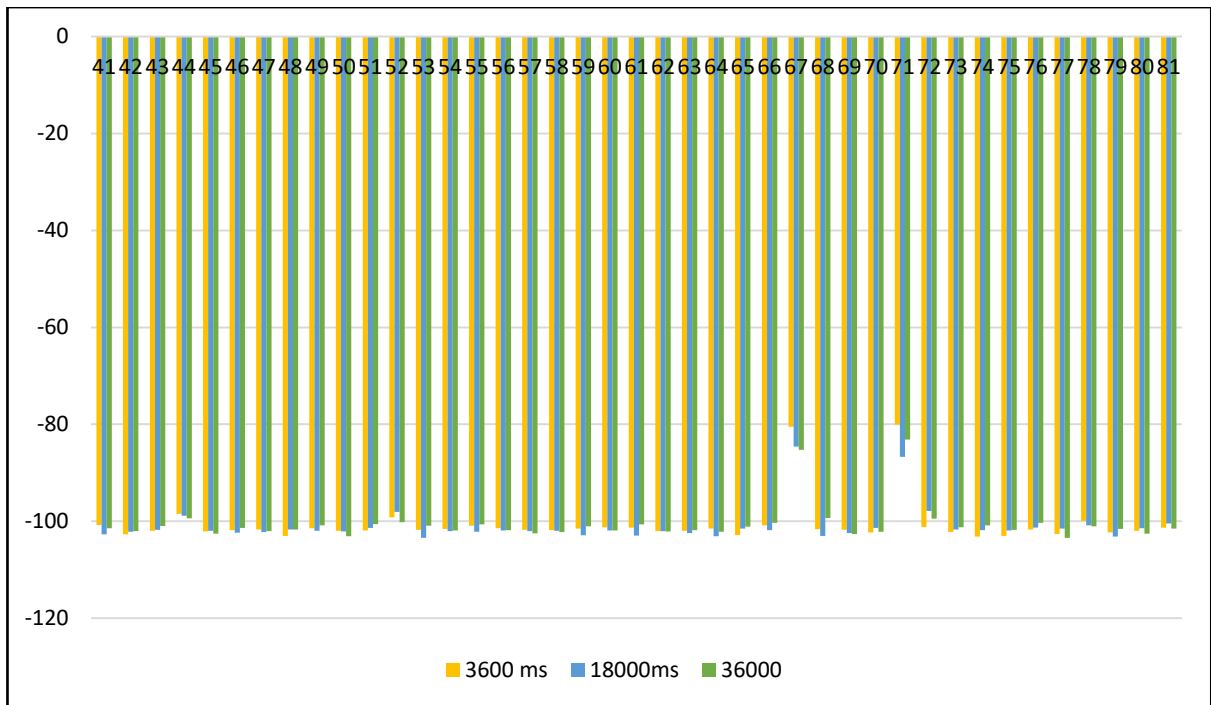
ค่า MAX-HOLD เป็นค่าระดับกำลังคลื่นที่วัดได้สูงสุดในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งมักนิยมใช้พารามิเตอร์นี้ก็ต่อเมื่อต้องตรวจวัดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับกำลังอย่างรวดเร็วตลอดเวลาหรือสัญญาณคลื่นวิทยุระบบ FM จึงจำเป็นต้องกำหนดระยะเวลาในการตรวจจับการแปรผันของค่าระดับสัญญาณสูงสุด

เพื่อกำหนดระยะเวลาในการตรวจจับที่เหมาะสม จึงได้ทดลองตรวจจับสัญญาณ โดยกำหนดระยะเวลาในการตรวจจับสัญญาณ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ 3,600 18,000 และ 36,000 มิลลิวินาที (หรือเทียบเป็นจำนวนรอบของการสุ่มวัด คือ 200 1,000 และ 2,000 ค่าระดับกำลังคลื่น) ณ บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 ของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในช่วงเวลา 19:00-21:00 น. ณ วันที่ 19 เมษายน 2561 และกำหนดค่า Span ของแต่ละช่องสัญญาณเป็น 250kHz ซึ่งได้ตรวจจับครอบคลุมทั้งย่าน 88-108 MHz เป็นจำนวน 81 ช่องสัญญาณ



(ก) ช่องสัญญาณที่ 1-40





(ข) ช่องสัญญาณที่ 40-81

รูปที่ 5.12 ค่า MAX-HOLD ที่ใช้ระยะเวลาในการตรวจจับสัญญาณ 3,600 18,000 และ 36,000 มิลลิวินาที

ผลการตรวจวัดค่า MAX-HOLD แสดงได้ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งเห็นได้ว่า ระดับค่ากำลังคลื่นสูงสุดที่ใช้ระยะเวลา 3,600 – 18,000 มิลลิวินาที มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากหลังจากวินาทีที่ 4 ค่ากำลังคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงไม่ต่างจากเดิม แต่การกำหนดระยะเวลาในการตรวจวัดสัญญาณมาก จะส่งผลให้การประมวลผลช้าเกินไป ดังนั้น โครงการนี้ จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ ค่า MAX-HOLD ที่มีการประมวลผลเป็นระยะเวลา 3,600 มิลลิวินาที หรือมีการสุ่มวัดเป็นจำนวน 200 ข้อมูล เพื่อใช้สำหรับการเก็บข้อมูลสำหรับการตัดสินใจ

#### การกำหนดค่า RBW

ค่า RBW: Resolution Bandwidth เป็นค่าความกว้างของแถบความถี่ที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งส่งผลต่อการแสดงผลของค่าผลต่างระหว่างระดับค่ากำลังคลื่นและระดับของ Noise Floor พารามิเตอร์นี้จึงนิยมใช้ในกรณีที่ต้องการตรวจวัดสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงแบนวิดธ์อย่างรวดเร็วและอย่างต่อเนื่อง เช่น สัญญาณคลื่นวิทยุระบบ FM เป็นต้น ภายในช่องสัญญาณหนึ่งๆ นั้น เครื่องวิเคราะห์ความถี่จะแสดงผลค่าผลต่างระหว่างระดับค่ากำลังคลื่นและระดับของ Noise Floor เพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีการกำหนดค่า RBW ลดลง ดังนั้น โครงการงานนี้ จึงจำเป็นต้องกำหนดค่า RBW สำหรับการประมวลผลที่เหมาะสมกับการตรวจจับสัญญาณของคลื่นวิทยุ FM และผลการศึกษา พบว่า ค่า RBW ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1kHz to 100kHz

● **ขั้นตอนที่สอง การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังคลื่นและระดับคุณภาพเสียง**

คุณภาพเสียงของแต่ละช่องสัญญาณ สามารถพิจารณาได้จากการตีมอดูเลตสัญญาณวิทยุระบบ FM ในแต่ละช่องสัญญาณ ซึ่งคุณภาพเสียงที่ได้รับ จะแปรตามหลายปัจจัย เช่น กำลังส่งของเครื่องส่งที่สถานีกระจายเสียง ระยะห่างระหว่างสถานีส่งและจุดรับสัญญาณ และสภาพแวดล้อมของพื้นที่ รวมทั้งอุปกรณ์ภายในระบบรับส่งสัญญาณด้วย

โครงการนี้ ใช้คุณภาพเสียงเป็นตัวกำหนดการใช้ช่องสัญญาณ เช่น ช่องสัญญาณใดที่มีสัญญาณเสียงชัดเจน ช่องสัญญาณนั้นกำลังถูกใช้งาน และในทางกลับกัน ช่องสัญญาณใดที่ไม่มีสัญญาณเสียง ช่องสัญญาณนั้นไม่ได้ถูกใช้งาน เป็นต้น จึงได้จำแนกระดับคุณภาพเสียง โดยแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 ระดับของคุณภาพเสียง

ระดับ	คุณภาพเสียงหลังการตีมอดูเลต
A	สัญญาณเสียงพูดที่ได้ยินอย่างชัดเจน
B	สัญญาณเสียงพูดที่ได้ยินไม่ชัดเจนบางช่วงเวลา แต่ยังจับใจความได้
C	สัญญาณพูดที่ไม่ชัดเจนและไม่สามารถจับใจความได้
D	สัญญาณที่ไม่ได้ยินเสียงพูด

เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระดับค่ากำลังคลื่นและระดับคุณภาพเสียงที่อยู่ภายในช่องสัญญาณนั้นๆ จึงจำเป็นต้องทดลองวัดระดับกำลังคลื่นของแต่ละระดับคุณภาพเสียง โครงการนี้ จึงได้สุ่มวัดค่าระดับกำลังคลื่นและตรวจจับระดับคุณภาพเสียงในแต่ละช่องสัญญาณ ณ บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 ของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในช่วงเวลา 19:00-21:00 น. ณ วันที่ 21 เมษายน 2561 ถึงวันที่ 26 เมษายน 2561 เป็นจำนวน 6 วัน โดยกำหนดค่า Span ของแต่ละช่องสัญญาณเป็น 250kHz

ผลการสุ่มวัดในแต่ละช่องสัญญาณของระบบ FM ที่ครอบคลุมทั้งย่าน 88-108 MHz จำนวนทั้ง 81 ช่องสัญญาณ จำนวน 6 วัน ในช่วงเวลาเดียวกัน ทำให้ได้รับข้อมูลตัวอย่าง จำนวน 486 ข้อมูล ซึ่งเมื่อจำแนกผลการตรวจวัดระดับคุณภาพเสียงในแต่ละวันนั้น พบว่า บางช่องสัญญาณมีระดับคุณภาพเปลี่ยนแปลง มีรายละเอียดตามตารางดังนี้

ตารางที่ 5.2 จำนวนของช่องสัญญาณในแต่ละกลุ่มคุณภาพเสียง

วันที่	จำนวนช่องสัญญาณในแต่ละระดับคุณภาพเสียง			
	A	B	C	D
1	3	2	4	72
2	3	2	4	72
3	3	3	6	69
4	4	7	3	67
5	2	5	4	70
6	3	4	8	66

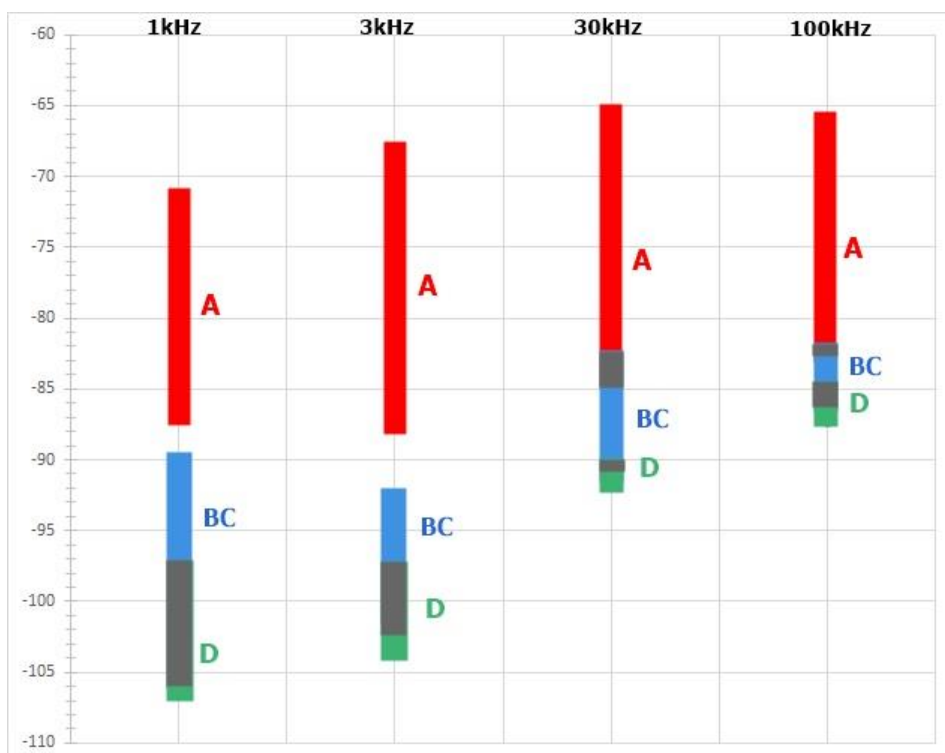
และได้พยายามสืบค้นว่า ช่องสัญญาณใดบ้างที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับคุณภาพเสียง โดยขอแสดงผลในวันที่ 1 3 และ 5 ของการตรวจวัด ดังแสดงในตาราง ดังนี้

ระดับคุณภาพเสียง	ช่องสัญญาณที่		
	วันที่ 1	วันที่ 3	วันที่ 5
A	29, 67, 71	29, 67, 71	29, 67, 71
B & C	17, 55, 23, 26, 44, 52	17, 55, 23, 44, 34, 57, 60, 62	17, 55, 23, 26, 52, 34, 33, 9
D	9, 34, 57, 60, 62, 58	26, 52, 9, 58	26, 44, 58, 62

ระดับคุณภาพเสียงของแต่ละช่องสัญญาณ ได้ถูกนำมาสร้างความสัมพันธ์กับค่าระดับกำลังคลื่น ซึ่งได้ทำการวัดด้วยการกำหนดพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน 4 กรณีที่มีค่า RBW แตกต่างกัน คือ 1 3 30 และ 100kHz ซึ่งทำให้มีจำนวนข้อมูลสุ่มวัดค่ากำลังคลื่น ทั้งสิ้น 1,944 ชุดข้อมูล และสามารถแยกแยะตามระดับคุณภาพเสียงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3 ค่าระดับกำลังคลื่นต่ำสุดและสูงสุดของแต่ละระดับคุณภาพเสียง

RBW (kHz)	ระดับค่ากำลังคลื่น (dBm) ของแต่ละกลุ่มคุณภาพเสียง							
	A (dBm)		B (dBm)		C (dBm)		D (dBm)	
	max	min	max	min	max	min	max	min
1	-71.29	-87.18	-89.88	-101.86	-98.45	-105.7	-97.38	-106.5
3	-68.11	-87.79	-92.47	-101.58	-96.19	-101.18	-96.93	-103.2
30	-65.34	-84.62	-83.0	-89.93	-88.45	-91.65	-90.4	-91.9
100	-65.85	-82.88	-82.19	-85.79	-84.55	-86.19	-84.84	-87.33



รูปที่ 5.13 การทับซ้อนของค่ากำลังคลื่นในแต่ละระดับคุณภาพเสียง

รูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังคลื่นและระดับคุณภาพเสียงที่มีการปรับค่า RBW แตกต่างกัน ซึ่งพบว่า ผลการวัดระดับกำลังคลื่นด้วยการกำหนดค่า RBW เป็น 30kHz และ 100kHz นั้น มีช่วงค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ในหลายกลุ่มระดับคุณภาพเสียง ส่งผลให้ยากที่จะนำความสัมพันธ์ฯ มาสร้างเป็น เกณฑ์การประเมินการใช้ช่องสัญญาณ อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังคลื่นและระดับคุณภาพเสียงที่มีการปรับค่า RBW เป็น 1kHz และ 3kHz สามารถแยกกลุ่มคุณภาพเสียง A ออกจากกลุ่มคุณภาพเสียง อื่นๆได้อย่างชัดเจน

- **ขั้นตอนที่สาม การกำหนดเกณฑ์แยกแยะสถานะการใช้งานช่องสัญญาณ**

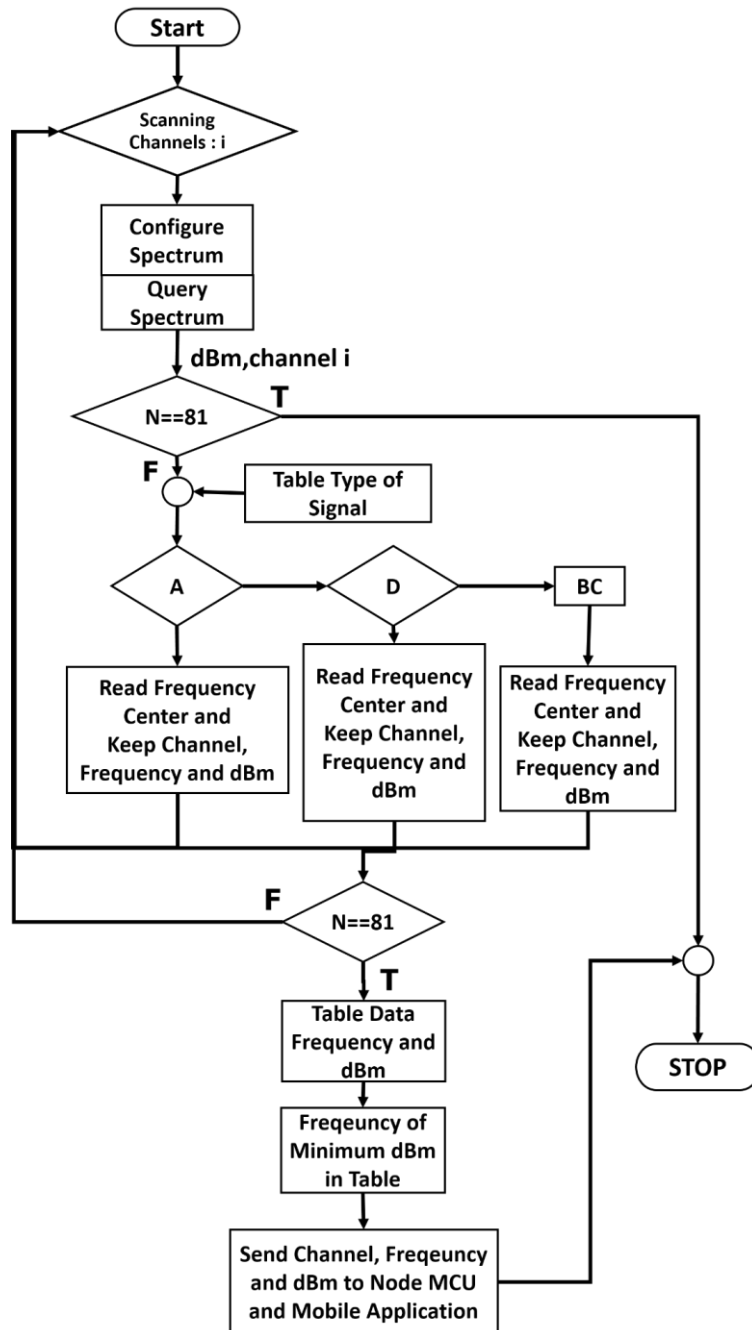
ความสัมพันธ์ระหว่างระดับกำลังคลื่นและระดับคุณภาพเสียงที่ได้รับ ได้ถูกนำมาใช้กำหนดเกณฑ์แยกแยะสถานะการใช้งานช่องสัญญาณ มีรายละเอียดดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.4 เกณฑ์การประเมินสถานะการใช้ช่องสัญญาณ

ระดับค่ากำลังคลื่นที่ใช้จำแนกแต่ละกลุ่มคุณภาพเสียง				สถานะการใช้งาน ช่องสัญญาณ
RBW 1kHz		RBW 3kHz		
Lower	Upper	Lower	Upper	
-87.1	-71.3	-87.8	-68.1	Occupied
-106.0	-105.0	-103.0	-102.0	Free

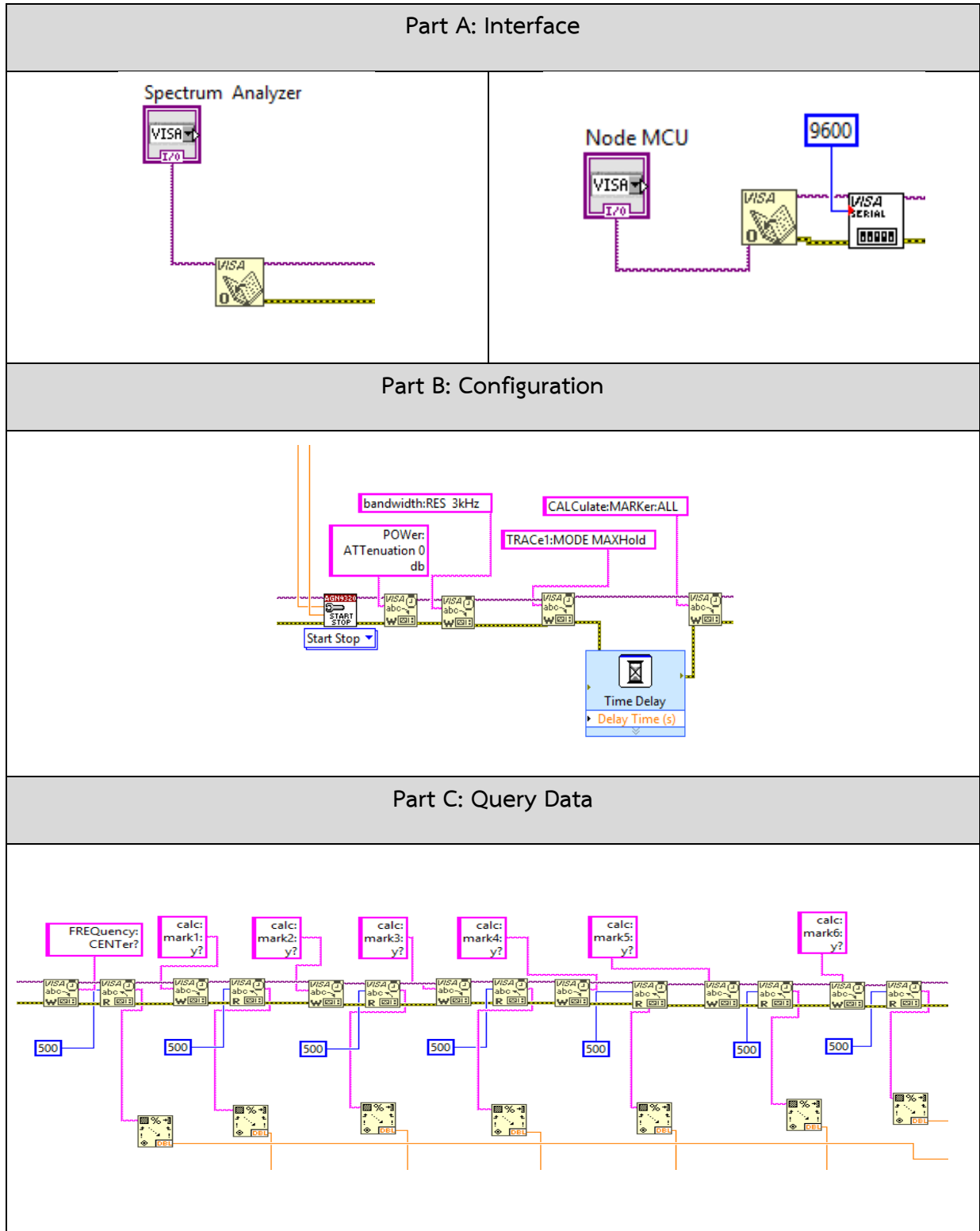
### 5.3.2 กระบวนการตัดสินใจ

กระบวนการทำงานของระบบตัดสินใจ ได้ถูกออกแบบโปรแกรมการทำงาน มีรายละเอียดดังรูปที่ 5.14 ซึ่งได้นำเกณฑ์การแยกแยะสถานะการเข้าใช้งานช่องสัญญาณมาใช้งาน ร่วมกับผลการสังเกตการณ์

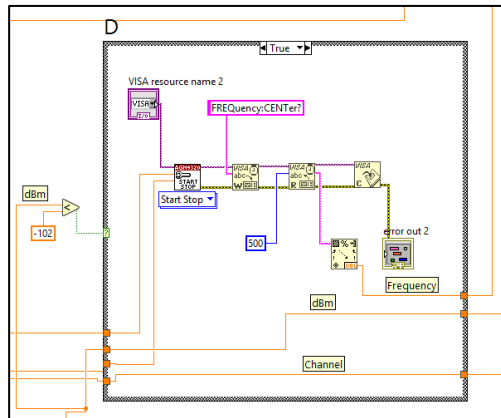
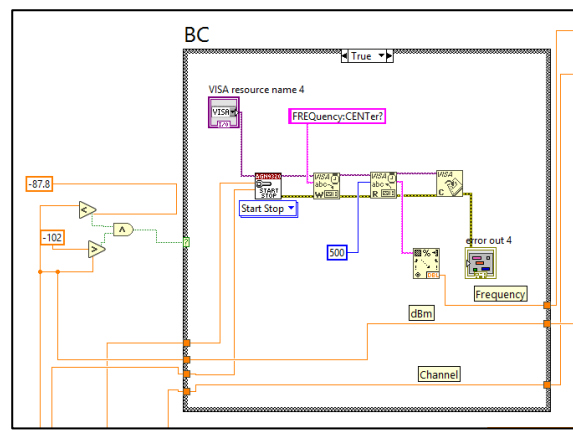
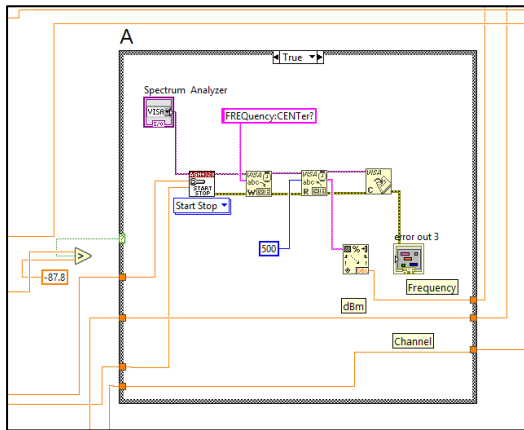


รูปที่ 5.14 โปรแกรมการทำงานของระบบตัดสินใจด้วยเกณฑ์

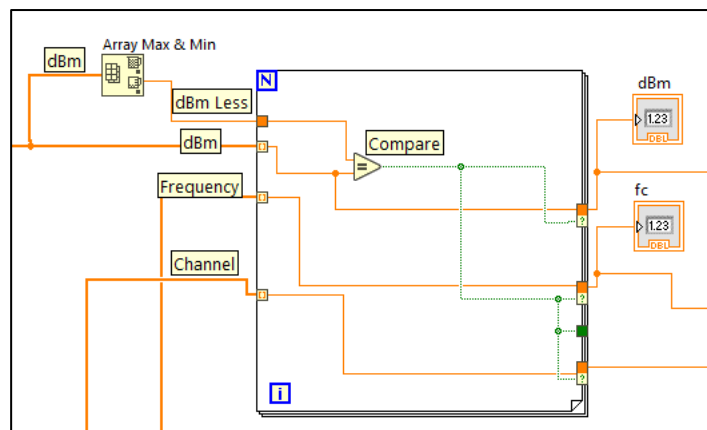
หลังจากได้ออกแบบโปรแกรมการทำงานของระบบสังเกตการณ์ ทำให้ทราบถึงชุดคำสั่ง SCPI ที่จำเป็นต้องใช้งาน และสร้างเป็นชุดโปรแกรม LabVIEW เพื่อประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 ส่วน ดังนี้



## Part D: Type of Signal

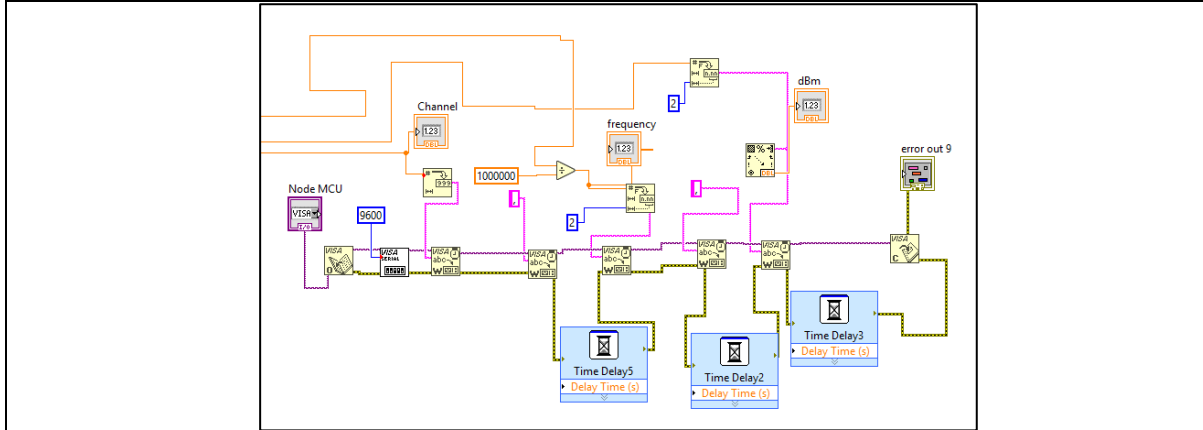


## Part E: Decision





## Part F: Send Data to Internet and Mobile App



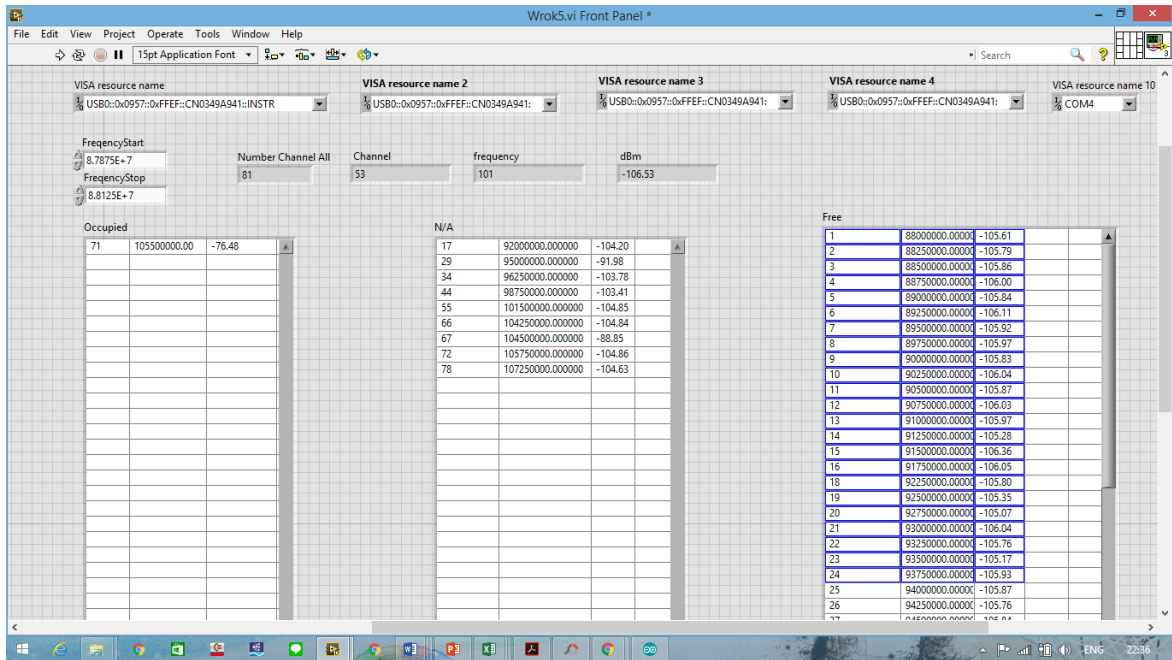
### 5.3.3 ผลการทดสอบของระบบตัดสินใจ เพื่อเลือกใช้งานช่องสัญญาณ

ระบบตัดสินใจ ได้ถูกทดสอบเพื่อเข้าใช้งานช่องสัญญาณของระบบวิทยุ FM ใน 5 ตำแหน่ง คือ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ สนามบินนครศรีธรรมราช สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษา เขต 12 และชุมชนเมืองของ จังหวัดนครศรีธรรมราช โดยแต่ละตำแหน่งจะทำการทดสอบ แบ่งออกเป็น 4 กรณี มีรายละเอียดตามตาราง ดังนี้

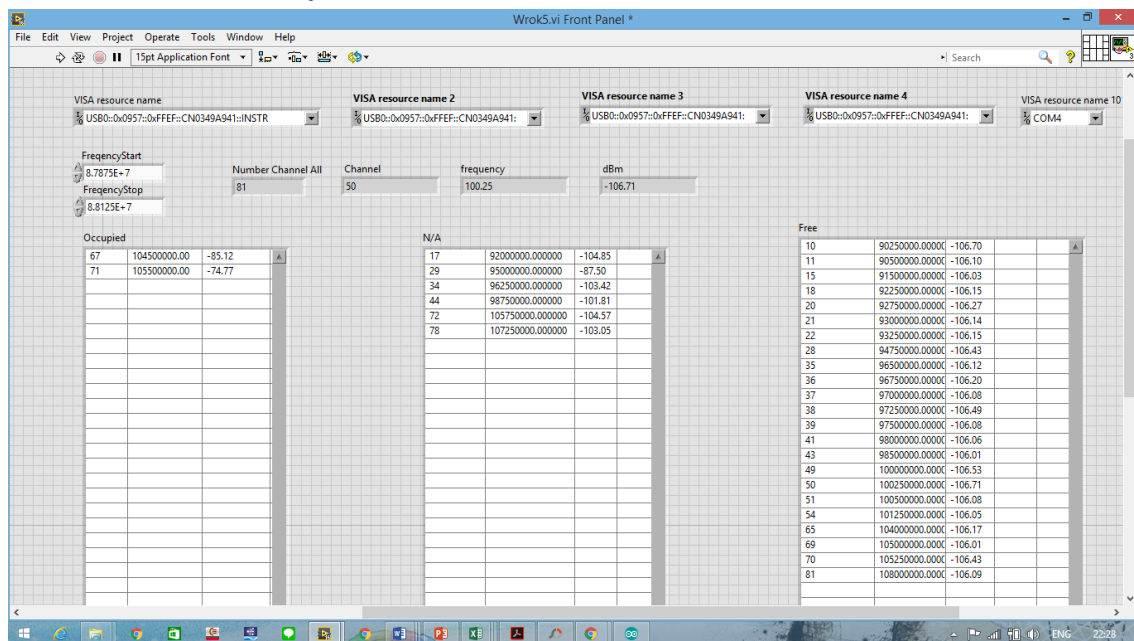
กรณีที่	ค่า RBW (kHz)	ค่าอ้างอิงที่ใช้ (dBm)
1	1	-105 (upper)
2	1	-106 (lower)
3	3	-102 (upper)
4	3	-103 (lower)

- จุดทดสอบภายในบริเวณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ครั้งที่ 1

จุดทดสอบภายในบริเวณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ได้เลือกทดสอบ ณ บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 ของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในวันที่ 5 พฤษภาคม 2561 ช่วงเวลา 20.00 – 22.30 น. และผลทำงานของระบบสังเกตการณ์ สามารถแยกแยะเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม Occupied กลุ่ม N/A และกลุ่ม Free ทั้ง 4 กรณีนี ตามแสดงในรูปที่ 5.15, 5.16, 5.17 และ 5.18



รูปที่ 5.15 RBW 1 kHz Reference value -105



รูปที่ 5.16 RBW 1 kHz Reference value -106



ผลการสังเกตการณ์ในแต่ละกรณี ถูกสรุปเป็นตารางที่ 5.5 พบว่า กรณีที่ 1 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่ามีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 71 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งานเพียง 10 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 12 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.19

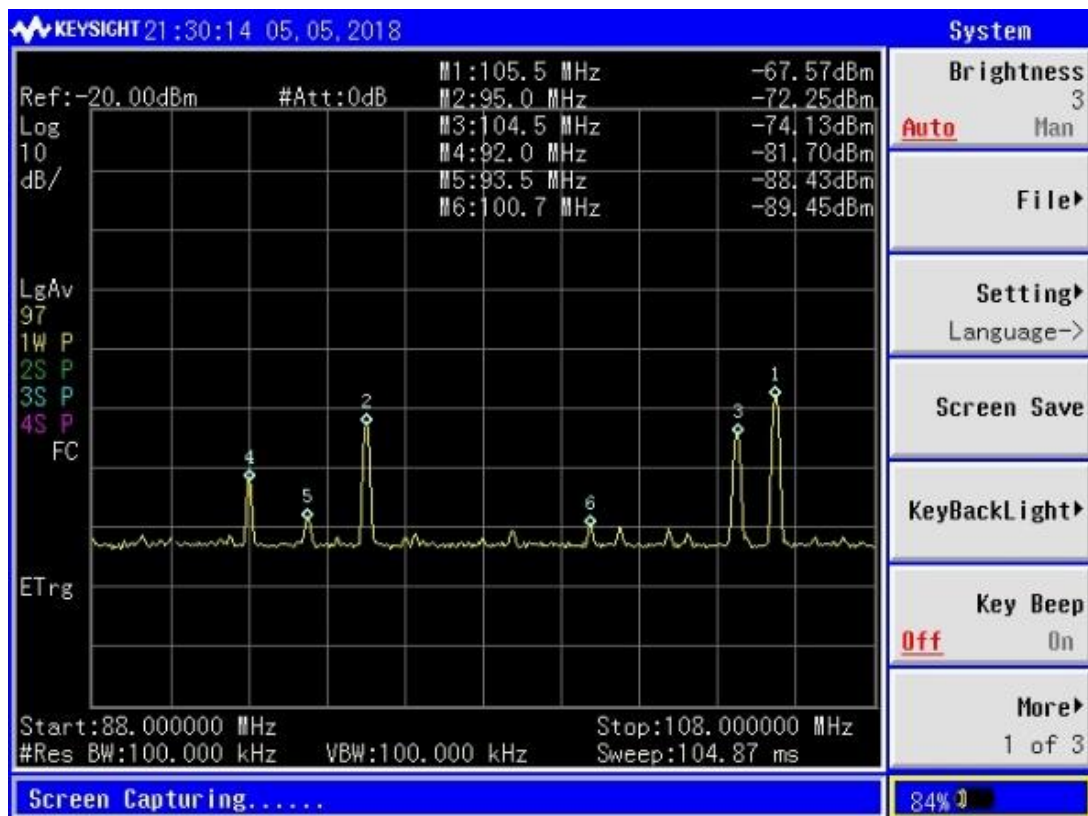
กรณีที่ 4 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่า มีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 2 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งานสูงถึง 79 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 12 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.19

ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์ในชุดโปรแกรมในกรณีที่ 2 และ 3 สามารถตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีที่ 1 และ 4

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ม.วลัยลักษณ์

กรณี	ค่า RBW ที่ใช้งาน (kHz)	ค่ากำลังคลื่นที่อ้างอิง (dBm)	จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน	ผลการตัดสินใจเลือกใช้งาน	
				ช่องสัญญาณ	ช่วงความถี่ (kHz)
1	1	-105	71	53	101.00
2	1	-106	23	50	100.25
3	3	-102	22	4	88.75
4	3	-103	2	61	103.00

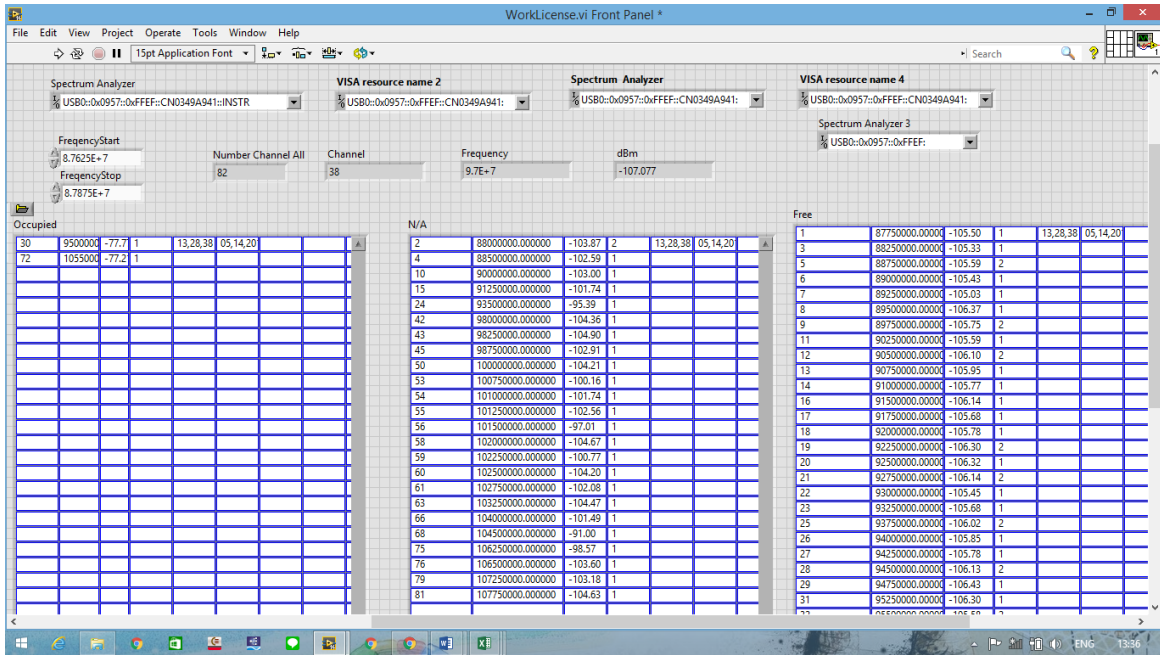
ผลการทดสอบกระบวนการตัดสินใจ ในแต่ละกรณีของชุดโปรแกรมคำสั่ง ได้ถูกสรุปในตารางที่ 5.5 ซึ่งผลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ โดยเลือกใช้ช่องสัญญาณที่มีค่าระดับกำลังคลื่นต่ำที่สุด และได้ตรวจสอบผลการตัดสินใจ โดยการฟังสัญญาณเสียงที่ได้จากการติมอดูเลตในช่องสัญญาณนั้นๆ ด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุ และพบว่า ไม่ได้ยินสัญญาณเสียงจากผู้ดำเนินรายการของสถานีวิทยุกระจายเสียง จึงขอสรุปว่า ชุดคำสั่งการตัดสินใจ สามารถจำลองการเลือกใช้งานได้อย่างถูกต้อง



