



การออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับระนาบแบบร่องที่มีลำคลื่นเอียง

THE DESIGN OF TILTED-BEAM PLANAR SLOTTED ARRAY ANTENNA



โดย
นายชาติรี บุตรธา
นางสาววัลย์ลิกา บัวสมบูรณ์
นางสาววิมลศรี รอดศิริ

วัน เดือน ปี..... 18. ค.ค. 2541
เลขทะเบียน..... 039066
เลขเรียกหนังสือ..... T. 110307 มธบ.ก.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

039066

การออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับระนาบแบบร่องที่มีลำคลื่นเอียง
THE DESIGN OF TILTED-BEAM PLANAR SLOTTED ARRAY ANTENNA

โดย

นายชาติ บุตรชา 37014094

นางสาววัลย์ธิดา บัวสมบุรณ์ 37014390

นางสาววิมลศรี รอดศิริ 37014401

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2540

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบเสาอากาศแบบแนวลำดับระนาบแบบร่องที่มีลำคลื่นเอียง

THE DESIGN OF TILTED-BEAM PLANAR SLOTTED ARRAY ANTENNA

ผู้จัดทำ

1. นายชาติ บุตรษา 37014094

2. นางสาววิมลฉัตร บัวสมบุญ 37014390

3. นางสาววิมลศรี รอดศิริ 37014401


(รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับแบบร่องที่มีลำ
คลื่นเอียง

THE DESIGN OF TILTED-BEAM PLANAR SLOT
ARRAY ANTENNA

โดย นายชาติ บุตรชา 37014094

นางสาววัลย์ลิกา บัวสมบุรณ์ 37014390

นางสาววิมลศรี รอดศิริ 37014401

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้ เป็นการแสดงการออกแบบ สร้าง และทดสอบสายอากาศแบบแถวลำดับระนาบแบบร่อง ที่มีลำคลื่นเอียงเพื่อใช้ในการรับสัญญาณดาวเทียมไทยคม โดยสายอากาศที่ทำกรออกแบบเป็นแบบแถวลำดับแบบเรโซแนนซ์ในระนาบสนามไฟฟ้า และเป็นแบบแถวลำดับแบบไม่เรโซแนนซ์ในระนาบสนามแม่เหล็ก โดยได้ออกแบบให้สายอากาศมีขนาด 32*32 ร่อง มีการกระจายของขนาดสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละร่องแบบสม่ำเสมอ และได้ชดเชยผลของมิวชวลคัปปลิงในการออกแบบร่องแพร่กระจายคลื่นที่เจาะบนท่อสาขา ระบบการป้อนสัญญาณเป็นแบบซิงเกิลเลเยอร์พีคคิงและมีอัตราขยาย 33 dB ในช่วงความถี่ 12.6575 GHz

ABSTRACT

This project describes the design , construction and experimental results of the tilted-beam planar slotted array antenna for receive signal from Thaicom satellite.The antenna is resonance array at E-plane and non-rationance array at H-plane.The antenna size is specified to be 32*32 slot at 12.6575 GHz.The amplitude excitation of radiating slots on branch line waveguide is uniform and mutual coupling compensation for every slots.Feeding system is single-layer feeding.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ	3
2.1 หลักการของร่องที่แพร่กระจายคลื่น	3
2.1.1 ร่องบนแผ่นตัวนำขนาดอนันต์	3
2.1.2 ร่องบนผนังท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม	7
2.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบระบบแพร่กระจายคลื่น	8
2.2.1 แถวลำดับแบบคลื่นจร	9
2.2.2 แถวลำดับแบบเรโซแนนท์	12
2.2.3 การออกแบบแถวลำดับเชิงเส้นของร่องบนผนังท่อนำคลื่น	14
2.2.4 การออกแบบแถวลำดับระนาบแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่น	18
2.3 ระบบการป้อนสัญญาณ	20
2.3.1 การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโพส	20
2.3.2 การออกแบบซิงเกิลเลเยอร์พีคเวฟไกด์	26
2.3.3 การออกแบบชั้นคอนสตาสำหรับการแพร่กระจายแบบยูนิฟอร์ม	28
2.4 วัสดุดูดซับคลื่น	32
2.4.1 คลื่นระนาบตกกระทบบที่รอยต่อ	32
2.4.2 การดูดซับคลื่นของสาร	35
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	38
3.1 ระบบการแพร่กระจายคลื่น	38
3.2 การออกแบบ	39
3.3 ระบบการป้อนสัญญาณ	39
3.4 วัสดุดูดซับคลื่น	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง	43
4.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบตามทฤษฎี	43
4.2 ตำแหน่งและขนาดของร่อง	43
4.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ทำการสร้าง	60
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	64
ภาคผนวก	

สารบัญรูปภาพ

ลำดับภาพ	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงร่องบนระนาบกราวน์ขนาดอนันต์ที่ป้อนสัญญาณกลางปากร่องด้วยสายส่งคู่ขนาน	3
รูปที่ 2.2 แสดงกราฟเชิงขั้วของสนาม E_ϕ แบบนอร์มัลไลซ์ที่แพร่กระจายจากร่อง	5
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม	7
รูปที่ 2.4 แสดง ก) การกระจายสนามไฟฟ้าและประจุ ข) การกระจายสนามแม่เหล็กและค) การกระจายความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ของคลื่นโหมด TE_{10} ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม	8
รูปที่ 2.5 แสดงแฉวลำดับเชิงเส้นของร่องบนผนังท่อนำคลื่น	9
รูปที่ 2.6 แสดง ก) แฉวลำดับแบบคลื่นจรของร่องตามยาวบนผนังท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมและ ข) วงจรสมมูล	10
รูปที่ 2.7 แสดง ก) แฉวลำดับแบบเรโซแนนท์ของร่องตามยาวบนผนังท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมและ ข) วงจรสมมูล	13
รูปที่ 2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซลล์พีแอดมิตแตนซ์แบบนอร์มัลไลซ์กับตราส่วน ความยาวร่องต่อความยาวที่เรโซแนนท์	15
รูปที่ 2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อกับค่าความยาวที่ เรโซแนนท์ของร่อง	16
รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำที่เรโซแนนท์แบบนอร์มัลไลซ์กับ ระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อก	16
รูปที่ 2.11 แสดงแฉวลำดับระนาบแบบร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น	19
รูปที่ 2.12 แสดงถึงโครงสร้างของซิงเกิลเลเซอร์ที่คเวฟไกด์	21
รูปที่ 2.13 แสดงท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโพส	22
รูปที่ 2.14 แสดงพาย-จังก์ชันที่แบ่งเป็น 5 รีเจียน	23
รูปที่ 2.15 แสดงถึงท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโพส	27
รูปที่ 2.16 แสดงคุณสมบัติความถี่ของการสะท้อน $ S_{11} $	28
รูปที่ 2.17 แสดงเฟสส่งผ่าน $\arg(S_{21})$	29
รูปที่ 2.18 แสดงแอมพลิจูดของกำลังงานที่ถูกแบ่ง	30
รูปที่ 2.19 แสดงเฟสของกำลังงานที่ถูกแบ่ง	30
รูปที่ 2.20 แสดง Notch length (h) และความกว้างของวินโดว์ (w) เป็นฟังก์ชันของกำลังงานที่ ถูกแบ่งและเฟส $\arg(S_p) - \arg(S_{21})$	31
รูปที่ 2.21 แสดงตำแหน่งของโพส (p, q) เส้นที่ b:p เส้นประ: q	31
รูปที่ 2.22 แสดง (a) คลื่นระนาบเดินทางตกกระทบในทิศทางตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลาง สองชนิด (b) สายส่งที่ดัดเทียมของข้อ (a)	32
รูปที่ 2.23 แสดงโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ แสดงแผ่นหกเหลี่ยมของคาร์บอนอะตอมตำแหน่ง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมแทนโดยทรงกลม และทิศทางของบอนด์แทนโดยก้านระหว่างทรงกลม	36
รูปที่ 3.1 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคลื่นของวัสดุดูดซับคลื่น	40
รูปที่ 3.2 แสดงการสร้างสายอากาศส่วนที่เป็นร่องในการแพร่กระจายคลื่น	40
รูปที่ 3.3 แสดงสายอากาศส่วนที่เป็นท่อนำคลื่นหลักและท่อนำคลื่นสาขา	41
รูปที่ 3.4 แสดงการใส่วัสดุดูดซับคลื่นในท่อนำคลื่นสาขา	41
รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งของโพส	42
รูปที่ 3.6 แสดงวินโดว์ที่ใช้ในการป้องกันสัญญาณ	42
รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าตามทฤษฎี	43
รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กตามทฤษฎี	43
รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า	
(a) rectangular plot (b) polar plot	60
รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก	
(a) rectangular plot (b) polar plot	61
รูปที่ 4.5 แสดงค่า SWR และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	62
รูปที่ 4.6 แสดงค่า log magnetude ของ return loss ของสายอากาศ	62

บทที่ 1

บทนำ

1 คำนำ

ในปัจจุบันนี้ การสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นรูปแบบการสื่อสารที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มบทบาทมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบที่เป็นระบบการสื่อสารที่มีสถานีทวนสัญญาณ (ดาวเทียม) อยู่ที่ระดับสูงมากจนแทบจะไม่มีสิ่งที่เป็นอุปสรรคมาบังหรือกีดขวางเส้นทางการสื่อสาร รูปแบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่มีใช้กันมากในขณะนี้คือการแพร่กระจายภาพและเสียงในความถี่ย่านซี (C-Band : 4.0 ~8.0 GHz) และย่านเคยู (Ku-Band : 12.4~18.0 GHz) ซึ่งจะนิยมใช้สายอากาศสะท้อนคลื่นแบบพาราโบลอยด์ในการรับสัญญาณ เนื่องจากมีแถบความถี่ (Bandwidth) ใช้งานได้กว้าง ค่าทวิกำลัง (Gain) สูง โครงสร้างไม่ซับซ้อนและในเชิงอุตสาหกรรมก็ผลิตได้ง่าย แต่สายอากาศแบบนี้เหมาะที่จะติดตั้งในสถานที่เท่านั้นเพราะโครงสร้างของสายอากาศมีขนาดใหญ่ หากต้องการสายอากาศที่จะติดตั้งบนยานพาหนะเพื่อใช้รับสัญญาณดาวเทียมในขณะที่เดินทางไปด้วยแล้วตัวสายอากาศจะต้องมีคุณสมบัติแบนราบ (Low Profile) ไม่ด้านลม แข็งแรงพุงตัวเองได้ (Self Support) และมีประสิทธิภาพสูง จากความต้องการดังที่ได้กล่าวมานั้นมีสายอากาศ 2 ชนิดที่สามารถตอบสนองได้คือ

1) สายอากาศไมโครสตริบ (Microstrip Antenna) [1,2]

จุดเด่น

- มีโครงสร้างบางมาก
- สร้าง (Fabricate) ง่าย
- ออกแบบได้ทั้งโพลาริเซชันเชิงเส้น และโพลาริเซชันวงกลม

จุดด้อย

- ประสิทธิภาพต่ำ - มีการสูญเสียในระบบป้อนสัญญาณค่อนข้างมาก
 - มีการสูญเสียในสารไดอิเล็กตริกซึ่งเป็นฐาน (Substrate) ของสายอากาศ
- มีระดับโพลาริเซชันไขว้ (Cross Polarization) สูง
- มีแถบความถี่ใช้งาน (Bandwidth) แคบ
- มีความสามารถในการรองรับกำลังงานได้ (Power Handling Capacity) ต่ำ
- สายอากาศมีโครงสร้างเปิด (Opened Boundary) ทำให้การคำนวณให้ถูกต้องแม่นยำทำได้ยาก
- วัสดุพิมพ์มีราคาสูงเพราะไม่สามารถผลิตได้เองในประเทศ

2) สายอากาศแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่น (Slotted-Waveguide Antenna) [3-7]

จุดเด่น

- มีโครงสร้างบาง
- ประสิทธิภาพสูง - ไม่มีการสูญเสียในระบบป้อนสัญญาณ
 - การสูญเสียต่ำเพราะโครงสร้างเป็นตัวนำล้วน

- ออกแบบได้ทั้งโพลาริเซชันเชิงเส้น และโพลาริเซชันวงกลม
- มีระดับโพลาริเซชันไขว้ต่ำ
- มีความสามารถในการรองรับกำลังงานได้สูง
- สามารถออกแบบให้มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่มีระดับของพูข้าง (Side Lobe Level) ต่ำมากได้
- สายอากาศมีโครงสร้างปิด (Closed Boundary) สามารถทำการคำนวณออกแบบได้อย่าง ถูกต้อง
- สามารถหาวัตถุบิด (ท่อนำคลื่น) ได้ไม่ยาก และมีราคาไม่สูงนัก
- จุดด้อย
- น้ำหนักค่อนข้างมาก
- สร้างยาก
- มีแถบความถี่ใช้งาน (Bandwidth) แคบ

จากการพิจารณาจุดเด่นและจุดด้อยของสายอากาศทั้งสองแบบ ความสามารถในการหาวัตถุบิด รวมทั้งศักยภาพของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ในการให้บริการใช้เครื่องมือในการสร้างและทดสอบสายอากาศ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจเลือกศึกษาสายอากาศแถวลำดับแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่น

ในการประยุกต์ใช้สายอากาศแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่นเป็นสายอากาศเพื่อรับสัญญาณที่แพร่กระจายจากดาวเทียมซึ่งมีระดับสัญญาณต่ำมาก สายอากาศที่ใช้จะต้องมีค่าทวิกำลังที่สูงพอ นั่นหมายความว่าความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศจะต้องมีค่าน้อยทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง และจากข้อกำหนดนี้ทำให้ต้องออกแบบสายอากาศให้เป็นแถวลำดับระนาบ (Planar Array) เพื่อให้สามารถควบคุมรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ได้ทุกระนาบ เมื่อสายอากาศเป็นระนาบขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยองค์ประกอบของสายอากาศขนาดเล็ก (ร่อง) เป็นจำนวนมาก ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อมีร่องจำนวนมากอยู่ใกล้กันคือจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำระหว่างร่องด้วยกันหรือเกิดมิวชวลคัปปลิง (Mutual Coupling) ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของร่องเปลี่ยนแปลงไปจากที่ได้ออกแบบไว้เดิม เป็นผลให้อิมพีแดนซ์รวมของระบบสายอากาศไม่สมพียงกับเครื่องรับทำให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง ดังนั้นต้องมีการคำนวณเพื่อชดเชยผลของมิวชวลคัปปลิง ซึ่งในการแก้ระบบสมการเชิงเส้นที่ใช้ออกแบบคำนวณหาความยาวของและตำแหน่งของแต่ละร่องได้เลือกใช้วิธีสเต็ปเปสตีดิเซนท์ (Steepest Descent) ซึ่งเป็นเทคนิคการหาเชิงเกรเดียนท์ (Gradient Search Technique) แบบหนึ่ง จากการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างการรวมผลของมิวชวลคัปปลิงและการไม่คิดผลของมิวชวลคัปปลิง [16] แสดงให้เห็นความแตกต่างอันเป็นสิ่งที่ยืนยันความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาชดเชยผลของมิวชวลคัปปลิงในการออกแบบสายอากาศ

บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ

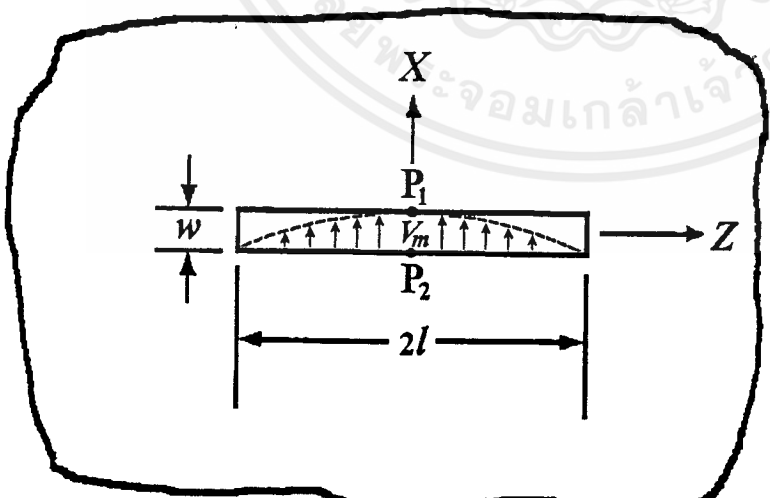
2.1 หลักการของร่องที่แพร่กระจายคลื่น

ในงานด้านสายอากาศส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ได้ก็คือร่อง(slot)ที่เหลื่อมมุมฉาก ซึ่งในการวิเคราะห์สายอากาศแบบร่อง (Slot Antenna) สามารถจะกระทำได้ในลักษณะเดียวกับสายอากาศไดโพลเพราะสายอากาศทั้งสองชนิดนี้เป็นสายอากาศคู่เติมเต็ม (Complementary Antenna) ของกันและกันหรืออาจจะกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่าถ้าเราทราบลักษณะสมบัติของสายอากาศไดโพลเราก็จะสามารถหา ลักษณะสมบัติของสายอากาศแบบร่องที่เป็นคู่เติมเต็มกันได้โดยง่าย โดยใช้ความสัมพันธ์ของ Booker ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าผลคูณของอินทิกรัลที่แดนซ์ของสายอากาศที่เป็นคู่เติมเต็มกันจะมีค่าเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่ง และสิ่งนี้จะ เป็นประโยชน์มากในกรณีที่ต้องการหา มิววลคัปปลิงของร่องซึ่งจะสะดวกกว่าถ้าเราจะหา มิววลคัปปลิงของไดโพลที่เป็นคู่เติมเต็มของร่องก่อนแล้วค่อยใช้ความสัมพันธ์ของ Booker แปลงกลับเป็น มิววลคัปปลิงของร่อง

2.1.1 ร่องบนแผ่นตัวนำขนาดอนันต์ (Slot in Infinite Conducting Plate)

องค์ประกอบพื้นฐานของสายอากาศที่มีความสำคัญมากอีกอย่างหนึ่งนอกจากไดโพลก็คือร่อง (Slot) ในการวิเคราะห์เบื้องต้นจะพิจารณาระนาบกราวด์ขนาดอนันต์ที่มีการเจาะร่องแคบๆบนระนาบนั้น โดยที่ร่องมีความยาว $2l$ กว้าง w (เมื่อ $2l \gg w$) และป้อนสัญญาณด้วยสายส่งคู่ขนานตรงกลางปากร่องที่จุด P_1 และ P_2 ดังรูปที่ 2.1

เมื่อความกว้างของร่องน้อยกว่าความยาวคลื่นมาก ($w \ll \lambda_0$) เราสามารถพิจารณาได้ว่าร่องเกิดจากสายส่งคู่ขนาน โดยที่สายส่งแต่ละเส้นมีขนาดเป็นครึ่งระนาบกราวด์ขนาดอนันต์ (Semi-Infinite Ground Plane) มีขอบวางใกล้กันที่ตำแหน่ง $x = \pm w/2$ และตัดวงจรที่ $z = \pm l$ ดังนั้นก็จะเกิดคลื่นนิ่ง(Standing Wave)บนปากร่องนี้



รูปที่ 2.1 แสดงร่องบนระนาบกราวด์ขนาดอนันต์ที่ป้อนสัญญาณกลางปากร่องด้วยสายส่งคู่ขนาน

การกระจายของสนามไฟฟ้า (E) บนปากกรองสามารถประมาณได้โดย

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

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

เราสามารถหาแผ่นกระแสแม่เหล็กสมมูล (Equivalent Magnetic Current Sheet : M) ที่กำเนิดสนามเหมือนกับที่กำเนิดจากสนามไฟฟ้าบนปากกรอง จาก

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

เมื่อใช้หลักการของภาพเงา (Image Principle) [16] บนระนาบกรวดด์ตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ขนาดอนันต์ จะได้ว่า

$$M(x, 0, z) = -2\hat{n} \times E(x, 0, z) \quad (2.2ข)$$

และเมื่อแทน (2.1) ใน (2.2ข) โดยที่ $\hat{n} = \hat{y}$ จะได้

$$\begin{aligned} M(x, 0, z) &= -2\hat{y} \times \hat{x} \frac{V_m}{w} \sin[k(l-|z|)] \\ &= 2\hat{z} \frac{V_m}{w} \sin[k(l-|z|)] \end{aligned} \quad (2.3)$$

จากนั้นจะหาคัดควเวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential : F) ในเชิงสเกลาร์จาก [5]

$$F_\theta(\theta, \phi) = \iiint_v [\cos\theta \cos\phi M_x(x, y, z) + \cos\theta \sin\phi M_y(x, y, z) - \sin\theta M_z(x, y, z)] e^{jk r} dx dy dz \quad (2.4ก)$$

$$F_\phi(\theta, \phi) = \iiint_v [-\sin\theta M_x(x, y, z) + \cos\phi M_y(x, y, z)] e^{jk r} dx dy dz \quad (2.4ข)$$

$$r = x \sin\theta \cos\phi + y \sin\theta \sin\phi + z \cos\theta \quad (2.4ค)$$

ในกรณีนี้แหล่งกำเนิดวางในแนวแกน z ชุดสมการ 2.4 จะลดรูปลงเป็น

$$F_\theta(\theta, \phi) = -\iiint_v \sin\theta M_z(x, y, z) e^{jk r} dx dy dz \quad (2.5ก)$$

$$F_\phi(\theta, \phi) = 0 \quad (2.5ข)$$

$$r = z \cos\theta \quad (2.5ค)$$

เมื่อแทน (2.3) ลงใน (2.5ก) โดยใช้ (2.5ค) และสมมติให้ร่องมีความกว้าง (w) น้อยมาก อินทิเกรตเชิงปริมาตรจะลดรูปลงเป็นอินทิเกรตเชิงเส้น ดังนี้

$$F_\theta(\theta) = -\int_{-l}^l \sin\theta 2\frac{V_m}{w} \sin[k(l-|z|)] e^{jkz \cos\theta} dz \quad (2.6ก)$$

รูปแบบการกระจายของแรงดันบนปากกรองจะสมมาตรกับแกน $x = 0$ เนื่องจากกำหนดให้ความกว้างของร่องน้อยมากจึงมีผลทำให้ส่วนที่เป็นฟังก์ชันคี่ (Odd Function) ของเทอม $\exp(jkz \cos\theta)$

เมื่ออินทิเกรตแล้วจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น (2.6ก) จะลดรูปลงเป็น

$$F_{\theta}(\theta) = -4V_m \sin\theta \int_0^l \sin[k(l-z)] \cos[kz \cos\theta] dz \quad (2.6\text{ก})$$

เมื่อทำการอินทิเกรตจะได้เป็น

$$F_{\theta}(\theta) = -\frac{4V_m}{k \sin\theta} (\cos[kl \cos\theta] - \cos[kl]) \quad (2.6\text{ข})$$

สำหรับกรณีที่มีร่องยาวครึ่งความยาวคลื่น ($2l = \lambda/2$) นั้น (2.6ก) จะลดรูปลงเป็น

$$F_{\theta}(\theta) = -\frac{4V_m \cos[(\pi/2) \cos\theta]}{k \sin\theta} \quad (2.7\text{ก})$$

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

$$F_{\theta}(r, \theta, \phi; t) = -\frac{V_m e^{j(\omega t - kr)} \cos[(\pi/2) \cos\theta]}{\pi k r \sin\theta} \quad (2.7\text{ข})$$

โดยที่ $\omega = 2\pi f$ คือความเร็วเชิงมุมของคลื่น

จากนี้ก็จะทำการหาสนามไฟฟ้า (\mathbf{E}) และสนามแม่เหล็ก (\mathbf{H}) ที่แพร่กระจายออกจากร่อง โดยใช้ความสัมพันธ์ของศักดาเวกเตอร์ไฟฟ้า (Electric Vector Potential : \mathbf{F}) และศักดาเวกเตอร์ แม่เหล็ก (Magnetic Vector Potential : \mathbf{A})

$$\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A} + jk(\hat{r} \times \mathbf{F}) \quad (2.8\text{ก})$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} = -\frac{j\omega}{\eta}(\hat{r} \times \mathbf{A}) - j\omega\epsilon_0\mathbf{F} = \frac{1}{\eta}(\hat{r} \times \mathbf{E}) \quad (2.8\text{ข})$$

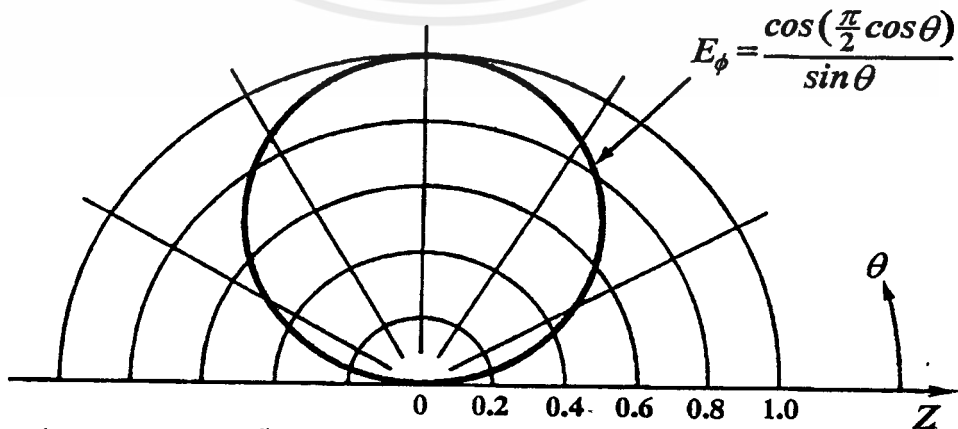
โดยที่ $\eta = 120\pi$ คืออินทรินสิคอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของอากาศ

เมื่อแทน (2.7ข) ลงใน (2.8ก) และ (2.8ข) โดยที่ศักดาเวกเตอร์แม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์ ($\mathbf{A} = 0$)

$$E_{\phi} = -j \frac{V_m e^{j(\omega t - kr)} \cos[(\pi/2) \cos\theta]}{\pi r \sin\theta} \quad (2.9\text{ก})$$

$$H_{\theta} = j \frac{V_m e^{j(\omega t - kr)} \cos[(\pi/2) \cos\theta]}{\pi \eta r \sin\theta} \quad (2.9\text{ข})$$

ซึ่ง (2.9ก) แสดงรูปแบบการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้าที่แปรผันตามมุม θ มีโพลาริเซชันในทิศ ϕ และได้แสดงกราฟเชิงขั้วในภาพที่ 2 ส่วน (2.9ข) แสดงรูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.2 แสดงกราฟเชิงขั้วของสนาม E_{ϕ} แบบนอร์มัลไลซ์ที่แพร่กระจายจากร่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถหาความหนาแน่นของกำลังงานได้จาก

$$P_{r,\theta}(\theta) = \frac{1}{2} \frac{k^2 \eta}{(4\pi r)^2} |F_\theta(\theta)|^2 \tag{2.10ก}$$

โดยแทน (2.7ก) ใน (2.10ก) จะได้รูปแบบการแพร่กระจายกำลังงานของคลื่นเป็น

$$P_{r,\theta}(\theta) = \frac{V_m^2}{2\eta(\pi r)^2} \frac{\cos^2[(\pi/2) \cos\theta]}{\sin^2\theta} \tag{2.10ข}$$

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

$$\begin{aligned} P_{rad} &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P_{r,\theta}(\theta, \phi) r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \\ &= 2\pi r^2 \int_0^\pi P_{r,\theta}(\theta) \sin\theta \, d\theta \end{aligned} \tag{2.11ก}$$

เมื่อแทน (2.10ข) ลงใน (2.11ก) จะได้ว่า

$$P_{rad} = \frac{2V_m^2}{\pi\eta} \int_0^\pi \frac{\cos^2[(\pi/2) \cos\theta]}{\sin^2\theta} \sin\theta \, d\theta \tag{2.11ข}$$

หลังจากทำการอินทิเกรตโดยวิธีเชิงเลขจะได้

$$P_{rad} = 0.609 \frac{2V_m^2}{\pi\eta} \tag{2.11ค}$$

ในการหาไดเรกทิวิตี้ (Directivity : D) ของร่องจะอาศัยความสัมพันธ์ของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่กำลังพิจารณาในทิศทางที่แรงที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไอโซโทรปิก [17]

$$D = \frac{\text{ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่แรงที่สุด}}{\text{ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศไอโซโทรปิก}} \tag{2.12ก}$$

$$\begin{aligned} D &= \frac{P_{r,\theta}(\theta = \pi/2)}{P_{rad}/4\pi r^2} \\ &= 1.64 \end{aligned} \tag{2.12ข}$$

เนื่องจากในกรณีนี้ $l = \lambda/4$ เราสามารถแสดงกำลังงานที่สายส่งป้อนให้แก่ร่องที่ขั้ว P_1 และ P_2 ด้วยแรงดัน V_m ได้ว่า

$$\frac{1}{2} V_m^2 G_{rad} = 0.609 \frac{2V_m^2}{\pi\eta} \tag{2.13}$$

โดยที่

$$R_{rad} = \frac{1}{G_{rad}} \tag{2.14}$$

ซึ่ง R_{rad} เรียกว่าความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Resistance) ของร่องยาวครึ่ง- ความยาวคลื่นที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งคู่ขนานตรงกลางร่อง

$$R_{rad}^{slot} = \frac{\pi\eta}{0.609 \times 4} = 486 \Omega \tag{2.15}$$

เนื่องจากเราทราบว่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นของไดโพลที่เป็นคู่เดิมเดิมของร่องมีค่า

$$R_{rad}^{dipole} = \frac{0.609\eta}{\pi} \tag{2.16}$$

เมื่อนำ (2.13ค) คูณกับ (2.13ง)

$$R_{rad}^{slot} R_{rad}^{dipole} = \left(\frac{\pi\eta}{0.609 \times 4}\right) \left(\frac{0.609\eta}{\pi}\right) = \frac{\eta^2}{4} \tag{2.17}$$

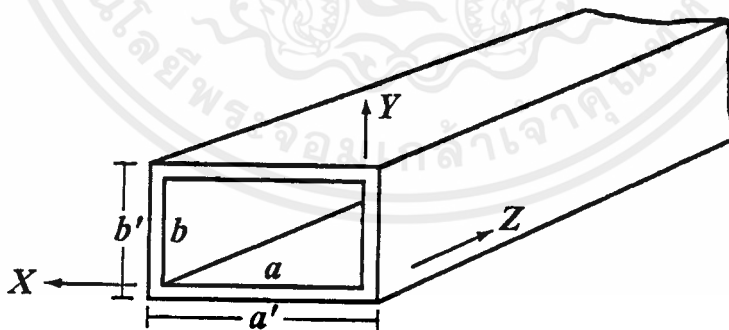
ซึ่งเป็นกรณีหนึ่งของความสัมพันธ์ของ Booker หรือเราอาจจะแสดงในรูปทั่วไป [5] ได้ว่า

$$Z^{slot} Z^{dipole} = \frac{\eta^2}{4} \tag{2.18}$$

ในการประยุกต์ใช้งานจริงนั้นจะไม่นิยมใช้ร่องบนระนาบกราวด์ในแบบที่ป้อนสัญญาณด้วยสายส่งคู่ขนานเพื่อแผ่กระจายคลื่นทั้งสองด้านของร่อง แต่ที่นิยมใช้จะเป็นแบบที่ป้อนสัญญาณด้วยวงจรเรโซแนนซ์แบบโพรง (Cavity Resonator) ด้านหนึ่งของร่องแล้วให้ร่องแผ่กระจายคลื่นเพียงด้านเดียว ซึ่งรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นที่ได้จะยังคงเดิมในด้านหนึ่งของร่อง ส่วนด้านตรงข้าม (ด้านที่มีวงจรเรโซแนนซ์แบบโพรง) จะไม่มี แต่อินพุตอิมพีแดนซ์ของร่องในระหว่างสองกรณีจะมีค่าแตกต่างกันมาก

