



การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ

ARRAY ANTENNA PATTERN SYNTHESIS



โดย

นางสาวศุภวรรณ นิติตาครินทร์

นางสาวอุริภรณ์ สุทธิวีระวัฒน์

เลขเรียกหนังสือ... ๕๗ ๑๖๓๓ ก ๑๕๔๑

เลขทะเบียน... ๐-๐๕๒๗

วัน เดือน ปี... ๑๑ กค ๕๖

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๔๑

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ

ARRAY ANTENNA PATTERN SYNTHESIS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2541

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ

ARRAY ANTENNA PATTERN SYNTHESIS

ผู้จัดทำ

1. นางสาวศุภวรรณ นิติสกรินทร์ 38014515

2. นางสาวอุริภรณ์ สุทธิวีระวัฒน์ 38014655


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสาย

อากาศแถวลำดับ

ARRAY ANTENNA PATTERN SYSTHESIS

โดย นางสาวศุภวรรณ นิติตาครินทร์ 38014515

นางสาวอุริภรณ์ สุทธิวีระวัฒน์ 38014655

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้นำเสนอการสังเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับชนิดที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ และไม่สม่ำเสมอ โดยวิธีที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอที่ใช้ได้แก่แบบทวินาม และโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉากอันได้แก่ พหุนามเลอจองดร์ พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 และพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 ตามลำดับ โดยคุณลักษณะที่นำมาวิเคราะห์ได้แก่ การกระจายกระแส แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระดับของโลบข้าง ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ความกว้างลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรก ค่าการชี้ทิศทางและประสิทธิภาพลำคลื่น จากนั้นนำผลที่ได้จากการสังเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องเชิงเส้นที่ 10 องค์ประกอบ ระดับโลบข้าง 20 เดซิเบล ที่ความถี่ 9 กิกะเฮิร์ตซ์ และนำสายอากาศที่สร้างไปทดสอบหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ผลที่ได้สอดคล้องกันเป็นอย่างดีระหว่างการคำนวณและการทดสอบ จึงเป็นการยืนยันว่าหลักการสังเคราะห์ใช้งาน ได้จริง ซึ่งอาจจะพัฒนาเป็นสายอากาศในระบบสื่อสารจุดต่อจุดเช่นสายอากาศเรดาร์ต่อไป

ABSTRACT

This project presents the synthesis of uniform and non-uniform amplitude array antenna characteristics. The non-uniform amplitude distribution method can be subdivided into two categories, i.e., Binomial method and Orthogonal Polynomial method such as Legendre polynomial, the first and the second kind Tscheybscheff polynomial, respectively. The antenna characteristics viz.. amplitude current distribution coefficient, radiation pattern, side lobe level, half-power beamwidth, first-null beamwidth, directivity, and beam efficiency are analyzed. These results are utilized to design the 10 elements linear slot array antenna of the side lobe level 20 dB at the operating frequency of 9 GHz. The radiation patterns of these antennas are compared together and these results are agreed very well with the theoretical results. From the consequence of these syntheses, it can be confirmed that the principle can apply to synthesize the antenna for the point-to-point communication system e.g. radar and radio astronomy efficiently

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ, ทวินามและพหุนามเชิงตั้งฉาก	3
2.1 การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ	4
2.2 การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทวินาม	7
2.3 คุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ของพหุนามเลอจองด์ร์และพหุนามเชฟปีเซฟทั้งสองแบบ	8
2.4 ขั้นตอนการออกแบบแถวลำดับ	11
บทที่ 3 การคำนวณ ผลการคำนวณ การออกแบบ และการสร้างสายอากาศ	13
3.1 การสังเคราะห์สายอากาศ	13
3.1.1 การกระจายกระแส	15
3.1.2 ตัวประกอบแถวลำดับ	16
3.1.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	20
3.1.4 ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	23
3.1.5 ความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลแรก	24
3.1.6 ค่าการชี้ทิศทาง	25
3.1.7 ประสิทธิภาพลำคลื่น	26
3.2 ระบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องโดยใช้ท่อนำคลื่น	27
3.3 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องเชิงเส้น	34
3.4 การสร้างสายอากาศ	35
บทที่ 4 การทดสอบและผลการทดสอบ	39
4.1 การทดสอบสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนท์	39
4.1.1 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ	40
4.1.2 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินาม	42
4.1.3 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟปีเซฟชนิดที่ 1	44
4.1.4 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟปีเซฟชนิดที่ 2	46
4.1.5 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์	48
4.2 การทดสอบสายอากาศ	50
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนที่ให้กำเนิดสัญญาณ	51
4.2.2 อุปกรณ์ในภาครับสัญญาณ	52
4.3 ผลการทดสอบ	54
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์	61

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารนี้จัดทำขึ้นที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปการหาสนามระยะไกลของแฉวลำดับ N องค์ประกอบของตัวแปรกระจายคลื่นไอโซทรอปิก	3
รูปที่ 2.2 รูปการวางองค์ประกอบของการแจกแจงกระแสแบบไม่สม่ำเสมอ	
2.2(ก) กรณีที่องค์ประกอบเป็นจำนวนคู่	5
2.2(ข) กรณีที่องค์ประกอบเป็นจำนวนคี่	6
รูปที่ 3.1 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามที่เกิดจากร่องเดี่ยวในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก	14
รูปที่ 3.2 แสดงการกระจายกระแสของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ, ทวินามและโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉากทั้งสาม	15
รูปที่ 3.3 แสดงตัวประกอบแฉวลำดับของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอในพิกัดมุมฉาก	16
รูปที่ 3.4 แสดงตัวประกอบแฉวลำดับของการกระจายกระแสแบบทวินามในพิกัดมุมฉาก	17
รูปที่ 3.5 แสดงตัวประกอบแฉวลำดับของการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 ในพิกัดมุมฉาก	17
รูปที่ 3.6 แสดงตัวประกอบแฉวลำดับของการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 ในพิกัดมุมฉาก	18
รูปที่ 3.7 แสดงตัวประกอบแฉวลำดับของการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเลอจองด์ร์ในพิกัดมุมฉาก	18
รูปที่ 3.8 แสดงตัวประกอบแฉวลำดับของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบในระนาบสนามแม่เหล็ก	19
รูปที่ 3.9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก	20
รูปที่ 3.10 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทวินามในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก	20
รูปที่ 3.11 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 ในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก	21
รูปที่ 3.12 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 ในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก	21
รูปที่ 3.13 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยใช้พหุนามเลอจองด์ร์ในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก	22
รูปที่ 3.14 แสดงความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครั้งหนึ่งของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ	23
รูปที่ 3.15 แสดงความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรกของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ	24
รูปที่ 3.16 แสดงค่าการชี้ทิศทางของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ	25
รูปที่ 3.17 แสดงประสิทธิภาพของลำคลื่นของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ	26
รูปที่ 3.18 แสดงลักษณะการเจาะร่องบนผนังท่ออากาศ	28
(ก) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านแคบ	
(ข) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านกว้าง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) การเจาะแบบกึ่งกลาง

(ง) การเจาะขอบผนัง

รูปที่ 3.19 แสดงการไหลของกระแสบนผิวท่อนำคลื่นโหมด TE ₁₀	29
รูปที่ 3.20 แสดงวงจรเสมือนของร่องแบบต่างๆที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่น	29
รูปที่ 3.21(ก) แสดงแถวลำดับแบบเรโซแนนซ์ของร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น สี่เหลี่ยม	30
3.21(ข) แสดงวงจรสมมูลในกรณีทั่วๆไปของเรโซแนนซ์	30
รูปที่ 3.22 แสดงร่องที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่น	32
รูปที่ 3.23 แสดงหน้าตัดของท่อทองเหลืองที่ใช้ในการสร้างสายอากาศ	34
รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะการเจาะร่องบนผนังคลื่นตามแนวยาว	35
รูปที่ 4.1 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอกรณีที่ไม่ได้ปรับจูน	40
รูปที่ 4.2 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอกรณีที่ไม่ได้ปรับจูน	40
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอกรณีที่ได้ปรับจูนด้วยสตัด	41
รูปที่ 4.4 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอกรณีที่ได้ปรับจูน ด้วยสตัด	41
รูปที่ 4.5 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบทวินามกรณีที่ไม่ได้ปรับจูน	42
รูปที่ 4.6 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินามกรณีที่ไม่ได้ปรับจูน	42
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบทวินามกรณีที่ได้ปรับจูนด้วยสตัด	43
รูปที่ 4.8 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินามกรณีที่ได้ปรับจูน ด้วยสตัด	43
รูปที่ 4.9 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 กรณีที่ไม่ได้ปรับจูน	44
รูปที่ 4.10 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 กรณีที่ไม่ได้ปรับจูน	44
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 กรณีที่ได้ปรับจูนด้วยสตัด	45
รูปที่ 4.12 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 กรณีที่ได้ปรับจูนด้วยสตัด	45
รูปที่ 4.13 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 กรณีที่ไม่ได้ปรับจูน	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเซฟปีเซฟชนิดที่ 2 กรณีที่ไม่ได้ปรับจูน	46
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเซฟปีเซฟชนิดที่ 2 กรณีที่ปรับจูนด้วยสตัด	47
รูปที่ 4.16 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเซฟปีเซฟชนิดที่ 2 กรณีที่ปรับจูนด้วยสตัด	47
รูปที่ 4.17 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์กรณีที่ไม่ได้ปรับจูน	48
รูปที่ 4.18 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์กรณีที่ ไม่ได้ปรับจูน	48
รูปที่ 4.19 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์กรณีที่ปรับจูนด้วยสตัด	49
รูปที่ 4.20 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์กรณี ที่ปรับจูนด้วยสตัด	49
รูปที่ 4.21 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทดสอบสายอากาศ	50
รูปที่ 4.22 แสดงอุปกรณ์ส่วนกำเนิดสัญญาณและสายอากาศส่ง	51
รูปที่ 4.23 แสดงอุปกรณ์ในภาครับสัญญาณ	52
รูปที่ 4.24 แสดงการจัดวางเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	53
รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดเชิงขั้ว	
4.25(ก) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสมมาตร	54
4.25(ข) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินาม	54
4.25(ค) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเซฟปีเซฟชนิดที่ 1	55
4.25(ง) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเซฟปีเซฟชนิดที่ 2	55
4.25(จ) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์	56
รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบผลการทดสอบและผลจากการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก	
4.26(ก) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสมมาตร	57
4.26(ข) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินาม	57
4.26(ค) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเซฟปีเซฟชนิดที่ 1	58
4.26(ง) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเซฟปีเซฟชนิดที่ 2	58
4.26(จ) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์	59
รูปที่ 4.27 แสดงผลการทดสอบและผลจากการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในระนาบสนามไฟฟ้าในพิกัดเชิงขั้ว	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ของพหุนามเลขจอร์ด์และพหุนามเชฟปีเซฟชนิดที่ 1 และ 2	8
ตารางที่ 2.2 แสดงค่า a_n , $p(x)$ และ $g(x)$ ของพหุนามเลขจอร์ด์และพหุนามเชฟปีเซฟชนิดที่ 1 และ 2	9
ตารางที่ 2.3 แสดงค่า $a_1(n)$, $a_2(n)$ และ $a_3(n)$	9
ตารางที่ 3.1 แสดงการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ(Uniform Array), ค่าความนำนอร์มัลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์	36
ตารางที่ 3.2 แสดงการกระจายกระแสแบบทวินาม(Binomial Array), ค่าความนำนอร์มัลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์	36
ตารางที่ 3.3 แสดงการกระจายกระแสแบบเชฟปีเซฟชนิดที่ 1 (First Kind Tschebyscheff Array), ค่าความนำนอร์มัลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์	37
ตารางที่ 3.4 แสดงการกระจายกระแสแบบเชฟปีเซฟชนิดที่ 2 (Second Kind Tschebyscheff Array), ค่าความนำนอร์มัลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์	37
ตารางที่ 3.5 แสดงการกระจายกระแสแบบเลขจอร์ด์(Legendre Array), ค่าความนำนอร์มัลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในการสื่อสารแบบไร้สาย(Wireless Communication)นั้น สายอากาศ(Antenna) นับว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการรับสัญญาณ ในการสื่อสารไร้สายแต่ละแบบก็จะมีความต้องการใช้สายอากาศต่างชนิดกันไป หนึ่งใน การสื่อสารไร้สายแบบจุดต่อจุด(Point to Point Communication)นั้น ความแม่นยำของการตรวจจับสัญญาณของสายอากาศจำเป็นต้องดีเพื่อให้มีการสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สายอากาศโดยทั่วไปในแต่ละองค์ประกอบ(Element) จะมีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น(Radiation Characteristics)ที่ต่างกัน เพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการ การสื่อสารแบบจุดต่อจุดนั้น แต่ละองค์ประกอบของสายอากาศจำเป็นต้องพัฒนาเพื่อจุดประสงค์ให้มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเป็นไปตามความต้องการของการประยุกต์ใช้งาน คุณลักษณะดังกล่าวได้แก่ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น(Radiation Pattern) เป็นรูปลำคินสอด(Pencil Beam) มีระดับโลบข้าง(Side Lobe Level)ต่ำ มีความกว้างลำคลื่น(Beamwidth)แคบ มีคุณสมบัติการชี้ทิศทาง(Directivity)สูง และมีประสิทธิภาพลำคลื่น(Beam Efficiency)สูง เป็นต้น การขยายขนาดของสายอากาศโดยทั่วไปไม่นิยมเนื่องจากจะทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง การนำสายอากาศมาเรียงเป็นแถวลำดับ(Array)เป็นที่นิยมเนื่องจากสามารถควบคุมคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นได้ และขนาดของสายอากาศไม่ใหญ่จนเกินไปอีกทั้งสามารถเลือกที่จะทำได้หลายแบบ โดยทั่วไปมีทั้งแถวลำดับเชิงเส้น(Linear Array) แถวลำดับระนาบ(Planar Array) แถวลำดับวงกลม(Circular Array) แถวลำดับลูกบาศก์(Cubical Array) แถวลำดับรูปกรวย(Conical Array) ฯลฯ สำหรับการควบคุมคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับก็ทำได้หลายวิธี ได้แก่

1. การเรียงรูปแบบต่างๆ ในแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับ
2. การปรับระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับ
3. ขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับ
4. เฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับ
5. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ต่างๆกันของแต่ละองค์ประกอบ

สำหรับรายงานฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับเชิงเส้น ที่มีการป้อนขนาดของกระแสที่แต่ละองค์ประกอบต่างๆกัน โดยที่เฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบคงที่ โดยที่พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในกรณีที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบมีระยะห่างเท่ากันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น โดยที่จะใช้องค์ประกอบของแถวลำดับเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซโทรปิก(Isotropic Radiator) ก่อนเพื่อความง่ายในการคำนวณ จากนั้นจะทำการคำนวณและออกแบบในกรณีที่สายอากาศมีองค์ประกอบเป็นร่อง(Slot)แทน เพื่อนำไปสร้างเพื่อทดสอบ และยืนยันผลการคำนวณต่อไป

การป้อนขนาดของกระแสให้กับแต่ละองค์ประกอบจะพิจารณาเป็น 5 ลักษณะ คือ

1. การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution)

การป้อนขนาดของกระแสแบบนี้จะให้มีความเท่ากันทุกองค์ประกอบของแถวลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การกระจายกระแสแบบทวินาม (Binomial Distribution)

การป้อนขนาดของกระแสแบบนี้จะถ่วงน้ำหนัก(Weighted) ให้แต่ละองค์ประกอบโดยใช้สัมประสิทธิ์จากทฤษฎีการกระจายแบบทวินาม(Binomial Expansion) หรือ สามเหลี่ยมปาสคาล(Pascal Triangle) นั่นเอง

3. การกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่หนึ่ง (First Kind Tschebyscheff Distribution)

4. การกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่สอง(Second Kind Tschebyscheff Distribution)

5. การกระจายกระแสแบบเลอจองด์ร์ (Legendre Distribution)

สำหรับการป้อนขนาดของกระแสในข้อ 3-5 นี้จะทำการสังเคราะห์บนพื้นฐานของพหุนามเชิงตั้งฉาก (Orthogonal Polynomial) 3 แบบคือ พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1, พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 และพหุนามเลอจองด์ร์ ตามลำดับ ซึ่งรายละเอียดในการสังเคราะห์การกระจายกระแสทั้ง 5 แบบดังกล่าวจะได้แสดงในบทที่ 2

ข้อดีข้อเสียของการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 5 แบบกล่าวคือสำหรับการกระจายกระแสแบบสมมาตรนั้นข้อดีคือ สร้างระบบการป้อนสัญญาณได้ง่ายและความกว้างลำคลื่นแคบมาก แต่พบว่าระดับโลบข้างสูงมากโดยทั่วไปสูงประมาณ 13-14 dB ซึ่งต่อมา John Stone ได้เสนอให้มีการถ่วงน้ำหนักของขนาดกระแสโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากการกระจายแบบทวินาม ซึ่งเขาได้จัดไว้ในสิทธิบัตร ข้อดีของการกระจายกระแสแบบทวินามนี้มีข้อดีคือระดับโลบข้างต่ำมากๆ หรือบางกรณีอาจปราศจากโลบข้างเลยเสียด้วยซ้ำ แต่ก็พบว่ามีลำคลื่นกว้างมากและพบว่าการสร้างระบบป้อนคลื่นทำได้ยาก โดยเฉพาะในกรณีที่แวลวลำดับมีขนาดมากกว่า 10 องค์ประกอบ อย่างไรก็ตามพบว่าการกระจายกระแสทั้งแบบสมมาตรและทวินามมีข้อเสียตรงกันในเรื่องที่ไม่สามารถควบคุมระดับโลบข้างได้ ต่อมา C.L.Dolph จึงได้เสนอให้มีการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 เพื่อให้ควบคุมระดับโลบข้างได้ และเป็นการประนีประนอมระหว่างระดับโลบข้างและความกว้างลำคลื่นของการกระจายแบบสมมาตรและทวินาม กล่าวคือ การกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 จะมีระดับโลบข้างต่ำกว่าการกระจายแบบสมมาตรและมีความกว้างลำคลื่นแคบกว่าการกระจายแบบทวินาม แต่เนื่องจากการสังเคราะห์ลำคลื่นอยู่บนพื้นฐานของพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 ดังนั้นพบว่าระดับโลบข้างจึงมีขนาดเท่ากันทุกๆ โลบซึ่งเป็นข้อเสียทำให้แทนที่กำลังงานจะกระจายอยู่บนลำคลื่นหลักกลับไปกระจายอยู่บนลำคลื่นย่อย ซึ่งมีผลให้ประสิทธิภาพลำคลื่นสูญเสียไปอย่างมาก

Phongcharoenpanich และคณะจึงได้นำเสนอการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบใหม่โดยใช้พหุนามเลอจองด์ร์และพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 เพื่อให้ได้คุณลักษณะลำคลื่นแคบ ระดับโลบข้างต่ำและยังให้ประสิทธิภาพลำคลื่นที่สูงอีกด้วย ซึ่งรายละเอียดของการคำนวณ ผลการคำนวณอันได้แก่การกระจายกระแส แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ความกว้างลำคลื่นที่เกิดนัลแรก ค่าการชี้ทิศทาง และประสิทธิภาพของลำคลื่น จะนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการสร้างสายอากาศแวลวลำดับแบบร่องเชิงเส้นดังจะกล่าวถึงในบทที่ 3 และสำหรับรายละเอียดของการทดสอบและผลจากการทดสอบจะแสดงไว้ในบทที่ 4 ส่วนในบทที่ 5 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายของปริญญาพนธ์จะเป็นสรุปและวิจารณ์ของโครงการนี้

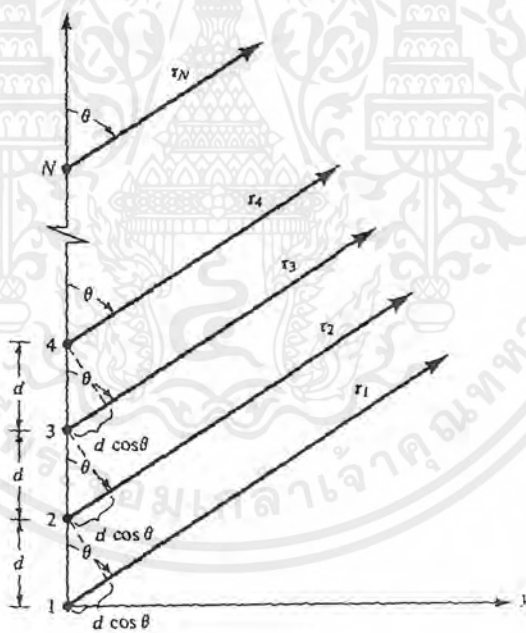
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ, ทวินามและพหุนามเชิงตั้งฉาก

ในบทนี้จะได้แสดงการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับเชิงเส้นที่มีการกระจายกระแสแบบต่างๆ อันได้แก่ การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ ทวินาม และโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉากทั้ง 3 แบบคือ พหุนามเชฟปีเชฟชนิดที่ 1 พหุนามเชฟปีเชฟชนิดที่ 2 และพหุนามเลอจองด์ โดยผลที่ได้จากการสังเคราะห์ในบทนี้จะแสดงผลในบทที่ 3 ต่อไป

พิจารณาแถวลำดับที่มีองค์ประกอบแบบไอโซทรอปิกวางอยู่ตามแกน Z และมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น d และองค์ประกอบที่เหมือนกันทั้งหมด N องค์ประกอบวางในแนวเดียวกันกับจุดกำเนิดตามแนวแกน Z และแต่ละองค์ประกอบมีเฟสเหมือนกัน ($\beta = 0$) เมื่อ β เป็นความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้แก่องค์ประกอบ โดยการวางองค์ประกอบจะวางในลักษณะดังรูป



รูปที่ 2.1 รูปการหาสนามระยะไกลของแถวลำดับ N องค์ประกอบของตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก

เนื่องจากสนามลัพท์ของแถวลำดับมีค่าเท่ากับสนามขององค์ประกอบเดี่ยว คุณด้วยแฟคเตอร์ซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับ หรือที่เรียกอีกอย่างว่า อาร์เรย์แฟคเตอร์ (Array Factor : AF) ดังนั้นในการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจึงต้องพิจารณาถึงตัวประกอบแถวลำดับด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในบทนี้เราจะพิจารณาในกรณีที่สนามขององค์ประกอบเดี่ยวเป็นสนามที่เกิดจากตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบมีระยะที่เท่ากัน และเฟสของกระแสที่ป้อนให้แก่องค์ประกอบเหมือนกัน ซึ่งมีลักษณะเป็นบรอดไซด์อาร์เรย์คือเป็นอาร์เรย์ที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดในทิศทางตั้งฉากกับแกนของอาร์เรย์(ลักษณะการวางองค์ประกอบ)

2.1 การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ

การป้อนกระแสให้แก่แต่ละองค์ประกอบมีขนาดเท่ากันหมด ดังรูปที่ 2.1 สำหรับสนามลิฟท์ของแถวลำดับจะเป็นการคูณระหว่างแบบรูปของแต่ละองค์ประกอบกับตัวประกอบแถวลำดับดังนี้

$$AF = 1 + e^{jkd \cos \theta} + e^{j2kd \cos \theta} + \dots + e^{j(N-1)kd \cos \theta} \quad (2.1)$$

$$= \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)kd \cos \theta} \quad (2.2)$$

ให้ $\psi = kd \cos \theta$

$$\therefore AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \quad (2.3)$$

คูณทั้งสองข้างด้วย $e^{j\psi}$ จะได้

$$(AF)e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \dots + e^{j(N-1)\psi} + e^{jN\psi} \quad (2.4)$$

เมื่อลบสมการ (2.3) ออกจากสมการ (2.4) จะได้

$$AF(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \quad (2.5)$$

หรือเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} AF &= \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1} \right] = e^{j \left[\frac{(N-1)}{2} \right] \psi} \left[\frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}} \right] \\ &= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{\sin \left(\frac{N}{2} \psi \right)}{\sin \left[\frac{\psi}{2} \right]} \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

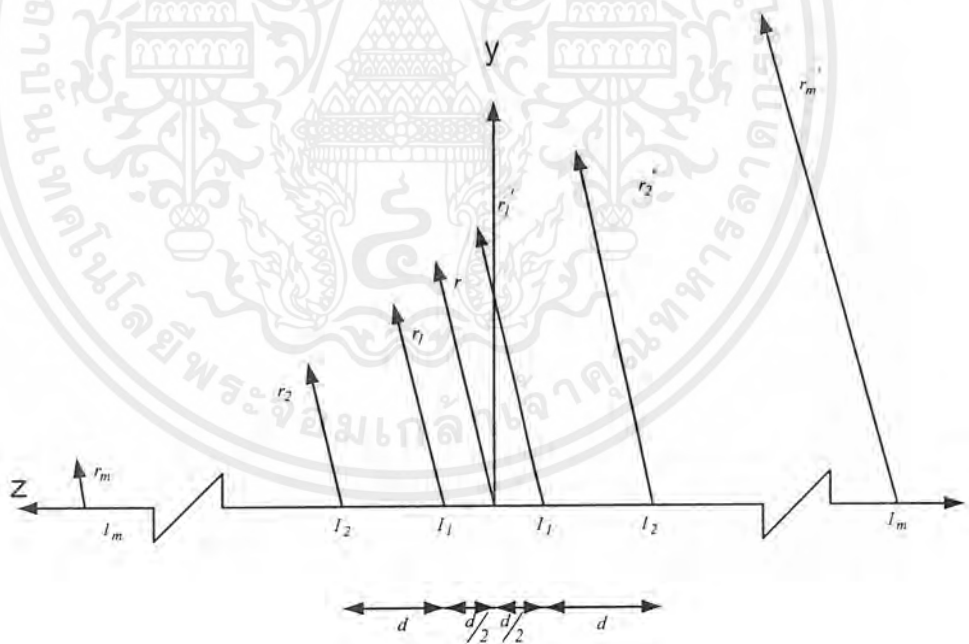
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าจุดเปรียบเทียบเฟสเป็นจุดกึ่งกลางของแถวลำดับจากสมการ (2.6) จะเป็น

$$AF = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \right] \quad (2.7)$$

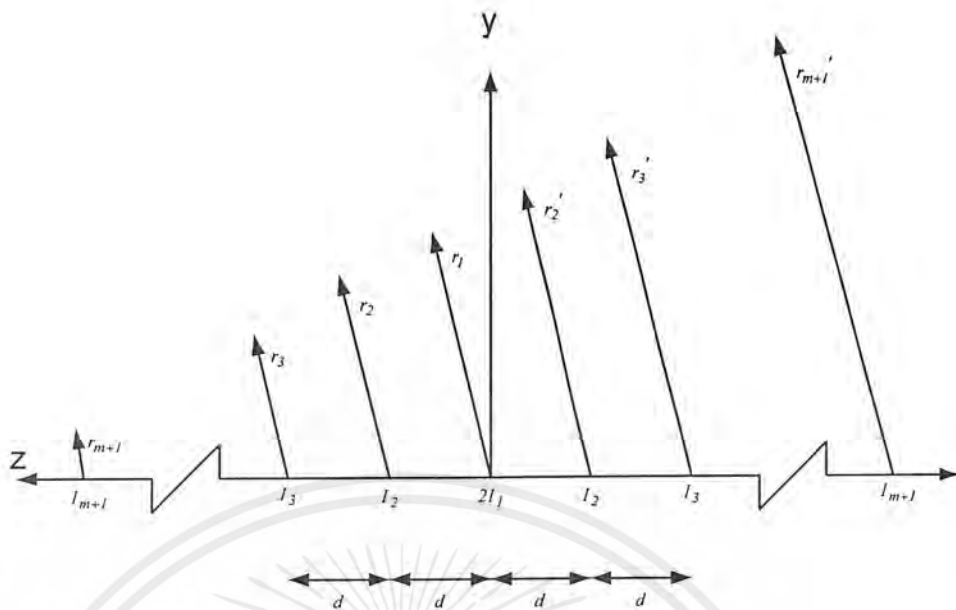
ซึ่งสมการที่ (2.7) นี้เองเป็นค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบแรงแปรสมมาตร

พิจารณาแถวลำดับที่มีองค์ประกอบแบบไอโซทรอปิกวางอยู่แนวแกน Z อย่างสมมาตรและมีระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบเป็น d และองค์ประกอบทั้ง N วางอย่างสมมาตรกับจุดกำเนิด ดังรูปที่ 2.2(ก) และ 2.2(ข) สำหรับกรณีที่มีการป้อนกระแสให้แต่ละองค์ประกอบมีขนาดไม่สม่ำเสมอ คือกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากันทุกองค์ประกอบ สำหรับในรูปที่ 2.1 และ 2.2 มีลักษณะการวางองค์ประกอบในลักษณะที่จัดเรียงองค์ประกอบเป็นเส้นตรง



