



สายอากาศแถวลำดับแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกสำหรับการโพลาไรซ์แบบวงกลม

Cylindrical Slot-pair Array Antenna for Circular Polarization Application



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 54967
วัน,เดือน,ปี..... 4 พ.ย. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าหน้าที่หอสมุดฯ หรือแจ้งไปยังผู้อำนวยการสำนักหอสมุดฯ



สายอากาศแถวลำดับแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกสำหรับการโพลาไรซ์แบบวงกลม
Cylindrical Slot-pair Array Antenna for Circular Polarization Application

โดย

นายพงษ์เดช ปราณิตพลกรัง

นายอนุสรณ์ สะท้อนไหว

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยานิพนธ์

เรื่อง สายอากาศแถวลำดับแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกสำหรับการโพลาไรซ์แบบวงกลม

Cylindrical Slot-pair Array Antenna for Circular Polarization Application

ผู้จัดทำ

1. นายพงษ์เดช ปราณีตพลกรัง 44015069
2. นายอนุสรณ์ สะท้อนไหว 44015092


อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)


อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแถวลำดับแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกสำหรับการโพลาไรซ์แบบวงกลม

Cylindrical Slot-pair Array Antenna for Circular Polarization Applications

โดย นายพงษ์เดช ปราณีตพลกรัง 44015069

นายอนุสรณ์ สะท้อนไหว 44015092

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำเสนอสายอากาศแบบร่องคู่ที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับบนผิวตัวนำทรงกระบอกสำหรับการประยุกต์ใช้งานที่ต้องการการโพลาไรซ์แบบวงกลม ข้อดีของสายอากาศชนิดนี้คือ โครงสร้างไม่ซับซ้อนเพราะตัวแบ่งกำลังงานและตัวป้อนสัญญาณได้ถูกรวมเป็นโครงสร้างเดียวกัน ในโครงการนี้จะได้ศึกษาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นอื่น ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและการโพลาไรซ์ของสายอากาศบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่ประกอบด้วยร่องคู่จำนวนหลายคู่มาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ จากนั้นทำการสร้างสายอากาศ โดยใช้โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นเป็นตัวป้อนสัญญาณและทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ แล้วทดสอบหาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นและการโพลาไรซ์ เพื่อเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี สำหรับสายอากาศที่วิเคราะห์มีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้กับโครงข่ายระบบท้องถิ่นไร้สาย

Abstract

This project presents the cylindrical slot-pair array antenna realizing circular polarization. The advantage of this antenna is that it belongs to the simple structure because the power divider and the feeder are integrated into a single structure. This project describes the calculation of radiation characteristic such as radiation pattern, beamwidth, directivity and polarization of the cylindrical slot-paired array antenna. The antenna structure is made up of a number of slot pairs cut on a surface of the cylinder and it is fed by a linear electric probe. The antenna fabrication is carried out. The impedance characteristics such as input impedance, return loss and standing wave ratio are also experimented. Then measured the radiation and polarization characteristics to compare with the theoretical predictions. The results from the investigations of this antenna are essential for the application of wireless LAN systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของสายอากาศ	3
2.1 ร่องบนแผ่นระนาบตัวนำขนาดอนันต์ (Slot in Infinite Conducting Plate)	3
2.2 อินทิกรัลการแพร่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย	7
2.2.1 ศักย์เวกเตอร์ \vec{A} อันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าต้นกำเนิด \vec{J}	8
2.2.2 ศักย์เวกเตอร์ \vec{F} อันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็กต้นกำเนิด \vec{M}	10
2.2.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสต้นกำเนิด \vec{J} และ \vec{M}	11
2.2.4 คำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียว	12
2.2.5 การแพร่กระจายคลื่นของสนามระยะไกล	15
2.3 โพลาริเซชัน (Polarization)	16
2.3.1 การโพลาริเซชันแบบเชิงเส้น (Linear Polarization)	17
2.3.2 การโพลาริเซชันแบบวงกลม (Circular Polarization)	20
2.3.3 การโพลาริเซชันแบบวงรี (Elliptical Polarization)	22
2.3.4 ตัวประกอบการสูญเสียเชิงโพลาริเซชัน (Polarization Loss Factor)	26
บทที่ 3 สายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก	27
3.1 พิกัดทรงกระบอกและสมการคลื่นในพิกัดทรงกระบอก	27
3.2 สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก (Axial Slot)	32
3.3 สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก (Circumferential Slot)	34
3.4 สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก (Incline Slot)	36
บทที่ 4 ผลคำนวณวิเคราะห์เชิงเลข	42
4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก	42
4.2 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก	56
4.3 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง	57
4.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	58
บทที่ 5 การสร้างและการทดสอบ	59
5.1 การสร้าง	59
5.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอก	59
5.1.2 ขั้นตอนการสร้าง	59
5.2 การทดสอบ	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 การทดสอบวัดอัตราส่วนของคลื่นนิ่ง , ความต้านทานอินพุท และค่าการสูญเสียย้อนกลับ	61
5.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	72
5.2.3 การทดสอบการ โพลาริซซ์ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยว	83
บทที่ 6 สายอากาศแถวลำดับและสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก	84
6.1 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่วางในตำแหน่งใด ๆ	84
6.2 สายอากาศแถวลำดับแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอก	84
6.3 ผลการคำนวณเชิงเลขของสายอากาศแถวลำดับบนผิวตัวนำทรงกระบอก	85
6.3.1 ผลการคำนวณเชิงเลขของสายอากาศแถวลำดับที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก	85
6.3.2 ผลการคำนวณเชิงเลขของสายอากาศแถวลำดับที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก	91
6.4 ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก	96
6.4.1 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก	96
6.4.2 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก	98
6.5 สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก	101
6.5.1 ผลการวิเคราะห์การ โพลาริซซ์ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก	101
6.5.2 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีการ โพลาริซซ์แบบวงกลม	102
6.5.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	103
6.5.4 การออกแบบสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก	104
6.5.5 การทดสอบสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก	105
บทที่ 7 ทวิจาร์ณและสรุป	111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงร่องบนระนาบกราวด์ขนาดอนันต์ที่ป้อนสัญญาณกลางปากร่องด้วยสายส่งคู่ขนาน	3
รูปที่ 2.2 กราฟเชิงขั้วของสนาม E_ρ แบบนอร์มอลไลซ์ (Normalized) ที่แพร่กระจายจากร่อง	5
รูปที่ 2.3 ผังภูมิของการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายจากด้นกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็ก	8
รูปที่ 2.4 ระบบโคออดิเนตที่ใช้สำหรับคำนวณหาสนาม	12
รูปที่ 2.5 การโพลาริซ์แบบต่างๆ	17
รูปที่ 2.6 การพิจารณาโพลาริซ์เซชันของคลื่น	17
รูปที่ 2.7 การโพลาริซ์แบบเชิงเส้นในทิศทาง θ	18
รูปที่ 2.8 การโพลาริซ์แบบเชิงเส้นในทิศทาง ϕ	19
รูปที่ 2.9 การโพลาริซ์แบบเชิงเส้นในทิศทาง γ	19
รูปที่ 2.10 โพลาริซ์แบบวงกลมที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนไปทางขวามือ	21
รูปที่ 2.11 โพลาริซ์แบบวงกลมที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนไปทางซ้ายมือ	22
รูปที่ 2.12 การโพลาริซ์แบบวงรีที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนทางขวามือ (Clockwise) และ การโพลาริซ์แบบวงรีที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนทางซ้ายมือ (Counter Clockwise)	24
รูปที่ 2.13 การโพลาริซ์แบบวงรีที่ไม่ได้อยู่ที่แกนหลักซึ่งมีมุมเอียง (Tilt) ออกจากแกนอ้างอิง θ	25
รูปที่ 2.14 หน่วยเวกเตอร์โพลาริเซชันของคลื่นของสายอากาศ	26
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดบนผิวตัวนำทรงกระบอก	27
รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมในการวิเคราะห์เพื่อหาสนามไฟฟ้าที่กระจายออกภายนอกช่องเปิด	29
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกน z บนผิวตัวนำทรงกระบอก	32
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก	34
รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก	36
รูปที่ 3.6 การทรานสฟอร์มแกนของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียง	37
รูปที่ 3.7 การแปลงทิศทางการวางของร่องระหว่างพิกัด $\{\delta, \tau\} \rightarrow \{\xi, \eta\}$	38
รูปที่ 4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่มีรัศมีเท่ากับ 0.1λ	43
รูปที่ 4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่มีรัศมีเท่ากับ 1λ	44
รูปที่ 4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่มีรัศมีเท่ากับ 3λ	45
รูปที่ 4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xy มีมุม $\psi = 0^\circ$	46
รูปที่ 4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xy มีมุม $\psi = 30^\circ$	47
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xy มีมุม $\psi = 45^\circ$	48
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xy มีมุม $\psi = 60^\circ$	49
รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xy มีมุม $\psi = 90^\circ$	50
รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xz มีมุม $\psi = 0^\circ$	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xz มีมุม $\psi = 30^\circ$	52
รูปที่ 4.11	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xz มีมุม $\psi = 45^\circ$	53
รูปที่ 4.12	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xz มีมุม $\psi = 60^\circ$	54
รูปที่ 4.13	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของทรงกลมทรงกระบอกระนาบ xz มีมุม $\psi = 90^\circ$	55
รูปที่ 4.14	ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง	57
รูปที่ 4.15	อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง	57
รูปที่ 4.16	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ	58
รูปที่ 5.1	การออกแบบสายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอก	60
รูปที่ 5.2	สายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก	61
รูปที่ 5.3	การวัดทดสอบสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก	62
รูปที่ 5.4	กราฟแสดงค่า SWR ที่วัดได้จากสายอากาศทั้ง 3 แบบ	65
รูปที่ 5.5	กราฟแสดงค่าความต้านทานที่วัดได้จากสายอากาศทั้ง 3 แบบ	68
รูปที่ 5.6	กราฟ Log magnitude ที่วัดได้จากสายอากาศทั้ง 3 แบบ	71
รูปที่ 5.7	สายอากาศแบบช่องเปิดเวฟไกด์	72
รูปที่ 5.8	การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	73
รูปที่ 5.9	การทดสอบสายอากาศในห้องทดสอบสายอากาศ	73
รูปที่ 5.10	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ $xy(\psi = 90^\circ)$	74
รูปที่ 5.11	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ $xy(\psi = 90^\circ)$	75
รูปที่ 5.12	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ $xz(\psi = 90^\circ)$	76
รูปที่ 5.13	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ $xz(\psi = 90^\circ)$	76
รูปที่ 5.14	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ $xy(\psi = 0^\circ)$	77
รูปที่ 5.15	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ $xy(\psi = 0^\circ)$	78
รูปที่ 5.16	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ $xz(\psi = 0^\circ)$	79
รูปที่ 5.17	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ $xz(\psi = 0^\circ)$	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.18	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบน ผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ $xy (\psi = 45^\circ)$	80
รูปที่ 5.19	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบน ผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ $xy (\psi = 45^\circ)$	81
รูปที่ 5.20	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบน ผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ $xz (\psi = 45^\circ)$	82
รูปที่ 5.21	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบน ผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ $xz (\psi = 90^\circ)$	82
รูปที่ 5.22	การ โพลารไรซ์ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก	83
รูปที่ 6.1	สายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของร่องอยู่ที่ $(\rho = a, \phi = \phi_p, z = z_p)$	84
รูปที่ 6.2	สายอากาศแถวลำดับบนผิวตัวนำทรงกระบอก	85
รูปที่ 6.3	สายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบน ผิวตัวนำทรงกระบอก	86
รูปที่ 6.4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่อง วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ	86
รูปที่ 6.5	ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xy ของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะ ร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ	87
รูปที่ 6.6	ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz ของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะ ร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ	87
รูปที่ 6.7	อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่อง วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ	88
รูปที่ 6.8	ค่าสภาพเจาะงทิสทางของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนว เส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ	88
รูปที่ 6.9	สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบน ผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 4 องค์ประกอบ	89
รูปที่ 6.10	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะ ร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีจำนวนองค์ประกอบ 4 องค์ประกอบ	89
รูปที่ 6.11	ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz ของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้น รอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก	90
รูปที่ 6.12	ค่าสภาพเจาะงทิสทางของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่อง วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรง	90
รูปที่ 6.13	สายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำ ทรงกระบอกจำนวน 2 องค์ประกอบ	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.14	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉลัดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่อง วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์กรประกอบ	91
รูปที่ 6.15	ค่าความกว้างลัดคลื่นครั้งกำลังในระนาบ xy ของสายอากาศแฉลัดับในแนวแกนที่มี ลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์กรประกอบ	92
รูปที่ 6.16	ค่าความกว้างลัดคลื่นครั้งกำลังในระนาบ xz ของสายอากาศแฉลัดับในแนวแกนที่มี ลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์กรประกอบ	92
รูปที่ 6.17	ค่าอัตราส่วนลัดคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศแฉลัดับในแนวแกนที่มี ลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์กรประกอบ	93
รูปที่ 6.18	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแฉลัดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตาม แนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์กรประกอบ	93
รูปที่ 6.19	สายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรง กระบอกจำนวน 5 องค์กรประกอบ	94
รูปที่ 6.20	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่อง วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 5 องค์กรประกอบ	94
รูปที่ 6.21	ค่าความกว้างลัดคลื่นครั้งกำลังในระนาบ xz ของสายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวง ที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก	95
รูปที่ 6.22	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่อง วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก	96
รูปที่ 6.23	สายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนว เส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 4 องค์กรประกอบ	96
รูปที่ 6.24	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มี ลักษณะการวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 4 องค์กรประกอบ	97
รูปที่ 6.25	ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวาง ตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 4 องค์กรประกอบ	97
รูปที่ 6.26	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยว ที่มีลักษณะการวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 4 องค์กรประกอบ	98
รูปที่ 6.27	สายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวแกน บนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 5 องค์กรประกอบ	99
รูปที่ 6.28	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มี ลักษณะการวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 5 องค์กรประกอบ	99
รูปที่ 6.29	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะ การวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 5 องค์กรประกอบ	100
รูปที่ 6.30	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉลัดับในแนวเส้นรอบวงแบบ ร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 5 องค์กรประกอบ	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 6.31	สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก	101
รูปที่ 6.32	อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก	102
รูปที่ 6.33	ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีโพลาไรซ์แบบวงกลม	103
รูปที่ 6.34	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$	103
รูปที่ 6.35	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$	104
รูปที่ 6.36	โครงสร้างสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$	104
รูปที่ 6.37	โครงสร้างสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$	105
รูปที่ 6.38	สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$	105
รูปที่ 6.39	สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$	106
รูปที่ 6.40	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$	106
รูปที่ 6.41	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$	107
รูปที่ 6.42	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$	108
รูปที่ 6.43	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$	108
รูปที่ 6.44	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$	109
รูปที่ 6.45	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$	109
รูปที่ 6.46	ค่าอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$	110
รูปที่ 6.47	ค่าอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

การสื่อสารได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในปัจจุบัน เพราะการสื่อสารโทรคมนาคมให้ทั้งข่าวสารความบันเทิง และยังเป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับการประกอบธุรกิจทั้งหลาย ทุกวันนี้การดำเนินการอะไรก็ตามต้องการข้อมูลข่าวสารมาเป็นตัวพิจารณาเพื่อใช้ในการตัดสินใจ กลุ่มบุคคลใดที่มีการติดต่อสื่อสารที่ดีจะทำให้ดำเนินการได้อย่างรวดเร็วมีประสิทธิภาพ

รูปแบบของการสื่อสารนั้นถ้าแบ่งตามลักษณะของตัวกลางที่ใช้ในการนำสัญญาณข้อมูลข่าวสารทางไฟฟ้านั้นสามารถทำได้ 2 วิธีการด้วยกันคือ การส่งสัญญาณทางไฟฟ้าไปตามสายส่งเช่น ระบบโทรศัพท์ ระบบใยแก้วนำแสง เป็นต้น และการส่งโดยไม่ต้องใช้สายส่ง แต่ใช้อากาศกระจายคลื่นวิทยุหรือที่เรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ระบบไมโครเวฟ ระบบสื่อสารดาวเทียม เป็นต้น ในการเลือกว่าจะใช้การสื่อสารแบบไหน นั้นก็ต้องดูองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ค่าใช้จ่ายในการลงทุน ลักษณะของพื้นที่นั้นๆ เป็นต้น

การสื่อสารแบบไร้สายนั้น สายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งในการรับส่งข่าวสาร เพราะถ้าสายอากาศมีคุณภาพที่ดีคือ มีอัตราขยายที่สูง มีทิศทางการรับคลื่นตรงตามที่ต้องการสามารถกำหนดทิศทางการแพร่กระจายคลื่นและการโพลาไรซ์ได้ ก็จะทำให้มีประสิทธิภาพในการรับส่งข่าวสารได้ดี ในการที่จะสร้างสายอากาศขึ้นมาใช้งานนั้น สิ่งสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงคือ วัสดุที่จะต้องนำมาทำสายอากาศซึ่งต้องเป็นตัวนำที่ดี มีน้ำหนักเบา มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและขนาดพอเหมาะที่แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีต้นทุนในการผลิตต่ำ ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นเราไม่สามารถที่จะสร้างสายอากาศให้มีคุณสมบัติที่ดีทั้งหมดดังที่กล่าวมาได้ เช่น สมมุติว่าเราถือแก้วสุกดตัวนำชนิดหนึ่งมาสร้างสายอากาศซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าวัสดุอีกชนิดแต่คุณสมบัติของความเป็นตัวนำอาจจะด้อยกว่า เป็นต้น

สายอากาศที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้มีรูปร่างและลักษณะการใช้งานหลายแบบ แต่ละแบบก็จะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน สายอากาศแบบร่องบนพื้นผิวตัวนำก็เป็นสายอากาศชนิดหนึ่งที่ได้มีการวิจัยขึ้นมาใช้งาน ซึ่งข้อดีของสายอากาศชนิดนี้เมื่อเทียบกับสายอากาศบนพื้นผิวตัวนำชนิดอื่นเช่น สายอากาศไดโพลบนพื้นผิวตัวนำ หรือสายอากาศไมโครสตริป (Microstrip Antenna) โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องบนพื้นผิวตัวนำจะมีความซับซ้อนน้อยกว่า สามารถสร้างได้ง่ายกว่า มีรูปทรงที่กระทัดรัด แข็งแรงสะดวกต่อการติดตั้ง ในการวิจัยสายอากาศแบบร่องบนพื้นผิวตัวนำขึ้นมาใช้งานนั้นจะทำการวิจัยในลักษณะของร่องบนผิวตัวนำทรงต่างๆซึ่งได้แก่ ร่องบนพื้นระนาบ ร่องบนผิวตัวนำทรงสี่เหลี่ยม ทรงกลม ทรงกรวย และทรงกระบอก ซึ่งในที่นี้ทางผู้วิจัยจะทำการสร้างสายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอก เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่าย โครงสร้างมีความซับซ้อนน้อย สามารถแพร่กระจายคลื่นได้ทั้งแบบมีทิศทาง (Directional pattern) และเมื่อทำการพัฒนาไปเป็นสายอากาศแบบร่องลำดับแถวบนผิวตัวนำทรงกระบอกจะได้ลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวจะดีกว่าทรงอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์หาคุณสมบัติของสายอากาศที่มีอยู่มากมายหลายแบบล้วนใช้ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในการวิเคราะห์ทั้งสิ้น ซึ่งสายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกเราจะทำการวิเคราะห์หาสมการของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยใช้ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า \vec{F} และศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า \vec{A} ช่วยในการหาสมการสนามจากต้นกำเนิดคลื่น ในขั้นแรกจะทำการวิเคราะห์หาสมการสนามจากสายอากาศแบบช่องเปิด(Aperture Antenna)ก่อน เพื่อนำสมการสนามที่ได้มาวิเคราะห์หาสมการสนามของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางในแนวต่างๆซึ่งได้แก่ สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก (Axial slot Antenna) สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก(Circumferential slot Antenna) และสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก (Incline slot Antenna) แล้วนำสมการสนามที่ได้ในแต่ละแบบมาวิเคราะห์หาคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เพื่อใช้พิจารณาในการสร้างสายอากาศซึ่งได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น(Radiation Pattern)ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง(HPBW : Half Power Beamwidth) ค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง(F/B : Front to Back Ratio) ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ(Directivity) และคุณลักษณะการโพลาไรซ์ของคลื่นซึ่งได้แก่ ค่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio) ค่ามุมเอียงของการโพลาไรซ์(Tilt Angle) ค่าความคางเฟสขององค์ประกอบสนามไฟฟ้าและค่าขนาดขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้า

สายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกนี้ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆมากมายอย่างเช่นนำไปประยุกต์ใช้กับอากาศยาน ระเบิดมิสไซล์ เพราะว่ามันมีรูปร่างที่กระชับรัดทำให้สามารถติดตั้งได้เข้ารูปพอดี นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย สำหรับสายอากาศที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นนี้มีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศที่สถานีฐาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของสายอากาศ

2.1 ร่องบนแผ่นระนาบตัวนำขนาดอนันต์ (Slot in Infinite Conducting Plate)

องค์ประกอบพื้นฐานของสายอากาศที่มีความสำคัญมากอีกอย่างหนึ่ง นอกจากไดโพลก็คือ ร่อง (Slot) ในการวิเคราะห์เบื้องต้นจะพิจารณาแผ่นระนาบกราวด์ขนาดอนันต์ที่มีการเจาะรูแถบ ๆ บนแผ่นระนาบนั้น โดยที่ร่องมีความยาว $2l$ กว้าง w ($2l \gg w$) และป้อนสัญญาณด้วยสายส่งคู่ขนานตรงกลางที่จุด P_1 และ P_2 ดังรูปที่ 2.1

เมื่อความกว้างของร่องน้อยกว่าความยาวคลื่น ($w \ll \lambda_0$) เราสามารถพิจารณาได้ว่าเกิดจากสายส่งคู่ขนาน โดยที่สายส่งแต่ละเส้นมีขนาดเป็นครึ่งแผ่นระนาบกราวด์ของอนันต์ (Semi-Infinite Ground Plane) มีขอบวงโค้งกลับที่ตำแหน่ง $x = \pm w/2$ และลัดวงจรที่ $z = \pm l$ ดังนั้นก็จะเกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) บนปากร่องนี้



รูปที่ 2.1 ร่องบนระนาบกราวด์ขนาดอนันต์ที่ป้อนสัญญาณกลางปากร่องด้วยสายส่งคู่ขนาน

จากรูปที่ 2.1 แสดงร่องบนระนาบกราวด์ขนาดอนันต์ที่ป้อนสัญญาณกลางปากร่องด้วยสายส่งคู่ขนานการกระจายของสนามไฟฟ้า (E) บนปากร่องสามารถประมาณได้โดย

$$E(x, y, z) = \hat{x}E_x(x, 0, z) = \hat{x}\frac{V_m}{w}\sin[k(l - |z|)] \quad (2.1)$$

เมื่อ V_m คือแรงดันสูงสุดบนปากร่อง และ $k = 2\pi/\lambda_0$ เป็นค่าคงที่ของเฟส

เราสามารถหาแผ่นกระแสแม่เหล็กสมมูล (Equivalent Magnetic Current Sheet: M) ที่กำเนิดสนามเหมือนกับที่กำเนิดจากสนามไฟฟ้าบนปากร่องจาก

$$\vec{M}(x, 0, z) = -\hat{n} \times \vec{E}(x, 0, z) \quad (2.2)$$

เมื่อใช้หลักการของภาพเงา (Image Principle) บนระนาบกราวด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ขนาดอนันต์ จะได้ว่า

$$\vec{M}(x, 0, z) = -2\hat{n} \times \vec{E}(x, 0, z) \quad (2.3)$$

และแทนสมการที่ (2.1) ลงในสมการ (2.2) โดยที่ $\hat{n} = \hat{y}$ จะได้

$$\begin{aligned} \vec{M}(x, 0, z) &= -2\hat{y} \times \hat{x}\frac{V_m}{w}\sin[k(l - |z|)] \\ &= 2\hat{z}\frac{V_m}{w}\sin[k(l - |z|)] \end{aligned} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นหาศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential: \vec{F}) ในเชิงสเกลาร์

$$F_\theta(\theta, \phi) = \iiint_V [\cos\theta \cos\phi M_x(x, y, z) + \cos\theta \sin\phi M_y(x, y, z) - \sin\theta M_z(x, y, z)] e^{jkr} dx dy dz \quad (2.5)$$

$$F_\phi(\theta, \phi) = \iiint_V [-\sin\theta M_x(x, y, z)] e^{jkr} dx dy dz \quad (2.6)$$

$$r = x \sin\theta \cos\phi + y \sin\theta \sin\phi + z \cos\theta \quad (2.7)$$

ในกรณีนี้แหล่งกำเนิดวางในแนวแกน z สมการที่ (2.5) ถึงสมการที่ (2.7) จะลดรูปลงได้เป็น

$$F_\theta(\theta, \phi) = - \iiint_V \sin\theta M_z(x, y, z) e^{jkr} dx dy dz \quad (2.8)$$

$$F_\phi(\theta, \phi) = 0 \quad (2.9)$$

$$r = z \cos\theta \quad (2.10)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.4) ลงในสมการที่ (2.8) โดยใช้ สมการที่ (2.10) และสมมติให้ร่องมีความกว้าง (w) น้อยมาก อินทิเกรตเชิงปริมาตรจะลดรูปลงเป็นอินทิเกรตเชิงเส้น ดังนี้

$$F_\theta(\theta) = - \int_{-l}^l \left[\sin\theta \frac{V_m}{w} [k(l-|z|)] e^{jkr \cos\theta} dz \right] \quad (2.11)$$

รูปแบบการกระจายแรงดันบนปากร่องจะสมมาตรกับแกน $x=0$ เนื่องจากกำหนดให้ความกว้างของร่องน้อยมากจึงมีผลทำให้ส่วนที่เป็นฟังก์ชันคี่ (Odd Function) ของเทอม $\exp(jkz \cos\theta)$ ทำการอินทิเกรตแล้วจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นสมการที่ (2.11) จะลดรูปลงเป็น

$$F_\theta(\theta) = -4V_m \sin\theta \int_0^l \left[\sin[k(l-|z|)] \cos[kz \cos\theta] dz \right] \quad (2.12)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตภายในสมการที่ (2.12) แล้วจะได้เป็น

$$F_\theta(\theta) = \frac{-4V_m}{k \sin\theta} (\cos[kl \cos\theta] - \cos[kl]) \quad (2.13)$$

สำหรับกรณีที่เกิดคลื่นยาวครึ่งความยาวคลื่น ($2l = \lambda_0 / 2$) นั้น สมการที่ (2.13) จะลดรูปลงเป็น

$$F_\theta(\theta) = \frac{-4V_m}{k} \frac{\cos\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos\theta\right]}{\sin\theta} \quad (2.14)$$

ซึ่ง $F_\theta(\theta)$ เป็นฟังก์ชันทางทิศทางเพียงอย่างเดียวดังนั้นถ้าจะแสดงให้เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง (r) และเวลา (t) จะต้องคูณด้วยเทอม $e^{j(\omega t - kr)} / 4\pi r$ ซึ่งหมายความว่า เป็นคลื่นทรงกลมที่เดินทางออกจากจุดกำเนิด

$$F_\theta(r, \theta, \phi; t) = - \frac{V_m}{\pi k} \frac{e^{j(\omega t - kr)}}{r} \frac{\cos\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos\theta\right]}{\sin\theta} \quad (2.15)$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$ คือความเร็วเชิงมุมของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นก็ทำการหาสนามไฟฟ้า (\vec{E}) และสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) ที่แพร่กระจายออกมาจากร่องโดยใช้ความสัมพันธ์ของศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential: \vec{F}) และศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic Vector Potential: \vec{A})

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} + jk(\hat{r} \times \vec{F}) \quad (2.16)$$

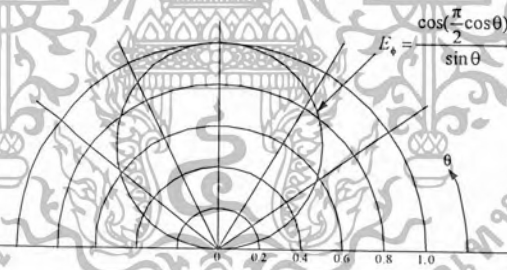
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} = -\frac{j\omega}{\eta}(\hat{r} \times \vec{A}) - j\omega\epsilon_0\vec{F} = \frac{1}{\eta}(\hat{r} \times \vec{E}) \quad (2.17)$$

โดยที่ η คืออิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Intrinsic Impedance) ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 120π เมื่อแทนสมการที่ (2.15) ลงในสมการที่ (2.16) และสมการที่ (2.17) โดยที่ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กมีค่าเท่ากับ ศูนย์ ($\vec{A} = 0$)

$$E_\phi = -j \frac{V_m}{\pi} \frac{e^{j(\omega t - kr)} \cos\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos\theta\right]}{r \sin\theta} \quad (2.18)$$

$$H_\theta = j \frac{V_m}{\pi\eta} \frac{e^{j(\omega t - kr)} \cos\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos\theta\right]}{r \sin\theta} \quad (2.19)$$

ซึ่งสมการที่ (2.18) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่แปรผันตามมุม θ มีโพลาริเซชันในทิศทาง ϕ และได้แสดงกราฟเชิงขั้วในรูปที่ 2.2 ส่วนสมการที่ (2.19) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.2 กราฟเชิงขั้วของสนาม E_ϕ แบบนอร์มอลไลซ์ (Normalized) ที่แพร่กระจายจากร่อง ดังนั้นสามารถหาความหนาแน่นของกำลังได้จาก

$$P_{r,\theta}(\theta) = \frac{1}{2} \frac{k^{2\eta}}{(4\pi r)^2} |F_\theta(\theta)|^2 \quad (2.20)$$

โดยแทนสมการที่ (2.14) ลงในสมการที่ (2.20) จะได้รูปแบบการแพร่กระจายกำลังงานของคลื่นเป็น

$$P_{r,\theta}(\theta) = \frac{V_m^2}{2\eta(\pi r)^2} \frac{\cos^2\left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos\theta\right]}{\sin^2\theta} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าพิจารณาว่าโครงสร้างของตัวกำเนิดคลื่น (Transmitter) และสายส่งคู่ขนาน ซึ่งอยู่ในบริเวณ $y < 0$ มีผลน้อยมากต่อสนามระยะไกลในบริเวณ $y > 0$ ดังนั้นกำลังงานของคลื่นที่แพร่กระจายทั้งหมดสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} P_{r,\theta}(\theta, \phi) r^2 \sin \theta d\theta d\phi \\ &= 2\pi r^2 \int_0^{\pi} P_{r,\theta}(\theta) \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (2.22)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.21) ลงในสมการที่ (2.22) จะได้ว่า

$$P_{rad} = \frac{2V_m^2}{\pi\eta} \int_0^{\pi} \frac{\cos^2\left[\left(\frac{\pi}{2}\right)\cos\theta\right]}{\sin^2\theta} d\theta \quad (2.23)$$

หลังจากทำการอินทิเกรตโดยวิธีเชิงเลขจะได้

$$P_{rad} = 0.609 \frac{2V_m^2}{\pi\eta} \quad (2.24)$$

ในการหาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity: D) จะอาศัยความสัมพันธ์ของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่กำลังพิจารณาในทิศทางที่แรงที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไอโซโทรปิก

$$\begin{aligned} D &= \frac{\text{ความเข้มการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่แรงที่สุด}}{\text{ความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไอโซโทรปิก}} \\ D &= \frac{P_{r,\theta}(\theta = \pi/2)}{P_{rad}/4\pi r^2} \\ &= 1.64 \end{aligned} \quad (2.25)$$

เนื่องจากกรณีนี้ $l = \lambda_0/4$ เราสามารถแสดงกำลังงานที่สายส่งป้อนให้แก่ร่องที่ขั้ว P_1 และ P_2 ด้วยแรงดัน V_m ได้ว่า

$$\frac{1}{2} V_m^2 G_{rad} = 0.609 \frac{2V_m^2}{\pi\eta} \quad (2.26)$$

โดยที่

$$R_{rad} = \frac{1}{G_{rad}} \quad (2.27)$$

ซึ่ง R_{rad} เรียกว่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Resistance) ของร่องยาวครึ่งความยาวคลื่นที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งคู่ขนานตรงกลางร่อง

$$R_{rad}^{slot} = \frac{\pi\eta}{0.609 \times 4} = 486\Omega \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเราทราบว่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นของไดโพลที่เป็นคู่เต็มเต็มของร่องมีค่า

$$R_{rad}^{dipole} = \frac{0.609\eta}{\pi} \quad (2.29)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.28) คูณกับสมการที่ (2.29)

$$R_{rad}^{slot} R_{rad}^{dipole} = \left(\frac{\pi\eta}{0.609 \times 4} \right) \left(\frac{0.609\eta}{\pi} \right) = \frac{\eta^2}{4} \quad (2.30)$$

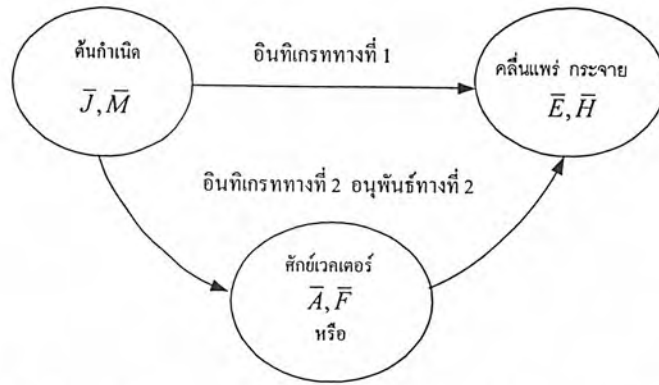
$$Z^{slot} Z^{dipole} = \frac{\eta^2}{4} \quad (2.31)$$

ในการประยุกต์ใช้งานจริงนั้นเราจะไม่นิยมใช้ร่องบนระนาบกรวดในแบบที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งคู่ขนานเพื่อแผ่กระจายคลื่นทั้งสองด้านของร่อง แต่นิยมใช้จะเป็นแบบที่ป้อนสัญญาณด้วยวงจรเรโซแนนท์แบบโพรง (Cavity Resonator) ด้านหนึ่งของร่องแล้วให้ร่องก็แผ่กระจายคลื่นเพียงด้านเดียว ซึ่งรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จะยังคงเดิมในด้านหนึ่งของร่อง ส่วนด้านตรงข้าม (ด้านที่มีวงจรเรโซแนนท์แบบโพรง) จะไม่มี แต่ความต้านทานอินพุทของร่องในระหว่างสองกรณีจะมีค่าแตกต่างกันมาก

2.2 อินทิกรัลการแผ่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย

ในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการแผ่กระจายคลื่น เราจะคำนวณหาคลื่นที่แผ่กระจายเมื่อกำหนดต้นกำเนิดคลื่นมาให้ ในทางกลับกันสำหรับการสังเคราะห์จะคำนวณต้นกำเนิดเมื่อกำหนดคลื่นที่แผ่กระจายมาให้

ในทางปฏิบัติวิธีการสังเคราะห์จะใช้ฟังก์ชันช่วย (Auxiliary Function) ที่เรียกว่าศักย์เวกเตอร์ (Vector Potential) ช่วยในการแก้ปัญหา ศักย์เวกเตอร์ที่ใช้มากได้แก่ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic Vector Potential) \vec{A} ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential) \vec{F} นอกจากนี้ก็มีศักย์เฮิร์ตซ์ (Hertz Potential) π_e และ π_m สำหรับการคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก \vec{E} และ \vec{H} ตามลำดับนั้นมักจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือจะหาฟังก์ชันช่วยจากความหนาแน่นกระแสต้นกำเนิด (Source Current Density) \vec{J} หรือ \vec{M} ก่อนจากนั้นจะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \vec{E} และความเข้มสนามแม่เหล็ก \vec{H} จากฟังก์ชันช่วยเหล่านี้ แทนที่จะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \vec{E} และความเข้มสนามแม่เหล็ก \vec{H} โดยตรงจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า \vec{J} และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก \vec{M} ซึ่งในบทยี่จะใช้ศักย์เวกเตอร์ \vec{A} และ \vec{F} ช่วยในการคำนวณหาสนาม



รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ของการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายจากต้นกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็ก

2.2.1 ศักย์เวกเตอร์ \vec{A} อันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าต้นกำเนิด \vec{J}

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การใช้ศักย์เวกเตอร์ \vec{A} ในการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่กำเนิดให้มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเป็นฮาร์โมนิกเป็นที่ทราบกันดีว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก \vec{B} มีลักษณะเป็นห่วงปิด คือมี $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ดังนั้นอาจแสดงได้ว่าเวกเตอร์ \vec{B} เป็นเคิร์ล (Curl) ของเวกเตอร์หนึ่งเวกเตอร์ใดได้เพราะเป็นไปตามเวกเตอร์ไอเดนติตี (Vector Identity) ต่อไป

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{A} = 0 \quad (2.32)$$

เมื่อ \vec{A} เป็นเวกเตอร์ใดๆ จะให้

$$\vec{B}_A = \mu \vec{H}_A = \nabla \times \vec{A} \quad (2.33ก)$$

หรือ

$$\vec{H}_A = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (2.33ข)$$

อักษร A ที่ห้อยท้ายแสดงว่าเป็นสนามที่เกิดจากศักย์เวกเตอร์ \vec{A} เมื่อแทนสมการที่(2.33ก) ในสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ที่ว่า $\nabla \times \vec{E}_A = -j\omega \vec{B}$ จะได้ว่า

$$\nabla \times \vec{E}_A = -j\omega \mu \vec{H}_A \quad (2.34)$$

$$= -j\omega \nabla \times \vec{A} \quad (2.35)$$

เพราะฉะนั้น

$$\nabla \times [\vec{E}_A + j\omega \vec{A}] = 0 \quad (2.36)$$

จากเวกเตอร์ไอเดนติตี ที่ว่าเคิร์ลของเกรเดียนท์มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สามารถสมมุติว่า

$$\nabla \times [-\nabla \phi_e] = 0 \quad (2.37)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.36) และสมการที่ (2.37) จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้คือ

$$\vec{E}_A + j\omega \vec{A} = -\nabla \phi_e \quad (2.38ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\bar{E}_A = -\nabla\phi_e - j\omega\bar{A} \quad (2.38\text{ข})$$

เมื่อ ϕ_e แทนศักยศาสตร์ไฟฟ้า (Electric Scalar Potential) ใดๆซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสเปซ

เมื่อทำการเคิร์ลทั้งสองข้างในสมการที่ (2.33) และใช้เวกเตอร์ไอเดนติตีที่ว่า $\nabla \times \nabla \bar{A} = \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A}$ จะทำให้ได้

$$\nabla \times (\mu \bar{H}_A) = \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A} \quad (2.39)$$

สำหรับกรณีที่ตัวกลางเป็นแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) จะเขียนสมการที่ (2.67) ได้ใหม่เป็นดังนี้คือ

$$\mu \nabla \times \bar{H}_A = \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A} \quad (2.40)$$

เมื่อจับสมการที่ (2.40) เท้ากลับสมการแมกซ์เวลล์ต่อไปนี้คือ $\nabla \times \bar{H}_A = \bar{J} + j\omega\epsilon\bar{E}_A$ จะทำให้สมการที่ (2.40) กลายเป็น

$$\mu \bar{J} + j\omega\epsilon\bar{E}_A = \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A} \quad (2.41)$$

หลังจากแทนสมการที่ (2.38ก) ลงในสมการที่ (2.41) จะได้

$$\begin{aligned} \nabla^2 \bar{A} + k^2 \bar{A} &= -\mu \bar{J} + \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) + \nabla(j\omega\mu\epsilon\phi_e) \\ &= -\mu \bar{J} + \nabla(\nabla \cdot \bar{A} + j\omega\mu\epsilon\phi_e) \end{aligned} \quad (2.42)$$

เมื่อ $k^2 = \omega^2\mu\epsilon$

สมการที่ (2.33) เป็นคำจำกัดความของศักยเวกเตอร์ \bar{A} ต่อไปจะกำหนดไดเวอร์เจนซ์ (Divergent) ของศักยเวกเตอร์ \bar{A} ขึ้นเองซึ่งขึ้นกับค่าเคิร์ลของมัน เพื่อให้สมการที่ (2.42) มีรูปสมการที่ง่ายขึ้น จะกำหนดให้

$$\nabla \cdot \bar{A} = -j\omega\mu\epsilon\phi_e \quad (2.43)$$

ซึ่งจะทำให้ได้

$$\phi_e = -\frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \cdot \bar{A} \quad (2.44)$$

เรียกสมการที่ (2.44) ว่าลอเรนซ์คอนดิชัน (Lorentz Condition) และเมื่อแทนสมการที่ (2.44) ลงในสมการที่ (2.42) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้คือ

$$\nabla^2 \bar{A} + k^2 \bar{A} = -\mu \bar{J} \quad (2.45)$$

นอกจากนี้เขียนสมการที่ (2.38ก) ได้ใหม่ดังนี้

$$\bar{E}_A = -\nabla\phi_e - j\omega\bar{A} = -j\omega\bar{A} - j\frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \cdot (\nabla \cdot \bar{A}) \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่แสดงมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าเมื่อเรารู้ค่าศักย์เวกเตอร์ \bar{A} จะสามารถคำนวณหา \bar{H}_A ได้จากสมการที่ (2.33ก) และหา \bar{E}_A ได้จากสมการที่ (2.46) ในหัวข้อ 2.2.4 จะแสดงวิธีการหาศักย์เวกเตอร์ \bar{A} ในเทอมของความหนาแน่นกระแส \bar{J} จากสมการที่ (2.36)

2.2.2 ศักย์เวกเตอร์ \bar{F} อันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็กต้นกำเนิด \bar{M}

แม้ว่ากระแสแม่เหล็กจะไม่มีจริงแต่อาจคิดว่ามีสนามแม่เหล็กสมมูลเกิดขึ้นในปริมาตรหรือพื้นผิวสมมูลได้สนามที่เกิดจากกระแสแม่เหล็กฮาร์โมนิกในบริเวณที่ตัวกลางเป็นโฮโมจีเนียสที่มี $\bar{J} = 0$ แต่ $\bar{M} \neq 0$ จะต้องสอดคล้องกับสมการ $\nabla \cdot \bar{D} = 0$

ดังนั้นสามารถแสดงได้ว่า เป็นเคิร์ลของศักย์เวกเตอร์ จาก

$$\bar{E}_F = \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F} \quad (2.47)$$

แทนสมการที่ (2.47) ลงในสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ ที่ว่า $\nabla \times \bar{H} = j\omega \bar{D}$ จะได้ว่า

$$\nabla \times \bar{H}_F = -j\omega \bar{E}_F \quad (2.48)$$

หรือ

$$\nabla \times (\bar{H}_F + j\omega \bar{F}) = 0 \quad (2.49)$$

จากเวกเตอร์ไอเดนติตีต่อไปนี่คือ $\nabla \times (-\nabla \phi_m) = 0$ ทำให้สามารถหาค่า \bar{H}_F ได้ดังนี้

$$\bar{H}_F = -\nabla \phi_m + j\omega \bar{F} \quad (2.50)$$

เมื่อ ϕ_m แทนศักย์สเกลาร์แม่เหล็กใดๆซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสเปซ เมื่อทำเคิร์ลในสมการที่ (2.47) จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี่คือ

$$\nabla \times \bar{E}_F = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \nabla \times \bar{F} = -\frac{1}{\epsilon} [\nabla \nabla \cdot \bar{F} - \nabla^2 \bar{F}] \quad (2.51)$$