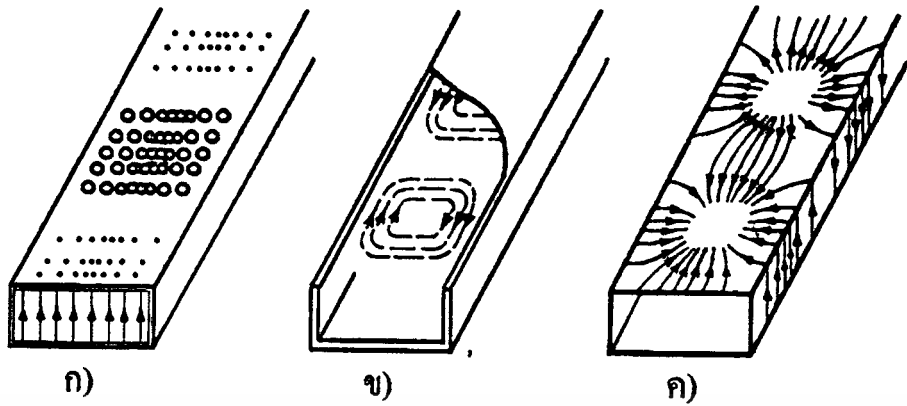
2.1.2 ร่องบนผนังที่นำคลื่นสี่เหลี่ยม

เนื่องจากวิธีการหาสมการโหมดคลื่นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมเป็นวิธีที่ทราบกันโดยทั่วไป [4,5,7,16] ดังนั้นในที่นี้จะละเว้นการขั้นตอนการแก้สมการคลื่น ในการใช้ท่อนำคลื่นป้อนสัญญาณให้แก่อำนาจนั้นจะนิยมป้อนสัญญาณให้ท่อนำคลื่นด้วยคลื่นโหมด TE_{10} เพราะเป็นโหมดที่กำเนิดสนามได้แรงที่สุด (Dominant Mode) ส่วนคลื่นโหมด TM_{mn} จะไม่นิยมใช้ ดังนั้นต่อจากนี้เราจะพิจารณาเฉพาะคลื่นโหมด TE_{mn} (กรณีทั่วไป) ที่เดินทางในทิศ $+z$ เพื่อหาการกระจายของสนามไฟฟ้า การกระจายสนามแม่เหล็กภายในท่อนำคลื่น และการกระจายของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าบนผนังที่นำคลื่นของท่อนำคลื่นที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

จะได้ว่ารูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าและประจุ การกระจายสนามแม่เหล็กและการกระจายความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของคลื่นโหมด TE_{10} ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4

แสดง ก) การกระจายสนามไฟฟ้าและประจุ ข) การกระจายสนามแม่เหล็ก และ ค) การกระจายความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ของคลื่นโหมด TE₁₀ ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

หากมีการเจาะร่องแคบๆลงบนผนังของท่อนำคลื่นในภาพที่ 2.4ค) โดยให้แนวยาวของร่องตัดผ่านเส้นทางการไหลของกระแส ก็จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าบนปากร่อง และสามารถแพร่กระจายคลื่นออกสู่ภายนอกได้ การเจาะร่องลงบนผนังท่อนำคลื่นนั้นจะนิยมเจาะใน 3 รูปแบบคือ

- ร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น
- ร่องเอียงบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น(Centered-Inclined Series Slot on Broad Wall)
- ร่องเอียงบนผนังด้านแคบของท่อนำคลื่น(Edged-Inclined Shunt Slot on Narrow Wall)

ในการสร้างสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น (Linear Array) แบบร่องบนผนังท่อนำคลื่นนั้นจะนิยมใช้แบบร่องเอียงบนผนังด้านแคบของท่อนำคลื่นเพราะสร้างได้ง่าย แต่ไม่นิยมนำมาทำเป็นแถวระดับระนาบ(Planar Array) เพราะผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นแต่ละสาขาจะไม่สามารถนำมาเชื่อมติดกันได้ [6] จึงต้องมีโครงสร้างยึดท่อนำคลื่นสาขาให้อยู่ห่างกัน และทำให้มีปัญหาในเรื่องความแข็งแรงของโครงสร้างแถวลำดับของสายอากาศ ดังนั้นในกรณีที่ต้องการสร้างสายอากาศเป็นแถวลำดับระนาบ ก็จะนิยมใช้แบบร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น เพราะท่อนำคลื่นแต่ละสาขาสามารถเชื่อมติดกันได้ ทำให้โครงสร้างแถวลำดับมีความแข็งแรงมากกว่า

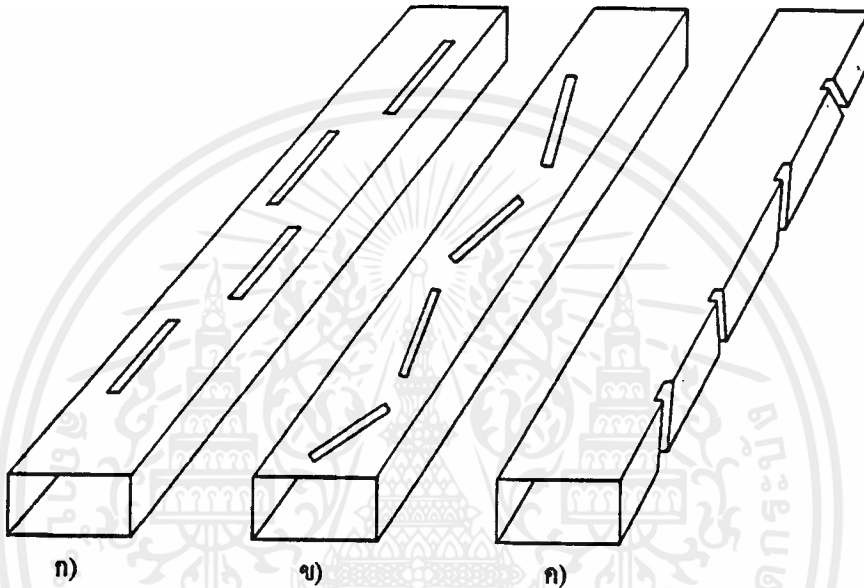
ส่วนร่องเอียงบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นนั้น จะไม่นิยมนำมาทำเป็นแถวลำดับระนาบ ถึงแม้โครงสร้างของแถวลำดับจะเหมือนกับร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น เพราะร่องเอียงแบบนี้จะมีปัญหาในเรื่องการรับสัญญาณที่มีโพลาไรเซชันไขว้ (Cross Polarization) แต่ร่องเอียงบนผนังด้านกว้างจะนิยมใช้ในท่อนำคลื่นหลักเพื่อป้อนสัญญาณให้กับท่อนำคลื่นสาขา

2.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการออกแบบระบบแพร่กระจายคลื่น

ร่องเดี่ยวมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่กว้างมากและมีค่าโคเรคทีวิตีต่ำ (1.64) ดังนั้นร่องเพียงร่องเดียวจึงยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำร่องมาประกอบเป็นแถวลำดับ ดังภาพที่ 2.5 เพื่อ

เพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของร่องเดี่ยวด้วยตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) ซึ่งแถวลำดับเชิงเส้นของร่องบนผนังท่อนำคลื่นนั้นสามารถจำแนกเป็น 2 รูปแบบคือ

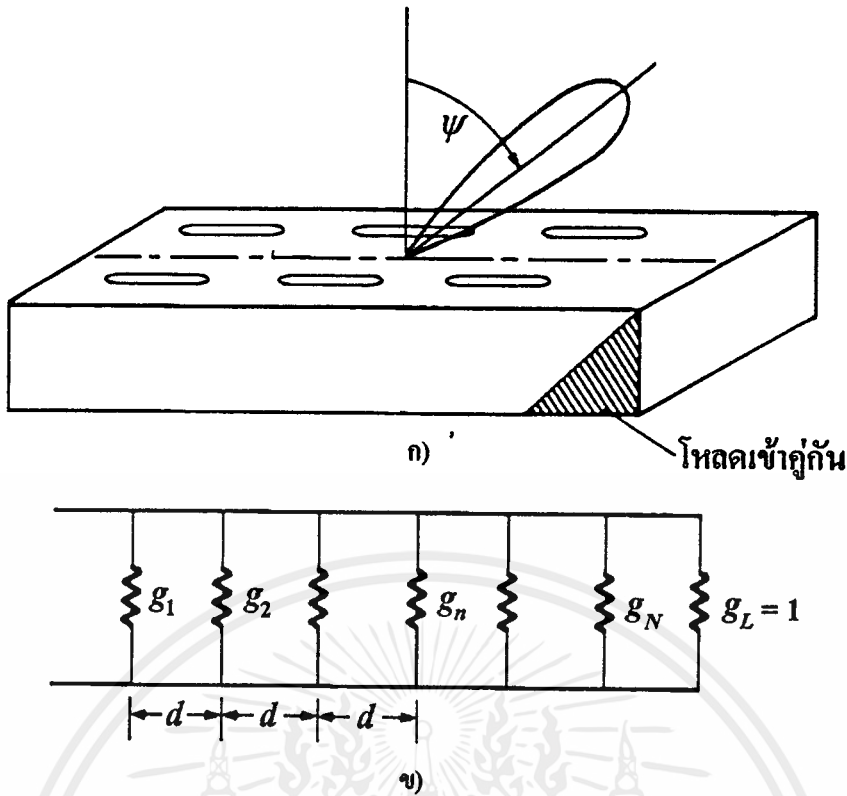
1. แถวลำดับแบบคลื่นจร (Traveling-Wave Array)
2. แถวลำดับแบบเรโซแนนท์ (Resonant Array)



รูปที่ 2.5 แสดงแถวลำดับเชิงเส้นของร่องบนผนังท่อนำคลื่นแบบ ก) ร่องตามยาวบนผนังด้านกว้าง
ข) ร่องเอียงบนผนังด้านกว้าง และ ค) ร่องเอียงบนผนังด้านแคบ

2.2.1 แถวลำดับแบบคลื่นจร (Traveling-Wave Array)

แถวลำดับแบบนี้สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่า แถวลำดับแบบไม่เรโซแนนท์ (Non-Resonant Array) แต่ชื่อแถวลำดับแบบคลื่นจรถจะเป็นที่นิยมมากกว่าเพราะสามารถเข้าใจได้ง่าย



รูปที่ 2.6 แสดง ก) แถวลำดับแบบคลื่นจรของร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมและ ข) วงจรสมมูล

ในแถวลำดับแบบคลื่นจรรนั้น ระยะห่างระหว่างร่องที่อยู่ใกล้กันจะมีค่าใดๆ ก็ได้ แต่จะไม่เท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในท่อ ($d \neq \lambda_g/2$) ซึ่งการวางตำแหน่งของร่องแบบนี้จะทำให้สามารถออกแบบให้สายอากาศมีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นทิศใดก็ได้ ในระนาบตั้งฉากกับผิวท่อนำคลื่นของแถวลำดับ ดังรูปที่ 2.6ก และมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.6ข ปลายท่อนำคลื่นด้านตรงข้ามกับปลายที่ป้อนคลื่น จะต้องต่อกับโหลดเข้าคู่กัน (Matched Load) ข้อกำหนดเบื้องต้นในการ วิเคราะห์แถวลำดับแบบคลื่นจรรนี้ก็คือ ร่องจะต้องเรโซแนนท์พอดี (มีเฉพาะค่าความนำแบบนอร์แมลไลซ์ : g_n) ไม่คิดผลของมิววลคัปปลิงระหว่างร่อง มีร่องบนผนังท่อนำคลื่นทั้งหมดจำนวน N ร่อง และมีขนาดของสัญญาณที่ป้อน (Amplitude Excitation) a_n ให้ร่องที่อยู่ติดจากกันวางตำแหน่งระยะห่างจากกึ่งกลางท่อ x_n สลับกัน จะสามารถแสดงองค์ประกอบแถวลำดับ (Array Factor : AF) ได้ดังนี้

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{jkn d \sin \psi - jn d \beta + jn \tau} \quad (2.19)$$

โดยที่เทอม $e^{-jnd\beta}$ แสดงถึงเฟสของคลื่นที่เดินทางในท่อนำคลื่น ณ ตำแหน่งร่องที่ n ซึ่งก็คือมุมเฟส (Phase Angle) ของสนามที่ป้อนให้ร่องนั้น

$e^{jn\tau}$ แสดงถึงการกลับเฟสของร่องเนื่องจากการสลับตำแหน่งของระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และได้สมมติให้ไม่มีคลื่นสะท้อนกลับจากร่อง (ไม่มีคลื่นเดินทางในทิศ-z) สำหรับเงื่อนไขที่จะให้คลื่นเสริมกัน
ในทิศ ψ ก็คือ

$$(k \sin \psi - \beta) d + \pi = 2m\pi \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.20)$$

จาก [4] ได้แสดงให้เห็นว่าค่า d ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงระหว่าง d ที่น้อยที่สุด กรณี $m = -1$ ถึง d ที่น้อยที่สุด
กรณี $m = 0$ ซึ่งแสดงได้ว่า

$$\frac{\lambda_0 \lambda_g}{2(\lambda_0 + \lambda_g)} < d < \frac{3\lambda_0 \lambda_g}{2(\lambda_0 + \lambda_g)} \quad (2.21)$$

ซึ่งค่า d จาก (2.21) สามารถนำมาคำนวณมุมที่เป็นไปได้ของลำคลื่นหลัก (ψ) ซึ่งจะได้ว่า

$$-\frac{\pi}{2} < \psi < \sin^{-1} \left(\frac{2\lambda_0 - \lambda_g}{3\lambda_g} \right) \quad (2.22)$$

และเนื่องจากความถี่ที่เหมาะสมที่ใช้กับท่อนำคลื่นจะอยู่ในช่วงความถี่ที่ให้ความยาวคลื่น $1.25\lambda_0 \leq \lambda_g \leq 2\lambda_0$
ดังนั้นมุมของลำคลื่นหลักที่เป็นไปได้ของ (2.22) จะอยู่ในช่วงระหว่าง -90° ถึง 11.5° (ที่ $\lambda_g = 1.25\lambda_0$)

ถ้าให้ระยะ x_n ของทุกร่องอยู่เพียงด้านเดียวจากระยะกึ่งกลาง ในกรณีนี้จะได้ว่า

$$\frac{\lambda_0 \lambda_g}{\lambda_0 + \lambda_g} < d < \frac{2\lambda_0 \lambda_g}{\lambda_0 + \lambda_g} \quad (2.23ก)$$

และ

$$-\frac{\pi}{2} < \psi < \sin^{-1} \left(\frac{2\lambda_0 - \lambda_g}{\lambda_g} \right) \quad (2.23ข)$$

ดังนั้นมุมของลำคลื่นหลักที่เป็นไปได้ของ (2.23ข) จะอยู่ในช่วงระหว่าง -90° ถึง 37° (ที่ $\lambda_g = 1.25\lambda_0$)

จากภาพที่ 2.6 ขั้วร่องมีขนาดของสัญญาณที่ป้อน a_n จะได้ว่ากำลังงานที่แพร่กระจาย P_n แปรผันเป็น
สัดส่วนกับ a_n^2 เมื่อเราสังเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเพื่อให้ได้ a_n เราก็จะสามารถหา P_n ที่เป็นสัดส่วน
กันได้ กำหนดให้ r คือกำลังงานที่ถูกดูดกลืนที่โหลดเข้าคู่กัน ถ้ากำลังงานที่ป้อนให้แถวลำดับมีค่าเป็น 1 กำลัง
งานที่ตกกระทบบรรยากาศที่ N จะมีค่าเป็น $r + P_n$ และจะมีแรงดันสมมูล V_n ตกคร่อม (สายส่งที่มีอิมพีแดนซ์คว
ลักษณะเท่ากับ 1) ที่จุดนี้ทำให้ได้ว่า

$$\frac{1}{2} |V_N|^2 = r + P_N \quad (2.24ก)$$

และกำลังงานที่แพร่กระจายจากร่องอันดับที่ N มีค่า

$$P_N = \frac{1}{2} |V_N|^2 g_N \quad (2.24ข)$$

หลังจากแทน (2.24ก) ลงใน (2.24ข) ก็จะได้ g_N เป็น

$$\begin{aligned} g_N &= \frac{2P_N}{|V_N|^2} \\ &= \frac{P_N}{r + P_N} \end{aligned} \quad (2.25ก)$$

กำลังงานที่ตกกระทบบนระดับที่ $N-1$ จะมีค่า $r+P_N+P_{N+1}$ และจะต้องเท่ากับ $\frac{1}{2}|V_{N-1}|^2$ ส่วนกำลังงานที่แพร่กระจายจากร่องนี้ (P_{N-1}) จะเท่ากับ $\frac{1}{2}|V_{N-1}|^2 g_{N-1}$ ซึ่งก็จะได้ g_{N-1} เป็น

$$\begin{aligned} g_{N-1} &= \frac{2P_{N-1}}{|V_{N-1}|^2} \\ &= \frac{P_{N-1}}{r+P_N+P_{N+1}} \end{aligned} \quad (2.25\text{ข})$$

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเดียวกันนี้กับร่องอันดับถัดไป ก็จะได้สูตรทั่วไปในการหาค่าความนำแบบนอร์มัลไลซ์ของร่องอันดับที่ n โดยได้ว่า

$$g_n = \frac{P_N}{r + \sum_{i=n}^N P_i} \quad (2.25\text{ค})$$

เนื่องจาก r รวมกับผลรวมของ P_n จะต้องมีค่าเป็น 1

$$r + \sum_{i=1}^N P_i = 1 \quad (2.25\text{ง})$$

ดังนั้น (2.25ค) จะสามารถเขียนแสดงได้ใหม่ว่า

$$g_n = \frac{P_n}{1 - \sum_{i=1}^{n-1} P_i} \quad (2.26)$$

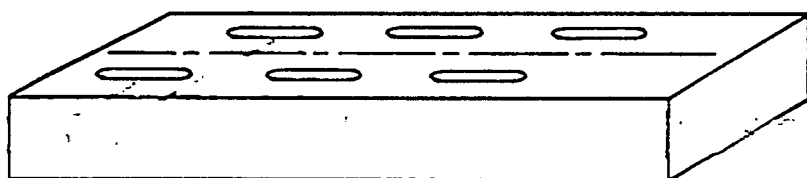
ในการนำค่า g_n ไปคำนวณหาระยะ x ก็สมารถทำได้โดยนำไปแทนใน (2.27)

$$g = \left(2.09 \frac{(a/b)}{(\beta/k)} \cos^2 \left(\frac{\beta\pi}{k2} \right) \right) \sin^2 \left(\frac{\pi x}{a} \right) \quad (2.27)$$

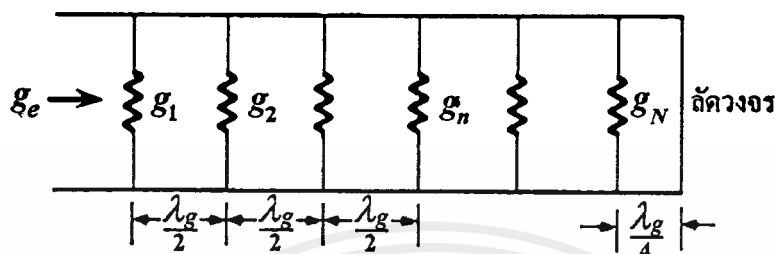
ถึงแม้ว่าแถวลำดับแบบคลื่นจรจะสามารถออกแบบให้ลำคลื่นหลักมีมุมเอียงใดๆก็ได้ แต่จะมีข้อยกเว้นที่มุมเอียงเป็นศูนย์ (ลำคลื่นหลักตั้งฉากกับระนาบของแถวลำดับ) ที่ตำแหน่งนี้จะได้ $d = \lambda_g/2$ ซึ่งจากข้อกำหนดคอนตันที่ถือว่าคลื่นที่สะท้อนกลับจากร่องมีค่าน้อยมากจะตัดทิ้งได้แต่ที่ $d = \lambda_g/2$ คลื่นสะท้อนจากทุกร่องจะมารวมกันที่ตำแหน่งบ่อนสัญญาณทำให้การออกแบบด้วยวิธีนี้มีความผิดพลาด ดังนั้นสำหรับกรณีเฉพาะที่ $d = \lambda_g/2$ (เรโซแนนท์) จะได้แสดงวิธีวิเคราะห์อีกลักษณะหนึ่ง ดังจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

2.2.2 แถวลำดับแบบเรโซแนนท์ (Resonant Array)

แถวลำดับแบบนี้สามารถเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่าแถวลำดับแบบคลื่นนิ่ง (Standing-Wave Array) ระยะห่างระหว่างแต่ละร่องของแถวลำดับแบบนี้จะต้องเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น $d = \lambda_g/2$ แต่ร่องสุดท้าย (อันดับที่ N) จะต้องอยู่ห่างจากแผ่นลัดวงจร (Short Plate) เป็นระยะทางหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น ($\lambda_g/4$) เพื่อให้โหมดแรงดัน ณ ตำแหน่งร่องอันดับที่



ก)



ข)

รูปที่ 2.7

แสดง ก) แถวลำดับแบบเรโซแนนซ์ของร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น
สี่เหลี่ยม และ ข) วงจรสมมูล (ในกรณีที่ทุกร่องเรโซแนนซ์)

N มีค่าสูงสุด จากแถวลำดับของร่องบนผนังท่อนำคลื่นในรูปที่ 2.7ก จะเห็นได้ว่า โหมดแรงดันของท่อนำคลื่น ณ ตำแหน่งของร่องที่อยู่ใกล้กันจะมีเฟสตรงกันข้าม ดังนั้นจึงต้องมีกระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อนำคลื่น เพื่อให้สนามบนปากร่องทุกร่องมีเฟสเดียวกันและมีผลให้คลื่นที่แพร่กระจายออกไปเสริมกันในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของแถวลำดับ

เช่นเดียวกันกับแถวลำดับแบบคลื่นจรเมื่อเราสังเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับเพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณที่ป้อนให้แก่แต่ละร่อง (a_n) ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ของขนาดของสัญญาณที่ป้อนกับค่าความนำแบบนอร์มัลไลซ์ที่เรโซแนนซ์ได้ว่า

$$g_N = K a_n^2 \quad (2.28ก)$$

เมื่อ K คือค่าคงที่

สำหรับเงื่อนไขเรโซแนนซ์ของแถวลำดับก็คือผลรวมของค่าความนำแบบนอร์มัลไลซ์ที่เรโซแนนซ์มีค่าเป็น 1 จากภาพที่ 2.7ข ซึ่งก็คือ

$$g_e = \sum_{n=1}^N g_n = 1 \quad (2.28ข)$$

และจะหาค่า K ใน (2.28ก) ได้จาก

$$K = \frac{1}{\sum_{n=1}^N a_n^2} \quad (2.28ค)$$

เมื่อนำค่า K จาก (2.28ค) ไปแทนใน (2.28ก) ก็จะทราบค่า g_n จากนั้นก็นำค่า g_n ไปแทนใน (2.27) ก็จะได้ระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อ (x_n)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งสมการ (2.27) เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำออร์เมทัลไลซ์ของร่องกับระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อนำคลื่นของร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น

ตั้งแต่หัวข้อที่ 2.2.1 มาถึงตรงนี้เป็นกรอกแบบโดยไม่คำนึงถึงผลของมิวชวลคัปปลิง ดังนั้นในลำดับต่อไปจะได้แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติของร่องอย่างละเอียดภายใต้หลักการของค่าแอกทีฟแอดมิตแตนซ์ (Active Admittance) ของร่องซึ่งก็คือการนำผลของมิวชวลคัปปลิงเข้ามารวม วิเคราะห์ด้วย เพื่อนำไปสร้างสมการที่ใช้ในการออกแบบแถวลำดับเบร็วของร่องบนผนังท่อนำคลื่น

2.2.3 การออกแบบแถวลำดับเชิงเส้นของร่องบนผนังท่อนำคลื่น

จากการวิเคราะห์ร่องบนผนังท่อนำคลื่นภายใต้แนวคิดของค่าแอกทีฟแอดมิตแตนซ์จะพบว่าสมการสองสมการหลักที่ใช้ในการออกแบบดังได้พิสูจน์ไว้ใน [5],[6] ซึ่งสามารถนำมาเขียนใหม่ในรูปย่อได้ดังนี้

$$\frac{Y_n^a}{G_o} = K_1 f_n \sin k_n \frac{V_n^S}{V_n} \quad (2.29)$$

$$\frac{Y_n^a}{G_o} = \frac{K_2 f_n^2}{Z_n^a} \quad (2.30)$$

โดยที่

$$K_1 = j \left(\frac{8}{\pi^2 \eta G_o} \left(\frac{a/b}{\beta/k} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.31ก)$$

$$K_2 = \frac{292(a/b)}{0.61\pi(\beta/k)} \quad (2.31ข)$$

และ

$$f_n = \left(\frac{\cos \beta l_n - \cosh k_n}{\sin k_n} \right) \sin \frac{\pi x_n}{a} \quad (2.31ค)$$

ค่าแอกทีฟอิมพีแดนซ์ของโหลดไดโพลสมมูล (Equivalent Loaded Dipole) อันดับ n คือ

$$Z_n^a = Z_{rn} + Z_n^b \quad (2.32ก)$$

ซึ่งมิวชวลคัปปลิงคือ

$$Z_n^b = \sum_{m=1}^N \frac{V_m^S \sin k_m}{V_n^S \sin k_n} Z_{rm} \quad (2.32ข)$$

และโหลดเซลล์อิมพีแดนซ์ของไดโพลก็คือ

$$Z_{rn} = Z_n + Z_n^L \quad (2.32ค)$$

ก่อนที่นำ (2.30) ไปใช้ในการออกแบบนั้นจะต้องทราบ Z_{rn} ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะจากกึ่งกลางผนังท่อนำคลื่นและความยาวของร่องก่อน ถ้าตั้งสมมติฐานว่าอินพุตแอดมิตแตนซ์ของร่องอันดับที่ n จะมีค่าคงเดิมถ้าร่อง

อื่นๆ 1) มีแต่ลัดวงจร หรือ 2) ไม่มี กับกรณีของอินพุตอิมพีแดนซ์ของโหลดใดโพล คือ โหลดใดโพลอื่นๆ 1) มีแต่เปิดวงจร หรือ 2) ไม่มี และจาก (2.30) จะได้ว่า

$$Z_m = \frac{K_2 f_n^2}{Y_n / G_0} \tag{2.33}$$

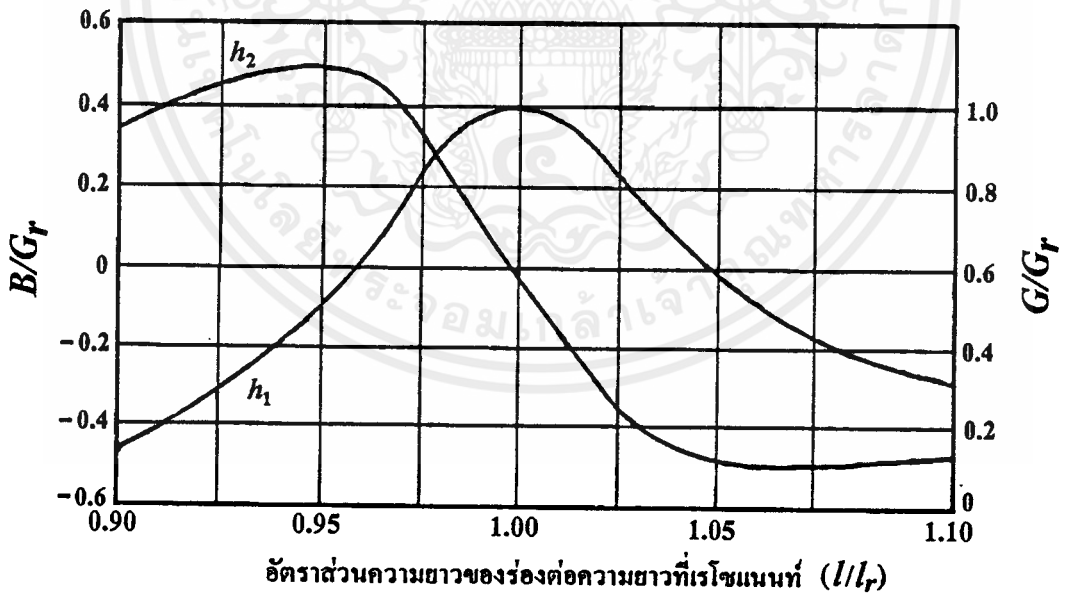
โดยที่ $Y_n / G_0(x_n, y_n)$ คือเซตที่แอดมิตแดนซ์ของร่องอิสระ (Isolate) อันดับที่ n ดังนั้นถ้าเราสามารถทำการทดลองเพื่อวัดค่า Y_n / G_0 ของร่องอิสระ โดยเป็นฟังก์ชันของระยะจากกึ่งกลางผนังท่อและความยาวของร่อง และ (2.33) สามารถใช้หาฟังก์ชันของความยาว และระยะจากกึ่งกลางผนัง และ (2.33) สามารถใช้หาฟังก์ชัน $Z_m(x_n, L_n)$ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องนำไปใช้กับ (2.30)

ข้อมูลค่าแอดมิตแดนซ์ของร่องอิสระ [5] สามารถแสดงในรูปทั่วไปซึ่งจะมีประโยชน์มากในการออกแบบ จากการทดลองวัดค่า Y_n / G_0 เทียบกับของระยะจากกึ่งกลางผนังท่อและความยาวของร่อง

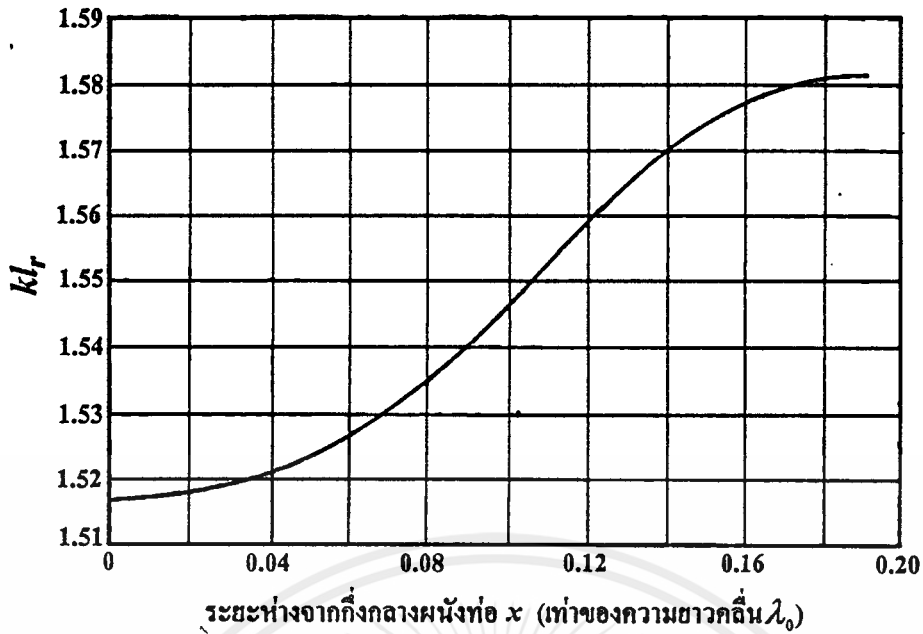
เมื่อนำข้อมูลไปสร้างกราฟก็จะได้กราฟ 2 เส้นดังรูปที่ 8 โดยที่แกนนอนแสดงโดย $y = l/L_r$ คือความยาวของร่องต่อความยาวที่เรโซแนนท์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$h(y) = h_1(y) + jh_2(y) \tag{2.34}$$