รูปที่ 2.2(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2(ข)

รูปที่ 2.2 รูปการวางองค์ประกอบของการแรงแจกรูปกระแสบางแบบไม่สม่ำเสมอ

2.2(ก) กรณีที่องค์ประกอบเป็นจำนวนคู่

2.2(ข) กรณีที่องค์ประกอบเป็นจำนวนคี่

สำหรับค่าตัวประกอบแอมพลิจูดพิจารณาได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 (AF)_{2M} = & I_1 e^{j\left(\frac{1}{2}\right)kd \cos \theta} + I_2 e^{j\left(\frac{3}{2}\right)kd \cos \theta} + \dots + I_M e^{j\left(\frac{(2M-1)}{2}\right)kd \cos \theta} \\
 & + I_1 e^{-j\left(\frac{1}{2}\right)kd \cos \theta} + I_2 e^{-j\left(\frac{3}{2}\right)kd \cos \theta} + \dots + I_M e^{-j\left(\frac{(2M-1)}{2}\right)kd \cos \theta}
 \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$(AF)_{2M} = 2 \sum_{n=1}^M I_n \cos \left[\frac{(2n-1)}{2} kd \cos \theta \right] \quad (2.9)$$

และค่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (Normalized Array Factor) จะเป็น

$$(AF_n)_{2M} = \sum_{n=1}^M I_n \cos \left[\frac{(2n-1)}{2} kd \cos \theta \right] \quad (2.10)$$

โดยที่ I_n เป็นสัมประสิทธิ์การป้อนกระแสให้แก่องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับในกรณีที่จำนวนองค์ประกอบเป็นเลขคี่ ($2M+1$; M เป็นจำนวนเต็ม) ค่าตัวประกอบแถวลำดับจะเป็น

$$(AF)_{2M+1} = I_1 + I_2 e^{jkd \cos \theta} + I_3 e^{j2kd \cos \theta} + \dots + I_{M+1} e^{jMkd \cos \theta} \\ + I_2 e^{-jkd \cos \theta} + I_3 e^{-j2kd \cos \theta} + \dots + I_{M+1} e^{-jMkd \cos \theta} \quad (2.11)$$

จะได้

$$(AF)_{2M+1} = 2 \sum_{n=1}^{M+1} I_n \cos[(n-1)kd \cos \theta] \quad (2.12)$$

และเช่นเดียวกันเมื่อปรับบรรทัดฐานแล้วจะเป็น

$$(AF_n)_{2M+1} = \sum_{n=1}^{M+1} I_n \cos[(n-1)kd \cos \theta] \quad (2.13)$$

ซึ่งจะเห็นว่า การป้อนกระแสให้กับองค์ประกอบกลางเป็น $2I_n$ ดังนั้นจึงทำการเขียนได้เป็น

$$(AF)_{2M} (\text{เลขคู่}) = \sum_{n=1}^M I_n \cos \left[(2n-1) \frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta \right] \quad (2.14)$$

และ

$$(AF)_{2M+1} (\text{เลขคี่}) = \sum_{n=1}^{M+1} I_n \cos \left[2(n-1) \frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta \right] \quad (2.15)$$

2.2 การตั้งคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทวินาม

การหาสัมประสิทธิ์การกระจายกระแสของการแจกแจงแบบทวินาม John Stone Stone กล่าวว่า สามารถเขียนฟังก์ชัน $(1+x)^{m-1}$ เป็นอนุกรมโดยใช้การกระจายอนุกรมทวินามได้ว่า

$$(1+x)^{m-1} = 1 + (m-1)x + \frac{(m-1)(m-2)}{2!} x^2 + \frac{(m-1)(m-2)(m-3)}{3!} x^3 + \dots \quad (2.16)$$

ถ้าค่า m เป็นจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับแล้ว สัมประสิทธิ์ของอนุกรมจะเป็นขนาดสัมพัทธ์ของกระแสในแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งเนื่องจากการหาสัมประสิทธิ์ของการป้อนกระแสให้กับองค์ประกอบของแถวลำดับได้จากอนุกรมทวินามจึงเรียกว่า แถวลำดับแบบทวินาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแตกสัมประสิทธิ์ที่เป็นค่าบวกของอนุกรมออกที่ค่า m ต่างๆ จะมีค่าดังต่อไปนี้

$m=1$				1				
$m=2$			1	1				
$m=3$		1	2	1				
$m=4$		1	3	3	1			
$m=5$		1	4	6	4	1		
$m=6$	1	5	10	10	5	1		
$m=7$	1	6	15	20	15	6	1	

(2.17)

เรียก (2.17) ว่าสามเหลี่ยมปาสคาล (Pascal's Triangle)

2.3 คุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ของพหุนามเลอจองด์ร์และพหุนามเชฟบีเชฟทั้งสองแบบ

พหุนามเลอจองด์ร์และพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 และ 2 จัดเป็นพหุนามเชิงตั้งฉากซึ่งเป็นไปตามสมการเชิงอนุพันธ์ของพหุนามเชิงตั้งฉากคือ

$$c_2(x) \frac{d^2 y}{dx^2} + c_1(x) \frac{dy}{dx} + c_0(n)y = 0 \quad (2.18)$$

โดยที่ $c_2(x)$, $c_1(x)$ และ $c_0(n)$ เป็นฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ และ $c_2(x)$ และ $c_1(x)$ เป็นฟังก์ชันของ x ที่อิสระจาก n และ $c_0(n)$ เป็นฟังก์ชันเฉพาะของ n เท่านั้น

ซึ่งค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ดังกล่าวของพหุนามเลอจองด์ร์และพหุนามเชฟบีเชฟทั้งสองแบบแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ของพหุนามเลอจองด์ร์และพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 และ 2

$f_n(x)$	$P_n(x)$	$T_n(x)$	$U_n(x)$
$c_2(x)$	$1-x^2$	$1-x^2$	$1-x^2$
$c_1(x)$	$-2x$	$-x$	$-3x$
$c_0(n)$	$n(n+1)$	n^2	$n(n+2)$

โดยที่ $f_n(x)$, $P_n(x)$, $T_n(x)$, และ $U_n(x)$ เป็นรูปทั่วไปของพหุนามเชิงตั้งฉากได้แก่พหุนามเลอจองด์ร์ พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ, n เป็นอันดับ (Order) ของพหุนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพหุนามเชิงตั้งฉากนี้สามารถเขียนในรูปแบบของ Rodrigues' ได้เป็น

$$f_n(x) = \frac{1}{a_n p(x)} \frac{d^n}{dx^n} [p(x) \{g(x)\}^n] \quad (2.19)$$

โดยที่ $p(x), g(x)$ เป็นฟังก์ชันของ x และอิสระจาก n ในขณะที่ a_n เป็นฟังก์ชันเฉพาะของ n เท่านั้น ค่าของฟังก์ชันเหล่านี้ แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงค่า $a_n, p(x)$ และ $g(x)$ ของพหุนามเลจองด์ร์และพหุนามเชฟปีเชฟชนิดที่ 1 และ 2

$f_n(x)$	$P_n(x)$	$T_n(x)$	$U_n(x)$
a_n	$(-1)^n 2^n n!$	$(-1)^n 2^n \frac{\Gamma(n + \frac{1}{2})}{\sqrt{\pi}}$	$(-1)^n 2^{n+1} \frac{\Gamma(n + \frac{3}{2})}{(n+1)\sqrt{\pi}}$
$p(x)$	1	$(1-x)^{\frac{1}{2}}$	$(1-x)^{\frac{1}{2}}$
$g(x)$	$1-x^2$	$1-x^2$	$1-x^2$

ส่วนรูปแบบทั่วไปของความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (Recurrence formula) สำหรับพหุนามเลจองด์ร์, และพหุนามเชฟปีเชฟชนิดที่ 1 และ 2 แสดงได้เป็น

$$a_1(n) f_{n+1}(x) - a_2(n) x f_n(x) + a_3(n) f_{n-1}(x) = 0 \quad (2.20)$$

โดยที่ $a_1(n), a_2(n)$ และ $a_3(n)$ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า $a_1(n), a_2(n)$ และ $a_3(n)$

$f_n(x)$	$P_n(x)$	$T_n(x)$	$U_n(x)$
$a_1(n)$	$n+1$	1	1
$a_2(n)$	$2n+1$	2	2
$a_3(n)$	n	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยพหุนามเลอจองด์ร์, เซฟบีเซฟชนิดที่ 1 และ 2 นั้นพบว่าคุณสมบัติที่สำคัญของพหุนามทั้งสามที่จำเป็นในการสังเคราะห์ลำดับได้แก่

1. พหุนามเลอจองด์ร์และเซฟบีเซฟชนิดที่ 1 ที่ทุกๆอันดับ (Order) จะผ่านจุด (1,1) เสมอ
2. แอมพลิจูดของพหุนามเลอจองด์ร์และเซฟบีเซฟชนิดที่ 1 จะอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ในบริเวณ $|\chi| \leq 1$
3. ในบริเวณ $|\chi| \leq 1$ ค่าสูงสุดอันดับแรกของแอมพลิจูดของพหุนามเซฟบีเซฟชนิดที่ 1 จะให้ค่าเท่ากับทั้งหมด ในขณะที่เลอจองด์ร์และเซฟบีเซฟชนิดที่ 2 จะให้ค่าที่ไม่สม่ำเสมอ

ในการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นในขั้นแรกจะพิจารณาตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor) ก่อน สมมติว่าให้มีองค์ประกอบตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปีกวางอย่างสมมาตรกับจุดกึ่งกลางของแถวลำดับและมีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากัน

ในกรณีที่มีจำนวนองค์ประกอบเป็นจำนวนคู่ ค่าตัวประกอบแถวลำดับจะเป็น

$$AF_{2N}(\theta) = \sum_{n=1}^N I_n \cos[(2n-1) \frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta] \quad (2.21 ก)$$

สำหรับตัวประกอบแถวลำดับในกรณีจำนวนองค์ประกอบเป็นจำนวนคี่จะเป็น

$$AF_{2N+1}(\theta) = \sum_{n=1}^{N+1} I_n \cos[2(n-1) \frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta] \quad (2.21 ข)$$

โดยที่ I_n เป็นแอมพลิจูดของการป้อนกระแสที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว $2N$ และ $2N+1$ เป็นจำนวนขององค์ประกอบที่เป็นจำนวนคู่และคี่ตามลำดับ เมื่อ d เป็นระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบ, λ เป็นความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ และ θ เป็นมุมระหว่างทิศทางของสนามกับจุดสังเกต

ในการที่จะสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับ ค่าผลรวมของฟังก์ชันโคไซน์สำหรับกรณีที่มีจำนวนองค์ประกอบเป็นเลขคู่และเลขคี่จะถูกกระจายออก โดยลำดับของฮาร์โมนิกซ์ของฟังก์ชันโคไซน์จะเท่ากับจำนวนองค์ประกอบทั้งหมดลบหนึ่ง และอาร์กิวเมนต์ของฟังก์ชันโคไซน์จะเป็นจำนวนเต็มบวกเท่าของความถี่พื้นฐาน (Fundamental Frequency) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$m = k,$$

$$\begin{aligned} \cos(mu) = & \cos^k(u) - \binom{k}{2} \cos^{k-2}(u) \sin^2(u) + \binom{k}{4} \cos^{k-4}(u) \sin^4(u) - \dots - \\ & \binom{k}{k-2} \cos^2(u) \sin^{k-2}(u) + \sin^k(u) \end{aligned} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่ } \binom{k}{n} = \frac{k!}{n!(k-n)!} \quad \text{และ} \quad \sin^2(u) = 1 - \cos^2(u)$$

ในการออกแบบแวลลำดับของพหุนามเชิงตั้งฉาก ค่าของพจน์โคไซน์และค่าของพหุนามเชิงตั้งฉากจะถูกจับมาเท่ากันคือ

$$m = k, \quad \cos(mu) = f_k(x) \quad (2.23)$$

2.4 ขั้นตอนการออกแบบแวลลำดับ

สมมติว่าจำนวนองค์ประกอบ, ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบในรูปของความยาวคลื่น และอัตราส่วนของค่าความเข้มลำคลื่นหลักต่อค่าลำคลื่นย่อยแรกเป็นค่าที่ทราบก่อนหน้านั้นเพื่อที่จะหาตัวประกอบของแวลลำดับจะใช้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จากค่าจำนวนองค์ประกอบที่ทราบค่า เราสามารถเลือกค่าตัวประกอบแวลลำดับได้จากสมการ (2.21 ก) หรือ (2.21 ข)

2. เลือกค่าฟังก์ชันโคไซน์ที่เหมาะสมจากสมการ (2.22) และแทนค่าลงในตัวประกอบแวลลำดับที่ได้กระจายแล้ว

3. หาค่าอันดับของพหุนามเชิงตั้งฉากโดยเอาจำนวนองค์ประกอบทั้งหมดของแวลลำดับลบหนึ่งจับพหุนามเชิงตั้งฉากกับค่าอัตราส่วนของความเข้มลำคลื่นหลักต่อค่าลำคลื่นย่อยแรก แล้วแก้สมการหาค่ารากของพหุนาม $x = x_m$ (ซึ่งเป็นจุดที่ค่าลำคลื่นหลักสูงสุดเกิดขึ้น) ค่าระดับลำคลื่นด้านข้างของแบบรูปแวลลำดับสามารถสร้างได้จากบริเวณจุด -1 ถึงจุดที่เกิดนิกไทด์จุด $+1$ ($x = x_n$) และลำคลื่นหลักสามารถสร้างได้จากบริเวณ x_n ถึง x_m

4. ปรับบรรทัดฐาน x เพื่อให้ค่าสูงสุดของฟังก์ชันโคไซน์ไม่เกินหนึ่ง โดยการหารด้วยค่า x_m

5. นำค่าตัวประกอบแวลลำดับที่ได้กระจายแล้วมาเท่ากับค่าของพหุนามเชิงตั้งฉาก และหาค่าแอมพลิจูดของสัมประสิทธิ์การป้อนกระแส I_n

หลังจากที่ทราบค่าสัมประสิทธิ์การป้อนกระแส โดยใช้สมการ (2.21 ก) และ (2.21 ข) เราสามารถเขียนนิพจน์ที่สมบูรณ์ของตัวประกอบแวลลำดับ และค่าคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของแวลลำดับจะสามารถวิเคราะห์ได้

อนึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่สำคัญที่จะพิจารณาได้แก่ ประสิทธิภาพลำคลื่น (Beam Efficiency) ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนของกำลังที่ส่ง(รับ)ภายในลำคลื่นหลักต่อกำลังส่ง(รับ)โดยสายอากาศทั้งหมด สำหรับกรณีแวลลำดับเชิงเส้น, ค่าประสิทธิภาพลำคลื่นสามารถสร้างสูตรได้เป็น

$$\text{ประสิทธิภาพลำคลื่น (BE)} = \frac{\int_{\theta_1}^{90^\circ} |AF(\theta)|^2 \sin\theta d\theta}{\int_0^{90^\circ} |AF(\theta)|^2 \sin\theta d\theta} \quad (2.24)$$

โดยที่ θ_1 เป็นมุมของกรวยที่ให้นัลครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งงานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศคือค่าการชี้ทิศทาง (Directivity) ซึ่งนิยามพิจารณาโดยอัตราส่วนของค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดต่อความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของตัวแพร่คลื่นไอโซทรอปิก ซึ่งในกรณีของแถวลำดับเชิงเส้นในแนวบรอดไซด์ค่าการชี้ทิศทางสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{ค่าการชี้ทิศทาง (Do)} = \frac{2|AF(90^\circ)|^2}{\int_0^{180^\circ} |AF(\theta)|^2 \sin\theta d\theta} \quad (2.25)$$

โดยทฤษฎีทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบแถวลำดับได้ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในบทที่ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณ ผลการคำนวณ การออกแบบ และการสร้างสายอากาศ

3.1 การตั้งเกราะห้สายอากาศ

ในทฤษฎีการวิเคราะห์และสังเคราะห์สายอากาศสิ่งที่เราต้องพิจารณาคือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของโคออร์ดิเนตตำแหน่ง (Space Coordinate) โดยส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้มักจะคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

เนื่องจากคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเดี่ยวซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นค่อนข้างกว้างและมีแกนต่ำ แต่ในงานบางอย่างต้องการใช้สายอากาศที่มีค่าการขยายสูง การเพิ่มแกนของสายอากาศอาจทำได้โดยเพิ่มขนาดของสายอากาศ แต่สายอากาศก็จะมีขนาดใหญ่ ซึ่งเราสามารถแก้ปัญหาได้โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศ โดยจัดองค์ประกอบที่แพร่กระจายคลื่นให้เหมาะสมทั้งทางไฟฟ้าและรูปทรง ซึ่งเรียกว่าแถวลำดับหรืออาร์เรย์ (Array)

ในปริภูมิตวินพจน์นี้เราได้พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบเชิงเส้นที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 10 องค์ประกอบ ซึ่งมีวิธีการควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะมีด้วยกัน 5 วิธีดังนี้ คือ

1. การจัดเรียงองค์ประกอบของอาร์เรย์เป็นเส้นตรง
2. ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น $\lambda/2$
3. ขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบมีลักษณะแตกต่างกัน 5 แบบดังนี้
 - การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ
 - การกระจายกระแสแบบทวินาม
 - การกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1
 - การกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2
 - การกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเลอจองดร์

สำหรับการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉากทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 นั้นสามารถทำการกำหนดระดับโลบข้างได้ โดยปริภูมิตวินพจน์นี้เราทำการกำหนดระดับของโลบข้างให้มีระดับเท่ากับ 20 dB (Side Lobe Level : SLL = 20 dB)

4. เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ กำหนดให้แต่ละองค์ประกอบมีเฟสตรงกันทุกองค์ประกอบ ($\beta = 0$) ซึ่งมีลักษณะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแนวบรอดไซด์คือ เป็นแถวลำดับที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดในทิศทางตั้งฉากกับแกนของแถวลำดับ

5. แบบรูปของแต่ละองค์ประกอบ เป็นลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดจากองค์ประกอบเดี่ยว

สนามลัพท์ที่ได้ของแถวลำดับมีค่าเท่ากับสนามขององค์ประกอบเดี่ยวที่วางที่จุดกำเนิดคลื่นด้วยตัว

ประกอบ ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) โดยตัวประกอบแถวลำดับเป็นฟังก์ชันของรูปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามลัพท์ที่ได้ของแถวลำดับมีค่าเท่ากับสนามขององค์ประกอบเดี่ยวที่วางที่จุดกำเนิดคูณด้วยตัวประกอบ ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบแถวลำดับ(Array Factor) โดยตัวประกอบแถวลำดับเป็นฟังก์ชันของรูปทรงแถวลำดับ โดยเราสามารถควบคุมสนามลัพท์ของแถวลำดับได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ(d), การจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับ(เส้นตรง, วงกลม, สี่เหลี่ยม ฯลฯ), ขนาดของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ, เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละองค์ประกอบ

$$\text{สนาม (ลัพท์)} = \text{สนาม[องค์ประกอบเดี่ยวอยู่ที่จุดกำเนิด]} \times [\text{ตัวประกอบแถวลำดับ}] \quad (3.1)$$

สนามจากร่องเดี่ยวแบบนอร์แมล โลซ์ของแถวลำดับที่ยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแสดงดังสมการที่ (3.2) และ (3.3)

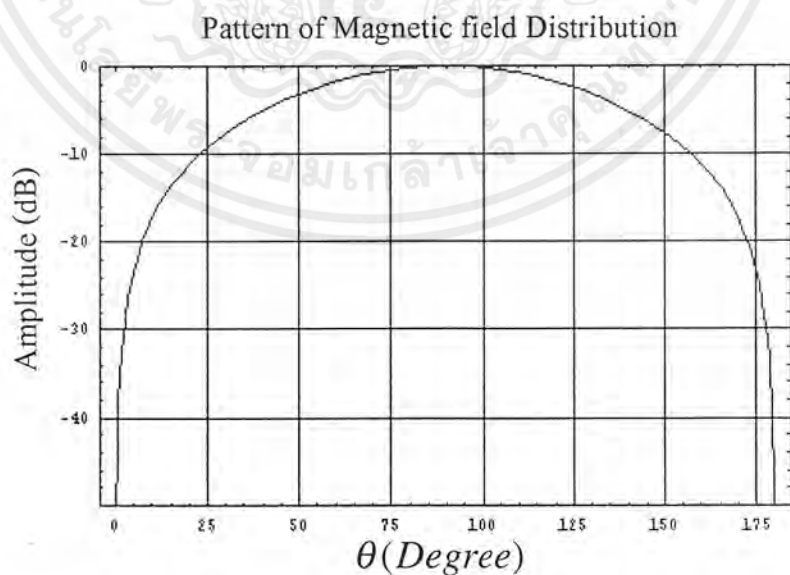
ในระนาบสนามไฟฟ้า

$$E_{\phi n} = I \quad (3.2)$$

ในระนาบสนามแม่เหล็ก

$$E_n = \frac{\cos[\frac{\pi}{2} \cos \theta]}{\sin \theta} \quad (3.3)$$

สนามจากร่องเดี่ยวของแถวลำดับแบบนอร์แมล โลซ์ที่ยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสดงในระนาบมุมฉากได้ดังรูปที่ 3.1

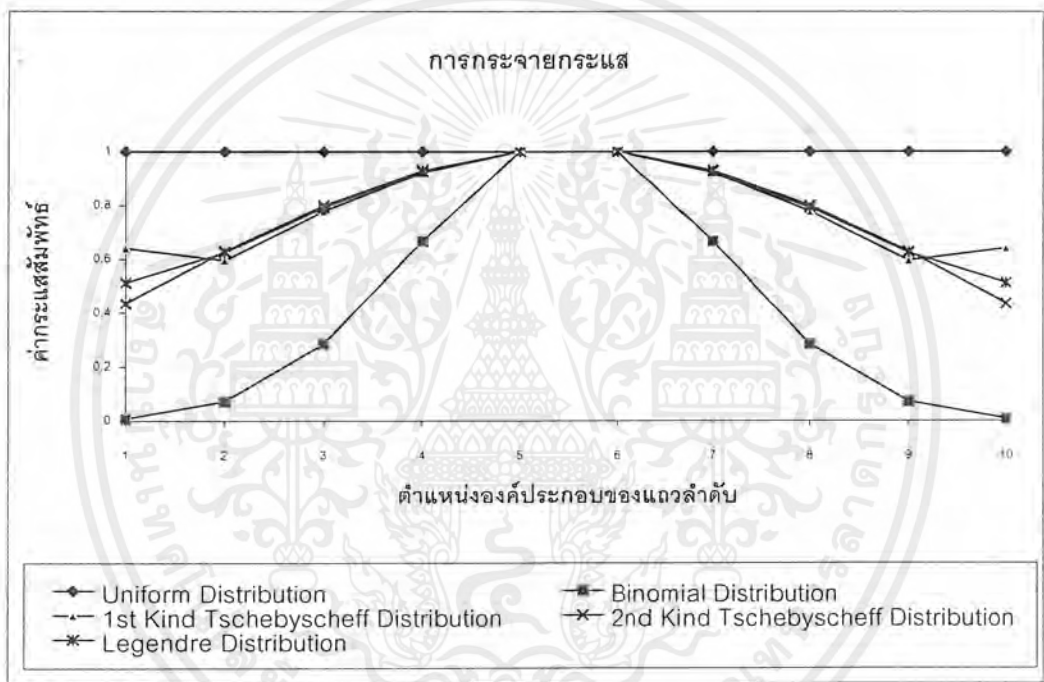


รูปที่ 3.1 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามที่เกิดจากร่องเดี่ยวในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การกระจายกระแส

การกระจายกระแสที่ป้อนให้แก่ละอองค์ประกอบ จะพิจารณาการกระจายกระแส 5 แบบ คือ การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ, แบบทวินาม ,แบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1,แบบพหุนามเชฟบีเชฟที่ 2 และแบบพหุนามเลอจองด์ร์ ในกรณีนี้ที่ประกอบด้วย 10 องค์ประกอบ(N = 10) และระยะห่างระหว่างองค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น($d = \lambda/2$) และเฟสที่ป้อนให้แก่ละอองค์ประกอบมีเฟสเดียวกัน แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายกระแสสัมพัทธ์ได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการกระจายกระแสของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ, ทวินามและโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉากทั้งสาม

จากการกระจายกระแสที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.2 พบว่าการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ กระแสที่ป้อนให้แก่ละอองค์ประกอบมีขนาดที่เท่ากัน ทำให้ง่ายต่อการป้อนสัญญาณให้แก่ละอองค์ประกอบ สำหรับการกระจายกระแสแบบทวินามจะพบว่า กระแสที่ป้อนให้แก่ละอองค์ประกอบมีขนาดแตกต่างกันมาก ซึ่งไม่เหมาะในทางปฏิบัติ เนื่องจากยากในการที่จะปรับให้ได้ขนาดกระแสต่างๆ ดังกล่าว และสำหรับการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉากทั้งสามแบบ มีขนาดของกระแสที่ป้อนไม่ต่างกันมากจนเกินไป ซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

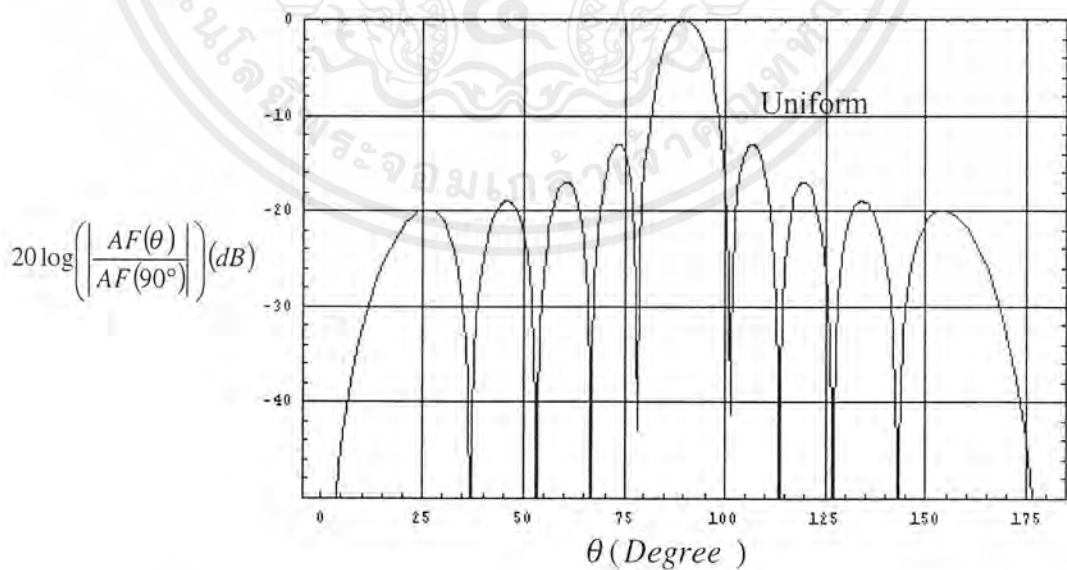
3.1.2 ตัวประกอบแอมพลิจูด

ตัวประกอบแอมพลิจูด คือ เป็นฟังก์ชันของรูปทรงของแอมพลิจูดและเฟสของการป้อนกระแส ให้แต่ละองค์ประกอบโดยพิจารณาแอมพลิจูดที่มีองค์ประกอบแบบไอโซทรอปิก ที่วางอย่างสมมาตรในแนวแกน มีการวางองค์ประกอบในลักษณะที่เป็นเส้นตรง ด้วยระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบเท่ากันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น โดยรูปที่ 3.3 ถึง 3.7 แสดงตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ อันได้แก่ การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ แบบทวินาม แบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 แบบพหุนามเชฟบีเชฟที่ 2 และแบบพหุนามเลอจองด์ร์โดยการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉากทั้งสามแบบนี้เราสามารถกำหนดระดับโลบข้างของลำคลื่นได้ โดยกำหนดระดับของโลบข้างให้มีขนาดต่ำกว่าระดับของลำคลื่นหลักเท่ากับ 20 dB สำหรับขั้นตอนการออกแบบแอมพลิจูดได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.4 และสมการของตัวประกอบแอมพลิจูดได้กล่าวไว้ในสมการที่ (2.14) และ (2.15) สำหรับในปริภูมิพหุนามนี้จะแสดงตัวประกอบแอมพลิจูดในกรณีที่มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 10 องค์ประกอบเพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างง่ายขึ้น จากจำนวนขององค์ประกอบมีจำนวนเป็นคู่ สามารถเขียนสมการตัวประกอบแอมพลิจูดที่ (2.14) สำหรับจำนวนองค์ประกอบ 10 องค์ประกอบได้ใหม่ดังนี้

$$AF_{10}(\theta) = I_1 \cos(u) + I_2 \cos(3u) + I_3 \cos(5u) + I_4 \cos(7u) + I_5 \cos(9u) \quad (3.4)$$

