



การลดขนาดของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น (Straight)
แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้

โดย

นายเก่งกาจ เนียมจิ้น

นายอนุพันธ์ จำปาสาร

นายลิขิต เสนาวงศ์

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

หัวข้อโครงการงาน	การลดขนาดของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้	
นักศึกษา	นายเก่งกาจ เนียมจีน	รหัส B5210497
	นายอนุพนธ์ จำปาสาร	รหัส B5229192
	นายลิขิต เสนาวงศ์	รหัส B5311859
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
พ.ศ.	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน	รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคค์	

บทคัดย่อ

สายอากาศ (Antenna) คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแผ่กระจายกำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปหรือในทางกลับกันใช้สำหรับรับกำลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเข้ามา สายอากาศจะทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์การนำทาง (Guiding Device) ให้แก่คลื่น เช่น สายส่ง (Transmission Line) สัญญาณหรือท่อนำคลื่น (Waveguide) กับอวกาศว่าง (Free-Space) หรือบ่อยครั้งมักจะเรียกว่า ตัวกลางไม่มีขอบเขต (Unbound Medium) ซึ่งในปัจจุบันวิทยุชุมชนได้นำสายอากาศไดโพลเส้นตรงมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับวิทยุของผู้รับสถานีนั่นๆแต่ก็มักพบปัญหาในเวลาติดตั้งซึ่งสายอากาศชนิดนี้มีความยาวและเปลืองพื้นที่ในการติดตั้งโครงการนี้จึงทำการออกแบบสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ให้มีความยาวลดลงแต่คุณสมบัติทุกอย่างเหมือนเดิมซึ่งจะทำให้การติดตั้งสายอากาศชนิดนี้ประหยัดพื้นที่ลงและเพิ่มสายอากาศได้มากขึ้นโดยนำวิธีการทำให้สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ให้มีความยาวลดลงแต่คุณสมบัติทุกอย่างเหมือนเดิมโดยใช้วิธีที่แตกต่างกัน ซึ่งวิธีดังกล่าวจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการติดตั้งและใช้งานสายอากาศสำหรับวิทยุชุมชนและผู้ที่สนใจต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดเริ่มแรกของการลดขนาดของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ที่ให้ความช่วยเหลือในการให้แนวคิด ให้คำปรึกษา แนะนำ ชี้แนะข้อบกพร่องที่ข้าพเจ้ามองข้ามและให้กำลังใจ ตลอดจนฝึกฝนและสนับสนุนข้าพเจ้าให้มีความสามารถในการทำโครงการจนสามารถนำเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่สั่งสอนให้ความรู้มาโดยตลอดและยังเป็นแบบอย่างที่ดีในการใช้ชีวิตในรั้วมหาวิทยาลัย

นายศรันย์ คัมภีร์ภัทร นางสาวเกวณัทรา คำพิกุล นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ช่วยให้คำแนะนำต่างๆ รวมไปถึงการสอนการใช้เครื่องมือแต่ละประเภท

นายพีรสันต์ คำสาลี นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ช่วยให้คำแนะนำต่างๆ รวมไปถึงการสอนการใช้เครื่องมือแต่ละประเภท

นายสมิง เต็มพรมราช นายกิจ บุญภูมิ วิศวกรประจำอาคารเครื่องมือ 3 ที่ช่วยเป็นจุดระตืดต่อการเบิกจ่ายค่าอุปกรณ์ต่างๆ รวมไปถึงการประสานงานการขอใช้เครื่องมือที่ใช้ทำการทดลอง

นายอนิวัฒน์ สุขสมร ผู้ช่วยสอน (TA) ประจำสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้ความสะดวกในการติดต่อเอกสาร

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากโครงการฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ผู้คอยห่วงใย ให้โอกาสให้กำลังใจและให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จมาจนถึงบัดนี้

นายเก่งกาจ เนียมจิ้น

นายอนุพนธ์ จำปาสาร

นายลิขิต เสนาวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญ(ต่อ)	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญรูป(ต่อ)	ช
สารบัญรูป(ต่อ)	ซ
สารบัญรูป(ต่อ)	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	3
2.1 กล่าวนำ	3
2.2 คุณสมบัติที่ดีของสายอากาศสำหรับส่งสัญญาณวิทยุ FM	3
2.3 ทฤษฎีสายอากาศไดโพล	9
2.4 การแมตซ์ซิ่ง (Matching Network)	15
2.5 สายนำสัญญาณ (Transmission Lines)	20
2.6 Superlens (ซูเปอร์เลน)	24
2.7 สรุป	25
บทที่ 3 การจำลองโครงสร้างของสายอากาศด้วยโปรแกรม	27
3.1 บทนำ	27
3.2 สายอากาศไดโพล	27

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3 วิธีการจำลองอากาศไดโพล	28
3.4 สรุป	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวัดสายอากาศ	46
4.1 กล่าวนำ	46
4.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบ	46
4.3 สรุป	63
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุป	64
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	68
ประวัติผู้เขียน	69



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณลักษณะเบอร์สายนำสัญญาณ	23
ตารางที่ 2.2 แสดงเบอร์สายและอัตราการสูญเสีย (dB) ต่อ 100 ฟุต	24
ตารางที่ 5.1 ตารางสรุป	65



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบการแผ่กระจายกำลังงาน ของสายอากาศ	4
รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว	5
รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบรูปแสงของไฟฉาย	8
รูปที่ 2.4 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth)	9
รูปที่ 2.5 สายอากาศไดโพล	10
รูปที่ 2.6 ระนาบสนามไฟฟ้า E-plane (y-z) และระนาบสนามแม่เหล็ก H-plane (x-y) ของสายอากาศไดโพล	11
รูปที่ 2.7 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลอุดมคติ	12
รูปที่ 2.8 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของไดโพลอุดมคติ	12
รูปที่ 2.9 การแจกแจงรูปของกระแสบนสายอากาศไดโพล $\lambda/2$	14
รูปที่ 2.10 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศไดโพล (เส้นทึบ) และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ)	14
รูปที่ 2.11 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล	15
รูปที่ 2.12 แสดงความแตกต่างของกระแสที่เกิดจากการต่อกันระหว่างสายอากาศไดโพลเส้น ลวดและสายส่งแบบแกนร่วมโดยตรง	16
รูปที่ 2.13 ตัวแปลงบาลันแบบปลอก 1:1 หรือแบบบาซูก้า	17
รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของบาลันแบบพับ 1:1	17
รูปที่ 2.15 บาลันแบบแกนร่วมความยาวครึ่งคลื่น 1:1	18
รูปที่ 2.16 การเทียบเคียงระหว่างโครงสร้างของบาลัน 1:1 ซึ่งใช้สายส่งแบบแกนร่วมกับการ ใช้ตัวแปลงอิมพีแดนซ์บนขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์	19
รูปที่ 2.17 สายนำสัญญาณ Balance Line	20
รูปที่ 2.18 สายนำสัญญาณ Unbalance Line	20
รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม CST Microwave Studio 2009	28
รูปที่ 3.2 เลือกแบบสายอากาศ (Wire)	28
รูปที่ 3.3 การกำหนดหน่วยต่างๆ	29
รูปที่ 3.4 การกำหนดช่วงระยะความถี่	29
รูปที่ 3.5 การขึ้นรูปชิ้นงาน	29
รูปที่ 3.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์	30

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 การกำหนดพอร์ต	30
รูปที่ 3.8 การกำหนดความถี่ (95 MHz)	30
รูปที่ 3.9 Transient	31
รูปที่ 3.10 สายอากาศไดโพล (87.5 - 108 MHz) ที่วางขายตามท้องตลาด	31
รูปที่ 3.11 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)	31
รูปที่ 3.12 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)	32
รูปที่ 3.13 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล 3 มิติ	32
รูปที่ 3.14 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})	33
รูปที่ 3.15 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไดโพล	33
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ อลูมิเนียม	34
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศ อัตราการขยายสายอากาศ ความหนาของสารซูเปอร์สทิน และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออลูมิเนียม 2.54 cm	34
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ความยาวสายอากาศ อัตราการขยายสายอากาศ แผ่นโลหะหนา 1 cm โดยความหนาของสารซูเปอร์สทิน 15 mm	35
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความยาวสายอากาศอัตราการขยายสายอากาศความหนาของสารซูเปอร์สทิน 1.5 cm โดยแผ่นโลหะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 cm	36
รูปที่ 3.20 ภาพการจำลองสายอากาศไดโพลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009	37
รูปที่ 3.21 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)	37
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)	38
รูปที่ 3.23 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล 3 มิติ	38
รูปที่ 3.24 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})	39
รูปที่ 3.25 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไดโพล	39
รูปที่ 3.26 ท่ออลูมิเนียม	40
รูปที่ 3.27 สารซูเปอร์สทินใช้หุ้มสายอากาศ	40
รูปที่ 3.28 แผ่นอลูมิเนียมปิดปลายสายอากาศทั้งสองข้าง	41
รูปที่ 3.29 แท่งทองแดงที่เป็นลวดตัวนำที่อยู่ตรงกลางท่ออลูมิเนียมที่ใช้แมตซ์	42
รูปที่ 3.30 แหวนที่ทำจากวัสดุซูเปอร์สทินใช้เป็นฉนวนระหว่างแท่งทองแดงกับท่ออลูมิเนียม	42
รูปที่ 3.31 ท่ออลูมิเนียมที่ใช้ในการแมตซ์แบบบาลัน	43
รูปที่ 3.32 ฝาอลูมิเนียมใช้ยึด 50 Ω N-type Connector	43

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.33 แผ่นอลูมิเนียมใช้ยึดทองแดงและท่ออลูมิเนียม	44
รูปที่ 3.34 ภาพจำลองภายในสายอากาศไดโพล	44
รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้	47
รูปที่ 4.2 บาลันแบบโคแอกเซียล (1:1)	47
รูปที่ 4.3 แมตซ์ชิงของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้	48
รูปที่ 4.4 สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้	48
รูปที่ 4.5 การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance)	49
รูปที่ 4.6 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าความถี่ 95 MHz ของสายอากาศต้นแบบ	50
รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})	50
รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ	51
รูปที่ 4.9 สายอากาศยาก็อิงที่ใช้เป็นตัวส่ง	52
รูปที่ 4.10 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D	53
รูปที่ 4.11 แบบจำลองการวัดระนาบสนามไฟฟ้า	53
รูปที่ 4.12 วิธีวัดแบบระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบ	54
รูปที่ 4.13 ระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้	54
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบและโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้	55
รูปที่ 4.15 แบบจำลองการวัดระนาบสนามแม่เหล็ก	55
รูปที่ 4.16 วิธีวัดแบบระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศต้นแบบ	56
รูปที่ 4.17 ระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้	56

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบและโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้	57
รูปที่ 4.19 แบบจำลองการวัดอัตราขยายของสายอากาศไดโพล 2 ตัว ที่มีลักษณะเหมือนกัน	58
รูปที่ 4.20 การวัดอัตราขยายของสายอากาศไดโพล 2 ตัว ที่มีลักษณะเหมือนกัน	59
รูปที่ 4.21 ค่าส่งผ่านคลื่น (S_{21}) ของสายอากาศไดโพล 2 ตัว ที่มีลักษณะเหมือนกัน	59
รูปที่ 4.22 แบบจำลองการวัดอัตราขยายของสายอากาศไดโพล (ภาคส่ง) กับ สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ (ภาครับ)	60
รูปที่ 4.23 การวัดอัตราขยายของสายอากาศไดโพล (ภาคส่ง) กับ สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ (ภาครับ)	61
รูปที่ 4.24 ค่าส่งผ่านคลื่น (S_{21}) ของสายอากาศไดโพล (ภาคส่ง) กับ สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ (ภาครับ)	61
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่กับ gain ของสายอากาศไดโพลทั่วไป (G_D), สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ (G_F)	62
รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบโครงสร้างของสายอากาศไดโพล	65
รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบพื้นที่ ที่ใช้ติดตั้งสายอากาศ 4 อิลิเมนต์	67

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันสายอากาศที่ใช้กับสถานีวิทยุ FM ย่านความถี่ 88 - 108 MHz จะใช้สายอากาศไดโพลแบบเส้นลวด ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้บนเสาส่งสัญญาณซึ่งกฎหมายกำหนดให้เสาส่งสัญญาณมีความสูงไม่เกิน 60 เมตร และทำให้ติดตั้งสายอากาศได้น้อยอีลีเมนต์ จะมีผลต่อการทำงานของสายอากาศ ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้สมบูรณ์และอาจไม่สามารถให้บริการกับผู้ใช้บริการได้

โครงการนี้จึงได้จัดทำสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีขนาดความยาวสั้นลง แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ซึ่งสายอากาศยังมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวเหมือนเดิม มีข้อดีคือความยาวของสายอากาศลดลง โดยจะติดตั้งสายอากาศนี้ไว้ด้านบนเสาส่งสัญญาณเหมือนเดิมซึ่งจะทำให้การทำงานของสายอากาศเกิดประสิทธิภาพไม่ต่างจากเดิมแต่ช่วยลดพื้นที่การติดตั้งสายอากาศได้มากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อออกแบบสายอากาศที่ใช้ในวิทยุ FM ในยุคปัจจุบัน
2. เพื่อศึกษาที่มาของสมการ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
3. สามารถนำแบบจำลองที่ออกแบบในข้างต้นไปสร้างสายอากาศที่ต้องการ
4. นำสายอากาศที่ออกแบบได้ไปใช้งานจริงในสถานีวิทยุ FM

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1. ศึกษาและหาข้อมูลการทำงานและคุณสมบัติของสายอากาศที่ใช้ในสถานีวิทยุ FM
2. ศึกษาการใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2009
3. ออกแบบสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2009
4. ออกแบบสายอากาศโดยลดขนาดไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2009
5. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับบอวิวัสดุ (Metamaterial)
6. สร้างสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น โดยนำบอวิวัสดุมาใช้ในการออกแบบ
7. ออกแบบบอวิวัสดุเพื่อใช้กับสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีแบบรูปการแผ่คลื่นแบบรอบตัวในระนาบเดียว โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2009
8. สร้างบอวิวัสดุต้นแบบ

9. นำสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น และอภิวัดมาประกอบกันเพื่อวัดคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ
10. ทดสอบการทำงานจริงและวัดผลการทดลองเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

กิจกรรม	พ.ศ. 2556					พ.ศ. 2557		
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษา ค้นคว้าหาข้อมูล	←→							
2. เขียนโครงการและเสนอโครงการกับอาจารย์ที่ปรึกษา		←→						
3. ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ทำอุปกรณ์ในการทำโครงงาน			←→					
4. ปรึกษาผลการทดลองกับอาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน				←→				
5. หาซื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงาน							←→	
6. สร้างอุปกรณ์ในการทำโครงงาน เพื่อให้อุปกรณ์สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์							←→	
7. วัดคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบและปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ เพื่อให้สามารถใช้งานได้ตรงตามเป้าหมาย							←→	
8. สรุปผลการทดลองและเขียนรายงาน							←→	
9. นำเสนอโครงงาน								←→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำความรู้ที่ได้มาใช้ในการประกอบวิชาชีพ
2. สามารถนำความรู้ทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ
3. รู้จักการวางแผนและทำงานอย่างมีระบบ
4. สามารถทำงานเป็นทีมได้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 กล่าวนำ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนคลื่นที่อยู่ในสายส่งสัญญาณ หรือท่อนำคลื่นให้แพร่กระจายออกสู่ตัวกลางที่สายอากาศวางอยู่ เช่น อากาศอิสระ (free space) หรือ ไดอิเล็กตริก และในทางกลับกันจะทำหน้าที่รับคลื่นที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลางให้เข้ามาอยู่ในท่อนำคลื่นหรือสายส่งสัญญาณได้ การศึกษารูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศแต่ละชนิดจึงมีความสำคัญ ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงคุณสมบัติที่เหมาะสมของสายอากาศที่จะเป็นสายอากาศส่งสัญญาณวิทยุ FM ในย่านความถี่ VHF ทฤษฎีของสายอากาศไดโพล เพื่อนำมาประยุกต์เป็นสายอากาศไดโพลที่สั้นลงและสายอากาศชนิดนี้มีคุณสมบัติตามเดิม

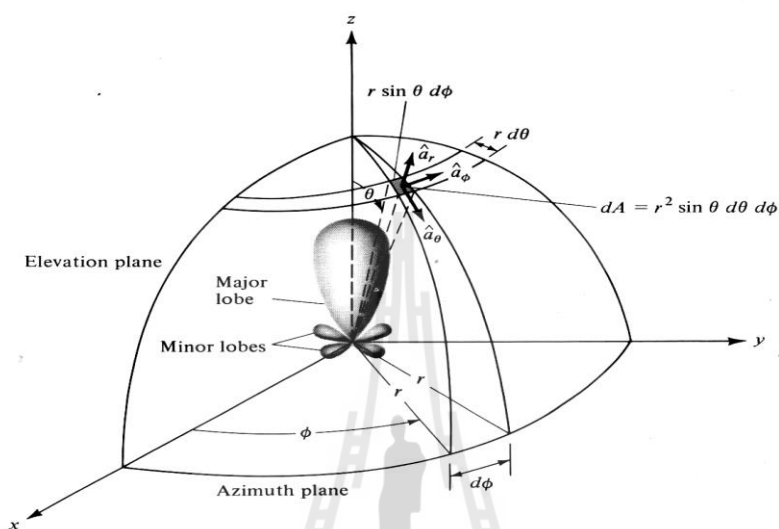
2.2 คุณสมบัติที่ดีของสายอากาศสำหรับส่งสัญญาณวิทยุ FM

สำหรับคุณสมบัติของสายอากาศที่จะทำหน้าที่เป็นสายอากาศตัวส่งที่ดีนั้น จะต้องเป็นสายอากาศที่ทำให้สายอากาศภาครับสามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด นั่นคือ ไม่ว่าสายอากาศภาครับจะอยู่ทางทิศใดของสายอากาศภาคส่ง และมีการโพลารไรซ์เป็นแบบใด ก็ควรที่จะสามารถรับคลื่นจากสถานีส่งได้ โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณวิทยุ FM ในย่าน VHF จะต้องมีแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ หรือสามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา และมีโครงสร้างของสายอากาศที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไปสามารถประกอบได้ง่าย มีขนาดสั้น รองรับกำลังงานที่สูงได้และมีอัตราขยายในรอบทิศทาง ซึ่งในโครงการฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบ ทดสอบและประเมินคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีขนาดความยาวสั้นลง แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ซึ่งสายอากาศยังมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวเหมือนเดิม เพื่อใช้เป็นสายอากาศสำหรับสถานีส่งสัญญาณวิทยุ FM ย่านความถี่ VHF ภายใต้การใช้งานจริงในระบบการสื่อสาร ณ ความถี่ปฏิบัติการ 95 MHz ดังนั้นคุณสมบัติที่ดีของสายอากาศสำหรับส่ง ที่สำคัญควรมีดังนี้

2.2.1 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation pattern)

แบบรูปการแผ่พลังงานหรือแบบรูปกระจายคลื่นของสายอากาศเป็นการนำเสนอคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานของสายอากาศในรูปของกราฟฟิกหรือในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพิกัดตำแหน่ง (Space Coordinates) ในการพิจารณาแบบรูปการแผ่กำลังงานจะต้องกระทำในบริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) เท่านั้น และจะนำเสนอในรูปฟังก์ชันของพิกัดทิศทาง (Directivity Coordinates) เสมอ ซึ่งคุณสมบัติการแผ่กำลังงานนี้สามารถที่จะพิจารณา รวมถึงความ

หนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก (Power Flux Density) ความเข้มการแผ่กำลังงาน (Radiation Intensity) ความแรงของสนาม (Field Strength) เฟสของสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity Phase) หรือการแยกขั้วคลื่น (Polarization) ได้ ซึ่งคุณสมบัติของการแผ่กำลังงาน สามารถที่จะแสดงในรูปของการกระจายพลังงานในแต่ละตำแหน่งและทิศทางที่เป็นแบบสองมิติและแบบสามมิติซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งของผู้สังเกตตลอดเส้นทางหรือผิวของทรงกลมที่มีรัศมีคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



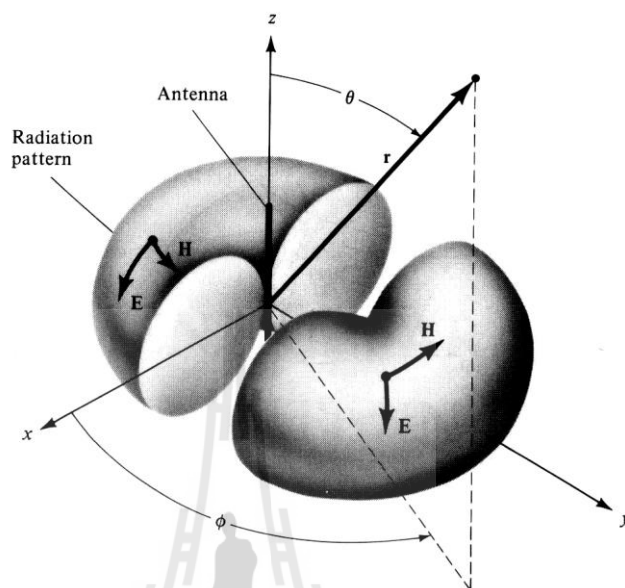
รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดทรงกลมซึ่งใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ

เส้นการกวาดของกำลังงานที่รับได้ที่ตำแหน่งรัศมีคงที่จะถูกเรียกว่า แบบรูปกำลังงาน(Field Pattern) และอีกวิธีหนึ่งถ้าเป็นแบบรูปที่ใช้แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กตามฟังก์ชันของตำแหน่ง เราจะเรียกว่า แบบรูปแอมพลิจูดของสนาม (amplitude Field Pattern)

แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศสามารถอธิบายได้ 3 แบบ ดังนี้

1. แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้นมาว่า ไม่มีการสูญเสียภายในตัวเอง และมีการแผ่พลังงานออกมาเท่ากันทุกทิศทาง
2. แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional pattern) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติในการแผ่กำลังงานหรือรับคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ ซึ่งมักจะนำมาใช้กับสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (Maximum Directivity) มากกว่าจะใช้กับสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศได้โพลความยาวครึ่งคลื่น (Half-wave Dipole)
3. แบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional Pattern) คือสายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่กำลังงานที่ไม่มีทิศทางในระนาบที่กำหนดให้ในที่นี้คือ มุมกวาด

(Azimuth) และระนาบที่ตั้งฉากกันจะมีแบบรูปการแผ่กำลังงานเป็นแบบมีทิศทางในกรณีนี้คือมุมเงย ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบตัวในระนาบเดียว

ในโครงการฉบับนี้ได้ออกแบบสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีขนาดความยาวสั้นลง แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ซึ่งสายอากาศยังมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวเหมือนเดิมแบบรูปการแผ่กำลังงานแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional Pattern) เพราะสายอากาศที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณวิทยุ ในย่านความถี่ VHF จะต้องมีการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ หรือสามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา

2.2.2 การโพลาไรซ์ (Polarization)

การแยกขั้วคลื่นที่แผ่กำลังงานออกไป (Polarization of a Radiated Wave) หมายถึง การอธิบายคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งขนาดสัมพัทธ์และทิศทางของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาตลอดทิศทางของการแผ่กำลังงานออกไป การแยกขั้วคลื่นสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบเชิงเส้น (Linear) แบบวงรี (Elliptical) และแบบวงกลม (Circular) ส่วนสายอากาศไดโพลนั้นมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น คือเวกเตอร์สนามไฟฟ้าของคลื่นเมื่อแปรผันตามเวลา ณ จุดใดๆ ในอากาศอย่างต่อเนื่อง แล้วมีลักษณะเป็นเส้นตรง

สำหรับการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีขนาดความยาวสั้นลง แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ซึ่งสายอากาศยังมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบ

รอบตัวเหมือนเดิมที่ออกแบบมีการโพลาริซ์เป็นแบบเชิงเส้น เพราะในโครงการฉบับนี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่กำลังงานสนามระยะไกล ซึ่งเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าจะมีการแปรผันตามเวลา ณ จุดใด ๆ ในอากาศอย่างต่อเนื่อง เมื่อเราทำการหมุนรอบรับคลื่น จาก 0 องศา ถึง 360 องศา เวลาที่วัดแบบรูปการแผ่กำลังงาน

2.2.3 อัตราขยาย (Gain)

ก. อัตราขยายจริง (Absolute Gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนดให้) หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้รับเข้ามา

ข. อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ก็คือ สายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Isotropic Source) และสายอากาศแบบไดโพล

การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน วิธีที่ง่ายที่สุด ก็คือวิธีที่เรียกว่า วิธีแบบใช้สายอากาศอ้างอิง (Reference Antenna Method) หรือ วิธีการเปรียบเทียบ (Comparison Method) หรือวิธีการแทนที่ (Substitution Method) ซึ่งสามารถหาได้โดยการเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับด้วยสายอากาศอ้างอิง (P_{ref}) กับกำลังงานที่รับได้จากสายอากาศที่ทำการทดสอบ (P_{test}) ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ต้องการทราบจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$G_{test} = \frac{P_{test}}{P_{ref}} G_{ref} \quad (2.1)$$

เมื่อต้องการคำตอบ ให้มีหน่วยเป็น dB ก็จะได้จากสมการ

$$G_{test} (dB) = P_{test} (dB) - P_{ref} (dB) + G_{ref} (dB) \quad (2.2)$$

ก่อนที่จะนำวิธีการแทนที่มาใช้ นั้น เราจะต้องปรับเทียบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ในการอ้างอิงเสียก่อน โดยการใช้สายอากาศสองตัวที่เหมือนกันทุกประการมาเป็นสายอากาศรับและส่ง จากนั้นวัดค่ากำลังงานที่ส่งออกไปและค่าของกำลังงานที่รับได้ นำมาคำนวณหาค่าอัตราขยาย

