

สายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว
AN ARRAY OF ANTENNA USING RECTANGULAR APERTURE RADIATING
UNIDIRECTIONAL BEAM



โดย
นายวิเชียร อุดมทองรัตน์
นายวิมนต์ พลเดช
นายสุพจน์ นิลจันทร์

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 50093

วัน,เดือน,ปี 21 ส.ย. 2547



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
แม้ว่า การแก้ไข หรือ การเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว
AN ARRAY OF ANTENNA USING RECTANGULAR APERTURE RADIATING
UNIDIRECTIONAL BEAM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

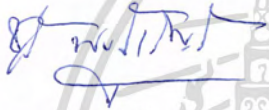
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

An Array of Antenna using Rectangular Aperture Radiating Unidirectional Beam

ผู้จัดทำ

- 1: นายวิเชียร อุดมทองรัตน์ 43015033
- 2: นายวิมนต์ พลเดช 43015034
- 3: นายสุพจน์ นิลจันทร์ 43015045



(ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ.ดร. สมพล โทศลิวิตร)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว
An Array of Antenna using Rectangular Aperture Radiating Unidirectional Beam

โดย นายวิเชียร อุดมทองรัตน์ 43015033
นายวิมนต์ พลเดช 43015034
นายสุพจน์ นิลจันทร์ 43015045

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษา คำนวณ วิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศ แบบแถวลำดับของช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ซึ่งสายอากาศชนิดนี้มีข้อดีคือเป็นสายอากาศแบบช่องเปิดที่แบนราบกับบริเวณที่ติดตั้ง โดยในโครงการนี้จะศึกษาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นอันของสายอากาศได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ความกว้างลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง การโพลาไรซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมองค์ประกอบเดียวบนผิวท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากก่อน จากนั้นจึงได้วิเคราะห์คุณลักษณะแถวลำดับเชิงเส้นและเชิงระนาบ และได้ทำการสร้างสายอากาศ โดยจะใช้โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นเป็นตัวป้อนสัญญาณให้กับแต่ละองค์ประกอบ จากนั้นได้ทดสอบคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากทฤษฎีและการทดสอบ นอกจากนี้ได้ทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ ได้แก่อินพุตอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ สำหรับสายอากาศที่ได้นำเสนอนี้จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับระบบการสื่อสารจุดต่อจุดต่อไป

Abstract

This project concerns about the study, calculation, analysis, design, fabrication and measurement of an array of antenna using rectangular aperture radiating unidirectional beam. The advantage of this antenna type belongs to its flush mounted structure that makes it low profile. In this project, we will calculate the radiation characteristics such as radiation pattern, beamwidth, directivity and polarization of a single aperture on rectangular waveguide. Subsequently, the linear and planar array orientations are performed. The antenna fabrication by using the probe excitation is achieved and then measured the radiation characteristics to compared with the theoretical predictions. The impedance characteristics such as input impedance, return loss and standing wave ratio are also measured. The results of this work can be applied for point to point communication.

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 นิยามสายอากาศ	3
2.2 หลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น	5
2.3 คุณสมบัติของสายอากาศ	7
2.4 สายอากาศแบบช่องเปิด	9
2.5 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	10
2.6 โหมดของคลื่น	19
2.7 การป้อนพลังงานคลื่นเข้าสู่ท่อนำคลื่นโดยใช้โพรบ	21
2.8 ลักษณะทั่วไปของสายอากาศ	21
2.9 อินทิกรัลการแพร่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย	22
2.10 สมการแพร่กระจายคลื่น	33
2.11 ตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor)	42
2.12 การจัดเรียงองค์ประกอบเชิงระนาบ (Planar)	53
บทที่ 3 การวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบ	55
3.1 โครงสร้างของสายอากาศ	55
3.2 การวิเคราะห์แบบรูปของสายอากาศที่จะนำไปใช้การออกแบบ	55
3.3 การพิจารณาค่าความกว้าง (a) และค่าความสูง (b)	55
3.4 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	56
3.5 การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ	58
3.6 การพิจารณาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	59
3.7 การหาความยาวโพรบ	60
3.8 การวิเคราะห์เมื่อนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับ	60
3.8.1 การจัดเรียงตามแนวแกน x	60
3.8.2 การจัดเรียงตามแนวแกน y	84
3.9 การจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ	108
3.10 การออกแบบ และการสร้างสายอากาศ	127
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	129
4.1 สายอากาศของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดด้านเดียว	129
4.2 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	131
4.3 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	135

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์
ภาคผนวก
กิตติกรรมประกาศ
หนังสืออ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สายอากาศเป็นเสมือนอุปกรณที่ใช้ในการส่งผ่านคลื่น	3
รูปที่ 2.2 Transmission - line Thevenin equivalent ของสายอากาศในโหมดการส่ง	4
รูปที่ 2.3 เงื่อนไขขอบเขตความเข้มสนามแม่เหล็ก	7
รูปที่ 2.4 รูปร่างของสายอากาศแบบช่องเปิด	9
รูปที่ 2.5 ระบบโคออดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	10
รูปที่ 2.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศรอบทิศทาง	11
รูปที่ 2.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร	12
รูปที่ 2.8 ลำคลื่น (Lobe) ต่างๆและความกว้างของลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	12
รูปที่ 2.9 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	13
รูปที่ 2.10 คำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน	14
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งการวางโพรบ	20
รูปที่ 2.12 สายอากาศที่วางในระนาบแกน xy	20
รูปที่ 2.13 ผังของการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายคลื่นของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็ก	22
รูปที่ 2.14 แหล่งกำเนิดจากจุดกำเนิด	27
รูปที่ 2.15 ระบบทรงกระบอกที่ใช้สำหรับคำนวณหาสนาม	27
รูปที่ 2.16 ลักษณะการวางสายอากาศในระนาบ xz	33
รูปที่ 2.17 สนามสมมุติที่แพร่อย่างสม่ำเสมอบริเวณช่องเปิดของสายอากาศ ที่วางบนแผ่นตัวนำ	36
รูปที่ 2.18 สนามสมมุติที่แพร่อย่างสม่ำเสมอบริเวณช่องเปิดของสายอากาศ เมื่อวางในช่องว่างอิสระ	38
รูปที่ 2.19 สนามสมมุติที่แพร่อย่างสม่ำเสมอบริเวณช่องเปิดของสายอากาศ ที่วางบนแผ่นตัวนำในโหมด TE_{10}	39
รูปที่ 2.20 สนามสมมุติที่แพร่อย่างสม่ำเสมอบริเวณช่องเปิดของสายอากาศ ที่วางในช่องว่างอิสระในโหมด TE_{10}	40
รูปที่ 2.21 สายอากาศไดโพล 2 องค์ประกอบที่วางบนแกน Z	42
รูปที่ 2.22 สายอากาศไดโพล N องค์ประกอบ ที่วางอยู่บนแกน Z	43
รูปที่ 2.23 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคี่	45
รูปที่ 2.24 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคู่	46
รูปที่ 2.25 การจัดวางสายอากาศแถวลำดับจำนวน N องค์ประกอบ บนแกน y	48
รูปที่ 2.26 การจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ	51
รูปที่ 2.27 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบ Side by Side	52

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.28 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบ Collinear	53
รูปที่ 2.29 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบ Face to Face	53
รูปที่ 2.30 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงระนาบ	54
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศวางบนระนาบ xz	55
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันมาวางบนแผ่นตัวนำ	56
รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันมาวางในช่องว่างอิสระ	56
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันมาวางบนแผ่นตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10}	57
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันมาวางในช่องว่างอิสระในส่วนของ TE_{10}	57
รูปที่ 3.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันมาวางบนแผ่นตัวนำ	58
รูปที่ 3.7 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันมาวางในช่องว่างอิสระ	58
รูปที่ 3.8 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันมาวางบนแผ่นตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10}	59
รูปที่ 3.9 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกันมาวางในช่องว่างอิสระในส่วนของ TE_{10}	59
รูปที่ 3.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศที่วางบนแผ่นตัวนำ	59
รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 2 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	60
รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 3 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	61
รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 4 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	61
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 5 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.32 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	69
รูปที่ 3.33 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ	69
รูปที่ 3.34 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ ในส่วนของโหมด TE_{10}	70
รูปที่ 3.35 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ ในส่วนของโหมด TE_{10}	70
รูปที่ 3.36 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางบนแผ่นระนาบตัวนำ (E-plane)	71
รูปที่ 3.37 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางบนแผ่นระนาบตัวนำ (H-plane)	72
รูปที่ 3.38 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางในช่องว่างอิสระ (E-plane)	72
รูปที่ 3.39 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางในช่องว่างอิสระ (H-plane)	73
รูปที่ 3.40 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (E-plane)	73
รูปที่ 3.41 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (H-plane)	74
รูปที่ 3.42 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (E-plane)	74
รูปที่ 3.43 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (H-plane)	75
รูปที่ 3.44 ค่า ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางบนแผ่นระนาบตัวนำ (E-plane)	76
รูปที่ 3.45 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางบนแผ่นระนาบตัวนำ (H-plane)	76
รูปที่ 3.46 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางในช่องว่างอิสระ (E-plane)	77
รูปที่ 3.47 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางในช่องว่างอิสระ (H-plane)	77
รูปที่ 3.48 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ วางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (E-plane)	78

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.49 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (H-plane)	78
รูปที่ 3.50 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (E-plane)	79
รูปที่ 3.51 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (H-plane)	79
รูปที่ 3.52 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (E-plane)	80
รูปที่ 3.53 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (H-plane)	81
รูปที่ 3.54 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (E-plane)	81
รูปที่ 3.55 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (H-plane)	82
รูปที่ 3.56 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (E-plane)	82
รูปที่ 3.57 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (H-plane)	83
รูปที่ 3.58 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (E-plane)	83
รูปที่ 3.59 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (H-plane)	84
รูปที่ 3.60 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 2 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	85
รูปที่ 3.61 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 3 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	85
รูปที่ 3.62 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 4 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	85
รูปที่ 3.63 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 5 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	86
รูปที่ 3.64 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 6 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	86
รูปที่ 3.65 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 2 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ	86
รูปที่ 3.66 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 3 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ	87

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.67 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 4 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ	87
รูปที่ 3.68 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 5 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ	87
รูปที่ 3.69 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 6 องค์ประกอบเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ	88
รูปที่ 3.70 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 2 องค์ประกอบเมื่อวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10}	88
รูปที่ 3.71 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 3 องค์ประกอบเมื่อวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10}	88
รูปที่ 3.72 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 4 องค์ประกอบเมื่อวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10}	89
รูปที่ 3.73 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 5 องค์ประกอบเมื่อวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10}	89
รูปที่ 3.74 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 6 องค์ประกอบเมื่อวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10}	89
รูปที่ 3.75 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 2 องค์ประกอบเมื่อวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10}	90
รูปที่ 3.76 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 3 องค์ประกอบเมื่อวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10}	90
รูปที่ 3.77 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 4 องค์ประกอบเมื่อวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10}	91
รูปที่ 3.78 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 5 องค์ประกอบเมื่อวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10}	91
รูปที่ 3.79 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตาม แกน Y จำนวน 6 องค์ประกอบเมื่อวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10}	91
รูปที่ 3.80 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	92
รูปที่ 3.81 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ	93
รูปที่ 3.82 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ ส่วนของโหมด TE_{10}	93
รูปที่ 3.83 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ ส่วนของโหมด TE_{10}	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.84 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (E-plane)	95
รูปที่ 3.85 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (H-plane)	95
รูปที่ 3.86 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (E-plane)	96
รูปที่ 3.87 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (H-plane)	96
รูปที่ 3.88 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (E-plane)	97
รูปที่ 3.89 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (H-plane)	97
รูปที่ 3.90 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (E-plane)	98
รูปที่ 3.91 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (H-plane)	98
รูปที่ 3.92 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์กลางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (E-plane)	99
รูปที่ 3.93 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์กลางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (H-plane)	100
รูปที่ 3.94 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์กลางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (E-plane)	100
รูปที่ 3.95 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์กลางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (H-plane)	101
รูปที่ 3.96 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์กลางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (E-plane)	101
รูปที่ 3.97 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์กลางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (H-plane)	102
รูปที่ 3.98 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์กลางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (E-plane)	102
รูปที่ 3.99 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์กลางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (H-plane)	103

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.100 ระดับลําคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (E-plane)	104
รูปที่ 3.101 ระดับลําคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (H-plane)	104
รูปที่ 3.102 ระดับลําคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (E-plane)	105
รูปที่ 3.103 ระดับลําคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (H-plane)	105
รูปที่ 3.104 ระดับลําคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ ส่วนของTE ₁₀ (E-plane)	106
รูปที่ 3.105 ระดับลําคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ ส่วนของTE ₁₀ (H-plane)	106
รูปที่ 3.106 ระดับลําคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ ส่วนของTE ₁₀ (E-plane)	107
รูปที่ 3.107 ระดับลําคลื่นย่อยแรก เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ ส่วนของTE ₁₀ (H-plane)	107
รูปที่ 3.108 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อนำสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบเมื่อวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	108
รูปที่ 3.109 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อนำสายอากาศจำนวน 9 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบเมื่อวางบนแผ่นระนาบตัวนำ	108
รูปที่ 3.110 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อนำสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบเมื่อวางในช่องว่างอิสระ	109
รูปที่ 3.111 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อนำสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบเมื่อวางในช่องว่างอิสระ	109
รูปที่ 3.112 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อนำสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบเมื่อวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของTE ₁₀	109
รูปที่ 3.113 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อนำสายอากาศจำนวน 9 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบเมื่อวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของTE ₁₀	110
รูปที่ 3.114 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อนำสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบเมื่อวางในช่องว่างอิสระส่วนของTE ₁₀	110
รูปที่ 3.115 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อนำสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบเมื่อวางในช่องว่างอิสระส่วนของTE ₁₀	111
รูปที่ 3.116 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบ วางบนแผ่นระนาบตัวนำ	112

รูปที่ 3.117 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบ
ในช่องว่างอิสระ 112
เอกสารนี้เป็นเอกสารทส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.118 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10}	113
รูปที่ 3.119 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ เมื่อสายอากาศเรียงแบบระนาบในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10}	113
รูปที่ 3.120 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (E-plane)	114
รูปที่ 3.121 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (H-plane)	115
รูปที่ 3.122 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระ (E-plane)	115
รูปที่ 3.123 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระ (H-plane)	116
รูปที่ 3.124 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (E-plane)	116
รูปที่ 3.125 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (H-plane)	117
รูปที่ 3.126 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (E-plane)	117
รูปที่ 3.127 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระส่วนของ TE_{10} (H-plane)	118
รูปที่ 3.128 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (E-plane)	119
รูปที่ 3.129 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (H-plane)	119
รูปที่ 3.130 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระ (E-plane)	120
รูปที่ 3.131 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระ (H-plane)	120
รูปที่ 3.132 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (E-plane)	121
รูปที่ 3.133 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศจัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของ TE_{10} (H-plane)	121

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.134 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ จัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระส่วนของTE ₁₀ (E-plane)	122
รูปที่ 3.135 ค่าความกว้างลำคลื่นที่มีค่าเท่ากับศูนย์คู่แรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ จัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระส่วนของTE ₁₀ (H-plane)	123
รูปที่ 3.136 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ จัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (E-plane)	123
รูปที่ 3.137 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ จัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (H-plane)	124
รูปที่ 3.138 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ จัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระ (E-plane)	124
รูปที่ 3.139 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ จัดเรียงแบบระนาบวางบนแผ่นระนาบตัวนำส่วนของTE ₁₀ (H-plane)	125
รูปที่ 3.140 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ จัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระส่วนของTE ₁₀ (E-plane)	125
รูปที่ 3.141 ระดับลำคลื่นย่อยแรกของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ จัดเรียงแบบระนาบวางในช่องว่างอิสระส่วนของTE ₁₀ (H-plane)	126
รูปที่ 4.1 สายอากาศของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าปลายเปิดด้านเดียวที่สร้าง	129
รูปที่ 4.2 สายอากาศที่นำมาเรียงแบบแถวลำดับ 2 องค์กรประกอบ	130
รูปที่ 4.3 สายอากาศที่นำมาเรียงแบบระนาบ 2*2 โดยใช้สายเป็นตัวแบ่งกำลังงาน	130
รูปที่ 4.4 สายอากาศที่นำมาเรียงแบบระนาบ 2*2 โดยใช้สายวงจรเป็นตัวแบ่งกำลังงาน	131
รูปที่ 4.5 การต่อสายอากาศที่จะทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์เข้ากับ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	133
รูปที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่วัดได้จากสายอากาศ	133
รูปที่ 4.7 ค่า อิมพีแดนซ์วัดได้จากสายอากาศ	134
รูปที่ 4.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับจากสายอากาศ	134
รูปที่ 4.9 ลักษณะการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	136
รูปที่ 4.10 ลักษณะการติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการทดสอบใน ระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	136
รูปที่ 4.11 สายอากาศขณะทำการทดสอบในระนาบสนามไฟฟ้า	136
รูปที่ 4.12 สายอากาศขณะทำการทดสอบในระนาบสนามแม่เหล็ก	137
รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูป ที่ได้จากการทดสอบในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศองค์ประกอบที่ 1	138

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากการคำนวณเปรียบเทียบกับกรณี ที่ได้ทดสอบในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศสององค์ประกอบที่ 9	146
รูปที่ 4.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางตามแนว แกน x จำนวน 2 องค์ประกอบในระนาบสนามไฟฟ้า	147
รูปที่ 4.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางตามแนว แกน x จำนวน 2 องค์ประกอบในระนาบสนามแม่เหล็ก	147
รูปที่ 4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางตามแนว แกน y จำนวน 2 องค์ประกอบในระนาบสนามไฟฟ้า	148
รูปที่ 4.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อจัดเรียงแบบแถวลำดับตามแนว แกน y จำนวน 2 องค์ประกอบในระนาบสนามแม่เหล็ก	148
รูปที่ 4.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อจัดเรียงแบบเชิง ระนาบ 2*2 ในระนาบสนามไฟฟ้า	149
รูปที่ 4.36 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อจัดเรียงแบบเชิง ระนาบ 2*2 ในระนาบสนามแม่เหล็ก	150



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในระบบการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ (Cellular mobile system) นั้นทำการแบ่งพื้นที่ให้บริการออกเป็น เซลล์(Cell)เล็กๆ โดยทั่วไปพื้นที่ที่จะแบ่งจะมีลักษณะเป็นวงกลมหรือหกเหลี่ยม โดยที่สายอากาศที่ใช้ก็นักจะเป็นสายอากาศแบบที่มีการแพร่กระจายรอบทิศทาง (Omnidirectional antenna) แต่สำหรับการให้บริการในบางพื้นที่ของระบบสื่อสารแบบเคลื่อนที่นั้น หากพื้นที่ที่ให้บริการมีลักษณะเป็นพื้นที่ที่แคบตามแนวยาว เช่น บนทางด่วนถนนหรืออุโมงค์เป็นต้นนั้นสายอากาศรอบทิศทางนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้งานลักษณะดังกล่าว จึงได้มีการนำสายอากาศแบบชี้ทิศทาง (Directional antenna) มาใช้และต้องการให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้มีค่าที่ดียิ่งขึ้นเช่นให้ได้ค่าที่มีค่าสูงมากขึ้นก็ทำได้โดยการนำเอาสายอากาศแต่ละองค์ประกอบที่ออกแบบไว้แล้วมาจัดเรียงในลักษณะแถวลำดับได้

หากเดิมเรามีสายอากาศแบบรอบทิศทางซึ่งมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทางอยู่แล้วนั้น เราจะพบว่าเมื่อคลื่นเดินทางออกจากสายอากาศแล้วไปกระทบวัตถุหรือโลหะที่มีลักษณะเรียบแล้วนั้นคลื่นจะเกิดการหักเหและเบี่ยงเบนออกจากแนวเดิมจากคุณสมบัติดังกล่าวหากเรานำเอาแผ่น โลหะที่มีลักษณะเป็นรูปกรอบสี่เหลี่ยมมารอบสายอากาศแบบรอบทิศทางไว้ตรงตามระนาบเอlevation (Elevation plane) หรือระนาบ xy จากเดิมคลื่นที่เคยสามารถแพร่กระจายรอบทิศทางอยู่นั้นจะไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นผ่านกรอบโลหะออกไปได้แต่จะเกิดการสะท้อนและหักเหทิศทาง การเดินทางของคลื่นจะออกไปได้เฉพาะบริเวณช่องที่เป็นปากเปิดของกรอบสี่เหลี่ยมเท่านั้นโดยถ้าหากเราสามารถหาขนาดและระยะห่างของกรอบสี่เหลี่ยมโลหะที่เหมาะสมได้แล้วนั้นจะส่งผลให้คลื่นที่แพร่กระจายออกมาจากช่องของปากเปิดของกรอบสี่เหลี่ยมโลหะมีขนาดความกว้างของลำคลื่น (Beam width) ที่แคบมีอัตราการขยายของสายอากาศ (Gain) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ที่ดีขึ้น

ในการพิจารณาเลือกใช้ขนาดของกรอบสี่เหลี่ยม โลหะนั้นจะต้องคำนึงถึงขนาดของกรอบสี่เหลี่ยมโลหะและย่านความถี่ที่จะใช้งานซึ่งเราพบว่าการเลือกขนาดของกรอบสี่เหลี่ยมโลหะและย่านความถี่นั้นจะต้องสัมพันธ์กัน ดังนั้นท่อนำคลื่นหรือท่อนำคลื่น (Wave guide) นั้นเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้งานทำเป็นกรอบสี่เหลี่ยมโลหะเพราะสามารถเลือกขนาดของท่อนำคลื่นให้สัมพันธ์กับความถี่ที่จะนำมาใช้งานได้ อย่างถูกต้องแน่นอน และท่อนำคลื่นนี้มีขนาดที่เล็กจึงส่งผลให้ส่วนของสายอากาศแบบรอบทิศทางที่นำมาใช้เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiator) แบบรอบทิศทางนั้นมีขนาดเล็กลงไปตามไปด้วย โดยความยาวของสายอากาศแบบรอบทิศทางจะมีขนาดความยาวไม่เกินความสูงของท่อนำคลื่น ดังนั้นเราจึงเลือกใช้สายอากาศแบบโมโนโพล (Mono pole) ที่มีความยาว $\lambda/4$ เมตร มาใช้ในการทดลองและทำการศึกษาในครั้งนี้

ดังนั้นเพื่อเป็นการง่ายต่อการศึกษาและการออกแบบเราจะนำการศึกษาในลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นออกจากท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีสายอากาศแบบโมโนโพลที่มีความยาว $\lambda/4$ เมตร เป็นตัวป้อนกำลังงานกระตุ้นให้เกิดคลื่นสัญญาณขึ้นในท่อนำคลื่นและเกิดการแพร่กระจายคลื่นออกไปแล้วทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศขึ้นอย่างเหมาะสมในบางครั้งเราก็มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มพื้นที่ของสายอากาศเพื่อที่จะให้อัตราการขยายของสายอากาศของสายอากาศหรือค่าสภาพเจาะจงทิศทางค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีค่าสูงมากขึ้น ซึ่งบางกรณีก็ไม่สามารถที่จะทำการเพิ่มพื้นที่ของสายอากาศได้ โดยอาจจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดหลายอย่าง แต่สามารถที่จะทำการเพิ่มคุณสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมาได้ด้วยโดยการนำเอาสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาวางแบบแถวลำดับ (Array) กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 นิยามสายอากาศ

ในระบบสื่อสารมีการใช้คลื่นเพื่อรับ-ส่งข้อมูล คลื่นดังกล่าวได้จากการป้อนกำลังงานจากเครื่องส่งผ่านสายส่งสัญญาณ (coaxial line) ไปยังสายอากาศ และสายอากาศจะแผ่รังสีพลังงานออกไปในอากาศด้วยความเร็วประมาณเท่ากับความเร็วของคลื่นแสง ส่วนทางด้านรับก็จะรับพลังงานผ่านสายอากาศ ผ่านสายส่ง ไปยังเครื่องรับ

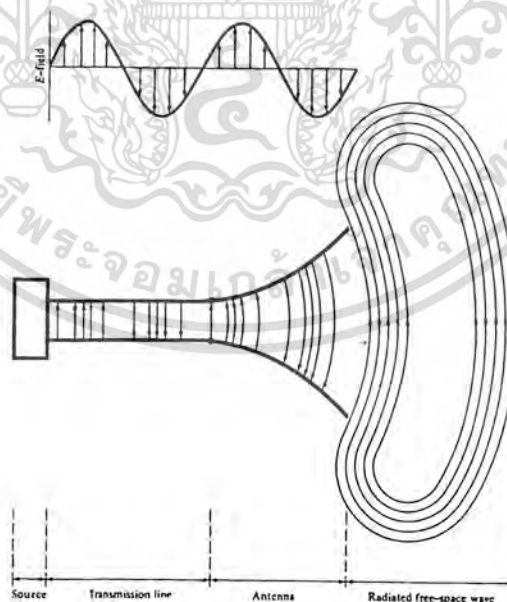
สายอากาศเป็นส่วนสำคัญของทางเครื่องส่งและเครื่องรับ สายอากาศส่วนใหญ่ทำจากลวดตัวนำ เป็นท่อนกลวงหรือตัน โครงสร้างเป็นเส้นตรงหรือโค้งงอแล้วแต่ชนิดของสายอากาศ ซึ่งสายอากาศมักจะมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น สายอากาศสามารถทำหน้าที่ได้ทั้งส่งและรับ จึงมีคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้น จึงมีคำจำกัดความของสายอากาศไว้ต่าง ๆ นานา ดังนี้

สายอากาศ ได้มีผู้ให้คำจำกัดความของสายอากาศไว้หลายอย่าง ดังนี้

“สายอากาศ คือ อุปกรณ์ระยะเทโละที่อาจเป็นแท่งกลมหรือเส้นลวด ใช้สำหรับการแพร่กระจายคลื่น หรือรับคลื่นวิทยุ”

“สายอากาศ หมายถึง การแพร่กระจายคลื่น หรือการรับคลื่นวิทยุ”

“สายอากาศ คือ สิ่งที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการส่งผ่านคลื่นระหว่าง free-space กับอุปกรณ์นำคลื่น” แสดงดังรูปที่ 2.1

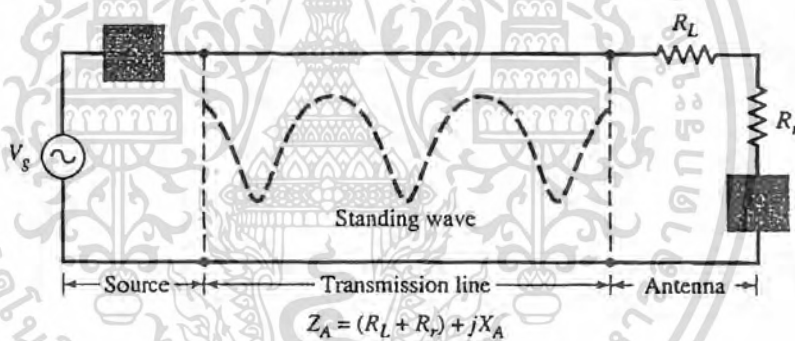


รูปที่ 2.1 สายอากาศเป็นเสมือนอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งผ่านคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์นำคลื่นหรือสายส่งสัญญาณ (transmission line) อาจเป็นสาย coaxial หรือท่อนำคลื่น (waveguide) ซึ่งใช้ในการส่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดเครื่องส่งผ่านไปยังสายอากาศ หรือจากสายอากาศไปยังเครื่องรับ โดยที่จะต้องมียาสอากาศส่งก่อนแล้วจึงค้อมีสายอากาศรับในภายหลัง

สายส่ง (transmission line) พร้อมระบบสายอากาศตามรูปที่ 2.1 สามารถเขียนเป็น Thevenin equivalent ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งแหล่งกำเนิดแทนด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอุดมคติ (ideal generator) และสายส่งแทนด้วยเส้นซิดโดยมี Characteristic impedance เป็น Z_c และสายอากาศแทนด้วย load Z_A [$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$] ค่อยอยู่กับสายส่ง สำหรับ load resistance R_L ใช้เพื่อแทนการสูญเสียเนื่องจากตัวนำและฉนวนที่สัมพันธ์กับโครงสร้างของสายอากาศ ขณะที่ R_r คือ ความต้านทานในการแพร่กระจาย (radiation resistance) ใช้แทนการแพร่กระจายโดยสายอากาศ reactance X_A ใช้แทน imaginary part ของ impedance ที่สัมพันธ์กับการแพร่กระจายคลื่นโดยสายอากาศ ภายใต้กรณีที่เป็นอุดมคติ พลังงานที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดควรจะเป็นพลังงานรวมทั้งส่งผ่านไปยังความต้านทานในการแพร่กระจาย (R_r) อย่างไม่ไรก็ดีในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียในตัวนำและฉนวนอันเนื่องมาจากธรรมชาติในสายส่งและสายอากาศเกิดขึ้น เช่นเดียวกันก็จะมีการสูญเสียอันเนื่องจากการสะท้อนกลับ (mismatch) ที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งและสายอากาศด้วย



รูปที่ 2.2 Transmission - line Thevenin equivalent ของสายอากาศในโหมดการส่ง

คลื่นสะท้อน (reflected waves) ที่เกิดขึ้นจะวิ่งไปตามทางพร้อม ๆ กับคลื่นเดินทาง (traveling wave) ที่มาจากแหล่งกำเนิดตรงไปยังสายอากาศผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นคลื่นนิ่ง (standing waves) และภายในสายส่งจะมีพลังงานสะสมอยู่ ซึ่งถือว่าสายส่งเป็นอุปกรณ์ resonant รูปภาพของคลื่นนิ่งแสดงด้วยเส้นซิดในรูปที่ 2.2 ถ้าระบบสายอากาศไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ นั่นคือในสายส่งจะมีการเก็บพลังงานของ element ไว้เป็นจำนวนมาก แทนที่จะเป็นการนำคลื่น (wave guiding) ก็จะกลายเป็นอุปกรณ์ในการส่งพลังงานออกไป ถ้าค่าสูงสุดของความเข้มสนามของคลื่นนิ่งถูกทำให้มีค่ามาก ๆ ก็จะสามรถเป็นเหตุให้เกิดคลื่นที่ไม่ต้องการ (คลื่นนิ่ง) ในสายส่ง

การสูญเสียอันเนื่องมาจากสายส่ง สายอากาศ และ การเกิดคลื่นนิ่ง เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ การสูญเสียในสายส่งสามารถทำให้ลดน้อยลงได้โดยการเลือกใช้สายส่งที่มีการสูญเสียต่ำขณะที่สายอากาศสามารถลดการสูญเสียได้โดยการลดค่าความต้านทานการสูญเสีย ซึ่งแทนด้วย R_r ดังในรูปที่ 2.2 สำหรับคลื่นนิ่ง

สามารถลดลงได้และพลังงานที่สะสมอยู่ในสายส่งก็ทำให้ต่ำสุดได้ โดยการแมชอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (load) เข้ากับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่ง นี้ก็เหมือนกับการแมชโหลดเข้ากับสายส่ง ซึ่งในที่นี้ โหลดก็คือสายอากาศ

2.2 หลักการพื้นฐานของการแพร่กระจายคลื่น

สายอากาศเป็นโครงสร้างซึ่งมักจะถูกสร้างจากวัสดุที่เป็นตัวนำที่ดี ที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีรูปร่างและขนาดที่จะแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นที่ทราบกันดีว่ากระแสซึ่งมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างั้นสายอากาศจึงมีโครงสร้างซึ่งถูกกระตุ้นด้วยกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งมักจะทำได้โดยใช้สายส่งกำลังหรือท่อนำคลื่นอาจมีรูปร่างแตกต่างกันไปมากมายอย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติโครงสร้างซึ่งมีรูปร่างที่ทำได้ง่ายประหยัดจะได้รับความนิยมในการใช้งาน ในการที่แพร่กระจายคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างน้อยที่สุดสายอากาศต้องมีขนาดเปรียบเทียบได้กับความยาวคลื่นที่แพร่กระจาย

ถ้ารู้ความหนาแน่นของกระแส \vec{j} ที่ป้อนให้กับสายอากาศ เราสามารถที่จะคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายได้แต่ความยุ่งยากอยู่ที่การคำนวณหาความหนาแน่นของกระแส \vec{j} บนสายอากาศที่จะทำให้อสนามที่ได้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตบนสายอากาศนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย

เนื่องจากสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) เป็นสมการเชิงเส้น ดังนั้นถ้ารู้การแพร่กระจายคลื่นจากฟิลาเมนต์ขนาดจิ๋ว คือ ldl แล้วเราสามารถนำหลักการซูเปอร์โพสิชัน เพื่อหาสนามที่แพร่กระจายจากกระแสซึ่งมีการแจกแจงเป็นรูปร่างใด ๆ ได้โดยรวมนามที่ถูกสร้างแต่ละเอเลเมนต์ของกระแสเข้าด้วยกันวิธีการนี้เป็นวิธีการที่ใช้ทั่วไปในการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศสมการแมกซ์เวลล์และเงื่อนไขขอบเขต

โดยจะเกี่ยวพันโดยพื้นฐานกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบไซน์ซุซอดอล (Sinusoidal) ดังนั้นจะวิเคราะห์ตามแบบเฟสเซอร์ทั่ว ๆ ไปซึ่งจะไม่แสดงแพลกเตอร์ที่แสดงการแปรผันกับเวลา $e^{j\omega t}$ จะแสดงกระแสและสนามเป็นแพลกเตอร์ฟังก์ชันของตำแหน่งโคออดิเนท และโดยทั่วไปแต่ละส่วนประกอบจะเป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนซึ่งประกอบด้วยส่วนของค่าจริงและค่าจินตภาพตัวอย่างจะเขียนสนามไฟฟ้าอยู่ในรูปต่อไปนี้

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_x(\vec{r})\vec{a}_x + \vec{E}_y(\vec{r})\vec{a}_y + \vec{E}_z(\vec{r})\vec{a}_z \quad (2.1)$$

ในโคออดิเนททรงสี่เหลี่ยม แต่ละส่วนประกอบ เช่น E_x เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนอยู่ในรูป $E_{xr} + jE_{xi}$ ซึ่ง E_{xr} ซึ่งเป็นค่าจริง และ E_{xi} เป็นค่าจินตภาพ ถ้าต้องการรู้สนามไฟฟ้าทางกายภาพจริง ๆ จะหาได้โดยคูณ $\vec{E} \cdot (\vec{r})$ ด้วย $e^{j\omega t}$ แล้วหาค่าจริงของผลคูณนี้ออกมา นั่นคือ

$$E(\vec{r}, t) = \text{Re} \cdot \vec{E}(\vec{r}) e^{j\omega t} \quad (2.2)$$

ซึ่งจะได้

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E(\vec{r}) \cos \omega t - E(\vec{r}) \sin \omega t \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนหรือที่สงวนในเอกสารของเข้านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณของสนาม 4 ปริมาณที่เราสนใจได้แก่ ความเข้มสนามไฟฟ้า $E(\vec{r})$ ความเข้มสนามแม่เหล็ก $\vec{H}(\vec{r})$ ความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า $\vec{D}(\vec{r})$ และ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก $\vec{B}(\vec{r})$ สนามเหล่านี้ตลอดจนต้นกำเนิดของสนามคือความหนาแน่นของกระแส $\vec{J}(\vec{r})$ และความหนาแน่นของประจุสัมพันธ์กันด้วยสมการแมกซ์เวลล์ ดังนี้คือ

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (\text{กฎของฟาราเดย์}) \quad (2.4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (\text{กฎทั่วไปของแอมแปร์}) \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{กฎของเกาส์}) \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{ความต่อเนื่องของเส้นแรงแม่เหล็ก}) \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = -j\omega \rho \quad (\text{กฎความต่อเนื่อง}) \quad (2.8)$$

ในฟรีสเปส (Free space) มีความสัมพันธ์ว่า

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (2.9)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2.10)$$

เมื่อ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-9}$ ฟารัดต่อเมตรเป็นค่าเพอร์มิตติวิตี (Permittivity) ของช่องว่างอิสระ และ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ เฮนรีต่อเมตร เป็นค่าเพอร์มิอับิลิตี (Permeability) ของช่องว่างอิสระ ในตัวกลางไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งมีค่าเพอร์มิตติวิตี ϵ และค่าความนำ σ จะมีกระแสนำ (Conduction Current) \vec{J} ไหลมีค่าเท่ากับ $\sigma \vec{E}$ ถ้ารวมกระแสนำ \vec{J} นี้เข้ากับกระแสที่เราป้อนเข้าไป \vec{J} สมการ(2.5) จะกลายเป็นดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= (j\omega\epsilon + \sigma) \vec{E} \\ &= j\omega\epsilon \vec{E} + \sigma \vec{E} \end{aligned} \quad (2.11)$$

อาจเรียกเทอม $\epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$ ว่าเป็นเพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อน โดยทั่วไปสารไดอิเล็กตริกจะมีค่าสูญเสียพลังงานรวมอยู่นอกเหนือจากค่าความนำ ดังนั้นแม้ว่า σ จะเป็นศูนย์ แต่ก็ยังเป็นค่าเชิงซ้อนอยู่ในรูป $\epsilon' - j\epsilon''$, $\epsilon' - j\epsilon''$ เมื่อไรก็ตามที่เราต้องเกี่ยวข้องกับสารไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสียพลังงานเราจะใช้เพอร์มิตติวิตีเชิงซ้อนและคิดการสูญเสียจากการนำกระแสว่าเป็นส่วนของค่าจินตภาพ ϵ'' ค่าตอบของสมการแมกซ์เวลล์จะยังไม่สมบูรณ์จนกว่าจะได้ใส่เงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมเข้าไปสำหรับในกรณีสนามที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมได้แก่

$$\vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_s \quad (2.12)$$

$$(\vec{E}_2 - \vec{E}_1) \times \vec{n} = \vec{M}_s \quad (2.13)$$

เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ผิว \vec{J}_s และกระแสแม่เหล็กที่ผิว \vec{M}_s ไหลอยู่ในบริเวณรอยต่อของตัวกลางที่เป็นแบบ โฮโมจีเนียส (Homogeneous) 2 ชนิด ซึ่งมีพารามิเตอร์เป็น $\epsilon_1 \mu_1 \sigma_1$ และ $\epsilon_2 \mu_2 \sigma_2$ ตามลำดับ จะเป็นศูนย์นอกเสียจากจะใช้แผ่นแม่เหล็กสมบูรณ์ และหน่วยที่ตั้งฉากที่ผิว จะชี้จากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 การคูณแบบครอส (Cross Product) ของเวกเตอร์กับหน่วยที่ตั้งฉากจะทำให้เกิดเป็นส่วนประกอบของ

สนามในแนวสัมผัสกับรอยต่อและสมการข้างต้นสามารถเขียนได้ใหม่เป็นดังนี้

$$\vec{H}_{\tan 2} - \vec{H}_{\tan 1} = \vec{J}_s \quad \text{มีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง} \quad (2.14)$$

ไม่ว่ากรณีใด $\vec{H}_{\tan 2} - \vec{H}_{\tan 1} = \vec{J}_s$ มีให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง (2.14)

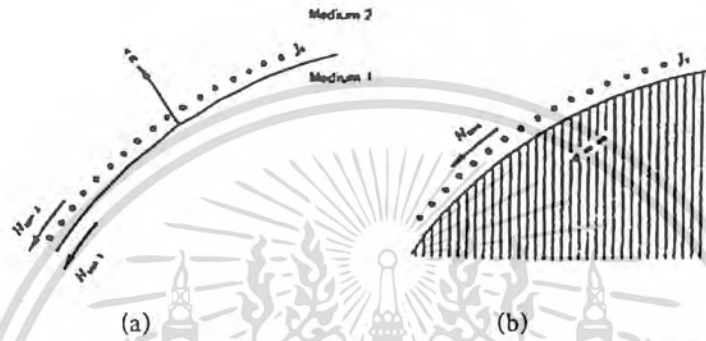
$$\vec{E}_{\tan 2} = \vec{E}_{\tan 1} + \vec{M}_s \quad (2.15)$$

ถ้าด้านหนึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์เงื่อนไขขอบเขตจะกลายเป็นดังต่อไปนี้

$$\vec{H}_{\tan} = \vec{J}_s \quad (2.16)$$

$$\vec{E}_{\tan} = 0 \quad (2.17)$$

เงื่อนไขขอบเขตของสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัส สำหรับกรณีทั่วไปแสดงไว้ในรูป 2.3 a) สำหรับในกรณีที่ตัวนำข้างหนึ่งเป็นสมบูรณ์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 b) พึงสังเกตว่าสนามทั้งหมดในสมการของขอบเขตถูกคำนวณที่รอยต่อ และสมการนี้ใช้ได้ตลอดทุกจุดตลอดแนวรอยต่อ



รูปที่ 2.3 เงื่อนไขขอบเขตความเข้มสนามแม่เหล็ก

a) กรณีทั่วไป

b) กรณีที่ตัวกลางหนึ่งเป็นตัวนำที่สมบูรณ์

ปรากฏการณ์เกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดจากต้นกำเนิดของสนามที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งได้รวบรวมกฎต่าง ๆ เขียนเป็นสมการทั่วไป เรียกสมการแมกซ์เวลล์ หากแก้สมการเหล่านี้ให้เป็นตามเงื่อนไขของต้นกำเนิดสนามอย่างเหมาะสมแล้วจะสามารถทำนายปรากฏการณ์เกี่ยวกับสาขาอากาศได้ สำหรับในการศึกษาเกี่ยวกับสาขาอากาศสิ่งแรกที่เราจะต้องหาได้คือสนามไฟฟ้า เพราะจะนำไปสู่การคำนวณหาคุณสมบัติต่างๆ ของสาขาอากาศ

2.3 คุณสมบัติของสาขาอากาศ

การเลือกใช้สาขาอากาศขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณที่ใช้ ยิ่งสัญญาณมีความถี่สูงมากเท่าไรก็จะทำให้ต้องใช้ตัวนำของสาขาอากาศสั้นมากเท่านั้น สาขาอากาศที่เป็นแบบเรโซแนนซ์ ดังเช่นสาขาอากาศที่ใช้ในย่านความถี่ 30 ถึง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ มักจะมีความยาวครึ่งลูกคลื่นสาขาอากาศที่ยังมีความยาวเท่าใดก็สามารถส่งหรือรับสัญญาณ ได้มากเท่านั้นที่ความยาวเรโซแนนซ์ของสาขาอากาศ จะทำให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด สำหรับคุณลักษณะที่สำคัญของสาขาอากาศมีดังต่อไปนี้

2.3.1 การต่อสาขาอากาศกับดิน (Grounded)

สาขาอากาศที่ทำงานโดยไม่มีการเชื่อมต่อกับดิน (Ungrounded) จะถูกเรียกว่ามีสองขั้วหรือที่เรียกว่าไดโพล (Dipole) ในแต่ละขั้วจะมีกระแสไหล โดยมีแหล่งกำเนิดสัญญาณเดียวกันอยู่ที่ตรงกลางการต่อ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบดินไม่มีความจำเป็น เพราะตัวคาปาซิเตอร์ของสายอากาศจะอยู่ระหว่างขั้วทั้งสอง ส่วนสายอากาศที่มีการเชื่อมต่อกับดินจะมีการต่อขั้วหนึ่งของสายอากาศลงดินส่วนอีกข้างหนึ่งทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสในสายอากาศจะไหลเข้าตัวนำข้างเดียวสายอากาศดังกล่าวเรียกว่าชนิดแอลหัวกลับ (Inverted-L type)

2.3.2 การกระจายของตัวนำ (Inductance) และตัวเก็บประจุ (Capacitance)

บนสายอากาศที่เป็นสายตัวนำหรือแท่งตัวนำนั้นที่ความถี่สูงในทางไฟฟ้าจะเป็นตัวนำกระจายอยู่บนสายอากาศข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่งอย่างอนุกรม (L) และในขณะเดียวกันก็จะมีตัวเก็บประจุต่ออยู่อย่างขนานตลอดสายตัวนำ (C) สำหรับสายอากาศแบบไดโพลจะมีค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างขั้วทั้งสองแต่สายอากาศแบบต่อลงดินจะมีค่าคาปาซิแตนซ์เทียบกับดิน

2.3.3 งานสายอากาศแบบเรโซแนนซ์ (Resonant Antennas)

ค่าของตัวนำ (L) และคาปาซิเตอร์ (C) ทำให้สายอากาศเสมือนเป็นวงจรเรโซแนนซ์ที่ต่ออย่างอนุกรมถึงแม้จะไม่มีตัวนำและตัวเก็บประจุต่ออยู่จริงสายอากาศก็จะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับวงจร LC ความยาวของสายอากาศซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นจะเป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์โดยทั่วไปที่ความยาวครึ่งลูกคลื่นของความถี่ที่ต้องการมักจะใช้เป็นความยาวของสายอากาศความยาวดังกล่าวใช้กับสายอากาศที่ไม่ต่อลงดิน หรือที่เรียกว่า ไดโพลครึ่งคลื่น สำหรับสัญญาณความถี่ต่ำสายอากาศแบบเรโซแนนซ์ที่ความยาวหนึ่งในสี่ของคลื่นจะเหมาะสมและมักจะใช้กับสายอากาศแบบต่อลงดิน

2.3.4 การโพลาไรซ์ (Polarization)

การโพลาไรซ์ของคลื่นที่แพร่กระจายนั้นเป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทาง และขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา รูปแสดงโพลาไรเซชัน จะแสดงการกวาดของขดลวดเวกเตอร์สนามไฟฟ้า ที่เวลาต่าง ๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป

สำหรับโพลาไรเซชันของสายอากาศ ในทิศทางหนึ่งทิศทางใด จะเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น (เมื่อเป็นสายส่ง) หรือเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้น จากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังงานที่ขั้วของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทางมาให้จะ หมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีเกนมากที่สุด ดังนั้น โพลาไรเซชัน ของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกันจะแตกต่างกัน

ตัวนำสายอากาศสามารถติดตั้งในแนวตั้งหรือแนวนอนก็ได้ ไม่ว่าจะเป็นแบบใด สนามไฟฟ้าก็จะมีทิศทางเดียวกับแนวการตั้งสายอากาศทิศทางโพลาไรเซชันของคลื่นวิทยุจะขึ้นอยู่กับทิศทางของแนวสนามไฟฟ้า (E) สำหรับสายอากาศในแนวตั้งคลื่นวิทยุที่ส่งออกมาก็มจะมีทิศทางเป็นโพลาไรเซชันในแนวตั้ง (Vertical Polarization) เช่นกันหากสายอากาศด้านส่งเป็นโพลาไรเซชันในแนวนอน (Horizontal Polarization) เช่นเดียวกัน เพื่อที่จะรับสัญญาณได้ดีที่สุดตัวอย่างเช่นในระบบโทรทัศน์นั้นคลื่นที่ส่งออกมาจะเป็นโพลาไรเซชันในแนวนอน นอกเหนือสายอากาศที่มีการโพลาไรเซชันในแต่ละแนว ก็ได้มีการพัฒนาสายอากาศที่มีทั้งโพลาไรเซชันในแนวตั้งและแนวนอนอยู่ร่วมกันในลักษณะที่ตั้งฉากกัน เรียกว่าโพลาไรเซชันเชิงวงกลม (Circular Polarization) ข้อดีของแบบนี้คือ สามารถรับสัญญาณ ได้ทั้งสองทิศทาง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแบ่งชนิดของโพลาไรเซชันอาจแบ่งออกได้เป็นแบบลิเนียร์โพลาไรเซชัน (Linearly Polarization) โพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circularly Polarization) และโพลาไรเซชันแบบวงรี (Elliptically Polarization) ขึ้นอยู่กับลักษณะ ของการหมุนยอด ของเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้า ถ้าเวกเตอร์ที่แสดงสนามไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลา ณ จุดใดๆในสเปซ ซึ่งเป็นเส้นตรงเสมอจะเรียกว่าเป็นโพลาไรเซชันแบบเส้นตรงหรือลิเนียร์ โพลาไรเซชัน แต่ถ้าสนามไฟฟ้ามีการหมุนรูปวงรีจะเรียกสนามแบบนี้ว่าเป็นโพลาไรเซชันแบบวงรี ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา คือเมื่อมองตามหลังคลื่นแล้วจะเห็นมีการหมุนตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่า โพลาไรเซชันหมุนขวา ในขณะที่สนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะเรียกว่าเป็นโพลาไรเซชันหมุนซ้าย

2.4 สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture Antenna)

สายอากาศแบบ Aperture อาจจะเป็นที่นิยมใช้กันมากขึ้นกว่าในอดีต เพราะความต้องการในด้านรูปแบบที่ทันสมัยและการนำไปใช้ประโยชน์ด้านความถี่สูง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.12 สายอากาศชนิดนี้มีประโยชน์สำหรับการนำไปใช้ในเครื่องบิน และอากาศยานอวกาศ เพราะว่าสามารถติดตั้งให้ปากเสมอกับผิวของเครื่องบินหรือยานอวกาศได้ โดยที่จะต้องเคลือบสายอากาศด้วยสารที่เป็นฉนวน (dielectric) เพื่อป้องกันสายอากาศจากกรณีอันตรายที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดลอม



Rectangular waveguide

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของสายอากาศแบบ Aperture

ท่อนำคลื่นที่มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าการพิจารณาจะใช้พิกัดมุมฉาก (x, y, z) มาพิจารณาโดยจะมีพื้นที่หน้าตัด $a \times b$ ซึ่ง a จะเป็นขนาดความกว้างและ b จะเป็นขนาดด้านสูง โดยจะมีพื้นที่หน้าตัดอยู่บนระนาบ $z = 0$

คุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นท่อนำสัญญาณในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยคุณสมบัติทั่วไปของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้นจะประพฤติตัวเหมือนกรองความถี่สูง (high-pass filter) โดยที่ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะยอมให้ความถี่สูงกว่าความถี่ตัดผ่าน (cut-off frequency: f_c) ผ่านได้เท่านั้น ซึ่งความถี่ตัดผ่านนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อนแต่ละเบอร์ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_c = \frac{c}{\lambda_c} \quad (2.19)$$

$$\lambda_c = 2a \quad (2.20)$$

f_c คือ ความถี่คัทออฟ (Hz)

λ_c คือ ความยาวคลื่นคัทออฟ

c คือ ความเร็วของการเดินทางของคลื่นในอากาศ (cm)

a คือ ขนาดด้านกว้างภายในท่อนำคลื่น (cm)

b คือ ขนาดด้านสูงภายในท่อนำคลื่น (cm)

d คือ ขนาดความยาวของท่อนำคลื่น (cm)

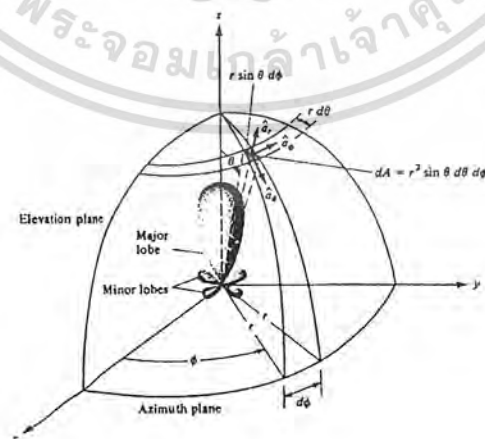
2.5 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.5.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (radiation pattern) คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (space coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปของการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (far field)

การอธิบายคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ คือความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (radiation intensity) เฟส (phase) หรือ โพลาไรเซชัน (polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงของพลังงานเป็นฟังก์ชัน ของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.5 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่าแบบรูปกำลังงาน (power pattern) ของสายอากาศ และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่มีชื่อเรียกว่าแบบรูปของสนาม (field pattern) ของสายอากาศนั้น



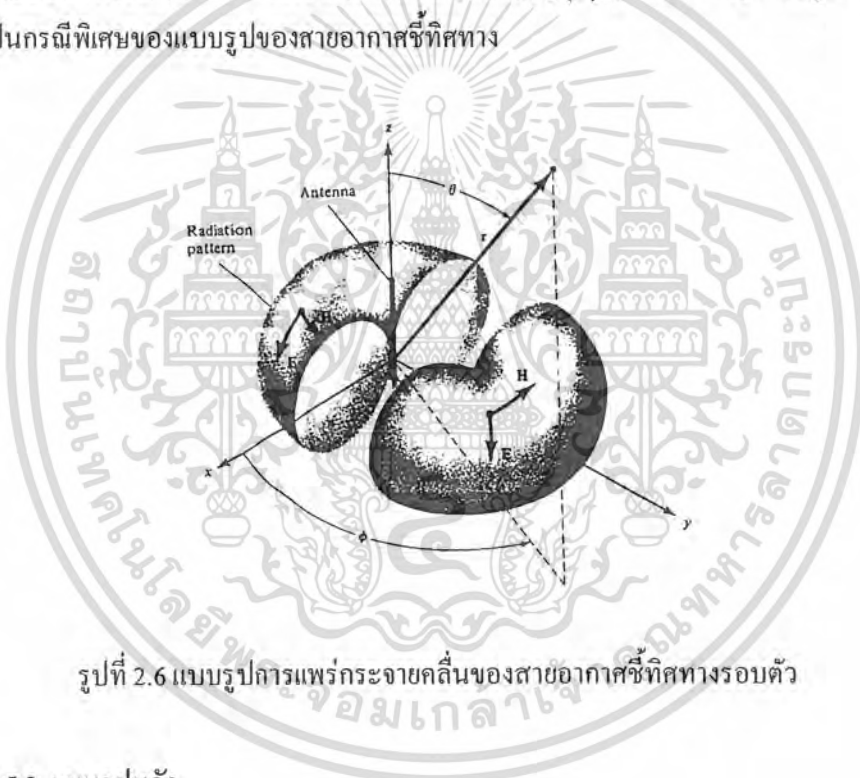
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 แบบรูปแบบไอโซโทรปิก ไดรอกซ์แนลและออมนิไดรอกซ์แนล

ตัวแพร่คลื่นไอโซโทรปิก (isotropic radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (point source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบออกนิไดรอกซ์แนล คุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบออกนิไดรอกซ์แนล คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้ มีดังแสดงในรูปที่ 2.6

ตามรูปจะเห็นว่าแบบรูปแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุท (azimuth plane) [$f(\phi), \theta =$ ค่าคงที่] แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชัน (elevation plane) [$g(\theta), \phi =$ ค่าคงที่] แบบรูปแบบชี้ทิศทางรอบตัวนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปของสายอากาศชี้ทิศทาง

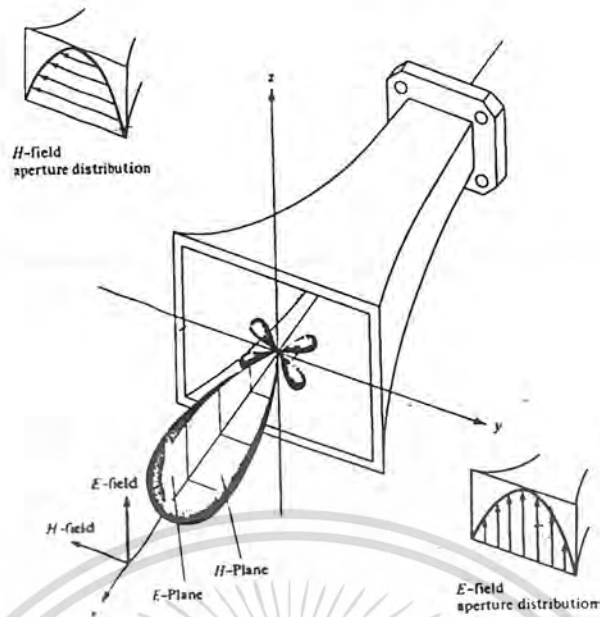


รูปที่ 2.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชี้ทิศทางรอบตัว

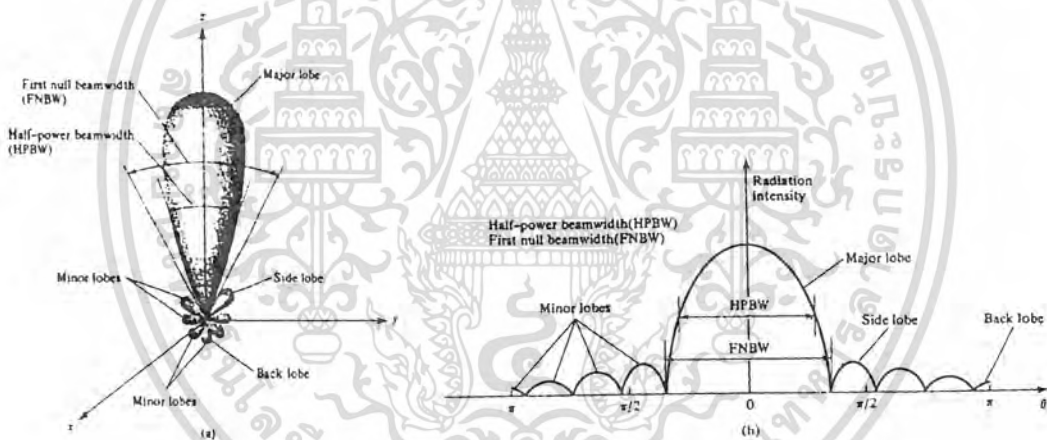
2.5.3 แบบรูปหลัก

เราอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศในเทอมของแบบรูปหลัก (principal pattern) ของสนามไฟฟ้า \vec{E} และสนามแม่เหล็ก \vec{H} สำหรับสายอากาศลิเนียร์โพลาไรเซชัน (linearly polarization) แบบรูปในระนาบ E จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบ H จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปหลักมีดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยมีระนาบ XZ (ระนาบเอเลเวชัน) เป็นระนาบ E หลักและมีระนาบ XY (ระนาบอาซิมุท, $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบ H หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แบบรูปหลักสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของสายอากาศปากแตร



รูปที่ 2.8 a) ล้อคลิ้น (Lobe) ต่างๆและความกว้างล้อคลิ้นของสายอากาศ

b) แบบรูปในแบบเชิงเส้น

2.5.4 ล้อคลิ้นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

โลบของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe) เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำรูปที่ 2.8a แบบรูปเชิงขั้ว (polar pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นโลบแบบต่าง ๆ ดังนี้

ล้อคลิ้นหลัก (major lobe หรือ main lobe) เป็นโลบของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด มีโลบหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิด อาจมีโลบหลักมากกว่าหนึ่งโลบ เช่นสายอากาศแยกขั้ว (split beam antenna)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกระใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำคลื่นย่อย (minor lobe) ได้แก่ โลบอื่น ๆ นอกเหนือไปจาก โลบหลัก

ลำคลื่นข้างหรือไซด์โลบ (side lobe) เป็น โลบย่อยที่อยู่ติดกับ โลบหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับ โลบหลัก

ลำคลื่นหลัง (back lobe) เป็น โลบย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับ โลบหลัก ปกติแล้ว โลบย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีจะต้องกำจัด โลบเหล่านี้ให้น้อยที่สุด ระดับของ โลบย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานใน โลบที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานใน โลบหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของไซด์โลบ (side lobe ratio) หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า -20dB



2.5.5 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (reactive-near field) สนามกระจายระยะใกล้ (radiating-near field) และสนามระยะไกล (far field) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุด และมีสนามเป็นชนิดรีแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่ บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$ จากผิวของสายอากาศ เมื่อ λ เป็นความยาวคลื่น และ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ และการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้น แปรผันตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \leq R \leq \frac{2D^2}{\lambda}$
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $\frac{2D^2}{\lambda}$ จากสายอากาศ

ในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามคดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า R เท่ากับ $\frac{2D^2}{\lambda}$ และขอบนอกเป็นอนันต์

2.5.6 เรเดียนแลสเตอเรเดียน

การวัดมุมบนระนาบจะมีหน่วยเป็นเรเดียน หนึ่งเรเดียนเป็นมุมระนาบ ซึ่งยอดของมุมอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมรัศมีที่มีรัศมี r และถูกปิดด้วยส่วนของเส้นรอบวง ซึ่งยาว r ดังแสดงในรูปที่ 2.15(a) เนื่องจากเส้นรอบวงที่มีรัศมี r มีความยาว $c = 2\pi r$ ดังนั้นบนหนึ่งรอบของวงกลม จะมี 2π เรเดียน ($\frac{2\pi r}{r}$)

