



สายอากาศแบบวงแหวนเชื่อมต่อด้วยร่องสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

A Unidirectional Beam Antenna using Slot-coupled Ring



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....

54928

2548

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไป  
b.....  
i.....

สายอากาศแบบวงแหวนเชื่อมต่อด้วยร่องสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

## A Unidirectional Beam Antenna using Slot-coupled Ring



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

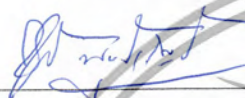
เรื่อง สายอากาศแบบวงแหวนเชื่อมต่อด้วยร่องสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

A Unidirectional Beam Antenna using Slot-coupled Ring

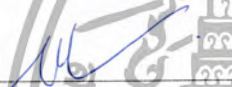
ผู้จัดทำ

1. นายวิวัฒน์ เจริญกระแจะ 44015026

2. นายสุทธิชาติ นามโกตร 44015036

  
(ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพานิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

  
(รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบวงแหวนเชื่อมต่อด้วยร่องสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

## A Unidirectional Beam Antenna using Slot-coupled Ring

โดย นาย วิวัฒน์ เจริญกระแจะ 44015026

นาย สุทธิชาติ นามโคตร 44015036

อาจารย์ที่ปรึกษา คร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพานิชย์

รศ.ดร.สมผล โกศลวิศรี

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็น การนำเสนอสายอากาศชนิดวงแหวนที่ป้อนสัญญาณ โดยการเชื่อมต่อจากร่องที่เจาะบนแผ่นระนาบตัวนำสำหรับสะท้อนคลื่น ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการทำสายอากาศ แถวลำดับที่มีอัตราขยายสูง สำหรับการวิเคราะห์จะเริ่มจากทฤษฎีของวงแหวนจากท่อนำคลื่นก่อน จากนั้นก็พิจารณาการป้อนสัญญาณโดยใช้ร่องเชื่อมต่อมายังโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น และโครงสร้างดังกล่าว จะวางบนแผ่นระนาบตัวนำสะท้อนคลื่นเพื่อให้สายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว คุณลักษณะที่จะทำการวิเคราะห์และทดสอบคือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นและค่า สภาพเจาะจงทิศทาง เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

### Abstract

This project is concerned about the slot-coupled ring antenna. The feed slot is located on the conducting plane that acts as the reflector. This structure is designed to radiate the unidirectional beam. The design procedure begins with selecting the appropriate dimensions of the ring by considering the waveguide theory. Subsequently, the slot-coupled probe inside the ring is investigated. The optimum spacing between the ring and the reflector will be clarified. The radiation pattern, half power beamwidth and directivity will be determined to use as the guideline for the antenna design in the practical applications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้งานในสายอากาศ	3
2.2 ลักษณะทั่วไปของสายอากาศ	6
2.3 หลักการของร่องที่แพร่กระจายคลื่น	10
2.4 สมการสนามที่แพร่กระจายจากตัวสายอากาศ	14
บทที่ 3 การวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบ	36
3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ	36
3.2 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	41
3.3 การพิจารณาค่าการชี้ทิศทาง	42
3.4 การพิจารณาค่าสหพหุคูณบีบรัด	42
3.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเมื่อวางวงแหวนที่ระยะห่างต่างๆกัน	43
บทที่ 4 การสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบ	57
4.1 การสร้าง	57
4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ	58
บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์	64
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

			หน้า
รูปที่ 2.1	รูปที่	สายอากาศแบบวงแหวนล้อมรอบโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นภายใน	6
รูปที่ 2.2	รูปที่	ความสัมพันธ์ของขนาดกำลังงานที่แพร่กระจายออกไปสำหรับโหมดคลื่นของ $TE_{11}$ , $TE_{10}$ และ $TE_{21}$ (โดยใช้วงแหวนที่ทำจากทองเหลืองด้วยคาร์ซีมีเท่ากับ 4.75 cm)	8
รูปที่ 2.3	รูปที่	ร่องบนระนาบกรวดซ์ขนาดอนันต์ที่ป้อนสัญญาณกลางปากกรองด้วยสายส่งคู่ขนาน	10
รูปที่ 2.4	รูปที่	กราฟเชิงขั้วของสนาม $E_{\theta}$ แบบนอร์มอลไลซ์ที่แพร่กระจายจากร่อง	13
รูปที่ 2.5	รูปที่	ท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอก ที่ระนาบ $z = 0$	20
รูปที่ 2.6	รูปที่	ท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่มีช่องเปิดแบบวงกลมบนระนาบ $Z = 0$	23
รูปที่ 2.7	รูปที่	การแพร่กระจายของสนามเมื่อทำการสังเกตที่สนามระยะไกล	31
รูปที่ 2.8	รูปที่	สนามไฟฟ้าแนวอน (Horizontal Electric Dipole) วางเหนือระนาบสะท้อนคลื่นแบบอนันต์	33
รูปที่ 2.9	รูปที่	สนามระยะไกล (Far-field observation)	34
รูปที่ 3.1	รูปที่	ท่อนำคลื่นทรงกระบอกและวงจรมีอน	37
รูปที่ 3.2	รูปที่	ขนาดของร่องและแผ่นระนาบสะท้อนคลื่น	38
รูปที่ 3.3	รูปที่	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการชี้ทิศทางกับความกว้างของสายอากาศในแต่ละค่าของคาร์ซีมีของสายอากาศ	40
รูปที่ 3.4	รูปที่	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	41
รูปที่ 3.5	รูปที่	ค่าสหพหาวอร์บีมีวิตที่ในระนาบของสนามไฟฟ้า	42
รูปที่ 3.6	รูปที่	ค่าสหพหาวอร์บีมีวิตที่ในระนาบของสนามแม่เหล็ก	43
รูปที่ 3.7	รูปที่	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ ระยะห่าง 0.1 $\lambda$	43
รูปที่ 3.8	รูปที่	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ ระยะห่าง 0.2 $\lambda$	44
รูปที่ 3.9	รูปที่	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ ระยะห่าง 0.3 $\lambda$	45
รูปที่ 3.10	รูปที่	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ ระยะห่าง 0.4 $\lambda$	45
รูปที่ 3.11	รูปที่	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ระยะห่าง 0.5 $\lambda$	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.12	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ ระยะห่าง 0.6 $\lambda$	47
รูปที่ 3.13	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ ระยะห่าง 0.7 $\lambda$	48
รูปที่ 3.14	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ระยะห่าง 0.8 $\lambda$	49
รูปที่ 3.15	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ ระยะห่าง 0.9 $\lambda$	50
รูปที่ 3.16	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ ระยะห่าง 1.0 $\lambda$	51
รูปที่ 3.17	ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็ก	52
รูปที่ 3.18	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อวางที่ระยะห่างต่างๆกัน	52
รูปที่ 3.19	ค่าสภาพเพาเวอร์บีมวิตท์ในระนาบสนาม ไฟฟ้าเมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่างต่างๆกัน	53
รูปที่ 3.20	ค่าสภาพเพาเวอร์บีมวิตท์ในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่างต่างๆกัน	53
รูปที่ 3.21	เปรียบเทียบค่าสภาพเพาเวอร์บีมวิตท์ในระนาบสนาม ไฟฟ้ากับในระนาบสนามแม่เหล็ก	54
รูปที่ 3.22	ค่าความกว้างจุดศูนย์กลางในระนาบสนาม ไฟฟ้าเมื่อวางวงแหวนที่ระยะห่างต่างๆกัน	54
รูปที่ 3.23	ค่าความกว้างจุดศูนย์กลางในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อวางวงแหวนที่ระยะห่างต่างๆกัน	55
รูปที่ 3.24	ค่าอัตราส่วนของระดับลำคลื่นหลักต่อระดับของลำคลื่นย่อยแรกในระนาบสนาม ไฟ ฟ้า เมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่างต่างๆกัน	55
รูปที่ 3.25	ค่าอัตราส่วนของระดับลำคลื่นหลักต่อระดับของลำคลื่นย่อยแรกในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ ระยะห่างต่างๆกัน	56
รูปที่ 3.26	เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของระดับลำคลื่นหลักต่อระดับลำคลื่นย่อยแรกในระนาบสนาม ไฟฟ้ากับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่างต่างๆกัน	56

รูปที่ 4.1 สายอากาศวงแหวนเชื่อมต่อกับร่องสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ประการใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.2	สายอากาศวงแหวนประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น	58
รูปที่ 4.3	ผลการทดสอบค่า VSWR = 1.336	58
รูปที่ 4.4	ผลการทดสอบค่า Impedance = $63.416 + j10.006 \Omega$	59
รูปที่ 4.5	ผลการทดสอบค่า Return loss = -16.593dB	59
รูปที่ 4.6	สายอากาศตัวส่งที่ใช้ในการทดสอบ	60
รูปที่ 4.7	การวางสายอากาศภายในห้องทดสอบ	60
รูปที่ 4.8	ผลการทดสอบสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าที่ระยะ 0.3 $\lambda$ เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	61
รูปที่ 4.9	ผลการทดสอบสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กที่ระยะ 0.3 $\lambda$ เมื่อเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารเคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ (Cellular) ได้มีบทบาทสำคัญจนกลายเป็นส่วนหนึ่งของการใช้ชีวิตประจำวันของบุคคลทั่วไปและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มบทบาทมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีผู้ใช้งานมากขึ้นความต้องการทางด้านการสื่อสารก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากระบบการสื่อสารที่อาศัยสถานีฐานสามารถทำการขยายพื้นที่ใช้งานสัญญาณได้มาก ดังนั้นจำนวนของสถานีฐาน (Base station) ที่ใช้รองรับพื้นที่ที่ให้บริการต้องมากขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามความต้องการใช้สัญญาณในแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกันตามสภาพภูมิประเทศ จึงเป็นสาเหตุให้มีการปรับปรุงและพัฒนาสายอากาศสำหรับสถานีฐานในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปตามสภาพพื้นที่การใช้งานนั้นๆ เพื่อให้ได้ระบบการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพและต้นทุนที่ไม่สูง โดยทั่วไปแล้วสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบตัว (Omnidirectional pattern) จะถูกนำมาใช้มาก แต่ในบางกรณีหรือในบางพื้นที่ที่ต้องการให้สัญญาณครอบคลุมได้เฉพาะพื้นที่บางส่วนหรือพื้นที่มากๆ โดยต้องการให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายของลำคลื่นแคบๆตามพื้นที่เหล่านั้นและเพื่อที่จะให้ได้อัตราขยาย (Gain) ที่สูงขึ้นก็จะหันมาใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว เช่น ทางเดินร่วมในตึก ระหว่างตึกกับตึก และ อุโมงค์ เป็นต้น

สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวนั้น ได้จากการนำสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางมาทำการปรับแต่งโดยนำตัวสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวมาเชื่อมต่อกันแต่หน้าบะสะท้อนคลื่นในระยะที่เหมาะสมเพียงด้านเดียว ก็จะทำให้สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางกลายเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว หรือไม่กี่ทำเป็นแบบสายอากาศแบบร่องเหนือแผ่นระนาบสะท้อน ซึ่งสายอากาศแบบนี้จะให้อัตราขยาย (Gain) สูง โดยลำคลื่นที่แพร่กระจายออกมามีลักษณะแคบสามารถสร้างและปรับแต่งได้ง่าย ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการสร้างต่ำลงและยังสามารถปรับปรุงอัตราการขยายได้โดยนำสายอากาศแบบวงแหวนมาเชื่อมต่อกันที่ การที่นำสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวมาวางเหนือแผ่นระนาบสะท้อนจะทำให้ได้อัตราการขยายเพิ่มขึ้นและมีค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ( Directivity ) ที่กำหนดได้เป็นผลให้ระบบการสื่อสารที่ใช้สถานีฐานมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสายอากาศแบบนี้มีจุดเด่นคือ มีโครงสร้างของตัวสายอากาศที่บาง ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นได้ไกลกว่าสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางที่มีลักษณะเดียวกัน ไม่มีการสูญเสียในระบบป้อนสัญญาณ การสูญเสียต่ำเพราะ โครงสร้างเป็นตัวนำล้วน มีความสามารถในการรองรับกำลังงานได้สูง ทำให้มีแบบรูปการแพร่กระจายของลำคลื่นหลักได้มาก เนื่องจากเราสามารถออกแบบสายอากาศให้มีระดับลำคลื่นย่อย ( side lobe level ) ต่ำลงได้ สามารถหาวัตถุดิบหรือท่อนำคลื่นได้ไม่ยากเนื่องจากตัวสายอากาศมีลักษณะไม่ซับซ้อนและมีราคาไม่สูงนัก จุดด้อยของสายอากาศคือ น้ำหนักค่อนข้างมาก สร้างยาก ดังนั้นสายอากาศนี้จึงเหมาะกับการติดตั้งเฉพาะสถานที่เท่านั้น หากต้องการติดตั้งบนยานพาหนะหรือใช้ในลักษณะที่มีกฎเกณฑ์ของตัวสายอากาศจะต้องมีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบให้ตัวสายอากาศมีลักษณะเล็ก แบนราบ (Low Profile) ไม่ต้านลม แข็งแรง พยุงตัวได้เอง (Self Support) และต้องมีการออกแบบให้มีคุณสมบัติอื่นๆที่เพิ่มขึ้นมา เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าเดิม

ดังนั้นในโครงการนี้จึงเป็นการนำเสนอสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว ( Unidirectional Beam Antenna ) ที่มีโครงสร้างวางอยู่บนแผ่นระนาบตัวนำสะท้อนคลื่น เพื่อให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว โดยจะป้อนสัญญาณโดยใช้ร่องเชื่อมต่อกับ โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นที่ถูกล้อมรอบด้วยวงแหวน เพื่อให้มีค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และอัตราขยายที่สูงขึ้น ซึ่งเหมาะกับการนำไปติดตั้งเป็นสายอากาศที่ใช้สำหรับสถานีฐานของระบบการสื่อสารเคลื่อนที่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในงานสายอากาศ (Essential Antenna Parameters)

##### 2.1.1 การโพลาไรซ์ (Polarization)

การโพลาไรซ์ เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนแปลงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปตามเวลาซึ่งจะใช้เวกเตอร์แสดงความเข้มของสนามไฟฟ้าในขณะใดขณะหนึ่ง รูปแบบของการโพลาไรซ์ประกอบด้วย

- การโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization)

คือ การเดินทางของสนามไฟฟ้าเป็นเส้นตรงตลอด แบ่งเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง (vertical polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (horizontal polarization)

- การโพลาไรซ์แบบวงกลม (circular polarization)

คือ เมื่อคลื่นเดินทางจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของวงกลมตลอดการเคลื่อนที่ซึ่งจะเป็นลักษณะการกวาดของสนามไฟฟ้ารวมเป็นวงกลมมีขนาดเท่ากันตลอดเวลา แบ่งเป็น

การโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา (right hand circular polarization)

การโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย (left hand circular polarization)

- การโพลาไรซ์แบบวงรี (elliptical polarization)

คือ เมื่อคลื่นเดินทางสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะวงรีตลอดการเคลื่อนที่ซึ่งจะเป็นลักษณะการกวาดของสนามไฟฟ้ารวมเป็นวงรีมีขนาดเท่ากันตลอดเวลา แบ่งเป็น

การโพลาไรซ์วงรีหมุนขวา (right hand elliptical polarization)

การโพลาไรซ์วงรีหมุนซ้าย (left hand elliptical polarization)

##### 2.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปที่แสดงให้เห็นว่าสายอากาศนั้นมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นออกไปทิศทางใดบ้างซึ่งสายอากาศแต่ละชนิดจะมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นที่แตกต่างกันไป การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นจะเป็นตัวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด (amplitude) ของสนาม (field) หรือกำลังงาน (power) กับทิศทาง (direction) ของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งแสดงในหน่วยของมุม (angle) องศา (degree) หรือ เรเดียน (radian)

##### 2.1.3 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (radiation intensity)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น คือ กำลังงานที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน (ตลอดพื้นที่ผิวทรงกลม) ซึ่งเป็นหน่วยของความหนาแน่นกำลังงาน

ความสัมพันธ์ของความเข้มการแพร่กระจายคลื่นกับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U(\theta, \phi) = \frac{r^2}{2 \cdot \eta} \left[ |E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E_\theta, E_\phi$  คือ ส่วนประกอบของนามไฟฟ้าในสนามระยะไกล

$\eta$  คือ อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

#### 2.1.4 ค่าการชี้ทิศทาง (Directivity)

ค่าการชี้ทิศทาง คือ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงว่า สายอากาศมีความแรงที่ชี้ทิศทางต่างๆ มากน้อยแค่ไหน ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$D_{\max} = D_0 = \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $U_{\max}$  คือ ค่าสูงสุดของความเข้มการแพร่กระจายคลื่น

$U_0$  คือ ค่าความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของแหล่งจ่ายแบบทรงกลม

$D_0$  คือ ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด

$P_{\text{rad}}$  คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด

$$P_{\text{rad}} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (2.3)$$

#### 2.1.5 อัตราการขยาย (gain)

คือ ความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าการชี้ทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ประสิทธิภาพของสายอากาศจะประกอบไปด้วย ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนคลื่นกลับ ประสิทธิภาพของตัวนำ และประสิทธิภาพของฉนวน

โดยสามารถหาอัตราการขยายได้จากสมการ

$$\text{Gain} = \text{Directivity} \times \text{Efficiency of antenna} \quad (2.4)$$

#### 2.1.6 อัตราส่วนของระดับลำคลื่นหลักต่อระดับลำคลื่นย่อยแรก (side lobe ratio : SLR)

คืออัตราส่วนระหว่างระดับลำคลื่นหลักต่อระดับลำคลื่นย่อยแรก ซึ่งค่าระดับของลำคลื่นย่อยแรกนี้ถ้าค่ามากจะดีเนื่องจากจะลดการรบกวนกันระหว่างลำคลื่นหลักและลำคลื่นย่อยได้มาก

หาค่า SLR ได้จากสมการ

$$\text{SLR} = \text{Main lobe level (dB)} - \text{Side lobe level (dB)} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.7 บีมวิดท์ที่จุดศูนย์คู่แรก (first null beam width)

คือ มุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นหลักมีค่าลดลงเป็นศูนย์ โดยวัดในหน่วยขององศา (degree)

### 2.1.8 ช่วงกว้างความถี่ (band width : $\Delta f$ )

คือช่วงของความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดหรือช่วงความถี่ที่สายอากาศนำไปใช้งานได้ แบ่งเป็น

- ช่วงกว้างความถี่แคบ (narrow band)

คือ ความถี่ที่มีช่วงความถี่ของความถี่ใช้งานน้อย

$$\Delta f = \frac{f_H - f_L}{f_0} \times 100\% \quad (2.6)$$

- ช่วงกว้างความถี่กว้าง (broad band)

คือ ความถี่ที่มีช่วงความถี่ของความถี่ใช้งานมาก

$$\Delta f = \frac{f_H}{f_L} : 1 \quad (2.7)$$

### 2.1.9 ฮาร์ฟพาวเวอร์บีมวิดท์ (half power beam width : HPBW)

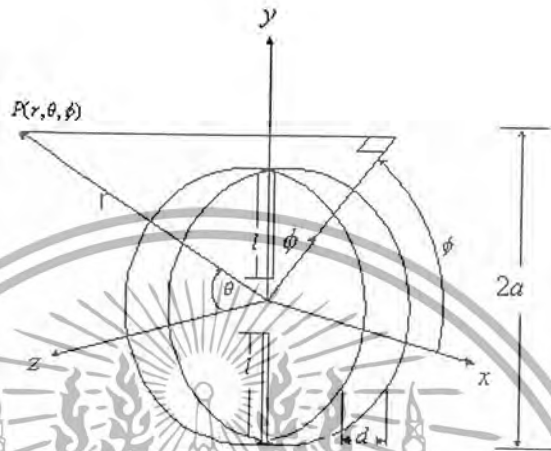
คือ มุมที่วัดระหว่างจุดที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด โดยวัดในหน่วยองศา (degree)

### 2.1.10 การเข้ากันได้ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ (Matching Impedance)

การเข้ากันได้ระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ จะเป็นตัวบอกให้รู้ว่า คลื่นที่แพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิด (Source) สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้หมดหรือไม่ โดยพิจารณาจากองค์ประกอบ 2 อย่าง คือ ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ (Input Impedance) ของสายอากาศและค่า อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ (Transmission Line)

## 2.2 ลักษณะทั่วไปของสายอากาศ

สายอากาศวงแหวนที่นำมาใช้จะประกอบด้วย โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นที่มีความยาวเป็น  $l$  และถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปทรงกระบอกโดยมีรัศมีเป็น  $a$  และความยาวเป็น  $d$  ซึ่งมีโพรบวางตามแนวแกน  $y$  ดังรูป



รูปที่ 2.1 สายอากาศแบบวงแหวนล้อมรอบโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นภายใน

โดยจะพิจารณาว่า วงแหวนเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายออกไปตามทิศทาง  $Z$  และ  $-Z$  และจะแพร่กระจายออกจากขอบของวงแหวนที่ช่องเปิดทั้ง 2 ด้าน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมานี้จะสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบด้วยโหมดคลื่นต่างๆภายในท่อนำคลื่นมากมา ดังนั้นการออกแบบวงแหวนจะให้รัศมีและความยาวน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะให้โหมดอื่นๆถูกตัดออกไปให้เห็นเหลือเพียงโหมดคลื่นหลัก (dominant mode :  $TE_{11}$ ) เพียงโหมดเดียว แต่ถึงอย่างไรก็ยังมีโหมดอื่นๆรวมอยู่บ้างเล็กน้อย

