

สายอากาศแถวลำดับค่าคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งตัดวงจร  
บนระนาบตัวสะท้อน

นายสมภพ พิมพล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2550

**A WIDE BEAM ARRAY ANTENNA USING  
SHORTED-END CURVED DIPOLES  
ON A REFLECTOR PLANE**

**Sompop Pimpol**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2007**

# สายอากาศแถวลำดับค่าคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.รังสรรค์ ทองทา)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภิต)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สมภพ พิมพล : สายอากาศแถวลำดับลำคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัว  
สะท้อน (A WIDE BEAM ARRAY ANTENNA USING SHORTED-END  
CURVED DIPOLES ON A REFLECTOR PLANE) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผศ. ดร. รังสรรค์ วงศ์สวรรค์, 115 หน้า

ในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความจำเป็นและ  
สำคัญมาก โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้สำหรับสถานีแพร่สัญญาณโทรทัศน์ จะต้องมีแบบรูปการ  
แผ่พลังงาน (radiation pattern) ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการ  
ออกแบบสายอากาศแถวลำดับลำคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัว  
สะท้อน และมีการป้อนสัญญาณเข้าที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศ ข้อดีของสายอากาศชนิดนี้ ก็คือ จะ  
มีโครงสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อน เนื่องจากได้มีการประยุกต์โครงสร้างของสายอากาศไดโพล  
เส้นตรง นำมาปรับรูปร่างให้เป็นแบบสายอากาศไดโพลโค้งและลัดวงจรที่ปลายของไดโพลเข้ากับ  
ระนาบตัวสะท้อน เพื่อเพิ่มความกว้างของลำคลื่น (beamwidth) และอัตราขยาย (gain) ในทิศทาง  
ด้านหน้าของสายอากาศให้มากขึ้น ในกระบวนการของงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลองสายอากาศ โดย  
ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SuperNEC เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศไดโพลโค้งที่ถูกลัดวงจร  
ที่ปลายเข้ากับระนาบตัวสะท้อน สำหรับกระบวนการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ได้นำระเบียบวิธีโมเมนต์  
(Method of Moments : MoM) มาประยุกต์ใช้เพื่อหาคุณลักษณะของสายอากาศ ที่สำคัญ ได้แก่  
แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) และอิมพีแดนซ์  
ด้านเข้า (input impedance) เป็นต้น สุดท้ายได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบตามขนาดที่ได้จากการ  
วิเคราะห์ เพื่อนำมาวัดทดสอบเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป  
SuperNEC และจากระเบียบวิธีโมเมนต์

SOMPOP PIMPOL : A WIDE BEAM ARRAY ANTENNA USING  
SHORTED-END CURVED DIPOLES ON A REFLECTOR PLANE.

THESIS ADVISOR : ASST. PROF. RANGSAN WONGSAN, D.Eng.

115 PP.

A WIDE BEAM ARRAY ANTENNA USING SHORTED-END CURVED DIPOLES  
ON A REFLECTOR PLANE.

In the wireless communication applications, antenna is the important component. Especially, the antenna applied for the broadcasting station requires the radiation beam with sufficient gain and wide beam the cover a service area. This thesis presents the design of array antenna using shorted-end curved dipole antennas on a square reflector plane and exiting feed point at the center of each curved dipole. Advantage of this antenna should possess physically strong structure, easy fabrication and cost effectiveness. Because, each antenna of array is made of the straight dipole, which its both arms are curved for enlarging the beamwidth and shorted on a metallic reflector plane for robusting the structure and increasing the directive gain. The feasibility of shorted-end curved dipole antennas on a square reflector plane has been carried out by using SuperNEC software and analyzed again by using the Method of Moments (MoM) for calculating the radiation patterns, directivity, and input impedance. Finally, the prototype of antenna is fabricated and measured to compare with the numerical results.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature \_\_\_\_\_

Academic Year 2007

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ ผู้ช่วยอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ แก้ปัญหา และกำลังใจ แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการและถ่ายทอดความรู้ประสบการณ์ และให้คำแนะนำ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม และอาจารย์ปิยาภรณ์ กระจอดนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณประพล จาระตะคุ วิศวกรศูนย์เครื่องมือฯ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ และให้กำลังใจมาโดยตลอด และขอขอบคุณ เพื่อน ๆ และพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณวิไลวรรณ พิมพล ภรรยา ที่เป็นเสมือนคู่คิดและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมาตลอด จนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้โอกาสในการลาศึกษาต่อและสนับสนุนค่าใช้จ่ายระหว่างการศึกษา จนสำเร็จการศึกษาด้วยดี ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการจัดทำวิทยานิพนธ์

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

สมภพ พิมพล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	3
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสายอากาศแถวลำดับค่าคลื่นกว้าง</b>	
<b>โดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรมหระนาบตัวสะท้อน.....</b>	<b>5</b>
2.1 กล่าวนำ.....	5
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2.1 ลักษณะสายอากาศสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย.....	6
2.2.2 ระเบียบวิธีวิเคราะห์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมา.....	10
2.3 โครงสร้างสายอากาศแถวลำดับค่าคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรมหระนาบตัวสะท้อน.....	12
2.4 สรุป.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>3</b>	<b>ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและระเบียบวิธีโมเมนต์</b> .....	<b>15</b>
3.1	กล่าวนำ.....	15
3.2	ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	15
3.3	ระเบียบวิธีโมเมนต์.....	24
3.4	สรุป.....	30
<b>4</b>	<b>การวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศแถวลำดับลำดับคลื่นกว้างโดยใช้</b>	
	<b>ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน</b> .....	<b>31</b>
4.1	กล่าวนำ.....	31
4.2	การออกแบบสายอากาศไดโพลโค้ง.....	31
4.2.1	พื้นฐานการออกแบบและการคำนวณพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลโค้ง.....	31
4.2.2	ศึกษาคุณลักษณะสายอากาศไดโพลโค้งโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป.....	32
4.3	การใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์หาผลเฉลยของสายอากาศไดโพลโค้ง.....	39
4.4	การวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับลำดับคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจร	
	บนระนาบตัวสะท้อน.....	66
4.5	สรุป.....	76
<b>5</b>	<b>ผลการทดลองและการวัดสายอากาศ</b> .....	<b>77</b>
5.1	กล่าวนำ.....	77
5.2	การสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	77
5.3	การวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	88
5.4	การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ.....	93
5.5	การวัดความกว้างแถบสายอากาศ.....	97
5.6	การวัดอัตราขยายในทิศทางด้านหน้า.....	97
5.7	สรุป.....	100
<b>6</b>	<b>สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>102</b>
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	102
6.2	ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	104



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....	105
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของสมการระเบียบวิธีโมเมนต์ .....	107
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....	113
ประวัติผู้เขียน .....	115

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 งานวิจัยในอดีตของสายอากาศแปรสัญญาณ โทรทัศน์ย่านความถี่สูงยิ่ง.....	11
5.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่ใช้ในการคำนวณและการวัด.....	78
6.1 คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ.....	103

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจัดวางไดโพลเส้นตรงให้เป็นแถวลำดับ และวางบนแผ่นสะท้อนร่วมกัน ที่เรียกว่าสายอากาศแบบแผง.....	8
2.2 สายอากาศที่มีการปรับรูปร่างไดโพลเส้นตรงให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ.....	9
2.3 สายอากาศไดโพลเส้นตรงลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน.....	9
2.4 โครงสร้างสายอากาศแถวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน.....	12
3.1 รูปแบบปัญหาของสายอากาศไดโพล.....	17
3.2 ระบบพิกัดทรงกระบอก.....	20
3.3 ฟังก์ชันฐานที่แบ่งส่วนเป็นขอบเขตย่อยเป็นค่าคงที่.....	28
3.4 รูปแบบการกระจายของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากฟังก์ชันฐาน $f_n(\phi')$ .....	29
4.1 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน ที่จำลองด้วย SuperNEC.....	36
4.2 หน้าต่างของการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC.....	36
4.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC.....	37
4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่จำลองแบบด้วย SuperNEC.....	37
4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่จำลองแบบด้วย SuperNEC.....	38
4.6 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน.....	39
4.7 (ก) คลื่นที่ตกกระทบและกระจายออกบนลวดตัวนำ (ข) ลักษณะของกระแสสมมูล.....	41
4.8 (ก) กระแสที่ไหลอยู่บนพื้นผิวของลวดตัวนำ (ข) กระแสที่ไหลอยู่ภายในลวดตัวนำ.....	46
4.9 การแบ่งเซกเตอร์และการกำหนดจุดจัดวางของสายอากาศ.....	53
4.10 การแจกแจงกระแสของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน.....	55
4.11 คุณลักษณะต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์.....	58
4.12 ช่วงความถี่ 470 MHz ที่เลือกสำหรับการออกแบบสายอากาศขนาดความยาว $\lambda/2$ .....	60
4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์.....	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 รูปทรงเรขาคณิตของแฉวลำดับสองอีลิเมนต์ ที่ถูกวางอยู่บนแกน $z$ .....	67
4.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจร บนระนาบตัวสะท้อน.....	69
4.16 ผลการวิเคราะห์อัตราขยายของสายอากาศ.....	73
4.17 อัตราส่วนค่าคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศ.....	74
4.18 สภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ.....	76
5.1 สายอากาศต้นแบบโดยใช้ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์.....	78
5.2 การแมตช์แบบขนาน.....	79
5.3 บาลันแบบโคแอกเซียล $\lambda/4$ (1:1).....	80
5.4 การต่อบาลันสำหรับสายอากาศไดโพลโค้ง.....	80
5.5 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ.....	81
5.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์.....	83
5.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่เปรียบเทียบกับกรวดแบบโพลาริไซซ์ไว้.....	84
5.8 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าความถี่ 470 MHz.....	85
5.9 คุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการวัดทดสอบ.....	86
5.10 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแฉวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน.....	87
5.11 สายอากาศต้นแบบ.....	88
5.12 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ.....	88
5.13 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบโพลาริไซซ์ร่วม.....	89
5.14 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบโพลาริไซซ์ไว้.....	90
5.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 2 อีลิเมนต์.....	92
5.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่เปรียบเทียบกับกรวดแบบโพลาริไซซ์ไว้.....	93
5.17 การต่อวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ.....	94
5.18 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศจากการวัด.....	95
5.19 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ.....	95
5.20 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ.....	96

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.21 อัตราการขยายของสายอากาศไดโพลโค้งที่ได้จากการวัดทดสอบ.....	98
5.22 อัตราการขยายของสายอากาศไดโพลโค้ง.....	99

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

UHF	=	ultra high frequency
MoM	=	Method of Moments
HPBW	=	half-power beamwidth
PIFA	=	planar inverted F antenna
EFIE	=	electric field integral equation
MFIE	=	magnetic field integral equation
$W$	=	width of the reflector plane antenna
$L$	=	length of the curved dipole
$d$	=	distance between curved dipole
$b$	=	radius of the wire
$a$	=	radius of curved dipole
$\phi$	=	azimuth direction of electric field
$S_{11}$	=	input reflection coefficient
$I_0$	=	maximum current
$k$	=	phase constant
$r$	=	distance from any point
$\eta_0$	=	intrinsic impedance
$\omega$	=	angular frequency
$\mu_0$	=	permeability of free-space
$\epsilon_0$	=	permittivity of free-space
$\lambda$	=	wavelength of electromagnetic wave
$\lambda_0$	=	wavelength of electromagnetic wave in free-space
$D$	=	largest dimension of the antenna
$Z_A$	=	antenna input impedance
$R_A$	=	antenna input resistance
$X_A$	=	antenna input reactance
$\Gamma$	=	reflection coefficient

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$Z_0$	=	characteristic impedance
$\beta$	=	propagation constant
$\epsilon_r$	=	relative permittivity
$V_p$	=	phase velocity
$f_c$	=	operating frequency
$G$	=	absolute gain
$D_{\max}$	=	directivity
$D_0$	=	maximum directivity
$U$	=	radiation intensity
$U_{\max}$	=	maximum radiation intensity
$U_0$	=	radiation intensity of isotropic source
$P_{\text{rad}}$	=	total radiation power
$SWR$	=	standing wave ratio
$BW$	=	bandwidth

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่มีความจำเป็นและสำคัญมาก โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้สำหรับสถานีแพร่สัญญาณโทรทัศน์ ในย่านความถี่สูงยิ่ง (ultra high frequency : UHF) ที่มีช่วงความถี่ตั้งแต่ 300 – 3000 MHz สายอากาศจะต้องมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป สามารถประกอบได้ง่าย มีน้ำหนักเบา รองรับกำลังงานที่สูงได้ มีความกว้างลำคลื่น (beamwidth) สำหรับการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้อย่างเพียงพอ และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้า (directive gain) สูง จึงจำเป็นต้องทำการพัฒนาอุปกรณ์สายอากาศให้สอดคล้องกับความต้องการและสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพสูงสุด

แง่มุมต่าง ๆ ของสายอากาศที่ใช้สำหรับสถานีแพร่สัญญาณโทรทัศน์ เป็นที่สนใจสำหรับนักวิจัยอย่างแพร่หลายตลอดมา จนกระทั่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศมากมาย ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input impedance) แบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) และอัตราขยายในทิศทางด้านหน้า เป็นต้น รวมทั้งรูปแบบการป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศ ซึ่งการวิเคราะห์สายอากาศจะอาศัยสมการเชิงอินทิกรัล ฟังก์ชันฐาน (basis function) และระเบียบวิธีโมเมนต์ (method of moment : MoM) จำนวนหากระแสไฟฟ้า

ในระบบการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ต้องการสายอากาศประจำสถานีที่ให้อัตราขยายกำลังงานสูง แบบรูปการแผ่พลังงานอาจเป็นสายอากาศที่มีทิศทาง (directional antenna) หรือสายอากาศรอบทิศทาง และมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth : HPBW) ที่กว้างเพียงพอ คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่กล่าวมานี้ทำให้สายอากาศที่ใช้อยู่หลาย ๆ แบบมีข้อจำกัด จึงมีความจำเป็นต้องพัฒนาสายอากาศให้เข้ากับความต้องการดังกล่าว นอกจากนั้นสายอากาศจะต้องมีคุณสมบัติทางกลที่แข็งแรง ทนกำลังได้สูง ประกอบง่าย และที่สำคัญต้องมีต้นทุนต่ำ ดังนั้นด้วยลักษณะโครงสร้างสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน มีการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัวไดโพลโค้ง สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม ในส่วนของการป้อนสัญญาณ ซึ่งมีข้อดีคือ เป็นระบบการป้อนสัญญาณที่ไม่ซับซ้อน การแจกจ่ายกระแส (current distribution) มีความสมดุลและสามารถทนกำลังได้สูง

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการปรับรูปร่างไดโพลเส้นตรงให้เป็นไดโพลโค้งและลัดวงจรที่ปลายของไดโพลเข้ากับระนาบตัวสะท้อน และเลือกรูปแบบการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัว



ไดโพลโค้ง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายกำลังในทิศทางด้านหน้าสูงสุด และมีความกว้างของ ลำ คลื่น ในการส่งสัญญาณของสายอากาศมากขึ้น โดยใช้วิธีการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม สำเร็จรูป SuperNEC เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศดังกล่าว จากนั้นจะใช้ระเบียบวิธี โมเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงเลขวิธีหนึ่ง ที่ให้ผลเฉลยที่แม่นยำสูง เพื่อหาแบบรูปการ แผ่พลังงาน สภาพเจาะจงทิศทาง และอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เป็นต้น สุดท้าย จะเป็นการสร้าง สายอากาศต้นแบบตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อนำมาวัดทดสอบเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SuperNEC และผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบ วิธีโมเมนต์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาและออกแบบสายอากาศไดโพลโค้งที่มีการลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัว สะท้อน สำหรับใช้กับสถานีส่งโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ที่มีความกว้างลำคลื่นของการแผ่กระจาย กำลังงานกว้างกว่าสายอากาศไดโพลที่ใช้กัน โดยทั่วไป และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้า ที่สูง ตลอดจนศึกษาพารามิเตอร์ของสายอากาศดังกล่าว ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า สภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) และแบบรูปการแผ่พลังงาน เป็นต้น

1.2.2 เพื่อนำระเบียบวิธีโมเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์หาคูณลักษณะพื้นฐานของ สายอากาศ ไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายเข้ากับระนาบตัวสะท้อน และสามารถคำนวณหา ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศได้อย่างแม่นยำ

1.2.3 เพื่อให้ได้สายอากาศต้นแบบตามรูปแบบและขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ โดยเป็น สายอากาศที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน สามารถสร้างและประกอบได้ง่าย มีน้ำหนักเบา แล้วนำมาทำ การวัดทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SuperNEC และ ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ โดยสุดท้ายได้ทำการปรับแต่งจนกระทั่งสามารถใช้งานจริงได้

## 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

1.3.1 โครงสร้างของสายอากาศแฉก ลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน จะช่วยเพิ่มความกว้างของลำคลื่น และอัตราขยายในทิศทางด้านหน้า ในการแผ่กระจายกำลังงาน ของสายอากาศที่มีรูปแบบลักษณะนี้มากขึ้น

1.3.2 ระเบียบวิธีโมเมนต์มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้วิเคราะห์หาคูณลักษณะพื้นฐาน ของสายอากาศ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง และแม่นยำ

1.3.3 คูณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ได้จากการวิเคราะห์กับผลการวัดจากสายอากาศ ต้นแบบจะมีความสอดคล้องและให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SuperNEC เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการวิเคราะห์สายอากาศแบบไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน

1.4.2 ใช้โปรแกรม MATLAB™ เพื่อพัฒนาระเบียบวิธีโมเมนต์สำหรับวิเคราะห์หาคะแสไฟฟ้า และค่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ

1.4.3 ดำเนินการศึกษาเทคนิคการเพิ่มความกว้างของลำคลื่นให้กับสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยนำเสนอแนวทางการพัฒนาเพื่อเปรียบเทียบผลจากโปรแกรมสำเร็จรูป SuperNEC และจากระเบียบวิธีโมเมนต์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้โปรแกรมจำลองผลเฉลยที่เกิดจากการพัฒนาระเบียบวิธีโมเมนต์ที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน

1.5.2 ได้ข้อสรุปอันเป็นประโยชน์เกี่ยวกับลักษณะรูปร่างของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบแผ่นสะท้อน ที่ทำให้ความกว้างของลำคลื่น และอัตราการขยายในทิศทางด้านหน้า มากขึ้น

1.5.3 ได้สายอากาศต้นแบบ เพื่อพัฒนาไปใช้งานจริง

## 1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอ การวิเคราะห์สายอากาศแฉวลำดับลำคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน มีเนื้อหาทั้งหมด 6 บท และ 2 ภาคผนวก

บทที่ 1 ได้กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาในเรื่องการสื่อสารไร้สายว่าการสื่อสารไร้สายนั้นมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันและการดำเนินธุรกิจของประชาชนเป็นอย่างมาก อุปกรณ์สื่อสารระบบไร้สายนั้นมีส่วนประกอบหลายส่วนแต่ในวิทยานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงเฉพาะส่วนของสายอากาศเท่านั้น การเลือกสายอากาศนอกจากพิจารณาชนิดของสายอากาศที่เหมาะสมกับความถี่การนำไปใช้งานแล้วควรพิจารณาวัสดุที่เป็นตัวนำที่ดี รูปร่างที่สร้างได้ง่าย แข็งแรง ประหยัดและมีการติดตั้งได้ง่าย เพื่อให้สายอากาศทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแต่ละชนิดที่ใช้ในงานการสื่อสารแบบไร้สายและปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ พร้อมทั้งกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างสายอากาศแฉวลำดับลำคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและพื้นฐานวิธีวิเคราะห์เชิงเลข โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ โดยเริ่มจากหลักการของระเบียบวิธีโมเมนต์ ประกอบไปด้วยเงื่อนไขความผิดพลาดและความเสถียรที่จะนำไปสู่ความถูกต้องในผลเฉลยของคำตอบที่ได้ จากนั้นจึงเข้าสู่วิธีการระเบียบวิธีโมเมนต์ในพิกัดทรงกระบอกที่เป็นโครงสร้างและเงื่อนไขเบื้องต้น

บทที่ 4 ได้นำเสนอผลเฉลยจากการจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมจำลอง SuperNEC และผลเฉลยจากการใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน สภาพเจาะจงทิศทาง และอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เป็นต้น เพื่อนำมาสร้างเป็นสายอากาศที่นำมาใช้งานย่านความถี่การสื่อสารแบบไร้สายและประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศสำหรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ที่นำเสนอไว้ข้างต้น

บทที่ 5 บทนี้ได้สร้างสายอากาศต้นแบบตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ถูกออกแบบไว้เพื่อยืนยันความถูกต้องด้วยผลการทดลองวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศโดยใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลจากการจำลองและจากผลการทดลองวัดสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบไว้ของวิทยานิพนธ์นี้ และขอแนะนำในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศแกลวลำดับลำดับกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลวดวงจรบนระนาบตัวสะท้อนในโอกาสต่อไป

ภาคผนวก ก. รายละเอียดของสมการระเบียบวิธีโมเมนต์

ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

## บทที่ 2

# ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสายอากาศแถวลำดับลำดับคลื่น กว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลวดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน

### 2.1 กล่าวนำ

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า ความต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารของมนุษย์นั้นมีมาตั้งแต่อดีต จนถึงยุคของการสื่อสารแบบไร้สายซึ่งเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน สำหรับปัจจัยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบไร้สายนั้นมีหลายส่วนที่เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ส่วนของการรับสัญญาณ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้โดยการทำให้ความหลากหลาย (diversity) หรือการเข้ารหัส (coding) เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึง การเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่อุปกรณ์สำคัญของระบบการสื่อสารแบบไร้สาย คือสายอากาศ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนข้อมูลในรูปของสัญญาณไฟฟ้า ให้อยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อส่งออกอากาศ และในทางกลับกันจะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นข้อมูลสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศจะต้องคำนึงถึงระบบที่จะต้องการนำสายอากาศนั้นไปใช้งานเป็นสำคัญ เนื่องจากระบบที่ต่างกันจะมีความต้องการคุณลักษณะของสายอากาศที่แตกต่างกันด้วย โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้สำหรับสถานีแพร่สัญญาณโทรทัศน์ จะต้องมีแบบรูปการแผ่พลังงาน ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการหรือเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการ ได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งโค้งที่ถูกลวดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน และมีการป้อนสัญญาณเข้าที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศ ข้อดีของสายอากาศชนิดนี้ก็คือ มีความแข็งแรง มีโครงสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อน เนื่องจากได้มีการประยุกต์โครงสร้างของสายอากาศไดโพลเส้นตรง มาปรับปรุงร่างให้เป็นแบบสายอากาศไดโพลโค้งและลวดวงจรที่ปลายของไดโพลเข้ากับระนาบตัวสะท้อน เพื่อเพิ่มความกว้างของลำคลื่น และมีระนาบตัวสะท้อนด้านหลังเพื่อช่วยเพิ่มอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศให้มากขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องดำเนินการสำรวจและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่เคยถูกนำมาใช้ ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อที่จะนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนั้นเป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ยังได้ทำการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น

จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ทั้งในและต่างประเทศ ผลการสืบค้นที่ได้จะใช้เป็นแนวทางในการดำเนิน การวิจัยต่อไป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึง ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของสายอากาศแบบต่าง ๆ รวมถึงสายอากาศไดโพลเส้นตรง สายอากาศที่มีตัวสะท้อน ได้แก่ สายอากาศแบบยากิ-อูตะ ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ ซึ่งจากโครงสร้างของสายอากาศแบบยากิ-อูตะ จะมีข้อดีในเรื่องของอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าที่สูงแต่จะมีข้อเสีย คือ ความกว้างของลำคลื่นจะแคบ ตลอดจนได้ศึกษาสายอากาศที่มีการปรับแต่งโครงสร้างให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ เช่น สายอากาศรูปตัวเอส สายอากาศรูปตัววี เป็นต้น เพื่อให้ทราบถึงคุณลักษณะของสายอากาศ ข้อดีและข้อเสียที่เกิดขึ้นเพื่อที่จะนำมาปรับปรุงให้สอดคล้องกับความต้องการดังกล่าว นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระเบียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ เพื่อให้ทราบถึงแนวทางในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ ระเบียบวิธีที่เคยถูกนำมาใช้ ข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี เพื่อนำไปสู่การเลือกวิธีที่จะใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ ต่อไป

## 2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

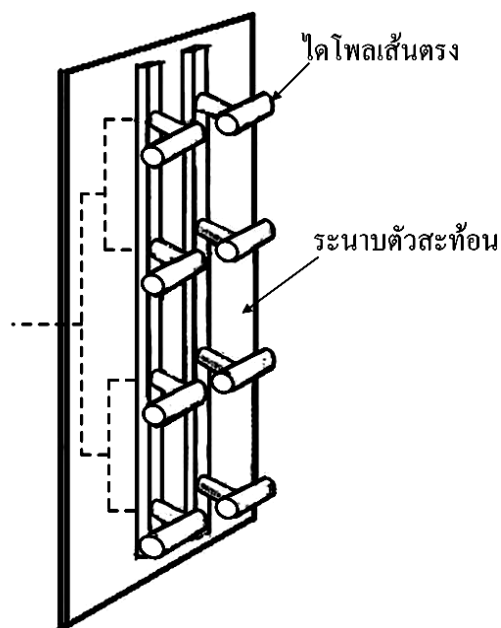
### 2.2.1 ลักษณะสายอากาศสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาการสื่อสารแบบไร้สายและระบบการส่งสัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF สำหรับแนวทางการออกแบบสายอากาศที่ใช้มีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับรูปแบบของระบบที่ต้องการใช้งานร่วมกับสายอากาศ ซึ่งยากที่จะกำหนดเป็นกฎเกณฑ์ที่แน่นอนลงไป ในปัจจุบันสายอากาศที่ทำงานในระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดคือสายอากาศโมโนโพล (monopole antenna) สายอากาศแบบปลอก (sleeve antenna) และสายอากาศแบบสัญญาณต่ำ (low-profile antenna) เช่น สายอากาศไมโครสตริป (micro strip antenna) และสายอากาศระนาบเอฟลิปส์ด้าน (planar inverted F antenna : PIFA) ทั้งสามแบบนี้ นิยมนำมาใช้ในการสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศแบบแรก คือสายอากาศโมโนโพลนิยมใช้มากที่สุดเพราะมีคุณลักษณะเป็นแถบกว้าง (broadband characteristics) และมีโครงสร้างไม่ยุ่งยาก บางครั้งเรียกสายอากาศชนิดนี้ว่าสายอากาศแบบแส้ (whip antenna) ส่วนประกอบของสายอากาศที่ทำหน้าที่ แผ่กระจายคลื่นติดตั้งอยู่บนระนาบกราวด์แบบอนันต์ ซึ่งสายอากาศนี้จะมีคุณลักษณะคล้ายกับสายอากาศไดโพล ในทางปฏิบัติสายอากาศโมโนโพลมีความยาวไม่ใช่ครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพล ถ้ามีระนาบกราวด์ที่กว้างจะทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะแตกต่างจากระนาบกราวด์แบบอนันต์ สายอากาศแบบที่สอง คือ สายอากาศแบบปลอก โดยมีโครงสร้างของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

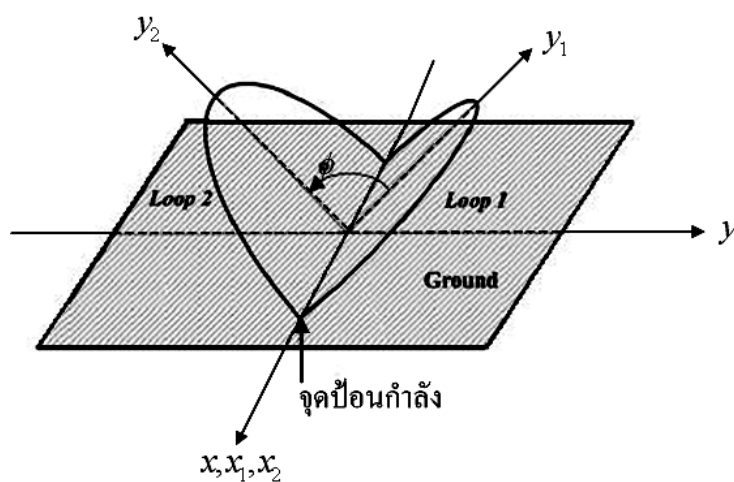
เป็นไดโพลแบบไม่สมมาตรของตัวนำ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดแตกต่างกัน โดยขนาดที่เล็กที่สุดของตัวนำจะเท่ากับตัวนำภายในสายโคแอกเซียลที่ป้อนให้กับสายอากาศ และขนาดที่ใหญ่จะมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางตัวนำซึ่งจะถูกฉลัดวงจรกับลวดอีกที่อยู่รอบ ๆ สายโคแอกเซียล สายอากาศนี้มีคุณลักษณะเหมือนกับสายอากาศโมนโพล ที่ไม่ต้องมีระนาบกราวด์ แต่การที่ไม่มีระนาบกราวด์นั้นมีข้อเสียเมื่อนำไปใช้งาน โดยที่ต้องนำไปติดตั้งเข้ากับส่วนต่าง ๆ ที่เป็นโลหะ ทำให้อัตราการขยายลดลง ข้อเสียอีกอย่างของสายอากาศแบบเส้นและสายอากาศแบบปลอก คือ โครงสร้างไม่แข็งแรงหักง่าย และการนำไปสร้างเป็นสายอากาศแบบสองความถี่เป็นไปได้ยาก แบบสุดท้ายคือ สายอากาศไมโครสตริปหรือสายอากาศแพทช์ (patch) มีโครงสร้างสามส่วนคือ ส่วนบนเป็นส่วนของการแผ่กระจายคลื่นโดยมีส่วนที่สองเป็นวัสดุฐานรองไดอิเล็กตริกที่คั่นกลางระหว่างกราวด์กับส่วนของการแผ่กระจายคลื่นที่เป็นแผ่นตัวนำ ส่วนสายอากาศระนาบเอฟกลับด้าน มีลักษณะของแถบเส้นเป็นรูปตัวเอฟ ที่พัฒนามาจากสายอากาศแบบไดโพลบนแผ่นวงจรพิมพ์ อย่างไรก็ตาม สายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศระนาบเอฟกลับด้านมีข้อเสียคือ มีความกว้างแถบที่แคบ

สำหรับสายอากาศที่นิยมใช้สำหรับการสื่อสารแบบไร้สายในปัจจุบันได้ถูกออกแบบให้สามารถรองรับการใช้งานในย่านความถี่ UHF ตามต้องการ ซึ่งใช้เทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ เทคนิคการสร้างสายอากาศร่องบนผิวโลหะ ซึ่งได้มีการศึกษาและพัฒนากันอย่างแพร่หลายบนหลาย ๆ โครงสร้าง ได้แก่ สายอากาศร่องบนท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม (Seki, 1985) (Hirokawa, 1993) จากนั้น ได้มีการพัฒนาเพื่อให้อาจเป็นสายอากาศร่องบนท่อนำคลื่นที่มีการโพลาไรซ์เชิงวงกลม (Min, Ko, Arai, and Kim, 2001) (Hirano, Hirokawa, and Ando, 2000) แต่เมื่อนำมาทำเบย์สแตกกิ้ง (bay stacking) เพื่อให้สามารถแพร่สัญญาณ ได้รอบทิศทางจะเกิดจุดอับของสัญญาณในบางตำแหน่ง อันเนื่องมาจาก โครงสร้างของตัวสายอากาศที่เป็นสี่เหลี่ยม สายอากาศร่องอีกแบบหนึ่งคือ สายอากาศร่องโคแอกเซียล (Casciola, Miers, and Surette, 1999) แต่จะมีความกว้างลำคลื่นแคบ และมีความเพี้ยนแบบรูปทางด้านข้าง เทคนิคต่อมา เป็นการจัดวางไดโพลเส้นตรงให้เป็นแถวลำดับและวางบนแผ่นสะท้อนร่วมกัน ที่เรียกว่าสายอากาศแบบแผง (Casciola, Miers, and Surette, 1999) (William Wickline, 1982) เพื่อทำให้อัตราขยายด้านหน้าสูงขึ้น และลดพหุหลัง แต่ก็ยังมีปัญหาในเรื่องของความกว้างลำคลื่น ที่ยังไม่กว้างเพียงพอ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และเทคนิคสุดท้าย ได้มีการพัฒนาโดยการปรับรูปร่างของสายอากาศไดโพลเส้นตรงให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ เช่น สายอากาศไดโพลที่มีลักษณะโค้ง (arc-curved dipole) (Jun-Hong Wang, Lang Jan, and Shui-Sheng Jian, 1997) แล้วทำมุมสายอากาศไดโพลรูปตัววี (V-shaped antenna) (Krishnan, Li, and Leong, 2005) และสายอากาศรูปตัวเอส (S-shaped antenna) (Hassan Elkamchouchi, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับ การสร้างสายอากาศไดโพลเส้นตรง

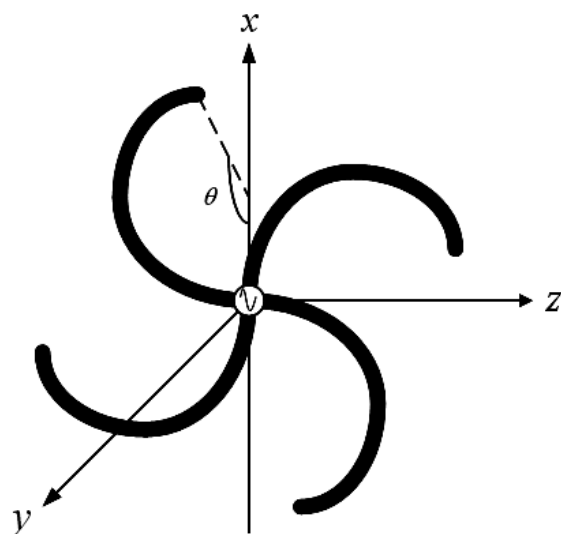
ลัทธิกระจายที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน ได้แก่ “Flat Radiating Dipoles and Applications to Array” (G. Dubost, 1981) ได้กล่าวถึง การวิเคราะห์หัตถ์อิมพีแดนซ์การแผ่พลังงานและความกว้างแถบ ของไดโพลเส้นตรงที่มีการลัทธิกระจายขนานกับระนาบตัวสะท้อนสมบูรณ์แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นต้น



รูปที่ 2.1 การจัดวางไดโพลเส้นตรงให้เป็นแถวลำดับและวางบนแผ่นสะท้อนร่วมกันที่เรียกว่าสายอากาศแบบแผง

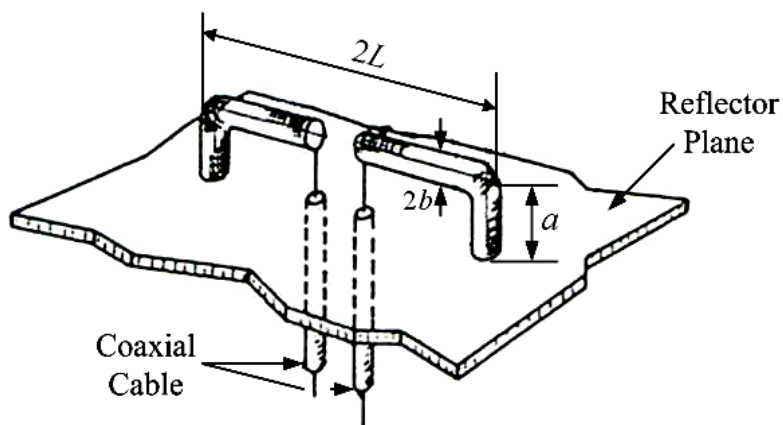


(ก) สายอากาศที่มีลักษณะรูปโค้ง



(ข) สายอากาศที่มีการตัดเป็นรูปตัวเอส

รูปที่ 2.2 สายอากาศที่มีการปรับรูปร่างไดโพลเส้นตรงให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ



รูปที่ 2.3 สายอากาศไดโพลเส้นตรงลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการปรับรูปร่างไดโพลเส้นตรงให้เป็นไดโพลโค้งและลัดวงจรที่ปลายของไดโพลเข้ากับระนาบตัวสะท้อน และเลือกรูปแบบการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัวไดโพลโค้ง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายกำลังในทิศทางด้านหน้าสูงสุด และมีความกว้างของลำคลื่น ในการส่งสัญญาณของสายอากาศมากขึ้น ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



### 2.2.2 ระเบียบวิธีวิเคราะห์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ผ่านมา

ในอดีตต้องใช้ความพยายามอย่างมากในการที่จะลดรูปของระบบสมการที่มีความยุ่งยากให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการหาคำตอบของสมการนั้น ๆ ในปัจจุบันเพื่อแบ่งเบาภาระของกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้มีการนำคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงมาใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ ทำให้สามารถคำนวณระบบที่มีความซับซ้อนได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความซ้ำซากที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยมืออีกด้วย