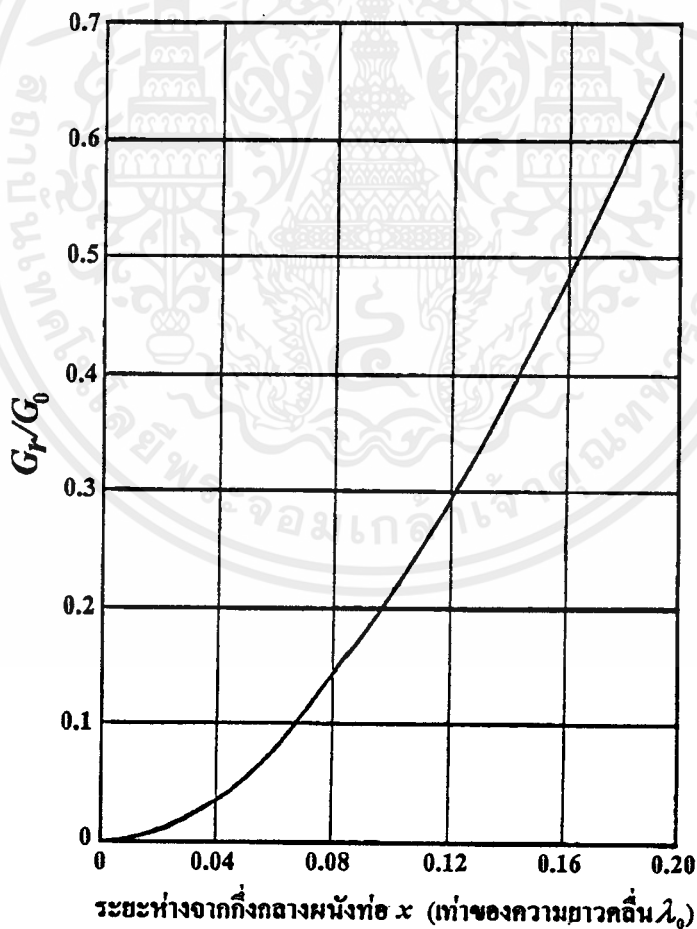
เป็นผลรวมเชิงซ้อนของกราฟ ถ้า $g(x)$ คือค่าความนำที่เรโซแนนท์แบบนอร์มัลไลซ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะจากกึ่งกลางของผนังท่อ ดังนั้นจะสามารถหาค่า Y_n / G_0 ได้จาก



รูปที่ 2.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเซตที่แอดมิตแดนซ์แบบนอร์มัลไลซ์กับอัตราส่วนความยาวของร่องต่อความยาวที่เรโซแนนท์



รูปที่ 2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อ
กับค่าความยาวที่เรโซแนนซ์ของร่อง



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำที่เรโซแนนซ์แบบนอร์แมลไลซ์กับ
ระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อของร่อง

$$\frac{Y}{G_0} = g(x)h(y) \quad (2.35)$$

ในการที่จะทราบค่า y ก็จะต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากกึ่งกลางผนังกับความยาวที่เรโซแนนท์ของร่อง ซึ่งอธิบายได้ด้วย

$$u(x) = k_r(x) \quad (2.36)$$

จากกราฟข้อมูลที่ได้จากการทดลองทำให้สามารถเขียน (2.33) ให้อยู่ในรูปใหม่คือ

$$Z_{mn}(x_n, y_n) = \frac{K_2 f_n^2(x_n, y_n)}{g(x_n)h(y_n)} \quad (2.37)$$

โดยที่

$$f_n(x_n, y_n) = \frac{\cos(\beta/k y_n u(x_n)) - \cos(y_n u(x_n))}{\sin(y_n u(x_n))} \sin \frac{\pi x_n}{a} \quad (2.38)$$

จากรูปที่ 2.8 ถึง 2.10 จะสามารถแสดงกราฟในรูปของฟังก์ชันได้เป็น

$$h_1(y_n) = 1 - 275(y_n - 1)^2 \quad (2.39ก)$$

$$h_2(y_n) = -14(y_n - 1) \quad (2.39ข)$$

$$g(x_n) = 1.177 \sin^2 \frac{\pi x_n}{a} \quad (2.39ค)$$

$$u(x_n) = 1517 + 1822x_n^2 \quad (2.39ง)$$

ซึ่ง (2.39) มีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับช่วงที่ใช้ในการออกแบบ

จากสมการที่ได้พิสูจน์มาทั้งหมดข้างต้น จนถึง ณ. ที่นี้จะสามารถนำมาออกแบบสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นแบบร่องบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นได้แล้ว โดยเริ่มจากสังเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเพื่อให้ได้การกระจายของค่าความนำที่เหมาะสมของแต่ละร่อง ภายใต้เงื่อนไขอินพุตที่สมพงษ์ จากนั้นก็จะนำไปคำนวณหาค่าระยะห่างจากกึ่งกลางผนังกับความยาวที่เรโซแนนท์ของร่องโดยไม่คิดมิวชวลคัปปลิง เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบ

ในการออกแบบแถวลำดับแบบเรโซแนนท์นั้น การกระจายแรงดันของแต่ละร่องจะมีเฟสเท่ากัน และจาก (2.29) ได้ชี้ให้เห็นว่า ค่าแอมพลิจูดแอมิตแดนซ์ก็จะต้องมีเฟสเดียวกันด้วย และค่าแอมพลิจูดแอมิตแดนซ์ควรจะเป็นจำนวนจริงเท่านั้น จากค่าเริ่มต้นของมิวชวลคัปปลิง จะทำให้ได้เงื่อนไขของคาร์เรแอกแดนซ์ X ว่า

$$X_{mn} = -X_n^b \quad (2.40)$$

สมการ (2.37) สามารถใช้คำนวณหาค่า (x_n, y_n) ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของ (2.40)

สมมติให้ตัวแปรคู่ (x_n, y_n) ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของ (2.40) และ $Y_n^a/G_0(x_n, y_n)$ เป็นค่าแอดทิฟแอดมิตแดนซ์ที่สัมพันธ์กันของร่องอันดับที่ n สำหรับร่องอันดับที่ m ก็จะต้องมีค่า (x_m, y_m) ที่สัมพันธ์กันกับค่าแอดทิฟแอดมิตแดนซ์ด้วย แต่ในแถวลำดับเดียวกันจะมีตัวแปรคู่ (x_n, y_n) เพียงคู่เดียวที่สามารถเข้าคู่กับ (x_m, y_m) แล้วให้การกระจายแรงดันที่เหมาะสม ซึ่งจากความต้อการนี้จะต้องเงื่อนไขว่า

$$\frac{Y_n^a/G_0(x_n, y_n)}{Y_m^a/G_0(x_m, y_m)} = \frac{f_n(x_n, y_n) \operatorname{sinc} k_n \frac{V_n^S/V_n}{V_m^S/V_m}}{f_m(x_m, y_m) \operatorname{sinc} k_m \frac{V_m^S/V_m}{V_n^S/V_n}} \quad (2.41)$$

สมการ (2.41) นี้จะให้ค่าตัวแปรคู่ที่เป็นไปตามเงื่อนไขของ (2.40) ด้วย และตัวแปรคู่นี้จะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขผลรวมของแอดทิฟแอดมิตแดนซ์แบบนอร์แมลไลซ์ (อินพุตแอดมิตแดนซ์ แบบนอร์แมลไลซ์) จะต้องมีความเป็น 1 ดัง (2.28ข) ซึ่งเขียนแสดงใหม่ได้เป็น

$$\sum_{n=1}^N \frac{Y_n^a}{G_0} = 1 \quad (2.42)$$

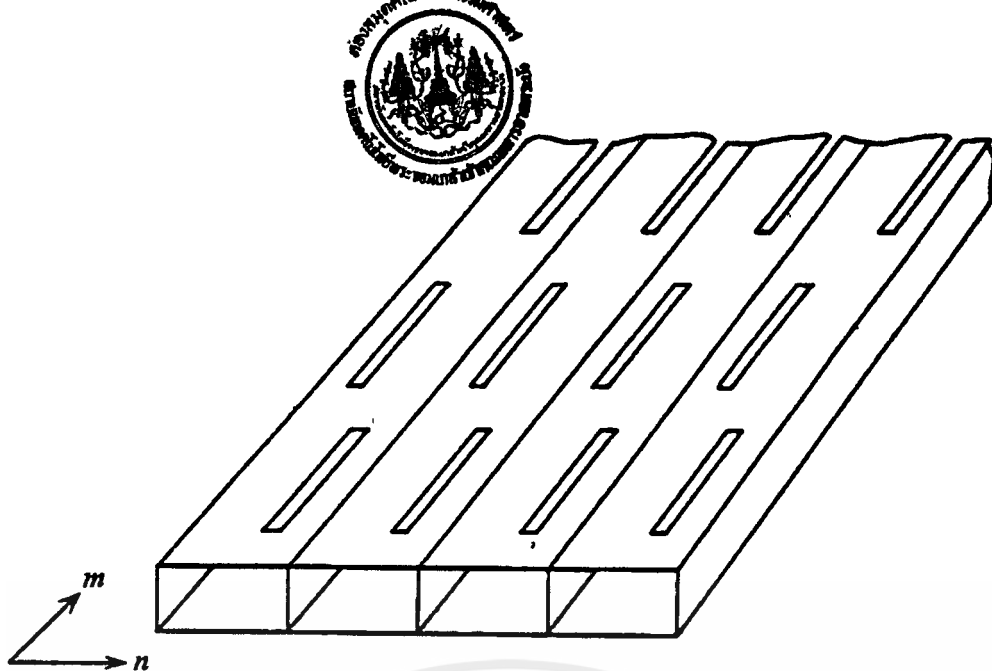
สุดท้ายนี้จะเห็นว่าสมการที่ใช้ในการออกแบบสองสมการหลัก (2.29) และ (2.30) เมื่อนำมาคำนวณจริงแล้วจะต้องกระจายออกเป็นชุดของสมการเชิงเส้น ซึ่งจาก (2.29) จะได้ชุดสมการ จำนวน $N/2$ สมการ (2.40) จำนวน $(N/2)-1$ สมการและจาก (2.42) อีกหนึ่งสมการรวมเป็นชุดของ N สมการ ที่ใช้ในการคำนวณออกแบบแถวลำดับเชิงเส้น

2.2.4 การออกแบบแถวลำดับระนาบแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่น

ถ้าแถวลำดับเชิงเส้นแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่นหลายสาขา (ต่อจากนี้จะเรียกว่าท่อนำคลื่นสาขา) มาวางเรียงกัน ก็จะได้แถวลำดับระนาบดังรูปที่ 2.11

จากสมการออกแบบแถวลำดับเชิงเส้นในหัวข้อที่ 2.2.3 เมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของการออกแบบแถวลำดับระนาบจะได้ดังนี้

$$\frac{Y_m^a}{G_0} = K_1 f_m \sin u(x_m) \frac{V_m^S}{V_m} \quad (2.43)$$



รูปที่ 2.11 แสดงแถวลำดับระนาบแบบร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น

$$\frac{y_m^a}{G_o} = K_2 \frac{f_{mm}^2}{Z_{mm}^a} \quad (2.44)$$

เมื่อ K_1 และ K_2 ยังคงแสดงโดย (2.31ก) และ (2.31ข) ตามลำดับ

$$f_{mm} = \left(\frac{\cos((\beta/k) y_{mm} u(x_{mm})) - \cos(y_{mm} u(x_{mm}))}{\sin(y_{mm} u(x_{mm}))} \right) \sin \frac{\pi x_{mm}}{a} \quad (2.45ก)$$

โดยที่

$$y_{mm} = l_{mm}/l_r(x_{mm}) \quad (2.45ข)$$

คือ ความยาวที่นอร์มัลไลซ์ของร่อง และ $(x_{mm}, 2l_{mm})$ คือระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อและความยาวของร่องอันดับที่ m บนท่อนำคลื่นสาขาอันดับที่ n ตามลำดับ

และจากเงื่อนไขแถวลำดับแบบเรโซแนนซ์ ดังนั้นระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของท่อนำคลื่นสาขาจะต้องเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในท่อด้วย ซึ่งก็หมายความว่า จะมีโหมดแรงดัน

$$V_{mm} = (-1)^m V_n \quad (2.46)$$

เมื่อ V_n คือโหมดแรงดันท่อนำคลื่นสาขาอันดับที่ n

และจากเหตุนี้ทำให้สามารถแสดง (2.43) ได้ใหม่เป็น

$$\frac{y_m^a}{G_o} = K_1 |f_{mm}| \sin u(x_{mm}) \frac{V_{mm}^s}{V_{mm}} \quad (2.47)$$

เนื่องจากการสลับทิศของระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อ จึงได้ความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก 039066

$$\sin \frac{x_{mn}}{a} = (-1)^m \left| \sin \frac{\pi x_{mn}}{a} \right| \quad (2.48)$$

จนถึงขณะนี้จะได้สมการหลักที่ใช้ในการออกแบบแถวลำดับระนาบคือ (2.44) และ (2.47) ในการนำไปใช้ก็จะต้องกระจายออกเป็นชุดสมการในลักษณะเดียวกับ (2.40) และ (2.41) ถ้ากำหนดให้แถวลำดับระนาบประกอบด้วยท่อนำคลื่นสาขา N สาขา แต่ละสาขามี M ร่อง ซึ่งจะต้องการอีกหนึ่งสมการคือเงื่อนไขอินพุตแอดมิตแดนซ์แบบนอร์มัลไลซ์ของทั้งแถวลำดับจะต้องเท่ากับหนึ่ง ในการที่จะได้มาซึ่งสมการสุดท้ายนี้จะต้องทราบรูปแบบการป้อนสัญญาณให้กับท่อนำคลื่นสาขา

มีสิ่งที่น่าสนใจคือในการคำนวณหาฟังก์ชันของร่องหนึ่งจะประกอบด้วยสองตัวแปรคือระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อ (x_n) กับความยาวของร่อง ($2l_n$) ดังนั้นในการออกแบบแถวลำดับระนาบขนาด $M \times N$ ร่อง ก็จะต้องการชุดสมการเชิงเส้น $2M \times N$ สมการ แต่จากวิธีการวิเคราะห์ที่ผ่านมาจะมีเพียง $M \times N$ สมการซึ่งไม่เพียงพอต่อการแก้ปัญหา แต่ในความเป็นจริงแล้วถ้าเราแบ่งแถวลำดับระนาบออกเป็น 4 จตุภาค (Quadrant) ก็จะเห็นว่า ตัวแปรของร่องในจตุภาคที่ 1 จะสมมาตรกับจตุภาคที่ 3 และในทำนองเดียวกันจตุภาค 2 จะสมมาตรกับจตุภาคที่ 4 หรืออธิบายอย่างง่ายได้ว่าตัวแปรของร่องอันดับที่ (1,1) จะสมมาตรกับร่องอันดับที่ (M,N) ยกเว้นว่าระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อจะสลับทิศกัน ร่องอันดับถัดไปก็จะสัมพันธ์กันในลักษณะเดียวกัน ซึ่งผลจากการสมมาตรนี้ทำให้ร่องที่จะต้องคำนวณหาตัวแปรมีเพียง $M \times N/2$ ร่อง (บนท่อนำคลื่นสาขาอันดับที่ 1 ถึง $N/2$) และ $M \times N$ ตัวแปรซึ่งเท่ากับชุดของสมการเชิงเส้นที่มี แต่ในการคำนวณหาค่ามิวซวลด์ปปลิ่งยังคงต้องคำนวณผลของร่องทั้งแถวลำดับ

2.3 ระบบการป้อนสัญญาณ

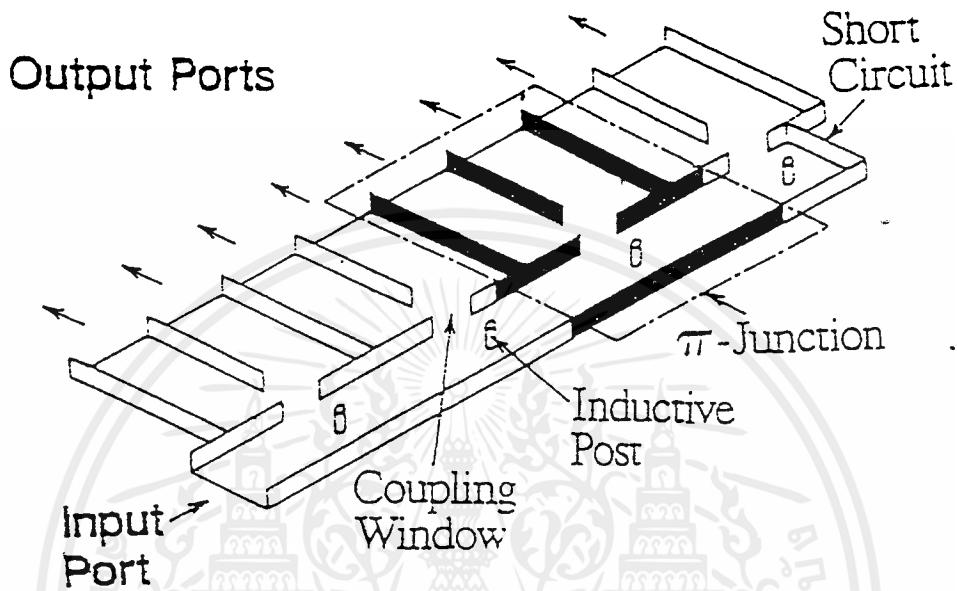
ระบบการป้อนสัญญาณจะเป็นแบบซิงเกิลเลเซอร์ฟีดคิง โดยในหัวข้อที่ 2.2.5.1 จะกล่าวถึงโครงสร้างของซิงเกิลเลเซอร์ฟีดคิง ซึ่งองค์ประกอบหนึ่งของซิงเกิลเลเซอร์ฟีดเวฟไกด์ คือท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชัน(π -junction) ที่มีอินดักทีฟโอส (inductive post)

ในหัวข้อ 2.2.5.2 จะเป็นการออกแบบโดยการนำพาย-จังก์ชันหลายๆอันมาแคสเคด(cascade)กันเป็นซิงเกิลเลเซอร์ฟีดเวฟไกด์ ที่จะแบ่งกำลังงานให้กับท่อนำคลื่นสาขา

2.3.1 การวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโอส

ซิงเกิลเลเซอร์ฟีดเวฟไกด์ ที่จะนำเสนอเป็นการสร้างอย่างง่ายของสายอากาศแบบแถวลำดับ ท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโอสนี้ถูกวิเคราะห์โดยใช้ Galerkin's method of moments ซึ่งตำแหน่งของโอสจะเป็นตัวกำจัดการสะท้อน

ชิงเกิล-เลเยอร์ฟีดเวฟไกด์



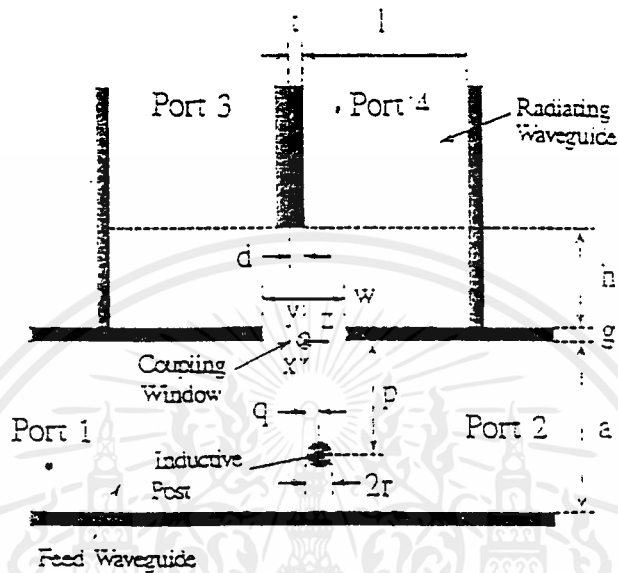
รูปที่ 2.12 แสดงถึงโครงสร้างของชิงเกิลเลเยอร์ฟีดเวฟไกด์

รูปที่ 2.12 แสดงถึงโครงสร้างของชิงเกิลเลเยอร์ฟีดเวฟไกด์ ซึ่งท่อฟีดนี้เป็นชั้นเดียวกับท่อนำคลื่นสาขา ลักษณะของพาย-จังก์ชันประกอบไปด้วย ท่อนำคลื่นสาขาจำนวน 2 ท่อ และมี 1 คัปปลิง วินโดว์ (coupling window) ตัดตรงผนังด้านแคบของท่อฟีด เพื่อที่จะใช้ป้อนสัญญาณเข้าไปยังท่อนำคลื่นสาขา 2 ท่อนั้น ซึ่งจะทำให้ได้กำลังงานที่แบ่งเข้าไปในท่อนำคลื่นสาขามีเฟสเดียวกัน

อย่างไรก็ตามการสะท้อนจากแต่ละคัปปลิงวินโดว์ จะทำให้ความถี่แบนด์วิดท์ (bandwidth) ของระบบแคบลงในขณะที่จำนวนของจังก์ชันเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อที่จะลดการสะท้อนของจังก์ชันและทำให้แบนด์วิดท์กว้างขึ้นจึงต้องทำการวางอินดักทีฟโพสไว้ข้างหน้าคัปปลิงวินโดว์ ดังนั้นท่อฟีดจึงประกอบไปด้วยพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโพสจำนวนมากมาต่อกันและถูกเทอร์มินาท (terminate) โดยปิดที่ปลาย

การวิเคราะห์

โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโพสดังรูป 2.13

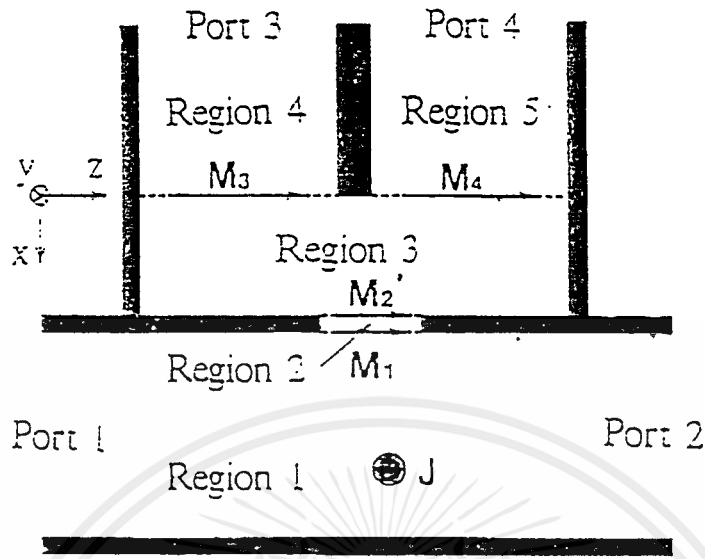


รูปที่ 2.13 แสดงท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโพส

พาย-จังก์ชัน ประกอบด้วยท่อพีคและท่อนำคลื่นสาขา 2 ท่อ โดยคัปปลิงผ่านทางวินโดว์ ความกว้างของท่อพีคและท่อนำคลื่นสาขาแสดงด้วย a และ l ตามลำดับ ระยะออฟเซต (offset) ของคัปปลิงวินโดว์แสดงด้วย d และความกว้างของวินโดว์แทนด้วย w พาย-จังก์ชันมีระยะ h ความรูป รัศมีของอินดักทีฟโพสคือ r และอยู่ที่ตำแหน่ง $(z,x) = (q,p)$ โครงสร้างนี้จะเป็น 2 มิติและเหมือนกันตลอดแนวแกน y

สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์

โหมด TE_{10} mode ที่มีขนาดเป็น 1 จากพอร์ท 1 เข้าไป โครงสร้างของพาย-จังก์ชันจะเหมือนกันตลอดแนวแกน y ดังนั้นสนามทั้งหมดจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับทิศ y จากทฤษฎีสนามสมมูลจะทำพาย-จังก์ชันให้เป็น 5 ภูมิภาค (region) แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงพาย-จังก์ชันที่แบ่งเป็น 5 รีเจียน

ความหนาของท่อปิด (region II) จะถูกนำมาพิจารณาด้วยเพื่อประเมินค่าของคัปปลิงพาวเวอร์ ได้อย่างถูกต้อง จากทฤษฎีสถานสมมูลจะได้ว่าอะเพอร์เจอร์ (aperture) S_j ($j=1$ ถึง 4) จะถูกแทนโดยกระแสแม่เหล็ก M_j กระแสไฟฟ้า J บนพื้นผิวของโพสถูกสมมติให้เป็น S_1 เพื่อประเมินค่าการสะท้อนที่พอร์ท 1 เงื่อนไขขอบเขตสำหรับสนามไฟฟ้าในระนาบสัมผัสบน S_j และเงื่อนไขความต่อเนื่องสำหรับสนามแม่เหล็กในระนาบสัมผัสบน S_j จะได้กลุ่มของสมการสำหรับหาค่ากระแส J และ M_j ดังนี้

On S_j ,

$$E_{in} + \iint_{S_j} ds_s \bar{G} I_{ee} \cdot J + \iint_{S_1} ds_s \bar{G} I_{em} \cdot M_1 = 0 \quad (2.49)$$

On S_1

$$H_{in} + \iint_{S_j} ds_s \bar{G} I_{me} \cdot J + \iint_{S_1} ds_s \bar{G} I_{mm} \cdot M_1 = \iint_{S_1} ds_s \bar{G} I_{mm} \cdot (-M_1) + \iint_{S_2} ds_s \bar{G} I_{mm} \cdot M_2 \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

On S_2

$$\begin{aligned} & \iint_{S_1} ds_2 \bar{G}II_{mm} \cdot (-M_1) + \iint_{S_2} \bar{G}II_{mm} \cdot M_2 \\ &= \iint_{S_2} ds_2 \bar{G}III_{mm} \cdot (-M_2) + \iint_{S_3} ds_3 \bar{G}III_{mm} \cdot M_3 + \iint_{S_4} ds_4 \bar{G}III_{mm} \cdot M_4 \end{aligned} \quad (2.51)$$

On S_3

$$\begin{aligned} & \iint_{S_2} ds_3 \bar{G}III_{mm} \cdot (-M_2) + \iint_{S_3} ds_3 \bar{G}III_{mm} \cdot M_3 + \iint_{S_4} ds_4 \bar{G}III_{mm} \cdot M_4 \\ &= \iint_{S_3} ds_3 \bar{G}IV_{mm} \cdot (-M_3) \end{aligned} \quad (2.52)$$

On S_4

$$\begin{aligned} & \iint_{S_2} ds_4 \bar{G}III_{mm} \cdot (-M_2) + \iint_{S_3} ds_3 \bar{G}III_{mm} \cdot M_3 + \iint_{S_4} ds_4 \bar{G}III_{mm} \cdot M_4 \\ &= \iint_{S_4} ds_4 \bar{G}V_{mm} \cdot (-M_4) \end{aligned} \quad (2.53)$$

ในสมการที่(2.49)และ(2.50) , E_{in} และ H_{in} เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (TE_{10} mode)จากพอร์ท 1 ตามลำดับ

$$E_{in} = E^{(+)} f_{10}$$

$$H_{in} = H^{(+)} f_{10}$$

โดยที่ $E^{(+)} f_{10}$ และ $H^{(+)} f_{10}$ เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่น TE_{10} mode ในทิศ + z

ในท้อพิดตามลำดับ

ไดอะดิกกรีนฟังก์ชัน (Dyadic Green's Function)

ในสมการที่(2.49) ถึง (2.53), \bar{G} 's เป็น ไดอะดิก กรีน ฟังก์ชัน

$\bar{G}I_{ee}$: เป็นสนามไฟฟ้าที่ได้จากกระแสไฟฟ้าในริเจียน I

$\bar{G}I_{em}$: เป็นสนามไฟฟ้าที่ได้จากกระแสแม่เหล็กในริเจียน I

$\bar{G}I_{me}$: เป็นสนามแม่เหล็กที่ได้จากกระแสไฟฟ้าในริเจียน I

$\bar{G}k_{mm}$: เป็นสนามแม่เหล็กที่ได้จากกระแสแม่เหล็ก ในริเจียน k

$$(k = I, II, III, IV, V)$$

ไดอะดิกกรีนฟังก์ชันในริเจียน I ใช้สำหรับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีความยาวอนันต์ , ไดอะดิกกรีนฟังก์ชันในริเจียน II และ III ใช้สำหรับช่องว่างสี่เหลี่ยมที่เทอร์มินเทโดยผนังไฟฟ้า 2 ด้าน , ไดอะดิกกรีนฟังก์ชันในริเจียน IV และ V ใช้สำหรับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่ถูกลบปลายที่ $z = -(g+h)$

เกเลอร์กินเมทอดออฟโมเมนต์ (Galerkin's Method of Moment)

เกเลอร์กินเมทอดออฟโมเมนต์ นำมาใช้ในการเปลี่ยนสมการอินทริกัลให้เป็นสมการลีนีเยร์ กระแสไฟฟ้า J บนโพสจะมียอดประกอบในแกน y เหมือนกันเท่านั้น และกระแสแม่เหล็ก M_j บนอะเพอร์เจอร์จะมียอดประกอบในทิศ z เท่านั้น กระแส J และ M_j จะกระจายตามฟังก์ชันพื้นฐานของสมการฟูเรียร์เป็นดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J = \hat{y} \frac{1}{2\pi r} \left(\sum_c A_c \cos(c\theta) + \sum_s A_s \sin(s\theta) \right) = \sum_c A_c j_c + \sum_s A_s j_s \quad (2.56)$$

$$M_1 = \hat{z} \sqrt{\frac{2}{wb}} \sum_\alpha A_\alpha \sin\left(\frac{\alpha\pi}{w} \left(z + \frac{w}{2}\right)\right) = \sum_\alpha A_\alpha m_\alpha \quad (2.57)$$

$$M_2 = \hat{z} \sqrt{\frac{2}{wb}} \sum_\beta A_\beta \sin\left(\frac{\beta\pi}{w} \left(z + \frac{w}{2}\right)\right) = \sum_\beta A_\beta m_\beta \quad (2.58)$$

$$M_3 = \hat{z} \sqrt{\frac{2}{lb}} \sum_\gamma A_\gamma \sin\left(\frac{\gamma\pi}{l} (z + d + t + l)\right) = \sum_\gamma A_\gamma m_\gamma \quad (2.59)$$

$$M_4 = \hat{z} \sqrt{\frac{2}{lb}} \sum_\delta A_\delta \sin\left(\frac{\delta\pi}{2} (z + d - t)\right) = \sum_\delta A_\delta m_\delta \quad (2.60)$$

สมการ (2.56) ถึง (2.60) ใช้แทนเข้าไปในสมการอินทริกัล (2.49) ถึง (2.53) หลังจากนั้นสมการอินทริกัลแต่ละสมการถูกคูณด้วยฟังก์ชันพื้นฐานและอินทริเกรตตลอดพื้นผิว จะได้เป็นสมการลิเนียร์ดังต่อไปนี้

On S_j

$$\sum_c A_c Z_{c'c} + \sum_s A_s Z_{s'c} + \sum_\alpha A_\alpha N_{c'\alpha} = -B^{(+)}_{c'} \quad (2.61)$$

$$\sum_c A_c Z_{s'c} + \sum_s A_s Z_{s's} + \sum_\alpha A_\alpha N_{s'\alpha} = -B^{(+)}_{s'} \quad (2.62)$$

On S_1

$$\sum_c A_c N_{\alpha'c} + \sum_s A_s N_{\alpha's} + \sum_\alpha A_\alpha (Y^I_{\alpha'\alpha} + Y^{II}_{\alpha'\alpha}) - \sum_\beta A_\beta Y^{II}_{\alpha'\beta} = -B^{(+)}_{\alpha'} \quad (2.63)$$