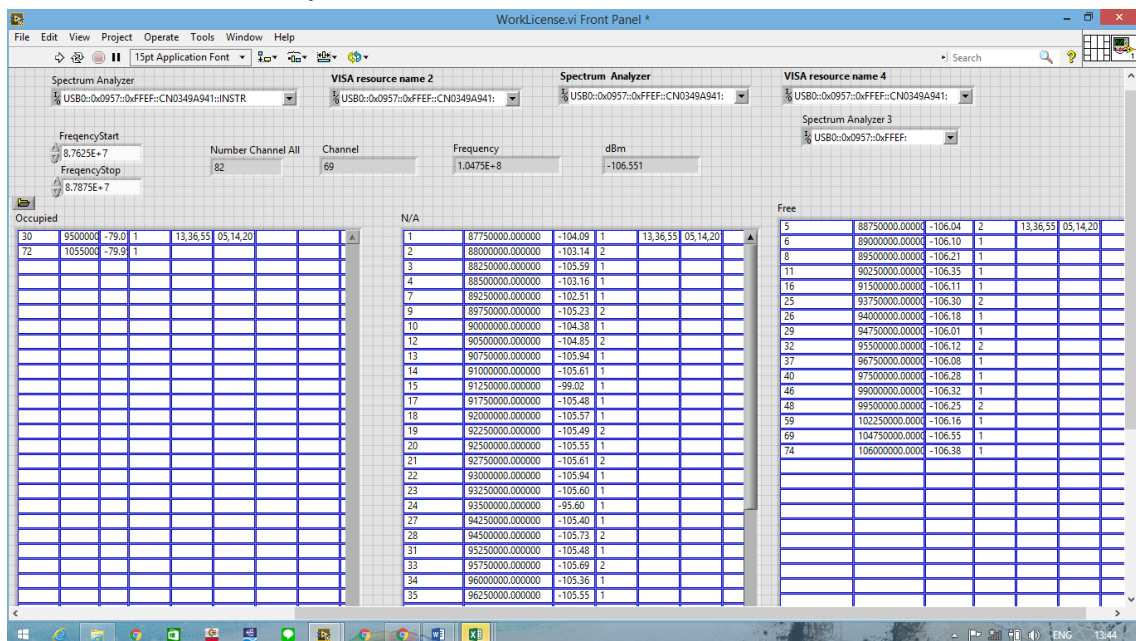
รูปที่ 5.19 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 1

● จุดทดสอบภายในบริเวณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ครั้งที่ 2

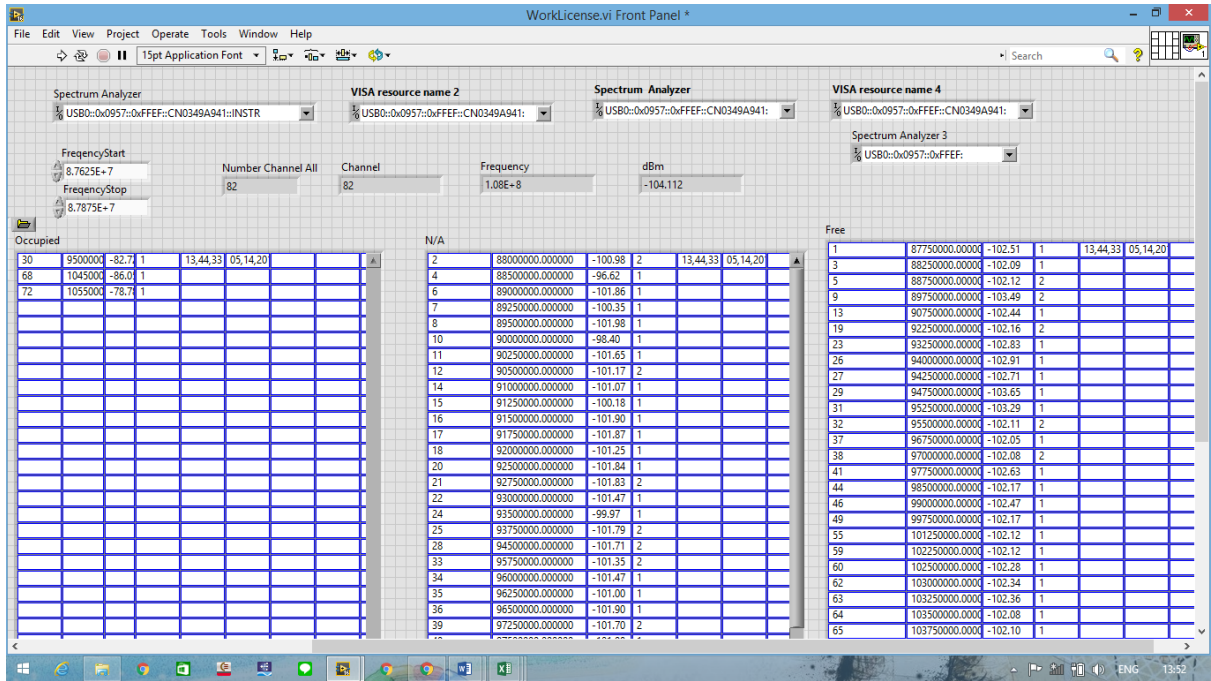
จุดทดสอบภายในบริเวณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ได้เลือกทดสอบ ณ บริเวณอาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 ของมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ในวันที่ 14 พฤษภาคม 2561 ช่วงเวลา 13.00 – 17.30 น. และผลทำงานของระบบสังเกตการณ์ สามารถแยกแยะเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม Occupied กลุ่ม N/A และกลุ่ม Free ทั้ง 4 กรณีนี ตามแสดงในรูปที่ 5.20, 5.21, 5.22 และ 5.23



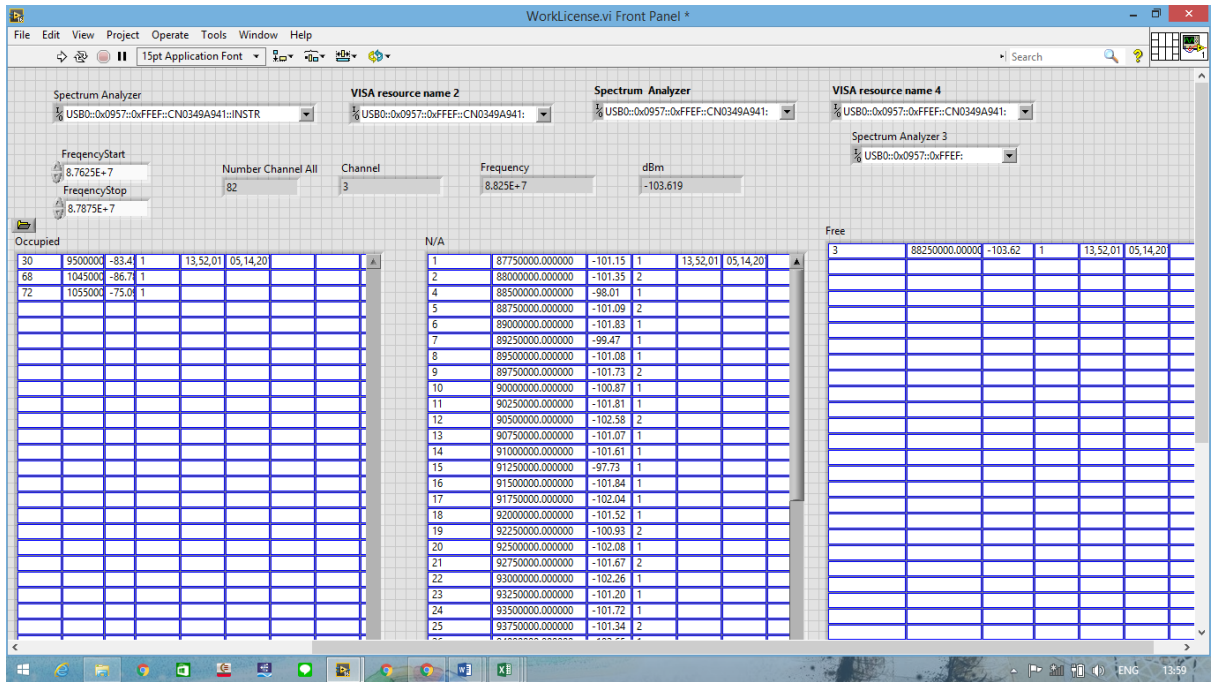
รูปที่ 5.20 RBW 1 kHz Reference value -105



รูปที่ 5.21 RBW 1 kHz Reference value -106



รูปที่ 5.22 RBW 3 kHz Reference value -102



รูปที่ 5.23 RBW 3 kHz Reference value -103

ผลการสังเกตการณ์ในแต่ละกรณี ถูกสรุปเป็นตารางที่ 5.6 พบว่า กรณีที่ 1 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่ามีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 56 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งานเพียง 25 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 12 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.24

กรณีที่ 4 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่า มีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งานสูงถึง 80 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 12 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.24

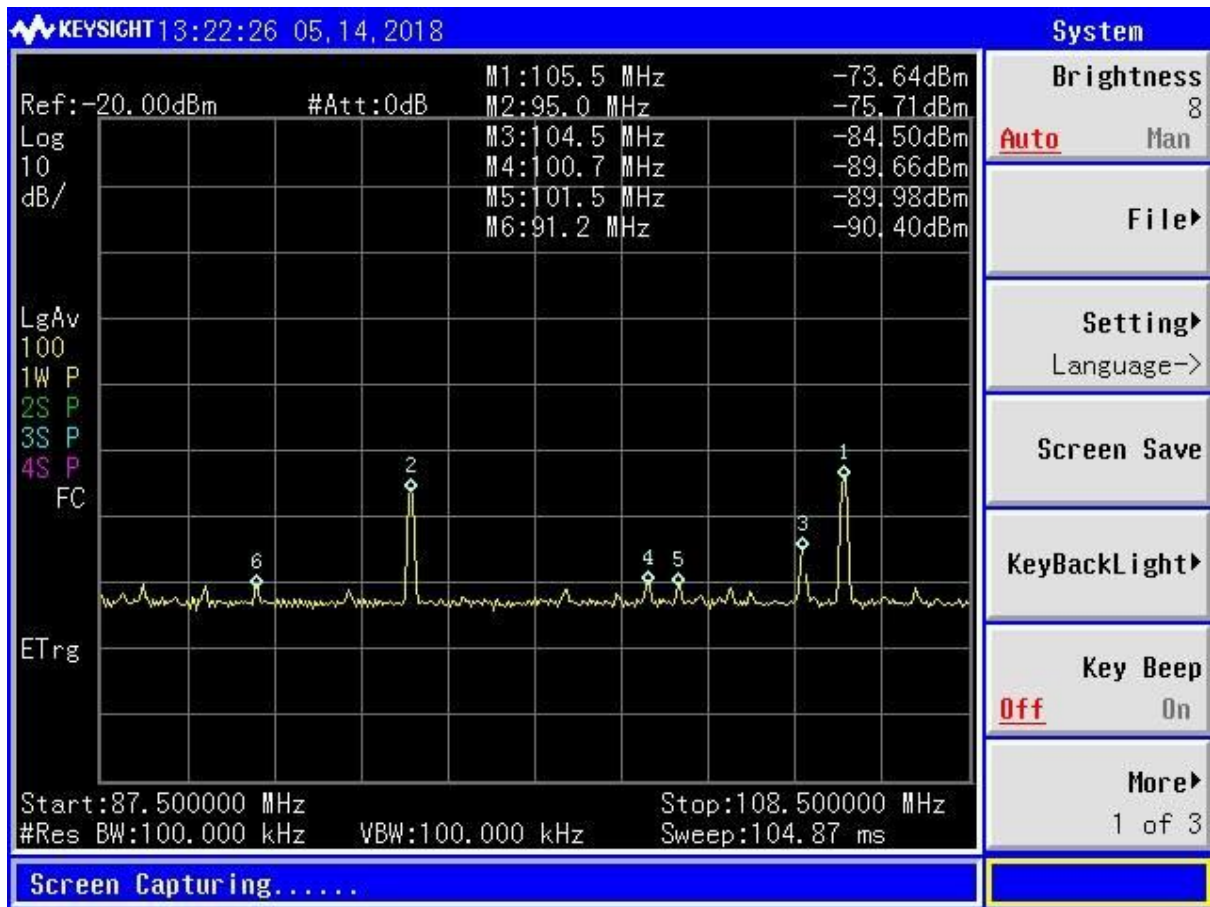
ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์ในชุดโปรแกรมในกรณีที่ 2 และ 3 สามารถตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีที่ 1 และ 4

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ อาคารศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ม.วลัยลักษณ์

กรณี	ค่า RBW ที่ใช้งาน (kHz)	ค่ากำลังคลื่นที่อ้างอิง (dBm)	จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน	ผลการตัดสินใจเลือกใช้งาน	
				ช่องสัญญาณ	ช่วงความถี่ (kHz)
1	1	-105	56	53	97.00
2	1	-106	16	50	104.75
3	3	-102	29	4	108.00
4	3	-103	1	61	88.25

ผลการทดสอบกระบวนการตัดสินใจ ในแต่ละกรณีของชุดโปรแกรมคำสั่ง ได้ถูกสรุปในตารางที่ 5.6 ซึ่งผลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ โดยเลือกใช้ช่องสัญญาณที่มีค่าระดับกำลังคลื่นต่ำที่สุด และได้ตรวจสอบผลการตัดสินใจ โดยการฟังสัญญาณเสียงที่ได้จากการดีมอดูเลตในช่องสัญญาณนั้นๆ ด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุ และพบว่า ไม่ได้ยินสัญญาณเสียงจากผู้ดำเนินรายการของสถานีวิทยุกระจายเสียง จึงขอสรุปว่า ชุดคำสั่งการตัดสินใจ สามารถจำลองการเลือกใช้งานได้อย่างถูกต้อง

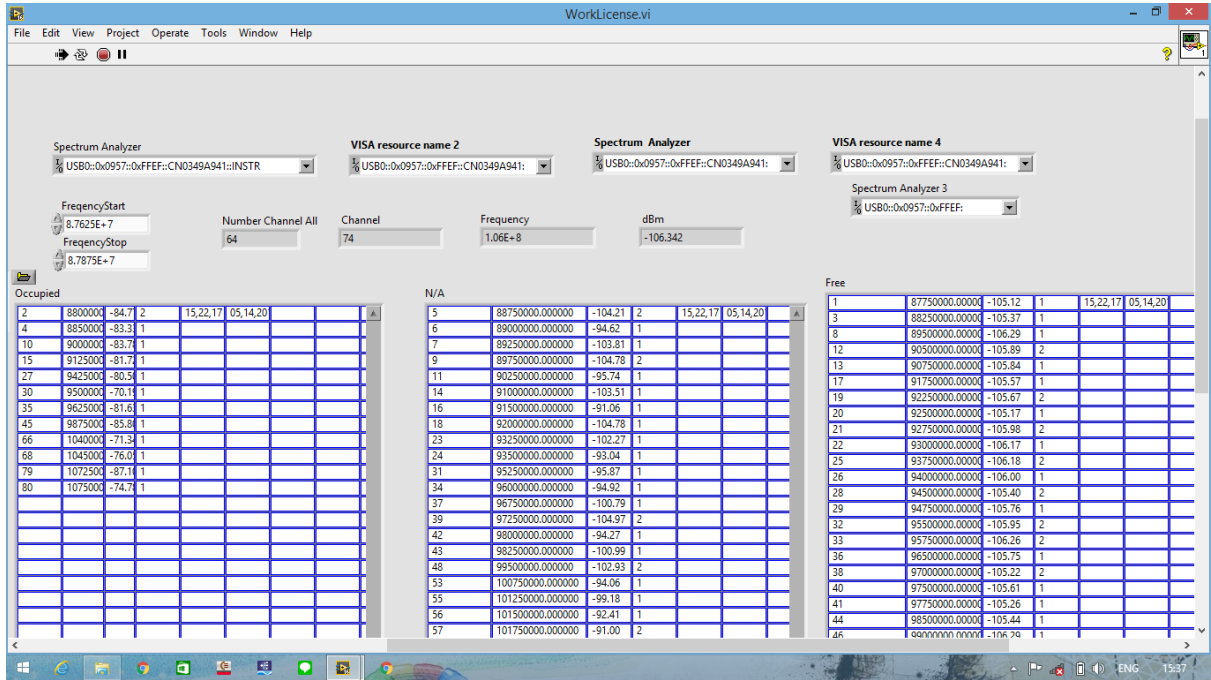




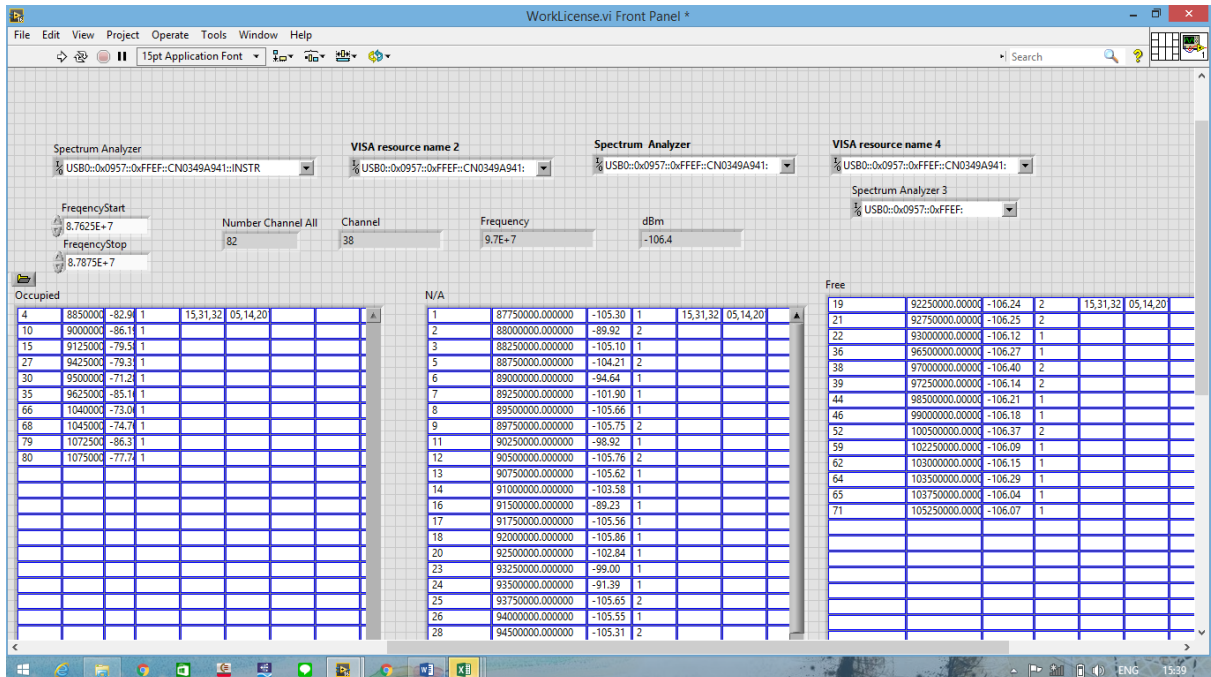
รูปที่ 5.24 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 2

- จุดทดสอบภายในบริเวณสนามบินนครศรีธรรมราช

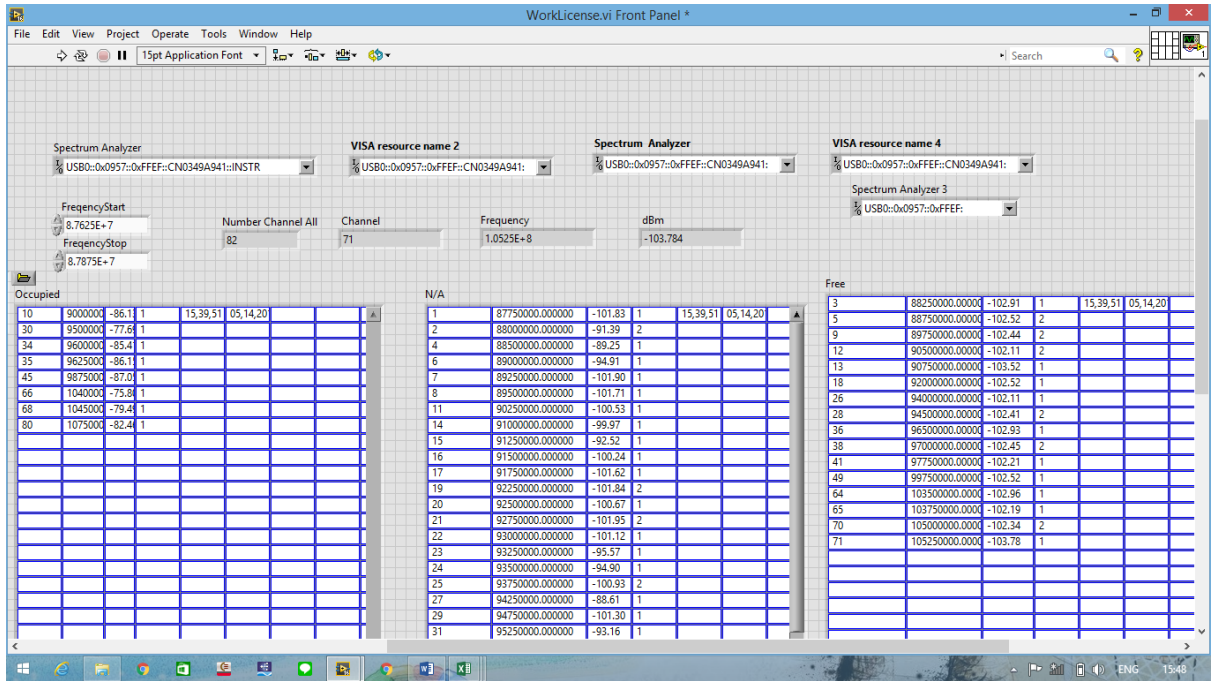
จุดทดสอบภายในบริเวณภายในสนามบินนครศรีธรรมราช ในวันที่ 14 พฤษภาคม 2561 ช่วงเวลา 13.00 - 17.30 น. และผลทำงานของระบบสังเกตการณ์ สามารถแยกแยะเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม Occupied กลุ่ม N/A และกลุ่ม Free ทั้ง 4 กรณีนี ตามแสดงในรูปที่ 5.25 5.26 5.27 และ 5.28



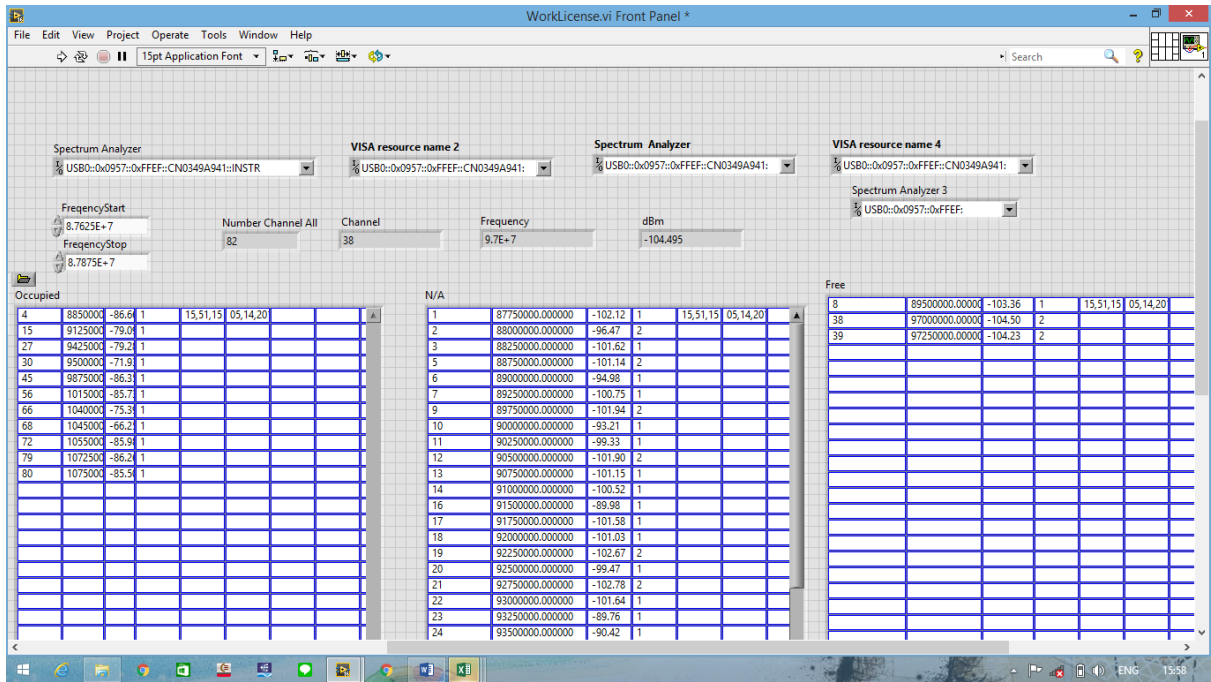
รูปที่ 5.25 RBW 1 kHz Reference value -105



รูปที่ 5.26 RBW 1 kHz Reference value -106



รูปที่ 5.27 RBW 3 kHz Reference value -102



รูปที่ 5.28 RBW 3 kHz Reference value -103

ผลการสังเกตการณ์ในแต่ละกรณี ถูกสรุปเป็นตารางที่ 5.7 พบว่า กรณีที่ 1 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่ามีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 38 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งาน 43 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 30 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.29

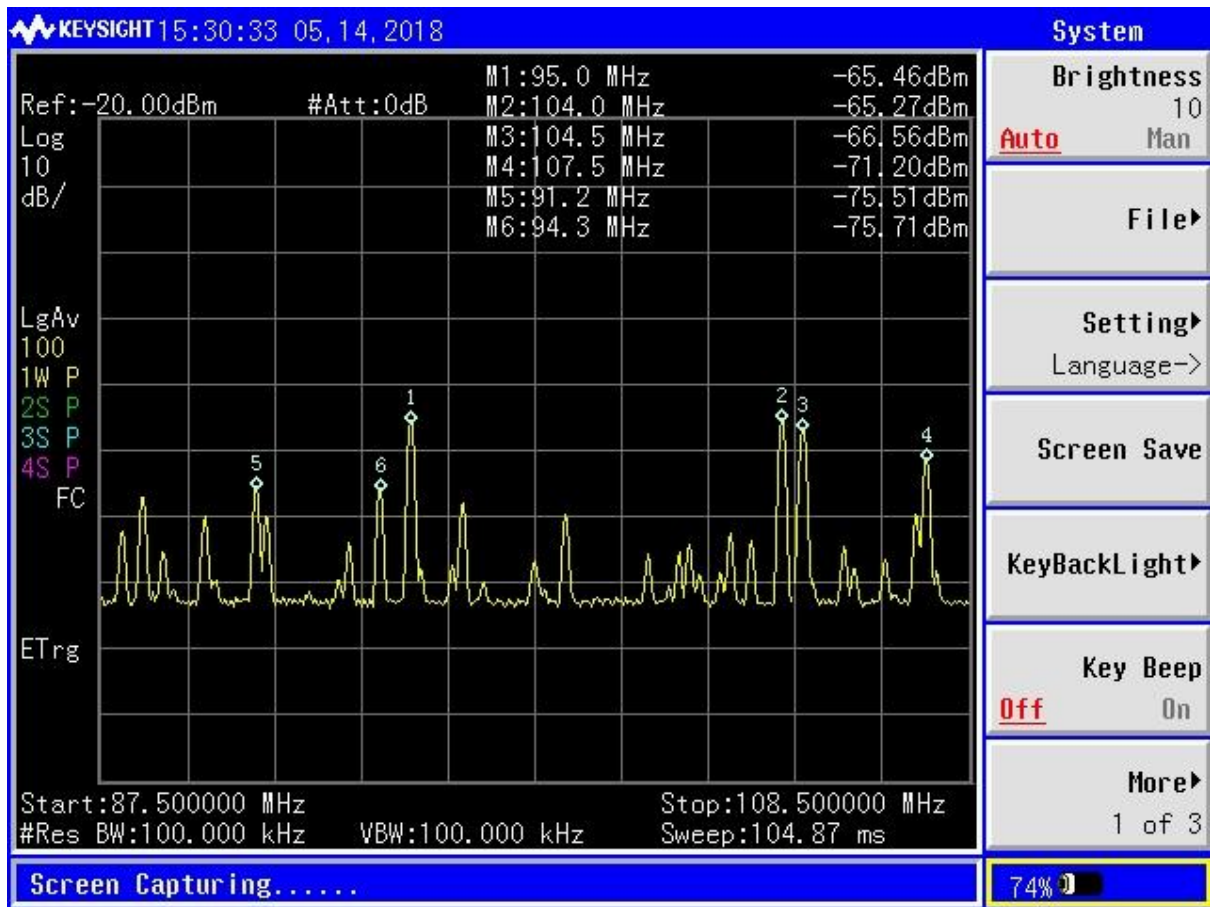
กรณีที่ 4 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่า มีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 3 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งานสูงถึง 78 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 12 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.29

ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์ในชุดโปรแกรมในกรณีที่ 2 และ 3 สามารถตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีที่ 1 และ 4

ตารางที่ 5.7 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ สนามบินนครศรีธรรมราช

กรณี	ค่า RBW ที่ใช้งาน (kHz)	ค่ากำลังคลื่นที่อ้างอิง (dBm)	จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน	ผลการตัดสินใจเลือกใช้งาน	
				ช่องสัญญาณ	ช่วงความถี่ (kHz)
1	1	-105	38	74	106.00
2	1	-106	14	38	97.00
3	3	-102	16	71	105.25
4	3	-103	3	38	97.00

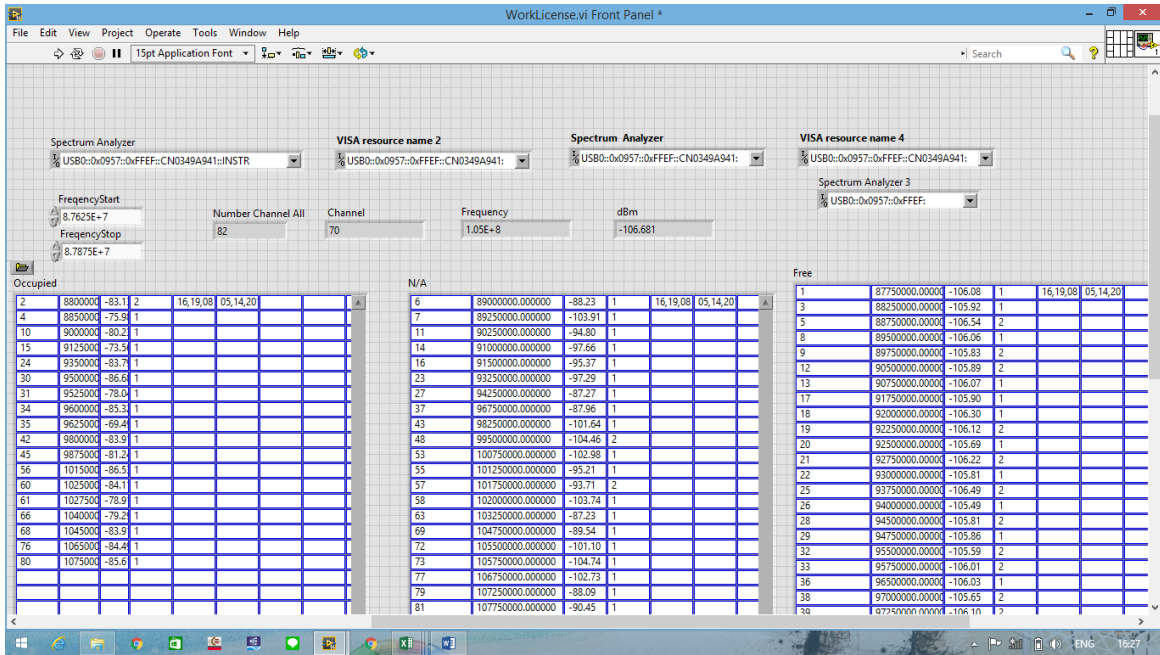
ผลการทดสอบกระบวนการตัดสินใจ ในแต่ละกรณีของชุดโปรแกรมคำสั่ง ได้ถูกสรุปในตารางที่ 5.7 ซึ่งผลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ โดยเลือกใช้ช่องสัญญาณที่มีค่าระดับกำลังคลื่นต่ำที่สุด และได้ตรวจสอบผลการตัดสินใจ โดยการฟังสัญญาณเสียงที่ได้จากการติ่มอูเลตในช่องสัญญาณนั้นๆ ด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุ และพบว่า ไม่ได้ยินสัญญาณเสียงจากผู้ดำเนินรายการของสถานีวิทยุกระจายเสียง จึงขอสรุปว่า ชุดคำสั่งการตัดสินใจ สามารถจำลองการเลือกใช้งานได้อย่างถูกต้อง



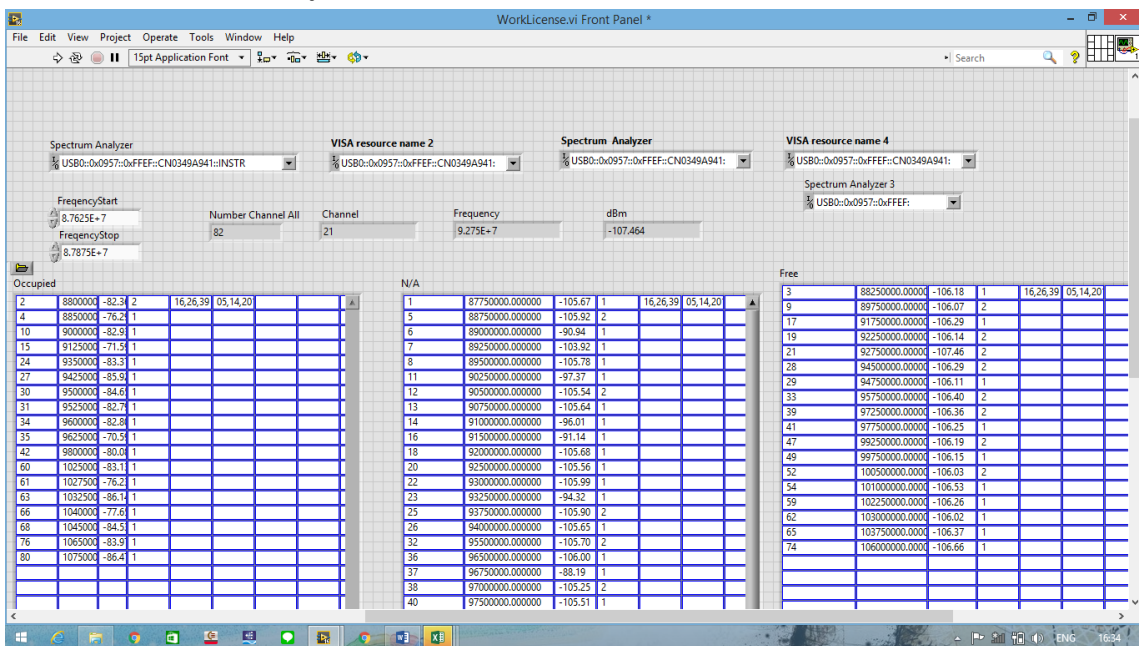
รูปที่ 5.29 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 3

● จุดทดสอบบริเวณใกล้สำนักงาน กสทช.เขต 12 (นครศรีธรรมราช)

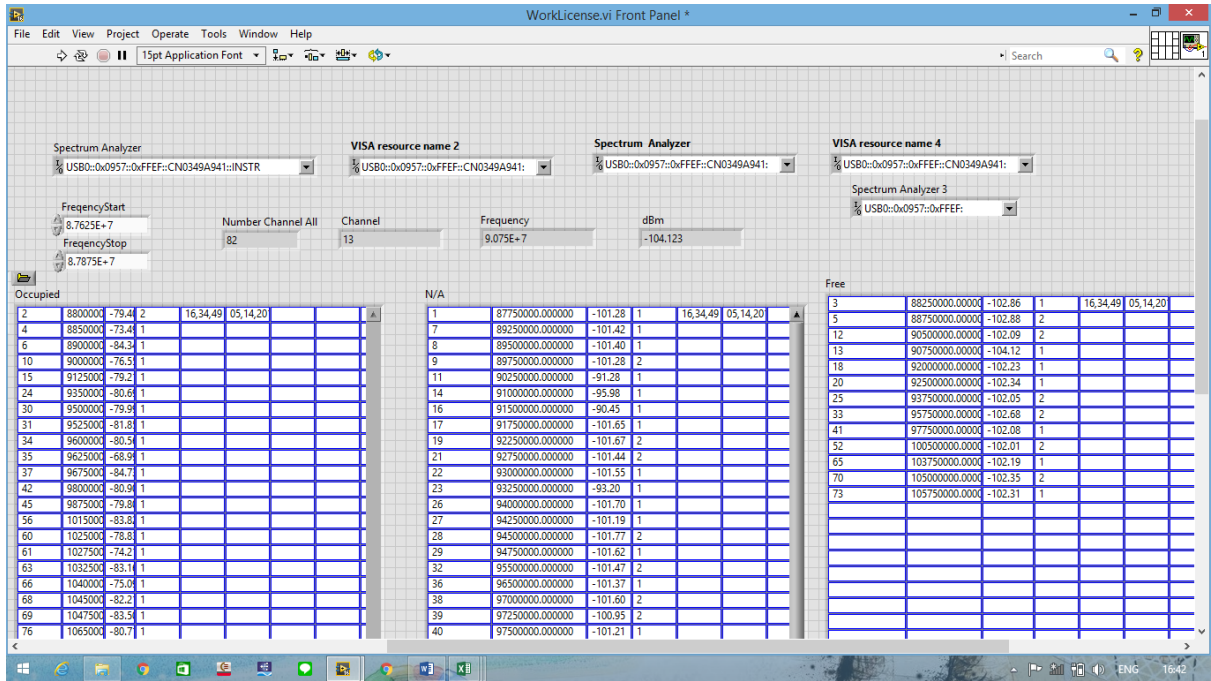
จุดทดสอบภายในบริเวณใกล้สำนักงาน กสทช.เขต 12 (นครศรีธรรมราช) ในระยะ 1.5 กิโลเมตร ในวันที่ 14 พฤษภาคม 2561 ช่วงเวลา 13.00 – 17.30 น. และผลทำงานของระบบสังเกตการณ์ สามารถแยกแยะเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม Occupied กลุ่ม N/A และกลุ่ม Free ทั้ง 4 กรณีนี ตามแสดงในรูปที่ 5.30 5.31 5.32 และ 5.33