ซึ่งจะเป็นอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง ดังสมการ

$$G = \frac{4\pi r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{rec}}{P_o}} \quad (2.3)$$

เมื่อ G คือ ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่จะใช้เป็นตัวอ้างอิง
 r คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศทั้งสอง
 P_{rec} และ P_o คือ กำลังงานที่ได้รับได้และกำลังงานที่ส่งออกไป ตามลำดับ
 λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศ (หน่วยเดียวกันกับระยะทาง)

สำหรับการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศไดโพลในโครงการนี้ ทำการวัดทดสอบโดยใช้สายอากาศไดโพล เป็นสายอากาศอ้างอิง ค่าที่ได้จึงมีหน่วยเป็นเดซิเบลไดโพล (dBd)

2.2.4 ความกว้างแถบ (Bandwidth)

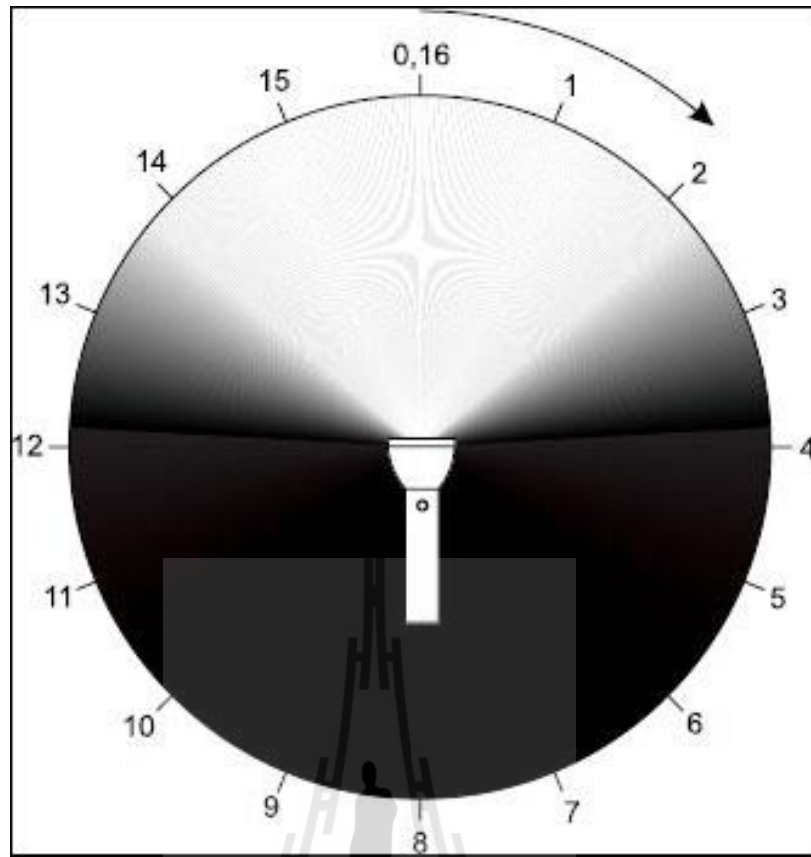
ความกว้างแถบของสายอากาศ ถูกนิยามว่า ย่านความถี่ที่ยังอยู่ในสถานะที่สายอากาศยังสามารถทำงานได้ สถานะดังกล่าวพิจารณาจากคุณสมบัติบางตัวของสายอากาศ และให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนด ความกว้างแถบจะพิจารณาจากช่วงของความถี่ที่ต่ำกว่าและสูงกว่าความถี่กลาง (Center Frequency) ซึ่งสถานะการทำงานของสายอากาศที่ยอมรับได้ จะต้องสามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่นี้

กรณีที่เป็น สายอากาศแถบกว้าง (Broadband Antennas) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่สายอากาศสามารถทำงานได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าสายอากาศชนิดนี้มีความกว้างแถบเท่ากับ 10 : 1 แสดงว่าความถี่สูงสุดมีค่ามากกว่าความถี่ต่ำสุดอยู่ 10 เท่า

และถ้าหากเป็นกรณีของ สายอากาศแถบแคบ (Narrowband Antennas) ความกว้างแถบมักจะแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ของผลต่างความถี่ (ความถี่สูงสุดลบความถี่ต่ำสุด) เมื่อเทียบกับความถี่กลางของความกว้างแถบ ตัวอย่างเช่น ถ้าสายอากาศชนิดนี้มีความกว้างแถบเท่ากับ 5% แสดงว่าผลต่างของความถี่ที่สายอากาศสามารถทำงานได้มีค่าเป็น 5% ของความถี่กลางของความกว้างแถบ

2.2.5 ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth)

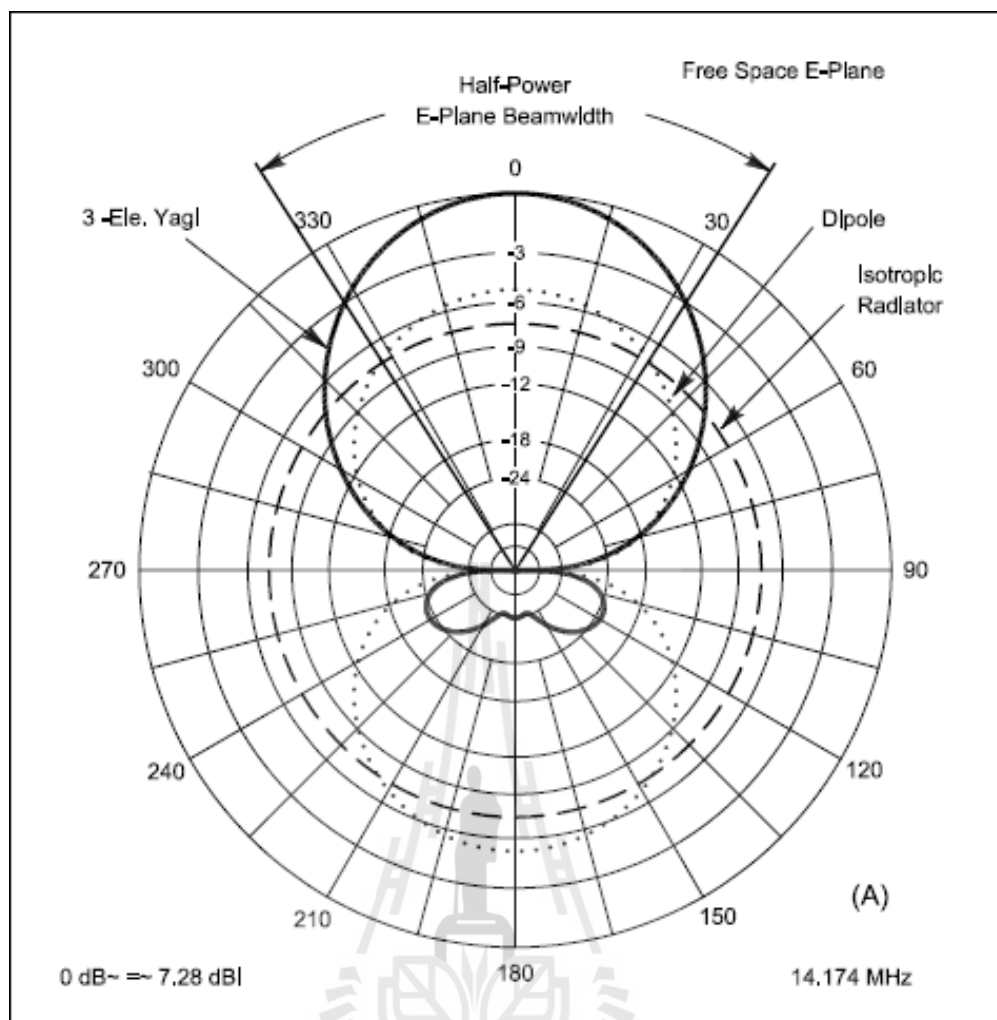
ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) คือ ความกว้างของลำคลื่นเป็นคุณสมบัติของสายอากาศทิศทางที่วัดเป็นองศาของส่วนที่เป็น Major lobe หรือ Main lobe ระหว่างสองทิศทาง ซึ่งกำลังไฟฟาลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB) ของค่าสูงสุด



รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบรูปแสงของไฟฉาย

2.2.6 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth)

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth) อธิบายได้ว่าในระนาบหนึ่ง ๆ ที่ประกอบด้วยทิศทางที่มีลำคลื่นสูงสุดและมีมุมซึ่งอยู่ระหว่างสองทิศทาง ซึ่งความเข้มของการแผ่กำลังงานมีค่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากค่าสูงสุดของมัน และคำว่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง มักจะใช้ อธิบายถึงความกว้างของลำคลื่นที่มีค่า 3 dB (3-dB Beamwidth) เสมอ



รูปที่ 2.4 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth)

ตัวอย่าง ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) ของสายอากาศ Yagi 3-element ซึ่งทิศทาง 0 องศา เรียกว่า main lobe จะมีลำคลื่นที่แรงที่สุด ถ้าเราวัดความแรงไปทางด้านข้างจนความแรงลดลงครึ่งหนึ่ง (-3dB) เรียกว่า จุดที่กำลังงานลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half-power Beamwidth) เราวัดมุมจากจุด Half-power จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งจะเท่ากับ Beamwidth ตัวอย่างในรูปที่ 2.4 คือประมาณ 66 องศา

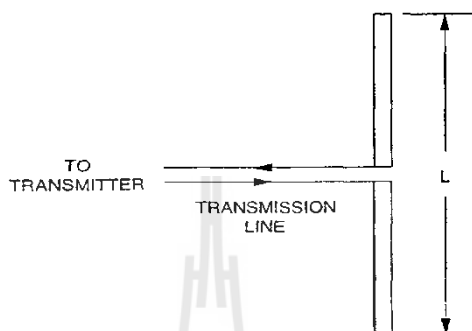
2.3 ทฤษฎีสายอากาศไดโพล

2.3.1 สายอากาศไดโพลในอุดมคติ

สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) เป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด มีส่วนประกอบเป็นเส้นลวดสองเส้นที่มีความยาว L วางเป็นแนวเส้นตรงดังรูปที่ 2.5 โดยจุดกึ่งกลางของตัวไดโพลจะถูกต่อเข้ากับเครื่องส่งโดยใช้สายส่งเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะจ่ายสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับไปยังสายอากาศ กระแสของสัญญาณนี้จะไหลไปยังหัวหนึ่ง

ของไดโพล และไหลกลับมายังอีกขั้วหนึ่งของไดโพลดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของกระแสที่ส่งไปยังขั้วแรกของไดโพล

การแจกแจงของกระแส (Current Distribution) จะแสดงให้เห็นขนาด (Magnitude) ของสัญญาณกระแสสลับที่เกิดขึ้นตลอดความยาวของสายอากาศไดโพลซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน โดยที่ปลายทั้งสองจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดกึ่งกลางหรือที่จุดอื่นๆ บนตัวไดโพล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของไดโพลและความถี่ของสัญญาณที่มาจากเครื่องส่ง



รูปที่ 2.5 สายอากาศไดโพล

ไดโพลอุดมคติ (Ideal Dipole) เป็นสายอากาศสมมติซึ่งใช้ประโยชน์ในการศึกษาสายอากาศชนิดอื่นๆ สามารถพิจารณาให้เป็นส่วนประกอบเล็กๆของความยาวไดโพล (Infinitesimal Dipole) ที่มีการแจกแจงของกระแสที่เท่ากันตลอดความยาวคุณลักษณะทางทฤษฎีของไดโพล อุดมคติจะประมาณให้มีค่าทางไฟฟ้าเท่ากับสายอากาศไดโพลที่มีขนาดเล็กๆ

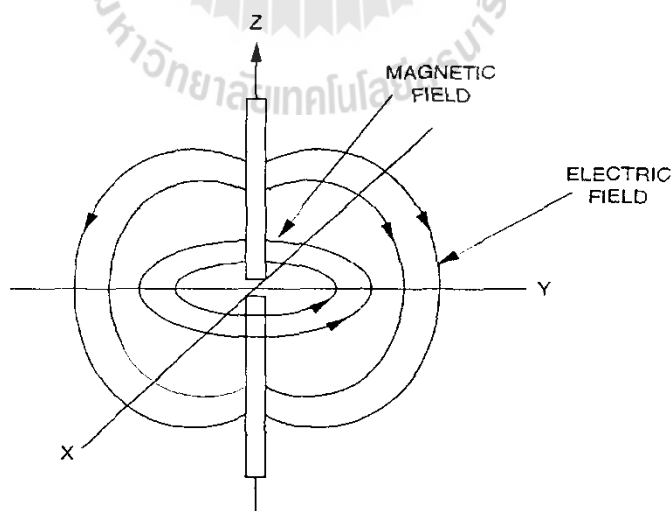
2.3.2 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานคือ การแสดงรูปแบบของกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากตัวสายอากาศเป็นรูปภาพ 3 มิติ ที่วัดได้ในบริเวณสนามระยะไกล (Far Field Region) คุณสมบัติการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของพิกัดเชิงตำแหน่ง (Space Coordinates) บริเวณของสนามระยะไกลคือ บริเวณที่ไกลเพียงพอสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะทางที่อยู่ห่างจากสายอากาศ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศใดๆ สามารถที่จะทราบได้ด้วยการวัดทดลองและถ้าเราทราบลักษณะการแจกแจงของกระแสบนตัวสายอากาศ ก็จะสามารถคำนวณหาจากการคำนวณได้เช่นเดียวกัน การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ จะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) โดยสามารถคำนวณจากสมการ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.4)$$

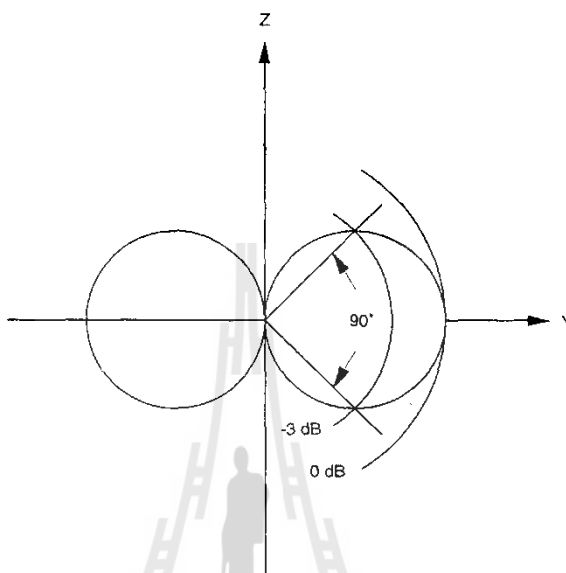
เมื่อ	R	คือ ระยะของสนามระยะไกล
	D	คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ
	λ	คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานจะเป็นตัวแสดงถึงการกระจายพลังงานออกไปตามฟังก์ชันของทิศทางของสัญญาณที่ส่งออกไปจากสายอากาศ ซึ่งแสดงถึงระดับสัมพันธ์ของกำลังงานที่ส่งออกไปซึ่งเป็นฟังก์ชันของทิศทาง ถึงแม้ว่าเราจะใช้คำว่า “การแผ่กระจายกำลังงาน” กับแบบรูปที่ใช้กับสายอากาศส่ง แต่ความจริงจะเป็นแบบรูปอันเดียวกันกับแบบรูป “การรับคลื่น” ในกรณีที่เป็นสายอากาศรับด้วย ตามทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่สมบูรณ์จะเป็นฟังก์ชันแบบ 3 มิติ แต่ทั่วไปจะใช้งานกันเพียง 2 มิติก็เพียงพอที่จะบอกคุณลักษณะของสายอากาศที่มีทิศทางได้ การวัดในแต่ละมิติจะวัดในแต่ละระนาบที่ตั้งฉากกัน คือระนาบที่ขนานกับสนามไฟฟ้าและระนาบที่ขนานกับสนามแม่เหล็กโดยเรียกว่า E-plane และ H-plane ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบหนึ่งๆ สามารถวัดได้โดยการหมุนสายอากาศในระนาบนั้นๆ ขณะที่ระดับของกำลังงานที่รับได้จะเป็นฟังก์ชันของการหมุนของสายอากาศ เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่ถูกต้องควรจะต้องจัดสภาพแวดล้อมที่อยู่รอบสายอากาศที่จะทำการวัดให้ปราศจากวัตถุใดๆ ที่อาจจะทำให้เกิดการสะท้อนสัญญาณและส่งกลับไปยังสายอากาศที่ทำการวัดอยู่

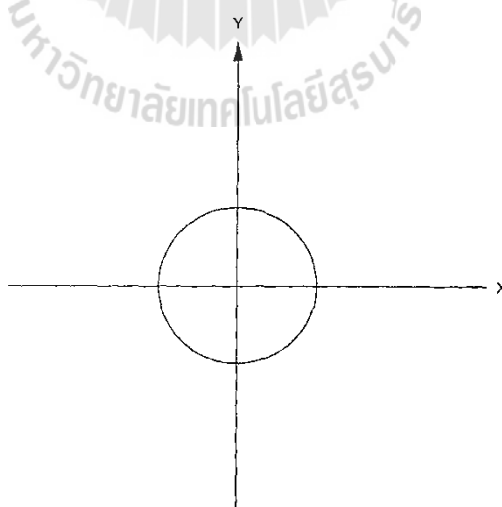


รูปที่ 2.6 ระนาบสนามไฟฟ้า E-plane (y-z) และระนาบสนามแม่เหล็ก H-plane (x-y) ของสายอากาศไดโพล

รูปที่ 2.7 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลอุดมคติ แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานนี้แสดงให้เห็นว่าไดโพลอุดมคตินั้นมีทิศทางด้วย เพราะว่าการแผ่กระจายกำลังงานจะมีความแรงของสัญญาณสูงในบางทิศทางเมื่อเทียบกับทิศทางอื่นๆ ส่วนแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในสนามแม่เหล็ก (H-plane) ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 ซึ่งในแบบรูปนี้การแผ่กระจายกำลังงานจะเท่ากันทุกทิศทาง



รูปที่ 2.7 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) ของไดโพลอุดมคติ



รูปที่ 2.8 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของไดโพลอุดมคติ

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half-Power Beamwidth: HPBW) ของสายอากาศ คือ การพิจารณามุมในลำคลื่นหลักโดยคิดที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (-3 dB) ของกำลังงานที่แผ่ออกในทิศทางของกำลังงานสูงสุด

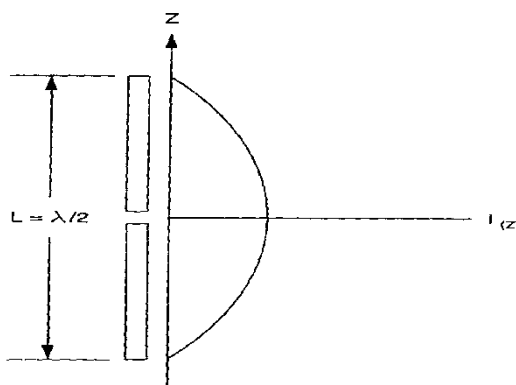
$$\text{HPBW} = \left| \theta_{\text{HPBwleft}} - \theta_{\text{HPBwright}} \right| \quad (2.5)$$

ค่า HPBW ของไดโพลอุดมคติในระนาบสนามไฟฟ้า E-plane จะเท่ากับ 90 องศาซึ่งดูได้จากรูปที่ 2.5 สำหรับสายอากาศไดโพลในทางปฏิบัติซึ่งใช้กันทั่วไป จะมีความยาว L เท่ากับ $\lambda/2$, λ และ $3\lambda/2$ ค่า λ เป็นค่าความยาวคลื่นของสัญญาณ การแจกแจงของกระแสที่เกิดขึ้นบนไดโพล $\lambda/2$ จะมีรูปร่างของสัญญาณเป็นรูปไซน์ครึ่งคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยกระแสนี้จะมีค่าสูงสุดที่จุดกึ่งกลาง และมีค่าศูนย์ที่จุดปลายสุดรูปที่ 2.10 ได้แสดงแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานทั้งจากสายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และในไดโพล อุดมคติ โดยสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ มี HPBW อยู่ที่ 78 องศา ในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และให้ผลที่แคบและบางกว่าลักษณะของสายอากาศไดโพลอุดมคติ ส่วนการแผ่กระจายกำลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ จะมีลักษณะเป็นวงกลมดังรูปที่ 2.8

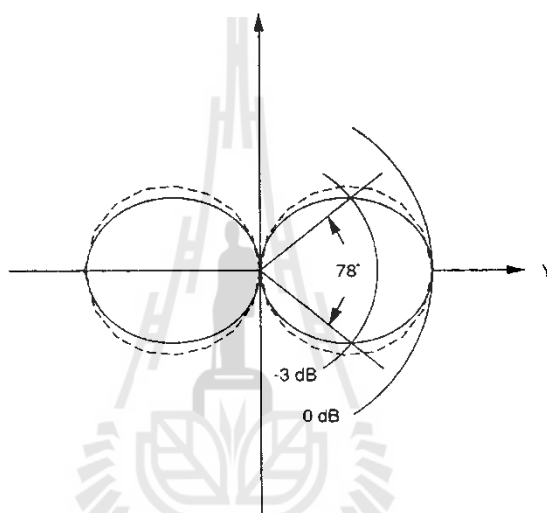
ในการออกแบบสายอากาศซึ่งสมมุติฐานของโครงการฉบับนี้ สายอากาศไดโพลเส้นตรง ความยาวครึ่งคลื่น ที่มีขนาดความยาวสั้นลง แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ซึ่งสายอากาศยังมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวเหมือนเดิมที่ออกแบบ จะให้ ค่าความกว้างแถบ (Beamwidth) ที่กว้างกว่าทฤษฎีข้างต้น คือต้องมากกว่า 79.6 องศา

2.3.3 การโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna Polarization)

การโพลาไรซ์ของสายอากาศ จะใช้ในการอธิบายทิศทางของสนามไฟฟ้าของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอากาศซึ่งถูกส่งออกไปโดยตัวสายอากาศในทิศทางซึ่งมีความเข้มของสนามสูงสุดและวัดได้ในสนามระยะไกล การสายอากาศจำนวนมากจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Polarization) นั่นคือในหนึ่งรอบ (Cycle) เวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และยังคงถูกแบ่งออกเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical Polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal Polarization) นอกจากนี้ยังมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization) และการโพลาไรซ์แบบรูปวงรี (Elliptical Polarization)

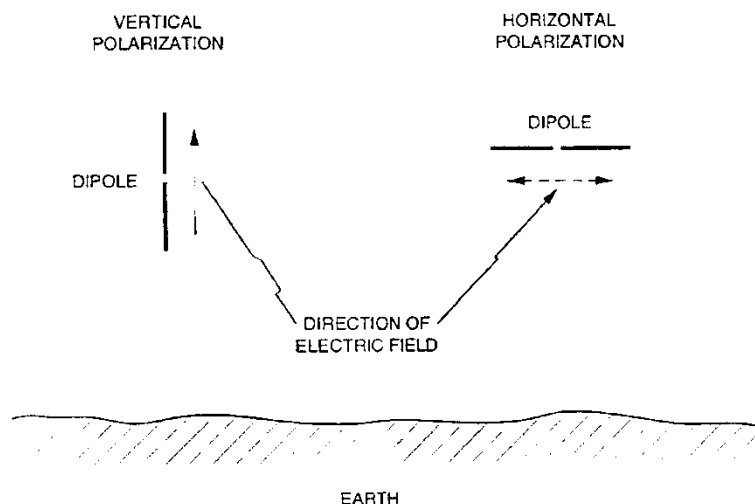


รูปที่ 2.9 การแจกแจงรูปของกระแสบนสายอากาศไดโพล $\lambda/2$



รูปที่ 2.10 แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสนามไฟฟ้า (E-Plane) ของสายอากาศไดโพล $\lambda/2$ (เส้นทึบ) และไดโพลอุดมคติ (เส้นประ)

บ่อยครั้งที่การโพลาไรซ์ของสายอากาศจะพิจารณาจากรูปทรงของตัวสายอากาศเอง เช่น ในกรณีของสายอากาศแบบเส้นลวด ซึ่งอาจจะมีส่วนประกอบเพียงตัวเดียวหรือหลายตัววางขนานกัน เช่น สายอากาศไดโพลและยากิเราสามารถที่จะสมมุติให้สนามไฟฟ้าซึ่งมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นขนานไปกับส่วนประกอบของตัวสายอากาศ แต่ก็มีสายอากาศบางชนิดซึ่งมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นเหมือนกันแต่ไม่สามารถจะใช้รูปทรงของโครงสร้างมาทำนายการโพลาไรซ์ได้ เช่น สายอากาศปากแตร (Horn) แบบปวง (Loop) และแบบร่อง (Slot) เป็นต้น