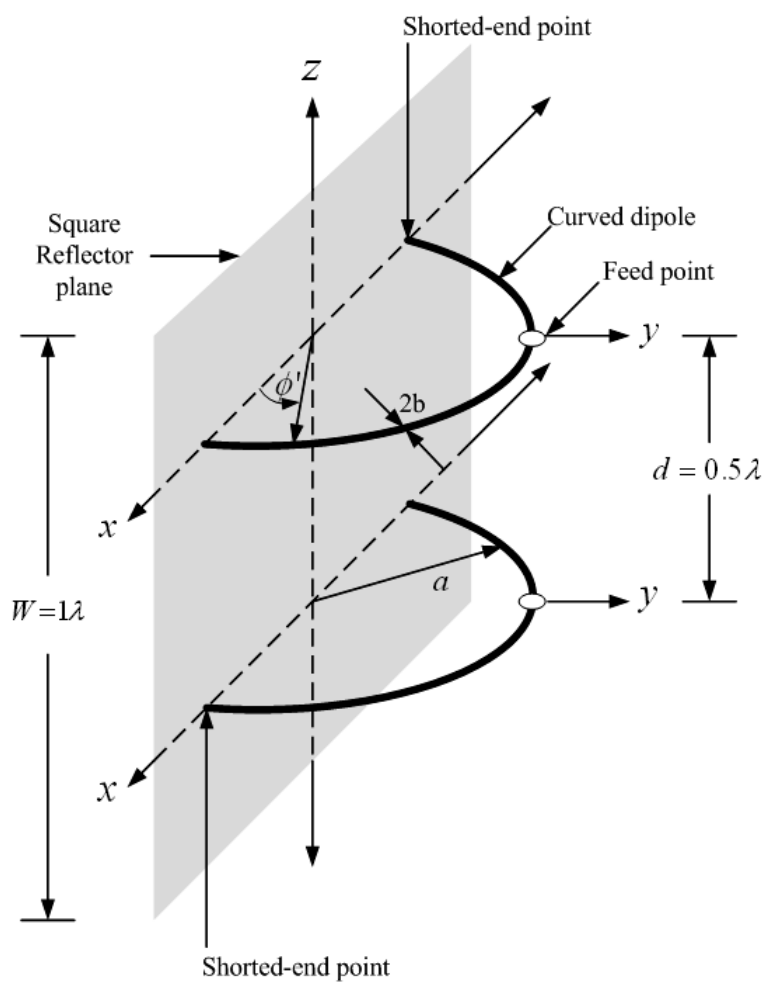
สำหรับระเบียบวิธีเพื่อคำนวณหาผลเฉลยของปัญหาด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้มีการศึกษาเพื่อให้เหมาะสมกับโครงสร้างของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน อิมพีแดนซ์ด้านเข้า และสภาพเจาะจงทิศทาง เป็นต้น ซึ่งวิธีการคำนวณเชิงเลขที่เหมาะสมกับโครงสร้างของสายอากาศในงานวิจัยนี้คือ ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งวิธีนี้ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2514 และได้มีการปรับปรุงพัฒนาวิธีการดังกล่าวมาอย่างต่อเนื่องโดยนักวิจัยหลายท่านที่มีความสนใจและเชื่อมั่นในวิธีการนี้เพื่อให้เกิดความเหมาะสม และมีประสิทธิภาพในทุกแง่มุมกับปัญหาที่พิจารณา วิธีการระเบียบวิธีโมเมนต์คือการคำนวณเชิงเลขเพื่อหาผลเฉลยของปัญหาทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้นำเสนอแนวความคิดการใช้วิธีประมาณการคำนวณเชิงเลขแบบระเบียบวิธีโมเมนต์สำหรับการแก้ปัญหาสมการแมกซ์เวลล์ ในงานวิจัยได้กำหนดการพิจารณาสายอากาศในพิกัดทรงกระบอก (cylindrical coordinate) ในการแก้ปัญหาระเบียบวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศไดโพล โค้งลัดวงจรมบนระนาบตัวสะท้อน นับว่าเป็นสิ่งสำคัญในการศึกษาสมรรถนะและผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นแก่สายอากาศ อาทิเช่น อัตราขยายในทิศทางด้านหน้า ความกว้างของลำคลื่น แบบรูปการแผ่พลังงาน สภาพเจาะจงทิศทาง อิมพีแดนซ์ด้านเข้า และคุณสมบัติอื่น ๆ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ได้นำเสนอการประยุกต์กรรมวิธี สมมติฐาน และทฤษฎีต่าง ๆ เพื่อให้การทำนายมีความแม่นยำหรือมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น สามารถแสดงให้เห็นความเป็นมาของวิธีนี้โดยเรียงลำดับดังตารางที่ 2.1 ได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยในอดีตของสายอากาศแพร่สัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่สูงยิ่ง

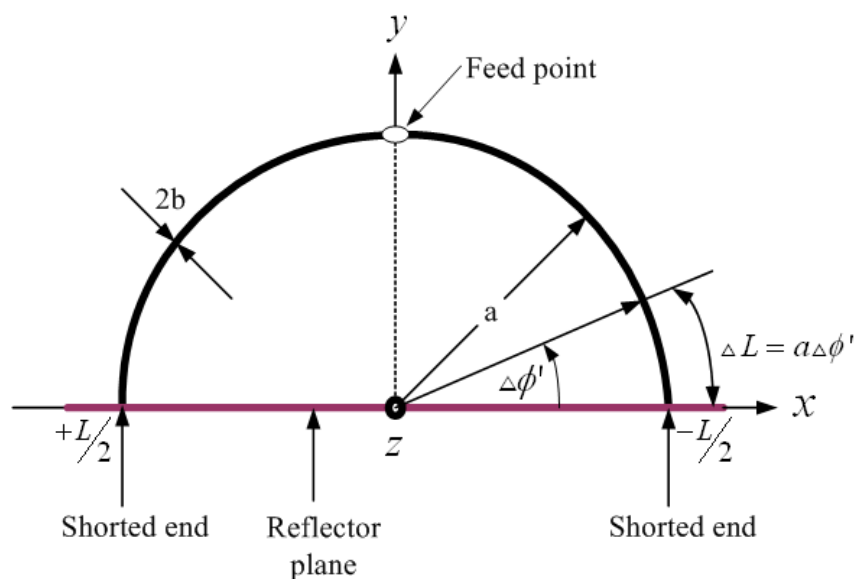
ผู้นำเสนอ	เรื่อง	ปี
William A. Wickline	นำเสนอการเพิ่มแถบความกว้างของคลื่น โดยการจัดวางไดโพลเส้นตรงสองตัวให้เป็นแถวลำดับ และวางบนแผ่นสะท้อนร่วมกัน ที่เรียกว่าสายอากาศแบบแผง	1982
J. H. Wang และ คณะ	นำเสนอการปรับปรุงร่างของสายอากาศไดโพลเพื่อให้ได้ความแรงสูงสุดของแบบรูปการแผ่พลังงานโดยการปรับให้เป็นรูปตัววี และทำการหาขนาดที่เหมาะสมโดยการเปลี่ยนขนาดมุมของแขนทั้งสองข้าง และโดยการเปลี่ยนความยาวรัศมีของความโค้งของไดโพล	1997
D. Casciola และ คณะ	นำเสนอแนวทางการใช้สายอากาศแบบร่องโคแอกเซียล ที่สามารถแผ่พลังงานได้ทั้งในแนวมุมกวาดและแนวมุมเมย	1999
D. Casciola และ คณะ	นำเสนอการจัดวางไดโพลเส้นตรงให้เป็นแถวลำดับ และวางบนแผ่นสะท้อนร่วมกัน ที่เรียกว่าสายอากาศแบบแผง เพื่อให้อัตราขยายด้านหน้าสูงขึ้น และลดพหุหลัง	1999
T. Hirano และ คณะ	นำเสนอการพัฒนาเพื่อให้สามารถเป็นสายอากาศร่องบนท่อนำคลื่นที่มีการโพลาริซเซชันวงกลม	2000
Hassan Elkamchouchi	นำเสนอการพัฒนาโดยการปรับปรุงร่างของสายอากาศไดโพลเส้นตรงให้เป็นรูปตัวเอส	2004
S. Krishnan และ คณะ	นำเสนอการพัฒนาโดยการปรับปรุงร่างของสายอากาศไดโพลเส้นตรงให้เป็นรูปตัววี	2005

นอกจากนี้ยังมีหนังสือที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสายอากาศไดโพลเส้นตรง ลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน ได้แก่ “Flat Radiating Dipoles and Applications to Array” (G. Dubost, 1981) ได้กล่าวถึง การวิเคราะห์อิมพีแดนซ์การแผ่พลังงานและความกว้างแถบของไดโพลเส้นตรงที่มีการลัดวงจรขนานกับระนาบตัวสะท้อนสมบูรณ์แบบ และหนังสือเล่มต่อมาเขียนโดย (Balanis, 1997) หนังสือชื่อ “Antenna Theory Analysis and Design” โดยมีเนื้อหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์สายอากาศ วิธีต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ รวมทั้งการออกแบบระบบสายอากาศ เป็นต้น

2.3 โครงสร้างสายอากาศแฉวลำดับล้นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งจัดวางจรบนระนาบตัวสะท้อน



(ก) โครงสร้างสายอากาศ



(ข) พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ

รูปที่ 2.4 โครงสร้างสายอากาศแฉวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้ง  
ลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน

จากรูปที่ 2.4 (ก) จะแสดงโครงสร้างของสายอากาศแฉวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ที่บอกถึงขนาดที่ใช้ในการออกแบบและการวิเคราะห์เชิงเลข ซึ่งจะประกอบไปด้วยไดโพลโค้งทำการลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อนทำการแฉวลำดับกัน 2 ตัว ไดโพลโค้งแต่ละตัวจะมีระยะห่างเท่ากับ  $d$  เพื่อที่จะใช้ประกอบในการออกแบบ และจะมีขนาดของแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ  $W$  การป้อนสัญญาณจะทำการป้อนที่จุดกึ่งกลางของไดโพลโค้งแต่ละตัวแล้วนำมาทำเบสแตกกิ่ง เพื่อให้สามารถแพร่สัญญาณได้ตามทิศทางที่ต้องการ

ในการวิเคราะห์สายอากาศโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงเลข จะทำการวางพิกัดของสายอากาศในลักษณะทรงกระบอก เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ในทิศทางของสนาม  $\phi$  ซึ่งมีขนาดของรัศมีไดโพลโค้งเท่ากับ  $a$  และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นลวดเท่ากับ  $2b$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข)

## 2.4 สรุป

เทคนิคการเพิ่มความกว้างลำคลื่นและเพิ่มอัตรายายของสายอากาศที่นำเสนอกระทำโดยการปรับรูปร่างสายอากาศไดโพลเส้นตรงให้เป็นไดโพลโค้งและลัดวงจรที่ปลายของไดโพล

เข้ากับระนาบตัวสะท้อน และเลือกรูปแบบการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัวไดโพลโค้ง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายกำลังในทิศทางด้านหน้าสูงสุด และมีความกว้างของลำคลื่น ในการส่งสัญญาณของสายอากาศมากขึ้น การวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบของผลเฉลยได้ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงเลขวิธีหนึ่งที่ให้ผลเฉลยที่แม่นยำสูง เพื่อหาแบบรูปการแผ่พลังงาน สภาพเจาะจงทิศทาง และอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เป็นต้น สุดท้าย จะเป็นการสร้างสายอากาศต้นแบบตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อนำผลการวัดทดสอบเปรียบเทียบกับ ผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์

## บทที่ 3

### ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและระเบียบวิธีโมเมนต์

#### 3.1 กล่าวนำ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนคลื่นที่อยู่ใน สายส่งสัญญาณ หรือท่อนำคลื่นให้แพร่กระจายออกสู่ตัวกลางที่สายอากาศวางอยู่ เช่น ช่องว่างอิสระ (free space) หรือไดอิเล็กตริก และในทางกลับกันจะทำหน้าที่รับคลื่นที่แพร่กระจายอยู่ในตัวกลาง ให้เข้ามาอยู่ในท่อนำคลื่นหรือสายส่งสัญญาณได้ การศึกษารูปแบบการกระจายคลื่นของสายอากาศแต่ละชนิดจึงมีความสำคัญ และทำให้ทราบถึงลักษณะและค่าการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเริ่มต้นด้วยการศึกษาสนามไฟฟ้าระยะใกล้ที่แพร่กระจายจากสายอากาศไดโพล ซึ่งถือว่าเป็นสายอากาศพื้นฐานที่มีรูปแบบง่ายชนิดหนึ่ง และมีรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าแบบรอบตัวในระนาบเดียว (omnidirection) เนื่องจากสายอากาศไดโพลมีโครงสร้างที่เป็นคู่เติมเต็ม (complementary structure) กับสายอากาศแบบไดโพลโค้ง ซึ่งสามารถนำไปสู่การศึกษารูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายจากสายอากาศแบบไดโพลโค้งด้วยจรรยาบรรณระนาบตัวสะท้อน ที่สามารถควบคุมการแพร่กระจายคลื่นให้ออกด้านเดียวได้

#### 3.2 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สมการพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องสอดคล้องและเป็นไปตามหลักของสมการแมกซ์เวลล์ ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\vec{E} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (3.4)$$

- โดย  $\bar{B}$  คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก มีหน่วยเป็น  $\text{Wb} \times \text{m}^{-2}$   
 $\bar{D}$  คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $\text{C} \times \text{m}^{-2}$   
 $\bar{E}$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $\text{V} \times \text{m}^{-1}$   
 $\bar{H}$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น  $\text{A} \times \text{m}^{-1}$   
 $\bar{J}$  คือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $\text{A} \times \text{m}^{-2}$   
 $\rho_v$  คือ ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $\text{C} \times \text{m}^{-3}$   
 $\mu$  คือ ความซึมซาบแม่เหล็ก มีหน่วยเป็น  $\text{H} \times \text{m}^{-1}$   
 $\epsilon$  คือ สภาพยอมไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $\text{F} \times \text{m}^{-1}$   
 $\sigma$  คือ ความนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น  $\text{S} \times \text{m}^{-1}$

นอกจากนี้ในการหาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า บางครั้งจำเป็นต้องอาศัยฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ช่วย (auxiliary vector potential functions) ดังนั้น จึงแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันดังกล่าวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ได้แก่  
 ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก  $\bar{A}$

$$\bar{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} \quad (3.5)$$

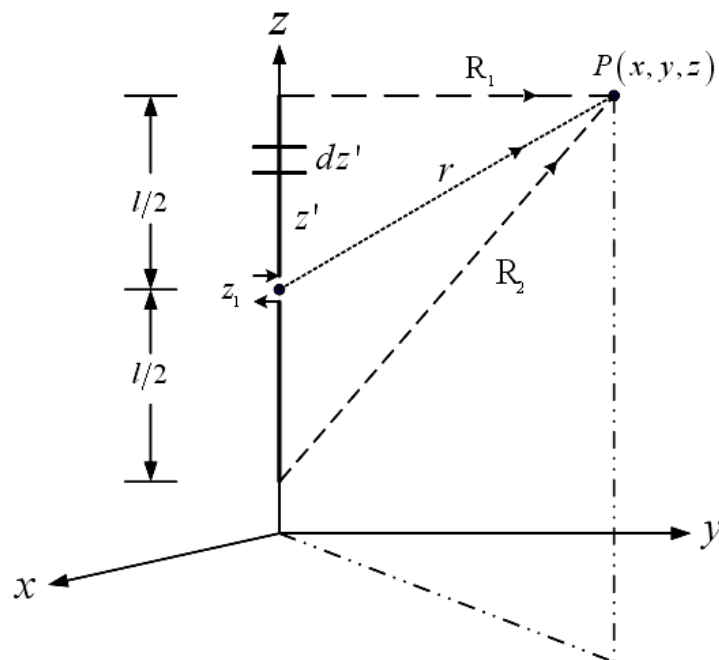
ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า  $\bar{F}$

$$\bar{E} = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F} \quad (3.6)$$

การพิจารณาสนามไฟฟ้าของสายอากาศไดโพล จะเริ่มต้นจากการพิจารณาสนามไฟฟ้าระยะใกล้ ที่มีขนาดความยาว  $l$  ตัวหนึ่งวางอยู่ในแนวแกน  $z$  ณ ตำแหน่ง  $(0, 0, z_1)$  ในตัวกลางเดี่ยวที่มีคุณสมบัติประจำตัวเป็น  $(\mu, \epsilon)$  ดังรูปที่ 3.1 หากไดโพลมีความผอม (thin wire dipole) สามารถพิจารณาแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า (electric current source) ที่ตัวของสายอากาศไดโพล ว่ามีการกระจายตัวของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า ( $\bar{I}_e(x', y', z')$ ) บนตัวของสายอากาศไดโพล เป็นไปในลักษณะของสัญญาณไซน์ ตามสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$\bar{I}_e = \begin{cases} \hat{a}_z I_0 \sin \left[ k \left( \frac{l}{2} - z' + z_1 \right) \right] \\ \hat{a}_z I_0 \sin \left[ k \left( \frac{l}{2} + z' - z_1 \right) \right] \end{cases} \quad \text{เมื่อ} \quad \begin{cases} z_1 \leq z' \leq z_1 + \frac{l}{2} \\ z_1 - \frac{l}{2} \leq z' \leq z_1 \end{cases} \quad (3.7)$$

ดังนั้นสามารถหาค่าศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก ตลอดความยาวของไดโพลได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 รูปแบบปัญหาของสายอากาศไดโพล

$$\bar{A} = \hat{a}_z \frac{\mu I_0}{4\pi} \left[ \int_{z_1 - \frac{l}{2}}^{z_1} \sin \left[ k \left( \frac{l}{2} + z' - z_1 \right) \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' + \int_{z_1}^{z_1 + \frac{l}{2}} \sin \left[ k \left( \frac{l}{2} - z' + z_1 \right) \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right] \quad (3.8)$$

โดยที่  $I_0$  เป็นค่าสูงสุดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศ

$k$  เป็นค่าคงที่เฟส เท่ากับ  $\omega\sqrt{\epsilon\mu}$

$r$  เป็นระยะทางจากสายอากาศถึงจุดที่สนใจใดๆ  $P(x, y, z)$



$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (3.9)$$

เมื่อสายอากาศอยู่ที่จุดกำเนิด ณ ตำแหน่ง  $x'=0, y'=0$  และพิจารณาในพิกัดทรงกระบอกจะได้ว่า

$$r = \sqrt{\rho^2 + (z-z')^2} \quad (3.10)$$

จากความสัมพันธ์ของศักย์แวกเตอร์แม่เหล็ก  $\bar{A}$  กับสนามแม่เหล็ก ตามสมการ (3.5) และพิจารณาในพิกัดทรงกระบอกสำหรับองค์ประกอบ  $A_z$  ไม่ได้แปรตามตัวแปร  $\phi$  ในสมการ (3.8) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{H} &= -\hat{a}_\phi \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \\ \bar{H} &= -\hat{a}_\phi \frac{I_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \int_{z_1 - \frac{l}{2}}^{z_1} \sin \left[ k \left( \frac{l}{2} + z' - z_1 \right) \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right. \\ &\quad \left. + \int_{z_1}^{z_1 + \frac{l}{2}} \sin \left[ k \left( \frac{l}{2} - z' + z_1 \right) \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right\} \end{aligned} \quad (3.11)$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler's relation)

$$\sin \left[ k \left( \frac{l}{2} \pm z' \pm z_1 \right) \right] = \frac{e^{jk \left( \frac{l}{2} \pm z' \pm z_1 \right)} - e^{-jk \left( \frac{l}{2} \pm z' \pm z_1 \right)}}{2j} \quad (3.12)$$

ทำให้สามารถลดรูปสมการ (3.11) ได้เป็น

$$H_\phi = -\frac{I_0}{4\pi} \frac{\partial}{\partial \rho} \left\{ \int_{z_1 - \frac{l}{2}}^{z_1} \left[ \frac{e^{jk\left(\frac{l}{2} + z' - z_1\right)} - e^{-jk\left(\frac{l}{2} + z' - z_1\right)}}{2j} \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right. \\ \left. + \int_{z_1}^{z_1 + \frac{l}{2}} \left[ \frac{e^{jk\left(\frac{l}{2} - z' + z_1\right)} - e^{-jk\left(\frac{l}{2} - z' + z_1\right)}}{2j} \right] \frac{e^{-jkr}}{r} dz' \right\} \quad (3.13)$$

ทำการอินทิเกรตและจัดรูปใหม่ได้

$$H_\phi = -\frac{I_0}{4\pi j \rho} \left\{ e^{-jkR_1} + e^{-jkR_2} - 2 \cos\left(\frac{kl}{2}\right) e^{-jkr} \right\} \quad (3.14)$$

โดยที่  $r = \sqrt{\rho^2 + (z - z_1)^2}$  (3.15)

$$R_1 = \sqrt{\rho^2 + \left(z - z_1 - \frac{l}{2}\right)^2} \quad (3.16)$$

$$R_2 = \sqrt{\rho^2 + \left(z - z_1 + \frac{l}{2}\right)^2} \quad (3.17)$$

จากสมการ (3.2) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และถ้าพิจารณาในตัวกลางที่เป็นช่องว่างอิสระ ดังนั้น  $\sigma = 0$  สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\bar{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \bar{H} \quad (3.18)$$

เมื่อสมมติว่าองค์ประกอบ  $H_\phi$  ไม่ได้แปรตามตัวแปร  $\phi$  จะสามารถหาสนามไฟฟ้าจากสมการ (3.18) ได้เป็น

$$E_\rho = j \frac{\eta_0 I_0}{4\pi \rho} \left[ \left(z - z_1 - \frac{l}{2}\right) \frac{e^{-jk_0 R_1}}{R_1} + \left(z - z_1 + \frac{l}{2}\right) \frac{e^{-jk_0 R_2}}{R_2} - 2(z - z_1) \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \right] \quad (3.19)$$

$$E_z = -j \frac{\eta_0 I_0}{4\pi} \left[ \frac{e^{-jk_0 R_1}}{R_1} + \frac{e^{-jk_0 R_2}}{R_2} - 2 \cos\left(\frac{k_0 l}{2}\right) \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \right] \quad (3.20)$$

โดยที่  $\rho$  เป็นตัวแปรรัศมีในพิกัดทรงกระบอก เท่ากับ  $\sqrt{x^2 + y^2}$

$\eta_0$  เป็นค่าอินทรีนซิกอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เท่ากับ  $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$

$k_0$  เป็นค่าคงตัวเฟส เท่ากับ  $\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$

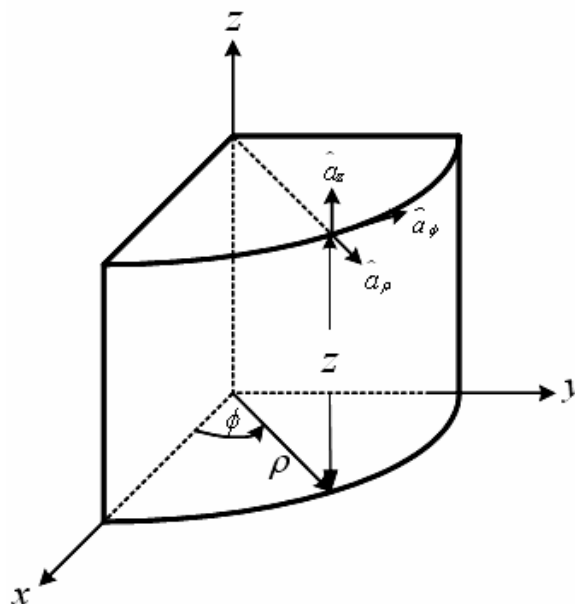
$\omega$  เป็นความเร็วเชิงมุมของความถี่  $f$  เท่ากับ  $2\pi f$

$l$  เป็นความยาวของสายอากาศ เท่ากับ  $\frac{\lambda}{2}$

สนามไฟฟ้าทั้งหมดเป็นผลรวมของสมการ (3.19) และ (3.20) ของสายอากาศไดโพล 1 ตัว คือ

$$\vec{E} = E_\rho \hat{a}_\rho + E_z \hat{a}_z \quad (3.21)$$

สำหรับการวิเคราะห์ สายอากาศไดโพลโค้งในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นการหาผลเฉลยของสมการคลื่นในระบบพิกัดทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบพิกัดทรงกระบอก

ในระบบพิกัดทรงกระบอก ที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศไดโพลโค้งในวิทยานิพนธ์นี้ สมการคลื่นเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีแหล่งกำเนิดและไม่มีกระแสจะเขียน

$$\nabla^2 \bar{E} = -\beta^2 \bar{E} \quad (3.22)$$

ซึ่งมีคำตอบเป็น

$$\bar{E}(\rho, \phi, z) = \hat{a}_\rho E_\rho(\rho, \phi, z) + \hat{a}_\phi E_\phi(\rho, \phi, z) + \hat{a}_z E_z(\rho, \phi, z) \quad (3.23)$$

เมื่อเรากระจายสมการ (3.22) เป็นสมการคลื่นสเกลาร์ ในแต่ละพิกัด จะได้สมการสเกลาร์ ดังนี้

$$\nabla^2 E_\rho + \left( -\frac{E_\rho}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\phi}{\partial \phi} \right) = -\beta^2 E_\rho \quad (3.24)$$

$$\nabla^2 E_\phi + \left( -\frac{E_\phi}{\rho^2} + \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\rho}{\partial \phi} \right) = -\beta^2 E_\phi \quad (3.25)$$

$$\nabla^2 E_z = -\beta^2 E_z \quad (3.26)$$

ในแต่ละสมการ (3.24) ถึง (3.26) จะมีค่า  $\nabla^2 \psi(\rho, \phi, z)$  คือลาปลาเซียนสเกลาร์ (Laplacian of a scalar) ของพิกัดทรงกระบอก สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \nabla^2 \psi(\rho, \phi, z) &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial \psi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \\ &= \frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (3.27)$$

จากสมการ (3.26) สามารถเขียนขยายได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\beta^2 \psi \quad (3.28)$$

โดยที่  $\psi(\rho, \phi, z)$  คือฟังก์ชันสเกลาร์ที่แทนสนามหรือส่วนประกอบสเกลาร์เวกเตอร์ และถ้าสมมติให้คำตอบของ  $\psi(\rho, \phi, z)$  เขียนได้ดังนี้

$$\psi(\rho, \phi, z) = f(\rho) g(\phi) h(z) \quad (3.29)$$

แล้วแทนค่าคำตอบสมการ (3.29) ลงในสมการ (3.28) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$gh \frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} + gh \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} + fh \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 g}{\partial \phi^2} + fg \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = -\beta^2 fgh \quad (3.30)$$

สมการ (3.30) หารถลอดด้วย  $fgh$  และแทนอนุพันธ์ย่อย (partials derivatives) โดยสมการอนุพันธ์สามัญ (ordinary derivatives) สามารถเขียนลดรูปสมการ (3.30) ได้ดังนี้

$$\frac{1}{f} \frac{d^2 f}{d\rho^2} + \frac{1}{f} \frac{1}{\rho} \frac{df}{d\rho} + \frac{1}{g} \frac{1}{\rho^2} \frac{d^2 g}{d\phi^2} + \frac{1}{h} \frac{d^2 h}{dz^2} = -\beta^2 \quad (3.31)$$

เทอมสุดท้ายด้านซ้ายมือเฉพาะฟังก์ชัน  $z$  ของสมการ (3.31) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{1}{h} \frac{d^2 h}{dz^2} = -\beta_z^2 \Rightarrow \frac{d^2 h}{dz^2} = -\beta_z^2 h \quad (3.32)$$

โดยที่  $\beta_z$  คือค่าคงที่ และแทนค่าสมการ (3.32) ลงในสมการ (3.31) แล้วทำการคูณตลอดด้วย  $\rho^2$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\rho^2}{f} \frac{d^2 f}{d\rho^2} + \frac{\rho}{f} \frac{df}{d\rho} + \frac{1}{g} \frac{d^2 g}{d\phi^2} + (\beta^2 - \beta_z^2) \rho^2 = 0 \quad (3.33)$$

เนื่องจากเทอมที่สามด้านซ้ายมือของสมการ (3.33) เฉพาะฟังก์ชัน  $\phi$  สามารถกำหนดให้เป็นค่าคงที่เท่ากับ  $-m^2$  ดังนั้น สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{1}{g} \frac{d^2 g}{d\phi^2} = -m^2 \Rightarrow \frac{d^2 g}{d\phi^2} = -m^2 g \quad (3.34)$$

ซึ่งจะทำให้

$$\beta^2 - \beta_z^2 = \beta_\rho^2 \Rightarrow \beta_\rho^2 + \beta_z^2 = \beta^2 \quad (3.35)$$

แทนค่าสมการ (3.34) ลงในสมการ (3.33) และคูณทั้งสองข้างด้วย  $f$  สามารถเขียนสมการ (3.33) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\rho^2 \frac{d^2 f}{d\rho^2} + \rho \frac{df}{d\rho} + \left[ (\beta_\rho \rho)^2 - m^2 \right] f = 0 \quad (3.36)$$

เมื่อใช้วิธีแยกตัวแปรของฟังก์ชันสเกลาร์ และแก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับแต่ละตัวแปรในสมการ (3.28) (3.29) (3.32) (3.34) และ (3.36) โดยใช้ข้อจำกัดตามสมการ (3.35) เขียนได้ดังนี้

$$\nabla^2 \psi(\rho, \phi, z) = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\beta^2 \psi \quad (3.37)$$

$$\text{โดยที่ } \psi(\rho, \phi, z) = f(\rho) g(\phi) h(z) \quad (3.38)$$

ซึ่งสามารถเขียนคำตอบของสมการคลื่นในพิกัดทรงกระบอก ได้ดังนี้

$$f_1(\rho) = A_1 J_m(\beta_\rho \rho) + B_1 Y_m(\beta_\rho \rho) \quad (3.39)$$

หรือ

$$f_2(\rho) = C_1 H_m^{(1)}(\beta_\rho \rho) + D_1 H_m^{(2)}(\beta_\rho \rho) \quad (3.40)$$

และ

$$g_1(\phi) = A_2 e^{-jm\phi} + B_2 e^{+jm\phi} \quad (3.41)$$

หรือ

$$g_2(\phi) = C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi) \quad (3.42)$$

และ

$$h_1(z) = A_3 e^{-j\beta_z z} + B_3 e^{+j\beta_z z} \quad (3.43)$$

หรือ

$$h_2(z) = C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z) \quad (3.44)$$

จากสมการ (3.39) ถึง (3.44) จะเป็นคำตอบของสมการคลื่นในพิกัดทรงกระบอก เราจะสามารถสังเกตได้ว่าพจน์  $e^{-j\beta_z z}$  แสดงถึงคลื่นจรที่เดินทางในทิศ  $+z$  ขณะที่พจน์  $e^{+j\beta_z z}$  แสดงถึงคลื่นจรที่เดินทางในทิศ  $-z$   $J_m(\beta_\rho \rho)$  และ  $Y_m(\beta_\rho \rho)$  เป็นฟังก์ชันเบสเซล (Bessel function) ชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สอง ตามลำดับ ฟังก์ชันนี้แสดงคลื่นนิ่ง  $H_m^{(1)}(\beta_\rho \rho)$  และ  $H_m^{(2)}(\beta_\rho \rho)$  เป็นฟังก์ชันแสงเกล (Hankel functions) ชนิดที่หนึ่งและชนิดที่สองตามลำดับ โดยที่ฟังก์ชันนี้แสดง

คลื่นจร สำหรับฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลและฟังก์ชันตรีโกณมิติ แสดงคลื่นจรและคลื่นนิ่งตามลำดับ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์สายอากาศที่มีการสมมติให้วางในแนวพิกัดทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นลวดที่เล็กมาก ๆ ดังนั้น ถ้าพิจารณาสนามไฟฟ้าทิศทางในแนว  $z$  จะเป็นศูนย์

### 3.3 ระเบียบวิธีโมเมนต์

ในอดีตต้องใช้ความพยายามอย่างมากในการที่จะลดรูปของระบบสมการที่มีความยุ่งยากให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการหาคำตอบของสมการนั้น ๆ ในปัจจุบันเพื่อแบ่งเบาภาระของกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้มีการนำคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วในการประมวลผลสูงมาใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ ทำให้สามารถคำนวณระบบที่มีความซับซ้อนได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดระยะเวลาที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยมืออีกด้วย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสำหรับการแก้ปัญหาสนามที่เป็นเชิงเส้นซึ่งนำมาประยุกต์ใช้หาสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าในสมการเชิงอินทิกรัล เราเรียกกระบวนการนี้ว่าวิธีเมตริกซ์ (matrix method) เนื่องจากวิธีนี้จะลดรูปของระบบสมการดั้งเดิมให้อยู่ในรูปของระบบสมการเมตริกซ์ และเราเรียกวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้มาซึ่งระบบสมการเมตริกซ์นี้ว่า วิธีโมเมนต์ ซึ่งคำตอบของสมการเชิงอินทิกรัลที่ได้ก็คือ กระแสที่เกิดการแจกแจงรูปตลอดอยู่ตัว โครงสร้างของสายอากาศ ค่ากระแสที่ได้นี้สามารถนำไปหาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศได้ เช่น แบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน อิมพีแดนซ์ด้านเข้า และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อแก้สมการเชิงเส้นโดยใช้วิธีโมเมนต์ พิเคราะห์สมการต่อไปนี้

$$L(f) = g \quad (3.45)$$

โดยที่  $L$  คือ ตัวดำเนินการเชิงเส้น (linear operator)

$g$  คือ ฟังก์ชันกระตุ้นหรือแหล่งกำเนิด (excitation function or source) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ทราบค่า

$f$  คือ ฟังก์ชันการตอบสนอง (response function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันไม่ทราบค่าที่ต้องการหา

ให้  $f$  ซึ่งแสดงด้วยอนุกรมของฟังก์ชัน  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$  ในโดเมนของ  $L$  นั่นคือ

$$f = \sum_n \alpha_n f_n \quad ; n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.46)$$



โดยที่  $\alpha_n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์คั้งที่ที่ไม่ทราบค่า (unknown coefficient)

$f_n$  คือ ฟังก์ชันการแผ่ขยาย (expansion function) หรือ ฟังก์ชันฐาน (basis function)

จุดประสงค์หลักของการหาคำตอบของสมการ (3.45) คือ การหาค่าของ  $f$  เมื่อรู้ค่า  $L$  และ  $g$  ตามลำดับ จากระเบียบวิธีโมเมนต์ จะทำการกระจายฟังก์ชัน (expansion function) การตอบสนองที่ ไม่ทราบค่า  $f$  ให้อยู่ในรูปของการรวมกันแบบเชิงเส้น (linear combination) ของฟังก์ชันการตอบสนองที่ทราบค่าทั้งหมด  $N$  พจน์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\alpha(\phi') = \alpha_1 f_1(\phi') + \alpha_2 f_2(\phi') + \dots + \alpha_N f_N(\phi') = \sum_{n=1}^N \alpha_n f_n(\phi') \quad (3.47)$$

โดยที่  $\alpha_n$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ที่ไม่ทราบค่า และ  $f_n(\phi')$  คือ ค่าฟังก์ชันที่ทราบค่า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะถูกเรียกว่าฟังก์ชันฐาน หรือ ฟังก์ชันการแผ่ขยาย กำหนดขอบเขตของฟังก์ชัน  $f_n(\phi')$  มีค่าเท่ากับ  $f(\phi')$  ในสมการ (3.46) สำหรับผลเฉลยถูกต้อง (exact solution) จะได้จากผลรวมของอนุกรมจำนวนเทอมที่เป็นอนันต์ โดยทั่วไปจำนวนเทอมของอนุกรมจะเป็นจำนวนจำกัดค่าหนึ่งเท่านั้นและผลรวมที่ได้เราจะเรียกว่าผลเฉลยประมาณ (approximated solution) โดยการแทนสมการ (3.46) ลงในสมการ (3.45) และใช้ความเป็นเชิงเส้นของ  $L$  จะได้ว่า

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n L(f_n) = g \quad (3.48)$$

จากสมการ (3.48) พบว่ามีค่าที่ต้องการหาทั้งหมด  $N$  ค่า คือ  $\alpha_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) แต่มีสมการเพียงสมการเดียวเท่านั้น ซึ่งเป็นไปไม่ได้ที่จะทำการแก้สมการหาคำตอบทั้งหมด ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องมสมการเชิงเส้นที่เป็นอิสระต่อกันทั้งหมด  $N$  สมการ ซึ่งสมการเหล่านี้สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ด้วยวิธีการจัดวาง ซึ่งจะใช้เงื่อนไขขอบเขตกระทำที่จุดทั้งหมด  $N$  จุด ที่แตกต่างกันบนตัวโครงสร้างของสายอากาศ จากการใช้วิธีการจัดวาง สมการ (3.48) สามารถเขียนได้เป็น

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n L(f_n) = g_m, \quad m = 1, 2, \dots, N \quad (3.49)$$

สมการ (3.49) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[Z_{mn}][I_n] = [V_m] \quad (3.50)$$

โดยที่

$$Z_{mn} = L(f_n) \quad (3.51)$$

$$I_n = \alpha_n \quad (3.52)$$

$$V_m = g_m \quad (3.53)$$

ค่าสัมประสิทธิ์  $\alpha_n$  สามารถแก้ปัญหา (3.50) ใช้เทคนิคเมตริกซ์ผกผัน (inversion matrix) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

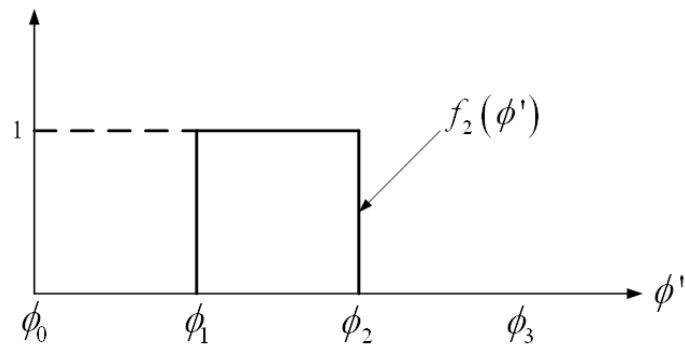
$$[I_n] = [Z_{mn}]^{-1} [V_m] \quad (3.54)$$

คำตอบที่ได้จากสมการ (3.54) ก็คือ ค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า  $\alpha_n$  โดยจะนำไปใช้ร่วมกับฟังก์ชันที่ทราบค่า  $\alpha_n(\phi')$  ในการหาฟังก์ชันการตอบสนองที่ไม่รู้ค่า  $\alpha$  ตามสมการ (3.47) ซึ่งจะทำให้รู้ค่ากระแสที่มีอยู่บนโครงสร้างของตัวสายอากาศ และจะนำค่ากระแสที่ได้นี้ ไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ของสายอากาศต่อไป

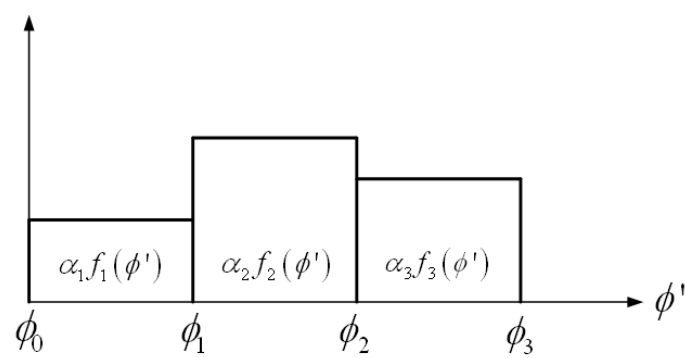
ขั้นตอนสำคัญของระเบียบวิธีโมเมนต์นั้นก็คือการเลือกฟังก์ชันฐาน  $f_n$  ให้เหมาะสมกับปัญหาและโครงสร้าง ซึ่ง  $f_n$  ควรจะเป็นอิสระเชิงเส้น (linearly independent) และจำนวนเทอมที่ใช้ในการประมาณสมการ (3.46) ควรเป็นไปอย่างสมเหตุสมผล