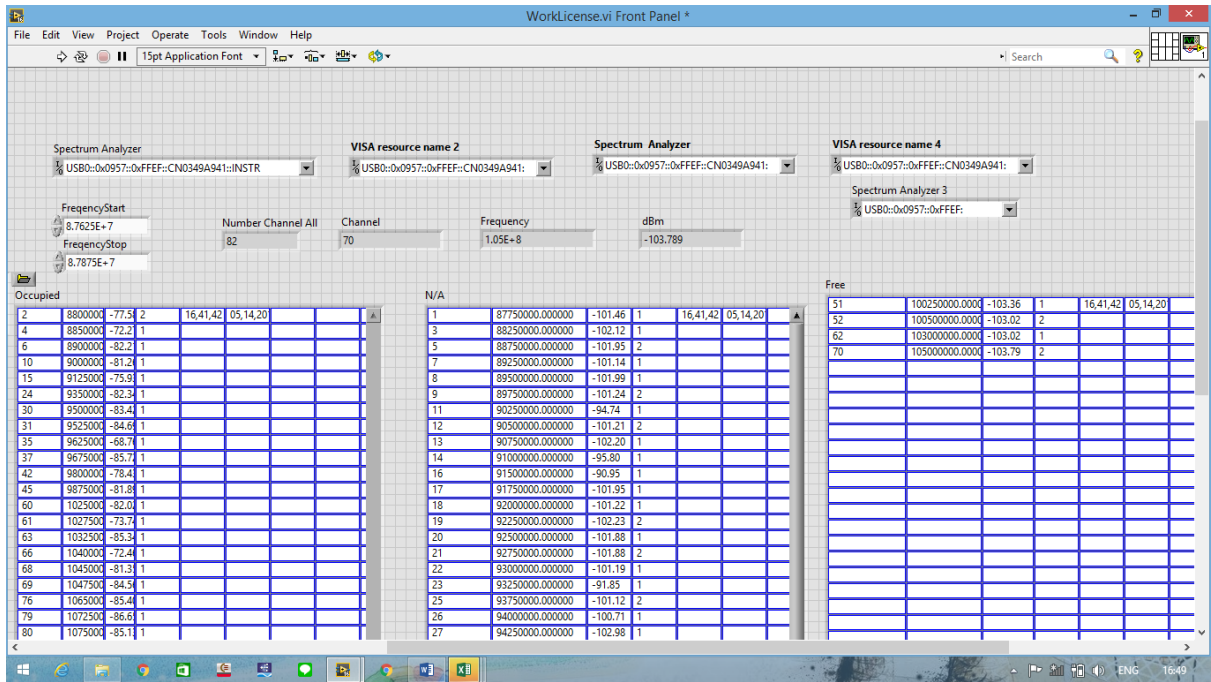
รูปที่ 5.30 RBW 1 kHz Reference value -105



รูปที่ 5.31 RBW 1 kHz Reference value -106



รูปที่ 5.32 RBW 3 kHz Reference value -102



รูปที่ 5.33 RBW 3 kHz Reference value -103

ผลการสังเกตการณ์ในแต่ละกรณี ถูกสรุปเป็นตารางที่ 5.8 พบว่า กรณีที่ 1 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่ามีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 43 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งาน 38 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 30 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.34

กรณีที่ 4 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่า มีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 4 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งานสูงถึง 77 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 12 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.34

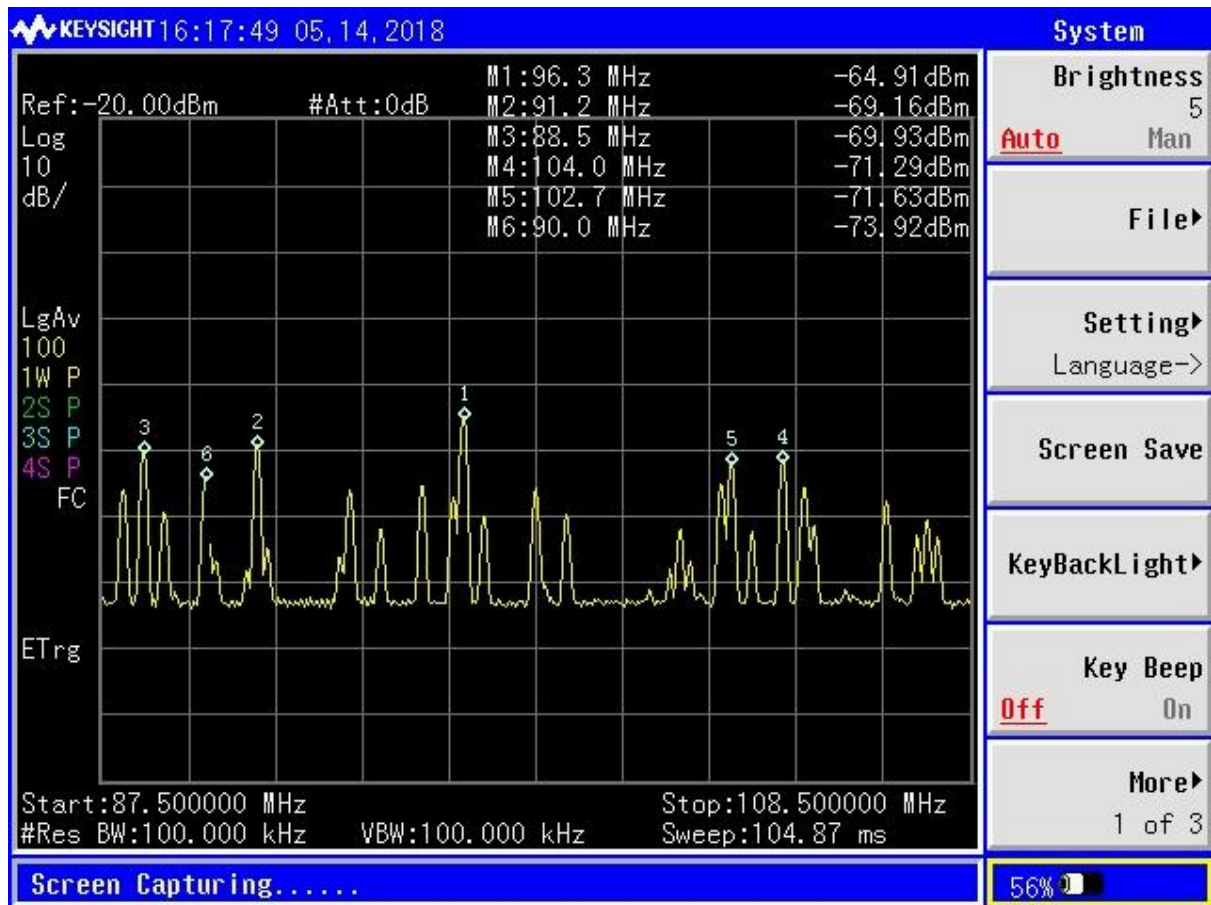
ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์ในชุดโปรแกรมในกรณีที่ 2 และ 3 สามารถตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีที่ 1 และ 4

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ จุดทดสอบบริเวณใกล้สำนักงาน กสทช. เขต 12

กรณี	ค่า RBW ที่ใช้งาน (kHz)	ค่ากำลังคลื่นที่อ้างอิง (dBm)	จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน	ผลการตัดสินใจเลือกใช้งาน	
				ช่องสัญญาณ	ช่วงความถี่ (kHz)
1	1	-105	43	70	105.00
2	1	-106	18	21	92.75
3	3	-102	13	13	90.75
4	3	-103	4	70	105.00

ผลการทดสอบกระบวนการตัดสินใจ ในแต่ละกรณีของชุดโปรแกรมคำสั่ง ได้ถูกสรุปในตารางที่ 5.8 ซึ่งผลการตัดสินใจเลือกใช้งานช่องสัญญาณ โดยเลือกใช้งานช่องสัญญาณที่มีค่าระดับกำลังคลื่นต่ำที่สุด และได้ตรวจสอบผลการตัดสินใจ โดยการฟังสัญญาณเสียงที่ได้จากการติ่มอูเลตในช่องสัญญาณนั้นๆ ด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุ และพบว่า ไม่ได้ยินสัญญาณเสียงจากผู้ดำเนินรายการของสถานีวิทยุกระจายเสียง จึงขอสรุปว่า ชุดคำสั่งการตัดสินใจ สามารถจำลองการเลือกใช้งานได้อย่างถูกต้อง

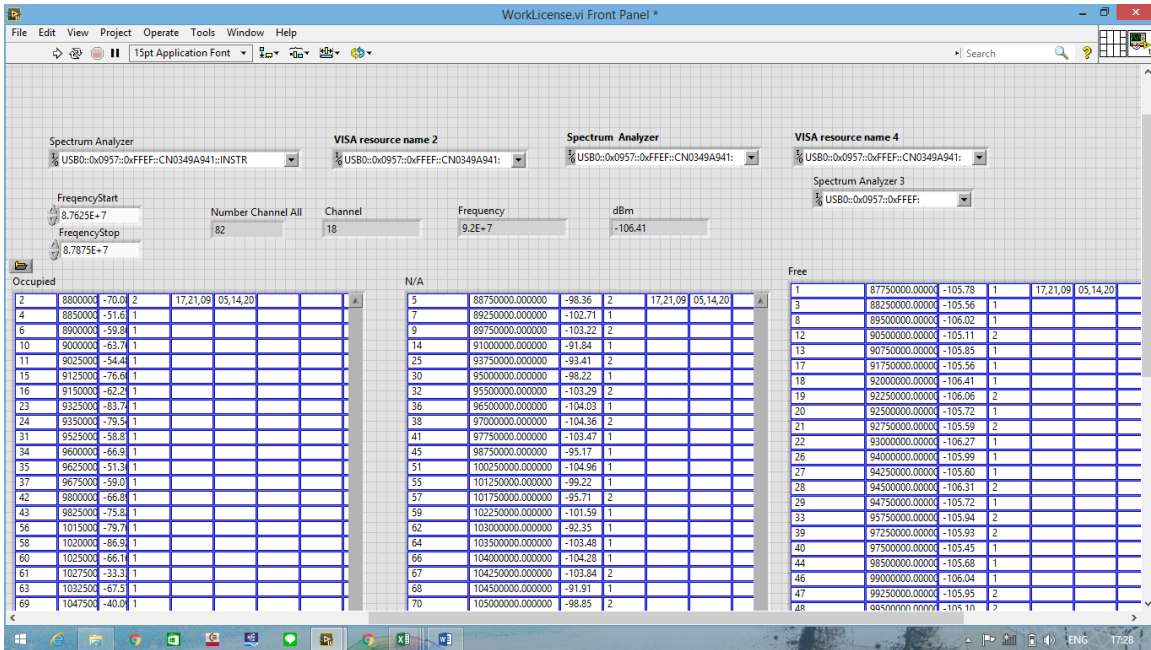




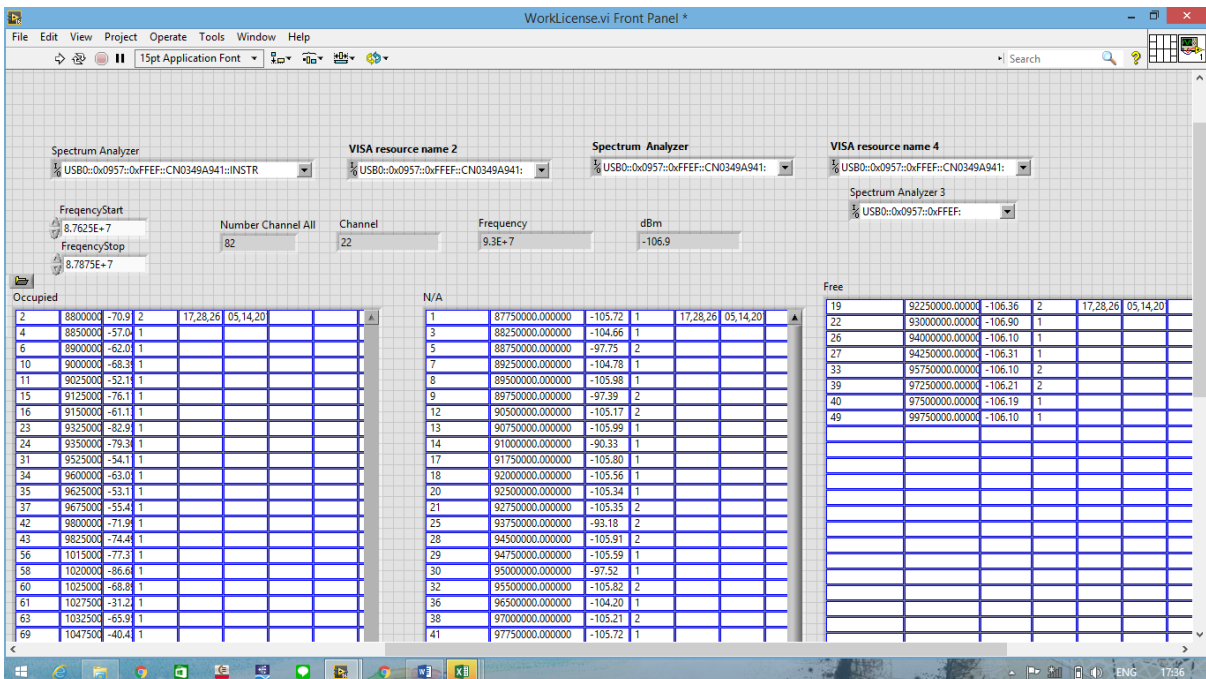
รูปที่ 5.34 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 4

● จุดทดสอบภายในบริเวณชุมชนเมืองนครศรีธรรมราช

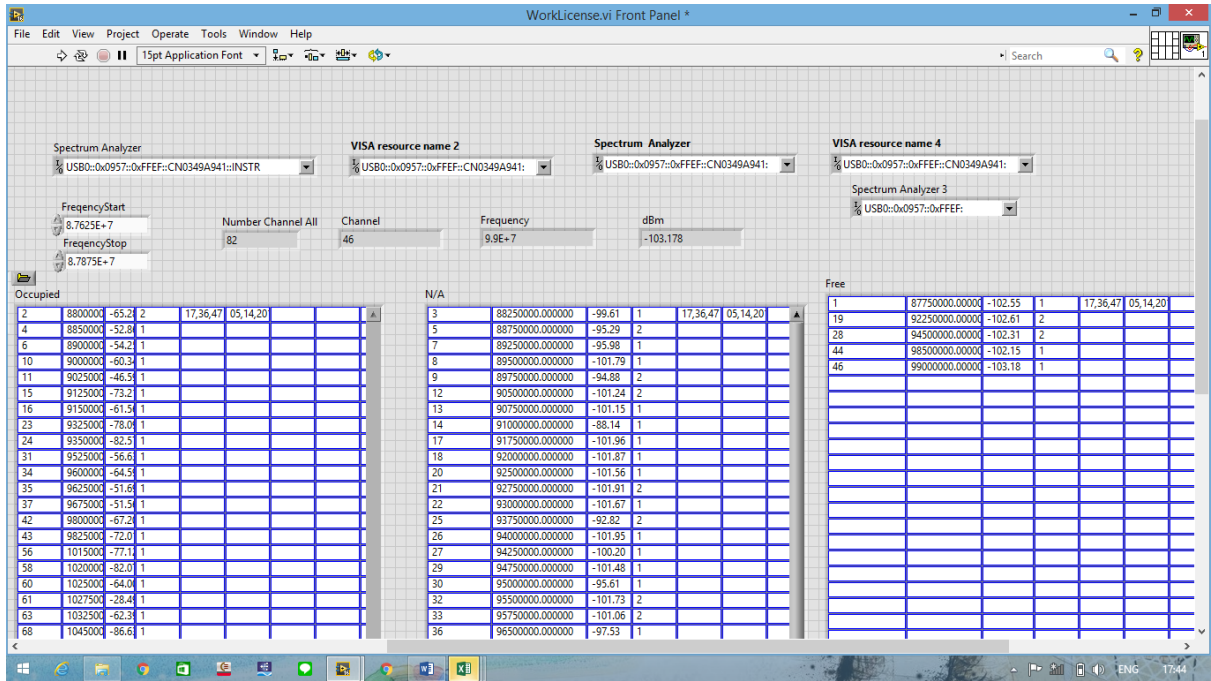
จุดทดสอบภายในบริเวณชุมชนเมืองนครศรีธรรมราช โดยห่างจากสี่แยกคูขวางเป็นระยะ 400 เมตร ในวันที่ 14 พฤษภาคม 2561 ช่วงเวลา 13.00 – 17.30 น. และผลทำงานของระบบสังเกตการณ์ สามารถแยกแยะเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่ม Occupied กลุ่ม N/A และกลุ่ม Free ทั้ง 4 กรณีย ตามแสดงในรูปที่ 5.35 5.36 5.37 และ 5.38



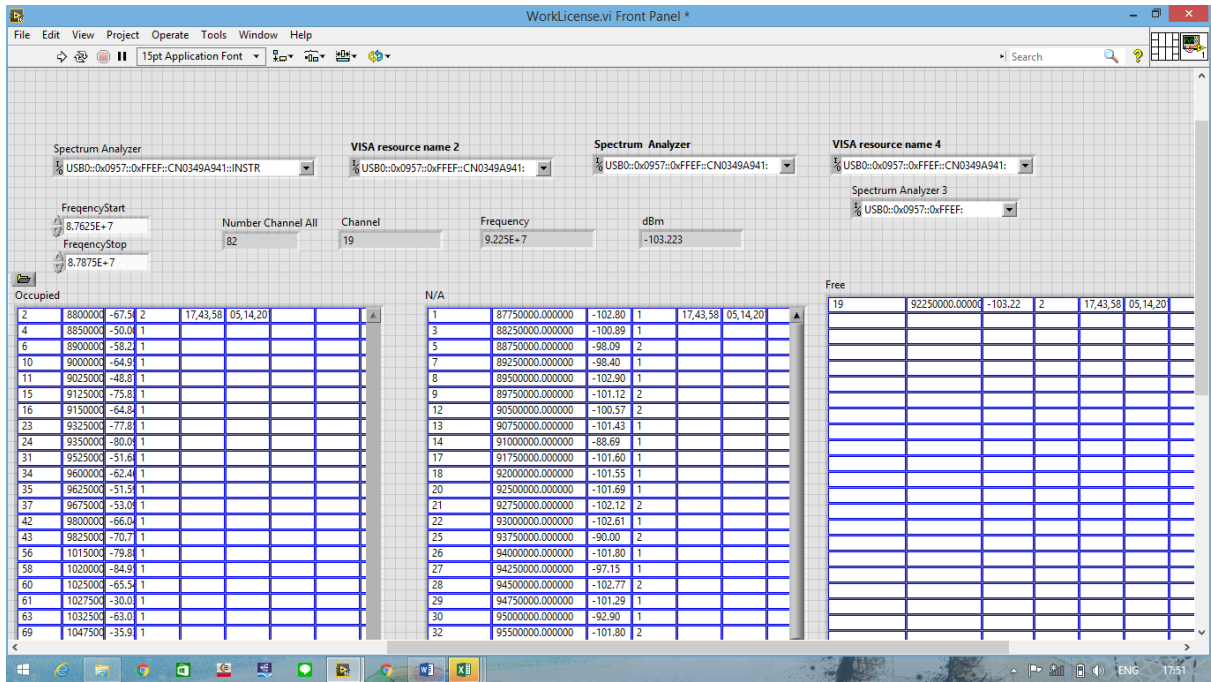
รูปที่ 5.35 RBW 1 kHz Reference value -105



รูปที่ 5.36 RBW 1 kHz Reference value -106



รูปที่ 5.37 RBW 3 kHz Reference value -102



รูปที่ 5.38 RBW 3 kHz Reference value -103

ผลการสังเกตการณ์ในแต่ละกรณี ถูกสรุปเป็นตารางที่ 5.9 พบว่า กรณีที่ 1 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่ามีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 34 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งาน 47 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนเล็กน้อย เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 30 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.39

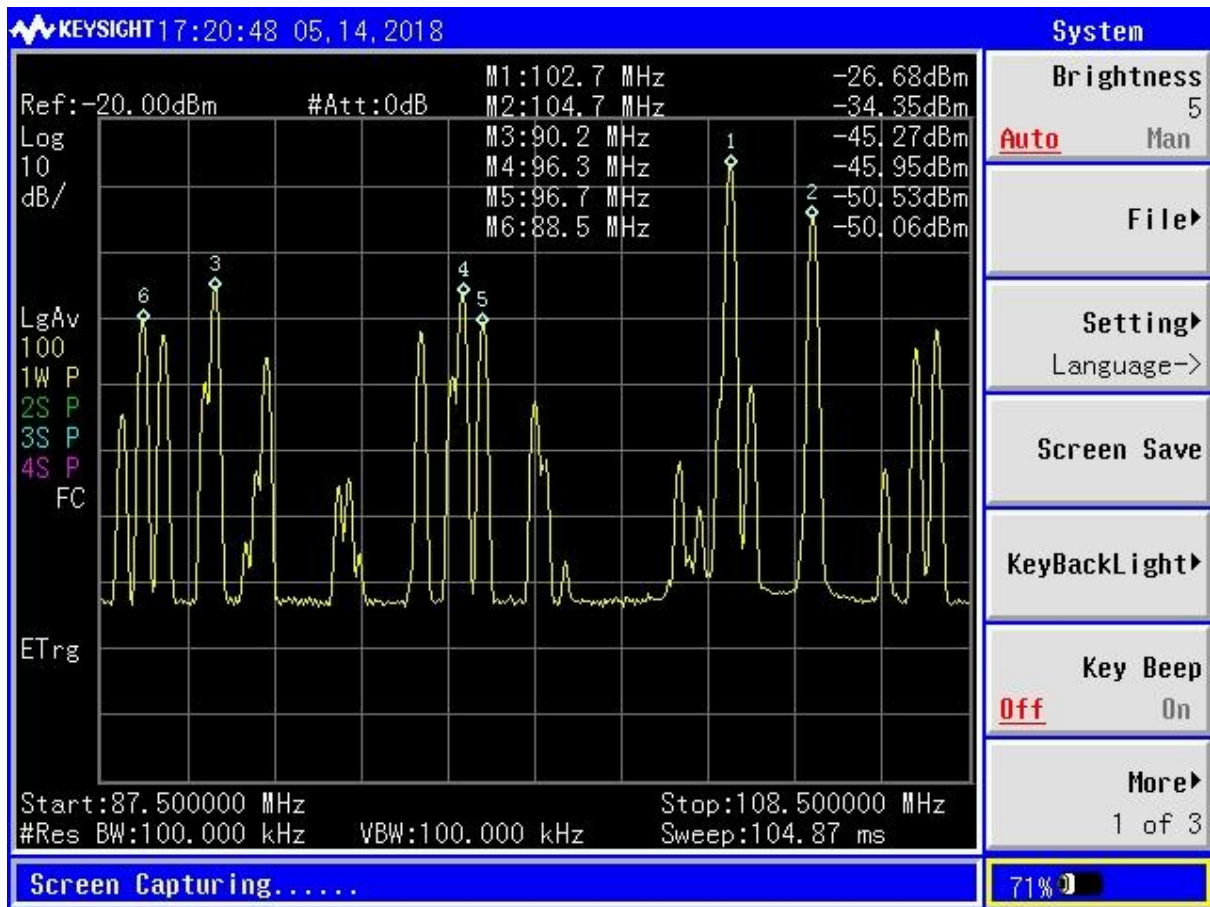
กรณีที่ 4 ชุดโปรแกรมได้ประเมินว่า มีช่องสัญญาณที่ไม่ใช้งานเป็นจำนวน 1 ช่องสัญญาณ ซึ่งหมายถึงจะมีช่องสัญญาณที่ใช้งานสูงถึง 80 ช่องสัญญาณ ดังนั้น จึงขอสรุปว่า ชุดโปรแกรมให้ผลการประเมินที่มีคลาดเคลื่อนสูง เนื่องจากผลการตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุระบบ FM สามารถรับสัญญาณได้ประมาณ 12 ช่องสัญญาณ หรือสามารถพิจารณาเทียบกับผลการวัดตลอดย่านในรูปที่ 5.39

ดังนั้น การกำหนดพารามิเตอร์ในชุดโปรแกรมในกรณีที่ 2 และ 3 สามารถตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ากรณีที่ 1 และ 4

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบทั้ง 4 กรณี ณ บริเวณชุมชนเมืองนครศรีธรรมราช

กรณี	ค่า RBW ที่ใช้งาน (kHz)	ค่ากำลังคลื่นที่อ้างอิง (dBm)	จำนวนช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน	ผลการตัดสินใจเลือกใช้งาน	
				ช่องสัญญาณ	ช่วงความถี่ (kHz)
1	1	-105	34	18	92.00
2	1	-106	8	22	93.00
3	3	-102	5	46	99.00
4	3	-103	1	19	92.25

ผลการทดสอบกระบวนการตัดสินใจ ในแต่ละกรณีของชุดโปรแกรมคำสั่ง ได้ถูกสรุปในตารางที่ 5.9 ซึ่งผลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ โดยเลือกใช้ช่องสัญญาณที่มีค่าระดับกำลังคลื่นต่ำที่สุด และได้ตรวจสอบผลการตัดสินใจ โดยการฟังสัญญาณเสียงที่ได้จากการติ่มอูเลตในช่องสัญญาณนั้นๆ ด้วยเครื่องรับสัญญาณวิทยุ และพบว่า ไม่ได้ยินสัญญาณเสียงจากผู้ดำเนินรายการของสถานีวิทยุกระจายเสียง จึงขอสรุปว่า ชุดคำสั่งการตัดสินใจ สามารถจำลองการเลือกใช้งานได้อย่างถูกต้อง



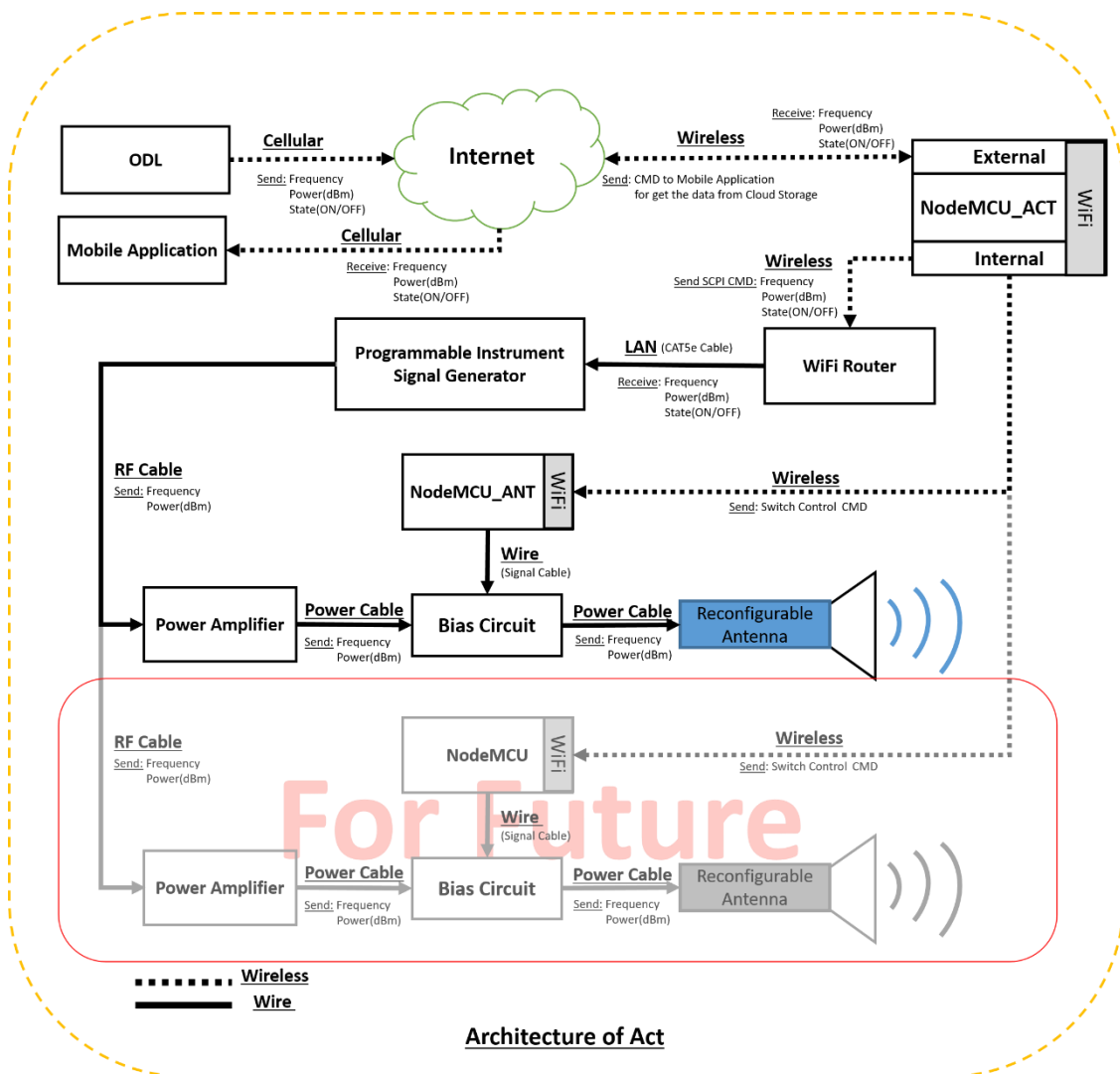
รูปที่ 5.39 ผลการวัดสัญญาณตลอดย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ FM ณ จุดทดสอบที่ 5

## 5.4 ระบบดำเนินการ (Act System)

ระบบดำเนินการ ถูกออกแบบขึ้นเพื่อจำลองการทำงานของระบบวิทยุรู้คิด และจำลองการควบคุมการทำงานของระบบส่งสัญญาณ โดยแบ่งการบรรยายออกเป็น 3 ส่วน คือ สถาปัตยกรรมของระบบ กระบวนการทำงานของระบบ และผลการทดสอบระบบ

### 5.4.1 สถาปัตยกรรมของระบบ Act

ระบบดำเนินการ มีสถาปัตยกรรมที่ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ สายส่งสัญญาณ สายอากาศ หน่วยประมวลผลเพื่อรับคำสั่ง และชุดโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบโมบายล์แอปพลิเคชัน (Mobile Application) ที่อาศัยระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.40 สถาปัตยกรรมของระบบดำเนินการ

- หน่วยประมวลผลเพื่อรับคำสั่งและควบคุมระบบ Act

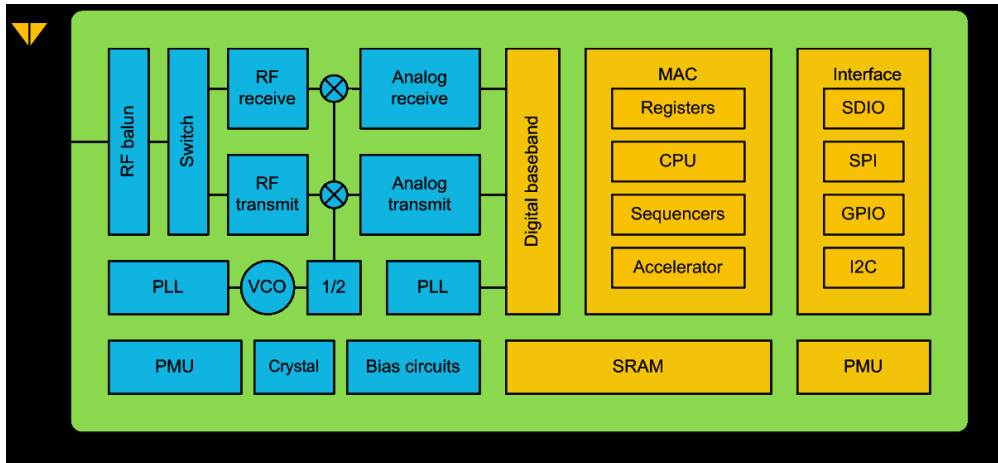
การประมวลผลภายในระบบ Act ถูกออกแบบโดยมีเป้าหมายหลัก 2 ส่วน คือ (1) สามารถควบคุมการทำงานของวงจรวจรไปอิส เพื่อปรับโหมดการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ และ (2) สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณจากระยะไกล เพื่อง่ายของการดูแลรักษาเครื่องกำเนิดสัญญาณ

ส่วนแรก NodeMCU-ACT ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างการสื่อสารภายในและภายนอก ระบบ การสื่อสารภายนอก คือ การรับข้อมูลคำสั่งจากระบบ ODL ผ่านระบบอินเทอร์เน็ต และการสื่อสารภายใน คือ การส่งข้อมูลคำสั่งไปยังเครื่องกำเนิดสัญญาณ ซึ่งรวมไปถึงการแปลงข้อมูลคำสั่งนั้น ให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการทำงานควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณ ส่วนที่สอง NodeMCU-ANT ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในวงจรวจรไปอิส เพื่อปรับโหมดการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ ดังนั้น จึงต้องเลือกใช้ตัวประมวลผลที่มีความสามารถ เช่น การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นภายในระบบ การจัดเก็บข้อมูลในหน่วยความจำ การประสานเวลากับเครื่องมือๆ เป็นต้น



รูปที่ 5.41 Node Devkit MCU V3

โครงการวิจัยนี้ จึงเลือกใช้หน่วยประมวลผลแบบไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Node Devkit MCU V3 ดังรูปที่ 5.41 ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญ คือ ESP8266EX ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับการเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ต โดยประกอบด้วย สายอากาศ วงจรขยายสัญญาณ วงจรรับสัญญาณที่ทนต่อสัญญาณรบกวน โดยมีกระบวนการทำงาน ดังรูปที่ 5.42 โปรแกรมการจัดการพลังงานของไมโครโทรลเลอร์รุ่นนี้ ถูกแบ่งออกเป็น 3 โหมด คือ โหมดแอกทีฟ (active mode) โหมดพัก (sleep mode) และโหมดเกือบปิด (deep sleep mode) จึงมีความต้องการใช้พลังงานค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 5.42 โครงสร้างของ ESP8266EX

ข้อมูลคุณลักษณะที่สำคัญ สำหรับการประยุกต์ใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ คลื่นวิทยุสำหรับการรับส่งข้อมูล อยู่ในช่วงความถี่ 2400 - 2483.5 MHz และมีกำลังส่ง อยู่ในช่วง 14-20 dBm (IEEE802.11) และสามารถรับสัญญาณที่ระดับ -91 dBm (with IEEE802.11 at 11 Mbps) โดยใช้สายอากาศชนิด PCB แร่งตันที่ต้องการอยู่ประมาณ 3.0 – 3.6 V และมีพิคคค่ากระแสโดยเฉลี่ย 80 mA โปรโตคอลที่รองรับ คือ IPv4 TCP/IP HTTP

- เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator)

เครื่องกำเนิดสัญญาณ มีหน้าที่กำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความถี่และค่ากำลังคลื่นตามที่กำหนด ในข้อมูลชุดคำสั่ง และมีความสามารถควบคุมการทำงานได้ผ่านชุดโปรแกรมคำสั่ง ซึ่งโครงงานนี้ ได้เลือกใช้ อุปกรณ์ที่ผลิตโดย KEYSIGHT รุ่น N5173B เป็นอุปกรณ์ที่ผ่านการทดสอบการทำงานจากองค์กรระดับนานาชาติ ดังรูปที่ 5.43 สามารถกำเนิดสัญญาณที่มีค่าความถี่ตั้งแต่ 9 kHz to 20 GHz และสามารถรับชุดโปรแกรมคำสั่ง SCPI เพื่อควบคุมระดับกำลังของสัญญาณได้ โดยผ่านระบบ LAN ด้วยสายสัญญาณ CAT5e และผ่านสายสัญญาณ USB/GPIB และสามารถสร้างสัญญาณที่มีระดับกำลังคลื่นสูงสุดที่ 5 dBm และมีความต้านทานของพอร์ตเท่ากับ 50 Ohm





รูปที่ 5.43 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator)

- **โมบายล์แอปพลิเคชัน (Mobile Application)**

โมบายล์แอปพลิเคชัน ทำหน้าที่ เข้าถึงข้อมูลในฐานข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต ซึ่งประกอบด้วยข้อมูล 3 ส่วน คือ Frequency (MHz) Power (dBm) และ State (ON/OFF) และนำมาแสดงผลบนโทรศัพท์มือถือ จึงทำให้ผู้ใช้งานสามารถตรวจดูการทำงานของระบบ Act โดยโมบายล์แอปพลิเคชัน จะดำเนินการติดต่อสื่อสารกับ NodeMCU เพื่อส่งรหัสสำหรับการเข้าใช้งานผ่านทางอีเมลของผู้ใช้งาน ซึ่งเป็นกระบวนการรักษาความปลอดภัย

## 5.4.2 กระบวนการทำงานของระบบ Act

ด้วยการทำงานของระบบ Act อาศัยการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ จึงจำเป็นต้องสร้างชุดโปรแกรมคำสั่งในโปรโตคอล SCPI บนไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Node Devkit MCU (NodeMCU) โดยใช้มาตรฐาน IEEE 488.2 ซึ่งเป็นการสื่อสารระหว่างเครื่องมือและอุปกรณ์ทางไฟฟ้า โดยแปลงเป็นรหัส ASCII ด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ เช่น ภาษา C++ Java Python Matlab LabView เป็นต้น

ชุดคำสั่ง SCPI ที่จำเป็นต้องใช้ในระบบ Act มีรายละเอียด ดังนี้

ฟังก์ชันการทำงานบนเครื่อง SG	โดยใช้ชุดคำสั่ง
กำเนิดสัญญาณ	[:SOURce] : OUTPut : STATe ON
หยุดกำเนิดสัญญาณ	[:SOURce] : OUTPut : STATe OFF
กำหนดค่าความถี่	[:SOURce] : FREQuency [:CWx]
กำหนดค่าระดับกำลังไฟฟ้า	[:SOURce] : POWer [:CWx]

นอกจากนี้ ยังมีฟังก์ชันอื่นๆ เช่น การปรับเทียบอุปกรณ์ก่อนการใช้งาน การถ่ายโอนข้อมูลของการกำเนิดสัญญาณ การเข้าจังหวะ (synchronization) การแสดงผล และการรายงานความคืบหน้าระหว่างการทำงาน เป็นต้น

NodeMCU ไม่สามารถใช้ชุดคำสั่ง SCPI ได้โดยตรง เนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับเครื่อง SG ได้อาศัยเครือข่ายไร้สาย จึงจำเป็นต้องทำการแปลงชุดคำสั่ง SCPI ให้สอดคล้องกับโปรโตคอล TCP/IP โดยการแปลงด้วยโปรแกรมภาษา C/C++ เป็นข้อมูลชนิด String ซึ่งมีชุดคำสั่งที่รองรับการทำงานแต่ละฟังก์ชัน (Subroutine-SCPI Command) ดังนี้

Subroutine: STATeON เป็นการแปลงชุดคำสั่ง SCPI สำหรับฟังก์ชัน STATeON

```
void StateON(void) {
    Serial.println("State ON Signal Gen. ");
    String question1 = "output:stat on\r\n";
    client.write((uint8_t*)&question1[0], question1.length());
}
```

รูปที่ 5.44 ฟังก์ชัน StateON

Subroutine: STATEOFF เป็นการแปลงชุดคำสั่ง SCPI สำหรับฟังก์ชัน STATEOFF

```
void StateOFF(void) {  
    Serial.println("State OFF Signal Gen. ");  
    String question1 = "output:stat off\r\n";  
    client.write((uint8_t*)&question1[0], question1.length());  
}
```

รูปที่ 5.45 ฟังก์ชัน STATEOFF

Subroutine: SendFreq เป็นการแปลงชุดคำสั่ง SCPI สำหรับฟังก์ชัน SendFreq

```
void SendFreq(void) {  
    delay(3000);  
    String SendFreq = "freq "+String(Fini)+String(UnitM)+String(Tap);  
    client.write((uint8_t*)&SendFreq[0], SendFreq.length());  
}
```

รูปที่ 5.46 ฟังก์ชัน SendFreq

```
void SendPower(void) {  
    delay(3000);  
    String SendPower = "pow" + String(Pow)+String(UnitdB)+String(Tap);  
    client.write((uint8_t*)&SendPower[0], SendPower.length());  
}
```

รูปที่ 5.47 ฟังก์ชัน SendPower

หลักการแปลงชุดคำสั่ง SCPI เพื่อให้รองรับการสื่อสารผ่านโปรโตคอล TCP/IP จะถูกนำมาประยุกต์ใช้ควบคุมการทำงานของระบบ Act ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการย่อย คือ กระบวนการติดตั้งระบบสื่อสาร กระบวนการเตรียมกระจายสัญญาณ และกระบวนการกระจายสัญญาณ

- กระบวนการติดตั้งระบบสื่อสาร

ระบบดำเนินการ จำเป็นต้องใช้ 2 ช่วงความถี่ คือ ช่วงความถี่แรกสำหรับการกระจายสัญญาณระบบ FM และช่วงความถี่ที่สองสำหรับการสื่อสารข้อมูลกับระบบตัดสินใจ ซึ่งอาศัยช่องสัญญาณของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อเข้าถึงฐานข้อมูลในระบบคลาวด์ (Cloud Storage) กระบวนการติดตั้งระบบสื่อสารแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

- 1) กำหนดค่า IP-Address ของ NodeMCU-Get-Data เพื่อเชื่อมต่อระบบอินเทอร์เน็ต สำหรับการรับข้อมูลคำสั่งจากระบบวิทยุรู้คิดที่ถูกจัดเก็บในระบบคลาวด์
- 2) กำหนดค่า IP-Address ของ NodeMCU-Get-Data เพื่อเชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สาย ซึ่งอยู่ในเครือข่ายเดียวกับเครื่องกำเนิดสัญญาณ และ NodeMCU Get Data

