



สายอากาศสำหรับสถานีวิทยุเอฟเอ็มที่มีการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงในแนวตั้ง
(Linearly Vertical Polarization Antenna for FM Broadcasting Station)

โดย

นายศพนธ์	โปยขุนทด	รหัสนักศึกษา B4902157
นางสาวนันทนา	คมกลาง	รหัสนักศึกษา B4917403
นายสรศักดิ์	แจ่มใสย์	รหัสนักศึกษา B5243891

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษารายวิชา 427494 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
และ 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม

หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2546

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประจำภาคการศึกษาที่ 3 ปีการศึกษา 2555

สายอากาศสำหรับสถานีวิทยุเอฟเอ็มที่มีการโพลาริซ์แบบเส้นตรงในแนวตั้ง

คณะกรรมการสอบโครงการ



(รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์)

กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดิมา พรหมมาก)

กรรมการ



(อ.ศรบุรุษวิทย์ ภูฉายา)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 427499 โครงการวิศวกรรม โทรคมนาคม และรายวิชา 427494 โครงการศึกษาวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2555

หัวข้อ โครงการงาน	สายอากาศสำหรับสถานีวิทยุเอฟเอ็มที่มีการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงในแนวตั้ง (Linearly Vertical Polarization Antenna for FM Broadcasting Station)		
นักศึกษา	นายศพนธ์	โปยขุนทด	รหัสนักศึกษา B4902157
	นางสาวนันทนา	คมกลาง	รหัสนักศึกษา B4917403
	นายสรศักดิ์	แจ่มไสย์	รหัสนักศึกษา B5243891
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
พ.ศ.	2555		
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน	รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สวรรค์		

บทคัดย่อ
(Abstract)

โครงการฉบับนี้เป็นการนำเสนอวิเคราะห์ ออกแบบ ทดสอบและประเมินคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล สำหรับสถานีวิทยุระบบ FM ย่านความถี่ 88-108 MHz โดยอาศัยการแมตช์แบบแกมมา (gamma match) ซึ่งสายอากาศมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสายอากาศไดโพล นำมาจัดเป็นแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ เพื่อให้ได้การโพลาไรซ์แบบเส้นตรงแนวตั้ง โดยใช้โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐานที่ช่วยในการออกแบบและทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานและความกว้างแถบ รวมทั้งออกแบบสายเฟสแบบแกนร่วม โลหะที่ใช้เชื่อมต่อสายอากาศให้เป็นแถวลำดับ เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลการคำนวณจึงสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมา เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงการสื่อสารภายใต้สภาพแวดล้อมการใช้งานจริงในระบบการสื่อสาร ณ ความถี่ปฏิบัติการ 99 MHz และทำการทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ แสดงให้เห็นว่าสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล สำหรับสถานีวิทยุระบบ FM ที่นำเสนอในโครงการฉบับนี้มีคุณสมบัติเพียงพอสำหรับการนำไปใช้งานจริง

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

โครงการเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้ความช่วยเหลือในการ ให้แนวคิด ให้คำปรึกษา แนะนำ ชี้แนะข้อบกพร่องที่ข้าพเจ้ามองข้ามและให้กำลังใจ ตลอดจนฝึกฝนและ สนับสนุนข้าพเจ้าให้มีความสามารถในการทำโครงการ จนสามารถนำเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและ ยอมรับได้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่สั่งสอนให้ความรู้มาโดยตลอด และยังเป็นแบบอย่างที่ดีในการใช้ชีวิตในรั้วมหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆที่ วิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่คอยแนะนำวิธีการวัดทดสอบสายอากาศ สำหรับคุณงามความดีที่เกิดจากโครงการฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ผู้คอยห่วงใย ให้โอกาส ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จมาจนถึงบัดนี้

ยศพนธ์ โปยขุนทด

นันทนา คมกลาง

สรศักดิ์ แจ่มใสย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ.....	ค
สารบัญ(ต่อ).....	ง
สารบัญ(ต่อ).....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สารบัญรูป(ต่อ).....	ซ
สารบัญรูป(ต่อ).....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	3
2.1 คุณสมบัติที่ดีของสายอากาศสำหรับส่งคลื่นวิทยุระบบ FM.....	3
2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายกำลังงาน.....	3
2.1.2 การโพลาไรซ์.....	4
2.1.3 อัตราขยาย.....	5
2.1.4 ความกว้างแถบ.....	6
2.1.5 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า.....	6
2.1.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง.....	7

สารบัญ (ต่อ)

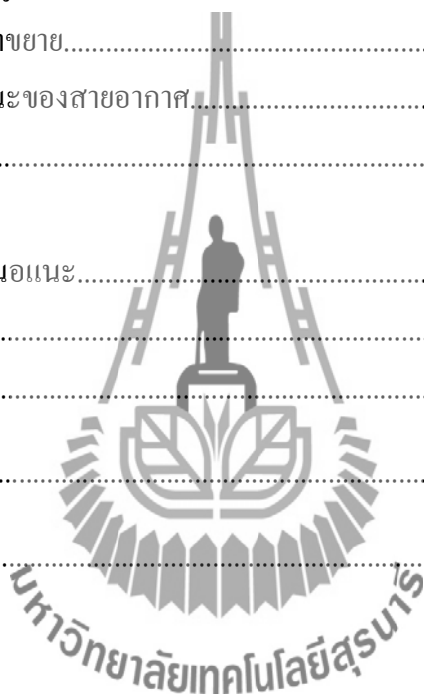
หน้า

2.2	ทฤษฎีสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ.....	8
2.3	ทฤษฎีสายอากาศไดโพล.....	9
2.3.1	สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ.....	9
2.3.2	แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน.....	10
2.3.3	การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล.....	13
2.4	ทฤษฎีสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์.....	15
2.4.1	ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ.....	16
2.5	การแมตชิง.....	17
2.6	สรุป.....	20
บทที่ 3	การจำลองโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม.....	21
3.1	กล่าวนำ.....	21
3.2	โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2.....	21
3.3	การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2.....	22
3.4	การใช้งานโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2.....	25
3.4.1	การใช้งานโปรแกรม.....	25
3.4.2	การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศ.....	27
3.5	การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล.....	30
3.6	สรุป.....	39
บทที่ 4	การสร้างและทดสอบสายอากาศต้นแบบ.....	40
4.1	การสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	40
4.1.1	การสร้างสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ.....	41
4.1.2	การสร้างสายอากาศไดโพล.....	46
4.1.3	การสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล.....	47

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 การวัดเพื่อทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ.....	48
4.2.1 การวัดอิมพีแดนซ์อินพุต.....	49
4.2.2 ความกว้างแถบของสายอากาศ.....	50
4.2.3 ค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก.....	50
4.2.4 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน.....	53
4.2.5 อัตราขยาย.....	58
4.3 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศ.....	60
4.4 สรุป.....	60
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 บทสรุป.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	63
ประวัติผู้เขียน.....	64



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก.....	53
ตารางที่ 4.2 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์โคโพล.....	60



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ.....	3
รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดี่ยว.....	4
รูปที่ 2.3 แบบรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
รูปที่ 2.4 สายอากาศในโหมดการส่ง.....	6
รูปที่ 2.5 การก่อรูปคลื่นนี้.....	7
รูปที่ 2.6 โครงสร้างสายนำสัญญาณแกนร่วมชนิดแข็ง.....	9
รูปที่ 2.7 สายอากาศไดโพล.....	10
รูปที่ 2.8 ระนาบสนามไฟฟ้า: E-plane (y-z) และระนาบสนามแม่เหล็ก: H-plane (x-y) ของสายอากาศไดโพล.....	11
รูปที่ 2.9 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลอุดมคติ.....	12
รูปที่ 2.10 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของไดโพลอุดมคติ.....	12
รูปที่ 2.11 การแจกแจงของกระแสบนสายอากาศไดโพล $\lambda/2$	14
รูปที่ 2.12 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสนามไฟฟ้า (E-plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ) และ ไดโพลอุดมคติ (เส้นประ).....	14
รูปที่ 2.13 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล.....	15
รูปที่ 2.14 แลวลำดับแบบคอลลิเนีย.....	16
รูปที่ 2.15 การแมตช์แบบแกมมา.....	17
รูปที่ 2.16 วงจรสมมูล.....	17
รูปที่ 3.1 ไอคอน 4nec2x ในการเข้าใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2.....	25
รูปที่ 3.2 การเลือกไฟล์แบบจำลอง.....	25
รูปที่ 3.3 เมนูหลักของโปรแกรม.....	26
รูปที่ 3.4 ไอคอน edit NEC input-file บนหน้าต่างหลัก.....	27
รูปที่ 3.5 การเลือกคำสั่ง new ในหน้าต่าง geometry edit เพื่อเข้าสู่หน้าต่าง geometry edit (file changed).....	28

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 หน้าต่าง geometry edit (file changed) และส่วนประกอบต่างๆ.....	28
รูปที่ 3.7 การป้อนค่าความถี่สายอากาศที่ต้องการออกแบบ.....	30
รูปที่ 3.8 หน้าต่างแสดงขนาดรัศมีของสายอากาศที่ต้องการในการออกแบบ.....	31
รูปที่ 3.9 ภาพวาดสายอากาศ พร้อมทั้งลักษณะการป้อนแหล่งจ่าย.....	31
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งและค่าในการปรับเช็คเมนต์.....	32
รูปที่ 3.11 ตำแหน่งคำสั่งในการตั้งค่าเช็คเมนต์แบบอัตโนมัติ.....	32
รูปที่ 3.12 หน้าต่างแสดงจำนวนเช็คเมนต์ที่ต้องการ.....	33
รูปที่ 3.13 หน้าต่างเจเนอร์เรท.....	33
รูปที่ 3.14 หน้าต่างหลักกับผลลัพธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศ.....	34
รูปที่ 3.15 หน้าต่างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ แถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล แบบ 2 มิติ.....	34
รูปที่ 3.16 หน้าต่างรูปแบบ โครงสร้างที่สมบูรณ์และการแผ่กำลังงาน.....	35
รูปที่ 3.17 หน้าต่างรูปแบบการแผ่กระจายกำลังงานสายอากาศ แถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล แบบ 3 มิติ.....	35
รูปที่ 3.18 การเลือกฟังก์ชัน และการกำหนดความถี่ในหน้าเจเนอร์เรท.....	36
รูปที่ 3.19 หน้าต่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าอิมพีแดนซ์.....	37
รูปที่ 3.20 ภาพวาดสายอากาศไดโพลกับสายส่งแบบแฉ่ง.....	38
รูปที่ 3.21 ภาพวาดสายอากาศคอลลิเนียร์ไดโพลกับสายส่งสัญญาณแบบแฉ่ง แบบ 3 มิติ.....	38
รูปที่ 3.22 หน้าต่างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสายอากาศที่สมบูรณ์ ที่มีสายส่งสัญญาณแบบแฉ่ง แบบ 3 มิติ.....	39
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล.....	41
รูปที่ 4.2 วัสดุที่ใช้สร้างสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ.....	42

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ.....	43
รูปที่ 4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วัดทดสอบ.....	44
รูปที่ 4.5 การวัดอิมพีแดนซ์ของ adaptor.....	44
รูปที่ 4.6 การวัดอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ.....	44
รูปที่ 4.7 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัว T-connector.....	45
รูปที่ 4.8 การวัดอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ.....	46
รูปที่ 4.9 การวัดอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล.....	47
รูปที่ 4.10 การแมตซ์สายอากาศ.....	47
รูปที่ 4.11 สายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลที่สมบูรณ์.....	48
รูปที่ 4.12 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ณ ความถี่ 99 MHz ของสายอากาศต้นแบบ.....	49
รูปที่ 4.13 ความกว้างแถบ ณ ความถี่ 99 MHz ของสายอากาศต้นแบบ.....	50
รูปที่ 4.14 องค์ประกอบของสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ ที่จะนำมาหาค่าสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก.....	51
รูปที่ 4.15 ค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) ของ adapter 2 ตัว.....	52
รูปที่ 4.16 การ calibrate adapter ร่วมกับสายสัญญาณ.....	52
รูปที่ 4.17 การวัดค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{22}) ของ T-Connector ตัวที่ 1 และ 2.....	52
รูปที่ 4.18 ค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) ของสายนำสัญญาณ.....	53
รูปที่ 4.19 เครื่องมือที่ใช้วัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน.....	54
รูปที่ 4.20 สายอากาศไดโพลอ้างอิง.....	54
รูปที่ 4.21 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลอ้างอิง.....	55
รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศไดโพลอ้างอิง.....	55
รูปที่ 4.23 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศต้นแบบ.....	56
รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศต้นแบบ.....	57
รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานออกแบบโดยโปรแกรม.....	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ตั้งแต่อดีตการสื่อสารและระบบข้อมูลข่าวสารนับเป็นสิ่งสำคัญซึ่งมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตามขีดความสามารถของเทคโนโลยีแต่ละยุคสมัย โดยการสื่อสารที่รู้จักกันดีคือ การสื่อสารระบบวิทยุเอฟเอ็ม ซึ่งใช้งานในย่านความถี่ 88-108 MHz (FM Broadcast Band) การสื่อสารระบบวิทยุเอฟเอ็มมีความสำคัญและเป็นที่ยอมรับอยู่มาก แม้จะถูกนำมาใช้ในประเทศไทยเป็นเวลานานแล้ว โดยสถานีส่งวิทยุระบบเอฟเอ็มที่คั่นนั้นย่อมต้องการที่จะส่งสัญญาณออกไปให้ได้ไกลที่สุดเท่าที่จะทำได้ และสามารถให้ผู้รับ รัับฟังได้โดยสะดวก ดังนั้นการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อส่งคลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็มให้สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง ด้วยเหตุนี้สายอากาศสำหรับส่งคลื่นวิทยุในระบบเอฟเอ็มจึงเป็นอุปกรณ์ที่เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่ง

ปัจจุบันสายอากาศที่มีการใช้งานอยู่ในประเทศยังคงเป็นสายอากาศที่นำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้นโครงการฉบับนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตสายอากาศภายในประเทศแทนการนำเข้าสายอากาศจากต่างประเทศ โดยได้เน้นการศึกษาและออกแบบสายอากาศซึ่งถูกตั้งชื่อว่าสายอากาศแฉกเส้นตรงแบบคอลลิเนียลไดโพล (collinear dipole) ซึ่งสายอากาศมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสายอากาศไดโพลนำมาจัดเป็นแฉกเส้นตรงแบบคอลลิเนียล ซึ่งจะทำให้เกิดการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงในแนวตั้ง โดยสายอากาศต้นแบบนี้ใช้ระบบการแมตซ์แบบแกมมา (gamma match) จุดเด่นของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงเมื่อใช้เป็นสายอากาศภาคส่งก็คือ ลักษณะของรูปแบบการแผ่กระจายกำลังงาน (radiation pattern) ที่มีลักษณะแผ่กระจายออกรอบตัวสายอากาศในระนาบเดียว มีการโพลาไรซ์ที่มีมุมหมุนครบทั้ง 360 องศา ทำให้เครื่องรับสามารถรับสัญญาณได้ไม่ว่าสายอากาศภาครับจะยังเคลื่อนที่อยู่ก็ตามและนอกจากนี้ยังสามารถออกแบบให้ทนกำลังได้สูง (high power handling)

ในระบบสถานีส่งวิทยุระบบ FM ต้องการสายอากาศที่ให้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียวและความกว้างแถบ (bandwidth) ในระนาบมุมเงย (elevation plane) ที่กว้างเพียงพอ เพราะคุณสมบัติทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขที่กล่าวมา จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาสายอากาศให้เข้ากับความต้องการดังกล่าว นอกจากนั้นสายอากาศจะต้องมีคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรงทนกำลังได้สูง และที่สำคัญต้องมีต้นทุนต่ำดังนั้นด้วยลักษณะ โครงสร้างสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุ FM ที่มีการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงแนวตั้ง สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาคูณลักษณะของสายอากาศสำหรับสถานีส่งวิทยุระบบเอฟเอ็มได้แก่
แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน(Radiation Pattern) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า
(Input Impedance) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing -Wave Ratio หรือ SWR)
ความกว้างแถบ (Bandwidth) ค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss; S_{21})
และค่าอัตราขยาย (Gain)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการทำงานและการใช้งานของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่2
(Numerical Electromagnetics Code 2: NEC2) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ
ต้นแบบที่ได้ศึกษาและออกแบบเพื่อใช้สำหรับสถานีส่งวิทยุระบบเอฟเอ็ม
- 1.2.3 เพื่อสร้างสายอากาศต้นแบบสำหรับใช้งานย่านความถี่เอฟเอ็มที่มีการโพลาไรซ์แบบ
เส้นตรงแนวตั้ง ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงและนำไปใช้ทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศ

1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

- 1.3.1 การศึกษาการทำสายอากาศเส้นตรงแนวตั้งและจัดทำเป็นแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์
- 1.3.2 ศึกษาการใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 ในการออกแบบสายอากาศ
- 1.3.3 ออกแบบสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงแนวตั้ง
- 1.3.4 ออกแบบระบบการแมตช์เชิงแบบแกมมาให้กับสายอากาศ ให้แมตช์กับค่าอิมพีแดนซ์
สายส่งโคแอกเซียล
- 1.3.5 ทำการวัดทดสอบคุณสมบัติและพารามิเตอร์ที่จำเป็นของสายอากาศ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1.4.1 วางแผนดำเนินการ ศึกษาโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงตัวเลขรุ่นที่ 2
- 1.4.2 ใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงตัวเลขรุ่นที่ 2 คำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
ของสายอากาศ
- 1.4.3 สร้างสายอากาศต้นแบบ
- 1.4.4 ศึกษาออกแบบระบบการแมตช์เชิงแบบแกมมา (Gamma Match) ให้กับสายอากาศ
- 1.4.5 วัดทดสอบคุณลักษณะสายอากาศ
- 1.4.6 สรุปผล

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

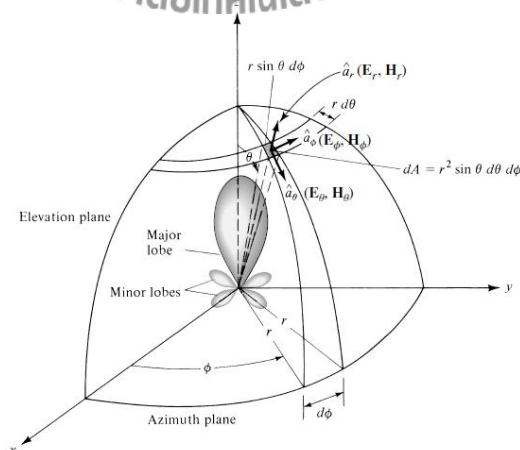
ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมของสายอากาศที่จะเป็นสายอากาศส่งคลื่นวิทยุระบบ FM ทฤษฎีของสายอากาศไดโพล (dipole antenna) ชนิดไดโพลนำมาจัดเป็นแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ (collinear array antenna) เพื่อนำมาประยุกต์เป็นสายอากาศสำหรับสถานีวิทยุระบบ FM ที่มีกรโพลาริซแบบเส้นตรงในแนวตั้ง เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ

2.1 คุณสมบัติที่ดีของสายอากาศสำหรับส่งคลื่นวิทยุระบบ FM

สำหรับคุณสมบัติของสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศตัวส่งที่ดีนั้น จะต้องเป็นสายอากาศที่ทำให้สายอากาศภาครับสามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด นั่นคือไม่ว่าสายอากาศภาครับจะอยู่ทางทิศทางใดของสายอากาศภาควัด และมีกรโพลาริซเป็นแบบใด ก็ควรที่จะสามารถรับส่งคลื่นจากสถานีส่งได้ ดังนั้นคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศสำหรับส่งคลื่นวิทยุระบบ FM ที่สำคัญมีดังนี้