On S_2

$$-\sum_\alpha A_\alpha Y^{II}_{\beta\alpha} + \sum_\beta A_\beta (Y^{II}_{\beta\beta} + Y^{III}_{\beta\beta}) - \sum_\gamma A_\gamma Y^{III}_{\beta\gamma} - \sum_\delta A_\delta Y^{III}_{\beta\delta} = 0 \quad (2.64)$$

On S_3

$$-\sum_\beta A_\beta Y^{III}_{\gamma\beta} + \sum_\gamma A_\gamma (Y^{III}_{\gamma\gamma} + Y^{IV}_{\gamma\gamma}) + \sum_\delta A_\delta Y^{III}_{\gamma\delta} = 0 \quad (2.65)$$

On S_4

$$-\sum_\beta A_\beta Y^{III}_{\delta\beta} + \sum_\gamma A_\gamma Y^{III}_{\delta\gamma} + \sum_\delta A_\delta (Y^{III}_{\delta\delta} + Y^V_{\delta\delta}) = 0 \quad (2.66)$$

โดยที่

$$-Z_{i'j} = \iint_{S_j} ds_0 \iint_{S_j} ds_s j_{i'} \cdot \overline{GI}_{ee} \cdot j_j \quad (i, j = c, s) \quad (2.67)$$

$$-N_{i'\alpha} = -N_{\alpha'i} = \iint_{S_j} ds_0 \iint_{S_1} ds_s j_{i'} \cdot \overline{GI}_{em} \cdot m_\alpha \quad (i = c, s) \quad (2.68)$$

$$-Y_{i'j} = \iint_{S_i} ds_0 \iint_{S_j} ds_s m_{i'} \cdot \overline{G}^k_{mm} \cdot m_j \quad (i, j = \alpha, \beta, \gamma, \delta) \quad (k = I, II, III, IV, V) \quad (2.69)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B^{(\pm)}_i = \iint_{S_j} ds_0 j_i \cdot E^{(\pm)} f 10 \quad (i = c, s) \quad (2.70)$$

$$B^{(\pm)}_\alpha = \iint_{S_1} ds_0 m_\alpha \cdot H^{(\pm)} f 10 \quad (2.71)$$

สแคตเตอร์ริงเมทริก (Scattering Matrix)

ค่า J และ M_j หาได้จากสมการลิเนียร์ (2.61) ถึง (2.66)

ค่าพลังงานการสะท้อน S_{11} ไปพอร์ต 1 เป็นผลรวมของคลื่นที่กระจายโดยกระแสไฟฟ้า J บนโพสและกระแสแม่เหล็ก M_1 บนอะเปอร์เจอร์ S_1

กำลังงานที่ส่งผ่าน S_{21} เป็นผลรวมของคลื่นตรง, คลื่นที่กระจายโดยกระแสไฟฟ้า J บนโพสและกระแสแม่เหล็ก M_1 บนอะเปอร์เจอร์ S_1

ค่าคัปปลิงพาวเวอร์ S_{31} และ S_{41} หาได้จากคลื่นที่กระจายโดยกระแสแม่เหล็ก M_3 และ M_4 ตามลำดับ

$$S_{11} = -\frac{1}{2} \left(\sum_c A_c B^{(+)}_c + \sum_s A_s B^{(+)}_s \right) + \frac{1}{2} \sum_\alpha A_\alpha B^{(+)}_\alpha \quad (2.72)$$

$$S_{21} = 1 - \frac{1}{2} \left(\sum_c A_c B^{(-)}_c + \sum_s A_s B^{(-)}_s \right) + \frac{1}{2} \sum_\alpha A_\alpha B^{(-)}_\alpha \quad (2.73)$$

$$S_{31} = -\frac{1}{2} \sum_\gamma A_\gamma (C^{(+)}_\gamma - C^{(-)}_\gamma) \quad (2.74)$$

$$S_{41} = -\frac{1}{2} \sum_\delta A_\delta (C^{(+)}_\delta - C^{(-)}_\delta) \quad (2.75)$$

โดยที่

$$C^{(\pm)}_i = \iint_{S_i} ds_0 m_i \cdot H^{(\pm)} r 10 \quad (i = \gamma, \delta) \quad (2.76)$$

$H^{(\pm)} r 10$ เป็นค่าสนามแม่เหล็กที่นอร์มอลไลซ์ของคลื่น TE_{10} mode ในทิส + ในท่อนำคลื่นสาขา

Numerical Result

จุดมุ่งหมายในการออกแบบของท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันในหัวข้อนี้เพื่อที่จะให้คัปปลิง พาวเวอร์ที่เท่าๆกันแก่พอร์ต 3 และพอร์ต 4 ภายใต้การสะท้อนที่น้อยๆ ในรีเจียน I กำลังงานที่แบ่งไปยังพอร์ต i ถูกคำนวณโดยสแคตเตอร์ริงเมทริก (scattering matrix) (S_{ij}) ของพาย-จังก์ชัน ซึ่งพอร์ตต่างๆเหล่านี้แสดงดังรูป 3 เฟสของ S_{21} และ S_{31} มีความสำคัญมากในการออกแบบพาย-จังก์ชันมาต่อกันเป็นวงจรแบ่งกำลังงานแบบหลายสาขา

ตำแหน่งของโพส (q,p) จะต้องปรับเพื่อให้ได้ค่าการสะท้อน $|S_{11}|$ ค่าที่สุด (ต่ำกว่า -40dB) สำหรับทุกๆออฟเซต ค่าออฟเซตที่ดีที่สุดคือ 0 มิลลิเมตรซึ่งจะให้ความแตกต่างระหว่างเฟสและแอมพลิจูดน้อยที่สุด

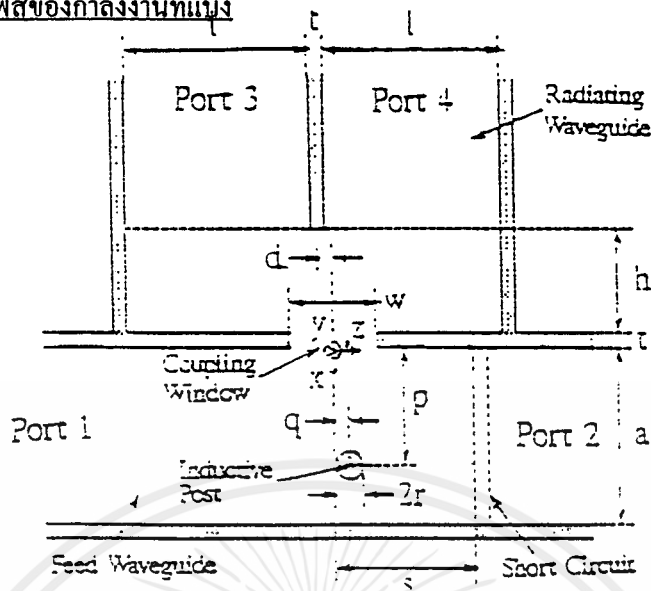
2.3.2 การออกแบบเชิงเกิลเลเยอร์พีคเวฟไกด์

ในหัวข้อนี้จะเป็นการออกแบบวงจรแบ่งกำลังงานแบบหลายสาขาสำหรับใช้ของวงจรพีคในแถวลำดับท่อนำคลื่นแบบร่อง อันดับแรกเป็นการออกแบบพารามิเตอร์ในพาย-จังก์ชัน คือ แอมพลิจูดและเฟสของกำลังงานที่แบ่งที่ถูกคำนวณตามฟังก์ชันของพารามิเตอร์ที่ออกแบบไว้แล้ว อันดับที่สองเป็นการออกแบบขั้นตอนในรายละเอียดของระบบแคสเคด ซึ่งจะแบ่งกำลังไปยังท่อนำคลื่นสาขาด้วยแอมพลิจูดและเฟสที่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโอส

แอมพลิจูดและเฟสของกำลังงานที่แบ่ง



รูปที่ 2.15 แสดงถึงท่อนำคลื่นแบบพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโอส

ระนาบอ้างอิงสำหรับพอร์ต 1 และพอร์ต 2 กำหนดไว้ที่จุดกำเนิด ($z=0$) ขณะที่พอร์ต 3 และพอร์ต 4 จะกำหนดไว้ที่คัปปลิงวินโดว ($x=0$) ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงพารามิเตอร์ของพาย-จังก์ชันที่ควบคุมแอมพลิจูดและเฟสของกำลังงานที่แบ่ง

ตำแหน่งของโอสที่ดีที่สุดที่จะให้ $|S_{11}|$ ต่ำที่สุด นั้นจะได้หลายค่า โดยที่ค่า w และ h ก็จะเปลี่ยนไปด้วย เมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางเปลี่ยนไปการสะท้อนก็ยังคงน้อยอยู่ขณะที่ตำแหน่งของโอสเปลี่ยนไป ซึ่งตำแหน่งของโอสที่เข้าใกล้จุดกึ่งกลางของท่อพีดและเคลื่อนไปทางพอร์ต 2 จะให้คัปปลิงแรง

แอมพลิจูดและเฟสของกำลังงานที่แบ่งของ 2 เอ้าท์พุทพอร์ต จะถูกควบคุมโดยค่า w และ h ค่ากำลังงานที่แบ่ง $= |S_{31}|^2 + |S_{41}|^2$ และเฟส $\arg(S_d) = [\arg(S_{31}) + \arg(S_{41})]/2$ ค่ากำลังงานที่แบ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อ w เพิ่มขึ้นแต่จะไม่ขึ้นอยู่กับค่า h ซึ่งค่า h จะมีผลกระทบต่อเฟส

ผลกระทบของอินดักทีฟโอส

อินดักทีฟโอสมีหน้าที่ในการกำจัดการสะท้อนที่เกิดจากจังก์ชัน จากรูปที่ 5 เส้นที่ 2 เส้นจะระบุการสะท้อนในขณะที่มีโอส ที่ความแตกต่างของกำลังงานที่ถูกแบ่ง 50% และ 10% ที่ความถี่ 11.85 GHz ในพาย-จังก์ชันที่ไม่มีโอส ค่าประสิทธิภาพการสะท้อนจะมากประมาณ -10 dB ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่อพีด.

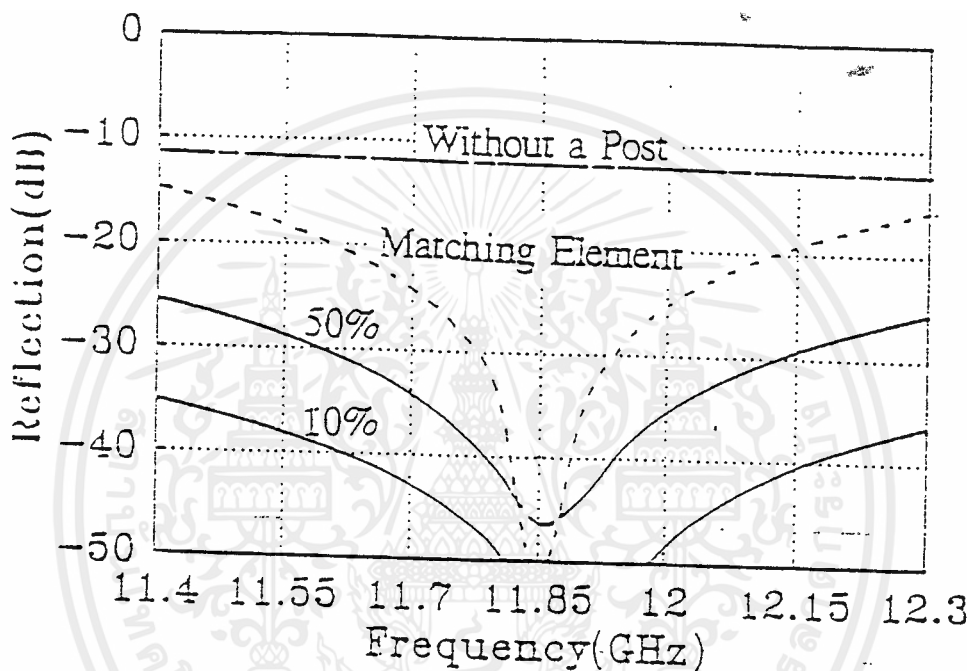
เฟสที่ส่งผ่าน $\arg(S_{21})$ เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการออกแบบเฟสของวงจรแบ่งกำลังงานแบบหลายสาขาซึ่งสามารถหาได้จากค่า w และ h หลายๆค่า แสดงดังรูป 2.17 ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของกำลังงานที่แบ่งในกรณีที่ไม่อินดักทีฟโอส ค่า $|\arg(S_{21})|$ จะมากและไวต่อกำลังงานที่แบ่งตามรูป 2.17

ในพาย-จังก์ชันที่มีอินดักทีฟโอส ค่ากำลังงานที่แบ่งมากที่สุด จะมีค่า 2.5 องศาเท่านั้น โอสจะแสดงตัวเป็นตัวเหนี่ยวนำอนุกรมบนสายส่ง ($\arg(S_{21}) > 0$) ในขณะที่คัปปลิงวินโดวที่คัตบนผนังด้านแคบจะแสดงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นตัวเหนี่ยวนำขนาน ($\arg(S_{21}) < 0$) แล้ว $\arg(S_{21})$ จะยังคงน้อยเพราะผลกระทบจากตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมและขนานจะไปทำให้การลดลงของความยาวคลื่นในท่อพีคเนื่องจากวินโดว์คัปปลิงจะไม่เกิดขึ้น แมทซ์ชิงพาย-จังก์ชัน

แมทซ์ชิงพาย-จังก์ชัน ออกแบบมาพิเศษสำหรับเทอร์มินเนทของท่อพีคซึ่งแบ่งกำลังงานทั้งหมดให้กับท่อนำคลื่นสาขาโดยปราศจากการสะท้อน ที่จุดปลายของพาย-จังก์ชันถูกเทอร์มินเนทโดยแผ่นตัวนำห่างจากวินโดว์ประมาณ λ_g จากรูป 2.16 เส้นประจะระบุคุณสมบัติความถี่ของการสะท้อน $|S_{11}|$ การสะท้อนนี้จะถูกจำกัดให้ต่ำกว่า -20 dB จาก 11.60 GHz ถึง 12.13 GHz (4.5 % แบนด์วิธ)



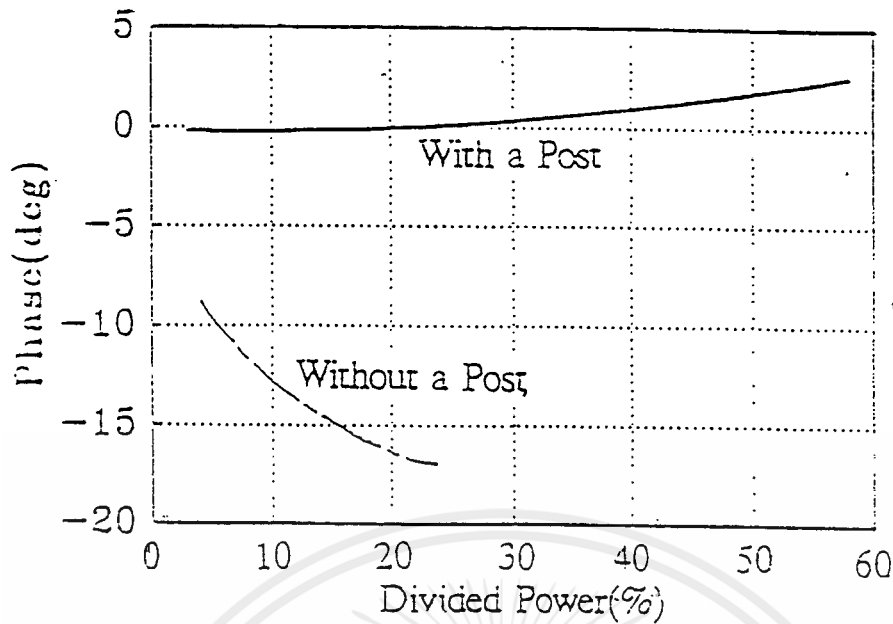
รูปที่ 2.16 แสดงคุณสมบัติความถี่ของการสะท้อน $|S_{11}|$

2.3.3 การออกแบบขั้นตอนสำหรับการแพร่กระจายแบบยูนิฟอร์ม

ในการนำพาย-จังก์ชันที่นำมาแคสเคดกันจำนวน N พาย-จังก์ชันนั้นจะเริ่มนับจากจุดที่เทอร์มินเนทมายังจุดพีค แบบฟอร์มการกระจายคลื่นนั้น กำลังงานที่ถูกแบ่งของจังก์ชัน k คือ $1/k$ เงื่อนไขเฟสแมทซ์ชิงระหว่างจังก์ชันที่อยู่ติดกัน คือ จังก์ชันที่ k และ $k-1$ จะแสดงดังนี้

$$\arg(S_d[k]) - \arg(S_{21}[k]) = \arg(S_d[k-1]) \quad (2.77)$$

โดยที่ $\arg(S_{21}[k])$ และ $\arg(S_d[k])$ เป็นเฟสของกำลังงานที่ส่งผ่าน (S_{21}) และกำลังงานที่ถูกแบ่งของจังก์ชัน k ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 แสดงเฟสส่งผ่าน $\arg(S_{21})$

การออกแบบของจังก์ชัน k จะเป็นดังนี้ ขั้นแรก $\arg(S_{21}[k])$ จะได้จากรูปที่ 2.17 หลังจากนั้นก็กำหนด $\arg(S_a[k-1])$ ขึ้นมา ก็จะหาเฟสของกำลังงานที่ถูกแบ่ง $\arg(S_a[k])$ ได้จากสมการที่ 2.77 ซึ่งค่าเฟสของ $\arg(S_a[k])$ จะเปลี่ยนแปลงตาม $h[k]$ และ $w[k]$ ตามรูปที่ 2.18 และ 2.19

เนื่องจากการสะท้อนจากแต่ละจังก์ชันจะถูกกำจัดได้ดี ในทางปฏิบัติการออกแบบจึงคิดจากจุดพีคไปยังจุดเทอร์มินเท เริ่มต้นจากรูปที่ 2.20 แสดงถึง $\arg(S_a) - \arg(S_{21})$ ขึ้นอยู่กับกำลังงานที่ถูกแบ่งเป็นฟังก์ชันของ h และ w จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1). จังก์ชัน 2 จะถูกออกแบบเป็นอันดับแรก ดังนั้นเฟสของ $\arg(S_a[2]) - \arg(S_{21}[2])$ จะมีค่ามากที่สุดบนเส้น 50% ของกำลังงานที่ถูกแบ่ง (จุด A ในรูปที่ 2.20) $h[2]$ และ $w[2]$ ของจังก์ชัน 2 จะได้จากกราฟ

2). เฟสของกำลังงานที่ถูกแบ่ง $\arg(S_a[2])$ ของจังก์ชัน 2 จะถูกหามาได้จาก $h[2]$ และ $w[2]$ โดยใช้รูปที่ 2.19

3). จากสมการ 2.77 เมทริกซ์จังก์ชัน 1 ถูกออกแบบ ดังนั้นเฟสของกำลังงานที่ถูกแบ่ง

$$\arg(S_a[1]) = \arg(S_a[2]) - \arg(S_{21}[2])$$

4). ขั้นตอนจากข้อ 5 ถึงข้อ 6 เป็นวิธีทำซ้ำสำหรับแต่ละจังก์ชัน k ($=3$ ถึง N)

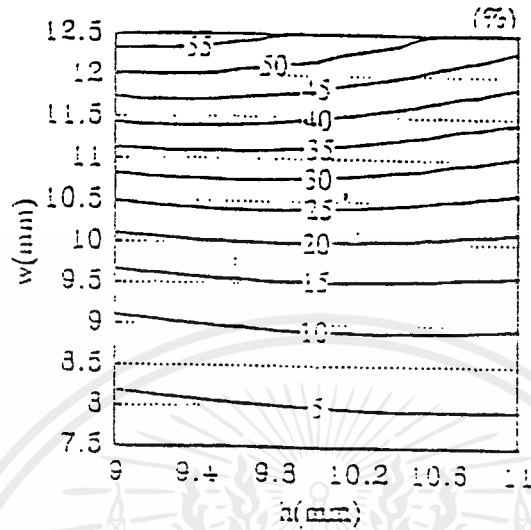
5). $h[k]$ และ $w[k]$ ของจังก์ชัน k ถูกหาโดยใช้รูปที่ 2.20 เพื่อให้ได้กำลังงานที่ถูกแบ่งคือ $1/k$ และเฟสจะเท่ากับ $\arg(S_a[k-1])$

6). เฟสของกำลังงานที่ถูกแบ่ง $\arg(S_a[k])$ จะได้จาก $h[k]$ และ $w[k]$ โดยใช้รูปที่ 2.19 ตำแหน่งของ $p[k]$ และ $q[k]$ จะได้จาก $h[k]$ และ $w[k]$ โดยใช้รูปที่ 2.21

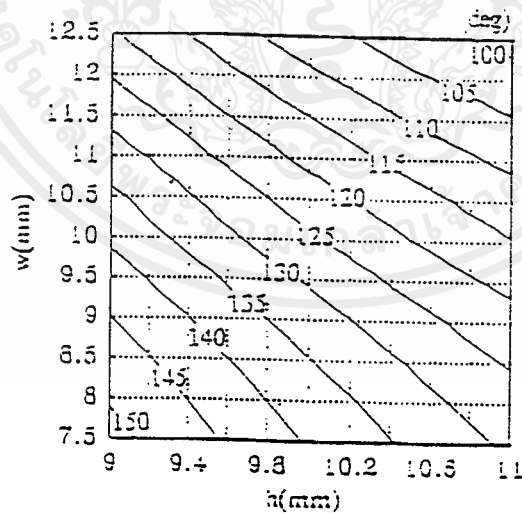
การออกแบบการแพร่กระจายแบบยูนิฟอร์ม พารามิเตอร์ของแต่ละพาย-จังก์ชัน ($k=1$ ถึง N) จะไม่ขึ้นอยู่กับจำนวนจังก์ชันทั้งหมด N จังก์ชัน เนื่องจากจะไม่คิดการสะท้อน

สมการสุดท้ายที่ใช้ในการออกแบบที่อนาคตินหลักก็คือเงื่อนไขอินพุตที่สมพงษ์ ดังนั้น จากภาพวงจรมุมของที่อนาคตินหลักจะได้

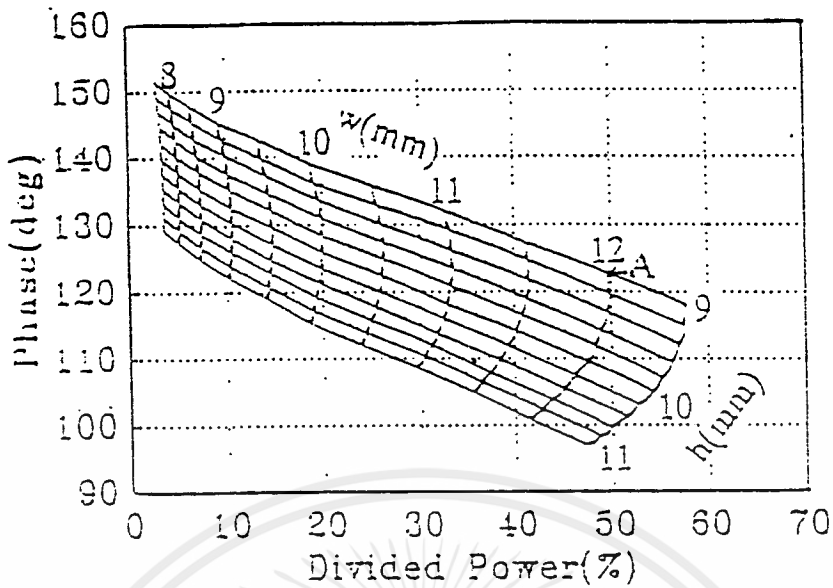
$$\sum_{n=1}^N \frac{Z_n^a}{Z_0} = 1 \quad (2.78)$$



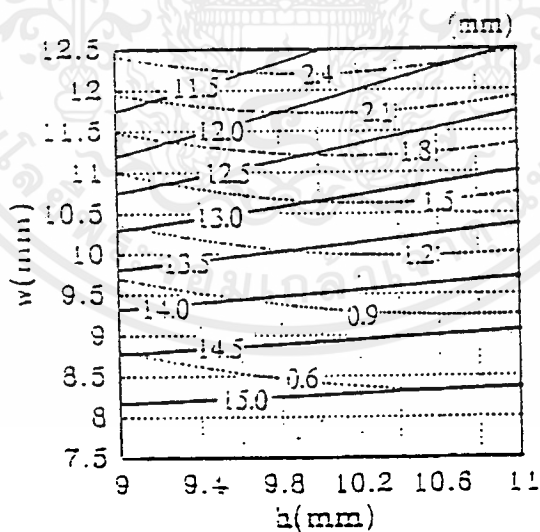
รูปที่ 2.18 แสดงแอมพลิจูดของกำลังงานที่ถูกแบ่ง



รูปที่ 2.19 แสดงเฟสของกำลังงานที่ถูกแบ่ง



รูปที่ 2.20 แสดง Notch length (h) และความกว้างของวินโดว์ (w)
เป็นฟังก์ชันของกำลังงานที่ถูกแบ่งและเฟส $\arg(S_{21}) - \arg(S_{11})$



รูปที่ 2.21 แสดงตำแหน่งของโพส(p,q) เส้นที่ p : เส้นประ : q

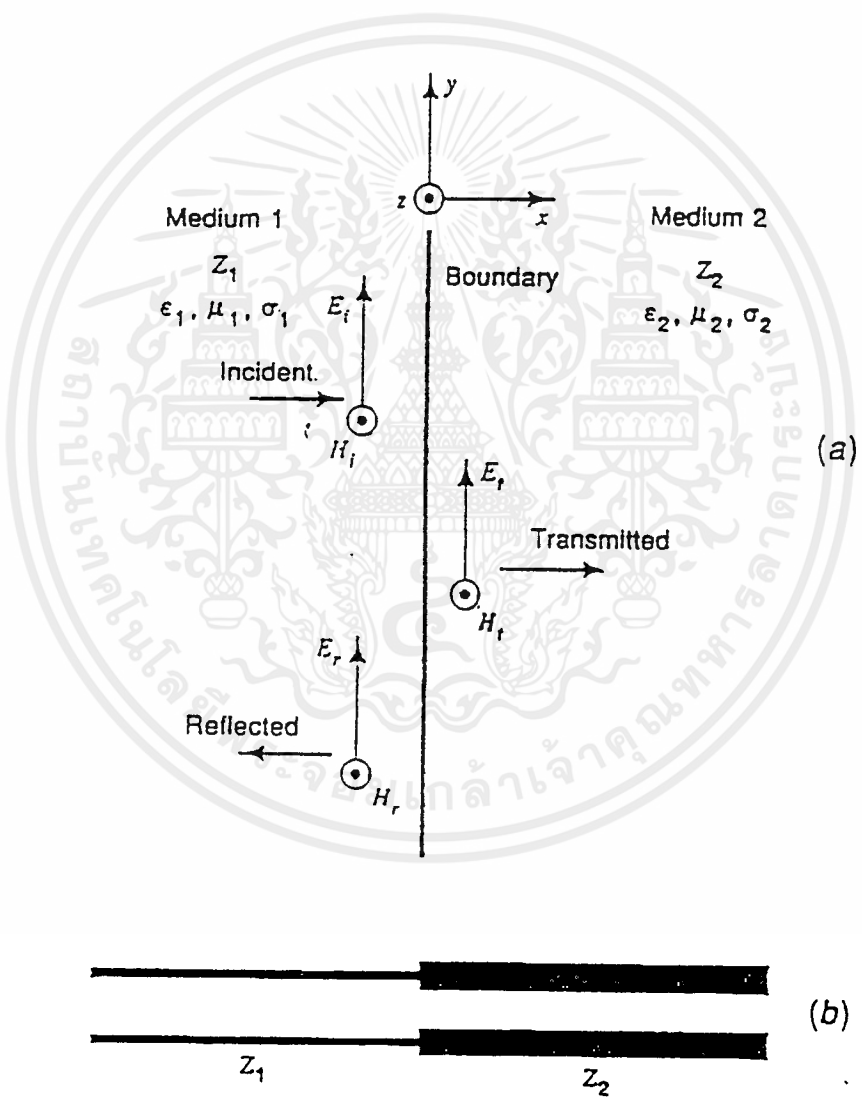
2.4 วัสดุดูดซับคลื่น (Absorber)

2.4.1 คลื่นระนาบตกกระทบบนที่รอยต่อ

พิจารณาคลื่นที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้นที่เดินทางในทิศ +x โดยมี E ในทิศ y และ H ในทิศ z

คลื่นนี้ตกกระทบบนในทิศตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สมมติว่าคลื่นที่ตกกระทบบนมีองค์ประกอบของสนามเป็น E_i และ H_i ที่รอยต่อ โดยทั่วไปแล้วส่วนหนึ่งของคลื่นตกกระทบบจะสะท้อนกลับมา ในขณะที่อีกส่วนหนึ่งจะส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สอง คลื่นสะท้อนกลับมีองค์ประกอบของสนามเป็น E_r และ H_r ที่รอยต่อ และคลื่นส่งผ่านมีองค์ประกอบของสนามเป็น E_t และ H_t ที่รอยต่อ

จากความต่อเนื่องขององค์ประกอบของสนามในทิศสัมผัสที่รอยต่อ เราได้ว่า



รูปที่ 2.22 (a) คลื่นระนาบเดินทางตกกระทบบนในทิศตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด (b)สายส่งที่ติดเทียมของข้อ (a)

$$E_i + E_r = E_t \quad (2.79)$$

และ

$$H_i + H_r = H_t \quad (2.80)$$

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นระนาบจะสัมพันธ์กันด้วยค่าอิมพีแดนซ์อินทรีนสิคของตัวกลางนั้นคือ

$$\frac{E_i}{H_i} = Z_1, \frac{E_r}{H_r} = -Z_1, \frac{E_t}{H_t} = Z_2 \quad (2.81)$$

อิมพีแดนซ์ของคลื่นสะท้อน (เดินทางในทิศ $-x$) จะให้มีค่าเท่ากับ $-z_1$ และของคลื่นตกกระทบเท่ากับ $+z_1$ ตามสมการ (2.80) และ (2.81)

$$H_t = \frac{E_t}{Z_2} = \frac{E_i}{Z_1} - \frac{E_r}{Z_1} \quad (2.82)$$

และ

$$E_t = \frac{Z_2}{Z_1} E_i - \frac{Z_2}{Z_1} E_r \quad (2.83)$$

คูณสมการที่ (2.79) ด้วย z_2/z_1 จะได้

$$\frac{Z_2}{Z_1} E_t = \frac{Z_2}{Z_1} E_i + \frac{Z_2}{Z_1} E_r \quad (2.84)$$

บวกสมการที่ (2.83) และ (2.84) เราจะได้

$$E_t \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) = 2 \frac{Z_2}{Z_1} E_i \quad (2.85)$$

หรือ

$$E_t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} E_i = \tau E_i \quad (2.86)$$

เมื่อ τ เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) และจะได้ต่อไปอีกว่า

$$\tau = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.87)$$

ลบสมการที่ (2.83) จากสมการที่ (2.84) จะได้

$$E_t \left(\frac{Z_2}{Z_1} - 1 \right) = 2 \frac{Z_2}{Z_1} E_r \quad (2.88)$$

แทนค่า E_t จากสมการที่ (2.86) ลงในสมการที่ (2.88) และแก้สมการหาค่า E_r เราจะได้

$$E_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} E_i = \rho E_i \quad (2.89)$$