โดยทั่วไปแล้ว โหมดอื่นๆที่เราไม่ต้องการมันจะเป็นรูปแบบของคลื่นที่เรียกว่า คลื่นจางหาย (evanescent wave) และคลื่นในโหมดเหล่านี้จะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรบมีค่ามากขึ้น ดังนั้นจะต้องเลือกระยะทางที่ห่างจากโพรบที่ทำให้ขนาดของโหมดคลื่นอื่นๆมีค่าน้อยมากเพื่อที่จะทำให้บริเวณขอบของวงแหวนที่เป็นช่องเปิดทั้ง 2 ด้านมีเฉพาะคลื่นที่รูปแบบโหมดหลักเพียงรูปแบบเดียว นั่นก็คือการกำหนดค่าความยาวของวงแหวนนั่นเอง ส่วนการกำหนดค่ารัศมีจะต้องทำให้มีความถี่ตัดออฟ (cut off frequency) ต่ำที่สุด เพื่อให้มีเพียงโหมดคลื่นหลักที่แพร่กระจายออกได้ ส่วนโหมดคลื่นอื่นๆที่ไม่ใช่โหมดคลื่นหลักจะถูกตัดออกไป ดังนั้นค่ารัศมีของวงแหวนที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$0.293 \lambda < a < 0.486 \lambda \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นที่ความถี่ใช้งาน (operating frequency) โดยค่าความถี่ที่ใช้งาน คือ  $f = 1.9065$  GHz เมื่อพิจารณารูปที่ 2.1 จะเห็นว่าโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นภายในวงแหวนเป็นผลทำให้คลื่นในโหมดต่างๆ ( $TE_{mn}$ ) ถูกปล่อยออกมาในบริเวณใกล้เคียงกับโพรบ โดยคลื่นที่ออกมาจะมีความซับซ้อนนั้นก็หมายความว่าคลื่นที่ความถี่หนึ่งๆจะประกอบด้วยโหมดต่างๆมากมาย แต่ที่สำคัญจะมีผลต่อการเดินทางของคลื่นในโหมดที่ออกแบบไว้ได้แก่ โหมดคลื่นของ  $TE_{11}$ ,  $TE_{21}$  และ  $TE_{01}$

ในขณะที่คลื่นเดินทางออกจากช่องเปิดทั้ง 2 ด้านของวงแหวน คลื่นจะเกิดการลดทอนซึ่งค่าการลดทอนในโหมดคลื่นหลัก แสดงได้ดังนี้

$$\alpha_{11} = \frac{R_s}{a\eta} \frac{8.686}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{c11}}\right)^2}} \left[ \left(\frac{\lambda}{\lambda_{c11}}\right)^2 + 0.420 \right] \quad (\text{dB/m}) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\lambda_{c11}$  คือ ค่าความยาวคลื่นตัดออฟ (cut off wavelength)  
 $\eta$  คือ ค่าอินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (intrinsic impedance) ของตัวกลาง  
 $R_s$  คือค่าความต้านทานลักษณะอิสระที่ไม่ขึ้นกับความถี่ของผนังโลหะ  
 (frequency dependent characteristic resistance of metal walls)

โดยที่

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (rad/sec) ;  $\omega = 2\pi f$   
 $\mu$  คือ ค่าความซึมซาบสภาพแม่เหล็ก (permeability) ของวัสดุ (H/m)  
 $\mu = \mu_0 \mu_r$   
 $\mu_0$  คือ ค่าความซึมซาบสภาพแม่เหล็กของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$   
 $\mu_r$  คือ ค่าความซึมซาบสภาพแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุ  
 $\sigma$  คือ ค่าความนำจำเพาะของวัสดุ (conductivity) (S/m)

ในส่วนของคลื่นจางหาย จะมีความยาวคลื่นในอากาศ (free space) มีค่ามากกว่าค่าความยาวคลื่นตัดออฟ (cut off wave length) ของตัวมันเอง ซึ่งโหมดของคลื่นจางหายที่มีความสำคัญต่อการเดินทางของคลื่นของสายอากาศที่ออกแบบไว้ ได้แก่  $TE_{21}$  และ  $TE_{01}$  โดยค่าการลดทอนของคลื่นจางหายอันเนื่องมาจากระยะทางนั้นจะสอดคล้องกับค่า  $e^{-\alpha}$  ซึ่งค่าคงที่ของการลดทอนสำหรับโหมดคลื่นของ  $TE_{21}$  แสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha_{21} = \frac{17.372 \pi}{\lambda_{c21}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{c21}}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{dB/m}) \quad (2.11)$$

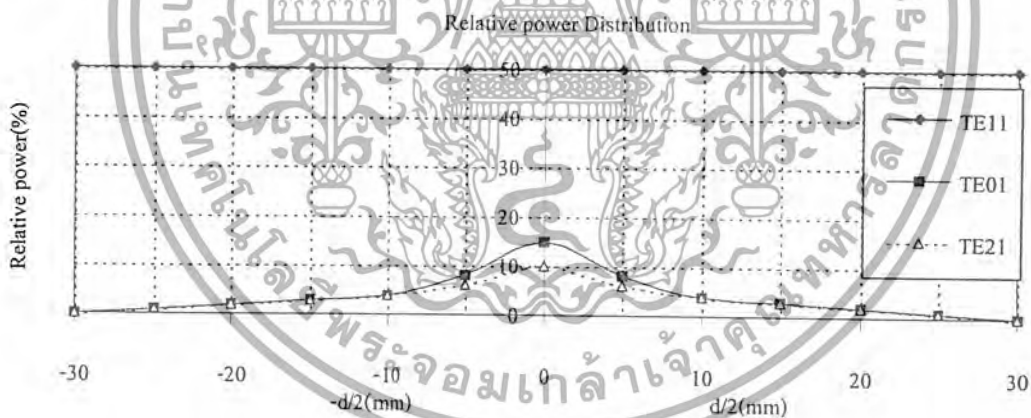
เมื่อ  $\lambda_{c21}$  คือ ค่าความยาวคลื่นตัดออฟ (cut off wavelength) ของโหมดคลื่น  $TE_{21}$  ซึ่งมีค่าเท่า 2.057a

โดยที่ a คือ ค่ารัศมีของวงแหวน และสำหรับรูปแบบคลื่น  $TE_{01}$  แสดงได้ดังนี้

$$\alpha_{01} = \frac{17.372 \pi}{\lambda_{c01}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{c01}}{\lambda}\right)^2} \quad (\text{dB/m}) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $\lambda_{c01}$  คือ ค่าความยาวคลื่นตัดออฟ (cut off wavelength) ของโหมดคลื่น  $TE_{01}$  ซึ่งมีค่าเท่า 1.640a โดยที่ a คือ ค่ารัศมีของวงแหวน

ความสัมพัทธ์ของขนาดกำลังงานที่แพร่กระจายออกไป (relative amplitude of the power distribution) ของโหมดคลื่นทั้ง 3 รูปแบบที่ความถี่ใช้งานเท่ากับ 1.9065 GHz สามารถแสดงตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพัทธ์ของขนาดกำลังงานที่แพร่กระจายออกไปสำหรับ โหมดคลื่นของ  $TE_{11}$ ,  $TE_{10}$  และ  $TE_{21}$  (โดยใช้วงแหวนที่ทำจากทองเหลืองด้วยค่ารัศมีเท่ากับ 4.75 cm)

กำลังงานที่แพร่กระจาย (power flow) ในแต่ละ โหมดคลื่น ( $TE_{mn}$ ) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$P = |A|^2 \omega \mu \beta a^4 A_{mn} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $A_{mn}$  คือค่าสัมประสิทธิ์ของการลดทอนในแต่ละโหมดคลื่น ( $TE_{mn}$ ) แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

$\beta$  คือ ค่าคงที่ทางเฟส (phase constant) (rad/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $a$  คือ ค่ารัศมีของวงแหวน (m)
- $\omega$  คือ ค่าความถี่เชิงมุม (rad/sec);  $\omega = 2\pi f$
- $\mu$  คือ ค่าความซึมซาบสภาพแม่เหล็กของวัสดุ (H/m);  $\mu = \mu_0 \mu_r$
- $\mu_0$  คือ ค่าความซึมซาบสภาพแม่เหล็กของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $4\pi \times 10^{-7}$  (H/m)
- $\mu_r$  คือ ค่าความซึมซาบสภาพแม่เหล็กสัมพัทธ์ของวัสดุ
- $A$  คือ ค่าแอมพลิจูด (amplitude) ของสัญญาณ โดยปกติจะนอร์มอลไรซ์ (normalize) ให้เท่ากับ 1

		$A_{mn} \times 10^{-3}$		
$n \backslash m$	0	1	2	
1	17.40	55.30	11.40	
2	2.87	3.19	1.56	
3	0.349	0.794	0.492	

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนในแต่ละโหมดคลื่น ( $TE_{mn}$ )

จะเห็นได้ชัดว่าค่าของขนาดสูงสุดที่ได้ทำถาวรนอร์มอลไรซ์แล้วสำหรับ โหมดคลื่นหลัก ( $TE_{11}$ ) มีค่าเท่ากับ 100% ส่วน โหมดคลื่นของ  $TE_{21}$  และ  $TE_{01}$  มีค่าเท่ากับ 20.61% และ 31.46% ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกำลังงานจะถูกแบ่งให้มีการแพร่กระจายคลื่นออกไปในทิศทางแกน  $z$  และ  $-z$  ขนาดที่ได้จึงเป็น 50% 10.31% และ 15.73% ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.2 บริเวณที่รูปกราฟของโหมดคลื่นของ  $TE_{21}$  และ  $TE_{01}$  ตัดกันจะถูกเลือกให้เป็นค่าความยาวของวงแหวน เพราะที่จุดนี้กำลังงานของรูปแบบคลื่นที่มีผลต่อโหมดคลื่นหลักมากที่สุด คือ  $TE_{21}$  จะถูกลดทอนไป 5.32 dB หรือลดลงในระดับน้อยกว่า 10% ของกำลังงานในโหมดคลื่นหลักซึ่งอยู่ในระดับที่สามารถละลายได้ได้ ส่วนโหมดคลื่นอื่นๆรวมถึง  $TE_{01}$  ก็จะมีค่าน้อยกว่าโหมด  $TE_{21}$  ด้วย เช่นที่  $a=4.7506$  cm,  $f=1.9065$  GHz ค่าคงที่ของการลดทอนสำหรับโหมดคลื่นของ  $TE_{21}$  โดยใช้ สมการที่ 2.11 มีค่าเท่ากับ 0.4378 dB/mm ดังนั้น จึงต้องการระยะความยาวของวงแหวน ( $d/2$ ) เท่ากับ 12.1517 mm เพื่อที่จะสามารถลดกำลังงานของโหมดคลื่น  $TE_{21}$  ไป 3.028 % หรือ 5.32 dB ในทำนองเดียวกันค่าคงที่ของการลดทอนสำหรับโหมดคลื่นหลัก  $TE_{11}$  จะมีค่าเท่ากับ 0.00006002 dB/mm ดังนั้น ที่ระยะ  $d/2$  เท่ากับ 12.1517 mm ค่ากำลังงานของโหมดคลื่นหลัก  $TE_{11}$  จะมีค่าเท่ากับ 49.9976 % ซึ่งอัตราส่วนของกำลังงานโหมดคลื่นหลัก  $TE_{11}$  กับรูปแบบคลื่นของ  $TE_{21}$  มีค่าเท่ากับ 16.5117 ดังนั้น กำลังงานของโหมดคลื่นหลัก  $TE_{11}$  มากกว่าโหมดคลื่นของ  $TE_{21}$  อยู่ 16 เท่าซึ่งผลที่ได้นี้ทำให้สนามที่แพร่กระจายออกมาจะมีโหมดคลื่นหลัก  $TE_{11}$  มากกว่าโหมดอื่นๆ ซึ่งมีค่าน้อยมากจนสามารถละลายได้ เพื่อเป็นการยืนยันผลที่ได้ ค่าคงที่ของการลดทอนสำหรับโหมดคลื่นหลัก  $TE_{01}$  โดยใช้สมการที่ 2.12 มีค่าเท่ากับ 0.6087 dB/mm ดังนั้น ที่ระยะ  $d/2=12.1517$  mm ค่ากำลังงานของโหมดคลื่นของ  $TE_{01}$  จะมีค่าเท่ากับ 2.86465 % ซึ่งอัตราส่วนของกำลังงานของโหมดคลื่นหลัก  $TE_{11}$  กับ  $TE_{01}$  มีค่าเท่ากับ 17.4524 ซึ่งถือว่ามีความน้อยมากสามารถละลายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีเครื่องหมายการค้าที่ปรากฏอยู่ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการกระทำที่ผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

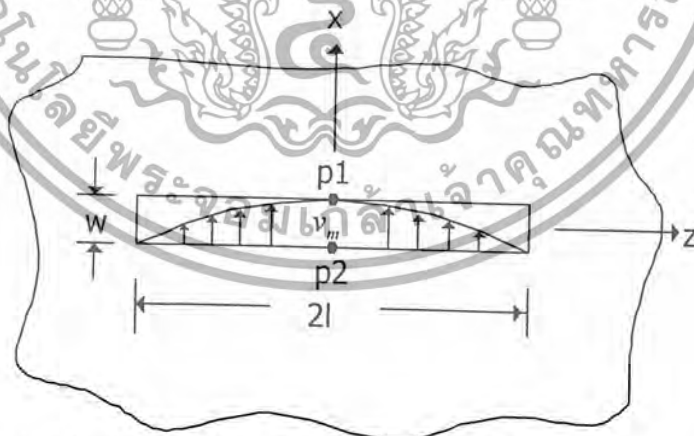
จากสิ่งเหล่านี้ชี้ให้เห็นถึงการออกแบบว่า ความยาวของวงแหวนสามารถถูกกำหนดอย่างง่าย ๆ โดยการคำนวณระยะทางจากโพรบที่จะทำให้ค่าคงที่ของการลดทอนของโหมดคลื่น  $TE_{21}$  มีค่าเท่ากับ 5.32 dB สาเหตุที่เลือกเอาโหมดคลื่น  $TE_{21}$  เพราะว่า ที่ระยะ  $d/2=12.1517$  mm โหมดคลื่น  $TE_{21}$  จะมีค่ากำลังงานมากกว่าโหมดคลื่น  $TE_{01}$  รวมถึงโหมดคลื่นอื่นๆเกินโหมดคลื่นหลัก ดังนั้น ที่จุดนี้โหมดคลื่น  $TE_{21}$  จึงมีผลต่อโหมดคลื่นหลักมากที่สุด เป็นผลให้พิจารณาโหมดคลื่น  $TE_{21}$  เป็นหลัก โดยระยะที่โหมดคลื่น  $TE_{21}$  และ  $TE_{01}$  มีค่ากำลังงานเท่ากันคือ ที่ระยะ  $d/2=10.723$  mm

### 2.3 หลักการของร่องที่แพร่กระจายคลื่น

โดยทั่วไปรูปแบบของค้ประกอบพื้นฐานของสายอากาศที่มักใช้วิเคราะห์ในเบื้องต้นคือสายอากาศไดโพล (Dipole Antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด และได้มีการพัฒนาสายอากาศต่างๆ ขึ้นมาโดยใช้พื้นฐานจากสายอากาศไดโพล เช่นสายอากาศโมโนโพล (Monopole Antenna) สายอากาศยาคิ-อูดา (Yagi-Uda Antenna) สายอากาศจานกรวย (Discone Antenna) และอื่นๆเพื่อวัตถุประสงค์การใช้งานที่ต่างกัน

#### 2.3.1 ร่องบนแผ่นตัวนำขนาดอนันต์ (Slot in Infinite Conducting Plate)

ในการวิเคราะห์เบื้องต้นจะพิจารณากรณีกรวดซ์ขนาดอนันต์ที่มีการเจาะร่องแคบๆบนระนาบนั้น โดยที่ร่องมีความยาว  $2l$  กว้าง  $w$  (เมื่อ  $2l \gg w$ ) และป้อนสัญญาณด้วยสายส่งคู่ขนานตรงกลางปากร่องที่จุด  $p1$  และ  $p2$  ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ร่องบนระนาบกรวดซ์ขนาดอนันต์ที่ป้อนสัญญาณกลางปากร่องด้วยสายส่งคู่ขนาน

เมื่อความกว้างของร่องน้อยกว่าความยาวคลื่นมาก เราสามารถพิจารณาได้ว่าร่องเกิดจากสายส่งคู่ขนาน โดยที่สายส่งแต่ละเส้นมีขนาดเป็นครึ่งระนาบกรวดซ์ขนาดอนันต์ (Semi Infinite Ground Plane) มีขอบวางใกล้กันที่ตำแหน่ง  $x = \pm w/2$  และลัดวงจรที่  $Z = \pm l$  ดังนั้นก็จะเกิดคลื่นนิ่ง (standing wave) บนปากร่องนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายของนามไฟฟ้า ( $\bar{E}$ ) บนปากกรองสามารถประมาณได้โดย

$$\bar{E}(x, y, z) = \hat{x} E_x(x, 0, z) = \hat{x} \frac{V_m}{w} \sin[k(l - |z|)] \quad (2.14)$$

เมื่อ  $V_m$  เป็นแรงดันสูงสุดบนปากกรอง และ  $K=2\pi/\lambda$  เป็นค่าคงที่เฟส เราสามารถหาแผ่นกระแสแม่เหล็กสมมูล ( Equivalent Magnetic Current Sheet :  $M$  ) ที่กำเนิดสนามเหมือนกับที่กำเนิดจากสนามไฟฟ้าบนปากกรองจาก

$$\bar{M}(x, 0, z) = -\hat{n} \times \bar{E}(x, 0, z) \quad (2.15ก)$$

เมื่อใช้หลักการของเงา ( Image principle ) บนระนาบกรวดคั่วหน้าไฟฟ้าสมมูลรัศขนาดอนันต์จะ  
ได้ว่า

$$\bar{M}(x, 0, z) = -2\hat{n} \times \bar{E}(x, 0, z) \quad (2.15ข)$$

และเมื่อแทน (2.14) ใน (2.15ข) โดยที่  $\hat{n} = \hat{y}$  จะได้

$$\begin{aligned} \bar{M}(x, 0, z) &= -2\hat{y} \times \hat{x} \frac{V_m}{w} \sin[k(l - |z|)] \\ &= 2\hat{z} \frac{V_m}{w} \sin[k(l - |z|)] \end{aligned} \quad (2.16)$$

จากนั้นจะหาค่าเวกเตอร์โพเทนเชียล ( Electric vector potential :  $\bar{F}$  ) ในเชิงสเกลาร์จาก

$$\begin{aligned} \bar{F}_\theta(\theta, \phi) &= \iiint_V [\cos\theta \cos\phi \bar{M}_x(x, y, z) + \cos\theta \sin\phi \bar{M}_y(x, y, z) \\ &\quad - \sin\theta \bar{M}_z(x, y, z)] e^{jkr} dx dy dz \end{aligned} \quad (2.17ก)$$

$$\bar{F}_\phi(\theta, \phi) = \iiint_V [-\sin\theta \bar{M}_x(x, y, z) + \cos\phi \bar{M}_y(x, y, z)] e^{jkr} dx dy dz \quad (2.17ข)$$

$$r = x \sin\theta \cos\phi + y \sin\theta \sin\phi + z \cos\theta \quad (2.17ค)$$

ในกรณีที่แหล่งกำเนิดวางในแนวแกน  $z$  ชุดสมการ 2.17 จะลดรูปลงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{F}_\theta(\theta, \phi) = - \iiint_V \sin \theta \bar{M}_z(x, y, z) e^{jkr} dx dy dz \quad (2.18ก)$$

$$\bar{F}_\phi(\theta, \phi) = 0 \quad (2.18ข)$$

$$r = z \cos \theta \quad (2.18ค)$$

เมื่อแทน (2.16) ลงใน (2.18ก) โดยใช้ (2.18ค) และสมมติให้ร่องมีความกว้าง ( $w$ ) น้อยมาก อินทิเกรตเชิงปริมาตรจะลดรูปลงเป็นอินทิเกรตเชิงเส้นดังนี้

$$\bar{F}_\theta(\theta) = - \int_{-l}^l \sin \theta 2 \frac{v_m}{w} \sin[k(l-|z|)] e^{jkz \cos \theta} dz \quad (2.19ก)$$

รูปแบบการกระจายของแรงดันบนปากร่องจะสมมาตรกับแกน  $x=0$  เนื่องจากกำหนดให้ความกว้างของร่องน้อยมากจึงมีผลทำให้ส่วนที่เป็นฟังก์ชันคี่ (Odd function) ของเทอม  $\exp(jkz \cos \theta)$  เมื่ออินทิเกรตแล้วจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น (2.19ก) จะลดรูปลงเป็น

$$\bar{F}_\theta(\theta) = -4v_m \sin \theta \int_0^l \sin[k(l-z)] \cos[kz \cos \theta] dz \quad (2.19ข)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตจะได้เป็น

$$\bar{F}_\theta(\theta) = -\frac{4v_m}{k \sin \theta} (\cos[kl \cos \theta] - \cos[kl]) \quad (2.20ค)$$

สำหรับกรณีที่ร่องยาวครึ่งความยาวคลื่น  $2l = \lambda / 2$  นั้น (2.6ก) จะลดรูปเป็น

$$\bar{F}_\theta(\theta) = -\frac{4v_m \cos[(\pi/2) \cos \theta]}{k \sin \theta} \quad (2.21ก)$$

ซึ่ง  $\bar{F}_\theta(\theta)$  เป็นฟังก์ชันของทิศทางเพียงอย่างเดียว ดังนั้นถ้าจะแสดงให้เห็นเป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง ( $r$ ) และเวลา ( $t$ ) จะต้องคูณด้วยเทอม  $e^{j(\omega t - kr)} / 4\pi r$  ซึ่งเป็นคลื่นวงกลมที่เดินทางออกจากจุดกำเนิด

$$\bar{F}_\theta(r, \theta, \phi; t) = -\frac{v_m}{\pi k} \frac{e^{j(\omega t - kr)}}{r} \frac{\cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\sin \theta} \quad (2.21ข)$$

โดยที่  $\omega = 2\pi f$  คือความเร็วเชิงมุมของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนี้ก็จะทำการหาสนามไฟฟ้า ( $\bar{E}$ ) และสนามแม่เหล็ก ( $\bar{H}$ ) ที่แพร่กระจายออกจากทรง โดยใช้ความสัมพันธ์ของศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential :F) และศักดาเวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic Vector Potential :A)

$$\bar{E} = -j\omega A + jk(\hat{r} \times F) \quad (2.22ก)$$

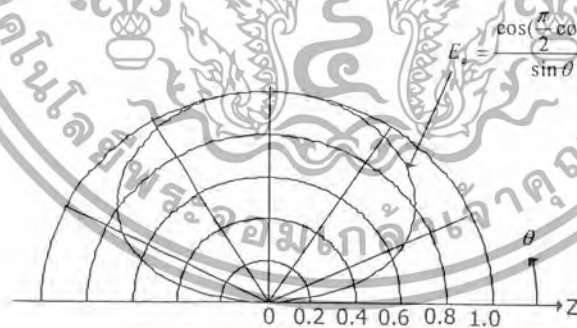
$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0} = -\frac{j\omega}{\eta}(\hat{r} \times A) - j\omega\epsilon_0 F = \frac{1}{\eta}(\hat{r} \times \bar{E}) \quad (2.22ข)$$