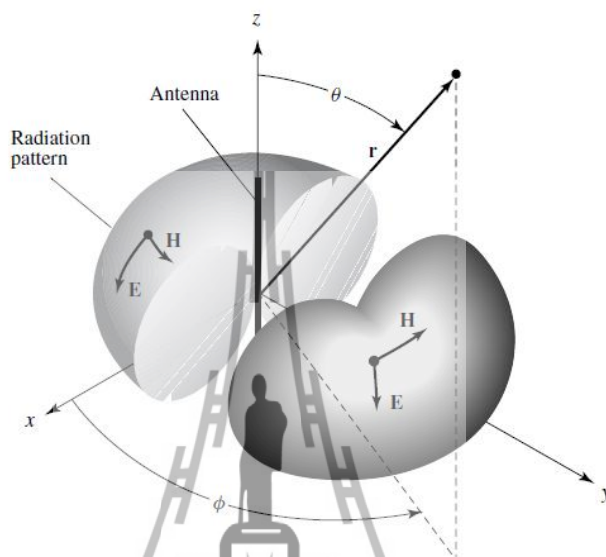
2.1.1 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern)

การนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศเชิงกราฟิกหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ [1] ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง (space coordinate) ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (far-field region)



รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ

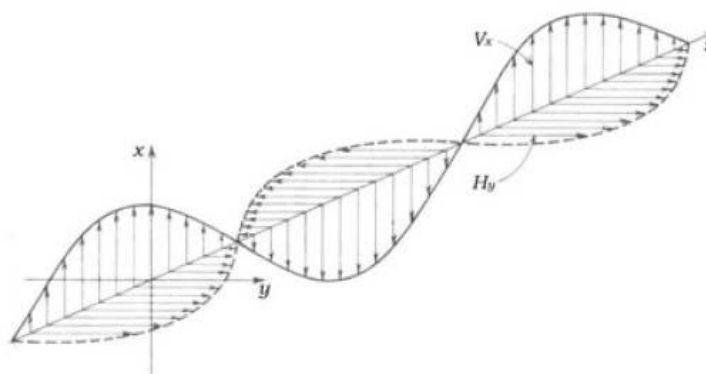
แบบรูปการแผ่กระจายแบบรอบตัวในระนาบเดียว (omni directional antenna) คือแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ในที่นี้คือมุมอาซิมุท (azimuth) และระนาบที่อยู่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการกระจายกำลังงานแบบมีทิศทาง ในกรณีนี้คือมุมเงย (elevation) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว

2.1.2 การโพลาไรซ์ (Polarization)

สายอากาศภาคส่งที่ดีสำหรับสถานีส่งวิทยุระบบ FM นั้น จะต้องมีการโพลาไรซ์ที่มีความเข้มของสัญญาณที่สูงและมีทิศทางมุ่งเน้นให้เครื่องรับสัญญาณได้รับสัญญาณข่าวสารที่ชัดเจนครบถ้วน



รูปที่ 2.3 แบบรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

โพลาไรเซชัน (Polarization) จากรูปที่ 2.3 เราจะเห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง โดยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน สนามแม่เหล็กจะตั้งฉากกับเส้นลวด ส่วนสนามไฟฟ้าจะขนานกับเส้นลวดและทรวงทรวงนี้ก็จะเป็กรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไปจากเส้นลวด ดังนั้นจึงเกิดขั้วของคลื่นที่แพร่กระจายจากสายอากาศเรียกว่าโพลาไรเซชัน ซึ่งจะเป็นเชิงเส้นคงที่ตลอด เช่นสายอากาศชนิดแนวตั้ง (vertical) จะแพร่กระจายคลื่นโดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเป็นแนวตั้งจึงเรียกว่าเวดิกคอลโพลาไรซ์ (vertical polarized) และในรูปที่ 2.3 ก็จะเป็นเวดิกคอลโพลาไรซ์ ส่วนสายอากาศชนิดแนวนอน (horizontal) ก็แพร่กระจายคลื่นโดยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเป็นแนวนอนจึงเรียกว่า ฮอริซอนทอลโพลาไรซ์ (horizontal polarized) สำหรับดวงอาทิตย์การแพร่กระจายแสงจะมีเวกเตอร์สะเปะสะปะไม่แน่นอนเราจึงเรียกว่า แรนดอมโพลาไรซ์ (random polarized) นอกจากนี้ยังมีสายอากาศที่เรียกว่าเฮลิคอล (helical) เวกเตอร์ไฟฟ้าของการแพร่กระจายจะหมุนเป็นวง เราจึงเรียกว่าเซอคูล่าโพลาไรซ์ (circular polarized) ในการติดตั้งสายอากาศส่งและรับจะต้องมีการโพลาไรซ์เหมือนกันจึงจะรับสัญญาณได้ดีที่สุด

2.1.3 อัตราขยาย (Gain)

ก. อัตราขยายจริง (Absolute Gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนดให้) หมายถึงอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้รับเข้ามา

$$Gain = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.1)$$

ข. อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตั้งโดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบก็คือสายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (lossless isotropic source) และสายอากาศแบบไดโพล

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.2)$$

เมื่อ P_{in} คือ กำลังงานที่ป้อนให้กับไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย

2.1.4 ความกว้างแถบ (Bandwidth)

ความกว้างแถบของสายอากาศถูกนิยามว่าย่านความถี่ที่ยังอยู่ภายในสภาวะที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้ สภาวะดังกล่าวพิจารณาจากคุณสมบัติบางตัวของสายอากาศและให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ความกว้างแถบจะพิจารณาจากช่วงของความถี่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่กลาง (center frequency) ซึ่งสภาวะการทำงานของสายอากาศที่ยอมรับได้จะต้องสามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่นี้ สำหรับการสื่อสารวิทยุระบบ FM ความกว้างแถบตามมาตรฐานกำหนดที่ 500 kHz [11]

2.1.5 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)

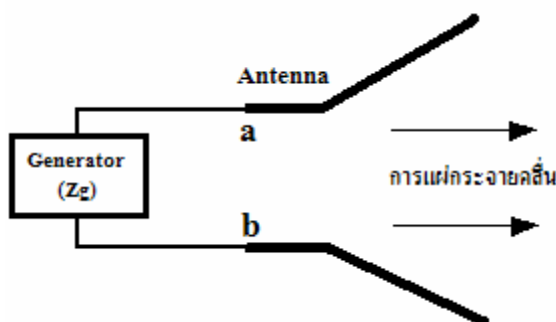
ค่าอิมพีแดนซ์อินพุต (input impedance) ของสายอากาศคือเป็นค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศหรือเป็นอัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่ขั้วของสายอากาศหรือเป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จุดหนึ่งๆ “ซึ่งในหน่วยนี้เราจะสนใจค่าอิมพีแดนซ์อินพุตที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.4” ในที่นี้คือ a-b อัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่ขั้วนี้ขณะไม่มีโหลดใดๆต่ออยู่ จะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.3)$$

โดยที่ Z_A = ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)

R_A = ค่าความต้านทานของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)

X_A = ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศที่ขั้ว a-b (โอห์ม)



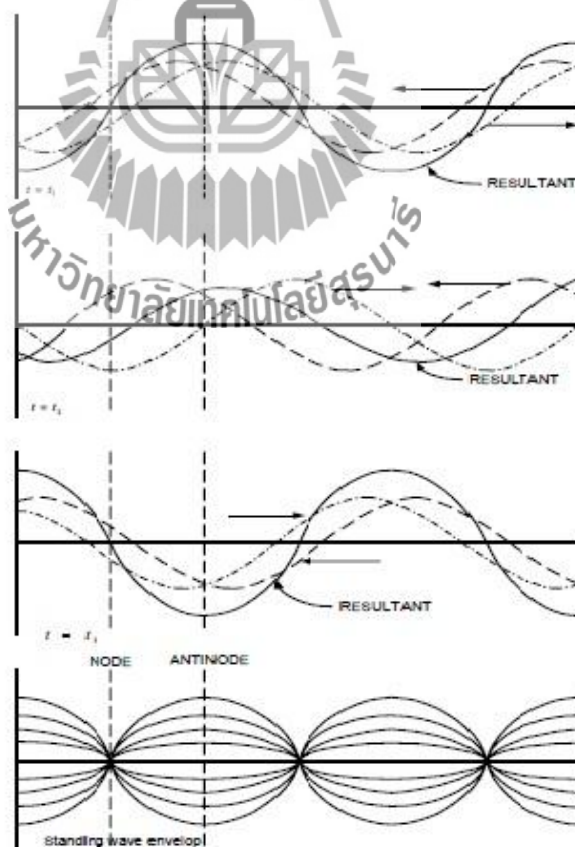
รูปที่ 2.4 สายอากาศในโหมดการส่ง

ปกติอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความถี่และจะแมตช์กับสายส่งเฉพาะในช่วงความถี่ช่วงหนึ่งๆเท่านั้น นอกจากนี้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์ต่างๆอีกได้แก่ รูปทรงวิธีการป้อนสัญญาณและสิ่งแวดล้อมข้างเคียง เนื่องจากคำนวณได้ยากจึงมักจะพบว่าส่วนใหญ่จะหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ได้จากการทดลอง

ในการออกแบบสายอากาศนั้นต้องคำนึงถึงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ด้วย เนื่องจากสายส่งและตัว SMA Connector ที่ใช้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นเราควรออกแบบค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์มด้วย

2.1.6 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)

ถ้าคลื่นที่มีแอมพลิจูดและความถี่เท่ากันสองคลื่นเคลื่อนที่ในสายส่งในทิศทางตรงกันข้ามคลื่นทั้งสองจะรวมตัวและหักล้างซึ่งกันและกันสลับกันไป ผลที่ได้จะเป็นคลื่นนิ่ง (SWR) รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าคลื่นทั้งสองคลื่นรวมตัวเป็นคลื่นนิ่งได้อย่างไร สังเกตว่าจุดที่เกิดแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดอยู่ที่เดิมเมื่อเทียบกับเวลาจุดที่คลื่นผ่านศูนย์ (zero crossing) เรียกว่า ปม (node) และตำแหน่งที่เกิดแอมพลิจูดสูงสุดเรียกว่า ขอด โยง (antinode)



รูปที่ 2.5 การก่อรูปคลื่นนิ่ง

อัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio เขียนย่อว่า VSWR) ในสายส่งที่มีการสูญเสียพลังงานน้อยมีค่าจำกัดความเป็นอัตราส่วนของแรงดันที่มากที่สุดต่อแรงดันที่น้อยที่สุดเมื่อเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์จะได้

$$VSWR = \frac{|V_{max}|}{|V_{min}|} \quad (2.4)$$

เราสามารถให้ค่าจำกัดความ VSWR ให้เป็นค่าที่จุกๆ หนึ่งในสายโดยใช้ความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนดังนี้

$$VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.5)$$

$$|\Gamma| = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2.6)$$

โดยที่ $|\Gamma|$ คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่น

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด

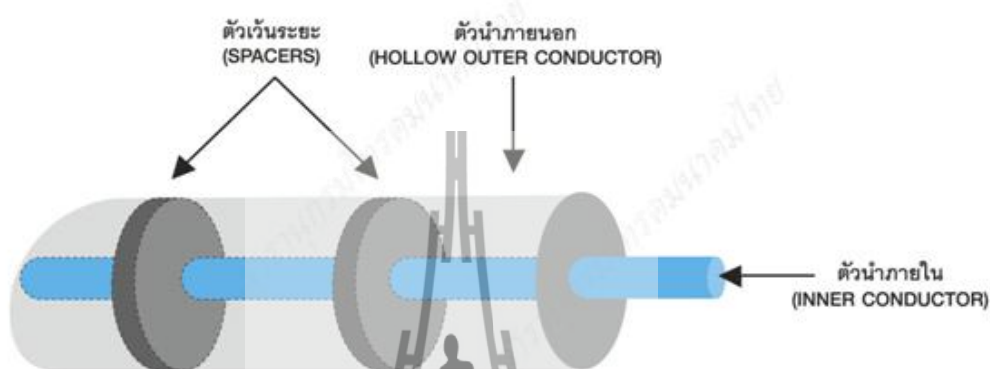
จากสมการ (2.6) จะพบว่า ถ้า $Z_1 = Z_0$ จะทำให้ $\Gamma = 0$ นั่นคือจะไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า $VSWR = 1$ ซึ่งก็คือการแมตซ์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศนั่นเอง แต่ถ้า $Z_1 \neq Z_0$ จะทำให้ $\Gamma \neq 0$ ก็จะส่งผลทำให้ค่า $VSWR \neq 1$ นั่นคือจะเกิดการไม่แมตซ์กันระหว่างสายส่งกับสายอากาศ ซึ่งถ้าค่า $VSWR$ มีค่ามากๆ ก็อาจส่งผลกระทบต่อเครื่องส่งทำให้เครื่องส่งเกิดความเสียหายได้ สำหรับค่า $VSWR$ ที่สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัตินั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 1.5

2.2 ทฤษฎีสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ

สายนำสัญญาณสามารถแบ่งย่อยได้เป็น สายแกนร่วมชนิดแข็ง (rigid coaxial line) และสายแกนร่วมชนิดอ่อน โดยที่ตัวนำภายในของสายแกนร่วมทั้งสองชนิดทำหน้าที่นำพาพลังงานในรูปแบบคลื่นวิทยุ และส่วนตัวนำภายนอกนั้นทำหน้าที่ป้องกันพลังงาน ไม่ให้เกิดการแผ่กระจายสู่ภายนอก โดยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถูกจำกัดให้อยู่ระหว่างตัวนำภายนอกและตัวนำภายใน นอกจากตัวนำภายนอกทำหน้าที่ดังที่ได้กล่าวมาแล้วยังสามารถป้องกันสัญญาณรบกวนจากแหล่งภายนอกได้ด้วย

สายชนิดแข็ง (rigid coaxial line) หรือสายแบบมีแกนกลาง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ประกอบด้วย ตัวนำภายในที่มีระยะห่างที่แน่นอนจากตัวนำภายนอก โดยใช้ตัวเว้นระยะ (spaces)

วางเป็นช่วงๆ อย่างสม่ำเสมอตลอดความยาวสาย ซึ่งตัวเว้นระยะนี้ทำจากวัสดุที่ให้คุณภาพการห่อหุ้มที่ดีและมีการสูญเสียต่ำที่ความถี่สูง ซึ่งในกรณีนี้ได้เลือกใช้ท่อทองแดงในการสร้างสายนำสัญญาณแบบแกนร่วม สำหรับภายในสายชนิดนี้ได้บรรจุฉนวนที่มีลักษณะแข็ง เข้าไปในสายเพื่อทำให้ยึด กันระหว่างตัวนำภายในกับตัวนำภายนอก



รูปที่ 2.6 โครงสร้างสายนำสัญญาณแกนร่วมชนิดแข็ง

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายหาได้จากสมการ

$$Z_0 = 138 \log D/d \quad (2.7)$$

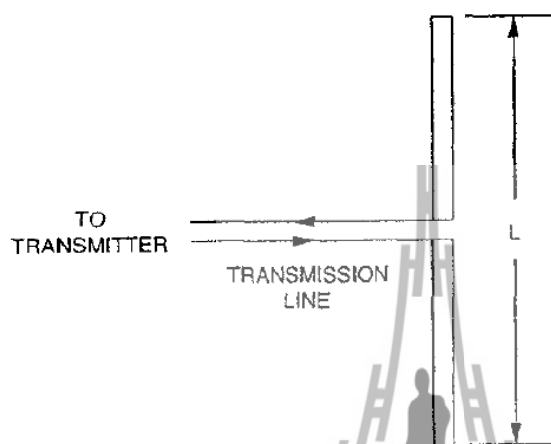
เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของฉนวนภายนอก
 d = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำใน

2.3 ทฤษฎีสายอากาศไดโพล

2.3.1 สายอากาศไดโพลและไดโพลอุดมคติ

สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างง่ายที่สุดมีส่วนประกอบเป็นเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว L วางเป็นแนวเส้นตรงดังรูปที่ 2.7 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะถูกต่อเข้ากับเครื่องส่ง โดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังขั้วหนึ่งของไดโพล และไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพลดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล

การแจกแจงของกระแส (current distribution) จะแสดงให้เห็นขนาด (magnitude) ของสัญญาณ กระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพล ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ปลายทั้งสองจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่นๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง



รูปที่ 2.7 สายอากาศไดโพล

ไดโพลอุดมคติ (Ideal Dipole) เป็นสายอากาศสมมติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่นๆ สามารถพิจารณาให้เป็นส่วนประกอบเล็กๆของความยาวไดโพล (infinitesimal dipole) ที่มีกระแสของกระแสที่เท่ากันตลอดความยาวคุณลักษณะทางทฤษฎีของไดโพลอุดมคติจะประมาณให้ค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็กๆ

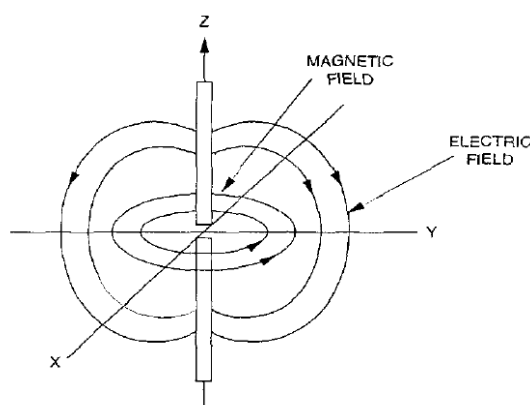
2.3.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานคือ การแสดงรูปแบบของกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากตัวสายอากาศเป็นรูปภาพ 3 มิติ ที่วัดได้ในบริเวณสนามระยะไกล (far field region) คุณสมบัติการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง (space coordinates) บริเวณของสนามระยะไกลคือ บริเวณที่ไกลเพียงพอสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ซึ่งจะไม่นับอยู่ใกล้ระยะทางที่อยู่ห่างจากสายอากาศ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศใดๆ สามารถที่จะทราบได้ด้วยการวัดทดลองและถ้าเราทราบลักษณะการแจกแจงของกระแสบนตัวสายอากาศ ก็จะสามารถคำนวณหาจากการคำนวณได้เช่นเดียวกัน การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ จะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (far-field region) โดยสามารถคำนวณจากสมการ

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.8)$$

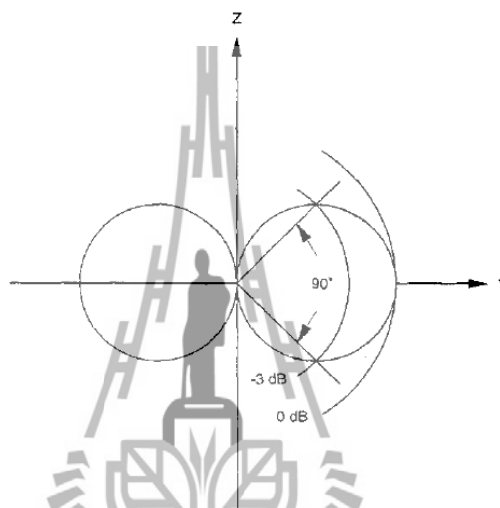
เมื่อ R คือ ระยะของสนามระยะไกล
 D คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ
 λ คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายพลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับความสัมพันธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแผ่กระจายกำลังงาน” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงจะเป็นแบบรูปอันเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่รับสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (reciprocity theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ การวัดในแต่ละมิติจะวัดในแต่ละระนาบที่ตั้งฉากกัน คือระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้าและระนาบที่ขนานกับสนามแม่เหล็กโดยเรียกว่า E-plane และ H-plane ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบหนึ่งสามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้นๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ถูกต้อง ควรจะจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใดๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

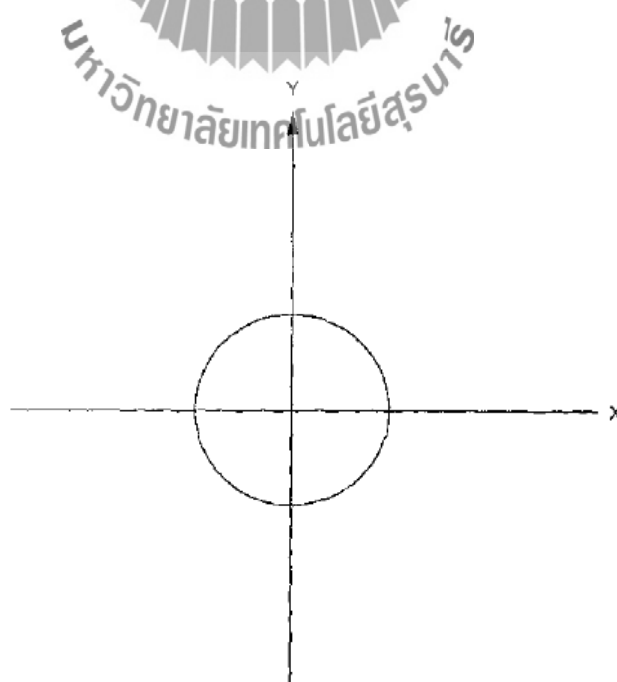


รูปที่ 2.8 ระนาบสนามไฟฟ้า: E-plane (y-z) และระนาบสนามแม่เหล็ก: H-plane (x-y)
 ของสายอากาศไดโพล

