



สายอากาศอัตราขยายสูงจากแถวลำดับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

A High Gain Antenna using Rectangular Aperture Array



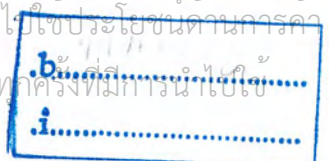
ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากพบการคัดลอกหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ฉบับที่.....
เลขทะเบียน..... 54940
วัน,เดือน,ปี..... 1 เม.ย. 2548



สายอากาศอัตรการขยายสูงจากแถวลำดับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

A High Gain Antenna using Rectangular Aperture Array



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศอัตรการขยายสูงจากแถวลำดับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

A High gain Antenna using Rectangular Aperture Array

ผู้จัดทำ

1. นายกมลชัย โปร่งจิต 44015001
2. นายจักรพงษ์ สายใหม่ 44015003
3. สัจเวียน สาอุด 44015086



(ดร. วังกัณฑ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)



(ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศอัตราขยายสูงจากแถวลำดับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

A High gain Antenna using Rectangular Aperture Array

โดย นายกมลชัย โปรงจิต 44015001
นายจักรพงษ์ สายใหม่ 44015003
นายสังเวียน สาอุด 44015086

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรนำเสนอสายอากาศแบบแถวลำดับช่องปากเปิดบนแผ่นตัวนำเพื่อให้มีอัตราการขยายสูง ซึ่งสายอากาศมีลักษณะโครงสร้างแบนราบกับบริเวณที่ติดตั้ง โดยโครงการนี้จะศึกษาคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นอันได้แก่ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง การโพลาไรซ์และคุณลักษณะอิมพีแดนซ์อินได้แก่ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ โดยสายอากาศที่วิเคราะห์จะมีประโยชน์ในการใช้เป็นสายอากาศที่มีการขยายสูงเพื่อการสื่อสารแบบจุดต่อจุดในระยะไกลต่อไป

Abstract

This project concerns about an array of rectangular aperture on conducting surface. This antenna has low profile configuration. This project analyzes the radiation characteristics such as radiation pattern, beam width, directivity, polarization, and impedance characteristics such as input impedance, return loss and standing wave ratio of aperture antenna on conducting surface. The analysis results are very useful for the application of high gain antenna for far distance point to point communication.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของสายอากาศ	3
2.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ	3
2.2 อินทิกรัลการแพร่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย	13
2.3 สัมพันธ์เวกเตอร์ \vec{F} อันเนื่องมาจากกระแสแม่เหล็กคั่นกำเนิด \vec{M}	16
2.4 คำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียว	19
2.5 การแพร่กระจายคลื่นของสนามระยะไกล	24
บทที่ 3 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศปากเปิด	28
3.1 การวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากร่องเปิดบนผิวตัวนำ	28
3.2 องค์ประกอบแอมพลิจูด	40
3.3 สายอากาศแอมพลิจูดแบบแผ่น (Planar Array)	41
3.4 ทฤษฎีเงา (Image Theory)	45
3.5 สายอากาศปากเปิดที่วางบนแผ่นตัวนำ	48
บทที่ 4 การคำนวณและออกแบบและสร้างสายอากาศ	52
4.1 การคำนวณหาขนาดของช่องเปิด	52
4.2 การวางตัวเป็นสายอากาศแบบแอมพลิจูดของช่องเปิด	56
4.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ	61
4.4 สายส่งแบบ ไมโครสตริบ (Micro strip Line)	65
4.5 การออกแบบตัวแบ่งกำลัง (Power Divider)	66
4.6 การออกแบบควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Quarterwave transformers)	69
4.7 การคำนวณความกว้างสายส่งไมโครสตริบ	69
4.8 การทดลองวัดผลการทำงานของสายอากาศ	72
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	84
ภาคผนวก	86

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	4
รูปที่ 2.2 รูปบนลำคลื่นต่าง ๆ และความกว้างลำคลื่นของแบบรูปสายอากาศ และรูปล่างแบบรูปในแบบเชิงเส้น	5
รูปที่ 2.3 การแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ	6
รูปที่ 2.4 รูปบนมุมบนระนาบจะมีหน่วยเป็นเรเดียน และรูปล่างการวัดมุมมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน	7
รูปที่ 2.5 ผังภูมิของการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายจากต้นกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็ก	13
รูปที่ 2.6 (ก) ระบบโคออดิเนตที่ใช้สำหรับคำนวณหาสนามที่ต้นกำเนิดของ สนามอยู่ที่จุดกำเนิด	19
รูปที่ 2.6 (ข) ระบบโคออดิเนตที่ใช้สำหรับคำนวณหาสนามที่ต้นกำเนิดของ สนามไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิด	20
รูปที่ 3.1 รูปแบบจำลองสมมูลของช่องเปิดเมื่อพิจารณาเป็นระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์	28
รูปที่ 3.2 ช่องเปิด (Aperture) บนแผ่นตัวนำขนาดอนันต์ในระนาบต่างๆ	29
รูปที่ 3.3 รูปแบบการวิเคราะห์สายอากาศในระบบพิกัดฉาก	32
รูปที่ 3.4 (ก) รูปการวางองค์ประกอบแถวลำดับแบบเส้นตรง	42
รูปที่ 3.4 (ข) รูปการวางองค์ประกอบภาพทรงวงแหวนลำดับแบบแผ่น	43
รูปที่ 3.5 การโพลาไรซ์ของคลื่นสะท้อนเป็นแนวตั้ง	46
รูปที่ 3.6 การโพลาไรซ์ของคลื่นสะท้อนเป็นแนวนอน	47
รูปที่ 3.7 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก และแหล่งกำเนิดเสมือน	48
รูปที่ 3.8 ลักษณะการวางแหล่งกำเนิดตามแนวนอนเหนือระนาบตัวนำ	49
รูปที่ 4.1 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า a ของช่องเปิดที่ละ 0.2λ	54
รูปที่ 4.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำจาก การเปลี่ยนแปลงค่า a ของช่องเปิดที่ละ 0.2λ ในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90^\circ$)	54
รูปที่ 4.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรกเมื่อทำจาก การเปลี่ยนแปลงค่า a ของช่องเปิดที่ละ 0.2λ ในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90^\circ$)	55
รูปที่ 4.4 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำจาก การเปลี่ยนแปลงค่า a ของช่องเปิดที่ละ 0.2λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0^\circ$)	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญาดต่อ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.5 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางครั้งแรกเมื่อทำจาก การเปลี่ยนแปลงค่า α ของช่องเปิดที่ละ 0.2λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0^\circ$)	56
รูปที่ 4.6 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำการจัดเรียงช่องเปิด 128 องค์ประกอบในแนวแกน y และทำการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$	57
รูปที่ 4.7 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรกจากการเรียงช่องเปิด 128 องค์ประกอบในแนวแกน y และทำการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$	58
รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อยที่มีการเรียงตัวของช่องเปิด 128 องค์ประกอบ และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$	58
รูปที่ 4.9 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อทำการจัดเรียงช่องเปิด 128 องค์ประกอบ โดยเรียงตามแนวแกน y และทำการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$	59
รูปที่ 4.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำการจัดเรียงช่องเปิด 128 องค์ประกอบในแนวแกน x และทำการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$	59
รูปที่ 4.11 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรกจากการเรียงช่องเปิด 128 องค์ประกอบในแนวแกน x และทำการเปลี่ยนแปลง ระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$	60
รูปที่ 4.12 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อย ที่มีการเรียงตัวของช่องเปิด 128 องค์ประกอบ ในแนวแกน x และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$	60
รูปที่ 4.13 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำการพิจารณา ผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 1 องค์ประกอบ	62
รูปที่ 4.14 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อทำการพิจารณาผลจาก การเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 1 องค์ประกอบ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญากาศอ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.15 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำการพิจารณา ผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 128 องค์ประกอบ	63
รูปที่ 4.16 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรกเมื่อทำการพิจารณา ผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 128 องค์ประกอบ	63
รูปที่ 4.17 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อยเมื่อทำการพิจารณา ผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 128 องค์ประกอบ	64
รูปที่ 4.18 ค่าสภาพเงาของทิศทางเมื่อทำการพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลง ความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 128 องค์ประกอบ	64
รูปที่ 4.19 แสดงโครงสร้างทางกายภาพของสายส่งไมโครสตริป	65
รูปที่ 4.20 ตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction แบบธรรมดาและแบบมีการแปลงอิมพีแดนซ์	67
รูปที่ 4.21 การหักมุมของสายส่งแบบไมโครสตริป	68
รูปที่ 4.22 สายคอแอดแอดพอร์ทที่ต่ออยู่กับสายส่งไมโครสตริป 50 โอห์ม	69
รูปที่ 4.23 ขนาดความกว้างของสายส่งไมโครสตริปที่ออกแบบแล้ว	70
รูปที่ 4.24 รูปโครงสร้างของสายอากาศที่จะทำการประกอบ	70
รูปที่ 4.25 สายอากาศแถวลำดับ 128 องค์ประกอบมุมมองด้านบน	71
รูปที่ 4.26 สายอากาศแถวลำดับ 128 องค์ประกอบมุมมองด้านล่าง	71
รูปที่ 4.27 ค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 1	72
รูปที่ 4.28 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 1	72
รูปที่ 4.29 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 1	73
รูปที่ 4.30 ค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 2	73
รูปที่ 4.31 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 2	74
รูปที่ 4.32 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 2	74
รูปที่ 4.33 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 1	75
รูปที่ 4.34 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 1	75
รูปที่ 4.35 ค่า SWR ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 1	76
รูปที่ 4.36 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 2	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพต่อ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.37 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแฉวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 2	77
รูปที่ 4.38 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแฉวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 2	77
รูปที่ 4.39 กราฟการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับที่ได้จาก การวัดในระนาบสนามไฟฟ้า	78
รูปที่ 4.40 กราฟการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับที่ได้จาก การวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก	78
รูปที่ 4.41 กราฟการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับที่ได้จาก การวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก	79
รูปที่ 4.42 กราฟการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับที่ได้จาก การจำลองการทำงานโดยโปรแกรม IE3D ในระนาบสนามแม่เหล็ก	79
รูปที่ 4.43 สายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบ ที่ช่องเปิดอยู่ด้านบน	80
รูปที่ 4.44 สายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบที่มีช่องเปิดและส่วนป้อนกำลัง	80
รูปที่ 4.45 การวัดส่วนป้อนกำลังขนาด 128 องค์ประกอบ โดยเครื่อง Network Analyzer	81
รูปที่ 4.46 การวัดสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบ โดยเครื่อง Network Analyzer	81
รูปที่ 4.47 การวัดสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบ โดยเครื่อง Network Analyzer	82
รูปที่ 4.48 การวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในห้องคู่อัดคลื่น	82



บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดในการทำปริญญานิพนธ์

การติดต่อสื่อสารเป็นสิ่งที่ไม่สามารถขาดได้ในการดำรงชีวิตของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นการสื่อสารในระยะใกล้หรือระยะไกล โดยการสื่อสารได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของมนุษย์ที่เพิ่มมากขึ้นจากการที่เทคโนโลยีมีการพัฒนาอุปกรณ์และเครื่องมือในการติดต่อสื่อสารมากขึ้นจนการสื่อสารพัฒนาจากการสื่อสารภาคพื้นดินสู่การสื่อสารที่ใช้ดาวเทียมเป็นสถานีทวนสัญญาณบนท้องฟ้าที่ใช้ความถี่ในการส่งทั้งในย่านความถี่สูง ทำให้การติดต่อสื่อสารกันทั่วทั้งโลกสามารถที่จะทำได้สะดวก และรวดเร็วมากขึ้น

ดังนั้นส่วนประกอบที่สำคัญของการติดต่อในระบบการสื่อสารไร้สายที่จะขาดไม่ได้ก็คือสายอากาศ โดยสายอากาศที่มีการสร้างขึ้นมาเพื่อที่จะทำงานในระบบสื่อสารมีหลายประเภท เช่นสายอากาศไมโครสตริป สายอากาศแบบยาคิ แต่สายอากาศแต่ละชนิดก็มีข้อได้เปรียบ เสียเปรียบที่ต่างกันไป เช่นสายอากาศไมโครสตริปที่สร้างได้ยากและมีการสูญเสีย(loss)มากและมีราคาแพง และสายอากาศแบบยาคิที่สร้างได้ยากมากที่การใช้งานที่ความถี่สูงเพราะมีขนาดเล็กเกินไป แต่สายอากาศทั้งสองจะมีข้อดีที่มีน้ำหนักเบา โดยในโรงงานนี้จะกล่าวถึงสายอากาศอัตราขยายสูงจากแถวลำดับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งออกแบบให้สามารถตอบสนองการใช้งานในย่านความถี่สูง โดยโครงสร้างของสายอากาศจะมีลักษณะแบนราบกับโครงสร้างที่ติดตั้ง ซึ่งโรงงานจะเสนอการศึกษาคุณลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นอันได้แก่ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างของลำคลื่น ถ้าสภาพเจาะจงทิศทาง การไหลไรซ์รวมทั้งคุณลักษณะอิมพีแดนซ์ ที่ประกอบด้วยค่าการสูญเสียย้อนกลับและค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ โดยที่การออกแบบสายอากาศจะใช้การคำนวณและนำผลการคำนวณไปทำการออกแบบในคอมพิวเตอร์และทำการจำลองการทำงานของตัวสายอากาศก่อนจะทำการสร้างชิ้นงานจริงและทำการวัดผลการทำงานของตัวสายอากาศจริงโดยสายอากาศที่วิเคราะห์จะมีประโยชน์ในการใช้งานเป็นสายอากาศที่มีอัตราขยายสูงเพื่อการสื่อสารแบบจุดต่อจุดในระยะไกลต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

- 1) เพื่อศึกษาการออกแบบสายส่งกำลังสายอากาศที่สามารถทำการแมทซ์ซิง(Matching) ให้มีค่าที่อยู่ในเงื่อนไขที่ยอมรับได้
- 2) เพื่อที่สามารถศึกษาการใช้งานโปรแกรม MathCAD และ IE3Dในการออกแบบและจำลองการทำงานของสายอากาศและสามารถนำผลมาสร้างสายอากาศได้
- 3) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสายอากาศและสายนำสัญญาณต่อไปในอนาคตให้ดียิ่งขึ้น และสามารถนำความรู้ที่ได้รับจากการศึกษาสายอากาศไปประยุกต์ใช้ในการทำงานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เนื้อหาของปริญาานิพนธ์

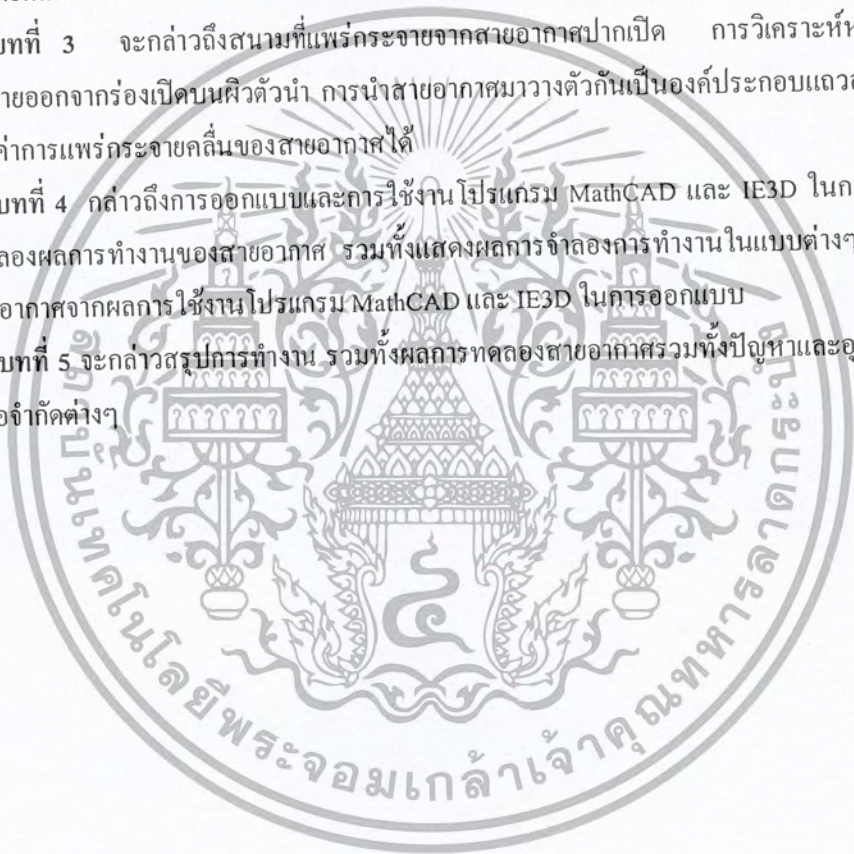
บทที่ 1 จะกล่าวถึงที่มาและแนวคิดในการทำปริญาานิพนธ์และวัตถุประสงค์ในการสร้างสายอากาศ อัตราแกนขยายสูงจากแถวลำดับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก ข้อดีข้อเสียของสายอากาศแบบต่างๆ

บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวกับสายอากาศ ซึ่งใช้ในการพิจารณาสายอากาศรวมถึง สมการทางคณิตศาสตร์ ที่กล่าวถึงสายอากาศพื้นฐาน เช่น พารามิเตอร์ (Parameter) พื้นฐานของสายอากาศ ซึ่งจะเป็นตัวบอกให้ทราบคุณสมบัติและคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ การวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่สนามระยะไกล

บทที่ 3 จะกล่าวถึงสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศปากเปิด การวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากช่องเปิดบนผิวตัวนำ การนำสายอากาศสมมาตรตัวกันเป็นองค์ประกอบแถวลำดับแบบต่างๆ ที่มีผลต่อค่าการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและการใช้งาน โปรแกรม MathCAD และ IE3D ในการออกแบบและทำการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ รวมทั้งแสดงผลการจำลองการทำงานในรูปแบบต่างๆ และแสดงการสร้างสายอากาศจากผลการใช้งานโปรแกรม MathCAD และ IE3D ในการออกแบบ

บทที่ 5 จะกล่าวสรุปการทำงาน รวมทั้งผลการทดลองสายอากาศรวมทั้งปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น รวมทั้งข้อจำกัดต่างๆ



บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 พารามิเตอร์พื้นฐานของสายอากาศ

2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

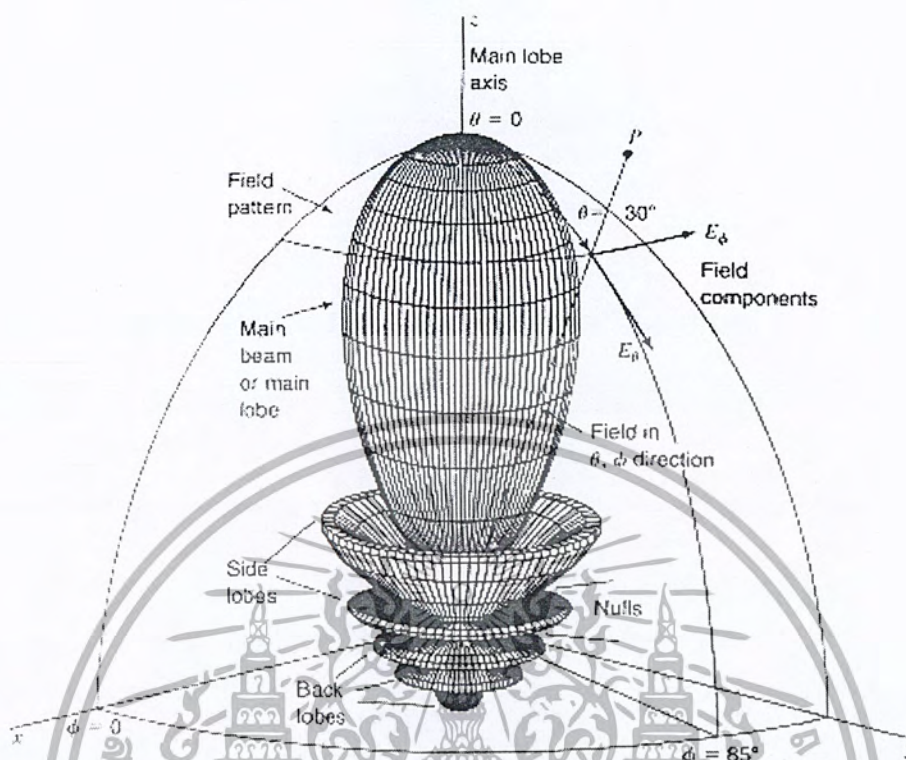
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นมักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกต ที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.1 แสดงระบบพิกัดโคออดิเนต (Coordinate) ที่ใช้ แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับ ได้ ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่า แบบรูปการแผ่กำลังงาน (Power Pattern) และกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่าแบบรูปการแพร่กระจายของสนาม (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

ตัวแพร่คลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic Radiation) คือสายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากัน ในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติของการแสดงทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศแบบชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่ง หรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างหนึ่งของสายอากาศที่มีคุณสมบัตินี้กล่าวคือสายอากาศที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายออกรอบตัว (Omni directional Antenna)



รูปที่ 2.1 ระบบพิกัดสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ

2.1.2 รูปคลื่นหลัก (Main Pattern)

โดยส่วนใหญ่ มักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของแบบรูปหลัก (Principal Pattern) ของสนามไฟฟ้า \vec{E} และสนามแม่เหล็ก \vec{H} สำหรับ สายอากาศโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (Linearly Polarization) แบบรูปในระนาบ \vec{E} จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์ (Vector) สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปในระนาบ \vec{H} จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด

2.1.3 ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

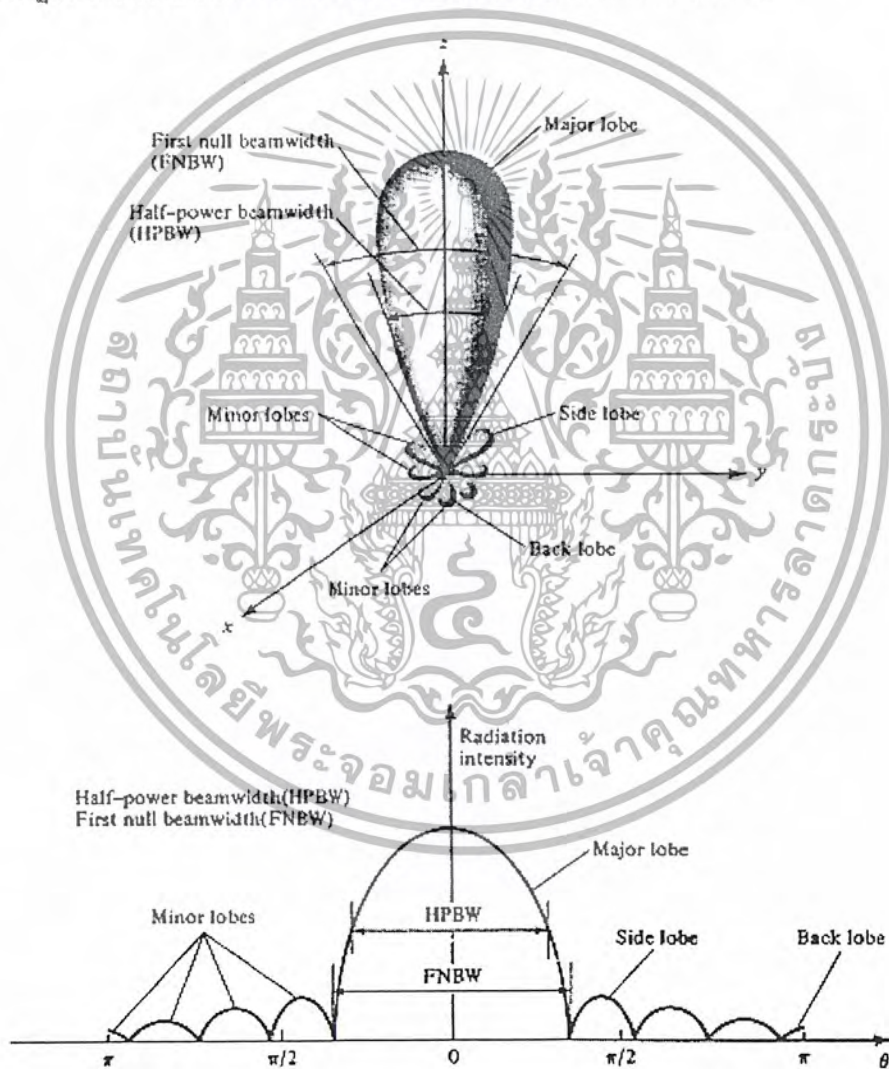
ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น คือส่วนที่เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการแหว่งล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูปที่ 2.2 แสดงแบบรูปเชิงขั้ว (Polar Pattern) แบบสามมิติ ซึ่งแบ่งเป็นลำคลื่นแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.2 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง z สายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น (Split Beam Antenna)

ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ลำคลื่นอื่น ๆ นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ดีต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักแสดงเป็น อัตราของความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนลำคลื่นข้าง (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของลำคลื่นข้างน้อยกว่า -20dB



รูปที่ 2.2 รูปบน ลำคลื่นต่าง ๆ และความกว้างลำคลื่นของแบบรูปสายอากาศและรูปล่างแบบรูปในแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 ระยะของสนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศ

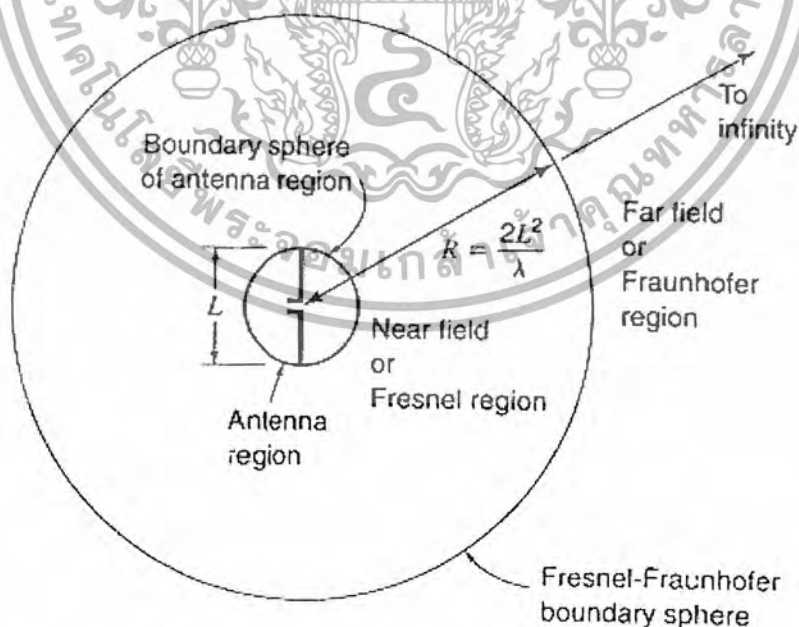
โดยทั่วไปมักจะแบ่งบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near Field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating-Near Field) และสนามระยะไกล (Far Field) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

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

บริเวณสนามกระจายระยะใกล้ เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่และการกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้น แปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นสนาม ในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $2D^2/\lambda \geq R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติใหญ่เท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ

ในบริเวณนี้สนามมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในของบริเวณดังกล่าวมีค่า R เท่ากับ $2D^2/\lambda$ และขอบนอกเป็นอนันต์



รูปที่ 2.3 แสดงการแบ่งบริเวณของสนามจากสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 เรเดียนและสเตอเรเดียน (Radian and Steradian)

การวัดมุมบนระนาบจะมีหน่วยเป็นเรเดียน หนึ่งเรเดียนเป็นมุมระนาบซึ่งยอดของมันอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลมที่มีรัศมี r และถูกปิดด้วยส่วนของเส้นรอบวง ซึ่งยาว r เนื่องจากเส้นรอบวงที่มีรัศมี r มีความยาว $c = 2\pi r$ ดังนั้นบนหนึ่งรอบวงกลม จะมี 2π เรเดียน

การวัดมุมมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน (sr) หนึ่งสเตอเรเดียนเป็นมุมตันที่มียอดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลมที่มีรัศมี r เนื่องจากพื้นที่ของทรงกลมรัศมี r มีค่าเท่ากับ $4\pi r^2$ ดังนั้นตลอดทรงกลมจะมี $4\pi sr$



รูปที่ 2.4 รูปบนมุมบนระนาบจะมีหน่วยเป็นเรเดียน และรูปล่าง การวัดมุมมีหน่วยเป็นสเตอเรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6 ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น

คือกำลังงานที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศ ต่อหน่วยมุมตัน ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกลความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่นและผลจากกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.1)$$

เมื่อ $U =$ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ($W / \text{หน่วยมุมตัน}$)

$W_{rad} =$ ความหนาแน่นของการแผ่กระจายคลื่น (W / m^2)

ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น สามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศ ระยะไกลได้คือ

$$\begin{aligned} U(\theta, \phi) &= (r^2 / 2\eta) |E(r, \theta, \phi)|^2 \\ &= (r^2 / 2\eta) [|E_\theta(r, \theta, \phi)|^2 + |E_\phi(r, \theta, \phi)|^2] \end{aligned} \quad (2.2)$$

เมื่อ $E =$ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล

$E_\theta, E_\phi =$ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศระยะไกล

$\eta =$ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลางมีค่าเท่ากับ $120\pi \Omega$

ดังนั้นแบบรูปของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

กำลังงานทั้งหมดหาได้โดยอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ตลอดมุมตันทั้งหมด ซึ่งจะ

ได้

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

2.1.7 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ไดเรกทีฟเนนในทิศทางที่กำหนด คืออัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือค่าของไดเรกทีฟเนนในทิศทางที่มีค่ามากที่สุดหรือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของต้นกำเนิดที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.4)$$

$$D_0 = \frac{U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2.5)$$

D_g = ไดเรกทีฟเนน (ไม่มีหน่วย)

D_0 = ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (ไม่มีหน่วย)

U = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

U_{max} = ค่าสูงสุดของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

U_0 = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)

P_{rad} = กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการที่ (2.4) และสมการที่ (2.5) จะทราบไดเรกทีฟเนนและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่มีค่าเป็นหนึ่ง เพราะว่ามันมีการแผ่กระจายกำลังงาน ออกไปทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน คือ U, U_{max} และ U_0 ต่างมีค่าเท่ากัน แต่ต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางมีมากกว่าหนึ่งเสมอ

สายอากาศที่มีลำคลื่นหลักแคบ ๆ เพียงลำคลื่นเดียวและมีลำคลื่นย่อยที่มีขนาดเล็กจนไม่สามารถตัดทิ้งได้มุมตันของลำคลื่นจะมีค่าประมาณเท่ากับผลคูณของ $HPBW$ ในระนาบซึ่งตั้งฉากกัน

$$D_0 = \frac{4\pi}{\Omega_A} \simeq \frac{4\pi}{\Theta_{1r}\Theta_{2r}} \quad (2.6)$$

มุมตันของลำคลื่น Ω_A ประมาณได้จาก

$$\Omega_A = \Theta_{1r} = \Theta_{2r} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Theta_{1r} = HPBW$ ระบายใด ๆ (เรเดียน)

$\Theta_{2r} = HPBW$ ซึ่งตั้งฉากกับระบายแรก(เรเดียน)

2.1.8 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half Power Beam width)

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง เป็นมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุดสองจุด

เมื่อทราบความกว้างลำคลื่นเป็นองศา จากสมการที่ (2.5) จะคิดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าความกว้างลำคลื่นนั้น โดยตรงได้เป็น

$$D_0 = \frac{4\pi(180/\pi)^2}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} \quad (2.8)$$

$\Theta_{1d} = HPBW$ ระบายใด ๆ (เรเดียน)

$\Theta_{2d} = HPBW$ ซึ่งตั้งฉากกับระบายแรก(เรเดียน)

2.1.9 อัตราขยาย (Gain)

เป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากอัตราขยายเชิงทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ค่าสภาพแฉะเชิงทิศทาง อธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

อัตราขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศ ในทิศทางที่กำหนดให้ มีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วจะคิดอัตราขยายกำลังในทิศทางที่มีการแผ่กระจายคลื่นแรงที่สุดดังนั้น

อัตราขยาย = 4π x (ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น)/(กำลังงานทั้งหมดที่ป้อนให้สายอากาศ)

$$= \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.9)$$

โดยทั่วไปแล้วมักจะพูดถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราขยายกำลัง ในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศนั้นต้องเท่ากัน สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.10)$$

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (P_{rad}) สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้กับสายอากาศ (P_{in}) ดังนี้

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.11)$$

เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ(ไม่มีหน่วย)ทำให้จะได้

$$G_g(\theta, \phi) = e_r \left[\frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.12)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับไดเรกทิวิตีดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.13)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

$$G_0 = G_g(\theta, \phi)|_{\max} = e_r D_g(\theta, \phi)|_{\max} \quad (2.14)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะได้

$$G_0 \cong \frac{30,000}{\Theta_{1d} \Theta_{2d}} \quad (2.15)$$

2.1.10 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศ จะใช้เมื่อคำนึงถึงการสูญเสียต่าง ๆ ที่ขั้วและภายในโครงสร้างของสายอากาศด้วย โดยทั่วไปแล้วประสิทธิภาพทั้งหมดคำนวณได้จาก

$$e_t = e_r e_c e_d \quad (2.16)$$

เมื่อ e_t = ประสิทธิภาพทั้งหมด (ไม่มีหน่วย)

e_r = ประสิทธิภาพเกี่ยวกับการสะท้อนกลับของคลื่น (ไม่มีหน่วย)

e_c = ประสิทธิภาพของตัวนำ (ไม่มีหน่วย)

e_d = ประสิทธิภาพของฉนวน (ไม่มีหน่วย)

Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสายอากาศ

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (2.17)$$

เมื่อ Z_{in} = อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

Z_0 = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance)

ปกติ e_c และ e_d คำนวณหาได้ลำบากมากมักจะได้อาจจากการทดลอง ดังนั้นเพื่อความสะดวกจึงมักเขียนได้เป็น

$$e_t = e_r e_{cd} \quad (2.18)$$

เมื่อ $e_{cd} = e_c e_d$ ประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

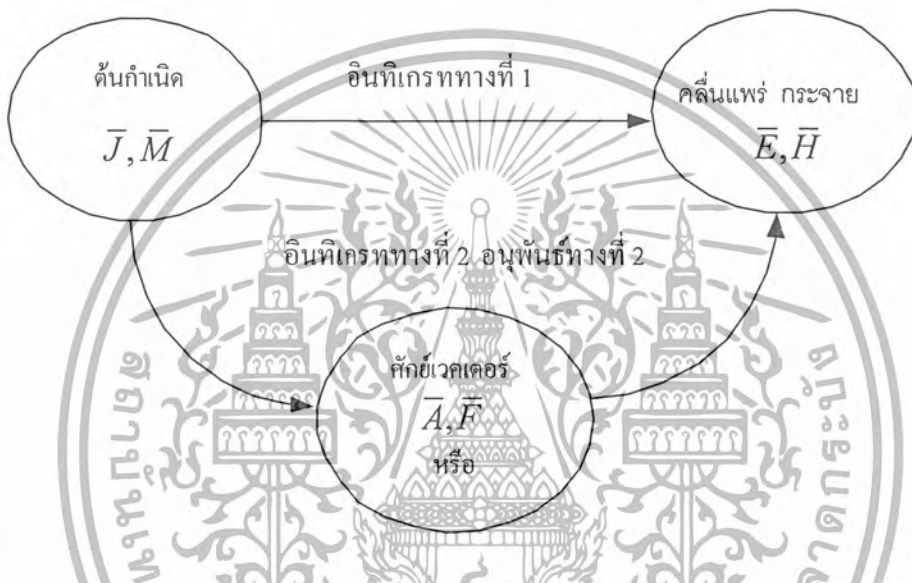
2.2 อินทิกรัลการแพร่กระจายคลื่นและฟังก์ชันช่วย

ในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับการแพร่กระจายคลื่น เราจะคำนวณหาคลื่นที่แพร่กระจายเมื่อกำหนดต้นกำเนิดคลื่นมาให้ ในทางกลับกันสำหรับการสังเคราะห์จะคำนวณต้นกำเนิดเมื่อกำหนดคลื่นที่แพร่กระจายมาให้

ในทางปฏิบัติวิธีการสังเคราะห์จะใช้ฟังก์ชันช่วย (Auxiliary Function) ที่เรียกว่าศักย์เวกเตอร์ (Vector Potential) ช่วยในการแก้ปัญหา ศักย์เวกเตอร์ที่ใช้นี้ได้แก่ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic Vector Potential) \vec{A} ศักย์เวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential) \vec{F} นอกจากนี้ก็มีศักย์ดาร์เรตซ์ (Hertz Potential) π_e

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ π_h สำหรับการคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก \bar{E} และ \bar{H} ตามลำดับนั้นมักจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือจะหาฟังก์ชันช่วยจากความหนาแน่นกระแสแสดต้นกำเนิด (Source Current Density) \bar{J} หรือ \bar{M} ก่อนจากนั้นจะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \bar{E} และความเข้มสนามแม่เหล็ก \bar{H} จากฟังก์ชันช่วยเหล่านี้ แทนที่จะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \bar{E} และความเข้มสนามแม่เหล็ก \bar{H} โดยตรงจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า \bar{J} และความหนาแน่นกระแสแสดแม่เหล็ก \bar{M} ซึ่งในบทนี้จะใช้ศักย์เวกเตอร์ \bar{A} และ \bar{F} ช่วยในการคำนวณหาสนาม



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันของการคำนวณหาสนามที่แพร่กระจายจากต้นกำเนิดไฟฟ้าและแม่เหล็ก

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

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้ศักย์เวกเตอร์ \bar{A} ในการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่กำเนิดให้มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาเป็นฮาร์โมนิค (Harmonic) เป็นที่ทราบกันดีว่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก \bar{B} มีลักษณะเป็นห่วงปิด คือมี $\nabla \cdot \bar{B} = 0$ ดังนั้นอาจแสดงได้ว่าเวกเตอร์ \bar{B} เป็นเคิร์ล (Curl) ของเวกเตอร์หนึ่งเวกเตอร์ใดได้เพราะเป็นไปตามเวกเตอร์ไอดentity (Vector Identity) ต่อไป

$$\nabla \cdot \nabla \times \bar{A} = 0 \tag{2.19}$$

เมื่อ \bar{A} เป็นเวกเตอร์ใด ๆ จะให้

$$\bar{B}_A = \mu \bar{H}_A = \nabla \times \bar{A} \tag{2.20ก}$$

หรือ

$$\bar{H}_A = \frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} \quad (2.20ข)$$

อักษร A ที่ห้อยท้ายแสดงว่าเป็นสนามที่เกิดจากศักย์เวกเตอร์ \bar{A} เมื่อแทนสมการที่ (2.20ก) ในสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ที่ว่า $\nabla \times \bar{E}_A = -j\omega \bar{B}$ จะได้ว่า

$$\nabla \times \bar{E}_A = -j\omega \mu \bar{H}_A \quad (2.21)$$

$$= -j\omega \nabla \times \bar{A} \quad (2.22)$$

เพราะฉะนั้น

$$\nabla \times [\bar{E}_A + j\omega \bar{A}] = 0 \quad (2.23)$$

จากเวกเตอร์ไอเดนติตีที่ว่าเคิร์ลของเกรเดียนที่มีค่าเท่ากับศูนย์ ทำให้สามารถสมมติว่า

$$\nabla \times [-\nabla \phi_e] = 0 \quad (2.24)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.23) และสมการที่ (2.24) จะได้ผลลัพธ์คือไปนี่คือ

$$\bar{E}_A + j\omega \bar{A} = -\nabla \phi_e \quad (2.25ก)$$

หรือ

$$\bar{E}_A = -\nabla \phi_e - j\omega \bar{A} \quad (2.25ข)$$

เมื่อ ϕ_e แทนศักย์ดาสเกลาร์ไฟฟ้า (Electric Scalar Potential) ใดๆซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสเปส

เมื่อทำการเคิร์ลทั้งสองข้างในสมการที่ (2.20) และใช้เวกเตอร์ไอเดนติตีที่ว่า $\nabla \times \nabla \bar{A} = \nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A}$ จะทำให้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla \times (\mu \bar{H}_A) = \nabla (\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A} \quad (2.26)$$

สำหรับกรณีที่ตัวกลางเป็นแบบเนื้อเดียว (Homogeneous) จะเขียนสมการที่ (2.26) ได้ใหม่เป็นดังนี้คือ

$$\mu \nabla \times \bar{H}_A = \nabla (\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A} \quad (2.27)$$

เมื่อจับสมการที่ (2.27) เท้ากับสมการแมกซ์เวลล์ต่อไปนี้คือ $\nabla \times \bar{H}_A = \bar{J} + j\omega \varepsilon \bar{E}_A$ จะทำให้สมการที่ (2.27) กลายเป็น

$$\mu \bar{J} + j\omega \varepsilon \bar{E}_A = \nabla (\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla^2 \bar{A} \quad (2.28)$$

หลังจากแทนสมการที่ (2.25ค) ลงในสมการที่ (2.28) จะได้

$$\nabla^2 \bar{A} + k^2 \bar{A} = \mu \bar{J} + \nabla (\nabla \cdot \bar{A}) + \nabla (j\omega \mu \varepsilon \phi_e) \quad (2.29)$$

เมื่อ $k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon$

สมการที่ (2.20) เป็นคำจำกัดความของสเกลาร์เวกเตอร์ \bar{A} ต่อไปจะกำหนดไดเวอร์เจนต์ (Divergent) ของสเกลาร์เวกเตอร์ \bar{A} ขึ้นเองซึ่งขึ้นกับค่าลิวต์ของมัน เพื่อให้สมการที่ (2.29) มีรูปสมการที่ง่ายขึ้น จะกำหนดให้

$$\nabla \cdot \bar{A} = -j\omega \mu \varepsilon \phi_e \quad (2.30)$$

ซึ่งจะทำให้ได้

$$\phi_e = -\frac{1}{j\omega \mu \varepsilon} \nabla \cdot \bar{A} \quad (2.31)$$

เรียกสมการที่ (2.31) ว่าลอเรนซ์เงื่อนไข (Lorentz Condition) และเมื่อแทนสมการที่ (2.31) ลงในสมการที่ (2.29) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\nabla^2 \bar{A} + k^2 \bar{A} = -\mu \bar{J} \quad (2.32)$$

นอกจากนี้ จะเขียนสมการที่ (2.25ก) ได้ใหม่ดังนี้

$$\bar{E}_A = -\nabla \phi_e - j\omega \bar{A} = -j\omega \bar{A} - j \frac{1}{j\omega \mu \epsilon} \nabla \cdot (\nabla \cdot \bar{A}) \quad (2.33)$$

จากที่แสดงมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าเมื่อเรารู้ค่าศักย์เวกเตอร์ \bar{A} จะสามารถคำนวณหา \bar{H}_A ได้จากสมการที่ (2.20ก) และหา \bar{E}_A ได้จากสมการที่ (2.33) ในหัวข้อ 2.2.1 จะแสดงวิธีการหาศักย์เวกเตอร์ \bar{A} ในเทอมของความหนาแน่นกระแส \bar{J} จากสมการที่ (2.22)

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

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

ดังนั้นสามารถแสดงได้ว่าเป็นเคิร์ลของศักย์เวกเตอร์ จาก

$$\bar{E}_F = \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F} \quad (2.34)$$

แทนสมการที่ (2.34) ลงในสมการเคิร์ลของแมกซ์เวลล์ที่ว่า $\nabla \times \bar{H} = j\omega \bar{D}$ จะได้ว่า

$$\nabla \times \bar{H}_F = -j\omega \bar{E}_F \quad (2.35)$$

หรือ

$$\nabla \times (\bar{H}_F + j\omega \bar{F}) = 0 \quad (2.36)$$

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

$$\bar{H}_F = -\nabla \phi_m \cdot j\omega \bar{F} \quad (2.37)$$

เมื่อ ϕ_m แทนศักย์สเกลาร์แม่เหล็กใดๆซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งในสเปส

อักษร F ที่ห้อยท้ายแสดงว่าเป็นสนามที่เกิดจากศักย์เวกเตอร์ \bar{F} นำไปแทนในสมการที่ (2.34)

$$\text{เมื่อทำการเคิร์ลของศักย์เวกเตอร์จากสมการ } \bar{E}_F = \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F}$$

จะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้

$$\nabla \times \bar{E}_F = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \nabla \times \bar{F} = -\frac{1}{\epsilon} [\nabla \nabla \cdot \bar{F} - \nabla^2 \bar{F}] \quad (2.38)$$

แล้วจับให้เท่ากับสมการแมกซ์เวลล์

$$\nabla \times \bar{E}_F = -\bar{M} - j\omega\mu\bar{H}_F \quad (2.39)$$

จะได้ผลลัพธ์ดังต่อไปนี้คือ

$$\nabla^2 \bar{F} + j\omega\mu\bar{H}_F = \nabla \nabla \cdot \bar{F} - \epsilon\bar{M} \quad (2.40)$$

หลังจากที่แทนสมการที่ (2.37) ลงในสมการที่ (2.40) จะเขียนสมการที่ (2.40) ได้ใหม่ว่า

$$\nabla^2 \bar{F} + k^2 \bar{F} = -\mu\bar{M} + \nabla(\nabla \cdot \bar{F}) + \nabla(j\omega\mu\epsilon\phi_m) \quad (2.41)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\nabla \cdot \bar{F} = j\omega\mu\epsilon\phi_m \rightarrow \phi_m = -\frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \cdot \bar{F} \quad (2.42)$$

สมการที่ (2.41) จะกลายเป็น

$$\nabla^2 \bar{F} + k^2 \bar{F} = -\epsilon\bar{M} \quad (2.43)$$

เมื่อทำการพิจารณาจากสมการที่แสดงข้างต้นมาแล้ว จะเห็นว่าเมื่อเรารู้ค่าศักย์เวกเตอร์ \bar{F} การหาค่า \bar{E}_F โดยนำค่า \bar{F} ไปแทนในสมการที่ (2.38) และหาค่า \bar{H}_F จากสมการที่ (2.37) หรือสมการที่ (2.39) เมื่อค่า $\bar{M} = 0$

2.3.1 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสต้านกำเนิด \bar{J} และ \bar{M}

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

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

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\bar{J} e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.44)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียว ในสมการที่ (2.32)

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

$$\bar{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iiint_V \frac{\bar{M} e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.45)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียว ในสมการที่ (2.43) ในสมการที่ (2.44) และสมการที่ (2.45) $k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon$ และ R เป็นระยะทางจากจุดใดๆ ในต้นกำเนิดไปยังจุดที่ทำการสังเกตค่าสนาม ในหัวข้อต่อไปจะแสดงวิธีหาคำตอบในสมการที่ (2.44) และสมการที่ (2.45)

3. ก) หา \bar{H}_A จากสมการที่ (2.20ก) และ \bar{E}_A จากสมการที่ (2.33) หรืออาจหา \bar{E}_A จากสมการแมกซ์เวลล์ เมื่อ $\bar{J} = 0$
- ข) หา \bar{E}_F จากสมการที่ (2.34) และ \bar{H}_F จากสมการที่ (2.34) หรืออาจหา \bar{H}_F จากสมการแมกซ์เวลล์ เมื่อ $\bar{M} = 0$
4. หาสนามรวมได้จาก

$$\bar{E} = \bar{E}_A + \bar{E}_F = -j\omega \bar{A} - j \frac{1}{\omega \mu \varepsilon} \nabla (\nabla \cdot \bar{A}) - \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \bar{F} \quad (2.46ก)$$

หรือ

$$\bar{E} = \bar{E}_A + \bar{E}_F = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \bar{H}_A - \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \bar{F} \quad (2.46\text{ข})$$

และ

$$\bar{H} = \bar{H}_A + \bar{H}_F = \frac{1}{\mu} \nabla \times -j\omega\bar{F} - j\frac{1}{\omega\mu\epsilon} \nabla(\nabla \cdot \bar{F}) \quad (2.47\text{ก})$$

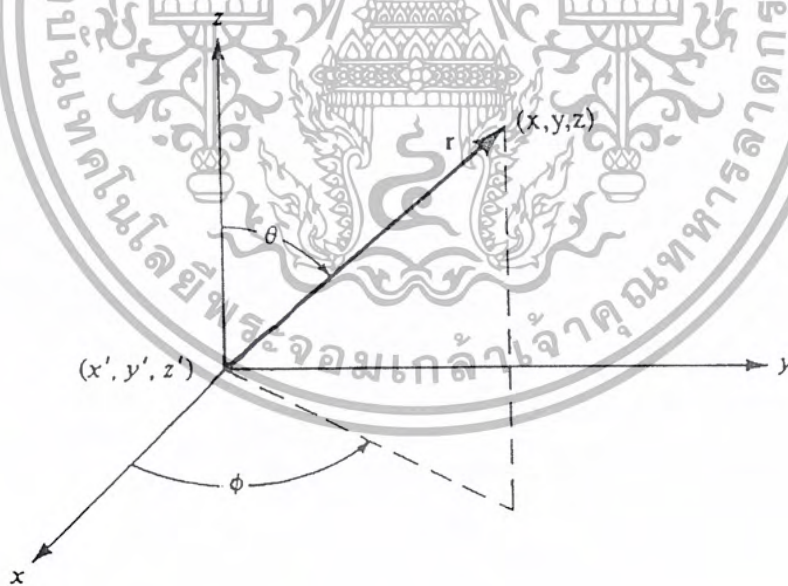
หรือ

$$\bar{H} = \bar{H}_A + \bar{H}_F = \frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A} - j\frac{1}{\omega\mu} \nabla \times \bar{E}_F \quad (2.47\text{ข})$$

2.4 ค่าตอบของสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียว

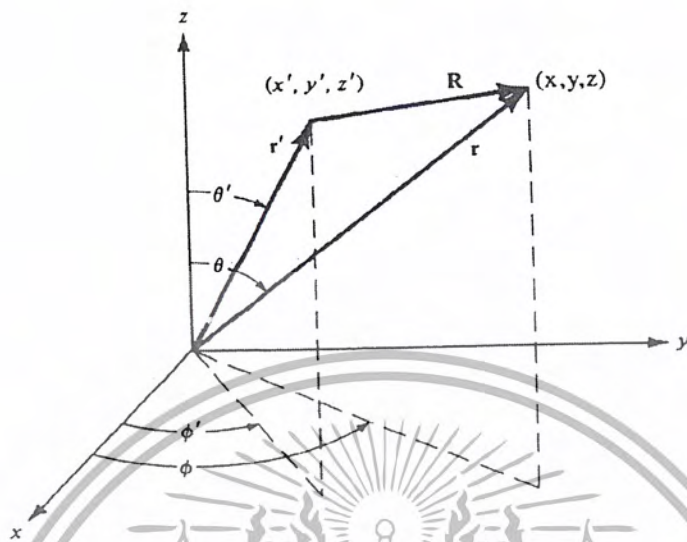
ในหัวข้อนี้จะแสดงวิธีการหาค่าเวกเตอร์ \bar{A} และ \bar{F} จากสมการเวกเตอร์คลื่นแบบเนื้อเดียว

สมมุติว่าต้นกำเนิดของสนามมีความหนาแน่นกระแสเป็น J_z ซึ่งในลิมิตจะเป็นต้นกำเนิดแบบเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมาก วางอยู่ที่จุดกำเนิด (Origin) ของระบบโดยออดินาท (x, y, z) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



(ก) ต้นกำเนิดอยู่ที่จุดกำเนิด

รูปที่ 2.6 (ก) ระบบ โคออดิเนทที่ใช้สำหรับคำนวณหาสนามเมื่อต้นกำเนิดอยู่ที่จุดกำเนิด



(ข) ต้นกำเนิดไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิด

รูปที่ 2.6(ข) ระบบโคออดิเนตที่ใช้สำหรับคำนวณหาสนามเมื่อต้นกำเนิดไม่ได้อยู่ที่จุดกำเนิด

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสในทิศทาง z (J_z) ดังนั้นจะมีเฉพาะ A_z ซึ่งจะเขียนสมการที่ (2.32) ได้ใหม่ว่า

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = -\mu J_z \quad (2.48)$$

ณ จุดซึ่งอยู่ห่างออกไปจากต้นกำเนิด ($J_z = 0$) สมการคลื่นจะกลายเป็น

$$\nabla^2 A_z + k^2 A_z = 0 \quad (2.49)$$

เพราะว่าในลิมิตต้นกำเนิดเป็นจุด A_z จึงไม่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง (θ และ ϕ) ดังนั้นในระบบโคออดิเนตทรงกลม $A_z = A_z(r)$ เมื่อ r เป็นระยะทางตามแนวรัศมี จะเขียนสมการที่ (2.49) ได้ใหม่ว่า

$$\nabla^2 A_z(r) + k^2 A_z(r) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{r^2 \partial A_z(r)}{\partial r} \right] + k^2 A_z(r) = 0 \quad (2.50)$$

และเนื่องจากเป็นฟังก์ชันของโคออดิเนตแนวรัศมีเท่านั้น การหาอนุพันธ์จึงเป็นแบบธรรมดา (Ordinary Differentiation) ซึ่งเป็นผลให้สมการที่ (2.50) กลายเป็นดังต่อไปนี้

$$\frac{d^2 A_z(r)}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dA_z(r)}{dr} + k^2 A_z(r) = 0 \quad (2.51)$$

สมการดิฟเฟอเรนเชียล ในรูปของสมการที่ (2.51) มี 2 คำตอบคือ

$$A_{z1} = C_1 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.52)$$

$$A_{z2} = C_2 \frac{e^{+jkr}}{r} \quad (2.53)$$

สมการที่ (2.52) แสดงคลื่นที่เดินทางออกไปจากต้นกำเนิดในทิศทางตามแนวรัศมี ในขณะที่สมการที่ (2.53) แสดงคลื่นที่เดินทางเข้าหาต้นกำเนิด ในกรณีนี้คลื่นกำเนิดถูกวางอยู่ที่จุดกำเนิด ซึ่งจะแพร่กระจายคลื่นออกไป เราจึงเลือกคำตอบในสมการที่ (2.52) จะได้ว่า

$$A_{z1} = A_{z2} = C_1 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.54)$$

ในกรณีของสนามสถิตย์ ($\omega = 0$) สมการที่ (2.54) จะเป็นดังนี้

$$A_z = \frac{C_1}{r} \quad (2.55)$$

ซึ่งเป็นคำตอบของสมการที่ (2.49) ถึงสมการที่ (2.51) เมื่อ $k=0$ ดังนั้นที่จุดที่ห่างออกไปจากต้นกำเนิด คำตอบของสมการซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลากับคำตอบของสนามสถิตย์จะต่างกันด้วยค่า e^{-jkr}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าหากมีค่านำเน็ด ($J_z \neq 0$) และ $k = 0$ สมการคลื่นสมการที่ (2.48) จะมีลักษณะดังนี้

$$\nabla^2 A_z = -\mu J_z \quad (2.56)$$

สมการที่ (2.56) เป็นสมการพัวซอง (Poisson's Equation) คือ

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.57)$$

ซึ่งมีคำตอบดังนี้คือ

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_v \frac{\rho}{r} dv' \quad (2.58)$$

เมื่อ r เป็นระยะทางจากจุดใดๆ บนความหนาแน่นประจุไปยังจุดสังเกต เนื่องจากสมการที่ (2.53) มีรูปแบบที่คล้ายกับสมการที่ (2.57) จึงอาจแสดงคำตอบของ สมการที่ (2.56) ได้ดังนี้

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_v \frac{J_z}{r} dv' \quad (2.59)$$

สมการที่ (2.59) เป็นคำตอบของสมการที่ (2.48) เมื่อ $k=0$ (เมื่อเป็นสนามสถิตย์) เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (2.54) กับสมการที่ (2.55) จะพบว่าคำตอบของสนามซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสมการที่ (2.48) หาได้โดยคูณคำตอบเมื่อเป็นสนามสถิตย์ของ สมการที่ (2.56) ด้วย e^{-jkr} เพราะฉะนั้นเราสามารถแสดงได้ว่า

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_v J_z \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.60)$$

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

ในกรณีที่ความหนาแน่นกระแสไหลในทิศทาง x และ y (J_x และ J_y) จะเขียนสมการคลื่นได้ว่า

$$\nabla^2 A_x + k^2 A_x = -\mu J_x \quad (2.61)$$

$$\nabla^2 A_y + k^2 A_y = -\mu J_y \quad (2.62)$$

ดังนั้นคำตอบของสมการคลื่นทั้งสอง จะเป็นดังนี้

$$A_z = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_v J_z \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.63)$$

$$A_y = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_v J_y \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.64)$$

จากสมการที่ (2.60) สมการที่ (2.63) และสมการที่ (2.64) ทำให้เขียนคำตอบของสมการคลื่น สมการที่ (2.32) ได้ดังนี้คือ

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_v \vec{J} \frac{e^{-jkr}}{r} dv' \quad (2.65)$$

สำหรับกรณีที่ดินกำเนิดไม่ได้อยู่ที่ออริจินแต่อยู่ที่ตำแหน่งใดๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สมการที่ (2.65) จะมีค่าดังนี้

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_v \vec{J}(x', y', z') \frac{e^{-jkr}}{R} dv' \quad (2.66)$$

สัญลักษณ์ แสดงถึงตำแหน่งของดินกำเนิด ส่วนที่ไม่มีสัญลักษณ์ หมายถึงตำแหน่งของจุดสังเกต และ R เป็นระยะทางจากจุดใดๆ ในดินกำเนิดไปยังจุดสังเกต

ในทำนองเดียวกันจะหาได้ว่า

$$\vec{F}(x, y, z) = \frac{\epsilon}{4\pi} \iiint_v \vec{M}(x', y', z') \frac{e^{-jkr}}{R} dv' \quad (2.67)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_s \bar{J}_s(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.68)$$

และ

$$\bar{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_s \bar{M}_s(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (2.69)$$

ส่วนในกรณีที่เป็นกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็ก การอินทิเกรตจะกลายเป็นแบบอินทิกรัลตามเส้น ดังนี้คือ

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_c \bar{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.70)$$

และ

$$\bar{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \int_c \bar{I}_m(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.71)$$

2.5 การแพร่กระจายคลื่นของสนามระยะไกล

เนื่องจากสนามซึ่งแพร่กระจายออกจากสายอากาศ ซึ่งมีขนาดจำกัดจะเป็นคลื่นทรงกลม ดังนั้นคำตอบทั่วไปของสมการเวกเตอร์คลื่น ของสายอากาศที่มีขนาดจำกัดที่แสดงในเทอมของส่วนประกอบแบบทรงกลม จะมีรูปแบบเป็น

$$\bar{A} = \hat{a}_r A_r(r, \theta, \phi) + \hat{a}_\theta A_\theta(r, \theta, \phi) + \hat{a}_\phi A_\phi(r, \theta, \phi) \quad (2.72)$$

ขนาดของแต่ละส่วนประกอบของสนามสมการที่ (2.72) แปรผันกับ r เป็น $\frac{1}{r}, n = 1, 2, 3, \dots$

เมื่อตัดเทอมที่มีค่า n สูง ๆ คือ $n = 2, 3, \dots$ เมื่อ $r \rightarrow \infty$ ทำให้สมการที่ (2.72) กลายเป็นดังนี้

$$\bar{A} \simeq [\hat{a}_r A'_r(\theta, \phi) + \hat{a}_\theta A'_\theta(\theta, \phi) + \hat{a}_\phi A'_\phi(\theta, \phi)] \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนสมการที่ (2.73) ลงในสมการที่ (2.33) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้คือ

$$\begin{aligned} \bar{E} = \frac{1}{r} \{ & -j\omega e^{-jkr} [\hat{a}_r A_r'(0) + \hat{a}_\theta A_\theta'(\theta, \phi) + \hat{a}_\phi A_\phi'(\theta, \phi)] \} \\ & + \frac{1}{r^2} \{ \dots \} + \dots \end{aligned} \quad (2.74ก)$$

ส่วนประกอบของสนามในแนวรัศมี ไม่มีเทอม $\frac{1}{r}$ เพราะหักล้างกัน ทำนองเดียวกันถ้าใช้สมการที่ (2.73) จะเขียนสมการที่ (2.20ก) ได้ว่า

$$\bar{H} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{j\omega e^{-jkr}}{\eta} [\hat{a}_r A_r'(0) + \hat{a}_\theta A_\theta'(\theta, \phi) - \hat{a}_\phi A_\phi'(\theta, \phi)] \right\} + \frac{1}{r^2} \{ \dots \} + \dots \quad (2.74ข)$$

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

เมื่อตัดเทอม $\frac{1}{r^n}$ ที่มีกำลังสูง ๆ ทั้ง สนามไฟฟ้า \bar{E} และสนามแม่เหล็ก \bar{H} ที่แพร่กระจายจะมีเฉพาะส่วนประกอบ θ และ ϕ ซึ่งเขียนได้ดังนี้
สนามระยะไกล

$$\left. \begin{aligned} E_r &\simeq 0 \\ E_\theta &\simeq -j\omega A_\theta \\ E_\phi &\simeq -j\omega A_\phi \end{aligned} \right\} \rightarrow \bar{E}_A \simeq -j\omega \bar{A} \quad (2.75ก)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

(2.76ข)

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

ส่วนประกอบของสนามในแนวรัศมีเฉพาะเทอมกำลังสูง ๆ ของ $\frac{1}{r^n}$ ทำนองเดียวกับสนามระยะไกลที่เกิดจากต้นกำเนิดสนามแม่เหล็ก \bar{M} (ศักย์ดาเวกเตอร์ไฟฟ้า \bar{F}) เขียนได้ดังนี้

สนามระยะไกล

$$\left. \begin{aligned} H_r &\simeq 0 \\ H_\theta &\simeq -j\omega F_\phi \\ H_\phi &\simeq -j\omega F_\theta \end{aligned} \right\} \rightarrow \bar{H}_F \simeq -j\omega \bar{F}$$

(2.77)

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

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

(2.78)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยใช้หลักการสนามสมมูลซึ่งจะกำหนดหาความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กเชิงผิว (\overline{M}_s) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเชิงผิว (\overline{J}_s) อันเป็นแหล่งจ่ายสมมูลซึ่งเป็นต้นกำเนิดออกมาดังนี้

$$\overline{M}_s = -2\hat{n} \times \overline{E}_a \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \overline{M}_s &= -2\hat{n} \times \overline{E}_a \\ &= -2\hat{a}_z \times \hat{a}_y E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \end{aligned}$$

$$\overline{M}_s = 2E_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \hat{a}_x \quad (3.3)$$

$$\overline{M}_s = 0$$

และ

$$\overline{J}_s = 0$$

สำหรับบริเวณอื่นๆ

สำหรับบริเวณอื่นๆ

(3.4)

เมื่อเราทราบต้นกำเนิดของสนามไฟฟ้า (\overline{J}_s) และสนามแม่เหล็ก (\overline{M}_s) แล้วโดยอาศัยศักย์ค่าเวกเตอร์ไฟฟ้า (\overline{F}) และศักย์ค่าเวกเตอร์แม่เหล็ก (\overline{A}) สามารถที่จะนำมาคำนวณหาสนามแม่เหล็ก (\overline{H}) และสนามไฟฟ้า (\overline{E}) ในบริเวณระยะไกล (Far-Field) อันเป็นรูปแบบในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบปากเปิดได้ดังนี้

1. กำหนดแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก \overline{M}_s และกระแสไฟฟ้า \overline{J}_s

2. หา \overline{F} เนื่องจาก \overline{M}_s เมื่อ โดยใช้ $\overline{J}_s = 0$

$$\overline{F} = \frac{\mathcal{E}}{4\pi} \iint_s \overline{M}_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \quad (3.5)$$

ในการออกแบบจะพิจารณาในบริเวณระยะไกล (Far field) สามารถประมาณค่า R ได้ดังนี้

$$R \cong r - r' \cos \phi \quad \text{สำหรับการแปรผันทางเฟส} \quad (3.6)$$

$$R \cong r \quad \text{สำหรับการแปรผันทางแอมพลิจูด} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ค่าสนามไฟฟ้า \vec{E} และสนามแม่เหล็ก \vec{H} ในระนาบฉากจะออร์ธोगอนอล (Orthogonal) ซึ่งกันและกัน และจะทำให้สนามมีลักษณะเป็นแบบ TEM (Transverse Electromagnetic Mode)



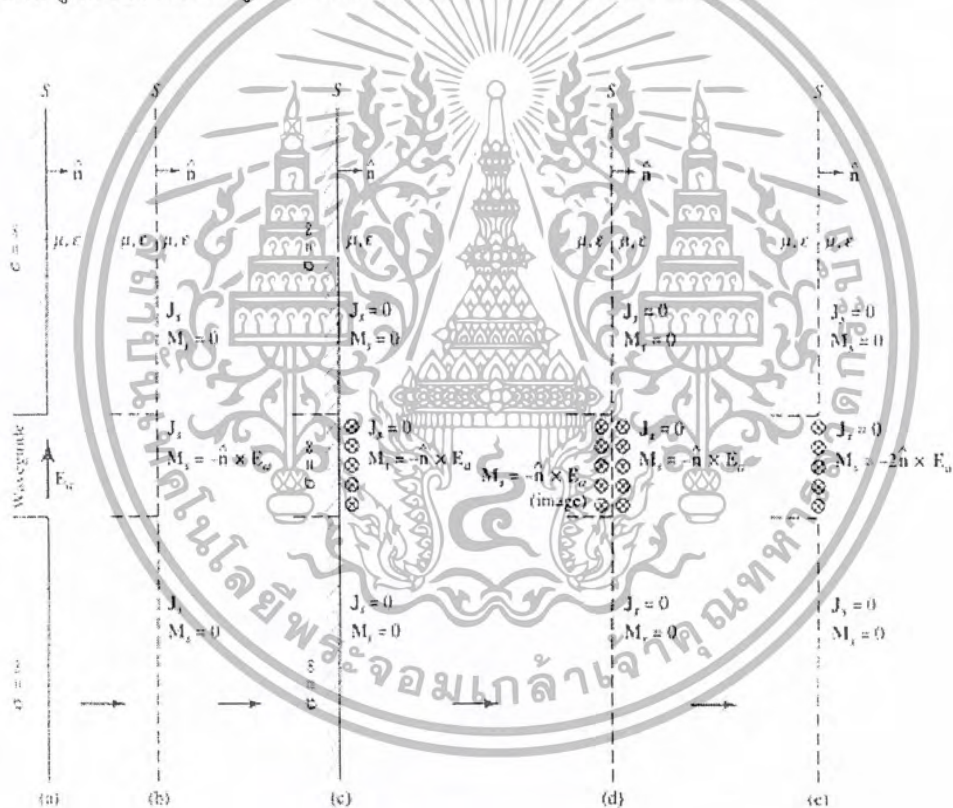
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สนามที่แพร่กระจายจากสายอากาศปากเปิด

3.1 การวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากช่องเปิดบนผิวตัวนำ

การพิจารณาสนามที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นฮาร์โมนิก ซึ่งแสดงได้ด้วยฟังก์ชันของ $e^{-j\omega t}$ ของสนามที่มีการแพร่กระจายออกจากสายอากาศปากเปิด สามารถพิจารณาได้จากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s บนพื้นผิวตัวนำ ซึ่งสมมติให้แผ่นตัวนำเป็นตัวนำสมบูรณ์ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s จะมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้เหลือเฉพาะความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s เท่านั้น โดยที่สนามจะมีความแรงที่สุดตรงกลางของช่องเปิดและที่ขอบของช่องเปิดจะเป็นศูนย์ โดยช่องเปิดมีรูปแบบจำลองสมมูลดังนี้เมื่อพิจารณาเป็นระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์



รูปที่ 3.1 รูปแบบจำลองสมมูลของช่องเปิดเมื่อพิจารณาเป็นระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์

โดยกระแสสมมูลของการกระจายความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s จะถูกสร้างขึ้นบนระนาบขนาดอนันต์ เมื่อองค์ประกอบในแนวสัมผัสของสนามไฟฟ้าที่ด้านนอกของช่องเปิดไม่มีเพราะเงื่อนไขขอบเขตจะหายไปจะเหลือแต่กระแสแม่เหล็ก M_s เท่านั้นที่ยังคงอยู่ส่วนกระแสไฟฟ้า J_s ที่ตำแหน่งใดๆจะไม่เป็นศูนย์และจะยังคงจะเป็นค่าที่ยังไม่ทราบค่าที่จะทำให้เกิดปัญหาได้

ยาก จึงทำการแก้ไขปัญหาโดยทำการสมมติให้แผ่นตัวนำเป็นตัวนำสมบูรณ์ J_s ที่ตำแหน่งใดๆเป็นศูนย์ที่ทุกบริเวณ ทำให้จะมีความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s ที่ช่องเปิดที่จุดกำเนิดที่พิจารณาเท่านั้น

จากการใช้ทฤษฎีเงาเมื่อแหล่งกำเนิดเสมือนมีทิศทางเดียวกันทำให้สามารถย้ายและแทนค่าด้วยแหล่งกำเนิดเสมือน และเมื่อพิจารณาเป็นศูนย์กลางที่ไม่มีขอบเขตจะทำให้การแก้ปัญหาสมการคลื่นทำได้ง่ายขึ้น

สำหรับการคำนวณหาค่า \bar{E} ของสายอากาศปากเปิด จะใช้ฟังก์ชันช่วย (Auxiliary Function) ที่เรียกว่า ศักย์ดาเวกเตอร์ (Vector Potential) มาช่วยในการแก้ปัญหา โดยศักย์ดาเวกเตอร์ที่ใช้กันมากได้แก่ ศักย์ดาเวกเตอร์แม่เหล็ก (Magnetic Vectors Potential) \bar{A} และ ศักย์ดาเวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential) \bar{F} สำหรับการคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \bar{E} และความเข้มสนามแม่เหล็ก \bar{H} มักจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ จะหาฟังก์ชันช่วยจากความหนาแน่นกระแสต้นกำเนิด (Source Current Density) ก่อน ซึ่งจะเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า \bar{J} และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s จากนั้นจะคำนวณหาความเข้มสนามไฟฟ้า \bar{E} และความเข้มสนามแม่เหล็ก \bar{H} ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ช่องเปิด บนแผ่นตัวนำขนาดอนันต์ในระนาบต่างๆ