รูปที่ 2.11 ลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศไดโพล

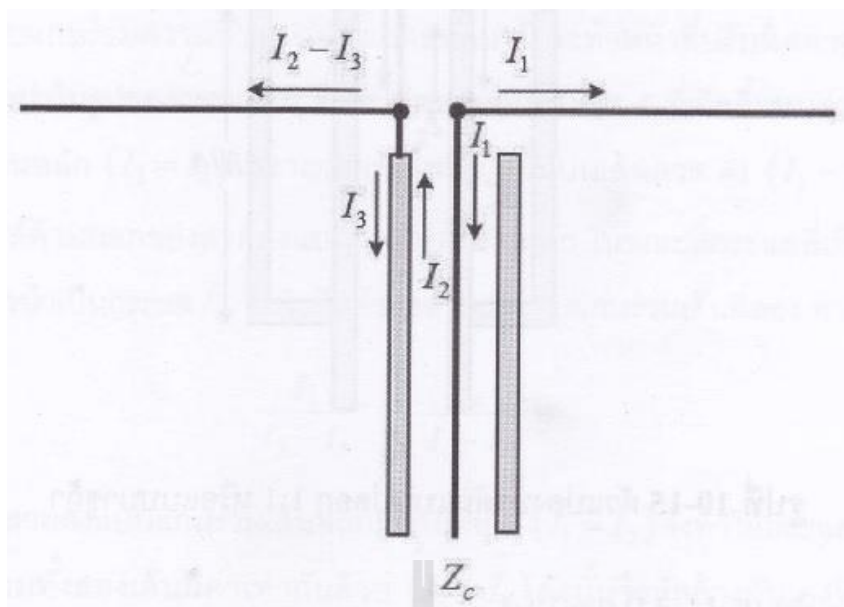
เพื่อให้การรับสัญญาณทำได้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ สิ่งสำคัญก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่รับสัญญาณจะต้องมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเดียวกันกับการโพลาไรซ์ของสัญญาณที่ส่งมา หากเกิดการสูญเสียสัญญาณอันเนื่องมาจากการจัดวางการโพลาไรซ์ไม่ถูกต้อง (เช่น สัญญาณที่รับได้เป็นของการโพลาไรซ์ทางแนวตั้งแต่สายอากาศที่ใช้มีการจัดการโพลาไรซ์ทางแนวนอน) เรียกว่า เกิดการแยกการโพลาไรซ์แบบไขว้ (Cross-Polarization Isolation)

2.4 การแมตซ์ซิ่ง (Matching Network)

ในการติดตั้งสายอากาศใช้งานจริง ต้องทำการแมตซ์ซิ่ง เพื่อให้สายอากาศสามารถใช้งานได้จริงในกรณีที่ต้องการ สำหรับโครงการนี้ทำการแมตซ์ซิ่งสายอากาศ กับสายโคแอกเซียล 50 โอห์ม ในที่นี้นำเสนอวิธีการแมตซ์ซิ่ง อย่างง่าย 2 วิธี ได้แก่

2.4.1 การแมตซ์ซิ่งด้วยบาลัน

บางครั้งเมื่ออุปกรณ์ที่ใช้งานความถี่สูงถูกต่อเข้าด้วยกัน แม้ว่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวอาจมีการแมตซ์กันเป็นอย่างดีแล้วก็ตามแต่ก็ยังมี การสะท้อนกลับของสนามเกิดขึ้นได้ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการไม่แมตซ์ของสนาม (Field Mismatch) ตัวอย่างทั่วไปที่เกิดขึ้นในระบบวิศวกรรมสายอากาศ ก็คือการต่อสายส่งแบบแกนร่วมที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ $Z_c=75 \Omega$ เข้ากับสายอากาศแบบไดโพลครึ่งคลื่นซึ่งมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้า $Z_{in}=73 \Omega$ ค่าของกำลังที่สะท้อนกลับซึ่งคำนวณได้จากสมการ $|\Gamma|^2 = \left(\frac{VSWR-1}{VSWR+1} \right)^2$ จะมีความมากกว่าหนึ่งมากซึ่งสาเหตุที่เกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้นมาเพราะว่า การแจนรูปสนามและกระแสที่เกิดขึ้นในสายส่งแบบแกนร่วมและที่ขั้วด้านเข้าของไดโพลเส้นลวดมีความแตกต่างกันมากนั่นเอง ดังแสดงในรูป 2.12

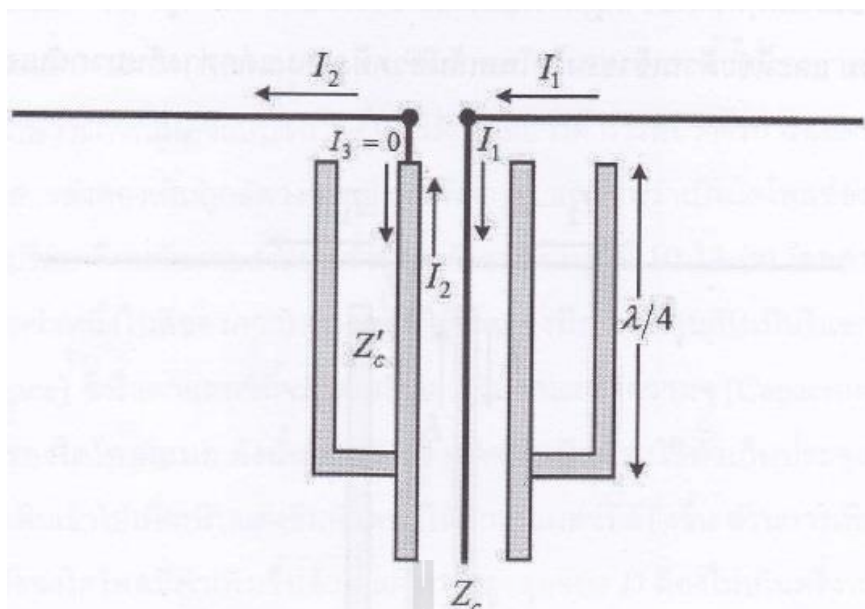


รูปที่ 2.12 แสดงความแตกต่างของกระแสที่เกิดจากการต่อกันระหว่างสายอากาศไดโพลเส้น ลวดและสายส่งแบบแกนร่วมโดยตรง

จากรูป 2.12 จะเห็นว่ากรณีที่กระแสเกิดขึ้นบนสองแขนของไดโพลมีค่าไม่เท่ากัน เป็นเหตุให้เกิดความไม่สมดุลกันระหว่างสายอากาศและสายส่งแบบแกนร่วม ดังนั้นเพื่อควบคุมให้กระแสได้คู่กันจึงมีการออกแบบอุปกรณ์ตัวแปลงที่เรียกว่า บาลัน หรือ Balun (มาจากคำเต็มในภาษาอังกฤษว่า Balanced-to-Unbalanced Transformer) ซึ่งปัจจุบันมีใช้งานในหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและความต้องการของผู้ออกแบบดังตัวอย่างและการอธิบายต่อไปนี้

ก) บาลันแบบปลอก (Sleeve Balun) 1:1

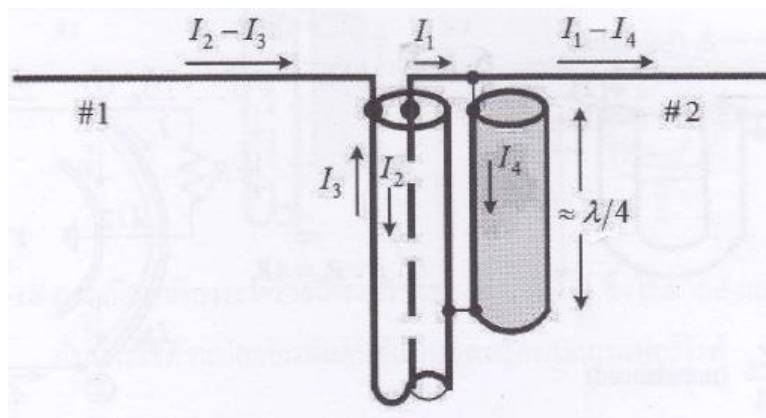
สำหรับบาลันแบบปลอกนี้ บางครั้งถูกเรียกว่า บาลันแบบบาซูก้า (Bazooka Balun) เพราะมีลักษณะคล้ายกับเครื่องยิงลูกระเบิดชื่อบาซูก้าในสมัยหนึ่งโดยมีโครงสร้างประกอบด้วยปลอกโลหะต่อรวมแกนกับด้านนอกของสายส่งแบบแกนร่วม เพื่อทำเป็นสายส่งแบบแกนร่วมอีกเส้นหนึ่งซึ่งครอบอยู่ด้านนอกสุดและมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ Z_c ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยความยาวของปลอกจะเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นเมื่อวัดจากขั้วด้านเข้าของสายอากาศ ข้อเสียของบาลันแบบปลอก ก็คือ ให้ความกว้างแถบที่ค่อนข้างแคบและไม่มีคุณสมบัติในการแปลงอิมพีแดนซ์ (อัตราส่วนการแปลงเท่ากับ 1:1) เป็นสาเหตุที่ไม่นิยมนำมาใช้งานเท่าใดนัก เนื่องจากความยุ่งยากในการสร้างตัวแปลงนั่นเอง



รูปที่ 2.13 ตัวแปลงบาลันแบบปลอก 1:1 หรือแบบบาซูก้า

ข) บาลันแบบพับ (Folded Balun) 1:1

บาลันแบบพับนี้ บางครั้งอาจเรียกว่า บาลันแบบแกนร่วมแยก (Split-Coaxial Balun) หรือ บาลันแบบแกนร่วมหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น ($\lambda/4$ -Coaxial Balun) ซึ่งมีบาลันแบบนี้สามารถสร้างได้ง่ายกว่าบาลันแบบปลอก แต่ยังมีคุณสมบัติในการแปลงอิมพีแดนซ์ด้วยอัตราส่วน 1:1 และมีกว้างแถบที่ค่อนข้างแคบเช่นเดียวกับบาลันแบบปลอก โครงสร้างของบาลันแบบพับซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 นั้นประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายส่งแบบแกนร่วมสำหรับป้อนสัญญาณเข้าโดยตรงกับแขนด้านหนึ่งของไดโพลและแขนอีกด้านหนึ่งถูกต่อเข้ากับส่วนที่เป็นชีลด์ด้านนอกของสายส่งเส้นเดียวกันนี้ ส่วนที่เป็นชีลด์ด้านนอกนี้จะถูกต่อเข้ากับส่วนที่เป็นชีลด์ของสายส่งแบบแกนร่วมอีกเส้นหนึ่งซึ่งมีความยาว $\lambda/4$ เพื่อจำลองให้ทำหน้าที่เสมือนกับมีสายส่งแบบสองสายอีกเส้นหนึ่งต่อเข้ากับแขนทั้งสองของไดโพล เนื่องจากสายส่งเส้นนี้ถูกต่อในลักษณะที่ขนานกับหัวด้านเข้าของไดโพลอิมพีแดนซ์ของสายเส้นนี้จึงมีค่าเป็นอนันต์และไม่มีผลกระทบต่ออิมพีแดนซ์เดิมของไดโพล



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของบาลันแบบพับ 1:1

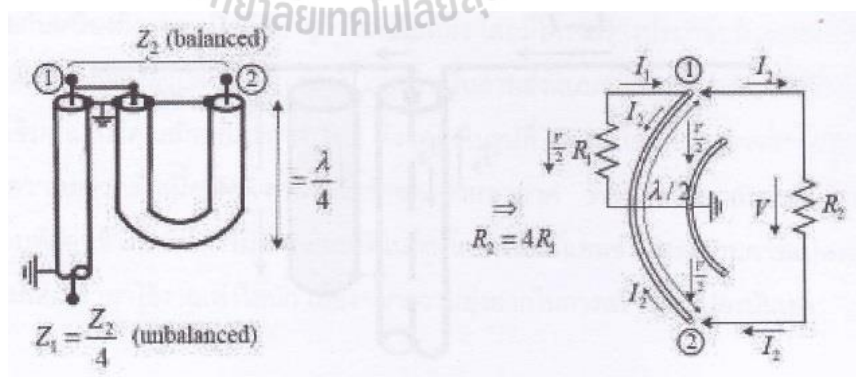
สายส่งแบบแกนร่วมความยาว $\lambda/4$ ที่แยกออกมา นี้ จะทำหน้าที่ปรับทิศทางบางส่วนของกระแส I1 โดยเหนี่ยวนำลงมาในรูปของกระแส I4 ซึ่งจะได้คู่ลกับกับกระแส I3 ที่เกิดขึ้นบนส่วนที่เป็นซีลด์ของสายส่งแบบแกนร่วมเส้นหลัก (I3=I4) เพราะว่ากระแสที่เกิดขึ้นบนเส้นลวด #1 (I2-I3) จะเหนี่ยวนำเป็นกระแส I3 ขึ้นที่ซีลด์ด้านนอกของสายส่งแบบแกนร่วมเส้นหลัก ในขณะที่กระแสเกิดขึ้นบนเส้นลวด #2 (I1-I4) จะเหนี่ยวนำเป็นกระแส I4 ขึ้นในซีลด์ของสายส่งแบบแกนร่วมเส้นที่สอง ทำให้

$$\frac{I_3}{I_2 - I_3} = \frac{I_4}{I_1 - I_4}$$

เนื่องจากกระแสในสายส่งแบบแกนร่วมเส้นหลักมีค่าเท่ากัน (I1=I2) จึงทำให้กระแสที่เกิดขึ้นในซีลด์ของสายส่งแบบแกนร่วมทั้งสองเส้นมีค่าเท่ากันด้วย (I3=I4) ดังนั้นจึงหักล้างกันเองที่ตำแหน่งความยาวประมาณ $\lambda/4$ ของสายส่งแบบแกนร่วม

ค) บาลันแบบแกนรวมคลื่น ($\lambda/4$ -Coaxial Balun) 1:4

บาลันแบบแกนรวมคลื่นนี้ จะมีคุณสมบัติในการแปลงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีค่าสูงกว่าให้สามารถแมตช์กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งที่มีค่าต่ำกว่าได้ โดยโครงสร้างของบาลันดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 สำหรับการอธิบายการทำงานของบาลันในที่นี่จะสมมุติว่า ผู้ออกแบบมีความต้องการนำสายส่งสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ $Z_c=75 \Omega$ ต่อใช้งานกับสายอากาศแบบไดโพลพับซึ่งมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้า $Z_A \approx 292 \Omega$ ซึ่งมีอัตราส่วนความแตกต่างของอิมพีแดนซ์ประมาณ 1:4 จึงสามารถนำบาลันแบบแกนรวมคลื่นนี้มาใช้เป็นอุปกรณ์การแมตช์ได้โดยรูปร่างและความยาวของส่วนที่เป็นบาลันได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.15 (ก)



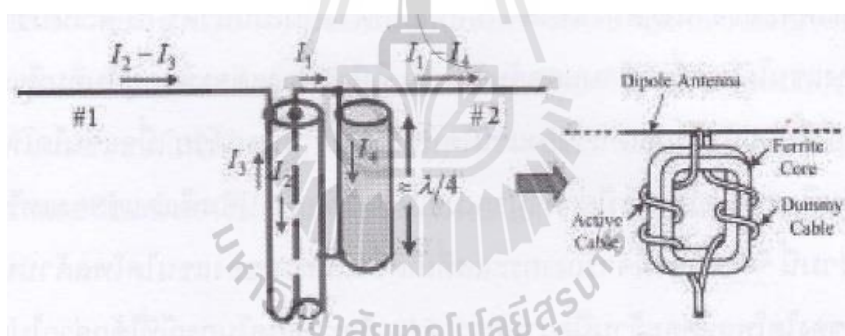
(ก) โครงสร้างของบาลัน

(ข) วงจรสมมูลของบาลัน

รูปที่ 2.15 บาลันแบบแกนร่วมความยาวคลื่นครึ่งคลื่น 1:1

จากบาลันทั้งสามแบบที่กล่าวไปแล้วจะเห็นว่าเป็นบาลันที่มีความกว้างแถบของความถี่ใช้งานค่อนข้างแคบ เนื่องจากขนาดของบาลันขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ใช้เป็นตัวกำหนดความยาวของสายส่งแบบแกนร่วมที่ใส่เพิ่มเติมเข้าไป สำหรับบาลันแถบกว้าง (Broadband Balun) ซึ่งมีความกว้างแถบใช้งานกว้างและนำไปใช้งานด้านความถี่สูงนั้น ก็สามารถสร้างขึ้นได้โดยใช้วิธีการลดขนาดของสายส่งแบบกระแสดัดคู่ให้มีลักษณะเรียวยาวเป็นลำดับแล้วจึงนำไปต่อเข้ากับสายส่งที่มีกระแสดัดคู่ จึงเรียกว่า บาลันเรียว (Tapered Balun) โดยความยาวทั้งหมดของสายส่งที่ถูกสร้างเป็นบาลันตามที่กำหนดนี้ จะมีความยาวหลายเท่าของความยาวคลื่น ซึ่งบาลันนี้มักนำไปใช้เป็นอุปกรณ์การแมตซ์ระหว่างไมโครสตริปหรือสายส่งแบบแกนร่วมกับสายส่งแบบสองสาย ในทางปฏิบัติบาลันเรียวจะไม่นิยมใช้งานที่ความถี่ต่ำ (ต่ำกว่าย่าน UHF)

เนื่องจากขนาดทางกายภาพของบาลันจะมีความยาวมากจึงนิยมใช้ตัวแปลงอิมพีแดนซ์แบบขดลวดพันบนแกนเฟอร์ไรต์มาเป็นอุปกรณ์สำหรับปรับอิมพีแดนซ์และสร้างระบบป้อนให้ได้คู่แทนการใช้สายส่งแบบแกนร่วม เนื่องจากมีขนาดที่เล็กกว่าและที่สำคัญคือ ให้ความกว้างแถบของความถี่ใช้งานได้กว้างพอสมควร (สามารถออกแบบให้มีความกว้างแถบได้สูงสุด 10:1) ในกรณีที่ต้องการออกแบบตัวแปลงโดยใช้ขดลวดพันบนแกนเฟอร์ไรต์เพื่อให้มีอัตราส่วนการแปลงอิมพีแดนซ์เป็น 1:1 นั้น สามารถเทียบเคียงจากวิธีการออกแบบบาลันแบบ 1:1 ก็ได้ แต่การใช้วิธีดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งได้อธิบายไปแล้วนี้จะให้ความกว้างแถบที่กว้างกว่าวิธีการใช้สายส่งแบบแกนร่วม



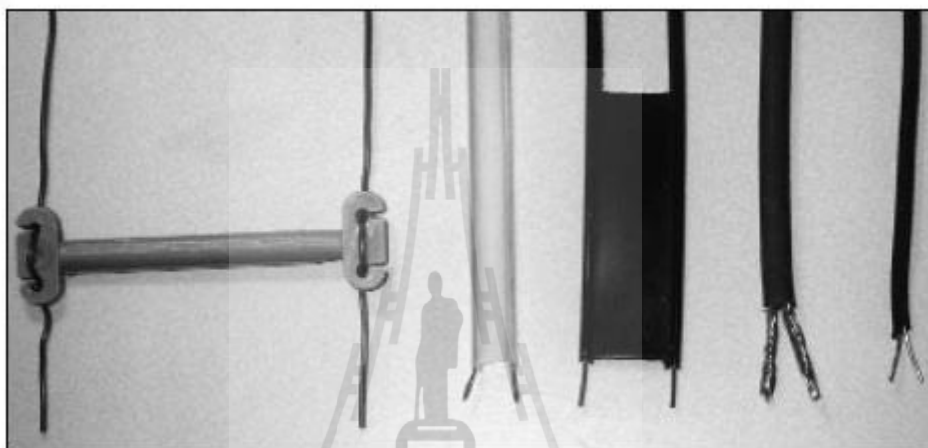
รูปที่ 2.16 การเทียบเคียงระหว่างโครงสร้างของบาลัน 1:1 ซึ่งใช้สายส่งแบบแกนร่วมกับการใช้ตัวแปลงอิมพีแดนซ์บนขดลวดบนแกนเฟอร์ไรต์

จากรูปที่ 2.16 ด้านขวามือนั้นจะเป็นการสร้างสายส่งขึ้นมาใหม่โดยใช้ชีลด์ด้านนอกของสายส่งแบบแกนร่วมสองเส้นพันบนแกนเฟอร์ไรต์ซึ่งจะทำให้เกิดอิมพีแดนซ์ที่สูงมากเนื่องจากแกนเฟอร์ไรต์จะมีสภาพ ยอมสัมพัทธ์ (Relative Permittivity) สูงมากเช่นเดียวกันด้วยเหตุนี้ ความยาวของสายส่งแบบแกนร่วมจึงไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและจะไม่กระทบต่ออิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

2.5 สายนำสัญญาณ (Transmission Lines)

ในการรับส่งสัญญาณวิทยุ นั้นสายนำสัญญาณก็มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าสายอากาศเลย การจะเลือกใช้สายนำสัญญาณ การจะเลือกใช้สายนำสัญญาณให้เหมาะสมกับงานนั้น ต้องศึกษาเรื่องของสายนำสัญญาณ ให้ดีก่อน สายนำสัญญาณ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.5.1 Balance Line คือสายนำสัญญาณที่มีตัวนำ 2 เส้น ที่มีลักษณะเหมือนกันนำมาต่อขนานกัน โดยมีตัวกลางกั้นไว้จะเป็นอากาศก็ได้ เช่นสายอากาศ Openwire จะมีฉนวนยึดสายเอาไว้เป็นระยะ เพื่อความแข็งแรง และคงลักษณะการขนานกันเอาไว้



รูปที่ 2.17 สายนำสัญญาณ Balance Line

สูตรการคำนวณ ค่า impedance ของสายนำสัญญาณแบบ Balance Line

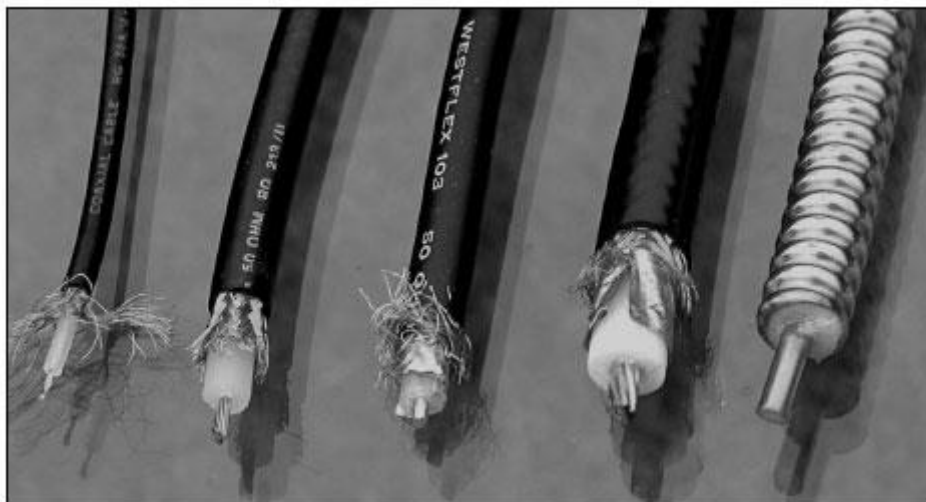
$$Z_0 = 276 \log_{10} \frac{2S}{d}$$

Z_0 = ค่า impedance ของสายนำสัญญาณแบบ Balance Line

S = ระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง (วัดจากแกนกลางของตัวนำ)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำ (ใช้หน่วยเดียวกับ S)

2.5.2 Unbalance Line คือสายนำสัญญาณที่มีตัวนำ 2 เส้น มีลักษณะต่างกัน หรือที่เรารู้จักกันดี ในนาม Coaxial Cable สายนำสัญญาณแบบนี้ถูกสร้างขึ้นมาทดแทนสายสัญญาณแบบ Balance Line เพื่อลดการแพร่กระจายคลื่นออกจากสายนำสัญญาณและป้องกันสัญญาณรบกวนได้ดีกว่า สามารถติดตั้งใกล้ ๆ โลหะได้



รูปที่ 2.18 สายนำสัญญาณ Unbalance Line

สูตรการคำนวณค่า impedance ของสายนำสัญญาณแบบ Unbalance Line

$$Z_0 = 138 \log_{10} \left(\frac{b}{a} \right)$$

Z_0 = ค่า impedance ของสายนำสัญญาณแบบ Unbalance Line

b = เส้นผ่านศูนย์กลางของชีลด์

a = เส้นผ่านศูนย์กลางของลวดตัวนำที่อยู่ตรงกลาง (ใช้หน่วยเดียวกับ b)

ในการติดตั้งสายแบบ balance Line เราต้องป้องกันไม่ให้ความชื้นเกิดขึ้นบนสายเพราะความชื้นทำให้ ค่าไดอิเล็กตริกเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ค่า impedance ของสายเปลี่ยนแปลงไปด้วย นอกจากนี้ การติดตั้งสายนำสัญญาณต้องห่างจากตัวนำหรือว่าโลหะอื่น ๆ โดยระยะห่างจากตัวนำอื่นประมาณ 2-3 เท่าของระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสอง สำหรับสาย Coaxial นั้นจะมีชีลด์ต่อลงกราวด์ ฉะนั้นการติดตั้งจึงไม่ค่อยมีปัญหา ติดตั้งใกล้โลหะได้ ปัญหาเรื่องความชื้นน้อยกว่า เว้นแต่ความชื้นจะเข้าไปในสาย สรุปได้ว่าสายแบบ balance จะมีการสูญเสียน้อย แต่สาย Coaxial จะติดตั้งง่ายกว่าค่าความเร็วของคลื่นวิทยุในสายนำสัญญาณ (Velocity Factor) ในสายนำสัญญาณนั้น คลื่นวิทยุ เดินทางได้ช้ากว่าในบรรยากาศ และช้ากว่าความเร็วของแสง ซึ่งค่าความเร็วของคลื่นในสายนำสัญญาณนี้สัมพันธ์กับค่าคงที่ของวัสดุที่นำมาทำเป็น Dielectric (Dielectric constant) โดยทั่วไปแล้ว ค่าความเร็วของคลื่นในสายเราเรียกว่า ตัวคูณความเร็วของสายเช่น สาย เบอร์ RG- 58 A/U มีตัวคูณความเร็วเท่ากับ 0.66 ดังนั้นความเร็วของคลื่นในสาย คือ 0.66×300 ล้านเมตร / วินาที เท่ากับ 1.98 ล้านเมตร / วินาที