เมื่อ ρ เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) และจะได้ต่อไปว่า

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.90)$$

จากสมการที่ (2.87) และ (2.90)

$$\tau = \rho + 1 \quad (2.91)$$

สภาพของคลื่นระนาบที่ตกกระทบในทิศตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลางแตกต่างกันสองชนิด ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์อินทรินสิคเป็น z_1 และ z_2 ตามลำดับ จะคล้ายคลึงกับสภาพของคลื่นที่เดินทางในสายส่งยาวอนันต์ (Infinite transmission line) ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใดจาก z_1 เป็น z_2 (รูปที่ 2.2(b)) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสำหรับศักดาไฟฟ้าตกคร่อมปลายส่ง จะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้ในสมการที่ (2.87) และ (2.90) ถ้าอิมพีแดนซ์อินทรินสิค z_1 ของตัวกลางที่ 1 ถูกทำให้มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายทางด้านซ้ายมือของส่วนต่อ (รูปที่ 2.22(b)) และค่าอิมพีแดนซ์อินทรินสิค z_2 ของตัวกลางที่ 2 ถูกทำให้มีค่าเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของสายทางด้านขวามือของส่วนต่อของสายส่ง เรากลับมาพิจารณากรณีที่คลื่นระนาบตกกระทบในทิศตั้งฉากบนรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.22(a) กันต่อไปโดยพิจารณากรณีเฉพาะต่อไปนี้คือ

กรณีที่ 1 สมมติตัวกลางที่ 1 เป็นอากาศและตัวกลางที่ 2 เป็นตัวนำ ดังนั้น $z_1 \gg z_2$ และจากสมการที่ (2.86) เราจะได้ความสัมพันธ์ซึ่งเป็นค่าประมาณคือ

$$E_r = 2 \frac{Z_2}{Z_1} E_i \quad (2.92)$$

แทนค่าจากสมการที่ (2.81) ความสัมพันธ์ข้างบนจะเป็น

$$H_r Z_2 \cong 2 \frac{Z_2}{Z_1} H_i Z_1 \quad (2.93)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$H_r = 2 H_i \quad (2.94)$$

นั่นคือ สำหรับคลื่นระนาบที่ตกกระทบในทิศตั้งฉากบนตัวกลางที่เป็นตัวนำ สนามแม่เหล็กบนตัวนำ จะมีค่าโดยประมาณเป็นสองเท่าของความเข้มสนามแม่เหล็กที่รอยต่อและจะได้ต่อไปอีกว่า $H_r \cong H_i$ ซึ่งจะได้เป็นคลื่นนิ่งบริสุทธิ์ทางซ้ายมือของรอยต่อ (ในตัวกลางที่ 1)

กรณีที่ 2 พิจารณาต่อไปในสภาพตรงข้ามกับกรณีที่ 1 บ้าง เมื่อตัวกลางที่ 1 เป็นตัวนำและตัวกลางที่ 2 เป็นอากาศ จะทำให้ $z_1 \ll z_2$ ดังนั้นจากสมการที่ (2.86) เราจะได้โดยประมาณว่า

$$E_r = 2 E_i \quad (2.95)$$

นั่นคือ สำหรับคลื่นที่เดินทางออกจากตัวกลางที่เป็นตัวนำ สนามไฟฟ้าในอากาศจะมีค่าเป็นสองเท่าของความเข้มสนามไฟฟ้าที่รอยต่อและจะได้ต่อไปอีกว่า $E_r \cong E_i$ นั่นคือ จะได้เป็นคลื่นนิ่งบริสุทธิ์ (VSWR = ∞) ทันทีทางด้านซ้ายมือของรอยต่อ (ในตัวกลางที่ 1) อย่างไรก็ตามเนื่องจากจะเกิดการลดทอนขนาดของคลื่นในตัวกลางที่ 1 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันไฟฟ้า (VSWR) จะลดลงอย่างรวดเร็วในระยะทางที่ห่างออกจากรอยต่อ (ไปทางซ้ายมือ)

กรณีที่ 3 ในกรณีที่ 1 เราได้สมมติว่า $z_1 \gg z_2$ พิจารณาต่อไปถ้า $z_2 = 0$ (ตัวกลางที่ 2 เป็นตัวนำสมบูรณ์) ดังนั้นจากสมการที่ (2.90) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน $\rho = -1$ และจากสมการที่ (2.87) ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน $\tau = 0$ นั่นคือคลื่นจะถูกสะท้อนกลับหมด และไม่มีสนามถูกส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 เลย พิจารณาต่อไปจะได้ $E_r = E_i$ และ $H_r = H_i$ นั่นคือค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะเป็นสองเท่าที่รอยต่อ สภาพเช่นนี้จะคล้ายกับสายส่งถูกลัดวงจร (Short-circuited transmission line)

กรณีที่ 4 ในกรณีที่ 2 เราได้สมมติว่า $z_1 \ll z_2$ พิจารณาต่อไปในกรณีที่ z_2 มีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นจากสมการที่ (2.90) $\rho = 1$ และจากสมการที่ (2.87) $\tau = 2$ นั่นคือคลื่นจะถูกสะท้อนกลับหมด แต่ $E_r = E_i$ ดังนั้นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่รอยต่อจะเป็นสองเท่าพอดี สภาพเช่นนี้จะคล้ายกับสายส่งที่ถูกเบี่ยงจร (Open-circuited transmission line)

กรณีที่ 5 สมมติว่าตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 เป็นสารไดอิเล็กทริกที่ไม่เป็นสารแม่เหล็กและไม่มี การสูญเสีย ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$) ดังนั้นจะได้จากสมการที่ (2.90) ว่า

$$\rho = \frac{\sqrt{\epsilon_1 / \epsilon_2} - 1}{\sqrt{\epsilon_1 / \epsilon_2} + 1} \quad (2.96)$$

และจากสมการที่ (2.87) ว่า

$$\tau = \frac{2}{1 + \sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_1}} \quad (2.97)$$

กรณีที่ 6 พิจารณากรณีที่ $z_2 = z_1$ ดังนั้น $\rho = 0$ และ $\tau = 1$ นั่นคือคลื่นจะเดินทางเข้าไปในตัวกลางที่ 2 โดยไม่มีการสะท้อนเลย สภาพเช่นนี้จะคล้ายกับกรณีของสายส่งที่ต่อเนื่องที่มีค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งสม่ำเสมอ นั่นเอง

2.4.2 การดูดซับคลื่นของสาร

วัสดุที่ใช้ดูดซับคลื่นจะลดทอนพลังงานที่จะสะท้อนเข้าสู่สายอากาศรับ หมายถึงการดูดซับคลื่นนั่นเอง พลังงานของคลื่นถูกดูดซับแบบการสูญเสีย โหห์มมิก (Ohmic loss) เป็นความจริงที่ว่า การสูญเสียนี้เปลี่ยนจากพลังงานไมโครเวฟเป็นความร้อน และวัสดุดูดซับคลื่นไม่ดูดซับพลังงานเพียงพอที่จะร้อนได้หรืออาจจะสัมผัสได้ว่าอุ่นมือใช้งาน นี่คือนิวตันที่เกิดขึ้น แม้ว่ามันจะทำงานด้วยกลไกใดก็ตาม ถ้าเครื่องส่งกับวัสดุที่ใช้ดูดซับคลื่นไมโครเวฟถูกนำเข้าไปใกล้กันเพียงพอ มันจะเกิดความร้อนขึ้น

2.4.3 ทำไมจึงเลือกใช้คาร์บอน

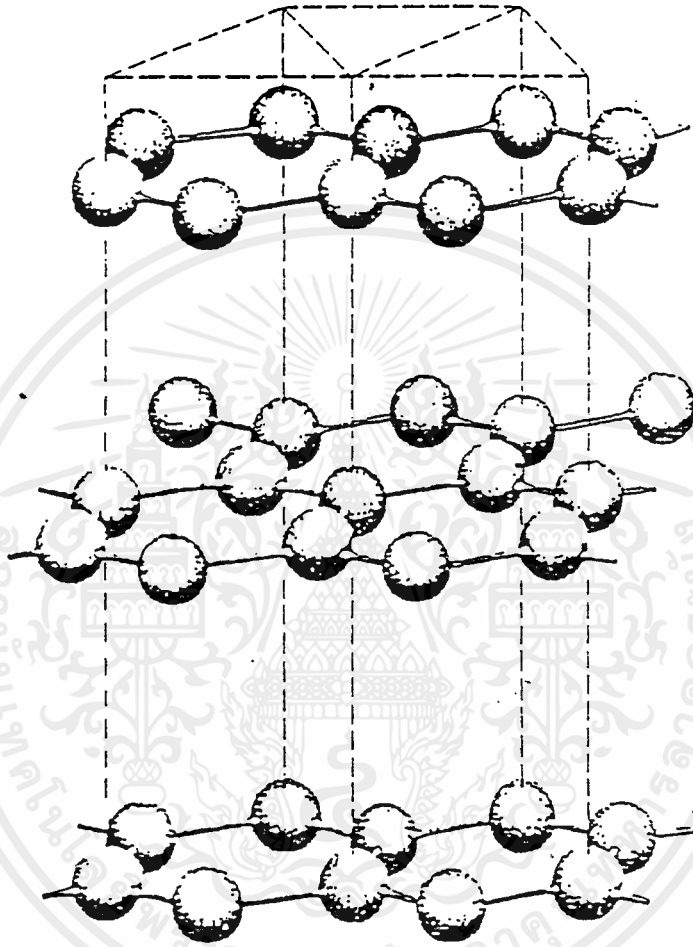
คาร์บอนเป็นวัสดุพื้นฐานที่ถูกใช้สร้างวัสดุดูดซับคลื่นเพราะค่าความนำที่ไม่สมบูรณ์ของมัน (Imperfect conductivity) คือมีค่าความนำอยู่ระหว่างค่าความนำที่มาก เช่น ทอง, เงิน, ทองแดง, เหล็ก กับค่าความนำที่น้อย เช่น แก้ว, ทราช, เทฟลอน วัสดุดังกล่าว เช่น คาร์บอน, ซิลิกอน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าความนำซีซีของโลหะพื้นฐาน

โลหะ	ค่าความนำ(s/m)
เงิน	62000000
ทองแดง	58000000
ทอง	41000000
เหล็ก	1200000
นิโครม	1000000
แกรไฟต์ (ในรูปของคาร์บอน)	71000
ซิลิกอน	1200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาโครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ ดังรูปที่ 2.23 ประกอบด้วยอะตอมยึดติดกันเป็นแพ เรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยม (Hexagonal) หลายๆรูปต่อเนื่องกัน อะตอมของคาร์บอนในแพเดียวกันต่างก็ยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันอย่างเหนียวแน่นและมั่นคงด้วยพันธะโควาเลนต์ แต่อะตอมที่อยู่กันคนละแพจะไม่มีแรงยึดเหนี่ยวกันเพราะอะตอมลื่นหลุดง่าย แกรไฟต์จะนำความร้อนและไฟฟ้าได้ง่ายในแนวที่ขนานกับแพกว่าในแนวที่ตั้งฉากกับแพ



รูปที่ 2.23 โครงสร้างผลึกของแกรไฟต์ แสดงแผ่นหกเหลี่ยมของคาร์บอนอะตอม ตำแหน่งอะตอมแทนโดยทรงกลม และทิศทางของบอนด์แทนโดยก้านระหว่างทรงกลม

ทฤษฎีแบบจำลองภาวะอะตอมของบอร์ คือ

1. อิเล็กตรอนของอะตอมซึ่งอยู่ในภาวะหนึ่งและมีพลังงานเพียงค่าหนึ่งเท่านั้นซึ่งสัมพันธ์กับวงโคจรในขณะนั้น
2. ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากชั้นที่ต่ำกว่า ไปยังชั้นที่สูงกว่า (วงโคจร) มันจะดูดซับพลังงานค่าหนึ่ง
3. ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากชั้นที่สูงกว่า ไปยังชั้นที่ต่ำกว่า (วงโคจร) มันจะคายพลังงานค่าหนึ่งออกมา

4. ถ้าอิเล็กตรอนรักษาพลังงานของมันไว้ที่ชั้นหนึ่ง (วงโคจร) มันจะดูดซับหรือไม่ก็คายพลังงานออกมา

คาร์บอนเป็นสารที่เป็นตัวนำไฟฟ้า พลังงานของวาเลนซ์อิเล็กตรอนในการยึดเกาะกันระหว่างอะตอมจะมีค่าอยู่ในแถบพลังงานวาเลนซ์ (Valence band) และพลังงานส่วนนี้ในภาวะปกติธรรมดาจะมีค่าชิดติดกับแถบพลังงานนำกระแส (Conduction band) หรือมีค่ามากกว่าแถบพลังงานนำกระแส ดังนั้นถ้าเราเพิ่มพลังงานแก่วาเลนซ์อิเล็กตรอนของคาร์บอน (อยู่ในรูปของแกรไฟต์) เพียงเล็กน้อย โดยป้อนสนามไฟฟ้า E ให้แก่ e^- ก็สามารถทำให้ e^- เคลื่อนที่ได้ โดยภาวะรูปทรงของอะตอมในการยึดเกาะกับอะตอมข้างเคียงไม่หลุดจากกัน วาเลนซ์อิเล็กตรอนเมื่อเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า E จะมีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนเป็น $F = -eE$ ถ้า e^- อยู่ในอวกาศอิสระมันจะเกิดความเร็วและมีความเร็วทวีเพิ่มขึ้น (รวมถึงพลังงานด้วย) อย่างต่อเนื่อง ในสารผลึก เช่น แกรไฟต์ ความเร็วของ e^- ที่ทวีเพิ่มขึ้นจะถูกต้านเพราะจะมีการชนกันกับโครงสร้างของตาข่ายของสารผลึก และในที่สุด e^- ก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ การเพิ่มขึ้นของพลังงานทำให้ e^- เคลื่อนที่จากชั้นวงโคจรที่ต่ำกว่าไปยังชั้นวงโคจรที่สูงกว่าและมันจะดูดซับพลังงานไว้ค่าหนึ่งตามทฤษฎีแบบจำลองภาวะอะตอมของบอร์ข้างต้น ด้วยเหตุนี้คาร์บอนจึงสามารถดูดซับพลังงานไว้ได้

วัสดุดูดซับคลื่นที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็ก (Magnetic absorber) จะมีการใช้งานที่กว้างกว่าแบบแรก โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานภายนอกได้คือ การสูญเสียกำหนดโดยแมกเนติก ไดโพลโมเมนต์ (Magnetic dipole moment) และมีส่วนประกอบของเหล็กเป็นพื้นฐาน ตัวอย่างเช่น คาร์บอนิล ไอรอน (Carbonyl iron) ทำให้มีความคงทนมากกว่า แต่มีข้อเสียคือ มีน้ำหนักมากเนื่องจากมีส่วนประกอบของเหล็ก

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

3.1 ระบบแพร่กระจายคลื่น

การออกแบบระบบแพร่กระจายคลื่นก็คือการออกแบบร่องที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่นสาขานั้นเอง และก่อนที่จะได้ทำการออกแบบร่องดังกล่าวก็จะกล่าวถึงข้อกำหนดเบื้องต้น ดังนี้

แบบของแวลวลำดับระนาบ

ในปริภูมิอนุพันธ์นี้จะเลือกแวลวลำดับแบบเรโซแนนซ์ในระนาบหนึ่งและแวลวลำดับแบบคลื่นจรในอีกระนาบหนึ่ง

ระนาบที่เป็นแวลวลำดับแบบเรโซแนนซ์อยู่ในแนวของระนาบของสนามไฟฟ้า ซึ่งระยะห่างระหว่างกึ่งกลางร่องจะห่างกันเป็นระยะทางครึ่งความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นสาขา ส่วนระนาบที่เป็นแวลวลำดับแบบคลื่นจรจะอยู่ในแนวระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะต้องมีโหนดที่เข้าสู่ต่อเข้ากับปลายท่อนำคลื่นทุกสาขา(หรือปลายท่อนำคลื่นหลัก) ซึ่งข้อกำหนดของระยะห่างระหว่างกึ่งกลางร่องจะมีค่าไม่เท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นสาขา ในที่นี้มีค่าเป็น 12.324 มม.

ความถี่ที่ออกแบบ

ในการออกแบบสายอากาศแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่นนั้นสิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือ การกำหนดความถี่ที่ออกแบบ ในปริภูมิอนุพันธ์นี้เลือกความถี่ (f_0) 12.6575 GHz ซึ่งเป็นความถี่กลางของการแพร่กระจายคลื่นย่านความถี่เคยของดาวเทียมไทยคม

การเลือกท่อนำคลื่น

ท่อนำคลื่นหลักมีขนาดของผนังด้านกว้างภายใน (a) 17.6 mm และขนาดผนังด้านแคบภายใน (b) 7.00 mm มีความถี่คัทออฟ (Cut-off Frequency : f_c) ของคลื่นโหมด TE_{10} เป็น 8.52 GHz (จาก $f_c = c/2a$ เมื่อ $c = 3 \times 10^8$ m/s คือความเร็วแสงในอากาศ) จะเห็นว่า $f_0 = 1.48 f_c$ ซึ่งอยู่ในช่วงใช้งานที่เหมาะสมของท่อนำคลื่นนี้ ($1.3f_c \leq f_0 \leq 1.9f_c$) ที่ความถี่ 12.6575 GHz ท่อนำคลื่นนี้จะให้ความยาวคลื่น (Guided Wavelength : λ_g) 32 mm (จาก $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}$ เมื่อ λ_0 คือความยาวคลื่นในอากาศ)

ท่อนำคลื่นสาขามีขนาดของผนังด้านกว้างภายใน (a) 14 mm และขนาดของผนังด้านแคบภายใน (b) 7.00 mm

ขนาดของสายอากาศ

ขนาดของสายอากาศจะกำหนดให้มีขนาด 32 ร่อง \times 32 ร่อง คือมีท่อนำคลื่นสาขา 32 สาขา แต่ละสาขาจะมี 32 ร่อง ทำให้สายอากาศมีมิติประมาณ 52 cm \times 50 cm ซึ่งเป็นขนาดที่ไม่เล็กหรือใหญ่จนเกินไปนักสำหรับสายอากาศค้นแบบ

การสังเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

สำหรับการสังเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนี้ จะเลือกใช้แบบการกระจายของสัญญาณที่ป้อนแบบคงตัว (Uniform Amplitude Excitation; $a_1 : a_2 : \dots : a_n = 1$) ทั้งในแวลวลำดับของท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลัก และแถวลำดับของท่อนำคลื่นสาขา เหตุผลที่เลือกใช้การสังเคราะห์แบบนี้เพราะสามารถให้ความกว้างของลำคลื่นหลักได้ใกล้เคียงกับการสังเคราะห์ด้วยวิธีอื่น ในขณะที่การสังเคราะห์แบบอื่นจะมีความยุ่งยากในการสังเคราะห์สูงกว่ามากจาก [21]

2.2 การออกแบบ

ในการออกแบบคำนวณหาระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อ (x_n) และความยาวร่อง ($2l_n$) ของแถวลำดับระนาบนั้นจะใช้ (3.48) (3.51) และ (4.4) โดยกระจาย (3.48) ออกเป็นชุดสมการลักษณะเดียวกับ (3.44) จำนวน $32 \times 16 = 512$ สมการ และกระจาย (3.51) ในลักษณะเดียวกับ (3.45) ได้ชุดสมการ $(32 \times 16) - 1 = 511$ สมการ สมการสุดท้ายคือเงื่อนไขอินพุตสมพงษ์ของ (4.4) 1 สมการ' ซึ่งจะต้องใช้ (3.43) ช่วยในการหาเซลฟ์อิมพีแดนซ์ จากนั้นทำการหามิวชวลอิมพีแดนซ์ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณมิวชวลคัปปลิง สมการที่ใช้ในการออกแบบทั้งหมดจะต้องแทนค่าตัวแปรต่างๆ ตามข้อกำหนดตั้งต้นในหัวข้อย่อย 3.1 และจาก 3 ชุดสมการที่ได้ซึ่งมีจำนวน 1024 สมการ ซึ่งเท่ากับตัวแปรที่ต้องการหาคือระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อ x_n โดยที่ $n = 1$ ถึง 1024 และความยาวที่เรโซ-แนนท์ของร่อง $2l_n$ โดยที่ $n = 1$ ถึง 1024 เช่นกัน

วิธีการที่ใช้ในการแก้สมการเชิงเส้นทั้ง 1024 สมการนี้จะเลือกใช้วิธีสตีปเปสต์ดิเจนต์ ซึ่งมีลำดับวิธีการเรียงแสดงในภาคผนวก ก

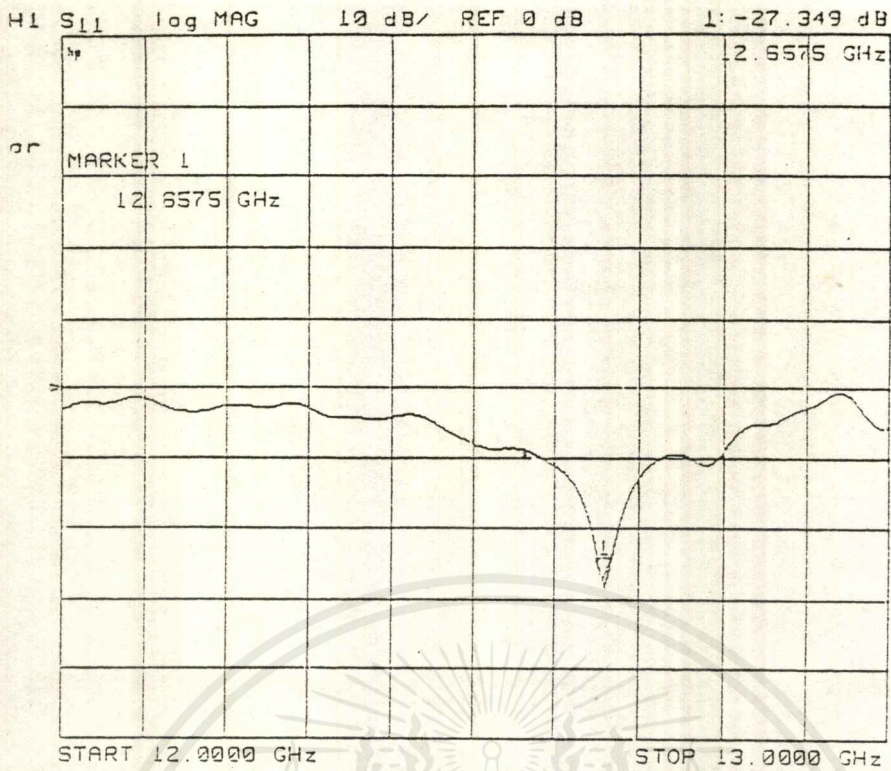
3.3 ระบบการป้อนสัญญาณ

จากทฤษฎีเกี่ยวกับระบบการป้อนสัญญาณในหัวข้อที่ 2.3 ทำให้ได้พารามิเตอร์ต่างๆของท่อฟีด ดังนี้

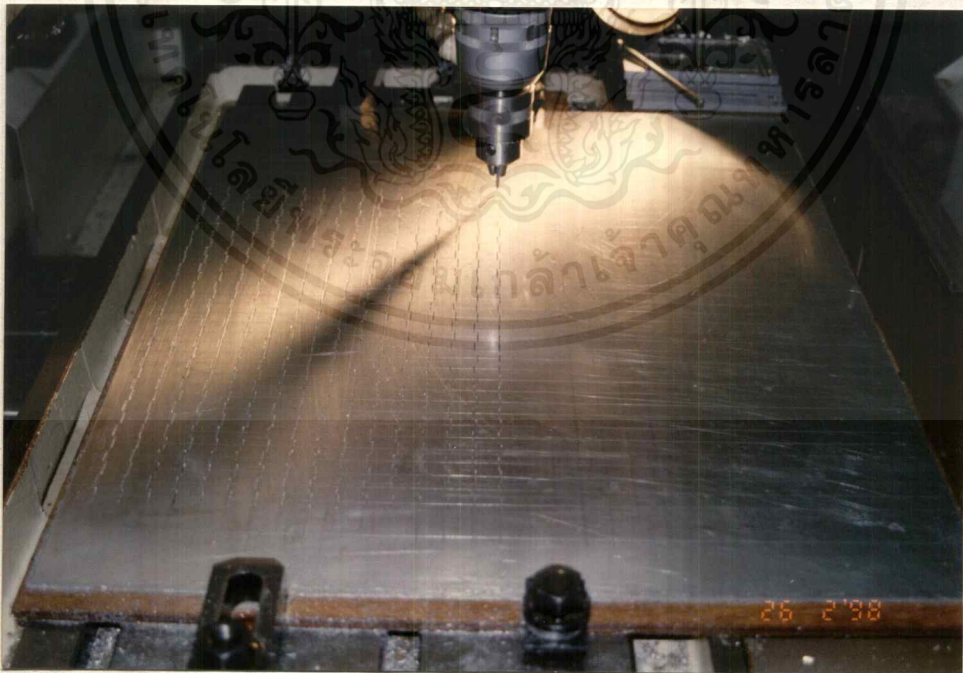
Notch length	h	10 มิลลิเมตร
ความกว้างของวินโดว์	w	7.3 มิลลิเมตร
ตำแหน่งของโพส	q	0.5 มิลลิเมตร
	p	13.5 มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของโพส	2r	1 มิลลิเมตร

3.4 วัสดุดูดซับคลื่น

เราได้ใช้กระดาษคาร์บอนเป็นวัสดุในการดูดซับคลื่นและได้ทำการทดสอบหาคุณสมบัติการดูดซับคลื่นของวัสดุดูดซับคลื่นที่ขนาดท่อ 14 มิลลิเมตร ความถี่ 12.6575 GHz โดยวางวัสดุดูดซับคลื่นห่างจากปากท่อที่ทำทำการป้อนสัญญาณเป็นระยะทาง 25.5 มิลลิเมตร พบว่าสามารถลดขนาดของการสะท้อนกลับได้ถึง -27.349 dB ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ค่าขนาดของการลดทอนที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 3.1 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคลื่นของวัสดุดูดซับคลื่น



รูปที่ 3.2 แสดงการสร้างสายอากาศส่วนที่เป็นร่องในการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

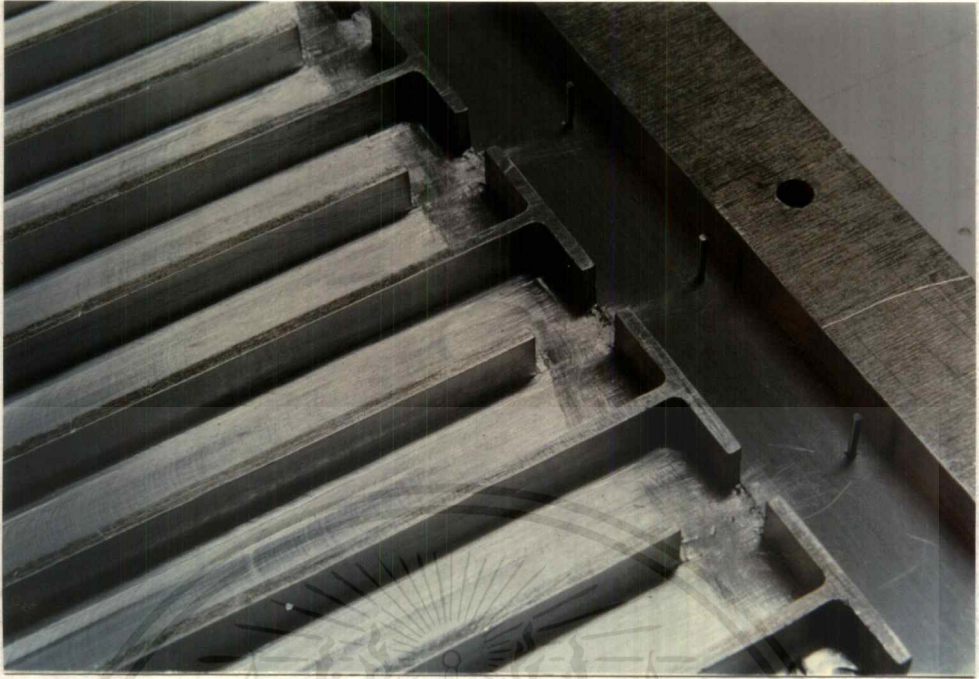


รูปที่ 3.3 แสดงสายอากาศส่วนที่เป็นท่อนำคลื่นหลักและท่อนำคลื่นสาขา

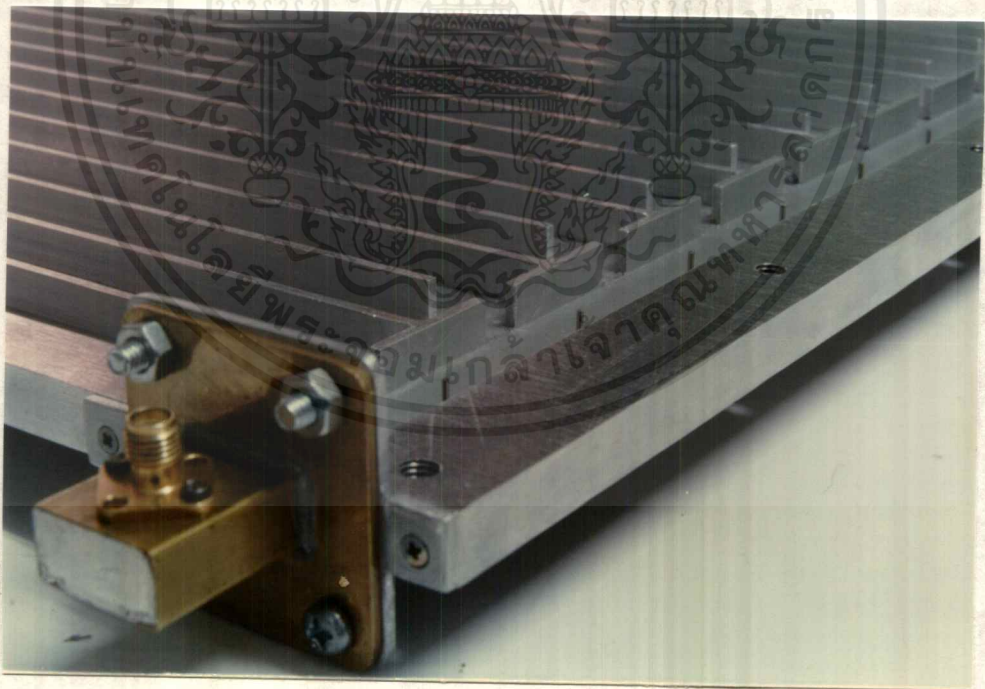


รูปที่ 3.4 แสดงการใส่วัสดุดูดซับคลื่นในท่อนำคลื่นสาขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงตำแหน่งของโพล



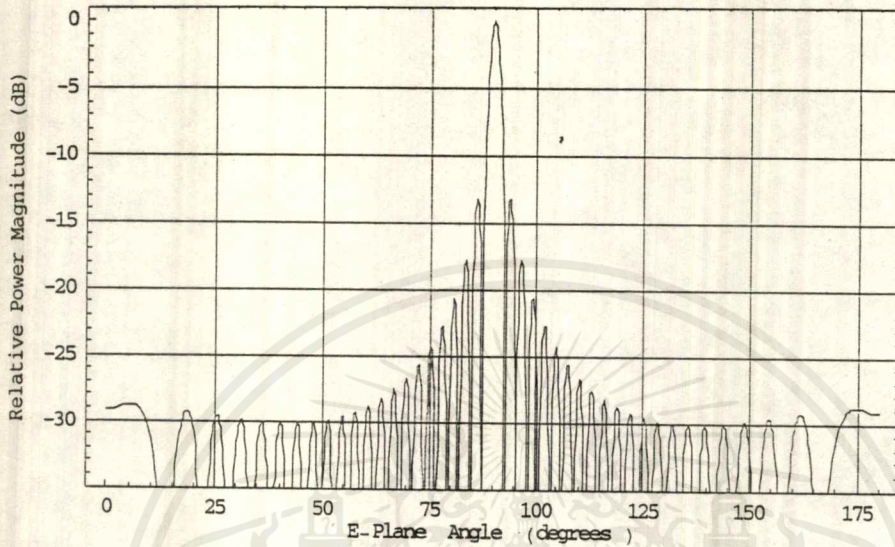
รูปที่ 3.6 แสดงวิน โคว์ที่ใช้ในการป้อนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