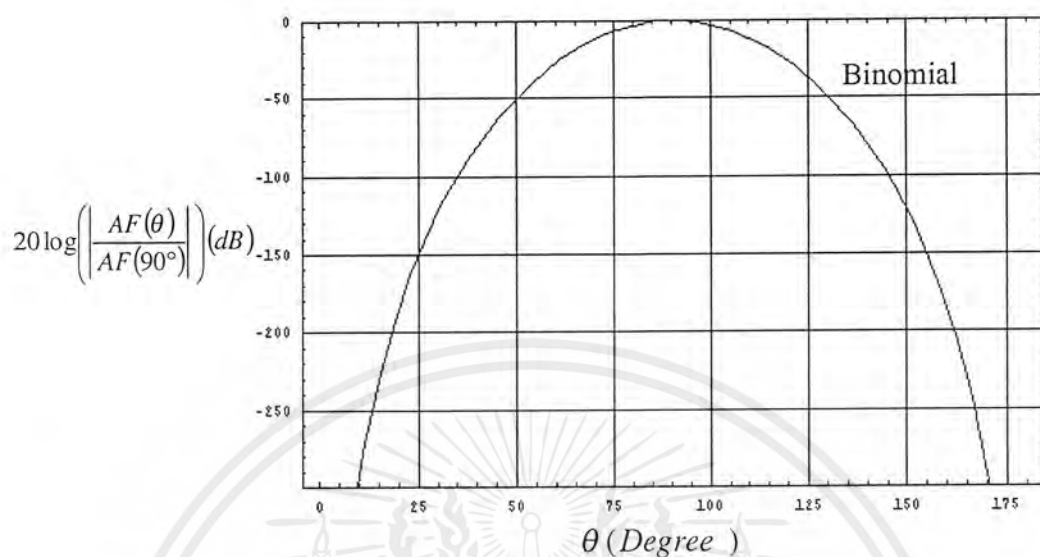
$$\text{โดยที่ } u = \frac{\pi d \cos \theta}{\lambda}$$

ตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉากแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ถึง 3.7

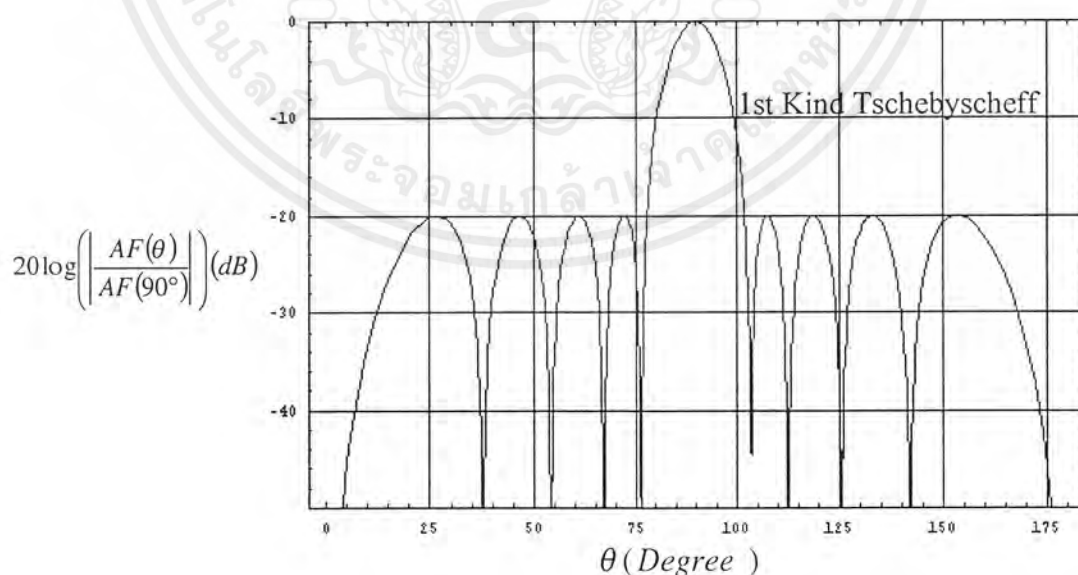


รูปที่ 3.3 แสดงตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอในพิกัดมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



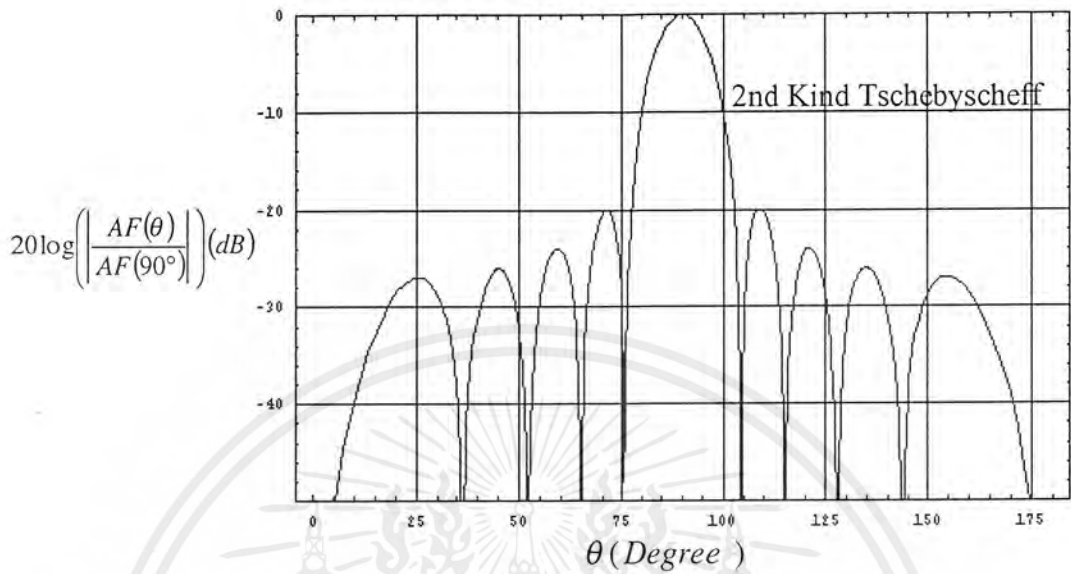
รูปที่ 3.4 แสดงตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสแบบทวินามในพิกัดมุมฉาก



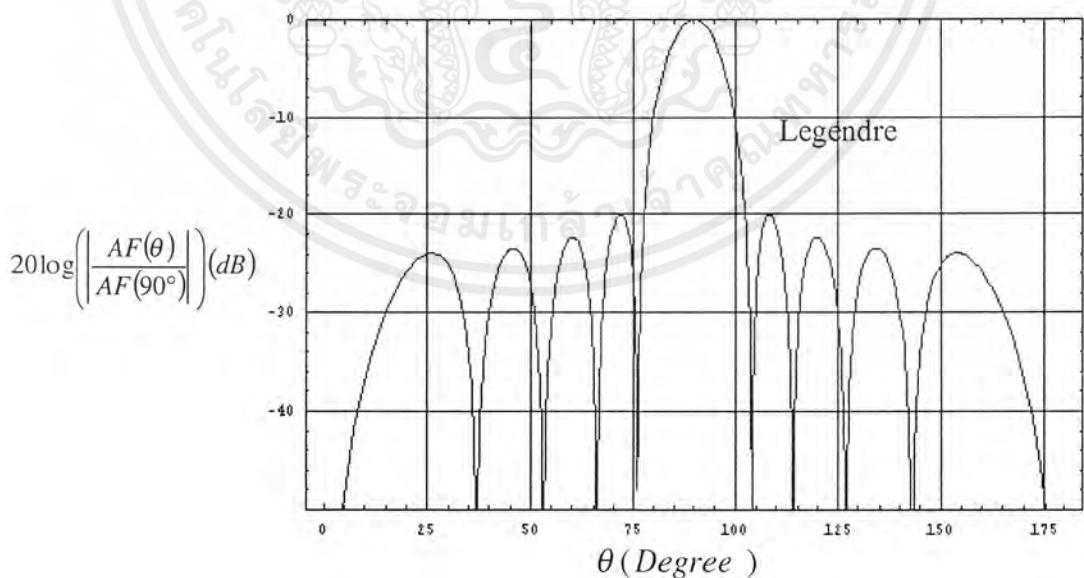
รูปที่ 3.5 แสดงตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1

ในพิกัดมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 ในพิกัดมุมฉาก

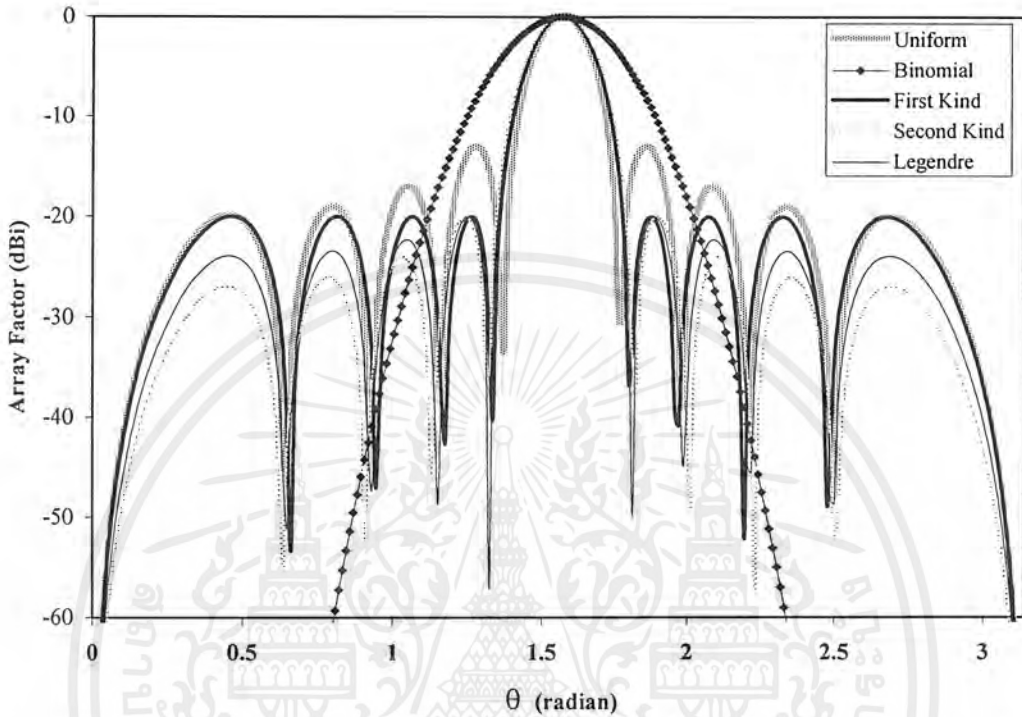


รูปที่ 3.7 แสดงตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเลอจองดร์ในพิกัดมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากรูปแสดงตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบที่ได้แสดงไว้ข้างต้น ได้นำมาแสดงรวมกันเพื่อเปรียบเทียบดังรูป



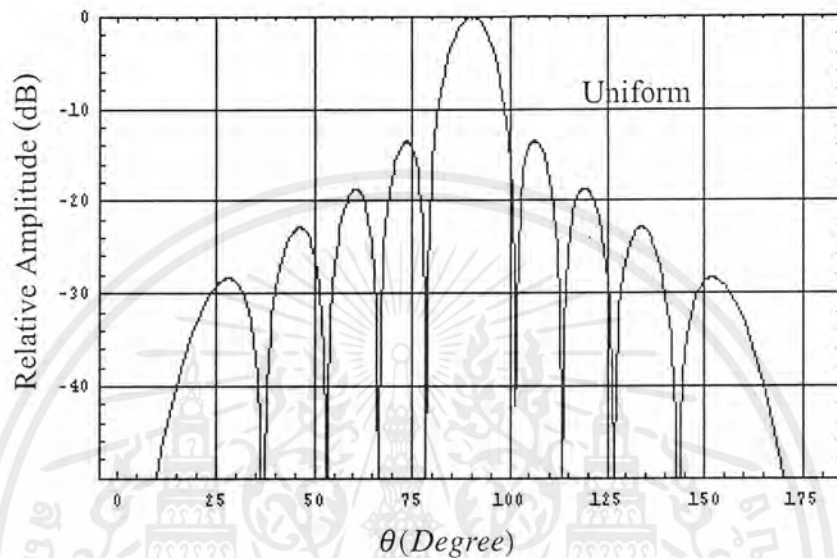
รูปที่ 3.8 แสดงตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.8 พบว่าการกระจายกระแสแต่ละแบบจะมีตัวประกอบแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน โดยการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอจะมีระดับของโลบข้างที่สูงที่สุดและมีลำคลื่นหลักที่แคบที่สุด สำหรับการกระจายกระแสแบบทวินามจะไม่เกิดโลบข้างเลย แต่ลำคลื่นหลักจะมีขนาดกว้างมาก และการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอและทวินามมีข้อเสียตรงกันในเรื่องที่ไม่สามารถควบคุมระดับโลบข้างได้ สำหรับการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉากทั้ง 3 แบบคือ การกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 แบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 และแบบเลอจองด์สามารถกำหนดระดับของโลบข้างได้และมีลำคลื่นหลักที่แคบ จากรูปจะเห็นว่า การกระจายกระแสทั้งสามแบบมีระดับของโลบข้างเท่ากับ 20 dB และการกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 ตัวประกอบแอมพลิจูดที่ได้จะมีระดับของโลบข้างที่เท่ากันจึงเป็นข้อเสียทำให้แทนที่กำลังงานจะกระจายอยู่บนลำคลื่นหลักกลับไปกระจายอยู่บนลำคลื่นย่อย ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพลำคลื่นสูญเสียไปอย่างมาก สำหรับการกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 จะพบว่าระดับของลำคลื่นย่อยจะลดต่ำลงมากที่สุด ส่วนการกระจายกระแสแบบเลอจองด์เป็นการประนีประนอมคุณสมบัติระหว่าง การกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 และ 2

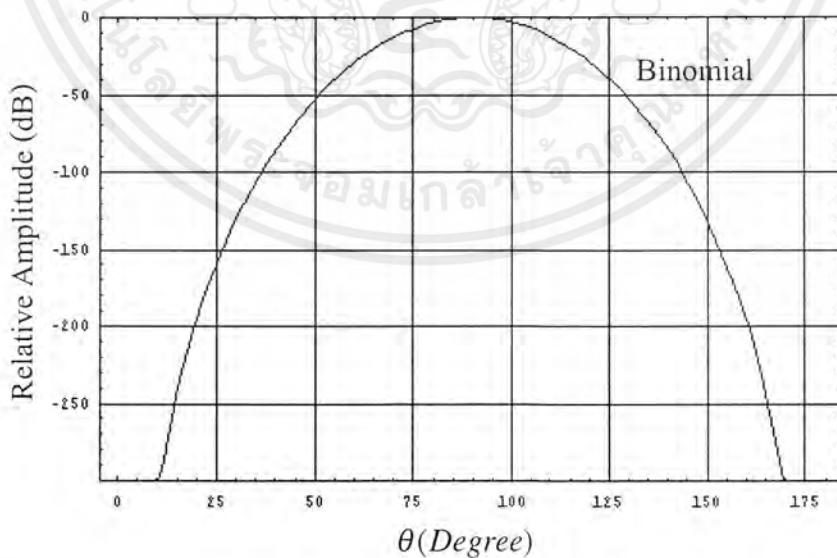
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

3.1.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ผลที่ได้จากการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบทำให้เราสามารถหาตัวประกอบแอมพลิจูดของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบได้ดังรูปที่ 3.3 – 3.7 เมื่อเรานำตัวประกอบแอมพลิจูดในรูปแบบไปคูณกับสนามที่เกิดจากองค์ประกอบเดี่ยวในรูปที่ 3.1 สามารถหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 5 แบบได้ดังนี้

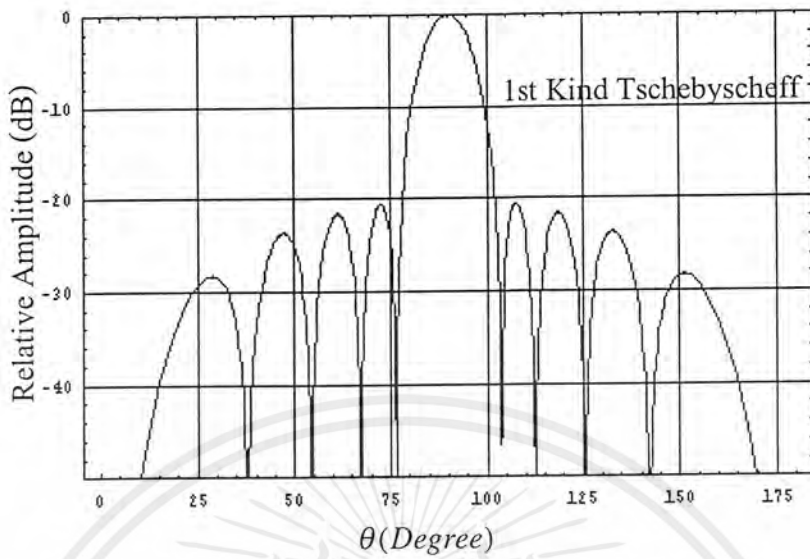


รูปที่ 3.9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก

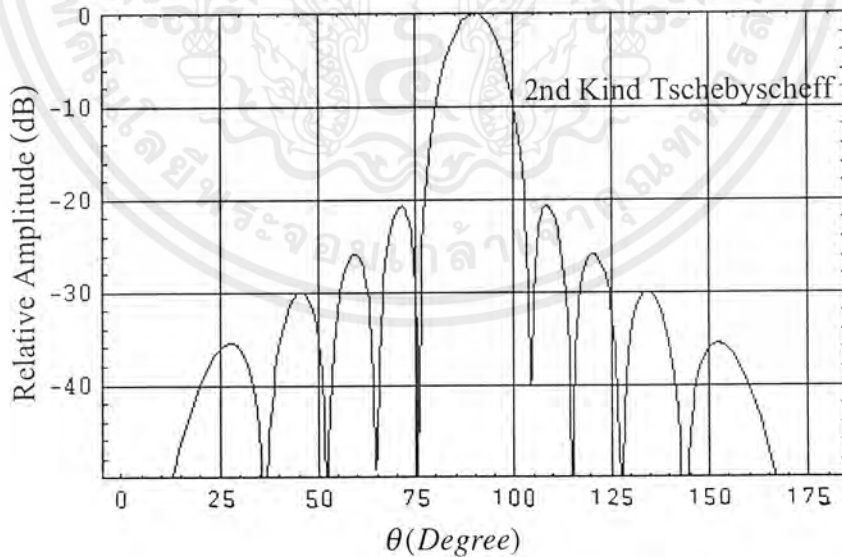


รูปที่ 3.10 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทวินามในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

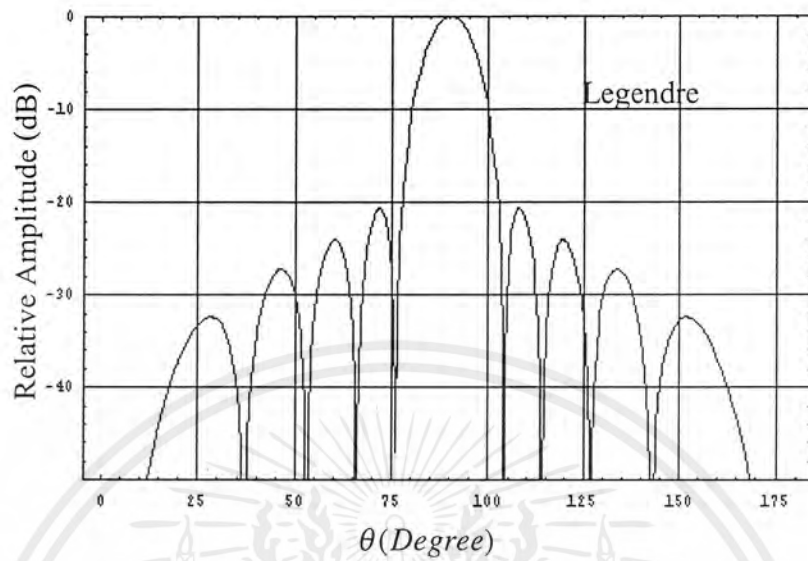


รูปที่ 3.11 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้พหุนามเชบิเชฟชนิดที่ 1
ในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก



รูปที่ 3.12 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้พหุนามเชบิเชฟชนิดที่ 2
ในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

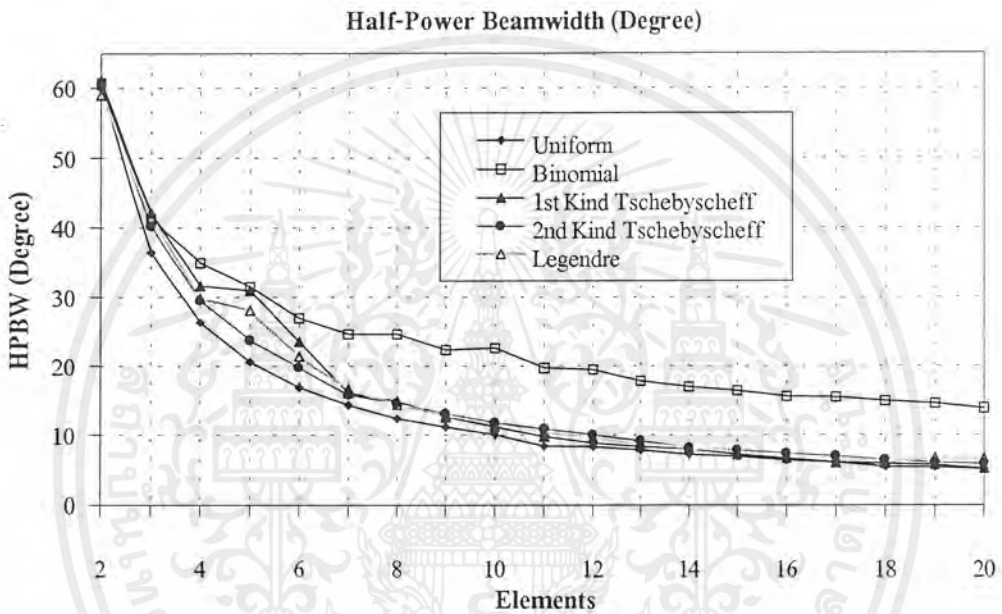


รูปที่ 3.13 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยใช้พหุนามเลอจองด์ร์
ในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง คือ มุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด ผลที่ได้จากการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ โดยทำการวิเคราะห์โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบมีค่าเท่ากันคือเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น และกำหนดให้จำนวนองค์ประกอบที่ทำการวิเคราะห์มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 2 - 20 องค์ประกอบ สามารถเปรียบเทียบความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งได้ดังนี้

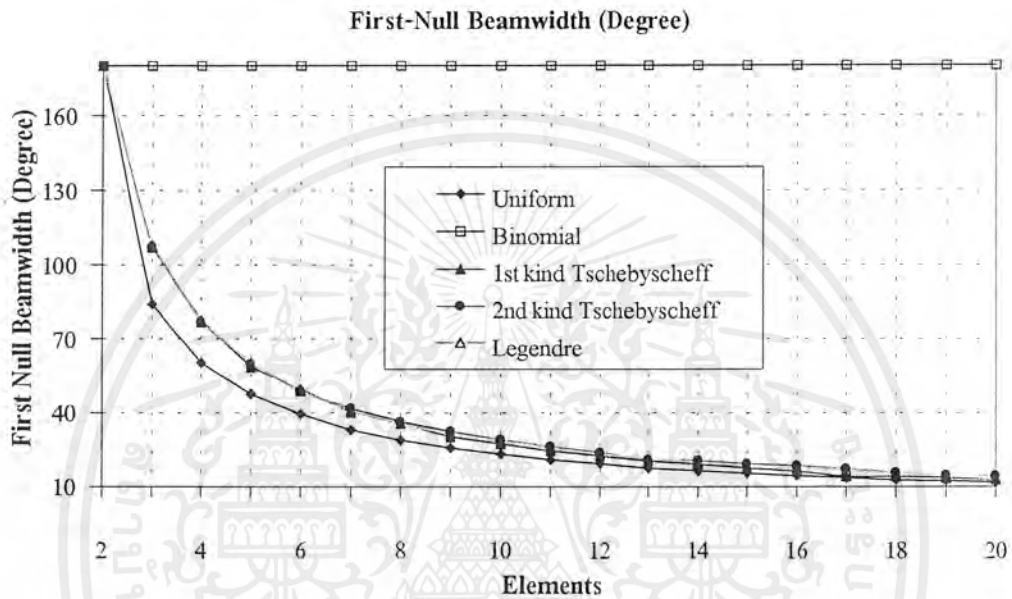


รูปที่ 3.14 แสดงความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรก

ความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรก โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบมีค่าเท่ากันคือเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น และกำหนดให้จำนวนองค์ประกอบที่ทำการวิเคราะห์มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 2 - 20 องค์ประกอบ ผลที่ได้จากการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ สามารถเปรียบเทียบความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรกได้ดังนี้



รูปที่ 3.15 แสดงความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรกของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ

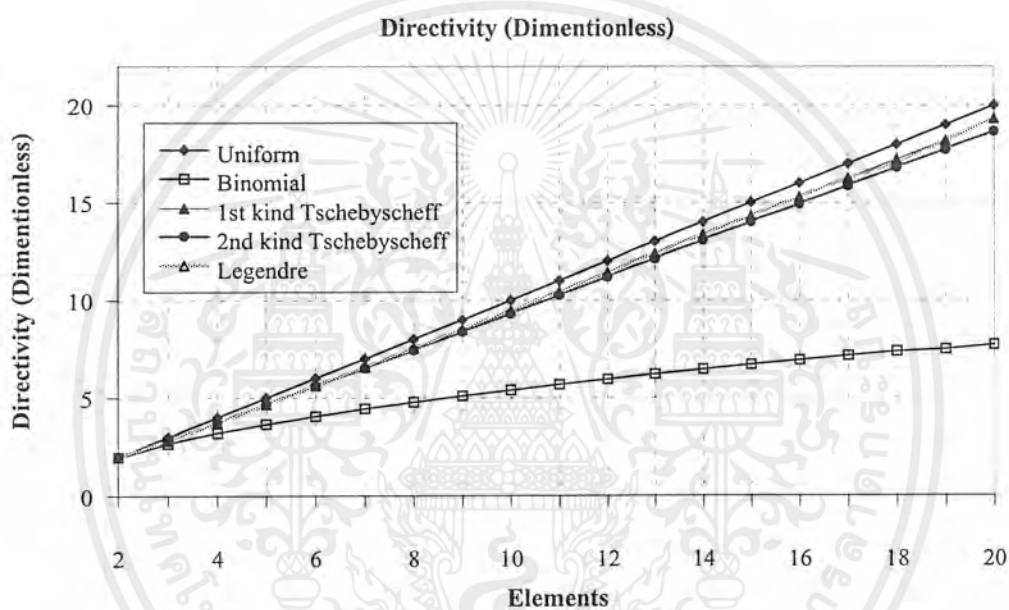
สำหรับคุณสมบัติความกว้างของลำคลื่นจะขอกล่าวโดยรวมทั้งความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งและความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรก จากรูปที่ 3.14 และ 3.15 พบว่าการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอมีความกว้างของลำคลื่นที่แคบที่สุด ถัดมาได้แก่แบบเซฟบีเซฟชนิดที่ 2, แบบเซฟบีเซฟชนิดที่ 1 และแบบเลอจองด์ร์ ตามลำดับ และการกระจายกระแสแบบทวินามจะมีความกว้างของลำคลื่นกว้างมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 ค่าการชี้ทิศทาง

ค่าการชี้ทิศทาง คืออัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก

สำหรับปริภูมิพหุนามนี้เราได้เลือกใช้สายอากาศที่มีตัวประกอบแถวลำดับแบบบรอดไซด์ (Broadside Array) เพื่อให้มีการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดในทิศทางตั้งฉากกับแกนของแถวลำดับ ซึ่งต้องการสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นขึ้นไปเพียงทิศทางเดียว ดังนั้นในการออกแบบจะเลือกค่าการชี้ทิศทางที่มีค่าสูง