จากสมการ (3.47) ฟังก์ชันฐานหรือฟังก์ชันขยาย โดยทั่วไปแล้วจะมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน แต่สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือฟังก์ชันโดเมนย่อย (subdomain functions) จะประกอบด้วยฟังก์ชันที่แบ่งเป็นขอบเขตย่อย ซึ่งจะมีค่าเฉพาะบริเวณของส่วนย่อยที่ถูกพิจารณา และฟังก์ชันประเภทนี้จะพิจารณาบนผิวของโครงสร้างเท่านั้น ในรูปที่ 3.3 ได้แสดงตัวอย่างของฟังก์ชันฐานที่แบ่งส่วนของขอบเขตย่อยเป็นค่าคงที่ ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือฟังก์ชันโดเมนรวม

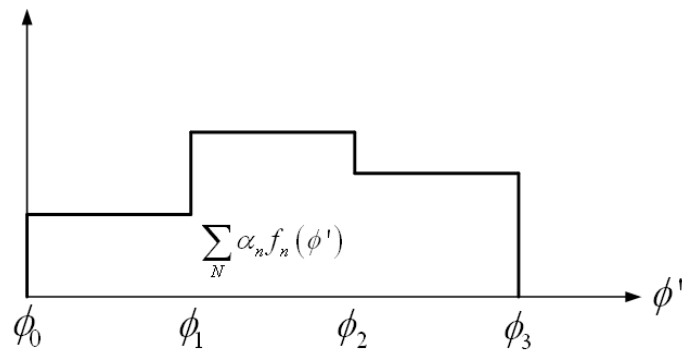
(entire-domain functions) จะเป็นฟังก์ชันแบบกระจายตลอดทั้งหมดของบริเวณที่พิจารณา ซึ่งจะคล้ายกับการกระจายอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series expansion)



(ก)



(ข)



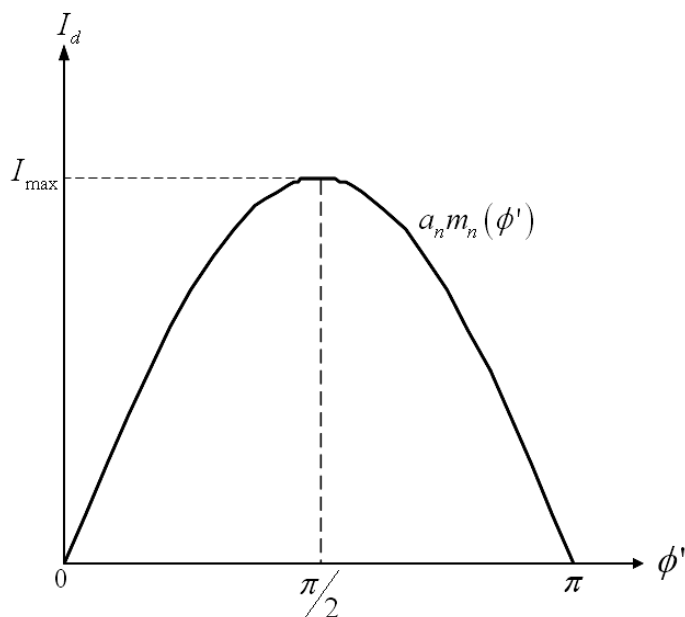
(ค)

รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันฐานที่แบ่งส่วนเป็นขอบเขตย่อยเป็นค่าคงที่

(ก) ส่วนเดียว (ข) หลายส่วน (ค) ผลรวมทั้งหมดของฟังก์ชัน

สำหรับโครงสร้างของสายอากาศที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษากระแสไฟฟ้าบนโครงสร้างของสายอากาศไดโพลโค้ง ซึ่งมีลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าตลอดความยาวของไดโพลโค้งเป็นฟังก์ชันโคไซน์ (cosine function) ดังนั้นเราจะเลือกรูปแบบของฟังก์ชันฐานประเภทฟังก์ชันโดเมนรวม มาใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศ สามารถแสดงได้ดังสมการ (3.55) และแบบรูปการกระจายของกระแสไฟฟ้าของสมการ แสดงในรูปที่ 3.4

$$f_n(\phi') = \cos\left[\frac{(2m-1)\pi\phi'_n}{L_n}\right], \quad 0 \leq \phi'_n \leq \pi \quad (3.55)$$



รูปที่ 3.4 รูปแบบการกระจายของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากฟังก์ชันฐาน  $f_n(\phi')$

จากที่ทราบกันดีว่า สายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัดใด ๆ จะมีการกระจายกระแสเป็นฟังก์ชันลักษณะรูปไซน์ และเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบเป็นเส้นลวดตัดโค้งที่มีความยาวจำกัดใด ๆ ซึ่งมีส่วนคล้ายคลึงกับโครงสร้างของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวจำกัดใด ๆ ดังนั้น จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เลือกฟังก์ชันชนิดนี้ในการวิเคราะห์หาค่ากระแสที่อยู่บนโครงสร้างของสายอากาศ ซึ่งจะทำให้ได้คำตอบที่มีความถูกต้องมากกว่าการเลือกใช้ฟังก์ชันอื่น ๆ และถือเป็นการใช้ข้อดีหลักของฟังก์ชันชนิดนี้ เนื่องจากฟังก์ชันนี้จะให้ผลที่ถูกต้องเมื่อสามารถคาดเดาถึงลักษณะการกระจายกระแสบนโครงสร้างของสายอากาศได้ แต่จะเกิดผลที่ผิดพลาดถ้านำฟังก์ชันชนิดนี้ไปใช้กับโครงสร้างของสายอากาศที่มีความซับซ้อนจนไม่สามารถคาดเดาถึงลักษณะของการกระจายกระแสบนโครงสร้างของสายอากาศนั้น ๆ ได้

จากสมการ (3.55) จะเห็นว่าฟังก์ชันฐานที่เลือกมีความสอดคล้องกับการกระจายสนามไฟฟ้าและเป็นฟังก์ชันที่มีความต่อเนื่องตลอดบริเวณโครงสร้างของสายอากาศไดโพลโค้งที่ได้ทำการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.4 นอกจากนี้เพียงจำนวนเทอมน้อย ๆ ของฟังก์ชันฐานสามารถให้ผลเฉลยของฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า (กระแสแม่เหล็ก) ที่แม่นยำในระดับที่ต้องการได้อีกด้วย

### 3.4 สรุป

โดยระเบียบวิธีโมเมนต์ และเทคนิควิธีการจัดวาง กระแสไฟฟ้าที่กระจายบนพื้นผิวของสายอากาศที่ทำการพิจารณา สามารถหาได้โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขตกระทำที่แต่ละจุดบนพื้นผิว

ของลวดตัวนำ เราสามารถแปลงระบบสมการเชิงเส้นเป็นระบบเมตริกซ์ เพื่อแก้สมการเชิงอินทิกรัลหาผลเฉลยของกระแสไม่ทราบค่า นั่นคือเราจะแทนค่าความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กไฟฟ้าที่ยังไม่ทราบค่าด้วยอนุกรมของฟังก์ชันซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์คงที่ที่ไม่ทราบค่าและฟังก์ชันฐาน ทำให้ลดรูประบบสมการเชิงเส้นที่มีความซับซ้อนให้อยู่ในรูปของระบบสมการเมตริกซ์ซึ่งจะแยกได้เป็น 3 เมตริกซ์ย่อย ได้แก่ เมตริกซ์ปฏิกิริยา เมตริกซ์สัมประสิทธิ์ที่ต้องการหาค่า และเมตริกซ์กระตุ้น ด้วยวิธีการทางเมตริกซ์ทำให้เราสามารถทราบค่ากระแสแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่เป็นผลเฉลยของสมการเชิงอินทิกรัลสำหรับโครงสร้างสายอากาศที่ศึกษาได้ จากนั้นจะนำไปวิเคราะห์หาค่าลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าต่อไป

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศแถวลำดับลำคลื่นกว้าง โดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศแถวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน โดยเริ่มต้นด้วยการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม SuperNEC เพื่อดูแนวทางการเป็นไปได้ของสายอากาศ ซึ่งเป็นโปรแกรมแก้ปัญหาทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นโลหะใด ๆ และได้นำเอาทฤษฎีพื้นฐานระเบียบวิธีโมเมนต์ในบทที่ 3 มาวิเคราะห์หาผลเฉลยคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยใช้การเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อนำมาแก้ปัญหาทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน และอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เป็นต้น เพื่อจะนำผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ไปเปรียบเทียบกับผลจากการวัดสายอากาศต้นแบบจริงที่ได้ทำการสร้างต่อไป

#### 4.2 การออกแบบสายอากาศไดโพลโค้ง

##### 4.2.1 พื้นฐานการออกแบบและการคำนวณพารามิเตอร์สายอากาศไดโพลโค้ง

สายอากาศที่ใช้สำหรับสถานีแพร่สัญญาณโทรทัศน์ ในย่านความถี่ UHF ต้องมีแบบรูปการแผ่พลังงาน ที่สามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ หรือสามารถเชื่อมต่อกับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพตลอดเวลา มีโครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อนจนเกินไป สามารถประกอบได้ง่าย มีน้ำหนักเบา รองรับกำลังงานที่สูงได้ และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศได้มากขึ้น ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบกับสายอากาศที่มีลักษณะแตกต่างออกไป ได้แก่ สายอากาศไดโพลเส้นตรง (Constantine A. Balanis, 1989) โดยมีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลัง ประมาณเท่ากับ 78 องศา และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ ประมาณเท่ากับ 2.15 dB ส่วนสายอากาศอีกแบบหนึ่งที่ทำให้การเปรียบเทียบ คือ แบบยาเกิ-ฮูเซ (Dong Xue, 2002) ขนาด 15 อีลีเมนต์ ที่มีความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลัง ประมาณเท่ากับ 28.877 องศา และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้า ประมาณเท่ากับ 14.21 dB จะเห็นได้ว่า สายอากาศทั้งสองแบบที่ได้นำมาเปรียบเทียบจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน คือ สายอากาศแบบ ไดโพลเส้น

ตรงจะให้ค่าความกว้างของลำคลื่นที่ค่อนข้างกว้าง แต่จะมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าที่ต่ำ ส่วนสายอากาศแบบยาจิก-อูตะ จะให้ค่าอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าที่สูงมาก แต่จะมีข้อเสียคือ มีค่าความกว้างของลำคลื่นที่แคบมาก

ดังนั้น ในการออกแบบสายอากาศที่มีพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เป็นไปตามจุดประสงค์ของการใช้งานสำหรับการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ต้องหาเทคนิคของการเพิ่มขนาดความกว้างของลำคลื่น และเพิ่มอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ พร้อมทั้งหาระเบียบวิธีเชิงเลขที่เหมาะสมเพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์หาผลเฉลยของสายอากาศ ในรูปแบบที่เราสนใจในการออกแบบ ซึ่งเทคนิคเบื้องต้นต่าง ๆ ของการออกแบบที่ได้ ทำการศึกษาได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคการปรับรูปร่างสายอากาศไดโพลเส้นตรงให้เป็นไดโพลโค้งเพื่อเพิ่มความกว้างของลำคลื่น พร้อมกันนี้ได้ มีการลดวงจรที่ปลายของไดโพลเข้ากับกระบวนตัวสะท้อน ทำให้เกิดอัตราขยายกำลังในทิศทางด้านหน้าที่สูงขึ้น สำหรับระเบียบวิธีเชิงเลขที่เลือกใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศคือ ระเบียบวิธีโมเมนต์ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงเลขที่ให้ผลเฉลยที่มีความแม่นยำสูง สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า แบบรูป การแผ่พลังงาน และอัตราขยายในทิศทางด้านหน้า เป็นต้น โดยเลือกรูปแบบการป้อน สัญญาณเข้าที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศ มีข้อดีคือ การป้อนสัญญาณสามารถป้อนได้ง่าย การแจกจ่ายกระแสของสายอากาศมีความสมดุล และสามารถสร้างสายอากาศให้มีโครงสร้าง ที่แข็งแรงได้ โดยง่าย ซึ่งจะได้สร้างสายอากาศต้นแบบแล้วทำการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ต่อไปในบทที่ 5

#### 4.2.2 ศึกษาคุณลักษณะสายอากาศไดโพลโค้งโดยใช้โปรแกรมจำลองแบบ SuperNEC

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลข SuperNEC เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใด ๆ ที่มีรูปทรงไม่เจาะจง รหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้จะต้องใส่เข้าไปนั้น คือ การสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวดเล็ก ๆ (wire) หรือพื้นผิว (surface) จำนวนมาก ซึ่งในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (electric field integral equation : EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (induced current) บนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด หรือ สนามที่ตกกระทบ (incident field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (magnetic field integral equation : MFIE) ในการหาค่าของกระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ สำหรับการกระตุ้นสามารถที่จะเป็นได้ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป (applied voltage source) หรือ คลื่นระนาบที่ตกกระทบ (incident plane wave) โปรแกรม SuperNEC



สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำและประจุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ระยะใกล้และไกล ภาคตัดขวางเป้าเรดาร์ (radar cross section : RCS) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า แอดมิตแตนซ์ (admittance) อัตรายายด้านหน้า และสภาพเจาะจงทิศทาง การใช้กำลังงาน (power budget) และการต่อเชื่อมร่วมระหว่างสายอากาศ (mutual coupling)

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก ดังนั้น สมการที่ใช้จึงเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้านี้เหมาะที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นผิวที่มีความหนาไม่มาก และไม่มีลักษณะเป็นตัวนำปิดที่ปิดได้ดีกว่าการใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก

การจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวดนั้น องค์ประกอบเบื้องต้นที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส SuperNEC คือ เซกเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น ซึ่งการกำหนดเซกเมนต์สำหรับการออกแบบนั้น เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะมีผลต่อความถูกต้องของผลเฉลย จำนวนของเซกเมนต์ควรจะมีค่าน้อยที่สุด แต่สามารถให้ผลเฉลยของปัญหาที่มีความถูกต้องแม่นยำ เพราะโปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนเซกเมนต์เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC ได้กำหนดจำนวนของเซกเมนต์ของการคำนวณเท่ากับ 45 เซกเมนต์ เนื่องจากเป็นจำนวนเซกเมนต์ที่ได้จากการวิเคราะห์การแจกแจงกระแสของสายอากาศ โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งทำให้แนวทางของการแจกแจงกระแสมีสถานะคู่เข้าสู่ความเสถียรภาพมากที่สุด

เซกเมนต์ของเส้นลวดจะถูกกำหนดโดยพิกัด (co-ordinate) ของจุดปลายทั้งสองของเซกเมนต์ และขนาดรัศมีของเส้นลวด การกำหนดความยาวเซกเมนต์ (segment length :  $\Delta$ ) จะสัมพันธ์กับค่าของความยาวคลื่น  $\lambda$  โดยปกติ  $\Delta$  ควรจะมีค่าน้อยกว่า  $0.1\lambda$  ที่ความถี่ปฏิบัติการสำหรับการออกแบบ ในบางครั้งอาจมีการใช้เซกเมนต์ที่ความยาวมากกว่านี้บนเส้นลวดที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ในขณะที่เซกเมนต์ที่สั้นกว่า เช่น  $0.05\lambda$  หรือน้อยกว่านี้ อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณเฉพาะตำแหน่งของสายอากาศ เพื่อต้องการดูผลตอบสนอง ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เฉพาะบริเวณนั้น ๆ ขนาดของเซกเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนโครงสร้างแบบจำลองสายอากาศ เนื่องจากกระแสจะถูกคำนวณที่ ตรงกลางของแต่ละเซกเมนต์ เซกเมนต์ที่มีขนาดสั้นมาก ๆ เช่น น้อยกว่า  $10^{-3}\lambda$  ไม่ควรนำมาใช้ เพราะความเหมือนกันขององค์ประกอบค่าคงที่และ โคลิไนซ์ของการกระจายของกระแส จะ ทำให้ผลเฉลยจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (wire radius :  $b$ ) ซึ่งสัมพันธ์กับ  $\lambda$  จะถูกจำกัด โดยการประมาณที่ใช้ในเคอร์เนล (kernel) ของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งมีการประมาณ 2 แบบด้วยกัน ที่ใช้ใน SuperNEC คือ เคอร์เนลแบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง สำหรับเคอร์เนลแบบเส้นลวดบางนั้น กระแสบนพื้นผิวของแต่ละเซกเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดนำไฟฟ้าเล็ก ๆ ของกระแสบนแกนเซกเมนต์ ส่วนในเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง กระแสจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอรอบพื้นผิวของเซกเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ในโปรแกรม SuperNEC จะบังคับเงื่อนไขกระแสและความหนาแน่นประจุตามแนวเส้นลวด ที่จุดเชื่อมต่อและที่ปลายเส้นลวด จากเงื่อนไขนี้ทำให้เซกเมนต์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลาย ถ้ามีการซ้อนทับกันเกิดขึ้นที่ปลายของแต่ละเซกเมนต์ ส่งผลให้โปรแกรมจำลองแบบ SuperNEC ไม่สามารถวิเคราะห์การไหลของกระแสจากเซกเมนต์หนึ่งไปยังเซกเมนต์อื่น ๆ ได้ ซึ่งเซกเมนต์จะเหมือนกับต่อกันเมื่อระยะห่างของจุดปลายของแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า  $10^{-3}$  เท่าของความยาวเซกเมนต์ที่สั้นที่สุด ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ ควรเชื่อมต่อเซกเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดพิกัดที่เหมือนกัน สำหรับข้อจำกัดอีกประการหนึ่งของการจำลองโครงสร้างด้วยตาข่ายเส้นลวด (wire-grid) ที่สร้างเป็นแผ่นระนาบ มีดังต่อไปนี้

1) เซกเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสระหว่างสองเซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้น ไม่สามารถจะแยกการไหลของกระแสจากปลายของเซกเมนต์ได้ เมื่อนำไปคำนวณเชิงเลข เซกเมนต์ที่ซ้อนทับกันจะมีผลให้เกิดสมการเมตริกซ์เอกฐาน (singular matrix equation)


2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเซกเมนต์ที่เชื่อมต่อกัน อาจจะมีผลทำให้ความแม่นยำลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า  $\Delta/b$  มีค่าน้อย ปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยการให้รัศมีของเส้นลวดลดลงตามลำดับ ตลอดหลายเซกเมนต์

3) จำเป็นที่จะต้องให้มีเซกเมนต์ที่จุดซึ่งมีการเชื่อมต่อกับโครงข่าย หรือแหล่งกำเนิดแรงดัน สำหรับช่องว่างการกระตุ้น ก็จำเป็นต้องมีเส้นลวดต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ต้องการสามารถระบุให้เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

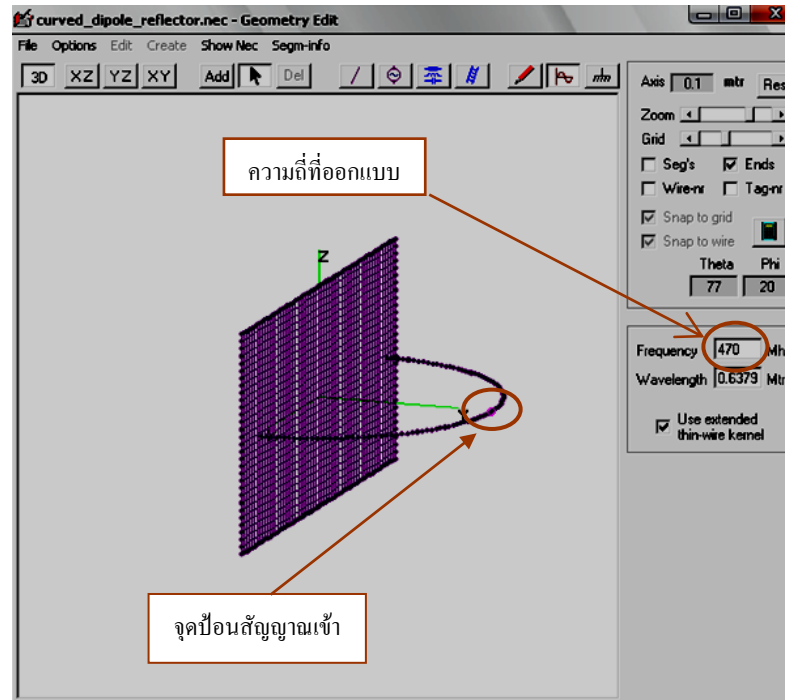
4) จำนวนเส้นลวดที่จะนำมาต่อที่จุดเชื่อมต่อใด ๆ นั้น ไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส SuperNEC

การจำลองแบบโดยใช้โปรแกรม SuperNEC และขั้นตอนของการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

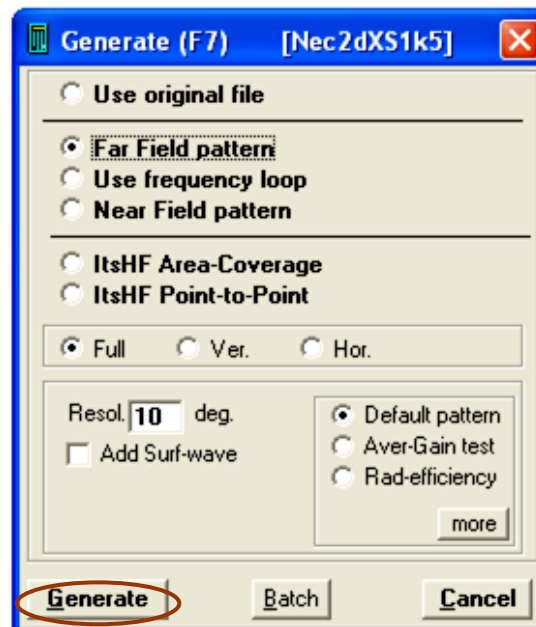
ขั้นตอนของการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศด้วยโปรแกรม SuperNEC นั้น เริ่มต้นด้วยการเลือกรูปแบบลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศให้สอดคล้องกับรูปร่างของสายอากาศที่มีให้ ซึ่งรูปร่างของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์เป็นไดโพลโค้ง ให้ทำการเลือกรูปแบบสายอากาศเป็นวงกลม (circular antenna) เพราะเมื่อทำการวาดรูปแบบของสายอากาศที่ทำการเลือกแล้ว ก็ตัดส่วนที่เกินขนาดความยาวของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ ซึ่งมีความยาวประมาณครึ่งความยาวคลื่น ( $\lambda/2$ ) โดยวงกลมที่ทำการวาดขึ้นมาจากรูปแบบของโปรแกรม SuperNEC มีความยาวของเส้นรอบวงกลม 1 รอบ เท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) สำหรับความถี่ปฏิบัติการที่ทำการวิเคราะห์หาผลเฉลย กำหนดไว้ที่ความถี่ย่าน UHF มีค่าเท่ากับ 470 MHz ซึ่งได้ค่าความยาวคลื่นจากการคำนวณของโปรแกรม เท่ากับ 0.638 เมตร ดังนั้น ขนาดความยาวของสายอากาศสำหรับการจำลองแบบใช้ขนาดประมาณครึ่งวงกลมหรือครึ่งความยาวคลื่น พร้อมทั้งทำการลัดวงจรที่ปลายทั้งสองข้างเข้ากับแผ่นระนาบตัวสะท้อนที่สร้างจากตาข่ายเส้นลวด ซึ่งความยาวของสายอากาศไดโพลโค้งมีค่าประมาณเท่ากับ 0.319 เมตร สำหรับการป้อนสัญญาณได้ใช้วิธีป้อนเข้าที่จุดกึ่งกลางของตัวไดโพลโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.1

จากนั้นทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC เพื่อดูพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า และแบบรูปการแผ่พลังงาน เป็นต้น โดยการเลือกไอคอนเจเนอเรท  ที่อยู่ด้านขวาของหน้าต่าง สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ต้องการของสายอากาศคือ  $Z_m = 50 \pm jX$  เพื่อให้เข้ากันกับสายส่งสัญญาณที่มีค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม ส่วนค่าที่เป็นจำนวนจินตภาพจะมีค่าเท่าใดก็ได้ แต่ควรจะมีค่าน้อยมาก ๆ เพื่อทำการปรับแต่งสายอากาศให้มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่เหมาะสมกับเครื่องส่งต่อไป หลังจาก que เลือกไอคอนเจเนอเรทแล้วจะปรากฏหน้าต่างเพื่อทำการเลือกรูปแบบของการแผ่พลังงาน จากนั้นให้เลือกรูปแบบที่เป็น Far Field pattern แล้วทำการกดปุ่ม **Generate** ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งผลของการจำลองแบบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ผลรวมของกระแสบนโครงสร้างของสายอากาศ เป็นต้น สามารถแสดงดังรูปที่ 4.3

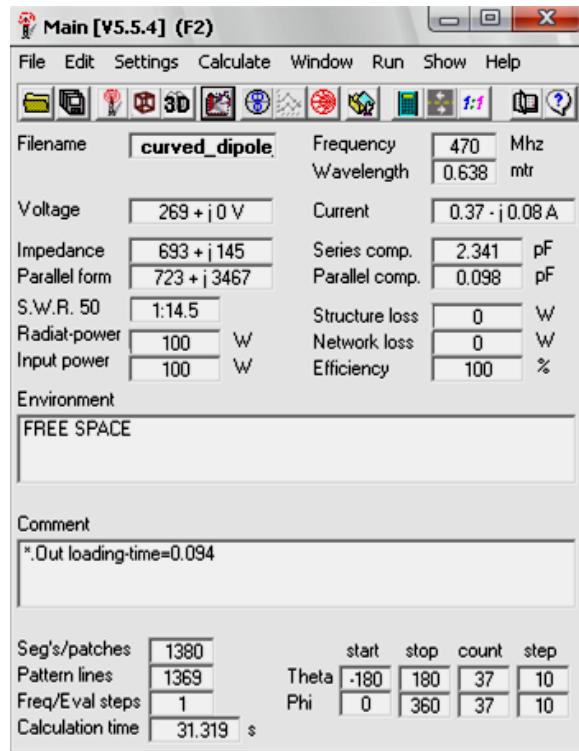
สำหรับการวิเคราะห์หาผลเฉลยแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ทำการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC โดยความยาวของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ได้ถูกวางในแนว  $\phi$  ของพิกัดทรงกระบอก และมีการป้อนสัญญาณเข้าที่จุดกึ่งกลางของไดโพลโค้ง ที่ตำแหน่ง  $\phi = \pi/2$  ซึ่งผลเฉลยแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้ในระนาบสนามไฟฟ้า (xy-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (yz-plane) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



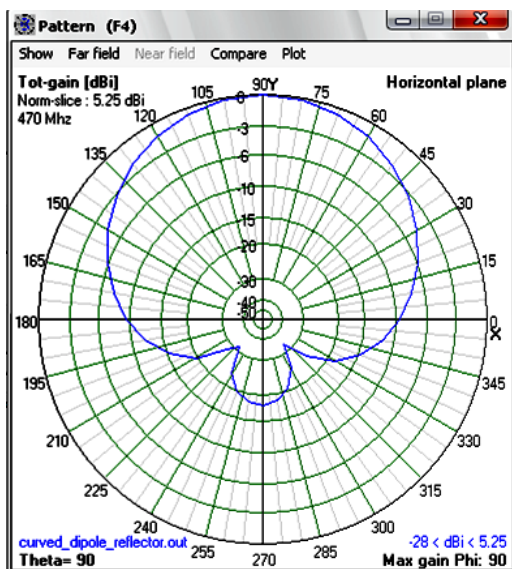
รูปที่ 4.1 โครงสร้างและขนาดของสายอากาศไดโพลโค้งติดตั้งวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อนที่จำลองด้วย SuperNEC



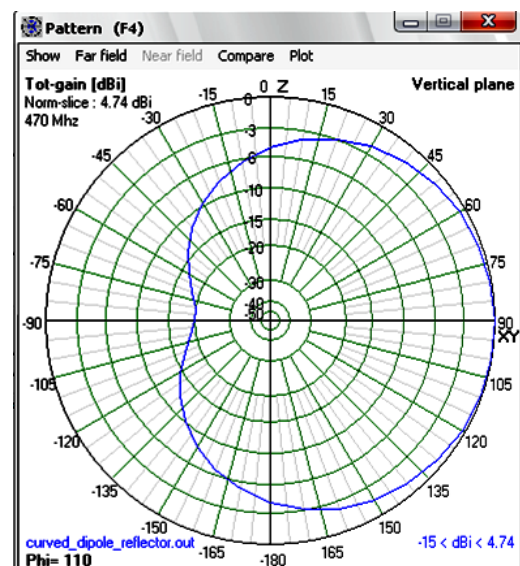
รูปที่ 4.2 หน้าต่างของการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC



รูปที่ 4.3 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการจำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC



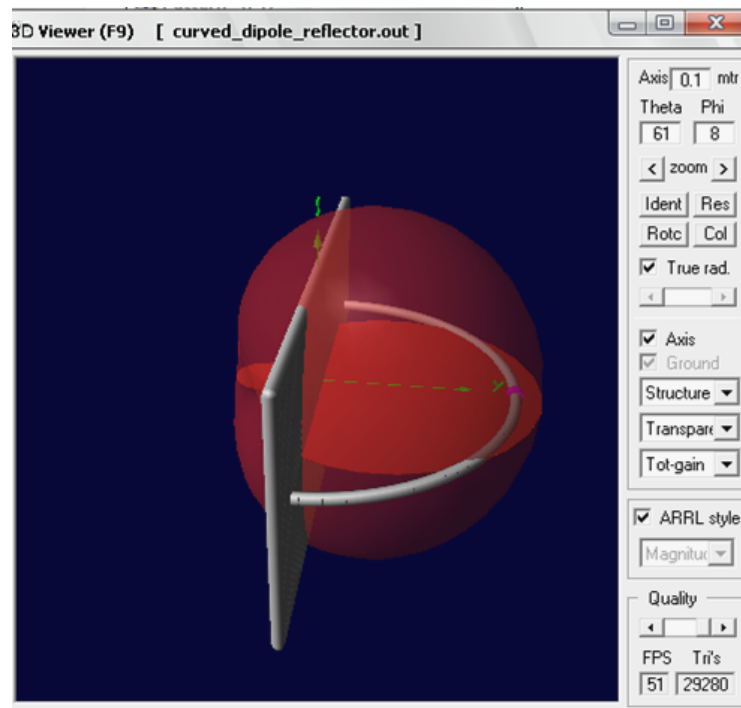
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่จำลองแบบด้วย SuperNEC

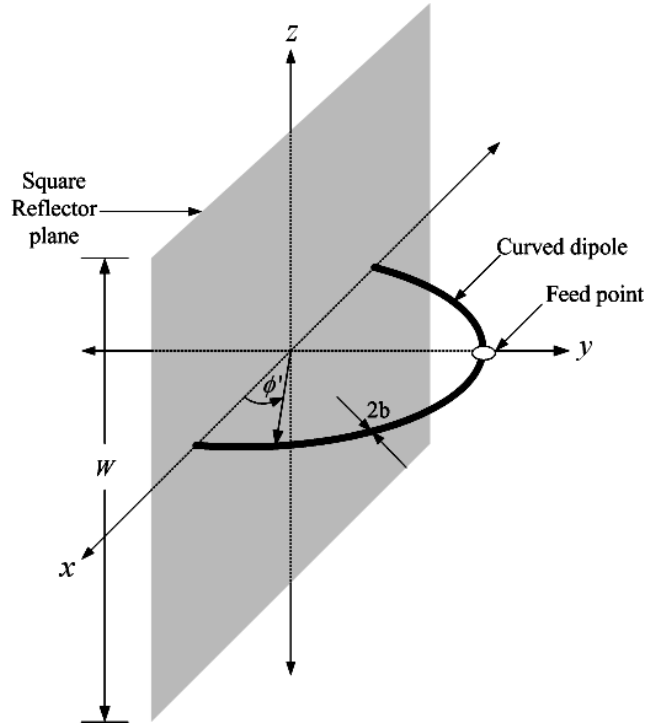
จากผลของการจำลองแบบเพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศตามรูปที่ 4.4 จะได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้าที่แผ่ออกไปในทิศทางด้านหน้าตามทิศทางแนวแกน  $y$  จะมีพลังงานสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทิศทางอื่น ๆ และจะสอดคล้องกันกับแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งถ้าคิดทิศทางในพิกัดทรงกระบอกจะอยู่ที่ตำแหน่ง  $\phi = \pi/2$  จะเป็นตำแหน่งของการป้อนสัญญาณเข้า ส่วนค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (half-power beamwidth : HPBW) ของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า จะมีค่าประมาณเท่ากับ 100 องศา และแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศที่จำลองแบบด้วยโปรแกรม SuperNEC สามารถแสดงในรูปแบบภาพ 3 มิติ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5



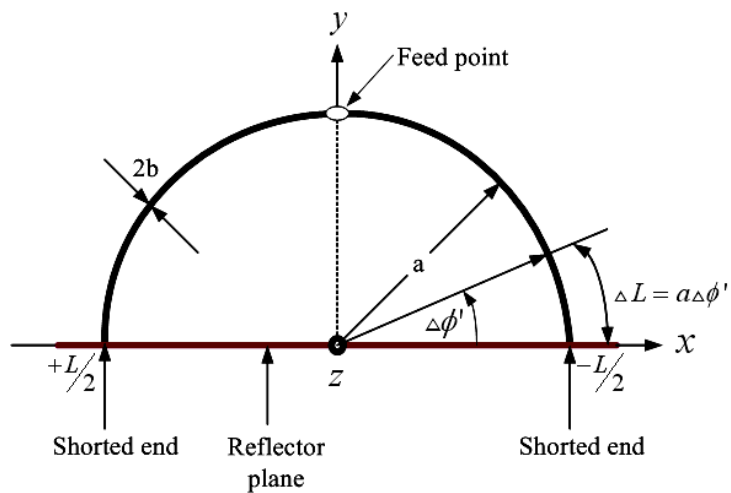
รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่จำลองแบบด้วย SuperNEC

โปรแกรม SuperNEC ได้รับการยอมรับว่าเป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศได้อย่างถูกต้องและแม่นยำสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 แต่สำหรับการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศด้วย SuperNEC นั้น ยังมีความผิดพลาดอยู่มาก เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม SuperNEC เอง จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิธีการแก้ไขปัญหาการคำนวณอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ผิดพลาดนี้ต่อไป

4.3 การใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์หาผลเฉลยของสายอากาศไดโพลโค้ง



(ก) โครงสร้างสายอากาศไดโพลโค้ง ที่ทำการวิเคราะห์



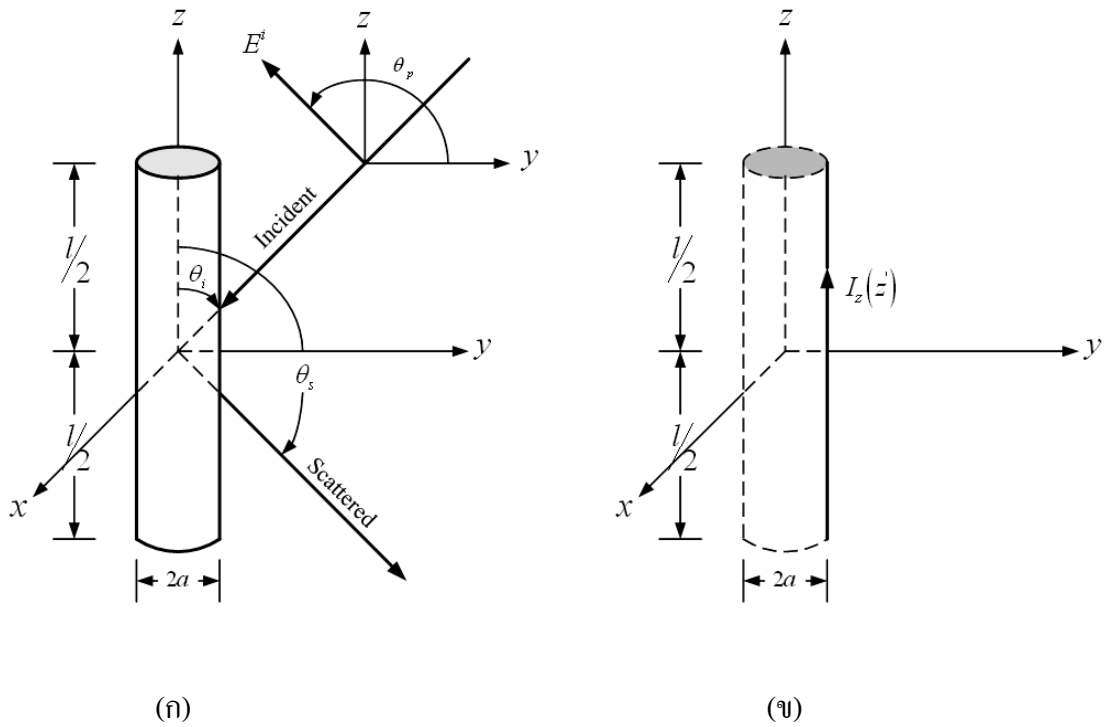
(ข) พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ

รูปที่ 4.6 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน





$$\overline{E}^t(\mathbf{r}) = \overline{E}^i(\mathbf{r}) + \overline{E}^s(\mathbf{r}) \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.7 (ก) คลื่นที่ตกกระทบและกระจายออกบนลวดตัวนำ

(ข) ลักษณะของกระแสสมมูล

เมื่อทำการย้ายจุดสังเกตมาอยู่ที่พื้นผิวของลวดตัวนำ  $r = r_s$  และลวดเป็นตัวนำสมบูรณ์ จะได้ว่า สนามไฟฟ้ารวมในแนวสัมผัสจะเป็นศูนย์ที่ผิวของลวดตัวนำ ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมในแนวสัมผัสบนพื้นผิวของลวดตัวนำในสมการ (4.1) สามารถแสดงได้เป็น

$$E_z^t(r = r_s) = E_z^i(r = r_s) + E_z^s(r = r_s) = 0 \quad (4.2)$$

หรือ

$$E_z^s(r = r_s) = -E_z^i(r = r_s) \quad (4.3)$$

โดยทั่วไปสนามไฟฟ้าที่กระจายออกไปถูกสร้างจากการเหนี่ยวนำของความหนาแน่นกระแสเชิงเส้น  $\bar{J}_s$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{E}^s(r) &= -j\omega\bar{A} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\nabla(\nabla\cdot\bar{A}) \\ &= -j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\left[k^2\bar{A} + \nabla(\nabla\cdot\bar{A})\right]\end{aligned}\quad (4.4)$$