สนามไฟฟ้าในแนวแกน Y ที่ ช่องเปิดเป็นค่าคงที่และมีค่าเท่ากับ

$$\bar{E}_a = a_y E_o \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \begin{cases} -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ -b/2 \leq y' \leq b/2 \end{cases} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

r คือ ระยะห่างจากจุดโคออดิเนท (Coordinate) ไปยังจุดที่สังเกต

r' คือ ระยะห่างจากจุดโคออดิเนทไปยังจุดใด ๆ บนพื้นที่

และ

φ คือ มุมระหว่างเวกเตอร์ r และ r'

เมื่อแทนสมการที่ (3.6) และสมการที่ (3.7) ลงในสมการที่ (3.5) สามารถหาค่าเวกเตอร์ไฟฟ้าได้ ดังนี้

$$\bar{F} \cong \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_s \overline{M_s} \frac{e^{-jk(r-r'\cos\varphi)}}{r} ds' \quad (3.8)$$

จากสมการที่ (3.8) และสามารถแยกพจน์ได้เป็น

$$\bar{F} \cong \frac{\varepsilon}{4\pi r} \iint_s \overline{M_s} e^{-jkr} e^{jkr'\cos\varphi} ds' \quad (3.9)$$

เมื่อพิจารณาเทอม e^{-jkr} ให้เป็นค่าคงที่สามารถดึงมาไว้หน้าเทอมอินทิเกรตจะได้

$$\bar{F} \cong \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi r} \iint_s \overline{M_s} e^{jkr'\cos\varphi} ds' \quad (3.10)$$

หรือ

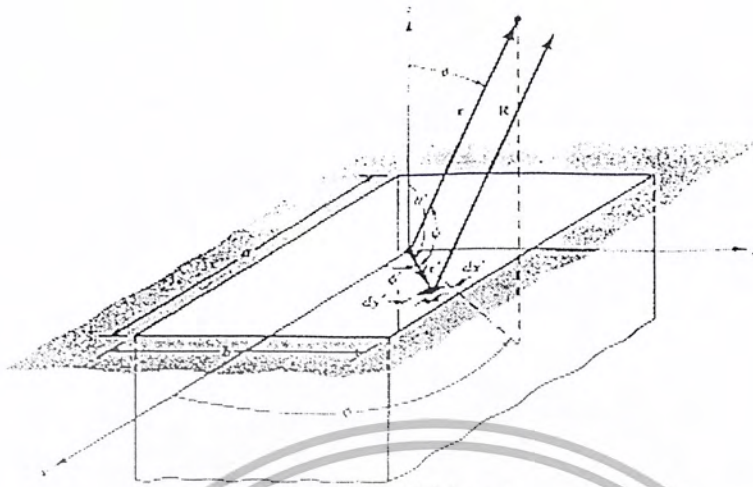
$$\bar{F} \cong \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi r} L \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$L = \iint_s \overline{M_s} e^{jkr'\cos\varphi} ds' \quad (3.12)$$

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยทั่วไปจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางตัวของสายอากาศที่วางตัวอยู่ในแต่ละระนาบซึ่งในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบปากเปิดจะพิจารณาให้สายอากาศวางตัวในระนาบ xy ดังแสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 รูปแบบการวิเคราะห์สายอากาศในระบบพิกัดฉาก

จากการวิเคราะห์สายอากาศในระบบพิกัดฉากดังนั้นในการหาระยะทางจากจุดใดๆบนแหล่งจ่ายไปยังจุดที่สังเกตสามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} r' \cos \phi &= r' \cdot \hat{a}_r = (\hat{a}_x x' + \hat{a}_y y') \cdot (\hat{a}_r \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_\phi \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \\ &= x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (3.13)$$

ในระบบพิกัดฉากในการหาอนุพันธ์ของพื้นที่ (Differential Area) ที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศสามารถหาได้จาก

$$ds' = dx' dy' \quad (3.14)$$

เมื่อนำค่าในสมการที่ (3.13) และสมการที่ (3.14) แทนค่าในสมการที่ (3.12) จะได้

$$\begin{aligned} L &= \iint_s \overline{M}_s \cdot e^{jk r' \cos \phi} ds' \\ &= \iint_s (2E_o \cos(\frac{\pi x'}{a}) \hat{a}_x) (e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \hat{a}_\theta) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 2Eo \iint_S e^{jk(x'\sin\theta\cos\phi + y'\sin\theta\sin\phi)} dx' dy' (\hat{a}_x \cdot \hat{a}_\theta) \quad (3.15)$$

การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะพิจารณาในระบบพิกัดทรงกลม ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนรูปแบบในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดทรงกลม โดยรูปแบบในการเปลี่ยนจากระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดทรงกลม (The Rectangular to Spherical Transformation Matrix) [Balanis,1982] ดังในสมการที่ (3.16)

$$\begin{bmatrix} A_r \\ A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta \cos\phi & \sin\theta \sin\phi & \cos\phi \\ \cos\theta \cos\phi & \cos\theta \sin\phi & -\sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

จากรูปแบบในการเปลี่ยนระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดทรงกลม เมื่อทำการคูณเมตริกจะได้

$$\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin\theta \cos\phi + \hat{a}_y \sin\theta \sin\phi + \hat{a}_z \cos\theta \quad (3.17)$$

$$\hat{a}_\theta = \hat{a}_x \cos\theta \cos\phi + \hat{a}_y \cos\theta \sin\phi - \hat{a}_z \sin\theta \quad (3.18)$$

$$\hat{a}_\phi = -\hat{a}_x \sin\phi + \hat{a}_y \cos\phi \quad (3.19)$$

เมื่อพิจารณา \hat{a}_r จะพบว่าแต่ละเฉพาะทิศทาง \hat{a}_x เท่านั้นเมื่อทำการ dot product ในทิศทางต่าง ๆ จะได้ผลดังนี้

$$\hat{a}_x \cdot \hat{a}_\theta = \hat{a}_x (\hat{a}_x \cos\theta \cos\phi + \hat{a}_y \cos\theta \sin\phi - \hat{a}_z \sin\theta) \quad (3.20)$$

$$\hat{a}_x \cdot \hat{a}_\theta = \cos\theta \cos\phi$$

$$\hat{a}_x \cdot \hat{a}_\phi = \hat{a}_x (-\hat{a}_x \sin\phi + \hat{a}_y \cos\phi) \quad (3.21)$$

$$\hat{a}_x \cdot \hat{a}_\phi = -\sin\phi$$

$$\hat{a}_r = 0 \quad (3.22)$$

แทนค่าสมการที่ (3.20) และแทนค่าขอบเขตของ x' และ y' แทนค่าลงในสมการที่ (3.15) จะได้ L ในทิศทาง \hat{a}_θ

$$L_\theta = 2Eo \cos\theta \cos\phi \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) e^{jk(x'\sin\theta\cos\phi + y'\sin\theta\sin\phi)} dx' dy' \quad (3.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.23) ซึ่งเทอมอินทิเกรตสามารถที่จะแยกการอินทิเกรตโดยใช้หลักการการอินทิเกรตดังสมการที่ (3.24)

$$\int_{-c/2}^{c/2} e^{j(\alpha)z} dz = c \left[\frac{\sin \frac{\alpha c}{2}}{\frac{\alpha c}{2}} \right] \quad (3.24)$$

เมื่อใช้หลักการการอินทิเกรตดังสมการที่ (3.24) ซึ่งสามารถแยกการพิจารณาการอินทิเกรตโดยพิจารณาแยกการอินทิเกรตของแต่ละเทอมได้ดังนี้

$$\int_{-b/2}^{b/2} (e^{jk(y' \sin \theta \sin \phi)}) dy' \quad (3.25)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.25) ซึ่งแยกเทอมการอินทิเกรตมาจกสมการที่ (3.23) เปรียบเทียบกับสมการที่ (3.24) จะพบว่า

$$\alpha = k \sin \theta \sin \phi \quad (3.26)$$

แทนสมการที่ (3.26) ในสมการที่ (3.24) จะได้

$$\int_{-b/2}^{b/2} e^{jk(y' \sin \theta \sin \phi)} dy' = b \left[\frac{\sin \frac{kb \sin \theta \sin \phi}{2}}{\frac{kb \sin \theta \sin \phi}{2}} \right] \quad (3.27)$$

และเทอมอินทิเกรต

$$\int_{-a/2}^{a/2} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi)} dx' \quad (3.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการและทำการคำนวณจะได้ว่า

$$\int_{-a/2}^{a/2} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) e^{jk(x'\sin\theta\cos\phi)} dx' = \frac{2a}{\pi} \cos\left(\frac{(ka\sin\theta\cos\phi)/2}{((ka\sin\theta\cos\phi)/2)^2 - (\pi/2)^2}\right) \quad (3.29)$$

ผลที่ได้จากการอินทิเกรตในแต่ละเทอมในสมการที่ (3.27) และสมการที่ (3.29) แทนค่าลงในสมการที่ (3.23) จะได้

$$L_\theta = (-\pi)abE_0 \cos\theta \cos\phi \cos\left[\frac{(ka\sin\theta\cos\phi)/2}{((ka\sin\theta\cos\phi)/2)^2 - (\pi/2)^2}\right] \left[\frac{\sin\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}}{\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}}\right] \quad (3.30)$$

หรือทำการเขียนให้อยู่ในรูปของ $f(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ จะได้ว่า

$$L_\theta = (-\pi)abE_0 \cos\theta \cos\phi \cos\left[\frac{x}{(x)^2 - (\pi/2)^2}\right] \left[\frac{\sin y}{y}\right] \quad (3.31)$$

$$x = \frac{(ka\sin\theta\cos\phi)}{2} \quad (3.32)$$

$$y = \frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2} \quad (3.33)$$

ในทำนองเดียวกันหากพิจารณา L ในทิศทาง \hat{a}_ϕ จะพบว่า

$$L_\phi = 2E_0 \iint_S \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) e^{jk(x'\sin\theta\cos\phi + y'\sin\theta\sin\phi)} dx' dy' \hat{a}_x \cdot \hat{a}_\phi \quad (3.34)$$

จากการเปลี่ยนระบบพิกัดฉากเป็นระบบพิกัดทรงกลม และพิจารณาในทิศทาง \hat{a}_ϕ เมื่อทำการ dot product กันในทิศทาง \hat{a}_x และ \hat{a}_ϕ จะได้ดังสมการที่ (3.20) และแทนค่าขอบเขตของ x' และ y' แทนค่าลงในสมการที่ (3.23)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$L_\phi = -2E_0 \sin \phi \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (3.35)$$

พิจารณาการอินทิเกรต สามารถแยกการพิจารณาเทอมอินทิเกรต โดยพิจารณาแยกแต่ละเทอมดังสมการที่ (3.27) โดยผลของการอินทิเกรตเทอมแรกจะได้

$$\int_{-b/2}^{b/2} e^{jk(y' \sin \theta \sin \phi)} dy' = b \left[\frac{\sin \frac{kb \sin \theta \sin \phi}{2}}{\frac{kb \sin \theta \sin \phi}{2}} \right] \quad (3.36)$$

และผลของการอินทิเกรตเทอมหลังก็ได้

$$\int_{-a/2}^{a/2} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi)} dx' = \left(\frac{-2\pi}{a} \right) \cos \left[\frac{ka \sin \theta \cos \phi}{2} \right] \frac{1}{\left(\frac{ka \sin \theta \cos \phi}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2} \quad (3.37)$$

ผลที่ได้จากการแยกอินทิเกรตในแต่ละเทอมในสมการที่ (3.36) และสมการที่ (3.37) เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (3.35) จะได้ค่า L ในทิศทางทาง \hat{a}_ϕ

$$L_\phi = \left(\frac{-4\pi}{a} \right) E_0 \sin \phi \cos \left[\frac{ka \sin \theta \cos \phi}{2} \right] \frac{1}{\left(\frac{ka \sin \theta \cos \phi}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2} b \left[\frac{\sin \frac{kb \sin \theta \sin \phi}{2}}{\frac{kb \sin \theta \sin \phi}{2}} \right] \quad (3.38)$$

เขียนให้อยู่ในรูป $f(x) = \frac{\sin(x)}{x}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_\phi = abE_0 \sin \phi \cos \left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2} \right] \left[\frac{\sin y}{y} \right] \quad (3.39)$$

จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชัน L กับ ศักย์ดาเวกเตอร์ไฟฟ้า F สามารถที่จะหาค่าศักย์ดาเวกเตอร์ไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ โดยการแทนค่าฟังก์ชัน L ที่ได้ในแต่ละทิศทางที่หาได้จากสมการที่ (3.30) และสมการที่ (3.38) ลงในสมการที่ (3.11) จะได้ ศักย์ดาเวกเตอร์ไฟฟ้า F ดังสมการที่ (3.40) และสมการที่ (3.41) ตามลำดับ

$$F_\theta \cong \frac{\epsilon e^{-jkr}}{4\pi r} (-\pi) abE_0 \cos \theta \cos \phi \cos \left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2} \right] \left[\frac{\sin y}{y} \right] \quad (3.40)$$

$$F_\phi \cong \frac{\epsilon e^{-jkr}}{4\pi r} abE_0 \sin \phi \cos \left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2} \right] \left[\frac{\sin y}{y} \right] \quad (3.41)$$

ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะพิจารณาในสนามระยะไกล (Far Field) โดยสนาม \vec{H} สามารถที่จะประมาณได้จาก

$$H_F = -j\omega F \quad (3.42)$$

และสนาม \vec{E} สามารถที่จะหาได้จาก

$$E_F = -\eta \hat{a}_r \times \overline{H}_F = j\omega \eta \hat{a}_r \times \overline{F} \quad (3.43)$$

$$\text{เมื่อ } \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.44)$$

η เป็นอินทริเนติก อิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

เมื่อพิจารณาสนาม \vec{E} ในองค์ประกอบต่าง ๆ โดยพิจารณาในทิศทาง \hat{a}_θ ก่อน

$$E_F = -\eta \hat{a}_r \times \overline{H}_F = j\omega \eta \hat{a}_r \times F_\theta \hat{a}_\theta \quad (3.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการที่ (2.40) ลงในสมการที่ (2.46) จะได้สนาม E ในทิศทาง \hat{a}_ϕ

$$E_\phi = j\omega\eta \frac{\epsilon e^{-jkr}}{4\pi r} (-\pi ab E_0 \cos\theta \cos\phi) \cos\left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2}\right] \left[\frac{\sin y}{y}\right] \quad (3.46)$$

หรือ

$$E_\phi = \left(\frac{-\pi}{2}\right) \frac{jab E_0 k e^{-jkr}}{2\pi r} (\cos\theta \cos\phi) \cos\left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2}\right] \left[\frac{\sin y}{y}\right] \quad (3.47)$$

และพิจารณา E ในทิศทาง \hat{a}_ρ

$$E_\rho = -\eta \hat{a}_r \times \overline{H}_\rho = j\omega\eta \hat{a}_r \times F_\phi \hat{a}_\phi \quad (3.48)$$

เมื่อทำการ Cross Product สมการที่ (3.48) จะได้

$$E_\rho = -j\omega\eta F_\phi \hat{a}_\theta \quad (3.49)$$

แทนค่าสมการที่ (3.40) ลงในสมการที่ (3.49) จะได้สนาม E ในทิศทาง \hat{a}_θ

$$E_\theta = j\omega\eta \frac{\epsilon e^{-jkr}}{4\pi r} (ab E_0 \sin\phi) \cos\left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2}\right] \left[\frac{\sin y}{y}\right] \quad (3.50)$$

สามารถที่จะจัดการที่ (3.50) ใหม่ได้เป็น

$$E_\theta = \left(\frac{-\pi}{2}\right) \frac{jab E_0 k e^{-jkr}}{2\pi r} (\sin\phi) \cos\left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2}\right] \left[\frac{\sin y}{y}\right] \quad (3.51)$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณาสนาม H ในองค์ประกอบต่างๆ ในพิจารณาในทิศทาง \hat{a}_θ

$$H_\theta = -j\omega \frac{\epsilon e^{-jkr}}{2\pi r} (abE_0 \sin \phi) \cos \left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2} \right] \left[\frac{\sin y}{y} \right] \quad (3.52ก)$$

$$H_\theta = \left(\frac{-\pi}{2} \right) \frac{jabE_0 k e^{-jkr}}{2\pi r \eta} (\sin \phi) \cos \left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2} \right] \left[\frac{\sin y}{y} \right] \quad (3.52ข)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.47) กับ สมการทั้งสองของสมการที่ (3.52) คือสมการที่ (3.52ก) และสมการที่ (3.52ข) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนาม E และ H โดยทั้งสองค่าจะสัมพันธ์กันด้วยค่า η

$$H_\theta = \frac{-E_\theta}{\eta} \quad (3.53)$$

η เป็นอินทริเนสิก อิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง

และพิจารณา \vec{H} ในทิศทาง \hat{a}_ϕ

$$H_\phi = -j\omega \vec{F}_\phi \quad (3.54)$$

แทนสมการที่ (3.41) ในสมการที่ (3.54) จะได้สนาม \vec{H} ในทิศทาง \hat{a}_ϕ

เขียนสมการได้ใหม่ดังนี้คือ

$$H_\phi = j\omega \frac{\epsilon e^{-jkr}}{2\pi r} (-\pi abE_0 \cos \theta \cos \phi) \cos \left[\frac{x}{(x)^2 - (\frac{\pi}{2})^2} \right] \left[\frac{\sin y}{y} \right] \quad (3.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$H_\phi = \left(\frac{-\pi}{2} \right) jk \frac{e^{-jkr}}{2\pi r \eta} (abE_0 \cos\theta \cos\phi) \cos \left[\frac{x}{(x)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right] \left[\frac{\sin y}{y} \right] \quad (3.56)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ (3.50) และสมการที่ (3.56) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสนาม \vec{E} และ \vec{H}

$$H_\phi = \frac{E_\phi}{\eta} \quad (3.57)$$

3.2 องค์ประกอบแถวลำดับ

โดยทั่วไปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเดี่ยวซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นค่อนข้างกว้าง และมีอัตราการขยายต่ำแต่ในบางงานที่ต้องการใช้งานอากาศที่มีอัตราการขยายสูง การเพิ่มอัตราการขยายนี้อาจทำได้โดยการเพิ่มขนาดของสายอากาศเดี่ยวจะทำให้คุณสมบัตินี้ในการจัดทิศทางดีขึ้นก็ตาม แต่ยังมีวิธีอื่นที่จะเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศ โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศที่นำมาทำเป็นองค์ประกอบ (Element) ซึ่งทำได้โดยการจัดองค์ประกอบเพื่อให้มีการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม ทั้งทางด้านไฟฟ้าและรูปทรงซึ่งเรียกว่า อาร์เรย์แฟกเตอร์ (Array Factor) ซึ่งปกติจะเลือกให้แต่ละองค์ประกอบเหมือนกัน ในการหาสนามลัพท์ขององค์ประกอบ สามารถหาได้โดยการบวกเวกเตอร์สนามของสนามที่แพร่กระจายในแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งสนามจะรวมกันในทิศทางที่ต้องการและ เมื่อตัดการคัปปลิง (Coupling) ระหว่างองค์ประกอบทั้ง จะหาสนามลัพท์ขององค์ประกอบแถวลำดับได้โดยบวกเวกเตอร์ของสนามที่แพร่กระจายจากแต่ละองค์ประกอบ สนามจะรวมกันในทิศทางที่ต้องการติดต่อสื่อสาร และหักล้างกันในทิศทางที่ไม่ต้องการติดต่อสื่อสาร

มีอยู่ 5 วิธีด้วยกันที่จะควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งทำให้โดยควบคุมสิ่งต่าง ๆ ต่อไปนี้ คือ

1. การจัดเรียงองค์ประกอบขององค์ประกอบแถวลำดับ (เป็นเส้นตรง, วงกลม, สี่เหลี่ยม ฯลฯ)
2. ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ
3. ขนาดของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ
4. เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ
5. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดเรียงองค์ประกอบแถวลำดับแบบที่มีการวางตัวเป็นเส้นตรงหรือ เรียกว่า Linear Array เป็นการ จัดเรียงองค์ประกอบแถวลำดับแบบวางตัวเป็นเส้นตรงเดียวกันและมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นไม่เป็น ศูนย์ ตัวแปรที่จะกำหนดลักษณะสมบัติของ สายอากาศแถวลำดับแบบนี้มีอยู่สองตัว คือระยะห่างระหว่าง สายอากาศและขนาดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบซึ่งรวมถึงเฟสของกระแส นั้น ด้วยจากตัวแปรสองชนิดนี้สามารถแบ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีการเรียงตัวเป็นเส้นตรงออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ ดังนี้

1. Uniform Array หมายถึงแบบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบและขนาดและ เฟสของกระแสเท่ากันหมด
2. Uniformly spaced but uniformly excited arrays หมายถึง แบบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศใน แต่ละองค์ประกอบเท่ากัน แต่ขนาดและเฟสของกระแสไม่เท่ากัน
3. Non uniformly spaced but uniformly excited arrays หมายถึง แบบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในแต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน แต่ขนาดและเฟสของกระแสเท่ากัน
4. Non uniformly spaced and non uniformly excited arrays หมายถึง แบบที่มีระยะห่างระหว่าง ระหว่างสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน แต่ขนาดและเฟสของกระแสไม่เท่ากันในการออกใน โครงการนี้จะกล่าวเฉพาะในแบบ Uniform Array เท่านั้น ซึ่งจะ เป็นแบบที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศในแต่ละ องค์ประกอบและขนาดและเฟสของกระแสเท่ากันหมด

3.3 สายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น (Planar Array)

ในส่วนของการจัดส่วนประกอบของแถวลำดับแบบเส้นตรง แต่ละอันสามารถจัดเรียงตำแหน่งตาม ลักษณะของตะแกรงสี่เหลี่ยม หรือสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น ได้โดยให้องค์ประกอบแถวลำดับแบบแผ่น นี้เป็นส่วนที่สามารถใช้ควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นขององค์ประกอบแถวลำดับแบบแผ่น ่องค์ประกอบแถวลำดับแบบแผ่นนี้มีประโยชน์อย่างมาก และสามารถทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ สมมาตรกันและมีโลบข้าง (Side Lobe) มีค่าต่ำสามารถประยุกต์ใช้ในส่วนของการ Tracking radar, search radar, remote sensing และอื่น ๆ อีกมาก

ค่าองค์ประกอบแถวลำดับของแถวลำดับแบบแผ่น

องค์ประกอบแถวลำดับของแถวลำดับแบบแผ่น ถ้ามี M องค์ประกอบและส่วนมากเป็นส่วนใน ระนาบแกน X ดังในรูปที่ 3.4 (ก) ซึ่งค่าองค์ประกอบแถวลำดับของมันคือ

$$AF = \sum_{M=1}^M e^{j(m-1)(kdcos\gamma+\beta)}$$

เมื่อ $cos\gamma = \sin\theta \cos\phi$ (ตามแนวแกน x)

$$AF = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \quad (3.58)$$

เมื่อ I_{m1} เป็นค่า Excitation coefficient ของแต่ละองค์ประกอบ ระยะห่างและเฟสซีฟระหว่างองค์ประกอบ ตามแกน X แสดงได้โดย d_x และ β_x ตามลำดับ ถ้า N องค์ประกอบมีการจัดเรียงแต่ละองค์ประกอบตามระนาบ Y มีระยะห่าง d_y และเฟส β_y ระนาบสี่เหลี่ยมองค์ประกอบ จะมีลักษณะตามรูปที่ 3.4 (ข) และค่าองค์ประกอบแถวลำดับในส่วนองค์ประกอบแถวลำดับแบบแผ่น สามารถเขียนได้ คือ

$$AF = \sum_{n=1}^N I_{n1} \left[\sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \right] e^{j(n-1)kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y} \quad (3.59)$$

หรือ

$$AF = S_{xm} S_{yn}$$

$$\text{เมื่อ } S_{xm} = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)}$$

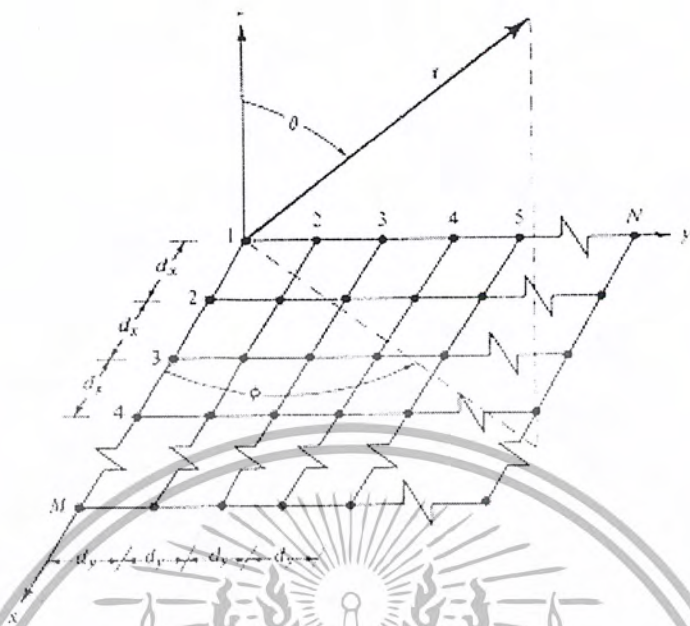
$$S_{yn} = \sum_{n=1}^N I_{n1} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)}$$

จากสมการข้างต้นแสดงว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นขององค์ประกอบแถวลำดับสี่เหลี่ยมนี้ ได้จากองค์ประกอบแถวลำดับในแนวแกน X และ Y



รูปที่ 3.4 (ก) รูปการวางองค์ประกอบแถวลำดับแบบเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 (ข) รูปการวางองค์ประกอบขององค์ประกอบแถวลำดับแบบแผ่น

ถ้าแอมพลิจูดของ Excitation coefficient ขององค์ประกอบในแนวแกน Y เป็นสัดส่วนกับแนวแกน

X คือ

$$I_{mn} = I_m I_n \tag{3.60}$$

ถ้าในส่วนของแอมพลิจูดของ Excitation coefficient ของแถวลำดับแบบสม่ำเสมอ คือ

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^M e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x)} \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y)} \tag{3.61}$$

ดังนั้นสมการขององค์ประกอบแถวลำดับสามารถเขียนได้คือ

$$AF_n(\theta, \phi) = \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2} \psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2} \psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \tag{3.62}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } \psi_x = kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x$$

$$\psi_y = kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y$$

ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากับหรือมากกว่าความยาวคลื่น (λ) ค่าสูงสุดของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะอ้างอิงกับลำคลื่นหลัก (major lobe) และการมีตะแกรงลำคลื่น (grating lobes) ซึ่งจะกำหนดจากลำคลื่นที่ได้หรือลำคลื่นหลัก ที่เกิดจากส่วนของสายอากาศแถวลำดับ เมื่อระยะระหว่างองค์ประกอบมีค่ามากเพียงพอ ที่จะทำให้มีเฟสตรงกับสนามการแพร่กระจายที่มากกว่าหนึ่งส่วน เมื่อให้ระยะห่างองค์ประกอบในส่วนแกน X และ Y น้อยกว่าความยาวคลื่น คือ $d_x < \lambda$ และ $d_y < \lambda$

$$\begin{aligned} kd_x \sin\theta \cos\phi + \beta_x &= \pm 2m\pi \quad m=0,1,2,\dots \\ kd_y \sin\theta \cos\phi + \beta_y &= \pm 2n\pi \quad n=0,1,2,\dots \end{aligned} \quad (3.63)$$

เฟส β_x และ β_y เป็นอิสระกันในแต่ละส่วน และสามารถปรับค่าลำคลื่น ของ S_{xm} และ S_{yn} เหมือนกับ S_{ym} อย่างไรก็ตามกรวยลำคลื่นของ S_{xm} และ S_{yn} มีการทาบกันและมีค่าสูงสุดตามทิศทางของสายอากาศ ถ้าต้องการลำคลื่นเดียว ในทิศทาง $\theta = \theta_0, \phi = \phi_0$ ซึ่งเฟสซึ่งระหว่างองค์ประกอบในส่วนแกน X และ Y จะเท่ากับ

$$\begin{aligned} \beta_y &= -kd_y \sin\theta_0 \cos\phi_0 \\ \beta_x &= -kd_x \sin\theta_0 \cos\phi_0 \\ \tan \phi_0 &= \frac{\beta_y d_x}{\beta_x d_y} \end{aligned} \quad (3.64)$$

$$\sin^2 \theta_0 = \left(\frac{\beta_x}{kd_x} \right)^2 + \left(\frac{\beta_y}{kd_y} \right)^2 \quad (3.65)$$

เมื่อ $m = n = 0$ และตะแกรงลำคลื่น สามารถกำหนดโดย

$$\begin{aligned} kd_x (\sin\theta \cos\phi - \sin\theta_0 \cos\phi_0) &= \pm 2m\pi \quad ,m=0,1,2,\dots \\ kd_y (\sin\theta \cos\phi - \sin\theta_0 \cos\phi_0) &= \pm 2n\pi \quad ,n=0,1,2,\dots \end{aligned} \quad (3.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$\begin{aligned} \sin\theta\cos\varphi - \sin\theta_0\cos\varphi_0 &= \pm \frac{n\lambda}{d_y}, n=0,1,2,\dots \\ \sin\theta\cos\varphi - \sin\theta_0\cos\varphi_0 &= \pm \frac{m\lambda}{d_x}, m=0,1,2,\dots \end{aligned} \quad (3.67)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\sin\theta_0\cos\varphi \pm n\lambda/d_y}{\sin\theta\cos\varphi_0 \pm m\lambda/d_x} \right] \quad (3.68)$$

และ

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{\sin\theta_0\cos\varphi_0 \pm m\lambda/d_x}{\cos\varphi} \right] = \sin^{-1} \left[\frac{\sin\theta_0\cos\varphi_0 \pm n\lambda/d_y}{\sin\varphi} \right] \quad (3.69)$$

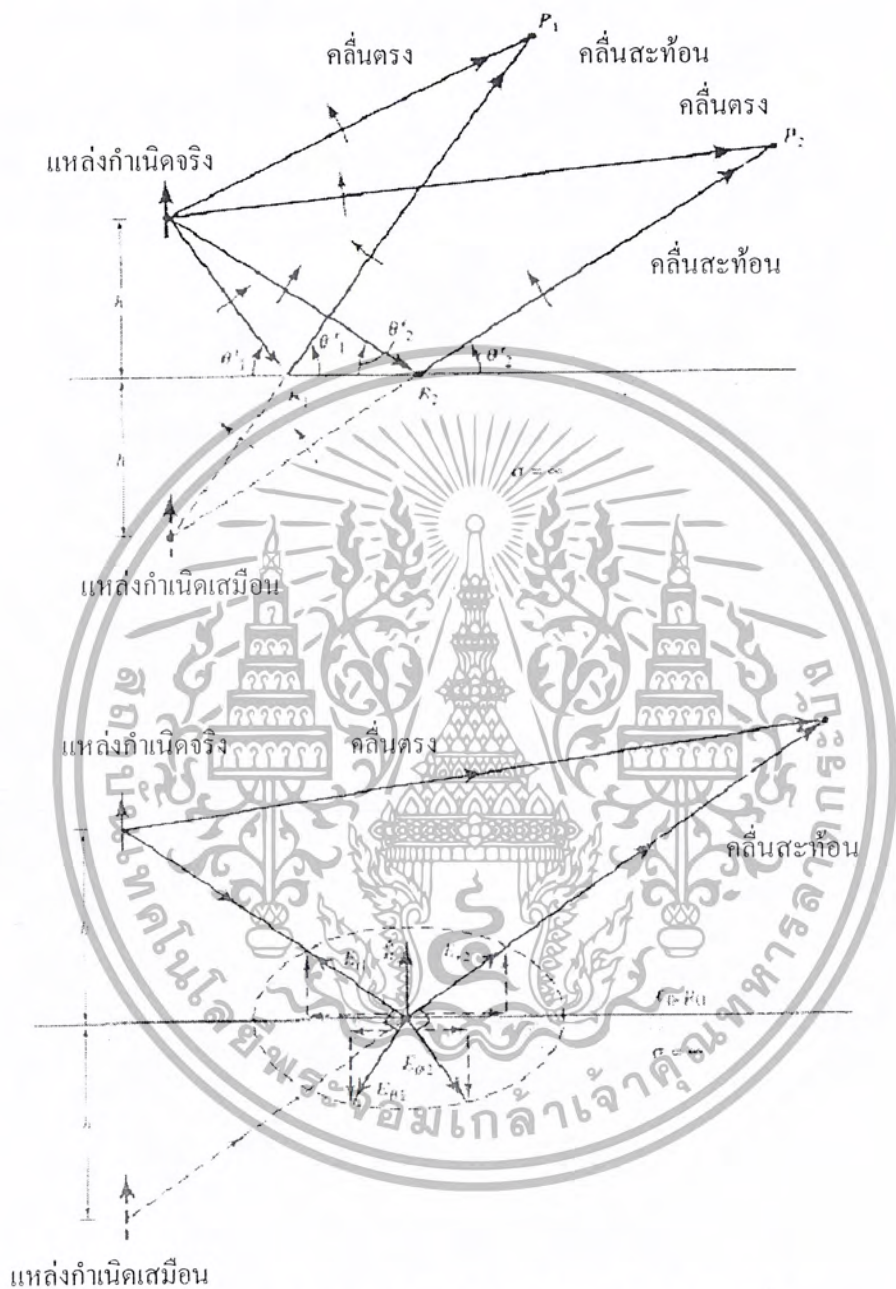
3.4 ทฤษฎีเงา (Image Theory)

การวิเคราะห์สายอากาศที่มีการวางตัวเหนือระนาบตัวนำที่มีขนาดอนันต์ จะพิจารณาว่ามีแหล่งกำเนิดเสมือนซึ่งสามารถที่จะสะท้อนระนาบตัวนำขึ้นมา การเพิ่มแหล่งกำเนิดเสมือนนี้มาให้ได้รวมแหล่งกำเนิดเสมือนที่เมื่อนำระนาบขนาดอนันต์ออกไปแล้ว ยังคงทำให้สนามในบริเวณด้านบนของของระนาบตัวนำเหมือนกับสนามที่เกิดจากปัญหาดั้งเดิมที่มีแหล่งกำเนิดจริงอยู่เหนือระนาบตัวนำ

สมมุติว่ามีสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์ตามแนวตั้งที่มีความสูง h จากระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 สายอากาศนี้จะกระจายคลื่นไปตามทิศทางต่างๆ ที่จุดสังเกต P_1 จะมีคลื่นตรงที่ส่งจากสายอากาศไปยังจุดสังเกตและมีคลื่นสะท้อนที่เกิดจากการกระทบที่ระนาบตัวนำและเดินทาง ไปจนถึงจุดสังเกต P_1 โดยที่มีมุม $\theta'_1 = \theta_1$ เมื่อเราต่อเส้นทางเดินของคลื่นที่สะท้อนลงไปใต้ผิวตัวนำจนถึงจุด h ที่อยู่ด้านล่างของตัวนำ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดเสมือน ถ้าเลื่อนจุดสังเกตไปที่ตำแหน่งอื่นๆ เช่นที่จุด P_2 จุดของการสะท้อนจะเลื่อนไปที่จุด Q_{R2} ซึ่งยังคงพบว่าแหล่งกำเนิดเสมือนยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม

ในการพิจารณาจะให้ป็นระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ สนามที่อยู่ด้านล่างของระนาบตัวนำนี้เป็นศูนย์ เพราะคลื่นไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ จากเงื่อนไขขอบเขตของตัวนำไฟฟ้าในส่วนประกอบของสนามในแนวสัมผัสกับผิวตัวนำนั้นจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ที่ทุกตำแหน่งบนผิวตัวนำนั้น ดังนั้นการโพลาไรซ์ของคลื่นสะท้อนเมื่อทำการเปรียบเทียบกับคลื่นตรง เมื่อทำการพิจารณารูปที่ 3.5 พบว่าถ้ากระตุ้นให้เกิดคลื่นที่สะท้อนสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต การโพลาไรซ์ของคลื่นสะท้อนต้องเป็นแนวตั้งเช่นเดียวกับคลื่นตรง ดังนั้น

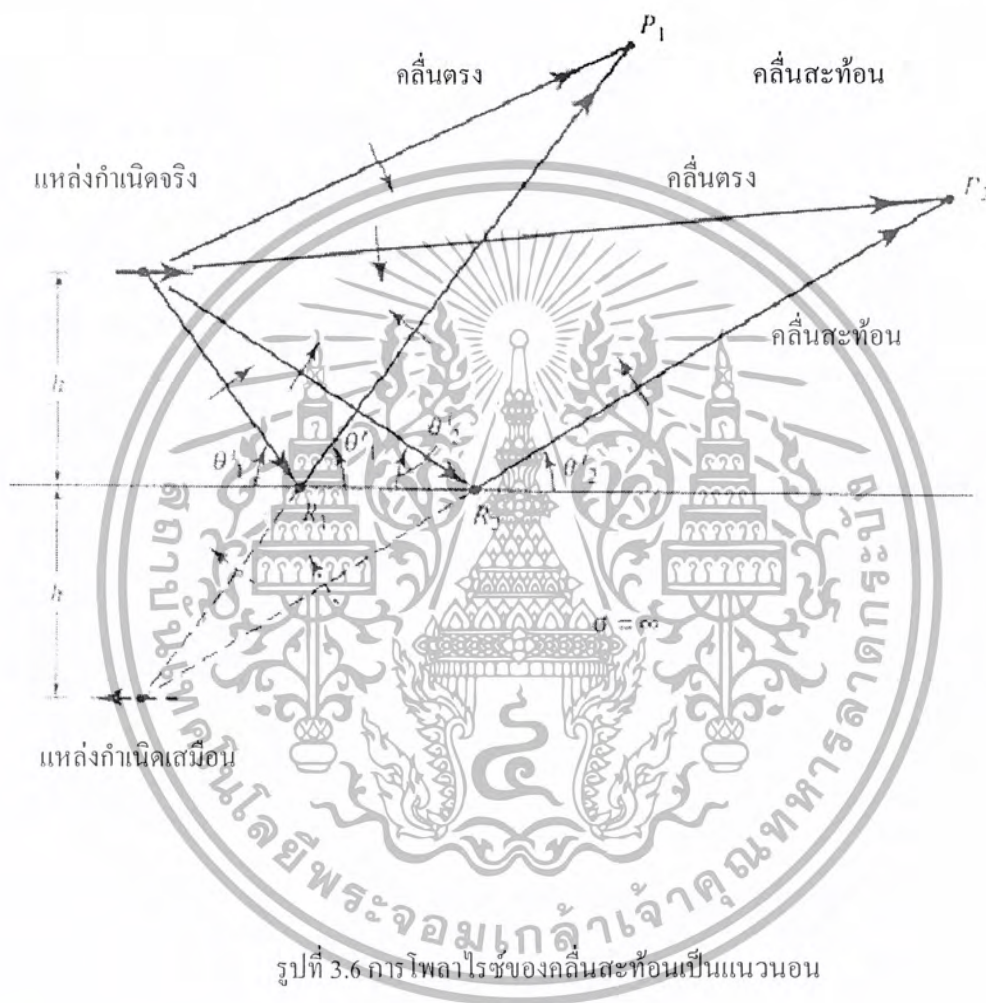
สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะต้องมีค่าเท่ากับ +1 และเมื่อพิจารณาพื้นที่ในเส้นประของรูปที่ 3.5 พบว่าสนามเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตซึ่งในปัญหานี้พิจารณาให้มีขนาดอนันต์



รูปที่ 3.5 การไหลไรซ์ของคลื่นสะท้อนเป็นแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

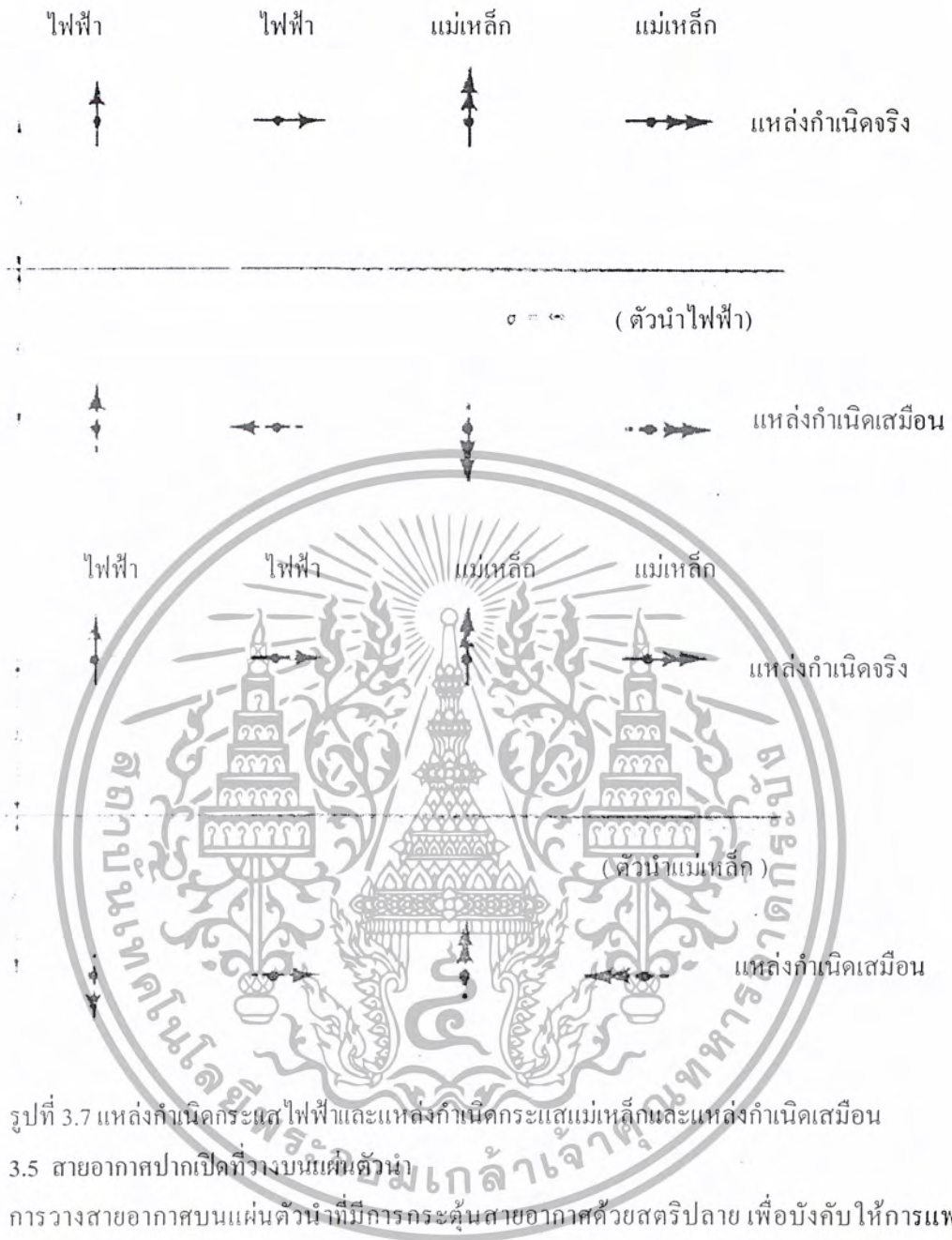
กรณีที่มีสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แบบแนวนอนดังรูปที่ 3.6 จะมีวิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกับสายอากาศที่มีการโพลาไรซ์ตามแนวตั้ง แต่แหล่งกำเนิดเสมือนจะมีเฟสต่างจากแหล่งกำเนิดจริง 180 องศา ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะต้องมีค่าเท่ากับ -1



รูปที่ 3.6 การโพลาไรซ์ของคลื่นสะท้อนเป็นแนวนอน

นอกจากปัญหาของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและระนาบตัวนำไฟฟ้าแล้ว ยังมีกรณีอื่นๆอีกได้แก่ แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กและระนาบตัวนำแม่เหล็กด้วย โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสมกับปัญหา ดังกล่าวจะแสดงแหล่งกำเนิดจริงและแหล่งกำเนิดเสมือนของปัญหาต่างได้แสดงในรูปที่ 3.7 โดยที่หัวลูกศรเดี่ยวแสดงแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและหัวลูกศรคู่แสดงแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก ส่วนหัวลูกศรแสดงหัวของคลื่นนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แท่งกำเนิดกระแสฟ้าผ่าและแท่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กและแท่งกำเนิดเสมือน

3.5 สายอากาศปากเปิดที่วางบนแผ่นตัวนำ

การวางสายอากาศบนแผ่นตัวนำที่มีการกระตุ้นสายอากาศด้วยสตรียปลาย เพื่อบังคับให้การแพร่กระจายคลื่นมีทิศทางออกไปด้านหน้าของสายอากาศ และด้านหลังถูกกันไว้ด้วยแผ่นตัวนำ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เหมือนกับการเกิดเงาขึ้นมาเช่นกัน ดังนั้นสนามที่เกิดการแพร่กระจายจึงเป็นผลรวมของแท่งกำเนิดเสมือนและแท่งกำเนิดจริง ในการพิจารณาเพื่อหาผลรวมของสนามที่ขนาดของแท่งกำเนิดเสมือนและแท่งกำเนิดจริง มีค่าเท่ากันดังนั้นสนามรวมของสายอากาศอาจกล่าวได้ว่า เป็นผลคูณของขนาดสนามคูณกับตัวประกอบแอมพลิจูด ซึ่งเป็นแอมพลิจูดที่พิจารณาจำนวนของเงาที่เกิดขึ้นร่วมกับแท่งกำเนิดจริง

จากการพิจารณาสายอากาศจะพบว่าผลการแผ่กระจายคลื่นเป็นผลรวมของแหล่งกำเนิดจริง(สตริป ลาย) และแหล่งกำเนิดเสมือน(เงาที่เกิดขึ้น) ในการพิจารณากำหนดให้แหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าเป็นสายอากาศ แบบไอโซโทรปิกวางตามแนวนอนในแนวแกน Y เหนือระนาบตัวนำขนาดอนันต์ โดยจะวิเคราะห์การเกิดเงา ที่สนามระยะไกล ดังแสดงในรูป 3.8



รูปที่ 3.8 ลักษณะการวางแหล่งกำเนิดตามแนวนอนเหนือระนาบตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการสนามที่เกิดขึ้นทั้งคู่คือ

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \quad (3.70)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \hat{a}_r &= \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta \\ \cos \psi_1 &= \cos \theta \\ \cos \psi_2 &= -\cos \theta \end{aligned} \quad (3.71)$$

เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r - \cos \psi_1 \\ r_2 &= r + \cos \psi_2 \end{aligned} \right\} \text{สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางเฟส} \quad (3.72)$$

$$r_1 = r_2 = r \quad \text{สำหรับการเปลี่ยนแปลงทางขนาด} \quad (3.73)$$

หากทำการพิจารณาที่ด้านบนของระนาบ $z \geq 0$, $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ และ $0 \leq \phi \leq 2\pi$ สามารถเขียน

สมการได้ว่า

$$E(r, \theta, \phi) = (e^{jkh \cos \theta} - e^{-jkh \cos \theta}) f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (3.74)$$

$$E(r, \theta, \phi) = 2j \sin(kh \cos \theta) f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (3.75)$$

ทำให้ทราบสนามไอโซโทรปิกขององค์ประกอบเดี่ยวได้ว่า

$$E_i = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (3.76)$$

ทำให้สามารถทราบตัวประกอบการคูณของสายอากาศแถวลำดับได้

$$AF(\theta, \phi) = \frac{E}{E_1} = 2j \sin(kh \cos \theta) \quad (3.77)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การคำนวณและออกแบบ

การคำนวณและออกแบบสายอากาศอัตรการขยายสูงแบบแฉวลำดับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีโครงสร้างของช่องเปิดที่วางบนแผ่นตัวนำ และมีตัวป้อนกำลังงานวางอยู่ข้างล่างของช่องเปิดโดยมีแผ่นโพลีเอทิลีนกลางระหว่างช่องเปิดและตัวป้อนกำลังงาน

4.1 การคำนวณหาขนาดของช่องเปิด

การพิจารณาหาขนาดของช่องเปิดที่เหมาะสมจะพิจารณาโดยคำนึงถึงโหมดการแพร่กระจายคลื่นโดยที่เลือกความถี่ที่ 12.50 จิกะเฮิร์ต

จาก

$$(f_c)_{mn} = \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \right) \quad (4.1)$$

f_c คือความถี่คัตออฟของช่องเปิด

a, b คือขนาดความกว้างและความยาวของช่องเปิดบนแผ่นตัวนำ

m คือจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านกว้างของช่องเปิด

n คือจำนวนเท่าของครึ่งความยาวคลื่นที่ด้านยาวของช่องเปิด

μ คือค่าเพอมีอิตีวีลิตีสัมพัทธ์ของอากาศ

ϵ คือค่าเพอมีตอวีลิตีสัมพัทธ์ของอากาศ

พิจารณาโหมดการแพร่กระจายคลื่นที่ TE_{10}

$$\text{เมื่อความเร็วในการเดินทางในอากาศ } v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = 3 \times 10^8 \quad (4.2)$$

ดังนั้น

$$(f_c)_{10} = \left(\frac{3 \times 10^8}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} \right) \quad (4.3)$$

กำหนด $f_c = 12.50 \times 10^9$ เฮิร์ต และ $\lambda = 2.4 \text{ cm}$

จะสามารถหาค่าขนาดช่องเปิดได้ $a = 0.5\lambda$

พิจารณาที่โหมดการแพร่กระจายคลื่นที่ TE_{11}

$$(12.5 \times 10^9)_{10} = \left(\frac{3 \times 10^8}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2} \right) \quad (4.4)$$

จะสามารถคำนวณได้ค่า

$$a = 0.7\lambda$$

จากการที่ทราบค่าของ $0.5\lambda < a < 0.7\lambda$ ที่การใช้งานที่ TE_{10} ทำการเปลี่ยนแปลงค่าขนาดของ a ที่ละ 0.2λ และทำการใช้โปรแกรม MathCAD ทำการวิเคราะห์ว่าหากขนาดของช่องเปิด a มีค่ามากขึ้นสนามที่แพร่กระจายออกจากช่องเปิดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

จากสมการการแพร่กระจายคลื่นของสนามระยะไกลของช่องเปิด

$$E_\theta(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2} \right) \left(jab \frac{k}{2\pi} \right) \sin \phi \left[\frac{\cos(x)}{(x)^2 - \left(\frac{\pi}{a} \right)^2} \right] \left[\frac{\sin y}{y} \right] \quad (4.5)$$

และ

$$E_\phi(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2} \right) \left(jab \frac{k}{2\pi} \right) \cos \theta \cos \phi \left[\frac{\cos(x)}{(x)^2 - \left(\frac{\pi}{a} \right)^2} \right] \left[\frac{\sin y}{y} \right] \quad (4.6)$$

เมื่อ

$$x = \frac{ka \sin \theta \cos \phi}{(2)} \quad (4.7)$$

$$y = \frac{kb \sin \theta \cos \phi}{(2)} \quad (4.8)$$

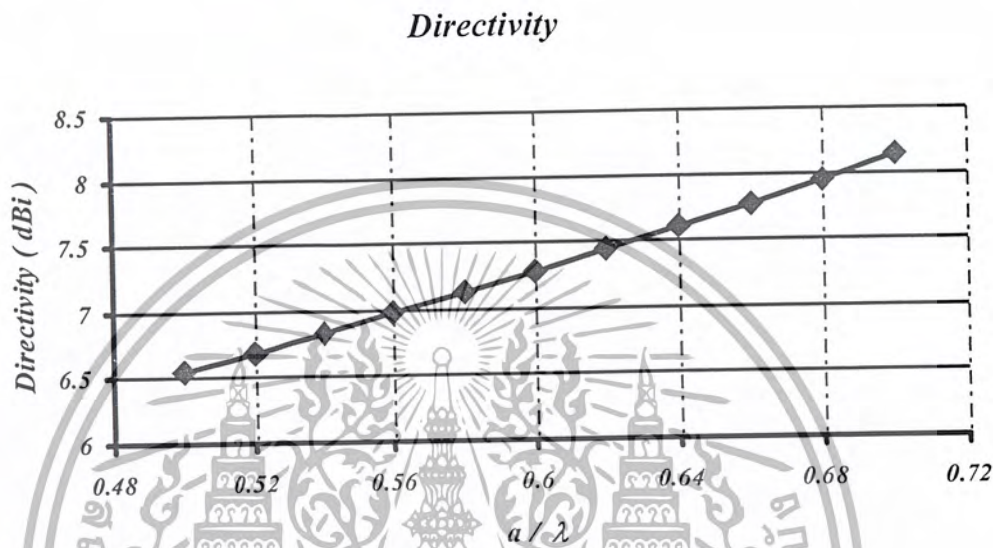
และผลการแพร่กระจายคลื่นที่ระยะไกลรวมเท่ากับ

$$E_r(\theta, \phi) = \sqrt{(|E_\theta(\theta, \phi)|)^2 + (|E_\phi(\theta, \phi)|)^2} \quad (4.9)$$

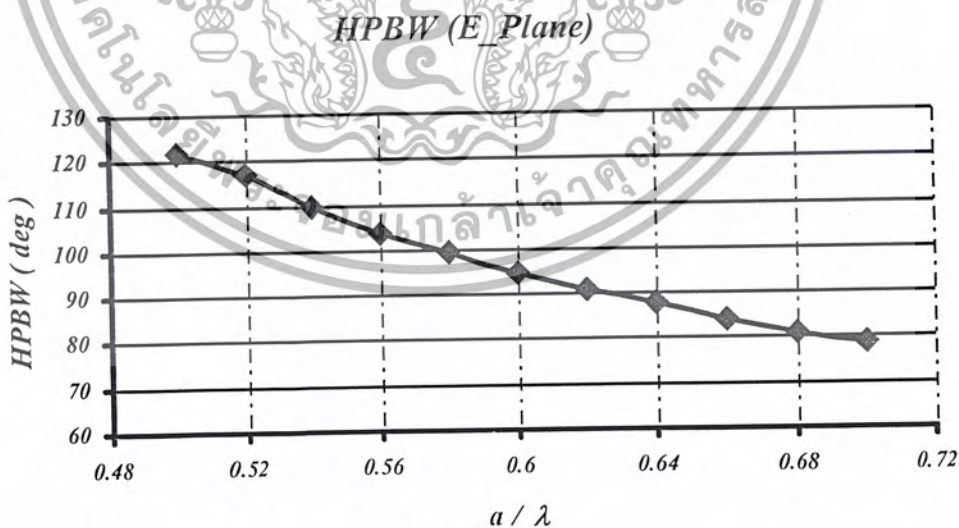
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะได้ผลการแพร่กระจายคลื่นที่ทำการพิจารณาที่ $E_Plane, \phi = 90^\circ$ โดยใช้โปรแกรมMathCAD ทำการวิเคราะห์เป็นดังต่อไปนี้

จากการเปลี่ยนแปลงค่า a ที่ละ 0.2λ สามารถนำผลการวิเคราะห์จาก โปรแกรม MathCAD มาแสดง โดยกราฟได้ดังนี้



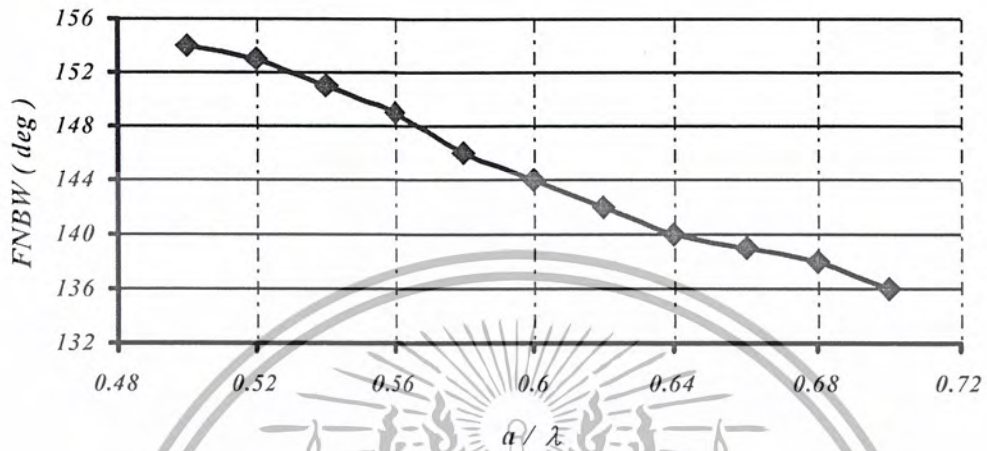
รูปที่ 4.1 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า a ของช่องเปิดทีละ 0.2λ



รูปที่ 4.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำจากการเปลี่ยนแปลงค่า a ของช่องเปิดทีละ 0.2λ ในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90^\circ$)

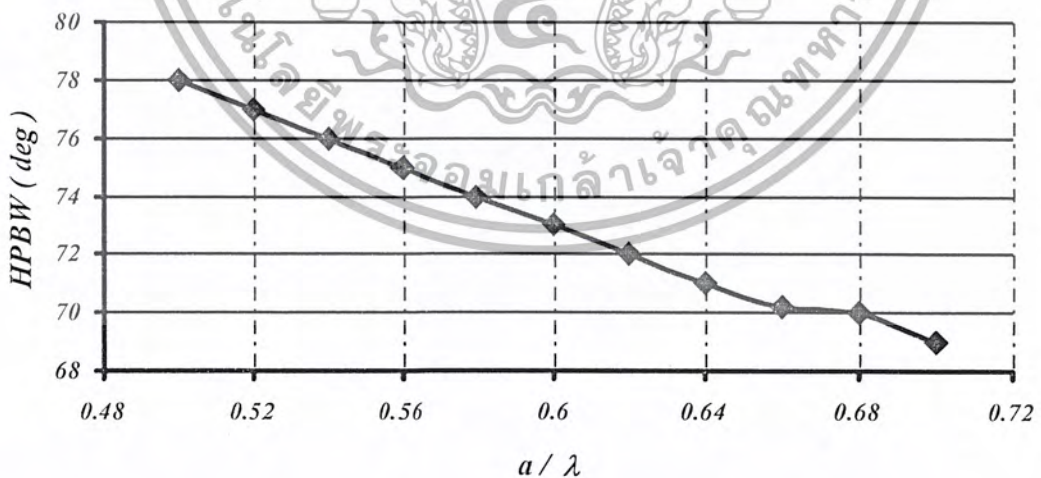
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FNBW (E_Plane)



รูปที่ 4.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรกเมื่อทำจากการเปลี่ยนแปลงค่า a ของช่องเปิดที่ละ 0.2λ ในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90^\circ$)
 ทำการพิจารณาในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่า a ที่ละ 0.2λ สามารถนำผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม MathCAD และแสดงเป็นกราฟได้ดังนี้

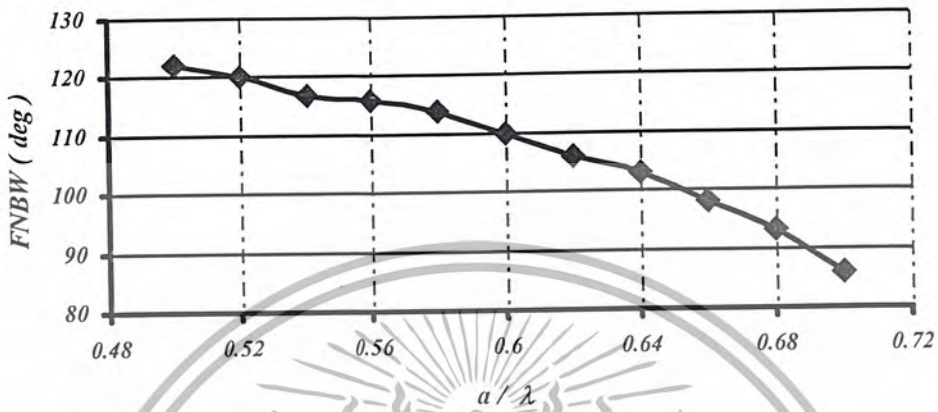
HPBW (H_Plane)



รูปที่ 4.4 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำจากการเปลี่ยนแปลงค่า a ของช่องเปิดที่ละ 0.2λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0^\circ$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FNBW (H_Plane)



รูปที่ 4.5 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรกเมื่อทำจากการเปลี่ยนแปลงค่า a ของช่องเปิดที่ละ 0.2λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0^\circ$)

4.2 การวางตัวเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิด

หลังจากการวิเคราะห์การหาขนาดของช่องเปิดและผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของช่องเปิดจากแผ่นกราวด์ จะนำมาวางตัวกัน เป็นแถวลำดับแบบแบนโดยพิจารณาแบบสม่ำเสมอ (Uniform array) ทำการพิจารณาการเรียงตัวของช่องเปิดขนาด 128 องค์ประกอบ

จากการพิจารณาสมการการวางสายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิด โดยพิจารณาในระนาบสนามไฟฟ้าจะได้สมการดังนี้

$$E_\theta(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2}\right) \left(jab \frac{k}{2\pi}\right) \sin(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2}\right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right] \text{sinc}\left(\frac{ka \sin(\theta) \sin(\phi)}{2}\right)$$

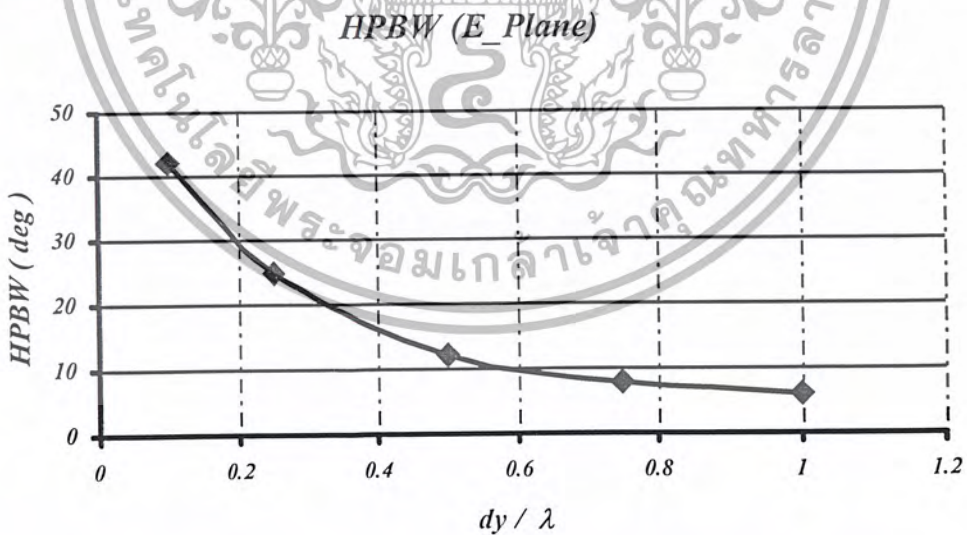
$$\times \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{Mkd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2}\right)}{\sin\left(\frac{kd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2}\right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{Nkd_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{kd_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2}\right)} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาสมการการวางสายอากาศแบบแถวลำดับของช่องเปิด โดยพิจารณาในระนาบ
สนามแม่เหล็กจะได้สมการดังนี้

$$E_\phi(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2}\right) \left(jab \frac{k}{2\pi}\right) \cos(\theta) \cos(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2}\right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right] \text{sinc}\left(\frac{kbs \sin(\theta) \sin(\phi)}{2}\right) \\ \times \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{Mkd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2}\right)}{\sin\left(\frac{kd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2}\right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{Nkd_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{kd_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2}\right)} \right]$$

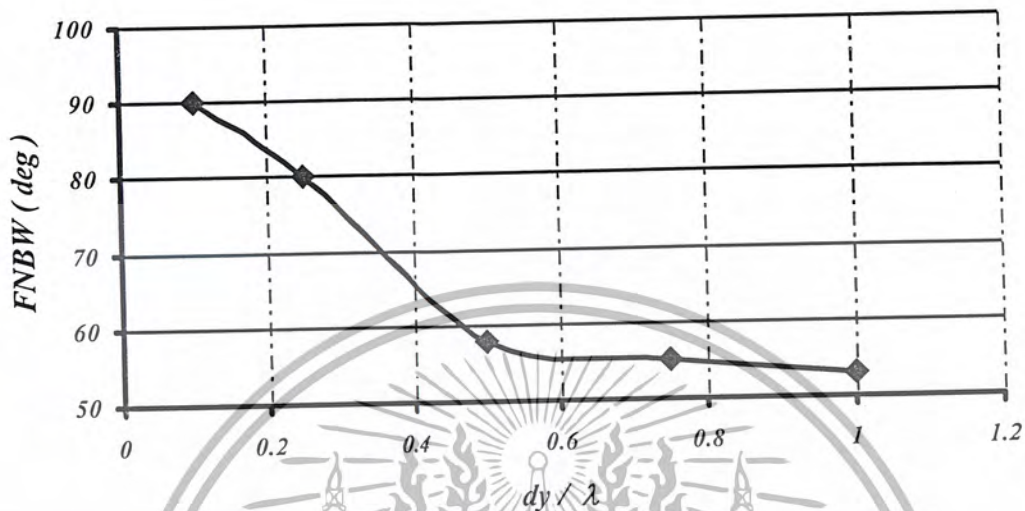
และทำการแสดงผลการวิเคราะห์ที่ผลของสนามระยะไกลโดยใช้กราฟได้ดังนี้



รูปที่ 4.6 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำการจัด เรียงช่องเปิด 128
องค์ประกอบในแนวแกน y และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$

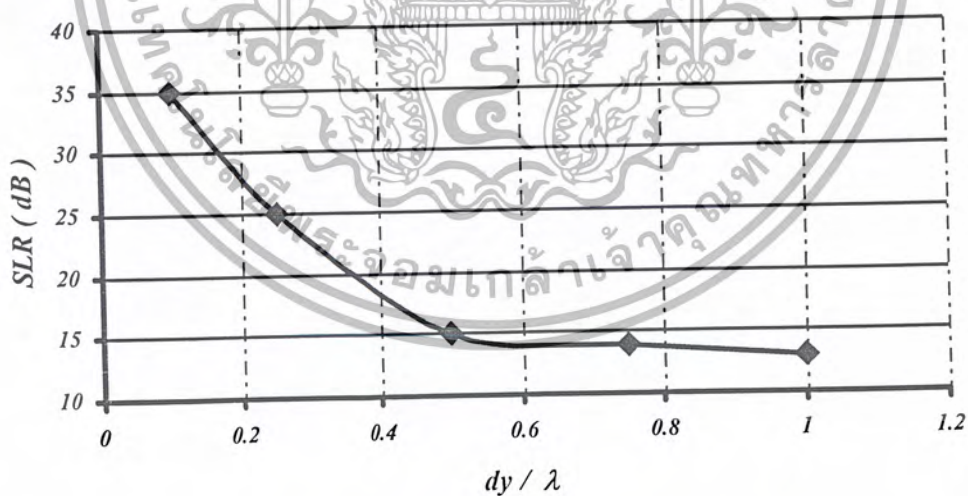
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FNBW (E_Plane)



รูปที่ 4.7 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรกจากการเรียงช่องเปิด 128 องค์ประกอบ ในแนวแกน y และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$

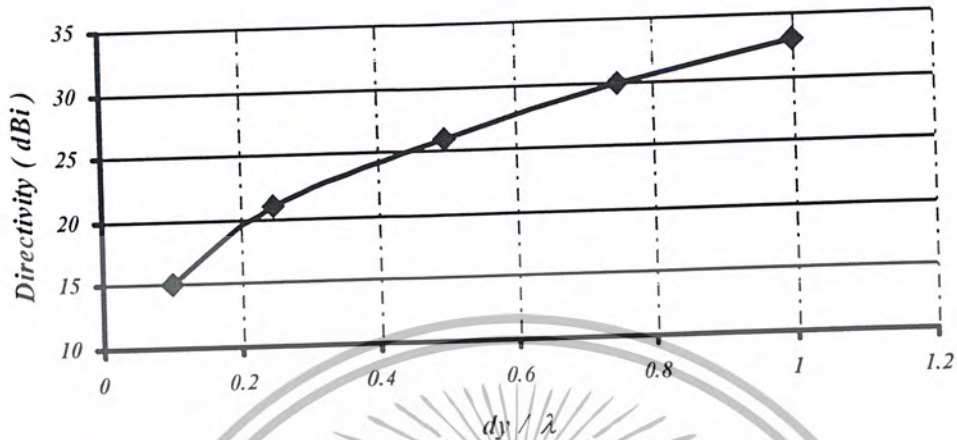
SLR (E_Plane)



รูปที่ 4.8 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อย ที่มีการเรียงตัวของช่องเปิด 128 องค์ประกอบ และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$

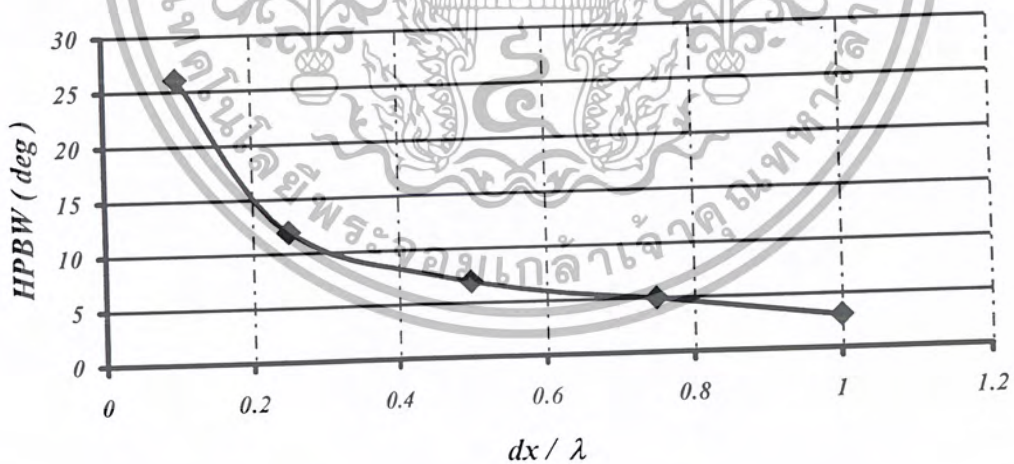
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Directivity



รูปที่ 4.9 ค่าสภาพจะจางทิศทางเมื่อทำการจัดเรียงช่องเปิด 128 ช่อง ประกอบโดยเรียงตามแนวแกน y และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างช่องประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$ ทำการพิจารณาการเรียงตัวบนแกน X ของการเรียงตัวของช่องเปิด 128 ช่อง ประกอบและแสดงผลโดยกราฟ