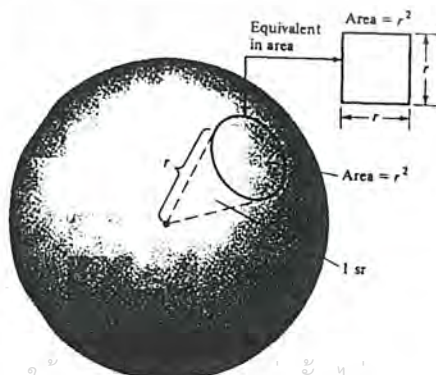
การวัดมุมตันมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (sr) หนึ่งสเตอเรเดียนเป็นมุมตันที่มียอดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมที่มีรัศมี r ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (b) เนื่องจากพื้นที่ของทรงกลมรัศมี r มีค่าเท่ากับ $4\pi r^2$ ดังนั้นตลอดทรงกลมจะมี $4\pi \text{sr}$ ($\frac{4\pi r^2}{r^2}$)

ตามรูปที่ 2.4 พื้นที่ขนาดจิ๋ว dA บนผิวของทรงกลมรัศมี r จะคำนวณได้เป็น

$$dA = r^2 \sin\theta d\theta d\phi \quad (\text{m}^2) \quad (2.21)$$

ดังนั้นเอเลเมนต์ (element) ของมุมตัน ของทรงกลมเขียนได้เป็น

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi \quad (2.22)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 2.10 รูปแสดงคำจำกัดความของเรเดียนและสเตอเรเดียน เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.7 ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half power beam width)

ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-power beamwidth :HPBW) เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในโลบหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุดหรือที่ตำแหน่งที่ -3dB ดังแสดงใน รูปที่ 2.7 เพื่อความสะดวกต่อไปจะใช้คำย่อ HPBW แทน

2.5.8 ความหนาแน่นของกำลังงานที่แพร่กระจาย

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการส่งข่าวสารผ่านตัวกลางถูกกำหนดให้มีความสัมพันธ์กับพลังงานและกำลังงานไฟฟ้า โดยใช้ตัวความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้แก่ พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (instantaneous poyniting vector) ซึ่งมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\omega = \varepsilon \times k \quad (2.23)$$

เมื่อ ω = พอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น (W/m²)

ε = ความเข้มสนามไฟฟ้าชั่วขณะเวลานั้น (V/m)

k = ความเข้มสนามแม่เหล็กชั่วขณะเวลานั้น (A/m)

เนื่องจากพอยดิงเวกเตอร์มีความหมายแสดงถึงความหนาแน่นของกำลังงาน ดังนั้นกำลังงานทั้งหมดที่พุ่งตัดผ่านพื้นผิวปิดจะสามารถหาได้โดยอินทิเกรตส่วนของพอยดิงเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวทั้งหมด ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสมการจะได้

$$P = \oint \omega_0 ds = \oint \omega_0 n da \quad (2.24)$$

เมื่อ P = กำลังงานทั้งหมดซึ่งขณะเวลานั้น (W)

ds = พื้นที่จ็วบนพื้นที่ปิด (m²)

ในกรณีของสนามที่แปรผันกับเวลา มักจะหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของกำลังงานได้โดยการอินทิเกรตค่าพอยดิงเวกเตอร์ชั่วขณะเวลานั้น ตลอด 1 คาบ แล้วหารด้วยคาบเวลานั้นสำหรับสนามที่แปรผันกับเวลา ซึ่งกระจายฮาร์โมนิกในรูป e เมื่อกำหนดสนาม E และ H เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเชิงซ้อน แล้วจะหาความสัมพันธ์กับค่า และ ชั่วขณะเวลาใดๆ ได้จาก

$$\varepsilon_{(x,y,z,t)} = \text{Re} [E(x,y,z) e^{j\omega t}] \quad (2.25)$$

$$k_{(x,y,z,t)} = \text{Re} [H(x,y,z) e^{j\omega t}] \quad (2.26)$$

จาก (2.22), (2.23) และโดยอาศัย $\text{Re} [E e^{j\omega t}] = 1/2 [E e^{j\omega t} + E^* e^{-j\omega t}]$ (2.20) จะเขียนได้

ใหม่เป็น

$$\omega = \varepsilon \times k = \frac{1}{2} [E \times H^*] + \frac{1}{2} \text{Re} [E \times H \cdot e^{j\omega t}] \quad (2.27)$$

เทอมแรกของ (2.24) ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลาและเทอมที่สองมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นสองเท่าของความถี่ที่กำหนดให้ ดังนั้นค่าเฉลี่ยของพอยดิงเวกเตอร์จึงสามารถที่จะหาได้เป็น

$$W_{(x,y,z)} = [W_{(x,y,z,t)}]_{av} = \frac{1}{2} \text{Re} [E \times H^*] \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.28)$$

ตัวประกอบ 1/2 ในเทอม (2.25) และ (2.26) เกิดขึ้น เพราะสนาม E และ H เป็นค่าสูงสุด ไม่ใช่ค่า

rms จาก (2.26) กำลังงานเฉลี่ยที่แพร่กระจายจากสายอากาศ จะเขียน ได้เป็น
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 P_{rad} &= P_{av} = \oint_S \mathcal{W}_{rad} ds \\
 &= \frac{1}{2} \oint_S \text{Re}(E \times H^*) ds
 \end{aligned} \tag{2.29}$$

2.5.9 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น

คำจำกัดความ: ของคำว่าความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ในทิศทางที่กำหนดให้คือ กำลังงานที่แผ่กระจายออกจากตัวสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น และผลจากการกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้คือ

$$U = r^2 W_{rad} \tag{2.30}$$

เมื่อ U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

W = ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W/m^2)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned}
 U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2} \eta [E(r, \theta, \phi)]^2 \\
 &\equiv \frac{r^2}{2} \eta [E_\theta(r, \theta, \phi)]^2 + [E_\phi(r, \theta, \phi)]^2 \\
 &\equiv \frac{\eta}{2} [E_\theta(\theta, \phi)]^2 + [E_\phi(\theta, \phi)]^2
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

เมื่อ E = ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

E_θ, E_ϕ = ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศระยะไกล

η = อินทรินซิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

กำลังงานทั้งหมดนี้หาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นตาม (2.24) ตลอด มุมตัน 4 ทั้งหมดซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\phi \tag{2.32}$$

2.5.10 ค่าสภาพเจาะทิศทาง (Directivity)

เพื่อที่จะเข้าใจถึงคำว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เราจำเป็นต้องรู้จักโคเรกทีฟเกน (directive gain) ไว้ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โคเรกทีฟเฟนในทิศทางที่กำหนด คืออัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส

ค่าสภาพเจาะจงคือค่าของโคเรกทีฟเฟน ในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าโคเรกทีฟเฟนของดันทำเน็ด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คืออัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = U/U_0 = 4\pi U/P_{rad} \quad (2.33)$$

$$D_0 = U_{max}/U_0 = 4\pi U_{max}/P_{rad} \quad (2.34)$$

D_g = โคเรกทีฟเฟน (ไม่มีหน่วย)

D_0 = ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (ไม่มีหน่วย)

U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/ต่อหน่วยมุมตัน)

U_{max} = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/ต่อหน่วยมุมตัน)

U_0 = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)

P_{rad} = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการ (2.33) และ (2.34) เราจะทราบว่า โคเรกทีฟเฟนและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า U , U_{max} และ U_0 ต่างมีค่าเท่ากัน

โคเรกทีฟเฟนของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแผ่กระจายกำลังงานออกไปทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับดันทำเน็ด(สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากกว่าหนึ่งเสมอ

ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าของโคเรกทีฟเฟนจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับโคเรกทีฟเฟน

โดยทั่วไปสูตรของโคเรกทีฟเฟนและค่าสภาพเจาะจงทิศทางอาจจะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม θ และ ϕ ด้วย ค่าสภาพเจาะจงทิศทางรวมสูงสุดจะสามารถแสดงได้เป็น

$$D_0 = D_\theta + D_\phi \quad (2.35)$$

โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางของแต่ละส่วนของ แสดงได้เป็น

$$D_\theta = \frac{4\pi U_\theta}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (2.36)$$

$$D_\phi = \frac{4\pi U_\phi}{(P_{rad})_\theta + (P_{rad})_\phi} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

U_0 = ส่วนประกอบของความเข้มของการแพร่กระจายที่มีทิศทางในสนาม

U_ϕ = ส่วนประกอบของความเข้มของการแพร่กระจายที่มีทิศทางในสนาม

$(P_{rad})_0$ = ส่วนประกอบของกำลังงานของการแพร่กระจายที่มีทิศทางในสนาม

$(P_{rad})_\phi$ = ส่วนประกอบของกำลังงานของการแพร่กระจายที่มีทิศทางในสนาม

ในกรณีที่สายอากาศที่มีโบลหลักเพียงโบลเดียวหรือมีโบลย่อยขนาดน้อยมากจนสามารถตัดออกได้เราสามารถหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางได้โดยใช้วิธีหาค่ามุมคั่นของบีบแล้วใช้สูตรของเกาส์ (Kraus Equation)

$$D_0 \approx \frac{4\pi \left(\frac{180}{\theta_H \times \theta_V}\right)^2}{\pi} = \frac{41,253}{\theta_H \times \theta_V} \quad (2.38)$$

โดยที่

θ_H คือ ค่ามุมที่ HPBW ของระนาบสนามแม่เหล็ก

θ_V คือ ค่ามุมที่ HPBW ของระนาบสนามไฟฟ้า

2.6 โหมดของคลื่น

โหมด (mode) คือแบบแผนของคลื่นเป็นลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในทิศทางใด ๆ ตามโครงสร้างของสายนำสัญญาณซึ่งส่วนใหญ่จะมีเงื่อนไขขอบเขตที่เกิดจากโครงสร้างของสายนำสัญญาณนั้น ๆ บังคับอยู่จึงให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีรูปแบบเพียงเฉพาะเท่านั้น

2.6.1 โหมดหลักในการส่งผ่าน

ในการออกแบบสายอากาศแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดหนึ่งด้าน เราเลือกใช้โหมด TE (transverse electric wave) เป็นโหมดหลักในการส่งผ่านคลื่นสัญญาณภายในท่อนำคลื่น

โดยทั่วไปจะระบุในรูป TE_{mn} ซึ่งหมายถึงอันดับโหมดที่ m และ n โดยเราจะเลือกใช้ในการส่งผ่านคลื่นในโหมด TE_{10} ซึ่งสามารถพิจารณาการส่งผ่านได้จากเงื่อนไขของท่อนำคลื่นและความถี่ที่กำหนดให้มา

K_{cmn} = ค่าคัทออฟเวฟนัมเบอร์

λ_{cmn} = ความยาวของคลื่นคัทออฟ ของโหมดอันดับต่าง ๆ (m)

f_{cmn} = ความถี่คัทออฟของโหมดอันดับต่าง ๆ (Hz)

$$K_{cmn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda_{cmn} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}} \quad (2.40)$$

$$f_{cmn} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2.41)$$

เมื่อพิจารณาโหมดที่เราเลือกนำมาใช้ได้แก่โหมด TE_{10} ดังนั้นอันดับ m และ n คือ 1,0 เมื่อเรานำค่า m, n แทนในสมการที่ (2.3) (2.4) (2.5) จะได้ว่า

$$f_{c10} = \frac{c}{\lambda_{c10}} \quad (2.42)$$

$$K_{c10} = \frac{\pi}{a} \quad (2.43)$$

$$\lambda_{c10} = 2a \quad (2.44)$$

ซึ่งจะพบว่าโหมด TE_{10} นี้ยังจัดว่าเป็นโหมดพื้นฐานของคลื่นที่ส่งผ่านไปในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าในการออกแบบการใช้งานท่อนำคลื่นทั่วไปนั้นจะให้ความสัมพันธ์ตามสมการและเงื่อนไขข้างต้น

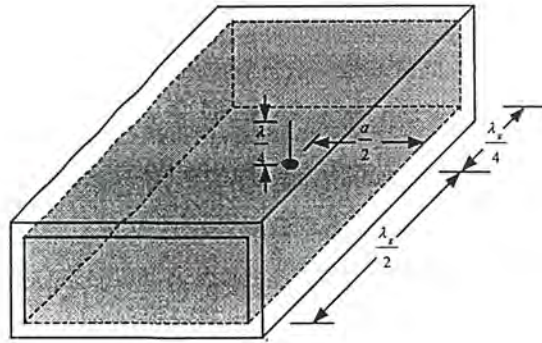
2.6.2 โหมดจางหาย

โหมดของคลื่นที่เกิดขึ้นบริเวณโพรงในท่อนำคลื่นนั้นไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะโหมดหลักเพียงโหมดเดียว แต่จะเกิดขึ้นได้หลายโหมด โดยโหมดอื่นที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเรียกว่าบริเวณที่มีความไม่สม่ำเสมอในท่อนำคลื่น เช่น ตำแหน่งที่มีฉากโลหะ เสาโลหะ หรือบริเวณโพรงในท่อนำคลื่นซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยค่าการสะท้อนโดยสนามที่แพร่กระจายจากปากท่อนำคลื่น

2.7 การป้อนพลังงานคลื่นเข้าสู่ท่อนำคลื่นโดยใช้โพรง

ในการป้อนพลังงานคลื่นเข้าสู่ท่อนำคลื่นนั้นเราจะต้องคำนึงถึงโหมดที่เราต้องการกระตุ้นให้เกิดขึ้นซึ่งในกรณีของท่านำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า เราจะให้เป็น TE_{10} นั้นเราจะทำการใส่โพรงเข้าไปที่ผนังปากท่อดังรูปที่ 2.12 จะทำให้ขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะมีค่าสูงสุดตรงตำแหน่งกึ่งกลางของด้าน a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงตำแหน่งการวางโพรบ

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sin(\theta)} = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (2.45)$$

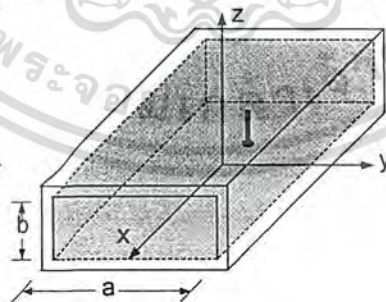
λ_g คือความยาวกลุ่มคลื่นที่เกิดขึ้นภายในท่อนำคลื่น

λ คือความยาวคลื่นที่ตกกระทบเข้ามาในท่อนำคลื่นหรือความยาวคลื่นที่ป้อนออกจาก

โพรบ

2.8 ลักษณะทั่วไปของสายอากาศ

สายอากาศที่นำมาใช้จะประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นด้วยความยาว l ที่ต่อกับสายนำสัญญาณแบบ coaxial โดยผ่านตัวต่อ (connector) แบบ SMA 3.5 มม. และถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนกรอบสี่เหลี่ยมที่มีโครงสร้างเป็นกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีความกว้าง ความสูงและความยาวเป็น a , b และ c ตามลำดับ ซึ่งโพรบจะวางตัวตามแนวแกน y ดังรูป



รูปที่ 2.12 สายอากาศที่วางในระนาบแกน xy

ให้พิจารณาว่า ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมซึ่งมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายในทิศทาง x และจะแพร่กระจายออกจากขอบของกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ช่องปากเปิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากช่อง

ปากเปิดจะสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยโหมดคลื่น (mode) ต่าง ๆ มากมายที่อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้น ในการออกแบบมักต้องการให้เกิดคลื่นส่งผ่านได้เพียงโหมดเดียว ซึ่งในที่นี้คือ โหมด TE_{10} เป็น โหมดพื้นฐาน (dominant mode)

โดยทั่วไปแล้ว โหมดคลื่นอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โหมดหลักจะเป็นรูปแบบของคลื่นที่เรียกว่า คลื่นจางหาย (evanescent wave) และโหมดคลื่นเหล่านี้จะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรมีค่ามากขึ้น ด้วยเหตุนี้จะต้องเลือกระยะทางที่ห่างจากโพรมที่ทำให้ขนาดของโหมดคลื่นอื่น ๆ มีค่าน้อยมากจนสามารถเพิกเฉยได้ เพื่อที่ว่าบริเวณขอบของวงแหวนที่ช่องเปิดทั้งสองด้านซึ่งเป็นจุดที่คลื่นจะเดินทางออกไปนั้น จะมีแต่รูปแบบหลักเพียงรูปแบบเดียว ซึ่งก็คือ การกำหนดค่าความยาวของวงแหวนรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั่นเอง ส่วนการกำหนดค่าความกว้าง จะต้องทำให้มีค่าความถี่ตัดออฟ (cut off frequency) ที่ต่ำสุด เพื่อให้มีเพียงโหมดคลื่นหลักแพร่กระจายออกจากช่องปากเปิดครอบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และโหมดคลื่นอื่น ๆ ที่อยู่ติดกับโหมดคลื่นหลัก จะต้องถูกตัดออกไป ดังนั้น ค่าขนาดความกว้างของท่อนำคลื่นที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังนี้

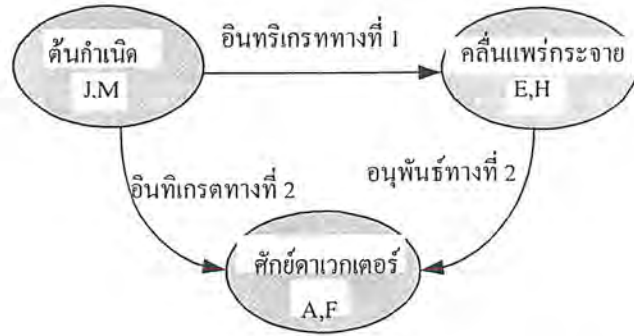
$$\frac{\lambda}{2} < a < \lambda \quad (2.46)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นที่ความถี่ที่ใช้งาน (operating frequency) โดยค่าความถี่ที่ใช้ งาน คือ $f = 12.6575 \text{ GHz}$

2.9 อินทิกรัลการแพร่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย (Radiation Integrals And Auxiliary Potential Functions)

ในทางปฏิบัติวิธีการวิเคราะห์จะใช้ฟังก์ชันช่วย (Auxiliary Function) ที่เรียกว่า ศักดาเวกเตอร์ (Vector Potential) ช่วยในการแก้ปัญหา ศักดาเวกเตอร์ที่ใช้มากได้แก่ ศักดาเวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic Vector Potential) \vec{A} ศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential) \vec{F} นอกจากนี้ก็มีศักดาเฮิซ (Hertz Potential) π_e และ π_m สำหรับการคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก \vec{E} และ \vec{H} ตามลำดับนั้น มักจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือฟังก์ชันช่วยจากความหนาแน่นกระแสต้นกำเนิด (Source Current Density) \vec{J} หรือ \vec{M} ก่อน จากนั้นจะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \vec{E} และความเข้มสนามแม่เหล็ก \vec{H} จากฟังก์ชันช่วยเหล่านี้ แทนที่จะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \vec{E} และความเข้มสนามแม่เหล็ก \vec{H} โดยตรงจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า \vec{J} และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก \vec{M} ซึ่งในบทนี้จะใช้ศักดาเวกเตอร์ \vec{A} และ \vec{F} ช่วยในการคำนวณหาสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ผังของการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายต้นกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็ก

2.9.1 ศักย์ดาวเวกเตอร์ \vec{A} อันเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าต้นกำเนิด

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้ศักย์ดาวเวกเตอร์ A ในการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่กำหนดให้มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาที่เป็นฮาร์โมนิกเป็นที่ยอมรับดีว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก \vec{B} มีลักษณะเป็นห่วงปิดคือมี $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ ดังนั้นอาจแสดงได้ว่าเวกเตอร์ \vec{B} เป็นเคิร์ล (Curl) ของเวกเตอร์หนึ่งเวกเตอร์ได้ได้เพราะเป็นไปตามเวกเตอร์ไเดนติตี (Vector Identity) ต่อไปนี้คือ

$$\nabla \cdot \nabla \times \vec{A} = 0 \quad (2.47)$$

เมื่อ \vec{A} เป็นเวกเตอร์ใดๆจะให้

$$\vec{B}_A = \mu \vec{H}_A = \nabla \times \vec{A} \quad (2.48)$$

หรือ

$$\vec{H}_A = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (2.48a)$$

อักษร A ที่ห้อยท้ายแสดงว่าเป็นสนามที่เกิดจากศักย์ \vec{A} เมื่อแทน (2.48a) จะได้ว่า

$$\nabla \times \vec{E}_A = -j\omega \mu \vec{H}_A \quad (2.49)$$

$$= -j\omega \nabla \times \vec{A} \quad (2.50)$$

เพราะฉะนั้น

$$\nabla \times [\vec{E}_A + j\omega \vec{A}] = 0 \quad (2.51)$$

จากเวกเตอร์ไเดนติตี ที่เคอร์ของเกรเดียนมีค่าเท่ากับ 0 ทำให้สมมุติว่า

$$\nabla \times [-\nabla \phi_e] = 0 \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจาก (2.51) และ (2.52) จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้คือ

$$\vec{E} + j\omega \vec{A} = -\nabla \phi_c \quad (2.53)$$

หรือ

$$\vec{E}_A = -\nabla \phi_c - j\omega \vec{A}$$

เมื่อ ϕ_c แทนศักยศาสตร์ไฟฟ้าใด ๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันในสเปซ

เมื่อทำการเทิร์ลทั้งสองข้างใน (2.48) และใช้เวกเตอร์ไอเดนติตี้ที่ว่า $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$ จะทำให้ได้

$$\nabla \times (\mu \vec{H}_A) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.54)$$

สำหรับกรณีที่ตัวกลางเป็นโฮโมจีเนียสจะเขียนได้ใหม่เป็นดังนี้คือ

$$(\mu \nabla \times \vec{H}_A) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.55)$$

เมื่อจับ (2.55) เท่ากับสมการแมกเวลล์ต่อไปนี้จะทำให้ (2.44) เป็น

$$\mu \vec{J} + J\omega \mu \epsilon \vec{E}_A = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (2.56)$$

หลังจากแทน (2.54) ลงใน (2.56) จะได้

$$\begin{aligned} \nabla^2 \vec{A} + K^2 \vec{A} &= -\mu \vec{J} + \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) + \nabla(J\omega \mu \epsilon \phi_c) \\ &= -\mu \vec{J} + \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) + (J\omega \mu \epsilon \phi_c) \end{aligned} \quad (2.57)$$

เมื่อ $K^2 = \omega^2 \mu \epsilon$

(2.48) เป็นคำจำกัดความของ A ต่อไปจะกำหนดไดเวอร์เจนซ์ของ A ขึ้นเองโดยไม่ขึ้นกับค่าของเคิร์ลเพื่อทำให้ (2.57) มีรูปสมการที่ง่ายขึ้นจะกำหนดให้

$$\nabla \cdot \vec{A} = -j\omega \mu \epsilon \phi_c \quad (2.58)$$

ซึ่งทำให้ได้

$$\phi_c = -\frac{1}{j\omega \mu \epsilon} \nabla \cdot \vec{A} \quad (2.59)$$

เรียก (2.59) ลอเรนซ์คอนดิชันเมื่อแทน (2.59) ลงใน (2.57) จะได้ผลลัพธ์คือ

$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (2.60)$$

นอกจากนี้จะเขียน (2.54) ได้ใหม่ดังนี้-

$$\vec{E}_A = -\nabla \phi_c - j\omega \vec{A} = -J\omega \vec{A} - j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) \quad (2.61)$$

จากที่แสดงมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่าเมื่อเรารู้ค่า \vec{A} จะสามารถคำนวณหา \vec{H}_A ได้จาก (2.48a) และหา \vec{E}_A ได้จาก (2.61) จะแสดงวิธีหาค่า \vec{A} ในเทอมของความหนาแน่นกระแส \vec{J} จาก (2.60)

2.9.2 ศักยศาสตร์ F อันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็กคั่นกำเนิด

แม้ว่ากระแสแม่เหล็กจะไม่มีจริงแต่อาจคิดว่ามีสนามแม่เหล็กสมมูลเกิดขึ้นในปริมาตรเหนือพื้น

ผิวสมมูลได้ สนามที่เกิดจากแม่เหล็กฮาร์โมนิกในบริเวณที่ตัวกลางเป็นโฮโมจีเนียสที่มี $\vec{J} = 0$ แต่

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\bar{M} \neq 0$ จะต้องสอดคล้องกับสมการ $\nabla \cdot \bar{D} = 0$ ดังนั้นสามารถแสดงได้ว่า \bar{E}_F เป็นเคิร์ลของศักดาเวกเตอร์ \bar{F} จาก

$$\bar{E}_F = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F} \quad (2.62)$$

แทน (2.62) ลงในสมการเคิร์ลของแมกเวลล์ที่ว่า $\nabla \times \bar{H} = j\omega \bar{D}$ จะได้ว่า

$$\nabla \times \bar{H}_F = j\omega \epsilon \bar{E}_F \quad (2.63)$$

หรือ

$$\nabla \times (\bar{H}_F + j\omega \bar{F}) = 0 \quad (2.64)$$

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

$$\bar{H}_F = -\nabla \phi_m - j\omega \bar{F}$$

เมื่อ ϕ_m แทนศักดาสเกลลาร์แม่เหล็กใด ๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสเปซเมื่อทำเคิร์ลใน (2.62) จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้เป็น

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

หรือ

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

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

$$\bar{H}_F = -\nabla \phi_m - j\omega \bar{F}$$

เมื่อ ϕ_m แทนศักดาสเกลลาร์แม่เหล็กใด ๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสเปซเมื่อทำเคิร์ลใน (2.62) จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้เป็น

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{H}_F = -\nabla\phi_m - j\omega\vec{F} \quad (2.65)$$

เมื่อ ϕ_m แทนศักยศาสตร์แม่เหล็กใด ๆ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสเปซเมื่อทำเทิร์ลใน (2.62) จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้คือ

$$\nabla \times \vec{E}_F = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \nabla \times \vec{F} = -\frac{1}{\epsilon} [\nabla \nabla \cdot \vec{F} - \nabla^2 \vec{F}] \quad (2.66)$$

แล้วจับให้เท่ากับสมการแมกเวลล์

$$\nabla \times \vec{E}_F = -\vec{M} - j\omega\mu\vec{H}_F \quad (2.67)$$

จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้

$$\nabla^2 \vec{F} + j\omega\mu\epsilon\vec{H}_F = \nabla \nabla \cdot \vec{F} - \epsilon\vec{M} \quad (2.68)$$

หลังจากแทน (2.65) ลงใน (2.68) จะเขียน (2.68) ได้ใหม่ว่า

$$\nabla^2 \vec{F} + K^2 \vec{F} = -\epsilon\vec{M} + \nabla(\nabla \cdot \vec{F}) + \nabla(j\omega\mu\epsilon\phi_m) \quad (2.69)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\nabla^2 \vec{F} + K^2 \vec{F} = -\epsilon\vec{M} \quad (2.70)$$

(2.58) จะกลายเป็น

$$\nabla^2 \vec{F} + K^2 \vec{F} = -\epsilon\vec{M} \quad (2.71)$$

และจะเขียน (2.54) ได้ใหม่ดังนี้คือ

$$\vec{H}_F = -j\omega\vec{F} - \frac{j}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{F}) \quad (2.72)$$

จะเห็นว่าเมื่อรู้ค่า \vec{F} จะได้ค่า \vec{E}_F ได้จาก (2.62) และ \vec{H}_F จาก (2.72) เมื่อ \vec{M}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสต้านกำเนิด \vec{J} และ \vec{M}

ในสองหัวข้อที่ผ่านมาได้แสดงสมการที่จะคำนวณหา \vec{E} และ \vec{H} จาก \vec{J} และ \vec{M} ในวิธีดังกล่าวต้องหาฟังก์ชันช่วย \vec{A} และ \vec{F} จาก \vec{J} และ \vec{M} ก่อน จากนั้นจึงหา \vec{E}_A, \vec{H}_A จาก \vec{A} หรือ \vec{E}_F, \vec{H}_F จาก \vec{F} ได้ สนามรวมจะเป็นผลรวมของสนามแต่ละสนามที่เกิดจาก \vec{A} และ \vec{F}

สรุปขั้นตอนการคำนวณหาสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ารวม

1. กำหนด \vec{J} และ \vec{M}
2. ก) หา \vec{A} ที่เกิดจาก \vec{J} โดยใช้

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \vec{J} \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.73)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบอินโฮโมจีนียสใน (2.49)

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

$$\vec{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iiint_V \vec{M} \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.74)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบอินโฮโมจีนียสใน (2.71) ใน (2.73) และ (2.74) $k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon$ และ R เป็นระยะทางจากจุดใด ๆ นั้นกำเนิดไปยังจุดที่ทำการสังเกตค่าสนามในหัวข้อต่อไปจะแสดงวิธีหาคำตอบใน (2.73) และ (2.74)

3. (ก) หา \vec{H}_A จาก (2.48a) และ \vec{E}_A จาก (2.61) หรืออาจหา \vec{E}_A จากสมการแมกซ์เวลล์ เมื่อ $\vec{J}=0$

ข) หา \vec{E}_F จาก (2.62) และ \vec{H}_F จาก (2.62) หรืออาจหา \vec{H}_F จากสมการแมกซ์เวลล์ เมื่อ

$$\vec{M}=0$$

1. หาสนามรวมได้จาก

$$2. \vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_F = -j\omega \vec{A} - j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{F} \quad (2.75)$$

หรือ

$$\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_F = \frac{1}{j\omega \varepsilon} \nabla \times \vec{H}_A - \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{F} \quad (2.75a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{H} = \vec{H}_A + \vec{H}_F = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \nabla (\nabla \cdot \vec{F}) \quad (2.76)$$

หรือ

$$\vec{H} = \vec{H}_A + \vec{H}_F = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} - \frac{1}{j\omega\mu} \nabla \times \vec{E}_F \quad (2.76a)$$

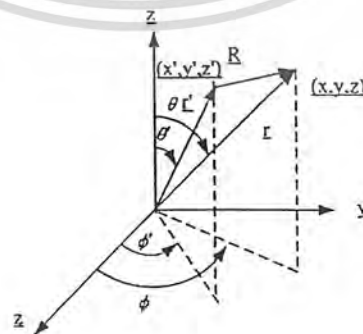
2.9.4 ค่าตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบไม่เอกพันธ์

ในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการหาค่าเวกเตอร์ \vec{A} และ \vec{F} จากสมการเวกเตอร์คลื่นแบบอินโฮโมจีนีเยส

สมมุติว่าต้นกำเนิดของสนามมีความหนาแน่นกระแสเป็น J_z ซึ่งในลิมิตจะเป็นต้นกำเนิดแบบเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมากตามที่จุดกำเนิดของระบบ โคออดิเนต x, y, z ดังรูป



รูปที่ 2.14 แหล่งต้นกำเนิดจากจุดกำเนิด



รูปที่ 2.15 ระบบทรงกระบอกที่ใช้สำหรับคำนวณหาสนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสชี้ในทิศทาง z ดังนั้นจะมีเฉพาะ A_z ซึ่งเขียน (2.60) ได้ใหม่ว่า

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = -\mu J_z \quad (2.77)$$

ณ จุดซึ่งอยู่ห่างออกไปจากต้นกำเนิดสมการคลื่นกลายเป็น

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = 0 \quad (2.78)$$

เพราะลิมิตต้นกำเนิดเป็นจุด A_z จึงไม่มีฟังก์ชันทิศทาง (θ และ ϕ) ดังนั้นในระบบโคออดิเนตทรงกลม $A_z = A_z(r)$ เมื่อ r เป็นระยะตามแนวรัศมีจะเขียน (2.78) ได้ใหม่ว่า

$$\nabla^2 A_z(r) + k^2 A_z(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \frac{\partial A_z(r)}{\partial r} \right] + k^2 A_z(r) = 0 \quad (2.79)$$

และเนื่องจากเป็นฟังก์ชันของ โคออดิเนตแนวรัศมีเท่านั้นการหาอนุพันธ์จึงเป็นแบบธรรมดาซึ่งเป็นผลให้ (2.79) กลายเป็นดังต่อไปนี้

$$\frac{d^2 A_z(r)}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dA_z(r)}{dr} + k^2 A_z(r) = 0 \quad (2.80)$$

เป็นที่ทราบกันดีว่าสมการดิฟเฟอเรนเชียลในรูปของ (2.80) มี 2 คำตอบคือ

$$A_{z1} = C_1 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.81)$$

$$A_{z2} = C_2 \frac{e^{+jkr}}{r} \quad (2.82)$$

(2.81) แสดงคลื่นที่เดินทางออกไปจากต้นกำเนิดในทิศทางตามแนวรัศมี ในขณะที่ (2.82) แสดงคลื่นที่เดินทางเข้าหาต้นกำเนิด ในกรณีนี้ต้นกำเนิดถูกวางอยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งจะแพร่กระจายคลื่นออกไป เราจึงเลือกคำตอบใน (2.81) จะได้ว่า

$$A_z = A_{z1} = C_1 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.83)$$

ในกรณีสนามสถิตย์ ($\omega = 0$) (2.83) จะเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_z = \frac{C_1}{r} \quad (2.84)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของ (2.78) (2.79) (2.81) เมื่อ $K=0$ ดังนั้นที่จุดซึ่งห่างออกไปจากต้นกำเนิดคำตอบของสนามซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลากับคำตอบของสนามสถิตยจะต่างกันด้วยค่า e^{-jkr} ถ้าหากมีต้นกำเนิด J_z ไม่เท่ากับ 0 และ $K=0$ สมการคลื่น (2.77) มีลักษณะดังนี้

$$\nabla^2 A_z = -\mu J_z \quad (2.85)$$

(2.85) เป็นสมการของพัวซองซึ่งคำตอบของมันคือ

$$\nabla^2 \phi = \frac{-\rho}{\epsilon} \quad (2.86)$$

ซึ่งมีคำตอบดังนี้

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_V \frac{\rho}{r} dv' \quad (2.87)$$

เมื่อ r เป็นระยะทางจากจุดใด ๆ บนความหนาแน่นประจุไปยังจุดสังเกต เนื่องจาก (2.85) มีรูปแบบที่คล้ายกับ (2.86) เขียนคำตอบได้เป็น

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{J_z}{r} dv' \quad (2.88)$$

จะพบว่าคำตอบของสนามซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาของ (2.77) หาได้โดยคูณคำตอบเมื่อเป็นสนามสถิตของ (2.88) ด้วย เพราะฉะนั้นเราแสดงได้ว่า

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \int J_z \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.89)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการ $\nabla^2 A_z + k^2 A_z = -\mu J_z$

จากสมการ (2.84) ทำให้เขียนคำตอบของสมการคลื่นดังนี้คือ

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \vec{J} \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.90)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่ดินกำเนิดไม่ได้อยู่ที่ออริจินแต่อยู่ที่ตำแหน่ง (x',y',z') ดังแสดงในรูปที่ (2.20) และรูปที่ (2.21) จะมีค่าดังนี้

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \vec{J}(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.91)$$

สัญลักษณ์ 'แสดงถึงตำแหน่งของดินกำเนิดส่วนที่ไม่มีสัญลักษณ์ ' ตำแหน่งของจุดสังเกตและ R เป็นระยะทางจากจุดใด ๆ ในดินกำเนิดไปยังจุดสังเกตในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$\vec{F}(x, y, z) = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iiint_V \vec{M}(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.92)$$

ถ้า \vec{J} และ \vec{M} เป็นความหนาแน่นของกระแสต่อหน่วยความยาว (m^{-1}) จะได้ว่า

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S \vec{J}_s(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.93)$$

และ

$$\vec{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_S \vec{M}_s(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.94)$$

ส่วนในกรณีที่เป็นการแผ่ไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก (\vec{I}_e และ \vec{I}_m) การอินทิเกรตจะกลายเป็นแบบโลรีอินทิกรัลดังนี้คือ

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_C \vec{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.95)$$

และ

$$\vec{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_C \vec{I}_m(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.96)$$

2.9.5 การแพร่กระจายคลื่นการของสนามระยะไกล

เนื่องจากสนามซึ่งแพร่ออกจากสายอากาศมีขนาดจำกัดจะเป็นคลื่นทรงกลมดังนั้นคำตอบทั่วไปของสมการเวกเตอร์คลื่น (2.60) ของสายอากาศที่มีขนาดจำกัดในเทอมของส่วนประกอบแบบเอกสารถึงกลมจะมีรูปแบบเป็น สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{A} = \bar{a}_r A_r(r, \theta, \phi) + \bar{a}_\theta A_\theta(r, \theta, \phi) + \bar{a}_\phi A_\phi(r, \theta, \phi) \quad (2.97)$$

ขนาดของแต่ละส่วนประกอบของสนามใน (2.93) แปรผันกับ r เป็น $\frac{1}{r^n}, n = 1, 2, \dots$

เมื่อตัดเทอมที่มีค่า n สูง ๆ คือ $n=2, 3, \dots$ ทำให้ (2.97) กลายเป็นดังนี้

$$\bar{A} \cdot \left[\bar{a}_r A'_r(\theta, \phi) + \bar{a}_\theta A'_\theta(\theta, \phi) + \bar{a}_\phi A'_\phi(\theta, \phi) \right] \frac{e^{-jkr}}{r}, r \rightarrow \infty \quad (2.98)$$

เมื่อแทน (2.81) ลงใน (2.76) จะได้ผลลัพธ์ต่อไปนี้คือ

$$\bar{E} = \frac{1}{r} \left\{ -j\omega e^{-jkr} \left[\bar{a}_r(0) + \bar{a}_\theta A'_\theta(\theta, \phi) + \bar{a}_\phi A'_\phi(\theta, \phi) \right] \right\} + \frac{1}{r^2} \{ \dots \} + \dots \quad (2.99)$$

ส่วนประกอบของสนามในแนวรัศมีไม่มีพจน์ $\frac{1}{r}$ เพราะหักล้างกันทำนองเดียวกันถ้าใช้ (2.94) จะเขียน

(2.48a) ได้ว่า

$$\bar{H} = \frac{1}{r} \left\{ j \frac{\omega}{\eta} e^{-jkr} \left[\bar{a}_r(\theta) + \bar{a}_\theta A'_\phi(\theta, \phi) - \bar{a}_\phi A'_\theta(\theta, \phi) \right] \right\} + \frac{1}{r^2} \{ \dots \} + \dots \quad (2.100)$$

เมื่อ $\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ เป็นอินทรีนสิกอิมพีแดนซ์ของตัวกลาง

เมื่อตัดเทอม $\frac{1}{r^n}$ ที่มีกำลังสูง ๆ ทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายจะมีส่วนประกอบของ θ และ ϕ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

สนามระยะไกล

$$\left. \begin{array}{l} E_r = 0 \\ E_\theta = -j\omega A_\theta \\ E_\phi = -j\omega A_\phi \end{array} \right\} \rightarrow \bar{E}_A = -j\omega \bar{A} \quad (2.101)$$

มีส่วนประกอบของ θ และ ϕ เท่านั้นเพราะ $E_r = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left. \begin{aligned} H_r &= 0 \\ H_\theta &= j\frac{\omega}{\eta} A_\phi = \frac{-E_\phi}{\eta} \\ H_\phi &= -j\frac{\omega}{\eta} A_\theta = \frac{E_\theta}{\eta} \end{aligned} \right\} \rightarrow \vec{H}_A = \frac{\vec{a}_r}{\eta} \times \vec{E}_A = -j\frac{\omega}{\eta} \vec{a}_r \times \vec{A} \quad (2.102)$$

มีส่วนประกอบของ θ และ ϕ เท่านั้นเพราะ $H_r = 0$

ส่วนประกอบของสนามในแนวรัศมีมีเฉพาะเทอมกำลังสูง ๆ ของ $\frac{1}{r^n}$ ทำนองเดียวกันสนามระยะไกลที่เกิดจากต้นกำเนิดสนามแม่เหล็กเขียนได้ดังนี้

สนามระยะไกล

$$\left. \begin{aligned} H_r &= 0 \\ H_\theta &= -j\omega F_\theta \\ H_\phi &= -j\omega F_\phi \end{aligned} \right\} \rightarrow \vec{H}_F = -j\omega \vec{F} \quad (2.103)$$

มีเฉพาะส่วนประกอบ θ และ ϕ เท่านั้นเพราะ $H_r = 0$

$$\left. \begin{aligned} E_r &= 0 \\ E_\theta &= -j\omega\eta F_\phi = \eta H_\phi \\ E_\phi &= j\omega\eta F_\theta = -\eta H_\theta \end{aligned} \right\} \rightarrow \vec{E}_F = -\eta \vec{a}_r \times \vec{H}_F = j\omega\eta \vec{a}_r \times \vec{F} \quad (2.104)$$

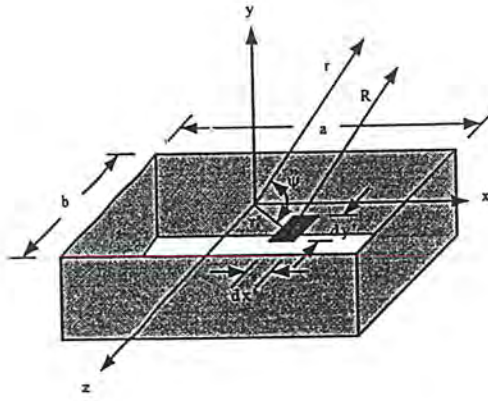
มีเฉพาะส่วนประกอบ θ และ ϕ เท่านั้นเพราะ $E_r = 0$

จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระยะไกลจะตั้งฉากกันและจะทำให้สนามมีลักษณะเป็นแบบ TEM

2.10 สมการแพร่กระจายคลื่น

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงการสังเคราะห์คำนวณหาต้นกำเนิดเมื่อกำหนดคลื่นที่แพร่ออกมาให้โดยการใช้ฟังก์ชันช่วย (Auxiliary Function) ที่เรียกว่า ศักย์ดาวเวกเตอร์ (Vector Potential) ส่วนใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.16 ลักษณะการวางสายอากาศในระนาบ xz

หัวข้อนี้จะแสดงการหาสมการการแพร่กระจายคลื่นเมื่อท่อนำคลื่นวางในลักษณะต่าง โดยใช้สมการที่ได้มาจากหัวข้อที่ผ่านมา

สำหรับสนามระยะไกลจุดสังเกตจะประมาณโดย

$$R = r - r' \cos \psi \quad \text{สำหรับการเปลี่ยนแปลงเชิงเฟส} \quad (2.105)$$

$$R = r \quad \text{สำหรับการเปลี่ยนแปลงเชิงแอมพลิจูด} \quad (2.106)$$

เมื่อ ψ เป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ r และ r' ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ดันกำเนิด $(x', y', z'$ หรือ $r', \theta', \phi')$ เป็นตำแหน่งของ J_s และ M_s จุดที่สองเป็นจุดสังเกต $(x, y, z$ หรือ $r, \theta, \phi)$ สมมติเวกเตอร์ R และ r ขนานกัน

จากหัวข้อที่ผ่านมาสรุปได้ว่า

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \iint_s J_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' = \frac{\mu e^{-jkR}}{4\pi r} N \quad (2.107)$$

$$N = \iint_s J_s \frac{e^{-jkr' \cos \psi}}{R} ds' \quad (2.108)$$

$$F = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_s M_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' = \frac{\varepsilon e^{-jkR}}{4\pi r} L \quad (2.109)$$

$$L = \iint_s M_s \frac{e^{-jkr' \cos \psi}}{R} ds' \quad (2.110)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสนามสนามระยะไกลซึ่งประกอบด้วยมุม θ และมุม ϕ ของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กซึ่งสามารถเขียนดังนี้

$$(E_A)_\theta = -j\omega A_\theta \quad (2.111)$$

$$(E_A)_\phi = -j\omega A_\phi \quad (2.112)$$

$$(H_F)_\theta = -j\omega F_\theta \quad (2.113)$$

$$(H_F)_\phi = -j\omega F_\phi \quad (2.114)$$

เมื่อนำค่า E_r และ H_λ ไปแทนใน (2.110)-(2.103) จะได้ดังนี้

$$(E_F)_\theta \approx +\eta(H_F)_\phi = -j\omega\eta F_\phi \quad (2.115)$$

$$(E_F)_\phi \approx -\eta(H_F)_\theta = +j\omega\eta F_\theta \quad (2.116)$$

$$(H_A)_\theta \approx -\frac{(E_A)_\phi}{\eta} = +j\omega\frac{A_\phi}{\eta} \quad (2.117)$$

$$(H_A)_\phi \approx +\frac{(E_A)_\theta}{\eta} = -j\omega\frac{A_\theta}{\eta} \quad (2.118)$$

ทำการรวมสมการ (2.100)-(2.103) กับ (2.104)-(2.107) ไปแทนใน (12.96)-(2.97) จะได้สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กทั้งหมด ดังนี้

$$E_r \approx 0 \quad (2.119)$$

$$E_\theta \approx -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}(L_\theta + \eta N_\theta) \quad (2.120)$$

$$E_\phi \approx +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}(L_\phi - \eta N_\phi) \quad (2.121)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $H_r \approx 0 \quad (2.122)$
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_r \approx 0$$

$$H_\theta \approx \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left(N_\phi - \frac{L_\theta}{\eta} \right) \quad (2.123)$$

$$H_\phi \approx -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left(N_\theta + \frac{L_\phi}{\eta} \right) \quad (2.124)$$

นำค่า $N_\theta, N_\phi, L_\theta, L_\phi$ ไปแทนใน (2.97) และ (2.99)

$$N = \iint_s J_s e^{+jkr' \cos \psi} ds' = \iint_s (\hat{a}_x J_x + \hat{a}_y J_y + \hat{a}_z J_z) e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.125)$$

$$L = \iint_s M_s e^{+jkr' \cos \psi} ds' = \iint_s (\hat{a}_x M_x + \hat{a}_y M_y + \hat{a}_z M_z) e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.126)$$

เพราะฉะนั้นจะได้

$$N_\theta = \iint_s [J_x \cos \theta \cos \phi + J_y \cos \theta \sin \phi - J_z \sin \theta] e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.127)$$

$$N_\phi = \iint_s [-J_x \sin \theta + J_y \cos \phi] e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.128)$$

$$L_\theta = \iint_s [M_x \cos \theta \cos \phi + M_y \cos \theta \sin \phi - M_z \sin \theta] e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.129)$$

$$L_\phi = \iint_s [-M_x \sin \theta + M_y \cos \phi] e^{+jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.140)$$

สมการเชิงอนุพันธ์

$$r' \cos \psi = r' \cdot \hat{a}_r = (\hat{a}_y y' + \hat{a}_z z') \cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \quad (2.141)$$

$$r' \cos \psi = r' \cdot \hat{a}_r = (\hat{a}_x x' + \hat{a}_z z') \cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \quad (2.142)$$

$$r' \cos \psi = r' \cdot \hat{a}_r = (\hat{a}_x x' + \hat{a}_y y') \cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \quad (2.143)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$ds' = dy' dz' \quad (2.144)$$

$$ds' = dx' dz' \quad (2.145)$$

$$ds' = dx' dy' \quad (2.146)$$

เมื่อมีท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมวางอยู่ในระนาบ $z=0$ สมมุติว่าเรารู้ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่สัมผัสกับผิวของท่อนำคลื่น และให้มีค่าเป็น E_o เราต้องการหาสนามที่แพร่กระจายในบริเวณที่ $z > 0$ จะสามารถคิดได้ว่าสนามที่ท่อนำคลื่นเกิดจากต้นกำเนิดองค์ประกอบหนึ่งในบริเวณ $z < 0$ แต่ไม่จำเป็นต้องรู้รายละเอียดของต้นกำเนิดนี้ เพราะสนาม E_o บนท่อนำคลื่นจะเป็นองค์ประกอบกำหนดสนามในครึ่งสเปซ $z > 0$ แต่เพียงผู้เดียว

การวิเคราะห์สามารถแบ่งกรณีตามลักษณะการแพร่ของสนามที่บริเวณช่องเปิดของท่อนำคลื่นของท่อนำคลื่นได้ 4 กรณีดังนี้

2.10.1 การกระจายอย่างสม่ำเสมอบนแผ่นองค์ประกอบตัวนำขนาดอนันต์

(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 2.17 สนามสมมุติที่แพร่อย่างสม่ำเสมอบริเวณช่องเปิดของสายอากาศที่วางบนแผ่นตัวนำ

จากรูปที่ 2.17 เราจะได้สนามสมมุติที่ช่องเปิดของท่อนำคลื่นคือ

$$E_o = \hat{a}_y E_o \quad -a/2 \leq x' \leq a/2, \quad -b/2 \leq y' \leq b/2 \quad (2.147)$$

โดยที่ E_o คือค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } M_s = \begin{cases} -2\hat{n} \times E_o = -2\hat{a}_z \times \hat{a}_y E_o = +\hat{a}_x 2E_o & \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \\ 0 & \text{บริเวณอื่น} \end{cases} \quad (2.148)$$

$$J_s = 0$$

จากนั้นนำสมการ (2.108)-(2.113),(2.116)-(2.119),(2.122),(2.125) และ(2.127)

$$N_\theta = N_\phi = 0 \quad (2.149)$$

$$L_\theta = \int_{-b/2-a/2}^{+b/2+a/2} \int [M_x \cos \theta \cos \phi] e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy'$$

$$L_\theta = \cos \theta \cos \phi \int_{-b/2-a/2}^{+b/2+a/2} \int M_x e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (2.150)$$

เมื่อนำ $M_x = 2E_o \hat{a}_x$ มาแทนใน L_θ และ L_ϕ ก็จะได้ค่าดังนี้

$$L_\theta = 2abE_o [\cos \theta \cos \phi \left(\frac{\sin x}{x} \right) \left(\frac{\sin y}{y} \right)] \quad (2.151)$$

$$L_\phi = -2abE_o [\sin \phi \left(\frac{\sin x}{x} \right) \left(\frac{\sin y}{y} \right)] \quad (2.152)$$

ดังนั้นทำให้ได้สมการแพร่กระจายคลื่นดังนี้

$$E_r = 0 \quad (2.153)$$

$$E_\theta = \frac{jabE_o e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\sin \phi \left(\frac{\sin x}{x} \right) \left(\frac{\sin y}{y} \right) \right] \quad (2.154)$$

$$E_\phi = \frac{jabE_o e^{-jkr}}{2\pi r} \left[\cos \theta \cos \phi \left(\frac{\sin x}{x} \right) \left(\frac{\sin y}{y} \right) \right] \quad (2.155)$$

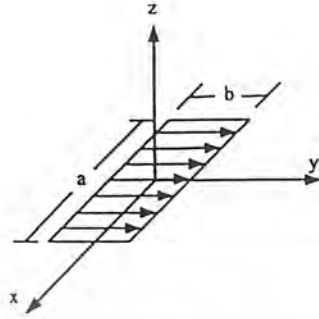
$$\text{เมื่อ } x = \frac{ka}{2} \sin \theta \cos \phi$$

$$y = \frac{kb}{2} \sin \theta \sin \phi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2 การกระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Freespace)



รูปที่ 2.18 สนามสมมุติที่แพร่อย่างสม่ำเสมอบริเวณช่องเปิดของสายอากาศเมื่อวางในช่องว่างอิสระ

จากรูปที่ 2.18 เราจะได้สนามสมมุติที่ช่องเปิดของท่อนำคลื่นซึ่งจะประกอบด้วยส่วนของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กคือ

$$E_a = \hat{a}_y E_o \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \quad (2.156)$$

$$H_a = -\hat{a}_x \frac{E_o}{\eta} \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \quad (2.157)$$

พิจารณาแหล่งกำเนิด

$$M_s = -\hat{n} \times E_o \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \quad (2.158)$$

$$J_s = \hat{n} \times H_a \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \quad (2.159)$$

จากนั้นก็ทำการพิจารณาเหมือนกับกรณีของการกระจายอย่างสม่ำเสมอบนแผ่นองค์ประกอบตัวนำขนาดอนันต์ก็จะได้สมการแพร่กระจายคลื่นดังนี้

$$E_\theta = \frac{c}{2} \sin \phi (1 + \cos \theta) \frac{\sin x \sin y}{x y} \quad (2.160)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\phi = \frac{c}{2} \cos \phi (1 + \cos \theta) \frac{\sin x}{x} \frac{\sin y}{y} \quad (2.161)$$

$$x = \frac{ka}{2} \sin \theta \cos \phi$$

$$y = \frac{kb}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$c = j \frac{abE_0 e^{-jkr}}{2\pi r}$$

2.10.3 การกระจายโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบองค์ประกอบตัวนำ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 2.19 สนามสมมุติที่แพร่อย่างสม่ำเสมอบริเวณช่องเปิดของสายอากาศที่วางบนแผ่นตัวนำในโหมด TE_{10}

จากรูปที่ 2.19 เราจะได้สนามสมมุติที่ช่องเปิดของท่อนำคลื่นซึ่งจะประกอบด้วยส่วนของสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวคือ

$$E_a = \hat{a}_y E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \quad (2.162)$$

พิจารณาแหล่งกำเนิด

$$\text{เมื่อ } M_s = \begin{cases} -2\hat{n} \times E_a = -2\hat{a}_z \times \hat{a}_y E_0 = +\hat{a}_x 2E_0 & \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \\ 0 & \end{cases} \quad (2.163)$$

$$J_s = 0$$

จากนั้นก็ทำการพิจารณาเหมือนกับกรณีที่ผ่านมาที่จะได้สมการแพร่กระจายคลื่นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_r = 0$$

$$E_\theta = -\frac{\pi}{2} c \left[\sin \phi \frac{\cos x}{x^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \left(\frac{\sin y}{y}\right) \right] \quad (2.164)$$

$$E_\phi = -\frac{\pi}{2} c \left[\cos \theta \cos \phi \frac{\cos x}{x^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \left(\frac{\sin y}{y}\right) \right] \quad (2.165)$$

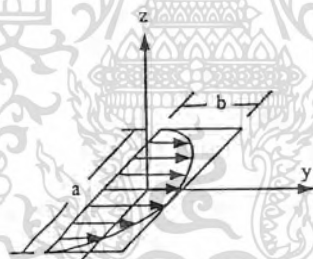
$$x = \frac{ka}{2} \sin \theta \cos \phi$$

$$y = \frac{kb}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$c = j \frac{ab E_o e^{-jkr}}{2\pi r}$$

2.10.4. การกระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 2.20 สนามสมมุติที่แพร่อย่างสม่ำเสมอบริเวณช่องเปิดของสายอากาศที่วางในช่องว่างอิสระในโหมด TE_{10}

จากรูปที่ 2.20 เราจะได้สนามสมมุติที่ช่องเปิดของท่อนำคลื่นซึ่งจะประกอบด้วยส่วนของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กคือคือ

$$E_a = \hat{a}_y E_o \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq x' \leq b/2 \end{cases} \quad (2.166)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$H_o = -\hat{a}_x \frac{E_o}{\eta} \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \quad (2.167)$$

พิจารณาแหล่งกำเนิด

$$M_s = -\hat{n} \times E_a \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \quad (2.168)$$

$$J_s = \hat{n} \times H_o \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \quad (2.169)$$

จากนั้นก็ทำการพิจารณาเหมือนกับแบบแรกก็จะได้สมการแพร่กระจายคลื่นดังนี้

$$E_\theta = \frac{c}{2} \sin \phi (1 + \cos \theta) \frac{\sin x}{x} \frac{\sin y}{y} \quad (2.170)$$

$$E_\phi = \frac{c}{2} \cos \phi (1 + \cos \theta) \frac{\sin x}{x} \frac{\sin y}{y} \quad (2.171)$$

$$x = \frac{ka}{2} \sin \theta \cos \phi$$

$$y = \frac{kb}{2} \sin \theta \sin \phi$$

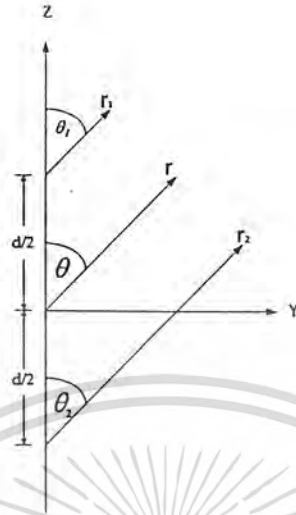
$$c = j \frac{abE_o e^{-jkr}}{2\pi r}$$

2.11 ตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor)

เนื่องจากรูปแบบของสายอากาศเพียงองค์ประกอบเดียว ไม่สามารถจะให้ค่าการชี้ทิศทางและค่าอัตราขยาย (gain) ซึ่งมีความสำคัญต่อการออกแบบสายอากาศให้มีค่ามาก ๆ ได้ ดังนั้น วิธีการหนึ่งที่จะทำให้ค่าการชี้ทิศทางและค่าอัตราขยายให้มีค่ามากขึ้นได้ คือ การจัดรูปแบบของสายอากาศให้เป็นแถวลำดับ (Array) ซึ่งเป็นการนำสายอากาศตั้งแต่ 2 องค์ประกอบขึ้นไปมาจัดเรียงในรูปแบบต่าง ๆ แต่รูปแบบที่ได้นั้นจะต้องมีความเข้าใจที่จะทำให้สนามที่แพร่กระจายออกจากองค์ประกอบสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเกิดการเสริมกัน ในทิศทางที่ต้องการและหักล้างกัน ในทิศทางที่ไม่ต้องการ ซึ่งการทำแถวลำดับนั้นมีหลายแบบด้วยกัน แต่ที่จะนำมาใช้ในโครงการนี้จะเป็นการทำแถวลำดับแบบเชิงเส้น (Linear Array)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะเริ่มพิจารณาจาก สายอากาศไดโพล 2 องค์ประกอบ ที่วางอยู่ในแนวแกน z ดังรูปที่ 2.21 เมื่อทำการสังเกตที่สนามระยะไกล ($r \rightarrow \infty$) และให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างสายอากาศทั้งสององค์ประกอบจะได้ว่า



รูปที่ 2.21 สายอากาศไดโพล 2 องค์ประกอบที่วางบนแกน z

$$\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta$$

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

สำหรับการแปรผันของเฟส

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

สำหรับการแปรผันของขนาด

$$r_1 = r_2 = r$$

ซึ่งจะได้สนามรวมในการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล 2 องค์ประกอบเป็นดังนี้

$$= a_o j \eta \frac{k I_o l}{4\pi} |\cos(\theta)| \frac{1}{r} \left[e^{-ikr + jk \frac{d}{2} \cos(\theta) + \frac{j\beta}{2}} + e^{-ikr - jk \frac{d}{2} \cos(\theta) + \frac{j\beta}{2}} \right] \quad (2.172)$$

$$\therefore E_t = a_o j \eta \frac{k I_o l}{4\pi} |\cos(\theta)| \frac{1}{r} e^{-ikr} \left[e^{\frac{i(kd \cos(\theta) + \beta)}{2}} + e^{-\frac{i(kd \cos(\theta) - \beta)}{2}} \right] \quad (2.173)$$

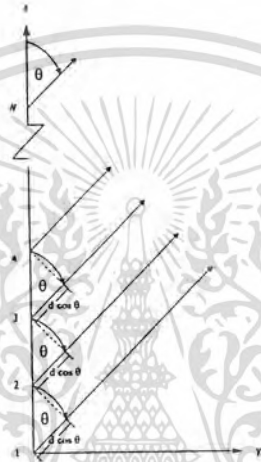
เมื่อ β คือ ความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการจะพบว่า สนามรวมในการแพร่กระจายคลื่นของไดโพล 2 องค์ประกอบ จะมีค่าเท่ากับสนามของไดโพล 1 องค์ประกอบ คูณอยู่กับเทอม ๆ หนึ่ง ซึ่งเทอมเทอมนี้จะถูกเรียกว่าเป็น อาร์เรย์แฟกเตอร์ ซึ่งเราจะได้เทอมของอาร์เรย์แฟกเตอร์ คือ

$$AF = e^{-i \frac{(kd \cos(\theta) - \beta)}{2}} + e^{-i \frac{(kd \cos(\theta) - \beta)}{2}} \quad (2.173)$$

ต่อไปจะพิจารณาจากสายอากาศไดโพล N องค์ประกอบ ที่วางอยู่ในแนวแกน z โดยเริ่มที่ตำแหน่ง $z = 0$ และจากการสังเกตที่สนามระยะไกล โดยให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเป็น d ดังรูปที่ 2.22 จะได้ว่า



รูปที่ 2.22 สายอากาศไดโพล N องค์ประกอบ ที่วางอยู่บนแกน z

$$\theta_N = \theta_{N-1} \approx \dots \approx \theta_3 \approx \theta_2 \approx \theta_1 \approx \theta$$

$$r_2 = r_1 - d \cos(\theta)$$

$$r_3 = r_1 - 2d \cos(\theta)$$

\vdots

สำหรับการแปรผันของเฟส

$$r_N = r_1 - (N-1)d \cos(\theta)$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r_3 \approx \dots \approx r_N \text{ สำหรับแปรผันของขนาด}$$

(2.174)

จากสนามรวมของสายอากาศไดโพล 2 องค์ประกอบ จะได้สนามรวมของสายอากาศไดโพล N องค์ประกอบ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Et = a_{\theta} j \eta \frac{kI_o}{4\pi} \left[\frac{e^{-j(kr_1 - \beta)}}{r_1} |\cos(\theta_1)| + \frac{e^{-j(kr_2 - \beta)}}{r_2} |\cos(\theta_2)| + \dots + \frac{e^{-j(kr_N - \beta)}}{r_N} |\cos(\theta_N)| \right] \quad (2.175)$$