รูปที่ 2.9 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลอุดมคติ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานนี้แสดงให้เห็นว่าไดโพลอุดมคตินั้นมีทิศทางด้วย เพราะว่าการแผ่กระจายกำลังงานจะมีความแรงของสัญญาณสูงในบางทิศทางเมื่อเทียบกับทิศทางอื่นๆ ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10 ซึ่งในแบบรูปนี้การแผ่กระจายกำลังงานจะเท่ากันทุกทิศทาง



รูปที่ 2.9 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลอุดมคติ



รูปที่ 2.10 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของไดโพลอุดมคติ

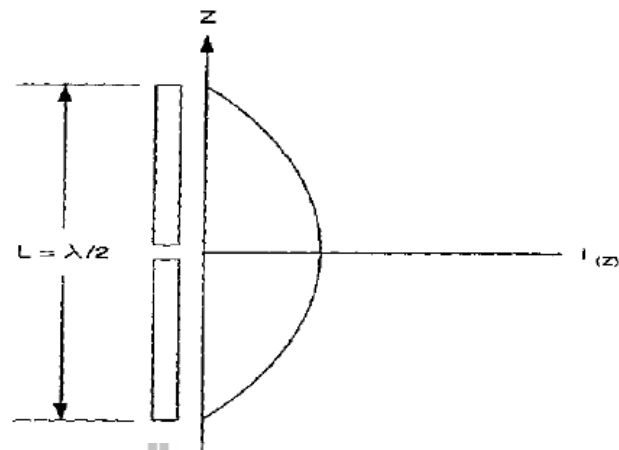
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth : HPBW) ของสายอากาศคือ การพิจารณามุมในลำคลื่นหลักโดยคิดที่ กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3 dB) ของกำลังงานที่แผ่ออกใน ทิศทางของกำลังงานสูงสุด

$$HPBW = [\theta_{HPBW_{lef}} - \theta_{HPBW_{right}}] \quad (2.9)$$

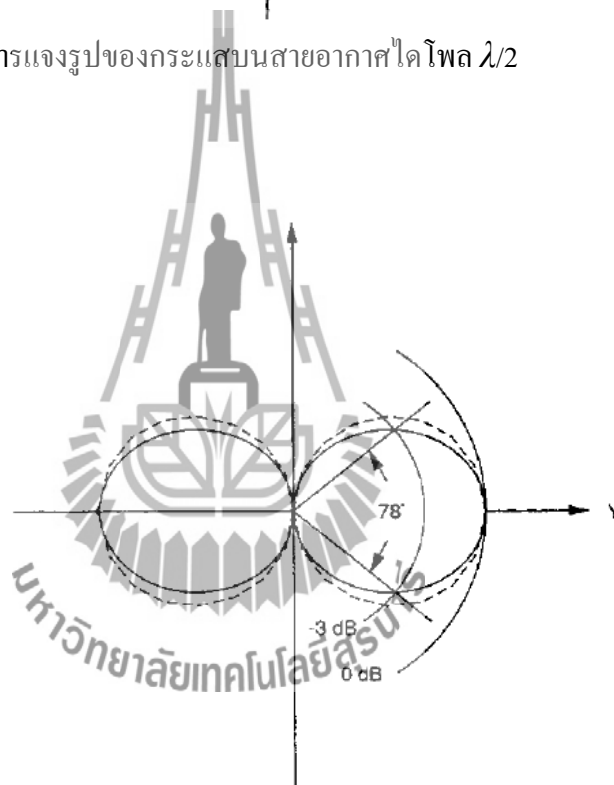
ค่า HPBW ของไดโพลอุดมคติในระนาบสนามไฟฟ้า E-plane จะเท่ากับ 90 องศาซึ่งดูได้จาก รูปที่ 2.6 สำหรับสายอากาศไดโพลในทางปฏิบัติซึ่งใช้กันทั่วไป จะมีความยาว L เท่ากับ $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ ค่า λ เป็นค่าความยาวคลื่นของสัญญาณ การแจกแจงรูปของกระแสที่เกิดขึ้นบนไดโพล $\lambda/2$ จะมีรูปร่างของสัญญาณเป็นรูปไซน์ครึ่งคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยกระแสนี้จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลางและมีค่าศูนย์ที่จุดปลายสุดรูปที่ 2.9 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งจากสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และในไดโพลอุดมคติ โดยสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ มี HPBW อยู่ที่ 78 องศา ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และให้ผลที่แคบและบางกว่าลักษณะของสายอากาศไดโพลอุดมคติ ส่วนการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ จะมีลักษณะเป็นวงกลมดังรูปที่ 2.9

2.3.3 การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna Polarization)

การโพลาไรซ์ของสายอากาศ จะใช้ในการอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศไปทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุดและวัดได้ในสนามระยะไกล สายอากาศลักษณะนี้ จะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (linear polarization) นั่นคือในหนึ่งรอบ (cycle) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และยังคงถูกแบ่งออกเป็น การโพลาไรซ์แนวตั้ง (vertical polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (horizontal polarization) นอกจากนี้ยังมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (circular) และแบบรูปวงรี (elliptical)

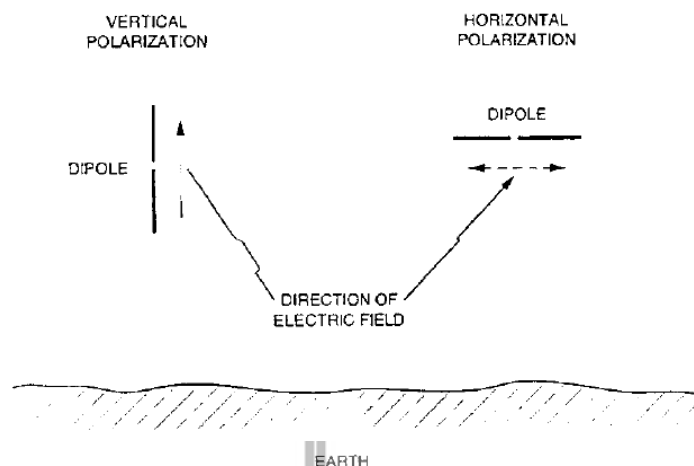


รูปที่ 2.11 การแจกแจงรูปของกระแสบนสายอากาศไดโพล $\lambda/2$



รูปที่ 2.12 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ) และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ)

บ่อยครั้งที่การโพลาริซชันของสายอากาศจะพิจารณาจากรูปทรงของตัวสายอากาศเอง เช่น ในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งอาจจะมีส่วนประกอบเพียงตัวเดียวหรือหลายตัววางขนานกัน เช่นสายอากาศไดโพลและหากเราสามารถที่จะสมมุติให้สนามไฟฟ้าซึ่งมีการโพลาริซชันแบบเชิงเส้นขนานไปกับส่วนประกอบของตัวสายอากาศ แต่ก็มีสายอากาศบางชนิดซึ่งมีการโพลาริซชันแบบเชิงเส้นเหมือนกันแต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงของโครงสร้างมาทำนายการโพลาริซชันได้ เช่นสายอากาศปากแตร (horn) แบบบ่วง (loop) และแบบร่อง (slit) เป็นต้น



รูปที่ 2.13 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล

เพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเดียวกันกับการโพลาไรซ์ของสัญญาณที่ส่งมาหากเกิดการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากการจัดการโพลาไรซ์ไม่ถูกต้อง (เช่น สัญญาณที่รับได้เป็นการโพลาไรซ์ทางแนวตั้งแต่สายอากาศที่ใช้มีการจัดการโพลาไรซ์ทางแนวนอน) เรียกว่า เกิดการแยกการโพลาไรซ์แบบไขว้ (cross-polarization isolation)

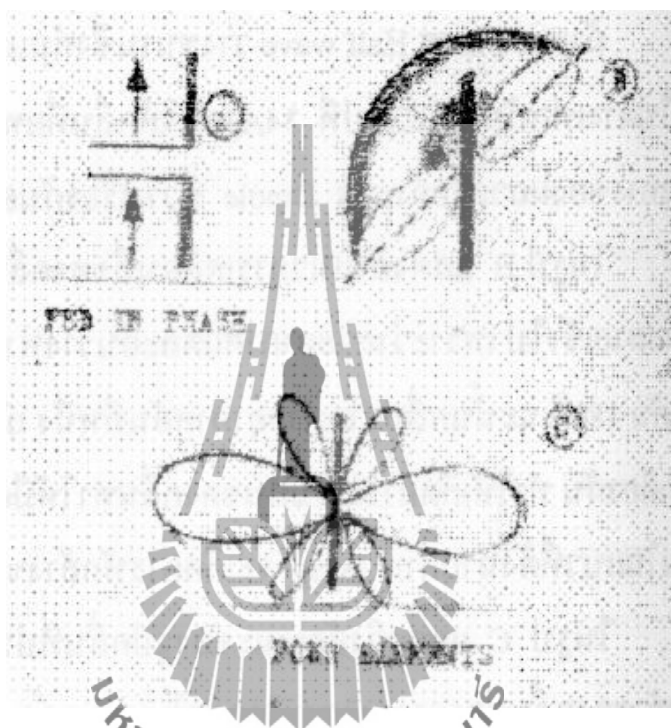
2.4 สายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ (Collinear Array Antenna)

แถวลำดับของสายอากาศ (Antenna Arrays) หมายถึงการนำเอาสายอากาศหลายๆตัวมาจัดวางเรียงกัน โดยมีระยะห่างที่แน่นอนโดยสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับเรียกว่าองค์ประกอบ (element) ซึ่งการนำเอาองค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับจะทำให้สมรรถนะคล้ายคลึงกับสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่มาก แต่การจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้นจะสามารถขจัดปัญหาในเรื่องของกลไกต่างๆ อันเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่ของสายอากาศได้

ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับจะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ นอกจากนี้สายอากาศแบบแถวลำดับยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้แก่แต่ละองค์ประกอบได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นที่ต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทได้

ในกรณีนี้ได้เลือกใช้แถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล ซึ่งตรงตามลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสถานีวิทยุระบบ FM โดยลักษณะโครงสร้างของสายอากาศแบบคอลลิเนียร์ ประกอบด้วยสายอากาศแบบ half wave ถูกวางไว้ในแนวเดียวกัน(ปลายต่อปลาย) ดังแสดงในรูป 14 A และเมื่อ

ป้อนกำลังเข้าไปทำให้เกิดเฟสเดียวกัน เรียกว่า collinear array เมื่อมองจากปลาย array เข้าไป รูปคลื่นเป็นวงกลมเหมือนกันกับใช้ไดโพลเพียงอันเดียว การจัด array ลักษณะนี้เพื่อที่จะบีบ รูปคลื่นแบบโดนัทให้ตีบหรือแคบเข้าไป เมื่อใช้จำนวนไดโพลเพิ่มขึ้นรูปคลื่นก็จะยิ่งแบนลงมาดัง รูปที่ 14 B ส่วนในรูปที่ 14 C เป็นการใส่ไดโพลถึง 4 อัน ทำให้ลำคลื่นแคบลงและมี lobe เล็ก เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.14 แกนลำคลื่นแบบคอลลิเนียร์

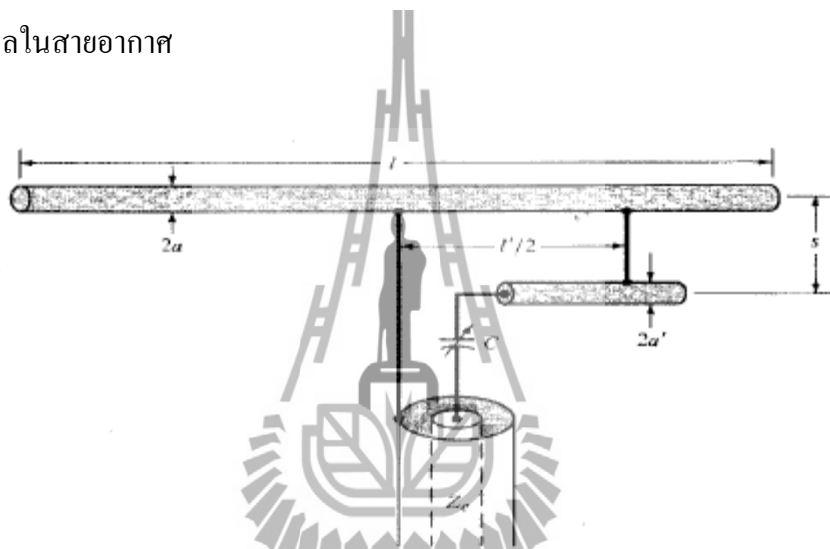
2.4.1 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ (Gain of Array Antennas)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางรวมทั้งค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับ มักจะมีค่ามากกว่ากรณีของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งคุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่างมากทั้งในการส่งและรับสัญญาณ ในการส่งสัญญาณนั้น สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีจะสามารถรวบรวมกำลังงานให้อยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆได้ ซึ่งให้ผลเสมือนว่าเกิดการเพิ่มกำลังงานให้กับจุดนั้นๆ ของเครื่องส่ง ส่วนทางด้านรับสายอากาศจะทำหน้าที่เสมือนว่าเลือกรับคลื่นที่เข้ามาในทิศทางที่เจาะจง โดยจะไม่เลือกรับสัญญาณที่เราไม่ต้องการรวมทั้งการแทรกสอดจากทิศทางอื่นๆ

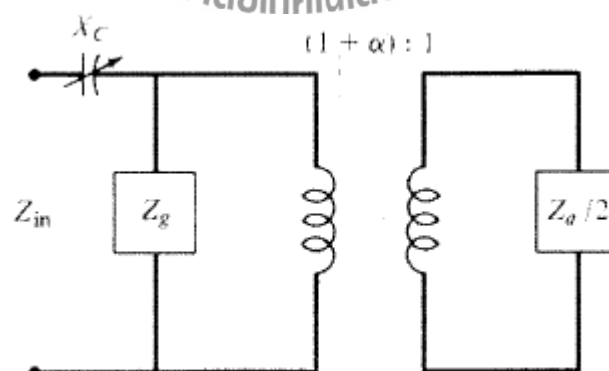
2.5 การแมตซิ่ง (Matching Network)

ก่อนที่จะนำสายอากาศไปใช้งานจริง ต้องทำการแมตซิ่ง เพื่อให้สายอากาศสามารถใช้งานได้จริงในควมถี่ที่ต้องการ สำหรับโครงการนี้ทำการแมตซิ่งสายอากาศกับสายโคแอกเซียล 50 โอห์ม ในที่นี้แนะนำวิธีการแมตซิ่งแบบแกมมา

การแมตซิ่งแบบแกมมา (gamma match) มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.15 เป็นรูปแบบที่มีลักษณะไม่สมดุลของการแมตซิ่งแบบที่ ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ความสะดวกสูงในการต่อกับสายอากาศ เพื่อทำการแมตซิ่งกับสายโคแอกเซียล นอกจากนั้นในส่วนของกรแมตซิ่งที่ต่ออยู่ระหว่างตรงกลางของสายอากาศกับข้างใดข้างหนึ่งของสายอากาศเพียงข้างเดียว เพื่อให้การกระจายของกระแสเกิดขึ้นอย่างสมดุลในสายอากาศ



รูปที่ 2.15 การแมตซิ่งแบบแกมมา



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูล

ก. วงจรสมมูล (Equivalent Circuit)

การแมตซ์แบบแกมม่านั้น เพื่อสร้างตัวเก็บประจุ (capacitor) ซึ่งมีลักษณะอนุกรมอยู่กับ ก้านแกมมา (gamma rod) ดังรูปที่ 4.15 แสดงวงจรสมมูลของการแมตซ์แบบแกมมา ซึ่งอิมพีแดนซ์ขาเข้า (input impedance) เท่ากับ

$$Z_{in} = -jX_c + \frac{Z_g [(1+\alpha)^2 Z_a]}{2Z_g + (1+\alpha)^2 Z_a} \quad (2.10)$$

เมื่อ Z_a คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศในอากาศว่าง ที่ยังไม่ต่อวงจรแกมมาแมตซ์

ข. การออกแบบ (Design Procedure)

1. หาค่าประกอบตัวแบ่งกระแส (Current division factor, α) จากสมการ

$$\alpha \approx \frac{\ln(v)}{\ln(v) - \ln(u)} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$u = \frac{a}{\alpha} \quad \text{และ} \quad v = \frac{s}{\alpha^2}$$

2. หาค่า Z_a โดยวัดจากจุดกลางของสายอากาศ (ยังไม่ต่อก้านแกมมา)
3. หาค่า Z_2 จากสมการ

$$Z_2 = R_2 + jX_2 = (1 + \alpha)^2 \frac{Z_a}{2} \quad (2.12)$$

4. หาค่า Z_0 โดยวัดสายอากาศที่ต่อก้านแกมมาแล้ว
5. ทำการนอมอลไรซ์ (normalized) Z_2 ดังสมการ

$$Z_2 = \frac{Z_2}{Z_0} = \frac{R_2 + jX_2}{Z_0} = r_2 + jx_2 \quad (2.13)$$

6. ทำการกลับค่า Z_2 จะได้ค่าแอดมิตแตนซ์ (admittance) $y_2 = g_2 + jb_2$ นำค่าไปลงบนสมิทชาร์ต (smith chart)

7. หาค่ารีแอกแตนซ์ที่เกิดจากก้านแกมมา Z_g

$$z_g = j \tan \left(k \frac{l'}{2} \right) \quad (2.14)$$

ก้านแกมมา (gamma rod) ต้องมีค่าน้อยกว่าครึ่งความยาวคลื่นมากๆ ($\ll \lambda/2$) ประมาณ 0.03 ถึง 0.06 λ

8. ทำการกลับค่า Z_g จากข้อ 7 จะได้ $y_g = g_g + jb_g$ นำค่าไปพล็อตลงบนสมิทชาร์ต

9. บวกค่าแอดมิตแตนซ์ (ข้อ 6 และ 8) จะได้ค่าแอดมิตแตนซ์อินพุต

$$y_{in} = y_2 + y_g = (g_2 + g_g) + j(b_2 + b_g) \quad (2.15)$$

10. กลับค่าอินพุตแอดมิตแตนซ์ y_{in}

$$z_{in} = r_{in} + jx_{in} \quad (2.16)$$

11. ทำการ unnormalized Z_{in}

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} = Z_0 z_{in} \quad (2.17)$$

12. นำค่าตัวเก็บประจุ C ที่ให้รีแอกแตนซ์เท่ากับขนาดของ X_{in}

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f_0 C} = X_{in} \quad (2.18)$$

เมื่อทำการแมตช์สมบูรณ์แล้ว ส่วนจริง R_{in} ของอินพุตอิมพีแดนซ์ ก็จะเท่ากับ Z_c ของสายโคแอกเซียล และสามารถเปลี่ยนแปลงความยาวของก้านแกมมา เพื่อปรับค่า C ได้

2.6 สรุป

สายอากาศสำหรับสถานีส่งวิทยุระบบ FM ที่มีคุณสมบัติที่สำคัญเช่น แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบทิศทาง การโพลาไรซ์แบบเส้นตรงความกว้างแถบที่แคบเพียงพอเป็นต้น สายอากาศเส้นตรงในแนวตั้ง เมื่อได้ลักษณะพื้นฐานของสายอากาศแล้วจะนำไปจำลองโครงสร้างเพื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 ในบทต่อไป



บทที่ 3

การจำลองโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและขั้นตอนการใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC2 เพื่อใช้ในการออกแบบสายอากาศคอลลิเนียลโพลเส้นตรงแนวตั้ง