แล้วจับให้เท่ากับสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \bar{E}_F = -\bar{M} - j\omega \mu \bar{H}_F \quad (2.52)$$

จะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้คือ

$$\nabla^2 \bar{F} + j\omega \mu \bar{H}_F = \nabla \nabla \cdot \bar{F} - \epsilon \bar{M} \quad (2.53)$$

หลังจากที่แทนสมการที่ (2.50) ลงในสมการที่ (2.53) จะเขียนสมการที่ (2.53) ได้ใหม่่ว่า

$$\nabla^2 \bar{F} + k^2 \bar{F} = -\mu \bar{M} + \nabla (\nabla \cdot \bar{F}) + \nabla (j\omega \mu \epsilon \phi_m) \quad (2.54)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\nabla \cdot \bar{F} = j\omega \mu \epsilon \phi_m \rightarrow \phi_m = -\frac{1}{j\omega \mu \epsilon} \nabla \cdot \bar{F} \quad (2.55)$$

สมการที่ (2.54) จะกลายเป็น

$$\nabla^2 \bar{F} + k^2 \bar{F} = -\epsilon \bar{M} \quad (2.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะเขียนสมการที่ (2.50) ได้ใหม่ดังนี้คือ

$$\bar{H}_F = -j\omega\bar{F} - \frac{j}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla\cdot\bar{F}) \quad (2.57)$$

จะเห็นว่าเมื่อรู้ค่าศักย์เวกเตอร์ \bar{F} จะหาค่า \bar{E}_F ได้จากสมการที่ (2.56) และ \bar{H}_F จากสมการที่ (2.57) หรือสมการที่ (2.52) เมื่อ $\bar{M} = 0$

2.2.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสต้นกำเนิด \bar{J} และ \bar{M}

ในสองหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงสมการที่จะคำนวณหาสนาม \bar{E} และ \bar{H} จากแหล่งกำเนิด \bar{J} และ \bar{M} ในวิธีดังกล่าวต้องหาฟังก์ชันช่วย \bar{A} และ \bar{F} ที่เกิดจาก \bar{J} และ \bar{M} ก่อน จากนั้นจึงจะหา \bar{E}_A, \bar{H}_A จาก \bar{A} หรือ \bar{E}_F, \bar{H}_F จาก \bar{F} ได้ สนามรวมจะเป็นผลรวมของสนามแต่ละสนามที่เกิดจาก \bar{A} และ \bar{F}

สรุปขั้นตอนการคำนวณหาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ารวม

1. กำหนด \bar{J} และ \bar{M}

2.ก) หา \bar{A} ที่เกิดจาก \bar{J} โดยใช้

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\bar{J} e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.58)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียว ในสมการที่ (2.45)

ข) หา \bar{F} ที่เกิดจาก \bar{M} โดยใช้

$$\bar{F} = \frac{\epsilon}{4\pi} \iiint_V \frac{\bar{M} e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.59)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียว ในสมการที่ (2.56) ในสมการที่ (2.58) และ สมการที่ (2.59) $k^2 = \omega^2\mu\epsilon$ และ R เป็นระยะทางจากจุดใดๆ ในต้นกำเนิดไปยังจุดที่ทำการสังเกตค่าสนาม ในหัวข้อต่อไปจะแสดงวิธีหาคำตอบในสมการที่ (2.58) และสมการที่ (2.59)

3.ก) หา \bar{H}_A จากสมการที่ (2.33ก) และ \bar{E}_A จากสมการที่ (2.41) หรืออาจหา \bar{E}_A จาก สมการแมกเวลล์ เมื่อ $\bar{J} = 0$

ข) หา \bar{E}_F จากสมการที่ (2.47) และ \bar{H}_F จากสมการที่ (2.52) หรืออาจหา \bar{H}_F จากสมการแมกซ์เวลล์ เมื่อ $\bar{M} = 0$

4.หาสนามรวมได้จาก

$$\bar{E} = \bar{E}_A + \bar{E}_F = -j\omega\bar{A} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla\cdot\bar{A}) - \frac{1}{\epsilon} \nabla\times\bar{F} \quad (2.60ก)$$

หรือ

$$\bar{E} = \bar{E}_A + \bar{E}_F = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla\times\bar{H}_A - \frac{1}{\epsilon} \nabla\times\bar{F} \quad (2.60ข)$$

และ

$$\bar{H} = \bar{H}_A + \bar{H}_F = \frac{1}{\mu} \nabla\times -j\omega\bar{F} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla\cdot\bar{F}) \quad (2.61ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\vec{H} = \vec{H}_A + \vec{H}_F = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - j \frac{1}{\omega \mu} \nabla \times \vec{E}_F \tag{2.61ข}$$

2.2.4 คำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียว

ในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการหาค่าเวกเตอร์ \vec{A} และ \vec{F} จากสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียวสมมุติว่าต้นกำเนิดของสนามมีความหนาแน่นกระแสเป็น J_z ซึ่งในลิมิตจะเป็นต้นกำเนิดแบบเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมาก วางอยู่ที่จุดกำเนิด (Origin) ของระบบโดยออดิเนท (x, y, z) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ระบบ โคออดิเนทที่ใช้สำหรับคำนวณหาสนาม

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสชี้ในทิศทาง z (J_z) ดังนั้นจะมีเฉพาะ A_z ซึ่งจะเขียนสมการที่ (2.45) ได้ใหม่ว่า

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = -\mu J_z \tag{2.62}$$

ณ จุดซึ่งอยู่ห่างออกไปจากต้นกำเนิด ($J_z = 0$) สมการคลื่นจะกลายเป็น
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = 0 \quad (2.63)$$

เพราะว่าในลิมิตต้นกำเนิดเป็นจุด A_z จึงไม่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง (θ และ ϕ) ดังนั้นในระบบโคออดิเนตทรงกลม $A_z = A_z(r)$ เมื่อ r เป็นระยะทางตามแนวรัศมี จะเขียนสมการที่ (2.63) ได้ใหม่ว่า

$$\nabla^2 A_z(r) + k^2 A_z(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r^2 \partial A_z(r)}{\partial r} \right] + k^2 A_z(r) = 0 \quad (2.64)$$

และเนื่องจากเป็นฟังก์ชันของโคออดิเนตแนวรัศมีเท่านั้น การหาอนุพันธ์จึงเป็นแบบธรรมดา (Ordinary Differentiation) ซึ่งเป็นผลให้สมการที่ (2.64) กลายเป็นดังต่อไปนี้

$$\frac{d^2 A_z(r)}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dA_z(r)}{dr} + k^2 A_z(r) = 0 \quad (2.65)$$

สมการดิฟเฟอเรนเชียล ในรูปของสมการที่ (2.65) มี 2 คำตอบคือ

$$A_{z1} = C_1 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.66)$$

$$A_{z2} = C_2 \frac{e^{+jkr}}{r} \quad (2.67)$$

สมการที่ (2.66) แสดงคลื่นที่เดินทางออกไปจากต้นกำเนิดในทิศทางตามแนวรัศมี ในขณะที่สมการที่ (2.67) แสดงคลื่นที่เดินทางเข้าหาต้นกำเนิด ในกรณีนี้ต้นกำเนิดถูกวางอยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งจะแพร่กระจายคลื่นออกไป เราจึงเลือกคำตอบในสมการที่ (2.66) จะได้ว่า

$$A_{z1} = A_{z2} = C_1 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.68)$$

ในกรณีของสนามสถิตย์ ($\omega = 0$) สมการที่ (2.68) จะเป็นดังนี้

$$A_z = \frac{C_1}{r} \quad (2.69)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการที่ (2.63) ถึงสมการที่ (2.65) เมื่อ $k = 0$ ดังนั้นที่จุดที่ห่างออกไปจากต้นกำเนิด คำตอบของสมการซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลากับคำตอบของสนามสถิตย์จะต่างกันด้วยค่า e^{-jkr} ถ้าหากมีต้นกำเนิด ($J_z \neq 0$) และ $k = 0$ สมการคลื่นสมการที่ (2.62) จะมีลักษณะดังนี้

$$\nabla^2 A_z = -\mu J_z \quad (2.70)$$

สมการที่ (2.70) เป็นสมการพัชของ (Poisson's Equation) คือ

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.71)$$

ซึ่งมีคำตอบดังนี้คือ

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_V \frac{\rho}{r} dv' \quad (2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ r เป็นระยะทางจากจุดใดๆ บนความหนาแน่นประจุไปยังจุดสังเกต เนื่องจากสมการที่ (2.70) มีรูปแบบที่คล้ายกับสมการที่ (3.71) จึงอาจแสดงคำตอบของ สมการที่ (2.70) ได้ดังนี้

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{J_z}{r} dv' \quad (2.73)$$

สมการที่ (2.73) เป็นคำตอบของสมการที่ (2.62) เมื่อ $k=0$ (เมื่อเป็นสนามสถิตย์) เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.68) กับสมการที่ (2.69) จะพบว่าคำตอบของสนามซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสมการที่ (2.62) หาได้โดยคูณคำตอบเมื่อเป็นสนามสถิตย์ของ สมการที่ (2.73) ด้วย e^{-jkr} เพราะฉะนั้นเราสามารถแสดงได้ว่า

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V J_z \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.74)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการ $\nabla^2 A_z + k^2 A_z = -\mu J_z$
ในกรณีที่ความหนาแน่นกระแสไหลในทิศทาง x และ y (J_x และ J_y) จะเขียนสมการคลื่นได้ว่า

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = -\mu J_x \quad (2.75)$$

$$\nabla^2 A_y + k^2 A_y = -\mu J_y \quad (2.76)$$

ดังนั้นคำตอบของสมการคลื่นทั้งสอง จะเป็นดังนี้

$$A_x = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V J_x \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.77)$$

$$A_y = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V J_y \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.78)$$

จากสมการที่ (2.74) สมการที่ (2.77) และสมการที่ (2.78) ทำให้เขียนคำตอบของสมการคลื่น สมการที่ (2.45) ได้ดังนี้คือ

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \bar{J} \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.79)$$

สำหรับกรณีที่ต้นกำเนิดไม่ได้อยู่ที่ออร์จินแต่อยู่ที่ตำแหน่งใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4x สมการที่ (2.79) จะมีค่าดังนี้

$$\bar{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \bar{J}(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.80)$$

สัญลักษณ์ แสดงถึงตำแหน่งของต้นกำเนิด ส่วนที่ไม่มีสัญลักษณ์ หมายถึงตำแหน่งของจุดสังเกต และ R เป็นระยะทางจากจุดใดๆ ในต้นกำเนิดไปยังจุดสังเกต

ในทำนองเดียวกันจะหาได้ว่า

$$\bar{F}(x, y, z) = \frac{\epsilon}{4\pi} \iiint_V \bar{M}(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.81)$$

ถ้า \bar{J} และ \bar{M} เป็นความหนาแน่นกระแสต่อความยาว (m^{-1}) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_s \bar{J}_s(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.82)$$

และ

$$\bar{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_s \bar{M}_s(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.83)$$

ส่วนในกรณีที่เป็นกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก การอินทิเกรตจะกลายเป็นแบบอินทิกรัลตามเส้น ดังนี้คือ

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_c \bar{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.84)$$

และ

$$\bar{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_c \bar{I}_m(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.85)$$

2.2.5 การแพร่กระจายคลื่นของสนามระยะไกล

เนื่องจากสนามซึ่งแพร่กระจายออกจากสายอากาศ ซึ่งมีขนาดจำกัดจะเป็นคลื่นทรงกลม ดังนั้นคำตอบทั่วไปของสมการเวกเตอร์คลื่น ของสายอากาศที่มีขนาดจำกัดที่แสดงในเทอมของส่วนประกอบแบบทรงกลม จะมีรูปแบบเป็น

$$\bar{A} = \hat{a}_r A_r(r, \theta, \phi) + \hat{a}_\theta A_\theta(r, \theta, \phi) + \hat{a}_\phi A_\phi(r, \theta, \phi) \quad (2.86)$$

ขนาดของแต่ละส่วนประกอบของสนามสมการที่ (2.86) แปรผันกับ r เป็น $\frac{1}{r}$, $n = 1, 2, 3, \dots$ เมื่อตัดเทอมที่มีค่า n สูง ๆ ก็คือ $n = 2, 3, \dots$ เมื่อ $r \rightarrow \infty$ ทำให้สมการที่ (2.81) กลายเป็นดังนี้

$$\bar{A} \simeq [\hat{a}_r A'_r(\theta, \phi) + \hat{a}_\theta A'_\theta(\theta, \phi) + \hat{a}_\phi A'_\phi(\theta, \phi)] \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.87)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.87) ลงในสมการที่ (2.46) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้คือ

$$\bar{E} = \frac{1}{r} \left\{ -j\omega e^{-jkr} [\hat{a}_r(0) + \hat{a}_\theta A'_\theta(\theta, \phi) + \hat{a}_\phi A'_\phi(\theta, \phi)] \right\} + \frac{1}{r^2} \{ \dots \} + \dots \quad (2.88ก)$$

ส่วนประกอบของสนามในแนวรัศมีจะไม่มีเทอม $\frac{1}{r}$ เพราะเกิดการหักล้างกัน ทำนองเดียวกันถ้าใช้สมการที่ (2.87) จะเขียนสมการที่ (2.33ก) ได้ว่า

$$\bar{H} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{j\omega e^{-jkr}}{\eta} [\hat{a}_r(0) + \hat{a}_\theta A'_\theta(\theta, \phi) - \hat{a}_\phi A'_\phi(\theta, \phi)] \right\} + \frac{1}{r^2} \{ \dots \} + \dots \quad (2.88ข)$$

เมื่อ $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ เป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของตัวกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อตัดทอม $\frac{1}{r^n}$ ที่มีกำลังสูง ๆ ทั้ง สนามไฟฟ้า \vec{E} และสนามแม่เหล็ก \vec{H} ที่แพร่กระจายจะมี เฉพาะส่วนประกอบ θ และ ϕ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

สนามระยะไกล

$$\left. \begin{array}{l} E_r \simeq 0 \\ E_\theta \simeq -j\omega A_\theta \\ E_\phi \simeq -j\omega A_\phi \end{array} \right\} \rightarrow \vec{E}_A \simeq -j\omega \vec{A} \quad (2.89ก)$$

มีเฉพาะส่วนประกอบ θ และ ϕ เท่านั้น เพราะ $E_r \simeq 0$

$$\left. \begin{array}{l} H_r \simeq 0 \\ H_\theta \simeq \frac{j\omega A_\phi}{\eta} = -\frac{E_\phi}{\eta} \\ H_\phi \simeq -\frac{j\omega A_\theta}{\eta} = \frac{E_\theta}{\eta} \end{array} \right\} \rightarrow \vec{H}_A \simeq \frac{\vec{a}_r}{\eta} \times \vec{E}_A = -\frac{j\omega}{\eta} \vec{a}_r \times \vec{A} \quad (2.89ข)$$

มีเฉพาะส่วนประกอบ θ และ ϕ เท่านั้น เพราะ $H_r \simeq 0$

ส่วนประกอบของสนามในแนวรัศมีเฉพาะเทอมกำลังสูง ๆ ของ $\frac{1}{r^n}$ ทำนองเดียวกันกับสนามระยะไกลที่เกิดจากต้นกำเนิดสนามแม่เหล็ก \vec{M} (ศักดา \vec{F}) เขียนได้ดังนี้

สนามระยะไกล

$$\left. \begin{array}{l} H_r \simeq 0 \\ H_\theta \simeq -j\omega F_\phi \\ H_\phi \simeq -j\omega F_\theta \end{array} \right\} \rightarrow \vec{H}_F \simeq -j\omega \vec{F} \quad (2.90ก)$$

มีเฉพาะส่วนประกอบ θ และ ϕ เท่านั้น เพราะ $H_r \simeq 0$

$$\left. \begin{array}{l} E_r \simeq 0 \\ E_\theta \simeq -j\omega\eta F_\phi = \eta H_\phi \\ E_\phi \simeq j\omega\eta F_\theta = -\eta H_\theta \end{array} \right\} \rightarrow \vec{E}_F \simeq -\eta \vec{a}_r \times \vec{H}_F = j\omega\eta \vec{a}_r \times \vec{F} \quad (2.90ข)$$

มีเฉพาะส่วนประกอบ θ และ ϕ เท่านั้น เพราะ $E_r \simeq 0$

จะเห็นว่าสนามไฟฟ้า \vec{E} และสนามแม่เหล็ก \vec{H} ในระยะไกลจะออร์ธอโกนอล(Orthogonal) ซึ่งกันและกัน และจะให้นามมีลักษณะเป็นแบบ TEM

2.3 โพลาริเซชัน (Polarization)

จาก IEEE Standard Definitions for Antennas ให้คำนิยามการโพลาริเซชันของการแพร่กระจายคลื่นคือ คุณสมบัติของการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งสามารถจะอธิบายได้โดยการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยสังเกตที่ตำแหน่งใดๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการพิจารณานขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ถ้าลักษณะการกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามี่ลักษณะเป็นอย่างไรแล้วก็จะกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้านั้นมีการโพลาริเซชันแบบนั้น ซึ่งการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะซึ่งได้แก่ การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีลักษณะเป็นวงกลมซึ่งจะเรียกลักษณะแบบนี้ว่าสนามไฟฟ้ามีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization) การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงรีก็จะเรียกว่าสนามไฟฟ้าที่มีลักษณะการโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical Polarization) และการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นก็จะเรียกว่าสนามไฟฟ้าที่มีลักษณะการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear Polarization)

ในกรณีของการโพลาไรซ์แบบวงกลม และแบบวงรีนั้นการกวาดหรือหมุนไปของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะคือ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางขวามือหรือ เรียกว่าเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา และ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางซ้ายมือหรือ เรียกว่าเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งลักษณะของการโพลาไรซ์แบบต่าง ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ดังนี้

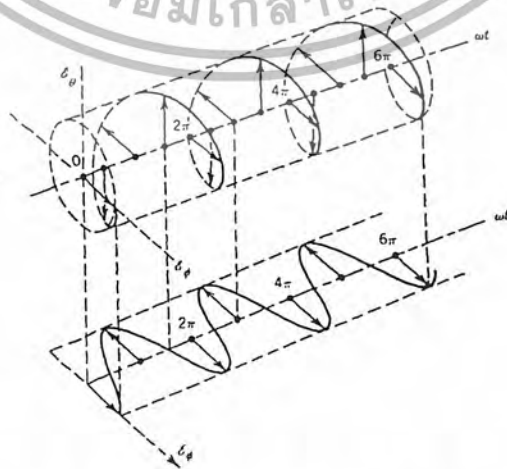


ก) การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น ข) การโพลาไรซ์แบบวงกลม ค) การโพลาไรซ์แบบวงรี

รูปที่ 2.5 การโพลาไรซ์แบบต่างๆ

2.3.1 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear Polarization)

เมื่อทำการพิจารณาคลื่นหรือสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยที่แกน θ, ϕ แทนแกนที่เป็นองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าชั่วขณะ E_θ, E_ϕ ตามลำดับและคลื่นเคลื่อนที่ออกมาในทิศทาง r ซึ่งมีทิศทางเป็นบวกหรือคลื่นที่เดินทางออกจากร่างเราออกไป การพิจารณาจะเป็นดังรูปที่ 2.6 ดังนี้



รูปที่ 2.6 การพิจารณาโพลาไรซ์เซชันของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าชั่วขณะจะสามารถได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{\mathcal{E}}(r, \theta, \phi; t) &= \text{Re}[\bar{E}(r, \theta, \phi)e^{j\omega t}] \\ &= \text{Re}[\bar{E}(\theta, \phi)e^{-jkr}e^{j\omega t}] \\ &= \text{Re}[\hat{a}_\theta \bar{E}(\theta, \phi)e^{-jkr}e^{j\omega t} + \hat{a}_\phi \bar{E}(\theta, \phi)e^{-jkr}e^{j\omega t}] \\ &= \text{Re}[\hat{a}_\theta E_{\theta 0}^+ e^{j(\omega t - kr)} + \hat{a}_\phi E_{\phi 0}^+ e^{j(\omega t - kr)}] \\ &= \hat{a}_\theta E_{\theta 0}^+ \cos(\omega t - kr + \beta_\theta) + \hat{a}_\phi E_{\phi 0}^+ \cos(\omega t - kr + \beta_\phi)\end{aligned}\quad (2.91)$$

$$= \hat{a}_\theta \mathcal{E}_\theta + \hat{a}_\phi \mathcal{E}_\phi \quad (2.92)$$

โดยที่ E_θ^+, E_ϕ^+ คือ ค่าเชิงซ้อนของสนามไฟฟ้า และ $E_{\theta 0}^+, E_{\phi 0}^+$ คือค่าจริงของสนามไฟฟ้า $\mathcal{E}_\theta, \mathcal{E}_\phi$ คือองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าชั่วขณะในแนว θ, ϕ ตามลำดับ

ในการพิจารณาจะดูที่การเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าชั่วขณะ (Instantaneous Electric Field) ($\bar{\mathcal{E}}$) ที่ระยะทาง r ใด ๆ โดยที่จากสมการที่ (2.91) เมื่อกำหนดให้ $r=0$ ($kr=0$) ซึ่งเรา สนใจ การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าตามเวลามากกว่าการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง (r) และในการพิจารณา โพลาริเซชันนี้จะพิจารณาโดยการมองตามหลังคลื่นที่เคลื่อนที่ไป

เพื่อเป็นการง่ายในขั้นแรกจะทำการกำหนดให้ $E_{\phi 0}^+ = 0$ ดังนั้นสมการที่ (2.91) จะได้ว่า

$$\bar{\mathcal{E}}(r, \theta, \phi; t) = \hat{a}_\theta E_{\theta 0}^+ \cos(\omega t + \beta_\theta) \quad (2.93)$$

ซึ่งเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในแนวแกนองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าชั่วขณะ \mathcal{E}_θ เท่านั้นและจะเรียกว่าเป็นการโพลาไรซ์ในทิศทาง θ หรือในแนวตั้ง แสดงในรูปที่ 2.7



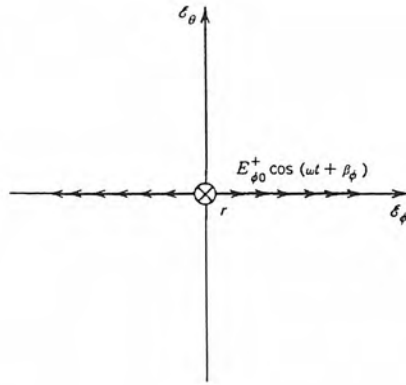
รูปที่ 2.7 การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นในทิศทาง θ

หรือในกรณีที่ไม่มีเฉพาะองค์ประกอบในแนว \mathcal{E}_θ เท่านั้นคือกำหนดให้ $\mathcal{E}_\theta = 0$ สนามไฟฟ้าชั่วขณะจากสมการที่ (2.91) จะได้ว่า

$$\bar{\mathcal{E}}(r, \theta, \phi; t) = \hat{a}_\phi E_{\phi 0}^+ \cos(\omega t + \beta_\phi) \quad (2.94)$$

ซึ่งเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงอยู่ในแนวแกนองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าชั่วขณะ \mathcal{E}_ϕ เท่านั้นและจะเรียกว่าเป็นการโพลาไรซ์ในทิศทาง ϕ หรือในแนวนอนแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การโพลาริซ์แบบเชิงเส้นในทิศทาง ϕ

เมื่อมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าชั่วขณะ ทั้งในแนว ε_θ และ ε_ϕ และเมื่อ $\beta_\theta = \beta_\phi = \beta$ จะ

ได้ว่า

$$\vec{e}(r, \theta, \phi; t) = \hat{a}_\theta E_{\theta 0}^+ \cos(\omega t + \beta) + \hat{a}_\phi E_{\phi 0}^+ \cos(\omega t + \beta) \tag{2.95}$$

ขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าคือ

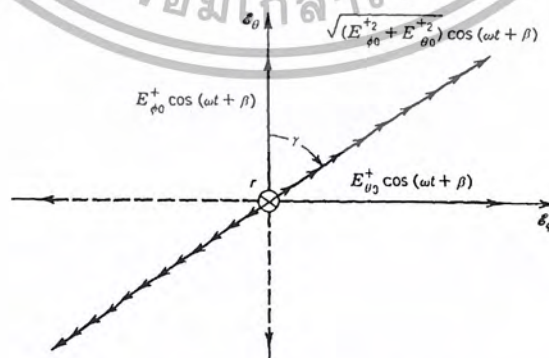
$$\bar{e}(r, \theta, \phi; t) = \sqrt{(E_{\theta 0}^+)^2 + (E_{\phi 0}^+)^2} \cos(\omega t + \beta) \tag{2.96}$$

ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงในทุก ๆ เวลาที่เปลี่ยนไปแต่มุมที่เบี่ยงเบนจากแกนอ้างอิงโดยในที่นี้ให้เป็นแกนที่เป็น θ การเบี่ยงเบนนี้จะทำมุม γ กับแกนอ้างอิง โดยที่มุม γ สามารถหาได้จาก

$$\gamma = \tan^{-1} \left[\frac{\varepsilon_\phi}{\varepsilon_\theta} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{E_{\phi 0}^+}{E_{\theta 0}^+} \right] \tag{2.97}$$

-หมายเหตุ ขนาดของเฟสระหว่างองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าที่วางในแนว θ, ϕ คือ $n\pi, n = 0, 1, 2, \dots$

ซึ่งเรียกได้ว่าเป็นการ โพลาริซ์แบบเชิงเส้นในทิศทาง γ แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ดังนี้



รูปที่ 2.9 การโพลาริซ์แบบเชิงเส้นในทิศทาง γ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization)

คลื่นที่ถูกเรียกว่ามีการโพลาไรซ์แบบวงกลม จะเกิดจากการที่โลกซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีลักษณะเป็นวงกลมในสเปซซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้ายังคงมีค่าคงที่แต่ลักษณะของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะมีลักษณะการกวาดที่เปลี่ยนไปตามเวลาซึ่งอธิบายได้โดยโลกซ์ที่เป็นวงกลม -การโพลาไรซ์แบบวงกลมที่มีทิศทางการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าทางขวามือ (Right-Hand Circular Polarization)

คลื่นหรือสนามไฟฟ้าจะถูกเรียกว่ามีการโพลาไรซ์แบบวงกลมที่เวกเตอร์ของสนามหมุนไปทางขวามือ ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการเคลื่อนที่แล้วเวกเตอร์สนามไฟฟ้านั้นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) และโลกซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าก็จะมีลักษณะเป็นวงกลมด้วยจึงจะเรียกว่าสนามไฟฟ้านั้นมีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

พิจารณาโลกซ์ของสนามไฟฟ้าชั่วขณะ (\vec{E}) ที่ระยะ $r=0$ ซึ่งสำหรับตัวอย่างนี้จะกำหนดให้

$$\begin{aligned}\beta_\theta &= 0 \\ \beta_\phi &= -\frac{\pi}{2}\end{aligned}\quad (2.98)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}E_{\theta 0}^+ &= E_{\phi 0}^+ = E_R \\ \epsilon_\theta &= E_R \cos(\omega t) \\ \epsilon_\phi &= E_R \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_R \sin(\omega t)\end{aligned}\quad (2.99)$$

$$\vec{E}(r, \theta, \phi, t) = \hat{a}_\theta E_R \cos(\omega t) + \hat{a}_\phi E_R \sin(\omega t)\quad (2.100)$$

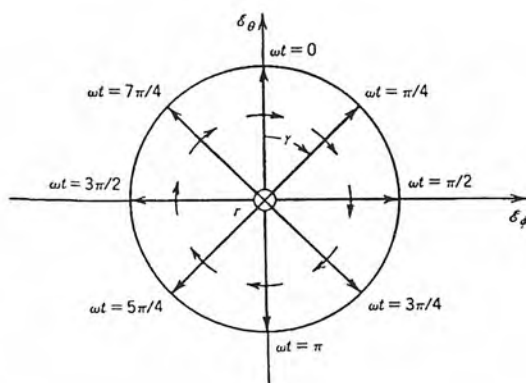
โลกซ์ของขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะสามารถกำหนดโดย

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_\theta^2 + \epsilon_\phi^2} = \sqrt{E_R^2 (\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t))} = E_R\quad (2.101)$$

ซึ่งการโพลาไรซ์จะมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงโดยที่แนวเส้นตรงนั้นจะเปลี่ยนมุมไปตามเวลาโดยมุมที่เบี่ยงเบนเทียบกับแกน θ การเบี่ยงเบนนี้จะทำมุม γ กับแกนอ้างอิง โดยที่มุม γ สามารถหาได้จาก

$$\gamma = \tan^{-1} \left[\frac{\epsilon_\phi}{\epsilon_\theta} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{E_R \sin(\omega t)}{E_R \cos(\omega t)} \right] = \tan^{-1} [\tan(\omega t)] = \omega t\quad (1.102)$$

เมื่อทำการพล็อตโลกซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งกำหนดให้ระยะ $r=0$ จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ E_R และมีการหมุนตามเข็มนาฬิกา ตามความถี่เชิงมุม (ω) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โพลาริซัชันแบบวงกลมที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนไปทางขวามือ

เราสามารถที่จะเขียนเวกเตอร์สนามไฟฟ้าชั่วขณะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{E}(r, \theta, \phi, t) &= \text{Re} \left[\hat{a}_\theta E_R e^{j(\omega t - kr)} + \hat{a}_\phi E_R e^{j(\omega t - kr - \frac{\pi}{2})} \right] \\ &= E_R \text{Re} \left\{ \left[\hat{a}_\theta - j\hat{a}_\phi \right] e^{j(\omega t - kr)} \right\}\end{aligned}\quad (2.103)$$

-การโพลาริซัชันแบบวงกลมที่มีทิศทางการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าทางซ้ายมือ (Left-hand Circular Polarization)

คลื่นหรือสนามไฟฟ้าจะถูกเรียกว่ามีการโพลาริซัชันแบบวงกลมที่เวกเตอร์ของสนามหมุนไปทางซ้ายมือ ถ้าคลื่นเคลื่อนที่ไปตามทิศทางการเคลื่อนที่แล้วเวกเตอร์สนามไฟฟ้านั้นมีการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clockwise) และ โลกัศของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าก็จะมีลักษณะเป็นวงกลมด้วยจึงจะเรียกว่าสนามไฟฟ้านั้นมีการโพลาริซัชันแบบวงกลม

พิจารณาโลกัศของสนามไฟฟ้าชั่วขณะ ($\bar{\mathcal{E}}$) ที่ระนาบ $r = 0$ ซึ่งสำหรับตัวอย่างนี้จะกำหนดให้

$$\begin{aligned}\beta_\theta &= 0 \\ \beta_\phi &= \frac{\pi}{2} \\ \mathbf{E}_{\theta\theta}^+ &= \mathbf{E}_{\phi\phi}^+ = E_L\end{aligned}\quad (2.104)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_\theta &= E_L \cos(\omega t) \\ \mathcal{E}_\phi &= E_L \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_L \sin(\omega t)\end{aligned}\quad (2.105)$$

$$\bar{\mathcal{E}}(r, \theta, \phi, t) = \hat{a}_\theta E_L \cos(\omega t) - \hat{a}_\phi E_L \sin(\omega t) \quad (2.106)$$

โลกัศของขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะสามารถกำหนดโดย

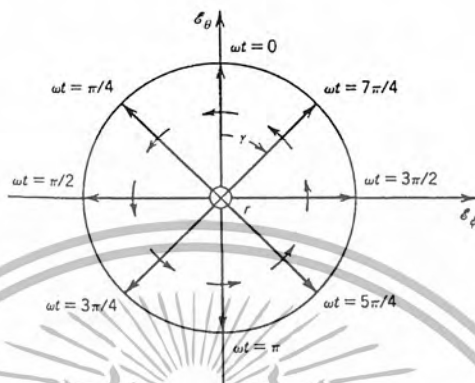
$$\mathcal{E} = \sqrt{\mathcal{E}_\theta^2 + \mathcal{E}_\phi^2} = \sqrt{E_L^2 (\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t))} = E_L \quad (2.107)$$

ซึ่งการโพลาริซัชันจะมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงโดยที่แนวเส้นตรงนั้นจะเปลี่ยนมุมไปตามเวลาโดยมุมที่เบี่ยงเบนเทียบกับแกน θ การเบี่ยงเบนนี้จะทำมุม γ กับแกนอ้างอิง โดยที่มุม γ สามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\gamma = \tan^{-1} \left[\frac{\mathcal{E}_\phi}{\mathcal{E}_\theta} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{-E_L \sin(\omega t)}{E_L \cos(\omega t)} \right] = \tan^{-1} [\tan(\omega t)] = -\omega t \tag{2.108}$$

เมื่อทำการพล็อตโลกซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งกำหนดให้ระนาบ $r=0$ จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ E_L และมีการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ตามความถี่เชิงมุม (ω) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โพลาริซ์แบบวงกลมที่เวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนไปทางซ้ายมือ

เราสามารถที่จะเขียนเวกเตอร์สนามไฟฟ้าชั่วขณะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \vec{\mathcal{E}}(r, \theta, \phi, t) &= \text{Re} \left[\hat{a}_\theta E_R e^{j(\omega t - kr)} + \hat{a}_\phi E_R e^{j(\omega t - kr + \frac{\pi}{2})} \right] \\ &= E_R \text{Re} \left\{ \left[\hat{a}_\theta + j\hat{a}_\phi \right] e^{j(\omega t - kr)} \right\} \end{aligned} \tag{2.109}$$

หมายเหตุ ขนาดของเฟสระหว่างองค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าในแนว θ, ϕ จะทำมุม 90° กันเสมอ

2.3.3 การโพลาริซ์แบบวงรี (Elliptical Polarization)

เราจะกล่าวได้ว่าคลื่นมีการโพลาริซ์แบบวงรีถ้าหากเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไปนั้นมีการหมุนไปหรือมีโลกซ์เป็นลักษณะวงรีซึ่งจะเป็นการโพลาริซ์แบบวงรีที่หมุนไปทางขวามือถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีการหมุนเป็นวงรีตามเข็มนาฬิกา (Clockwise) และจะเป็นการโพลาริซ์แบบวงรีที่หมุนไปทางซ้ายมือถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีการหมุนเป็นวงรีทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clockwise)

พิจารณาโลกซ์ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าชั่วขณะ ($\vec{\mathcal{E}}$) ที่ระนาบ $r=0$ ที่ทุก ๆ เวลา สำหรับการอธิบายนี้จะกำหนดให้

$$\begin{aligned} \beta_\theta &= \frac{\pi}{2} \\ \beta_\phi &= 0 \\ E_{\theta 0}^+ &= (E_R + E_L) \\ E_{\phi 0}^+ &= (E_R - E_L) \end{aligned} \tag{2.110}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้องค์ประกอบของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าชั่วขณะ

$$\begin{aligned}\varepsilon_\theta &= (E_R + E_L) \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = -(E_R + E_L) \sin(\omega t) \\ \varepsilon_\phi &= (E_R - E_L) \cos(\omega t)\end{aligned}\quad (2.111)$$

เราจะสามารถเขียนโลกซ์ของแอมพลิจูดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\omega t &= (2n+1)\frac{\pi}{2}, n=0,1,2,\dots \\ \varepsilon^2 &= \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_\phi^2 \\ &= (E_R + E_L)^2 \sin^2(\omega t) + (E_R - E_L)^2 \cos^2(\omega t) \\ &= E_R^2 \sin^2(\omega t) + E_L^2 \sin^2(\omega t) + 2E_R E_L \sin^2(\omega t) \\ &\quad + E_R^2 \cos^2(\omega t) + E_L^2 \cos^2(\omega t) - 2E_R E_L \cos^2(\omega t)\end{aligned}$$

จะได้

$$\varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_\phi^2 = E_R^2 + E_L^2 + 2E_R E_L [\sin^2 \omega t - \cos^2 \omega t] \quad (2.112)$$

อย่างไรก็ตาม

$$\sin(\omega t) = \frac{-\varepsilon_\theta}{(E_R + E_L)} \quad (2.113)$$

$$\cos(\omega t) = \frac{\varepsilon_\phi}{(E_R - E_L)} \quad (2.114)$$

แทนค่าสมการที่ (2.113) และสมการที่ (2.114) ลงในสมการที่ (2.112) จะได้

$$\left\{ \frac{\varepsilon_\theta}{E_R + E_L} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_\phi}{E_R - E_L} \right\}^2 = 1 \quad (2.115)$$

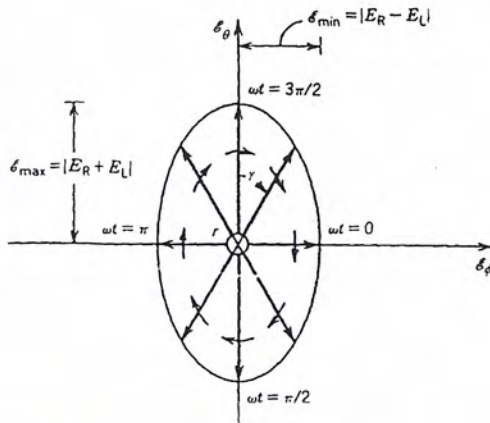
ซึ่งก็คือสมการวงรีที่มีแกนหลักอยู่ที่

$$|\varepsilon|_{\max} = |E_R + E_L| \text{ เมื่อ } \omega t = (2n+1)\frac{\pi}{2}, n=0,1,2,\dots \quad (2.116)$$

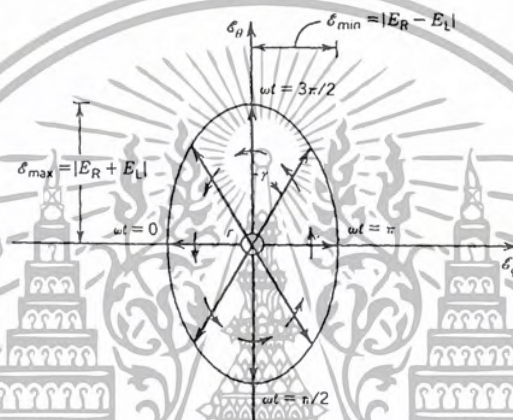
มีแกนรองอยู่ที่

$$|\varepsilon|_{\max} = |E_R - E_L| \text{ เมื่อ } \omega t = n\pi, n=0,1,2,\dots \quad (2.117)$$

เมื่อเวลาเปลี่ยนไปเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะหมุนไปและความยาวของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปซึ่งมีลักษณะเป็นวงรีแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



ก) กรณีที่หมุนทางขวามือ



ข) กรณีที่หมุนทางซ้ายมือ

รูปที่ 2.12 การโพลาไรซ์แบบวงรีที่อยู่บนแกนหลักกรณีหมุนซ้ายและหมุนขวา

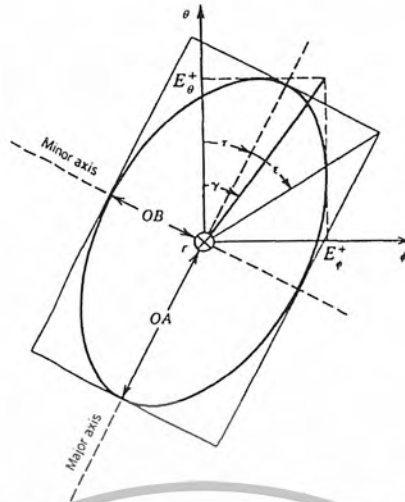
ค่าอัตราส่วนของแกน(Axial Ratio) คืออัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$AR = \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_{min}} = \frac{(E_R + E_L)}{(E_R - E_L)} \tag{2.118}$$

เมื่อ E_R, E_L เป็นจำนวนจริงบวก และเมื่อ AR เป็นค่าบวกแสดงว่าการโพลาไรซ์เป็นแบบหมุนซ้าย (Counter Clockwise) หรือถ้าหากว่า AR มีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นการโพลาไรซ์ของคลื่นแบบหมุนขวา (Clockwise)

ในกรณีที่วงรีของการโพลาไรซ์ไม่ได้อยู่ที่แกนหลักคือมีการเอียงออกมาจากแกนหลักซึ่งจะเกิดมุมๆ หนึ่งขึ้นเรียกว่ามุมเอียง (Tilt) แสดงในรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การโพลาริซ์แบบวงรีที่ไม่ได้อยู่ที่แกนหลักซึ่งมีมุมเอียง (Tilt) ออกจากแกนอ้างอิง θ
 ในกรณีนี้จะสามารถหาค่าอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองได้จาก

$$AR = \pm \frac{\text{major axis}}{\text{minor axis}} = \pm \frac{OA}{OB}, \quad I \leq |AR| \leq \infty \quad (2.119)$$

โดยที่ $AR=1$ เป็นการโพลาริซ์แบบวงกลม

$1 < AR < \infty$ จะเป็นการโพลาริซ์แบบวงรี

$AR = \infty$ จะเป็นการโพลาริซ์แบบเชิงเส้น

เมื่อ

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ (E_{\theta 0}^+)^2 + (E_{\phi 0}^+)^2 + \left[(E_{\theta 0}^+)^4 + (E_{\phi 0}^+)^4 + 2(E_{\theta 0}^+)^2 (E_{\phi 0}^+)^2 \cos(2\Delta\beta) \right]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.120)$$

$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ (E_{\theta 0}^+)^2 + (E_{\phi 0}^+)^2 - \left[(E_{\theta 0}^+)^4 + (E_{\phi 0}^+)^4 + 2(E_{\theta 0}^+)^2 (E_{\phi 0}^+)^2 \cos(2\Delta\beta) \right]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.121)$$

โดยที่

$$E_{\theta 0}^+ = E_R + E_I$$

$$E_{\phi 0}^+ = E_R - E_I$$

$$\Delta\beta = \beta_\theta - \beta_\phi$$

โดยที่ความต่างเฟส (Phase Different) จะพิจารณาอยู่ที่ $-180^\circ < \Delta\beta < 180^\circ$

$\Delta\beta$ คือค่าความต่างเฟส เมื่อ $\Delta\beta$ มีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นการโพลาริซ์แบบหมุนซ้าย เมื่อมีค่าเป็นบวกแสดงว่าเป็นการโพลาริซ์แบบหมุนขวา และเมื่อ $\Delta\beta = 0^\circ, \pm 180^\circ$ จะแสดงว่าเป็นการโพลาริซ์แบบเชิงเส้น

มุมเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกนขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนว θ ซึ่งเราใช้เป็นแกนอ้างอิง ดังนั้น มุมของการเอียง (Tilt) จะกำหนดได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_{\theta 0}^+ E_{\phi 0}^+}{(E_{\theta 0}^+)^2 - (E_{\phi 0}^+)^2} \cos(\beta_\theta - \beta_\phi) \right] \text{ เมื่อ } E_{\theta 0}^+ \geq E_{\phi 0}^+ \quad (2.122)$$

$$\tau = -\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_{\theta 0}^+ E_{\phi 0}^+}{(E_{\theta 0}^+)^2 - (E_{\phi 0}^+)^2} \cos(\beta_\theta - \beta_\phi) \right] \text{ เมื่อ } E_{\theta 0}^+ < E_{\phi 0}^+ \quad (2.123)$$

โดยที่ $-90^\circ \leq \tau \leq 90^\circ$

2.3.4 ตัวประกอบการสูญเสียเชิงโพลาไรซ์ (Polarization Loss Factor)