โดยกำหนดให้ ความต่างเฟสของกระแส (β) ที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเป็นแบบ Progressive phase คือ เฟสของกระแสในสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ จะนำหน้าเฟสของกระแสในสายอากาศที่อยู่ก่อนหน้าในแถวลำดับเดียวกัน
เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$Et = a_{\theta} j \eta \frac{kI_o l}{4\pi r} |\cos(\theta)| \left[e^{j(kr_1 - \beta)} + e^{j(kr_2 - \beta)} + \dots + e^{j(kr_N - \beta)} \right] \quad (2.176)$$

เนื่องจากที่ r_1 เรากำหนดให้เป็นจุดอ้างอิงที่ $z = 0$ ดังนั้น จะได้ว่า ความต่างเฟสของกระแสในส่วนของ r_1 มีค่าเท่ากับ 0 เพราะฉะนั้น จากสมการรวม E, จะได้ว่า

$$Et = a_{\theta} j \eta \frac{kI_o l}{4\pi r} |\cos(\theta)| e^{jk_1 r_1} \left[1 + e^{j(kd \cos(\theta) + \beta)} + \dots + e^{j(N-1)(kd \cos(\theta) + \beta)} \right] \quad (2.177)$$

ถ้าพิจารณาในเทอมของอาร์เรย์แฟกเตอร์ จะได้ว่า

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos(\theta) + \beta)} \quad (2.178)$$

$$= \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad ; \psi = kd \cos(\theta) + \beta \quad (2.179)$$

เพื่อให้รูปแบบของอาร์เรย์แฟกเตอร์เรียงง่ายขึ้นสามารถทำได้โดยการคูณทั้งสองข้างของสมการด้วย $e^{j\psi}$ ทำให้ได้ว่า

$$AF \cdot e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{jN\psi} \quad (2.180)$$

นำสมการที่ 2.179 ลบกับสมการที่ 2.178 จะได้ว่า

$$AF(e^{j\psi} - 1) = -1 + e^{jN\psi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \frac{-1 + e^{jN\psi}}{e^{j\psi} - 1}$$

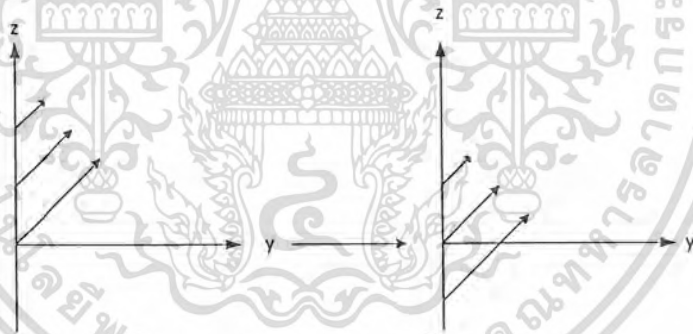
$$AF = e^{j\frac{(N-1)}{2}\psi} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right] \quad (2.181)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ

ดังนั้น จากสมการที่ 2.181 ก็คือ รูปแบบอย่างง่ายที่สามารถแทนค่าจำนวนสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ แทนการหาผลรวมทั้งหมด N องค์ประกอบที่แสดงในสมการที่ 2.178 ซึ่งจะให้ค่าที่เท่ากันต่อไปเราจะกำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศที่มีอยู่ทั้งหมด N องค์ประกอบ ซึ่งแบ่งการพิจารณาได้ 2 กรณี คือ

2.11.1 เมื่อ N เป็นจำนวนคี่

เราจะได้จุดอ้างอิงตรงกับตำแหน่งของสายอากาศที่จะแบ่งสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบในแนวแกน $+z$ และ $-z$ อย่างละ $N-1/2$ องค์ประกอบ เช่น $N=3$ ก็จะแบ่งสายอากาศออกในแนวแกน $+z$ และ $-z$ อย่างละ 1 องค์ประกอบ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคี่

จากสมการที่ 2.178 เมื่อทำการคิดที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$AF = 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi} + e^{-j\psi} + e^{-j2\psi} + \dots + e^{-j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi} \quad (2.182)$$

จากนั้น ทำการคูณทั้งสองข้างของสมการที่ 2.181 ด้วย $e^{j\frac{\psi}{2}}$ และ $e^{-j\frac{\psi}{2}}$ จะได้ว่า

$$AF \left(e^{j\frac{\omega}{2}} - e^{-j\frac{\omega}{2}} \right) = e^{j\frac{N}{2}\psi} - e^{-j\frac{N}{2}\psi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส (จนไว้สำหรับภา) ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

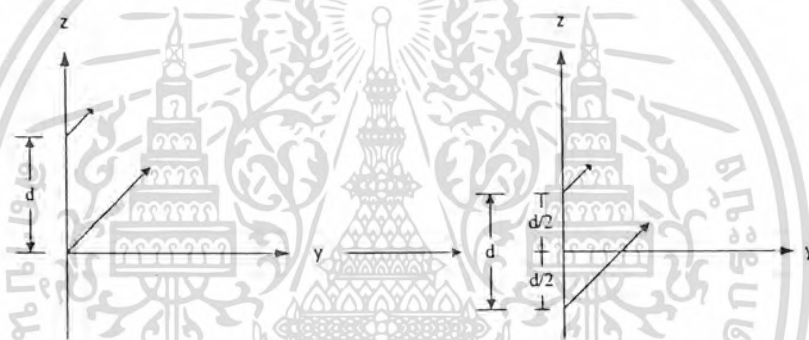
$$AF = \frac{e^{j\frac{N}{2}\psi} - e^{-j\frac{N}{2}\psi}}{e^{j\frac{\omega}{2}} - e^{-j\frac{\omega}{2}}}$$

$$\therefore AF = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.183)$$

เมื่อ N องค์ประกอบ คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ

2.11.2 เมื่อ N เป็นจำนวนคู่

เราจะได้จุดอ้างอิงตรงกับตำแหน่งของสายอากาศที่จะแบ่งสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบในแนวแกน $+z$ และ $-z$ อย่างละ $(N-1)/2$ องค์ประกอบเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 แต่ต่างกันตรงที่ ระยะห่างระหว่างจุดอ้างอิงกับสายอากาศองค์ประกอบแรก ทั้งในแนวแกน $+z$ และ $-z$ จะมีค่าเป็น $d/2$ ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคู่

จากสมการเมื่อทำการคิดที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$AF = e^{j\frac{\psi}{2}} + e^{j\frac{3}{2}\psi} + \dots + e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi} + e^{-\frac{\psi}{2}} + e^{-j\frac{3}{2}\psi} + \dots + e^{-j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi} \quad (2.184)$$

จากนั้น ทำการคูณทั้งสองข้างของสมการด้วย $e^{j\frac{\psi}{2}}$ และ $e^{-j\frac{\psi}{2}}$ จะได้ว่า

$$AF \left(e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}} \right) = e^{j\frac{N}{2}\psi} - e^{-j\frac{N}{2}\psi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \frac{e^{j\frac{N}{2}} - e^{-j\frac{N}{2}}}{e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}}}$$

$$\therefore AF = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.185)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ

ซึ่งจะพบว่า ไม่ว่า N จะเป็นจำนวนคี่หรือจำนวนคู่ ค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์ที่ได้จะเหมือนกัน ดังนั้น การทำอาร์เรย์ของสายอากาศ N องค์ประกอบตามแกน z และให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศ N ตามแนวแกน z และให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ จะได้ค่าอาร์เรย์แฟคเตอร์คือ

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.186)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ

จากการสังเกตที่สนามระยะไกลตั้งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะพบว่าสามารถแสดงรูปแบบของอาร์เรย์แฟคเตอร์ได้ใหม่ดังนี้

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)(kd \cos(\gamma) + \beta)} \quad (2.187)$$

โดย a_n คือแอมพลิจูดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

λ คือ มุมระหว่างแกนที่องค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบถูกนำมาจัดเรียงกันเป็นแถวลำดับ

จากรูปแบบของอาร์เรย์แฟคเตอร์นี้ สามารถแสดงอาร์เรย์แฟคเตอร์เมื่อองค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบจัดเรียงกันในแนวแกน $x y z$ ได้ดังนี้

2.1.1.3 เมื่อมีการจัดเรียงองค์ประกอบกันบนแกน z ทั้งหมด N องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)(kd \cos(\gamma) + \beta)}$$

สามารถหา γ ได้จาก การคูณแบบจุด (dot product) ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ในทิศทางของจุดสังเกต สามารถแสดงได้ดังนี้ $\therefore \cos(\gamma) = a_z a_r$

$$\begin{aligned} a_z \cdot a_r &= |a_z| |a_r| \cos(\gamma) = \cos(\gamma) \\ \therefore \cos(\gamma) &= a_z \cdot a_r \\ &= a_z \cdot \{ a_x \sin(\theta) \cos(\phi) + a_y \sin(\theta) \sin(\phi) + a_z \cos(\theta) \} \\ &= \cos(\theta) \\ \therefore \gamma &= \theta \end{aligned}$$

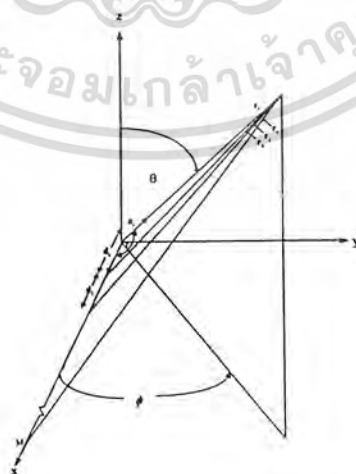
ได้ว่า

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)(kd \cos(\theta) + \beta)} \quad (2.188)$$

ถ้าให้ a_n มีค่าเท่ากับ 1 ในสายอากาศทุก ๆ องค์ประกอบ จะพบว่า อาร์เรย์แฟคเตอร์ที่ได้ เหมือนกับสมการที่เป็นอาร์เรย์แฟคเตอร์ของสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ ที่วางองค์ประกอบตามแกน z

ดังนั้นเราจะใช้อาร์เรย์แฟคเตอร์รูปแบบนี้ในการหาอาร์เรย์แฟคเตอร์ของสายอากาศที่วางองค์ประกอบตามแกน x และ y ต่อไป

2.11.4 กรณีวางองค์ประกอบตามแกน x ทั้งหมด N องค์ประกอบ สามารถแสดงการจัดวางได้ดังรูปที่ 2.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือที่สงวนลิขสิทธิ์โดยผู้อื่น มิฉะนั้นผู้ใดที่เห็นหรือใช้เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก

$$AF = \sum_{n=1}^M a_n e^{j(n-1)(kd \cos(\gamma) + \beta)}$$

$$\cos(\gamma) = a_x \cdot a_r$$

$$= a_x \cdot \{a_x \sin(\theta) \cos(\phi) + a_y \sin(\theta) \sin(\phi) + a_z \cos(\theta)\}$$

$$\therefore \gamma = \cos^{-1}(\sin(\theta) \cos(\phi))$$

ถ้าให้ a_n มีค่าเท่ากับ 1 ในสายอากาศทุกๆ องค์ประกอบ ได้ว่า

$$AF_x = \sum_{n=1}^M e^{j(n-1)(kd \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta)} \quad (2.189)$$

จัดรูปใหม่ โดยให้ $\psi_x = (kd \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta)$ ได้ว่า

$$\begin{aligned} AF_x &= \frac{e^{jM\psi_x} - 1}{e^{j\psi_x} - 1} \\ &= \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} \left(e^{j\frac{M}{2}\psi_x} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_x} \right)}{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} \left(e^{j\frac{\psi_x}{2}\psi_x} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_x} \right)} \\ \therefore AF &= e^{j\frac{(M-1)}{2}\psi_x} \left[\frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] \quad (2.199) \end{aligned}$$

เมื่อ M คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x

แต่โดยทั่วไปแล้วเราจะกำหนดจุดอ้างอิงไว้ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดในแถวลำดับ จากกรณีของแถวลำดับในแกน z จะพบว่า ไม่ว่าจะมีความยาวสายอากาศเป็นจำนวนคี่หรือจำนวนคู่ในแถวลำดับ ก็จะได้ค่าอาร์เรย์แฟลคเตอร์เหมือนกันได้ว่า

$$AF_x \left(e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}} \right) = e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 AF_x & \left(e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}} \right) = e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}} \\
 AF_x & = \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_x}}{e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}}} \\
 \therefore AF & = \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \tag{2.200}
 \end{aligned}$$

เมื่อ M คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงลำดับในแนวแกน x

2.11.5 กรณีวางองค์ประกอบตามแกน y ทั้งหมด N องค์ประกอบ
จากสมการที่ 2.132

$$\begin{aligned}
 AF & = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)(kd \cos(\gamma) + \beta)} \\
 \cos(\gamma) & = a_y a_r \\
 \therefore \gamma & = \cos^{-1}(\sin(\theta) \sin(\phi))
 \end{aligned}$$

ถ้าให้ a_n มีค่าเท่ากับ 1 ในสายอากาศทุกๆ องค์ประกอบ ได้ว่า

$$AF_y = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \sin(\theta) \sin(\phi) + \beta)} \tag{2.201}$$

จัดรูปใหม่ โดยให้ $\psi_y = (kd \sin(\theta) \sin(\phi) + \beta)$ ได้ว่า

$$\begin{aligned}
 AF_y & = \frac{e^{jN\psi_y} - 1}{e^{j\psi_y} - 1} \\
 & = \frac{e^{j\frac{N}{2}\psi_y} \left(e^{j\frac{N}{2}\psi_y} - e^{-j\frac{N}{2}\psi_y} \right)}{e^{j\frac{\psi_y}{2}} \left(e^{j\frac{\psi_y}{2}} - e^{-j\frac{\psi_y}{2}} \right)}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\therefore AF = e^{j \frac{(n-1)}{2} \psi_y} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \quad (2.202)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y

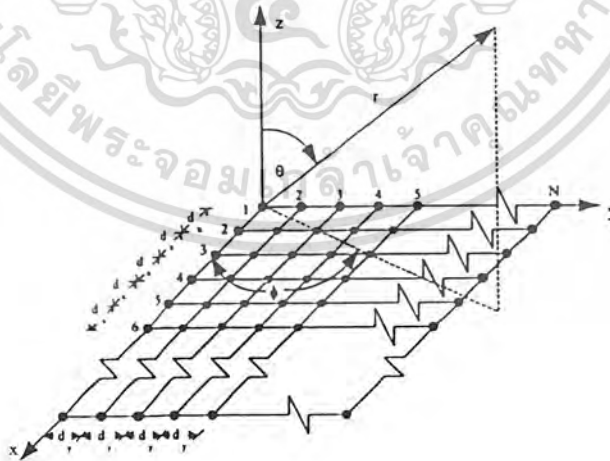
เมื่อกำหนดจุดอ้างอิงไว้ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศทุกองค์ประกอบในแถวลำดับ จะได้ว่า

$$AF_{xy} \left(e^{j \frac{\psi_y}{2}} - e^{-j \frac{\psi_y}{2}} \right) = e^{j \frac{N}{2} \psi_y} - e^{-j \frac{N}{2} \psi_y}$$

$$AF_{xy} = \frac{e^{j \frac{N}{2} \psi_{xy}} - e^{-j \frac{N}{2} \psi_{xy}}}{e^{j \frac{\psi_{xy}}{2}} - e^{-j \frac{\psi_{xy}}{2}}} \quad (2.203)$$

2.12 การวางองค์ประกอบแบบระนาบ (Planar)

คือการรวมกันระหว่างแถวลำดับในแนวแกน x และแถวลำดับในแนวแกน y โดยให้สายอากาศแต่ละองค์ประกอบในแนวแกน x มีจำนวนทั้งหมด M องค์ประกอบ แต่ละองค์ประกอบห่างกัน dx และเฟสเป็น β_x ส่วนสามารถแสดงการจัดเรียงขสายอากาศแบบระนาบได้ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การจัดเรียงสายอากาศแบบระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นอาร์เรย์แฟกเตอร์ที่ได้สำหรับแถวลำดับแบบระนาบคือ การคูณกันระหว่างอาร์เรย์แฟกเตอร์ในแนวแกน x กับอาร์เรย์แฟกเตอร์ในแนวแกน y ได้ว่า

$$AF = AF_x \times AF_y \quad (2.204)$$

$$AF = e^{j\frac{(M-1)\Psi_x}{2}} \left[\frac{\sin\left(\frac{M}{2}\Psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\Psi_x}{2}\right)} \right] e^{j\frac{(M-1)\Psi_y}{2}} \left[\frac{\sin\left(\frac{M}{2}\Psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\Psi_y}{2}\right)} \right] \quad (2.205)$$

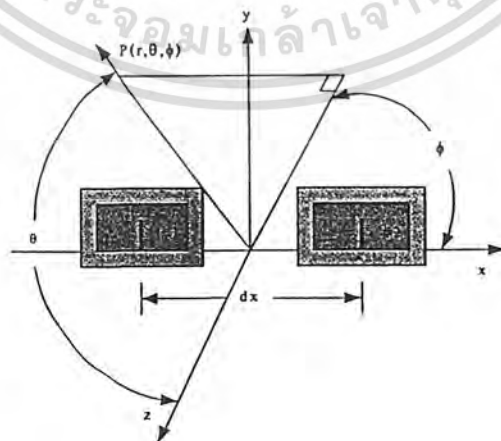
เมื่อพิจารณา ที่จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ จะได้ว่า

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\Psi_x\right) \sin\left(\frac{N}{2}\Psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\Psi_x}{2}\right) \sin\left(\frac{\Psi_y}{2}\right)} \quad (2.206)$$

เมื่อ M คือจำนวนของสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน x
N คือจำนวนของสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับในแนวแกน y

2.12.1 แสดงตัวอย่างการจัดเรียงสายอากาศแบบแถวลำดับเชิงเส้น

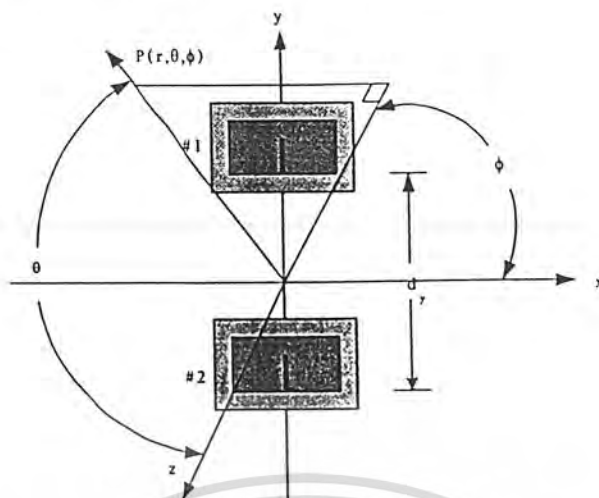
- 1) การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน x (แบบ Side by Side)



รูปที่ 2.27 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบ Side by Side

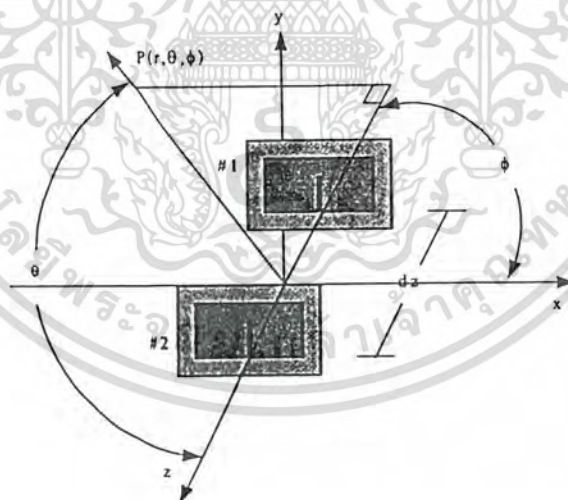
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน y (แบบ Collinear)



รูปที่ 2.28 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบ Collinear

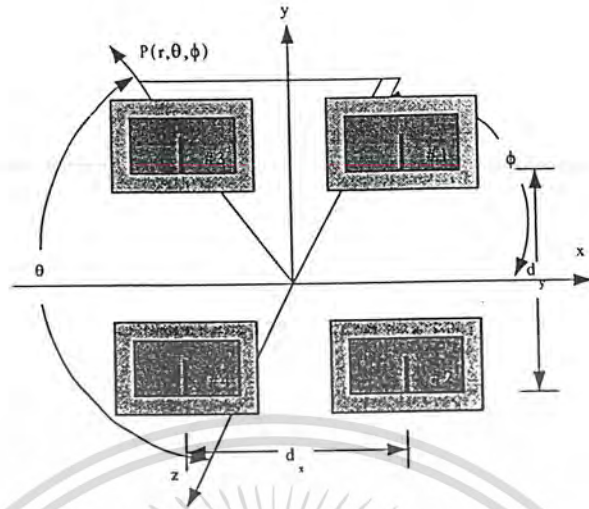
3.) การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน z (แบบ Face to Face)



รูปที่ 2.29 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบ Face to Face

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.) การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบระนาบ (Planar)



รูปที่ 2.30 การจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นแบบ Planar

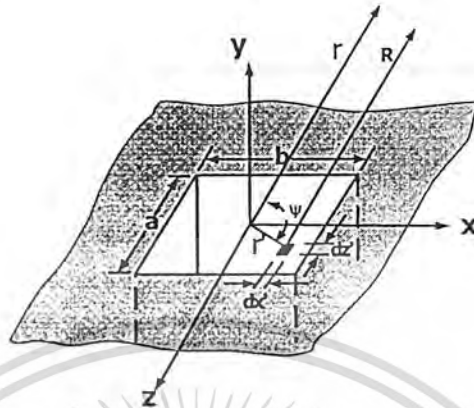


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิเคราะห์ กำเนิด และออกแบบ

3.1 โครงสร้างของสายอากาศ

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศวางบนระนาบ xz

3.2 การวิเคราะห์แบบรูปของสายอากาศที่จะนำไปใช้การออกแบบ

ในการวิเคราะห์แบบรูปของสายอากาศที่มีลักษณะช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้น จะสนใจในส่วนของความยาวด้านกว้าง (a) และความยาวด้านสูงความสูง (b) ของสายอากาศของสายอากาศก่อนเป็นอันดับแรก โดยค่าดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดแบบรูปของคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศและการเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่จะต้องพิจารณาก่อนเป็นอันดับแรก สิ่งต่อไปที่เราจะพิจารณาคือความยาวของโพรบที่ใช้กับสายอากาศ ค่าความกว้างของลำคลื่น ค่าความกว้างของลำคลื่นที่ เท่ากับศูนย์ครั้งแรก อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านข้างโดยค่าดังกล่าว จะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ , ค่าอัตราส่วนของคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) สายอากาศเมื่อได้แบบรูปที่แน่นอนสำหรับตัวสายอากาศแล้ว ก็จะนำมาจัดเรียงองค์ประกอบแบบสายเป็นแบบแถว ลำดับเชิงเส้นเพื่อเพิ่มค่าการชี้ทิศทางและอัตราการขยายของสายอากาศให้สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้คลื่นสามารถถูกส่งออกไปได้มากขึ้น

3.3. การพิจารณาค่าความยาวด้านกว้าง (a) และค่าความยาวด้านสูง (b)

ในกรณีของสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ตามลักษณะของโครงสร้างค่าความยาวด้านกว้างจะมีค่าเป็นสองเท่าของความยาวด้านสูง ($a=2b$) ในการพิจารณาถึงค่าความกว้างและความสูงนั้นจะพิจารณาถึงค่าความกว้างและความสูงที่ทำให้คลื่นที่ร่อออกมาจากสายอากาศมีเพียงรูปแบบคลื่นหลักเท่านั้น ในกรณีของตัวสายอากาศรูปแบบหลักคือ TE_{10} จากบทที่ 2 จะได้ค่าความกว้างในช่วงที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานของนักศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

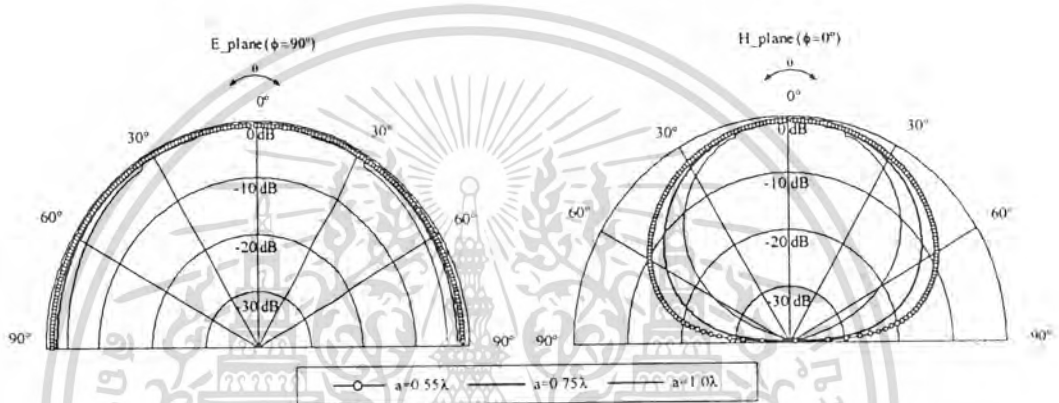
ซึ่งในช่วงของค่ากว้างเหล่านี้ ก็จะเหมาะสมกับความกว้างของสี่เหลี่ยมที่ไม่เหมือนกัน โดยแต่ละค่าของความกว้างจะมีความเหมาะสมกับค่าความของสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เหมาะสมเพียงค่าเดียวเท่านั้น

3.4 การพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบทิศทางเดียวซึ่งสามารถแบ่งการวิเคราะห์ตามลักษณะการวางสายอากาศ สำหรับการวิเคราะห์จะใช้โปรแกรม Mathcad วิเคราะห์หาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบริเวณช่องปากเปิดของสายอากาศ ดังนั้นจึงสามารถแบ่งกรณีการวิเคราะห์ได้ดังนี้

3.4.1 การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

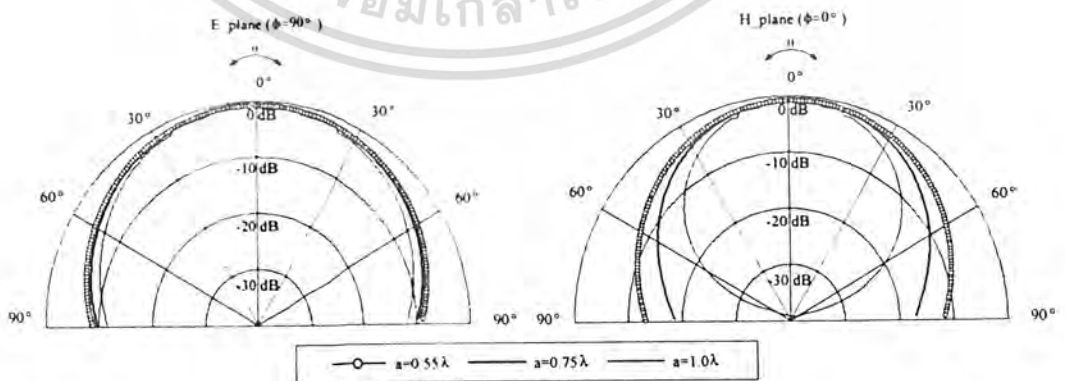
(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกัน มาวางบนแผ่นตัวนำ

3.3.2 การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

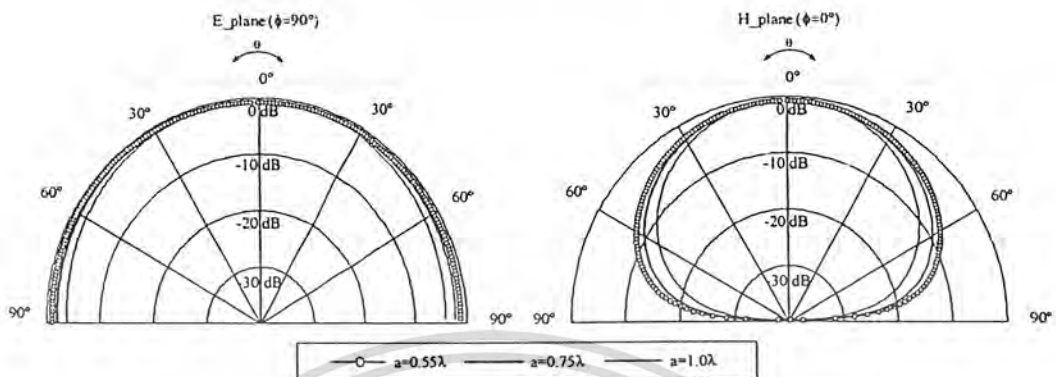
(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกัน มาวางในช่องว่างอิสระ

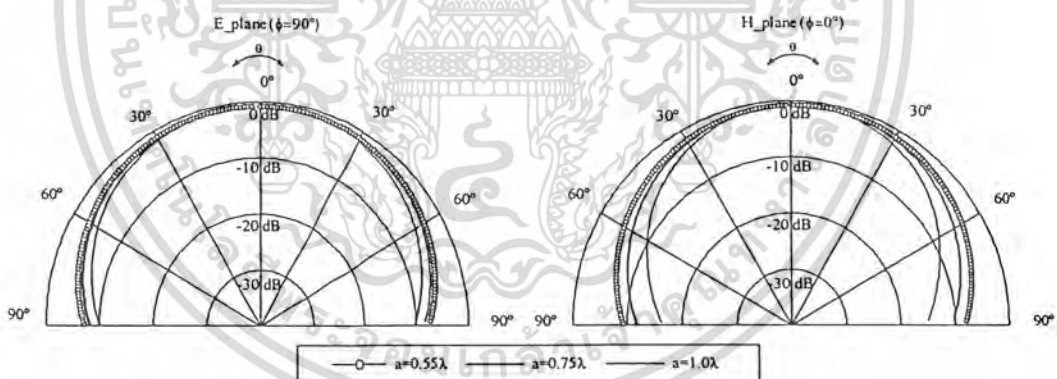
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ (TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกัน มาวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของ TE_{10}

3.4.4 การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศที่มีขนาดที่แตกต่างกัน มาวางในช่องว่างอิสระในส่วนของ TE_{10}

จากการวิเคราะห์จะพบว่าเมื่อความยาวของด้านกว้าง (a) มีค่ามากขึ้นเป็นผลให้ลำคลื่นมีขนาดแคบลง เมื่อทำการเปรียบเทียบจะเห็นว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่น (Beam) มากกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็ก และจากรูปได้ทำการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความยาวด้านกว้าง (a) ที่ต่าง ๆ กันคือ 0.5λ , 0.75λ , 1.0λ

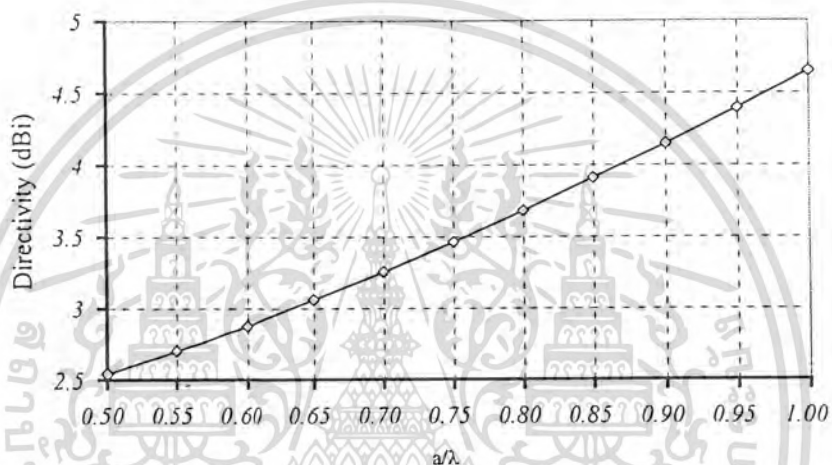
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆ มากน้อยแค่ไหน ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi สายอากาศที่สร้างขึ้นมาผู้สร้างต้องการให้มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงจึงเป็นเหตุผลที่ต้องทำการวิเคราะห์ค่าเจาะจงทิศทาง โดยในโครงการนี้จะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Mathcad หาขนาดด้านกว้าง (a) ที่ค่าเจาะจงทิศทางที่ดี และสามารถส่งผ่านคลื่นได้โดยไม่เกิดโหมดอันดับสูง การวิเคราะห์ค่าเจาะจงทิศทางจะทำการวิเคราะห์ตามกรณีการแพร่กระจายคลื่นบริเวณช่องปากเปิดของสายอากาศซึ่งจะแบ่งได้ 4 กรณี ดังนี้

3.5.1 การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

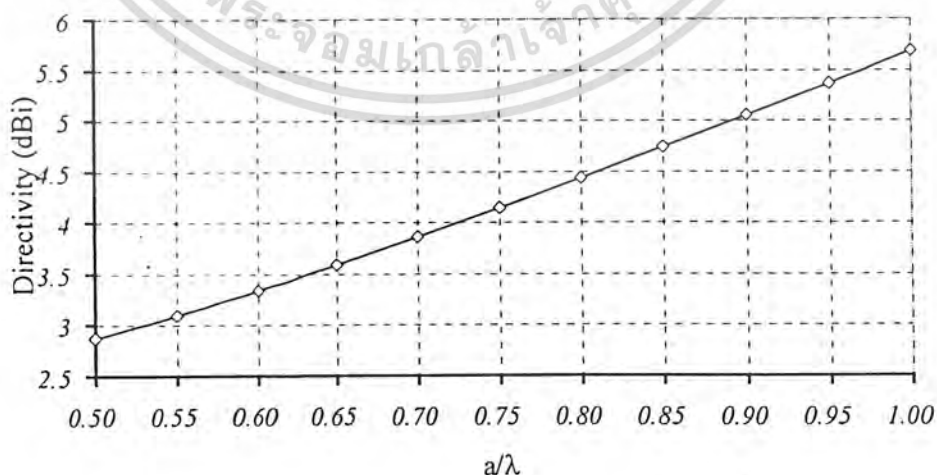
(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

3.5.2 การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

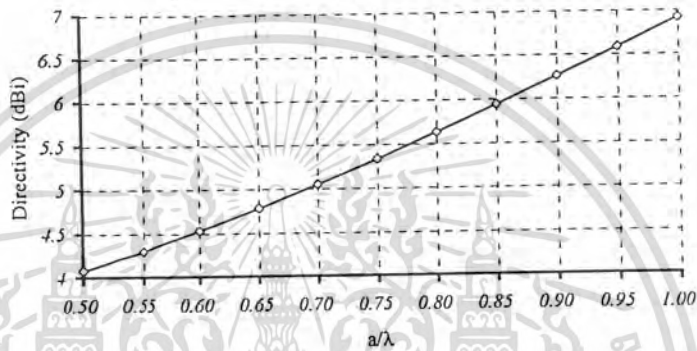
(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.7 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆมากน้อยแค่ไหน ซึ่งวัดในหน่วยของ dBi สายอากาศที่สร้างขึ้นมาผู้สร้างต้องการให้มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงจึงเป็นเหตุผลที่ต้องทำการวิเคราะห์ค่าเจาะจงทิศทาง โดยในโครงการนี้จะวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Mathcad หาขนาดด้านกว้าง (a) ที่ค่าเจาะจงทิศทางที่ดี และสามารถส่งผ่านคลื่นได้โดยไม่เกิดโหมดอันดับสูง การวิเคราะห์ค่าเจาะจงทิศทางจะทำการวิเคราะห์ตามกรณีการแพร่กระจายคลื่นบริเวณช่องปากเปิดของสายอากาศซึ่งจะแบ่งได้ 4 กรณี ดังนี้

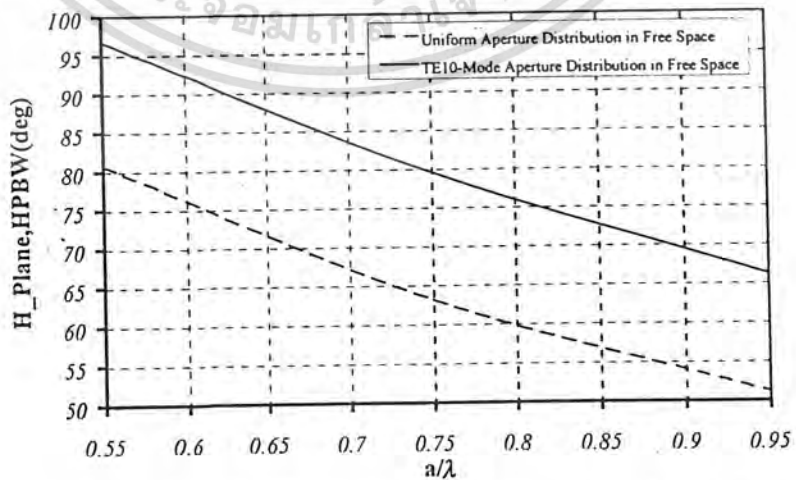
3.5.3 การแพร่กระจายโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
 ((TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.9 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10}

จากรูปค่าสภาพเจาะจงทิศทางทั้ง 4 กรณีสรุปได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความยาวของด้านกว้าง (a) มีค่าเพิ่มขึ้นนั้นก็คือขนาดของสายอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้น ในทางกลับกันค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะลดลงเมื่อค่าความยาวของด้านกว้าง (a) ลดลงเช่นกัน ดังนั้นการเลือกขนาดของค่าความยาวด้านกว้าง (a) จะเลือกที่ ค่าความยาวด้านกว้าง (a) ที่ใกล้เคียงกับ 1λ เพราะจะให้ค่าเจาะจงทิศทางสูง

3.6 การพิจารณาค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในที่ควารศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 รูปที่ 3.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งของสายอากาศที่วางบนแผ่นตัวนำ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การพิจารณาหาค่าความยาวโพรบ

ค่าความยาวของโพรบที่ใช้ทดลองกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย จะพบว่า ค่าความยาวโพรบที่เหมาะสมสำหรับค่าความกว้าง (a) ค่าความยาวโพรบนั้น จะต้องทำให้เข้าใกล้การเกิดรีโซแนนซ์ให้มากที่สุดเพื่อให้คลื่นส่งออกไปมีพลังงานมากที่สุดก็จะสามารถส่งไปได้ไกลโดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการออกแบบนั้นมีค่าเท่ากับ 50Ω เพื่อให้คลื่นที่ออกมาจากสายนำสัญญาณ สามารถส่งผ่านสายอากาศไปได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นต้องทำให้สายอากาศมีค่า VSWR ที่ดีที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยค่ามาตรฐานกำหนดไว้สำหรับสายอากาศคือค่า VSWR ไม่ควรเกิน 1.5 และค่าการสูญเสียสะท้อนกลับจะต้องมีค่าน้อยกว่า -15 dB ส่วนการหาช่องกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานนั้น ทำได้โดยการหาความถี่ที่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่กลางที่มีค่า VSWR เท่ากับ 1.5 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งานซึ่งค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งานควรจะมีค่ามากกว่า 10 % ขึ้นไป

3.8 การวิเคราะห์เมื่อนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับ (Array)

จากหลักการที่กล่าวมาในบทที่ 2 คือมีการจัดเรียงสายอากาศตามแกน X และตามแนวแกน Y การวิเคราะห์ก็จะมีลักษณะเดียวกับสายอากาศตัวเดียวคือแบ่งกรณีของลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่บริเวณช่วงปากเปิดของสายอากาศเมื่อมีการวางสายอากาศในลักษณะต่างๆ การนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของสายอากาศที่ดีขึ้นเช่นมีค่าเจงสภาพทิศทางการแผ่รังสีมาอัตราการขยายที่ดีขึ้น การวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ทั้ง 4 กรณี

3.8.1 การจัดเรียงตามแนวแกน X

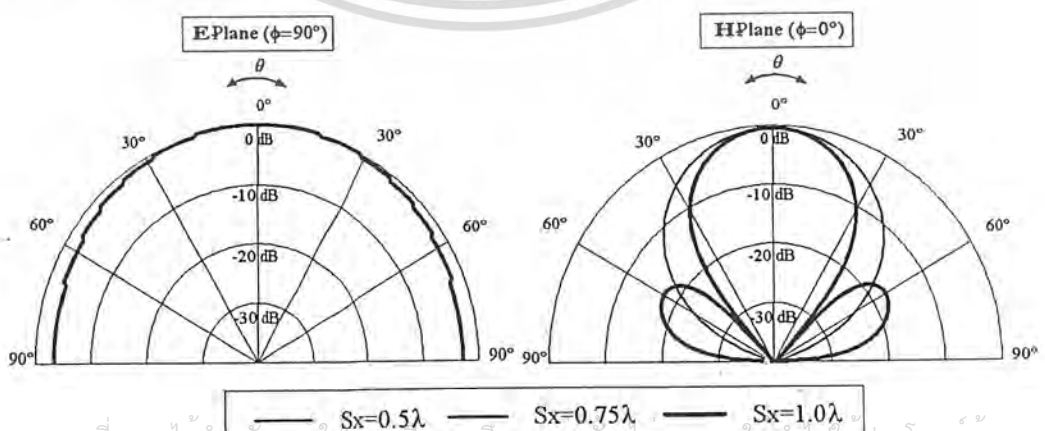
เป็นการนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาวางจัดเรียงตามแนวแกน X โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบโดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

3.8.1.1 การพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

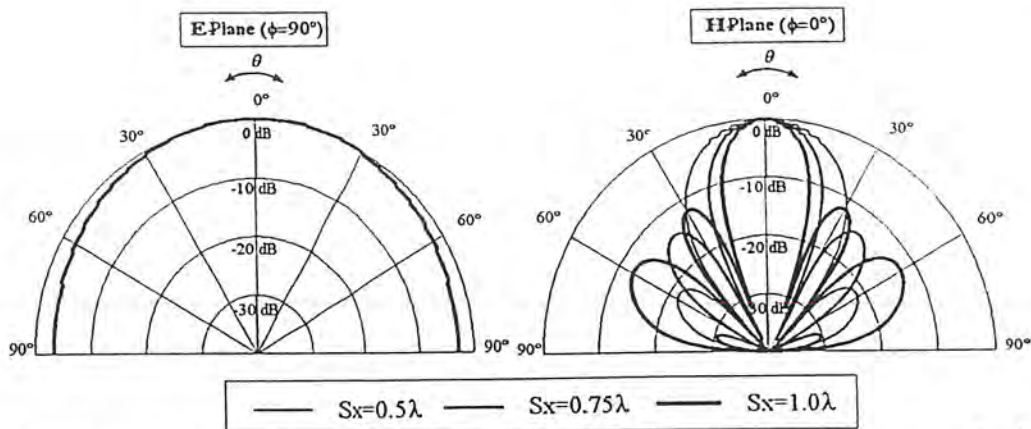
การพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นเป็นตัวบ่งบอกว่าสายอากาศมีทิศทางการแผ่กระจายคลื่นเป็นอย่างไร การวิเคราะห์ก็ทำการวิเคราะห์เหมือนที่ผ่านมามี 4 กรณีดังนี้

การแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

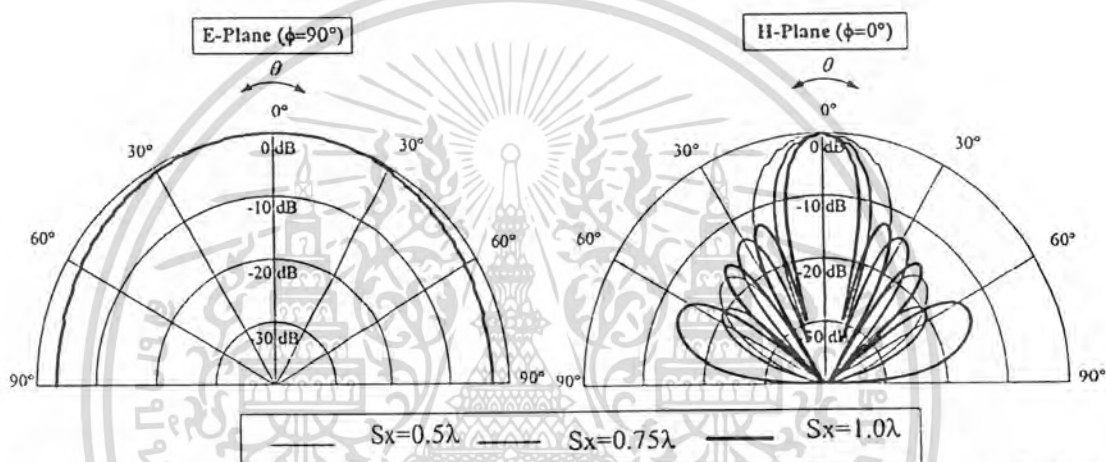
(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



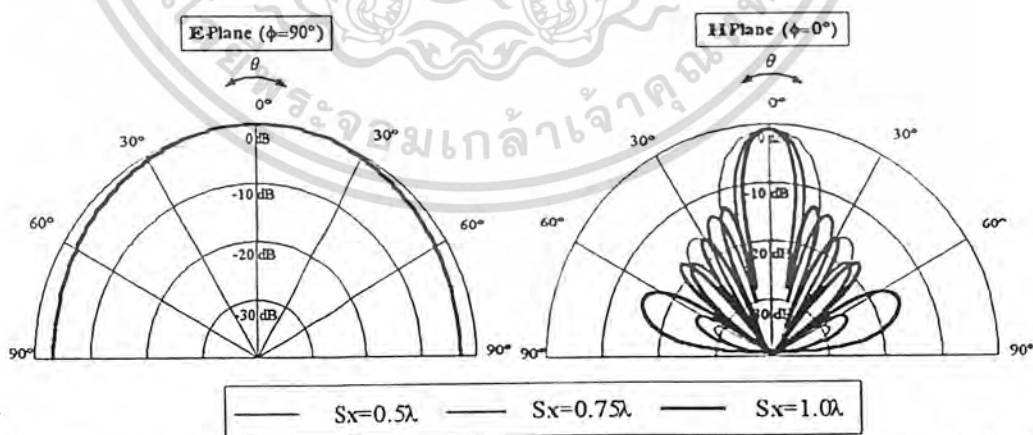
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 3 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

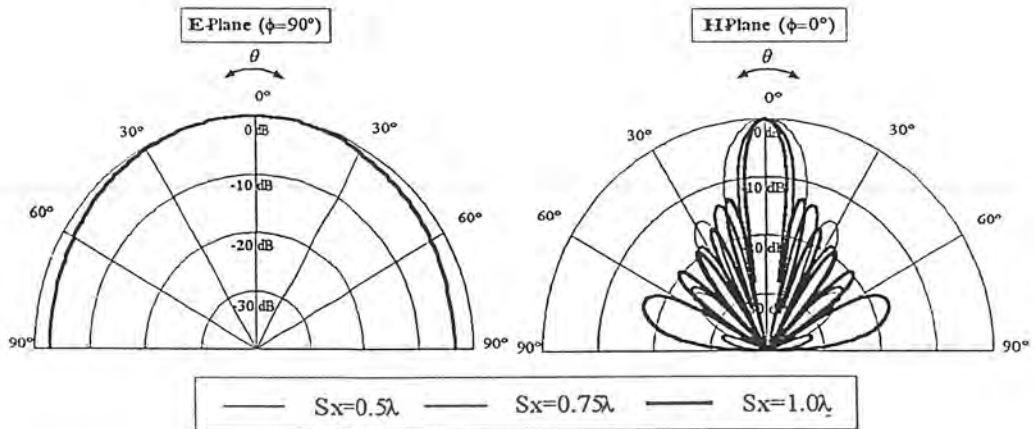


รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 4 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



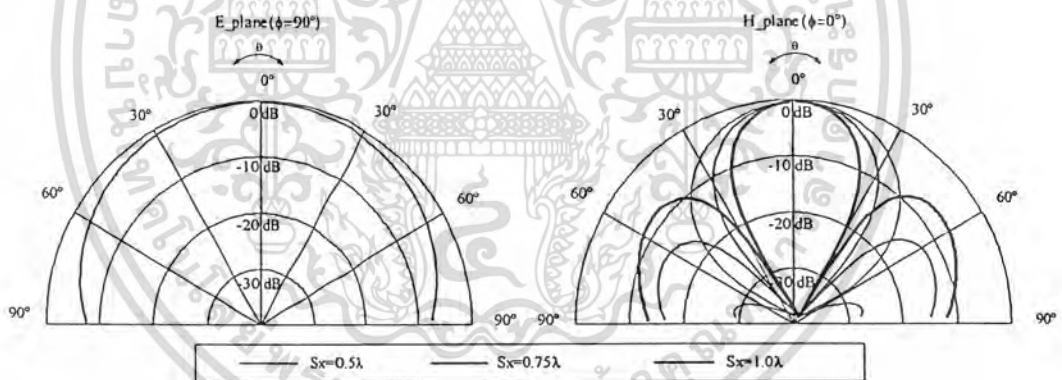
รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 5 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



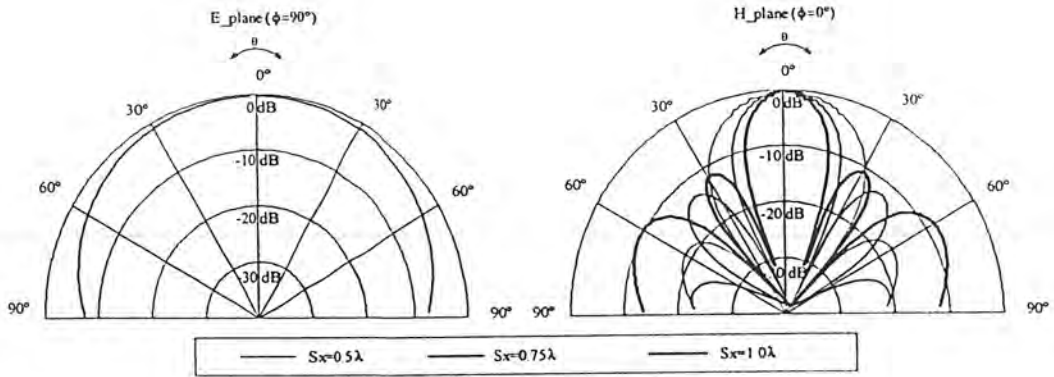
รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 6 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)

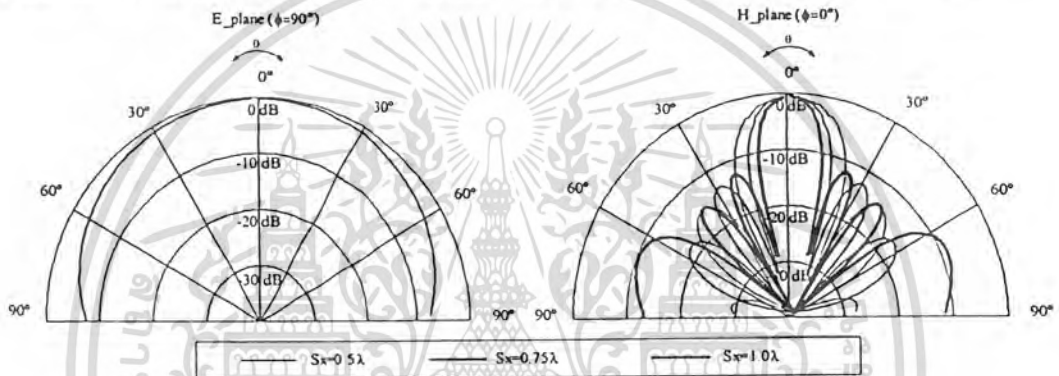


รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 2 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

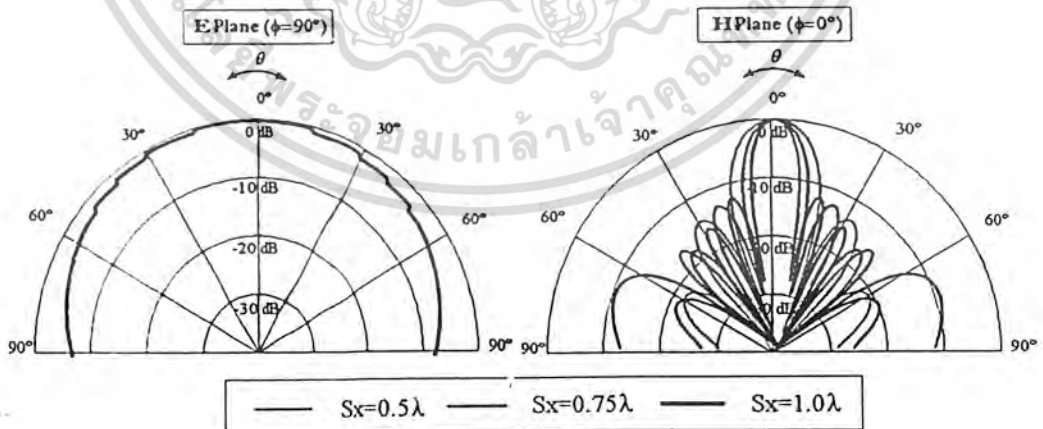
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 3 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

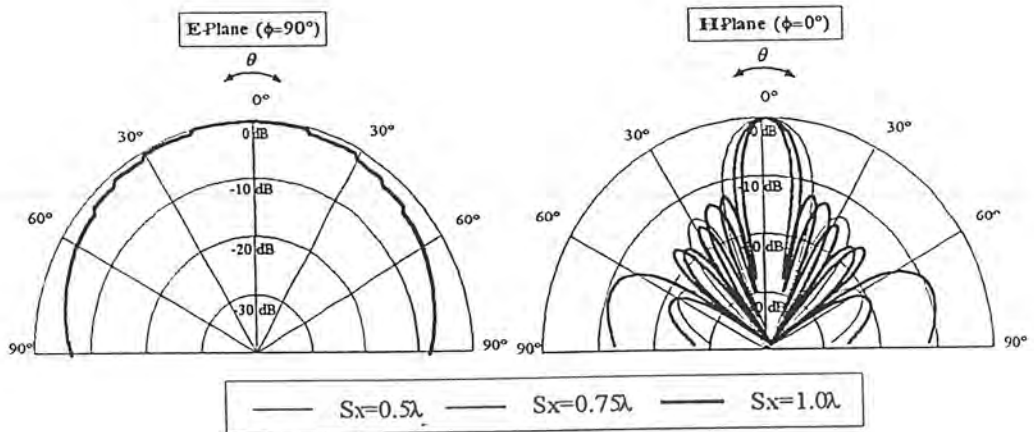


รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 4 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



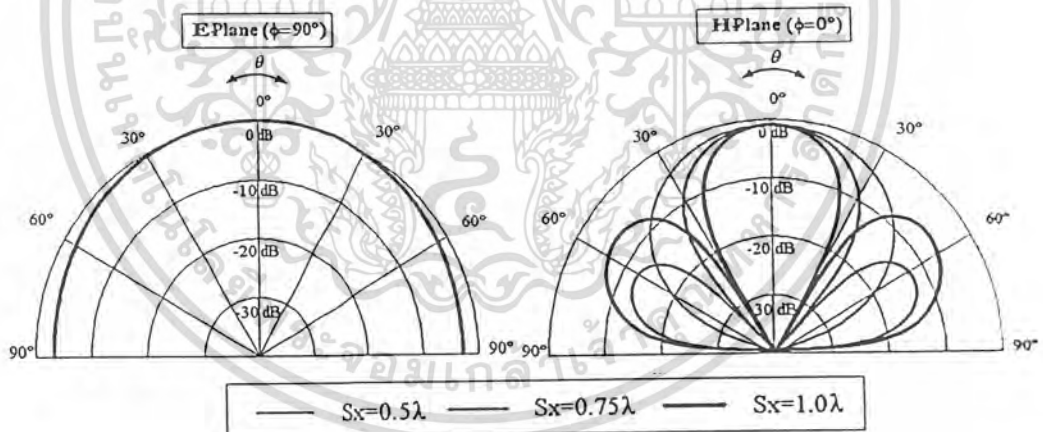
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 5 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



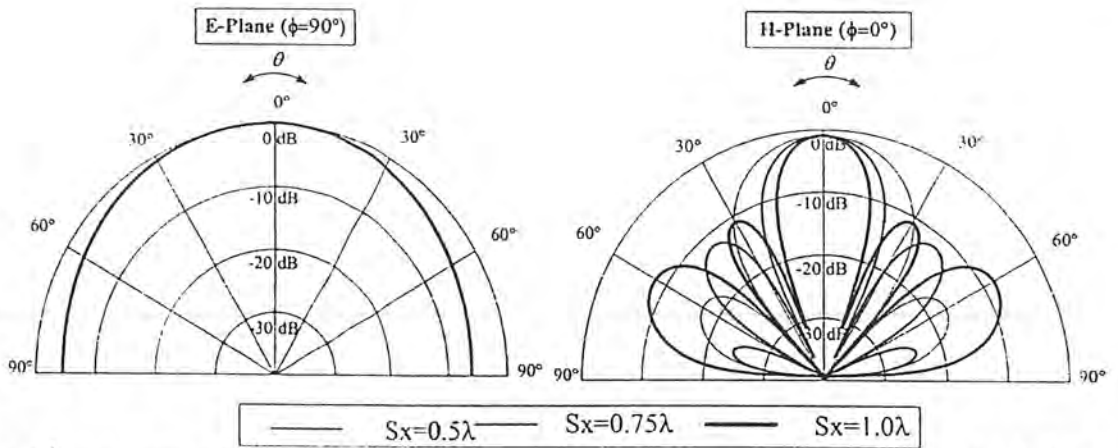
รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 6 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)

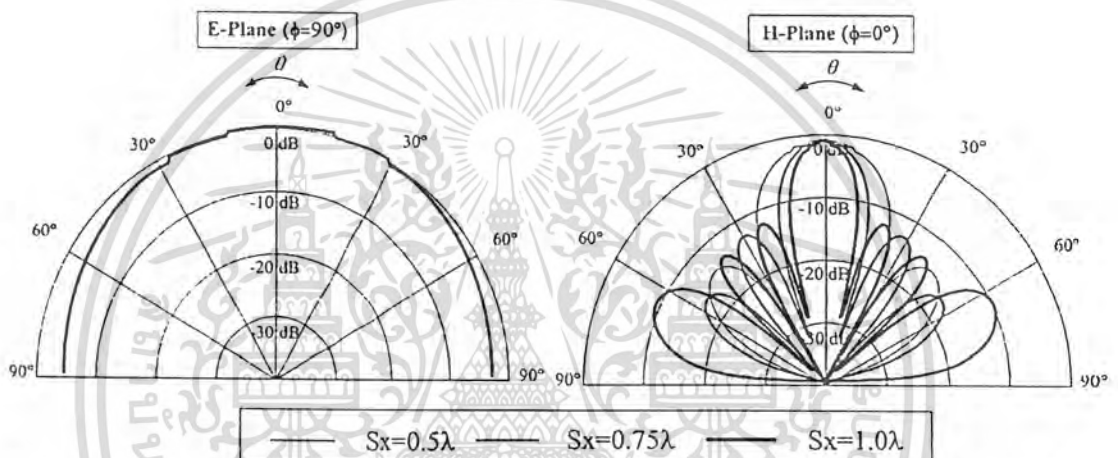


รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 2 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

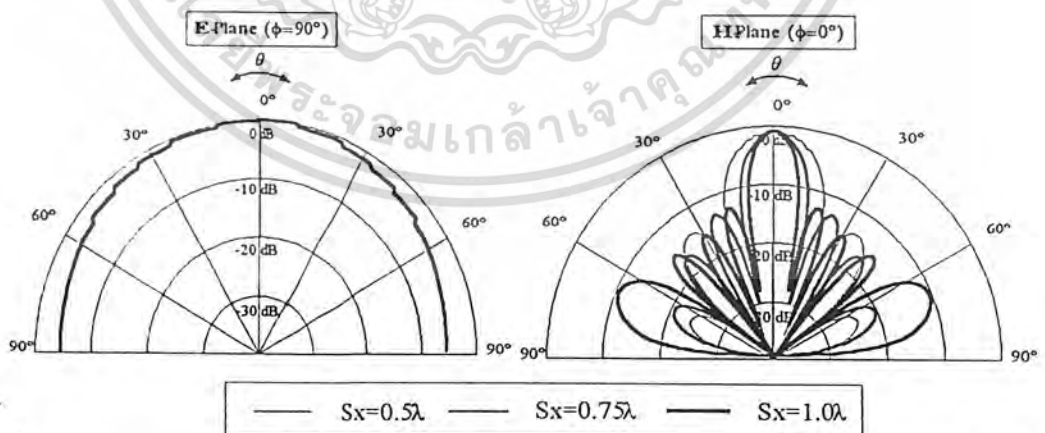
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 3 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