3.2 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC2 เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ลิเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา และเป็นโปรแกรมประเภทฟรีแวร์ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดมาใช้ได้โดยง่ายจาก <http://www.qsl.net/wb6tpu/swindex.html> การจะสั่งให้โปรแกรมทำงานนั้นผู้ใช้จะต้องจัดเรียงรหัสทางคอมพิวเตอร์ (User-oriented computer code) ให้กับโปรแกรมเพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใดๆที่มีรูปทรงไม่เจาะจงรหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปนั้นคือการสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็กๆ (wire) หรือพื้นผิว (surface) จำนวนมากซึ่งในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation: EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (induced current) บนโครงสร้างนั้นซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดหรือสนามที่ตกกระทบ (incident field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Integral Equation: MFIE) ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการการกระตุ้นที่สามารถที่จะเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป (applied voltage source) หรือคลื่นระนาบที่ตกกระทบ (incident plane wave) 4NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล ภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ (Radar Cross Section: RCS) อิมพีแดนซ์ แอดมิตแตนซ์ (admittance) อัตราขยาย สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) การใช้กำลังงาน (power budget) และการต่อเชื่อมร่วมระหว่างสายอากาศ (mutual coupling)

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในโครงการฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศโดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยเส้นลวดขนาดเล็กดังนั้นสมการที่ใช้จึงเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้านี้เหมาะที่จะนำมาใช้แก้ปัญหา

โครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นผิวที่มีความหนาไม่มากและไม่มีลักษณะเป็นตัวนำปิดทึบได้ดีกว่าการใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก

3.3 การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สำหรับการจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวดนั้น อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส 4NEC2 คือเซ็กเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น การกำหนดเซ็กเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ จำนวนของเซ็กเมนต์ควรมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะต้องการสำหรับความถูกต้องเพราะ โปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเซ็กเมนต์เพิ่มขึ้น

เซ็กเมนต์เส้นลวดจะถูกกำหนดโดยระบบพิกัด (co-ordinate) ของจุดปลายทั้งสองของเซ็กเมนต์และขนาดของรัศมีการกำหนดความยาวเซ็กเมนต์ (segment length: Δ) จะสัมพันธ์กับค่าของความยาวคลื่น λ โดยปกติ Δ ควรจะมีค่าน้อยกว่า 0.1λ ที่ความถี่ที่ต้องการ ในบางครั้งอาจมีการใช้เซ็กเมนต์ที่มีความยาวมากกว่านั้นบนเส้นลวดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เซ็กเมนต์ที่สั้นกว่าเช่น 0.05λ หรือน้อยกว่านี้อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณที่มีความสำคัญของสายอากาศ ขนาดของเซ็กเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลองเนื่องจากกระแสจะถูกคำนวณที่ตรงกลางของแต่ละเซ็กเมนต์ เซ็กเมนต์ที่มีขนาดสั้นมากๆเช่นน้อยกว่า $10^{-3} \lambda$ ไม่ควรนำมาใช้เพราะความเหมือนกันขององค์ประกอบค่าคงที่และโคไซน์ของการกระจายของกระแส จะทำให้ผลจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (wire radius: a) ซึ่งสัมพันธ์กับ λ จะถูกจำกัดโดยการประมาณที่ใช้ในเคอร์เนล (kernel) ของสมการอินทิกรัลเชิงเลขแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีการประมาณ 2 แบบด้วยกันที่ใช้ใน 4NEC2 คือเคอร์เนลแบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง สำหรับเคอร์เนลแบบเส้นลวดบางนั้นกระแสบนพื้นผิวของแต่ละเซ็กเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดนำไฟฟ้าเล็กๆของกระแสบนแกนเซ็กเมนต์ ส่วนในเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง กระแสจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบพื้นผิวของเซ็กเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ใน 4NEC2 จะบังคับเงื่อนไขกระแสและความหนาแน่นประจุตามแนวเส้นลวดที่จุดเชื่อมต่อและที่ปลายเส้นลวดจากเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้เซ็กเมนต์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลายถ้าเซ็กเมนต์มีการซ้อนทับกันเกิดขึ้นที่ปลายของแต่ละอัน 4NEC2 จะไม่ยอมให้กระแสไหลจากเซ็กเมนต์หนึ่งไปยังเซ็กเมนต์อื่นๆเซ็กเมนต์จะเหมือนกับต่อกันเมื่อระยะห่างของจุดปลายของแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า 10^{-3} เท่าของความยาวเซ็กเมนต์ที่สั้นที่สุดดังนั้นถ้าเป็นไปได้ควรเชื่อมต่อเซ็กเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

ข้อจำกัดของการจำลองโครงสร้างด้วยตาข่ายเส้นลวด (wire-grid) มีดังต่อไปนี้

(1) เช็กเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกันเนื่องจากการแบ่งกระแสมุมระหว่างสองเช็กเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้นไม่สามารถสรุปได้เช็กเมนต์ที่ซ้อนทับกันอาจจะมีผลในสมการเมตริกซ์เอกฐาน (singular matrix equation)

(2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเช็กเมนต์ที่เชื่อมต่อกัน อาจจะมีผลทำให้ความแม่นยำลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่า Δ/a มีค่าน้อยปัญหานี้ สามารถแก้ได้โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับตลอดหลายเช็กเมนต์

(3) จำเป็นที่จะต้องมิเช็กเมนต์ที่จุดซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโครงข่ายหรือแหล่งกำเนิดแรงดันสำหรับช่องว่างการกระตุ้นก็จำเป็นต้องมีเส้นลวดต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้นแรงดันตกคร่อมที่ต้องการสามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

(4) จำนวนเส้นลวดที่จะนำมาต่อที่จุดเชื่อมต่อใดๆนั้นไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส 4NEC2

ข้อมูลที่ใช้อธิบายสายอากาศและสภาพแวดล้อมและคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการจะคำนวณจะเป็นอินพุตที่จะใส่เข้าไปคล้ายกับบัตรเจาะรูที่เป็นข้อมูลใส่ให้กับคอมพิวเตอร์ เมนเฟรมในสมัยก่อน กลุ่มของรหัสข้อมูลในการทำงานครั้งหนึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ประเภทด้วยกัน ส่วนแรกเริ่มต้นด้วยรหัสหนึ่งชุดหรือมากกว่านั้นซึ่งบรรยายรายละเอียดของการทำงานซึ่งจะพิมพ์เป็นตัวหนังสือที่จุดเริ่มต้นของไฟล์เอาต์พุตต่อมาจะตามด้วยรหัสข้อมูลระบุแบบทางเรขาคณิตซึ่งจะระบุรูปทรงของสายอากาศและสุดท้ายจะเป็นส่วนของรหัสควบคุมโปรแกรมซึ่งจะระบุตัวแปรทางไฟฟ้าเช่นความถี่การโหลด (loading) การกระตุ้น (excitation) รวมทั้งความต้องการให้คำนวณกระแสและสนามของสายอากาศ

รหัสข้อมูลทุกรหัสจะมีตัวอักษร 2 ตัวในคอลัมน์ที่หนึ่งและที่สองเพื่อเป็นการระบุรหัสให้กับโปรแกรม ตัวอย่างเช่น รหัสระบุข้อมูลเส้นลวด (Wire Specification: GW) ซึ่งจะเป็นรหัสที่ใช้ในการกำหนดเส้นลวดขึ้นมาระหว่างจุดสองจุดซึ่งมีลักษณะของข้อมูลที่จะต้องใส่ลงไปดังนี้

GW	I1	I2	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
ITG	NS	XW1	YW1	ZW1	XW2	YW2	ZW2	RAD	

ความหมายของตัวแปรแต่ละตัวที่จะต้องใส่ลงไปคือ

ITG (I1) คือป้ายแสดงหมายเลข (tag) ที่จะกำหนดให้เส้นลวดมีหมายเลขประจำเส้นลวดเป็นค่าเท่าใดรวมทั้งเช็กเมนต์ทุกเช็กเมนต์ของเส้นลวดก็จะมีหมายเลขตามหมายเลขเส้นลวดนั้นด้วย

YW1 (F2) คือพิกัด y ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด

ZW1 (F3) คือพิกัด z ของจุดปลายที่หนึ่งของเส้นลวด
 XW2 (F4) คือพิกัด x ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด
 YW2 (F5) คือพิกัด y ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด
 ZW2 (F6) คือพิกัด z ของจุดปลายที่สองของเส้นลวด
 RAD (F7) คือรัศมีของเส้นลวด

การกำหนดรัศมีของเส้นลวดนั้นจะต้องเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดที่ทำให้พื้นที่ผิวรวมของเส้นลวดทั้งหมดมีค่าเท่ากับพื้นที่ผิวของตัวนำของสายอากาศ

จากรหัสตัวอย่างข้างต้นเมื่อทำการใส่ตัวแปรต่างๆลงไปแล้วและสั่งให้โปรแกรมทำงาน 4NEC2 จะสร้างเส้นลวดให้ 1 เส้นซึ่งเส้นลวดนี้จะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์เล็กๆจำนวน NS เซกเมนต์ การสร้างแบบจำลองของสายอากาศสามารถทำได้โดยการใส่รหัสที่มีลักษณะเดียวกันไปเรื่อยๆก็จะทำให้สามารถสร้างโครงสร้างสายอากาศและหาคุณสมบัติของสายอากาศที่ต้องการได้ นอกจากนี้โครงสร้างที่สร้างขึ้นโดย 4NEC2 ยังสามารถกำหนดสภาพนำ (conductivity) ให้เท่ากับสภาพนำของโลหะที่จะใช้ทำสายอากาศได้ เช่นในกรณีนี้สายอากาศต้นแบบจะสร้างขึ้นโดยใช้อะลูมิเนียม ดังนั้นในการคำนวณโดยใช้ 4NEC2 ก็จะทำให้การกำหนดสภาพนำของโครงสร้างด้วยค่าสภาพนำของอะลูมิเนียมคือ 5.08×10^7 S/m โดยการใส่คำสั่งโหลด (load)

ในการตรวจสอบโครงสร้างของสายอากาศว่าได้สร้างถูกต้องเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ นั้นสามารถดูได้โดยใช้โปรแกรม necview ซึ่งจะแสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ใส่รหัสใน 4NEC2 ออกมาเป็นตาข่ายเส้นตรงตามที่กำหนดในระบบพิกัด x, y และ z นอกจากนี้โปรแกรม necview ยังใช้ในการดูผลแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระบบพิกัด x, y และ z ของสายอากาศที่ 4NEC2 คำนวณออกมาได้ด้วยสำหรับไฟล์เอาต์พุตที่ได้ออกมาจากการรันโปรแกรม 4NEC2 นั้นจะเป็นไปตามรูปแบบของข้อมูลที่ใส่เข้าไปเริ่มต้นด้วยการอธิบายตามมาด้วยข้อมูลทางเรขาคณิต และจากนั้นเป็นผลของตัวแปรที่ต้องการจะคำนวณ

4NEC2 ได้รับการยอมรับว่าเป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศได้อย่างถูกต้องและแม่นยำแต่สำหรับการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศด้วย 4NEC2 นั้นยังมีความผิดพลาดอยู่บ้างเนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม 4NEC2 เองจึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิธีการแก้ไขปัญหาการคำนวณอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ผิดพลาดนี้

3.4 การใช้งานโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

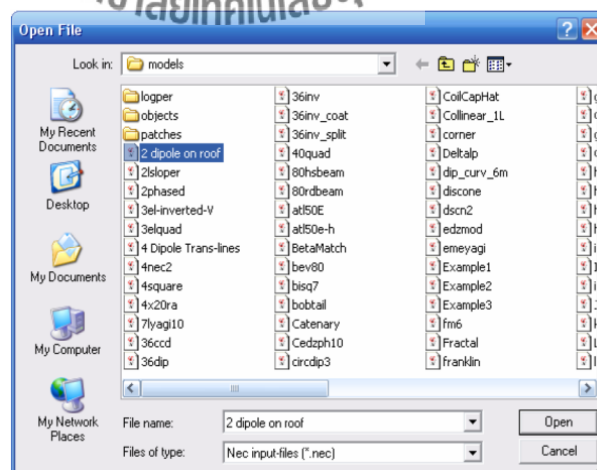
3.4.1 การเข้าใช้งานโปรแกรม

1) ดับเบิลคลิกที่ไอคอนโปรแกรม 4nec2x จะเห็นหน้าจอโปรแกรมดังรูปที่ 3.1

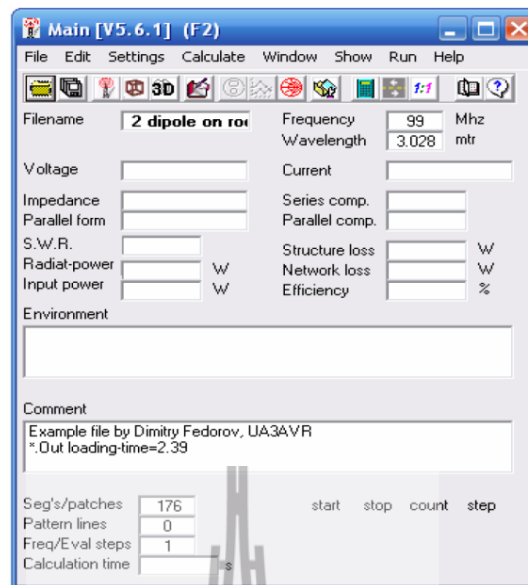


รูปที่ 3.1 ไอคอน 4nec2x ในการเข้าใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

2) เลือกไฟล์ของแบบจำลองใดๆเพื่อเข้าสู่หน้าจอหลักของโปรแกรมเช่น 2 dipole on roof ดังรูปที่ 3.2 จากนั้นหน้าต่างเมนูหลักของโปรแกรมจะปรากฏขึ้นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 การเลือกไฟล์แบบจำลอง



รูปที่ 3.3 เมนูหลักของโปรแกรม

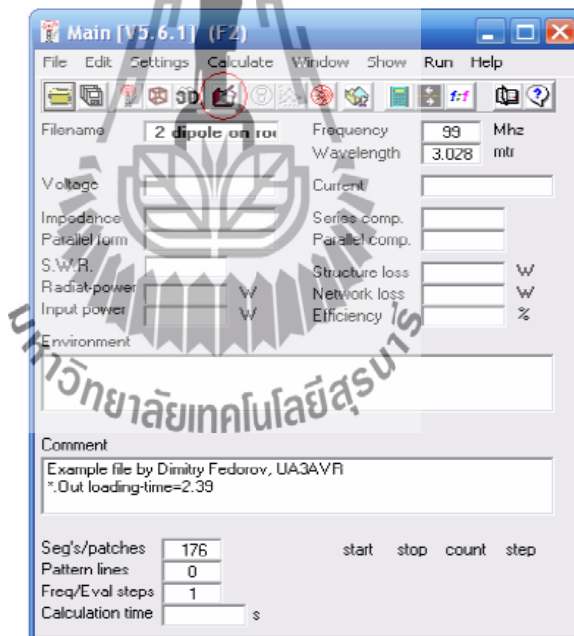
ในเมนูหลักของโปรแกรมแต่ละส่วนมีความหมายดังนี้

- Filename:** แสดงชื่อไฟล์ที่ใช้งานอยู่
- Frequency:** แสดงค่าความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ โครงสร้างสายอากาศในหน่วย เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz)
- Wavelength:** ค่าความยาวคลื่นที่คำนวณจากค่าความถี่ใช้งานในหน่วยเมตร (m)
- Voltage:** ค่าแรงดันที่ป้อนให้กับ โปรแกรม
- Current:** ค่ากระแสที่โปรแกรมคำนวณได้
- Impedance:** ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณ ได้จาก โปรแกรมณความถี่ใช้งาน
- Series comp.:** เป็นค่าที่ได้จากการแมตช์ของสายอากาศแบบอนุกรมที่ความถี่ใช้งาน
- Parallel form:** ค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณ ได้จาก โปรแกรมณความถี่ใช้งานแบบขนาน
- Parallel comp.:** เป็นค่าที่ได้จากการแมตช์ของสายอากาศแบบขนานที่ความถี่ใช้งาน
- Radiat-power:** ค่ากำลังงานที่ใช้ในการแผ่กระจายกำลังงานในหน่วยวัตต์ (W)
- Input power:** ค่ากำลังงานด้านเข้าในหน่วยวัตต์
- Structure loss:** ค่าความสูญเสียเนื่องจาก โครงสร้างในหน่วยวัตต์
- Network loss:** ค่าความสูญเสียเนื่องจาก โครงข่ายในหน่วยวัตต์
- Efficiency** ค่าประสิทธิภาพคิดเป็นเปอร์เซ็นต์
- Environment** ใช้แสดงเมื่อมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นจากการทำงานของ โปรแกรม

- Comment:** แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างโครงสร้าง
- Seg's/patches:** แสดงจำนวนเซ็กเมนต์ทั้งหมดใน โครงสร้าง
- Pattern line:** แสดงจำนวนบรรทัดในการสร้างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน
- Freq/Eval steps:** จำนวนความถี่ที่ต้องการผันแปร
- Calculation tim:** เวลาที่โปรแกรมใช้ในการทำงานของไฟล์นั้น
- Theta:** การกำหนดมุมในการหมุนเริ่มต้นและสิ้นสุดของมุม theta โดยเพิ่มค่าทีละเท่าๆกันจนครบ 360°
- Phi:** การกำหนดมุมในการหมุนเริ่มต้นและสิ้นสุดของมุม phi โดยเพิ่มค่าทีละเท่าๆกันจนครบ 360°

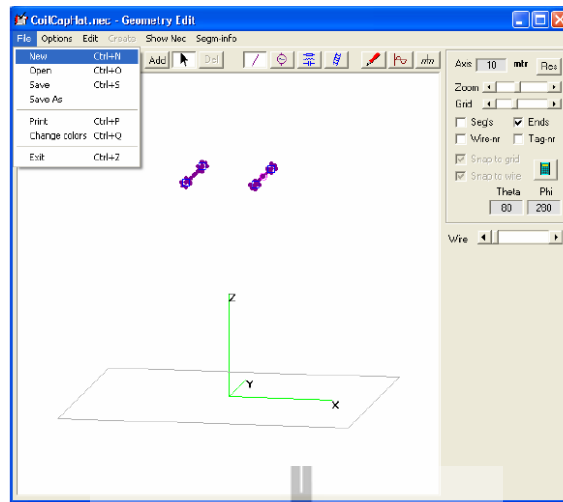
3.4.2 การออกแบบโครงสร้างของสายอากาศ

- 1) คลิกที่ไอคอน edit NEC input-file ดังรูปที่ 3.4

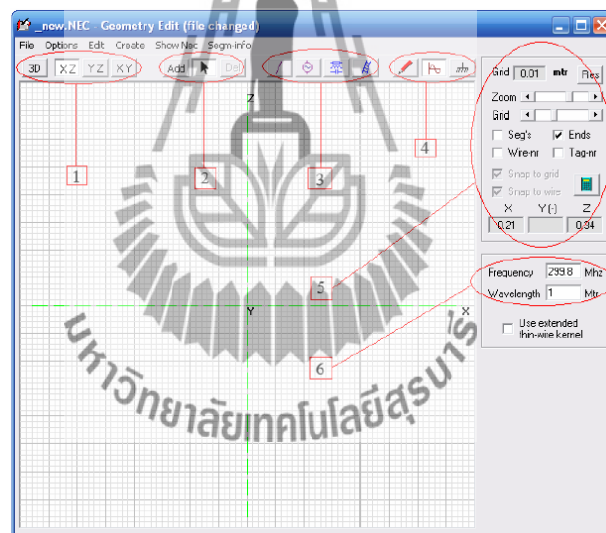


รูปที่ 3.4 ไอคอน edit NEC input-file บนหน้าต่างหลัก

จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง geometry edit ขึ้นให้ทำการเลือก file --> new ดังรูปที่ 3.5 เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนทำการออกแบบสายอากาศตัวใหม่ในหน้าต่าง geometry edit (file changed) ที่ปรากฏขึ้นตามมาดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การเลือกคำสั่ง new ในหน้าต่าง geometry edit เพื่อเข้าสู่หน้าต่าง geometry edit (file changed)



รูปที่ 3.6 หน้าต่าง geometry edit (file changed) และส่วนประกอบต่างๆ

จากรูปที่ 3.6 ความหมายของแต่ละส่วนมีดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 คือ ไอคอนเกี่ยวกับมุมมองของสายอากาศในแต่ละระนาบประกอบด้วย