สูตรการคำนวณค่าความเร็วในสาย

$$\lambda = \frac{983.6}{f} \times VF$$

โดยที่

λ = wavelength, in ft

f = frequency in MHz

VF = velocity factor

สูตรการคำนวณค่าความเร็วในสาย (velocity factor) มีหน่วยเป็น ฟุต เมื่อสายนำสัญญาณนำมาใช้ปรกติ ตัวคูณความเร็วของสายแทบไม่ต้องสนใจ แต่ถ้านำสายสัญญาณมาต่อเพื่อ ขนานกับสายอากาศหลาย ๆ ต้น เข้าเป็นชุด เช่น การอากาศยาก็หลาย ๆ สแต็ก หรือสายอากาศ Dipole หลาย ๆ ท่วง (สาย phasing line) เราต้องนำความเร็วตัวนี้มาเกี่ยวข้องด้วย



ตารางที่ 2.1 แสดงคุณลักษณะเบอร์สายนำสัญญาณ

<i>RG or Type</i>	<i>Part Number</i>	<i>Nom. Z_0 Ω</i>	<i>VF %</i>	<i>Cap. pF/ft</i>	<i>Cent. Cond. AWG</i>
RG-6	Belden 1694A	75	82	16.2	#18 Solid BC
RG-6	Belden 8215	75	66	20.5	#21 Solid CCS
RG-8	Belden 7810A	50	86	23.0	#10 Solid BC
RG-8	TMS LMR400	50	85	23.9	#10 Solid CCA
RG-8	Belden 9913	50	84	24.6	#10 Solid BC
RG-8	CXP1318FX	50	84	24.0	#10 Flex BC
RG-8	Belden 9913F7	50	83	24.6	#11 Flex BC
RG-8	Belden 9914	50	82	24.8	#10 Solid BC
RG-8	TMS LMR400UF	50	85	23.9	#10 Flex BC
RG-8	DRF-BF	50	84	24.5	#9.5 Flex BC
RG-8	WM CQ106	50	84	24.5	#9.5 Flex BC
RG-8	CXP008	50	78	26.0	#13 Flex BC
RG-8	Belden 8237	52	66	29.5	#13 Flex BC
RG-8X	Belden 7808A	50	86	23.5	#15 Solid BC
RG-8X	TMS LMR240	50	84	24.2	#15 Solid BC
RG-8X	WM CQ118	50	82	25.0	#16 Flex BC
RG-8X	TMS LMR240UF	50	84	24.2	#15 Flex BC
RG-8X	Belden 9258	50	82	24.8	#16 Flex BC
RG-8X	CXP08XB	50	80	25.3	#16 Flex BC
RG-9	Belden 8242	51	66	30.0	#13 Flex SPC
RG-11	Belden 8213	75	84	16.1	#14 Solid BC
RG-11	Belden 8238	75	66	20.5	#18 Flex TC
RG-58	Belden 7807A	50	85	23.7	#18 Solid BC
RG-58	TMS LMR200	50	83	24.5	#17 Solid BC
RG-58	WM CQ124	52	66	28.5	#20 Solid BC

ควรใช้สายนำสัญญาณยาวเท่าไร ในการใช้สายนำสัญญาณส่งผ่านกำลังส่งจากเครื่องส่งวิทยุไปยังสายอากาศ และนำสัญญาณที่รับได้กลับเข้าสู่เครื่องรับ ในเครื่องรับวิทยุสื่อสาร สายนำสัญญาณจะยาวเท่าไร ก็ไม่มีผลต่อค่า impedance เราจะตัดที่ความยาวเท่าไรก็ได้ สายอากาศที่ matching ไม่ดี ค่า SWR สูง มิได้หมายความว่า สายนำสัญญาณที่ต่อเข้าเครื่อง ไม่ลงตัวกับความยาวคลื่น ผิดกับสาย phasing line ที่ต้องคำนึงถึง ความยาวของสายเป็นพิเศษ ในการใช้งานธรรมดา ความยาวของสายมีผลคือ สูญเสียกำลังส่งไปในสาย (Losses in Transmission Lines) สายที่ยาวมากๆ จะลดทอนกำลังส่งมาก ตัวอย่างเช่น สายอากาศสูง 30 เมตร ใช้สายนำสัญญาณ RG 58/U ถ้าส่งด้วยความถี่ 150 MHz จะสูญเสีย 6 dB ถ้าเราส่งด้วยกำลังส่ง 10 วัตต์ กำลังจะถูกลดทอนไปถึง 7.49 วัตต์ กำลังส่ง ที่ออกไปถึงสายอากาศเพียง 2.51 วัตต์เท่านั้น แต่ถ้าเราเปลี่ยนมาใช้ สายนำสัญญาณเบอร์ RG-8 แบบโฟม จะมีการสูญเสียเพียง 2.1 dB ที่ 30 เมตร กำลังส่งที่ปลายสายจะได้ถึง 6.17 วัตต์

ตารางที่ 2.2 แสดงเบอร์สายและอัตราการสูญเสีย (dB) ต่อ 100 ฟุต

RG or Type	Part Number	Nom. Z_0 Ω	VF %	Matched Loss (dB/100')			
				1 MHz	10	100	1000
RG-6	Belden 1694A	75	82	0.2	.7	1.8	5.9
RG-6	Belden 8215	75	66	0.4	0.8	2.7	9.8
RG-8	Belden 7810A	50	86	0.1	0.4	1.2	4.0
RG-8	TMS LMR400	50	85	0.1	0.4	1.3	4.1
RG-8	Belden 9913	50	84	0.1	0.4	1.3	4.5
RG-8	CXP1318FX	50	84	0.1	0.4	1.3	4.5
RG-8	Belden 9913F7	50	83	0.2	0.6	1.5	4.8
RG-8	Belden 9914	50	82	0.2	0.5	1.5	4.8
RG-8	TMS LMR400UF	50	85	0.1	0.4	1.4	4.9
RG-8	DRF-BF	50	84	0.1	0.5	1.6	5.2
RG-8	WM CQ106	50	84	0.2	0.6	1.8	5.3
RG-8	CXP008	50	78	0.1	0.5	1.8	7.1
RG-8	Belden 8237	52	66	0.2	0.6	1.9	7.4
RG-8X	Belden 7808A	50	86	0.2	0.7	2.3	7.4
RG-8X	TMS LMR240	50	84	0.2	0.8	2.5	8.0
RG-8X	WM CQ118	50	82	0.3	0.9	2.8	8.4
RG-8X	TMS LMR240UF	50	84	0.2	0.8	2.8	9.6
RG-8X	Belden 9258	50	82	0.3	0.9	3.1	11.2
RG-8X	CXP08XB	50	80	0.3	0.9	3.1	14.0
RG-9	Belden 8242	51	66	0.2	0.6	2.1	8.2
RG-11	Belden 8213	75	84	0.2	0.4	1.3	5.2
RG-11	Belden 8238	75	66	0.2	0.7	2.0	7.1
RG-58	Belden 7807A	50	85	0.3	1.0	3.0	9.7
RG-58	TMS LMR200	50	83	0.3	1.0	3.2	10.5
RG-58	WM CQ124	52	66	0.4	1.3	4.3	14.3
RG-58	Belden 8240	52	66	0.3	1.1	3.8	14.5
RG-58A	Belden 8219	53	73	0.4	1.3	4.5	18.1
RG-58C	Belden 8262	50	66	0.4	1.4	4.9	21.5
RG-58A	Belden 8259	50	66	0.4	1.5	5.4	22.8

ลักษณะของสายนำสัญญาณสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตัวอย่างเช่น RG- 58A/U RG ย่อมาจาก Radio Guide ก็คือสายนำสัญญาณวิทยุ 58 % ของสายอักษรตัวแรก อาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ แสดงถึงการเพิ่มเติมหรือการเปลี่ยนแปลง วัสดุ เช่น เปลือกสาย จำนวนลวดตัวนำ /U หมายถึง Utility หรือ Universal คือใช้ในงานทั่วไป

2.6 ซุปเปอร์ลีน (Superlene)

ซุปเปอร์ลีน (Superlene) หรือชื่อทางการค้าคือ Nylon ชื่อทางเคมีคือ Polyamide (PA6) Superlene Nylon (ซุปเปอร์ลีน ไนลอน) เป็นชื่อที่คนไทยรู้จักพลาสติกประเภทนี้

ซุปเปอร์ลีน เป็นพลาสติก ประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) จัดอยู่ในกลุ่มพลาสติกวิศวกรรมที่ได้จากการกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ของเอไมด์ (amide ,CHONH) และกรดอินทรีย์ มีการเพิ่มสารแต่งเติม (Filler & Additives) ประเภทกราฟท์และ โมลิบเดนัมไดซัลไฟด์ (Graphite & Molibdenum Disulphite) ทำให้เพิ่มคุณสมบัติให้ดีขึ้น

2.6.1 คุณสมบัติของ ซุปเปอร์ลีน

- ใช้งานในอุณหภูมิที่สูงได้ 120 องศาเซลเซียส เพราะมีจุดหลอมเหลว 180-200 องศาเซลเซียส
- ความแข็ง 82 Shore D หรือ 112 R Scale
- ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่อันตราย
- ปิดผนึกด้วยความร้อนได้ แต่ต้องใช้ อุณหภูมิสูงมากจึงไม่นิยมใช้เป็นชั้นปิดผนึกด้วยตัวเอง
- มีความเหนียว ขยายตัวได้มาก ยืดหยุ่นได้ดี ต้านทานแรงดึงและแรงฉีกขาดได้ดี ทนการบิดพับงอได้
- ทนต่อการกัดกร่อนและการเสียดสี ไม่เสีรูปทรงง่าย
- แกร่ง เหมาะสำหรับงานรับแรงมากๆ
- ทนต่อสารเคมี ทนต่อการขีดข่วน การขีด
- ดูดซึมน้ำได้มาก แต่ถ้ามีเปอร์เซ็นต์ของกลุ่ม Amide ในโครงสร้างลดลง จะสามารถลดการดูดน้ำ และความชื้นได้ซึ่งทำให้เสถียรภาพทางโครงสร้าง และทางไฟฟ้าดีขึ้น
- ป้องกันการซึมผ่านของไขมัน ออกซิเจนและกลิ่นต่างๆได้ดี
- ความแข็งแรงและการป้องกันการซึมผ่านของก๊าซลดลงเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น

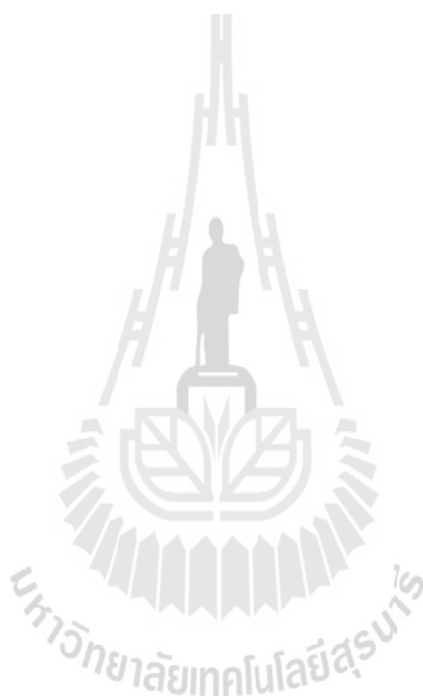
2.6.2 ลักษณะการใช้งาน ซุปเปอร์ลีน

การใช้งานของ ซุปเปอร์ลีน กว้างขวางมาก เช่น ใช้ทำแบร็ริง บูช เฟือง ลูกปืน ลูกล้อ ลูกกลิ้ง เกียร์ วาล์ว อะไหล่เครื่องจักร ล้อจักรยานยนต์ ต้มปากกา ลูกกลิ้ง แห อวน ถุงน่องสตรี ถุงเท้า สายไฟ ปลั๊กไฟฟ้า หมกเทียม เส้นใยสิ่งทอ นอกจากนี้ยังใช้ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยผลิตในรูปฟิล์ม ซึ่งในโครงงานนำ ซุปเปอร์ลีน มาหุ้มสายอากาศเพื่อลดขนาดความยาวคลื่น เพื่อให้สายอากาศสั้นลง

2.7 สรุป

สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนคลื่นที่อยู่ ในสายส่งสัญญาณหรือท่อนำคลื่นให้แพร่กระจายออกสู่ตัวกลางที่สายอากาศวางอยู่ เช่น อากาศอิสระ (free space) หรือไดอิเล็กตริกและในทางกลับกันจะทำหน้าที่รับคลื่นที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลางให้เข้ามาอยู่ในท่อนำคลื่นหรือสายส่งสัญญาณได้ สายอากาศที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณวิทยุ FM ในระบบ VHF ที่ดีควรมีคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานแบบรอบทิศทาง ความกว้างแถบที่เพียงพอ และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศได้มากขึ้น สำหรับสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น (Straight) ที่มีขนาดความยาวสั้นลง แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ซึ่งสายอากาศยังมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบตัวเหมือนเดิมในโครงงานฉบับนี้ การแผ่กำลังงานของสายอากาศเป็นแบบรอบทิศทางในระนาบเดียว (Omnidirectional Pattern) เพราะสายอากาศที่ใช้สำหรับส่งสัญญาณ

วิทยุ FM ในย่านความถี่ VHF จะต้องมีแบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation Pattern) ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ หรือสามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา การศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศแต่ละชนิดจึงมีความสำคัญ เพื่อให้ทราบถึงลักษณะและค่าการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ เมื่อได้ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศได้โพลแล้ว จะต้องนำไปจำลองโครงสร้าง เพื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST Microwave studio 2009 ต่อไป



บทที่ 3

การออกแบบและการจำลอง

3.1 บทนำ

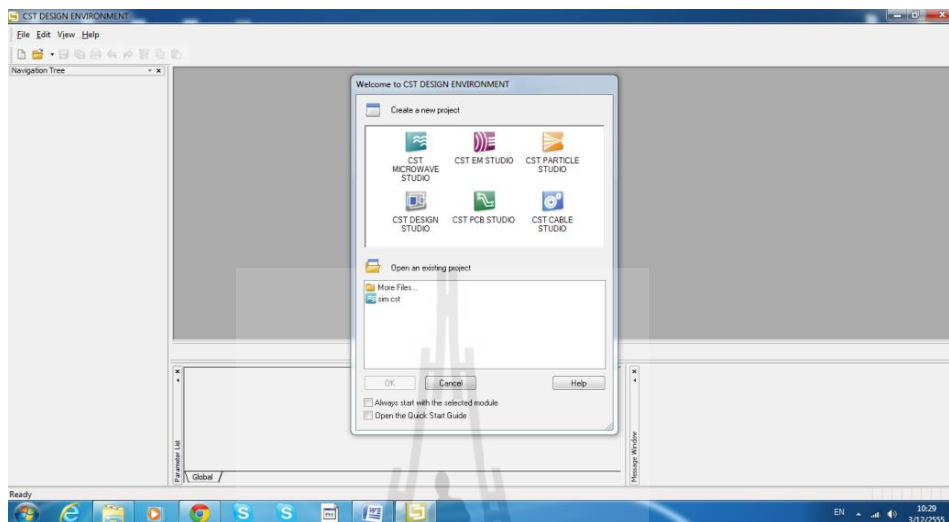
ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและการจำลองชิ้นงาน เพื่อที่จะนำไปสร้างชิ้นงานจริง โครงการนี้จึงได้จัดทำสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีขนาดความยาวสั้นลง แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ซึ่งสายอากาศยังมีรูปแบบการแผ่พลังงานแบบรอบตัวเหมือนเดิม มีข้อดีคือ ความยาวของสายอากาศลดลง ซึ่งจะสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ในการศึกษาแนวโน้มและคุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์และรูปแบบชิ้นงานให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งานสำหรับสถานีวิทยุ FM ย่านความถี่ 95 MHz

3.2 สายอากาศไดโพล

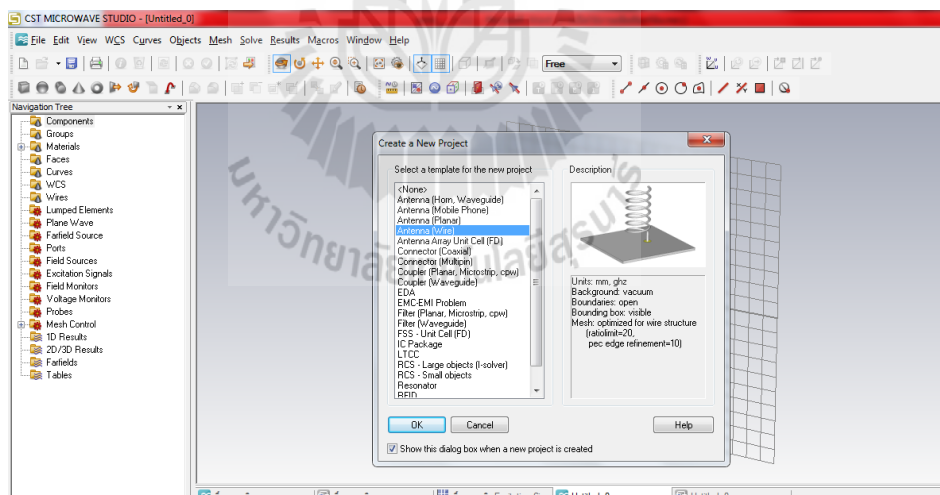
สำหรับโครงการนี้ได้นำสายอากาศไดโพลความยาวครึ่งคลื่นมาลดขนาดของสายอากาศลง แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติการแผ่พลังงานเพื่อนำไปใช้งานกับสถานีวิทยุ FM โดยการออกแบบและการจำลองผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2009 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ถึงคุณลักษณะสมบัติของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยทำการลดขนาดของสายอากาศลงแต่รักษาอัตราขยายและการแผ่พลังงาน จากนั้นทำการจำลองผลค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการพิจารณาการแมตซ์อิมพีแดนซ์ด้านเข้า คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient) หรือในรูปของพารามิเตอร์ S_{11} และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio หรือ SWR) สำหรับค่า SWR สามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ โดยถ้า SWR มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตซ์ที่สมบูรณ์ หมายความว่ากำลังไฟฟ้าด้านเข้าที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแผ่พลังงานออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่า SWR เท่ากับอนันต์หมายความว่าสายอากาศนั้นไม่แมตซ์ ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมด ส่งผลให้เครื่องส่งได้รับความเสียหายในงานประยุกต์ต่าง ๆ ค่าของ S_{11} จะยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตซ์ที่ดี

3.3 วิธีการจำลองอากาศไดโพล

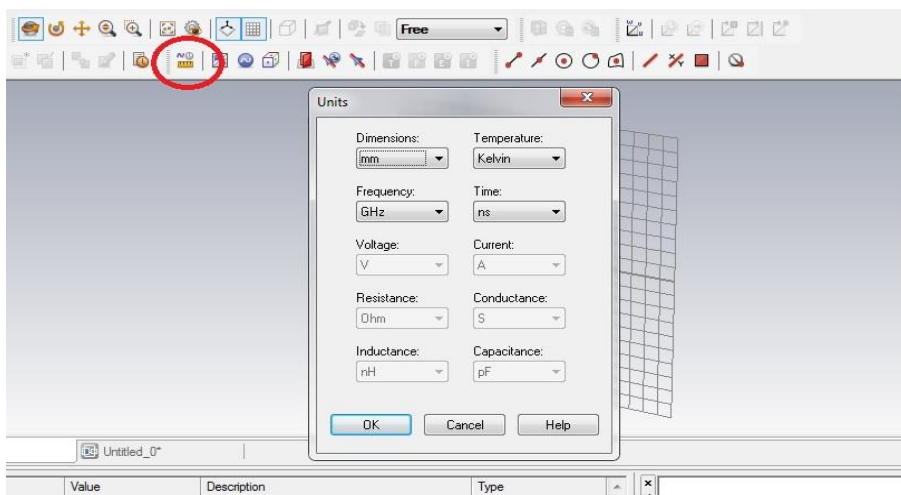
การจำลองสายอากาศไดโพลจะทำการจำลองโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2009 การจำลองต้องคำนึงถึงความถี่ (Frequency) ที่ต้องการใช้ เราได้จำลองขึ้นตามตัวอย่างของสายอากาศไดโพลที่ใช้ได้จริง ซึ่งจะใช้ความถี่ที่ทำการทดสอบคือ 95 MHz โดยมีขั้นตอนดังนี้



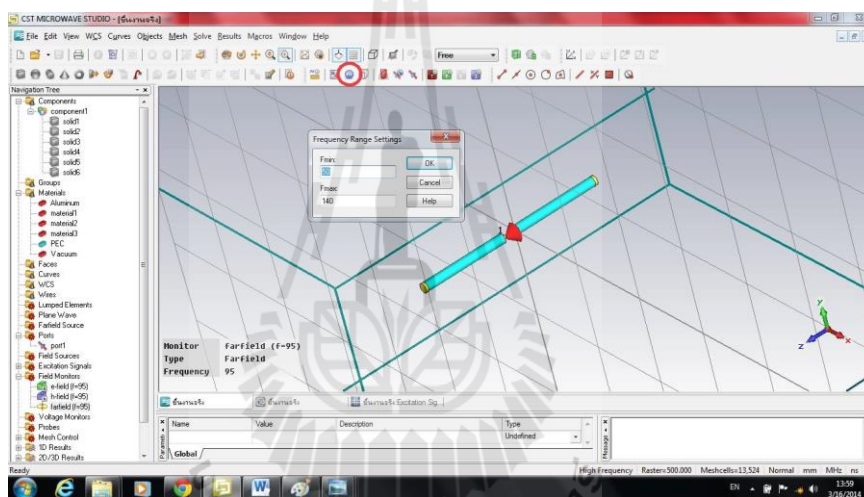
รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม CST Microwave Studio 2009



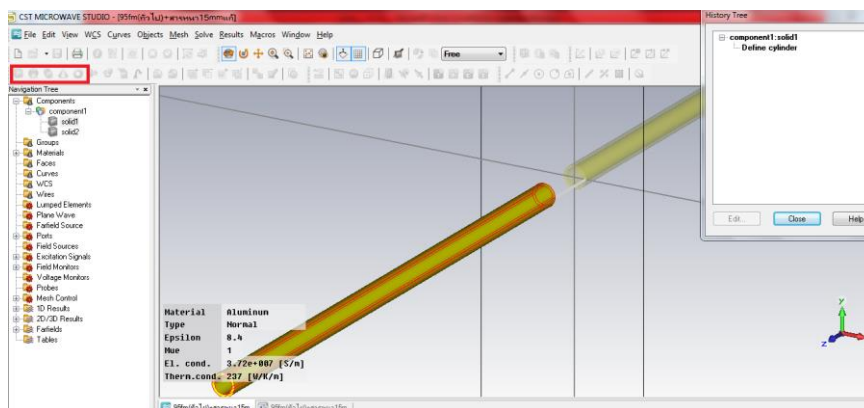
รูปที่ 3.2 เลือกแบบสายอากาศ (Wire)