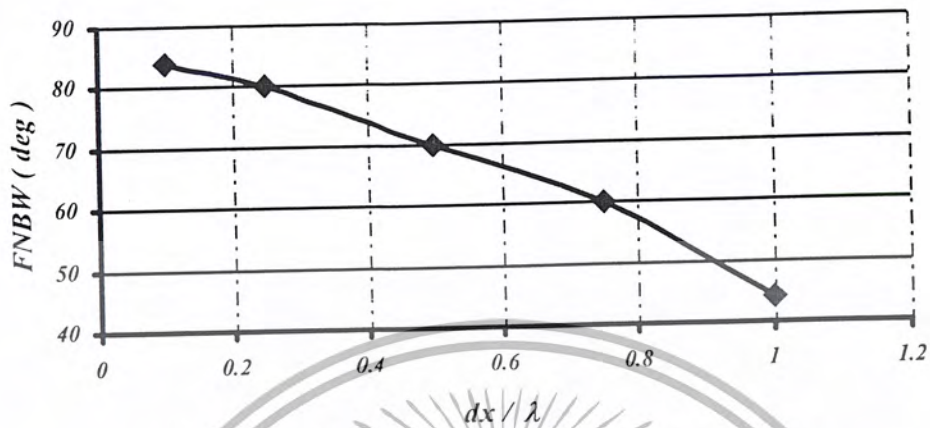
HPBW (H Plane)



รูปที่ 4.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำการจัดเรียงช่องเปิด 128 ช่อง ประกอบในแนวแกน x และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างช่องประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FNBW (H_Plane)



รูปที่ 4.11 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรกจากการเรียงช่องเปิด 128 องค์ประกอบในแนวแกน X และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$

SLR (E Plane)



รูปที่ 4.12 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อย ที่มีการเรียงตัวของช่องเปิด 128 องค์ประกอบ ในแนวแกน x และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างองค์ประกอบตั้งแต่ $0.2\lambda - 1\lambda$

จากรูปจะพบว่าหากทำการเพิ่มจำนวนแถวลำดับเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความกว้างของลำคลื่นลดลงแต่จะเกิดโลบข้างเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.3 ผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ

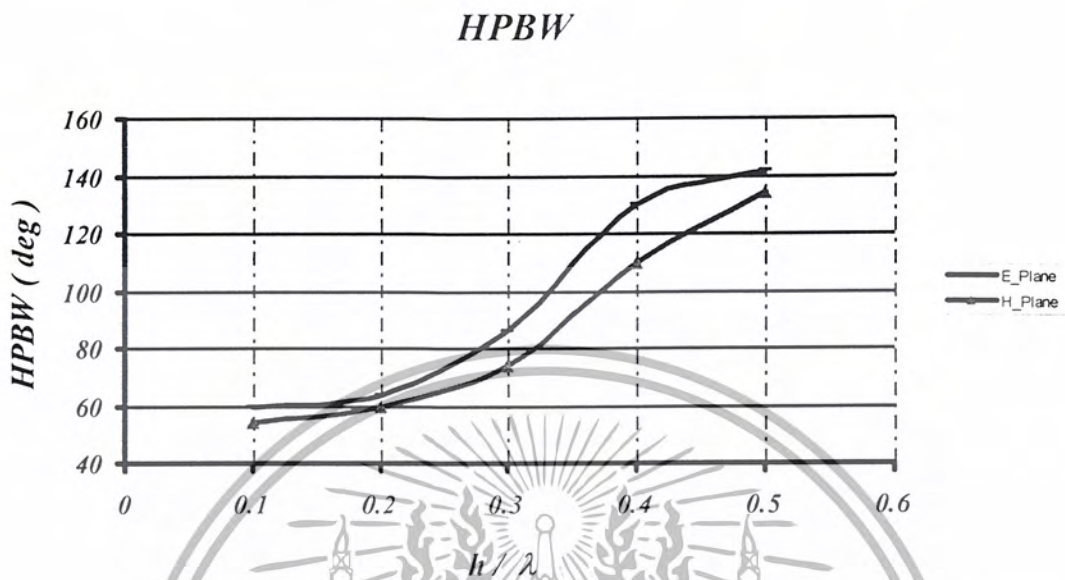
จากการพิจารณาการเกิดของทฤษฎีเงาในบทที่ผ่านมาพิจารณาผลของความสูงที่เกิดขึ้นได้ โดยพิจารณาในระนาบสนามไฟฟ้าจะได้สมการดังนี้และทำการแสดงผลการวิเคราะห์ผลของสนามระยะไกลโดยใช้กราฟได้ดังนี้

$$E_{\theta}(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2}\right) \left(jab \frac{k}{2\pi}\right) \sin(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2}\right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right] \operatorname{sinc}\left(\frac{ka \sin(\theta) \sin(\phi)}{2}\right) \\ \times 2j \sin(kh \cos(\theta))$$

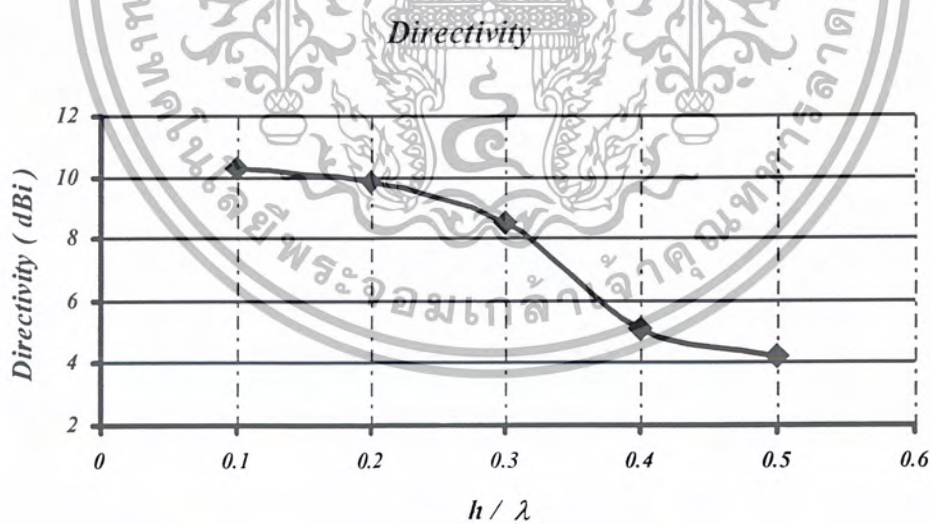
โดยพิจารณาในระนาบสนามไฟฟ้าจะได้สมการดังนี้

$$E_{\phi}(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2}\right) \left(jab \frac{k}{2\pi}\right) \cos(\theta) \cos(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2}\right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right] \operatorname{sinc}\left(\frac{kbs \sin(\theta) \sin(\phi)}{2}\right) \\ \times 2j \sin(kh \cos(\theta))$$

และทำการแสดงผลการวิเคราะห์ผลของสนามระยะไกลโดยใช้กราฟได้ดังนี้

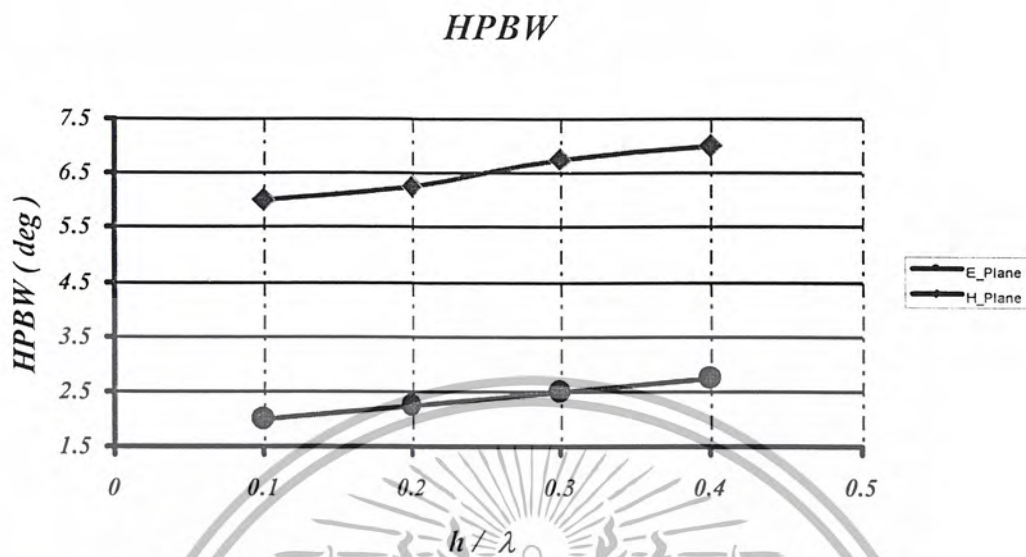


รูปที่ 4.13 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำการพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 1 องค์ประกอบ

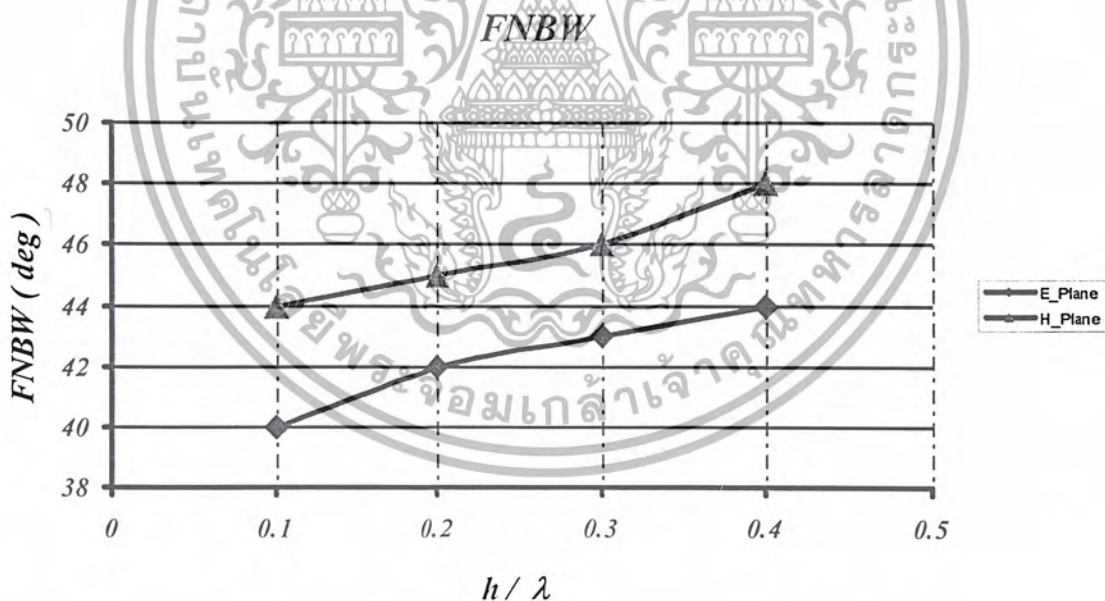


รูปที่ 4.14 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อทำการพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 1 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

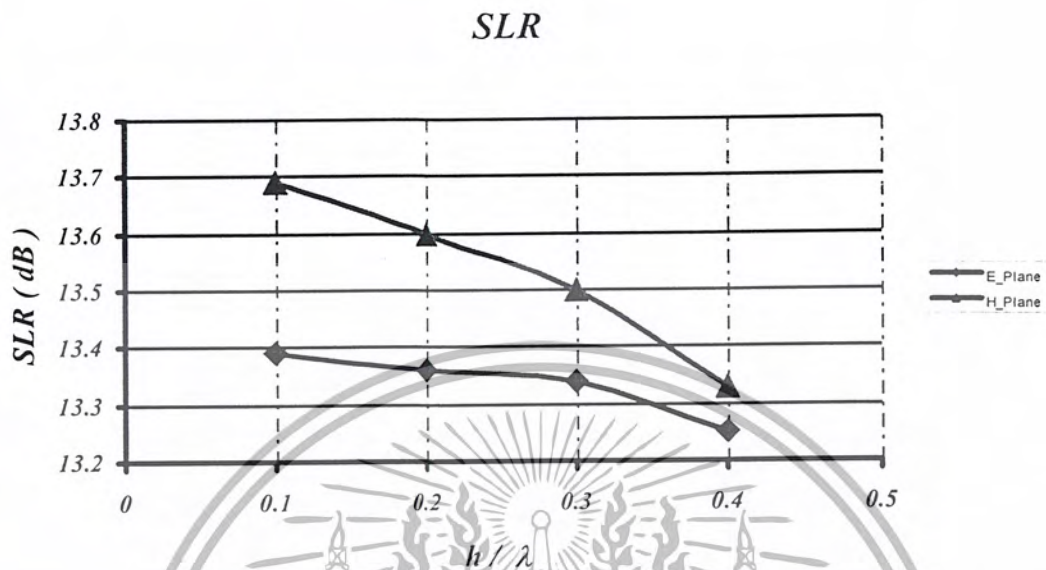


รูปที่ 4.15 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่มีกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อทำการพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 128 องค์ประกอบ

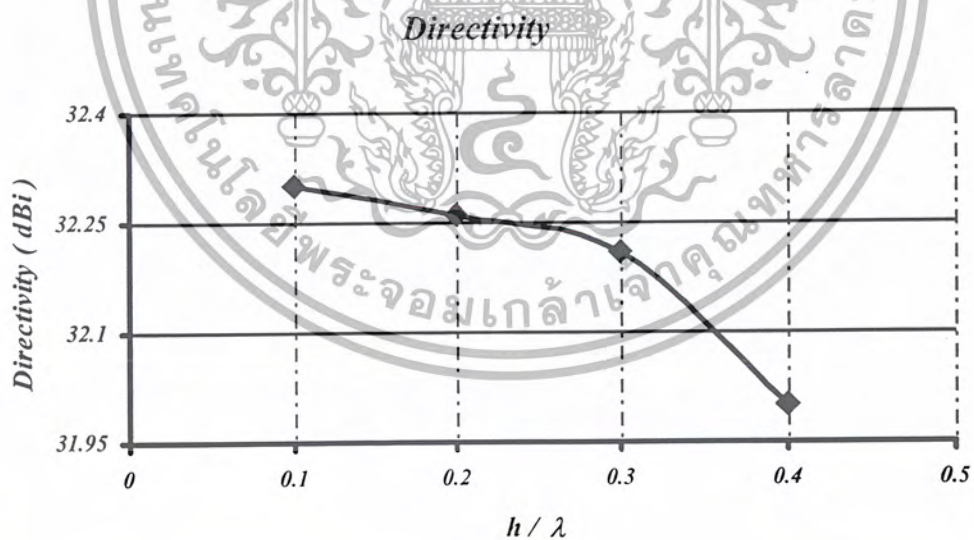


รูปที่ 4.16 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่เป็นศูนย์ครั้งแรกเมื่อทำการพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 128 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



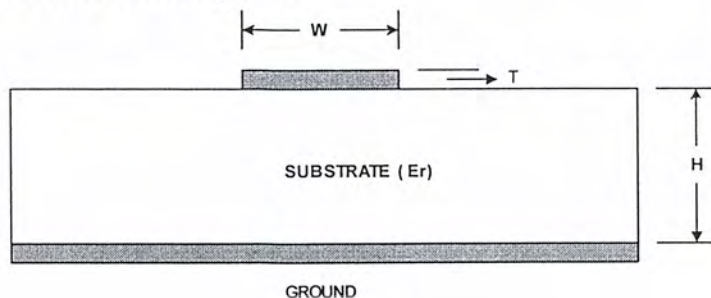
รูปที่ 4.17 ค่าอัตราส่วนกำลังคลื่นหลักต่อกำลังคลื่นย่อยเมื่อทำการพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 128 องค์ประกอบ



รูปที่ 4.18 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อทำการพิจารณาผลจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นปากเปิดที่วางบนตัวป้อนสัญญาณ โดยเรียงตัว 128 องค์ประกอบ
จะพบว่าการเพิ่มความสูงของสายอากาศให้มากขึ้นจะทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สายส่งแบบไมโครสตริป (Micro strip Line)



รูปที่ 4.19 แสดงโครงสร้างทางกายภาพของสายส่งไมโครสตริป

แถบตัวนำกว้าง w ทน t ถูกวางอยู่บนสารสับสเตรทไดอิเล็กตริก ที่มีคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์เป็น ϵ_r สารสับสเตรทที่มีใช้มากมายหลายชนิด เช่น อลูมินาเคลือบด้วยดีบุก ซึ่งมีค่า ϵ_r แปรเปลี่ยนตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 12 ข้างบนสารไดอิเล็กตริกจะมีค่า $\epsilon_r = 3.8063$

สายส่งแบบไมโครสตริปถูกใช้เป็นส่วนประกอบของ MIC เนื่องจากทำได้ด้วยราคาถูกอุปกรณ์ลัมพ์แบบพาสซีฟ ก็สามารถถูกสร้างอยู่บนสารสับสเตรทชั้นเดียวกันได้ ขาอุปกรณ์แอกทีฟและพอกซีฟต่างๆ ก็สามารถเชื่อมต่อกับแถบโลหะได้โดยตรง ค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะของสายส่งไมโครสตริปที่มีความกว้าง w สูง h และโลหะมีความหนาน้อยมาก ($t/h \leq 0.005$)

กรณี $w/h \leq 1$

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{1}{4h} \right) / (\epsilon_c)^{1/2} \quad (4.10)$$

เมื่อ

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} + 0.04 \left(1 - \frac{1}{h} \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

กรณี $w/h \geq 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi / (\epsilon_c)^{1/2}}{w/h + 1.393 + 0.667 \ln(w/h + 1.44)} \quad (4.12)$$

เมื่อ

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2} \quad (4.13)$$

เมื่อ $w/h \leq 2$

$$w/h = \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \quad (4.14)$$

เมื่อ $w/h \geq 2$

$$w/h = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (4.15)$$

เมื่อ

$$A = \frac{Z_0}{60} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{2} \right)^{1/2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (4.16)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\epsilon_r^{1/2}} \quad (4.17)$$

โครงสร้างของสายส่งไมโครสตริปเป็นลักษณะกึ่ง TEM ดังนั้นสมการพื้นฐานเกี่ยวกับความยาวคลื่นคือในสายส่งไมโครสตริป คือ

$$\lambda_g = \frac{c}{f(\epsilon_r)^{1/2}} \quad (4.18)$$

เมื่อ λ_g คือ ความยาวคลื่นในไมโครสตริป

c คือ ความเร็วแสง

f คือ ความถี่ที่ใช้งาน

4.5 การออกแบบตัวแบ่งกำลัง (Power Divider)

เครื่องมือพื้นฐานสำหรับแบ่งกระจายกำลังระหว่างพอร์ตเอาต์พุต n พอร์ตตามการกระจายกำลังงานตามต้องการคือ ตัวแบ่งกำลัง n ทางหลายๆ ตัว โดย $m < n$ และถ้าเลือก $m = 2$ ตัวแบ่งนี้จะทำให้อัตราส่วนระหว่างอิมพีแดนซ์ค่าน้อย มีค่าน้อยสุดจะปรากฏอยู่ที่อินพุตและจะ ไม่มีการควมกันของการแพร่กระจายกำลังที่เอาต์พุตพอร์ต การแยกดังกล่าวอาจทำได้โดยวิธีการแบ่งกำลังแบบวิลคินสัน (Wilkinson Power Divider) ซึ่งใช้ตัวต้านทานเป็นตัวแยก แต่มีข้อเสียคือ แบนด์วิดท์แคบและมีการต่อตัวต้านทานทำให้โครงสร้างยุ่งยากกว่าการเป็นโครงข่ายแบบระนาบ (Planar Network) ธรรมดา

ตัวแบ่งกำลังแบบนอนไอโซเลตเอาต์พุต (non-isolating output) ที่มีแบนด์วิดท์กว้างตัวหนึ่งคือ T-junction การออกแบบ T-junction ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (4.19)$$

เมื่อ Z_m , Z_1 และ Z_2 คืออิมพีแดนซ์ของสายส่งไมโครสตริปอินพุต และเอาต์พุตตามลำดับ

ดังนั้นการออกแบบระบบป้อนกำลังจึงต้องเลือกอัตราส่วนการแบ่งกำลังในแต่ละตัวอย่างถูกต้อง

เพื่อให้ได้การกระจายกำลังที่เอาต์พุตตามต้องการ การออกแบบดังกล่าวอาจทำในรูปของเพลท 3 ชั้น (triplat)

หรือไมโครสตริป ซึ่งต้องคำนวณความกว้างของสาย เพื่อให้ได้อิมพีแดนซ์ตามต้องการ ในตัวแบ่งกำลังไม

สมมาตรทางเฟสอาจเกิดขึ้นที่จุดหักมุมต่างๆ ซึ่งอาจชดเชยได้โดยการปรับความยาวของสายป้อน นอกจากนี้ ถ้าทำในรูปเพลท 3 ชั้นนอกจากจะชดเชยการสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายคลื่นแล้วเรายังไม่ต้องชดเชยกับการที่ค่าคงตัวทางเฟสขึ้นกับความกว้างของไมโครสตริปด้วย

รายละเอียดการออกแบบตัวแบ่งกำลังแบบ T- Junction



รูปที่ 4.20 ตัวแบ่งกำลังแบบ T-junction แบบธรรมดาและแบบมีการแปลงอิมพีแดนซ์

พอร์ทอินพุตต้องแมทช์และเอาท์พุตต้องสัมพันธ์กับอินพุต เช่น ถ้าอินพุตเป็น 50 โอห์ม เอาท์พุตแต่ละเส้นเป็น 100 โอห์ม (กรณีแบ่งกำลังเท่ากัน) และควรจะมีการตัดเป็นตัว $v > 90$ องศา เพื่อช่วยในการแมทช์ การแปลงอิมพีแดนซ์ไปเป็น 50 โอห์ม ที่เอาท์พุตต้องใช้สเต็ปทรานส์ฟอร์มเมอร์ (step transformers) หรือการเทเปอร์ (taper)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่แบ่งกำลังไม่เท่ากัน ทำได้โดยการใช้สายที่มีอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ตามต้องการที่พอร์ทเอาต์พุตและต้องการเมทซ์ที่จุดต่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (c)

ถ้าเราใช้ไมโครสตริปแทนเพลท 3 ชั้น ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติด้านดิสเพอร์ซีฟ (dispersive) ของสายส่งด้วยค่าคงที่ทางเฟสของสายส่งไมโครสตริปขึ้นกับทั้งความถี่และอิมพีแดนซ์ของสาย ดังนั้นถ้าอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากันในแต่ละสาย จะต้องมีการปรับความยาวให้ได้เฟสที่เอาต์พุตตามต้องการ สภาวะต่างๆ ที่กล่าวมาจะตรงกับความต้องการของเราที่ความถี่ๆ หนึ่งเท่านั้น

คุณลักษณะของตัวแบ่งกำลังแบบนี้ถูกจำกัดโดยการโอโซเลทที่ค่อนข้างต่ำระหว่างพอร์ทเอาต์พุต ถ้าพอร์ทเหล่านี้ไม่เมทซ์ซึ่งกำลังบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับไปยังอินพุตและบางส่วนจะถูกคัปเปิล (Couple) ไปยังพอร์ทเอาต์พุตอีกพอร์ทหนึ่ง ดังนั้นการกระจายกำลังที่เอาต์พุตจะถูกบิดเบือนไป ซึ่งเป็นปัญหาอย่างมากในการออกแบบสายอากาศที่มีไซส์โสมดำ ตัวแบ่งกำลังแบบนี้มีข้อจำกัดของอัตราส่วนอิมพีแดนซ์คือ มีค่ามากกว่า 2 มากๆ ไม่ได้ เนื่องจากมีปัญหาในการสร้างเส้นที่มีขนาดแคบที่สุด (อิมพีแดนซ์มากที่สุด) ในทางปฏิบัติสำหรับการตัดมุมบริเวณ T-junction จะทำการตัดมุมบริเวณตรงกันไปเป็นตัว V 90 องศาและการหักมุมดังรูปที่ 4.21 การหักมุมจะช่วยลดผลของความไม่ต่อเนื่องใน โครงสร้างไมโครสตริปลงได้



รูปที่ 4.21 การหักมุมของสายส่งแบบไมโครสตริป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การออกแบบควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Quarterwave transformers)

ในการนำสายอากาศแบบสี่เหลี่ยมมาวางแนวลำดับเรียงกันเป็นแนวลำดับแบบแบน จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเปลี่ยนไป ดังนั้นจึงได้มีการนำหลักการของควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์เข้ามาเพื่อปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้ได้ตามต้องการ ในการออกแบบแต่ละองค์ประกอบจะออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งเมื่อนำสายอากาศมารวมกันจำนวน 2 องค์ประกอบจะทำให้อิมพีแดนซ์รวมของสายอากาศซึ่งจะพิจารณาเหมือนมีค่าความต้านทานสองตัวขนานกันทำให้ได้ค่าความต้านทานรวมของสายอากาศเท่ากับ 25 โอห์ม

การออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะใช้ทฤษฎีข้างต้นมาใช้ในการออกแบบโดยคำนวณความกว้างแถบตัวนำโดยที่กำหนดอิมพีแดนซ์ของสายส่งมีค่า 25 โอห์ม และ 50 โอห์ม



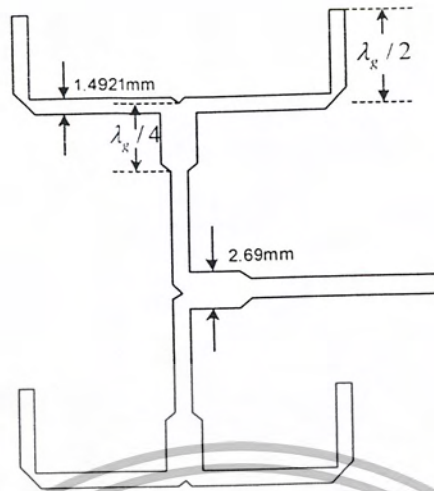
รูปที่ 4.22 สายควอเตอร์เวฟทรานส์ฟอร์มเมอร์ซึ่งต่ออยู่กับสายส่งไมโครสตริป 50 โอห์ม

4.7 การคำนวณความกว้างสายส่งไมโครสตริป

โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.10)-(4.18) วัสดุที่นำมาทำสายส่งไมโครสตริปเป็น กลาส-อีพ็อกซี่ ซึ่งมีค่า ϵ_r ประมาณ 3.8063 , t มีค่าประมาณ 0.025 มิลลิเมตร และ h มีค่าประมาณ 0.75 มิลลิเมตร

- ที่อิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม จะมีความกว้าง $w = 1.4921$ มิลลิเมตร , $\lambda_g = 14$ มิลลิเมตร และมีค่า $\epsilon_c = 2.93$

- ที่อิมพีแดนซ์เท่ากับ 35.35 โอห์ม จะมีความกว้าง $w = 2.69$ มิลลิเมตร , $\lambda_g = 15.269$ มิลลิเมตร และมีค่า $\epsilon_c = 2.47$



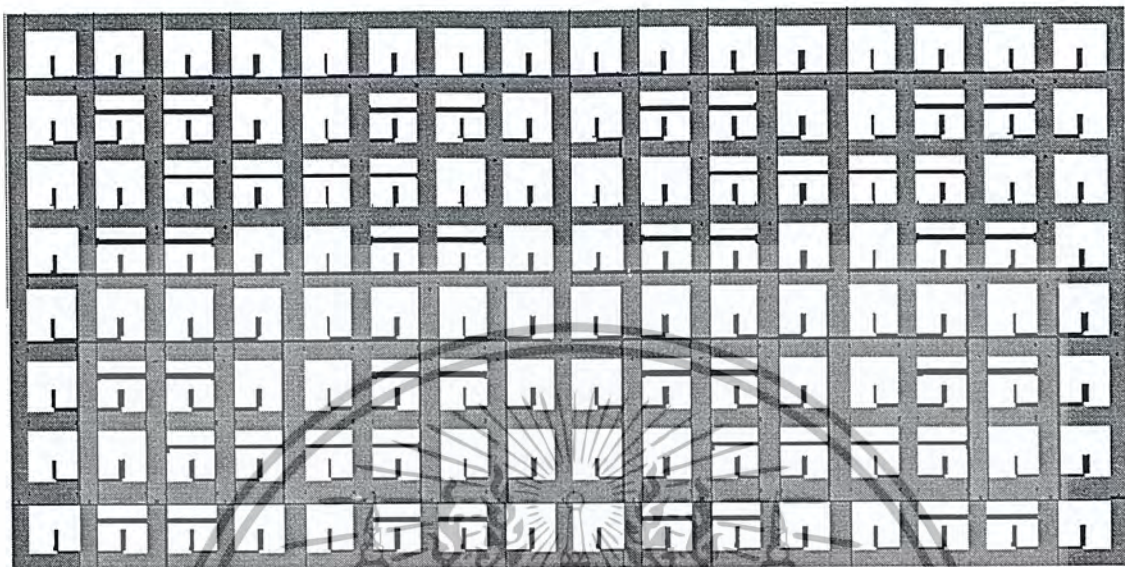
รูปที่ 4.23 ขนาดความกว้างของสายส่งไมโครสตริปที่ออกแบบแล้ว



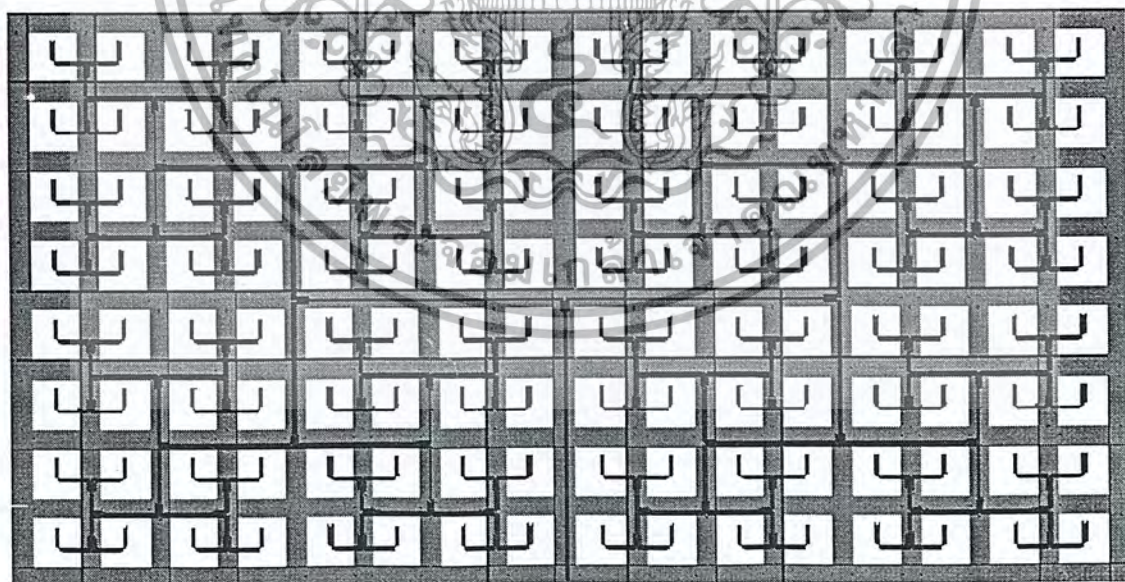
รูปที่ 4.24 รูปโครงสร้างของสายอากาศที่จะทำการประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม IE3D จะได้ดังรูปสายอากาศ128 องค์ประกอบข้างล่าง



รูปที่ 4.25 สายอากาศแถวลำดับ 128 องค์ประกอบมุมมองด้านบน

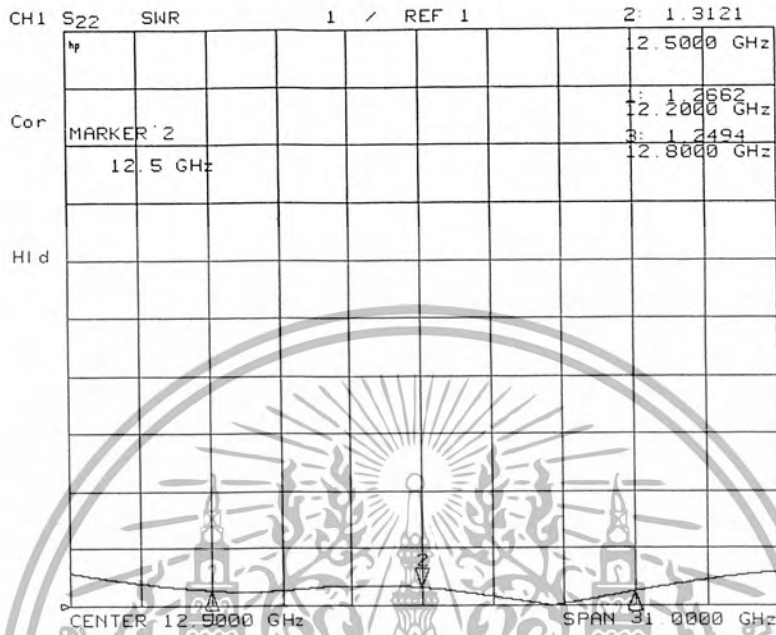


รูปที่ 4.26 สายอากาศแถวลำดับ 128 องค์ประกอบมุมมองด้านล่าง

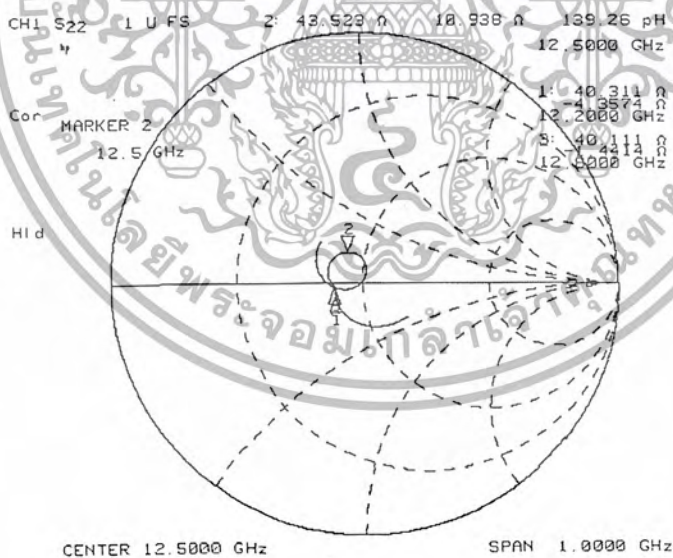
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองวัดผลของสายอากาศ

แสดงผลการวัดสายอากาศ โดยใช้เครื่อง Network Analyzer

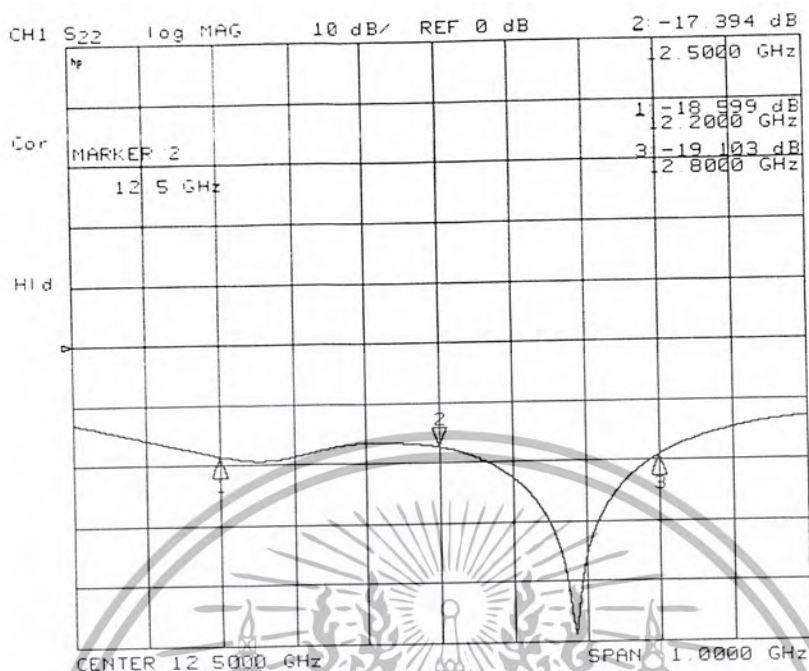


รูปที่ 4.27 ค่า SWR ของสายอากาศแฉกดำดับขนาด 128 องศาประกอบตัวที่ 1

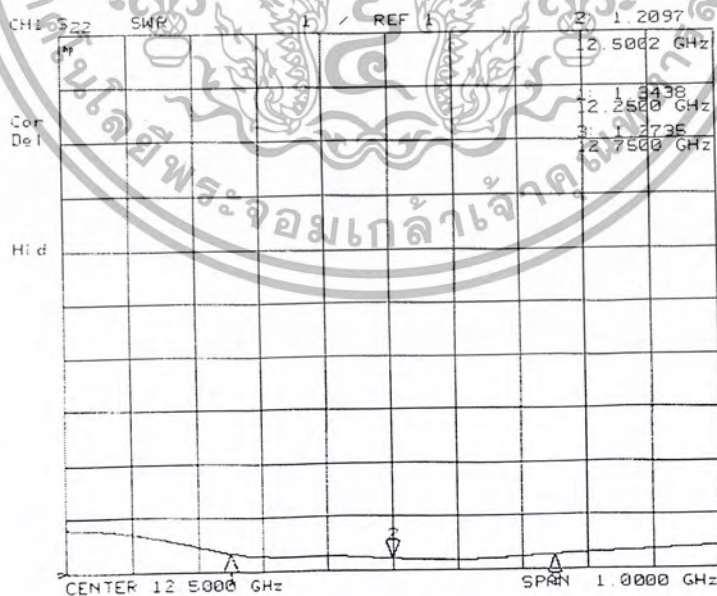


รูปที่ 4.28 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแฉกดำดับขนาด 128 องศาประกอบตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

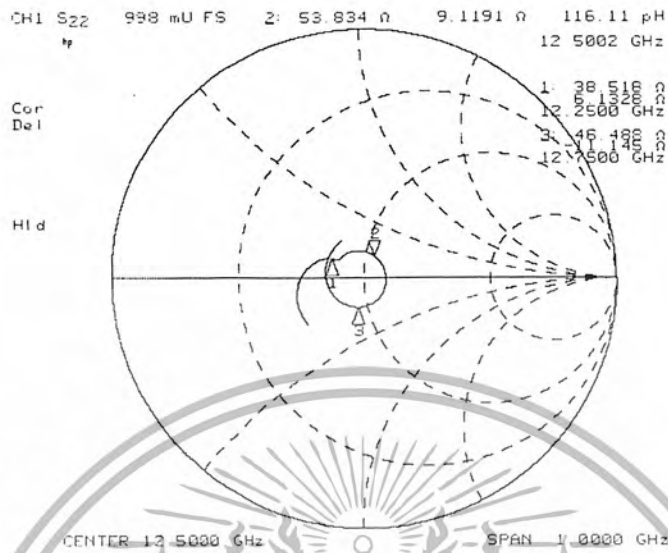


รูปที่ 4.29 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแฉกลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 1 จากกราฟจะเห็นว่าค่า SWR ของสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 1 มีค่า 1.3121 และจากกราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบจะได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $43.529 + j10.938$ โอห์ม และมีค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบมีค่า -17.394 dB

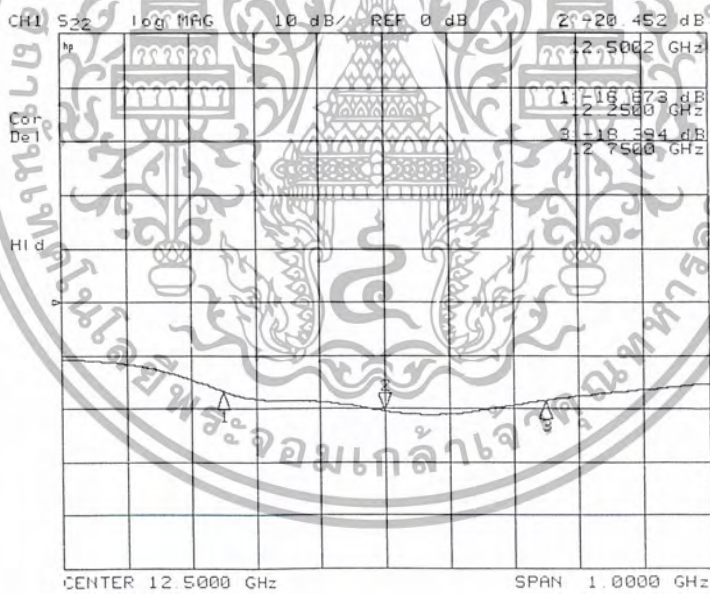


รูปที่ 4.30 ค่า SWR ของสายอากาศแฉกลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



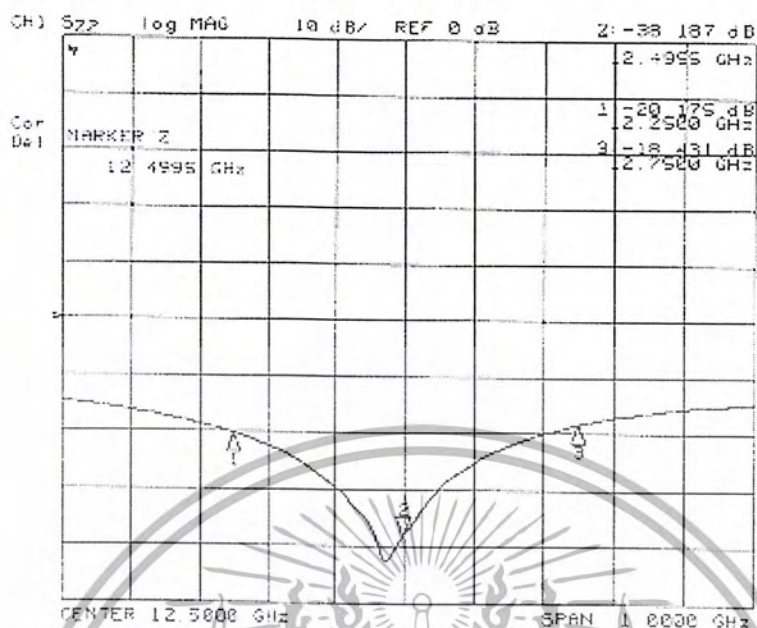
รูปที่ 4.31 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 2



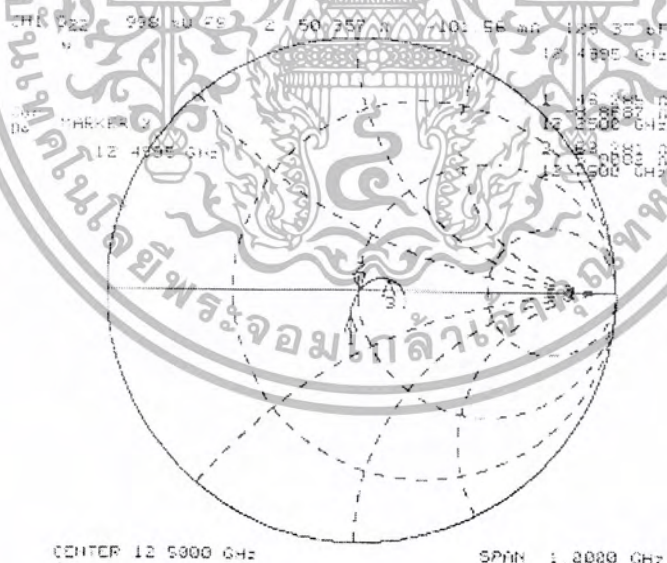
รูปที่ 4.32 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 2

จากกราฟจะเห็นว่าค่า SWR ของสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบตัวที่ 2 มีค่า 1.2097 และจากกราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบจะได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $53.834 + j9.1191$ โอห์ม และมีค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบมีค่า -20.452 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

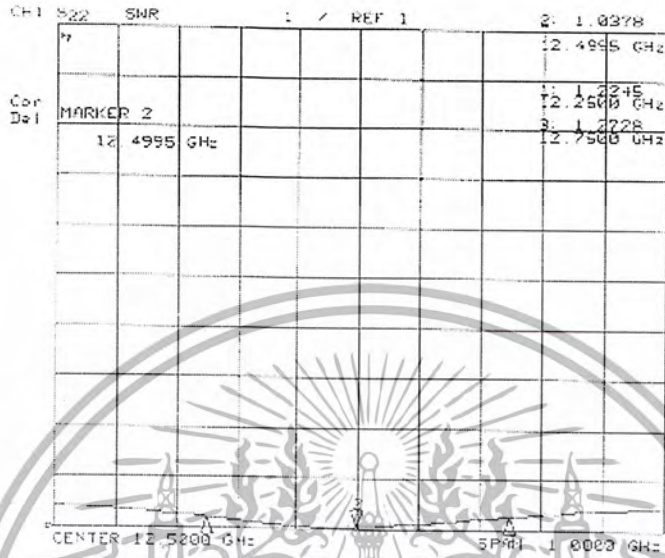


รูปที่ 4.33 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 1



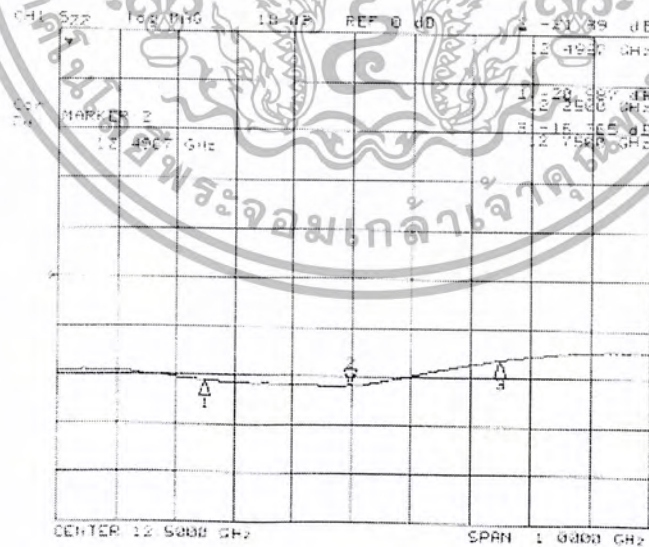
รูปที่ 4.34 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



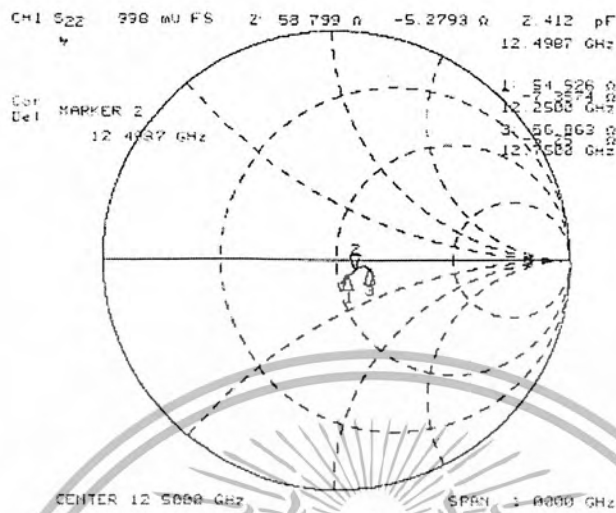
รูปที่ 4.35 ค่า SWR ของสายอากาศแฉก ลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 1

จากกราฟจะเห็นว่าค่า SWR ของสายอากาศขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 1 มีค่า 1.0378 และจากกราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขนาด 16 องค์ประกอบจะได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $50.357 - j0.101$ โอห์ม และมีค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศขนาด 16 องค์ประกอบมีค่า -38.187 dB

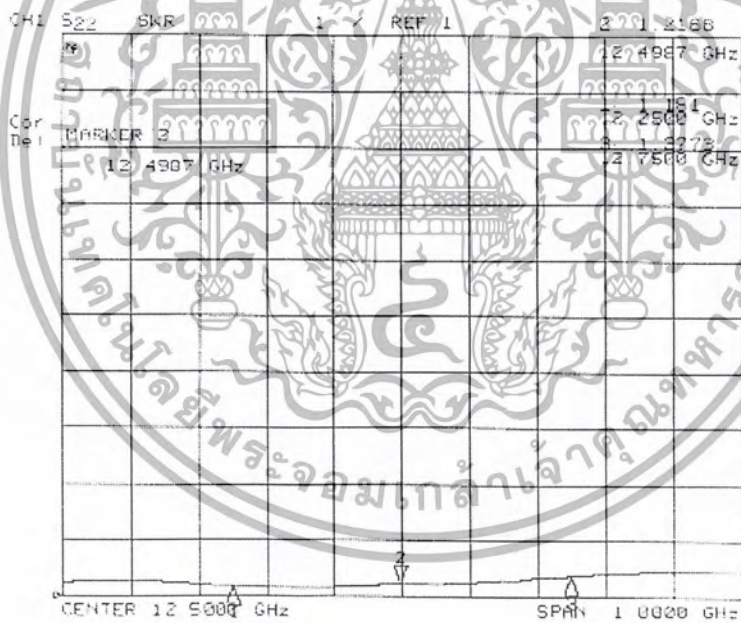


รูปที่ 4.36 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแฉก ลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



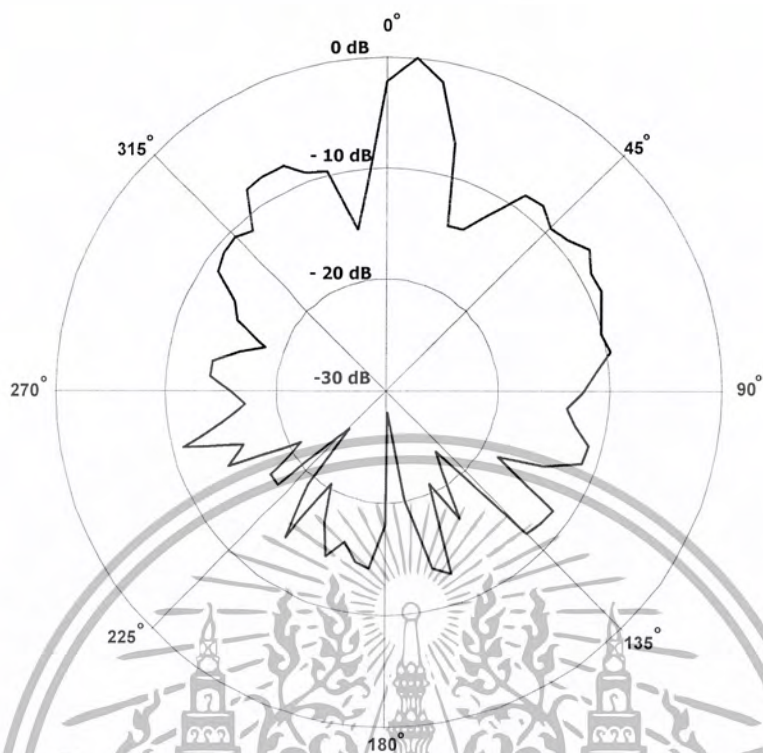
รูปที่ 4.37 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 2



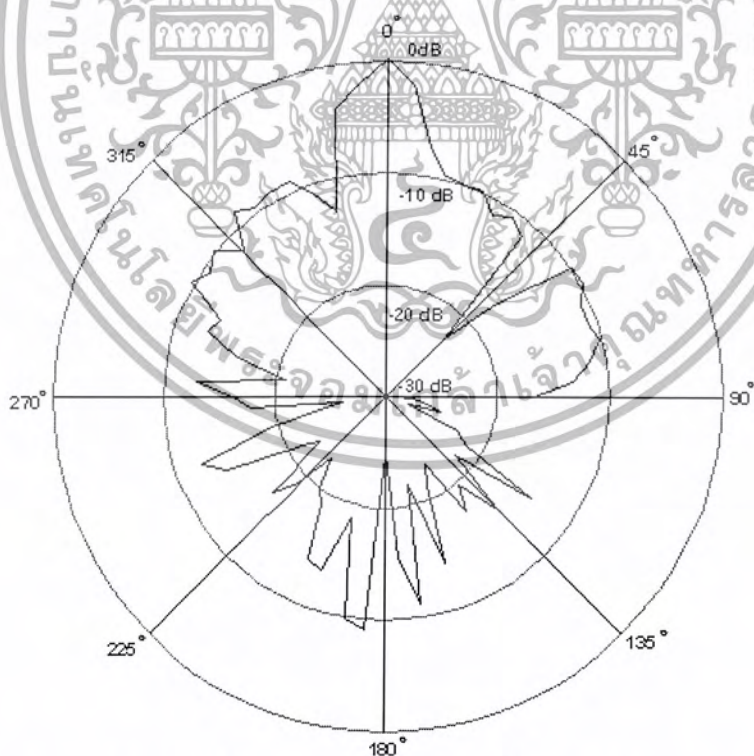
รูปที่ 4.38 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 2

จากกราฟจะเห็นว่าค่า SWR ของสายอากาศขนาด 16 องค์ประกอบตัวที่ 2 มีค่า 1.2168 และจากกราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศขนาด 16 องค์ประกอบจะได้ค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 58.799-j27.938 โอห์ม และมีค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศขนาด 16 องค์ประกอบมีค่า -21.89 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

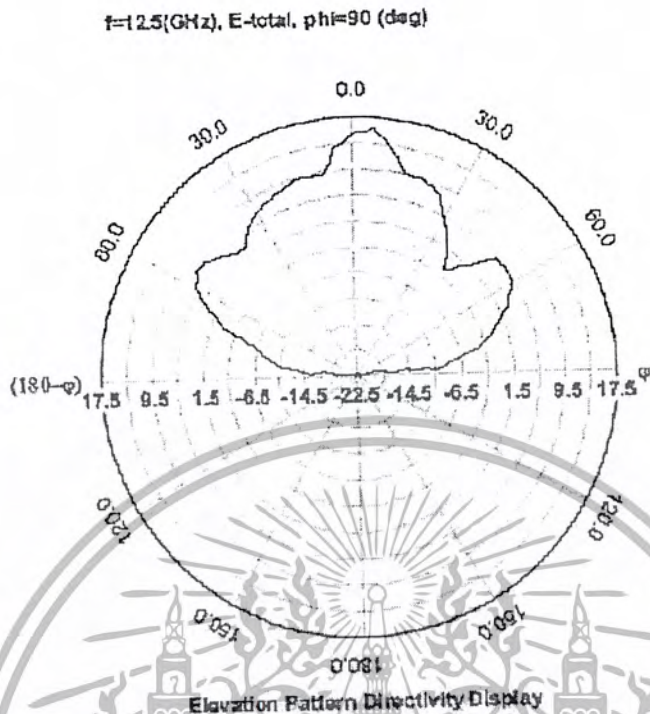


รูปที่ 4.39 กราฟการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า

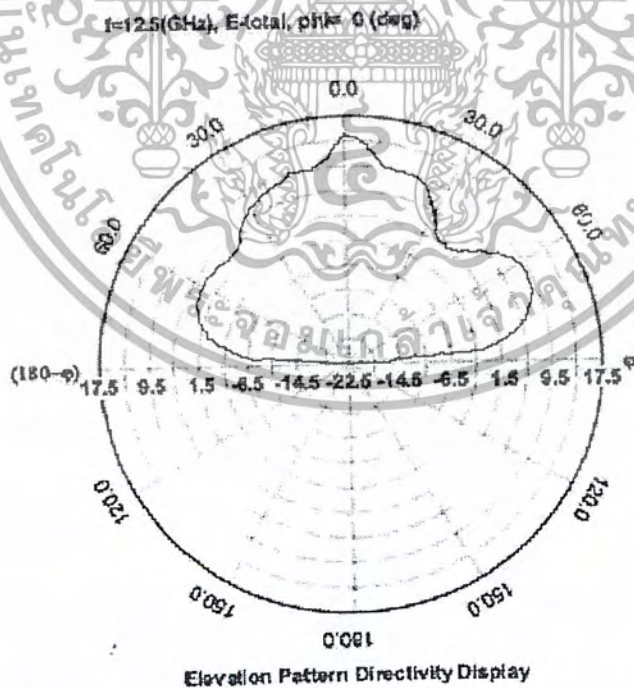


รูปที่ 4.40 กราฟการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



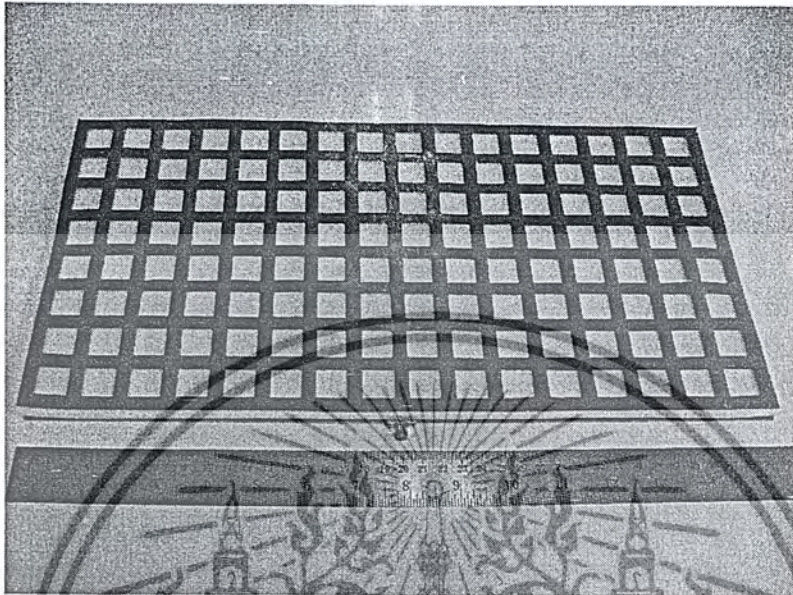
รูปที่ 4.41 กราฟการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกลำดับที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม IE3D ในระนาบสนามไฟฟ้า



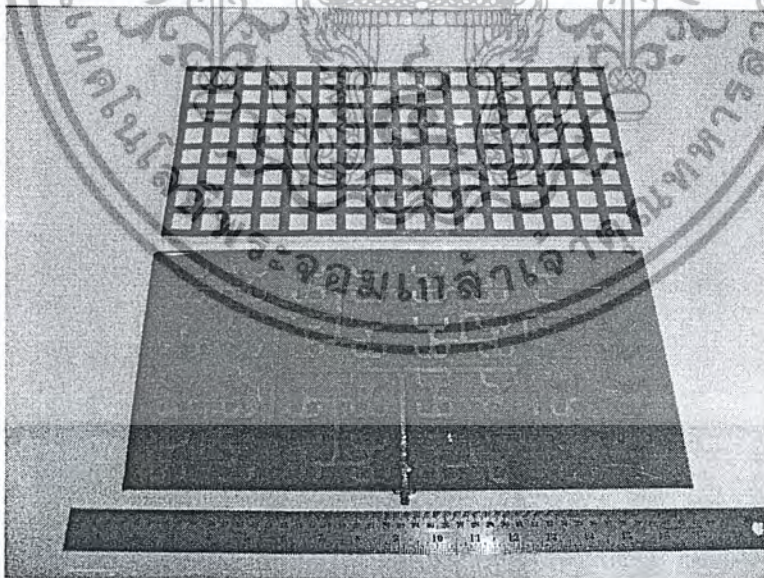
รูปที่ 4.42 กราฟการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉกลำดับที่ได้จากการจำลองการทำงานโดยโปรแกรม IE3D ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่ายของสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบ

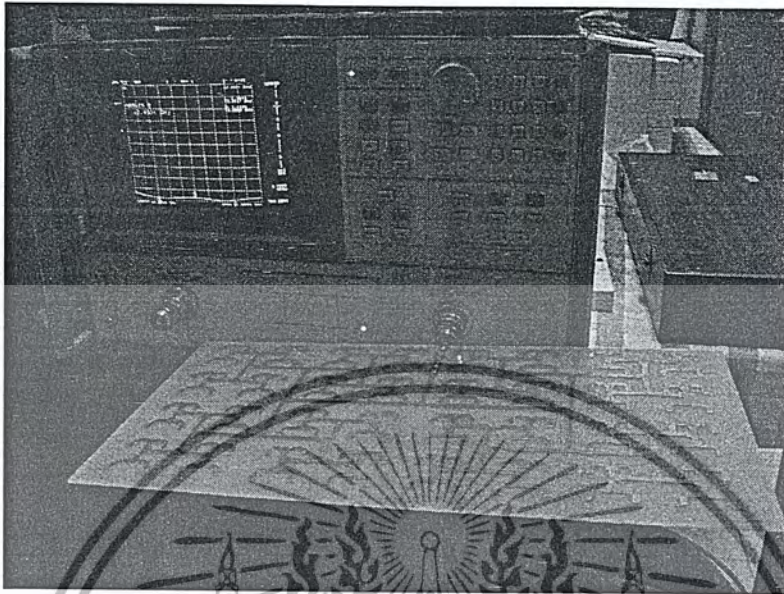


รูปที่ 4.43 สายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบ ที่ช่องเปิดอยู่ด้านบน

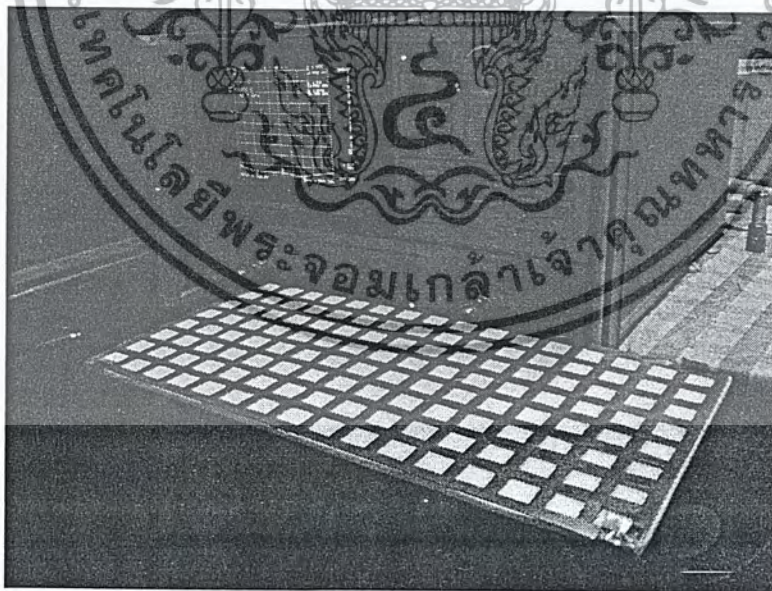


รูปที่ 4.44 สายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบที่มีช่องเปิดและส่วนป้อนกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

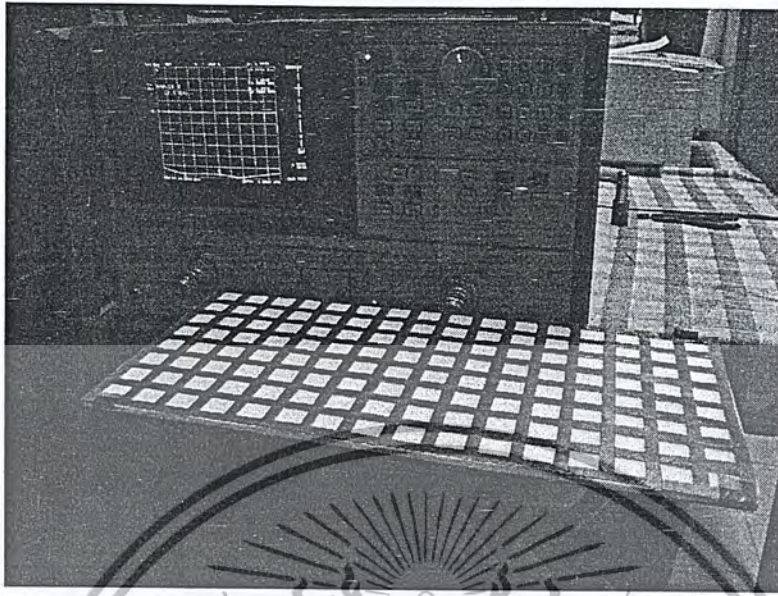


รูปที่ 4.45 การวัดส่วนป้อนกำลังขนาด 128 องค์กรประกอบด้วยเครื่อง Network Analyzer

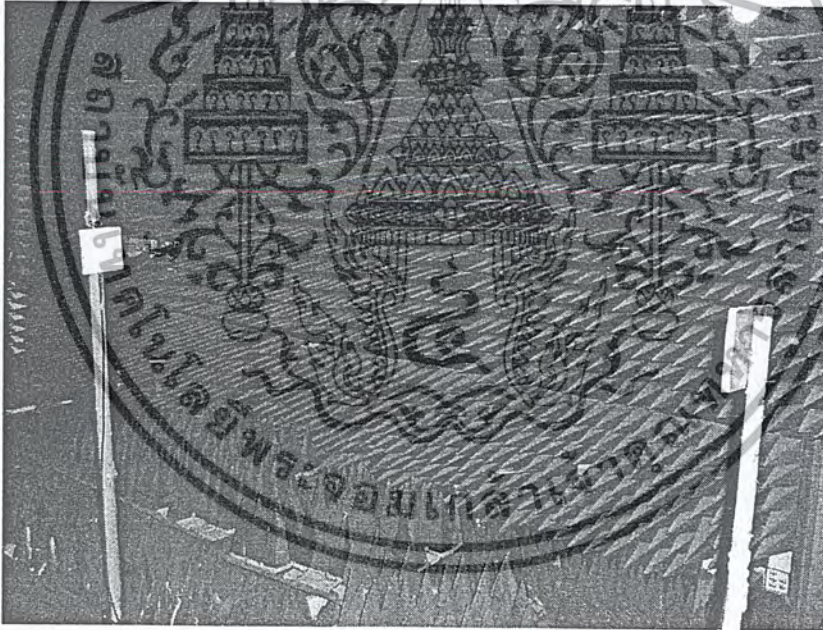


รูปที่ 4.46 การวัดสายอากาศขนาด 128 องค์กรประกอบด้วยเครื่อง Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 การวัดสายอากาศขนาด 128 องค์ประกอบโดยเครื่อง Network Analyzer



รูปที่ 4.48 การวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในห้อง ดูดซับคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดอัตราขยายโดยใช้เครื่อง Network Analyzer

สมการของ Friis Transmission

$$Pr(dBm) = Pt(dBm) + Gt(dB) + Gr(dB) - 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

เมื่อ

$Pr(dBm)$ = กำลังงานที่รับได้ ของ Network Analyzer

$Pt(dBm)$ = กำลังงานที่ส่งออก ของ Network Analyzer

$Gt(dB)$ = อัตราขยายของสายอากาศส่ง

$Gr(dB)$ = อัตราขยายของสายอากาศรับ

d = ระยะห่างของสายอากาศส่งกับสายอากาศรับ (m)

λ = ความยาวคลื่นที่ความถี่ที่ใช้งาน (m)

เมื่อกำหนดให้ $Gt(dB) = Gr(dB)$

$\lambda = 0.024 \text{ m}$ (ที่ความถี่ใช้งาน 12.5 GHz)

$d = 1.88 \text{ m}$ (โดยที่ระยะของการแพร่กระจายคลื่นของสนามระยะไกลคือ 1.75 m)

และจากการอ่านค่าจากเครื่อง Network Analyzer

$$Pr(dBm) - Pt(dBm) = -45 \text{ (dBm)} \text{ และ } 20 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = -60 \text{ (dB)}$$

จะได้อัตราขยายของสายอากาศเท่ากับ 7.5 (dBi)



บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การออกแบบและการทำสายอากาศมีขั้นตอนการทำงานตามโครงการนี้คือ การศึกษาและทำความเข้าใจในหลักการพื้นฐานและคุณสมบัติของสายอากาศ รวมทั้งศึกษาและวิเคราะห์สายอากาศแบบเฉพาะ โดยในโครงการนี้ออกแบบและทำสายอากาศแบบสายอากาศอัตรการขยายสูงจากแถวลำดับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่มีการประกอบกันขึ้นจากส่วนของตัวป้อนกำลังที่เป็นสายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศอัตรการขยายสูงจากแถวลำดับช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากส่วนของตัวสะท้อนหรือรีเฟลคเตอร์ โดยการคำนวณทางคณิตศาสตร์จะใช้โปรแกรมคำนวณ MathCAD เพื่อคำนวณถึงการแพร่กระจายคลื่นที่สนามไฟฟ้าแม่เหล็กที่ระยะไกลรวมทั้งการคำนวณเพื่อหาขนาดของช่องเปิดที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนให้มีขนาดของช่องเปิดที่เหมาะสมในการทำงานของสายอากาศสามารถทำงานได้ในโหมดการทำงานพื้นฐาน และส่วนของตัวป้อนกำลังหลังจากทำการคำนวณแล้วจะทำการออกแบบและจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม IE3D และวิเคราะห์ผลการทำงานของสายอากาศจากกราฟเคลื่อนที่ของสายอากาศตัวจริงออกมา

ปัญหาและอุปสรรคในการทำงานและที่ทำการศึกษาทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติผลที่ได้ยังไม่ตรงกัน บางประการและยังให้ผลที่ไม่ดีนัก ซึ่งข้อผิดพลาดจะเกิดขึ้นได้ โดยที่ทางทฤษฎีนั้นทำการสมมุติต้นกำเนิดสนามขึ้นมาและกำหนดการแปรผันสนามในฟังก์ชันเพื่อที่จะให้ง่ายต่อการคำนวณทางคณิตศาสตร์ แต่เนื่องจากการคำนวณในทางทฤษฎีจะต้องใช้ผลการทดลองจากการปฏิบัตินำไปทำการประมวลผลหากการปฏิบัติเกิดการคลาดเคลื่อนจะทำให้การคำนวณผิดพลาดด้วย สำหรับในการปฏิบัติข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้หลายประการ อาทิเช่น ผลจากการวัดค่า(E_{θ}) ที่ได้ อาจเกิดการผิดพลาดเนื่องจากสาเหตุดังนี้ การใช้แผ่นฟอยล์หุ้มขอบข้างของเรโซเนเตอร์อาจเกิดการทำให้ขนาดของเรโซเนเตอร์คลาดเคลื่อนได้ การอ่านค่าความถี่ของการสะท้อนที่ตกลงมาในจอของเครื่องเน็คเวิร์คอาจเกิดจากความผิดพลาดได้ การไปโหมดเคลื่อนที่การแพร่กระจายจากโหมดต่ำไปโหมดสูงอาจเกิดการผิดพลาดได้เพราะ อีป็อกซี่มีส่วนผสมของสารที่ทำให้ค่าการวัดเกิดผิดพลาดไปได้ การสร้างสายอากาศไม่สามารถทำให้มีขนาดตรงตามทฤษฎีได้เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ทำการสร้างสายอากาศ เช่นแผ่นกรวด์เพลนไม่สามารถที่จะทำตัวเป็นตัวนำที่สมบูรณ์และมีขนาดที่ไม่จำกัดได้ รวมปัญหาในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทศนิยมหลายตำแหน่ง (เกิน 3 ตำแหน่ง) แต่ในเครื่องมือวัดจะไม่ละเอียดพอ ในทางปฏิบัติหากเกิน 3 ตำแหน่งจะทำการตัดทิ้งไปทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนได้ค่าคงที่สัมพัทธ์ของสารที่ใช้ทำสายอากาศจากการคำนวณผลการทดลองใช้ แต่ในการทดลองไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของค่าคงที่สัมพัทธ์ได้ และแผ่นทองแดงที่ใช้ทำแผ่นปากเปิดอาจไม่เป็นตัวนำที่สมบูรณ์ได้เนื่องจากอาจมีการผสมของสารอื่นในแผ่นทองแดงทำให้ไม่บริสุทธิ์พอ การป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศในทางปฏิบัติอาจเกิดการผิดพลาดจากตำแหน่งการป้อนสัญญาณที่ไม่เหมาะสมทำให้เกิดการสะท้อนกลับของพลังงานเนื่องจากการที่อินพุตอิมพีแดนซ์ที่ไม่สมพียงกัน จึงทำการแก้ไขโดยใช้วิธีหลักการเลียนแบบการปรับแมทซ์ซึ่งโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นทองแดงมาใช้ซึ่งเป็นวิธีของสตีปเมทซ์ซึ่ง การวางไม่ตรงกันของตัวรับและตัวส่งในการทดลองจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการวัดได้ การวัดการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไม่สามารถวัดได้ตามเงื่อนไขทางทฤษฎีได้ทั้งหมดเพราะข้อจำกัดทางสถานที่และอุปกรณ์ จากการปฏิบัติทำให้ทราบว่ายังมีข้อจำกัดหลายประการที่ทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นมายังไม่ดีเท่าที่ควร หากทำการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ก็จะทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศที่ทำการสร้างขึ้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นไป