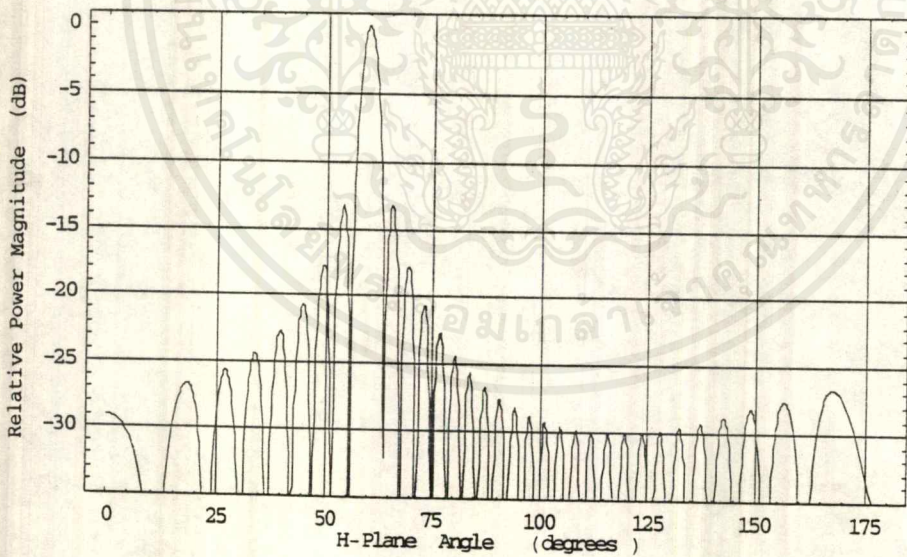
ผลการทดลอง

4.1 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการออกแบบตามทฤษฎี

จากที่ได้ทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับระนาบแบบร่องที่มีลำคลื่นเฉียงขนาด 32X32 ร่องแล้วทำการพล็อตรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็กได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก

4.2 ตำแหน่งและขนาดของร่อง

จากการที่ได้ทำการคำนวณหาระยะห่างของร่องจากกึ่งกลางท่อและความยาวร่องโดยคิดผลของมิวซลคัปปลิงตามโปรแกรมในภาคผนวก ก จะได้ค่าของระยะห่างจากกึ่งกลางท่อและค่าความยาวร่องตามตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 1 และ 32

สาขาที่1(m,n)	สาขาที่32(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,1	32,32	0.6916	11.9499
2,1	31,32	-1.1592	11.8989
3,1	30,32	0.3491	11.7785
4,1	29,32	-1.0435	11.9027
5,1	28,32	1.0856	11.9128
6,1	27,32	-1.1085	11.9150
7,1	26,32	0.7143	11.8325
8,1	25,32	-0.5224	11.7931
9,1	24,32	0.4969	11.7958
10,1	23,32	-0.5506	11.8165
11,1	22,32	0.6799	11.8513
12,1	21,32	-0.3426	11.8041
13,1	20,32	0.2003	11.7993
14,1	19,32	-0.0339	11.7752
15,1	18,32	0.0662	11.7828
16,1	17,32	-0.0247	12.0127
17,1	16,32	0.4206	11.8983
18,1	15,32	-0.8323	11.9151
19,1	14,32	0.7624	11.9132
20,1	13,32	-1.0231	11.9267
21,1	12,32	1.0171	11.9265
22,1	11,32	-1.0684	11.9300
23,1	10,32	1.0141	11.9264
24,1	9,32	-0.9986	11.9255
25,1	8,32	0.995	11.9250
26,1	7,32	-0.9861	11.9243
27,1	6,32	1.0737	11.9301
28,1	5,32	-0.9700	11.9233
29,1	4,32	0.9978	11.9249
30,1	3,32	-0.9388	11.9216
31,1	2,32	0.9452	11.9217
32,1	1,32	-1.0880	11.9312

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 2 และ 31

สาขาที่2(m,n)	สาขาที่31(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,2	32,31	1.0701	11.9285
2,2	31,31	-0.8306	11.9149
3,2	30,31	1.1009	11.9311
4,2	29,31	-0.9867	11.9233
5,2	28,31	0.9985	11.9240
6,2	27,31	-0.9703	11.9224
7,2	26,31	0.9812	11.9229
8,2	25,31	-0.9896	11.9232
9,2	24,31	0.9841	11.9229
10,2	23,31	-0.9992	11.9240
11,2	22,31	0.9713	11.9226
12,2	21,31	-1.0203	11.9253
13,2	20,31	1.0866	11.9298
14,2	19,31	-1.1009	11.9306
15,2	18,31	1.0844	11.9288
16,2	17,31	-1.5615	11.9700
17,2	16,31	0.6741	11.9183
18,2	15,31	-0.2379	11.9565
19,2	14,31	0.3198	11.9909
20,2	13,31	-0.3271	11.9712
21,2	12,31	0.3844	11.9619
22,2	11,31	-0.3586	11.9705
23,2	10,31	0.5516	11.9469
24,2	9,31	-0.6227	11.9409
25,2	8,31	0.5983	11.9423
26,2	7,31	-0.5125	11.9511
27,2	6,31	0.3524	11.9798
28,2	5,31	-0.4882	11.9577
29,2	4,31	0.4670	11.9618
30,2	3,31	-0.5081	11.9820
31,2	2,31	0.5104	11.9449
32,2	1,31	-0.8571	11.9200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 3 และ 30

สาขาที่3(m,n)	สาขาที่30(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,3	32,30	1.4520	11.9602
2,3	31,30	-1.1771	11.9364
3,3	30,30	1.0070	11.9251
4,3	29,30	-1.0656	11.9290
5,3	28,30	0.9999	11.9246
6,3	27,30	-1.0400	11.9274
7,3	26,30	0.9813	11.9236
8,3	25,30	-0.9575	11.9221
9,3	24,30	0.9779	11.9233
10,3	23,30	-0.9954	11.9245
11,3	22,30	1.0704	11.9295
12,3	21,30	-0.9995	11.9246
13,3	20,30	0.9849	11.9237
14,3	19,30	-0.9796	11.9236
15,3	18,30	0.8908	11.9184
16,3	17,30	-1.1106	11.9321
17,3	16,30	1.0713	11.9287
18,3	15,30	-0.8378	11.9158
19,3	14,30	1.0546	11.9278
20,3	13,30	-1.0085	11.9248
21,3	12,30	0.9904	11.9239
22,3	11,30	-0.9561	11.9219
23,3	10,30	0.9988	11.9242
24,3	9,30	-1.0331	11.9264
25,3	8,30	1.0143	11.9252
26,3	7,30	-0.9798	11.9230
27,3	6,30	0.9343	11.9207
28,3	5,30	-0.9902	11.9238
29,3	4,30	1.1183	11.9323
30,3	3,30	-1.0713	11.9286
31,3	2,30	1.0709	11.9283
32,1	1,30	-1.4646	11.9598

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนาคลิ้นสาขาที่ 4 และ 29

สาขาที่4(m,n)	สาขาที่29(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,4	32,29	0.9739	11.9227
2,4	31,29	-0.5791	11.9291
3,4	30,29	0.5572	11.9377
4,4	29,29	-0.4859	11.9476
5,4	28,29	0.6254	11.9340
6,4	27,29	-0.6549	11.9330
7,4	26,29	0.6254	11.9347
8,4	25,29	-0.6672	11.9339
9,4	24,29	0.6962	11.9321
10,4	23,29	-0.7423	11.9306
11,4	22,29	0.7030	11.9312
12,4	21,29	-0.6299	11.9342
13,4	20,29	0.5089	11.9466
14,4	19,29	-0.5835	11.9368
15,4	18,29	0.5985	11.9288
16,4	17,29	-0.9921	11.9234
17,4	16,29	1.4451	11.9586
18,4	15,29	-1.1043	11.9307
19,4	14,29	1.0183	11.9255
20,4	13,29	-1.0968	11.9309
21,4	12,29	0.9913	11.9240
22,4	11,29	-0.9837	11.9235
23,4	10,29	1.0068	11.9250
24,4	9,29	-1.0149	11.9254
25,4	8,29	0.9996	11.9245
26,4	7,29	-0.9733	11.9229
27,4	6,29	0.9902	11.9239
28,4	5,29	-0.9918	11.9241
29,4	4,29	1.0182	11.9256
30,4	3,29	-1.0286	11.9263
31,4	2,29	0.8682	11.9173
32,4	1,29	-1.0838	11.9298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 5 และ 28

สาขาที่5(m,n)	สาขาที่28(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,5	32,28	1.0838	11.9298
2,5	31,28	-0.8682	11.9173
3,5	30,28	1.0286	11.9263
4,5	29,28	-1.0182	11.9256
5,5	28,28	0.9918	11.9241
6,5	27,28	-0.9902	11.9239
7,5	26,28	0.9733	11.9229
8,5	25,28	-0.9996	11.9245
9,5	24,28	1.0149	11.9254
10,5	23,28	-1.0068	11.9250
12,5	22,28	0.9837	11.9235
13,5	21,28	-0.9913	11.9240
13,5	20,28	1.0968	11.9309
14,5	19,28	-1.0183	11.9255
15,5	18,28	1.1043	11.9307
16,5	17,28	-1.4451	11.9586
17,5	16,28	0.9921	11.9234
18,5	15,28	-0.5985	11.9288
19,5	14,28	0.5835	11.9368
21,5	13,28	-0.5089	11.9466
21,5	12,28	0.6229	11.9342
22,5	11,28	-0.7030	11.9312
23,5	10,28	0.7423	11.9306
24,5	9,28	-0.6962	11.9321
25,5	8,28	0.6672	11.9339
26,5	7,28	-0.6754	11.9347
27,5	6,28	0.6549	11.9330
28,5	5,28	-0.6254	11.9340
29,5	4,28	0.4859	11.9476
30,5	3,28	-0.5572	11.9377
31,5	2,28	0.5791	11.9291
32,5	1,28	-0.9378	11.9227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 6 และ 27

สาขาที่6(m,n)	สาขาที่27(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง x _{mn} (mm)	ความยาวร่อง 2l _n (mm)
1,6	32,27	1.4646	11.9599
2,6	31,27	-1.0709	11.9283
3,6	30,27	1.0713	11.9286
4,6	29,27	-1.1183	11.9323
5,6	28,27	0.9902	11.9238
6,6	27,27	-0.9343	11.9207
7,6	26,27	0.9798	11.9230
8,6	25,27	-1.0143	11.9252
9,6	24,27	1.0331	11.9264
10,6	23,27	-0.9988	11.9242
11,6	22,27	0.9561	11.9219
12,6	21,27	-0.9904	11.9239
13,6	20,27	1.0085	11.9248
14,6	19,27	-1.0546	11.9278
15,6	18,27	0.8378	11.9158
16,6	17,27	-1.0713	11.9287
17,6	16,27	1.1106	11.9321
18,6	15,27	-0.8908	11.9184
19,6	14,27	0.9796	11.9236
20,6	13,27	-0.9849	11.9237
21,6	12,27	0.9995	11.9246
22,6	11,27	-1.0704	11.9295
23,6	10,27	0.9954	11.9245
24,6	9,27	-0.9779	11.9233
25,6	8,27	0.9575	11.9221
26,6	7,27	-0.9813	11.9236
27,6	6,27	1.0401	11.9274
28,6	5,27	-0.9999	11.9246
29,6	4,27	1.0656	11.9290
30,6	3,27	-1.0070	11.9251
31,6	2,27	1.1771	11.9364
32,6	1,27	-1.4520	11.9602

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อน้ำคลื่นสาขาที่ 7 และ 26

สาขาที่7(m,n)	สาขาที่26(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmm(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,7	32,26	0.8571	11.9200
2,7	31,26	-0.5105	11.9449
3,7	30,26	0.5082	11.9820
4,7	29,26	-0.4670	11.9618
5,7	28,26	0.4882	11.9527
6,7	27,26	-0.3524	11.9798
7,7	26,26	0.5125	11.9511
8,7	25,26	-0.5983	11.9423
9,7	24,26	0.6227	11.9409
10,7	23,26	-0.5516	11.9462
11,7	22,26	0.3585	11.9705
12,7	21,26	-0.3844	11.9619
13,7	20,26	0.3271	11.9712
14,7	19,26	-0.3198	11.9909
15,7	18,26	0.2379	11.9565
16,7	17,26	-0.6740	11.9183
17,7	16,26	1.5615	11.9700
18,7	15,26	-1.0843	11.9288
19,7	14,26	1.1009	11.9306
20,7	13,26	-1.0866	11.9298
21,7	12,26	1.0203	11.9253
22,7	11,26	-0.9713	11.9226
23,7	10,26	0.9992	11.9240
24,7	9,26	-0.9841	11.9229
25,7	8,26	0.9896	11.9232
26,7	7,26	-0.9812	11.9229
27,7	6,26	0.9703	11.9224
28,7	5,26	-0.9985	11.9240
29,7	4,26	0.9867	11.9233
30,7	3,26	-1.1009	11.9311
31,7	2,26	0.8306	11.9149
32,7	1,26	-1.0701	11.9285

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 8 และ 25

สาขาที่8(m,m)	สาขาที่25(m,m)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,8	32,25	1.0880	11.9312
2,8	31,25	-0.9452	11.9217
3,8	30,25	0.9388	11.9216
4,8	29,25	-0.9978	11.9249
5,8	28,25	0.9699	11.9233
6,8	27,25	-1.0734	11.9301
7,8	26,25	0.9846	11.9242
8,8	25,25	-0.9901	11.9247
9,8	24,25	0.9858	11.9244
10,8	23,25	-0.9977	11.9251
11,8	22,25	1.0499	11.9285
12,8	21,25	-0.9976	11.9250
13,8	20,25	0.9996	11.9249
14,8	19,25	-0.7393	11.9119
15,8	18,25	0.8046	11.9134
16,8	17,25	-0.4385	11.8984
17,8	16,25	0.0205	11.9892
18,8	15,25	-0.03218	11.7805
19,8	14,25	0.0195	11.7607
20,8	13,25	-0.1253	11.7936
21,8	12,25	0.2214	11.7986
22,8	11,25	-0.4485	11.8484
23,8	10,25	0.3681	11.8130
24,8	9,25	-0.3351	11.8052
25,8	8,25	0.3577	11.8047
26,8	7,25	-0.4970	11.8281
27,8	6,25	0.7879	11.8865
28,8	5,25	-0.7877	11.8707
29,8	4,25	0.7693	11.8706
30,8	3,25	-0.2611	11.7777
31,8	2,25	0.8891	11.8693
32,8	1,25	0.5399	11.9641

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อน้ำคูลิ่งสาขาที่ 9 และ 24

สาขาที่1(m,n)	สาขาที่32(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmm(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,9	32,24	0.6916	11.9499
2,9	31,24	-1.1592	11.8989
3,9	30,24	0.3491	11.7785
4,9	29,244	-1.0435	11.9027
5,9	28,24	1.0856	11.9128
6,9	27,24	-1.1085	11.9150
7,9	26,24	0.7143	11.8325
8,9	25,24	-0.5224	11.7931
9,9	24,24	0.4969	11.7958
10,9	23,24	-0.5506	11.8165
11,9	22,24	0.6799	11.8513
12,9	21,24	-0.3426	11.8041
13,9	20,24	0.2003	11.7993
14,9	19,24	-0.0339	11.7752
15,9	18,24	0.0662	11.7828
16,9	17,24	-0.0247	12.0127
17,9	16,24	0.4206	11.8983
18,9	15,24	-0.8323	11.9151
19,9	14,24	0.7624	11.9132
20,9	13,24	-1.0231	11.9267
21,9	12,24	1.0171	11.9265
22,9	11,24	-1.0684	11.9300
23,9	10,24	1.0141	11.9264
24,9	9,24	-0.9986	11.9255
25,9	8,24	0.995	11.9250
26,9	7,24	-0.9861	11.9243
27,9	6,24	1.0737	11.9301
28,9	5,24	-0.9700	11.9233
29,9	4,24	0.9978	11.9249
30,9	3,24	-0.9388	11.9216
31,9	2,24	0.9452	11.9217
32,9	1,24	-1.0880	11.9312

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 10 และ 23

สาขาที่2(m,n)	สาขาที่31(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmm(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,10	32,23	1.0701	11.9285
2,10	31,23	-0.8306	11.9149
3,10	30,23	1.1009	11.9311
4,10	29,23	-0.9867	11.9233
5,10	28,23	0.9985	11.9240
6,10	27,23	-0.9703	11.9224
7,10	26,23	0.9812	11.9229
8,10	25,23	-0.9896	11.9232
9,10	24,23	0.9841	11.9229
10,10	23,23	-0.9992	11.9240
11,10	22,23	0.9713	11.9226
12,110	21,23	-1.0203	11.9253
13,10	20,23	1.0866	11.9298
14,10	19,23	-1.1009	11.9306
15,10	18,23	1.0844	11.9288
16,10	17,23	-1.5615	11.9700
17,10	16,23	0.6741	11.9183
18,10	15,23	-0.2379	11.9565
19,10	14,23	0.3198	11.9909
20,10	13,23	-0.3271	11.9712
21,10	12,23	0.3844	11.9619
22,10	11,23	-0.3586	11.9705
23,10	10,23	0.5516	11.9469
24,10	9,23	-0.6227	11.9409
25,10	8,23	0.5983	11.9423
26,10	7,23	-0.5125	11.9511
27,10	6,23	0.3524	11.9798
28,10	5,23	-0.4882	11.9577
29,10	4,23	0.4670	11.9618
30,10	3,23	-0.5081	11.9820
31,10	2,23	0.5104	11.9449
32,10	1,23	-0.8571	11.9200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 11 และ 22

สาขาที่3(m,n)	สาขาที่30(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,11	32,22	1.4520	11.9602
2,11	31,22	-1.1771	11.9364
3,11	30,22	1.0070	11.9251
4,11	29,22	-1.0656	11.9290
5,11	28,22	0.9999	11.9246
6,11	27,22	-1.0400	11.9274
7,11	26,22	0.9813	11.9236
8,11	25,22	-0.9575	11.9221
9,11	24,22	0.9779	11.9233
10,11	23,22	-0.9954	11.9245
11,11	22,22	1.0704	11.9295
12,11	21,22	-0.9995	11.9246
13,11	20,22	0.9849	11.9237
14,11	19,22	-0.9796	11.9236
15,11	18,22	0.8908	11.9184
16,11	17,22	-1.1106	11.9321
17,11	16,22	1.0713	11.9287
18,11	15,22	-0.8378	11.9158
19,11	14,22	1.0546	11.9278
20,11	13,22	-1.0085	11.9248
21,11	12,22	0.9904	11.9239
22,11	11,22	-0.9561	11.9219
23,11	10,22	0.9988	11.9242
24,1	9,22	-1.0331	11.9264
25,11	8,22	1.0143	11.9252
26,11	7,22	-0.9798	11.9230
27,11	6,22	0.9343	11.9207
28,11	5,22	-0.9902	11.9238
29,11	4,22	1.1183	11.9323
30,11	3,22	-1.0713	11.9286
31,11	2,22	1.0709	11.9283
32,11	1,22	-1.4646	11.9598

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อน้ำคลื่นสาขาที่ 12 และ 21

สาขาที่4(m,n)	สาขาที่29(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,12	32,21	0.9739	11.9227
2,12	31,21	-0.5791	11.9291
3,12	30,21	0.5572	11.9377
4,12	29,21	-0.4859	11.9476
5,12	28,21	0.6254	11.9340
6,12	27,21	-0.6549	11.9330
7,12	26,21	0.6254	11.9347
8,12	25,21	-0.6672	11.9339
9,12	24,21	0.6962	11.9321
10,12	23,21	-0.7423	11.9306
11,12	22,21	0.7030	11.9312
12,12	21,21	-0.6299	11.9342
13,12	20,21	0.5089	11.9466
14,12	19,21	-0.5835	11.9368
15,12	18,21	0.5985	11.9288
16,12	17,21	-0.9921	11.9234
17,12	16,21	1.4451	11.9586
18,12	15,21	-1.1043	11.9307
19,12	14,21	1.0183	11.9255
20,12	13,21	-1.0968	11.9309
21,12	12,21	0.9913	11.9240
22,12	11,21	-0.9837	11.9235
23,12	10,21	1.0068	11.9250
24,12	9,21	-1.0149	11.9254
25,12	8,21	0.9996	11.9245
26,12	7,21	-0.9733	11.9229
27,12	6,21	0.9902	11.9239
28,12	5,21	-0.9918	11.9241
29,12	4,21	1.0182	11.9256
30,12	3,21	-1.0286	11.9263
31,12	2,21	0.8682	11.9173
32,12	1,21	-1.0838	11.9298

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 13 และ 20

สาขาที่5(m,n)	สาขาที่28(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmm(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,13	32,20	1.0838	11.9298
2,13	31,20	-0.8682	11.9173
3,13	30,20	1.0286	11.9263
4,13	29,20	-1.0182	11.9256
5,13	28,20	0.9918	11.9241
6,13	27,20	-0.9902	11.9239
7,13	26,20	0.9733	11.9229
8,13	25,20	-0.9996	11.9245
9,13	24,20	1.0149	11.9254
10,13	23,20	-1.0068	11.9250
12,13	22,20	0.9837	11.9235
13,13	21,20	-0.9913	11.9240
13,13	20,20	1.0968	11.9309
14,13	19,20	-1.0183	11.9255
15,13	18,20	1.1043	11.9307
16,13	17,20	-1.4451	11.9586
17,13	16,20	0.9921	11.9234
18,13	15,20	-0.5985	11.9288
19,13	14,20	0.5835	11.9368
21,13	13,20	-0.5089	11.9466
21,13	12,20	0.6229	11.9342
22,13	11,20	-0.7030	11.9312
23,13	10,20	0.7423	11.9306
24,13	9,20	-0.6962	11.9321
25,13	8,20	0.6672	11.9339
26,13	7,20	-0.6754	11.9347
27,13	6,20	0.6549	11.9330
28,13	5,20	-0.6254	11.9340
29,13	4,20	0.4859	11.9476
30,13	3,20	-0.5572	11.9377
31,13	2,20	0.5791	11.9291
32,13	1,20	-0.9378	11.9227

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 14 และ 19

สาขาที่6(m,n)	สาขาที่27(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,14	32,19	1.4646	11.9599
2,14	31,19	-1.0709	11.9283
3,14	30,19	1.0713	11.9286
4,14	29,19	-1.1183	11.9323
5,14	28,19	0.9902	11.9238
6,14	27,19	-0.9343	11.9207
7,14	26,19	0.9798	11.9230
8,14	25,19	-1.0143	11.9252
9,14	24,19	1.0331	11.9264
10,14	23,19	-0.9988	11.9242
11,14	22,19	0.9561	11.9219
12,14	21,19	-0.9904	11.9239
13,14	20,19	1.0085	11.9248
14,14	19,19	-1.0546	11.9278
15,14	18,19	0.8378	11.9158
16,14	17,19	-1.0713	11.9287
17,14	16,19	1.1106	11.9321
18,14	15,19	-0.8908	11.9184
19,14	14,19	0.9796	11.9236
20,14	13,19	-0.9849	11.9237
21,14	12,19	0.9995	11.9246
22,14	11,19	-1.0704	11.9295
23,14	10,19	0.9954	11.9245
24,14	9,19	-0.9779	11.9233
25,14	8,19	0.9575	11.9221
26,14	7,19	-0.9813	11.9236
27,14	6,19	1.0401	11.9274
28,14	5,19	-0.9999	11.9246
29,14	4,19	1.0656	11.9290
30,14	3,19	-1.0070	11.9251
31,14	2,19	1.1771	11.9364
32,14	1,19	-1.4520	11.9602

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อน้ำคลื่นสาขาที่ 15 และ 18

สาขาที่7(m,n)	สาขาที่26(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmm(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,15	32,18	0.8571	11.9200
2,15	31,18	-0.5105	11.9449
3,15	30,18	0.5082	11.9820
4,15	29,18	-0.4670	11.9618
5,15	28,18	0.4882	11.9527
6,15	27,18	-0.3524	11.9798
7,15	26,18	0.5125	11.9511
8,15	25,18	-0.5983	11.9423
9,15	24,18	0.6227	11.9409
10,15	23,18	-0.5516	11.9462
11,15	22,18	0.3585	11.9705
12,15	21,18	-0.3844	11.9619
13,15	20,18	0.3271	11.9712
14,15	19,18	-0.3198	11.9909
15,15	18,18	0.2379	11.9565
16,15	17,18	-0.6740	11.9183
17,15	16,18	1.5615	11.9700
18,15	15,18	-1.0843	11.9288
19,15	14,18	1.1009	11.9306
20,15	13,18	-1.0866	11.9298
21,15	12,18	1.0203	11.9253
22,15	11,18	-0.9713	11.9226
23,15	10,18	0.9992	11.9240
24,15	9,18	-0.9841	11.9229
25,15	8,18	0.9896	11.9232
26,15	7,18	-0.9812	11.9229
27,15	6,18	0.9703	11.9224
28,15	5,18	-0.9985	11.9240
29,15	4,18	0.9867	11.9233
30,15	3,18	-1.1009	11.9311
31,15	2,18	0.8306	11.9149
32,15	1,18	-1.0701	11.9285

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

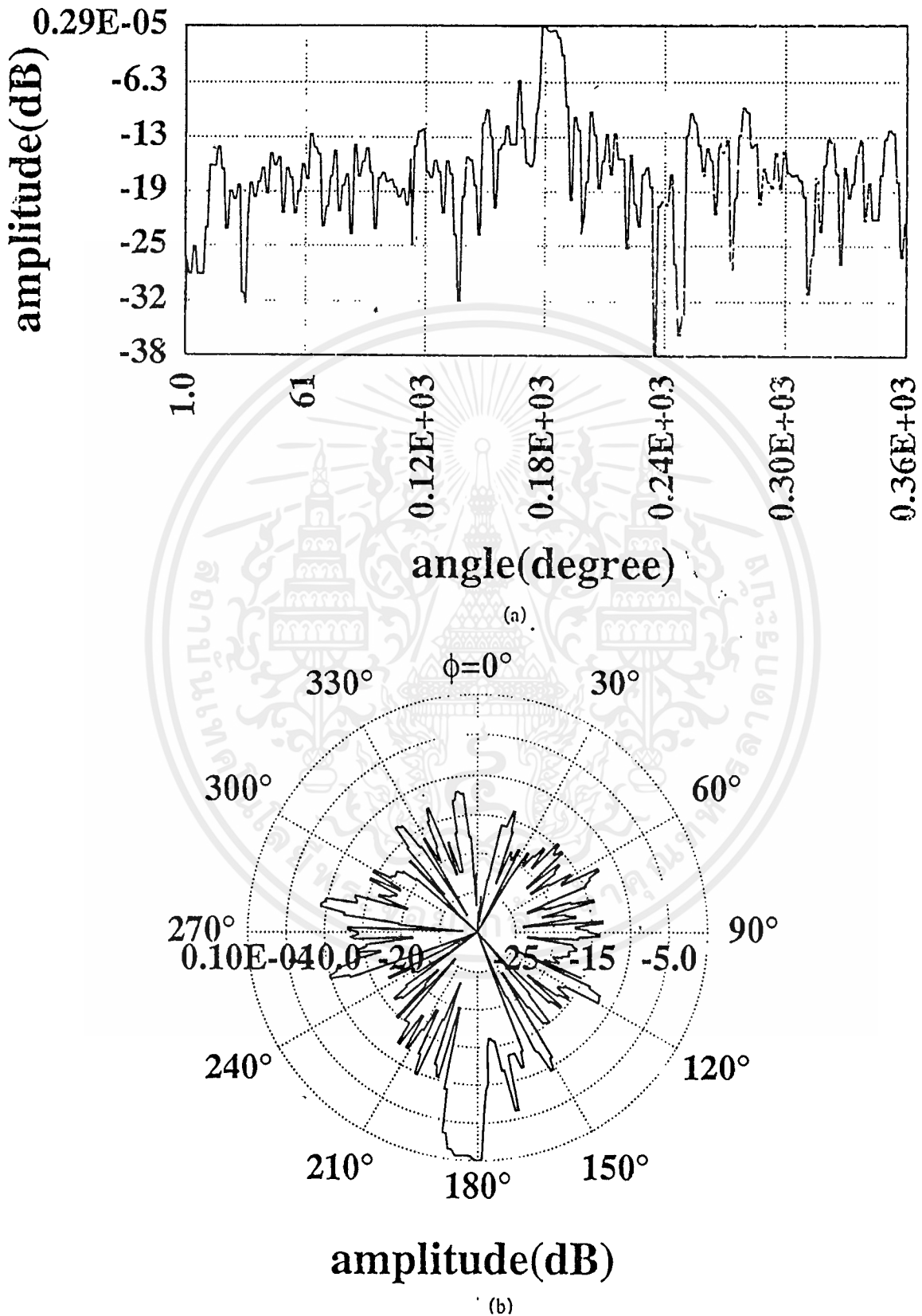
แสดงตำแหน่งและขนาดของร่องในท่อนำคลื่นสาขาที่ 16 และ 17

สาขาที่ 8(m,n)	สาขาที่ 25(m,n)	ระยะห่างจากกึ่งกลาง xmn(mm)	ความยาวร่อง 2ln(mm)
1,16	32,17	1.0880	11.9312
2,16	31,17	-0.9452	11.9217
3,16	30,17	0.9388	11.9216
4,16	29,17	-0.9978	11.9249
5,16	28,17	0.9699	11.9233
6,16	27,17	-1.0734	11.9301
7,16	26,17	0.9846	11.9242
8,16	25,17	-0.9901	11.9247
9,16	24,17	0.9858	11.9244
10,16	23,17	-0.9977	11.9251
11,16	22,17	1.0499	11.9285
12,16	21,17	-0.9976	11.9250
13,16	20,17	0.9996	11.9249
14,16	19,17	-0.7393	11.9119
15,16	18,17	0.8046	11.9134
16,16	17,17	-0.4385	11.8984
17,16	16,17	0.0205	11.9892
18,16	15,17	-0.03218	11.7805
19,16	14,17	0.0195	11.7607
20,16	13,17	-0.1253	11.7936
21,16	12,17	0.2214	11.7986
22,16	11,17	-0.4485	11.8484
23,16	10,17	0.3681	11.8130
24,16	9,17	-0.3351	11.8052
25,16	8,17	0.3577	11.8047
26,16	7,17	-0.4970	11.8281
27,16	6,17	0.7879	11.8865
28,16	5,17	-0.7877	11.8707
29,16	4,17	0.7693	11.8706
30,16	3,17	-0.2611	11.7777
31,16	2,17	0.8891	11.8693
32,16	1,17	0.5399	11.9641

