สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้พหุนาม Gegenbauer

Array Antenna Pattern Synthesis Using Gegenbauer Polynomial

T061949

โดย

นายกิจติศักดิ์ พลตื้อ

นายอภิลักษณ์ คำคุณา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 61949
วัน,เดือน,ปี 25 ก.ค. 2549

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้พหุนาม Gegenbauer

Array Antenna Pattern Synthesis Using Gegenbauer Polynomial

โดย

นายกิจติศักดิ์ พลตื้อ 45015046

นายอภิลักษณ์ คำคุณา 45015086

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้พหุนาม Gegenbauer

Array Antenna Pattern Synthesis Using Gegenbauer Polynomial

ผู้จัดทำ

1.นายกิจติศักดิ์ พลตื้อ 45015046

2.นายอภิลักษณ์ กำคุณา 45015086

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ชูวงก์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับโดยใช้พหุนาม Gegenbauer

Array Antenna Pattern Synthesis Using Gegenbauer Polynomial

โดย นายกิจติศักดิ์ พลตื้อ 45015046
นายอภิลักษณ์ คำคุณา 45015086

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการสังเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดที่มีการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ โดยวิธีที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอจะได้ใช้พหุนาม Gegenbauer ซึ่งพหุนามนี้สามารถกำหนดคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นได้โดยการปรับพารามิเตอร์ α ของพหุนาม ซึ่งข้อดีของวิธีที่นำเสนอนี้คือสามารถให้คุณลักษณะตามที่เราต้องการ เช่น ลำคลื่นที่แคบ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงและประสิทธิภาพลำคลื่นที่สูง จากนั้นนำผลที่ได้จากการสังเคราะห์ไปประยุกต์ในการออกแบบสร้างสายอากาศแถวลำดับ และสร้างสายอากาศเพื่อนำไปทดสอบหาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเพื่อเทียบกับผลการคำนวณ

ABSTRACT

This project presents the synthesis of uniform and non-uniform amplitude array-antenna characteristics. The non-uniform amplitude distribution method can be carrier out using Gegenbauer polynomial. It is found that the characteristics of the array can be simply adjusted by varying the α parameter of the polynomial. The advantage of this method is that the desired characteristics such as the narrow beamwidth, high directivity and high beam efficiency can be achieved. These results of the synthesis are utilized to design the array antenna. The antenna prototype is fabricated to compare with the calculated results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ,และพหุนาม Gegenbauer	3
	2.1 การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ	4
	2.2 การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบพหุนาม Gegenbauer	7
	2.3 ขั้นตอนการออกแบบแถวลำดับ	9
บทที่ 3	ผลการสังเคราะห์	11
	3.1 ผลที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้พหุนาม Gegenbauer	11
	3.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	12
	3.1.2 ความกว้างของลำคลื่นเมื่อกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	12
	3.1.3 ค่าการชี้ทิศทาง	13
	3.1.4 ประสิทธิภาพลำคลื่น	14
	3.1.5 อัตราส่วนกระแสสูงสุดต่อกระแสต่ำสุด	14
	3.2 การสังเคราะห์สายอากาศ	15
	3.2.1 การกระจายกระแส	16
	3.2.2 ตัวประกอบแถวลำดับ	17
	3.2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ	20
	3.2.4 ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	21
	3.2.5 ความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรก	22
	3.2.6 ค่าการชี้ทิศทาง	23
	3.2.7 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ	24
	3.2.8 ประสิทธิภาพของลำคลื่น	25
บทที่ 4	การออกแบบ และ การสร้าง	26
	4.1 ระบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องโดยใช้ท่อนำคลื่น	26
	4.2 ลักษณะการเจาะร่องบนท่อนำคลื่น	27
	4.3 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องเชิงเส้น	33
	4.4 การสร้างสายอากาศ	34
บทที่ 5	การทดสอบและผลการทดสอบ	36
	5.1 การทดสอบสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนท์	36
	5.1.1 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer	37
	5.2 การทดสอบสายอากาศ	39
	5.2.1 สายอากาศที่ใช้ส่งสัญญาณ	40
	5.2.2 สายอากาศที่ใช้ทดสอบ	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3 ผลการทดสอบ	41
5.4 การทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศ	45
บทที่ 6 วิจารณ์และบทสรุป	46
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

		หน้า
รูปที่ 2.1	รูปการหาสนามระยะไกลของแถวลำดับ N องค์ประกอบของตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก	3
รูปที่ 2.2	รูปการวางองค์ประกอบของการแจกแจงรูปแบบกระแสไม่สม่ำเสมอ	
	2.2 (ก) กรณีที่องค์ประกอบเป็นจำนวนคู่	5
	2.2 (ข) กรณีที่องค์ประกอบเป็นจำนวนคี่	6
รูปที่ 3.1	แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	12
รูปที่ 3.2	แสดงความกว้างของลำคลื่นเมื่อกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	13
รูปที่ 3.3	แสดงค่าการชี้ทิศทาง	13
รูปที่ 3.4	แสดงประสิทธิภาพลำคลื่น	14
รูปที่ 3.5	แสดงอัตราส่วนกระแสสูงสุดต่อกระแสต่ำสุด	14
รูปที่ 3.6	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามที่เกิดจากร่องเดี่ยวในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก	16
รูปที่ 3.7	แสดงการกระจายกระแสของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer	17
รูปที่ 3.8	แสดงตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอในพิกัดฉาก	18
รูปที่ 3.9	แสดงตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ในพิกัดมุมฉาก	18
รูปที่ 3.10	แสดงตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอและการกระจายกระแสโดยใช้พหุนาม Gegenbauer	19
รูปที่ 3.11	แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก	20
รูปที่ 3.12	แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบพหุนาม Gegenbauer ในพิกัดมุมฉาก	20
รูปที่ 3.13	แสดงความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ	21
รูปที่ 3.14	ความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลแรกของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ	22
รูปที่ 3.15	แสดงค่าการชี้ทิศทางของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ	23
รูปที่ 3.16	แสดงค่าอัตราการขยายของสายอากาศของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ	24
รูปที่ 3.17	แสดงประสิทธิภาพของลำคลื่นของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ	25
รูปที่ 4.1	แสดงลักษณะการเจาะร่องบนผนังท่อนำคลื่น	27
	ก) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านแคบ	
	ข) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านกว้าง	
	ค) การเจาะแบบกึ่งกลาง	
	ง) การเจาะขอบผนัง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.2	วงจรเสมือนของร่องแบบต่างๆที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่น	28
รูปที่ 4.3	(ก) แสดงแถวลำดับแบบเรโซแนนท์ของร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม (ข) แสดงวงจรสมมูลในกรณีที่ทุกร่องเรโซแนนท์	29
รูปที่ 4.4	แสดงร่องที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่น	31
รูปที่ 4.5	แสดงหน้าตัดของท่ออลูมิเนียมที่ใช้ในการสร้างสายอากาศ	33
รูปที่ 4.6	แสดงลักษณะการเจาะร่องบนผนังท่อนำคลื่นตามแนวยาว	34
รูปที่ 5.1	แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$	37
รูปที่ 5.2	แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$	37
รูปที่ 5.3	แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$	38
รูปที่ 5.4	แสดงแผนผังการทดสอบสายอากาศ	39
รูปที่ 5.5	แสดงรูปสายอากาศส่งสัญญาณ	40
รูปที่ 5.6	แสดงสายอากาศที่ใช้ทดสอบ	40
รูปที่ 5.7	แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดเชิงขั้วโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$	42
รูปที่ 5.8	แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดฉากโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$	43
รูปที่ 5.9	แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าในพิกัดเชิงขั้วโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$	44
รูปที่ 5.10	การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศ	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงสัมประสิทธิ์การกระตุ้นของกระแส	11
ตารางที่ 3.2 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น	11
ตารางที่ 4.1 แสดงการกระจายกระแสแบบพหุนาม Gegenbauer (Gegenbauer Array) ที่ α = 1, ค่าความนำนอร์มอลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication) นั้น สายอากาศ (Antenna) นับว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการรับส่งสัญญาณ ในการสื่อสารแบบไร้สายแต่ละแบบก็จะมีความต้องการใช้สายอากาศต่างชนิดกันไป อนึ่งในการสื่อสารไร้สายแบบจุดต่อจุด (Point to Point Communication) นั้น ความแม่นยำของการจับสัญญาณของสายอากาศจำเป็นต้องดีเพื่อให้มีการสื่อสารได้อย่างมีประสิทธิภาพ สายอากาศโดยทั่วไปในแต่ละองค์ประกอบ (Element) จะมีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Characteristics) ที่ต่างกัน เพื่อเป็นการตอบสนองความต้องการ การสื่อสารแบบจุดต่อจุดนั้น แต่ละองค์ประกอบของสายอากาศจำเป็นต้องพัฒนาเพื่อจุดประสงค์ให้มีคุณลักษณะการแพร่กระจายเป็นไปตามความต้องการของการประยุกต์ใช้งานคุณลักษณะดังกล่าว ได้แก่ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattrern) เป็นรูปลำดินสอ (Pencil Beam) มีระดับลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe Level) ต่ำ มีความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) แคบ มีคุณสมบัติการชี้ทิศทาง (Directivity) สูง และมีประสิทธิภาพลำคลื่น (Beam Efficiency) สูงเป็นต้น การขยายขนาดของสายอากาศโดยทั่วไปไม่นิยมเนื่องจากจะทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง การนำสายอากาศมาเรียงเป็นแถวลำดับ (Array) เป็นที่นิยมเนื่องจากจะทำให้สายอากาศไม่ใหญ่เกินไปอีกทั้งสามารถเลือกที่จะทำได้หลายแบบ โดยทั่วไปมีทั้งแถวลำดับเชิงเส้น (Linear Array) แถวลำดับระนาบ (Planar) แถวลำดับวงกลม (Circular Array) แถวลำดับลูกบาศก์ (Cubical Array) แถวลำดับรูปกรวย (Conical Array) ฯลฯ สำหรับการควบคุมคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับก็ทำได้หลายวิธี ได้แก่

1.การเรียงรูปแบบต่างๆในแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับ
2.การปรับระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับ
3.ขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับ
4.เฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับ
5.แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ต่างๆกันของแต่ละองค์ประกอบ

สำหรับรายงายฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแถวดับเชิงเส้น ที่มีการป้อนขนาดของกระแสที่แต่ละองค์ประกอบต่างๆกัน โดยที่เฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบคงที่ โดยที่พิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในกรณีที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบมีระยะห่างเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น โดยที่จะใช้องค์ประกอบของแถวลำดับเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซโทรปิก (Isotropic Radiation) ก่อนเพื่อความง่ายในการคำนวณ จากนั้นจะทำการคำนวณและการออกแบบในกรณีที่สายอากาศมีองค์ประกอบเป็นร่อง (Slot) แทน เพื่อนำไปสร้างเพื่อทดสอบ และยืนยันผลการคำนวณต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การป้อนขนาดของกระแสให้กับแต่ละองค์ประกอบจะพิจารณาเป็น 2 ลักษณะ คือ

1.การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ (Uniform Distribution)

การป้อนขนาดของกระแสแบบนี้จะให้มีค่าเท่ากันทุกองค์ประกอบของแถวลำดับ

2.การกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer (Non-uniform Distribution)

สำหรับการป้อนขนาดของกระแสในข้อ 2 นี้จะทำการสังเคราะห์บนพื้นฐานของพหุนาม Gegenbauer (Gegenbuer Polynomial) โดยทำการเปลี่ยนค่า α ของพหุนาม Gegenbauer เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นตามที่เราต้องการ ซึ่งรายละเอียดในการสังเคราะห์การกระจายกระแสทั้ง 2 แบบดังกล่าวจะได้แสดงในบทที่ 2

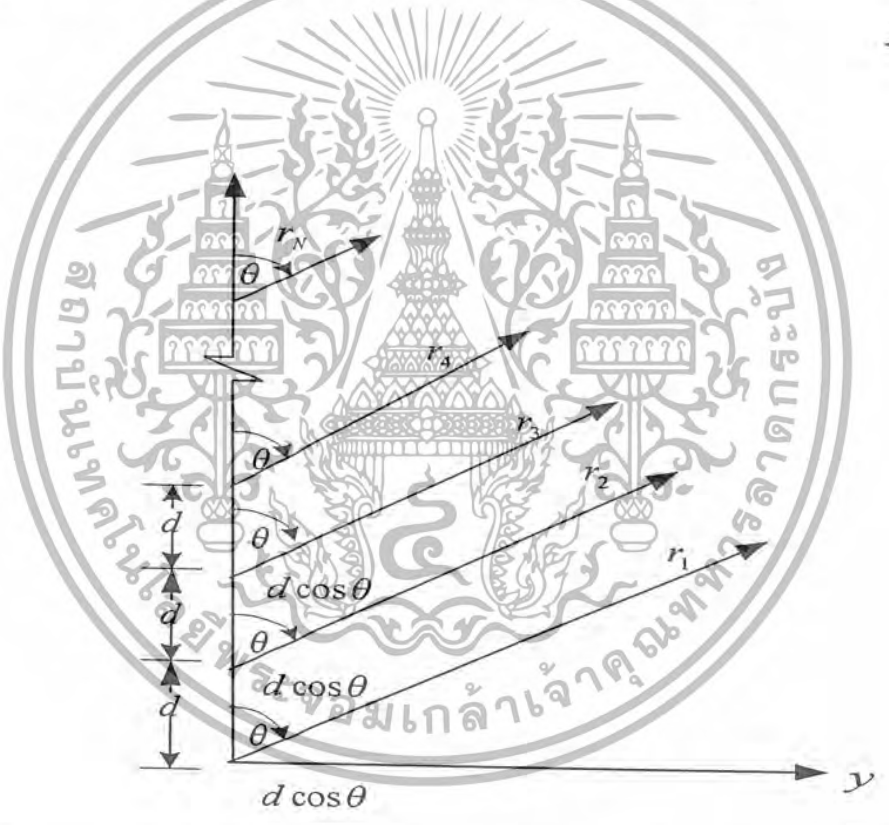
ข้อดีข้อเสียของการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 แบบกล่าวคือ สำหรับการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอนั้นมีข้อดีคือ สร้างระบบการป้อนสัญญาณได้ง่ายและความกว้างของลำคลื่นแคบมาก แต่พบว่าระดับลำคลื่นด้านข้างสูง สำหรับข้อ 2 เราได้นำพหุนาม Gegenbauer มาแก้ไขข้อเสียของการป้อนกระแสแบบสม่ำเสมอ เนื่องจากว่าพหุนาม Gegenbauer นี้สามารถกำหนดคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นได้โดยการปรับพารามิเตอร์ α ของพหุนาม ซึ่งข้อดีของพหุนาม Gegenbauer นี้คือสามารถให้คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นได้ตามที่เราต้องการ เช่น ลำคลื่นที่แคบ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูง และประสิทธิภาพลำคลื่นที่สูง ซึ่งรายละเอียดของการคำนวณ ผลการคำนวณอันได้แก่การกระจายกระแส แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง ความกว้างลำคลื่นที่เกิดนัลแรก ค่าการชี้ทิศทาง และประสิทธิภาพของลำคลื่น ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวไว้ในบทที่ 3 และนำผลที่ได้จากการสังเคราะห์ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการสร้างสายอากาศแถวลำดับ แบบร่องเชิงเส้น ดังจะกล่าวถึงในบทที่ 4 และสำหรับรายละเอียดของการทดสอบและผลการทดสอบจะแสดงไว้ในบทที่ 5 ส่วนในบทที่ 6 ซึ่งเป็นบทสุดท้ายของปริญญานิพนธ์จะเป็นสรุปและวิจารณ์ของโครงงานนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ และพหุนาม Gegenbauer

ในบทนี้จะได้แสดงการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับเชิงเส้นที่มีการกระจายกระแสแบบต่างๆ อันได้แก่ การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ และพหุนาม Gegenbauer โดยผลที่ได้จากการสังเคราะห์ในบทนี้จะแสดงผลในบทที่ 3 ต่อไป

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



รูปที่ 2.1 รูปการหาสนามระยะไกลของแถวลำดับ N องค์ประกอบของตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก

เนื่องจากสนามลัพธ์ของแถวลำดับมีค่าเท่ากับสนามขององค์ประกอบเดี่ยว คูณด้วยแฟคเตอร์ซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อาร์เรย์แฟคเตอร์ (Array Factor : AF) ดังนั้นในการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจึงต้องพิจารณาถึงตัวประกอบแถวลำดับด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในบทนี้เราจะพิจารณาในกรณีที่สนามขององค์ประกอบเดี่ยวเป็นสนามที่เกิดจากตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบมีระยะห่างที่เท่ากัน และเฟสของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบเหมือนกัน ซึ่งมีลักษณะเป็นบรอดไซด์อาร์เรย์คือเป็นอาร์เรย์ที่มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดในทิศทางตั้งฉากกับแกนของอาร์เรย์ (ลักษณะการวางองค์ประกอบ)

2.1 การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอ

การป้อนกระแสให้แต่ละองค์ประกอบมีขนาดเท่ากันหมด ดังรูปที่ 2.1 สำหรับสนามลัพธ์ของแถวลำดับจะเป็นการคูณระหว่างแบบรูปของแต่ละองค์ประกอบกับตัวประกอบแถวลำดับดังนี้

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

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

ให้ $\psi = kd\cos\theta$

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

คูณทั้งสองข้างด้วย $e^{j\psi}$ จะได้

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

เมื่อลบสมการ (2.3) ออกจากสมการ (2.4) จะได้

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

หรือเขียนได้ว่า

$$AF = \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi}}\right] = e^{j\left[\frac{(N-1)}{2}\right]\psi}\left[\frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}}\right] \tag{2.6}$$