โดยทั่วไปแล้วการโพลาไรซ์ของสายอากาศอาจไม่เหมือนกับการโพลาไรซ์ของคลื่นที่เดินทางเข้ามายังสายอากาศ ซึ่งเรียกว่าเกิดโพลาไรเซชันที่ไม่สมพงษ์ (Polarization Mismatch) ทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกมาจากคลื่นได้สูงสุด เนื่องจากการสูญเสียจากโพลาไรเซชัน (Polarization Loss) สมมุติว่าสนามไฟฟ้าของคลื่นที่เดินทางมายังสายอากาศ (กรณีส่ง) เป็นดังนี้

$$\vec{E}_i = \hat{p}_w E_i \quad (2.124)$$

เมื่อ \hat{p}_w เป็นหน่วยเวกเตอร์ของคลื่น และโพลาไรเซชันของสนามไฟฟ้าของสายอากาศรับมีค่าดังนี้คือ

$$\vec{E}_a = \hat{p}_a E_a \quad (2.125)$$

เมื่อ \hat{p}_a เป็นหน่วยเวกเตอร์ของสายอากาศ

จะกำหนดให้โพลาไรเซชันลอสแฟกเตอร์มีค่าดังนี้

$$PLF = |\hat{p}_w \cdot \hat{p}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2 \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.126)$$

เมื่อ ψ_p เป็นมุมระหว่างหน่วยเวกเตอร์ทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 หน่วยเวกเตอร์โพลาไรเซชันของคลื่นของสายอากาศ

ถ้าหากว่าเกิดการโพลาไรซ์ที่สมพงษ์กันระหว่างคลื่นที่ส่งมาและคลื่นที่รับได้ทีสายอากาศนั้นค่า PLF จะมีค่าเป็นหนึ่งและสายอากาศจะรับกำลังงานได้มากที่สุด

บทที่ 3

สายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก

การวิเคราะห์หาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอกแบ่งได้เป็นขั้นตอนดังนี้

3.1 พิกัดทรงกระบอกและสมการคลื่นในพิกัดทรงกระบอก

พิกัดทรงกระบอกประกอบด้วย (ρ, ϕ, z) ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าทรงกระบอกวางในทิศทางตามแนวแกน z ดังนั้นสนามแม่เหล็กตามขวาง (TM) และสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE) จะพิจารณาเทียบกับทิศทางในแกน z



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องเปิดบนผิวตัวนำทรงกระบอก

การพิจารณาสถาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกภายนอกตัวนำทรงกระบอกตรงช่องเปิด (Aperture) ที่เกิดจากผลรวมของสนามแม่เหล็กตามขวาง (TM) และสนามไฟฟ้าตามขวาง (TE) ที่ระยะ $(\rho = a)$ จะสามารถพิจารณาได้จากการใช้ศักย์เวกเตอร์ (Vector Potential) (A_z, F_z)

โหมดคลื่นในพิกัดทรงกระบอกทิศทางตามแนวแกน z

โหมดคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (Transverse Magnetic Mode:TM)

$$\vec{A} = A_z \vec{a}_z \quad \vec{F} = 0 \quad (3.1)$$

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) \quad (3.2)$$

$$\vec{E} = -j\omega A_z \vec{a}_z + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left[\frac{\partial^2 A_z}{\partial \rho \partial z} \vec{a}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \phi \partial z} \vec{a}_\phi + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \vec{a}_z \right] \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจะได้

$$E_\rho = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial\rho\partial z}$$

$$E_\phi = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon\rho} \frac{\partial^2 A_z}{\partial\phi\partial z}$$

$$E_z = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) A_z \quad (3.4)$$

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

$$\bar{H} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial\phi} \bar{a}_\rho - \frac{\partial A_z}{\partial\rho} \bar{a}_\phi \right] \quad (3.6)$$

ดังนั้นจะได้

$$H_\rho = -\frac{1}{\mu\rho} \frac{\partial A_z}{\partial\phi}$$

$$H_\phi = \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A_z}{\partial\rho}$$

$$H_z = 0$$

$$(3.7)$$

โหมดคลื่นไฟฟ้าตามขวาง (Transverse Electric Mode: TE)

$$\bar{A} = 0 \quad \bar{F} = F_z \bar{a}_z \quad (3.8)$$

$$\bar{E} = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F} \quad (3.9)$$

$$\bar{E} = -\frac{1}{\epsilon} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial F_z}{\partial\phi} \bar{a}_\rho - \frac{\partial F_z}{\partial\rho} \bar{a}_\phi \right] \quad (3.10)$$

ดังนั้นจะได้

$$E_\rho = -\frac{1}{\epsilon\rho} \frac{\partial F_z}{\partial\phi}$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial\rho}$$

$$E_z = 0$$

$$(3.11)$$

$$\bar{H} = -j\omega\bar{F} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \bar{F}) \quad (3.12)$$

$$\bar{H} = -j\omega F_z \bar{a}_z + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left[\frac{\partial^2 F_z}{\partial\rho\partial z} \bar{a}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 F_z}{\partial\phi\partial z} \bar{a}_\phi + \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2} \bar{a}_z \right] \quad (3.13)$$

ดังนั้นจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_\rho = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 F_z}{\partial\rho\partial z}$$

$$H_\phi = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon\rho} \frac{\partial^2 F_z}{\partial\phi\partial z} \tag{3.14}$$

$$H_z = \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) F_z$$

เมื่อ $A_z = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\infty}^{\infty} e^{jnh} \int_{-\infty}^{\infty} f_n(h) H_n^{(2)}(\rho\sqrt{k^2 - h^2}) e^{jhz} dh$ (3.15)

$$F_z = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\infty}^{\infty} e^{jnh} \int_{-\infty}^{\infty} g_n(h) H_n^{(2)}(\rho\sqrt{k^2 - h^2}) e^{jhz} dh \tag{3.16}$$

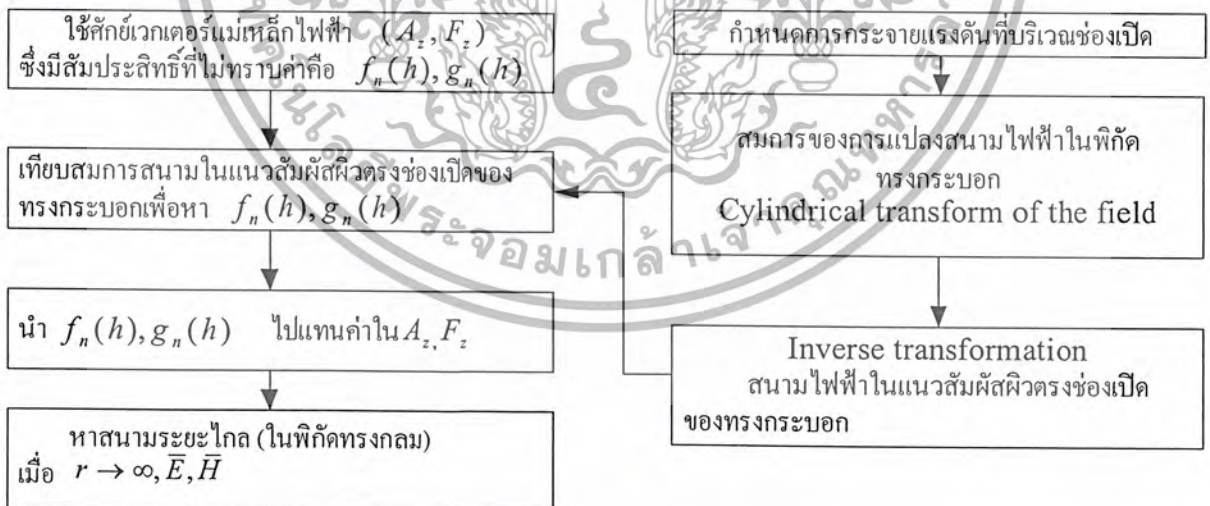
โดยที่ A_z และ F_z ได้จากสมการ Helmholtz ในส่วนของสมการคลื่นในพิกัดทรงกระบอกเมื่อ $H_n^{(2)}(k_\rho\rho)$ คือฟังก์ชันแอสแตอริคชนิดที่ 2

$$k^2 = k_\rho^2 + h^2$$

$$k_\rho^2 = k_x^2 + k_y^2$$

โดยที่ $h^2 = k_z^2$

ในการวิเคราะห์เพื่อหาสนามไฟฟ้าที่กระจายออกภายนอกช่องเปิด (Aperture) ของตัวนำทรงกระบอก ($\rho = a$) จะอาศัยศักย์เวกเตอร์ซึ่งกระบวนการในการวิเคราะห์นี้แสดงได้ตามบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 3.2 ดังนี้



รูปที่ 3.2 บล็อกไดอะแกรมในการวิเคราะห์เพื่อหาสนามไฟฟ้าที่กระจายออกภายนอกช่องเปิด

จากรูปที่ 3.1 ในการวิเคราะห์เพื่อหาสนามที่แพร่กระจายออกภายนอกของตัวนำทรงกระบอกโดยใช้เงื่อนไขสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสผิวตรงช่องเปิดบนผิวตัวนำทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำดับแรกในการหาค่าสนามจะอาศัยสมการของการแปลงสนามไฟฟ้าในพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical transform) ซึ่งมีนิพจน์ดังต่อไปนี้

$$\tilde{E}_z(n, h) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-\infty}^{\infty} dz E_z(a, \phi, z) e^{-jn\phi} e^{-jhz} \quad (3.17)$$

$$\tilde{E}_\phi(n, h) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi \int_{-\infty}^{\infty} dz E_\phi(a, \phi, z) e^{-jn\phi} e^{-jhz} \quad (3.18)$$

ดังนั้นเมื่อรวมองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าโดยการแปลงอินเวิร์สในสมการที่ (3.17) และสมการที่ (3.18) สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสผิวของทรงกระบอกจะเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$E_z(a, \phi, z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\phi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_z(n, h) e^{jhz} dh \quad (3.19)$$

$$E_\phi(a, \phi, z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\phi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}_\phi(n, h) e^{jhz} dh \quad (3.20)$$

สนามที่แพร่กระจายออกภายนอกทรงกระบอกสามารถแสดงได้ในรูปผลรวมของโหมดคลื่นไฟฟ้าตามขวางและคลื่นแม่เหล็กตามขวาง (TE และ TM โหมด) ดังนี้

$$\vec{E} = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{F} - j\omega \vec{A} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \nabla \cdot \vec{A} \quad (3.21ก)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - j\omega \vec{F} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \nabla \cdot \vec{F} \quad (3.21ข)$$

โดยที่ $\vec{A} = A_z \hat{a}_z$ และ $\vec{F} = F_z \hat{a}_z$ เมื่อสมการของฟังก์ชันคลื่นคือสมการที่ (3.15) และ (3.16) แทนสมการของฟังก์ชันคลื่นลงในสมการ (3.21) จะได้ผลรวมของสนามไฟฟ้าในโหมดรวมดังนี้

$$E_z(\rho, \phi, z) = \frac{1}{2\pi j\omega\mu\epsilon} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\phi} \int_{-\infty}^{\infty} (k^2 - h^2) f_n(h) H_n^{(2)}(\rho\sqrt{k^2 - h^2}) e^{jhz} dh \quad (3.22)$$

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\phi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[-\frac{nh}{j\omega\mu\epsilon\rho} f_n(h) H_n^{(2)}(\rho\sqrt{k^2 - h^2}) + \frac{1}{\epsilon} g_n(h) \sqrt{k^2 - h^2} H_n^{(2)'}(\rho\sqrt{k^2 - h^2}) \right] e^{jhz} dh \quad (3.23)$$

จะพบว่าจะมีสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าคือ $f_n(h)$ และ $g_n(h)$ เราจะทำการหา $f_n(h)$ และ $g_n(h)$ โดยนำสมการ (3.22) เทียบกับสมการ (3.19) และสมการ (3.23) เทียบกับสมการ (3.20) โดยกำหนดให้ $\rho = a$ ซึ่งจะทำให้ได้ค่า $f_n(h)$ และ $g_n(h)$ ดังนี้

$$f_n(h) = \frac{j\omega\mu\epsilon \tilde{E}_z(n, h)}{(k^2 - h^2) H_n^{(2)}(a\sqrt{k^2 - h^2})} \quad (3.24)$$

$$g_n(h) = \frac{\epsilon}{\sqrt{(k^2 - h^2) H_n^{(2)'}(a\sqrt{k^2 - h^2})}} \left[\tilde{E}_\phi(n, h) + \frac{nh}{a(k^2 - h^2)} \tilde{E}_z(n, h) \right] \quad (3.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสัมประสิทธิ์ที่ได้นี้กลับไปแทนในสมการที่ (3.15) และ (3.16) เพื่อทำการหาสนามระยะไกล (Far Field)

สนามระยะไกลสามารถหาได้โดยใช้นิพจน์เชิงเส้นกำกับ (Asymptotic Expression) ซึ่งเป็นกรประมาณค่าฟังก์ชันเมื่อ $r \rightarrow \infty$ และเมื่อ $h = -k \cos \theta$ จะได้

$$A_z \approx \frac{e^{-jkr}}{\pi r} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\phi} j^{n+1} f_n(-k \cos \theta) \quad (3.26)$$

$$F_z \approx \frac{e^{-jkr}}{\pi r} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\phi} j^{n+1} g_n(-k \cos \theta) \quad (3.27)$$

ทำการเปลี่ยนเวกเตอร์ในพิกัดทรงกระบอกให้เป็นพิกัดทรงกลมเพื่อทำการประมาณการกระจายสนามระยะไกล จะได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} A_r \\ A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \\ \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}$$

ในกรณีนี้ $A_x = A_y = 0$ เพราะฉะนั้นจะได้

$$A_r = A_z \cos \theta$$

$$A_\theta = -A_z \sin \theta$$

$$A_\phi = 0$$

(3.28)

$$\begin{bmatrix} F_r \\ F_\theta \\ F_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \\ \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}$$

ในกรณีนี้ $F_x = F_y = 0$ เพราะฉะนั้นจะได้

$$F_r = F_z \cos \theta$$

$$F_\theta = -F_z \sin \theta$$

$$F_\phi = 0$$

(3.29)

ดังนั้นจะได้เวกเตอร์ในพิกัดทรงกระบอกไปเป็นพิกัดทรงกลมดังนี้

$$\bar{A}(r, \theta, \phi) = \{A_z\} \cos \theta \hat{a}_r - \{A_z\} \sin \theta \hat{a}_\theta \quad (3.30ก)$$

$$\bar{F}(r, \theta, \phi) = \{F_z\} \cos \theta \hat{a}_r - \{F_z\} \sin \theta \hat{a}_\theta \quad (3.30ข)$$

จากการประมาณสนามระยะไกล (Far Fields)

$$E_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (3.31ก)$$

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx -j\omega [A_\theta + \eta F_\phi] \quad (3.31ข)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx -j\omega [A_\phi - \eta F_\theta] \quad (3.31ค)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \tag{3.31g}$$

$$H_\theta(r, \theta, \phi) \approx -\frac{1}{\eta} E_\phi(r, \theta, \phi) \tag{3.31h}$$

$$H_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{1}{\eta} E_\theta(r, \theta, \phi) \tag{3.31i}$$

เมื่อ η คือค่าอินทรีนสิกอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีค่าเป็น $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ และเท่ากับ 120π ในช่องว่างอิสระ จากศึกย์เวกเตอร์และการประมาณสนามระยะไกล (Far Field) จะได้สนามระยะไกลดังนี้

$$E_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \tag{3.32g}$$

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx -\frac{e^{-jkr}}{\pi r} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^{n+1} e^{jn\phi} \tilde{E}_z(n, -k \cos \theta)}{\sin \theta H_n^{(2)}(k a \sin \theta)} \tag{3.32h}$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{e^{-jkr}}{\pi r} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^n e^{jn\phi}}{H_n^{(2)}(k a \sin \theta)} \left(\tilde{E}_\phi(n, -k \cos \theta) - \frac{n \cot \theta}{k a \sin \theta} \tilde{E}_z(n, -k \cos \theta) \right) \tag{3.32i}$$

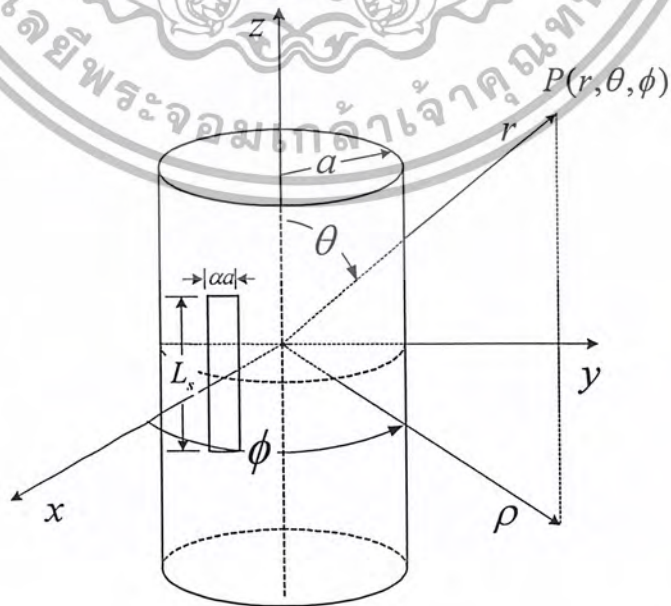
$$H_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \tag{3.32j}$$

$$H_\theta(r, \theta, \phi) \approx -\frac{1}{\eta} E_\phi(r, \theta, \phi) \tag{3.32k}$$

$$H_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{1}{\eta} E_\theta(r, \theta, \phi) \tag{3.32l}$$

3.2 สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก (Axial Slot)

สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกนี้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาช่องเปิดของสายอากาศมีความยาวของร่องเท่ากับ L_s ความกว้างของร่องเท่ากับ αa โดยที่รัศมีของทรงกระบอกมีขนาดเท่ากับ a ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกน z บนผิวตัวนำทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เผยแพร่เพื่อประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายแรงดันที่บริเวณปากช่อง(เมื่อความยาวของช่องต่อความกว้างของช่องมีค่ามากๆ หรือ $L_s \gg W_s$ โดยที่ $W_s = \alpha a$ และตำแหน่งกึ่งกลางของช่องอยู่ที่ $(\rho = a, \phi = 0^\circ, z = 0)$) สมมติเป็นการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันไซน์ดังนี้

$$E'_\perp = E_\phi(a, \phi, z) = \frac{V}{W_s} \cos\left(\frac{\pi z}{L_s}\right) \begin{cases} -\frac{L_s}{2} < z < \frac{L_s}{2} \\ -\frac{W_s}{2a} < \phi < \frac{W_s}{2a} \end{cases} \quad (3.33ก)$$

$$E'_\parallel = E_z(a, \phi, z) = 0 \quad (3.33ข)$$

จาก Cylindrical Transform จะได้

$$\tilde{E}_z(n, h) = 0 \quad (3.34)$$

$$\tilde{E}_\phi(n, h) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{W_s}{2a}}^{\frac{W_s}{2a}} d\phi \int_{-\frac{L_s}{2}}^{\frac{L_s}{2}} dz \left[\frac{V}{W_s} \cos\left(\frac{\pi z}{L_s}\right) \right] e^{-jn\phi} e^{-jh z} \quad (3.35)$$

$$\tilde{E}_\phi(n, h) = \frac{VL_s}{a(\pi^2 - (hL_s)^2)} \operatorname{sinc}\left(\frac{nW_s}{2a}\right) \cos\left(\frac{hL_s}{2}\right) \quad (3.36)$$

เมื่อ W_s มีค่าน้อยมากๆ ดังนี้

$$\lim_{W_s \rightarrow 0} \operatorname{sinc}\left(\frac{nW_s}{2a}\right) = 1 \quad (3.37)$$

ดังนั้น

$$\tilde{E}_\phi(n, h) = \frac{VL_s \cos(hL_s/2)}{a \pi^2 - (L_s h)^2} \quad (3.38)$$

นำสมการที่ (3.34) และ (3.38) ไปแทนในสมการ (3.32) จะได้สนามระยะไกลดังนี้

$$E_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (3.39ก)$$

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (3.39ข)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{VL_s}{\pi^3 ar} e^{-jkr} \left[\frac{\cos\left(\frac{kL_s}{2} \cos \theta\right)}{1 - \left(\frac{kL_s}{\pi} \cos \theta\right)^2} \right] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^n e^{jn\phi}}{H_n^{(2)'}(ka \sin \theta)} \quad (3.39ค)$$

$$H_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (3.39ง)$$

$$H_\theta(r, \theta, \phi) \approx -\frac{VL_s}{\eta \pi^3 ar} e^{-jkr} \left[\frac{\cos\left(\frac{kL_s}{2} \cos \theta\right)}{1 - \left(\frac{kL_s}{\pi} \cos \theta\right)^2} \right] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^n e^{jn\phi}}{H_n^{(2)'}(ka \sin \theta)} \quad (3.39จ)$$

$$H_\phi(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (3.39ฉ)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันแฮงเกิล (Hankel Function)

$$H_n^{(2)'}(x) = (-1)^n H_n^{(2)'}(x) \quad (3.40)$$

และเมื่อขนาดของร่องมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($L_s = 0.5\lambda$) สนามระยะไกลจะสามารถประมาณได้เป็น

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{V\lambda}{2\pi^3 ar} e^{-jkr} \left[\frac{\cos(0.5\pi \cos \theta)}{(\sin \theta)^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{c_n j^n \cos(n\phi)}{H_n^{(2)'}(ka \sin \theta)} \right] \quad (3.41ก)$$

$$H_\theta(r, \theta, \phi) \approx -\frac{V\lambda}{2\eta\pi^3 ar} e^{-jkr} \left[\frac{\cos(0.5\pi \cos \theta)}{(\sin \theta)^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{c_n j^n \cos(n\phi)}{H_n^{(2)'}(ka \sin \theta)} \right] \quad (3.41ข)$$

โดยที่ $c_n = \begin{cases} 1, n=0 \\ 2, n \neq 0 \end{cases}$

3.3 สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก (Circumferential Slot)

สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกนี้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาช่องเปิดของสายอากาศมีความยาวของร่องเท่ากับ L_s ความกว้างของร่องเท่ากับ W_s โดยที่รัศมีของทรงกระบอกมีขนาดเท่ากับ a ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก

การกระจายแรงดันที่บริเวณปากร่อง(เมื่อความยาวของร่องต่อความกว้างของร่องมีค่ามาก ๆ หรือ $L_s \gg W_s$ โดยที่ $L_s = \alpha a$ และตำแหน่งกึ่งกลางของร่องอยู่ที่ $(a, \phi = 0, z = 0)$) สมมติเป็นการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันไซน์ดังนี้

$$E'_1 = E_z(a, \phi, z) = \frac{V}{W_s} \cos\left(\frac{\alpha\pi\phi}{L_s}\right) \begin{cases} -\frac{W_s}{2} \langle z \rangle \frac{W_s}{2} \\ -\frac{L_s}{2a} \langle \phi \rangle \frac{L_s}{2a} \end{cases} \quad (3.42ก)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\parallel}' = E(a, \phi, z) = 0 \quad (3.42\text{ข})$$

จาก Cylindrical Transform จะได้

$$\tilde{E}_z(n, h) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{L_s}{2a}}^{\frac{L_s}{2a}} d\phi \int_{-\frac{W_s}{2}}^{\frac{W_s}{2}} dz \left[\frac{V}{W_s} \cos\left(\frac{a\pi\phi}{L_s}\right) \right] e^{-jn\phi} e^{-jhz} \quad (3.43)$$

$$\tilde{E}_z(n, h) = \frac{VL_s}{a \left(\pi^2 - \left(\frac{nL_s}{a} \right)^2 \right)} \cos\left(\frac{nL_s}{2a}\right) \text{sinc}\left(\frac{hW_s}{2}\right) \quad (3.44)$$

เมื่อ W_s มีค่าน้อยมาก ๆ ดังนั้น

$$\lim_{W_s \rightarrow 0} \text{sinc}\left(\frac{hW_s}{2}\right) = 1 \quad (3.45)$$

ดังนั้น

$$\tilde{E}_z(n, h) = \frac{VL_s}{a \left(\pi^2 - \left(\frac{nL_s}{a} \right)^2 \right)} \cos\left(\frac{nL_s}{2a}\right) \quad (3.46)$$

$$\tilde{E}_\phi(n, h) = 0 \quad (3.47)$$

นำสมการที่ (3.46) และ (3.47) ไปแทนในสมการ (3.32) จะได้สนามระยะไกลดังนี้

$$E_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (3.48\text{ก})$$

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx \frac{VL_s e^{-jkr}}{a\pi r \sin\theta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^{n+1} e^{jn\phi} \cos\left(\frac{nL_s}{2a}\right)}{\left(\pi^2 - \left(\frac{nL_s}{a} \right)^2 \right)} H_n^{(2)}(ka \sin\theta) \quad (3.48\text{ข})$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{VL_s e^{-jkr} \cot\theta}{\pi r k a^2 \sin\theta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n j^n e^{jn\phi} \cos\left(\frac{nL_s}{2a}\right)}{\left(\pi^2 - \left(\frac{nL_s}{a} \right)^2 \right)} H_n^{(2)'}(ka \sin\theta) \quad (3.48\text{ค})$$

$$H_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (3.48\text{ง})$$

$$H_\theta(r, \theta, \phi) \approx \frac{VL_s e^{-jkr} \cot\theta}{\eta\pi r k a^2 \sin\theta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n j^n e^{jn\phi} \cos\left(\frac{nL_s}{2a}\right)}{\left(\pi^2 - \left(\frac{nL_s}{a} \right)^2 \right)} H_n^{(2)'}(ka \sin\theta) \quad (3.48\text{จ})$$

$$H_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{VL_s e^{-jkr}}{\eta a \pi r \sin\theta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{j^{n+1} e^{jn\phi} \cos\left(\frac{nL_s}{2a}\right)}{\left(\pi^2 - \left(\frac{nL_s}{a} \right)^2 \right)} H_n^{(2)}(ka \sin\theta) \quad (3.48\text{ฉ})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันแฮงเกิล (Hankel Function) ในสมการ (3.40) และเมื่อขนาดของร่องมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($L_s = 0.5\lambda$) สภาวะระยะไกลจะสามารถประมาณได้เป็น

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx -\frac{0.5\lambda V e^{-jkr}}{\alpha \pi r \sin \theta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n j^{n+1} e^{jn\phi} \cos(n\phi) \cos\left(\frac{0.25\lambda n}{a}\right)}{\left(\pi^2 - \left(\frac{0.5\lambda n}{a}\right)^2\right) H_n^{(2)}(ka \sin \theta)} \quad (3.49ก)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx -\frac{0.25\lambda^2 V e^{-jkr}}{ra^2 \pi^2} \frac{\cot \theta}{\sin \theta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_n n j^{n+1} \sin(n\phi) \cos\left(\frac{0.25\lambda n}{a}\right)}{\left(\pi^2 - \left(\frac{0.5\lambda n}{a}\right)^2\right) H_n^{(2)'}(ka \sin \theta)} \quad (3.49ข)$$

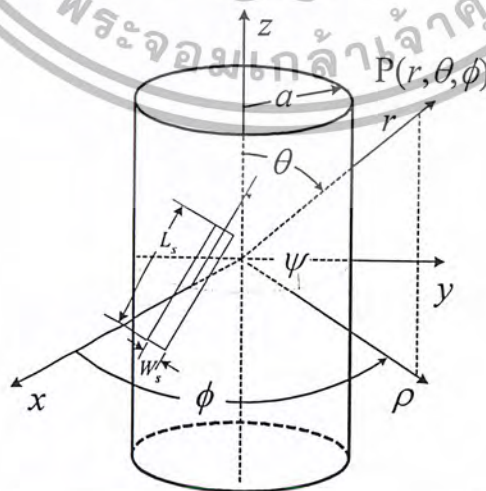
$$H_\theta(r, \theta, \phi) \approx \frac{0.25\lambda^2 V e^{-jkr}}{\eta ra^2 \pi^2} \frac{\cot \theta}{\sin \theta} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_n n j^{n+1} \sin(n\phi) \cos\left(\frac{0.25\lambda n}{a}\right)}{\left(\pi^2 - \left(\frac{0.5\lambda n}{a}\right)^2\right) H_n^{(2)'}(ka \sin \theta)} \quad (3.49ค)$$

$$H_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{0.5\lambda V e^{-jkr}}{\alpha \pi r \sin \theta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_n j^{n+1} e^{jn\phi} \cos(n\phi) \cos\left(\frac{0.25\lambda n}{a}\right)}{\left(\pi^2 - \left(\frac{0.5\lambda n}{a}\right)^2\right) H_n^{(2)}(ka \sin \theta)} \quad (3.49ง)$$

โดยที่ $c_n = \begin{cases} 1, n=0 \\ 2, n \neq 0 \end{cases}$

3.4 สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก (Incline Slot)

สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกนี้ในการวิเคราะห์จะพิจารณาช่องเปิดของสายอากาศมีความยาวของร่องเท่ากับ L_s ความกว้างของร่องเท่ากับ W_s โดยที่รัศมีของทรงกระบอกมีขนาดเท่ากับ a ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.5

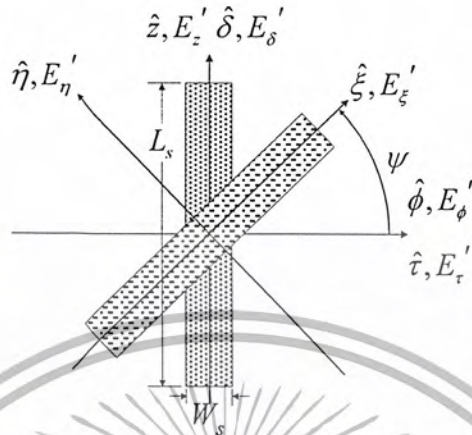


รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนที่เราจะทำการวิเคราะห์หาค่าสนามระยะไกลเราจะต้องทำการแปลงพิกัดของร่องเมื่อเราทำการวางร่องเปลี่ยนไปที่มุมต่าง ๆ

การแปลงพิกัดเมื่อทำการวางร่องเปลี่ยนไปที่มุมต่าง ๆ



(ก) การแปลงทิศทางกรวางของร่องระหว่างพิกัด $\{z, \phi\} \rightarrow \{\delta, \tau\} \rightarrow \{\xi, \eta\}$



(ข) การแปลงทิศทางกรวางร่องระหว่างพิกัด $\{z, \phi\} \rightarrow \{\delta, \tau\}$

รูปที่ 3.6 การทรานสฟอร์มแกนของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียง

จากสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกน $(a, \phi = 0^\circ, z = 0)$ จะได้ว่า

$$E_{\perp}' = E_{\phi}(a, \phi, z) = \frac{V}{W_s} \cos\left(\frac{\pi z}{L_s}\right) \begin{cases} -\frac{L_s}{2} < z < \frac{L_s}{2} \\ -\frac{W_s}{2a} < \phi < \frac{W_s}{2a} \end{cases} \quad (3.50ก)$$

$$E_{\parallel}' = E_z(a, \phi, z) = 0 \quad (3.50ข)$$

$$\hat{z} \rightarrow a\hat{\delta}, \hat{\phi} \rightarrow \hat{\tau}, \quad (3.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E'_\perp = E_r(a, \tau, \delta) = \frac{V}{W_s} \cos\left(\frac{\pi a \delta}{L_s}\right) \begin{cases} -\frac{L_s}{2a} \langle \delta \rangle \langle \frac{L_s}{2a} \\ -\frac{W_s}{2a} \langle \tau \rangle \langle \frac{W_s}{2a} \end{cases} \quad (3.52ก)$$

$$E'_\parallel = E_s(a, \tau, \delta) = 0 \quad (3.52ข)$$

จาก Cylindrical Transform จะได้

$$\tilde{E}_r(n, h) = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{W_s}{2a}}^{\frac{W_s}{2a}} d\tau \int_{\frac{L_s}{2a}}^{\frac{L_s}{2a}} d(a\delta) E_r(a, \tau, \delta) e^{-jn\tau} e^{-jha\delta} \quad (3.52ก)$$

$$\tilde{E}_s(n, h) = 0 \quad (3.52ข)$$



รูปที่ 3.7 การแปลงทิศทางการวางของร่องระหว่างพิกัด $\{\delta, \tau\} \rightarrow \{\xi, \eta\}$

$$\hat{\delta} = \hat{\eta} \cos \psi + \hat{\xi} \sin \psi \quad (3.53ก)$$

$$\hat{\tau} = -\hat{\eta} \sin \psi + \hat{\xi} \cos \psi \quad (3.53ข)$$

$$E'_\perp = E_\eta(a, \eta, \xi) = \frac{V}{W_s} \cos\left(\frac{\pi a \xi}{L_s}\right) \begin{cases} -\frac{L_s}{2a} \langle \xi \rangle \langle \frac{L_s}{2a} \\ -\frac{W_s}{2a} \langle \eta \rangle \langle \frac{W_s}{2a} \end{cases} \quad (3.54ก)$$

$$E'_\parallel = E_\xi(a, \eta, \xi) = 0 \quad (3.54ข)$$

$$\begin{aligned} e^{-jha\delta} e^{-jn\tau} &= e^{-jha(\eta \cos \psi + \xi \sin \psi)} e^{-jn(-\eta \sin \psi + \xi \cos \psi)} \\ &= e^{-j(ha \sin \psi + n \cos \psi)\xi} e^{-j(ha \cos \psi - n \sin \psi)\eta} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

$$Hn_1 = (h \sin \psi + n \cos \psi)$$

$$Hn_2 = (h \cos \psi - n \sin \psi)$$

จะได้

$$\tilde{E}_z(n, h) = 0 \quad (3.55)$$

$$\tilde{E}_\eta(n, h) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{W_s}{2a}}^{\frac{W_s}{2a}} d\eta \int_{-\frac{L_s}{2a}}^{\frac{L_s}{2a}} d\xi [aE_\eta(a, \eta, \xi)] e^{-jHn_1\xi} e^{-jHn_2\eta} \quad (3.56)$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{W_s}{2a}}^{\frac{W_s}{2a}} d\eta \int_{-\frac{L_s}{2a}}^{\frac{L_s}{2a}} d\xi \left[a \frac{V}{W_s} \cos\left(\frac{\pi a \xi}{L_s}\right) \right] e^{-jHn_1\xi} e^{-jHn_2\eta}$$

$$= \frac{Va}{2\pi W_s} \int_{-\frac{W_s}{2a}}^{\frac{W_s}{2a}} e^{-jHn_2\eta} d\eta \int_{-\frac{L_s}{2a}}^{\frac{L_s}{2a}} d\xi \left[\cos\left(\frac{\pi a \xi}{L_s}\right) \right] e^{-jHn_1\xi}$$

ทำการแยกอินทิกรัลออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1

$$W_n = \frac{Va}{2\pi W_s} \int_{-\frac{W_s}{2a}}^{\frac{W_s}{2a}} e^{-jHn_2\eta} d\eta \quad (3.57)$$

$$W_n = \frac{V}{2\pi} \frac{\sin\left(Hn_2 \frac{W_s}{2a}\right)}{\left(Hn_2 \frac{W_s}{2a}\right)} \quad (3.58)$$

เมื่อ W_s มีค่าน้อยมาก ๆ ดังนั้น

$$\lim_{W_s \rightarrow 0} \text{sinc}\left(Hn_2 \frac{W_s}{2}\right) = 1 \quad (3.59)$$

ดังนั้น

$$W_n = \frac{V}{2\pi} \quad (3.60)$$

ส่วนที่ 2

$$L_n = \int_{-\frac{L_s}{2a}}^{\frac{L_s}{2a}} d\xi \left[\cos\left(\frac{\pi a \xi}{L_s}\right) \right] e^{-jHn_1\xi} \quad (3.61)$$

$$L_n = \frac{2\pi a}{L_s \left[\left(\frac{\pi a}{L_s}\right)^2 - Hn_1^2 \right]} \cos\left(Hn_1 \frac{L_s}{2a}\right) \quad (3.62)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_n W_n = \frac{aV}{L_s \left[\left(\frac{\pi a}{L_s} \right)^2 - Hn_1^2 \right]} \cos \left(Hn_1 \frac{L_s}{2a} \right) \quad (3.63)$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \tilde{E}_\phi(n, h) &= -\tilde{E}_\eta(n, h) \sin \psi + \tilde{E}_\xi(n, h) \cos \psi \\ &= -\frac{aV}{L_s \left[\left(\frac{\pi a}{L_s} \right)^2 - Hn_1^2 \right]} \cos \left(Hn_1 \frac{L_s}{2a} \right) \sin \psi \end{aligned} \quad (3.64)$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}_z(n, h) &= \tilde{E}_\eta(n, h) \cos \psi + \tilde{E}_\xi(n, h) \sin \psi \\ &= \frac{aV}{L_s \left[\left(\frac{\pi a}{L_s} \right)^2 - Hn_1^2 \right]} \cos \left(Hn_1 \frac{L_s}{2a} \right) \cos \psi \end{aligned} \quad (3.65)$$

$$h = -k \cos \theta$$

นำสมการที่ (3.64) และ (3.65) ไปแทนในสมการ (3.32) จะได้สนามระยะไกลดังนี้

$$E_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (3.66ก)$$

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx \frac{aV e^{-jkr} \cos \psi}{L_s \pi r \sin \theta} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{j^{n+1} e^{jn\phi} \cos \left(\frac{Hn_1 L_s}{2a} \right)}{\left(\left(\frac{\pi a}{L_s} \right)^2 - Hn_1^2 \right) H_n^{(2)}(k a \sin \theta)} \quad (3.66ข)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{aV e^{-jkr}}{\pi r L_s} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{j^n e^{jn\phi} \cos \left(\frac{Hn_1 L_s}{2a} \right)}{\left(\left(\frac{\pi a}{L_s} \right)^2 - Hn_1^2 \right) H_n^{(2)'}(k a \sin \theta)} \left(-\sin \psi - \frac{n \cot \theta}{k a \sin \theta} \cos \psi \right) \quad (3.66ค)$$

$$H_r(r, \theta, \phi) \approx 0 \quad (3.66ง)$$

$$H_\theta(r, \theta, \phi) \approx \frac{aV e^{-jkr}}{\eta \pi r L_s} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{j^{n+1} e^{jn\phi} \cos \left(\frac{Hn_1 L_s}{2a} \right)}{\left(\left(\frac{\pi a}{L_s} \right)^2 - Hn_1^2 \right) H_n^{(2)'}(k a \sin \theta)} \left(-\sin \psi - \frac{n \cot \theta}{k a \sin \theta} \cos \psi \right) \quad (3.66ฉ)$$

$$H_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{aV e^{-jkr} \cos \psi}{\eta L_s \pi r \sin \theta} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{j^{n+1} e^{jn\phi} \cos \left(\frac{Hn_1 L_s}{2a} \right)}{\left(\left(\frac{\pi a}{L_s} \right)^2 - Hn_1^2 \right) H_n^{(2)}(k a \sin \theta)} \quad (3.66ช)$$

และเมื่อขนาดของร่องมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($L_s = 0.5\lambda$) สนามระยะไกลจะสามารถประมาณได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx -\frac{2aVe^{-jkr} \cos\psi}{\lambda\pi r \sin\theta} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{j^{n+1} e^{jn\phi} \cos\left(\frac{0.25\lambda Hn_1}{a}\right)}{\left(\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 - Hn_1^2\right) H_n^{(2)}(ka \sin\theta)} \quad (3.67ก)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{2aVe^{-jkr}}{\lambda\pi r} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{j^n e^{jn\phi} \cos\left(\frac{0.25\lambda Hn_1}{a}\right)}{\left(\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 - Hn_1^2\right) H_n^{(2)'}(ka \sin\theta)} \left(-\sin\psi - \frac{n \cot\theta}{ka \sin\theta} \cos\psi\right) \quad (3.67ข)$$

$$H_\theta(r, \theta, \phi) \approx -\frac{2aVe^{-jkr}}{\eta\lambda\pi r} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{j^n e^{jn\phi} \cos\left(\frac{0.25\lambda Hn_1}{a}\right)}{\left(\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 - Hn_1^2\right) H_n^{(2)'}(ka \sin\theta)} \left(-\sin\psi - \frac{n \cot\theta}{ka \sin\theta} \cos\psi\right) \quad (3.67ค)$$

$$H_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{2aVe^{-jkr} \cos\psi}{\eta\lambda\pi r \sin\theta} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} \frac{j^{n+1} e^{jn\phi} \cos\left(\frac{0.25\lambda Hn_1}{a}\right)}{\left(\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 - Hn_1^2\right) H_n^{(2)}(ka \sin\theta)} \quad (3.67ง)$$

ซึ่งเราจะนำสมการที่ (3.41ก) ไปใช้ในการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบ ร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก สมการที่ (3.49ก) และ สมการที่ (3.49ข) ไปใช้ในการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำ ทรงกระบอก และสมการที่ (3.67ก) และ (3.67ข) ไปใช้ในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก

บทที่ 4

ผลการคำนวณเชิงเลข

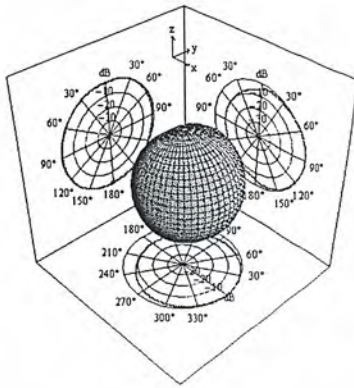
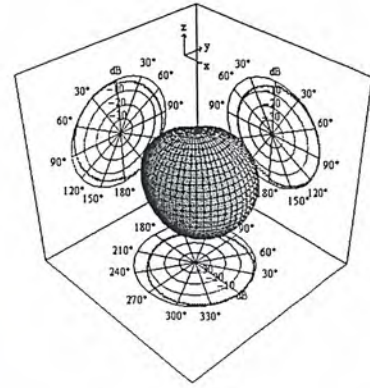
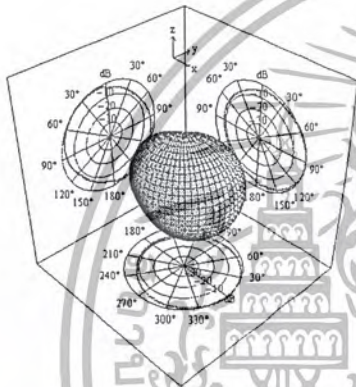
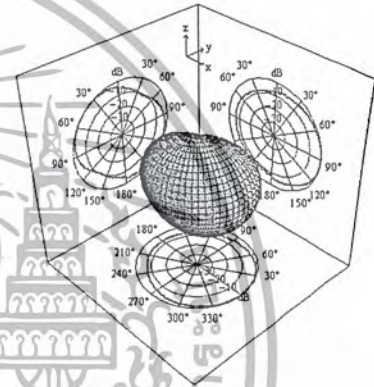
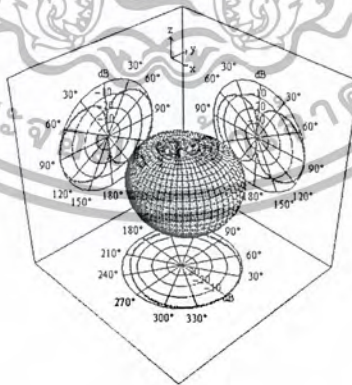
การวิเคราะห์และคำนวณสายอากาศจะพิจารณาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern), ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beam Width), อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง (Front to Back) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) แต่เนื่องจากว่าการวิเคราะห์มีความยุ่งยากและซับซ้อน ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการคำนวณ ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ได้แก่ Mathcad, MATLAB และ Mathematica เป็นหลักในการคำนวณ โดยการคำนวณจะใช้สมการการแพร่กระจายสนามระยะไกล

ผลของการวิเคราะห์เชิงเลขจะแสดงคุณลักษณะต่าง ๆ ของการแพร่กระจายคลื่นตามที่ได้กล่าวข้างต้น จะกำหนดให้ความกว้างของร่องของตัวนำทรงกระบอกนั้นมีค่าเล็กมาก ๆ เมื่อเทียบกับความยาวของร่อง (ความยาวของร่องเท่ากับ 0.5λ) โดยตัวนำทรงกระบอกสมมติให้วางตามแนวแกน z และยังไม่พิจารณาความยาวของทรงกระบอก (ความยาวของทรงกระบอกยาวอนันต์)