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

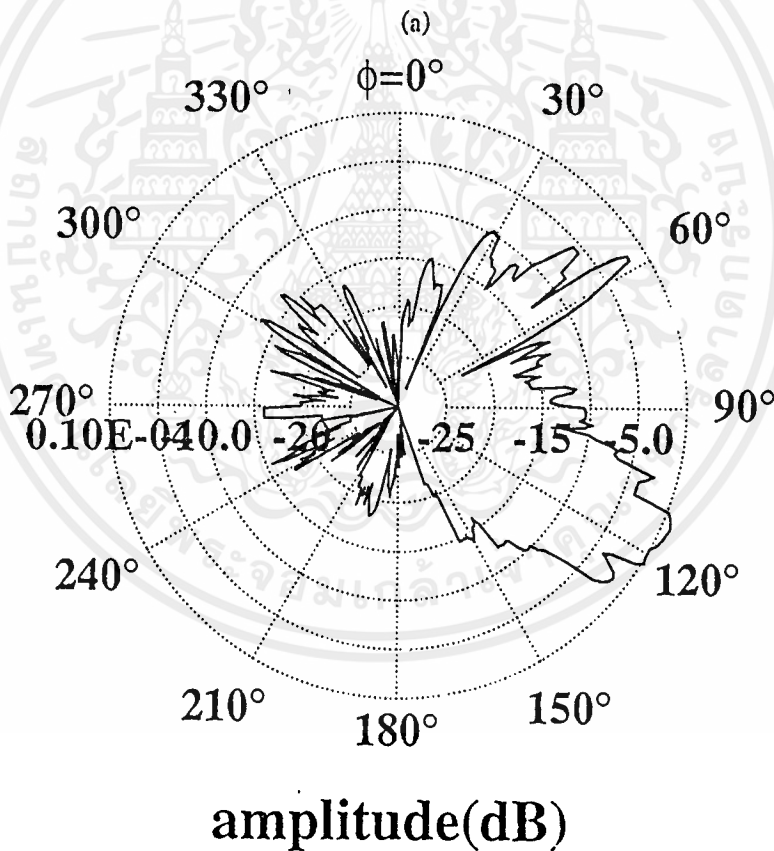
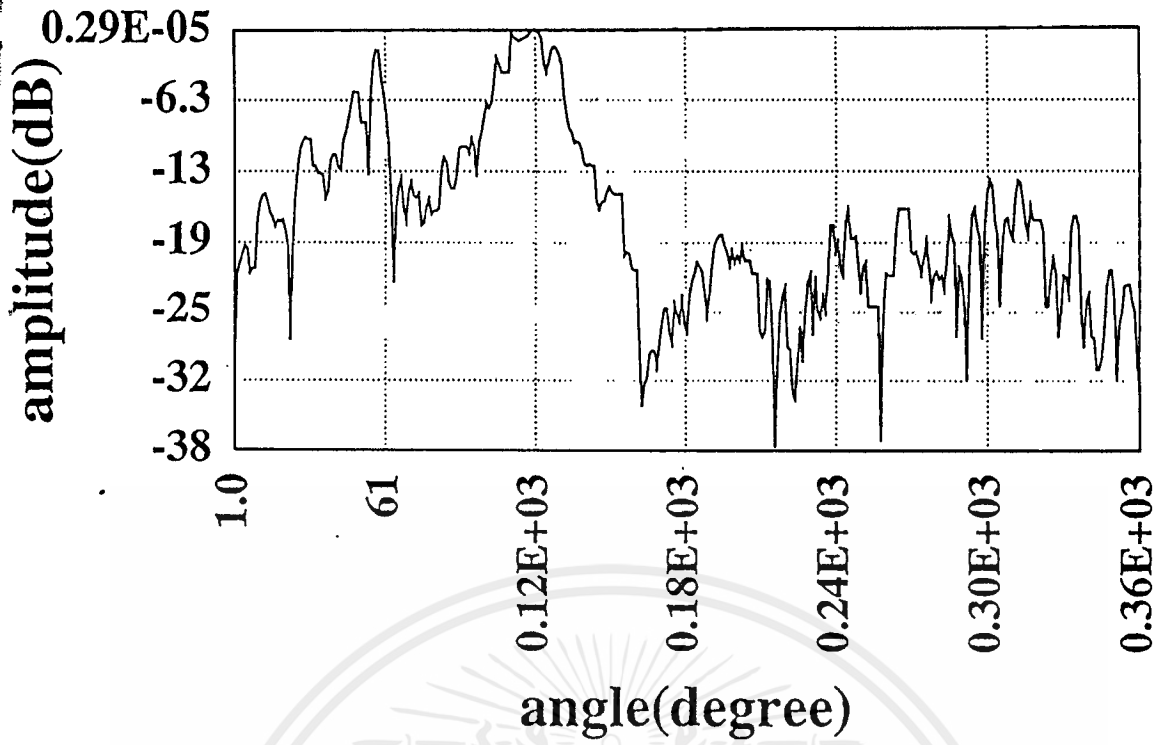
4.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ทำการสร้าง

จากการที่เราได้ทำการออกแบบและทำการสร้างสายอากาศตามที่ได้ออกแบบ แล้วทำการทดสอบหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ พบว่าได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษา (a) rectangular plot (b) polar plot กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



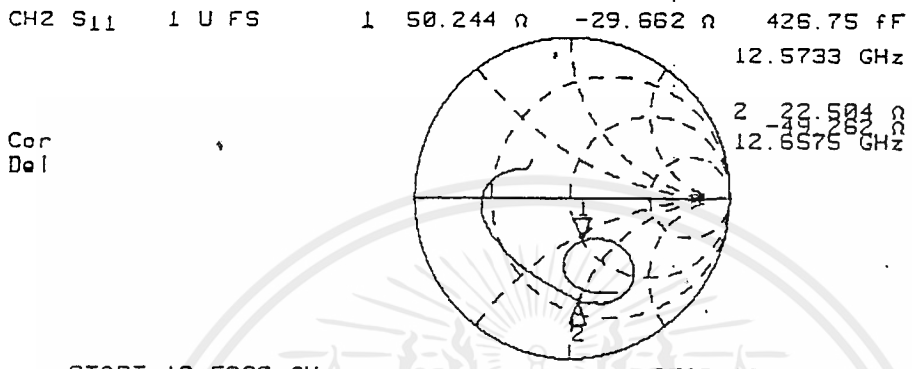
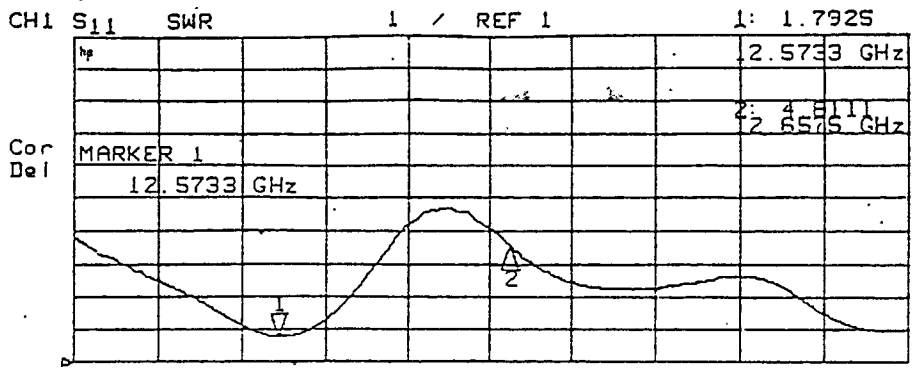
(b)

รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก

(a) rectangular plot (b) polar plot

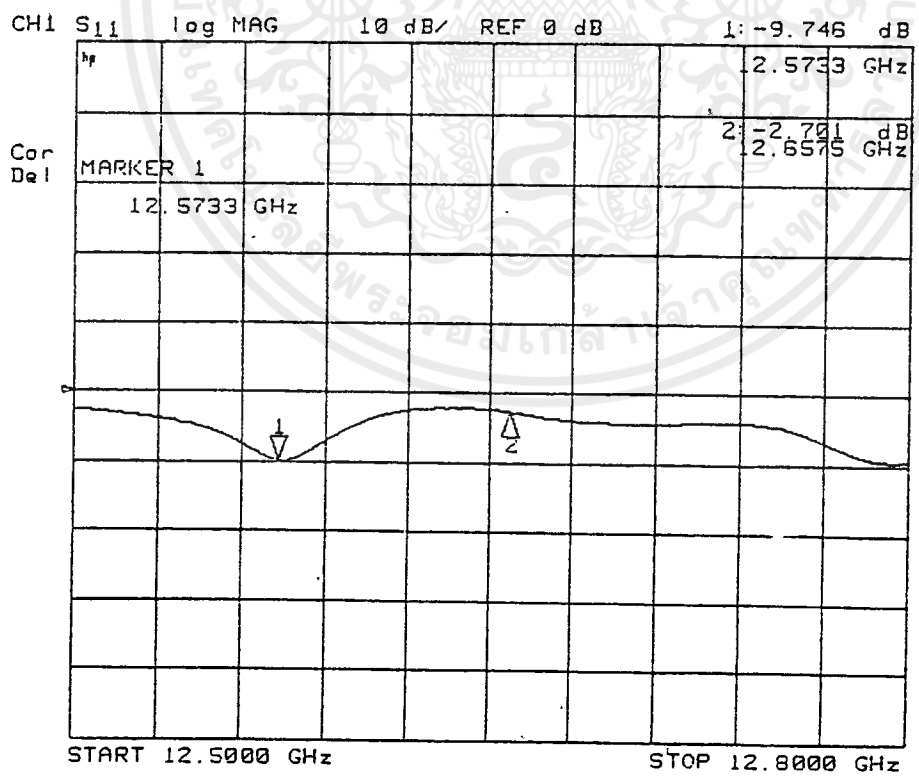
นอกจากนั้นได้ทำการทดสอบหา SWR , อิมพีแดนซ์ และค่า log magnitude ของ return loss ของสายอากาศพบว่าค่าที่ได้แสดงตามรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



START 12.5000 GHz STOP 12.8000 GHz

รูปที่ 4.5 แสดงค่า SWR และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



รูปที่ 4.6 แสดงค่า log magnetude ของ return loss ของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ได้ พบว่าสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบและทำการสร้างให้ผลตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ คือ สายอากาศมีค่าคลื่นหลักเชิงทำมุม 30 องศา กับแนวตั้งฉากของระนาบของสายอากาศ ดังจะเห็นได้ว่า

- ในระนาบสนามไฟฟ้าค่าคลื่นหลักจะทำมุม 90 องศา กับแนวตั้งฉากกับระนาบของสายอากาศ
- ในระนาบสนามแม่เหล็กค่าคลื่นหลักจะทำมุม 30 องศา กับแนวตั้งฉากของระนาบสนามไฟฟ้า
- ค่าทวิกำลัง 30 dB
- ค่าอิมพีแดนซ์ 22.504 โอห์ม
- ค่า SWR = 4.8111
- ค่า log magnitude ของ return loss ของสายอากาศ = -2.701 dB
- ค่า Band Width ที่ SWR <= 2 มีค่า 22 MHz

ซึ่งอาจมีการผิดพลาดขึ้นบ้างเล็กน้อย การวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในบทที่ 5



บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์

โครงการฉบับนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับระนาบแบบร่องบนผนังท่อ-นำคลื่นสี่เหลี่ยม ขนาด 32 ร่อง คูณ 32 ร่อง ที่ความถี่ 12.6575 GHz โดยเริ่มจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของร่องเดี่ยวที่เจาะบนแผ่นตัวนำขนาดอนันต์ ในลักษณะเดียวกับการวิเคราะห์โคโพล จากนั้นจะได้รับความสัมพันธ์ของ Booker ภายใต้พื้นฐานหลักการของ Babinet ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง คุณสมบัติของร่องกับคุณสมบัติของโคโพลอันจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการคำนวณค่ามิวชวลแอดมิตแดนซ์ของร่อง ต่อจากนั้นก็แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่ส่งผ่านคลื่นโหมด TE_{10} ซึ่งท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมนี้เป็นทั้งตัวป้อนสัญญาณให้แก่ร่องและเป็นโครงสร้างพื้นฐานของตัวสายอากาศแบบร่องเองด้วย แล้วก็แสดงการวิเคราะห์ร่องตามยาวที่เจาะบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมภายใต้แนวคิดของค่าเอกทิฟแอดมิตแดนซ์ซึ่งก็คือ นำผลของค่ามิวชวลคัปปลิง (ซึ่งคำนวณจากมิวชวลแอดมิตแดนซ์) เข้าร่วมในการคำนวณด้วย และก็จะได้สมการหลักที่ใช้ในการออกแบบแถวลำดับระนาบแบบไม่เรโซแนนท์ของร่องที่แพร่กระจายคลื่นบนผนังท่อนำคลื่นสาขาในการออกแบบได้กำหนดให้มีท่อนำคลื่น 32 สาขา แต่ละสาขามี 32 ร่อง ลำดับถัดจากนั้นแสดงการวิเคราะห์ระบบป้อนสัญญาณให้ท่อนำคลื่นสาขาด้วยระบบการป้อนสัญญาณชั้นเดียว

จากวิธีการออกแบบที่วิเคราะห์ได้มา ก็จะนำมาใช้ออกแบบเพื่อคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของแต่ละร่องในแถวลำดับระนาบโดยกำหนดให้การกระจายของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละร่องเป็นแบบสม่ำเสมอ ซึ่งก็จะได้ผลดังตารางที่ 4.1-4.16 จากนั้นก็นำข้อมูลในตารางไปสร้างสายอากาศในการเจาะร่องเพื่อให้เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นนั้นจะเจาะได้ร่องที่มีปลายกลม แต่ขนาดของร่องที่คำนวณได้เป็นขนาดของร่องที่มีปลายสี่เหลี่ยมตามข้อกำหนดดั้งเดิมในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงต้องชดเชยความยาวของร่องปลายกลมภายใต้สมมติฐานที่ให้ร่องทั้งสองแบบมีพื้นที่เท่ากัน

จากผลการทดสอบสายอากาศที่ได้พบว่าเป็นไปตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ แต่ว่ามีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นบ้างเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุอาจเกิดเนื่องมาจาก

1. ข้อจำกัดในการสร้างสายอากาศ

หลังจากที่ได้ผลการออกแบบสายอากาศ ในขั้นตอนถัดไปซึ่งมีความสำคัญไม่น้อยกว่าการคำนวณออกแบบ ก็คือการสร้างชิ้นงานเพราะถึงแม้ว่าการคำนวณจะทำให้ดีหรือละเอียดเพียงใด แต่ถ้าการสร้างชิ้นงานทำได้ไม่ดีแล้วการคำนวณที่ทำมาก็จะไม่มี ความหมายอะไรเลย ดังนั้นในปริญญาโทครั้งนี้จึงใช้เครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerically Control : CNC Milling Machine) ในการสร้างชิ้นงานทั้งหมดซึ่งเครื่องกัดนี้สามารถให้ความละเอียดได้ถึง $\pm 1 \mu\text{m}$ แต่ข้อจำกัดของความละเอียดจะไปสูญเสียที่การตั้งจุดศูนย์ (Zero Point) ของชิ้นงานเพื่อเป็นจุดอ้างอิงเพราะในทางปฏิบัติการตั้งจุดศูนย์ชิ้นงานจะต้องตั้งในระบบหัตถกิจ (Manual) อีกปัจจัยหนึ่งที่ลดความละเอียดในการสร้างคือ ขนาดของดอกสว่านที่ใช้ เนื่องจากในการกัดชิ้นงานนั้นตัวดอกสว่านเองก็จะต้องสึกหรือด้วยทำให้ขนาดของดอกสว่านค่อยๆเปลี่ยนไปเมื่อใช้งานไปนานๆ และถึงแม้ว่าจะสามารถเจาะร่องได้แม่นยำก็ตาม แต่ในการประกอบท่อนำคลื่นสาขาเข้ากับท่อนำคลื่นหลักนั้นก็ยังมี

โอกาสที่จะทำให้สูญเสียความละเอียดในการสร้างได้อีก การประกอบท่อนำคลื่นนั้นมียุหลายวิธีด้วยกันกล่าวคือ

1.1 การเชื่อมทางความร้อน (Welding) ซึ่งแบ่งเป็นการเชื่อมด้วยเลเซอร์และการเชื่อมด้วย ล้อ อิเล็กตรอน ซึ่งการเชื่อมแบบหลังจะเหมาะกับสายอากาศที่ทำด้วยแมกนีเซียม

1.2 การบัดกรีทองเหลือง (Brazing) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป แต่วิธีนี้ก็มียุข้อเสียคือมักจะมีสิ่งตกค้าง (ตัวเชื่อมประสาน) ภายในตัวสายอากาศหลังจากการบัดกรี เทคนิคการบัดกรีโดยไม่ต้องอาศัยตัวเชื่อมประสาน (Fluxless-Brazing Technique) สามารถทำได้ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย

1.3 การลีดโดยวิธีชั้นน็อคยึดให้แน่น ซึ่งเป็นวิธีที่มีข้อจำกัดในการนำสายอากาศไปประยุกต์ใช้งาน เป็นวิธีที่ให้ความแม่นยำต่ำ และลดประสิทธิภาพของสายอากาศลงมากเมื่อเทียบกับสองวิธีข้างต้น

ในการประกอบสายอากาศในปริณญาณินพจน์นี้ ได้ใช้วิธียึดด้วยการขันน็อค เหตุที่ไม่ใช้การเชื่อมทางความร้อนเพราะอาจจะทำให้ชิ้นงานเสียรูปได้และอีกเหตุผลหนึ่งก็คือสามารถปรับปรุงท่อนำคลื่นหลักได้เพราะถ้าทำการเชื่อมทางความร้อนแล้วจะไม่สามารถปรับเปลี่ยนอะไรได้อีกเลย แต่การประกอบสายอากาศด้วยวิธีการยึดเช่นนี้มีผลให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลงเพราะอาจจะมีจุดสัมผัสบางจุดที่ไม่แนบสนิทกันจริงๆ ซึ่งในทางคลื่นอาจจะเห็นว่าแผ่นชิ้นงานบางส่วนไม่ได้ลัดวงจรจริงๆ และทำให้เฟสของคลื่นในท่อเปลี่ยนไปจากที่ได้ออกแบบไว้เป็นผลให้อินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไม่สมพจน์ และมีแถบความถี่ที่แคบลงด้วย

2. ข้อจำกัดในการทดสอบสายอากาศ

เนื่องจากว่าสายอากาศมีขนาดใหญ่ ซึ่งการทำกรวัดที่สนามระยะไกลทำได้ลำบาก ดังนั้นจึงทำการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในบริเวณสนามระยะใกล้แล้วจึงค่อยแปลงเป็นสนามระยะไกล ซึ่งขั้นตอนนี้อาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้นได้

และจากการที่สายอากาศมีขนาดใหญ่ พื้นที่ของการแพร่กระจายคลื่นที่ออกมาจากตัวสายอากาศมีบริเวณกว้าง แต่เครื่องมือที่ใช้ในการวัดมีพื้นที่จำกัดซึ่งทำให้ไม่สามารถรับพลังงานทั้งหมดที่ส่งออกมาจากสายอากาศได้ ซึ่งทำให้เกิดการผิดพลาดขึ้นได้เช่นกันในขั้นตอนนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการของสตีปเปสต์ดิเซนต์ (Steepest Descent Method)

วิธีการของสตีปเปสต์ดิเซนต์นี้เป็นวิธีหนึ่งในวิธีการหาเชิงเกรเดียนท์ (Gradient Search Technique) ซึ่งมักจะใช้แก้ปัญหาของชุดสมการเชิงเส้น ที่ไม่สามารถจะหาผลเฉลยที่ถูกต้องจริงๆ ได้

ลำดับขั้นตอนของวิธีสตีปเปสต์ดิเซนต์ มีดังนี้

1. กำหนดสมการเชิงเส้นให้อยู่ในรูปฟังก์ชัน f จำนวน n ฟังก์ชัน

$$f_1(x) = 0, f_2(x) = 0, \dots, f_n(x) = 0$$

โดยที่ตัวแปร $x = x_1, x_2, \dots, x_n$

2. กำหนดความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (Tolerance : tol) ซึ่งปกติจะกำหนดจากความละเอียดที่สามารถสร้างชิ้นงานได้

3. กำหนดฟังก์ชันผิดพลาด (Error Function : $erf(x)$) คือผลการรวมของกำลังสองของทุกฟังก์ชันในข้อ 1

$$erf(x) = f_1^2(x) + f_2^2(x) + \dots + f_n^2(x)$$

4. หาเกรเดียนท์ของ $erf(x)$

$$\mathbf{Z} = \nabla erf(x) = \frac{\partial erf(x)}{\partial x_1} x_1 + \frac{\partial erf(x)}{\partial x_2} x_2 + \dots + \frac{\partial erf(x)}{\partial x_n} x_n$$

จะเขียนย่อได้ว่า

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \dots + \mathbf{Z}_n \quad \text{หรือ} \quad \mathbf{Z} = Z_1, Z_2, \dots, Z_n$$

5. หาขนาดของ Z แล้วนำไปเก็บในตัวแปร

$$Z_0 = |\mathbf{Z}| = \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2 + \dots + Z_n^2}$$

6. สมมติค่าตอบขึ้นมาเป็นค่าเริ่มต้น $x = x^{(1)}$ แล้วแทนลงในข้อ 3 จะได้ erf_1 เพื่อหา $Z_0^{(1)}$ ถ้า $Z_0^{(1)} < tol$ ดังนั้น $x^{(1)}$ คือคำตอบสุดท้าย

7. ทำการนอร์มัลไลซ์ Z ด้วย Z_0

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}/Z_0$$

8. กำหนด $\alpha_1 = 0$ และ $\alpha_3 = 1$ แล้วหา erf_3 เมื่อ

$$erf_3 = erf(x - \alpha_3 \mathbf{Z})$$

9. แทนค่า $x = x^{(1)}$ ลงใน erf_3 ถ้า $|erf_3| \geq |erf_1|$ ให้หา α_3 ใหม่โดยที่ $\alpha_3/2$ แล้วหา erf_3 ใหม่

ถ้า $\alpha_3 < tol$ ดังนั้น $x = x^{(1)} - \alpha_3 \mathbf{Z}$ คือคำตอบสุดท้าย

10. กำหนด $\alpha_2 = \alpha_3/2$ แล้วหา $erf_2 = erf(x - \alpha_2 \mathbf{Z})$

11. กำหนด $h_1 = \frac{erf_2 - erf_1}{\alpha_2}$ $h_2 = \frac{erf_3 - erf_2}{(\alpha_3 - \alpha_2)}$

$$h_3 = (h_2 - h_1) \alpha_3$$

แล้วหา $erf_0 = erf(x - \alpha_0 \mathbf{Z})$ โดยที่ $\alpha_0 = \frac{1}{2}(\alpha_2 - \frac{h_1}{h_3})$

12. เลือก α จาก α_0 หรือ α_3 ที่ให้ค่า erf ต่ำที่สุด

จะได้คำตอบใหม่ $x^{(2)} = x^{(1)} - \alpha Z$ ที่มีฟังก์ชันผิดพลาดเป็น erf

13. ถ้า $|erf_1| - |erf_2| \leq tol$ ก็จะได้ $x = x^{(2)}$ คือคำตอบสุดท้าย

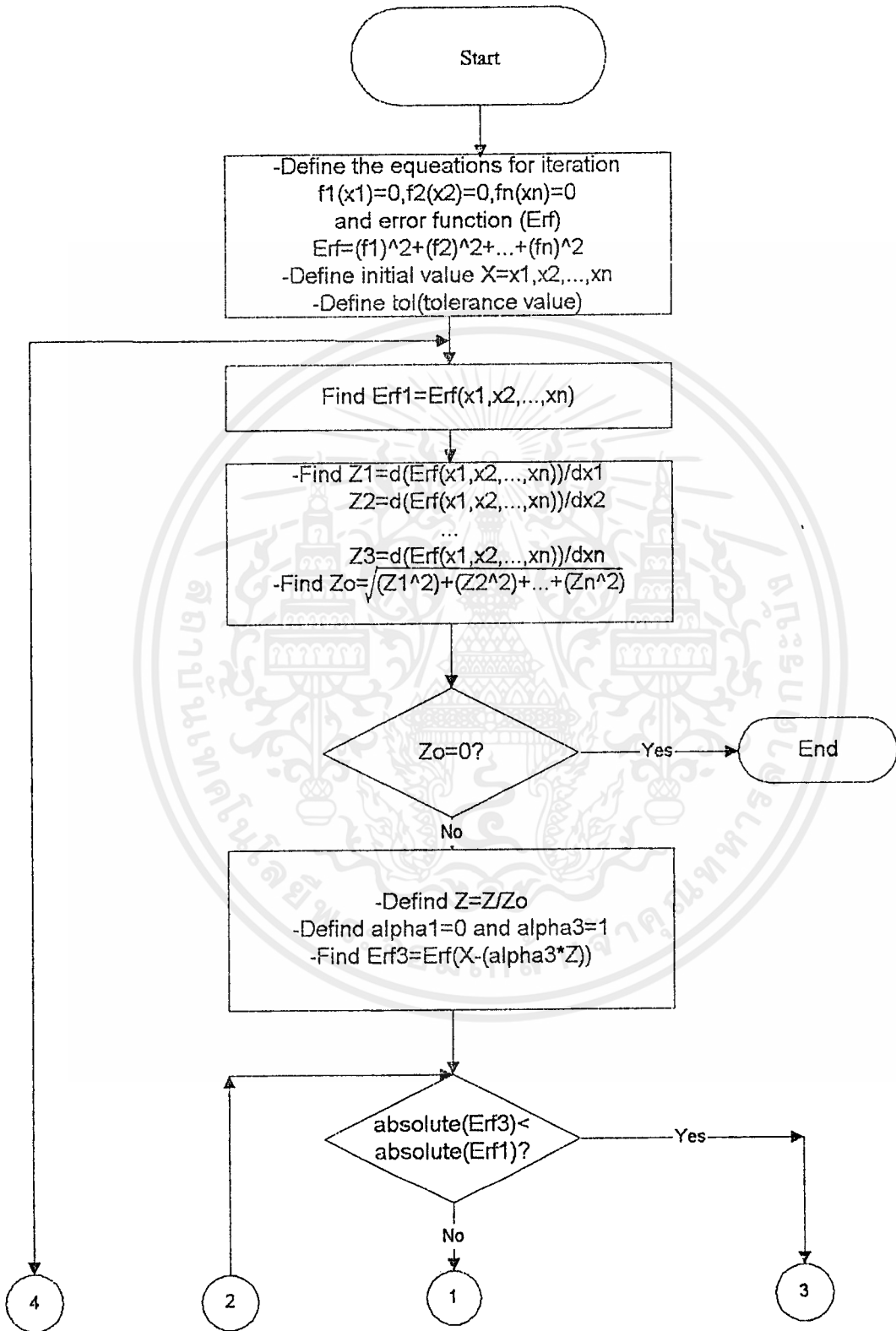
14. ถ้ายังไม่ได้คำตอบสุดท้ายก็ให้เริ่มคำนวณซ้ำตั้งแต่ข้อ 6 ลงมาอีกครั้งจนบรรลุเงื่อนไขใดเงื่อนไข

จากวิธีที่อธิบายจะเห็นว่าเป็นการหาคำตอบใหม่จากคำตอบที่สมมติขึ้นมา โดยพยายามลดค่าความผิดพลาดรวมของฟังก์ชันให้เหลือน้อยที่สุด ในการแก้ปัญหาด้วยวิธีสตีปเปสต์ดิเช่นด์นี้จำนวนของตัวแปรไม่จำเป็นต้องเท่ากับจำนวนของฟังก์ชัน และวิธีนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่าวิธีจุด-อานม้า (Saddle Point Method)

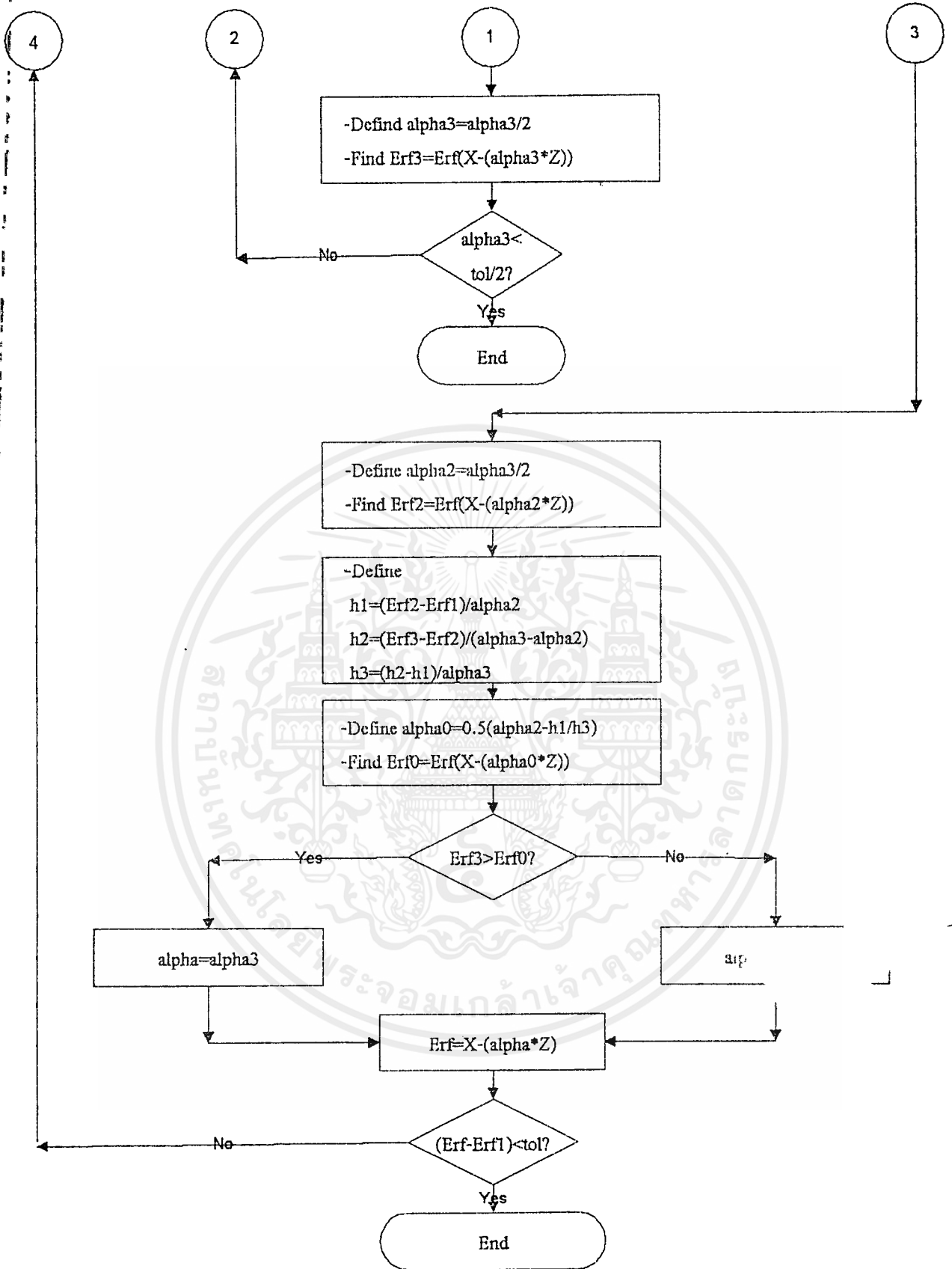
ถ้าจะให้ความหมายในเชิงกายภาพของวิธีสตีปเปสต์ดิเช่นด์นี้ จะสมมติว่ามีคนตาบอดที่พยายามจะปีนลงหุบเขา ซึ่งคนตาบอดจะไม่เห็นอะไรเลย (เปรียบเสมือนการไม่รู้จักฟังก์ชันที่กำลังแก้ปัญหาอยู่) สิ่งที่ได้ก็คือคลำหาความชันของพื้นที่รอบตัวแล้วมุ่งหน้าไปยังทิศที่มีความชันน้อยที่สุด (คือทิศสลาดเกรเดียนต์ของฟังก์ชัน) เมื่อเดินทางไปได้ระยะหนึ่ง ก็จะตรวจสอบความชันที่จุดใหม่แล้วก็มุ่งไปในทิศที่มีความชันน้อยกว่าแล้วทำอย่างนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนตรวจสอบพบว่าความชันรอบตัวนั้นมีค่าเป็นบวกทั้งหมดก็จะสรุปได้ว่าที่จุดนั้นคือจุดต่ำสุดของหุบเขา (คำตอบสุดท้าย)



Flow Chart of Steepest Descent Method



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include <process.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

```