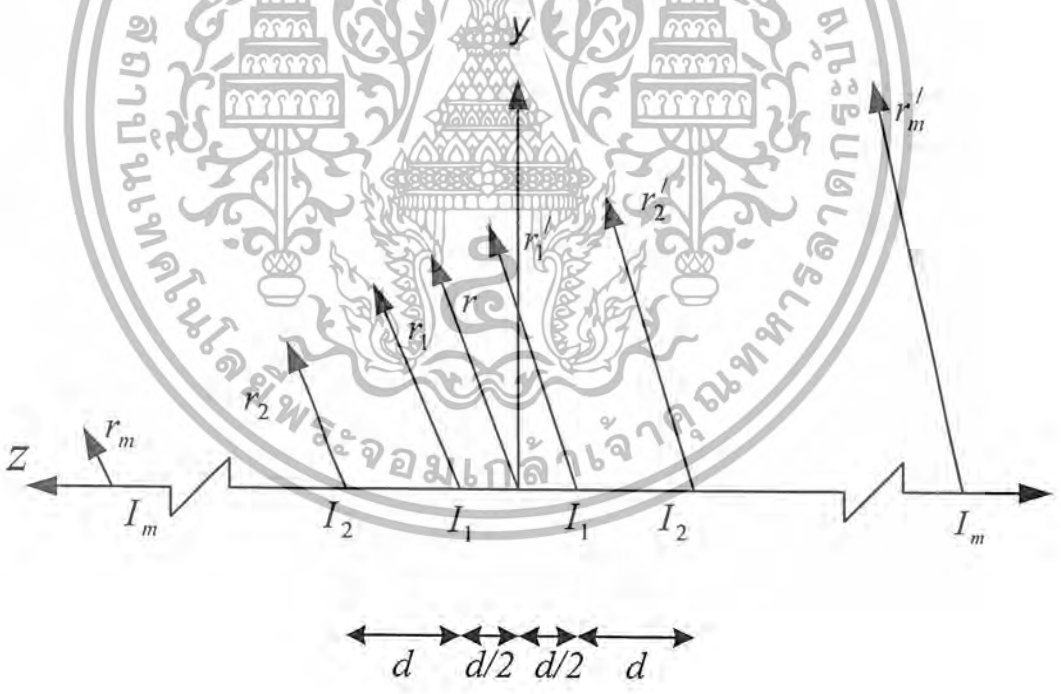
และถ้าจุดเปรียบเทียบเฟสเป็นจุดกึ่งกลางของแถวลำดับจากสมการ (2.6) จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

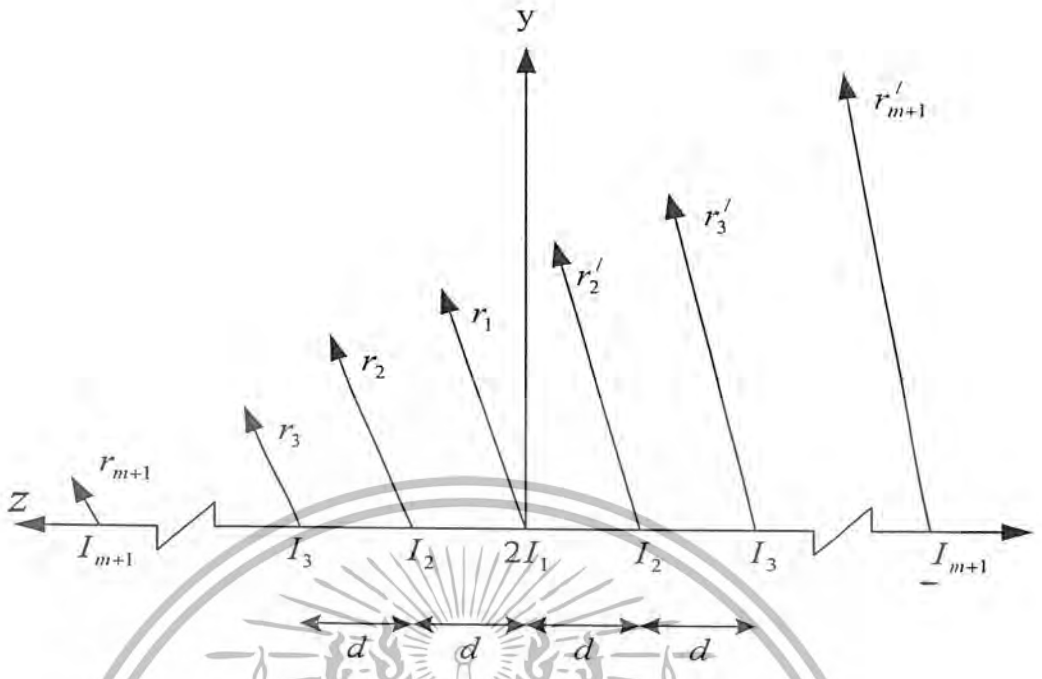
ซึ่งสมการที่ (2.7) นี้เป็นค่าตัวประกอบแถวลำดับแบบแจกแจงสม่ำเสมอ

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



รูปที่ 2.2 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 (ข)

รูปที่ 2.2 รูปการวางองค์ประกอบของการแจกแจงรูปแบบกระแสไม่สม่ำเสมอ

2.2 (ก) กรณีที่องค์ประกอบเป็นจำนวนคู่

2.2 (ข) กรณีที่องค์ประกอบเป็นจำนวนคี่

สำหรับค่าตัวประกอบแถวลำดับพิจารณาได้ดังนี้

$$(AF)_{2M} = I_1 e^{j\left(\frac{1}{2}\right)} + I_2 e^{j\left(\frac{3}{2}\right)} + \ldots + I_M e^{j\left(\frac{(2M-1)}{2} kd\cos\theta\right)}$$

$$+ I_1 e^{-j\left(\frac{1}{2}\right)kd\cos\theta} + I_2 e^{-j\left(\frac{3}{2}\right)kd\cos\theta} + \ldots + I_M e^{-j\left(\frac{(2M-1)}{2} kd\cos\theta\right)} \quad (2.8)$$

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

และค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ปรับบรรทัดฐานแล้ว (Normalized Array Factor) จะเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ I_n เป็นสัมประสิทธิ์การป้อนกระแสให้แต่ละองค์ประกอบ

เช่นเดียวกับในกรณีที่จำนวนองค์ประกอบเป็นเลขคี่ (2M+1; M เป็นจำนวนเต็ม) ค่าคงตัวประกอบแถวลำดับจะเป็น

$$(AF)_{2M+1} = 2I_{1+I2}e^{jkd\cos\theta} + I_3e^{j2kd\cos\theta} + \ldots + I_{M+1}e^{jMkd\cos\theta}$$

$$+ I_2e^{-jkd\cos\theta} + I_3e^{-j2kd\cos\theta} + \ldots + I_{M+1}e^{-jMkd\cos\theta} \qquad (2.11)$$

จะได้

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

และเช่นเดียวกันเมื่อปรับบรรทัดฐานแล้วจะเป็น

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

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการป้อนกระแสให้กับองค์ประกอบกลางเป็น $2I_n$ ดังนั้นจึงทำการเขียนได้เป็น

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

และ

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

2.2 การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบพหุนาม Gegenbauer

พหุนาม Gegenbauer เป็นฟังก์ชันเชิงตั้งฉากที่สามารถประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ โดยคุณสมบัติพื้นฐานของพหุนาม Gegenbauer, $P_n^{(\alpha)}(x)$,สามารถนิยามในช่วง $a \le x \le b$ โดยจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชัน w(x)

$$\int w(x)P_n^{(\alpha)}(x)P_m^{(\alpha)}(x)dx \qquad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $P_n^{(\alpha)}(x)$ และ $P_m^{(\alpha)}(x)$ เป็นพหุนาม Gegenbauer ที่มีดีกรี m และ n ตามลำดับ ในกรณีนี้ $w(x)$ คือ $(1-x^2)^{\alpha-\frac{1}{2}}$ ดังนั้นรูปแบบมาตรฐานของพหุนาม Gegenbauer สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\int_{-1}^{1}(1-x^2)^{\alpha-\frac{1}{2}}P_n^{(\alpha)}(x)P_m^{(\alpha)}(x)dx=\begin{cases}\dfrac{\pi 2^{1-2\alpha}\Gamma(n+2\alpha)}{n!(n+\alpha)[\Gamma(\alpha)]^2}, & \alpha\neq 0\\ \dfrac{2\pi}{n^2}, & \alpha=0\end{cases} \tag{2.17}$$

สมการเชิงอนุพันธ์ของพหุนาม Gegenbauer สามารถแสดงได้เป็น

$$(1-x^2)\frac{d^2P_n^{(\alpha)}(x)}{dx^2}-(2\alpha+1)x\frac{dP_n^{\alpha}(x)}{dx}+n(n+2\alpha)P_n^{(\alpha)}(x)=0 \tag{2.18}$$

ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นของพหุนาม Gegenbauer สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$P_{n+1}^{\alpha}(x)=\frac{2(n+\alpha)x}{n+1}P_n^{(\alpha)}(x)-\frac{(n+2\alpha-1)}{n+1}P_{n-1}^{(\alpha)}(x) \tag{2.19}$$

สำหรับพหุนาม Gegenbauer นี้สามารถเขียนในรูปของ Rodrigues's ได้เป็น

$$P_n^{(\alpha)}(x)=\frac{(-1)^n\Gamma\left(\alpha+\frac{1}{2}\right)\Gamma(n+2\alpha)}{2^n n!(1-x^2)^{\alpha-\frac{1}{2}}\left(\Gamma(2\alpha)\Gamma\left(\alpha+n+\frac{1}{2}\right)\right)}\frac{d^n(1-x^2)^{n+\alpha-\frac{1}{2}}}{dx^n} \tag{2.20}$$

ตัวอย่างเช่นเราให้ค่า α คงที่ จะทำให้ได้ค่าของพหุนาม Gegenbauer เป็นดังนี้

$$P_1^{(\alpha)}(x)=2\alpha x, \tag{2.21}$$

$$P_2^{(\alpha)}(x)=-\alpha+2\alpha(1+\alpha)x^2, \tag{2.22}$$

$$P_3^{(\alpha)}(x)=-2\alpha(1+\alpha)x+\frac{4}{3}\alpha(1+\alpha)(2+\alpha)x^3, \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้ α คงที่อยู่ค่าหนึ่งสมการ (2.20) สามารถเขียนได้เป็น

$$P_n^{(1)}(x)=\frac{(-1)^n(n+1)\sqrt{\pi}}{2^{n+1}\Gamma\left(n+\frac{3}{2}\right)\left(1-x^2\right)^{\frac{1}{2}}}\frac{d^n\left(1-x^2\right)^{n+\frac{1}{2}}}{dx^n} \tag{2.24}$$

จากสมการ (2.24) เป็นสูตร Rodrigue's ของพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยพหุนาม Gegenbauer พหุนามนี้จะเข้าสู่พหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 เมื่อให้พารามิเตอร์ α เป็น 1 และเมื่อให้พารามิเตอร์ α เป็น 0.5 สูตร Rodrigue's ของพหุนาม Gegenbauer สามารถเขียนได้เป็น

$$P_n^{(0.5)}(x)=\frac{(-1)^n}{2^n n!}\frac{d^n\left(1-x^2\right)^n}{dx^n} \tag{2.25}$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพหุนาม Gegenbauer สามารถเปลี่ยนเป็นพหุนามเลอจองดร์เมื่อพารามิเตอร์ α เป็น 0.5 เพราะว่าสมการที่ (2.25) เป็นสูตร Rodrigue's ของพหุนามเลอจองดร์ พหุนาม Gegenbauer จะเข้าใกล้พหุนามเชฟบีเชฟที่ 1 เมื่อ α เข้าสู่ 0 ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\lim_{\alpha\to 0}\frac{P_n^{\alpha}(x)}{\alpha}=\frac{2}{n}\frac{(-1)^2\sqrt{\pi}}{2^n\Gamma\left(n+\frac{1}{2}\right)\left(1-x^2\right)^{-\frac{1}{2}}}\frac{d^n\left(1-x^2\right)^{n-\frac{1}{2}}}{dx^n} \tag{2.26}$$

2.3 ขั้นตอนการออกแบบแถวลำดับ

สมมติว่าจำนวนองค์ประกอบ, ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบในรูปของความยาวคลื่นแบบอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยแรกเป็นค่าที่ทราบก่อนดังนั้นเพื่อที่จะหาตัวประกอบของแถวลำดับจะใช้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. จากค่าจำนวนขององค์ประกอบที่ทราบค่า เราสามารถเลือกค่าตัวประกอบแถวลำดับได้จากสมการ (2.14) หรือ (2.15)
2. เลือกค่าฟังก์ชันโคไซน์ที่เหมาะสมจากสมการ (2.14) และแทนค่าลงตัวประกอบแถวลำดับที่ได้กระจายแล้ว
3. หาค่ารากของพหุนามเชิงตั้งฉากโดยเอาจำนวนองค์ประกอบทั้งหมดของแถวลำดับลบหนึ่งจับพหุนามเชิงตั้งฉากกับค่าอัตราส่วนของความเข้มลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยแรก แล้วแก้สมการหาค่ารากของพหุนาม $x = x_m$ (ซึ่งเป็นจุดที่ค่าลำคลื่นหลักสูงสุดเกิดขึ้น) ค่าระดับลำคลื่นด้านข้างของแบบรูปแถวลำดับสามารถสร้างได้จากบริเวณจุด -1 ($x = x_n$) และลำคลื่นหลักสามารถสร้างได้จากบริเวณ x_n ถึง x_m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปรับบรรทัดฐาน x เพื่อให้ค่าสูงสุดของฟังก์ชันโคไซน์ไม่เกินหนึ่ง โดยการหารด้วยค่า x_m
5. นำค่าตัวประกอบแถวลำดับที่ได้กระจายมาแล้วมาเท่ากับค่าของพหุนามเชิงตั้งฉาก และหาค่าแอมปลิจูดของสัมประสิทธิ์การป้อนกระแส I_n

หลังจากที่ทราบค่าสัมประสิทธิ์การป้อนกระแส โดยใช้สมการ (2.14) และ (2.15) เราสามารถเขียนนิพจน์ที่สมบูรณ์ของตัวประกอบแถวลำดับ และค่าคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับจะสามารถวิเคราะห์ได้

อนึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่สำคัญที่จะพิจารณา ได้แก่ ประสิทธิภาพลำคลื่น (Beam Efficiency) ซึ่งนิยามโดยอัตราส่วนของกำลังที่ส่ง (รับ) ภายในลำคลื่นหลักต่อกำลังส่ง (รับ) โดยสายอากาศทั้งหมด สำหรับกรณีแถวลำดับเชิงเส้น, ค่าประสิทธิภาพลำคลื่นสามารถสร้างสูตรได้เป็น

$$\text{ประสิทธิภาพลำคลื่น(BE)} = \frac{\int_{\theta_1}^{90^\circ} |AF(\theta)|^2 \sin\theta d\theta}{\int_{0}^{90^\circ} |AF(\theta)|^2 \sin\theta d\theta} \qquad (2.27)$$

โดยที่ θ_1 เป็นมุมของกรวยที่ให้นัลครั้งแรก

อีกพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศคือค่าการชี้ทิศทาง (Directivity) ซึ่งนิยมพิจารณาโดยอัตราส่วนของค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดต่อความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของตัวแพร่คลื่นไอโซทรอปิก ซึ่งในกรณีของแถวลำดับเชิงเส้นในแนวบอร์ดไซด์ค่าการชี้ทิศทางสามารถเขียนได้เป็น

$$\text{ค่าการชี้ทิศทาง (Do)} = \frac{2|AF(90^\circ)|^2}{\int_{0}^{180^\circ} |AF(\theta)|^2 \sin\theta d\theta} \qquad (2.28)$$

โดยทฤษฎีทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบแถวลำดับได้ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ผลการสังเคราะห์

3.1 ผลที่ได้จากการสังเคราะห์โดยใช้พหุนาม Gegenbauer

เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับข้อแตกต่างของการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแถวลำดับเชิงเส้นในแนวบรอดโซด์ที่ 10 องค์ประกอบและมีระดับลำคลื่นด้านข้าง 20 dB โดยระยะห่างของสายอากาศเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ขั้นตอนการออกแบบจะพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การกระตุ้นของกระแส I_n ซึ่งแสดงในตาราง 3.1

α	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
เข้าสู่ 0	1	0.92	0.78	0.59	0.64
0.5	1	0.93	0.80	0.62	0.51
1	1	0.93	0.80	0.63	0.44
2	1	0.94	0.81	0.62	0.35
5	1	0.95	0.82	0.58	0.25
10	1	0.96	0.82	0.54	0.21

ตาราง 3.1 แสดงสัมประสิทธิ์การกระตุ้นของกระแส

หลังจากที่ได้สัมประสิทธิ์การกระตุ้นของกระแสดังแสดงในตารางที่ 3.1 แล้ว เราก็นำค่าที่ได้ไปแทนใน (2.14) ก็จะทำให้ได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับ เมื่อนำค่าตัวประกอบแถวลำดับนี้ไปพล็อตกราฟก็จะได้ดังรูปที่ 3.1 ส่วนคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแสดงในตาราง 3.2

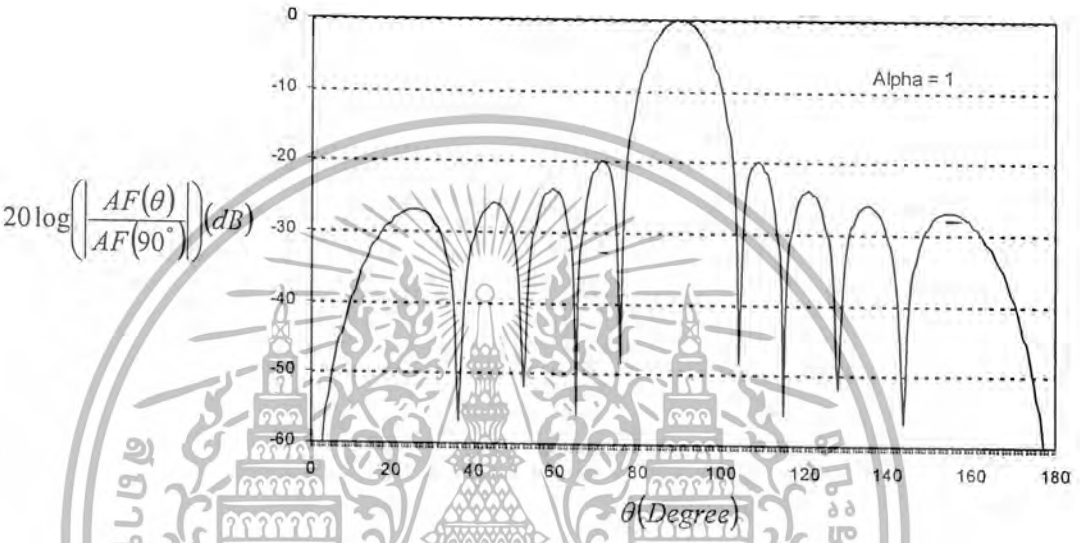
α	BE (%)	HPBW(deg)	FNBW (deg)	D_0 (dBi)
เข้าสู่ 0	96.299	11.183	27.160	9.833
0.5	97.849	11.537	28.113	9.765
1	98.421	11.794	28.842	9.694
2	98.811	12.146	29.821	9.582
5	99.005	12.669	31.284	9.405
10	99.029	13.008	32.240	9.290