โดยที่  $\eta = 120\pi$  คืออินทริเนติกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของอากาศ เมื่อแทน (2.21ข) ลงใน (2.22ก) และ (2.22ข) โดยที่ศักดาเวกเตอร์แม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ ( $A=0$ )

$$E_\theta = -\frac{jV_m e^{j(\omega t - kr)} \cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\pi r \sin \theta} \quad (2.23ก)$$

$$H_\phi = \frac{jV_m e^{j(\omega t - kr)} \cos[(\pi/2) \cos \theta]}{\pi \eta r \sin \theta} \quad (2.23ข)$$

ซึ่ง (2.23ก) แสดงรูปแบบการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่แปรผันตามมุม  $\theta$  มีโพลไรเซชันในทิศ  $\phi$  และได้แสดงกราฟเชิงขั้วในรูปที่ 2.4 ส่วน (2.23ข) แสดงรูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 กราฟเชิงขั้วของสนาม  $E_\theta$  แบบนอร์มอลไลซ์ที่แพร่กระจายจากร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 สมการของสนามที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศ

### 2.4.1 สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา (wave Equations of Time-Varying Electromagnetic Field)

จากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation for Time-varying Field) ในรูปสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \bar{E} = -\bar{M}_i - \mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \quad (2.24)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J}_i + \sigma \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \quad (2.25)$$

ทำการ curl ทั้งสองข้างของสมการที่ 2.24 และ 2.25 จะได้

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \bar{E} &= -\nabla \times \bar{M}_i - \mu \nabla \times \left( \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} \right) \\ &= -\nabla \times \bar{M}_i - \mu \frac{\partial (\nabla \times \bar{H})}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \bar{H} &= \nabla \times \bar{J}_i + \sigma \nabla \times \bar{E} + \varepsilon \nabla \times \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} \\ &= \nabla \times \bar{J}_i + \sigma \nabla \times \bar{E} + \varepsilon \frac{\partial (\nabla \times \bar{E})}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.27)$$

แทนสมการที่ (2.24) ลงในสมการที่ (2.27) และแทน สมการ (2.25) ลงในสมการ (2.26)

$$\nabla \times \nabla \times \bar{H} = \nabla \times \bar{J}_i - \sigma \bar{M}_i - \sigma \mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial \bar{M}_i}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2.28)$$

$$\nabla \times \nabla \times \bar{E} = -\nabla \times \bar{M}_i - \mu \frac{\partial \bar{J}_i}{\partial t} + \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (2.29)$$

จากคุณสมบัติของลาปลาเซียนเวกเตอร์ของพิกัดทรงกระบอก (Laplacian vector of Cylindrical Coordinates)

$$\begin{aligned} \nabla^2 A &= \nabla (\nabla \cdot A) - \nabla \times \nabla \times A \\ \therefore \nabla \times \nabla \times A &= \nabla (\nabla \cdot A) - \nabla^2 A \end{aligned} \quad (2.30)$$

แทน สมการที่(2.30) ลงในสมการที่ (2.29) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla(\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla^2 \bar{E} = -\nabla \times \bar{M}_i - \mu \frac{\partial \bar{J}_i}{\partial t} - \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (2.31)$$

จากสมการแมกซ์เวลล์ในรูปความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density) แสดงได้ดังนี้

$$\nabla \cdot \bar{D} = q_{ev} = \epsilon \nabla \cdot \bar{E} \Rightarrow \nabla \cdot \bar{E} = \frac{q_{ev}}{\epsilon} \quad (2.32)$$

แทนสมการที่ (2.32) ลงในสมการที่ (2.31) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\nabla q_{ev}}{\epsilon} - \nabla^2 \bar{E} &= -\nabla \times \bar{M}_i - \mu \frac{\partial \bar{J}_i}{\partial t} - \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \bar{E} &= \frac{\nabla q_{ev}}{\epsilon} + \nabla \times \bar{M}_i + \mu \frac{\partial \bar{J}_i}{\partial t} + \mu \sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.33)$$

ในลักษณะเดียวกันแทนสมการที่ (2.30) ลงในสมการที่ (2.28) จะได้

$$\nabla(\nabla \cdot \bar{H}) - \nabla^2 \bar{H} = \nabla \times \bar{J}_i - \sigma \bar{M}_i - \mu \sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - \epsilon \frac{\partial \bar{M}_i}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2.34)$$

จากสมการแมกซ์เวลล์ในรูปความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density)

$$\nabla \cdot \bar{B} = \mu \nabla \cdot \bar{H} = q_{mv} \Rightarrow \nabla \cdot \bar{H} = \frac{q_{mv}}{\mu} \quad (2.35)$$

แทนสมการที่ (2.35) ลงในสมการที่ (2.34)

$$\begin{aligned} \frac{\nabla q_{mv}}{\mu} - \nabla^2 \bar{H} &= \nabla \times \bar{J}_i - \sigma \bar{M}_i - \mu \sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} - \epsilon \frac{\partial \bar{M}_i}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \bar{H} &= -\nabla \times \bar{J}_i + \sigma \bar{M}_i + \frac{1}{\mu} \nabla q_{mv} + \epsilon \frac{\partial \bar{M}_i}{\partial t} + \mu \sigma \frac{\partial \bar{H}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2.36)$$

สมการที่ (2.33) และ (2.36) เรียกว่าสมการเวกเตอร์ของคลื่น สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

สำหรับบริเวณที่เป็นอิสระจากแหล่งจ่ายและตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย (lossless media) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{J}_i = q_{ev} = \bar{M}_i = q_{mv} = 0, \quad \sigma = 0$$

จะได้รูปแบบของสมการ vector ของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังนี้

$$\nabla^2 \bar{E} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} \quad (2.37)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2.38)$$

โดยทั่วไปสมการ (2.37) และ (2.38) จะเป็นรูปแบบที่ง่ายที่สุดของสมการเวกเตอร์ของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

#### 2.4.2 สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลาแบบฮาร์มอนิก

(Wave Equation of Time-Harmonic Electromagnetic Field)

สำหรับสนามที่แปรผันกับเวลาแบบฮาร์มอนิก หมายถึง เวลาที่มีการแปรผันในรูปแบบของ  $e^{j\omega t}$  ดังนั้น จะได้สมการเวกเตอร์ของคลื่นสำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เช่นเดียวกับกรณีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา โดยกำหนดให้

$$\frac{\partial}{\partial t} = j\omega \Rightarrow \frac{\partial^2}{\partial t^2} = (j\omega)^2 = -\omega^2$$

ดังนั้นสมการที่ (2.37) กับ (2.38) จึงเขียนได้เป็น

$$\nabla^2 \bar{E} = -\omega^2 \mu\epsilon \bar{E} = -k^2 \bar{E} \quad (2.39)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = -\omega^2 \mu\epsilon \bar{H} = -k^2 \bar{H} \quad (2.40)$$

เมื่อ  $k^2 = \omega^2 \mu\epsilon$

และ  $k$  คือ ค่าคงที่ทางเฟส (Phase Constant)

#### 2.4.3 การหาคำตอบของสมการคลื่นสำหรับพิกัดทรงกระบอก

สมการคลื่นสำหรับสภาวะที่ปราศจากจากแหล่งจ่ายและตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียของ

สนามไฟฟ้าในระบบพิกัดทรงกระบอกแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก  $\bar{E}(\rho, \phi, z) = \bar{a}_\rho E_\rho(\rho, \phi, z) + \bar{a}_\phi E_\phi(\rho, \phi, z) + \bar{a}_z E_z(\rho, \phi, z)$  (2.41)

แทนสมการที่ (2.41) ลงในสมการที่ (2.39)

$$\nabla^2(\bar{a}_\rho E_\rho + \bar{a}_\phi E_\phi + \bar{a}_z E_z) = -k^2(\bar{a}_\rho E_\rho + \bar{a}_\phi E_\phi + \bar{a}_z E_z)$$
 (2.42)

เขียนในรูปทั่วไป คือ

$$\nabla^2 \bar{E} = -k^2 \bar{E}$$
 (2.43)

จากคุณสมบัติลาปลาซเขียนของเวกเตอร์ของพิกัดทรงกระบอกเขียนได้ว่า

$$\nabla^2 \bar{E} = \nabla(\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla \times \nabla \times \bar{E}$$
 (2.44)

$$\therefore \nabla(\nabla \cdot \bar{E}) - \nabla \times \nabla \times \bar{E} = -k^2 \bar{E}$$
 (2.45)

เมื่อแทนสมการสนามไฟฟ้าจากสมการ (2.42) ใน (2.45) จะได้

$$\nabla^2 E_\rho + \left( \frac{E_\rho}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\phi}{\partial \phi} \right) = -k^2 E_\rho$$
 (2.46)

$$\nabla^2 E_\phi + \left( \frac{E_\phi}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\rho}{\partial \phi} \right) = -k^2 E_\phi$$
 (2.47)

$$\nabla^2 E_z = -k^2 E_z$$
 (2.48)

เมื่อ  $\nabla^2 \bar{\varphi}(\rho, \phi, z)$  เป็นสเกลลาร์ลาปลาซเขียนของพิกัดทรงกระบอก ซึ่งแสดงค่าได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \nabla^2 \bar{\varphi}(\rho, \phi, z) &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial z^2} \\ &= \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial z^2} \end{aligned}$$
 (2.49)

สมการที่ (2.46) กับ (2.47) มีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้ามากกว่าหนึ่งองค์ประกอบเราจึงใช้สมการที่ (2.48) ในการหาคำตอบ และแทนสมการที่ (2.49) ลงใน (2.48) จะได้

$$\frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{\varphi}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \bar{\varphi}}{\partial z^2} = -k^2 \bar{\varphi}$$
 (2.50)

เมื่อ  $\bar{\varphi}(\rho, \phi, z)$  เป็นฟังก์ชันสเกลาร์ที่แสดงองค์ประกอบของเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\bar{\varphi}(\rho, \phi, z) = f(\rho)g(\phi)h(z) \quad (2.51)$$

นำฟังก์ชันในสมการที่ (2.51) แทนลงในสมการที่ (2.50) จะได้

$$gh \frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} + gh \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} + fh \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 g}{\partial \phi^2} + fg \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = -k^2 fgh \quad (2.52)$$

นำ  $fgh$  ไปหารออกทั้งสองข้างของสมการที่ (2.52) และจากสมการอนุพันธ์ที่แก้กับตัวแปรเดียว จึงเปลี่ยนให้อยู่ในรูป  $\frac{d}{dx}$  จะได้

$$\frac{1}{f} \frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} + \frac{1}{f} \frac{1}{\rho} \frac{df}{d\rho} + \frac{1}{g} \frac{1}{\rho^2} \frac{d^2 g}{d\phi^2} + \frac{1}{h} \frac{d^2 h}{dz^2} = -k^2 \quad (2.53)$$

จากสมการที่ (2.53) จะเห็นว่าแต่ละพจน์เป็นฟังก์ชันของตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว ดังนั้นผลรวมทุกพจน์จึงมีค่าเท่ากับ  $-K^2$  ก็คือเมื่อค่าของแต่ละพจน์เป็นค่าคงที่ดังนี้

$$\frac{1}{h} \frac{d^2 h}{dz^2} = -k_z^2 \Rightarrow \frac{d^2 h}{dz^2} = -k_z^2 h \quad (2.54)$$

เมื่อ  $K_z$  คือค่าคงที่

เอา  $\rho^2$  คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.53) และแทนสมการที่ (2.54) ลงไปจะได้

$$\frac{\rho^2}{f} \frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} + \frac{\rho}{f} \frac{df}{d\rho} + \frac{1}{g} \frac{d^2 g}{d\phi^2} + (k^2 - k_z^2) \rho^2 = 0 \quad (2.55)$$

จะเห็นว่าเทอมที่สามของสมการที่ (2.55) เป็นฟังก์ชันของ  $\phi$  เพียงอย่างเดียว จึงสามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$\frac{1}{g} \frac{d^2 g}{d\phi^2} = -m^2 \Rightarrow \frac{d^2 g}{d\phi^2} = -m^2 g \quad (2.56)$$

และกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k^2 - k_z^2 = k_\rho^2 \quad \Rightarrow \quad k_\rho^2 + k_z^2 = k^2 \quad (2.57)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.55) ด้วย  $f$  และแทนสมการที่ (2.57) ลงไปจะได้

$$\rho^2 \frac{d^2 f}{d\rho^2} + \rho \frac{df}{d\rho} + (k_\rho^2 \rho^2 - m^2) f = 0 \quad (2.58)$$

สมการที่ (2.57) เรียกว่า สมการจำกัด (Constant Equation) สำหรับคำตอบที่ได้จากสมการคลื่นในพิกัดทรงกระบอก และ สมการที่ (2.58) เรียกว่า สมการเชิงอนุพันธ์ของเบสเซล (Bessel Differential Equation)

ดังนั้นคำตอบของสมการที่ (2.50) เราสามารถหาได้จากสมการที่ (2.54) , (2.56) , (2.58) และ สมการจำกัด (2.57) ซึ่งจะสมมติคำตอบให้เป็นฟังก์ชันของ

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

ซึ่งจะเขียนแสดงได้ดังนี้

$$\rho^2 \frac{d^2 f}{d\rho^2} + \rho \frac{df}{d\rho} + (k_\rho^2 \rho^2 - m^2) f = 0 \quad (2.59)$$

$$\frac{d^2 g}{d\phi^2} = -m^2 g \quad (2.60)$$

$$\frac{d^2 h}{dz^2} = -k_z^2 h \quad (2.61)$$

โดยที่  $k_\rho^2 + k_z^2 = k^2 \quad (2.62)$

คำตอบที่ได้จากสมการ (2.59) → (2.62) สามารถหาได้ดังนี้

$$f_1(\rho) = A_1 J_m(k_\rho \rho) + B_1 Y_m(k_\rho \rho) \quad (2.63)$$

หรือ

$$f_2(\rho) = C_1 H_m^{(1)}(k_\rho \rho) + D_1 H_m^{(2)}(k_\rho \rho) \quad (2.64)$$

และ

$$g_1(\phi) = A_2 e^{-jm\phi} + B_2 e^{jm\phi} \quad (2.65)$$

หรือ

$$g_2(\phi) = C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi) \quad (2.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_1(z) = A_3 e^{-jk_z z} + B_3 e^{jk_z z} \quad (2.67)$$

หรือ

$$h_2(z) = C_3 \cos(k_z z) + D_3 \sin(k_z z) \quad (2.68)$$

โดยที่	$J_m(k_\rho \rho)$	คือฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่ 1
	$Y_m(k_\rho \rho)$	คือฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่ 2
	$H_m^{(1)}(k_\rho \rho)$	คือฟังก์ชันแสงเกลชนิดที่ 1
	$H_m^{(2)}(k_\rho \rho)$	คือฟังก์ชันแสงเกลชนิดที่ 2

สำหรับท่อนำคลื่นทรงกระบอก คำตอบของสมการคลื่นที่อยู่ในรูปของการคูณกันของ  $f(\rho)g(\phi)h(z)$  ที่เหมาะสมที่สุดดังรูปที่ 2.5 ได้มาจาก สมการที่ (2.63), (2.66), และ (2.67) ซึ่งเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 ท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอก ที่ระนาบ  $z = 0$

$$\begin{aligned} \bar{\varphi}(\rho, \phi, z) &= f(\rho)g(\phi)h(z) \\ &= [A_1 J_m(k_\rho \rho) + B_1 Y_m(k_\rho \rho)] \times \\ &\quad [C_2 \cos(m\phi_s) + D_2 \sin(m\phi_s)] [A_3 e^{-jk_z z} + B_3 e^{+jk_z z}] \end{aligned} \quad (2.69)$$

#### 2.4.4 สนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวน (Aperture Field)

จากคำตอบที่ได้จากสมการเวกเตอร์ในสมการ ที่ 2.69 นั้น สามารถที่จะนำมาหาสนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวนในตัวสายอากาศได้ โดยกำหนดค่าต่างๆที่อยู่ในสมการ 2.69 ให้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับสุญญากาศสามารถแสดงได้ดังนี้

1. สนามทั้งหมดที่แพร่กระจายออกจากตัวนำไฟฟ้าจะต้องมีค่าจำกัดดังนั้น  $B_1 = 0$

เพราะว่า  $Y_m(\rho=0) = \infty$  ซึ่งไม่เป็นจริงตามเงื่อนไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สนามทั้งหมดที่แพร่กระจายออกจากตัวนำไฟฟ้าจะต้องมีค่าเหมือนเดิมทุกค่าของมุม  $\phi_s$  ที่มีค่าเท่ากับ  $2\pi$  ดังนั้น จะต้องเป็นค่าจำนวนเต็มเพื่อให้ค่าของสนามมีค่าคงเดิมเมื่อมุม  $\phi_s$  มีค่าเปลี่ยนแปลงไปทุกๆ  $2\pi$  จะได้ว่า

$$m = 1, 2, 3, \dots$$

3. ค่า  $C$  และ  $D$  เป็นค่าคงที่ใดๆที่อาจจะให้  $C$  หรือ  $D$  มีค่าเท่ากับศูนย์ก็ได้ แต่  $C$  และ  $D$  จะมีค่าเป็นศูนย์ทั้งสองตัวไม่ได้เพราะจะทำให้สนามทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์ นั่นหมายความว่าไม่มีสนามแพร่กระจายออกมาจากท่อ นำคลื่นเลย ซึ่งไม่เป็นจริง ดังนั้นเพื่อให้สนามมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ  $m$  มีค่าเป็นศูนย์ จะกำหนดให้  $C \neq 0, D = 0$

4. เนื่องจากสนามที่แพร่กระจายออกจากท่อ นำคลื่น จะเดินทางในทิศทางแนวแกน  $+Z$  ดังนั้น เราจะสนใจในพจน์ของ  $e^{-jk_z z}$  เท่านั้น และเมื่อคิดสนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของท่อ นำคลื่นที่ระนาบ  $Z = 0$  จะได้ว่า

$$B_z = 0, e^{jk_z z} \Big|_{z=0} = 1$$

5. ค่าของ  $k_p$  สามารถแสดงความสำคัญได้ดังนี้

$$k_p = \frac{X'_{mn}}{a}$$

โดยที่

$X'_{mn}$  คือค่าที่ทำให้ฟังก์ชันเบสเซล ชนิดที่ 1 ( $J_m$ ) ลำดับที่  $m$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์เป็นครั้งที่  $n$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )

จะได้ว่ากรณีของโหมดคลื่นหลัก  $TE_{11}$  คือ  $m = 1, n = 1$  จะได้ค่าของ  $X'_{mn}$  มีค่าเท่ากับ 1.8412

$$k_p \Big|_{m=1} = \frac{1.8412}{a}$$

เมื่อนำเงื่อนไขข้างต้นแทนลงในสมการที่ 46 จะได้ว่า

$$\bar{\varphi}_z^+(\rho, \phi_s, z) = A_1 J_m(k_p \rho) \cdot C_2 \cos(m\phi_s) \cdot A_3 \quad (2.70)$$

เมื่อ  $\bar{\varphi}_z^+(\rho, \phi_s, z)$  คือศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้าของสนามที่แพร่กระจายออกมาในแนวแกน  $+Z$  ของระบบพิกัดทรงกระบอก

ในกรณีของรูปแบบคลื่นหลัก  $TE_{11}$  จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{\varphi}_z^+(\rho, \phi_s, z) = A_1 J_1 \frac{1.8412\rho}{a} \cdot C_2 \cos(\phi_s) \cdot A_3 \quad (2.71)$$

กำหนดให้

$$A_{mn} = A_1 \cdot A_3$$

$$C_2 = 1$$

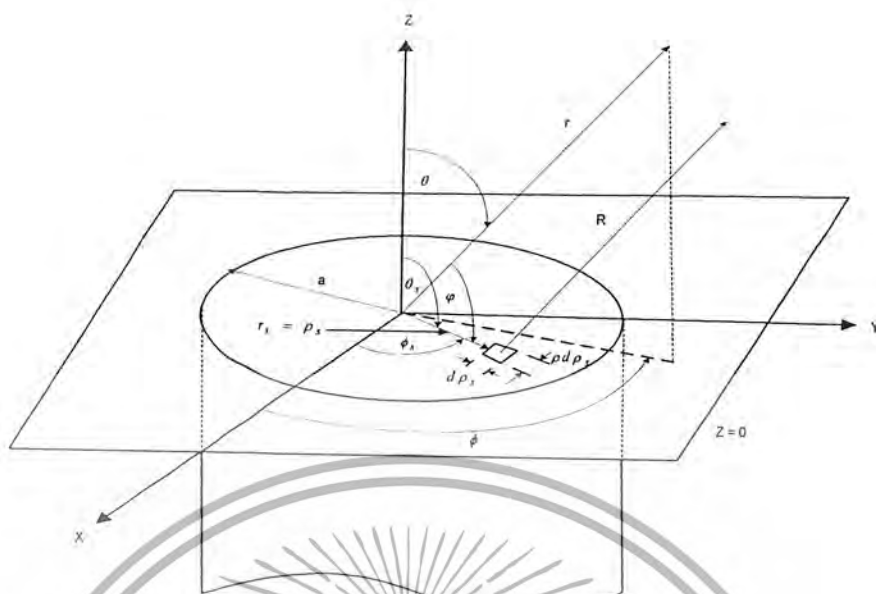
โดยที่  $A_{mn}$  คือ ค่าที่ถูกระบุกำหนดจากกำลังคลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปในท่อนำคลื่นของแต่ละโหมดคลื่น จะได้ว่า

$$\bar{\varphi}_z^+(\rho, \phi_s, z) = A_{11} J_1 \frac{1.8412\rho}{a} \cos(\phi_s) \quad (2.72)$$

จากส่วนประกอบของสนามที่เกิดขึ้นโดยมีโหมดคลื่นเป็นโหมด  $TE_{11}$  ซึ่งมีการเคลื่อนที่ของคลื่นในทิศทางแกน Z สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_\rho &= -\frac{1}{\epsilon\rho} \frac{\partial \bar{\varphi}_z}{\partial \phi} & H_\rho &= -\frac{1}{\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}_z}{\partial \rho \partial z} \\ E_\phi &= \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial \bar{\varphi}_z}{\partial \rho} & H_\phi &= -\frac{1}{\omega\mu\epsilon\rho} \frac{\partial^2 \bar{\varphi}_z}{\partial \phi \partial z} \\ E_z &= 0 & H_z &= -\frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \bar{\varphi}_z \end{aligned}$$

เนื่องจากแหล่งกำเนิด (source) ที่ใช้ในการแพร่กระจายคลื่นนั้น เป็นโพรบ (probe) เริงเส้นไฟฟ้า ดังนั้นส่วนประกอบของสนามที่เกิดขึ้น จะสนใจเฉพาะส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าเท่านั้นเมื่อนำสมการที่ 2.72 แทนลงไปในส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดยคิดที่มุม  $\phi_s$  จะได้ว่า