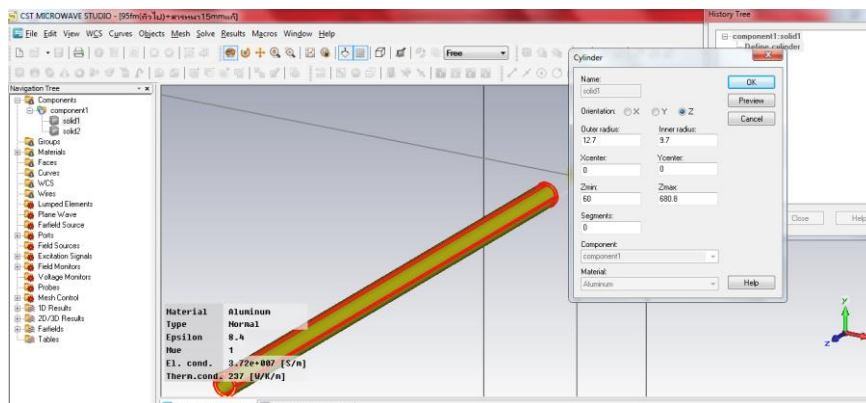
รูปที่ 3.3 การกำหนดหน่วยต่างๆ



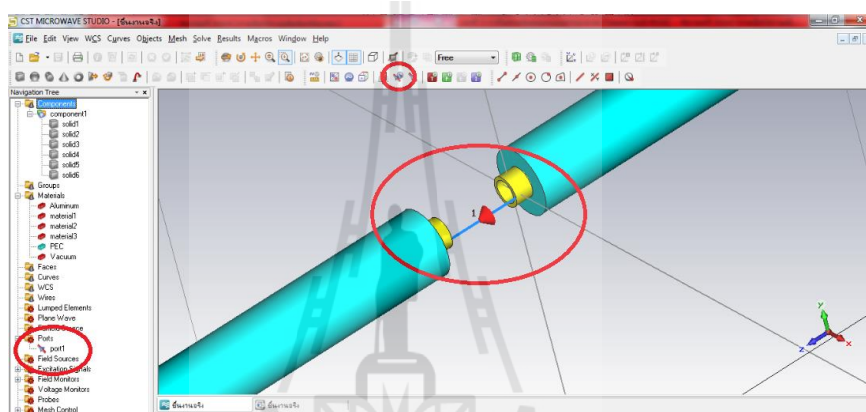
รูปที่ 3.4 การกำหนดช่วงระยะความถี่



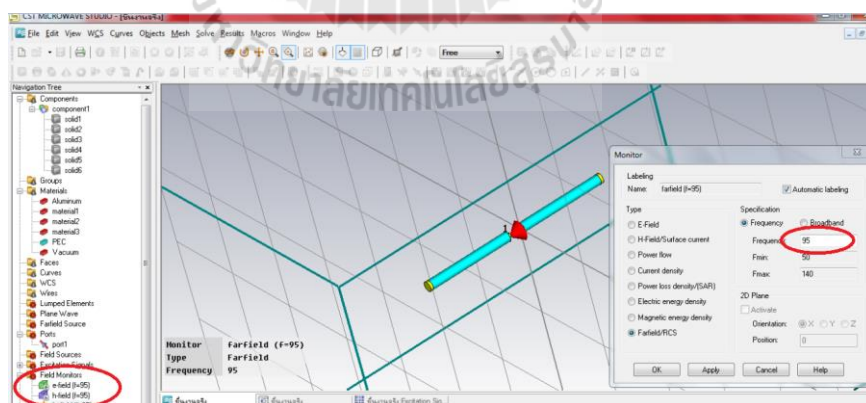
รูปที่ 3.5 การขึ้นรูปชิ้นงาน



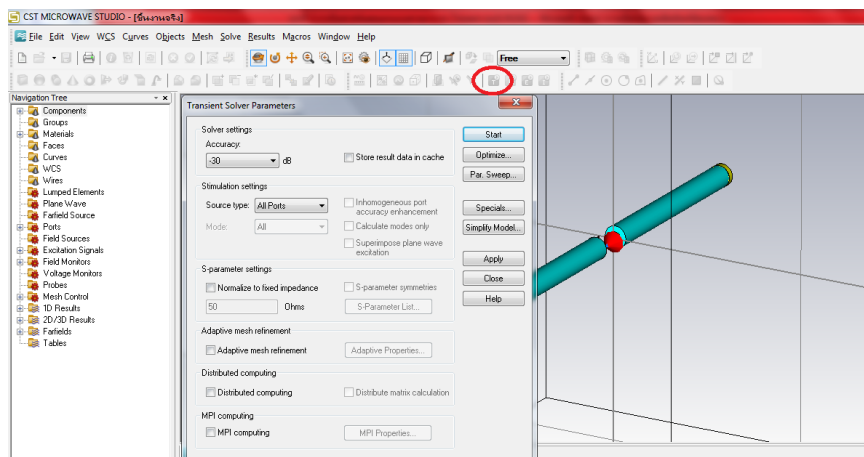
รูปที่ 3.6 การกำหนดค่าพารามิเตอร์



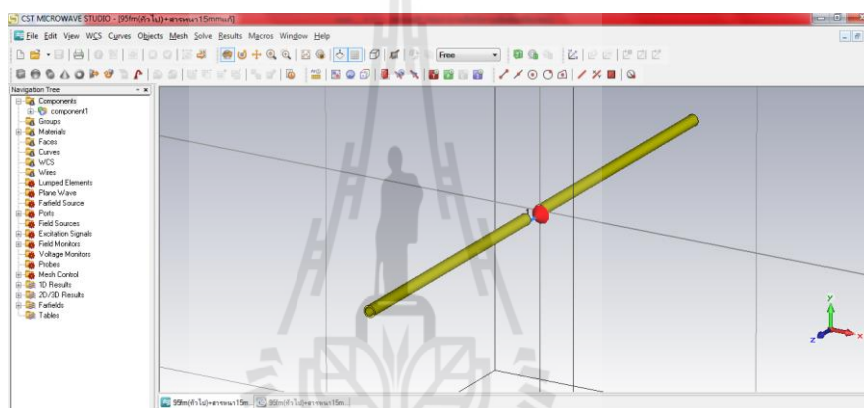
รูปที่ 3.7 การกำหนดพอร์ต



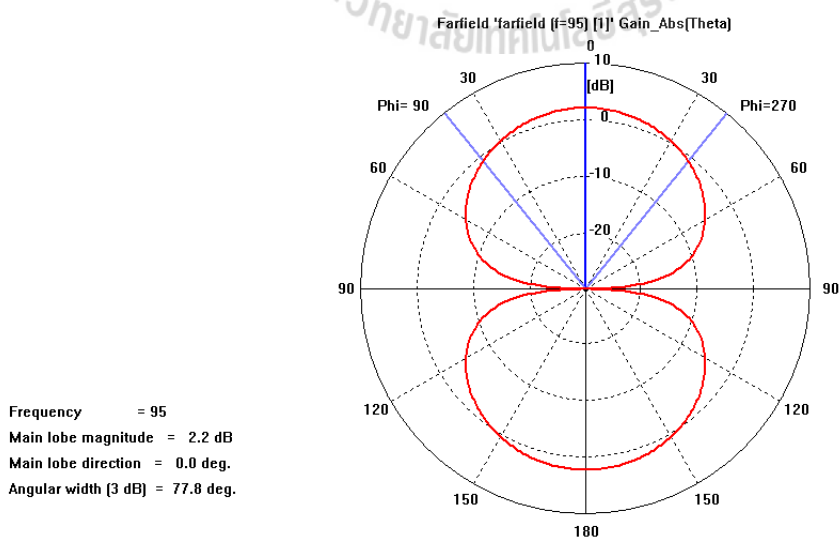
รูปที่ 3.8 การกำหนดความถี่ (95 MHz)



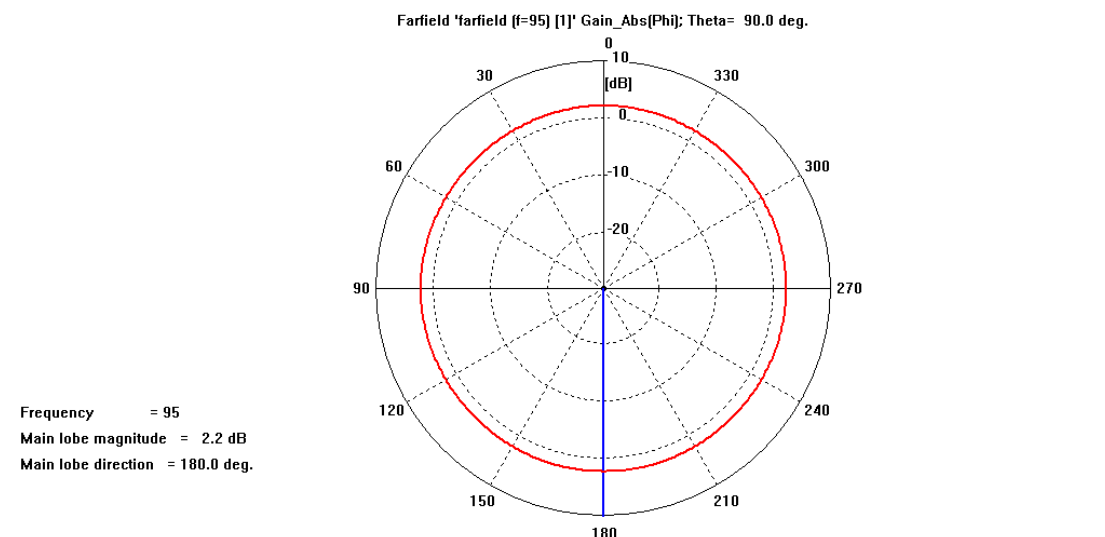
รูปที่ 3.9 Transient



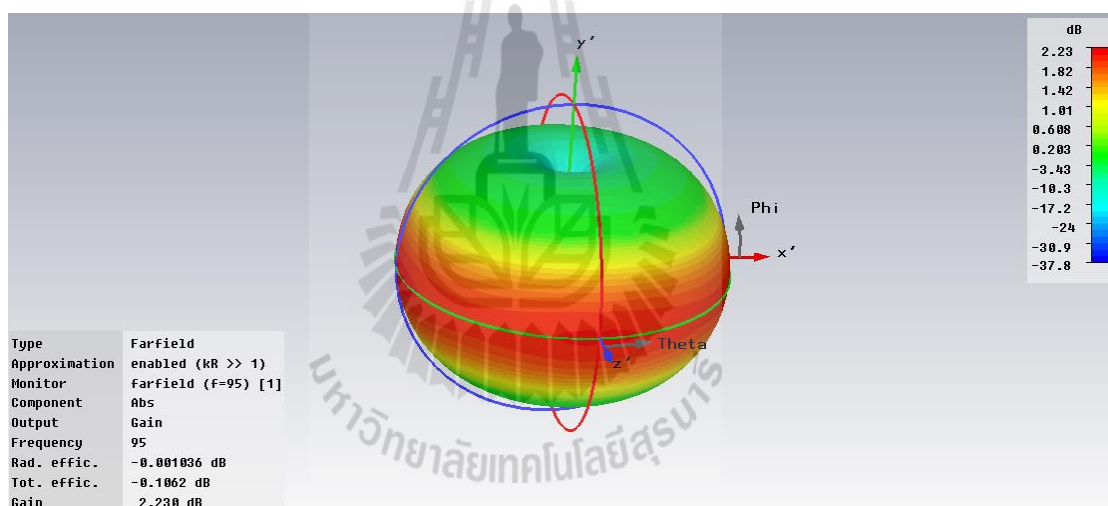
รูปที่ 3.10 ภาพการจำลองสายอากาศไดโพลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009



รูปที่ 3.11 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)

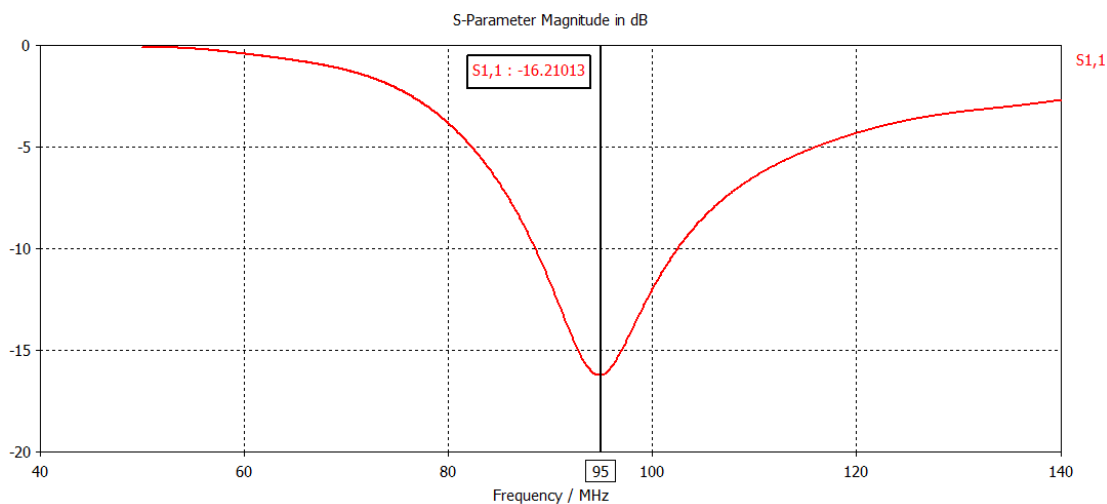


รูปที่ 3.12 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)



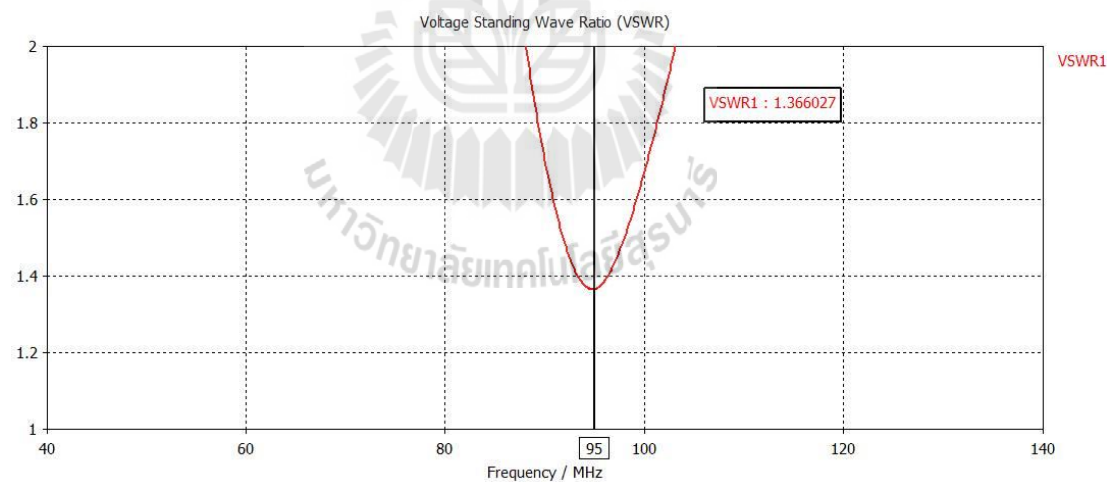
รูปที่ 3.13 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล 3 มิติ

จากรูปที่ 3.11 ถึง 3.13 ได้แสดงรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลที่ได้ ออกแบบในระนาบไฟฟ้า (E-plane), แม่เหล็ก (H-plane) และ 3 มิติ ตามลำดับ โดยมีอัตราขยายที่ ความถี่กลาง 95 MHz เท่ากับ 2.230 dBi



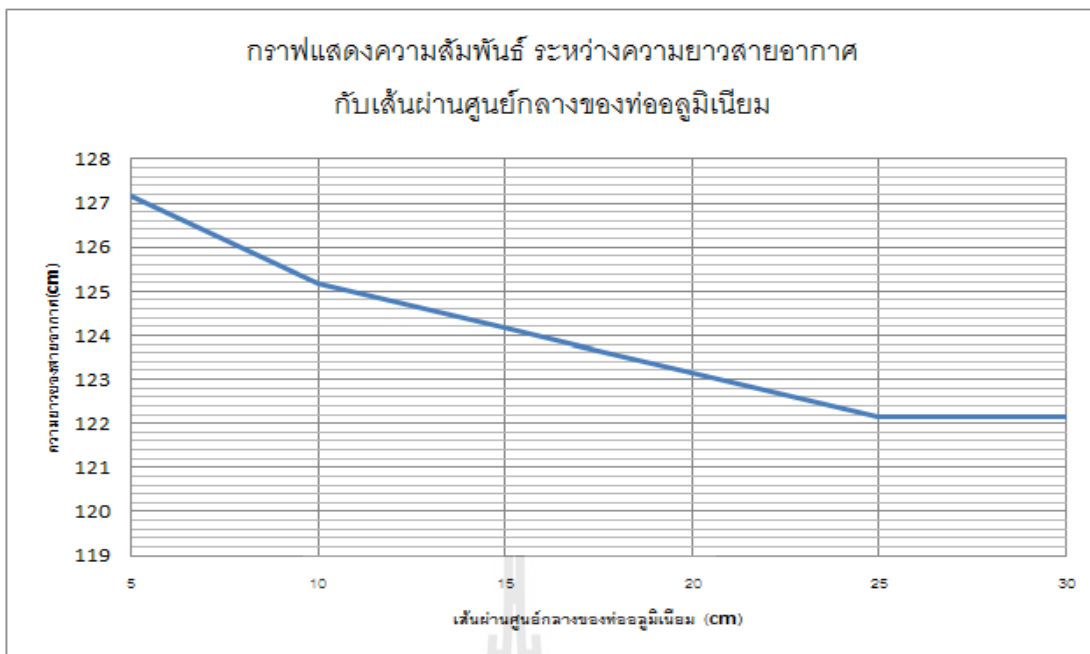
รูปที่ 3.14 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})

จากรูปที่ 3.14 แสดงกราฟค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศไดโพลในรูปของพารามิเตอร์ S_{11} จากรูปจะสังเกตเห็นว่าสายอากาศที่ได้จากการออกแบบมีค่า S_{11} ต่ำกว่า -10 dB ที่ช่วงความถี่ที่ 95 MHz ซึ่งสอดคล้องกับค่า SWR ที่มีค่าต่ำกว่า 2 ที่ช่วงความถี่เดียวกันแสดงดังรูปที่ 3.15



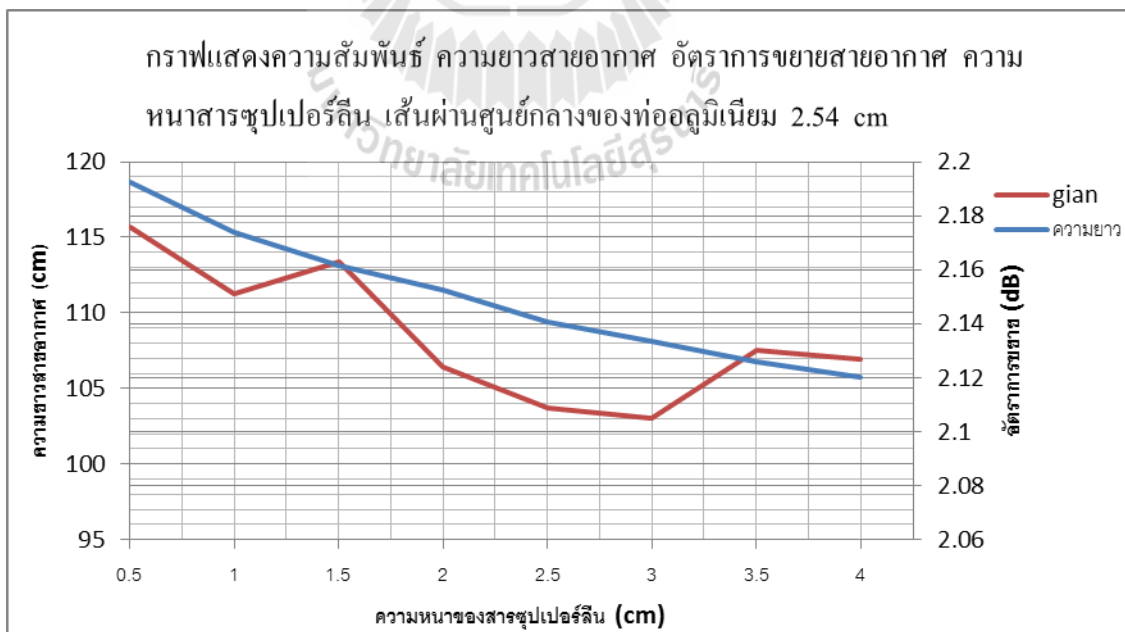
รูปที่ 3.15 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไดโพล

จากข้อมูลข้างบนสายอากาศมีความยาวไม่เหมาะสำหรับการติดตั้งใช้งานจริง ผู้จัดทำโครงการจึงได้ศึกษาอภิวัดศุเพื่อมาออกแบบสายอากาศให้สั้นลง แต่รักรักษาคุณสมบัติของสายอากาศไดโพลครึ่งคลื่นไว้เหมือนเดิมดังจะแสดงในการจำลองสายอากาศจากโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ซึ่งจะพิจารณาดังผลที่ได้ดังต่อไปนี้



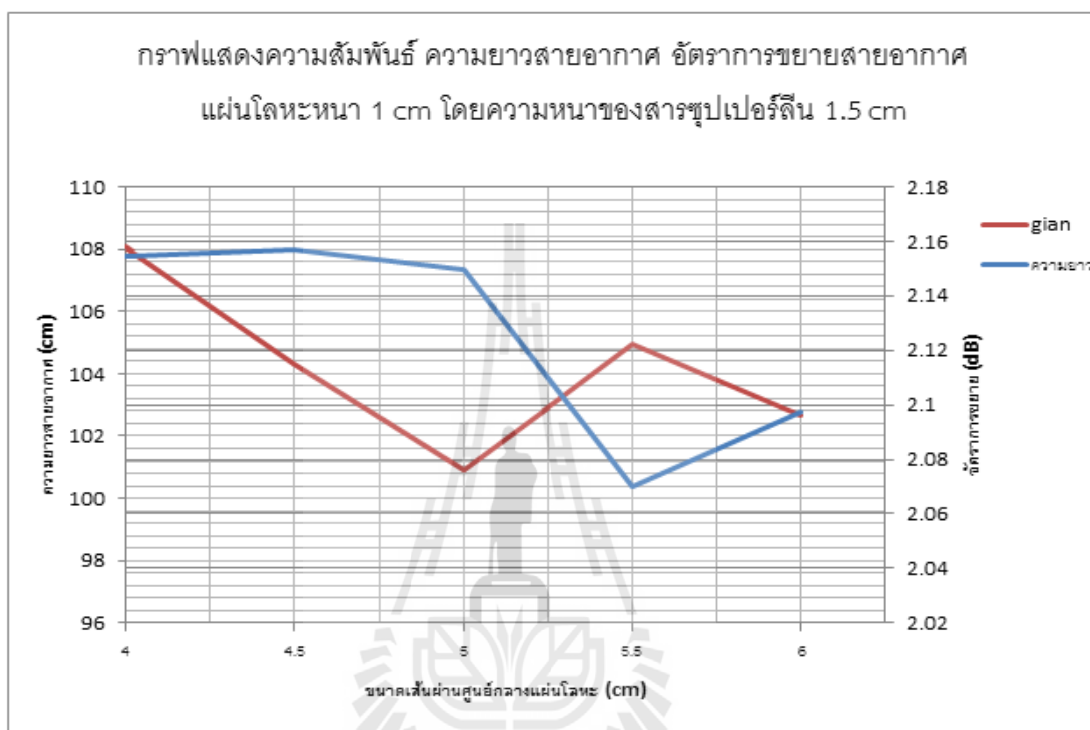
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออลูมิเนียม

จากรูปที่ 3.16 เมื่อพิจารณาค่าความยาวสายอากาศที่ 122.16 cm กับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออลูมิเนียมขนาด 2.5 cm มีความเหมาะสมที่สุดในการสร้างสายอากาศที่ความถี่ 95 MHz แต่ในท้องตลาดมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออลูมิเนียมขนาด 2.54 cm จึงนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009



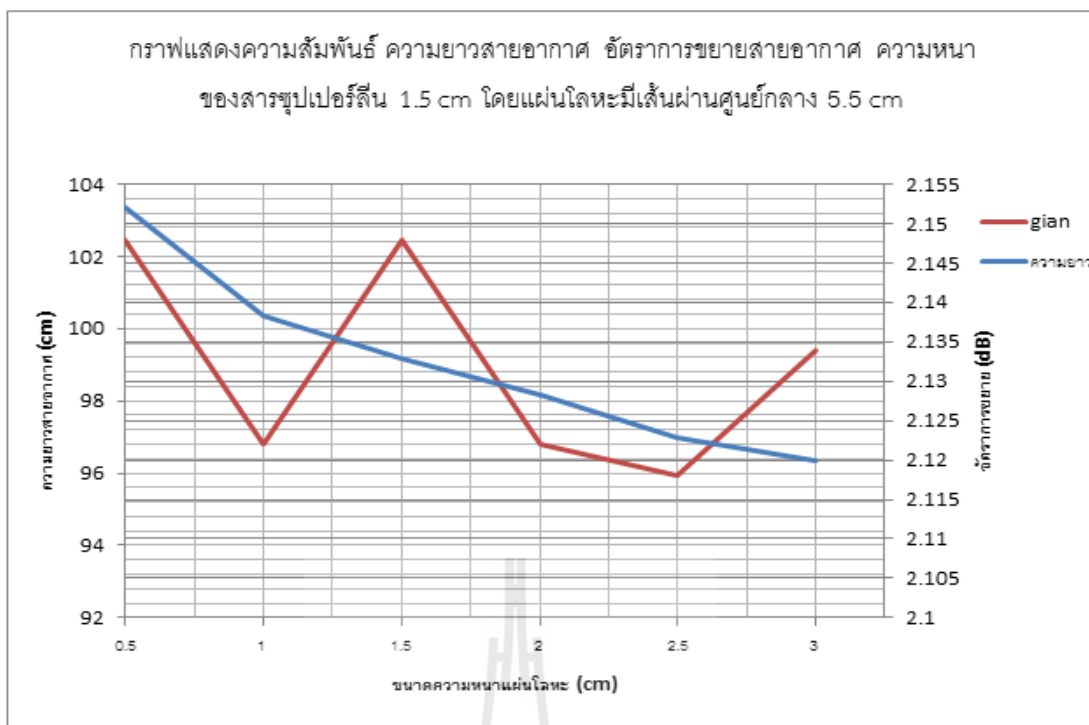
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวสายอากาศ อัตราการขยายสายอากาศ ความหนาของสารซูเปอร์ลีน และเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออลูมิเนียม 2.54 cm

เมื่อพิจารณาความหนาของสารซูเปอร์ลีนที่ 1.5 cm จะเห็นได้ว่าความยาวของสายอากาศสั้นลงจาก 122.16 cm เหลือ 113.5 cm ลดลง 3.28 % และค่า gain = 2.163 dB เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอื่นๆแล้ว ความยาวของสายอากาศและค่า gain มีความเหมาะสมมากที่สุด แต่ต้องการให้สายอากาศสั้นลงกว่านี้จึงใช้วิธีเพิ่มแผ่นอลูมิเนียมที่ปลายของสายอากาศหรือที่เรียกว่า hat antenna จะสังเกตเห็นว่าจากรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ความยาวสายอากาศ อัตราการขยายสายอากาศ แผ่นโลหะหนา 1 cm โดยความหนาของสารซูเปอร์ลีน 1.5 cm