สายอากาศที่ทำการสร้างมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักที่เบา มีรูปทรงสี่เหลี่ยมแบนราบกับพื้นผิวที่ทำการติดตั้ง และมีราคาของวัสดุอุปกรณ์ที่ไม่แพงมากนักทำให้สามารถปรับปรุงสายอากาศเป็นสายอากาศที่มีการเพิ่มวงจรที่มีความสามารถในการขยายและทำการปรับสัญญาณได้จะทำให้การทำงานของสายอากาศดีขึ้น และสามารถทำการปรับปรุงให้สามารถติดตั้งบนยานพาหนะที่เคลื่อนที่เพื่อทำการรับสัญญาณดาวเทียมขณะที่เคลื่อนที่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

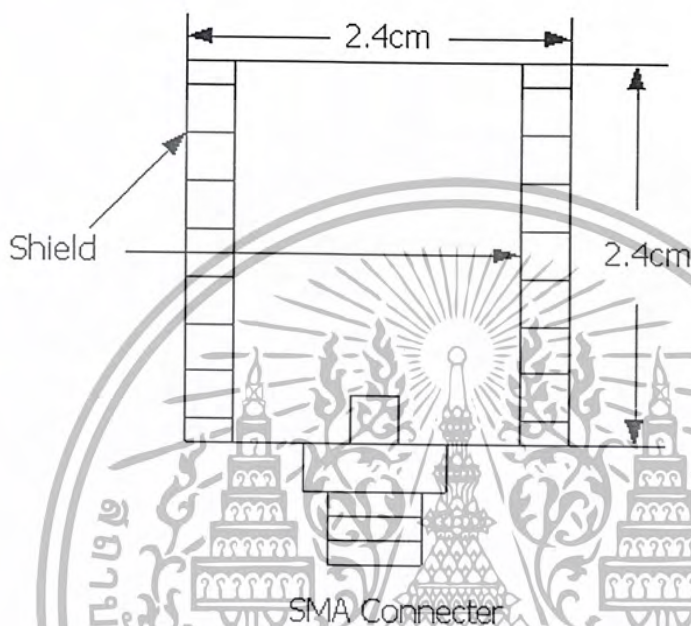


ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของแผ่นปรีนที

ได้ใช้สับสเตรทเป็นอีพ็อกซี่ (Epoxy) มีความหนา 0.85 mm คัดแผ่นปรีนทีเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2.4cm*2.4cm และทำการเชื่อม (Shield) ขอบ 2 ด้านที่ขนานกัน ต่อจากนั้นจึงเชื่อมต่อ SMA Connector เข้ากับแผ่นปรีนทีที่ทำการตัดแล้ว จากแล้วทำการวัด Return Loss (S22)



รูปที่ 1 แสดงการต่อ SMA Connector เข้ากับแผ่นทองแดง

จากสมการแสดงโหมดคลื่นของแผ่นไมโครสตริป

$$(f_r)_{mn} = \left[\frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{w}\right)^2} \right] ; l = w = 2.4 \text{ cm} \quad (1)$$

l = ความกว้างของแผ่นปรีนที

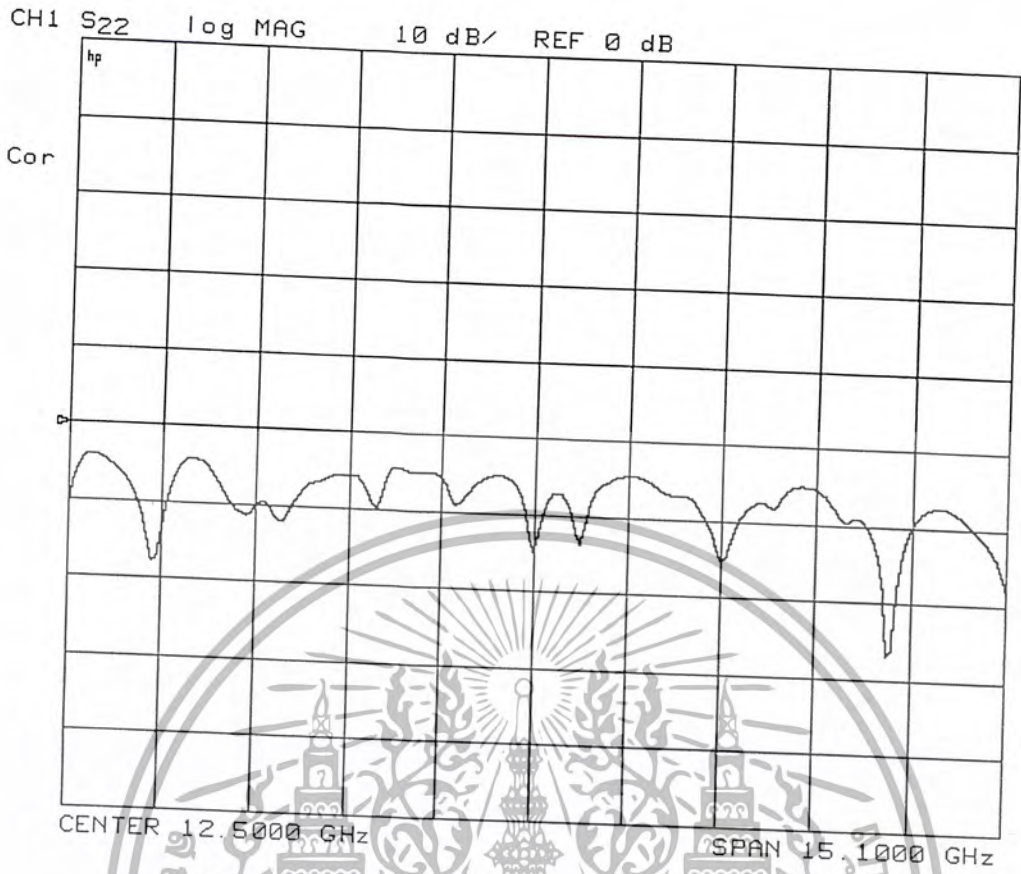
w = ความยาวของแผ่นปรีนที

ลดรูปสมการเป็น

$$(f_r)_{mn} = \left[\left(\frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \right) \sqrt{(m)^2 + (n)^2} \right] \quad (2)$$

$$\epsilon_r = \left[\left(\frac{c}{2\pi(f_r)_{mn}} \right) \sqrt{(m)^2 + (n)^2} \right]^2 \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 การเกิด Return Loss ของแผ่นปรีนขนาด 2.4 cm

สมการ (3) ใช้สำหรับหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์

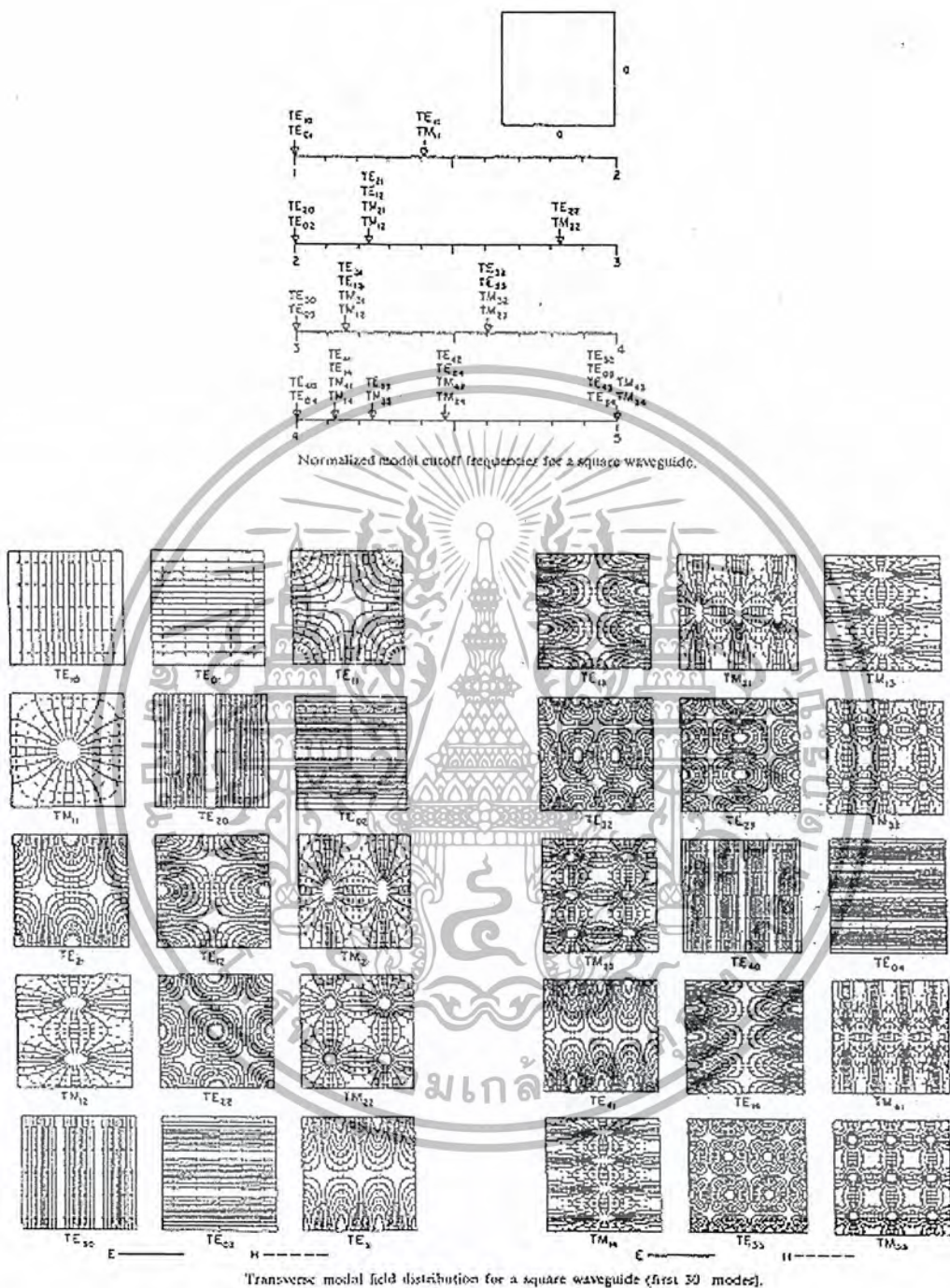
ตารางที่ 1 แสดงการหาค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ ในคลื่นโหมดต่าง ๆ

POSITION	f_r (GHz)	MODE(m,n)	ϵ_r
1	6.4177	1,0	0.847
2	7.5433	2,1	3.065
3	8.2980	2,2	4.052
4	9.9436	2,3	4.585
5	11.3581	3,1	2.703
6	12.5756	3,2	2.867
7	13.2596	3,3	3.57
8	15.5041	4,2	2.902
9	16.3805	4,3	3.249
10	18.2368	4,4	3.356

จากตารางที่ 1 จะได้ค่าเพอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ เฉลี่ยเท่ากับ 3.043 ซึ่งจะนำค่านี้ไปใช้ออกแบบสายอากาศ

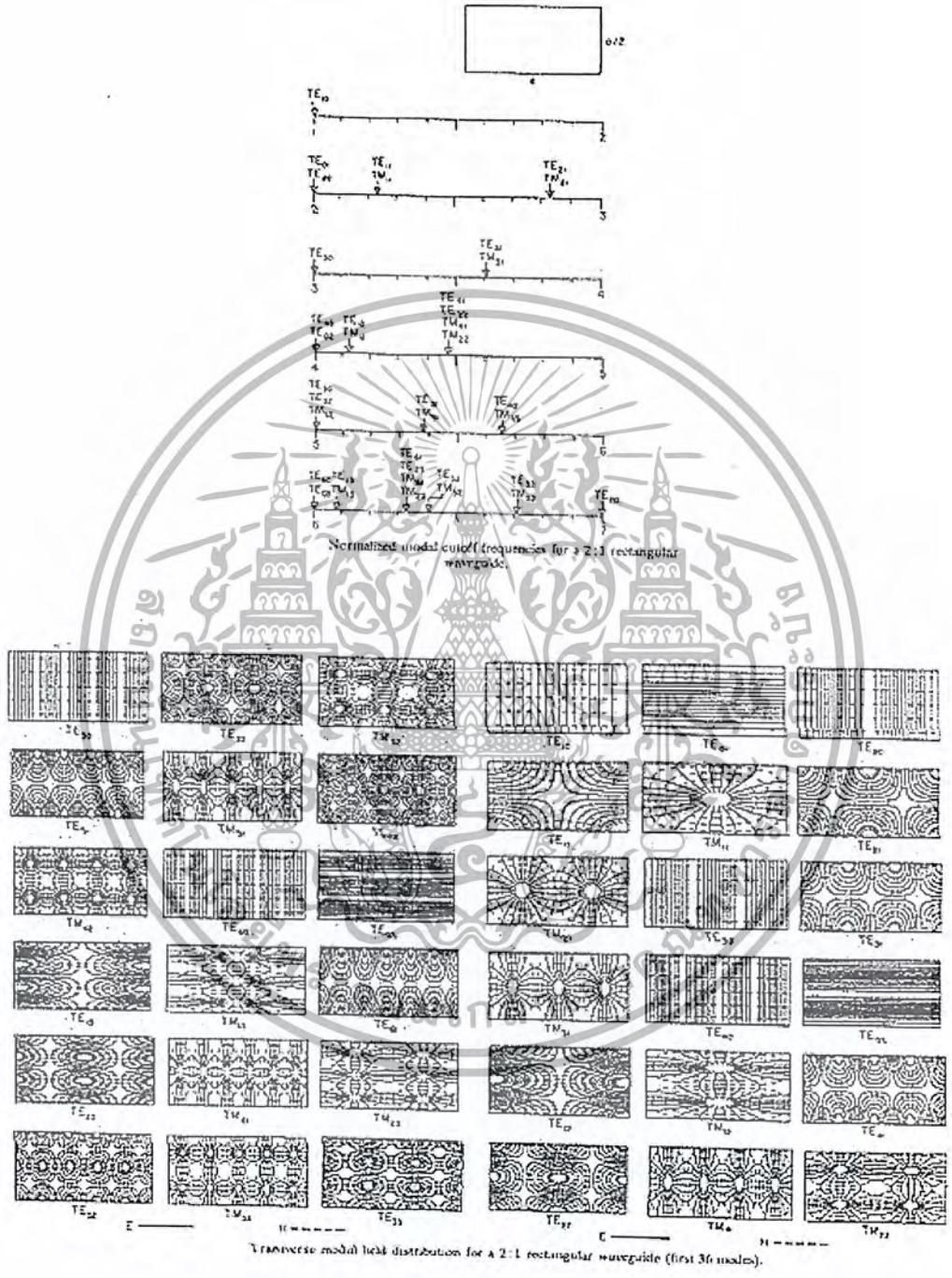
ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



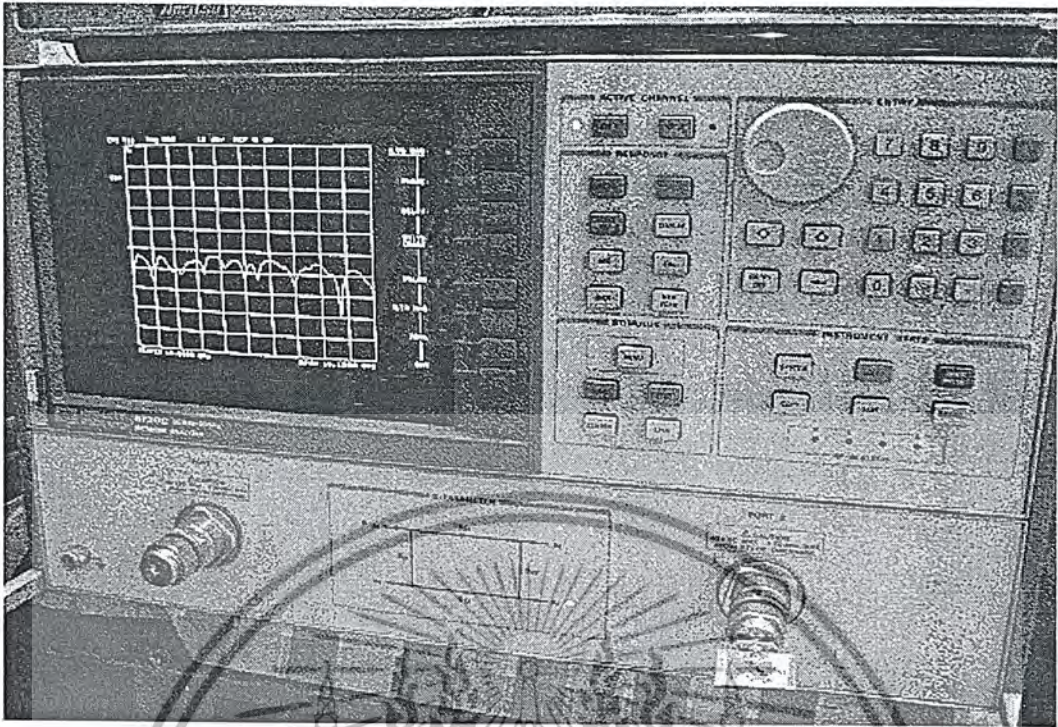
รูปที่ 3 ภาพโหมดการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก 30 โหมดแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

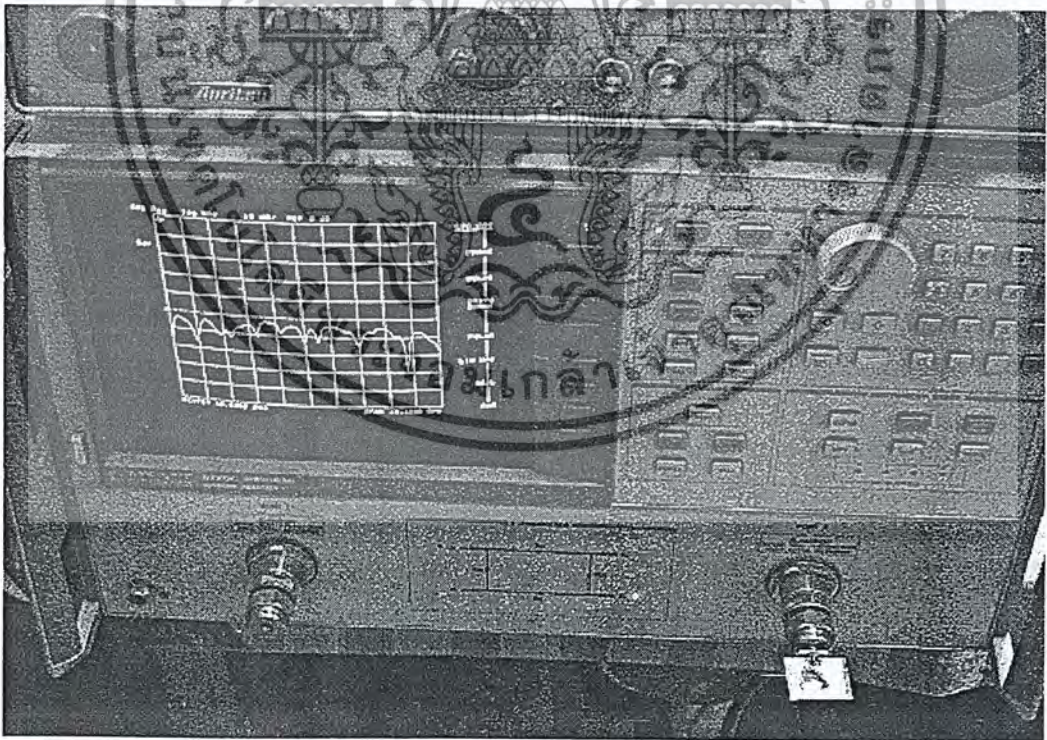


รูปที่ 4 ภาพโหนดการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นในช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก 30 โหนดแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.(ก) ภาพการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของแผ่นปรีนขนาด 2.4 cm



รูปที่ 5.(ข) ภาพการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของแผ่นปรีนขนาด 2.4 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการหาขนาดปากเปิดโดยใช้โปรแกรมMathCAD

$$c = 3 \times 10^8 \quad f = 12.5 \times 10^9 \quad \eta = 120\pi$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.024 \text{ cm} \quad k = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)$$

$$a = 0.5\lambda \quad b = a \quad \phi = 90 \text{ deg}$$

$$\text{sinc}(x) = \left[\frac{\sin(x + 10^{-9})}{(x + 10^{-9})} \right]$$

$$E_\theta(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2} \right) \left(jab \frac{k}{2\pi} \right) \sin(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2} \right] \text{sinc}\left(\frac{ka \sin(\theta) \sin(\phi)}{2} \right)$$

$$E_\phi(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2} \right) \left(jab \frac{k}{2\pi} \right) \cos(\theta) \cos(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2} \right] \text{sinc}\left(\frac{kb \sin(\theta) \sin(\phi)}{2} \right)$$

$$E_{total}(\theta, \phi) = \sqrt{\left(|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right)}$$

$$u(\theta, \phi) = \frac{\left(|E_{total}(\theta, \phi)| \right)^2}{2\eta}$$

$$\text{Prad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi$$

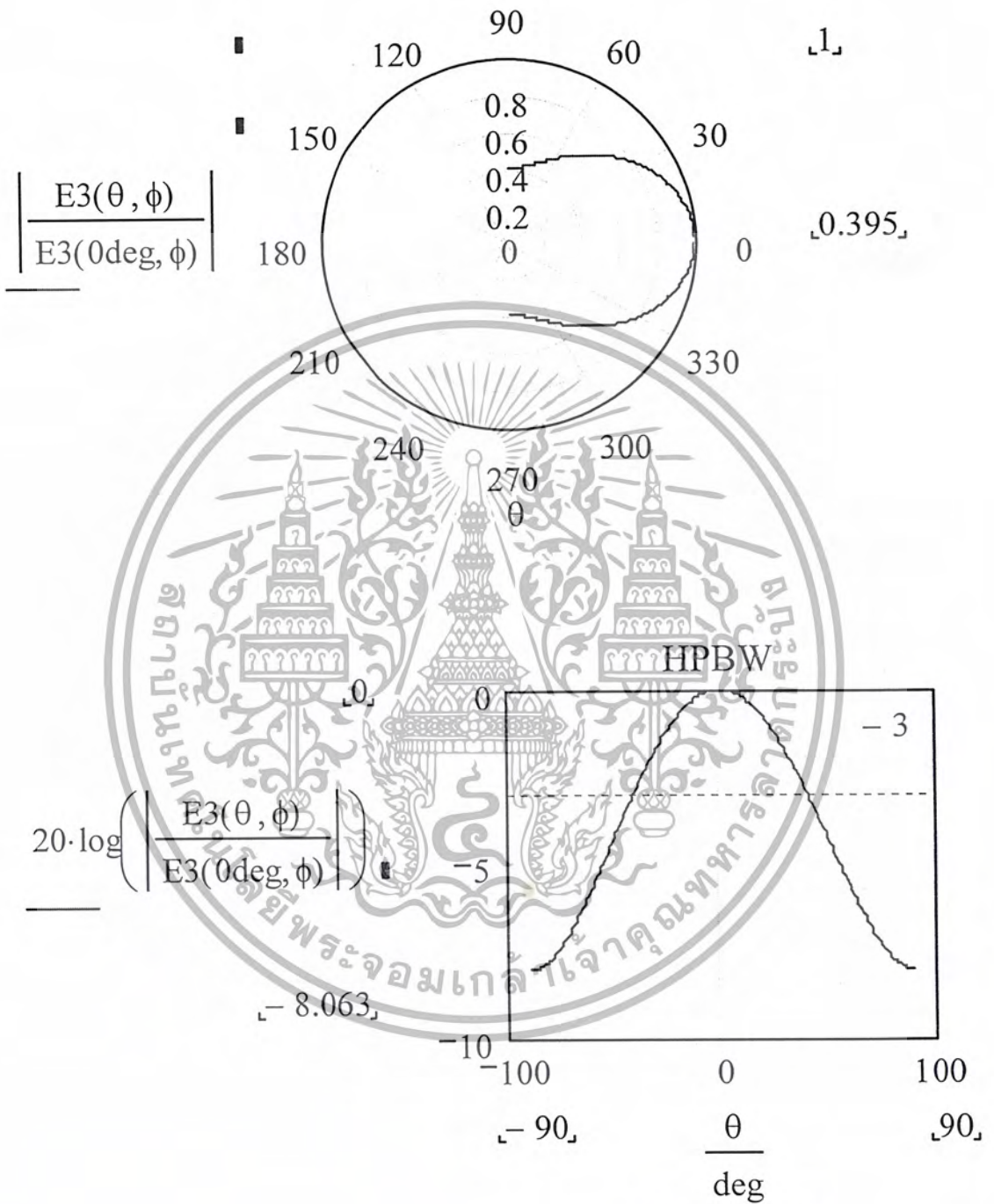
$$D = 4\pi \frac{u(\theta, \phi)}{\text{Prad}}$$

$$10 \log(D) = 6.55$$



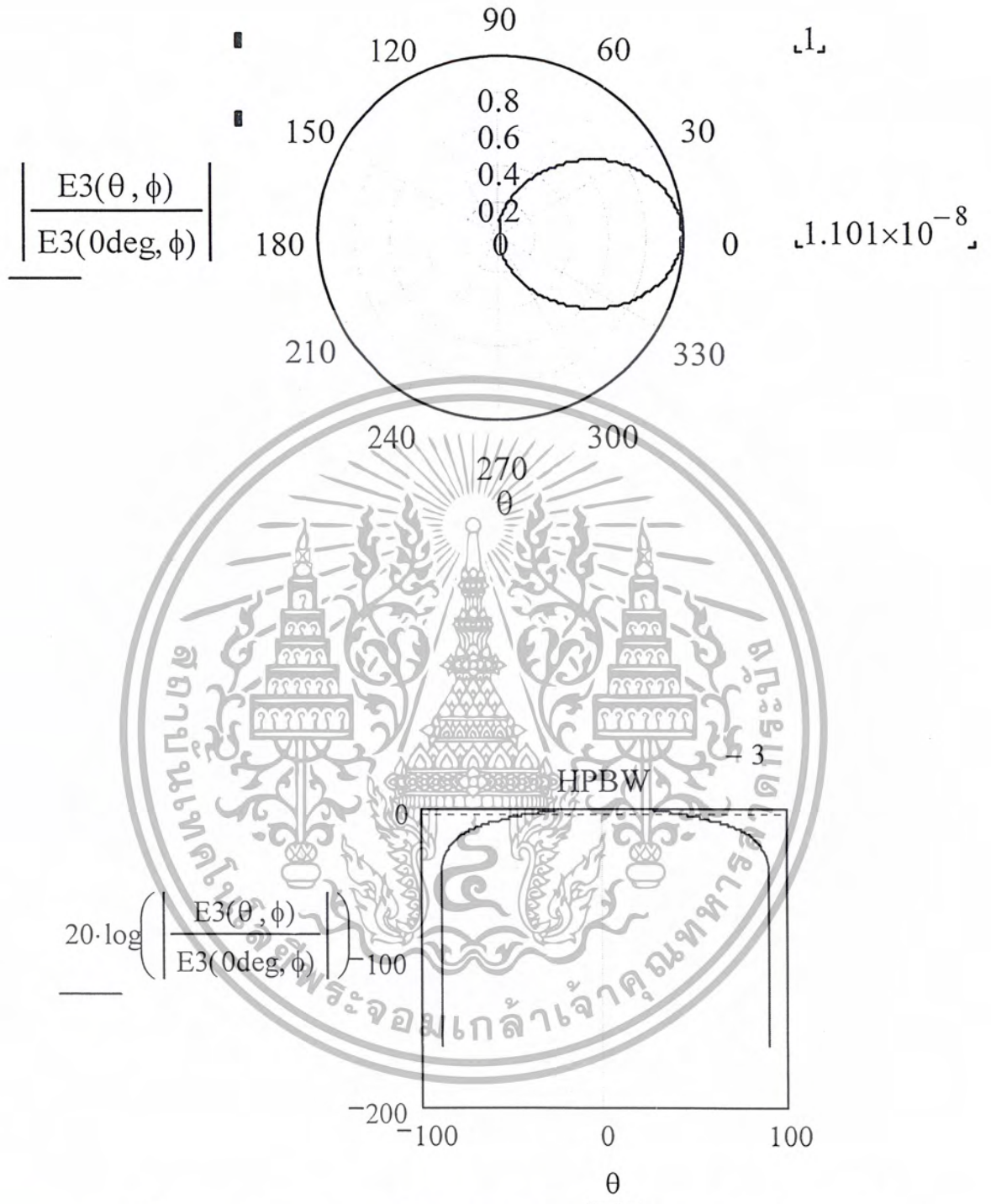
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแพร่กระจายคลื่นของช่องเปิดเมื่อทำการพิจารณาที่สนามระยะไกลโดยที่ทำการเปลี่ยนขนาดของช่องเปิด



รูปที่ 6 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90 \text{ deg}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0\text{deg}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการวางสายอากาศแบบแถวลำดับ 128 องค์ประกอบของสายอากาศ

$$c = 3 \times 10^8 \quad f = 12.5 \times 10^9 \quad \eta = 120\pi$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.024 \text{ cm} \quad k = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)$$

$$a = 0.5\lambda \quad b = a \quad \phi = 90 \text{ deg}$$

$$\text{sinc}(x) = \left[\frac{\sin(x + 10^{-9})}{(x + 10^{-9})} \right] \quad M=8 \quad N=16 \quad d_x = d_y = \lambda \quad \beta_x = \beta_y = 0$$

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

$$\times \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M k d_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2}\right)}{\sin\left(\frac{k d_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2}\right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N k d_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{k d_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2}\right)} \right]$$

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

$$\times \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M k d_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2}\right)}{\sin\left(\frac{k d_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2}\right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N k d_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2}\right)}{\sin\left(\frac{k d_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2}\right)} \right]$$

$$E_{total}(\theta, \phi) = \sqrt{\left(|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right)}$$

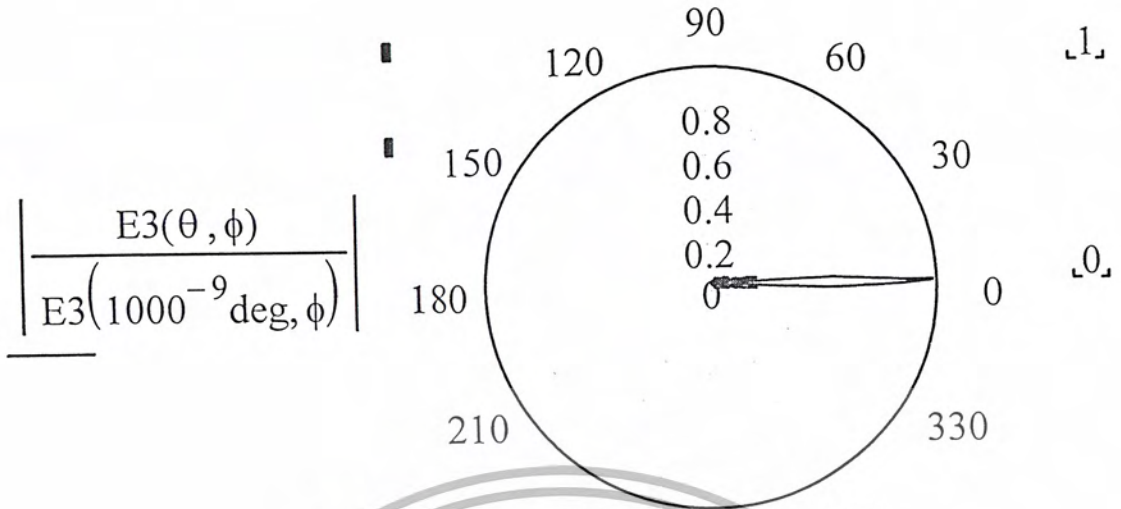
$$u(\theta, \phi) = \frac{\left(|E_{total}(\theta, \phi)| \right)^2}{2\eta}$$

$$\text{Prad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi$$

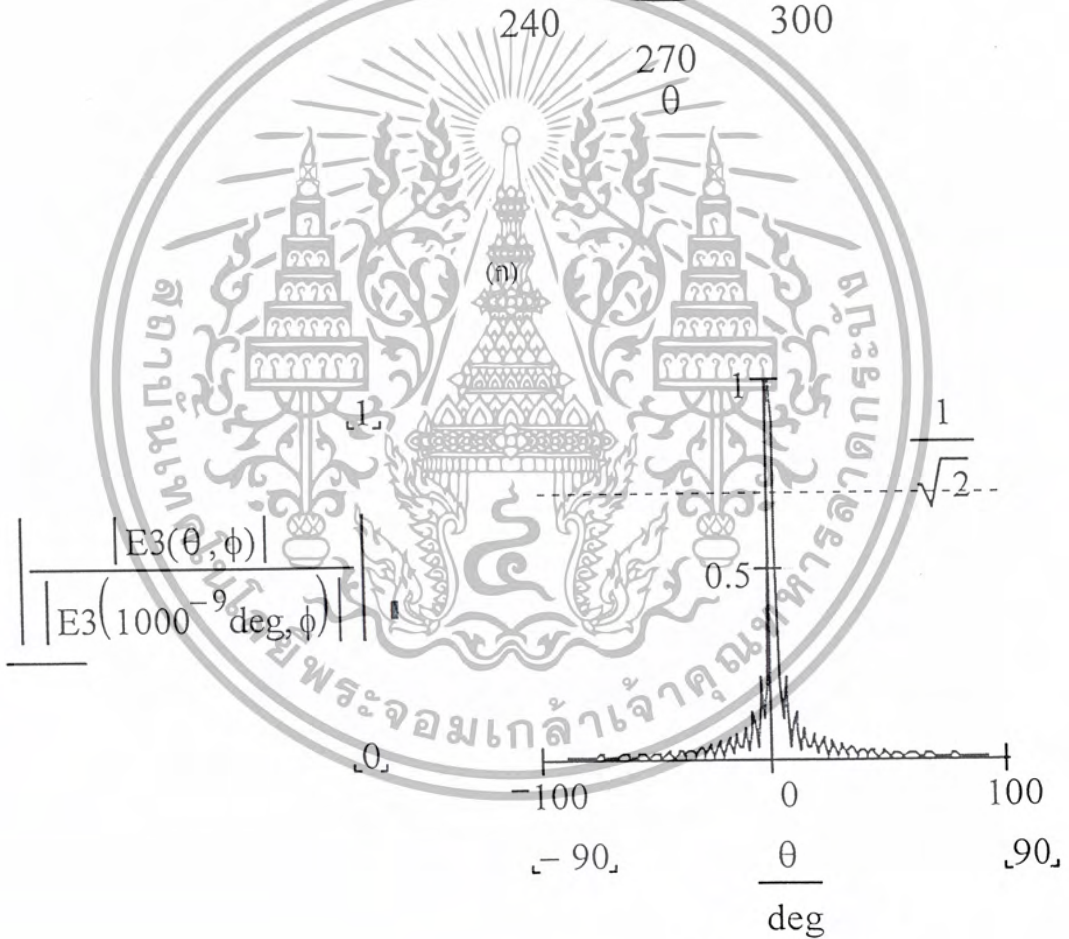
$$D = 4\pi \frac{u(\theta, \phi)}{\text{Prad}}$$

$$10 \log(D) = 32.27$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$\frac{|E_3(\theta, \phi)|}{|E_3(1000^{-9} \text{ deg}, \phi)|}$$