รูปที่ 2.6 ท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่มีช่องเปิดแบบวงกลมบนระนาบ  $Z = 0$

$$E_\rho = \frac{1}{\epsilon \rho} \frac{\partial}{\partial \phi_s} \left[ A_{11} J_1 \frac{1.8412 \rho}{a} \cos(\phi_s) \right] \quad (2.73)$$

$$\therefore E_\rho = \frac{1}{\epsilon \rho} \left[ A_{11} J_1 \frac{1.8412 \rho}{a} \sin(\phi_s) \right] \quad (2.74)$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[ A_{11} J_1 \frac{1.8412 \rho}{a} \cos(\phi_s) \right] \quad (2.75)$$

$$\therefore E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{1.8412}{a} A_{11} J_1' \frac{1.8412 \rho}{a} \cos(\phi_s) \quad (2.76)$$

$$E_z = 0 \quad (2.77)$$

ดังนั้นจะได้ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายบริเวณพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอก ซึ่งเปรียบเสมือนกับสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวนของตัวสายอากาศได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\rho = \frac{1}{\epsilon\rho} A_{11} J_1 \frac{1.8412 \rho}{a} \sin(\phi_s) \quad (2.78)$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{1.8412}{a} A_{11} J_1' \frac{1.8412 \rho}{a} \cos(\phi_s) \quad (2.79)$$

$$E_z = 0 \quad (2.80)$$

โดยที่

$$\rho = \frac{\partial}{\partial \left( \frac{1.8412 \rho}{a} \right)}$$

#### 2.4.5 สนามที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศ (Radiation Field)

จากสนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวน เราสามารถหาสนามที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศได้ โดยการพิจารณาสนามระยะไกลของสนามที่แพร่กระจายจากหน้าคลื่นแบบทรงกระบอกที่ระนาบ  $Z=0$

จากส่วนประกอบของสนามที่แพร่กระจายบริเวณช่องเปิดของวงแหวน จะพบว่าส่วนประกอบของสนามในแนวแกน  $Z$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะส่วนประกอบของสนามที่เหลืออยู่สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_\rho = \frac{1}{\epsilon\rho} A_{11} J_1 \frac{1.8412 \rho}{a} \sin(\phi_s) \quad (2.81)$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{1.8412}{a} A_{11} J_1' \left( \frac{1.8412 \rho}{a} \right) \cos(\phi_s) \quad (2.82)$$

ทำการแปลงส่วนประกอบของสนามที่ได้ในสมการที่ (2.81) และ (2.82) ที่อยู่ในระบบพิกัดมุมฉาก (Rectangular coordinate) โดยให้คุณสมบัติดังนี้

$$E_x = E_\rho \cos(\phi_s) - E_\phi \sin(\phi_s) \quad (2.83)$$

$$E_y = E_\rho \sin(\phi_s) - E_\phi \cos(\phi_s) \quad (2.84)$$

จะได้ว่า

$$E_x = \frac{A_{11}}{\epsilon\rho} \sin(\phi) \cos(\phi) \left\{ \frac{1}{\rho} J_1 \left( \frac{1.8412 \rho}{a} \right) - \frac{1.8412}{a} J_1' \left( \frac{1.8412 \rho}{a} \right) \right\} \quad (2.85)$$

จากคุณสมบัติของฟังก์ชันเบสเซลที่แสดงได้ดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{m}{u} J_m(u) = \frac{1}{2} [J_{m-1}(u) + J_{m+1}(u)] \quad (2.86)$$

$$\frac{m}{u} \frac{dJ_m(u)}{du} = \frac{1}{2} [J_{m-1}(u) - J_{m+1}(u)] \quad (2.87)$$

จะได้ว่า

$$E_x = \frac{A_{11}}{\varepsilon \rho} \frac{1.8412}{2a} J_2\left(\frac{1.8412 \rho}{2a}\right) \sin(2\phi_s) \quad (2.88)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับ  $E_y$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} E_y &= \frac{A_{11}}{\varepsilon} \frac{1.8412}{2a} \left[ \left\{ J_0\left(\frac{1.8412}{a}\right) + J_2\left(\frac{1.8412}{a}\right) \right\} \sin^2(\phi_s) \right. \\ &\quad \left. + \left\{ J_0\left(\frac{1.8412}{a}\right) - J_2\left(\frac{1.8412}{a}\right) \right\} \cos^2(\phi_s) \right] \\ \therefore E_y &= \frac{A_{11}}{\varepsilon} \frac{1.8412}{2a} \left\{ J_0\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) - J_2\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) \cos^2(2\phi_s) \right\} \end{aligned} \quad (2.89)$$

จากคุณสมบัติการแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform) 2 มิติสามารถแสดงได้ดังนี้

$$f(k_x, k_y) = \iint_{\Omega} E_a(x, y) e^{jk_x x + jk_y y} dx dy \quad (2.90)$$

เนื่องจากพื้นที่ที่ใช้ในกรณีปัญหานี้เป็นพื้นที่หน้าตัดของท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่ระนาบ  $Z=0$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ x &= \rho \cos(\phi_s) \\ y &= \rho \sin(\phi_s) \\ dx dy &= \rho d\rho d\phi_s \end{aligned} \quad (2.91)$$

และจากการสังเกตที่สนามระยะไกล จะกำหนดให้

$$\begin{aligned} k_x &= k_0 \sin(\theta) \cos(\phi) \\ k_y &= k_0 \sin(\theta) \sin(\phi) \end{aligned} \quad (2.92)$$

นำสมการที่ (2.88) , (2.89) , (2.90) และ (2.91) แทนลงในสมการที่ (2.92) โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}_a(x, y) = E_x \hat{a}_x + E_y \hat{a}_y \quad (2.93)$$

และกำหนดให้

$$M = \frac{A_{11}}{\varepsilon} \frac{1.8412}{2a} \quad (2.94)$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{f}_t(x, y) = M & \left[ \int_0^a \int_0^{2\pi} J_2\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) \sin(2\phi_s) e^{jk_0\rho \sin\theta \cos(\phi-\phi_s)} \rho d\phi_s d\rho \hat{a}_x \right. \\ & + \int_0^a \int_0^{2\pi} J_0\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) e^{jk_0\rho \sin\theta \cos(\phi-\phi_s)} \rho d\phi_s d\rho \hat{a}_y \\ & \left. - \int_0^a \int_0^{2\pi} J_2\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) \cos(2\phi_s) e^{jk_0\rho \sin\theta \cos(\phi-\phi_s)} \rho d\phi_s d\rho \hat{a}_y \right] \end{aligned} \quad (2.95)$$

จากคุณสมบัติที่แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} e^{j\omega \cos(\phi-\phi')} = & J_0(\omega) - 2[J_2(\omega) \cos 2(\phi-\phi') - J_4(\omega) \cos 4(\phi-\phi') + \dots] \\ & + 2j[J_1(\omega) \cos 2(\phi-\phi') - J_3(\omega) \cos 4(\phi-\phi') + \dots] \end{aligned} \quad (2.96)$$

เมื่อพิจารณาการปฏิกิริยาพื้นที่เทียบกับมุม  $\phi_s$  เมื่อแทนสมการที่ 2.96 ลงในสมการที่ 2.95

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \bar{f}_t(x, y) = M & \left[ -2\pi \sin(2\phi) \int_0^a J_2\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) J_2(k_0\rho \sin(\theta)) \rho d\rho \hat{a}_x \right. \\ & + 2\pi \int_0^a J_0\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) J_0(k_0\rho \sin(\theta)) \rho d\rho \hat{a}_y \\ & \left. + 2\pi \cos(2\phi) \int_0^a J_2\left(\frac{1.8412\rho}{a}\right) J_2(k_0\rho \sin(\theta)) \rho d\rho \hat{a}_y \right] \end{aligned} \quad (2.97)$$

จากรูปแบบสนามทั้งหมดที่แพร่กระจายโดยการสังเกตที่สนามระยะไกล สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_r = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} & \left[ \hat{a}_\theta \{f_x \cos(\phi) + f_y \sin(\phi)\} + \hat{a}_\phi \cos(\phi) \{f_y \cos(\phi) \right. \\ & \left. - f_x \sin(\phi)\} \right] \end{aligned} \quad (2.98)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.97) และ (2.98) จะกำหนดให้  $f_x$  เป็นค่าที่อยู่ในพจน์ของ  $\hat{a}_x$  และ  $f_y$  เป็นค่าที่อยู่ในพจน์ของ  $\hat{a}_y$  และให้  $E_\theta$  เป็นค่าที่อยู่ในพจน์ของ  $\hat{a}_\theta$  และ  $E_\phi$  เป็นค่าที่อยู่ในพจน์ของ  $\hat{a}_\phi$  เมื่อพิจารณาในพจน์ของ  $E_\theta$  จะได้ว่า

$$E_\theta = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} M \left[ -2\pi \sin(2\phi) \cos(\phi) \int_0^a J_2\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right. \\ \left. + 2\pi \sin(\phi) \int_0^a J_0\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_0(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right. \\ \left. + 2\pi \cos(2\phi) \sin(\phi) \int_0^a J_2\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right] \quad (2.99)$$

ถ้ากำหนดให้

$$N = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \quad (2.100)$$

และใช้คุณสมบัติที่แสดงได้ดังนี้

$$\sin(x - y) = \sin(x) \cos(y) - \cos(x) \sin(y) \quad (2.101)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.100) และ (2.101) แทนลงในสมการที่ (2.99) จะได้ว่า

$$E_\theta = 2NM\pi \sin(\phi) \int_0^a J_0\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_0(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \\ - \int_0^a J_2\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \quad (2.102)$$

จากรูปแบบการทำปฏิยานุพันธ์ของเบสเซลฟังก์ชัน ที่แสดงได้ดังนี้

$$\int_0^a J_n(k_1 r) J_n(k_2 r) r dr = \frac{a}{k_1^2 - k_2^2} [k_2 J_n(k_1 a) J_{n-1}(k_2 a) \\ - k_1 J_{n-1}(k_1 a) J_n(k_2 a)] \quad (2.103)$$

และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J_{-n} = (-1)^n J_n(n) \quad (2.104)$$

จะได้ว่า

$$E_\theta = 2NM\pi \sin(\phi) \frac{a^3}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \left[ \{-k_0 \sin(\theta) J_0(1.8412) \right. \\ \left. J_1(k_0 a \sin(\theta)) + \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) J_0(k_0 a \sin(\theta))\} \right. \\ \left. - \{k_0 \sin(\theta) J_2(1.8412) J_1(k_0 a \sin(\theta)) - \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) \right. \\ \left. J_2(k_0 a \sin(\theta))\} \right] \quad (2.105)$$

จากสมการที่ (2.86) สามารถเขียนสมการที่ (2.105) ได้ดังนี้

$$E_\theta = 2NM\pi \sin(\phi) \frac{a^3}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \left[ \{-k_0 \sin(\theta) J_0(1.8412) \right. \\ \left. J_1(k_0 a \sin(\theta)) + \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) J_0(k_0 a \sin(\theta))\} \right. \\ \left. - \{k_0 \sin(\theta) J_2(1.8412) J_1(k_0 a \sin(\theta)) - \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) \right. \\ \left. J_2(k_0 a \sin(\theta))\} \right] \\ = 2NM\pi \sin(\phi) \frac{2a^2}{(1.8412)(k_0 \sin(\theta))} J_1(1.8412) J_1(k_0 a \sin(\theta)) \quad (2.106)$$

เมื่อแทนค่า  $N$  และ  $M$  ลงในสมการที่ (2.106) จะได้ว่า

$$E_\theta = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{er} A_{11} a \sin(\phi) J_1(1.8412) \frac{J_1(k_0 a \sin(\theta))}{k_0 a \sin(\theta)} \quad (2.107)$$

เช่นเดียวกันสำหรับ  $E_\phi$  สามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 E_\phi = jk_0 \frac{e^{jk_0 r}}{2\pi r} M & \left[ 2\pi \cos(\phi) \cos(\theta) \int_0^a J_0\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_0(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right. \\
 & + 2\pi \cos(\phi) \cos(2\phi) \cos(\theta) \int_0^a J_2\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \\
 & \left. + 2\pi \sin(2\phi) \sin(\phi) \cos(\theta) \int_0^a J_2\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right]
 \end{aligned} \quad (2.108)$$

จากสมการที่ (2.69) และความสัมพันธ์ที่สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\cos(x - y) = \cos(x) \cos(y) + \sin(x) \sin(y) \quad (2.109)$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 E_\phi = 2NM\pi \cos(\phi) \cos(\theta) & \left[ \int_0^a J_0\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_0(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right. \\
 & \left. + \int_0^a J_2\left(\frac{1.8412 \rho}{a}\right) J_2(k_0 \rho \sin(\theta)) \rho d\rho \right]
 \end{aligned} \quad (2.110)$$

จากสมการที่ (2.103) และ (2.104) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 E_\phi = 2NM\pi \cos(\theta) \cos(\phi) & \frac{a^3}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \left[ \left\{ -k_0 \sin(\theta) J_0(1.8412) \right. \right. \\
 & \times J_1(k_0 a \sin(\theta)) + \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) J_0(k_0 a \sin(\theta)) \left. \right\} + k_0 \sin(\theta) \\
 & \times J_2(1.8412) J_1(k_0 a \sin(\theta)) - \frac{1.8412}{a} J_1(1.8412) J_2(k_0 a \sin(\theta)) \left. \right]
 \end{aligned} \quad (2.111)$$

จากสมการที่ (2.87) และใช้คุณสมบัติ แสดงดังนี้

$$\left. \frac{dJ_n(k_c r)}{dr} \right|_{r=a} = 0 \quad (2.112)$$

โดยที่  $k_c = \frac{k'_{mn}}{a}$  (2.113)

ซึ่งกรณีของโหมดคลื่นหลัก  $TE_{11}$  ค่าของ  $k'_{mn}$  จะมีค่าเท่ากับ 1.8412  
 ดังนั้นสมการที่ (2.110) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\phi = 2NM\pi \cos(\theta)\cos(\phi) \frac{a^2}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} (1.8412) J_1(1.8412) \\ \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} \quad (2.114)$$

เมื่อแทนค่า M และ N ลงในสมการที่ (2.114) จะได้ว่า

$$E_\phi = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{\epsilon r} A_{11} a \cos(\theta) \cos(\phi) \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \\ \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} \quad (2.115)$$

ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายออกจากท่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกที่ระนาบ  $Z=0$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_\theta = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{\epsilon r} A_{11} a \sin(\phi) J_1(1.8412) \frac{J_1(k_0 a \sin(\theta))}{k_0 a \sin(\theta)} \quad (2.116)$$

$$E_\phi = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{\epsilon r} A_{11} \cos(\theta) \cos(\phi) \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \\ \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} \quad (2.117)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.6 สนามที่แพร่กระจายจากช่องเปิดทั้งสองด้านของวงแหวน (Radiation Field)

เนื่องจากช่องเปิดของวงแหวนทั้งสองด้าน จะมีระยะห่างอยู่ที่  $Z = \frac{d}{2}$  และ  $-Z = \frac{d}{2}$  ดังนั้น เมื่อทำการสังเกตที่สนามระยะไกล ดังรูปที่ 2.7 สนามทั้งหมดที่แพร่กระจายออกจากช่องเปิดทั้งสองด้านของวงแหวนจะมีค่าเท่ากับ สนามที่แพร่กระจายออกไปจากระนาบ  $Z = \frac{d}{2}$  รวมกับสนามแพร่กระจายออกไปจากระนาบ  $-Z = \frac{d}{2}$  สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 การแพร่กระจายของสนามเมื่อทำการสังเกตที่สนามระยะไกล

ที่ระยะ  $Z = \frac{d}{2}$  และ  $-Z = \frac{d}{2}$

จากการสังเกตที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$\theta_1 = \theta \quad (2.118)$$

$$r_1 = r - \frac{d}{2} \cos(\theta) \quad (2.119)$$

$$r_2 = r + \frac{d}{2} \cos(\theta) \quad (2.120)$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r \quad (2.121)$$

โดยสมการที่ (2.119) และ (2.120) จะมีผลในส่วนของเฟส (Phase) และสมการที่ (2.121) จะมีผลในส่วนของขนาด

$$E_{\theta_1} = \frac{jk_0}{r} \frac{A_{11}}{\epsilon} a \sin(\phi) J_1(1.8412) \frac{J_1(k_0 a \sin(\theta))}{(k_0 a \sin(\theta))} e^{-jk_0 r} e^{jk_0 \frac{d}{2} \cos(\theta)} \hat{a}_\theta \quad (2.122)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\phi} = \frac{jk_0}{r} \frac{A_{11}}{\epsilon} a \cos(\theta) \cos(\phi) \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} e^{-jk_0 r} e^{jk_0 \frac{d}{2} \cos(\theta)} \hat{a}_\phi \quad (2.123)$$

และเมื่อพิจารณาสนามที่แพร่กระจายออกจากกระนาบ  $-Z = \frac{d}{2}$  จะพบว่าทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นจะตรงข้ามกับกระนาบ  $Z = \frac{d}{2}$  ได้ว่า

$$E_{\theta 2} = \frac{jk_0}{r} \frac{A_{11}}{\epsilon} a \sin(\phi) J_1(1.8412) \frac{J_1(k_0 a \sin(\theta))}{(k_0 a \sin(\theta))} e^{-jk_0 r} e^{jk_0 \frac{d}{2} \cos(\theta)} (-\hat{a}_\theta) \quad (2.124)$$

$$E_{\phi 2} = \frac{jk_0}{r} \frac{A_{11}}{\epsilon} a \cos(\theta) \cos(\phi) \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} e^{-jk_0 r} e^{jk_0 \frac{d}{2} \cos(\theta)} (-\hat{a}_\phi) \quad (2.125)$$

ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายจากช่องเปิดของวงแหวนทั้งสองด้านของตัวสายอากาศ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} E_\theta &= E_{\theta 1} + E_{\theta 2} \\ &= E_{\theta 1}(\hat{a}_\theta) + E_{\theta 2}(-\hat{a}_\theta) \end{aligned}$$

$$\therefore E_\theta = \frac{j^2 k_0}{\epsilon r} e^{-jk_0 r} A_{11} 2a \sin(\phi) J_1(1.8412) \frac{J_1(k_0 a \sin(\theta))}{(k_0 a \sin(\theta))} \sin\left(k_0 \frac{d}{2} \cos(\theta)\right) \quad (2.126)$$

$$\begin{aligned} \overline{E}_\phi &= \overline{E}_{\phi 1} + \overline{E}_{\phi 2} \\ &= E_{\phi 1}(\hat{a}_\phi) + E_{\phi 2}(-\hat{a}_\phi) \end{aligned}$$

$$E_\phi = \frac{j^2 k_0}{\epsilon r} e^{-jk_0 r} A_{11} a \cos(\theta) \cos(\phi) \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} \sin\left(k_0 \frac{d}{2} \cos(\theta)\right) \quad (2.127)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ส่วนประกอบของสนามที่แพร่กระจายออกจากช่องเปิดของวงแหวนทั้งสองด้านของตัวสายอากาศเมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\therefore E_\theta = \frac{j^2 k_0}{\epsilon r} e^{-jk_0 r} A_{11} 2a \sin(\phi) J_1(1.8412) \frac{J_1(k_0 a \sin(\theta))}{(k_0 a \sin(\theta))} \sin\left(k_0 \frac{d}{2} \cos(\theta)\right) \quad (2.128)$$

$$E_\phi = \frac{j^2 k_0}{\epsilon r} e^{-jk_0 r} A_{11} a \cos(\theta) \cos(\phi) \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \times \frac{dJ_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} \sin\left(k_0 \frac{d}{2} \cos(\theta)\right) \quad (2.129)$$

#### 2.4.7 สนามที่แพร่กระจายออกจากวงแหวน เหนือระนาบสะท้อนคลื่น

จะหาสมการจากไดโพล (Dipole) ที่วางเหนือระนาบกราวด์เพลน (Ground Plane) แบบอนันต์ ดังรูปที่ 2.8 โดยจุดสังเกตอยู่ที่สนามระยะไกล



รูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้าแนวอน (Horizontal Electric Dipole)วางเหนือระนาบสะท้อนคลื่นแบบอนันต์

จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{องค์ประกอบของคลื่น} \Rightarrow E_\phi^d = j\eta \frac{kI_0 I e^{-jkr_1}}{4\pi r_1} \sin(\phi) \quad (2.130)$$

และองค์ประกอบคลื่นสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E'_\phi = -jR_h \eta \frac{kI_0 I e^{-jkr_{21}}}{4\pi r_2} \sin(\phi) \quad (2.131)$$

หรือ

$$E'_\phi = -j\eta \frac{kI_0 I e^{-jkr_{21}}}{4\pi r_2} \sin(\phi) \quad (2.132)$$

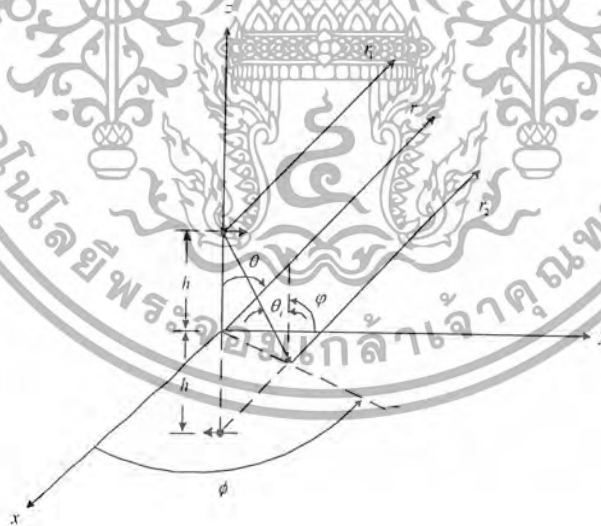
$R_h$  = Reflection Coefficient ในที่นี้มีค่าเท่ากับ  $-1$   
จะหามุม  $\phi$  โดยวัดจาก แกน  $y$  ไปจุดสังเกต จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \cos(\phi) &= \hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = \hat{a}_y \cdot (\hat{a}_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \hat{a}_y \sin(\theta) \sin(\phi) + \hat{a}_z \cos(\theta)) \\ &= \sin(\theta) \sin(\phi) \end{aligned} \quad (2.133)$$

เราจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sin(\phi) = \sqrt{1 - \cos^2(\phi)} = \sqrt{1 - \sin^2(\theta) \sin^2(\phi)} \quad (2.134)$$