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในรูปที่ 3.1 สายอากาศแถวลำดับมีข้อแตกต่างกันคือ เมื่อเลือกค่าพารามิเตอร์ α นำมาเปลี่ยน ซึ่งเราสามารถเลือกค่าพารามิเตอร์ α เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ต้องการ อย่างไรก็ตามพหุนาม Gegenbauer สามารเข้าสู่พหุนามเชฟบีเชฟที่ชนิด 1 เมื่อ α เข้าสู่ 0 จะเป็นพหุนามเลอร์จองและพหุนามเชฟบีเชฟชนิดที่ 2 เมื่อทำการเลือกพารามิเตอร์ α เท่ากับ 0.5 และ 1 ตามลำดับ

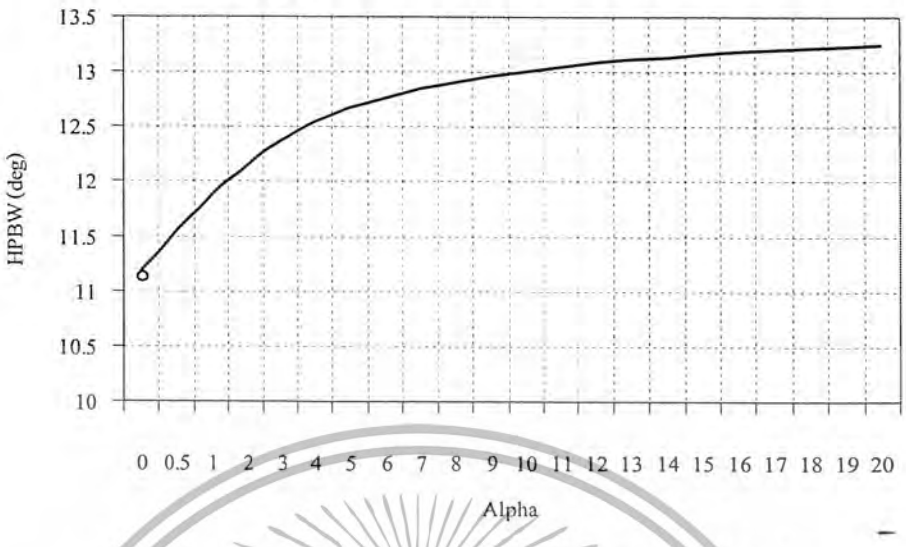


รูปที่ 3.1 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

3.1.2 ความกว้างของลำคลื่นเมื่อกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

ความกว้างของลำคลื่นเมื่อกำลังลดลงครึ่งหนึ่งนิยามได้ คือ มุมระหว่างการชี้ทิศทางในความเข้มของการแพร่กระจายซึ่งก็คือมุมเมื่อกำลังลดลงครึ่งหนึ่งของลำคลื่นแสดงในรูปที่ 3.2 จากรูปจะเป็นการค่าความกว้างเมื่อกำลังลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ α ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า α ค่าน้อยๆจะให้ค่าความกว้างเมื่อกำลังลดลงครึ่งหนึ่งแคบกว่าค่า α ที่ค่ามากๆ

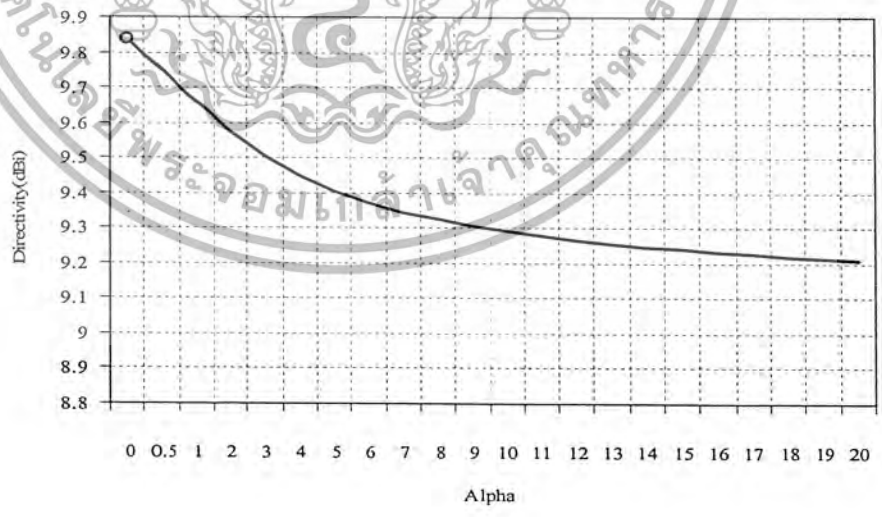
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แสดงความกว้างของลำคลื่นเมื่อกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

3.1.3 ค่าการชี้ทิศทาง

ค่าการชี้ทิศทาง คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก จากการสังเคราะห์พบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า α ให้มากขึ้นจะทำให้ค่าการชี้ทิศทางลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.3

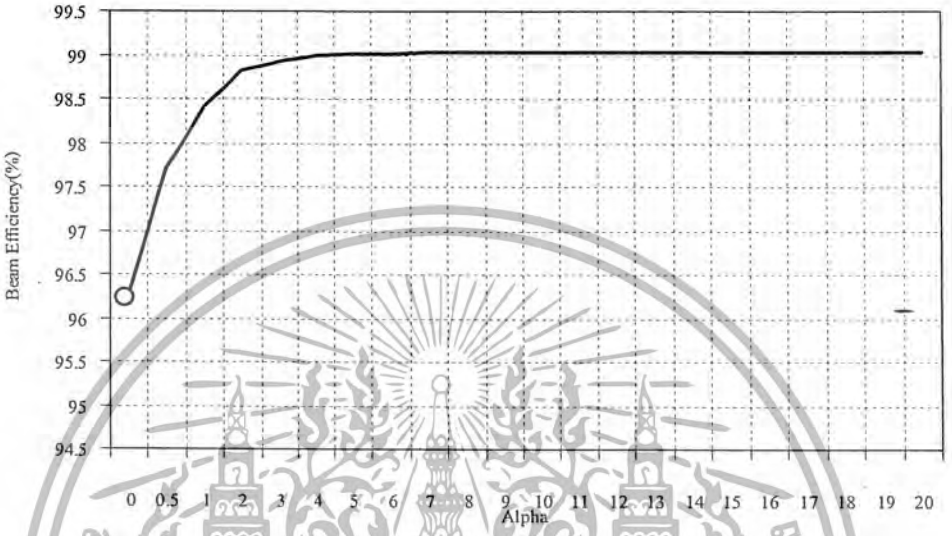


รูปที่ 3.3 แสดงค่าการชี้ทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ประสิทธิภาพลำคลื่น

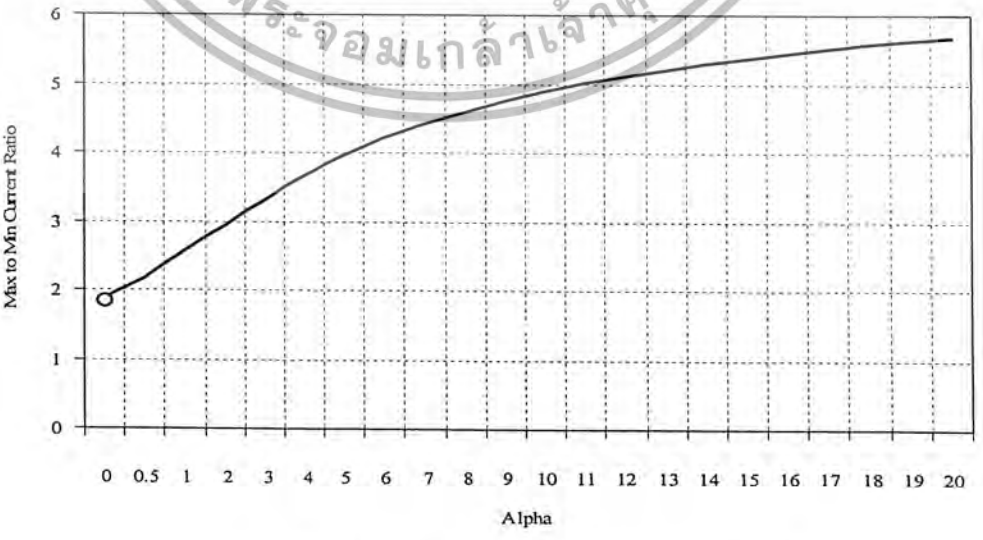
ประสิทธิภาพลำคลื่น คือ อัตราส่วนของกำลังการกระจายคลื่นในลำคลื่นหลักต่อกำลังทั้งหมด ในทางปฏิบัติต้องการให้มีค่าประสิทธิภาพที่สูงรูปที่ 3.4 แสดงประสิทธิภาพลำคลื่นซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า α ขึ้นจนถึง 20 จะทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพลำคลื่นสูงถึง 99.02



รูปที่ 3.4 แสดงประสิทธิภาพลำคลื่น

3.1.5 อัตราส่วนกระแสสูงสุดต่อกระแสต่ำสุด

อัตราส่วนกระแสสูงสุดต่อกระแสต่ำสุดเป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่เป็นคุณลักษณะของแบบรูปแถวลำดับ อัตราส่วนที่สูงขึ้นซึ่งก็จะทำให้การสร้างนั้นยากขึ้นตามไปด้วย รูปที่ 3.5 แสดงอัตราส่วนกระแสสูงสุดต่อกระแสต่ำสุด จากรูปเมื่อค่า α มีค่าสูงขึ้นก็จะทำให้ค่านี้สูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 3.5 แสดงอัตราส่วนกระแสสูงสุดต่อกระแสต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การสังเคราะห์สายอากาศ

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

เนื่องจากคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเดี่ยวซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นค่อนข้างกว้างและมี Gain ต่ำ แต่ในงานบางอย่างต้องการใช้สายอากาศที่มีค่าการขยายสูง การเพิ่ม Gain ของสายอากาศทำได้โดยเพิ่มขนาดของสายอากาศ ซึ่งทำให้สายอากาศมีขนาดใหญ่ ซึ่งเราสามารถแก้ปัญหาได้โดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของสายอากาศ โดยจัดองค์ประกอบที่แพร่กระจายให้เหมาะสมทั้งทางไฟฟ้าและรูปทรง ซึ่งเรียกว่าแถวลำดับ (array)

ในปริญญานิพนธ์นี้เราได้พิจารณาแบบรูปการแพร่คลื่นแบบเชิงเส้นที่องค์ประกอบ 10 องค์ประกอบ ซึ่งมีวิธีการควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะมีด้วยกัน 5 วิธีดังนี้

1.การจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับเป็นเส้นตรง

2.ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น $\lambda_g/2$

3.ขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบมีลักษณะแตกต่างกัน 2 แบบดังนี้

- การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ
- การกระจายกระแสโดยใช้พหุนาม Gegenbauer

สำหรับการกระจายกระแสโดยใช้พหุนาม Gegenbauer นี้สามารถทำการกำหนดระดับลำคลื่นด้านข้างได้ โดยปริญญานิพนธ์นี้เราทำการกำหนดระดับลำคลื่นด้านข้างให้มีระดับเท่ากับ 20 dB (Side Lobe Level ;SLL = 20 dB)

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

5.แบบรูปของแต่ละองค์ประกอบ เป็นลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดขึ้นจากองค์ประกอบเดี่ยว

สนามลัพธ์ที่ได้ของแถวลำดับมีค่าเท่ากับสนามขององค์ประกอบเดี่ยวที่วางที่จุดกำเนิดคูณด้วยตัวประกอบ ซึ่งเรียกว่าตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) โดยตัวประกอบแถวลำดับเป็นฟังก์ชันของรูปทรงแถวลำดับ โดยเราสามารถควบคุมสนามลัพธ์ของแถวลำดับได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ (d), การจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับ (เส้นตรง, วงกลม,สี่เหลี่ยม ฯลฯ), ขนาดกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ, เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ, เฟสของกระแสที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแต่ละองค์ประกอบ

$$\text{สนาม (ลัพธ์)} = \text{สนาม}[\text{องค์ประกอบเดี่ยวอยู่ที่จุดกำเนิด}] \times [\text{ตัวประกอบแถวลำดับ}] \qquad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามจากร่องเดี่ยวแบบนอร์มอลไลซ์ของแถวลำดับที่ยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแสดงดังสมการที่ (3.2) และ (3.3)

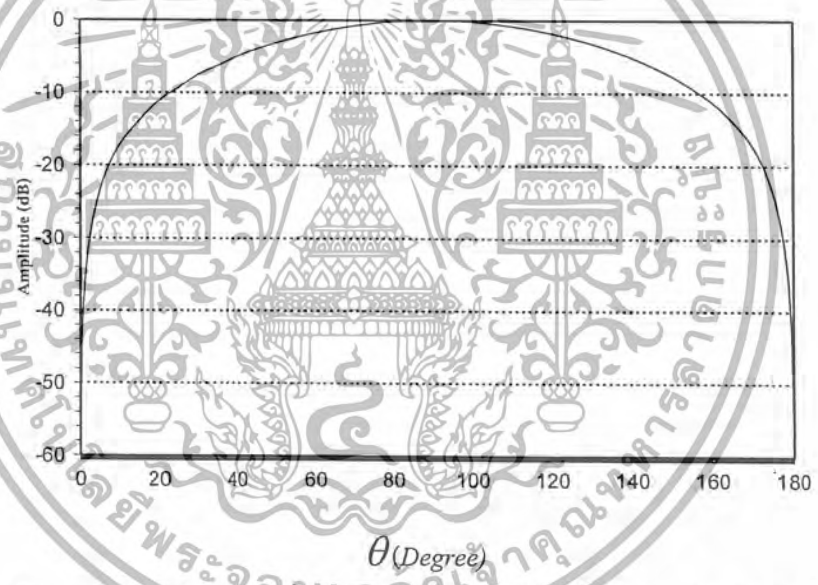
ในระนาบสนามไฟฟ้า

$$E_{\phi n} = 1 \tag{3.2}$$

ในระนาบสนามแม่เหล็ก

$$E_n = \frac{\cos\left[\frac{\pi}{2}\cos\theta\right]}{\sin\theta} \tag{3.3}$$

สนามจากร่องเดี่ยวของแถวลำดับแบบนอร์มอลไลซ์ที่ยาวครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแสดงในระนาบมุมฉากได้ดังรูปที่ 3.6



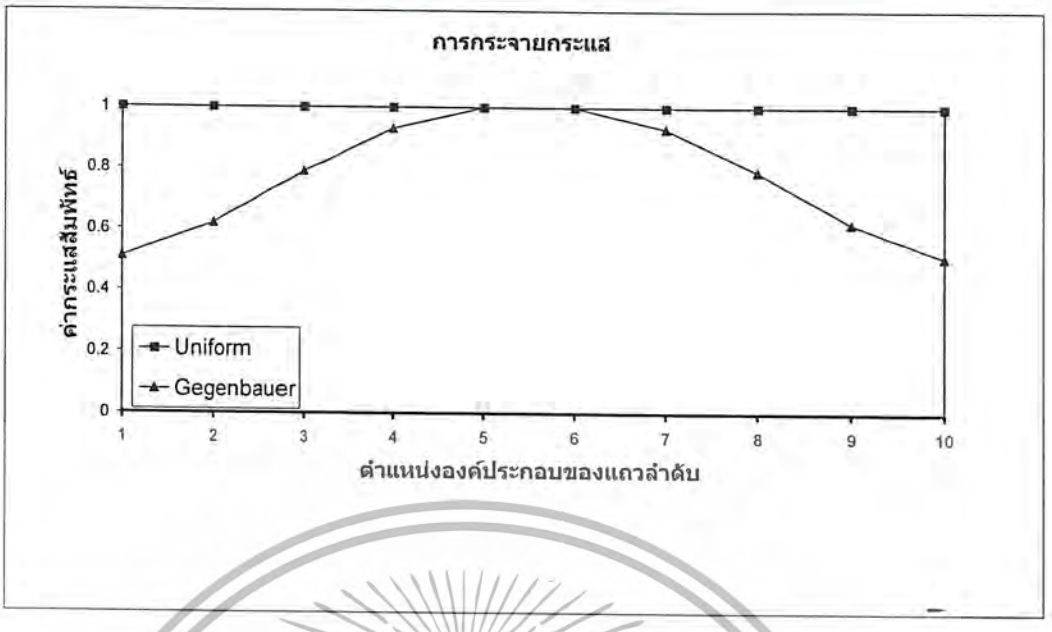
รูปที่ 3.6 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามที่เกิดจากร่องเดี่ยวในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก

3.2.1 การกระจายกระแส

การกระจายกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบ จะพิจารณาการกระแส 2 แบบ คือ การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ, แบบพหุนาม Gengebauer ในกรณีที่ประกอบด้วย 10 องค์ประกอบ (N = 10) และระยะห่างระหว่างองค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบเท่ากับหนึ่งความยาวคลื่น $(d = \lambda/2)$ และเฟสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบมีเฟสเดียวกัน แสดงความสัมพันธ์ของการกระจายกระแสสัมพัทธ์ได้ดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 3.7 แสดงการกระจายกระแสของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอและโดยใช้พหุนาม Gegenbauer

การกระจายกระแสที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 พบว่าการกระจายแบบสม่ำเสมอ กระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบมีขนาดที่เท่ากัน ทำให้ง่ายต่อการป้อนสัญญาณให้แต่ละองค์ประกอบ สำหรับการกระจายกระแสแบบพหุนาม Gegenbauer พบว่ากระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบจะไม่เท่ากันโดยขึ้นอยู่กับการเลือกค่า α ของพหุนาม