โดยที่  $k^2 = \omega^2\mu\epsilon$

เนื่องจากการพิจารณาที่พื้นผิวของลวดตัวนำ ดังนั้น สมการ (4.4) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$E_z^s(r) = -j\frac{1}{\omega\mu\epsilon}\left(k^2 A_z + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2}\right) \quad (4.5)$$

ฟังก์ชันศักย์แม่เหล็กในสมการ (4.5) เมื่อพิจารณาที่พื้นผิวของลวดตัวนำ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S J_z \frac{e^{-jkR}}{R} dS' = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l/2}^{+l/2} \int_0^{2\pi} J_z \frac{e^{-jkR}}{R} a d\phi' dz' \quad (4.6)$$

จากสมการของกระแสทั้งหมดที่ผ่านพื้นที่ผิวที่กำหนด เขียนได้ดังสมการ (4.7)

$$I = \int_S \bar{J} \cdot d\bar{S} \quad (4.7)$$

ถ้ากำหนดให้ลวดมีรัศมีน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดความยาวคลื่น ( $a \ll \lambda$ ) จะทำให้ความหนาแน่นกระแส  $J_z$  ไม่เป็นฟังก์ชันของมุม  $\phi$  จากสมการ (4.7) เมื่อทำการพิจารณาที่จุดใด ๆ บนพื้นผิวของลวดตัวนำจะได้ว่า

$$2\pi a J_z = I_z(z') \Rightarrow J_z = \frac{1}{2\pi a} I_z(z') \quad (4.8)$$

โดยที่  $I_z(z')$  ถูกสมมุติให้เป็นกระแสชนิดเส้นสมมูล (equivalent filament line-source current) ที่วางตัวอยู่บนผิวของลวดตัวนำเป็นระยะทาง  $\rho = a$  จากแนวแกน  $z$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) ดังนั้น เมื่อทำการแทนสมการ (4.8) ลงในสมการ (4.6) จะได้ว่า

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-1/2}^{+1/2} \left[ \frac{1}{2\pi a} I_z(z') \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{R} a d\phi' \right] dz' \quad (4.9)$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (4.10)$$

เมื่อกำหนดให้  $x = \rho \cos(\phi)$ ,  $x' = \rho' \cos(\phi')$ ,  $y = \rho \sin(\phi)$ ,  $y' = \rho' \sin(\phi')$ ,  $\rho' = a$  สมการ (4.10) สามารถเขียนได้เป็น

$$R = \sqrt{\rho^2 + a^2 - 2\rho a \cos(\phi - \phi') + (z - z')^2} \quad (4.11)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ระยะทางในแนวรัศมี (radial distance) ไปยังจุดสังเกต และ  $a$  คือ รัศมีของลวดตัวนำ

เนื่องจากจุดสังเกตไม่เป็นฟังก์ชันของมุม  $\phi$  เพราะเกิดความสมมาตรในการกระจายของสนามไฟฟ้าบนลวดตัวนำ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะพิจารณาที่มุม  $\phi$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น เมื่อพิจารณาที่พื้นผิวของลวดตัวนำ  $\rho = a$  สมการ (4.9) และ (4.11) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} A_z(\rho = a) &= \mu \int_{-1/2}^{+1/2} I_z(z') \left( \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} d\phi' \right) dz' \\ &= \mu \int_{-1/2}^{+1/2} I_z(z') G(z, z') dz' \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\text{โดยที่ } G(z, z') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} d\phi' \quad (4.13)$$

$$\text{และ } R(\rho = a) = \sqrt{4a^2 \sin^2\left(\frac{\phi'}{2}\right) + (z - z')^2} \quad (4.14)$$

ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่กระจายออกไปตามสมการ (4.5) เมื่อสังเกตที่พื้นผิวของลวดตัวนำ  $\rho = a$  โดยการแทนสมการ (4.12) ลงในสมการ (4.5) จะได้ว่า

$$E_z^s(\rho = a) = -j \frac{1}{\omega\epsilon} \left( k^2 + \frac{d^2}{dz^2} \right) \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') G(z, z') dz' \quad (4.15)$$

จากสมการ (4.3) สามารถเขียนสมการ (4.15) ใหม่เป็น

$$-j \frac{1}{\omega\epsilon} \left( \frac{d^2}{dz^2} + k^2 \right) \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') G(z, z') dz' = -E_z^i(\rho = a) \quad (4.16)$$

$$\text{หรือ } \left( \frac{d^2}{dz^2} + k^2 \right) \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') G(z, z') dz' = -j\omega\epsilon E_z^i(\rho = a) \quad (4.17)$$

จากสมการ (4.17) สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') \left[ \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) G(z, z') \right] dz' = -j\omega\epsilon E_z^i(\rho = a) \quad (4.18)$$

โดยที่  $G(z, z')$  ได้แสดงไว้แล้วตามสมการ (4.13)

จากสมการ (4.18) สมการนี้จะถูกเรียกว่า สมการเชิงอินทิกรัลของพอดคลิงตัน ซึ่งสมการดังกล่าว จะถูกนำมาใช้ในการหากระแสชนิดเส้นสมมูล  $I_z(z')$  และความหนาแน่นกระแส  $J_z$  บนลวด

ตัวนำ เมื่อทราบค่าของสนามไฟฟ้าที่เข้ามาตกกระทบบนพื้นผิวของลวดตัวนำ ถ้าสมมติให้ลวดตัวนำมีรัศมีน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดความยาวคลื่น ( $a \ll \lambda$ ) จากสมการ (4.13) จะได้ว่า

$$G(z, z') = G(R) = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \quad (4.19)$$

สมการ (4.18) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้น ได้ดังนี้

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R^5} \left[ (1 + jkR)(2R^2 - 3a^2) + (kaR)^2 \right] dz' = -j\omega \epsilon E_z^i(\rho = a) \quad (4.20)$$

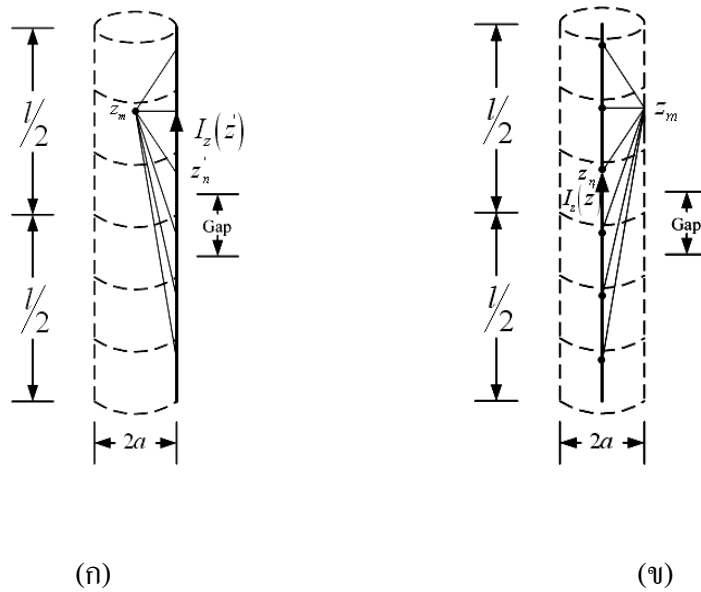
โดยที่จุดสังเกตอยู่บนจุดศูนย์กลางของเส้นลวดตามแนวแกน ( $\rho = 0$ )

$$R = \sqrt{a^2 + (z - z')^2} \quad (4.21)$$

ในสมการ (4.18) หรือ (4.20) ค่าของ  $I_z(z')$  สามารถถูกแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 (ข)

ด้วยวิธีการจัดวาง กระแสนี้สามารถหาได้โดยการใช้เงื่อนไขขอบเขตกระทำที่แต่ละจุดบนพื้นผิวของลวดตัวนำ จากนั้นจะใช้วิธีโมเมนต์ มาทำการแก้สมการเพื่อหาค่ากระแส  $I_z(z')$  นี้ออกมา

โดยทั่วไปแล้วจะทำการเลือกจุดจัดวาง (matching point) ให้อยู่ภายในลวดตัวนำตามแนวแกนดังรูปที่ 4.8 (ก) ซึ่งกระแสจะไหลอยู่ที่พื้นผิวของลวดตัวนำ แต่ในทำนองเดียวกันรูปแบบในรูปที่ 4.8 (ก) สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบตามรูปที่ 4.8 (ข) ได้ เมื่อกระแสถูกสมมุติให้อยู่ภายในลวดตัวนำตามแนวแกนและจุดจัดวางถูกเลือกอยู่ที่พื้นผิวของลวดตัวนำ ซึ่งทั้งสองรูปแบบสามารถนำไปใช้หากระแสเชิงเส้นสมมูลได้เหมือนกัน



รูปที่ 4.8 (ก) กระแสที่ไหลอยู่บนพื้นผิวของลวดตัวนำ  
(ข) กระแสที่ไหลอยู่ภายในลวดตัวนำ

สำหรับการพิจารณาสมการเชิงอินทิกรัลของแอสเลน นั้น จากรูปที่ 4.7 (ก) ให้ทำการสมมติว่าความยาวของลวดตัวนำมีค่ามากกว่ารัศมีของลวดตัวนำมาก ( $l \gg a$ ) และรัศมีมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นมาก ( $a \ll \lambda$ ) ซึ่งจะทำให้ผลกระทบอันเนื่องมาจากพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของลวดตัวนำมีค่าน้อยมาก จนสามารถไม่นำมาคิดได้ ดังนั้น จากการใช้เงื่อนไขสำหรับลวดตัวนำสมบูรณ์จะทำให้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสเป็นศูนย์ที่ผิวของลวดตัวนำ และกระแสที่จุดปลายของลวดตัวนำเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้น จะมีเพียงความหนาแน่นกระแสไหลตามแนวแกนของลวดตัวนำเท่านั้น ซึ่งก็คือ แนวแกน  $z$  จากสมการ (4.4) จะได้ว่า

$$E_z' = -j\omega A_z - j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left[ \frac{d^2 A_z}{dz^2} + \omega^2 \mu\epsilon A_z \right] \quad (4.22)$$

เนื่องจากสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสจะเป็นศูนย์ที่พื้นผิวของลวดตัวนำ ดังนั้น สมการ (4.22) สามารถแสดงได้เป็น

$$\frac{d^2 A_z}{dz^2} + k^2 A_z = 0 \quad (4.23)$$

โดยที่  $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$

พิจารณาความหนาแน่นกระแสที่ไหลในลวดตัวนำมีความสมมาตรกัน  $[J_z(z') = J_z(-z')]$  ซึ่งทำให้ฟังก์ชันศักย์แม่เหล็กเกิดความสมมาตรตามไปด้วย  $[A_z(z') = A_z(-z')]$  ดังนั้น เมื่อทำการแก้สมการ (4.23) จะได้ว่า

$$A_z(z) = -j\sqrt{\mu\epsilon} [B_1 \cos(kz) + C_1 \sin(k|z|)] \quad (4.24)$$

โดยที่  $B_1$  และ  $C_1$  คือ ค่าคงที่ และจากที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้นว่าฟังก์ชันศักย์แม่เหล็กเกิดความสมมาตรกัน ดังนั้น ในพจน์สุดท้ายของสมการ (4.24) จึงต้องใส่เครื่องหมายค่าสัมบูรณ์ให้กับ  $z$  ซึ่งจะทำให้ค่าของ  $\sin$  มีค่าเท่ากันไม่ว่าค่า  $z$  จะมีค่าเป็นบวกหรือเป็นลบ จากฟังก์ชันศักย์แม่เหล็กสำหรับกระแสที่ไหลบนลวดตัวนำ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int I(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (4.25)$$

กำหนดให้สมการ (4.24) มีค่าเท่ากับสมการ (4.25) จะได้ว่า

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dz' = -j\sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} [B_1 \cos(kz) + C_1 \sin(k|z|)] \quad (4.26)$$

จากสมการ (4.26) สมการนี้จะถูกเรียกว่า สมการเชิงอินทิกรัลของแฮลเลน สำหรับลวดตัวนำสมมาตร ส่วนค่าคงที่  $C_1$  จะถูกกำหนดจากแรงดันที่ใช้ในการป้อนกำลังให้กับลวดตัวนำ ( $C_1 = V_i/2$ ) และ  $B_1$  จะถูกกำหนดจากเงื่อนไขขอบเขตที่ต้องการให้กระแสเป็นศูนย์ที่จุดปลายของลวดตัวนำ

สำหรับรูปแบบของตัวจ่ายกำลังงาน โดยทั่วไปแล้วจะมีรูปแบบของตัวจ่ายกำลังงานที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศอยู่ 2 รูปแบบด้วยกัน คือ รูปแบบช่องว่างเคลด้า (delta-gap excitation) และรูปแบบของกระแสวงแหวนแม่เหล็กสมมูล (equivalent magnetic ring current หรือ magnetic frill generator) ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้รูปแบบของตัวจ่ายกำลังงานแบบช่องว่างเคลด้าในการวิเคราะห์สายอากาศ ดังนั้น จึงขอกกล่าวถึงรูปแบบของตัวจ่ายกำลังงานแบบช่องว่างเคลด้าเท่านั้น

รูปแบบตัวจ่ายกำลังงานแบบช่องว่างเคลด้านี้ถือเป็นรูปแบบที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศมากที่สุดและมีวิธีการที่ง่ายที่สุดด้วย แต่วิธีการนี้จะมีความถูกต้องมากที่สุดก็ต่อเมื่อความกว้างของช่องว่างจะต้องมีค่าน้อย ๆ ดังนั้น เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่มีความถูกต้องแม่นยำ ในการกำหนดความกว้างของแถบควรกำหนด ให้มีค่าน้อย ๆ โดยเฉพาะการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

การใช้รูปแบบของตัวจ่ายกำลังงานแบบช่องว่างเคลด้า จะสมมุติให้แรงดันที่ป้อนให้กับตัวสายอากาศมีค่าคงที่ ( $V_i$ ) ในช่วงความกว้างของช่องว่าง ส่วนบริเวณอื่น ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่เข้ามา ( $E_z^i(\rho = a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, -l/2 \leq z \leq +l/2)$ ) ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงดันที่ป้อนให้กับตัวสายอากาศ จะมีค่าคงที่ตลอดช่วงความกว้างของช่องว่างและมีค่าเป็นศูนย์ที่บริเวณอื่น ๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_z^i = \begin{cases} V_i & , -\frac{\Delta}{2} \leq z' \leq \frac{\Delta}{2} \\ \Delta & \\ 0 & , \text{ ณ ตำแหน่งอื่น} \end{cases} \quad (4.27)$$

โดยที่  $V_i$  คือ แรงดันที่ป้อนให้กับสายอากาศ

$\Delta$  คือ ช่วงความกว้างของช่องว่าง ( $\Delta = l/N$ )

$N$  คือ จำนวนเซกเมนต์ที่ทำการกำหนด

การแจกแจงกระแส ของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน สามารถใช้สมการเชิงอินทิกรัลของพอคลิงตัน โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ในการหาผลเฉลยของปัญหา และเทคนิคการจับวาง (point-matching (collocation) method) (Thiele, 1966) (Balanis, 1982) ถูกนำมาใช้สำหรับหาความหนาแน่นของกระแสที่ไม่ทราบค่า โดยการกระจายเป็นแบบอนุกรมมีขอบเขต วิธีการลดรูปสมการเชิงเส้นที่ซับซ้อนมาเป็นสมการเมตริกซ์และการทำเมตริกซ์ผกผันเพื่อหาผลเฉลยจะเหมาะสมอย่างยิ่งกับการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือ และยิ่งกว่านั้นเมตริกซ์ผกผันนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวแทนของระบบการคำนวณได้อีกด้วย นั่นคือ เราสามารถหา



ทุก ๆ ผลตอบสนองที่เกิดจากการกระตุ้นแบบใด ๆ ได้ โดยใช้เมตริกซ์ผกผันเดิมซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวแทนของระบบนั้น เพื่อวิเคราะห์หาค่ากระแสที่กระจายบนผิวและใช้ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

จากข้อดีของสมการเชิงอินทิกรัลของพอลลิงตัน ที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการเลือกใช้สมการเชิงอินทิกรัลพอลลิงตัน สำหรับวิเคราะห์หาผลเฉลยโครงสร้างของสายอากาศและหาสนามรวม โดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ในพื้นที่อากาศว่าง โดยทำการกำหนดให้ลวดมีรัศมีน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดความยาวคลื่น ( $b \ll \lambda$ ) สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(\phi') \left( \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + k^2 \right) \frac{e^{-jkR}}{R} d\phi' = j4\pi\omega\epsilon_0 E_\phi^i \quad (4.28)$$

โดยที่

$$R = \sqrt{(\rho - \rho')^2 + (\phi - \phi')^2 + (z - z')^2} \quad (4.29)$$

เนื่องจาก

$$\frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) = \frac{\partial^2}{\partial \phi'^2} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) \quad (4.30)$$

ลดรูปสมการ (4.28) สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(\phi') \frac{\partial^2}{\partial \phi'^2} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) d\phi' + k^2 \int_{-l/2}^{+l/2} I(\phi') \frac{e^{-jkR}}{R} d\phi' = j4\pi\omega\epsilon_0 E_\phi^i \quad (4.31)$$

ทำการอินทิเกรตเทอมแรกของสมการ (4.31) ด้วยวิธีการอินทิเกรตทีละส่วน (partial integration) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$u = I(\phi') \quad (4.32)$$

$$du = \frac{dI(\phi')}{d\phi'} d\phi' \quad (4.43)$$

$$dv = \frac{\partial^2}{\partial \phi'^2} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) d\phi' = \frac{\partial}{\partial \phi'} \left[ \frac{\partial}{\partial \phi'} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) \right] d\phi' \quad (4.44)$$

$$v = \frac{\partial}{\partial \phi'} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) \quad (4.45)$$

แทนสมการ (4.32) ถึง (4.45) ลงในเทอมแรกของสมการ (4.31) สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(\phi') \frac{\partial^2}{\partial \phi'^2} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) d\phi' = I(\phi') \left[ \frac{\partial}{\partial \phi'} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) \right]_{-l/2}^{+l/2} - \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{\partial}{\partial \phi'} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) \frac{dI(\phi')}{d\phi'} d\phi' \quad (4.46)$$

เนื่องจาก กำหนดให้กระแสที่ปลายทั้งสองของลวดตัวนำเป็นศูนย์ เราต้องการให้กระแสที่ปลายแต่ละด้านหายไป นั่นคือ  $I_\phi(\phi' = +l/2) = I_\phi(\phi' = -l/2) = 0$  ดังนั้น สมการ (4.46) สามารถลดรูปได้คือ

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(\phi') \frac{\partial^2}{\partial \phi'^2} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) d\phi' = - \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{\partial}{\partial \phi'} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) d\phi' \frac{dI(\phi')}{d\phi'} \quad (4.47)$$

จากนั้นทำการอินทิเกรตสมการ (4.47) ด้วยวิธีการอินทิเกรตทีละส่วน จะได้ว่า

$$u = \frac{dI(\phi')}{d\phi'} \quad (4.48)$$

$$du = \frac{d^2 I(\phi')}{d\phi'^2} d\phi' \quad (4.49)$$

$$dv = \frac{\partial}{\partial \phi'} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) d\phi' \quad (4.50)$$

$$v = \frac{e^{-jkR}}{R} \quad (4.51)$$

แทนสมการ (4.48) ถึง (4.51) ลงในสมการที่ (4.47) สามารถเขียนสมการ ได้ดังนี้

$$\int_{-l/2}^{+l/2} I(\phi') \frac{\partial^2}{\partial \phi'^2} \left( \frac{e^{-jkR}}{R} \right) d\phi' = - \left. \frac{dI(\phi')}{d\phi'} \frac{e^{-jkR}}{R} \right|_{-l/2}^{+l/2} + \int_{-l/2}^{+l/2} \frac{d^2 I(\phi')}{d\phi'^2} \frac{e^{-jkR}}{R} d\phi' \quad (4.52)$$

เมื่อแทนค่าสมการ (4.52) ลงในเทอมแรกของสมการ (4.31) จะลดรูปสมการได้เป็น

$$- \left. \frac{dI(\phi')}{d\phi'} \frac{e^{-jkR}}{R} \right|_{-l/2}^{+l/2} + \int_{-l/2}^{+l/2} \left[ k^2 I(\phi') + \frac{d^2 I(\phi')}{d\phi'^2} \right] \frac{e^{-jkR}}{R} d\phi' = j4\pi\omega\epsilon_0 E_\phi^t \quad (4.53)$$

จากสมการ (4.53) สำหรับเส้นลวดที่มีขนาดเล็ก กระแสของแต่ละองค์ประกอบ (element) ของสายอากาศ สามารถประมาณได้ด้วยการกำหนดฟังก์ชันฐานประเภทฟังก์ชันแบบโคไซน์รวมขอบเขตของโหนดคู่ ดังนั้น กระแสที่จำนวน  $n$  อิเล็กเมนต์ จะสามารถเขียนในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ (Fourier series expansion) ดังนี้

$$I_n(\phi') = \sum_{m=1}^M I_{nm} \cos \left[ (2m-1) \frac{\pi\phi'}{l_n} \right] \quad (4.54)$$

โดยที่  $I_{nm}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสเชิงซ้อน (complex current coefficient) ของโหนด  $m$  บนองค์ประกอบ  $n$  และ  $l_n$  คือ ค่าความยาวขององค์ประกอบที่สอดคล้องของ  $n$  ตามลำดับดำเนินการอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งและอันดับที่สอง ของสมการที่ (4.54) และแทนค่าสมการ (4.54) ในสมการ (4.53) สามารถลดรูปสมการได้เป็น

$$\sum_{m=1}^M I_{nm} \left\{ \frac{(2m-1)}{l_n} \sin \left[ (2m-1) \frac{\pi \phi'_n}{l_n} \right] \frac{e^{-jkR}}{R} \right\}_{-l_n/2}^{+l_n/2} + \left[ k^2 - \frac{(2m-1)^2 \pi^2}{l_n^2} \right] \times \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} \cos \left[ (2m-1) \frac{\pi \phi'_n}{l_n} \right] \frac{e^{-jkR}}{R} d\phi'_n \Bigg\} = j4\pi\omega\varepsilon_0 E_\phi^i \quad (4.55)$$

เนื่องจากฟังก์ชันโคไซน์ (cosine function) เป็นฟังก์ชันคู่ สามารถลดรูปสมการ (4.55) ได้โดยการอินทิเกรตขอบเขตความยาวในช่วง  $0 \leq \phi' \leq l/2$  ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_\phi^i = \frac{1}{j4\pi\omega\varepsilon_0} \sum_{m=1}^M I_{nm} \left\{ (-1)^{m+1} \frac{(2m-1)\pi}{l_n} G_2 \left( \rho, \rho', \phi, \phi' / z, \frac{l_n}{2} \right) + \left[ k^2 - \frac{(2m-1)^2 \pi^2}{l_n^2} \right] \times \int_0^{l_n/2} G_2 \left( \rho, \rho', \phi, \phi' / z, \phi'_n \right) \cos \left[ \frac{(2m-1)\pi \phi'_n}{l_n} \right] d\phi'_n \right\} \quad (4.56)$$

โดยที่

$$G_2 \left( \rho, \rho', \phi, \phi' / z, \phi'_n \right) = \frac{e^{-jkR_-}}{R_-} + \frac{e^{-jkR_+}}{R_+} \quad (4.57)$$

$$R_\pm = \sqrt{(a-a')^2 + (z-z')^2 + b^2 + (\phi \pm \phi')^2} \quad (4.58)$$

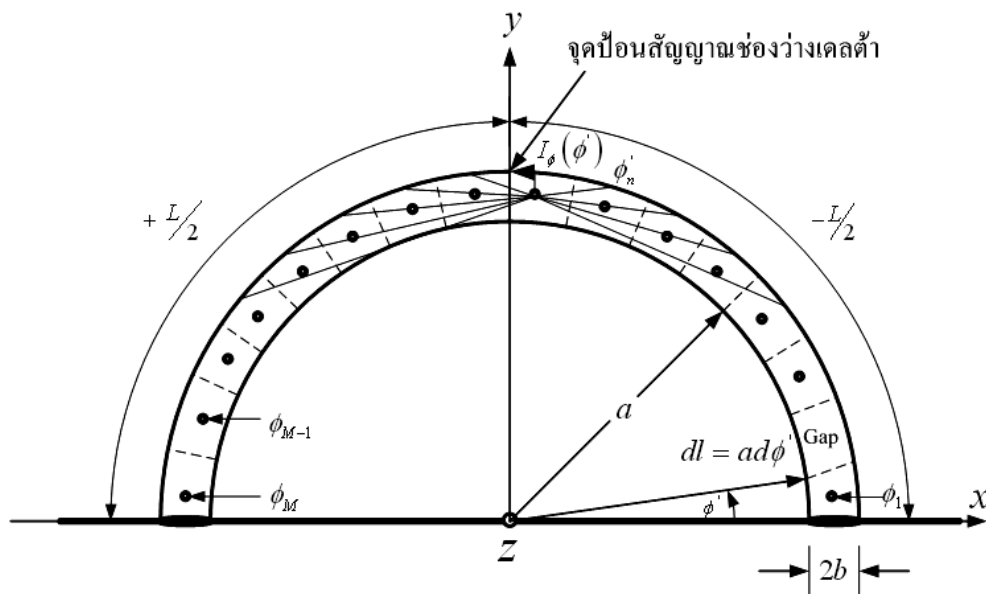
โดยที่  $n$  คือ ค่าจำนวนเต็ม มีค่าเท่ากับ  $1, 2, 3, \dots, N$

$N$  คือ จำนวนองค์ประกอบทั้งหมดของสายอากาศ

$R_\pm$  คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของรัศมีขององค์ประกอบหนึ่งไปยังจุดศูนย์กลางขององค์ประกอบหนึ่ง

จากสมการ (4.55) จะใช้วิธีการโมเมนต์ ในการหาค่าสัมประสิทธิ์กระแสเชิงซ้อน  $I_{nm}$  โดยจะทำการแบ่งแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศออกเป็นเซกเมนต์ ซึ่งกำหนดให้แต่ละองค์ประกอบมีจำนวนเซกเมนต์ทั้งหมด  $M$  เซกเมนต์ และกำหนดจุดจัดวางให้อยู่ที่จุดกึ่งกลางของแต่ละเซกเมนต์ในแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ

จากวิธีการจัดวาง จะใช้เงื่อนไขขอบเขตกระทำกับแต่ละจุดจัดวางในแต่ละเซกเมนต์ของแต่ละองค์ประกอบ โดยกำหนดให้สนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ในแต่ละจุดจัดวางของแต่ละองค์ประกอบ ยกเว้นเซกเมนต์ที่ได้รับการป้อนกำลังงาน ดังนั้น องค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกำลังงาน สนามไฟฟ้าจะเกิดการจางหายที่จุดจัดวางในแต่ละเซกเมนต์ทั้งหมด  $M-1$  จุด ส่วนองค์ประกอบอื่น ๆ สนามไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ที่จุดจัดวางในแต่ละเซกเมนต์ทั้งหมด  $M$  จุด ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การแบ่งเซกเตอร์และการกำหนดจุดจัดวางของสายอากาศ

สมการอินทิกรัลของสมการ (4.56) จะถูกต้องสำหรับแต่ละองค์ประกอบ และสมมติให้  $M$  ของโหมดกระแสของแต่ละองค์ประกอบจะเหมือนกัน ใช้สมการ (4.56) เพื่อหาผลเฉลยโดยระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งกำหนดให้แต่ละองค์ประกอบ ถูกแบ่งออกเป็นส่วนเล็ก ๆ จำนวน  $M$  เซกเมนต์ และจะได้สมการทั้งหมดจำนวน  $M$  สมการบนองค์ประกอบที่มีการป้อน ซึ่งจะมีการนอร์มัลไลซ์ค่าของกระแสในโหมด  $M$  ที่ตำแหน่งจุดป้อนกำลังงาน ( $\phi' = \pi/2$ ) ขององค์ประกอบขับ (driven element) เขียนสมการได้ดังนี้

$$\sum_{m=1}^M I_{nm}(\phi' = \pi/2) \Big|_{n=N} = 1 \quad (4.59)$$

เนื่องจากการวิเคราะห์ที่ได้ทำการเลือกใช้รูปแบบตัวจ่ายกำลังงานแบบช่องว่างเคลต้า ดังนั้น เซกเมนต์ที่ได้รับการป้อนกำลังงานจะมีค่าของสนามไฟฟ้าเท่ากับค่าของสนามไฟฟ้าในช่องว่างใด ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ในแต่ละโหมคระหว่าง เซกเมนต์ในองค์ประกอบเดียวกันและความสัมพันธ์ในแต่ละโหมคระหว่างเซกเมนต์ ในองค์ประกอบที่ต่างกัน ซึ่งการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวจะทำให้เกิดระบบสมการเชิงเส้นขึ้นมา

สำหรับขั้นตอนการสร้างระบบสมการเชิงเส้น จะเริ่มพิจารณาความสัมพันธ์จาก องค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน จากนั้นจะทำการพิจารณาความสัมพันธ์ในองค์ประกอบ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกำลังงาน ซึ่งในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเพื่อทำการอธิบายถึงรูปแบบของระบบ สมการเชิงเส้นสำหรับ โครงสร้างของสายอากาศที่มีองค์ประกอบที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน และ ตัวจ่ายกำลังงาน อย่างละ 1 องค์ประกอบ โดยกำหนดให้แต่ละองค์ประกอบถูกแบ่งออกเป็น 2 เซกเมนต์ และมีโหมคของกระแสแต่ละองค์ประกอบทั้งหมด 2 โหมค ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{15} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} & B_{25} & B_{26} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} & B_{35} & B_{36} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} & B_{45} & B_{46} \\ B_{51} & B_{52} & B_{53} & B_{54} & B_{55} & B_{56} \\ B_{61} & B_{62} & B_{63} & B_{64} & B_{65} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_i/\Delta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

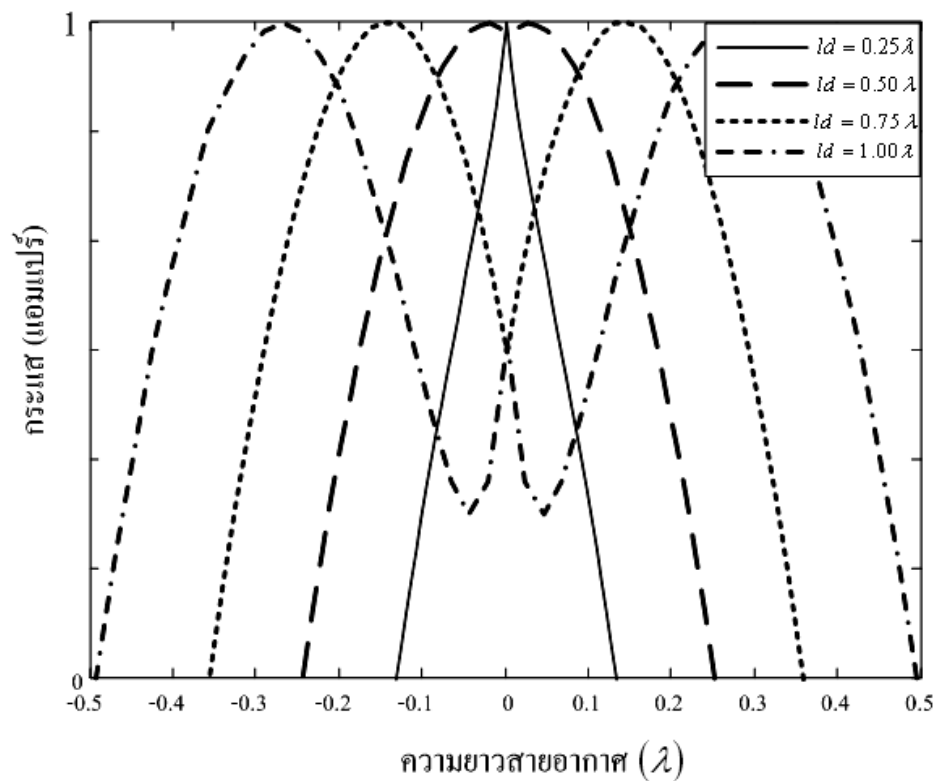
เมื่อทำการเปรียบเทียบสมการ (4.60) กับสมการ (4.56) จะพบว่า

$$[B] = \frac{1}{-j4\pi\omega\epsilon_0} \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{m=1}^M \left\{ (-1)^{m+1} \frac{(2m-1)\pi}{l_n} G_2 \left( \rho, \rho', \phi, \phi' / z, \frac{l_n}{2} \right) \right. \right. \\ \left. \left. + \left[ k^2 - \frac{(2m-1)^2 \pi^2}{l_n^2} \right] \times \int_0^{l_n/2} G_2 \left( \rho, \rho', \phi, \phi' / z, \phi'_n \right) \cos \left[ \frac{(2m-1)\pi\phi'_n}{l_n} \right] d\phi'_n \right\} \right\} \quad (4.61)$$

$$[I] = \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{m=1}^M I_{nm} \right\} \quad (4.62)$$

$$E_{\phi}^i = V_i / \Delta \quad (4.63)$$

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ จะได้ผลเฉลยของการแจกแจงรูปกระแสของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นผลเฉลยที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของสายอากาศไดโพลโค้ง ประกอบด้วยความยาว  $0.25\lambda$   $0.50\lambda$   $0.75\lambda$  และ  $1.00\lambda$  การแจกแจงรูปของกระแสแบบนี้ ได้สมมุติว่าสายอากาศเป็นชนิดป้อนตรงกลาง (center-fed) และที่ปลายทั้งสองด้านของสายอากาศจะไม่มีกระแสเกิดขึ้น ที่ตำแหน่งของ  $\phi' = \pm l/2$  จากการกำหนดลักษณะฟังก์ชันการกระจายของสนามไฟฟ้า ในบทที่ 3 ว่ากระแสไฟฟ้าบนสายอากาศเส้นลวดจะมีรูปแบบเป็นสัญญาณรูปไซน์โดยที่ปลายทั้งสองจะมีค่าเป็นศูนย์ จากผลเฉลยของการวิเคราะห์สายอากาศ จะเห็นได้ว่าความยาวที่เหมาะสมในการออกแบบจะอยู่ที่ประมาณ  $0.50\lambda$  เนื่องจากมีลักษณะของการแจกแจงรูปของกระแสที่มีการป้อนกระแสสูงสุดที่เวลาใด ๆ บนตัวไดโพล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของกระแสจะเป็นฟังก์ชันของเวลา



รูปที่ 4.10 การแจกแจงรูปกระแสของสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรีที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน  
ที่มีความยาวของสายอากาศไดโพลโค้ง  $0.25\lambda$   $0.50\lambda$   $0.75\lambda$  และ  $1.00\lambda$

จากผลเฉลยการแจกแจงรูปกระแสของสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เห็นได้ว่า จากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ โดยมีการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของสายอากาศ สามารถนำผลเฉลยที่ได้ไปวิเคราะห์หาผลเฉลยของอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ โดยเป็นค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วด้านเข้าของสายอากาศ สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีการดังนี้ คือเป็นอัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่ขั้วของสายอากาศ หรืออีกวิธีหนึ่ง เป็นอัตราส่วนขององค์ประกอบที่เหมาะสมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่จุดหนึ่ง ๆ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ ในลักษณะอัตราส่วนของแรงดันกับกระแสที่กระจายบนผิวของสายอากาศ โดยสมมติให้ขนาดของแรงดันด้านเข้าของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้น จะทำให้เกิดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$Z_A = \frac{V_i}{I_n(\phi')} \quad (4.64)$$

โดยที่  $V_i$  คือ แรงดันด้านเข้าของสายอากาศ มีหน่วยเป็น โวลต์

$I_n(\phi')$  คือ กระแสที่จุดต่อด้านเข้าของสายอากาศ มีหน่วยเป็น แอมแปร์

สามารถเขียนค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศในรูปแบบของจำนวนเชิงซ้อน ได้ดังนี้

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (4.65)$$

โดยที่  $Z_A$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ มีหน่วยเป็น โอห์ม

$R_A$  คือ ค่าความต้านทานของสายอากาศ มีหน่วยเป็น โอห์ม

$X_A$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศ มีหน่วยเป็น โอห์ม

จากการคำนวณหาผลเฉลยค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ ดังสมการ (4.64) และ (4.65) ทำให้สามารถนำผลเฉลยที่ได้ไปคำนวณหาความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (return loss) ของสายอากาศ โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของสายอากาศไดโพลโค้ง ได้แก่  $0.25 \lambda$   $0.50 \lambda$   $0.75 \lambda$  และ  $1.00 \lambda$  ซึ่งได้กำหนดช่วงความถี่ในการพิจารณาผลการคำนวณที่เกิดขึ้น อยู่ระหว่าง 300 MHz ถึง 1000 MHz เพื่อหาขนาดความยาวสายอากาศ และความถี่



ปฏิบัติการสำหรับการออกแบบสายอากาศ ให้ได้พารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

จะสังเกตได้ว่า ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ มีความสำคัญในการพิจารณาสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ (reflection coefficient) และอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio) ซึ่งสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนได้ดังสมการ (4.66) และ (4.67) ตามลำดับ

$$\Gamma(\text{dimensionless}) = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (4.66)$$

และ

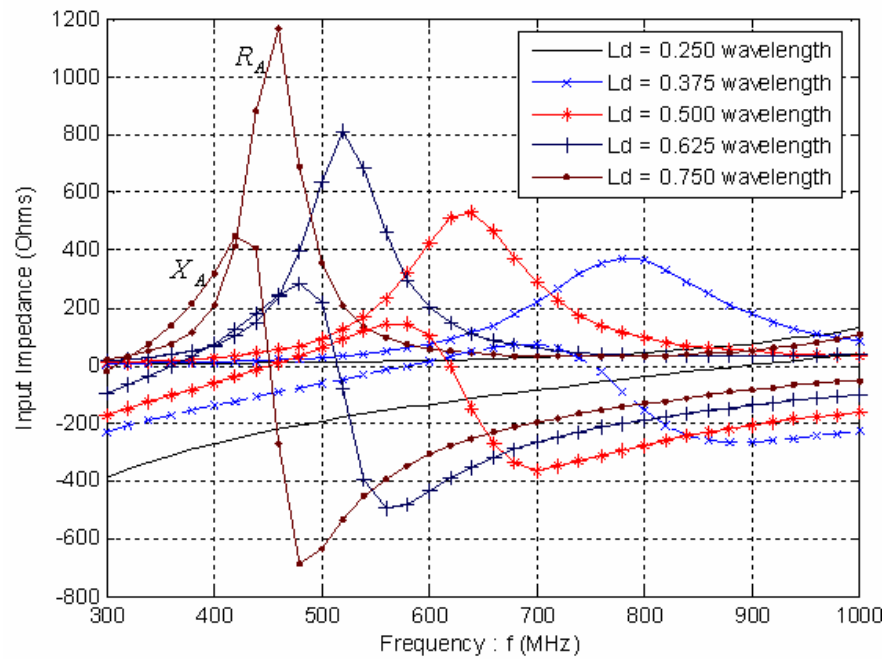
$$\text{Return Loss (dB)} = -20 \log |\Gamma(\text{dimensionless})| \quad (4.67)$$