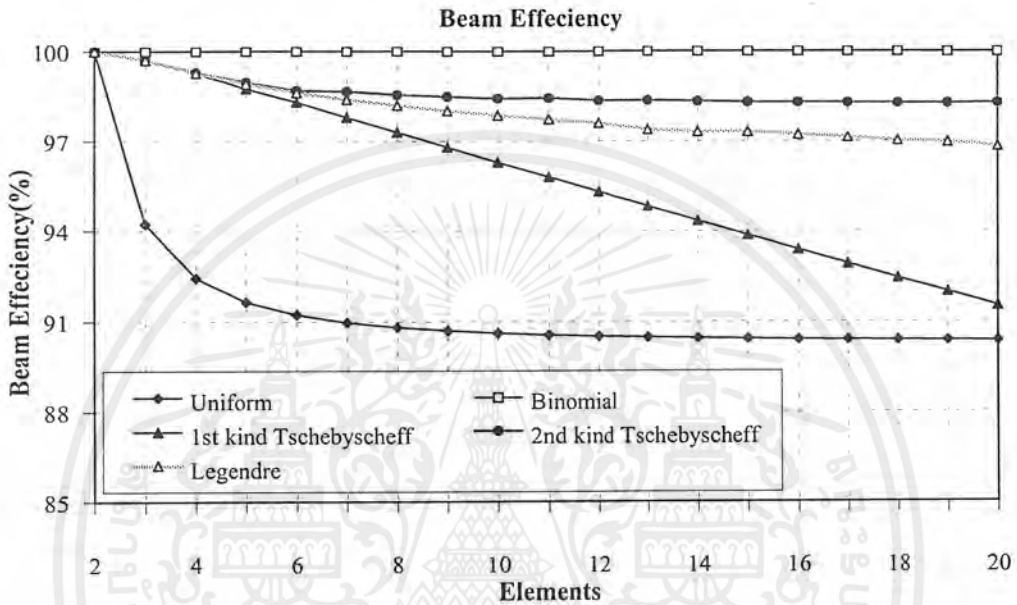


รูปที่ 3.16 แสดงค่าการชี้ทิศทางของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ

จากรูปที่ 3.16 พบว่าการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอมีค่าการชี้ทิศทางที่ดีที่สุด รองลงมาได้แก่การกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 แบบเลอจองด์ร์ แบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 และแบบทวินาม ตามลำดับ และค่าการชี้ทิศทางจะมีค่าสูงมากขึ้นเมื่อจำนวนองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้น

3.1.7 ประสิทธิภาพของลำคลื่น

ประสิทธิภาพของลำคลื่น คือปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงานในลำคลื่นหลักต่อ กำลังงานที่มีทั้งหมด ผลที่ได้จากการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลำ คลื่น ได้ดังนี้



รูปที่ 3.17 แสดงประสิทธิภาพของลำคลื่นของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ

จากรูปที่ 3.17 พบว่าค่าประสิทธิภาพลำคลื่นของการกระจายกระแสแบบทวินามมีค่าเท่ากับ 100% เนื่องจากไม่มีการสูญเสียกำลังงานในโลบข้าง โดยการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอจะมีค่าประสิทธิภาพลำคลื่นที่ต่ำที่สุด เนื่องมาจากมีระดับของโลบข้างที่สูงคือ ประมาณ 13 dB และสำหรับการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉาก พบว่าค่าประสิทธิภาพลำคลื่นของการกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 มีค่ามากที่สุด รองมาได้แก่ การกระจายกระแสแบบเลอจองดร์ และแบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ระบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องโดยใช้ท่อนำคลื่น

การป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณผ่านทางตัวนำ เช่น สายเคเบิลแกนร่วม(Coaxial Line) ไมโครสตริป(Microstrip) หรือการป้อนสัญญาณผ่านท่อนำคลื่น (Waveguide) เป็นต้น ซึ่งการเลือกป้อนสัญญาณต่างๆ ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบและชนิดของสายอากาศนั้นๆ สำหรับสายอากาศแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่นที่ใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave)เหมาะสมกับการป้อนสัญญาณผ่านทางท่อนำคลื่น(Main Waveguide) เพราะใช้วัสดุชนิดเดียวกัน ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและสร้างสายอากาศ นอกจากนี้กำลังงานที่ป้อนผ่านทางร่องระหว่างท่อนำคลื่นสามารถเลือกให้ป้อนออกไป มากหรือน้อยได้ตามต้องการขึ้นอยู่กับลักษณะของร่องและกำลังงานของคลื่นที่เดินทางไปในท่อนำคลื่นมีการสูญเสียต่ำเมื่อใช้ในย่านความถี่สูง

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของร่องเดี่ยว พบว่าร่องเดี่ยวมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่กว้างมากและมีค่าการชี้ทิศทางต่ำ ดังนั้นเราจึงนำร่องมาประกอบกันขึ้นเป็นแถวลำดับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของร่องเดี่ยวด้วยตัวประกอบแถวลำดับ(Array Factor) ซึ่งแถวลำดับเชิงเส้นของร่องบนผนังท่อนำคลื่นนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบดังนี้

การจัดวางตำแหน่งของร่องบนท่อนำคลื่น สามารถจัดได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. แบบท่อนำคลื่นเรโซแนนท์ (Resonant Slotted Waveguide)

การออกแบบลักษณะนี้คลื่นเดินทางภายในท่อนำคลื่นจะเสมือนเป็นคลื่นนิ่ง เพราะมีการจัดวางตำแหน่งร่องไว้อย่างเหมาะสม โดยมีข้อกำหนดดังนี้

- 1.1 ทุกๆร่องในแถวลำดับจะต้องเรโซแนนท์ กล่าวคือ ค่าซัสเซ็ปแตนซ์(Susceptance) หรือ รีแอกแตนซ์(Reactance) ของวงจรสมมูลย์ของร่อง จะต้องมีค่าเป็นศูนย์ที่ความถี่ที่ออกแบบ
- 1.2 แต่ละร่องที่อยู่ติดกันจะต้องมีระยะห่างกันเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น คือ $\lambda_g/2$
- 1.3 ลักษณะลำคลื่นจะตั้งฉากกับแนวแกนของอาร์เรย์ หรือเรียกว่า บรอดไซด์(Broadside)

2. แบบท่อนำคลื่นเดินทาง (Travelling Wave Slotted Waveguide)

แบบท่อนำคลื่นเดินทางมีลักษณะแตกต่างกับแบบท่อนำคลื่นเรโซแนนท์คือ

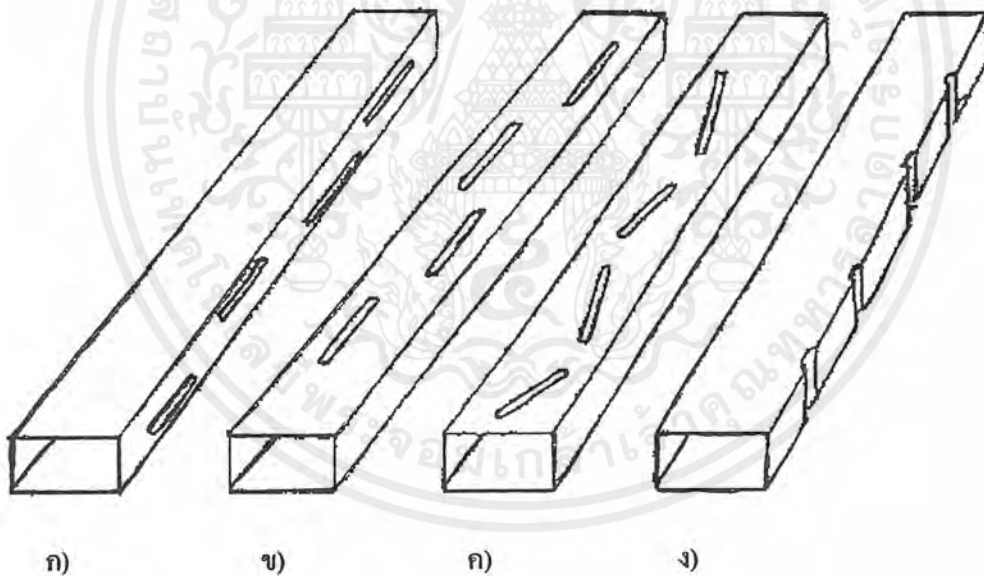
- 2.1 ระยะห่างระหว่างร่องที่อยู่ติดกันมีค่ามากกว่า หรือน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น
- 2.2 ปลายท่อนำคลื่นลักษณะนี้จะต้องติดไว้ด้วยแมทช์โหลด (Match Load)
- 2.3 ลักษณะลำคลื่นไม่อยู่ในแนวบรอดไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการเจาะร่องบนท่อนำคลื่น

ร่องที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่นจะไปขวางการไหลของกระแสบนผิวท่อ ซึ่งทำให้เกิดกำลังงานกระจายออกมา โดยร่องที่เจาะขนานไปกับเวกเตอร์ของกระแสที่ผิวจะไม่กระจายคลื่นออกมาเช่น ร่องที่เจาะขนานไปตามเส้นกึ่งกลางท่อนำคลื่น การเจาะร่องนั้นกระทำได้หลายลักษณะขึ้นกับตำแหน่งที่เจาะหรือด้านที่เจาะ ดังนี้

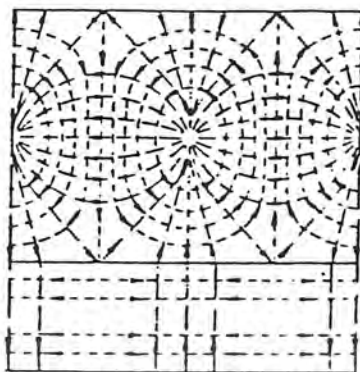
1. การเจาะบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น (Broad Wall Slot) เช่น
 - 1.1 การเจาะแบบขนานตามยาว(Longitudinal Slot)
 - 1.2 การเจาะแบบกึ่งกลาง(Center Incline Slot)
2. การเจาะร่องบนผนังด้านแคบของท่อนำคลื่น(Narrow Wall Slot)
 - 2.1 การเจาะแบบขนานตามยาว(Longitudinal Slot)
 - 2.2 การเจาะขอบผนัง(Edge Wall Slot)



- รูปที่ 3.18 ก) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านแคบ
 ข) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านกว้าง
 ค) การเจาะแบบกึ่งกลาง
 ง) การเจาะขอบผนัง

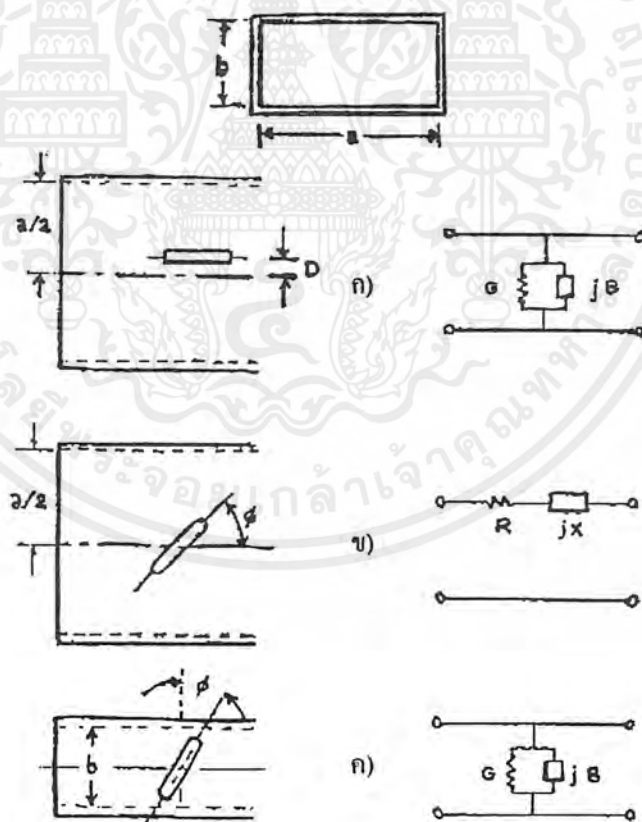
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางการไหลของกระแสบนผิวของท่อนำคลื่นทรงสี่เหลี่ยม โหมด TE_{10} แสดงได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงการไหลของกระแสบนผิวของท่อนำคลื่นโหมด TE_{10}

วงจรเสมือนของร่องแบบต่างๆที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่น (Equivalent-Network Representations of Slot)



รูปที่ 3.20 วงจรเสมือนของร่องแบบต่างๆที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถแสดงวงจรเสมือนแทนลักษณะของร่องแบบต่างๆ โดยที่ร่องเดี่ยวแต่ละองค์ประกอบ ถูกกำหนดโดยสมมติฐานที่ว่าความยาวร่อง(Slot Width) เปรียบเทียบกับความยาวคลื่นแล้วมีค่าน้อยมาก

วงจรเสมือนของร่องที่เจาะแบบขนานตามยาวบนผนังท่อนำคลื่นด้านกว้างและเจาะแบบขอบผนังบนผนังด้านแคบ แสดงได้ด้วยองค์ประกอบแบบขนาน(Shunt Element)ของแอดมิแตนซ์ประกอบด้วย คอนดักแตนซ์(G) กับชัสมชแดนซ์(B) ดังรูป (ก) และ (ค)

วงจรเสมือนของร่องที่เจาะแบบกึ่งกลางทำมุม ϕ กับเส้นสมมติกึ่งกลางตามแนวยาวของท่อ แสดงได้ด้วยองค์ประกอบแบบอนุกรม(Series Element)ของอิมพีแดนซ์ประกอบด้วย รีซิสแตนซ์(R) กับ รีแอกแตนซ์(X) ดังรูป (ข)

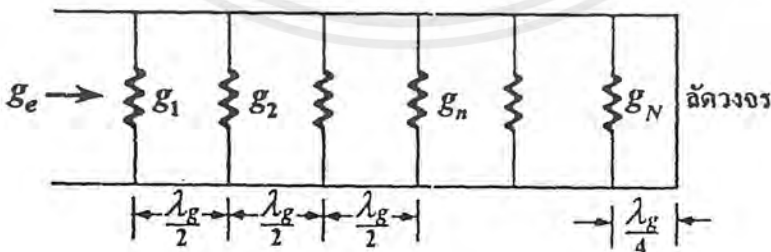
จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของร่องเดี่ยว พบว่าร่องเดี่ยวมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่กว้างมากและมีค่าไคเรคติวิตีต่ำ ดังนั้นเราจึงนำร่องมาประกอบกันขึ้นเป็นแถวลำดับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของร่องเดี่ยวด้วยตัวประกอบแถวลำดับ(Array Factor) ซึ่งแถวลำดับเชิงเส้นของร่องบนผนังท่อนำคลื่นนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

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

สำหรับการใน โครงงานนี้ได้เลือกใช้สายอากาศในรูปแบบแถวลำดับแบบเรโซแนนท์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแถวลำดับแบบคลื่นนิ่ง(Standing Wave Array) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้



ก)



ข)

รูปที่ 3.21 (ก) แสดงแถวลำดับแบบเรโซแนนท์ของร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

(ข) แสดงวงจรสมมูลในกรณีที่ทุกร่องเรโซแนนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวลำดับแบบนี้ระยะห่างระหว่างแต่ละร่องของแนวลำดับจะต้องเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น ($d = \lambda_g/2$) แต่ร่องอันดับสุดท้ายจะต้องวางอยู่ห่างจากแผ่นสัตวงจรเป็นระยะทางหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น ($\lambda_g/4$) เพื่อให้โหนดแรงดันของร่องอันดับสุดท้ายมีค่าสูงสุด และเนื่องจากโหนดแรงดันของท่อนำคลื่นของร่องที่อยู่ใกล้กันจะมีเฟสตรงกันข้าม ดังนั้นจึงต้องมีการสลับระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อนำคลื่นเพื่อให้สนามบนปากร่องทุกร่องมีเฟสเดียวกันและมีผลทำให้คลื่นที่แพร่กระจายออกไปเสริมกันในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของแนวลำดับ

สนามในท่อนำคลื่นสำหรับโหมด TE₁₀ เมื่อท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมีขนาดความกว้าง a และความสูง b

$$E_y = E_0 \sin \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \quad (3.5)$$

$$H_x = -E_0 Y_w \sin \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \quad (3.6)$$

$$H_z = jE_0 \frac{\pi Y_0}{k_0 a} \cos \frac{\pi x}{a} e^{-j\beta z} \quad (3.7)$$

ที่ซึ่ง β คือ ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย โดยกำหนดให้เป็น

$$\beta = \left[k_0^2 - \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

และ Y_w คือ ค่าคอนดัคแตนซ์ในโหมดคลื่น

$$Y_w = \frac{Y_0 \beta}{k_0} \quad (3.9)$$

ความยาวคลื่นในท่อ λ_g กำหนดให้เป็น

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda_0}{\left(1 - \lambda_0^2 / 4a^2 \right)^{1/2}} \quad (3.10)$$

กระแสพื้นผิวบนผนังท่อนำคลื่นด้านบน J_s คือ

$$J_s = -a_y \times H = \left(-jE_0 \frac{\pi Y_0}{k_0 a} a_x \cos \frac{\pi x}{a} - E_0 Y_w \sin \frac{\pi x}{a} a_z \right) e^{-j\beta z} \quad (3.11)$$

ในการออกแบบสร้างสายอากาศแบบแนวลำดับเชิงเส้นในแบบต่าง ๆ นั้น ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบคือการป้อนกระแสหรือโวลต์เตจให้แก่ละองค์ประกอบในแบบต่างๆกัน โดยตัวแปรที่เป็นตัวควบคุมขนาดของโวลต์เตจที่ป้อนให้แก่ละร่องคือ ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อ (x) และความยาวเรโซแนนท์ (2l)

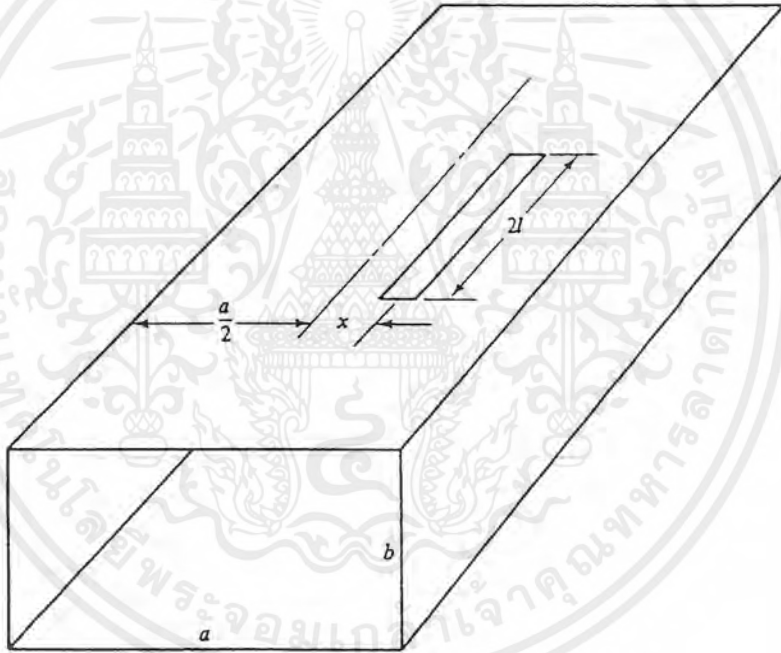
จากทฤษฎีของร่องที่ป้อนสัญญาณ โดยท่อนำคลื่นและสมการที่ใช้ในการออกแบบซึ่งป้อนกระแสแบบคลื่นนิ่งภายในท่อนำคลื่นเพราะต้องการให้จุดที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุดของคลื่นนิ่งเกิดขึ้นที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่องที่ใช้แพร่กระจายคลื่นพอดี้ จากเหตุผลดังกล่าว ระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบ(d) บนท่อนำคลื่นจะมีค่าเท่ากับ $\lambda_g/2$ (เมื่อ λ_g คือความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น)

เพื่อที่จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับขนาดของท่อนำคลื่น และความถี่ที่ใช้งาน สำหรับในกรณีที่ไม่คิดผลของ mutual coupling เราพิจารณาจากเงื่อนไข 2 ข้อดังนี้

1. ความยาวเรโซแนนท์($2l \approx \lambda_0/2$)
2. ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อนำคลื่น (x_n)

ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้มีความสัมพันธ์กับค่าความนำแบบนอร์แมลไลซ์ของแต่ละร่อง เมื่อเราสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับเพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละร่อง (I_n) ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ของขนาดของสัญญาณที่ป้อนกับค่าความนำแบบนอร์แมลไลซ์ที่เรโซแนนท์ได้



รูปที่ 3.22 แสดงร่องที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่น

เนื่องจากค่าความนำแบบนอร์แมลไลซ์ของร่องมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแอมพลิจูด (I_n) ดังนั้นเมื่อทราบการกระจายของแอมพลิจูด ก็จะสามารถหาการกระจายของค่าความนำแบบนอร์แมลไลซ์ได้ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขการสมพียงของอินพุต (Input Matching)

$$\sum_{i=1}^n g(x) \equiv 1 \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราสังเคราะห์รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของแวลวลำดับเพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณที่ป้อนให้แก่ช่อง (I_n) ก็สามารหาคความสัมพันธ์ของขนาดของสัญญาณที่ป้อนกับค่าความนำแบบนอร์แมลไลซ์ที่เรโซแนนท์ได้ว่า

$$g_n = KI_n^2 \quad (3.13)$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่

สำหรับเงื่อนไขเรโซแนนท์ของแวลวลำดับก็คือผลรวมของค่าความนำแบบนอร์แมลไลซ์ที่เรโซแนนท์ (g_e) มีค่าเป็น 1 ดังรูปที่ 3.21 (ข) ซึ่งก็คือ

$$g_e = \sum_{n=1}^N g_n = 1 \quad (3.14)$$

และจะหาค่า K ใน (3.9) ได้จาก

$$K = \frac{1}{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (3.15)$$

จากนั้นนำค่าความนำที่ได้มาพิจารณาพร้อมกับฟังก์ชันจากกราฟผลการทดลองของ R.J Stegen ซึ่งใช้สำหรับพิจารณาระยะห่างจากกึ่งกลางท่อนำคลื่น โดยไม่คิดผลของ mutual coupling ดังนี้

$$g_n = 2.09 \frac{\lambda_g a}{\lambda_0 b} \cos^2 \frac{\pi \lambda_0}{2 \lambda_g} \sin^2 \frac{\pi x_n}{a} \quad (3.16)$$

จะได้สมการ

$$g_n = 1.536 \sin^2 \frac{\pi x_n}{a} \quad (3.17)$$

เมื่อนำค่า K ที่ได้จาก (3.14) ไปแทนใน (3.12) ก็จะทราบค่า g_n จากนั้นก็นำค่า g_n ไปแทนใน (3.15) ก็จะได้ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อ (x_n)

$$x_n = \frac{a}{\pi} \sin^{-1} \sqrt{\frac{g_n}{1.536}} \quad (3.18)$$

หรือ

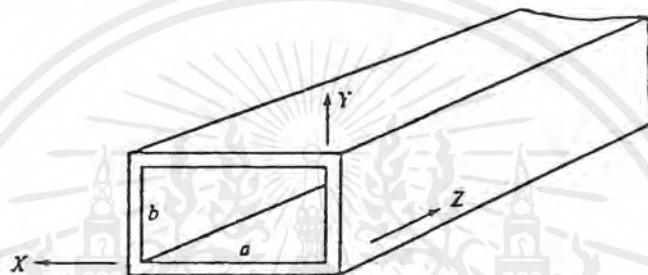
$$x_n = \frac{a}{\pi} \sin^{-1} (0.807 \sqrt{g_n}) \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบร่องเชิงเส้น

จากการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้กล่าวในบทที่ 2 และผลจากการคำนวณที่ได้กล่าวในตอนแรกของบท ประกอบกับคุณสมบัติของร่องสำหรับโครงการนี้ได้ทำการเลือกออกแบบสร้างสายอากาศแฉวลำดับแบบเรโซแนนซ์ที่มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 10 องค์ประกอบ โดยใช้วิธีการเจาะร่องตามยาวบนผนังท่อนำคลื่น โดยสายอากาศที่สังเคราะห์มีการกระจายกระแสต่างกัน 5 ลักษณะ สิ่งที่ใช้พิจารณาในการคำนวณมีดังนี้

1. ขนาดของท่อนำคลื่นที่เหมาะสมกับความถี่ 9 GHz ที่นำมาใช้งานคือ WRJ-10 (8.20-12.40 GHz) ที่มีขนาดของหน้าตัดของท่อแสดงในรูป



รูปที่ 3.23 แสดงหน้าตัดของท่อทองเหลืองที่ใช้ในการสร้างสายอากาศ

โดย	a' = ความยาวของหน้าตัดท่อนำคลื่นด้านนอก	= 25.4 mm.
	b' = ความกว้างของหน้าตัดท่อนำคลื่นด้านนอก	= 12.7 mm.
	a = ความยาวของหน้าตัดท่อนำคลื่นด้านใน	= 22.9 mm.
	b = ความกว้างของหน้าตัดท่อนำคลื่นด้านใน	= 10.2 mm.
	t = ความหนาของท่อนำคลื่น	= 1.25 mm

2. ความถี่ที่ออกแบบเท่ากับ 9 GHz

จากความเร็วแสง $c = 3 \times 10^8$ จะได้

$$\lambda_0 = 33.333 \text{ mm.}$$

$$\lambda_g = 48.606 \text{ mm.}$$

3. ขนาดของสายอากาศ

ขนาดของสายอากาศจะกำหนดให้มีขนาด 10 องค์ประกอบ ทำให้สายอากาศมีขนาดกะทัดรัด

4. การออกแบบ

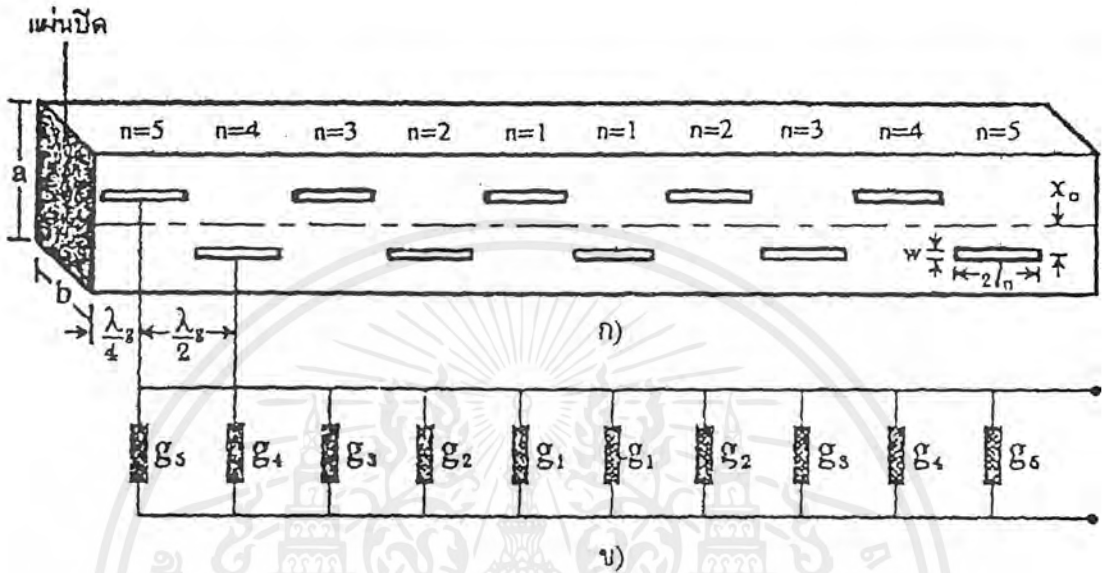
ในการออกแบบคำนวณหาระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อ (x_n) และความยาวร่อง ($2l_n$) ของแต่ละองค์ประกอบเพื่อให้ได้ขนาดของกระแสตามที่ได้ออกแบบไว้

5. การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การสร้างสายอากาศ

สำหรับการออกแบบสร้าง เราทำการสร้างสายอากาศแบบท่อนำคลื่นเรโซแนนท์ โดยทำการเจาะร่องบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นในลักษณะขนานตามยาว โดยเจาะร่องตามที่ได้คำนวณไว้ในบทที่ 3 ดังตารางที่ 3.1 – 3.5 โดยไม่ได้คิดผลของมิวชวลคัปปลิง แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะการเจาะร่องบนผนังท่อนำคลื่นตามแนวยาว

การเจาะร่องบนผนังท่อนำคลื่นดังที่ได้คำนวณไว้แล้วดังตารางที่ 3.1 - 3.5 ด้วยระยะห่างจากกึ่งกลางท่อนำคลื่น และความยาวเรโซแนนท์ นั้นจะต้องอาศัยความละเอียดมาก ดังนั้นการเจาะร่องเราจะใช้เครื่อง CNC ในการกัดชิ้นงานเพื่อให้ได้ความละเอียดและแม่นยำในการสร้างชิ้นงาน สำหรับการเจาะร่องด้วยเครื่อง CNC นั้น เราสามารถสร้างชิ้นงานที่มีความถูกต้องและรายละเอียดสูงได้ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 3 สำหรับการเจาะร่องนั้นเราจะทำการโปรแกรมเครื่อง CNC โดยการเขียน G-Code เพื่อลำดับการทำงานได้อย่างถูกต้อง และเพื่อเพิ่มความเร็วในการทำงานด้วย สำหรับวัสดุที่ใช้ในการเจาะร่องนั้น เราได้ใช้หัว End mill ขนาด 1 mm.