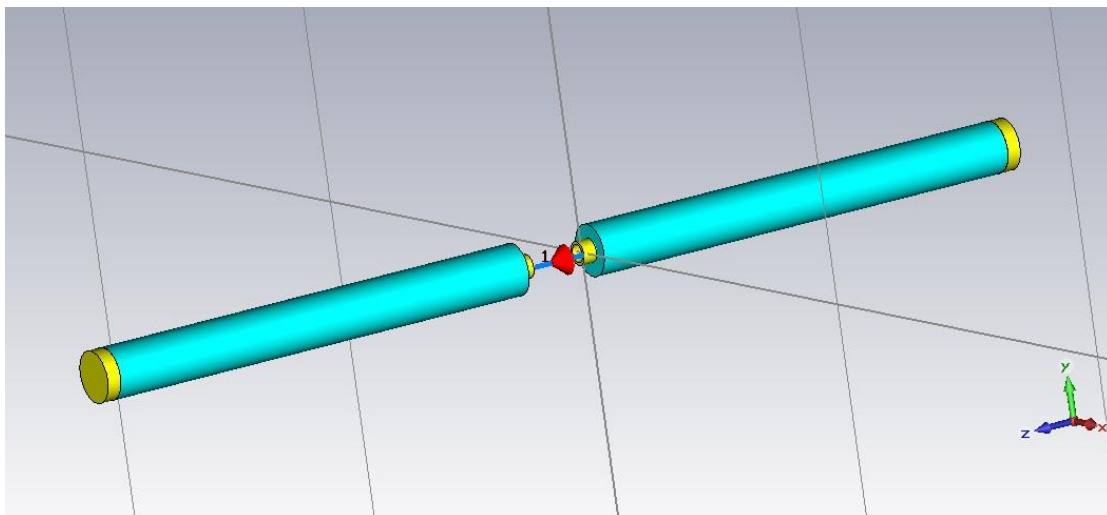
เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 cm จะเห็นได้ว่าความยาวของสายอากาศสั้นลงจาก 122.16 cm เหลือ 100.36 cm ลดลง 17.84 % และค่า gain = 2.122 dB เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอื่นๆแล้ว ความยาวของสายอากาศและค่า gain มีความเหมาะสมมากที่สุด



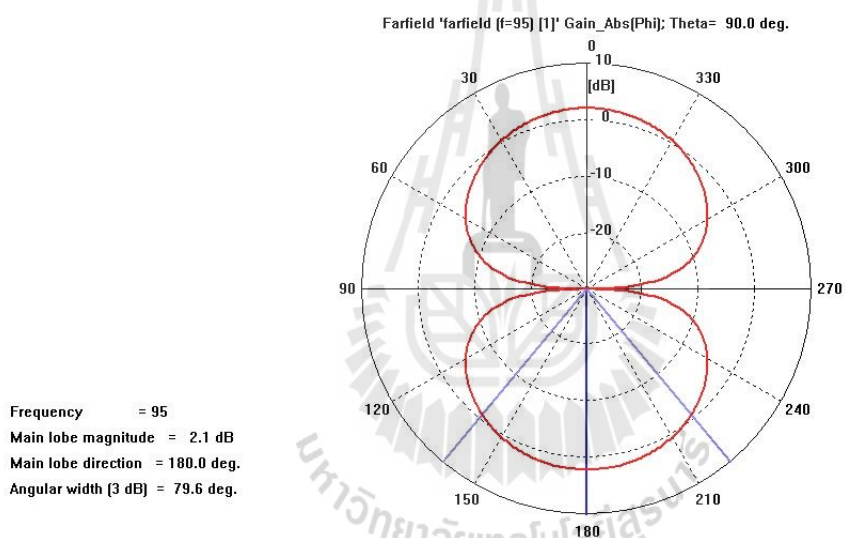
รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความยาวสายอากาศอัตราขยายสายอากาศความหนาของสารซูเปอร์ลีน 1.5 cm โดยแผ่นโลหะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 cm

เมื่อพิจารณาขนาดความหนาแผ่นโลหะ 1.5 cm จะเห็นได้ว่าความยาวของสายอากาศสั้นลงจาก 122.16 cm เหลือ 99.16 cm ลดลง 18.82 % และค่า gain = 2.148 dB เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอื่นๆแล้ว ความยาวของสายอากาศและค่า gain มีความเหมาะสมมากที่สุด

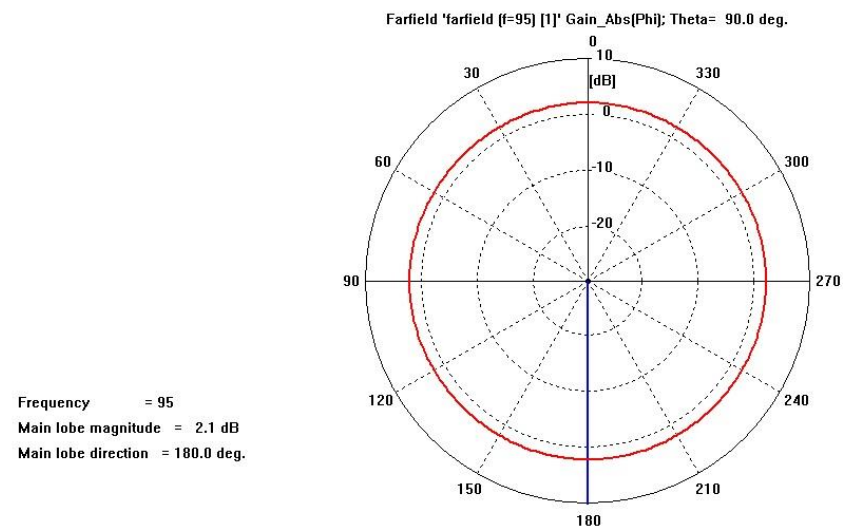
จะสังเกตเห็นว่า รูปที่ 3.18 เมื่อเรายังไม่ใส่แผ่นโลหะความยาวลดลง 17.48 % gain = 2.122 dB แต่เมื่อใส่แผ่นโลหะทำให้สายอากาศสั้นลงอีกเป็น 18.82 % แสดงว่าเมื่อใส่แผ่นโลหะแล้วสายอากาศสั้นลงอีก 1.34 % แต่ทำให้ gain ดีขึ้นจาก 2.122 dB เป็น 3.148 dB เมื่อใช้โปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ออกแบบสายอากาศตัวใหม่ขึ้นมา ทำให้ได้ผลการทดลองดังนี้



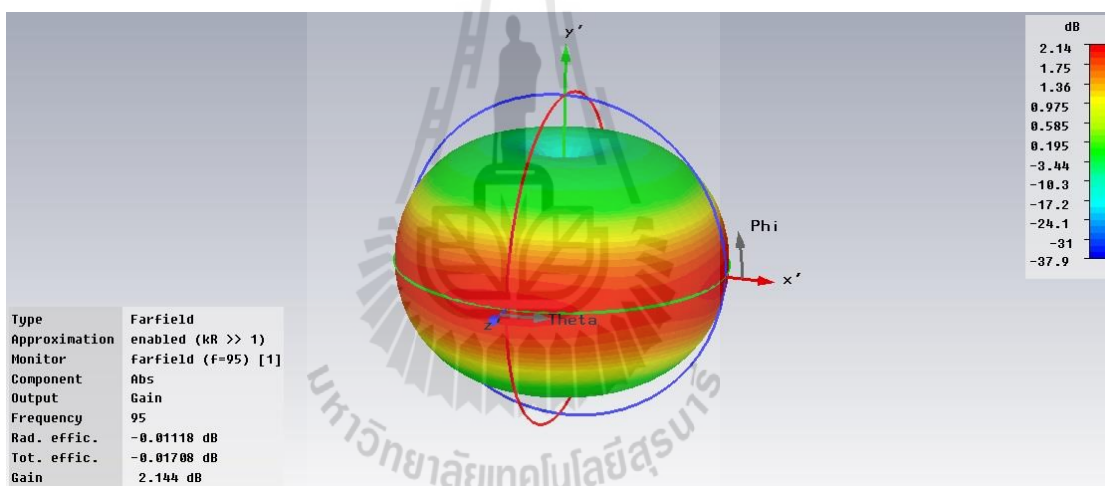
รูปที่ 3.20 ภาพการจำลองสายอากาศไดโพลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009



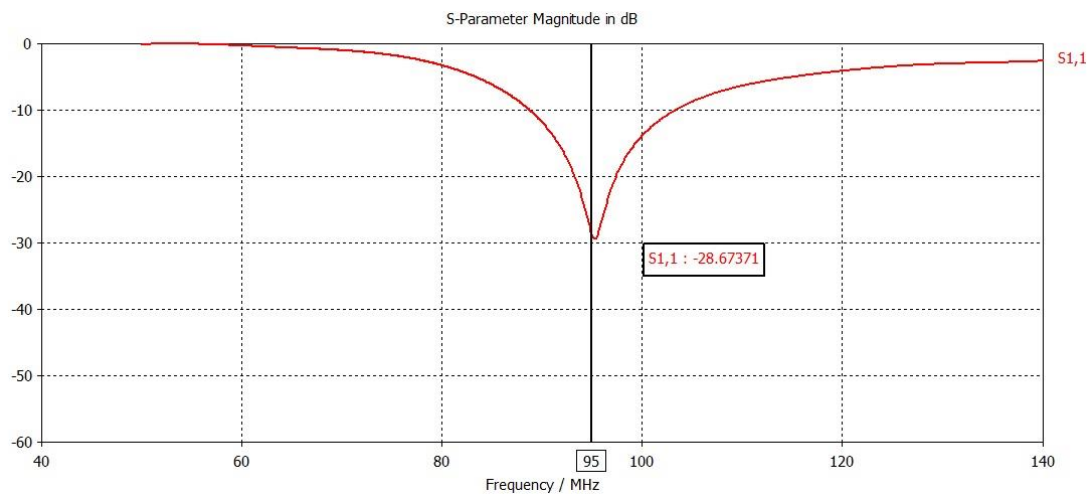
รูปที่ 3.21 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane)



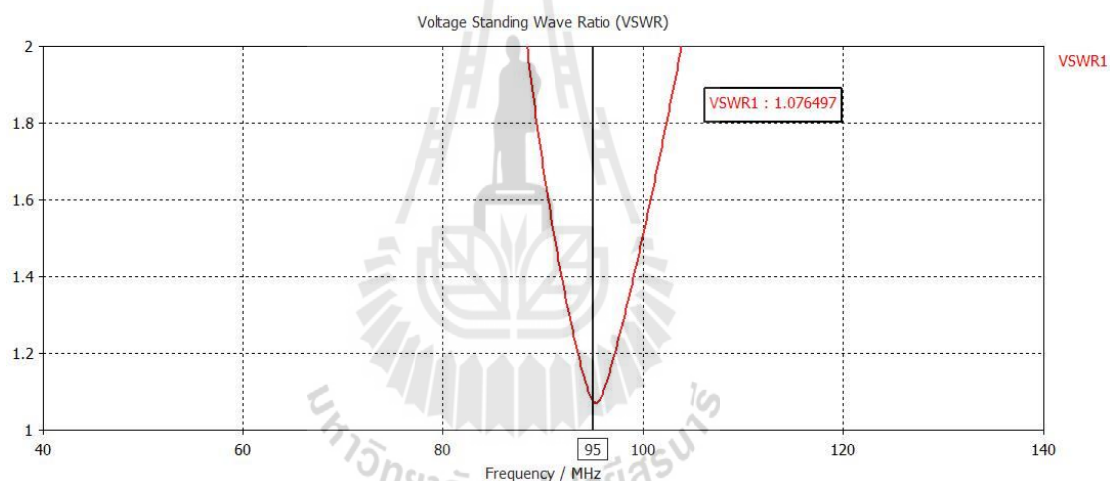
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane)



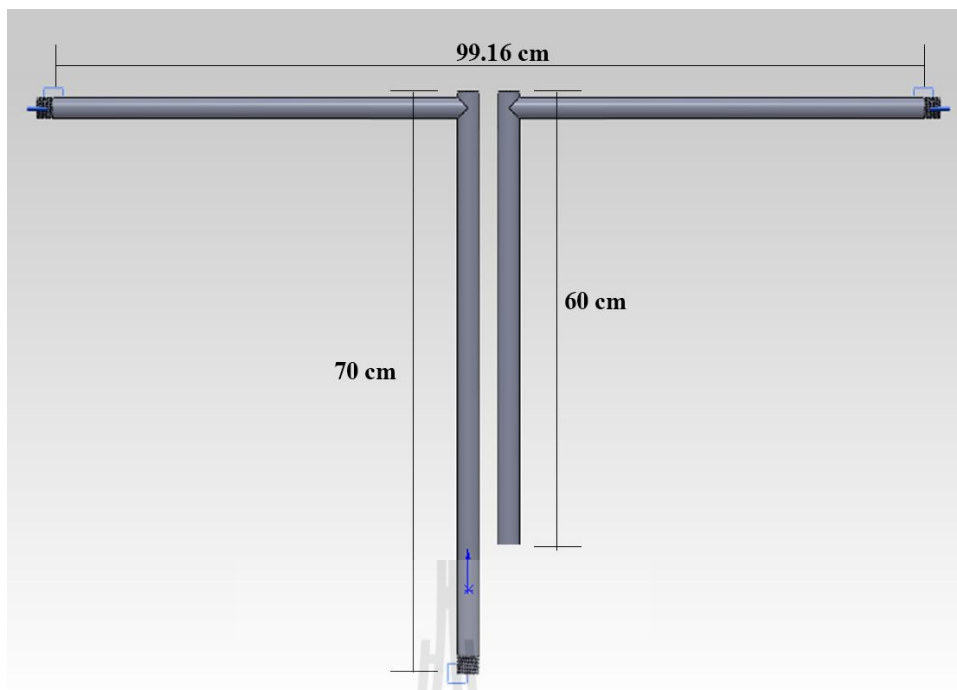
รูปที่ 3.23 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศไดโพล 3 มิติ



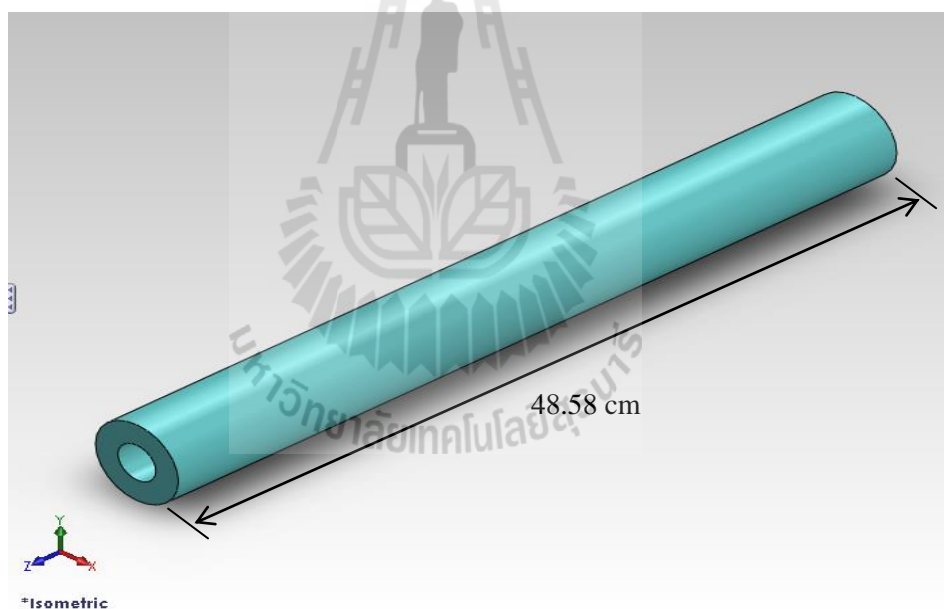
รูปที่ 3.24 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})



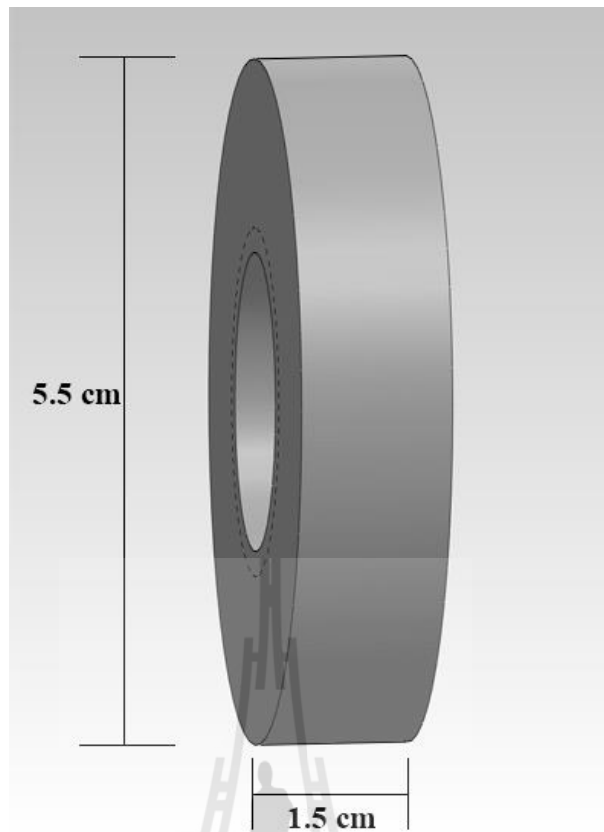
รูปที่ 3.25 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศไดโพล



รูปที่ 3.26 ท่ออลูมิเนียม

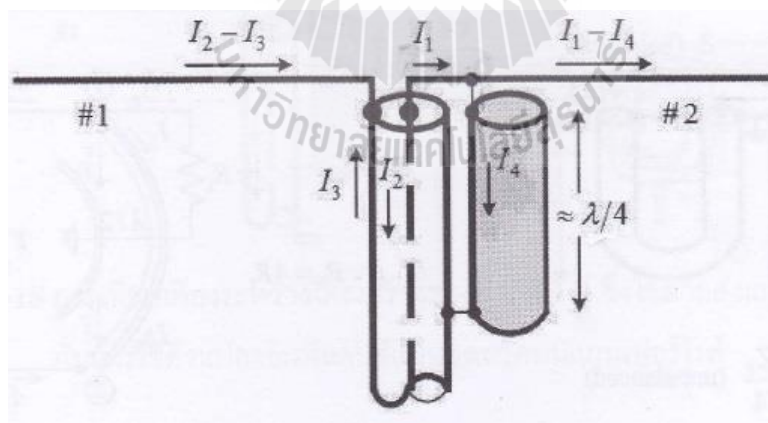


รูปที่ 3.27 สารซูเปอร์ลีนใช้หุ้มสายอากาศ



รูปที่ 3.28 แผ่นอลูมิเนียมปิดปลายสายอากาศทั้งสองข้าง

3.3.1 การออกแบบบาลัน



แสดงโครงสร้างของบาลันแบบพับ 1:1

บาลันแบบพับนี้ บางครั้งอาจเรียกว่า บาลันแบบแกนร่วมแยก (Split-Coaxial Balun) หรือบาลันแบบแกนร่วมหนึ่งในสี่ความยาวคลื่น ($\lambda/4$ -Coaxial Balun) ซึ่งมี บาลันแบบนี้สามารถสร้างได้ ง่ายกว่าบาลันแบบปอด แต่ยังมีคุณสมบัติในการแปลงอิมพีแดนซ์ด้วยอัตราส่วน 1:1 มีกว้างแถบที่ค่อนข้างแคบเช่นเดียวกับบาลันแบบปอด และสามารถรองรับกำลังส่งได้ไม่ต่ำกว่า 500 วัตต์

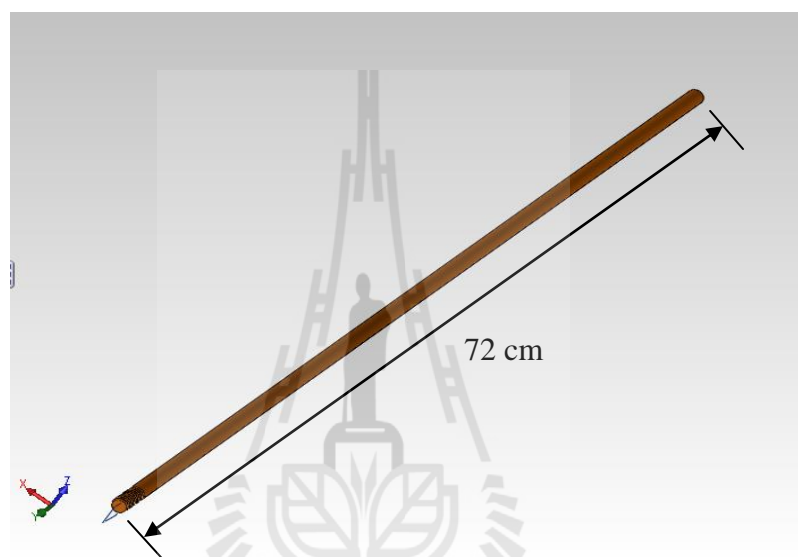
เนื่องจากโครงสร้างการแมตซ์ไม่มีสายนำสัญญาณ โครงสร้างของบาลันแบบพับซึ่งได้แสดงไว้ในรูป

$$\text{ด้านบน จากสมการ } Z_0 = 138 \log_{10} \left(\frac{b}{a} \right)$$

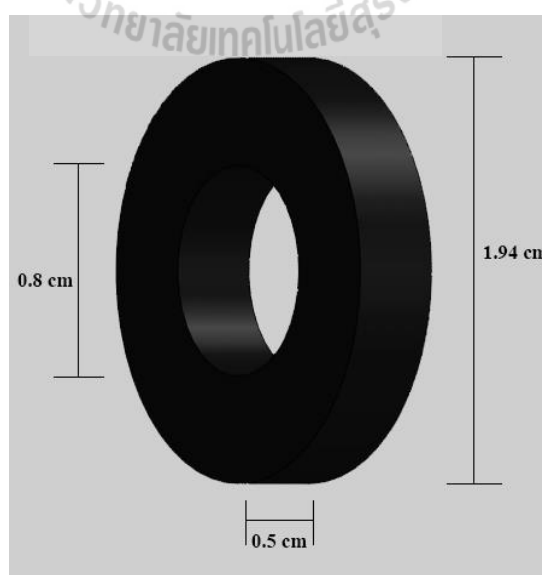
$$Z_0 = 138 \log_{10} \left(\frac{8}{1.94} \right)$$

$$Z_0 = 53.09$$

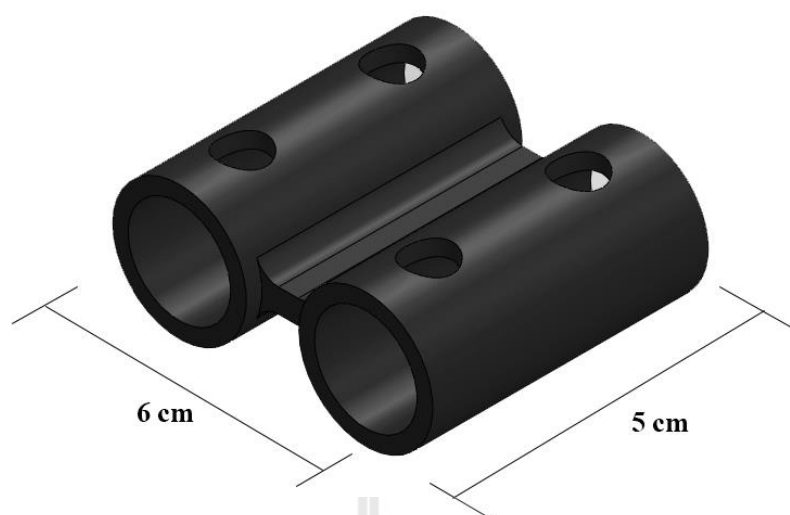
จากนั้นจึงแมตซ์ด้วยการเลื่อนอุปกรณ์ในรูป 3.31 เพื่อให้ได้ 50 Ω ต่อไป



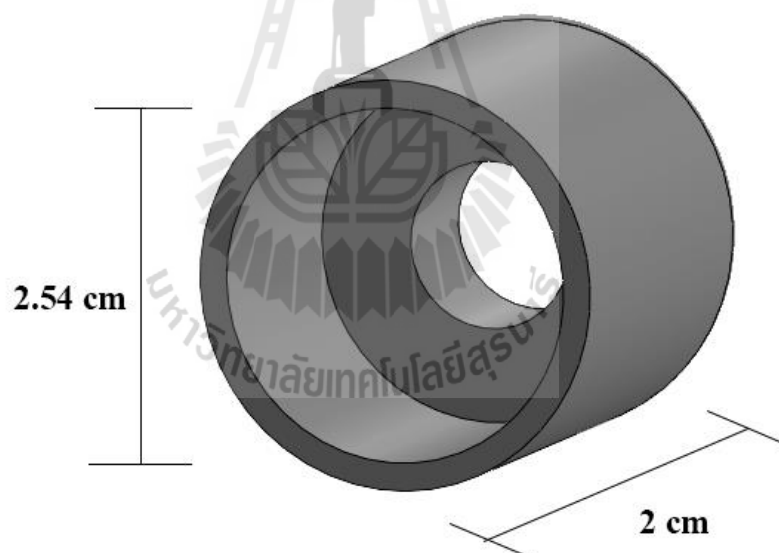
รูปที่ 3.29 แท่งทองแดงที่เป็นลวดตัวนำที่อยู่ตรงกลางท่ออลูมิเนียมที่ใช้แมตซ์



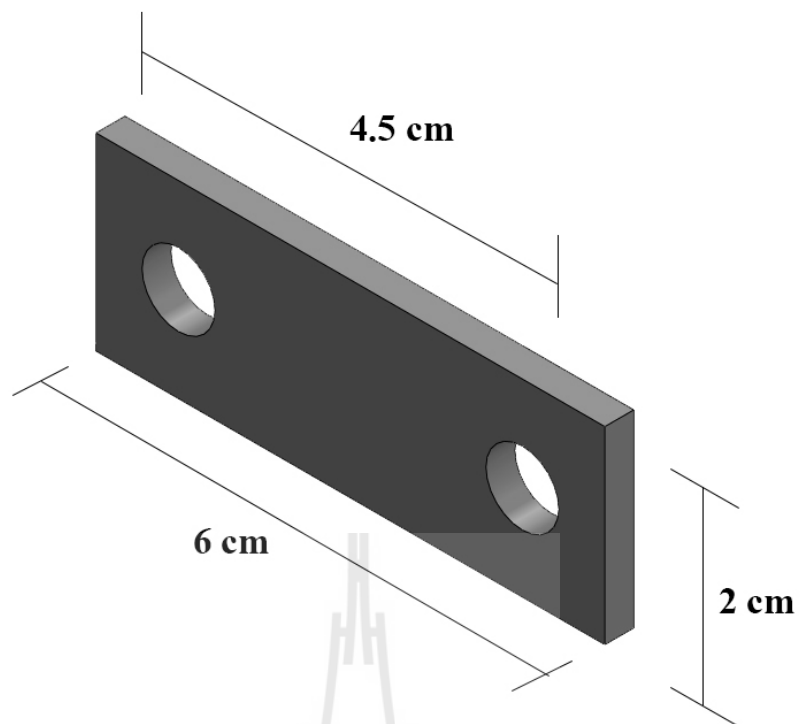
รูปที่ 3.30 แหวนที่ทำจากวัสดุซูเปอร์พอร์ลินใช้เป็นฉนวนระหว่างแท่งทองแดงกับท่ออลูมิเนียม