โดยที่  $\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

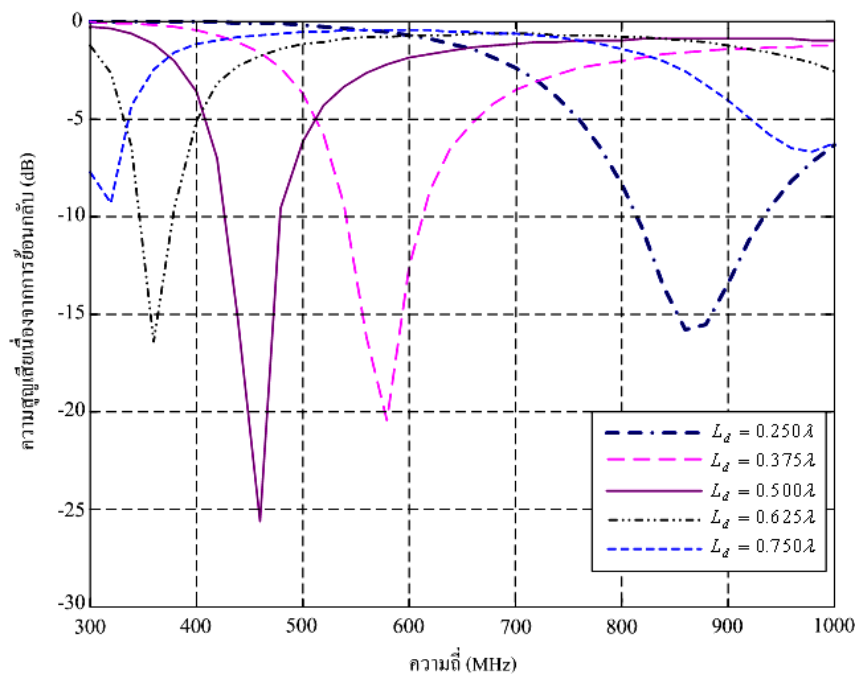
$Z_A$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ มีหน่วยเป็น โอห์ม

$Z_0$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ มีหน่วยเป็น โอห์ม

ผลจากการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศและความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ สามารถแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) และ(ข) ตามลำดับ



(ก) อิมพีแดนซ์ด้านเข้า

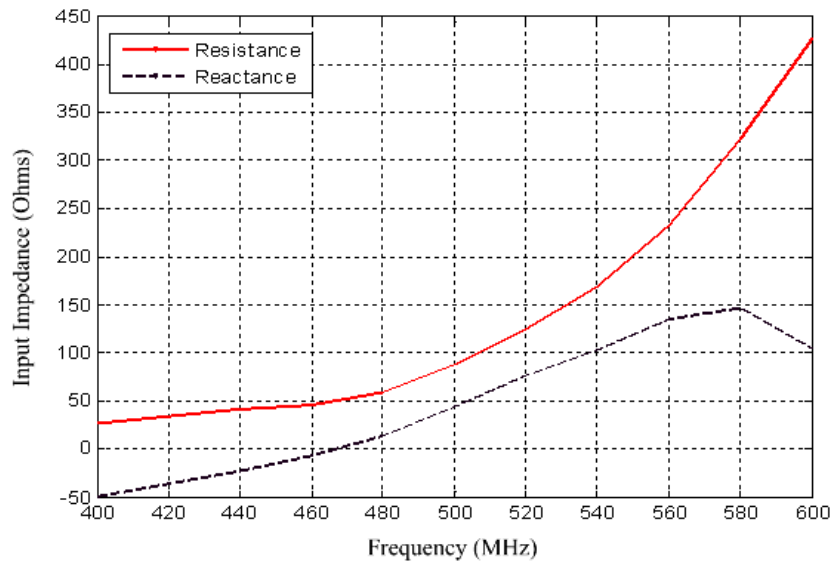


(ข) ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

รูปที่ 4.11 คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์

จากผลการวิเคราะห์หาผลเฉลยค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ ที่มีความยาวแตกต่างกันและมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ปฏิบัติการตั้งแต่ 300 MHz ถึง 1000 MHz เห็นได้ว่าสายอากาศที่มีความยาวประมาณ  $\lambda/2$  จะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นที่มีประสิทธิภาพได้ เนื่องจากผลของการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ได้ค่าความต้านทาน (resistance) ประมาณเท่ากับ 50 โอห์ม และจะพบว่าค่ารีแอคแตนซ์ (reactance) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด เขียนค่าประมาณได้เท่ากับ  $Z_A = 50 + j0\Omega$  ซึ่งตรงกับค่าความถี่ปฏิบัติการประมาณ 470 MHz ทั้งนี้จากค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) สามารถคำนวณหาค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศได้ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ข)

สำหรับสายอากาศที่มีขนาดความยาวอื่น ๆ (มากกว่า  $\lambda/2$  แต่ไม่ถึง  $\lambda$ ) มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์มากกว่า 50 โอห์ม และค่ารีแอคแตนซ์มีค่าไม่เข้าใกล้กับศูนย์ ส่งผลทำให้แรงดันกับกระแสมีเฟสต่างกัน ทำให้สายอากาศไม่มีประสิทธิภาพในการแผ่กระจายคลื่นและการปรับแต่งสายอากาศให้มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์มีค่าเหมาะสมกับเครื่องส่งนั้น จะทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจากผลเฉลยที่ได้ ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งนำไปสู่การออกแบบเพื่อทำการสร้างสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อนต้นแบบตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อนำผลที่ได้จากการวัดสายอากาศเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีโมเมนต์ต่อไป ซึ่งในการออกแบบได้ใช้ความถี่ปฏิบัติการจากการคำนวณมีค่าความถี่ 470 MHz รัศมีของสายอากาศไดโพลโค้ง  $a = 10.15$  เซนติเมตร รัศมีของเส้นลวด  $b = 0.03 \lambda$  และมีความยาวของสายอากาศไดโพลโค้งเท่ากับ  $0.50 \lambda$  ดังผลแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ช่วงความถี่ 470 MHz ที่เลือกสำหรับการออกแบบสายอากาศขนาดความยาว  $\lambda/2$

จากรูปที่ 4.12 เป็นการแสดงช่วงความถี่ที่เลือกใช้ในการออกแบบสายอากาศที่เหมาะสมที่สุด แสดงให้เห็นค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศจากผลการวิเคราะห์ ซึ่งนำไปสู่การสร้างสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อนแบบ แล้วนำผลที่ได้จากการวัดสายอากาศนั้นนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ดังจะได้แสดงในบทที่ 5 ต่อไป

การพิจารณาสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะกำหนดให้ความหนาแน่นกระแส ( $\bar{J}$ ) ขององค์ประกอบที่  $n$  เมื่อพิจารณาที่จุดใด ๆ ในแนวแกน  $\phi$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\bar{J} = I_n \cdot e^{jk(\rho_n \sin \theta \cos \phi + \phi_n \sin \phi + \phi'_n \cos \theta)} \hat{a}_\phi \quad (4.68)$$

โดยที่  $\rho_n, \phi_n$  คือ ตำแหน่งขององค์ประกอบที่  $n$

$\phi'_n$  คือ จุดใด ๆ ที่ทำการพิจารณาในแนวแกน  $\phi$

จากสมการของฟังก์ชันศักย์แม่เหล็กที่สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\bar{J} e^{-jkR}}{R} dv' \quad (4.69)$$

เมื่อทำการพิจารณาให้แหล่งกำเนิดอยู่ที่จุดกำเนิดและทำการแทนสมการ (4.68) ลงในสมการ (4.69) จะได้ว่า

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n \cdot e^{jk(\rho_n \sin \theta \cos \phi + \phi_n \sin \phi + \phi'_n \cos \theta)} \frac{e^{jkr}}{r} d\phi'_n \hat{a}_\phi \quad (4.70)$$

เนื่องจากการวิเคราะห์หาสนามที่แพร่กระจายคลื่นออกจากสายอากาศนั้น จะทำการวิเคราะห์ในระบบพิกัดทรงกลมเพราะสายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นในทุกทิศทาง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องทำการแปลงสมการ (4.70) ซึ่งอยู่ในพิกัดทรงกระบอกให้อยู่ในพิกัดทรงกลม โดยใช้สูตรการแปลงดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} A_r \\ A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & 0 & \cos \theta \\ \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_\rho \\ A_\phi \\ A_z \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

จากสมการ (4.71) จะพบว่าจะมีเฉพาะเทอมของ  $A_\phi$  เท่านั้น ดังนั้น จากสมการ (4.71) จะได้ว่า

$$A_\phi = A_\phi = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n \cdot e^{jk(\rho_n \sin \theta \cos \phi + \phi_n \sin \phi + \phi'_n \cos \theta)} \frac{e^{jkr}}{r} d\phi'_n \quad (4.72)$$

จากการวิเคราะห์ที่ได้ค่าการแรงแจกรูปกระแสของแต่ละองค์ประกอบ สามารถนำไปสู่การหาแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งจะพิจารณาในสถานะที่เป็นสนามระยะไกล (far-field region) ผลรวมของสนามจะได้จากผลรวมของแต่ละองค์ประกอบ ใช้การวิเคราะห์ที่ผ่านมาโดยโหมด  $M$  ขององค์ประกอบที่  $n$  มีทิศทางในแนวแกน  $\phi$  เขียนได้โดย

$$E_{\phi n} = -j\omega A_{\phi n} \quad (4.73)$$

$$A_{\phi n} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jk(\rho_n \sin \theta \cos \phi + \phi_n \sin \phi + \phi'_n \cos \theta)} d\phi'_n$$

$$A_{\phi_n} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \left[ e^{jk(\rho_n \sin \theta \cos \phi + \phi_n \sin \theta \sin \phi)} \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jk\phi'_n \cos \theta} d\phi'_n \right] \quad (4.74)$$

โดยที่  $\rho_n, \phi_n$  คือ ตำแหน่งขององค์ประกอบที่  $n$   
 $\phi'_n$  คือ จุดใด ๆ ที่ทำการพิจารณาในแนวแกน  $\phi$

สนามไฟฟ้ารวมที่ได้จากผลรวมของแต่ละองค์ประกอบ  $N$  และสามารถเขียนได้โดย

$$E_\phi = \sum_{n=1}^N E_{\phi_n} = -j\omega A_{\phi_n} \quad (4.75)$$

$$A_\phi = \sum_{n=1}^N A_{\phi_n} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(\rho_n \sin \theta \cos \phi + \phi_n \sin \theta \sin \phi)} \times \left[ \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jk\phi'_n \cos \theta} d\phi'_n \right] \right\} \quad (4.76)$$

สำหรับเส้นลวดแต่ละเส้น กระแสที่ได้สามารถแสดงได้โดยสมการ (4.54) เพราะฉะนั้น การอินทิกรัลส่วนสุดท้ายของสมการ (4.76) สามารถเขียนได้โดย

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jk\phi'_n \cos \theta} d\phi'_n = \sum_{m=1}^M I_{nm} \int_{-l_n/2}^{+l_n/2} \cos \left[ \frac{(2m-1)\pi\phi'_n}{l_n} \right] e^{jk\phi'_n \cos \theta} d\phi'_n \quad (4.77)$$

เนื่องจากโคไซน์เป็นฟังก์ชันคู่สมการที่ (4.77) สามารถเขียนได้ว่า

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jk\phi'_n \cos \theta} d\phi'_n = \sum_{m=1}^M I_{nm} \int_0^{+l_n/2} 2 \cos \left[ \frac{(2m-1)\pi\phi'_n}{l_n} \right] \times \left[ \frac{e^{jk\phi'_n \cos \theta} + e^{-jk\phi'_n \cos \theta}}{2} \right] d\phi'_n \quad (4.78)$$

ใช้เอกลักษณ์ตรีโกณมิติ

$$2 \cos(\alpha) \cos(\beta) = \cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta) \quad (4.79)$$

สมการที่ (4.78) สามารถเขียนได้เป็น

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jk\phi_n \cos \theta} d\phi_n = \sum_{m=1}^M I_{nm} \left\{ \int_0^{+l_n/2} \cos \left[ \frac{(2m-1)\pi}{l_n} + k \cos \theta \right] \phi_n' d\phi_n' \right. \\ \left. + \int_0^{+l_n/2} \cos \left[ \frac{(2m-1)\pi}{l_n} - k \cos \theta \right] \phi_n' d\phi_n' \right\} \quad (4.80)$$

เนื่องจาก

$$\int_0^{\alpha/2} \cos[(b \pm c)\phi] d\phi = \frac{\alpha}{2} \frac{\sin \left[ (b \pm c) \frac{\alpha}{2} \right]}{(b \pm c) \frac{\alpha}{2}} \quad (4.81)$$

สมการที่ (4.80) สามารถลดสมการได้

$$\int_{-l_n/2}^{+l_n/2} I_n e^{jk\phi_n \cos \theta} d\phi_n = \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[ \frac{\sin(\phi^+)}{\phi^+} + \frac{\sin(\phi^-)}{\phi^-} \right] \frac{l_n}{2} \quad (4.82)$$

$$\text{โดยที่ } \phi^+ = \left[ \frac{(2m-1)\pi}{l_n} + k \cos \theta \right] \frac{l_n}{2} \quad (4.83)$$

$$\phi^- = \left[ \frac{(2m-1)\pi}{l_n} - k \cos \theta \right] \frac{l_n}{2} \quad (4.84)$$

ดังนั้นผลรวมของสนามจากสมการที่ (4.75) และ (4.76) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_\phi = \sum_{n=1}^N E_{\phi n} = -j\omega A_{\phi n} \quad (4.85)$$

$$A_\phi = \sum_{n=1}^N A_{\phi n} = -\frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(\rho_n \sin\theta \cos\phi + \phi_n \sin\theta \sin\phi)} \right. \\ \left. \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[ \frac{\sin(\phi^+)}{\phi^+} + \frac{\sin(\phi^-)}{\phi^-} \right] \right\} \frac{l_n}{2} \quad (4.86)$$

ดังนั้น สนามไฟฟ้ารวมทั้งหมดของสายอากาศทั้งหมด  $N$  องค์ประกอบ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_\phi = j\omega \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(\rho_n \sin\theta \cos\phi + \phi_n \sin\theta \sin\phi)} \right. \\ \left. \cdot \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[ \frac{\sin(\phi^+)}{\phi^+} + \frac{\sin(\phi^-)}{\phi^-} \right] \frac{l_n}{2} \right\} \quad (4.87)$$

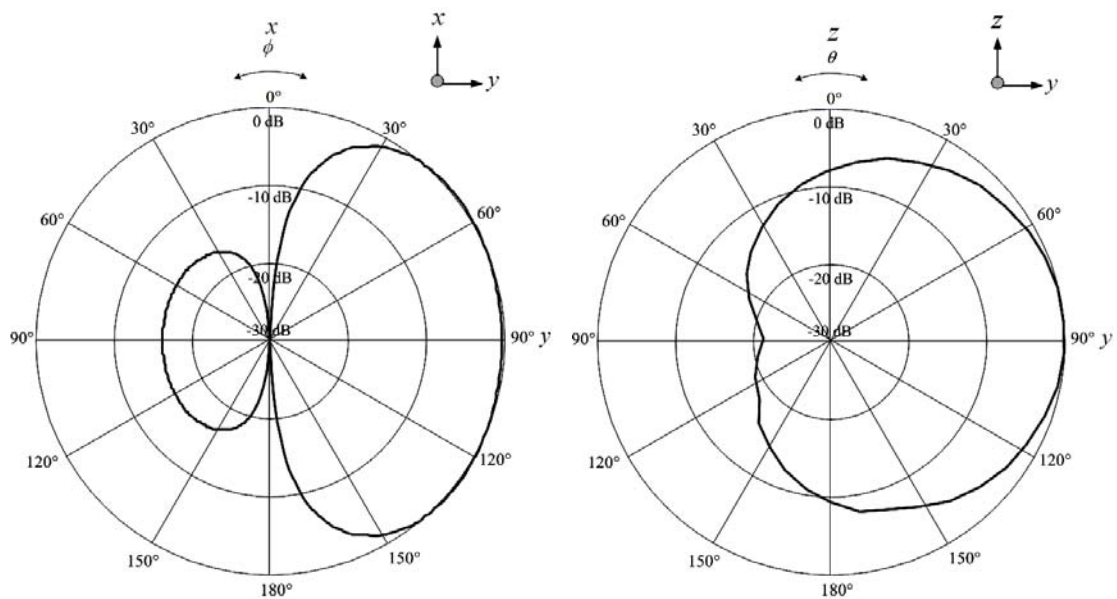
และสนามแม่เหล็กทั้งหมด สามารถเขียนได้ดังสมการ (4.88)

$$H_\phi = -\frac{E_\phi}{\eta} = -j\omega \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(\rho_n \sin\theta \cos\phi + \phi_n \sin\theta \sin\phi)} \right. \\ \left. \cdot \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[ \frac{\sin(\phi^+)}{\phi^+} + \frac{\sin(\phi^-)}{\phi^-} \right] \frac{l_n}{2} \right\} \quad (4.88)$$

ในการวิเคราะห์หาผลเฉลยและพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน เพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจในธรรมชาติของสายอากาศโดยใช้โคโพลโค้ง ลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบและสร้างสายอากาศตามที่ต้องการได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ในการวิเคราะห์คุณลักษณะแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศจะทำได้โดยการศึกษาผลกระทบอันเนื่องมาจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ได้แก่ ความยาวของสายอากาศ ความถี่ที่ใช้ในการพิจารณา และระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองอีลิเมนต์ ว่ามี



ผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศอย่างไร จากนั้นจะออกแบบและสร้างสายอากาศที่ให้แบบรูปการแผ่พลังงานและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่สอดคล้องกับความต้องการใช้งานได้ ซึ่งจะแสดงความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์ได้จากผลการทดสอบ ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.13 โดยเป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศที่มีขนาดความยาวประมาณ  $0.50 \lambda$  ในแนวระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงในรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์

จากผลการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงาน ดังรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่า แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ใช้ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ ระนาบสนามไฟฟ้ามีทิศทางการแผ่พลังงานออกไปในทิศทางด้านหน้ามากกว่าด้านหลัง เนื่องจากสายอากาศมีแผ่นระนาบตัวสะท้อนเพื่อบังคับให้การแผ่พลังงานไปในทิศทางด้านหน้าตามที่ต้องการ ซึ่งจากแบบรูปการแผ่พลังงาน ตามรูปที่ 4.13 มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ประมาณเท่ากับ 120 องศา และจะมีโหลบทางด้านหลังของการแผ่กำลังงานประมาณเท่ากับ -18 dB

#### 4.4 การวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับลำดับคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้ง

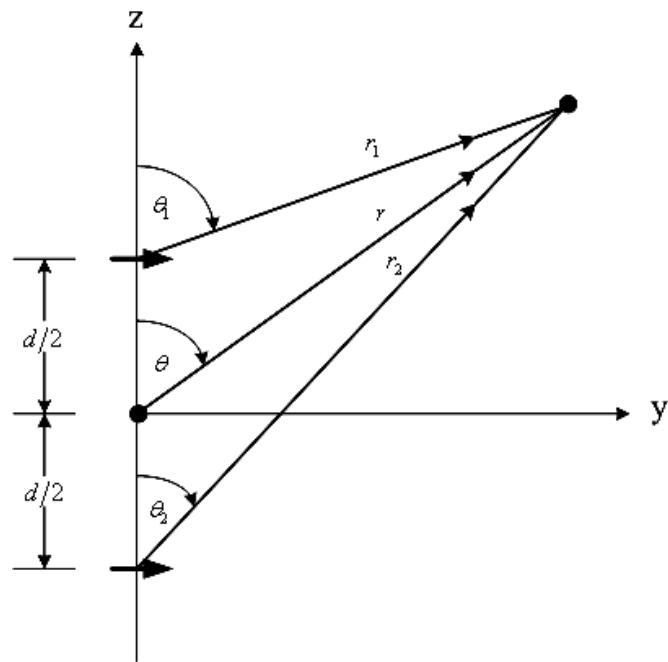
##### ลัทธิวงจรบนระนาบตัวสะท้อน

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศอีลิเมนต์เดี่ยวจะให้แบบรูปที่กว้างและให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากขึ้น วิธีอื่นที่ทำได้ก็คือ การประกอบอีลิเมนต์ตั้งแต่สองอีลิเมนต์ขึ้นไปให้มีรูปร่างเหมาะสมทั้งทางเรขาคณิตและทางไฟฟ้า สายอากาศแบบนี้จะถูกเรียกว่า สายอากาศแบบแถวลำดับหรืออาร์เรย์ (array antenna) โดยทั่วไปแล้ว อีลิเมนต์แต่ละตัวที่ประกอบขึ้นเป็นแถวลำดับจะมีลักษณะเหมือนกัน เพื่อให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการสร้างในทางปฏิบัติ

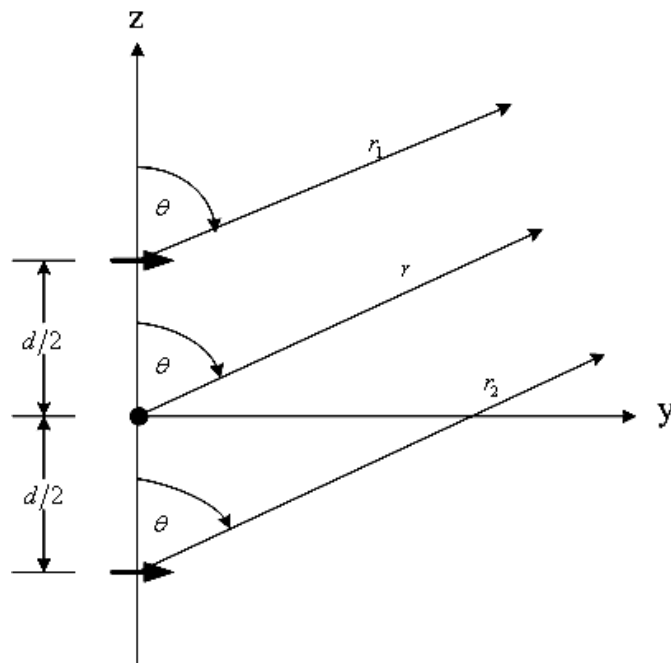
เมื่ออีลิเมนต์ของแถวลำดับเหมือนกัน เราสามารถควบคุมรูปร่างของแบบรูปการแผ่พลังงานรวมของสายอากาศได้โดยการควบคุม ดังต่อไปนี้

1. รูปทรงทางคณิตศาสตร์ของแถวลำดับ (เช่น แบบเชิงเส้น โค้ง ทรงกลม สี่เหลี่ยม เป็นต้น)
2. ระยะห่างระหว่างอีลิเมนต์แต่ละตัว
3. แอมพลิจูดของกระแสที่ป้อนให้กับแต่ละอีลิเมนต์
4. เฟสของกระแสที่ป้อนให้กับแต่ละอีลิเมนต์
5. แบบรูปการแผ่พลังงานระหว่างอีลิเมนต์

สายอากาศแถวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้งลัทธิวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ประกอบขึ้นแนวนอนสองอีลิเมนต์วางในแนวแกน  $z$  ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก)



(ก) ไดโพลสองอีลิเมนต์



(ข) การสังเกตสนามระยะไกล

รูปที่ 4.14 รูปทรงเรขาคณิตของแถวลำดับสองอีลิเมนต์ ที่ถูกวางอยู่บนแกน  $z$

สนามไฟฟ้ารวมที่ถูกแผ่ออกไปจากอีลีเมนต์ทั้งสอง (ซึ่งสมมติว่าไม่มีการเชื่อมต่อกันระหว่างอีลีเมนต์) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของสนามไฟฟ้าทั้งสองในระนาบ  $xy$  ซึ่งพิจารณาสมการสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวแกน  $\phi$  จากสมการ (4.87) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$E_t = E_1 + E_2 = j\omega \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \sin\theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(\rho_n \sin\theta \cos\phi + \phi_n \sin\theta \sin\phi)} \cdot \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[ \frac{\sin(\phi^+)}{\phi^+} + \frac{\sin(\phi^-)}{\phi^-} \right] \frac{l_n}{2} \right\} \times \left\{ \frac{e^{-j[kr_1 - (\beta/2)]}}{r_1} \cos\theta_1 + \frac{e^{-j[kr_2 + (\beta/2)]}}{r_2} \cos\theta_2 \right\} \quad (4.89)$$

โดยที่  $\beta$  คือ ความแตกต่างของเฟสที่ป้อนให้ระหว่างอีลีเมนต์ โดยขนาด (magnitude) ของการกระตุ้นให้กับตัวแผ่กำลังงานจะเหมือนกัน สมมติให้เป็นการสังเกตสนามระยะไกล โดยพิจารณาจากรูปที่ 4.14 (ข)

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta \quad (4.90)$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r - \frac{d}{2} \cos\theta \\ r_2 &= r + \frac{d}{2} \cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (4.91)$$

$$r_1 = r_2 = r \quad (4.92)$$

สมการที่ (4.89) จะลดรูปลงเป็น

$$\begin{aligned}
E_t &= j\omega \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r^2} \sin \theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(\rho_n \sin \theta \cos \phi + \phi_n \sin \theta \sin \phi)} \right. \\
&\quad \cdot \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[ \frac{\sin(\phi^+)}{\phi^+} + \frac{\sin(\phi^-)}{\phi^-} \right] \frac{l_n}{2} \left. \right\} \\
&\quad \times |\cos \theta| \left[ e^{+j(kd \cos \theta + \beta)/2} + e^{-j(kd \cos \theta + \beta)/2} \right] \\
E_t &= j\omega \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r^2} \sin \theta \sum_{n=1}^N \left\{ e^{jk(\rho_n \sin \theta \cos \phi + \phi_n \sin \theta \sin \phi)} \right. \\
&\quad \cdot \sum_{m=1}^M I_{nm} \left[ \frac{\sin(\phi^+)}{\phi^+} + \frac{\sin(\phi^-)}{\phi^-} \right] \frac{l_n}{2} \left. \right\} \\
&\quad \times |\cos \theta| 2 \cos \left[ \frac{1}{2}(kd \cos \theta + \beta) \right]
\end{aligned} \tag{4.93}$$

จากสมการ (4.93) สนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศแถวลำดับจะเท่ากับสนามไฟฟ้าของอีลิเมนต์เดี่ยวแต่ละตัววางห่างกันด้วยระยะ  $d$  ทำการคูณด้วยค่าตัวประกอบแถวลำดับ (array factor) สำหรับสายอากาศแถวลำดับแบบสองอีลิเมนต์ที่มีแอมพลิจูดคงที่ ค่าของตัวประกอบแถวลำดับจะสามารถกำหนดได้ดังสมการ (4.94)

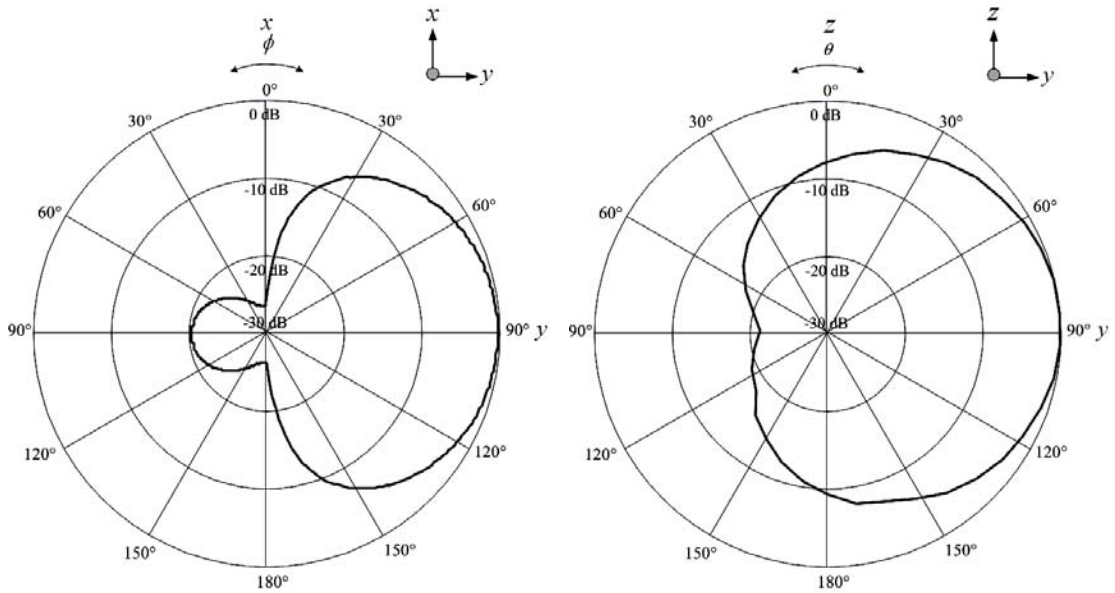
$$AF = 2 \cos \left[ \frac{1}{2}(kd \cos \theta + \beta) \right] \tag{4.94}$$

ซึ่งสามารถเขียนสมการในรูปของนอร์แมลไลซ์ได้คือ

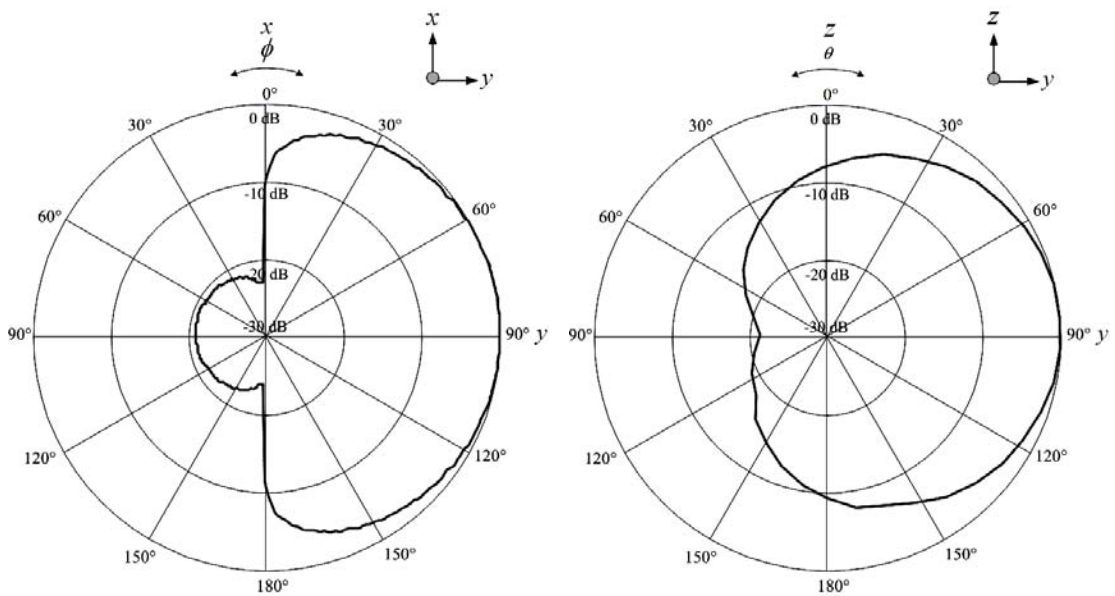
$$(AF)_n = \cos \left[ \frac{1}{2}(kd \cos \theta + \beta) \right] \tag{4.95}$$

จากสมการ (4.94) และ (4.95) ตัวประกอบแถวลำดับจะเป็นฟังก์ชันของรูปทรงของแถวลำดับและเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับแต่ละอีลิเมนต์ โดยการเปลี่ยนแปลงระยะห่าง  $d$  และ/หรือเฟส  $\beta$  ระหว่างอีลิเมนต์ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่าง  $d$  และให้ค่าเฟส  $\beta = 0$  ดังนั้นคุณลักษณะของตัวประกอบแถวลำดับและของสนามไฟฟ้ารวมของสายอากาศแถวลำดับจะสามารถควบคุมได้ง่ายขึ้น ซึ่งในการวิเคราะห์ได้ทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของ  $d$  มีค่า

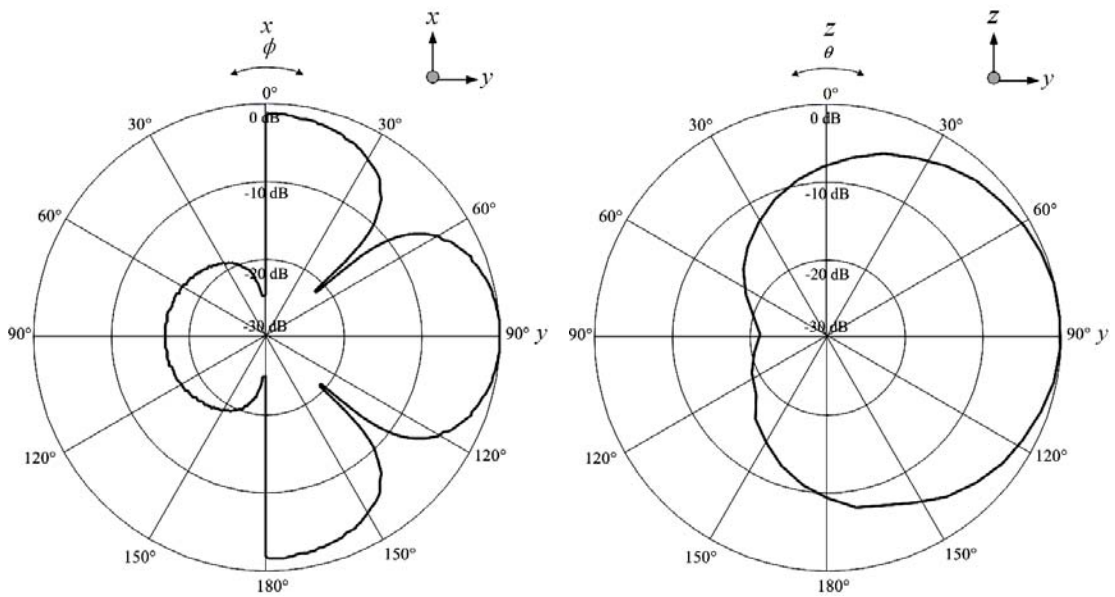
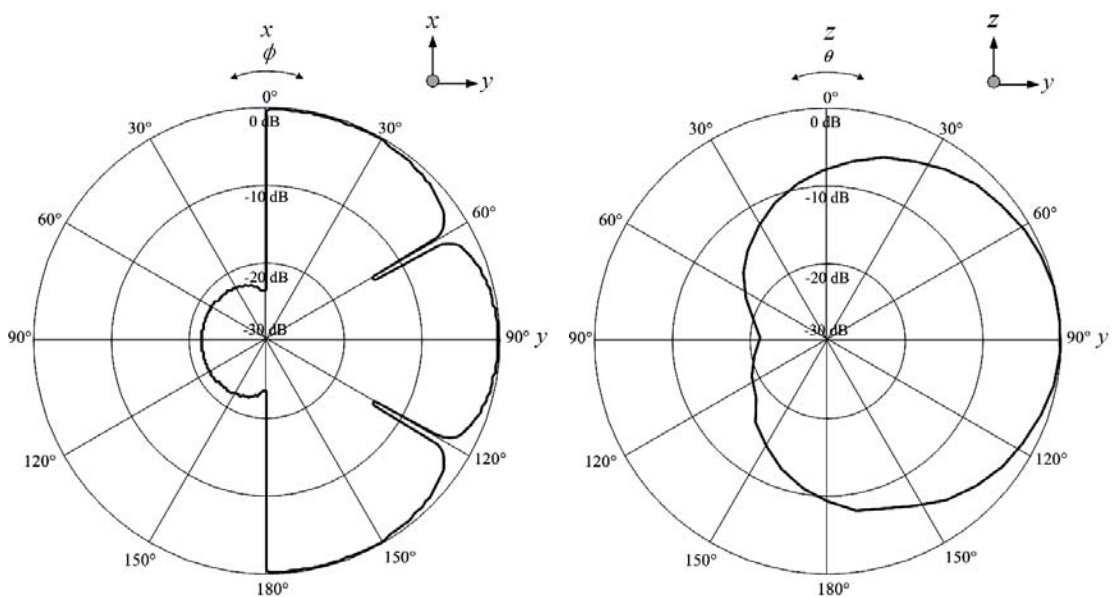
เท่ากับ  $0.25\lambda$   $0.50\lambda$   $0.75\lambda$  และ  $1.00\lambda$  ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศได้ดังรูปที่ 4.15 (ก) ถึง (ง) ตามลำดับ



(ก)  $d = 0.25\lambda$



(ข)  $d = 0.50\lambda$

(ค)  $d = 0.75\lambda$ (ง)  $d = 1.00\lambda$ 

รูปที่ 4.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรมระนาบ  
ตัวสะท้อน เมื่อ (ก)  $d = 0.25\lambda$  (ข)  $d = 0.50\lambda$  (ค)  $d = 0.75\lambda$  (ง)  $d = 1.00\lambda$

จากผลของการวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับค่าคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรถน ระบายตัวสะท้อน ตามรูปที่ 4.15 เห็นได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนระยะห่างของสายอากาศไดโพลโค้ง ทั้ง สองตัว จะได้ค่าของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อหาระยะห่าง ระหว่างสายอากาศไดโพลโค้งลัดวงจรถนระบายตัวสะท้อนทั้งสองตัวที่จะนำมาทำเบย์สแตกกึ่ง ที่ เหมาะสมที่สุด จึงได้ทำการเปลี่ยนระยะห่าง ดังนี้  $0.25\lambda$   $0.50\lambda$   $0.75\lambda$  และ  $1.00\lambda$  พบว่า ระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบจะมีค่าเท่ากับ  $0.50\lambda$  เนื่องจากผลที่ได้จากการคำนวณ แบบรูปการแผ่พลังงานได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบ สนามแม่เหล็ก กว้างที่สุดโดยมีค่าประมาณ 120 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ข) ซึ่งเป็นไปตาม จุดประสงค์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของสายอากาศอีกตัวหนึ่งคืออัตราขยายใน ทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ โดยทั่วไปแล้วอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศจะมีความสัมพันธ์กันอย่างมากกับสภาพเจาะจงทิศทาง แต่เป็นการวัดคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับทิศทาง ของสายอากาศ ได้ถูกบังคับด้วยแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนั้น ซึ่งในการวิเคราะห์ สายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นอัตราขยายสัมบูรณ์ (absolute gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่ กำหนดให้) หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ต่อความเข้ม การแผ่พลังงานที่ได้รับเข้ามา และถ้าพลังงานที่รับเข้ามาโดยสายอากาศนั้น มีการแผ่พลังงานเข้ามา ในลักษณะของไอโซทรอปิกแล้ว ความเข้มของการแผ่พลังงานลักษณะนี้จะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ สายอากาศรับเข้ามาที่ขั้วอินพุตหารด้วย  $4\pi$  สามารถเขียนได้ดังสมการ (4.96)

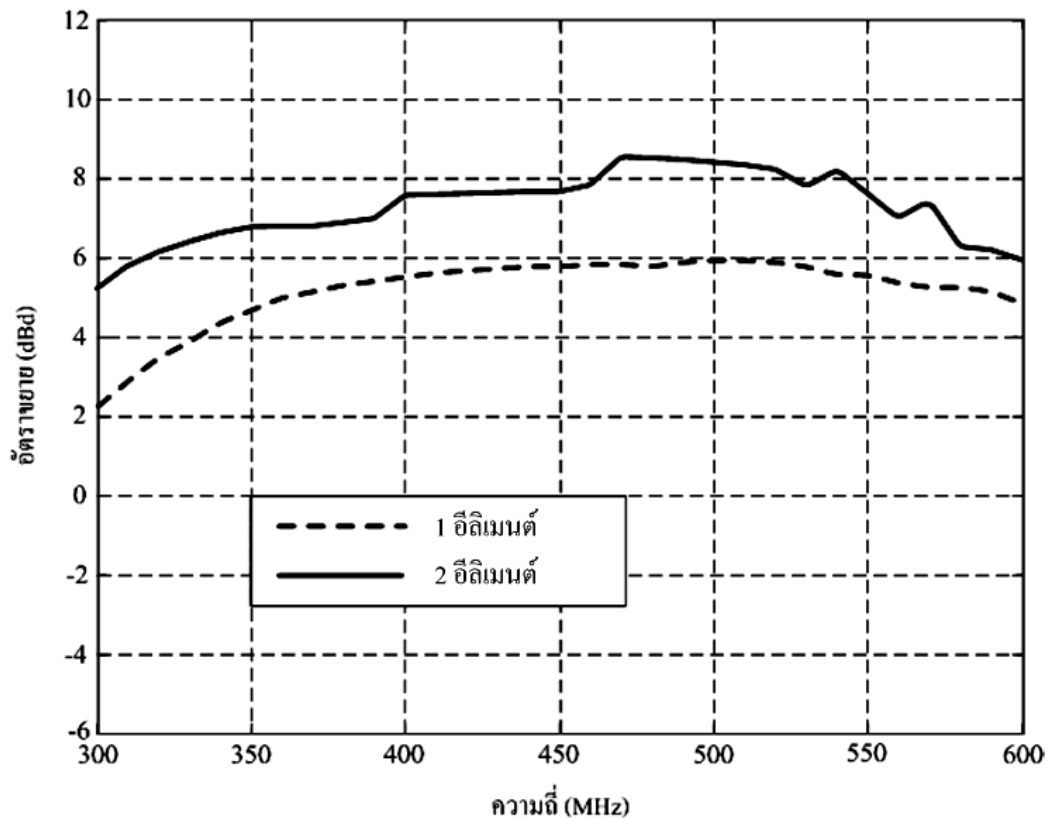
$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \quad (4.96)$$

นอกจากนี้อัตราขยายอีกนิยามหนึ่งที่เรากันพบบ่อยครั้งก็คือ อัตราขยายสัมพัทธ์ (relative gain) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของอัตราขยายพลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายพลังงาน ของสายอากาศอ้างอิงในทิศทางนั้น โดยพลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศทั้งสองจะต้อง เท่ากัน ส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบจะเป็นสายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดแบบ ไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (lossless isotropic source) ดังสมการ (4.97)

$$G = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}(\text{Lossless Isotropic})} \quad (4.97)$$



เมื่อไม่มีการกำหนดทิศทางมาให้ อัตราขยายพลังงานจะต้องคิดในทิศทางที่มีการแผ่พลังงานสูงสุดเสมอ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์อัตราขยายด้านหน้าของสายอากาศ ที่ใช้ไดโพลตัวเดียวและไดโพลสองตัวมาจัดวางเป็นแถวลำดับกัน โดยเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ปฏิบัติการระหว่าง 300 MHz ถึง 600 MHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลการวิเคราะห์อัตราขยายของสายอากาศ

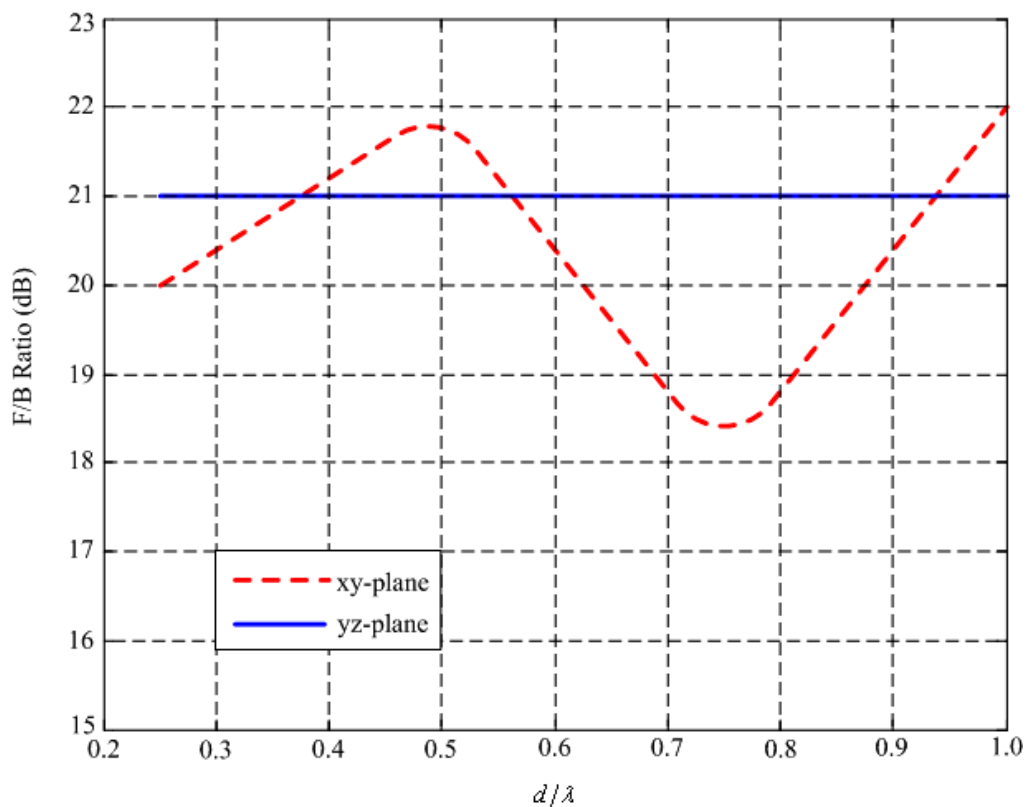
จากผลการวิเคราะห์อัตราขยายของสายอากาศ ดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ปฏิบัติการระหว่าง 300 MHz ถึง 600 MHz โดยการกำหนดให้สายอากาศมีขนาดความยาวของไดโพลโค้ง เท่ากับ  $0.5\lambda$  เปรียบเทียบอัตราการขยายของสายอากาศ ไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อนระหว่างการใช้ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ กับการใช้ไดโพลโค้ง 2 อีลิเมนต์ มาจัดวางเป็นแถวลำดับกัน ซึ่งการวิเคราะห์อัตราการขยายของสายอากาศ ที่มีไดโพลโค้ง 2 อีลิเมนต์ มาจัดวางเป็นแถวลำดับกัน จะมีค่าอัตราการขยายในทิศทางด้านหน้าที่สูงกว่า โดยจะทำการพิจารณาแต่ละความถี่ปฏิบัติการที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น ที่ความถี่ปฏิบัติการที่ใช้ในการออกแบบ 470 MHz จะมีอัตราการขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศ

มากที่สุด โดยถ้าเป็นสายอากาศที่ใช้ไดโพลโค้งตัวเดียว มีค่าอัตราขยายของสายอากาศประมาณเท่ากับ 5.9 dBd และถ้าเป็นสายอากาศที่ใช้ไดโพลโค้งสองอีลิเมนต์ที่มาจัดวางเป็นแถวลำดับกัน มีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าของสายอากาศประมาณเท่ากับ 8.55 dBd และที่ความถี่ปฏิบัติการอื่น ๆ มีอัตราการขยายลดต่ำลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.16

สำหรับค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (front-to-back ratio : F/B ratio) มีหน่วยเป็นเดซิเบล เป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณที่ต้องการส่งในทิศทางที่ต้องการกับความแรงของสัญญาณในทิศทางตรงกันข้าม สามารถเขียนได้ดังสมการ (4.98)

$$\frac{F}{B} = \text{Main Lobe (dB)} - \text{Back Lobe (dB)} \quad (4.98)$$

ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งคือใช้อธิบายความสามารถของสายอากาศ เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างสัญญาณที่เข้ามาจากด้านหน้าและสัญญาณที่ได้มาจากด้านหลัง เมื่อสายอากาศถูกใช้เป็นตัวรับ สามารถแสดงผลการวิเคราะห์สายอากาศได้ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศ

จากผลของการวิเคราะห์สายอากาศ จะเห็นได้ว่า ในระนาบสนามไฟฟ้า xy อัตราส่วน ล้อคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลง โดยการวิเคราะห์ได้มีการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างไดโพลโค้ง 2 อีลิเมนต์ คือค่า  $d$  ที่ค่าระหว่าง  $0.25\lambda$  ถึง  $1.00\lambda$  ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าอัตราส่วนล้อคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศที่ระยะห่าง  $d = 0.50\lambda$  มีค่าสูงที่สุด ประมาณเท่ากับ 21.89 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.17

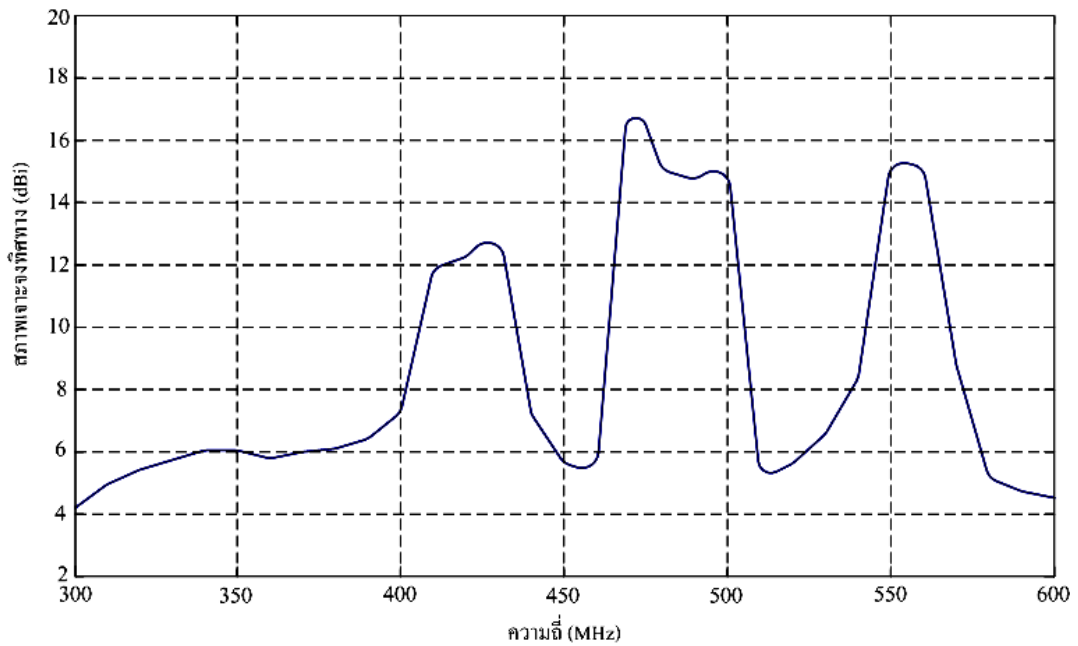
ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่ได้จากการวิเคราะห์ เป็นอัตราส่วนของความเข้มการแผ่พลังงานในทิศทางที่กำหนดให้จากตัวสายอากาศกับความเข้มการแผ่พลังงานที่เฉลี่ยออกไปทุกทิศทาง ค่าความเข้มการแผ่พลังงานเฉลี่ยจะเท่ากับกำลังงานรวมที่แผ่ออกมาจากตัวสายอากาศหารด้วย  $4\pi$  และถ้าไม่มีการกำหนดทิศทางให้กับสายอากาศ ให้ถือว่าทิศทางที่มีการแผ่พลังงานสูงสุด คือทิศทางที่กำหนดค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศนั้น ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (4.99)

$$D_{\max} = D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (4.99)$$

โดยที่	$D$	คือ สภาพเจาะจงทิศทาง (ไม่มีหน่วย)
	$D_0$	คือ สภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด (ไม่มีหน่วย)
	$U$	คือ ความเข้มการแผ่พลังงาน มีหน่วยเป็น W/unit solid angle
	$U_{\max}$	คือ ความเข้มการแผ่พลังงานสูงสุด มีหน่วยเป็น W/unit solid angle
	$U_0$	คือ ความเข้มการแผ่พลังงานของแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิก มีหน่วยเป็น W/unit solid angle
	$P_{\text{rad}}$	คือ กำลังงานรวมของการแผ่พลังงาน มีหน่วยเป็น W

สำหรับผลเฉลยจากการคำนวณค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ จากสมการ (4.99) ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ปฏิบัติการ ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 600 MHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18

จากผลการคำนวณสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้ง ลัดวงจรมระนาบตัวสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการปรับเปลี่ยนความถี่ปฏิบัติการ ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 600 MHz ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีค่าสูงที่สุด ประมาณเท่ากับ 16.78 dBi ที่ความถี่ปฏิบัติการ เท่ากับ 470 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่เลือกใช้สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นและที่ความถี่ปฏิบัติการอื่น ๆ จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางลดลง



รูปที่ 4.18 สภาพจะจกทิศทางของสายอากาศ

#### 4.5 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบ และวิเคราะห์หาผลเฉลยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแถวลำดับคลื่นกว้างโดยใช้โคโพลโค้งลวดวงจรมระนาบตัวสะท้อน โดยขั้นแรกทำการออกแบบสายอากาศโดยดูแนวทางเป็นไปได้ของสายอากาศจากการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SuperNEC แล้วทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์เพื่อหาผลเฉลย ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงเลขที่ให้ความแม่นยำสูง จากผลเฉลยที่ได้นำไปหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ และสามารถหาแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ แล้วนำผลเฉลยต่าง ๆ ที่ได้เปรียบเทียบกับการวัดสายอากาศต้นแบบจริง ต่อไปในบทที่ 5

## บทที่ 5

### ผลการทดลองและการวัดสายอากาศ

#### 5.1 กล่าวนำ

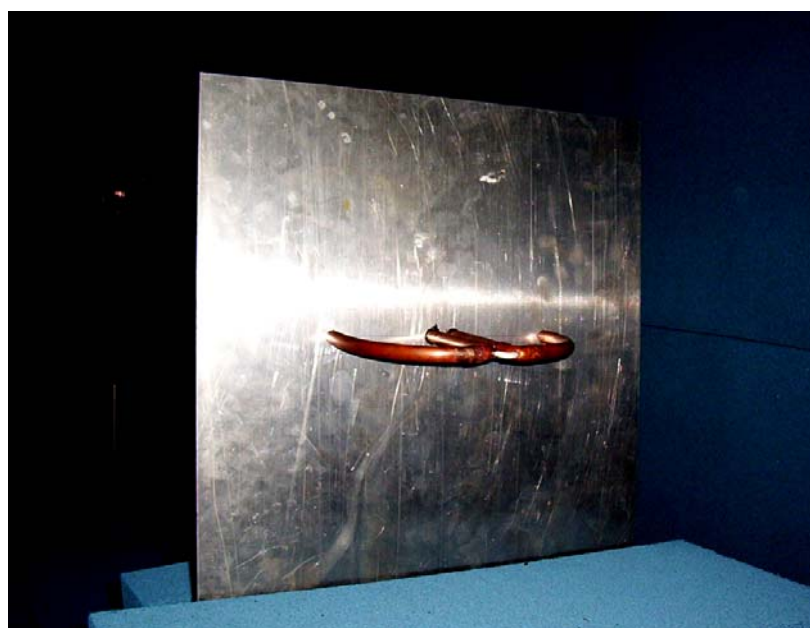
ในบทนี้เป็นการนำผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 มาใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบจริงและวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศแถวลำดับ โดยใช้ไดโพลโค้ง ลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์และนำมาวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ได้แก่ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ค่าการสูญเสีย เนื่องจากการย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (standing wave ratio : SWR) ความกว้างแถบสายอากาศ อัตราการขยายด้านหน้าของสายอากาศ และแบบรูปการแผ่พลังงาน ทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) รุ่น HP8722D ซึ่งในการออกแบบได้ใช้ความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ความถี่ 470 MHz เพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ ต่อไป

#### 5.2 การสร้างสายอากาศต้นแบบ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำผลเฉลยจากการวิเคราะห์สายอากาศด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยจะนำไปสู่การสร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อนต้นแบบตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งในตอนแรกได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่ใช้ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ เพื่อนำมาวัดเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งในการออกแบบได้ใช้ความถี่ปฏิบัติการอยู่ที่ความถี่ 470 MHz รัศมีของสายอากาศไดโพลโค้ง  $a = 10.15$  เซนติเมตร รัศมีของเส้นลวด  $b = 0.03\lambda$  และมีความยาวของสายอากาศไดโพลโค้งเท่ากับ  $0.50\lambda$  โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณและการวัดแสดงดังตารางที่ 5.1 ซึ่งได้แสดงโครงสร้างของสายอากาศไว้แล้วในรูปที่ 4.6 และสายอากาศต้นแบบที่ใช้ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่ใช้ในการคำนวณและการวัด

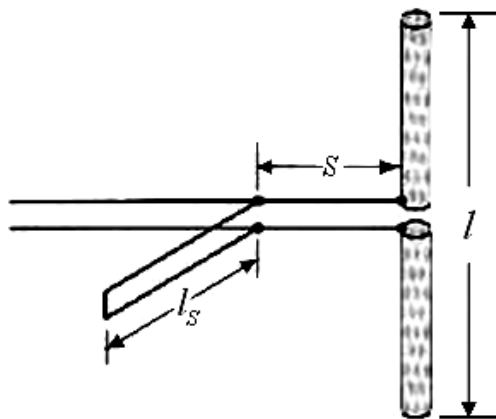
พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ ที่ ความถี่ 470 MHz
ความยาวของสายอากาศไดโพลโค้ง ( $L$ )	$0.50\lambda$	31.90 cm
รัศมีของความโค้งของไดโพล ( $a$ )	$0.159\lambda$	10.15 cm
รัศมีของเส้นลวด ( $b$ )	$0.03\lambda$	1.91 cm
ตัวสะท้อนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $W$ )	$1\lambda$	63.8 cm
จุดป้อนสัญญาณของไดโพล ( $\phi$ )	$90^\circ$	$90^\circ$



รูปที่ 5.1 สายอากาศต้นแบบโดยใช้ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์

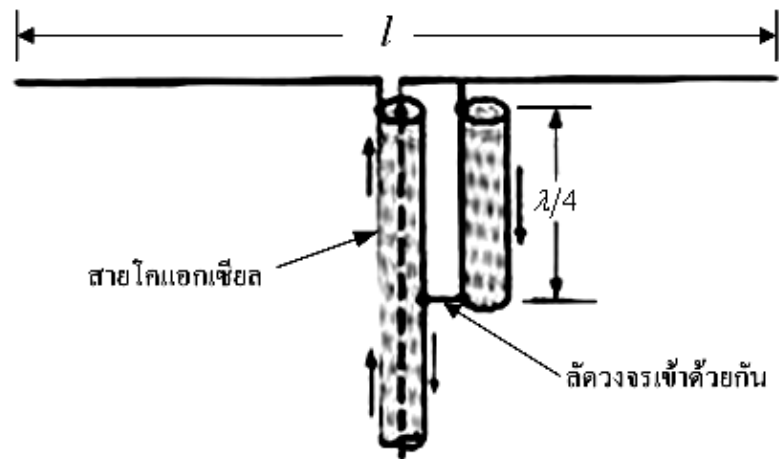
สายอากาศที่ได้ทำการออกแบบในทางปฏิบัติ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณจะเป็นค่าจำนวนจริงเสมอ ในขณะที่อิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะเป็นค่าจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันของความถี่ไม่เหมือนกัน ดังนั้น จึงต้องทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของทั้งสองส่วนซึ่งต้องต่อร่วมกันให้มีการเชื่อมต่อที่แน่นที่สุดตลอดย่านความถี่ที่กำหนดให้ การแมตช์ในอุดมคติที่ความถี่สำหรับการออกแบบ สามารถทำได้โดยการติดตั้งสลับแบบปลายเปิดหรือ

แบบลัดวงจรที่ปลายขนานเข้ากับสายนำสัญญาณที่ระยะเท่ากับ  $S$  จากจุดต่อระหว่างสายอากาศและสายนำสัญญาณ เมื่อมีการปรับระยะ  $S$  จะทำให้ส่วนที่เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์สายอากาศเท่ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณ และหากเปลี่ยนแปลงความยาว  $l_s$  ของสตับ จะทำให้ค่าซัสเซพแตนซ์ (susceptance) ของสตับมีขนาดเท่ากับค่าซัสเซพแตนซ์ของจุดต่อระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ แต่จะมีเฟสตรงกันข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.2



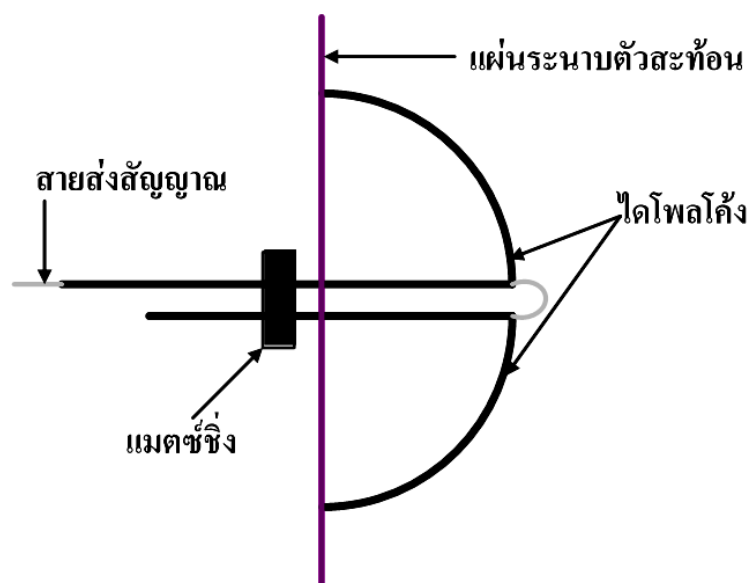
รูปที่ 5.2 การแมตช์แบบขนาน

ในการติดตั้งสายอากาศใช้งานจริง ต้องทำการแมตช์ซึ่ง เพื่อให้สายอากาศสามารถใช้งานได้จริงในความถี่ที่ต้องการ สำหรับงานวิจัยนี้ทำการแมตช์สายอากาศ กับสายโคแอกเชียล 50 โอห์ม ในที่นี้แนะนำเสนอวิธีการแมตช์อย่างง่าย 2 วิธี ได้แก่ การแมตช์ด้วยสตับแบบขนาน (parallel stub match) และการทำสตับด้วยแบบสายโคแอกเชียลขนาน (parallel coaxial) โดยอุปกรณ์ที่สามารถใช้ทำหน้าที่เป็นตัวทำสมดุลให้กับระบบที่ไม่สมดุลได้ โดยการยับยั้งกระแสที่อยู่ด้านนอก เราจะเรียกอุปกรณ์นี้ว่า บาลัน (Balun : Balance to Unbalance) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้บาลันแบบโคแอกเชียล  $\lambda/4$  (1:1) ดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 บาลันแบบโคแอกเซียล  $\lambda/4$  (1:1)

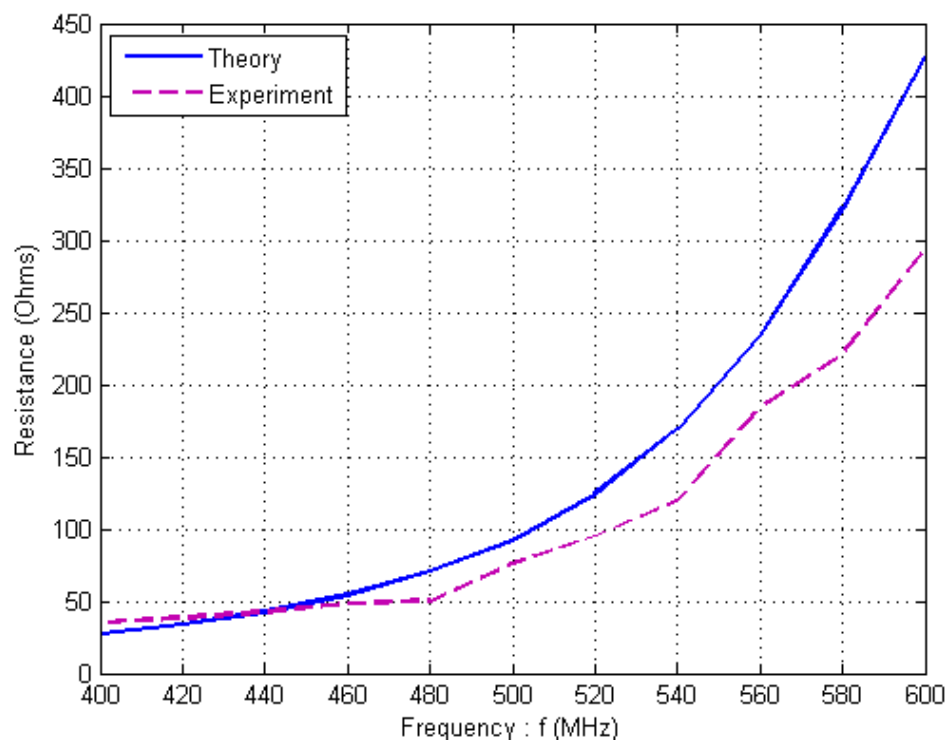
จากรูป 5.3 จะเห็นว่า การใช้แมตซ์ชิ่งร่วมกับบาลัน แบบสายโคแอกเซียลขนาน (parallel coaxial) จะมีท่อดำนำ 2 ท่อ ต่อกันออกจากตัวของสายอากาศซึ่งภายในท่อดำนำจะมีสายโคแอกเซียลอยู่ ซึ่งเป็นสายที่ยังไม่สามารถใช้งานร่วมกับสายอากาศได้ เมื่อทำการแมตซ์ชิ่งและใส่บาลันสายอากาศจึงสามารถใช้งานที่ความถี่ที่เราต้องการได้ ซึ่งในการสร้างสายอากาศไดโพลโค้งใช้การแมตซ์ชิ่งแบบสายโคแอกเซียลขนาน (parallel coaxial) โดยการต่อใช้งานจริงสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4



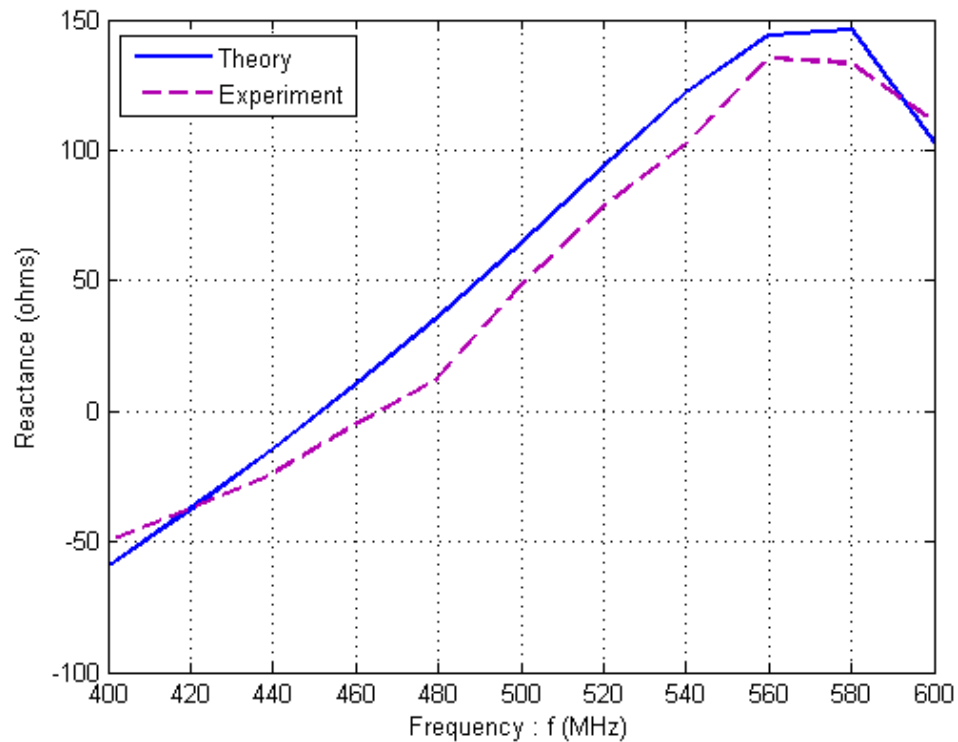
รูปที่ 5.4 การต่อบาลันสำหรับสายอากาศไดโพลโค้ง



ผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ในบทที่ 4 ได้ค่าการแจกแจงกระแสของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นผลเฉลยที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของสายอากาศไดโพลโค้ง จากผลการวิเคราะห์สายอากาศ จะสังเกตได้ว่าขนาดความยาวของสายอากาศที่เหมาะสมในการออกแบบจะอยู่ที่ประมาณเท่ากับ  $0.50 \lambda$  เนื่องจากมีลักษณะของการแจกแจงของกระแสที่มีการป้อนกระแสสูงสุดที่เวลาใด ๆ บนตัวไดโพลโค้ง ดังนั้น เมื่อทำการวัดพารามิเตอร์ของสายอากาศ คือค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก) ความต้านทาน

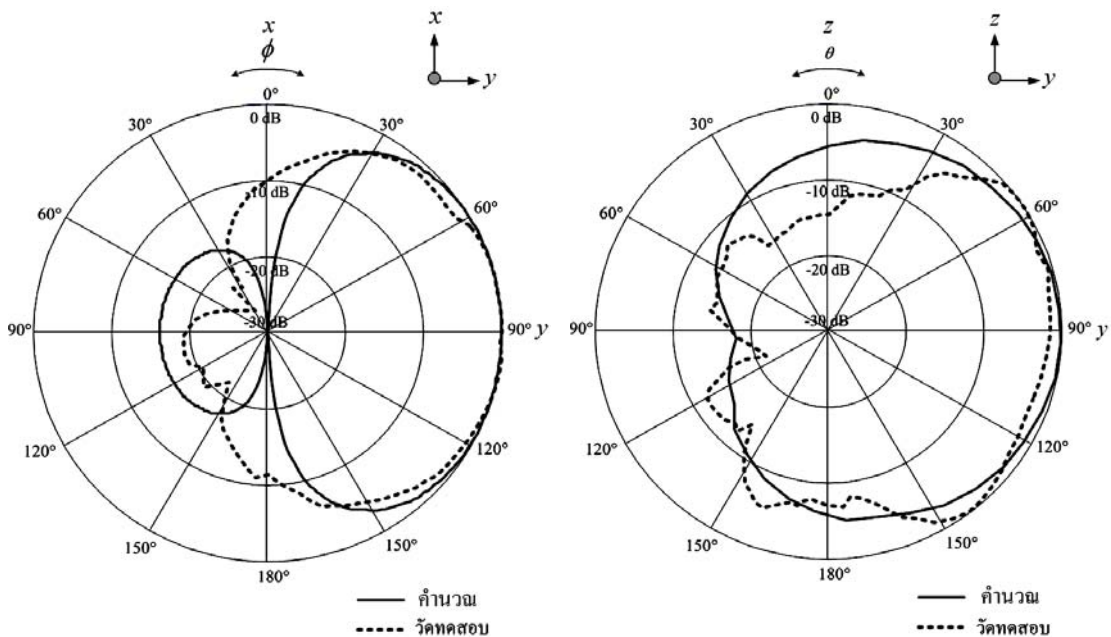


(ข) รีแอกแตนซ์

## รูปที่ 5.5 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์และผลจากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศโดยใช้ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ ดังรูปที่ 5.5 ได้ค่าที่สอดคล้องกัน ซึ่งผลของการวัดและการวิเคราะห์ได้มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ปฏิบัติการอยู่ระหว่าง 300 MHz ถึง 600 MHz โดยสายอากาศที่ทำการออกแบบใช้งานที่ความถี่ 470 MHz จึงได้ค่าค่าความต้านทานประมาณเท่ากับ 50 โอห์ม และค่ารีแอกแตนซ์ มีค่าประมาณเท่ากับ 0 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่เหมาะสมกับสายส่งสัญญาณและเครื่องส่ง เพื่อนำไปต่อใช้งานต่อไป

สำหรับการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



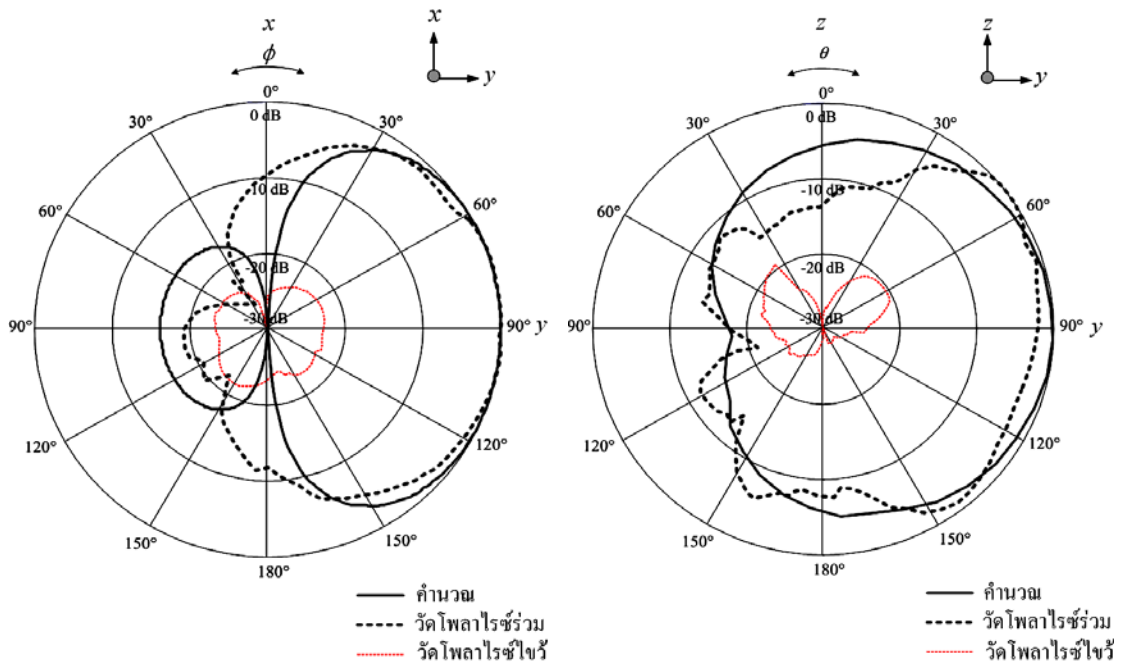
(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์

จากรูปที่ 5.6 (ก) และ(ข) เป็นผลที่ได้จากการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า ผลของการเปรียบเทียบจะสอดคล้องกันเป็นอย่างดี จากแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้า จากการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ประมาณเท่ากับ 120 องศา ซึ่งผลที่ได้จากการวัดสายอากาศต้นแบบจริง จะได้ประมาณเท่ากับ 130 องศา และแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็ก มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ประมาณเท่ากับ 130 องศา โดยผลที่ได้จากการวัดสายอากาศจะมีค่าประมาณเท่ากับ 120 องศา โดยมีค่ากำลังด้านหลัง ประมาณเท่ากับ -20 dB และพลังงานสูงสุดที่แผ่ออกจะอยู่ที่มุมเท่ากับ 90 องศา

สำหรับการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในลักษณะที่เป็นโพลาไรซ์ไขว้ (cross-polarized) ในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก โดยทำการเปรียบเทียบกับแบบรูปการแผ่พลังงานในโพลาไรซ์ร่วม (co-polarized) ทั้งในแนวนอน และแนวตั้งของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7