- 3) กำหนดค่า IP-Address ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ เพื่อเชื่อมต่อระบบเครือข่ายด้วยสายสัญญาณชนิด CAT5e ซึ่งอยู่ภายในเครือข่ายเดียวกับ NodeMCU Get Data
- 4) ระบุค่า IP-Address ของระบบคลาวด์ในชุดโปรแกรมคำสั่งของ NodeMCU Send Data และ NodeMCU Get Data เพื่อดำเนินการเข้าถึงข้อมูล
- 5) เปิดโมบายล์แอปพลิเคชันบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบดำเนินการ

- **กระบวนการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือเพื่อการกระจายสัญญาณ**

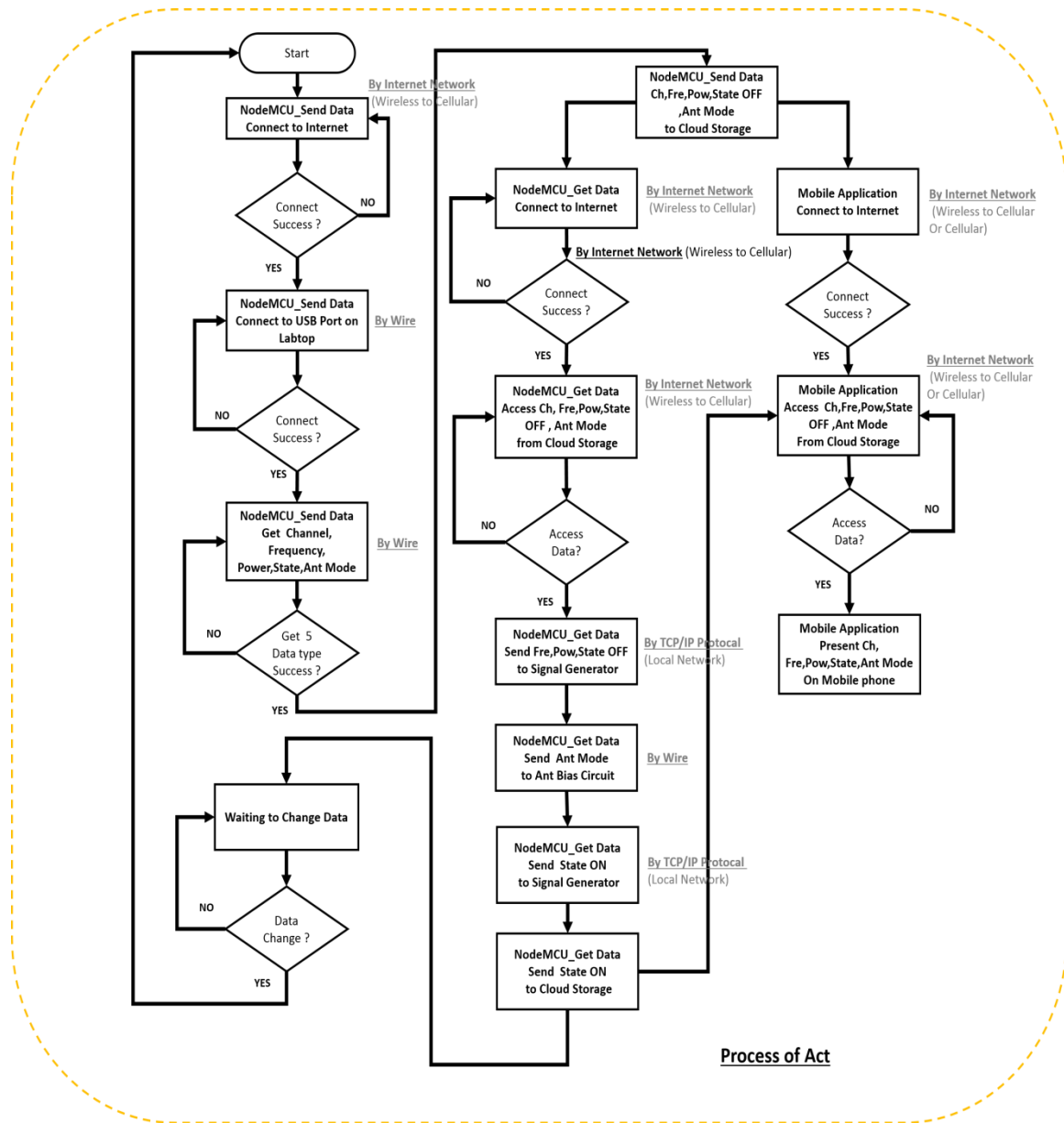
หลังจากติดตั้งระบบสื่อสารได้แล้ว ระบบดำเนินการจะเริ่มประมวลผลตามโปรแกรมการทำงาน ซึ่งเป็นการกำหนดพารามิเตอร์ให้กับอุปกรณ์และเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยมีลำดับการทำงาน ดังนี้

- 1) NodeMCU Get Data จะรับข้อมูลคำสั่งจากระบบตัดสินใจผ่านระบบคลาวด์ ได้แก่ ลำดับช่องสัญญาณ ช่วงความถี่ (MHz) ระดับกำลัง (dBm) และสถานะทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (State: ON/OFF) และโหมดการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่
- 2) NodeMCU Get Data แปลงข้อมูลเป็นชุดคำสั่ง SCPI และส่งไปยังเครื่องกำเนิดสัญญาณ

- **กระบวนการกระจายสัญญาณ**

หลังจากการจัดเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือแล้ว ระบบดำเนินการกระจายสัญญาณผ่านระบบสายอากาศ เมื่อ NodeMCU Get Data ส่งข้อมูลคำสั่งผ่านไปยังเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยใช้ฟังก์ชันคำสั่ง [STATeON] และส่งสถานะการทำงานนี้ไปแสดงบนโมบายล์แอปพลิเคชันผ่านระบบคลาวด์

กระบวนการทำงานของระบบดำเนินการ ได้ถูกออกแบบโปรแกรมการทำงาน มีรายละเอียดดังรูปที่ 5.48



รูปที่ 5.48 โปรแกรมการทำงานของระบบดำเนินการ

### 5.4.3 ผลการทำงานของระบบดำเนินการ

ระบบดำเนินการ ได้ถูกทดสอบเพื่อเข้าใช้งานช่องสัญญาณของระบบวิทยุ FM ในบริเวณมหาวิทยาลัย วลัยลักษณ์ แบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

- ผลการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณตามตารางการทำงาน (Time-table)

เพื่อตรวจสอบผลการทำงานของชุดโปรแกรมคำสั่งที่สร้างขึ้น สำหรับการเข้าถึงและควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ จึงดำเนินการทดสอบระบบเบื้องต้น โดยการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณให้สร้างสัญญาณรูปแบบต่างๆตามระยะเวลาที่กำหนด โดยการใช้โปรแกรมคำสั่งที่สร้างขึ้น เช่น ฟังก์ชัน SendFreq ฟังก์ชัน SendPower ฟังก์ชัน STATEON และฟังก์ชัน STATEOFF

การทดสอบชุดโปรแกรมคำสั่ง เริ่มต้นจากการกำหนดให้เครื่องกำเนิดสัญญาณ สร้างและปรับเปลี่ยนคุณลักษณะของสัญญาณตามระยะเวลา โดยให้มีค่าความถี่และค่ากำลังไฟฟ้าตามตารางการทำงานดังแสดงในตารางที่ 5.10 ซึ่งการตรวจสอบผลการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator: SG) นั้น จะใช้เครื่องวิเคราะห์ความถี่ (Spectrum Analyzer: SA) เพื่อตรวจจับระดับกำลังไฟฟ้าและค่าความถี่ รุ่น N9340B Handheld Spectrum Analyzer (HSA) ของบริษัท Keysight Technologies ในโหมดการทำงานแบบ Normal และเพื่อสะดวกในการพิจารณาและเปรียบเทียบผลการทำงานในแต่ละช่วงเวลา จึงใช้โหมด แบบ Max Hold ในการบันทึกผลการกำเนิดสัญญาณในลำดับก่อนหน้า สายสัญญาณที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่อง SG ไปยังเครื่อง SA เป็นสายสัญญาณที่ใช้ (HUBER SUHNER SUCOFLEX\_102) เป็นสายสัญญาณที่ใช้ทำงานในย่านความถี่ 2.3 – 46 GHz ซึ่งเมื่อใช้ทดสอบในย่านกิจการกระจายเสียง ในย่าน 88 – 108 MHz จึงเกิดกำลังสูญเสียในสายสัญญาณ ประมาณ 13 dBm

ตารางที่ 5.10 ตารางการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

ระยะเวลา (วินาที)	ค่าความถี่ (MHz)	ค่ากำลังไฟฟ้าจากเครื่อง SG (dBm)	ค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้บนเครื่อง SA (dBm)
10	88	-10	-23
15	98	-20	-33
20	108	-20	-33

รูปที่ 5.49 แสดงผลการตรวจจับสัญญาณของเครื่อง SA ซึ่งประกอบ 2 เส้นกราฟ เส้นกราฟที่ 1 เป็นเส้นกราฟสีเหลือง ซึ่งแสดงถึงค่าระดับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในเวลาขณะนั้น และเส้นกราฟที่ 2 เป็นเส้นกราฟสี

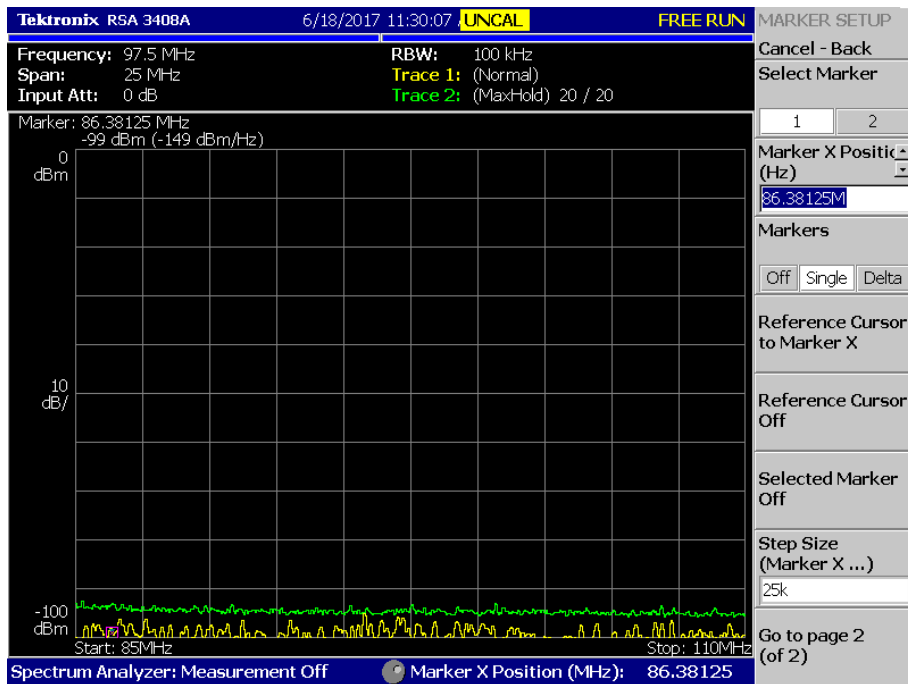
เขียว ซึ่งแสดงถึงค่าระดับกำลังไฟฟ้าที่วัดได้ในเวลาก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่า เครื่อง SA ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้จากเครื่อง SG จึงสรุปได้ว่า เครื่อง SG ยังทำงานอยู่ในโหมด OFF ตามชุดโปรแกรมคำสั่ง

เครื่อง SA สามารถตรวจจับสัญญาณได้ ณ เวลา 11:35:44 ดังรูปที่ 5.50 ซึ่งแสดงถึงกราฟ MAX HOLD และ NORMAL ที่มีระดับกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ -23.32 dBm ที่ค่าความถี่ 88.0 MHz จึงสรุปได้ว่า เครื่อง SG กำลังทำงานตามคำสั่งในลำดับที่ 1

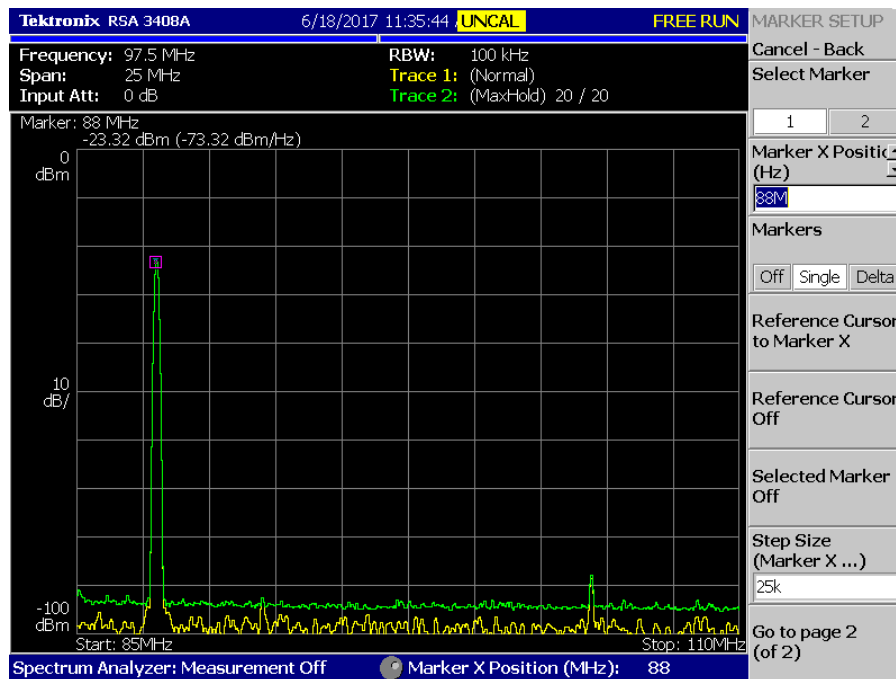
หลังจากนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 10 วินาที สามารถตรวจจับสัญญาณได้ ณ เวลา 11:36:03 ดังรูปที่ 5.51 ซึ่งแสดงถึงกราฟ NORMAL มีระดับกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ -33.43 dBm ที่ความถี่ 98.0 MHz และกราฟ MAXHOLD มีระดับกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ 2 ค่าความถี่ คือ 88.0 MHz (ซึ่งเป็นผลการทำงานในลำดับที่ 1) และ 98.0 MHz (ซึ่งเป็นผลการทำงานในลำดับที่ 2) จึงสรุปได้ว่า เครื่อง SG กำลังทำงานตามคำสั่งในลำดับที่ 2

หลังจากนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 15 วินาที สามารถตรวจจับสัญญาณได้ ณ เวลา 11:36:21 ดังรูปที่ 5.52 ซึ่งแสดงถึงกราฟ NORMAL มีระดับกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ -33.93 dBm ที่ความถี่ 108.0 MHz และกราฟ MAXHOLD มีระดับกำลังไฟฟ้าสูงสุด ณ 3 ค่าความถี่ คือ 88.0 98.0 และ 108.0 MHz (ซึ่งเป็นผลการทำงานในลำดับที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ) จึงสรุปได้ว่า เครื่อง SG กำลังทำงานตามคำสั่งในลำดับที่ 3

ในช่วงเวลาสุดท้าย หลังเสร็จสิ้นการสั่งงาน เครื่อง SA สามารถตรวจจับสัญญาณได้ ณ เวลา 11:36:58 ดังรูปที่ 5.53 ซึ่งแสดงถึง กราฟ NORMAL มีระดับกำลังไฟฟ้า เท่ากับ -98.14 dBm ตลอดช่วงความถี่ 85.0 - 110 MHz และกราฟ MAXHOLD จะแสดงระดับกำลังไฟฟ้าสูงสุด 3 ค่าความถี่ คือ 88.0 98.0 และ 108.0 MHz (ซึ่งเป็นผลการทำงานในลำดับที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ) จึงสรุปได้ว่า เครื่อง SG กำลังทำงานตามคำสั่งในโหมด OFF

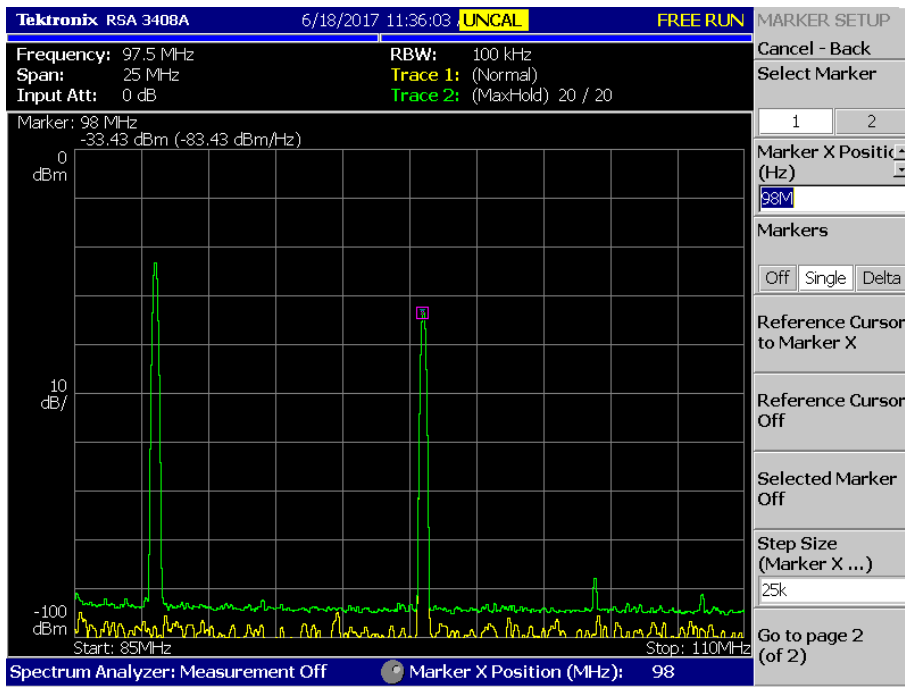


รูปที่ 5.49 ช่วงก่อนเริ่มการสั่งงาน

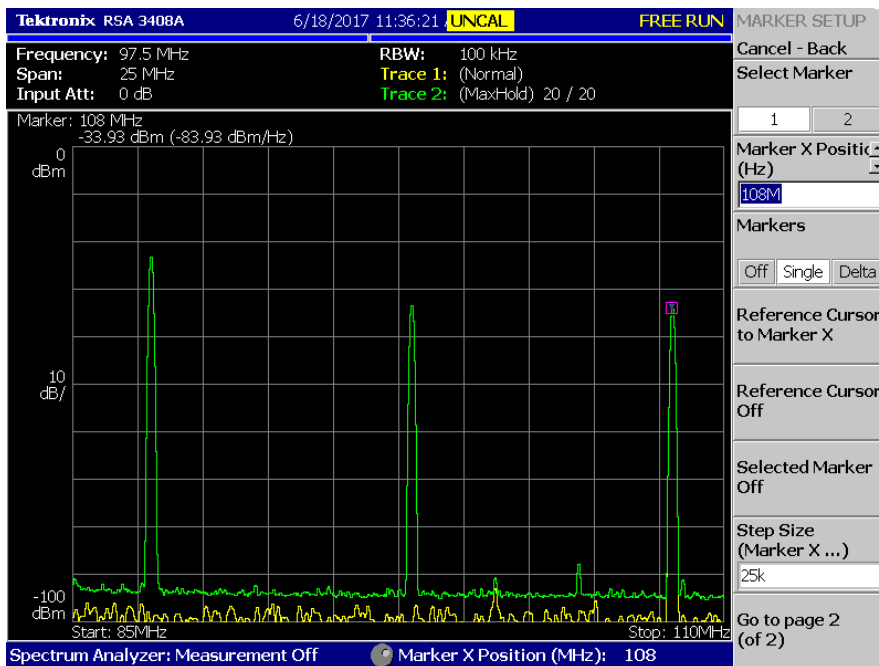


รูปที่ 5.50 ภายใน 10 วินาที หลังจากเริ่มการสั่งงาน

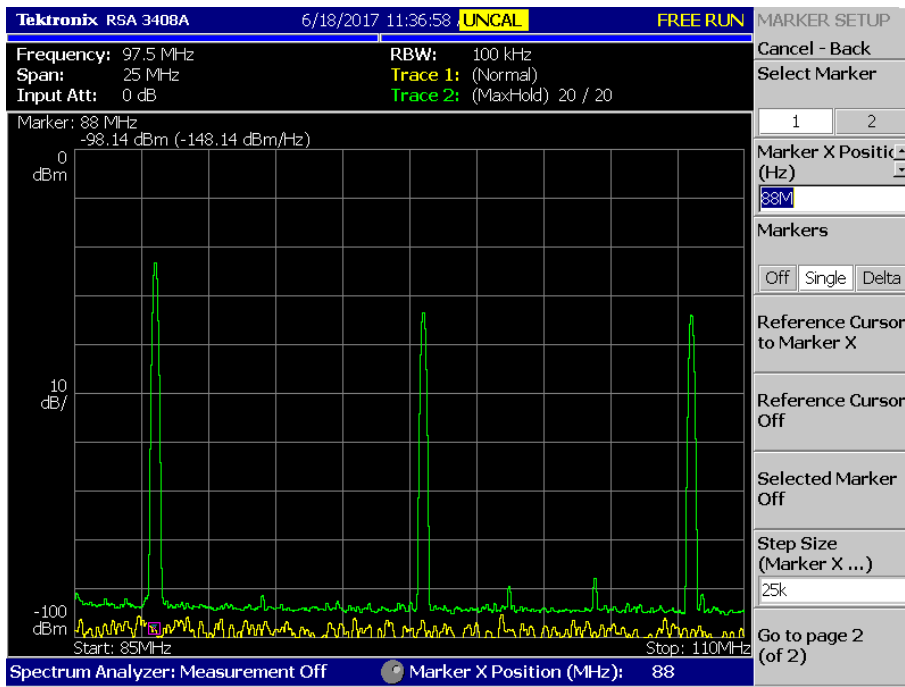




รูปที่ 5.51 ภายใน 15 วินาที หลังจากเสร็จสิ้นการทำงานช่วงที่ 1



รูปที่ 5.52 ภายใน 20 วินาที หลังจากเสร็จสิ้นการทำงานช่วงที่ 2



รูปที่ 5.53 หลังจากเสร็จสิ้นการทำงานช่วงที่ 3

- ผลการจำลองการสร้างช่องสัญญาณของหอบังคับการบิน

ผลการศึกษาเบื้องต้นภายในพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราชชี้ให้เห็นว่า ช่องสัญญาณในการสื่อสารระหว่างหอบังคับการบินกับเครื่องบิน มักถูกรบกวนด้วยสัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลตระหว่างกันของคลื่นวิทยุที่มีการใช้งานจากสถานีวิทยุกระจายเสียงแบบ FM ที่ตั้งอยู่บริเวณสนามบิน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ผู้ใช้งานจึงเลือกปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณในการสื่อสาร โครงการวิจัยนี้จึงทดสอบการทำงานของระบบ Act ที่สร้างขึ้น เพื่อทำการควบคุมการสร้างช่องสัญญาณโดยอัตโนมัติ

ช่องสัญญาณสำหรับระบบเครื่องช่วยการเดินอากาศย่านความถี่ 108-117.975 MHz และสำหรับวิทยุสื่อสารในการควบคุมจราจรทางอากาศใช้ระบบ AM ย่านความถี่ 118-137 MHz ดังนั้น ย่านความถี่ที่ใช้งานจะครอบคลุม 108-137 MHz ซึ่งย่านความถี่ดังกล่าวนี้ จะถูกนำมาใช้ในการทดสอบการควบคุมการทำงานของระบบ Act

ระบบ Act ดำเนินการทำงานตามคำสั่งการของระบบ ODL แต่การทดสอบระบบ Act ในหัวข้อนี้จะจำลองการรับคำสั่งจากระบบ ODL โดยการป้อนข้อมูลโดยตรงจากแป้นพิมพ์ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ระบุค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียงในย่านความถี่ 88.0 – 108.0 MHz จำนวน 2 ค่าความถี่ โดยกำหนดเป็นตัวแปร fA และ fB ซึ่งใช้แสดงถึงค่าความถี่ต่ำและค่าความถี่สูง ตามลำดับ หลังจากนั้น ข้อมูลค่าความถี่ดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้ในการจำลองการเกิดสัญญาณมอดูเลตระหว่างกัน ซึ่งจะเกิดขึ้นจำนวน 2 ค่าความถี่ โดยกำหนดเป็นตัวแปร f1M,L และ f1M,H ซึ่งใช้แสดงถึงค่าความถี่ต่ำและค่าความถี่สูง ตามลำดับ

เพื่อแสดงถึงผลการทดสอบการทำงานของระบบ Act ซึ่งต้องดำเนินการปรับเปลี่ยนและสร้างช่องสัญญาณสำหรับการสื่อสารที่เหมาะสมกับการใช้งาน จึงขอกำหนดช่องสัญญาณสมมติ โดยขนาดแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณมีค่า เท่ากับ 1.0 MHz และค่าความถี่กลางของช่องสัญญาณถูกกำหนดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.11 ค่าความถี่ของช่องสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ

ช่องสัญญาณ	ค่าความถี่กลาง (MHz)	ค่าความถี่ขอบล่าง (MHz)	ค่าความถี่ขอบบน (MHz)
Ch.1	118.5	118	119
Ch.2	119.5	119	120
Ch.3	120.5	120	121
Ch.4	121.5	121	122
Ch.5	122.5	122	123
Ch.6	123.5	123	124
Ch.7	124.5	124	125
Ch.8	125.5	125	126
Ch.9	126.5	126	127
Ch.10	127.5	127	128
Ch.11	128.5	128	129
Ch.12	129.5	129	130
Ch.13	130.5	130	131
Ch.14	131.5	131	132
Ch.15	132.5	132	133
Ch.16	133.5	133	134
Ch.17	134.5	134	135
Ch.18	135.5	135	136
Ch.19	136.5	136	137

การทำงานของระบบ Act ในกรณีศึกษา นี้ เพื่อใช้ในการทดสอบชุดโปรแกรมคำสั่ง (Subroutine) ที่ได้สร้างขึ้น จึงได้ออกแบบกระบวนการทำงานของระบบ Act ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 5.54 โดยสรุปเป็นขั้นตอนหลัก ดังนี้

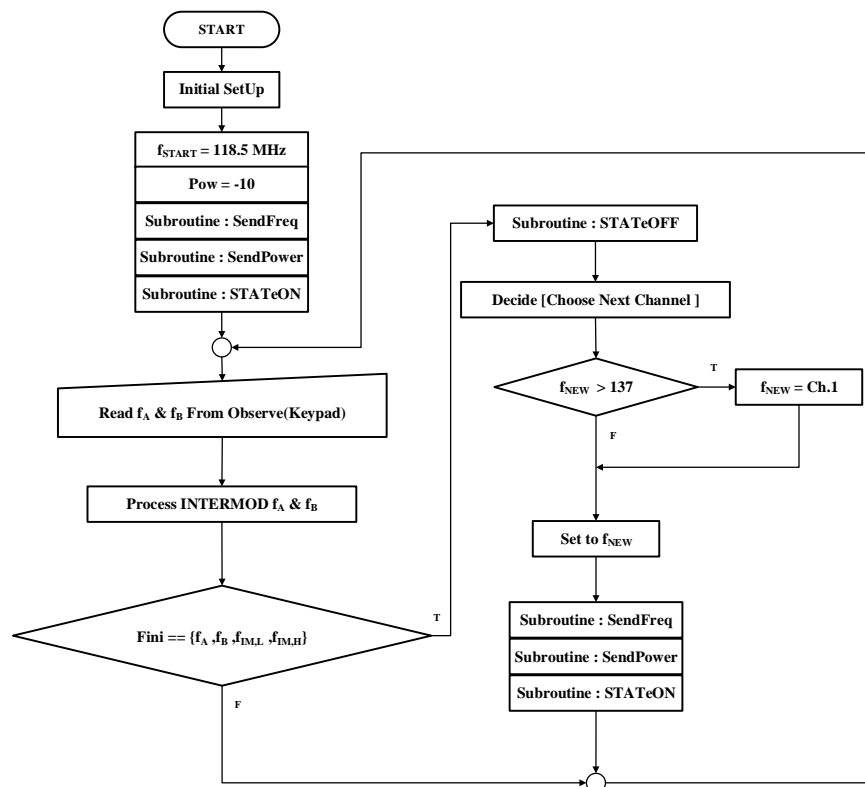
ขั้นตอนแรก เป็นการติดตั้งระบบการสื่อสารภายในระบบ Act ระหว่างไมโครคอนโทรเลอร์และอุปกรณ์เราเตอร์ โดยการโปรแกรมคำสั่งบนไมโครคอนโทรเลอร์แพลตฟอร์มของ Arduino โดยโลบลารีชื่อ “ESP8266WiFi.h” เพื่อให้อุปกรณ์เราเตอร์ของระบบ WLAN กำหนดหมายเลข IP Address ให้กับไมโครคอนโทรเลอร์

ขั้นตอนที่สอง เป็นการกำหนดชุดคำสั่งเริ่มต้นการทำงานของเครื่อง SG โดยการกำหนดค่าความถี่เริ่มต้นเป็น 118.5 MHz และค่าระดับกำลังเป็น -10 dBm หลังจากนั้น จึงดำเนินการส่งชุดคำสั่งไปยังเครื่อง SG

ขั้นตอนที่สาม เป็นการรับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียง โดยเก็บในตัวแปร  $f_A$  และ  $f_B$  และดำเนินการคำนวณค่าความถี่ของสัญญาณมอดูเลตระหว่างกัน โดยเก็บในตัวแปร  $f_{IM,L}$  และ  $f_{IM,H}$

ขั้นตอนที่สี่ เป็นการตรวจสอบว่า ช่องสัญญาณที่กำลังใช้งานอยู่นั้น เกิดการถูกรบกวนหรือไม่ ถ้าไม่มีการรบกวนช่องสัญญาณ ระบบ Act จะดำเนินการใช้งานช่องสัญญาณเดิมต่อไป แต่ถ้ามีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นภายในช่องสัญญาณ ระบบ Act จะดำเนินการสั่งหยุดการทำงานของเครื่อง SG และปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณ โดยการใช้ช่องสัญญาณถัดไป

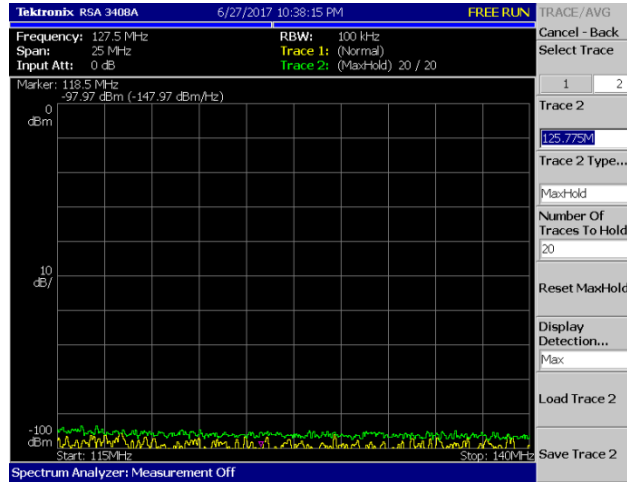
ขั้นตอนที่ห้า เป็นการกำหนดชุดคำสั่ง เพื่อปรับเปลี่ยนการทำงานของเครื่อง SG โดยการกำหนดค่าความถี่ของช่องสัญญาณใหม่ หลังจากนั้น จึงดำเนินการส่งชุดคำสั่งไปยังเครื่อง SG



รูปที่ 5.54 การทำงานของระบบ Act สำหรับการปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณของหอบังคับการบิน

ผลการทดสอบชุดโปรแกรมคำสั่ง ในแต่ละขั้นตอนตามหลักการทำงาน มีรายละเอียดดังนี้

```
Connecting to EMRL2017
.....
WiFi connected
IP address:
192.168.1.12
Connecting to EXG Analog Signal Generator N5173B
.....
MCU_V3 connect to Signal Generator N5173B >> SUCCESS
```



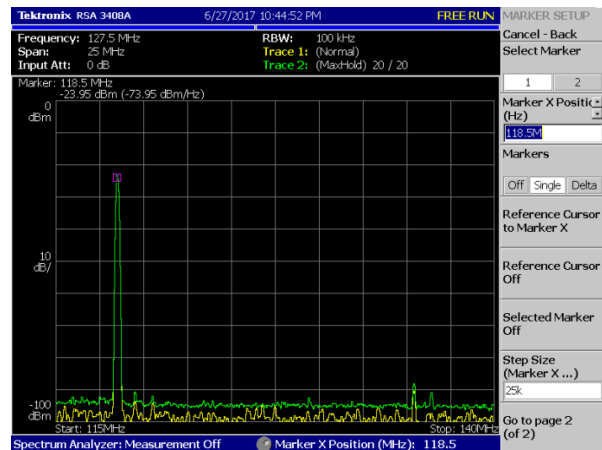
(ก) การประมวลผลของ MCU และเครื่อง SG

(ข) ผลการแสดงผลของเครื่อง SA

รูปที่ 5.55 ขั้นตอนที่ 1 การติดตั้งระบบการสื่อสารภายในระบบ Act

ขั้นตอนแรก ผลการติดตั้งระบบการสื่อสารภายในระบบ Act มีรายละเอียดดังรูปที่ 5.55 ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับ IP Address เป็น 192.168.1.12 และทำการเชื่อมต่อกับเครื่อง SG แต่ยังไม่กำหนดให้ปล่อยสัญญาณ

```
Frequency Start >> 118.50MHz
SendFreq >> 118.50MHz
SendPower >> -10dBm
State >> ON
```



(ก) การประมวลผลของ MCU และเครื่อง SG

(ข) ผลการแสดงผลของเครื่อง SA

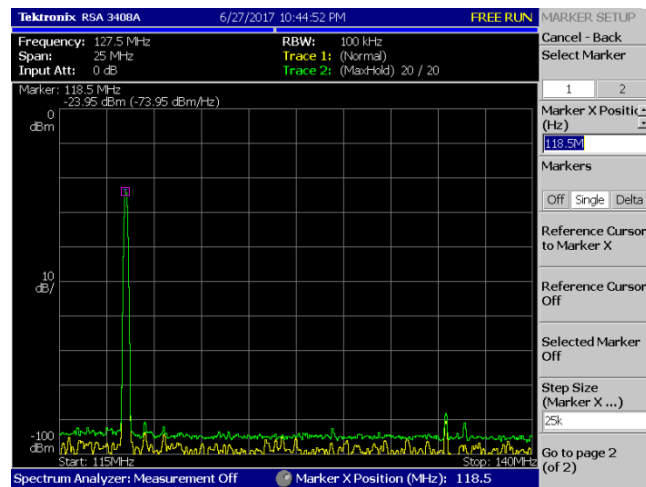
รูปที่ 5.56 ขั้นตอนที่ 2 การกำหนดชุดคำสั่งเริ่มต้นการทำงานของเครื่อง SG

ขั้นตอนที่สอง ดังรูปที่ 5.56(ก) แสดงถึงผลการกำหนดให้เครื่อง SG กำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 118.5 MHz และระดับกำลัง -10 dBm โดยรูปที่ 5.56(ข) แสดงถึงผลการทำงานของเครื่อง SG ที่ตรวจจับสัญญาณด้วยเครื่อง SA ซึ่ง Marker ได้ตรวจจับได้ว่า มีค่า peak ที่ค่าความถี่ 118.5 MHz และมีระดับกำลัง -23.95

dBm ระดับค่ากำลังที่ลดลงเป็น -13.95 dBm ซึ่งเกิดจากการสูญเสียในสายสัญญาณที่เชื่อมต่อจากเครื่อง SG กับเครื่อง SA

```
Reading Frequency From Observe(Keypat)
.....
Reading Frequency A
-----
Frequency A >> 88.25MHz
Reading Frequency From Observe(Keypat)
.....
Reading Frequency B
-----
Frequency B >> 108.00MHz
Reading Frequency From Observe(Keypat)
.
Processing INTERMODULATION
INTERMODULATION Low Freq = 68.50
INTERMODULATION High Freq = 127.75

MODULATION >> NO
Present Frequency >> 118.50MHz
```



(ก) การประมวลผลของ MCU และเครื่อง SG

(ข) ผลการแสดงผลของเครื่อง SA

รูปที่ 5.57 ขั้นตอนที่ 3 และ 4 การรับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียงครั้งที่ 1

ขั้นตอนที่สามและสี่ ได้นำเข้าค่าความถี่ fA และ fB ด้วยอุปกรณ์ Keypad ด้วยค่าความถี่ 88.25 MHz และ 108.0 MHz ตามลำดับ เพื่อจำลองการตรวจจับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียง และการจัดการความถี่ และผลการประมวลผลการคำนวณค่าความถี่ของสัญญาณรบกวนการเกิดมอดูเลต ระหว่างกัน หลังจากนั้นจึงทำการตรวจสอบการรบกวนกับช่องสัญญาณที่กำลังใช้งานอยู่ ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 5.57(ก) ผลการตรวจสอบ พบว่า การใช้งานของสัญญาณค่าความถี่ fA และ fB ไม่ส่งผลต่อการใช้ช่องสัญญาณที่ 1 จึงกำหนดให้เครื่อง SG ยังใช้งานในช่องสัญญาณเดิม ซึ่งสามารถสังเกตผลการทำงานของเครื่อง SG ได้จากรูปที่ 5.57(ข) ซึ่งเป็นค่าความถี่เดิม 118.5 MHz

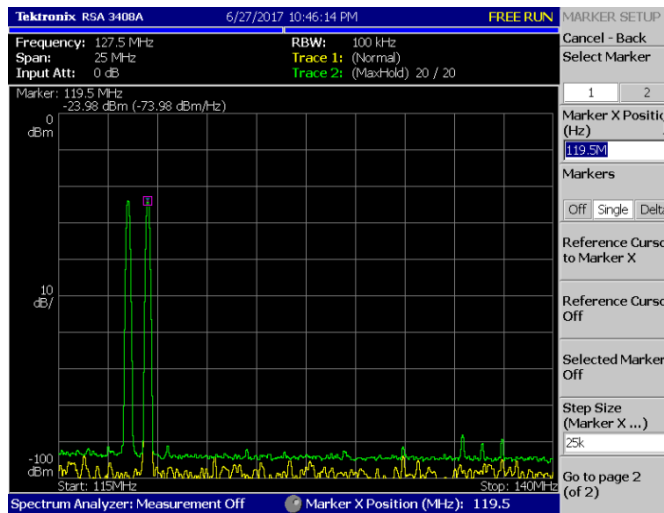
```

Reading Frequency From Observe (Keypat)
.....
Reading Frequency A
-----
Frequency A >> 94.50MHz
Reading Frequency From Observe (Keypat)
.....
Reading Frequency B
-----
Frequency B >> 106.50MHz
Reading Frequency From Observe (Keypat)
.
Processing INTERMODULATION
INTERMODULATION Low Freq = 82.50
INTERMODULATION High Freq = 118.50
State >> OFF

MODULATION >> YES

Present Frequency >> 119.50MHz

```



(ก) การประมวลผลของ MCU และเครื่อง SG

(ข) ผลการแสดงผลของเครื่อง SA

รูปที่ 5.58 ชั้นตอนที่ 3 และ 4 การรับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียงครั้งที่ 2

หลังจากนั้น ได้นำเข้าค่าความถี่ fA และ fB ด้วยอุปกรณ์ Keypat เป็นครั้งที่ 2 ด้วยค่าความถี่ 94.5 MHz และ 106.5 MHz ตามลำดับ เพื่อจำลองการตรวจจับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียงและการจัดการความถี่ และผลการประมวลผลการคำนวณค่าความถี่ของสัญญาณรบกวนการเกิดมอดูเลตระหว่างกัน หลังจากนั้นจึงทำการตรวจสอบการรบกวนกับช่องสัญญาณที่กำลังใช้งานอยู่ ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 5.58(ก) ผลการตรวจสอบ พบว่า การใช้งานของสัญญาณค่าความถี่ fA และ fB ส่งผลต่อการใช้ช่องสัญญาณที่ 1 จึงกำหนดให้เครื่อง SG ใช้งานในช่องสัญญาณใหม่ โดยเปลี่ยนเป็นช่องสัญญาณที่ 2 ที่ค่าความถี่ 119.5 MHz ซึ่งสามารถสังเกตผลการทำงานของเครื่อง SG ได้จากรูปที่ 5.58(ข) ซึ่งแสดงด้วยเส้นกราฟที่เหลือง (Normal Mode) ที่ค่าความถี่ 119.5 MHz และเส้นกราฟสีเขียว (Max Hold Mode) แสดงถึงค่าความถี่เดิมและค่าความถี่ใหม่



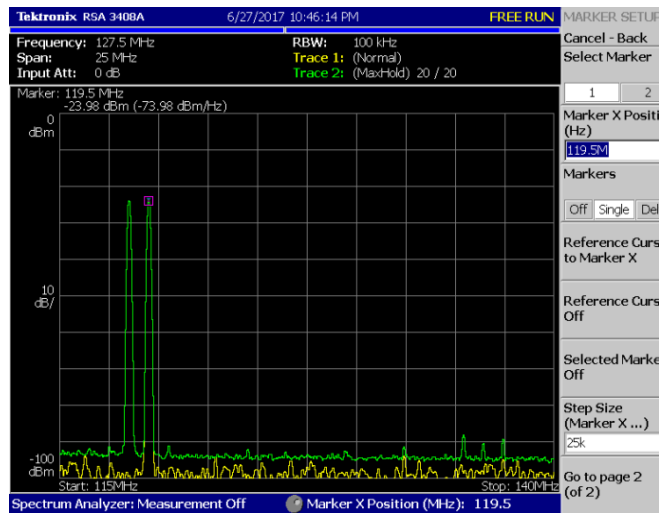
```

Reading Frequency From Observe (Keypat)
.....
Reading Frequency A
-----
Frequency A >> 93.25MHz
Reading Frequency From Observe (Keypat)
.....
Reading Frequency B
-----
Frequency B >> 106.00MHz
Reading Frequency From Observe (Keypat)
.....
Processing INTERMODULATION
INTERMODULATION Low Freq = 80.50
INTERMODULATION High Freq = 118.75

MODULATION >> NO
Present Frequency >> 119.50MHz

Reading Frequency From Observe (Keypat)
.....