เมื่อจุดสังเกตอยู่ที่สนามระยะไกล ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สนามระยะไกล (Far-field observation)

$$\left. \begin{aligned} r_1 &\approx r - h \cos(\theta) \\ r_2 &\approx r + h \cos(\theta) \end{aligned} \right\} \text{สำหรับการเปลี่ยนเฟส}$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r \quad \text{สำหรับการเปลี่ยนขนาด}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสนามทั้งหมดที่แพร่กระจายออกมาเหนือกราวด์เพลน (Ground Plane) ที่บริเวณ

$$z \geq 0, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, 0 \leq \phi \leq 2\pi \text{ เขียนได้ดังนี้}$$

$$E_\phi = E_\phi^d + E_\phi^r = j\eta \frac{kl_0 I e^{-jkr_2}}{4\pi r_2} \sqrt{1 - \sin^2(\theta) \sin^2(\phi)} [2j \sin(kh \cos(\theta))] \quad (2.135)$$

สมการที่ (2.135) เรียกว่าสมการไดโพลไฟฟ้าแนวนอน (Horizontal Electric Dipole) ซึ่งวางเหนือระนาบสะท้อนคลื่นแบบอนันต์ซึ่งสมการสะท้อนคลื่นจากสมการที่ (2.135) คือ

$$2j \sin(kh \cos(\theta)) \quad (2.136)$$

สมการที่ (2.136) สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศที่มีการแพร่กระจายออกจากช่องเปิดของวงแหวนทั้งสองด้านเพื่อที่จะทำให้สายอากาศเป็นแบบแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล แสดงได้ดังนี้

$$E_\theta = \frac{j^2 k_0}{\epsilon r} e^{-jk_0 r} A_{11} 2a \sin(\phi) J_1 \left( 1.8412 \frac{J_1(k_0 a \sin(\theta))}{k_0 a \sin(\theta)} \sin k_0 \frac{d}{2} \cos(\theta) \right) 2j \sin(kh \cos(\theta)) \quad (2.137)$$

$$E_\phi = \frac{j^2 k_0}{\epsilon r} e^{-jk_0 r} A_{11} 2a \cos(\theta) \cos(\phi) \frac{(1.8412)^2 J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (k_0 a \sin(\theta))^2} \times \frac{d J_1(k_0 a \sin(\theta))}{d(k_0 a \sin(\theta))} \sin \left( k_0 \frac{d}{2} \cos(\theta) \right) 2j \sin(kh \cos(\theta)) \quad (2.138)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

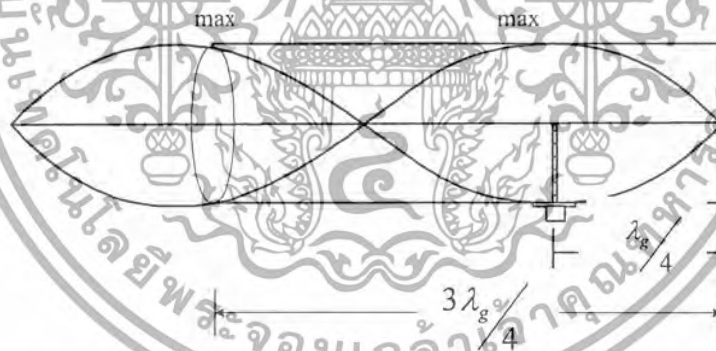
### บทที่ 3

#### การวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบ

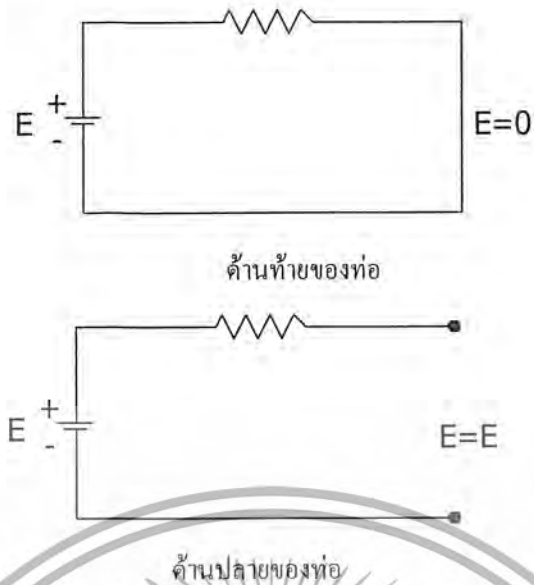
##### 3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ

ในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้น เริ่มแรกจะพิจารณาขนาดของท่อนำคลื่นทรงกระบอกก่อนที่จะทำให้สนามออกมามีค่ามากที่สุด ต่อไปจะสนใจในส่วนของค่ารีซีทีและความยาวของตัวสายอากาศวงแหวน โดยค่าดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศและค่าการรีซีทีของสายอากาศ ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากที่จะต้องพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรก สิ่งต่อไปที่จะต้องพิจารณาคือ ความยาวของโพรบที่ใช้กับตัวสายอากาศวงแหวน โดยค่าดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ( Voltage Standing Wave Ratio ) ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการย้อนกลับ ( Return Loss ) และค่าความกว้างของความถี่ใช้งาน ( Bandwidth ) ของสายอากาศ เมื่อได้รูปแบบที่แน่นอนของตัวสายอากาศวงแหวนแล้ว ก็จะนำวางที่ระยะห่างต่างๆกันจากแผ่นระนาบตัวนำสะท้อนคลื่นเพื่อให้ได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว

##### 3.1.1 การพิจารณาขนาดของท่อทรงกระบอก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ท่อนำคลื่นทรงกระบอกและวงจรเสมือน

จากรูป 3.1 จะเห็นว่าคลื่นที่เดินทางในท่อทรงกระบอก (Cylindrical Cavity) จะมีความยาวคลื่นเป็น  $\lambda_g$  และด้านท้ายของท่อจะเป็นแบบปิดเหมือนวงจรปิด (close circuit) ดังนั้นแรงดันตรงจุดนี้จะเป็นศูนย์ ส่วนที่ด้านปลายของท่อซึ่งจะเป็นส่วนที่คลื่น จะเดินทางออกไปยังร่องบนแผ่นระนาบตัวนำสะท้อนคลื่น ที่จุดนี้ต้องการให้มีค่าขนาดแรงดันสูงสุดหรือมีค่าความแรงของสนามที่ออกมามากที่สุด ดังนั้นจึงตัดท่อให้มีความยาวเท่ากับ  $\frac{3\lambda_g}{4}$  ดังรูป สำหรับจุดที่จะป้อนสัญญาณเข้าไปในท่อ ก็จะต้องให้อยู่ในจุดที่มีค่าแรงดันสูงสุด ฉะนั้นจะต้องป้อนสัญญาณเข้าที่ตำแหน่ง  $\frac{\lambda_g}{4}$  ของท่อทรงกระบอกตามรูป ซึ่งขนาดต่างๆที่คำนวณได้มีดังนี้

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{3.412a}\right)^2}}$$

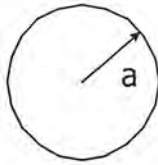
$\lambda_g$  = ความยาวคลื่นของคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่น

$\lambda_0$  = ความยาวคลื่นที่เดินทางในอากาศว่าง (free space)

$3.412a$  = ความยาวคลื่นคัตออฟของท่อนำคลื่นทรงกระบอก

$a$  = รัศมีของท่อนำคลื่นทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1.9065 \times 10^9} = 15.74 \text{ cm} .$$

$$a = 0.3019 \lambda_0 = 4.75 \text{ cm}$$

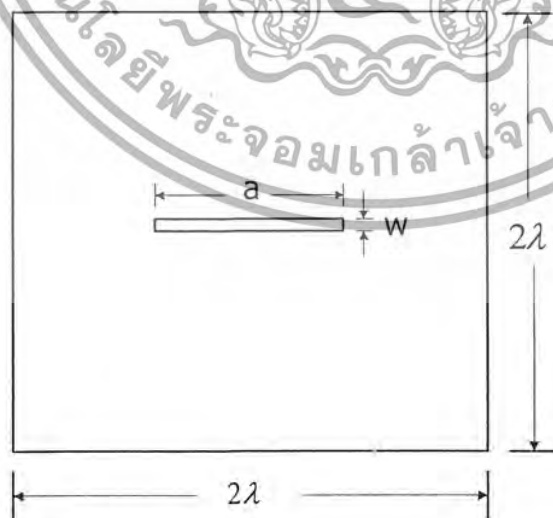
$$3.412a = 16.207 \text{ cm}$$

$$\lambda_g = \frac{15.412}{\sqrt{1 - \left(\frac{15.74}{16.207}\right)^2}} = 66 \text{ cm}$$

$$\text{จุดป้อนสัญญาณ (feed)} = \frac{\lambda_g}{4} = 16.5 \text{ cm}$$

$$\text{ความยาวของท่อทรงกระบอก} = \frac{3\lambda_g}{4} = 49.5 \text{ cm}$$

### 3.1.2 การพิจารณาขนาดของร่องและแผ่นระนาบสะท้อนคลื่น



รูปที่ 3.2 ขนาดของร่องและแผ่นระนาบสะท้อนคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

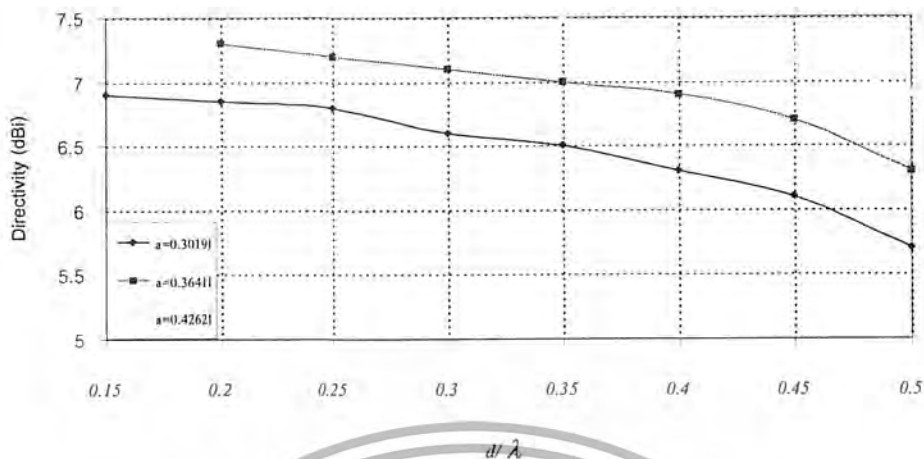
จากรูป 3.2 โดยทั่วไปแล้วขนาดของร่องจะให้  $2a \gg w$  เสมอซึ่งในโครงการนี้จะใช้ค่า  $w = 2mm$  . ตามขนาดของดอกกัณฑ์เล็กที่สุดที่หาได้ ส่วนค่า  $a$  หรือความยาวของปากร่อง จะใช้ความยาว  $\frac{\lambda}{2}$  หรือเท่ากับ  $7.87cm$  . เพื่อให้สัญญาณมีความแรงมากที่สุดที่ตรงกลางของปากร่อง ซึ่งที่จุดกึ่งกลางร่องก็จะตรงกันกับโพรบไฟฟ้าภายในท่อนำคลื่นทรงกระบอก ทำให้ได้สัญญาณออกมาแรงที่สุด สำหรับขนาดของแผ่นระนาบตัวนำสะท้อนคลื่น ในทางทฤษฎีแล้ว แผ่นระนาบตัวนำสะท้อนคลื่นต้องมีขนาดเป็นอนันต์ จึงทำให้เกิดปัญหาว่า ในทางปฏิบัติไม่สามารถหาแผ่นสะท้อนที่มีขนาดเป็นอนันต์ได้ ดังนั้นจึงพยายามทำแผ่นสะท้อนให้ใหญ่ แต่ปัญหาที่ตามมาก็คือเมื่อแผ่นมีขนาดใหญ่ ก็จะมี ความยุ่งยากในการติดตั้งใช้งาน ดังนั้นในโครงการนี้จึงใช้แผ่นสะท้อนเท่ากับ  $2\lambda$  ซึ่งมีขนาดที่ไม่ใหญ่ไม่เล็กจนเกินไป และมีรูปร่างเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

### 3.1.3 การพิจารณาค่ารัศมีและความกว้างของสายอากาศวงแหวน

ในการพิจารณารัศมีที่รัศมีนั้น จะพิจารณารัศมีของตัวสายอากาศที่ทำให้คลื่นที่ออกมาจากตัวสายอากาศมีเพียงรูปแบบคลื่นหลักเท่านั้น ในกรณีของตัวสายอากาศวงแหวนรูปแบบของคลื่นหลักคือ TE<sub>11</sub> จากบทที่ 2 จะได้ว่ารัศมีที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ระหว่าง

$$0.293 \lambda < a < 0.486 \lambda$$

ซึ่งรัศมีเหล่านี้ ก็จะเหมาะสมกับความกว้างของวงแหวนที่ไม่เหมือนกัน โดยแต่ละรัศมีจะเหมาะสมกับความกว้างเพียงค่าเดียวเท่านั้นที่จะให้ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการชี้ทิศทางกับความกว้างของสายอากาศในแต่ละค่าของค่ารัศมีของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.3 จะพบว่าที่รัศมีเท่ากับ 0.3019  $\lambda$  ความกว้างที่เหมาะสมที่สุดจะให้ค่าการชี้ทิศทางมีค่าสูงสุดและทำให้คลื่นที่ออกจากสายอากาศเป็นรูปแบบคลื่นหลัก TBM นั้น มีค่าเท่ากับ 0.154  $\lambda$  เช่นเดียวกันสำหรับค่ารัศมีที่ 0.3641  $\lambda$  จะเหมาะสมกับค่าความกว้างที่ 0.225  $\lambda$  และสำหรับค่ารัศมีที่ 0.4262  $\lambda$  จะเหมาะสมกับค่าความกว้างที่ 0.35  $\lambda$  ส่วนการออกแบบที่ค่าอื่นๆ นอกเหนือจากนี้ก็ยังสามารถทำได้เช่นเดียวกัน เช่นถ้าเราต้องการออกแบบค่ารัศมีที่ 0.35  $\lambda$  และต้องการค่าการชี้ทิศทางเท่ากับ 6.5 dBi จะได้ค่าความกว้างที่เหมาะสมคือ 0.44  $\lambda$  ในทางกลับกัน ถ้าเราต้องการค่ารัศมีที่ 0.40  $\lambda$  และค่าความกว้างที่ 0.37  $\lambda$  ค่าการชี้ทิศทางที่ควรจะได้รับคือ 7.4 dBi เพราะฉะนั้น ถ้ากำหนดค่าพารามิเตอร์มา 2 ตัว ก็สามารถหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมอีกตัวหนึ่งได้

ตัวสายอากาศสองแฉกที่ได้ทำการออกแบบไว้สำหรับปริณูณานิพนธ์นี้คือ ค่ารัศมีเท่ากับ 0.3019  $\lambda$  และค่าความกว้างเท่ากับ 0.154  $\lambda$  โดยให้ค่าการชี้ทิศทางเท่ากับ 6.816 dBi

### 3.1.4 การพิจารณาค่าความยาวโพรบ

ค่าความยาวของโพรบที่ได้ทำการทดลองกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ( Network Analyzer ) จะพบว่าค่าความยาวโพรบที่เหมาะสมสำหรับค่ารัศมีและความกว้างที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งเราจะใช้โพรบ 2 ด้าน ด้านละประมาณ 4.6 cm ซึ่งการพิจารณาค่าความยาวโพรบนั้น จะต้องทำให้เข้าใกล้การเกิดรีโซแนนซ์ ( resonance ) ให้มากที่สุดเพื่อให้คลื่นที่ส่งออกไปมีพลังงานมากที่สุดก็จะทำให้สามารถส่งไปได้ไกล โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นก็ต้องทำให้สายอากาศมีค่า VSWR ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ทั่วไปสำหรับสายอากาศ คือ ค่า VSWR ไม่ควรมีค่ามากกว่า 1.5 และค่าการเอกสาร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูญเสียของการสะท้อนกลับ ( return loss ) จะต้องมีค่าน้อยกว่า -15 dB; ขึ้นไปดังนั้น ค่าความยาว โพรบที่ได้นั้น ก็ได้มาจากข้อกำหนดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ส่วนการคำนวณหาค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานนั้น ทำได้โดยการหาความถี่ที่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่กลางที่มีค่า VSWR เท่ากับ 1.5 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งานได้จาก

$$BW = \frac{f_H - f_L}{f_0} \times 100\% \tag{3.1}$$

ซึ่งค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานควรมีค่ามากกว่า 10 % ขึ้นไป

### 3.2 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบทิศทางเดียว แสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้ากับในระนาบสนามแม่เหล็กจะเห็นว่าในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่น (beam) ที่มากกว่าในระนาบสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

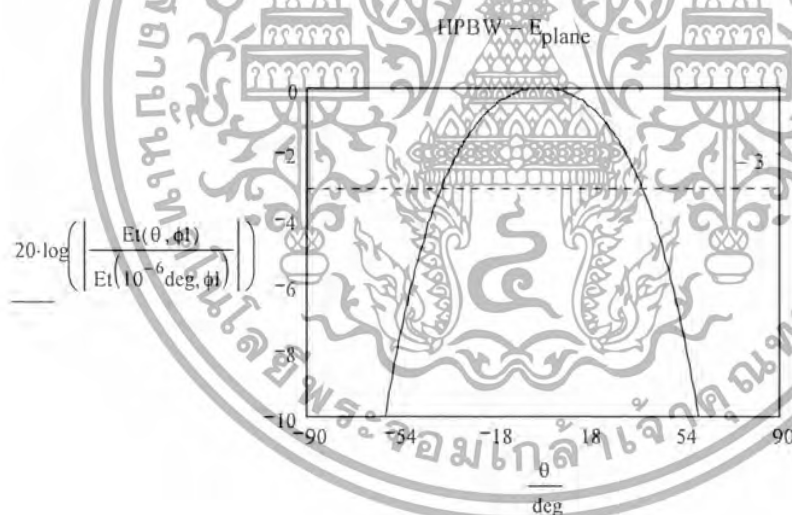
### 3.3 การพิจารณาค่าการชี้ทิศทาง

พบว่าสำหรับ ความห่างของสายอากาศวงแหวนกับระนาบตัวนำสะท้อนคลื่นเมื่อความห่างมากขึ้นจะทำให้ค่าการชี้ทิศทางลดลงจนถึง  $0.4 \lambda$  ถึงจะค่อยกลับมามีค่ามากขึ้นอีกแต่ที่ความสูงตั้งแต่  $0.4 \lambda$  ขึ้นไปรูปแบบคลื่นจะเกิดการแตกออกและจะเริ่มมี side lobe เกิดขึ้นซึ่งเป็นที่เราไม่ต้องการให้เกิด เพราะว่า side lobe ที่เกิดขึ้นมีค่าไม่ถึง 20 dB ขนาดของ side lobe ที่ยอมรับได้จะต้องมีค่ามากกว่า 20 dB

ในส่วนของตัววงแหวนเองนั้นสำหรับรัศมีค่าหนึ่ง เมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการชี้ทิศทางลดลง และถ้าความหนามีค่ามากกว่า  $0.5 \lambda$  รูปแบบคลื่นที่กระจายออกมาก็จะเกิดการแตกออกเช่นกัน และที่ความหนาครั้งที่กำหนด เมื่อค่ารัศมีมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าการชี้ทิศทางเพิ่มขึ้นตามไปด้วยแต่ก็จะทำให้วงแหวนมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับการใช้งาน และค่าการชี้ทิศทางที่เพิ่มก็มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

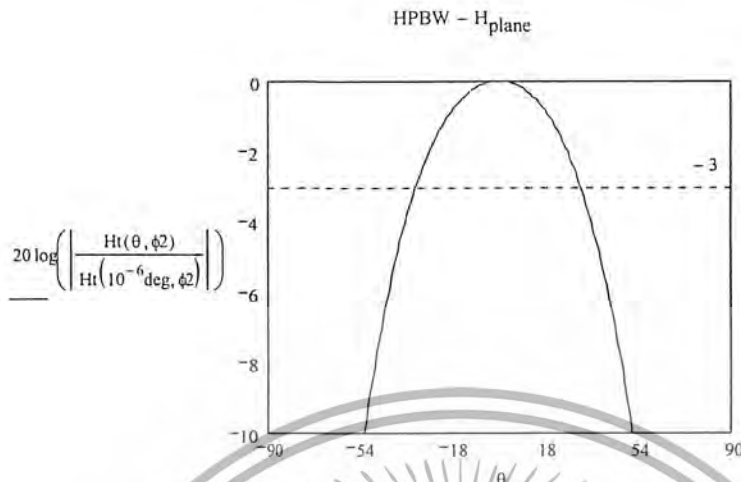
### 3.4 การพิจารณาค่าฮาฟเพาเวอร์บีมวิดท์ (Half Power Beamwidth)

สำหรับในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กจะเท่ากับ 76 และ 64 องศาตามลำดับแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 ค่าฮาฟเพาเวอร์บีมวิดท์ในระนาบของสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



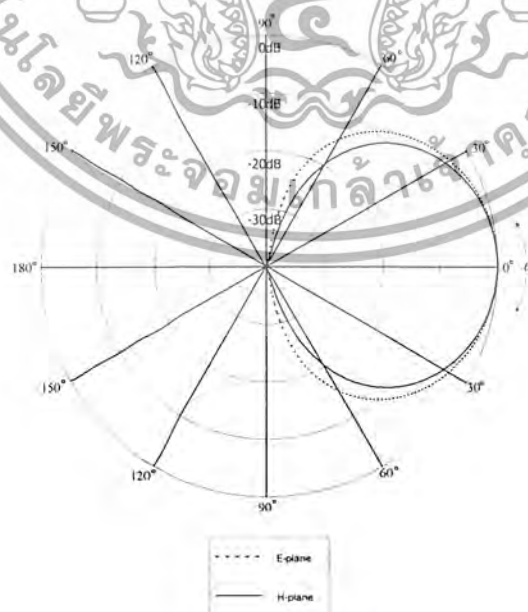
รูปที่ 3.6 ค่าสหพแหวอรับมวัดที่ในระนาบของสนามแม่เหล็ก

ดังนั้น จะเห็นว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่น (beam) ที่กว้างกว่าในระนาบของสนามแม่เหล็กตรงตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

3.5 การพิจารณาการแผ่รังสีของเสาอากาศวงแหวนวางที่ระยะห่างต่างๆกัน

3.5.1 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ 0.1 λ

สามารถแสดงค่าต่างๆได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศวงแหวนวางที่ระยะห่าง 0.1 λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่า ในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่น (beam) มากกว่าในระนาบของสนามแม่เหล็ก