3D คือมุมมองสายอากาศในลักษณะที่เป็น

XZ คือมุมมองสายอากาศในระนาบ XZ


YZ คือมุมมองสายอากาศในระนาบ YZ

 คือมุมมองสายอากาศในระนาบ XY

ส่วนที่ 2 คือ ไอคอนเกี่ยวกับการกระทำกับสายอากาศประกอบด้วย

 คือคำสั่งเพิ่มเช่นถ้าต้องการเพิ่มจุดป้อนแรงดันให้เลือกจุดป้อนแรงดัน (ดูส่วนที่ 3) จากนั้นเลือกไอคอน  แล้ววาดลงบนส่วนของสายอากาศบนระนาบตาต้องการ

 คือคำสั่งเลือก


 คือคำสั่งลบ

ส่วนที่ 3 คือ ไอคอนประเภทขององค์ประกอบของตัวโครงสร้างสายอากาศ


 คือ โครงสร้างสายอากาศที่เป็นเส้นตรง

 คือจุดป้อนสัญญาณ


 คือประเภทของโหลดได้แก่ตัวต้านทานตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ

 คือสายส่งสัญญาณ


ส่วนที่ 4 คือ ไอคอนเกี่ยวกับตำแหน่งความถี่และประเภทของกราวด์ตามลำดับ

 คือ ไอคอนที่ใช้ในการแสดงจำนวนเส้นตรงของโครงสร้างสายอากาศที่มีอยู่จำนวน เซกเมนต์และตำแหน่งของสายอากาศทั้งในแนวแกน X แกน Y และแกน Z

 คือความถี่และความยาวคลื่นที่ใช้ในการออกแบบ

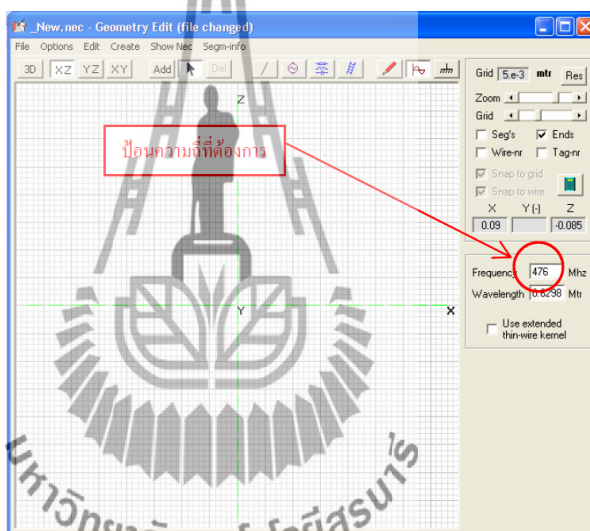
 คือประเภทของกราวด์ที่ต้องการใช้ในการออกแบบเช่นแบบอากาศว่างและแบบ สมบูรณ์แบบ

ส่วนที่ 5 คือส่วนที่ใช้ในการจัดการกับหน้าต่างในการออกแบบเช่นแสดงกริด (grid) ชุมเข้า- ออก ขยาย-ลดกริดและแสดงตำแหน่งของเมาส์ปัจจุบันในแนวแกน X แกน Y และแกน Z นอกจากนี้ใน

ส่วนนี้ยังประกอบไปด้วยไอคอน  ซึ่งใช้ในการรันโปรแกรมเมื่อทำการออกแบบสายอากาศเสร็จสิ้นแล้ว

ส่วนที่ 6 คือความถี่และความยาวคลื่นที่ใช้ในการออกแบบซึ่งเป็นสิ่งแรกสุดในการป้อนค่าพารามิเตอร์ก่อนที่จะทำการออกแบบตัวสายอากาศ


2) ป้อนค่าความถี่ของสายอากาศที่ต้องการออกแบบในที่นี้ใช้ 476 MHz ดังรูปที่ 3 จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความยาวคลื่นให้โดยอัตโนมัติ (หมายเหตุ การเลือกความถี่ในการออกแบบสายอากาศสามารถเลือกทำที่ความถี่ใดๆเนื่องจากในการใช้งานจริงสามารถทำการเปลี่ยนแปลงความถี่ปฏิบัติการในการใช้งานได้โดยการปรับความยาวของส่วนที่เป็นไดโพล



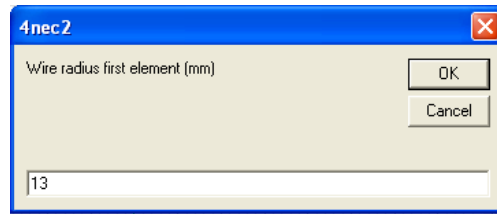
รูปที่ 3.7 การป้อนค่าความถี่สายอากาศที่ต้องการออกแบบ

3) วาดรูปโครงสร้างสายอากาศ โดยที่ในการออกแบบสายอากาศไดโพลนั้น จะทำการแบ่งการออกแบบเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นสายนำสัญญาณและส่วนที่เป็นสายอากาศไดโพลหรือสายส่ง

3.5 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล

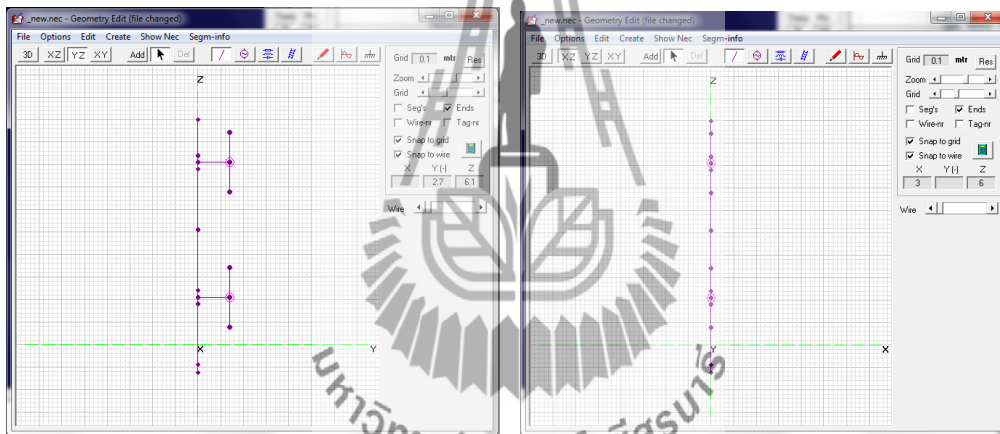
ในการออกแบบสายอากาศ จะทำการวาดรูปโดยการเลือกไอคอน  ตามด้วยไอคอน **Add** จากนั้นทำการวาดรูปสายอากาศลงในระนาบตามที่ต้องการ (ในที่นี้วาดในระนาบXY) ซึ่งเมื่อทำการวาดรูปเสร็จสิ้นแล้วหนึ่งเส้น จะปรากฏหน้าต่างที่ให้ระบุขนาดรัศมีของโครงสร้างสายอากาศในหน่วยมิลลิเมตร เนื่องจากในโครงการนี้ได้ใช้ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 1 นิ้ว

หรือประมาณ 25.4 มิลลิเมตร ดังนั้นขนาดของรัศมีจึงเท่ากับ 12.7 มิลลิเมตร ซึ่งประมาณได้ว่าเท่ากับ 13 มิลลิเมตร จากนั้นจึงป้อนตัวเลข 13 ลงในหน้าต่างที่ปรากฏขึ้นมาตอนแรกดังรูปที่ 3.8

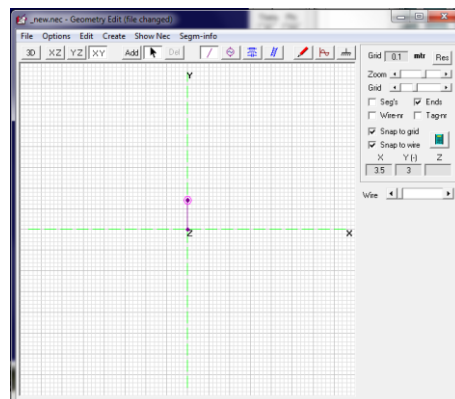


รูปที่ 3.8 หน้าต่างแสดงขนาดรัศมีที่ต้องการในการออกแบบ

จากนั้นทำการวาดสายอากาศให้สมบูรณ์ โดยที่ส่วนต้นของสายอากาศให้ต่อกับแหล่งจ่ายที่มีลักษณะดังรูปที่ 3.9



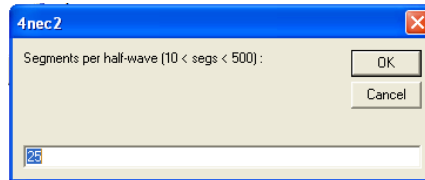
(a) ภาพวาดในระนาบ YZ (b) ภาพวาดในระนาบ XZ



(c) ภาพวาดในระนาบ XY

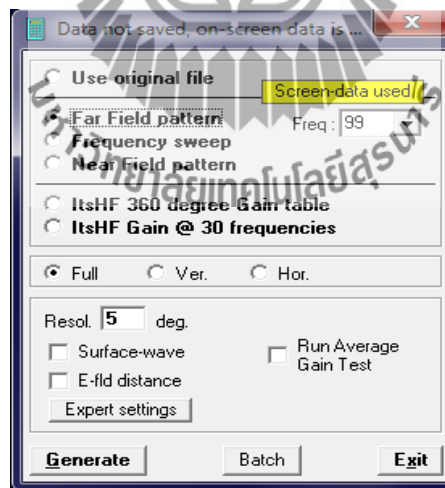
รูปที่ 3.9 ภาพวาดสายอากาศ พร้อมทั้งลักษณะการป้อนแหล่งจ่าย

เมื่อเลือกคำสั่ง auto segmentation แล้วจะปรากฏหน้าต่างเพื่อให้ระบุค่าของจำนวนเซ็กเมนต์ที่ต้องการ ซึ่งเมื่อหน้าต่างดังกล่าวปรากฏให้ทำการระบุค่าเซ็กเมนต์ให้เท่ากับ 25 ซึ่งเป็นจำนวนขนาดกลางของโปรแกรม ดังรูปที่ 3.12



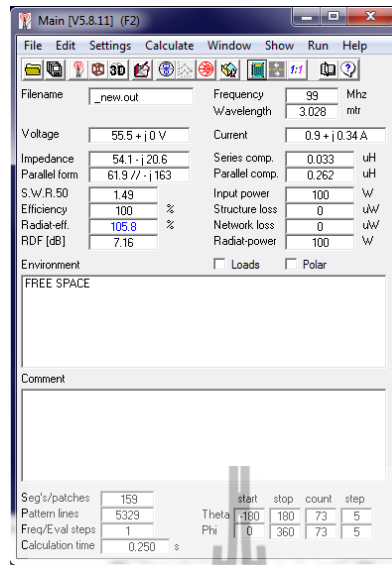
รูปที่ 3.12 หน้าต่างแสดงจำนวนเซ็กเมนต์ที่ต้องการ

จากนั้นทำการคำนวณด้วยโปรแกรมเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าโดยการเลือกไอคอนเจเนอร์เรท  ที่อยู่ด้านขวาของหน้าต่าง สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าที่ต้องการคือ $Z_{in}=50+jX$ เพื่อให้เข้ากันกับสายส่งสัญญาณที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม ส่วนค่าที่เป็จำนวนจินตภาพจะมีค่าเท่าใดก็ได้ แต่ควรมีค่าน้อย ๆ หลังจากที่ได้เลือกที่ไอคอนเจเนอร์เรทแล้วจะปรากฏหน้าต่างออกมา จากนั้นให้เลือกที่คำสั่ง far-field pattern จากนั้นกดปุ่ม **Generate** ดังรูปที่ 3.13



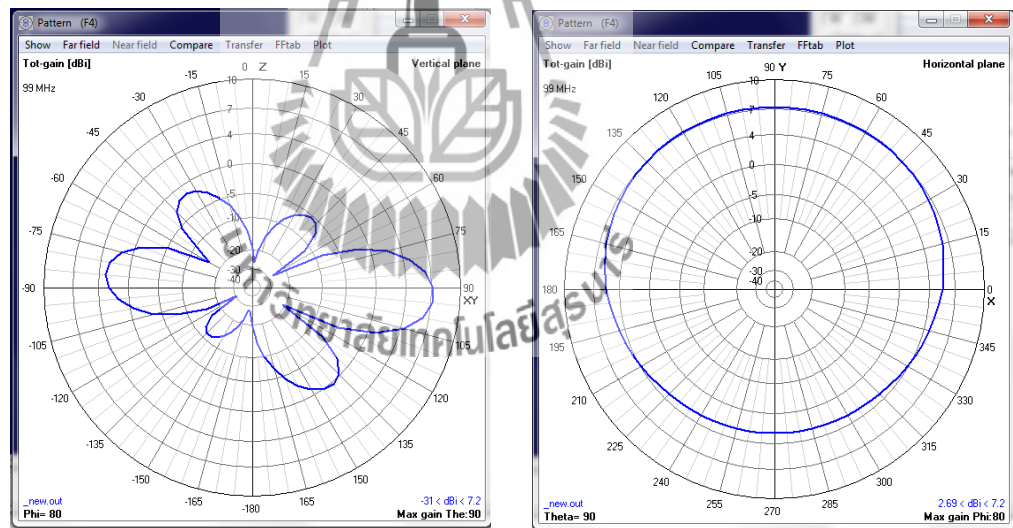
รูปที่ 3.13 หน้าต่างเจเนอร์เรท

ผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะแสดงผลที่ออกมาเป็นต่างจำนวน 3 หน้าต่างด้วยกันคือ
1. หน้าต่างหลักที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ต้องการ คือ อิมพีแดนซ์ขาเข้า ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 หน้าต่างหลักกับผลลัพธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศ

2. หน้าต่างที่แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของคลื่น ดังรูปที่ 3.15

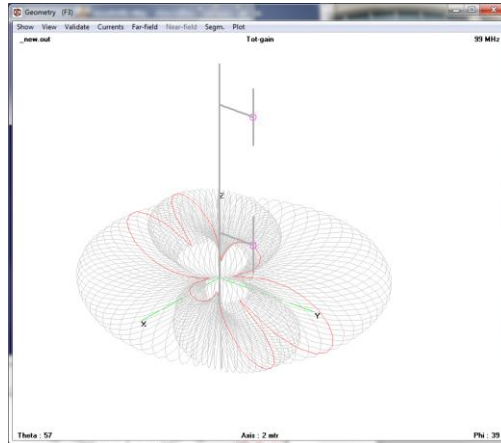


(ก) ในระนาบแนวตั้ง (Vertical plane)

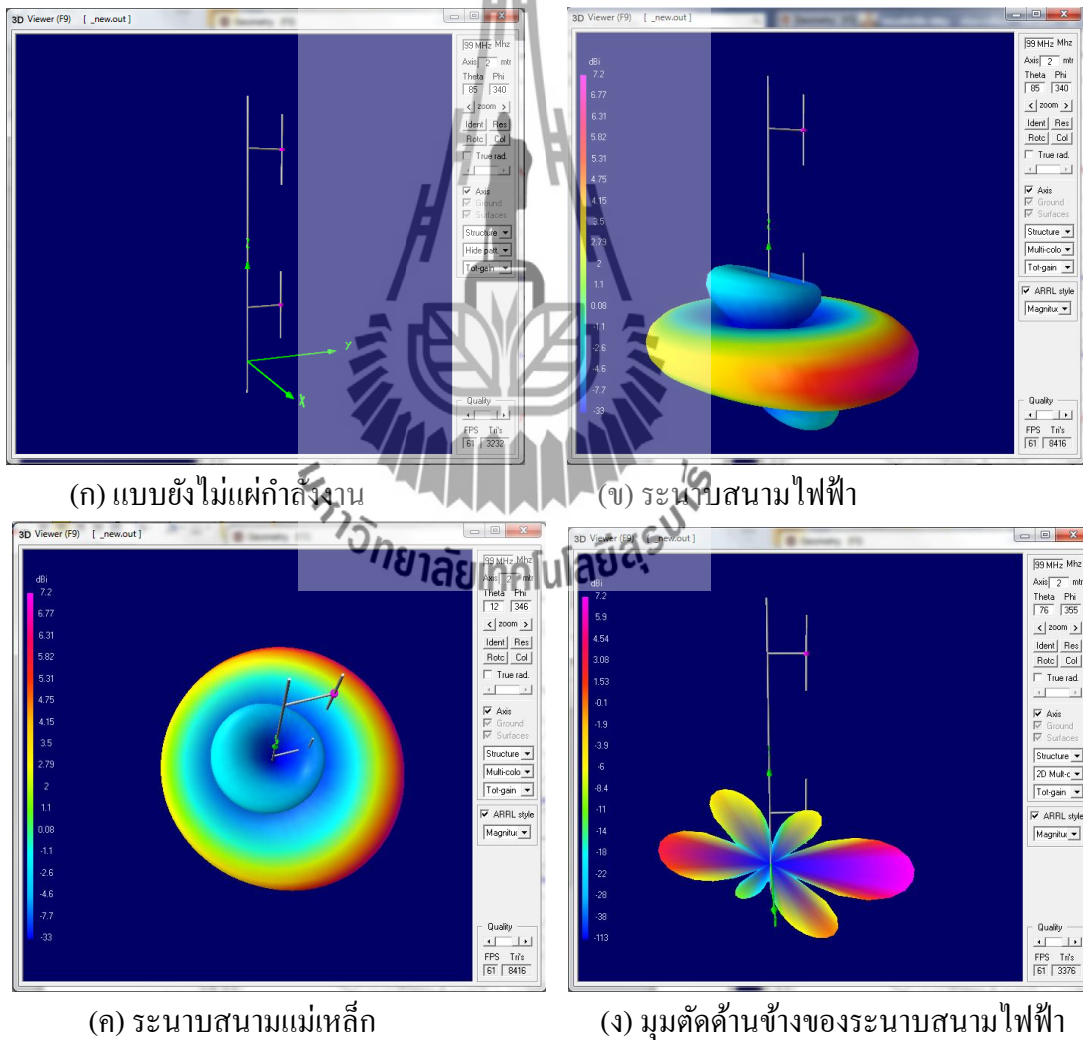
(ข) ในระนาบแนวนอน (Horizontal plane)

รูปที่ 3.15 หน้าต่างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสายอากาศแถวลำดับ

แบบคอลลิเนียร์ไดโพล แบบ 2 มิติ



รูปที่ 3.16 หน้าต่างรูปแบบโครงสร้างที่สมบูรณ์และการแก้กำลังงาน



(ก) แบบยังไม่แก้กำลังงาน


(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ค) ระนาบสนามแม่เหล็ก

(ง) มุมตัดด้านข้างของระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 3.17 หน้าต่างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสายอากาศแฉกลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล แบบ 3 มิติ

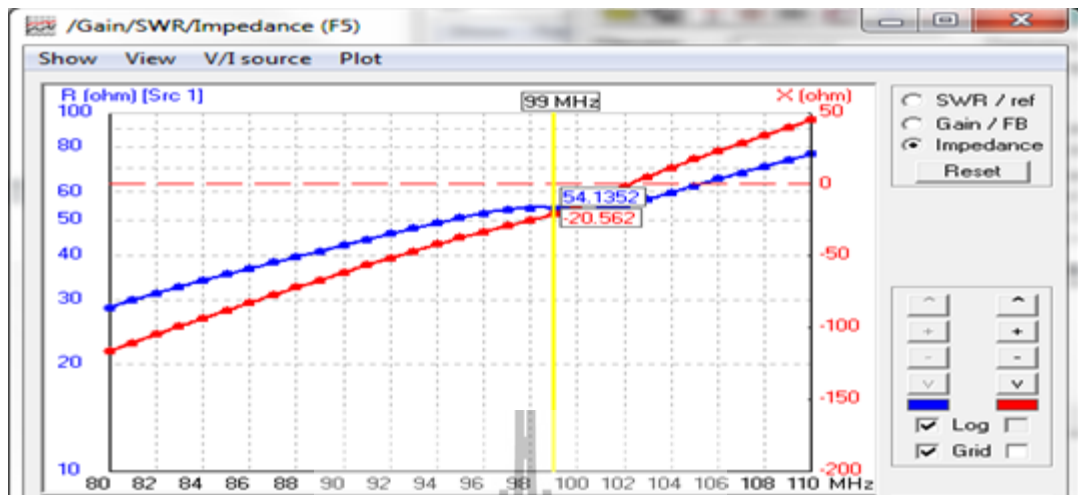
หลังจากที่ได้ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า $Z_{in} = 54.1 - j20.6$ โอห์ม ต่อไปจะเป็นการพิจารณาเทอมของค่าจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ขาเข้าหรือค่ารีแอกแตนซ์ (Reactance) คือค่า $-j20.6$ ซึ่งต้องการให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อให้เกิดการเรโซแนนซ์ (resonance) กับความถี่ใช้งานคือ 99 MHz

การดูความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าอิมพีแดนซ์สามารถทำได้โดยคลิกที่ไอคอนเจนอ์เรท  เมื่อปรากฏหน้าต่างใหม่ขึ้นมาให้ทำการเลือก use frequency loop พร้อมทั้งทำการกำหนดความถี่เริ่มต้นและความถี่สุดท้ายที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 การเลือกฟังก์ชันและการกำหนดความถี่ในหน้าต่างเจนอ์เรท

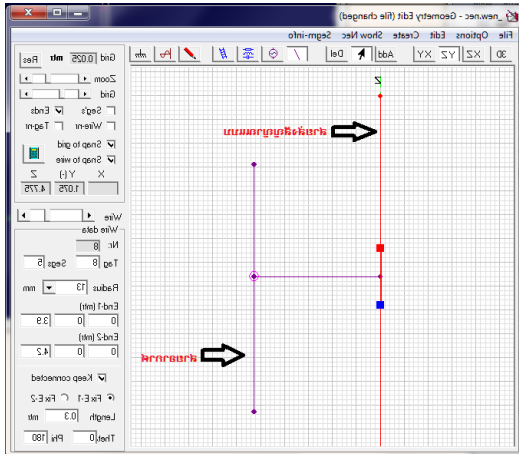
เมื่อกดปุ่ม **Generate** จะปรากฏหน้าต่างความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและความถี่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตามลำดับ แต่ที่ต้องการทราบคือค่าความถี่กับค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งสามารถทราบได้โดยเลือกที่เมนู show จากนั้นเลือก imped./phase จากนั้นจะปรากฏหน้าต่างที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการดังรูปที่ 3.19



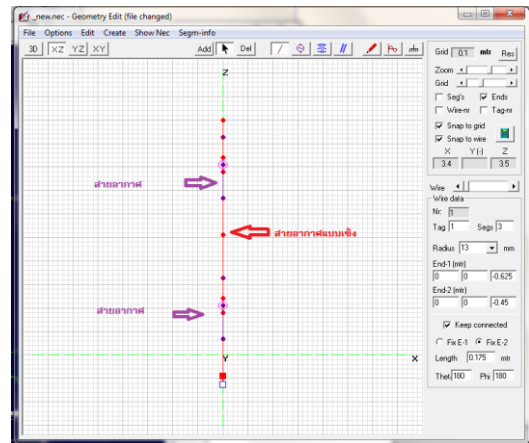
รูปที่ 3.19 หน้าต่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่าอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 3.19 พบว่าสายอากาศยังไม่ลงที่ความถี่ 99 MHz แต่กลับลงที่ความถี่ 102 MHz และจากรูปที่ 3.19 พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ยังไม่ลงที่ 50 โอห์ม แต่กลับลงที่ค่าอิมพีแดนซ์ 54.1 โอห์ม อย่างไรก็ตามสายอากาศที่ออกแบบสามารถปรับให้ค่าทุกค่าลงตัวได้โดยการใช้การแมทชิงแบบแกมมา (gamma match) ซึ่งได้กล่าวในบทที่ 2 แล้ว นอกจากนี้ในทางปฏิบัติผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมและการวัดผลจริงจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่มากในเรื่องอิมพีแดนซ์ เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณยังเป็นโปรแกรมระดับไม่สูงมากนัก

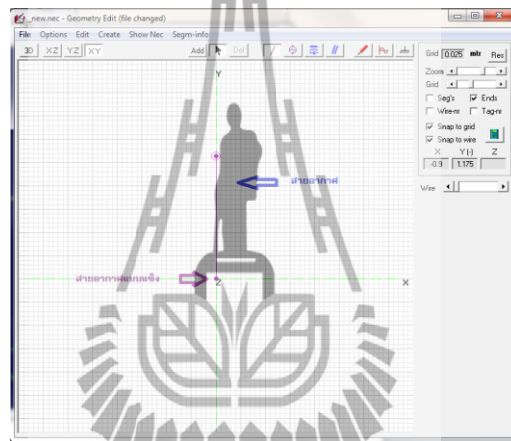
ในทางปฏิบัติการนำสายอากาศแฉวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลมาใช้งานจะต้องมีเสายึดเพื่อให้สายอากาศอยู่ในอากาศว่างหรือที่สูงได้ ในโครงงานนี้ได้มีการออกแบบนำสายส่งสัญญาณแบบแข็ง (rigid coaxial line) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทองแดงมาต่อเข้ากับสายอากาศไดโพลโดยนำมาจัดเป็นแฉวลำดับแบบคอลลิเนียร์ ซึ่งเป็นทั้งสายส่งสัญญาณและเสายึดเพื่อให้สายอากาศวางตัวอยู่ในอากาศว่างได้ ซึ่งสายส่งสัญญาณแบบแข็งนี้มีผลต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล ดังนั้นในการออกแบบด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 จะต้องทำการวาดสายส่งสัญญาณแบบแข็งที่บริเวณจุดป้อนสัญญาณสายอากาศดังรูป



(ก) ในระนาบ YZ

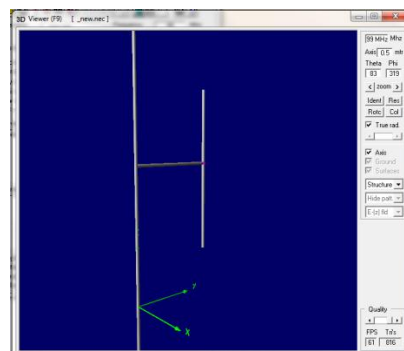


(ข) ในระนาบ XZ



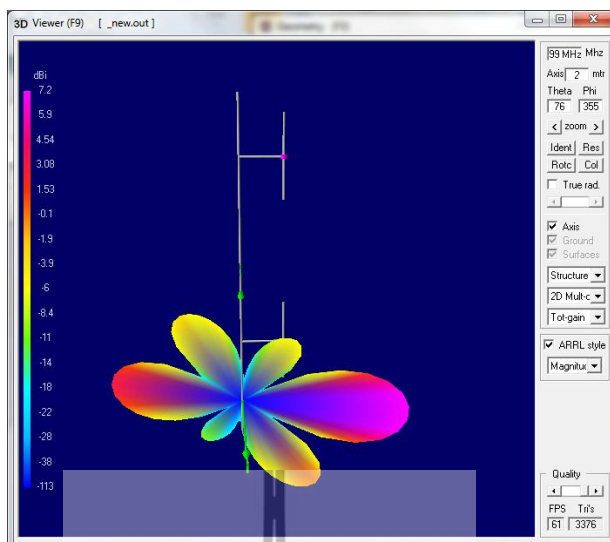
(ค) ในระนาบ XY

รูปที่ 3.20 ภาพวาดสายอากาศไดโพลกับสายส่งแบบแข็ง



รูปที่ 3.21 ภาพวาดสายอากาศแกลวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลกับสายส่งสัญญาณแบบแข็ง

แบบ 3 มิติ



รูปที่ 3.22 หน้าต่างแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสายอากาศที่สมบูรณ์ที่มีสายส่งสัญญาณแบบแข็งแบบ 3 มิติ

จากรูปที่ 3.22 จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น มีการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณซีกซ้ายจะมีลักษณะการแผ่กระจายคลื่นเล็กกว่าบริเวณซีกขวา อันเนื่องมาจาก ณ บริเวณดังกล่าวมีการรับสัญญาณที่ส่งมาได้น้อยลง เพราะมีสายส่งสัญญาณแบบแข็งบังอยู่

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล รวมทั้งรายละเอียดในการวิเคราะห์คุณสมบัติบางอย่างของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงตัวเลข ซึ่งก็คือแบบการแผ่กระจายกำลังงานของคลื่นและอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศและยังได้กล่าวถึงข้อจำกัดของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข ในบทต่อไปจะเป็นการนำสายอากาศที่ได้ถูกออกแบบโดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข ไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบจริงและการวัดผลค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

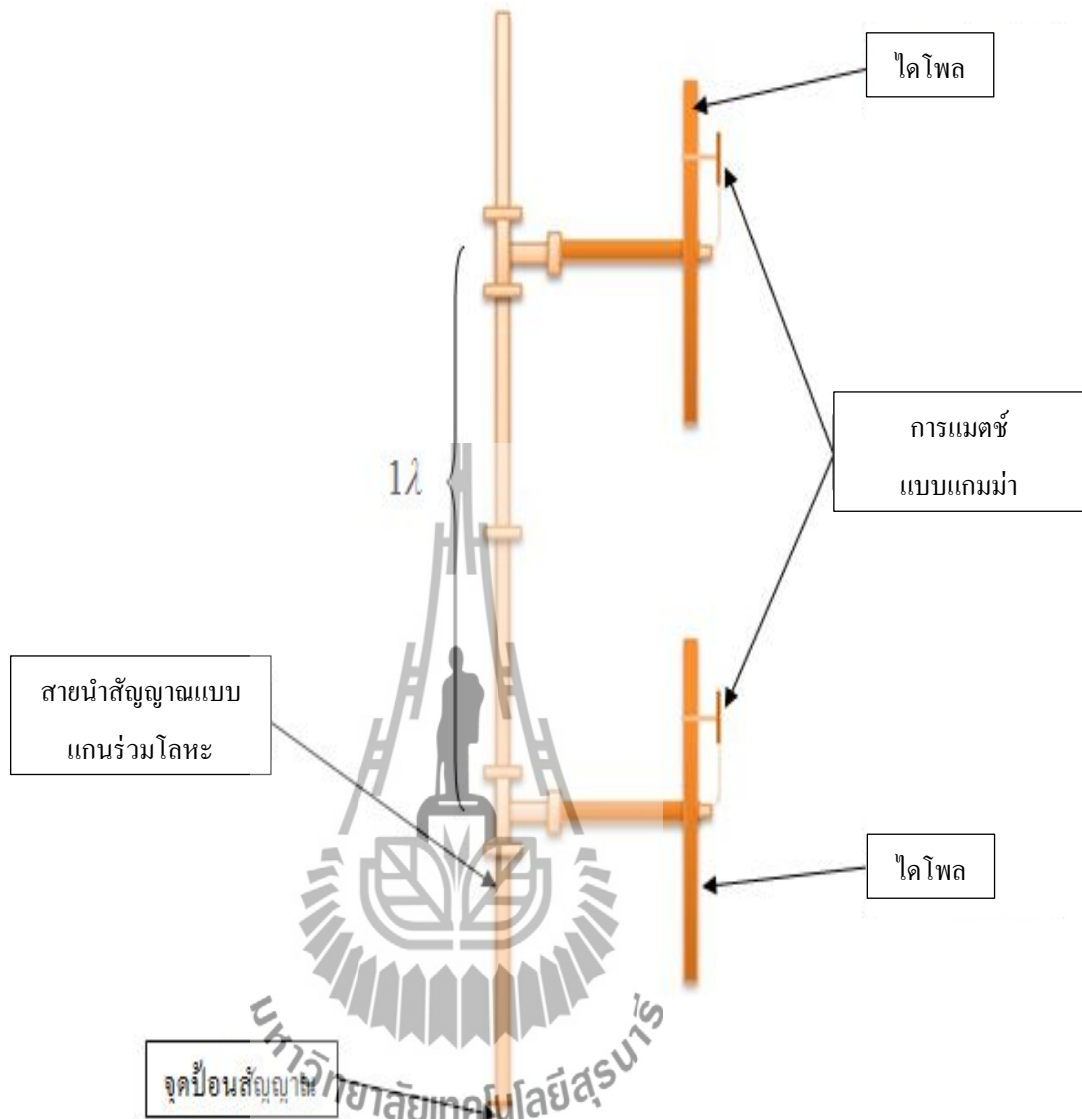
บทที่ 4

การสร้างและทดสอบสายอากาศต้นแบบ

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการสร้างสายอากาศขึ้นมาโดยใช้ขนาดและส่วนต่างๆ ของสายอากาศที่ได้จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข แต่เพื่อยืนยันความถูกต้องและให้สายอากาศนำไปใช้งานได้จริง จึงต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันผล โดยมีขั้นตอนการออกแบบและทดสอบ พร้อมแสดงผลการทดสอบ

4.1 การสร้างสายอากาศต้นแบบ

จากการนำโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพลนำมาจัดเป็นแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ ดังรูปที่ 4.1 จึงได้สร้างสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะขึ้น โดยใช้ท่อทองแดง เพื่อใช้เชื่อมต่อสายอากาศไดโพลให้เป็นแถวลำดับ ซึ่งในตอนแรกได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่ใช้ไดโพล 2 อิลิเมนต์ นำมาวัดเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข เพื่อจะนำไปสู่การสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล ตามขนาดที่ได้จากการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข และในการติดตั้งสายอากาศใช้งานจริง ต้องทำการแมตซ์ซึ่ง เพื่อให้สายอากาศใช้งานได้จริงตามความถี่ที่ต้องการ สำหรับโครงการนี้ ได้ทำการแมตซ์สายอากาศกับสายโคแอกเซียล 50 โอห์ม โดยเลือกใช้การแมตซ์แบบแกมมา (gamma match) ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

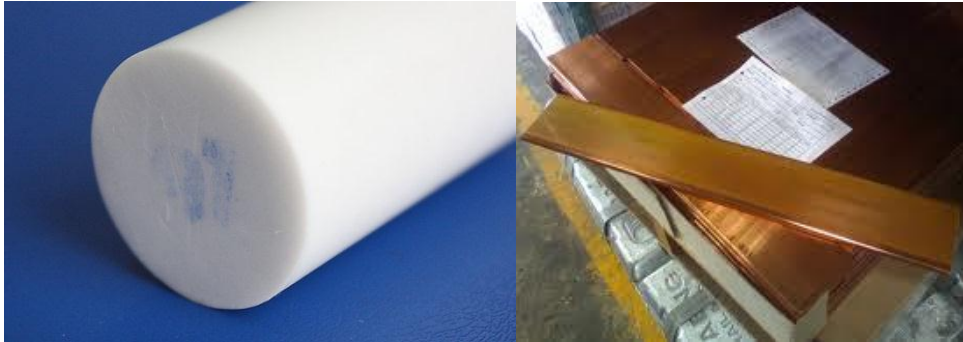


รูปที่ 4.1 องค์ประกอบสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล

โดยในการสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลนี้มีสองส่วนที่สำคัญคือ สายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ ซึ่งวิธีการสร้างมีดังนี้

4.1.1 การสร้างสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ

จากที่ได้ทำการออกแบบสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะมาแล้ว โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข ซึ่งได้เลือกใช้ทองแดงในการออกแบบ เนื่องจากมีราคาถูกและนำสัญญาณได้ดี



(ก) เทปป้องกันความร้อน

(ข) แผ่นทองแดง



(ค) ท่อทองแดง

(ง) หัว connector n-type

รูปที่ 4.2 วัสดุที่ใช้สร้างสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ

- คำนวณหาขนาดของท่ออากาศสมการ (2.7)

$$Z_0 = 138 \log D/d$$

เมื่อ Z_0 = อิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ

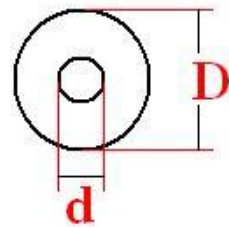
D = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของฉนวนภายนอก

d = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของลวดตัวนำใน

แทน $D = 35$ มิลลิเมตร

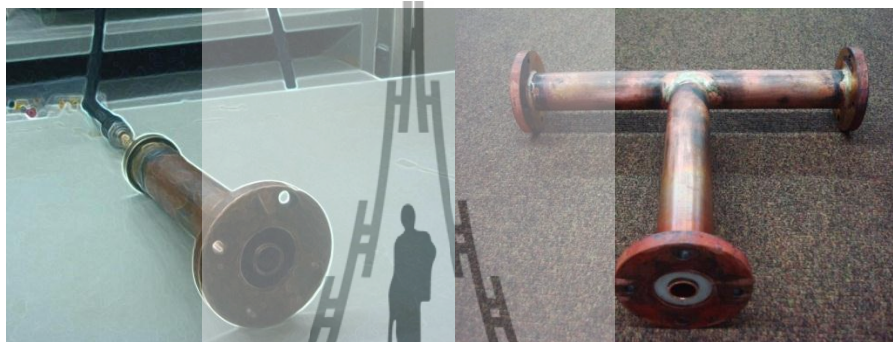
$d = 15$ มิลลิเมตร

$Z_0 = 50.78$ โอห์ม



- ขั้นตอนการสร้าง

- 1) ทำการตัดและเชื่อมทองแดง ให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม
- 2) นำเทปล่อนนำความร้อนมาใส่ระหว่างท่อตัวนำภายใน เพื่อยึดท่อทองแดงให้อยู่ที่กลางระหว่างท่อตัวนำภายในและภายนอก
- 3) ทำการกลึง และเชื่อมแฟรงค์ให้ติดกับท่อทองแดง เพื่อใช้เป็นตัวต่อกับชิ้นส่วนอื่น
- 4) วัดค่าอิมพีแดนซ์แต่ละชิ้นส่วน



(ก) Adapter

(ข) T-connector



(ง) สายนำสัญญาณ

รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ

- ขั้นตอนการวัดอิมพีแดนซ์

- 1) ทำการ calibrate เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ความถี่ตั้งแต่ 50 MHz ถึง 110 MHz
- 2) ทำการต่อชิ้นส่วนที่จะวัดเข้าพอร์ต 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
- 3) ทำการวัด S_{11} เลือก format และเลือก smith chart แล้วทำการอ่านค่า บันทึกผล



(ก) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



(ข) สาย RG-316

รูปที่ 4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วัดทดสอบ



รูปที่ 4.5 การวัดอิมพีแดนซ์ของ adaptor

จากรูปที่ 4.5 วัดค่าอิมพีแดนซ์ของ adaptor โดยที่ปลายอีกด้านใส่ตัวต้านทาน 50 โอห์ม
อ่านค่าอิมพีแดนซ์จากเครื่องได้เท่ากับ 55.473 โอห์ม

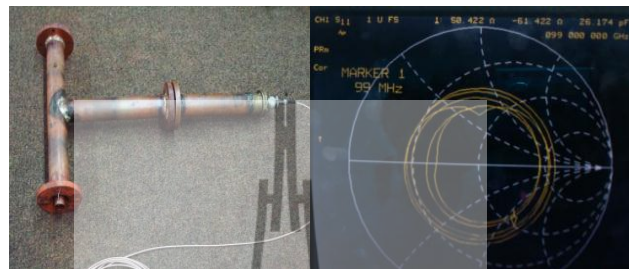


รูปที่ 4.6 การวัดอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ

จากรูปที่ 4.6 วัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ โดยที่ปลายอีกด้านใส่ตัวต้านทาน 50
โอห์ม อ่านค่าอิมพีแดนซ์จากเครื่องได้เท่ากับ 53.926 โอห์ม



(ก) พอร์ต 1 อิมพีแดนซ์เท่ากับ 53.305 โอห์ม



(ข) พอร์ต 2 อิมพีแดนซ์เท่ากับ 50.422



(ค) พอร์ต 3 อิมพีแดนซ์เท่ากับ 52.650

รูปที่ 4.7 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของตัว T-connector

จากรูปที่ 4.7 วัดค่าอิมพีแดนซ์ของ T-connector โดยใส่ตัวต้านทาน 100 โอห์ม เข้าพอร์ตที่ว่าง ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบทั้งสามพอร์ต และวัด T-connector ตัวที่ 2 ก็ทำเช่นเดียวกัน ปรากฏว่าได้อิมพีแดนซ์ประมาณ 50 โอห์มทุกพอร์ต