```

//-----Declare function-----

```

```

// Main function
void Findzbn(void); // find Zbn
double Integrate_Z(char cmpx,double l1,double l2,double y,double z);
double funcR(double l1,double l2,double y,double z,double x); //
(7.155)
double funcI(double l1,double l2,double y,double z,double x); //
(7.156)
double h1(double y); // function h1(y) --> (8.99)
double h2(double y); // function h2(y) --> (8.100)
double gx(double x); // function g(x) --> (8.101)
double vx(double x); // function v(x) --> (8.102)
double fxy(double x,double y); // function f(x,y) --> (8.96)
double yg(double x,double y,int co); // function Y/Go (8.108)
double yz(double x,double y,int count); // (8.109-8.110)
double diff(double X,int i); // find the gradient of error function
double ful(double x,int i); // This function is used by function
diff
double ee1(void);
double ee2(void);
double ee3(void);
double ee(void);

void display(double error); // Display every values
(x,y,Y/Go,Error,iteration)

```

```

//-----Define global variable-----

```

```

double huge vn[2500],z[3000]; // vn[] = voltage ratio of the slots
// z[n] = x[n] or y[n]
// if n = odd no., z[n] = x (slot's
offset) // if n = even no., z[n] = y (1/lr)
double huge Y[3000],Rbn[2500],Ibn[2500];
// Y[] = arbitrary variable = a copy
set of z[] // Rbn + jIbn = Zbn
double freq,lamda,a,b,pi,k,K2,lamdaG,B,t;
// Frequency, lamda, a and b demension
of waveguide, // Pi, k=2Pi/lamda, K2=(8.86),lamdaG ,
B=2Pi/lamdaG // and thickness of waveguide
int Mm,Nn; // Slots per waveguide and number of
waveguides
long int roundmax,round; // Max. round of iteration and number
of round
FILE *data;
double huge buf[3000];
char finame[50];

```

```

//-----Functions -----

```

```

void main(void)
{
double tol,error0,error1,error2,error3,error;
// tolerance, erf0, erf1, erf2, erf3 and erf
double alpha,alpha0,alpha2,alpha3;
// ALPHA, ALPHA0, ALPHA1, ALPHA2 and ALPHA3

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

double h1,h2,h3,z0,z1[3000];
    // h1,h2 and h3 will used to find ALPHA0
    // z1[] = Z1, Z2, Z3, ...
    //          = d(erf)/d(x1), d(erf)/d(y1), d(erf)/d(x2),...
int i,j,x,y,u,w,point,o; // arbitrary variable
char num[3]; // arbitrary variable ( for setting up GUI )
int iteration; // number of iteration

clrscr();
pi = M_PI; // pi = pi of Borland C library
Mm = 32;
Nn = 32;
freq = 12.6575*pow(10,9); // frequency
lamda = 3*pow(10,8)/freq*100/2.54; // lamda = c/frequency (inches)
a = 0.5511810; // a-demention of waveguide (inches)
b = 0.2362204; // b-demention of waveguide (inches)
t = 0.0393700; // thickness of waveguide (inches)
lamdaG = lamda/sqrt(1-pow(lamda/(2*a),2));
k = 2*pi/lamda;
B = 2*pi/lamdaG;
K2 = (292*a/b)/(0.61*pi*B/k); // (8.86)

// Voltage ratio for all slots
printf("NUMBER OF ITERATION:");
scanf("%d",&w);
printf("FILE NAME:");
scanf("%s",&filename);
for(u=1;u<=Mm*Nn;u++)
    vn[u]=1;
// Initial for iteration
roundmax = 5000000; // max. number of iteration's
round = 1;
tol = 0.0000001; // error tollerance
iteration = w; // initial number of iteration*/

// Initial x and y of every slots
if(iteration==1)
for(i=1;i<=2*Mm*Nn;i+=4)
    {z[i]=0.0393700; z[i+1]=0.45511811;
    z[i+2]=-0.0393700; z[i+3]=0.45511811;}}
else
{data = fopen(filename,"rb");
fread(z,sizeof(double),(2*Nn*Mm)+1,data);
fclose(data);}

// Start iteration !!!
for(round = w; round<=roundmax ; round++)
{
    // FIND erf or erf1 (erf = erf1 because ALPHA1 = 0)
    for(i=1;i<=2*Mm*Nn;i++)
        Y[i] = z[i]; // copy all x and y to Y[] for
calculation
    Findzbn();
    error1 = ee();

    // FIND Z1, Z2, Z3, ... ( Z1 = d(erf)/d(x1) )
    // z1[] = Z1,Z2,Z3,...

    for(i=1;i<=2*Mm*Nn;i++)
        z1[i] = diff(Y[i],i);

    // FIND z0 = U(Z1y+Z2y+Z3y+...)
    z0 = 0.0;
    for(i=1;i<=2*Mm*Nn;i++)
        Y[i] = z[i]; // copy all x and y to Y[] for calculation
    for(i =1;i<=2*Mm*Nn;i++)
        z0 = z0+pow(z1[i],2); // Find Z1y+Z2y+Z3y+...
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        z0 = sqrt(z0); // and then find the square root or
them
        // z0 means the length of vector which its coordinate is
(Z1,Z2,Z3,...)
        // If z0 (distance of gradient) = 0,
        // it means that we meet the satisfy point
        if (z0==0.0)
        { printf("ZERO GRADIENT \n");
          printf("PROCEDURE COMPLETE MAY HAVE A
MINIMUM\n\007\007\007");
          exit(1);
        }

        // Define z1[] = z1[]/z0 ;example Z1 = Z1/z0
        for(i=1;i<=2*Mm*Nn;i++)
            z1[i] = z1[i]/z0;

        // Set ALPHA1 = 0 and ALPHA3 = 1
        alpha0 = 0.0;
        alpha3 = 1;

        // FIND erf3
        for(i = 1;i <= 2*Mm*Nn;i++)
            Y[i] = z[i] - (alpha3*z1[i]); // prepare X - (alpha3 * z1
[])
            // X = x1,y1,x2,y2,x3,y3,...
        Findzbn(); // find new Zbn for alpha3
        error3 = ee(); // find erf2

        // Check !!! --> erf3 or erf1 is max.
        // If erf3 < erf1 then we devide ALPHA3 by 2 (ALPHA3 =
ALPHA3/2),
        // then find the new erf3 and compare with erf1 again.
        // If erf3 still more than erf1, devide ALPHA3 by 2 and find
new erf3
        // until erf3 < erf1
        // NOTE: 1.If erf3 < (tol/2), we may very very close to the
answer.
        // 2.We compare absolute value of erf3 and absolute value
of
        // erf1, not erf3 and erf1
        while(fabs(error3) >= fabs(error1))
        {
            alpha3 = alpha3/2;
            for(i=1;i<=2*Mm*Nn;i++)
                Y[i] = z[i]-(alpha3*z1[i]);
            Findzbn();
            error3 = ee();
            if (alpha3 < (tol/2))
            {
                display(error);
                gotoxy(31,24);
                printf("No like improve\n\007\007\007");
                exit(1);
            }
        }
    }

    // Define ALPHA2 = ALPHA3 devided by 2
    alpha2 = alpha3/2;
    for(i=1;i<=2*Mm*Nn;i++)
        Y[i] = z[i] - alpha2*z1[i];
    Findzbn();
    error2 = ee();

    // FIND ALPHA0
    h1 = (error2 -error1)/alpha2;
    h2 = (error3 -error2)/(alpha3-alpha2);
    h3 = (h2 - h1)/alpha3;
    alpha0 = 0.5*(alpha2 - (h1/h3));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// FIND erf0
for(i=1;i<= 2*Mm*Nn;i++)
    Y[i] = z[i] - alpha0*z1[i];
Findzbn();
error0 = ee();

// COMPARE erf0 and erf3, which one is minimum.
// Then define ALPHA = ALPHA of minimum erf (ALPHA0 or ALPHA3)
// and find erf of ALPHA
if(error0 < error3)
    alpha = alpha0;
else
    alpha = alpha3;
for(i = 1;i<= 2*Mm*Nn;i++)
    Y[i] = z[i] - alpha*z1[i];
Findzbn();
error = ee();
fclose(data);

// Copy all value of Y[] back to z[] (all new x and new y)
for(i=1;i<=2*Mm*Nn;i++)
{ z[i] = Y[i];
  buf[i]=z[i]; }
o=1;
point=(2*Nn*Mm)+1;
while(o<=point)
{ data = fopen(filename,"wb");
  fwrite(&buf,sizeof(double),point,data);

  fclose(data);
  o++;}

// Display number of iteration, error, x,y and Y/G0
// on the screen
if (iteration%5==0)
{   sound(2000);
    display(error);
    nosound();
}

// Now, compare erf and erf1, or we can say compare new erf
// and old erf. If erf-erf1 < tol, we have probably found the
answer !
// if ( fabs(error-error1) < tol )
// {   gotoxy(21,24);
//     textcolor(14);
//     printf("CONGRAURATION ! The answer is here !!
\007\007\007");
//     exit(1);
// }

// Display number of iteration
gotoxy(3,3);
printf("ITERATION");
gotoxy(10,3);
printf("%9d",iteration);
w=iteration++; // Increase the number of iteration
} // end for-round
} // END OF MAIN

void display(double error)
{
    int i;
    // error
    gotoxy(20,3);
    printf("ERROR");
    gotoxy(25,3);
    printf("%16.10f",error);

```

```

// x and y
for(i=1;i<=/*2*Mm*Nn*/80;i=i+2)
{
    if (i<=40)
    {
        if (z[i]>=0) gotoxy(2,4+((i+1)/2));/*(12,7+((i+1)/2));*/
        else gotoxy(1,4+((i+1)/2));/*(11,7+((i+1)/2));*/
        printf("%.8f",z[i]);
        gotoxy(15,4+((i+1)/2));
        printf("%.8f",z[i+1]);
    }
    if (i>40)
    {
        if (z[i]>=0) gotoxy(51,4+((i-39)/2));
        else gotoxy(50,4+((i-39)/2));
        printf("%.8f",z[i]);
        gotoxy(66,4+((i-39)/2));
        printf("%.8f",z[i+1]);
    }
}
// Y/G0
gotoxy(45,3);
printf("Y/G0");
gotoxy(50,3);
printf("%16.10f\n",sqrt(ee3()+1);
}

// function g(x)
double gx(double x)
{ double GX;
  GX = 1.177*pow(sin((pi*x)/a),2);
  return(GX);
}
// end of function g(x)

// function v(x)
double vx(double x)
{ double VX;
  VX = 1.517+1.822*pow(x,2);
  return(VX);
}
// end of function v(x)

// function h1
double h1(double y)
{ double H1;
  H1 = 1-275*pow(y-1,2);
  return(H1);
}
// end of function h1

// function h2
double h2(double y)
{ double H2;
  H2 = -14*(y-1);
  return(H2);
}
// end of function h2

// function f(x,y)
double fxy(double x,double y)
{ double F;
  F = (cos((B/k)*y*vx(x)) - cos(y*vx(x)))*sin(pi*x/a)/sin(y*vx(x));
  return(F);
}
// end of function f(x,y)

// function y(g) <---- "yg" of "y(g)"
double yg(double x,double y,int co)
{ double YG;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

YG = K2*pow(fxy(x,y),2)/(K2*pow(fxy(x,y),2)*h1(y)
    /(gx(x)*(pow(h1(y),2)+pow(h2(y),2)))+Rbn[co]);
return(YG);
}
// end of function y(g)

// function yz
double yz(double x,double y,int co)
{ double YZ;
  YZ = -K2*pow(fxy(x,y),2)*h2(y)/(gx(x)*(pow(h1(y),2)+pow(h2(y),2)))+
  Ibn[co];
  return(YZ);
}
// end of function yz

//function ee1
double ee1(void)
{ int i;
  double EE1=0;
  for( i=1 ; i<=2*Mm*Nn ; i+=2)
    EE1 = EE1+pow(yz(Y[i],Y[i+1],1+(i-1)/2),2);
  return(EE1);
}

// function ee2
double ee2(void)
{
  int i;
  double EE2=0;
  for( i=1 ; i <= 2*Mm*Nn-2 ; i+=2 )
    EE2 = EE2+pow( yg(Y[i+2],Y[i+3],2+(i-1)/2)/fxy(Y[i+2],Y[i+3])
+
    vn[2+(i-1)/2]*sin(vx(Y[i+2]))*yg(Y[i],Y[i+1],1+(i-1)/2)
/
    (vn[1+(i-1)/2]*sin(vx(Y[i]))*fxy(Y[i],Y[i+1])),2);
// EE2 = EE2+pow( ( yg(Y[i+2],Y[i+3],2+(i-1)/2) / fxy(Y[i+2],Y
[i+3]) ) +
// ( ( sin(vx(Y[i+2])) ) * yg(Y[i],Y[i+1],1+(i-1)
/2) ) /
// ( sin(vx(Y[i])) * fxy(Y[i],Y[i+1]) ) )
, 2);
  return(EE2);
}

// function ee3
double ee3(void)
{ int i,j;
  double EE3=0;
  for( i=0 ; i<=Nn ; i+=Mm )
  {
    for( j=1 ; j<=2*Mm ; j+=2 )
      EE3 = EE3 + (yg(Y[i+j],Y[i+j+1],1+(i+j-1)/2));
    EE3 = pow(EE3-Nn,2);
  }
  return(EE3);
}

// function ee
double ee(void)
{ double E,E1,E2,E3;
  E1 = ee1();
  E2 = ee2();
  E3 = ee3();
  E = E1+E2+E3;
  return(E);
}

double Integrate_Z(char cmpx,double l1,double l2,double y,double z)
// This function is used to determining Z coupling which is

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// complex numbers. Unfortunately, normal C compilers cannot
perform
// complex numbers calculating, so we must separately determine R
// and I, which are parts of Z,  $Z = R + jI$ . We have therefore setup
// the variable named 'cmpx' to distinguish whether this function
// is used to determine R or I.
// ( If cmpx = R then this function is used to determine R else
// if cmpx = I then this function is used to determine I. )
// =====
//
// ALGORITHM SIMPSON (xi, fi, j = 0, 1, ..., 2n)
//
// This algorithm computes the integral  $J = \int_a^b f(x) dx$  from given
values
//
//  $\delta b$ 
//  $\delta a$ 
// fi = f(xi) at equidistant  $x_0 = a$ ,  $x_1 = x_0 + h, \dots, x_{2n} = x_0 + 2nh = b$ 
// by Simpson's rule, where  $h = (b-a)/2n$ .
//
// INPUT: a, b, n, f0, ..., f2n
// OUTPUT: Approximate value J' of J
// Compute  $s_0 = f_0 + f_{2n}$ 
//  $s_1 = f_1 + f_3 + \dots + f_{2n-1}$ 
//  $s_2 = f_2 + f_4 + \dots + f_{2n-2}$ 
//  $h = (b-a)/2n$ 
//  $J' = (h/3)(s_0 + 4s_1 + 2s_2)$ 
// OUTPUT J' Stop.
// End SIMPSON
{ double R12 = 0.0; // define & initial J'
double s0=0.0, s1=0.0, s2=0.0; // define & initial s0,s1,s2
double n,h; // define n,h
int i; // arbitrary variable

n = 5; // 2n = number of subintervals
h = 12/n; //  $h = (a-b)/2n = (12-(-12))/(2*5)$ 
// find s0 -----
if (cmpx=='R') // If this function used to find Real value
s0 = funcR(l1,l2,y,z,-l2)+funcR(l1,l2,y,z,l2);
else if (cmpx=='I') // If this function used to find Imaginary
value
s0 = funcI(l1,l2,y,z,-l2)+funcI(l1,l2,y,z,l2);
// find s1 -----
if (cmpx=='R')
for(i=1;i<=(2*n-1);i+=2)
s1 += funcR(l1,l2,y,z,-l2+(h*i));
else if (cmpx=='I')
for(i=1;i<=(2*n-1);i+=2)
s1 += funcI(l1,l2,y,z,-l2+(h*i));
// find s2 -----
if (cmpx=='R')
for(i=2;i<=(2*n-2);i+=2)
s2 += funcR(l1,l2,y,z,-l2+(h*i));
else if (cmpx=='I')
for(i=2;i<=(2*n-2);i+=2)
s2 += funcI(l1,l2,y,z,-l2+(h*i));
// find answer = (h/3)(s0 + 4s1 + 2s2) -----
R12 = (h/3)*(s0+(4*s1)+(2*s2));
R12 = R12*(30/(sin(k*l1)*sin(k*l2)));
return(R12);
}

```

```

double funcR(double l1,double l2,double y,double z,double x)
// This function is the integral part in equation 7.155-(real part)
// Note: This function is used with function 'Integrate_Z'
determining
// the value of f0, f1, ..., f2n-1 <see SIMPSON>.
{ double r12,r,r1,r2;
r = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x,2)); // (7.151)
r1 = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x-l1,2)); // (7.152)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

r2 = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x+l1,2)); // (7.153)
r12= (sin(k*r1)/r1)+(sin(k*r2)/r2)-(2*cos(k*l1)*sin(k*r)/r);
r12= r12*sin(k*(l2-fabs(x)));
return(r12);
}

double funcI(double l1,double l2,double y,double z,double x)
// This function is the integral part in equation 7.156-(imaginary
part)
// Note: This function is used with function 'Integrate_Z'
determining
// the value of f0, f1, ... ,f2n-1 <see SIMPSON>.
{ double r12,r,r1,r2;
r = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x,2)); // (7.151)
r1 = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x-l1,2)); // (7.152)
r2 = sqrt(pow(y,2)+pow(z+x+l1,2)); // (7.153)
r12= (cos(k*r1)/r1)+(cos(k*r2)/r2)-(2*cos(k*l1)*cos(k*r)/r);
r12= r12*sin(k*(l2-fabs(x)));
return(r12);
}

void Findzbn(void) // ( with symmetry assumption )
{
double l1,l2,y_d,z_d,tmp;
int i,j,ref1,ref2,m,n,slotnum;
double R[2500],I[2500],x[2500],lr[2500],l[2500];
// Find the resonance length (lr) and length (l) of each slots
for(i=1;i<=Mm*Nn;i++)
{
x[i] = Y[2*i-1]; // x[] = offset
lr[i] = vx(x[i])/k; // lr
l[i] = Y[2*i]*lr[i]; // l
}

if (Nn>1) slotnum = Mm*Nn/2;
else slotnum = Mm*Nn;
for(i=1;i<=slotnum;i++)
{for(j=1;j<=Mm*Nn;j++)
{ R[j]=0;
I[j]=0;
//if ((j!=i)&&(j>i))
if (j!=i)
{
if (i%Mm == 0) ref1=i/Mm-1;
else ref1 = i/Mm;
if (j%Mm == 0) ref2=j/Mm-1;
else ref2 = j/Mm;
y_d = fabs(Y[2*i-1]-Y[2*j-1])+((a+2*t)*abs(ref1-ref2));
// y_d = space between 2 slots in vertical axis

ref1 = i%Mm;
if (ref1==0) ref1=Mm;
ref2 = j%Mm;
if (ref2==0) ref2=Mm;
z_d = (lamda*0.52)*abs(ref1-ref2);
// z_d = space between 2 slots in horizontal axis

R[j] = Integrate_Z('R',l[i],l[j],y_d,z_d);
I[j] = Integrate_Z('I',l[i],l[j],y_d,z_d);
// fprintf(stdprn,"%7.3f ",fabs(R[i][j]));
}
}
}

// Find Zbn
// number of slots for mutual coupling calculation

Rbn[i] = 0;
Ibn[i] = 0;
for(j=1;j<=Mm*Nn;j++) // refer to all other slots
{ if(j!=i)
{ tmp = (sin(vx(Y[2*j-1]))/sin(vx(Y[2*i-1])));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        Rbn[i] += R[j]*tmp;
        Ibn[i] += I[j]*tmp;
    }
}
}
if (Nn>1)
    for(j=Mm*Nn,i=1;j>=Mm*Nn/2+1;j--,i++)
        {
            Rbn[j] = Rbn[i];
            Ibn[j] = Ibn[i];
        }
}

double diff(double X,int i)
{
    int n;
    double TOL,H,MAX,D[3000],E[3000],R[3000];
    TOL = 0.00005; // tolerance
    H = 1; // initial diff. range value
    MAX = 20;
    D[0] = 0.5*(fu1(X+H,i)-fu1(X-H,i))/H;

    for( n=1 ; n<=2 ; n++)
        {
            H = H/2;
            D[n] = 0.5*(fu1(X+H,i)-fu1(X-H,i))/H;
            E[n] = fabs(D[n] - D[n-1]);
            R[n] = 2*E[n]/(fabs(D[n])+fabs(D[n-1])+TOL);
        }
    n = 1;
    while( ((E[n]>E[n+1]) || (R[n]>=TOL)) && (n<MAX) )
        {
            H = H/2;
            D[n+2] = 0.5*(fu1(X+H,i)-fu1(X-H,i))/H;
            E[n+2] = fabs(D[n+2]-D[n+1]);
            R[n+2] = 2*E[n+2]/(fabs(D[n+2])+fabs(D[n+1])+TOL);
            n++;
        }
    return(D[n-1]);
}

double fu1(double x,int i)
{
    double FU1;
    int bb;
    for(bb=1;bb<=2*Mm*Nn;bb++)
        Y[bb] = z[bb];
    Y[i] = x;
    FU1 = ee();
    return(FU1);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
โปรแกรมส่วนแสดงผล

```
#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<string.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>

#define dat1 1500

void getdata();
void showdata();
int dat,p;
double huge amp[dat1];

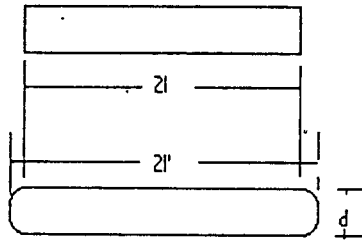
void getdata()
{FILE *fil;
 char finame[50];
 int m;
 printf("ENTER NUMBER OF DATA:");
 scanf("%d",&p);
 geta:printf("ENTER FILENAME:");
 scanf("%s",&finame);
 fil=fopen(finame,"rb");
 if(fil==NULL)
 {
 printf("ERROR IN OPEN FILE\n");
 goto geta;
 }
 fread(amp,sizeof(double),p+1,fil);
}

void showdata()
{int k;
 for (k=1;k<=p;k=k+4)
 {printf("%10.9f",amp[k]*25.4);
 printf("%15.9f",.(amp[k+1]*25.4)+0.3648);
 printf("%20.9f",amp[k+2]*25.4);
 printf("%25.9f\n", (amp[k+3]*25.4)+0.3648);
 getch();}
}

void main()
{getdata();
 showdata();}
```

ภาคผนวก ก.

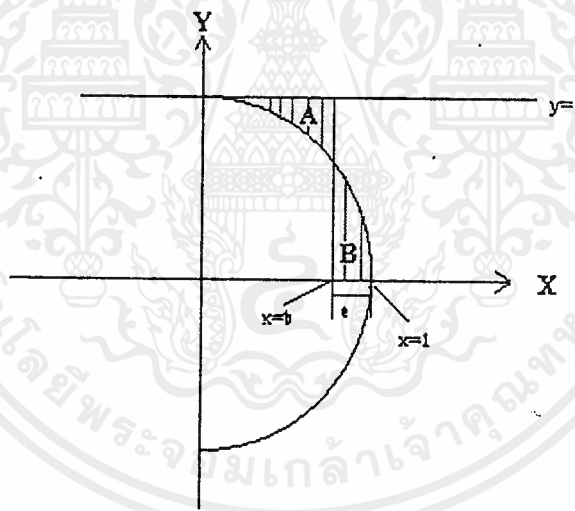
การหาความสัมพันธ์ของร่องปลายสี่เหลี่ยมกับร่องปลายกลม



รูปที่ ก.1

แสดงขนาดของ ก) ร่องปลายสี่เหลี่ยม ข) ร่องปลายกลม

โดยใช้สมมติฐานที่ว่าให้ร่องปลายกลมมีพื้นที่เท่ากับร่องปลายสี่เหลี่ยม เราจะมาพิจารณาเฉพาะส่วน
ส่วนปลายทั้งสองดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.2

แสดงความสัมพันธ์ของร่องปลายสี่เหลี่ยมกับร่องปลายกลม

สมการที่ใช้แสดงวงกลมรัศมี 1 หน่วย คือ

$$x^2 + y^2 = 1$$

(ก.1ก)

จัดให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของ $y(x)$ เป็น

$$y(x) = \sqrt{1-x^2}$$

(ก.1ข)

ภายใต้สมมติฐานข้างต้นเมื่อพิจารณาเฉพาะในจุดภาคที่ 1 ได้ว่าพื้นที่ B ต้องเท่ากับพื้นที่ A ดังนั้นเราจะหาค่าแห่ง b ได้จาก

$$\text{พื้นที่ A} = \text{พื้นที่ B}$$

$$\int_0^b [1 - \sqrt{1-x^2}] dx = \int_b^1 \sqrt{1-x^2} dx \quad (\text{ค.2})$$

จากคุณสมบัติของการอินทิเกรต

$$\int \sqrt{a^2 - u^2} du = \frac{u}{2} \sqrt{a^2 - u^2} + \frac{a^2}{2} \sin^{-1}\left(\frac{u}{a}\right) + C \quad (\text{ค.3})$$

เมื่อใช้คุณสมบัติ(ค.3)ก็จะแก้(ค.2)ได้ดังนี้

$$b - \left[\frac{x}{2} \sqrt{1-x^2} + \frac{1}{2} \sin^{-1}(x) \right]_{x=0}^{x=b} = \left[\frac{x}{2} \sqrt{1-x^2} + \frac{1}{2} \sin^{-1}(x) \right]_{x=b}^{x=1} \quad \because C = 0$$

$$b = \frac{1}{2} \sin^{-1}(1)$$

$$b = \frac{\pi}{4} \quad (\text{ค.4})$$

จาก(ค.4)ก็จะหาระยะ e ในรูปที่ ค.2 ได้เป็น

$$e = 1 - \frac{\pi}{4} \quad (\text{ค.5})$$

ถ้าวงกลมในรูปที่ ค.2 มีรัศมี $d/2$ ก็จะได้ (ค.5) ที่นอร์มัลไลซ์กลับ(Denormalize)ด้วย $d/2$ ดังต่อไปนี้

$$e_d = \frac{d}{2} \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \quad (\text{ค.6})$$

ในลำดับสุดท้ายจาก(ค.6)จะหาความสัมพันธ์ของความยาวร่องปลายสี่เหลี่ยม(2l)กับความยาวของร่องปลายกลม(2l') โดยมีค่าชดเชย(Correction Factor:C)ด้วยได้ดังนี้

$$2l' = 2l + Cd \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \quad (\text{ค.7})$$

โดยค่าชดเชย $C=1$ สำหรับกรณีของร่องที่ใช้ป้อนสัญญาณ (Coupling Slot) และ $C=1.7$ สำหรับกรณีของร่องที่แผ่กระจายคลื่น(Radiating Slot)

กิติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้จะสำเร็จลงไม่ได้หากไม่ได้ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆคนตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นการทำงานจนโครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอบพระคุณ

รศ.ดร. โม ไนย ไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ

ขอบคุณ

นายคมศักดิ์ เมฆสมุทร นักศึกษาปริญญาเอก
นายชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ นักศึกษาปริญญาโท
นายสังวาลย์ การคนชื่อ นักศึกษาปริญญาตรี

ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ ในการสร้างชิ้นงานจนสำเร็จ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน

ผู้จัดทำ

4 มีนาคม 2541

บรรณานุกรม

- [1] I. J. Bahl and P. Bhartia, *Microstrip Antenna*, Massachusetts:Artech House Inc., 1982.
- [2] J. R. James and P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*, vol.1, London:Peter Peregrinus Ltd., 1986.
- [3] R. C. Johnson and H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*, vol.1, 2nd ed., New York:McGraw-Hill, 1984, chap. 9,15.
- [4] R. E. Collin, *Antennas and Radiowave Propagation*, Singapore:McGraw-Hill, 1985.
- [5] R. S. Elliott, *Antenna Theory and Design*, India: Prentice-Hall, 1985.
- [6] R. S. Elliott, *Antenna Handbook Theory Applications and Design*, New Jersey: Prentice-Hall, 1981, chap. 12.
- [7] R. S. Elliott, *An Introduction to Guided Waves and Microwave Circuits*, New Jersey: Prentice-Hall, 1993.
- [8] J. Sangster and A. H. I. McCormick, "Theoretical design and synthesis of slotted waveguide arrays," *Inst. Elec. Eng. Proc.*, vol. 136, pt. H, no. 1, pp. 39-46, Feb. 1989.
- [9] R. S. Elliott, "On the design of travelling-wave-fed longitudinal shunt slot arrays," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-27, pp. 717-720, Sept. 1979.
- [10] R. S. Elliott, "Improved design procedure for small arrays of shunt slots," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-31, pp. 48-53, Jan. 1983.
- [11] S. R. Rengarajan and L. G. Josefsson, "Slotted-waveguide-array antenna technology," *IEEE AP-S and URSI Meeting*, California, June 1995.
- [12] J. G. Stern and R. S. Elliott, "Resonant length of longitudinal slots and validity of circuit representation: Theory and experiment," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-33, pp. 1264-1271 Nov. 1985.
- [13] L. G. Josefsson, "Analysis of longitudinal slots in rectangular waveguides," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-35, pp. 589-592, Dec. 1987.
- [14] S. R. Rengarajan, "Analysis of a Centered-Inclined Waveguide Slot Coupler," *IEEE Trans. IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-39, pp. 1219-1223, July 1991.
- [15] R. Rengarajan, "Higher order modes coupling effects in feeding waveguide of a planar slot array," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-39, pp. 1219-1223, July 1991.
- [16] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, New York:John Wiley & Sons, 1989.
- [17] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, New York:Harper & Row, 1982.
- [18] A. F. Stevenson, "Theory of slots in rectangular waveguides," *J. Appl. Phys.*, vol. 19, pp. 24-38, Jan. 1948.

- [19] คมศักดิ์ เมฆสมุทร, เวช วิเวก และ โมไนย ไกรฤกษ์, "สายอากาศแถวลำดับระนาบแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่น," *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 18*, ม.เทคโนโลยีมหานคร, หน้า 410-414, พฤศจิกายน 2538
- [20] M. Mahadallah, "Frequency limitations broad-band performance of shunt slot arrays," *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, vol. AP-37, pp. 817-823, July. 1989
- [21] คมศักดิ์ เมฆสมุทร และ โมไนย ไกรฤกษ์, "การสังเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่น," *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 19*, ม.ขอนแก่น, vol. 1, หน้า CM-38-CM-42, พฤศจิกายน 2539
- [22] H. Y. Yee, "Impedance of a narrow longitudinal shunt slot in a slotted waveguide array," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-22, pp. 589-592, July 1974.
- [23] G. E. Evans, *Antenna Measurement Techniques*, Boston: Artech House, 1990.
- [24] R. Telikepalli ed. al., "Wide band microstrip phased array for mobile satellite communications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-43, pp. 1758-1763, July 1995.
- [25] A. A. Oliner, "The impedance properties of narrow radiating slots in the broad face of the rectangular waveguide, Part I and II," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-5, pp. 4-20, Jan. 1957.
- [26] H. Y. Yee, "The Design of large waveguide array of shunt slots," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.40, no.7, pp. 775-781, July 1992.
- [27] M. C. Bailey, "The impedance properties of dielectric-covered narrow radiating slots in the broad face of a rectangular waveguide," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.18, no.7, pp. 596-603, Sep. 1970.
- [28] คมศักดิ์ เมฆสมุทร, "การออกแบบสายอากาศแถวลำดับระนาบแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่น"
- [29] กวิน นิตรานนท์, ธนา อุ๋นสมบัติ, จิระ คุณากร, ธนาพันธ์ คันทิตยกุล, "การออกแบบสายอากาศแบบพลาสมาสล็อตอาร์เรย์"
- [30] Andre Dion, "Nonresonant Slotted Arrays" *IRE Transactions On Antennas And Propagation*, Oct. 1998