3.2.2 ตัวประกอบแถวลำดับ

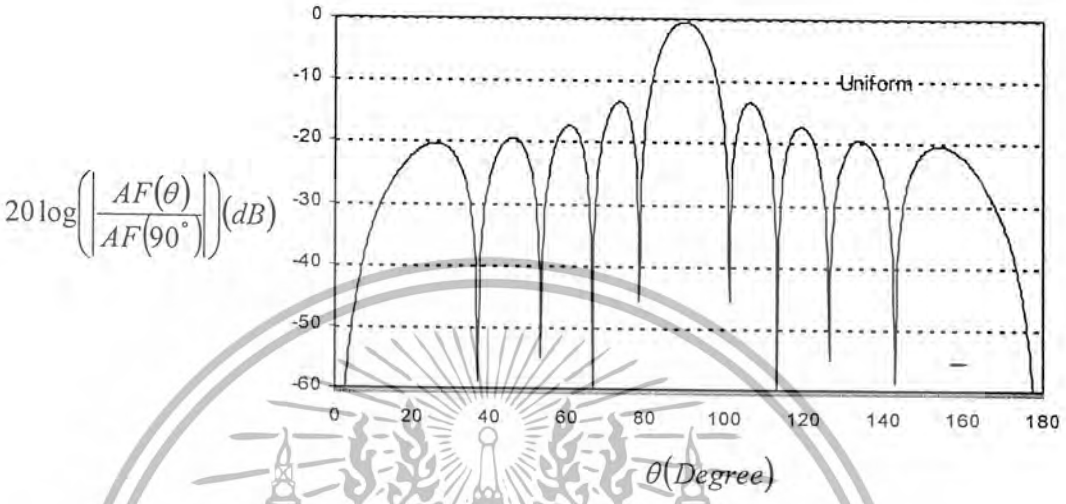
ตัวประกอบแถวลำดับ คือ เป็นฟังก์ชันของรูปทรงของแถวลำดับและเฟสของการป้อนกระแสให้แต่ละองค์ประกอบ โดยพิจารณาแถวลำดับที่มีองค์ประกอบแบบไอโซทรอปิก ที่วางอย่างสมมาตรในแนวแกน มีการวางองค์ประกอบในลักษณะที่เป็นเส้นตรง ด้วยระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น โดยรูปที่ 3.8 ถึง 3.9 แสดงตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ อันได้แก่ การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ แบบพหุนาม Gegenbauer ซึ่งสามารถกำหนดระดับลำคลื่นด้านข้างของลำคลื่นได้ โดยกำหนดระดับลำคลื่นด้านข้างให้มีขนาดต่ำกว่าระดับของลำคลื่นหลักเท่ากับ 20 dB สำหรับขั้นตอนการออกแบบแถวลำดับได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.3 และสมการของตัวประกอบแถวลำดับได้กล่าวไว้ในสมการ (2.14) และ (2.15) สำหรับในปริญญานิพนธ์นี้จะแสดงตัวประกอบแถวลำดับในกรณีที่มีองค์ประกอบเท่ากับ 10 องค์ประกอบเพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างง่ายขึ้น จากจำนวนขององค์ประกอบมีจำนวนขององค์ประกอบเป็นคู่ สามารถเขียนสมการตัวประกอบแถวลำดับที่ (2.14) สำหรับจำนวนองค์ประกอบ 10 องค์ประกอบได้ใหม่ดังนี้

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

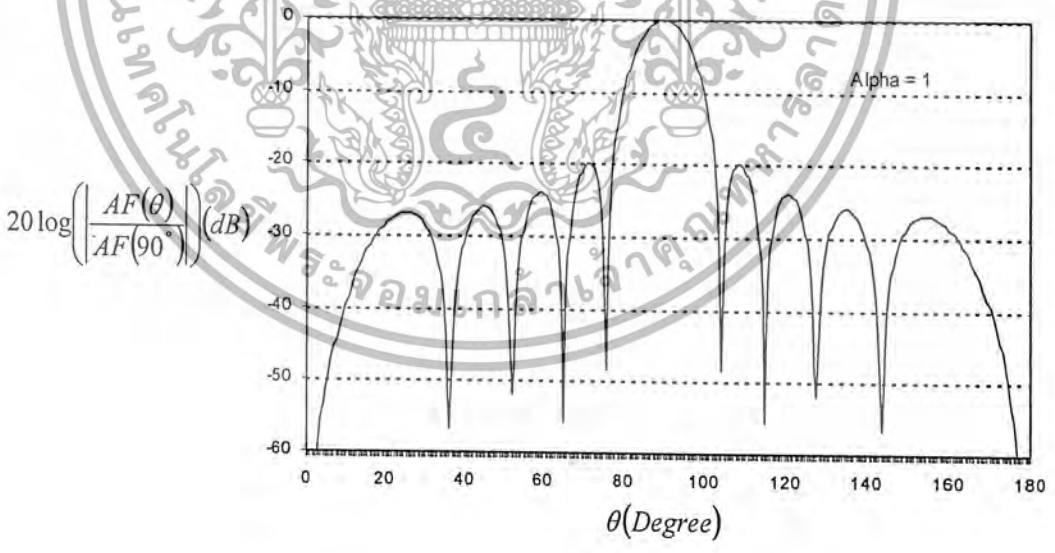
โดยที่ $u = \dfrac{\pi d\cos\theta}{\lambda}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
61949

ตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 ถึง 3.9



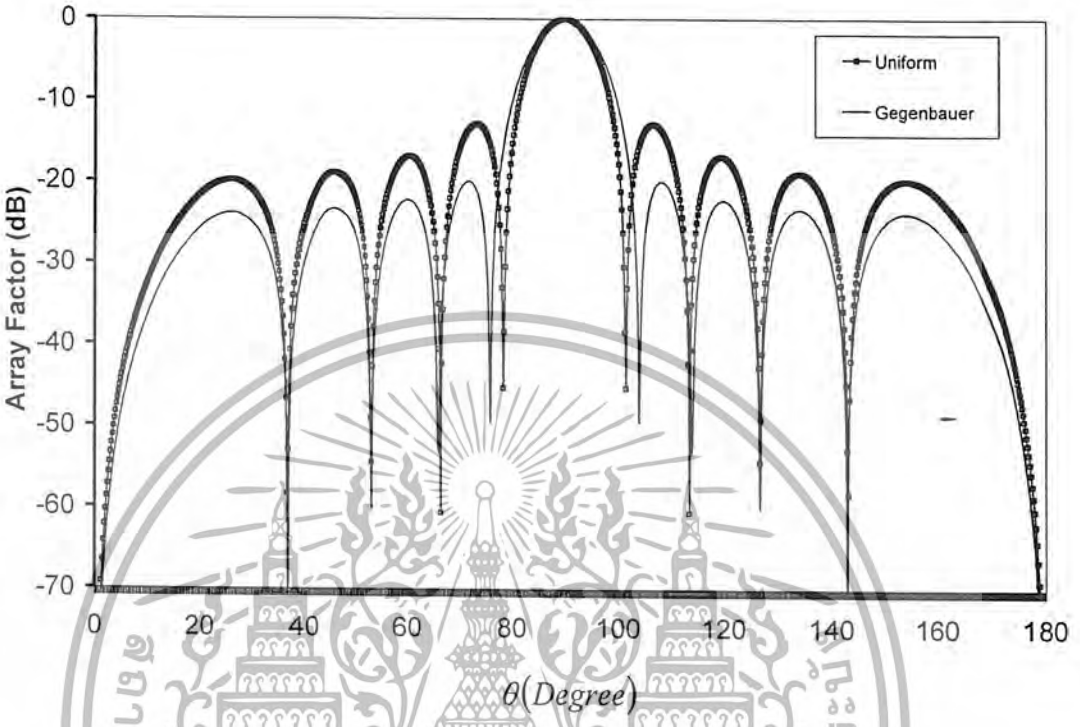
รูปที่ 3.8 แสดงตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอในพิกัดฉาก



รูปที่ 3.9 แสดงตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ในพิกัดมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแสดงตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสทั้งแบบสม่ำเสมอและการกระจายกระแสโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ได้แสดงข้างต้น ได้นำมาแสดงรวมกันเพื่อเปรียบเทียบดังรูป



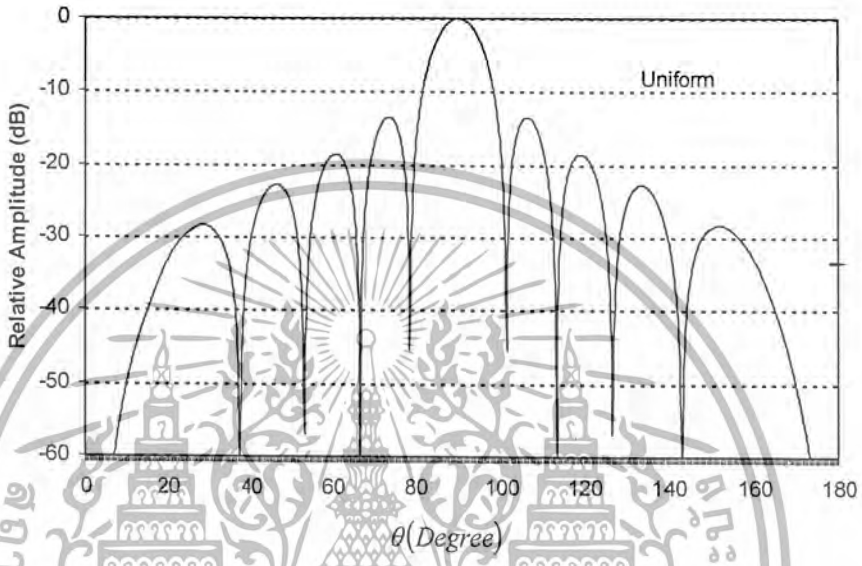
รูปที่ 3.10 แสดงตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอและการกระจายกระแสโดยใช้พหุนาม Gegenbauer

จากรูป 3.10 พบว่าการกระจายกระแสแต่ละแบบจะมีตัวประกอบแถวลำดับที่แตกต่างกัน โดยการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอจะมีระดับลำคลื่นด้านข้างที่สูงที่สุดและมีลำคลื่นที่แคบที่สุด สำหรับการกระจายกระแสแบบพหุนาม Gegenbauer ที่กำหนดให้ค่าระดับลำคลื่นด้านข้างเท่ากับ 20 dB และทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์ α ให้มีค่าต่างๆกัน ซึ่งพบว่ายิ่งกำหนดค่า α มากๆระดับค่าระดับลำคลื่นด้านข้างก็จะยิ่งลดลง

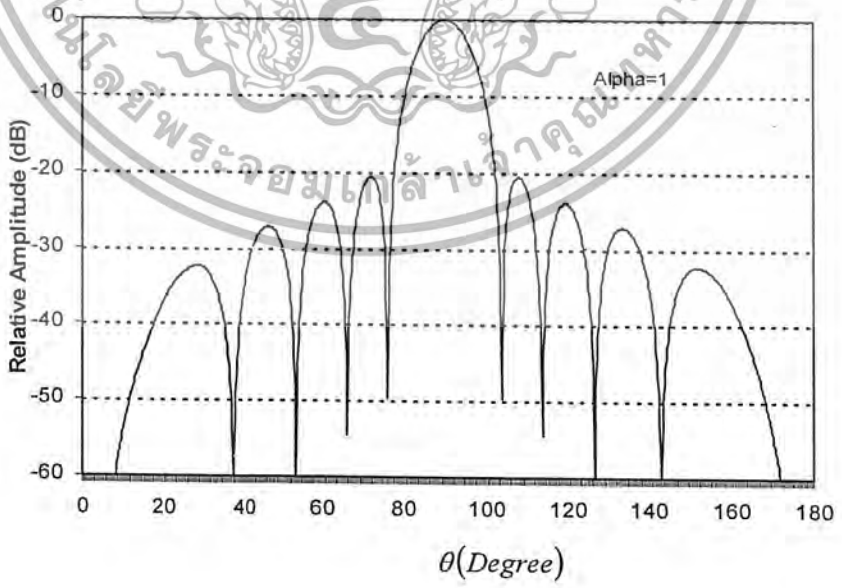
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ

ผลที่ได้จากการกระจายกระแสที่ผ่านมาทั้งแบบสม่ำเสมอและพหุนาม Gegenbauer ทำให้เราสามารถหาตัวประกอบแถวลำดับของการกระจายกระแสได้ดังรูปที่ 3.8 - 3.9 เมื่อเรานำตัวประกอบแถวลำดับในรูปไปคูณกับสนามที่เกิดจากองค์ประกอบเดี่ยวในรูปที่ 3.6 สามารถหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ดังนี้



รูปที่ 3.11 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสม่ำเสมอในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉาก

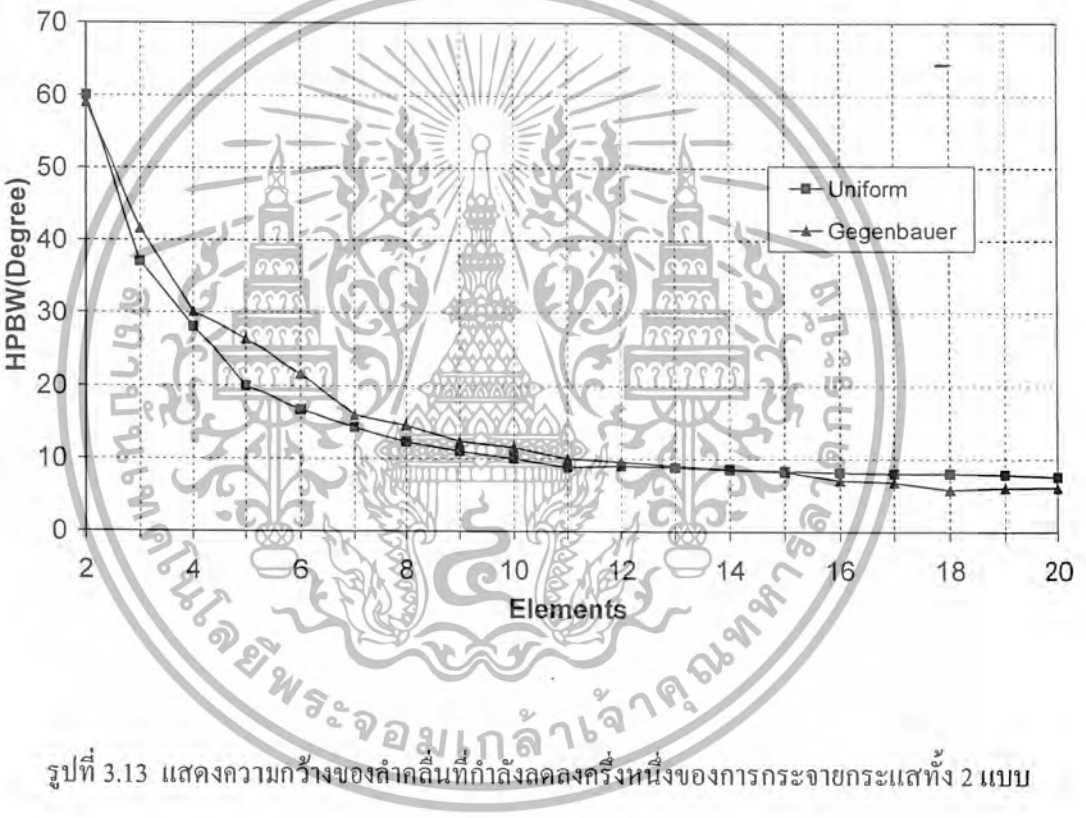


รูปที่ 3.12 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบพหุนาม Gegenbauer ในพิกัดมุมฉาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง คือ มุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด ผลที่ได้จากการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ โดยทำการวิเคราะห์โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบมีค่าเท่ากันคือเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น และกำหนดให้จำนวนองค์ประกอบที่ทำการวิเคราะห์มีจำนวนองค์ประกอบที่ทำการวิเคราะห์มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 2-20 องค์ประกอบ สามารถเปรียบเทียบความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งได้ดังนี้

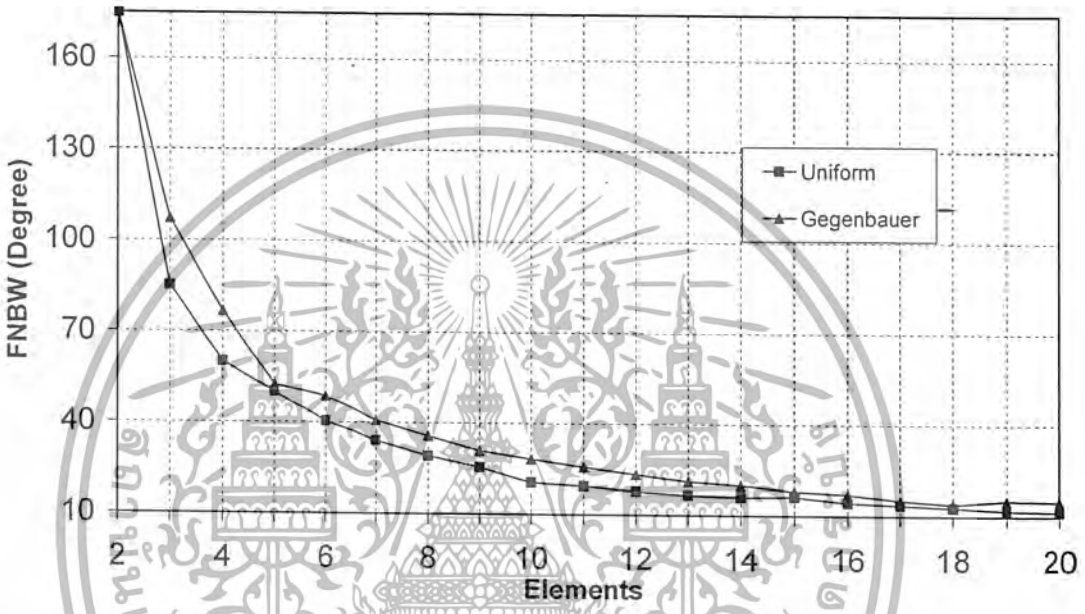


รูปที่ 3.13 แสดงความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรก

ความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรก โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบมีค่าเท่ากันคือครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น และกำหนดให้จำนวนองค์ประกอบที่ทำการวิเคราะห์มีจำนวนองค์ประกอบที่เท่ากับ 2-20 องค์ประกอบ ผลที่ได้จากการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ สามารถเปรียบเทียบความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลแรกได้ดังนี้



รูปที่ 3.14 แสดงความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลแรกของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ

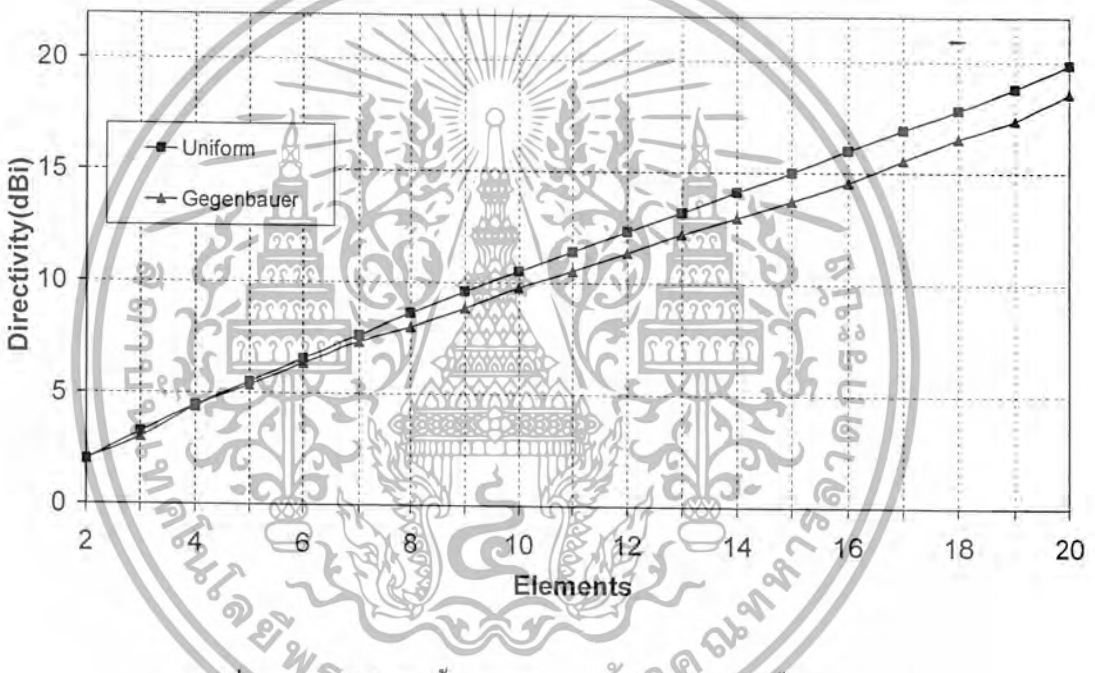
สำหรับคุณสมบัติความกว้างของลำคลื่นจะขอกล่าวโดยรวมทั้งความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งและความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลครั้งแรก จากรูปที่ 3.13 และ 3.14 พบว่าการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอมีความกว้างของลำคลื่นที่แคบที่สุด ส่วนแบบพหุนาม Gegenbauer พบว่าเมื่อค่า α มีค่ามากขึ้นจะทำให้ความกว้างของลำคลื่นมากขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 ค่าการชี้ทิศทาง

ค่าการชี้ทิศทาง คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก

สำหรับปริญญานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้สายอากาศที่มีตัวประกอบแถวลำดับในแนวบรอดไซด์ (Broadside Array) เพื่อให้มีการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุดในทิศทางตั้งฉากกับแกนของแถวลำดับ ซึ่งต้องการสายอากาศที่มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นชี้ไปทิศทางเดียว ดังนั้นในการออกแบบจะเลือกค่าการชี้ทิศทางที่สูง



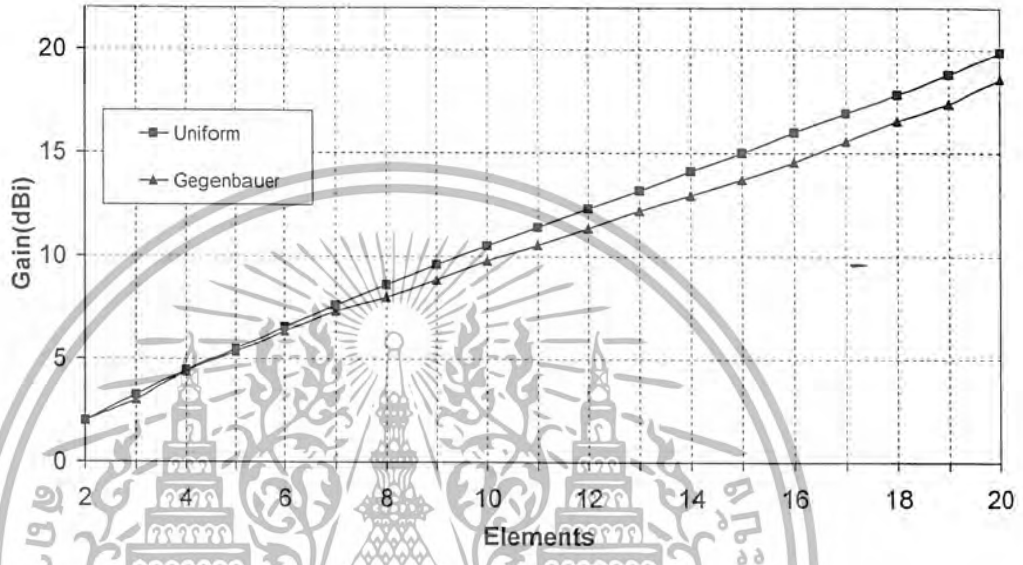
รูปที่ 3.15 แสดงค่าการชี้ทิศทางของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ

จากรูปที่ 3.15 พบว่าการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอมีค่าการชี้ทิศทางที่ดีที่สุด ส่วนการกระจายกระแสแบบพหุนาม Gegenbauer มีค่าชี้ทิศทางรองลงมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าการชี้ทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย จากการคำนวณกำหนดให้ประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์



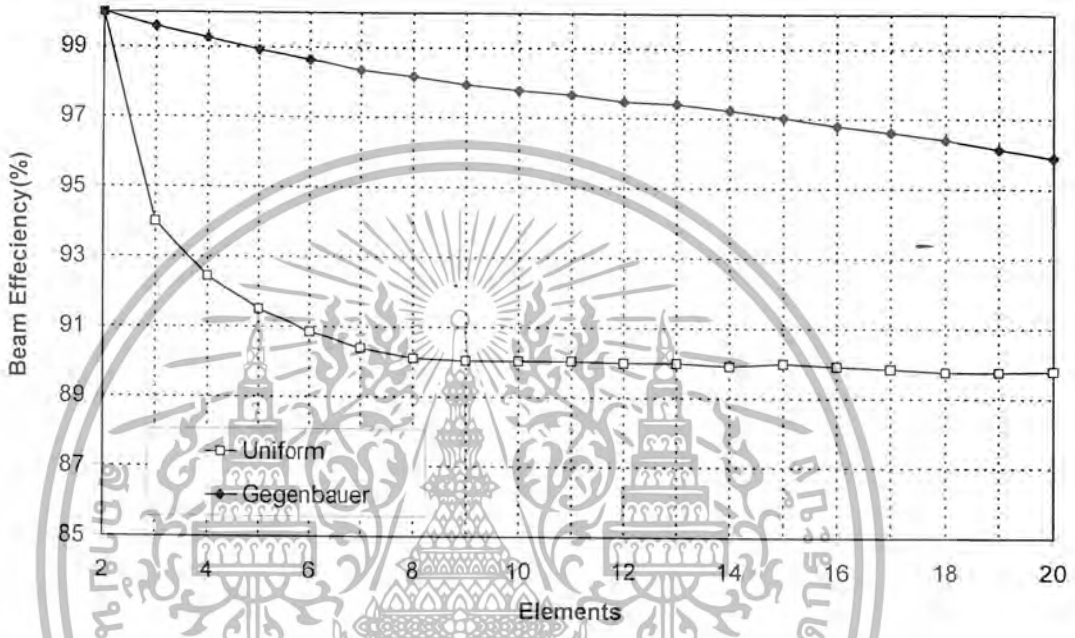
รูปที่ 3.16 แสดงค่าอัตราการขยายของสายอากาศของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ

จากรูปที่ 3.16 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ ส่งผลให้ค่าอัตราการขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.8 ประสิทธิภาพของลำคลื่น

ประสิทธิภาพของลำคลื่น คือ ปริมาณที่แสดงถึงอัตราส่วนของจำนวนกำลังงานในลำคลื่นหลักต่อกำลังที่มีทั้งหมด ผลที่ได้จากการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของลำคลื่นได้ดังนี้



รูปที่ 3.17 แสดงประสิทธิภาพของลำคลื่นของการกระจายกระแสทั้ง 2 แบบ

จากรูปที่ 3.17 พบว่าค่าประสิทธิภาพลำคลื่นของการกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอเมื่อองค์ประกอบมากขึ้นจะทำให้ค่าประสิทธิภาพลำคลื่นลดลงส่วนการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer เมื่อค่า α มีค่ามากขึ้นพบว่าค่าประสิทธิภาพลำคลื่นยิ่งมีค่าสูงตามไปด้วย

จากผลการสังเคราะห์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและการสร้างสายอากาศแถวลำดับต่อไปได้ ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบ และ การสร้าง

4.1 ระบบการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศแถวลำดับแบบร่องโดยใช้ท่อนำคลื่น

การป้อนสัญญาณให้แก่สายอากาศนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณผ่านทางตัวนำ เช่น สายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Line) ไมโครสตริป (Microstrip) หรือการป้อนสัญญาณผ่านท่อนำคลื่น (Wave) เป็นต้น ซึ่งการเลือกป้อนสัญญาณต่างๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการออกแบบและชนิดของสายอากาศนั้นๆ สำหรับสายอากาศแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่นที่ใช้งานในย่านไมโครเวฟ (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 ค่าซัสเซ็พแตนต์ (Susceptance) หรือรีแอกแตนซ์ (Reactance) ของวงจรสมมูลย์ของร่องจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ที่ความถี่ที่ออกแบบ

   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)

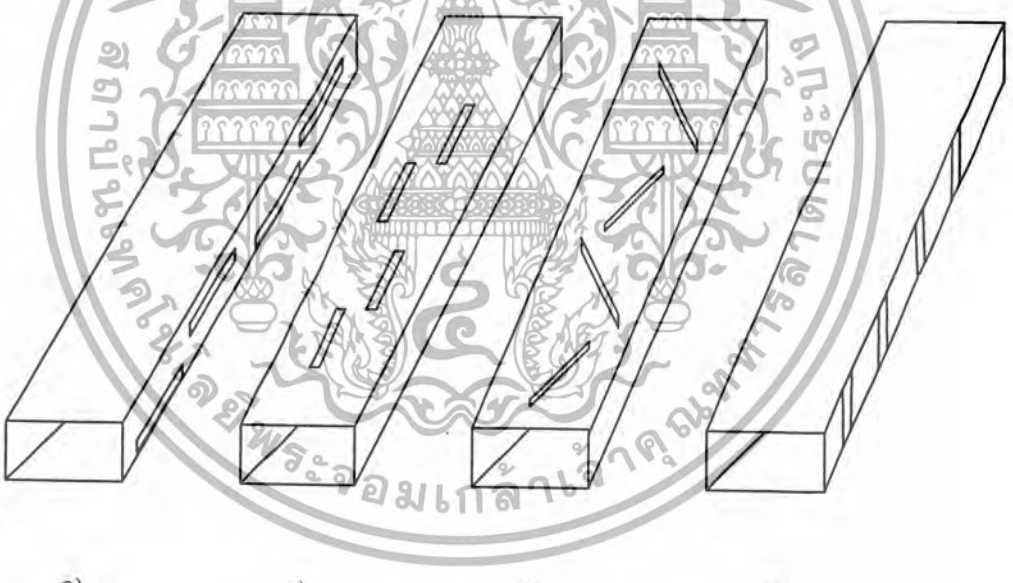
   2.3 ลักษณะลำคลื่นไม่อยู่ในแนวบรอดไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ลักษณะการเจาะร่องบนท่อนำคลื่น

ร่องที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่นจะไปขวางการไหลของกระแสบนผิวท่อ ซึ่งทำให้เกิดกำลังงานกระจายออกมา โดยร่องที่เจาะขนานไปกับเวคเตอร์ของกระแสที่ผิวจะไม่กระจายคลื่นออกมาเช่น ร่องที่เจาะขนานไปตามเส้นกึ่งกลางท่อนำคลื่น การเจาะร่องนั้นกระทำได้หลายลักษณะขึ้นกับตำแหน่งที่เจาะ ดังนี้

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

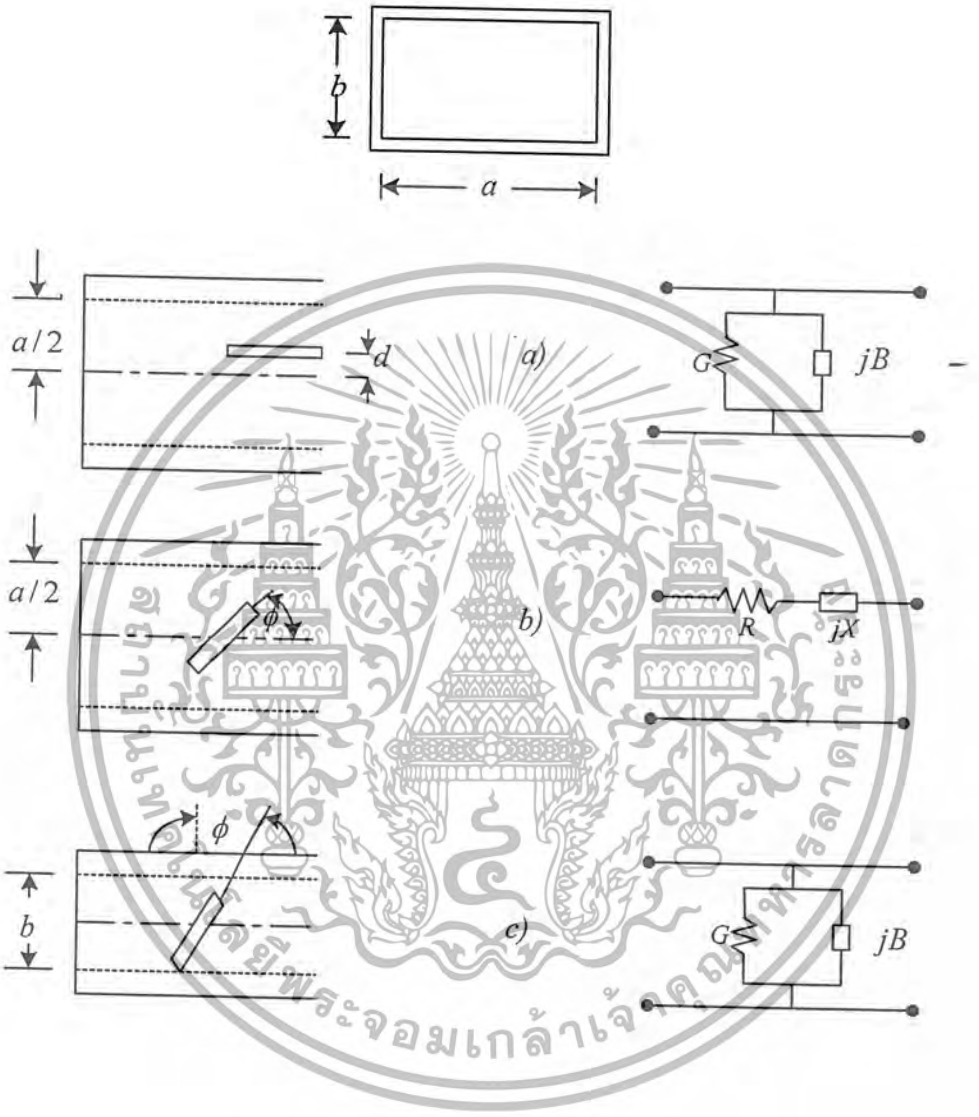


ก) ข) ค) ง)

รูปที่ 4.1 ก) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านแคบ
ข) การเจาะแบบขนานตามยาวบนผนังด้านกว้าง
ค) การเจาะแบบกึ่งกลาง
ง) การเจาะขอบผนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรเสมือนของร่องแบบต่างๆที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่น (Equivalent-Network Representations of Slot)



รูปที่ 4.2 วงจรเสมือนของร่องแบบต่างๆที่เจาะบนผนังท่อนำคลื่น

เราสามารถแสดงวงจรเสมือนแทนลักษณะของร่องแบบต่างๆ โดยที่ร่องเดี่ยวแต่ละองค์ประกอบถูกกำหนดโดยสมมติฐานที่ว่าความยาวร่อง (Slot Width) เปรียบเทียบกับความยาวคลื่นแล้วมีค่าน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรเสมือนของร่องที่เจาะแบบขนานตามความยาวบนผนังท่อนำคลื่นด้านกว้างและเจาะแบบขอบผนังด้านแคบ แสดงได้ด้วยองค์ประกอบแบบขนาน (Shunt Element) ของแอดมิดแตนซ์ประกอบด้วย คอนดักแตนซ์ (G) กับซัสเซบแตนซ์ (B) ดังรูป (ก) และ (ค)

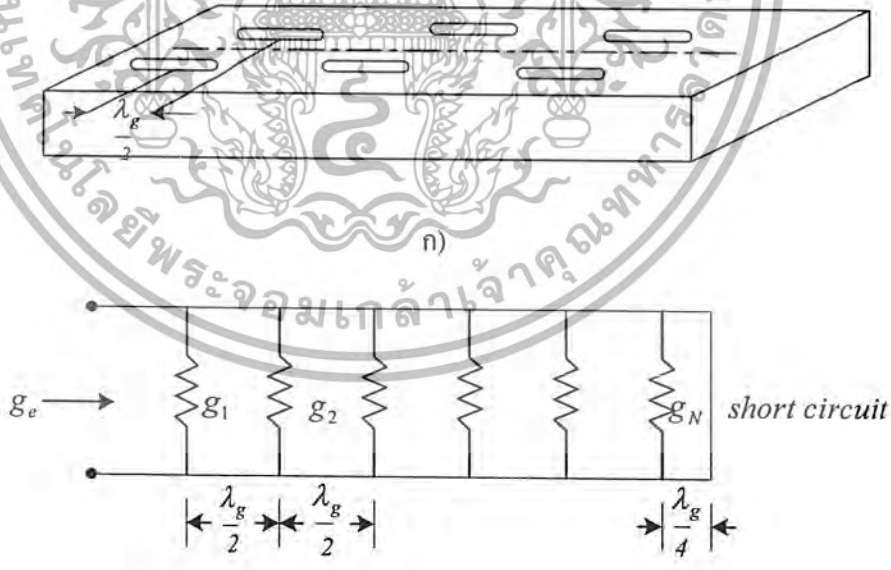
วงจรเสมือนของร่องที่เจาะแบบกึ่งกลางทำมุม ϕ กับเส้นสมมติกึ่งกลางตามแนวยาวของท่อแสดงได้ด้วยองค์ประกอบแบบอนุกรม (Series Element) ของอิมพีแดนซ์ประกอบด้วย รีซิสแตนซ์ (R) กับรีแอกแตนซ์ (X) ดังรูป (ข)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของร่องเดี่ยว พบว่าร่องเดี่ยวมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่กว้างมากและมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางต่ำ ดังนั้นเราจึงนำร่องมาประกอบกันขึ้นเป็นแถวลำดับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของร่องเดี่ยวด้วยตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) ซึ่งแถวลำดับเชิงเส้นของร่องบนผนังท่อนำคลื่นนั้นแบ่งได้ 2 แบบคือ