เมื่อวัดอิมพีแดนซ์ครบทุกชิ้นส่วนให้ได้ 50 โอห์มแล้ว นำส่วนประกอบของสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะทั้งหมดที่วัด มาต่อรวมกันแล้ววัดค่าอิมพีแดนซ์อีกครั้งดังรูปที่ 4.8 ในการวัดครั้งนี้วัดเพื่อจะออกแบบสายอากาศ โดยปลายบนสุดเปิดวงจร ใส่ตัวต้านทานให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย 50 โอห์ม จากผลการวัดคือใส่ค่าความต้านทาน 25 โอห์ม ทั้งสองอิมพีแดนซ์ จำลองการใช้ไดโพล ปรากฏว่าที่ 25 โอห์ม สายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 49.914 โอห์ม วิธีการวัดเป็นดังรูป



รูปที่ 4.8 การวัดอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณแบบแกนร่วม โลหะ

4.1.2 การสร้างสายอากาศไดโพล

วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้เหมือนกับการสร้างสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ จะมีเพิ่มเข้ามาคือ สายโคแอกเซียล RG-58 เพื่อใช้ในการแมตช์แบบแกมมา

- หาความยาวของสายอากาศไดโพลจากสมการ

$$v = f\lambda$$

(4.1)

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{99 \times 10^6}$$

$$\lambda = 3.03 \text{ m}$$

- ขั้นตอนการสร้าง

- 1) ตัดทองแดงให้ได้ $\frac{\lambda}{2} \approx 1.515 \text{ m}$
- 2) จากนั้นตัดแบ่งครึ่งให้เป็นสองแขนจะได้ข้างละประมาณ 0.75 m ทำการเชื่อมติดกับท่อทองแดงเป็นรูปตัวที เพื่อใช้เป็นตัวเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ โดยขาตัวทีใช้ยาว 0.5 m
- 3) ใช้ท่อเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 mm เป็นท่อนำตัวในข้างใน และใช้เทปเลื่อนทนความร้อนช่วยยึดระหว่างท่อทองแดงภายในและภายนอกเพื่อให้ท่อทองแดงอยู่ตรงกลาง
- 4) นำสาย RG-58 มาปลอกสายออกให้เห็นทองแดงเฉพาะส่วนที่จะนำมาเชื่อมเข้ากับท่อนำข้างในของขาตัวที ส่วนที่เหลือให้เหลือซิลิโคนไว้
- 5) วัดอิมพีแดนซ์ให้ได้ 25 โอห์ม

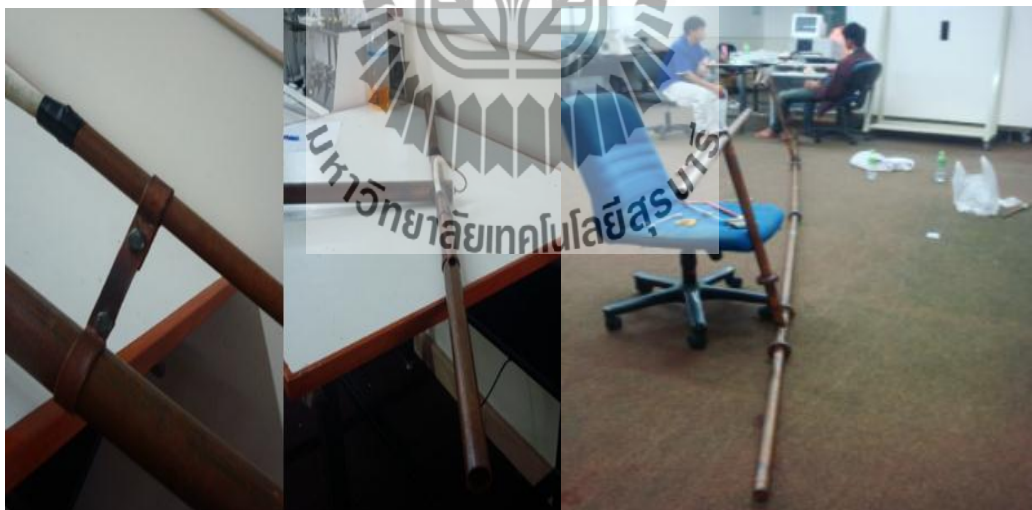


รูปที่ 4.9 การวัดอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพล

จากสมิทชาร์ต(smith chart) ได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 24.883 โอห์ม ซึ่งใกล้เคียง 25 โอห์ม

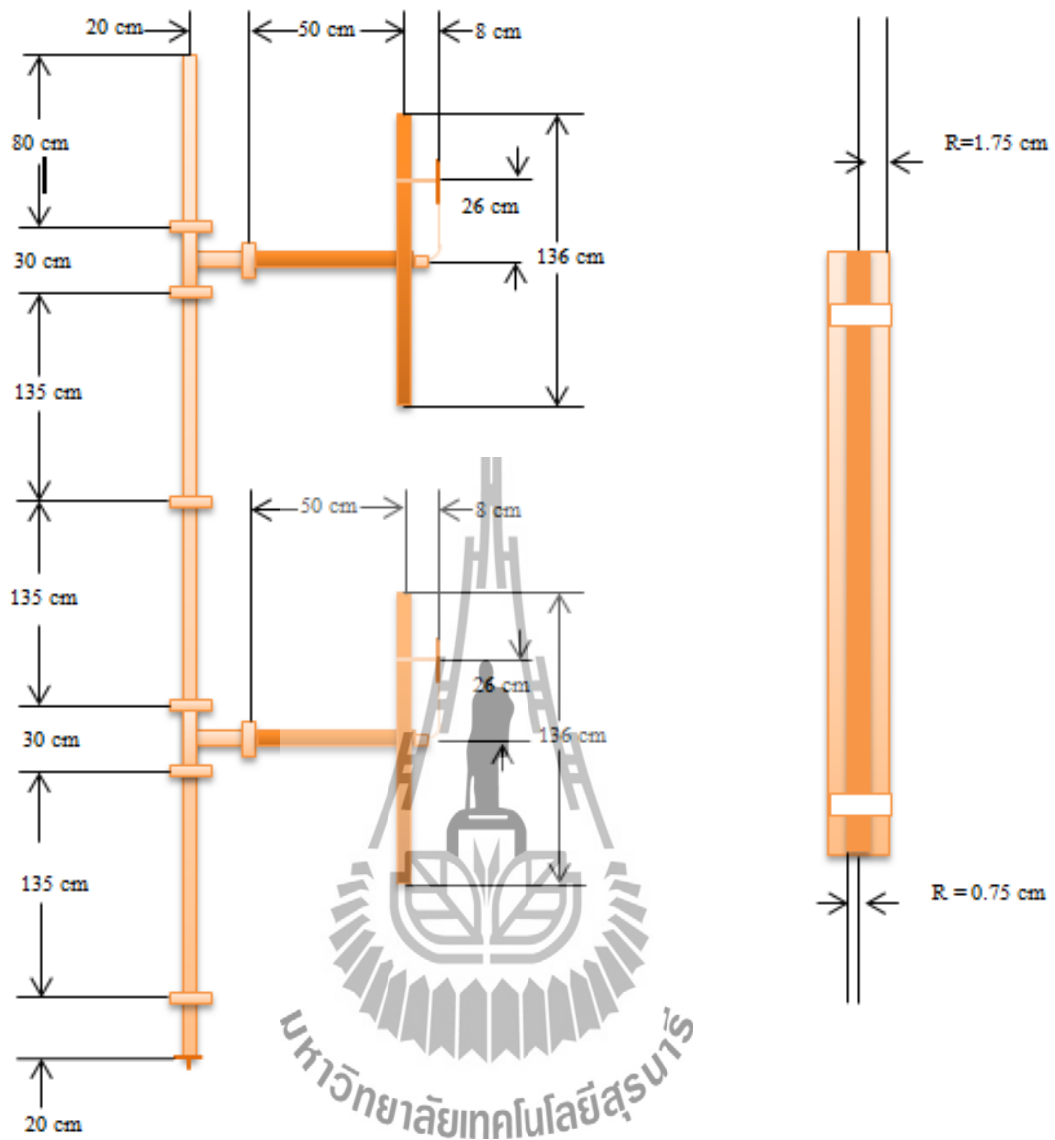
4.1.3 การสร้างสายอากาศแวลวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล

1) นำไดโพลมาเชื่อมต่อเข้ากับตัวสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะ โดยนำมาจัดเป็นแวลวลำดับแบบคอลลิเนียร์ และใช้วิธีการแมตซ์ซิ่งเพื่อให้ได้ค่าจลนภาพน้อยๆ โดยใช้วิธีการแมตซ์แบบแกมมาดังได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 4.10 การแมตซ์สายอากาศ

2) เมื่อทำการแมตซ์เสร็จเรียบร้อยแล้วจะได้สายอากาศแวลวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลที่สมบูรณ์ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.11 สายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลที่สมบูรณ์

4.2 การวัดเพื่อทดสอบพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ

การวัดทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศคือ การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นของสายอากาศ โดยโครงการฉบับนี้ได้ทำการสร้างสายอากาศคอลลิเนียร์ไดโพลจำนวน 2 ตัว เพื่อทำการอะเรย์ให้มีกำลังขยายสูงขึ้นด้วยสายส่งโคแอกเซียล

4.2.1 การวัดอิมพีแดนซ์อินพุต

อิมพีแดนซ์อินพุตเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเป็นอันดับแรก เพราะว่าหากสายอากาศไม่แมตช์กับสายนำสัญญาณแล้ว สายอากาศก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงได้ สำหรับโครงการฉบับนี้ใช้สายส่งโคแอกเซียลที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลที่สร้างขึ้นจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับหรือใกล้เคียง 50 โอห์ม

1. ขั้นตอนการวัดค่าอิมพีแดนซ์

- ก) ทำการ calibrate เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ความถี่ตั้งแต่ 50 MHz ถึง 110 MHz
- ข) เลือกคำสั่ง Save เพื่อจะได้ไม่ต้องทำการเซตเครื่องใหม่ เมื่อมาใช้งานตอนหลังอีก
- ค) ต่อสายอากาศคอลลิเนียร์ไดโพล เข้าที่ Port 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D
- ง) ทำการวัด S_{11} เลือก format แบบ smith chart

2. ผลการวัด



รูปที่ 4.12 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ณ ความถี่ 99 MHz ของสายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 4.12 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล 2 อิลิเมนต์ นั้นมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 99 MHz เท่ากับ $50.17 + j0.57 \Omega$ แสดงว่าสามารถนำสายอากาศไปใช้งานได้กับสายโคแอกเซียลที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ได้จริง

4.2.2 ความกว้างแถบของสายอากาศ

ความกว้างแถบของสายอากาศ หมายถึงช่วงความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้ดี สายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลในโครงการนี้จะพิจารณาความกว้างแถบของสายอากาศอยู่ที่ -10 dB ในโหมดของ LOG MAG

1. ขั้นตอนการวัดความกว้างแถบ

- ก) recall state จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่จัดเก็บไว้
- ข) เลือกคำสั่ง format และเลือก LOG MAG

2. ผลการวัด



รูปที่ 4.13 ความกว้างแถบ ณ ความถี่ 99 MHz ของสายอากาศต้นแบบ

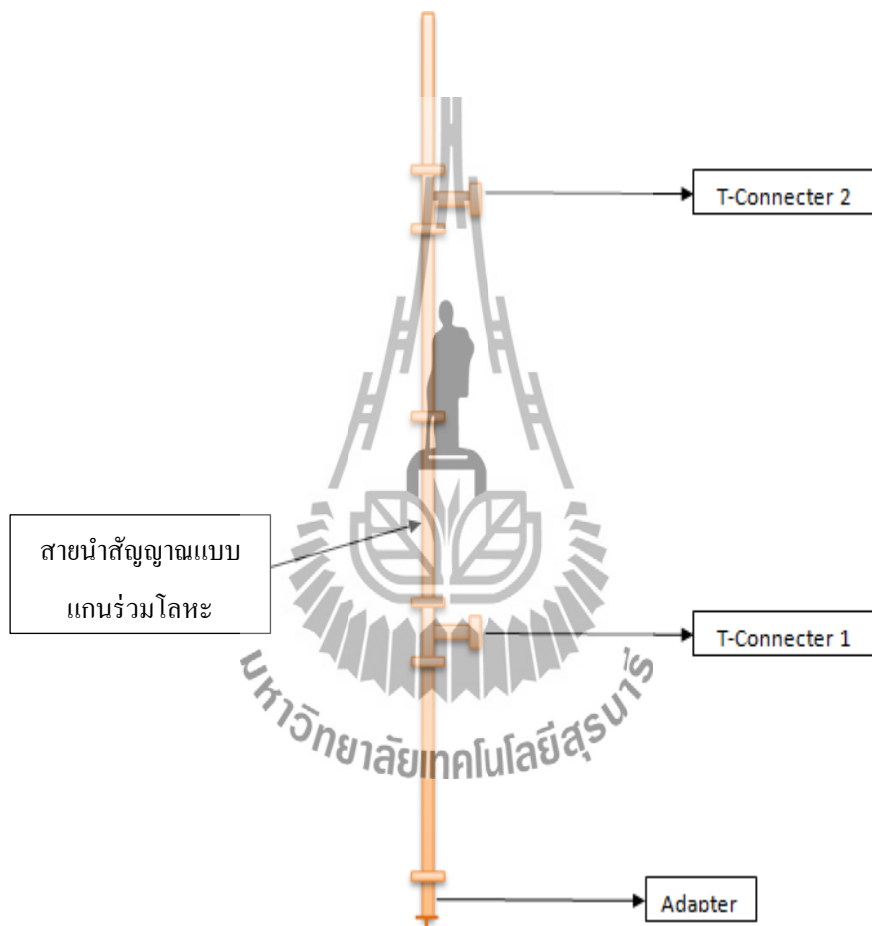
จากรูปที่ 4.13 เป็นผลการวัดความกว้างแถบ โดยสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล 2 อีลิเมนต์ ตัวนี้มีความกว้างแถบอยู่ที่ประมาณ 4 MHz สำหรับสายอากาศภาคส่งสถานีวิทยุระบบ FM นั้น ความกว้างแถบระดับนี้ถือว่ากว้างเพียงพอ

4.2.3 ค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก (Insertion Loss; S_{21})

การสูญเสียหรือ loss นั้นจะเกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อระบบการสื่อสารของเราเริ่มทำงาน ซึ่งผลของมันอาจจะไม่เป็นที่ต้องการของเรา เพราะมันจะทำให้ระบบของเรามีประสิทธิภาพต่ำลงนั่นเอง ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการวัดค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก (insertion loss)

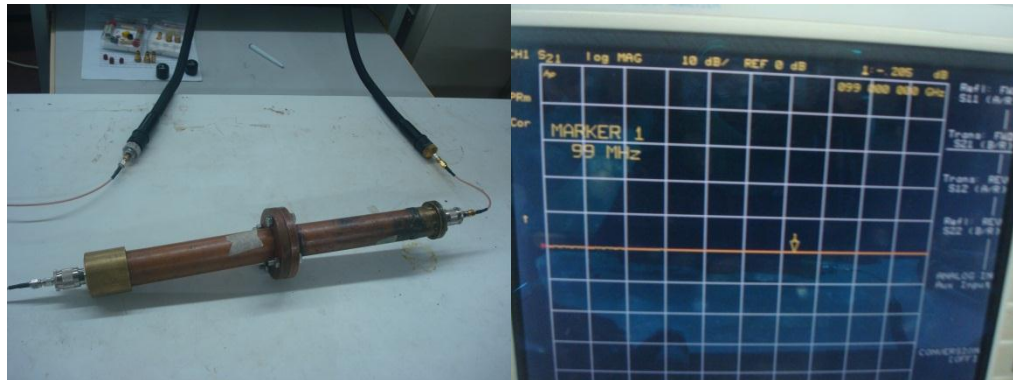
1. ขั้นตอนการวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก

- ก) ต่อสายเข้าที่พอร์ต1 และพอร์ต2 ทำการ Calibrate เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ความถี่ตั้งแต่ 50 MHz ถึง 110 MHz
- ข) ต่อAdapter เข้าที่พอร์ต 1 และพอร์ต 2 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D
- ค) ทำการวัด S_{21} เลือก Format และเลือก LOGMAG
- ง) หลังจากวัดค่า S_{21} ของ adapter เรียบร้อย ก็ทำการ calibrate adapter รวมกับสายอีกครั้ง



รูปที่ 4.14 องค์ประกอบของสายนำสัญญาณแบบแกนร่วม โลหะ ที่จะนำมาหาค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก

2. ผลการวัด



รูปที่ 4.15 ค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) ของ adapter 2 ตัว จากกราฟอ่านค่า $S_{21} = -0.24$ dB ดังนั้นจะเท่ากับตัวละ -0.12 dB



รูปที่ 4.16 การ calibrate adapter ร่วมกับสายสัญญาณ



รูปที่ 4.17 การวัดค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก (S_{21}) ของ T-connector ตัวที่ 1 และ 2

จากรูปที่ 4.17 จะเป็นการวัดค่าการสูญเสียจากการใส่แทรกของ T-connector ตัวที่ 1 และ 2 โดยเมื่อทำการวัดค่า (S_{21}) โดยจะใส่ตัวต้านทาน 50 โอห์มพอร์ตที่ว่าง จะได้ค่าดังตาราง

ตาราง 4.1 ค่าการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก

การวัด	การสูญเสียจากการใส่แทรก (S ₂₁) dB	
	T-connector 1	T-connector 2
Port 1 ไป 2	-0.742	-0.931
Port 2 ไป 3	-1.010	-1.033
Port 3 ไป 1	-1.042	-1.1



รูปที่ 4.18 ค่าการสูญเสียจากการใส่แทรก (S₂₁) ของสายนำสัญญาณนำคลื่น จากกราฟอ่านค่า S₂₁ = -0.12 dB

4.2.4 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศจะอาศัยทฤษฎีวิธีไซโปรซิดี้ โดยทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการ

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \tag{4.2}$$

- เมื่อ R คือระยะของสนามระยะไกล
- D คือความยาวสูงสุดของสายอากาศ
- λ คือความยาวคลื่นของสายอากาศ

ในการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ จะต้องมีทั้งสายอากาศภาคส่ง และภาครับ ในที่นี่ได้ใช้สายอากาศไดโพลที่สร้างขึ้นเองดังรูป 4.20 โดยมีความถี่เรโซแนนซ์ 99MHz เท่ากับสายอากาศคอลลิเนียไดโพล โดยสายอากาศอ้างอิงที่สร้างขึ้นนี้ ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง ซึ่งได้สร้างขึ้นจำนวน 2 ตัว เพื่อวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน เพื่อจะนำไปหาค่าอัตราขยาย (gain) และจะนำค่าอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง ไปใช้ในการหาค่าอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ (สายอากาศคอลลิเนียไดโพล) ต่อไป

ซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก โดยสายอากาศที่ทำกรทดสอบนั้นจะเป็นสายอากาศรับ ซึ่งจะทำกรหมุนเพื่อรับคลื่นจาก 0 องศาจนถึง 360 องศา ส่วนสายอากาศส่งเป็นสายอากาศไดโพลออกแบบที่ความถี่เดียวกันกับสายอากาศรับ และต้องมีโพลาริซที่เหมือนกันระดับความสูงของสายอากาศรับและสายอากาศส่งต้องเท่ากันด้วย รูปที่ 4.21 (ก) เครื่องวิเคราะห์แถบคลื่นสัญญาณ (spectrum analyzer) ที่เราใช้วัดค่าแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศ รูปที่ 4.21 (ข) เครื่องกำเนิดสัญญาณ(signal generator 2032) โดยใช้กำลังส่ง 5 dBm ที่ความถี่ 99 MHz