### 3.5.2 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ $0.2 \lambda$

สามารถพิจารณาค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้

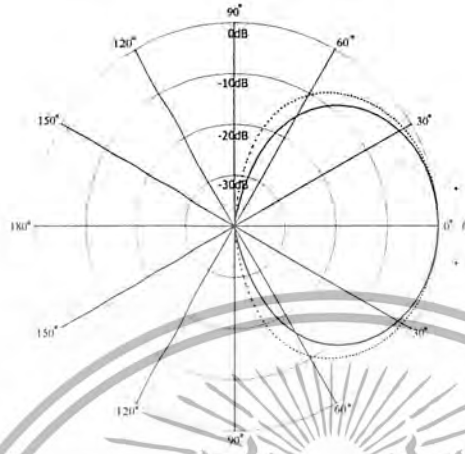


รูปที่ 3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเทียบกับระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศห่างที่ระยะห่าง  $0.2 \lambda$

จะพบว่า ในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่น (beam) มากกว่าในระนาบของสนามแม่เหล็กและก็มีมากกว่าที่ระยะ  $0.1 \lambda$

### 3.5.3 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ 0.3 $\lambda$

สามารถพิจารณาค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



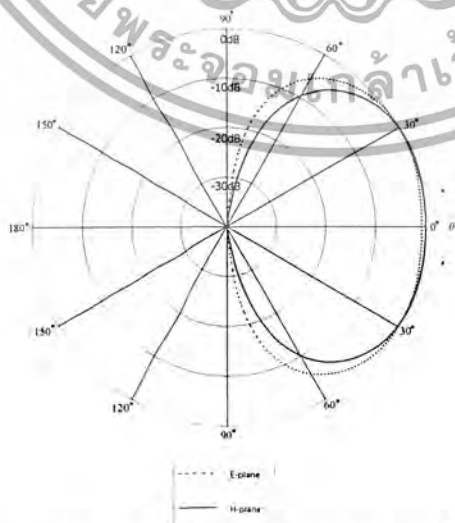
รูปที่ 3.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเทียบกับ

ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศสองแหวนที่ระยะห่าง 0.3  $\lambda$

จะพบว่า ในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่น (beam) มากกว่าในระนาบของสนามแม่เหล็กและก็มากกว่าที่ระยะ 0.2  $\lambda$  ซึ่งจะมีผลให้ค่าสภาพเงาเงจทิศทางของสายอากาศลดลง

### 3.5.4 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ 0.4 $\lambda$

สามารถพิจารณาค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเทียบกับ

ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศสองแหวนที่ระยะห่าง 0.4  $\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่า ในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่น (beam) มากกว่าในระนาบของสนามแม่เหล็กและก็มากกว่าที่ระยะ  $0.3 \lambda$  ซึ่งจะมีผลให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศลดลงและที่ระยะนี้จะเกิดการแตกออกของลำคลื่น

3.5.5 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ  $0.5 \lambda$

สามารถพิจารณาค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้

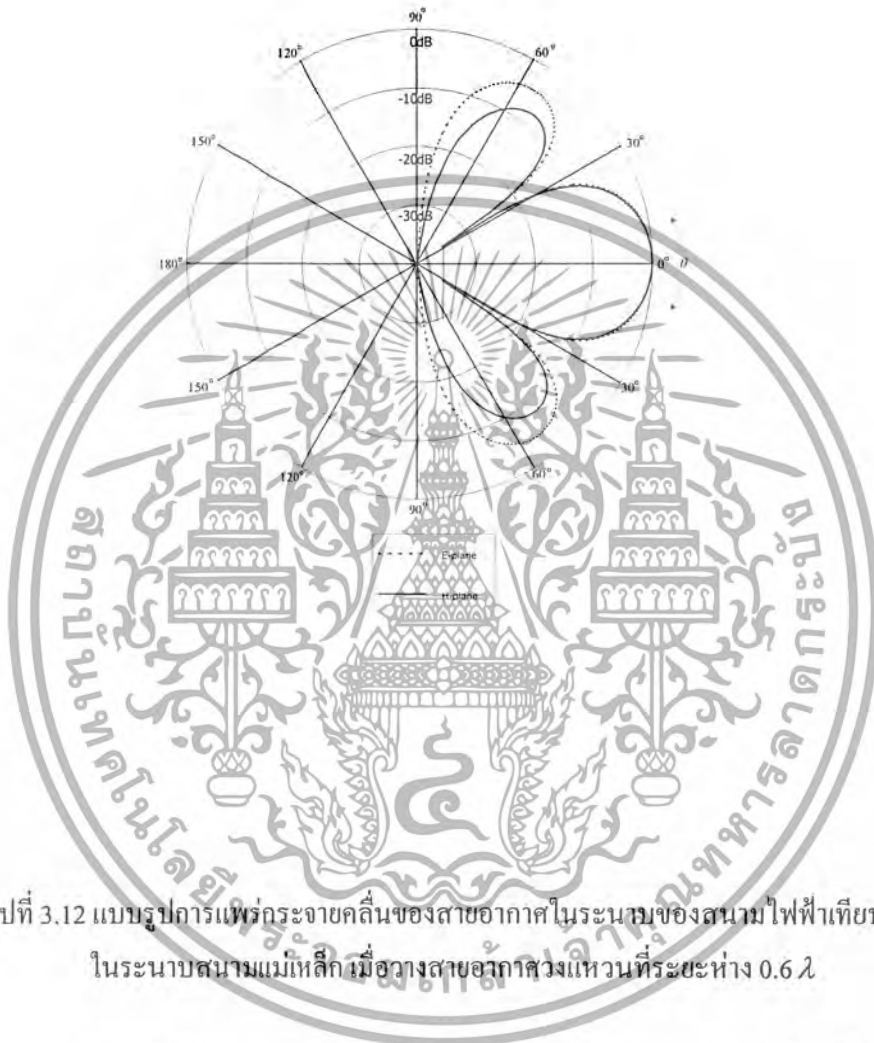


รูปที่ 3.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่าง  $0.5 \lambda$

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าและในระนาบของสนามแม่เหล็กจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่ใช่แบบทิศทางเดียวตามที่ต้องการ โดยที่จะมีการแตกออกของลำคลื่นซึ่งในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่นที่มากกว่าในระนาบสนามแม่เหล็ก

### 3.5.6 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ $0.6 \lambda$

สามารถพิจารณาค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเทียบกับ  
ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่าง  $0.6 \lambda$

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าและในระนาบของสนามแม่เหล็กจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีการเกิดขึ้นของลำคลื่นย่อย ( side lobe ) รวมอยู่ด้วยซึ่งเป็นที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น และความกว้างของลำคลื่นย่อยที่เกิดในระนาบสนามไฟฟ้าจะกว้างกว่าในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.7 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ  $0.7 \lambda$   
สามารถพิจารณาค่าต่างๆได้ดังรูปต่อไปนี้

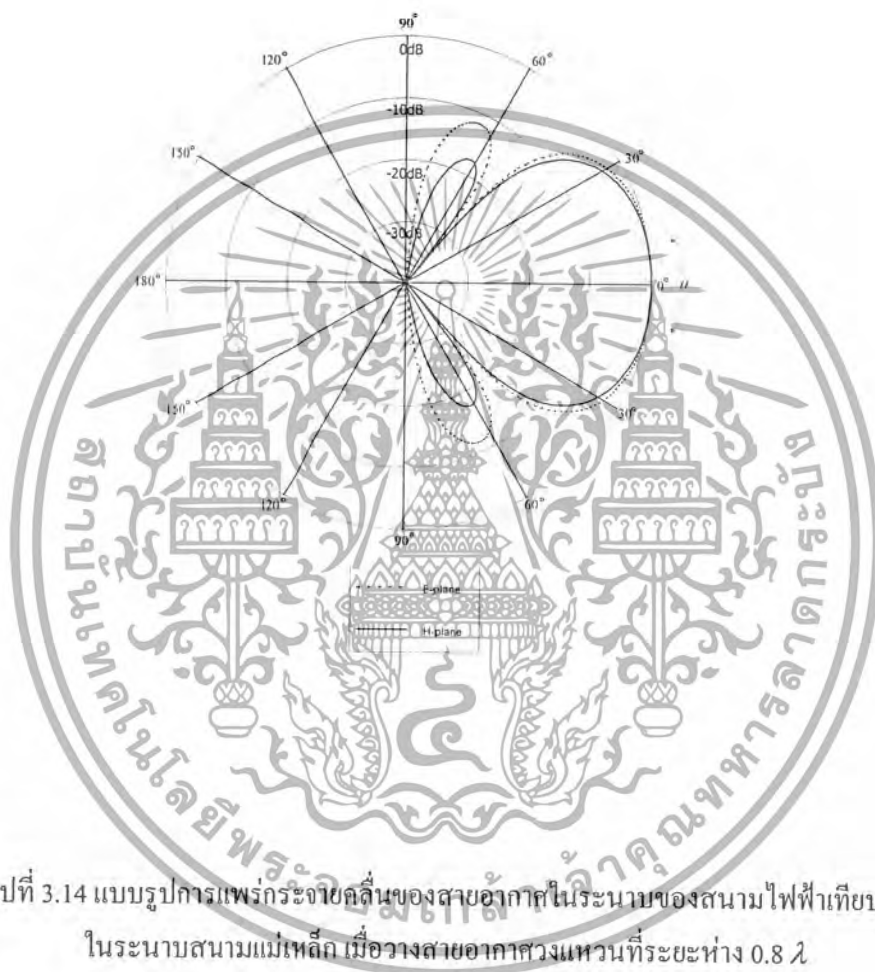


รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเทียบกับ  
ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่าง  $0.7 \lambda$

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าและในระนาบของสนามแม่เหล็กจะมีแบบรูปการ  
แพร่กระจายคลื่นที่มีการเกิดขึ้นของลำคลื่นย่อย ( side lobe ) รวมอยู่ด้วยซึ่งในระนาบ  
สนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่นย่อยที่กว้างกว่าในระนาบสนามแม่เหล็ก แต่ขนาดของลำ  
คลื่นย่อยที่เกิดขึ้นจะมีขนาดที่น้อยกว่าที่ระยะ  $0.5 \lambda$  และ  $0.6 \lambda$

### 3.5.8 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ $0.8 \lambda$

สามารถพิจารณาค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเทียบกับ  
ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่าง  $0.8 \lambda$

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าและในระนาบของสนามแม่เหล็กจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีการเกิดขึ้นของลำคลื่นย่อย ( side lobe ) รวมอยู่ด้วยซึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่นย่อยที่กว้างกว่าในระนาบสนามแม่เหล็ก แต่ขนาดของลำคลื่นย่อยที่เกิดขึ้นจะมีขนาดที่น้อยกว่าที่ระยะ  $0.5 \lambda$   $0.6 \lambda$  และ  $0.7 \lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.9 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ 0.9 $\lambda$

สามารถพิจารณาค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



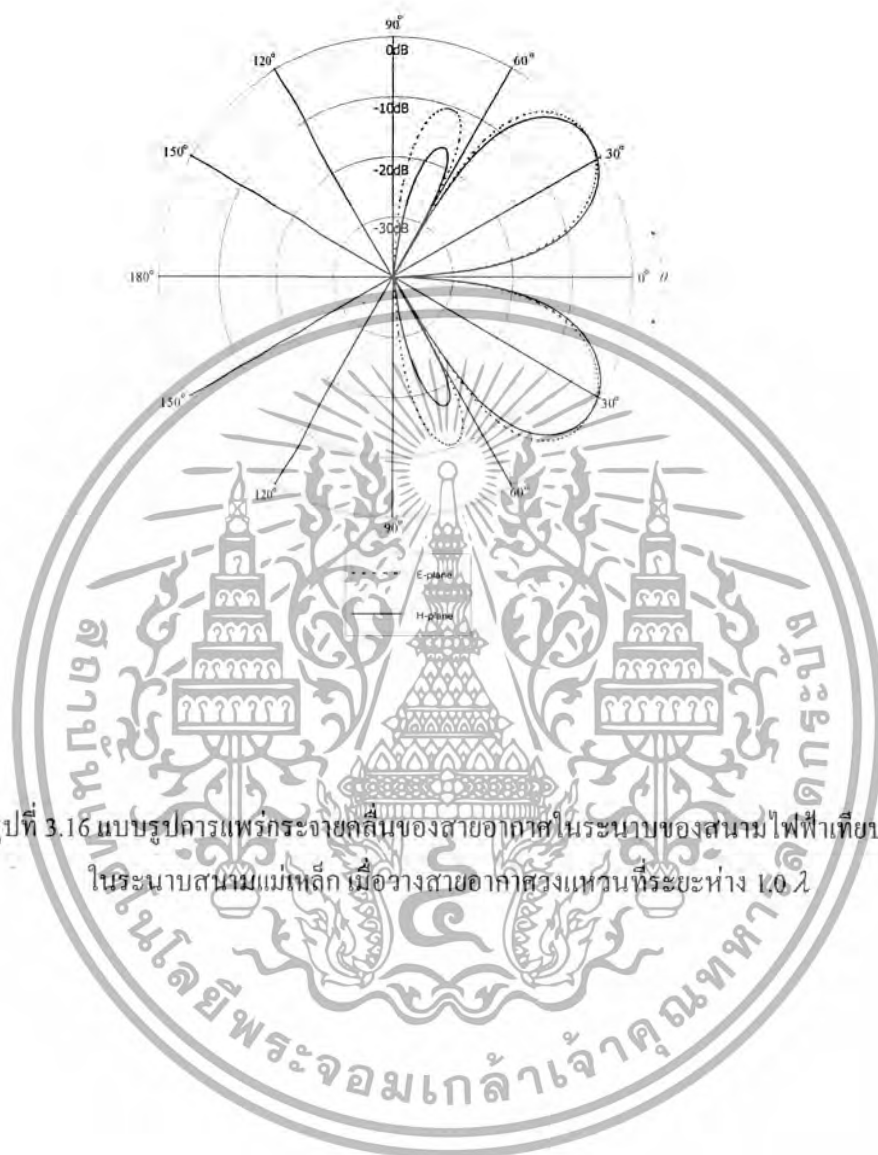
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเทียบกับ  
ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศวางห่างที่ระยะห่าง 0.9  $\lambda$

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าและในระนาบของสนามแม่เหล็กจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีการเกิดขึ้นของลำคลื่นย่อย ( side lobe ) รวมอยู่ด้วยซึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่นย่อยที่กว้างกว่าในระนาบสนามแม่เหล็ก แต่ขนาดของลำคลื่นย่อยที่เกิดก็จะมีความถี่เกือบจะเท่ากับระยะ 0.7  $\lambda$  และที่ระยะนี้จะเห็นว่าลำคลื่นเกิดการแตกออกความแรงของสนามจะไม่มากที่สุดที่ 0 องศา การที่เกิดการแตกออกของลำคลื่นเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการเพราะสายอากาศจะไม่เป็นแบบชี้ทิศทางที่ 0 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.10 เมื่อวางเป็นระยะห่างเท่ากับ $1.0 \lambda$

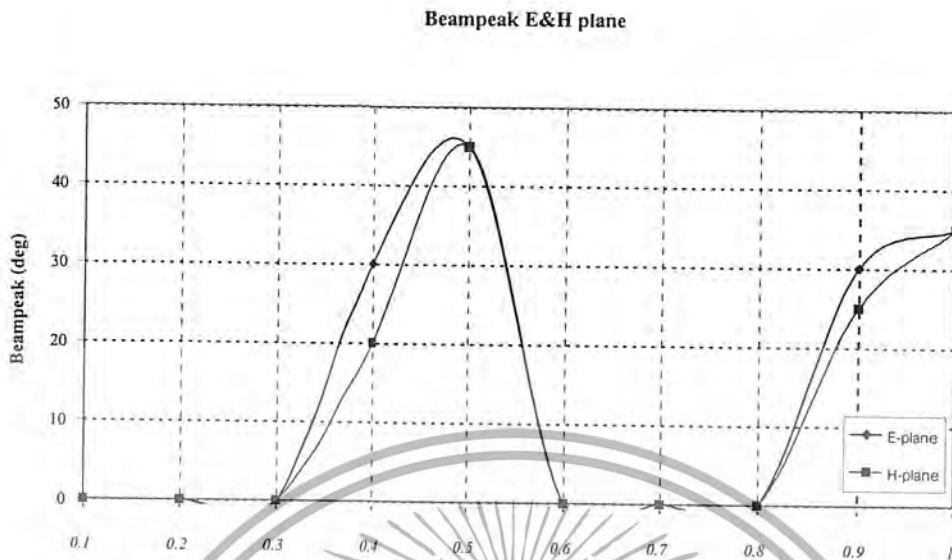
สามารถพิจารณาค่าต่างๆ ได้ดังรูปต่อไปนี้



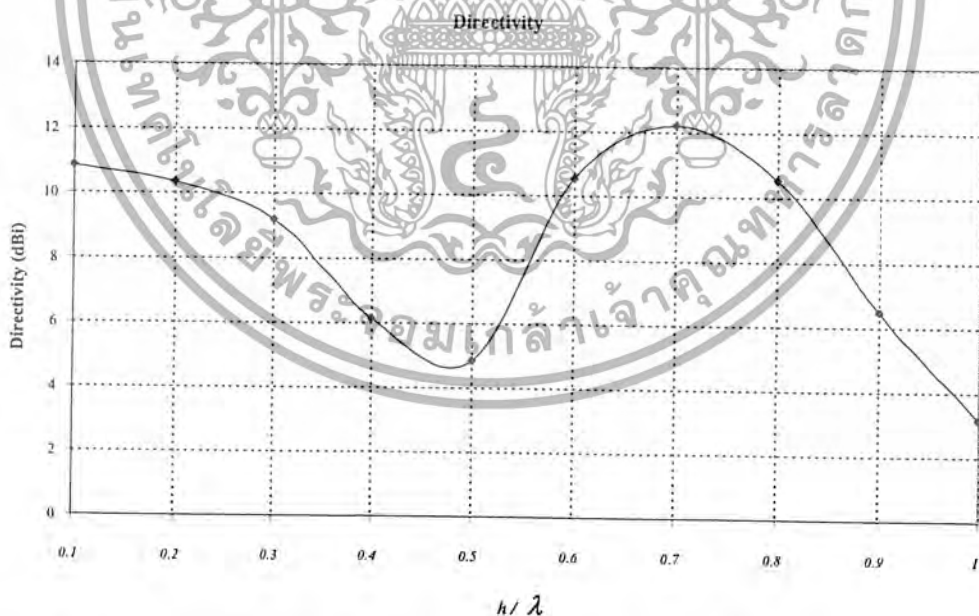
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าเทียบกับ  
ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศตรงหาแนวที่ระยะห่าง  $1.0 \lambda$

จะพบว่าในระนาบของสนามไฟฟ้าและในระนาบของสนามแม่เหล็กจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีการเกิดขึ้นของลำคลื่นย่อย ( side lobe ) รวมอยู่ด้วยซึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่นย่อยที่กว้างกว่าในระนาบสนามแม่เหล็ก และจะมีขนาดของ side lobe level ที่มากขึ้นกว่าทุกระยะที่ผ่านมาแต่ก็ไม่ถึง 20dB ( ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ) ที่ระยะ  $0.4 \lambda$  จะเกิดการแตกออกของลำคลื่นและตั้งแต่ว่าระยะห่างเท่ากับ  $0.5 \lambda$  ขึ้นไปจะมีลำคลื่นย่อยเกิดขึ้นซึ่งจะทำให้ไม่เป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวตามที่ต้องการ ดังนั้นจะพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ค่าฮาทเพาเวอร์บีมวิดท์ ค่าความกว้างจุดศูนย์คู่แรก ค่าระดับลำคลื่นย่อย แรกในช่วงที่กล่าวไว้ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



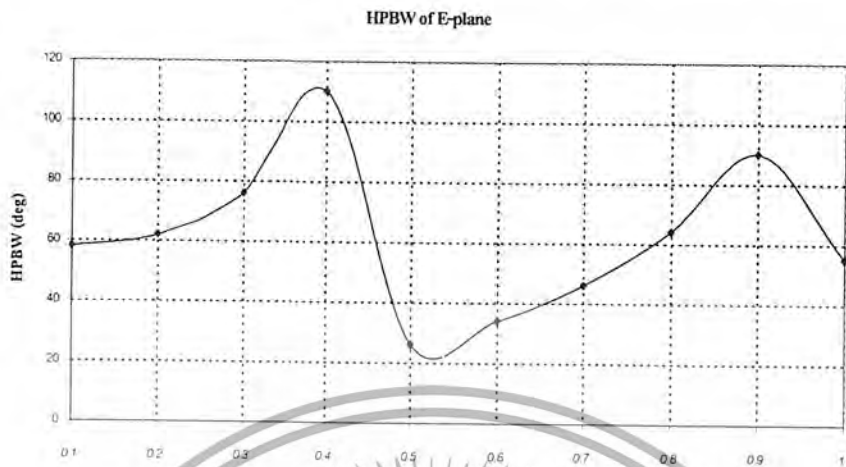
รูปที่ 3.17 ค่ามุมทิศทางสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าเทียบกับในระนาบสนามแม่เหล็ก พบว่าที่ระยะ 0.4 0.5 0.9 และ 1.0  $\lambda$  สนามจะไม่แรงที่สุดที่ 0 องศา



รูปที่ 3.18 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เมื่อวางที่ระยะห่างต่างๆกัน

จะพบว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีค่าลดลงตามระยะห่างที่มากขึ้นเรื่อยๆของสายอากาศ จะลดลงถึง 0.5  $\lambda$  แล้วก็จะกลับมาเพิ่มขึ้นอีกจนถึง 0.7  $\lambda$  ซึ่งเป็นค่าสูงสุดหลังจากนี้ก็จะลดลงอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

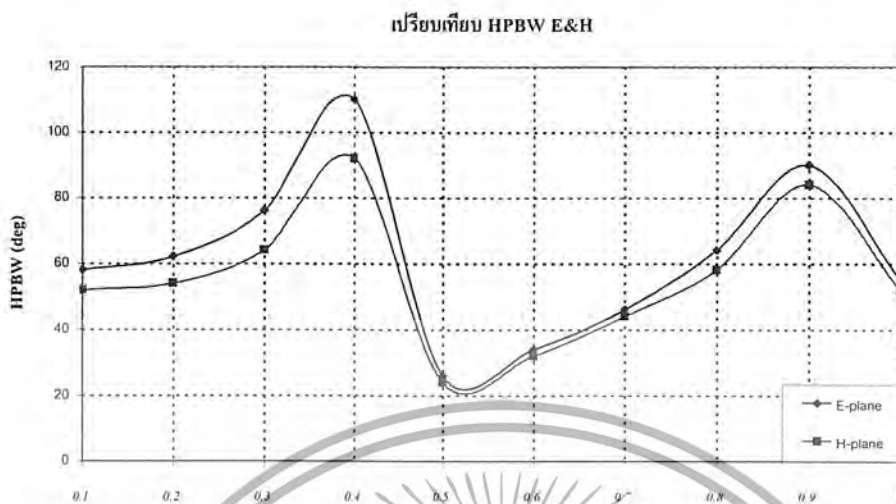


รูปที่ 3.19 ค่าฮัพเพวเออร์บีมวิตท์ในระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน

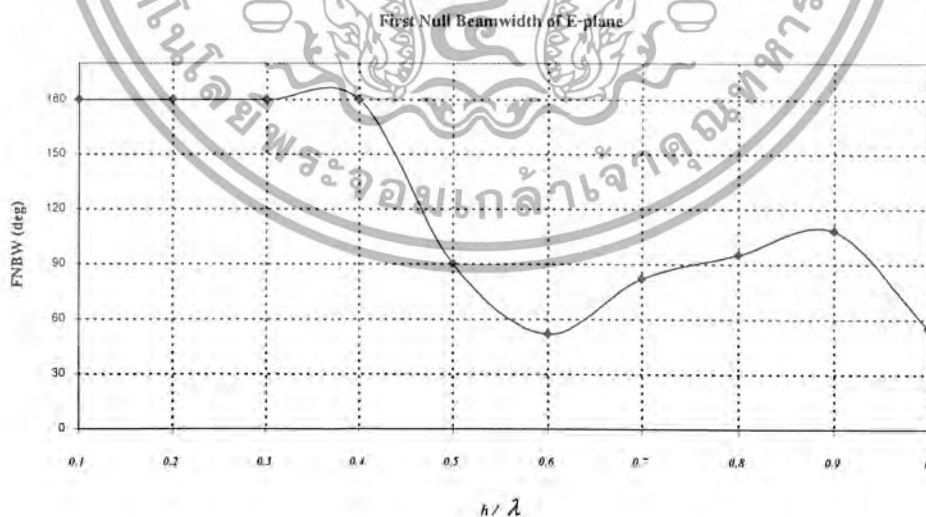


รูปที่ 3.20 ค่าฮัพเพวเออร์บีมวิตท์ในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

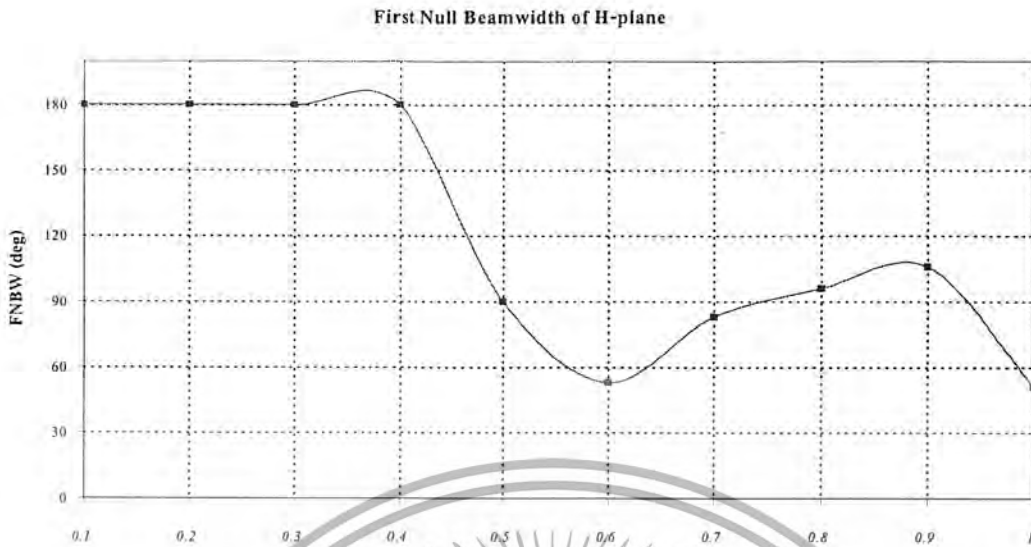


รูปที่ 3.21 เปรียบเทียบค่าฮาวเพนเจอร์บีมวิดท์ในระนาบสนามไฟฟ้ากับในระนาบสนามแม่เหล็ก จะพบว่าค่าฮาวเพนเจอร์บีมวิดท์ในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างมากกว่าในระนาบสนามแม่เหล็กและจะมีความกว้างขึ้นเรื่อยๆจนถึง 0.4  $\lambda$  ก็จะลดลงมา แล้วเพิ่มอีกที่ 0.6  $\lambda$  และที่ 0.9  $\lambda$  ก็จะลดลงอีกครั้ง



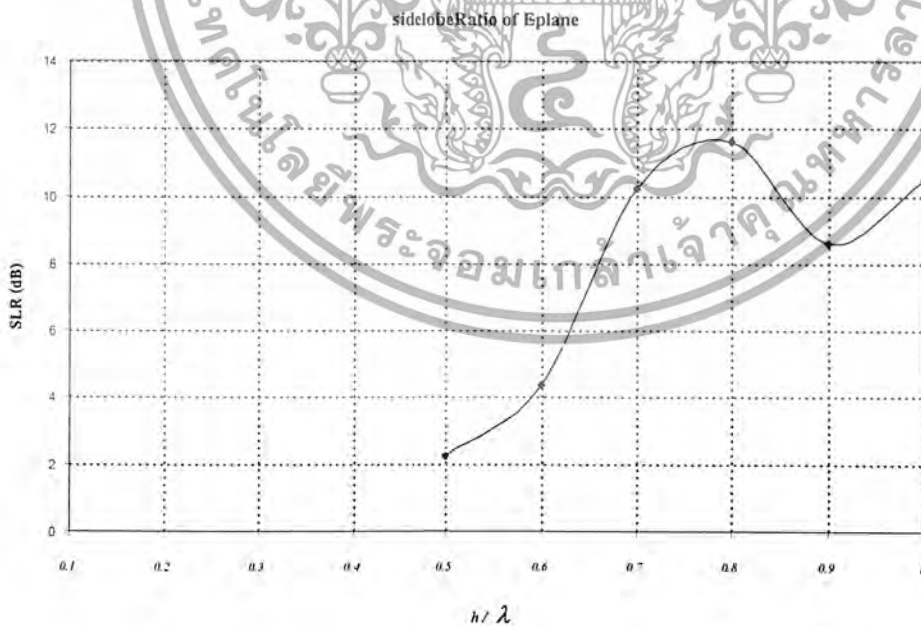
รูปที่ 3.22 ค่าความกว้างจุดศูนย์คู่แรกในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อวางวงแหวนที่ระยะห่างต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



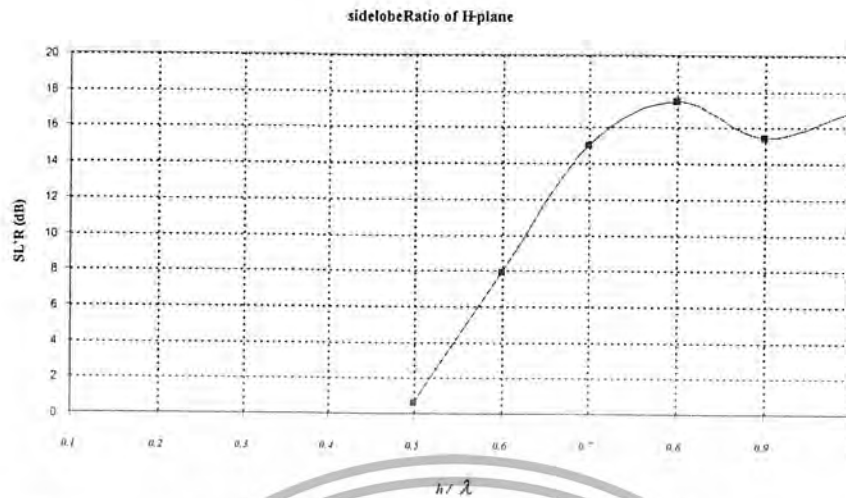
รูปที่ 3.23 ค่าความกว้างจุดศูนย์คู่แรกในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางวงแหวนที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน

จะพบว่าทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กจะมีค่าความกว้างจุดศูนย์คู่แรกที่เกี่ยวข้องจะเท่ากันจะต่างกันเพียงหนึ่งหรือสององศาเท่านั้น และจะมีค่าลดลงที่  $0.4 \lambda$  เป็นต้นไป เพราะคลื่นเกิดการแตกออกและมีค่าคลื่นย่อยเกิดขึ้น



รูปที่ 3.24 ค่าอัตราส่วนของระดับลำคลื่นหลักต่อระดับของลำคลื่นย่อยแรกในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 ค่าอัตราส่วนของระดับลำคลื่นหลักต่อระดับของลำคลื่นย่อยแรกในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ ระยะห่างต่างๆกัน



รูปที่ 3.26 เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของระดับลำคลื่นหลักต่อระดับลำคลื่นย่อยแรกในระนาบสนามไฟฟ้ากับในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อวางสายอากาศวงแหวนที่ระยะห่างต่างๆกัน จะพบว่าทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กจะมีค่าอัตราส่วนของระดับลำคลื่นหลักต่อระดับของลำคลื่นย่อยแรกเกิดขึ้นที่ระยะ  $0.5 \lambda$  และอัตราส่วนนี้ก็จะมากขึ้นเรื่อยๆ โดยเปลี่ยนตามค่าระยะห่างที่มากขึ้น จนถึงที่ระยะ  $0.8 \lambda$  อัตราส่วนนี้จะลดลงเล็กน้อยแล้วก็จะเพิ่มขึ้นอีก จะสังเกตเห็นว่าอัตราส่วนของระดับลำคลื่นหลักต่อระดับของลำคลื่นย่อยแรกในระนาบสนามแม่เหล็กจะมีค่ามากกว่าในระนาบสนามไฟฟ้า ดังนั้นในการออกแบบจะใช้ที่ระยะ  $0.3 \lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบ

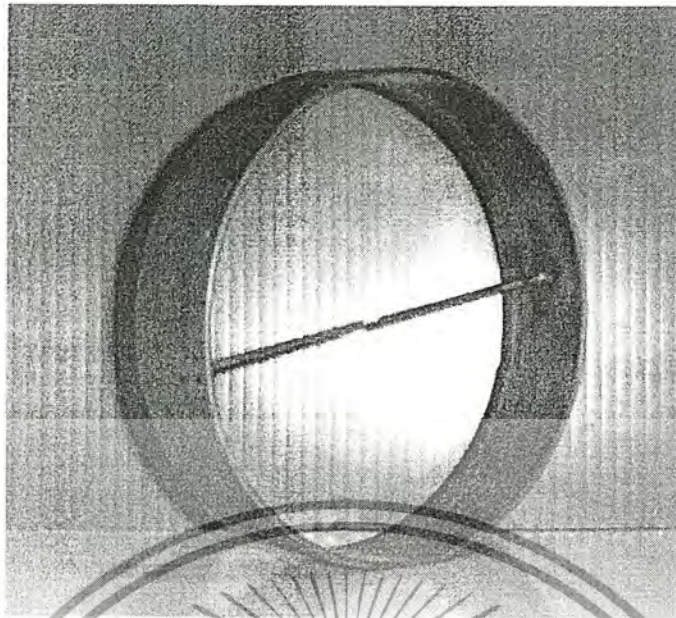
#### 4.1 การสร้าง

จากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ได้ทำการสร้างสายอากาศแบบร่องโดยสร้างจากท่อนำคลื่นทรงกระบอกโดยปลายด้านหนึ่งปิด และปลายอีกด้านใช้แผ่นตัวนำที่มีความยาวด้านละ  $2 \lambda$  ( $30 \text{ cm}$ ) ปิดเช่นกัน โดยแผ่นตัวนำจะเจาะร่องตรงกลางกว้าง  $2 \text{ mm}$  ยาว  $0.5 \lambda$  และท่อนำคลื่นยาว  $3.145 \lambda$  ( $49.5 \text{ cm}$ )

สายอากาศวงแหวนที่วางเหนือระนาบตัวนำสะท้อนคลื่น ซึ่งการป้อนสัญญาณจะอาศัยร่องของระนาบตัวนำสะท้อนคลื่นเป็นตัวส่งผ่านคลื่น รัศมีของวงแหวนที่ใช้จะมีค่าเท่ากับ  $0.3019 \lambda$  ( $4.752 \text{ cm}$ ) และค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.154 \lambda$  ( $2.424 \text{ cm}$ ) มีค่าความยาวโพรบด้านละเท่ากับ  $0.293 \lambda$  ( $4.6 \text{ cm}$ ) โดยทำงานที่ความถี่  $1.9065 \text{ GHz}$  และเพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวตามที่ต้องการและได้สภาพเจาะจงทิศทางที่สูง จะต้องวางวงแหวนห่างจากระนาบตัวนำสะท้อนคลื่นเป็นระยะ  $0.3 \lambda$  จากรูปแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้สร้างสายอากาศตามการวิเคราะห์ในบทที่ 3 สามารถแสดงรูปแบบของสายอากาศได้ดังต่อไปนี้



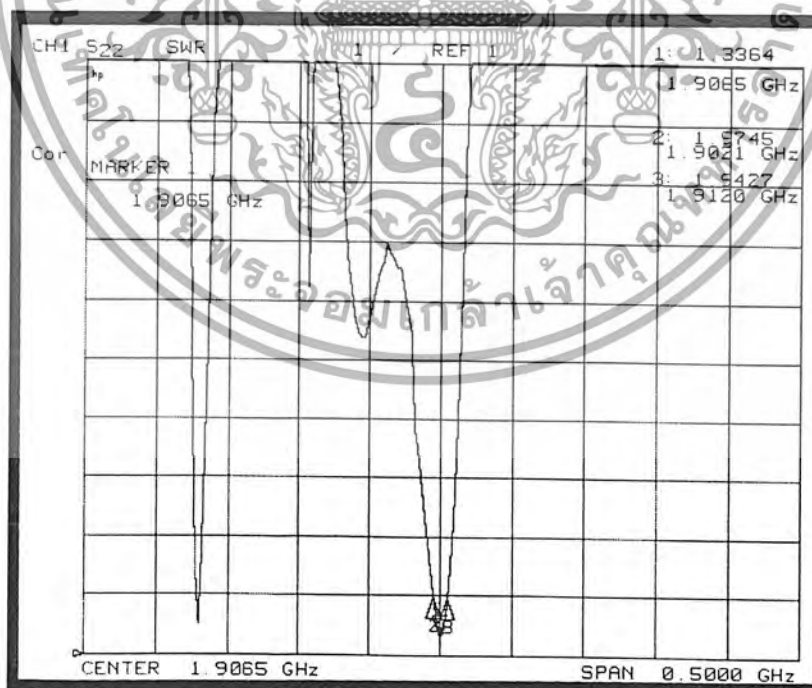
รูปที่ 4.1 สายอากาศวงแหวนเชื่อมต่อด้วยร่องสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายทางแหวนประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น

#### 4.2 การทดสอบและผลการทดสอบ

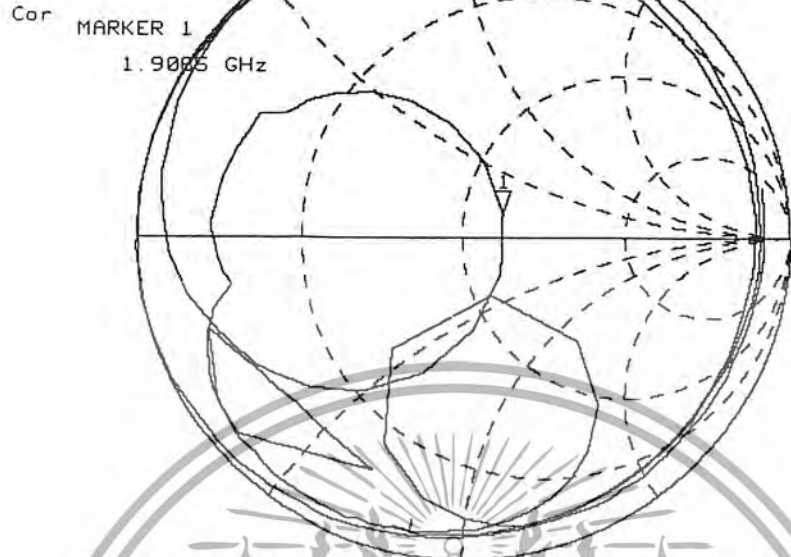
##### 4.2.1 การทดสอบค่า VSWR , Return loss และ Impedance



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบค่า VSWR = 1.336

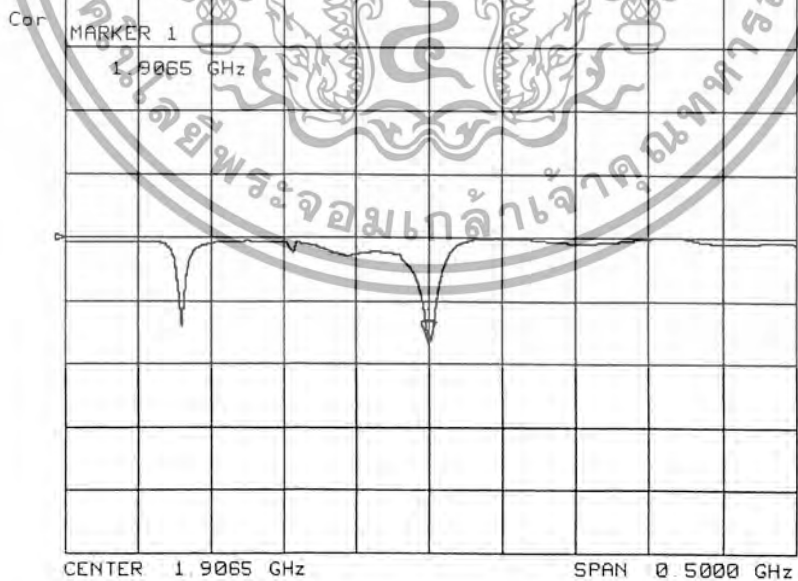
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CH1 S22 1 U FS 1: 63.416 Ω 10.006 Ω 835.29 pH  
 hp 1.9065 GHz



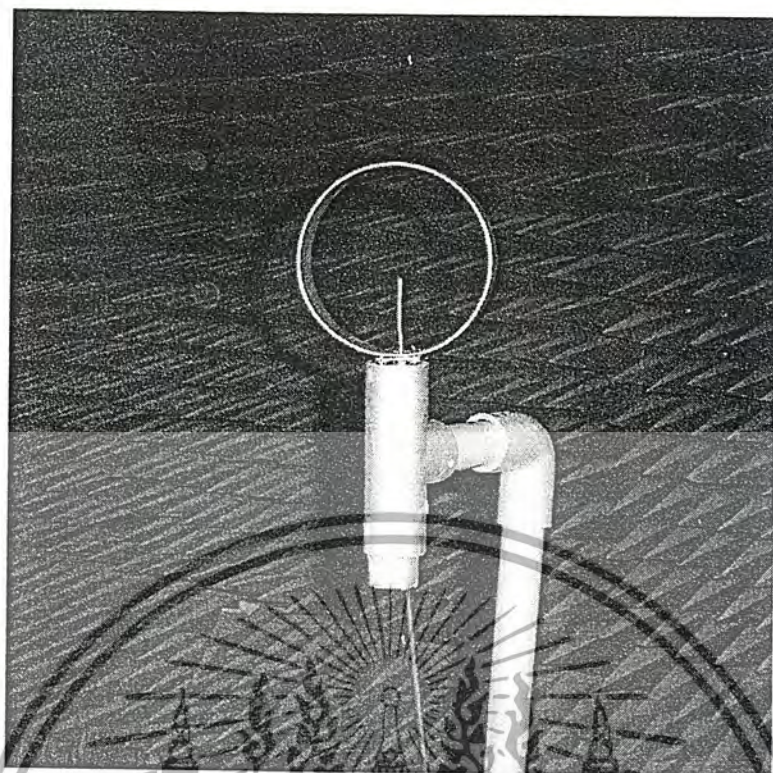
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบค่า Impedance =  $63.416 + j10.006 \Omega$

CH1 S22 log MAG 10 dB/ REF 0 dB 1: -16.593 dB  
 hp 1.9065 GHz

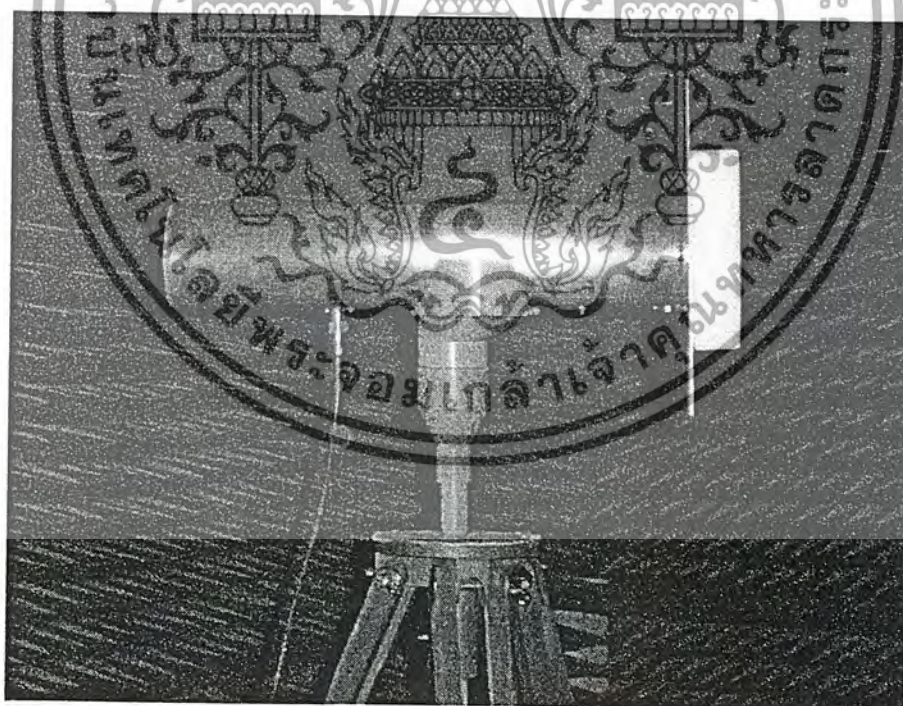


รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบค่า Return loss = -16.593 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 สายอากาศตัวส่งที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.7 การวางสายอากาศภายในห้องทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