1.แถวลำดับแบบคลื่นจร (Travelling Wave Array)

2.แถวลำดับแบบเรโซแนนท์ (Resonant)

สำหรับในโครงงานนี้ได้เลือกใช้สายอากาศในรูปแบบแถวลำดับแบบเรโซแนนท์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแถวลำดับคลื่นนิ่ง (Standing Wave Array) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้



ก)

ข)

รูปที่ 4.3 (ก) แสดงแถวลำดับแบบเรโซแนนท์ของร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

(ข) แสดงวงจรสมมูลในกรณีที่ทุกร่องเรโซแนนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถวลำดับแบบนี้ระยะห่างระหว่างแต่ละร่องของแถวลำดับจะต้องเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น $(d = \lambda_g/2)$ แต่ร่องอันดับสุดท้ายจะต้องวางอยู่ห่างจากแผ่นลัดวงจรเป็นระยะทางหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น $(\lambda_g/4)$ เพื่อให้โหมดแรงดันของร่องอันดับสุดท้ายมีค่าสูงสุด และเนื่องจากโหมดแรงดันของท่อนำคลื่นของร่องที่อยู่ใกล้กันจะมีเฟสตรงกันข้าม ดังนั้นจึงต้องมีการสลับระยะห่างจากกึ่งกลางผนังท่อนำคลื่นเพื่อให้สนามบนปากร่องทุกร่องมีเฟสเดียวกันและมีผลทำให้คลื่นที่แพร่กระจายออกไปเสริมกันในทิศทางตั้งฉากกับระนาบของแถวลำดับ

สนามในท่อนำคลื่นสำหรับที่มิติโหมด TE_{10} เมื่อท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมีขนาดความกว้าง a และความสูง b

$$E_y = E_0 \sin\frac{\pi x}{a} e^{-j\beta_z} \tag{4.1}$$

$$H_x = -E_0 Y_w \sin\frac{\pi x}{a} e^{-j\beta_z} \tag{4.2}$$

$$H_z = jE_0 \frac{\pi Y_0}{k_0 a} \cos\frac{\pi x}{a} e^{-j\beta_z} \tag{4.3}$$

ที่ซึ่ง β คือ ค่าคงที่ของการแพร่กระจาย โดยกำหนดให้เป็น

$$\beta = \left[k_0^{\,2} - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \right]^{1/2} \tag{4.4}$$

และ Y_w คือ ค่าคอนดัคแตนซ์ในโหมดคลื่น

$$Y_w = \frac{Y_0 \beta}{k_0} \tag{4.5}$$

ความยาวคลื่นในท่อ λ_g กำหนดให้เป็น

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda_0}{\left(1 - \lambda_0^{\,2}/4a^2\right)^{1/2}} \tag{4.6}$$

กระแสพื้นผิวบนท่อนำคลื่นด้านบน J_s คือ

$$J_s = -a_y \times H = \left(-jE_0 \frac{\pi Y_0}{k_0 a} a_x \cos\frac{\pi x}{a} - E_0 Y_w \sin\frac{\pi x}{a} a_z \right) e^{-j\beta_z} \tag{4.7}$$

ในการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับเชิงเส้นในแบบต่างๆนั้น ตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบคือการป้อนกระแสหรือโวลต์เตจให้แต่ละองค์ประกอบในแบบต่างๆกัน โดยตัวแปรที่เป็นตัวควบคุมขนาดของโวลต์เตจที่ป้อนให้แต่ละร่องคือ ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อ (x_n) และความยาวเรโซแนนท์ $(2l_n)$

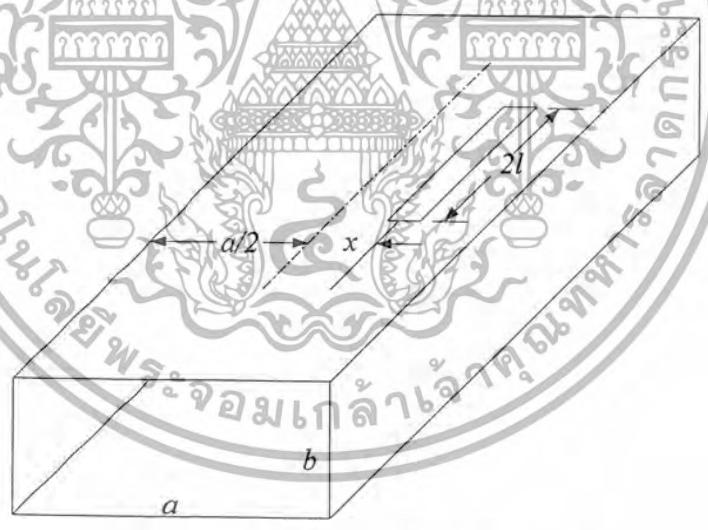
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เพื่อที่จะได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ที่ใช้งาน สำหรับในกรณีที่ไม่คิดผลของ Mutual coupling เราพิจารณาจากเงื่อนไข 2 ข้อดังนี้

1. ความยาวเรโซแนนท์ $(2l_n = \lambda_0/2)$
2. ระยะห่างจากจุดกึ่งกลางท่อนำคลื่น (x_n)

ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองค่านี้มีความสัมพันธ์กับค่าความนำแบบนอร์มอลไลซ์ของแต่ละร่อง เมื่อเราสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับเพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละร่อง (I_n) ก็จะสามารถหาความสัมพันธ์ของขนาดของสัญญาณที่ป้อนกับค่าความนำแบบนอร์มอลไลซ์ที่เรโซแนนท์ได้



รูปที่ 4.4 แสดงร่องที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่น

เนื่องจากค่าความนำแบบนอร์มอลไลซ์ของร่องมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าแอมพลิจูด (I_n) ดังนั้นเมื่อทราบการกระจายของแอมพลิจูด ก็จะสามารถหาการกระจายของค่าความนำแบบนอร์มอลไลซ์ได้ โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขการสมพงษ์ของอินพุต (Input Matching)

$$\sum_{i=1}^{n} g(x) \cong 1 \tag{4.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับเพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละร่อง (I_n) ก็สามารถหาความสัมพันธ์ของขนาดของสัญญาณที่ป้อนกับค่าความนำแบบนอร์มอลไลซ์ที่เรโซแนนท์ได้ว่า

$$g_n = KI_n^{\,2} \tag{4.9}$$

เมื่อ K เป็นค่าคงที่

สำหรับเงื่อนไขเรโซแนนท์ของแถวลำดับก็คือผลรวมของค่าความนำนอร์มอลไลซ์ที่เรโซแนนท์ (G_c) มีค่าเป็น 1 ดังรูปที่ 4.3 (ข) ซึ่งก็คือ

$$g_c = \sum_{n=1}^{N} g_n = 1 \tag{4.10}$$

และจะหาค่า K ใน (4.9) ได้จาก

$$K = \frac{1}{\sum_{n=1}^{N} I_n^{\,2}} \tag{4.11}$$

จากนั้นนำค่าความนำที่ได้มาพิจารณาร่วมกับฟังก์ชันจากกราฟผลการทดลองของ R.J.stegen ซึ่งใช้สำหรับพิจารณาระยะห่างจากกึ่งกลางท่อนำคลื่นโดยไม่ได้คิดผลของ mutual coupling ดังนี้

$$g_n = 2.09\frac{\lambda_g a}{\lambda_o b}\cos^2\frac{\pi\lambda_g}{2\lambda_g}\sin^2\frac{\pi x_n}{a} \tag{4.12}$$

จะได้สมการ

$$g_n = 1.536\sin^2\frac{\pi x_n}{a} \tag{4.13}$$

เมื่อนำค่า K ที่ได้จาก (4.11) ไปแทนใน (4.9) ก็จะทราบค่า g_n จากนั้นก็นำค่า g_n ไปแทนใน (4.15) ก็จะได้ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อ (x_n)

$$x_n = \frac{a}{\pi}\sin^{-1}\sqrt{\frac{g_n}{1.536}} \tag{4.14}$$

หรือ

$$x_n = \frac{a}{\pi}\sin^{-1}\left(0.807\sqrt{g_n}\right) \tag{4.15}$$

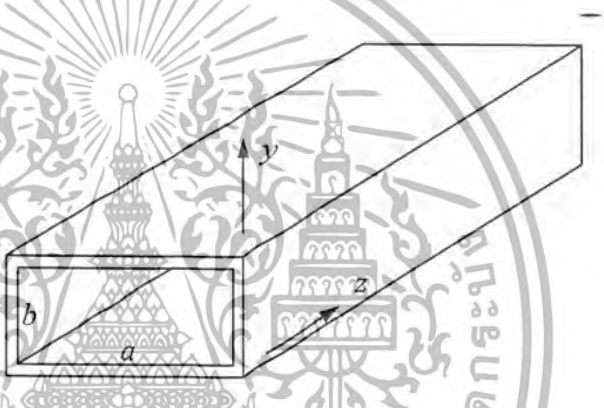
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบร่องเชิงเส้น

จากการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้กล่าวในบทที่ 2 และผลจากการคำนวณที่ได้กล่าวในตอนแรกของบท ประกอบกับคุณสมบัติของร่องสำหรับโครงงานนี้ได้ทำการออกแบบสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบเรโซแนนท์ที่มีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 6 องค์ประกอบ โดยใช้วิธีการเจาะร่องตามยาวบนผนังท่อนำคลื่น โดยสายอากาศที่สังเคราะห์เป็นการกระจายกระแสแบบพหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$

สิ่งที่ใช้ในการพิจารณาในการคำนวณมีดังนี้

1. ขนาดท่อนำคลื่นที่เหมาะสมกับความถี่ 2.45 GH_z ที่นำมาใช้งานมีขนาดหน้าตัดของท่อดังแสดงในรูป



รูปที่ 4.5 แสดงหน้าตัดของท่ออลูมิเนียมที่ใช้ในการสร้างสายอากาศ

โดย a' = ความยาวของหน้าตัดท่อนำคลื่นด้านนอก = 76.2 mm.

b' = ความกว้างของหน้าตัดท่อนำคลื่นด้านนอก = 38.4 mm.

a = ความยาวของหน้าตัดท่อนำคลื่นด้านใน = 72.2 mm.

b = ความกว้างของหน้าตัดท่อนำคลื่นด้านใน = 34.4 mm.

t = ความหนาของท่อนำคลื่น = 2 mm.

2. ความถี่ที่ออกแบบเท่ากับ 2.45 GH_z

จากความเร็วแสง $c = 3*10^8$ m/s จะได้

$\lambda_o = 122.45$ mm.

$\lambda_g = 231.03$ mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขนาดของสายอากาศ

ขนาดของสายอากาศจะกำหนดให้มีขนาด 6 องค์ประกอบ เพื่อต้องการให้สายอากาศมีอัตราการขยายประมาณ 8 dBi เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานโครงข่ายไร้สายแบบตอนนอก (Wireless LAN แบบ Outdoor)

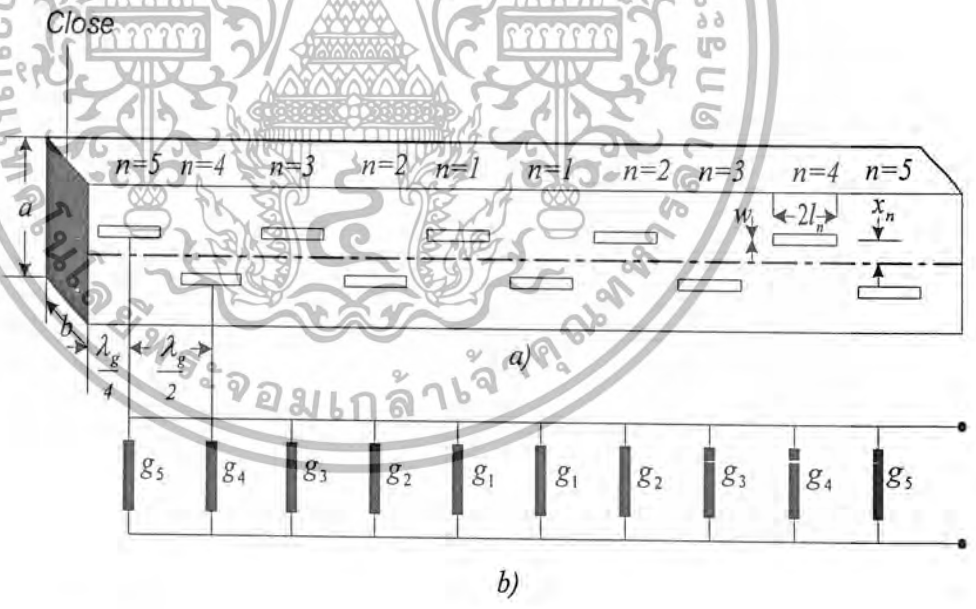
4. การออกแบบ

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

5. การสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

4.4 การสร้างสายอากาศ

สำหรับการออกแบบสร้าง เราทำการสร้างสายอากาศแบบท่อนำคลื่นเรโซแนนท์ โดยทำการเจาะร่องบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นในลักษณะขนานตามยาว โดยเจาะร่องตามที่ได้คำนวณไว้ในบทที่ 4 ดังตารางที่ 4.1 โดยไม่คิดผลของมิวชวลคัปปลิ้ง แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการเจาะร่องบนผนังท่อนำคลื่นตามแนวยาว

การเจาะร่องบนผนังท่อนำคลื่นที่ได้คำนวณไว้แล้วดังตารางที่ 4.1 และ ด้วยระยะห่างจากกึ่งกลางท่อนำคลื่น และความยาวเรโซแนนท์ นั้นจะต้องอาศัยความละเอียดมาก ดังนั้นการเจาะร่องเราจะใช้เครื่อง CNC ในการกัดชิ้นงานเพื่อให้ได้ความละเอียดและแม่นยำในการสร้างชิ้นงาน สำหรับการเจาะร่องด้วยเครื่อง CNC นั้น เราสามารถสร้างชิ้นงานที่มีความถูกต้องและรายละเอียดสูงได้ถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเจาะร่องนั้นเราจะทำการโปรแกรมเครื่อง CNC โดยการเขียน G-Code เพื่อลำดับการทำงานได้อย่างถูกต้อง และเพื่อเพิ่มความเร็วในการทำงานด้วย สำหรับตัววัสดุที่ใช้ในการเจาะร่องนั้นเราได้ใช้หัว End Mill ขนาด 4 mm.

หลังจากที่ได้ชิ้นงานแล้ว เราจะนำชิ้นงานที่ได้มาทำการเชื่อมปิดที่ปลายด้านหนึ่งของท่อโดยใช้แผ่นอะลูมิเนียมที่มีขนาดพอดีกับผนังท่อด้านนอก จากนั้นทำการเชื่อมให้ผิวชิ้นงานติดกัน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะทำการประกบติดด้วย Flange เพื่อที่นำไปต่อกับอุปกรณ์ที่ทำการป้อนสัญญาณ

จากหลักการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถนำมาเขียนตารางแสดงค่ากระแสหรือแอมพลิจูด, ค่าความนำนอร์มอลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลางท่อนำคลื่น และความยาวเรโซแนนท์ ของการกระจายกระแสแบบพหุนาม Gegenbauer โดยมีจำนวนองค์ประกอบเท่ากับ 6 องค์ประกอบได้ดังตารางที่ 4.1

แอมพลิจูด	ค่าความนำนอร์มอลไลซ์	ระยะห่างจากกึ่งกลาง	ความยาวเรโซแนนท์
$I_1 = 0.493$	$g_1 = 0.064$	$x_1 = -4.734$ mm.	$2l_1 = 61.22$ mm
$I_2 = 0.806$	$g_2 = 0.172$	$x_2 = 7.834$ mm.	$2l_2 = 61.22$ mm.
$I_3 = 1.000$	$g_3 = 0.264$	$x_3 = -9.828$ mm.	$2l_3 = 61.22$ mm.
$I_4 = 1.000$	$g_4 = 0.264$	$x_4 = 9.828$ mm.	$2l_4 = 61.22$ mm.
$I_5 = 0.806$	$g_5 = 0.172$	$x_5 = -7.834$ mm.	$2l_5 = 61.22$ mm.
$I_6 = 0.493$	$g_6 = 0.064$	$x_6 = -4.734$ mm.	$2l_6 = 61.22$ mm.