```



(ก) การประมวลผลของ MCU และเครื่อง SG

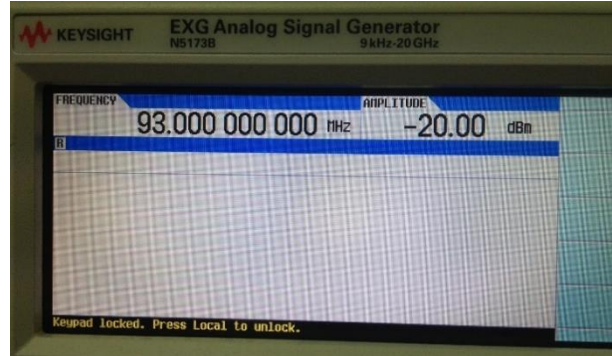
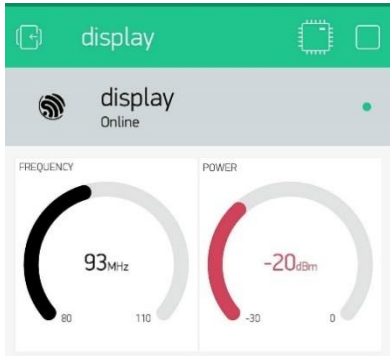
(ข) ผลการแสดงผลของเครื่อง SA

รูปที่ 5.59 ขั้นตอนที่ 3 และ 4 การรับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียงครั้งที่ 3

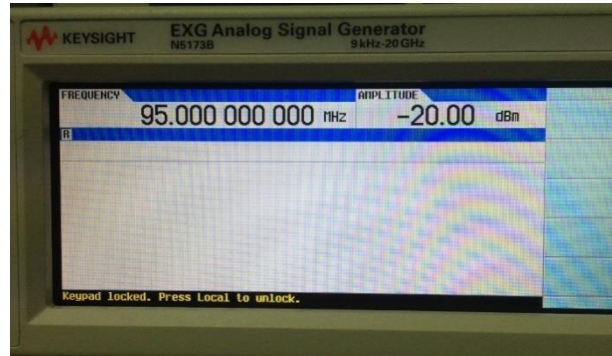
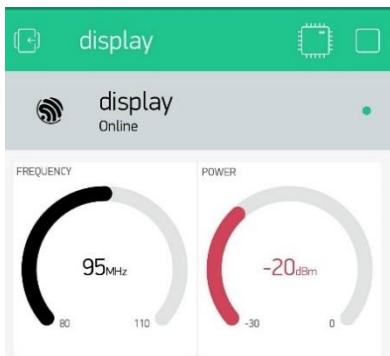
หลังจากนั้น ได้นำเข้าค่าความถี่ fA และ fB ด้วยอุปกรณ์ Keypad เป็นครั้งที่ 3 ด้วยค่าความถี่ 93.25 MHz และ 106.0 MHz ตามลำดับ เพื่อจำลองการตรวจจับค่าความถี่ที่มีการใช้งานของกิจการวิทยุกระจายเสียงและการจัดการความถี่ และผลการประมวลผลการคำนวณค่าความถี่ของสัญญาณรบกวนการเกิดมอดูเลตระหว่างกัน หลังจากนั้นจึงทำการตรวจสอบการรบกวนกับช่องสัญญาณที่กำลังใช้งานอยู่ ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 5.59 (ก) ผลการตรวจสอบ พบว่า การใช้งานของสัญญาณค่าความถี่ fA และ fB ไม่ส่งผลต่อการใช้ช่องสัญญาณที่ 2 จึงกำหนดให้เครื่อง SG ยังใช้งานในช่องสัญญาณเดิม ซึ่งสามารถสังเกตผลการทำงานของเครื่อง SG ได้จากดังรูปที่ 5.59(ข) ซึ่งเป็นค่าความถี่เดิม 119.5 MHz

- ผลทดสอบการแสดงผลการสั่งงานบนโทรศัพท์มือถือ

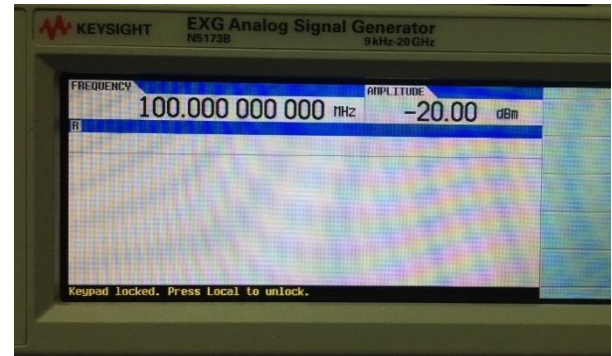
การแสดงผลการสั่งงานบนโทรศัพท์มือถือที่อาศัยโมบายล์แอปพลิเคชัน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการทำงานของระบบดำเนินการได้ถูกทดสอบ โดยการให้แสดงข้อมูลคำสั่งที่ควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ คือ ข้อมูลความถี่และข้อมูลระดับกำลังไฟฟ้า ซึ่งได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณี



(ก) กรณีที่ 1 ข้อมูลคำสั่ง 93 MHz และ -20 dBm



(ข) กรณีที่ 1 ข้อมูลคำสั่ง 95 MHz และ -20 dBm

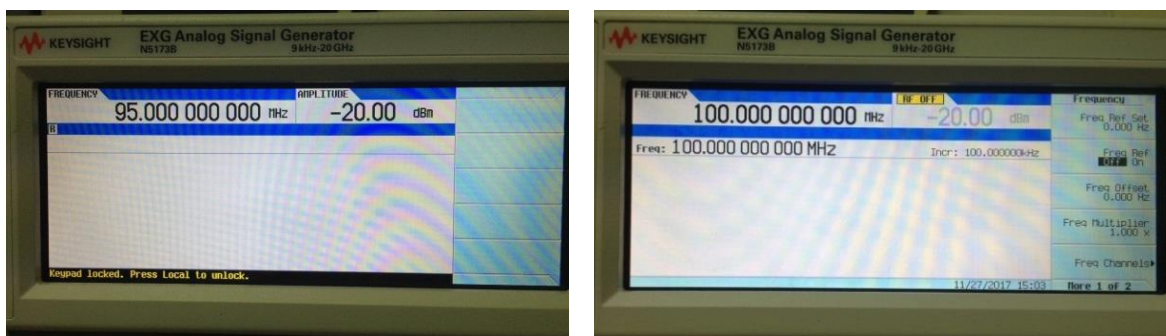


(จ) กรณีที่ 3 ข้อมูลคำสั่ง 100 MHz และ -20 dBm

รูปที่ 5.60 เปรียบเทียบกับสถานะการทำงาน

ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.60 กรณีที่ 1 ข้อมูลคำสั่ง คือ 93 MHz และ -20dBm ได้ถูกแสดงบนโทรศัพท์มือถือเป็น 93 MHz และ -20dBm ซึ่งโปรแกรมการทำงานสามารถแสดงผลได้อย่างถูกต้องเช่นเดียวกันกับกรณีที่ 2 และ 3

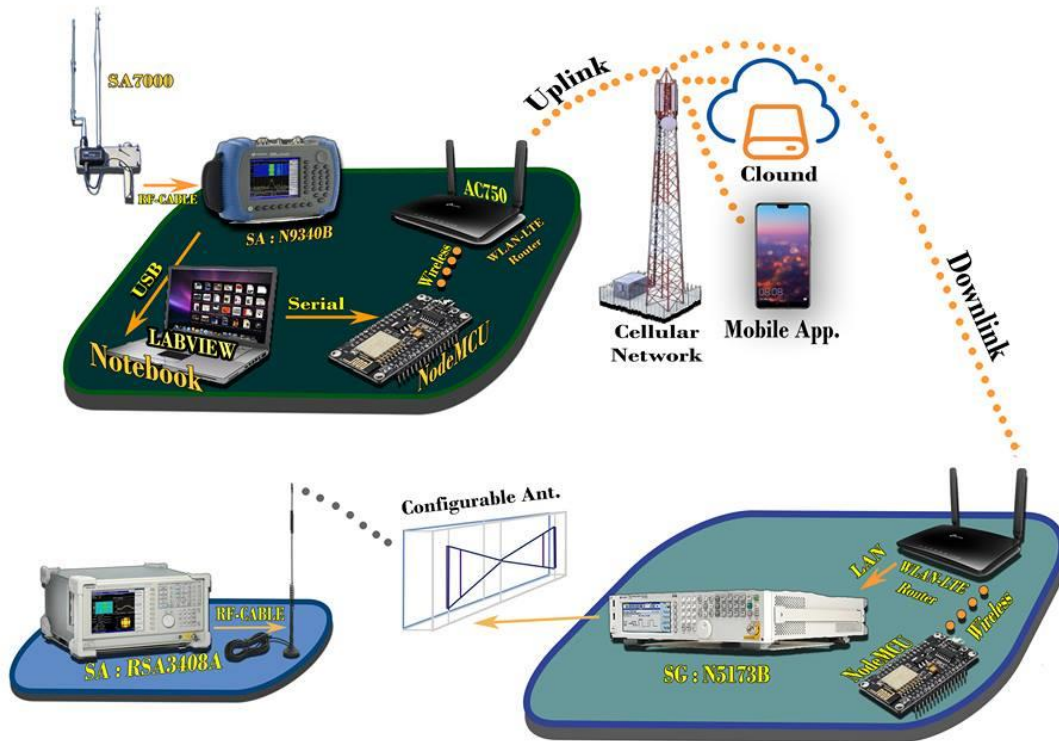
นอกจากนั้น ในช่วงเวลาที่ MCU-Act กำลังควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณนั้น ผู้ใช้งานจะไม่สามารถเข้าควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณผ่านแผงควบคุมได้ ซึ่งสามารถสังเกตได้มู่กลางด้านซ้ายมือของรูปหน้าจอแสดงผลของเครื่องกำเนิดสัญญาณ อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้งานสามารถเข้าควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณได้โดยการกดปุ่ม Local บนแผงหน้าจอ ซึ่งแสดงผลการกดปุ่มดังกล่าวในรูปที่ 5.61



รูปที่ 5.61 แสดงสถานะเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ไม่สามารถควบคุมผ่านตัวเครื่องโดยตรง

## 5.5 ผลการทำงานของระบบวิทยุรู้คิดจำลอง

### 5.5.1 ระบบรู้คิดจำลอง



รูปที่ 5.62 สถาปัตยกรรมของระบบวิทยุรู้คิดจำลอง

รูปที่ 5.62 เป็นสรุปผลการประกอบระบบวิทยุรู้คิดทั้งหมด ซึ่งบรรยายตามลำดับการทำงาน ดังนี้

(1) ระบบสังเกตการณ์ ประกอบด้วยอุปกรณ์สายอากาศ (SA7000) เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ (N9340B) และคอมพิวเตอร์ประมวล (LabVIEW) ซึ่งทำงานร่วมกันด้วยโปรแกรมชุดคำสั่งด้วยภาษา LabVIEW เพื่อสังเกตการณ์การใช้ช่องสัญญาณของกิจการวิทยุกระจายเสียงระบบ FM

(2) ระบบตัดสินใจ ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ประมวล (LabVIEW) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Node-MCU) อุปกรณ์เครือข่าย (WLAN-LTE Router) ซึ่งทำงานร่วมกันด้วยโปรแกรมชุดคำสั่งด้วย LabVIEW เพื่อตัดสินใจ และโปรแกรมชุดคำสั่งด้วยภาษาซี เพื่อส่งข้อมูลการตัดสินใจไปยังระบบดำเนินการ ผ่านระบบอินเทอร์เน็ต

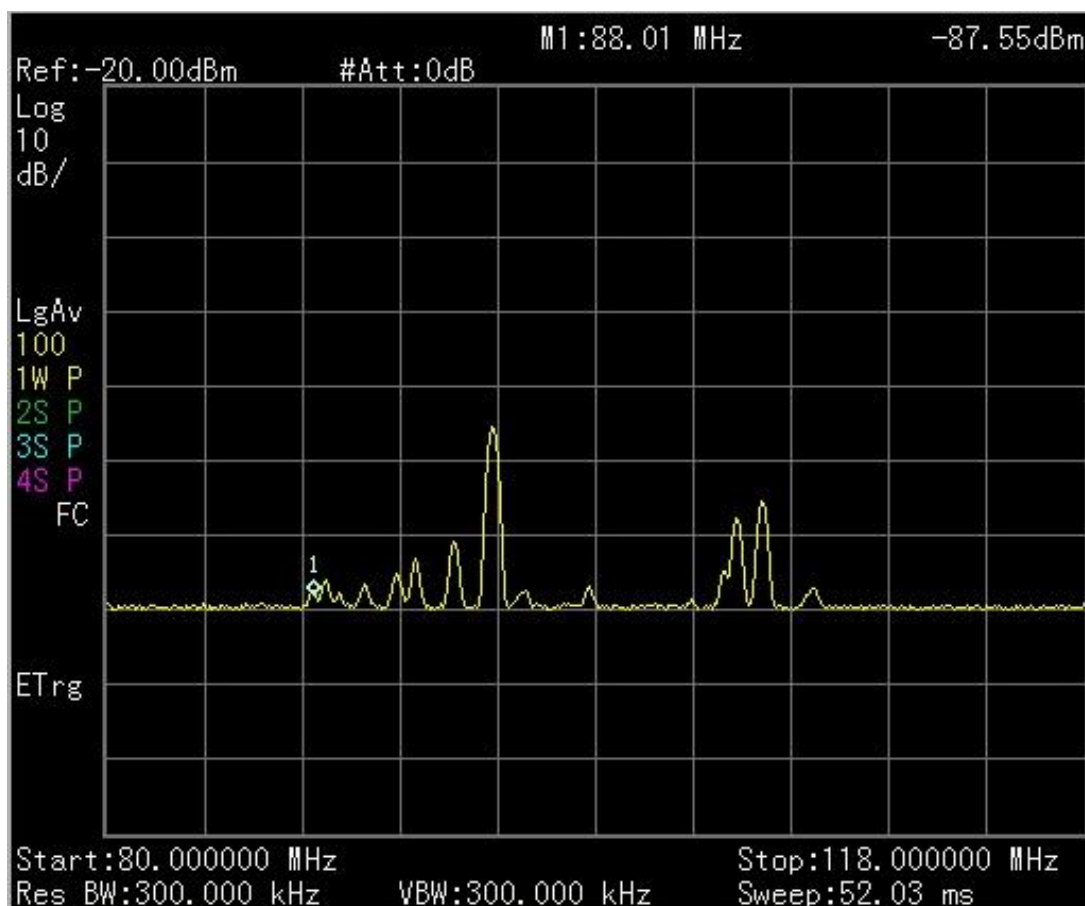
(3) ระบบดำเนินการ ประกอบด้วย อุปกรณ์เครือข่าย (WLAN-LTE Router) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Node-MCU) เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูง (N5173B) อุปกรณ์ขยายกำลังคลื่น (Power Amplifier) สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ (Reconfigurable Antenna) ซึ่งทำงานร่วมกันด้วยโปรแกรมชุดคำสั่งด้วย

ภาษาซี เพื่อรับข้อมูลการตัดสินใจจากระบบคลาวด์ในระบบอินเทอร์เน็ต และส่งอุปกรณ์การทำงานของเครื่อง  
กำเนิดสัญญาณ และการปรับโหมดสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

### 5.5.2 ผลการทำงานของระบบรู้คิดจำลอง

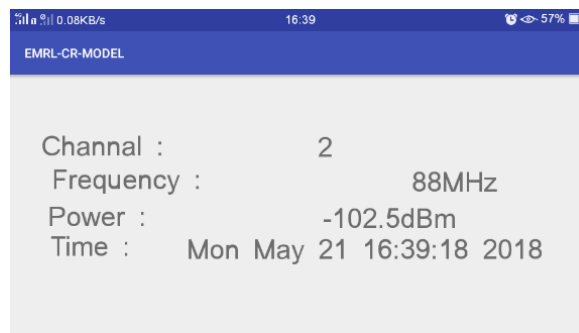
กรณีที่ 1 ผลการตัดสินใจเข้าใช้ช่องสัญญาณ 88.00 MHz ซึ่งได้ทดสอบระบบในบริเวณ  
มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ โดยระบบสังเกตการณ์ติดตั้ง ณ อาคารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 และระบบ  
ดำเนินการติดตั้ง ณ อาคารวิชาการ 4 ซึ่งมีระยะทางห่างกัน 2 กิโลเมตร การจำลองการทำงานมีรายละเอียด  
ดังนี้ เริ่มจากระบบสังเกตการณ์ตรวจวัดช่องสัญญาณ 88.00 MHz ว่ามีการใช้งานหรือไม่ ถ้าไม่มีการใช้งาน  
ระบบตัดสินใจจะส่งข้อมูลคำสั่งผ่านระบบโทรศัพท์มือถือ เพื่อสั่งงานให้ระบบดำเนินการ ปล่อยสัญญาณเพื่อ  
เข้าใช้ช่องสัญญาณ 88.00 MHz ในระดับกำลังส่ง 2 ระดับ คือ -1 dBm และ 5 dBm ตามลำดับ

- ผลการสังเกตการณ์ในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ซึ่งมีระดับกำลังคลื่น -87.55 dBm เมื่อใช้ค่า RBW =  
300 kHz สำหรับวัดพิจารณาทั้งย่านระบบ FM ด้วยมนุษย์ มีรายละเอียดตามรูปดังนี้



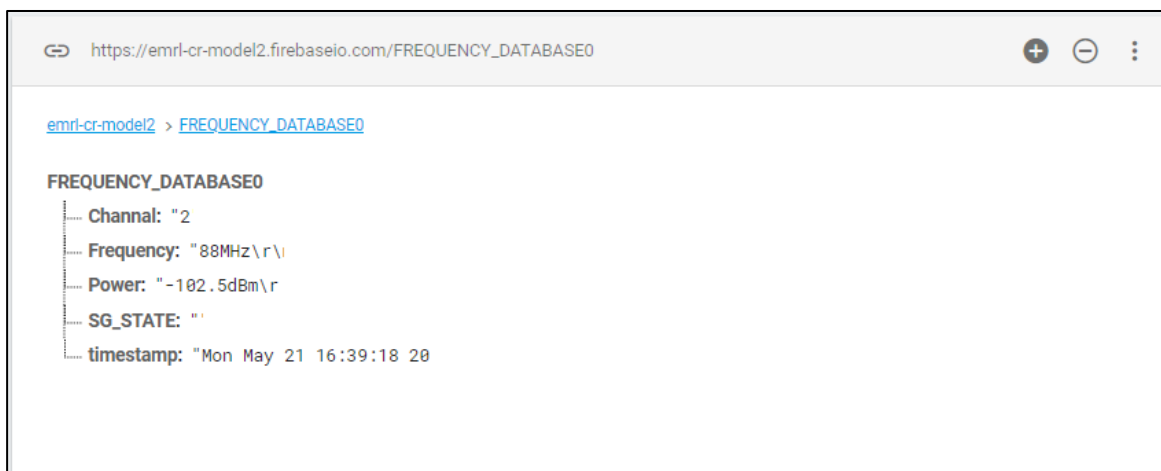
รูปที่ 5.63 กำลังสัญญาณที่ความถี่ 88 MHz ที่เลือกใช้เป็นช่องสัญญาณที่ว่าง

- ผลการสังเกตการณ์ในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ซึ่งมีระดับกำลังคลื่น -102.5 dBm เมื่อใช้ค่า RBW = 3 kHz สำหรับวัดพิจารณาเพียงหนึ่งช่องสัญญาณ ด้วยชุดโปรแกรมคำสั่ง มีรายละเอียดตามรูปดังนี้



รูปที่ 5.64 ผลการสังเกตการณ์ช่องสัญญาณ 88.00 MHz

- ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสินใจในระบบคลาวด์ ซึ่งเลือกใช้ช่องสัญญาณ 88.00 MHz มีรายละเอียดตามรูปดังนี้



รูปที่ 5.65 ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ 88.00 MHz ในระบบคลาวด์

- ผลการรับข้อมูลการตัดสินใจในระบบคลาวด์ โดยระบบดำเนินการ เพื่อใช้ในควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง -1.0 dBm

```

Channel IN   : 2
Frequency IN : 88MHz

Power IN     : -102.5dBm

Time IN      : Mon May 21 16:39:18 2018

Start to send Power...
Power in :-1
State OFF Signal Gen.
  send Power (dBm)      = -1
  send Frequency (Mhz) = 88MHz

State ON Signal Gen.

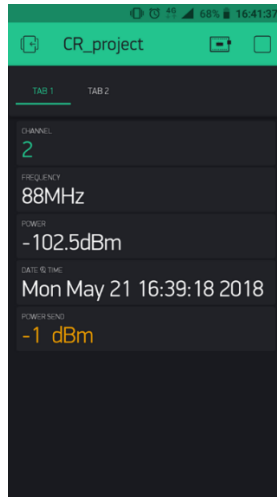
```

รูปที่ 5.66 ผลการรับข้อมูลช่องสัญญาณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

- ผลการควบคุมกำเนิดสัญญาณในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง -1.0 dBm

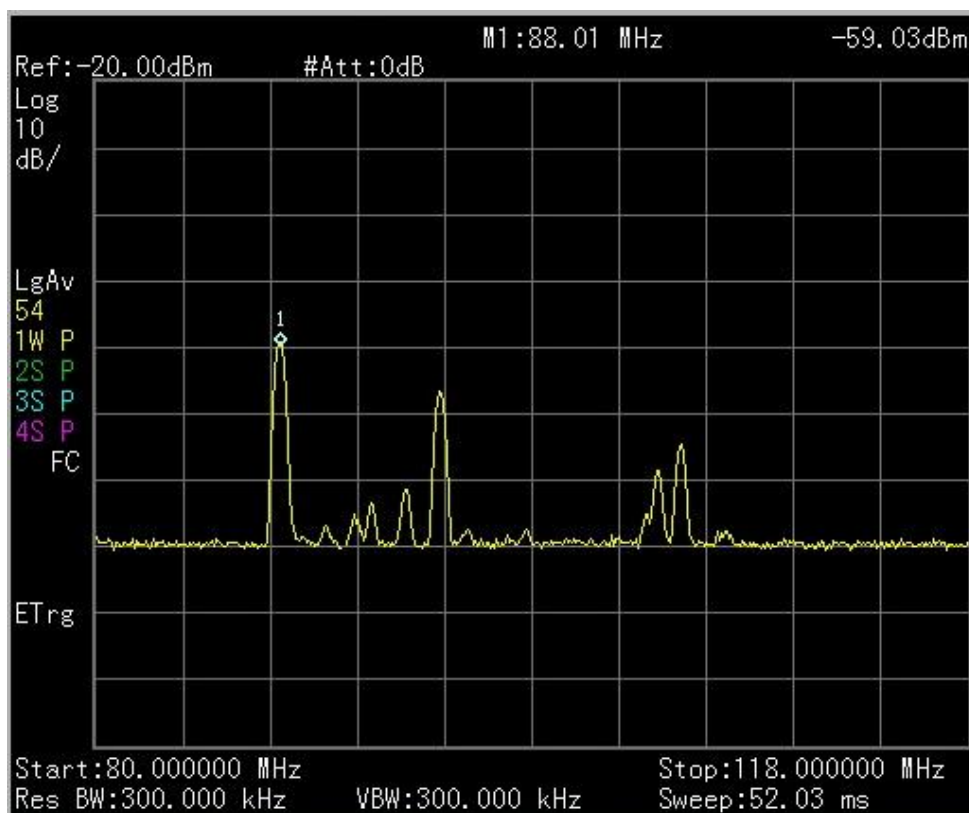


รูปที่ 5.67 ผลการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง -1.0 dBm



รูปที่ 5.68 ผลการติดตามการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

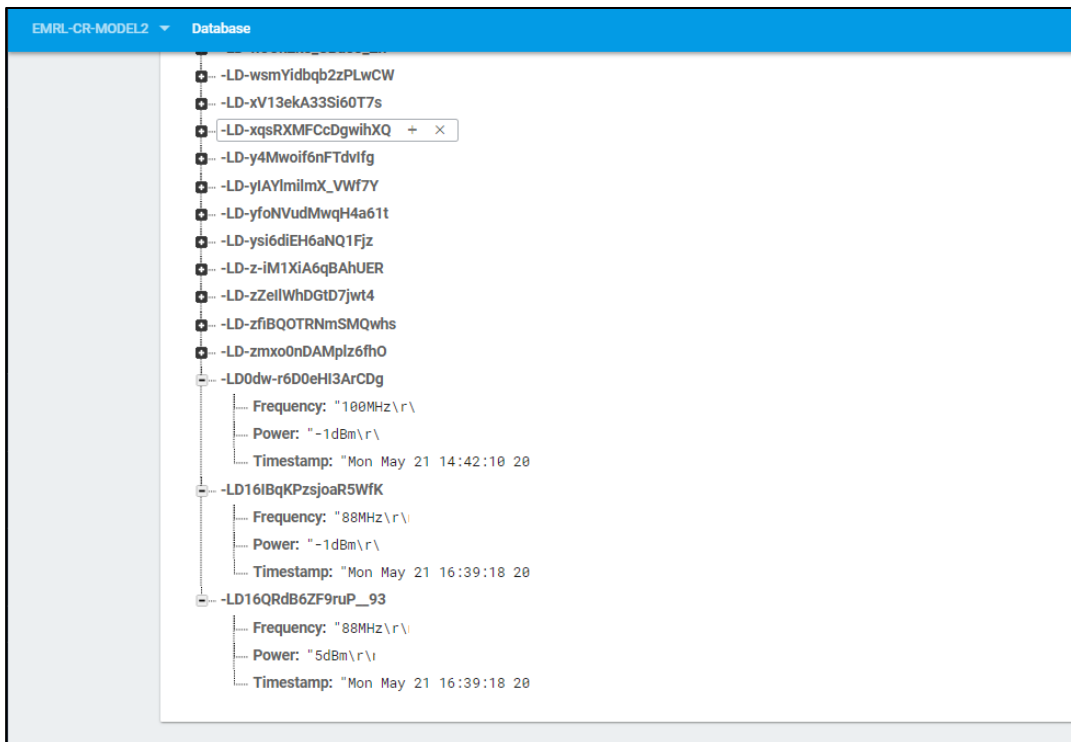
- ผลการสังเกตการณ์ใช้ในช่องสัญญาณ 88.00 MHz หลังจากระบบดำเนินการทำงาน ในรูปที่ 5.69 ซึ่งสังเกตที่ช่องสัญญาณจะพบว่า มีกำลังคลื่นสูงขึ้นเป็นระดับ -59.03 dBm เมื่อเทียบกับผลการสังเกตการณ์ก่อนหน้า ในรูปที่ 5.63 ซึ่งมีระดับกำลัง -87.55 dBm



รูปที่ 5.69 หน้าจอเครื่องกำเนิดสัญญาณ เลือกใช้ช่องสัญญาณที่ 2 ความถี่ 88 MHz กำลังส่งที่ -1 dBm

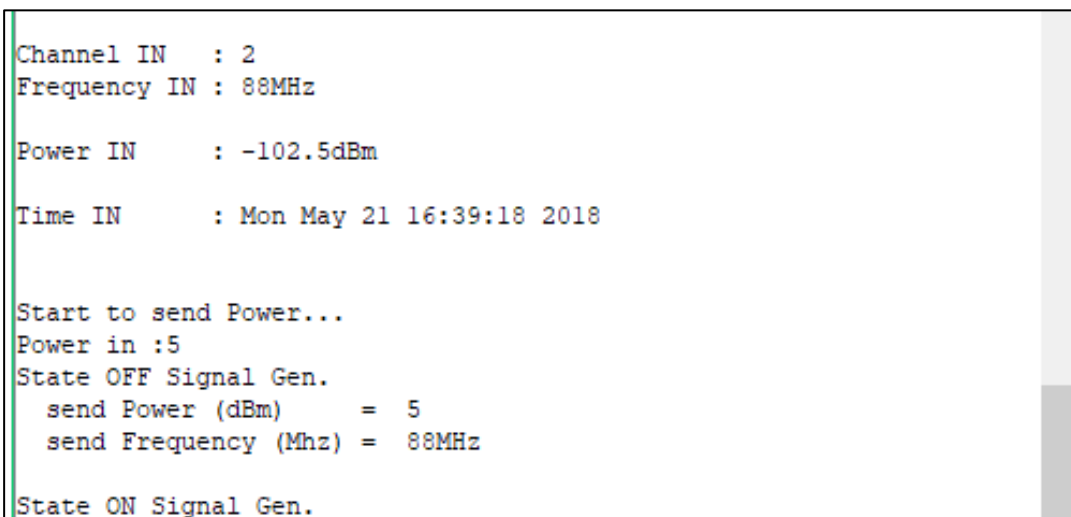


- ระบบตัดสัญญาณ ได้มีคำสั่งเพิ่มระดับกำลังส่งของระบบดำเนินการ โดยเพิ่มจากระดับ -1 dBm เป็น 5 dBm และมีผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสัญญาณในระบบคลาวด์ รายละเอียดตามรูปดังนี้



รูปที่ 5.70 ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสัญญาณเลือกใช้ช่องสัญญาณ 88.00 MHz ในระบบคลาวด์

- ผลการรับข้อมูลการตัดสัญญาณในระบบคลาวด์ โดยระบบดำเนินการ เพื่อใช้ในควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง 5.0 dBm

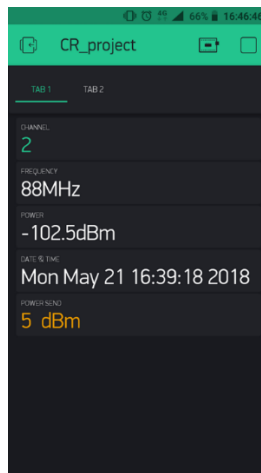


รูปที่ 5.71 ผลการรับข้อมูลช่องสัญญาณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

- ผลการควบคุมกำเนิดสัญญาณในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง 5.0 dBm

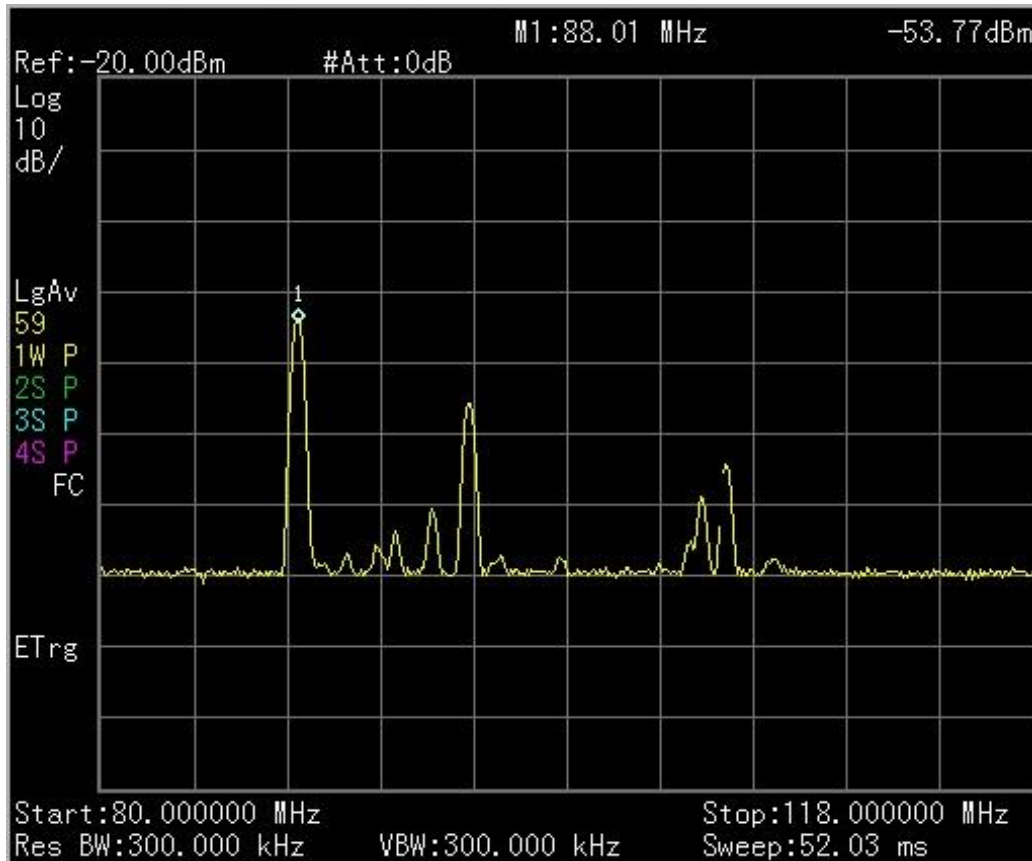


รูปที่ 5.72 ผลการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในช่องสัญญาณ 88.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง 5 dBm



รูปที่ 5.73 ผลการติดตามการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

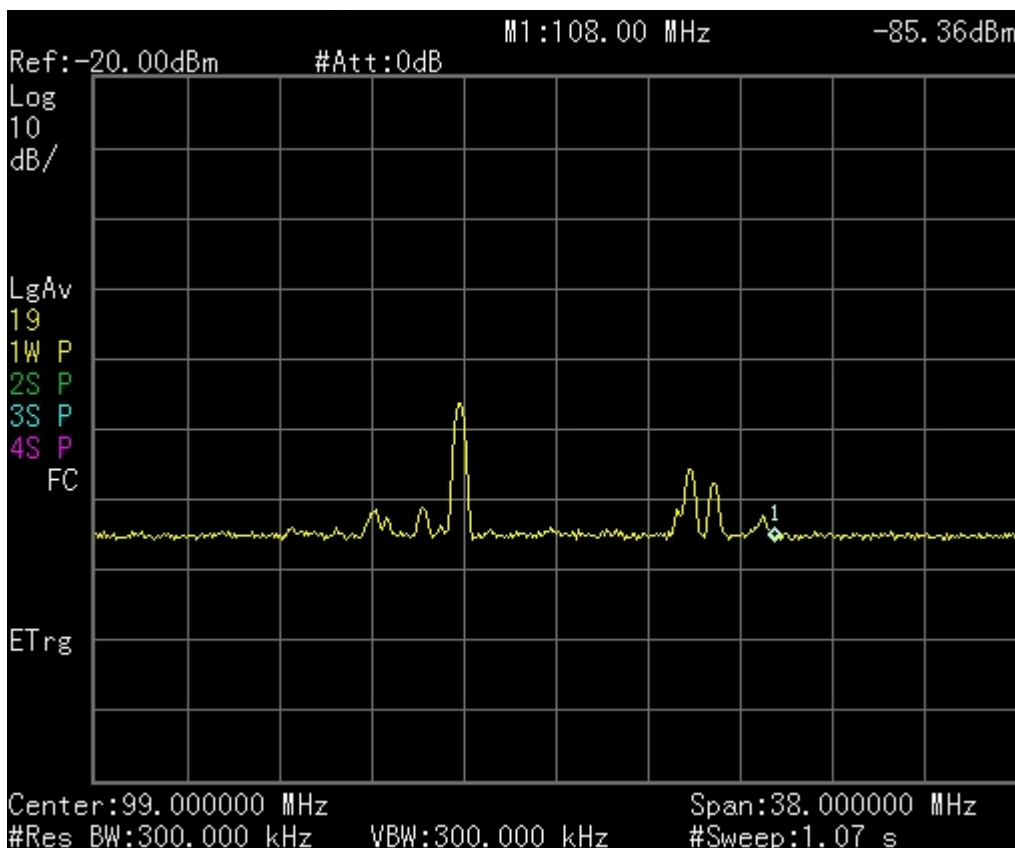
- ผลการสังเกตการณ์ใช้ในช่องสัญญาณ 88.00 MHz หลังจากระบบดำเนินการทำงาน ในรูปที่ 5.74 ซึ่งสังเกตที่ช่องสัญญาณจะพบว่า มีกำลังคลื่นสูงขึ้นเป็นระดับ -53.77 dBm เมื่อเทียบกับผลการสังเกตการณ์ก่อนหน้า ในรูปที่ 5.69 ซึ่งมีระดับกำลัง -59.03 dBm



รูปที่ 5.74 การส่งกำลังที่ 5 dBm ความถี่ 88 MHz

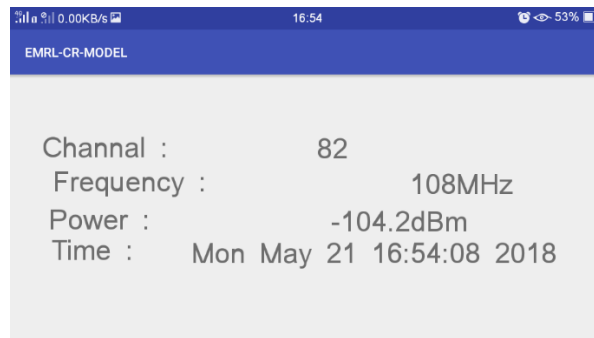
กรณีที่ 2 ผลการตัดสินใจเข้าใช้ช่องสัญญาณ 108.00 MHz ซึ่งได้ทดสอบระบบในบริเวณมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ โดยระบบสังเกตการณ์ติดตั้ง ณ อาคารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 7 และระบบดำเนินการติดตั้ง ณ อาคารวิชาการ 4 ซึ่งมีระยะทางห่างกัน 2 กิโลเมตร การจำลองการทำงานมีรายละเอียดดังนี้ เริ่มจากระบบสังเกตการณ์ตรวจวัดช่องสัญญาณ 108.00 MHz ว่ามีการใช้งานหรือไม่ ถ้าไม่มีการใช้งานระบบตัดสินใจจะส่งข้อมูลคำสั่งผ่านระบบโทรศัพท์มือถือ เพื่อสั่งงานให้ระบบดำเนินการ ปล่อยสัญญาณเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณ 108.00 MHz ในระดับกำลังส่ง 2 ระดับ คือ -1 dBm และ 5 dBm ตามลำดับ

- ผลการสังเกตการณ์ในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ซึ่งมีระดับกำลังคลื่น -85.36 dBm เมื่อใช้ค่า RBW = 300 kHz สำหรับวัดพิจารณาทั้งย่านระบบ FM ด้วยมนุษย์ มีรายละเอียดตามรูปดังนี้