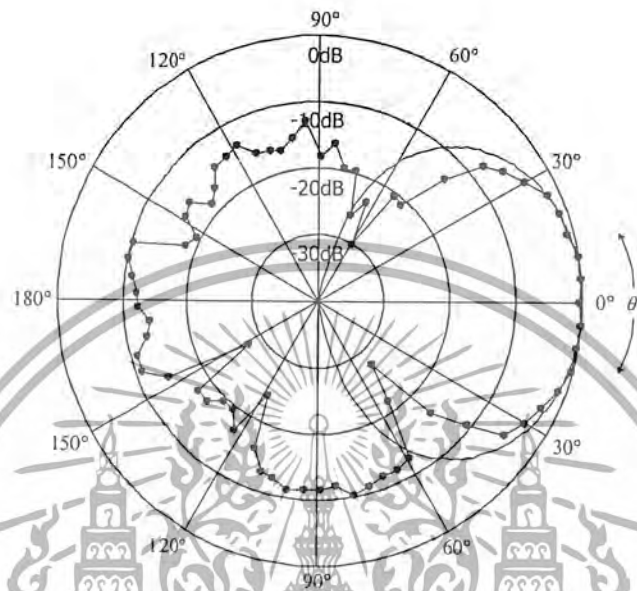
#### 4.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะทำการทดสอบที่ระยะ  $0.3 \lambda$  เพราะจากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ที่ระยะห่างตั้งแต่  $0.4 \lambda$  แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเกิดการแตกออกและมีลำคลื่นย่อยเกิดขึ้น โดยการทดสอบทั้งหมด ได้ทำการทดสอบภายในห้องทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สามารถแสดงผลที่ได้จากการทดสอบและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลจากการวิเคราะห์ ได้ดังนี้



รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าที่ระยะ  $0.3 \lambda$  เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

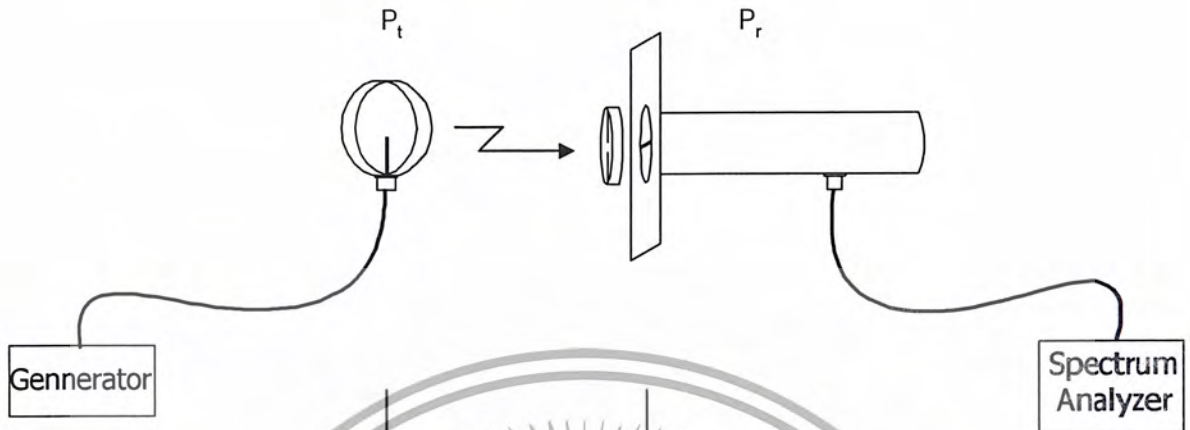


รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กที่ระยะ 0.3  $\lambda$  เทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

จะพบว่า ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะ 0.3  $\lambda$  นั้น มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ จะสังเกตว่าทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กค่ามุมที่สนามมีความแรงสูงสุดจะอยู่ที่ 0 องศาเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ ในระนาบสนามแม่เหล็กจะมีความใกล้เคียงกับการวิเคราะห์มากที่สุด สำหรับค่าผิดเพี้ยนเล็กน้อยที่เกิดจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น เกิดจากการวิเคราะห์ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Mathcad นั้นไม่สามารถหาสมการที่มีคุณสมบัติเหมือนสายอากาศจริงๆ ได้ครบถ้วน และอาจเกิดจากการไม่สัมพันธ์กันระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด รวมถึงตัวต่อ (connector) ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับสายอากาศ สิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณที่ออกจากสายอากาศได้ทำให้ผลที่ได้ผิดเพี้ยนเล็กน้อยไปจากการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2.3 การทดสอบ Gain ของสายอากาศ



ในการทดสอบวัดค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศนั้นจะอาศัยสมการการส่งผ่านของฟรีส(FrissTransmission) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$P_r \text{ (dBm)} = P_t \text{ (dBm)} + G_t \text{ (dB)} - L_t \text{ (dB)} + G_r \text{ (dB)} - L_r \text{ (dB)} - 20 \log \left( \frac{4\pi D}{\lambda} \right)$$

ในการวัดจะใช้ตัวส่งเป็นวงแหวนซึ่งมี Gain ( $G_t$ ) = 4.975 dBi

ค่าการลดทอนของสายส่ง  $L_t = 1$  dB

ค่าการลดทอนของสายที่ด้านรับ  $L_r = 1.3$  dB

ระยะทางที่ใช้ในการวัดจะให้ค่ามากกว่าระยะ farfield โดยระยะ farfield =  $2D^2/\lambda$  ในการทดสอบจึงใช้ระยะทางเท่ากับ 4 เมตร

ด้านส่งใช้กำลัง 1 mW หรือเท่ากับ 0 dBm ทางด้านรับรับได้ -39.2 dBm เมื่อนำค่าต่างๆไป

คำนวณตามสูตรแล้วจะได้ Gain ของสายอากาศเท่ากับ 8.125 dBi จะเห็นว่าน้อยกว่าค่า

Directivity ของสายอากาศที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณออกแบบซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.18 dBi ที่

เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากการคิดค่าการลดทอนของสายนำสัญญาณและการลดทอนตามระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์

### สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้ ได้ทำการนำเสนอสายอากาศวงแหวนที่วางอยู่เหนือระนาบตัวนำสะท้อนคลื่น ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมในการทำสายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงโดยอาศัยการป้อนสัญญาณจากร่อง สายอากาศที่ออกแบบไว้จะทำงานที่ความถี่เท่ากับ 1.9065 GHz โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวทำให้เหมาะที่จะนำไปใช้ในพื้นที่ที่มีลักษณะแคบและยาวได้ดี เช่น อุโมงค์ใต้ดิน ทางเดินเชื่อมภายในอาคารหรือระหว่างตึกสองตึก รูปแบบของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบไว้มีลักษณะดังนี้ ท่อนำคลื่นยาว 49.5 cm แผ่นระนาบสะท้อนคลื่นยาวด้านละ 30 cm ร่องยาว 7.8 cm กว้าง 2 mm ส่วนวงแหวนมีรัศมีเท่ากับ 4.752 cm และมีค่าความยาวของวงแหวนเท่ากับ 2.424 cm โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นที่ใช้ยาวด้านละ 4.6 cm จากนั้นได้ทำการนำสายอากาศวงแหวนไปวางเหนือระนาบตัวนำสะท้อนคลื่นตามระยะที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งพบว่าเมื่อวางสายอากาศวงแหวนเป็นระยะห่าง 0.3  $\lambda$  จากแผ่นระนาบตัวนำสะท้อนคลื่น ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะ 0.3  $\lambda$  นั้น มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ จะสังเกตว่าทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กค่ามุมที่สนามมีความแรงสูงสุดจะอยู่ที่ 0 องศาเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ ในระนาบสนามแม่เหล็กจะมีความใกล้เคียงกับการวิเคราะห์มากที่สุด สำหรับค่าผิดเพี้ยนเล็กน้อยที่เกิดจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้น เกิดจากการวิเคราะห์ที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Mathcad นั้นไม่สามารถหาสมการที่มีคุณสมบัติเหมือนสายอากาศจริงๆ ได้ครบถ้วน และอาจเกิดจากการไม่สัมพันธ์กันระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด รวมถึงตัวต่อ (connector) ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับสายอากาศ สิ่งเหล่านี้อาจจะทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณที่ออกจากสายอากาศได้ทำให้ผลที่ได้ผิดเพี้ยนเล็กน้อยไปจากการวิเคราะห์

ดังนั้นปริญญานิพนธ์นี้ จึงได้ทำการวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างสายอากาศที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด และสามารถนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดด้วย

### วิจารณ์และข้อเสนอแนะ

ข้อสำคัญในการออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศ จะต้องทำให้ได้สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามที่ต้องการให้ได้

ปัญหาในการออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศคือไม่สามารถหาสมการที่จะนำมาใช้ในโปรแกรม Mathcad เพื่อทำการวิเคราะห์สายอากาศให้มีคุณสมบัติครอบคลุมเหมือนสายอากาศจริงๆ ได้ และสายอากาศที่ได้ยังมีขนาดใหญ่ ทำให้การทดสอบลำบากเพราะว่ายังใช้ที่ความถี่ไม่สูงนั่นเอง

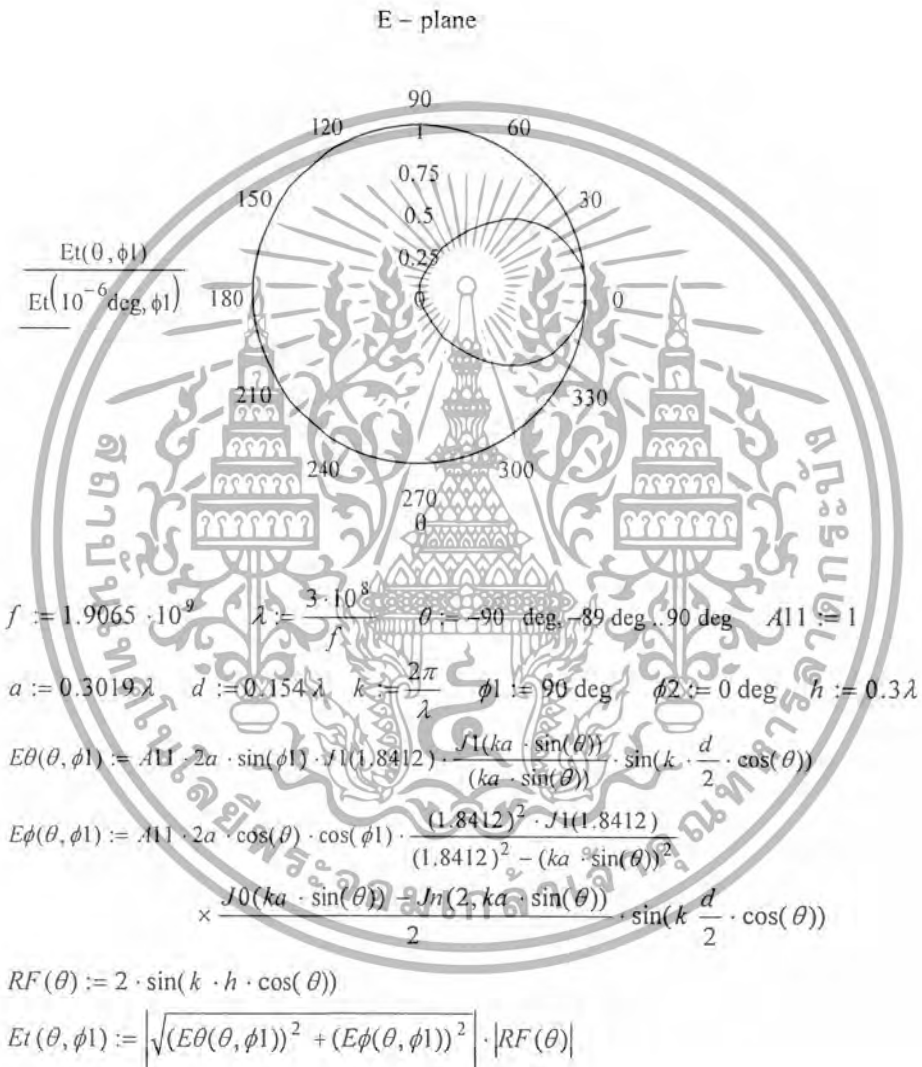
แนวทางในการพัฒนาโครงการนี้ คือ จะต้องทำการลดขนาดของสายอากาศลงโดยการเพิ่มความถี่ขึ้นและจะต้องเพิ่มค่าการชี้ทิศทางของสายอากาศขึ้นโดยการจัดสายอากาศแบบอาร์เรย์

ภาคผนวก

แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์

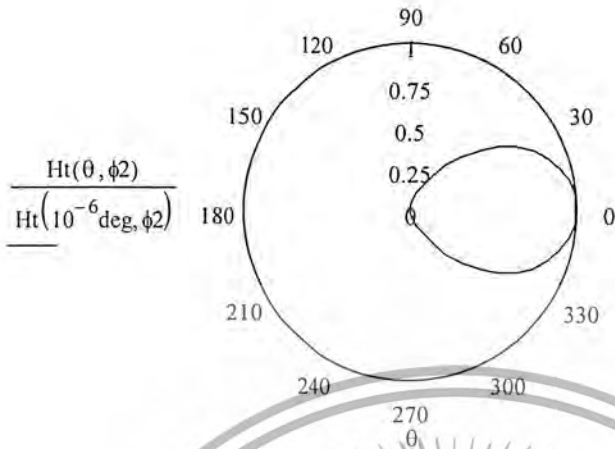
โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ จะใช้โปรแกรม Mathcad 2000 ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

1. การคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

H - plane



$$E\theta(\theta, \phi_2) := A_{11} \cdot 2a \cdot \sin(\phi_2) \cdot J_1(1.8412) \cdot \frac{J_1(ka \cdot \sin(\theta))}{(ka \cdot \sin(\theta))} \cdot \sin(k \cdot \frac{d}{2} \cdot \cos(\theta))$$

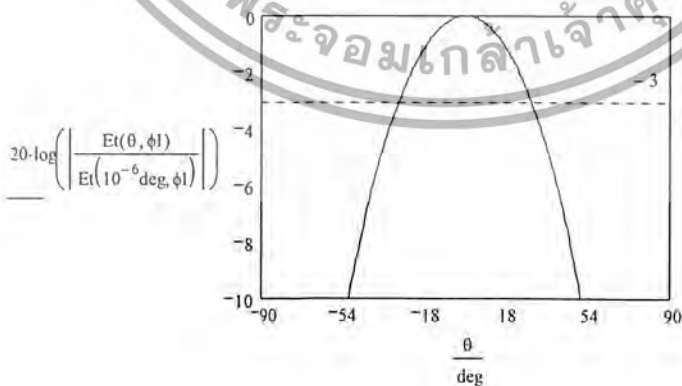
$$E\phi(\theta, \phi_2) := A_{11} \cdot 2a \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{(1.8412)^2 \cdot J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (ka \cdot \sin(\theta))^2} \times \frac{J_0(ka \cdot \sin(\theta)) - J_n(2, ka \cdot \sin(\theta))}{2} \cdot \sin(k \cdot \frac{d}{2} \cdot \cos(\theta))$$

$$RF(\theta) := 2 \cdot \sin(k \cdot h \cdot \cos(\theta))$$

$$Ht(\theta, \phi_2) := \sqrt{(E\theta(\theta, \phi_2))^2 + (E\phi(\theta, \phi_2))^2} \cdot RF(\theta)$$

2. การคำนวณค่าฮัพเพนเบอร์เป็นวัตต์และระดับกำลังคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ

HPBW - E-plane



$$f := 1.9065 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{f} \quad \theta := -90 \text{ deg}, -89 \text{ deg} \dots 90 \text{ deg} \quad A_{11} := 1$$

$$a := 0.3019 \lambda \quad d := 0.154 \lambda \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad \phi_1 := 90 \text{ deg} \quad \phi_2 := 0 \text{ deg} \quad h := 0.3 \lambda$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

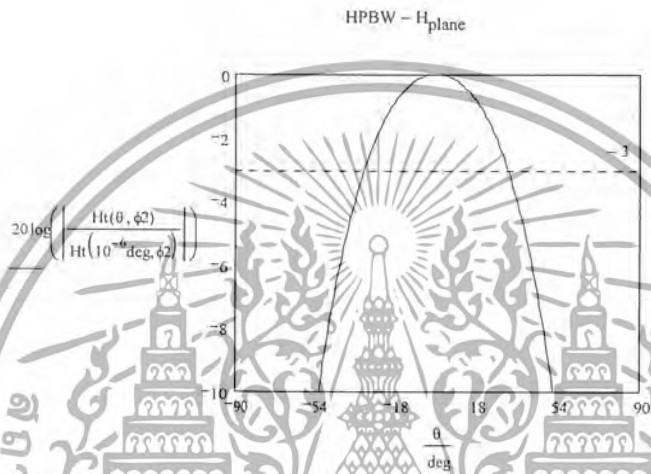
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E\theta(\theta, \phi_1) := A_{11} \cdot 2a \cdot \sin(\phi_1) \cdot J_1(1.8412) \cdot \frac{J_1(ka \cdot \sin(\theta))}{(ka \cdot \sin(\theta))} \cdot \sin(k \cdot \frac{d}{2} \cdot \cos(\theta))$$

$$E\phi(\theta, \phi_1) := A_{11} \cdot 2a \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi_1) \cdot \frac{(1.8412)^2 \cdot J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (ka \cdot \sin(\theta))^2} \\ \times \frac{J_0(ka \cdot \sin(\theta)) - J_n(2, ka \cdot \sin(\theta))}{2} \cdot \sin(k \cdot \frac{d}{2} \cdot \cos(\theta))$$

$$RF(\theta) := 2 \cdot \sin(k \cdot h \cdot \cos(\theta))$$

$$Et(\theta, \phi_1) := \sqrt{(E\theta(\theta, \phi_1))^2 + (E\phi(\theta, \phi_1))^2} \cdot |RF(\theta)|$$



$$E\theta(\theta, \phi_2) := A_{11} \cdot 2a \cdot \sin(\phi_2) \cdot J_1(1.8412) \cdot \frac{J_1(ka \cdot \sin(\theta))}{(ka \cdot \sin(\theta))} \cdot \sin(k \cdot \frac{d}{2} \cdot \cos(\theta))$$

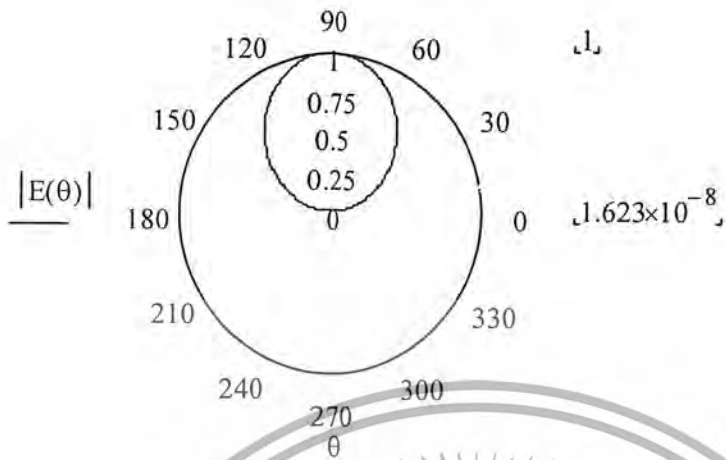
$$E\phi(\theta, \phi_2) := A_{11} \cdot 2a \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{(1.8412)^2 \cdot J_1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (ka \cdot \sin(\theta))^2} \\ \times \frac{J_0(ka \cdot \sin(\theta)) - J_n(2, ka \cdot \sin(\theta))}{2} \cdot \sin(k \cdot \frac{d}{2} \cdot \cos(\theta))$$

$$RF(\theta) := 2 \cdot \sin(k \cdot h \cdot \cos(\theta))$$

$$Ht(\theta, \phi_2) := \sqrt{(E\theta(\theta, \phi_2))^2 + (E\phi(\theta, \phi_2))^2} \cdot |RF(\theta)|$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. การคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของร่อง



$$\theta := 10^{-6} \text{ deg}, 1 \text{ deg} .. 180 \text{ deg}$$

$$E(\theta) := \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)}$$

### 4. การคำนวณค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

$$f := 1.9065 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{3 \cdot 10^8}{f} \quad \theta := -90 \text{ deg} .. 90 \text{ deg} \quad A11 := 1$$

$$a := 0.3019 \lambda \quad d := 0.154 \lambda \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad \phi1 := 90 \text{ deg} \quad \phi2 := 0 \text{ deg} \quad h := 0.3 \lambda$$

$$E\theta(\theta, \phi1) := A11 \cdot 2a \cdot \sin(\phi1) \cdot J1(1.8412) \cdot \frac{J1(ka \cdot \sin(\theta))}{(ka \cdot \sin(\theta))} \cdot \sin\left(k \cdot \frac{d}{2} \cdot \cos(\theta)\right)$$

$$E\phi(\theta, \phi1) := A11 \cdot 2a \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi1) \cdot \frac{(1.8412)^2 \cdot J1(1.8412)}{(1.8412)^2 - (ka \cdot \sin(\theta))^2} \\ \times \frac{J0(ka \cdot \sin(\theta)) - Jn(2, ka \cdot \sin(\theta))}{2} \cdot \sin\left(k \cdot \frac{d}{2} \cdot \cos(\theta)\right)$$

$$RF(\theta) := 2 \cdot \sin(k \cdot h \cdot \cos(\theta))$$

$$Et(\theta, \phi1) := \left| \sqrt{(E\theta(\theta, \phi1))^2 + (E\phi(\theta, \phi1))^2} \right| \cdot |RF(\theta)|$$

$$U(\theta, \phi1) := \frac{(Et(\theta, \phi1))^2}{2\eta}$$

$$Prad := \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} U(\theta, \phi1) \cdot \sin(\theta) d\theta d\phi$$

$$\theta := 10^{-6} \text{ deg}$$

$$D0 := 10 \cdot \log\left(4\pi \frac{U(\theta, \phi1)}{Prad}\right) \quad D0=9.181$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ก็ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ของ ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้คอยเอาใจใส่ดูแลและให้คำปรึกษาในการทำโครงการ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ขอขอบคุณ คุณสุราณี ละมุลตรี และ คุณไพโรจน์ วุ่นชุม ที่ช่วยดูแลให้ความช่วยเหลือเสมอมา ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งทางตรงและทางอ้อม

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความสำคัญกับการศึกษาของลูกและให้การสนับสนุนเอาใจใส่ดูแลด้วยดีเสมอมา รวมทั้งกำลังใจอันยิ่งใหญ่อย่างหาที่เปรียบมิได้

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S.Kosulvit, “A Bidirectional Antenna Using a Probe Excited Ring,” Doctoral Thesis, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2001
- [2] C.A. Balanis, “Antenna Theory Analysis and Design,” 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc., 1997
- [3] C.A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics,” John Wiley & Sons, Inc., 1998
- [4] โมไนย ไกรฤกษ์, “วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า,” บริษัท พิมพ์สวย จำกัด, 2544
- [5] R.E Collin, “Field Theory of Guided Waves,” McGraw-Hill Book Company, Inc., 1960



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้