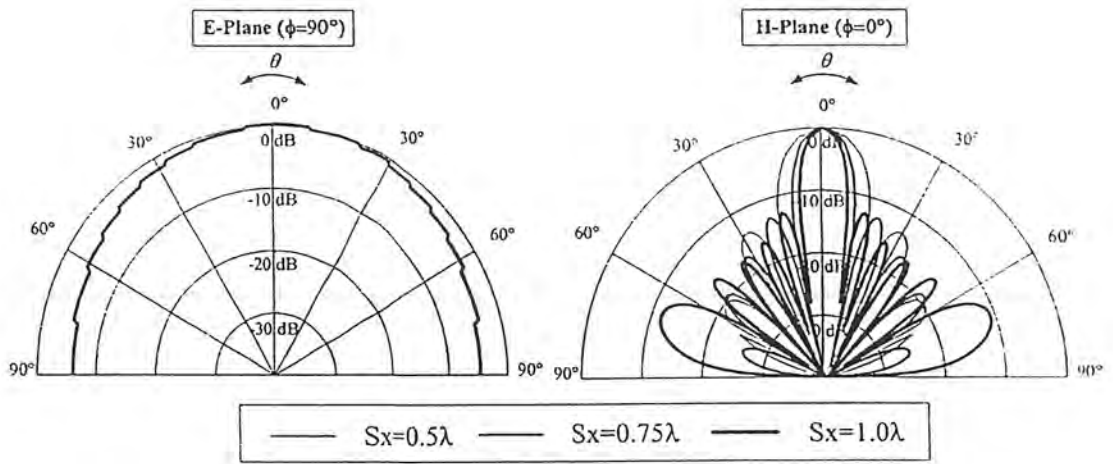


รูปที่ 3.24 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 4 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



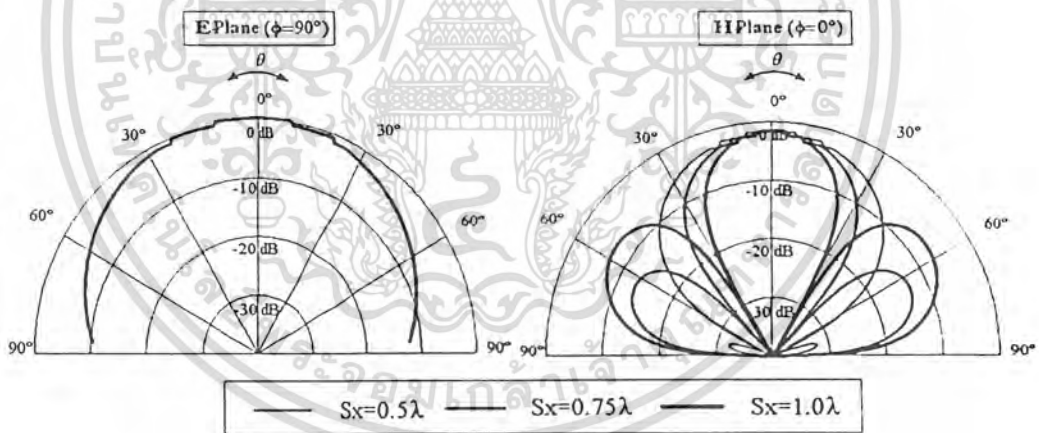
รูปที่ 3.25 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 5 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



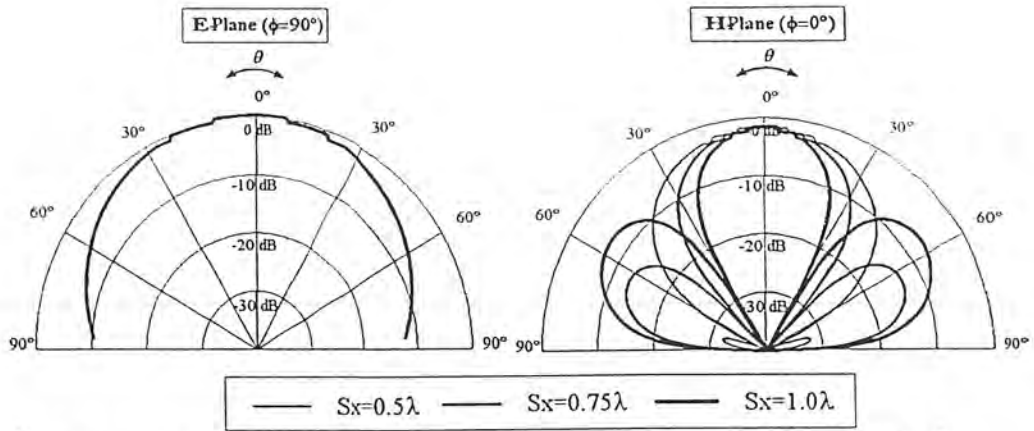
รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 6 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)

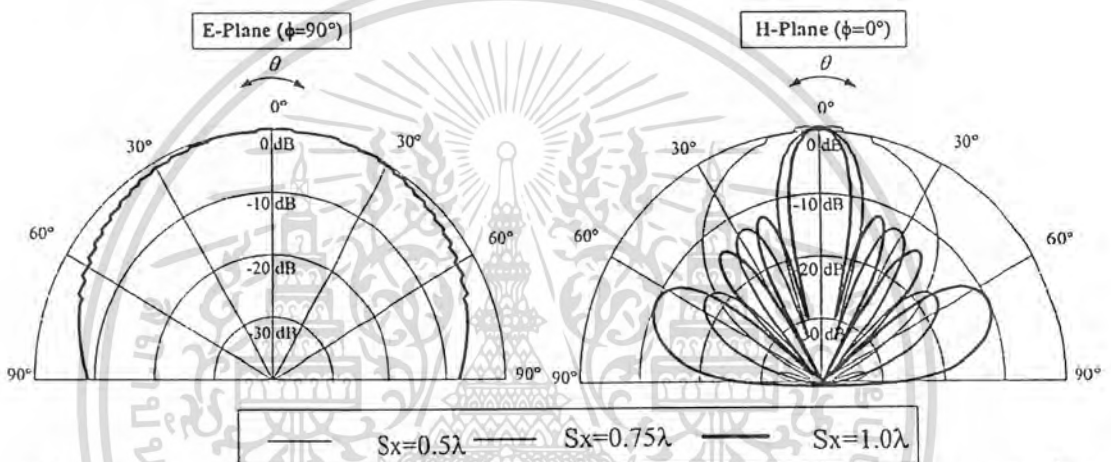


รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 2 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

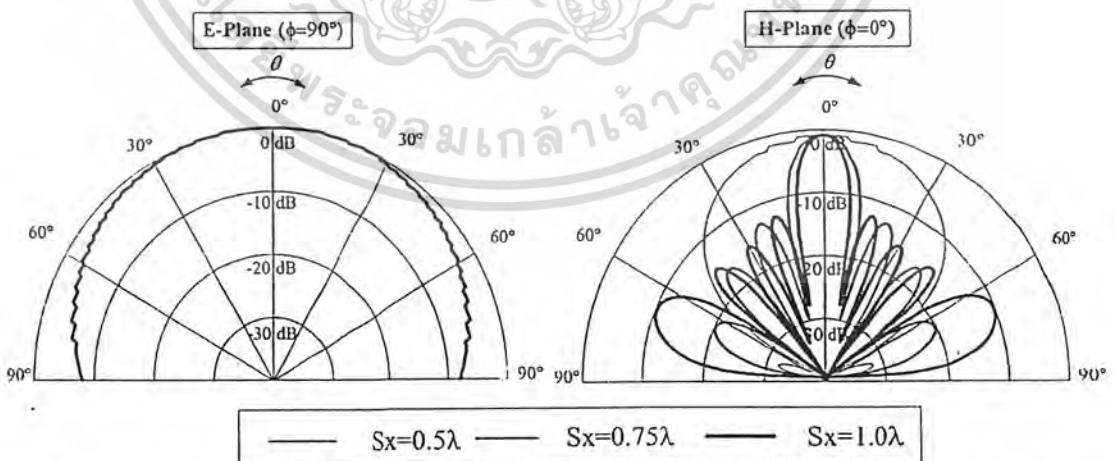
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 3 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

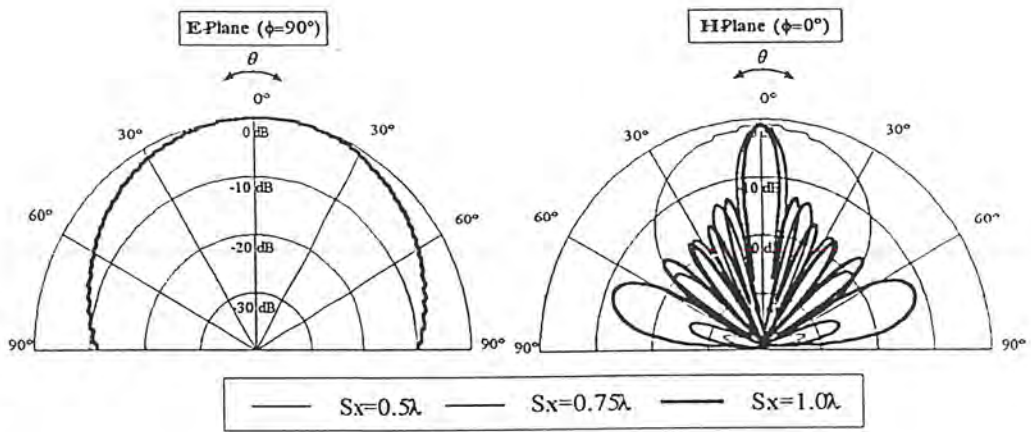


รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 4 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 5 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน X จำนวน 6 องค์ประกอบ โดย S_x คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

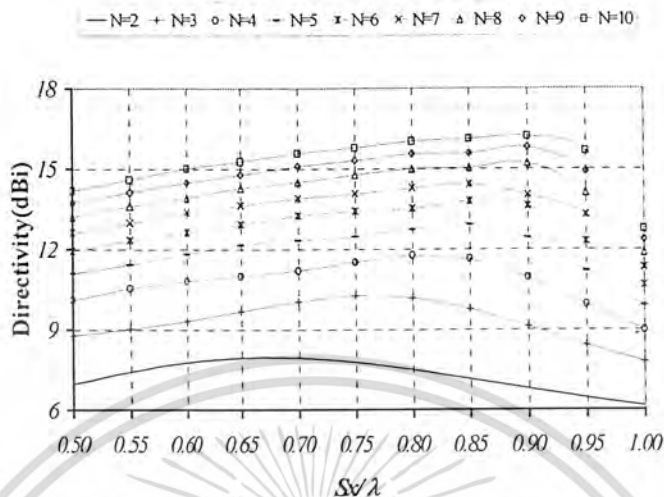
จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาจัดเรียงแบบเชิงเส้นตามแนวแกน x จะสรุปได้ว่าในระนาบสนามไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงของความกว้างของลำคลื่นเมื่อจำนวนขององค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของลำคลื่นคือ เมื่อจำนวนขององค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มจะทำให้ลำคลื่นหลักแคบลงและเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างอีกด้วย ลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีจำนวนมากขึ้นเมื่อองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.8.1.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้น คล้ายกับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศองค์ประกอบเดียวคือเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆมากน้อยแค่ไหน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นในขึ้นอยู่กักระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ ในที่นี้กำหนดให้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบสายอากาศ คือ S_x และ N คือจำนวนของสายอากาศที่นำมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้น การวิเคราะห์จะวิเคราะห์ค่าเจาะจงสภาพทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ $0.5\lambda - 1\lambda$ จำนวนสายอากาศมีตั้งแต่จัดเรียง 2 องค์ประกอบจนถึงการจัดเรียง 10 องค์ประกอบ และสามารถทำการเลือกระยะที่เหมาะสมที่มีค่าเจาะจงสภาพทิศทางสูงการวิเคราะห์ค่าเจาะจงทิศทางจะทำการวิเคราะห์ตามกรณีการแพร่กระจายคลื่นบริเวณช่องปากเปิดของสายอากาศซึ่งจะแบ่งได้ 4 กรณีดังนี้

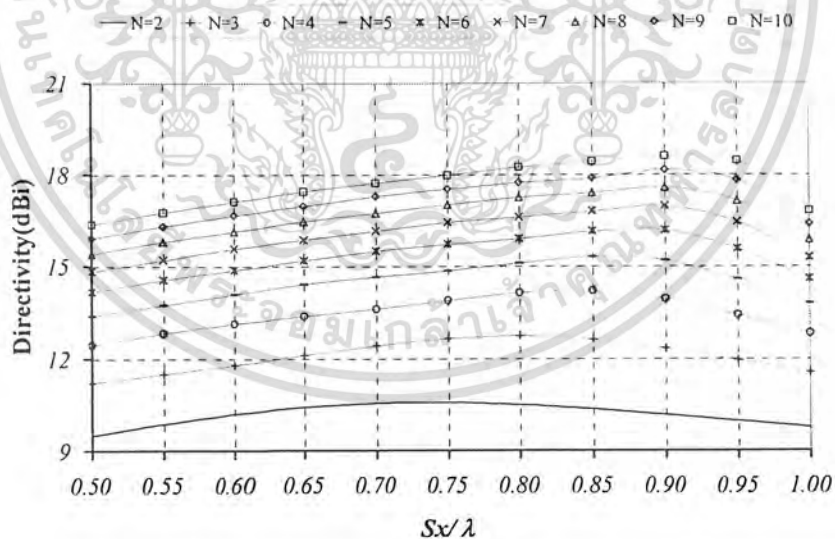
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.32 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณิการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

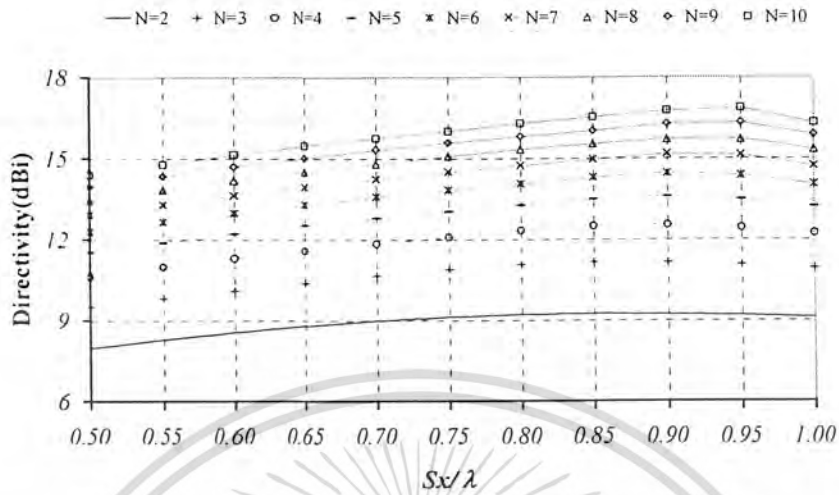
การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.33 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณิการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ

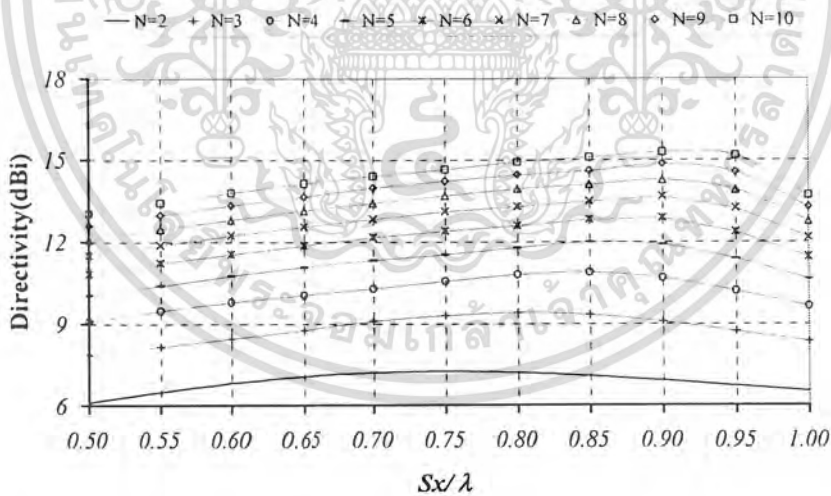
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.34 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ ในส่วนของ โหมด TE_{10}

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.35 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ ในส่วนของโหมด TE_{10}

จากรูปของค่าสภาพเจาะจงทิศทางทั้ง 4 กรณีสรุปได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงที่ระยะห่างเท่ากับ 0.95λ ซึ่งแนวโน้ม

ของค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

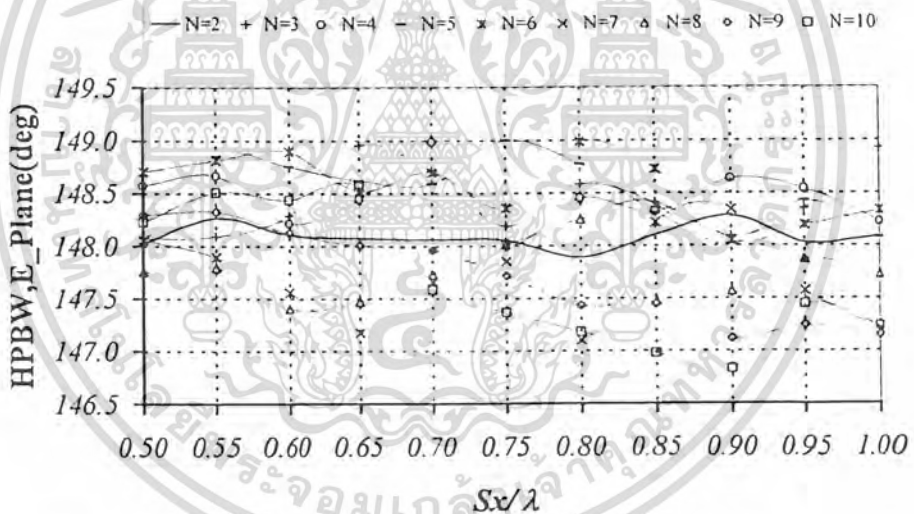
จากรูปจะพบว่าจำนวนของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ทั้ง 4 กรณีจะพบว่าองค์ประกอบของสายอากาศมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงกว่าองค์ประกอบของสายอากาศที่มีจำนวนน้อยกว่า

การเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศไม่ควรเกิน 0.95λ เพราะเมื่อระยะห่างมากกว่านี้จะทำให้ค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง ส่วนจำนวนสายอากาศที่จะนำมาวางเรียงกันนั้นขึ้นอยู่กับว่าผู้สร้างต้องการค่าเจาะจงทิศทางแรงแค่ไหน แต่ก็ควรพิจารณาพร้อมกับค่าพารามิเตอร์อื่นด้วย

3.8.1.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width)

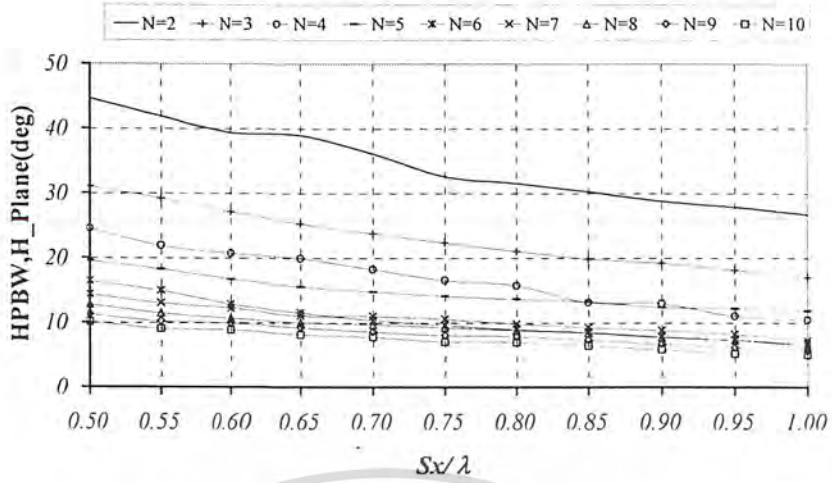
การวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกว่าคุณลักษณะหลักแคบหรือกว้าง โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบโดยเริ่มตั้งแต่ $0.5\lambda - 1\lambda$ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งคือความต้องการที่จะนำสายอากาศไปใช้งานบริเวณใดๆ ต้องการลำคลื่นแคบหรือกว้าง

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



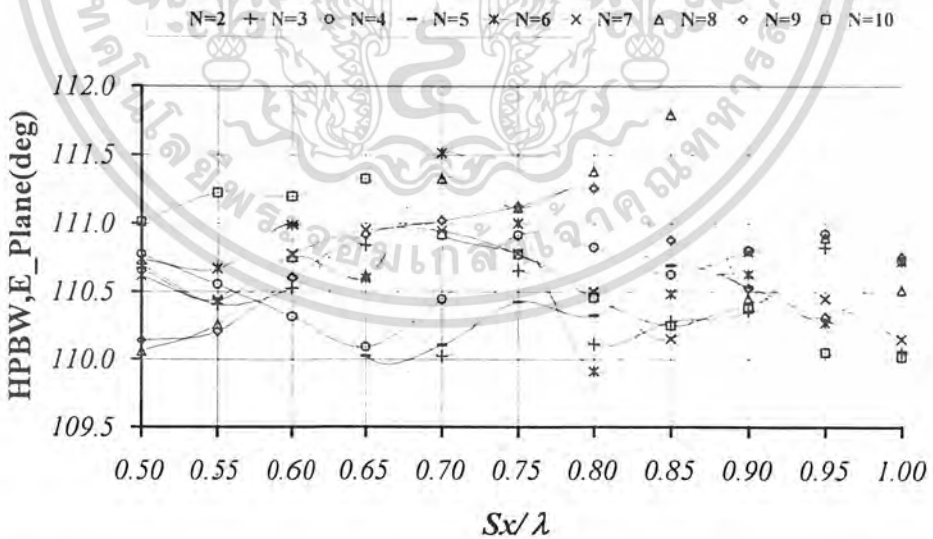
รูปที่ 3.36 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



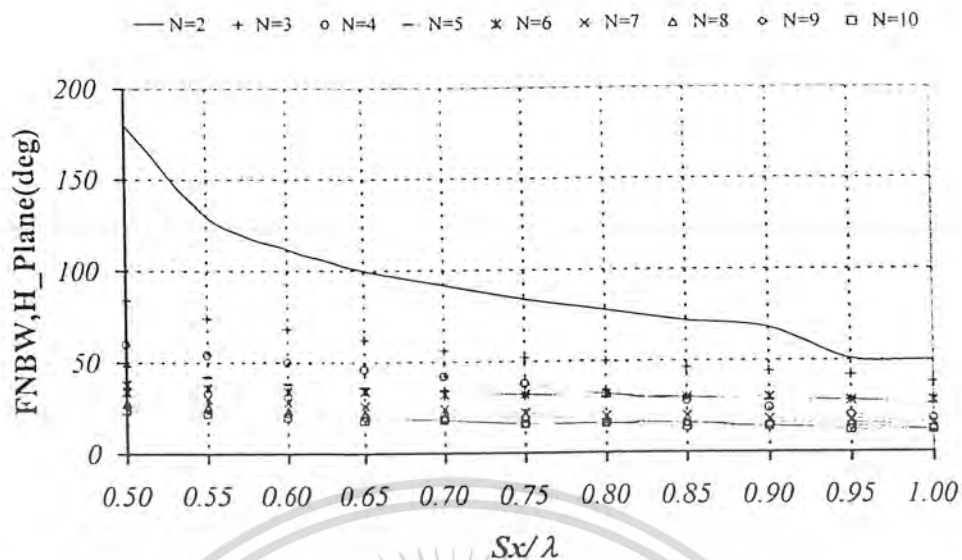
รูปที่ 3.37 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามแม่เหล็ก

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



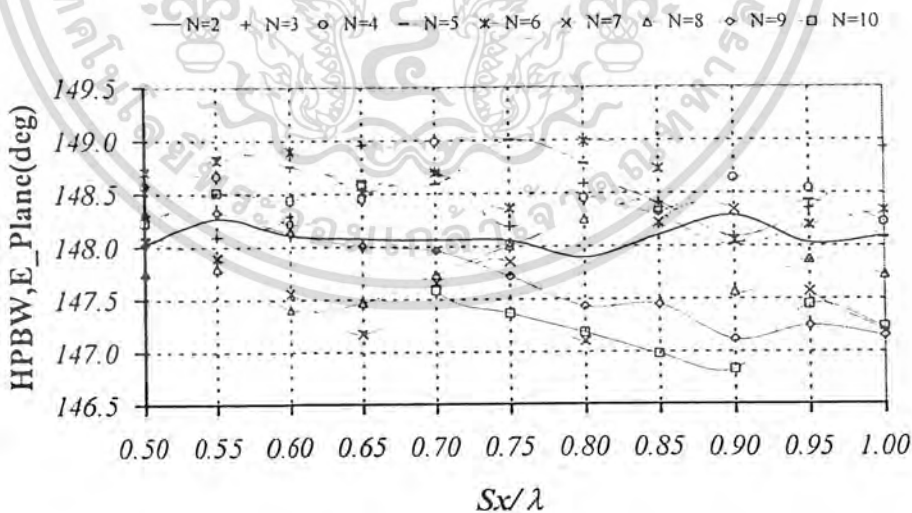
รูปที่ 3.38 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



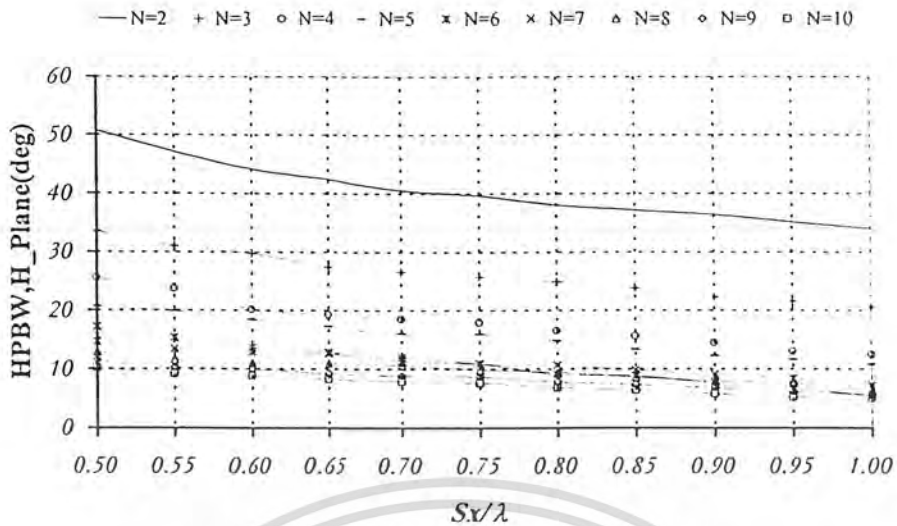
รูปที่ 3.39 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามแม่เหล็ก

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.40 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ ในส่วนของ โหมด TE_{10} ในระนาบ

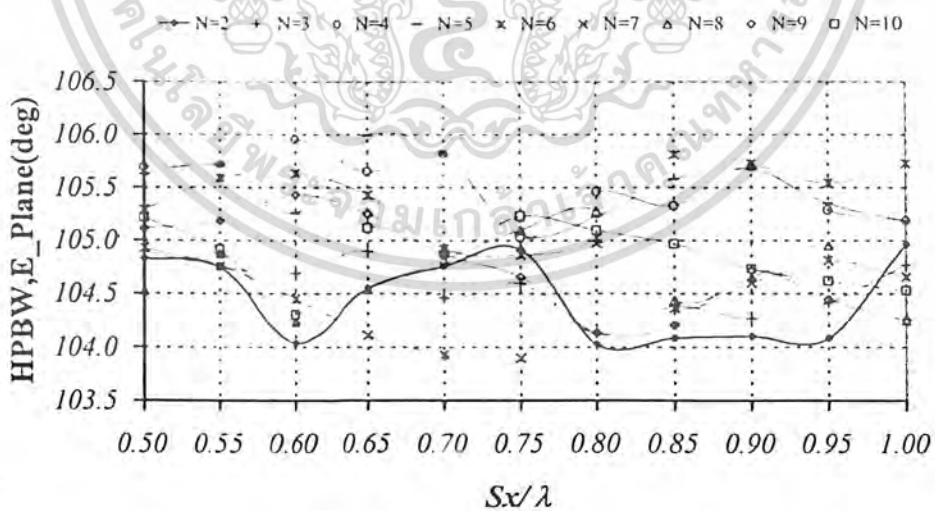
สนามไฟฟ้า
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.41 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ ในส่วนของ โหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

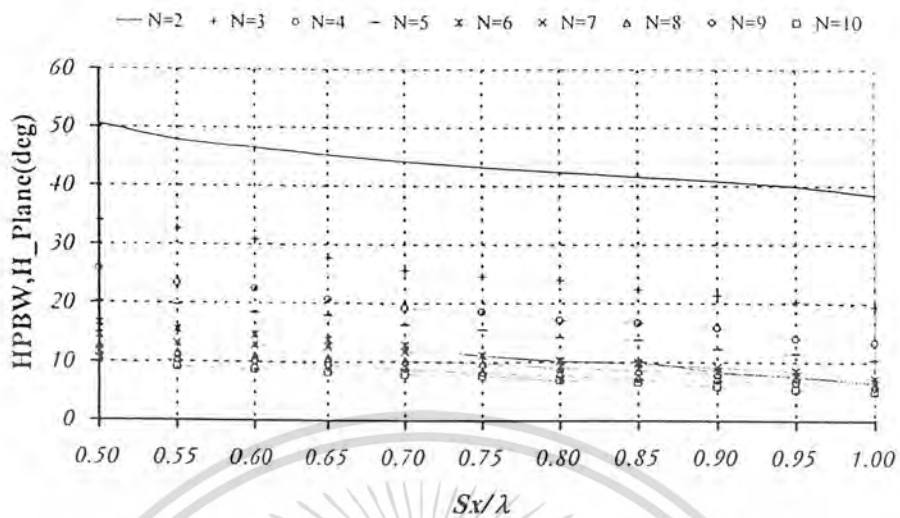
การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.42 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เพื่อเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.43 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณิการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้วิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่น จะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลขเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่นที่ได้ทำการวิเคราะห์มาถึงแม้ว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ตรงกันข้ามที่ระนาบสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งมีค่าลดลงตามระยะห่างของสายอากาศที่ห่างมากขึ้นกล่าวคือลำคลื่นหลักจะแคบลงเมื่อระยะระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น

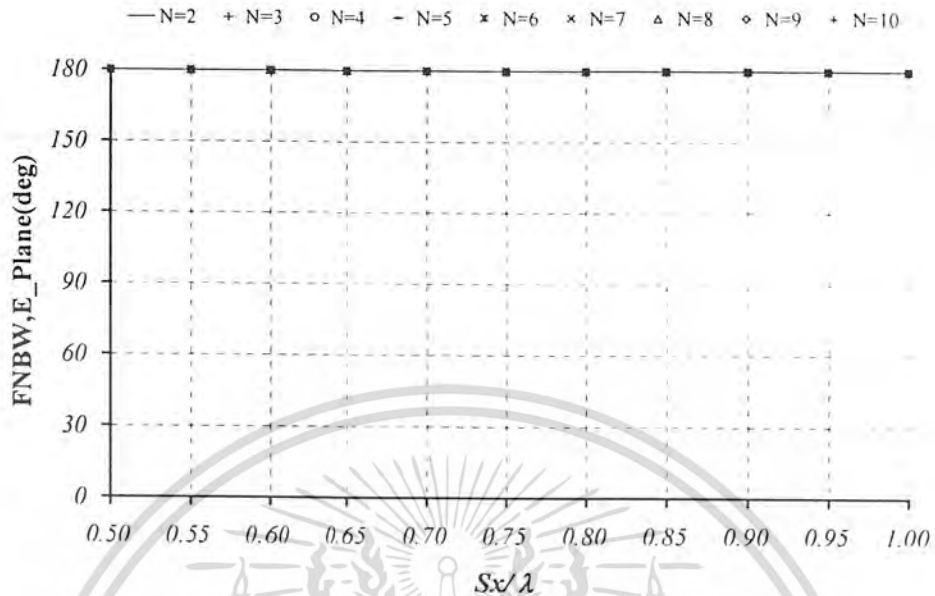
3.8.1.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width)

การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกเป็นการวิเคราะห์ว่าเกิดลำคลื่นด้านข้างหรือไหมมามากน้อยเพียงใด ในการออกแบบสายอากาศผู้สร้างไม่ต้องการที่จะให้เกิดลำคลื่นด้านข้างเพราะลำคลื่นด้านข้างอาจรบกวนลำคลื่นหลักในการส่งรับส่งสัญญาณ

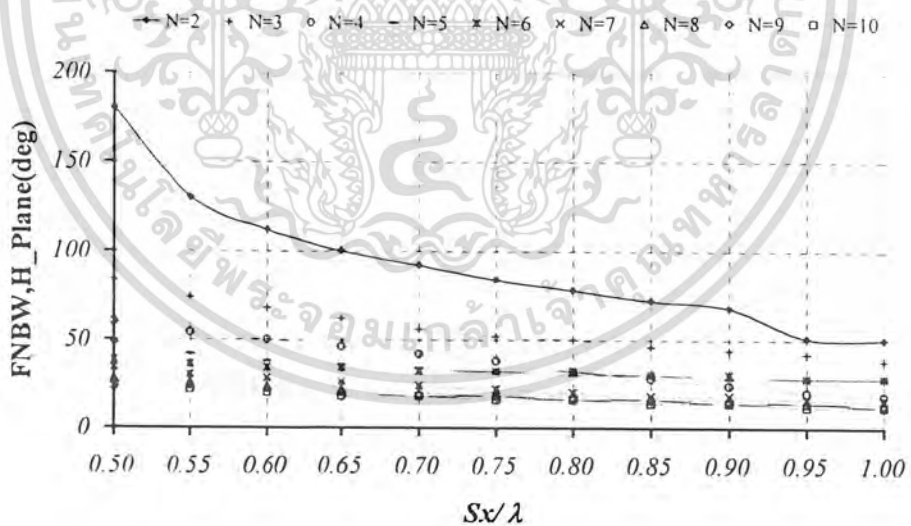
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.44 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามไฟฟ้า

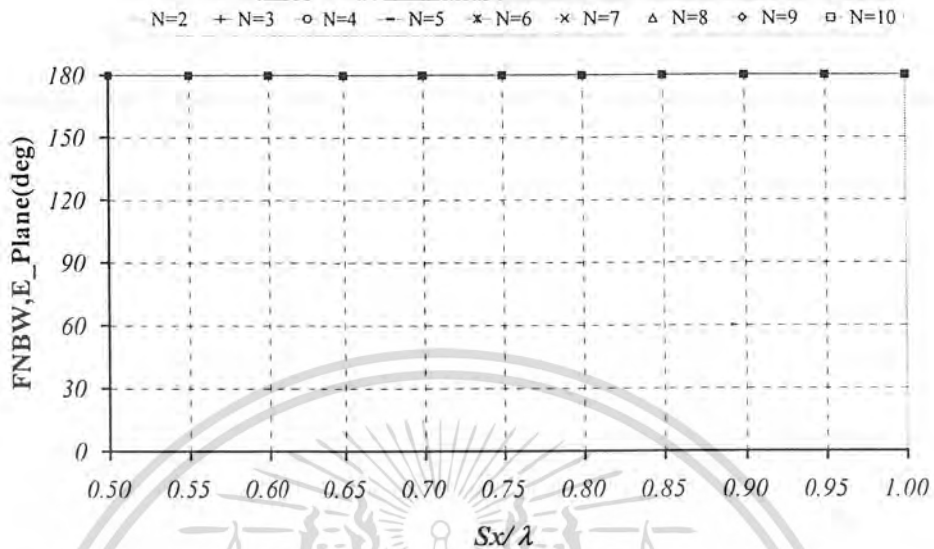


รูปที่ 3.45 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามแม่เหล็ก

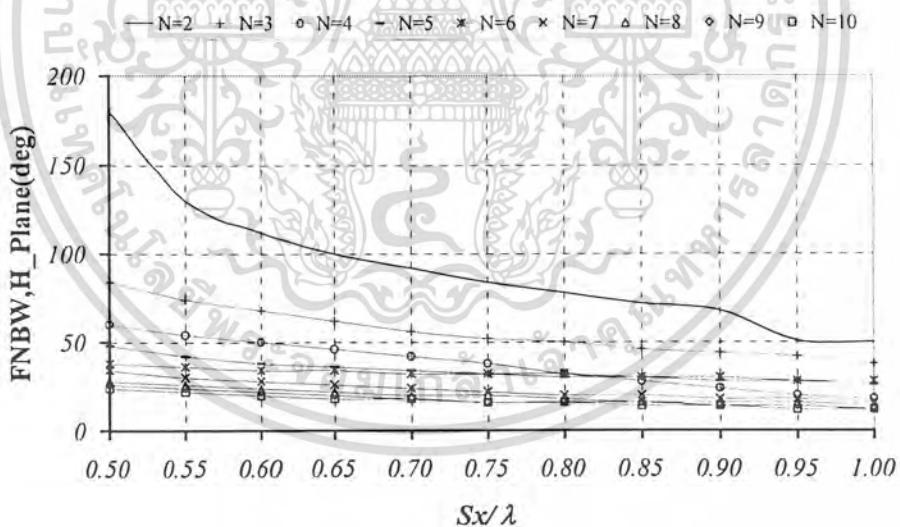
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



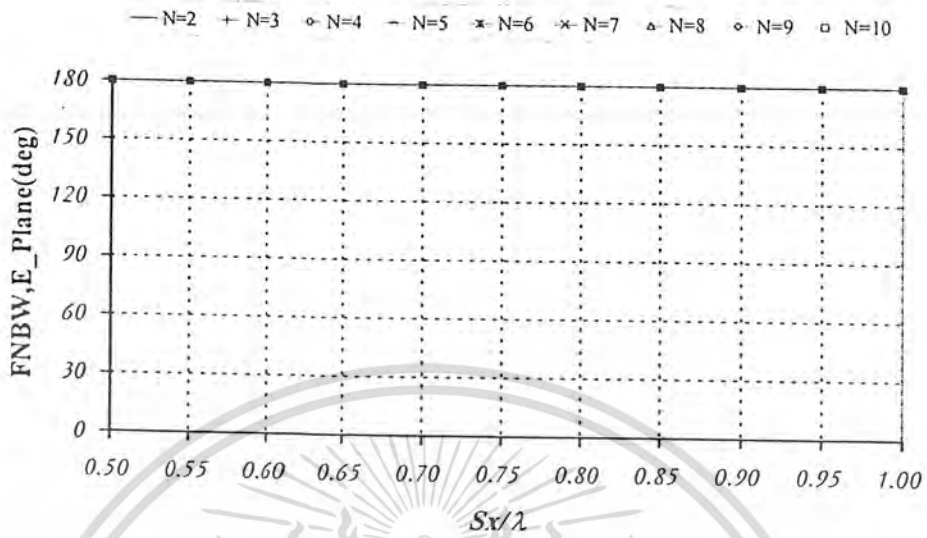
รูปที่ 3.46 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามไฟฟ้า



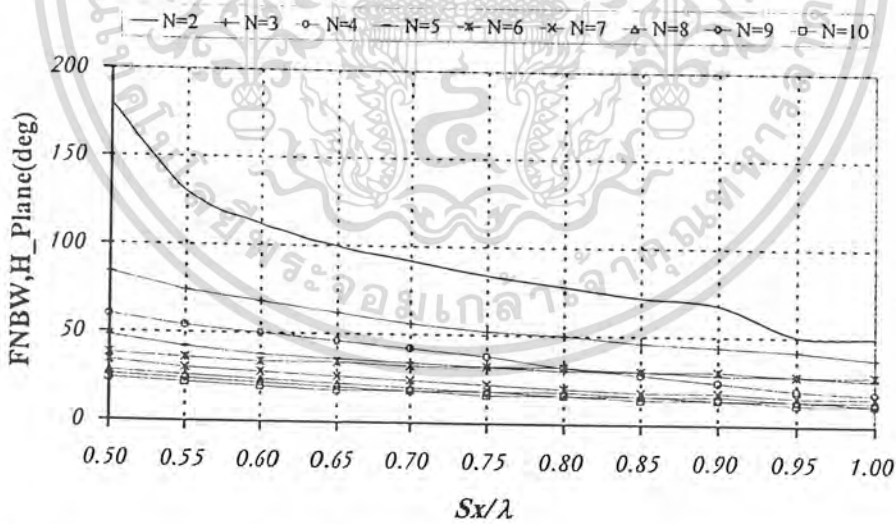
รูปที่ 3.47 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 48 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

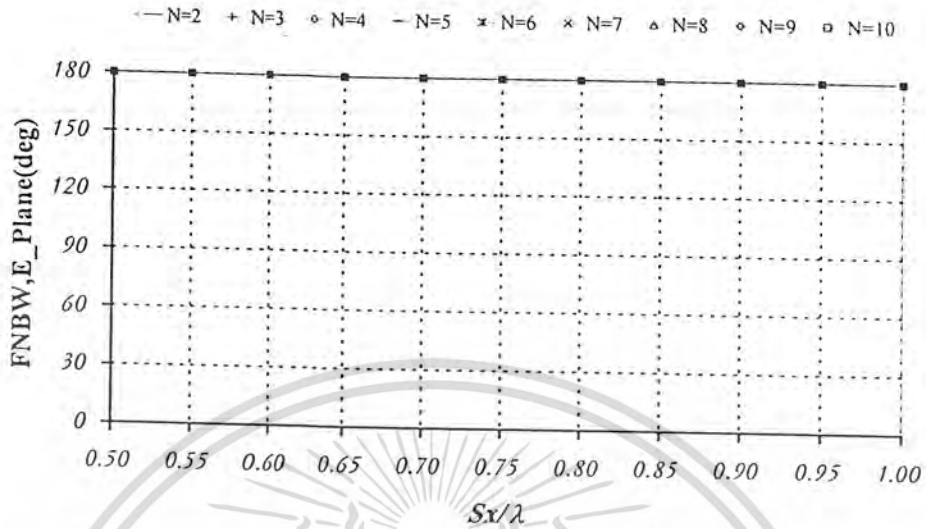


รูปที่ 3.49 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

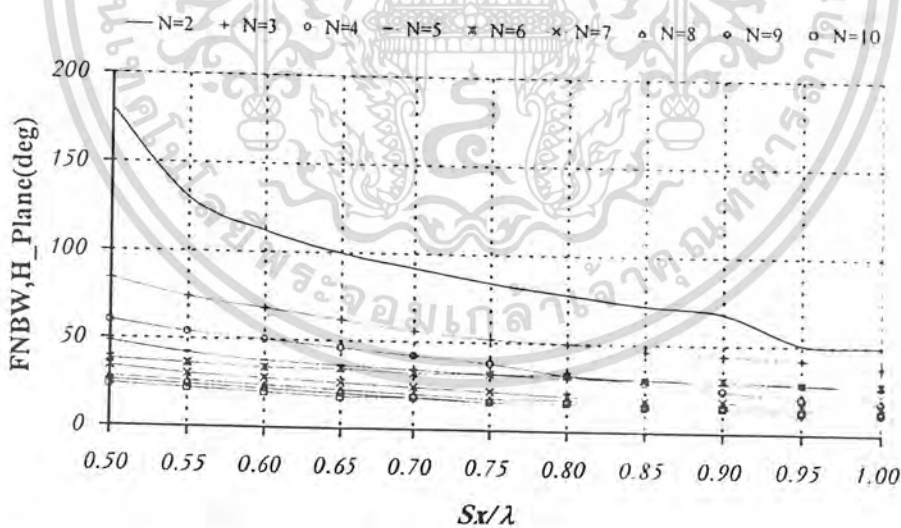
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.50 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ ในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.51 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ ในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

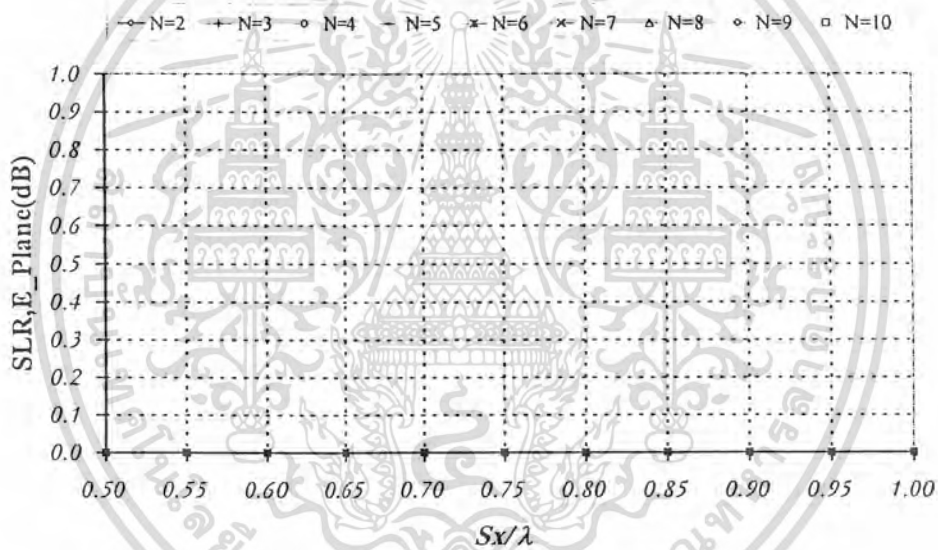
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์ทั้ง 4 กรณีจะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือไม่มีลำคลื่นด้านข้าง และในทางกลับกันที่สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็ยังน้อยแต่กรณีนี้ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

3.8.1.5 การวิเคราะห์ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)

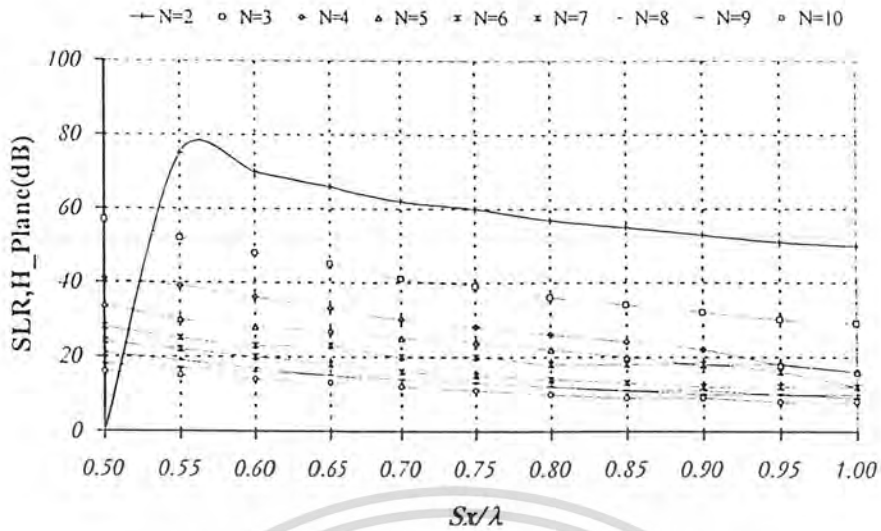
การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



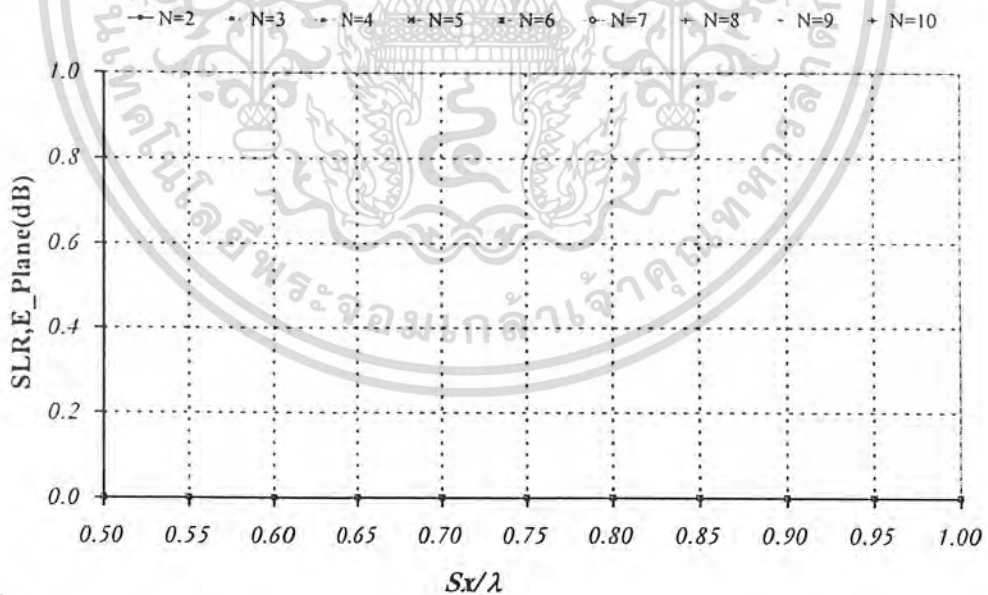
รูปที่ 3.52 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



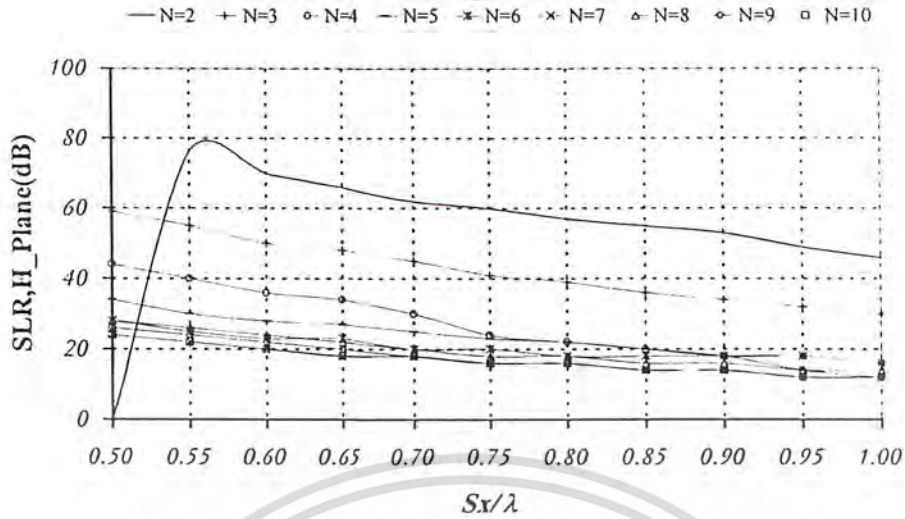
รูปที่ 3.53 ค่าลอคัลหลักต่อลอคัลน้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามไฟฟ้าแม่เหล็ก

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



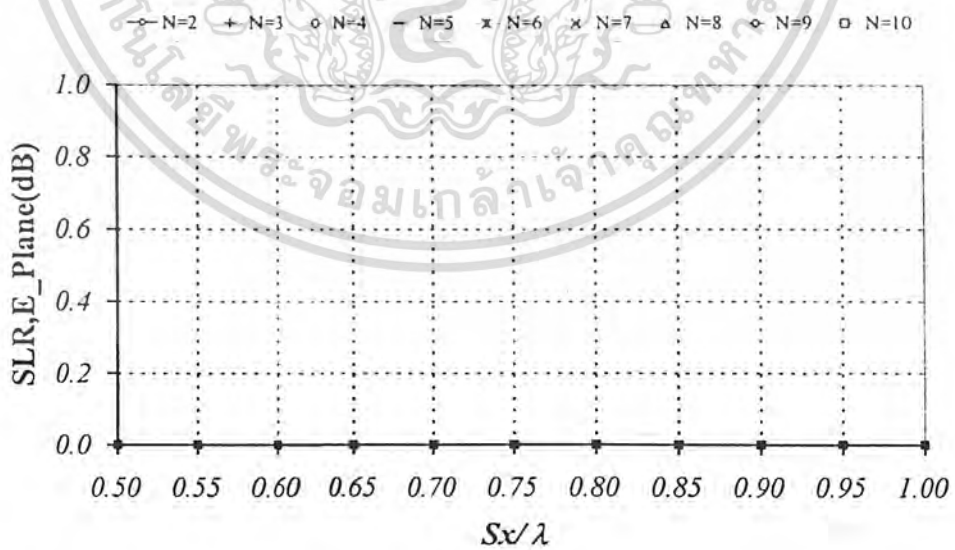
รูปที่ 3.54 ค่าลอคัลหลักต่อลอคัลน้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



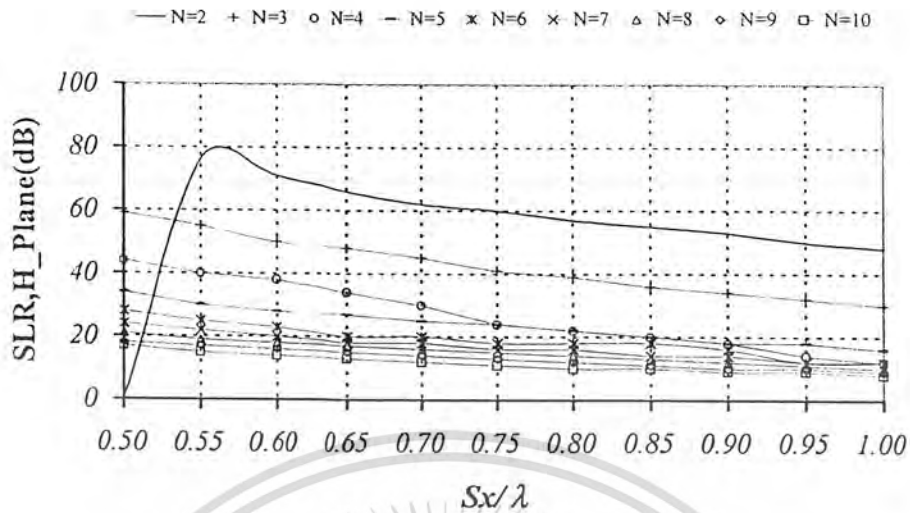
รูปที่ 3.55 ค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นข้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามแม่เหล็ก

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(TE₁₀-Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



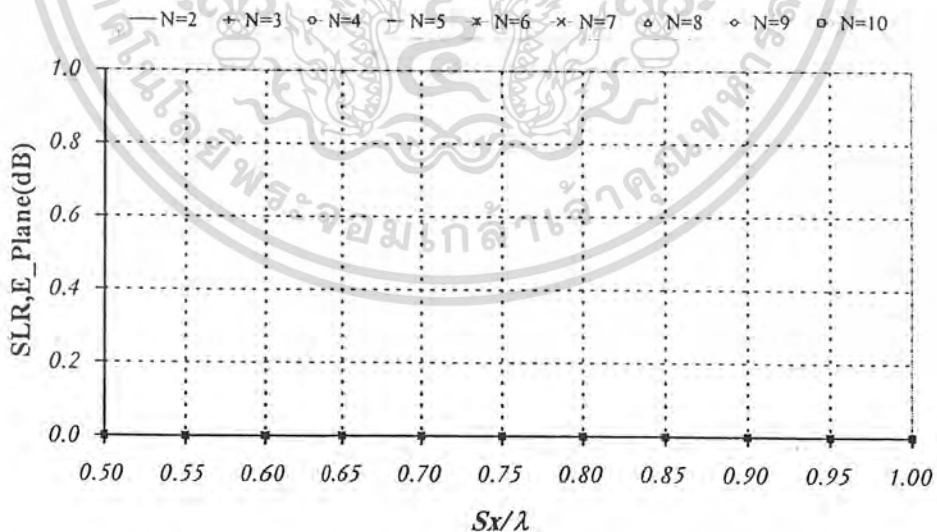
รูปที่ 3.56 ค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นข้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



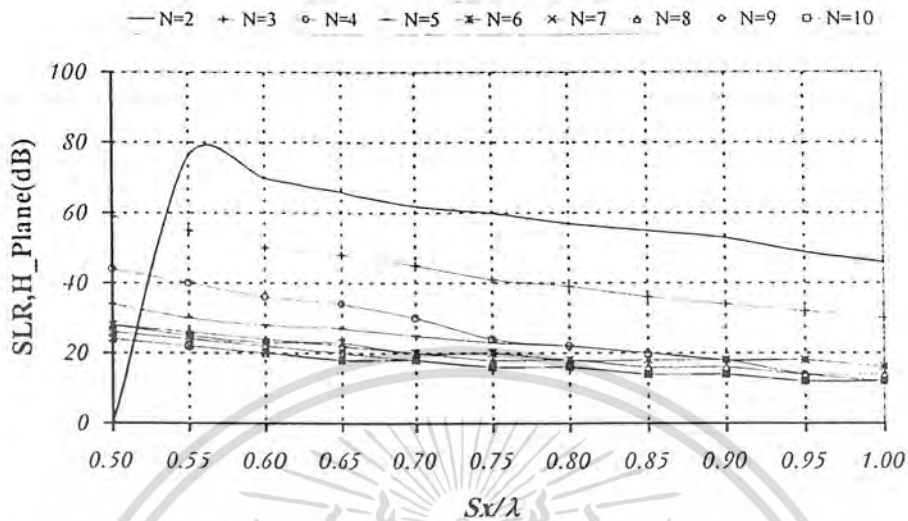
รูปที่ 3.57 ค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.58 ค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.59 ค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นข้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้จากวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่เฉพาะที่ระนาบแม่เหล็กโดยค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นข้อยด้านข้างจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่า ถ้าค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นข้อยด้านข้างมีค่ามากแสดงว่าเกิดลาคลื่นด้านข้างน้อยและค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นด้านข้างมีค่าน้อยกล่าวคือแสดงว่ามีลาคลื่นด้านเกิดขึ้นใกล้เคียงกับลาคลื่นหลัก

3.8.2 การจัดเรียงตามแนวแกน Y

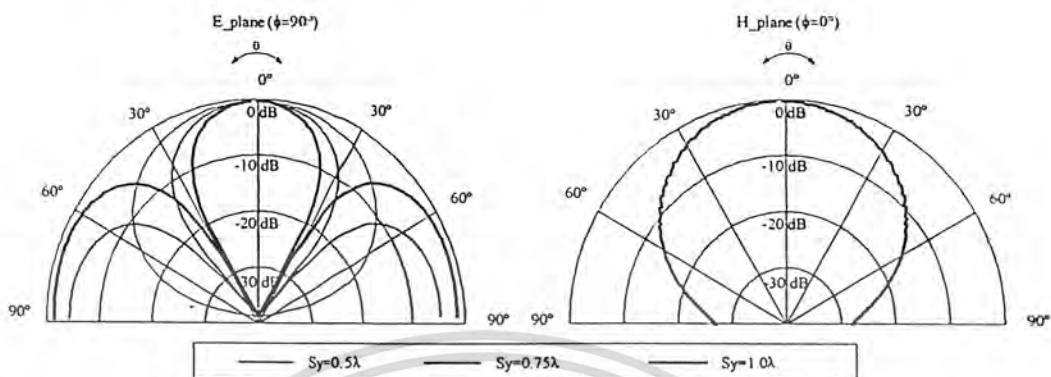
เป็นการนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาวางจัดเรียงตามแนวแกน Y โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ โดยการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

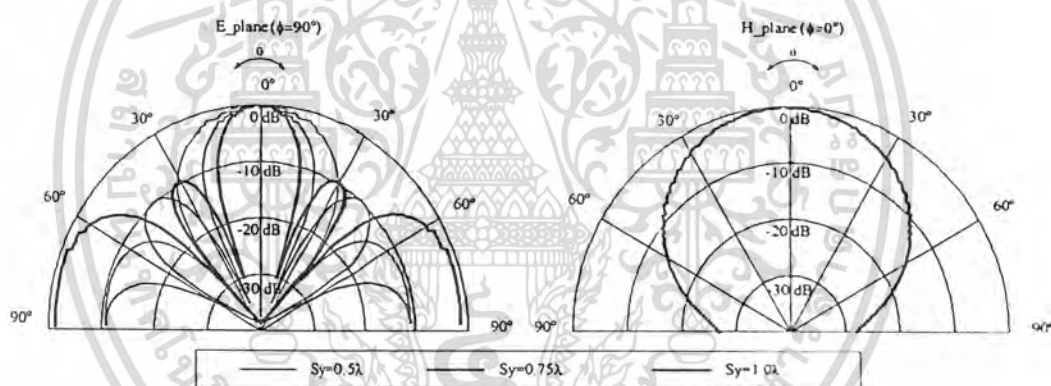
3.8.2.1 การพิจารณาแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

การแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

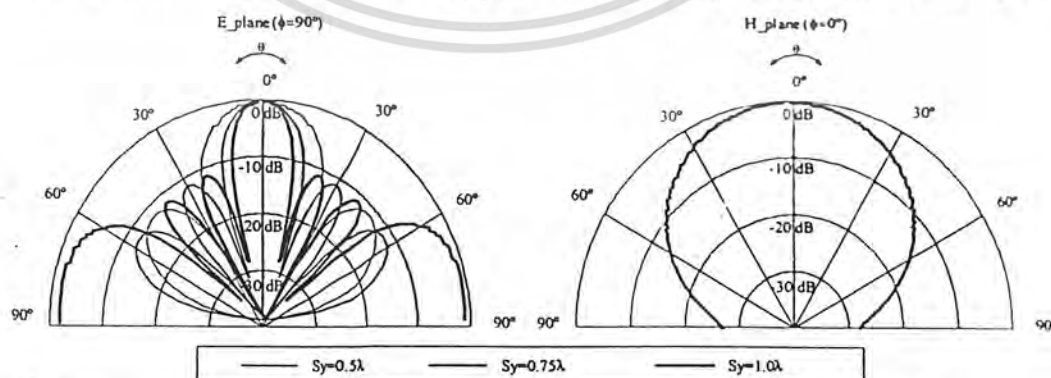
(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.60 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 2 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