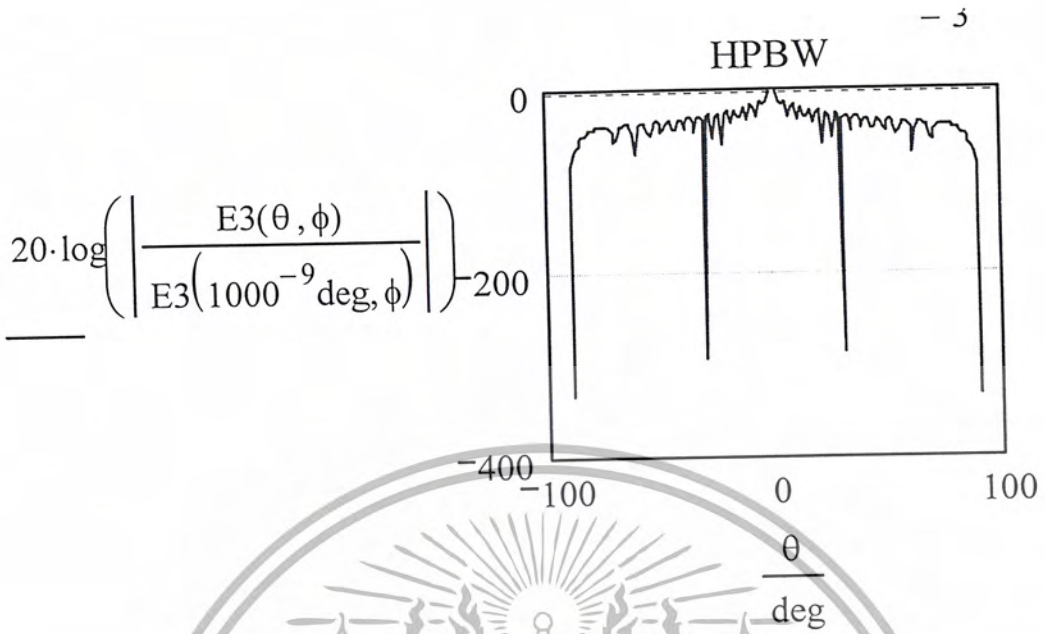


$$\frac{|E_3(\theta, \phi)|}{|E_3(1000^{-9} \text{ deg}, \phi)|}$$

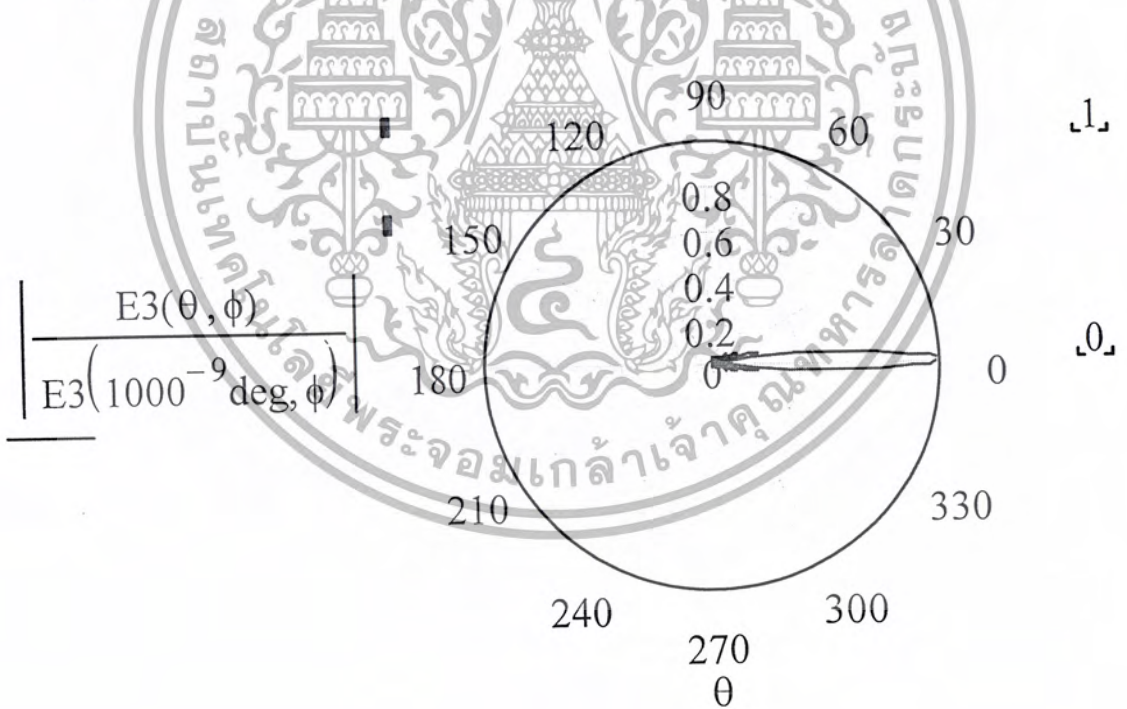
(ข)

รูปที่ 8 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90 \text{ deg}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

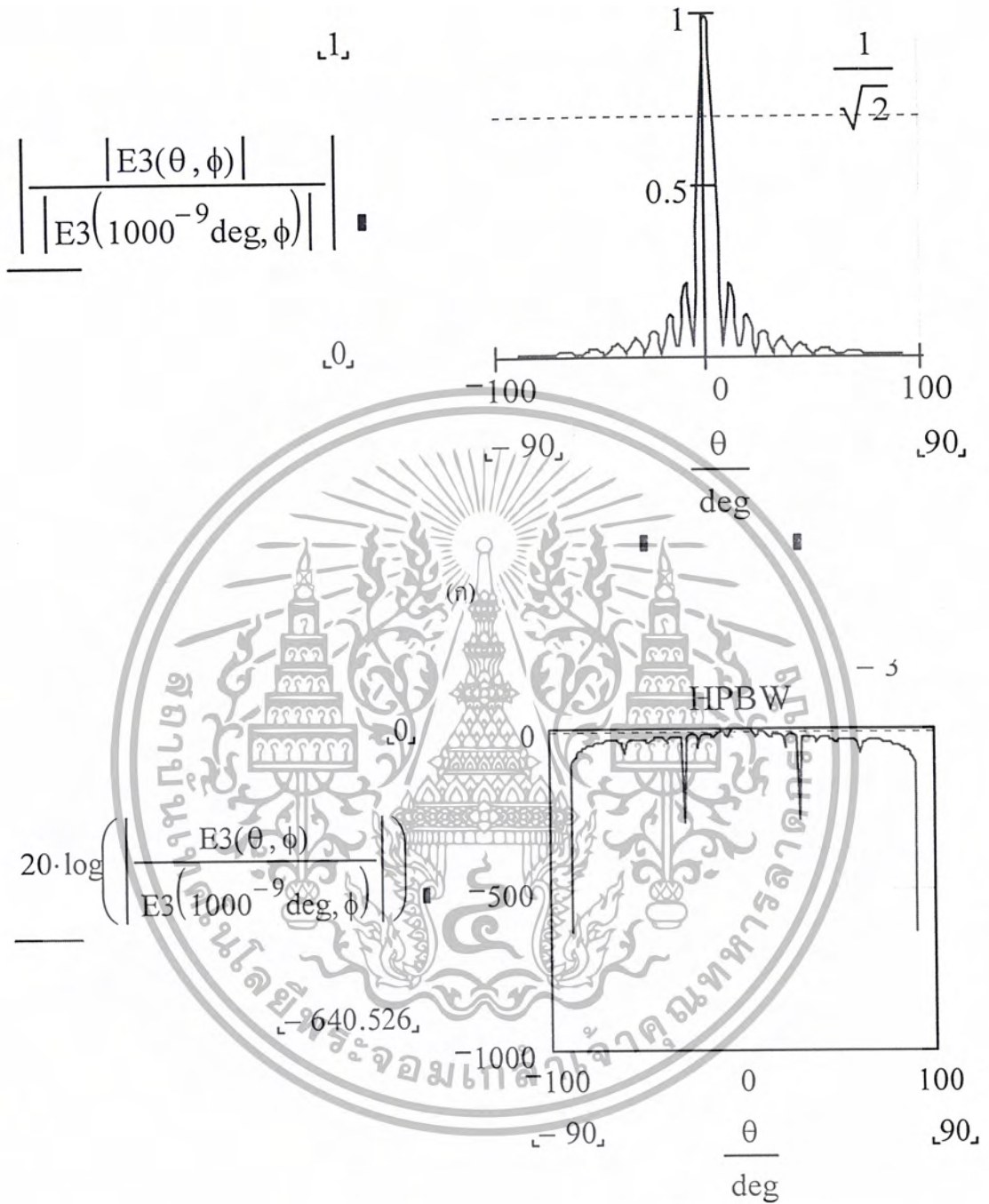


รูปที่ 9 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90 \text{ deg}$)



รูปที่ 10 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0 \text{ deg}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0 \text{ deg}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการศึกษาผลของการแพร่กระจายคลื่นที่สนามระยะไกลจากการวางสายอากาศปากเปิดบนตัวป้อน
กำลังที่ระดับต่างๆกันโดยใช้โปรแกรมMathCAD

1.โปรแกรมสำหรับสายอากาศปากเปิดขนาด 1 องศาประกอบ

$$c = 3 \times 10^8 \quad f = 12.5 \times 10^9 \quad \eta = 120\pi$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.024 \text{ cm} \quad k = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)$$

$$a = 0.5\lambda \quad b = a \quad \phi = 90 \text{ deg}$$

$$\text{sinc}(x) = \left[\frac{\sin(x + 10^{-9})}{(x + 10^{-9})} \right] \quad h = \lambda$$

$$E_\theta(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2} \right) \left(jab \frac{k}{2\pi} \right) \sin(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2} \right] \text{sinc}\left(\frac{ka \sin(\theta) \sin(\phi)}{2} \right) \\ \times 2j \sin(kh \cos(\theta))$$

$$E_\phi(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2} \right) \left(jab \frac{k}{2\pi} \right) \cos(\theta) \cos(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2} \right] \text{sinc}\left(\frac{kbs \sin(\theta) \sin(\phi)}{2} \right) \\ \times 2j \sin(kh \cos(\theta))$$

$$E_{\text{total}}(\theta, \phi) = \sqrt{\left(|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right)}$$

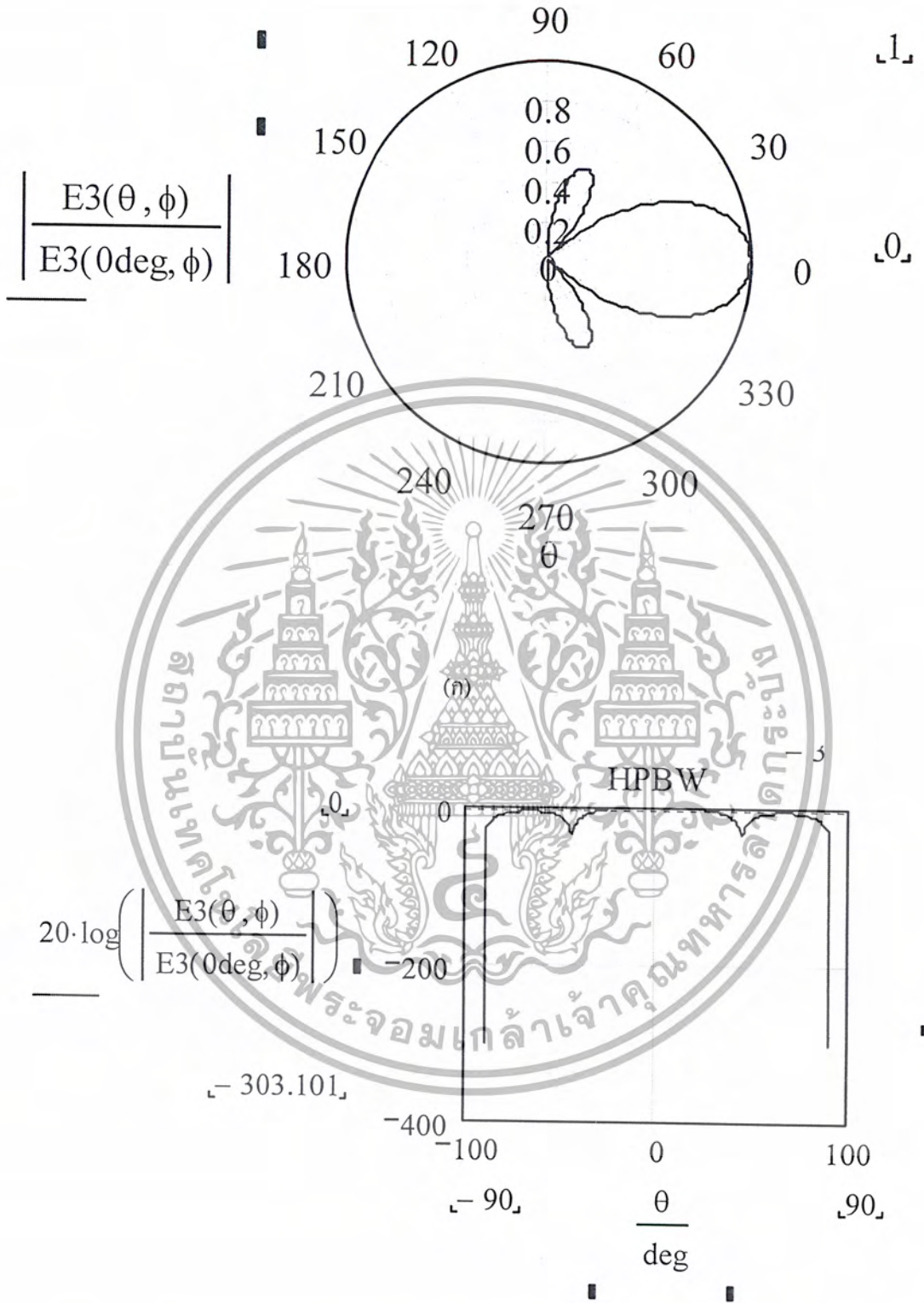
$$u(\theta, \phi) = \frac{\left(|E_{\text{total}}(\theta, \phi)| \right)^2}{2\eta}$$

$$\text{Prad} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} u(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi$$

$$D = 4\pi \frac{u(\theta, \phi)}{\text{Prad}}$$

$$10 \log(D) = 6.55$$

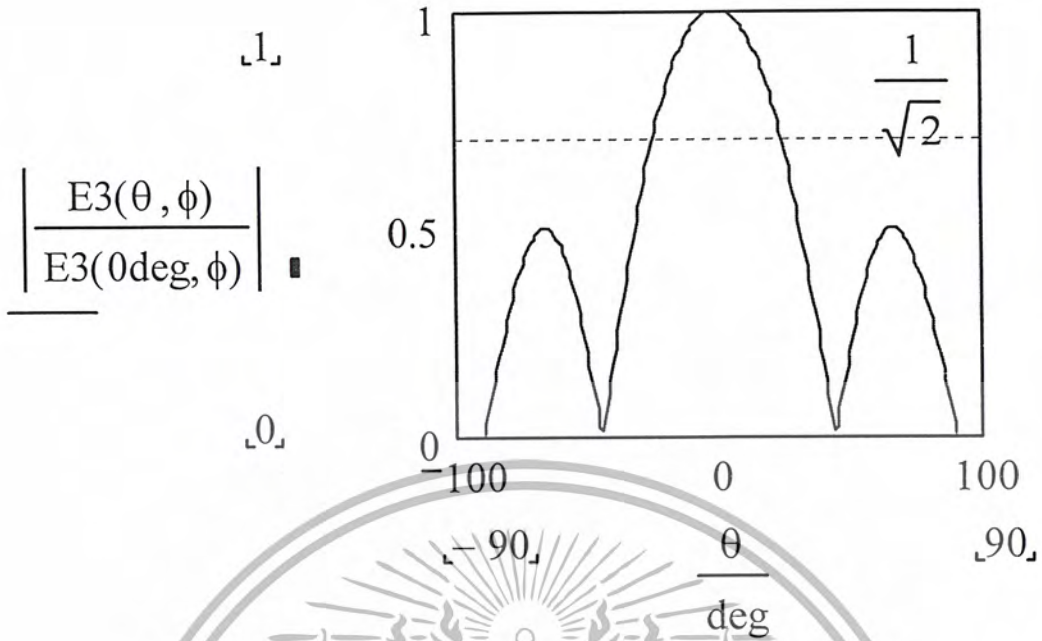
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



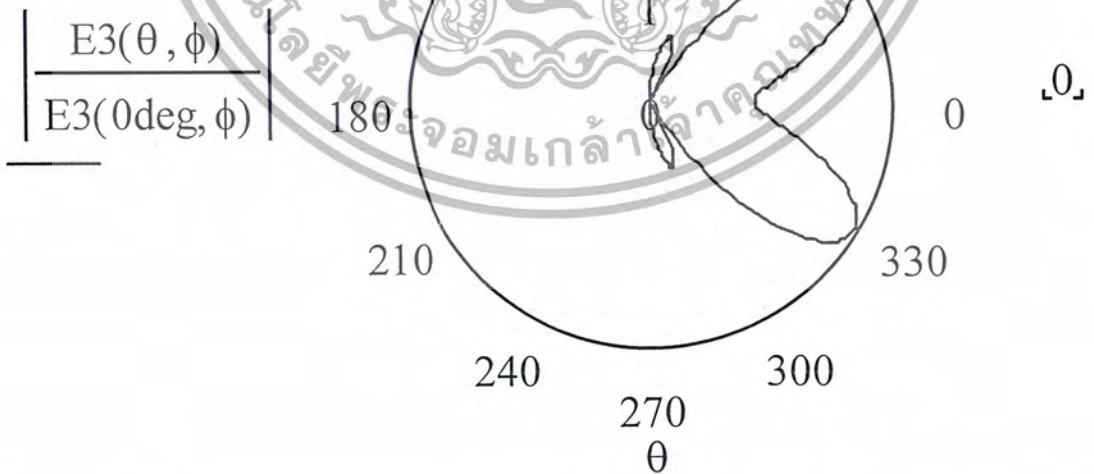
(ข)

รูปที่ 12 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90 \text{ deg}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

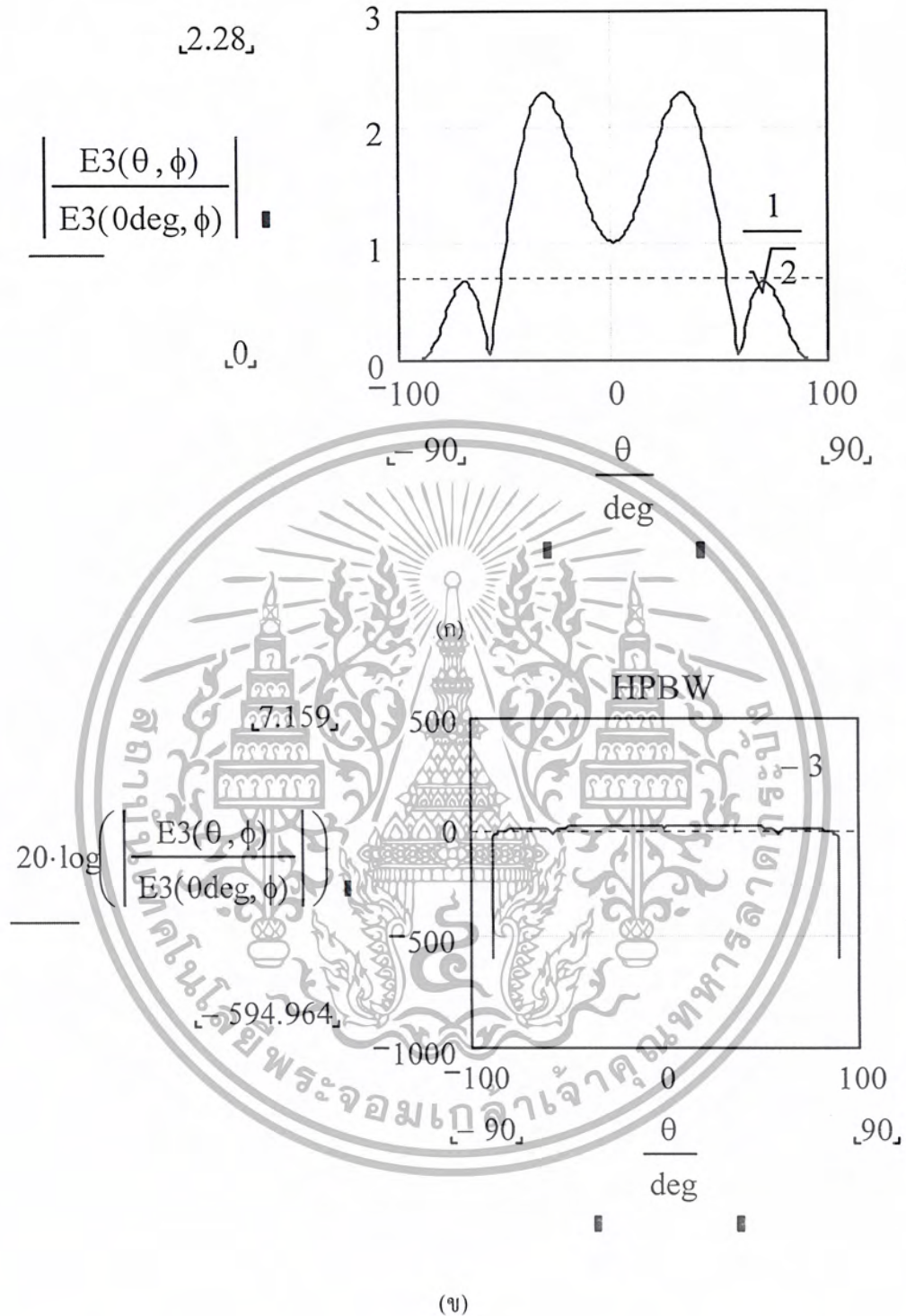


รูปที่ 13 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90 \text{ deg}$)



รูปที่ 14 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0 \text{ deg}$) ที่แสดงให้เห็นว่าเกิดการแตกออกของกราฟการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามแม่เหล็ก ($\phi = 0\text{deg}$) ที่แสดงให้เห็นว่าเกิดการแตกออกของกราฟซึ่งทำให้การทำงานของสายอากาศไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โปรแกรมสำหรับสายอากาศปากเปิดขนาด 128 องค์ประกอบ

$$c = 3 \times 10^8 \quad f = 12.5 \times 10^9 \quad \eta = 120\pi$$

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.024 \text{ cm} \quad k = \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)$$

$$a = 0.5\lambda \quad b = a \quad \phi = 90 \text{ deg}$$

$$\text{sinc}(x) = \left[\frac{\sin(x + 10^{-9})}{(x + 10^{-9})} \right] \quad h = \lambda$$

$$E_\theta(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2} \right) \left(jab \frac{k}{2\pi} \right) \sin(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2} \right] \text{sinc}\left(\frac{ka \sin(\theta) \sin(\phi)}{2} \right)$$

$$\times 2j \sin(kh \cos(\theta))$$

$$\times \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{Mkd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2} \right)}{\sin\left(\frac{kd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2} \right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{Nkd_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2} \right)}{\sin\left(\frac{kd_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2} \right)} \right]$$

$$E_\phi(\theta, \phi) = \left(\frac{-\pi}{2} \right) \left(jab \frac{k}{2\pi} \right) \cos(\theta) \cos(\phi) \left[\frac{\cos\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)}{\left(\frac{ka \sin(\theta) \cos(\phi)}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2} \right] \text{sinc}\left(\frac{kbs \sin(\theta) \sin(\phi)}{2} \right)$$

$$\times 2j \sin(kh \cos(\theta))$$

$$\times \left[\frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{Mkd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2} \right)}{\sin\left(\frac{kd_x \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_x}{2} \right)} \right] \left[\frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{Nkd_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2} \right)}{\sin\left(\frac{kd_y \sin(\theta) \cos(\phi) + \beta_y}{2} \right)} \right]$$

$$E_{\text{total}}(\theta, \phi) = \sqrt{\left(|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right)}$$

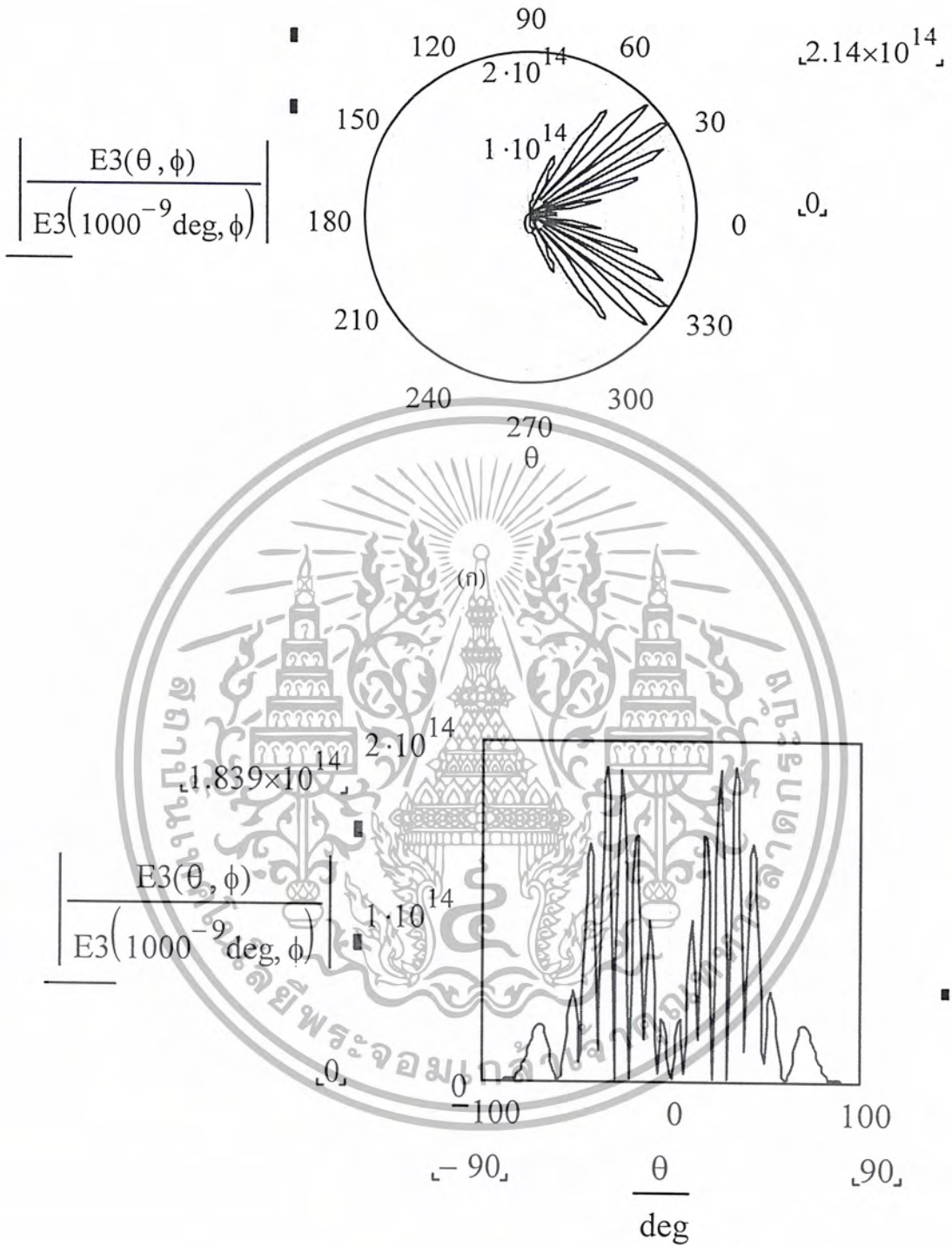
$$u(\theta, \phi) = \frac{\left(|E_{\text{total}}(\theta, \phi)| \right)^2}{2\eta}$$

$$\text{Prad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} u(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi$$

$$D = 4\pi \frac{u(\theta, \phi)}{\text{Prad}}$$

$$10 \log(D) = 6.55$$

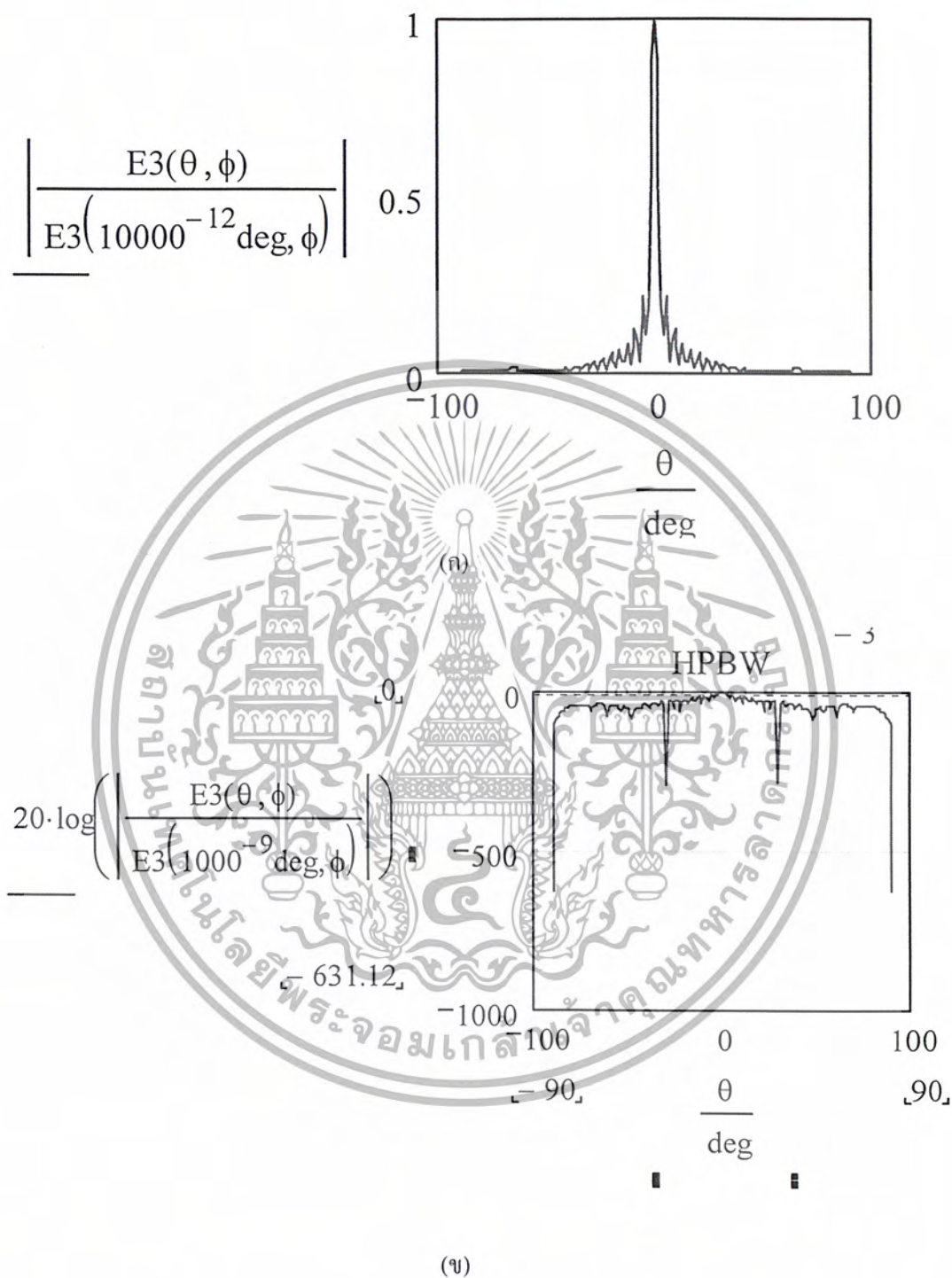
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 16 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90 \text{ deg}$)
 ที่แสดงให้เห็นว่าเกิดการแตกออกของกราฟการแพร่กระจายคลื่น (เมื่อวางสายอากาศสูง 0.5λ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 ผลของการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดในระนาบสนามไฟฟ้า ($\phi = 90 \text{ deg}$)
 ที่แสดงให้เห็นว่าเกิดการแตกออกของกราฟ (เมื่อวางสายอากาศสูง 0.5λ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การทำโครงการนี้คงไม่สามารถประสบความสำเร็จได้หากขาดการช่วยเหลือแนะนำ และการตักเตือนที่เป็นตัวกระตุ้นให้ผู้ร่วมงานทุกคนมีความกระตือรือร้นในการทำงานจนงานสามารถลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาทั้งสองท่านคือ ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ รวมทั้งอาจารย์เร สุรวัฒน์ปัญญา

ขอขอบคุณเพื่อนักศึกษาในห้องปฏิบัติการสายอากาศหลายๆท่านที่ให้ความช่วยเหลือมาตลอดคือ

1. คุณสุธาสินี ละมุลตรี
2. คุณไพโรจน์ วุ่นชุม
3. คุณธนรัชต์ สร้อยสุวรรณ
4. คุณไพศาล งามจรรยาภรณ์
5. คุณประสิทธิ์ อินทร์ทอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.F. Harrington, Time-Harmonic Electromagnetic Fields, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [2] J. Helszajn, Microwave Planar Passive Circuits and Filter, Chichester:John Wiley&Sons Ltd., 1996
- [3] C.A. Balanis, Advance Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [4] Sainati, Robert A., CAD of Microstrip antennas for Wireless Applications, Boston:Artech House Inc, 1996
- [5] I.J. Bahl and P.Bhartia, Microstrip Antenna, Massachusetts:Artech House Inc., 1986
- [6] C.A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, John Wiley & Sons, New York, 1997
- [7].K.C.Gupta, Microstrip Lines and Slotlines, Artech House, Boston, 1996



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้