หลังจากที่ได้ชิ้นงานแล้ว เราจะนำชิ้นงานที่ได้มาทำการเชื่อมปิดที่ปลายด้านหนึ่งของท่อนำคลื่น โดยใช้แผ่นทองเหลืองที่มีขนาดพอดีกับผนังท่อนำคลื่น จากนั้นใช้ตะกั่วบัดกรีเป็นตัวเชื่อมให้ผิวชิ้นงานติดกัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะทำการติดประกบด้วย Flange เพื่อที่นำไปต่อกับอุปกรณ์ที่ทำการป้อนสัญญาณ

จากหลักการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถนำมาเขียนตารางแสดงค่ากระแสเสาหรือแอมพลิจูด, ค่าความต้านอร์แมลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อนำคลื่น และความยาวเรโซแนนท์ ของการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบ โดยมีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 10 องค์ประกอบได้ดังตารางที่ 3.1 – 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ(Uniform Array), ค่าความนำออร์เมลโลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์

แอมพลิจูด	ค่าความนำออร์เมลโลซ์	ระยะห่างจากกึ่งกลาง	ความยาวเรโซแนนท์
$I_1 = 1$	$g_1 = 0.1$	$x_1 = -1.881 \text{ mm.}$	$2l_1 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_2 = 1$	$g_2 = 0.1$	$x_2 = 1.881 \text{ mm.}$	$2l_2 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_3 = 1$	$g_3 = 0.1$	$x_3 = -1.881 \text{ mm.}$	$2l_3 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_4 = 1$	$g_4 = 0.1$	$x_4 = 1.881 \text{ mm.}$	$2l_4 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_5 = 1$	$g_5 = 0.1$	$x_5 = -1.881 \text{ mm.}$	$2l_5 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_6 = 1$	$g_6 = 0.1$	$x_6 = 1.881 \text{ mm.}$	$2l_6 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_7 = 1$	$g_7 = 0.1$	$x_7 = -1.881 \text{ mm.}$	$2l_7 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_8 = 1$	$g_8 = 0.1$	$x_8 = 1.881 \text{ mm.}$	$2l_8 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_9 = 1$	$g_9 = 0.1$	$x_9 = -1.881 \text{ mm.}$	$2l_9 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_{10} = 1$	$g_{10} = 0.1$	$x_{10} = 1.881 \text{ mm.}$	$2l_{10} = 16.667 \text{ mm.}$

ตารางที่ 3.2 แสดงการกระจายกระแสแบบทวินาม(Binomial Array), ค่าความนำออร์เมลโลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์

แอมพลิจูด	ค่าความนำออร์เมลโลซ์	ระยะห่างจากกึ่งกลาง	ความยาวเรโซแนนท์
$I_1 = 1$	$g_1 = 0.3265$	$x_1 = -0.0267 \text{ mm.}$	$2l_1 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_2 = 9$	$g_2 = 0.145$	$x_2 = 0.2401 \text{ mm.}$	$2l_2 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_3 = 36$	$g_3 = 0.0265$	$x_3 = -0.9622 \text{ mm.}$	$2l_3 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_4 = 84$	$g_4 = 1.666 \cdot 10^{-3}$	$x_4 = 2.2768 \text{ mm.}$	$2l_4 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_5 = 126$	$g_5 = 2.057 \cdot 10^{-5}$	$x_5 = -3.4935 \text{ mm.}$	$2l_5 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_6 = 126$	$g_6 = 2.057 \cdot 10^{-5}$	$x_6 = 3.4935 \text{ mm.}$	$2l_6 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_7 = 84$	$g_7 = 1.666 \cdot 10^{-3}$	$x_7 = -2.2768 \text{ mm.}$	$2l_7 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_8 = 36$	$g_8 = 0.0265$	$x_8 = 0.9622 \text{ mm.}$	$2l_8 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_9 = 9$	$g_9 = 0.145$	$x_9 = -0.2401 \text{ mm.}$	$2l_9 = 16.667 \text{ mm.}$
$I_{10} = 1$	$g_{10} = 0.3265$	$x_{10} = 0.0267 \text{ mm.}$	$2l_{10} = 16.667 \text{ mm.}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 แสดงการกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 (First Kind Tschebyscheff Array), ค่าความนำนอร์แมลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์

แอมพลิจูด	ค่าความนำนอร์แมลไลซ์	ระยะห่างจากกึ่งกลาง	ความยาวเรโซแนนท์
$I_1 = 1.630$	$g_1 = 0.064$	$x_1 = -1.5176$ mm.	$2l_1 = 16.667$ mm.
$I_2 = 1.510$	$g_2 = 0.055$	$x_2 = 1.2169$ mm.	$2l_2 = 16.667$ mm.
$I_3 = 1.977$	$g_3 = 0.094$	$x_3 = -1.8471$ mm.	$2l_3 = 16.667$ mm.
$I_4 = 2.311$	$g_4 = 0.132$	$x_4 = 2.1969$ mm.	$2l_4 = 16.667$ mm.
$I_5 = 2.541$	$g_5 = 0.1565$	$x_5 = -2.3982$ mm.	$2l_5 = 16.667$ mm.
$I_6 = 2.541$	$g_6 = 0.1565$	$x_6 = 2.3982$ mm.	$2l_6 = 16.667$ mm.
$I_7 = 2.311$	$g_7 = 0.132$	$x_7 = -2.1969$ mm.	$2l_7 = 16.667$ mm.
$I_8 = 1.977$	$g_8 = 0.094$	$x_8 = 1.8471$ mm.	$2l_8 = 16.667$ mm.
$I_9 = 1.510$	$g_9 = 0.055$	$x_9 = -1.2169$ mm.	$2l_9 = 16.667$ mm.
$I_{10} = 1.630$	$g_{10} = 0.064$	$x_{10} = 1.5176$ mm.	$2l_{10} = 16.667$ mm.

ตารางที่ 3.4 แสดงการกระจายกระแสแบบเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 (Second Kind Tschebyscheff Array), ค่าความนำนอร์แมลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์

แอมพลิจูด	ค่าความนำนอร์แมลไลซ์	ระยะห่างจากกึ่งกลาง	ความยาวเรโซแนนท์
$I_1 = 2.583$	$g_1 = 0.0307$	$x_1 = -1.0342$ mm.	$2l_1 = 16.667$ mm.
$I_2 = 3.725$	$g_2 = 0.0638$	$x_2 = 1.4963$ mm.	$2l_2 = 16.667$ mm.
$I_3 = 4.747$	$g_3 = 0.1037$	$x_3 = -1.9163$ mm.	$2l_3 = 16.667$ mm.
$I_4 = 5.516$	$g_4 = 0.1400$	$x_4 = 2.2359$ mm.	$2l_4 = 16.667$ mm.
$I_5 = 5.929$	$g_5 = 0.1618$	$x_5 = -2.4098$ mm.	$2l_5 = 16.667$ mm.
$I_6 = 5.929$	$g_6 = 0.1618$	$x_6 = 2.4098$ mm.	$2l_6 = 16.667$ mm.
$I_7 = 5.516$	$g_7 = 0.1400$	$x_7 = -2.2359$ mm.	$2l_7 = 16.667$ mm.
$I_8 = 4.747$	$g_8 = 0.1037$	$x_8 = 1.9163$ mm.	$2l_8 = 16.667$ mm.
$I_9 = 3.725$	$g_9 = 0.0638$	$x_9 = -1.4963$ mm.	$2l_9 = 16.667$ mm.
$I_{10} = 2.583$	$g_{10} = 0.0307$	$x_{10} = 1.0342$ mm.	$2l_{10} = 16.667$ mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 แสดงการกระจายกระแสแบบเลอจองด์ร์ (Legendre Array), ค่าความนำนอร์แมลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์

แอมพลิจูด	ค่าความนำนอร์แมลไลซ์	ระยะห่างจากกึ่งกลาง	ความยาวเรโซแนนท์
$I_1 = 0.543$	$g_1 = 0.042$	$x_1 = -1.2082$ mm.	$2l_1 = 16.667$ mm.
$I_2 = 0.983$	$g_2 = 0.062$	$x_2 = 1.4760$ mm.	$2l_2 = 16.667$ mm.
$I_3 = 0.840$	$g_3 = 0.100$	$x_3 = -1.8800$ mm.	$2l_3 = 16.667$ mm.
$I_4 = 0.983$	$g_4 = 0.137$	$x_4 = 2.2094$ mm.	$2l_4 = 16.667$ mm.
$I_5 = 1.069$	$g_5 = 0.1595$	$x_5 = -2.3912$ mm.	$2l_5 = 16.667$ mm.
$I_6 = 1.069$	$g_6 = 0.1595$	$x_6 = 2.3912$ mm.	$2l_6 = 16.667$ mm.
$I_7 = 0.983$	$g_7 = 0.137$	$x_7 = -2.2094$ mm.	$2l_7 = 16.667$ mm.
$I_8 = 0.840$	$g_8 = 0.100$	$x_8 = 1.8800$ mm.	$2l_8 = 16.667$ mm.
$I_9 = 0.662$	$g_9 = 0.137$	$x_9 = -1.4760$ mm.	$2l_9 = 16.667$ mm.
$I_{10} = 0.543$	$g_{10} = 0.1595$	$x_{10} = 1.2082$ mm.	$2l_{10} = 16.667$ mm.

จากตาราง ค่า I_n คือค่าของแอมพลิจูดของแต่ละองค์ประกอบ
 g_n คือค่าความนำนอร์แมลไลซ์ของแต่ละองค์ประกอบ
 x_n คือระยะห่างจากกึ่งกลางหนึ่งท่อนำคลื่นของแต่ละองค์ประกอบ
 $2l_n$ คือความยาวเรโซแนนท์ของแต่ละองค์ประกอบ

สำหรับสายอากาศที่สร้างเสร็จแล้วจะนำไปทำการทดสอบต่อไป โดยการทดสอบสายอากาศและผลการทดสอบจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดสอบและผลการทดสอบ

ในการทดสอบสายอากาศนี้ความถี่ที่เรโซแนนซ์จะสามารถแสดงผลในรูปของค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ(Return Loss) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง(Standing Wave Ratio : SWR) หรืออิมพีแดนซ์ของสายอากาศอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ แต่ทั้ง 3 ค่านี้ก็มีข้อเด่นในการแสดงผลที่แตกต่างกัน กล่าวคือค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับจะแสดงผลได้ทุกค่าตลอดย่านความถี่ และในการหาแถบความถี่ของสายอากาศมักจะหาจากค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง(ความกว้างของแถบความถี่คือช่วงที่มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 2 : 1) และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศก็จะแสดงทั้งค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ ซึ่งจะใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีและใช้ในการคำนวณเพื่อปรับจูนสายอากาศเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์สมพ้องกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ

4.1 การทดสอบสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนซ์

สำหรับการทดสอบสายอากาศนั้น คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบในการทดสอบสายอากาศคือความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบไว้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่สมพ้องกับสายนำสัญญาณ(Transmission Line) ที่ความถี่ที่ออกแบบไว้

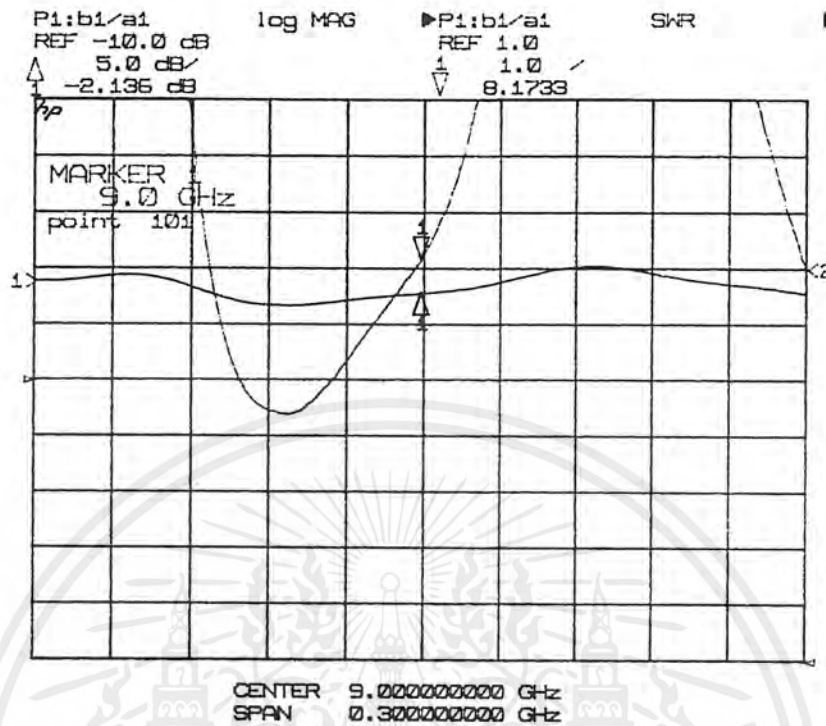
ถ้ามีค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศเป็นบวกแสดงว่ามีสภาพเป็นอินดักแตนซ์และถ้าค่ารีแอคแตนซ์ของสายอากาศเป็นลบแสดงว่ามีสภาพเป็นคาปาซิแตนซ์ ดังนั้นจึงต้องจูนให้สนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นหลักแรงขึ้นเพื่อชดเชยสภาพอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ให้สายอากาศมีเฉพาะค่าความต้านทาน โดยการโดยการขยับนิ้วของเครื่องบริเวณตรงกลางผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น ณ ตำแหน่งที่สนามไฟฟ้าแรงที่สุด(ห่างจากแผ่นปิดปลายท่อนำคลื่นเป็นระยะทาง $(2n + 1)\lambda_g / 4$ โดยที่ $n=0,1,2,\dots$ แต่ต้องอยู่นอกบริเวณของร่องป้อนสัญญาณ) แม้ว่าสลับเดียวจะจูนให้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ใกล้เคียงกับที่ออกแบบแต่ก็ยังไม่สามารถเลื่อนความถี่เรโซแนนซ์ไปที่ความถี่ที่ออกแบบได้จึงต้องเพิ่มสลับเพื่อปรับเลื่อนความถี่อีกตัวหนึ่งจึงกลายเป็นสลับคู่ โดยสลับตัวที่สองจะอยู่ห่างจากสลับตัวแรกเป็นระยะ $\lambda_g / 8$ ไปทางแผ่นปิดปลายท่อ

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นการแสดงผลการทดสอบความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศจะทำการแสดงผลค่าทั้งสาม(ค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ,อัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์)ของสายอากาศแถวลำดับที่ทำการออกแบบไว้ทั้งหมด 5 แบบ เปรียบเทียบในกรณีที่ยังไม่ได้ปรับจูนและกรณีที่ยูนด้วยสลับ(Stub Tuner)แล้ว โดยสายอากาศที่ออกแบบไว้ทั้ง 5 แบบมีลักษณะการกระจายกระแสดังนี้

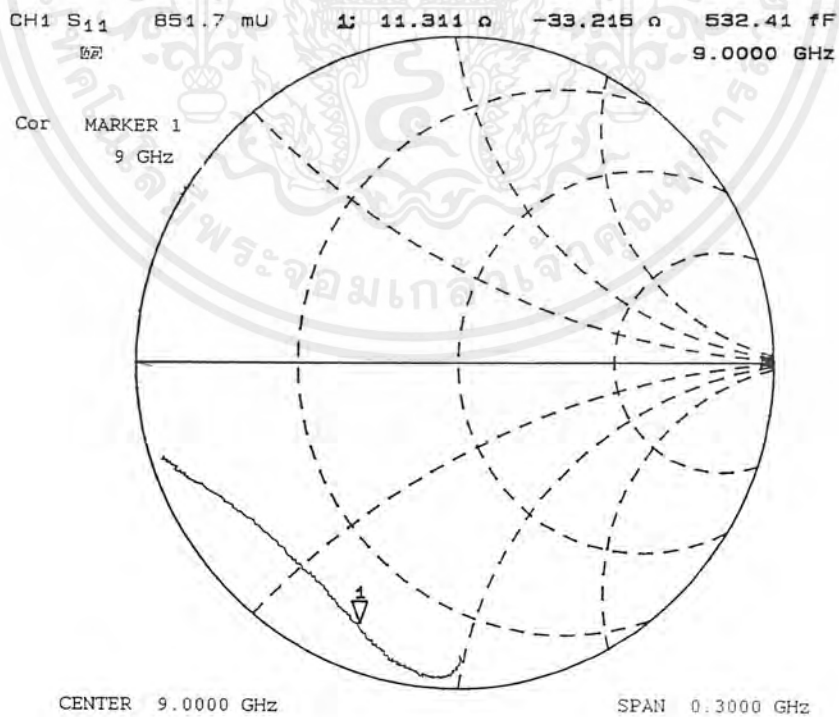
1. สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสมมาตร
2. สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินาม
3. สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1
4. สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2
5. สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองดูร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ

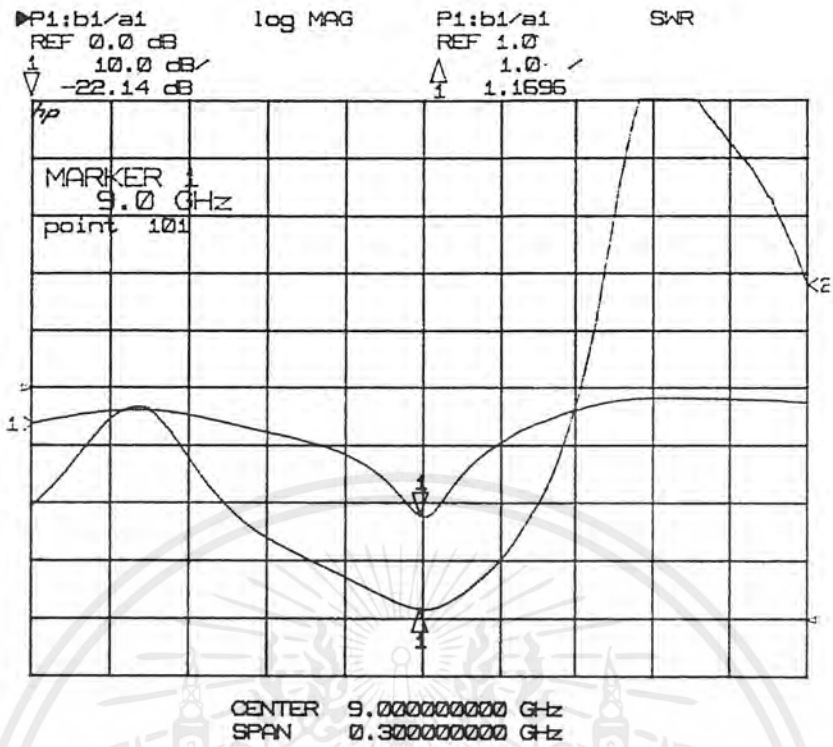


รูปที่ 4.1 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอกรณีที่ไม่ได้ปรับจูน

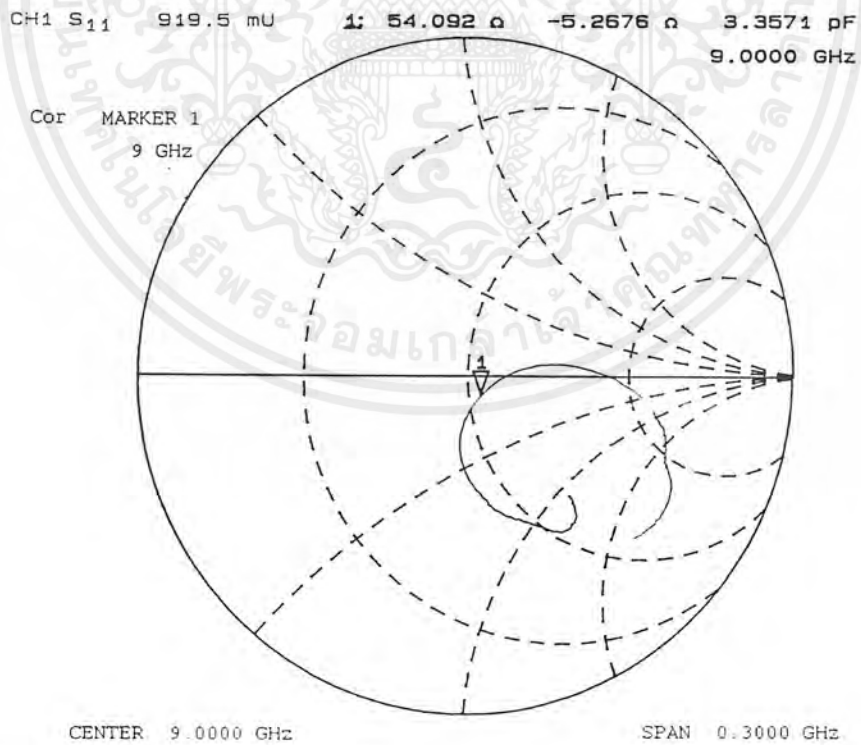


รูปที่ 4.2 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอกรณีที่ไม่ได้ปรับจูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



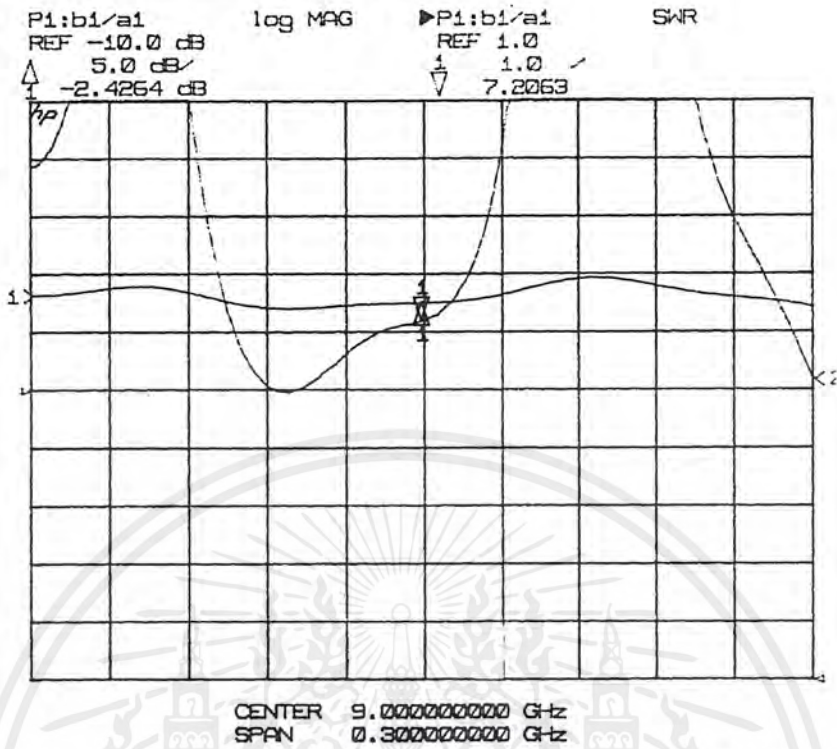
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ
 ที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอกรณีปรับจูนด้วยสลับ



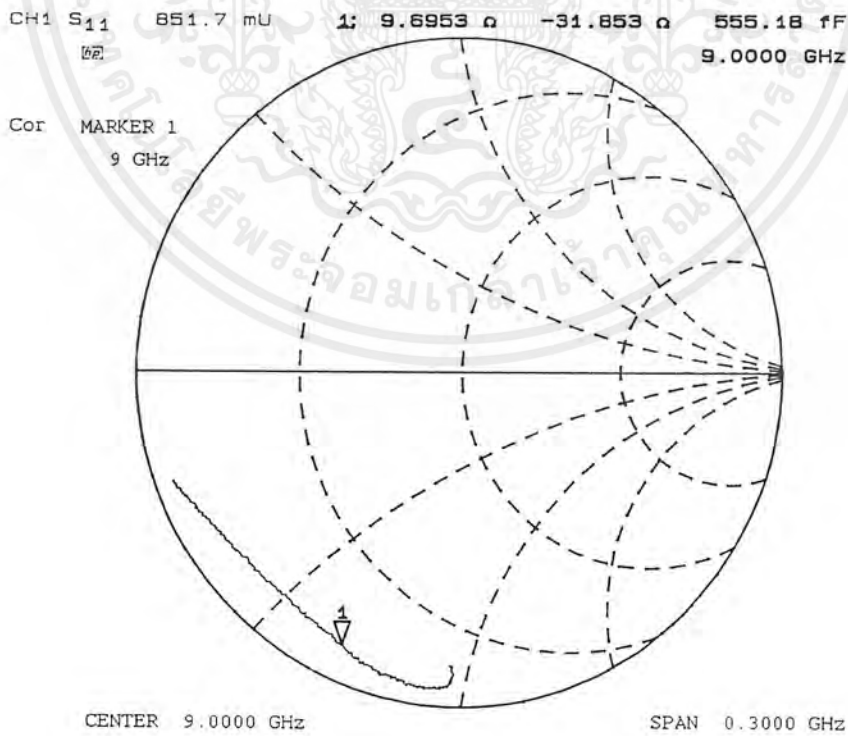
รูปที่ 4.4 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอกรณีปรับจูนด้วยสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

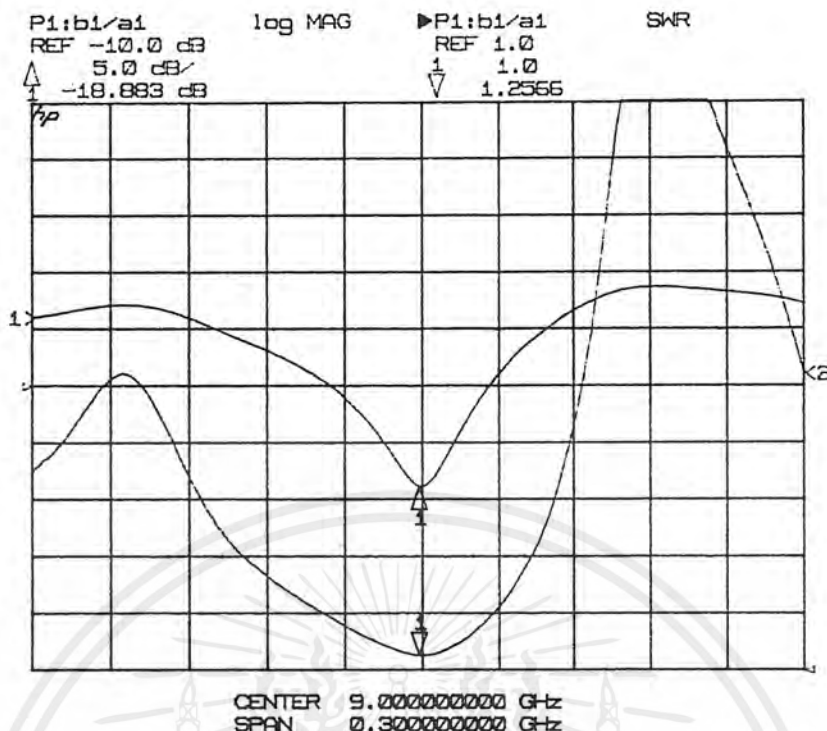
4.1.2 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินาม



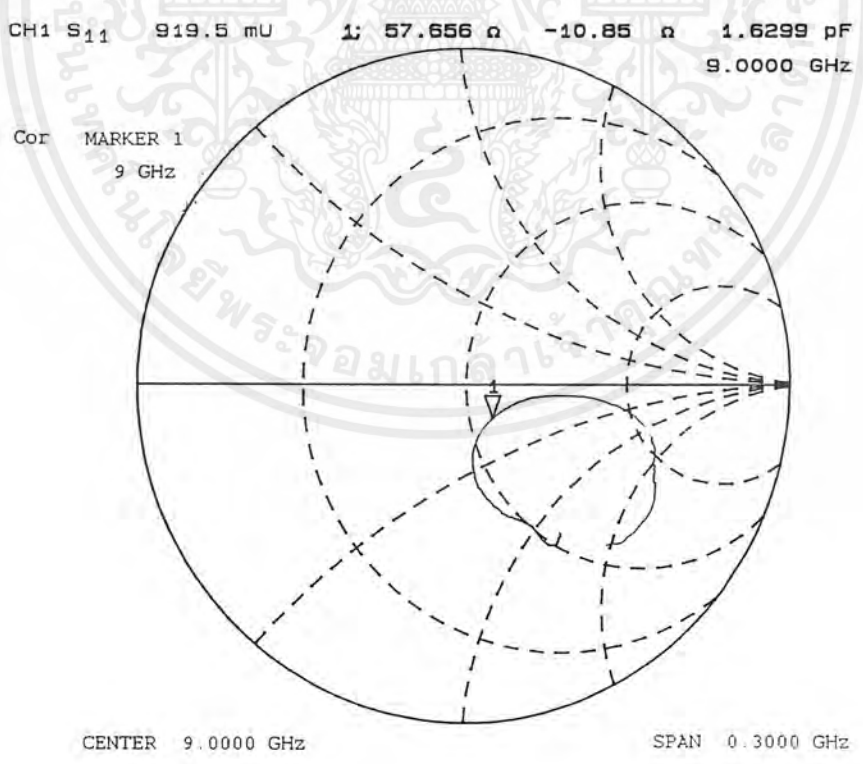
รูปที่ 4.5 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินามกรณีที่ไม่ได้ปรับจูน