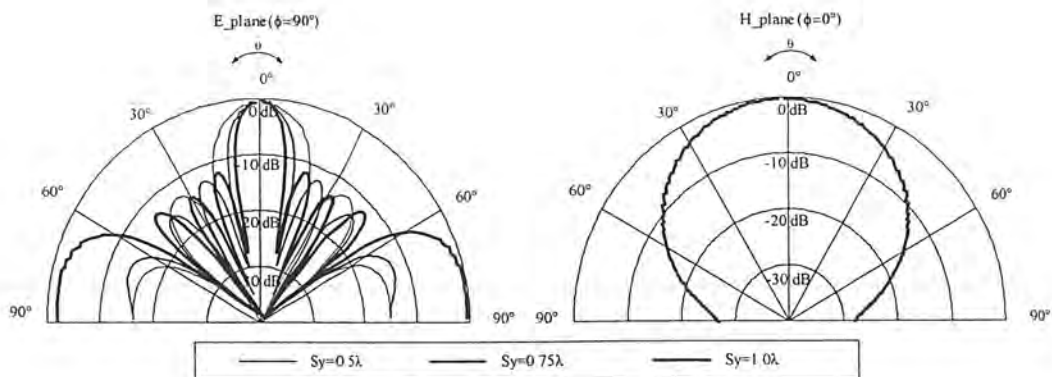
รูปที่ 3.61 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 3 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



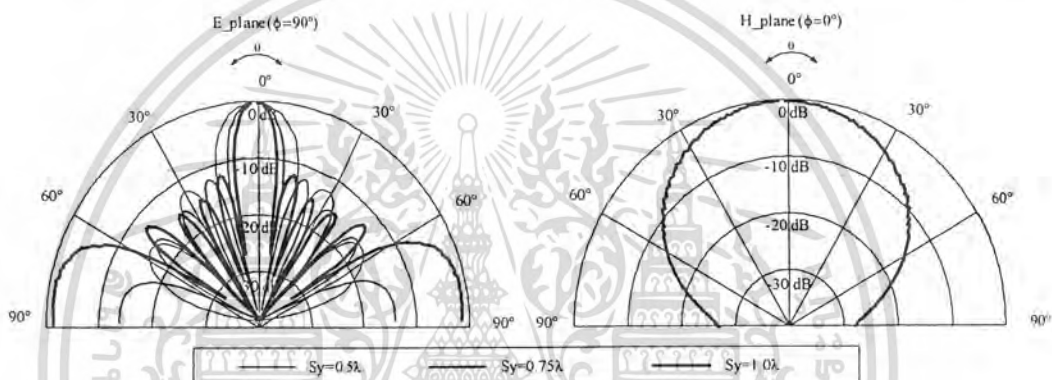
รูปที่ 3.62 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก

เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 4 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

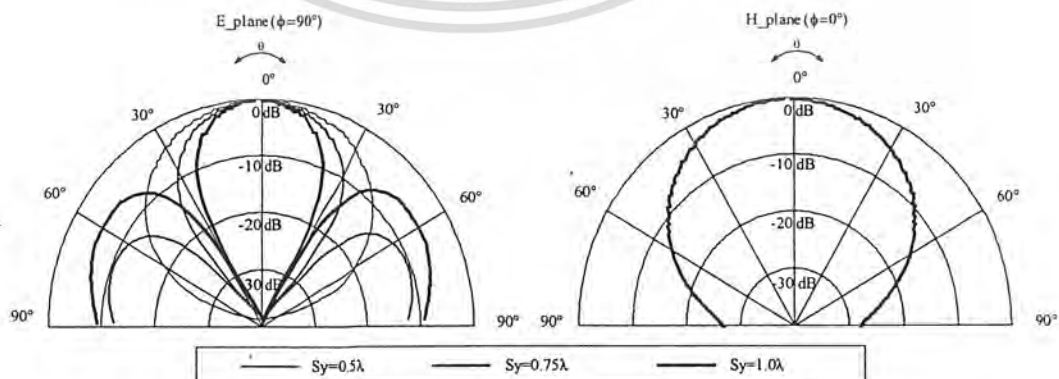


รูปที่ 3.63 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 5 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

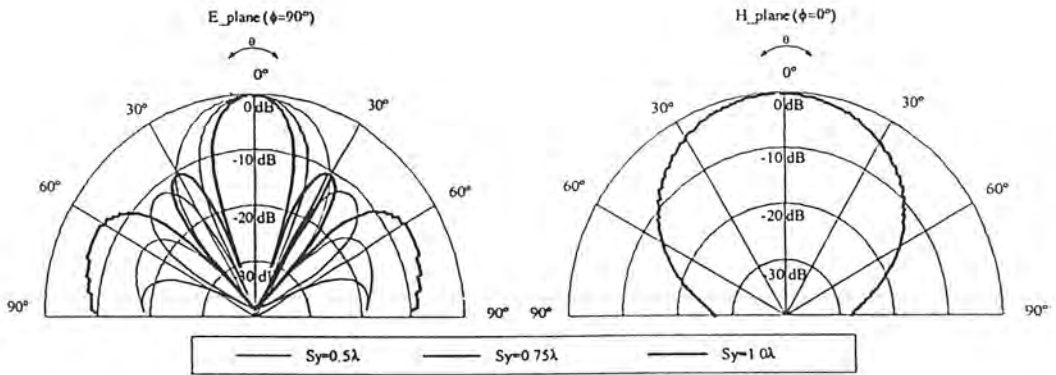


รูปที่ 3.64 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 6 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

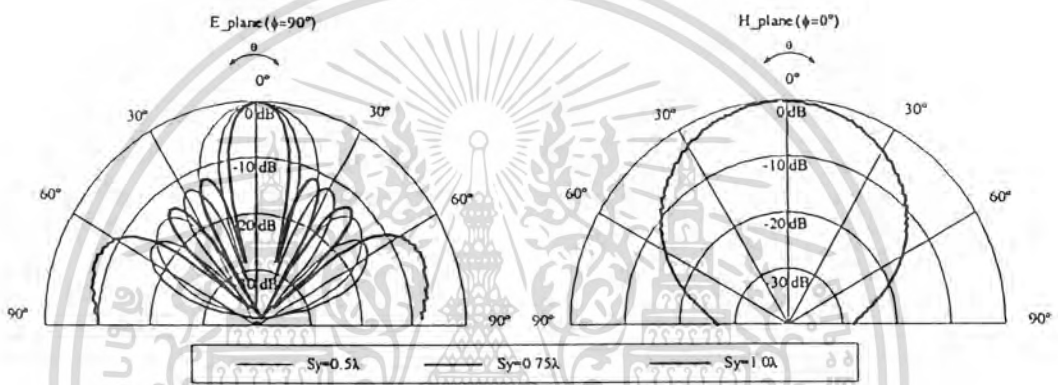
การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



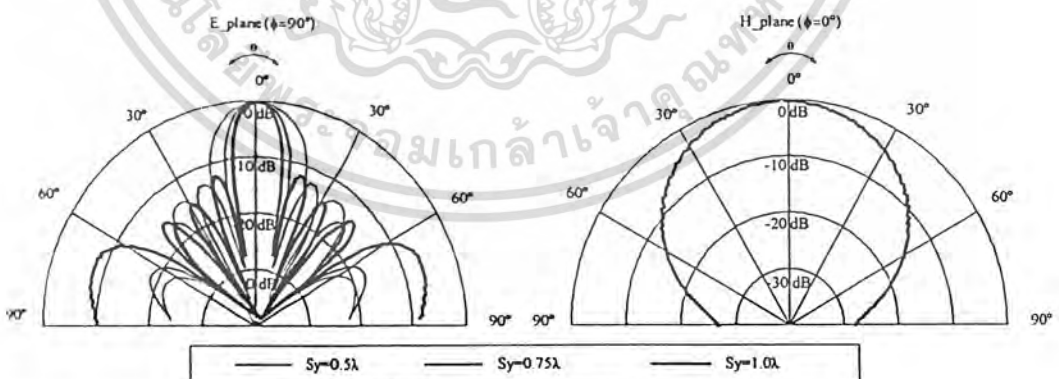
รูปที่ 3.65 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปประโยชน์ทางการค้า
เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 2 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.66 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 3 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

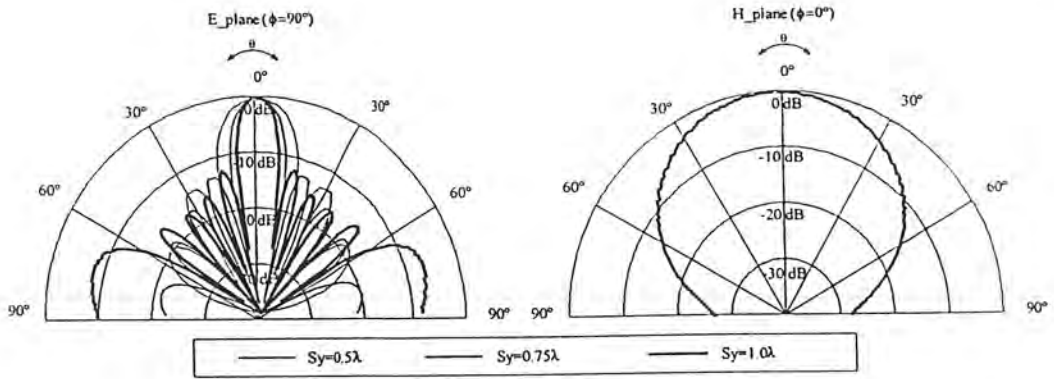


รูปที่ 3.67 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 4 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



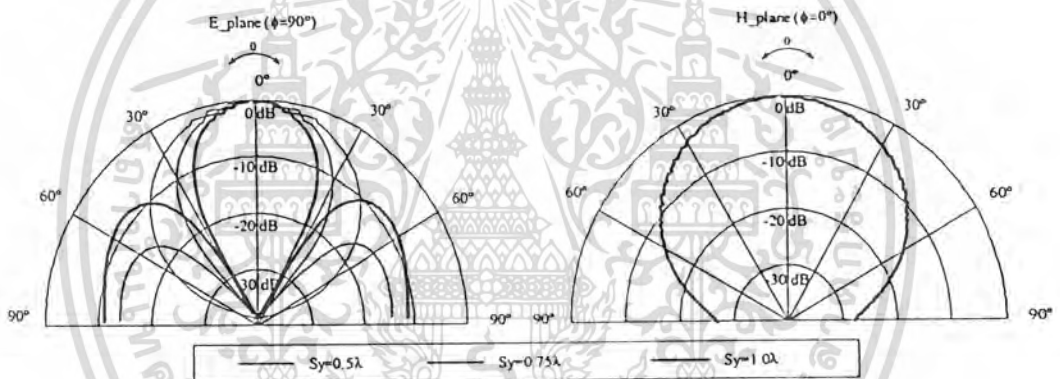
รูปที่ 3.68 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 5 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

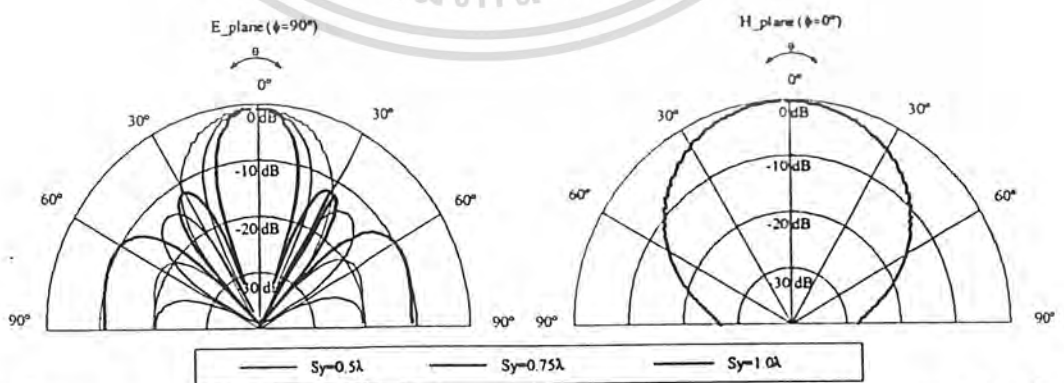


รูปที่ 3.69 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 6 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

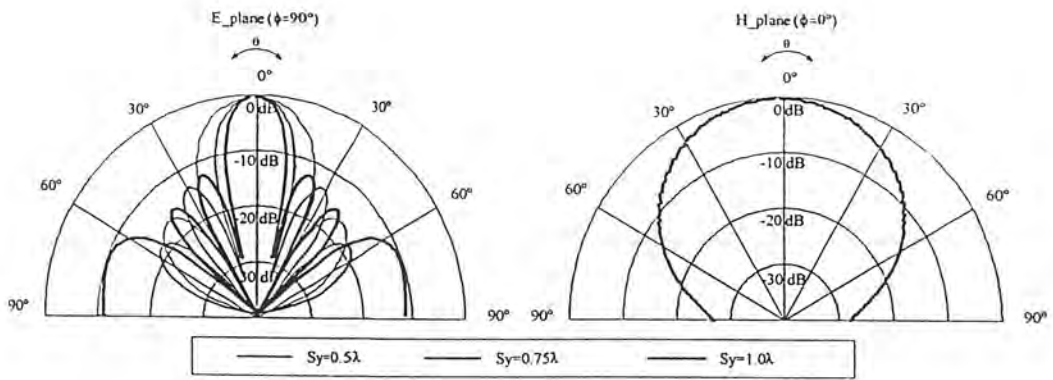
การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



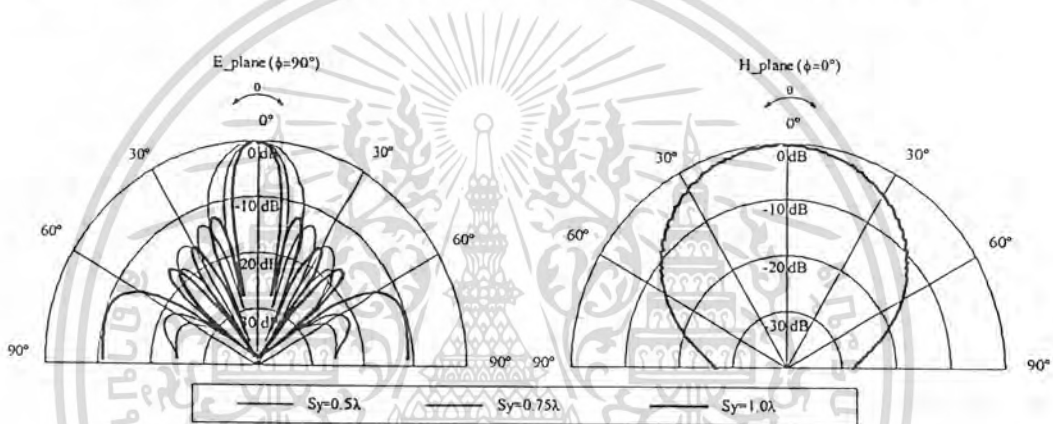
รูปที่ 3.70 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 2 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



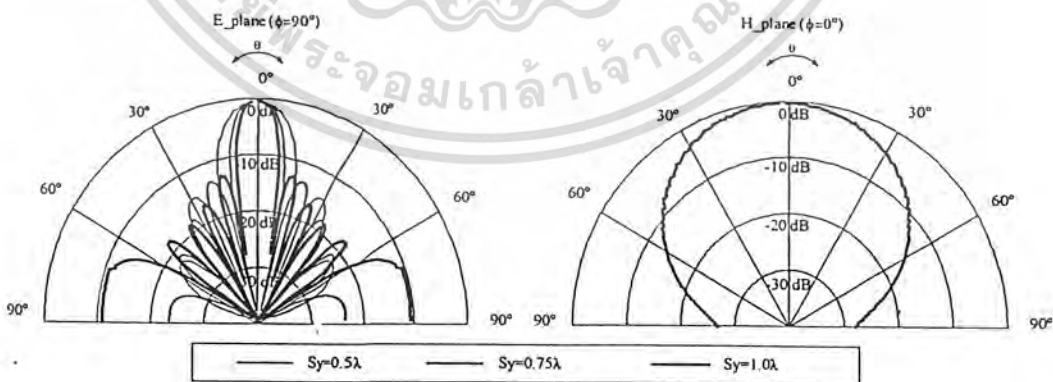
รูปที่ 3.71 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำเอกสารนี้ใส่สายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 3 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.72 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 4 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



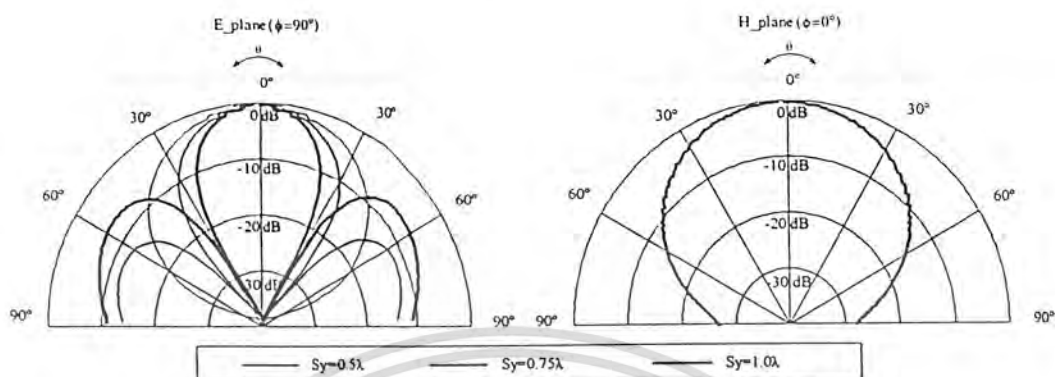
รูปที่ 3.73 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 5 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



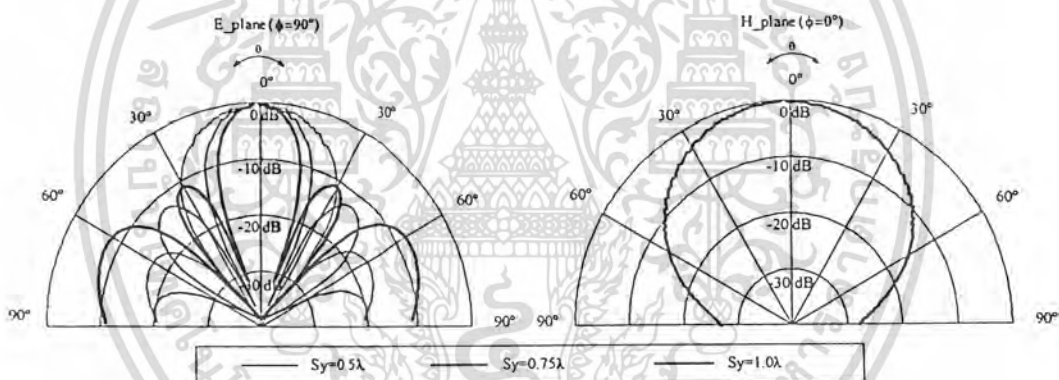
รูปที่ 3.74 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 6 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)

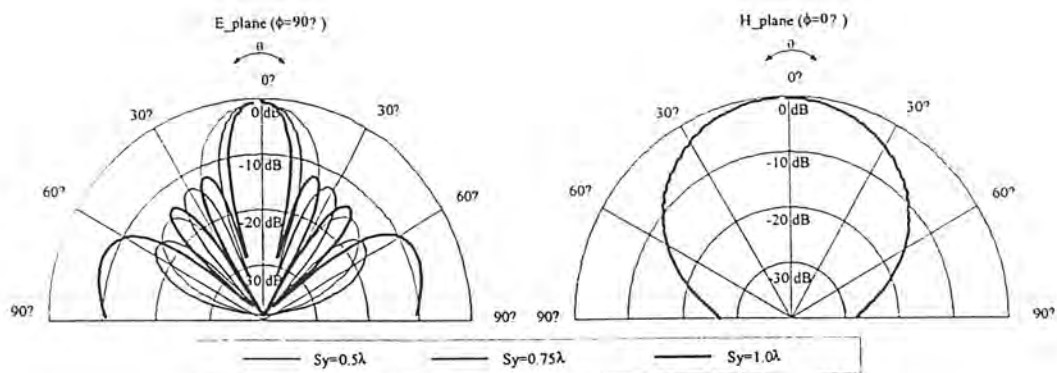


รูปที่ 3.75 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก
เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 2 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

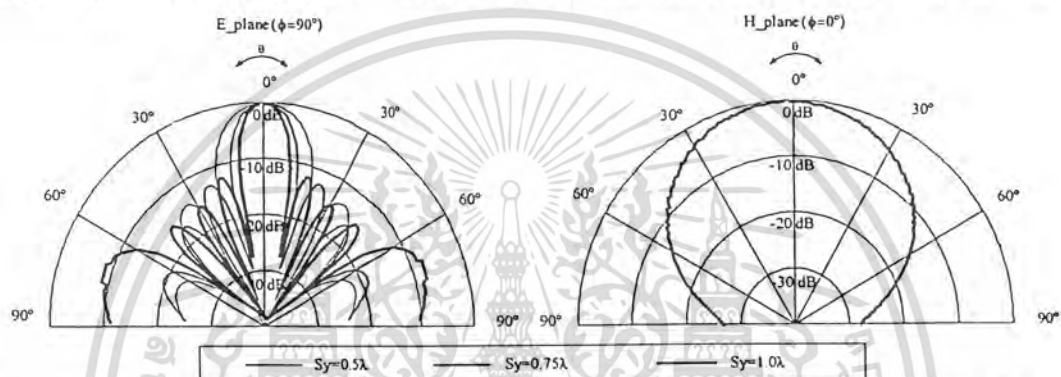


รูปที่ 3.76 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำ
สายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 3 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

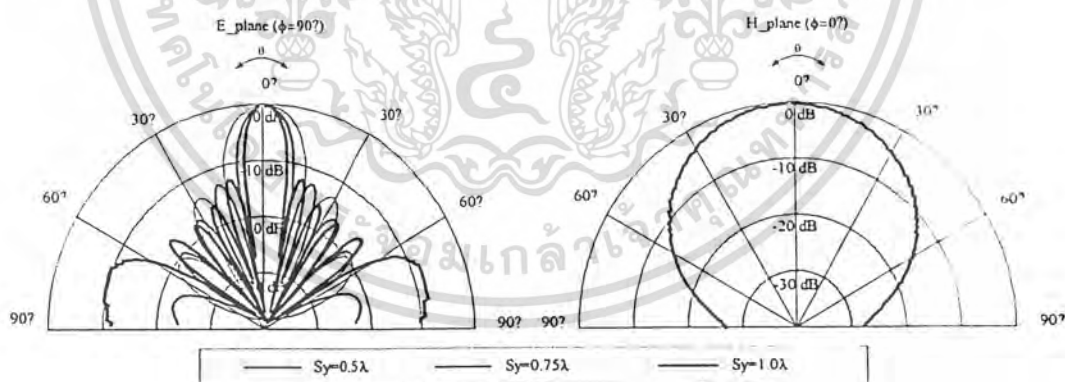
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.77 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็ก เมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 4 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



รูปที่ 3.78 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 5 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ



รูปที่ 3.79 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบของสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศมาวางเรียงตามแกน Y จำนวน 6 องค์ประกอบ โดย S_y คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาจัดเรียงแบบเชิงเส้นตามแนวแกน y จะสรุปได้ว่าในระนาบสนามแม่เหล็กแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะไม่มีเปลี่ยนแปลงของควมกว้างของลำคลื่นเมื่อจำนวนขององค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น ส่วนในระนาบสนามไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

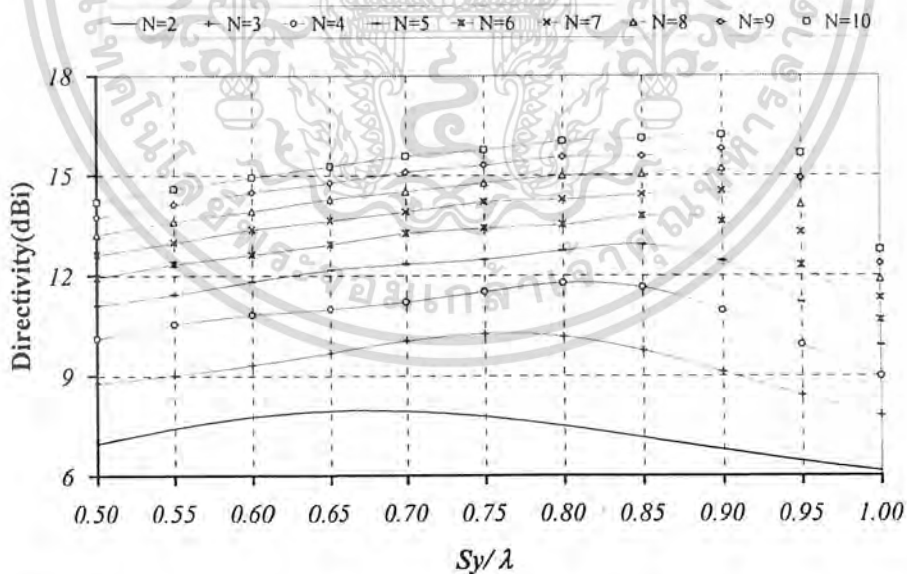
ไฟฟ้า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของลำคลื่นคือ เมื่อจำนวนขององค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มจะทำให้ลำคลื่นหลักแคบลงและเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างอีกด้วย ลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีจำนวนมากขึ้นเมื่อองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.8.2.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นคล้ายกับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศองค์ประกอบเดียวคือเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆมากน้อยแค่ไหน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้น ในขึ้นอยู่กัระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ ในที่นี้ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบสายอากาศ คือ S_y และ N คือจำนวนของสายอากาศที่นำมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้น การวิเคราะห์จะวิเคราะห์ค่าสภาพทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ $0.5\lambda - 1\lambda$ จำนวนสายอากาศมีตั้งแต่จัดเรียง 2 องค์ประกอบจนถึงการจัดเรียง 10 องค์ประกอบ และสามารถทำการเลือกระยะที่เหมาะสมที่มีค่าเจาะจงสภาพทิศทางสูง การวิเคราะห์ค่าเจาะจงทิศทางจะทำให้การวิเคราะห์ตามกรณีการแพร่กระจายคลื่นบริเวณช่องปากเปิดของสายอากาศซึ่งจะแบ่งได้ 4 กรณี ดังนี้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)

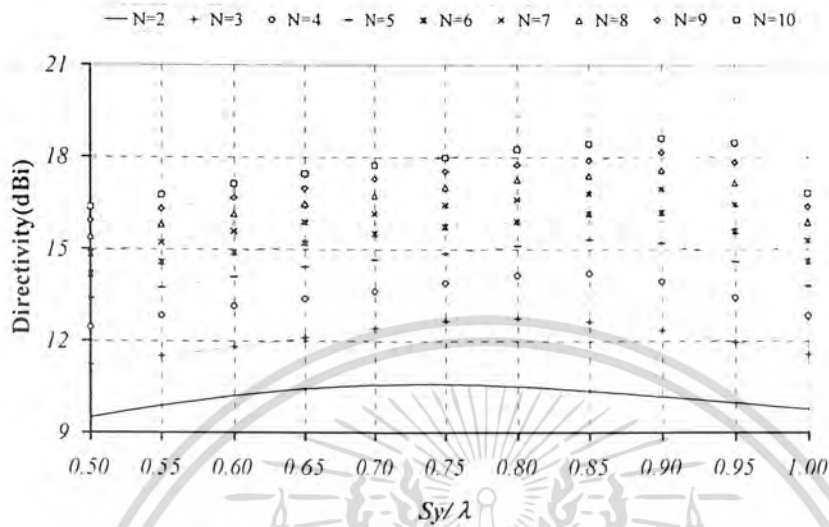


รูปที่ 3.80 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

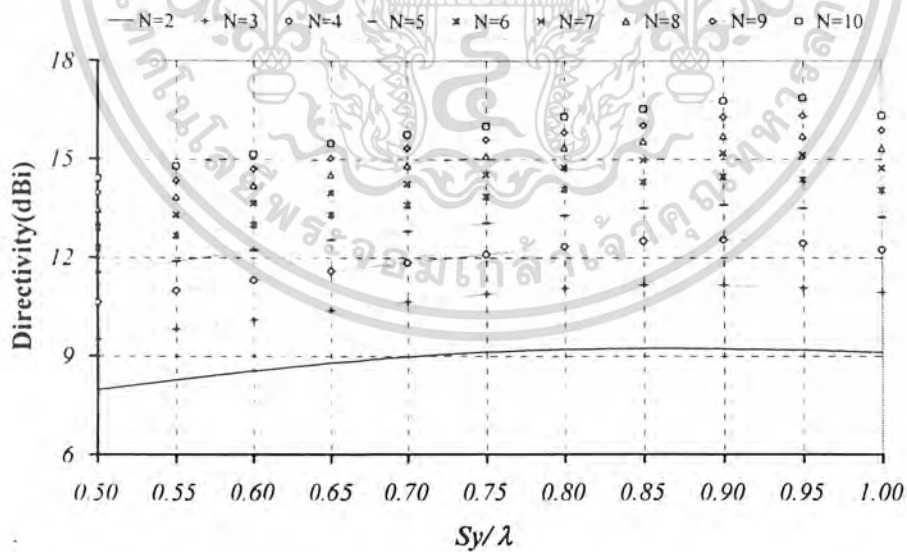
(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.81 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)

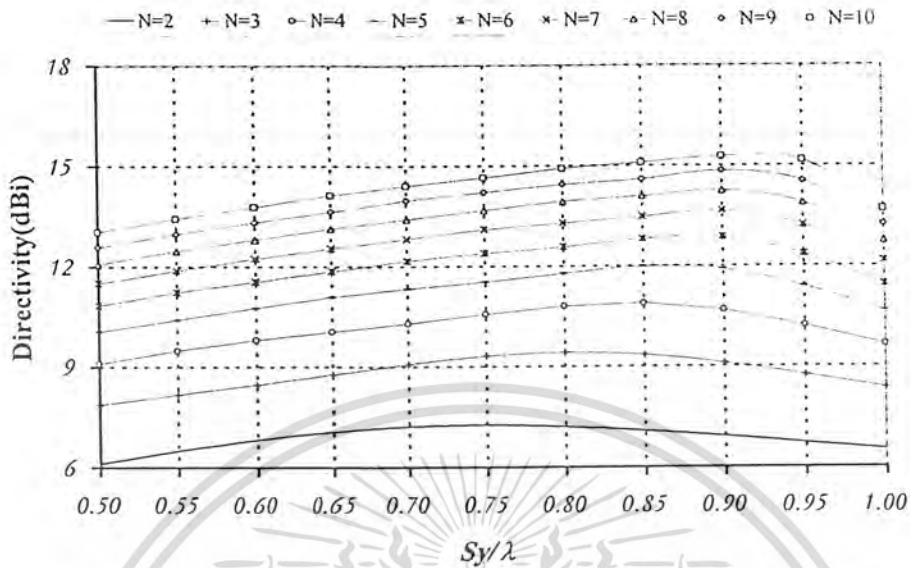


รูปที่ 3.82 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ
ในส่วนของ โหมด TE_{10}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.83 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ ในส่วนของโหมด TE_{10}

จากรูปของค่าสภาพเจาะจงทิศทางทั้ง 4 กรณีสรุปได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงที่ระยะห่างเท่ากับ 0.95λ ซึ่งแนวโน้มของค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง

จากรูปจะพบว่าจำนวนของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ทั้ง 4 กรณีจะพบว่าองค์ประกอบของสายอากาศมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงกว่าองค์ประกอบของสายอากาศที่มีจำนวนน้อยกว่า

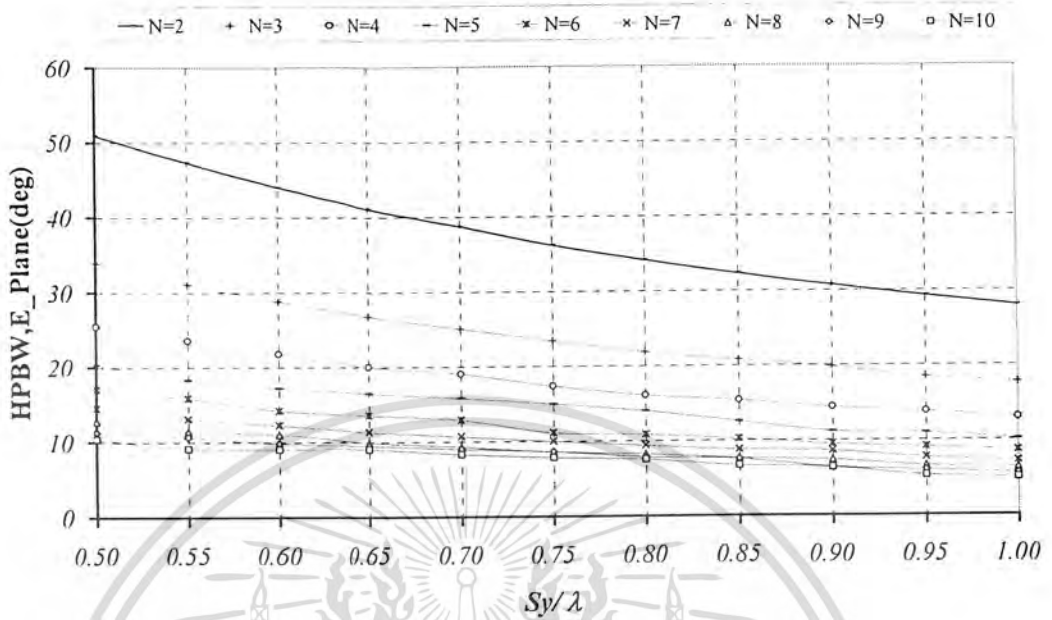
การเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศไม่ควรเกิน 0.95λ เพราะเมื่อระยะห่างมากกว่านี้จะทำให้ค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง ส่วนจำนวนสายอากาศที่จะนำมาวางเรียงกันนั้นขึ้นอยู่กับว่าผู้สร้างต้องการค่าเจาะจงทิศทางแรงแค่ไหน แต่ก็ควรพิจารณาพร้อมกับค่าพารามิเตอร์อื่นด้วย

3.8.2.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width)

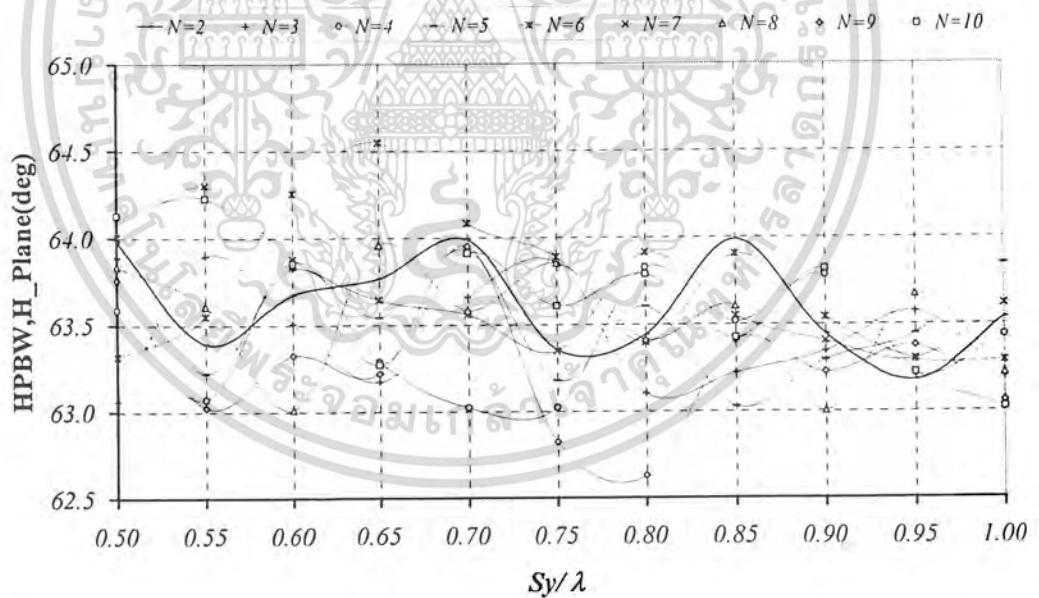
การวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกว่าคุณคลื่นหลักแคบหรือกว้าง โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบโดยเริ่มตั้งแต่ $0.5\lambda - 1\lambda$ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งคือความต้องการที่จะนำสายอากาศไปใช้งานบริเวณใดๆ ต้องการลำคลื่นแคบหรือกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ
(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.84 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามไฟฟ้า

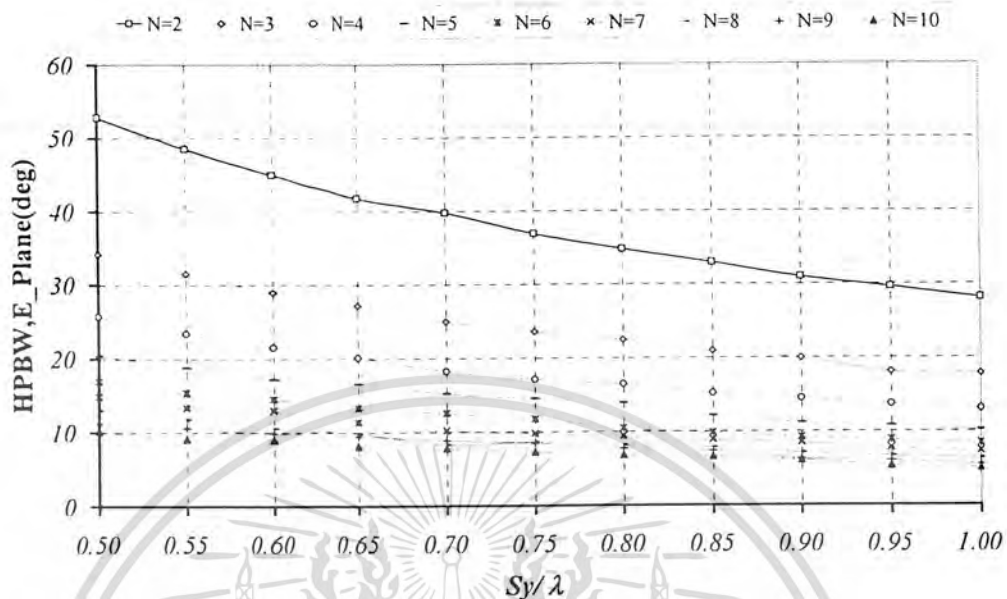


รูปที่ 3.85 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามแม่เหล็ก

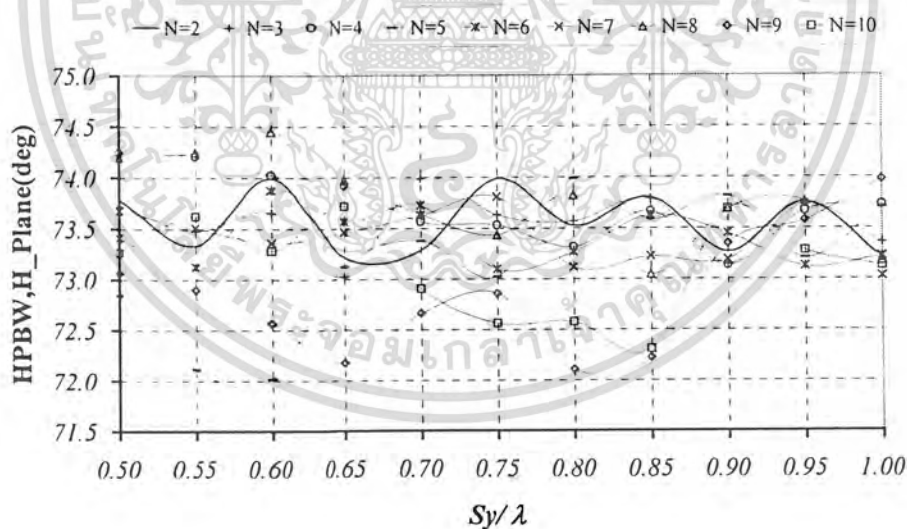
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.86 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามไฟฟ้า

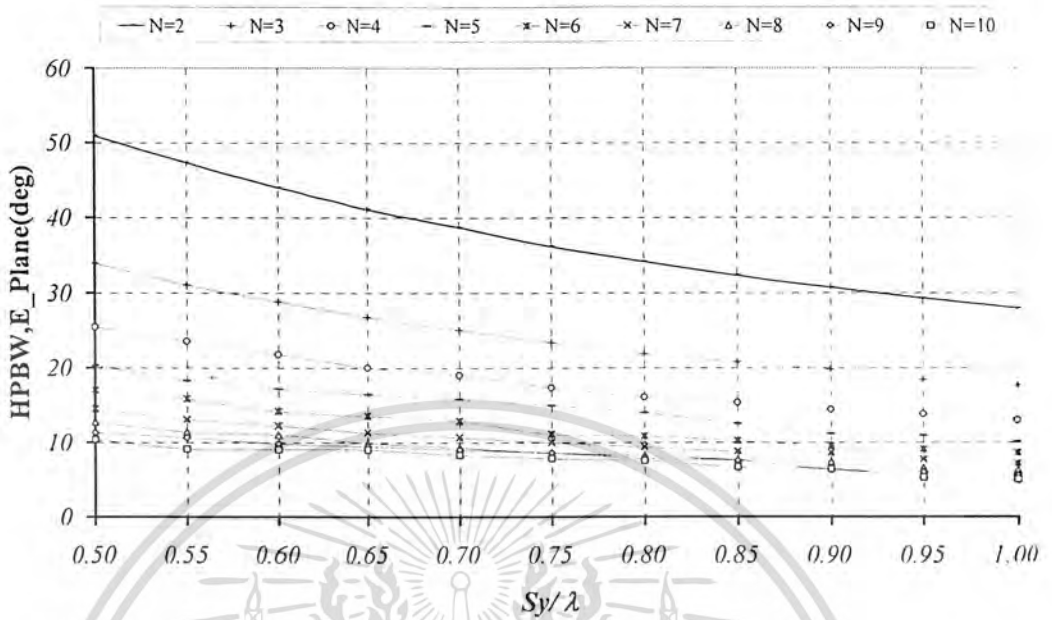


รูปที่ 3.87 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามแม่เหล็ก

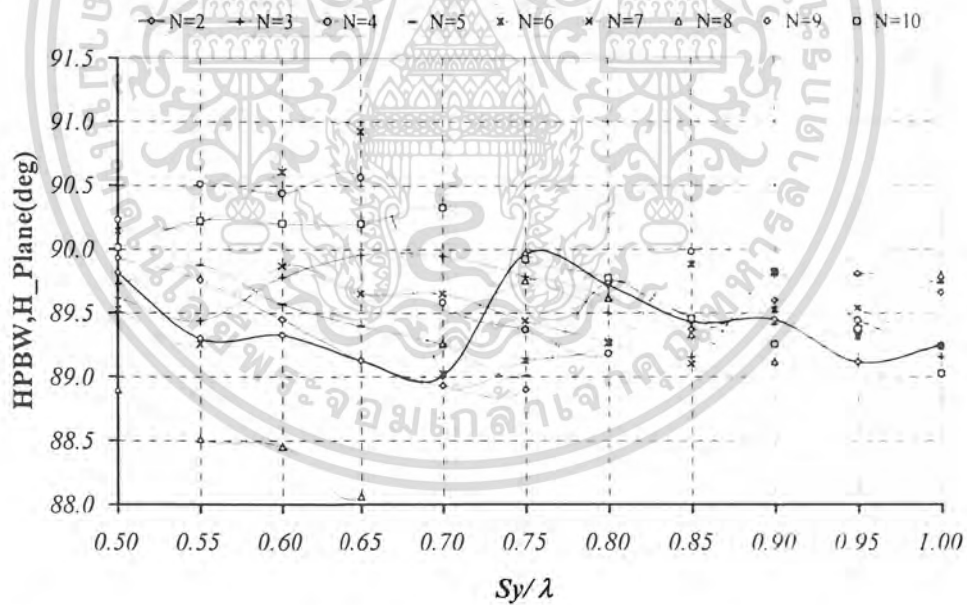
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.88 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ ในส่วนของ โหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

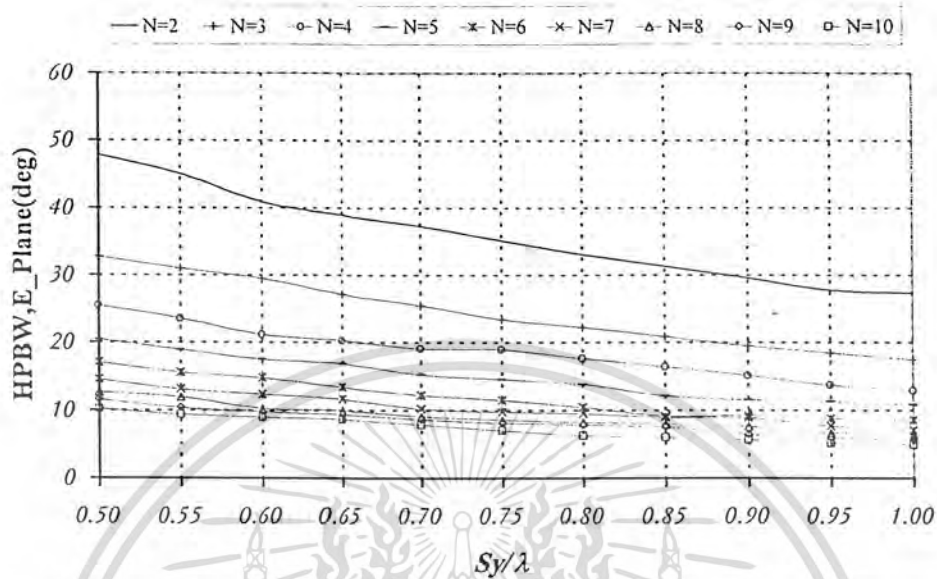


รูปที่ 3.89 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

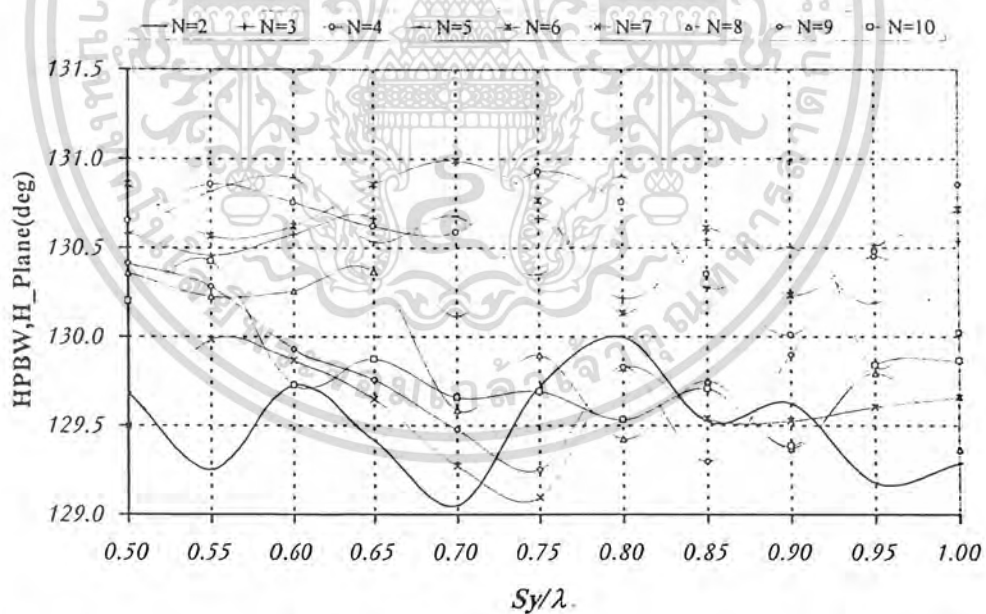
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.90 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.91 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

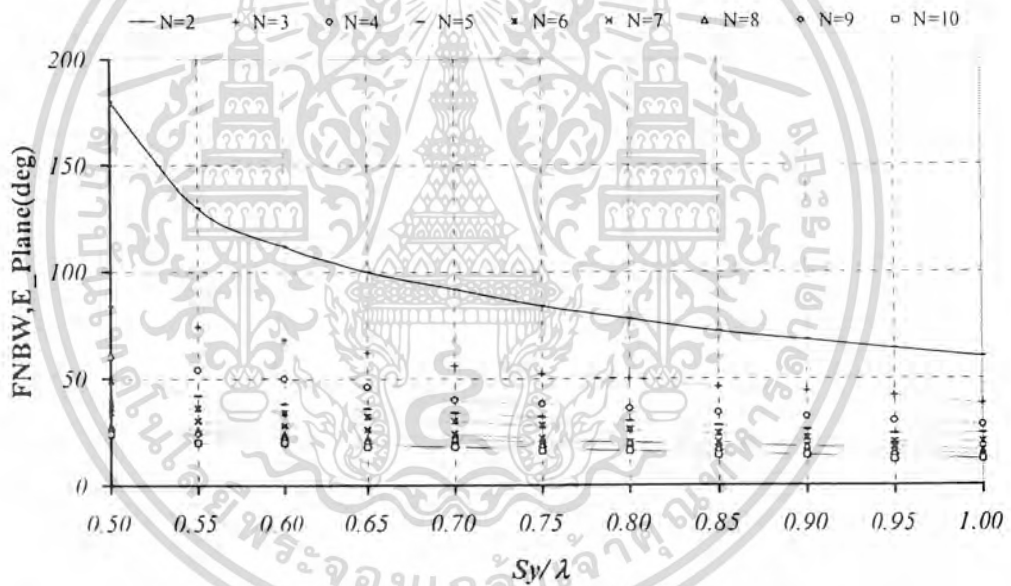
จากรูปที่ ได้วิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่น จะเห็นว่าที่ระนาบสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยเมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายของคลื่นที่ได้ทำการวิเคราะห์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาถึงแม้ว่าระยะห่างระหว่างสายอากาศจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ตรงกันข้ามที่ระนาบสนามไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดครั้งหนึ่งมีค่าลดลงตามระยะห่างของสายอากาศที่ห่างมากขึ้น กล่าวคือลำคลื่นหลักจะแคบลงเมื่อระยะระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.8.2.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width)

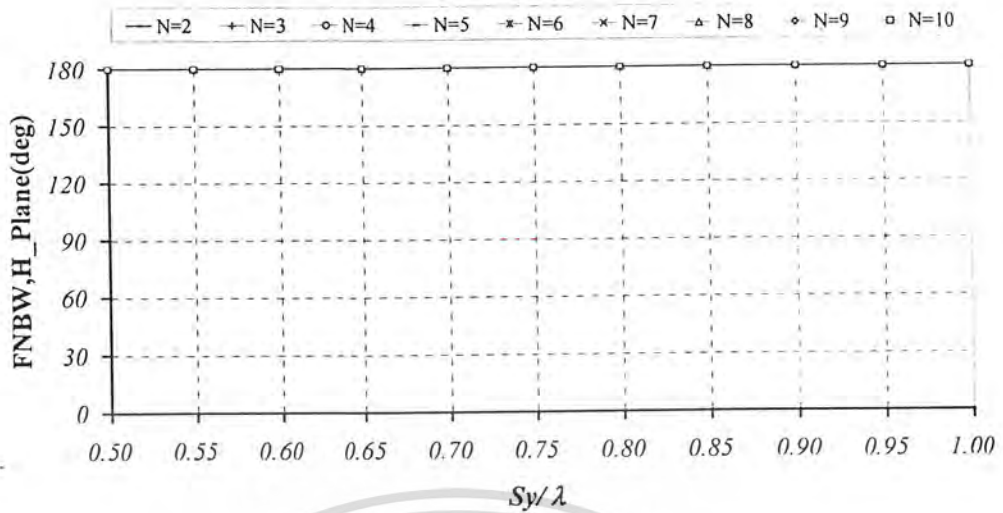
การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกเป็นการวิเคราะห์ว่ามีการเกิดขึ้นของลำคลื่นด้านข้างหรือไหม่มาอย่างน้อยเพียงใด ในการออกแบบสายอากาศผู้สร้างไม่ต้องการที่จะให้เกิดลำคลื่นด้านข้างเพราะลำคลื่นด้านข้างอาจรบกวนลำคลื่นหลัก

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ
(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.92 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามไฟฟ้า

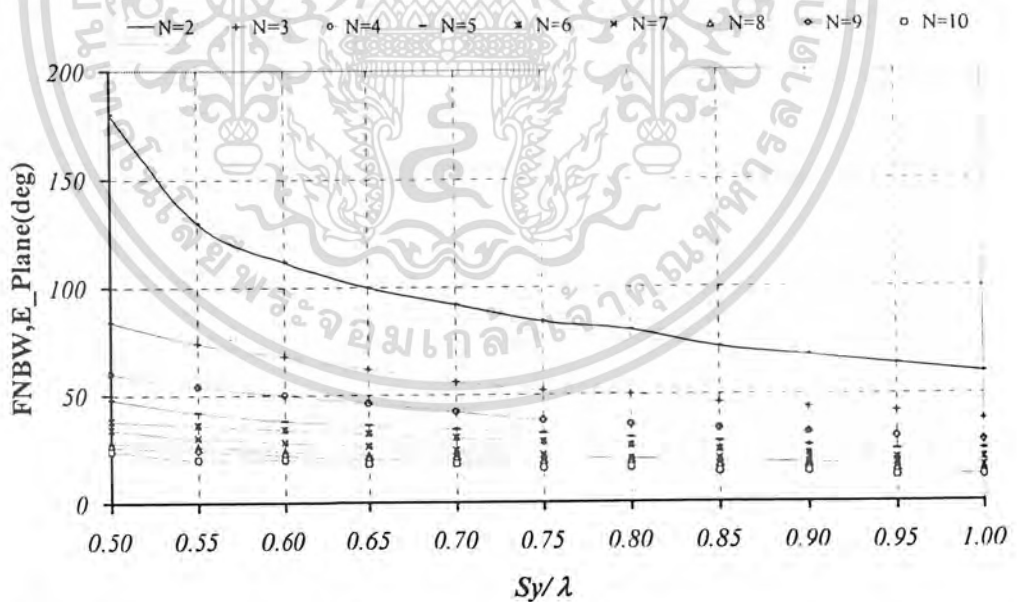
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.93 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามแม่เหล็ก

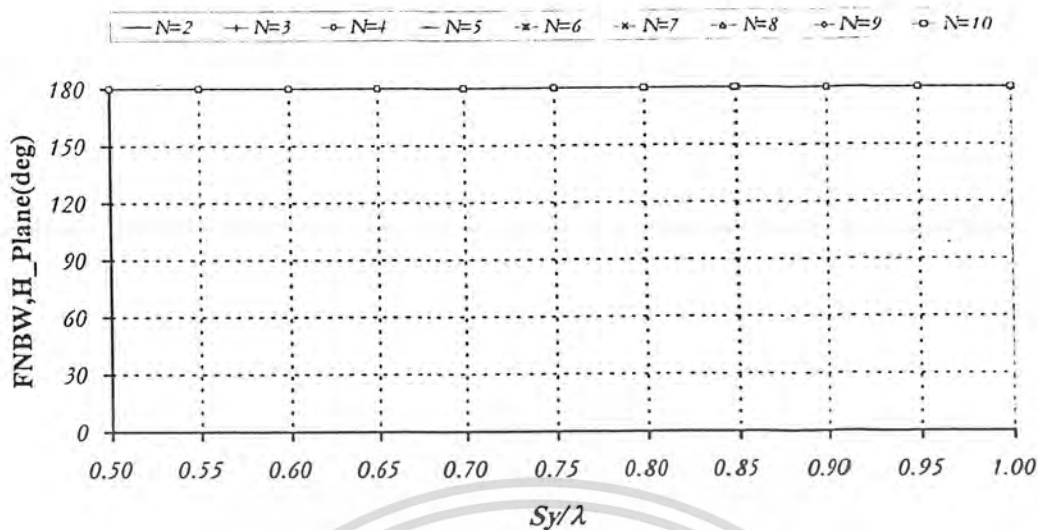
การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



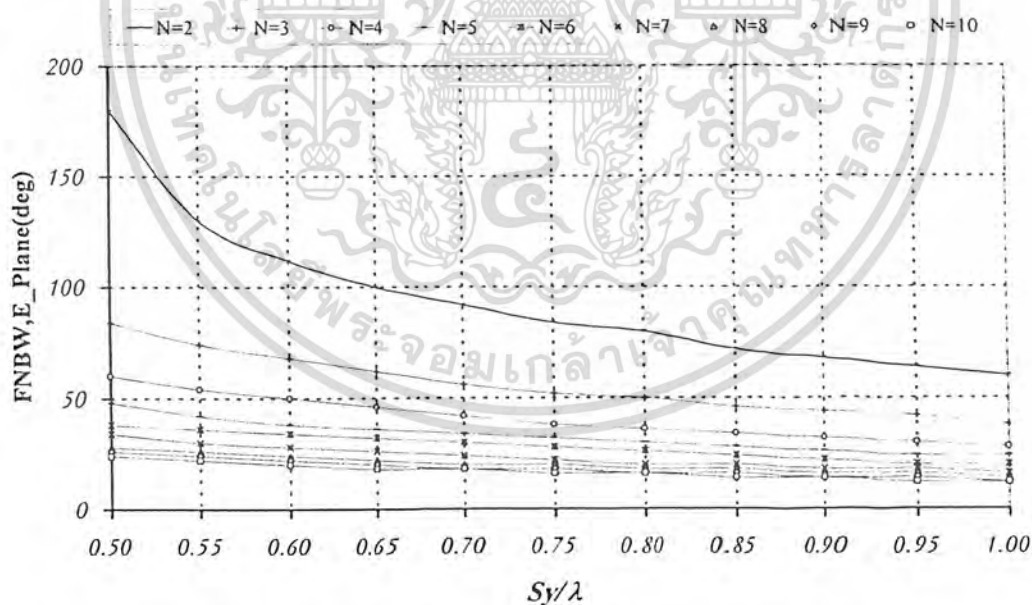
รูปที่ 3.94 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



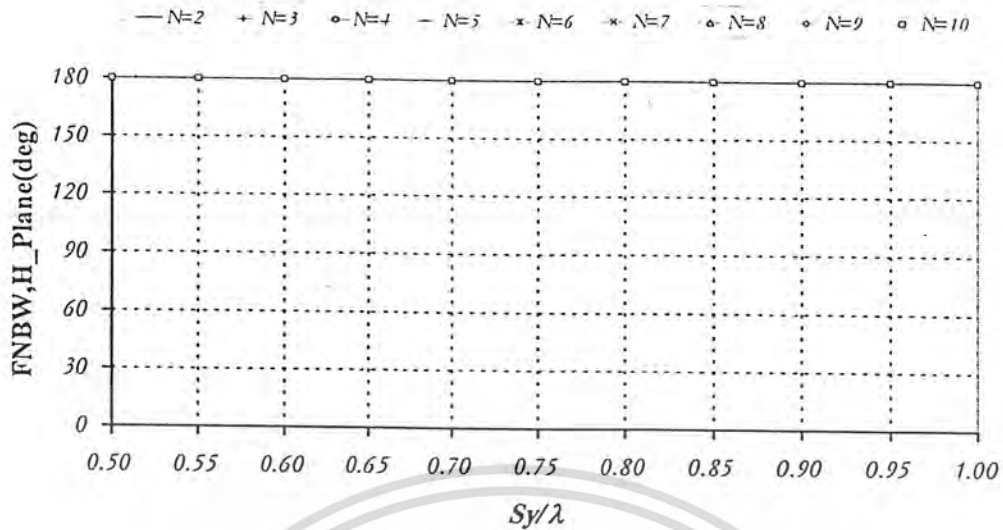
รูปที่ 3.95 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามแม่เหล็ก

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



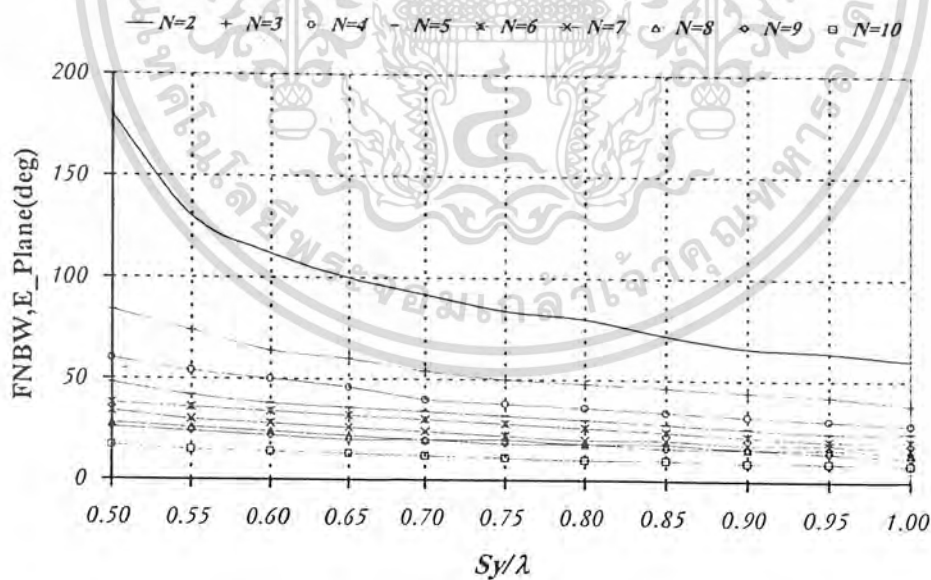
รูปที่ 3.96 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