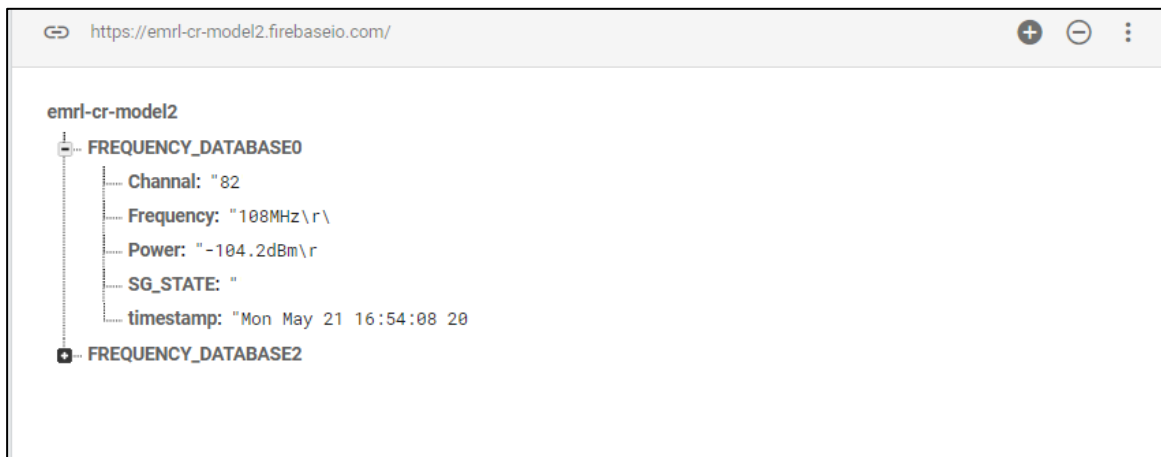
รูปที่ 5.75 กำลังสัญญาณที่ความถี่ 108 MHz ที่เลือกใช้เป็นช่องสัญญาณที่ว่าง

- ผลการสังเกตการณ์ในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ซึ่งมีระดับกำลังคลื่น -102.5 dBm เมื่อใช้ค่า RBW = 3 kHz สำหรับวัดพิจารณาเพียงหนึ่งช่องสัญญาณ ด้วยชุดโปรแกรมคำสั่ง มีรายละเอียดตามรูปดังนี้



รูปที่ 5.76 ผลการสังเกตการณ์ช่องสัญญาณ 108.00 MHz ที่แสดงบนแอปพลิเคชันโทรศัพท์เคลื่อนที่ของระบบสังเกตการณ์

- ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสินใจในระบบคลาวด์ ซึ่งเลือกใช้ช่องสัญญาณ 108.00 MHz มีรายละเอียดตามรูปดังนี้



รูปที่ 5.77 ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ 108.00 MHz ในระบบคลาวด์

- ผลการรับข้อมูลการตัดสินใจในระบบคลาวด์ โดยระบบดำเนินการ เพื่อใช้ในควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง -1.0 dBm

```

Channel IN   : 82
Frequency IN : 108MHz

Power IN     : -104.2dBm

Time IN      : Mon May 21 16:54:08 2018

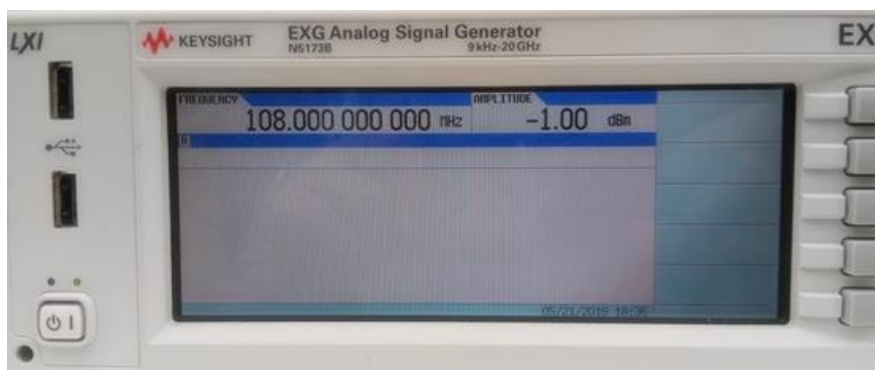
Start to send Power...
Power in :-1
State OFF Signal Gen.
  send Power (dBm)      = -1
  send Frequency (Mhz) = 108MHz

State ON Signal Gen.
Mon May 21 16:54:08 2018
pushed:/FREQUENCY_DATABASE2/-LD17sGXirGdOGHGUSnx

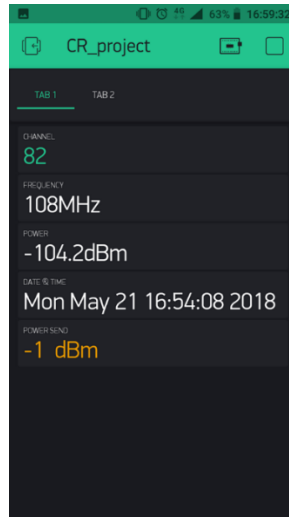
```

รูปที่ 5.78 ผลการรับข้อมูลช่องสัญญาณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

- ผลการควบคุมกำเนิดสัญญาณในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง -1.0 dBm

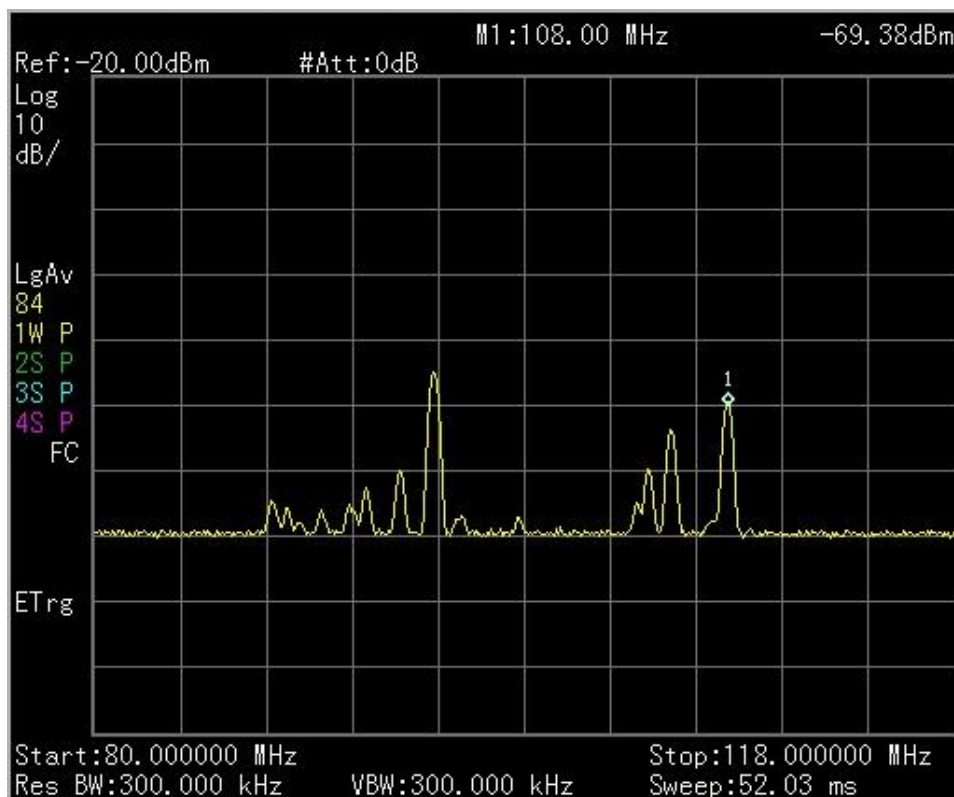


รูปที่ 5.79 ผลการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง -1.0 dBm



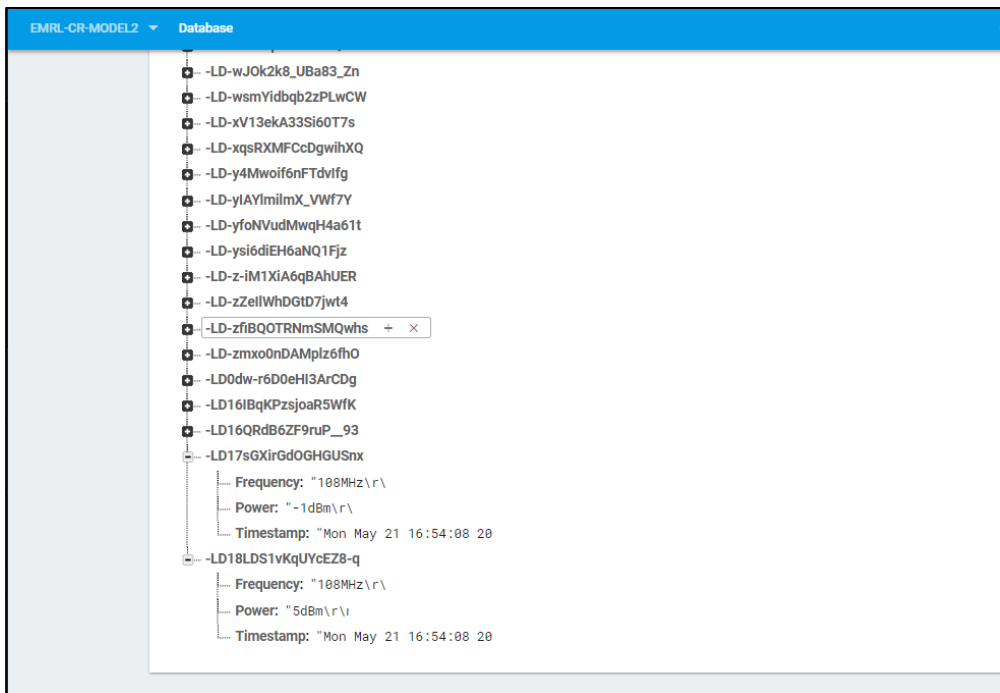
รูปที่ 5.80 ผลการติดตามการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

- ผลการสังเกตการณ์ใช้ในช่องสัญญาณ 108.00 MHz หลังจากระบบดำเนินการทำงาน ในรูปที่ 5.81 ซึ่งสังเกตที่ช่องสัญญาณจะพบว่า มีกำลังคลื่นสูงขึ้นเป็นระดับ -69.38 dBm เมื่อเทียบกับผลการสังเกตการณ์ก่อนหน้า ในรูปที่ 5.75 ซึ่งมีระดับกำลัง -85.36 dBm



รูปที่ 5.81 หน้าจอเครื่องกำเนิดสัญญาณ เลือกใช้ช่องสัญญาณที่ 2 ความถี่ 108 MHz กำลังส่งที่ -1 dBm

- ระบบตัดสวิตช์ ได้มีคำสั่งเพิ่มระดับกำลังส่งของระบบดำเนินการ โดยเพิ่มจากระดับ -1 dBm เป็น 5 dBm และมีผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสวิตช์ในระบบคลาวด์ รายละเอียดตามรูปดังนี้



รูปที่ 5.82 ผลการจัดเก็บข้อมูลการตัดสวิตช์เลือกใช้ช่องสัญญาณ 108.00 MHz ในระบบคลาวด์

- ผลการรับข้อมูลการตัดสวิตช์ในระบบคลาวด์ โดยระบบดำเนินการ เพื่อใช้ในควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง 5.0 dBm

```

Channel IN      : 82
Frequency IN   : 108MHz

Power IN       : -104.2dBm

Time IN        : Mon May 21 16:54:08 2018

Start to send Power...
[93438] Connecting to blynk-cloud.com:8442
[94697] Ready (ping: 1000ms).
Power in : 5
State OFF Signal Gen.
  send Power (dBm) = 5
  send Frequency (Mhz) = 108MHz

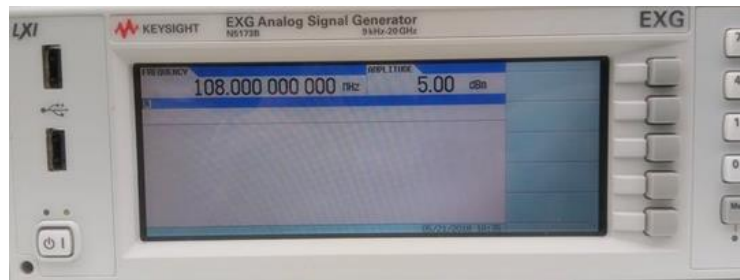
State ON Signal Gen.
Mon May 21 16:54:08 2018
pushed:/FREQUENCY_DATABASE2/-LD18LDS1vKqUYcEZ8-q

```

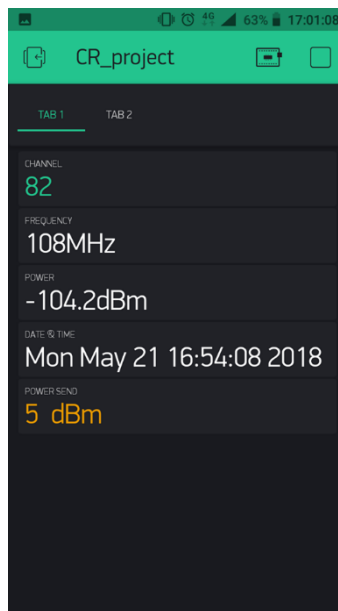
รูปที่ 5.83 ผลการรับข้อมูลช่องสัญญาณโดยไมโครคอนโทรลเลอร์



- ผลการควบคุมกำเนิดสัญญาณในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง 5.0 dBm

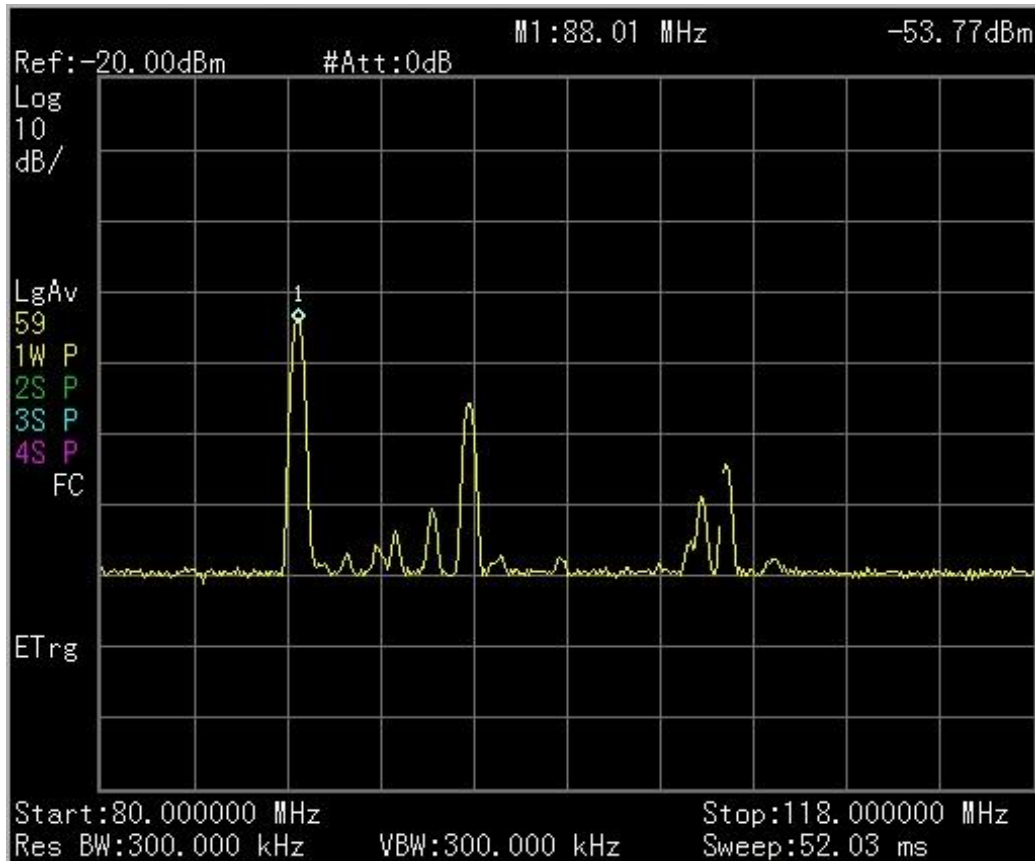


รูปที่ 5.84 ผลการควบคุมเครื่องกำเนิดสัญญาณ ในช่องสัญญาณ 108.00 MHz ด้วยระดับกำลังส่ง 5 dBm



รูปที่ 5.85 ผลการติดตามการทำงานของเครื่องกำเนิดสัญญาณ

- ผลการสังเกตการณ์ใช้ในช่องสัญญาณ 108.00 MHz หลังจากระบบดำเนินการทำงาน ในรูปที่ 5.86 ซึ่งสังเกตที่ช่องสัญญาณจะพบว่า มีกำลังคลื่นสูงขึ้นเป็นระดับ -53.77 dBm เมื่อเทียบกับผลการสังเกตการณ์ก่อนหน้า ในรูปที่ 5.81 ซึ่งมีระดับกำลัง -69.38 dBm



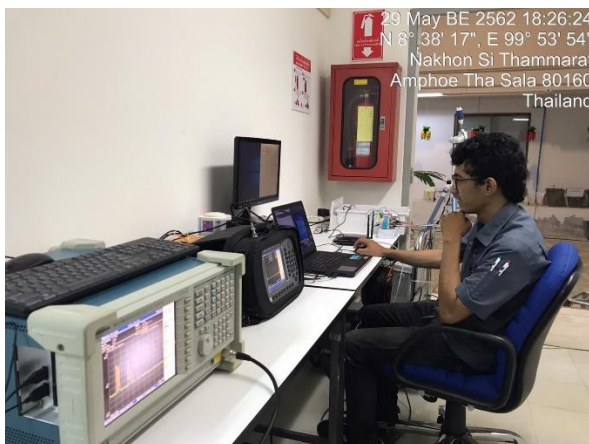
รูปที่ 5.86 การส่งกำลังที่ 5 dBm ความถี่ 108 MHz

### 5.5.3 ผลการทำงานของระบบรู้คิดจำลองร่วมกับสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่

ในหัวข้อนี้จะบรรยายผลการทำงานของระบบวิทยุรู้คิดร่วมกับสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ทั้ง 3 ช่วงความถี่ คือ ช่วงความถี่สำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. ช่วงความถี่กิจการโทรทัศน์ดิจิทัล และช่วงความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคม ซึ่งได้ติดตั้งระบบวิทยุรู้คิดร่วมกับสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ และชุดตรวจวัดกำลังคลื่นวิทยุ (ในที่นี้เลือกใช้เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่ Tektronix รุ่น RSA3303A และเชื่อมต่อสายอากาศมาตรฐาน) ณ อาคารวิชาการ 4 มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ โดยที่สายอากาศของระบบสังเกตการณ์และสายอากาศ จัดตั้งอยู่ห่างจากชุดตรวจวัดกำลังคลื่นวิทยุภายในรัศมีไม่เกิน 10 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.87



(ก) สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่กิจการโทรทัศน์ดิจิทัลที่เชื่อมต่อกับระบบดำเนินการ



(ข) ระบบสังเกตการณ์



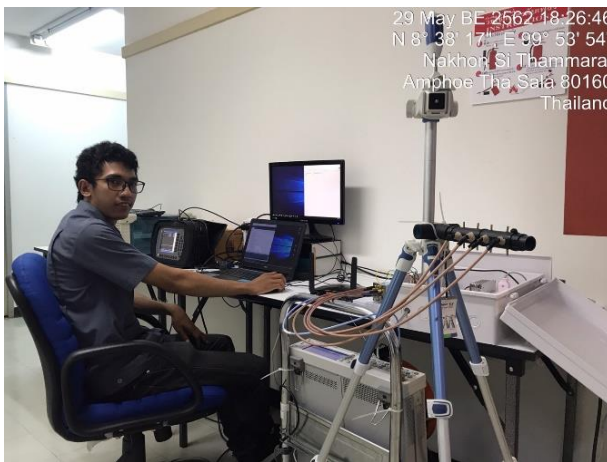
(ค) การติดตั้งสายอากาศ



(ง) สายอากาศของระบบสังเกตการณ์และ  
สายอากาศกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม.



(จ) สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่กิจการกระจาย  
เสียง เอฟ.เอ็ม.ที่เชื่อมต่อกับระบบดำเนินการ



(ฉ) สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่กิจการ  
โทรคมนาคมที่เชื่อมต่อกับระบบดำเนินการ  
รูปที่ 5.87 ผลการติดตั้งวิทยุรู้คิดร่วมกับสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่



(ช) เครื่องวิเคราะห์แถบความถี่สำหรับตรวจวัดผล  
การทำงานของระบบฯ

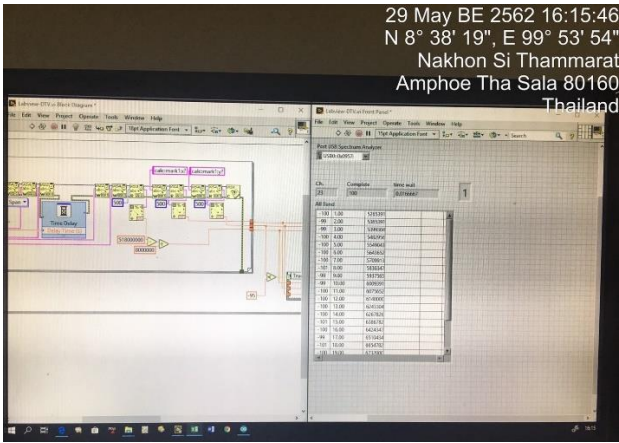
### 5.5.3.1 ผลการทดสอบระบบสำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล

การทดสอบระบบสำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล ถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนแรก ระบบสังเกตการณ์จะเริ่มตรวจจับช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 518-702 MHz จากนั้นระบบตัดสินใจจะเลือกใช้ช่องสัญญาณ และระบบดำเนินการจะเข้าใช้งานช่องสัญญาณนั้น พร้อมควบคุมการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ขั้นตอนที่สอง ระบบควบคุมกลาง จะตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณและปรับเปลี่ยนการใช้งานช่องสัญญาณ เพื่อแสดงผลการควบคุมการทำงานของระบบดำเนินการร่วมกับการปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่สำหรับกิจการโทรทัศน์ดิจิทัล ให้เป็นไปตามคุณลักษณะของสายอากาศในตารางที่ 4.17 และขั้นตอนที่ 3 เป็นการประเมินผลการทำงานของระบบโดยพิจารณาจากผลการวัดกำลังคลื่นด้วยชุดตรวจวัดกำลังคลื่นวิทยุ โดยการทดสอบจะมีการปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณแบ่งออกเป็น 5 กรณี ดังตารางต่อไปนี้

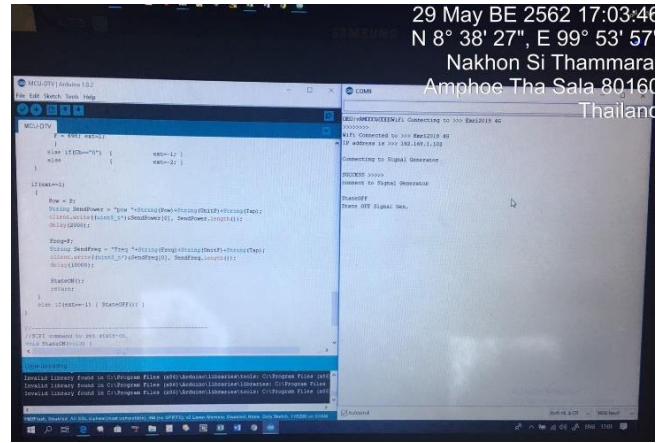
กรณีที่	ช่องสัญญาณเดิม	ช่องสัญญาณใหม่	หมายเหตุ
1	ไม่มี (เริ่มต้น)	ช่องสัญญาณที่เลือกด้วย ODL	ประเมินผลร่วมกันทั้งสามกรณี
2	ช่องสัญญาณที่เลือกด้วย ODL	ช่องสัญญาณ DTV-2	
3	ช่องสัญญาณ DTV-2	ช่องสัญญาณ DTV-3	
4	ช่องสัญญาณ DTV-3	ช่องสัญญาณ DTV-1	การปรับเปลี่ยนไปใช้งาน DTV-1 อีกครั้ง เพื่อแสดงให้เห็นว่า ระบบฯ สามารถเข้าควบคุมได้ตามความต้องการของระบบควบคุมกลาง
5	ช่องสัญญาณ DTV-1	ช่องสัญญาณ DTV-6	

- กรณีที่ 1

ในขั้นตอนแรก แสดงผลตามรูปที่ 5.88 ซึ่งระบบสังเกตการณ์ได้ตรวจจับการใช้งานช่องสัญญาณ และระบุช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งานในหน้าจอแสดงผล ดังแสดงในรูปที่ 5.88 (ก) หลังจากนั้นระบบดำเนินการได้เชื่อมต่อกับชุดควบคุมการทำงานสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ และรับข้อมูลผลการตัดสินใจจากระบบควบคุมกลางให้เข้าใช้ช่องสัญญาณที่ความถี่ 522 MHz ดังแสดงในรูปที่ 5.88 (ข) แต่ระบบฯ ยังไม่เริ่มปล่อยสัญญาณจนกว่าจะได้รับคำสั่ง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการแสดงผลของชุดตรวจวัด ในรูปที่ 5.88 (ค) ชี้ให้เห็นว่า ระดับค่ากำลังคลื่นที่ความถี่ 522 MHz ยังมีใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน



(ก) ช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน

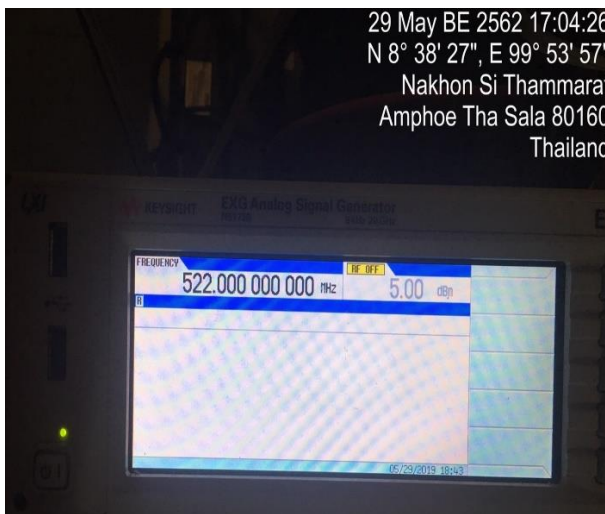


(ข) ระบบดำเนินการติดตั้งการเชื่อมกับระบบ  
สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่



(ค) ผลการตรวจจับความถี่วิทยุก่อนใช้งานช่องสัญญาณ  
รูปที่ 5.88 ผลการทำงานของระบบสังเกตการณ์กิจการโทรศัพท์เคลื่อนที่ดิจิทัล

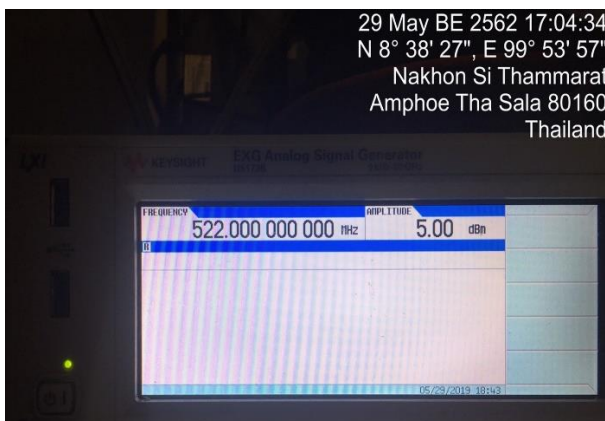
ในขั้นตอนที่ 2 แสดงผลตามรูปที่ 5.89 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 522 MHz เป็นลำดับดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 522 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.89 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ DTV-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.89 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ DTV-1 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.89 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้  $-71.44\text{dBm}$  ที่ความถี่ 522 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.89 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ DTV-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2



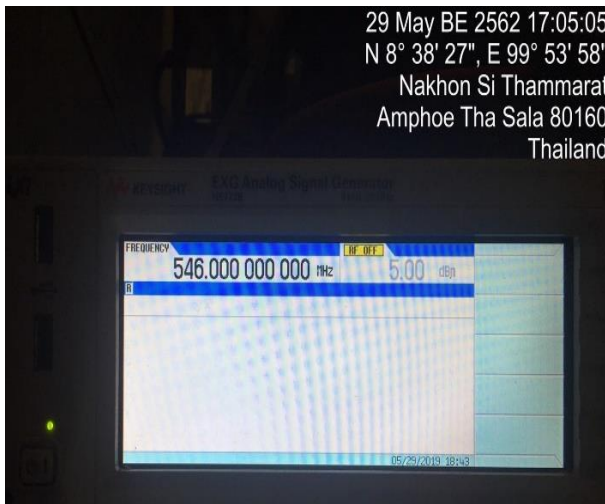
(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



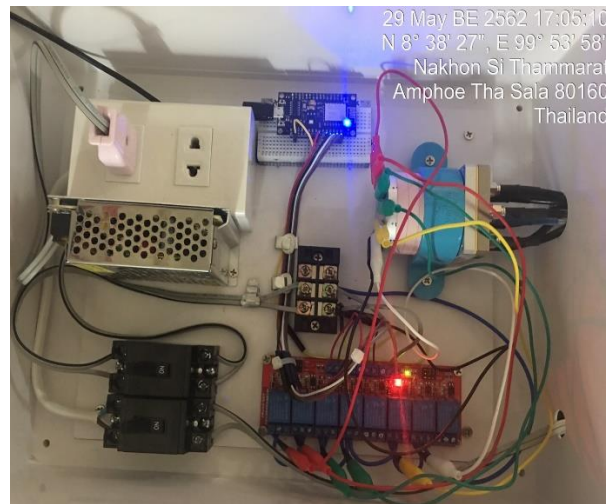
(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุรูปที่ 5.89 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 1

- กรณีที่ 2

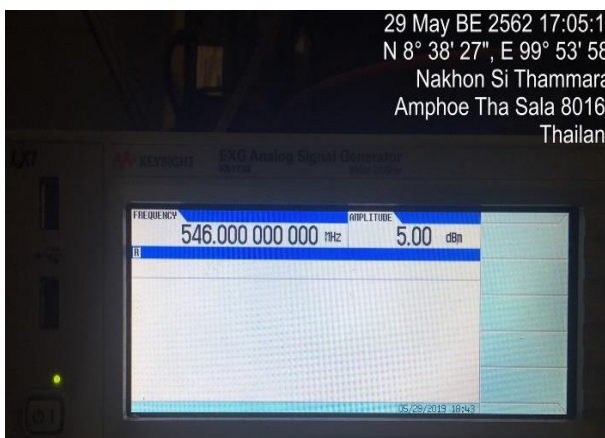
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.90 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้เริ่มรับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 546 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากความถี่ 522 MHz เป็นความถี่ 546 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.90 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ DTV-2 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 3 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.90 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ DTV-2 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.90 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -64.37dBm ที่ความถี่ 546 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.90 (ง)



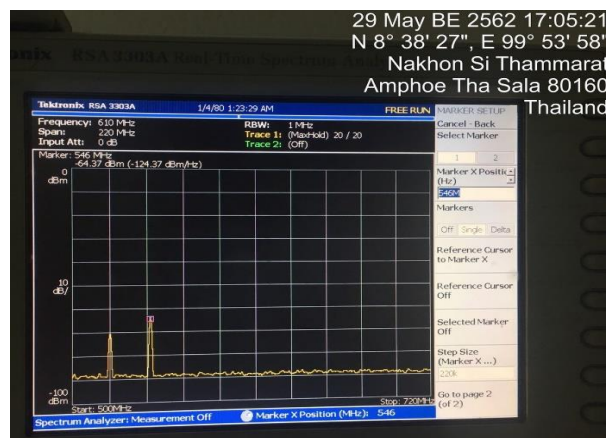
(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ DTV-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



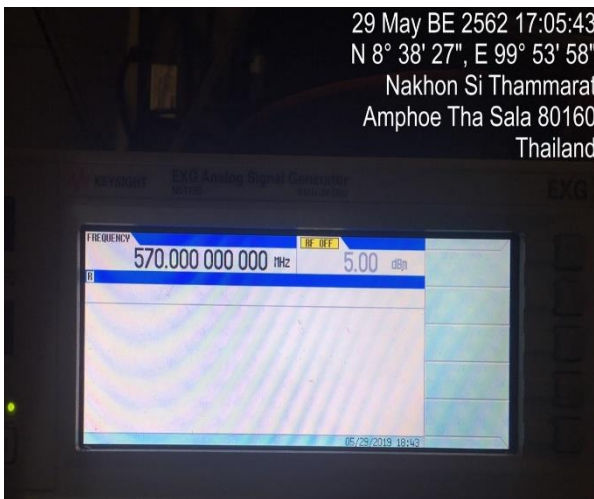
(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.90 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 2



- กรณีที่ 3

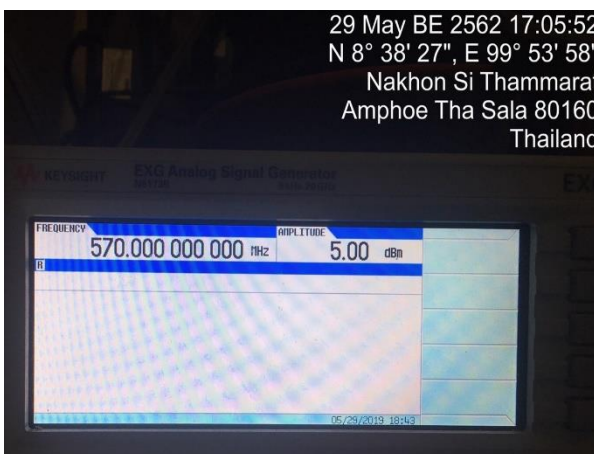
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.91 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 570 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งได้ปรับจากค่าความถี่ 546 MHz เป็นค่าความถี่ 570 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.91 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ DTV-3 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 5 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.91 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ DTV-3 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.91 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -67.31dBm ที่ความถี่ 570 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.91 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ DTV-3 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 5



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง

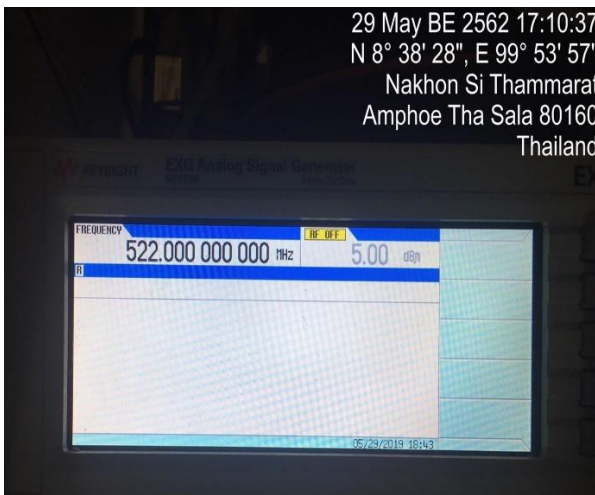


(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.91 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 3

- กรณีที่ 4

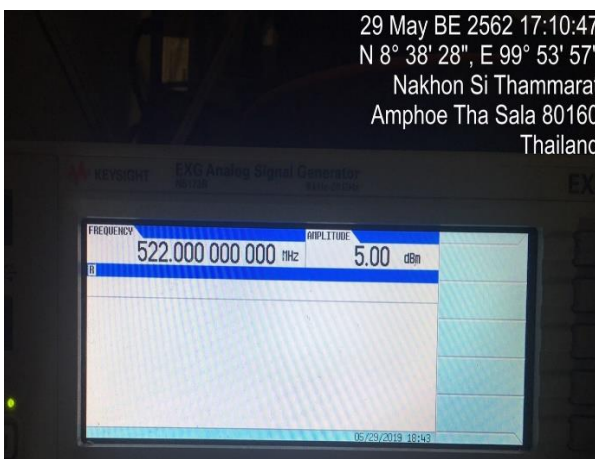
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.92 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 522 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งปรับจากค่าความถี่ 570 MHz เป็นค่าความถี่ 522 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.92 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ DTV-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.92 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 5 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ DTV-1 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.92 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -73.84dBm ที่ความถี่ 522 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.92 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ DTV-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง

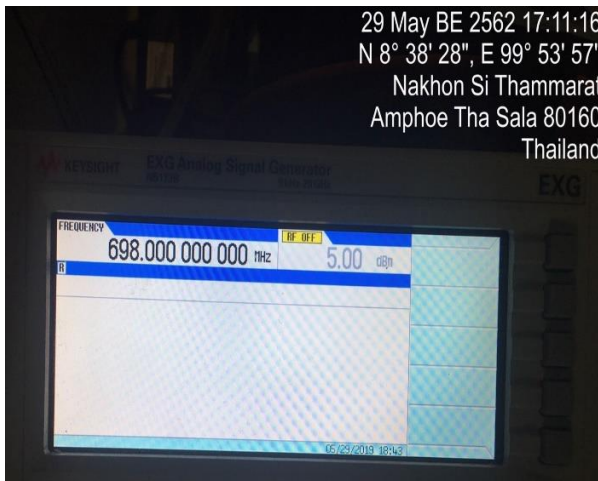


(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

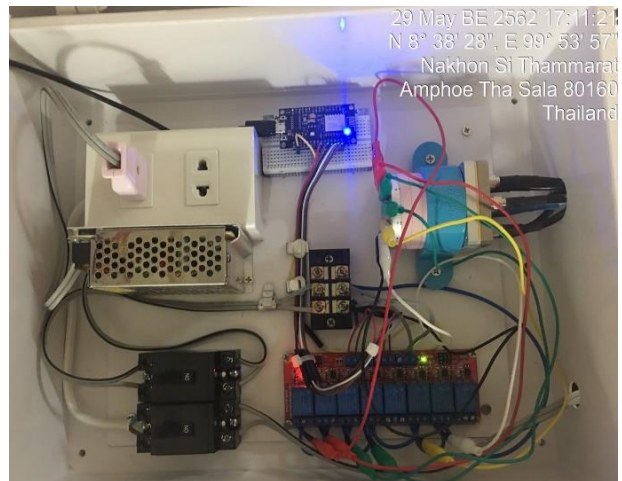
รูปที่ 5.92 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 4

- กรณีที่ 5

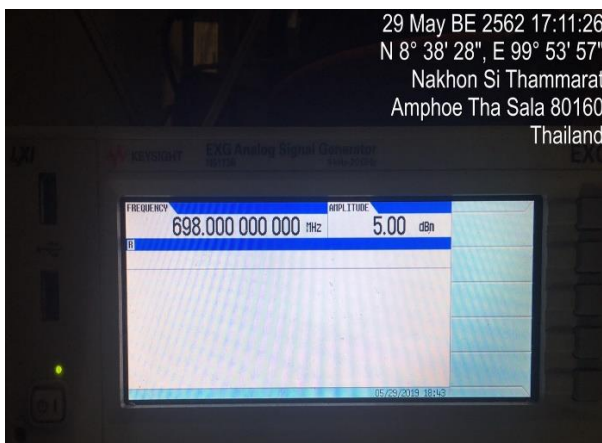
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.93 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 698 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 522 MHz เป็นค่าความถี่ 698 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.93 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ DTV-6 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 8 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.93 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ DTV-6 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.93 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -76.96dBm ที่ความถี่ 698 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.93 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ DTV-6 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 8



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ง) จุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.93 ผลการทดสอบกิจการ DTV กรณีที่ 5

### 5.5.3.2 ผลการทดสอบระบบสำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม.

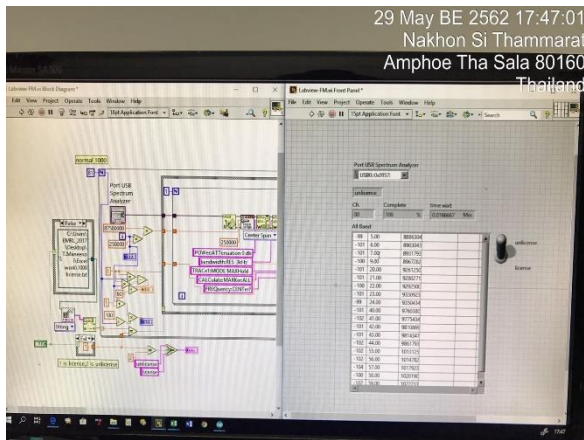
การทดสอบระบบสำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. ถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนแรก ระบบสังเกตการณ์จะเริ่มตรวจจับช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 87-108 MHz จากนั้นระบบตัดสินใจจะเลือกใช้ช่องสัญญาณ และระบบดำเนินการจะเข้าใช้งานช่องสัญญาณนั้น พร้อมควบคุมการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ขั้นตอนที่สอง ระบบควบคุมกลาง จะตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณ และปรับเปลี่ยนการใช้งานช่องสัญญาณ เพื่อแสดงผลการควบคุมการทำงานของระบบดำเนินการร่วมกับการปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่สำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. ให้เป็นไปตามคุณลักษณะของสายอากาศในตารางที่ 4.15 และขั้นตอนที่ 3 เป็นการประเมินผลการทำงานของระบบโดยพิจารณาจากผลการวัดกำลังคลื่นด้วยชุดตรวจวัดกำลังคลื่นวิทยุ โดยการทดสอบจะมีการปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณแบ่งออกเป็น 7 กรณี ดังตารางต่อไปนี้