ตารางที่ 4.1 แสดงการกระจายกระแสแบบพหุนาม Gegenbauer (Gegenbauer Array) ที่ $\alpha = 1$, ค่าความนำนอร์มอลไลซ์, ระยะห่างจากกึ่งกลาง และความยาวเรโซแนนท์

สำหรับสายอากาศที่สร้างเสร็จแล้วจะนำทำการทดสอบต่อไป โดยการทดสอบสายอากาศและผลการทดสอบจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การทดสอบและผลการทดสอบ

ในการทดสอบสายอากาศนี้ความถี่ที่เรโซแนนท์จะสามารถแสดงผลในรูปของค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (Return Loss) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio : SWR) หรืออิมพีแดนซ์ของสายอากาศอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ แต่ทั้ง 3 ค่านี้ก็มีข้อเด่นในการแสดงผลที่แตกต่างกัน กล่าวคือค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับจะแสดงผลได้ทุกค่าตลอดย่านความถี่ และในการหาแถบความถี่ของสายอากาศมักจะหาจากค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (ความกว้างของแถบความถี่คือช่วงที่มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 2:1) และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศก็จะแสดงทั้งความต้านทานและค่ารีแอกแตนซ์ ซึ่งจะใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีกับค่าทางทฤษฎีและใช้ในการคำนวณเพื่อปรับจูนสายอากาศเพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์สมพงษ์กับค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ

5.1 การทดสอบสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนท์

สำหรับการทดสอบสายอากาศนั้น คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งที่ต้องนำมาพิจารณาประกอบในการทดสอบสายอากาศคือความถี่เรโซแนนท์ของสายอากาศที่นำมาทำการออกแบบและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

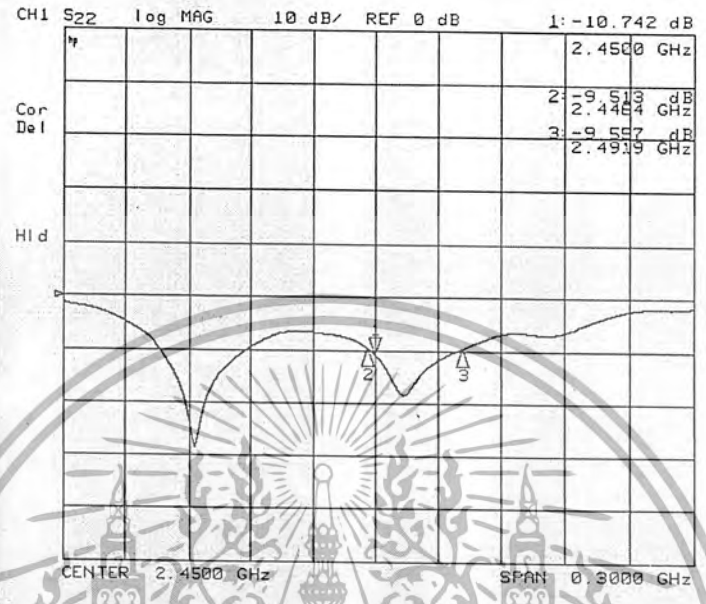
เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ทำการออกแบบไว้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่สมพงษ์กับสายนำสัญญาณ (Tranmission Line) ที่ความถี่ที่ออกแบบไว้

ถ้ามีค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศเป็นบวกแสดงว่ามีสภาพเป็นอินดักแตนซ์และถ้าค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศเป็นลบแสดงว่ามีสภาพเป็นคาปาซิแตนซ์ ดังนั้นจึงต้องจูนให้สนามไฟฟ้าในท่อนำคลื่นหลักแรงขึ้นเพื่อชดเชยสภาพอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ให้สายอากาศมีเฉพาะค่าความต้านทาน โดยการขันน็อตอะลูมิเนียมบริเวณตรงกลางผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่น ณ ตำแหน่งที่สนามไฟฟ้าแรงที่สุด (ห่างจากแผ่นปิดปากท่อนำคลื่นเป็นระยะทาง $(2n+1)\lambda_g/4$ โดยที่ $n = 0,1,2,....$ แต่ต้องอยู่ในบริเวณของร่องป้อนสัญญาณ) แม้ว่าสตับเดี่ยวจะจูนให้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับมีค่าต่ำมากได้ที่ความถี่ใกล้เคียงกับที่ออกแบบแต่ยังไม่สามารถเลื่อนความถี่เรโซแนนท์ไปที่ความถี่ที่ออกแบบได้ จึงต้องเพิ่มสตับเพื่อปรับเลื่อนความถี่อีกตัวหนึ่งจึงกลายเป็นสตับคู่ โดยสตับตัวที่สองจะอยู่ห่างจากสตับตัวแรกเป็นระยะ $\lambda_g/8$ ไปทางแผ่นปิดปลายท่อ แต่เนื่องจากการทดสอบของสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้นมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่สามารถยอมรับได้จึงไม่ต้องทำการสตับ

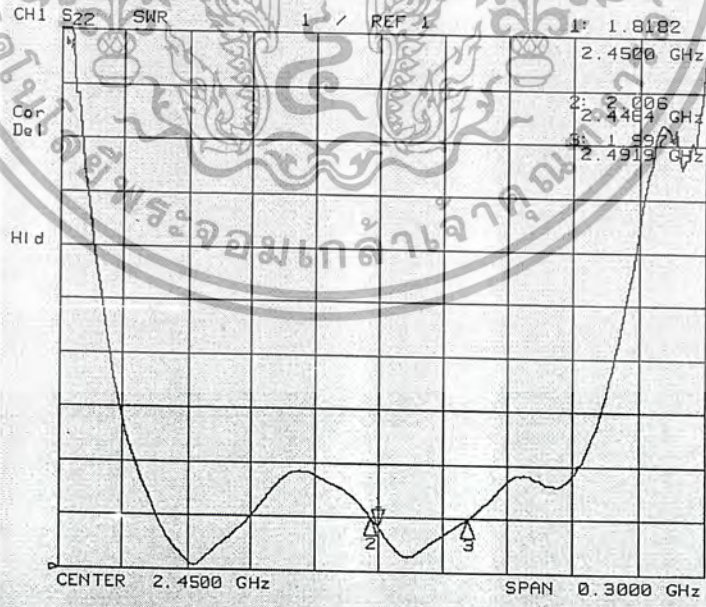
จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นการแสดงผลการทดสอบความถี่เรโซแนนท์ของสายอากาศจะทำการแสดงผลค่าทั้งสาม (ค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ,อัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์) ของสายอากาศแถวลำดับที่ทำการออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.1 สายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$

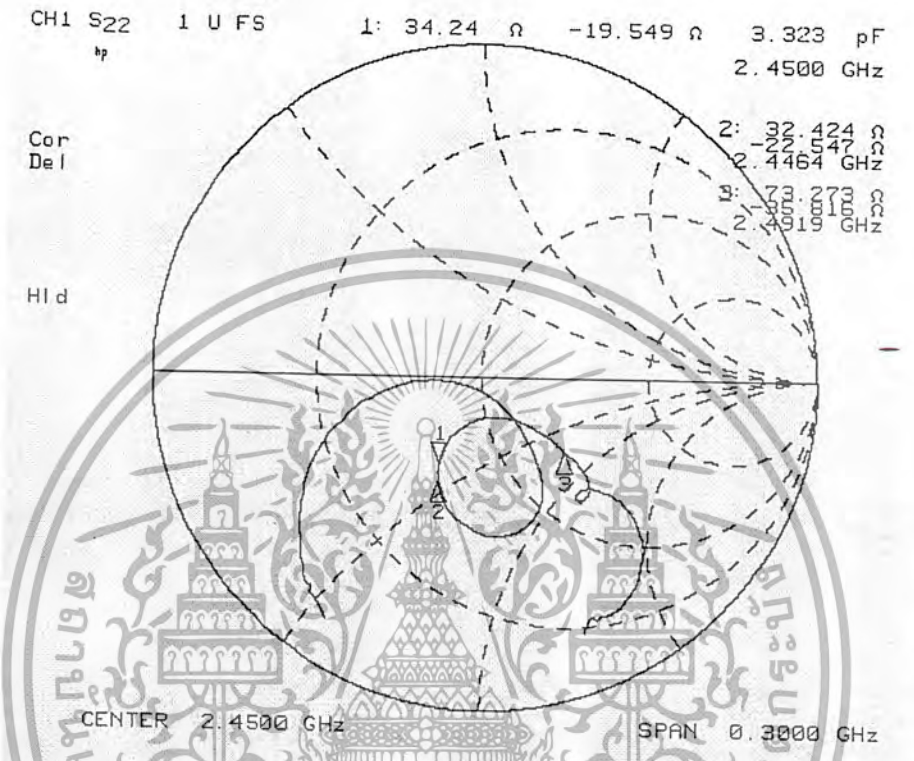


รูปที่ 5.1 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$



รูปที่ 5.2 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แสดงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่มีการกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$

จากการทดสอบสายอากาศที่ความถี่เรโซแนนท์ และเมื่อทำการปรับจูนแล้ว ได้ค่าความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -10.742 dB ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศได้เท่ากับ 1.8102 :1 ซึ่งเป็นค่ายอมรับได้ และค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้เท่ากับ 34.24-j19.59 โอห์ม แสดงว่ามีสภาพเป็นคาปาซิแตนซ์ มีแบนด์วิดท์เท่ากับ 45.5MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดสอบสายอากาศ

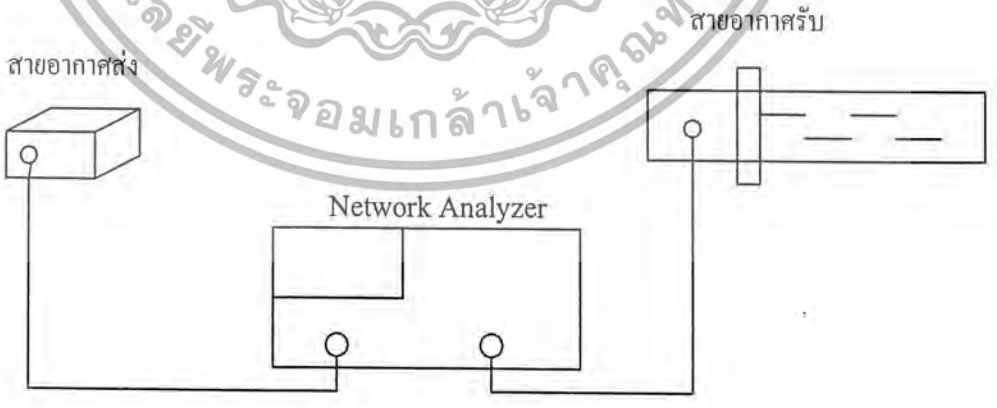
นำสายอากาศที่สร้างขึ้นวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ (Return Loss) , อิมพีแดนซ์ (Impedance) , อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio) ของสายอากาศโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย(Network Analyzer) พร้อมทั้งทำการปรับจูนค่าเพื่อให้สายอากาศสามารถตอบสนอง ณ ความถี่ที่ทำการออกแบบไว้ได้ดี ซึ่งผลจากกการวัดค่าต่างๆเหล่านี้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

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

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน

1) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)
2) สายอากาศที่ใช้ส่งซึ่งทำการรับสัญญาณมาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)
3) สายอากาศชนิดแถวลำดับที่ทำการทดสอบ โดยจะทำการติดตั้งสายอากาศอยู่กับฐานซึ่งเป็นแท่นหมุน (Turn Table) ซึ่งจะหมุนทีละ 2 องศาจนครบรอบ 360 องศา

วิธีการทดสอบทำได้โดยติดตั้งสายอากาศส่งและสายอากาศรับกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) แต่สายอากาศรับจะติดตั้งกับแท่นหมุนซึ่งจะหมุนไปทีละ 2 องศาแล้วทำการวัดระดับความแรงของสัญญาณที่ความถี่ที่ออกแบบไว้คือ 2.45 GHz ซึ่งเป็นความถี่เรโซแนนท์แล้วนำค่าที่ได้แล้วไปพล็อตกราฟเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ ซึ่งแผนผังการทดสอบสายอากาศแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

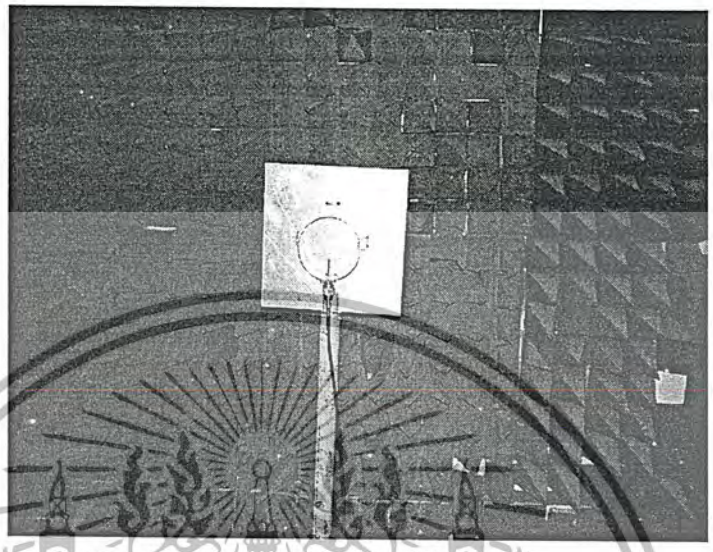


รูปที่ 5.4 แสดงแผนผังการทดสอบสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.1 สายอากาศที่ใช้ส่งสัญญาณ

เป็นสายอากาศแบบวงแหวน แสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แสดงรูปสายอากาศส่งสัญญาณ

5.2.2 สายอากาศที่ใช้ทดสอบ

เป็นสายอากาศแถวลำดับในภาครับความถี่ที่ออกแบบ 2.45 GHz โดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$ แสดงดังรูปที่ 5.6

รูปที่ 5.6 แสดงสายอากาศที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda_o} \tag{5.1}$$

เมื่อ D คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ $(D_t + D_r)$

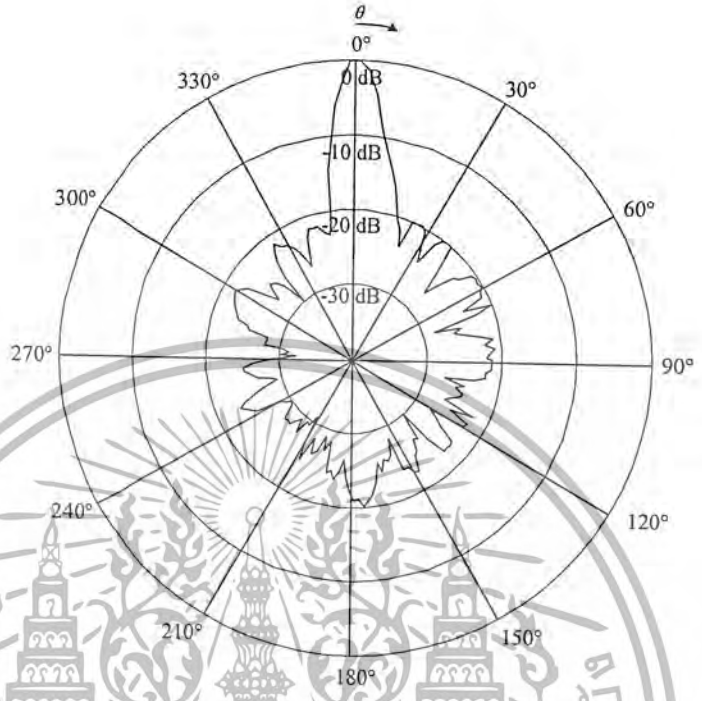
λ_o คือ ความยาวคลื่นในอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

สนามระยะไกลของสายอากาศรับและส่งที่ทำการทดสอบต้องมีระยะมากกว่า 19.763 เมตร เมื่อมิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศเท่ากับ 80.45 เซนติเมตร (มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศทดสอบวัดในแนวทแยง) ส่วนของสายอากาศส่งที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณความถี่ที่ทำการออกแบบมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ 29.56 เซนติเมตร

5.3 ผลการทดสอบ

ผลที่ได้จากการวัดค่าระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้ทุกๆ 2 องศา และนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ออกแบบ จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบของแถวลำดับซึ่งเป็นระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศแบบพหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$ ความถี่ 2.45 GHz ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.7

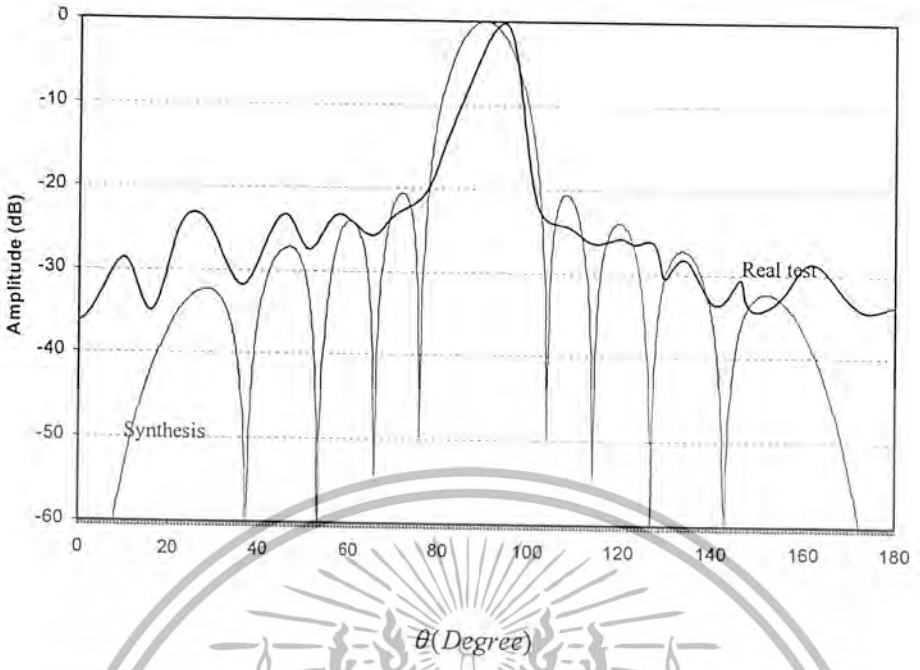
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดเชิงขั้วโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีการกระจายกรแสแบบพหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$ ที่ทำการทดสอบในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดเชิงขั้วที่แสดงดังรูปที่ 5.7 ได้นำผลที่ทดสอบที่ได้มาแสดงเปรียบเทียบกับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้คำนวณไว้แล้วในบทที่ 3 สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดมุมฉากแสดงได้ดังรูปที่ 5.8