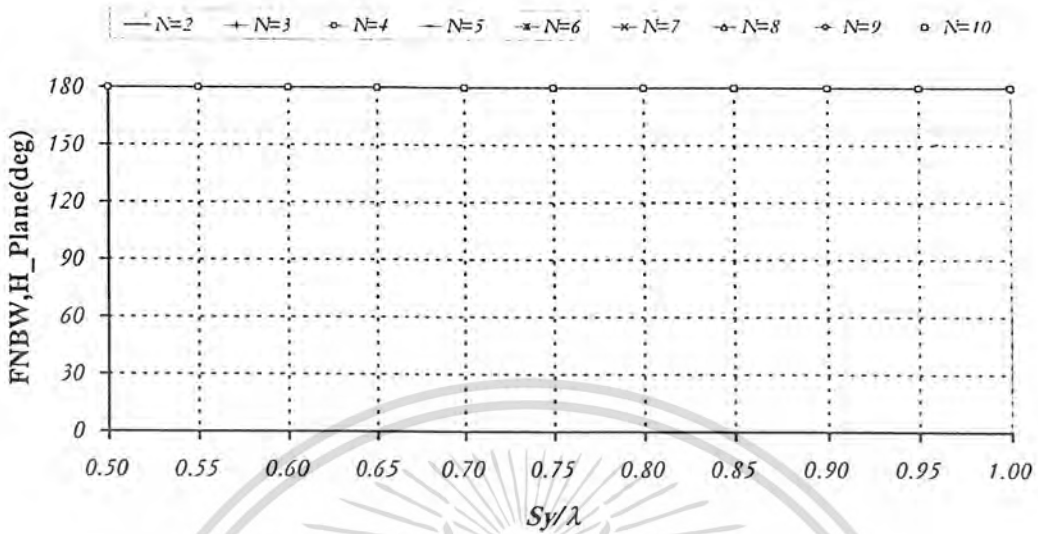
รูปที่ 3.97 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่ค่าสังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.98 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่ค่าสังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.99 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีกการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE₁₀ ในระนาบสนามแม่เหล็ก

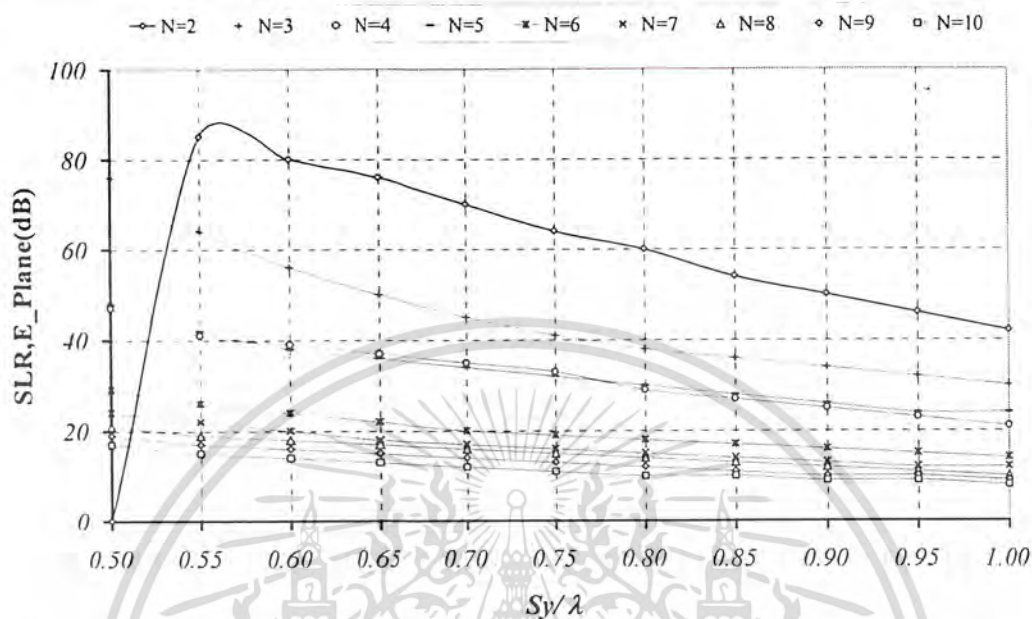
จากรูปที่ทำการวิเคราะห์ทั้ง 4 กรณีจะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงคือไม่มีลำคลื่นด้านข้าง และในทางกลับกันที่สนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็ยังน้อยแต่กรณีที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

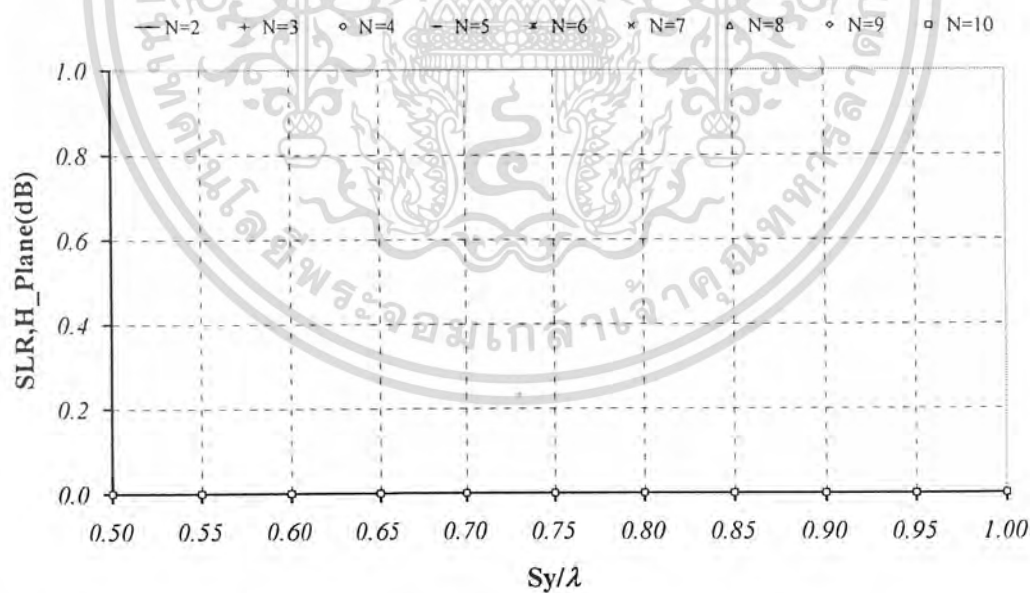
3.8.2.5 การวิเคราะห์ค่าลาค์หลักต่อลาค์น้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.100 ค่าลาค์หลักต่อลาค์น้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามไฟฟ้า

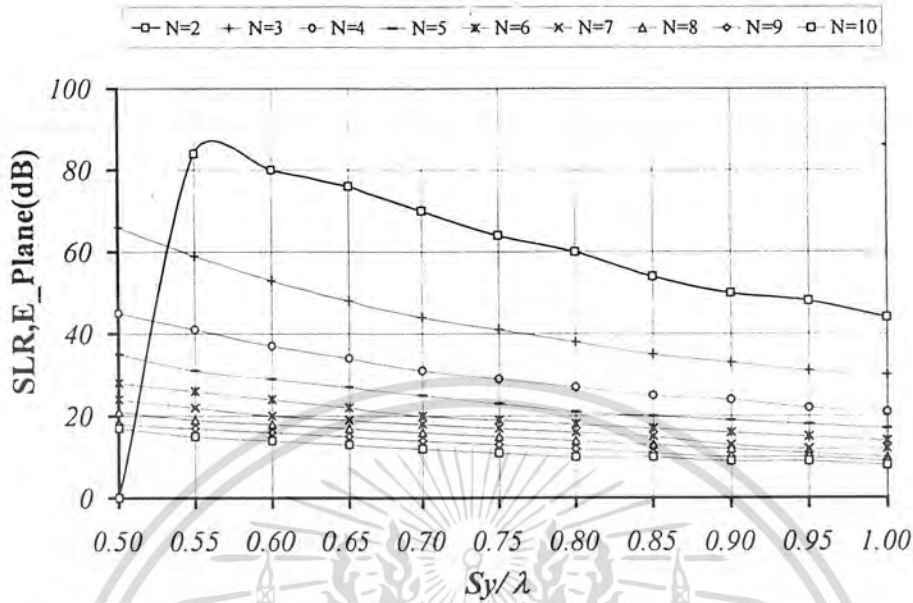


รูปที่ 3.101 ค่าลาค์หลักต่อลาค์น้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามไฟฟ้าแม่เหล็ก

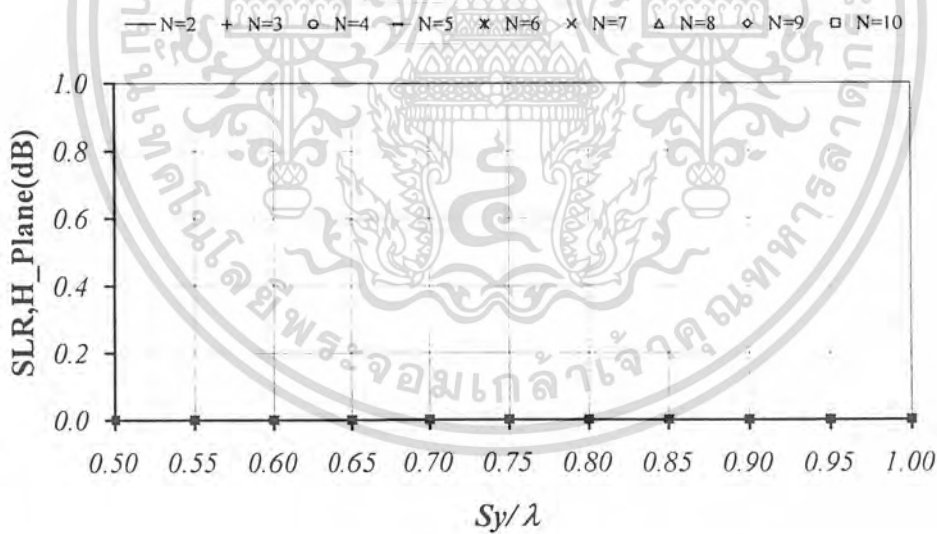
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.102 ค่าลาคิ้นหลักต่อลาคิ้นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามไฟฟ้า

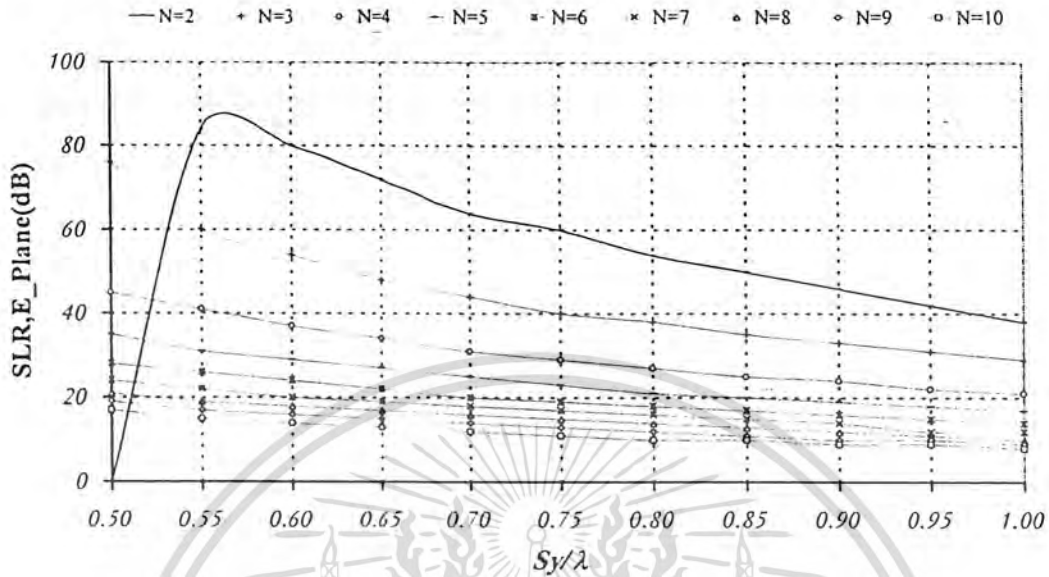


รูปที่ 3.103 ค่าลาคิ้นหลักต่อลาคิ้นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามแม่เหล็ก

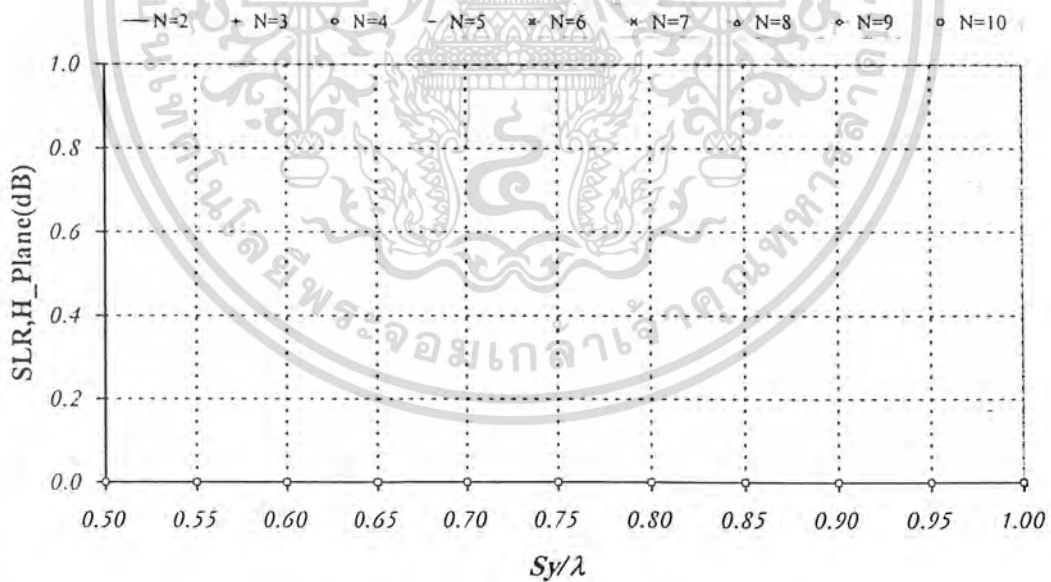
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.104 ค่าล้นหลักต่อล้นข้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

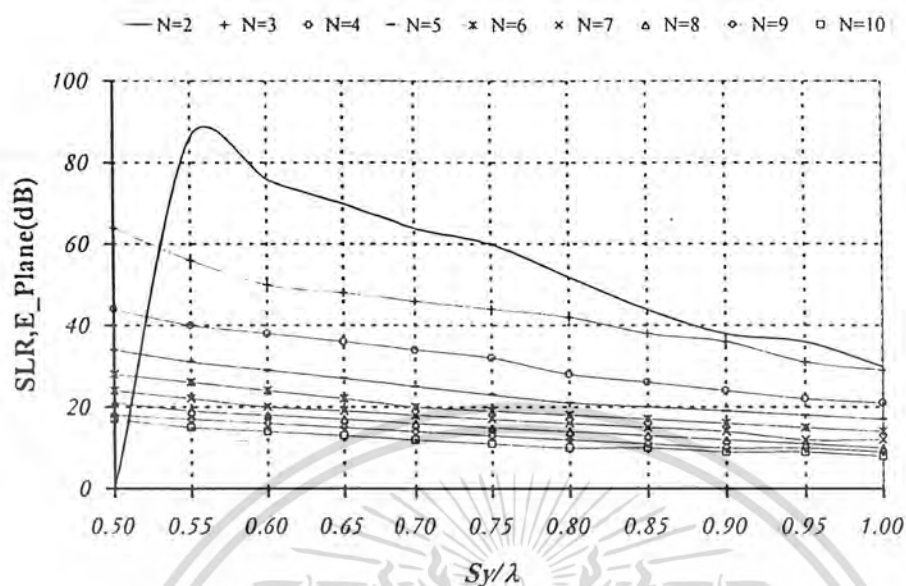


รูปที่ 3.105 ค่าล้นหลักต่อล้นข้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

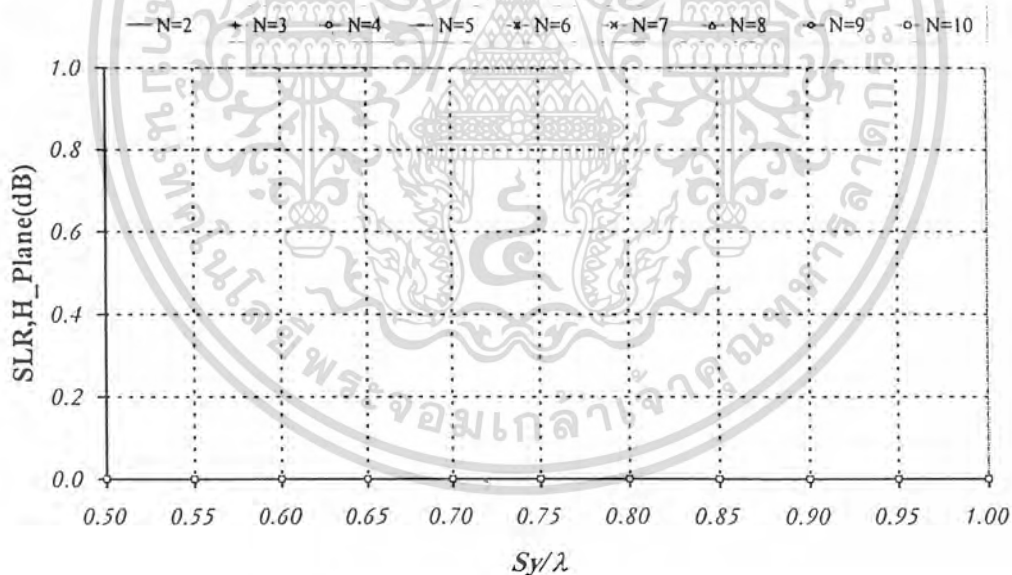
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.106 ค่าลาคิ้นหลักต่อลาคิ้นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.107 ค่าลาคิ้นหลักต่อลาคิ้นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่เฉพาะที่ระนาบสนามไฟฟ้าโดยค่าลาคิ้นหลัก

ต่อลาคิ้นย่อยด้านข้างจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วน

ระนาบสนามแม่เหล็กจะไม่เปลี่ยนแปลงและไม่เกิดลาคิ้นด้านข้างด้วย สรุปได้ว่าค่าลาคิ้นหลักต่อลาคิ้นย่อยด้านข้าง

ไม่วากกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นย่อยด้านข้างมีค่ามากแสดงว่าเกิดคลื่นด้านข้างน้อยและค่าคลื่นหลักต่อคลื่นด้านข้างมีค่าน้อย กล่าวคือแสดงว่ามีคลื่นด้านเกิดขึ้นใกล้เคียงกับคลื่นหลัก

3.9 การจัดเรียงแบบเชิงระนาบ (Planar)

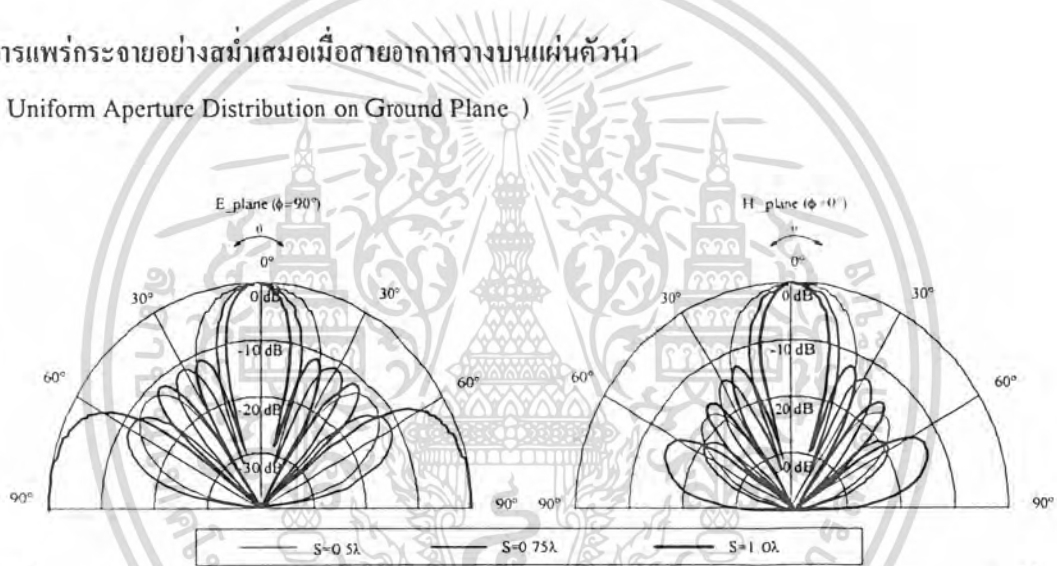
เป็นการจัดเรียงสายอากาศแบบเชิงระนาบตามที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 โดยให้สายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีจำนวนเท่ากับ N องค์ประกอบระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบมีความยาวเท่ากับ S ซึ่งเป็นความยาวตามแนวแกน x และ y สามารถพิจารณาตามลักษณะการกระจายคลื่นได้ดังนี้

3.9.1 .การวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

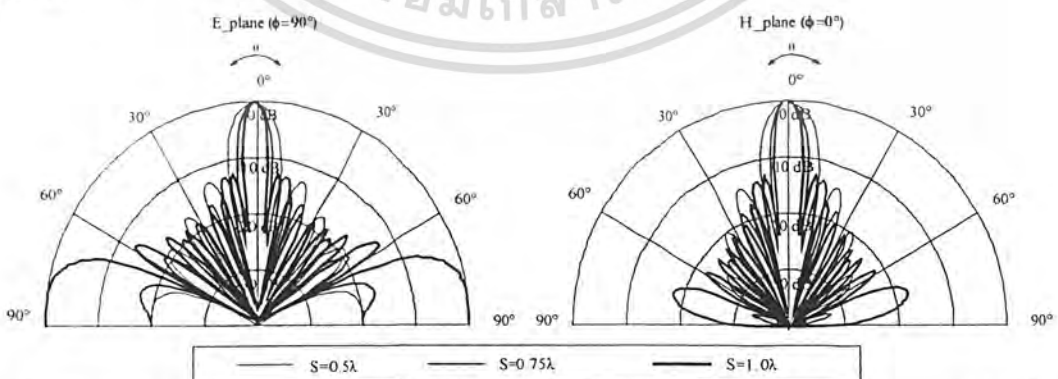
การวิเคราะห์ที่ทำการวิเคราะห์เหมือนที่ผ่านมามี 4 กรณีดังนี้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนพื้นตัวนำ

(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.108 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบ โดย S คือระยะระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ



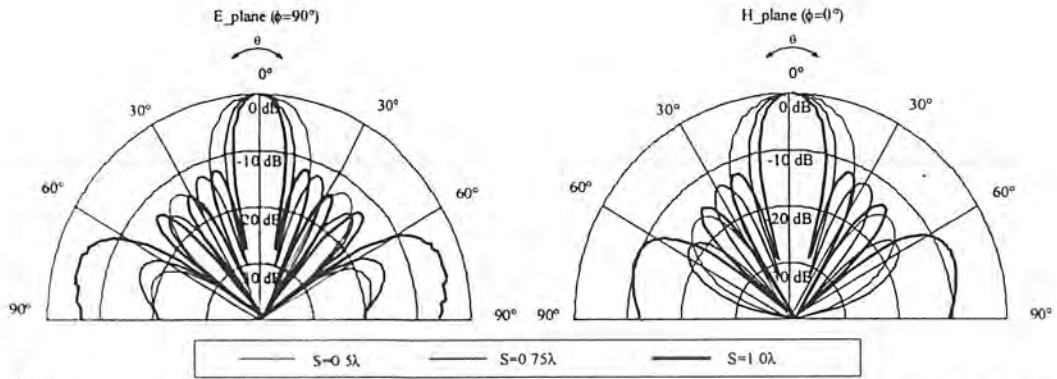
รูปที่ 3.109 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อนำ

สายอากาศจำนวน 9 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบ โดย S คือระยะระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

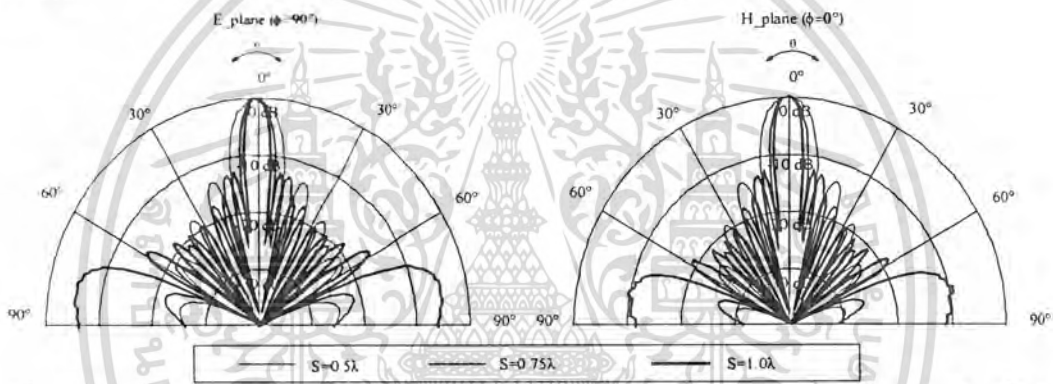
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Free Space)



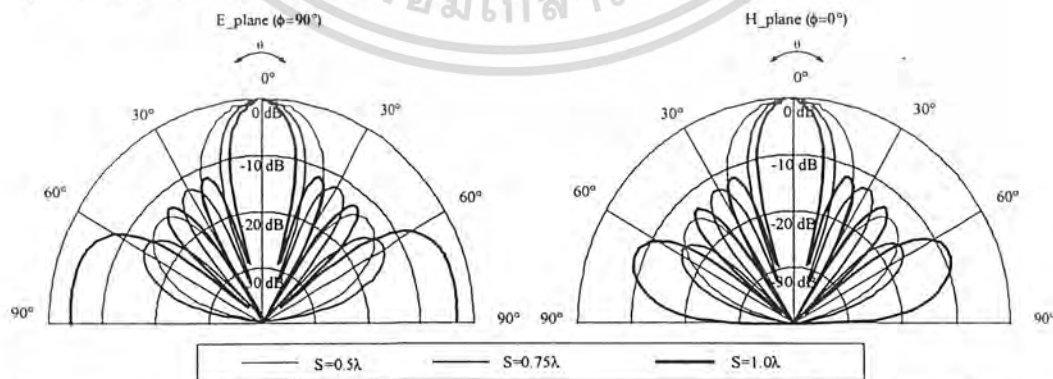
รูปที่ 3.110 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบ โดย S คือระยะระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ



รูปที่ 3.111 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศจำนวน 9 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบ โดย S คือระยะระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

(TE₁₀-Mode Aperture Distribution on Ground Plane)

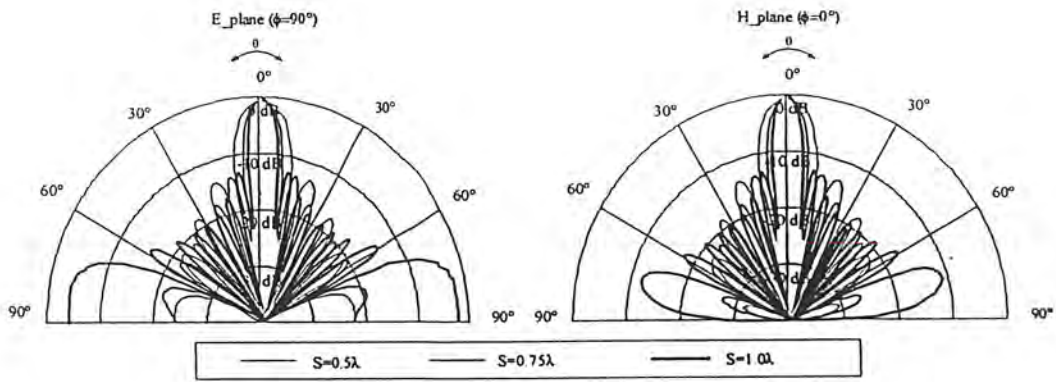


รูปที่ 3.112 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อนำ

สายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบ โดย S คือระยะระหว่างสายอากาศแต่ละองค์

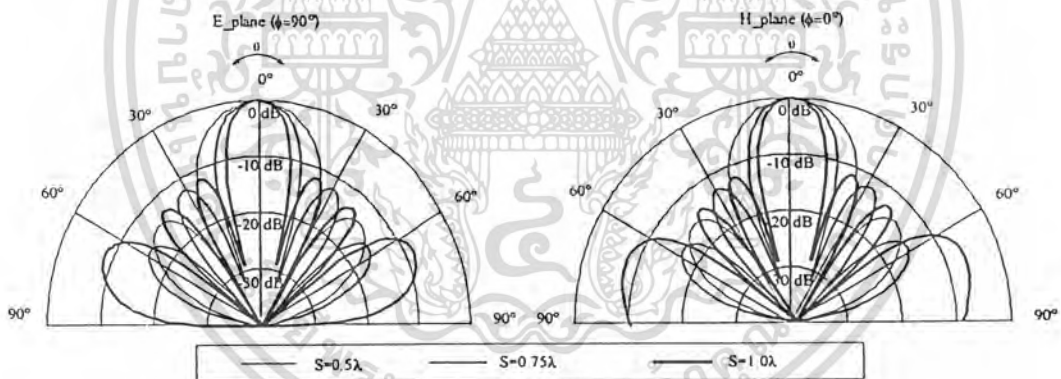
ประกอบ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



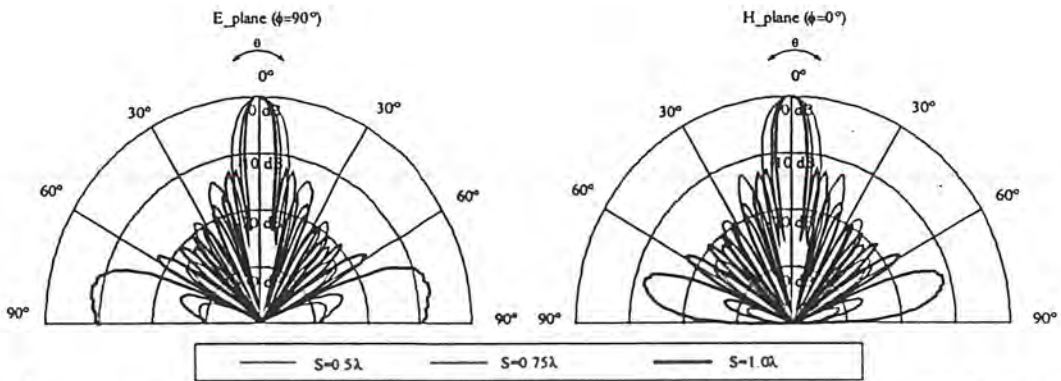
รูปที่ 3.113 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศจำนวน 9 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบ โดย S คือระยะระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.114 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศจำนวน 4 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบ โดย S คือระยะระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.115 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อนำสายอากาศจำนวน 9 องค์ประกอบ มาต่อเรียงแบบระนาบ โดย S คือระยะระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

จากรูปที่ได้มาจากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อนำสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมาจัดเรียงแบบเชิงระนาบ จะสรุปได้ว่าในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะการเปลี่ยนแปลงของความกว้างของลำคลื่นเมื่อจำนวนขององค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนขององค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มจะทำให้ลำคลื่นหลักแคบลงและเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างอีกด้วย ลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีจำนวนมากขึ้นเมื่อองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น

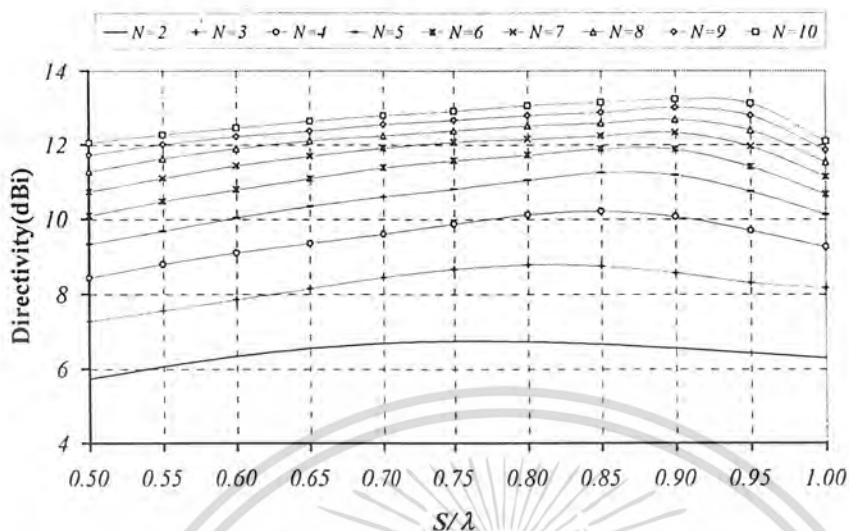
3.9.2 การวิเคราะห์ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

การพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการนำสายอากาศมาจัดเรียงแบบเชิงระนาบคล้ายกับการพิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศองค์ประกอบเดียวคือเป็นการพิจารณาว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่างๆมากน้อยแค่ไหน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของการจัดเรียงแบบแถวเชิงระนาบในขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ ในที่นี้ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบสายอากาศ คือ S และ N คือจำนวนของสายอากาศที่นำมาจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้น การวิเคราะห์จะวิเคราะห์ค่าเจาะจงสภาพทิศทางที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ $0.5\lambda - 1\lambda$ จำนวนสายอากาศมีตั้งแต่จัดเรียง 2 องค์ประกอบจนถึงการจัดเรียง 10 องค์ประกอบ และสามารถทำการเลือกระยะที่เหมาะสมที่มีค่าเจาะจงสภาพทิศทางสูง การวิเคราะห์ค่าเจาะจงทิศทางจะทำการวิเคราะห์ตามกรณีการแผ่กระจายคลื่นบริเวณช่องปากเปิดของสายอากาศซึ่งจะแบ่งได้ 4 กรณี ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

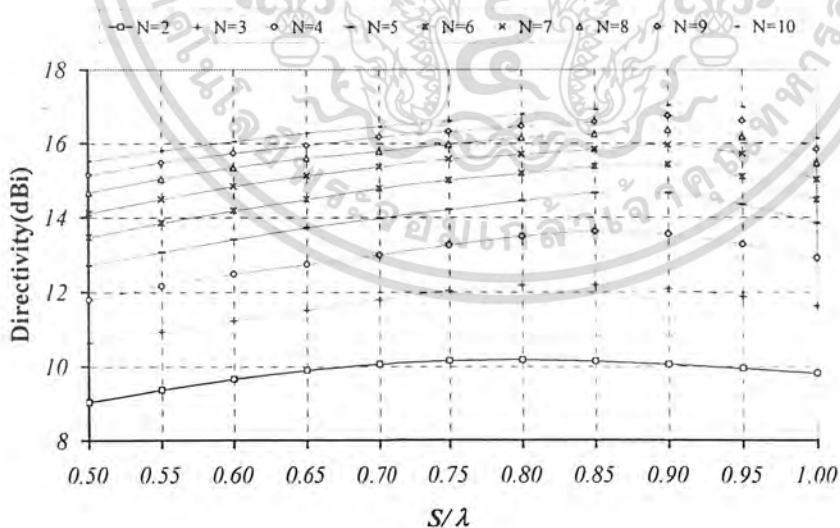
(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.116 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)

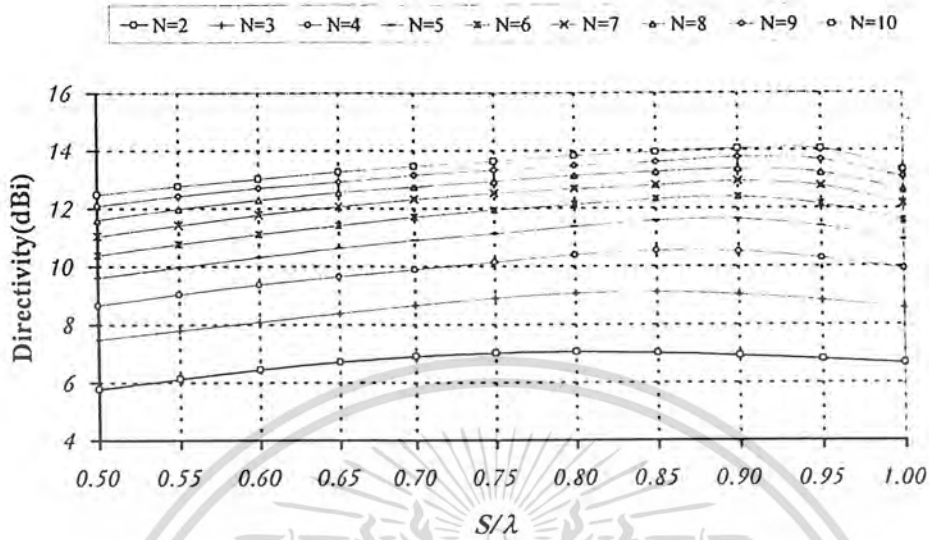


รูปที่ 3.117 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

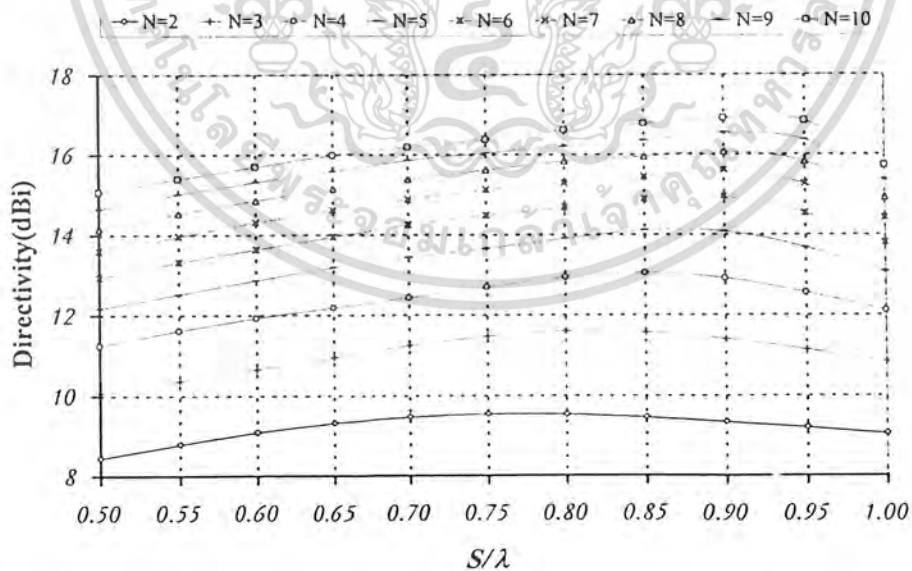
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.118 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ ในส่วนของ โหมด TE_{10}

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.119 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่าง

อิสระในส่วนของ โหมด TE_{10}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปของค่าสภาพเจาะจงทิศทางทั้ง 4 กรณีสรุปได้ว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงที่ระยะห่างเท่ากับ 0.95λ ซึ่งแนวโน้มของค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง

จากรูปจะพบว่าจำนวนของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ทั้ง 4 กรณีจะพบว่าองค์ประกอบของสายอากาศมีจำนวนมากขึ้นจะทำให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงกว่าองค์ประกอบของสายอากาศที่มีจำนวนน้อยกว่า

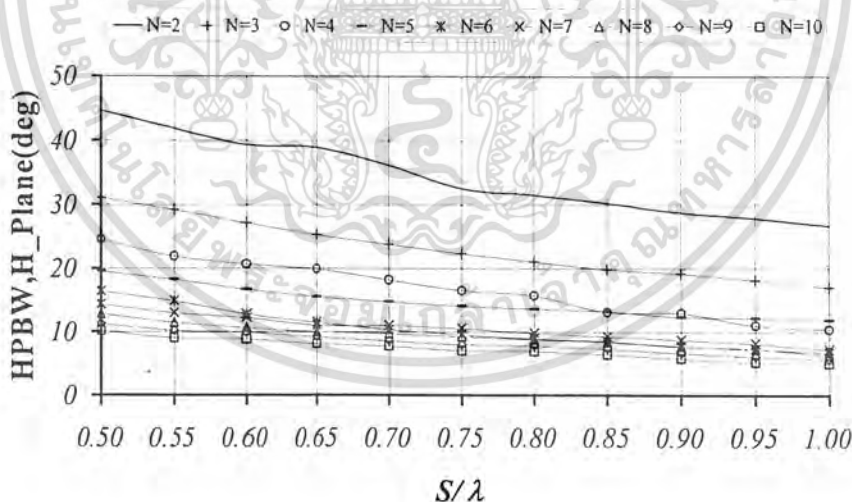
การเลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศไม่ควรเกิน 0.95λ เพราะเมื่อระยะห่างมากกว่านี้จะทำให้ค่าเจาะจงสภาพทิศทางลดลง ส่วนจำนวนสายอากาศที่จะนำมาวางเรียงกันนั้นขึ้นอยู่กับว่าผู้สร้างต้องการค่าเจาะจงทิศทางแรงแค่ไหน แต่ไม่ควรพิจารณาพร้อมกับค่าพารามิเตอร์อื่นด้วย

3.9.3 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width)

โดยการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบโดยเริ่มตั้งแต่ $0.5\lambda - 1\lambda$ จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่งคือความต้องการที่จะนำสายอากาศไปใช้งานบริเวณใดๆ ต้องการลำคลื่นแคบหรือกว้าง

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)

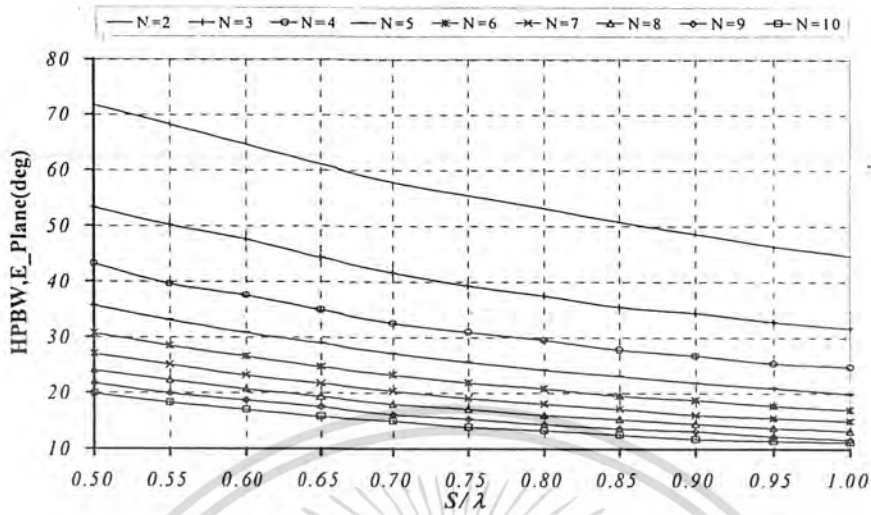


รูปที่ 3.120 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามแม่เหล็ก

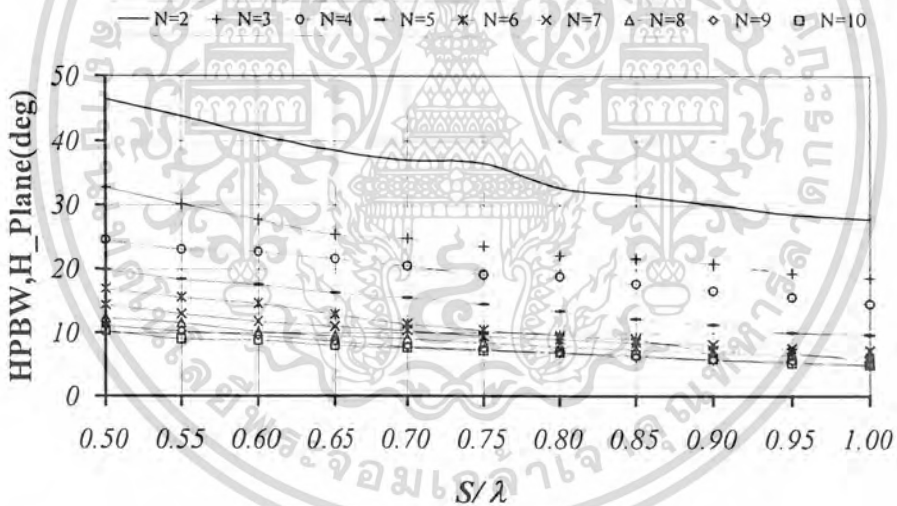
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.121 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามไฟฟ้า

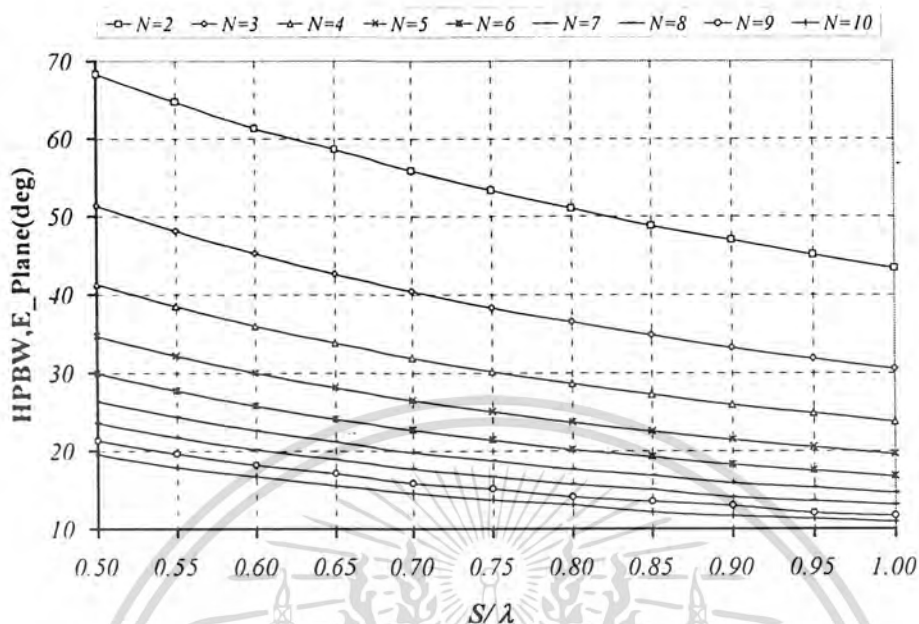


รูปที่ 3.122 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามแม่เหล็ก

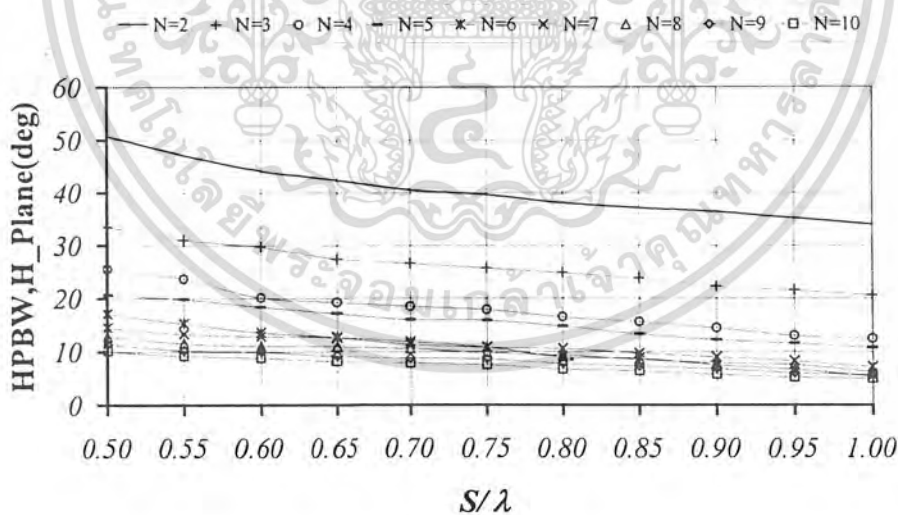
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

(TE₁₀-Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.123 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ ในส่วนของ โหมด TE₁₀ ในระนาบสนามไฟฟ้า

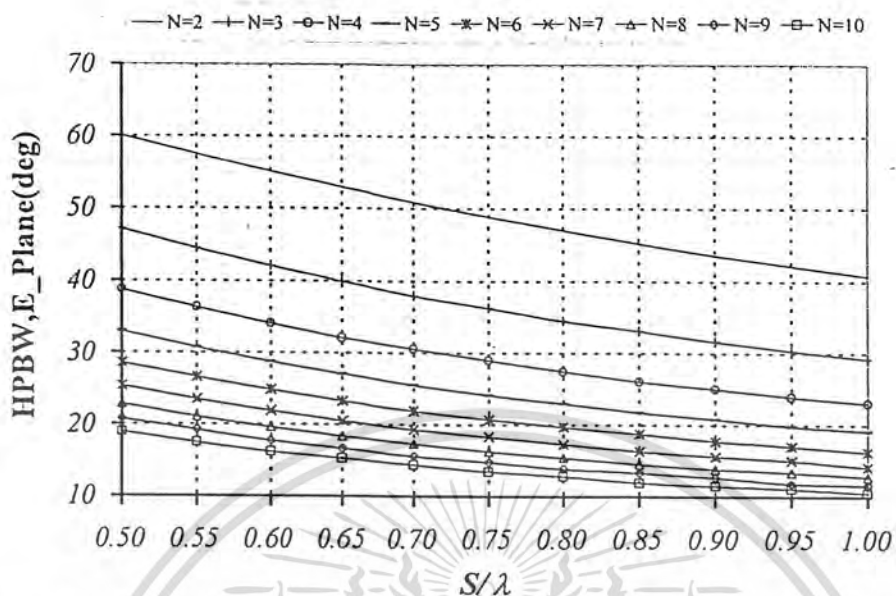


รูปที่ 3.124 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ ในส่วนของ โหมด TE₁₀ ในระนาบสนามแม่เหล็ก

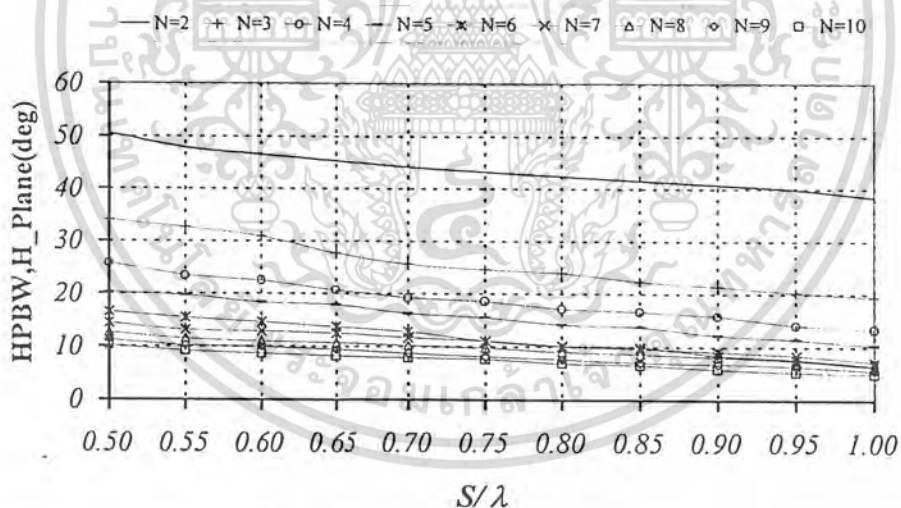
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.125 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.126 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมาครึ่งหนึ่ง (Half Power Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้วิเคราะห์ค่าความกว้างของลำคลื่น จะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีค่าเพิ่มขึ้นค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

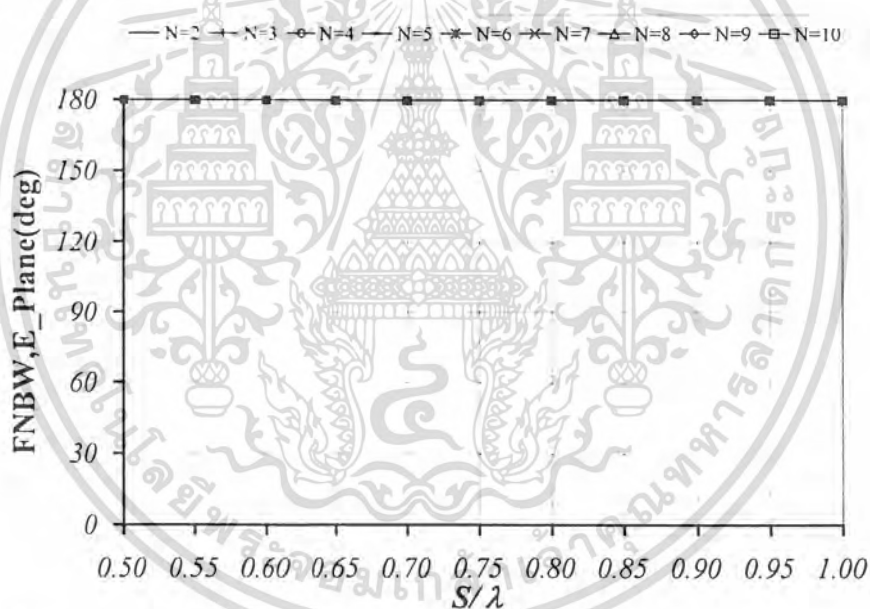
ครึ่งหนึ่งก็จะลดลง ที่ระนาบสนามแม่เหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลด ครึ่งหนึ่งมีค่าลดลงตามระยะห่างของสายอากาศที่ห่างมากขึ้น กล่าวคือลำคลื่นหลักจะแคบลงเมื่อระยะระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.9.4 การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width)

การวิเคราะห์ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรกเป็นการวิเคราะห์ว่าเกิดลำคลื่นด้านข้างหรือไหม่มาอย่างน้อยเพียงใด ในการออกแบบสายอากาศผู้สร้างไม่ต้องการที่จะให้เกิดลำคลื่นด้านข้างเพราะลำคลื่นด้านข้างอาจรบกวนลำคลื่นหลัก

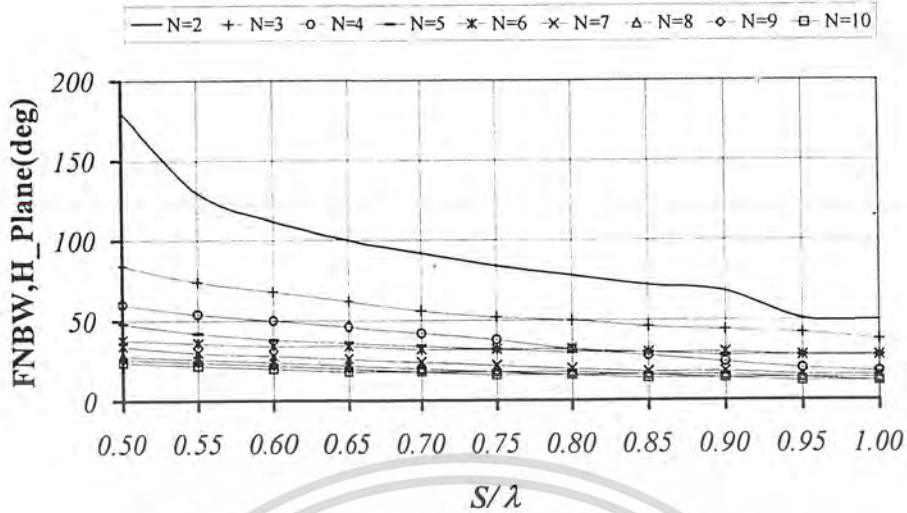
การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.127 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามแม่เหล็ก

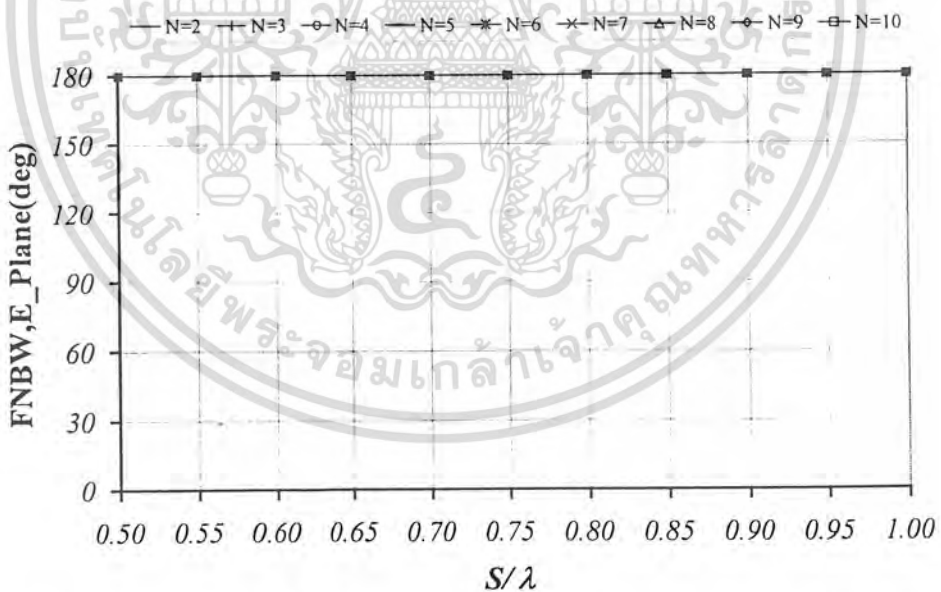
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.128 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามแม่เหล็ก

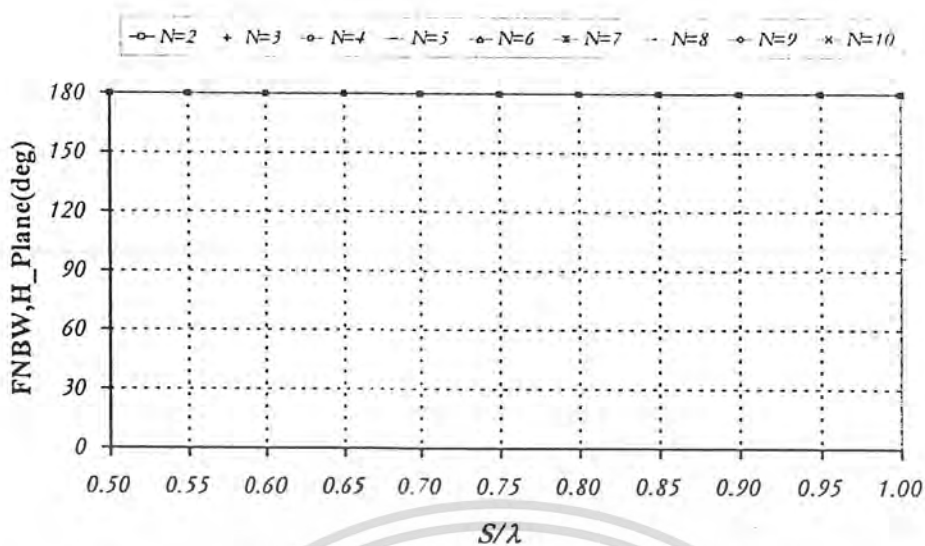
การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



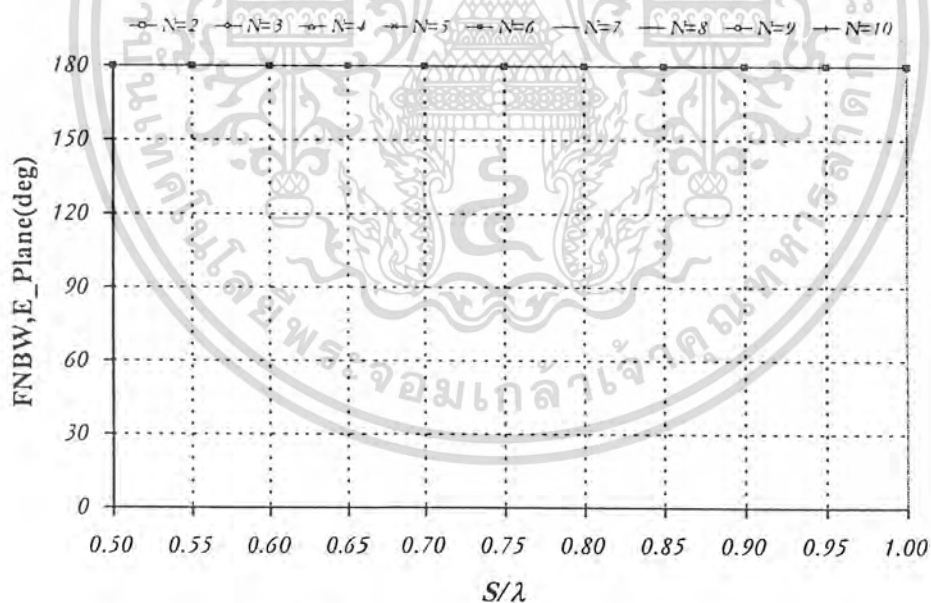
รูปที่ 3.129 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