รูปที่ 4.6 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินามกรณีที่ไม่ได้ปรับจูน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



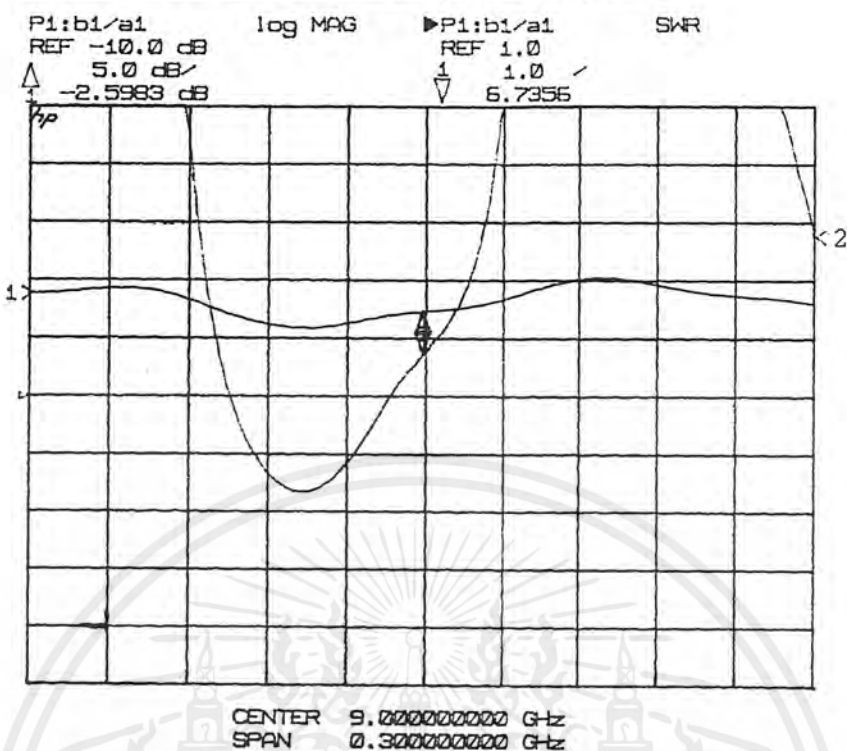
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินามกรีนี่ที่ปรับจูนด้วยสตัด



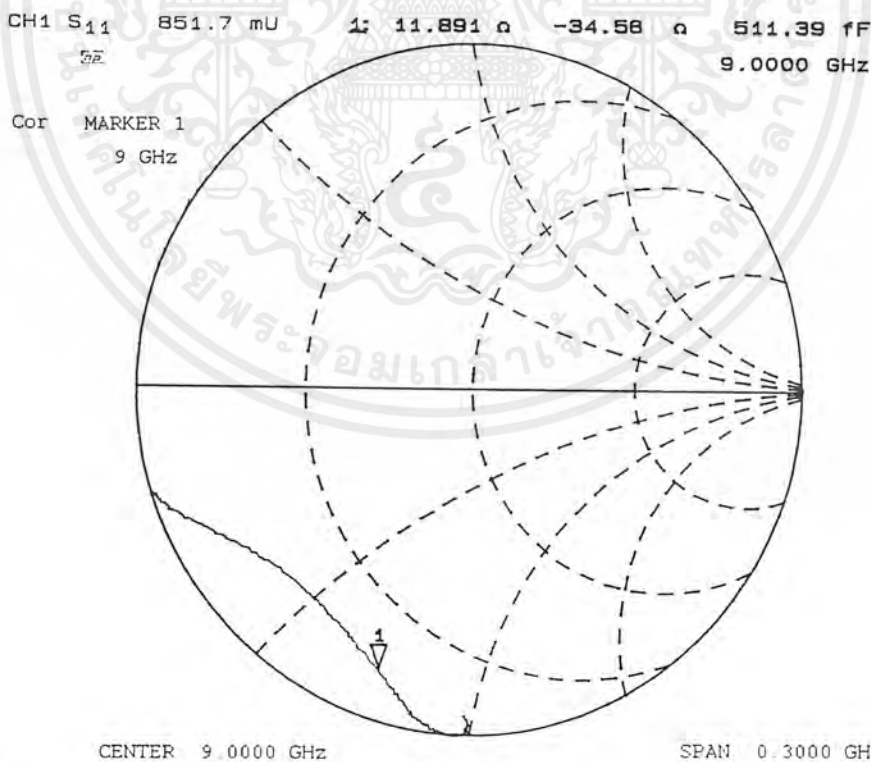
รูปที่ 4.8 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินามกรีนี่ที่ปรับจูนด้วยสตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1

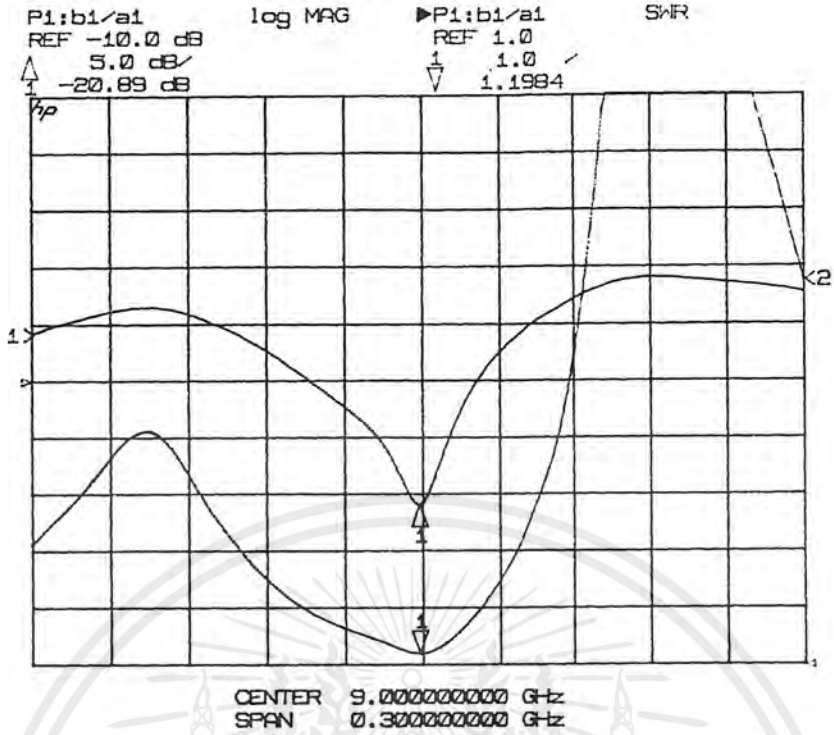


รูปที่ 4.9 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 กรณีที่ไม่ได้ปรับจูน

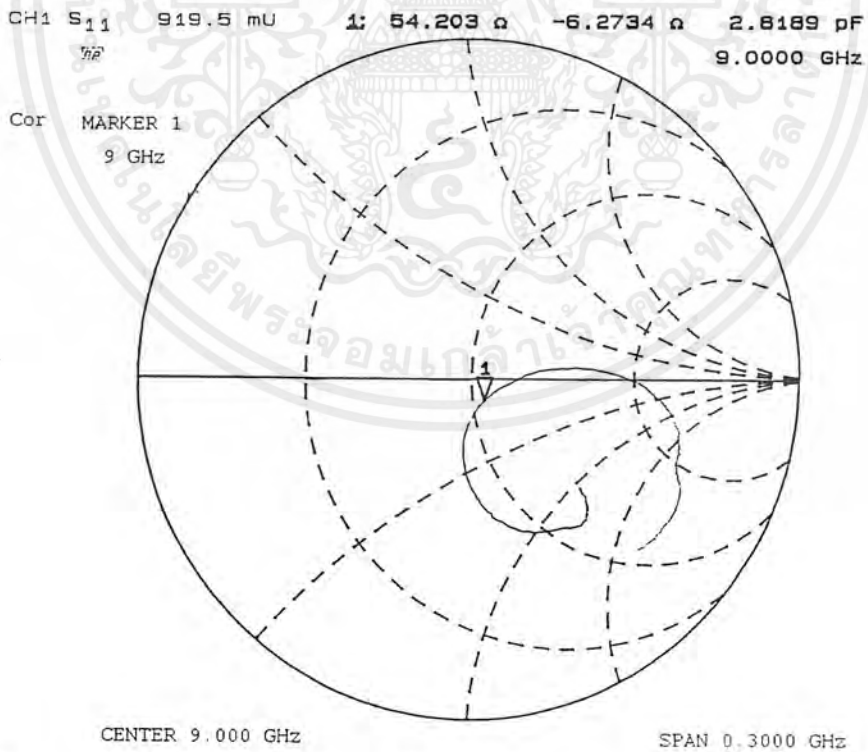


รูปที่ 4.10 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1 กรณีที่ไม่ได้ปรับจูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



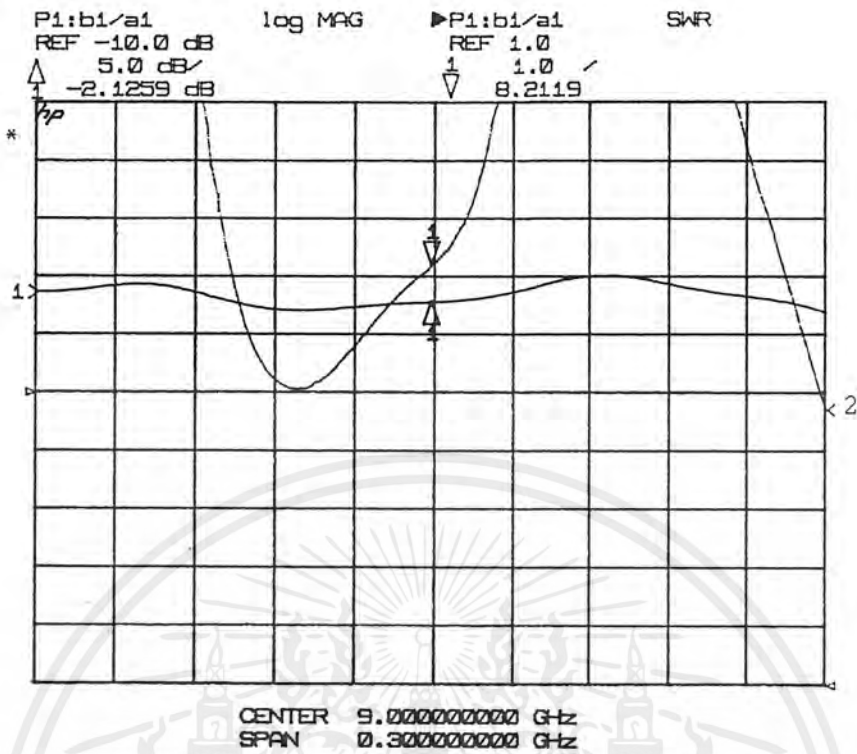
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชอปีเชฟชนิดที่ 1 กรณีที่ปรับจูนด้วยสตัด



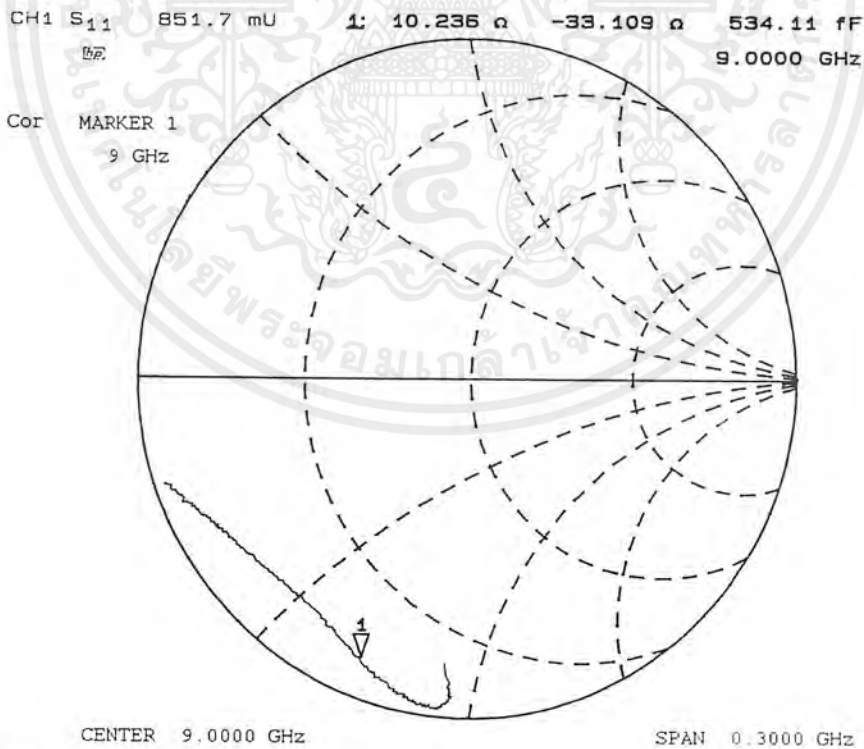
รูปที่ 4.12 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชอปีเชฟชนิดที่ 1 กรณีที่ปรับจูนด้วยสตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2

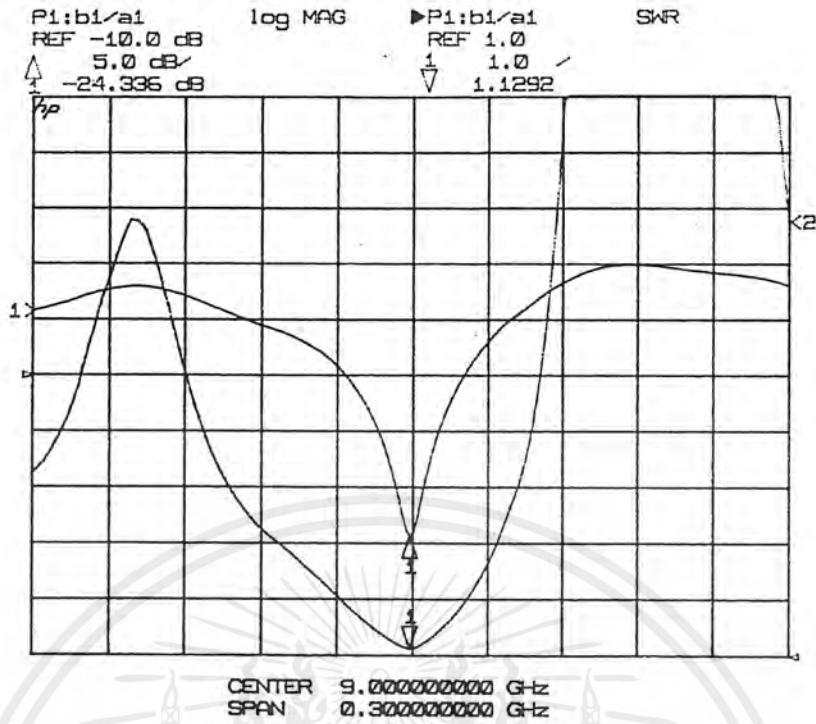


รูปที่ 4.13 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 กรณีที่ไม่ได้ปรับจูน

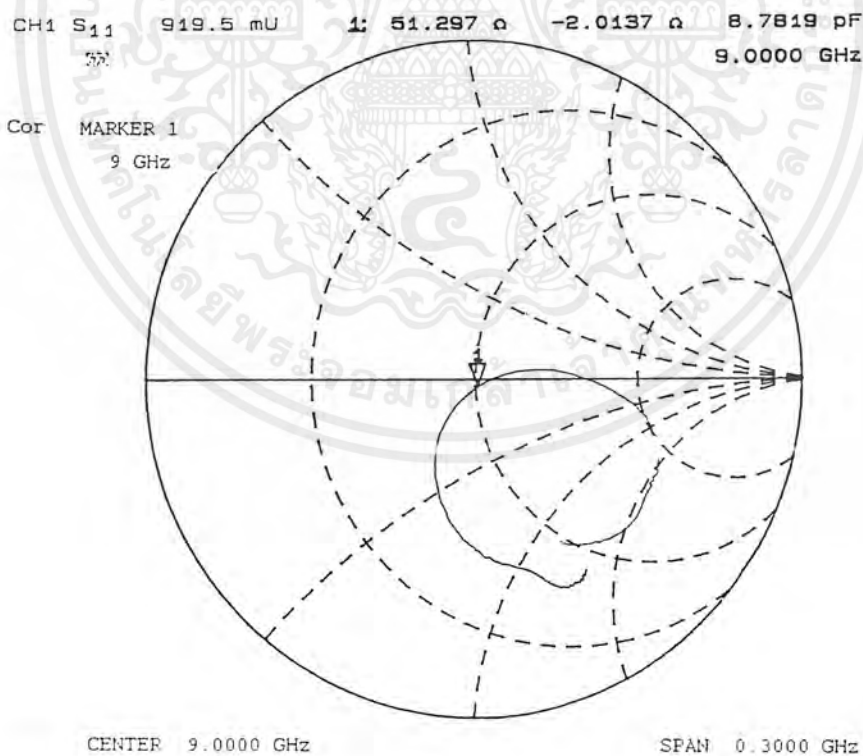


รูปที่ 4.14 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 กรณีที่ไม่ได้ปรับจูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



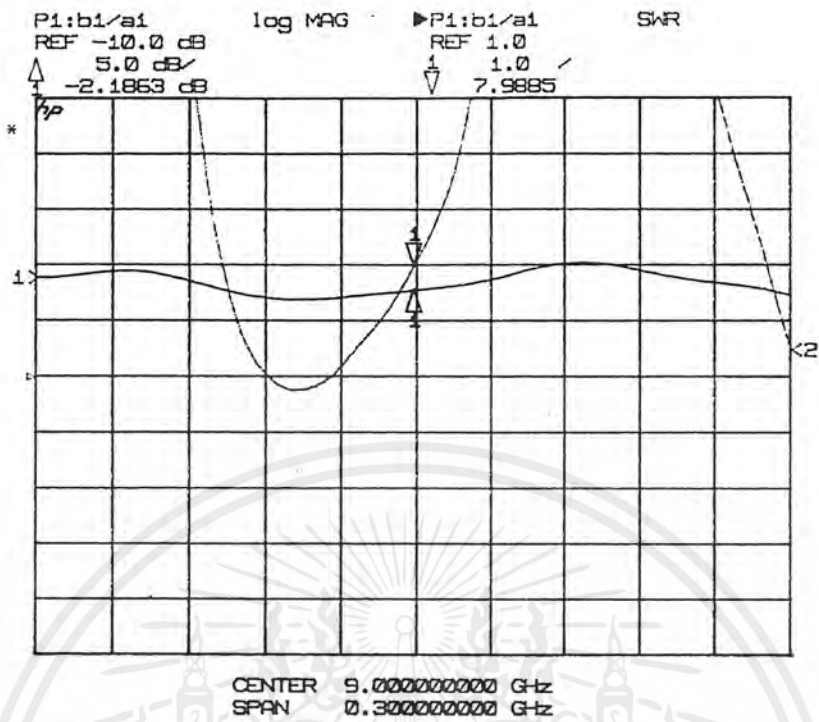
รูปที่ 4.15 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเซฟชนิดที่ 2 กรณีที่ปรับจูนด้วยสลับ



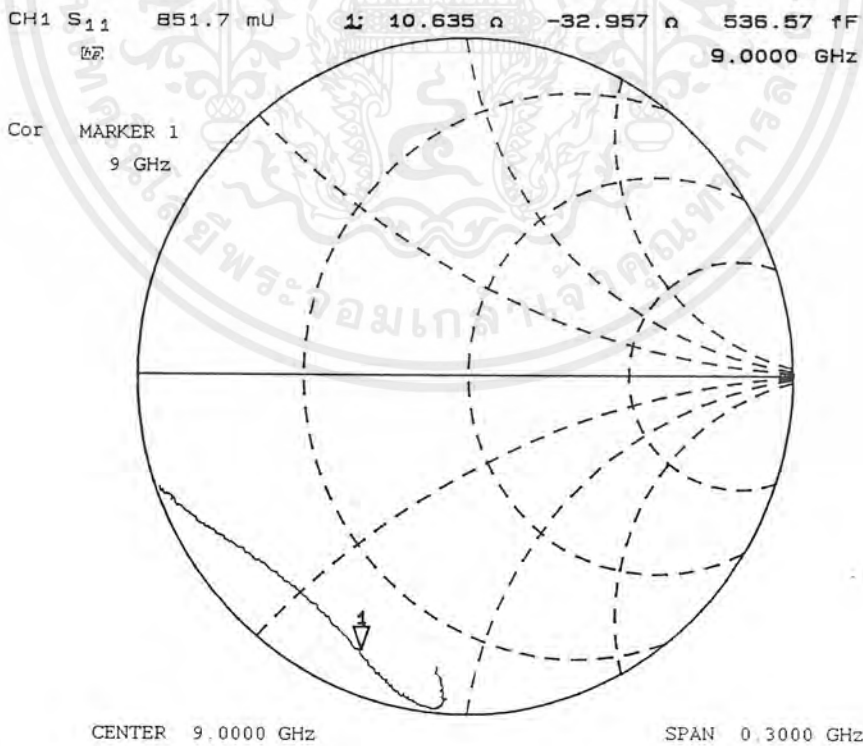
รูปที่ 4.16 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเซฟชนิดที่ 2 กรณีที่ปรับจูนด้วยสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์รี

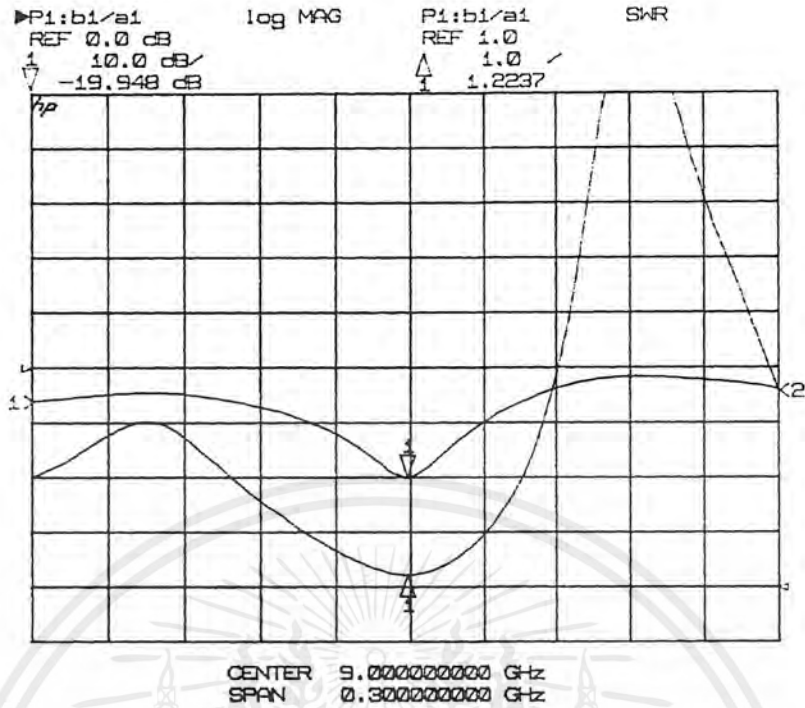


รูปที่ 4.17 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์รีที่ไม่ได้ปรับจูน

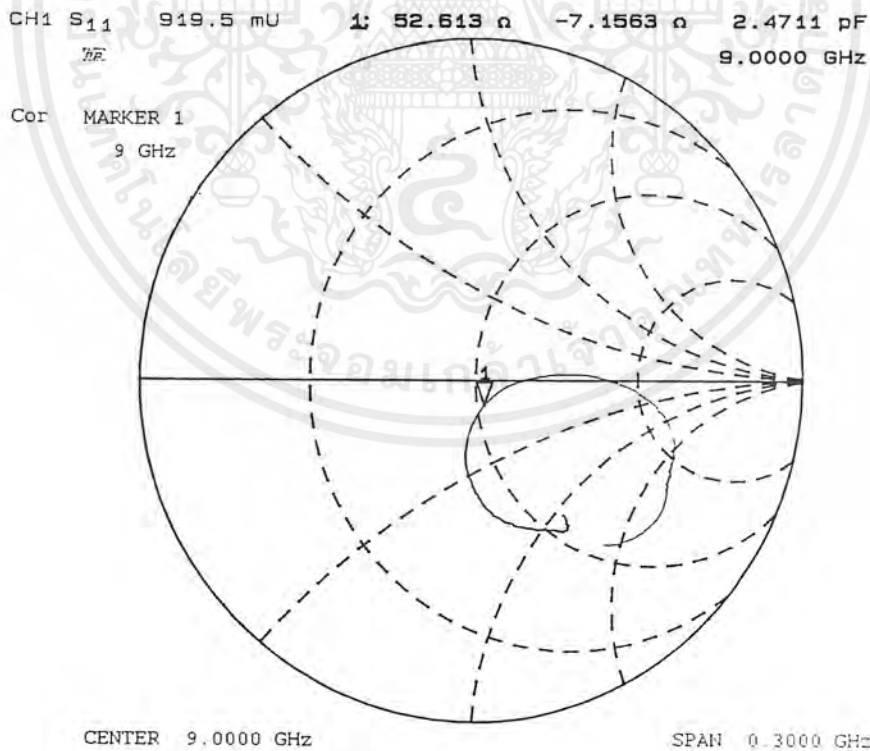


รูปที่ 4.18 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์รีที่ไม่ได้ปรับจูน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์กรณีที่ปรับจูนด้วยสลับ



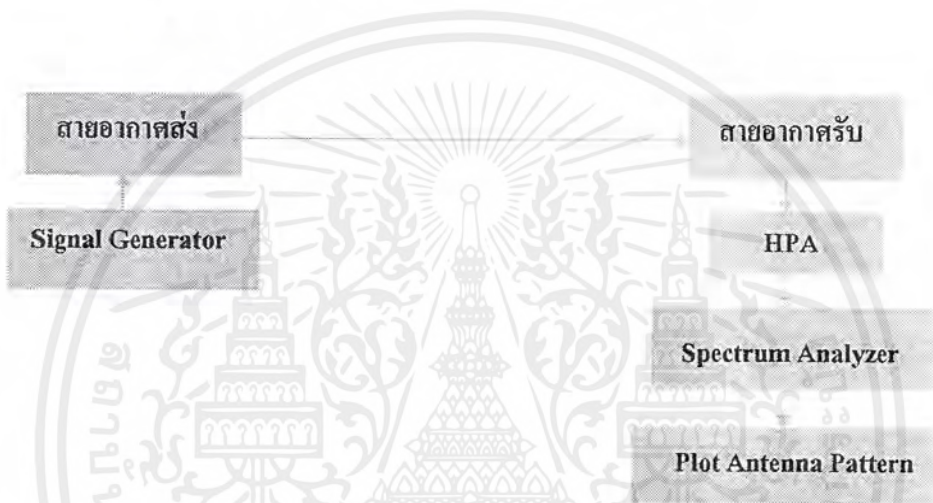
รูปที่ 4.20 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์กรณีที่ปรับจูนด้วยสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดสอบสายอากาศ

นำสายอากาศที่สร้างขึ้นวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ(Return Loss), อิมพีแดนซ์ (Impedance), อัตราส่วนคลื่นนิ่ง(Standing Wave Ratio:SWR)ของสายอากาศโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer) พร้อมทั้งทำการปรับจูนค่าเพื่อให้สายอากาศสามารถตอบสนอง ณ ความถี่ที่ทำการออกแบบไว้ได้ดี ซึ่งผลจากการวัดค่าต่างๆเหล่านี้ จะทำให้ทราบความถี่ที่สายอากาศสามารถตอบสนองได้ดีที่สุดว่าห่างจากความถี่ที่เราทำการออกแบบไว้มากน้อยเพียงไร

หลังจากนั้นนำสายอากาศไปวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น(Radiation Pattern) ในระนาบสนามไฟฟ้า(E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก(H-plane) ซึ่งบล็อกไดอะแกรมแสดงการทดสอบสายอากาศแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.21 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทดสอบสายอากาศ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วนด้วยกันคือ