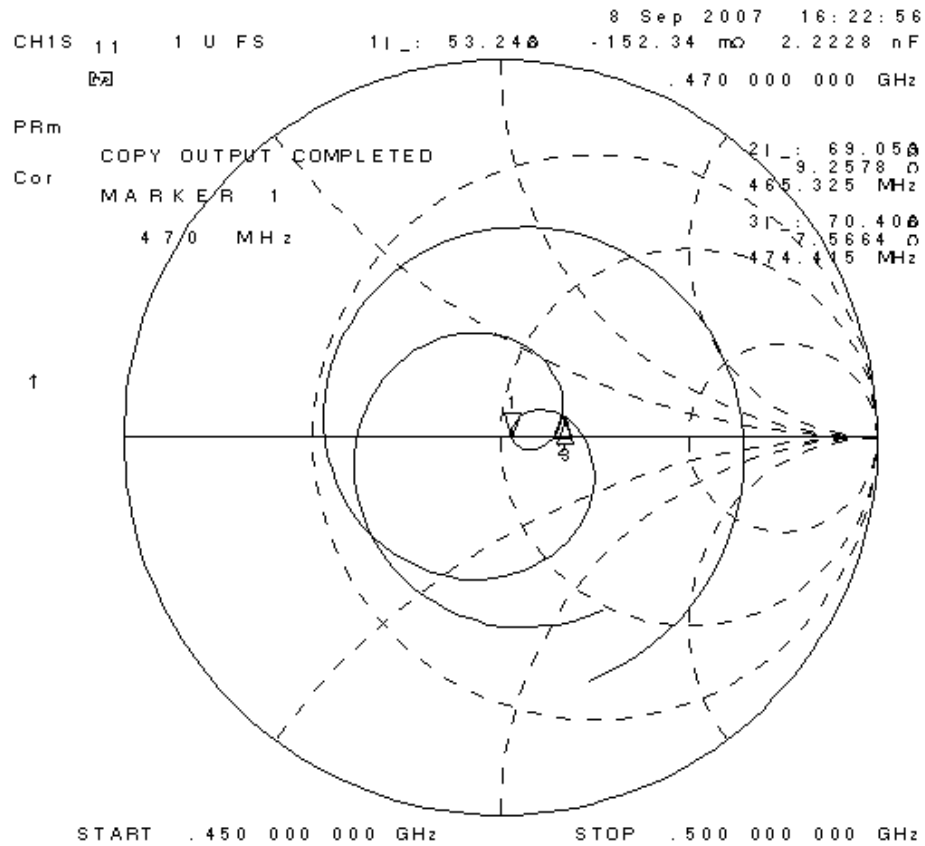
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่เปรียบเทียบกับการวัดแบบโพลาริไซซ์

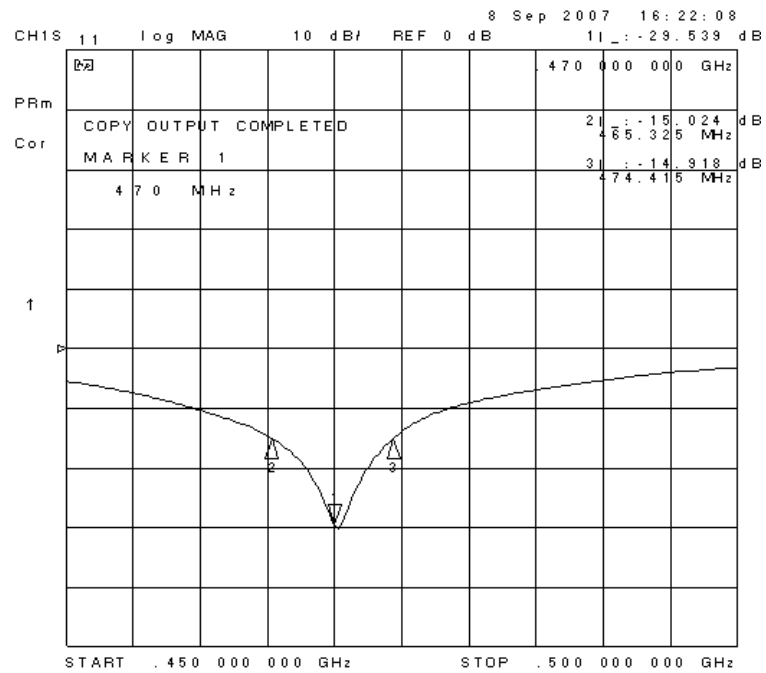
จากผลการวัดโพลาริไซซ์ จากรูปที่ 5.7 จะสังเกตได้ว่า แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบแม่เหล็ก จะสามารถกระจายคลื่นได้ดี ซึ่งแต่ละระนาบมีค่าประมาณเท่ากับ  $-25$  dB และ  $-20$  dB ตามลำดับ

ผลจากการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อิลิเมนต์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย แสดงดังรูปที่ 5.8 แสดงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบสายอากาศ ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $53.248 - j0.152 \Omega$

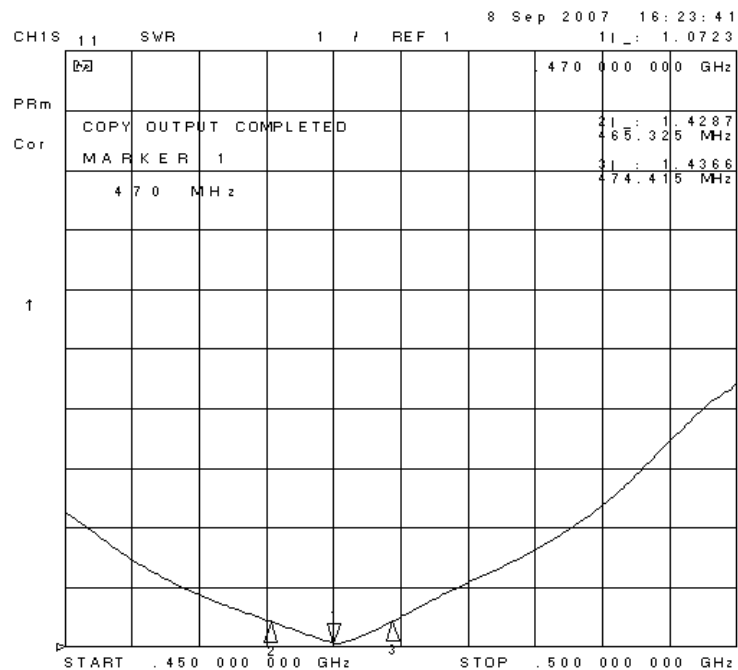


รูปที่ 5.8 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าความถี่ 470 MHz

จากผลการทดลองวัดสายอากาศไดโพลโค้งลวดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน โดยใช้ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ ตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ จะสังเกตได้ว่า ผลที่ได้จากการวัดสายอากาศนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องไปในแนวทางเดียวกัน โดยที่ตำแหน่งความถี่ปฏิบัติการของการวิเคราะห์อยู่ที่ความถี่ 470 MHz ได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ  $-29.539$  dB และมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับ  $1:1.0723$  ความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศ ประมาณเท่ากับ  $3.2\%$  โดยพิจารณาที่ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับประมาณเท่ากับ  $-15$  dB และจะมีค่าประมาณเท่ากับ  $4.25\%$  ถ้าพิจารณาที่ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับประมาณ เท่ากับ  $-10$  dB ผลของการวัดคุณลักษณะของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



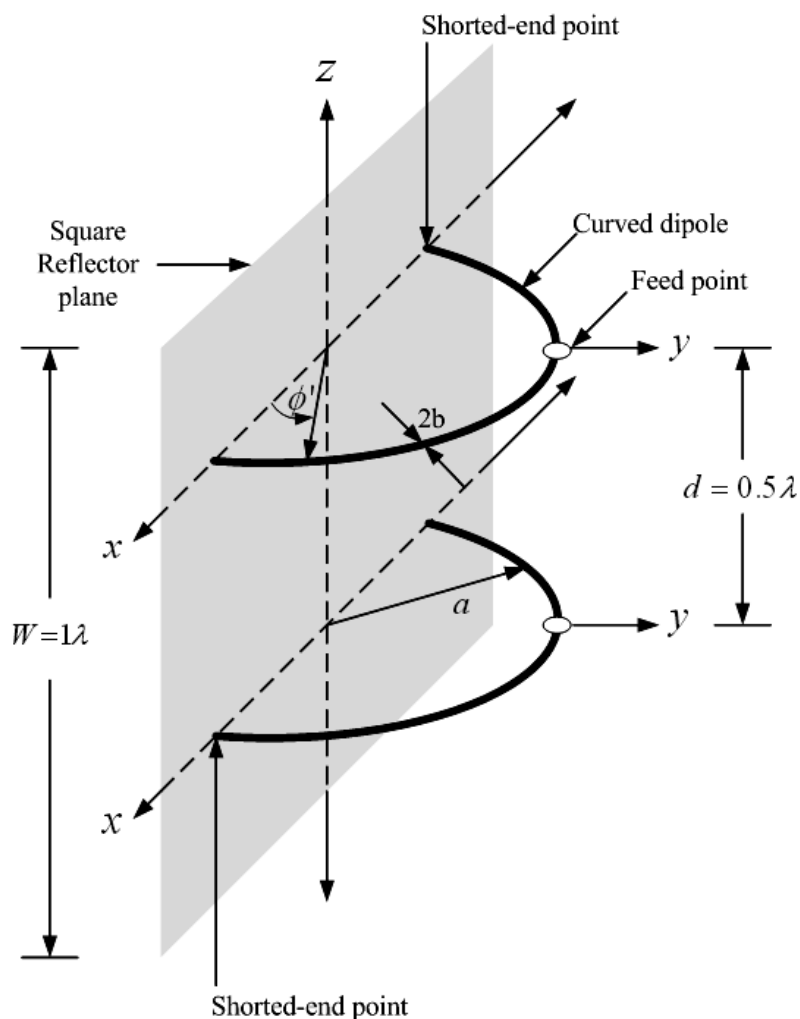
(ก) ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ



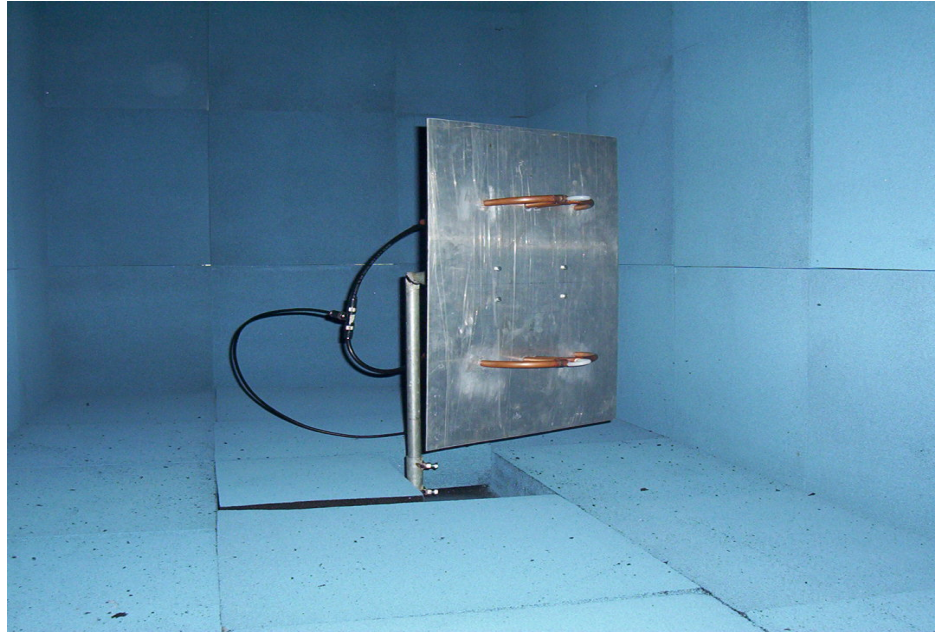
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ

รูปที่ 5.9 คุณลักษณะของสายอากาศที่ได้จากการวัดทดสอบ

เมื่อสายอากาศทำการเบย์สแตกก็จะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสอง คือ  $d = 0.50 \lambda$  และขนาดของระนาบตัวสะท้อน  $W = 1 \lambda$  การทดสอบสายอากาศ ก็คือ การวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญของสายอากาศ เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศนั้นขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นนั่นเอง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน จำนวน 2 อีลิเมนต์ ที่มีรูปทรงโครงสร้างสายอากาศเหมือนกัน โดยที่มีขนาดรัศมีของสายอากาศไดโพลโค้ง 10.15 เซนติเมตร มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 1.91 เซนติเมตร ในการออกแบบสายอากาศผู้ออกแบบต้องการเห็นความแตกต่างของสายอากาศคือสายอากาศที่มีความถี่ 470 MHz สามารถปรับค่าได้ในช่วงความถี่ประมาณ 300 MHz ถึง 600 MHz ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งจะบอกถึงระยะและขนาดต่าง ๆ ของสายอากาศที่จะทำการสร้าง และ สายอากาศต้นแบบที่ได้ทำการสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 5.11

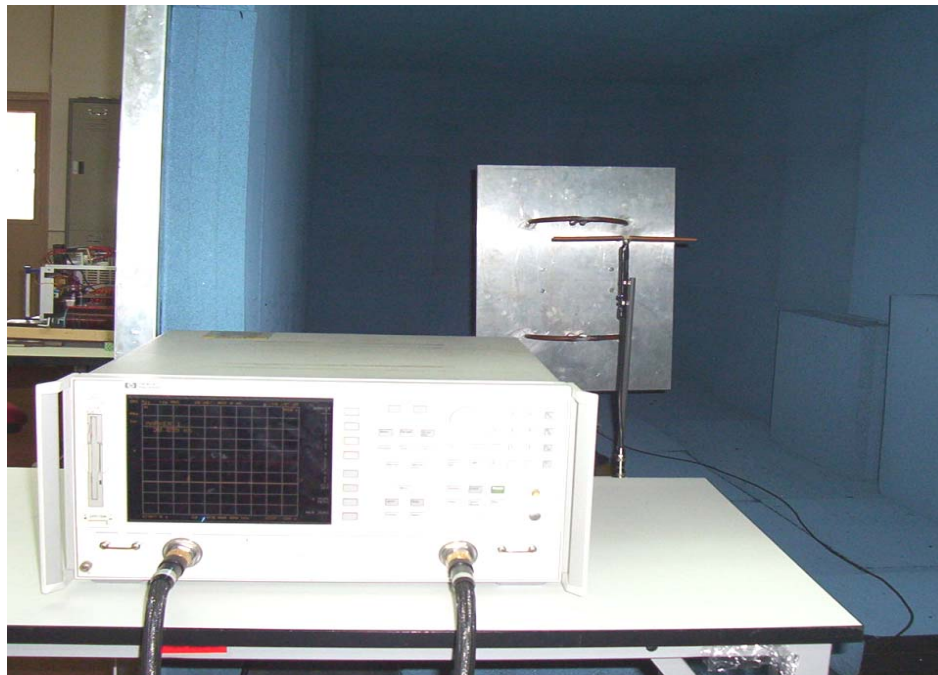


รูปที่ 5.10 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน



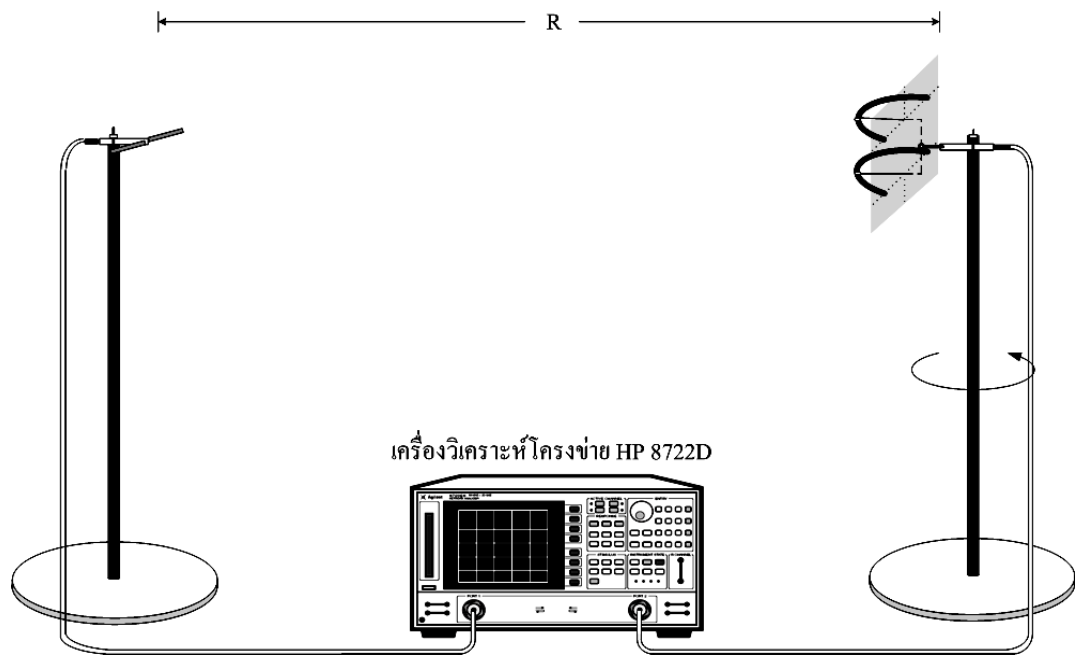
รูปที่ 5.11 สายอากาศต้นแบบ

### 5.3 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern)

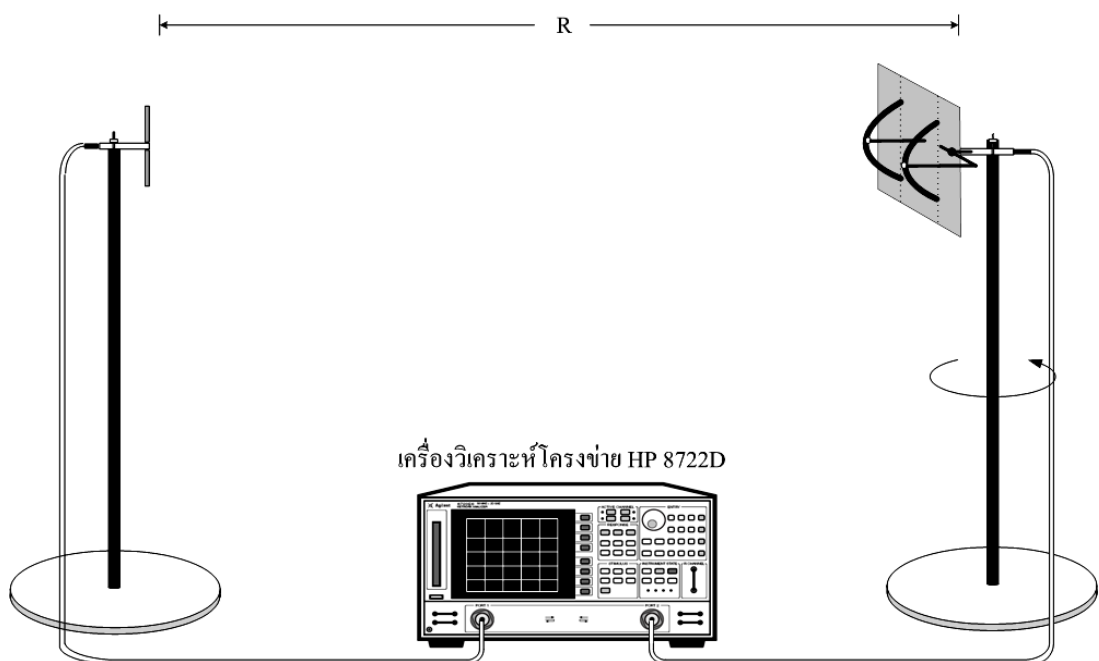


รูปที่ 5.12 การวัดทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ



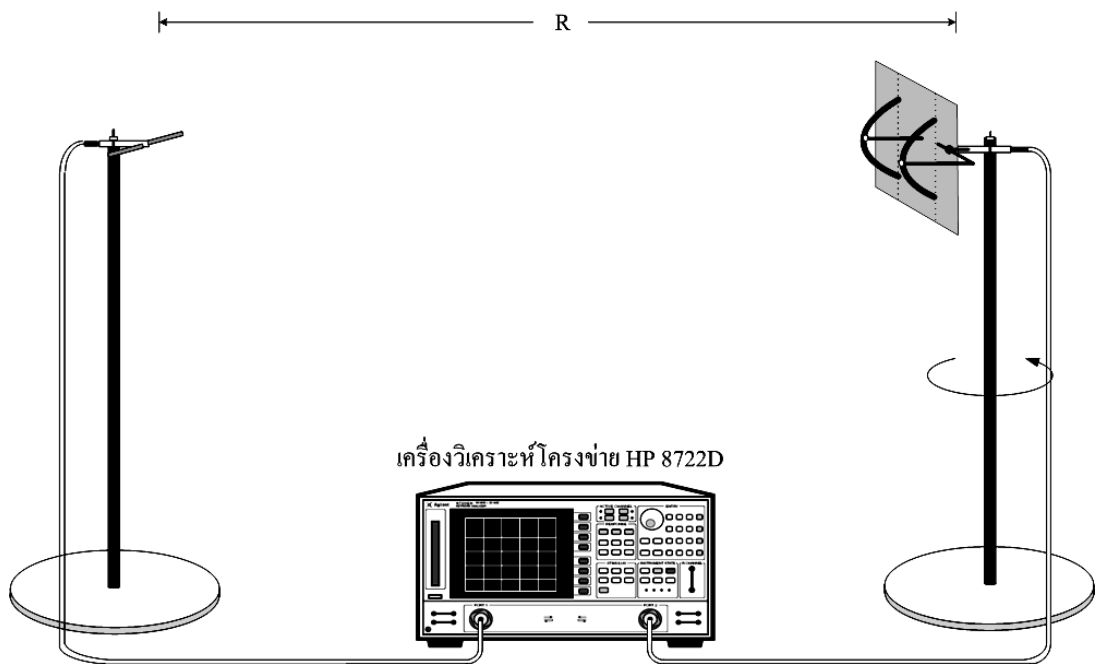


(ก) วิธีการวัดทดสอบในระนาบสนามไฟฟ้า

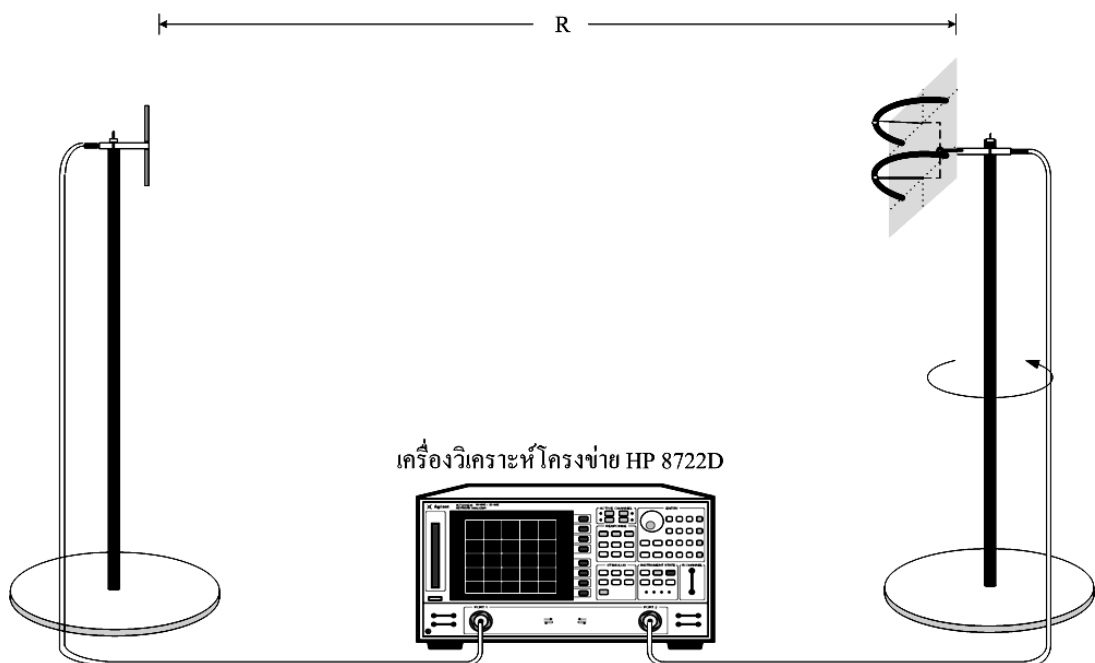


(ข) วิธีการวัดทดสอบในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.13 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบโพลาริซั่วม



(ก) วิธีการวัดทดสอบในระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) วิธีการวัดทดสอบในระนาบสนามแม่เหล็ก

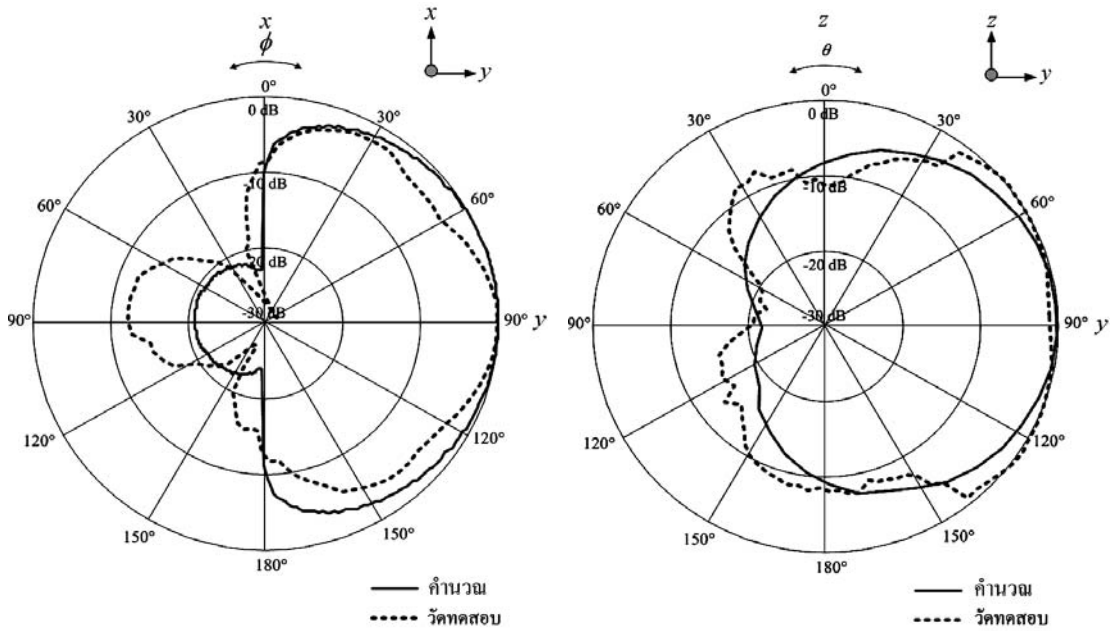
รูปที่ 5.14 การวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบโพลาริไซซ์ไขว้

ในการทดสอบจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กโดยทดสอบในห้องที่ไม่มีกระแสท่อน (chamber) ดังแสดงในรูปที่ 5.12 สายอากาศที่จะทำการทดสอบนั้นจะเป็นสายอากาศรับ ซึ่งจะทำการหมุนเพื่อรับคลื่นจาก 0 องศาจนถึงมุม 360 องศา ส่วนสายอากาศส่งเป็นสายอากาศแบบไดโพลเส้นตรง ออกแบบที่ความถี่เดียวกันกับสายอากาศด้านรับ และต้องมีโพลาริซซ์ที่เหมือนกันถ้าเป็นการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบโพลาริซซ์ร่วม และระดับความสูงของสายอากาศรับและสายอากาศส่งต้องเท่ากันด้วย ในรูปที่ 5.13 (ก) และ(ข) แสดงการเตรียมเครื่องมือสำหรับการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ

สำหรับการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบโพลาริซซ์ไขว้ ในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงการจัดเตรียมเครื่องมือได้ดังรูปที่ 5.14 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศนั้นได้ทดสอบในระยะสนามระยะไกล คือ  $R \geq 2D^2/\lambda$  เมื่อ  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศทดสอบ และสายอากาศอ้างอิง ในการทดสอบนี้เรากำหนดให้ระยะทางมีค่าคงที่ โดยมีความถี่ในการออกแบบเท่ากับ 470 MHz ได้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ เท่ากับ 31.9 เซนติเมตร และ  $D$  คือ ขนาดของสายอากาศที่กว้างที่สุดมีค่าเท่ากับ 31.9 เซนติเมตร ซึ่งในที่นี้ได้ใช้สายอากาศไดโพลเส้นตรงที่ความถี่ 470 MHz เป็นสายอากาศอ้างอิง ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศที่นำมาทดสอบจะมีการหมุนรับคลื่นจาก 0 องศา ถึง 360 องศา ซึ่งจะทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ในระนาบสนามไฟฟ้า ในระนาบ xy และระนาบสนามแม่เหล็ก ในระนาบ yz ดังแสดงในรูปที่ 5.15 (ก) และ (ข) ตามลำดับ

การหมุนรอบรับคลื่นจาก 0 องศาจนถึงมุม 360 องศา มุมเหล่านี้จะใช้วัดค่าเมื่อเปลี่ยนค่ารัศมีไปทำให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก เป็นดังแสดงในรูปที่ 5.15 ซึ่งได้เลือกวิธีเปรียบเทียบกราฟ จากระเบียบวิธีโมเมนต์เทียบกับวิธีการวัดทดสอบ ซึ่งจะสังเกตได้ว่า จากแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าที่ได้จะสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบแม่เหล็ก ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานสนามระยะไกล พบว่ามีแบบรูปการแผ่พลังงานของสนามเป็นแบบบรอดไซด์ คือ มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพุ่งออกในลักษณะตั้งฉากกับตัวสายอากาศ และมีทิศพุ่งออกในทิศทางเดียวกับรูปร่างของสายอากาศ ที่ได้ออกแบบ

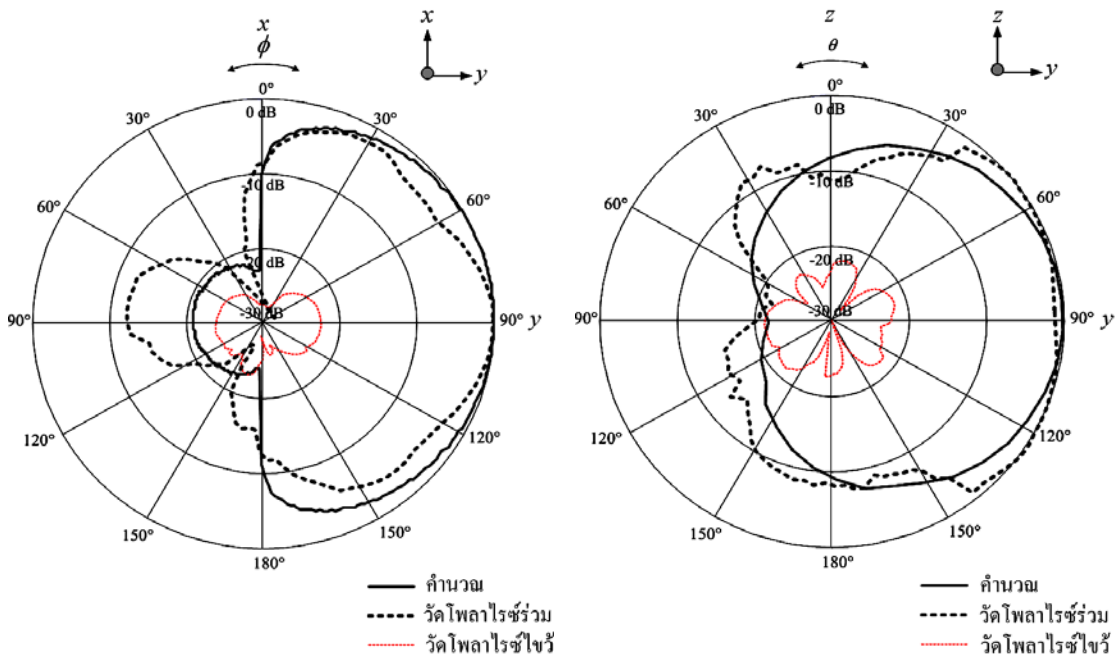


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศไดโพล โคง 2 อีลิเมนต์

จากรูปที่ 5.15 (ก) และ (ข) เป็นผลที่ได้จากการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับไดโพล โคง 2 อีลิเมนต์ตรงแนวระนาบตัวสะท้อน เปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามลำดับ จะสังเกตได้ว่า ผลของการเปรียบเทียบจะสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ประมาณเท่ากับ 120 องศา ซึ่งผลที่ได้จากการวัดสายอากาศต้นแบบจริง จะได้ประมาณเท่ากับ 130 องศา และแบบรูปการแผ่พลังงานระนาบสนามแม่เหล็กมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ประมาณเท่ากับ 130 องศา โดยผลที่ได้จากการวัดสายอากาศจะมีค่าประมาณเท่ากับ 120 องศา โดยมีค่ากำลังด้านหลัง ประมาณเท่ากับ -15 dB และพลังงานสูงสุดที่แผ่ออกจะอยู่ที่มุมเท่ากับ 90 องศา



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

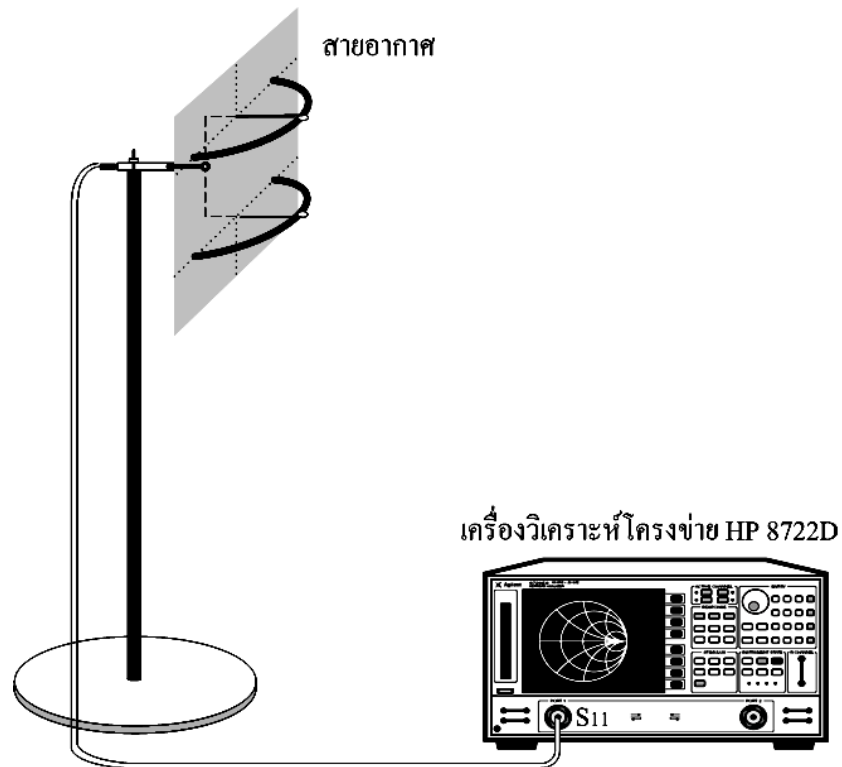
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่เปรียบเทียบกับกรวดแบบโพลาริซซ์ไจว์

จากผลการวัดโพลาริซซ์ไจว์ จากรูปที่ 5.16 จะสังเกตได้ว่า แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบแม่เหล็กจะสามารถกระจายคลื่นได้ดี ซึ่งแต่ละระนาบมีค่าประมาณเท่ากับ  $-25$  dB และ  $-20$  dB ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นมีการโพลาริซซ์เป็นแบบเส้นตรง

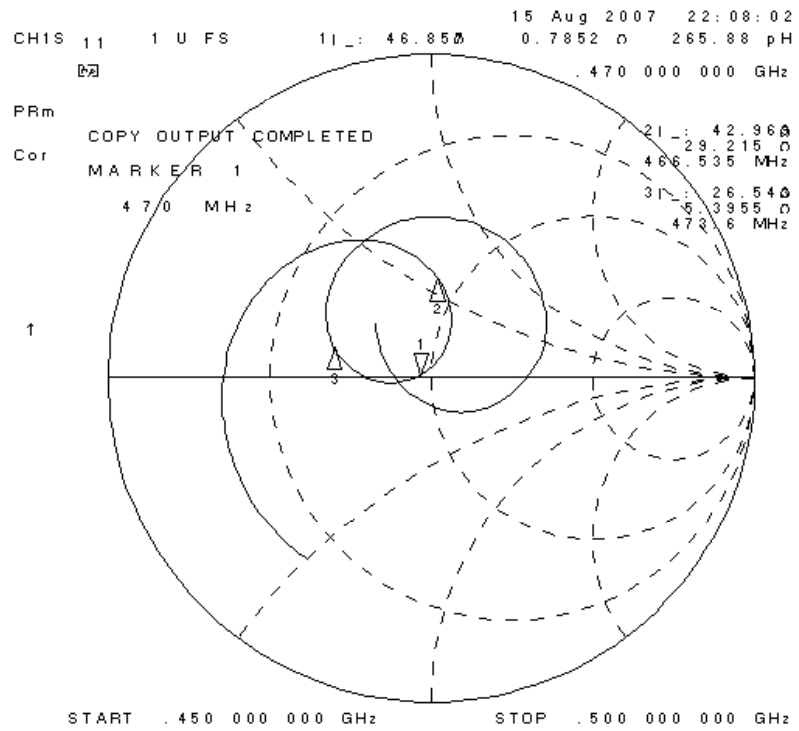
#### 5.4 การวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristics impedance)

อิมพีแดนซ์ด้านเข้า เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก เพราะว่าหากสายอากาศไม่แมตช์กับสายนำสัญญาณแล้ว สายอากาศก็ไม่สามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง ๆ ได้ สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ใช้สายนำสัญญาณแบบโคแอกเซียลที่มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งเท่ากับ 50 โอห์ม ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน ที่สร้างจะต้องมีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ หรือใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุด โดยสามารถดูจากค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ที่จะต้องไม่เกิน 1.5 dB ซึ่งการวัดค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP8722D สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.17