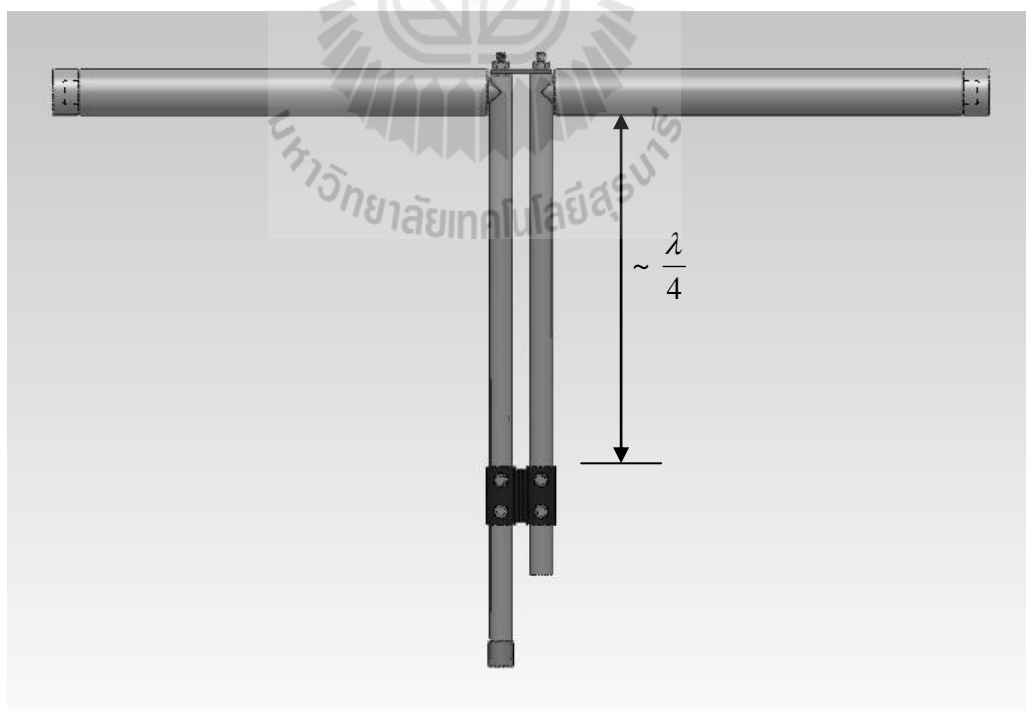
รูปที่ 3.31 ท่ออลูมิเนียมที่ใช้ในการแมตช์แบบบวล์



รูปที่ 3.32 ฝาอลูมิเนียมใช้ยึด 50 Ω N-type Connector



รูปที่ 3.33 แผ่นอลูมิเนียมใช้ยึดทองแดงและท่ออลูมิเนียม



รูปที่ 3.34 ภาพจำลองภายในสายอากาศไดโพล

3.4 สรุป

ในบทนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและประมวผลของการลดขนาดของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีขนาดความยาวสั้นลง แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ โดยใช้วัสดุซูเปอร์ลีนมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากสารซูเปอร์ลีนนั้นสามารถทำให้สายอากาศสั้นลงแต่ก็ทำให้อัตราการขยายลดลงด้วยเช่นกัน โดยในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CST Microwave Studio 2009 มาช่วยในการประมวผลหาอัตราขยายและรูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพล ทั้งสามารถบอกค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และอัตราส่วนคลื่นนิ่งได้ในรูปแบบกราฟ แต่ในความเป็นจริง อาจมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ ดังนั้นความสามารถในการประมวผลของคอมพิวเตอร์เป็นหลัก ตลอดจนความรู้ ความถนัดของผู้วิจัยด้วย ทั้งนี้เพื่อให้ได้วิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสมและตรงกับความต้องการมากที่สุด แนวคิดนี้ จึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการนำไปใช้ต่อไป



บทที่ 4

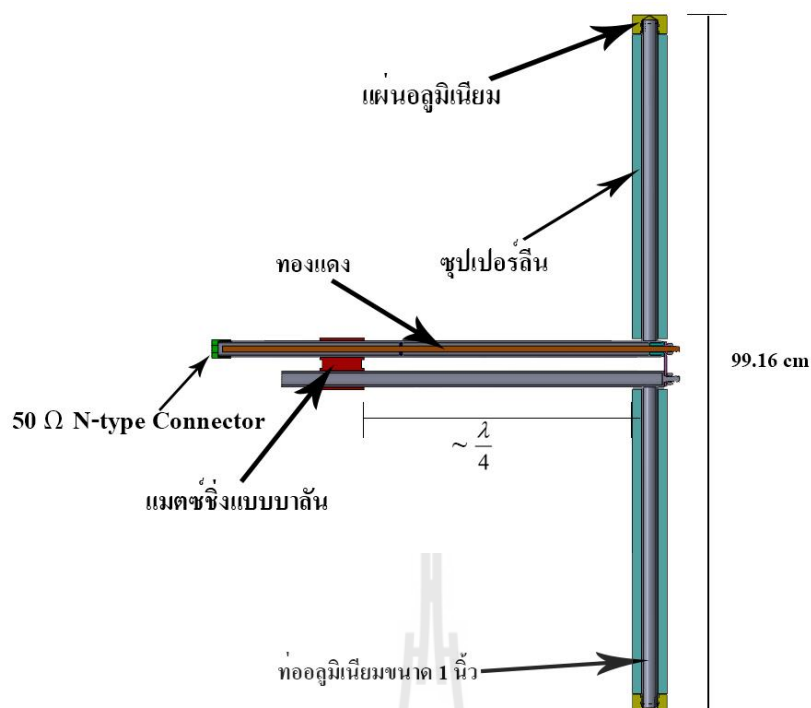
ผลการทดลองและการวัดสายอากาศ

4.1 กล่าวนำ

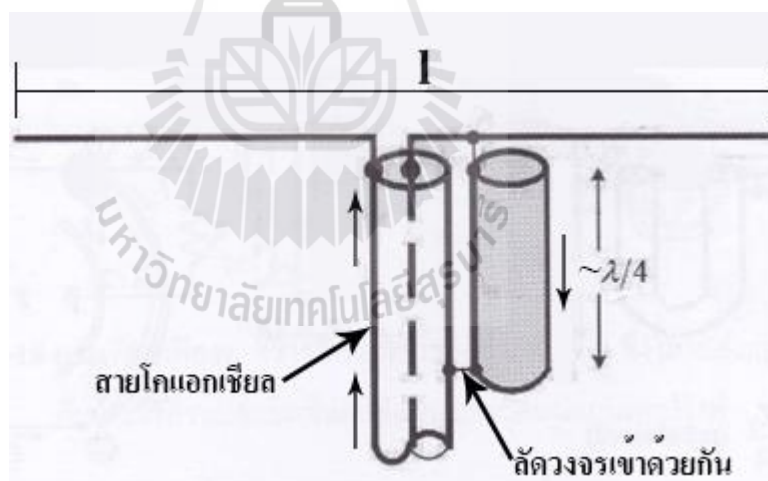
ในบทนี้เป็นการนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 มาใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบจริงและวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ซึ่งได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์และนำมาวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio : SWR) ความกว้างแถบสายอากาศ และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) รุ่น HP8722D ซึ่งในการออกแบบได้ใช้ความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ความถี่ 95 MHz เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ต่อไป

4.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบ

จากการนำโครงสร้างของสายอากาศไดโพล มาประยุกต์เพื่อให้ได้โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งในตอนแรกได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ นำมาวัดเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 เพื่อจะนำไปสู่การสร้างสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ตามขนาดที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 แต่ในการติดตั้งสายอากาศใช้งานจริงต้องทำการแมตซ์ซิ่ง เพื่อให้สายอากาศที่สามารถใช้งานได้จริงในความถี่ที่ต้องการ สำหรับโครงงานฉบับนี้ได้ทำการแมตซ์สายอากาศ กับสายโคแอกเซียล 50 Ω โดยเลือกใช้บาลันโคแอกเซียล $\lambda/4$ (1:1) ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้



รูปที่ 4.2 บาลันแบบโคแอกเซียล $\lambda/4$ (1:1)



รูปที่ 4.3 แมตซ์ซิ่งของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้



รูปที่ 4.4 สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้

4.2.1 การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance)

อิมพีแดนซ์ด้านเข้า เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก เพราะว่าหากสายอากาศไม่แมตซ์กับสายนำสัญญาณแล้วสายอากาศก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง ๆ ได้ สำหรับโครงการนี้ใช้สายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งเท่ากับ 50Ω ดังนั้น สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติ

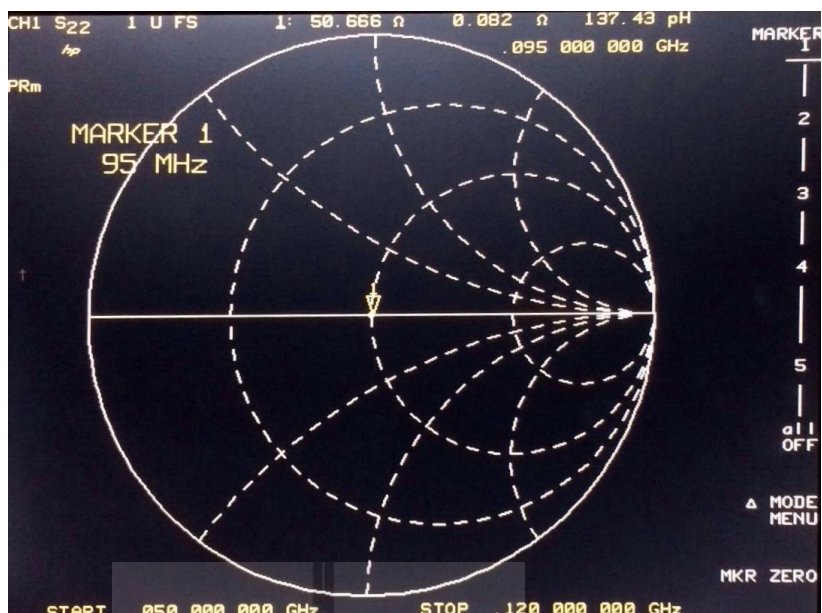
ของสายอากาศชนิดนี้ ที่สร้างจะต้องมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เท่ากับ หรือใกล้เคียง 50Ω มากที่สุด โดยสามารถดูจากค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ที่จะต้องไม่เกิน 1.5 dB



รูปที่ 4.5 การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance)

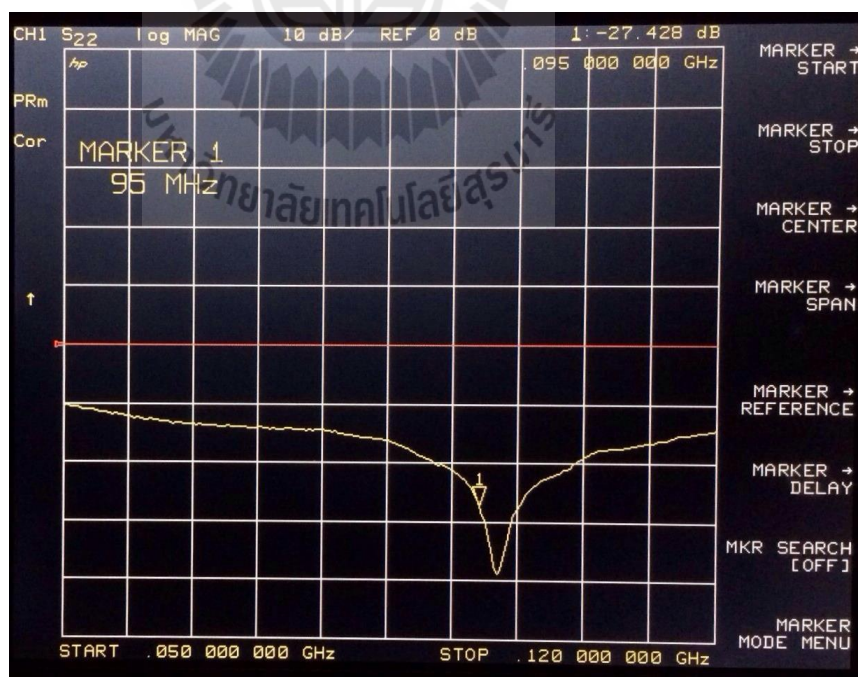
ขั้นตอนการวัดค่าอิมพีแดนซ์

- ก) ทำการ Calibrate เครื่อง Network Analyzer ที่ความถี่ตั้งแต่ 50 MHz ถึง 120 MHz
- ข) เลือกคำสั่ง Save เพื่อจะได้ไม่ต้องทำการเซตเครื่องใหม่ เมื่อมาใช้งานตอนหลังอีก
- ค) ต่อสายอากาศไดโพลโค้ง เข้าที่ Port 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D
- ง) ทำการวัด S_{11} เลือก Format แบบ Smith Chart



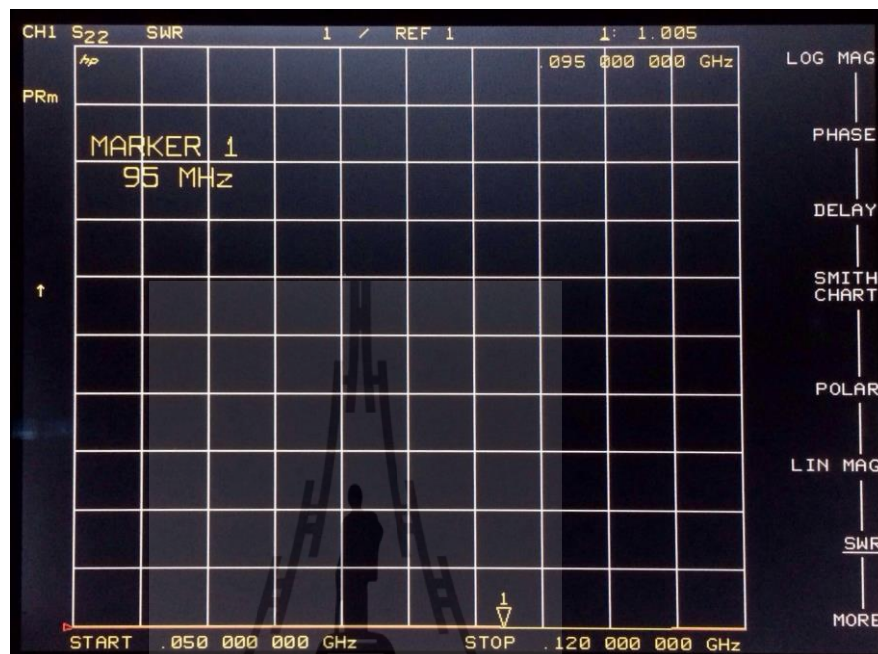
รูปที่ 4.6 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าความถี่ 95 MHz ของสายอากาศต้นแบบ

จากผลการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ความถี่ 95 MHz โดยดูค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำการวัดได้จากกราฟ Smith Chart มีค่าเท่ากับ 50.67Ω และจากการทดลองได้นำค่าอิมพีแดนซ์และความถี่มาสร้างกราฟเพื่อจะได้นำมาวิเคราะห์ผลการทดลองและค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณคือ 50Ω



รูปที่ 4.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11})

จากผลการทดลองวัดสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ จะสังเกตได้ว่า ได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -27.428 dB ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ

จากผลการทดลองวัดสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ จะสังเกตได้ว่า มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับ 1:1.005

4.2.2 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้

การวัดแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ จะทำการวัดที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-Field Region) โดยสามารถคำนวณจากสมการ

$$R > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

- เมื่อ
- R คือ ระยะของสนามระยะไกล
 - D คือ ความยาวสูงสุดของสายอากาศ
 - λ คือ ความยาวคลื่นของสายอากาศ

ในการวัดแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ขนาดของสายอากาศที่ยาวที่สุดมีค่าเท่ากับ 99.16 cm ทำให้ได้ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับเท่ากับ 62.29 cm ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สายอากาศยาก็ี่ความถี่ 95 MHz เป็นสายอากาศอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศที่นำมาทดสอบจะมีการหมุนรับคลื่น จาก 0 องศา ถึง 360 องศา ในที่โล่ง ซึ่งจะช่วยลดการสะท้อนของคลื่น โดยรูปแบบการวัดการแผ่กำลังงานของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งจะได้รูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ในระนาบสนามไฟฟ้า ในระนาบ xy และระนาบสนามแม่เหล็ก ในระนาบ yz



รูปที่ 4.9 สายอากาศยาก็ี่อิงที่ใช้เป็นตัวส่ง

ในการทดสอบจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กโดยทดสอบในที่โล่ง สายอากาศที่จะทำการทดสอบนั้นจะเป็นสายอากาศรับ ซึ่งจะทำการหมุนเพื่อรับคลื่น

จาก 0 องศาจนถึงมุม 360 องศา ส่วนสายอากาศส่งเป็นสายอากาศแบบยาก็ ออกแบบที่ความถี่เดียวกันกับสายอากาศรับ และต้องมีโพลาไรซ์ที่เหมือนกัน ระดับความสูงของสายอากาศรับและสายอากาศส่งต้องเท่ากันด้วย รูปที่ 4.10 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D ที่เราใช้ในการวัดค่ารูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรมลายบนแผ่นตัวสะท้อน

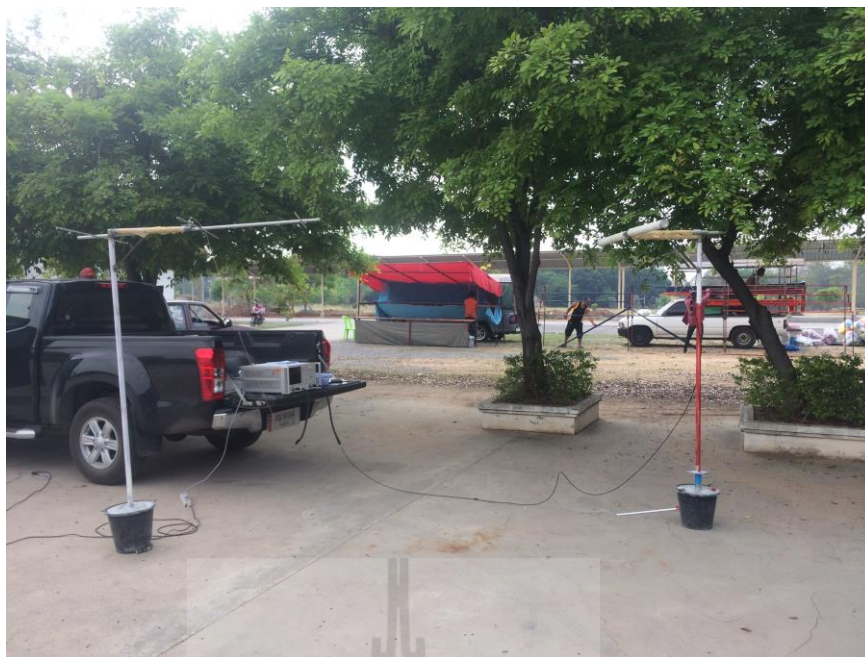


รูปที่ 4.10 เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D

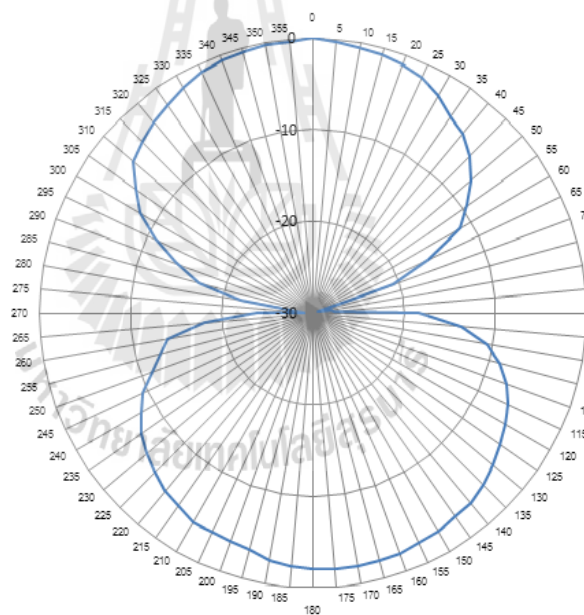
- การวัดระนาบสนามไฟฟ้า



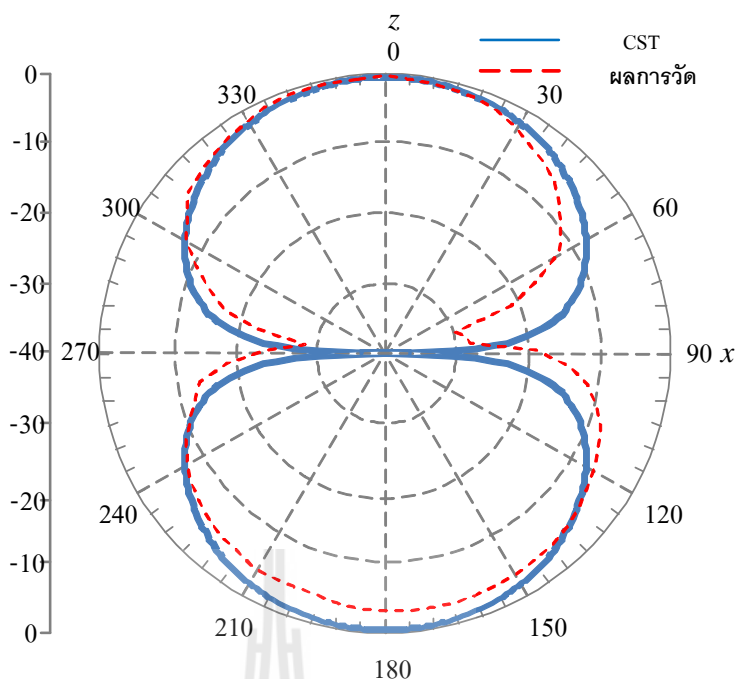
รูปที่ 4.11 แบบจำลองการวัดระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.12 วิธีวัดแบบระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 4.13 ระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศไดโพลเส้นตรง ความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบและโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้

จากรูปที่ 4.14 เป็นผลที่ได้จากการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ จากแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในแนวระนาบสนามไฟฟ้าจะรูปร่างที่คล้ายกัน

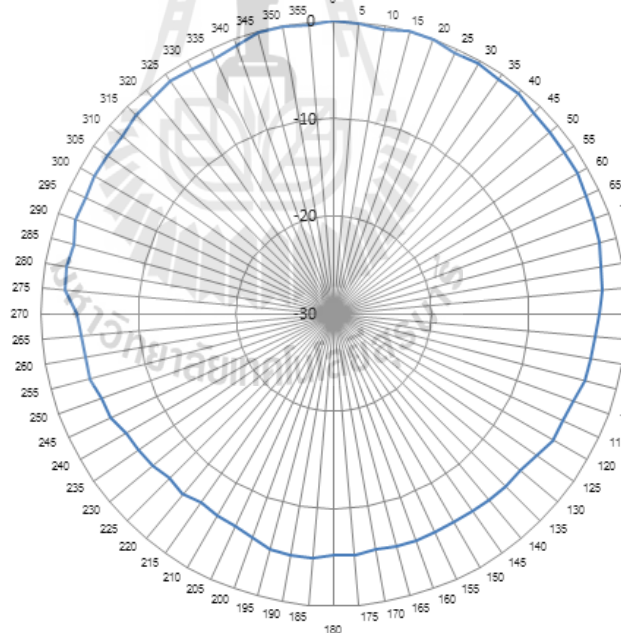
- การวัดระนาบสนามแม่เหล็ก



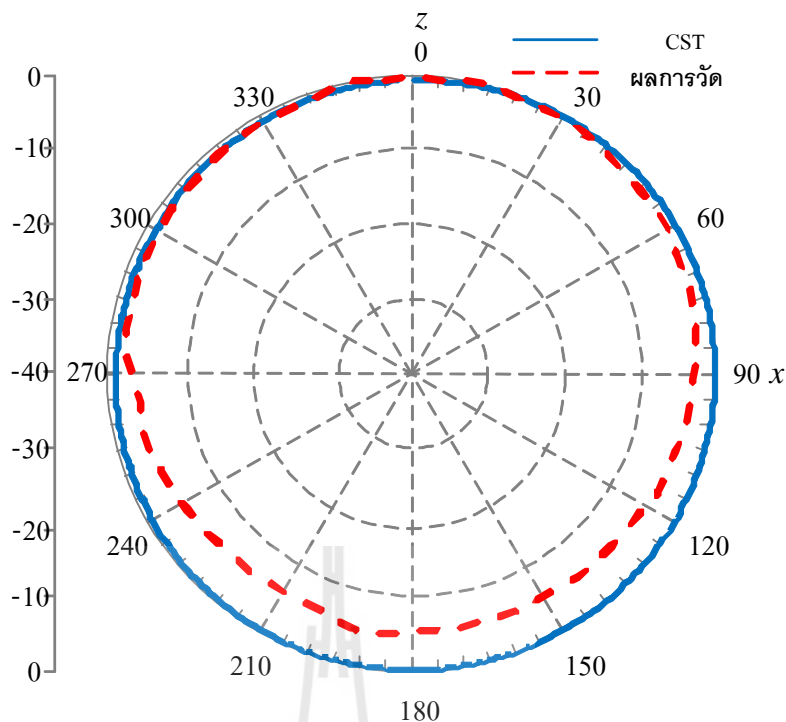
รูปที่ 4.15 แบบจำลองการวัดระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.16 วิธีวัดแบบระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศต้นแบบ