- 1) ส่วนกำเนิดสัญญาณในช่วงความถี่ที่ออกแบบไว้คือ 9 GHz ซึ่งเป็นความถี่ที่สายอากาศเรโซแนนท์โดยเครื่องกำเนิดสัญญาณจะต่ออยู่กับสายอากาศส่งซึ่งทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่นออกไป
- 2) สายอากาศชนิดแถวลำดับที่ทำการทดสอบ โดยจะทำการติดตั้งสายอากาศอยู่กับฐานซึ่งเป็นแท่นหมุน(Turn Table) ซึ่งจะหมุนไปที่ละ 1 องศาจนครบรอบ 360 องศา
- 3) ส่วนที่เป็นตัวตรวจวัดระดับสัญญาณที่ได้รับจากส่วนกำเนิดสัญญาณ ซึ่งจะทำการต่อจาก HPAที่ทำหน้าที่ในขยายสัญญาณที่ได้รับมาจากสายอากาศรับโดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม(Spectrum Analyzer)ที่ทำหน้าที่แสดงสเปกตรัมของสัญญาณที่รับได้ที่สายอากาศและค่าที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของสายอากาศที่หมุนไป

ผลที่ได้จากการวัดค่าสเปกตรัมของสัญญาณทั้งหมด จะนำไปแปลงเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนที่ทำการกำเนิดสัญญาณ

ประกอบด้วยตัวให้กำเนิดสัญญาณความถี่ไมโครเวฟที่ตั้งให้ทำงานที่โหมดส่งคลื่นต่อเนื่อง(Continuous Wave : CW) มีกำลังส่ง 10 dBm หรือ 10 mW และสายอากาศส่งแบบช่องเปิด แสดงดังรูป

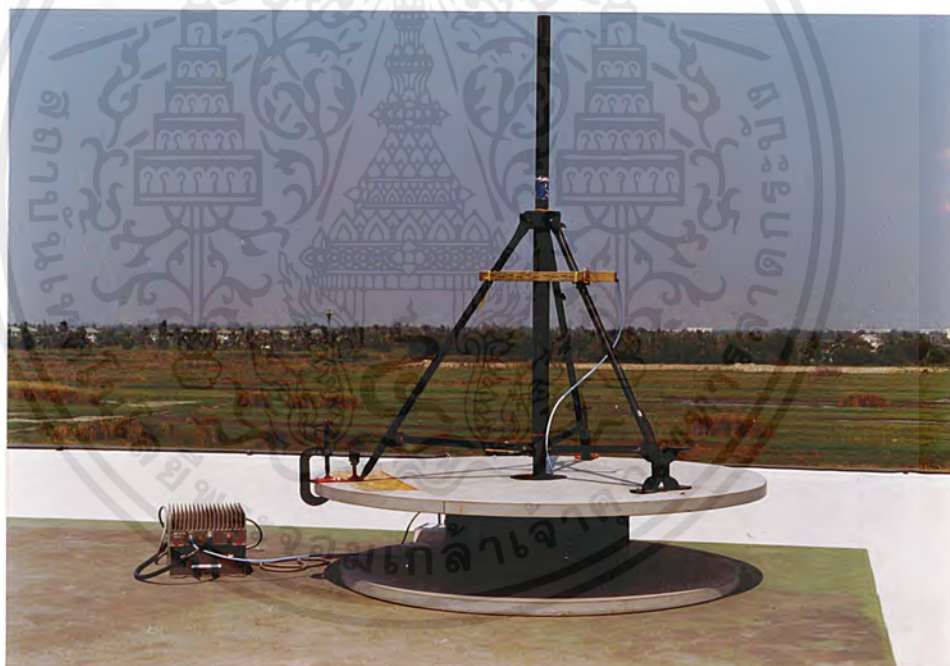


รูปที่ 4.22 แสดงอุปกรณ์ส่วนกำเนิดสัญญาณและสายอากาศส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 อุปกรณ์ในภาครับสัญญาณ

ประกอบด้วยสายอากาศรับ(สายอากาศที่นำมาทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งหมด 5 แบบ)ที่ติดตั้งอยู่บนฐานซึ่งเป็นแท่นหมุน, อุปกรณ์ HPA ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศรับ เนื่องจากระยะทางจากสายอากาศทดสอบที่ทำหน้าที่รับสัญญาณไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมต้องใช้สายนำสัญญาณที่มีความยาวถึง 10 เมตร ดังนั้นถ้าส่งผ่านสัญญาณความถี่ไมโครเวฟเลยจะทำให้เกิดการสูญเสียในสายนำสัญญาณมากจึงได้ทำการต่อสายอากาศผ่านอุปกรณ์ HPA ก่อน แทนที่จะต่อสายนำสัญญาณไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมโดยตรง



รูปที่ 4.23 แสดงอุปกรณ์ในภาครับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจัดวางวิธีทดสอบคังบล็อกโคอะแกรมั้น ในการทดสอบจริงจะต้องปรับโพลาไรเซชันของสายอากาศส่งและรับให้ตรงกันเสียก่อนจึงจะเริ่มทำการทดสอบได้ โดยเราต้องทำการคำนวณหาสนามระยะไกล(Far Field : R)ของสายอากาศเพื่อหาระยะทดสอบ(Test Range)ที่เหมาะสม จะหาได้จากสมการ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda_0} \quad (4.1)$$

เมื่อ D คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ
 λ_0 คือ ความยาวคลื่น ในอากาศที่ความถี่ 9 GHz

สนามระยะไกลของสายอากาศรับที่ทำการทดสอบต้องมีระยะมากกว่า 8.5 เมตร เมื่อมิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศเท่ากับ 37 เซนติเมตร(มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศทดสอบวัดในแนวทแยงมุม) ส่วนสนามระยะไกลของสายอากาศส่งที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณความถี่ที่ทำการออกแบบมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ 20 เซนติเมตร ซึ่งสนามระยะไกลของสายอากาศส่งที่คำนวณ ได้ควรมีระยะที่มากกว่า 2.5 เมตร

ดังนั้นระยะทดสอบที่น้อยที่สุดที่จะสามารถทำการทดสอบได้ Minimum Test Range ก็คือ สนามระยะไกลที่มีค่ามากที่สุดของสายอากาศส่งหรือรับตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งในที่นี้คือระยะ 8.5 เมตร สำหรับการทดสอบนี้ใช้ระยะทดสอบเท่ากับ 23 เมตร และทำการบันทึกค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ทุกๆ 1 องศา และนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ การทดสอบสายอากาศแสดงดังรูป

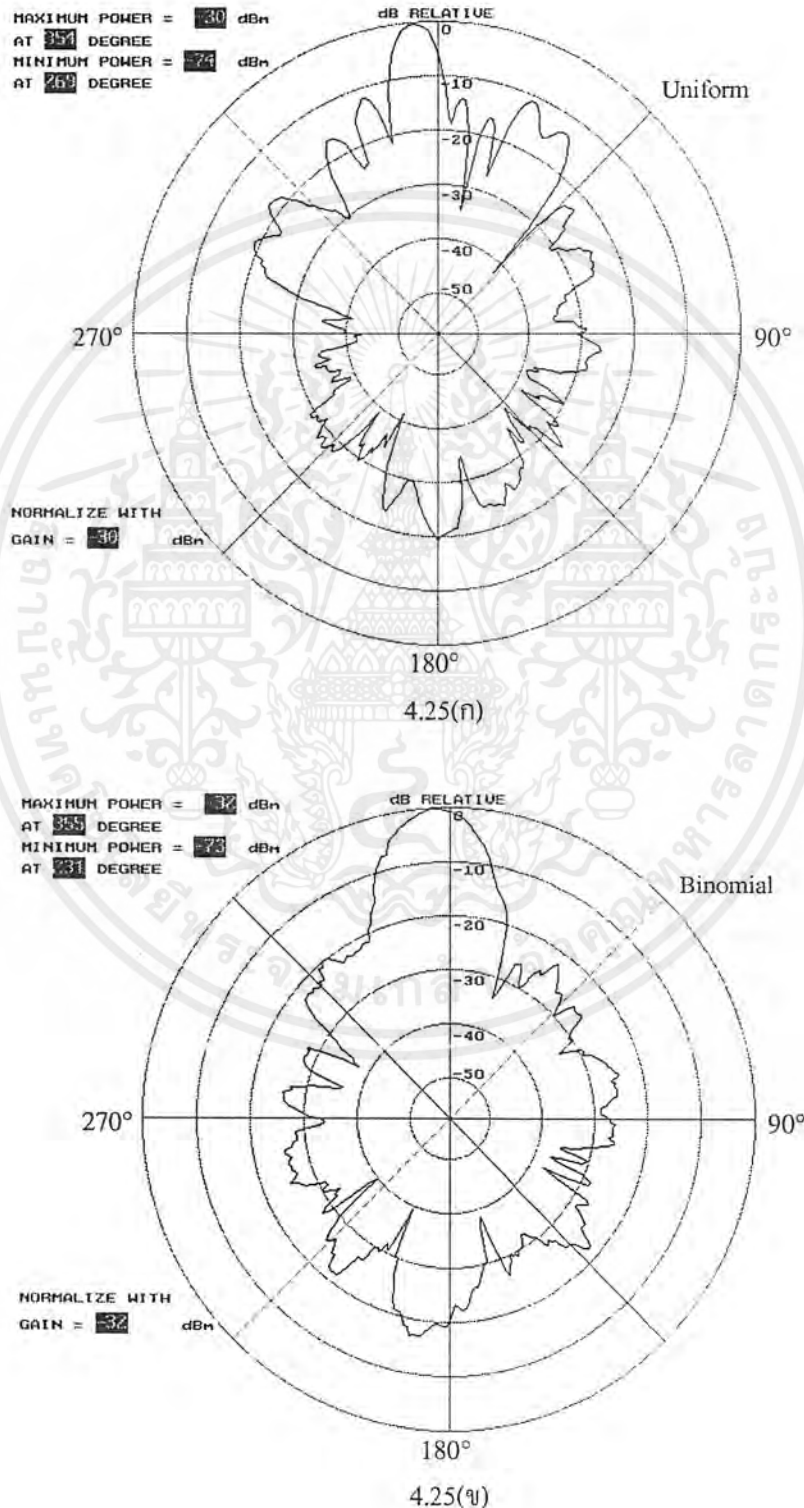


รูปที่ 4.24 แสดงการจัดวางเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

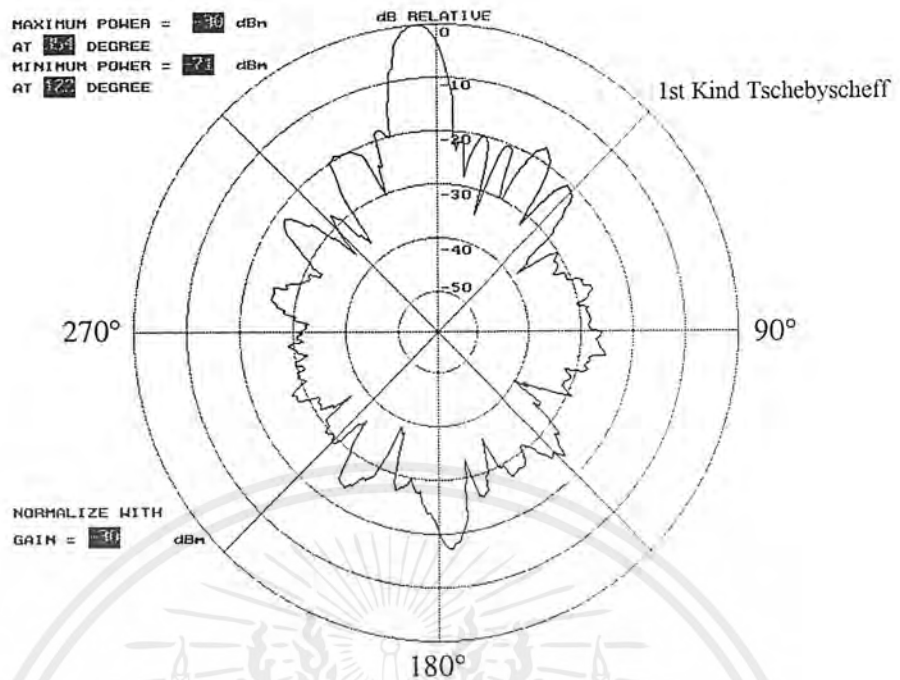
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการทดสอบ

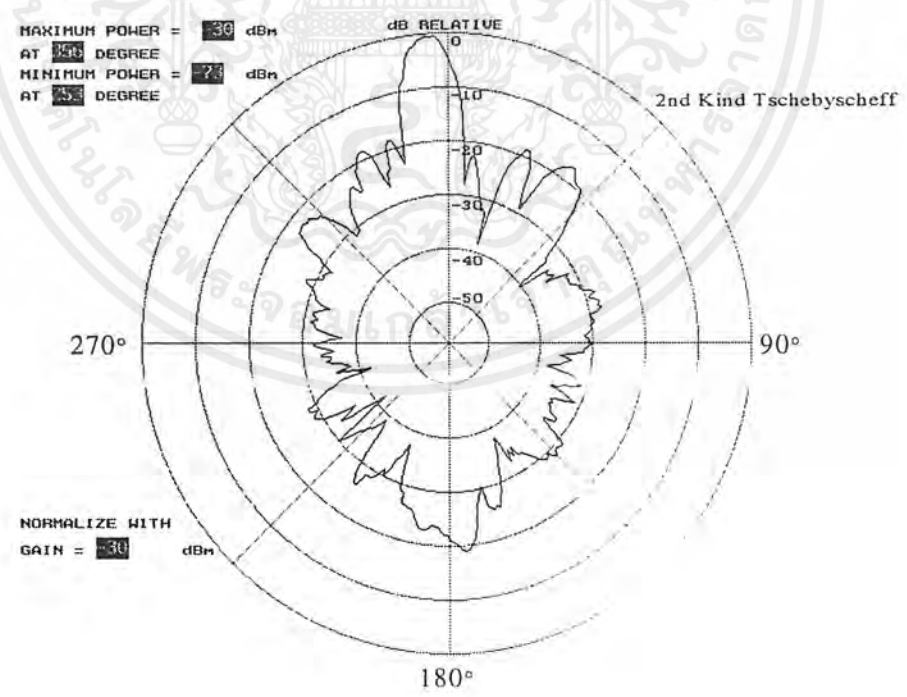
ผลที่ได้จากการวัดค่าสเปกตรัมของสัญญาณของสายอากาศ ที่ทำการบันทึกค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ทุกๆ 1 องศา และนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ที่ออกแบบ จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบของแนวลำดับซึ่งเป็นระนาบสนามแม่เหล็ก(H-plane) ของสายอากาศทั้ง 5 แบบ ที่ความถี่ 9 GHz ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.25



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

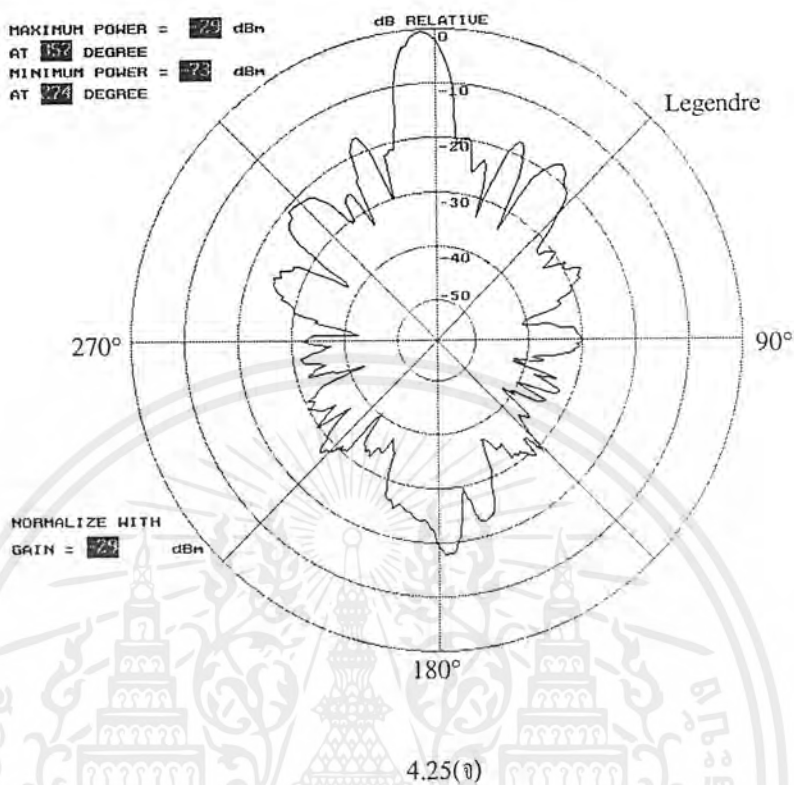


4.25(ค)



4.25(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

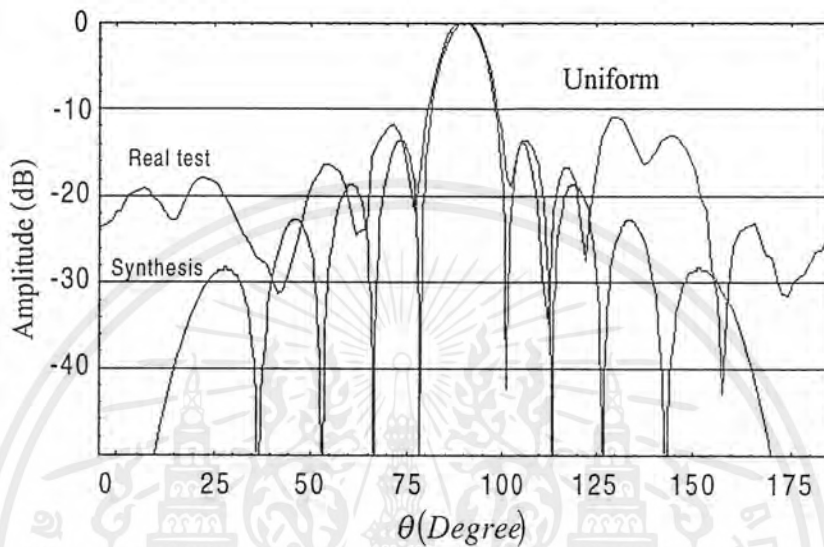


รูปที่ 4.25 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดเชิงขั้ว

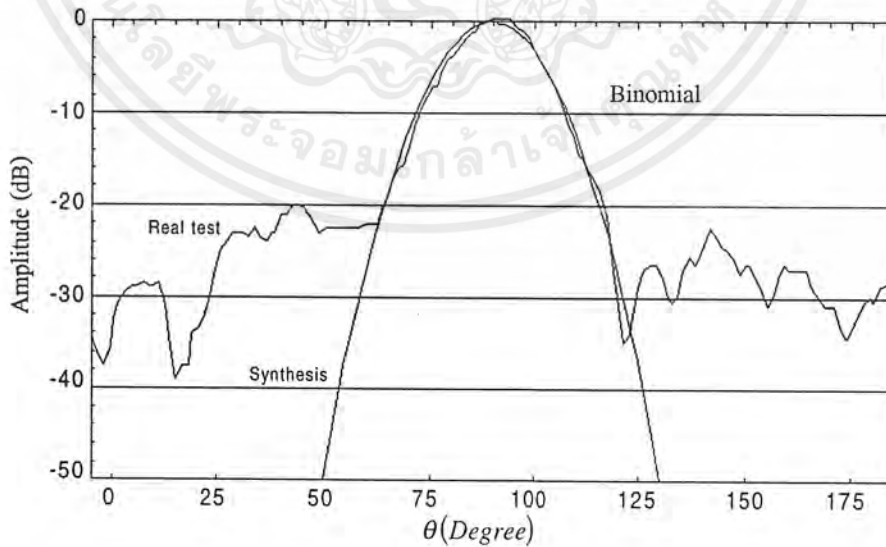
- 4.25(ก) สาขาอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ
- 4.25(ข) สาขาอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินาม
- 4.25(ค) สาขาอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1
- 4.25(ง) สาขาอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2
- 4.25(จ) สาขาอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสทั้ง 5 แบบที่ทำการศึกษาทดสอบในระนาบสนามแม่เหล็กในทิศทางเชิงขั้วที่แสดงดังรูปที่ 4.25(ก) ถึง 4.25(จ) ได้นำผลการทดสอบที่ได้มาแสดงเปรียบเทียบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้คำนวณไว้แล้วในบทที่ 3 สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กในทิศทางมุมฉากแสดงได้ดังรูปที่ 4.26

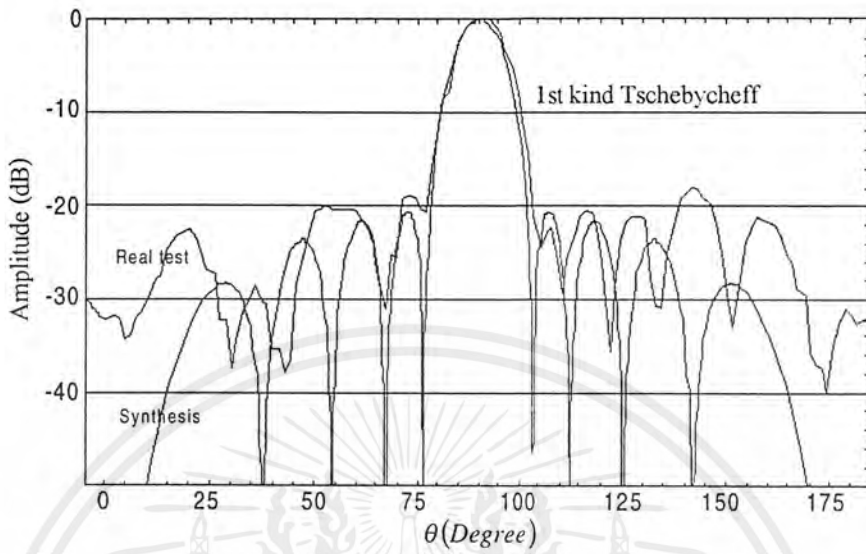


4.26(ก)

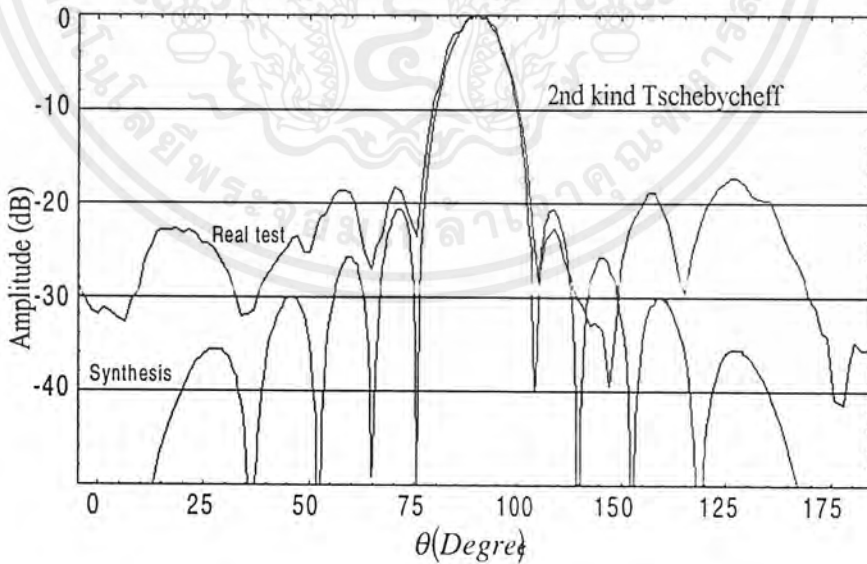


4.26(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

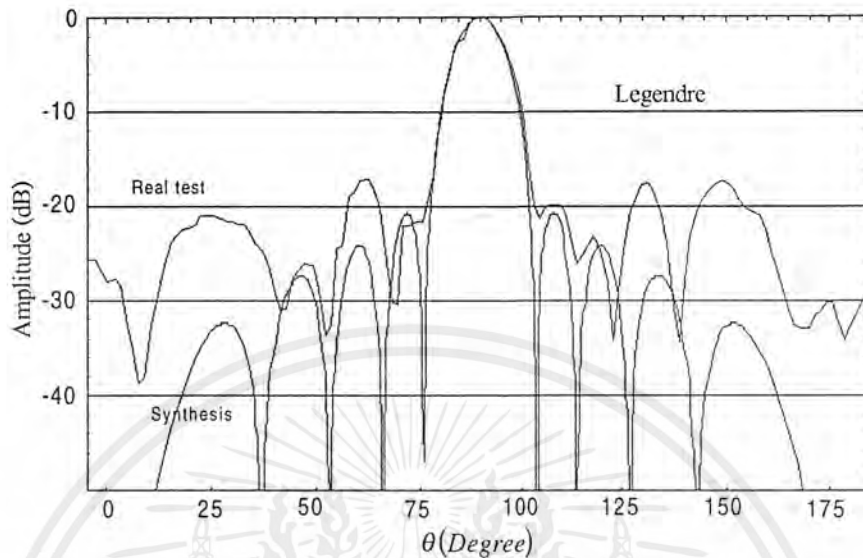


4.26(ก)



4.26(ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



4.26(จ)

รูปที่ 4.26 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก

4.26(ก) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ

4.26(ข) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบทวินาม

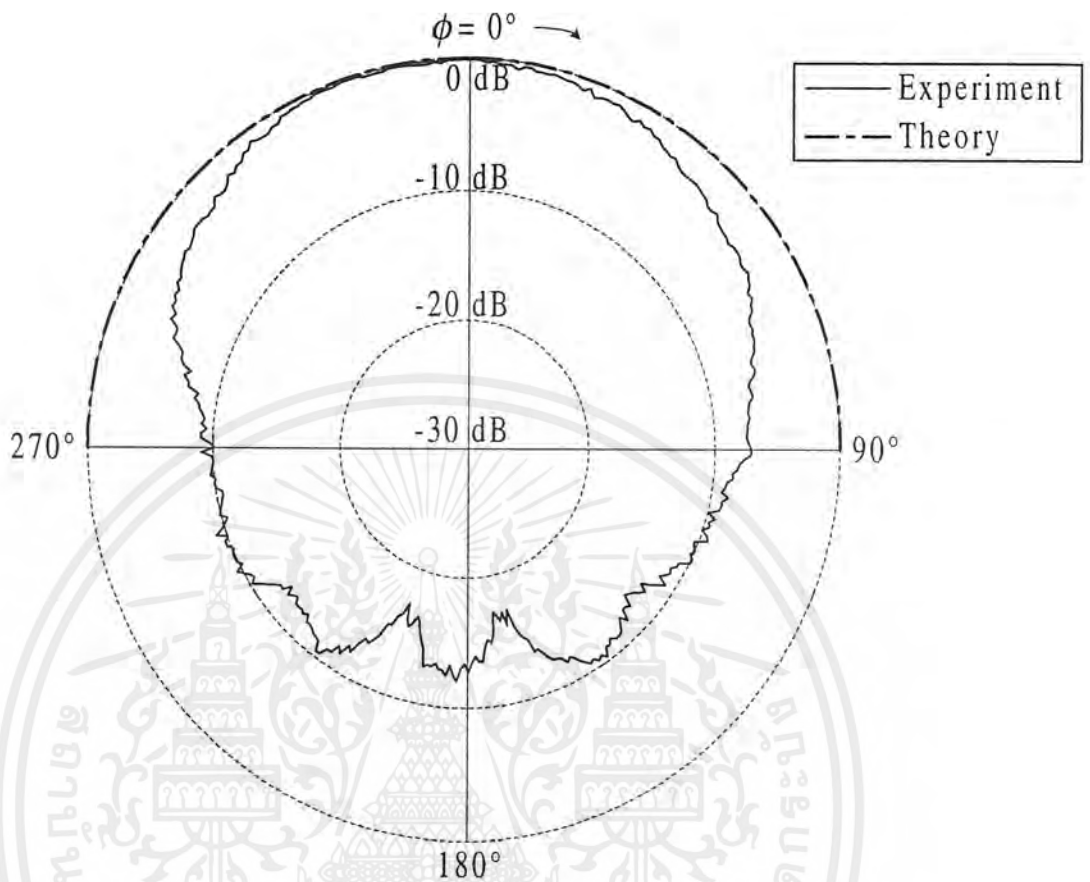
4.26(ค) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1

4.26(ง) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2

4.26(จ) สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเลอจองด์ร์

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าในพิกัดเชิงขั้วของสายอากาศแถว ลำดับเชิงเส้นทั้ง 5 แบบ พบว่าการกระจายกระแสของแถวลำดับเชิงเส้นจะไม่มีผลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า(E-plane) เนื่องจากในสนามไฟฟ้านั้นจำนวนองค์ประกอบมีเพียงองค์ประกอบเดียวเท่านั้น ดังนั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 5 แบบจึงมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันในระนาบสนามไฟฟ้า กล่าวคือสนามในระนาบสนามไฟฟ้าจะเท่ากันหมดและมีสนามเพียงด้านเดียวคือด้านที่เป็นร่องสำหรับการคำนวณกำหนดให้ระนาบของกราวด์(Ground Plane) มีขนาดเป็นอนันต์ แต่สายอากาศที่ทำการทดสอบมีระนาบของกราวด์เท่ากับความกว้างของผนังท่อนำคลื่นเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นผลให้แทนที่สนามจะเท่ากันกลับทำให้สนามมีค่าลดลงเรื่อยๆและทำให้เกิดโลบด้านหลังของสายอากาศ ดังแสดงผลการทดสอบและผลจากการคำนวณอันเนื่องมาจากการกระจายกระแสในระนาบสนามไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าในพิกัดเชิงขั้ว

จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ, ทำการสร้างและปรับจูนให้ผลตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ คือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสทั้ง 5 ลักษณะ มีความกว้างของนัลแรกใกล้เคียงกับที่ได้คำนวณไว้ในบทที่ 3 และสำหรับสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบพหุนามเชิงตั้งฉากทั้งสามแบบ(พหุนามเลอจองด์, พหุนามเชฟบีเรฟชนิดที่ 1 และ 2) ซึ่งออกแบบให้มีระดับของโลบข้างเท่ากับ 20 dB ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าได้ระดับโลบข้างที่ใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้

บทที่ 5

วิจารณ์และบทสรุป

ปริญญาโทฉบับนี้นำเสนอการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น โดยคุณสมบัติของสายอากาศที่พิจารณาได้แก่

1. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
2. การกระจายกระแส
3. ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง
4. ความกว้างของลำคลื่นที่เกิดคลื่นแรก
5. ค่าการชี้นำทิศทาง
6. ประสิทธิภาพลำคลื่น

สำหรับโครงการนี้พิจารณาคุณสมบัติของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 10 องค์ประกอบ ที่มีระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบเท่ากัน และเฟสที่ป้อนให้แก่แต่ละองค์ประกอบมีเฟสเดียวกัน โดยมีวิธีการควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังนี้คือ

1. การจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับเป็นเส้นตรง(ที่มีจำนวนองค์ประกอบตั้งแต่ 2 องค์ประกอบ จนถึง 20 องค์ประกอบ
2. ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น $\lambda_g / 2$
3. ขนาดของกระแสที่ป้อนให้แก่แต่ละองค์ประกอบมีลักษณะแตกต่างกัน 5 แบบดังนี้
 - การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ
 - การกระจายกระแสแบบทวินาม
 - การกระจายกระแส โดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 1
 - การกระจายกระแส โดยใช้พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2
 - การกระจายกระแส โดยใช้พหุนามเลอจองด์ร์

สำหรับการกระจายกระแสโดยใช้พหุนามเชิงตั้งฉากทั้ง 3 แบบที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 นั้นสามารถกำหนดระดับโลบข้างได้ โดยปริญญาโทฉบับนี้เราทำการกำหนดระดับของโลบข้างให้มีระดับเท่ากับ 20 dB (Side Lobe Level : SLL = 20 dB)

4. เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ เรากำหนดให้เฟสเดียวกันทุกองค์ประกอบ ($\beta = 0$)
5. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละองค์ประกอบ เป็นลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดจากองค์ประกอบของร่องเดี่ยว

จากคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ได้เลือกทำการออกแบบสร้างสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่มีจำนวนองค์ประกอบ 10 องค์ประกอบโดยเลือกออกแบบสายอากาศที่ความถี่ 9 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามลัพท์ที่ได้ของแวลวลำดับมีค่าเท่ากับสนามขององค์ประกอบเดี่ยวที่วางที่จุดกำเนิดคูณด้วยตัวประกอบ ที่เรียกว่าตัวประกอบแวลวลำดับ โดยที่จะใช้องค์ประกอบของแวลวลำดับเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิกก่อนเพื่อความง่ายในการคำนวณ

จากวิธีการวิเคราะห์ที่ผ่านมา ได้ทำการคำนวณและออกแบบในกรณีที่สายอากาศมีองค์ประกอบเป็นร่อง โดยเริ่มจากการวิเคราะห์คุณสมบัติร่องเดี่ยว พบว่าร่องเดี่ยวมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่กว้างมากและมีค่าการชี้ทิศทางต่ำ ดังนั้นเราจึงนำร่องมาประกอบกันขึ้นเป็นแวลวลำดับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของร่องเดี่ยวด้วยตัวประกอบแวลวลำดับ ต่อจากนั้นก็ได้แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่ส่งผ่านคลื่นโหมด TE_{10} โดยพิจารณาการจับวางตำแหน่งของร่องบนผนังท่อนำคลื่นแบบท่อนำคลื่นเรโซแนนท์(Resonant Slotted Waveguide) ซึ่งท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมนี้เป็นทั้งตัวป้อนสัญญาณให้แก่ร่องและเป็นโครงสร้างพื้นฐานของตัวสายอากาศแบบร่องเองด้วย โดยไม่คิดผลของค่ามิวซวลคัปปลิง และก็จะได้สมการหลักที่ใช้ในการออกแบบแวลวลำดับแบบเรโซแนนท์ของร่องที่แพร่กระจายคลื่นบนผนังท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมในการออกแบบได้กำหนดให้มี จำนวนองค์ประกอบ 10 องค์ประกอบ ลำดับถัดจากนั้นแสดงการวิเคราะห์ระบบป้อนสัญญาณให้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมด้วยร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมในลักษณะของแวลวลำดับแบบเรโซแนนท์

จากวิธีการออกแบบที่วิเคราะห์ได้มา ก็จะนำมาใช้ออกแบบเพื่อคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของแต่ละร่องในแวลวลำดับเชิงเส้น โดยกำหนดให้การกระจายของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละร่องแตกต่างกัน 5 แบบ ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ 3.1 ถึง ตารางที่ 3.5 จากนั้นก็นำข้อมูลในตาราง ไปสร้างสายอากาศ

ข้อจำกัดในการสร้างสายอากาศ

หลังจากที่ได้ผลการออกแบบสายอากาศ ในขั้นตอนถัดไปซึ่งมีความสำคัญไม่น้อยกว่าการคำนวณและการออกแบบ ก็คือการสร้างชิ้นงานเพราะถึงแม้ว่าการคำนวณจะทำให้ดีหรือละเอียดเพียงใด แต่ถ้าวการสร้างชิ้นงานทำได้ไม่ดีแล้วการคำนวณที่ทำมาก็จะ ไม่มีความหมายอะไรเลย ดังนั้นในปริญญาานิพนธ์นี้จึงได้ใช้เครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์(Computer Numerically Control :CNC Milling Machine) ในการสร้างชิ้นงานทั้งหมดซึ่งเครื่องกัดนี้สามารถให้ความละเอียดได้ถึง $\pm 1 \mu m$ แต่ข้อจำกัดของความละเอียดจะไปสูญเสียที่การตั้งจุดศูนย์(Zero Point) ของชิ้นงานเพื่อเป็นจุดอ้างอิงเพราะในทางปฏิบัติการตั้งจุดศูนย์ชิ้นงานจะต้องตั้งในระบบหัตถกิจ(Manual) อีกปัจจัยหนึ่งที่ลดความละเอียดในการสร้างคือขนาดของดอกสว่านที่ใช้ เนื่องจากในการกัดชิ้นงานนั้นตัวดอกสว่านก็จะต้องสึกหรือด้วยทำให้ขนาดของดอกสว่านที่ใช้ค่อยๆเปลี่ยนไปเมื่อใช้งานไปนานๆ และถึงแม้ว่าจะสามารถเจาะร่องได้แม่นยำก็ตาม แต่ในการประกอบแผ่นทองเหลืองที่ปิดปลายท่อเข้ากับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม และการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณก็ยังมีโอกาสที่จะทำให้เกิดความสูญเสียความละเอียดในการสร้างอีก สำหรับการประกอบท่อนำคลื่นมีด้วยกันหลายวิธีคือ

1. การเชื่อมทางความร้อน(Welding) ซึ่งแบ่งเป็นการเชื่อมด้วยเลเซอร์และการเชื่อมด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งการเชื่อมด้วยอิเล็กตรอนเหมาะที่จะทำการเชื่อมสำหรับสายอากาศที่ทำด้วยแมกนีเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การบัดกรีทองเหลือง(Brazing) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียคือมักจะมีการสังคายน์(ตัวเชื่อมประสาน) ภายในตัวสายอากาศหลังจากการบัดกรี เทคนิคการบัดกรีโดยไม่ต้องอาศัยตัวเชื่อมประสาน(Fluxless-Brazing Technique) สามารถทำได้ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย

สำหรับปริญญาโทได้ใช้วิธีการเชื่อมบัดกรีที่นำคลื่นสี่เหลี่ยมโดยใช้ตะกั่วบัดกรี เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากในการประกอบแผ่นทองเหลืองที่ปิดปลายเข้ากับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม แต่การประกอบสายอากาศในลักษณะนี้จะมีผลที่ทำให้เกิดสังคายน์อันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียของกำลังงาน และเป็นผลให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลงเนื่องมาจากความไม่แนบสนิทกัน ไม่ว่าจะเป็นที่ค้ำปลายท่อ หรือขณะที่ทำการต่อท่อเข้ากับตัวป้อนสัญญาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก (ก)

Tschebyscheff's differential Equation

$$(1-x^2) \frac{d^2 T_n(x)}{dx^2} - x \frac{dT_n(x)}{dx} + n^2 T_n(x) = 0 \quad n = 0, 1, 2$$

Tschebyscheff's polynomial of the first kind

$$T_n(x) = \cos(n \cos^{-1} x)$$

$$= x^n - \left(\frac{n}{2}\right) x^{n-2} (1-x^2) + \left(\frac{n}{4}\right) x^{n-4} (1-x^2)^2 - \dots$$

Special Tschebyscheff polynomial of the first kind

Table I First kind Tschebyscheff polynomial of order 0-19

n	$T_n(x)$
0	1
1	x
2	$2x^2-1$
3	$4x^3-3x$
4	$8x^4-8x^2+1$
5	$16x^5-20x^3+5x$
6	$32x^6-48x^4+18x^2-1$
7	$64x^7-112x^5+56x^3-7x$
8	$128x^8-256x^6+160x^4-32x^2+1$
9	$256x^9-576x^7+342x^5-120x^3+9x$
10	$512x^{10}-2304x^8+1792x^6-560x^4+60x^2-1$
11	$1024x^{11}-2816x^9+2816x^7-1232x^5+220x^3-11x$
12	$2048x^{12}-6144x^{10}+6912x^8-3584x^6+840x^4-72x^2+1$
13	$4096x^{13}-13312x^{11}+16640x^9-9984x^7+2912x^5-364x^3+13x$
14	$8192x^{14}-28672x^{12}+39424x^{10}-26880x^8+9408x^6-1568x^4+98x^2-1$
15	$16384x^{15}-61440x^{13}+92160x^{11}-70400x^9+28800x^7-6048x^5+560x^3-15x$
16	$32768x^{16}-131072x^{14}+212992x^{12}-180224x^{10}+84480x^8-21504x^6+2688x^4-128x^2+1$
17	$65536x^{17}-278528x^{15}+487424x^{13}-452608x^{11}+239360x^9-71808x^7+11424x^5-816x^3+17x$
18	$131072x^{18}-589824x^{16}+1105920x^{14}-1118208x^{12}+658944x^{10}-228096x^8+44352x^6-4320x^4+162x^2-1$
19	$262144x^{19}-1245184x^{17}+2490368x^{15}-2723840x^{13}+1770496x^{11}-695552x^9+160512x^7-20064x^5+1140x^3-19x$

Recursion formula for $T_n(x)$

$$T_{n+1}(x) = 2xT_n(x) - T_{n-1}(x)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tschebyscheff's differential Equation

$$(1-x^2) \frac{d^2 U_n(x)}{dx^2} - 3x \frac{dU_n(x)}{dx} + n(n+2)U_n(x) = 0$$

Tschebyscheff's polynomial of the second kind

$$U_n(x) = \frac{\sin[(n+1)\cos^{-1} x]}{\sin(\cos^{-1} x)}$$

$$= \left(\frac{n+1}{1}\right)x^n - \left(\frac{n+1}{3}\right)x^{n-2}(1-x^2) + \left(\frac{n+1}{5}\right)x^{n-4}(1-x^2)^2 - \dots$$

Special Tschebyscheff polynomial of the second kind

Table II Second kind Tschebyscheff polynomial of order 0-19

n	$U_n(x)$
0	1
1	2x
2	$4x^2-1$
3	$8x^3-4x$
4	$16x^4-12x^2+1$
5	$32x^5-32x^3+6x$
6	$64x^6-80x^4+24x^2-1$
7	$128x^7-192x^5+80x^3-8x$
8	$256x^8-448x^6+240x^4-40x^2+1$
9	$512x^9-1024x^7+672x^5-160x^3+10x$
10	$1024x^{10}-2304x^8+1792x^6-560x^4+60x^2-1$
11	$2048x^{11}-5120x^9+4608x^7-1792x^5+280x^3-12x$
12	$4096x^{12}-11264x^{10}+11520x^8-5376x^6+1120x^4-84x^2+1$
13	$8192x^{13}-24576x^{11}+28160x^9-15360x^7+4032x^5-448x^3+14x$
14	$16384x^{14}-53248x^{12}+67584x^{10}-42240x^8+13440x^6-2016x^4+112x^2-1$
15	$32768x^{15}-114688x^{13}+159744x^{11}-112640x^9+42240x^7-8064x^5+672x^3-16x$
16	$65536x^{16}-245760x^{14}+372736x^{12}-292864x^{10}+126720x^8-29568x^6+3360x^4-144x^2+1$
17	$131072x^{17}-524288x^{15}+860160x^{13}-745472x^{11}+366080x^9-101376x^7+14784x^5-960x^3+18x$
18	$262144x^{18}-1114112x^{16}+1966080x^{14}-1863680x^{12}+1025024x^{10}-329472x^8+59136x^6-5280x^4+180x^2-1$
19	$524288x^{19}-2359296x^{17}+4456448x^{15}-4587520x^{13}+2795520x^{11}-1025024x^9+219648x^7-25344x^5+1320x^3-20x$

Recursion formula for $U_n(x)$

$$U_{n+1}(x) = 2xU_n(x) - U_{n-1}(x)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Legendre's differential Equation

$$(1-x^2)\frac{d^2 P_n(x)}{dx^2} - 2x\frac{dP_n(x)}{dx} + n(n+1)P_n(x) = 0$$

Legendre's polynomial using Rodrigue's formula

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n (x^2 - 1)^n}{dx^n}$$

Special Legendre polynomial

Table III Legendre polynomial of order 0-19

<i>n</i>	<i>P_n(x)</i>
0	1
1	<i>x</i>
2	1/2(3 <i>x</i> ² -1)
3	1/2(5 <i>x</i> ³ -3 <i>x</i>)
4	1/8(35 <i>x</i> ⁴ -30 <i>x</i> ² +3)
5	1/8(63 <i>x</i> ⁵ -70 <i>x</i> ³ +15 <i>x</i>)
6	1/16(231 <i>x</i> ⁶ -315 <i>x</i> ⁴ +105 <i>x</i> ² -5)
7	1/16(429 <i>x</i> ⁷ -693 <i>x</i> ⁵ +315 <i>x</i> ³ -35 <i>x</i>)
8	1/128(6435 <i>x</i> ⁸ -12012 <i>x</i> ⁶ +6930 <i>x</i> ⁴ -1260 <i>x</i> ² +35)
9	1/128(12155 <i>x</i> ⁹ -25740 <i>x</i> ⁷ +18018 <i>x</i> ⁵ -4620 <i>x</i> ³ +315 <i>x</i>)
10	1/256(46189 <i>x</i> ¹⁰ -109395 <i>x</i> ⁸ +90090 <i>x</i> ⁶ -30030 <i>x</i> ⁴ +3465 <i>x</i> ² -63)
11	1/256(88179 <i>x</i> ¹¹ -230945 <i>x</i> ⁹ +218790 <i>x</i> ⁷ -90090 <i>x</i> ⁵ +15015 <i>x</i> ³ -693 <i>x</i>)
12	1/1024(676039 <i>x</i> ¹² -1939938 <i>x</i> ¹⁰ +2078505 <i>x</i> ⁸ -1021020 <i>x</i> ⁶ +225225 <i>x</i> ⁴ -18018 <i>x</i> ² +231)
13	1/1024(1300075 <i>x</i> ¹³ -4056234 <i>x</i> ¹¹ +4849845 <i>x</i> ⁹ -2771340 <i>x</i> ⁷ +765765 <i>x</i> ⁵ -90090 <i>x</i> ³ +3003 <i>x</i>)
14	1/2048(5014575 <i>x</i> ¹⁴ -16900975 <i>x</i> ¹² +22309287 <i>x</i> ¹⁰ -14549535 <i>x</i> ⁸ +4849845 <i>x</i> ⁶ -765765 <i>x</i> ⁴ +45045 <i>x</i> ² -429)
15	1/2048(9694845 <i>x</i> ¹⁵ -35102025 <i>x</i> ¹³ +50702925 <i>x</i> ¹¹ -37182145 <i>x</i> ⁹ +14549535 <i>x</i> ⁷ -2909907 <i>x</i> ⁵ +255255 <i>x</i> ³ -6435 <i>x</i>)
16	1/32768(300540195 <i>x</i> ¹⁶ -1163381400 <i>x</i> ¹⁴ +1825305300 <i>x</i> ¹² -1487285800 <i>x</i> ¹⁰ +669278610 <i>x</i> ⁸ -162954792 <i>x</i> ⁶ +19399380 <i>x</i> ⁴ -875160 <i>x</i> ² +6435)
17	1/32768(583401555 <i>x</i> ¹⁷ -2404321560 <i>x</i> ¹⁵ +4071834900 <i>x</i> ¹³ -3650610600 <i>x</i> ¹¹ +1859107250 <i>x</i> ⁹ -535422888 <i>x</i> ⁷ +81477396 <i>x</i> ⁵ -5542680 <i>x</i> ³ +109395 <i>x</i>)
18	1/65536(2268783825 <i>x</i> ¹⁸ -9917826435 <i>x</i> ¹⁶ +18032411700 <i>x</i> ¹⁴ -17644617900 <i>x</i> ¹² +10039179150 <i>x</i> ¹⁰ -3346393050 <i>x</i> ⁸ +624660036 <i>x</i> ⁶ -58198140 <i>x</i> ⁴ +2078505 <i>x</i> ² -12155)
19	1/65536(4418157975 <i>x</i> ¹⁹ -20419054425 <i>x</i> ¹⁷ +39671305740 <i>x</i> ¹⁵ -42075627300 <i>x</i> ¹³ +26466926850 <i>x</i> ¹¹ -10039179150 <i>x</i> ⁹ +2230928700 <i>x</i> ⁷ -267711444 <i>x</i> ⁵ +14549535 <i>x</i> ³ -230945 <i>x</i>)

Recursion formula for *P_n(x)*

$$P_{n+1}(x) = \left(\frac{2n+1}{n+1}\right)xP_n(x) - \frac{n}{n+1}P_{n-1}(x)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

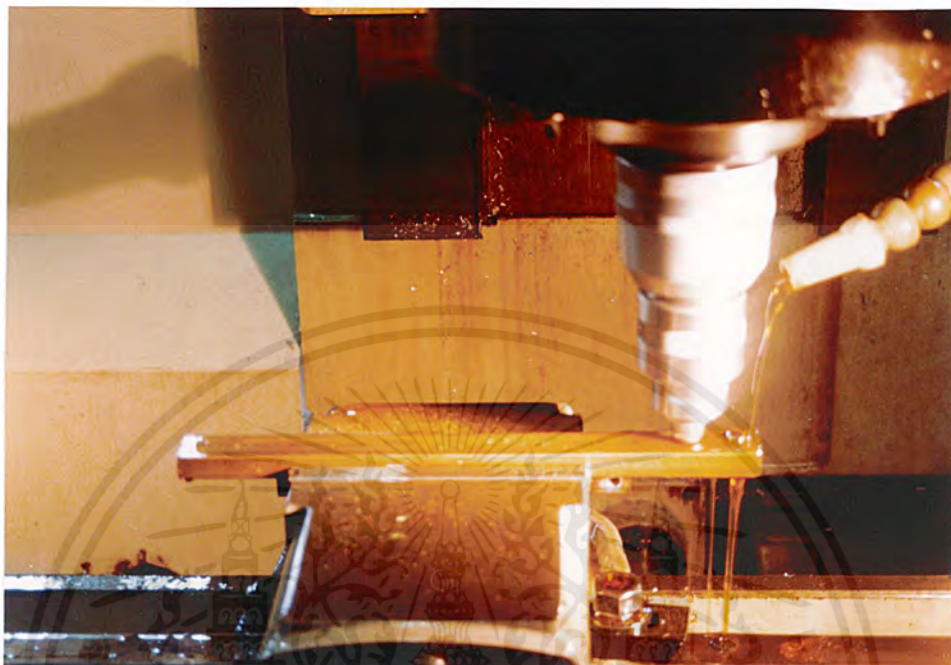
ภาคผนวก (ข)

ตัวอย่างขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ใช้งาน

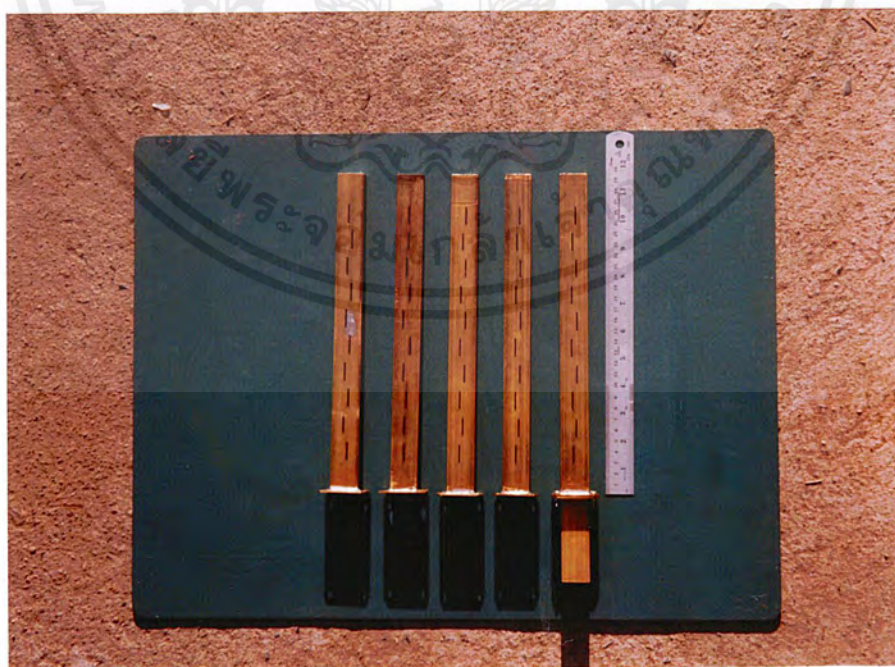
WRJ-No.	ความถี่(GHz)	ขนาดด้านใน (mm)			ขนาดด้านนอก (mm)	
		A	B	$\Delta A(\Delta B)$	C	D
WRJ-1	0.74 ~ 1.12	247.65	123.83	0.5	254.00	130.17
WRJ-1.4	1.12 ~ 1.70	165.10	82.55	0.5	167.10	84.55
WRJ-2	1.70 ~ 2.60	109.22	54.61	0.20	113.28	58.67
WRJ-2.6	2.17 ~ 3.30	86.36	43.18	0.17	90.42	47.24
WRJ-3.4	2.60 ~ 3.95	72.10	34.00	0.13	76.10	38.00
WRJ-4	3.30 ~ 4.90	58.10	29.10	0.10	61.30	32.20
WRJ-5	3.95 ~ 5.85	47.55	22.15	0.10	50.75	25.35
WRJ-6	4.90 ~ 7.05	40.00	20.00	0.10	43.20	23.20
WRJ-7	5.85 ~ 8.20	34.85	15.85	0.10	38.05	19.05
WRJ-9	7.05 ~ 10.00	28.50	12.60	0.10	31.70	15.80
WRJ-10	8.20 ~ 12.40	22.90	10.20	0.08	25.40	12.70
WRJ-12	9.84 ~ 15.0	19.050	9.525	0.05	21.59	12.06
WRJ-14	11.9 ~ 18.0	15.799	7.899	0.05	17.83	9.93
WRJ-18	14.5 ~ 22.0	12.954	6.477	0.045	14.99	8.51
WRJ-22	17.6 ~ 26.7	10.668	4.318	0.04	12.70	6.35
WRJ-26	21.7 ~ 33.0	8.636	4.318	0.035	10.67	6.35
WRJ-32	26.4 ~ 40.1	7.112	3.556	0.030	9.14	5.59
WRJ-40	33.0 ~ 50.1	5.690	2.845	0.030	7.72	4.88
WRJ-50	39.3 ~ 59.7	4.775	2.388	0.025	6.81	4.42
WRJ-62	49.9 ~ 75.8	3.756	1.880	0.025	5.79	3.91
WRJ-74	60.5 ~ 92.0	3.099	1.550	0.020	5.13	3.58
WRJ-90	73.8 ~ 112	2.540	1.270	0.020	4.57	3.30
WRJ-120	92.3 ~ 140	2.032	1.016	0.020	4.06	3.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก (ค)



รูปแสดงการสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่น



แสดงสายอากาศแถวลำดับที่มีการกระจายกระแส 5 ลักษณะ คือ แบบสม่ำเสมอ แบบทวินาม

แบบเซฟบีเซฟชนิดที่ 1 แบบเซฟบีเซฟชนิดที่ 2 และเลอจองค์ร์ เรียงตามลำดับจากซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้หากไม่ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายท่านตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานจนโครงการฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอบพระคุณ

รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ

ขอบคุณ

นายชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ นักศึกษาปริญญาเอก
นายคมศักดิ์ เมฆสมุทร นักศึกษาปริญญาเอก
เจ้าหน้าที่ห้อง EMC-EMI สำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบสายอากาศ
ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆในการสร้างชิ้นงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี อีกทั้งขอขอบคุณบิดา
มารดา และเพื่อนๆ ตลอดจนผู้ที่มีส่วนช่วยเหลือทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] C.A.Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd.Ed., New York. John Wiley and Sons, 1997, ch.7.
- [2] H.Jasik, "Fundamentals of Antennas," ch.2 in *Antenna Engineering Handbook*, R.C.Johnson and H.Jasik (eds.), 2nd.Ed., New York. McGraw-Hill, 1984, pp.2-14 to 2-41.
- [3] V.H.Kummer, "Basic Array Theory," *Proc.IEEE*, vol.80, no.1, pp.127-140, Jan.1992.
- [4] R.C.Hansen, "Array Pattern Control and Synthesis," *Proc.IEEE*, vol.80, no.1, pp.141-151, Jan.1992.
- [5] R.C.Hansen, "Aperture Theory," ch.1 in *Microwave Scanning Antenna, vol.1*, R.C.Hansen(ed.), New York: Academic Press, 1964, pp.58-60.
- [6] L.J.Ricardi, "Radiation Properties of the Binomial Array," *Microwave Journal*, vol.15, no.12, p.20, Dec.1972.
- [7] C.L.Dolph, "A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationship between beamwidth and side-lobe level," *Proc.IRE*, vol.34, pp.335-348, June 1946.
- [8] C.Phongcharoenpanich and M.Krairiksh, "The Discrete Antenna Array Pattern Synthesis which Provides the Tapered Minor Lobes" *Thammasat International Journal for Science and Technology*, vol.3, no.2, pp.80-87, July 1998
- [9] C.Phongcharoenpanich and M.Krairiksh, "A Modified One-Parameter Taylor Method for the Discrete Array Application," *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*, vol.8, no. 2, pp. 1-8, 1997.
- [10] C.Phongcharoenpanich and M.Krairiksh, "Discrete Array Pattern Synthesis by Using Some Orthogonal Polynomials," *Proceeding of the 1998 IEEE Asia-Pacific Conference on Communications*, Singapore, vol.1, pp.433-437, 1998.
- [11] C.Phongcharoenpanich and M.Krairiksh, "Second Kind Tschebyscheff Array," *Proc. of the Progress in Electromagnetic Research Symposium*, p.107, 1998.
- [12] C.Phongcharoenpanich, M.Krairiksh, K.Meksamoot and T.Wakabayashi, "Legendre Array," *Proc. of the Thailand-Japan Joint Symposium on Antenna and Propagation*, pp.195-201, May 1997.
- [13] C.Phongcharoenpanich and M.Krairiksh, "The Characteristics Comparison between Legendre and Two Kinds Tschebyscheff Array," *Proc. of the Electrical Engineering Conference*, vol.1, pp.207-212, Nov. 1997.
- [14] M.Abramowitz and I.A.Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, New York. John Wiley and Sons, 1997, ch.22.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้