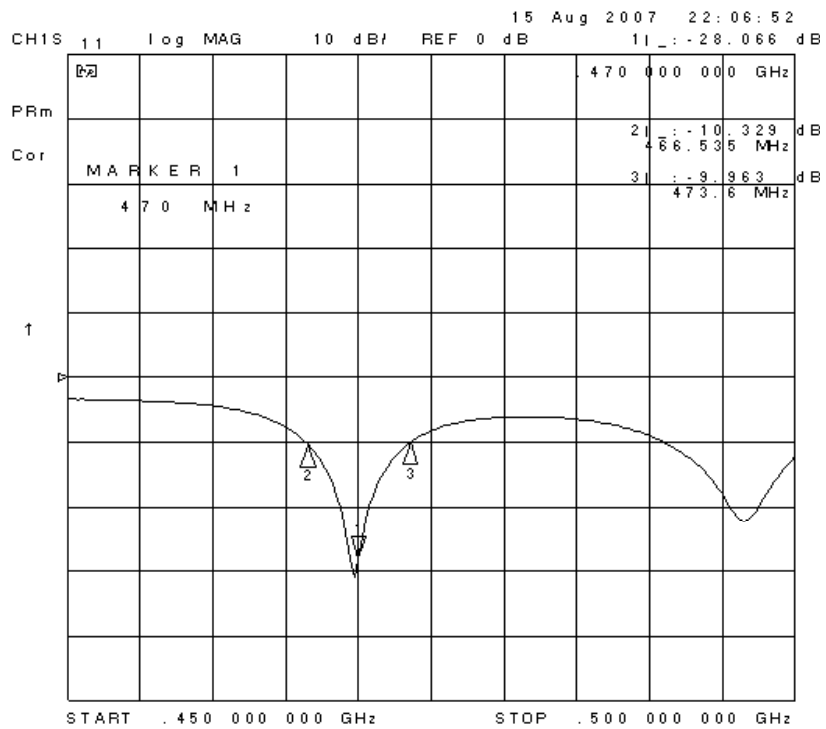


รูปที่ 5.17 การต่อวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ

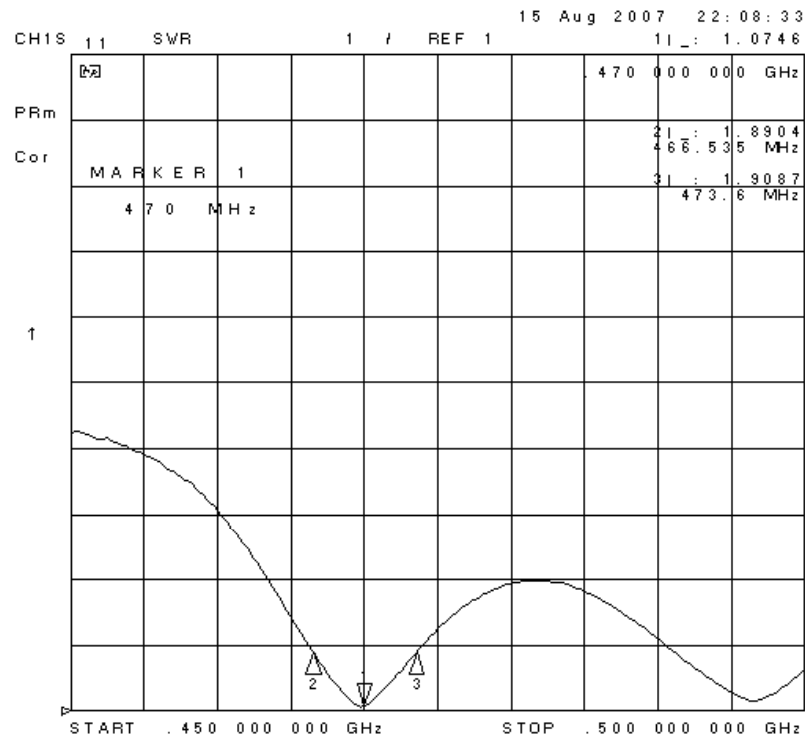
จากผลการวิเคราะห์แล้วนำไปสู่การสร้างสายอากาศแถวลำดับไดโพลโค้งลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อนแบบตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่า เมื่อทำการพิจารณาในส่วนของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า และความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ แล้วนำผลที่ได้จากการวัดสายอากาศนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ซึ่งผลที่ได้จะสอดคล้องไปในแนวทางเดียวกัน โดยที่ตำแหน่งความถี่ปฏิบัติการของการวิเคราะห์อยู่ที่ความถี่ 470 MHz จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ  $46.85 + 0.7852j \Omega$  มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -28.066 dB และมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับ 1:1.0746 ดังแสดงผลการวัดอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศได้ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศจากการวัด



รูปที่ 5.19 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ



รูปที่ 5.20 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศ

ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ สามารถมีค่าได้ตั้งแต่ 0 dB ถึง ลบอนันต์ (negative infinity : dB) ถ้ามีค่าเท่ากับ 0 dB แสดงว่าไม่แมตช์อย่างสมบูรณ์ และถ้ามีค่าเป็นลบอนันต์ แสดงว่ามีการแมตช์ที่สมบูรณ์ที่สุด (รังสรรค์ วงศ์สรรค์ และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพานิชย์, ม.ป.ป.) ดังนั้น ในงานประยุกต์ต่าง ๆ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ จะยอมรับได้ถ้ามีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งจะสอดคล้องกับค่า SWR เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตช์ที่ดี รูปที่ 5.19 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ มีค่าน้อยกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ 466.5 MHz ถึง 473.6 MHz

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาการแมตช์ของอิมพีแดนซ์ด้านเข้า คือ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ โดยที่ค่าของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งสามารถมีค่าต่ำสุดตั้งแต่ 1 ถึงอนันต์ ถ้าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าสายอากาศนั้นมีการแมตช์ที่สมบูรณ์ ส่วนค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ หมายความว่ากำลังไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนให้กับสายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นออกไปทั้งหมดไม่มีการสะท้อนกลับมา และถ้าสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับอนันต์หมายความว่า สายอากาศนั้นเกิดการไม่แมตช์ทำให้กำลังไฟฟ้าที่ส่งออกไปเกิดการสะท้อนกลับมาทั้งหมดทำให้เครื่องส่งเสียหายได้ ซึ่งจากรูปที่ 5.20 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ความถี่ 470 MHz เท่ากับ 1:1.0746 ที่ได้จากการวัดทดสอบ



## 5.5 การวัดความกว้างแถบสายอากาศ (antenna bandwidth)

โดยการพิจารณาความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศสามารถหาได้จาก

$$\% \text{ ความกว้างแถบ} = \frac{f_{high} - f_{low}}{f_c} \times 100 \quad (5.1)$$

เมื่อ  $f_{high}$  คือค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้  $f_{low}$  คือค่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้ และ  $f_c$  คือค่าความถี่กึ่งกลางของความกว้างแถบนั้น ๆ ดังนั้น จากรูปที่ 5.8 สายอากาศจะมีความกว้างแถบประมาณ 2.47%

## 5.6 การวัดอัตราขยายในทิศทางด้านหน้า (gain)

การวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน วิธีที่ง่ายที่สุด ก็คือวิธีที่เรียกว่า วิธีแบบใช้สายอากาศอ้างอิง (reference antenna method) หรือวิธีการเปรียบเทียบ (comparison method) หรือวิธีการแทนที่ (substitution method) ซึ่งสามารถหาได้โดยการเปรียบเทียบกำลังงานที่ได้รับด้วยสายอากาศอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) กับกำลังงานที่รับได้จากสายอากาศที่ทำการทดสอบ ( $P_{test}$ ) ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ต้องการทราบจะหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$G_{test} = \frac{P_{test}}{P_{ref}} G_{ref} \quad (5.2)$$

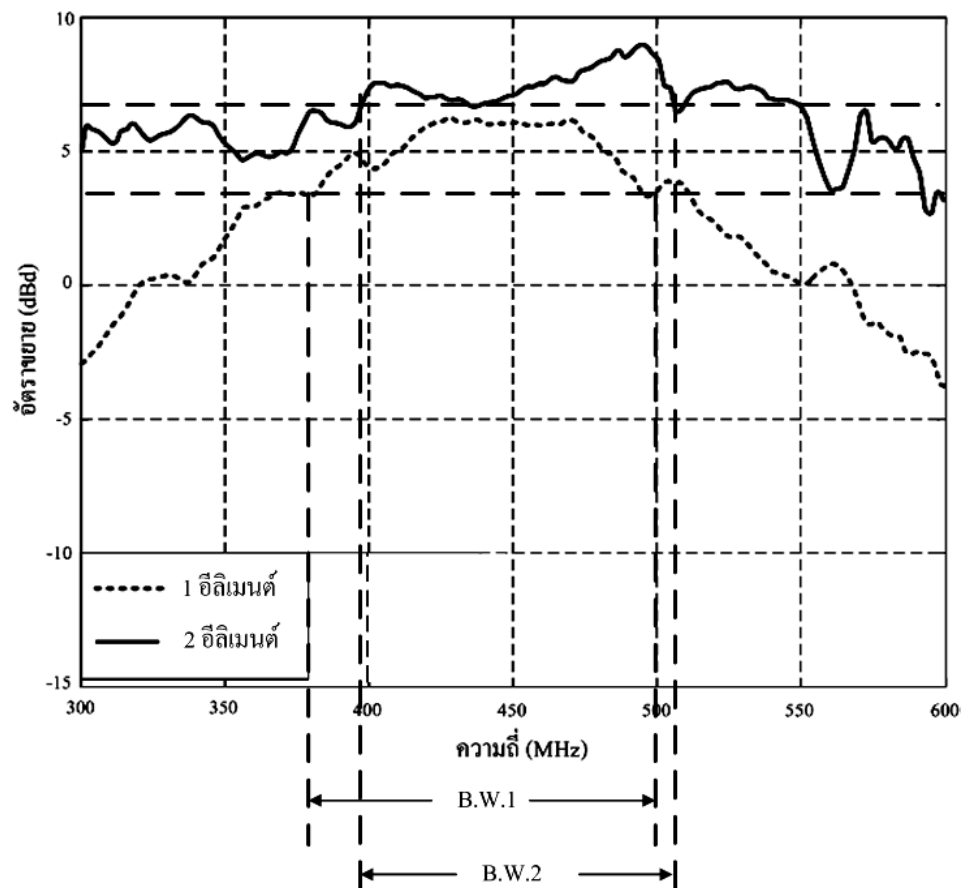
เมื่อต้องการหาค่าตอบ ให้มีหน่วยเป็น dB ก็จะหาได้จากสมการ

$$G_{test} \text{ (dB)} = P_{test} \text{ (dB)} - P_{ref} \text{ (dB)} + G_{ref} \text{ (dB)} \quad (5.3)$$

ก่อนที่จะนำวิธีการแทนที่มาใช้ นั้น เราจะต้องเปรียบเทียบเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศที่ใช้ในการอ้างอิงเสียก่อน โดยการใส่สายอากาศสองตัวที่เหมือนกันทุกประการมาเป็นสายอากาศรับและส่ง จากนั้นวัดค่ากำลังงานที่ส่งออกไปและค่าของกำลังงานที่รับได้ นำมาคำนวณหาค่าอัตราขยาย ซึ่งเป็นอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง ดังสมการ (5.4)

$$G = \frac{4\pi r}{\lambda} \sqrt{\frac{P_{rec}}{P_0}} \quad (5.4)$$

- โดยที่  $G$  คือ ค่าอัตราขยายของสายอากาศที่จะใช้เป็นตัวอ้างอิง
- $r$  คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศทั้งสอง
- $P_{rec}$  และ  $P_0$  คือ กำลังงานที่รับได้และกำลังงานที่ส่งออกไป ตามลำดับ
- $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศ

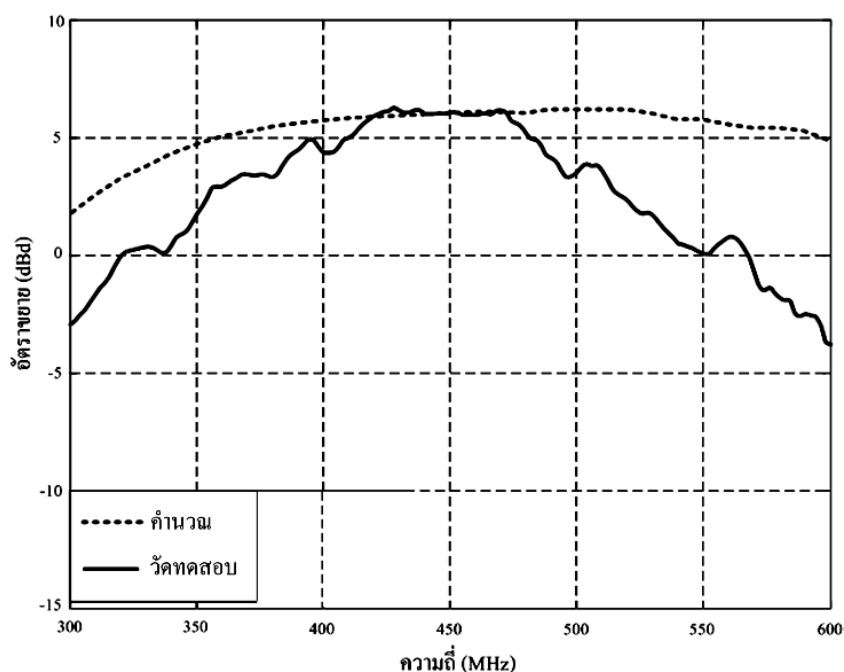


รูปที่ 5.21 อัตราการขยายของสายอากาศไดโพลโค้งที่ได้จากการวัดทดสอบ

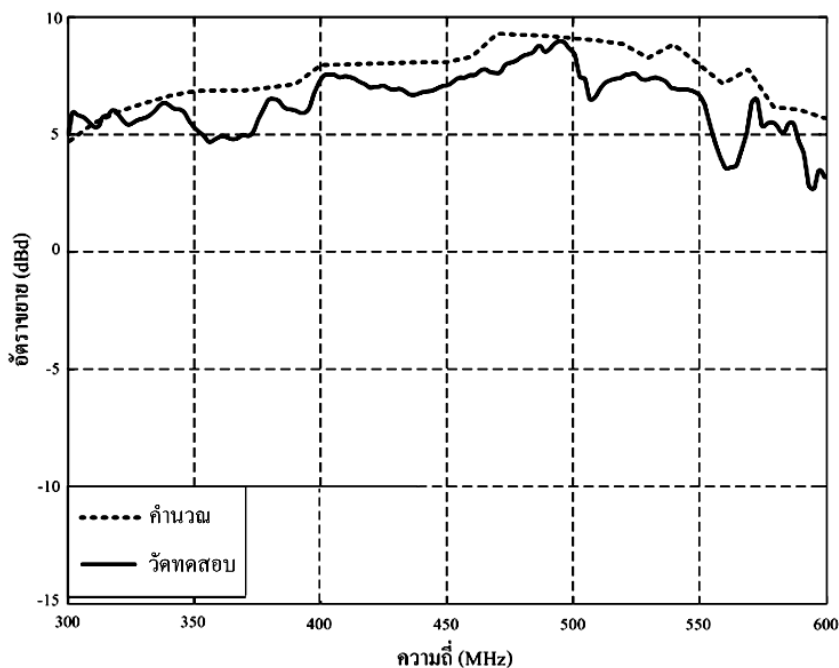
ในที่นี้ได้ใช้สายอากาศไดโพลเส้นตรงที่ความถี่ 470 MHz เป็นสายอากาศอ้างอิงทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศที่นำมาทดสอบจะมีการหมุนรับคลื่นจาก 0 องศา ถึง 360 องศา ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งจะทำได้แบบรูปของการแผ่พลังงานของสายอากาศ ในระนาบสนามไฟฟ้า และ

ระนาบสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.15 จะสังเกตได้ว่า อัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดลองวัดสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ จะมีค่าสูงสุดประมาณเท่ากับ 5.9 dB และอัตราการขยายที่ได้จากการวัดสายอากาศไดโพลโค้ง 2 อีลิเมนต์ จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.55 dB สามารถแสดงผลของการวัดสายอากาศได้ ดังรูปที่ 5.21 โดยการพิจารณาถึงค่าความกว้างแถบอัตราการขยายของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ ที่ได้จากการวัดทดสอบ จะมีค่าความถี่ตั้งแต่ 380 MHz ถึง 500 MHz และค่าความกว้างแถบอัตราการขยายของสายอากาศไดโพลโค้ง 2 อีลิเมนต์ ที่ได้จากการวัดทดสอบ จะมีค่าความถี่ตั้งแต่ 395 MHz ถึง 510 MHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.21

สำหรับการเปรียบเทียบอัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณและจากการวัดทดสอบสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ และ 2 อีลิเมนต์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 (ก) และ (ข) ตามลำดับ จากรูปจะสังเกตได้ว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณและผลที่ได้จากการวัดทดสอบจะมีความสอดคล้องกัน โดยอัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดลองวัดสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์ จะมีค่าสูงสุดประมาณเท่ากับ 5.8 dB ซึ่งมีค่าอัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ จะมีค่าเท่ากับ 5.9 dB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 (ก) และอัตราการขยายที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศไดโพลโค้ง 2 อีลิเมนต์ จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.55 dB ซึ่งมีค่าอัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณ จะมีค่าเท่ากับ 8.59 dB สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 (ข)



(ก) อัตราการขยายของสายอากาศไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์



(ข) อัตราการขยายของสายอากาศไดโพลโค้ง 2 อีลิเมนต์

รูปที่ 5.22 อัตราการขยายของสายอากาศไดโพลโค้ง

## 5.7 สรุป

ในบทนี้เป็นการแสดงการสร้าง และการวัดทดสอบสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ ว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่พิจารณา ได้แก่ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ความกว้างแถบสายอากาศ อัตราการขยายของสายอากาศ แบบรูปการแผ่พลังงาน และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศแฉวลำดับลำคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อน จะสังเกตได้ว่า พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศที่ได้จากการวัดทดสอบและการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์มีความแตกต่างกันบ้าง ซึ่งการวัดอัตราการขยายกำลังของสายอากาศ จะใช้การวัดสนามระยะไกลโดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศไดโพลเส้นตรงเป็นสายอากาศตัวส่งกับสายอากาศแฉวลำดับลำคลื่นกว้างโดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อนที่เป็นสายอากาศตัวรับ เท่ากับ 31.9 เซนติเมตร ผลการวัดทดสอบ อัตราขยายสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 8.55 dB ดังแสดงในรูปที่ 5.19 อัตราขยายสูงสุดที่ได้จากการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ในระนาบสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 8.59 dB นั่นคืออัตราขยายสูงสุดจากการวัดมีค่าต่ำกว่าการจำลองผลประมาณ 0.04 dB

สำหรับผลการวัดความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 130 องศา และ 90 องศา ตามลำดับ ผลจากการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์มีค่าเท่ากับ 120 องศา และ 130 องศา ตามลำดับ โดยความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังที่ได้จากการวัดมีค่าแตกต่างจากผลการคำนวณเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองผลคือ อาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งตัวสายอากาศส่งและสายอากาศที่ออกแบบเพื่อเป็นสายอากาศรับ จะทำให้เกิดการเลื่อนเชิงตำแหน่งของแบบรูปการแผ่พลังงาน และผลกระทบจากค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้วัดทดสอบสายอากาศ เป็นต้น

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการศึกษา วิเคราะห์ ออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบ แล้วทำการวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศแฉวลำดับลำคลื่นกว้าง โดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัวสะท้อนเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งมีการป้อนสัญญาณเข้าที่จุดกึ่งกลางของไดโพลโค้ง คุณสมบัติของสายสายอากาศจะต้องมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนจนเกินไป สามารถประกอบได้ง่าย มีน้ำหนักเบา รองรับกำลังงานที่สูงได้ มีความกว้างลำคลื่นสำหรับการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้อย่างเพียงพอ และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าสูง จึงจำเป็นต้องทำการพัฒนาอุปกรณ์สายอากาศให้สอดคล้องกับความต้องการและสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการปรับรูปร่างไดโพลเส้นตรงให้เป็นไดโพลโค้งและลัดวงจรที่ปลายของไดโพลเข้ากับระนาบตัวสะท้อน และเลือกรูปแบบการป้อนสัญญาณที่จุดกึ่งกลางของตัวไดโพลโค้ง เพื่อทำให้เกิดอัตราขยายกำลังในทิศทางด้านหน้าสูงสุด และมีความกว้างของลำคลื่น ในการส่งสัญญาณของสายอากาศมากขึ้น โดยมีขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยดังนี้ เริ่มแรก ใช้วิธีการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SuperNEC เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของสายอากาศดังกล่าว จากนั้นจะใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงเลขวิธีหนึ่งที่ทำให้ผลเฉลยที่แม่นยำสูง เพื่อหาแบบรูปการแผ่พลังงาน สภาพแฉะจางทิศทาง และอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เป็นต้น สุดท้าย จะเป็นการสร้างสายอากาศต้นแบบตามขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ เพื่อนำมาวัดทดสอบเปรียบเทียบกับผลเฉลยที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SuperNEC และผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์หาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศ ทำให้สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยายสูงสุด และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารแบบไร้สาย โดยเฉพาะสายอากาศที่ใช้สำหรับสถานีแพร่สัญญาณโทรทัศน์ ในย่านความถี่ UHF ที่มีช่วงความถี่ตั้งแต่ 300 – 3000 MHz ต่อไป

ได้มีการศึกษาถึงปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศแต่ละชนิดที่ใช้ในงานการสื่อสารแบบไร้สายและปริทัศน์วรรณกรรมงานวิจัยวิธีระเบียบวิธีโมเมนต์ พร้อมทั้งกล่าวถึงลักษณะ โครงสร้างสายอากาศแฉวลำดับลำคลื่นกว้าง โดยใช้ไดโพลโค้งลัดวงจรบนระนาบตัว

สะท้อนที่สนใจในการออกแบบ ได้ทำการศึกษาทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและพื้นฐาน วิธีวิเคราะห์เชิงเลขโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 โดยเริ่มจากหลักการของระเบียบวิธีโมเมนต์ ประกอบไปด้วยเงื่อนไขความผิดพลาด และความเสถียรที่จะนำไปสู่ความถูกต้องในผลเฉลยของคำตอบที่ได้ จากนั้นจึงเข้าสู่วิธีการระเบียบวิธีโมเมนต์ในฟังก์ชันทรงกระบอกที่เป็นโครงสร้างและเงื่อนไขเบื้องต้น ต่อจากนั้น ในบทที่ 4 ได้นำเสนอผลเฉลยจากการจำลองสายอากาศต้นแบบด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมจำลอง SuperNEC และผลเฉลยจากการใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์วิเคราะห์สายอากาศ ซึ่งได้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน สภาพเจาะจงทิศทาง และอิมพีแดนซ์ด้านเข้า เป็นต้น เพื่อนำมาสร้างเป็นสายอากาศที่นำมาใช้งานย่านความถี่การสื่อสารแบบไร้สายและประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศสำหรับส่งสัญญาณ โทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ที่นำเสนอไว้ข้างต้น และสุดท้ายได้สร้างสายอากาศต้นแบบตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ถูกออกแบบไว้เพื่อยืนยันความถูกต้องของการออกแบบ ด้วยผลการทดลองวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศโดยใช้เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการ ดังได้กล่าวรายละเอียดไว้แล้วในบทที่ 5

สรุปผลที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศมีความสอดคล้องกับผลเฉลยที่ได้จากการวิเคราะห์และคำนวณ โดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ แต่ผลจากการวัดทดสอบอาจจะให้ค่าที่คลาดเคลื่อนขึ้นได้เล็กน้อย ซึ่งสาเหตุของการคลาดเคลื่อนระหว่างผลการวัดทดสอบและผลการจำลองผล คือ อาจเกิดจากความสูญเสียในระบบสายอากาศ เช่น ความสูญเสียในสายส่ง ความผิดพลาดจากการจัดวางตำแหน่งสายอากาศส่งและสายอากาศรับ สุดท้ายเกิดจากผลกระทบจากสภาพแวดล้อมขณะวัดทดสอบสายอากาศ เป็นต้น คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ ทำการเปรียบเทียบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ

คุณลักษณะของสายอากาศ	ไดโพลโค้ง 1 อีลิเมนต์		ไดโพลโค้ง 2 อีลิเมนต์		ไดโพลเส้นตรง บนแผ่นระนาบ	
	E- plane	H- plane	E- plane	H- plane	E- plane	H- plane
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (ผลวัด)	130 °	120 °	120 °	120 °	78 °	110 °
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (คำนวณ)	130 °	120 °	120 °	130 °	78 °	100 °
อัตราขยายสูงสุด (ผลวัด)	5.8 dB		8.55 dB		3.15 dB	
อัตราขยายสูงสุด (คำนวณ)	5.9 dB		8.59 dB		3.297 dB	

## 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

จากบทสรุปที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่า นอกจากการเลือกเทคนิคของการสร้างสายอากาศที่เหมาะสมกับจุดประสงค์ของการทำงานสำหรับการแพร่สัญญาณโทรทัศน์ที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้อย่างเพียงพอ และมีอัตราขยายในทิศทางด้านหน้าสูง ยังต้องพิจารณาถึงกระบวนการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศด้วย เพื่อที่จะนำผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณและวิเคราะห์ไปประกอบการสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป นอกจากนี้สายอากาศที่ได้ทำการวิจัย อาจนำไปประยุกต์ใช้กับรูปแบบการแพร่สัญญาณโทรทัศน์แบบรอบทิศทาง โดยการวางตำแหน่งของสายอากาศ 3 ตัว รอบ ๆ สถานีแพร่สัญญาณโทรทัศน์ย่านความถี่ UHF ก็จะสามารถครอบคลุมพื้นที่ให้บริการได้ 360 องศา และทำการปรับปรุงรูปแบบการแผ่กระจายให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะได้ทำการพัฒนารูปแบบการจัดวางสายอากาศต่อไป

ในลำดับสุดท้ายนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิธีการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบ รวมถึงการสร้างสายอากาศต้นแบบพร้อมทั้งผลการทดลองจากวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางที่ดีให้แก่ผู้สนใจศึกษาและค้นคว้า ในเรื่องของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้ไดโพลโค้ง ลัดวงจรที่ปลายบนระนาบตัวสะท้อน และวิธีการวิเคราะห์เชิงเลขของระเบียบวิธีโมเมนต์ ทั้งในโครงสร้างแบบเดียวกับในวิทยานิพนธ์นี้ รวมถึงโครงสร้างแบบอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป



## รายการอ้างอิง

- รังสรรค์ วงศ์สรรค์ และ ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์. (ม.ป.ป.). **คู่มือการทดลองพื้นฐานของสายอากาศ**. สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Balanis, C. A. (1989). **Advanced Engineering Electromagnetics**. John Wiley & Sons. New York.
- Balanis, C. A. (1997). **Antenna Theory Analysis and Design**. John Wiley & Sons. New York.
- Bergmann, J.R., Hasselmann, F.J.V., Branco, M.G.C. (2002). MoM Analysis of a Reflector Antenna Design for Omnidirectional Coverage. **Antennas and Propagation Society International Symposium**. 4: 148-151.
- Casciola, D., Miers, G.L., and Surette, R.A. (1999). UHF Antenna Choices. **IEEE Transaction Broadcasting**. 45(1): 93-105.
- Cheng, D.K. (1991). Gain Optimization for Yagi-Uda Arrays. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**. 33(3): 42-46.
- Dubost, G. (1981). **Flat Radiating Dipoles and Applications to Array**. Research Studies Press a division of John Wiley & Sons LTD. New York.
- Elkamchouchi, H. (2004). The S-Shaped Dipole Antenna. **Proceeding IEEE Microwave and Millimeter Wave Technology, 2004, ICMMT 4<sup>th</sup> International Conference**. 19-22.
- Hirano, T., Hirokawa, J., and Ando, M. (2000). Method of Moment Analysis of a Waveguide Crossed Slot by using the Eigenmode Basis Functions Derived by the Edge-Based Finite-Element Method. **Proceeding Institute Electric Engineering Microwave Antennas Propagation**. 147(5): 349-353.
- Hirokawa, J. (1993). **A Study of Slotted Waveguide Array Antenna**. Department of Electrical and Electric Engineering, Doctoral Dissertation, Tokyo Institute of Technology.
- Harrington, R. F. (1961). **Time-Harmonic Electromagnetic Fields**. McGraw-Hill. New York.
- Krishnan, S., Li, L.-W., and Leong, M.-S. (2005). A V-Shaped Structure for Improving the Directional Properties of the Loop Antenna. **IEEE Trans. Antennas Propagation**. 53(6): 2114-2117.

- Min, K.S., Ko, J.W., Arai, H., and Kim, D.I. (2001). Circularly Polarized Array Antenna with Electromagnetically Coupled Cross Slot Radiator. **in Proceeding IEEE Microwave Conference, 2001. APMC 2001.2001 Asia-Pacific**. 3: 1147-1150.
- Mizuno, K., Uehara, K., Nishimura, H., Yonekura, T., and Suzuki, T. (1991). Yagi-Uda array for millimeter-wave imaging. **Electronics Letters**. 27(2): 108-109.
- Mushiake, Y. (2003). A report on Japanese developments of antennas from Yagi-Uda antenna to self-complementary antennas. **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**. 3: 841-844.
- Mushiake, Y. A theoretical analysis of the multi-element end-fire array with particular reference to the Yagi-Uda antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. 4(3): 441-444.
- Ray, K.P., Chande, J.V., and Damle, S.H. (1995). The mutual coupling effect on the input impedance and radiation pattern of Yagi antenna in an array environment. **Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings, SBMO/IEEE MTT-S International**. 1: 326-331.
- Seki, H. (1985). **Moment and Variation Analysis Slotted Waveguide Antennas and Its Applications**. Doctoral Dissertation, Department of Electrical and Electric Engineering, Tokyo Institute of Technology.
- Underhill, M. J. (2000). Comparison of the predicted performance of typical HF and VHF Yagi-Uda antennas with the theoretical limit of all their elements being driven. **HF Radio Systems and Techniques, Eighth International Conference**. 10-13: 163-168.
- Wang, J-H., Jan, L., and Jian, S-S. (1997). Optimization of the Dipole Shapes for Maximum Peak Values of the Radiating Pulse. **in Proc. IEEE AP-S Int. Symposium**. 526-529.
- William A. Wickline. (1982). Special Properties of "PANEL"Antennas. **Vehicular Technology Conference**. 32: 299-302.

ภาคผนวก ก

รายละเอียดของสมการระเบียบวิธีโมเมนต์

ก.1 ฟังก์ชันกรีนแบบสเกลาร์และการหาระยะทาง

กำหนดให้  $G(R) = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R}$  เป็นฟังก์ชันกรีนแบบสเกลาร์ ซึ่งมีระยะทาง

$$R = |\vec{R}| = |\vec{r} - \vec{r}'| = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (\text{ก-1})$$

เมื่อ  $\vec{r}' = \hat{a}_x x' + \hat{a}_y y' + \hat{a}_z z'$  เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของแหล่งกำเนิดและ  $\vec{r} = \hat{a}_x x + \hat{a}_y y + \hat{a}_z z$  เป็นเวกเตอร์บอกตำแหน่งของจุดสังเกต

โดยที่ กำหนดให้  $x = \rho \cos(\phi), x' = \rho' \cos(\phi'), y = \rho \sin(\phi), y' = \rho' \sin(\phi'), \rho' = a$  สมการ (ก-1) สามารถเขียนได้เป็น

$$R = \sqrt{\rho^2 + a^2 - 2\rho a \cos(\phi - \phi') + (z - z')^2} \quad (\text{ก-2})$$

โดยที่  $\rho$  คือ ระยะทางในแนวรัศมี (radial distance) ไปยังจุดสังเกต และ  $a$  คือ รัศมีของลวดตัวนำ

เนื่องจากจุดสังเกตไม่เป็นฟังก์ชันของมุม  $\phi$  เพราะเกิดความสมมาตรในการกระจายของสนามไฟฟ้าบนลวดตัวนำ เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาจะพิจารณาที่มุม  $\phi$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่พื้นผิวของลวดตัวนำ  $\rho = a$  สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} A_z(\rho = a) &= \mu \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') \left( \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} d\phi' \right) dz' \\ &= \mu \int_{-l/2}^{+l/2} I_z(z') G(z, z') dz' \end{aligned} \quad (\text{ก-3})$$

$$\text{โดยที่ } G(z, z') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} d\phi' \quad (\text{ก-4})$$

$$\text{และ } R(\rho = a) = \sqrt{4a^2 \sin^2\left(\frac{\phi'}{2}\right) + (z - z')^2} \quad (\text{ก-5})$$

### ก.2 ศักย์เวกเตอร์ $\vec{A}$ สำหรับแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า $\vec{J}$ และการใช้คุณลักษณะเวกเตอร์

ศักย์เวกเตอร์  $\vec{A}$  จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าฮาร์โมนิก  $\vec{J}$  สำหรับเส้นแรงแม่เหล็ก  $\vec{B}$  จะเป็นโซลินอยด์เสมอ นั่นคือ  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$  ดังนั้น จึงสามารถจะแสดงให้อยู่ในรูปของเคิร์ล (Curl) ของเวกเตอร์ใด ๆ ซึ่งจะเป็นไปตามเอกลักษณ์เวกเตอร์ (vector identity)

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{A} = 0 \quad (\text{ก-6})$$

ขณะที่  $\vec{A}$  เป็นเวกเตอร์ใด ๆ ดังนั้นจะกำหนดให้

$$\vec{B}_A = \mu \vec{H}_A = \nabla \times \vec{A} \quad (\text{ก-7})$$

หรือ

$$\vec{H}_A = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (\text{ก-8})$$

โดยอักษร  $A$  จะแสดงว่าเป็นสนามที่เกิดจากศักย์เวกเตอร์  $\vec{A}$  เมื่อนำสมการ (ก-8) แทนลงในสมการเชิงอนุพันธ์ของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \vec{E}_A = -j\omega\mu\vec{H}_A \quad (\text{ก-9})$$

$$\nabla \times \vec{E}_A = -j\omega\mu\vec{H}_A = -j\omega\nabla \times \vec{A} \quad (\text{ก-10})$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$(\nabla \times \vec{E}_A) + (j\omega \nabla \times \vec{A}) = 0$$

$$\nabla \times [\vec{E}_A + j\omega \vec{A}] = 0 \quad (\text{ก-11})$$

จากคุณลักษณะเวกเตอร์

$$\nabla \times (-\nabla \phi_e) = 0 \quad (\text{ก-12})$$

เมื่อเทียบกับ (ก-11) จะได้ว่า

$$\vec{E}_A + j\omega \vec{A} = -\nabla \phi_e \quad (\text{ก-13})$$

หรือ

$$\vec{E}_A = -\nabla \phi_e - j\omega \vec{A} \quad (\text{ก-14})$$

ฟังก์ชันสเกลาร์  $\phi_e$  เป็นตัวแสดงศักย์ไฟฟ้าสเกลาร์ใด ๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง เมื่อทำการเคิร์ลทั้งสองด้านของสมการ (ก-7) และใช้คุณลักษณะเวกเตอร์

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (\text{ก-15})$$

จากสมการ (ก-8) และ(ก-15) เขียนลดรูปลงได้เป็น

$$\nabla \times (\mu \vec{H}_A) = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (\text{ก-16})$$

กรณีที่ว่ากลางเป็นแบบเอกพันธ์ (homogeneous medium) สมการ (ก-16) จะลดรูปลงเป็น

$$\mu \nabla \times \vec{H}_A = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (\text{ก-17})$$

$$\nabla \times \vec{H}_A = \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (\text{ก-18})$$

เมื่อเทียบกับสมการของแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \vec{H}_A = \vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E}_A \quad (\text{ก-19})$$

สมการ (ก-17) จะเปลี่ยนเป็น

$$\vec{J} + j\omega\epsilon\vec{E}_A = \frac{1}{\mu} \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (\text{ก-20})$$

หรือ

$$\mu\vec{J} + j\omega\mu\epsilon\vec{E}_A = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (\text{ก-21})$$

นำสมการ (ก-14) แทนลงใน (ก-21) จะได้

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} &= -\mu\vec{J} + \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) + \nabla (j\omega\mu\epsilon\phi_e) \\ &= -\mu\vec{J} + \nabla (\nabla \cdot \vec{A} + j\omega\mu\epsilon\phi_e) \end{aligned} \quad (\text{ก-22})$$

โดยที่  $k^2 = \omega^2 \mu\epsilon$

คำตอบของเคิร์ล  $\vec{A}$  ได้หาออกมาดังสมการ (ก-7) และต่อไปจะเป็นการหาคำตอบของไดเวอร์เจน  $\vec{A}$  ซึ่งไม่ขึ้นกับการเคิร์ลของมัน และเพื่อเขียนสมการ (ก-22) ให้มีรูปที่ง่ายยิ่งขึ้น โดยกำหนดให้

$$\nabla \cdot \vec{A} = -j\omega\mu\epsilon\phi_e \Rightarrow \phi_e = -\frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \cdot \vec{A} \quad (\text{ก-23})$$

ซึ่งเป็นเงื่อนไขของลอเรนซ์ (Lorentz condition) และเมื่อนำสมการ (ก-23) แทนลงใน (ก-22) จะได้

$$\nabla^2 \bar{A} + k^2 \bar{A} = -\mu \bar{J} \quad (\text{ก-24})$$

ดังนั้นสมการ (ก-14) จะลดรูปลงเป็น

$$\bar{E}_A = -\nabla \phi_e - j\omega \bar{A} = -j\omega \bar{A} - j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \nabla (\nabla \cdot \bar{A}) \quad (\text{ก-25})$$

จะเห็นว่าเมื่อเราทราบ  $\bar{A}$  ก็จะหาค่า  $\bar{H}_A$  จากสมการ (ก-8) และหา  $\bar{E}_A$  ได้จากสมการ (ก-25) นอกจากนี้  $\bar{E}_A$  ยังสามารถหาได้โดยง่ายจากสมการของแมกซ์เวลล์ในสมการ (ก-19) โดยกำหนดให้  $\bar{J} = 0$  และต่อไปจะแสดงวิธีการหาค่าของ  $\bar{A}$  ในเทอมของความหนาแน่นของกระแส  $\bar{J}$  ซึ่งจะเป็นคำตอบของสมการเฮล์มโฮลทซ์ไม่เอกพันธ์ (Inhomogeneous Helmholtz Equation) ในสมการ (ก-24)



## ประวัติผู้เขียน

นายสมภพ พิมพล เกิดเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2516 ที่อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่ บ้านเลขที่ 181 หมู่ที่ 14 ตำบลกุดขอนแก่น อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น เริ่มการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านกุดขอนแก่น ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-3 ที่โรงเรียนภูเวียงวิทยาคม อำเภอภูเวียง จังหวัดขอนแก่น ได้เข้าศึกษาต่อระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) ถึงระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ จากศูนย์กลางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล (อ. รัชฎาบุรี จ. ปทุมธานี) เมื่อปี พ.ศ. 2538 เริ่มรับราชการครู เมื่อปี พ.ศ. 2538 ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2548 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้รับเงินอุดหนุนจากกองทุนวิจัยและพัฒนาเพื่อทำวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2550 จากสถาบันวิจัยและพัฒนาพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์-โทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น

ในขณะศึกษาระดับปริญญาโท ได้นำเสนอผลงานวิชาการและได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิศวกรรมไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคม และเทคโนโลยีสารสนเทศระดับนานาชาติ ประจำปี พ.ศ. 2550 จำนวน 1 เรื่อง คือ **Impedance Analysis of a Shorted-End Curved Dipole on Reflector Plane using Method of Moments** ซึ่งวารสาร ECTI-CON 2007 Proceedings of the 2007 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference ฉบับที่ 2 หน้า 667-670