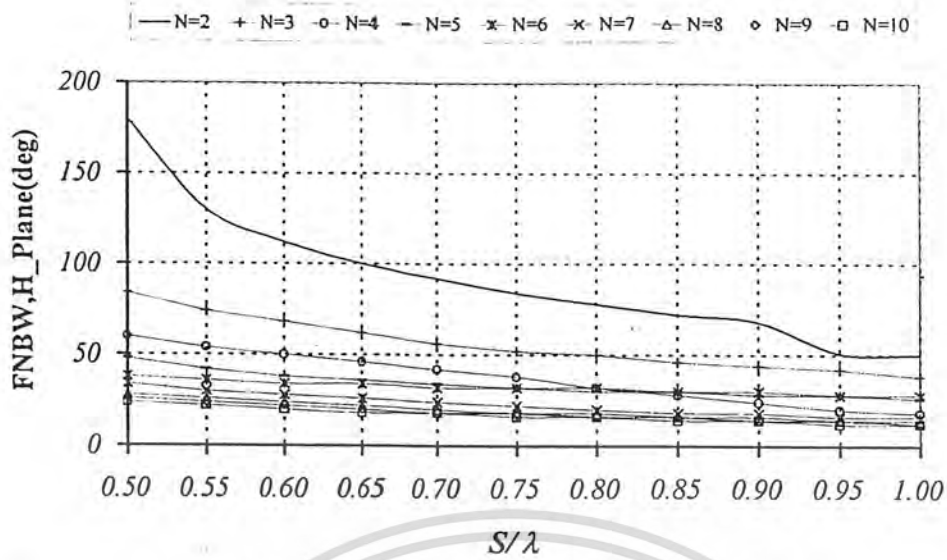
รูปที่ 3.130 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามแม่เหล็ก

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ
(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



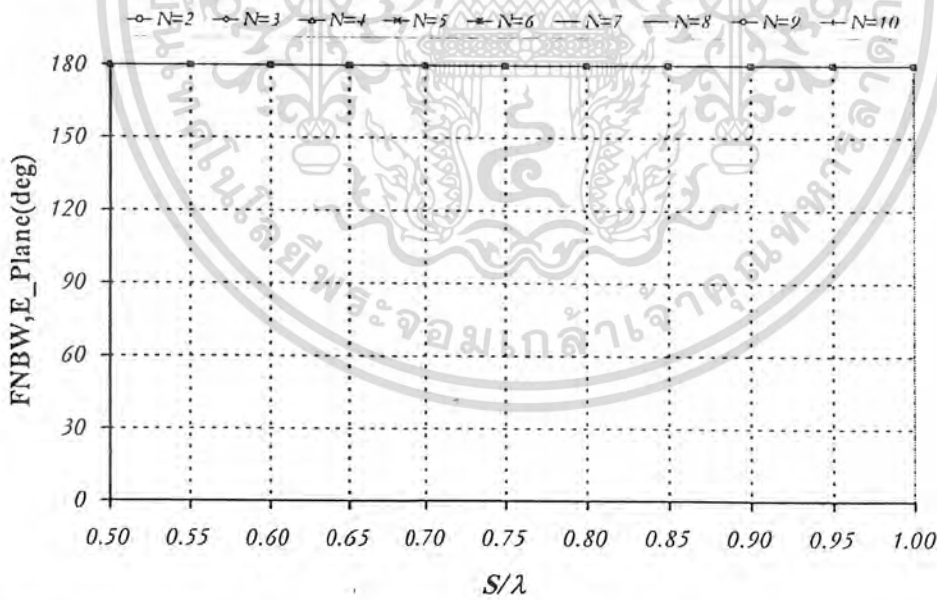
รูปที่ 3.131 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของ โหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



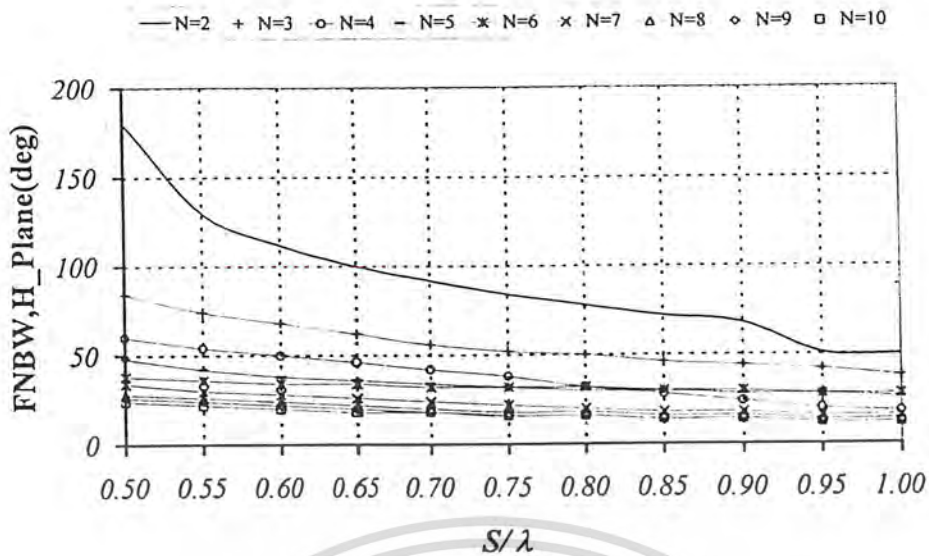
รูปที่ 3.132 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) กรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบคว้านำในส่วนของโหมด TE₁₀ ในระนาบสนามแม่เหล็ก

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ (TE₁₀-Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.133 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE₁₀ ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.134 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์ครั้งแรก (First Null Beam Width) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE₁₀ ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ทำการวิเคราะห์ทั้ง 4 กรณีจะเห็นว่าที่ระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงคือค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์แรกมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น กล่าวคือเมื่อค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์แรกมีค่ามากก็จะเกิดลำคลื่นด้านข้างแต่ก็น้อยแต่กรณีที่ ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์แรกมีค่าน้อยจะทำให้เกิดลำคลื่นด้านข้างมาก

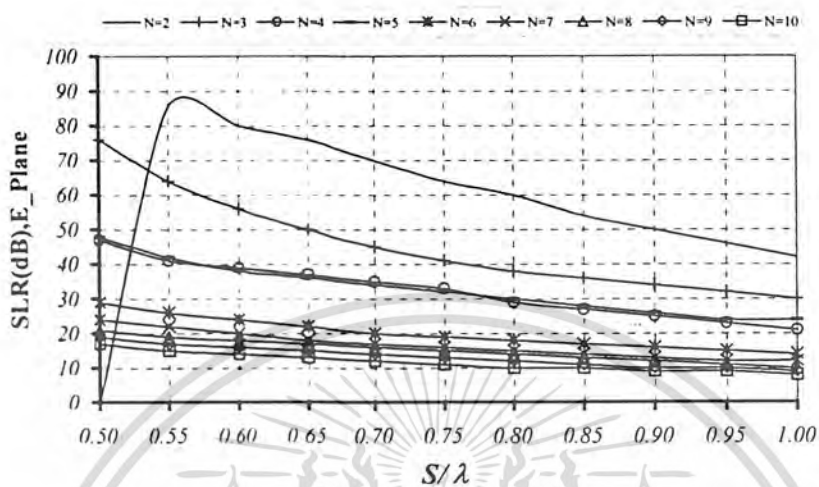
ดังนั้นในการออกแบบจึงหลีกเลี่ยงระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ทำให้เกิดค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเท่ากับศูนย์แรกที่มีค่าน้อยๆ แต่ก็ต้องพิจารณาควบคู่กับพารามิเตอร์อื่นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

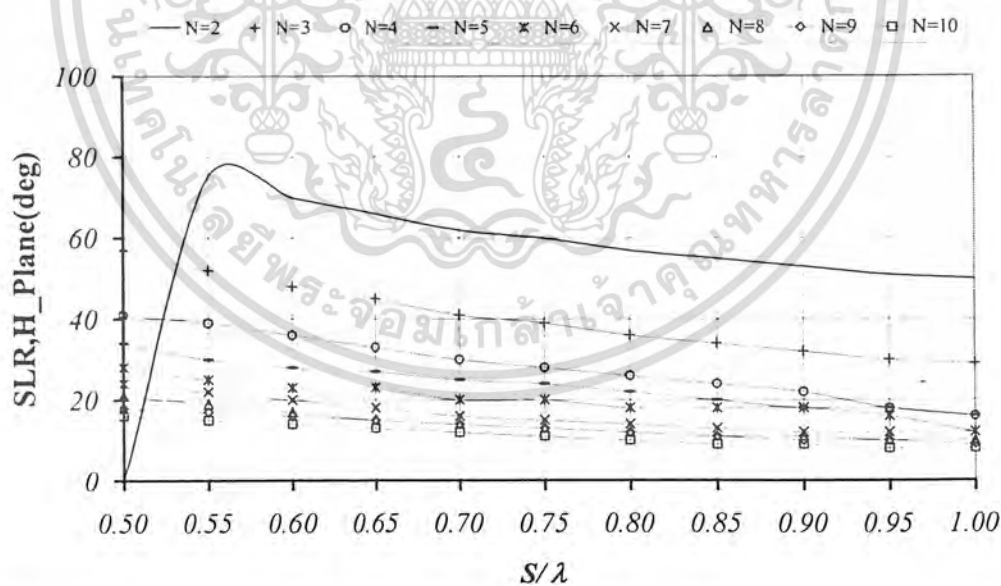
3.9.6 การวิเคราะห์ค่าลอคัลหลักต่อลอคัลน้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio)

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นตัวนำ

(Uniform Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.135 ค่าลอคัลหลักต่อลอคัลน้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามไฟฟ้า

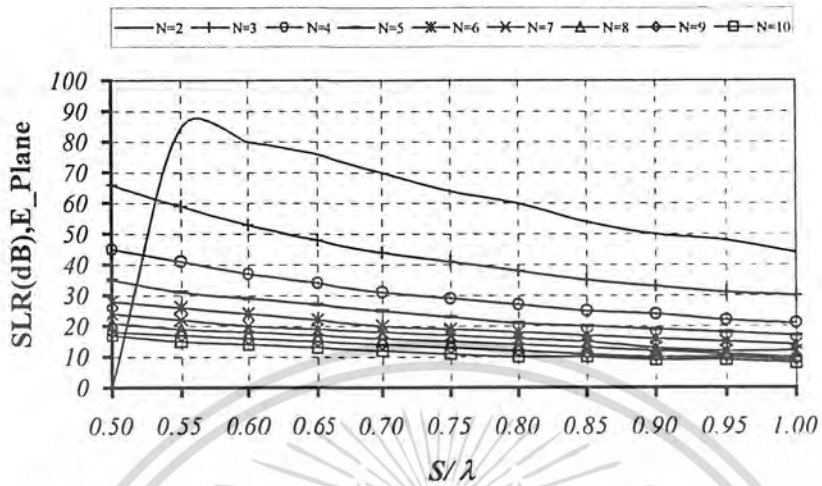


รูปที่ 3.136 ค่าลอคัลหลักต่อลอคัลน้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในระนาบสนามแม่เหล็ก

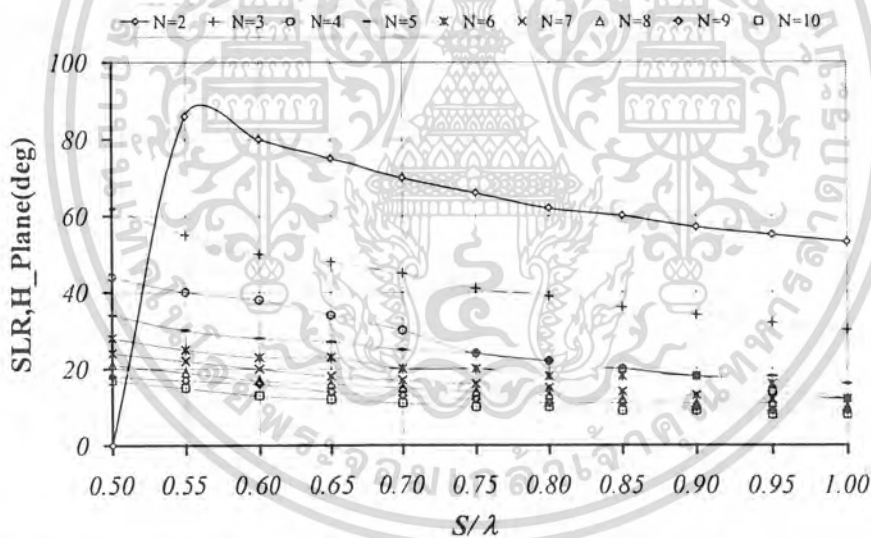
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(Uniform Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.137 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามไฟฟ้า

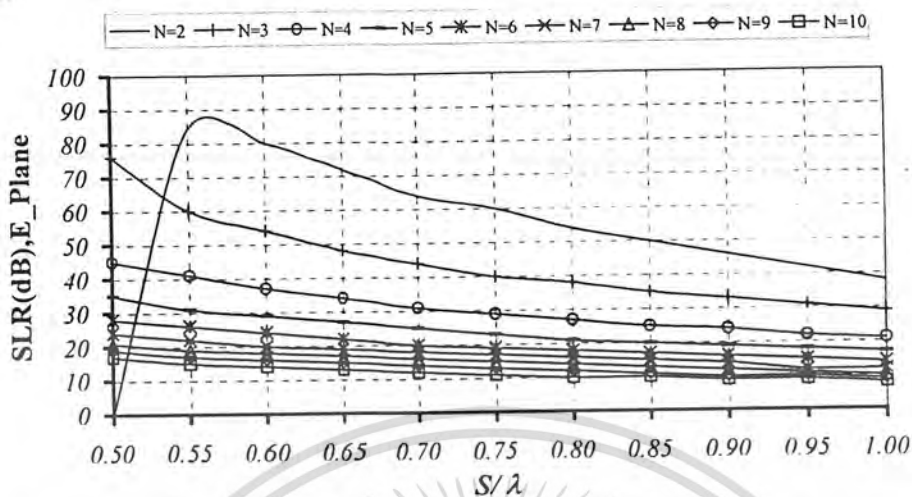


รูปที่ 3.138 ค่าลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระในระนาบสนามแม่เหล็ก

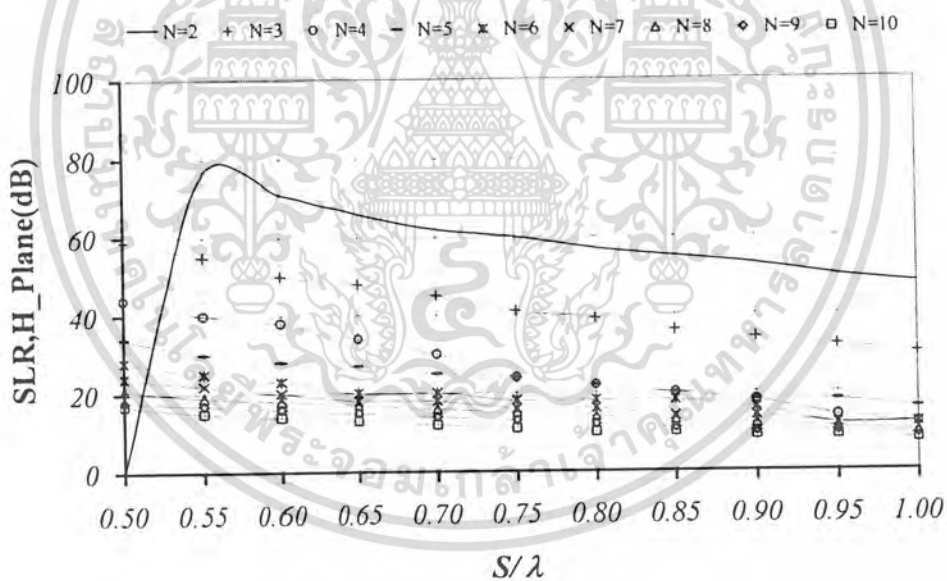
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution on Ground Plane)



รูปที่ 3.139 ค่าลอคัลลิ้นหลักต่อลอคัลลิ้นข้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า

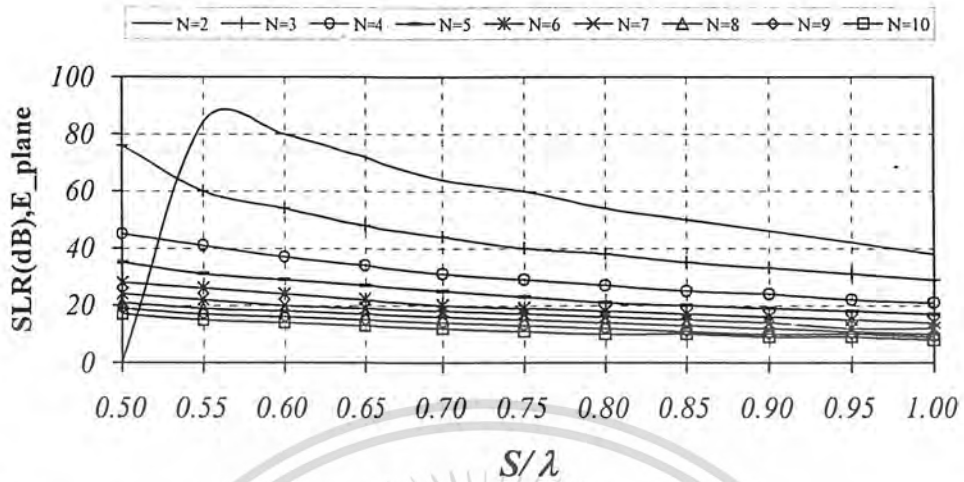


รูปที่ 3.140 ค่าลอคัลลิ้นหลักต่อลอคัลลิ้นข้อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

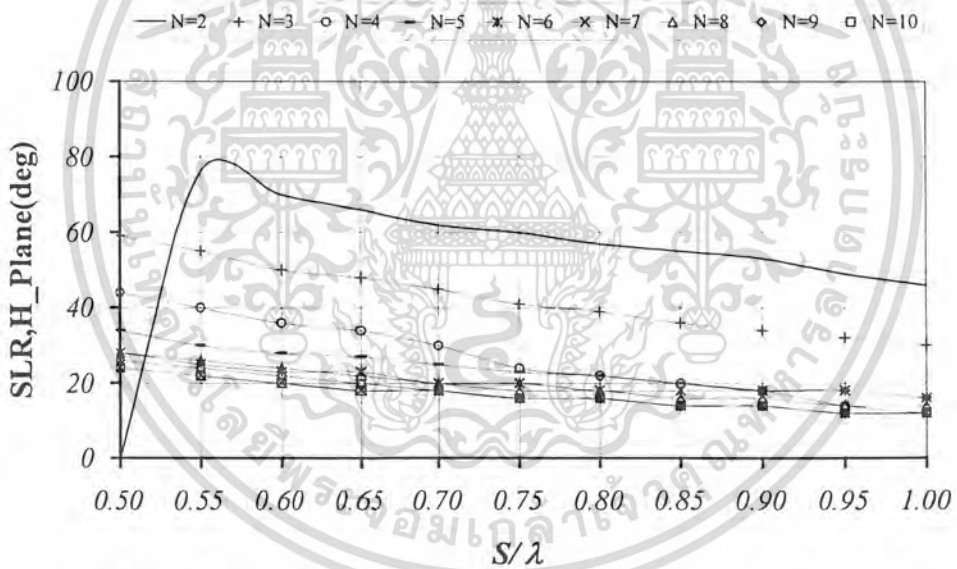
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

(TE_{10} -Mode Aperture Distribution in Free-Space)



รูปที่ 3.141 ค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.142 ค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio) ของกรณีการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศในช่องว่างอิสระในส่วนของโหมด TE_{10} ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ได้จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กโดยค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นย่อยด้านข้างจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนระนาบสนามแม่เหล็กจะไม่เปลี่ยนแปลงและไม่เกิดลาคลื่นด้านข้างด้วย สรุปได้ว่าถ้าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นย่อยด้านข้างมีค่ามากแสดงว่าเกิดลาคลื่นด้านข้างน้อยและค่าลาคลื่นหลักต่อลาคลื่นด้านข้างมีค่าน้อยกว่าคือแสดงว่ามีลาคลื่นด้านเกิดขึ้นใกล้เคียงกับลาคลื่นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือมีเงื่อนไขการใช้งานอื่นใด มิใช่ผู้จัดทำหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 การออกแบบ และการสร้างสายอากาศ

จากบทที่ 2 และ บทที่ 3 กล่าวถึงคุณสมบัติต่างรวมถึงการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหลี่ยมผืนผ้าช่องปากเปิดด้านเดียวซึ่งในการออกแบบสายอากาศที่เหลี่ยมผืนผ้าช่องปากเปิดด้านเดียวที่ความถี่ใช้งาน 12.6575 GHz มีความยาวคลื่นเท่ากับ 0.024 เมตร ใช้โหมด TE₁₀ เป็นโหมดหลักในการส่งผ่านคลื่นสัญญาณภายในตัวสายอากาศ การพิจารณาหาความยาวด้านกว้าง (a) และความยาวด้านสูง (b) ในกรณีของสายอากาศที่เหลี่ยมผืนผ้าช่องปากเปิดด้านเดียวมีเงื่อนไขคือ a=2b โดยมีหลักการพิจารณาดังนี้

- 1). เพื่อให้คลื่นเดินทางได้ในสายอากาศ ซึ่งขนาดความยาวด้านกว้าง (a) ที่น้อยที่สุดที่คลื่นเดินทางได้ มีเงื่อนไขคือ

$$\lambda < \lambda_{c10}$$

จากสมการที่ 2.40 จะได้ว่า

$$\lambda_{c10} = 2a \text{ ดังนั้น } \lambda < 2a \text{ หรือ } a > \frac{\lambda}{2}$$

- 2). เพื่อป้องกันการเกิดโหมดอันดับสูง จะต้องมีขนาดความยาวด้านกว้าง (a) ที่กว้างที่สุดในโหมด TE₁₀ ที่คลื่นเดินทางได้โดยไม่เกิด โหมดอันดับสูง มีเงื่อนไขคือ

$$\lambda > \lambda_c \text{ ของโหมดอันดับสูง}$$

โดยโหมดอันดับสูงที่จะเกิดขึ้นจะเป็นโหมด TE₁₀ และ TE₀₁ ดังนั้น

$$\lambda = \lambda_{c20} \cdot \lambda_{c01}$$

$$\text{เมื่อ } \lambda_{c20} = a, \quad \lambda_{c01} = 2b$$

จากเงื่อนไขของทั้งสองกรณีจะได้ว่า

$$\lambda_c \text{ ของโหมดอันดับสูง} < \lambda < \lambda_c \text{ ของ TE}_{10}$$

ดังนั้นขนาดของความยาวด้านกว้าง (a) จะอยู่ในช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4).เลือกขนาดของความยาวด้านกว้าง (a) ของสายอากาศที่จะสร้างคือ

a=0.015 เมตร หรือ 0.625 λ

b=0.0075 เมตร หรือ 0.3125 λ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

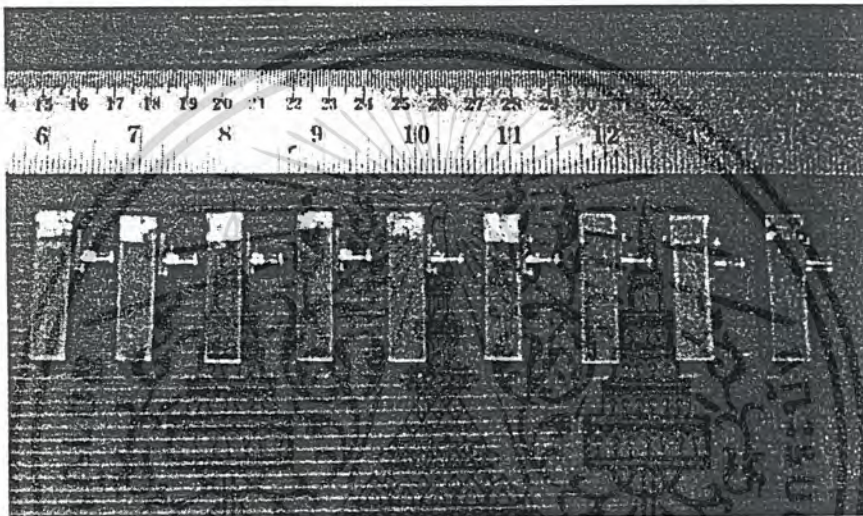
การทดลองใน โครงงานนี้จะทำการทดลองการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบท่อนำคลื่น
เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดด้านเดียว โดยจะทำการวัดค่าและทดสอบคุณสมบัติของพารามิเตอร์ต่างๆ คือ

อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)

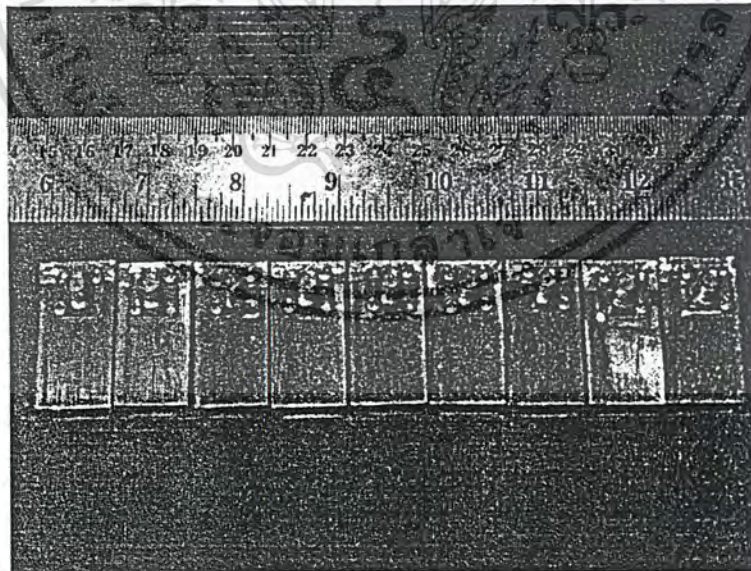
อิมพีแดนซ์ (Impedance)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

4.1 สายอากาศของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดด้านเดียว



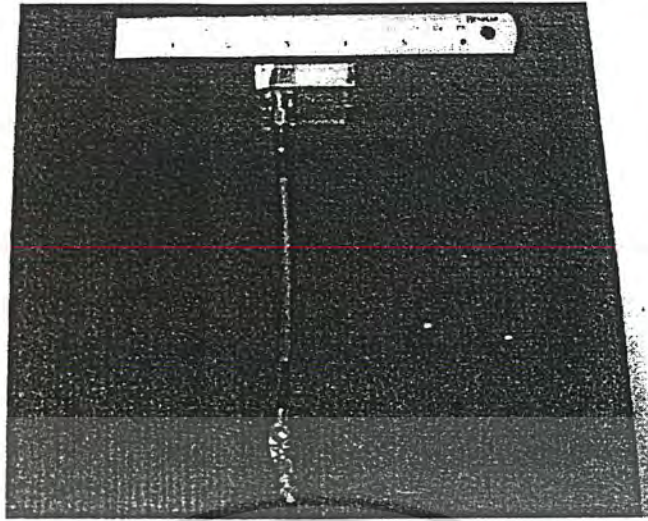
(ก)



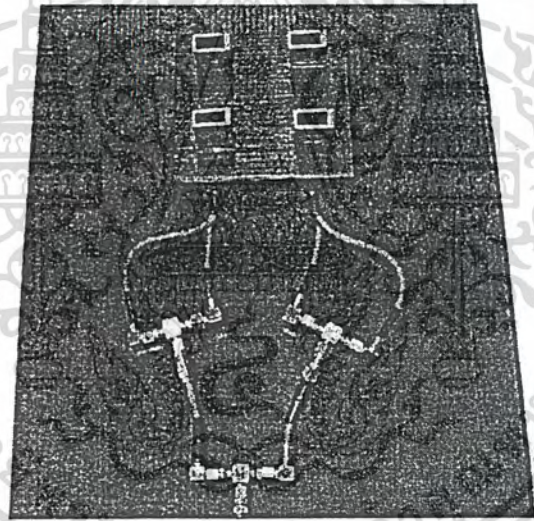
(ข)

รูปที่ 4.1 ภาพสายอากาศของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดด้านเดียวที่สร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

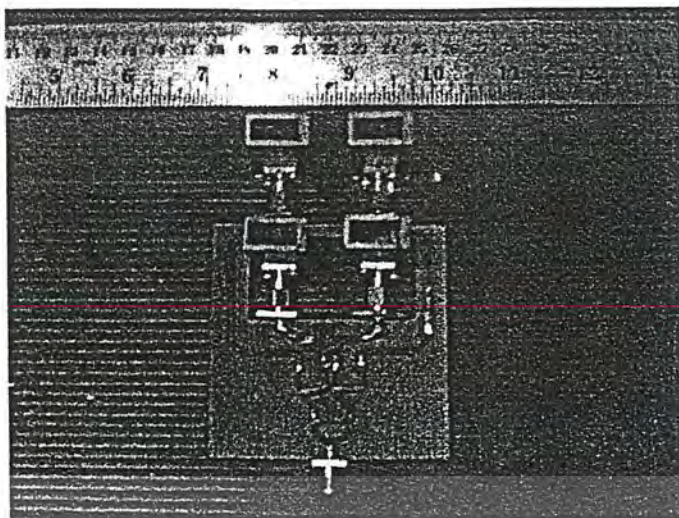


รูปที่ 4.2 ภาพสายอากาศที่นำมาเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.3 สายอากาศที่นำมาเรียงแบบเชิงระนาบ 2*2 โดยใช้สายเป็นตัวแบ่งกำลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สายอากาศที่นำมาเรียงแบบเชิงระนาบ 2*2 โดยใช้ลวดวงจรเป็นตัวแบ่งกำลังงาน

4.2 การวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) เนื่องจากในทางปฏิบัติจริง ๆ นั้น สายอากาศของเราจะไม่สามารถที่จะปรับให้มีค่าอิมพีแดนซ์ (ค่าอิมพีแดนซ์ที่วัดได้จากขั้วของสายอากาศ) ได้เท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของเครื่องรับหรือเครื่องส่งได้ ดังนั้นเมื่อมีการต่อสายอากาศเข้ากับเครื่องรับหรือเครื่องส่ง ผลก็จะทำให้กำลังงานส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับที่จุดอินพุตของสายอากาศ ดังนั้นเพื่อเป็นการบ่งบอกแก่ผู้นำสายอากาศไปใช้งานว่าสายอากาศตัวนี้หากนำไปใช้งานแล้วจะสามารถรับกำลังงานที่ส่งมาจากเครื่องส่งได้มากน้อยเพียงใดจะสามารถบอกได้ด้วยค่า ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR)

4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. Network Analyzer
2. ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดด้านเดียว
3. N-type 50 Ω Calibration Kit
4. เครื่อง Plotter

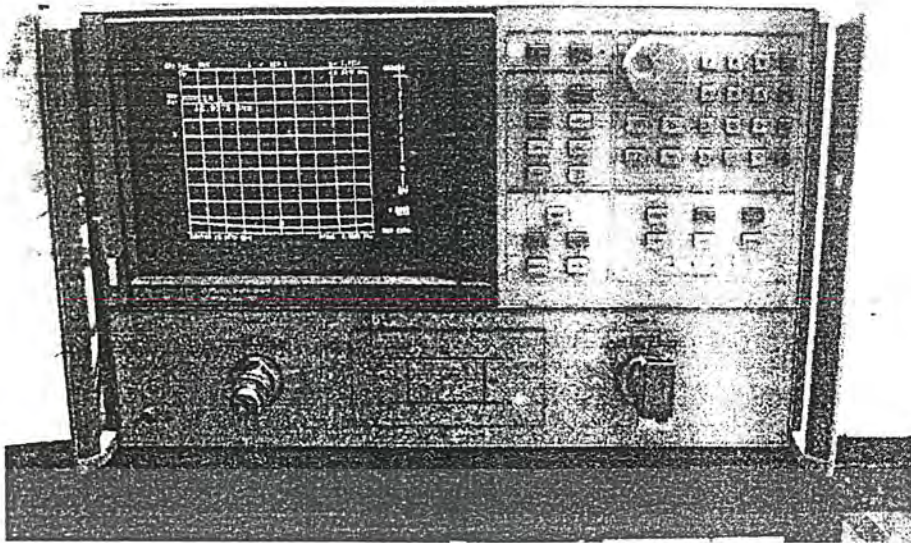
4.2.2 ลำดับขั้นตอนการวัด

1. ทำการปรับสถานะเครื่อง Network Analyzer เป็นแบบ two port (S 22)
2. กดปุ่ม START ป้อนความถี่เริ่มต้น ตามหน่วยของความถี่
3. กดปุ่ม STOP ป้อนความถี่สุดท้าย ตามด้วยหน่วยของความถี่
4. กดปุ่ม MKR (marker)
 - 4.1 ให้ MARKER 1 อยู่ที่ความถี่เริ่มต้น (3 GHz)
 - 4.2 ให้ MARKER 2 อยู่ที่ความถี่ใช้งาน (12.6575 GHz)
 - 4.3 ให้ MARKER 3 อยู่ที่ความถี่สิ้นสุด (5 GHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

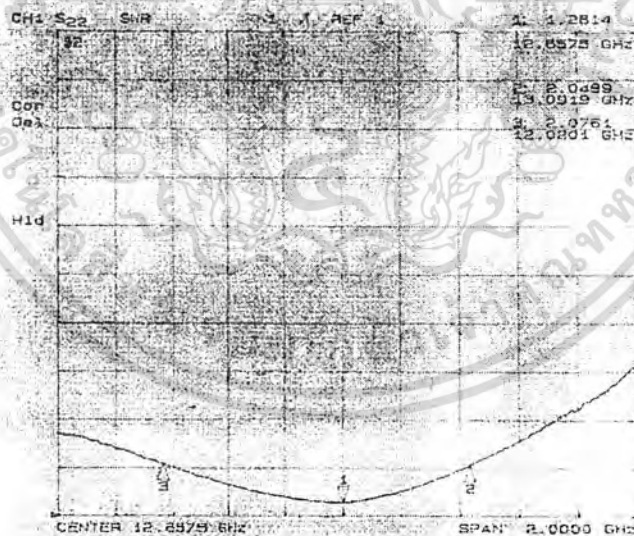
5. กดปุ่ม CAL (calibration) เลือกที่ S 22 เป็นการทำการ calibrate เครื่องโดยจะขึ้นข้อความ OPEN, SHORT, LOAD
6. นำตัว calibrator แบบ OPEN มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม OPEN แล้วทำการถอดตัว calibrator
7. นำค่า calibrator แบบ short มาต่อกับสายนำสัญญาณแล้วกดปุ่ม short แล้วทำการถอดตัว calibrator ออก
8. นำตัว calibrator แบบ Broadband Load มาต่อเข้ากับสายนำสัญญาณ แล้วกดปุ่ม Broadband แล้วกด Done Load สองครั้ง ทางจอภาพจะแสดงตัวหนังสือ " Cor" (calibration) แล้วทำการถอดตัว Load ออก
9. ทำการกดปุ่ม Format จะมีเมนูให้เลือก ทำการเลือกที่ Smith Chart
10. นำตัว calibrator แบบ short มาต่อเข้ากับสายนำสัญญาณอีกครั้งหนึ่งเพื่อทำการปรับสเกลอ้างอิงโดยทำการปรับที่ electrical delay เลื่อนไปที่ตำแหน่งของลูกศรไปที่ตำแหน่งขวามือสุดของ Smith Chart
11. ขั้นตอนที่ 1-10 เป็นขั้นตอนการ calibration เครื่อง
12. นำท่อนำคลื่นปลายเปิด 1 ด้านมาทำการต่อเข้ากับเครื่อง Network Analyzer
13. กดปุ่ม Format เครื่องจะแสดงค่า LOG MAG, และ SMITH CHART, SWR, PHASE และ DELAY
14. เลือกที่ SWR เครื่องจะแสดงค่า SWR ของท่อนำคลื่นที่วัดออกมาได้ ถ้าค่าที่วัดได้ยังไม่เข้าใกล้ 1.00 ให้ทำการปรับแต่งความยาวของโพรบสายอากาศตัวกระตุ้น จนกว่าจะได้ค่า SWR ที่เข้าใกล้ 1.00 มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ หลังจากนั้นทำการกดปุ่ม COPY เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา
15. ทำการเลือกที่ LOG MAG, และ SMITH CHART แล้วทำการกดปุ่ม COPY เพื่อทำการพิมพ์รูปออกมา
16. ท่อนำคลื่นอีกอันทำตามขั้นตอนที่ 12-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



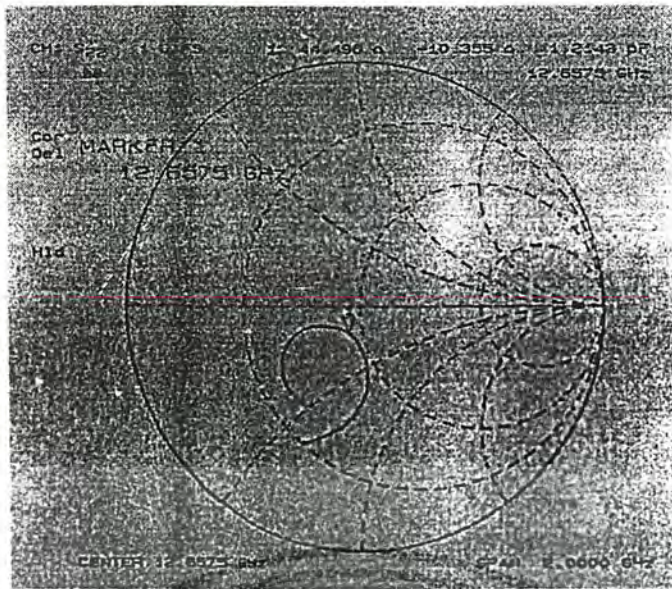
รูปที่ 4.5 การต่อสายอากาศที่จะทำการวัดค่าพารามิเตอร์เข้ากับ Network Analyzer

โดยทั่วไปแล้วค่า VSWR ที่สามารถนำมาใช้งานได้จะต้องไม่เกิน 2:1 แต่ถ้าเราจะนำไปใช้งานจริงๆ ต้องมีค่าไม่เกิน 1.5:1 และค่าอิมพีแดนซ์จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม ซึ่งเราอาจจะทำการปรับที่ค่าความยาวของโพรบ หรือทำการปรับตำแหน่งของแผ่นสะท้อนคลื่นเพื่อให้ค่า VSWR และ อิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด

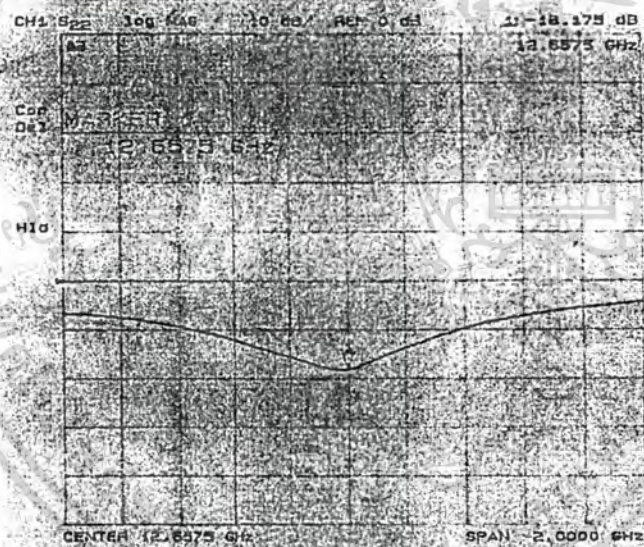


รูปที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่วัดได้จากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ค่าอิมพีแดนซ์วัดได้จากสายอากาศ



รูปที่ 4.8 ค่า Return Loss วัดได้จากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศ

สายอากาศ	VSWR	Return Loss (dB)	Impedance (Ω)	Band Windth (%)	Gain (dBi)
1	1.4432	-14.826	37.799-j2.2578	6.63	6.2
2	1.1764	-21.828	57.357-j4.6602	10.60	6.2
3	1.5922	-12.824	31.497-j2.1328	7.22	6.2
4	1.4868	-14.166	50.24-j20.008	9.24	6.2
5	1.2814	-18.175	44.496-j10.355	8.46	6.2
6	1.3530	-16.476	40.775-j10.135	7.62	6.2
7	1.1386	-23.765	44.361-j23.828	8.60	6.2
8	1.4283	-22.118	42.381-j6.486	7.54	6.2
9	1.5644	-18.925	40.882-j10.754	9.06	6.2
Array แกน x 2 องค์ประกอบ	1.8721	-10.151	45.357-j32.037	1.62	9.6
Array แกน y 2 องค์ประกอบ	1.784	-15.697	39.475-j11.34	1.76	9.6
Planar 2*2	1.2733	-18.289	39.311-j2.0117	2.99	12.3

จากตารางที่ 4.1 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศ ที่วัดได้จาก Network Analyzer ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว 9 ตัว สายอากาศวางเรียงแบบแถวลำดับตาม แกน x สายอากาศวางเรียงแบบแถวลำดับตามแกน y สายอากาศวางเรียงแบบระนาบ 2*2

4.3 การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)

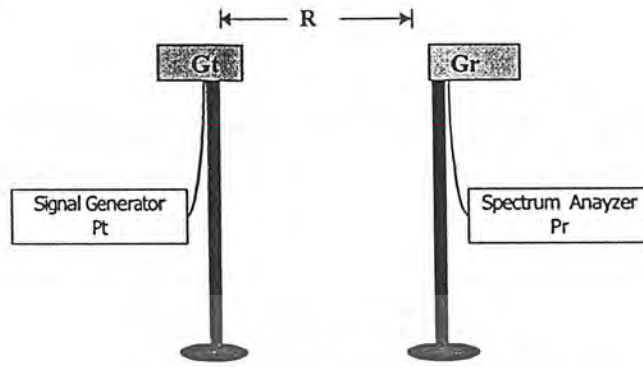
การวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern) จะทำการวัดการแพร่กระจายคลื่นทั้งระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก การวัดจะพิจารณาที่ระยะไกล (Far field) ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและตัวรับมีค่าเท่ากับ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{เมตร}$$

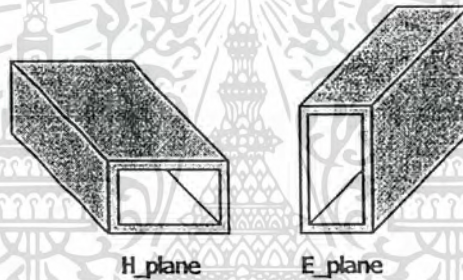
โดยที่ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ

ดังนั้นการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องมีระยะห่างคือ

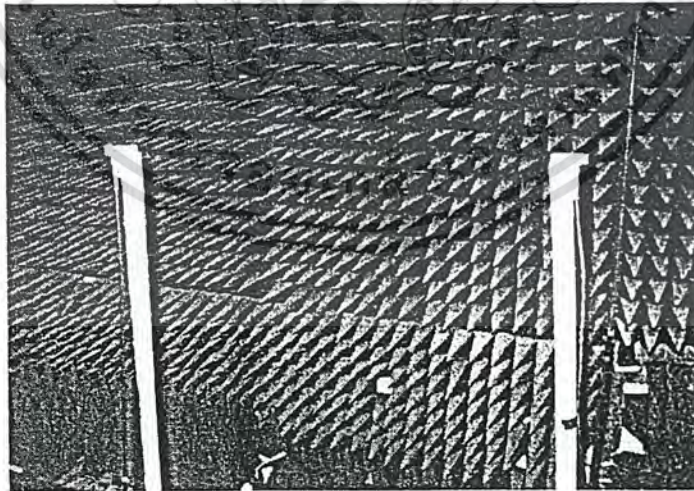
$$R \geq 0.0234 \text{ เมตร}$$



รูปที่ 4.9 ลักษณะการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

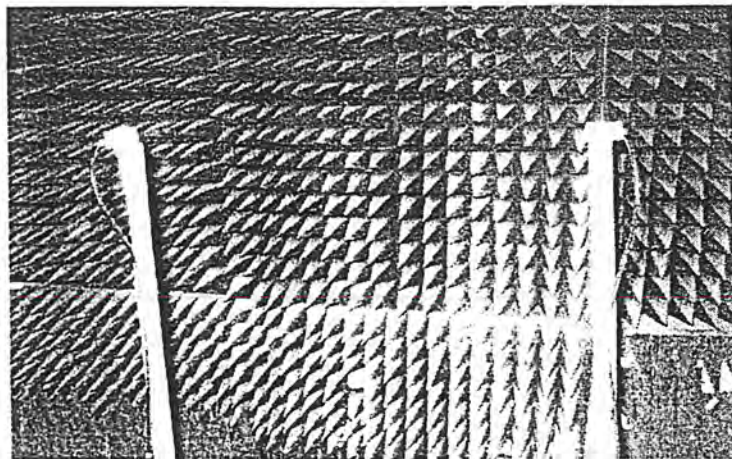


รูปที่ 4.10 ลักษณะการติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการวัดค่าระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.11 ภาพของสายอากาศขณะทำการวัดค่าของระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพของสายอากาศขณะทำการวัดค่าของระนาบสนามแม่เหล็ก

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

1. เครื่อง Network Analyzer
2. เครื่อง Signal Generator
3. สายนำสัญญาณ
4. ขาค้างสำหรับการติดตั้งสายอากาศ
5. เครื่อง Turn table ที่ใช้ในการหมุนสายอากาศรับ
6. สายอากาศแบบท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบปลายเปิดด้านเดียว

4.3.2 วิธีการวัด

1. เครื่อง Analyzer Spectrum ตั้งไว้ที่ความถี่ 12.6575 GHz
2. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศเข้ากับ Signal Generator เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณ
3. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศเข้ากับ Analyzer Spectrum เพื่อเป็นตัวรับสัญญาณซึ่งสายอากาศทั้งสองที่ใช้ในการทดลองต้องมีระยะห่างไม่น้อยกว่า

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

R คือระยะห่างของสายอากาศตัวส่งและตัวรับ

D คือมิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

4. ทำการหมุนสายอากาศตัวรับที่ติดตั้งบนเครื่อง Turn Table ไปจาก 0 องศาไปจนครบ 360 องศา แล้วทำการบันทึกค่าที่ได้จนครบ 360 องศา
5. ทำการเปลี่ยนระนาบการวัด
6. นำค่าที่วัดได้ของสายอากาศแต่ละค่ามาทำการ Normalize แล้วนำไปเขียนกราฟด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

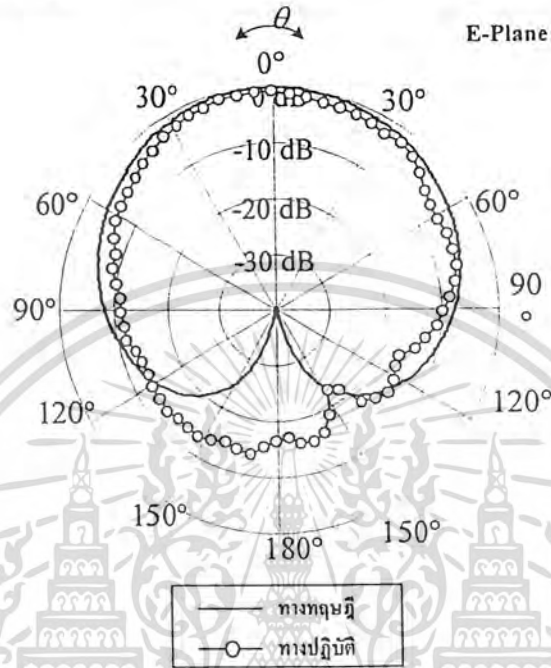
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

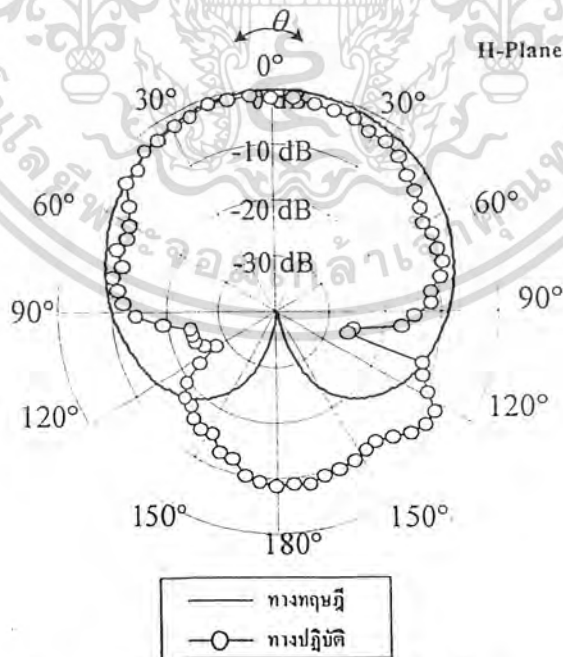
จะแสดงส่วนของการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในจากสายอากาศที่สร้างขึ้นมาเปรียบเทียบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการคำนวณ

4.3.3.1 แบบรูปการการแพร่กระจายออกของสายอากาศองค์ประกอบเดียว

สายอากาศตัวที่ 1



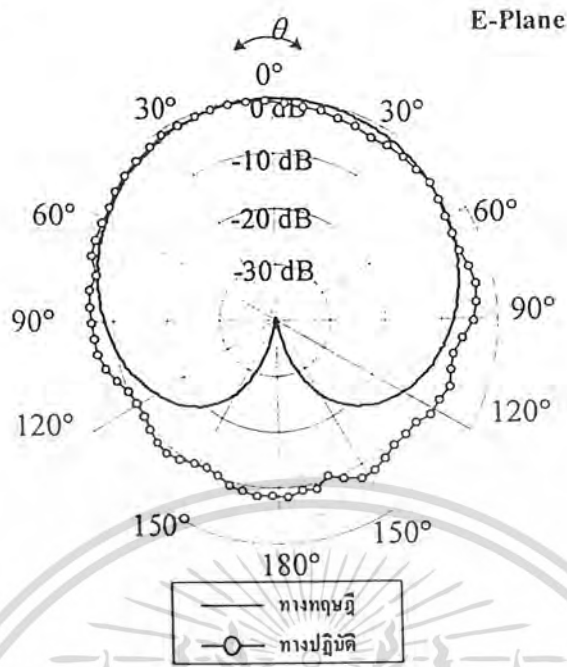
รูปที่ 4.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า



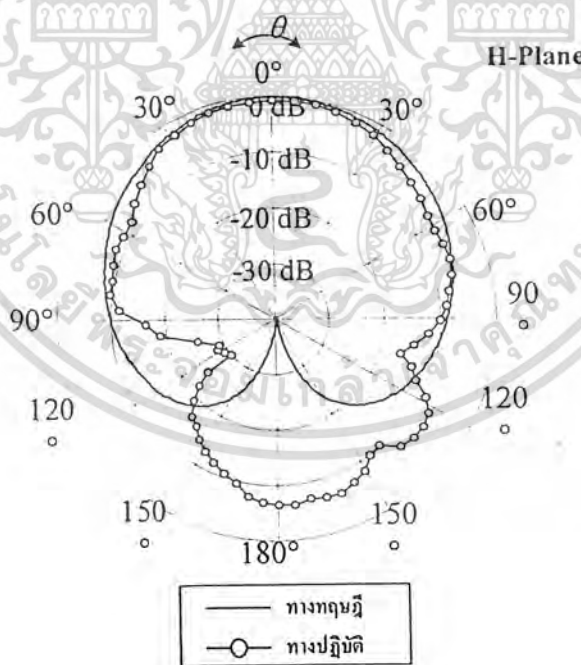
รูปที่ 4.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบ

เอกสารต้นฉบับไฟฟ้า ทฤษฎีไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวที่ 2



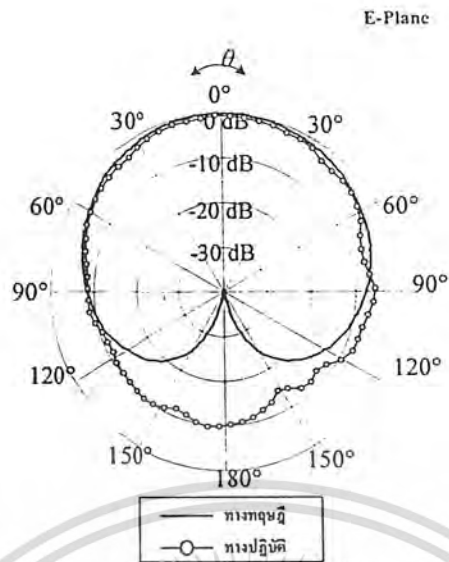
รูปที่ 4.15 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า



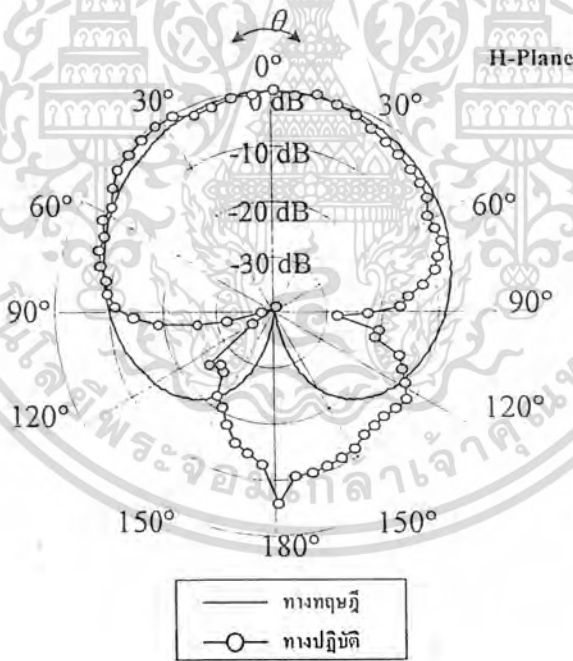
รูปที่ 4.16 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวที่ 3



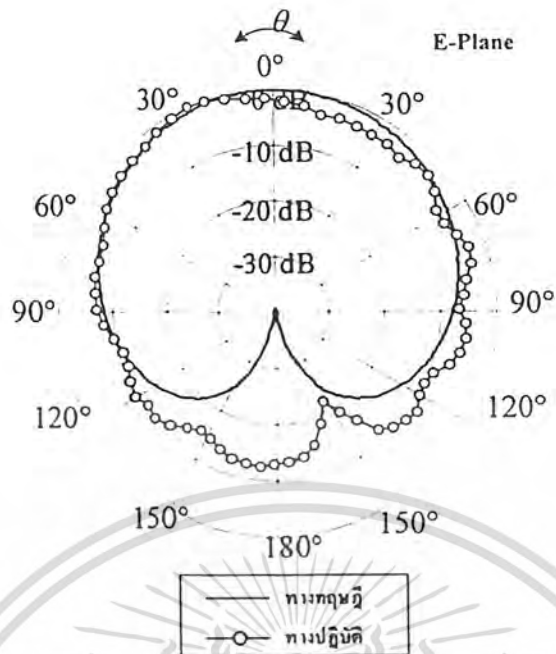
รูปที่ 4.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า



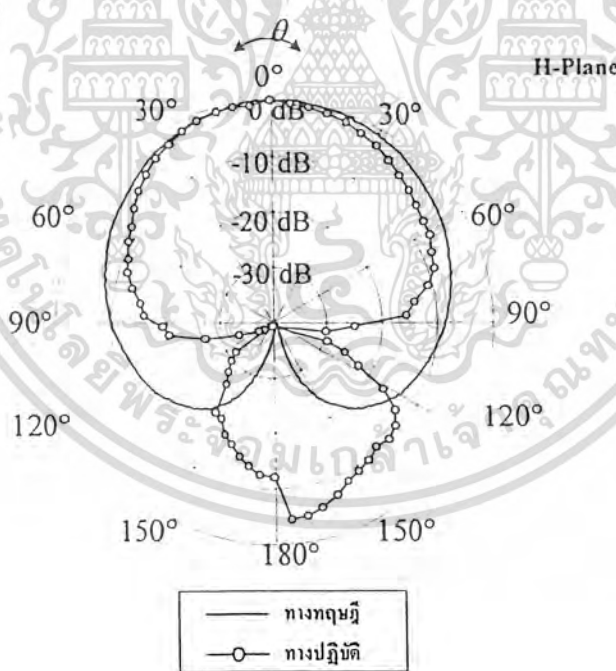
รูปที่ 4.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวที่ 4



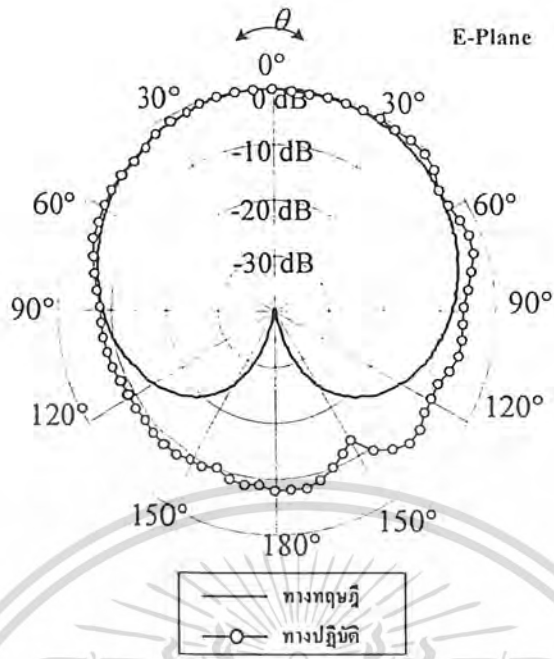
รูปที่ 4.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า



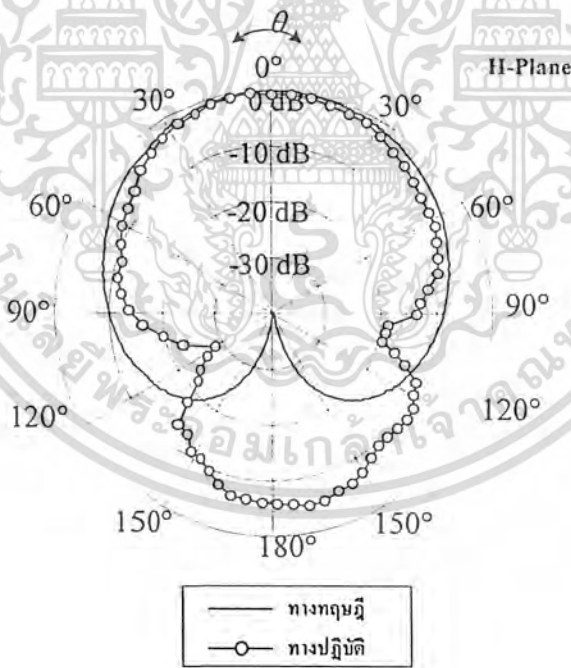
รูปที่ 4.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวที่ 5



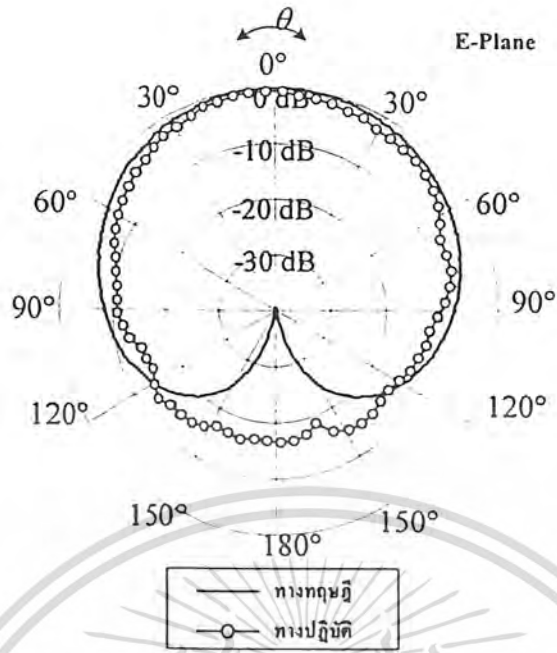
รูปที่ 4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า