4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก

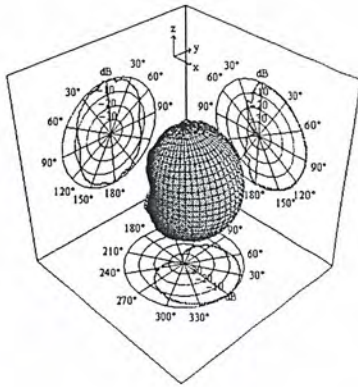
ในการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อให้สามารถพิจารณาเห็นถึงลักษณะการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy , xz และระนาบ yz ได้อย่างชัดเจน และจะแสดงในรูปแบบ 2 มิติ ในระนาบ xy และ xz เพราะในทรงกระบอกที่มีรัศมีมาก ๆ ทำให้ไม่สามารถที่จะใช้โปรแกรม 3 มิติวิเคราะห์ได้เนื่องจากความสามารถของคอมพิวเตอร์ไม่เพียงพอ สำหรับสิ่งที่ต้องพิจารณาคือรัศมีของทรงกระบอก ในการพิจารณารัศมีของตัวนำทรงกระบอกนั้นจะพิจารณาเทียบกับความยาวคลื่น ซึ่งจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของรัศมีประสิทธิผล (Efficiency Radius) (ka) โดยที่ $k = 2\pi / \lambda$ แล้วทำการเปลี่ยนค่า ka ไปในการคำนวณจะให้ค่า ka มีค่าเท่ากับ 0.5, 1, 5, 10, 15, 20, 30 และ infinity ตามลำดับ และมุมการเอียงของร่องที่มุม 0, 30, 45, 60 และ 90 องศา ซึ่งจะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งจะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามรูปที่ 4.1 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

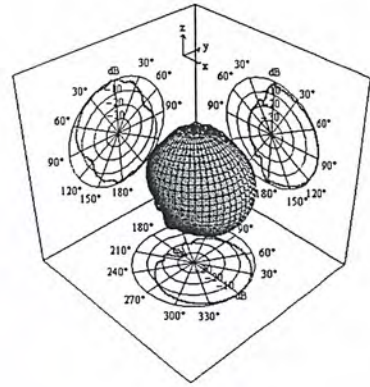
ก) $\psi = 0^\circ$ ข) $\psi = 30^\circ$ ค) $\psi = 45^\circ$ ง) $\psi = 60^\circ$ จ) $\psi = 90^\circ$

รูปที่ 4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่มีรัศมีเท่ากับ 0.1λ

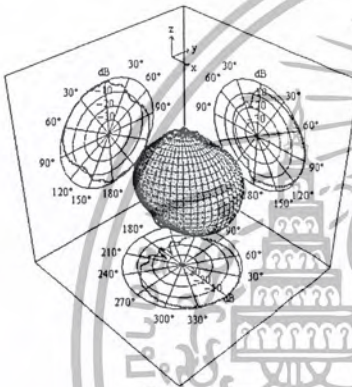
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



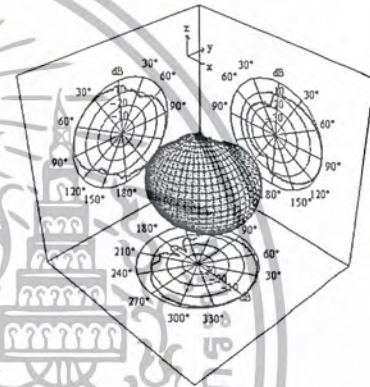
ก) $\psi = 0^\circ$



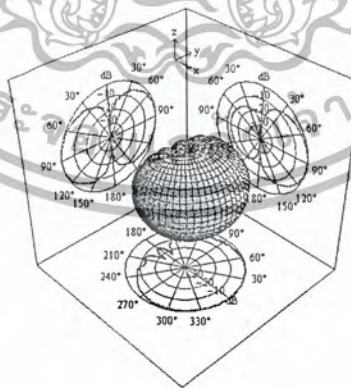
ข) $\psi = 30^\circ$



ค) $\psi = 45^\circ$



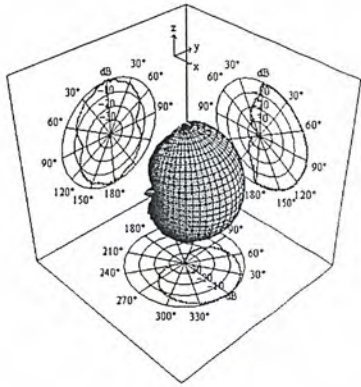
ง) $\psi = 60^\circ$



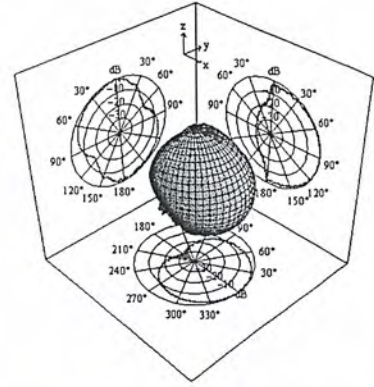
จ) $\psi = 90^\circ$

รูปที่ 4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่มีรัศมีเท่ากับ 1λ

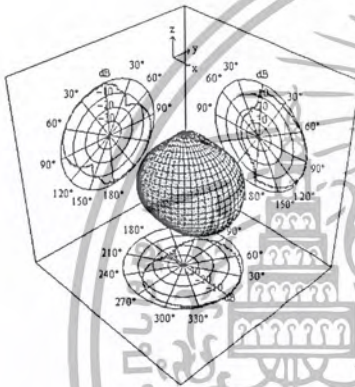
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



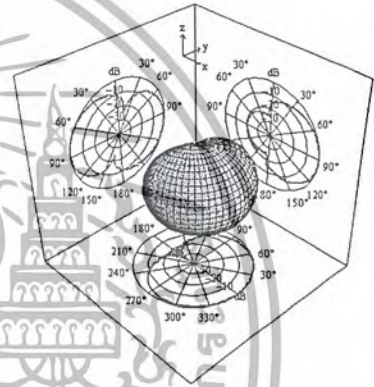
$$\text{ก) } \psi = 0^\circ$$



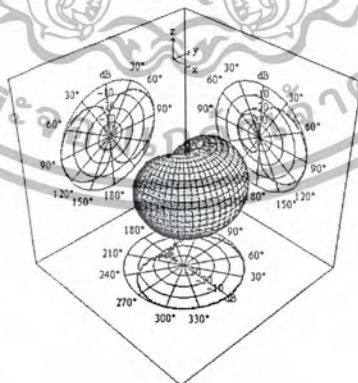
$$\text{ข) } \psi = 30^\circ$$



$$\text{ค) } \psi = 45^\circ$$



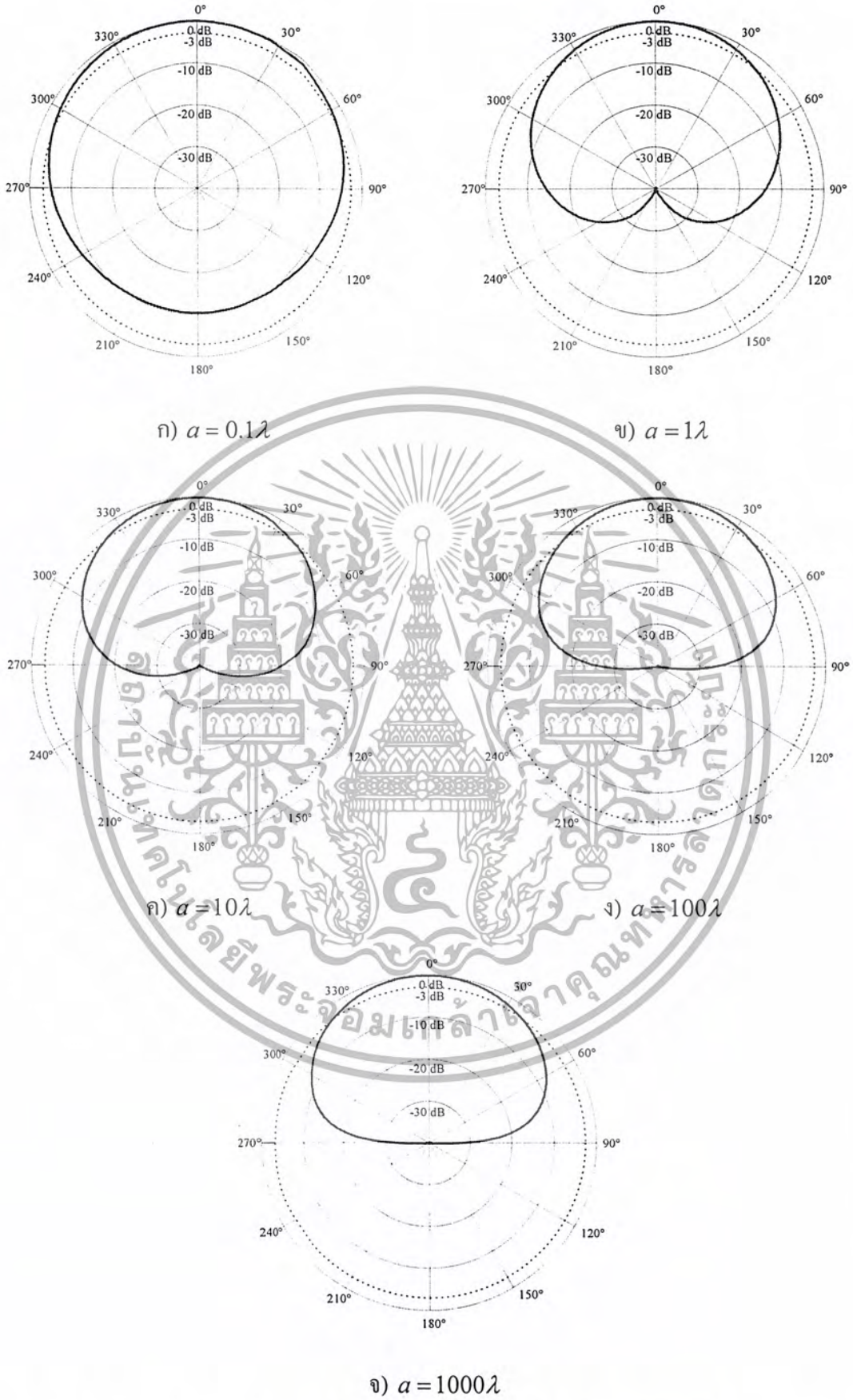
$$\text{ง) } \psi = 60^\circ$$



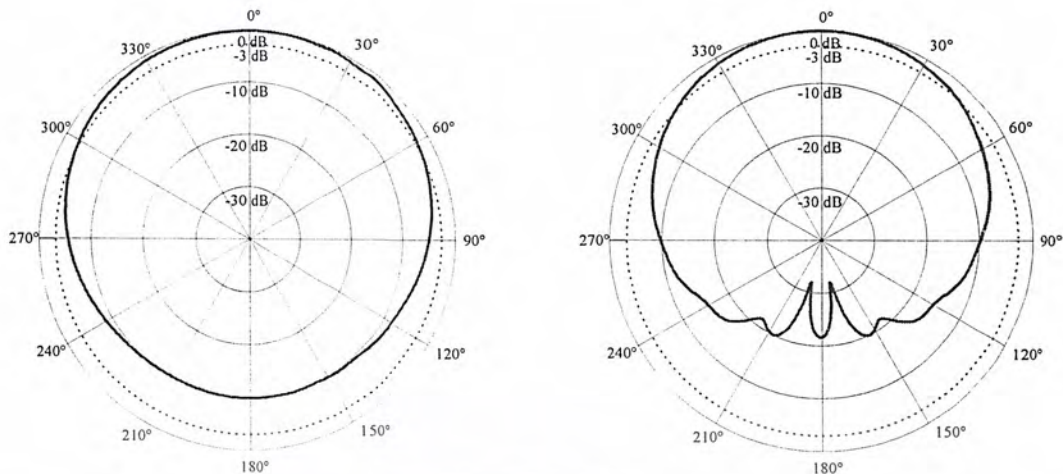
$$\text{จ) } \psi = 90^\circ$$

รูปที่ 4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่มีรัศมีเท่ากับ 3λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

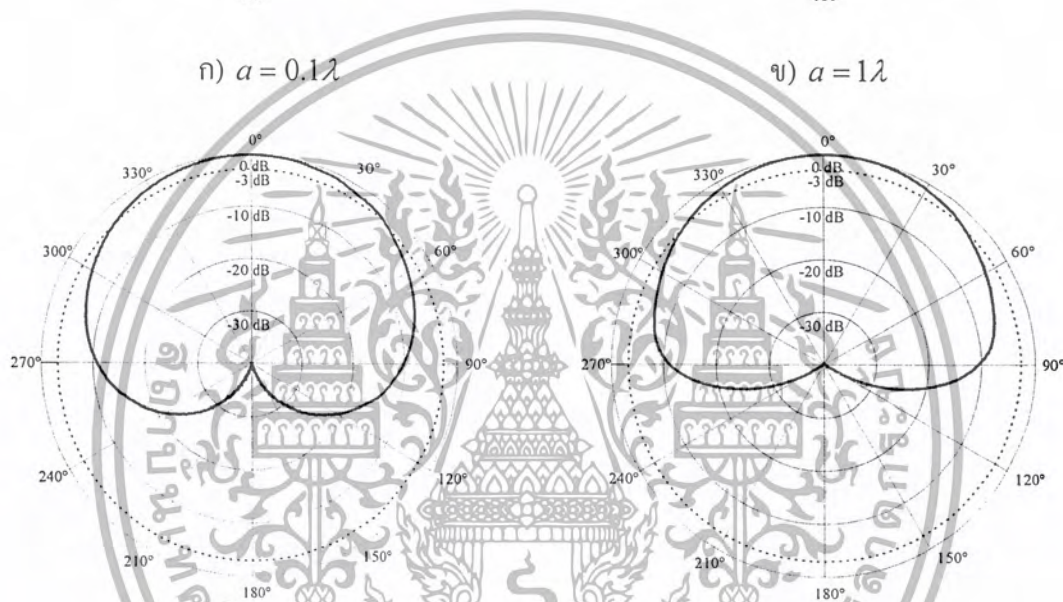


รูปที่ 4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xy มีมุม $\psi = 0^\circ$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



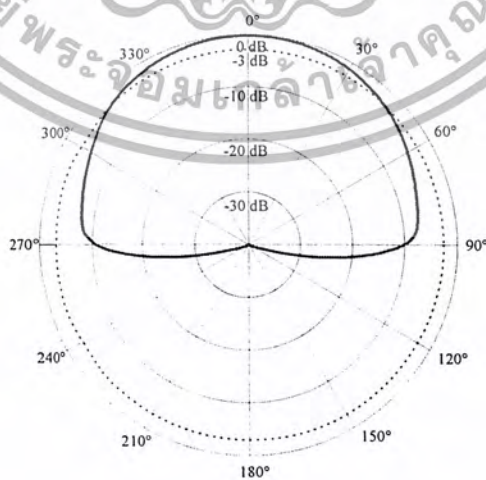
ก) $a = 0.1\lambda$

ข) $a = 1\lambda$



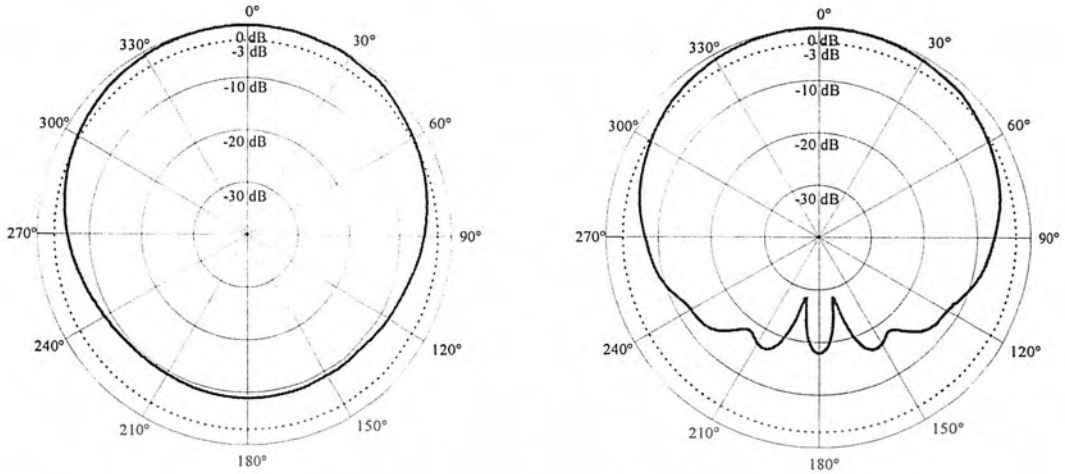
ค) $a = 10\lambda$

ง) $a = 100\lambda$



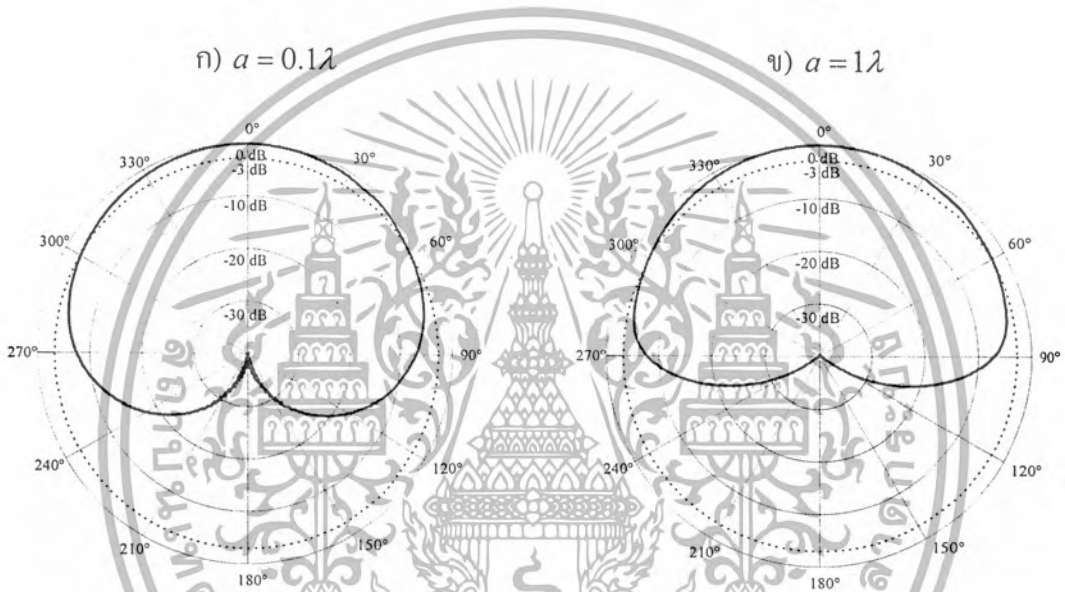
จ) $a = 1000\lambda$

รูปที่ 4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xy มีมุม $\psi = 30^\circ$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



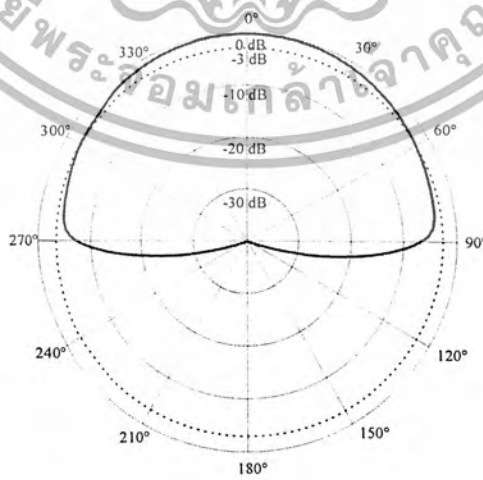
ก) $a = 0.1\lambda$

ข) $a = 1\lambda$



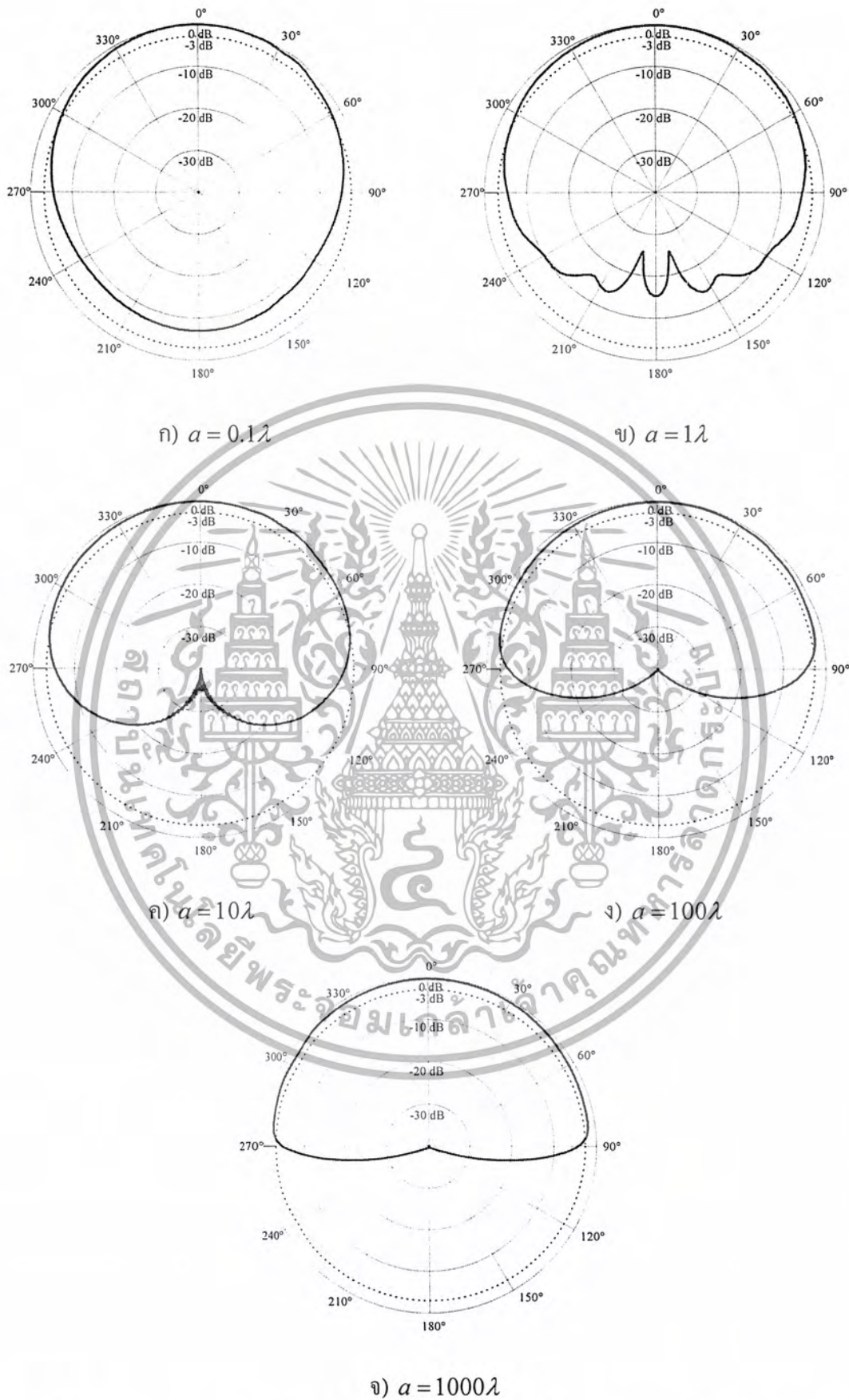
ค) $a = 10\lambda$

ง) $a = 100\lambda$

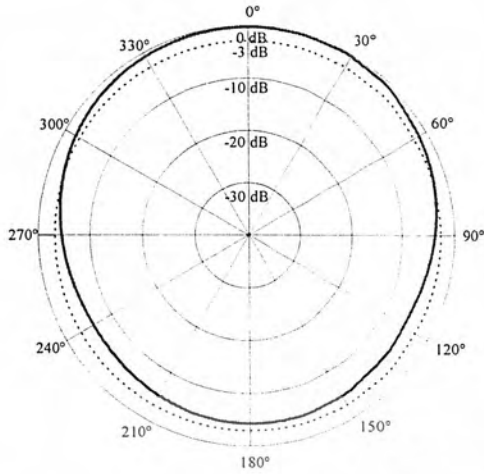


จ) $a = 1000\lambda$

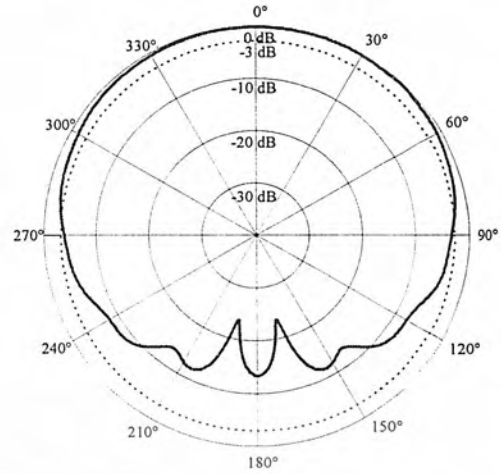
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xy มีมุม $\psi = 45^\circ$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



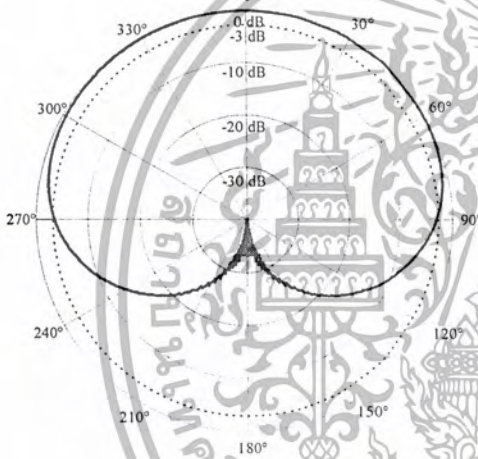
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xy มีมุม $\psi = 60^\circ$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



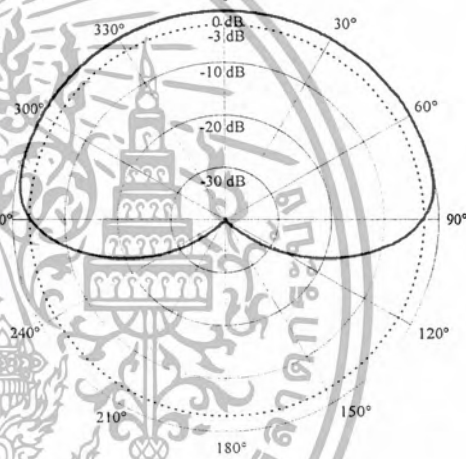
ก) $a = 0.1\lambda$



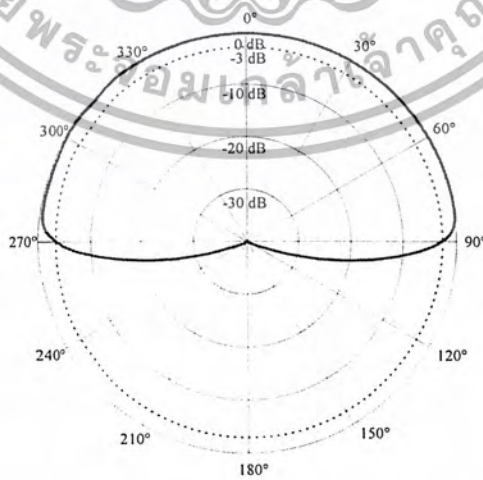
ข) $a = 1\lambda$



ค) $a = 10\lambda$

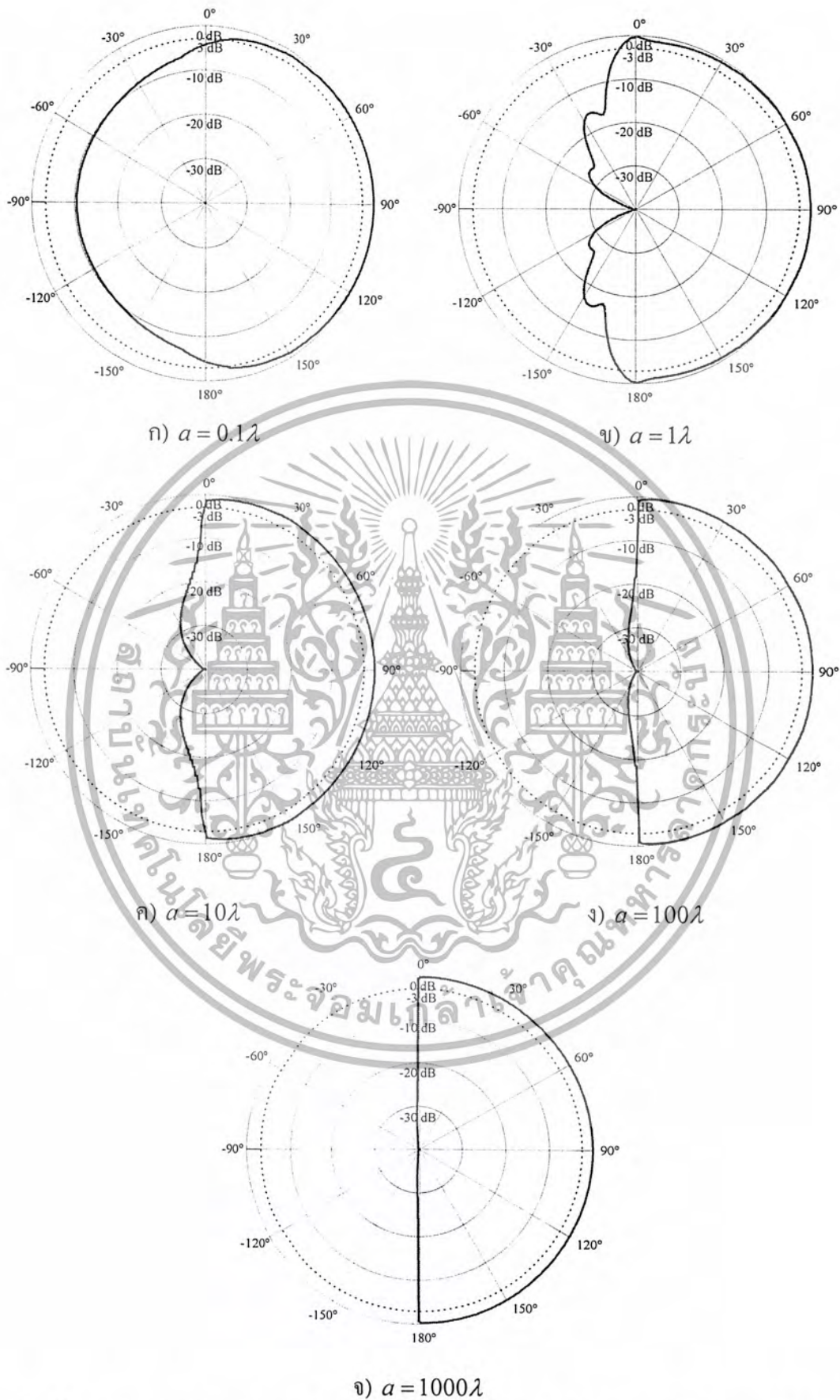


ง) $a = 100\lambda$

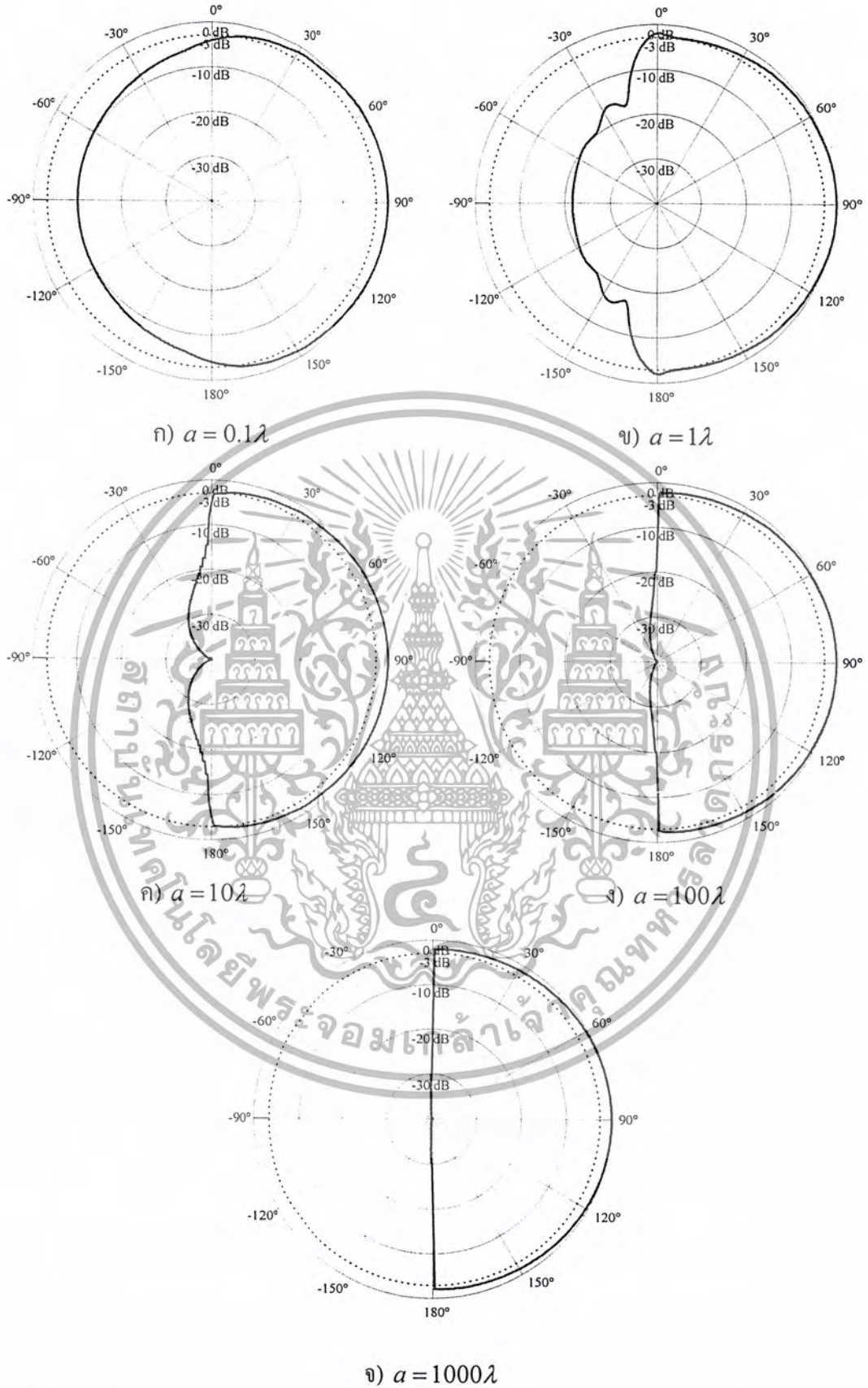


จ) $a = 1000\lambda$

รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xy มีมุม $\psi = 90^\circ$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

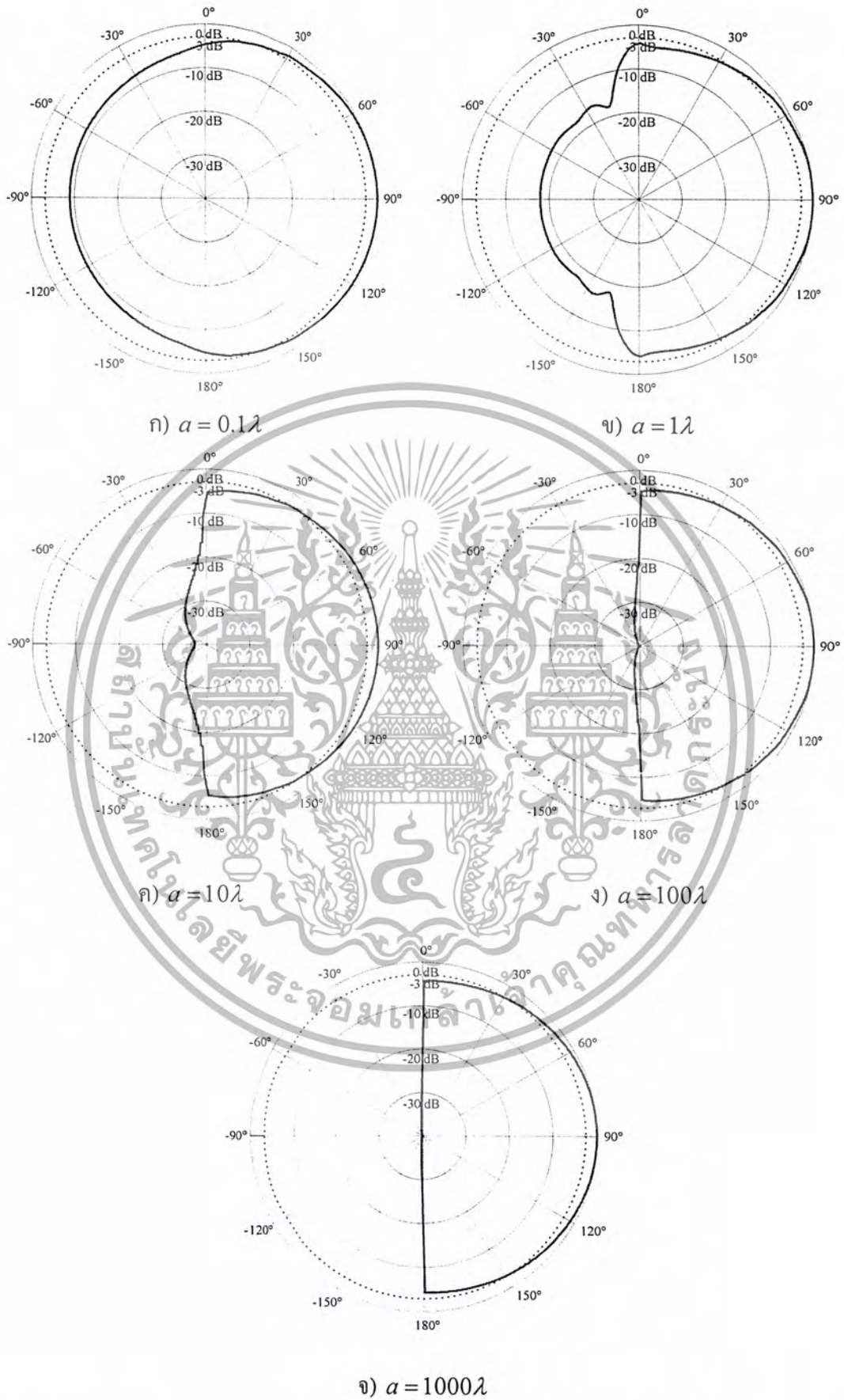


รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xz ที่มีมุม $\psi = 0^\circ$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

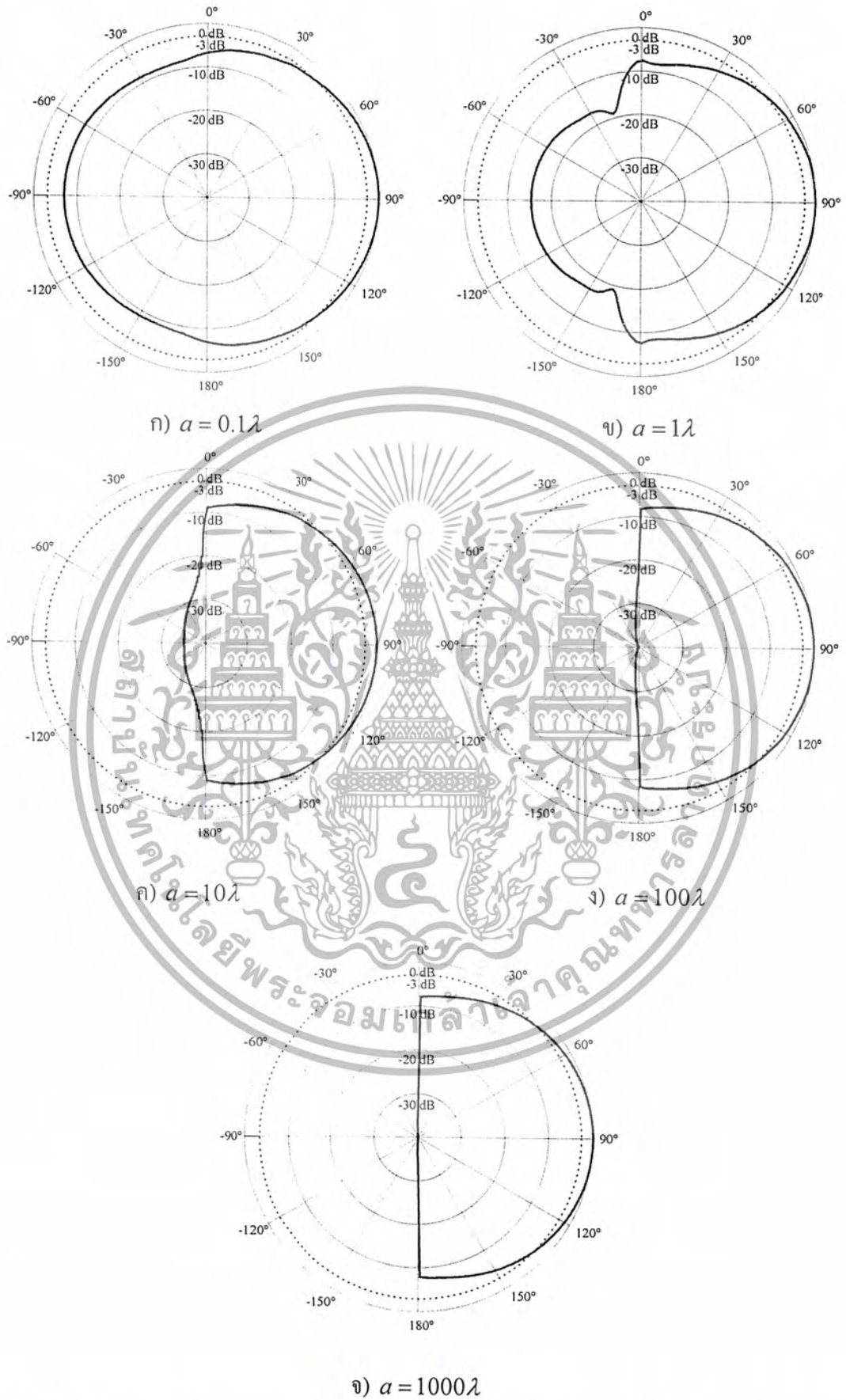


รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xz มีมุม $\psi = 30^\circ$

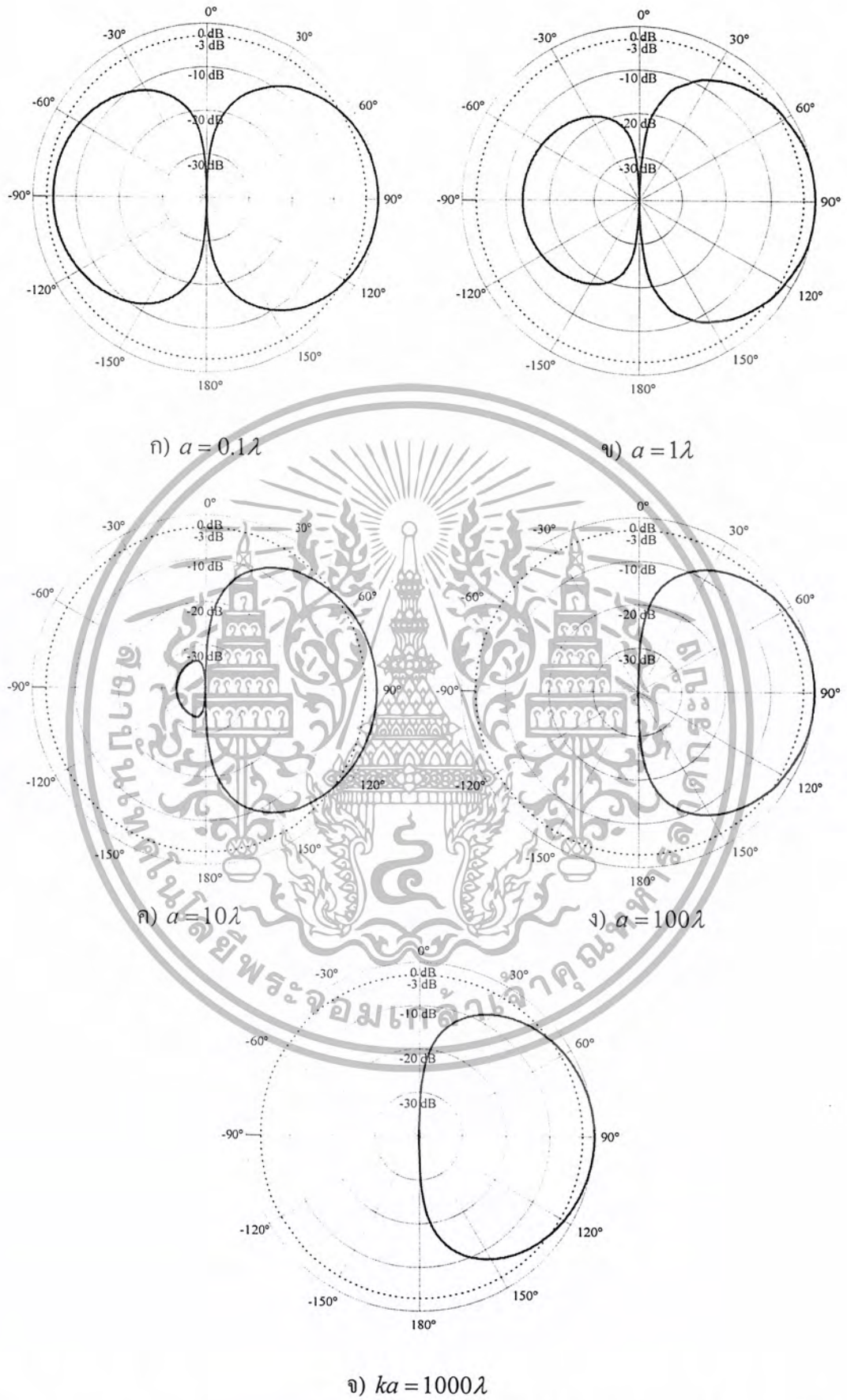
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xz มีมุม $\psi = 45^\circ$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ลงนิตยสาร
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xz มีมุม $\psi = 60^\circ$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