กรณีที่	ช่องสัญญาณเดิม	ช่องสัญญาณใหม่	หมายเหตุ
1	ไม่มี (เริ่มต้น)	ช่องสัญญาณที่เลือกด้วย ODL	ประเมินผลร่วมกันทั้งสามกรณี
2	ช่องสัญญาณที่เลือกด้วย ODL	ช่องสัญญาณ FM-2	
3	ช่องสัญญาณ FM-2	ช่องสัญญาณ FM-3	
4	ช่องสัญญาณ FM-3	ช่องสัญญาณ FM-1	การปรับเปลี่ยนไปใช้งาน FM-1 อีกครั้ง เพื่อแสดงให้เห็นว่า ระบบฯ สามารถเข้าควบคุมได้ตามความต้องการของระบบควบคุมกลาง
5	ช่องสัญญาณ FM-1	ช่องสัญญาณ FM-5	
6	ช่องสัญญาณ FM-5	ช่องสัญญาณ FM-2	ประเมินผลร่วมกันทั้งสองกรณี
7	ช่องสัญญาณ FM-2	ช่องสัญญาณ FM-6	

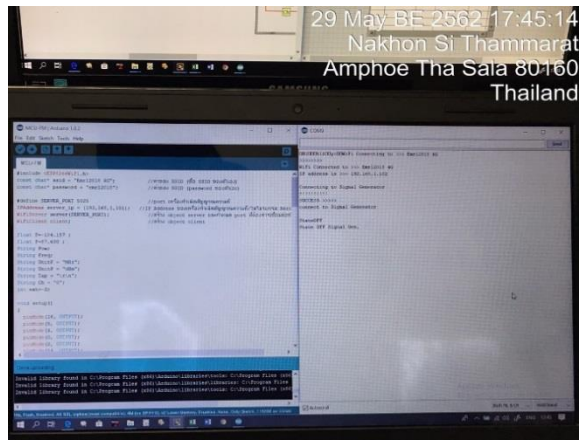
- กรณีที่ 1

ในขั้นตอนแรก แสดงผลตามรูปที่ 5.94 ซึ่งระบบสังเกตการณ์ได้ตรวจจับการใช้งานช่องสัญญาณ และระบุช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งานในหน้าจอแสดงผล ดังแสดงในรูปที่ 5.94 (ก) หลังจากนั้นระบบดำเนินการได้เชื่อมต่อกับชุดควบคุมการทำงานสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ และรับข้อมูลการตัดสินใจจากระบบควบคุมกลางให้เข้าใช้ช่องสัญญาณที่ความถี่ 89.125 MHz ดังแสดงในรูปที่ 5.94 (ข) แต่ระบบฯ ยังไม่เริ่ม

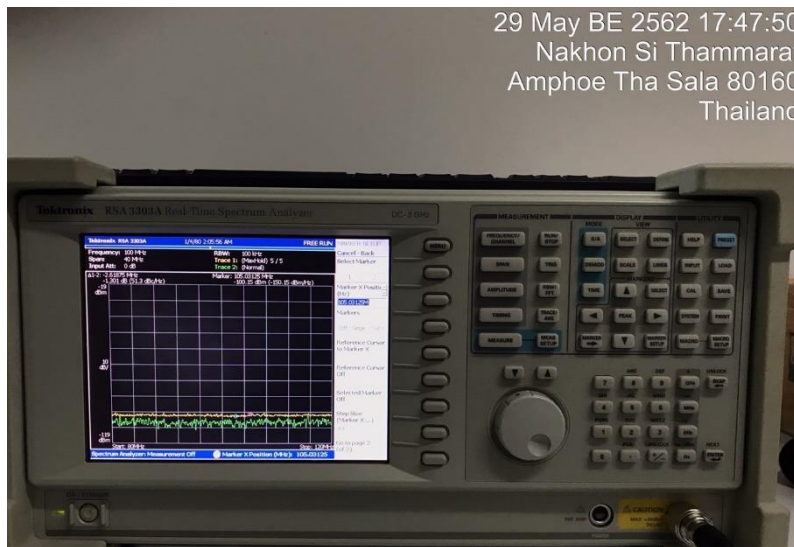
ปล่อยสัญญาณจนกว่าจะได้รับคำสั่ง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการแสดงผลของชุดตรวจวัดในรูปที่ 5.94 (ค) ซึ่งให้เห็นว่า ระดับค่ากำลังคลื่นที่ความถี่ 89.125 MHz ยังมีใกล้เคียงกับสัญญาณรบกวน



(ก) ช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน



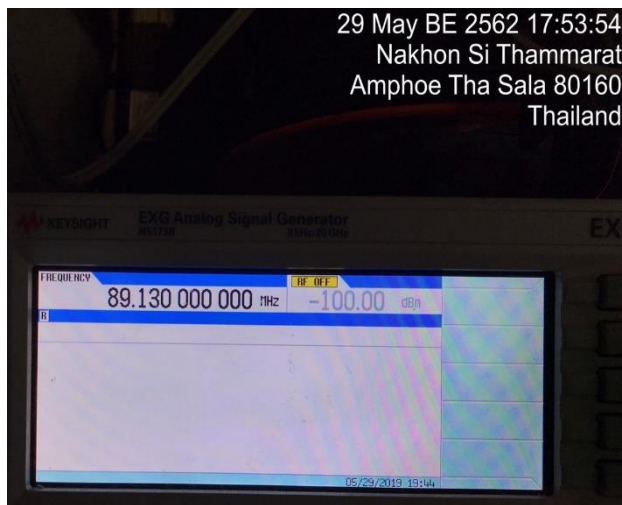
(ข) ระบบดำเนินการติดตั้งการเชื่อมกับระบบสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่



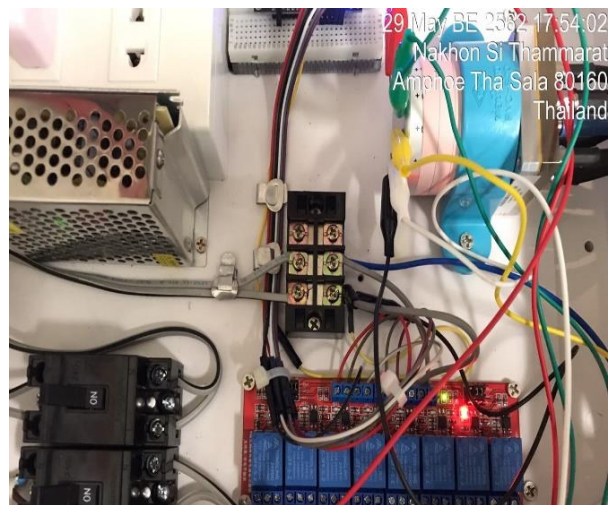
(ค) ผลการตรวจจับความถี่วิทยุก่อนใช้งานช่องสัญญาณ

รูปที่ 5.94 ผลการทำงานของระบบสังเกตการณ์สำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม.

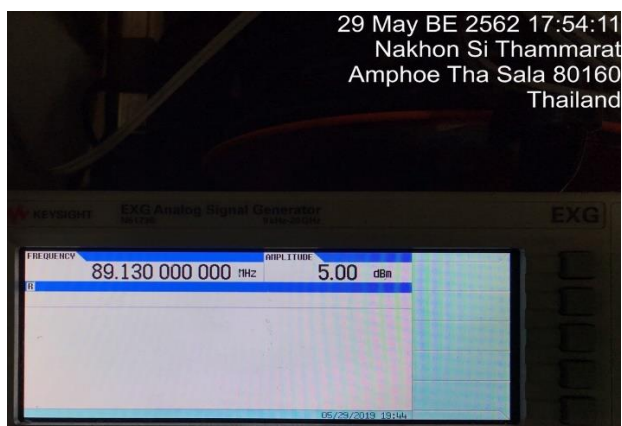
ในขั้นตอนที่ 2 แสดงผลตามรูปที่ 5.95 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 89.125 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 89.125 MHz แต่เครื่องกำเนิดสัญญาณอ่านค่าเป็น 89.130 MHz และยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.95 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ FM-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.95 (ข) (3) หลังจากช่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ FM-1 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.95 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้  $-78.65\text{dBm}$  ที่ความถี่ 89.13125 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.95 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ FM-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2



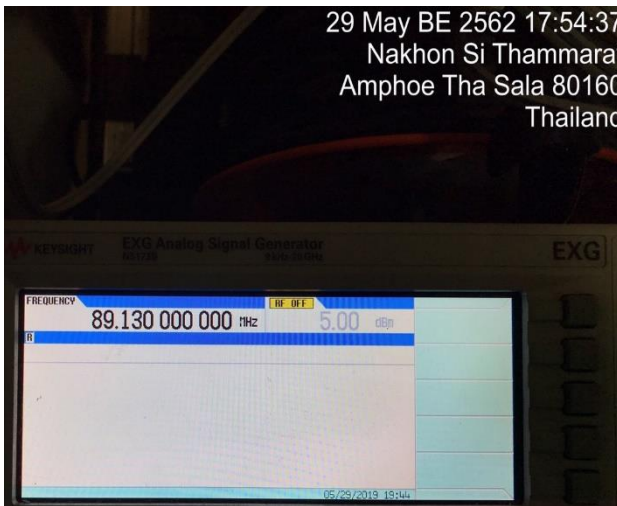
(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่งรูปที่ 5.95 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 1



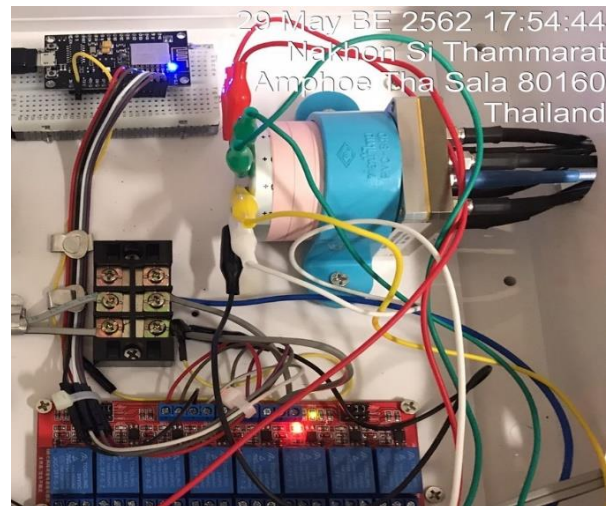
(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

- กรณีที่ 2

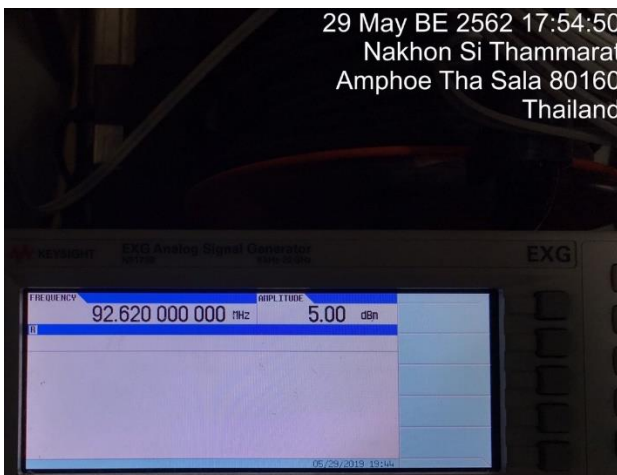
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.96 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 92.625 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 89.130 MHz เป็นค่าความถี่ 92.620 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.96 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ FM-2 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 3 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.96 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ FM-2 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.96 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -87.62dBm ที่ความถี่ 92.61875 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.96 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ FM-2 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 3



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง

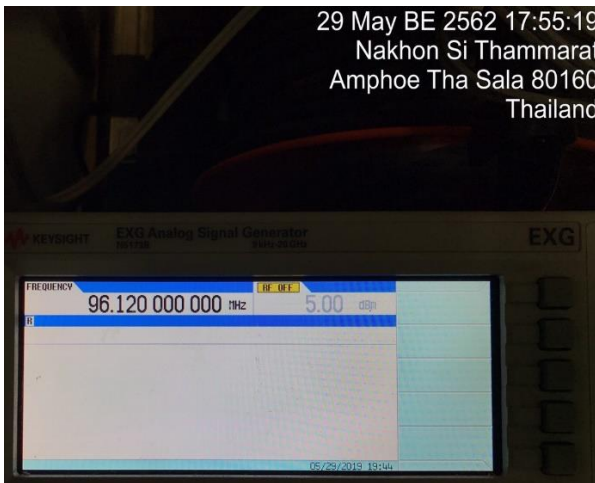


(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

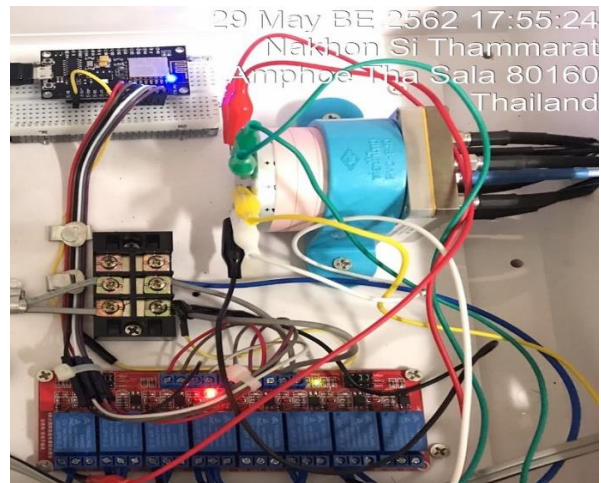
รูปที่ 5.96 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 2

- กรณีที่ 3

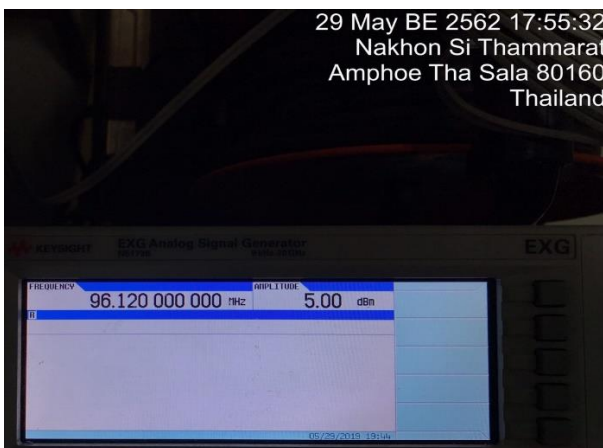
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.97 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 96.125 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 92.620 MHz เป็นค่าความถี่ 96.120 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.97 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ FM-3 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 5 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.97 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ FM-3 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.97 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -82.36dBm ที่ความถี่ 96.11875 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.97 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ FM-3 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 5



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



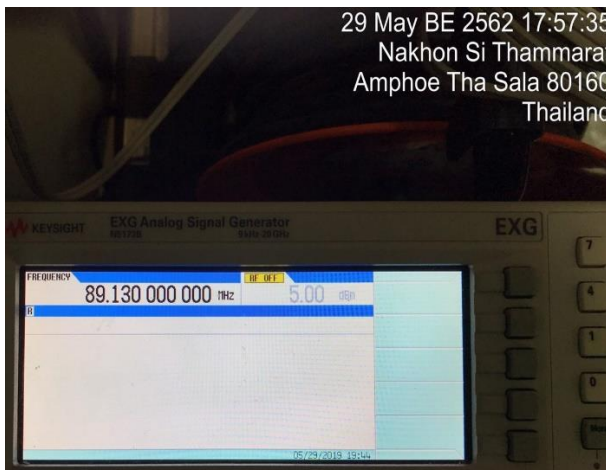
(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.97 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 3

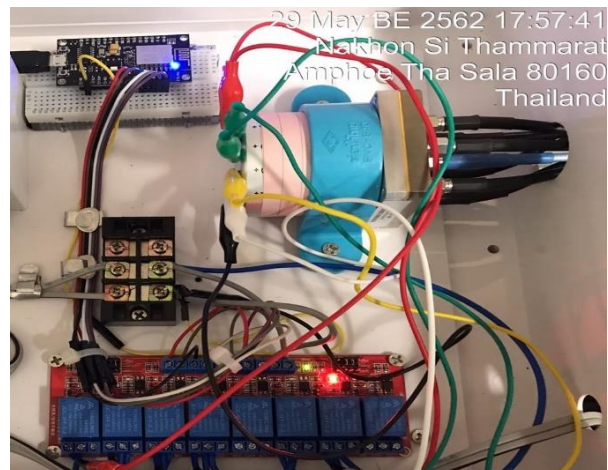


- กรณีที่ 4

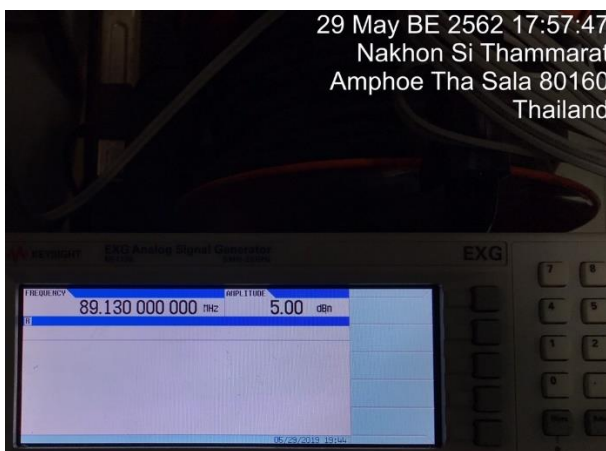
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.98 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 89.125 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 96.120 MHz เป็นค่าความถี่ 89.130 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.98 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ FM-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.98 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ FM-1 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.98 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้  $-79.616\text{dBm}$  ที่ความถี่ 89.13125 MHz (เป็นผลจากการพิจารณาค่าผลต่างระหว่าง Marker-1 กับ Marker-2: Power:  $-25.494\text{dBm}$  Freq:  $10.4875\text{MHz}$ ) และค่าของ Marker-1: Power:  $105.11\text{dBm}$  Freq:  $99.61875\text{MHz}$ ) ได้ดังรูปที่ 5.98 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ FM-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง

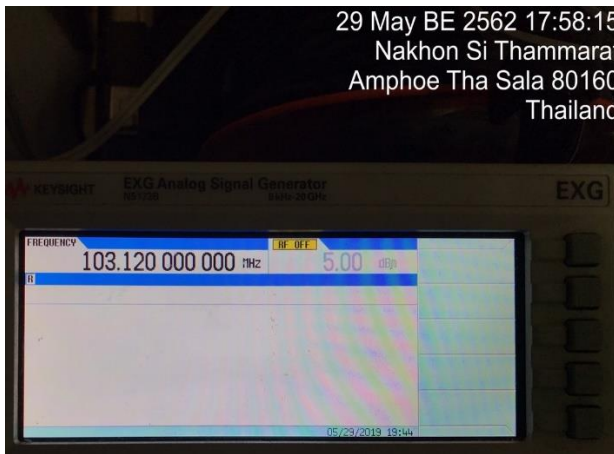


(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.98 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 4

- กรณีที่ 5

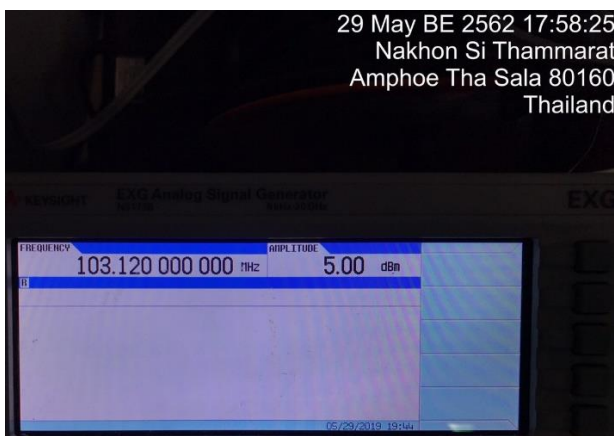
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.99 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 103.125 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 89.130 MHz เป็นค่าความถี่ 103.120 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.99 (ก) (2) การตั้งควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ FM-5 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 7 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.99 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ FM-5 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.99 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -88.8dBm ที่ความถี่ 103.11875 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.99 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ FM-5 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 7



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง

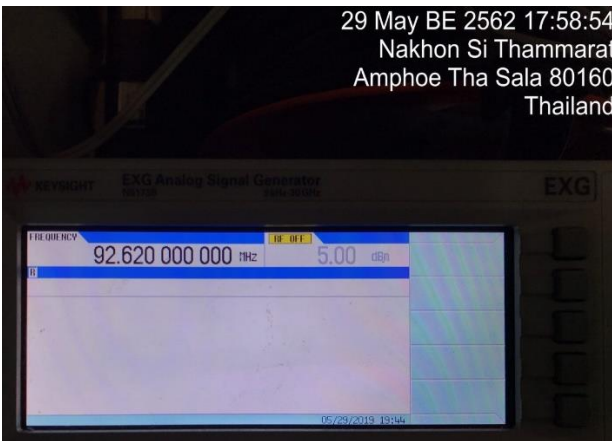


(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.99 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 5

- กรณีที่ 6

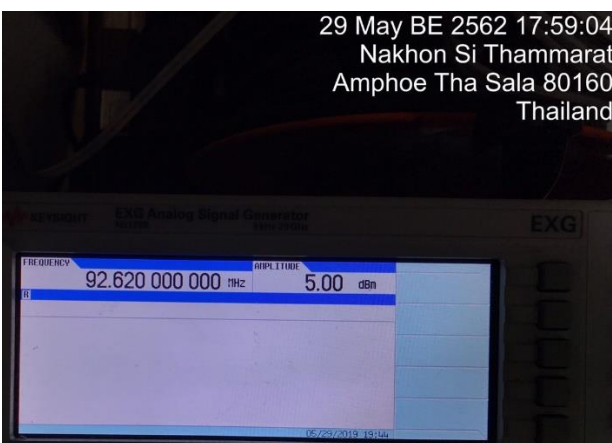
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.100 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 92.625 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 103.120 MHz เป็นค่าความถี่ 92.620 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.100 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ FM-2 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 3 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.100 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ FM-2 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.100 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -89.72dBm ที่ความถี่ 92.61875 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.100 (ง)



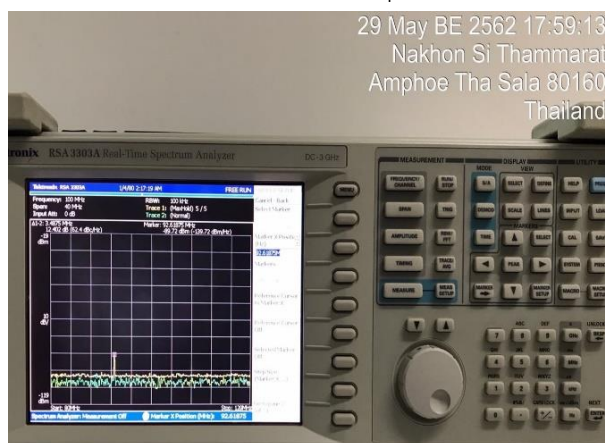
(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ FM-2 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 3



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง

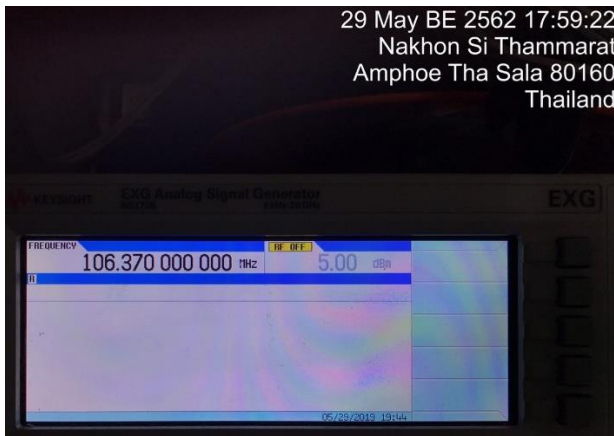


(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

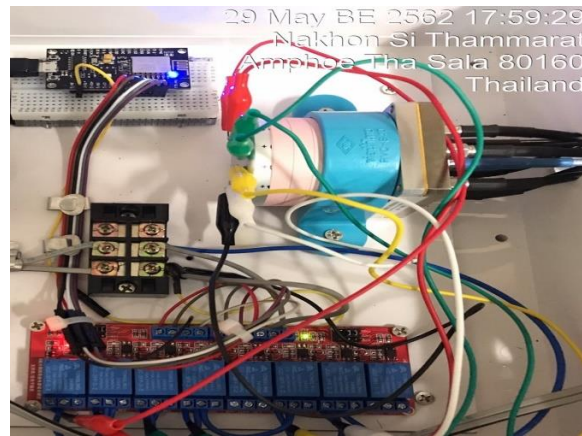
รูปที่ 5.100 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 6

- กรณีที่ 7

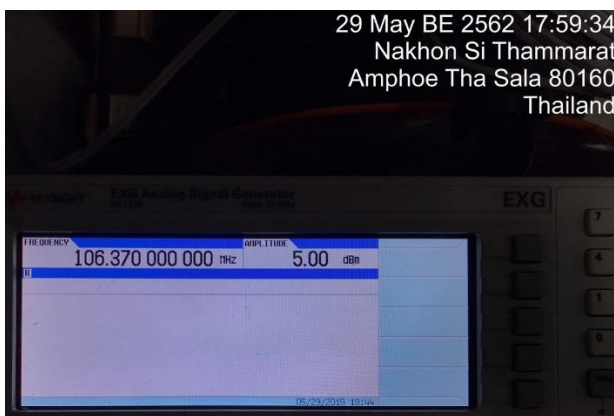
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.101 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 106.375 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 92.620 MHz เป็นค่าความถี่ 106.370 MHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.101 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ FM-6 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 8 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.101 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ FM-6 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.101 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -82.5dBm ที่ความถี่ 106.36875 MHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.101 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ FM-6 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 8



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.101 ผลการทดสอบกิจการ FM กรณีที่ 7

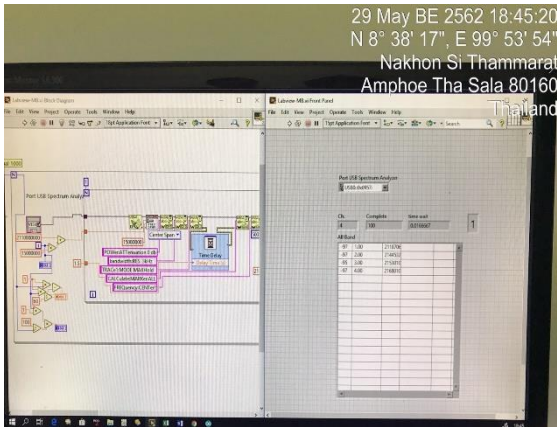
### 5.5.3.3 ผลการทดสอบระบบสำหรับกิจการโทรคมนาคม

การทดสอบระบบสำหรับกิจการโทรคมนาคม ถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ ขั้นตอนแรก ระบบสังเกตการณ์จะเริ่มตรวจจับช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2110-2170 MHz จากนั้นระบบตัดสินใจจะเลือกใช้ช่องสัญญาณ และระบบดำเนินการจะเข้าใช้งานช่องสัญญาณนั้น พร้อมควบคุมการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ ขั้นตอนที่สอง ระบบควบคุมกลางจะตัดสินใจเลือกใช้ช่องสัญญาณและปรับเปลี่ยนการใช้งานช่องสัญญาณ เพื่อแสดงผลการควบคุมการทำงานของระบบดำเนินการร่วมกับการปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานของสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่สำหรับกิจการโทรคมนาคม ให้เป็นไปตามคุณลักษณะของสายอากาศในตารางที่ 4.19 และขั้นตอนที่ 3 เป็นการประเมินผลการทำงานของระบบโดยพิจารณาจากผลการวัดกำลังคลื่นด้วยชุดตรวจวัดกำลังคลื่นวิทยุ โดยการทดสอบจะมีการปรับเปลี่ยนช่องสัญญาณแบ่งออกเป็น 6 กรณี ดังตารางต่อไปนี้

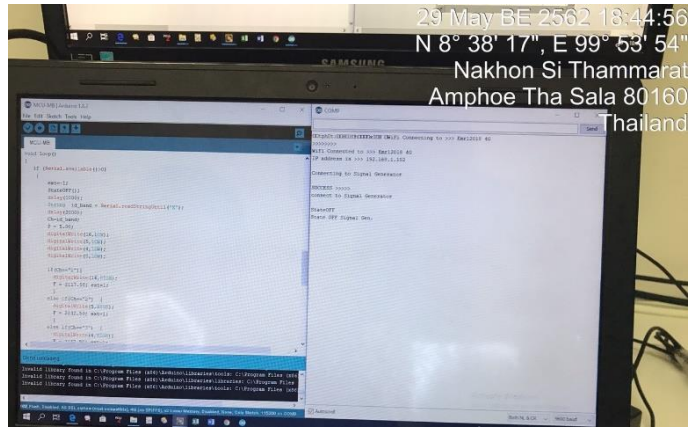
กรณีที่	ช่องสัญญาณเดิม	ช่องสัญญาณใหม่	หมายเหตุ
1	ไม่มี (เริ่มต้น)	ช่องสัญญาณที่เลือกด้วย ODL	ประเมินผลร่วมกันทั้งสองกรณี
2	ช่องสัญญาณที่เลือกด้วย ODL	ช่องสัญญาณ Mb-2	
3	ไม่มี (เริ่มต้น)	ช่องสัญญาณ Mb-2	การปรับเปลี่ยนไปใช้งาน Mb-2 อีกครั้ง เพื่อแสดงให้เห็นว่า ระบบฯ สามารถเข้าควบคุมได้ตามความต้องการของระบบควบคุมกลาง
4	ช่องสัญญาณ Mb-2	ช่องสัญญาณ Mb-3	
5	ช่องสัญญาณ Mb-3	ช่องสัญญาณ Mb-4	
6	ช่องสัญญาณ Mb-4	ช่องสัญญาณ Mb-0	

- กรณีที่ 1

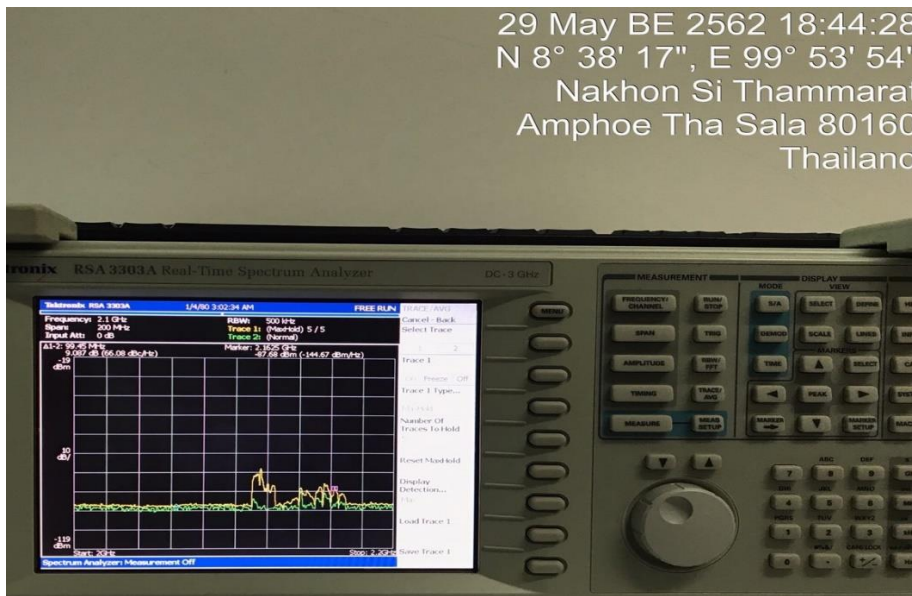
ในขั้นตอนแรก แสดงผลตามรูปที่ 5.102 ซึ่งระบบสังเกตการณ์ได้เริ่มตรวจจับการใช้งานช่องสัญญาณ และแสดงผลเพื่อระบุช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 5.102 (ก) หลังจากนั้นระบบดำเนินการจึงเริ่มเชื่อมต่อกับชุดควบคุมการทำงานสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ และรับข้อมูลการตัดสินใจจากระบบควบคุมกลางให้เข้าใช้ช่องสัญญาณที่ความถี่ 2117.5 MHz ดังแสดงในรูปที่ 5.102 (ข) แต่ระบบฯ ยังไม่เริ่มปล่อยสัญญาณจนกว่าจะได้รับคำสั่ง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการแสดงผลของชุดตรวจวัด ในรูปที่ 5.102 (ค) ซึ่งให้เห็นว่า ระดับค่ากำลังคลื่นที่ความถี่ 2162.5 MHz เท่ากับ -87.68 dBm แต่ระดับกำลังคลื่นที่ค่าความถี่ 2117.5 MHz ต่ำกว่า -100dBm



(ก) ช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งาน

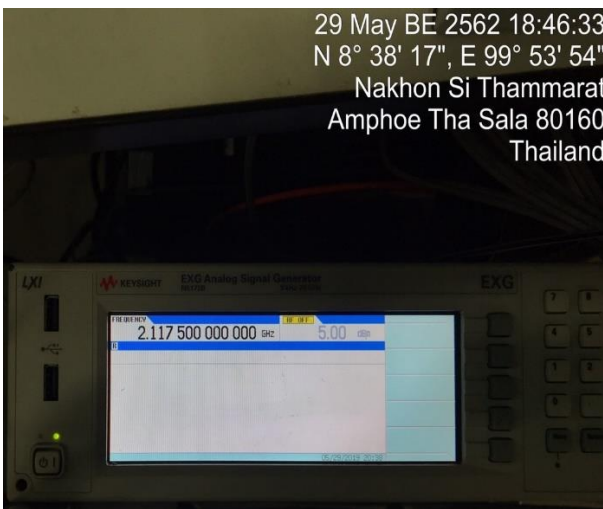


(ข) ระบบดำเนินการติดตั้งการเชื่อมกับระบบสายอากาศ  
ปรับเปลี่ยนความถี่



(ค) ผลการตรวจจับความถี่วิทยุก่อนใช้งานช่องสัญญาณ  
รูปที่ 5.102 ผลการทำงานของระบบสังเกตการณ์สำหรับกิจการโทรคมนาคม

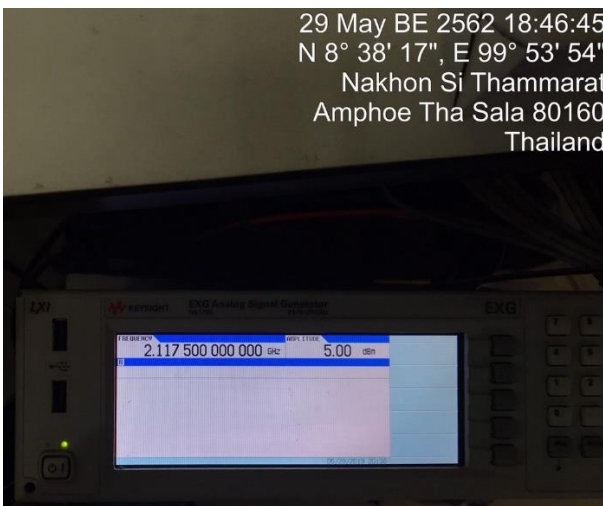
ในขั้นตอนที่ 2 แสดงผลตามรูปที่ 5.103 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2117.50 MHz เป็นลำดับดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 2.1175 GHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.103 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อกับสายอากาศ Mb-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.103 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ Mb-1 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.103 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -44.74dBm ที่ความถี่ 2.1175 GHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.103 (ง)



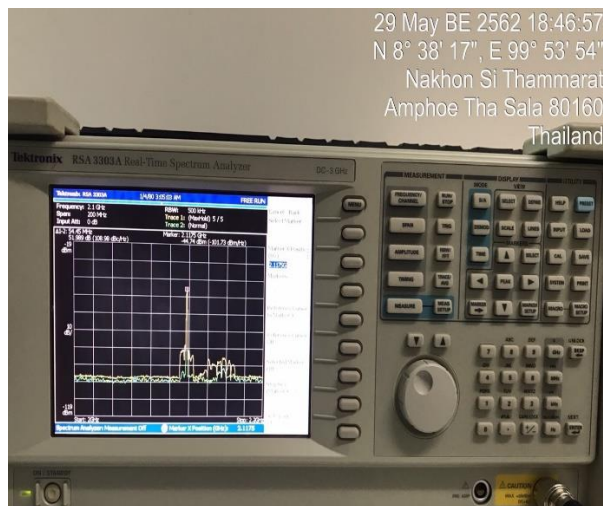
(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ Mb-1 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 2



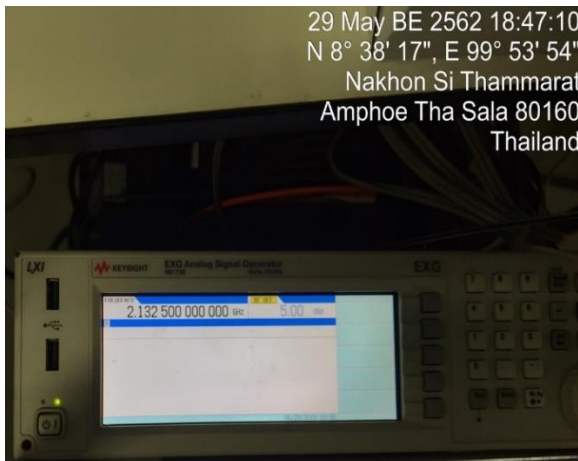
(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่งรูปที่ 5.103 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 1



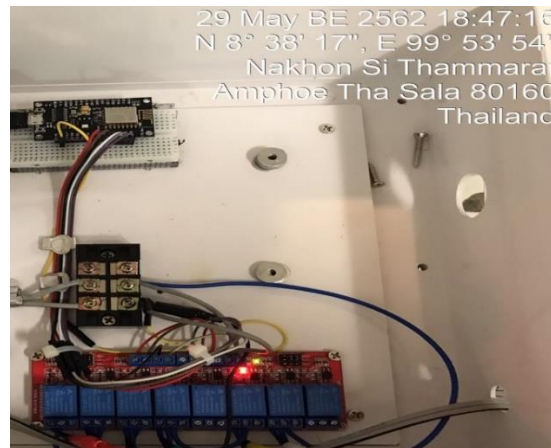
(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

- กรณีที่ 2

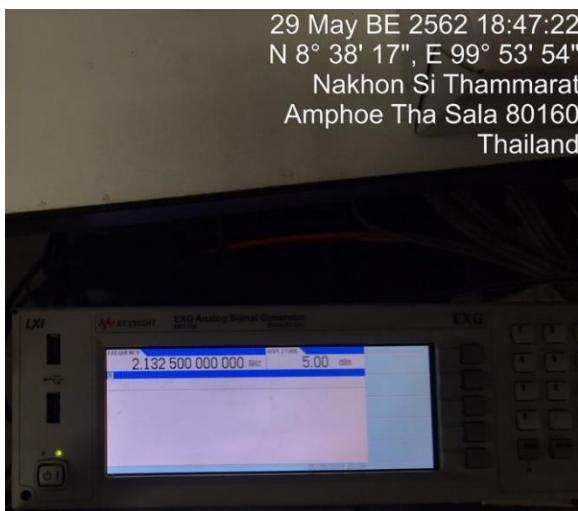
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.104 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2132.5 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 2.1175 GHz เป็นค่าความถี่ 2.1325 GHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.104 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ Mb-2 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 3 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.104 (ข) (3) หลังจากช่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ Mb-2 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.104 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -47.58dBm ที่ความถี่ 2.1325 GHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.104 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ Mb-2 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 3



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



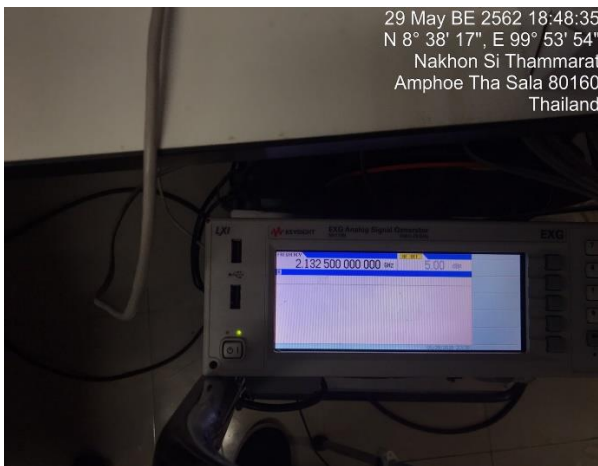
(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.104 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 2