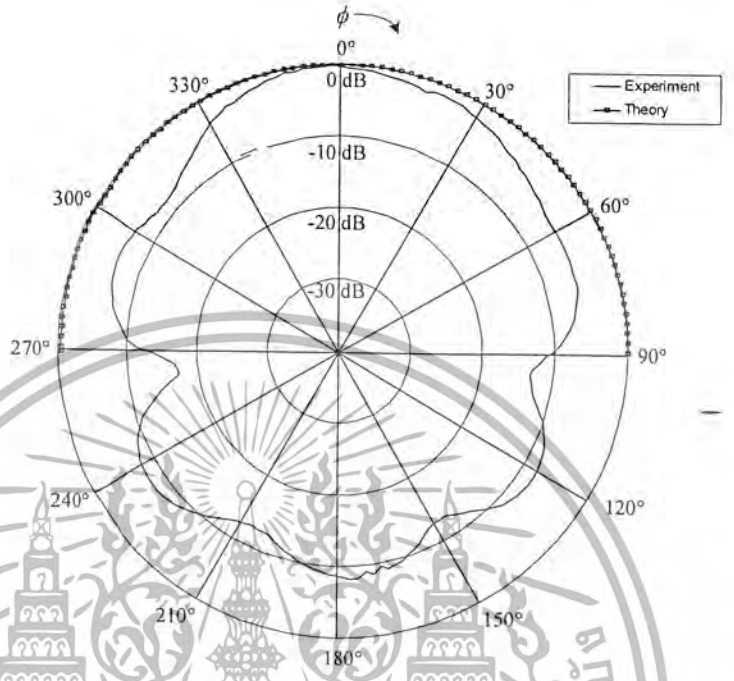
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กในพิกัดฉากโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าในพิกัดเชิงขั้วของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นแบบพหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$ พบว่าการกระจายกระแสของแถวลำดับเชิงเส้นจะไม่มีผลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) เนื่องจากในสนามไฟฟ้านั้นจำนวนองค์ประกอบเดียวเท่านั้น ดังนั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$ จึงมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันในระนาบสนามไฟฟ้า กล่าวคือสนามในระนาบสนามไฟฟ้าจะเท่ากันหมดและมีสนามเพียงด้านเดียวคือด้านที่เป็นร่องสำหรับในการคำนวณกำหนดให้ระนาบของกราวนด์ (Ground Plane) มีขนาดเป็นอนันต์ แต่สายอากาศที่ทำการทดสอบมีระนาบของกราวนด์เท่ากับความกว้างของผนังท่อผนังท่อนำคลื่นเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นผลให้แทนที่สนามจะเท่ากันกลับทำให้สนามมีค่าลดลงเรื่อยๆ และทำให้เกิดลำคลื่นด้านหลังของสายอากาศ ดังนั้นแสดงผลการทดสอบและผลจากการคำนวณอันเนื่องมาจากการคำนวณอันเนื่องมาจากการกระจายกระแสในระนาบสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังรูปที่ 5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



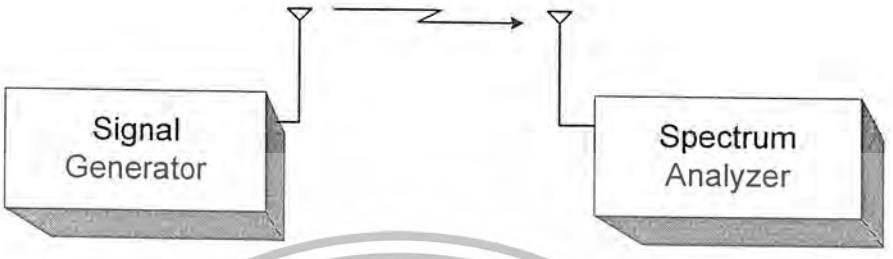
รูปที่ 5.9 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าในพิกัดเชิงขั้วโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ $\alpha = 1$

จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบ, ทำการสร้างและปรับจูนให้ผลตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ คือมีความกว้างของลำคลื่น และมีระดับลำคลื่นด้านข้างเท่ากับ 20 dB ใกล้เคียงกับผลการสังเคราะห์ในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศ (Gain)

หลังจากที่ทำการสร้างและทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแล้วขั้นตอนต่อมาคือ การทดสอบหาอัตราการขยายของสายอากาศ



รูปที่ 5.10 การต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการขยายของสายอากาศ

สูตรในการคำนวณหาอัตราการขยายของสายอากาศมีสูตรดังนี้

$$G_r\,(dBi) = P_r(dBm) - P_t\,(dBm) - G_t\,(dBi) + L_r\,(dB) + L_t\,(dB) + L_s\,(dB) \qquad (5.2)$$

โดยที่ P_r มีค่าเท่ากับ 0 dBm และการสูญเสียในอากาศมีค่าเท่ากับ

$$L_s = 20\log\left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right) \qquad (5.3)$$

ซึ่งในการทดสอบใช้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับ (R) เท่ากับ 24.3 เมตร จะได้การสูญเสียในอากาศ (L_s) มีค่าเท่ากับ 67.94 dBm โดยมีการสูญเสียในสายที่ใช้ต่อกับสายอากาศรับ (L_r) เท่ากับ 8.2 dBm และมีค่าการสูญเสียในสายที่ใช้ต่อกับสายอากาศส่ง (L_t) เท่ากับ 4.34 dBm โดยสายอากาศส่งมีค่าอัตราการขยาย (G_t) เท่ากับ 8.12 dBi และใช้กำลังในการส่ง (P_t) เท่ากับ 0dBm เมื่อทราบค่าต่างแล้วนำอุปกรณ์มาต่อตาม รูปที่ 5.10 แล้วทำการวัดค่ากำลังที่รับได้ (P_R) เท่ากับ -65.31 dBm แล้วนำไปคำนวณโดยใช้สมการที่ (5.2) ก็จะได้อัตราการขยายของสายอากาศเท่ากับ 7.05 dBi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
วิจารณ์และบทสรุป

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการสังเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับแบบร่องบนผนังท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีการพลาไรซ์แบบเชิงเส้น โดยคุณสมบัติของสายอากาศที่พิจารณาได้แก่

1. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น
2. การกระจายกระแส
3. ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง
4. ความกว้างของลำคลื่นที่เกิดนัลแรก
5. ค่าการชี้ทิศทาง
6. ประสิทธิภาพลำคลื่น

สำหรับโครงงานนี้พิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 6 องค์ประกอบ ที่มีระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบเท่ากัน และเฟสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบมีเฟสเดียวกัน โดยมีวิธีการควบคุมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังนี้คือ

1. การจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับเป็นเส้นตรง (ที่มีจำนวนองค์ประกอบตั้งแต่ 2 องค์ประกอบ จนถึง 20 องค์ประกอบ)
2. ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น $\lambda_g/2$
3. ขนาดของกระแสที่ป้อนให้แต่ละองค์ประกอบมีลักษณะแตกต่างกัน 2 แบบดังนี้
   - การกระจายกระแสแบบสม่ำเสมอ
   - การกระจายกระแสแบบไม่สม่ำเสมอโดยใช้พหุนาม Gegenbauer

สำหรับการกระจายกระแสโดยใช้พหุนาม Gegenbauer ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 นั้นสามารถกำหนดระดับลำคลื่นด้านข้างได้ โดยปริญญานิพนธ์นี้เราทำการกำหนดระดับลำคลื่นด้านข้างให้มีระดับเท่ากับ 20 dB (Side Lobe Level : SLL = 20 dB)

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

จากคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ได้เลือกทำการออกแบบสร้างสายอากาแถวลำดับเชิงเส้นที่มีจำนวนองค์ประกอบ 6 องค์ประกอบโดยเลือกออกแบบสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

สนามลัพธ์ที่ได้ของแถวลำดับมีค่าเท่ากับสนามขององค์ประกอบเดี่ยวที่วางที่จุดกำเนิดคูณด้วยตัวประกอบ ที่เรียกว่าตัวประกอบแถวลำดับ โดยที่จะใช้องค์ประกอบของแถวลำดับเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิกก่อนเพื่อความง่ายในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการวิเคราะห์ที่ผ่านมา ได้ทำการคำนวณและออกแบบในกรณีที่สายอากาศมีองค์ประกอบเป็นร่อง โดยเริ่มจากการวิเคราะห์คุณสมบัติร่องเดี่ยว พบว่าร่องเดี่ยวมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่กว้างมากและมีค่าการชี้ทิศทางต่ำ ดังนั้นเราจึงนำร่องมาประกอบกันขึ้นเป็นแถวลำดับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของร่องเดี่ยวด้วยตัวประกอบแถวลำดับ ต่อจากนั้นก็ได้แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่ส่งผ่านคลื่นโหมด TE_{10} โดยพิจารณาการจัดวางตำแหน่งของร่องบนผนังท่อนำคลื่นแบบท่อนำคลื่นเรโซแนนท์ (Resonant Slotted Waveguide) ซึ่งท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมนี้เป็นทั้งตัวป้อนสัญญาณให้แก่ร่องและเป็นโครงสร้างพื้นฐานของตัวสายอากาศแบบร่องเองด้วย โดยไม่คิดผลของค่ามิวชวลคัปปลิ้ง และก็จะได้สมการหลักที่ใช้ในการออกแบบแถวลำดับแบบเรโซแนนท์ของร่องที่แพร่กระจายคลื่นบนผนังท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ในการออกแบบได้กำหนดให้มีจำนวนองค์ประกอบ 6 องค์ประกอบ ลำดับถัดจากนั้นแสดงการวิเคราะห์ระบบการป้อนสัญญาณให้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมด้วยร่องตามยาวบนผนังด้านกว้างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมในลักษณะของแถวลำดับแบบเรโซแนนท์

จากการวิเคราะห์วิธีการออกแบบที่ได้มา ก็จะนำมาใช้ออกแบบเพื่อคำนวณหาขนาดและตำแหน่งของแต่ละร่องในแถวลำดับเชิงเส้นโดยกำหนดให้การกระจายกรแสที่ป้อนให้แต่ละร่องเป็นแบบพหุนาม Gegenbauer จากนั้นก็นำข้อมูลในตารางไปสร้างสายอากาศ

ข้อจำกัดในการสร้างสายอากาศ

หลังจากที่ได้ผลการออกแบบสายอากาศ ในขั้นตอนถัดไปซึ่งมีความสำคัญไม่น้อยกว่าการคำนวณและการออกแบบ ก็คือการสร้างชิ้นงานเพราะถึงแม้ว่าการคำนวณจะทำได้ดีหรือละเอียดเพียงใด แต่ถ้าการสร้างชิ้นงานทำได้ไม่ดีแล้วการคำนวณที่ทำมาก็จะไม่มีความหมายอะไรเลย ดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้จึงได้ใช้เครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerically Control : CNC Milling Machine) ในการสร้างชิ้นงานทั้งหมดซึ่งเครื่องกัดนี้สามารถให้ความละเอียดได้ถึง $\pm 1\ \mu m$ แต่ข้อจำกัดของความละเอียดจะไปสูญเสียที่การตั้งจุดศูนย์ (Zero Point) ของชิ้นงานเพื่อเป็นจุดอ้างอิงเพราะในทางปฏิบัติการตั้งจุดศูนย์ชิ้นงานจะต้องตั้งในระบบหัตถกิจ (Manual) อีกปัจจัยหนึ่งที่ลดความละเอียดในการสร้างคือขนาดของดอกสว่านที่ค่อยๆเปลี่ยนไปเมื่อใช้งานไปนานๆ และถึงแม้ว่าจะสามารถเจาะร่องได้แม่นยำก็ตาม แต่ในการประกอบแผ่นอะลูมิเนียมที่ปิดปลายท่อเข้ากับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม และการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณก็ยังมีโอกาสที่จะทำให้เกิดความสูญเสียความละเอียดในการสร้างอีก สำหรับการประกอบท่อนำคลื่นนั้นมีด้วยกันหลายวิธีคือ

1. การเชื่อมทางความร้อน (Welding) ซึ่งแบ่งเป็นการเชื่อมด้วยเลเซอร์และการเชื่อมด้วยอิเล็กตรอน ซึ่งการเชื่อมด้วยอิเล็กตรอนเหมาะที่จะทำการเชื่อมสำหรับสายอากาศที่ทำด้วยแมกนีเซียม

2. การบัดกรีอะลูมิเนียม (Aluminum) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียคือมักจะมีสิ่งตกค้าง (ตัวเชื่อมประสาน) ภายในตัวสายอากาศหลังจากการบัดกรี เทคนิคการบัดกรีโดยไม่ต้องอาศัยตัวเชื่อมประสาน (Fluxless-Brazing Technique) สามารถทำได้ภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับปริญญานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการเชื่อมบัดกรีท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมโดยใช้ตะกั่วบัดกรี เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากในการประกอบแผ่นอะลูมิเนียมที่ปิดปลายเข้ากับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม แต่การประกอบสายอากาศในลักษณะนี้จะมีผลที่ทำให้เกิดสิ่งตกค้างอันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียของกำลังงาน และเป็นผลให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลงเนื่องมาจากความไม่แนบสนิทกัน ไม่ว่าจะเป็นที่ด้านปลายท่อหรือขณะที่ทำการต่อท่อเข้ากับตัวป้อนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณและสังเคราะห์

1. แสดงโปรแกรมการเลือกจำนวนองค์ประกอบและค่า α ของพหุนาม Gegenbauer จะใช้โปรแกรม Mathmatica 4

```
n := 9
alp := 1.0
GegenbauerC[n, alp ,x]
Solve[∂x GegenbauerC[n, alp, x] == 0,x]
```

$$0. + 10.x - 160.x^3 + 672.x^5 - 1024.x^7 + 512.x^9$$

```
{{x → 0.900068},{x → 0.714262},{x → 0.458578},{x → 0.158015},{x → 0.158015},
{x → 0.458578},{x → 0.714262},{x → 0.900068}}
```

```
n =9
Expand[s = Sum [Binomial[n , k]Cos[x]^k(1-Cos[x]^2)
^((n-k)/2)Cos[(n-k)Pi/2],{k,0,n}]]
```

9

$$9\cos[x] - 120\cos[x]^3 + 432\cos[x]^5 - 576\cos[x]^7 + 256\cos[x]^9$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ใช้โปรแกรม Mathcad 2001 ในการคำนวณคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระตุ้นของกระแส

$\theta := 10^{-99}\cdot deg, 0.2deg .. 180deg \quad \lambda := 1 \quad d := \frac{\lambda}{2} \quad u(\theta) := \frac{\pi d}{\lambda}\cos(\theta)$

Element = 10 $\quad Rn := 20 \quad Ro := 10^{\frac{Rn}{20}} \quad n := 9 \quad N := 5$

$CPx := (2.4893410000000\ 2.4893410000000\ 7.687681000000\ 800800\ 20020)$

$P(x) := CPx_{0,0}\cdot x^9 - CPx_{0,1}\cdot x^7 + CPx_{0,2}\cdot x^5 - CPx_{0,3}\cdot x^3 + CPx_{0,4}\cdot x$

$dP(x) := CPx_{0,0}\cdot 9\cdot x^8 - CPx_{0,1}\cdot 7\cdot x^6 + CPx_{0,2}\cdot 5\cdot x^4 - CPx_{0,3}\cdot 3\cdot x^2 + CPx_{0,4}$

$x := 1 \quad xn := root[(dP(x)), x] \quad xn = 0.6678$

$yn := |P(xn)| \quad yn = 20982.61709$

$xm := root[P(x) - (Ro\cdot yn), x] \quad xm = 0.794$

$I_5 := \frac{CPx_{0,0}\cdot xm^9}{256}$

$I_4 := \frac{-CPx_{0,1}\cdot xm^7 + 576I_5}{64}$

$I_3 := \frac{CPx_{0,2}\cdot xm^5 + 112\cdot I_4 - 432I_5}{16}$

$I_2 := \frac{-CPx_{0,3}\cdot xm^3 + 20\cdot I_3 - 56I_4 + 120I_5}{4}$

$I_1 := CPx_{0,4}\cdot xm + 3I_2 - 5I_3 + 7I_4 - 9I_5$

$I10element := (I_1\ I_2\ I_3\ I_4\ I_5)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้โปรแกรม Mathcad 2001 ในการคำนวณหาค่าคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น

$$AF(\theta) := \sum_{n=1}^{N} I_n \cos[(2n-1)\cdot u(\theta)]$$

$$E(\theta) := \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cdot\cos(\theta)\right)}{\sin(\theta)}$$

$$Et(\theta) := AF(\theta)\cdot E(\theta)$$

$$PAF(x) := \left[\left(I_1 - 3\cdot I_2 + 5\cdot I_3 - 7\cdot I_4 + 9\cdot I_5\right)\cdot x + \left(4I_2 - 20I_3 + 56I_4 - 120I_5\right)\cdot x^3 + \left(-112I_4 + 16I_3 + 432I_5\right)\cdot x^5 + \left(64I_4 - 576I_5\right)\cdot x^7 + \left(256I_5\right)\cdot x^9\right]$$

$$Do := \frac{2\left(\left|AF\left(\frac{\pi}{2}\right)\right|\right)^2}{\int_0^{\pi}\left(|AF(\theta)|\right)^2\sin(\theta)\,d\theta}$$

$$Do\_dB := 10\log(Do)$$

$$\theta 1 := \frac{\operatorname{acos}\left[\frac{2}{\pi}\cdot\operatorname{acos}\left[\operatorname{root}[(PAF(x)),x]\right]\right]}{deg}$$

$$FNBW := (90 - \theta 1)\cdot 2$$

$$HPBW := (90 - \theta 3dB)\cdot 2$$

$$BE := \frac{\int_{\theta 1\cdot deg}^{\frac{\pi}{2}}\left(|AF(\theta)|\right)^2\sin(\theta)\,d\theta}{\int_0^{\frac{\pi}{2}}\left(|AF(\theta)|\right)^2\sin(\theta)\,d\theta}$$

$$BE\% := 100BE$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้หากไม่ได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายท่าน ขอบพระคุณ

ผศ.ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ขอบคุณ

นาย สัญชัย เอียดปราบ นักศึกษาปริญญาโท

ตลอดจนนักศึกษาปริญญาเอก ปริญญาโทท่านอื่นๆ ที่คอยให้คำแนะนำดูแลเอาใจใส่การทำโครงงานนี้เป็นอย่างดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง ขอขอบคุณสำหรับกำลังใจและคำแนะนำเกี่ยวกับการแก้ปัญหาต่างๆ และความช่วยเหลือทุกอย่างระหว่างการทำโครงงานของเพื่อนๆทุกคน และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ต่างๆให้แก่ผู้จัดทำ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความสำคัญกับการศึกษาแก่ผู้จัดทำและให้การสนับสนุนเอาใจใส่ดูแลด้วยดีเสมอมา รวมทั้งกำลังใจอันยิ่งใหญ่อย่างหาที่เปรียบมิได้

กิจติศักดิ์ พลตื้อ

อภิลักษณ์ คำคุณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] C.A. Balanis, *Antenna Theory analysis and Design*, 2nd.Ed, New York.John and sons, 1997, ch.7.

[2] H.jasik, "Fundamentals of Antenna," 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] 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.

[5] S. Eardprab, A. Kruekaew,C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh," Generalized array Pattern Synthesis using Ultra spherical Polynommial,"Proceedings of First Electical Engineering/Electronics, Computer,Telecommunications, and Information technology (ECTI) annual Conference, pp.79-82

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้