รูปที่ 4.17 ระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศไดโพลเส้นตรง ความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบและโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 ของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้

จากรูปที่ 4.18 เป็นผลที่ได้จากการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวระนาบในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ จากแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานในแนวระนาบสนามไฟฟ้าจะรูปร่างที่คล้ายกัน

4.2.3 การวัดอัตราการขยายของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้

อัตราการสูญเสียในอากาศ (Free-Space Loss)

การหาอัตราการสูญเสียของสายอากาศต้นแบบที่ใช้ในการทดสอบ สามารถทำได้จากสมการ

$$loss(dB) = 20 \log \left[\frac{\lambda}{4\pi R} \right] \quad (4.2)$$

R คือ ระยะห่างของสายอากาศระหว่างภาคส่งและภาครับ (เมตร)

λ คือ ความยาวคลื่น (เมตร)

จากการคำนวณระยะสนามไกลได้ที่ 0.7137 m ซึ่งระยะห่างของสายอากาศภาครับและภาคส่งจะต้องมีระยะ R มากกว่า 0.7137 m ดังนั้นจึงได้ตั้งสายอากาศทั้งภาคส่งและภาครับให้ห่างกันที่ระยะ 1.5 m และสามารถแทนค่าในสมการหาค่าการสูญเสียในอากาศได้เท่ากับ

$$loss(dB) = 20 \log\left[\frac{3.158}{4\pi(1.5)}\right] = -15.518 \text{ dB}$$

การคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศ

จากสมการของ Friis ในหน่วย dB

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

จัดรูปสมการจะได้

$$G_r = P_r - P_t - G_t - G_r - 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right) \quad (4.4)$$

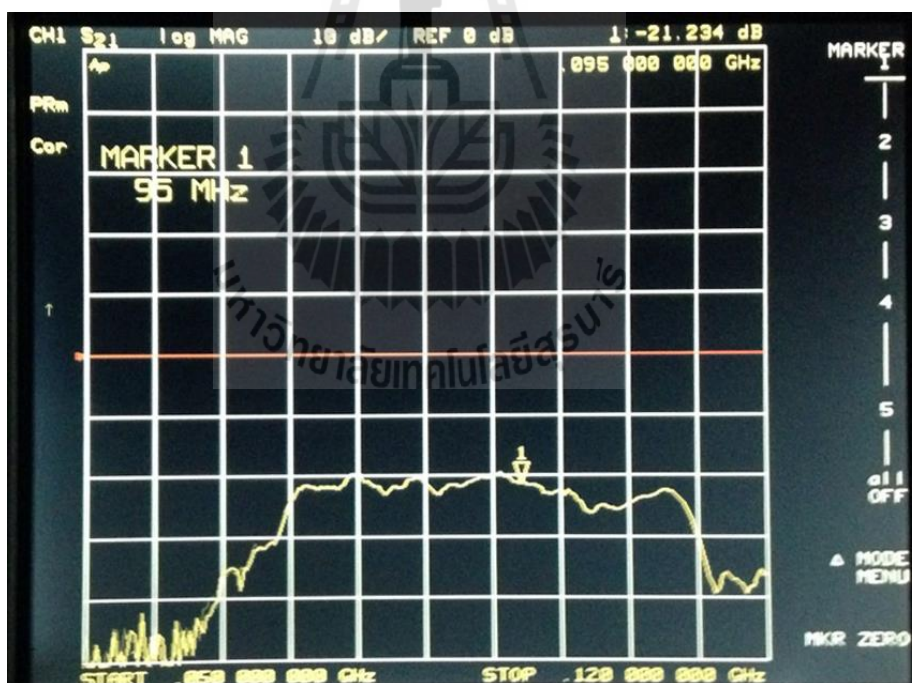
จะใช้คำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศ โดยจะใช้สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศภาคส่ง โดยลำดับแรกจะใช้สายอากาศไดโพล 2 ตัว ที่ทำงานในย่านความถี่ 95 MHz ให้ตัวหนึ่งเป็นภาคส่ง และอีกตัวหนึ่งเป็นภาครับ วางห่างกันที่ระยะ 1.5 m แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 แบบจำลองการวัดอัตราขยายของสายอากาศไดโพล 2 ตัว ที่มีลักษณะเหมือนกัน



รูปที่ 4.20 การวัดอัตราขยายของสายอากาศไดโพล 2 ตัว ที่มีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งเครื่อง Network Analyzer จะอ่านค่า P_r ได้เท่ากับ -21.234 dB แสดงดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ค่าส่งผ่านคลื่น (s_{21}) ของสายอากาศไดโพล 2 ตัว ที่มีลักษณะเหมือนกัน

จากนั้นแทนค่าในสมการที่ (4.3) เพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศไดโพล โดย G_t และ G_r จะมีอัตราขยายที่เท่ากัน

$$P_r - P_t = G_t + G_r + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)$$

เมื่อ P_r เท่ากับ -21.234 dB, P_t เท่ากับ -10 dB และ loss เท่ากับ -15.518 dB แทนค่า

$$-21.234 + 10 \text{ (dB)} = 2G_t \text{ (dB)} - 15.518 \text{ (dB)}$$

$$2G_t \text{ (dB)} = 4.284$$

$$G_t \text{ (dB)} = 2.142 \text{ dB}$$

จากนั้นเราจะวัดอัตราขยายของสายอากาศที่เราสร้าง โดยใช้สายอากาศไดโพลเป็นสายอากาศภาคส่ง และ ใช้สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ เป็นสายอากาศภาครับวางห่างกันที่ระยะ 1.5 m แสดงดังรูปที่ 4.23

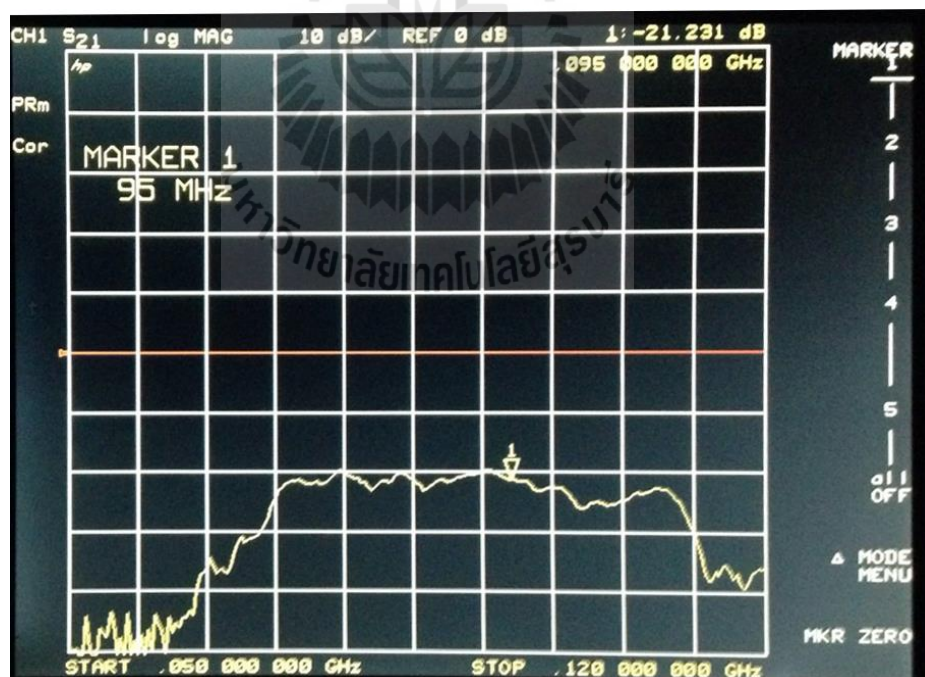


รูปที่ 4.22 แบบจำลองการวัดอัตราขยายของสายอากาศไดโพล (ภาคส่ง) กับ สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ (ภาครับ)



รูปที่ 4.23 การวัดอัตราขยายของสายอากาศไดโพล (ภาคส่ง) กับ สายอากาศไดโพลเส้นตรง ความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ (ภาครับ)

ซึ่งเครื่อง Network Analyzer จะอ่านค่า P_r ได้เท่ากับ -21.234 dB แสดงดังรูปที่ 4.24



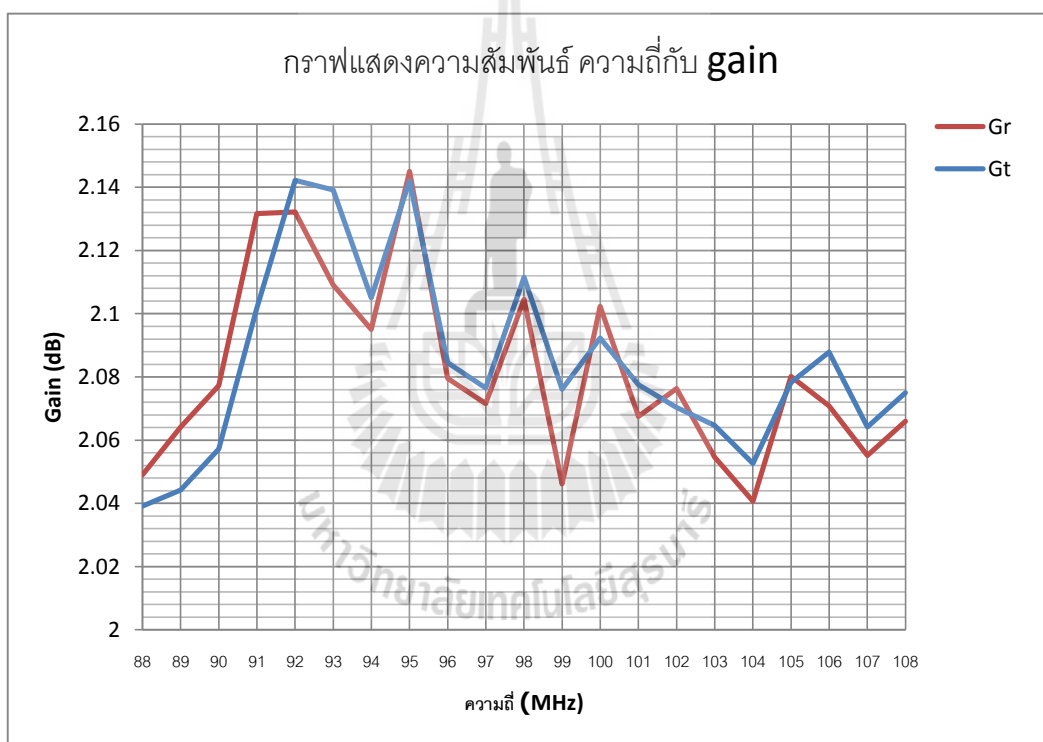
รูปที่ 4.24 ค่าส่งผ่านคลื่น (S_{21}) ของสายอากาศไดโพล (ภาคส่ง) กับ สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ (ภาครับ)

จากนั้นแทนค่าในสมการที่ (4.3) เพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ โดย $G_t = 2.142$ dB

$$P_r - P_t = G_t + G_r + 20 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)$$

เมื่อ P_r เท่ากับ -21.234 dB, P_t เท่ากับ -10 dB และ loss เท่ากับ -15.518 dB แทนค่า

$$\begin{aligned} -21.231 + 10 \text{ (dB)} &= 2.142 + G_r \text{ (dB)} - 15.518 \text{ (dB)} \\ G_r \text{ (dB)} &= 2.145 \text{ dB} \end{aligned}$$



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความถี่กับ gain ของสายอากาศไดโพลทั่วไป (G_t),สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ (G_r)

จากรูปที่ 4.25 จะเห็นได้ว่าอัตราการขยายของสายอากาศไดโพลทั่วไป (G_t) และสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษา

คุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ (G_r) ใกล้เคียงกันและอัตราการขยายจะดีในช่วง 95 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้

4.3 สรุป

ในบทที่ 4 เป็นการทดสอบวัดสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น (Straight) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ตามที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 มาแล้วในบทที่ 3 เพื่อทดสอบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบคือ ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่งและแบบรูปการแผ่กำลังงาน ซึ่งผลการวัดกับทฤษฎีสอดคล้องกันทั้งสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้



บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

โครงการฉบับนี้ได้ดำเนินการศึกษาวิเคราะห์ออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบแล้วทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ซึ่งมีการป้อนสัญญาณเข้าที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศ คุณสมบัติของสายอากาศจะต้องมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป สามารถประกอบได้ง่าย มีขนาดความยาวที่สั้นกว่าสายอากาศทั่วไปรองรับกำลังงานที่สูงได้ มีความกว้างลำคลื่น สำหรับการแพร่สัญญาณวิทยุที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้อย่างเพียงพอ และมีอัตราขยายในรอบทิศทาง จึงจำเป็นต้องทำการพัฒนาอุปกรณ์สายอากาศให้สอดคล้องกับความต้องการและสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงสุด ในโครงการฉบับนี้ได้ใช้เทคนิคการปรับปรุงร่างไดโพลเส้นตรงให้มีขนาดสั้นลงและนำแผ่นโลหะมาใส่ที่ปลายของไดโพล และเลือกรูปแบบการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัวไดโพลโค้ง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายกำลังในรอบทิศทาง และมีความกว้างของลำคลื่น ในการส่งสัญญาณของสายอากาศมากขึ้น ในโครงการฉบับนี้ได้นำโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 เข้ามาวิเคราะห์ โดยโครงสร้างของสายอากาศได้ถูกแทนด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า ในการหากระแสเหนี่ยวนำบนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด หรือ สนามที่ตกกระทบ ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ การกระตุ้นเกิดจากแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป CST Microwave Studio 2009 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระยะใกล้และไกล อิมพีแดนซ์ แอตมิตแตนซ์ อัตราขยาย และสภาพเจาะจงทิศทาง การใช้กำลังงาน และการต่อเชื่อมร่วมระหว่างสายอากาศได้

การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศในโครงการฉบับนี้จะเริ่มจากอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ความกว้างแถบ และแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแบบไดโพล อัตราส่วนแกน และอัตราขยาย ซึ่งทำให้มีความรู้และเข้าใจในพื้นฐานของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่มีต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ในส่วนของการออกแบบเพื่อจะนำสายอากาศไปใช้งาน สิ่งสำคัญนั้นคือจะต้องทำให้สายอากาศมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับระบบนั้นๆ และเงื่อนไขที่ได้นำมาพิจารณาในการออกแบบสายอากาศนั้นก็คือแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบ และอัตราส่วนแกน การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีทั้งหมดทำโดยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009

จากบทที่ 4 ได้แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบ และอัตราขยายของสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้าง จะพบว่าผลการทดสอบนั้นเป็นที่ยอมรับได้ คือค่อนข้างตรงตามทฤษฎี และตามความต้องการของสายอากาศที่จะใช้งานจริง ไม่

ว่าจะเป็นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน ความกว้างแถบ และอัตราขยายของสายอากาศ เพื่อนำมาสร้างเป็นสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศสำหรับส่งสัญญาณวิทยุ FM ย่านความถี่ VHF ที่นำเสนอไว้ข้างต้น และสุดท้ายได้สร้างสายอากาศต้นแบบตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ถูกออกแบบไว้เพื่อยืนยันความถูกต้องด้วยผลการทดลองวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศโดยใช้เครื่องมือวัดในที่โล่งและห้องปฏิบัติการ ดังได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 4



(ก) ไดโพล (ทั่วไป)



(ข) ไดโพล (ออกแบบ)

รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบโครงสร้างของสายอากาศไดโพล

ตาราง 5.1 ตารางสรุป

คุณลักษณะของสายอากาศ	สายอากาศไดโพล (ออกแบบ)	สายอากาศไดโพล (ทั่วไป)
ความยาว (cm)	99.16	122.16
Input Impedance (Ω)	50.67	50
S_{11} (dB)	-27.428	-16.21
SWR	1.005	ไม่เกิน 1.35
Bandwidth (MHz)	91-105	87.5-108
Gain (dB)	2.148	2

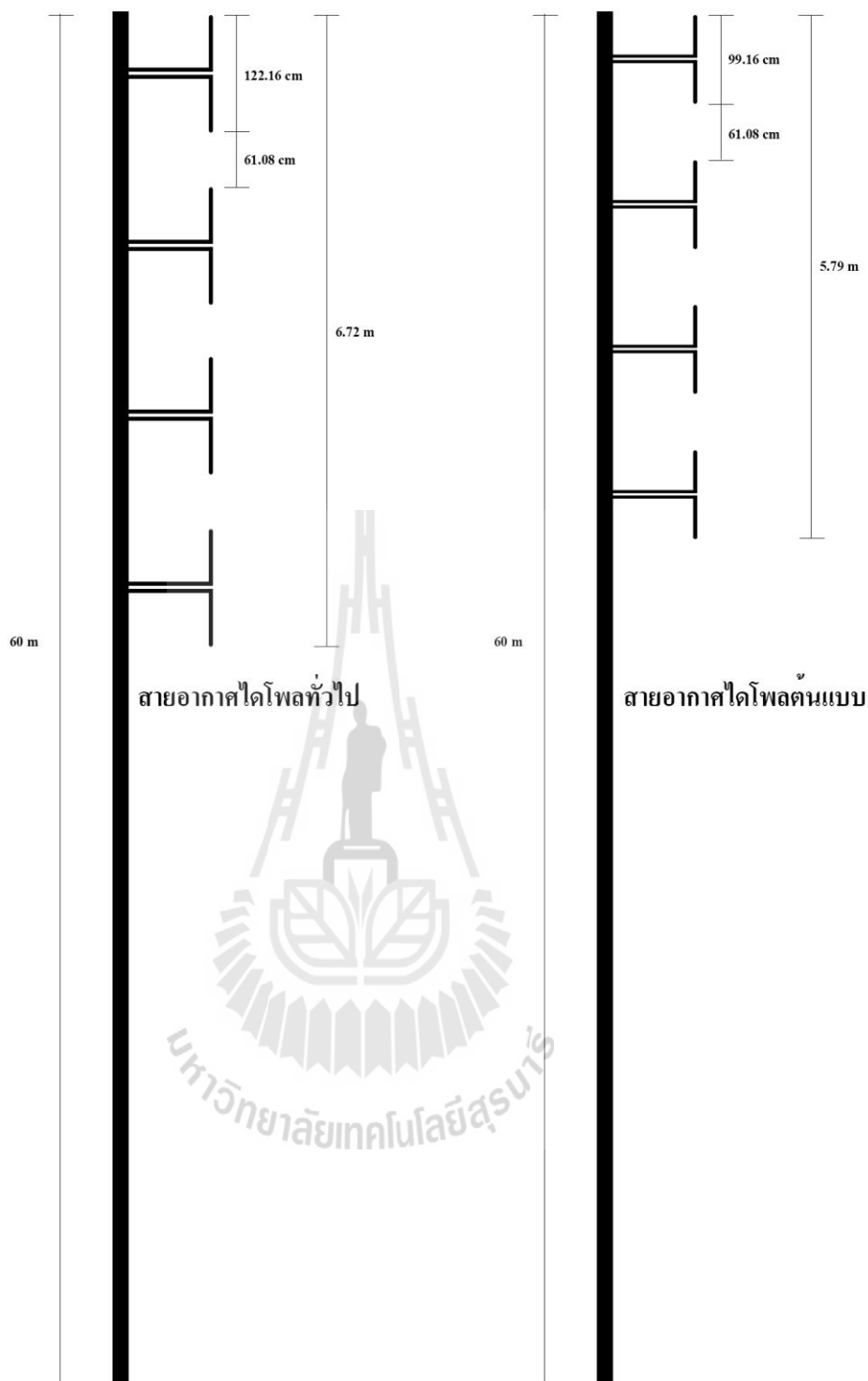
สรุปผลที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศมีความสอดคล้องกับผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 แต่ผลจากการวัดทดสอบอาจจะให้ค่าที่คลาดเคลื่อนไปบ้างเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการ

จำลองด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio 2009 คืออาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ สุดท้ายเกิดจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อมขณะวัดทดสอบสายอากาศเพราะการทดสอบสายอากาศที่ดีนั้น ควรจะหาพื้นที่โล่งและกว้างพอสมควร เพื่อลดปัญหาการบังหรือสะท้อนของคลื่นระหว่างสายอากาศภาคส่ง และภาครับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากบทสรุปที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า นอกจากการเลือกเทคนิคของการสร้างสายอากาศที่เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการใช้งานสำหรับการแพร่สัญญาณวิทยุ FM ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้อย่างเพียงพอ และมีอัตราขยายรอบทิศทาง ยังต้องพิจารณาถึงกระบวนการในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศด้วย เพื่อที่จะนำผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณและวิเคราะห์ไปประกอบการสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป และสายอากาศที่จะนำมาเป็นสายอากาศภาคส่งต้องมีความถี่เรโซแนนซ์ เท่ากับความถี่เรโซแนนซ์ ของสายอากาศที่จะทำการทดสอบ เพื่อให้สายอากาศทั้งสองตัวทำงานได้ดีที่สุดที่ความถี่เดียวกัน ในส่วนของการวัดเพื่อบันทึกค่านั้น ควรทำการวัดอย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย จะทำให้ได้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยลง

การนำสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ($\lambda/2$ Straight dipole) ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ไปใช้งานในระบบแพร่สัญญาณเสียงสำหรับสถานีส่งวิทยุ FM ระบบ VHF สายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ ควรจะถูกพัฒนาต่อไปในด้านของขนาด วิธีการแมตซ์ให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้นเพื่อให้สายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานออกทุกทิศทาง อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่เหมาะสม และมีการโพลาไรซ์แบบเส้นตรงต่อไป



รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบพื้นที่ที่ใช้ติดตั้งสายอากาศ 4 อิลิเมนต์

จากรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าสายอากาศไดโพลเส้นตรงความยาวครึ่งคลื่น ที่มีความยาวน้อยกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป แต่ยังคงรักษาคุณสมบัติของสายอากาศชนิดนี้ เมื่อนำไปติดตั้งจะใช้พื้นที่บนเสาส่งสัญญาณจะประหยัดพื้นที่มากกว่าสายอากาศไดโพลทั่วไป 13.83 % และยังสามารถเพิ่มจำนวนอิลิเมนต์ของสายอากาศได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์, วิศวกรรมสายอากาศ (พิมพ์ครั้งที่ 3), ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยีการศึกษา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.
- [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] Antenna Design for Omnidirectional Coverage. Antennas and Propagation Society International Symposium.
- [6] Casciola, D., Miers, G.L., and Surette, R.A. (1999). UHF Antenna Choices. IEEE Transaction Broadcasting.
- [7] Cheng, D.K. (1991). Gain Optimization for Yagi-Uda Arrays. IEEE Antennas and Propagation Magazine.
- [8] Pimpol, S., and Wongsan, R. (2007). Impedance Analysis of a Shorted-End Curved Dipole on Reflector Plane using Method of Moments. **ECTI International Conference.**
- [9] [http://www.superlenethai.com/product/1079278/Superlene-\(%E0%B8%8B%E0%B8%B8%E0%B8%9B%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B8%99\)-sheet.html](http://www.superlenethai.com/product/1079278/Superlene-(%E0%B8%8B%E0%B8%B8%E0%B8%9B%E0%B9%80%E0%B8%9B%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B9%8C%E0%B8%A5%E0%B8%B5%E0%B8%99)-sheet.html)
- [10] <http://www.feed-auto.com/bbu/antenna.htm>
- [11] <http://th.fmuser.net/content/?778.html>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายเก่งกาจ เนียมจีน
 วัน-เดือน-ปีเกิด 16 พฤศจิกายน 2533
 ที่อยู่ 425/2 ซอยท้าวสุระ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
 การศึกษา -ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา
 -ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมัธยมศึกษาราชสีมาวิทยาลัย จังหวัดนครราชสีมา
 การศึกษาปัจจุบัน นักศึกษาชั้นปีที่ 5 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 โทรศัพท์ 08-0154-0386

ชื่อ-นามสกุล นายอนุพันธ์ จำปาสาร
 วัน-เดือน-ปีเกิด 21 กรกฎาคม 2534
 ที่อยู่ 96 หมู่ 1 ต.สหพันธ์ อ.สหพันธ์ จ.กาฬสินธุ์ 46140
 การศึกษา -ระดับประถมศึกษา โรงเรียนสหพันธ์วิทยาคม จังหวัดกาฬสินธุ์
 -ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนกาฬสินธุ์พิทยาสรรพ์ จังหวัดกาฬสินธุ์
 การศึกษาปัจจุบัน นักศึกษาชั้นปีที่ 5 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 โทรศัพท์ 09-1016-4206

ชื่อ-นามสกุล นายลิขิต เสนาวงศ์
 วัน-เดือน-ปีเกิด 5 สิงหาคม 2534
 ที่อยู่ 48 หมู่ 5 ต.บ้านโปร่ง อ.ศรีธาตุ จ.อุดรธานี 41230
 การศึกษา -ระดับประถมศึกษา โรงเรียนบ้านสามขา จังหวัดอุดรธานี
 -ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนมัธยมปลายกุมภวาปี จังหวัดอุดรธานี
 การศึกษาปัจจุบัน นักศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 โทรศัพท์ 08-3364-4149