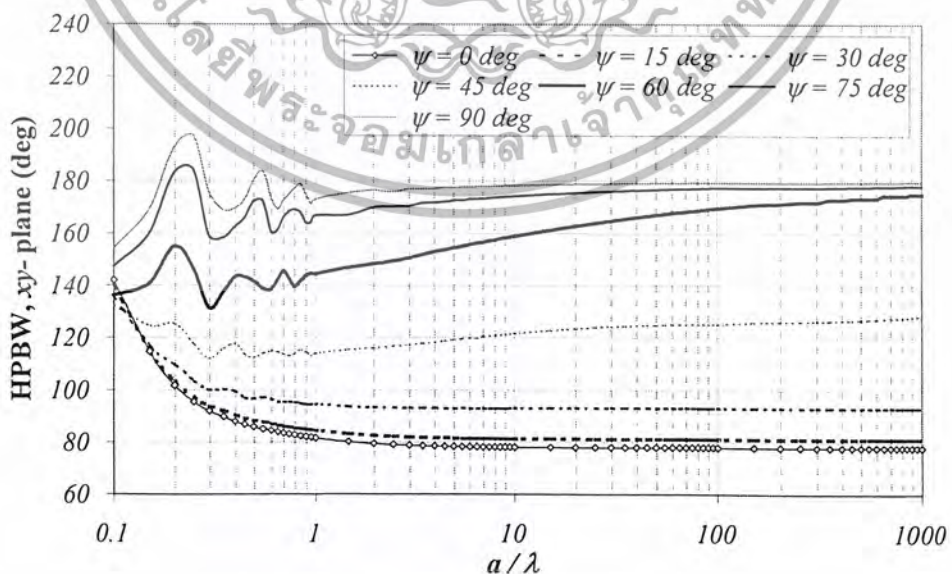


รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวในระนาบ xz มีมุม $\psi = 90^\circ$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ในทางการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าเมื่อรัศมีของตัวนำทรงกระบอกทรงกลมถ้ามีค่าน้อย จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางเหมือนกับสายอากาศแบบไดโพล และเมื่อรัศมีมีค่าเพิ่มขึ้นมาเรื่อย ๆ ลำคลื่นด้านหลังจะมีขนาดลดลงเรื่อย ๆ จนไม่มีลำคลื่นด้านหลังเปรียบเสมือนกับสายอากาศแบบร่องบนแผ่นตัวนำอนันต์ และที่มุมเอียงของร่อง 0, 30, 45, 60, 90 องศา เมื่อพิจารณาที่รัศมีเท่ากัน เมื่อพิจารณาในระนาบ 3 มิติ จะเห็นว่าจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่บิดเบี้ยวไปตามลักษณะของมุมที่เปลี่ยนไป ในรูป 2 มิติ ระนาบ xy จะมีลักษณะการแพร่กระจายของลำคลื่นด้านหลังนั้น ที่มุมน้อย ๆ จะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นไปทางด้านหลังไม่มากนัก แต่เมื่อมีมุมที่เพิ่มขึ้นลักษณะการแพร่กระจายคลื่นไปทางด้านหลังก็จะเพิ่มตามไปด้วย และลักษณะการแพร่กระจายของลำคลื่นด้านหน้า นั้นก็มีลักษณะเช่นเดียวกับการแพร่กระจายลำคลื่นด้านหลัง สำหรับระนาบ xz จะมีลักษณะการแพร่กระจายของลำคลื่นด้านหลังเหมือนกับระนาบ xy แต่ลำคลื่นด้านหน้าจะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นโดยที่มุมน้อย ๆ จะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นด้านหน้ามาก เมื่อมีมุมเพิ่มขึ้นลักษณะการแพร่กระจายคลื่นด้านหน้าจะลดลง

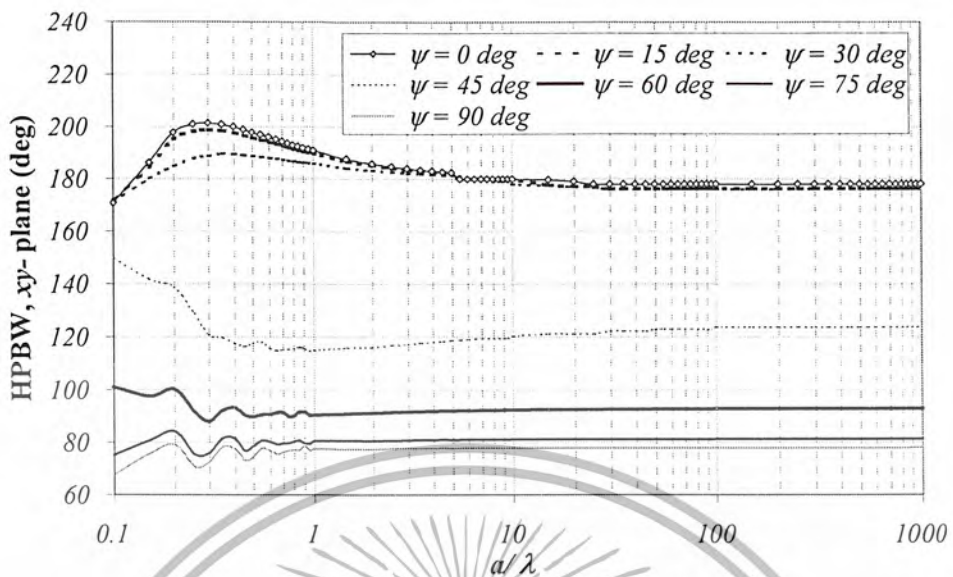
4.2 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก

การวิเคราะห์ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะทำการวิเคราะห์ที่ระนาบ xy และ xz ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ที่มุมการเอียงของร่องที่มุม 0, 15, 30, 45, 60, 75 และ 90 องศา ในการวิเคราะห์นี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของรัศมีของสายอากาศต่อความยาวคลื่น (a/λ) โดยทำการพิจารณา (a/λ) จาก 0.1 ถึง 1000 ซึ่งจะได้ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังดังรูปที่ 4.14 ซึ่งจะเห็นว่าในทุกมุมของการเอียงของร่องทั้งสองระนาบในช่วงที่ค่ารัศมีของสายอากาศต่อความยาวคลื่นมีค่าน้อยๆ ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะมีค่าเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อค่ารัศมีของสายอากาศต่อความยาวคลื่นมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะมีค่าคงที่



ก) ระนาบ xy

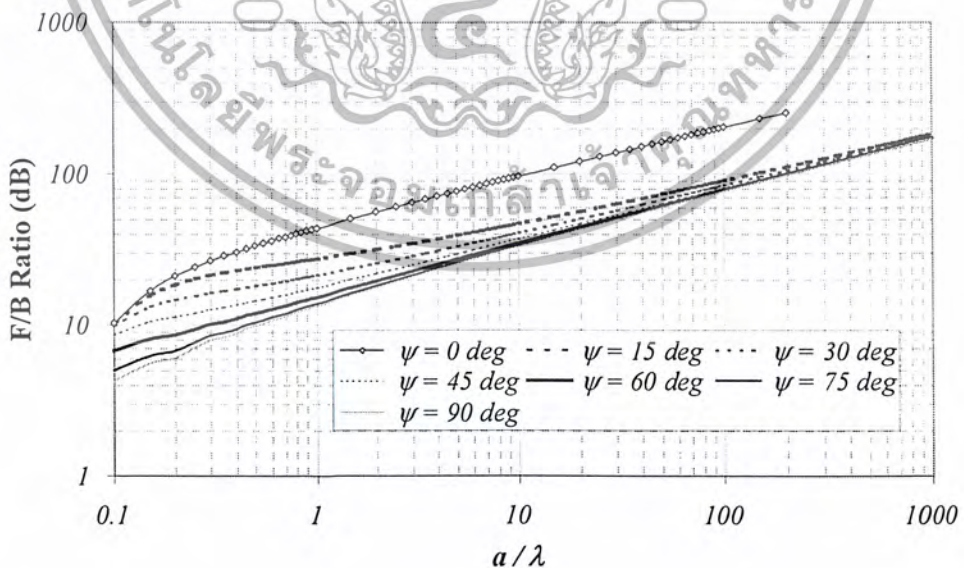
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

4.3 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง

ในการวิเคราะห์อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของรัศมีของสายอากาศต่อความยาวคลื่น (a/λ) ในลักษณะเช่นเดียวกับการหาค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ซึ่งสามารถแสดงค่าที่ได้ดังรูปที่ 4.15



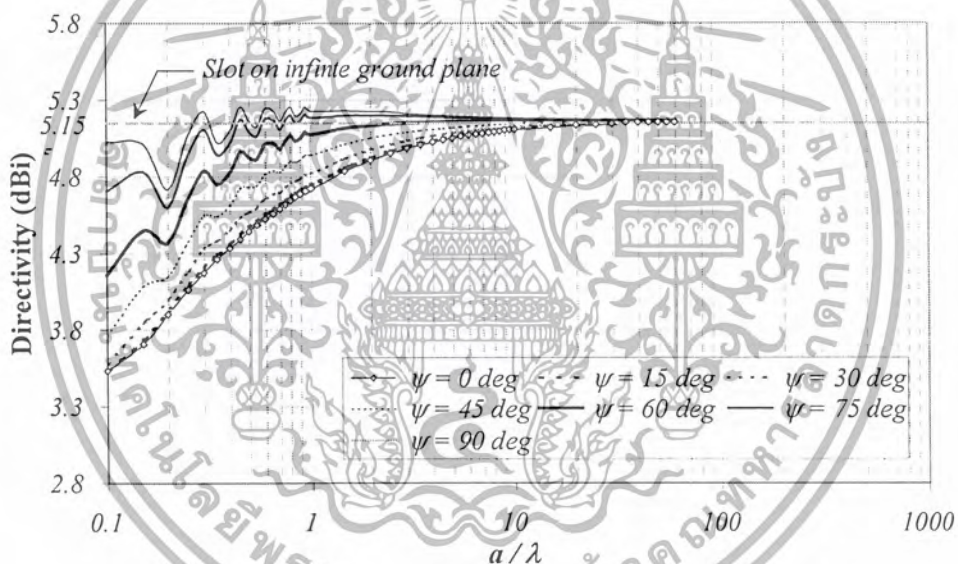
รูปที่ 4.15 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 ค่าของอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังในช่วงที่ค่าของรัศมีของสายอากาศต่อความยาวคลื่นมีค่าน้อยๆ ค่าของอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่ได้จะมีค่าน้อย แสดงว่าลำคลื่นด้านหน้ากับลำคลื่นด้านหลังมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อค่าของรัศมีของสายอากาศต่อความยาวคลื่นมีค่าเพิ่มมากขึ้นค่าของอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม แสดงว่าเมื่อค่าของรัศมีของสายอากาศต่อความยาวคลื่นมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะมีเฉพาะส่วนของลำคลื่นด้านหน้าส่วนลำคลื่นด้านหลังจะลดลงเรื่อยๆ

4.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางในแต่ละมุมของการเอียงของร่องเมื่อค่ารัศมีของตัวนำทรงกระบอกเปลี่ยนไป คือที่รัศมีตัวนำทรงกระบอกน้อย ๆ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีการเปลี่ยนแปลงไปมาแต่เมื่อรัศมีมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะคงที่ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

จากผลการวิเคราะห์ พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศเราจะนำไปเปรียบเทียบกับสายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การสร้างและการทดสอบ

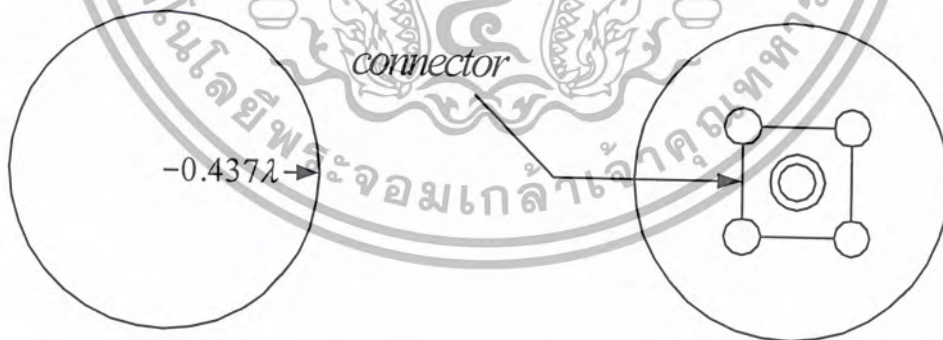
5.1 การสร้าง

5.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอก

1. วัสดุโลหะตัวนำทรงกระบอกในที่นี่ใช้ท่อทองเหลือง(ใช้แผ่นทองเหลืองม้วนเป็นทรงกระบอก)
2. คอนเนคเตอร์ (SMA connector)
3. โพรบ (Probe) ทองแดงสำหรับกระจายกระแส

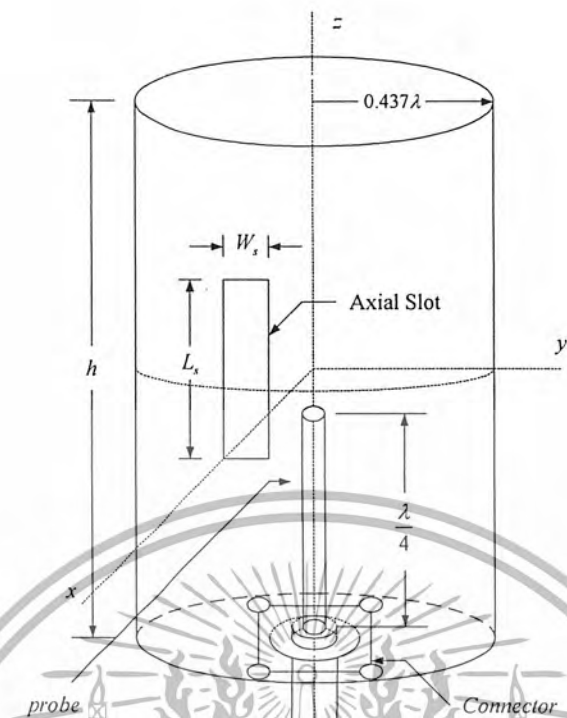
5.1.2 ขั้นตอนการสร้าง

1. เลือกความถี่ที่ใช้งานประมาณ 5.25GHz .
2. หาความยาวคลื่นที่ความถี่ที่เลือกโดยคำนวณได้จาก $\lambda = c/f$ เมื่อ c คือความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8\text{ m/s}$ และ f คือความถี่ที่ต้องการจะออกแบบซึ่งจะได้ $\lambda = 5.714$ เซนติเมตร ดังนั้น เลือกออกแบบที่ $a = 0.42\lambda$
3. หาความยาวร่องจาก $L_r = 0.5\lambda$ ดังนั้นจะได้ความยาวร่องเท่ากับ 2.857 เซนติเมตร
4. หาความกว้างร่องจาก $w_r = \frac{1}{40}\lambda$ ดังนั้นจะได้ความกว้างร่องเท่ากับ 1.43 มิลลิเมตร
5. เลือกความยาวของท่อ 2 ค่าที่ใช้ในการทดลองคือ 0.7λ และ 2λ ซึ่งจะได้เท่ากับ 4.4 เซนติเมตร และ 11.428 เซนติเมตรตามลำดับ การออกแบบจะแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ดังต่อไปนี้



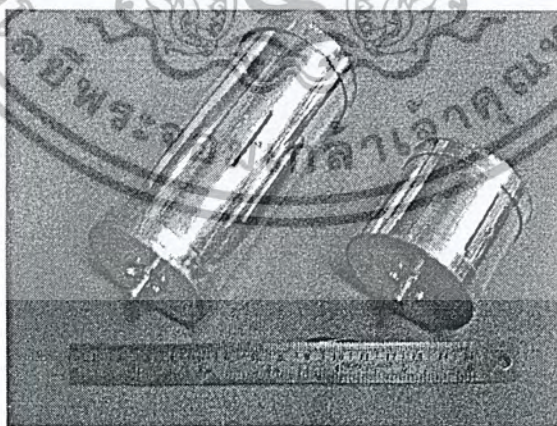
ก) ภาพด้านบนของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ง) โครงสร้างของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก
รูปที่ 5.1 การออกแบบสายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอก

หลังจากได้ทำการออกแบบแล้วก็ได้ทำการสร้างสายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกทั้ง 3 แบบ ซึ่งได้แก่ สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกน สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงและสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ซึ่งได้แสดงดังรูปที่ 5.2



ก) สายอากาศร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข) สายอากาศร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก



ค) สายอากาศร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก

รูปที่ 5.2 สายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก

5.2 การทดสอบ

การทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศ ว่ามีคุณสมบัติอย่างไร ตรงตามกับที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ คุณสมบัติที่จะทำการทดสอบในโครงการนี้ได้แก่

1. อัตราส่วนของคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR)
2. ค่าความต้านทานของสายอากาศ (Z_{in})
3. ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)
4. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)

5.2.1 การทดสอบวัดอัตราส่วนของคลื่นนิ่ง , ความต้านทานอินพุท และค่าการสูญเสียย้อนกลับ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและทดสอบ

1. สายอากาศแบบร่องเดี่ยวทั้ง 3 แบบ
2. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) พร้อมด้วยชุด Calibrate
3. คอนเนคเตอร์ SMA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการปรับเครื่องเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายให้ใช้งานได้ตามมาตรฐาน โดยใช้ชุดปรับ calibrate
 2. ต่อสายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกเข้ากับเครื่องเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
 3. ทำการวัดค่าโดยเริ่มจากอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และความต้านทานอินพุทของสายอากาศ และค่าการสูญเสียย้อนกลับ
- ซึ่งจะแสดงการวัดค่าอัตราส่วนของคลื่นนิ่ง ค่าความต้านทานของสายอากาศและค่าการสูญเสียย้อนกลับดังรูปที่ 5.3

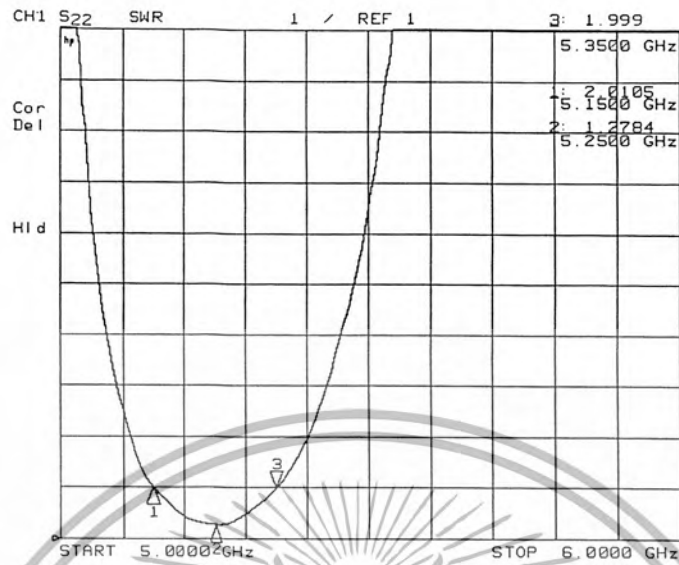


รูปที่ 5.3 การทดสอบสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก

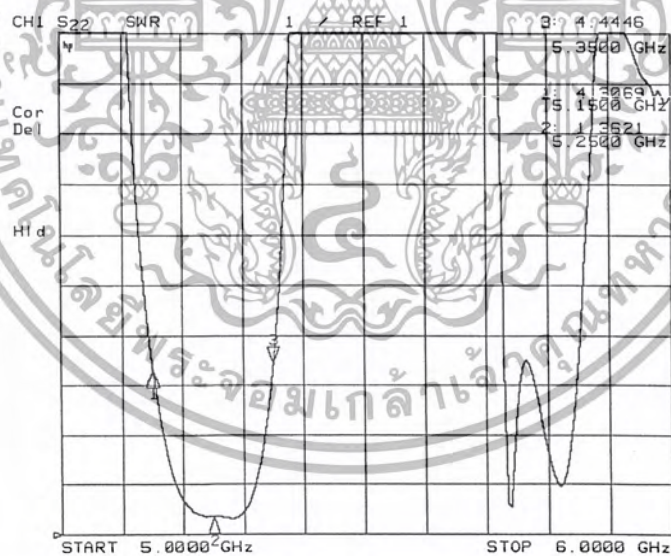
ในการวัดคุณสมบัติของสายอากาศตามที่กล่าวมาข้างต้น จะทำการวัดสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกและสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีความยาวต่อเท่ากับ และ ในการวัดค่านั้นผู้วิจัยได้ทำการวัดที่ความถี่ความถี่กลางเท่ากับ 5.25GHz และความถี่ข้างคือ 5.15GHz และ 5.35GHz

อัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ดูว่าสายอากาศที่ทดสอบมีคุณภาพที่ดีเพียงพอดต่อการนำไปใช้งานได้หรือไม่ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีค่าไม่เกิน 1:2 และในการทดสอบและสร้างสายอากาศในห้องวิจัยค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าไม่เกิน 1:1.5 สำหรับการวัดค่าอัตราส่วนของคลื่นนิ่ง นี้จะทำการวัดโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายในการวัดและจากการทดสอบได้ผลของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งแสดงดังรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

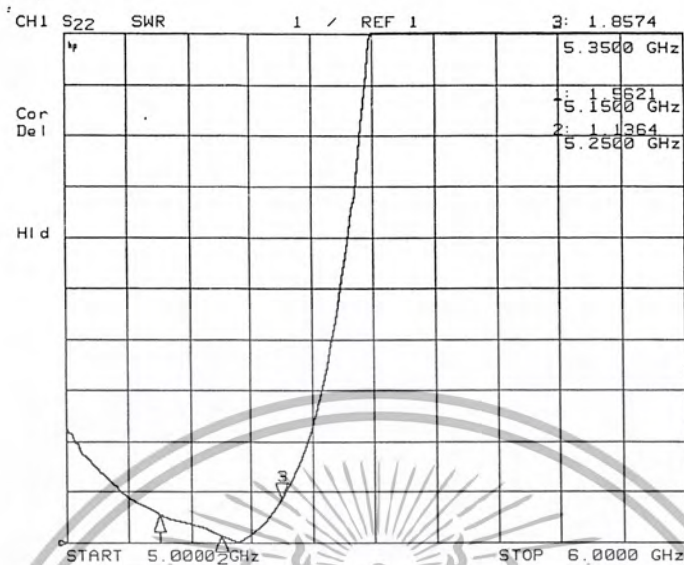


ก). การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ โดยค่า SWR ที่อ่านได้เท่ากับ 1.2784 : 1

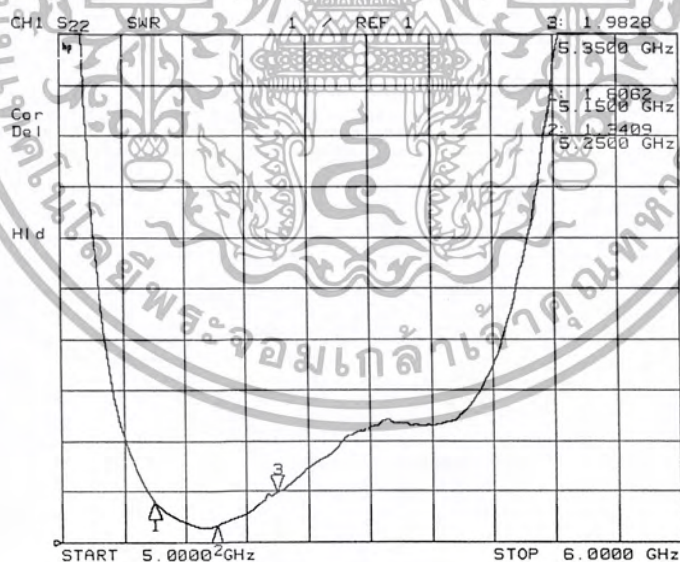


ข). การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ โดยค่า SWR ที่อ่านได้เท่ากับ 1.3621 : 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

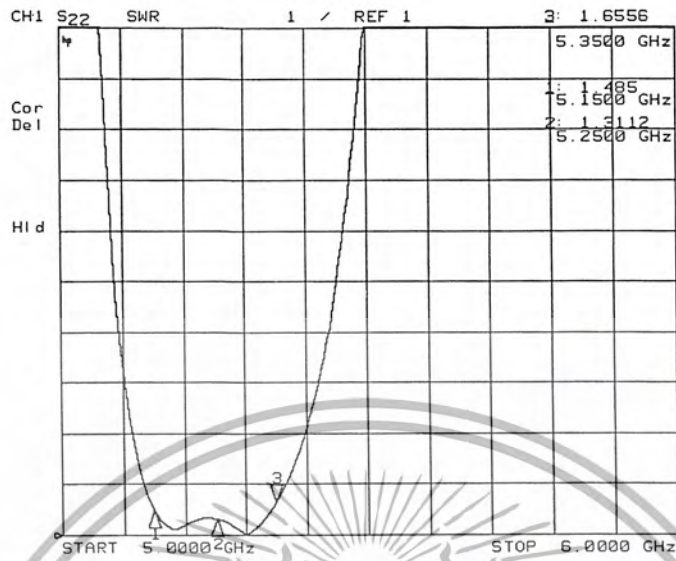


ค). การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ โดยค่า SWR ที่อ่านได้เท่ากับ 1.1364 : 1

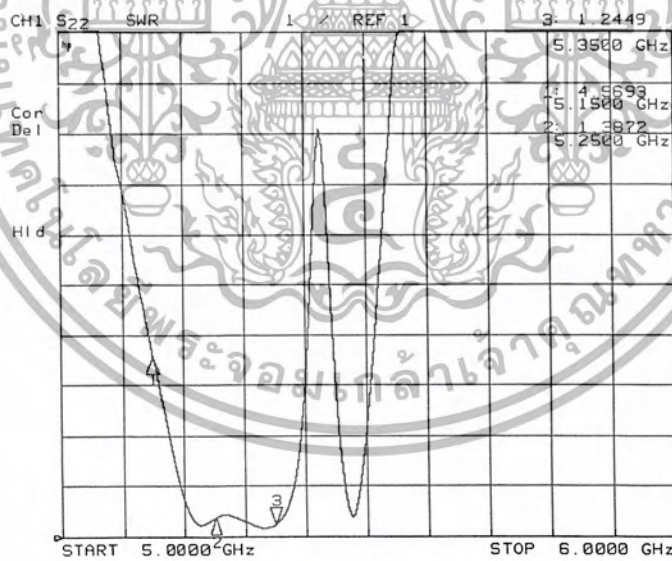


ง). การทดสอบวัดค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ โดยค่า SWR ที่อ่านได้เท่ากับ 1.3409 : 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ). การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ โดยค่า SWR ที่อ่านได้เท่ากับ 1.3112 : 1



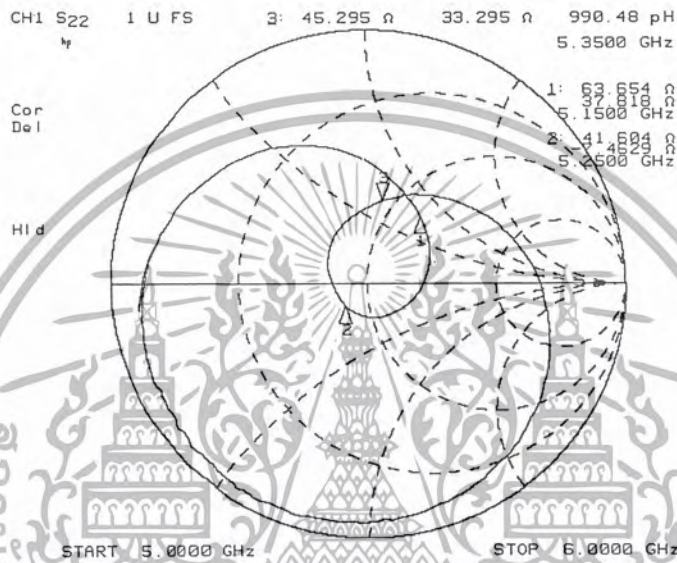
จ). การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ โดยค่า SWR ที่อ่านได้เท่ากับ 1.3872 : 1

รูปที่ 5.4 กราฟแสดงค่า SWR ที่วัดได้จากสายอากาศทั้ง 3 แบบ

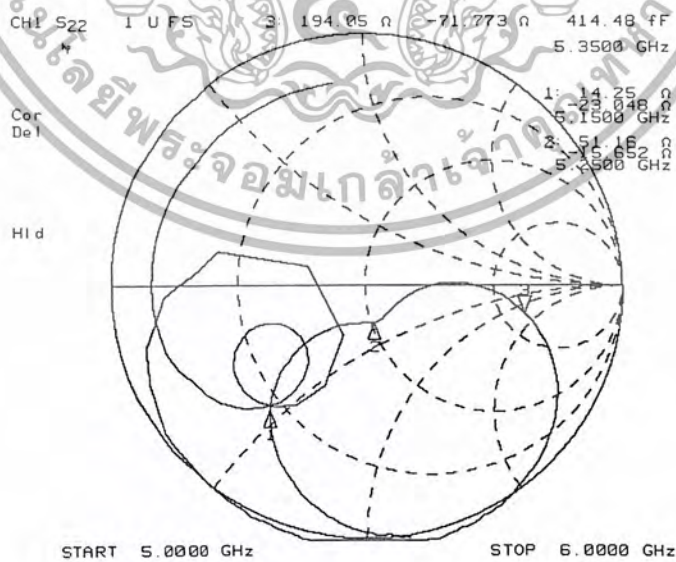
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานของสายอากาศจะทำการวัด ณ. ที่จุดป้อนสัญญาณของสายอากาศซึ่งองค์ประกอบของอิมพีแดนซ์นั้นประกอบด้วยค่า $Z = R + jX$ โดยที่ค่าความต้านทานคุณลักษณะของสายส่งสัญญาณมีค่าเท่ากับ 50Ω เราจึงต้องพยายามปรับค่าความต้านทานให้เหมาะสมหรือใกล้เคียงกับความต้านทานของสายส่งสัญญาณให้มากที่สุด

ค่าความต้านทานนั้นจะสามารถวัดจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายได้โดยตรงโดยแสดงจุดที่มีอัตราคลื่นนิ่งที่ต่ำที่สุดหรือสายอากาศสมพงษ์ที่สุดบนกราฟสมิทชาร์ตซึ่งทำการอ่านค่าออกมาได้เลยและการทดสอบได้ผลของค่าความต้านทานของสายอากาศออกมาแสดงดังรูปที่ 5.5

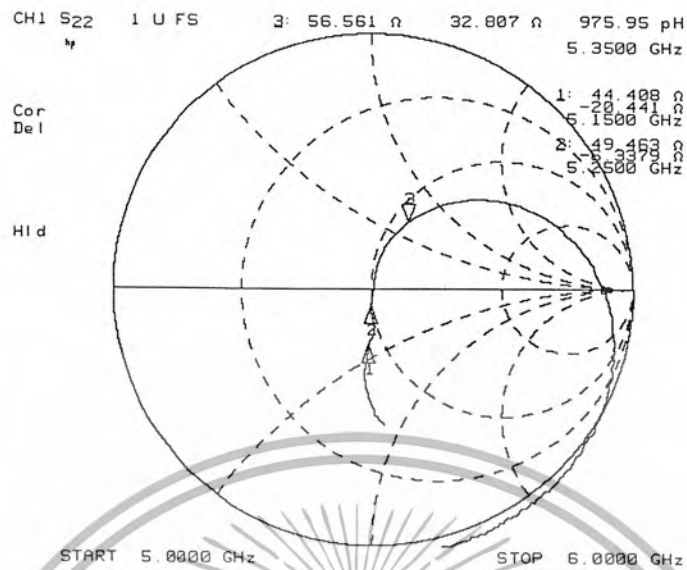


ก) การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ โดยค่าความต้านทานที่วัดได้เท่ากับ $41.604 - j7.4629\Omega$

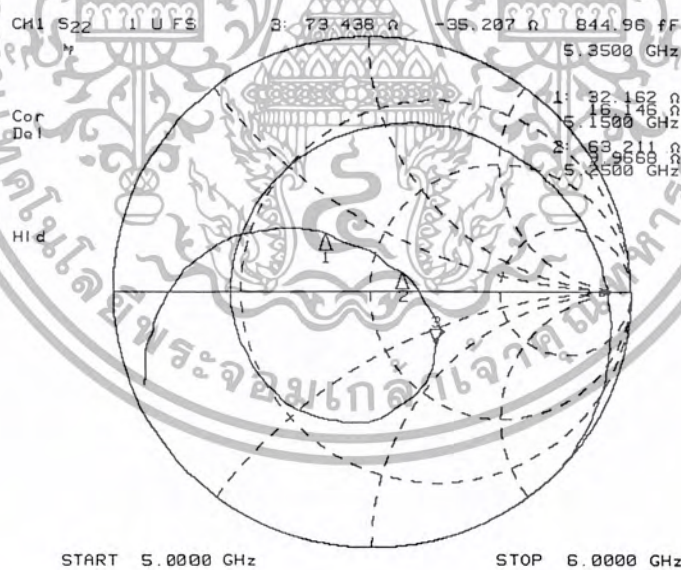


ข) การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ โดยค่าความต้านทานที่วัดได้เท่ากับ $51.16 - j15.652\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

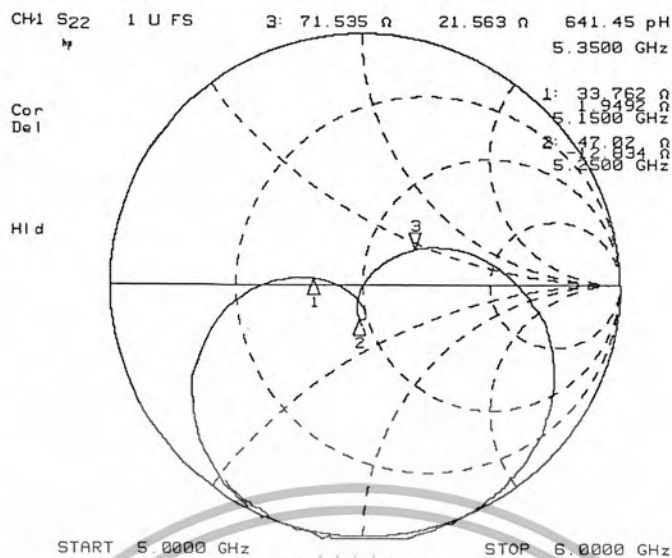


ค) การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก
ที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7 λ โดยค่าความต้านทานที่วัดได้เท่ากับ $49.463 - j5.3379\Omega$



ง) การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก
ที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ โดยค่าความต้านทานที่วัดได้เท่ากับ $63.221 + j9.9668\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ) การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ โดยค่าความต้านทานที่วัดได้เท่ากับ $47.02 - j12.834\Omega$

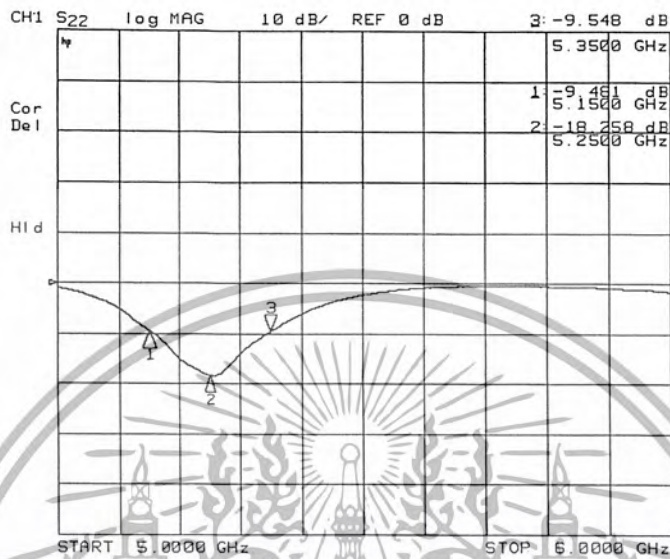


ฉ) การทดสอบค่า SWR ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ โดยค่าความต้านทานที่วัดได้เท่ากับ $36.422 + j8.541\Omega$

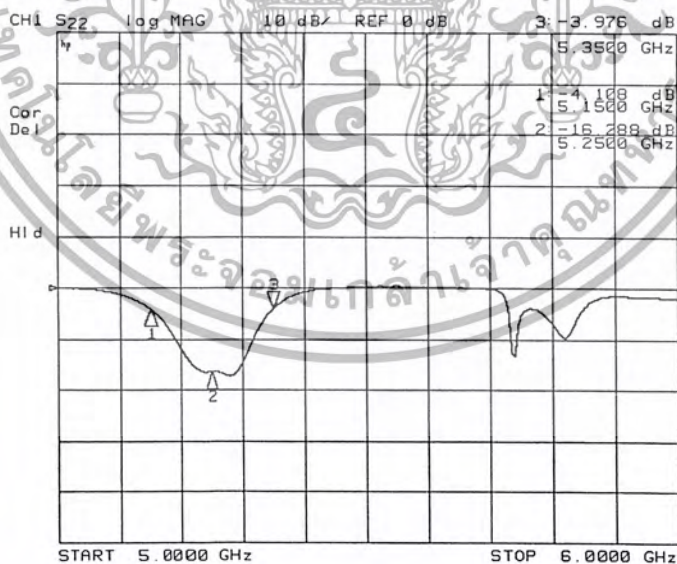
รูปที่ 5.5 กราฟแสดงค่าความต้านทานที่วัดได้จากสายอากาศทั้ง 3 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการสูญเสียย้อนกลับสามารถแสดงได้ในรูปของค่า log magnitude ซึ่งค่าการสูญเสียย้อนกลับนั้นจะมีค่าตรงกันข้ามกับค่า log magnitude ซึ่งค่านี้จะสามารถวัดและอ่านค่าออกมาได้โดยตรงจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย สำหรับผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับแสดงได้ดังรูปที่ 5.6

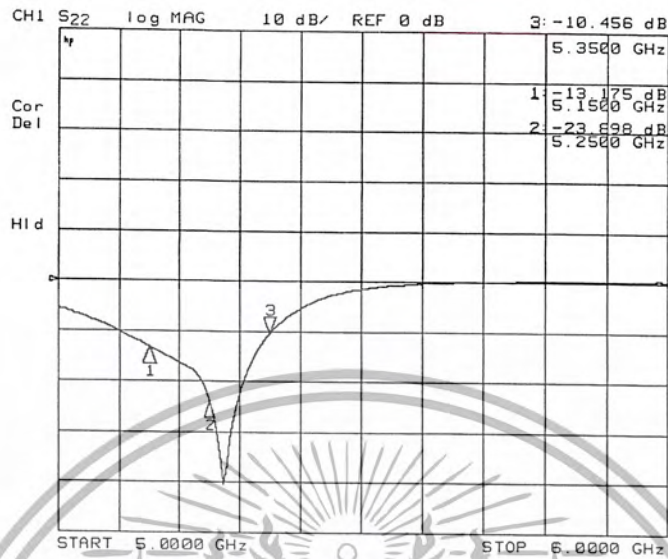


ก) การทดสอบค่า Log magnitude ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ

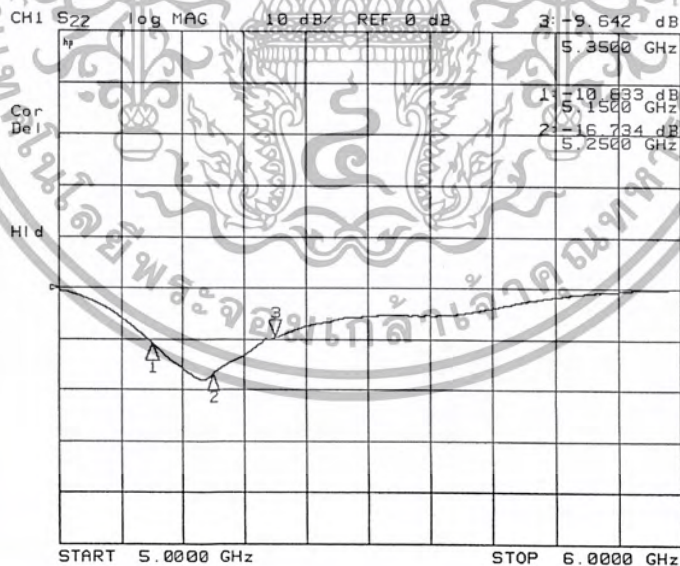


ข) การทดสอบค่า Log magnitude ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

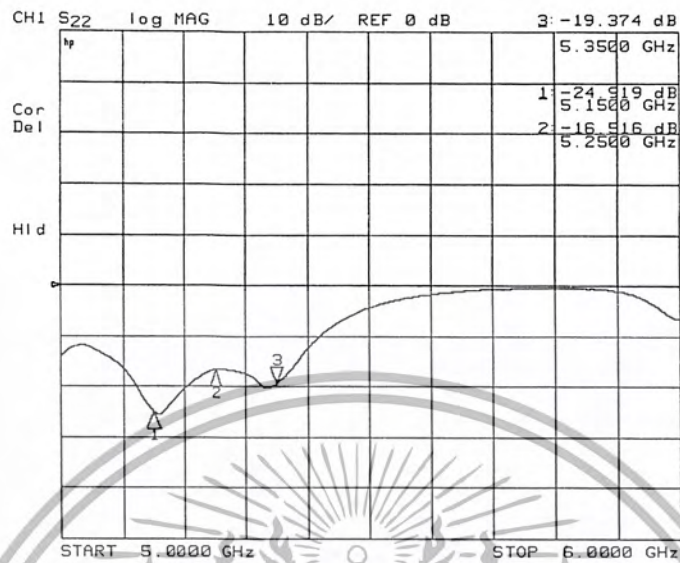


ค) การทดสอบค่า Log magnitude ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ

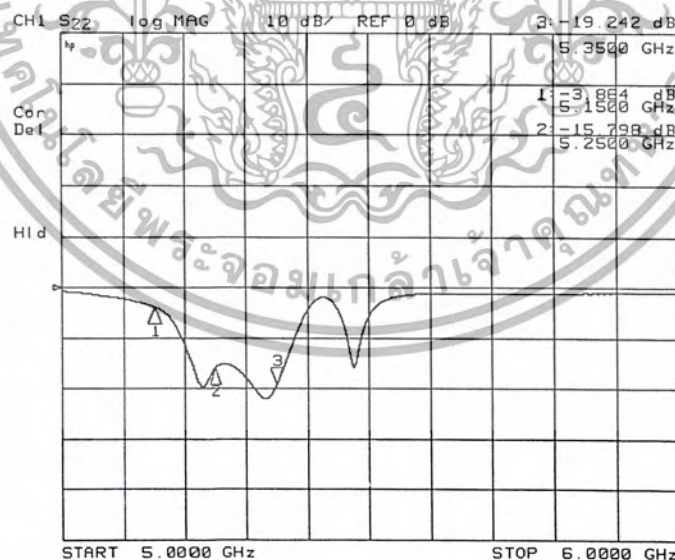


ง) การทดสอบค่า Log magnitude ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จ) การทดสอบค่า Log magnitude ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ



ค) การทดสอบค่า Log magnitude ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ

รูปที่ 5.6 กราฟ Log magnitude ที่วัดได้จากสายอากาศทั้ง 3 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

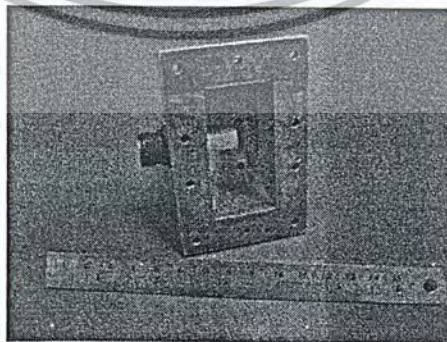
สำหรับการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอกนี้จะทำการทดสอบในห้องทดสอบการสะท้อนต่ำ โดยใช้สายอากาศแบบช่องเปิดของท่อนำคลื่น ดังรูปที่ 5.7 เป็นตัวส่งสัญญาณและใช้สายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่ต้องการทดสอบเป็นตัวรับสัญญาณ โดยให้มีระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบช่องเปิดของท่อนำคลื่นและสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอกเท่ากับการคำนวณค่าสนามระยะไกลของสายอากาศ ดังรูปที่ 5.8 โดยให้มีการหมุนที่ละ 5 องศา จนครบ 360 องศา

อุปกรณ์ที่ใช้วัดผลการทดลอง

1. สายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก
2. สายอากาศแบบช่องเปิดเซฟไฟด์
3. สายนำสัญญาณ
4. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย
5. เครื่องควบคุมการหมุน
6. คอนเนคเตอร์ SMA

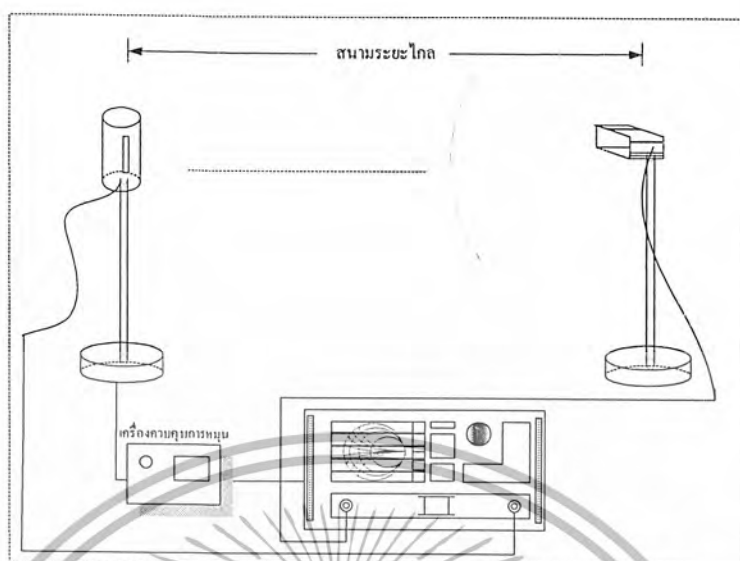
ขั้นตอนการทดลอง

1. นำสายอากาศแบบช่องเปิดของท่อนำคลื่นติดตั้งที่เสาสำหรับส่งสัญญาณ
2. นำสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่ต้องการจะทดสอบ ไปติดตั้งที่เสาสำหรับรับสัญญาณ ซึ่งมีเครื่องควบคุมการหมุนติดอยู่ด้วย
3. ต่อเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเข้ากับสายอากาศแบบช่องเปิดของท่อนำคลื่น สายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก และเครื่องควบคุมการหมุนโดยผ่านสายนำสัญญาณและคอนเนคเตอร์
4. กำหนดให้เครื่องควบคุมการหมุน หมุนที่ละ 5 องศา
5. เปิดเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายและทำการปรับให้พร้อมที่จะใช้ทดสอบ
6. สังเกตดูค่าพลังงานที่รับได้ที่ความถี่ของสายอากาศนั้นได้ออกแบบไว้
7. เปลี่ยนองศาการหมุนของสายอากาศ พร้อมบันทึกค่าพลังงานที่ได้รับได้ จนครบ 360 องศา



รูปที่ 5.7 สายอากาศแบบช่องเปิดของท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



(ก) ในระนาบ xz



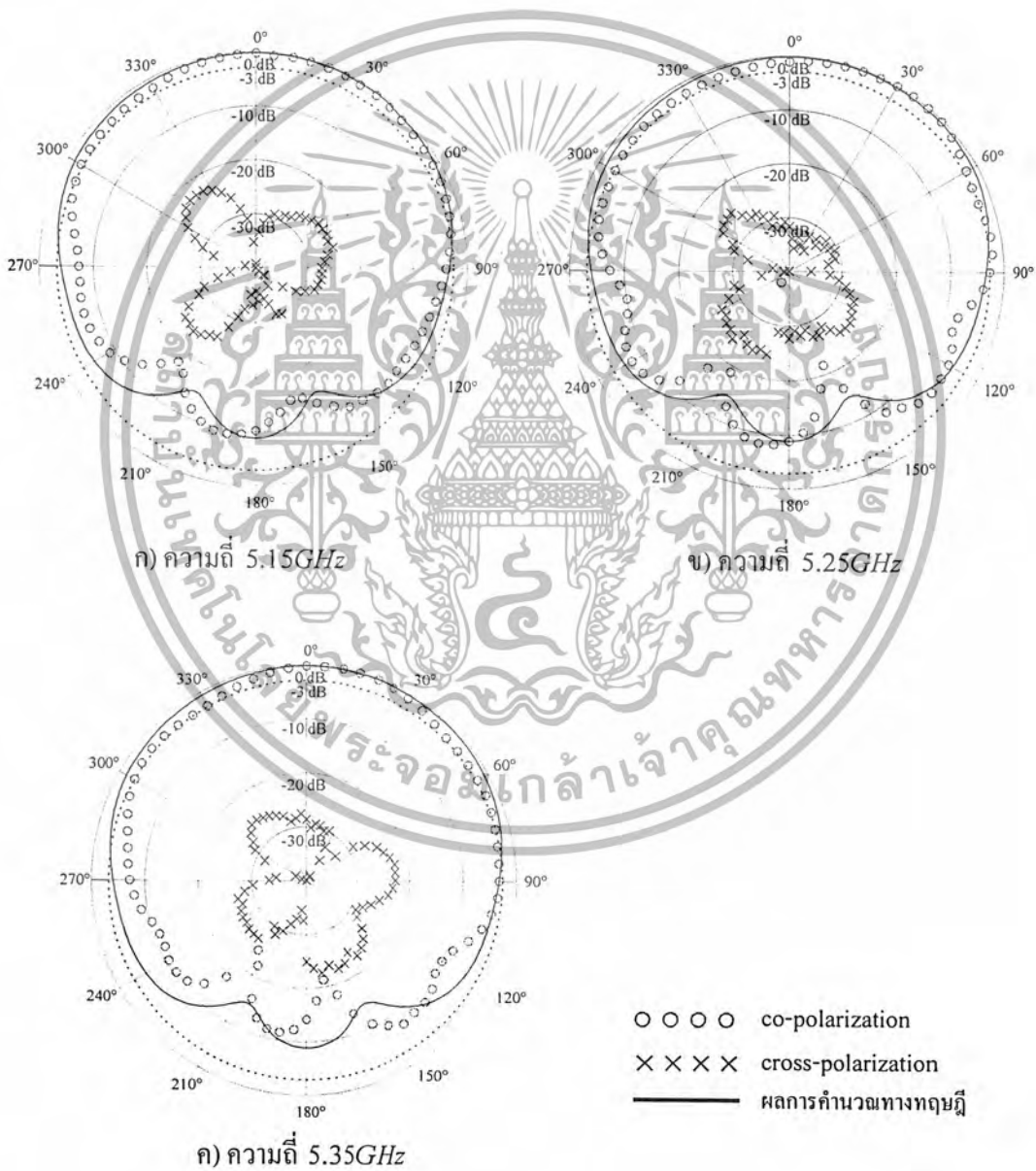
(ข) ในระนาบ xy

รูปที่ 5.9 การทดสอบสายอากาศในห้องทดสอบสายอากาศ

รูปที่ 5.9 แสดงการวัดและทดสอบสายอากาศในห้องทดสอบ โดยการทดสอบจะพิจารณากรณีของมุมกวาดและมุมเงยของสายอากาศ นั่นก็คือทั้งในระนาบ xy และระนาบ xz และทำการวัดสายอากาศในลักษณะการส่งสายอากาศแบบช่องเปิดของท่อนำคลื่นในลักษณะที่โพรบของสายอากาศนั้นตัดขวางร่องและตามร่องของสายอากาศตัวรับตามลำดับ แล้วนำแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบในแต่ละมุมมาทำการพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับค่าความทงทฤษฎีของสายอากาศทั้ง 3 แบบ คือทั้งในระนาบ xy และระนาบ xz

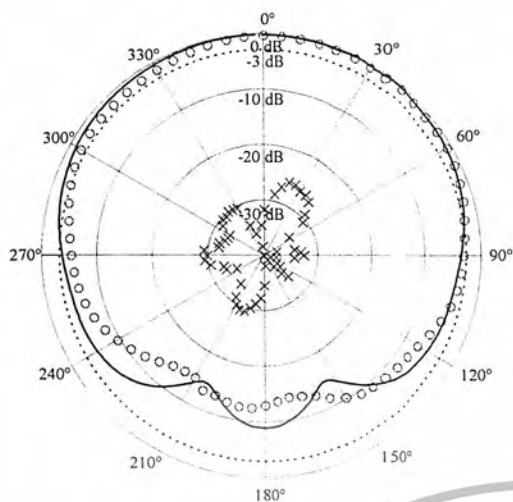
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่ทำการทดสอบที่ความถี่ 3 ความถี่คือ ความถี่กลางเท่ากับ $5.25GHz$ และความถี่ข้างทั้งสองความถี่เท่ากับ $5.15GHz$ และ $5.35GHz$ และทำการวัดสายอากาศในลักษณะการส่งสายอากาศแบบช่องเปิดของท่อ นำคลื่นในลักษณะที่โพรบของสายอากาศนั้นตัดขวางร่องและตามร่อง ซึ่งเรียกว่า โพลาริซั่วม (co-polarization) และ โพลาริซั้ว (cross-polarization) ตามลำดับ จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.10-5.21



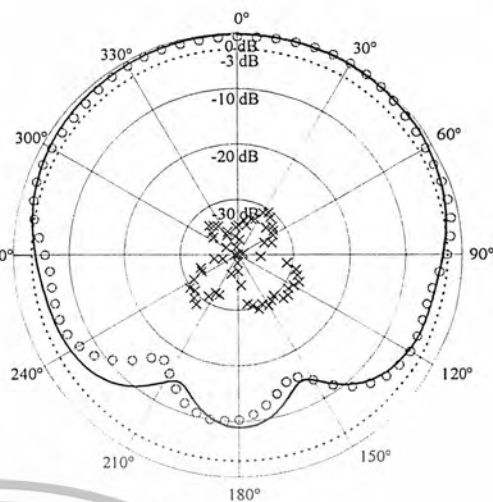
รูปที่ 5.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัว

นำทรงกระบอกที่มีความยาวเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ xy ($\theta = 90^\circ$)

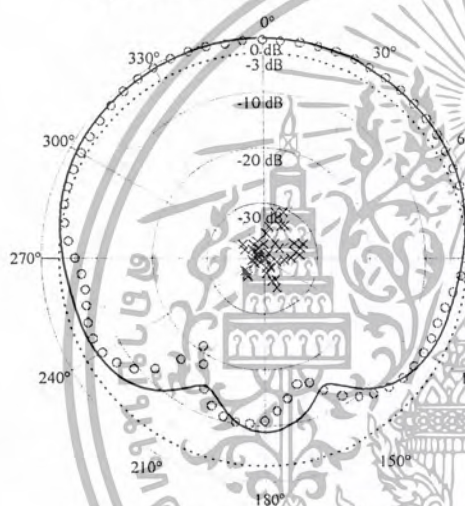
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และเผยแพร่โดยไม่หวังผลกำไร หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงและขอสงวนสิทธิ์ในการแก้ไข
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ความถี่ 5.15GHz



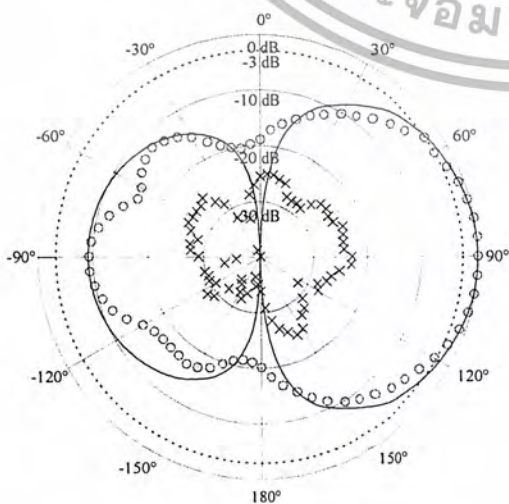
ข) ความถี่ 5.25GHz



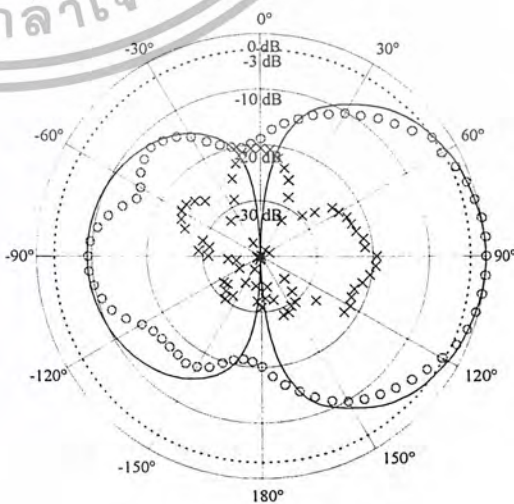
ค) ความถี่ 5.35GHz

○ ○ ○ ○ co-polarization
 × × × × cross-polarization
 ————— ผลการคำนวณทางทฤษฎี

รูปที่ 5.11 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวพอเท่ากับ 2λ ในระนาบ xy ($\psi = 90^\circ$)

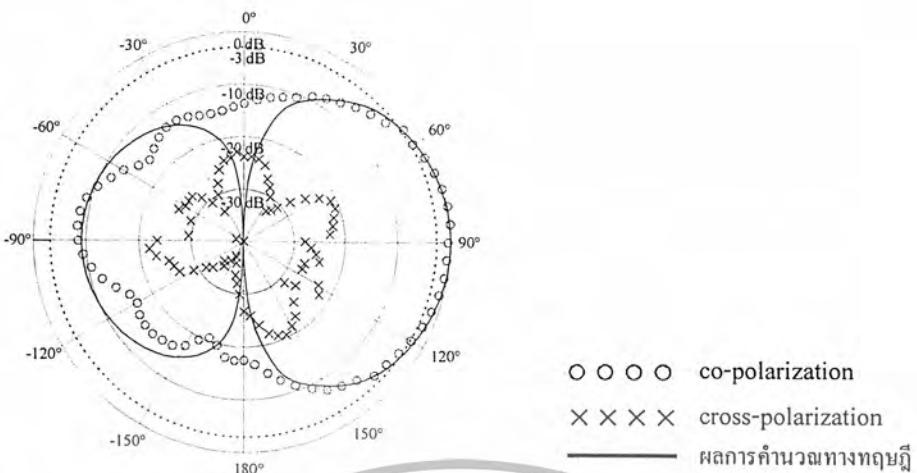


ก) ความถี่ 5.15GHz



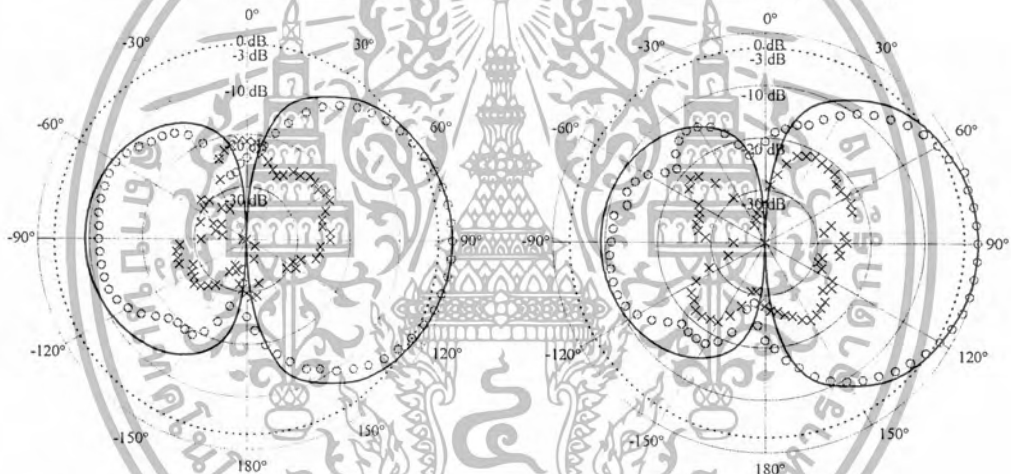
ข) ความถี่ 5.25GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



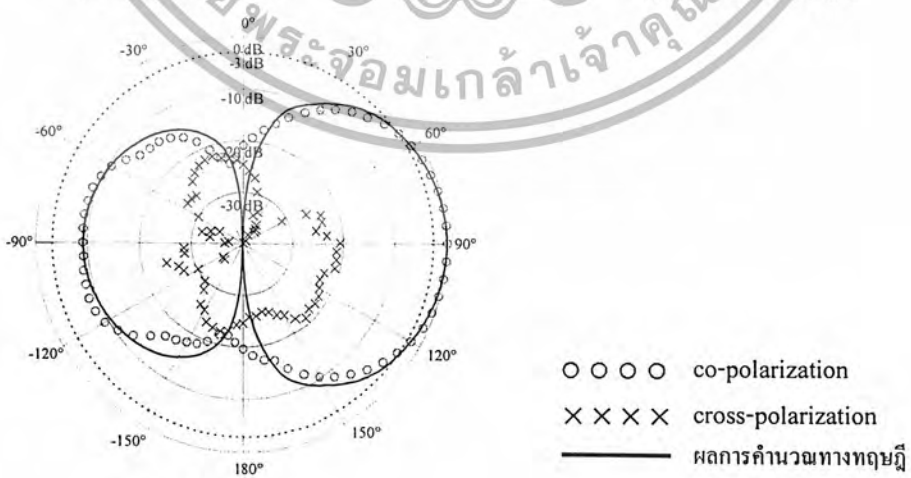
ค) ความถี่ 5.35GHz

รูปที่ 5.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ xz ($\psi = 90^\circ$)



ก) ความถี่ 5.15GHz

ข) ความถี่ 5.25GHz

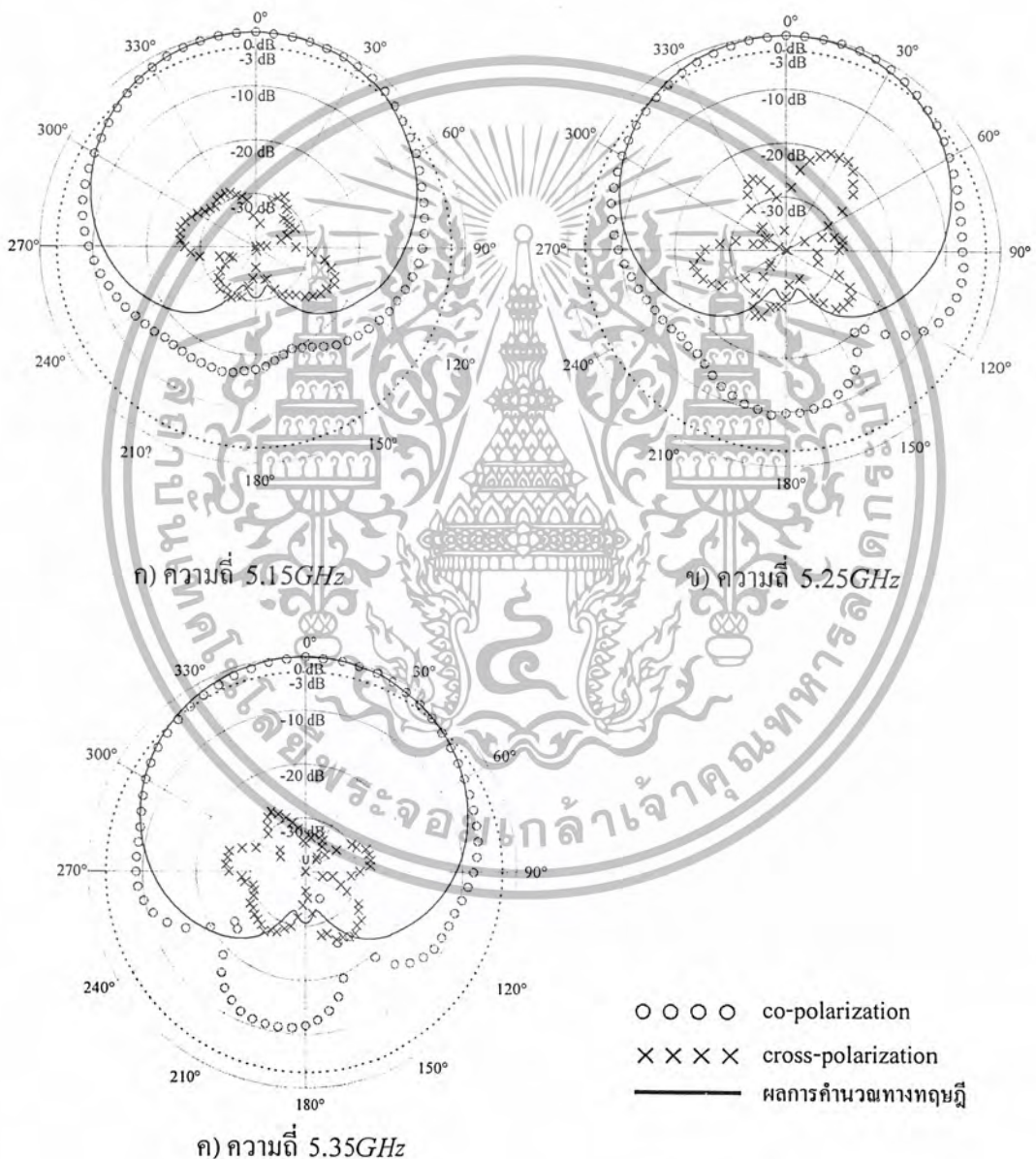


ค) ความถี่ 5.35GHz

รูปที่ 5.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ xz ($\psi = 90^\circ$)

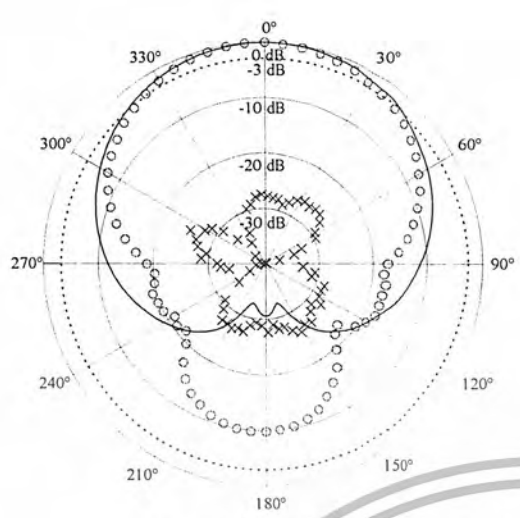
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.10-5.13 เป็นการวัดสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบน ผิวตัวนำทรงผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ และ 2λ พบว่าจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบ xy และ xz มีลักษณะใกล้เคียงกัน เพราะว่าจากการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งจะคำนวณที่ความยาวของท่อเป็นอนันต์ ระนาบ xz ที่มุม 0 และ 180 องศา ซึ่งเป็นบริเวณขอบด้านบนและด้านล่างของทรงกระบอกนั้น จะเกิดสนามมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้นความยาวจึงไม่มีผลกระทบต่อสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก

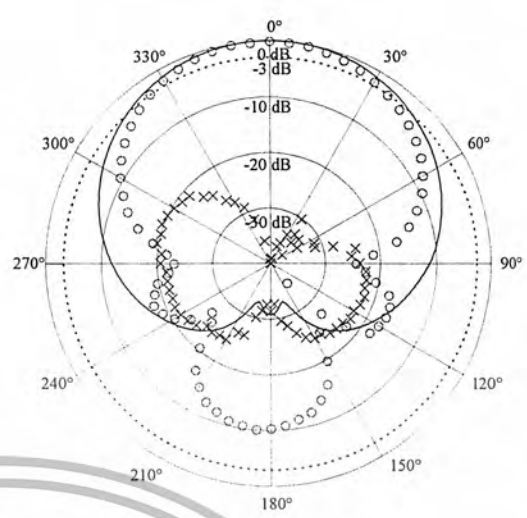


รูปที่ 5.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ $xy (\psi = 0^\circ)$

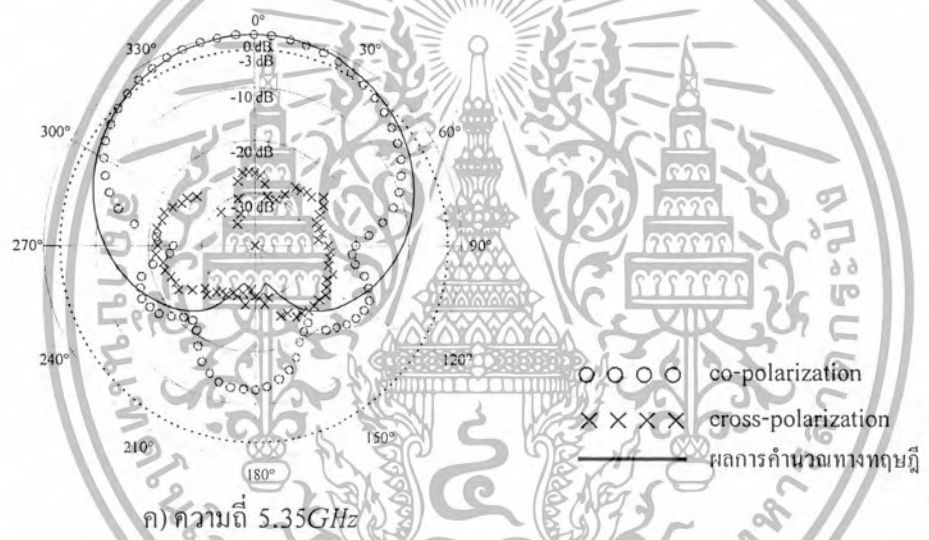
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ความถี่ 5.15GHz

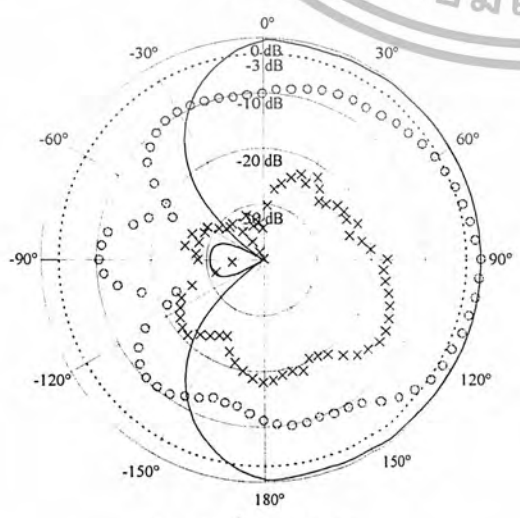


ข) ความถี่ 5.25GHz

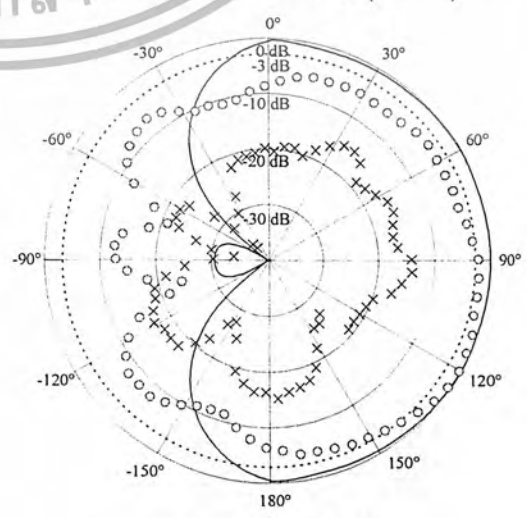


ค) ความถี่ 5.35GHz

รูปที่ 5.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ $xy(\psi = 0^\circ)$

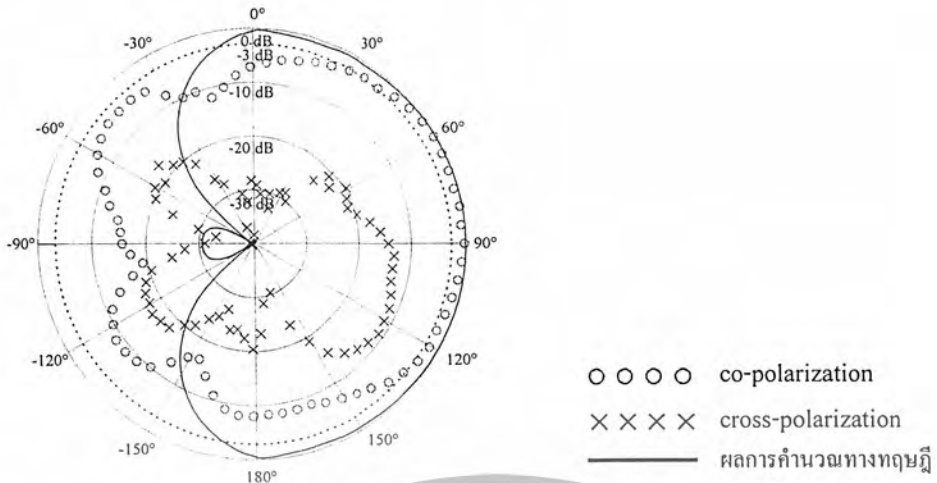


ก) ความถี่ 5.15GHz



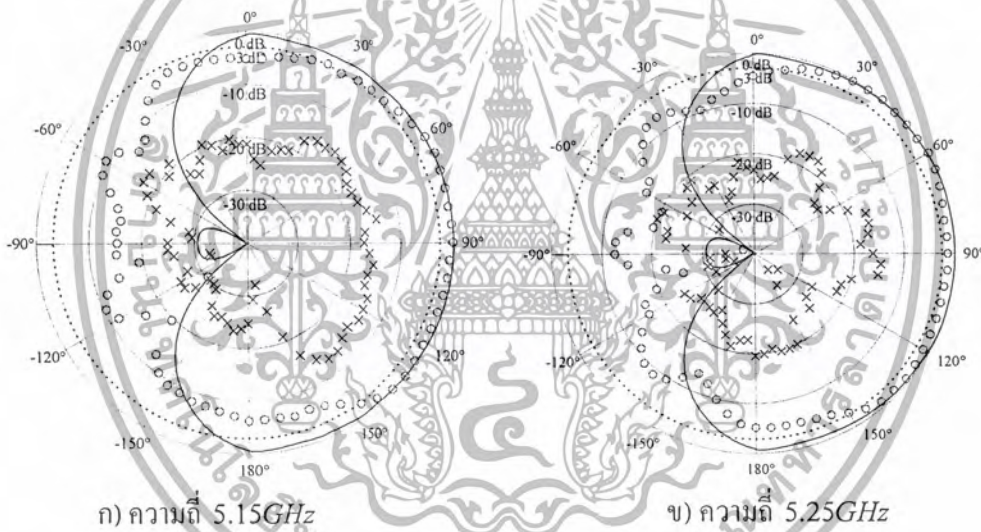
ข) ความถี่ 5.25GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



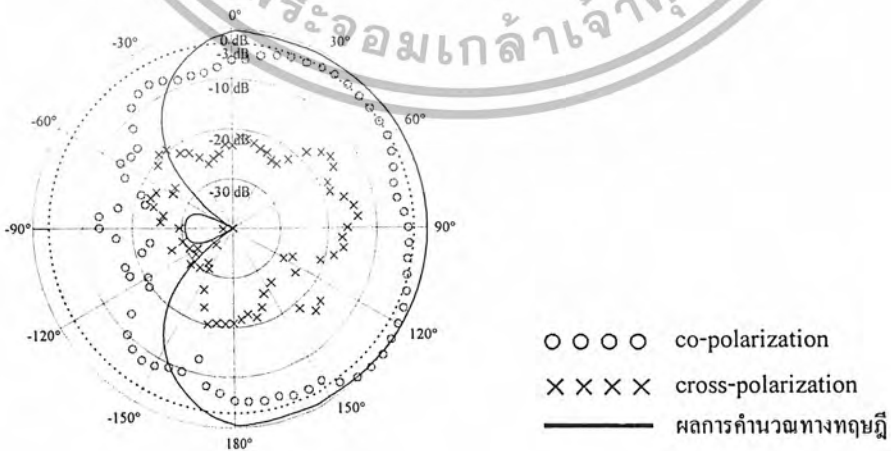
ค) ความถี่ 5.35GHz

รูปที่ 5.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ $xz (\psi = 0^\circ)$



ก) ความถี่ 5.15GHz

ข) ความถี่ 5.25GHz

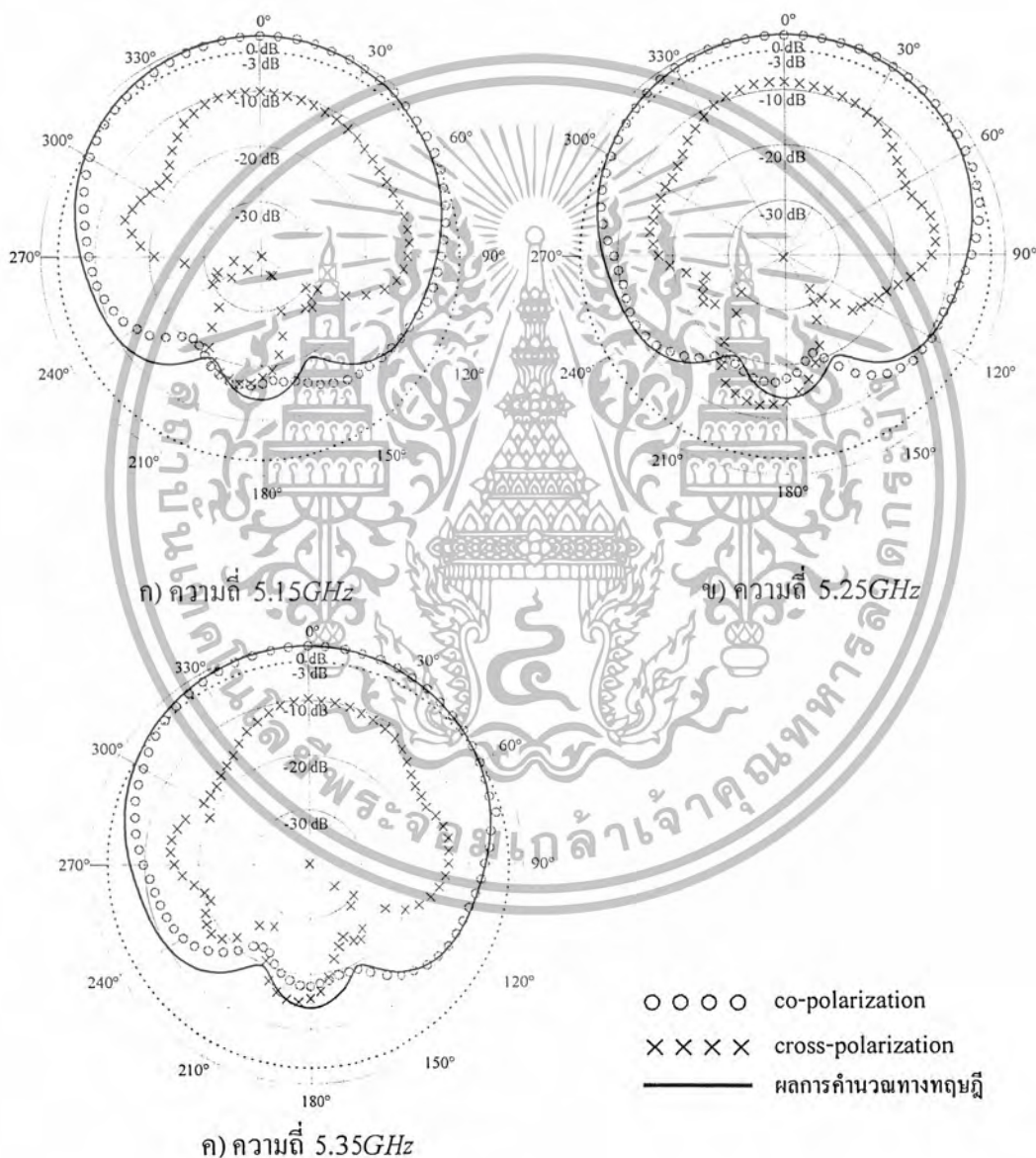


ค) ความถี่ 5.35GHz

รูปที่ 5.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวเท่ากับ 2λ ในระนาบ $xz (\psi = 0^\circ)$

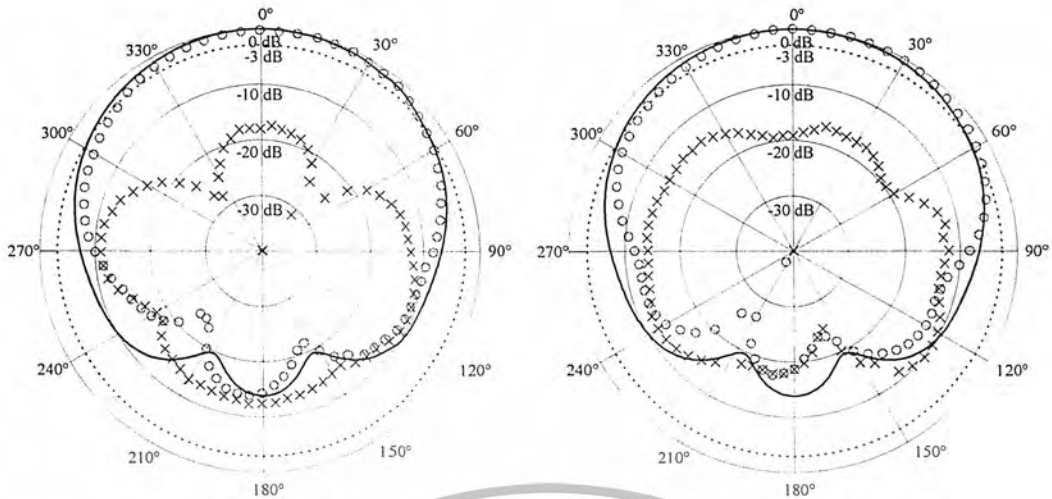
เอกสารนี้เป็นเอกสารของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและทบวงมหาวิทยาลัย ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ ไม่สามารถคืนค่า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.14-5.17 เป็นการวัดสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีความยาวท่อเท่ากับ 0.7λ และ 2λ พบว่าที่ความยาวท่อ 0.7λ จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังที่แรงกว่าที่ความยาว 2λ เพราะว่าการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งจะคำนวณที่ความยาวของท่อเป็นอนันต์ พบว่าที่ระนาบ xz ที่มุมเท่ากับ 0 และ 180 องศา ซึ่งเป็นบริเวณด้านบนและด้านล่างของท่อทรงกระบอก จะมีลักษณะสนามที่แรง จึงทำให้ท่อที่มีความยาวที่สั้นนั้นมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นด้านหลังที่มากกว่าท่อที่มีความยาวของท่อมักกว่า ส่วนในระนาบ xy นั้นจะเกิดการเลี้ยวเบนของขอบทำให้ลำคลื่นเปลี่ยนไป



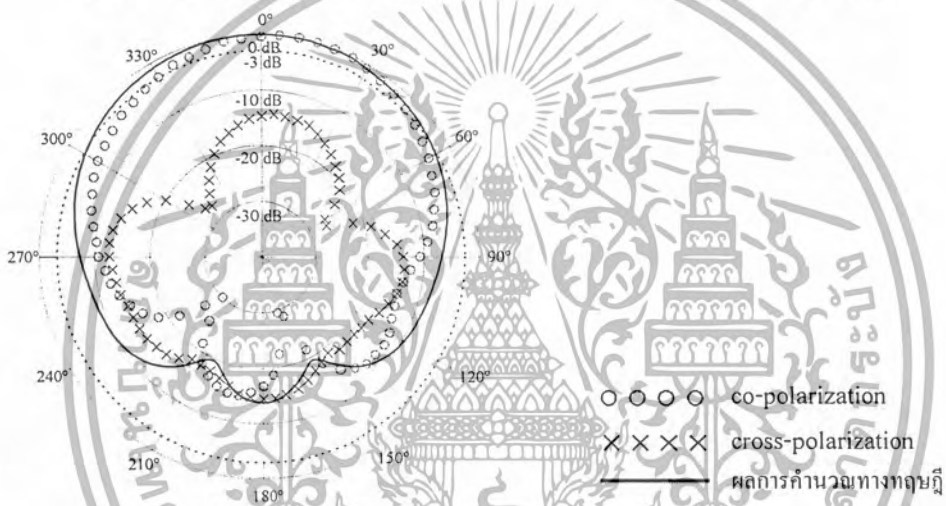
รูปที่ 5.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเยื้องบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวท่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ $xy (\psi = 45^\circ)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



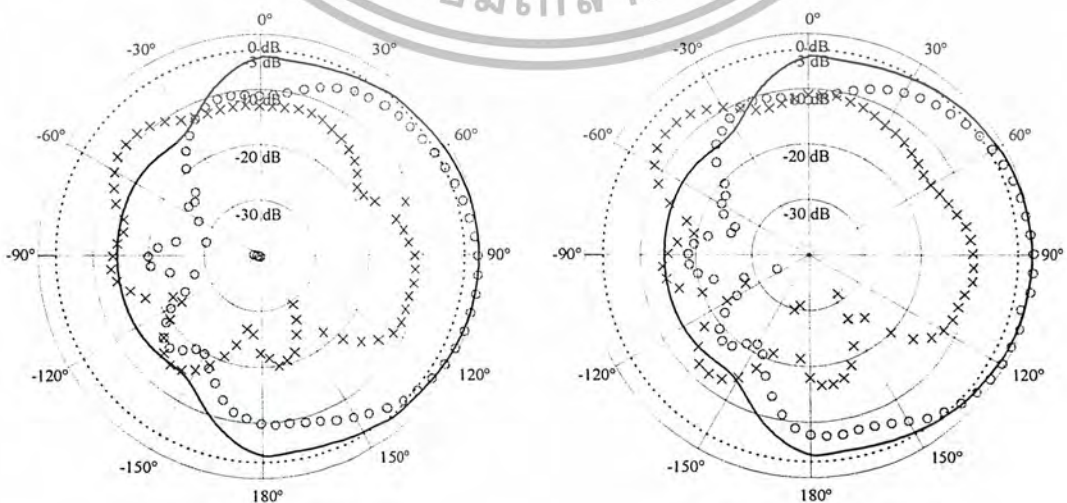
ก) ความถี่ 5.15GHz

ข) ความถี่ 5.25GHz



ค) ความถี่ 5.35GHz

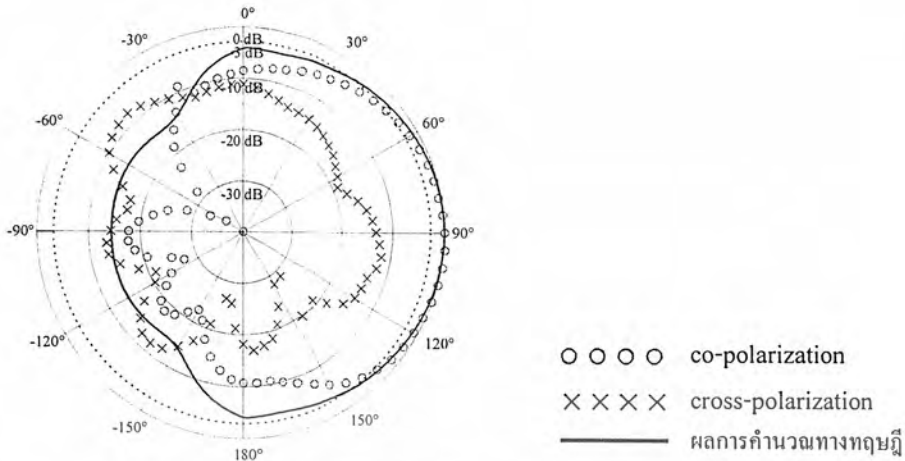
รูปที่ 5.19 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวท่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ $\psi(\psi = 45^\circ)$



ก) ความถี่ 5.15GHz

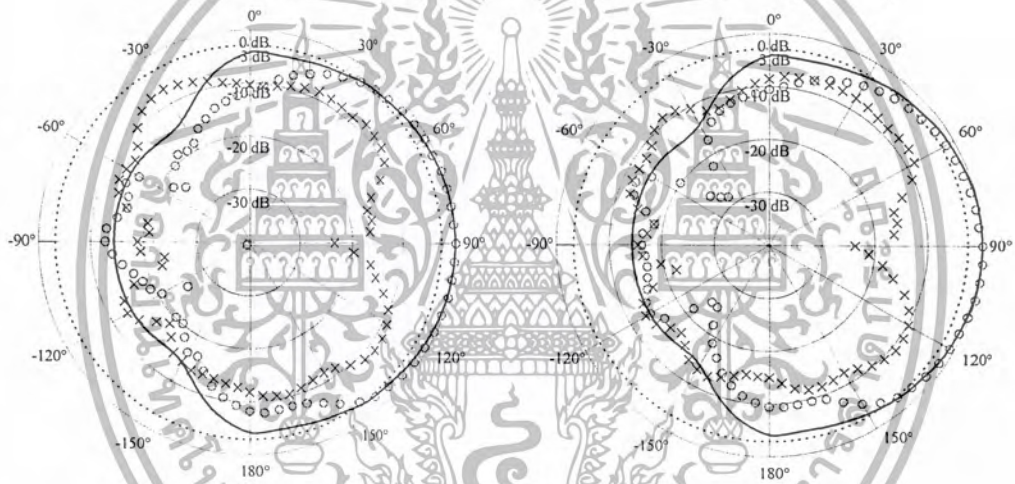
ข) ความถี่ 5.25GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



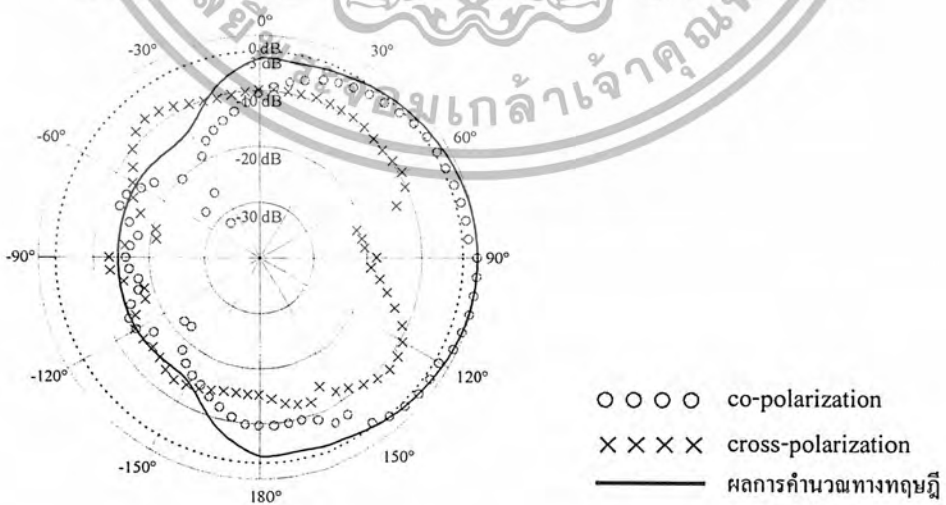
ค) ความถี่ 5.35GHz

รูปที่ 5.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 0.7λ ในระนาบ xz (ψ = 45°)



ก) ความถี่ 5.15GHz

ข) ความถี่ 5.25GHz



ค) ความถี่ 5.35GHz

รูปที่ 5.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีความยาวต่อเท่ากับ 2λ ในระนาบ xz (ψ = 90°)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบในรูปที่ 5.18-5.21 เป็นการวัดสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีความยาวท่อเท่ากับ 0.7λ และ 2λ พบว่าในระนาบ xz ที่ความยาวท่อ 2λ จะมีแบบรูปการแพร่กระจายที่ใกล้เคียงกับทฤษฎีมากกว่าที่ความยาว 2λ เพราะว่าจากการคำนวณทางทฤษฎีซึ่งจะคำนวณที่ความยาวของท่อเป็นอนันต์ ทำให้ท่อที่มีความยาวมากกว่าจะมีลักษณะใกล้เคียงกว่าท่อที่มีความยาวสั้นกว่า ส่วนในระนาบ xy นั้นจะมีลักษณะใกล้เคียงกับทฤษฎี

สำหรับ โพลาริไซซ์ไว้นั้นในทางทฤษฎีจะต้องเป็นศูนย์แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ เพราะท่อไม่ได้มีขนาดเป็นอนันต์

5.2.3 การทดสอบการโพลาริไซซ์ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยว

ในการทดสอบผู้ทดสอบได้นำสายอากาศที่มีการโพลาริไซซ์แบบวงกลมหมุนขวาและหมุนซ้าย ซึ่งในที่นี้ได้้นำสายอากาศแบบ Helix มาทำการส่งคลื่นโดยใช้สายอากาศแบบร่องเดี่ยวเป็นตัวรับคลื่น แล้วนำค่าที่วัดได้มาแทนสูตรทำการหาค่า อัตราส่วนแกนหลักต่อแกนรอง (Axial Ratio) ทำให้ได้ค่าจากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 การ โพลาริไซซ์ของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก

จากรูปที่ 5.22 พบว่าที่มุม $\phi = 0^\circ$ ซึ่งเป็นบริเวณด้านหน้าของร่องพบว่า สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่วางตามแนวแกนและวางตามแนวเส้นรอบวงจะมีค่าอัตราส่วนแกนหลักต่ออัตราส่วนแกนรองจะมีค่ามาก ทำให้พบว่ามีโพลาริไซซ์เป็นแบบเชิงเส้น และพบว่าสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอกจะมีค่าอัตราส่วนแกนหลักต่ออัตราส่วนแกนรองมีค่าประมาณ 13dB พบว่าจะมีการโพลาริไซซ์แบบวงรี

ในการทดสอบอาจเกิดการผิดพลาดจากการวัดแต่ละระนาบมีความแตกต่างกัน ตำแหน่งของจุดป้อนสัญญาณเวลาหมุนสายอากาศเพื่อเก็บค่าพลังงาน การตั้งตำแหน่งโพรบของสายอากาศตัวส่ง และตัวรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สายอากาศแฉวลำดับและสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก

ในการพิจารณาสายอากาศแบบแฉวลำดับแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกนั้น จะต้องทำการพิจารณาว่าแต่ละร่องนั้นมีลักษณะการวางตำแหน่งของร่องว่ามีลักษณะเป็นเช่นไรเสียก่อน

6.1 สายอากาศแฉวลำดับแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่วางในตำแหน่งใด ๆ

กรณีที่ตั้งตำแหน่งกึ่งกลางของร่องไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่ง $(\rho = a, \phi = 0^\circ, z = 0)$ แต่เปลี่ยนตำแหน่งไปอยู่ที่ $(\rho = a, \phi = \phi_p, z = z_p)$ ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 สายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกที่ตำแหน่งกึ่งกลางของร่องอยู่ที่ $(\rho = a, \phi = \phi_p, z = z_p)$

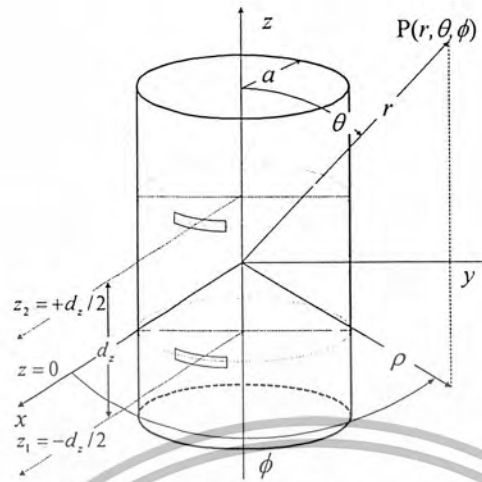
จะมีสมการของสนามระยะใหม่ดังนี้

$$E''(r, \theta, \phi) = E(r, \theta, \phi - \phi_p) e^{jk_z z_p \cos \theta} \quad (6.1)$$

6.2 สายอากาศแฉวลำดับแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอก

สายอากาศแฉวลำดับแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกนั้นมีลักษณะการจัดวาง 2 ลักษณะคือ สายอากาศแฉวลำดับที่จัดวางตามแนวแกนและสายอากาศแบบร่องที่จัดวางตามแนวเส้นรอบวง ดังแสดงในรูปที่

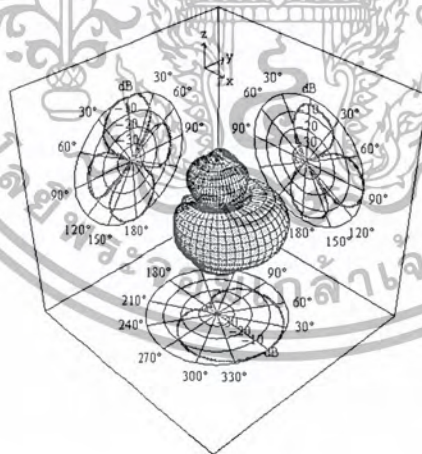
6.2



รูปที่ 6.3 สายอากาศแฉวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก

6.3.1.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นกำหนดให้มีรัศมีเท่ากับ 0.437λ ตามที่ทำการทดลองสายอากาศร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ 0.65λ จากการคำนวณเชิงเลขพบว่า จะมีการแพร่กระจายคลื่นที่ด้านหน้าจะมีมากกว่าด้านหลังจะมีค่าคลื่นเล็กน้อย ในระนาบ xy จะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่เหมือนกับสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 6.4

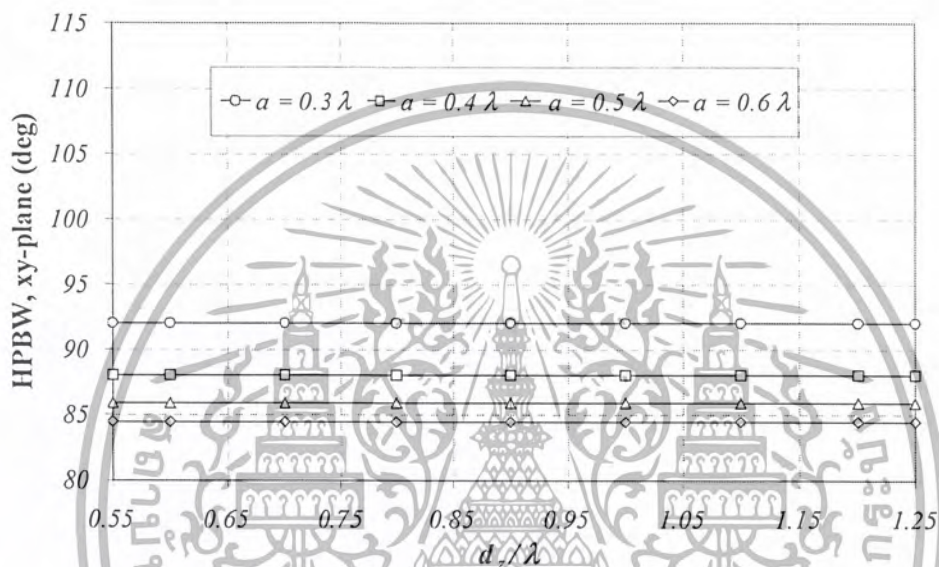


รูปที่ 6.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแฉวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ

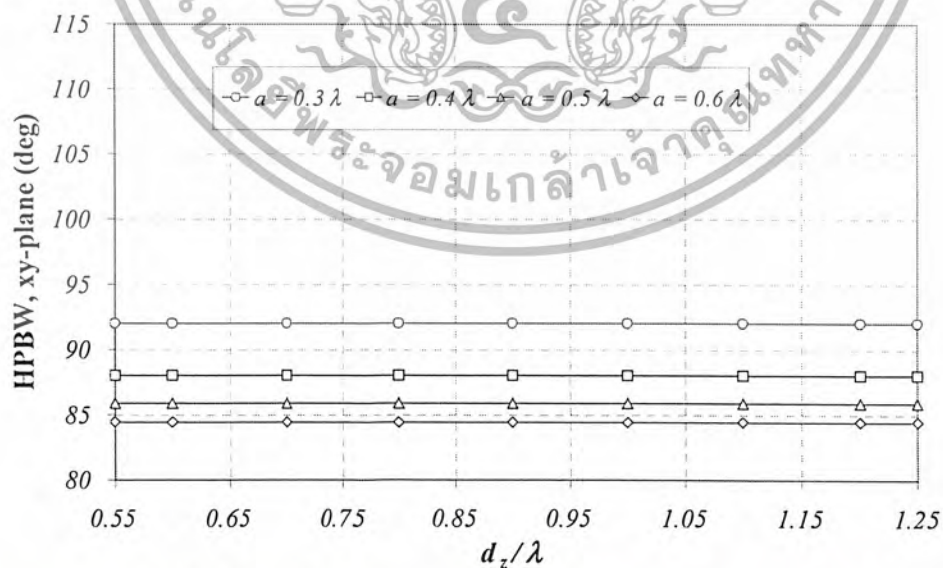
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.1.2 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xy เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างร่องจะมีลักษณะคงที่และเมื่อมีการเพิ่มรัศมีของทรงกระบอก จะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเพิ่มขึ้น สำหรับในระนาบ xz เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างร่องจะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างร่องเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรัศมีของทรงกระบอกค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 6.5 และรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xy ของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ

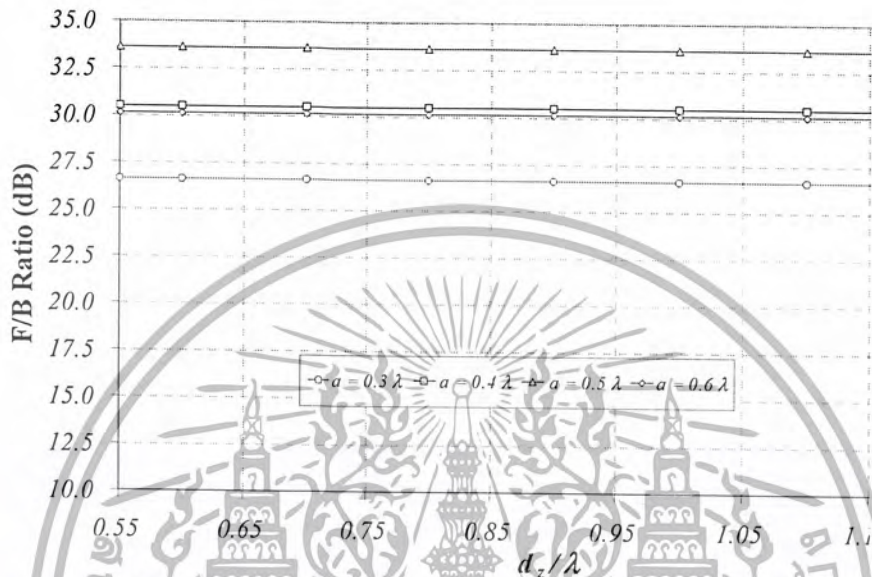


รูปที่ 6.6 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz ของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.1.3 อัตราส่วนค่าคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง

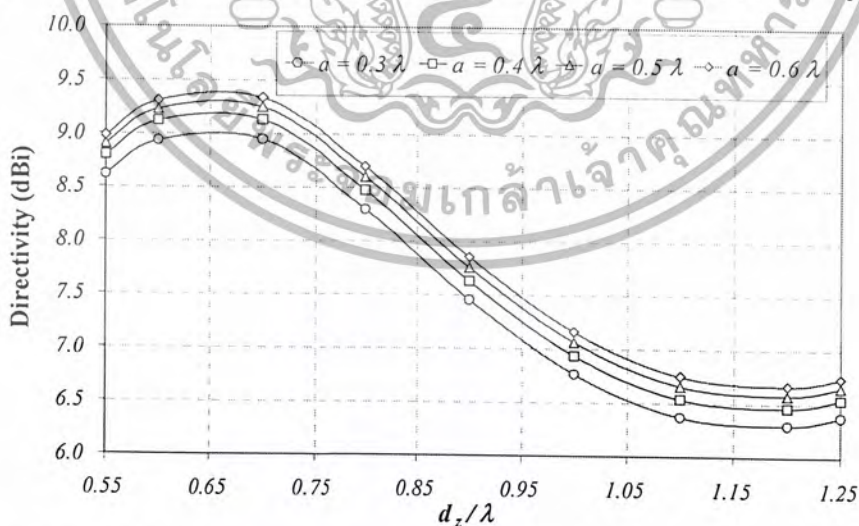
เมื่อระยะห่างระหว่างร่อง มีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนค่าคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังจะมีค่าคงที่ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรัศมีของร่องเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าอัตราส่วนด้านหน้าต่อด้านหลัง จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 อัตราส่วนค่าคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์กรประกอบ

6.3.1.1.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

จากรูปที่ 6.8 พบว่าที่ระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ 0.65λ จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด

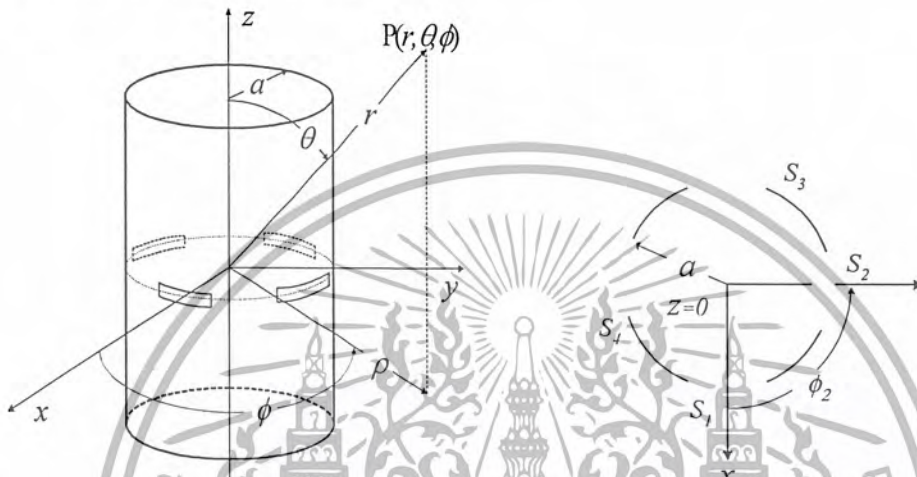


รูปที่ 6.8 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์กรประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.2 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก

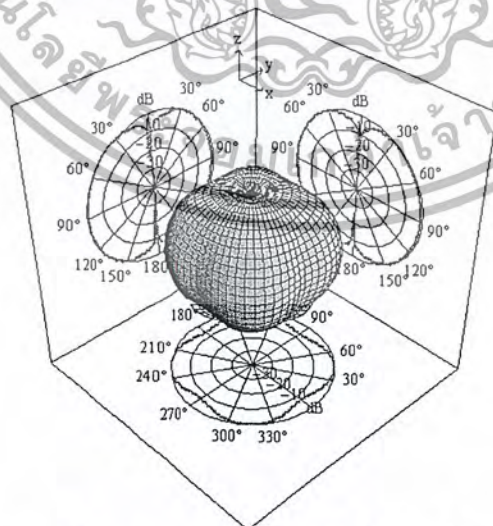
ในการวิเคราะห์แถวลำดับในแนวเส้นรอบวง จะทำการวิเคราะห์แถวลำดับที่มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 3, 4, 5 และ 6 องค์ประกอบ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6.9 ซึ่งเป็นสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 4 องค์ประกอบ



รูปที่ 6.9 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 4 องค์ประกอบ

6.3.1.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

การวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะทำการวิเคราะห์ที่ รัศมีเท่ากับ 0.437λ และมีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 4 องค์ประกอบ พบว่าจะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวดังแสดงในรูปที่ 6.10

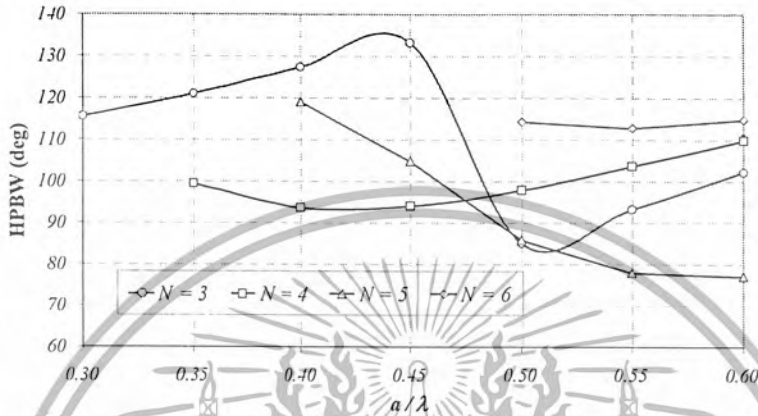


รูปที่ 6.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่มีจำนวนองค์ประกอบ 4 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.1.2.2 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะทำการพิจารณาเฉพาะในระนาบ xz เนื่องจากในระนาบ xy เป็นการแพร่กระจายแบบรอบทิศทาง ซึ่งจะพบว่า ที่รัศมีเท่ากันจำนวนองค์ประกอบที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเพิ่มขึ้นตาม ดังแสดงในรูปที่ 6.11



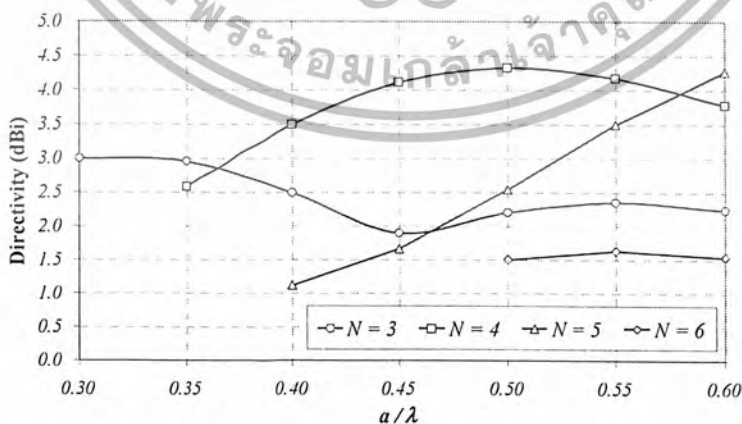
รูปที่ 6.11 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz ของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก

6.3.1.2.3 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง

เนื่องจากสายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ทำให้ลำคลื่นด้านหน้ากับด้านหลังมีค่าเท่ากัน จึงไม่ต้องทำการวิเคราะห์อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง

6.3.1.2.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

พบว่าเมื่อมีรัศมีเพิ่มขึ้นจะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อแถวลำดับมีจำนวน 3 องค์ประกอบค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะมีแนวโน้มที่ต่างกัน เมื่อจำนวนองค์ประกอบสูงขึ้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศก็จะมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน



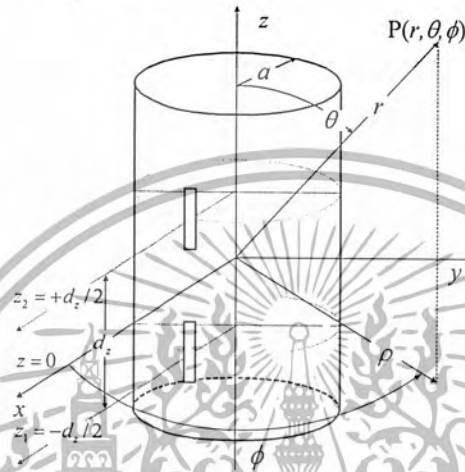
รูปที่ 6.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2 ผลการคำนวณเชิงเลขของสายอากาศแถวลำดับที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก

6.3.2.1 สายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก

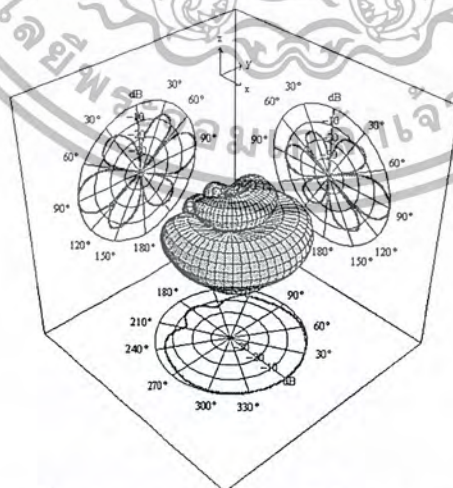
จะทำการวิเคราะห์สายอากาศที่มีแถวลำดับจำนวน 2 องค์ประกอบ มีรัศมีของทรงกระบอกเท่ากับ 0.437λ ซึ่งจะมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 สายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์ประกอบ

6.3.2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ทำการพิจารณาที่ระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ 1.0λ จากการวิเคราะห์พบว่า ในระนาบ xy จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นคล้ายกับสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก ซึ่งจะแสดงในรูปที่ 6.14

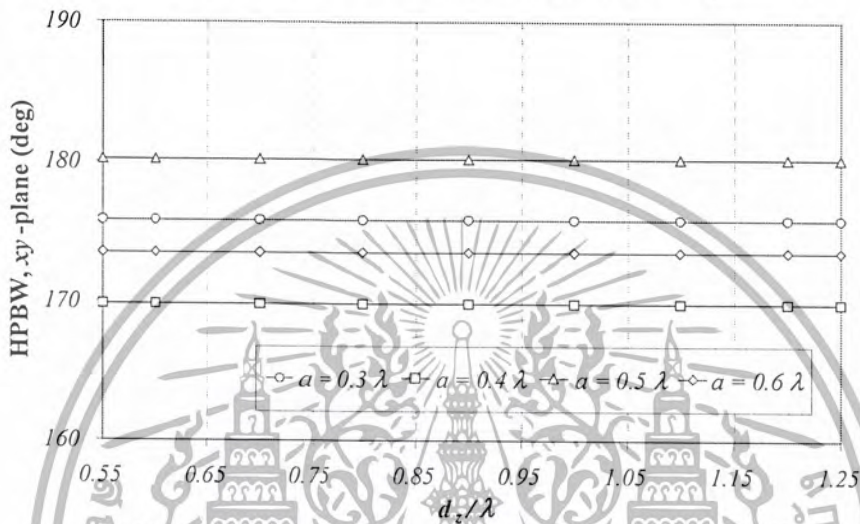


รูปที่ 6.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์ประกอบ

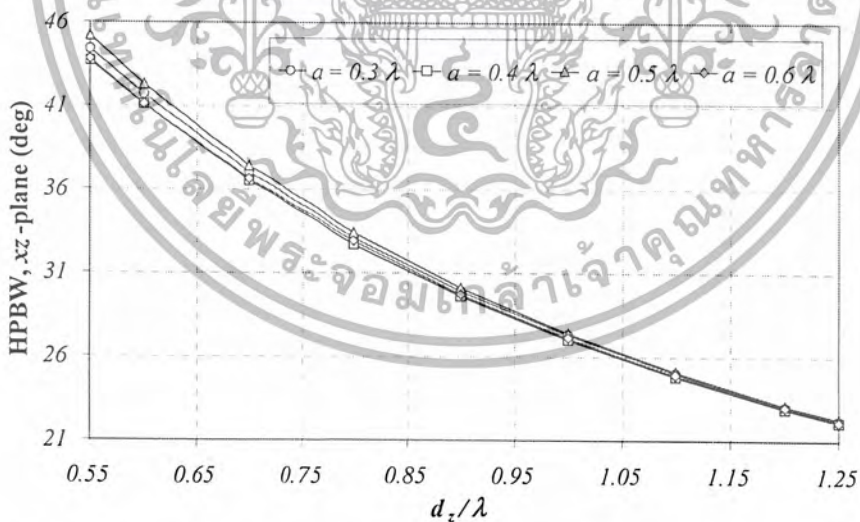
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2.1.2 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xy เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างร่องจะมีลักษณะคงที่และเมื่อมีการเพิ่มรัศมีของทรงกระบอก จะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเพิ่มขึ้น สำหรับในระนาบ xz เมื่อรัศมีแตกต่างกันจะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังใกล้เคียงกัน และเมื่อระยะห่างระหว่างร่องมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6.15 และรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.15 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xy ของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์ประกอบ

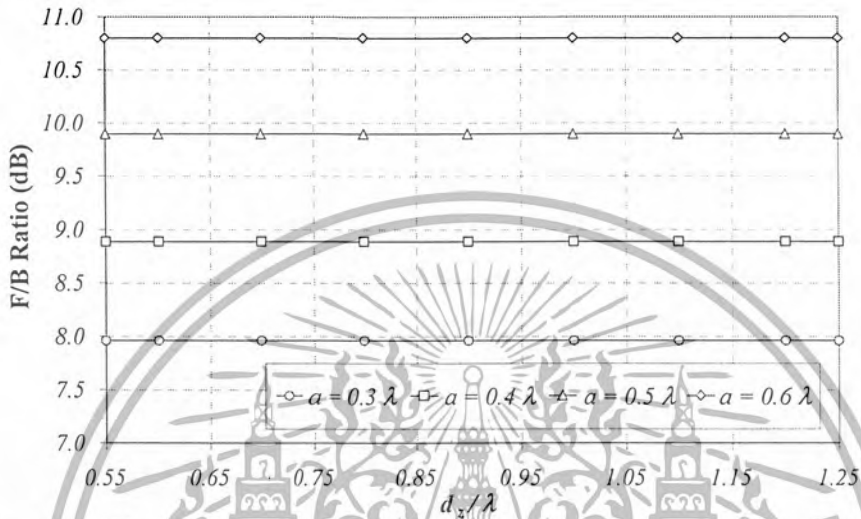


รูปที่ 6.16 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz ของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2.1.3 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง

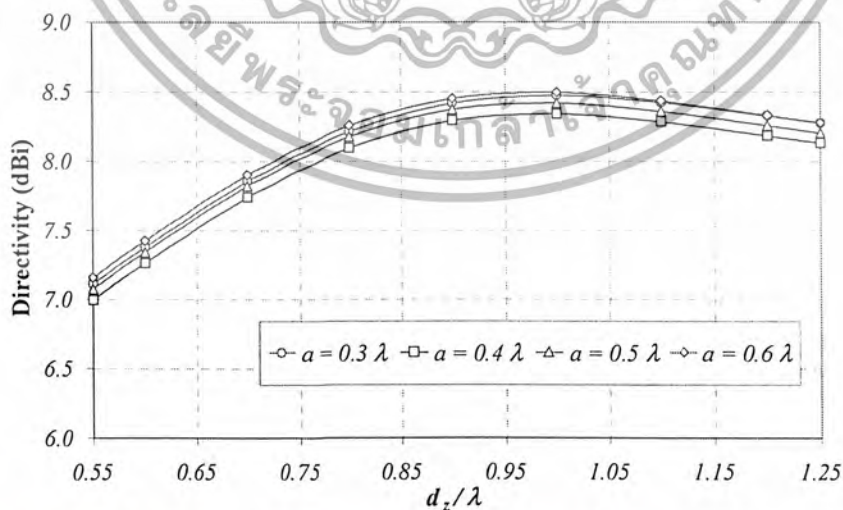
ค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังนั้น พบว่าระยะห่างระหว่างร่องจะไม่มีผลต่อค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง เมื่อรัศมีของทรงกระบอกเพิ่มขึ้นจะมีค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลังของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวค้ำนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์ประกอบ

6.3.2.1.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

ที่ระยะห่างระหว่างร่องมีค่าน้อย จะมีลักษณะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งจะมีค่าสูงสุดที่ระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ 1.0λ เมื่อค่าระยะห่างระหว่างร่องมีค่ามากกว่า 1.0λ จะเริ่มมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางลดลง ดังแสดงในรูปที่ 6.18

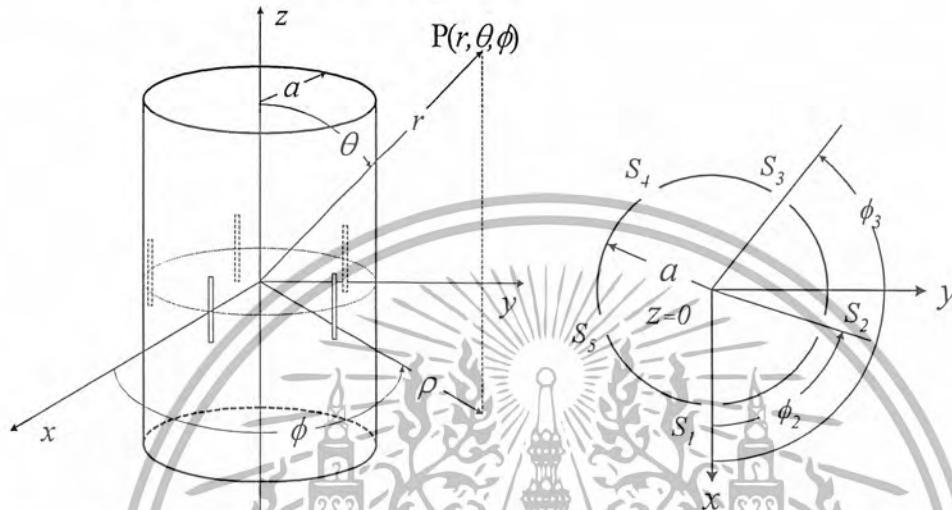


รูปที่ 6.18 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแถวลำดับในแนวแกนที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวค้ำนำทรงกระบอกจำนวน 2 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2.2 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก

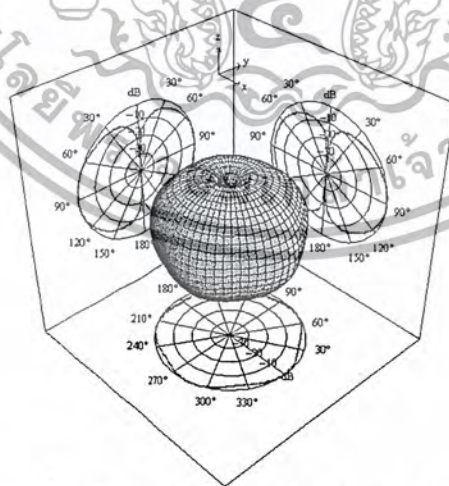
ในการวิเคราะห์แถวลำดับในแนวเส้นรอบวง จะทำการวิเคราะห์แถวลำดับที่มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 3, 4, 5 และ 6 องค์ประกอบ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 6.19 ซึ่งเป็นสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 5 องค์ประกอบ



รูปที่ 6.19 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 5 องค์ประกอบ

6.3.2.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะทำการพิจารณาที่รัศมีของทรงกระบอกเท่ากับ 0.437λ และจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 5 องค์ประกอบ พบว่าจะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 6.20

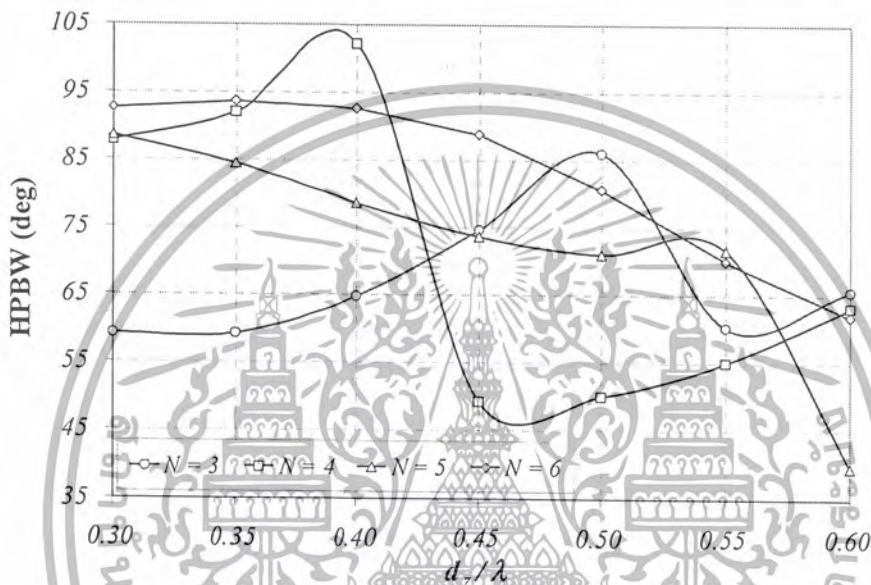


รูปที่ 6.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 5 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3.2.2.1 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง

ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะทำการพิจารณาเฉพาะในระนาบ xz เนื่องจากในระนาบ xy เป็นการแพร่กระจายแบบรอบทิศทาง ซึ่งจะพบว่า ที่จำนวนองค์ประกอบของสายอากาศเท่ากับ 3 และ 4 องค์ประกอบจะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังจะมีค่าน้อยแล้วเพิ่มขึ้นเมื่อถึงค่าๆหนึ่งแล้วค่าก็จะตกลงอีกครั้ง และเมื่อถึงจุดหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นใหม่ เมื่อองค์ประกอบเพิ่มขึ้นจะมีลักษณะค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังใกล้เคียงกัน คือเมื่อรัศมีเพิ่มขึ้นจะมีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังลดลง



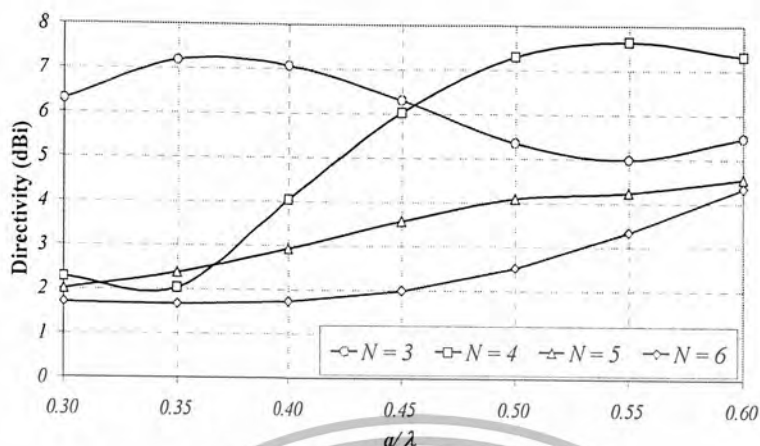
รูปที่ 6.21 ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz ของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก

6.3.2.2.3 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง

เนื่องจากสายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ทำให้ลำคลื่นด้านหน้ากับด้านหลังมีค่าเท่ากัน จึงไม่ต้องทำการวิเคราะห์อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง

6.3.2.2.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

ที่จำนวนองค์ประกอบของสายอากาศเท่ากับ 3 องค์ประกอบจะมีลักษณะที่แตกต่างจากจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 4, 5 และ 6 องค์ประกอบ แต่เมื่อองค์ประกอบมีค่ามากขึ้นจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน คือ เมื่อรัศมีเพิ่มขึ้นจะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.22 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่มีลักษณะร่องวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก

6.4 ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องเดียวบนผิวตัวนำทรงกระบอก

ในการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องเดียวบนผิวตัวนำทรงกระบอก จะทำการทดสอบเฉพาะสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงเท่านั้น เนื่องจากการทำสายอากาศแบบแถวลำดับแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกมีจุดประสงค์เพื่อให้ตัวสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง และทำการออกแบบที่ความถี่ 5.25GHz ซึ่งใช้งานกับการสื่อสาร โครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย

6.4.1 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดียวที่มีลักษณะการวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก

จากผลการทดสอบสายอากาศแบบร่องเดียวบนผิวตัวนำทรงกระบอก ที่ความยาว 0.7λ และ 2.0λ แล้วมีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใกล้เคียงกัน จึงเลือกความยาวของสายอากาศเท่ากับ 0.7λ มาสร้างเป็นแถวลำดับเพราะว่าจะมีขนาดเล็กกว่า และมีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 4 องค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 6.23