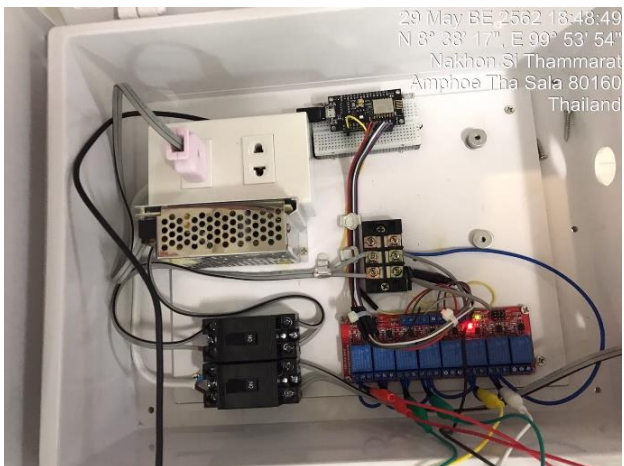


- กรณีที่ 3

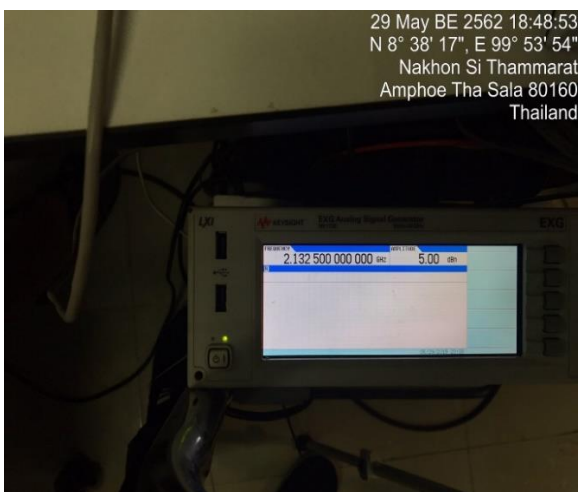
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.105 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2132.5 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ 2.1325 GHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.105 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ Mb-2 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 3 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.105 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ Mb-2 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.105 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -48.51dBm ที่ความถี่ 2.1325 GHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.105 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ Mb-2 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 3



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง

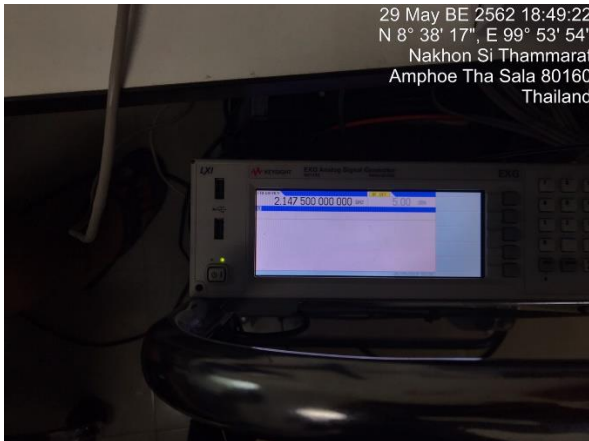


(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.105 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 3

- กรณีที่ 4

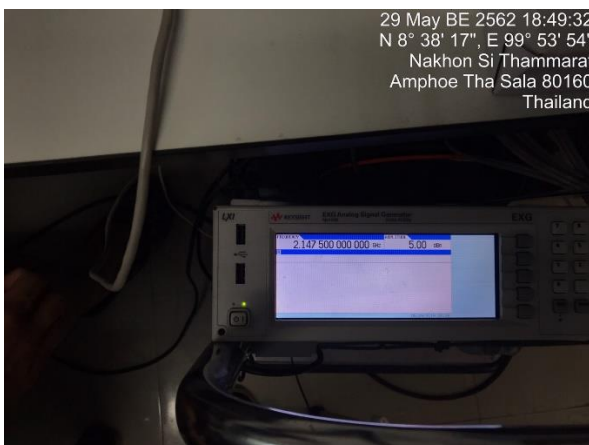
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.106 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2147.5 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 2.1325 GHz เป็นค่าความถี่ 2.1475 GHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.106 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ Mb-3 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 5 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.106 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ Mb-3 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.106 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -51.29dBm ที่ความถี่ 2.1475 GHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.106 (ง)



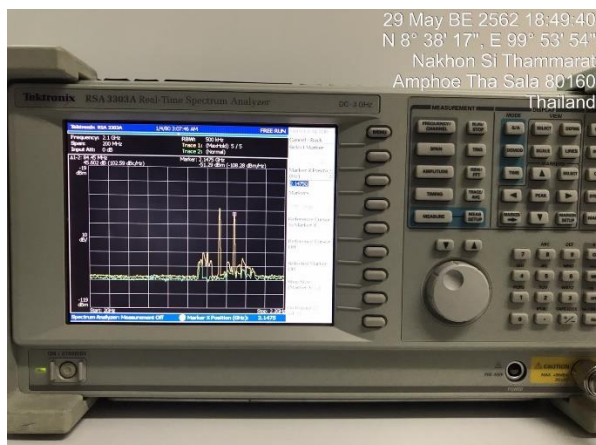
(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ Mb-3 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 5



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง

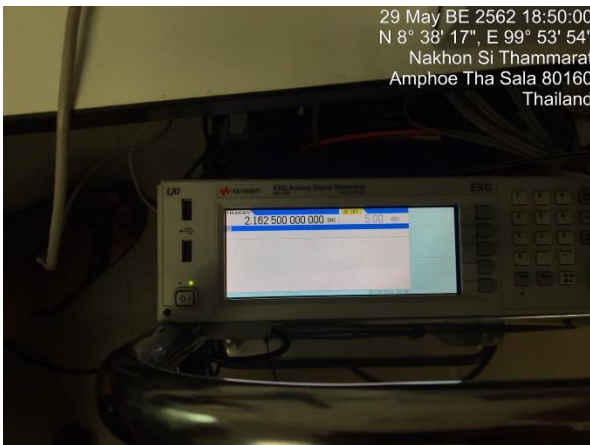


(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

รูปที่ 5.106 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 4

- กรณีที่ 5

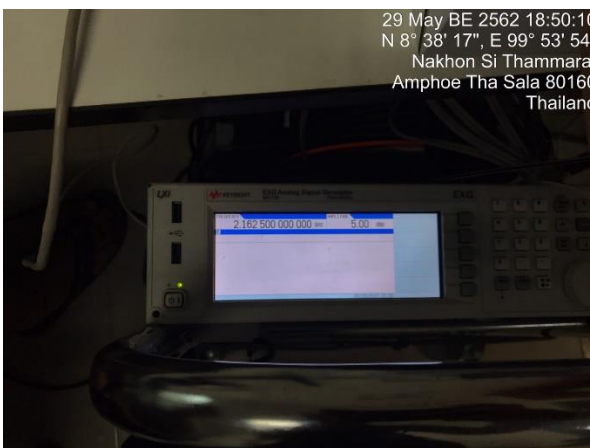
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.107 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ปล่อยคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2162.5 MHz เป็นลำดับ ดังนี้ (1) การตั้งค่าของเครื่องกำเนิดสัญญาณซึ่งกำลังปรับจากค่าความถี่ 2.1475 GHz เป็นค่าความถี่ 2.1625 GHz แต่ยังไม่ปล่อยสัญญาณ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.107 (ก) (2) การควบคุมให้สวิตช์เชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ Mb-4 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 6 (สถานะเป็น LED) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.107 (ข) (3) หลังจากหน่วงเวลาไว้ประมาณ 15 วินาที เครื่องกำเนิดสัญญาณจะถูกควบคุมให้ปล่อยสัญญาณไปยังสายอากาศ Mb-4 (สถานะเป็น “AMPLITUDE”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.107 (ค) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้ -50.06dBm ที่ความถี่ 2.1625 GHz (สถานะของ MARKER-1) ได้ดังรูปที่ 5.107 (ง)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณพร้อมเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง



(ข) ระบบดำเนินการเชื่อมต่อกับสายอากาศ Mb-4 ด้วยรีเลย์ชุดที่ 6



(ค) เครื่องกำเนิดสัญญาณทำงานเมื่อได้รับคำสั่ง

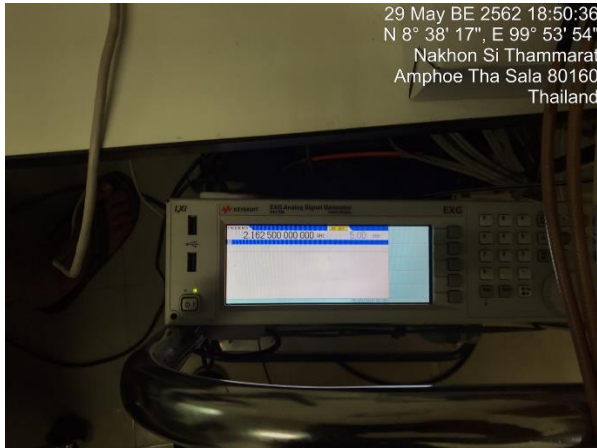


(ง) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ

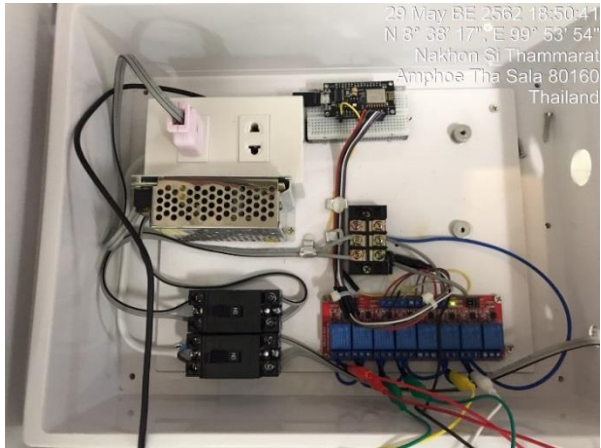
รูปที่ 5.107 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 5

- กรณีที่ 6

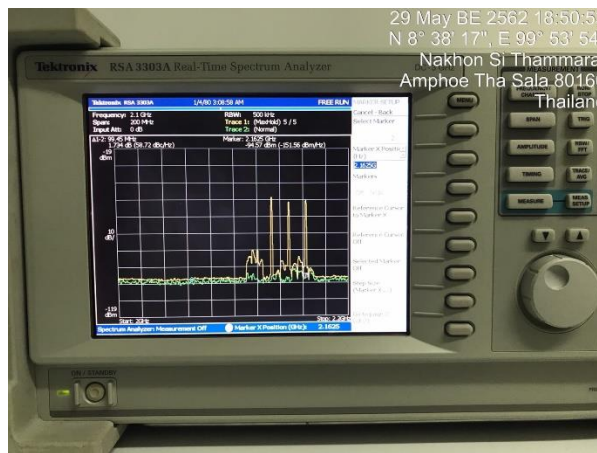
ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.108 โดยจะเริ่มจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งระบบดำเนินการได้รับคำสั่ง และเข้าควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้สายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่หยุดปล่อยคลื่นวิทยุ (สถานะเป็น “RF OFF”) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.108 (ก) และการควบคุมให้สวิตซ์ยังการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องกำเนิดสัญญาณกับสายอากาศ (สถานะเป็น LED ดับทั้งหมด) ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 5.108 (ข) และในขั้นตอนที่ 3 แสดงผลการตรวจวัดกำลังคลื่นได้  $-94.57\text{dBm}$  ที่ความถี่  $2.1625\text{ GHz}$  ได้ดังรูปที่ 5.108 (ค)



(ก) เครื่องกำเนิดสัญญาณหยุดปล่อยสัญญาณ



(ข) ระบบดำเนินการหยุดเชื่อมต่อกับสายอากาศ



(ค) ชุดตรวจวัดแสดงค่ากำลังคลื่นวิทยุ  
รูปที่ 5.108 ผลการทดสอบกิจการ Mb กรณีที่ 6

## บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุป

โครงการวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่สำหรับระบบวิทยุรู้คิด เพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งได้ดำเนินงานตามวัตถุประสงค์ของโครงการ ดังนี้

**ส่วนแรก** ได้ศึกษาข้อมูลจำเพาะของสายอากาศที่มีการใช้งานจริงในระบบวิทยุกระจายเสียง ระบบโทรทัศน์ดิจิทัล และระบบการสื่อสารไร้สาย เช่น ที่ตั้งสถานี จำนวนสถานีส่งโดยแยกเป็นประเภทการอนุญาตให้ใช้งาน เป็นต้น โดยใช้วิธีการสำรวจและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากสำนักงาน กสทช. เขต 12 (จังหวัดนครศรีธรรมราช) และสถานีส่งที่อยู่ในเขตพื้นที่จังหวัดนครศรีธรรมราช ผลการสำรวจข้อมูลนั้นได้รับจากสถานีมากกว่า 20 สถานี โดยส่วนใหญ่เป็นสถานีส่งคลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็มที่ครอบคลุมทุกประเภทการขออนุญาตใช้ช่องสัญญาณ

ในแต่ละสถานีส่งคลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็ม เจ้าหน้าที่ผู้ดูแลสามารถให้ข้อมูลจำเพาะของสายอากาศเพียงบางส่วน เนื่องจากเจ้าหน้าที่ประจำสถานีส่งมักเป็นผู้ใช้งานเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถให้ข้อมูลเชิงเทคนิคได้มากนัก และวิธีการซ่อมบำรุงระบบของแต่ละสถานีนั้น มักใช้บริการช่างอิเล็กทรอนิกส์ผู้เชี่ยวชาญจากภายนอก อย่างไรก็ตาม แต่ละสถานีพยายามให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์สำหรับการสืบค้นเพิ่มเติมจนผู้วิจัยมีแนวทางการกำหนดคุณลักษณะของสายอากาศได้โดยง่าย

นอกจากคณะผู้วิจัยจะได้รับข้อมูลจำเพาะของสายอากาศจากแต่ละสถานีส่งระหว่างการสำรวจพื้นที่หน้าจริงแล้วนั้น ยังได้รับข้อมูลสำหรับการศึกษาความเป็นไปได้ของการเกิดสัญญาณมอดูเลตระหว่างกันและทำให้เกิดการรบกวนการกระจายสัญญาณของบางสถานีด้วย ผลการศึกษานี้ จึงทำให้ทราบว่า ตำแหน่งที่ตั้งและช่วงความถี่ที่ใช้งานของแต่ละสถานีส่ง เป็นปัจจัยสำคัญต่อการเกิดปัญหาการมอดูเลตระหว่างกัน และมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถวิเคราะห์บริเวณที่เกิดสัญญาณรบกวนโดยใช้ผลการวัดระดับคลื่นวิทยุร่วมด้วย

**ส่วนที่สอง** เป็นส่วนของการออกแบบและสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ โดยได้เริ่มจากการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ที่เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานสำคัญในการพิจารณาออกแบบสายอากาศ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การสะท้อน อัตราขยาย แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โพลาริเซชัน เป็นต้น ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวล้วนส่งผลต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ของสายอากาศ ในขั้นต้นเมื่อกำหนดคุณลักษณะพื้นฐานที่ต้องการของพารามิเตอร์ได้แล้ว ทางคณะผู้วิจัยได้นำเสนอโครงสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ที่อาศัยหลักการแมกนีโตอิเล็กทริกไดโพล ซึ่งมีข้อดี คือ อัตราขยายสูง และมีความสมมาตรของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อออกแบบและสร้างเพื่อทดสอบ

ประสิทธิภาพของสายอากาศ พบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ดี ค่าอัตราขยายสูง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคงที่ตลอดช่วงความถี่ แต่สายอากาศดังกล่าวมีข้อด้อย คือ มีน้ำหนักมากและมีโครงสร้างที่ต้านทานแรงลม ซึ่งยากต่อการนำไปติดตั้งเพื่อใช้งานจริง ทางคณะวิจัยจึงหาวิธีการย่อขนาดของโครงสร้างของสายอากาศดังกล่าว แต่พบว่าการลดพื้นที่ผิวสัมผัสของสายอากาศ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ดังนั้นจึงได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างสายอากาศเป็นสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่แบบไดโพลรูปโบริวที่มีตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง ซึ่งมีข้อดี คือ อัตราขยายสูง ง่ายต่อการปรับเปลี่ยนความถี่ น้ำหนักเบา และโครงสร้างไม่ต้านทานแรงลม ซึ่งจากการออกแบบ สร้าง และทดสอบสายอากาศดังกล่าวพบว่า ด้วยโครงสร้างสายอากาศที่ปรับเปลี่ยนความถี่ด้วยการใช้สวิตช์ตัดต่อเส้นทางการไหลของกระแสบนตัวสายอากาศ ทำให้สายอากาศมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่ดี นอกจากนี้ในส่วนของตัวสะท้อนคลื่นด้านหลัง ยังมีขนาดใหญ่และไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานจริง

ดังนั้นทางคณะวิจัยเลือกใช้โครงสร้างสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่แบบไดโพลรูปโบริวหลายอิลิเมนต์วางเรียงซ้อนกัน แต่ละอิลิเมนต์เชื่อมต่อโดยตรงกับอุปกรณ์สวิตช์ทางกลในการเลือกให้สายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ทำงานสำหรับการปรับเปลี่ยนความถี่ แทนที่โครงสร้างเดิมที่ใช้สวิตช์ทางไฟฟ้าตัดต่อเส้นทางการไหลของกระแสบนผิวโลหะของสายอากาศในการปรับเปลี่ยนความถี่ ซึ่งข้อดีของการเลือกใช้โครงสร้างดังกล่าว คือ สายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ทำงานอิสระต่อกัน สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ที่ต้องการ และมีการแมตซ์ซึ่งที่ดี นอกจากนี้การวางโครงสร้างสายอากาศแต่ละอิลิเมนต์ซ้อนกันในระยะห่างที่เหมาะสมแทนการใช้ตัวสะท้อนคลื่น ทำให้สายอากาศมีอัตราขยายที่สูงขึ้น มีการชี้ทิศทางไปข้างหน้า ซึ่งจากการออกแบบ สร้าง และทดสอบสายอากาศรูปโบริวที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่ได้ 3 สายอากาศ ที่ทำงานสำหรับกิจการกระจายเสียง เอฟ.เอ็ม. กิจการโทรทัศน์ดิจิทัล และกิจการโทรคมนาคม (Mobile 4G) พบว่าสายอากาศสามารถมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ดี แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยายเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

**ส่วนที่สาม** เป็นการจำลองระบบวิทยุรู้คิด เพื่อใช้งานร่วมกับสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้ คณะผู้วิจัยได้สร้างระบบวิทยุรู้คิด โดยประกอบด้วยระบบหลัก 3 ระบบ คือ ระบบสังเกตการณ์ ระบบตัดสินใจ และระบบดำเนินการ

ระบบสังเกตการณ์ ถูกจำลองด้วยเครื่องวิเคราะห์แถบความถี่และคอมพิวเตอร์ โดยได้ออกแบบและสร้างชุดโปรแกรมคำสั่ง เพื่อควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งสามารถกำหนดช่วงความถี่ในการสังเกตหรือเฝ้าติดตามการใช้งานในแต่ละช่วงเวลาได้ รวมทั้งสามารถเก็บบันทึกข้อมูลได้ ยิ่งไปกว่านั้น ชุดโปรแกรมสามารถ

เข้าถึงแถบความถี่คุม (Guard band) ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสังเกตการณ์ จึงสามารถทำได้โดยง่ายด้วยการการพัฒนาชุดโปรแกรมคำสั่งและสร้างฐานข้อมูลสิ่งแวดล้อม ระบบตัดสินใจ ถูกจำลองด้วยชุดโปรแกรมคำสั่ง เพื่อนำเกณฑ์การตัดสินใจเข้าใช้งานช่องสัญญาณในแต่ละกรณี เกณฑ์การตัดสินใจจึงกลายเป็นกลไกสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมระบบ คณะผู้วิจัยได้สร้างเกณฑ์อย่างง่ายขึ้นเพื่อให้ระบบวิทยุรู้คิดตัดสินใจเข้าใช้งานช่องสัญญาณ เช่น การใช้ช่องสัญญาณที่ไม่มีการใช้งานและมีค่ากำลังคลื่นต่ำที่สุด เป็นต้น และระบบดำเนินการ ถูกจำลองด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์และเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยได้ออกแบบและสร้างชุดโปรแกรมคำสั่ง เพื่อควบคุมการทำงานของระบบจากระยะไกล ซึ่งสามารถกำหนดค่าความถี่และระดับกำลังคลื่น เพื่อใช้งานแต่ละช่องสัญญาณตามผลการตัดสินใจของระบบได้ รวมทั้ง ยังสามารถเข้าควบคุมสวิตซ์ตัดต่อวงจรของชุดสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่ได้

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ผลการดำเนินงานของคณะผู้วิจัย ทำให้เกิดแนวทางการพัฒนาและการแก้ปัญหาในการดำเนินงานของกิจการวิทยุกระจายเสียง โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

**ส่วนแรก** การซ่อมบำรุงและควบคุมอุปกรณ์ส่งสัญญาณของเจ้าหน้าที่แต่ละสถานี ยังมีประสิทธิภาพน้อย จึงจำเป็นต้องมีระบบและกลไกในการสนับสนุนให้เจ้าหน้าที่เหล่านี้ มีความรู้และความสามารถเบื้องต้น เพื่อดำเนินการเข้าใช้งานช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการจัดอบรมให้ความรู้อย่างทั่วถึง และจัดหาผู้เชี่ยวชาญเข้าซ่อมบำรุงและควบคุมอุปกรณ์ส่งสัญญาณประจำสถานีอย่างต่อเนื่อง เพื่อประโยชน์ของผู้ดำเนินกิจการกระจายเสียงของแต่ละสถานีและผู้ดูแลการใช้ช่องสัญญาณ

**ส่วนที่สอง** การติดตามการเข้าใช้งานช่องสัญญาณโดยหน่วยงานผู้รับผิดชอบนั้น สามารถประยุกต์ใช้ระบบสังเกตการณ์ของระบบวิทยุรู้คิด เพื่อการตรวจวัดสัญญาณได้ในแต่ละช่วงเวลา และการเก็บบันทึกผลการใช้งานช่องสัญญาณอย่างเป็นระบบ รวมทั้ง ยังสะดวกต่อการปรับเปลี่ยนตำแหน่งการตรวจวัดสัญญาณด้วย เนื่องจากชุดโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบสังเกตการณ์ สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ จึงทำให้ลดภาระการทำงานของเจ้าหน้าที่ได้อย่างมาก

**ส่วนที่สาม** การตัดสินใจให้ใช้งานช่องสัญญาณ ระบบตัดสินใจสามารถควบคุมการใช้ช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ข้อมูลสังเกตการณ์ที่ได้รับในช่วงเวลานั้นๆ ประกอบการตัดสินใจ เช่น ข้อมูลการเกิดสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ ข้อมูลระเบียบการใช้ช่องสัญญาณ และนโยบายการใช้ช่องสัญญาณในแต่ละช่วงเวลา เป็นต้น รวมทั้ง การเข้าควบคุมการทำงานของสถานีส่งสัญญาณจากระยะไกลได้ในอนาคต

## บรรณานุกรม

- [1] B. Razavi, RF Microelectronics, Prentice Hall, 1998.
- [2] LBA Group. RF interference analysis & intermodulation studies. [Online]. Available: <https://www.lbagroup.com/services/intermodulation-studies-and-rf-interference-analysis>.
- [3] Softwright LLC. Finding, solving, and preventing intermodulation problems. [Online]. Available: [http://www.softwright.com/faq/support/intermod\\_finding\\_solving.html](http://www.softwright.com/faq/support/intermod_finding_solving.html).
- [4] J. P. Borrego and N. B. Carvalho, "Harmful interferences to aeronautical radio communications arising from passive intermodulation," in Proc. International Union of Radio Science.
- [5] Urgen Communications. Solving intermodulation interference. [Online]. Available: [http://urgentcomm.com/techspeak/radio\\_solving\\_intermodulation\\_interference](http://urgentcomm.com/techspeak/radio_solving_intermodulation_interference).
- [6] Report ITU-R SM.2021. Production and mitigation of intermodulation products in the transmitter. [Online]. Available: [http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2021-2000-PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2021-2000-PDF-E.pdf)
- [7] C-PMSE. (2015, Aug. 8). A research project to improve the frequency utilization and coexistence for PMSE systems by cognitive methods. [Online]. Available: <http://cpmse.research-project.de/index.php/en>
- [8] Upmal and Lackey, "SPEAKeasy, the Military Software Radio," *IEEE Communications Magazine* (NY: IEEE Press), 1995.
- [9] Joseph Mitola III, "Cognitive Radio: Agent-based control of software radios," Proc. of 1st Karlsruhe Workshop on Software Radios, pp, 35-43, Karlsruhe, Germany, March 2000.
- [10] A. Wiesler and F. Jondral, "Software radio structure for second generation mobile communications systems," *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference* (NY: IEEE Press), 1998. (Not available)



- [11] A. Wiesler, R. Machauer, and F. Jondral, "Comparison of GMSK and linear approximated GMSK for software radio," *Proc. of ISSTA5, (NY: IEEE Press)*, 1998. (Not available)
- [12] J. Meggers, and et al, "Mobile Multimedia for small Handheld Devices," *Proc. ACTS Mobile Summit, (Rhodes, Greece: The European Commission)*, June 1998. (Not available)
- [13] H. W. Beadle, G. Q. Maguire, and M. T. Smith, "Environment Aware Computing and Communications Systems," ([www.kth.edu](http://www.kth.edu): Royal Technical Institute), 1998. (Not available)
- [14] M. Kloc, S. Riess, J. Brendel, S. Linz, M. Gardill, R. Weigel, and G. Fischer, "Let's Make Them Cognitive Cognitive Radio Technology Applied to Professional Wireless Microphone Systems," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 17, no. 1, pp. 70-78, 2016.
- [15] Ettus Research. (2015, Aug. 2) Product categories. [Online]. Available: <http://www.ettus.com/product>
- [16] Matchstick—Handheld Reconfigurable RF Transceiver Datasheet, EPIQ Solution, Verona, WI, 2013.
- [17] USB-SA44B Spectrum Analyzer, Signal Hound, La Center, WA, 2015.
- [18] Joseph Mitola III, "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications," *Proc. of 6th International Workshop on Mobile Communications*, November 1999.
- [19] Nick Neronponte, (Cambridge, MA: MIT Multimedia Laboratory) circa 1990.
- [20] D. H. Schaubert, F. G. Farrar, S. T. Hayes, and A. R. Sindoris, "Frequency-agile polarization diverse microstrip antennas and frequency scanned arrays," *US Patent 4,367,474, to the United States of America as represented by the Secretary of the Army*, Washington D.C.1983.
- [21] J. K. Smith, "Reconfigurable program (RECAP)," *DARRA*, 1999.
- [22] S. Yang, C. Zhang, H. Pan, A. Fathy, and V. Nair, "Frequency-reconfigurable antennas for multiradio wireless platforms," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 10, pp. 66- 83, Feb. 2009.

- [23] A-F. Sheta and S. F. Mahmoud, "A widely tunable compact patch antenna," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 40-42, 2008.
- [24] A. C. K. Mak, C. R. Rowell, R. D. Murch, and C-L. Mak, "Reconfigurable multiband antenna designs for wireless communication devices," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 7, pp. 1919-1928, Jul. 2007.
- [25] M. Ali, A. T. M. Sayem, and V. K. Kunda, "A reconfigurable stacked microstrip patch antenna for satellite and terrestrial links," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 56, no. 2, pp. 426-435, Mar. 2007.
- [26] S. V. Shynu, G. Augustin, C. K. Aanandan, P. Mohanan, and K. Vasudevan, "C- shaped slot loaded reconfigurable microstrip antenna," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 6, pp. 316-318, Mar. 2006.
- [27] N. Behdad and K. Sarabandi, "Dual-band reconfigurable antenna with a very wide tunability range," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 2, pp. 409-416, Feb. 2006.
- [28] G. H. Huff and J. T. Bernhard, "Frequency reconfigurable CPW-fed hybrid folded slot/slot dipole antenna," in *Proc. IEEE/ACES Int. Conf. Wirel. Comm. Appl. Comp. Electromag.*, pp. 574-577, Apr. 2005.
- [29] S. Kawasaki and T. Itoh, "A slot antenna with electronically tunable length," in *Proc. IEEE/URSI Int. Symp. Antennas Propag.*, vol. 1, pp. 130-133, Jun. 1991.
- [30] T. Wu, R. L. Li, S. Y. Eom, S. S. Myoung, K. Lim, J. Laskar, S. I. Jeon, and M. M. Tentzeris, "Switchable quad-band antennas for cognitive radio base station applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 5, pp. 1468-1476, May 2010.
- [31] M. R. F. Hamid, P. Gardner, P. S. Hall, and F. Ghanem, "Switched band vivaldi antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 5, pp. 1472-1480, May 2011.
- [32] L. M. Feldner, C. T. Rodenbeck, C. G. Christodoulou, and N. Kinzie, "Electrically small frequency-agile PIFA-as-a-package for portable wireless devices," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 11, pp. 3310-3319, Nov. 2007.
- [33] L. Ge and K. M. Luk, "Frequency-reconfigurable low-profile circular monopolar patch antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 7, pp. 3443-3449, Jul. 2014.

- [34] L. Ge and K. M. Luk, "A band-reconfigurable antenna based on directed dipole," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 1, pp. 64-71, Jan. 2014.
- [35] F. Canneva, J. -M Ribero, and R. Staraj, "Reconfigurable meander antenna for DVB-H band," *Antenna Technology (iWAT), 2010 International Workshop*, pp. 1-4, 2010.
- [36] F. Canneva, F. Ferrero, J. -M Ribero, and R. Staraj, "Reconfigurable miniature antenna for DVB-H standard," *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), IEEE*, pp. 1-4, 2010.
- [37] Alan Dick. AN INTRODUCTION TO BROADCAST TRANSMITTING ANTENNAS. [Online]. Available: <http://www.alandickbroadcast.com/Engineering%20Data/INTRO%20TO%20ANTENNAS.pdf>.
- [38] H. E. Gihring. 14 antennas for television broadcast [Online]. Available: <http://www.americanradiohistory.com/Archive-NAB-Engineering/NAB-6th-Edition/TV-Antennas-NAB-engineering-Handbook-6th-Edition.pdf>
- [39] FM broadcasting in the United States [Online]. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/FM\\_broadcasting\\_in\\_the\\_USA](http://en.wikipedia.org/wiki/FM_broadcasting_in_the_USA).
- [40] วิทยุกระจายเสียงในประเทศไทย [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/วิทยุกระจายเสียงในประเทศไทย>.
- [41] Bandwidth and other technical matters in FM broadcasting Factors affecting FM quality [Online]. Available: <http://www.axino-tech.co.nz/>
- [42] R. G. MEDHURST and B.Sc, "Harmonic Distortion of Frequency-modulated waves by linear networks" *Proceedings of the IEE - Part III: Radio and Communication Engineering (Volume:101, Issue: 71)*, Page(s): 171 – 181, 1954.
- [43] Y. Tawk, M. Bkassiny, G. El-Howayek, S. K. Jayaweera, K. Avery, and C. G. Christodoulou, "Reconfigurable front-end antennas for cognitive radio applications," *IET Microw. Antennas Propag.*, Vol. 5, no. 8, pp. 985-992, Jun. 2011.
- [44] C. G. Christodoulou, "Cognitive radio: the new frontier for antenna design," *IEEE Antennas Propag. Soc. Feature Artic.*, 2009.

- [45] N. Haider, D. Caratelli, and A. G. Yarovoy, "Recent developments in reconfigurable and multiband antenna technology," *Int. Journal Antennas Propag.*, vol. 2013.
- [46] S. Yang, C. Zhang, H. Pan, A. Fathy, and V. Nair, "Frequency-reconfigurable antennas for multi radio wireless platforms," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 10, pp. 66-83, Feb. 2009.
- [47] A-F. Sheta and S. F. Mahmoud, "A widely tunable compact patch antenna," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 40-42, 2008.
- [48] A. C. K. Mak, C. R. Rowell, R. D. Murch, and C-L. Mak, "Reconfigurable multiband antenna designs for wireless communication devices," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 7, pp. 1919-1928, Jul. 2007.
- [49] M. Ali, A. T. M. Sayem, and V. K. Kunda, "A reconfigurable stacked microstrip patch antenna for satellite and terrestrial links," *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, vol. 56, no. 2, pp. 426-435, Mar. 2007.
- [50] S. V. Shynu, G. Augustin, C. K. Aanandan, P. Mohanan, and K. Vasudevan, "C-shaped slot loaded reconfigurable microstrip antenna," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 6, pp. 316-318, Mar. 2006.
- [51] N. Behdad and K. Sarabandi, "Dual-band reconfigurable antenna with a very wide tunability range," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 2, pp. 409-416, Feb. 2006.
- [52] G. H. Huff and J. T. Bernhard, "Frequency reconfigurable CPW-fed hybrid folded slot/slot dipole antenna," in *Proc. IEEE/ACES Int. Conf. Wirel. Comm. Appl. Comp. Electromag.*, pp. 574-577, Apr. 2005.
- [53] S. Kawasaki and T. Itoh, "A slot antenna with electronically tunable length," in *Proc. IEEE/URSI Int. Symp. Antennas Propag.*, vol. 1, pp. 130-133, Jun. 1991.
- [54] A. Ramadan, M. Al-Jusseini, Y. Tawk, K. Y. Kabalan, and A. El-Hajj, "A novel frequency/ pattern- reconfigurable microstrip antenna for WLAN applications," *European Con. Antennas Propag. (EuCAP 2010)*, Apr. 2010.
- [55] W. Lee, H. Kim, and Y. J. Yoon, "Reconfigurable slot antenna with wide bandwidth," *IEEE Int. Sym. Antennas Propag. Dig.*, pp. 3063-3066, Jul. 2006.

- [56] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Patch antennas with switchable slots (PASS) in wireless communications: concepts, designs, and application," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 13-29, Apr. 2005.
- [57] D. Peroulis, K. Sarabandi, and L. P. B. Katehi, "Design of reconfigurable slot antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-56, no. 4, pp. 645-654, Feb. 2005.
- [58] B. A. Cetiner, G. R. Crusats, L. Jofre, and N. Biyikh, "RF MEMS integrated frequency reconfigurable annular slot antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-58, no. 3, pp. 626-632, Mar. 2010.
- [59] R. K. Gupta, U. C. Sharma, P. Ayanu, and G. Kumar, "MEMS based reconfigurable dual band antenna," *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 50, no. 6, pp. 1570-1575, Jun. 2008.
- [60] O. Kivekas, J. Ollikainen, and P. Vainikainen, "Tunable internal antenna for mobile phones," in *Proc. 12th int. JINA*, pp. 53-56, Nov. 2002.
- [61] จังหวัดนครศรีธรรมราชไทย [Online]. Available:<https://th.wikipedia.org/wiki/จังหวัดนครศรีธรรมราช>.
- [62] สถานีฐาน [Online]. Available:<http://www.trendy2.mobi/2014/03/3g-base-station/>
- [63] ตารางกำหนดคลื่นความถี่แห่งชาติ (พ.ศ. 2558) ตามประกาศของสำนักงาน กสทช.
- [64] แผนการกำหนดและจัดสรรคลื่นความถี่ใหม่ คณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ พ.ศ. 2553
- [65] สายอากาศ [Online]. Available:<http://www.jampro.com>
- [66] สายอากาศ [Online]. Available:<http://m.huawei.com>
- [67] ศูนย์ข้อมูลทางแผนที่ กรมแผนที่ทหาร. (2543). ดัชนีแผนที่ชุด L7018 มาตรฐาน 1:50000. สืบค้นจาก <http://www.rtsd.mi.th/gps/17018.html> [25 พฤษภาคม 2559]
- [68] A. Clavin, "A new antenna feed having equal E- and H-plane patterns," *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-2, pp. 113 -119, 1954.
- [69] A. Clavin, D. A. Huebner, and F. J. Kilburg, "An improved element for use in array antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-22, no. 4, pp. 521 - 526, Jul. 1974.
- [70] K. M. Luk and H. Wong, "A new wideband unidirectional antenna element," *Int. J. Microw. Opt. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 35 - 44, 2006.

- [71] K. M. Luk and H. Wong, "A complementary wideband antenna," U.S. Patent No. 11/373, 518, Mar. 10, 2006.
- [72] K. M. Luk and B. Q. Wu, "A broadband dual-polarized magneto-electric dipole antenna with simple feeds," IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett., vol. 8, pp. 60 - 63, 2009.
- [73] K. M. Luk and B. Q. Wu, "A magneto-electric dipole with a modified ground plane," IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett., vol. 8, pp. 627 - 629, 2009.
- [74] Z. Y. Zhang, G. Fu, S. L. Zuo, and T. Ran, "A shorted magneto-electric dipole with  $\Gamma$ -shaped strip feed," Progress In Electromagnetics Research Letters, vol. 12, pp. 119 - 125, 2009.
- [75] W. X. An, K. L. Lau, S. F. Li, and Q. Xue, "Wideband E-shaped dipole antenna with staircase-shaped feeding strip," Electron. Lett., vol. 46, no. 24, pp. 1583 - 1584, Nov. 2010.
- [76] L. Ge and K. M. Luk, "A wideband magneto-electric dipole antenna," IEEE Antennas Propagat., vol. 60, no. 11, pp. 4987 - 4991, Nov. 2012.
- [77] Z. Y. Zhang, S. L. Zuo, and J. Y. Zhao, "Wideband folded bowtie antenna with  $\Gamma$ -shaped strip feed and tuning stubs," Microw. Opt. Technol. Lett., vol. 55, no. 9, pp. 2145 - 2149, 2013.
- [78] W. X. An, S. F. Li, W. Hong, F. Z. Han, and K. P. Chen, "Design of wideband dual-band dual-polarized dipole for base station antenna," Int. J. Electron. Commun., vol. 19, no. 1, pp. 22 - 28, Jun. 2012.
- [79] I. Govindanarayanan, N. Rangaswamy, and R. Anbazhagan, "Design and analysis of broadband magneto-electric dipole antenna for LTE femtocell base stations," J. Comput. Electron., vol. 15, no. 1, pp. 200 -209, Mar. 2016.
- [80] CST Microwave Studio, 2011.
- [81] ไทยพีบีเอส (17 เม.ย. 2555) “ดูวิทยุฯ ที่ถูกเดือนกวนคลื่นการบิน”. สืบค้นจาก <https://www.youtube.com/watch?v=Y9NVmIpilyc&t=89s>
- [82] ดร.อจลวิษฐ์ ฉันทวีโรจน์. “การพัฒนาสายอากาศปรับเปลี่ยนความถี่สำหรับระบบวิทยุรู้คิดเพื่อแก้ปัญหาการจัดสรรแถบความถี่ที่มีอยู่อย่างจำกัดอย่างประสิทธิภาพ”

- [83] สำนักงาน กสทช. “ ผู้ได้รับอนุญาตทดลองประกอบกิจการฯที่สามารถออกอากาศได้ ” สืบค้นจาก <https://broadcast.nbtc.go.th/radio/index.php?type=NTYwNDAwMDAwMDAx>
- [84] มูฮำหมัดซัลบรี เจะเตะ “ การควบคุมการกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุของเครื่องกำเนิดสัญญาณแบบอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับประยุกต์ใช้ในระบบวิทยุรู้คิด ”
- [85] Werner Henkel and Behrouz Touri “ Remote Control of the Spectrum Analyzer ”
- [86] eDSPlab: A remote-accessed instrumentation laboratory for digital signal processors training based on the Internet Provider : Sergio Gallardo, Federico Barrero, Sergio L. Toral and Mario J. Durán
- [87] A Web-Based Remote Access Laboratory Using SCADA Provider : Zafer Aydogmus, Member, IEEE, and Omur Aydogmus, Student Member, IEEE
- [88] User Manual RSA4308A 8 GHz Real Time Spectrum Analyzer and Programmer’s Guide Agilent N9340B Handheld Spectrum Analyzer
- [89] LabVIEW สืบค้นจาก [http://www.researchsystem.siam.edu/images/coop/DESIGN\\_AND\\_CONSTRUCTION\\_OF\\_ELECTRICAL\\_MEASUREMENT\\_USING\\_LABVIEW\\_\\_\\_PROGRAM/ch2.pdf](http://www.researchsystem.siam.edu/images/coop/DESIGN_AND_CONSTRUCTION_OF_ELECTRICAL_MEASUREMENT_USING_LABVIEW___PROGRAM/ch2.pdf)
- [90] Following the SCPI Learning Process and Using the Tool สืบค้นจาก [http://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/FollowtheSCPILearningProcessandUsingtheTool.pdf](http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/FollowtheSCPILearningProcessandUsingtheTool.pdf)