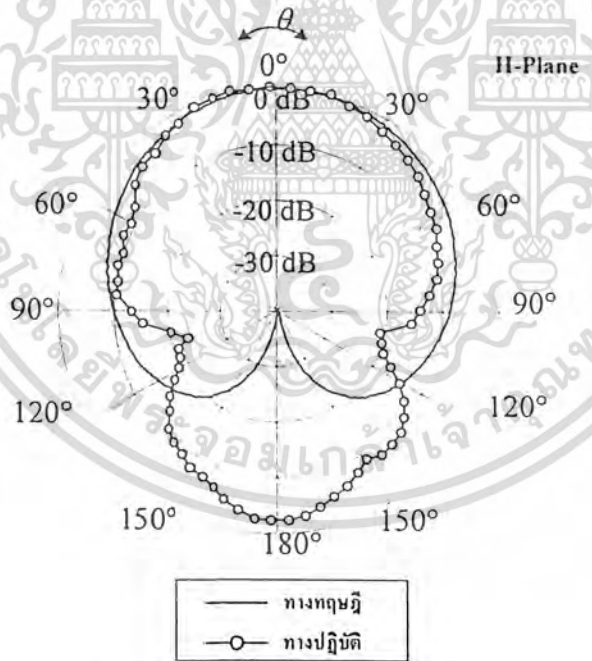
รูปที่ 4.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวที่ 6



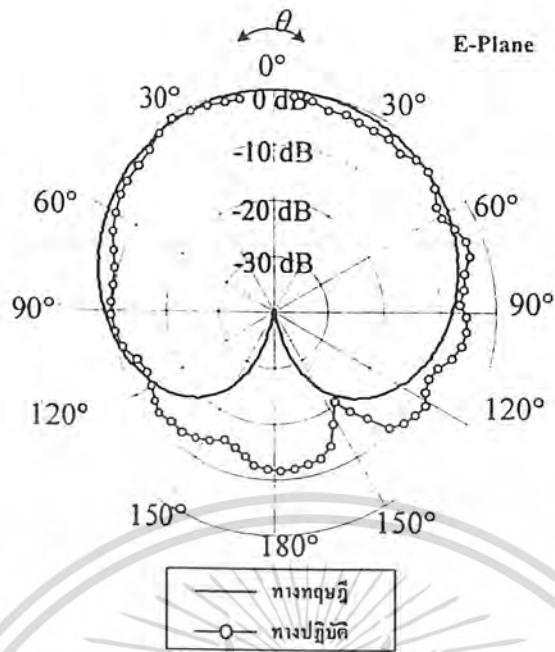
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า



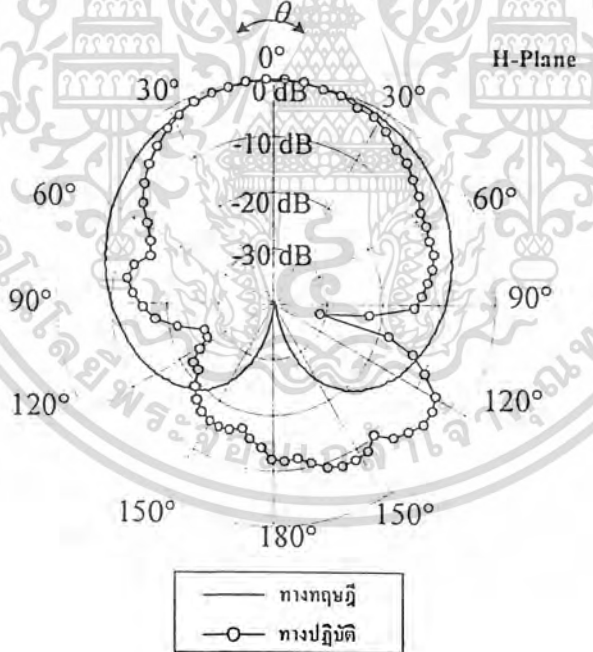
รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวที่ 7



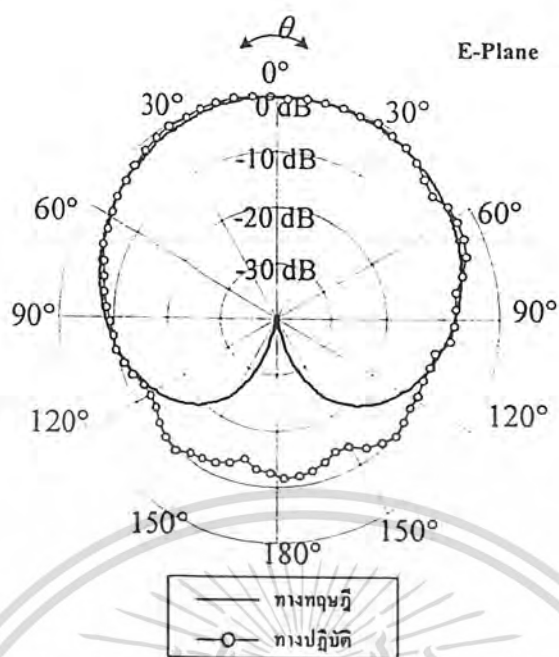
รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า



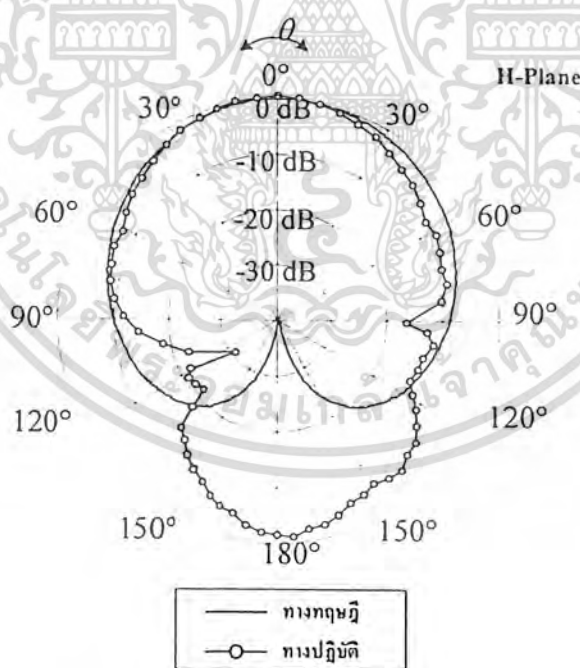
รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวที่ 8



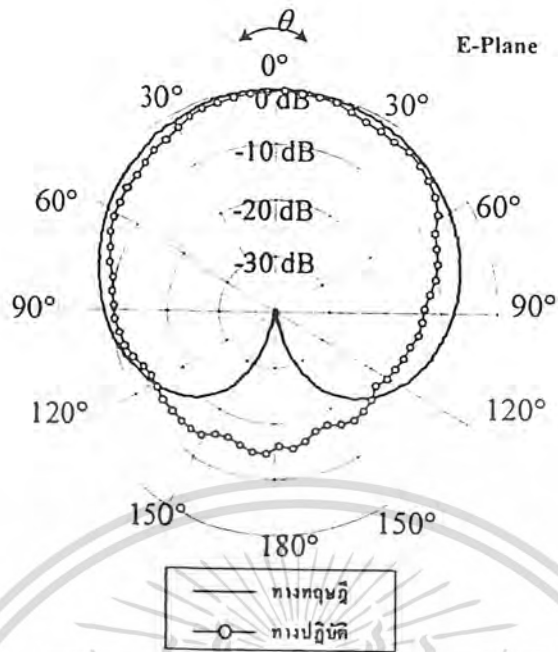
รูปที่ 4.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า



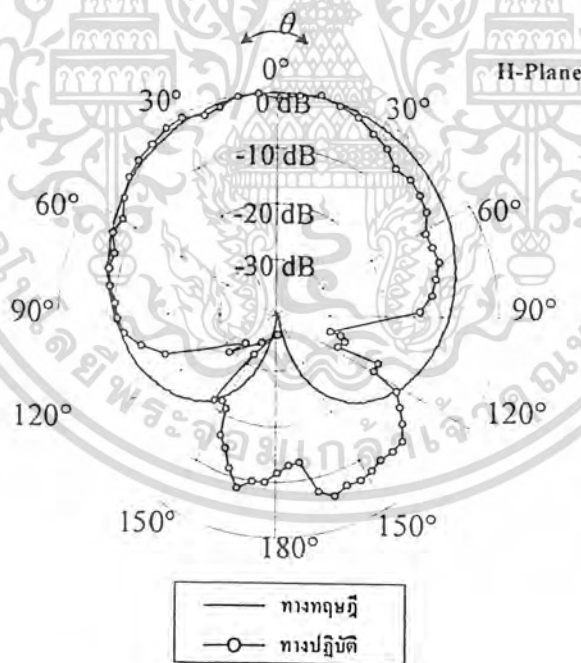
รูปที่ 4.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศตัวที่ 9



รูปที่ 4.29 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า

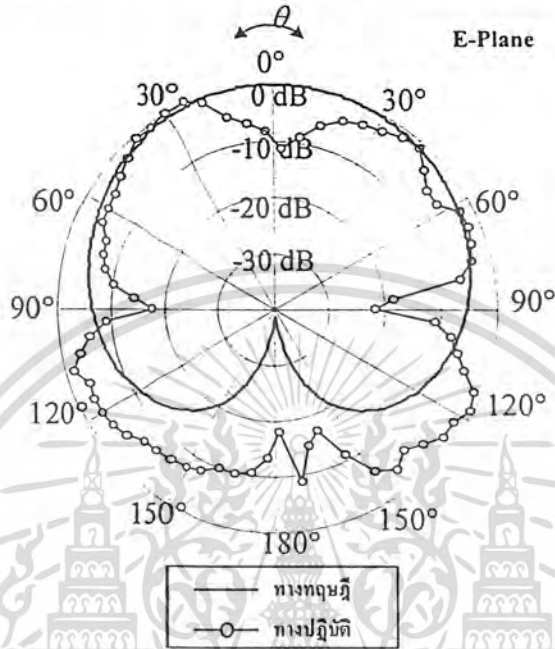


รูปที่ 4.30 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจากการคำนวณเปรียบเทียบกับแบบรูปที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

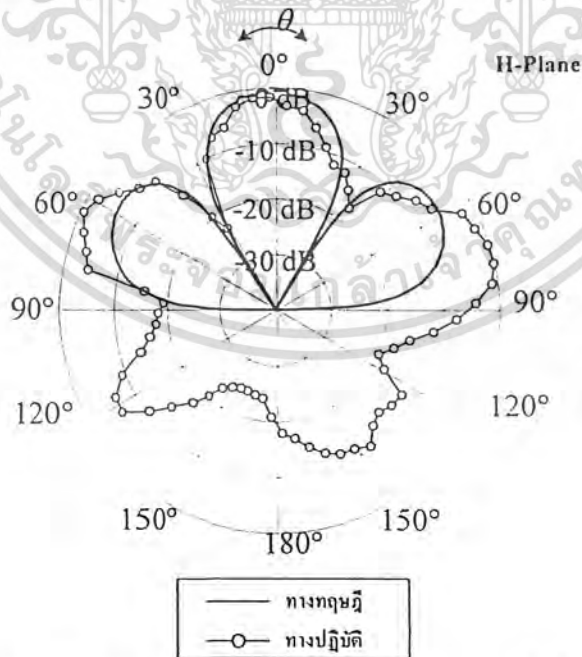
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบรูปที่ได้จากการทดสอบสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวทั้ง 9 องค์ประกอบจะเห็นได้ว่าทางด้านลำคลื่นหลักที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณมาแต่จะแตกต่างตรงส่วนของลำคลื่นด้านหลังแบบรูปที่ได้จากการทดสอบจะมีส่วนของลำคลื่นด้านหลังออกมาแต่แบบรูปที่คำนวณมาไม่มีส่วนของลำคลื่นด้านหลัง

4.3.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่วางแบบแถวลำดับเชิงเส้น (Array)



รูปที่ 4.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางแบบแถวเชิงเส้นตามแนวแกน x จำนวน 2 องค์ประกอบในระนาบสนามไฟฟ้า

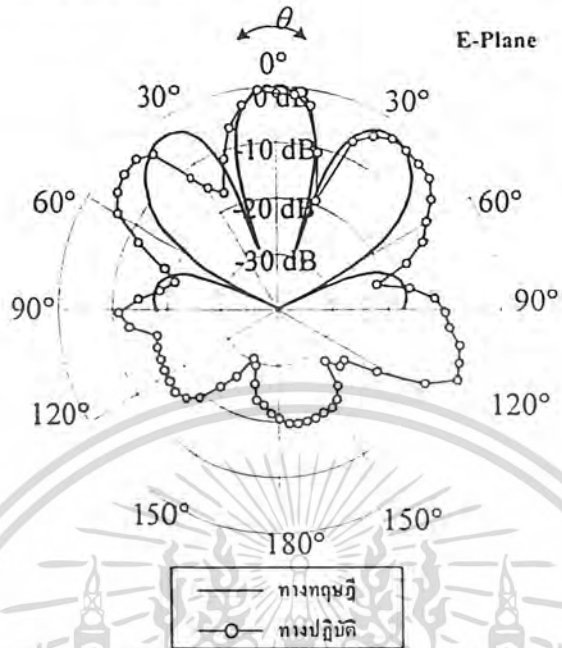


รูปที่ 4.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางแบบแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x

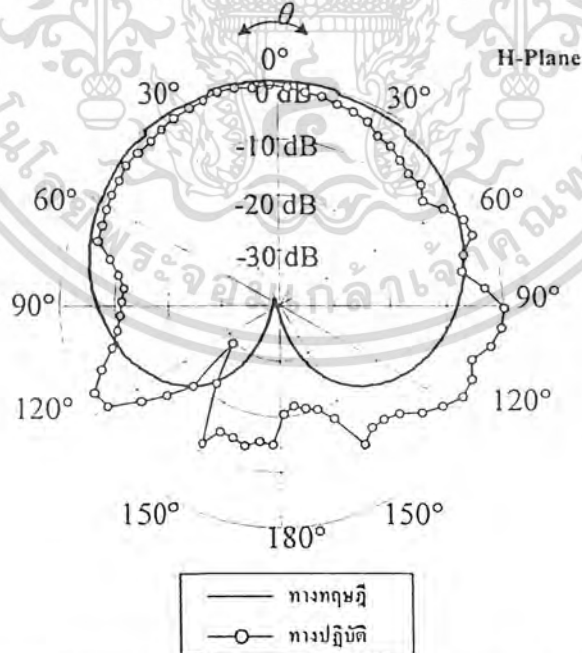
จำนวน 2 องค์ประกอบในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.31 และ รูปที่ 4.32 เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณจะแตกต่างที่ลาคลื่นด้านหลังคือแบบรูปที่ได้จากการทดสอบจะมีลาคลื่นด้านหลังเกิดขึ้น



รูปที่ 4.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางแบบแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y จำนวน 2 องค์ประกอบในระนาบสนามไฟฟ้า

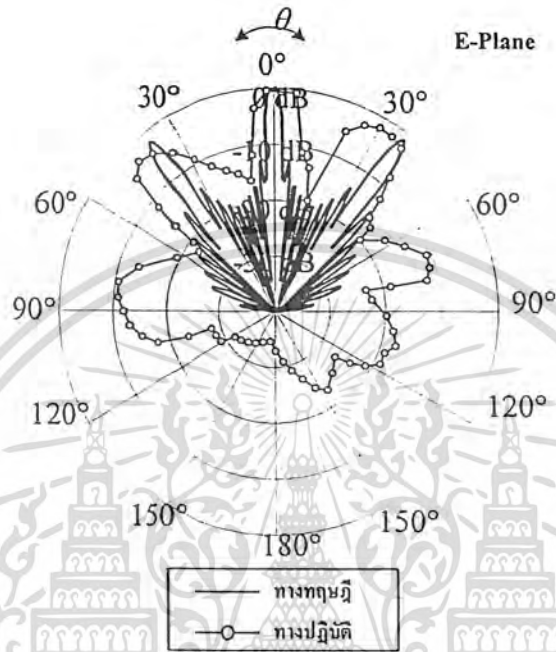


รูปที่ 4.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางแบบแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y จำนวน 2 องค์ประกอบในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.33 และ รูปที่ 4.33 เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณจะแตกต่างที่ลาคลื่นด้านหลังคือแบบรูปที่ได้จากการทดสอบจะมีลาคลื่นด้านหลังเกิดขึ้น

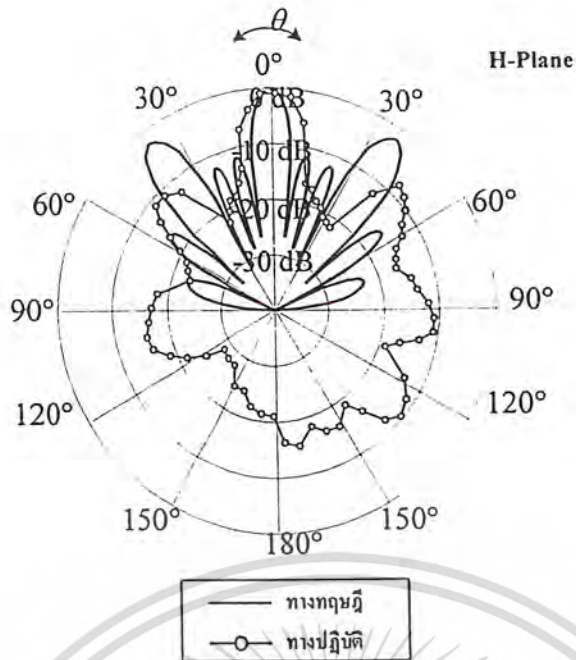
4.3.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางแบบเชิงระนาบ (Planar)



รูปที่ 4.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางแบบเชิงระนาบ 2*2 ในเชิงระนาบสนามไฟฟ้า

จากรูปจะเห็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบสายอากาศมีความใกล้เคียงกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการคำนวณ แต่ลาคลื่นหลักที่ได้จากการทดสอบจะมีความกว้างของลาคลื่นมากกว่าความกว้างของลาคลื่นที่ได้จากการคำนวณและมีลาคลื่นด้านข้างเกิดขึ้น ใกล้เคียงกันด้วยแต่ยังมีขนาดที่แตกต่างกัน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบสายอากาศจะเกิดลาคลื่นด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อวางแบบเชิงระนาบ 2×2 ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปจะเห็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบสายอากาศมีความใกล้เคียงกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการคำนวณ แต่ลำคลื่นหลักที่ได้จากการทดสอบจะมีความกว้างของลำคลื่นมากกว่าความกว้างของลำคลื่นที่ได้จากการคำนวณและมีลำคลื่นด้านข้างเกิดขึ้น ใกล้เคียงกันด้วยแต่ยังมีขนาดที่แตกต่างกัน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบสายอากาศจะเกิดลำคลื่นด้านหลังที่เพิ่มมากกว่าระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการเสนอสายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวเป็นสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่เท่ากับ 12.6575 GHz โดยมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวจากการศึกษาสายอากาศโดยทั่วไปสายอากาศแบบรอบทิศทางซึ่งมีคุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางนั้นพบว่าคลื่นจะเดินทางไปตกกระทบกับวัตถุหรือโลหะที่มีลักษณะเรียบแล้วคลื่นจะหักเหและเบี่ยงเบนออกไปจากแนวเดิมจากคุณสมบัติดังกล่าวจึงได้ทำการนำเสนอสายอากาศแบบช่องเปิดสี่เหลี่ยมสำหรับแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยการนำแผ่นโลหะที่มีลักษณะเป็นกรอบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเหมาะสมมาครอบสายอากาศแบบรอบทิศทางแล้วส่งผลให้คลื่นที่แพร่กระจายรอบทิศทางอยู่นั้นไม่สามารถแพร่กระจายคลื่นผ่านโลหะออกไปได้แต่จะเกิดการสะท้อนและหักเหทิศทางการเดินทางของคลื่นออกไปได้แต่จะบริเวณช่องเปิดของกรอบสี่เหลี่ยมนั้น ในที่นี้มีช่องเปิดปากท่อไว้เพียงด้านเดียวคลื่นจึงเดินทางได้ทิศทางเดียวทำให้มีขนาดลำคลื่น (Beam width) ที่แคบมีอัตราขยาย (Gain) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ที่ดีขึ้น

โครงสร้างของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบและสร้างมีลักษณะดังนี้เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด ด้านความกว้างเท่ากับ 0.625λ (1.5cm.) และด้านความสูงเท่ากับ 0.3125λ (0.75 cm.) ซึ่งค่าที่ได้มาจากการคำนวณและทดลองปรับเปลี่ยนค่าความกว้างและความสูงตามลำดับโดยใช้โปรแกรม Mathcad จนค่าที่ได้ส่งผลให้ได้ขนาดของลำคลื่นที่แคบและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุด จากนั้นใช้โพรบที่เป็นโพรบเชิงเส้นที่มีความยาวประมาณ 0.1477λ (0.35cm.) ตำแหน่งของโพรบห่างจากช่องเปิดของท่อประมาณ 1.2658λ (3cm.) ซึ่งเป็นระยะที่มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นได้แรงระยะหนึ่งและห่างจากปลายปิดอีกด้านประมาณ 0.2953λ (0.7cm.) ซึ่งทำให้วัดค่า SWR ไม่เกิน 1.5 จากท่อนำคลื่นที่ได้นี้จะนำมาต่อเป็นแถวลำดับเชิงเส้นและเชิงระนาบในแนวต่างๆและทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศเพื่อหาค่าที่ดีที่สุดที่ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเพิ่มขึ้นและสามารถนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ได้มากที่สุดสำหรับค่าที่ผิดเพี้ยนไปเล็กน้อยที่เกิดขึ้นจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นอาจจะเกิดจากการไม่สัมผัสกันอย่างแท้จริงระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด รวมถึงตัวต่อ (connector) ที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับสายอากาศ ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะทำให้เกิดการสูญเสีย(loss)ของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศได้ ทำให้ผลที่ได้ผิดเพี้ยนไปเล็กน้อยไม่สมบูรณ์เหมือนกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ แต่ผลทดสอบโดยรวมแสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้ตรงตามความต้องการที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

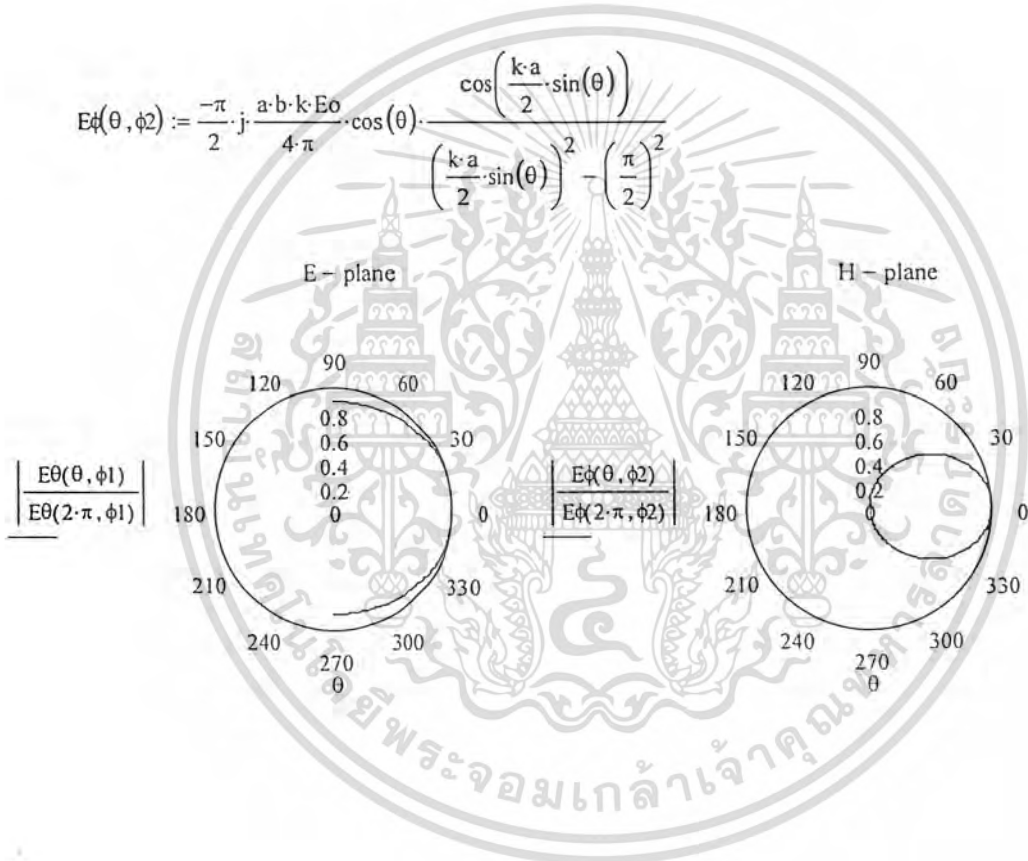
การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$f := 12.657510^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad j := \sqrt{-1} \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad r := 1 \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{ deg}, -89 \text{ deg} .. 90 \text{ deg} \quad \lambda = 0.024 \quad \phi_1 := 90 \text{ deg} \quad \phi_2 := 0 \text{ deg} \quad a := 0.55\lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E\theta(\theta, \phi_1) := \frac{-\pi}{2} \cdot j \cdot \frac{a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot \left[\frac{1}{\left[\left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \right]} \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)} \right) \right]$$

$$E\phi(\theta, \phi_2) := \frac{-\pi}{2} \cdot j \cdot \frac{a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

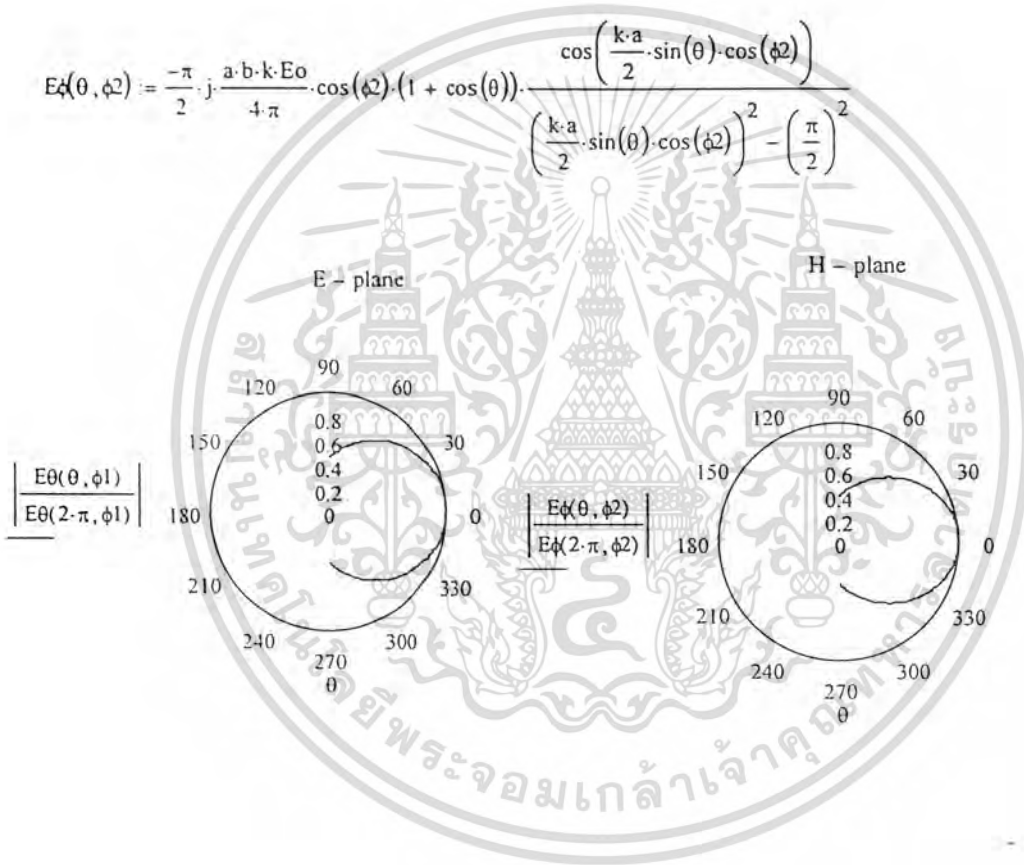
การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$f := 12.657510^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad j := \sqrt{-1} \quad \eta := 120\pi \quad r := 1 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{ deg} .. 90 \text{ deg} \quad \lambda = 0.024 \quad \phi_1 := 90 \text{ deg} \quad \phi_2 := 0 \text{ deg} \quad a := 0.55\lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\theta(\theta, \phi_1) := \frac{-\pi}{2} \cdot j \cdot \frac{a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \frac{1}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)}$$

$$E_\phi(\theta, \phi_2) := \frac{-\pi}{2} \cdot j \cdot \frac{a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi_2) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การคำนวณกำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตัวเดียวในแต่ละแบบ

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$f := 12.657510^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad j := \sqrt{-1} \quad \eta := 120 \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad r := 1$$

$$\theta := -90 \text{ deg}, -89 \text{ deg} .. 90 \text{ deg} \quad E_0 := 1 \quad \lambda = 0.024 \quad \phi := 90 \text{ deg} \quad a := 0.55 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := j \cdot \frac{a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2\pi} \left[\cos(\theta) \frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)} \right] \quad E_\theta(\theta, \phi) := j \cdot \frac{a \cdot b \cdot E_0 \cdot k}{2 \cdot \pi} \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)} \right)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{(E_\theta(\theta, \phi))^2 + (E_\phi(\theta, \phi))^2} \quad U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot (|E_t(\theta, \phi)|^2) \quad U_{\max} := U(360 \text{ deg}, \phi)$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad U_{\max} = 3.409 \times 10^{-8} \quad \text{Prad} = 2.3 \times 10^{-7}$$

$$D_1 := 10 \cdot \log\left(\frac{\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D_1 = -3.319$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad j := \sqrt{-1} \quad \eta := 120 \cdot \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{ deg}, -89 \text{ deg}.. 90 \text{ deg} \quad r := 1 \quad \lambda = 0.024 \quad \phi := 90 \text{ deg} \quad a := 0.55 \cdot \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := j \cdot \frac{a \cdot b \cdot E_0 \cdot k}{4 \cdot \pi} \cdot \left[(1 + \cos(\theta)) \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)} \right]$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \left[(1 + \cos(\theta)) \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)} \right]$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{(E_\theta(\theta, \phi))^2 + (E_\phi(\theta, \phi))^2} \quad U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot (|E_t(\theta, \phi)|)^2 \quad U_{\max} := U(360 \text{ deg}, \phi)$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad U_{\max} = 3.409 \times 10^{-8} \quad \text{Prad} = 1.012 \times 10^{-7}$$

$$D_1 := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D_1 = 6.268$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$f := 12.657510^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad j := \sqrt{-1} \quad \eta := 120 \cdot \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad \epsilon_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{ deg}, -89 \text{ deg} .. 90 \text{ deg} \quad r := 1 \quad \lambda = 0.024 \quad \phi := 90 \text{ deg} \quad a := 0.55 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot j \cdot \frac{a \cdot b \cdot \epsilon_0}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right] \cdot \left[\frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)} \right]$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot j \cdot \frac{a \cdot b \cdot \epsilon_0}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \quad E_t(\theta, \phi) := \sqrt{(E_\theta(\theta, \phi))^2 + (E_\phi(\theta, \phi))^2}$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot (|E_t(\theta, \phi)|)^2 \quad U_{\max} := U(360 \text{ deg}, \phi) \quad U_{\max} = 4.915 \times 10^{-14}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 3.028 \times 10^{-13}$$

$$DI := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad DI = 3.096$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$f := 12.657510^9 \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad j := \sqrt{-1} \quad \eta := 120\pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad \epsilon_0 := 1$$

$$\theta := -90\text{deg}, 1\text{deg}.. 90\text{deg} \quad r := 1 \quad \lambda = 0.024 \quad \phi := 90\text{deg} \quad a := 0.55\lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot j \cdot \frac{a \cdot b \cdot \epsilon_0 \cdot k}{4\pi} \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right]$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot j \cdot \frac{a \cdot b \cdot \epsilon_0 \cdot k}{4\pi} \cdot \sin(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right] \cdot \left[\frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta)} \right]$$

$$Et(\theta, \phi) := \sqrt{(E_\theta(\theta, \phi))^2 + (E_\phi(\theta, \phi))^2} \quad U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot (|Et(\theta, \phi)|)^2$$

$$U_{\max} := U(360\text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 1.382 \times 10^{-8}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 3.228 \times 10^{-8}$$

$$D1 := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D1 = 7.306$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน x
การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \epsilon_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

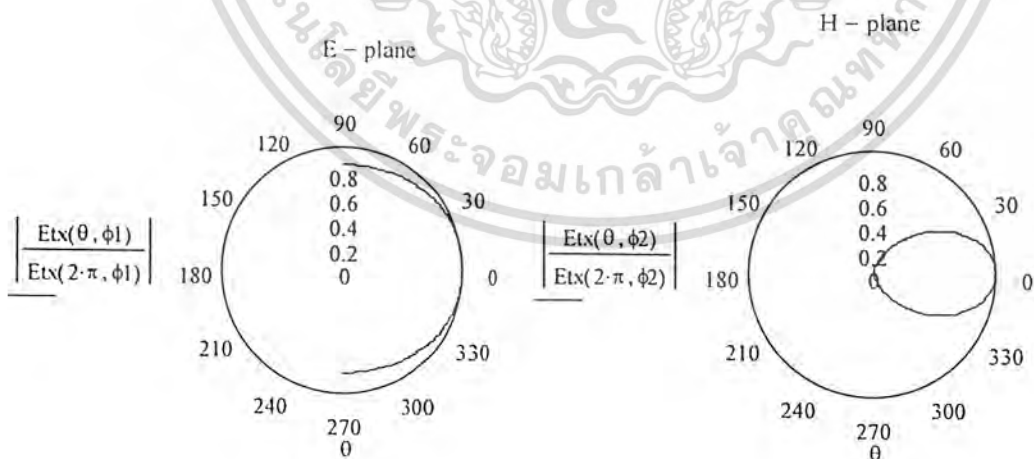
$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} \dots 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg}$$

$$E_\theta(\theta, \phi_1) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)}$$

$$E_\phi(\theta, \phi_2) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)}$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi_1)^2 + E_\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad dx := 0.5 \lambda \quad N := 2 \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad E_t(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad E_0 := 1 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \beta := 0 \text{deg}$$

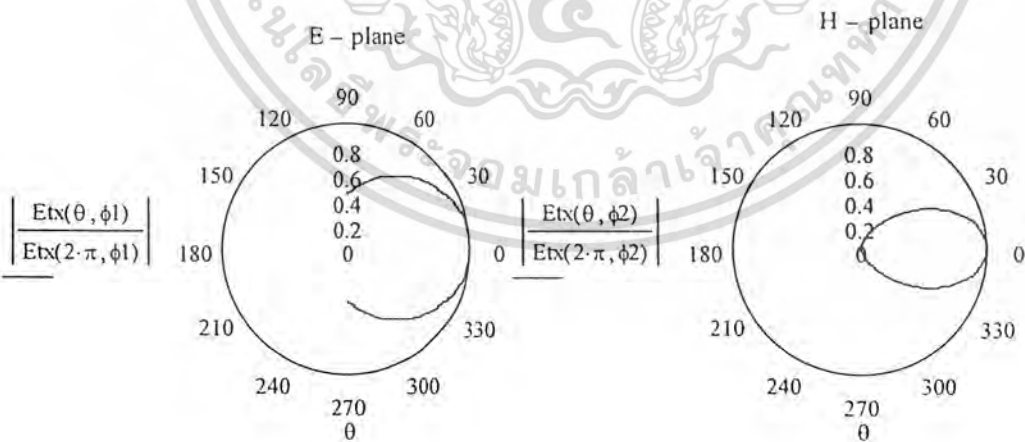
$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg}.. 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi_2 := 0 \text{deg}$$

$$E_\theta(\theta, \phi_1) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)} \right)$$

$$E_\phi(\theta, \phi_2) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi_2) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)} \right)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi_1)^2 + E_\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \lambda \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad E_{tx}(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \epsilon_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} .. 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg}$$

$$E_\theta(\theta, \phi_1) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)$$

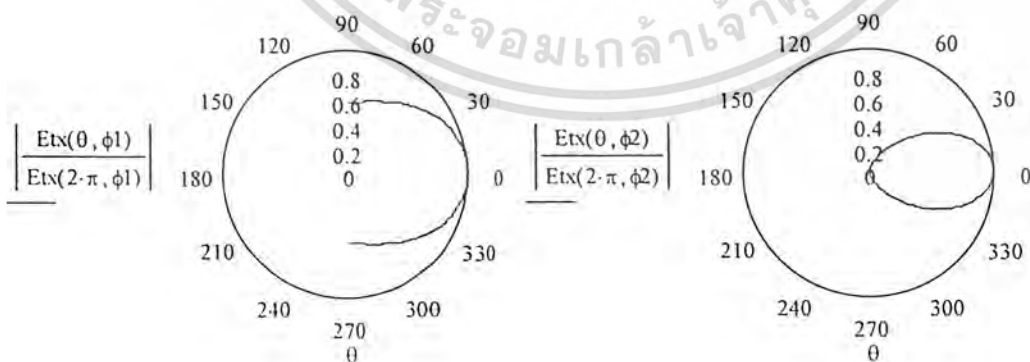
$$E_\phi(\theta, \phi_2) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi_1)^2 + E_\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \lambda \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad E_{tx}(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

E - plane

H - plane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE_{10} เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

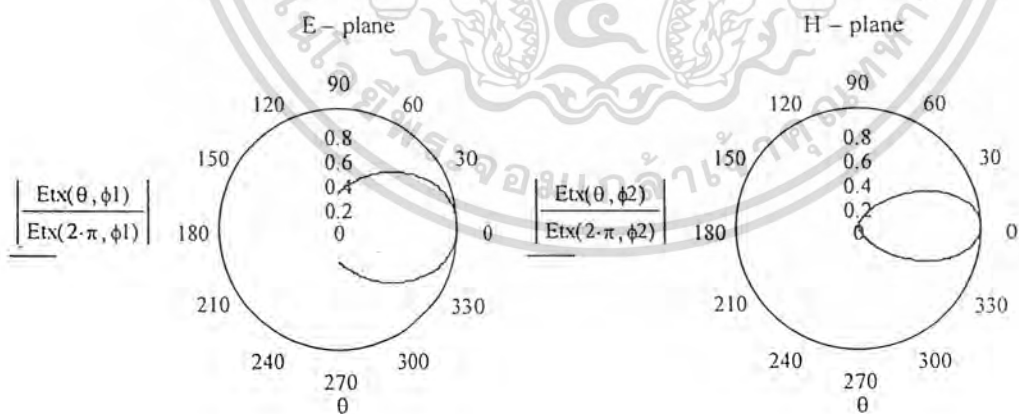
$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} .. 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg}$$

$$E_\theta(\theta, \phi_1) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\left[\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right] \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)}$$

$$E_\phi(\theta, \phi_2) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi_2) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\left[\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2\right] \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)}$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi_1)^2 + E_\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \lambda \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad E_{tx}(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การคำนวณกำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน x ในแต่ละแบบ

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \eta := 120\pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90\text{deg}, -89\text{deg}..90\text{deg} \quad \beta := 0\text{deg} \quad \phi := 90\text{deg} \quad a := 0.625\lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \quad dx := 0.5 \cdot \lambda \quad N := 2 \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})}{2}\right)} \quad E_t(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_t(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360\text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 1.137 \times 10^{-7}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 2.868 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 6.973$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \eta := 120 \cdot \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg}.. 90 \text{deg} \quad \beta := 0 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi := 90 \text{deg}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \quad dx := 0.5 \cdot \lambda \quad N := 2 \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad E_t x(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_t x(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360 \text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 1.137 \times 10^{-7}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 1.6 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 9.509$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \eta := 120 \cdot \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \epsilon_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg}.. 90 \text{deg} \quad \beta := 0 \text{deg} \quad a := 0.625 \cdot \lambda \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi := 90 \text{deg}$$

$$E\theta(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E\phi(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E\theta(\theta, \phi)^2 + E\phi(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \cdot \lambda \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad Et_x(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|Et_x(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360 \text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 4.608 \times 10^{-8}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 1.413 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 6.125$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายโนโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \eta := 120 \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{deg} .. 90 \text{deg} \quad \beta := 0 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi := 90 \text{deg}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right]$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right]$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \lambda \quad \psi(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad E_t(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_t(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360 \text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 1.843 \times 10^{-7}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 3.688 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 7.98$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน y
การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \epsilon_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} \dots 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg}$$

$$E\theta(\theta, \phi_1) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)}$$

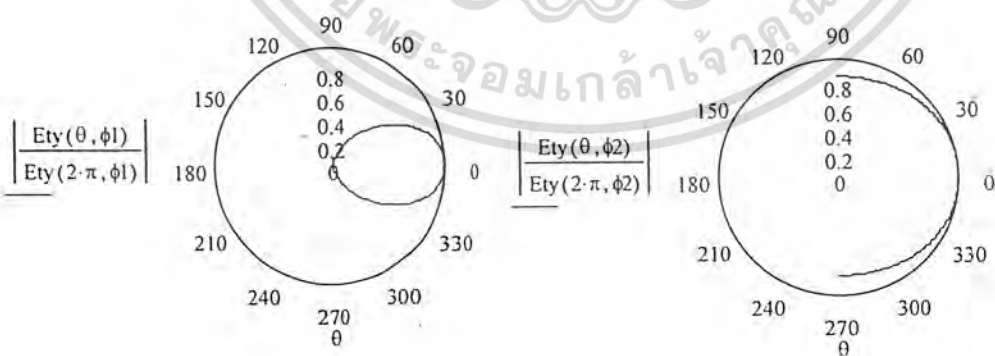
$$E\phi(\theta, \phi_2) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)}$$

$$E(\theta, \phi) := \sqrt{E\theta(\theta, \phi_1)^2 + E\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dy := 0.5 \lambda \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E(\theta, \phi)$$

E - plane

H - plane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

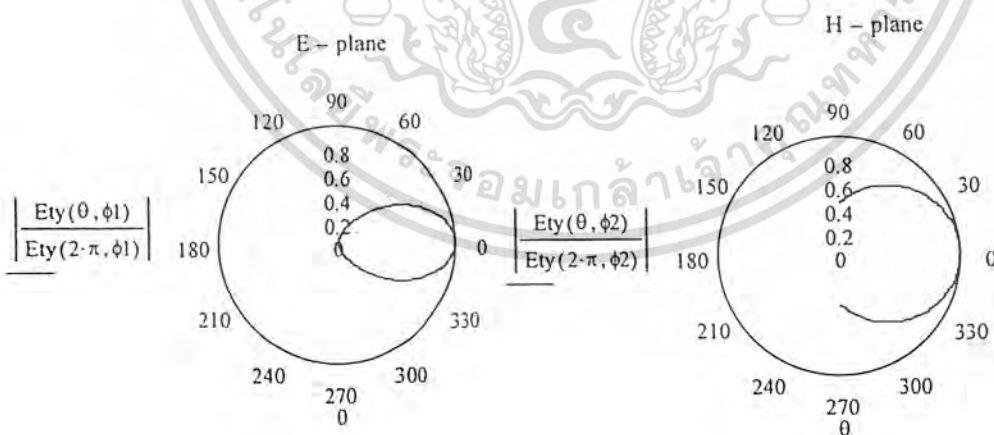
$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg}.. 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg}$$

$$E_\theta(\theta, \phi_1) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1) \quad \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)} \right)$$

$$E_\phi(\theta, \phi_2) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi_2) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \quad \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)} \right)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi_1)^2 + E_\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dy := 0.5 \lambda \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายโนโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \epsilon_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

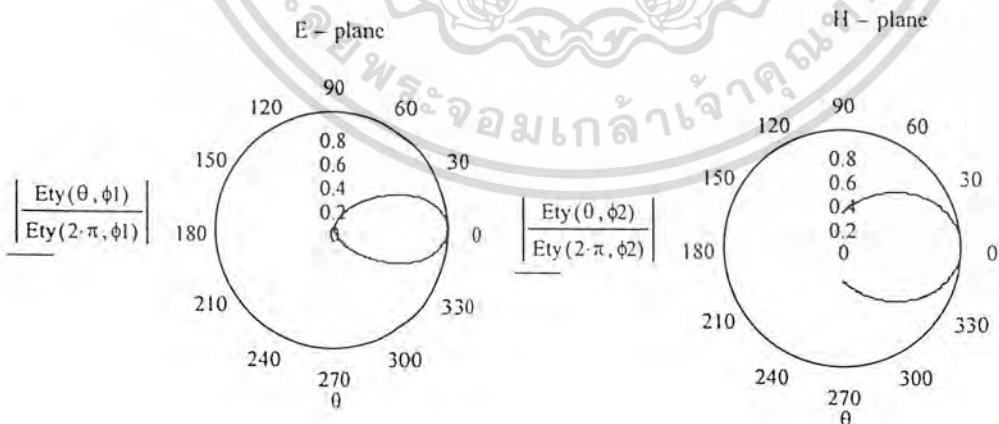
$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} .. 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg}$$

$$E\theta(\theta, \phi_1) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} - \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)} \right]$$

$$E\phi(\theta, \phi_2) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi_2) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} - \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)} \right]$$

$$Et(\theta, \phi) := \sqrt{E\theta(\theta, \phi_1)^2 + E\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dy := 0.5 \lambda \quad \psi y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AFy(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad Ety(\theta, \phi) := AFy(\theta, \phi) \cdot Et(\theta, \phi)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. การคำนวณกำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นในแนวแกน y

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \eta := 120 \cdot \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} .. 90 \text{deg} \quad \beta := 0 \text{deg} \quad \phi := 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dy := 0.5 \lambda \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_{ty}(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360 \text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 1.137 \times 10^{-7}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 2.868 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 6.973$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \eta := 120\pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90\text{deg}, -89\text{deg}..90\text{deg} \quad \beta := 0\text{deg} \quad \phi := 90\text{deg} \quad a := 0.625\lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_{\theta}(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_{\phi}(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_{\theta}(\theta, \phi)^2 + E_{\phi}(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dy := 0.5 \cdot \lambda \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})}{2}\right)} \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_{ty}(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360\text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 1.137 \times 10^{-7}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 1.6 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 9.509$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \eta := 120\pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad \epsilon_0 := 1$$

$$\theta := -90\text{deg}, -89\text{deg}.. 90\text{deg} \quad \beta := 0\text{deg} \quad \phi := 90\text{deg} \quad a := 0.625\lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E\theta(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)}$$

$$E\phi(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot \epsilon_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)}$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E\theta(\theta, \phi)^2 + E\phi(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dy := 0.5\lambda \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})}{2}\right)} \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_{ty}(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360\text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 4.608 \times 10^{-8}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 1.413 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 6.125$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \eta := 120\pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90\text{deg}, -89\text{deg}..90\text{deg} \quad \beta := 0\text{deg} \quad \phi := 90\text{deg} \quad a := 0.625\lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right]$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right]$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dy := 0.5 \cdot \lambda \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})}{2}\right)} \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_{ty}(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360\text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 1.843 \times 10^{-7}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 3.688 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 7.98$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. การคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.5 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} \dots 90 \text{deg} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E\theta(\theta, \phi_1) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)}$$

$$E\phi(\theta, \phi_2) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)}$$

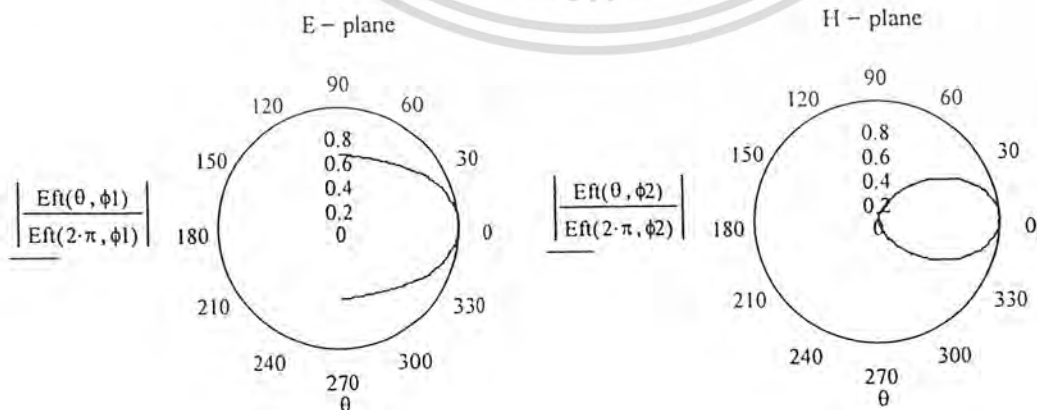
$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E\theta(\theta, \phi_1)^2 + E\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dy := 0.5 \lambda \quad dx := 0.5 \lambda$$

$$\psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta, \phi)\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta, \phi)}{2}\right)} \quad AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta, \phi)\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta, \phi)}{2}\right)}$$

$$E_{tx}(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi) \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$AF_t(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot AF_y(\theta, \phi) \quad E_f(\theta, \phi) := \sqrt{E_{tx}(\theta, \phi)^2 + E_{ty}(\theta, \phi)^2}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} \dots 90 \text{deg} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\theta(\theta, \phi_1) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_1) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)} \right)$$

$$E_\phi(\theta, \phi_2) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi_2) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)} \right)$$

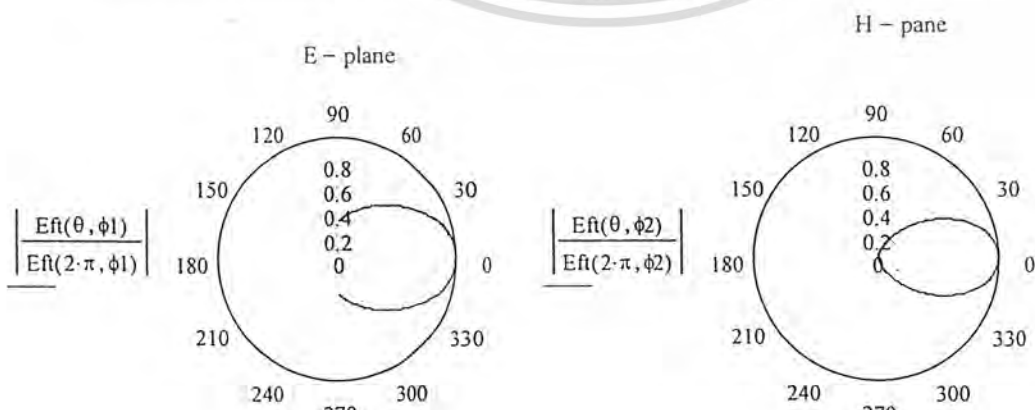
$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi_1)^2 + E_\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \lambda \quad dy := 0.5 \lambda$$

$$\psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta, \phi)\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta, \phi)}{2}\right)} \quad AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta, \phi)\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta, \phi)}{2}\right)}$$

$$E_{tx}(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi) \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$AF_t(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot AF_y(\theta, \phi) \quad E_{ft}(\theta, \phi) := \sqrt{E_{tx}(\theta, \phi)^2 + E_{ty}(\theta, \phi)^2}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} .. 90 \text{deg} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E\theta(\theta, \phi_1) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)}$$

$$E\phi(\theta, \phi_2) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)}$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E\theta(\theta, \phi_1)^2 + E\phi(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dy := 0.5 \lambda \quad dx := 0.5 \lambda$$

$$\psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

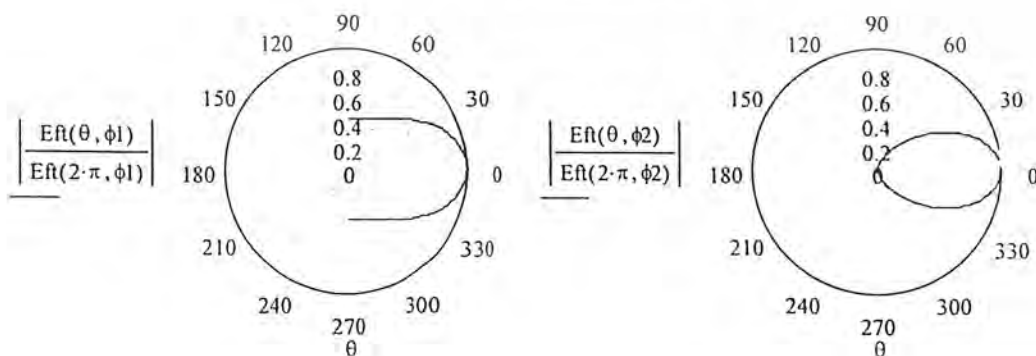
$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta, \phi)\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta, \phi)}{2}\right)} \quad AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta, \phi)\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta, \phi)}{2}\right)}$$

$$E_{tx}(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi) \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$AF_t(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot AF_y(\theta, \phi) \quad E_{ft}(\theta, \phi) := \sqrt{E_{tx}(\theta, \phi)^2 + E_{ty}(\theta, \phi)^2}$$

E - plane

H - plane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1 \quad \beta := 0 \text{deg}$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg}.. 90 \text{deg} \quad \phi_1 := 90 \text{deg} \quad \phi_2 := 0 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_{\theta}(\theta, \phi_1) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi_1) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_1)\right]$$

$$E_{\phi}(\theta, \phi_2) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi_2) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi_2)\right]$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_{\theta}(\theta, \phi_1)^2 + E_{\phi}(\theta, \phi_2)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \lambda \quad dy := 0.5 \lambda$$

$$\psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

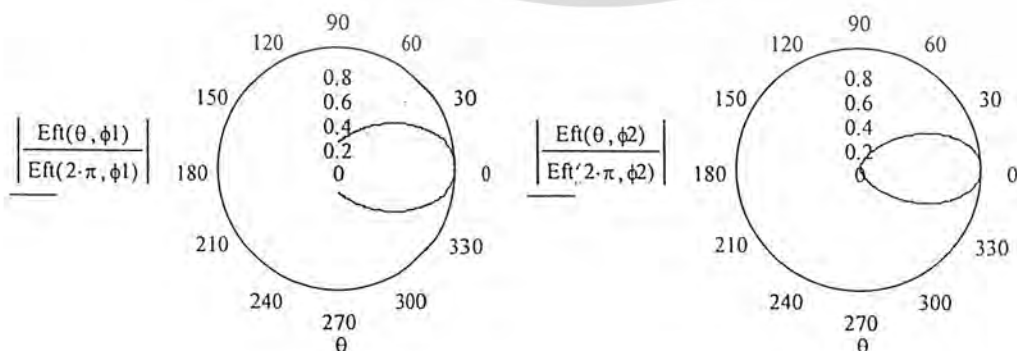
$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta, \phi)\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta, \phi)}{2}\right)} \quad AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta, \phi)\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta, \phi)}{2}\right)}$$

$$Et_x(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi) \quad Et_y(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$AF_t(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot AF_y(\theta, \phi) \quad Eft(\theta, \phi) := \sqrt{Et_x(\theta, \phi)^2 + Et_y(\theta, \phi)^2}$$

E - plane

H - plane



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การคำนวณกำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศและค่าสภาพเงาเงงทิศทางของสาย

อากาศแถวลำดับเชิงระนาบ

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.657510^9 \quad \eta := 120 \cdot \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{deg}, -89 \text{deg} \dots 90 \text{deg} \quad \beta := 0 \text{deg} \quad \phi := 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \cdot \lambda \quad dy := 0.5 \cdot \lambda$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$Et_x(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi) \quad Et_y(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$AF_t(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot AF_x(\theta, \phi) \quad Eft(\theta, \phi) := \sqrt{Et_x(\theta, \phi)^2 + Et_y(\theta, \phi)^2}$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|Eft(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360 \text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 2.274 \times 10^{-7}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 7.616 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 5.742$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอเมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \eta := 120 \cdot \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{ deg}, -89 \text{ deg} .. 90 \text{ deg} \quad \beta := 0 \text{ deg} \quad \phi := 90 \text{ deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{4 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi)\right) \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) \quad \frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)} \right)$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \cdot \lambda \quad dy := 0.5 \cdot \lambda$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9} \text{ deg}, \phi + 10^{-9} \text{ deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9} \text{ deg}, \phi + 10^{-9} \text{ deg})}{2}\right)} \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9} \text{ deg}, \phi + 10^{-9} \text{ deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9} \text{ deg}, \phi + 10^{-9} \text{ deg})}{2}\right)} \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$AF_t(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot AF_x(\theta, \phi) \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$E_{tx}(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi) \quad E_{ft}(\theta, \phi) := \sqrt{E_{tx}(\theta, \phi)^2 + E_{ty}(\theta, \phi)^2}$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_{ft}(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360 \text{ deg}, \phi) \quad U_{\max} = 2.274 \times 10^{-7}$$

$$Prad := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad Prad = 3.565 \times 10^{-7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสาร (4π · U_{max}) สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 D := 10 · log₁₀ (Prad) D = 9.039
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางบนแผ่นระนาบตัวนำ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \eta := 120 \pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90 \text{deg} .. 90 \text{deg} \quad \beta := 0 \text{deg} \quad \phi := 90 \text{deg} \quad a := 0.625 \lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E\theta(\theta, \phi) := \frac{-\pi \cdot j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0 \cdot \sin(\phi)}{2 \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)}$$

$$E\phi(\theta, \phi) := \frac{-\pi \cdot j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \cdot \frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \frac{\sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)}$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E\theta(\theta, \phi)^2 + E\phi(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5 \lambda \quad dy := 0.5 \lambda$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9} \text{deg}, \phi + 10^{-9} \text{deg})}{2}\right)} \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$AF_t(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot AF_x(\theta, \phi) \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$E_{tx}(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi) \quad E_{ft}(\theta, \phi) := \sqrt{E_{tx}(\theta, \phi)^2 + E_{ty}(\theta, \phi)^2}$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_{ft}(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360 \text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 9.215 \times 10^{-8}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 3.059 \times 10^{-7}$$

$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right)$ สำหรับการใช้งานหรือการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแพร่กระจายในโหมด TE₁₀ เมื่อสายอากาศวางในช่องว่างอิสระ

$$j := \sqrt{-1} \quad c := 3 \cdot 10^8 \quad f := 12.6575 \cdot 10^9 \quad \eta := 120\pi \quad \lambda := \frac{c}{f} \quad k := \frac{2\pi}{\lambda} \quad E_0 := 1$$

$$\theta := -90\text{deg}, -89\text{deg}.. 90\text{deg} \quad \beta := 0\text{deg} \quad \phi := 90\text{deg} \quad a := 0.625\lambda \quad b := \frac{a}{2}$$

$$E_\theta(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \sin(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right) \right]$$

$$E_\phi(\theta, \phi) := \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{j \cdot a \cdot b \cdot k \cdot E_0}{2 \cdot \pi} \cdot \cos(\phi) \cdot (1 + \cos(\theta)) \cdot \left[\frac{\cos\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)}{\left(\frac{k \cdot a}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \cdot \sin\left(\frac{k \cdot b}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi)\right) \right]$$

$$E_t(\theta, \phi) := \sqrt{E_\theta(\theta, \phi)^2 + E_\phi(\theta, \phi)^2} \quad N := 2 \quad dx := 0.5\lambda \quad dy := 0.5\lambda$$

$$AF_y(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_y(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})}{2}\right)} \quad \psi_y(\theta, \phi) := k \cdot dy \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) + \beta$$

$$AF_x(\theta, \phi) := \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \cdot \psi_x(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x(\theta + 10^{-9}\text{deg}, \phi + 10^{-9}\text{deg})}{2}\right)} \quad \psi_x(\theta, \phi) := k \cdot dx \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\phi) + \beta$$

$$AF_t(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot AF_x(\theta, \phi) \quad E_{ty}(\theta, \phi) := AF_y(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi)$$

$$E_{tx}(\theta, \phi) := AF_x(\theta, \phi) \cdot E_t(\theta, \phi) \quad E_{ft}(\theta, \phi) := \sqrt{E_{tx}(\theta, \phi)^2 + E_{ty}(\theta, \phi)^2}$$

$$U(\theta, \phi) := \frac{1}{2 \cdot \eta} \cdot \left(|E_{ft}(\theta, \phi)|^2 \right) \quad U_{\max} := U(360\text{deg}, \phi) \quad U_{\max} = 3.686 \times 10^{-7}$$

$$\text{Prad} := \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin(\theta) \, d\theta \, d\phi \quad \text{Prad} = 6.623 \times 10^{-7}$$

$$D := 10 \cdot \log\left(\frac{4\pi \cdot U_{\max}}{\text{Prad}}\right) \quad D = 8.447$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำและได้รับความช่วยเหลือจากหลายท่านดังนี้

ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
ผศ.ดร.สมผล โกศลวิตร
คุณสุธาสิณี ละมุลศรี
คุณไพโรจน์ วุ่นชุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- [1] โมไนย ไกรฤกษ์ “ ทฤษฎีสายอากาศ ”, วศ.สจล. , คณะวิศวกรรมศาสตร์ , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [2] R.E.Collin, “ Antennas and Radiowave Propagation, ” McGraw-Hill International Editions, 1985
- [3] C.A.Balanis, “ Antenna Theory Analysis and Design, ” 2nd ed. John Wiley & Sons , Inc., 1997
- [4] C.A.Balanis, “ Advanced Engineering Electromagnetics, ” John Wiley & Sons , Inc., 1997



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้