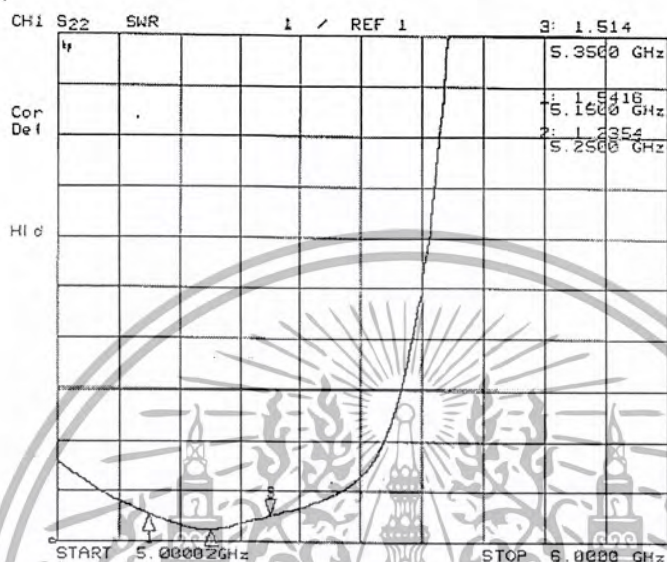


รูปที่ 6.23 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดียวที่มีลักษณะการวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 4 องค์ประกอบ

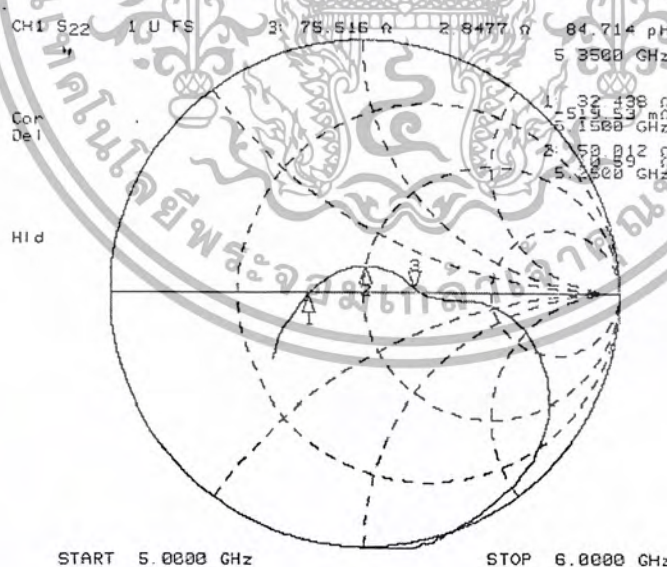
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4.1.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์

จากการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์ จะได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.2354 : 1 และได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $50.012 + j10.59 \Omega$ ดังแสดงในรูปที่ 6.24 และ 6.25



รูปที่ 6.24 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอกจำนวน 4 องค์ประกอบ

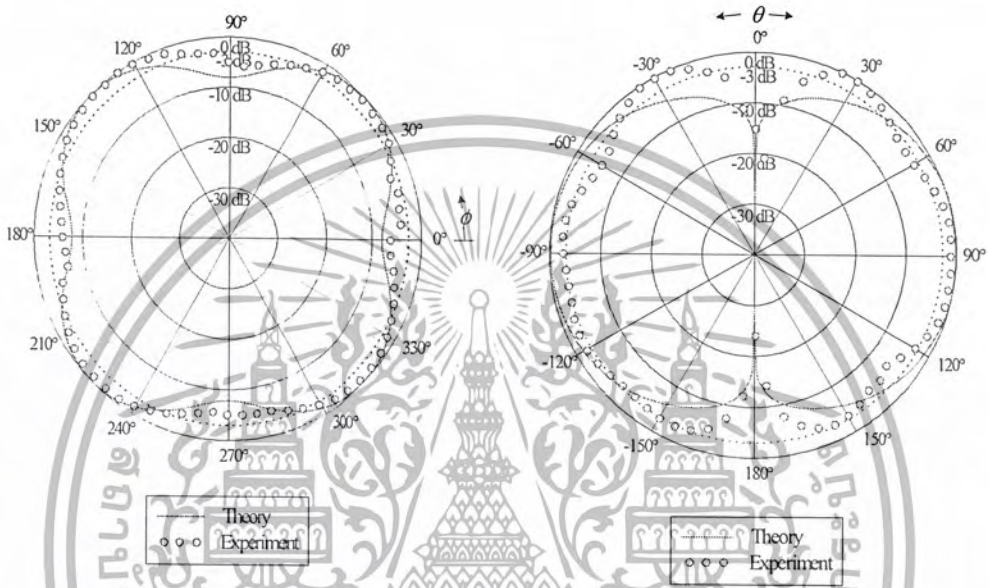


รูปที่ 6.25 ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 4 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มีลักษณะใกล้เคียงกับที่ทำการวิเคราะห์ ที่ระนาบ xy และ xz ดังแสดงในรูปที่ 6.26



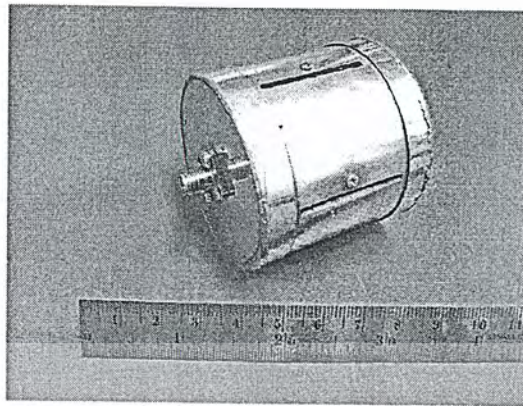
ก) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz

รูปที่ 6.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงเบอร์รองเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวเส้นรอบวงบนฟิวต์ว้นำทรงกระบอก จำนวน 4 องค์ประกอบ

6.4.2 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงเบอร์รองเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวแกนบนฟิวต์ว้นำทรงกระบอก

สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงที่รองวางตามแนวแกน มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 5 องค์ประกอบ มีความยาวเท่ากับ 0.7 λ ดังแสดงในรูปที่ 6.26

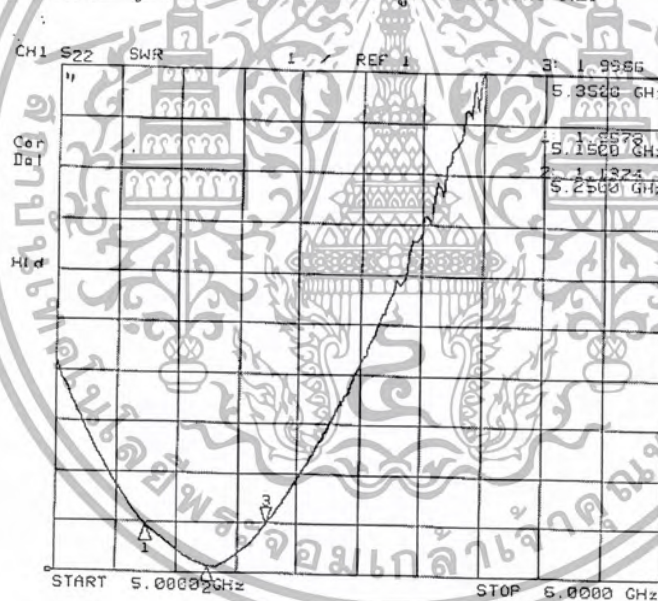
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.27 สายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 5 องค์ประกอบ

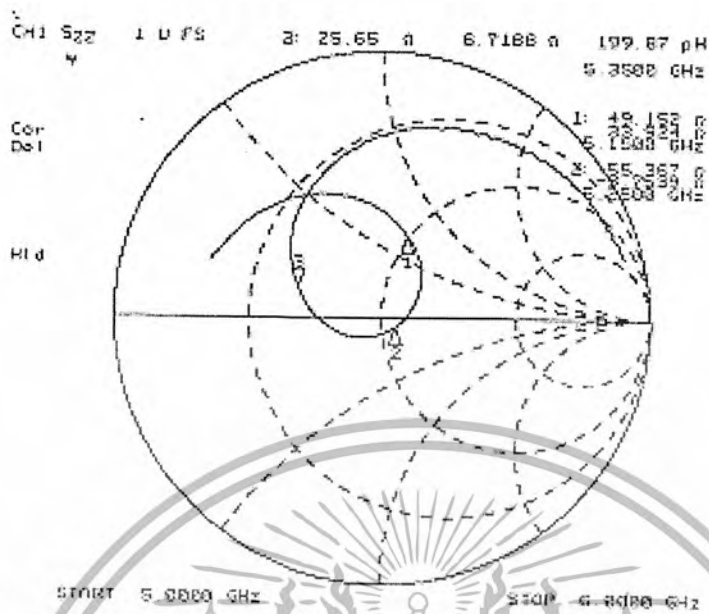
6.4.2.1 อัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์

จากการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์ จะได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.1324 : 1 และได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $55.367 - j8.7539 \Omega$ ดังแสดงในรูปที่ 6.28 และ 6.29



รูปที่ 6.28 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแถวลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 5 องค์ประกอบ

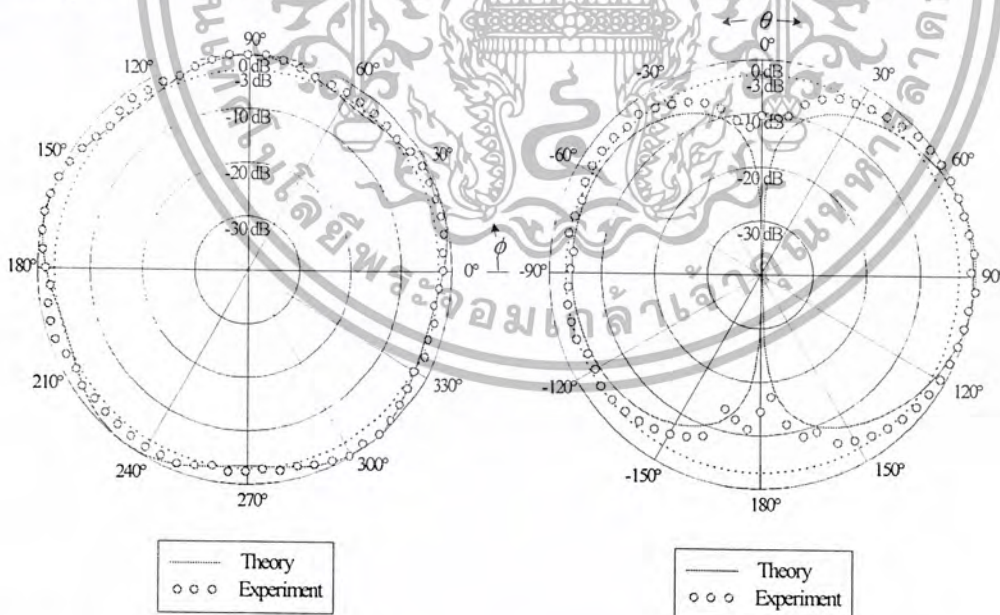
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.29 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแฉกลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 5 องค์กรประกอบ

6.4.2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ทำการทดสอบ จะมีลักษณะสอดคล้องกับการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 6.30



รูปที่ 6.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกลำดับในแนวเส้นรอบวงแบบร่องเดี่ยวที่มีลักษณะการวางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก จำนวน 5 องค์กรประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำสายอากาศแถวลำดับบนผิวตัวนำทรงกระบอกนั้นจะมีลักษณะใกล้เคียงกับที่ได้ทำการวิเคราะห์ คือจะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง ซึ่งจะทำให้สามารถเลือกทิศทางการแพร่กระจายคลื่นได้ ในกรณีที่ต้องการแบบทิศทางเดียว ก็สามารถใช้สายอากาศแบบร่องเดี่ยว และในกรณีที่ต้องการแบบรอบทิศทางจะใช้สายอากาศที่เป็นชนิดแถวลำดับ

6.5 สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก

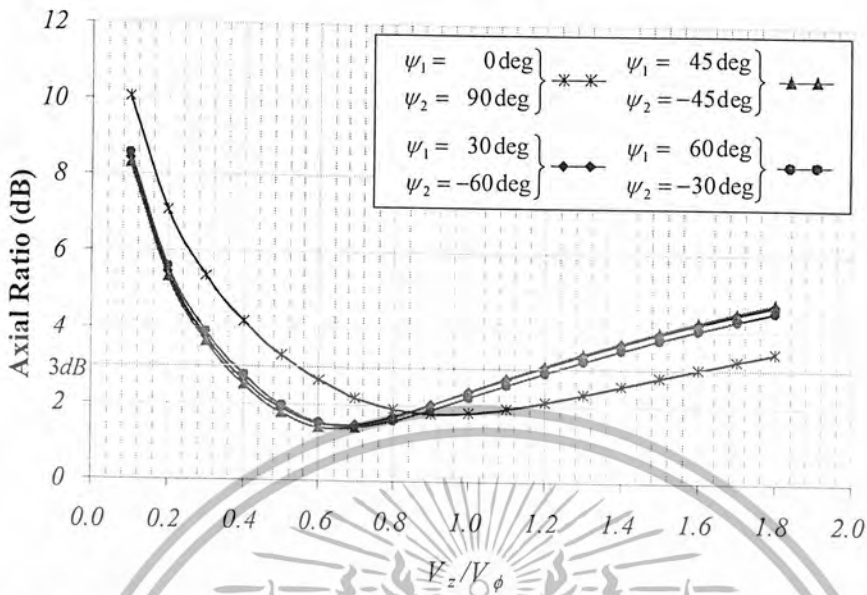
การวิเคราะห์สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก จะใช้สมการของสายอากาศแถวลำดับที่มีลักษณะการวางของร่องที่ 1 (ψ_1) และร่องที่ 2 (ψ_2) ให้มีความเอียงของร่องต่างกัน 90 องศา ตำแหน่งกึ่งกลางของร่องอยู่ที่ ($a = 0.437\lambda, \phi = 0^\circ, z = 0$) ดังรูปที่ 6.31



รูปที่ 6.31 สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก

6.5.1 ผลการวิเคราะห์การโพลาไรซ์ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก

ในการวิเคราะห์สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกจะทำการป้อนให้กระแสของทั้งสองร่องมีความต่างเฟสกัน 90 องศา และมีขนาดเท่ากัน โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างแรงดัน V_z/V_ϕ ซึ่งจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 6.32



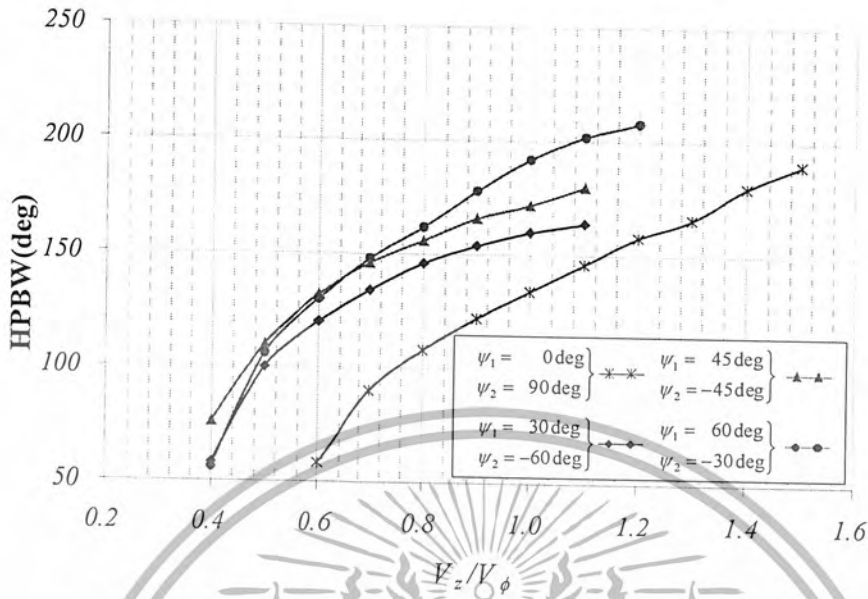
รูปที่ 6.32 อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวค้อนนำทรงกระบอก

จากรูปที่ 6.31 จุดที่มีการยอมรับว่ามีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมคือตั้งแต่ 0dB - 3dB ที่ร่องของมุม $\psi_1 = 0^\circ, \psi_2 = 90^\circ$ อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันระหว่าง V_z/V_ϕ ที่มีค่าน้อยนั้นจะมีค่าอัตราส่วนแกนหลักต่อแกนรองมากกว่า 3dB ทำให้มีโพลาไรซ์แบบวงรี แต่เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันระหว่าง V_z/V_ϕ มีค่าประมาณ 0.6 - 1.6 จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างแกนหลักต่อแกนรองในช่วง 3dB ซึ่งจะมีโพลาไรซ์แบบวงกลม และเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_z/V_ϕ มีค่ามากกว่า 1.6 จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างแกนหลักต่อแกนรองมากกว่า 3dB ซึ่งจะมีโพลาไรซ์แบบวงรี ส่วนในกรณีที่ร่องมีมุม $\psi_1 = 30^\circ, \psi_2 = -60^\circ, \psi_1 = 45^\circ, \psi_2 = -45^\circ$ และ $\psi_1 = 60^\circ, \psi_2 = -30^\circ$ จะมีค่าอัตราส่วนแกนหลักต่อแกนรองเมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_z/V_ϕ จะมีลักษณะใกล้เคียงกันคือ เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_z/V_ϕ มีค่าน้อยกว่า 0.4 จะมีค่าอัตราส่วนแกนหลักต่อแกนรองมากกว่า 3dB ซึ่งจะมีโพลาไรซ์แบบวงรี แต่เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันระหว่าง V_z/V_ϕ มีค่าประมาณ 0.4 - 1.2 จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างแกนหลักต่อแกนรองในช่วง 3dB ซึ่งจะมีโพลาไรซ์แบบวงกลม และเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดัน V_z/V_ϕ มีค่ามากกว่า 1.2 จะมีค่าอัตราส่วนระหว่างแกนหลักต่อแกนรองมากกว่า 3dB ซึ่งจะมีโพลาไรซ์แบบวงรี

6.5.2 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม

ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม จะแสดงดังรูปที่ 6.33 จากรูปพบว่าที่ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่มีค่าน้อยจะมีค่าความกว้างลำคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมน้อย แต่เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันมีค่าเพิ่มมากขึ้นก็จะมีค่าความกว้างลำคลื่นที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมเพิ่มมากขึ้นด้วย

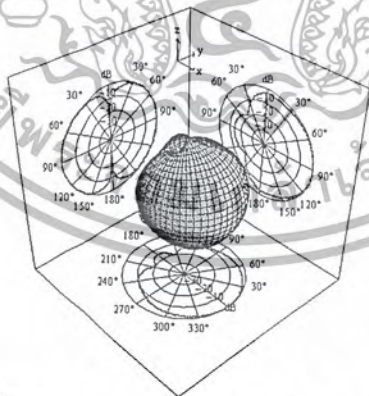
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.33 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีโพลาไรซ์แบบวงกลม

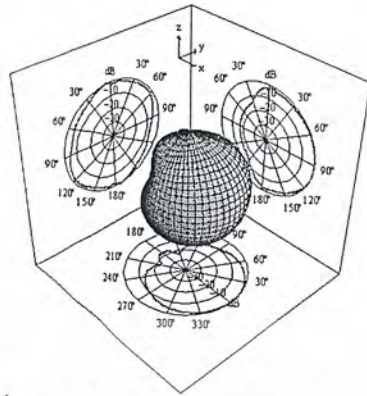
6.5.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะทำการวิเคราะห์ที่ $\psi_1 = 0^\circ, \psi_2 = 90^\circ$ และ $\psi_1 = 45^\circ, \psi_2 = -45^\circ$ และมีรัศมีเท่ากับ 0.42λ พบว่าสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ทั้งสองนี้จะมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่เหมือนกันในระนาบ xy และ xz ดังรูปที่ 6.34 และ 6.35



รูปที่ 6.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0^\circ, \psi_2 = 90^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

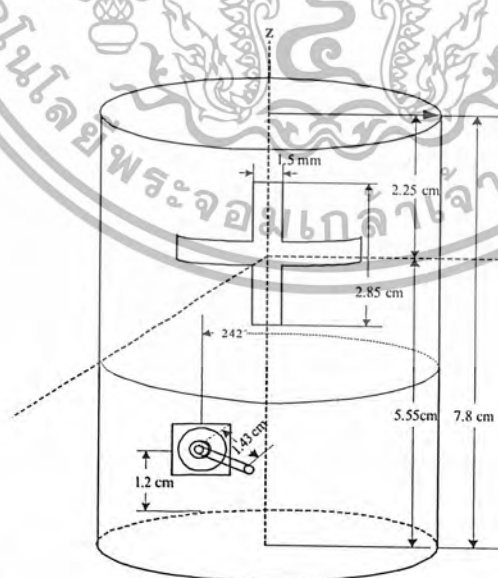


รูปที่ 6.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$

6.5.4 การออกแบบสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก

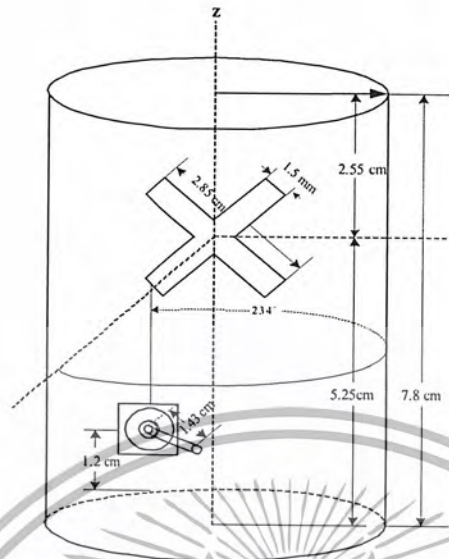
ในการออกแบบสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก ผู้จัดทำได้ทำการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า NEC2 มาใช้ในการออกแบบ ซึ่งการออกแบบโดยโปรแกรม NEC2 นี้จะมีลักษณะการออกแบบโดยทำการวาดรูปแบบของตัวสายอากาศ(model) จากนั้นทำการประมวลผล ซึ่งโปรแกรม NEC2 จะแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ เช่น ค่าแบบรูปการแพร่กระจาย ค่าการโพลาไรซ์ เป็นต้น ซึ่งจะทำให้การทดสอบที่สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$ และ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$

เมื่อทำการออกแบบจากโปรแกรม NEC2 แบบของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมจะมีลักษณะดังรูปที่ 6.36 และ 6.37



รูปที่ 6.36 โครงสร้างสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.37 โครงสร้างสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ

$$\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$$

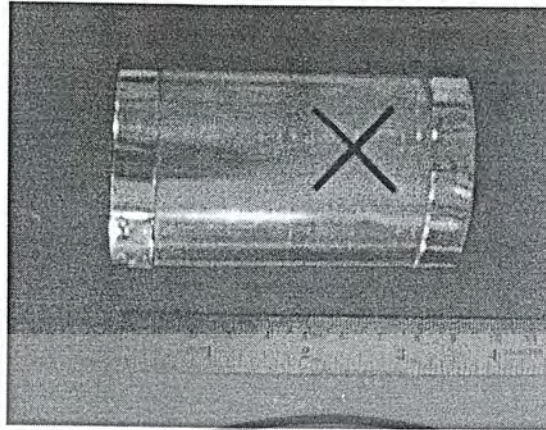
6.5.5 การทดสอบสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก

เมื่อได้ทำการออกแบบสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$ และ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$ จึงนำไปสร้างตัวสายอากาศจะได้ดังรูปที่ 6.38 และ 6.39



รูปที่ 6.38 สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$

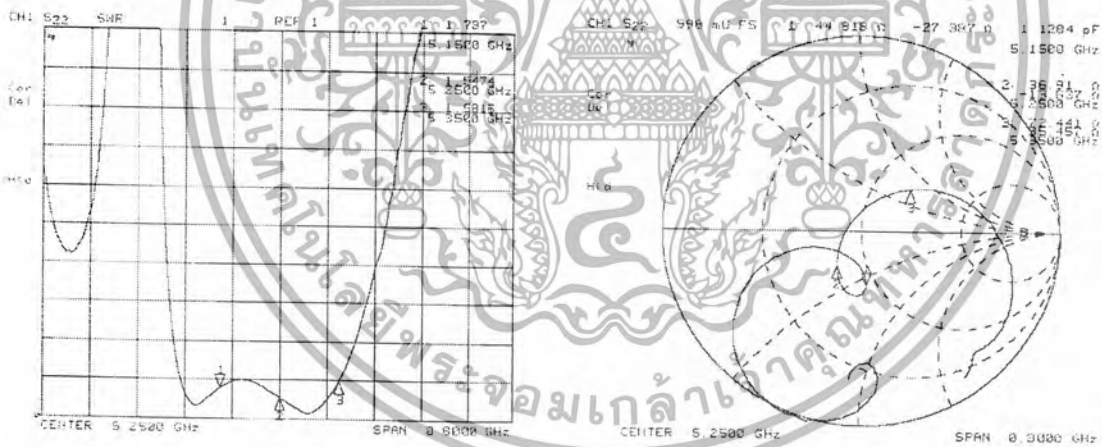
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.39 สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$

6.5.5.1 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าอิมพีแดนซ์

จากการทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์ จะได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$ เท่ากับ 1.5474 : 1 ได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $36.91 - j13.637 \ \Omega$ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$ เท่ากับ 1.5692% : 1 ได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $32.984 + j7.1348 \ \Omega$ ดังแสดงในรูปที่ 6.40 และ 6.41

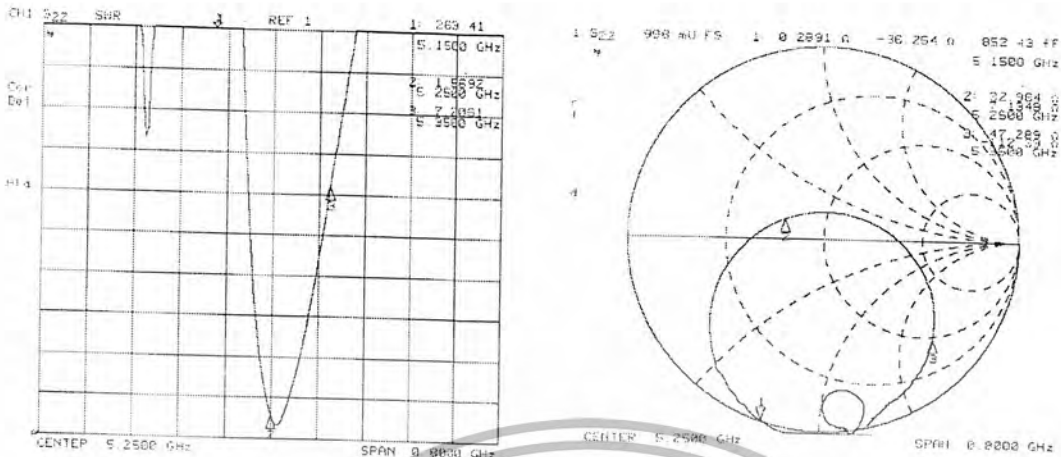


ก) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ข) ค่าอิมพีแดนซ์

รูปที่ 6.40 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ข) ค่าอิมพีแดนซ์

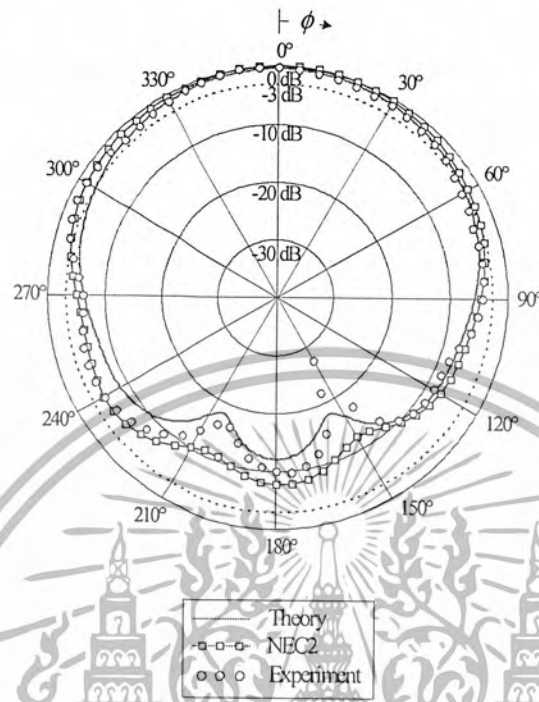
รูปที่ 6.41 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและค่าอิมพีแดนซ์ของของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$

6.5.5.2 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

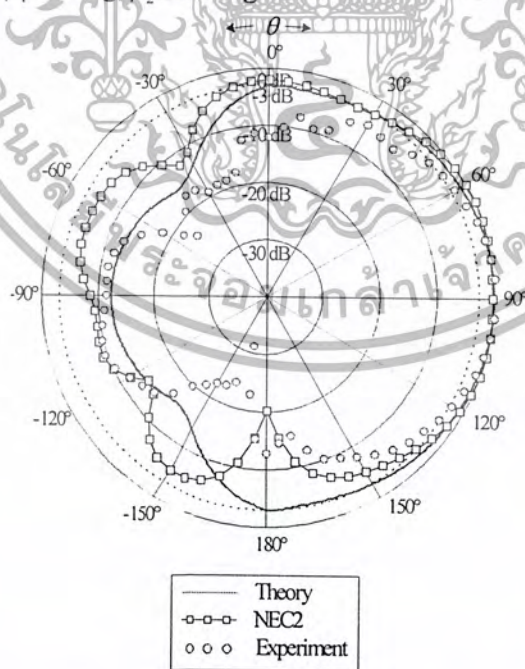
จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งสองตัว พบว่าในระนาบ xy นั้นจะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์และผลการคำนวณด้วยโปรแกรม NEC2 สำหรับในระนาบ xz พบว่าลวดคลื่นด้านหน้าจากการทดสอบจะมีค่าที่แคบกว่าจากการวิเคราะห์และผลการคำนวณด้วยโปรแกรม NEC2 ส่วนลวดคลื่นด้านหลังนั้น จะมีขนาดของลวดคลื่นที่ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์และผลจากการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 แต่ลวดคลื่นจะมีค่าแคบกว่ามาก

ลวดคลื่นที่ได้ในระนาบ xz จะเห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ผลการคำนวณด้วยโปรแกรม NEC2 และที่ได้จากการทดลองจะมีลักษณะไม่สมมาตรกัน อันเนื่องมาจากการตำแหน่งของโพรบที่ใช้ป้อนกระแสไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งมุม $\phi = 180$ แต่จากการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ตำแหน่งของโพรบของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$ จะอยู่ที่ $\phi = 242$ และสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$ จะอยู่ที่ $\phi = 234$ เหตุที่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของโพรบตามมุม ϕ ก็เพื่อต้องการให้ให้กระแสของทั้งสองร่องมีขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

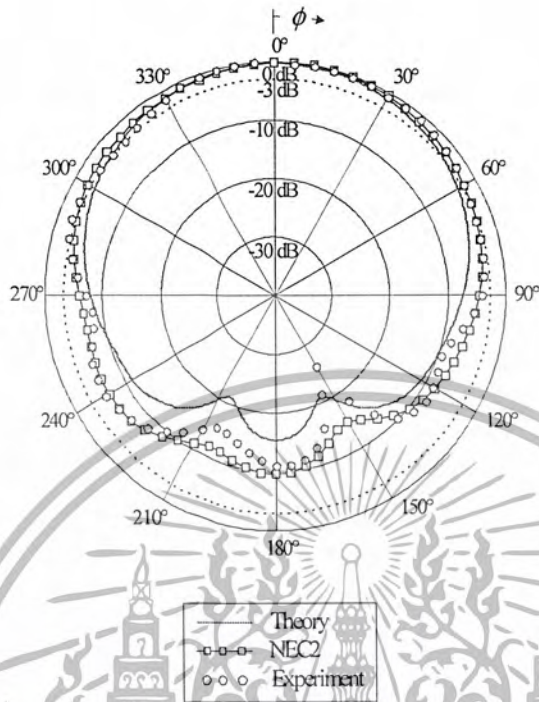


รูปที่ 6.42 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$

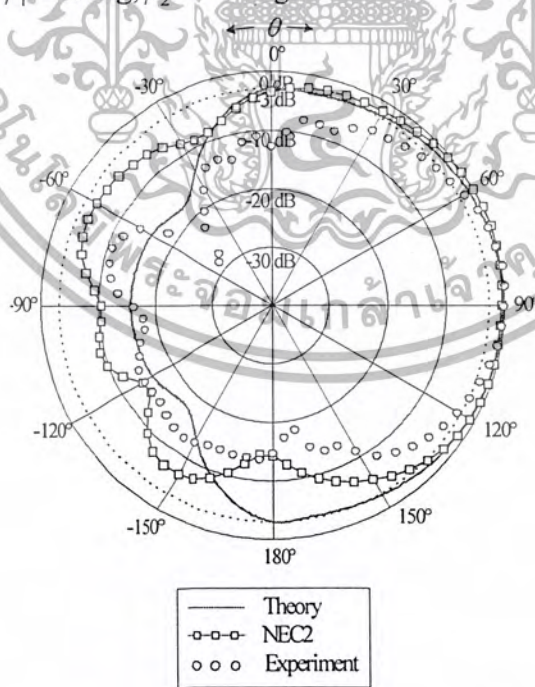


รูปที่ 6.43 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.44 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xy ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$

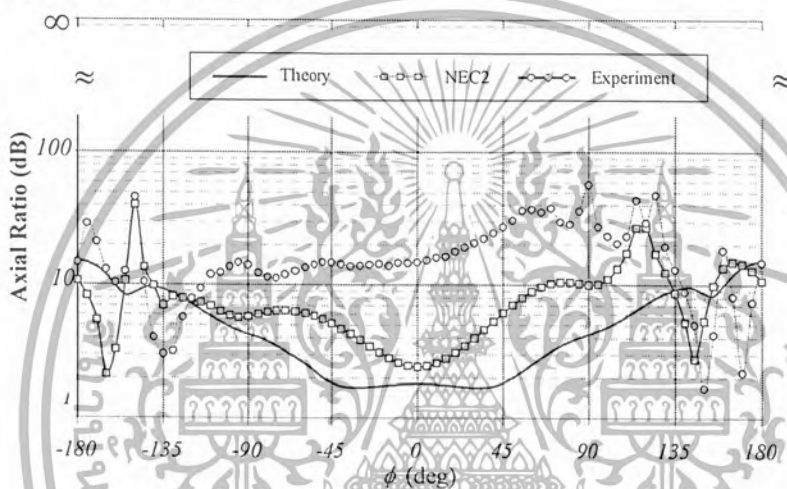


รูปที่ 6.45 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz ของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$

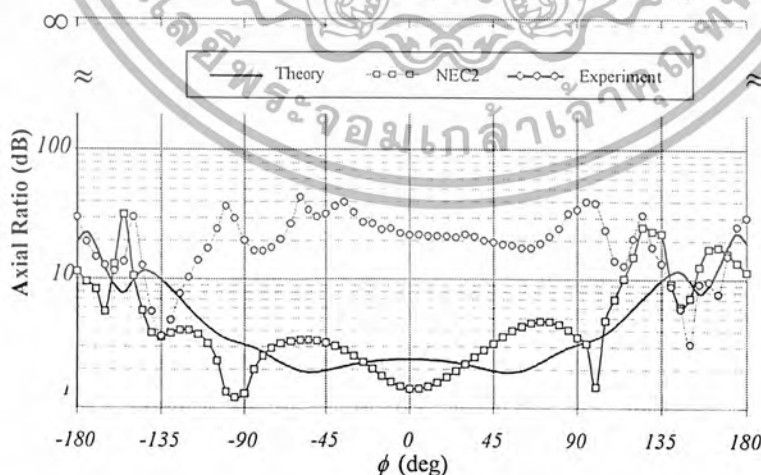
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.5.5.3 ผลการทดสอบโพลาริซซ์

จากการทดสอบค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$ ที่มุม ϕ เท่ากับ 0 องศา จะได้ค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 14.72 ซึ่งจะมีลักษณะการโพลาริซซ์แบบวงรี และการทดสอบค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$ ที่มุม ϕ เท่ากับ 0 องศา จะได้ค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 21.9 ซึ่งจะมีลักษณะการโพลาริซซ์แบบวงรีเช่นเดียวกัน จากการทดสอบนั้นไม่เป็นโพลาริซซ์แบบวงกลมเนื่องในการทำชิ้นงานนั้น มีความผิดพลาด ทำให้มีการป้อนกระแสภายในท่อไม่เท่ากันทุกจุด การโพลาริซซ์ของตัวสายอากาศทั้งสองตัวแสดงดังรูปที่ 6.46 และ 6.47



รูปที่ 6.46 ค่าอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 0 \text{ deg}, \psi_2 = 90 \text{ deg}$



รูปที่ 6.47 ค่าอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองของสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่มีมุมของร่องเท่ากับ $\psi_1 = 45 \text{ deg}, \psi_2 = -45 \text{ deg}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7 บทวิจารณ์และสรุป

โครงการนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ การออกแบบ การสร้างและการทดสอบสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกที่ให้การโพลาไรซ์แบบวงกลม ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทางและแบบรอบตัวเมื่อทำการสร้างสายอากาศแบบแฉวลำดับ ซึ่งสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมนี้เหมาะสำหรับเป็นสายอากาศที่สถานี เช่น สายอากาศของการแพร่กระจายสัญญาณโทรทัศน์ โทรศัพทเคลื่อนที่ ดาวเทียม ซึ่งสายอากาศที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นนี้มีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้กับโครงข่ายระบบท้องถิ่นไร้สาย

การสร้างสายอากาศขึ้นมาใช้งานนั้นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ โครงสร้างของสายอากาศที่ไม่ซับซ้อน มีการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ มีขนาดกระทัดรัด แข็งแรง สามารถติดตั้งได้ง่าย มีต้นทุนในการผลิตต่ำ ซึ่งสายอากาศที่ผู้วิจัยได้ทำการสร้างขึ้นนี้อยู่ในข่ายที่ได้กล่าวมา ข้อดีอีกอย่างของสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลมคือข้อมูลระหว่างที่ถูกส่งและรับจะมีการผิดเพี้ยนน้อยกว่าสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น และมีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวที่ดีด้วยคุณลักษณะของตัวนำทรงกระบอกที่ร่องลำดับแต่ละร่องถูกวางในลักษณะที่มุมการแพร่กระจายคลื่นมีความสม่ำเสมอ

ในการวิเคราะห์สายอากาศแบบร่องแฉวลำดับนั้นในเบื้องต้นจะทำการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากร่องบนผิวตัวนำ โดยทำการพิจารณาหาสมการสนามระยะไกลของสายอากาศแบบช่องเปิดก่อนโดยใช้ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า \vec{F} และศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก \vec{A} ช่วยในการหาสมการสนามที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศ จากนั้นจะทำการวิเคราะห์หาสมการสนามของสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวแกนบนผิวตัวนำทรงกระบอก สายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเส้นรอบวงบนผิวตัวนำทรงกระบอก และสายอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตามแนวเอียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก แล้วนำสมการสนามที่ได้ไปวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง ค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกนำมาพิจารณาออกแบบสร้างสายอากาศแบบแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอก

ในการคำนวณนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงค่ารัศมีของทรงกระบอก ผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณซึ่งได้แสดงไว้ในก่อนหน้านี้ จากการวิเคราะห์จะใช้ตัวนำทรงกระบอกที่มีค่ารัศมี (a) เท่ากับ 0.437λ เพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสม และที่สำคัญที่ค่ารัศมี เท่ากับ 0.437λ มีขนาดรัศเท่ากับ 2.4 cm มีใกล้เคียงรัศมีของท่อทองเหลืองที่จะนำมาทำสายอากาศที่มีขายในท้องตลาด

สายอากาศแฉวลำดับแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอกถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทำการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวของสายอากาศแบบร่องบนผิวตัวนำทรงกระบอกซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบมีความใกล้เคียงกับผลทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวิเคราะห์สายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกเราจะใช้ค่ารัศมีของทรงกระบอก เหมือนกันกับสายแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก และสมการสนามการแพร่กระจายคลื่นที่จะนำมา วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจะได้มาจากสมการสนามการแพร่กระจายคลื่นของอากาศแบบร่องเดี่ยวที่วางตาม แนวเฉียงบนผิวตัวนำทรงกระบอก หรือสมการสนามการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบร่องบนผิวตัว ทรงกระบอกที่มีมุม ψ ใดๆนำมาบวกกัน

ในส่วนของการออกแบบสร้างสายอากาศแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกเพื่อให้ได้สายอากาศที่มี การโพลาริซ์แบบวงกลมนั้นจะต้องให้สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากร่องทั้งสองร่องมีขนาดเท่ากันและมี ความต่างเฟสกัน 90 องศา ซึ่งในการออกแบบได้จะใช้โปรแกรม NEC 2 สร้างแบบจำลองและทดสอบ การทำงานเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลมและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง จากการออกแบบก็จะได้แบบของสายอากาศตามคุณสมบัติตามที่ต้องการดังที่แสดงไว้ในบทที่ 6

ผลการทดสอบสายแบบร่องคู่บนผิวตัวนำทรงกระบอกค่าอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรองของ สายอากาศทั้งสองแบบมีค่ามากกว่า 3dB ทำให้สายอากาศที่ได้ไม่เป็นสายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม อันเนื่องมาจากการทำให้ความต่างเฟสของของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากร่องให้มีความต่างเฟสเท่า กับ 90 องศาทำได้ยาก ซึ่งการปรับเฟสนั้นทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงระยะความห่างจากบริเวณตรงกลาง ร่องถึงขอบฝาด้านบนซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวตรงบริเวณนี้เพียงเล็กน้อยก็ทำให้ความต่างเฟสที่เกิดขึ้น เปลี่ยนแปลงไปมาก

ในการนำสายอากาศไปใช้งาน เมื่อเป็นงานที่ต้องการการเชื่อมต่อเป็นแบบจุดต่อจุด สามารถที่จะ เลือกใช้สายอากาศแบบร่องเดี่ยวบนผิวตัวนำทรงกระบอก เพราะที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว แต่เมื่อต้องการเชื่อมต่อแบบรอบทิศทางสามารถที่จะเลือกใช้สายอากาศแถวลำดับที่วางบนผิวตัวนำทรง กระบอก เพราะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง

แนวทางในการพัฒนาต่อไปนั้นจะต้องทำการปรับปรุงสายอากาศให้มีค่าอัตราส่วนของแกนหลักต่อ แกนรองให้มีค่าน้อยกว่านี้กล่าวคือต้องให้ได้ค่าอยู่ในช่วง 0dB - 3dB ซึ่งจะให้ได้สายอากาศที่มีการโพลาริซ์แบบวงกลม แล้วทำการพัฒนาต่อไปเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่ กระจายคลื่นแบบรอบตัว

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องด้วย ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา เป็นผู้ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนในทุกๆด้านเกี่ยวกับการทำปริญญาบัตร รวมทั้งตรวจทานต้นฉบับของปริญญาบัตรนี้ ขอขอบพระคุณ ดร.สมพล โกศลวิตร ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับการทำปริญญาบัตร

ขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ วรรณชุ่ม เป็นอย่างยิ่งซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษา แนะนำทางด้านเทคนิค ด้านวิชาการและคำแนะนำเกี่ยวกับการทดลอง ขอขอบคุณ คุณสุธาสิณี ละมุลตรี ที่ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการและให้การสนับสนุนอุปกรณ์ซอฟต์แวร์ ขอขอบคุณรุ่นพี่คณะวิศวกรรมเครื่องกลที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้านเทคนิคในการสร้างชิ้นงาน

สุดท้ายนี้ความดีอันบังเกิดจากปริญญาบัตรฉบับนี้ขอมอบให้แก่บิดา มารดา และผู้ที่มีพระคุณทุกคนของข้าพเจ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.A Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wilay & Sons, New York, 1985.
- [2] R.F Harrington, Time-Hamonic Electromagnetic Fields, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [3] C.A Balanis, Advanced Engineering Electromagnetic, John Wilay & Sons, New York, 1985.
- [4] J.R.Wait, Electromagnetic Radiation from Cylindrical structures, PeterPeregrinus, London, 1988.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้