(ก) Spectrum Analyser

(ข) Signal Generator

รูปที่ 4.19 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแผ่กำลังงาน



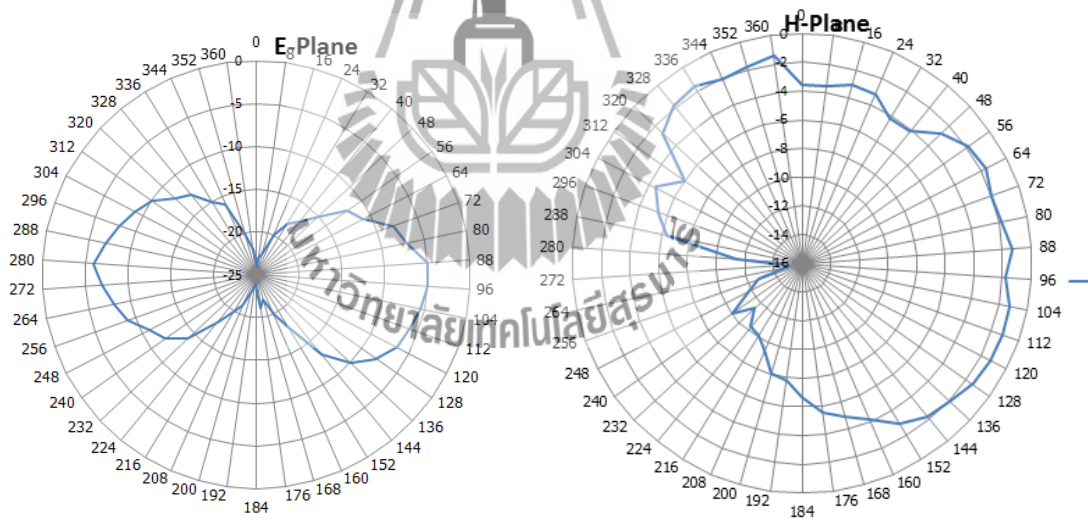
รูปที่ 4.20 สายอากาศไดโพลอ้างอิง



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.21 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศอ้างอิง



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศอ้างอิง

ลำดับต่อไปเป็นการวัดสายอากาศคอลลิเนียร์ไดโพล(สายอากาศต้นแบบ) โดยจะวัดในทำนองเดียวกับ การหาแบบรูปการแผ่กระจายของสายอากาศอ้างอิง แต่เปลี่ยนด้านรับของสายอากาศ เป็นสายอากาศคอลลิเนียร์ไดโพล(สายอากาศต้นแบบ) แสดงดังรูป 4.23

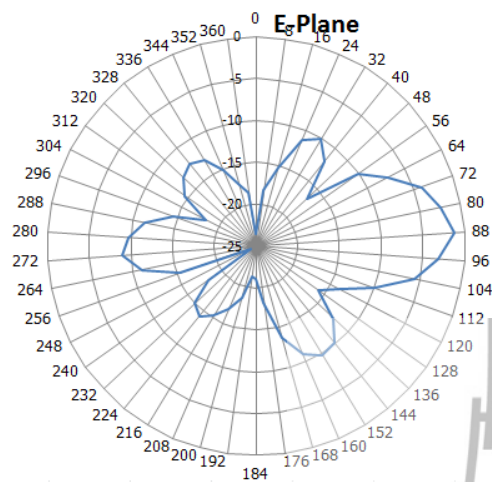


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

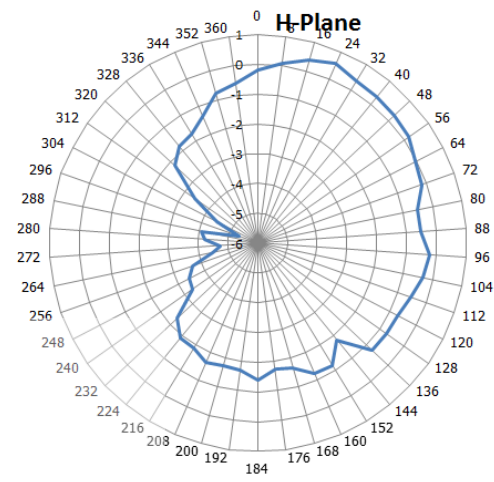
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.23 การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศต้นแบบ

สำหรับการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 4.24 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



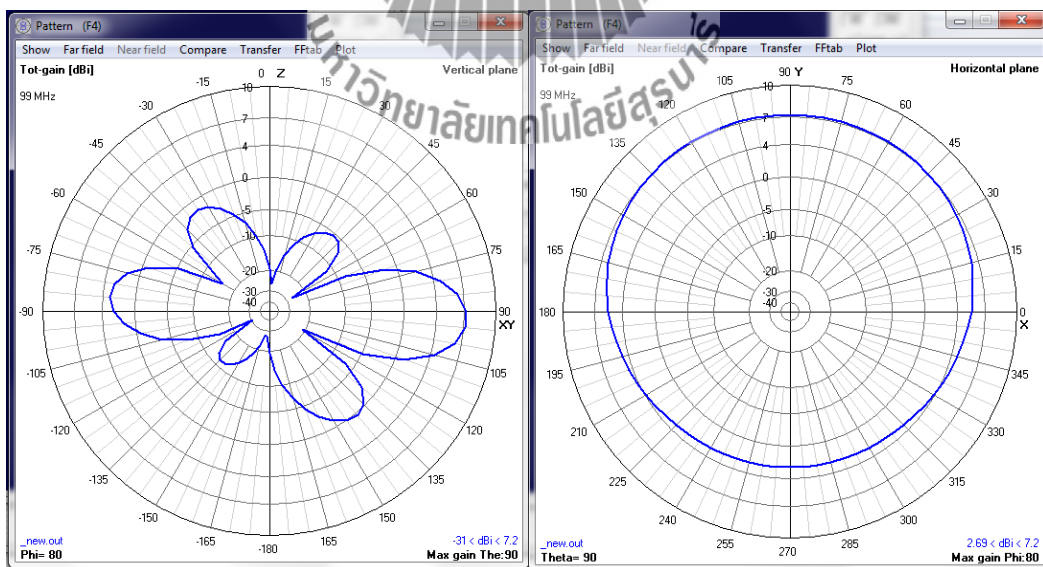
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



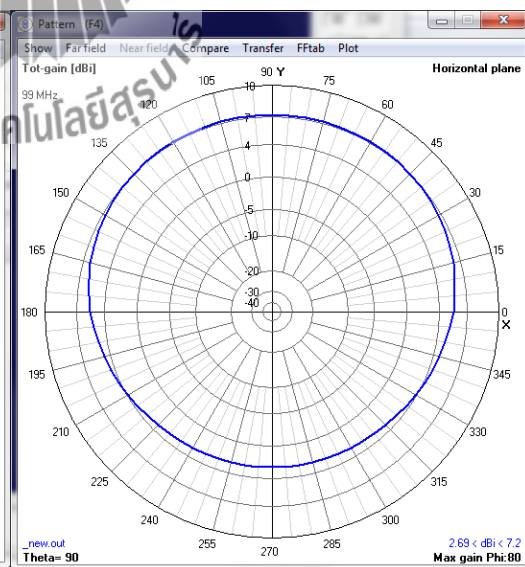
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศต้นแบบ

สำหรับรูปที่ 4.25 จะเป็นแบบรูปการแผ่กำลังงานโดยใช้โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขในการออกแบบ ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 4.25 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานออกแบบโดยใช้โปรแกรม

จากผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล ในระนาบสนามไฟฟ้าปรากฏว่าให้ผลที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข โดยมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเป็นแบบมีทิศทาง และผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กก็ให้ผลสอดคล้องกับผลจากการคำนวณโดยโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข โดยมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเป็นวงกลม แต่แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งสองมีความคลาดเคลื่อนบ้าง เนื่องจากในการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมนั้น ไม่มีส่วนของการแมตชิงอยู่ จากรูปแบบการแผ่กระจายกำลังงานทั้งสองระนาบทำให้ทราบว่าสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลแบบ 2 อิลิเมนต์ ที่สร้างขึ้นนี้มีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเป็นแบบรอบตัวในระนาบเดียว

4.2.5 อัตราขยาย (Gain)

1) การคำนวณอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง

ทำการคำนวณหาอัตราขยายในระนาบสนามแม่เหล็ก เนื่องจากเป็นระนาบที่นำไปใช้งานจริง โดยวัดกำลังส่งและกำลังที่รับได้จากสายอากาศไดโพลที่มีความเหมือนกันทุกประการแล้ว แทนลงในสมการ

$$P_r = P_t + G_t - 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + G_r - \text{Loss}_{\text{สาย}} \quad (4.3)$$

จากการวัดได้ค่าต่างๆดังนี้

$$R = 3 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{99 \times 10^6} \approx 3 \text{ m}$$

$$P_r = -15 \text{ dBm}$$

$$P_t = 5 \text{ dBm}$$

$$\text{Loss}_{\text{สาย}} = 1.04 \text{ dB}$$

$$G_t = G_r = G$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการ

$$-15 \text{ dBm} = 5 \text{ dBm} + 2G - 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) - \text{Loss}_{\text{สาย}}$$

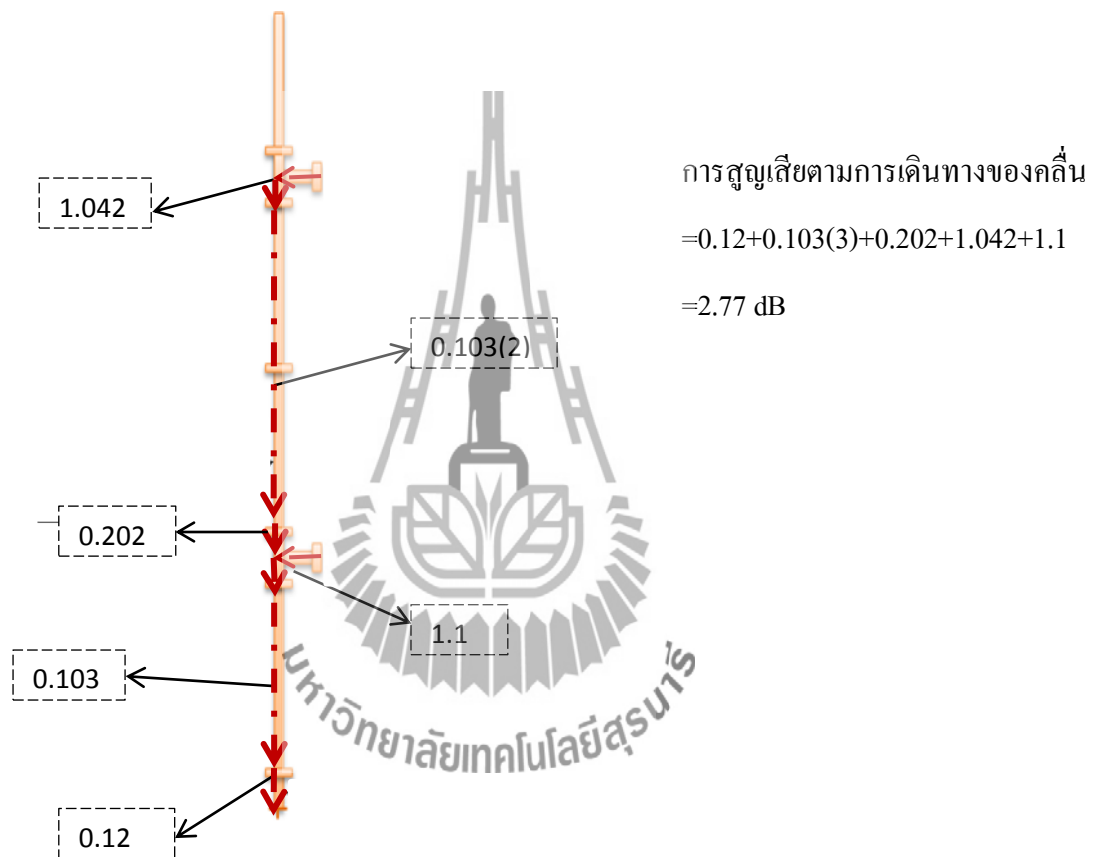
$$G = 1.4 \text{ dB}$$

ดังนั้นจะได้อัตราขยายของสายอากาศอ้างอิงคือ 1.4 dB

2) การคำนวณอัตรายายของสายอากาศต้นแบบ

ในที่นี้ให้สายอากาศอ้างอิงเป็นสายอากาศด้านส่งและสายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศด้านรับและใช้สมการ (4.3) ในการหาค่าอัตรายายของสายอากาศต้นแบบ

ในกรณีนี้นอกจากจะมี loss ในสายส่งตามหัวข้อ 1) แล้วยังมีการสูญเสียในสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมโลหะซึ่งเป็นส่วนประกอบของสายอากาศต้นแบบ โดยหาได้จากค่า S_{21} ดังนี้



ดังนั้นจากการหาค่า S_{21} จากการวัดและการหาอัตรายายของสายอากาศอ้างอิงตามหัวข้อ 1) ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

$$P_r = -30.22 \text{ dBm}$$

$$P_t = 5 \text{ dBm}$$

$$R = 20 \text{ m}$$

$$\lambda = 3 \text{ m}$$

$$G_t = 1.4$$

$$\text{Loss}_{\text{total}} = 1.04 + 2.77 = 3.81 \text{ dB}$$

แทนค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวลงในสมการ (4.3) จะได้

$$-30.22 \text{ dBm} = 5 \text{ dBm} + 1.4 + G_r - 20 \log \left(\frac{4\pi(20)}{3} \right) - \text{Loss}_{\text{สาย}}$$

$$G_r = 5.65 \text{ dB}$$

ดังนั้น จะได้ อัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ คือ 5.65 dB

4.3 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศ

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล

คุณลักษณะของสายอากาศ	ค่าที่ได้
อิมพีแดนซ์อินพุต (โอห์ม)	50.17+j0.57
S_{11} (dB)	-26.104
ความกว้างแถบ (MHz)	4
อัตราขยาย (dBD)	5.65

4.4 สรุป

จากรูปแบบทางโครงสร้างของสายอากาศ ที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรมแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข ในบทนี้จึงได้ทำการแมตช์สายอากาศเพื่อให้ได้อิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม เท่ากับสายนำสัญญาณ เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน และอัตราขยาย จากผลการทดสอบที่ได้ทำให้ทราบว่าสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลนี้มีคุณสมบัติเหมาะสมเป็นสายอากาศภาคส่งสำหรับที่สถานีส่งวิทยุระบบ FM ที่ดี

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

โครงการฉบับนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศสำหรับสถานีส่งวิทยุระบบ FM ที่มีการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงในแนวตั้ง ซึ่งสายอากาศมีโครงสร้างพื้นฐานแบบไดโพลนำมาจัดเป็นแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ จึงมีชื่อเรียกว่า สายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพล สายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลนี้ มีลักษณะเด่นด้วยโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน มีความแข็งแรง รองรับกำลังงานได้สูง

ในเชิงทฤษฎีได้นำโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข เข้ามาวิเคราะห์ โดยโครงสร้างของสายอากาศได้ถูกแทนด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า ในการหากระแสเหนี่ยวนำบนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดหรือสนามที่ตกกระทบ ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นเกิดจากแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กเชิงเลขนี้สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล อิมพีแดนซ์ แอตมิตแดนซ์ อัตราขยาย และสภาพเจาะจงทิศทาง การใช้กำลังงาน และการต่อเชื่อมระหว่างสายอากาศได้

การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศในโครงการฉบับนี้ จะเริ่มจากอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ความกว้างแถบ และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศคอลลิเนียร์ไดโพล และอัตราขยาย ซึ่งทำให้มีความรู้และเข้าใจในพื้นฐานของอิทธิพลจากขนาดของพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่มีต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน และอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ในส่วนของการออกแบบเพื่อนำสายอากาศไปใช้งาน สิ่งสำคัญก็จะต้องทำให้สายอากาศให้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบนั้นๆ และเงื่อนไขที่ได้นำมาพิจารณาในการออกแบบสายอากาศนั้นก็คือ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ความกว้างแถบ และอัตราขยาย การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีทั้งหมดทำโดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

จากบทที่ 4 ได้แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบ และอัตราขยายของสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้าง จะพบว่าผลการทดสอบนั้นเป็นที่ยอมรับได้ คือค่อนข้างตรงตามทฤษฎี และตามความต้องการของสายอากาศที่จะใช้งานจริง ไม่ว่าจะเป็นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ความกว้างแถบ และอัตราขยาย อย่างไรก็ตามยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง อันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางการคำนวณด้วยโปรแกรม และความไม่พร้อมของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างและการทดสอบ ในส่วนของการทดสอบสายอากาศนั้น เนื่องจากสายอากาศทดสอบมีขนาดค่อนข้างใหญ่ ดังนั้นจึงเกิดความไม่สะดวกอย่างมากในการทดสอบแบบ

รูปการแผ่กระจายกำลังงานเนื่องจากความสูญเสียในสายส่งสัญญาณและความไม่สมบูรณ์ของสถานที่ทดสอบ

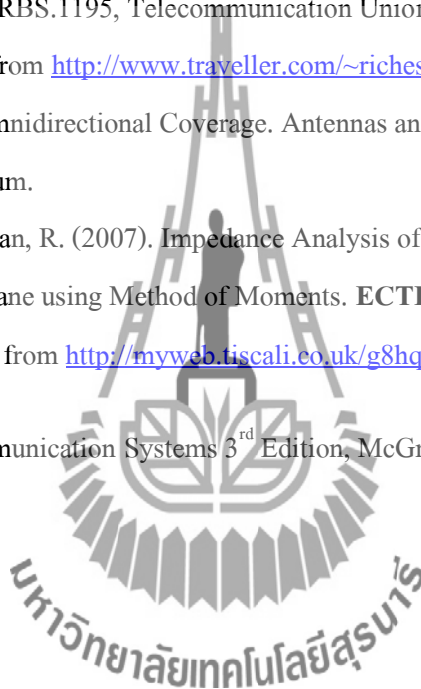
5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบคอลลิเนียร์ไดโพลที่ได้ทำการทดสอบนี้ มีความคลาดเคลื่อนไปจากผลที่คำนวณได้จาก โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 อยู่พอสมควรทั้งนี้ เป็นผลจากสภาพแวดล้อมและอุปกรณ์ในการทดสอบ และจากการออกแบบเอง และการทดสอบสายอากาศที่ดีนั้น ควรจะหาพื้นที่โล่งและกว้างพอสมควร เพื่อลดปัญหาการบังหรือสะท้อนของคลื่นระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ รวมถึงเพื่อสะดวกในการหมุนโครงสร้างของสายอากาศ ในการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน และสายอากาศที่จะนำมาเป็นสายอากาศภาคส่งจะต้องมีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่ทำการทดสอบ เพื่อให้สายอากาศทั้งสองตัวทำงานได้ดีที่สุดที่ความถี่เดียวกัน เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ถูกต้องมากที่สุด



บรรณานุกรม

- [1] รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สวรรค์, Antenna Engineering, from <http://sut.ac.th/e-text/antennas,2004>
- [2] Constantine A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design 2nd Edition, John Wiley & Sons, INC. 1982
- [3] R. Dean Straw, The ARRL Antenna Book 17th Edition, The American Radio Relay League, 1994
- [4] International, Transmission antenna characteristics at VHF and UHF, Recommendation ITU-R BS.1195, Telecommunication Union, 1995
- [5] NEC-2 User's Guide, from <http://www.traveller.com/~richesop/nec>
- [6] Antenna Design for Omnidirectional Coverage. Antennas and Propagation Society International Symposium.
- [9] Pimpol, S., and Wongsan, R. (2007). Impedance Analysis of a Shorted-End Curved Dipole on Reflector Plane using Method of Moments. **ECTI International Conference.**
- [10] Gammarmatch Guide, from <http://myweb.tiscali.co.uk/g8hqp/radio/gammamatch.pdf>
- [11] A. Bruce Carlson, Communication Systems 3rd Edition, McGraw-Hill, Inc. pp.276, 1986



ประวัติผู้เขียน



นายศพนธ์ โปยขุนทด

เกิดเมื่อวันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2530

ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลด่านขุนทด อำเภอด่านขุนทด จังหวัดนครราชสีมา

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล

อำเภอมือง จังหวัดชัยภูมิ เมื่อปี พ.ศ. 2549

ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 7 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นางสาวนันทนา คมกลาง

เกิดเมื่อวันที่ 2 เมษายน พ.ศ. 2531

ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลบึง อำเภอนนสูง จังหวัดนครราชสีมา

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนมหิศราธิปดี

อำเภอมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2549

ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 7 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นายสรศักดิ์ แจ่มไสย์

เกิดเมื่อวันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2531

ภูมิลำเนาอยู่ที่ ตำบลตาตุ่ม อำเภอสังขะ จังหวัดสุรินทร์

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจาก โรงเรียนขนาดมอญพิทยาคม

อำเภอสังขะ จังหวัดสุรินทร์ เมื่อปี พ.ศ. 2550

ปัจจุบันเป็นนักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี