

การวิเคราะห์สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก
THE ANALYSIS OF A PROBE EXCITED RECTANGULAR RING ANTENNA

สุธาสินี ละมุลตรี
SUTHASINEE LAMULTREE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-809-0

การวิเคราะห์สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

THE ANALYSIS OF A PROBE EXCITED RECTANGULAR RING ANTENNA



สุธาสินี ละมุลตรี

SUTHASINEE LAMULTREE

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

ISBN 974-324-809-9

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 48894
วัน, เดือน, ปี 12 ม.ค. 2547

.b.....
.i.....

THE ANALYSIS OF A PROBE EXCITED RECTANGULAR RING ANTENNA

SUTHASINEE LAMULTREE

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-809-9

COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก
THE ANALYSIS OF A PROBE EXCITED RECTANGULAR RING
ANTENNA

ชื่อนักศึกษา นางสาวสุชาสินี ละมุลตรี

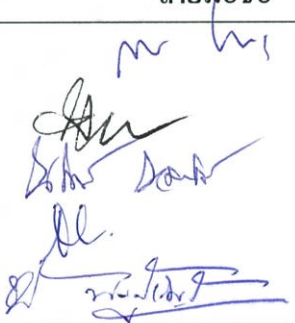
รหัสประจำตัว 44061730

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.สมยศ	จุณณะปิยะ	
รศ.ดร. โมไนย	ไกรฤกษ์	
รศ.ณรงค์	เหมกรณ์	
รศ.ดร.สมผล	โกศลวิตร	
ดร.ชวรงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 30 กันยายน 2546 เวลา 10.30-12.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (E12-404)


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัทธู)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....15.....เดือน.....๑๒.....พ.ศ.....๒๕๔๖.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก
นักศึกษา	นางสาวสุธาณี ละมุลตรี
รหัสประจำตัว	44061730
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร. สมผล โกศลวิตร

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากล้อมรอบโพรบที่ป้อนสัญญาณ สายอากาศชนิดนี้จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง และจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเมื่อนำมาวางไว้เหนือตัวสะท้อน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาทั้งกรณีที่เป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและแบบทิศทางเดียว โดยในการพิจารณาขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้นอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ยอมให้เฉพาะคลื่นในโหมดเป็นใหญ่เท่านั้นที่สามารถเดินทางผ่านได้ ในการวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นที่เกิดจากวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ในขั้นแรกจะใช้วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ในการพิจารณานิพจน์ของสนาม ซึ่งวิธีการนี้จะพิจารณาให้คลื่นแพร่กระจายจากช่องเปิดของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่านั้น จากนั้นจะพิจารณาผลที่เกิดจากโพรบป้อนสัญญาณร่วมด้วยโดยใช้ฟังก์ชันของกรีนชนิดไดโอดิก ในการวิเคราะห์จะพิจารณาคูณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศ คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย และเพื่อพิสูจน์ผลที่ได้จากการคำนวณได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากล้อมรอบโพรบป้อนสัญญาณขึ้นเพื่อทำการทดสอบและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วย ในการประยุกต์ใช้งานของสายอากาศแบบสองทิศทางนั้นเหมาะสำหรับใช้ในระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ที่มีบริเวณให้บริการในลักษณะพื้นที่ที่แคบและตามแนวยาว เช่นบนทางด่วน ในอุโมงค์ หรือ ทางเดินระหว่างตึก สำหรับสายอากาศแบบทิศทางเดียวนั้นเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด เช่น ใช้เป็นสายอากาศที่สถานีฐานในระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้ติดตั้งในหน่วยงาน หรือ ระหว่างตึก เป็นต้น

Thesis Title	The Analysis of a Probe Excited Rectangular Ring Antenna
Student	Miss Suthasinee Lamultree
Student ID.	44061730
Degree	Master of Engineering
Programme	Telecommunication Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Dr. Chuwong Phongcharoenpanich
Co-advisor	Assoc. Prof. Dr. Sompol Kosulvit

ABSTRACT

This thesis presents a probe excited rectangular ring antenna. This antenna provides the bidirectional beam pattern. The unidirectional beam can be made up by placing the probe excited rectangular ring above the reflector. The analysis of both bidirectional antenna and unidirectional antenna by using rectangular ring are included in this thesis. A choice of a ring width and ring height are chosen to achieve the condition that only the dominant mode can be propagated. The radiation field of two apertures of the rectangular ring is first derived from the vector potential approach. Then, the effect of a linear probe is incorporately calculated with the rectangular ring by the dyadic Green's function technique. The numerical results of the radiation performances such as the radiation pattern, beamwidth, maximum directivity, polarization and impedance of the antenna are also investigated. In order to verify the calculation, the prototype of the probe excited rectangular ring are designed and fabricated. The measured and calculated results are afterwards compared. The bidirectional antenna is suitable for installing as the base station of the mobile communication of the long and narrow path service area, such as the high way, tunnel, and corridor. The unidirectional antenna is very useful for the point to point communication, for example placing for bridging outdoor for wireless communication.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ผู้ซึ่งให้โอกาสในหลายๆ อย่างทางการศึกษา อบรมสั่งสอน แนะนำ และช่วยเหลืออย่างอดทนและต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มต้นการเป็นนักศึกษาทดลองวิจัยเรื่อยมา เพื่อให้ผ่านพ้นปัญหาและอุปสรรคต่างๆ ได้ นอกจากนี้ยังได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก รศ.ดร. สมพล โกศลวิตร และ รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ สำหรับความรู้ความเข้าใจ และ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย ขอขอบพระคุณ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ดร.คมศักดิ์ เมฆสมุทร และ อ.จิตติพงษ์ เลิศวิริยะประภา ที่ให้คำแนะนำทางด้านเทคนิค และกำลังใจในการแก้ปัญหาเมื่อยังเป็น นักศึกษาทดลองวิจัย

ขอขอบคุณ คุณไพศาล งามจรรยาภรณ์ คุณดวงอาทิตย์ ศรีมูล คุณปาณิสสา แก้วสวัสดิ์ นักศึกษาระดับปริญญาเอกในห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สาย และ คุณอาณัติ เหมือนชู สำหรับความช่วยเหลือ คำแนะนำ และเทคนิคต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย ขอขอบคุณ คุณไพโรจน์ วุ่นชุม และ คุณฉัตรชัย บุรณะคุณาภรณ์ สำหรับข้อเสนอแนะ และการอภิปรายปัญหาที่เป็นประโยชน์ ขอขอบคุณ คุณศาสตรา ขุนพลพิทักษ์ คุณพงษ์เพชร วีระสู คุณอมรเทพ สุขปาน คุณประสิทธิ์ อินทร์ทอง และ คุณสุวรรณ จันทร์อินทร์ สำหรับความช่วยเหลือในการทดสอบ ชิ้นงาน ขอขอบคุณ คุณจิตินันท์ โอวาท สำหรับความช่วยเหลือในการจัดเรียงรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และความสะดวกในการจัดการ นอกจากนี้ ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สายทุกท่านสำหรับคำแนะนำ และข้อคิดระหว่างร่วมอภิปราย และความสนุกสนานในการทำกิจกรรมร่วมกัน

สุดท้าย คุณงามความดีที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบให้แก่บิดา มารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัวสำหรับการสนับสนุนทางการศึกษา ความอบอุ่น ความเข้าใจ และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุธาสินี ละมุลตรี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 โครงสร้างของสายอากาศ.....	6
2.3 หลักการพิจารณาค่าความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	7
2.4 การแพร่กระจายคลื่น.....	8
2.4.1 วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์.....	9
2.4.2 วิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอติก.....	15
2.5 ทฤษฎีเงา.....	33
2.6 สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่วางเหนือตัวสะท้อน.....	36
2.7 สายอากาศแฉวลำดับ.....	38
2.8 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขฐาน 2 หรือ NEC 2.....	48
2.8.1 วิธีการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า เชิงเลขฐานที่ 2.....	49
2.9 คุณลักษณะเชิงการโพลาริซั.....	51
2.10 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า.....	53
2.11 สรุป.....	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ผลการวิเคราะห์สายอากาศแบบสองทิศทางโดยโพรบกระตุ้น	57
วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	
3.1 บทนำ	57
3.2 คุณลักษณะของสายอากาศองค์ประกอบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	57
3.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation pattern)	58
3.2.2 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด	62
3.2.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	64
3.2.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรก	65
3.2.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ	66
3.2.6 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์	69
3.2.7 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์	73
3.3 คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	78
3.3.1 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของโพรบกระตุ้น	78
วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	
3.3.2 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้น	99
วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	
3.4 บทสรุป	103
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์สายอากาศแบบทิศทางเดียว	105
4.1 บทนำ	105
4.2 คุณลักษณะของสายอากาศองค์ประกอบของโพรบกระตุ้น	105
วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	
4.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation pattern)	106
4.2.2 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด	112
4.2.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	113
4.2.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรก	114
4.2.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	115
4.2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ	116

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.7 คุณลักษณะเชิงการโพลาริซ์	117
4.3 คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับ โพรบกระตุ้นวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน	122
4.3.1 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของ โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน	123
4.3.2 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของ โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน	150
4.4 บทสรุป	163
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบสายอากาศ	165
5.1 บทนำ	165
5.2 การสร้างและการทดสอบสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	165
5.2.1 การสร้างและการออกแบบสายอากาศ	165
5.2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	167
5.2.3 ค่าอัตราขยายของสายอากาศ	174
5.2.4 คุณลักษณะเชิงการโพลาริซ์ของสายอากาศ	176
5.2.5 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	177
5.3 การสร้างและการทดสอบสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน	182
5.3.1 การสร้างและการออกแบบสายอากาศ	182
5.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	184
5.3.3 ค่าอัตราขยายของสายอากาศ	192
5.3.4 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	193
5.4 สรุป	197
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	199
6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม	199
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา	201

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	202
ภาคผนวก.....	204
ภาคผนวก ก โหมคในท่อน้ำคูลิ้นสี่เหลี่ยม.....	205
ภาคผนวก ข ฟังก์ชันไดแอดิก.....	219
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	227
ประวัติผู้เขียน.....	228

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	100
ตารางที่ 4.1	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.3λ	152
ตารางที่ 4.2	สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.3λ ในระนาบสนามไฟฟ้า	153
ตารางที่ 4.3	สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.3λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก	154
ตารางที่ 4.4	ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.7λ	155
ตารางที่ 4.5	สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.7λ ในระนาบสนามไฟฟ้า	156
ตารางที่ 4.6	สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.7λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก	157
ตารางที่ 5.1	ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่น้อยที่สุด (ที่สนามระยะไกล) ในแต่ละกรณี	169
ตารางที่ 5.2	ค่าอัตราการขยายและประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	175
ตารางที่ 5.3	สรุปคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	182
ตารางที่ 5.4	ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับในการทดสอบและระยะสนามระยะไกล กรณีของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน	185

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 5.5 ค่าอัตราการขยาย และประสิทธิภาพของสายอากาศโพรบกระตุ้น 190	190
วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนแบบระนาบ	
ตารางที่ 5.6 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์และช่วงกว้างแถบความถี่ของสายอากาศ..... 195	195
โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน	

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของสายอากาศ	4
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก	6
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตัดของโหมดใดๆ ต่อโหมด TE_{10} ท่อนำคลื่น สี่เหลี่ยมมุมฉาก	8
รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมการหาค่าตอบของสนามจากแหล่งกำเนิด	8
รูปที่ 2.4 ตำแหน่งของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากสำหรับการวิเคราะห์	9
รูปที่ 2.5 การกระจายสนามที่ช่องเปิด	9
รูปที่ 2.6 แบบจำลองสมมูลของช่องเปิดท่อนำคลื่นบนระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์	10
รูปที่ 2.7 การแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดที่สังเกตที่สนามระยะไกล	13
รูปที่ 2.8 โครงสร้างปัญหาที่เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม	17
รูปที่ 2.9 ลักษณะการกระจายกระแสของโพรบเชิงไฟฟ้า	23
รูปที่ 2.10 ตำแหน่งและลักษณะของโพรบเชิงไฟฟ้า	23
รูปที่ 2.11 สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์วางเหนือระนาบตัวนำขนาดอนันต์	34
รูปที่ 2.12 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กพร้อมด้วยแหล่งกำเนิดเสมือน	35
รูปที่ 2.13 โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากวางเหนือตัวสะท้อน	36
รูปที่ 2.14 แหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าตามแนวอนเหนือระนาบตัวนำขนาดอนันต์	38
รูปที่ 2.15 สายอากาศไอโซโทรปิกที่จัดวางตามแนวแกน z	39
รูปที่ 2.16 สายอากาศไอโซโทรปิกจำนวน N องค์ประกอบที่จัดวางตามแนวแกน z	40
รูปที่ 2.17 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคี่	42
รูปที่ 2.18 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคู่	43
รูปที่ 2.19 การจัดวางสายอากาศแถวลำดับจำนวน M องค์ประกอบตามแนวแกน x	44
รูปที่ 2.20 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ	47
รูปที่ 2.21 การจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้น และแถวลำดับเชิงระนาบของสายอากาศ	48
รูปที่ 2.22 การจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้น และแถวลำดับเชิงระนาบของสายอากาศ โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน (มองจากด้านบน)	48
รูปที่ 2.23 การโพลาไรซ์ที่มีลักษณะเอียงจากแกนอ้างอิง	52
รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลของสายอากาศ	54

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสามมิติ เมื่อนำขนาดความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (c) เท่ากับ 0.25λ	59
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนขนาดความยาว วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (c) โดยวิธีฟังก์ชันศັกย์เวกเตอร์	59
รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนขนาดความยาว วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (c) โดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอติก	60
รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนขนาดความยาว วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยพิจารณาผลจากการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด และรวมผลของโพรบร่วมด้วย	61
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อพิจารณาจากวิธีต่าง ๆ เปรียบเทียบกัน	62
รูปที่ 3.6 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	62
รูปที่ 3.7 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของความยาว วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	64
รูปที่ 3.8 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรกที่เป็นฟังก์ชันของความยาว วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	66
รูปที่ 3.9 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความยาว วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	67
รูปที่ 3.10 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันความถี่	68
รูปที่ 3.11 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ	69
รูปที่ 3.12 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก โดยใช้วิธีฟังก์ชันศັกย์เวกเตอร์	69
รูปที่ 3.13 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก โดยใช้ฟังก์ชันกรีนไดแอติก	70
รูปที่ 3.14 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก โดยใช้โปรแกรม NEC2	71
รูปที่ 3.15 การ โพลาริซซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่	72

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนความยาว ของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก	74
รูปที่ 3.17 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อคำนวณ โดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก	75
รูปที่ 3.18 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉากที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ โดยโปรแกรม NEC2	76
รูปที่ 3.19 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ โดยโปรแกรม NEC2	77
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับตามแนวแกน x	79
รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับตามแนวแกน y	80
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับตามแนวแกน z	80
รูปที่ 3.23 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x	82
รูปที่ 3.24 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y	82
รูปที่ 3.25 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z	83
รูปที่ 3.26 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x	84
รูปที่ 3.27 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y	85
รูปที่ 3.28 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z	86
รูปที่ 3.29 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะ ห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x	86
รูปที่ 3.30 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะ ห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y	87
รูปที่ 3.31 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะ ห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z	88

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.32 ค่าอัตราส่วนลาคัสสันหลักต่อลาคัสสันย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะ ห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x	89
รูปที่ 3.33 ค่าอัตราส่วนลาคัสสันหลักต่อลาคัสสันย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะ ห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y	90
รูปที่ 3.34 ค่าอัตราส่วนลาคัสสันหลักต่อลาคัสสันย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะ ห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z	90
รูปที่ 3.35 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่าง สายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x	91
รูปที่ 3.36 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่าง สายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y	92
รูปที่ 3.37 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่าง สายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z	92
รูปที่ 3.38 ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	93
รูปที่ 3.39 ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอติก	94
รูปที่ 3.40 ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม NEC2	95
รูปที่ 3.41 ค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	96
รูปที่ 3.42 ค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันไดแอติก	97
รูปที่ 3.43 ค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม NEC2	98
รูปที่ 3.44 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ ของโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	99
รูปที่ 3.45 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	101
รูปที่ 3.46 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอติก	102
รูปที่ 3.47 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม NEC2	102
รูปที่ 4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสามมิติ	106
รูปที่ 4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่าง ระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน โดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	107
รูปที่ 4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เปลี่ยนระยะห่างระหว่าง สายอากาศและตัวสะท้อน โดยวิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอติก	107

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่เปรียบเทียบกันระหว่าง กรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด และพิจารณาผลที่เกิดจาก ตัวสะท้อนขนาดจำกัด เมื่อ $h = 0.3\lambda$	108
รูปที่ 4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่เปรียบเทียบกันระหว่าง กรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด และพิจารณาผลที่เกิดจาก ตัวสะท้อนขนาดจำกัด เมื่อ $h = 0.7\lambda$	108
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่เปรียบเทียบขนาดของ ตัวสะท้อน เมื่อ $h = 0.3\lambda$	110
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่เปรียบเทียบขนาด ของตัวสะท้อน เมื่อ $h = 0.7\lambda$	110
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จาก การคำนวณวิธีต่างๆ $h = 0.3\lambda$	111
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จาก การคำนวณวิธีต่างๆ $h = 0.7\lambda$	111
รูปที่ 4.10 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ และตัวสะท้อน	112
รูปที่ 4.11 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน	113
รูปที่ 4.12 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรกที่ฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน	115
รูปที่ 4.13 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่ฟังก์ชันของระยะ ห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน	116
รูปที่ 4.14 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่าง สายอากาศและตัวสะท้อน	117
รูปที่ 4.15 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.3λ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	118

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.3λ โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก	118
รูปที่ 4.17 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.3λ โดยใช้โปรแกรม NEC2	119
รูปที่ 4.18 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.7λ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	120
รูปที่ 4.19 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.7λ โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก	120
รูปที่ 4.20 คุณลักษณะเชิงการ โพลาริซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.7λ โดยใช้โปรแกรม NEC2	121
รูปที่ 4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของ โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน x โดย $h = 0.3\lambda$	124
รูปที่ 4.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของ โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน y โดย $h = 0.3\lambda$	124
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของ โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน x โดย $h = 0.7\lambda$	125
รูปที่ 4.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของ โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน y โดย $h = 0.7\lambda$	125
รูปที่ 4.25 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$	127

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.26 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$	128
รูปที่ 4.27 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$	128
รูปที่ 4.28 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.7\lambda$	129
รูปที่ 4.29 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$	130
รูปที่ 4.30 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$	131
รูปที่ 4.31 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$	131
รูปที่ 4.32 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.7\lambda$	132
รูปที่ 4.33 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$	133
รูปที่ 4.34 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$	134
รูปที่ 4.35 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่าง ระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$	134

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.36 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.7\lambda$	135
รูปที่ 4.37 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$	136
รูปที่ 4.38 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$	137
รูปที่ 4.39 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$	137
รูปที่ 4.40 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน เมื่อ $h = 0.7\lambda$	138
รูปที่ 4.41 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$	139
รูปที่ 4.42 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$	140
รูปที่ 4.43 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$	140
รูปที่ 4.44 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.7\lambda$	140
รูปที่ 4.45 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.3\lambda$) โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	141
รูปที่ 4.46 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.3\lambda$) โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก	142
รูปที่ 4.47 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.3\lambda$) โดยใช้โปรแกรม NEC2	144

สารบัญรูปร่าง (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.48 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.7\lambda$) โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	145
รูปที่ 4.49 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.7\lambda$) โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก	147
รูปที่ 4.50 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.7\lambda$) โดยใช้โปรแกรม NEC2	148
รูปที่ 4.51 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของ โพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.3\lambda$)	150
รูปที่ 4.52 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของ โพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.7\lambda$)	151
รูปที่ 4.53 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ โดยคำนวณจาก วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	158
รูปที่ 4.54 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวน สี่เหลี่ยมที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ โดยคำนวณจาก วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก	159
รูปที่ 4.55 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยม ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2	159
รูปที่ 4.56 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวน สี่เหลี่ยม ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ โดยคำนวณจาก วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์	160
รูปที่ 4.57 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวน สี่เหลี่ยม ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ โดยคำนวณจาก วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก	161
รูปที่ 4.58 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยม ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2	162
รูปที่ 5.1 สายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากขนาดต่างๆ	165
รูปที่ 5.2 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	166
รูปที่ 5.3 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	166

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.4 การจัดเตรียมเครื่องมือในการทดสอบสายอากาศ สำหรับสายอากาศโพรบ กระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	167
รูปที่ 5.5 การติดตั้งสายอากาศรับและสายอากาศส่ง	168
รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบ กระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบ เมื่อ c เท่ากับ 0.25λ	170
รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบ กระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อขนาดความยาวของวงแหวนมีค่าต่างๆ	170
รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบ กระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน x	171
รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระดุน วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน y	171
รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระดุน วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน z	172
รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระดุน วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ	173
รูปที่ 5.12 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบค่าอัตราการขยายของสายอากาศ	174
รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบการ โพลาริซั่มร่วมและการ โพลาริซั่มไขว้จากการคำนวณ และการทดสอบ	176
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชัน ของความยาวโพรบจากการคำนวณและการทดสอบ	177
รูปที่ 5.15 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก เมื่อความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.15λ	178
รูปที่ 5.16 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก เมื่อความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.25λ	179
รูปที่ 5.17 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก เมื่อความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.35λ	179
รูปที่ 5.18 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก เมื่อความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.45λ	179

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.19 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x	180
รูปที่ 5.20 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y	180
รูปที่ 5.21 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z	181
รูปที่ 5.22 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ xy	181
รูปที่ 5.23 โครงสร้างสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วาง เหนือตัวสะท้อน กรณีองค์ประกอบเดียว	183
รูปที่ 5.24 โครงสร้างสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วาง เหนือตัวสะท้อน กรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับ	183
รูปที่ 5.25 การติดตั้งสายอากาศรับและสายอากาศส่ง สำหรับทดสอบแบบรูป การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน	184
รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบ กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ	186
รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบ กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ	186
รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เหนือตัวสะท้อนเป็นแผ่นวงจรมิมพ์และ ลวดตาข่ายเมื่อ h เท่ากับ 0.3λ	187
รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เหนือตัวสะท้อนเป็นแผ่นวงจรมิมพ์และ ลวดตาข่ายเมื่อ h เท่ากับ 0.7λ	188
รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน x ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ	188
รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน y ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ	189

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.32 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ	189
รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน x ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ	190
รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน y ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ	190
รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ เชิงระนาบ ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ	191
รูปที่ 5.36 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ กรณีองค์ประกอบเดียว	194
รูปที่ 5.37 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x ที่ h เท่ากับ 0.3λ	194
รูปที่ 5.38 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y ที่ h เท่ากับ 0.3λ	194
รูปที่ 5.39 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ ที่ h เท่ากับ 0.3λ	195
รูปที่ 5.40 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ กรณีองค์ประกอบเดียว	195
รูปที่ 5.41 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x ที่ h เท่ากับ 0.7λ	195

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.42 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y ที่ h เท่ากับ 0.7λ	196
รูปที่ 5.43 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ ที่ h เท่ากับ 0.7λ	196
รูปที่ ก.1 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก	207
รูปที่ ก.2 การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่น TE และ คลื่น TM กรณี ($a = 2b$)	212
รูปที่ ก.3 นอร์มัลไลซ์โหมดความถี่ตัดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ($a = 2b$)	214
รูปที่ ก.4 การแพร่กระจายคลื่นใน โหมดต่างๆ ($a = 2b$)	214
รูปที่ ก.5 นอร์มัลไลซ์โหมดความถี่ตัดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม ($a = b$)	215
รูปที่ ก.6 การแพร่กระจายคลื่นใน โหมดต่างๆ ($a = b$)	215
รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อนำคลื่นและ ขนาดของความกว้างท่อนำคลื่นที่เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น	216
รูปที่ ข.1 แสดงสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดไดโพลไฟฟ้าจิวสามตำแหน่ง ที่วางอยู่ที่ \bar{R}' ในทิศทาง xy และ z	226

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้มีความก้าวหน้าและมีอิทธิพลอย่างมากต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์ หนึ่งในนั้นคือการสื่อสารซึ่งไม่ว่าจะอยู่ที่ไหนก็สามารถติดต่อกันได้อย่างรวดเร็วโดยไม่มีอุปสรรคเรื่องระยะทางอย่างสมัยก่อน และได้พัฒนาจนมีความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่อง การสื่อสารแบบไร้สายนั้นก็เป็อีกเทคโนโลยีหนึ่งที่มีความโดดเด่นในปัจจุบัน อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับและส่งสัญญาณจึงจำเป็น ดังนั้นสายอากาศจึงมีความสำคัญสำหรับระบบเหล่านี้ การพัฒนาชนิดของสายอากาศที่เหมาะสมเพื่อตอบสนองความต้องการของระบบต่างๆ เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง

ระบบการสื่อสารเคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างมากในชีวิตประจำวัน และระบบขนาดเล็กมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทำให้จำนวนลูกข่ายเพิ่มขึ้นอย่างมาก ฉะนั้นการพัฒนาสายอากาศที่มีราคาถูกเพื่อใช้เป็นสายอากาศที่สถานีฐานจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยทั่วไปสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศแบบรอบตัวที่ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการรูปวงกลม แต่ในการใช้งานบางพื้นที่ที่มีลักษณะพื้นที่ยาวและแคบ เช่น บนทางด่วน ในอุโมงค์ และ ทางเดินระหว่างตึกเป็นต้น จะนิยมใช้สายอากาศแบบทิศทางเดียวหรือแบบสองทิศทางแทนการใช้งานของสายอากาศแบบรอบทิศทาง ทั้งนี้เพราะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศชนิดนี้ถูกจำกัดให้แพร่กระจายคลื่นเฉพาะทิศทางเท่านั้น เป็นผลให้ความสามารถของสายอากาศครอบคลุมพื้นที่ให้บริการตามแนวยาวและแคบได้มากขึ้น การพัฒนาสายอากาศแบบทิศทางเดียวหรือแบบสองทิศทางให้มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งานเฉพาะบางประเภทนั้นมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะด้านต้นทุนการผลิตที่ต่ำนั้นเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาเนื่องจากจำนวนของพื้นที่ที่ให้บริการมีอยู่มากนั่นเอง ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากจึงเป็นสายอากาศอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ ด้วยต้นทุนที่ต่ำ และโครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะที่ไม่ซับซ้อนหลักการออกแบบสายอากาศทำได้ง่ายและตรงไปตรงมา สายอากาศชนิดนี้จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง นอกจากนี้ยังพบว่าสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้เมื่อนำมาวางไว้เหนือตัวสะท้อนเพื่อบังคับให้สายอากาศมีการแพร่กระจายคลื่นไปด้านหน้าทางเดียว ซึ่งมีผลให้อัตราการขยายของสายอากาศเพิ่มสูงขึ้น

สำหรับสายอากาศแบบสองทิศทางดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่เป็นสายอากาศแบบสองทิศทางที่ได้จากการรวมกันของสายอากาศทิศทางเดียวสององค์ประกอบ เช่น สายอากาศยาคี โดยให้ชี้ไปในทิศทางที่ตรงข้ามกัน หรือได้จากสายอากาศแบบรอบทิศทาง เช่น สายอากาศโมโนโพลที่ป้อนด้วยเฟสที่

เหมาะสม [1] แต่พบว่าสายอากาศที่สร้างด้วยเทคนิคเหล่านี้จะสูญเสียในระบบการป้อนสัญญาณสูง ประกอบด้วยโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ราคาสูงขึ้น การพัฒนาสายอากาศแบบสองทิศทางมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น สายอากาศแพทช์แนวยาว (The bidirectional narrow patch antenna: BNPA) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นตัวนำแนวยาว โดยที่ทั้งสองด้านของซิปสเตทที่เป็นไดอิเล็กตริกแนวยาวถูกป้อนสัญญาณด้วยเส้นไมโครสตริปคู่ขนาน สายอากาศชนิดนี้สร้างได้ง่ายโดยทำจากวงจรพิมพ์และโครงข่ายป้อนสัญญาณบนซิปสเตท แต่สายอากาศชนิดนี้มีประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นต่ำ ดังนั้นจึงมีการเพิ่มแผ่นตัวนำปรสิตเพื่อสร้างสายอากาศ BNPA ให้เป็น BNPA-A (BNPA array) [2] ซึ่งทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ ซึ่งค่าอัตราการขยายของสายอากาศชนิดนี้มีค่าสูงกว่าสายอากาศแบบเชิงเส้นแนวยาว (Collinear) อนึ่งสำหรับการประยุกต์ใช้งานบนท้องถนนที่มีความกว้างประมาณ 30-60 เมตรนั้น สายอากาศ BIRA (bidirectional rod array antenna) [3] มีลักษณะที่เหมาะสมกว่า การพัฒนาสายอากาศสองทิศทางที่น่าสนใจอีกอย่างคือ การใช้สายอากาศที่เป็นรอยบากเข้าไปในแผ่นตัวนำเหนือแผ่นระนาบ ซึ่งสายอากาศชนิดนี้ถูกนำมาใช้เพื่อขยายพื้นที่ครอบคลุมของสถานีรีเลย์ (Relay) ในระบบบัสเตอร์ภายในอุโมงค์ [4] ค่าการโพลาริไซซ์ไขว้ที่ไม่ต้องการจะถูกกำจัดในระนาบสนามแม่เหล็กในสายอากาศชนิดรอยบาก อีกวิธีหนึ่งของการออกแบบสายอากาศสองทิศทางคือ ทำได้โดยใช้สายอากาศที่มีโครงสร้างเป็นรูปข้อศอก (Crank) ซึ่งดัดแปลงมาจากสายอากาศรูปบากดั้งเดิม [5] แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเหล่านี้จะถูกยกขึ้นจากกำแพงซึ่งเราต้องทำการกดมันลงมาให้มันครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ การกดลงนี้ทำได้โดยใช้องค์ประกอบปรสิตและเพื่อเพิ่มอัตราการขยาย [6] แต่การเพิ่มปรสิตต่างๆเข้ามานี้ทำให้เพิ่มความซับซ้อนมากขึ้น และราคาต้นทุนค่อนข้างสูง จากรายละเอียดทั้งหมดที่กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าการพัฒนาสายอากาศสองทิศทางที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานเฉพาะบางประเภทมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะต้นทุนการผลิตที่ต่ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาอันเนื่องมาจากจำนวนของพื้นที่ให้บริการที่มีอยู่มากนั่นเอง สายอากาศแบบทิศทางเดียวเป็นอีกชนิดที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้งานบางประเภทที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่นระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point to point) ซึ่งสายอากาศแบบทิศทางเดียวนี้อาจได้จากการสังเคราะห์จากสายอากาศไมโครสตริปที่ทำงานในโหมดพื้นฐาน (Fundamental mode microstrip antenna) [7] ที่มีระบบการป้อนสัญญาณที่ยู่ยาก สายอากาศปากแตร (Horn antenna) [8] ซึ่งมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก เป็นต้น

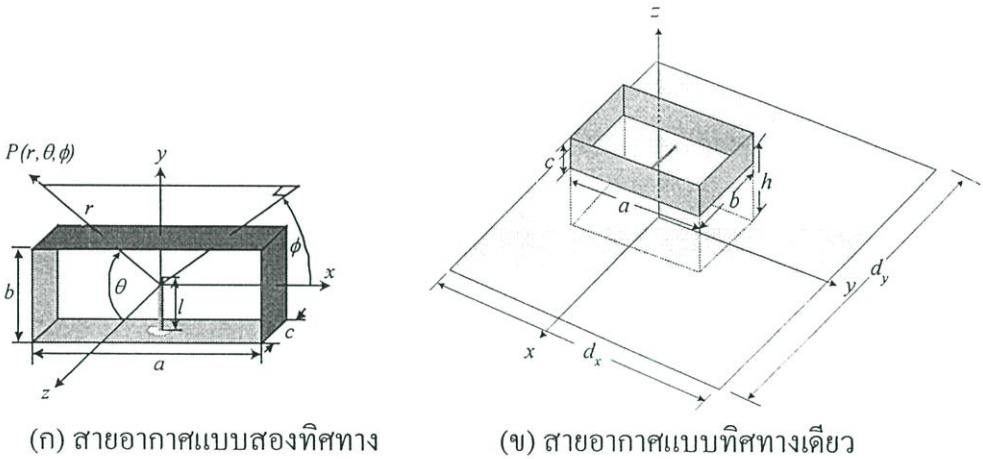
สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาสายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก สำหรับแนวคิดของสายอากาศถูกนำเสนอใน [9] แต่ทฤษฎีที่ใช้ในการคำนวณยังไม่ละเอียดและสมบูรณ์เพียงพอ ทั้งนี้เพราะนิพจน์ของสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศใน [9] ไม่สามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์ได้ทั้งหมด กล่าวคือ ยังไม่พิจารณาความยาวโพรบที่ป้อนสัญญาณซึ่งพารามิเตอร์นี้ผลต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และจะมีผลอย่างยิ่ง

ต่อคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการแสดงวิธีการหาผลเฉลยนิพจน์ของสมการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและวิธีการวิเคราะห์โดยละเอียด นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์สายอากาศแบบทิศทางเดียวโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากวางเหนือตัวสะท้อนด้วย โครงสร้างของสายอากาศทิศทางเดียวโดยโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้มีลักษณะง่ายไม่ซับซ้อน อีกทั้งทำให้ค่าอัตรการขยายของสายอากาศให้สูงขึ้นด้วย

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากล้อมรอบโพรบที่ป้อนสัญญาณ โดยโครงสร้างของสายอากาศชนิดนี้จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิศทาง และเมื่อนำมาวางไว้เหนือตัวสะท้อนจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวที่ให้อัตรการขยายของสายอากาศเพิ่มขึ้นอีกด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศอย่างละเอียดโดยจะพิจารณาทั้งกรณีที่เป็นสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและแบบทิศทางเดียว โครงสร้างของสายอากาศสามารถสร้างง่าย มีลักษณะไม่ซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยในการพิจารณาขนาดความกว้างและความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้นจะเลือกขนาดที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ยอมให้เฉพาะคลื่นในโหมดเป็นใหญ่เท่านั้นที่สามารถเดินทางผ่านได้ และเมื่อระบุขนาดของความกว้างและความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากไว้ที่ค่าหนึ่ง พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามค่าความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งค่าความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เหมาะสมเท่านั้นจะให้ค่าสภาพเจาะงทิศทางที่ดีที่สุดที่จะถูกเลือกมาใช้ในการออกแบบ เมื่อได้ขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศแล้ว จากนั้นจะทำการพิจารณาในกรณีที่เป็นแถวลำดับเชิงเส้นลักษณะต่างๆ คือ ตามแนวด้านข้าง (Side by side) ตามแนวยาว (Collinear) และหันหน้าเข้าหากัน (Face to face) ตามลำดับ จากนั้นจะพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้น และนัระยะที่เหมาะสมของการจัดเรียงในแต่ละแนวแกนนี้มาพิจารณาจัดเรียงสายอากาศเป็นลักษณะแถวลำดับเชิงระนาบ (Planar array) ทั้งนี้เพื่อเพิ่มอัตรการขยายของสายอากาศให้สามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ใช้งานตามความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ นอกจากนี้พบว่าอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถเพิ่มอัตรการขยายของสายอากาศ คือ การนำสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมาวางไว้เหนือตัวสะท้อนเพื่อบังคับให้มีการแพร่กระจายคลื่นไปด้านหน้าทิศทางเดียว ซึ่งการพิจารณาจะเริ่มด้วยกรณีของคัพระกอบเดี่ยวก่อนเพื่อพิจารณาค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนที่เหมาะสมก่อน จากนั้นจะพิจารณากรณีที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวต่างๆ และแถวลำดับเชิงระนาบในลำดับต่อไป สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อหาพจน์ของสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จะใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ในการพิจารณานิพจน์ของสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ซึ่งวิธีการนี้จะพิจารณาให้คลื่นแพร่กระจายจากช่องเปิดของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่านั้น โดยไม่รวมผลจากโพรบป้อนสัญญาณด้วย จากนั้นจะพิจารณาผลที่เกิดจากโพรบป้อนสัญญาณร่วมด้วย โดยใช้ฟังก์ชันของกรีนชนิดไดแอติก ทั้งนี้เพื่อให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องยิ่งขึ้น สำหรับคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้อธิบายไว้ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าสภาพแฉะงทิสทางที่มากที่สุดของสายอากาศ นอกจากนี้ได้พิจารณาคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย เพื่อพิสูจน์ผลที่ได้จากการคำนวณได้ทำการออกแบบและสร้างสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากล้อมรอบโพรบป้อนสัญญาณขึ้นที่ความถี่ 1.9 GHz เพื่อทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลจากการทดสอบและผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีต่างๆ สำหรับการประยุกต์ใช้งานของสายอากาศแบบสองทิศทางนั้นเหมาะสำหรับระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ที่ให้บริการในบริเวณพื้นที่ที่มีลักษณะแคบและตามแนวยาว เช่น บนทางด่วน ในอุโมงค์ หรือ ทางเดินระหว่างตึก สำหรับสายอากาศแบบทิศทางเดียวนั้น ด้วยคุณลักษณะของสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวนั้นเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับระบบจุดต่อจุด เช่น ในระบบสถานีฐานของการสื่อสารแบบไร้สาย ใช้ติดต่อกันระหว่างตึกในหน่วยงาน หรือ ประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารดาวเทียม เป็นต้น



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของสายอากาศ

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 จะกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา ตลอดจนจุดมุ่งหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์นี้ อีกทั้งเนื้อหาโดยรวมที่ได้รวบรวมไว้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและหลักการของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งได้อธิบายถึงโครงสร้างของสายอากาศ ตลอดจนวิธีการหาสนามการแพร่กระจายคลื่น โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และฟังก์ชันของกรีนชนิดไดแอติก นอกจากนี้ได้กล่าวถึงโปรแกรมคำนวณ

แม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 ซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมด้วย อีกทั้งอธิบายถึงคุณลักษณะเชิงการไหลไรซ์และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย

บทที่ 3 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศแบบสองทิศทางโดยโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งอาศัยทฤษฎีที่ได้จากบทที่ 2 เป็นการแสดงกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศให้ได้ตามความต้องการ โดยจะลำดับการแสดงผลจากกรณีองค์ประกอบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศองค์ประกอบเดียวก่อน จากนั้นจะเป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ในกรณีแถวลำดับเชิงเส้นเพื่อวิเคราะห์หาระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสม และนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในกรณีจัดเรียงสายอากาศเป็นแบบแถวลำดับเชิงเส้นแบบต่างๆ นี้ มาพิจารณาจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ

บทที่ 4 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์สายอากาศแบบทิศทางเดียวโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ซึ่งอาศัยทฤษฎีที่ได้จากบทที่ 2 และใช้ขนาดของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ได้จากบทที่ 3 เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเมื่อนำมาวางไว้เหนือตัวสะท้อนในระยะต่างๆ โดยจะลำดับการแสดงผลจากกรณีองค์ประกอบเดียวก่อนเพื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนที่เหมาะสม จากนั้นจะแสดงผลการวิเคราะห์ในกรณีแถวลำดับเชิงเส้นเพื่อวิเคราะห์หาระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสม และนำระยะที่เหมาะสมของการจัดเรียงในแต่ละแบบนี้มาพิจารณาจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบต่อไป

บทที่ 5 เป็นขั้นตอนการสร้าง การทดสอบ และแสดงผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับการคำนวณในกรณีต่างๆ

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการวิจัยทั้งหมด ตลอดจนวิจารณ์ และเสนอแนะแนวทางสำหรับการพัฒนาสายอากาศต่อไป

สุดท้ายเป็นภาคผนวกที่รวบรวมหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในวิทยานิพนธ์นี้ กล่าวคือภาคผนวก ก จะกล่าวถึงการเกิดโหมดคลื่นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ภาคผนวก ข จะกล่าวถึงพีชคณิตของฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และการเขียนสมการแมกซ์เวลล์ในรูปของไดโอดิก ทั้งนี้เพื่อความรู้อและความเข้าใจเกี่ยวกับเนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้ยิ่งขึ้น และภาคผนวก ค ได้รวบรวมผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ของผู้วิจัย

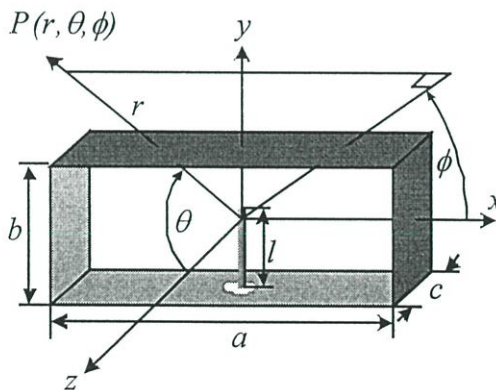
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

2.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการแสดงทฤษฎีและหลักการของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งจะแสดงโครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ของสายอากาศ อีกทั้งได้แสดงวิธีการหาผลเฉลยของสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยวิธีการต่างๆ ได้แก่ วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ และฟังก์ชันกรีนไดโอดิก ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณแต่ละวิธี นอกจากนี้จะกล่าวถึงโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC2 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่จะใช้ในการคำนวณเปรียบเทียบวิธีการอื่นๆ ด้วย อีกทั้งจะกล่าวถึงคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ และวิธีคำนวณอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศด้วย

2.2 โครงสร้างของสายอากาศ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

สายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้น โครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากช่องเปิดทั้งสองด้าน ประกอบด้วยโพรบไฟฟ้ากระตุ้นมีความยาว l วางตามแนวแกน y และยื่นเข้าไปด้านในของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความกว้าง a ความสูง b และความยาว c จากโครงสร้างนี้พบว่าพารามิเตอร์ a และ b เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดโหมดการแพร่กระจายคลื่นของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งจะกล่าวในหัว

ข้อย่อยต่อไป และเมื่อกำหนดให้ a และ b มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง พบว่าคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามพารามิเตอร์ c ดังนั้นจะพิจารณาค่า c ที่ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงๆ ส่วนพารามิเตอร์ l จะมีผลต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศและจะมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งจะพิจารณาที่ความยาวที่ทำให้คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าที่ยอมรับได้และมีการแมตซ์กับสายนำสัญญาณที่ดีที่สุด (เมื่อพิจารณาให้อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ช่องเปิดและช่องว่างอิสระแมตซ์ซึ่งดีที่สุดคือ SWR เท่ากับ 1:1)

2.3 หลักการพิจารณาค่าความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

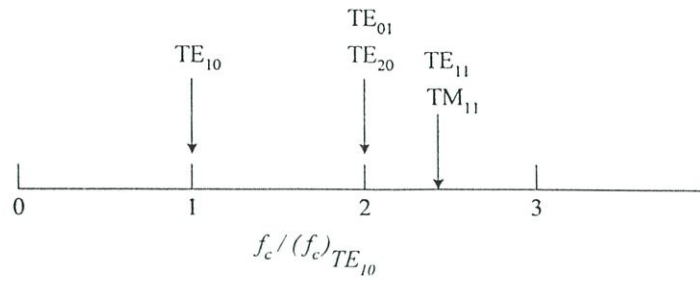
ในการพิจารณาโหมดที่เกิดขึ้นในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้นรายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก สำหรับในหัวข้อนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการเลือกค่าความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อให้เกิดเฉพาะโหมด TE_{10} หรือ โหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode) ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งการเกิดโหมดเป็นใหญ่ในท่อนำคลื่นนี้จะมีคุณสมบัติดังนี้

- ช่วงระหว่างความถี่ตัด (f_c) ของโหมดเป็นใหญ่ (TE_{10}) และโหมดอันดับสูงที่อยู่ถัดไปมีความกว้างมาก ดังนั้นการกระตุ้นให้เกิดโหมดเป็นใหญ่นี้จะเกิดขึ้นได้กว้างขึ้นด้วย และทำให้การกระตุ้นเพื่อให้เกิดโหมดในอันดับที่สูงกว่าอย่างไม่ต่อเนื่อง
- การโพลาไรซ์ของสนามไม่เปลี่ยนแปลง คือสนามไฟฟ้าจะผ่านจากท่อนำคลื่นด้านบนลงด้านล่าง ซึ่งการโพลาไรซ์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงนี้อาจเป็นลักษณะการโพลาไรซ์ที่ต้องการสำหรับระบบที่ต้องการการโพลาไรซ์ที่คงที่ไม่เปลี่ยนแปลง
- การสูญเสียอันเนื่องมาจากตัวนำ (Conducting loss) ที่ความถี่ที่ออกแบบนั้นมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับโหมดอื่นๆ

สำหรับการพิจารณาขนาดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่กว้าง a และสูง b จะพิจารณาจาก [10]

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}$$

โดยที่ λ_c คือความยาวคลื่นตัด (Cut off frequency) ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่มากที่สุดที่คลื่นสามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นได้ โดยที่ $m=0,1,2,\dots$ และ $n=0,1,2,\dots$ เมื่อพิจารณาในกรณีที่ว่าความกว้างของท่อนำคลื่นเป็นสองเท่าของความสูงของท่อนำคลื่น ($a=2b$) จะสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตัด (ความถี่ที่มากที่สุดที่คลื่นสามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นได้) ของโหมดใดๆ ต่อโหมด TE_{10} ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากได้ดังนี้

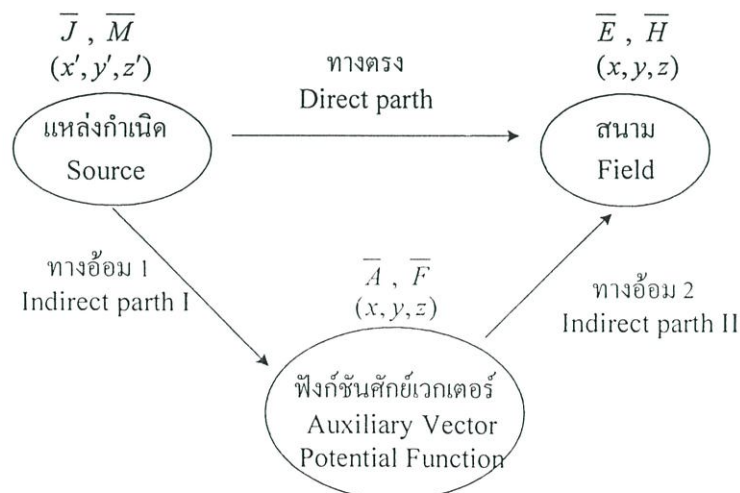


รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ตัดของโหมดใดๆ ต่อโหมด TE_{10} ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

การพิจารณาให้เกิดโหมด TE_{10} นั้น จะพบว่าขนาดความกว้างท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่คลื่นสามารถเดินทางผ่านได้ต้องมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ ($a > \lambda/2$) แต่ถ้าขนาดของท่อนำคลื่นขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้เกิดคลื่นในโหมดสูง (Higher mode) ขึ้น โดยจะพิจารณาโหมดที่จะเกิดขึ้นถัดจากโหมดเป็นใหญ่ ซึ่งจะเป็น TE_{20} เกิดขึ้นพร้อมกับ TE_{01} ซึ่งจะมีขนาด $a > \lambda$ และถัดไปเป็น TM_{11} เกิดขึ้นพร้อมกับ TE_{11} ได้ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าขนาดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดโหมดเป็นใหญ่ขึ้นควรมีขนาด $\frac{\lambda}{2} < a < \lambda$ เท่านั้น เมื่อพิจารณากรณีที่ความกว้างเป็นสองเท่าของความสูงของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

2.4 การแพร่กระจายคลื่น

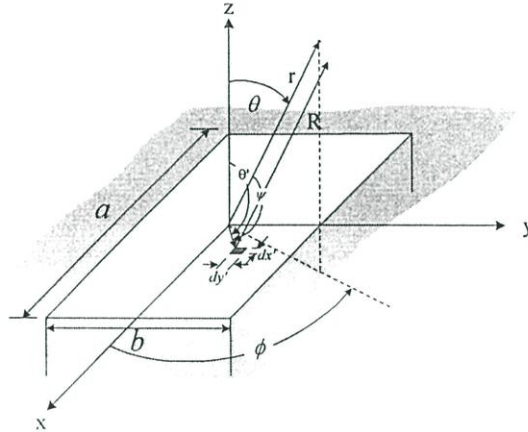
การแพร่กระจายคลื่นเป็นปัญหาที่พิจารณารวมแหล่งกำเนิดสนามซึ่งได้แก่สายอากาศ ทำให้สมการคลื่นเป็นสมการไม่เอกพันธ์ การแก้ปัญหานั้นจะกล่าวต่อไปนี้จะแบ่งเป็นสองวิธี กล่าวคือ การหาคำตอบของสนามจากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ (vector potentials function) และวิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอดิก (Dyadic green function) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบของสนามโดยทางอ้อมและทางตรงตามลำดับ สามารถเขียนเป็นไดอะแกรม [11] ได้ดังรูปที่ 2.3 สำหรับกระบวนการต่างๆ จะกล่าวต่อไป



รูปที่ 2.3 ไดอะแกรมการหาคำตอบของสนามจากแหล่งกำเนิด

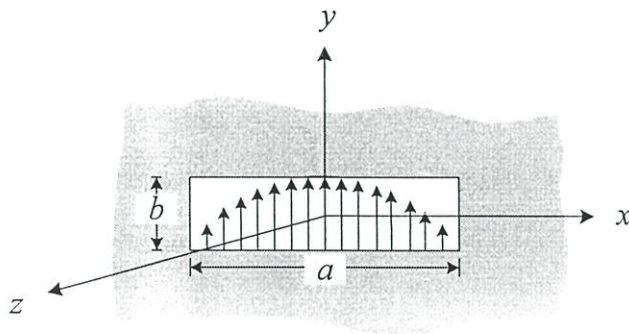
2.4.1 วิธีฟังก์ชันศักราณเวกเตอร์

สำหรับวิธีนี้จะพิจารณาให้โครงสร้างของสายอากาศเป็นลักษณะช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยการหาคำตอบของนิพจน์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในกรณีนี้จะไม่พิจารณาโพรบเชิงเส้นร่วมด้วย โดยตำแหน่งของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากสำหรับการวิเคราะห์มีลักษณะดังนี้



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งของช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากสำหรับการวิเคราะห์

การพิจารณาสนามมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นฮาร์มอนิก ซึ่งแสดงด้วยฟังก์ชัน $e^{-j\omega t}$ ตลอดวิทยานิพนธ์นี้ สำหรับการพิจารณาหาคำตอบนิพจน์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเริ่มพิจารณาจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_x และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_x บนพื้นผิวตัวนำ ซึ่งสมมติให้เป็นตัวนำที่มีพื้นที่ผิวเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ดังนั้นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะเท่ากับศูนย์ จะมีเฉพาะความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กเท่านั้น โดยที่สนามที่ช่องเปิดนั้นจะมีสนามแรงที่สุดตรงกลาง และที่ตำแหน่งขอบทั้งสองด้านเป็นศูนย์ (สนามกระจายคลื่นในโหมด TE_{10}) ดังรูปที่ 2.5 [12]

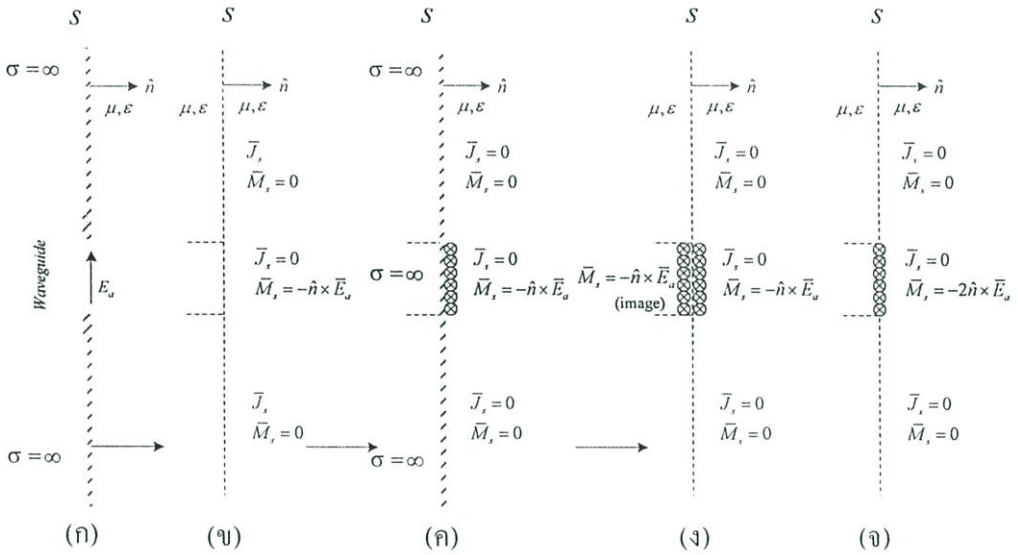


รูปที่ 2.5 การกระจายสนามที่ช่องเปิด

ดังนั้น

$$\bar{E}_a = \hat{a}_y E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a} x'\right) \quad (2.1)$$

สำหรับ $-\frac{a}{2} \leq x' \leq \frac{a}{2}$ และ $-\frac{b}{2} \leq y' \leq \frac{b}{2}$ เพื่อจัดรูปสมมูลพื้นผิวปิดที่มีขอบเขตจาก $-\infty$ จนถึง ∞ บนระนาบ xy เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนั้นรูปแบบจำลองสมมูล สำหรับช่องเปิดที่นำคลื่นบนระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์สามารถแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แบบจำลองสมมูลของช่องเปิดที่นำคลื่นบนระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์

โดยที่กระแสสมมูลของการกระจายความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J_s และความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก M_s จะถูกสร้างขึ้นบนระนาบขนาดอนันต์ในรูปที่ 2.6 (ข) เมื่อองค์ประกอบในแนวสัมผัสของสนามไฟฟ้าที่ด้านนอกของช่องเปิดไม่มี เนื่องจากเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) จะหายไป จะมีเฉพาะองค์ประกอบของ M_s ที่ช่องเปิด J_s ที่ตำแหน่งใดๆ นั้นไม่เป็นศูนย์และยังคงเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าซึ่งทำให้แก้ปัญหาได้ยาก ดังนั้นจึงสมมติให้พื้นที่ผิวเป็นตัวนำสมบูรณ์ J_s ที่ตำแหน่งใดๆ เป็นศูนย์ จะมีเฉพาะ M_s ที่ช่องเปิดที่แหล่งกำเนิดที่พิจารณาเท่านั้น ดังรูปที่ 2.6 (ค) จากทฤษฎีเงา (Image theory) เมื่อแหล่งกำเนิดเสมือน (Imaginary source) มีทิศทางเดียวกัน ดังนั้นสามารถย้ายและแทนด้วยแหล่งกำเนิดเสมือน หรือแหล่งกำเนิดสมมูล (Equivalent source) M_s ดังรูป 2.6 (ง) เมื่อพิจารณาเป็นตัวกลางที่ไม่มีขอบเขต (Unbounded medium) ดังนั้นสามารถดัดรูปจากรูปที่ 2.6 (ง) เป็นรูปที่ 2.6 (จ) ทั้งนี้เพื่อให้ปัญหาง่ายขึ้น ดังนั้น

$$\vec{M}_s = \begin{cases} -2\hat{n} \times \vec{E}_o & -a/2 \leq x' \leq a/2 \\ 0 & b/2 \leq y' \leq b/2 \\ & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2.2)$$

ที่ทุกตำแหน่ง

ดังนั้น โหมดสมมูลจะเป็น

$$\begin{aligned}
\bar{M}_s &= -2\hat{n} \times \bar{E}_a \\
&= -2\hat{a}_z \times \hat{a}_y E_0 \cos\left(\frac{\pi}{2}x'\right) \\
&= 2\hat{a}_x E_0 \cos\left(\frac{\pi}{2}x'\right)
\end{aligned} \tag{2.3}$$

ในการพิจารณาสนามที่แพร่กระจายออกจากช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากในรูปที่ 2.4 ซึ่งสามารถหาได้โดยใช้สมการ (2.4) ถึงสมการ (2.8) [12] ดังนี้

$$E_r \approx 0 \tag{2.4}$$

$$E_\theta \approx -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\phi + \eta N_\theta) \tag{2.5}$$

$$E_\phi \approx \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\theta - \eta N_\phi) \tag{2.6}$$

$$H_r \approx 0 \tag{2.7}$$

$$H_\theta \approx \frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left(N_\phi - \frac{L_\theta}{\eta} \right) \tag{2.8}$$

$$H_\phi \approx -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left(N_\theta + \frac{L_\phi}{\eta} \right) \tag{2.9}$$

โดยที่ N_θ , N_ϕ , L_θ และ L_ϕ สามารถหาได้จาก

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_s \bar{J}_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \approx \frac{\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \bar{N} \tag{2.10}$$

$$\bar{N} = \iint_s \bar{J}_s e^{jkr' \cos \psi} ds'$$

$$\bar{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_s \bar{M}_s \frac{e^{-jkR}}{R} ds' \approx \frac{\varepsilon e^{-jkr}}{4\pi r} \bar{L} \tag{2.11}$$

$$\bar{L} = \iint_s \bar{M}_s e^{jkr' \cos \psi} ds'$$

จากสมการที่ (2.4) ถึงสมการที่ (2.11) ใช้การแปลงองค์ประกอบจากพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็นพิกัดทรงกลม (Rectangular-to-spherical coordinates) ดังนั้นจะพบว่า

$$N_\theta = \iint_s [J_x \cos \theta \cos \phi + J_y \cos \theta \sin \phi - J_z \sin \theta] e^{jkr' \cos \psi} ds' \tag{2.12}$$

$$N_\phi = \iint_s [-J_x \sin \phi + J_y \cos \phi] e^{jkr' \cos \psi} ds' \tag{2.13}$$

$$L_\theta = \iint_s [M_x \cos \theta \cos \phi + M_y \cos \theta \sin \phi - M_z \sin \theta] e^{jkr' \cos \psi} ds' \tag{2.14}$$

$$L_\phi = \iint_s [-M_x \sin \phi + M_y \cos \phi] e^{jkr' \cos \psi} ds' \tag{2.15}$$

โดยที่ $ds' = dx'dy'$ และ $r' \cos \psi = x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi$ ดังนั้น เมื่อแทน (2.3) ลงในสมการ (2.14) และ (2.15) จะได้

$$L_\theta \approx \iint_s M_x \cos \theta \cos \phi e^{jkr' \cos \psi} ds' \tag{2.16}$$

$$L_\phi \approx \iint_s -M_y \sin \phi e^{jkr' \cos \psi} ds' \quad (2.17)$$

เมื่อนำ (2.16) และ (2.17) แทนใน (2.5) และ (2.6) เพื่อหา นิพจน์ของสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ดังนั้น จะได้อีก ประการของนิพจน์ของสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในแนวตั้งและแนวนอนดังนี้

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx -\frac{2jke^{-jkr}}{4\pi r} \iint_s -2E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x'\right) \sin \phi e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (2.18)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx -\frac{2jke^{-jkr}}{4\pi r} \iint_s 2E_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x'\right) \cos \theta \cos \phi e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) จัดใหม่ได้เป็น

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx \frac{2jkE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{a}x'\right) \sin \phi e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (2.20)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{2jkE_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \cos\left(\frac{\pi}{a}x'\right) \cos \theta \cos \phi e^{jk(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)} dx' dy' \quad (2.21)$$

ในการพิจารณาการอินทิเกรตกำหนดให้

$$\int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} e^{j\alpha z} dz = c \frac{\sin\left(\alpha \frac{c}{2}\right)}{\alpha \frac{c}{2}} \quad (2.22)$$

$$\int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} e^{j\alpha z} \cos(\beta z) dz = \frac{e^{j\alpha z} (j\alpha \cos \beta z + \beta \sin \beta z)}{\beta^2 - \alpha^2} \\ = \frac{2\beta \cos\left(\alpha \frac{d}{2}\right)}{\beta^2 - \alpha^2} \quad (2.23)$$

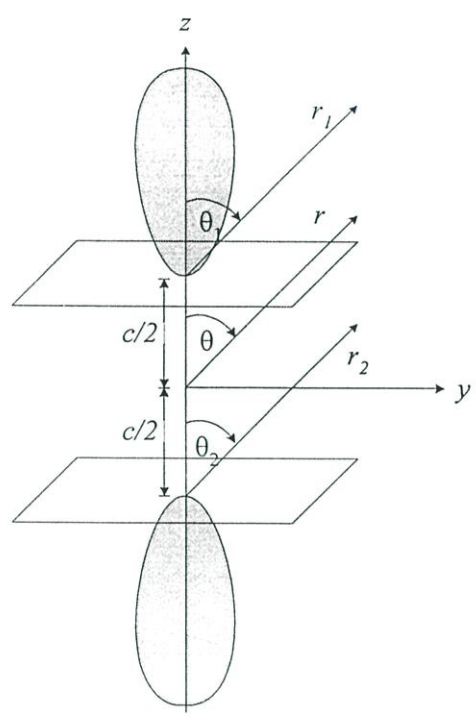
จะได้คำตอบของสนามเป็น

$$E_\theta(r, \theta, \phi) \approx \frac{jkbE_0}{a} \frac{\cos\left(k \frac{a}{2} \sin \theta \cos \phi\right) \sin\left(\frac{kb \sin \theta \sin \phi}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k \sin \theta \cos \phi)^2} \frac{\sin \phi e^{-jkr}}{r} \quad (2.24)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) \approx \frac{jkbE_0}{a} \frac{\cos\left(k \frac{a}{2} \sin \theta \cos \phi\right) \sin\left(\frac{kb \sin \theta \sin \phi}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k \sin \theta \cos \phi)^2} \frac{\cos \theta \cos \phi e^{-jkr}}{r} \quad (2.25)$$

ซึ่งสมการที่ (2.24) และ (2.25) เป็นสนามของช่องเปิดด้านเดียว แต่เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะเป็นช่องเปิดทั้งสองด้านตามแนวแกน z ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง $z = \frac{c}{2}$ และ $z = -\frac{c}{2}$ ดังนั้นเมื่อทำการสังเกตที่สนามระยะไกล ดังรูปที่ 2.7 สนามที่แพร่กระจายออกจากช่องเปิดทั้งสอง

ด้านของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมีค่าเท่ากับผลรวมของสนามที่แพร่กระจายจากระนาบ $z = \frac{c}{2}$ และ $z = -\frac{c}{2}$ สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 การแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดที่สังเกตที่สนามระยะไกล

จากการสังเกตที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta \tag{2.26}$$

$$r_1 = r - \frac{c}{2} \cos \theta \tag{2.27}$$

$$r_2 = r + \frac{c}{2} \cos \theta \tag{2.28}$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r \tag{2.29}$$

สมการที่ (2.27) และ (2.28) สำหรับองค์ประกอบของเฟส ส่วนสมการที่ (2.29) สำหรับองค์ประกอบของขนาด ดังนั้นเมื่อพิจารณาสนามที่แพร่กระจายจากระนาบ $z = \frac{c}{2}$ จะได้

$$E_{\theta_1}(r, \theta, \phi) = \frac{jkbE_0}{a} \frac{\cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\cos\phi\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k\sin\theta\cos\phi)^2} \frac{\sin\left(\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}} \sin\phi e^{jk\frac{c}{2}\cos\theta} \frac{e^{-jkr}}{r} \tag{2.30}$$

$$E_{\phi_1}(r, \theta, \phi) = \frac{jkbE_0}{a} \frac{\cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\cos\phi\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k\sin\theta\cos\phi)^2} \frac{\sin\left(\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}} \cos\theta \cos\phi e^{jk\frac{c}{2}\cos\theta} \frac{e^{-jkr}}{r} \tag{2.31}$$

และเมื่อพิจารณาสนามที่แพร่กระจายจากระนาบ $z = -\frac{c}{2}$ ซึ่งการแพร่กระจายสนามจะเกิด

ในทิศทางตรงข้ามหรือมีความต่างเฟสเป็น π (180 องศา) กับระนาบ $z = \frac{c}{2}$ ดังนั้น

$$E_{\theta 2}(r, \theta, \phi) = \frac{jkbE_0}{a} \frac{\cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\cos\phi\right) \sin\left(\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k\sin\theta\cos\phi)^2} \frac{1}{\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}} \sin\phi e^{-j\left(k\frac{c}{2}\cos\theta - \pi\right)} \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.32)$$

$$E_{\phi 2}(r, \theta, \phi) = \frac{jkbE_0}{a} \frac{\cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\cos\phi\right) \sin\left(\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k\sin\theta\cos\phi)^2} \frac{1}{\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}} \cos\theta \cos\phi e^{-j\left(k\frac{c}{2}\cos\theta - \pi\right)} \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.33)$$

ดังนั้นสนามที่แพร่กระจายจากช่องเปิดทั้งสองด้านของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_{\theta}(r, \theta, \phi) = E_{\theta 1}(r, \theta, \phi) + E_{\theta 2}(r, \theta, \phi) \quad (2.34)$$

$$E_{\phi}(r, \theta, \phi) = E_{\phi 1}(r, \theta, \phi) + E_{\phi 2}(r, \theta, \phi) \quad (2.35)$$

จากกฎของออยเลอร์ $\sin kx = \frac{e^{jkx} - e^{-jkx}}{2j}$ และ $\cos kx = \frac{e^{jkx} + e^{-jkx}}{2}$ ดังนั้นองค์ประกอบของ

สนามที่แพร่กระจายจากช่องเปิดทั้งสองด้านของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อสังเกตที่สนามระยะไกลสามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_{\theta}(r, \theta, \phi) \approx -\frac{jkbE_0}{a} \frac{\cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\cos\phi\right) \sin\left(\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k\sin\theta\cos\phi)^2} \frac{1}{\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}} \sin\phi \sin\left(k\frac{c}{2}\cos\theta\right) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.36)$$

$$E_{\phi}(r, \theta, \phi) \approx -\frac{jkbE_0}{a} \frac{\cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\cos\phi\right) \sin\left(\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k\sin\theta\cos\phi)^2} \frac{1}{\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}} \cos\theta \cos\phi \sin\left(k\frac{c}{2}\cos\theta\right) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.37)$$

คุณลักษณะของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อพิจารณาในกรณีองค์ประกอบเดียวสามารถใช้สมการที่ (2.36) และ (2.37) ซึ่งในการพิจารณาจะพิจารณาในลักษณะกราฟ 2 มิติ โดยจะพิจารณาสองระนาบ กล่าวคือระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) หรือระนาบ yz ($0 \leq \theta \leq \pi$, $\phi = \pi/2$) และระนาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (H-plane) หรือระนาบ xz ($0 \leq \theta \leq \pi$, $\phi = 0$) โดยผลจากการวิเคราะห์จะแสดงไว้ในบทที่ 3

2.4.2 วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก [13]

ฟังก์ชันกรีนเป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ฟังก์ชันขับเป็นฟังก์ชันอิมพัลส์ (Impulse function) หรือฟังก์ชันไดเรคเดลตา (Dirac delta function) เพื่อหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) การหาคำตอบของฟังก์ชันขับจริงได้โดยการทับซ้อน (Superposition) ของฟังก์ชันกรีนกับฟังก์ชันขับ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่เข้าใจร่วมกันว่าฟังก์ชันกรีนเป็นฟังก์ชันตอบสนองอิมพัลส์ หรือฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ในทฤษฎีระบบหรือทฤษฎีวงจร

2.4.2.1 คำจำกัดความของฟังก์ชันกรีนไดเอดิก

ฟังก์ชันกรีนไดเอดิกเป็นฟังก์ชันตอบสนองอิมพัลส์หรือฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่มีแหล่งกำเนิดเป็นฟังก์ชันอิมพัลส์ กล่าวได้ว่าฟังก์ชันกรีนไดเอดิกคือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดจากไดโพลจิ๋ว นั่นเอง ในปัญหาที่แตกต่างกันจะมีเงื่อนไขขอบเขตที่ต่างกันทำให้ฟังก์ชันกรีนแตกต่างกันตามเงื่อนไขขอบเขตนั้นๆ ดังนั้นการรู้ฟังก์ชันกรีนไดเอดิกของปัญหานั้นๆ ซึ่งมีแหล่งกำเนิดเป็นฟังก์ชันอิมพัลส์ ดังนั้นการหาคำตอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอันเนื่องจากการกระจายกระแสในรูปแบบใดๆ ได้โดยการอินทิเกรตตลอดปริมาตรของแหล่งกำเนิดของผลคูณระหว่างฟังก์ชันกรีนไดเอดิกและการกระจายความหนาแน่นกระแสที่แหล่งกำเนิดนั้นๆ

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในหลักการและความหมายของฟังก์ชันกรีนไดเอดิกยิ่งขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึงพีชคณิตของฟังก์ชันกรีนไดเอดิก และการเขียนสมการแมกซ์เวลล์ในรูปของไดเอดิก โดยรวบรวมไว้ในภาคผนวก ข และในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้สนามมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นฮาร์มอนิก ซึ่งแสดงด้วยฟังก์ชัน $e^{-j\omega t}$ นอกจากนี้ได้แสดงวิธีการหาคำตอบของสนามไฟฟ้าของปัญหาที่มีโครงสร้างของโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งจะอธิบายรายละเอียดต่อไป

2.4.2.2 ชนิดของฟังก์ชันกรีนชนิดไดเอดิก

ฟังก์ชันกรีนไดเอดิกแบบไฟฟ้าสามารถจำแนกตามเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับฟังก์ชันได้สองชนิด คือ ฟังก์ชันกรีนไดเอดิกแบบไฟฟ้าชนิดที่หนึ่ง $\overline{\overline{G}}_{e1}$ ซึ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตดิริคเลต์ (Dirichlet boundary condition) นั่นคือ

$$\hat{n} \times \overline{\overline{G}}_{e1}(\overline{R}, \overline{R}') = 0 \quad (2.38)$$

เมื่อฟังก์ชันไดเอดิกแบบไฟฟ้าชนิดที่สอง $\overline{\overline{G}}_{e2}$ จะต้องรองรับเงื่อนไขขอบเขตของนอยมานน์ (Neumann boundary condition) นั่นคือ

$$\hat{n} \times \nabla \times \overline{\overline{G}}_{e2}(\overline{R}, \overline{R}') = 0 \quad (2.39)$$

จากสมการที่ (2.38) พบว่าองค์ประกอบของฟังก์ชันกรีนไดเอดิกชนิดที่หนึ่งในแนวสัมผัสกับผิวของปัญหามีค่าเป็นศูนย์ และจากสมการ (2.49) องค์ประกอบของฟังก์ชันกรีนไดเอดิกชนิดที่สองในแนวตั้งฉากกับผิวของปัญหามีค่าเป็นศูนย์

สำหรับฟังก์ชันกรีน ไดแอดิกแบบแม่เหล็กใช้เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริคท์และเงื่อนไขขอบเขตนอยมานน์สามารถแบ่งฟังก์ชันเป็นสองชนิดเช่นเดียวกับฟังก์ชันกรีน ไดแอดิกแบบไฟฟ้า กล่าวคือ

$$\hat{n} \times \overline{\overline{G}}_{m1}(\overline{R}, \overline{R}') = 0 \quad (2.40)$$

และ

$$\hat{n} \times \nabla \times \overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') = 0 \quad (2.41)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{\overline{G}}_e$ และ $\overline{\overline{G}}_m$ ในสมการ (ข-45ก) จะได้ว่า

$$\nabla \times \overline{\overline{G}}_{e2}(\overline{R}, \overline{R}') = \overline{\overline{G}}_{m1}(\overline{R}, \overline{R}') \quad (2.42)$$

และเมื่ออาศัยคุณสมบัติสมมาตรของฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์ จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\overline{\overline{G}}_{e1}$ และ $\overline{\overline{G}}_{m2}$ ได้ดังนี้

$$\nabla \times \overline{\overline{G}}_{e1}(\overline{R}, \overline{R}') = \overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') \quad (2.43)$$

และเมื่อพิจารณาสมการ (ข-45ข) ร่วมกับเงื่อนไขดิริคท์ จะหา $\overline{\overline{G}}_{e1}$ ได้ดังนี้

$$\nabla \times \overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') = I\delta(\overline{R} - \overline{R}') + k^2 \overline{\overline{G}}_{e1}(\overline{R}, \overline{R}') \quad (2.44)$$

และเงื่อนไขนอยมานน์ จะหา $\overline{\overline{G}}_{e2}$ ได้ดังนี้

$$\nabla \times \overline{\overline{G}}_{m1}(\overline{R}, \overline{R}') = I\delta(\overline{R} - \overline{R}') + k^2 \overline{\overline{G}}_{e2}(\overline{R}, \overline{R}') \quad (2.45)$$

สมการที่ (2.42) และ (2.44) ที่ได้นั้น เป็นความสัมพันธ์ที่สำคัญสำหรับหา $\overline{\overline{G}}_{m1}$ เมื่อทราบ $\overline{\overline{G}}_{e2}$ และ $\overline{\overline{G}}_{e1}$ เมื่อทราบ $\overline{\overline{G}}_{m2}$

สำหรับบางกรณีโครงสร้างที่กระจัดกระจายคลื่น (Scattering body) ซึ่งบางส่วนที่เป็นตัวนำ เช่น โครงสร้างโพรงวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ไม่มีแหล่งกำเนิดกระแสดจากภายนอกของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 จะสามารถหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปมาตรฐานโดยใช้สมการดังนี้

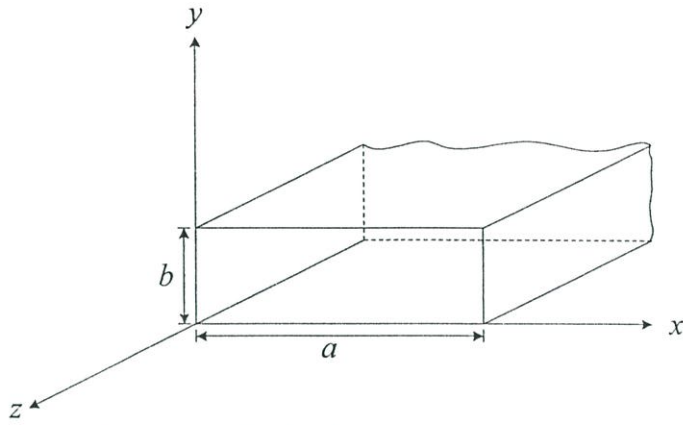
$$\overline{E}(\overline{R}) = -j\omega\mu_0 \iiint_v \overline{\overline{G}}_{e1}(\overline{R}, \overline{R}') \cdot \overline{J}(\overline{R}') dv' \quad (2.46ก)$$

$$\overline{E}(\overline{R}) = - \iint_{S_a} \left[\nabla \times \overline{\overline{G}}_{e2}(\overline{R}, \overline{R}') \right] \cdot [\hat{n}' \times \overline{E}(\overline{R}')] ds' \quad (2.46ข)$$

$$\overline{H}(\overline{R}) = \iiint_v \left[\nabla \times \overline{\overline{G}}_{e1}(\overline{R}, \overline{R}') \right] \cdot \overline{J}(\overline{R}') dv' \quad (2.46ค)$$

$$\overline{H}(\overline{R}) = j\omega\varepsilon_0 \iint_{S_a} \overline{\overline{G}}_{e2}(\overline{R}, \overline{R}') \cdot [\hat{n}' \times \overline{E}(\overline{R}')] ds' \quad (2.46ง)$$

โดยที่ \overline{R} คือตำแหน่งเวกเตอร์ของจุดสังเกต และ \overline{R}' คือตำแหน่งเวกเตอร์ของจุดกำเนิด



รูปที่ 2.8 โครงสร้างปัญหาที่เป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยม

2.4.2.3 ฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์ในพิกัดสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์ (Vector wave function) คือฟังก์ชันเจาะจง (Eigen function) หรือฟังก์ชันคุณลักษณะ (Characteristic function) ที่เป็นผลเฉลยของสมการคลื่นเวกเตอร์เอกพันธ์ (Homogeneous vector wave equation)

$$\nabla \times \nabla \times \bar{F} - \kappa^2 \bar{F} = 0 \tag{2.47}$$

สมการ (2.47) เป็นสมการคลื่นเวกเตอร์เอกพันธ์ โดยที่ κ เป็นเวกเตอร์ค่าใดๆ ซึ่งจะได้ฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์ในระบบคาร์ทีเซียน (Cartesian) หรือ ฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์เรกติลิเนียร์ (Rectilinear vector wave function) ดังต่อไปนี้

$$\bar{F} = \nabla \times (\psi_1 \bar{c}) \tag{2.48}$$

โดยที่ ψ_1 คือ ฟังก์ชันคุณลักษณะซึ่งสอดคล้องกับสมการคลื่นสเกลาร์ (Scalar wave equation)

$$\nabla^2 \psi + \kappa^2 \psi = 0 \tag{2.49}$$

κ คือค่าคงที่ใดๆ (Arbitrary constant) และ \bar{c} เป็นค่าเวกเตอร์คงที่ (Constant vector) ได้แก่ \hat{x} , \hat{y} หรือ \hat{z} เพื่อความสะดวกจะเรียก \bar{c} ใหม่ว่าเวกเตอร์นำร่อง (Piloting vector) และ ψ ว่าเป็นฟังก์ชันกำเนิด (Generating function) หาก ψ_1 เป็นผลเฉลยสำหรับสมการ (2.49) จะได้ (2.48) เป็นผลเฉลยสำหรับสมการ (2.47) ซึ่งเมื่อกำหนดให้ \bar{M} เป็นฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์ นั่นคือ

$$\bar{M}_1 = \nabla \times (\psi_1 \bar{c}) \tag{2.50}$$

ส่วนฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์อีกชุดหนึ่งซึ่งแทนด้วย \bar{N} จะได้ว่า

$$\bar{N}_2 = \frac{1}{\kappa} \nabla \times \nabla \times (\psi_2 \bar{c}) \tag{2.51}$$

โดยที่ ψ_2 คือฟังก์ชันคุณลักษณะที่สอดคล้องกับสมการ (2.49) และ \bar{N}_2 คือผลเฉลยสำหรับสมการ (2.47) ในกรณีที่ใช้ฟังก์ชันกำเนิด ψ เหมือนกันทั้ง \bar{M} และ \bar{N} จะได้ความสัมพันธ์ที่สมมาตรกันระหว่างฟังก์ชันสองชนิดนี้

$$\bar{N} = \frac{1}{\kappa} \nabla \times \bar{M} \quad (2.52)$$

$$\bar{M} = \frac{1}{\kappa} \nabla \times \bar{N} \quad (2.53)$$

ในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีลักษณะเป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงไว้ใน รูปที่ 2.8 (จะทำการย้ายพิกัดให้ x และ y อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากภายหลัง) กำหนดให้เวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{a}_z แทนเวกเตอร์นำร่อง \bar{c} และในการวิเคราะห์เพื่อหาฟังก์ชันเวกเตอร์คลื่น (\bar{M} \bar{N} และ \bar{L}) โดยใช้วิธี \bar{G}_m (Magnetic dyadic Green function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันโซลินอยด์ (Solenoidal) โดยที่ \bar{L} ไม่จำเป็นต้องใช้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี \bar{G}_e และ \bar{G}_A ซึ่งเป็นจำเป็นต้องมี \bar{L} ด้วยทำให้เกิดความซับซ้อนยิ่งขึ้น [13] แต่ท้ายที่สุดคำตอบที่ได้จะเหมือนกัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธี \bar{G}_m เท่านั้น

สำหรับการพิสูจน์หาฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์โดยใช้วิธีแยกตัวแปร (Separation of variable method) ใน โครงสร้างดังรูปที่ 2.8 (รายละเอียดจากภาคผนวก ก) นั้นจะได้

$$\psi = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y) e^{-jk_z z} \quad (2.54)$$

เมื่อ $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = \kappa^2$

$$k_x = \frac{m\pi}{a}, \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

โดยที่ m และ n ต้องไม่เป็นศูนย์พร้อมกัน

$$k_y = \frac{n\pi}{b}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

ในกรณีของท่อนำคลื่นที่ทำให้เกิดโหมด TE นั้น เงื่อนไขของขอบเขตปัญหาในสมการที่ (2.54) $B=0$ และ $D=0$ ทำให้ได้

$$\psi_{emn}(k_z) = A_{mn} \cos(k_x x) \cos(k_y y) e^{-jk_z z} \quad (2.55)$$

ส่วนท่อนำคลื่นที่ทำให้เกิดโหมด TM เงื่อนไขของขอบเขตปัญหาในสมการที่ (2.54) $A=0$ และ $C=0$ ฟังก์ชันคลื่นจะเป็น

$$\psi_{omn}(k_z) = B_{mn} \sin(k_x x) \sin(k_y y) e^{-jk_z z} \quad (2.56)$$

A_{mn} และ B_{mn} เป็นค่าคงที่เป็น AC และ BD ตามลำดับ ส่วนตัวห้อย e และ o นั้น แสดงถึงเลขคู่และเลขคี่ตามลำดับ ถ้าคลื่นในท่อนำคลื่นถูกนอร์มัลไลซ์ให้ $A_{mn} = B_{mn} = 1$ ส่วน \bar{M}_{emn} และ \bar{N}_{omn} จะถูกกำหนดให้เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตดิริคเลต์ที่ผนังท่อนำคลื่น นั่นคือ

$$\hat{n} \times \bar{M}_{emn} = 0 \quad (2.57)$$

และ

$$\hat{n} \times \bar{N}_{omn} = 0 \quad (2.58)$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \bar{M}_{emn}(k_z) &= \nabla \times [\hat{a}_z \psi_{emn}(k_z)] \\ &= (-\hat{a}_x k_y C_x S_y + \hat{a}_y k_x S_x C_y) e^{-jk_z z} \end{aligned} \quad (2.59)$$

และ

$$\begin{aligned}\bar{N}_{omn}(k_z) &= \frac{1}{\kappa} \nabla \times \nabla \times [\hat{a}_z \psi_{omn}(k_z)] \\ &= \frac{1}{\kappa} (-\hat{a}_x j k_x C_x S_y - \hat{a}_y j k_y S_x C_y + \hat{a}_z k_c^2 S_x S_y) e^{-jk_z z}\end{aligned}\quad (2.60)$$

เมื่อ $\bar{M}_{emn}(k_z)$ และ $\bar{N}_{omn}(k_z)$ แสดงสนามไฟฟ้าของคลื่น TE_{mn} และ TM_{mn} ตามลำดับ โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned}S_x &= \sin(k_x x) & C_x &= \cos(k_x x) \\ S_y &= \sin(k_y y) & C_y &= \cos(k_y y) \\ \kappa^2 &= k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k_c^2 + k_z^2 & k_c^2 &= k_x^2 + k_y^2\end{aligned}$$

ค่าคงที่ k_c คือเลขคลื่นตัดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Cut-off wave number of rectangular waveguide) และจากความสัมพันธ์ที่สมมาตรกันในสมการที่ (2.52) และ (2.53) ฟังก์ชันเวกเตอร์ที่เหมาะสมที่จะแสดงสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่น คือ

$$\begin{aligned}\bar{M}_{omn}(k_z) &= \frac{1}{\kappa} \nabla \times \bar{N}_{omn}(k_z) = \nabla \times [\hat{a}_z \psi_{omn}(k_z)] \\ &= (\hat{a}_x k_y S_x C_y - \hat{a}_y k_x C_x S_y) e^{-jk_z z}\end{aligned}\quad (2.61)$$

$$\begin{aligned}\bar{N}_{emn}(k_z) &= \frac{1}{\kappa} \nabla \times \bar{M}_{emn}(k_z) = \frac{1}{\kappa} \nabla \times \nabla \times [\hat{a}_z \psi_{emn}(k_z)] \\ &= \frac{1}{\kappa} (\hat{a}_x j k_x k_z S_x C_y + \hat{a}_y j k_z k_y C_x S_y + \hat{a}_z k_c^2 C_x C_y) e^{-jk_z z}\end{aligned}\quad (2.62)$$

\bar{M}_{omn} และ \bar{N}_{emn} เป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตนอyman นั้นคือ

$$\hat{n} \times \left\{ \begin{aligned} \nabla \times \bar{M}_{omn}(k_z) \\ \nabla \times \bar{N}_{emn}(k_z) \end{aligned} \right\} = 0 \quad (2.63)$$

ดังนั้นสามารถสรุปฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์ที่สมบูรณ์ได้ดังนี้

$$\bar{M}_{e\ o\ mn}(k_z) = \nabla \times \left[\hat{a}_z \psi_{e\ o\ mn}(k_z) \right] \quad (2.64)$$

$$\bar{N}_{e\ o\ mn}(k_z) = \frac{1}{\kappa} \nabla \times \nabla \times \left[\hat{a}_z \psi_{e\ o\ mn}(k_z) \right] \quad (2.65)$$

เมื่อ

$$\psi_{e\ o\ mn}(k_z) = \begin{pmatrix} \cos \frac{m\pi x}{a} & \cos \frac{n\pi y}{b} \\ \sin \frac{m\pi x}{a} & \sin \frac{n\pi y}{b} \end{pmatrix} e^{-jk_z z} = \begin{pmatrix} C_x & C_y \\ S_x & S_y \end{pmatrix} e^{-jk_z z} \quad (2.66)$$

$$\kappa^2 = \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 + k_z^2 = k_c^2 + k_z^2 \quad (2.67)$$

2.4.2.4 ฟังก์ชันกรีนไดแอดิกในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก [13]

อันดับแรกประยุกต์ใช้วิธีการของ โอห์มเรย์ลี (Ohm-Rayleigh method) เพื่อหาฟังก์ชันกรีนไดแอดิกแบบแม่เหล็กชนิดที่สองของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งจะสอดคล้องกับสมการ

$$\nabla \times \nabla \times \overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') - k^2 \overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') = \nabla \times [\overline{\overline{I}}\delta(\overline{R} - \overline{R}')] \quad (2.68)$$

ซึ่งสมการนี้จะเป็นจริงในช่วง $0 \leq x \leq a$ $0 \leq y \leq b$ และ $-\infty \leq z \leq \infty$ ดังรูปที่ 2.8 และฟังก์ชันกรีนไดแอดิกนี้ต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตของนอยมานน์ด้วย ดังสมการ

$$\hat{n} \times \nabla \times \overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') = 0 \quad (2.69)$$

ที่ตำแหน่ง $x=0$ และ a ส่วน $y=0$ และ b เมื่อ $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ และจากวิธีของโอห์มเรย์ลีนี้ การกระจายฟังก์ชันเงาของฟังก์ชันแหล่งกำเนิด $\nabla \times [\overline{\overline{I}}\delta(\overline{R} - \overline{R}')] โดย$ ใช้ฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์โซลินอยด์ที่ได้กล่าวมาแล้ว ฟังก์ชันที่เหมาะสมคือ $\overline{M}_{omn}(k_z)$ และ $\overline{N}_{omn}(k_z)$ เนื่องจากสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตในสมการที่ (2.69) ดังนั้น

$$\nabla \times [\overline{\overline{I}}\delta(\overline{R} - \overline{R}')] = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} [\overline{N}_{omn}(k_z)\overline{A}_{emn}(k_z) + \overline{M}_{omn}(k_z)\overline{B}_{omn}(k_z)] dk_z \quad (7.70)$$

สำหรับ $\overline{A}_{emn}(k_z)$ และ $\overline{B}_{omn}(k_z)$ เป็นสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ (Vector coefficient) ซึ่งหาได้โดยการอินทิเกรตตลอดปริมาตรในสมการที่ (7.68) หลังจากที่คุณเชิงสเกลาร์ข้างหน้าด้วย $\overline{N}_{em'n'}(-k'_z)$ และ $\overline{M}_{om'n'}(-k'_z)$ และใช้ทฤษฎีเกาส์ไดแอดิก (Dyadic Gauss Theorem) ร่วมกับความสัมพันธ์ออร์โธโกนัล (Orthogonal relation) ระหว่างฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์ ดังนั้น

$$\overline{A}_{emn}(k_z) = \frac{(2 - \delta_o)\kappa}{\pi abk_c^2} \overline{M}'_{emn}(-k_z) \quad (2.71)$$

$$\overline{B}_{omn}(k_z) = \frac{(2 - \delta_o)\kappa}{\pi abk_c^2} \overline{N}'_{omn}(-k_z) \quad (2.72)$$

เมื่อ δ_o เป็นฟังก์ชันเดลตาโครเนคเกอร์ (Kronecker delta function) ที่มีค่าเป็น

$$\delta_o = \begin{cases} 1 & m \vee n = 0 \\ 0 & m \wedge n \neq 0 \end{cases}$$

เมื่อแทนสมการ (2.71) และ (2.72) ในสมการที่ (2.70) การกระจายฟังก์ชันเงาของ $\nabla \times [\overline{\overline{I}}\delta(\overline{R} - \overline{R}')] จะเป็น$

$$\nabla \times [\overline{\overline{I}}\delta(\overline{R} - \overline{R}')] = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2 - \delta_o)\kappa}{\pi abk_c^2} [\overline{N}_{emn}(k_z)\overline{M}'_{emn}(-k_z) + \overline{M}_{omn}(k_z)\overline{N}'_{omn}(-k_z)] dk_z \quad (2.73)$$

เพื่อหา $\overline{\overline{G}}_{m2}$ จะใช้การกระจายฟังก์ชันแหล่งกำเนิด ดังในสมการ (2.73) แต่จะมีสัมประสิทธิ์ไม่ทราบค่า $a(k_z)$ และ $b(k_z)$ เพิ่มขึ้นมา ดังนั้น

$$\overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') = \int_{-x}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_o)\kappa}{\pi ab k_c^2} [a(k_z) \overline{N}_{emn}(k_z) \overline{M}'_{emn}(-k_z) + b(k_z) \overline{M}_{omn}(k_z) \overline{N}'_{omn}(-k_z)] dk_z \quad (2.74)$$

เมื่อแทนสมการ (2.73) และ (2.74) ในสมการ (2.68) และทำให้

$$\nabla \times \nabla \times \begin{bmatrix} \overline{N}_{emn} \\ \overline{M}_{omn} \end{bmatrix} = \kappa^2 \begin{bmatrix} \overline{N}_{emn} \\ \overline{M}_{omn} \end{bmatrix}$$

จะได้สัมประสิทธิ์ $a(k_z)$ และ $b(k_z)$ เป็น

$$a(k_z) = b(k_z) = \frac{1}{\kappa^2 - k^2}$$

ดังนั้น $\overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}')$ จะเป็น

$$\overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') = \int_{-x}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_o)\kappa}{\pi ab k_c^2 (\kappa^2 - k^2)} [\overline{N}_{emn}(k_z) \overline{M}'_{emn}(-k_z) + \overline{M}_{omn}(k_z) \overline{N}'_{omn}(-k_z)] dk_z \quad (2.75)$$

และจากที่ใช้การอินทิเกรตโครงข่าย (Contour Integration) แล้วจะหา $\overline{\overline{G}}_{m2}$ ได้ดังนี้

$$\overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') = -\frac{jk}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2-\delta_o}{k_c^2 k_z} [\overline{N}_{emn}(\pm k_z) \overline{M}'_{emn}(\mp k_z) + \overline{M}_{omn}(\pm k_z) \overline{N}'_{omn}(\mp k_z)] \quad \begin{matrix} z > z' \\ < \end{matrix} \quad (2.76)$$

เมื่อ $k_z = (k^2 - k_c^2)^{1/2}$ มีค่าจริงเมื่อ k มีค่ามากกว่า k_c และมีค่าเป็นจินตภาพเมื่อ k มีค่าน้อยกว่า k_c

จากสมการแมกซ์เวลล์ในรูปแบบของไดแอดิก

$$\overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}') = \overline{\overline{I}} \delta(\overline{R} - \overline{R}') + k^2 \overline{\overline{G}}_{e1}(\overline{R}, \overline{R}') \quad (2.77)$$

ร่วมกับฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วยเฮวิไซด์ (Heaviside unit step function) ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตดิริคเล่

$$\hat{n} \times \overline{\overline{G}}_{e1}(\overline{R}, \overline{R}') = 0 \quad (2.78)$$

สำหรับ $\overline{\overline{G}}_{e1}$ หาได้ดังนี้

$$\overline{\overline{G}}_{e1}(\overline{R}, \overline{R}') = -\hat{a}_z \hat{a}_z \frac{1}{k^2} \delta(\overline{R} - \overline{R}') - \frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2-\delta_o}{k_c^2 k_z} [\overline{M}_{emn}(\pm k_z) \overline{M}'_{emn}(\mp k_z) + \overline{N}_{omn}(\pm k_z) \overline{N}'_{omn}(\mp k_z)] \quad \begin{matrix} z > z' \\ < \end{matrix} \quad (2.79)$$

การใช้สัญลักษณ์ของฟังก์ชันไดแอดิกข้างต้นที่ผ่านมา แต่ละพารามิเตอร์สื่อความหมายว่าเป็นไดแอดิกกรีนชนิดใด และเกิดจากแหล่งกำเนิดชนิดใด ได้ดังนี้

$\overline{\overline{G}}_{e1}(\overline{R}, \overline{R}')$ หมายถึงฟังก์ชันกรีนไดแอดิกไฟฟ้าที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

$\overline{\overline{G}}_{m1}(\overline{R}, \overline{R}')$ เป็นฟังก์ชันกรีนไดแอดิกไฟฟ้าที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

$\overline{\overline{G}}_{e2}(\overline{R}, \overline{R}')$ เป็นฟังก์ชันกรีนไดแอดิกแม่เหล็กที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก

$\overline{\overline{G}}_{m2}(\overline{R}, \overline{R}')$ เป็นฟังก์ชันกรีนไดแอดิกแม่เหล็กที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

สำหรับโครงสร้างของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เนื่องด้วยเงื่อนไขโครงสร้างของสายอากาศ ดังนั้นจะมีบางองค์ประกอบของฟังก์ชันกรีนไดโอดิก แต่ละชนิดเท่านั้นที่จำเป็นสำหรับปัญหานี้ โดยอาศัยสมการที่ (2.59) (2.60) (2.76) และ (2.79) สามารถแสดงแต่ละองค์ประกอบดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{G}_{e1}(\bar{R}, \bar{R}') &= -\hat{a}_z \hat{a}_z \frac{1}{k^2} \delta(\bar{R} - \bar{R}') \\ &\quad - \frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2 - \delta_0}{k_c^2 k_z} \left[\bar{M}_{emn}(\pm k_z) \bar{M}'_{emn}(\mp k_z) + \bar{N}_{omn}(\pm k_z) \bar{N}'_{omn}(\mp k_z) \right] \quad \begin{matrix} z > z' \\ < z' \end{matrix} \end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \bar{M}_{emn}(k_z) &= (-\hat{a}_x k_y C_x S_y + \hat{a}_y k_x S_x C_y) e^{-jk_z z} \\ \bar{M}'_{emn}(-k_z) &= (-\hat{a}_x k_y C'_x S'_y + \hat{a}_y k_x S'_x C'_y) e^{jk_z z} \\ \bar{N}_{omn}(k_z) &= \frac{1}{K} (-\hat{a}_x j k_z k_x C_x S_y - \hat{a}_y j k_z k_y S_x C_y + \hat{a}_z k_c^2 S_x S_y) e^{-jk_z z} \\ \bar{N}'_{omn}(-k_z) &= \frac{1}{K} (\hat{a}_x j k_z k_x C_x S_y + \hat{a}_y j k_z k_y S_x C_y + \hat{a}_z k_c^2 S_x S_y) e^{jk_z z} \end{aligned}$$

จะได้ว่า

$$G_{e1}^{xy} = -\frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2 - \delta_0}{k_c^2 k_z} \begin{cases} \left(-k_x k_y C_x S_y S'_x C'_y + \frac{1}{K^2} k_z^2 k_x k_y C_x S_y S'_x C'_y \right) e^{-jk_z(z-z')} & ; z > z' \\ \left(-k_x k_y C_x S_y S'_x C'_y + \frac{1}{K^2} k_z^2 k_x k_y C_x S_y S'_x C'_y \right) e^{-jk_z(z'-z)} & ; z < z' \end{cases} \quad (2.80)$$

$$G_{e1}^{yy} = -\frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2 - \delta_0)}{k_c^2 k_z} k_x k_y \left(\frac{k_z^2}{K^2} - 1 \right) C_x S_y S'_x C'_y e^{-jk_z|z-z'|} \quad (2.81)$$

$$G_{e1}^{yy} = -\frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2 - \delta_0}{k_c^2 k_z} \begin{cases} \left(k_x^2 S_x C_y S'_x C'_y + \frac{1}{K^2} k_z^2 k_y^2 S_x C_y S'_x C'_y \right) e^{-jk_z(z-z')} & ; z > z' \\ \left(k_x^2 S_x C_y S'_x C'_y + \frac{1}{K^2} k_z^2 k_y^2 S_x C_y S'_x C'_y \right) e^{-jk_z(z'-z)} & ; z < z' \end{cases} \quad (2.82)$$

$$G_{e1}^{yy} = -\frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2 - \delta_0)}{k_c^2 k_z} \left\{ k_x^2 + \frac{1}{K^2} k_z^2 k_y^2 \right\} S_x C_y S'_x C'_y e^{-jk_z|z-z'|} \quad (2.83)$$

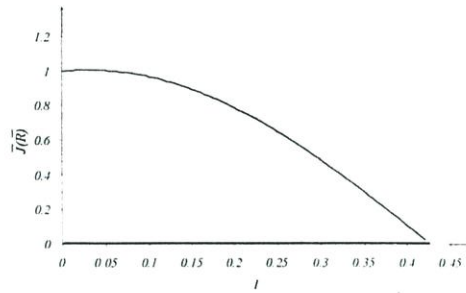
$$G_{e1}^{zy} = -\frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2 - \delta_0}{k_c^2 k_z} \begin{cases} \frac{j}{K^2} k_c^2 k_z k_y S_x S_y S'_x C'_y e^{-jk_z(z-z')} & ; z > z' \\ -\frac{j}{K^2} k_c^2 k_z k_y S_x S_y S'_x C'_y e^{-jk_z(z-z')} & ; z < z' \end{cases}$$

$$G_{e1}^{zy} = \pm \frac{1}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2 - \delta_0}{K^2} k_y S_x S_y S'_x C'_y e^{-jk_z|z-z'|} \quad \begin{matrix} z > z' \\ < z' \end{matrix} \quad (2.84)$$

ในการพิจารณาสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก จากความสัมพันธ์ในสมการที่ (2.46ก) ดังนั้น

$$\bar{E}(\bar{R}) = -j\omega\mu_0 \int_0^l \int_{-w/2}^{w/2} (\hat{a}_x \hat{a}_y G_{e1}^{xy} + \hat{a}_y \hat{a}_y G_{e1}^{yy} + \hat{a}_z \hat{a}_y G_{e1}^{zy}) \cdot \hat{a}_y J(y') dy' dx' \quad (2.85)$$

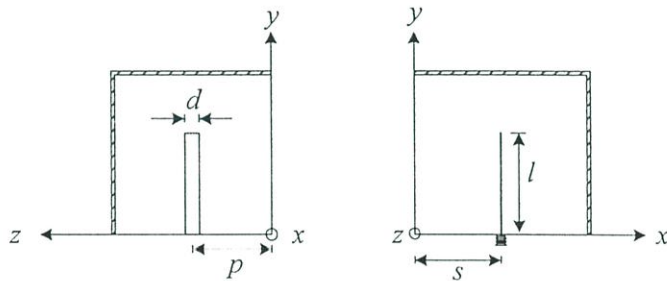
เมื่อพิจารณาให้กระแสมากที่สุดที่จุดป้อนสัญญาณดังรูปที่ 2.9 ดังนี้



รูปที่ 2.9 ลักษณะการกระจายกระแสของโพรบเชิงไฟฟ้า

$$\bar{J}(\bar{R}') = \hat{a}_y \frac{I_m}{d} \sin k(l - y') \quad (2.86)$$

โดยที่ I_m คือกระแสที่ป้อนสูงสุด d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบเชิงเส้นไฟฟ้า และเมื่อพิจารณาลักษณะของโพรบให้มีลักษณะเป็นแถบสตริป $w = \pi d$ (ลักษณะของโพรบที่มีหน้าตัดวงกลมแล้วกางออก) ดังแสดงในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งและลักษณะของโพรบเชิงไฟฟ้า

$$E_x = -j\omega\mu_0 \int_0^{w/2} \int_{-w/2}^0 \left\{ -\frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{k_c^2 k_z} k_x k_y \left(\frac{k_z^2}{\kappa^2} - 1 \right) C_x S_y S_x' C_y' e^{-jk_z |z-z'|} \right\} \times \frac{I_m}{d} \sin k(l - y') dx' dy' \quad (2.87)$$

ในการพิจารณาดำแหน่งของโพรบร่วมด้วย ดังนั้นจะพิจารณาดำแหน่งของโพรบใหม่เป็น $x' \rightarrow x' + s$ และ $z' \rightarrow z' + p$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (2.87) ใหม่ได้เป็น

$$E_x = \frac{-\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{k_c^2 k_z} k_x k_y \left(\frac{k_z^2}{\kappa^2} - 1 \right) C_x S_y e^{-jk_z |z-z'|} \int_{-w/2}^{w/2} \sin k_x (x' + s) dx' \int_0^l \cos k_y y' \sin k(l - y') dy' \quad (2.88)$$

และจากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันตรีโกณมิติ

$$\cos A \sin B = \frac{1}{2} \{ \sin(A + B) - \sin(A - B) \} \quad (2.89)$$

$$2 \sin A \sin B = \cos(A - B) - \cos(A + B) \quad (2.90)$$

จากสมการที่ (2.88) แยกพิจารณาได้ว่า

$$\begin{aligned} \int_{-w/2}^{w/2} \sin k_x(x' + s) dx' &= -\frac{1}{k_x} \cos k_x(x' + s) \Big|_{-w/2}^{w/2} \\ &= -\frac{1}{k_x} \left\{ \cos k_x \left(\frac{w}{2} + s \right) - \cos k_x \left(-\frac{w}{2} + s \right) \right\} \\ &= \frac{2}{k_x} \sin(k_x s) \sin \left(k_x \frac{w}{2} \right) \end{aligned} \quad (2.91)$$

และ

$$\begin{aligned} \int_0^l \cos(k_y y') \sin[k(l - y')] dy' &= \int_0^l \frac{1}{2} \left\{ \sin[k_y y' + k(l - y')] - \sin[k_y y' - k(l - y')] \right\} dy' \\ &= \int_0^l \frac{1}{2} \left\{ \sin[(k_y - k)y' + kl] - \sin[(k_y + k)y' - kl] \right\} dy' \\ &= \frac{1}{2} \left\{ -\frac{1}{k_y - k} \cos[(k_y - k)y' + kl] + \frac{1}{k_y + k} \cos[(k_y + k)y' - kl] \right\} \Big|_0^l \\ &= -\frac{k}{k_y^2 - k^2} \left\{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \right\} \end{aligned} \quad (2.92)$$

นำ (2.91) และ (2.92) แทนในสมการที่ (2.88) ดังนั้น

$$\begin{aligned} E_x &= -\frac{\omega \mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2 - \delta_0)}{k_c^2 k_z} k_x k_y \left(\frac{k_z^2}{k^2} - 1 \right) C_x S_y e^{-jk_z |z - (z' + p)|} \\ &\quad \left\{ \frac{2}{k_x} \sin(k_x s) \sin \left(k_x \frac{w}{2} \right) \right\} \left\{ -\frac{k}{k_y^2 - k^2} [\cos(k_y l) - \cos(kl)] \right\} \\ &= -\frac{2\omega \mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2 - \delta_0) k_y k C_x S_y}{k_z k^2 (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin \left(k_x \frac{w}{2} \right) [\cos(k_y l) - \cos(kl)] e^{-jk_z |z - (z' + p)|} \end{aligned} \quad (2.93)$$

กำหนดให้จุดกำเนิด $x' = 0$ และ $z' = 0$ ดังนั้นเขียน (2.93) ใหม่เป็น

$$E_x = -\frac{2\omega \mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2 - \delta_0) k_y k C_x S_y}{k_z k^2 (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin \left(k_x \frac{w}{2} \right) [\cos(k_y l) - \cos(kl)] e^{-jk_z |z - p|} \quad (2.94)$$

จากสมการ (2.83) จะได้

$$G_{cl}^{yy'} = -\frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2 - \delta_0)}{k^2 k_z} (k^2 - k_y^2) S_x C_y S'_x C'_y e^{-jk_z |z - z'|} \quad (2.95)$$

นำ (2.95) แทนในสมการ (2.85) ดังนั้น

$$\begin{aligned}
E_y &= -j\omega\mu_0 \int_0^l \int_{-w/2}^{w/2} \left\{ -\frac{j}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{\kappa^2 k_z} (\kappa^2 - k_y^2) S_x C_y S'_x C'_y e^{-jk_z |z-z'|} \right\} \times \frac{I_m}{d} \sin k(l-y') dy' dx' \\
&= -\frac{\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{\kappa^2 k_z} (\kappa^2 - k_y^2) S_x C_y e^{-jk_z |z-p|} \int_{-w/2}^{w/2} \sin[k_x(x'+s)] dx' \int_0^l \cos(k_y y') \sin[k(l-y')] dy'
\end{aligned} \tag{2.96}$$

จากสมการ (2.91) และ (2.92) นำมาแทนในสมการที่ (2.96) ดังนั้น

$$E_y = \frac{2\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)(\kappa^2 - k_y^2)}{\kappa^2 k_x (k_y^2 - k^2)} S_x C_y k \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{\cos(k_y l) - \cos(kl)\} e^{-jk_z |z-p|} \tag{2.97}$$

และจากสมการที่ (2.84) และ (2.85) ดังนั้น

$$\begin{aligned}
E_z &= -j\omega\mu_0 \int_0^l \int_{-w/2}^{w/2} \left\{ \pm \frac{1}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2-\delta_0}{\kappa^2} k_y S_x S_y S'_x C'_y e^{-jk_z |z-z'|} \right\} \times \frac{I_m}{d} \sin k(l-y') dy' dx' \\
&= \mp \frac{j\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{\kappa^2} k_y S_x S_y e^{-jk_z |z-p|} \int_{-w/2}^{w/2} \sin[k_x(x'+s)] dx' \\
&\quad \int_0^l \cos(k_y y') \sin[k(l-y')] dy' \tag{2.98}
\end{aligned}$$

$$E_z = \pm \frac{2j\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)k_y k S_x S_y}{\kappa^2 k_x (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{\cos(k_y l) - \cos(kl)\} e^{-jk_z |z-p|}; z > z' \tag{2.99}$$

เนื่องจาก $\bar{E}(x, y, z) = \hat{a}_x E_x + \hat{a}_y E_y + \hat{a}_z E_z$ ดังนั้นจาก (2.94) (2.97) และ (2.99) จะได้

$$\begin{aligned}
\bar{E}(x, y, z) &= \frac{2\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)k}{\kappa^2 k_z (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) e^{-jk_z |z-p|} \\
&\quad \times \left\{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \right\} \left\{ -\hat{a}_x k_y C_x S_y + \hat{a}_y \frac{(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} S_x C_y \pm \hat{a}_z \frac{k_y k_z}{k_x} S_x S_y \right\}
\end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้

$$F = \frac{2\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)k}{\kappa^2 k_z (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{\cos(k_y l) - \cos(kl)\} e^{-jk_z |z-p|} \tag{2.100}$$

ดังนั้น

$$\bar{E}(x, y, z) = F \left\{ -\hat{a}_x k_y C_x S_y + \hat{a}_y \frac{(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} S_x C_y \pm \hat{a}_z \frac{k_y k_z}{k_x} S_x S_y \right\} \tag{2.101}$$

ต่อไปจะพิจารณาหากระแสแม่เหล็ก $\bar{M}_1(\bar{R})$ และ $\bar{M}_2(\bar{R})$ โดย

$$\bar{M}_1(\bar{R}) = \bar{E}(\bar{R}) \Big|_{z=c/2} \times \hat{a}_z \tag{2.102}$$

และ

$$\bar{M}_2(\bar{R}) = \bar{E}(\bar{R}) \Big|_{z=-c/2} \times (-\hat{a}_z) \tag{2.103}$$

จากสมการที่ (2.101) (2.102) และ (2.103) ดังนั้น

$$\begin{aligned} \bar{M}_1(\bar{R}) &= \frac{2\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)k}{\kappa^2 k_z (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \left\{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \right\} \\ &\quad \times \left\{ \hat{a}_x \frac{(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} S_x C_y + \hat{a}_y k_y C_x S_y \right\} e^{-jk_z \left| \frac{c}{2} - p \right|} \end{aligned} \quad (2.104)$$

$$\begin{aligned} \bar{M}_2(\bar{R}) &= \frac{2\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)k}{\kappa^2 k_z (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \left\{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \right\} \\ &\quad \times \left\{ -\hat{a}_x \frac{(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} S_x C_y - \hat{a}_y k_y C_x S_y \right\} e^{-jk_z \left| -\frac{c}{2} - p \right|} \end{aligned} \quad (2.105)$$

ต่อไปจะพิจารณาสนามแม่เหล็ก $\bar{H}(\bar{R})$ สามารถหาได้จากสมการ (2.46) (2.59)-(2.62) และสมการที่ (2.76) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\bar{H}(\bar{R}) = \iiint_v \bar{G}_{m2}(\bar{R}, \bar{R}') \cdot \bar{J}(\bar{R}') dv' \quad (2.106)$$

และ

$$\bar{G}_{m2}(\bar{R}, \bar{R}') = -\frac{jk}{ab} \sum_{m,n} \frac{2-\delta_0}{k_c^2 k_z} \left[\bar{N}_{emn}(\pm k_z) \bar{M}'_{emn}(\mp k_z) + \bar{M}_{omn}(\pm k_z) \bar{N}'_{omn}(\mp k_z) \right] dk_z \quad \begin{matrix} z > z' \\ < \end{matrix}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \bar{M}'_{emn}(k_z) &= (-\hat{a}_x k_y C'_x S'_y \hat{x} + \hat{a}_y k_x S'_x C'_y) e^{-jk_z z'} \\ \bar{M}'_{emn}(-k_z) &= (-\hat{a}_x k_y C'_x S'_y + \hat{a}_y k_x S'_x C'_y) e^{jk_z z'} \\ \bar{N}'_{omn}(k_z) &= \frac{1}{k} (-\hat{a}_x j k_z k_x C'_x S'_y - \hat{a}_y j k_z k_y S'_x C'_y + \hat{a}_z k_c^2 S'_x S'_y) e^{-jk_z z'} \\ \bar{N}'_{omn}(-k_z) &= \frac{1}{k} (\hat{a}_x j k_z k_x C'_x S'_y + \hat{a}_y j k_z k_y S'_x C'_y + \hat{a}_z k_c^2 S'_x S'_y) e^{jk_z z'} \\ \bar{N}_{emn}(k_z) &= \frac{1}{k} (\hat{a}_x j k_z k_x S_x C_y + \hat{a}_y j k_z k_y C_x S_y + \hat{a}_z k_c^2 C_x C_y) e^{-jk_z z'} \\ \bar{N}_{emn}(-k_z) &= \frac{1}{k} (-\hat{a}_x j k_z k_x S_x C_y - \hat{a}_y j k_z k_y C_x S_y + \hat{a}_z k_c^2 C_x C_y) e^{jk_z z'} \\ \bar{M}_{omn}(k_z) &= (\hat{a}_x k_y S_x C_y - \hat{a}_y k_x C_x S_y) e^{-jk_z z'} \\ \bar{M}_{omn}(-k_z) &= (\hat{a}_x k_y S_x C_y - \hat{a}_y k_x C_x S_y) e^{jk_z z'} \end{aligned}$$

และ

$$\bar{G}_{m2} = \hat{a}_x \hat{a}_x G_{m2}^{xx} + \hat{a}_x \hat{a}_y G_{m2}^{xy} + \hat{a}_x \hat{a}_z G_{m2}^{xz} + \hat{a}_y \hat{a}_x G_{m2}^{yx} + \hat{a}_y \hat{a}_y G_{m2}^{yy} + \hat{a}_y \hat{a}_z G_{m2}^{yz} + \hat{a}_z \hat{a}_x G_{m2}^{zx} + \hat{a}_z \hat{a}_y G_{m2}^{zy} + \hat{a}_z \hat{a}_z G_{m2}^{zz}$$

ในการพิจารณาองค์ประกอบของ \bar{G}_{m2} จะสนใจพิจารณาบางองค์ประกอบ กล่าวคือ G_{m2}^{xy} G_{m2}^{yy} และ G_{m2}^{zy} ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} G_{m2}^{xy} &= -\frac{jk}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{k_c^2 k_z} \begin{cases} \frac{1}{k} (j k_z k_x^2 S_x C_y S'_x C'_y + j k_z k_y^2 S_x C_y S'_x C'_y) e^{-jk_z(z-z')} & ; z > z' \\ \frac{1}{k} (-j k_z k_x^2 S_x C_y S'_x C'_y - j k_z k_y^2 S_x C_y S'_x C'_y) e^{-jk_z(z'-z)} & ; z < z' \end{cases} \\ G_{m2}^{xy} &= \pm \frac{k}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{k} S_x C_y S'_x C'_y e^{-jk_z |z-z'|} \quad ; z \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} z' \end{aligned} \quad (2.107)$$

$$G_{m2}^{yy} = -\frac{jk}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{k_c^2 k_z} \begin{cases} \frac{1}{\kappa} (jk_z k_x k_y C_x S_y S'_x C'_y - jk_z k_x k_y C_x S_y S'_x C'_y) e^{-jk_z(z-z')} & ; z > z' \\ \frac{1}{\kappa} (-jk_z k_x k_y C_x S_y S'_x C'_y + jk_z k_x k_y C_x S_y S'_x C'_y) e^{-jk_z(z'-z)} & ; z < z' \end{cases}$$

$$G_{m2}^{yy} = 0 \quad (2.108)$$

$$G_{m2}^{zy} = -\frac{jk}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{k_c^2 k_z} \begin{cases} -\frac{1}{\kappa} k_c^2 k_x C_x S_y S'_x S'_y e^{-jk_z(z-z')} & ; z > z' \\ -\frac{1}{\kappa} k_c^2 k_x C_x S_y S'_x S'_y e^{-jk_z(z'-z)} & ; z < z' \end{cases}$$

$$G_{m2}^{zy} = \frac{jk}{ab} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{k_c^2 k_z} \frac{1}{\kappa} k_c^2 k_x C_x S_y S'_x S'_y e^{-jk_z|z-z'|} \quad (2.109)$$

จากสมการที่ (2.106) (2.107) (2.108) และ (2.109) ดังนั้นสามารถหาสนามแม่เหล็กได้ดังนี้

$$\bar{H}(\bar{R}) = \int_{-w/2}^{w/2} \int_0^l (\hat{a}_x \hat{a}_y G_{m2}^{xy} + \hat{a}_y \hat{a}_y G_{m2}^{yy} + \hat{a}_z \hat{a}_y G_{m2}^{zy}) \cdot \hat{a}_y J(y') dy' dx'$$

$$H_x = \pm \frac{2I_m k^2}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{\kappa k_x (k_y^2 - k^2)} S_x C_y \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right)$$

$$\times \begin{cases} \cos(k_y l) - \cos(kl) & z > z' \\ \cos(kl) - \cos(k_y l) & z < z' \end{cases} e^{-jk_z|z-p|} \quad (2.110)$$

$$H_y = 0 \quad (2.111)$$

$$H_z = \frac{jkI_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{\kappa k_z (k_y^2 - k^2)} C_x S_y \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right)$$

$$\{2k_y \sin(k_y l) - (k + k_y) \sin(kl)\} e^{-jk_z|z-p|} \quad (2.112)$$

ต่อไปจะพิจารณาหากระแสไฟฟ้า $\bar{J}_1(\bar{R})$ และ $\bar{J}_2(\bar{R})$ โดย

$$\bar{J}_1(\bar{R}) = \hat{a}_z \times \bar{H}(\bar{R}) \Big|_{z=c/2} \quad (2.113)$$

และ

$$\bar{J}_2(\bar{R}) = (-\hat{a}_z) \times \bar{H}(\bar{R}) \Big|_{z=-c/2} \quad (2.114)$$

ดังนั้น

$$\bar{J}_1(x, y, \frac{c}{2}) = -\hat{a}_y \frac{2I_m k^2}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0) S_x C_y}{\kappa k_x (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \} e^{-jk_z \left| \frac{c}{2} - p \right|} \quad (2.115)$$

$$\bar{J}_2(x, y, -\frac{c}{2}) = -\hat{a}_y \frac{2I_m k^2}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0) S_x C_y}{\kappa k_x (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \} e^{-jk_z \left| -\frac{c}{2} - p \right|} \quad (2.116)$$

กำหนดให้

$$J_{10} = -\frac{2I_m k^2}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{\kappa k_x (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \} e^{-jk_z \left| \frac{c}{2} - p \right|} \quad (2.117)$$

$$J_{20} = -\frac{2I_m k^2}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{\kappa k_x (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \} e^{-jk_z \left| -\frac{c}{2} - p \right|} \quad (2.118)$$

$$M_{10} = \frac{2\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)k}{\kappa^2 k_x (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{\cos(k_y l) - \cos(kl)\} e^{-jk_z \left|\frac{c}{2} - p\right|} \quad (2.119)$$

$$M_{20} = \frac{2\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)k}{\kappa^2 k_x (k_y^2 - k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{\cos(k_y l) - \cos(kl)\} e^{-jk_z \left|\frac{c}{2} - p\right|} \quad (2.220)$$

ต่อไปจะทำการย้ายพิกัดในด้าน x และ y เพื่อให้ตำแหน่งของพิกัด x และ y อยู่ที่กึ่งกลางท่อนำคลื่น ($-a/2 \leq x \leq a/2$ และ $-b/2 \leq y \leq b/2$) โดยนำสมการที่ (2.117) และ (2.118) แทนในสมการที่ (2.104) และ (2.105) ส่วนสมการที่ (2.119) และสมการที่ (2.220) แทนใน (2.115) และ (2.116) ตามลำดับ และทำการย้ายพิกัดจาก $x' \rightarrow x' + \frac{a}{2}$ และ $y' \rightarrow y' + \frac{b}{2}$ เขียนใหม่เป็น

$$\bar{M}_1(x', y') = M_{10} \left\{ \hat{a}_x \frac{(k^2 - k_y^2)}{k_x} S\left(x' + \frac{a}{2}\right) C\left(y' + \frac{b}{2}\right) + \hat{a}_y k_y C\left(x' + \frac{a}{2}\right) S\left(y' + \frac{b}{2}\right) \right\} \quad (2.221)$$

$$\bar{M}_2(x', y') = M_{20} \left\{ -\hat{a}_x \frac{(k^2 - k_y^2)}{k_x} S\left(x' + \frac{a}{2}\right) C\left(y' + \frac{b}{2}\right) - \hat{a}_y k_y C\left(x' + \frac{a}{2}\right) S\left(y' + \frac{b}{2}\right) \right\} \quad (2.222)$$

$$\bar{J}_1(x', y') = \hat{a}_y J_{10} S\left(x' + \frac{a}{2}\right) C\left(y' + \frac{b}{2}\right) \quad (2.223)$$

$$\bar{J}_2(x', y') = \hat{a}_y J_{20} S\left(x' + \frac{a}{2}\right) C\left(y' + \frac{b}{2}\right) \quad (2.224)$$

$$\text{โดยที่ } S\left(x' + \frac{a}{2}\right) = \sin k_x \left(x' + \frac{a}{2}\right) \quad S\left(y' + \frac{b}{2}\right) = \sin k_y \left(y' + \frac{b}{2}\right)$$

$$C\left(x' + \frac{a}{2}\right) = \cos k_x \left(x' + \frac{a}{2}\right) \quad C\left(y' + \frac{b}{2}\right) = \cos k_y \left(y' + \frac{b}{2}\right)$$

จากนั้นจะพิจารณาสนามที่แพร่กระจายคลื่นออกจากช่องเปิด ซึ่งจะพิจารณาที่ระยะสนามระยะไกล โดยอาศัยสมการกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กจากสมการที่ (2.221)-(2.224) และ สนามที่ระยะไกลจากสมการที่ (2.5)-(2.6) และสมการ (2.12)-(2.15) ดังต่อไปนี้

$$E_\theta(r, \theta, \phi) = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\phi + \eta N_\theta)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) = +\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_\theta - \eta N_\phi)$$

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

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

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

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

$$ds' = dx' dy'$$

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

$$= x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi$$

$$N_{\theta 1} = \iint_s \left[J_{10} \left\{ \sin k_x \left(x' + \frac{a}{2}\right) \cos k_y \left(y' + \frac{b}{2}\right) \right\} \cos\theta \sin\phi e^{jkr' \cos\psi} \right] ds \quad (2.225)$$

$$\begin{aligned}
N_{\theta_1} &= J_{10} \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} \left\{ \frac{e^{jk_x(x'+\frac{a}{2})} - e^{-jk_x(x'+\frac{a}{2})}}{2j} \right\} \left(\frac{e^{jk_x(y'+\frac{b}{2})} + e^{-jk_x(y'+\frac{b}{2})}}{2} \right) \cos \theta \sin \phi \\
&\quad e^{jk(\sin \theta \cos \phi x' + \sin \theta \sin \phi y')} \left. dx' dy' \right. \\
N_{\theta_1} &= J_{10} \cos \theta \sin \phi \int_{-a/2}^{a/2} \left\{ \frac{e^{j(k_x + k \sin \theta \cos \phi)x'} e^{jk_x \frac{a}{2}} - e^{-j(k_x - k \sin \theta \cos \phi)x'} e^{-jk_x \frac{a}{2}}}{2j} \right\} dx' \\
&\quad \int_{-b/2}^{b/2} \left\{ \frac{e^{j(k_y + k \sin \theta \sin \phi)y'} e^{jk_y \frac{b}{2}} + e^{-j(k_y - k \sin \theta \sin \phi)y'} e^{-jk_y \frac{b}{2}}}{2} \right\} dy' \tag{2.226}
\end{aligned}$$

จาก

$$\int_{-x/2}^{x/2} e^{j\alpha z} dz = x \frac{\sin \frac{\alpha}{2} x}{\frac{\alpha}{2} x}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
N_{\theta_1} &= \frac{J_{10} \cos \theta \sin \phi}{4j} \left\{ \frac{\sin \frac{a}{2} (k_x + k \sin \theta \cos \phi)}{\frac{a}{2} (k_x + k \sin \theta \cos \phi)} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin \frac{a}{2} (k \sin \theta \cos \phi - k_x)}{\frac{a}{2} (k \sin \theta \cos \phi - k_x)} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right\} \\
&\quad \left\{ b \frac{\sin \frac{b}{2} (k_y + k \sin \theta \sin \phi)}{\frac{b}{2} (k_y + k \sin \theta \sin \phi)} e^{jk_y \frac{b}{2}} + b \frac{\sin \frac{b}{2} (k \sin \theta \sin \phi - k_y)}{\frac{b}{2} (k \sin \theta \sin \phi - k_y)} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right\}
\end{aligned}$$

กำหนดให้

$$A = \frac{a}{2} (k_x + k \sin \theta \cos \phi) \tag{2.227}$$

$$A' = \frac{a}{2} (k \sin \theta \cos \phi - k_x) \tag{2.228}$$

$$B = \frac{b}{2} (k_y + k \sin \theta \sin \phi) \tag{2.229}$$

$$B' = \frac{b}{2} (k \sin \theta \sin \phi - k_y) \tag{2.230}$$

ดังนั้น

$$N_{\theta_1} = \frac{J_{10} ab \cos \theta \sin \phi}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \tag{2.231}$$

$$\begin{aligned}
N_{\phi_1} &= \iiint_{\mathcal{V}} J_{10} S \left(x' + \frac{a}{2} \right) C \left(y' + \frac{b}{2} \right) \cos \phi \left[e^{jk_r' \cos \psi'} ds' \right. \\
&\quad \left. = J_{10} \cos \phi \int_{-a/2}^{a/2} \sin \left[k_x \left(x' + \frac{a}{2} \right) \right] e^{jk_x' (\sin \theta \cos \phi) x'} dx' \int_{-b/2}^{b/2} \cos \left[k_y \left(y' + \frac{b}{2} \right) \right] e^{jk_y' (\sin \theta \sin \phi) y'} dy' \right.
\end{aligned}$$

$$N_{\phi_1} = \frac{J_{10} ab \cos \phi}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \tag{2.232}$$

$$\begin{aligned}
L_{\theta_1} &= M_{10} \iint_s \left\{ \frac{(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} S\left(x' + \frac{a}{2}\right) C\left(y' + \frac{b}{2}\right) \cos \theta \cos \phi \right. \\
&\quad \left. + k_y C\left(x' + \frac{a}{2}\right) S\left(y' + \frac{b}{2}\right) \cos \theta \sin \phi \right\} e^{jkr' \cos \psi} ds' \\
L_{\theta_1} &= M_{10} \cos \theta \cos \phi \frac{(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} \int_{-a/2}^{a/2} \sin \left[k_x \left(x' + \frac{a}{2} \right) \right] e^{jkx'(\sin \theta \cos \phi)} dx' \int_{-b/2}^{b/2} \cos \left[k_y \left(y' + \frac{b}{2} \right) \right] e^{jky'(\sin \theta \sin \phi)} dy' \\
&\quad + M_{10} \cos \theta \sin \phi k_y \int_{-a/2}^{a/2} \cos \left[k_x \left(x' + \frac{a}{2} \right) \right] e^{jkx'(\sin \theta \cos \phi)} dx' \int_{-b/2}^{b/2} \sin \left[k_y \left(y' + \frac{b}{2} \right) \right] e^{jky'(\sin \theta \sin \phi)} dy' \\
L_{\theta_1} &= M_{10} ab \cos \theta \cos \phi \frac{(\kappa^2 - k_y^2)}{4jk_x} \left\{ \frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right\} \left\{ \frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right\} \\
&\quad + \frac{M_{10} ab \cos \theta \sin \phi k_y}{4j} \left\{ \frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right\} \left\{ \frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right\} \tag{2.233}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_{\phi_1} &= \iiint_s (-M_x \sin \phi + M_y \cos \phi) e^{jkr' \cos \psi} ds' \\
L_{\phi_1} &= -\frac{M_{10} ab \sin \phi}{4jk_x} (\kappa^2 - k_y^2) \left\{ \frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right\} \left\{ \frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right\} \\
&\quad + \frac{M_{10} ab k_y \cos \phi}{4j} \left\{ \frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right\} \left\{ \frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right\} \tag{2.234}
\end{aligned}$$

พิจารณาอีกด้านของช่องเปิด

$$\begin{aligned}
N_{\theta_2} &= \iint_s [J_x \cos \theta \cos \phi + J_y \cos \theta \sin \phi - J_z \sin \theta] e^{jkr' \cos \psi} ds' \\
&= J_{20} \cos \theta \sin \phi \int_{-a/2}^{a/2} S\left(x' + \frac{a}{2}\right) e^{jkx'(\sin \theta \cos \phi)} dx' \int_{-b/2}^{b/2} C\left(y' + \frac{b}{2}\right) e^{jky'(\sin \theta \sin \phi)} dy' \\
N_{\theta_2} &= \frac{J_{20} ab \cos \theta \sin \phi}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \tag{2.235}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{\phi_2} &= \iint_s [J_{20} S\left(x' + \frac{a}{2}\right) C\left(y' + \frac{b}{2}\right) \cos \phi] e^{jkr' \cos \psi} ds' \\
N_{\phi_2} &= \frac{J_{20} ab \cos \phi}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \tag{2.236}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_{\theta_2} &= -\frac{M_{20} (\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} \cos \theta \cos \phi \iint_s S\left(x' + \frac{a}{2}\right) C\left(y' + \frac{b}{2}\right) e^{jkr' \cos \psi} ds' \\
&\quad - M_{20} k_y \cos \theta \sin \phi \iint_s C\left(x' + \frac{a}{2}\right) S\left(y' + \frac{b}{2}\right) e^{jkr' \cos \psi} ds' \\
L_{\theta_2} &= -\frac{M_{20} ab (\kappa^2 - k_y^2)}{4jk_x} \cos \theta \cos \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \\
&\quad - \frac{M_{20} ab k_y}{4j} \cos \theta \sin \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \tag{2.237}
\end{aligned}$$

$$L_{\phi_2} = \iiint_s [-M_x \sin \phi + M_y \cos \phi] e^{jkr' \cos \psi} ds'$$

$$L_{\phi 2} = \frac{M_{20}ab(\kappa^2 - k_y^2)}{4jk_x} \sin \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \\ - \frac{M_{20}abk_y}{4j} \cos \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \quad (2.238)$$

จากสมการที่ (2.231)-(2.238) จะได้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังนี้

$$E_{\theta 1}(r, \theta, \phi) = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left\{ -\frac{M_{10}ab(\kappa^2 - k_y^2) \sin \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right)}{4jk_x} \right. \\ \left. + \frac{M_{10}abk_y \cos \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right)}{4j} \right. \\ \left. + \eta \frac{J_{10}ab \cos \theta \sin \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right)}{4j} \right\} \\ E_{\theta 1}(r, \theta, \phi) = -\frac{abke^{-jkr}}{16\pi r} \left\{ \left[\left(\eta J_{10} \cos \theta \sin \phi - M_{10} \frac{(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} \sin \phi \right) \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \right] \right. \\ \left. \times \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right] + \left[M_{10} k_y \cos \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \right. \\ \left. \times \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right] \right\} \quad (2.239)$$

$$E_{\theta 2}(r, \theta, \phi) = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left\{ \frac{M_{20}ab(\kappa^2 - k_y^2) \sin \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right)}{4jk_x} \right. \\ \left. - \frac{M_{20}abk_y \cos \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right)}{4j} \right. \\ \left. + \eta \frac{J_{20}ab \cos \theta \sin \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right)}{4j} \right\} \\ E_{\theta 2}(r, \theta, \phi) = -\frac{abke^{-jkr}}{16\pi r} \left\{ \left[\left(\eta J_{20} \cos \theta \sin \phi + M_{10} \frac{(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} \sin \phi \right) \right. \right. \\ \left. \times \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right] \right. \\ \left. - M_{20} k_y \cos \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right\} \quad (2.240)$$

$$E_{\theta} = E_{\theta 1} + E_{\theta 2}$$

$$\begin{aligned}
E_\theta(r, \theta, \phi) = & -\frac{abke^{-jkr}}{16\pi r} \left\{ \left[\left(\frac{(M_{20} - M_{10})(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} \sin \phi + \eta(J_{20} + J_{10}) \cos \theta \sin \phi \right) \right. \right. \\
& \times \left. \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right] \\
& + (M_{10} - M_{20}) k_y \cos \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \left. \right\}
\end{aligned} \tag{2.241}$$

$$\begin{aligned}
E_{\phi_1}(r, \theta, \phi) = & j \frac{k}{4\pi r} \left\{ \frac{M_{10} ab \cos \theta \cos \phi (\kappa^2 - k_y^2)}{4jk_x} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right. \\
& + \frac{M_{10} ab k_y \cos \theta \sin \phi}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \\
& \left. - \eta J_{10} \frac{ab \cos \phi}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{\phi_1}(r, \theta, \phi) = & \frac{abk}{16\pi r} e^{-jkr} \left\{ \left[\left(\frac{M_{10}(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} \cos \theta \cos \phi - \eta J_{10} \cos \phi \right) \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \right. \right. \\
& \times \left. \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right] + \left[M_{10} k_y \cos \theta \sin \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \right. \\
& \left. \left. \times \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{2.242}$$

$$\begin{aligned}
E_{\phi_2} = & j \frac{k}{4\pi r} \left\{ -\frac{M_{20} ab \cos \theta \cos \phi (\kappa^2 - k_y^2)}{4jk_x} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right. \\
& - \frac{M_{20} ab k_y \cos \theta \sin \phi}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \\
& \left. - \eta J_{20} \frac{ab \cos \phi}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{\phi_2} = & \frac{abk}{16\pi r} e^{-jkr} \left\{ \left[\left(-\frac{M_{20}(\kappa^2 - k_y^2)}{k_x} \cos \theta \cos \phi - \eta J_{20} \cos \phi \right) \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \right. \right. \\
& \times \left. \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right] - \left[M_{20} k_y \cos \theta \sin \phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \right. \\
& \left. \left. \times \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right] \right\}
\end{aligned} \tag{2.243}$$

$$E_\phi = E_{\phi_1} + E_{\phi_2}$$

$$\begin{aligned}
E_\phi(r, \theta, \phi) = & \frac{abk}{16\pi r} e^{-jkr} \left\{ \left[\frac{(M_{10} - M_{20})(k^2 - k_y^2)}{k_x} \cos\theta \cos\phi - \eta(J_{10} + J_{20}) \cos\phi \right] \right. \\
& \times \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \\
& \left. + (M_{10} - M_{20}) k_y \cos\theta \sin\phi \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right) \right\}
\end{aligned} \tag{2.244}$$

ข้อสังเกต

$$\begin{aligned}
& \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} \cos k_x \left(x' + \frac{a}{2} \right) \sin k_y \left(y' + \frac{b}{2} \right) e^{jk(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi)} dx' dy' \\
& = \frac{ab}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} + \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} - \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right)
\end{aligned} \tag{2.245}$$

$$\begin{aligned}
& \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-a/2}^{a/2} \sin k_x \left(x' + \frac{a}{2} \right) \cos k_y \left(y' + \frac{b}{2} \right) e^{jk(x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi)} dx' dy' \\
& = \frac{ab}{4j} \left(\frac{\sin A}{A} e^{jk_x \frac{a}{2}} - \frac{\sin A'}{A'} e^{-jk_x \frac{a}{2}} \right) \left(\frac{\sin B}{B} e^{jk_y \frac{b}{2}} + \frac{\sin B'}{B'} e^{-jk_y \frac{b}{2}} \right)
\end{aligned} \tag{2.246}$$

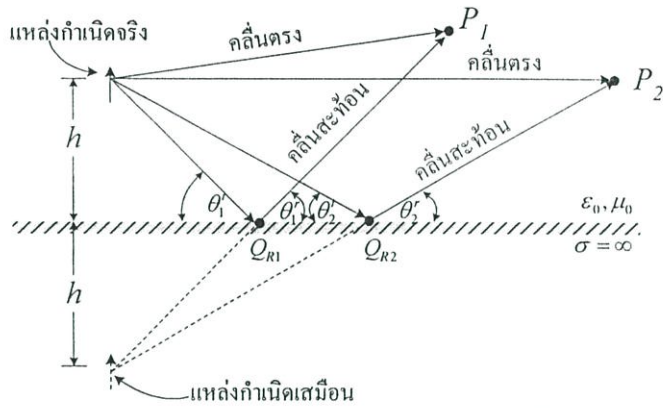
ดังนั้นจะได้สมการสนามในองค์ประกอบแนวตั้งและแนวนอนดังสมการที่ (2.441) และ (2.444) ซึ่งจากสมการพบว่ามีกรรวมโหมดจาก $0 \rightarrow \infty$ โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะกำหนดให้ $\infty = 3$ ทั้งนี้พิจารณาจากแบบรูปของสายอากาศทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม (เนื่องจาก ∞ เมื่อมีค่ามากๆ มีผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกว้างมาก และ ∞ มีค่าน้อยกว่า 9 เท่านั้นที่ให้เงื่อนงำที่เป็นไปได้) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าลักษณะของสายอากาศต่อไป

2.5 ทฤษฎีเงา (Image Theory) [14]

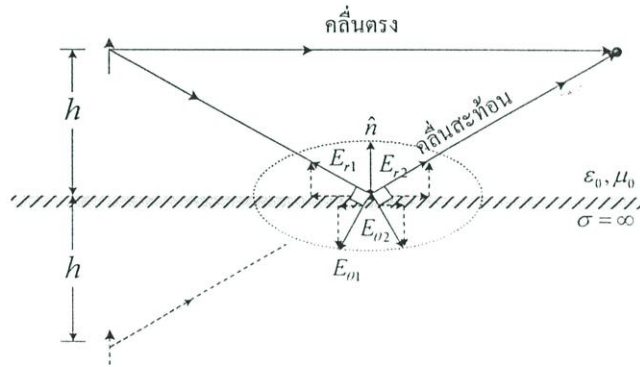
ในการวิเคราะห์หาค่าลักษณะของสายอากาศที่อยู่เหนือระนาบตัวนำขนาดอนันต์ จะพิจารณาว่ามีแหล่งกำเนิดเสมือน ซึ่งแสดงสนามที่สะท้อนระนาบตัวนำเพิ่มขึ้นมา การเพิ่มแหล่งกำเนิดเสมือนนี้ทำให้ได้รวมแหล่งกำเนิดเสมือนที่เมื่อนำระนาบตัวนำขนาดอนันต์ออกไปแล้ว ยังคงให้สนามในบริเวณด้านบนของระนาบตัวนำเหมือนกับสนามที่เกิดจากปัญหาดั้งเดิมที่มีแหล่งกำเนิดจริงอยู่เหนือระนาบตัวนำ

สมมติว่ามีสายอากาศที่มีการโพลาริเซชันตามแนวตั้งที่ความสูง h จากระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11ก สายอากาศนี้จะกระจายคลื่นไปในทิศต่างๆ ที่จุดสังเกต P_i จะมีคลื่นตรงจากสายอากาศนั้นรวมกับคลื่นสะท้อนที่สายอากาศส่งออกไปสะท้อนระนาบตัวนำที่จุด Q_{Ri} แล้วสะท้อนไปยังจุด P_i โดยที่มีมุม $\theta_i' = \theta_i$ เมื่อเราต่อเส้นทางของคลื่นสะท้อนลงไปใต้ระนาบตัวนำจนถึงจุดที่ตำแหน่ง h ใต้ตัวนำนั้น ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดเสมือน ถ้าเลื่อนจุดสังเกตไปที่

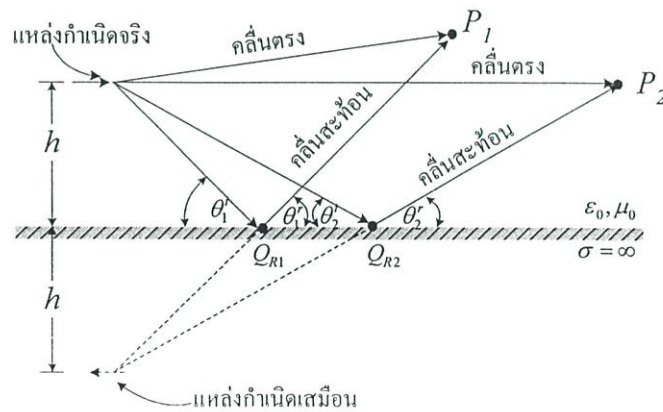
ตำแหน่งอื่นๆ เช่นที่จุด P_2 จุดของการสะท้อนจะเลื่อนไปอยู่ที่จุด Q_{R2} ซึ่งยังคงพบว่าแหล่งกำเนิดเสมือน
เสมือนยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม



(ก) สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์แนวตั้ง



(ข) การโพลาไรซ์ของคลื่นสะท้อนเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นตรง



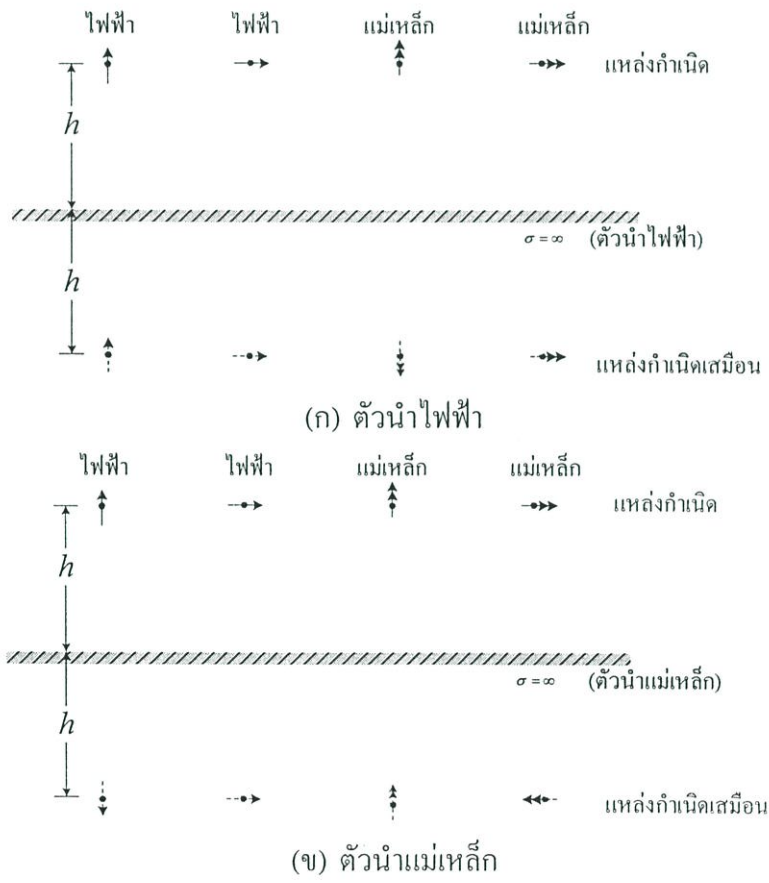
(ค) สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์อยู่ในแนวนอน

รูปที่ 2.11 สายอากาศที่มีการโพลาไรซ์วางเหนือระนาบตัวนำขนาดอนันต์

ในการพิจารณาจะให้ป็นระนาบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ สนามที่อยู่ด้านล่างของระนาบนี้เป็นศูนย์เพราะคลื่นไม่สามารถทะลุผ่านตัวนำนี้ไปได้ จากเงื่อนไขขอบเขตของตัวนำไฟฟ้านั้นส่วนประกอบของสนามในแนวสัมผัสผิวตัวนำจะต้องเป็นศูนย์ที่ทุกตำแหน่งบนผิวตัวนำนั้น ดังนั้นการ

โพลาริซชันของคลื่นสะท้อนเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นตรง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.11 ข พบว่าถ้า กระตุ้นให้เกิดคลื่นสะท้อนที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต การโพลาริซชันของคลื่นสะท้อนต้องเป็น แนวตั้งเช่นเดียวกับคลื่นตรง ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะต้องมีค่าเป็น +1 เมื่อพิจารณาบริเวณ ปิดในเส้นประของรูปที่ 2.11 ข พบว่าสนามเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตซึ่งในปัญหานี้พิจารณาให้มี ขนาดอนันต์

กรณีที่สายอากาศที่มีการโพลาริซชันในแนวนอนดังรูปที่ 2.11 ค จะมีวิธีวิเคราะห์เช่นเดียวกับ กรณีสายอากาศที่มีการโพลาริซชันวางแนวตั้ง แต่แหล่งกำเนิดเสมือนจะมีเฟสต่างจากแหล่งกำเนิด จริง 180 ดังนั้นสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะมีค่าเท่ากับ -1 ซึ่งจากหลักการนี้จะนำไปสู่การวิเคราะห์ เพื่อหาค่าของสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่วาง เหนือตัวสะท้อนต่อไป



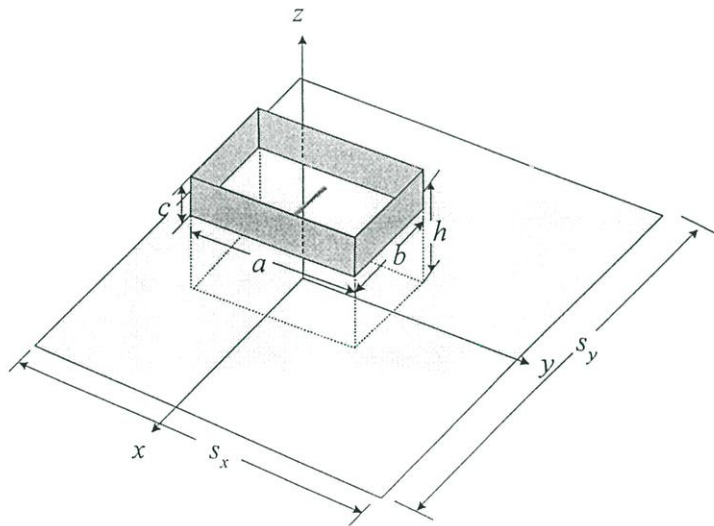
รูปที่ 2.12 แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กพร้อมด้วยแหล่งกำเนิดเสมือน

นอกจากปัญหาของแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและระนาบตัวนำไฟฟ้าแล้ว ยังมีกรณีอื่นๆ อีก ได้แก่ แหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็กและตัวนำแม่เหล็กอีกด้วย โดยอาศัยเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม กับปัญหาดังกล่าวจะแสดงแหล่งกำเนิดจริงและแหล่งกำเนิดเสมือนของปัญหาต่างๆ ได้ดังแสดงใน

รูปที่ 2.12 โดยที่หัวลูกศรเดี่ยวแสดงแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า และลูกศรคู่แสดงแหล่งกำเนิดกระแสแม่เหล็ก ส่วนหัวลูกศรแสดงขั้วของคลื่นนั้นๆ

2.6 สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้นมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง นอกจากนี้พบว่าเมื่อนำสายอากาศชนิดนี้มาวางเหนือตัวสะท้อน ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นการบังคับให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นไปทิศด้านหน้า ส่วนของด้านหลังจะถูกกั้นไว้ด้วยตัวสะท้อนเป็นผลให้เสมือนว่ามีแหล่งกำเนิดเกิดขึ้นด้านหลังแล้วแพร่กระจายคลื่นออกมาเช่นกัน ดังนั้นสนามการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งหมดจึงเกิดจากผลรวมของสนามที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเสมือน และแหล่งกำเนิดจริง ในการพิจารณาเพื่อหาผลรวมของสนามที่ซึ่งขนาดของแหล่งกำเนิดจริงและแหล่งกำเนิดเสมือนมีค่าเท่ากัน ดังนั้นสนามของสายอากาศอาจกล่าวได้ว่า เป็นผลคูณของขนาดสนามคูณกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor) ซึ่งเป็นแถวลำดับที่พิจารณาจำนวนของเงาที่เกิดขึ้นรวมกับแหล่งกำเนิดจริง โดยการหาตัวประกอบแถวลำดับนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากวางเหนือตัวสะท้อน

ในการพิจารณา สายอากาศในรูปที่ 2.13 พบว่าการแพร่กระจายสนามทั้งหมดเกิดจากผลรวมของสนามจากแหล่งกำเนิด (สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก) และสนามจากแหล่งกำเนิดเสมือน (เงาที่เกิดขึ้น) ซึ่งในการพิจารณาเพื่อให้ง่ายในการคำนวณ จะสมมติให้แหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า (เป็นไอโซโทรปิก) วางตามความยาวแนวอนในทิศแกน y เหนือระนาบตัวนำ

ขนาดอนันต์ โดยจะวิเคราะห์การเกิดเงาและพิจารณาที่สนามระยะไกล ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ดังนั้นสนามที่เกิดขึ้นทั้งหมด

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \quad (2.247)$$

โดยที่

$$\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta \quad (2.248)$$

$$\cos \psi_1 = \hat{a}_z \cdot \hat{a}_r = \cos \theta$$

$$\cos \psi_2 = -\hat{a}_z \cdot \hat{a}_r = -\cos \theta$$

เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= r - h \cos \psi_1 \\ r_2 &= r + h \cos \psi_2 \end{aligned} \right\} \quad \text{สำหรับการเปลี่ยนแปลงเฟส} \quad (2.249)$$

$$r_1 = r_2 = r \quad \text{การเปลี่ยนแปลงขนาด} \quad (2.250)$$

ดังนั้นสนามรวมเฉพาะด้านบนของระนาบ $z \geq 0$ $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ และ $0 \leq \phi \leq 2\pi$ สามารถเขียนเป็น

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

$$E(r, \theta, \phi) = 2j \sin(kh \cos \theta) f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.251)$$

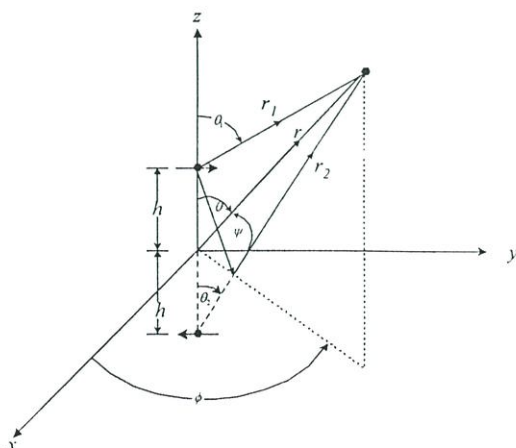
โดย h คือค่าความสูงระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน

สนามของไอโซโทรปิกองค์ประกอบเดียว (แพร่กระจายคลื่นในช่องว่างอิสระ (Free space)) เป็น

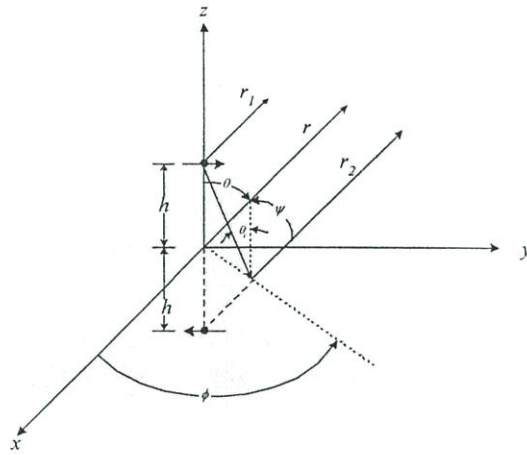
$$E_1 = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.252)$$

และตัวประกอบแอมพลิจูดของการจัดวางสายอากาศตามแนวอนหรือแหล่งกำเนิดที่มีสนามไฟฟ้าในทิศตามแกน y สามารถหาได้โดย

$$AF(\theta, \phi) = \frac{E}{E_1} = 2j \sin(kh \cos \theta) \quad (2.253)$$



(ก) ลักษณะการวางของแหล่งกำเนิดตามแนวอนเหนือระนาบตัวนำ



(จ) สังกะสีที่สนามระยะไกล

รูปที่ 2.14 แหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าตามแนวนอนเหนือระนาบตัวนำขนาดอนันต์

พบว่าตัวประกอบแอมพลิจูดของการจัดวางสายอากาศลักษณะเช่นนี้ คือ $2j \sin(kh \cos \theta)$ ดังนั้นสนามของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ดังรูปที่ 2.13 คือ

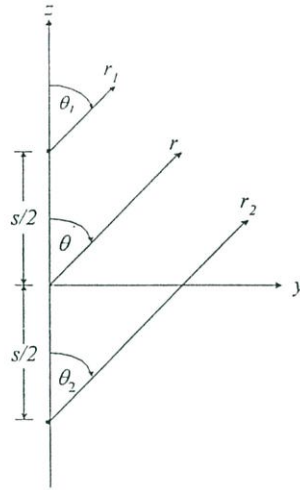
$$E_\theta(r, \theta, \phi) = -\frac{2kbE_0}{a} \frac{\cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\cos\phi\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k\sin\theta\cos\phi)^2} \frac{\sin\left(\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}} \times \sin\phi \sin\left(k\frac{c}{2}\cos\theta\right) \sin(kh\cos\theta) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.254)$$

$$E_\phi(r, \theta, \phi) = -\frac{2kbE_0}{a} \frac{\cos\left(k\frac{a}{2}\sin\theta\cos\phi\right)}{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 - (k\sin\theta\cos\phi)^2} \frac{\sin\left(\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}\right)}{\frac{kb\sin\theta\sin\phi}{2}} \times \cos\theta \cos\phi \sin\left(k\frac{c}{2}\cos\theta\right) \sin(kh\cos\theta) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.255)$$

2.7 สายอากาศแอมพลิจูด

ในพัฒนาสายอากาศเพื่อเพิ่มความสามารถในการแพร่กระจายคลื่นอีกวิธีคือ ทำการจัดเรียงสายอากาศในลักษณะแอมพลิจูด ซึ่งอาจเป็นลักษณะแอมพลิจูดวงกลม เซึ่งเส้น หรือ เซึ่งระนาบนั้นก็ขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสม สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะในกรณีแอมพลิจูดเชิงเส้นและเชิงระนาบ โดยสนามรวมทั้งหมดของสายอากาศนั้นเกิดจากผลคูณของสายอากาศองค์ประกอบเดียวกับตัวประกอบแอมพลิจูด (ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบสายอากาศ) ซึ่งในการหาตัวประกอบแอมพลิจูดของสายอากาศเชิงเส้นแนวต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

เริ่มจากการพิจารณาสายอากาศที่จัดเรียงตามแนวแกน z โดยพิจารณาสายอากาศไอโซโทรปิกสององค์ประกอบวางตามแนวแกน z ดังรูปที่ 2.15 และสังเกตที่สนามระยะไกล กำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กลางระหว่างสายอากาศทั้งสองดังนั้น



รูปที่ 2.15 สายอากาศไอโซโทรปิกที่จัดวางตามแนวแกน z

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

$$r_1 = r - \frac{s}{2} \cos \theta$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของเฟส

$$r_2 = r + \frac{s}{2} \cos \theta$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของขนาด

ซึ่งจะได้สนามรวมในการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกสององค์ประกอบเป็นดังนี้

$$E_r(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \left\{ \frac{e^{j[kr_1 - \frac{\beta}{2}]}}{r_1} + \frac{e^{-j[kr_2 + \frac{\beta}{2}]}}{r_2} \right\} \quad (2.256)$$

$$= f(\theta, \phi) \frac{1}{r} \left[e^{-jkr + jk\frac{s}{2}\cos\theta + \frac{j\beta}{2}} + e^{-jkr - jk\frac{s}{2}\cos\theta + \frac{j\beta}{2}} \right]$$

$$E_r(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-ikr}}{r} \left[e^{\frac{jk s \cos \theta + \beta}{2}} + e^{-\frac{jk s \cos \theta - \beta}{2}} \right] \quad (2.257)$$

เมื่อ β คือ ความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ $\beta = 0$ เนื่องจากเฟสของสนามที่พิจารณาสำหรับสายอากาศนี้มีค่าเท่ากันทุกองค์ประกอบและไม่มีการเปลี่ยนเฟส

และจากสมการ (2.257) พบว่า สนามรวมในการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกสององค์ประกอบมีค่าเท่ากับสนามของไอโซโทรปิกหนึ่งองค์ประกอบคูณอยู่กับนิพจน์ ๆ หนึ่ง ซึ่งนิพจน์นี้

ถูกเรียกว่าเป็น ตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor) ซึ่งตัวประกอบแถวลำดับของการจัดเรียงองค์ประกอบตามแนวแกน z คือ

$$AF = e^{j\frac{ks\cos\theta}{2}} + e^{-j\frac{ks\cos\theta}{2}} \quad (2.258)$$

ต่อไปจะพิจารณาจากสายอากาศไอโซโทรปิก N องค์ประกอบ ที่วางอยู่ตามแนวแกน z โดยเริ่มที่ตำแหน่ง $z=0$ และจากการสังเกตที่สนามระยะไกล โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเป็น s ดังรูปที่ 2.16 จะได้ว่า

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

$$r_2 = r_1 - s \cos \theta$$

$$r_3 = r_1 - 2s \cos \theta$$

$$\vdots$$

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

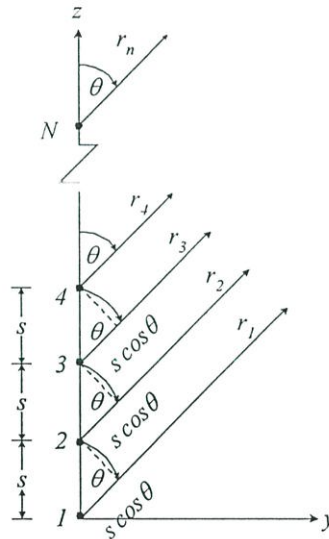
$$r_1 \approx r_2 \approx r_3 \approx \dots \approx r_N$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงเฟส

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของขนาด

จากสนามรวมของสายอากาศไอโซโทรปิกสององค์ประกอบ จะได้สนามรวมของสายอากาศไอโซโทรปิก N องค์ประกอบ ดังนี้

$$E_i(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \left[\frac{e^{-jk r_1}}{r_1} + \frac{e^{-jk r_2}}{r_2} + \dots + \frac{e^{-jk r_N}}{r_N} \right] \quad (2.259)$$



รูปที่ 2.16 สายอากาศไอโซโทรปิกจำนวน N องค์ประกอบที่จัดวางตามแนวแกน z

โดยกำหนดให้ ความต่างเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเป็นแบบ (Progressive phase) คือ เฟสของกระแสของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะนำหน้าเฟสของกระแสของสายอากาศที่อยู่ก่อนหน้าในแถวลำดับเดียวกัน เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$E_i(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{1}{r} \left[e^{jk r_1} + e^{jk r_2} + \dots + e^{jk r_N} \right] \quad (2.260)$$

เนื่องจากที่ r , เรากำหนดให้เป็นจุดอ้างอิงที่ $z=0$ ดังนั้น ความต่างเฟสของกระแสในส่วน
ของ r , มีค่าเท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้น จากสนามรวม E , จะได้ว่า

$$E_r(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{jk\eta}}{r} [1 + e^{jk\psi \cos \theta} + \dots + e^{j(N-1)k\psi \cos \theta}] \quad (2.261)$$

ถ้าพิจารณาในนิพจน์ของตัวประกอบแถวลำดับ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} AF &= \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(k\psi \cos \theta)} \\ &= \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi} \end{aligned} \quad (2.262)$$

เมื่อ

$$\psi = ks \cos \theta \quad (2.262ก)$$

จัดรูปแบบของตัวประกอบแถวลำดับให้ง่ายขึ้น สามารถทำได้โดยทำการคูณทั้งสองข้างของ
สมการที่ 2.262 ด้วย $e^{j\psi}$ ทำให้ได้ว่า

$$AF e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{jN\psi} \quad (2.263)$$

นำสมการที่ (2.263) ลบกับสมการที่ 2.262 จะได้ว่า

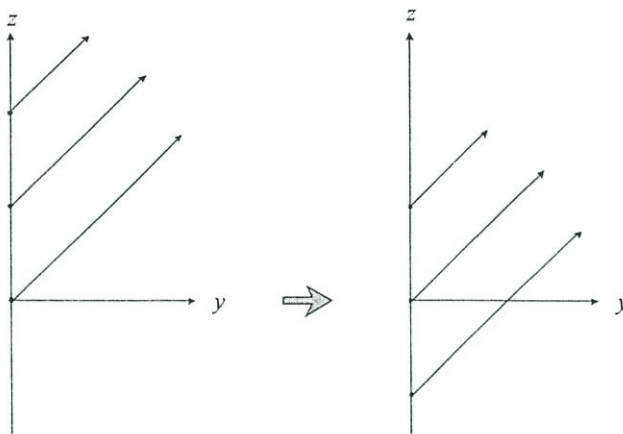
$$\begin{aligned} AF(e^{j\psi} - 1) &= -1 + e^{jN\psi} \\ AF &= \frac{-1 + e^{jN\psi}}{e^{j\psi} - 1} \\ AF &= e^{j\frac{N-1}{2}\psi} \left[\frac{\sin \frac{N}{2}\psi}{\sin \frac{\psi}{2}} \right] \end{aligned} \quad (2.264)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ ดังนั้น จากสมการที่ (2.264) ก็คือ
รูปแบบอย่างง่ายที่สามารถแทนค่าจำนวนสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ แทนการหาผลรวมทั้ง
หมด N องค์ประกอบที่แสดงในสมการที่ 2.262 ซึ่งมีค่าเท่ากัน

เมื่อพิจารณาให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ โดยการพิจารณา
แบ่งได้ 2 กรณี คือ

1. เมื่อ N เป็นจำนวนคี่

เราจะได้จุดอ้างอิงตรงกับตำแหน่งของสายอากาศที่จะแบ่งสายอากาศทั้งหมด N องค์
ประกอบในทิศ $+z$ และ $-z$ อย่างละ $N - \frac{1}{2}$ องค์ประกอบ เช่น $N=3$ ก็จะแบ่งสายอากาศออก
ในทิศ $+z$ และ $-z$ อย่างละ 1 องค์ประกอบ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคี่

จากสมการที่ (2.262ก) เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกลจะได้ว่า

$$AF = 1 + e^{j\psi} + e^{j2\psi} + \dots + e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi} + e^{-j\psi} + e^{-j2\psi} + \dots + e^{-j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi} \quad (2.265)$$

จากนั้น ทำการคูณทั้งสองข้างของสมการที่ 2.265 ด้วย $e^{j\frac{\psi}{2}}$ และ $e^{-j\frac{\psi}{2}}$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} AF \left(e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}} \right) &= e^{j\frac{N}{2}\psi} - e^{-j\frac{N}{2}\psi} \\ AF &= \frac{e^{j\frac{N}{2}\psi} - e^{-j\frac{N}{2}\psi}}{e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}}} \\ AF &= \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \end{aligned} \quad (2.266)$$

2. N เป็นจำนวนคู่

จุดอ้างอิงตรงกับตำแหน่งของสายอากาศที่จะแบ่งสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบในทิศทาง $+z$ และ $-z$ อย่างละ $(N-1)/2$ องค์ประกอบเช่นเดียวกับกรณีที่ 1 แต่ต่างกันคือ ระยะห่างระหว่างจุดอ้างอิงกับสายอากาศองค์ประกอบแรก ทั้งในทิศ $+z$ และ $-z$ จะมีค่าเป็น $\frac{S}{2}$ ดังรูปที่

2.18

จากสมการที่ (2.262ก) เมื่อพิจารณาที่สนามระยะไกล จะได้ว่า

$$AF = e^{j\frac{\psi}{2}} + e^{j\frac{3}{2}\psi} + \dots + e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi} + e^{-j\frac{\psi}{2}} + e^{-j\frac{3}{2}\psi} + \dots + e^{-j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi} \quad (2.267)$$

จากนั้น ทำการคูณทั้งสองข้างของสมการที่ (2.267) ด้วย $e^{j\frac{\psi}{2}}$ และ $e^{-j\frac{\psi}{2}}$ จะได้ว่า

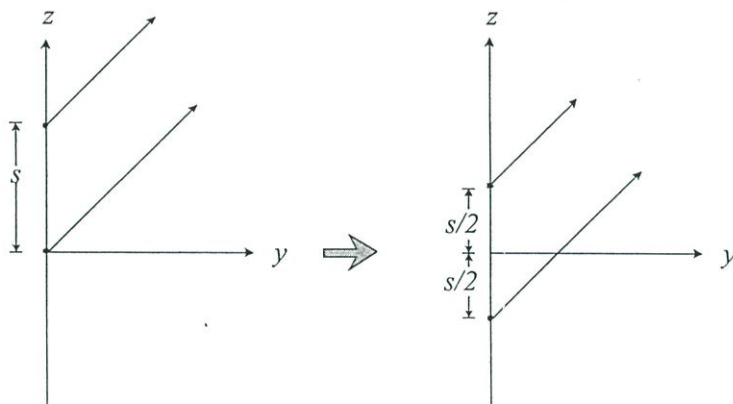
$$AF \left(e^{j\frac{\psi}{2}} - e^{-j\frac{\psi}{2}} \right) = e^{j\frac{N}{2}\psi} - e^{-j\frac{N}{2}\psi}$$

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

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (2.268)$$

ซึ่งจะพบว่า N เป็นจำนวนคี่หรือจำนวนคู่ ค่าตัวประกอบแฉวลำดับที่ได้จะเหมือนกัน ดังนั้นการจัดเรียงแบบแฉวลำดับของสายอากาศ N องค์ประกอบตามแนวแกน z และให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศ N องค์ประกอบตามแนวแกน z และให้จุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ จะได้ค่าตัวประกอบแฉวลำดับคือ

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



รูปที่ 2.18 การกำหนดจุดอ้างอิงให้อยู่กึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดที่เป็นจำนวนคู่

จากการสังเกตที่สนามระยะไกลดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่า รูปแบบของตัวประกอบแฉวลำดับสามารถแสดงได้ใหม่ ดังนี้

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

$$= \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)\psi} \quad (2.269)$$

$$\psi = ks \cos \gamma \quad (2.269ก)$$

โดย a_n คือ แอมพลิจูดของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

γ คือ มุมระหว่างแกนขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนำมาจัดเรียงกันเป็นแฉวลำดับ จากรูปแบบของตัวประกอบแฉวลำดับนี้ สามารถแสดงตัวประกอบแฉวลำดับเมื่อองค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบจัดเรียงกันตามแนวแกน x แกน y และตามแนวแกน z ได้ดังนี้

1. เมื่อมีการจัดเรียงองค์ประกอบกันบนแกน z ทั้งหมด N องค์ประกอบ จากสมการที่ (2.269)

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

สามารถหา γ ได้จาก การคูณแบบจุด (Dot product) ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit vector) ในทิศทางของจุดสังเกต สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{a}_z \cdot \hat{a}_r &= |a_z| |a_r| \cos \gamma = \cos \gamma \\ \therefore \cos \gamma &= \hat{a}_z \cdot \hat{a}_r \\ &= \hat{a}_z \cdot \{ \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta \} \\ &= \cos \theta \\ \therefore \gamma &= \theta \end{aligned} \quad (2.270)$$

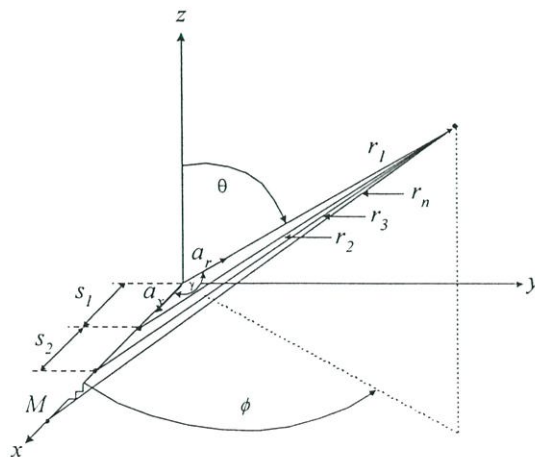
ดังนั้น

$$AF = \sum_{n=1}^N a_n e^{j(n-1)(kx \cos \theta)} \quad (2.271)$$

ถ้าให้ a_n มีค่าเท่ากับ 1 ในสายอากาศทุกๆ องค์ประกอบ จะพบว่าตัวประกอบแอมพลิจูดที่ได้ เหมือนกับสมการที่ (2.262) ซึ่งเป็นตัวประกอบแอมพลิจูดของสายอากาศทั้งหมด N องค์ประกอบ ที่วางตามแกน z ดังนั้น เราจะใช้ตัวประกอบแอมพลิจูดรูปแบบนี้ในการหาตัวประกอบแอมพลิจูดของสายอากาศที่วางตามแกน x และ y ต่อไป

2. กรณีวางตามแกน x

สามารถแสดงการจัดวางได้ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การจัดวางสายอากาศแอมพลิจูดจำนวน M องค์ประกอบตามแนวแกน x

$$\begin{aligned}
 AF &= \sum_{n=1}^M a_n e^{j(n-1)(ks \cos \gamma)} \\
 \cos(\gamma) &= \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r \\
 &= \hat{a}_x \cdot \{ \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta \} \\
 \therefore \gamma &= \cos^{-1}(\sin \theta \cos \phi)
 \end{aligned} \tag{2.272}$$

ถ้าให้ a_n มีค่าเท่ากับ 1 ในสายอากาศทุก ๆ องค์ประกอบ ดังนั้น

$$AF_x = \sum_{n=1}^M e^{j(n-1)(ks \sin \theta \cos \phi)} \tag{2.273}$$

จัดรูปใหม่ โดยให้ $\psi_x = ks \sin \theta \cos \phi$ ได้ว่า

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

เมื่อ M คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน x เมื่อกำหนดจุดอ้างอิงไว้ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศทั้งหมดในแถวลำดับ จากกรณีของแถวลำดับตามแนวแกน z จะพบว่า จำนวนสายอากาศเป็นจำนวนคี่หรือจำนวนคู่ก็ได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเหมือนกัน ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 AF_x \left(e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}} \right) &= e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}} \\
 AF_x &= \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_x} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_x}}{e^{j\frac{\psi_x}{2}} - e^{-j\frac{\psi_x}{2}}} \\
 \therefore AF &= \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)}
 \end{aligned} \tag{2.274}$$

3. กรณีวางตามแนวแกน y

จากสมการที่ (2.262)

$$\begin{aligned}
 AF &= \sum_{n=1}^M a_n e^{j(n-1)(ks \cos \gamma)} \\
 \cos \gamma &= \hat{a}_y \cdot \hat{a}_r \\
 &= \hat{a}_y \cdot \{ \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta \}
 \end{aligned}$$

$$\therefore \gamma = \cos^{-1}(\sin \theta \sin \phi) \quad (2.275)$$

ถ้าให้ a_n มีค่าเท่ากับ 1 ในสายอากาศทุก ๆ องค์ประกอบ ได้ว่า

$$AF_y = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(ks \sin \theta \sin \phi)} \quad (2.276)$$

จัดรูปใหม่ โดยให้ $\psi_y = (ks \sin \theta \sin \phi)$ ได้ว่า

$$\begin{aligned} AF_y &= \frac{e^{jN\psi_y} - 1}{e^{j\psi_y} - 1} \\ &= \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_y} \left(e^{j\frac{M}{2}\psi_y} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_y} \right)}{e^{j\frac{\psi_y}{2}} \left(e^{j\frac{\psi_y}{2}} - e^{-j\frac{\psi_y}{2}} \right)} \\ \therefore AF_y &= e^{j\frac{(n-1)}{2}\psi_y} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \end{aligned} \quad (2.277)$$

เมื่อ N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน y และเมื่อกำหนดจุดอ้างอิงไว้ที่จุดกึ่งกลางของสายอากาศทุกองค์ประกอบในแถวลำดับ จะได้

$$\begin{aligned} AF_y \left(e^{j\frac{\psi_y}{2}} - e^{-j\frac{\psi_y}{2}} \right) &= e^{j\frac{M}{2}\psi_y} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_y} \\ AF_y &= \frac{e^{j\frac{M}{2}\psi_y} - e^{-j\frac{M}{2}\psi_y}}{e^{j\frac{\psi_y}{2}} - e^{-j\frac{\psi_y}{2}}} \\ \therefore AF_y &= \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \end{aligned} \quad (2.278)$$

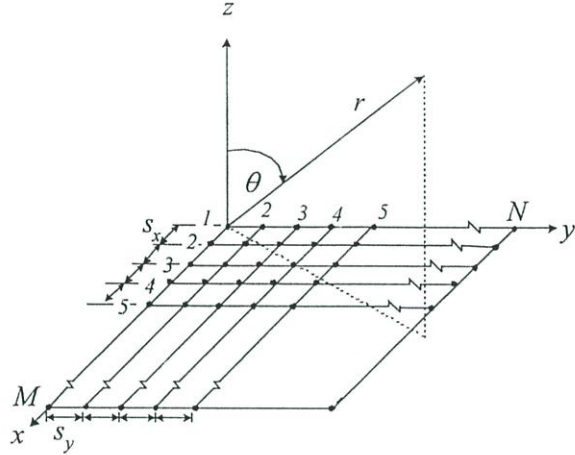
4. กรณีแถวลำดับเชิงระนาบ (planar)

การจัดเรียงสายอากาศในลักษณะรวมกันระหว่างแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x และแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y โดยสายอากาศที่จัดเรียงตามแนวแกน x และ y มีจำนวนทั้งหมด M และ N องค์ประกอบตามลำดับ ซึ่งแต่ละองค์ประกอบจัดวางห่างกัน s_x และ s_y โดยการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ ได้แสดงดังรูปที่ 2.20

ดังนั้น ตัวประกอบแถวลำดับที่ได้สำหรับแถวลำดับแบบระนาบจึงเป็นผลคูณระหว่างตัวประกอบแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x กับตัวประกอบแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y

$$AF = AF_x \times AF_y \quad (2.279)$$

$$AF = e^{j\left(\frac{M-1}{2}\right)\psi_x} \left[\frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right] e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right)\psi_y} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right] \tag{2.280}$$



รูปที่ 2.20 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ

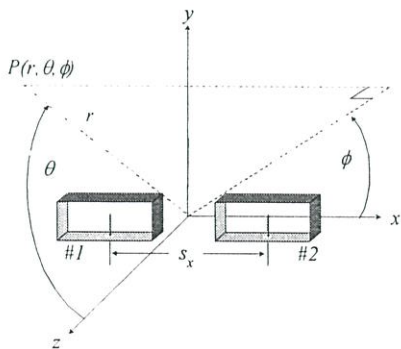
เมื่อจุดอ้างอิงอยู่ที่กึ่งกลางของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะได้ว่า

$$AF = \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right) \sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right) \sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \tag{2.281}$$

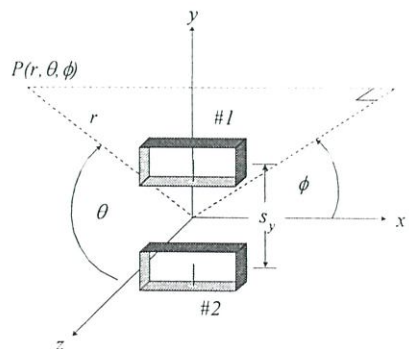
เมื่อ M คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน x

N คือ จำนวนสายอากาศทั้งหมดที่นำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน y

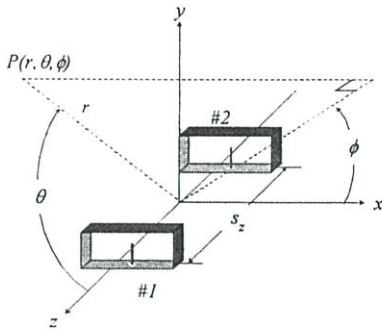
สำหรับการจัดเรียงสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากในลักษณะแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวต่างๆ และเป็นแถวลำดับเชิงระนาบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 และในรูปที่ 2.22 เป็นแถวลำดับเชิงเส้นและเชิงระนาบของโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน



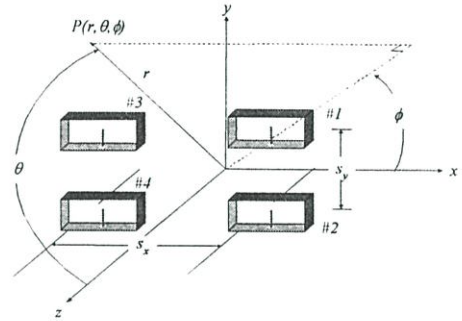
(ก) แถวลำดับตามแนวแกน x



(ข) แถวลำดับตามแนวแกน y

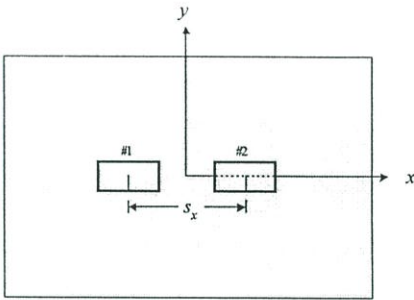


(ค) แถวลำดับตามแนวแกน z

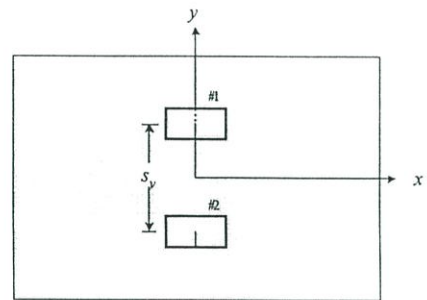


(ง) แถวลำดับเชิงระนาบ xy

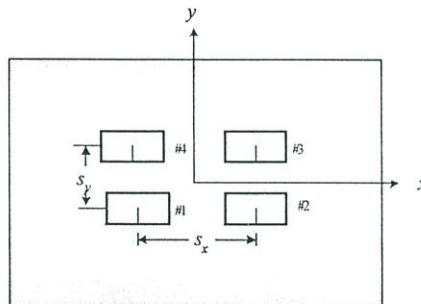
รูปที่ 2.21 การจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้น และแถวลำดับเชิงระนาบของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก



(ก) แถวลำดับตามแนวแกน x



(ข) แถวลำดับตามแนวแกน y



(ง) แถวลำดับเชิงระนาบ xy

รูปที่ 2.22 การจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้น และแถวลำดับเชิงระนาบของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน (มองจากด้านบน)

2.8 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC2

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่น 2 หรือ NEC2 [15] เป็นโปรแกรมที่ถูกพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอเรนซ์ลิเวอร์มอร์ (Lawrence Livermore National Laboratory) ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นโปรแกรมประเภทฟรีแวร์ (Freeware) ซึ่งผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดมาใช้ได้โดยง่าย ในการสั่งให้โปรแกรมทำงาน ผู้ใช้จะต้องจัดเรียงรหัสทางคอมพิวเตอร์ (User-Oriented Computer Code) ให้กับโปรแกรมเพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแม่เหล็กไฟ

ฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใดๆ ที่มีรูปทรงไม่เจาะจงรหัสทางคอมพิวเตอร์ของโปรแกรมที่ผู้ใช้ต้องใส่เข้าไป กล่าวคือ การสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นลวด โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric Field Integral Equation: EFIE) ในการหากระแสเหนี่ยวนำ (Induced current) บนโครงสร้างนั้น ซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิด (Source) หรือ สนามตกกระทบ (Incident field) และในกรณีที่โครงสร้างถูกแทนด้วยพื้นผิว โปรแกรมจะใช้สมการอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Integral Equation: MFIE) ในการหาค่ากระแสเหนี่ยวนำที่ต้องการ นอกจากนี้ยังมีการคำนวณโดยใช้ฟังก์ชันของกรีนสำหรับการแก้ปัญหาในส่วนของเมตริกซ์และกราวนด์ที่มีการสูญเสียเพื่อความถูกต้องใกล้เคียงกับพื้นผิวกราวนด์สำหรับสายอากาศ สำหรับการกระตุ้นสามารถที่จะเป็นไปได้ทั้งแหล่งกำเนิดแรงดันที่ป้อนเข้าไป (Applied voltage source) หรือคลื่นระนาบที่ตกกระทบ (Incident plane wave) NEC2 สามารถใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสเหนี่ยวนำ และประจุ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กระยะใกล้และระยะไกล ภาคตัดขวางเรดาร์ (Radar Cross Section: RCS) อิมพีแดนซ์ แอดมิตแตนซ์ (Admittance) อัตราการขยาย (Gain) และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) การใช้กำลังงาน (Power Budget) และการเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศ (Mutual coupling)

ในโปรแกรม NEC2 สมการอินทิกรัลพื้นผิวนั้น จะถูกแทนด้วยเส้นลวดทรงกระบอกบางๆ ซึ่งในการโปรแกรมจะสมมติโดยประยุกต์ใช้เส้นลวดบาง เรียกว่า วิธีการประมาณเส้นลวดบาง (Thin-Wire Approximation) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- (1) กระแสตามขวางที่สัมพันธ์กับกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- (2) การเปลี่ยนแปลงโดยรอบในกระแสตามแกน ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา
- (3) กระแสสามารถแทนได้โดยกระแสเชิงเส้น (Filament) บนแกนเส้นลวด
- (4) เงื่อนไขขอบเขตของสนามไฟฟ้าจะถูกบังคับให้มีเฉพาะในทิศทางตามแกนเท่านั้น

การประมาณนี้สามารถนำมาใช้ได้เมื่อรัศมีของเส้นลวดมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นและความยาวของเส้นลวดมีความยาวมากๆ นอกจากนี้ สมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปในกรณีที่รัศมีของเส้นลวดมีขนาดใหญ่มาก จนไม่สามารถใช้วิธีการประมาณโดยใช้วิธีการประมาณโดยเส้นลวดบางได้นั้นก็ถูกรวบรวมไว้ใน NEC2 ด้วย ซึ่งการประมาณแบบนี้มีชื่อเรียกว่า การขยายออกของการประมาณเส้นลวดบาง (Extended Thin Wire Approximation)

2.8.1 วิธีการจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2

สำหรับการจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวดนั้น อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยรหัส NEC2 คือ เซ็กเมนต์ที่มีลักษณะตรงและสั้น การกำหนดเซ็กเมนต์สำหรับการออกแบบเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะจะมีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ จำนวนของเซ็กเมนต์ควรมีค่า

น้อยที่สุดเท่าที่จะต้องการสำหรับความถูกต้อง เพราะโปรแกรมจะใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อจำนวนของเซ็กเมนต์เพิ่มขึ้น

เซ็กเมนต์ของเส้นลวดจะถูกกำหนดโดยระบบพิกัด (Co-ordinate) ของจุดปลายทั้งสองของเซ็กเมนต์ (Segment Length: Δ) จะสัมพันธ์กับค่าความยาวคลื่น λ โดยปกติ Δ ควรจะมีค่าน้อยกว่า 0.1 λ ที่ความถี่ที่ต้องการ ในบางครั้งอาจมีการใช้จำนวนเซ็กเมนต์ที่ยาวมากกว่านี้บนเส้นลวดยาวที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด ในกรณีเซ็กเมนต์ที่สั้นกว่าเช่น 0.05 λ หรือน้อยกว่านี้ อาจจะต้องใช้ในการจำลองบริเวณที่มีความสำคัญของสายอากาศ ขนาดของเซ็กเมนต์จะเป็นตัวกำหนดการแก้ปัญหาสำหรับการหากระแสบนแบบจำลอง เนื่องจากกระแสจะถูกคำนวณที่ตรงกึ่งกลางของแต่ละเซ็กเมนต์ เซ็กเมนต์ที่มีขนาดสั้นมากๆ เช่นน้อยกว่า $10^{-3}\lambda$ ไม่ควรนำมาใช้ เพราะความเหมือนกันของค่าประกอบคงที่และฟังก์ชันไซน์ของการกระจายกระแสจะทำให้ผลการจัดระเบียบวิธีเชิงเลขไม่แม่นยำ

รัศมีของเส้นลวด (Wire Radius: a) ซึ่งสัมพันธ์กับ λ จะถูกจำกัดโดยการประมาณที่ใช้ในเคอร์เนล (Kernel) ของสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งมีการประมาณ 2 แบบด้วยกันใน NEC2 คือเคอร์เนลแบบเส้นลวดบาง และเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง ซึ่งได้กล่าวไว้ในข้างต้น สำหรับเคอร์เนลบนเส้นลวดบางนั้น กระแสบนพื้นผิวของแต่ละเซ็กเมนต์จะถูกลดกลายเป็นเส้นลวดตัวนำไฟฟ้าเล็กๆ ของกระแสบนแกนเซ็กเมนต์ ส่วนเคอร์เนลแบบขยายออกของเส้นลวดบาง กระแสจะมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอรอบพื้นผิวของเซ็กเมนต์นั้น

การกระจายกระแสที่ใช้ใน NEC2 จะบังคับกระแสและความหนาแน่นประจุตามแนวเส้นลวดที่เชื่อมต่อและที่ปลายเส้นลวด จากเงื่อนไขเหล่านี้ทำให้เซ็กเมนต์จะต้องต่อกันทางไฟฟ้าที่จุดปลาย ถ้าเซ็กเมนต์มีการซ้อนทับกันขึ้นที่จุดปลายของแต่ละอัน NEC2 จะไม่ยอมให้กระแสไหลจากเซ็กเมนต์หนึ่งไปยังเซ็กเมนต์อื่นๆ เซ็กเมนต์จะเหมือนกับต่อกัน โดยเซ็กเมนต์ของแต่ละด้านมีค่าน้อยกว่า 10^{-3} เท่าของความยาวเซ็กเมนต์ที่สั้นที่สุด ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ควรเชื่อมต่อเซ็กเมนต์ด้วยวิธีการกำหนดระบบพิกัดที่เหมือนกัน

ข้อกำหนดของการจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวด (Wire grid) ตาข่าย มีดังนี้

- (1) เซ็กเมนต์จะต้องไม่ซ้อนทับกัน เนื่องจากการแบ่งกระแสรหว่างสองเซ็กเมนต์ที่ซ้อนทับกันนั้นไม่สามารถสรุปได้ เซ็กเมนต์ที่ซ้อนทับกันอาจมีผลในสมการเมตริกซ์เอกฐาน (Singular matrix equation)
- (2) การเปลี่ยนแปลงรัศมีที่มีความแตกต่างกันมากของเซ็กเมนต์ที่มีการเชื่อมต่อกัน อาจมีผลทำให้ความแม่นยำมีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ค่า Δ/a มีค่าน้อย ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการให้รัศมีลดลงตามลำดับตลอดเซ็กเมนต์
- (3) จำเป็นต้องมีเซ็กเมนต์ตรงจุดที่มีการเชื่อมต่อกับโครงข่าย (Network) หรือแหล่งกำเนิดแรงดัน (Voltage source) สำหรับช่องว่างการกระตุ้น (Excitation gap) ก็จำเป็นต้องมี

เส้นลวดต่อเนื่องลากข้ามช่องว่าง ดังนั้น แรงดันตกคร่อมที่ต้องการที่สามารถระบุให้ เป็นเงื่อนไขขอบเขตได้

- (4) จำนวนเส้นลวดที่นำมาต่อกับจุดเชื่อมต่อใดๆ นั้น ไม่สามารถมีค่าเกิน 30 เส้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดของมิติในรหัส NEC2

ข้อมูลที่ใช้อธิบายสายอากาศ สภาพแวดล้อม และคุณลักษณะของสายอากาศที่ต้องการคำนวณ จะเป็นอินพุตที่ใส่เข้าไปเป็นกลุ่มตัวเลข กลุ่มของรหัสข้อมูลในการทำงานครั้งหนึ่งจะประกอบด้วย รหัสข้อมูล 3 ประเภท ส่วนแรกเริ่มด้วยรหัสหนึ่งชุด หรือมากกว่านั้น ซึ่งจะบรรยายละเอียดของการทำงาน ซึ่งจะพิมพ์เป็นตัวหนังสือที่เริ่มต้นของไฟล์เอาต์พุต ต่อมาจะตามด้วยรหัสข้อมูลระบุรูปแบบทางเรขาคณิตเป็นการระบุรูปทรงของสายอากาศ และสุดท้ายจะเป็นส่วนของรหัสควบคุมโปรแกรม โดยระบุตัวแปรทางไฟฟ้า เช่น ความถี่ การโหลด (Loading) และการกระตุ้น (Excitation) รวมทั้ง ความต้องการให้คำนวณกระแสและสนามของสายอากาศ

NEC2 ได้รับการยอมรับว่าเป็นโปรแกรมที่สามารถคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ แต่สำหรับการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศนั้น ยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม NEC2 เอง จึงจำเป็นต้องศึกษาวิธีแก้ไข ปัญหาการคำนวณอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ผิดพลาดนี้

สำหรับสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ โดยการแทนโครงสร้างของสายอากาศด้วยเส้นลวดขนาดเล็ก ดังนั้น สมการที่ใช้จึงเป็นสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้า ซึ่งสมการอินทิกรัลเชิงสนามไฟฟ้านี้เหมาะที่จะนำมาใช้แก้ปัญหา โครงสร้างที่มีขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวที่ไม่หนาแน่นมาก และมีลักษณะไม่เป็นตัวนำที่ปิดทึบได้ดีกว่า การใช้สมการอินทิกรัลได้ดีกว่าการใช้การอินทิกรัลเชิงสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้ในการคำนวณด้วย NEC2 นั้น ผลที่ได้ น่าจะมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองด้วย ทั้งนี้เพราะได้รวบรวมทั้งผลที่เกิดจากการเลี้ยวเบนคลื่นที่เกิดจากลักษณะโครงสร้าง และผลจากการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด และระหว่างสายอากาศด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณต่างๆ จะถูกแสดงในบทต่อไป

2.9 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์

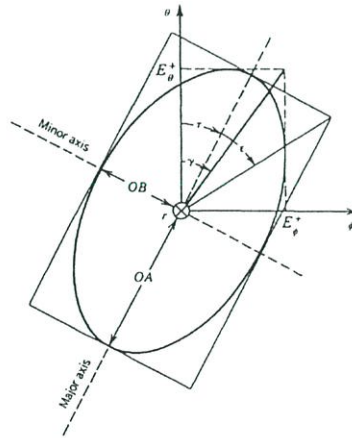
สำหรับคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศเป็นการบ่งบอกถึงคุณสมบัติของการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถจะอธิบายได้โดยการพิจารณาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาโดยสังเกตที่ตำแหน่งใดๆ โดยทั่วไปจะทำการพิจารณานาขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะได้แก่

- (1) การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงกลมเรียกลักษณะแบบนี้ว่าสนามไฟฟ้ามีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization) แบ่ง 2 ลักษณะคือ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางขวามือหรือ เรียกว่าเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา

นาฬิกา (Clockwise polarization) และการกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางซ้ายมือหรือ เรียกว่าเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter clockwise polarization)

- (2) การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงรีก็จะเรียกว่าสนามไฟฟ้ามีลักษณะการโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical Polarization) แบ่ง 2 ลักษณะคือ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางขวามือหรือ เรียกว่าเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise polarization) และ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางซ้ายมือหรือ เรียกว่าเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter clockwise polarization)
- (3) การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นก็จะเรียกว่าสนามไฟฟ้ามีลักษณะการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear Polarization) แบ่งเป็นการโพลาไรซ์แนวตั้ง (Vertical polarization) และการโพลาไรซ์แนวนอน (Horizontal polarization)

ซึ่งการบ่งบอกถึงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ สามารถแสดงได้จากส่วนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแกนหลักต่อแกนรอง เรียกว่า ค่าอัตราส่วนแกน (Axial ratio) ความต่างเฟสระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแกนตั้งกับแกนนอน (Phase different) หรือลักษณะการเอียงของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าเปรียบเทียบกับแกนอ้างอิง (ซึ่งจะยึดแกนตั้งเป็นแกนอ้างอิง) เรียกว่ามุมเอียง (Tilt angle) ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การโพลาไรซ์ที่มีลักษณะเอียงจากแกนอ้างอิง

ในกรณีนี้จะสามารถหาค่าอัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนรอง [19] ได้จาก

$$AR = \pm \frac{\text{major axis}}{\text{minor axis}} = \pm \frac{OA}{OB} \quad , \quad 1 \leq |AR| \leq \infty \quad (2.282)$$

โดยที่ $AR = 1$ เป็นการโพลาไรซ์แบบวงกลม

$1 < AR < \infty$ จะเป็นการโพลาไรซ์แบบวงรี

$AR = \infty$ จะเป็นการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

เมื่อ

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ (E_{\theta 0}^+)^2 + (E_{\phi 0}^+)^2 + \left[(E_{\theta 0}^+)^4 + (E_{\phi 0}^+)^4 + 2(E_{\theta 0}^+)^2 (E_{\phi 0}^+)^2 \cos(2\Delta\beta) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.283)$$

$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ (E_{\theta 0}^+)^2 + (E_{\phi 0}^+)^2 - \left[(E_{\theta 0}^+)^4 + (E_{\phi 0}^+)^4 + 2(E_{\theta 0}^+)^2 (E_{\phi 0}^+)^2 \cos(2\Delta\beta) \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.284)$$

โดยที่

$$E_{\theta 0}^+ = E_R + E_L$$

$$E_{\phi 0}^+ = E_R - E_L$$

$$\Delta\beta = \beta_\theta - \beta_\phi$$

โดยที่ความต่างเฟส (Phase difference) จะพิจารณาอยู่ที่ $-180^\circ < \Delta\beta < 180^\circ$ ซึ่ง $\Delta\beta$ คือค่าความต่างเฟส เมื่อ $\Delta\beta$ มีค่าเป็นลบแสดงว่าเป็นการโพลาไรซ์แบบหมุนซ้าย เมื่อมีค่าเป็นบวกแสดงว่าเป็นการโพลาไรซ์แบบหมุนขวา และเมื่อ $\Delta\beta = 0$ องศา และ ± 180 องศา จะแสดงว่าเป็นการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

มุมเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกนขององค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง ซึ่งใช้เป็นแกนอ้างอิงคั้งนั้น มุมของการเอียง (Tilt) จะกำหนดได้โดย

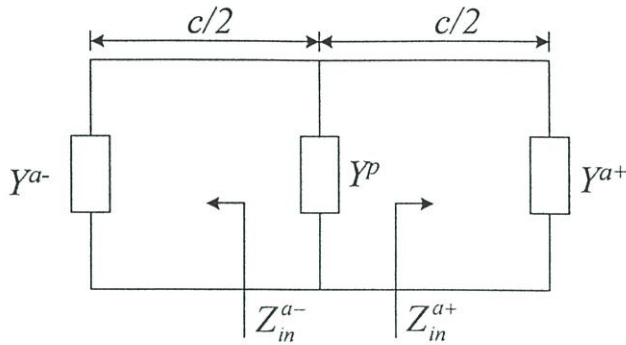
$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_{\theta 0}^+ E_{\phi 0}^+}{(E_{\theta 0}^+)^2 - (E_{\phi 0}^+)^2} \cos(\beta_\theta - \beta_\phi) \right] \text{ เมื่อ } E_{\theta 0}^+ \geq E_{\phi 0}^+ \quad (2.285)$$

$$\tau = -\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_{\theta 0}^+ E_{\phi 0}^+}{(E_{\theta 0}^+)^2 - (E_{\phi 0}^+)^2} \cos(\beta_\theta - \beta_\phi) \right] \text{ เมื่อ } E_{\theta 0}^+ < E_{\phi 0}^+ \quad (2.286)$$

โดยที่ $-90^\circ \leq \tau \leq 90^\circ$ และถ้า τ เท่ากับ 0° นั่นคือเป็นการโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง และถ้าเท่ากับ $\pm 90^\circ$ ก็คือเป็นการโพลาไรซ์แนวอนั่นเอง

2.10 อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)

ในการพิจารณาคูณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศนั้นถือว่ามีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง เนื่องจากเป็นตัวบ่งชี้ว่าสายอากาศชนิดนั้นๆ เมื่อนำไปต่อกับสายนำสัญญาณจะมีความเข้ากันได้มากน้อยเพียงใด โดยในการพิจารณาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ จะพิจารณาในนิพจน์ของแอดมิตแดนซ์ที่ต่อขนานกัน โดยแสดงวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 วงจรสมมูลของสายอากาศ

ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของโพรบเชิงเส้นที่ป้อนสัญญาณ (Z_p) ให้วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเมื่อกำหนดให้มีค่ากระแสสูงสุด (I_m) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.282 [16]

$$Z_p = -\frac{1}{I_m^2} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} E_y(x=x', y=y') J_y(x=x', y=y') dx' dy' \quad (2.282)$$

จากสมการที่ (2.86) และ (2.97) นำมาแทนลงในสมการที่ (2.282) ดังนั้นเขียนใหม่ได้เป็น

$$Z_p = -\frac{1}{I_m^2} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{w}{2}}^{\frac{w}{2}} \left\{ \frac{I_m \sin[k(l-y')]}{d} \frac{2\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)(k^2-k_y^2)}{k_g k^2 k_x (k_y^2-k^2)} \right. \\ \left. \times \kappa S_x C_y \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \left\{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \right\} e^{-jk_x |z-l|} dx' dy' \right. \quad (2.288)$$

จากสมการที่ (2.283) เขียนใหม่ได้เป็น

$$Z_p = -\frac{j\omega\mu_0}{ad^2} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{kk_g k_x^2} \sin^2(k_x s) \sin^2\left(k_x \frac{w}{2}\right) \left\{ \cos(k_y l) - \cos(kl) \right\} e^{-jk_x |z-l|} \\ \times \left\{ \left[\frac{\sin\left[(k_y-k)\frac{b}{2}\right]}{(k_y-k)\frac{b}{2}} + \frac{\sin\left[(k_y+k)\frac{b}{2}\right]}{(k_y+k)\frac{b}{2}} \right] e^{jkl} - \left[\frac{\sin\left[(k_y+k)\frac{b}{2}\right]}{(k_y+k)\frac{b}{2}} + \frac{\sin\left[(k-k_y)\frac{b}{2}\right]}{(k-k_y)\frac{b}{2}} \right] e^{-jkl} \right\} \quad (2.289)$$

จากสมการที่ (2.284) นั้นเป็นอิมพีแดนซ์ที่โพรบเชิงเส้น แต่อิมพีแดนซ์ด้านเข้าทั้งหมดนั้นเกิดจากการผลรวมทั้งหมดที่ได้จากอิมพีแดนซ์ที่โพรบและจากช่องเปิดทั้งสองด้านของสายอากาศ ซึ่งที่ช่องเปิดนั้นมีค่าแอดมิตแตนซ์เป็น

$$Y_a = \frac{1}{V^2} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} (\bar{E}_i^a \times \bar{H}_i^a) \cdot \hat{a}_z dx dy \quad (2.290)$$

เมื่อ E_i^a คือสนามไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสกับช่องเปิด และ H_i^a คือสนามแม่เหล็กที่ผิวสัมผัสกับช่องเปิด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.94) และ (2.97) สำหรับสนามไฟฟ้า สำหรับสนามแม่เหล็ก

นี้หาได้จากแทนสมการที่ (2.101) ใน สมการแมกซ์เวลล์ (กฎของแอมแปร์) โดย V คือการเชื่อมต่อของศักย์ไฟฟ้าในโหมดเป็นใหญ่ (Dominant mode voltage coupled) ที่ช่องเปิด

$$\begin{aligned} \bar{E}_i^a = & \frac{2\omega\mu_0 I_m}{abd} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{kk_g(k_y^2-k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{\cos(k_y l) - \cos(kl)\} \\ & \times \left\{ -k_y C_x S_y \hat{x} + \frac{(k^2-k_y^2)}{k_x} S_x C_y \hat{y} \right\} e^{-jk_x |z-l|} \end{aligned} \quad (2.291)$$

จาก
$$\bar{H} = \frac{j}{\omega\mu_0} \nabla \times \bar{E}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \bar{H}_i^a = & 2jI_m \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2-\delta_0)}{kk_g(k_y^2-k^2)} \sin(k_x s) \sin\left(k_x \frac{w}{2}\right) \{\cos(k_y l) - \cos(kl)\} \\ & \times \left\{ S_x C_y \left(jk_g \frac{(k^2-k_y^2)}{k_x} \mp k_y \right) \hat{x} + C_x S_y (jk_g k_y \pm k_x) \hat{y} \right\} e^{-jk_x |z-l|} \end{aligned} \quad (2.292)$$

เมื่อพิจารณาสำหรับ โหมดเป็นใหญ่ (TE_{10}) เมื่อแทน (2.291) และ (2.292) ในสมการที่ (2.290) ดังนั้น แอดมิตแดนซ์ที่ช่องเปิดแต่ละด้านจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} Y_a = & -\frac{4\omega\mu_0 I_m^2}{abd} \frac{(2-\delta_0)^2 \sin^2(k_x s) \sin^2\left(k_x \frac{w}{2}\right)}{k^2 k_g^2 (k_y^2 - k^2)^2} (\cos k_y l - \cos kl)^2 e^{-jk_x |z-l|} \left\{ jk_y (mn C_x S_y)^2 \right. \\ & \left. \times \left[jk_g (k^2 - k_y^2) \pm k_x \right] + j \frac{(k^2 - k_y^2)}{k_x} (mn S_x C_y)^2 \left[jk_g \frac{(k^2 - k_y^2)}{k_x} \mp k_y \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.293)$$

จากนั้นจะพิจารณาอิมพีแดนซ์ที่สังเกตจากโพรบไปยังช่องเปิดทั้งสองด้าน (Z_m^a) ดังนั้น สามารถหา Z_m^a ได้จาก

$$Z_m^a = Z_0 \frac{Z_a + jZ_0 \tan \beta l_a}{Z_0 + jZ_a \tan \beta l_a} \quad (2.294)$$

โดยที่ Z_a ที่ปลายทั้งสองด้านของช่องเปิด ($Z_a = 1/Y_a$) ส่วน l_a คือระยะห่างระหว่างจุดสังเกตไปยังปลายทั้งสองด้านของช่องเปิด พิจารณาให้ $\alpha = 0$ เนื่องจากมีการลดทอนต่ำมากและความยาวของสายนำสัญญาณ (ความยาวท่อนำคลื่น) ไม่มากนัก Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายอากาศ (Characteristic impedance) ซึ่งพิจารณาสำหรับโหมดเป็นใหญ่ (TE_{10}) [17] แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Z_0 = & \frac{\beta_{10} \int_0^a \int_0^b \left[\frac{\omega\mu_0}{\pi/a} \right]^2 \sin^2\left(\pi \frac{x}{a}\right) dx dy}{\left[-\int_0^a \left[\frac{\beta_{10}}{(\pi/a)^2} \right] \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) dx \right]^2} \\ Z_0 = & \frac{\pi^2 \eta \lambda_g b}{8\sqrt{\epsilon_r} \lambda a} \end{aligned} \quad (2.295)$$

โดยที่

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (2.296)$$

$$\beta = k \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (2.297)$$

และพิจารณาแอมพลิจูดที่ด้านเข้าทั้งหมดดังนี้

$$Y_{total} = Y_m^{a-} + Y_p + Y_m^{a+} \quad (2.298)$$

โดยที่ด้วย $a-$ และ $a+$ หมายถึงตำแหน่งของช่องเปิด เมื่อ $z < z'$ และ $z > z'$ ตามลำดับ และจากสมการที่ (2.298) สามารถหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าได้โดยหาจากส่วนกลับของสมการ (2.298) นั่นเอง (พิจารณาให้อิมพีแดนซ์ที่ช่องเปิดทั้งสองด้านแมตซ์ซิ่งกับช่องว่างอิสระ)

2.11 สรุป

ในบทนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับหลักการ และทฤษฎีที่สำคัญสำหรับสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยได้แสดงโครงสร้างของสายอากาศ ตลอดจนพารามิเตอร์ที่ผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสายอากาศ อีกทั้งได้แสดงวิธีการหาผลเฉลยของสนาม โดยวิธีการต่างๆ ได้แก่ วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไดแอดิกอย่างละเอียด นอกจากนี้ได้อธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีเงา ซึ่งเป็นหลักการที่อธิบายถึงการทำงานของสายอากาศเมื่อนำมาวางไว้เหนือตัวสะท้อน เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้ได้คำนวณคุณลักษณะของสายอากาศโดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 ซึ่งการคำนวณด้วยโปรแกรมนี้ได้พิจารณาความยาวโพรบและการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดร่วมด้วย (วิธีวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไดแอดิกไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด) ดังนั้นอธิบายการคำนวณของโปรแกรมนี้ด้วย คุณลักษณะการโพลาไรซ์ของสายอากาศเป็นอีกคุณลักษณะหนึ่งที่สำคัญและอธิบายไว้ด้วย และสุดท้ายได้กล่าวถึงการหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศตลอดจนวิธีการในการคำนวณ สำหรับผลจากการคำนวณจากการแต่ละวิธีจะแสดงในบทที่ 3 และบทที่ 4 สำหรับสายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก และสายอากาศทิศทางเดียวโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากวางเหนือตัวสะท้อน ตามลำดับ

บทที่ 3

ผลการวิเคราะห์สายอากาศแบบสองทิศทางโดยโพรบกระตุ้น วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

3.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์จากการคำนวณโดยใช้นิพจน์ของสมการการแพร่กระจายคลื่นจากบทที่ 2 ซึ่งในการวิเคราะห์จะเริ่มจากกรณีสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมก่อน จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ในกรณีที่เป็นแถวลำดับเชิงเส้น และแถวลำดับเชิงระนาบตามลำดับ โดยคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศ นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ และ คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย ในการวิเคราะห์จะพิจารณาการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ (การคำนวณง่าย ไม่ซับซ้อน และรวดเร็ว) ซึ่งไม่พิจารณาผลจากโพรบและการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด วิธีที่สองคือ ฟังก์ชันกรีนไดโอดิกซึ่งจะพิจารณาผลของโพรบร่วมด้วยแต่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด (วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกนี้จะนำมาใช้คำนวณคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ) นอกจากนี้ได้พิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งจะพิจารณาทั้งโพรบป้อนสัญญาณและการเชื่อมต่อยุ่ด้วย โดยในการแสดงผลการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธีต่างๆ ด้วย ดังจะได้แสดงในหัวข้อต่อไป

3.2 คุณลักษณะของสายอากาศองค์ประกอบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

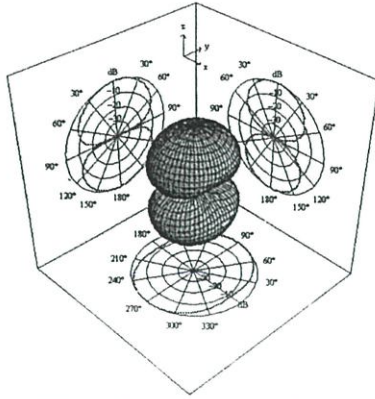
ในหัวข้อนี้จะแสดงคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรณีก้องประกอบเดี่ยว โดยจะพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ อันดับแรกที่พิจารณาคือ ขนาดความกว้าง (a) และความสูง (b) ของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นโหมดเป็นใหญ่ หรือ TE_{10} ซึ่งจากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และในภาคผนวก ก พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเกิดโหมดในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้ได้แก่ ขนาดความกว้างและความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนั่นเอง จากเอกสารอ้างอิง [10] กล่าวไว้ว่า เมื่อความกว้างของท่อนำคลื่นคงที่หากความสูงของท่อนำคลื่นยิ่งน้อยก็จะยิ่งทำให้ช่วงกว้างของความถี่ตัดของโหมด TE_{10} และความถี่ตัดของโหมดอันดับที่สูงกว่ายังมีช่วงกว้างขึ้น อีกทั้งสนามไฟฟ้าที่หน้าตัดท่อนำคลื่นจะมีกำลังงานส่งผ่านสูงขึ้น และจากเอกสารอ้างอิง [18] พบว่าถ้าขนาดความกว้างและความสูงของท่อนำคลื่นเท่ากันนั้น โหมดต่ำที่สุดที่ได้จะเกิดขึ้นพร้อมกันสองโหมดหรือกล่าวได้ว่าจะเกิด

คลื่นหลายโหมดขึ้น ดังนั้นในการพิจารณาขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้ค่าความกว้างของวงแหวนเป็นสองเท่าของความสูง ($a=2b$) และพบว่าเงื่อนไขที่สอดคล้องที่ทำให้เกิดโหมด TE_{10} คือ $\frac{\lambda}{2} < a < \lambda$ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงเลือกพิจารณาที่ a และ b ค่าหนึ่ง (ซึ่งเป็นขนาดที่หาได้ในทางปฏิบัติด้วย) คือ a เท่ากับ 0.69λ และ b เท่ากับ 0.35λ พบว่าคุณลักษณะของสายอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (c) ดังนั้นจึงพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศในกรณีที่เปลี่ยนขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยในการแสดงผลจะแสดงทั้งผลจากการคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไคแอติกเปรียบเทียบกัน ส่วนผลจากโปรแกรม NEC2 นั้นจะแสดงเฉพาะกรณีที่เลือกพารามิเตอร์ของสายอากาศในแต่ละกรณีได้แล้ว และจะแสดงผลเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ฟังก์ชันกรีนไคแอติก และผลจากโปรแกรม NEC2 ทั้งนี้เนื่องจาก โปรแกรม NEC2 หากเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ใดๆ ต้องทำการจำลองการสร้างสายอากาศใหม่ด้วย ซึ่งต้องใช้เวลาในการคำนวณนานหากมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปมาก และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะนานขึ้นอีกหากต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูง ดังนั้นในการพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศที่ต้องการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์เป็นค่าต่างๆ หลายค่า นั้น จึงไม่สะดวกสำหรับการใช้โปรแกรม NEC2 เป็นอย่างยิ่ง

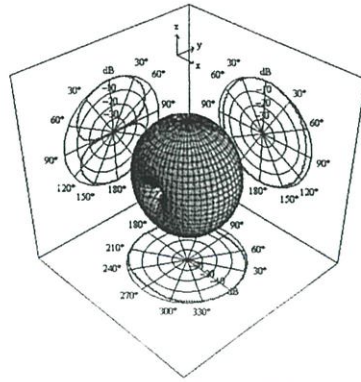
3.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่ทิศทางต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด (Amplitude) ของสนาม หรือกำลังงาน (Power) กับทิศทาง (Direction) ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่แสดงในรูปของมุมในหน่วยองศาหรือเรเดียน

งานวิจัยนี้ต้องการสายอากาศที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง โดยสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้จะสามารถตอบสนองความต้องการนั้นได้ เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 1.1 พบว่าเงื่อนไขที่เกิดแบบรูปการแพร่กระจายแบบสองทิศทางได้นั้นคือ ค่ามุมที่สนามสูงสุด (ในระนาบมุมยก) ของทั้งระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ซึ่งที่มุม 0 ด้านหน้าและ 180 ในทิศด้านตรงข้าม รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่แพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง



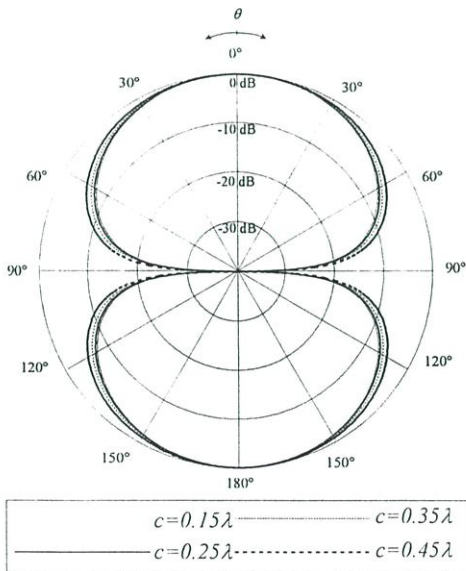
(ก) วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์



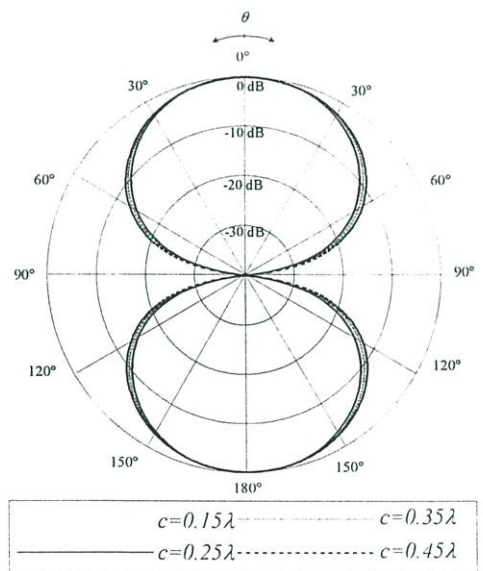
(ข) วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอคติก

รูปที่ 3.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสามมิติ เมื่อขนาดความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (c) เท่ากับ 0.25λ

พบว่าผลจากการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไดแอคติกจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมือนกันในระนาบสนามไฟฟ้า ส่วนระนาบสนามแม่เหล็กนั้นวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอคติกจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีความกว้างของลำคลื่นกว้างกว่าวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ เนื่องจากวิธีศักร์เวกเตอร์ไม่ได้รวมผลจากความหนาของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากในการคำนวณ

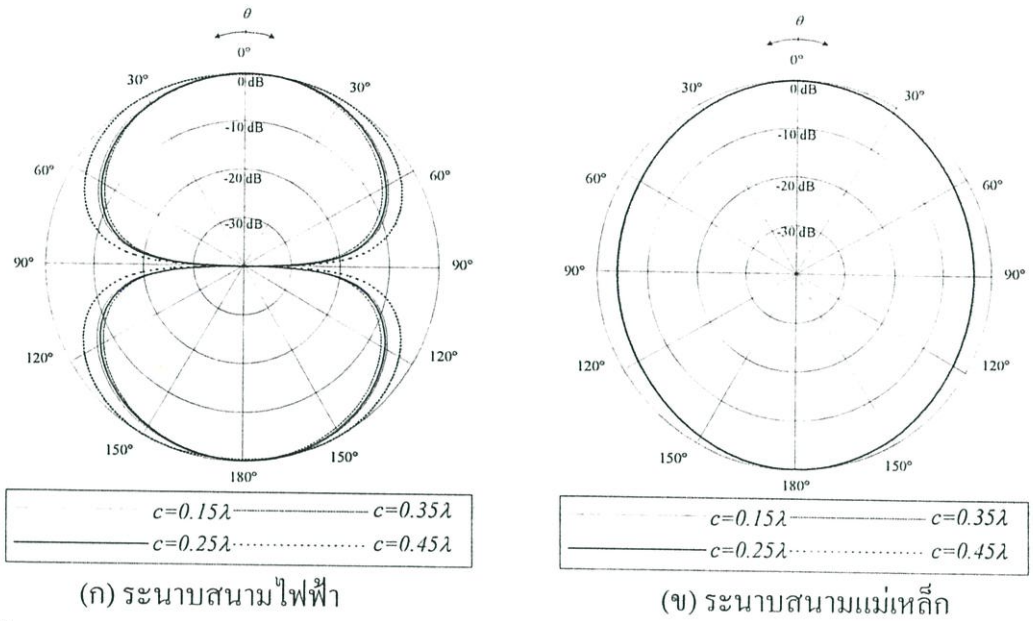


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนขนาดความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (c) โดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์

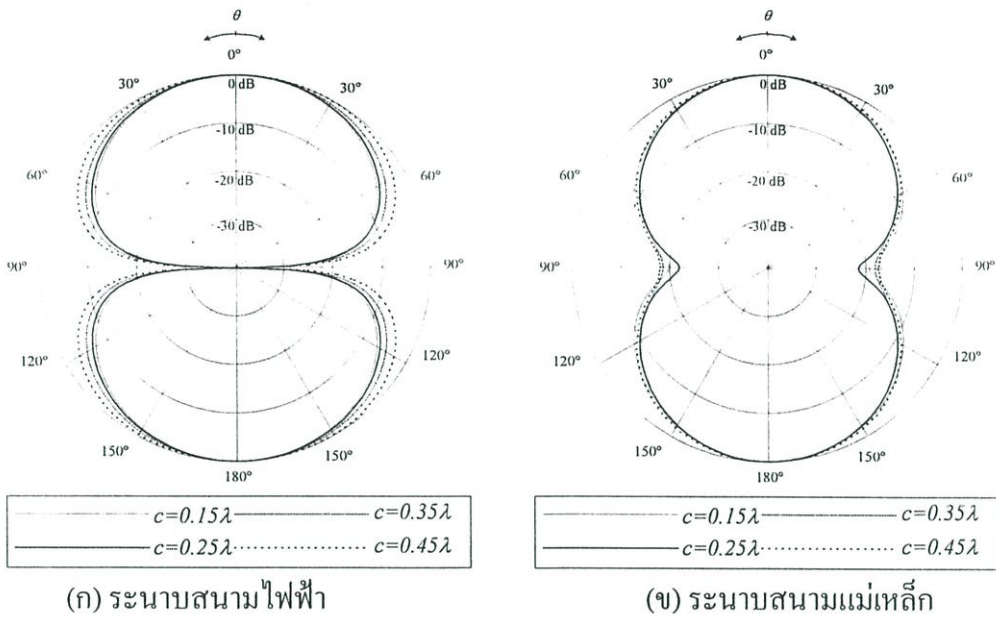


รูปที่ 3.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนขนาดความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (c) โดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งเป็นภาพสองมิติ ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อเปลี่ยนขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่คำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์แสดงดัง ได้แสดงดังรูปที่ 3.2 และ วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกแสดงในรูปที่ 3.3

จากรูปพบว่าทั้งวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกนั้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งสองกรณีจะมีแนวโน้มคล้ายกัน กล่าวคือ เมื่อขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมีค่ามากขึ้น ลักษณะลำคลื่นจะยิ่งกว้างมากขึ้นสำหรับระนาบสนามไฟฟ้า ยกเว้นในกรณีที่ c เท่ากับ 0.25λ กล่าวคือ เมื่อคำนวณ โดยฟังก์ชันกรีนไดเอดิกนั้นขนาดความกว้างลำคลื่นของสายอากาศจะแคบกว่ากรณีที่ c เท่ากับ 0.15λ สำหรับระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์นั้นค่าความกว้างลำคลื่นจะมีแนวโน้มกว้างขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อคำนวณโดยฟังก์ชันกรีนไดเอดิกพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะไม่เปลี่ยนแปลงในระนาบสนามแม่เหล็ก และสังเกตได้ว่าสิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนของทั้งสองวิธีคือ แบบรูปการกระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีความกว้างลำคลื่นที่แคบกว่าการคำนวณ โดยฟังก์ชันกรีนไดเอดิก

สำหรับผลที่ได้จากทั้งสองวิธีข้างต้นนี้ เป็นการพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นจากช่องเปิดทั้งสองด้านของสายอากาศโดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ และได้รวมผลจากโพรบร่วมด้วยโดยใช้ฟังก์ชันกรีนไดเอดิก แต่ทั้งสองกรณีดังกล่าวยังไม่ได้พิจารณาผลที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองด้านของสายอากาศร่วมด้วย ดังนั้นในรูปที่ 3.4

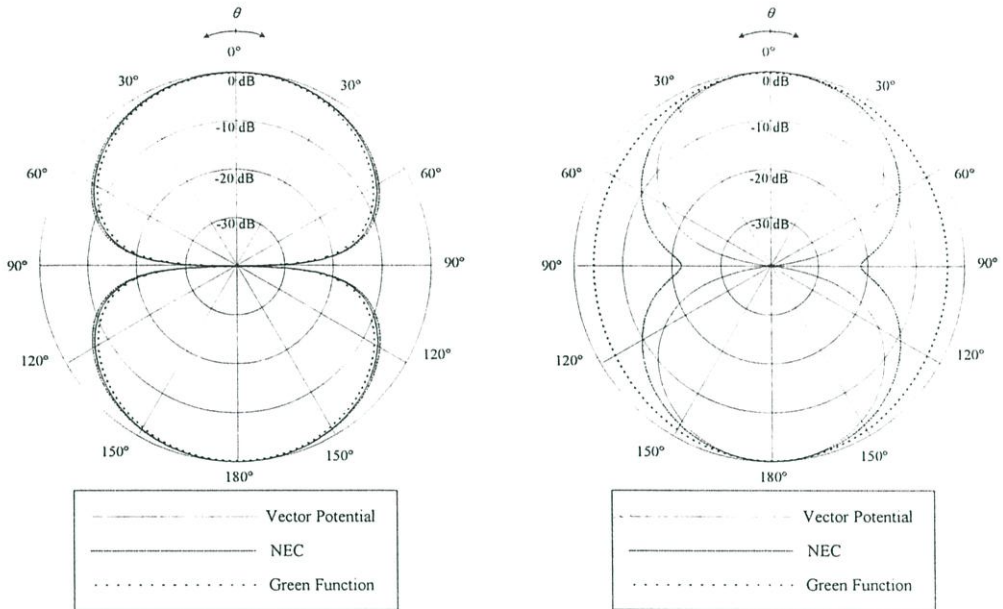


รูปที่ 3.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนขนาดความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยพิจารณาผลจากการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด และรวมผลของโพรบร่วมด้วย

ในรูปที่ 3.4 จะเป็นการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่คำนวณโดยโปรแกรม NEC2 ซึ่งได้พิจารณาผลจากการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองด้านของสายอากาศและพิจารณาผลของโพรบร่วมด้วย จากรูปพบว่า เมื่อความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมากขึ้น ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศจะยังมีแนวโน้มกว้างมากขึ้นทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ยกเว้นกรณีที่ c เท่ากับ 0.15λ จะมีลำคลื่นกว้างกว่ากรณีที่ c เท่ากับ 0.25λ และ 0.35λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก และเมื่อเปรียบเทียบกับสองกรณีข้างต้นพบว่า ในระนาบสนามไฟฟ้านั้นค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน แต่สำหรับระนาบสนามแม่เหล็กนั้นพบว่าค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศเมื่อคำนวณโดยโปรแกรม NEC2 จะมีค่าอยู่ตรงกลางระหว่างผลที่ได้จากศักย์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไดแอติก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งจากผลที่ได้นี้สามารถกล่าวได้ว่า การพิจารณาผลของโพรบร่วมด้วยนั้นจะมีผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กมีความกว้างลำคลื่นกว้างขึ้น (จะมีผลทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศต่ำ) และการพิจารณาผลของการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดจะมีผลให้ความกว้างลำคลื่นแคบลง (จะมีผลทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสูง)

สำหรับคุณลักษณะอื่นๆ ของสายอากาศจะแสดงในอันดับต่อไปนั้น จะพิจารณาผลการคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ (VPA) เปรียบเทียบกับวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอติก (DGA) แต่สำหรับการคำนวณโดยใช้โปรแกรม NEC2 นั้นจะไม่สะดวกและยุ่งยากทั้งนี้เนื่องจาก โปรแกรม NEC2 ต้องจำลองการสร้างสายอากาศใหม่ทุกครั้งที่เปลี่ยนพารามิเตอร์ของสายอากาศและเวลาในการประมวลผลโปรแกรมนั้นต้องใช้เวลานานหากต้องการความละเอียด ดังนั้นการพิจารณาคุณ

ลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากหลายๆ คำนับการใช้โปรแกรม NEC2 จึงไม่สะดวก ฉะนั้นกรณีที่พิจารณาคูณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมจึงจะพิจารณาเพียงกรณีที่คำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์เปรียบเทียบกับวิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอคิก



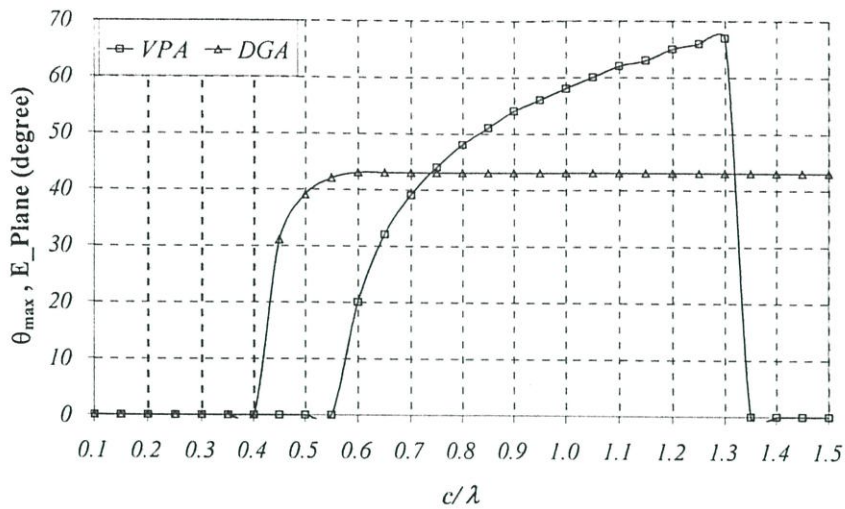
(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

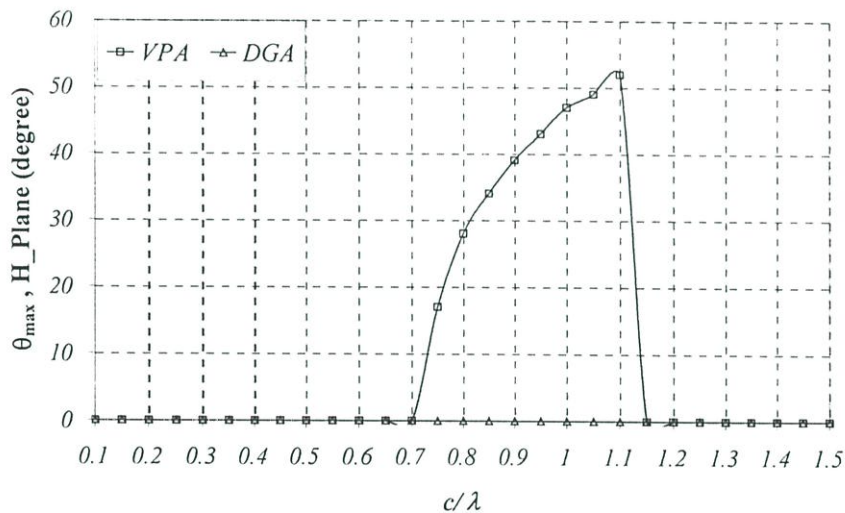
รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อพิจารณาจากวิธีต่างๆเปรียบเทียบกัน

3.2.2 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด

ในการออกแบบสายอากาศให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการนั้น จำเป็นต้องพิจารณาคูณลักษณะของสายอากาศหลายๆ อย่างร่วมกัน สิ่งที่สำคัญสิ่งหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือ ทิศทางการแพร่กระจายสนามที่แรงที่สุดของสายอากาศ โดยทิศทางที่จะพิจารณาคือ ทิศทางในระนาบมุมต่างๆ (θ, ϕ) ที่อ้างอิง ซึ่งในการพิจารณาสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาในระบบพิกัดทรงกลมที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.1 ที่พิจารณาให้สนามเดินทางในทิศตามแนวแกน z ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของสนามในระนาบต่างๆ ที่พิจารณาคือ ระนาบ xz และระนาบ yz นั่นคือ จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามในระนาบมุมยก (หรือระนาบมุม θ) นั่นเอง ดังนั้นค่ามุมยกที่สนามสูงสุดนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากต้องการสายอากาศที่สามารถแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางหน้าและด้านหลังทั้งสองด้าน ดังนั้นเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความแรงของสนามในทิศดังกล่าวจึงจำเป็นต้องพิจารณาร่วมด้วย



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

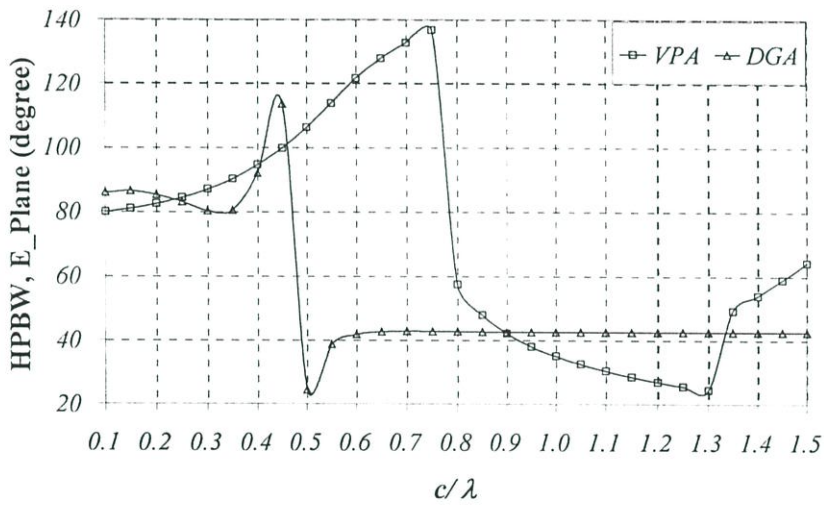
รูปที่ 3.6 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด เมื่อเปลี่ยนความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ในรูปที่ 3.6 เมื่อเปลี่ยนค่าความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็นค่าต่าง ๆ ซึ่งได้แสดงผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์เปรียบเทียบกับวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก พบว่าจะมีบางค่าเท่านั้นที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทาง กล่าวคือ ค่ามุมยกที่สนามสูงสุดซึ่งที่ 0° เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ในการคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์นั้น ขนาดความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่สายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางนั้น ต้องมีความยาวน้อยกว่า 0.55λ และเกิดขึ้นอีกครั้งเมื่อขนาดความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมากกว่า 1.35λ (พิจารณาในกรณี $0.1\lambda \leq c \leq 1.5\lambda$) แต่จากการคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางจะเกิดขึ้นเมื่อความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุม

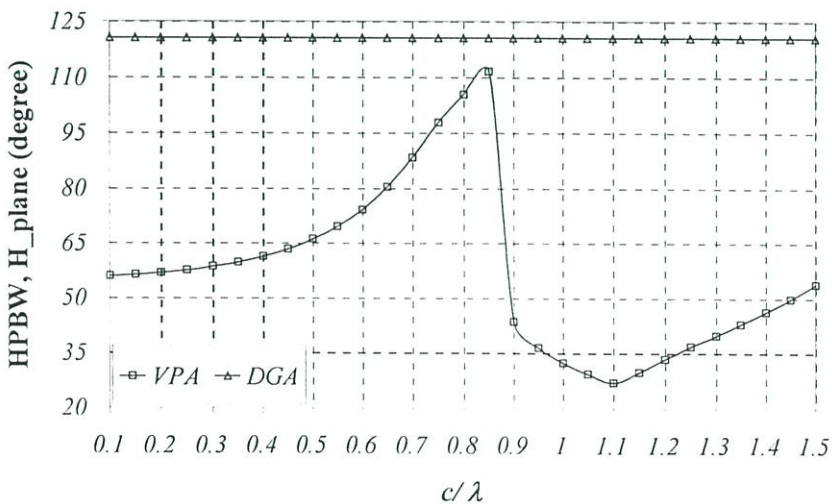
ฉากต้องไม่เกิน 0.4λ เท่านั้น คุณลักษณะนี้ของสายอากาศเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการพิจารณา ออกแบบสายอากาศต่อไป

3.2.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเป็นคุณลักษณะหนึ่งที่สำคัญของสายอากาศ ทั้งนี้ เพราะค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเป็นสิ่งที่ใช้บ่งชี้ถึงคุณสมบัติของสายอากาศ โดย ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ต้องการคือมีความกว้างแคบๆ ทั้งนี้เพื่อให้สายอากาศ แพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการแม่นยำขึ้นและมีการสูญเสียกำลังงานน้อย ในรูปที่ 3.7 แสดงค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

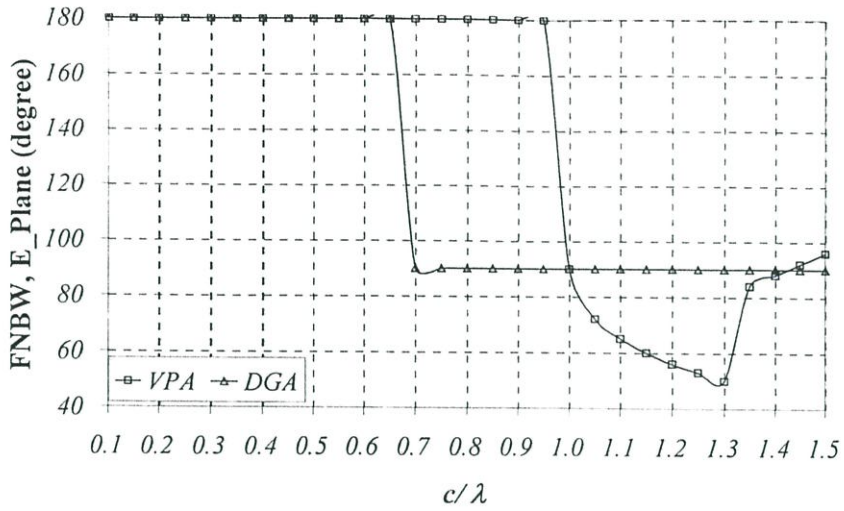
รูปที่ 3.7 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

เมื่อคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์พบว่ายิ่งเพิ่มขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากค่าความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศยิ่งกว้างขึ้นจนถึงค่าหนึ่งคือที่ c เท่ากับ 0.75λ และ 0.85λ ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับความกว้างลำคลื่นจะเริ่มแคบลง สำหรับวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกนั้น ในระนาบสนามไฟฟ้าพบว่า ค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศจะแคบลงเมื่อขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากยาวขึ้นจนถึงค่าหนึ่งคือที่ c เท่ากับ 0.4λ (ขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางโดยพิจารณาจากหัวข้อที่ 3.2.2) จากนั้นความกว้างลำคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากและเริ่มคงที่ เมื่อ c เท่ากับ 0.6λ ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กพบว่าค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศคงที่เท่ากับ 120.64 ตลอดช่วงที่พิจารณา นั่นคือขนาดของความยาววงแหวนจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อพิจารณาวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกนั่นเอง นอกจากนี้พบว่าที่ c เท่ากับ 0.25λ นั้นค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากทั้งวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไดเอดิกมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นผลที่ได้จากการคำนวณโดยฟังก์ชันกรีนไดเอดิกจะมีค่าความกว้างลำคลื่นกว้างกว่าวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ทุกกรณี

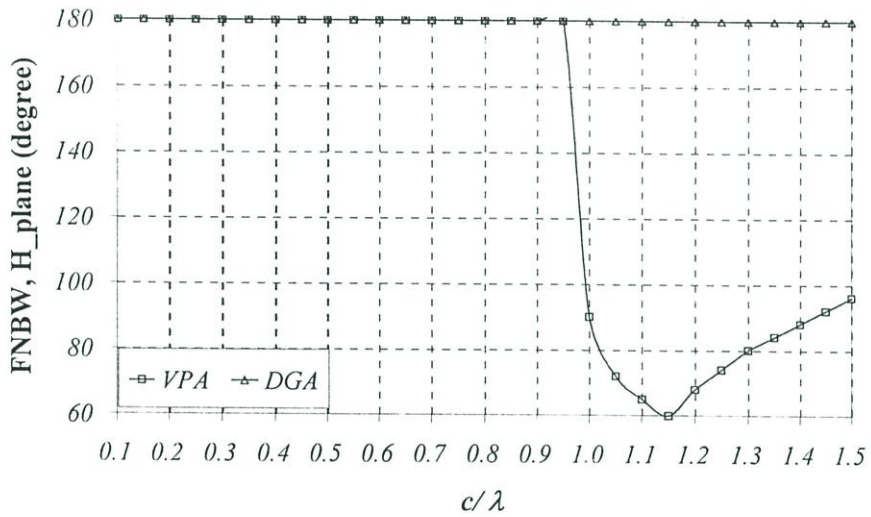
3.2.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลาง

ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลาง คือช่วงกว้างของมุมที่ความเข้มการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าการคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์นั้น เมื่อความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมากขึ้นค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางจะคงที่จนถึงที่ค่าหนึ่งคือ ที่ c เท่ากับ 0.95λ จากนั้นความกว้างลำคลื่นจะเริ่มแคบลงทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก นั่นคือ ที่ค่า c มีค่าน้อย ๆ สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นมีเพียงลำคลื่นเดียว แต่เมื่อ c มากขึ้น (ช่วงที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศลำคลื่นหลักจะเริ่มชี้ทิศทางสูงสุดไปในทิศทางอื่น กล่าวคือมีลำคลื่นจะแยกออกเป็นสองลำคลื่นนั่นเอง

สำหรับวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกพบว่า ค่าความกว้างลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรกจะมีค่าคงที่ที่ 180 ตลอดทุกความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ($0.1\lambda \leq c \leq 1.5\lambda$) ในสนามแม่เหล็ก ส่วนในระนาบสนามไฟฟ้า ค่าความกว้างลำคลื่นที่เป็นศูนย์กลางแรกจะมีค่าคงที่ที่ 180 เมื่อ c น้อยกว่า 0.65λ จากนั้นลำคลื่นจะแคบลงและคงที่ที่ 90 นั่นคือ ในช่วงแรกนั้นจะให้ลำคลื่นหลักลำคลื่นเดียวแล้วจากนั้นลักษณะลำคลื่นหลักจะชี้ทิศทางสูงสุดไปในทิศทางอื่นและมีหลายลำคลื่นเกิดขึ้นนั่นเอง



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.8 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สำคัญตามเป็นศูนย์กลางคู่แรกที่เป็นฟังก์ชันของความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

3.2.5 ค่าสภาพเงาเงงทิศทางของสายอากาศ

ค่าสภาพเงาเงงทิศทางของสายอากาศ คือค่าที่แสดงว่าสายอากาศมีความแรงที่ทิศทางต่าง ๆ มากน้อยเพียงใดเทียบกับตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซโทรปิกมีหน่วยเป็น dBi ซึ่งในการพิจารณาจะใช้ค่าสภาพเงาเงงทิศทางที่มากที่สุด โดยได้จากความสัมพันธ์

$$D_0(\theta, \phi) = 10 \log \left(\frac{4\pi U_{\max}(\theta, \phi)}{P_{\text{rad}}} \right) \quad (3.1)$$

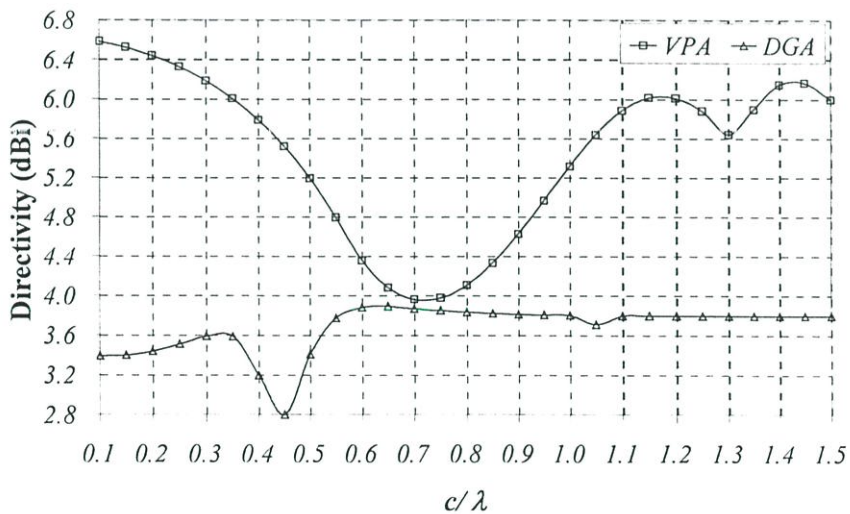
โดย U_{\max} คือค่าสูงสุดของความเข้มการแพร่กระจายคลื่นหาได้จาก

$$U_{\max}(\theta, \phi) = \frac{1}{2\eta} \left[|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2 \right]_{\text{max}} \quad (3.2)$$

P_{rad} คือกำลังงานที่แพร่กระจายคลื่นทั้งหมด โดยที่หาได้จาก

$$P_{rad} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} U(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (3.3)$$

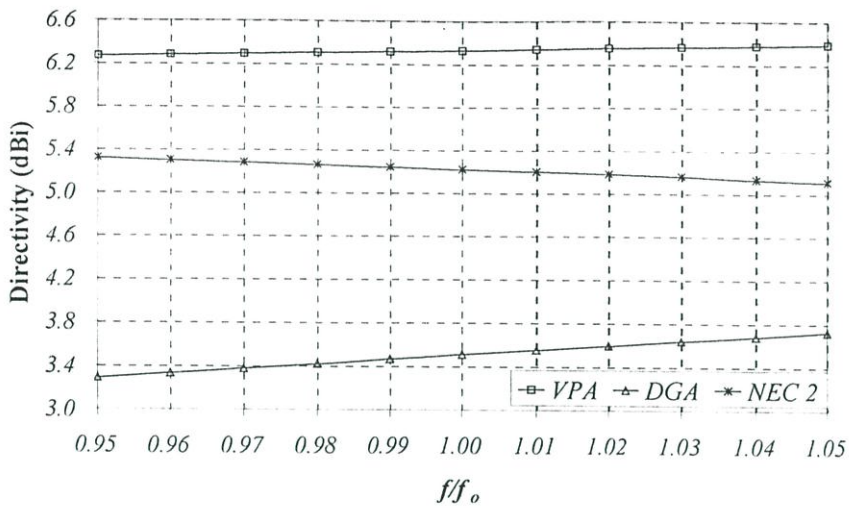
ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 ผลจากการคำนวณวิธีฟังก์ชันศักร์แวกเตอร์พบว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะยิ่งลดลงเมื่อความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มขึ้น (ในเงื่อนไขที่สายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง) สำหรับวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกนั้นในเงื่อนไขที่สายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง (เมื่อ c ไม่เกิน 0.4λ) พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่มากที่สุดคือ c มีค่าประมาณ 0.3λ จากนั้นจะเริ่มลดลง นอกจากนี้พบว่า ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักร์แวกเตอร์จะมีค่ามากกว่าวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกทุกกรณี และเมื่อพิจารณาในเงื่อนไขที่สายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่คำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักร์แวกเตอร์จะสูงกว่าวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก ทั้งนี้เนื่องจากลำคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกมีความกว้างกว่าวิธีฟังก์ชันศักร์แวกเตอร์ ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการพิจารณาโพรบป้อนสัญญาณร่วมด้วยในวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกนั่นเอง



รูปที่ 3.9 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

นอกจากนี้ได้พิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ โดยเลือกขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่ากับ 0.25λ ซึ่งเป็นขนาดที่ให้ค่าความกว้างของลำคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าใกล้เคียงกันในการพิจารณาจากวิธีฟังก์ชันศักร์แวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก (จากหัวข้อ 3.2.3 และ 3.2.4) โดยค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศใน

ระนาบสนามแม่เหล็กอาจแตกต่างกันในแต่ละวิธี (พิจารณาจากหัวข้อ 3.2.1 3.2.3 และ 3.2.4) ดังแสดงในรูปที่ 3.10

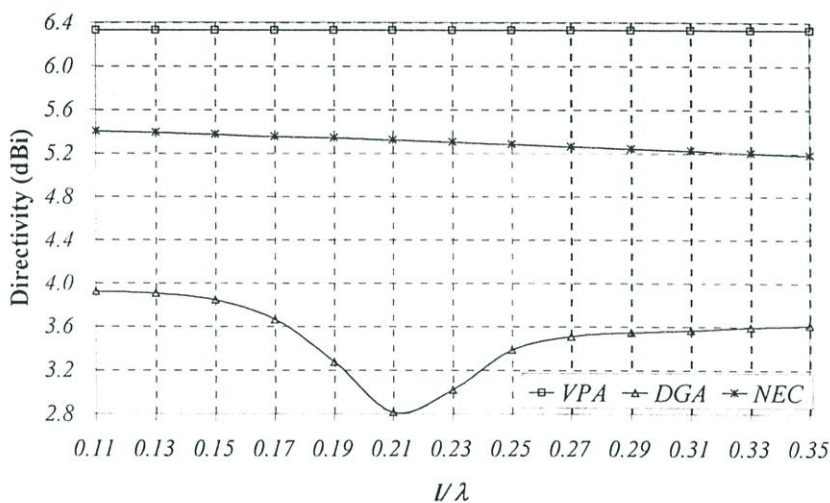


รูปที่ 3.10 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันความถี่

สำหรับวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก จะพบว่ายิ่งความถี่ยิ่งสูงขึ้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่สำหรับกรณีที่คำนวณจากโปรแกรม NEC2 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะยังมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรม NEC2 จะมีค่าอยู่ระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก เมื่อพิจารณาที่ความถี่ปฏิบัติการคือ f/f_0 เท่ากับ 1 พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศในกรณีที่คำนวณจากโปรแกรม NEC2 และวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์จะแตกต่างกันประมาณ 1.11 dB และความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากโปรแกรม NEC2 และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกประมาณ 1.67 dB และพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศมีค่าลดลงจากตำแหน่งที่มีค่าสูงสุดไม่เกิน 3 dB นั่นคือตลอดช่วงความถี่ $0.95f_0$ ถึง $1.05f_0$ สายอากาศสามารถทำงานได้ตลอดทั้งช่วง

และในรูปที่ 3.11 ได้พิจารณาค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนความยาวของโพรบป้อนสัญญาณเป็นค่าต่างๆ พบว่าเมื่อความยาวโพรบยาวขึ้น สำหรับการคำนวณโดยโปรแกรม NEC2 และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกนั้น ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศก็มีแนวโน้มลดลง แต่วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะคงที่เท่ากับ 6.33 dB นั่นคือวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์นี้ไม่พิจารณาผลของโพรบร่วมด้วย และพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่ได้จากโปรแกรม NEC2 จะมีค่าอยู่ตรงกลางระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า

วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ที่ไม่พิจารณาผลของโพรบร่วมด้วย (มีผลต่อระนาบสนามแม่เหล็กมากกว่าระนาบสนามไฟฟ้า) จะมีค่าความกว้างลำคลื่นแคบเป็นผลให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงกว่าวิธีอื่น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวิธีฟังก์ชันกรีน ไคแอดิก และ NEC2 ที่พิจารณาโพรบร่วมด้วยทั้งคู่ พบว่าวิธีฟังก์ชันกรีน ไคแอดิกให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ต่ำกว่านั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากวิธีฟังก์ชันกรีน ไคแอดิกไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดร่วมด้วยนั่นเอง



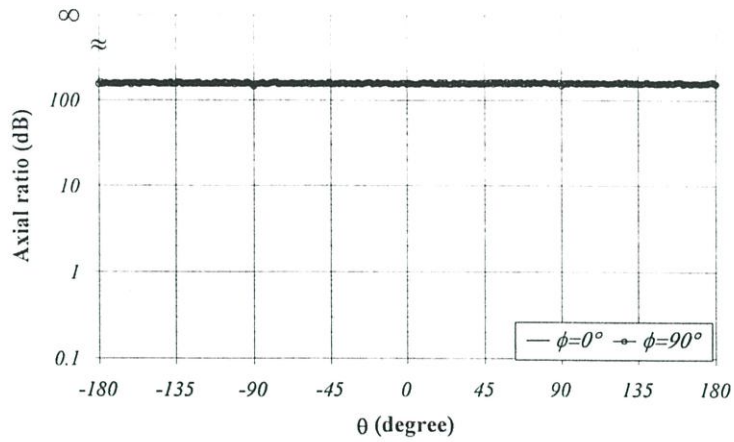
รูปที่ 3.11 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ

จากคุณลักษณะต่างๆที่แสดงในข้างต้นนี้จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อหาค่าความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยจะพิจารณารณมิติที่ทำให้เงื่อนไขที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายแบบสองทิศทางและให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงที่สุดและเป็นเงื่อนไขที่สอดคล้องกันทั้งวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีน ไคแอดิก ดังนั้นจึงเลือกขนาดของวงแหวนที่มีความยาวเท่ากับ 0.25λ นอกจากนี้พบว่า ผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีน ไคแอดิก และจากโปรแกรม NEC2 เมื่อขนาดความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่ากับ 0.25λ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกัน (แต่จะแตกต่างในระนาบสนามแม่เหล็ก) โดยจะใช้ขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้ตลอดการวิเคราะห์กรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับ และนำไปวางใกล้ตัวสะท้อนในหัวข้อต่อไปด้วย

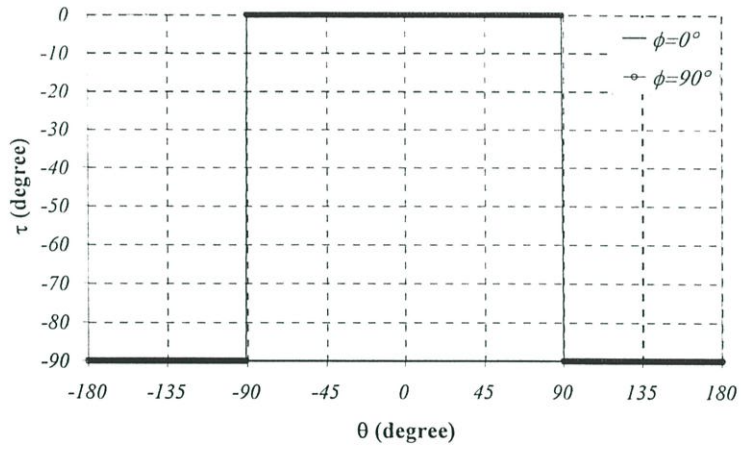
3.2.6 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาคคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ โดยจะพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศซึ่งเป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงลักษณะการโพลาไรซ์ และค่ามุมเอียงของการเปลี่ยนแปลงของสนามเปรียบเทียบกับแกนอ้างอิงซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาให้แกนตั้ง (E_θ) เป็นแกนอ้างอิง ในรูปที่ 3.12 ถึงรูปที่ 3.14 ได้แสดงคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบ

กระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อ c เท่ากับ 0.25λ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก และ โปรแกรม NEC2 ตามลำดับ

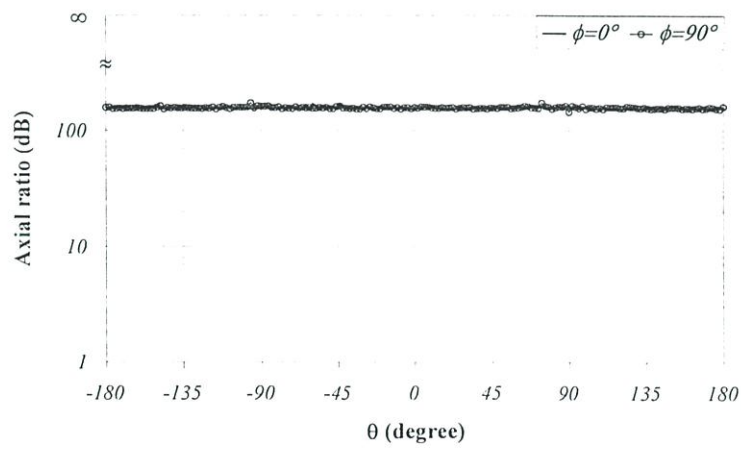


(ก) ค่าอัตราส่วนแกน

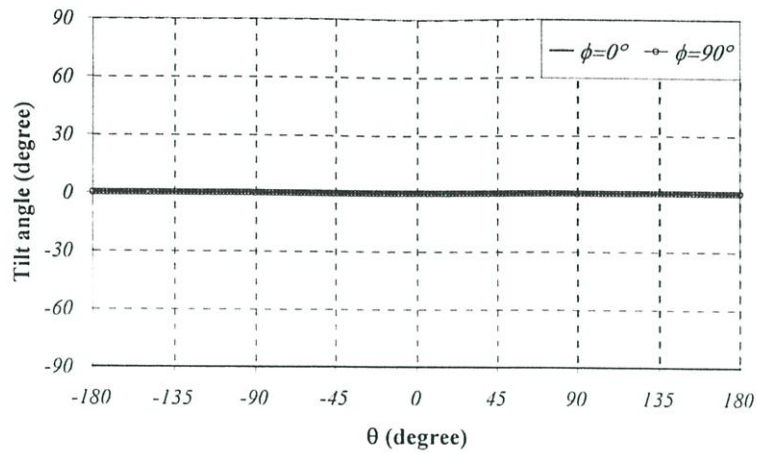


(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.12 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์

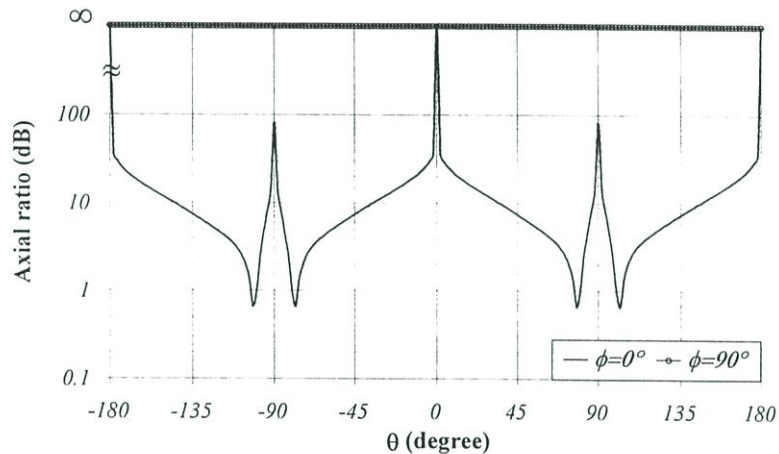


(ค) ค่าอัตราส่วนแกน

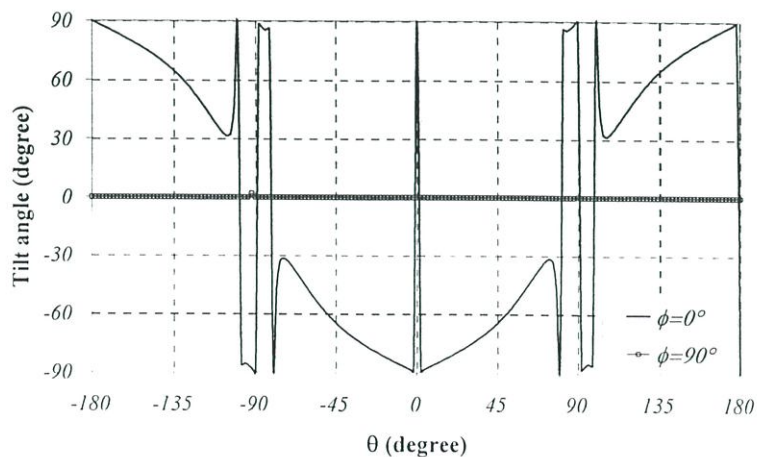


(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.13 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดย
ใช้ฟังก์ชันกรีนไดเอดิก



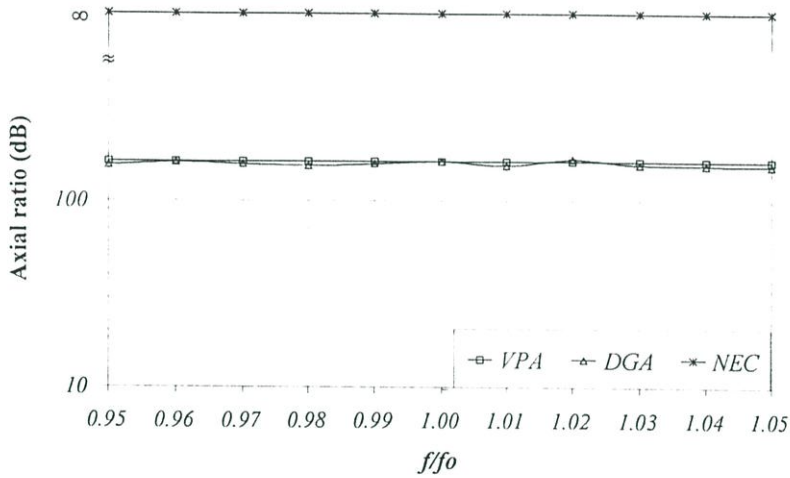
(ก) ค่าอัตราส่วนแกน



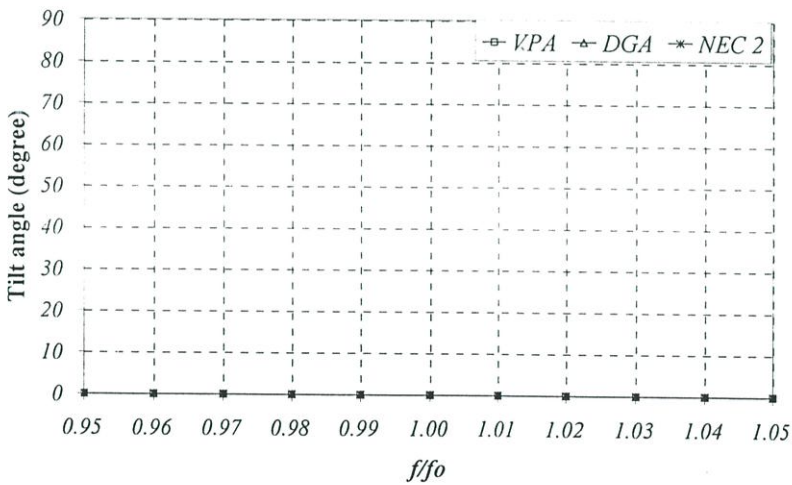
(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.14 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดย
ใช้โปรแกรม NEC2

พบว่าทั้งสามวิธีให้ผลที่สอดคล้องกันเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งด้านหน้าของสายอากาศ ($\theta = 0^\circ$) ค่าอัตราส่วนของสายอากาศมีค่าลู่เข้าสู่ ∞ dB นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเป็นแบบเชิงเส้น และมุมเอียงของสนามแนวตั้ง (E_θ) และแนวนอน (E_ϕ) เป็น 0° และ 90° แสดงว่าสายอากาศนี้ให้การโพลาไรซ์แนวนอนและแนวตั้งตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า สายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้งเมื่อ $\phi = 90^\circ$ และมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวนอนเมื่อ $\phi = 0^\circ$ ในทิศทางที่สนามสูงสุดนั่นเอง



(ก) ค่าอัตราส่วนแกน



(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.15 การโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่

นอกจากนี้ได้พิจารณาการโพลาไรซ์ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ โดยพิจารณาจากด้านหน้า ($\theta = 0, \phi = 90$) พบว่า ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศเมื่อคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไดเอดิกจะมีค่าสูงมากเข้าใกล้ ∞ dB ส่วนค่าอัตราส่วนแกนของสาย

อากาศจากโปรแกรม NEC2 นั้นมีค่าเท่ากับ ∞ dB นั่นคือการโพลาไรซ์ของสายอากาศเป็นแบบเชิงเส้น และลักษณะการเอียงของการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0 ทุกกรณี จึงกล่าวได้ว่าสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้งตลอดช่วงความถี่ $0.95f_0$ ถึงความถี่ $1.05f_0$ ดังแสดงในรูปที่ 3.15

3.2.7 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์

คุณลักษณะสุดท้ายที่จะพิจารณาสำหรับสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่แพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางนี้ก็คือ คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งเป็นการพิจารณาความเข้ากันได้ของสายอากาศและสายนำสัญญาณ ทั้งนี้เพราะเป็นสิ่งที่บ่งชี้ว่าคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดนั้นสามารถส่งผ่านสายนำสัญญาณไปยังสายอากาศได้มากน้อยเท่าใด ซึ่งในการพิจารณาจะใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกและโปรแกรม NEC2 ในการคำนวณ ส่วนวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์นั้นไม่สามารถพิจารณาคคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ เนื่องจากสนามที่ได้นั้นเกิดจากกระแสสมมติที่ช่องเปิด และจากการพิจารณาที่ผ่านมาข้างต้นจะพบว่าความยาวของโพรบจะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของสายอากาศ โดยการพิจารณาคคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์กับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) ดังแสดงในสมการที่ (3.8)

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.8)$$

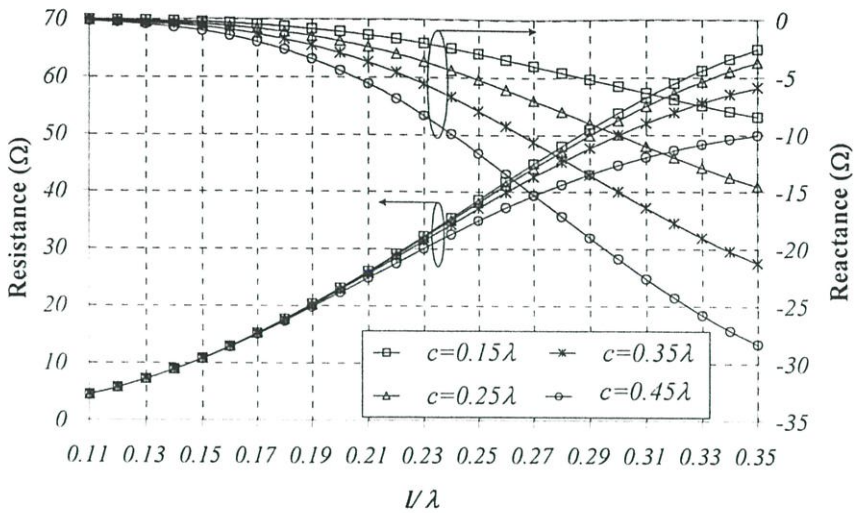
โดย Γ คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ซึ่งหาได้จาก

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \quad (3.9)$$

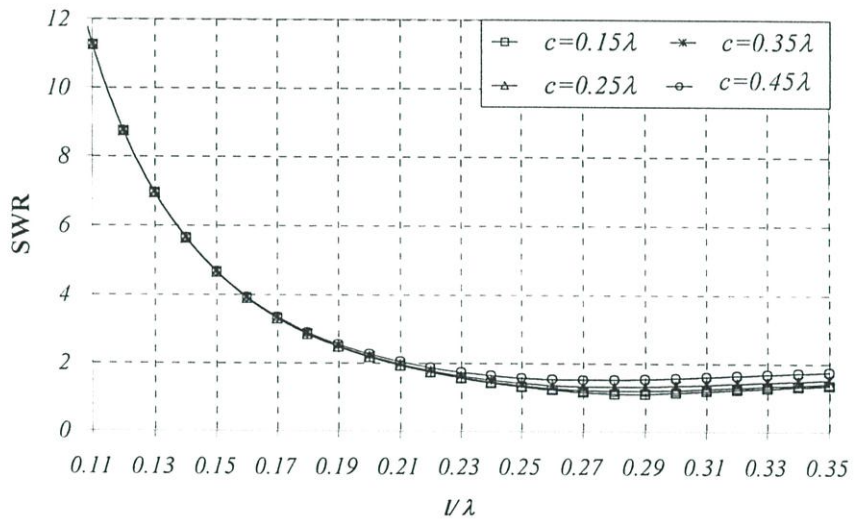
สำหรับ Z_A คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และ Z_0 คือค่าความต้านทานคุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ของสายนำสัญญาณ

3.2.7.1 การวิเคราะห์โดยใช้สนามจากวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก

ในการพิจารณาคคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโดยใช้ฟังก์ชันกรีนไดโอดิกนี้จะคำนวณด้วยวิธีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced EMF) กระแสที่ได้นั้นเกิดจากการสมมติ และนิพจน์ของสมการการแพร่กระจายคลื่นได้จากวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกนั้นพิจารณาดำแหน่งของโพรบป้อนสัญญาณร่วมด้วย และพบว่าขนาดความยาวของโพรบป้อนสัญญาณจะมีผลต่อคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งแสดงด้วยค่าอิมพีแดนซ์ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ จากรูปพบว่า เมื่อความยาวโพรบเชิงเส้นยังมีความยาวมากขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะมีแนวโน้มสูงขึ้น และเข้าใกล้ 50 โอห์ม ที่ความยาวโพรบระยะหนึ่ง



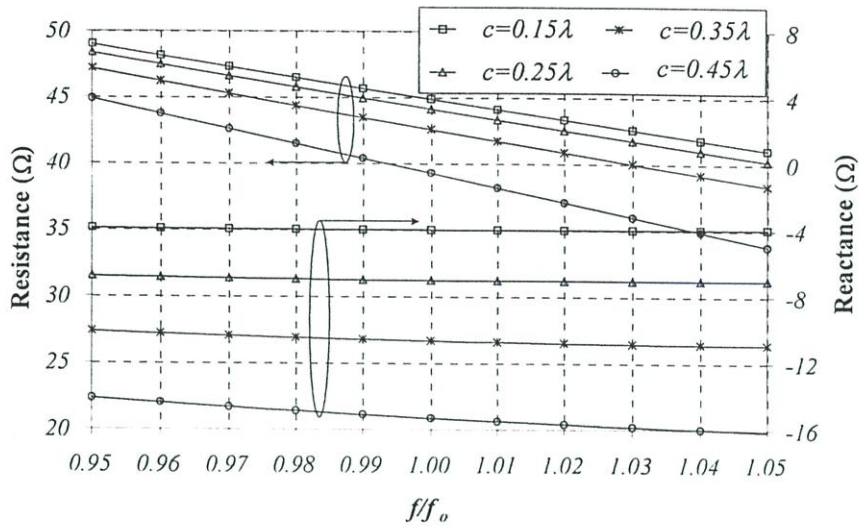
(ก) ค่าอิมพีแดนซ์



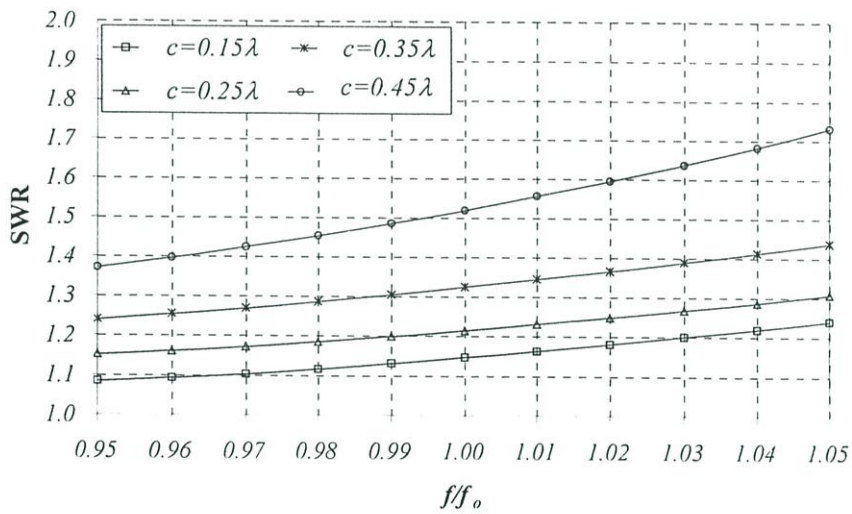
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก

ในทำนองเดียวกันค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศจะมีแนวโน้มลดลงจนต่ำกว่า 2:1 (กำลังงานที่สะท้อนกลับมาไม่เกิน 11.11%) ที่ความยาวโพรบมากกว่าประมาณ 0.21λ สำหรับสายอากาศที่มีความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก c เท่ากับ 0.15λ 0.25λ 0.35λ และ 0.45λ และจะมีตำแหน่งที่มีอิมพีแดนซ์แมตซ์ซึ่งดีที่สุดที่สุดเมื่อโพรบมีความยาวประมาณ 0.27λ



(ก) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



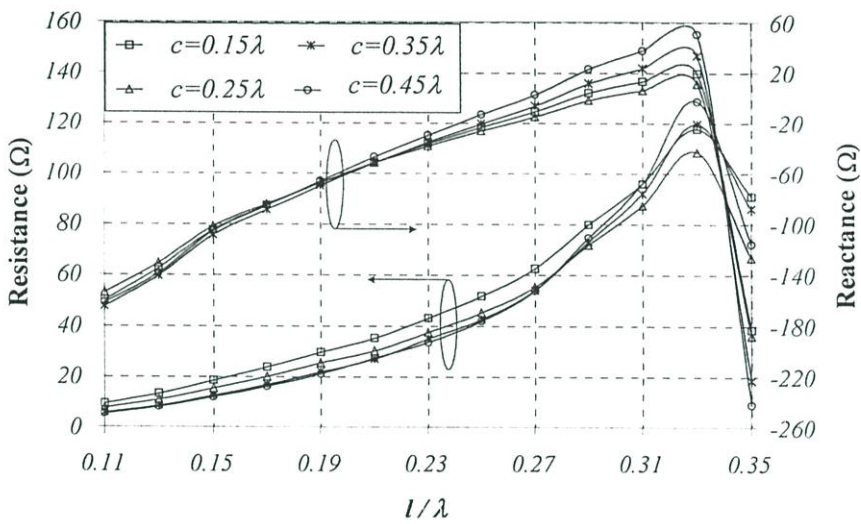
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

รูปที่ 3.17 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อคำนวณ โดยวิธี ฟังก์ชันกรีนไดแอติก

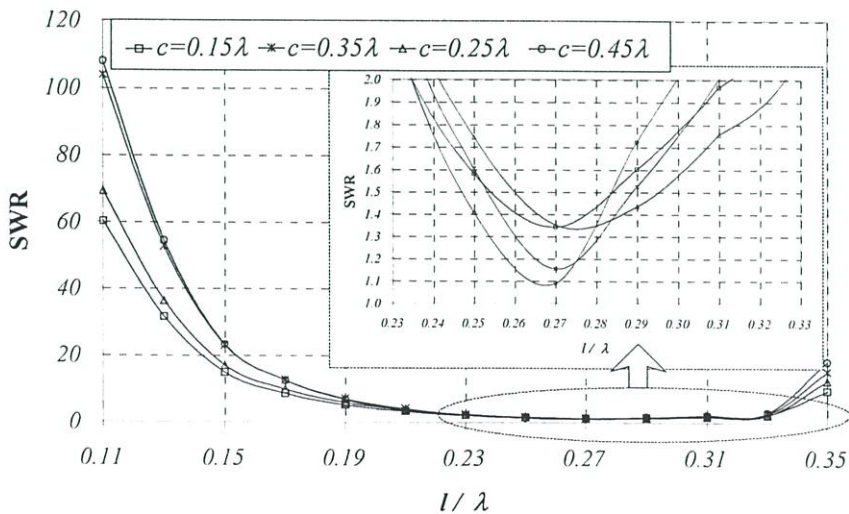
และเมื่อพิจารณาคูณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ โดยพิจารณาที่ความยาวของโพรบป้อนสัญญาณเท่ากับ 0.27λ (กรณีที่มีคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ดีที่สุด) จะพบว่าค่าความต้านทานและค่าแอดมิตแดนซ์ของสายอากาศมีแนวโน้มต่ำลงเมื่อความถี่สูงขึ้นตลอดย่านความถี่ตั้งแต่ $0.95f_0$ จนถึง $1.05f_0$ ทุกกรณี และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศพบว่าทุกกรณีมีแนวโน้มของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งสูงขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้นและมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2:1 ตลอดย่านความถี่ (สามารถทำงานได้ตลอดย่านความถี่ $0.95f_0$ จนถึง $1.05f_0$) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.17

3.2.7.2 การวิเคราะห์โดยโปรแกรม NEC2

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโดยใช้โปรแกรม NEC2 โดยจะพิจารณากรณีที่เปลี่ยนความยาวของโพรบป้อนสัญญาณเป็นค่าต่างๆ ในรูปที่ 3.18 ได้แสดงคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยจะแสดงเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทาน (Resistance) และ ค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance) นอกจากนี้ได้พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศด้วย จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์จะมีแนวโน้มสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่มีความยาวประมาณ 0.33λ ก็จะเริ่มลดลง



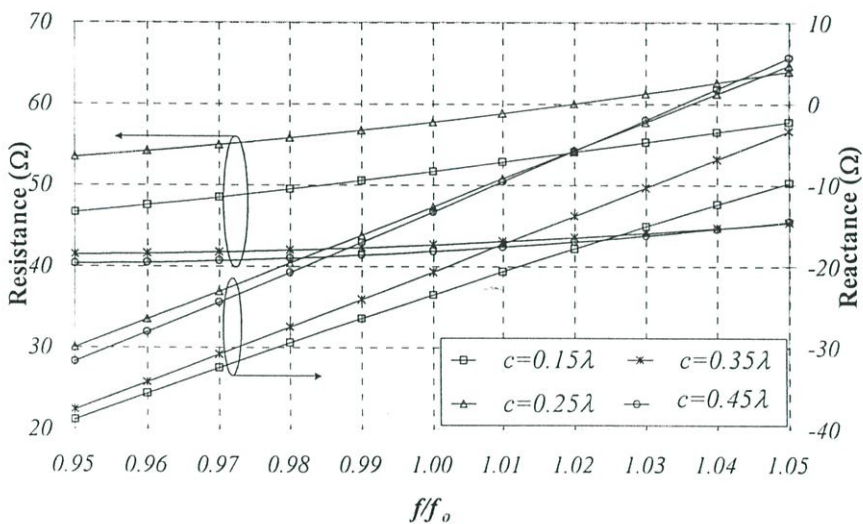
(ก) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



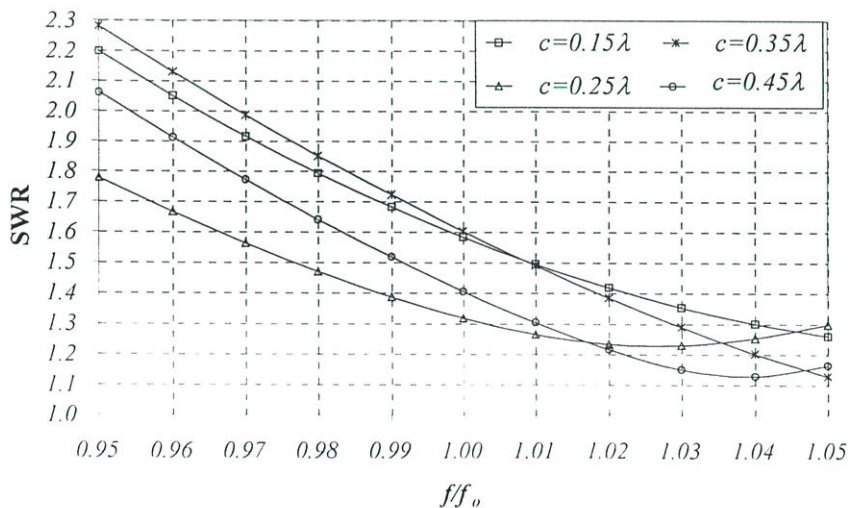
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

รูปที่ 3.18 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ โดยโปรแกรม NEC2

และพบว่าที่ความยาวโพรบประมาณ 0.23λ ถึง 0.27λ ค่าความต้านทานเข้าใกล้ 50 โอห์ม ขณะที่ค่ารีแอกแตนซ์จะกลับเฟสที่ความยาวโพรบประมาณ 0.27λ ในทุกกรณี สำหรับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบพบว่า ยิ่งความยาวโพรบยาวมากขึ้นค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งยิ่งลดลงจนถึงค่าหนึ่งที่มีความยาวประมาณ 0.33λ จะสูงเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และความยาวโพรบที่ให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2:1 คือความยาวเริ่มตั้งแต่ประมาณ 0.24λ จนถึงความยาวประมาณ 0.31λ กรณีความยาววงแหวนเท่ากับ 0.15λ และ 0.35λ และที่ความยาวประมาณ 0.30λ และ 0.32λ ในกรณีความยาววงแหวน 0.45λ และ 0.25λ ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำที่สุดที่ความยาวโพรบ 0.27λ ของทุกกรณี



(ก) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

รูปที่ 3.19 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ โดยโปรแกรม NEC2

ในรูปที่ 3.19 แสดงคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของความถี่ เมื่อความยาวโพรบเท่ากับ 0.27λ พบว่า เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย และทำนองเดียวกันค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศจะมีค่าต่ำลงเมื่อความถี่สูงขึ้น และจะมีค่าต่ำกว่า 2:1 เมื่อความถี่ประมาณ $0.96f_0$ เมื่อ c เท่ากับ 0.15λ ที่ความถี่ $0.97f_0$ เมื่อ c เท่ากับ 0.35λ และ 0.45λ สำหรับ c เท่ากับ 0.25λ จะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2:1 ตลอดช่วงความถี่ $0.95f_0$ ถึง $1.05f_0$

3.3 คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากจากข้างต้น ได้เลือกขนาดของสายอากาศกรณีองค์ประกอบเดี่ยวดังนี้ ขนาดความกว้างของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่ากับ 0.69λ วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมีความสูงเท่ากับ 0.35λ ความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก 0.25λ และโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นยาว 0.27λ ซึ่งจะใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ตลอดวิทยานิพนธ์นี้

เนื่องจากสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดประมาณ 6.33 dBi จะครอบคลุมพื้นที่แนวแคบได้ระยะทางหนึ่ง หากต้องการพัฒนาสายอากาศให้ได้อัตราการขยายที่สูงเพื่อครอบคลุมพื้นที่ได้ไกลมากขึ้น วิธีหนึ่งที่จะเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศ คือ การจัดเรียงสายอากาศเป็นลักษณะแถวลำดับ และด้วยโครงสร้างของสายอากาศที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้ เพื่อความสะดวกในการจัดเรียงได้ง่ายและไม่ซับซ้อนมาก จึงพิจารณาจัดเรียงสายอากาศเป็นลักษณะแถวลำดับเชิงเส้นและแถวลำดับเชิงระนาบ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อนี้ต่อไป

3.3.1 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

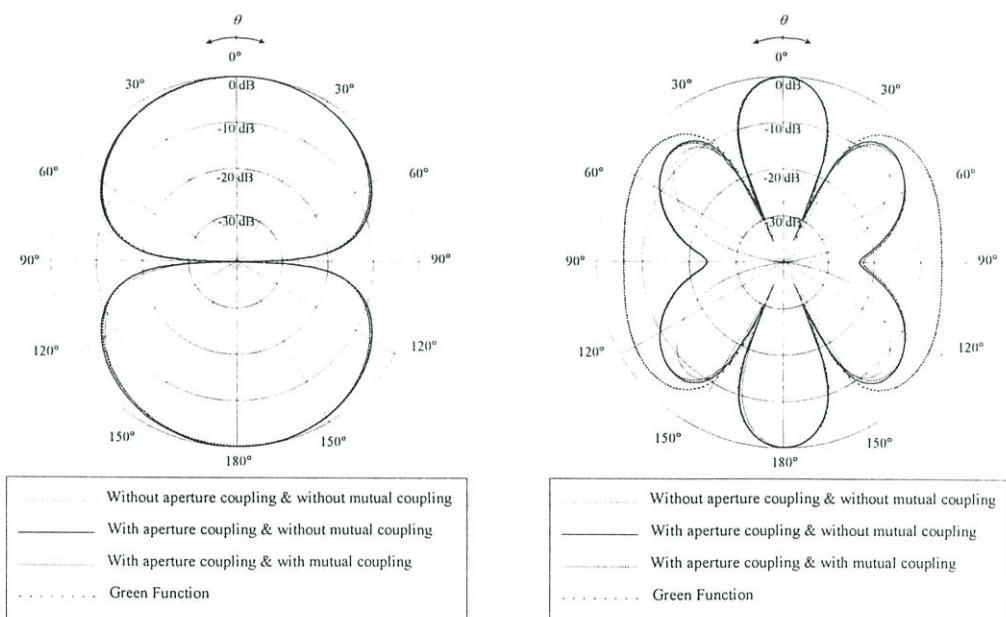
จากบทที่ 2 พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับนั้น ได้แก่ ระยะห่างระหว่างสายอากาศและจำนวนของสายอากาศนั่นเอง ดังนั้นจะพิจารณาทั้งกรณีที่เปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศและจำนวนของสายอากาศด้วย ทั้งนี้เพื่อหาระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสมที่ให้คุณลักษณะของสายอากาศตามที่ต้องการ โดยคุณลักษณะที่พิจารณาก็คือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าความกว้างลำคลื่น และค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ ซึ่งในการพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับเหล่านี้จะพิจารณาโดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ ทั้งนี้เพราะการคำนวณจากโปรแกรม NEC2 ต้องจำลองโครงสร้างของสายอากาศใหม่เมื่อเงื่อนไขเปลี่ยนไปซึ่งไม่สะดวกและใช้เวลานาน ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากและซับซ้อนลง สามารถทำได้โดยนำสนามของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวคูณกับองค์ประกอบแถบลำดับของสายอากาศแต่ละกรณีได้ โดยผลที่ได้ก็นับยอมรับได้แต่อาจมีความแม่นยำลดลง ซึ่งการวิเคราะห์ในข้างต้นพบว่าที่ความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่ากับ 0.25λ ค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศ

ในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และโปรแกรม NEC2 จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก (แต่ในระนาบสนามแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกัน) ดังนั้นเมื่อนำไปคูณกับตัวประกอบแอมพลิจูดเดียวกันจะได้ค่าที่ใกล้เคียงกันและได้แนวโน้มนั้นเหมือนกัน ดังนั้นเพื่อความรวดเร็วและสะดวกในการพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศและจำนวนองค์ประกอบของแอมพลิจูดจึงจะคำนวณโดยใช้วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์

นอกจากนี้จะพิจารณาคุณลักษณะเชิงโพลาริซัด้วย โดยการจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับนี้จะพิจารณาการจัดเรียงตามแนวแกนดังนี้ ตามแนวแกน x เรียกว่า การจัดเรียงแถวลำดับด้านข้าง (Side by side) ตามแนวแกน y เรียกว่า การจัดเรียงแถวลำดับตามยาว (Collinear) และ จัดเรียงตามแนวแกน z เรียกว่า การจัดเรียงแถวลำดับแบบหันหน้าเข้าหากัน (Face to face)

3.3.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

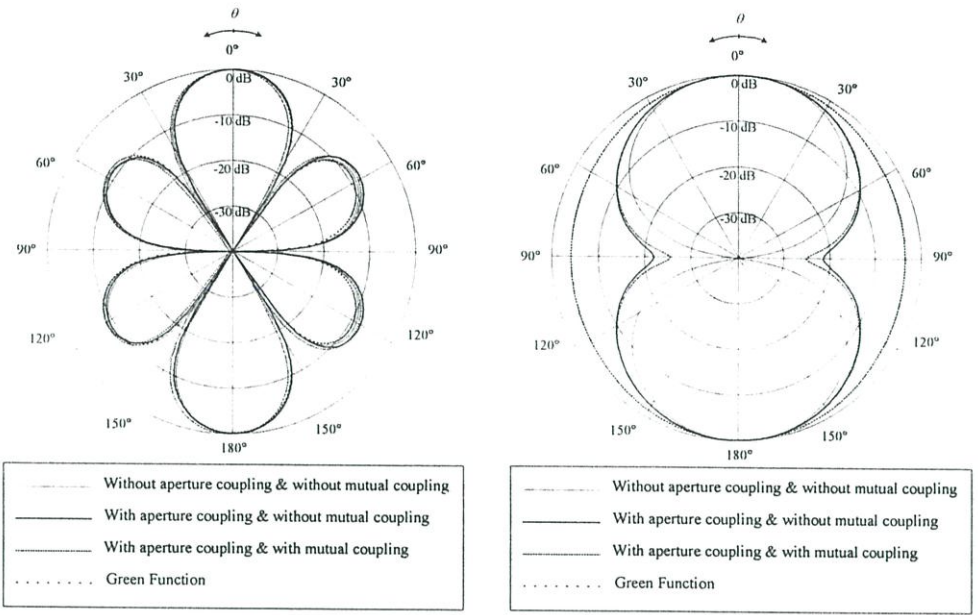
สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นแต่ละแบบนั้นจะแสดงที่ระยะต่างๆ กัน ทั้งนี้เพราะมีข้อจำกัดของขนาดวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่แต่ละด้านด้วย จึงแสดงเฉพาะในกรณีที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางเท่านั้น และเนื่องจากระยะห่างที่เลือกนั้นแตกต่างกัน ดังนั้นในแต่ละแบบจึงแสดงผลแยกกันดังนี้ คือระยะห่างของสายอากาศสององค์ประกอบตามแนวแกน x แกน y และตามแกน z มีค่าเท่ากับ 1.2λ 0.95λ และ 0.75λ ตามลำดับ โดยการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะใช้ค่าดังที่ได้กล่าวมานี้แสดง



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

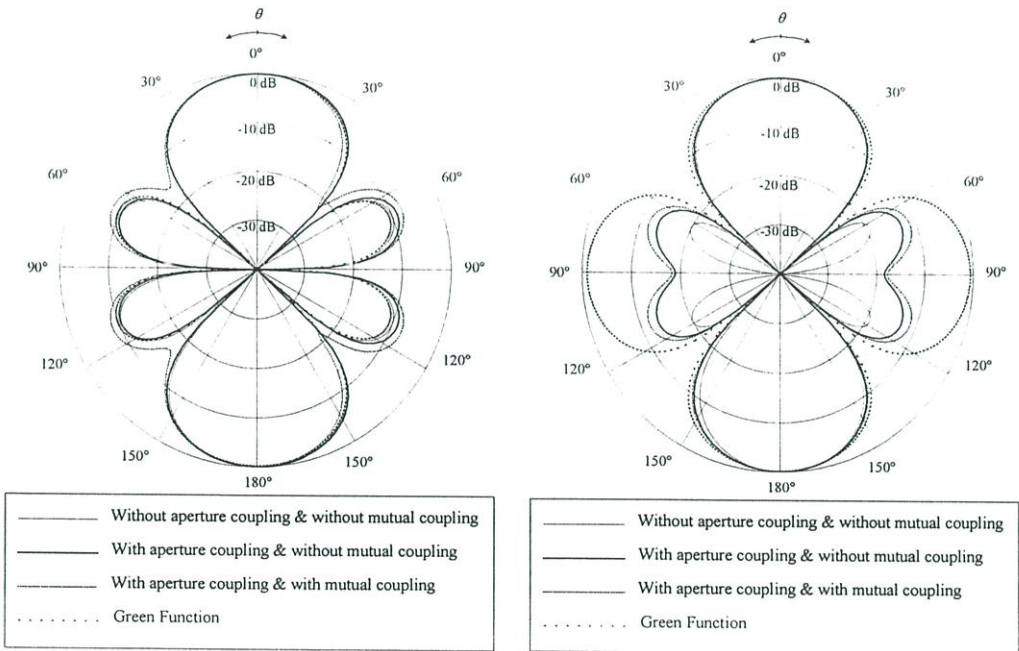
รูปที่ 3.20 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับตามแนวแกน x



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับตามแนวแกน y



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

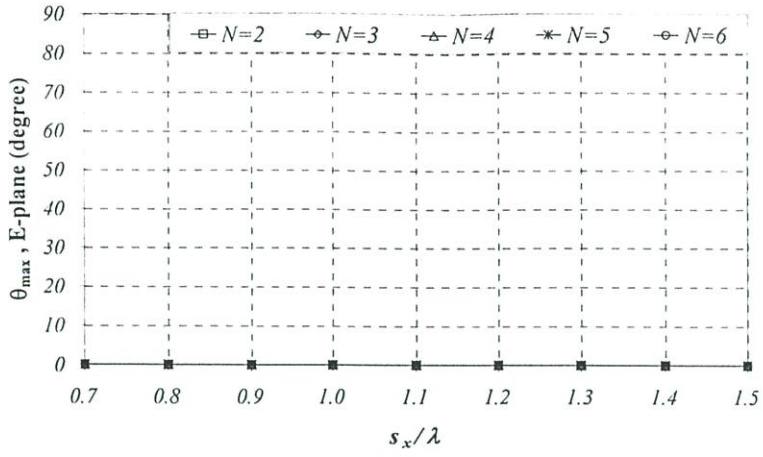
รูปที่ 3.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับตามแนวแกน z

จากรูปที่ 3.20 ถึงรูปที่ 3.22 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x แกน y และตามแนวแกน z ตามลำดับ โดยได้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างการคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสอง

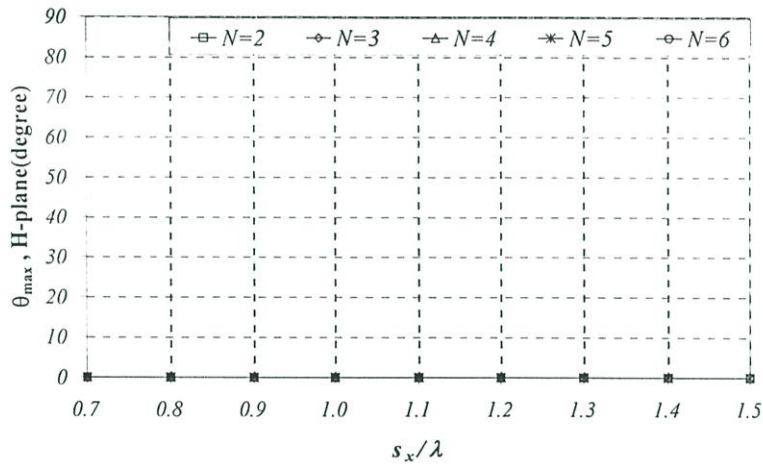
ด้านของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากและระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ การคำนวณที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองด้านของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากแต่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบสายอากาศโดยคำนวณจากสายอากาศองค์ประกอบเดียว (จากโปรแกรม NEC2) คูณกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor) การคำนวณโดยโปรแกรม NEC2 ซึ่งพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองด้านของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากและระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองด้านของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากและระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ แต่รวมผลจากโพรบป้อนสัญญาณร่วมด้วย ซึ่งพบว่าในระนาบสนามไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากแต่ละวิธีมีความใกล้เคียงกัน แต่ในระนาบสนามแม่เหล็กพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นแบบสองทิศทางที่มีลักษณะความกว้างลำคลื่นแตกต่างกัน กล่าวคือ วิธีศักย์เวกเตอร์จะให้ค่าความกว้างลำคลื่นแคบที่สุด ส่วนวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกจะมีค่าความกว้างลำคลื่นที่กว้างที่สุด สำหรับผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม NEC2 นั้น (การคำนวณโดยพิจารณาผลของการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดแต่ไม่คำนวณผลจากการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบ และกรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดและระหว่างองค์ประกอบ) มีค่าความกว้างลำคลื่นอยู่ระหว่างผลการคำนวณ โดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก

3.3.1.2 ค่ามุมที่สนามสูงสุด

ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาลักษณะของสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง กล่าวคือ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต้องชี้ที่ 0 พร้อมกันทั้งคู่ ซึ่งในการพิจารณาการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นนี้ พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ และจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาว่าที่ตำแหน่งใดบ้างที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ซึ่งในรูปที่ 3.23 จนถึงรูปที่ 3.25 ได้แสดงค่ามุมที่สนามสูงสุดทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบเป็นค่าต่างๆ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x แกน y และตามแนวแกน z ตามลำดับ พบว่าในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x และตามแนวแกน y จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางตลอดระยะห่างระหว่างสายอากาศ 0.1λ ถึง 1.5λ แต่ในกรณีจัดเรียงตามแนวแกน z พบว่าจะมีค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศบางตำแหน่งเท่านั้นที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางและจะแตกต่างกันเมื่อเพิ่มจำนวนองค์ประกอบสายอากาศ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์นี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งในหัวข้อย่อยต่อไป จะพิจารณาเฉพาะกรณีที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางเท่านั้น

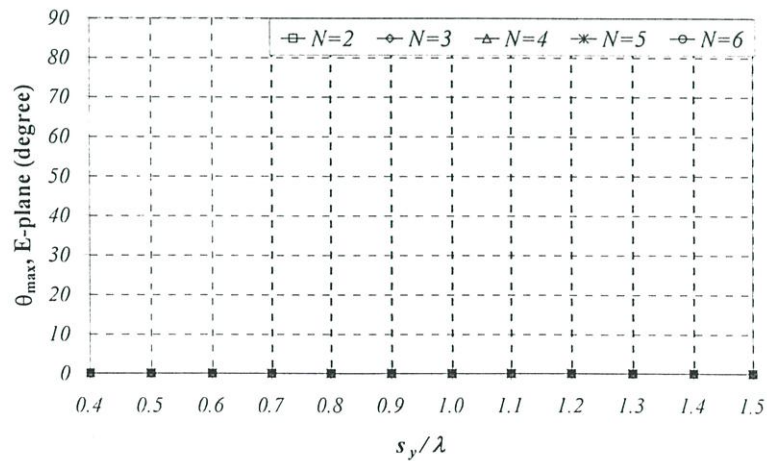


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

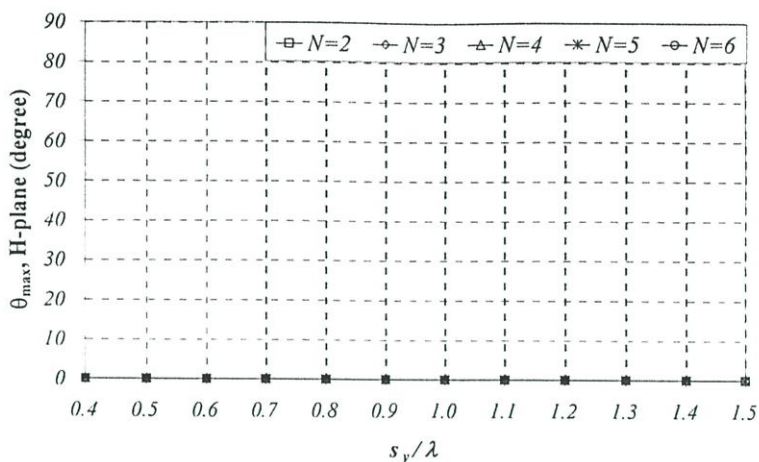


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.23 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x

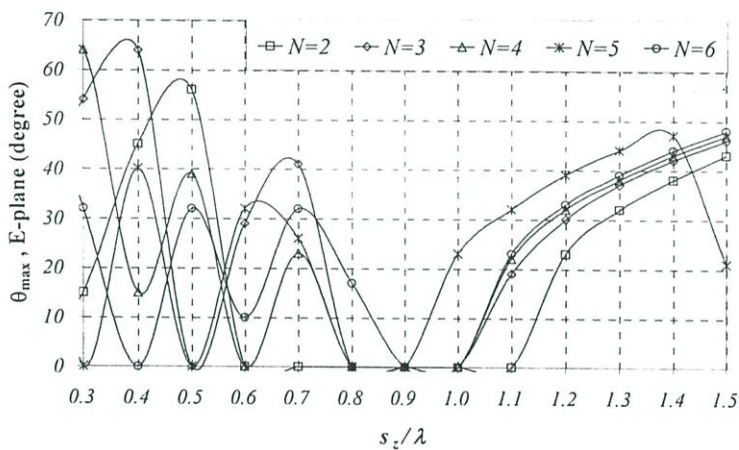


(ค) ระนาบสนามไฟฟ้า

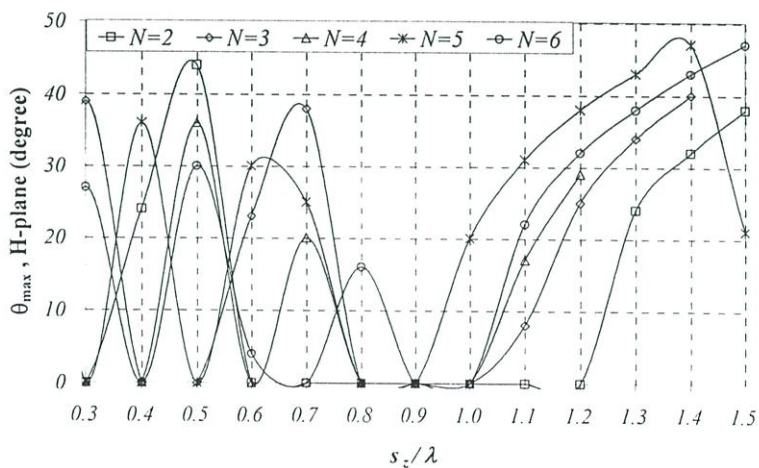


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.24 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y



(ค) ระนาบสนามไฟฟ้า

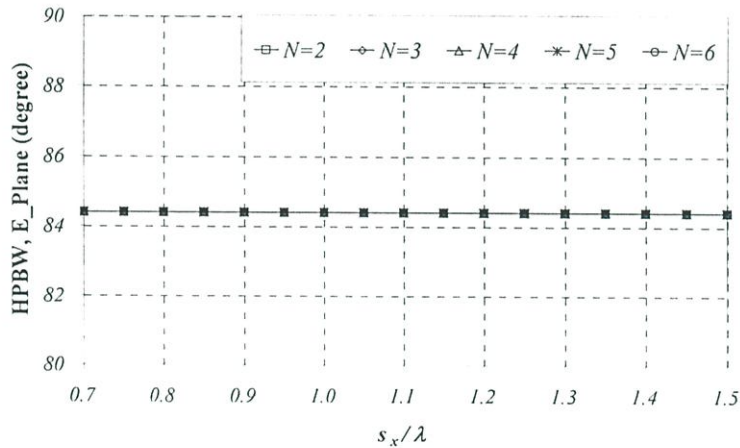


(ง) ระนาบสนามแม่เหล็ก

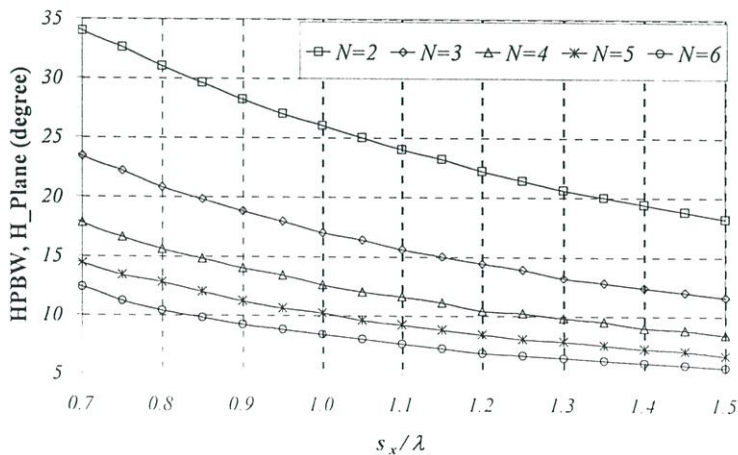
รูปที่ 3.25 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z

3.3.1.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

สำหรับค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกนต่างๆ เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศ ได้แสดงในรูปที่ 3.26 ถึงรูปที่ 3.28 พบว่าค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งจะมีค่าคงที่ที่ค่าหนึ่งคือ 84.4° ในระนาบสนามไฟฟ้าและ 58° ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้นกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และ y ตามลำดับ ค่าความกว้างลำคลื่นกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และ y ตามลำดับจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามจะมีค่าความกว้างลำคลื่นจะกว้างขึ้นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้นในกรณีที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน z และค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งจะยังคงเดิมเมื่อจำนวนสายอากาศเพิ่มมากขึ้นในทุกกรณี

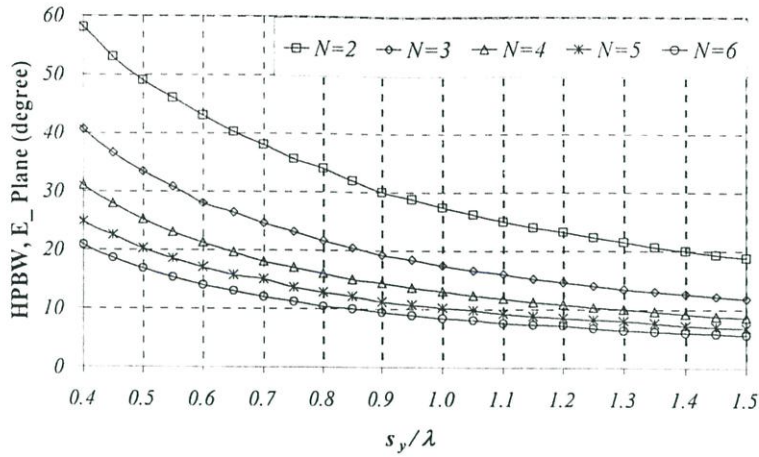


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

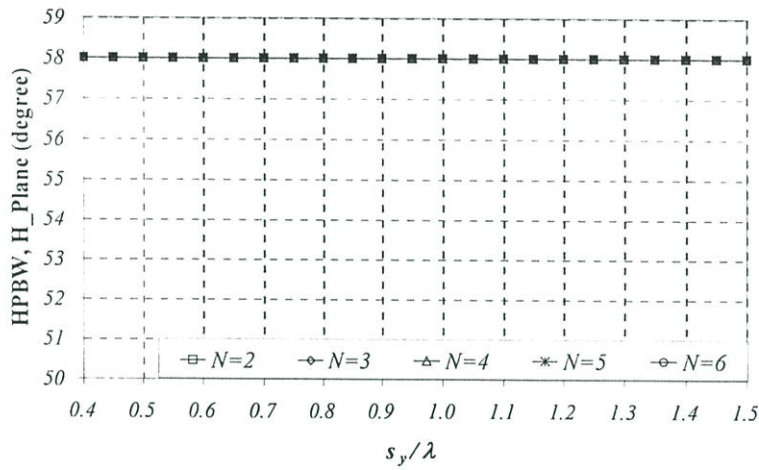


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.26 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x

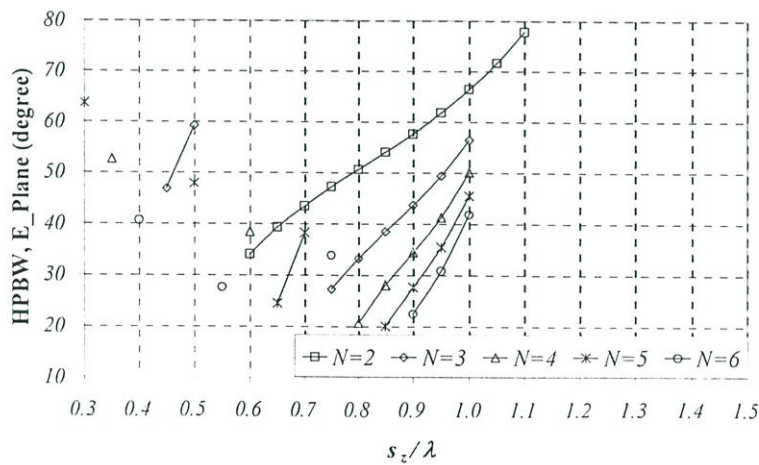


(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

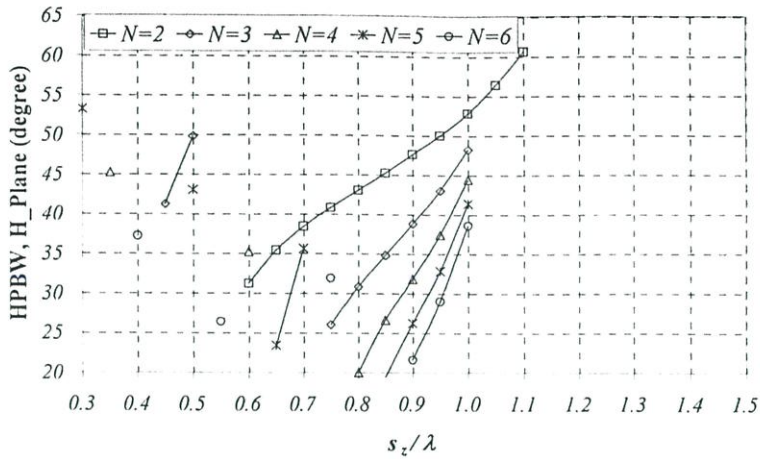


(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.27 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y



(ค) ระบายสนามไฟฟ้า

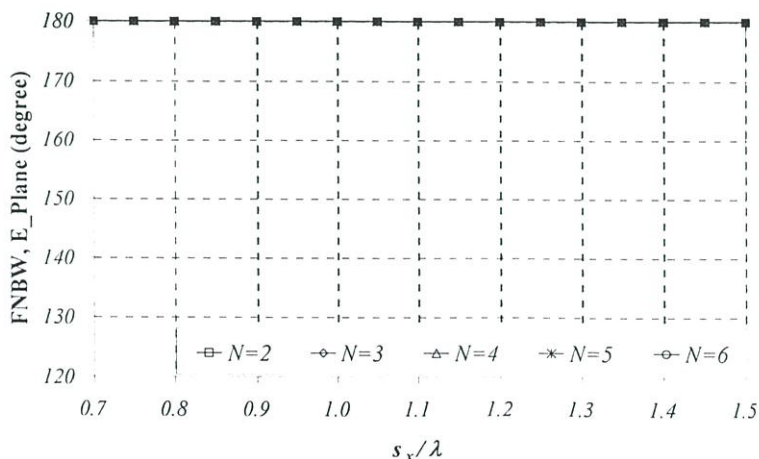


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

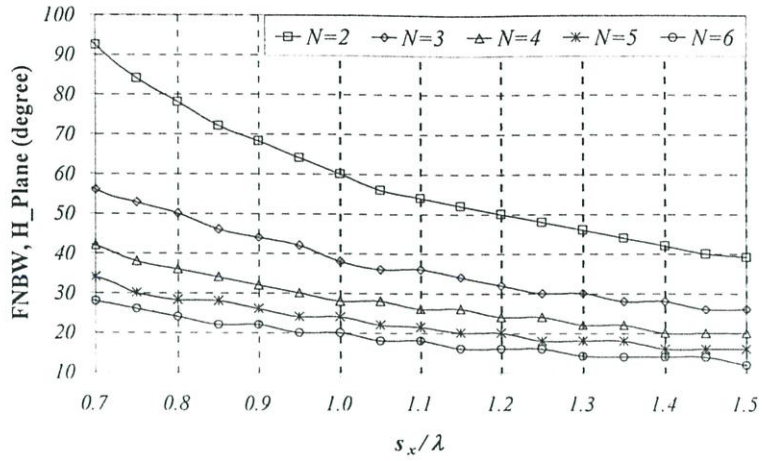
รูปที่ 3.28 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ
ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z

3.3.1.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สำคัญเป็นศูนย์กลางคู่แรก

ค่าความกว้างลำคลื่นที่สำคัญเป็นศูนย์กลางคู่แรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ
กรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x แกน y และตามแนวแกน z ตามลำดับ ได้แสดง
ไว้ในรูปที่ 3.29 ถึง 3.31 พบว่าในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน x และแกน y จะมีผลต่อ
คุณลักษณะของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้าตามลำดับ กล่าวคือ เมื่อ
เพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศจะมีผลให้ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศแคบลงทั้งในระนาบ
สนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้าเมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x และแกน y
ตามลำดับ ส่วนระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตาม
แนวแกน x และแกน y จะมีค่าคงที่ที่ 180° ทั้งคู่

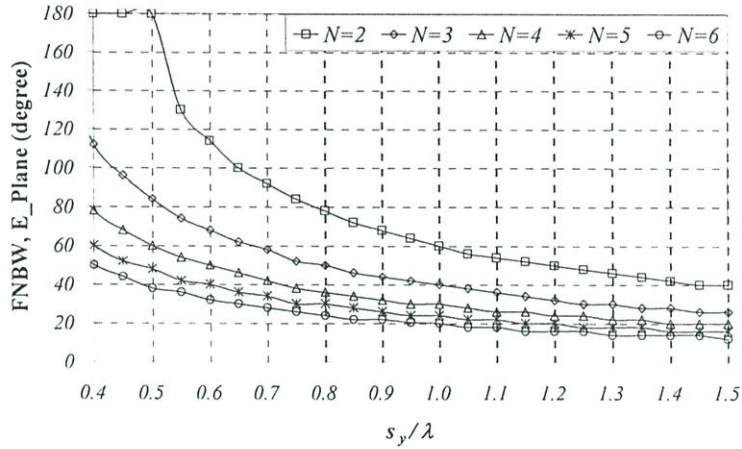


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

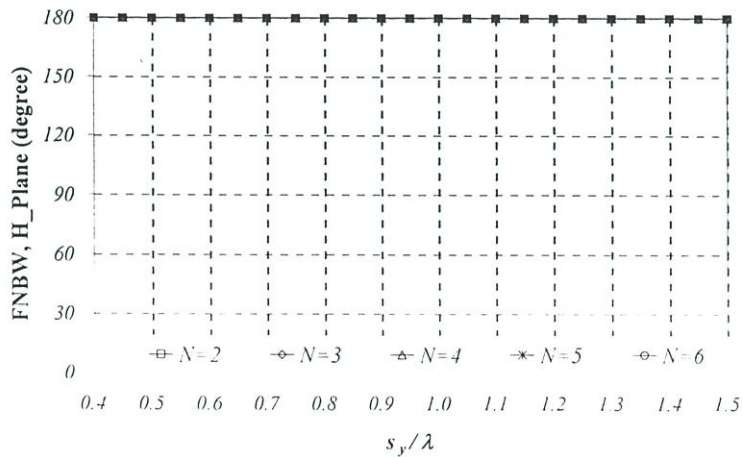


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.29 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x

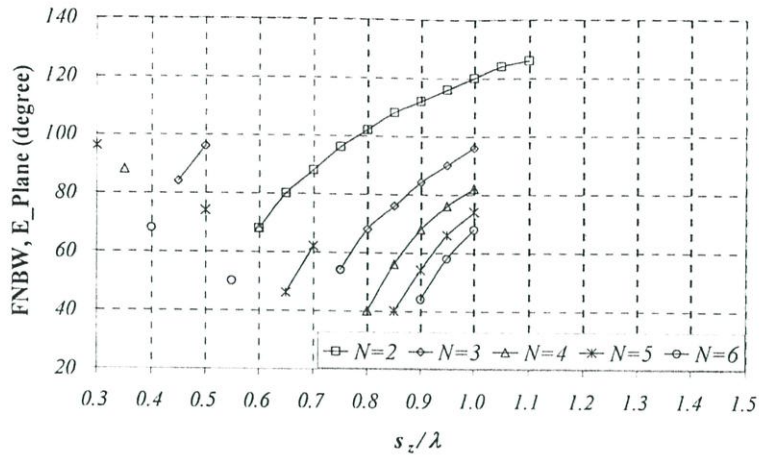


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

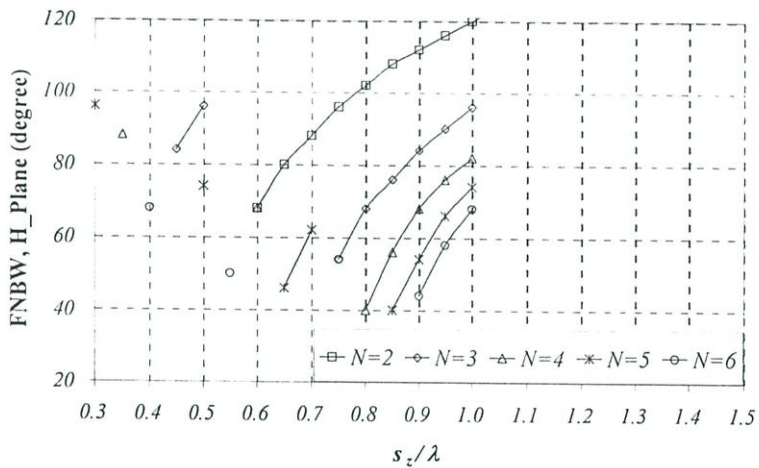


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.30 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

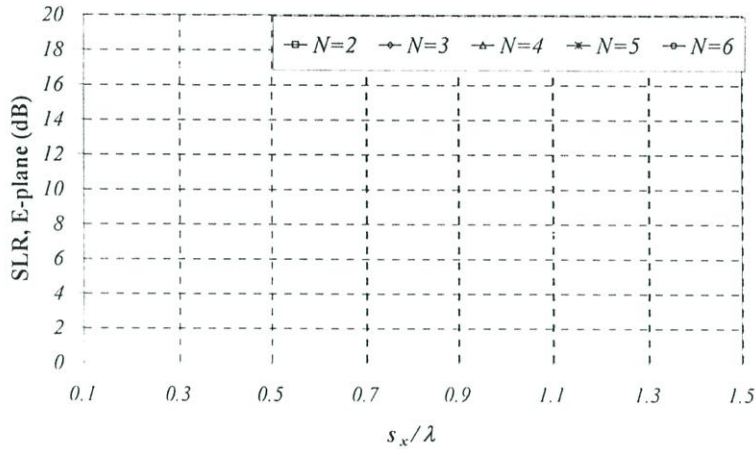
รูปที่ 3.31 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z

สำหรับการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z จะมีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศทั้งระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า คือ เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้นค่าความกว้างลำคลื่นจะยิ่งแคบลง และเมื่อเพิ่มจำนวนองค์ประกอบแถวลำดับขึ้นพบว่า ค่าความกว้างลำคลื่นจะยิ่งแคบลงด้วยในทุกกรณี

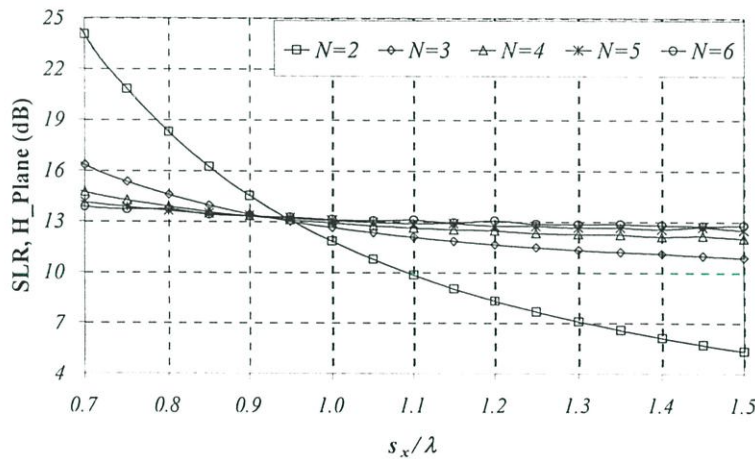
3.3.1.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x แกน y และตามแนวแกน z ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 3.32 ถึงรูปที่ 3.33 พบว่าสำหรับการจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และแกน y จะเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างในระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามลำดับ และพบว่ายิ่ง

เพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างยังมีแนวโน้มลดลงทั้งคู่ แต่ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของการจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแกน x และแกน y จะไม่เกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างขึ้น ส่วนการจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน z ในรูปที่ 3.34 จะเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างขึ้นทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก โดยพบว่ายิ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มมากขึ้นค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

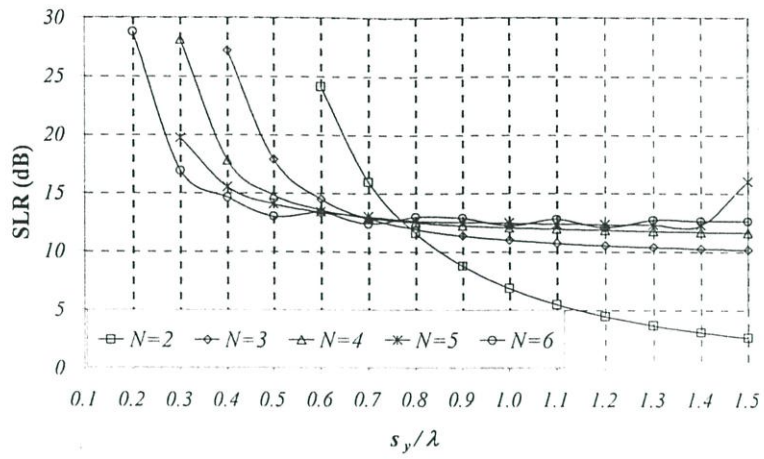


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

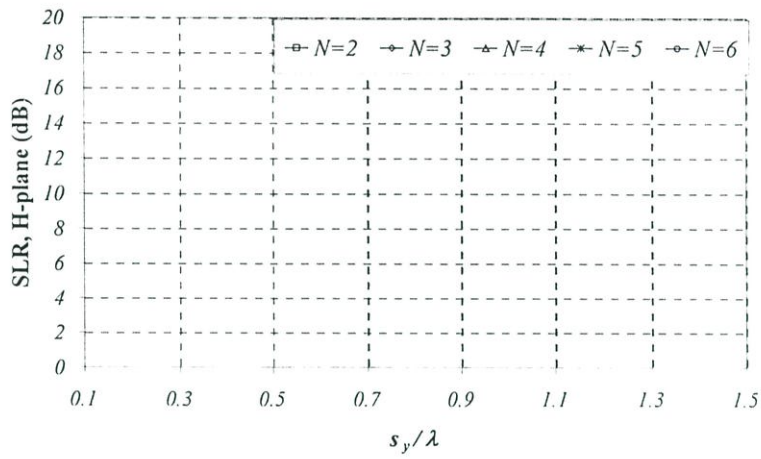


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.32 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x

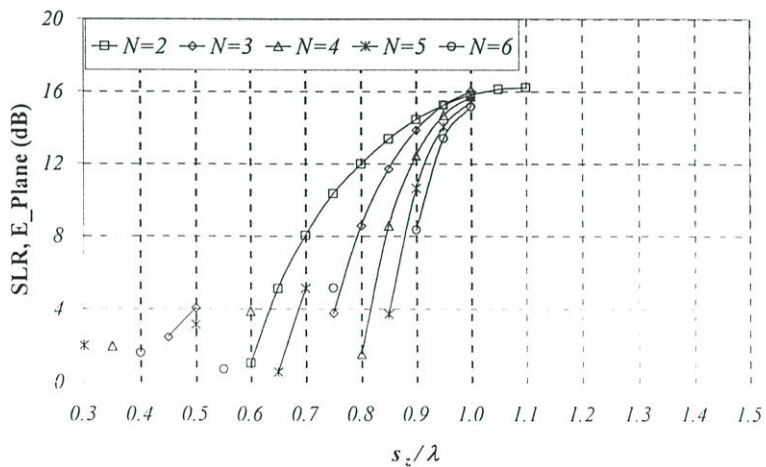


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

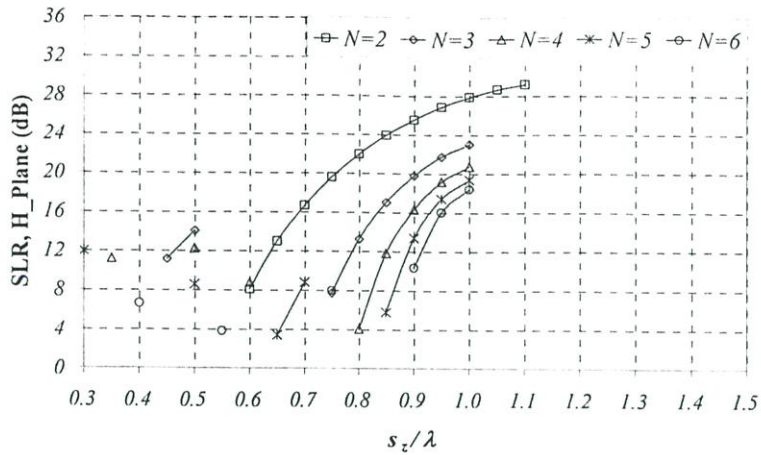


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.33 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

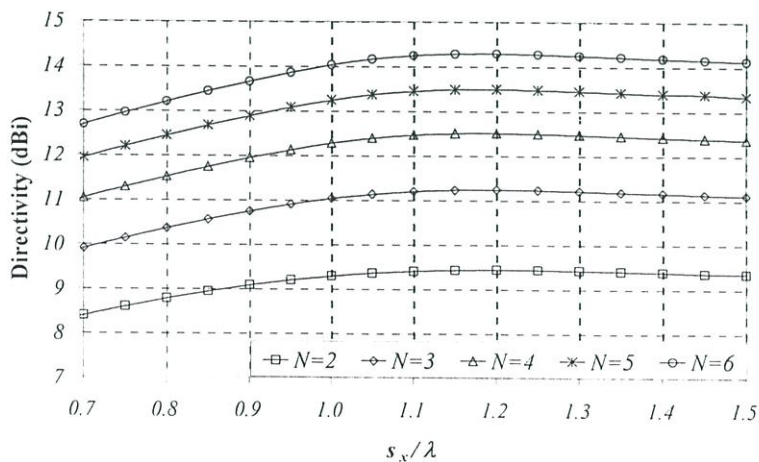


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

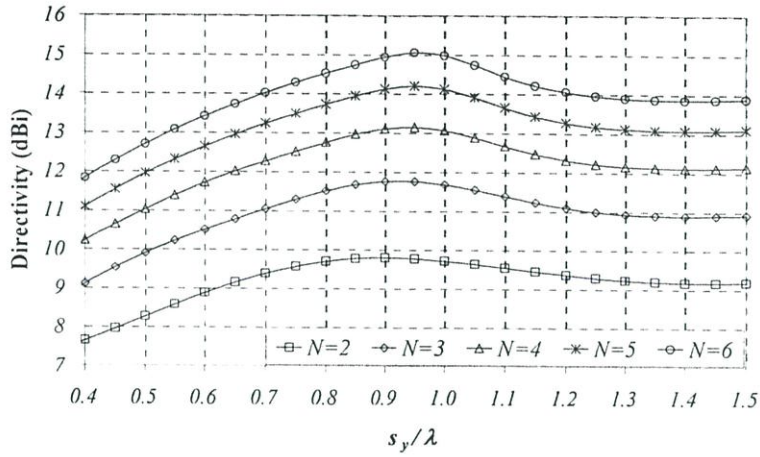
รูปที่ 3.34 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z

3.3.1.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

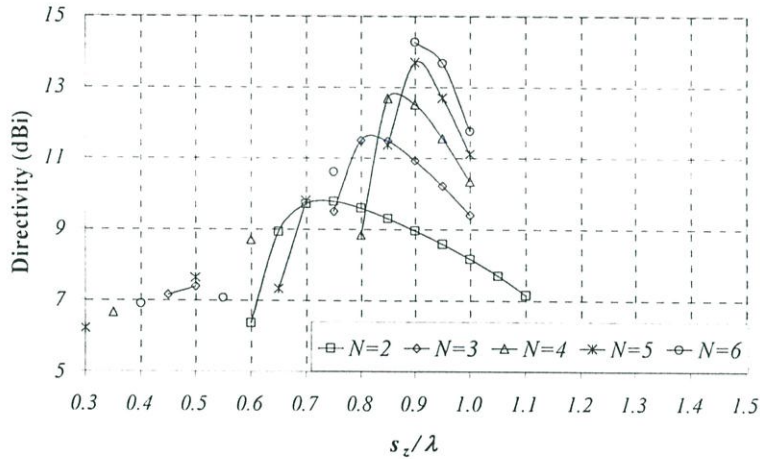
ในหัวข้อนี้จะแสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ เมื่อจัดเรียงองค์ประกอบของสายอากาศเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x แกน y และตามแนวแกน z ดังรูปที่ 3.35 จนถึงรูปที่ 3.37 พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะยังมีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มมากขึ้นจนถึงระยะหนึ่งที่ประมาณ 1.2λ และ 0.95λ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะเริ่มลดลง เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x และตามแนวแกน y ตามลำดับ ขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศเมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z จะเกิดขึ้นที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศต่างกันในแต่ละกรณีของจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ



รูปที่ 3.35 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x



รูปที่ 3.36 ค่าสภาพเจาะงทศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y



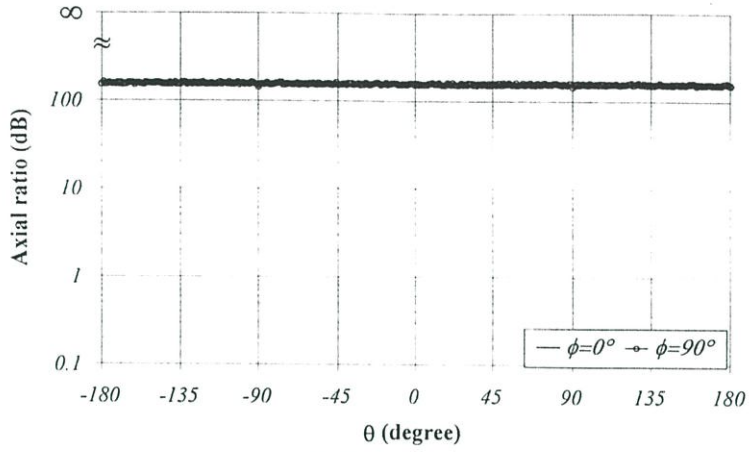
รูปที่ 3.37 ค่าสภาพเจาะงทศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z

สำหรับผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นเหล่านี้ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับใช้เป็นแนวทางในการจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

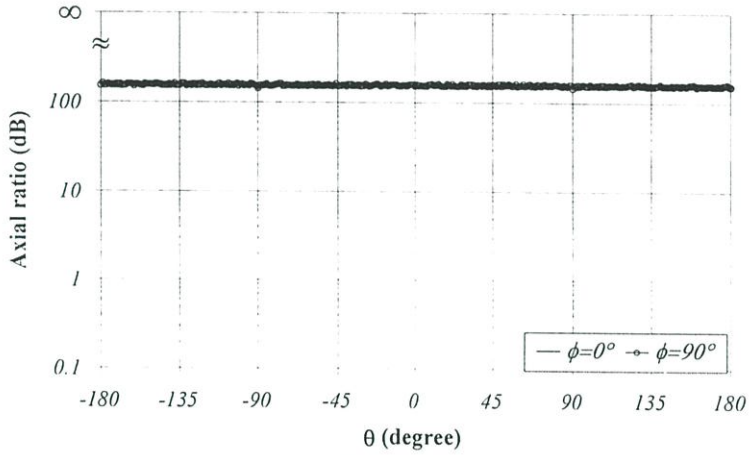
3.3.1.7 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ

สำหรับคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นจะแสดงโดยค่าอัตราส่วนแกน และค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยพิจารณาทั้งจากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีน ไดแอดิก และโปรแกรม NEC2 ดังนี้ ในรูปที่ 3.38 ถึงรูปที่ 3.40 แสดงค่าอัตราส่วนแกนของสาย

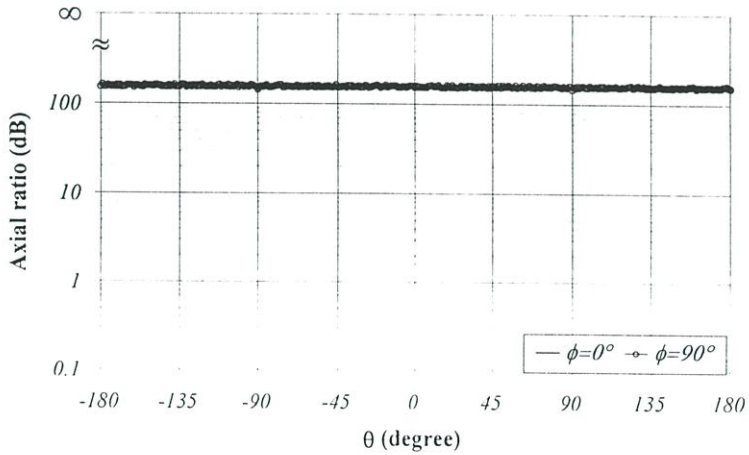
อากาศ โดยคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และใช้โปรแกรม NEC2 ตามลำดับ



(ก) แถวลำดับตามแนวแกน x

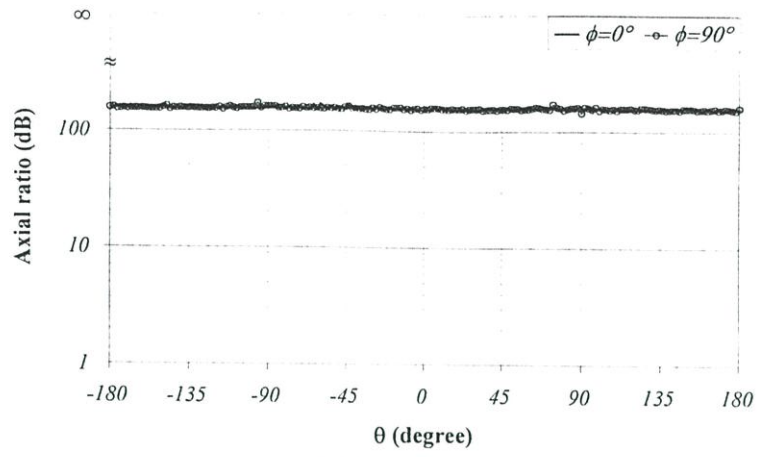


(ข) แถวลำดับตามแนวแกน y

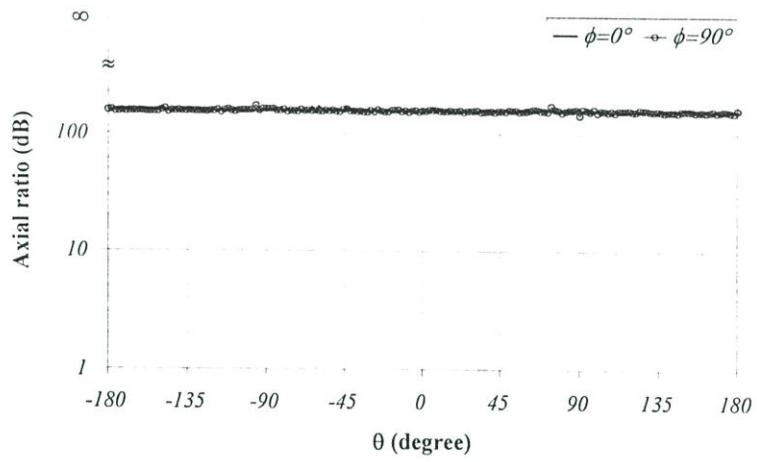


(ค) แถวลำดับตามแนวแกน z

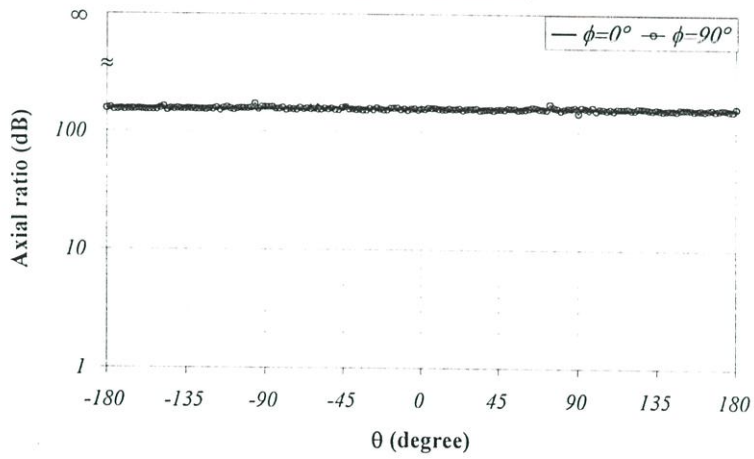
รูปที่ 3.38 ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์



(ก) แกวลำดับตามแนวแกน x

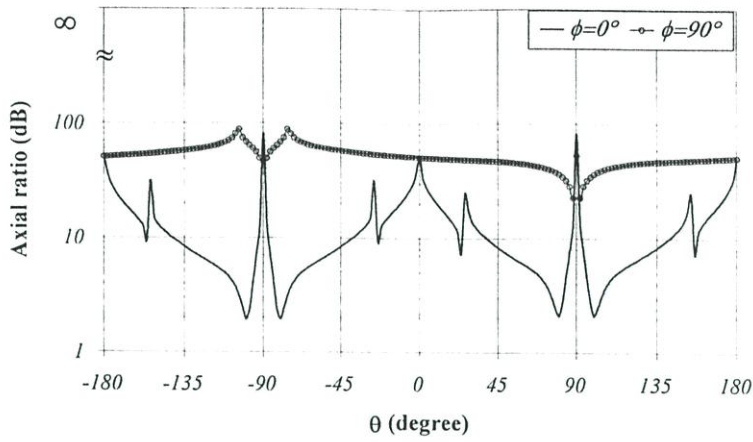


(ข) แกวลำดับตามแนวแกน y

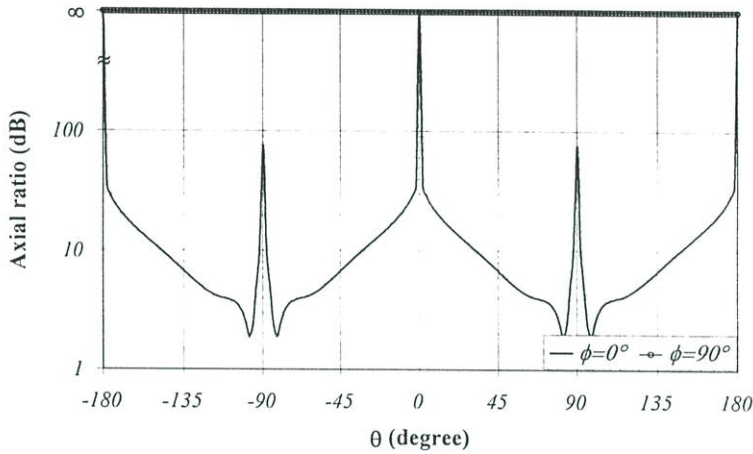


(ค) แกวลำดับตามแนวแกน z

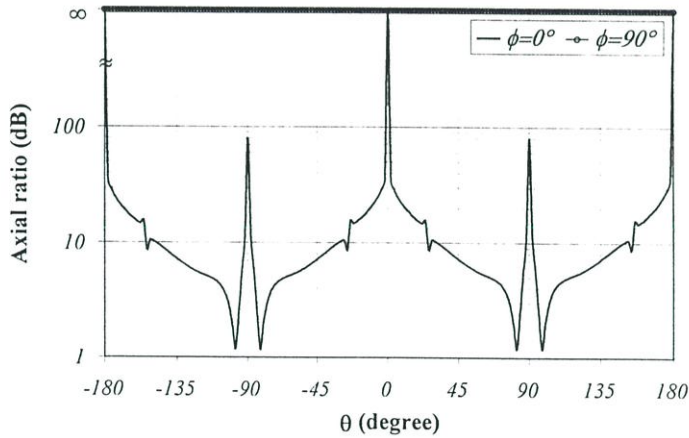
รูปที่ 3.39 ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก



(ก) แกว่ลําดับตามแนวแกน x



(ข) แกว่ลําดับตามแนวแกน y

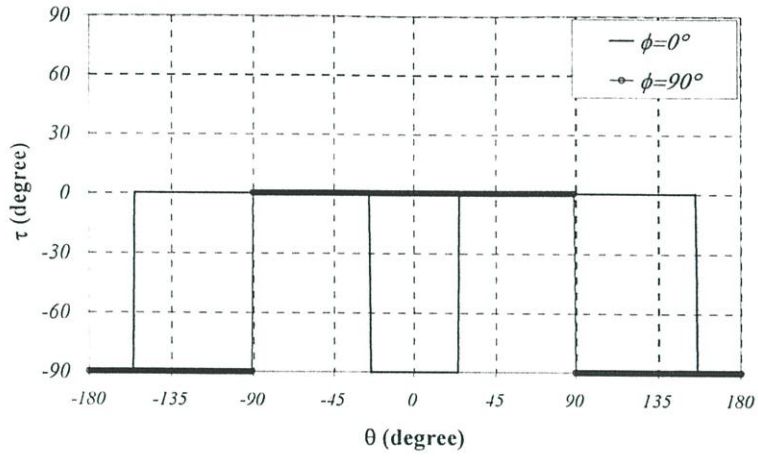


(ค) แกว่ลําดับตามแนวแกน z

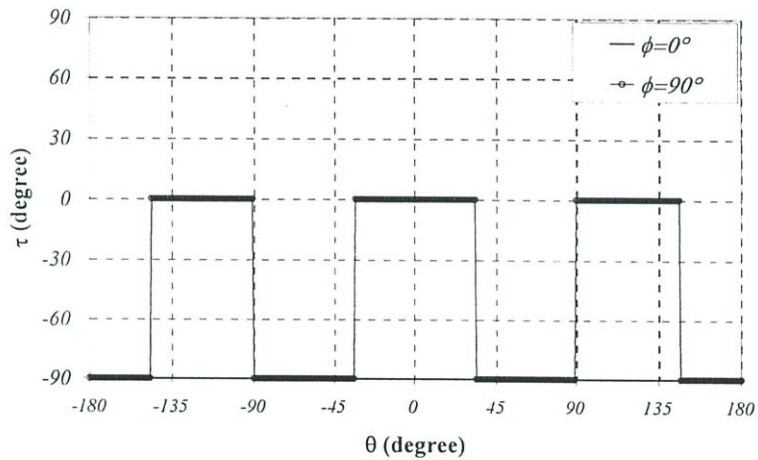
รูปที่ 3.40 ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม NEC2

พบว่าเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งด้านหน้าของสายอากาศคือ ที่มุม $\theta=0$ จะพบว่าผลที่ได้จากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และใช้โปรแกรม NEC2 นั้นมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนแกนมีแนวโน้มเข้าสู่ ∞ dB ในทุกกรณีที่จัดเรียงเป็นแกว่ลําดับเชิงเส้นตามแนวแกน นั่นคือมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นนั่นเอง สำหรับลักษณะการเอียงของการเปลี่ยน

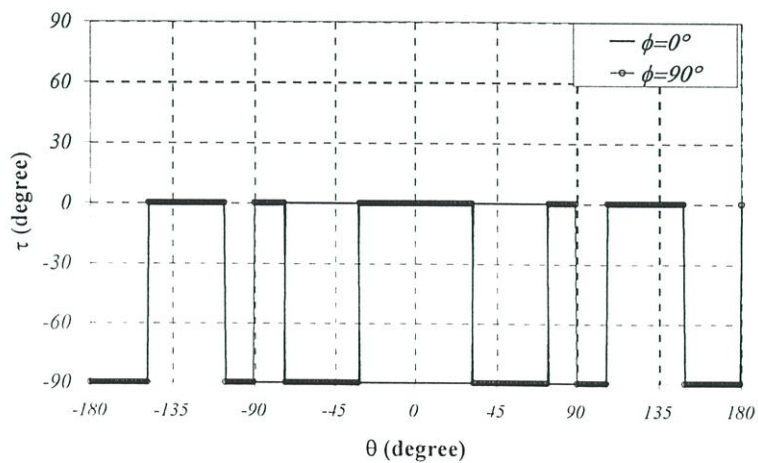
แปลงสนามไฟฟ้าของสายอากาศแสดงในรูปที่ 3.41 ถึงรูปที่ 3.43 โดยวิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และใช้โปรแกรม NEC2 ตามลำดับ



(ก) แฉวลำดับตามแนวแกน x

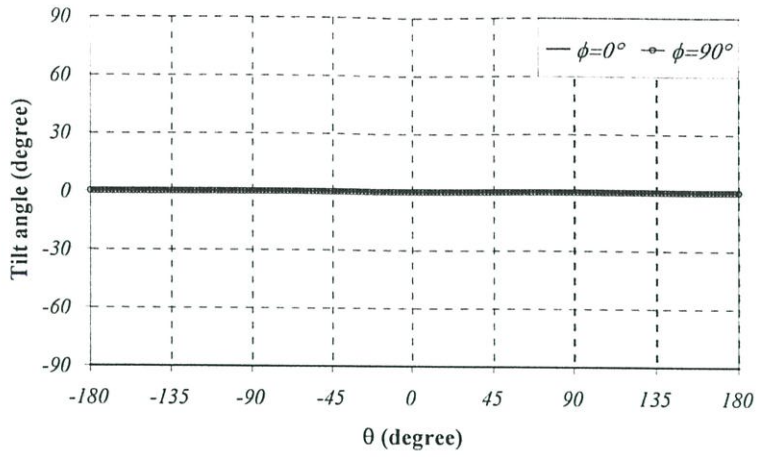


(ข) แฉวลำดับตามแนวแกน y

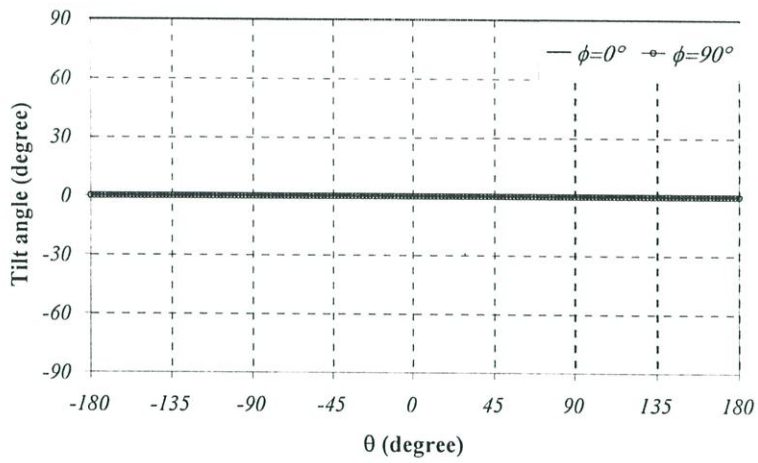


(ค) แฉวลำดับตามแนวแกน z

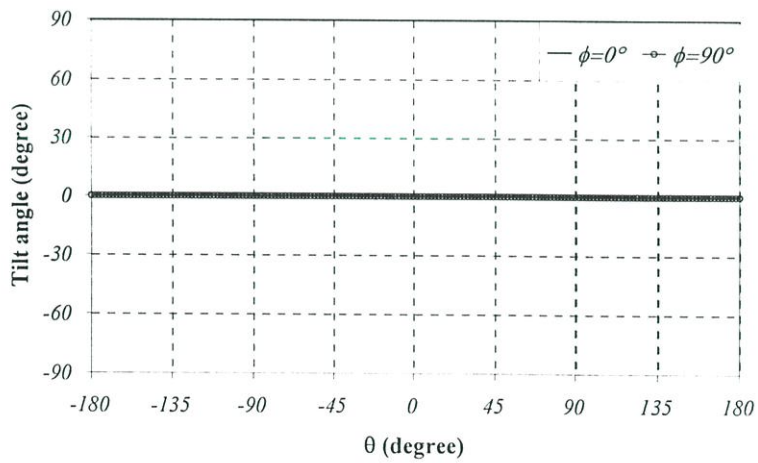
รูปที่ 3.41 ค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์



(ก) แถวลำดับตามแนวแกน x

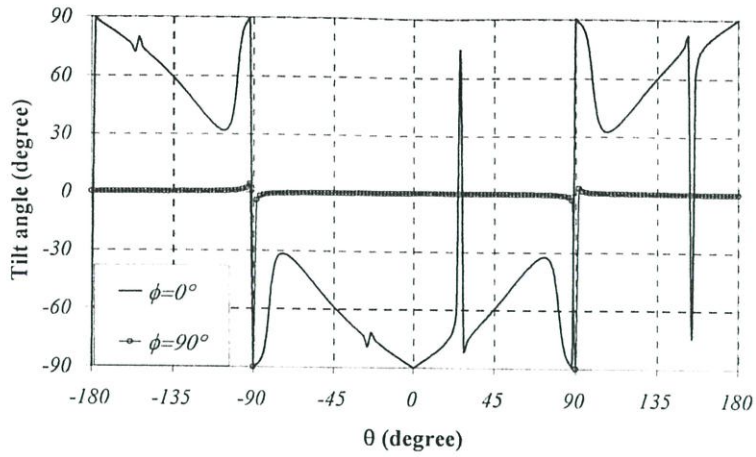


(ข) แถวลำดับตามแนวแกน y

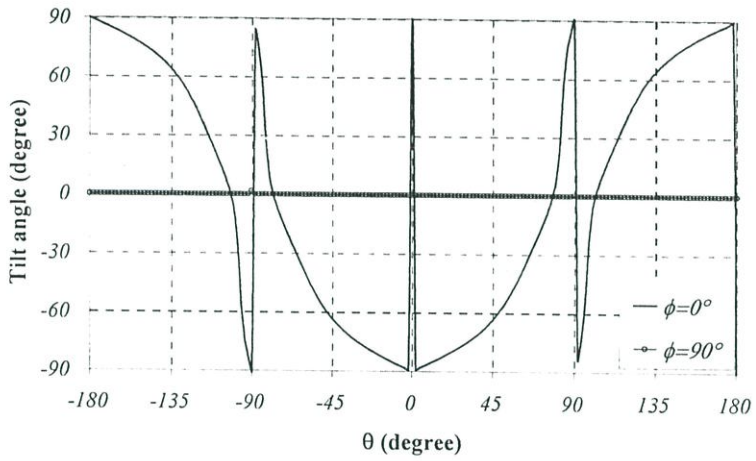


(ค) แถวลำดับตามแนวแกน z

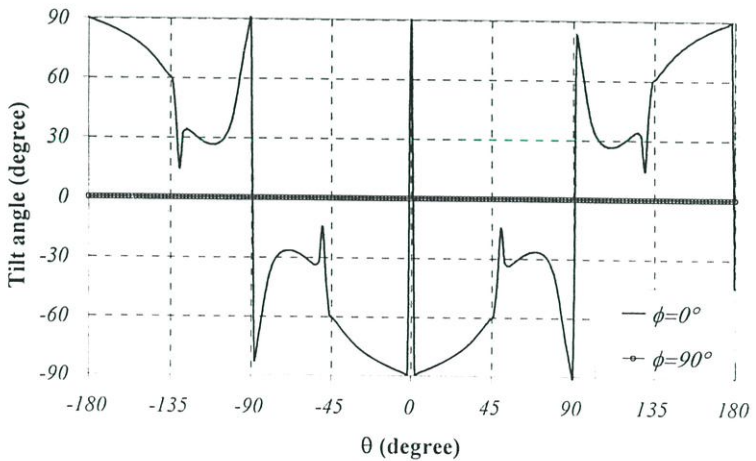
รูปที่ 3.42 ค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันไดเอดิก



(ก) แกวลำดับตามแนวแกน x



(ข) แกวลำดับตามแนวแกน y



(ค) แกวลำดับตามแนวแกน z

รูปที่ 3.43 ค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม NEC2

พบว่าในทุกกรณีมีความสอดคล้องกันระหว่างวิธีฟังก์ชันศักระกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดแอดิก และโปรแกรม NEC2 นั่นคือ มีค่ามุมเอียงเป็น 0° และ 90° หรือ -90° สำหรับที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ และ

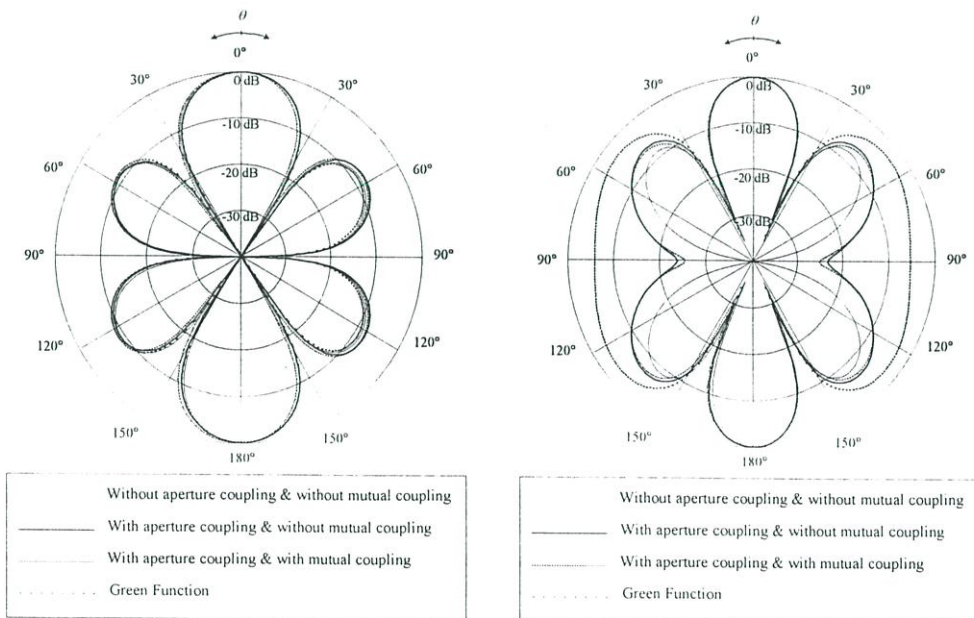
$\phi = 0^\circ$ โดยอ้างอิงจากองค์ประกอบสนามแนวตั้ง นั่นคือ สายอากาศนี้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้งที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ และมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวนอนที่ตำแหน่ง $\phi = 0^\circ$

3.3.2 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนมาจัดเรียงในลักษณะแถวลำดับเชิงระนาบ ซึ่งจะใช้ผลจากการวิเคราะห์ในส่วนของการจัดเรียงแถวลำดับเชิงเส้นมาพิจารณา โดยจะเลือกกรณีที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางที่มีค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และมีค่าสภาพเงาจงทิศทางที่สูงๆ ในแต่ละลักษณะการจัดเรียงตามแนวแกน ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ xy โดยคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศจะแสดงดังนี้

3.3.2.1 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่จะพิจารณานี้จะเลือกพิจารณาที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดจากการพิจารณาในข้างต้น โดยที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยังคงแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.44 ซึ่งเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบลักษณะ 2×2 โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศตามแนวแกน x เท่ากับ 1.2λ และระยะห่างระหว่างสายอากาศตามแนวแกน y เท่ากับ 0.95λ



รูปที่ 3.44 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

จากรูปพบว่าสายอากาศนี้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทาง และเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ ซึ่งไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดและการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ (Without aperture coupling and without mutual coupling) กรณีองค์ประกอบจากโปรแกรม NEC2 คุณตัวประกอบแถวลำดับ (With aperture coupling and without mutual coupling) ซึ่งพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดแต่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ และพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดและการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ (With aperture coupling and with mutual coupling) จากโปรแกรม NEC2 และวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก ซึ่งไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดและการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศ แต่พิจารณาโพรบป้อนสัญญาณร่วมด้วย พบว่าผลจากการคำนวณจากแต่ละวิธีมีแนวโน้มที่เหมือนกัน กล่าวคือ ในระนาบสนามไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเป็นแบบสองทิศทางที่มีลักษณะของลำคลื่นเกือบเท่ากัน ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นจะมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันแต่ลักษณะความกว้างของลำคลื่นจากวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกจะมีลักษณะลำคลื่นกว้างกว่าทุกกรณี

สำหรับการพิจารณาค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเมื่อเพิ่มจำนวนแถวลำดับ และระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ดีที่สุดในการจัดเรียงแต่ละแนวแกน ได้สรุปไว้ในตารางที่ 3.1 ดังนี้

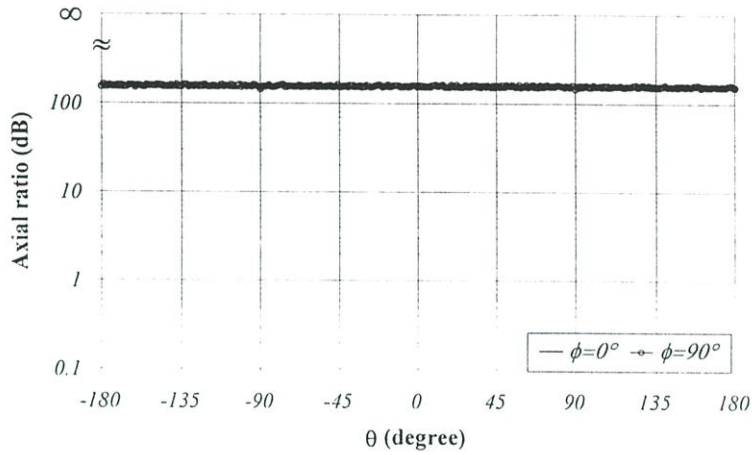
ตารางที่ 3.1 สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

N	s_x / λ	s_y / λ	Directivity (dBi)	E_Plane			H_Plane		
				HPBW (degree)	FNBW (degree)	SLR (dB)	HPBW (degree)	FNBW (degree)	SLR (dB)
2	1.2	0.9	12.86	30.40	67.39	8.77	22.37	49.22	8.30
3	1.2	0.9	16.61	19.41	43.47	11.35	14.44	32.2	10.07
4	1.2	0.9	19.25	14.35	32.2	12.22	10.78	24.15	10.91
5	1.2	0.95	21.26	10.81	24.38	12.54	8.53	19.09	11.38
6	1.2	0.95	22.92	8.98	20.24	12.77	7.09	15.87	11.67
7	1.2	0.95	24.32	7.68	17.25	12.90	6.07	13.57	11.86
8	1.2	0.95	25.55	6.71	15.18	12.99	5.31	11.96	11.99
9	1.2	0.95	26.52	5.96	13.34	13.04	4.71	10.58	12.08
10	1.2	0.95	27.64	5.36	12.19	13.09	4.24	9.66	12.15

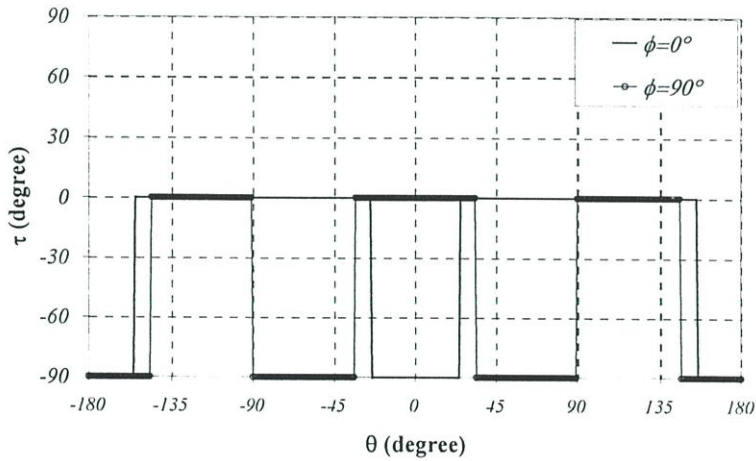
จากตารางพบว่าเมื่อจำนวนองค์ประกอบแถวลำดับต่างกัน ระยะห่างระหว่างสายอากาศตามแนวแกน x จะมีค่าเหมาะสมประมาณ 1.2λ ส่วนระยะห่างที่เหมาะสมตามแนวแกน y จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.9λ และ 0.95λ และพบว่าเมื่อจำนวนแถวลำดับมากขึ้นลักษณะความกว้างลำคลื่นจะแคบลงและอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างมากขึ้น สำหรับค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศเพิ่มขึ้น

3.3.2.2 คุณลักษณะเชิงการโพลาริซ

สำหรับคุณลักษณะเชิงการโพลาริซของสายอากาศ ซึ่งจะแสดงโดยค่าอัตราส่วนแกน และ ค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยจะพิจารณาทั้งจากวิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอคติก และ ใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ ดังนี้ ในรูปที่ 3.45 ถึงรูปที่ 3.47 แสดงคุณลักษณะเชิงการโพลาริซของสายอากาศ โดยคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์ วิธี ฟังก์ชันกรีนไดแอคติก และใช้โปรแกรม NEC2 ตามลำดับ

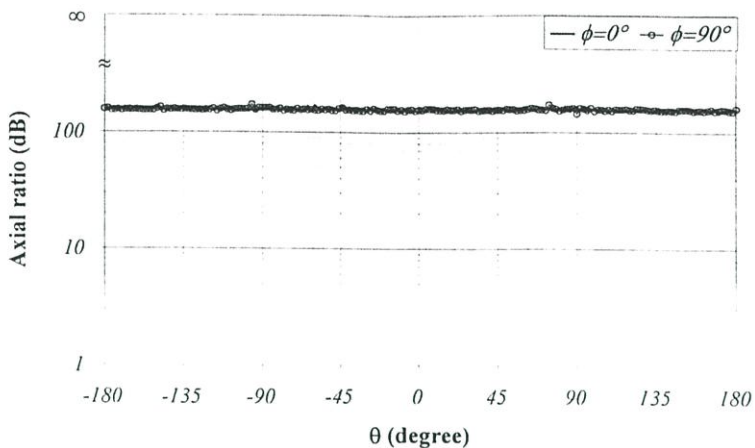


(ก) ค่าอัตราส่วนแกน

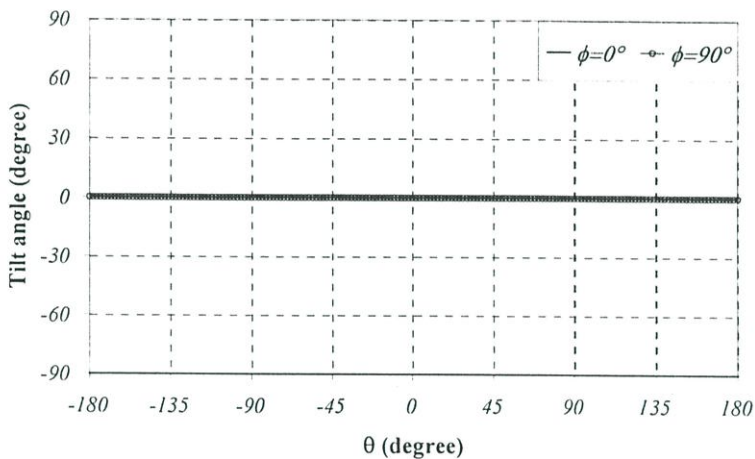


(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.45 คุณลักษณะเชิงการโพลาริซของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์

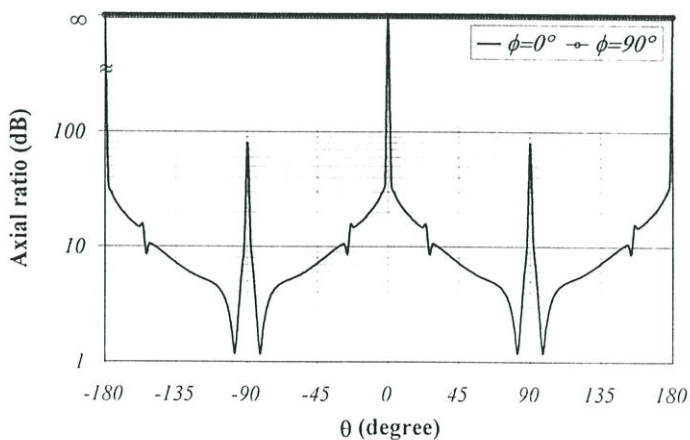


(ก) ค่าอัตราส่วนแกน

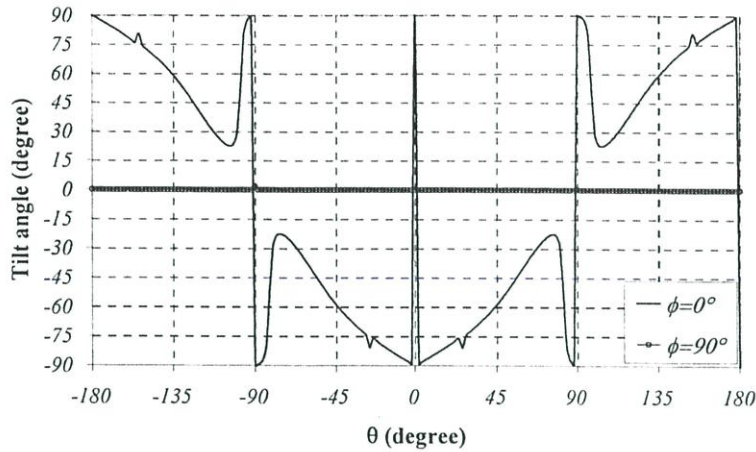


(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.46 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอดดิก



(ก) ค่าอัตราส่วนแกน



(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 3.47 คุณสมบัติเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม NEC2

พบว่าเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งด้านหน้าของสายอากาศคือ ที่มุม $\theta = 0$ พบว่าทั้งผลจากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และใช้โปรแกรม NEC2 นั้นมีความสอดคล้องกันคือ ค่าอัตราส่วนแกนมีแนวโน้มเข้าสู่ ∞ dB ในทุกกรณีที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ นั่นคือ สายอากาศนี้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นนั่นเอง สำหรับลักษณะการเอียงของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของสายอากาศนั้น พบว่าวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และโปรแกรม NEC2 มีความสอดคล้องกัน คือ มีค่ามุมเอียงเป็น 0° และ 90° หรือ -90° สำหรับที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ และ $\phi = 0^\circ$ โดยอ้างอิงจากสนามแนวตั้ง ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าสายอากาศนี้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้งที่ตำแหน่ง $\phi = 90$ และมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวนอนที่ตำแหน่ง $\phi = 0$ นั่นเอง

3.4 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งสายอากาศชนิดนี้จะแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง โดยในการพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศจะเริ่มจากกรณีองค์ประกอบเดี่ยวก่อนเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางที่มีค่าอัตราการขยายที่สูง โดยขนาดของความกว้างและความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากจะมีค่าเท่ากับ 0.69λ และ 0.35λ โดยเป็นค่าที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ยอมให้เฉพาะโหมด TE_{10} เท่านั้นที่สามารถเดินทางผ่านท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากได้ สำหรับความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมีค่าเท่ากับ 0.25λ ซึ่งค่านี้จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิศและมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสูง และพบว่าที่ค่าความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากค่านี้ ขนาดของความกว้างลำคลื่นของสายอากาศจากวิธี

ฟังก์ชันเวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก และโปรแกรม NEC2 จะมีค่าเกือบเท่ากันเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าอื่นๆ และพบว่าค่าการคำนวณโดยโปรแกรม NEC2 จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศมีค่าอยู่ระหว่างกรณีที่คำนวณโดยฟังก์ชันเวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก ซึ่งวิธีฟังก์ชันเวกเตอร์จะให้ค่าสูงกว่าวิธีอื่นๆ ทั้งนี้เพราะไม่ได้พิจารณาผลของโพรบร่วมด้วย ส่วนวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกจะให้ค่าความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กกว้างที่สุดและให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศต่ำที่สุดนั้น เพราะวิธีนี้ได้รวมผลของโพรบร่วมด้วยและไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดร่วมด้วย นอกจากนี้ได้พิจารณาทั้งคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย พบว่าสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้จะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้งที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ และมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวอนที่ตำแหน่ง $\phi = 0^\circ$ เมื่อพิจารณาจากค่าอัตราส่วนแกนและค่ามุมเอียงของสายอากาศ สำหรับคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะพบว่าความยาวของโพรบป้อนสัญญาณจะมีผลต่อคุณลักษณะนี้อย่างมาก ในการพิจารณาคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์นี้ไม่สามารถคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ได้ทั้งนี้เพราะในการคำนวณนั้นกระแสที่ได้เป็นกระแสสมมติและไม่ได้พิจารณาผลจากโพรบป้อนสัญญาณร่วมด้วย ดังนั้นจึงพิจารณาจากวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกและโปรแกรม NEC2 และพบว่าความยาวโพรบประมาณ 0.27λ จะทำให้คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุด กล่าวคือ มีค่าอิมพีแดนซ์เข้าใกล้ 50 โอห์มและค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2:1 มากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกความยาวโพรบป้อนสัญญาณเท่ากับ 0.27λ ในการพิจารณาต่อไป

สำหรับจัดเรียงเป็นแบบแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกนต่างๆ พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศคือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศและจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ ดังนั้นจึงพิจารณาเพื่อหาระยะที่เหมาะสม ที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสองทิศทางที่มีค่าความกว้างลำคลื่นแคบๆ อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างมีค่าสูงๆ และให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสูงๆ นั่นเอง พบว่าการจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน x และตามแนวแกน y จะมีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้าตามลำดับ และการจัดเรียงตามแนวแกนดังกล่าวนี้จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางตลอดการระยะห่างระหว่างสายอากาศที่พิจารณาไม่เกิน 1.5λ แต่การจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน z จะมีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก และจะมีเฉพาะระยะห่างระหว่างสายอากาศบางตำแหน่งเท่านั้นที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง จากนั้นจะนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นนี้ไปใช้ในการพิจารณาจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ xy โดยได้สรุปผลไว้ในตารางที่ 3.1 นอกจากนี้ยังได้พิจารณาคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ จากผลที่ได้แสดงในข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์สายอากาศแบบทิศทางเดียว

4.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยการคำนวณจากนิพจน์ของสมการการแพร่กระจายคลื่นในบทที่ 2 ดังที่กล่าวมาแล้ว โดยนำสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง (ดังแสดงไว้ในบทที่ 3) มาวางเหนือตัวสะท้อนโดยอาศัยหลักการของทฤษฎีเงา กล่าวคือ จะเสมือนว่ามีแหล่งกำเนิดเกิดขึ้นสองแหล่งกำเนิด คือ สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่อยู่ด้านบน (ด้านหน้า) ของตัวสะท้อน และอีกแหล่งกำเนิดหนึ่งจากด้านล่าง (ด้านหลัง) ของตัวสะท้อน ซึ่งจะมีผลทำให้คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน ในการวิเคราะห์จะเริ่มจากกรณีสายอากาศสองคู่ประกอบเดี่ยวก่อนเพื่อหาระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสม (คือ สายอากาศให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวและให้ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางสูงๆ) จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในกรณีที่เป็นแถวลำดับเชิงเส้น และแถวลำดับเชิงระนาบต่อไป โดยคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเงาเชิงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศ นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศด้วย ดังจะได้แสดงในหัวข้อต่อไปของบทนี้

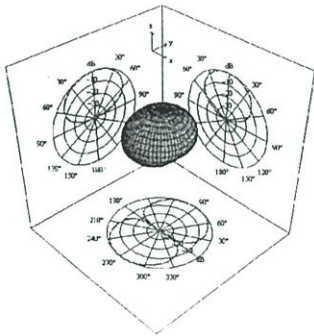
4.2 คุณลักษณะของสายอากาศสองคู่ประกอบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

ในหัวข้อนี้จะแสดงการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรณีองค์ประกอบเดี่ยว สำหรับโครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 1.1 (ก) ซึ่งพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้แก่ ขนาดความกว้าง (a) และความสูง (b) ความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (c) และความยาวของโพรบป้อนสัญญาณ (l) จะกำหนดตามที่ได้วิเคราะห์ในบทที่ 3 คือ 0.69λ 0.35λ 0.25λ และ 0.27λ ตามลำดับ และเมื่อระบุขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมตามที่ได้กล่าวมานี้พบว่า คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน ในการวิเคราะห์นั้นจะคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันคักย์เวกเตอร์ และวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกเปรียบเทียบกัน สำหรับวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกนี้จะ

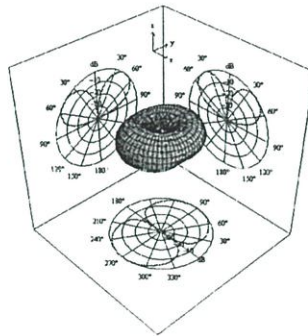
พิจารณาจากองค์ประกอบของแฉกลำดับโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (ดังสมการที่ 2.241 และ 2.244 โดยพิจารณาโพรบป้อนสัญญาณร่วมด้วย) คุณลักษณะของแฉกลำดับกรณีสี่เหลี่ยมจัตุรัสวางสายอากาศเหนือตัวสะท้อน (สมการที่ 2.253) แต่เนื่องจากทั้งสองวิธีนี้พิจารณาในกรณีที่ตัวสะท้อนมีขนาดเป็นอนันต์ซึ่งไม่สามารถสร้างได้จริง ดังนั้นจึงคำนวณโดยใช้โปรแกรม NEC2 เปรียบเทียบด้วย แต่เนื่องจากโปรแกรม NEC2 มีข้อจำกัดของจำนวนเช็กเมนต์ที่ใช้และต้องใช้เวลาในการจำลองโครงสร้างและรันโปรแกรม (ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และบทที่ 3) การที่จะใช้โปรแกรม NEC2 จึงไม่สะดวกในการคำนวณเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศในทุกกรณี ดังนั้นในการเปรียบเทียบผลการคำนวณระหว่างวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอคติก และโปรแกรม NEC2 จะพิจารณาเฉพาะตำแหน่งเท่านั้น

4.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation pattern)

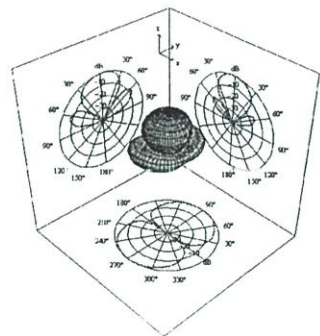
สำหรับสายอากาศแบบสองทิศทางเมื่อนำมาวางเหนือตัวสะท้อนจะบังคับให้สนามแพร่กระจายคลื่นไปทิศทางด้านหน้าทิศทางเดียว ดังนั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นแบบทางเดียว



$$h = 0.3\lambda$$

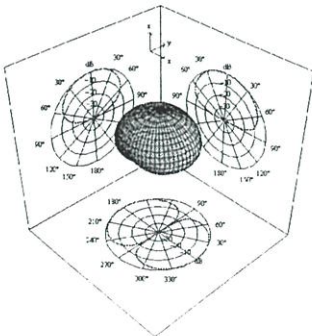


$$h = 0.5\lambda$$

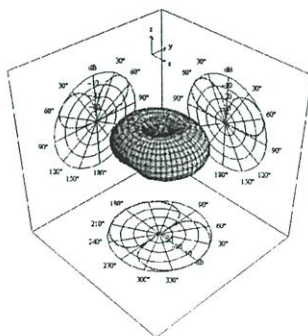


$$h = 0.7\lambda$$

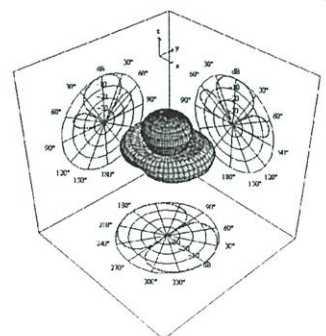
(ก) วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์



$$h = 0.3\lambda$$



$$h = 0.5\lambda$$

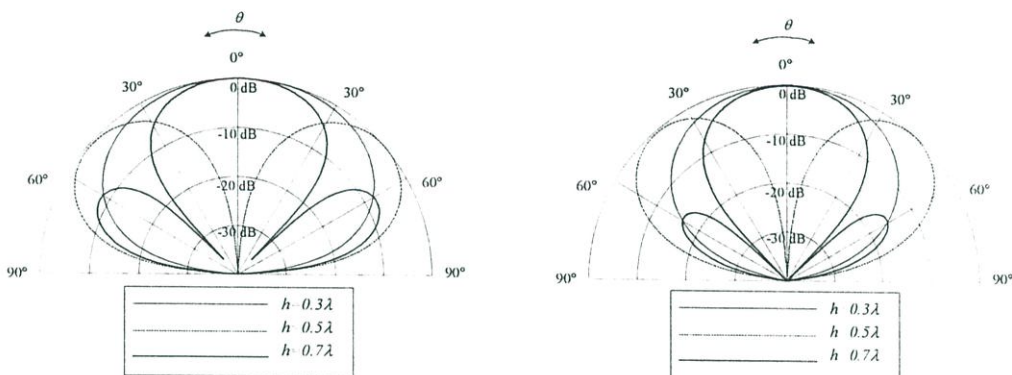


$$h = 0.7\lambda$$

(ข) วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอคติก

รูปที่ 4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบสามมิติ

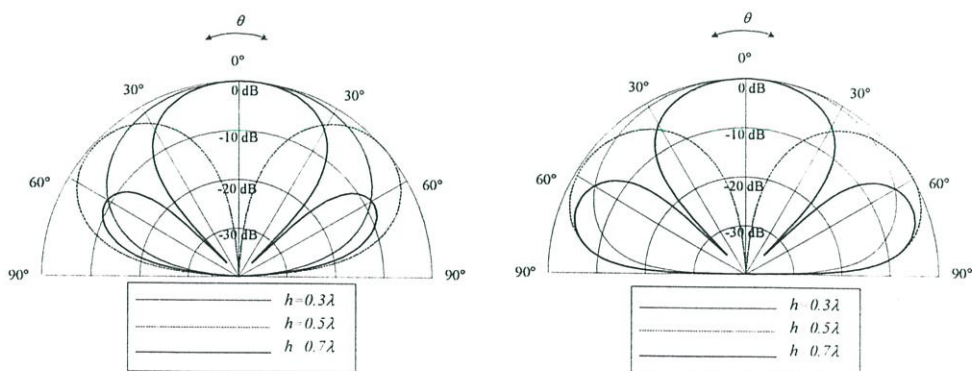
กล่าวคือ สนามจะแรงในทิศตั้งฉากกับระนาบสายอากาศ ซึ่งค่ามุมที่สนามสูงสุด (ในระนาบมุมยก) ของทั้งระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ซึ่งที่มุม 0° และต้องเกิดขึ้นพร้อมกัน และพบว่าสายอากาศชนิดนี้จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเมื่อวางห่างจากตัวสะท้อนในบางตำแหน่งเท่านั้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนนั้น ได้แสดงดังรูปที่ 4.1 เป็นรูปภาพสามมิติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ส่วนรูปภาพสองมิติได้แสดงในรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 ซึ่งคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ และวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกตามลำดับ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน โดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์



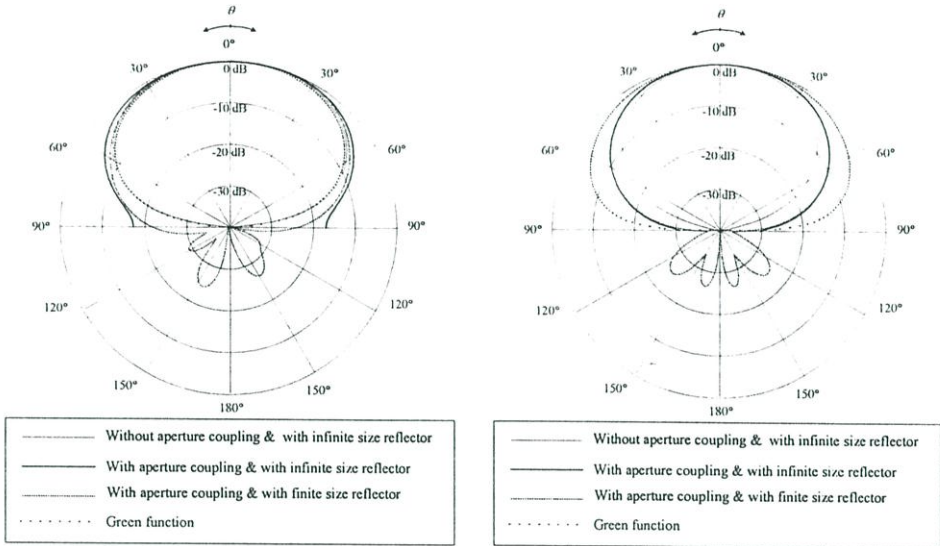
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน โดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก

จากรูปพบว่าทั้งวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกนั้นมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่คล้ายกัน กล่าวคือ เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนจะมีบางตำแหน่งเท่านั้นที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว และเมื่อระยะ

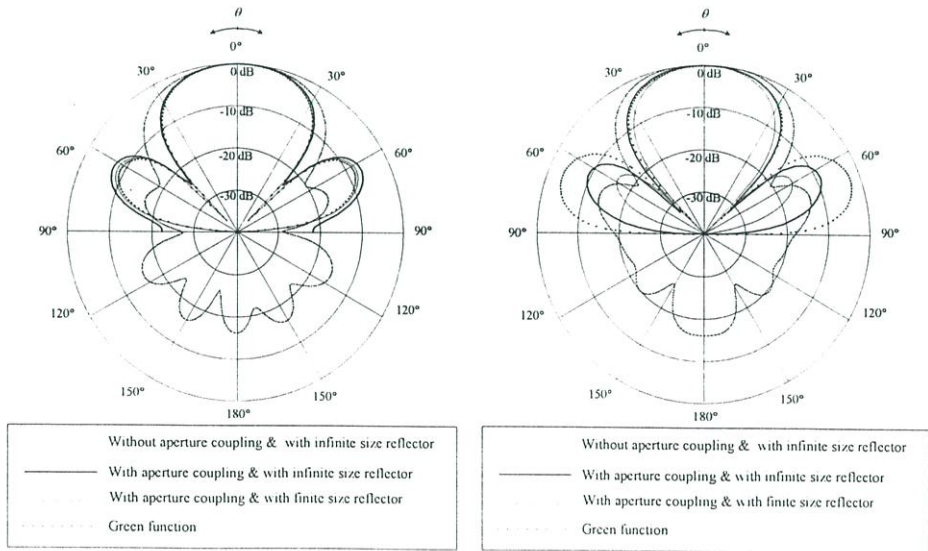
ห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนยิ่งมากขึ้นลำคลื่นหลักจะเริ่มชี้ทิศทางสูงสุดไปในทิศทางอื่น (ไม่เป็นแบบทิศทางเดียวเพราะมีมากกว่าหนึ่งทิศทาง) จนถึงที่ระยะหนึ่ง จากนั้นจะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวอีกครั้งพร้อมกับมีลำคลื่นย่อยด้านข้างเกิดขึ้น พบว่าลักษณะความกว้างของลำคลื่นจะยิ่งกว้างมากขึ้นทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนมากขึ้น



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีทีพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด และพิจารณาผลที่เกิดจากตัวสะท้อนขนาดจำกัด เมื่อ $h = 0.3\lambda$



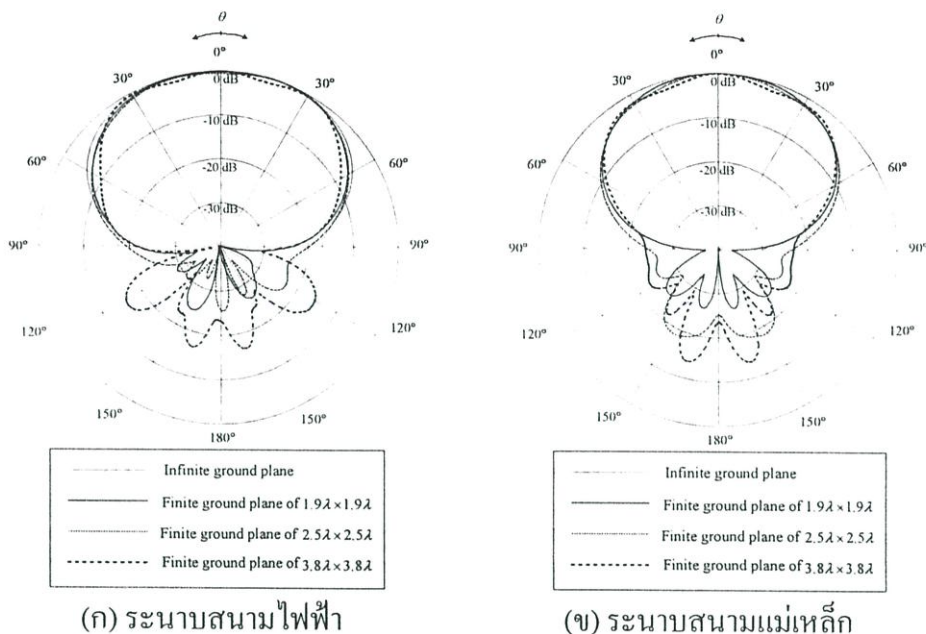
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่เปรียบเทียบกันระหว่างกรณีทีพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด และพิจารณาผลที่เกิดจากตัวสะท้อนขนาดจำกัด เมื่อ $h = 0.7\lambda$

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าจากการคำนวณในแต่ละวิธีมีค่าใกล้เคียงกันมากยกเว้นกรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดและพิจารณาขนาดตัวสะท้อนมีขนาดจำกัด (With aperture coupling and with finite size reflector) จากโปรแกรม NEC2 จะมีลักษณะความกว้างลำคลื่นกว้างกว่ากรณีอื่นๆ และเกิดลำคลื่นย่อยด้านหลังขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาลักษณะกรณีที่พิจารณาให้ขนาดตัวสะท้อนมีขนาดอนันต์ กล่าวคือ วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ (Without aperture coupling and with infinite size reflector) วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และ โปรแกรม NEC2 (With aperture coupling and with infinite size reflector) พบว่าจากทั้งสามวิธีให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ใกล้เคียงกันมากทั้งค่าความกว้างของลำคลื่นหลัก และระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างด้วย เมื่อพิจารณาในระนาบสนามแม่เหล็กพบว่าเมื่อพิจารณาที่ลำคลื่นหลักของสายอากาศจะมีความสอดคล้องกันในทุกกรณี ลักษณะความกว้างลำคลื่นที่คำนวณด้วย โปรแกรม NEC2 จะอยู่ตรงกลางระหว่างวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ และ วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกเมื่อ h เท่ากับ 0.3λ (ไม่เกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างขึ้นในกรณีนี้) โดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลักษณะความกว้างลำคลื่นแคบที่สุด สำหรับกรณีที่ h เท่ากับ 0.7λ ซึ่งที่ตำแหน่งนี้จะเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างขึ้นด้วย พบว่าวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกและการคำนวณที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองของสายอากาศที่พิจารณาขนาดตัวสะท้อนขนาดอนันต์จากโปรแกรม NEC2 เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลักของสายอากาศจะมีความใกล้เคียงกันมากจนเกือบเท่ากัน ส่วนวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์จะลำคลื่นแคบที่สุด ขณะที่วิธีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองของสายอากาศและตัวสะท้อนมีขนาดจำกัด (With aperture coupling and finite size reflector) จาก โปรแกรม NEC2 จะมีลักษณะลำคลื่นที่กว้างที่สุด

นอกจากนี้พบว่าเมื่อพิจารณาผลที่เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดและพิจารณาตัวสะท้อนขนาดอนันต์จากโปรแกรม NEC2 และการคำนวณที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อด้วยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกนั้นจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีค่าความกว้างและลักษณะลำคลื่นย่อยด้านข้างเคียงกันมากในระนาบสนามไฟฟ้า ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กลักษณะความกว้างของลำคลื่นหลักของสายอากาศจากโปรแกรม NEC2 จะอยู่ตรงกลางระหว่างวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไดโอดิกในกรณีที่ไม่มีลำคลื่นย่อยด้านข้าง แต่กรณีที่เกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างเกิดขึ้นนั้น วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกและโปรแกรม NEC2 จะมีความใกล้เคียงกันมาก โดยที่กรณีที่ตัวสะท้อนมีขนาดอนันต์นี้จะไม่เกิดลำคลื่นย่อยด้านหลังเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาการเชื่อมต่อและพิจารณาขนาดตัวสะท้อนมีขนาดจำกัดด้วย พบว่าจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สอดคล้องกับกรณีอื่นๆ แต่จะลักษณะของลำคลื่นจะกว้างกว่าทุกกรณี ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างลดลง และเกิดลำคลื่นย่อยด้านหลังด้วย และยิ่งขนาดตัวสะท้อนยังมีขนาดใหญ่ลักษณะของระดับลำคลื่นย่อยด้านหลังที่เกิดขึ้นยังมีระดับต่ำและความกว้างของลำคลื่นจะค่อนข้างแคบกว่ากรณีที่ตัวสะท้อนขนาดเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7

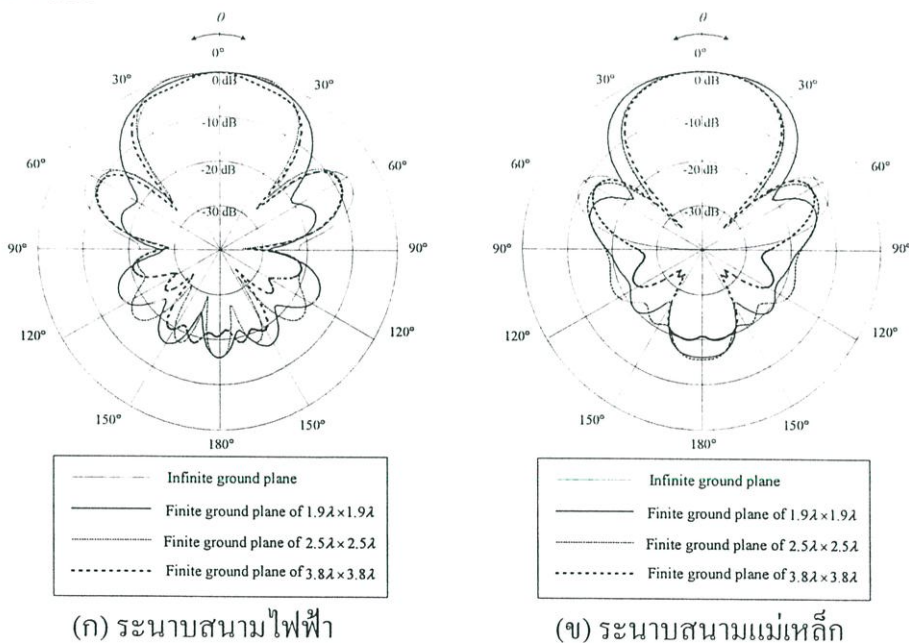


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่เปรียบเทียบขนาดของตัวสะท้อน เมื่อ

$h = 0.3\lambda$



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

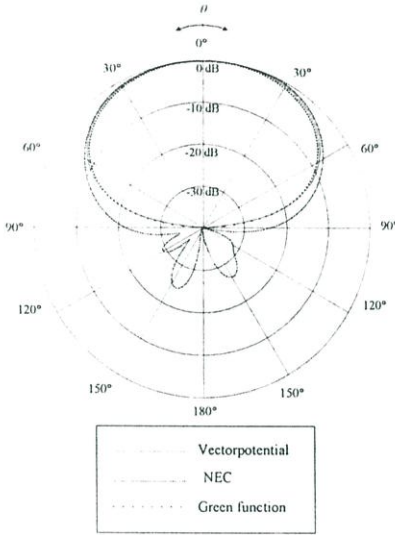
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่เปรียบเทียบขนาดของตัวสะท้อน เมื่อ

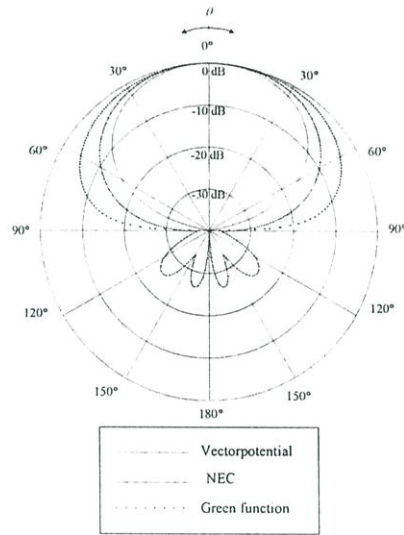
$h = 0.7\lambda$

นอกจากนี้ได้แสดงการคำนวณแต่ละวิธีเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ ตามลำดับ พบว่าในกรณีที่คำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ และวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก (พิจารณาโพรปอนสัญญาณร่วมด้วย) ที่ทั้งสองกรณีไม่พิจารณาผลของการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าใกล้เคียงกันมาก แต่ระนาบสนามแม่เหล็กวิธีที่ได้จากฟังก์ชันกรีนได

แอดิกจะมีความกว้างของลำคลื่นกว้างและมีระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างสูงกว่าวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ได้จากโปรแกรม NEC2 ที่พิจารณาทั้งผลการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดและขนาดตัวสะท้อนมีขนาดจำกัด ($1.9\lambda \times 1.9\lambda$) ที่เกิดจากตัวสะท้อนขนาดจำกัด พบว่ามีความกว้างลำคลื่นกว้างกว่ากรณีอื่นๆ ในระนาบสนามไฟฟ้า แต่ในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศจากโปรแกรม NEC2 จะอยู่ตรงกลางระหว่างวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก แต่ผลที่ได้จากทุกกรณีนั้นจะมีความสอดคล้องกันเมื่อพิจารณาลำคลื่นหลัก (ลักษณะลำคลื่นด้านหน้า) ของสายอากาศ



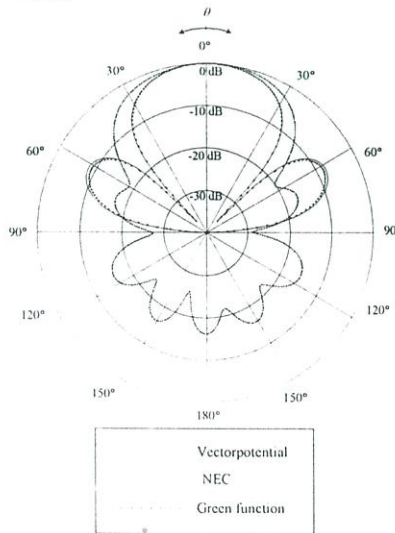
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



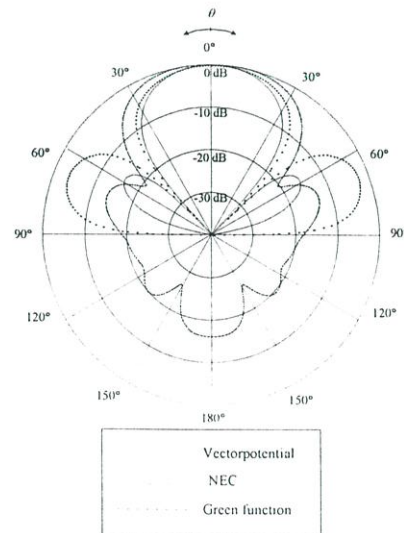
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณวิธีต่างๆ เมื่อ

$$h = 0.3\lambda$$



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



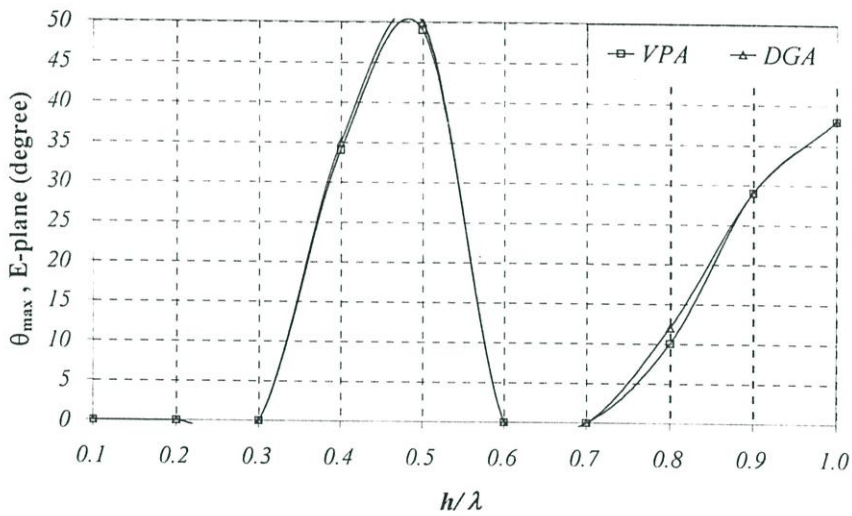
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการคำนวณวิธีต่างๆ เมื่อ

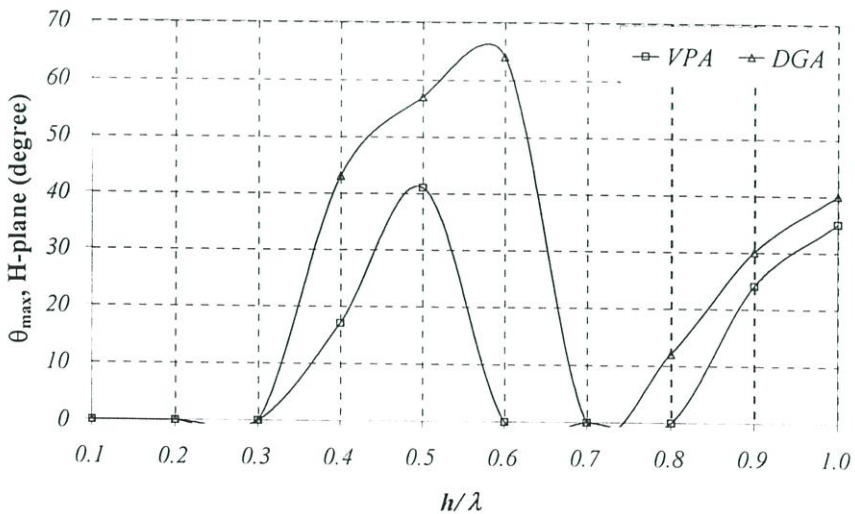
$$h = 0.7\lambda$$

4.2.2 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด

ค่ามุมยกที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กนั้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากหากต้องการสายอากาศที่สามารถแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (ในทิศด้านหน้า หรือมีการกระจายสนามแรงที่สุดในทิศตั้งฉากกับระนาบสายอากาศ) ดังนั้นเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความแรงของการแพร่กระจายคลื่นในทิศดังกล่าวนี้ ($\theta = 0^\circ$) จึงจำเป็นต้องพิจารณาพร้อมด้วย โดยแสดงไว้ในรูปที่ 4.10 เมื่อเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเป็นค่าต่าง ๆ เปรียบเทียบกันระหว่างวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ (VPA) และฟังก์ชันกรีนไดเอดิก (DGA)



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



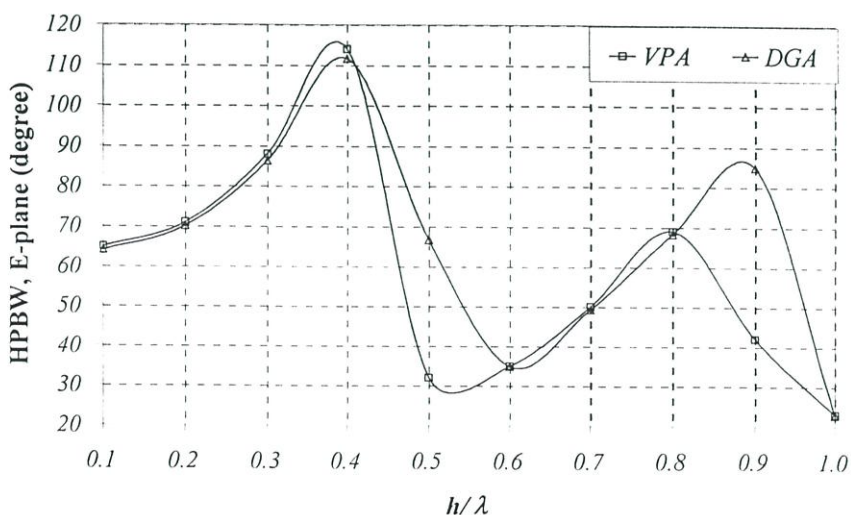
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.10 ค่ามุมยกที่สนามสูงสุด ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน

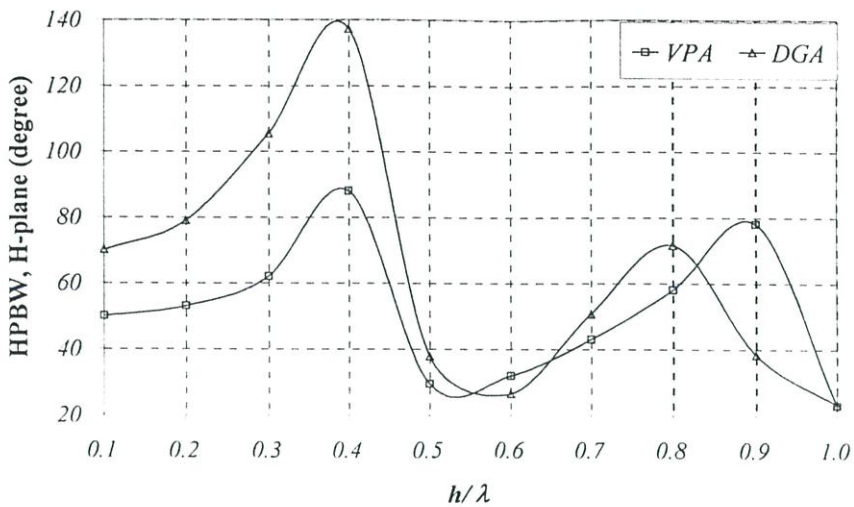
จากรูปพบว่า เมื่อเปลี่ยนค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเป็นค่าต่างๆ นั้นจะมีบางค่าเท่านั้นที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว กล่าวคือ ค่ามุมยกที่สนามสูงสุดซึ่งที่ 0° เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์นั้นระยะที่ทำให้ได้เงื่อนไขนี้ได้แก่ ระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนที่น้อยกว่า 0.3λ และจะเกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่งพร้อมกับมีค่าคลื่นย่อยด้านข้างเมื่ออยู่ที่ตำแหน่งเริ่มจาก 0.6λ ถึง 0.7λ ในลักษณะที่คล้ายเคียงกันเมื่อคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอดิกพบว่าเงื่อนไขที่สายอากาศแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวคือระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนที่น้อยกว่า 0.3λ และจะเกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่งพร้อมกับมีค่าคลื่นย่อยด้านข้างที่ตำแหน่ง 0.7λ พบว่ามีตำแหน่งที่อยู่ในเงื่อนไขที่ต้องการนี้จะแคบกว่ากรณีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ จากการวิเคราะห์ในส่วนนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการพิจารณาเพื่อออกแบบสายอากาศแบบทิศทางเดียวต่อไป

4.2.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเป็นคุณลักษณะหนึ่งที่สำคัญของสายอากาศ ทั้งนี้เพราะค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงคุณสมบัติของสายอากาศ ซึ่งค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่ต้องการคือมีความกว้างแคบๆ ทั้งนี้เพื่อให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการแม่นยำขึ้นและมีการสูญเสียกำลังงานน้อย ในรูปที่ 4.11 แสดงค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอดิก จากรูปพบว่าทั้งสองวิธียังค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนยิ่งมากขึ้นค่าความกว้างลำคลื่นจะมีแนวโน้มกว้างขึ้นจนถึงตำแหน่งหนึ่งที่ h เท่ากับ 0.4λ จากนั้นจะเริ่มลดลง ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



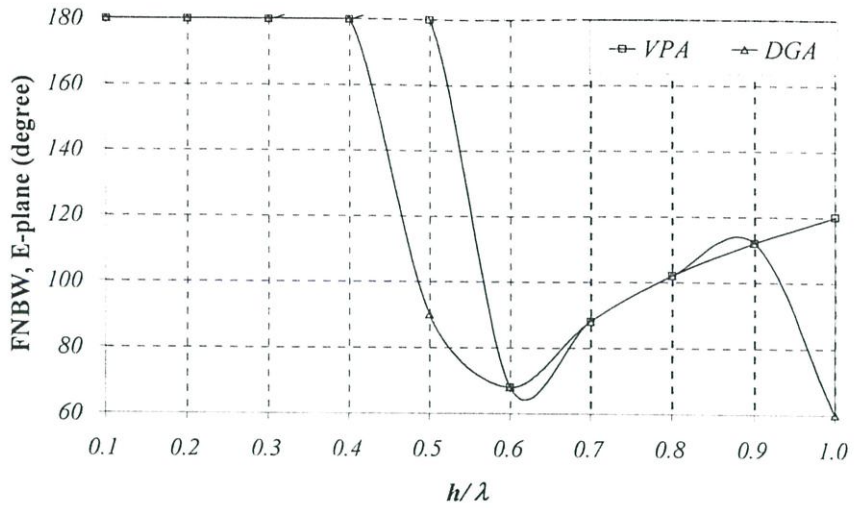
(จ) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.11 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน

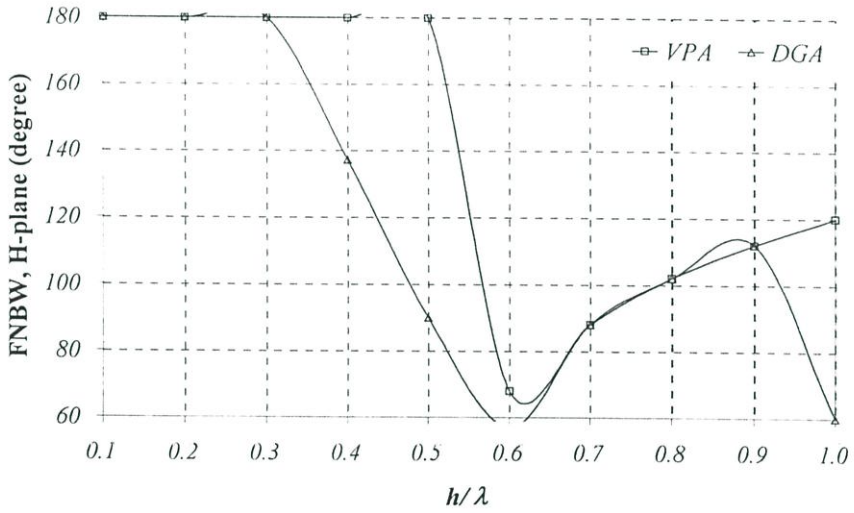
เมื่อพิจารณาค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองวิธี แต่ในระนาบสนามแม่เหล็กพบว่าวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์จะให้ค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศแคบกว่ากรณีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก

4.2.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรก

ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรก คือช่วงระหว่างจุดที่ความเข้มการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลักมีค่าลดลงเป็นศูนย์ ซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 ในระนาบสนามไฟฟ้า จะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนมากขึ้น ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรกจะคงที่เท่ากับ 180° จนถึงที่ค่าหนึ่งคือ ที่ h เท่ากับ 0.5λ และ 0.4λ จากนั้นความกว้างลำคลื่นจะเริ่มแคบลง สำหรับวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกตามลำดับ ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนมากขึ้น ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรกจะคงที่เท่ากับ 180° จนถึงที่ค่าหนึ่งคือ ที่ h เท่ากับ 0.5λ และ 0.3λ จากนั้นความกว้างลำคลื่นจะเริ่มแคบลง สำหรับวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกตามลำดับ มีข้อสังเกตคือ ที่ค่า h มีค่าน้อย ๆ สายอากาศจะแพร่กระจายคลื่นมีเฉพาะลำคลื่นหลักเท่านั้น แต่เมื่อ h มากขึ้น (ช่วงที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลง) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเริ่มชี้ทิศทางสูงสุดไปในทิศทางอื่น กล่าวคือ มีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งเกิดขึ้นนั่นเอง



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



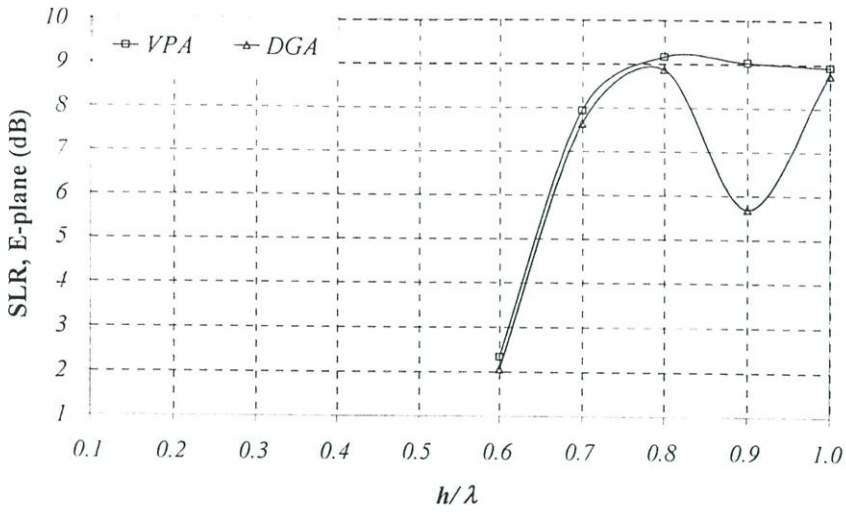
(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.12 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สำคัญจาเป็นศูนย์กลางแรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน

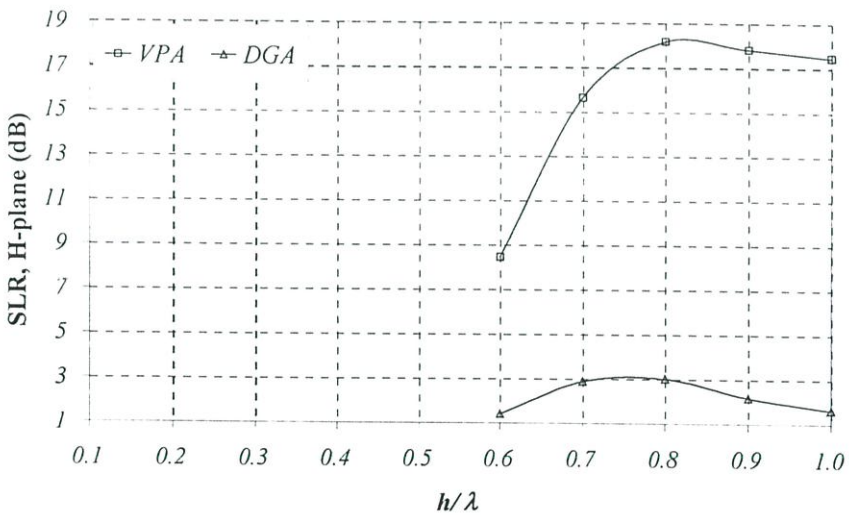
4.2.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนวงสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า ในช่วงแรก หรือค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนมีค่าน้อยๆ (น้อยกว่า 0.6λ) จะไม่เกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างขึ้น แต่เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มมากขึ้นค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างยังมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น (ความแตกต่างระหว่างระดับลำคลื่นหลักกับลำคลื่นย่อยด้านข้างมีมากขึ้น) ทั้งวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไคเอดิก แต่ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยที่

คำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์จะมีค่าสูงกว่าวิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอดิกทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



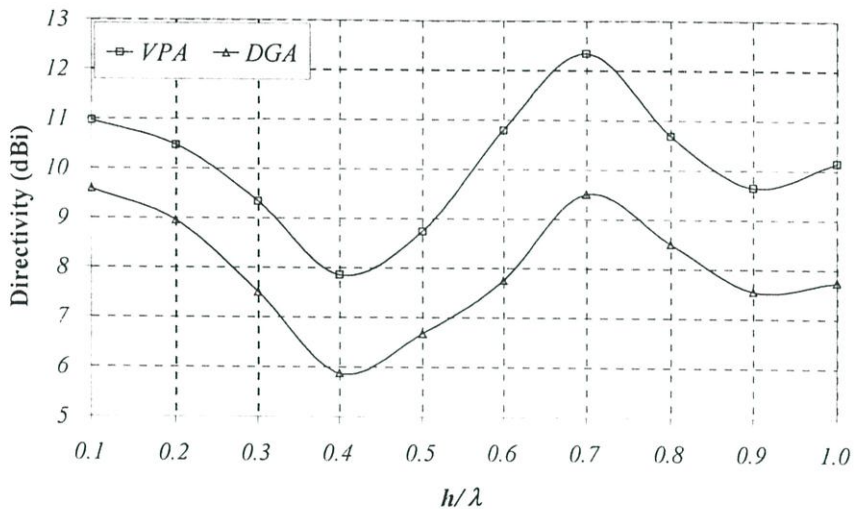
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.13 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน

4.2.6 ค่าสภาพเจาะงทิตทางของสายอากาศ

ค่าสภาพเจาะงทิตทางที่มากที่สุดของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน พบว่าค่าสภาพเจาะงทิตทางที่มากที่สุดของสายอากาศจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนมากขึ้นจนถึงที่ระยะหนึ่งคือประมาณ 0.4λ จากนั้นค่าสภาพเจาะงทิตทางของสายอากาศจะมีแนวโน้มสูง

ขึ้นอีกครั้ง และพบว่าที่ตำแหน่งประมาณ 0.7λ (ในระยะเวลาที่เป็นไปได้คือประมาณ $h \geq 0.13\lambda$) จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางมากที่สุดประมาณ 12.34 dBi และ 9.5 dBi สำหรับวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 นอกจากนี้พบว่าวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศมากกว่าวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกทุกกรณี

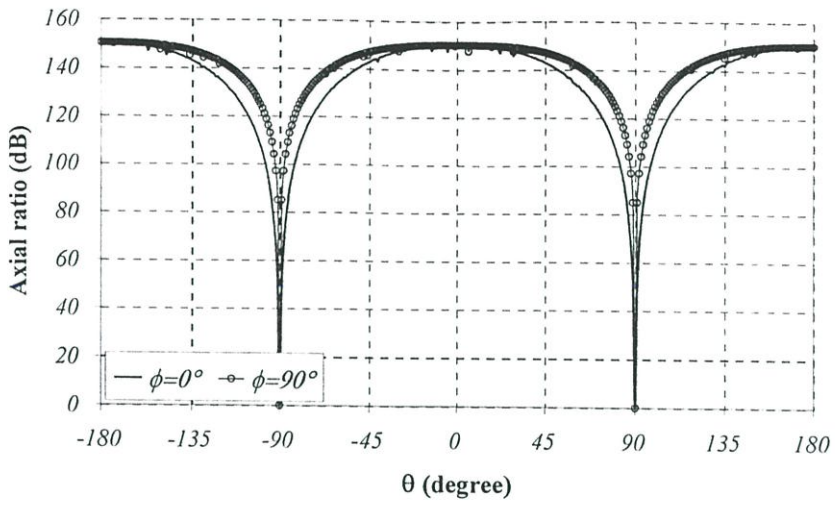


รูปที่ 4.14 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน

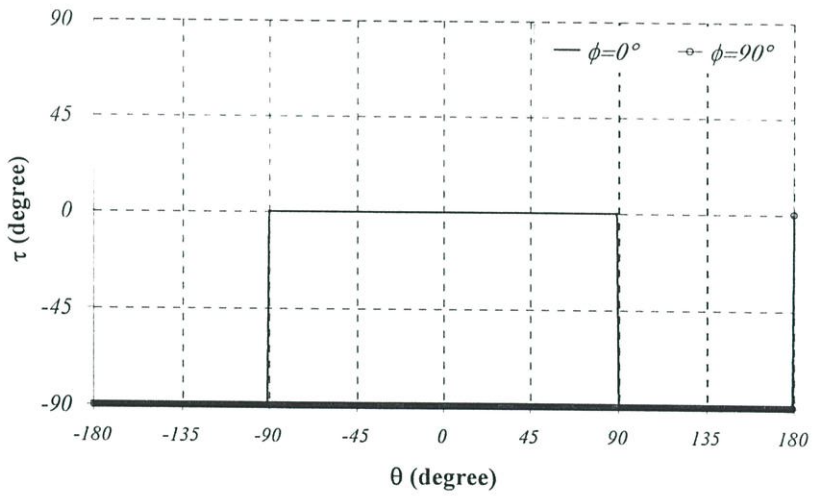
จากคุณลักษณะต่างๆที่แสดงในข้างต้นนี้จะนำมาพิจารณาเพื่อหาค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน โดยจะพิจารณารณณ์ที่ทำให้เงื่อนไขที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว และให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงที่สุด แต่เนื่องจากตำแหน่งที่ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด ($h = 0.7\lambda$) นั้นจะเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างด้วย ดังนั้นในการพิจารณาจึงเลือกพิจารณาที่ h เท่ากับ 0.3λ และ h เท่ากับ 0.7λ เปรียบเทียบกัน ดังนั้นการแสดงผลการวิเคราะห์ต่อไปนี้มีทั้งสองค่านี้แสดงตลอด

4.2.7 คุณลักษณะเชิงการโพลาริซ

สำหรับคุณลักษณะเชิงการโพลาริซของสายอากาศจะพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนและ ค่ามุมเอียงของสายอากาศเพื่อบ่งชี้ลักษณะการโพลาริซ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และโปรแกรม NEC2 ซึ่งในการแสดงจะแสดงทั้งกรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ ดังรูปที่ 4.15 4.16 และ 4.17 และ สำหรับกรณีที่ h เท่ากับ 0.7λ แสดงดังรูปที่ 4.18 4.19 และ 4.20 โดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และจากโปรแกรม NEC2 ตามลำดับ

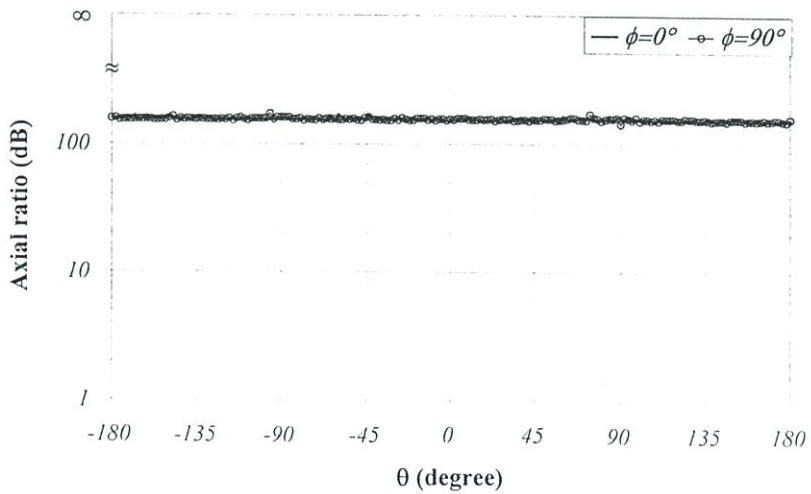


(ก) ค่าอัตราส่วนแกน

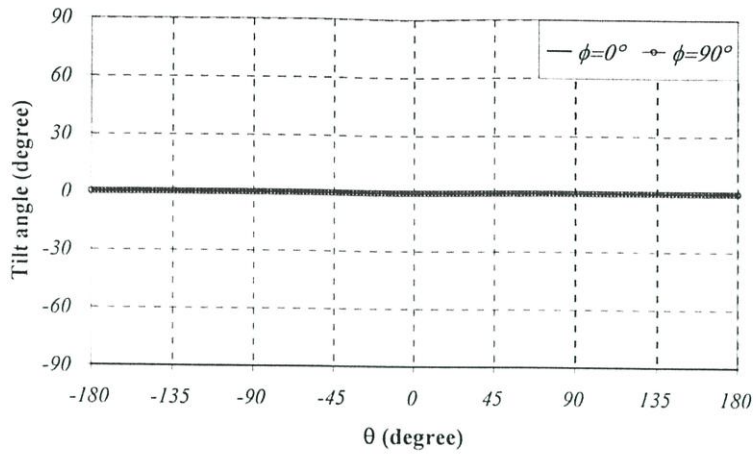


(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 4.15 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.3λ โดยใช้วิธีฟังก์ชันศັกย์เวกเตอร์

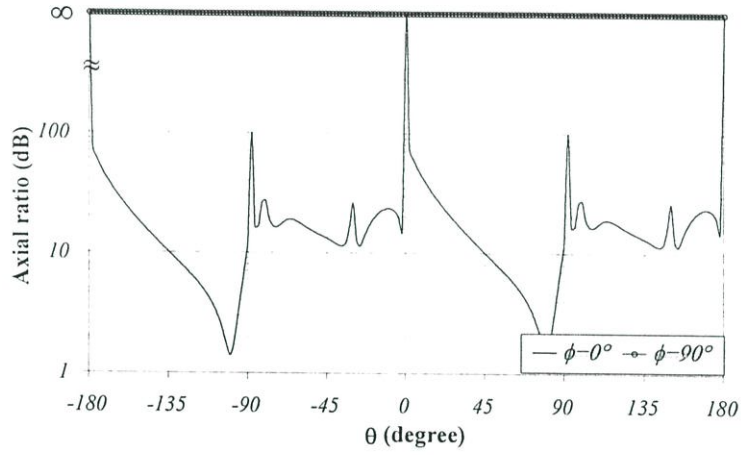


(ค) ค่าอัตราส่วนแกน

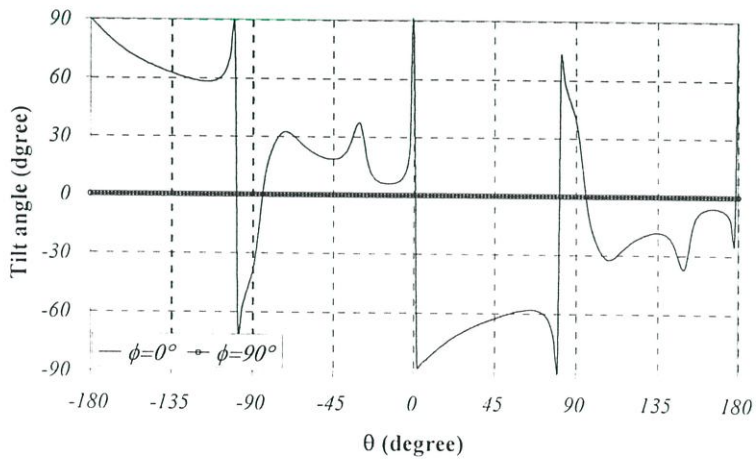


(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 4.16 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.3λ โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก

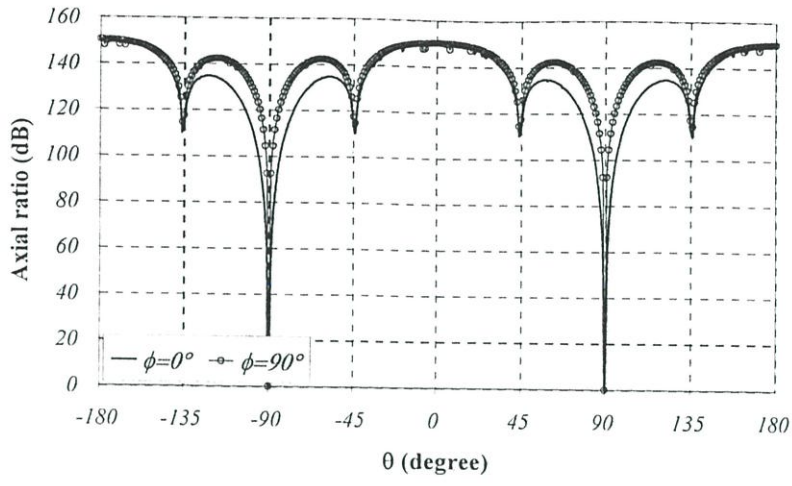


(ก) ค่าอัตราส่วนแกน

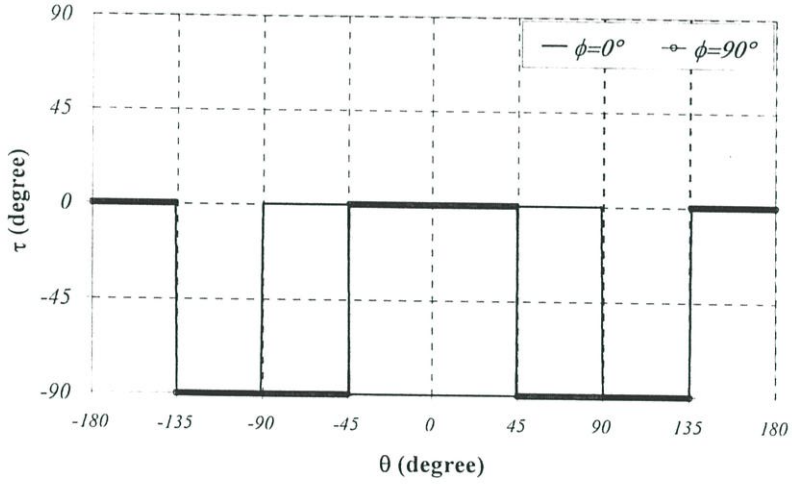


(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 4.17 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.3λ โดยใช้โปรแกรม NEC2

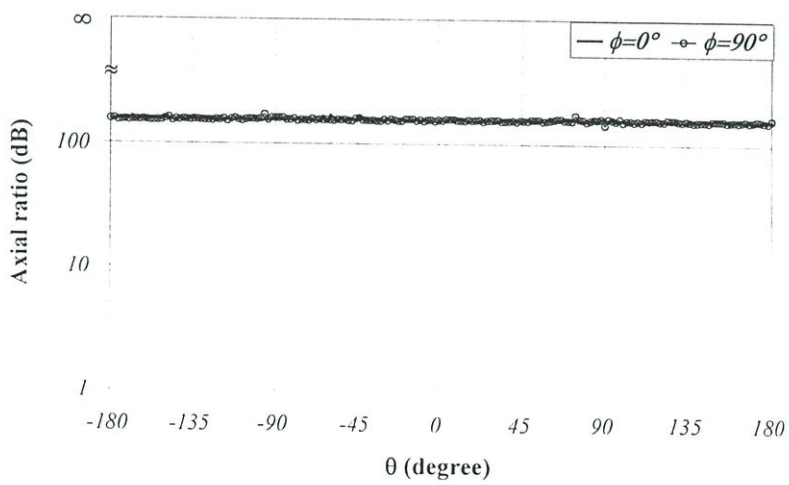


(ก) ค่าอัตราส่วนแกน

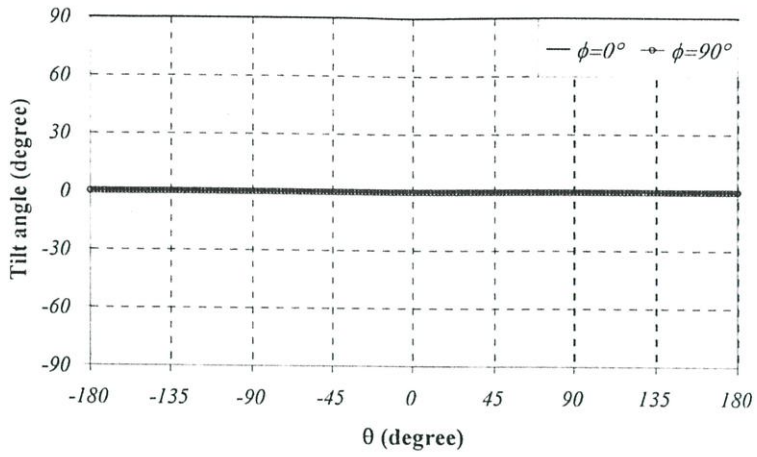


(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 4.18 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.7λ โดยใช้วิธีฟังก์ชันซันคักย์เวกเตอร์

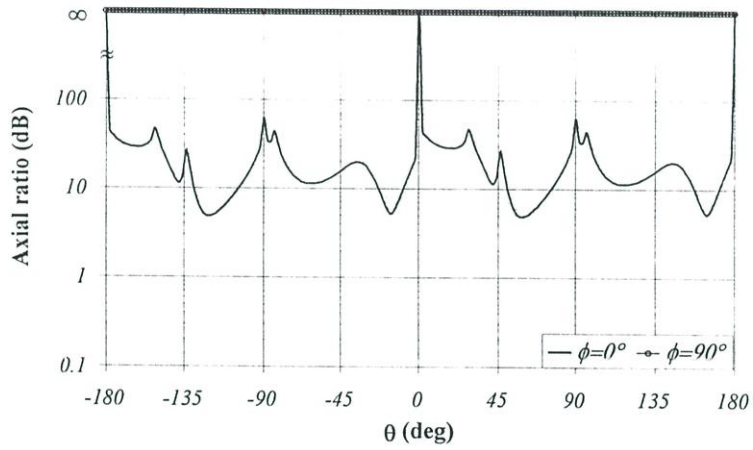


(ค) ค่าอัตราส่วนแกน

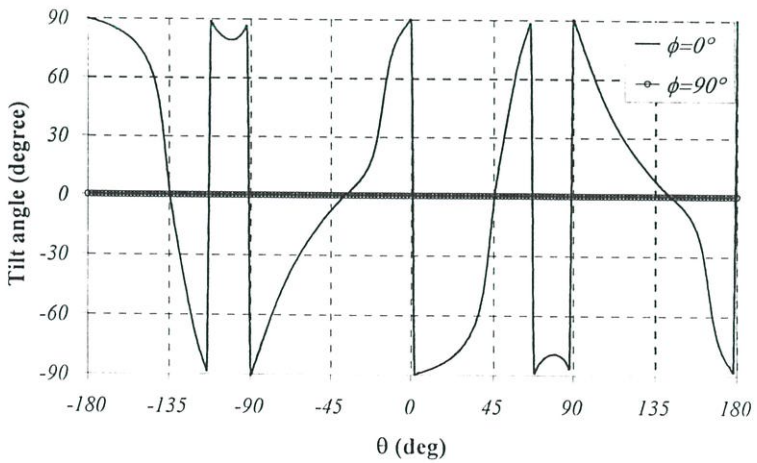


(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 4.19 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.7λ โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก



(ก) ค่าอัตราส่วนแกน



(ข) ค่ามุมเอียง

รูปที่ 4.20 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อวางเหนือตัวสะท้อนมีระยะห่างเท่ากับ 0.7λ โดยใช้โปรแกรม NEC2

จากรูปพบว่าจากการวิเคราะห์จากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก และโปรแกรม NEC2 ได้ผลที่สอดคล้องกันเมื่อพิจารณาที่ด้านหน้าของสายอากาศ ($\theta = 0^\circ$) กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนของสายอากาศมีค่าเข้าสู่ ∞ dB หรือมีค่าที่ค่อนข้างสูงเข้าใกล้ ∞ dB นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเป็นแบบเชิงเส้น ทั้งกรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ

เมื่อพิจารณาค่ามุมเอียงของสนามแนวตั้ง (E_θ) และแนวนอน (E_ϕ) เมื่ออ้างอิงกับแกนแนวตั้งเป็น 0 และ 90 จากวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก และโปรแกรม NEC2 กรณีที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเป็น 0.3λ นั่นคือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของการหมุนของสนามไฟฟ้าอ้างอิงจากองค์ประกอบสนามแนวตั้งจะขนานกัน นั่นคือ สายอากาศนี้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้งนั่นเอง สำหรับกรณีที่ h เท่ากับ 0.7λ พบว่าค่ามุมเอียงของสนามแนวตั้ง (E_θ) และแนวนอน (E_ϕ) เมื่ออ้างอิงกับแกนแนวตั้งเป็น 0° และ 90° จากทุกวิธี นั่นคือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของของสนามไฟฟ้าเป็นลักษณะแนวตั้งและแนวนอนเมื่อเปรียบเทียบกับแกนอ้างอิง ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนจะมีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนที่ตำแหน่ง $\phi = 90$ และ $\phi = 0$ ตามลำดับ

4.3 คุณลักษณะของสายอากาศแฉวลำดับโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

การวิเคราะห์สายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนในกรณีองค์ประกอบเดียวจากหัวข้อ 4.2 ได้เลือกระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเป็น 0.3λ และ 0.7λ ซึ่งจากหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนทั้งสองนี้พบว่า คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์และฟังก์ชันไดเอดิกจะมีค่าใกล้เคียงกันมากในระนาบสนามไฟฟ้า และในระนาบสนามแม่เหล็กแม่จะมีค่าแตกต่างกันแต่พบว่ามีลักษณะแนวโน้มที่เหมือนกัน โดยวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์จะให้ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศสูงกว่าวิธีฟังก์ชันไดเอดิก ดังนั้นในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศและเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบของแฉวลำดับจะพิจารณาเฉพาะวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์เท่านั้น สำหรับกรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ นี้จะทำการวิเคราะห์ควบคู่กันตลอดทั้งบท ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบสายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวที่มีค่าอัตราการขยายสูงเพื่อประยุกต์ใช้ในระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุดต่อไป และเนื่องจากต้องการพัฒนาสายอากาศให้ได้อัตราการขยายที่สูงเพื่อครอบคลุมพื้นที่ได้ไกลมากขึ้น วิธีหนึ่งที่จะเพิ่มอัตราการขยายของสายอากาศ คือ การจัดเรียงสายอากาศเป็นลักษณะแฉวลำดับ จากโครงสร้างของสายอากาศที่มีลักษณะสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้

เพื่อความสะดวกในการจัดเรียงได้ง่ายและไม่ซับซ้อนมาก จะพิจารณาจัดเรียงสายอากาศเป็นลักษณะแถวลำดับเชิงเส้นและแถวลำดับเชิงระนาบ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อนี้ต่อไป

4.3.1 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

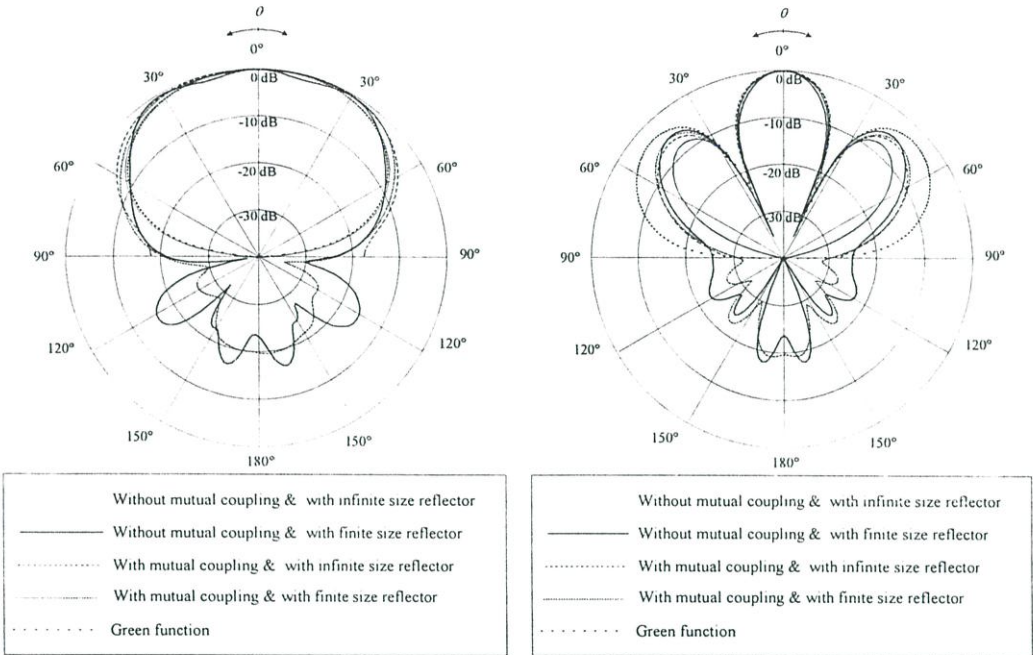
จากบทที่ 2 เมื่อกำหนดขนาดของสายอากาศสองคู่ประกอบเต็มมีพารามิเตอร์ดังนี้คือ ขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากกว้าง 0.69λ สูง 0.35λ ยาว 0.25λ โพรบป้อนสัญญาณยาว 0.27λ ระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างสายอากาศและจำนวนของสายอากาศนั่นเอง ดังนั้นจะพิจารณาทั้งกรณีที่เปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศและจำนวนของสายอากาศด้วย ทั้งนี้เพื่อหาระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสมที่ทำให้คุณลักษณะของสายอากาศตามที่ต้องการ โดยคุณลักษณะที่พิจารณาก็คือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าความกว้างลำคลื่น และค่าสภาพเงาเชิงทิศทางสูงสุดของสายอากาศ นอกจากนี้จะพิจารณาคคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศด้วย โดยการจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับนี้ คือ จัดเรียงตามแนวแกน x เรียกว่า การจัดเรียงแถวลำดับด้านข้าง (Side by side) และตามแนวแกน y เรียกว่า การจัดเรียงแถวลำดับตามยาว (Collinear) ทั้งนี้เพราะตัวสะท้อนจะวางขนานในระนาบ xy โดยคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศจะแสดงดังต่อไปนี้

4.3.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นแต่ละแนวแกนนั้นจะแสดงที่ระยะต่างๆ กัน ทั้งนี้เพราะมีข้อจำกัดของขนาดวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่แต่ละด้านด้วย (ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เป็นไปได้เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน x และแกน y ระยะที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ คือ 0.69λ และ 0.35λ ตามลำดับ) จึงแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเฉพาะกรณีที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเท่านั้น

รูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.24 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x และ y ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน มีระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ ตามลำดับ โดยการจัดเรียงในแต่ละแนวแกนจะใช้ระยะห่างที่ระยะที่ต่างกันนั้น คือในกรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ ระยะห่างระหว่างสายอากาศตามแนวแกน x และ y เท่ากับ 1.2λ และ 0.95λ ตามลำดับ กรณีที่ h เท่ากับ 0.7λ ระยะห่างระหว่างสายอากาศตามแนวแกน x และ y เท่ากับ 1.5λ ผลที่ได้จากการคำนวณในแต่ละวิธีเมื่อพิจารณาที่ลำคลื่นหลักของสายอากาศเปรียบเทียบกับกันนั้นพบว่ามีความสอดคล้องกัน คือ ค่ามุมที่

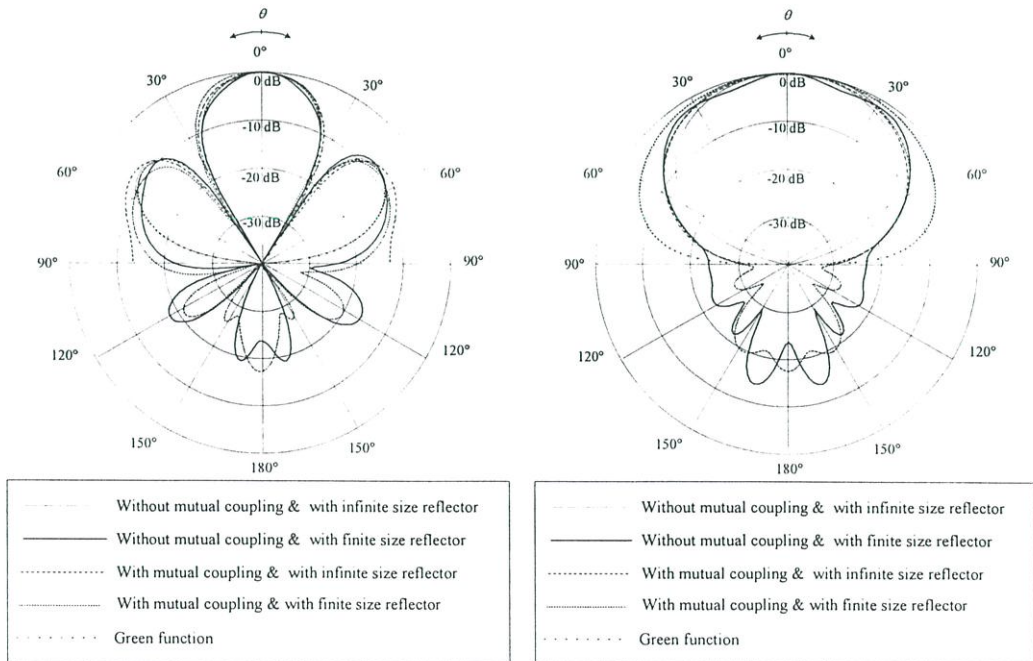
สนามสูงสุดชี้ที่ 0° และลักษณะลำคลื่นมีความกว้างลำคลื่นใกล้เคียงกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

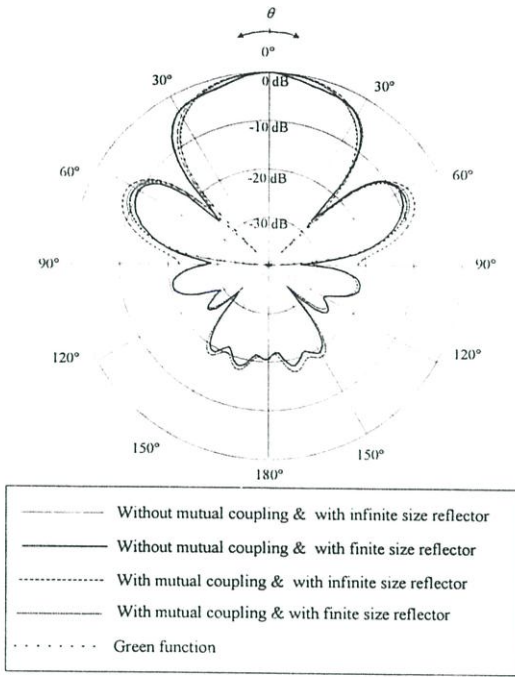
รูปที่ 4.21 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน x โดย $h = 0.3\lambda$



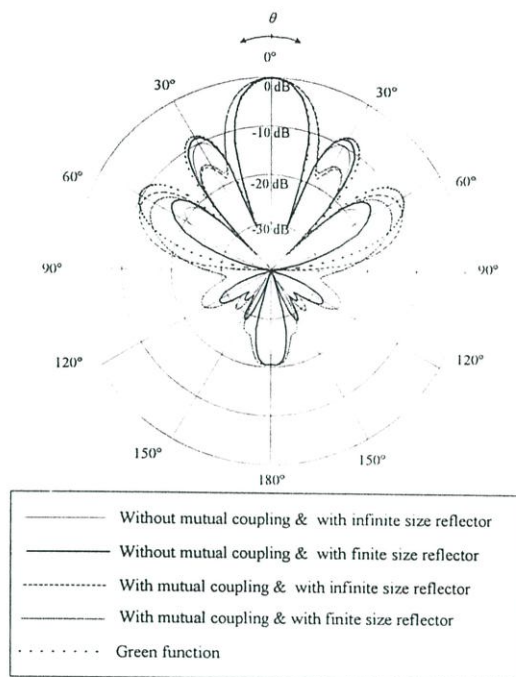
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน y โดย $h = 0.3\lambda$

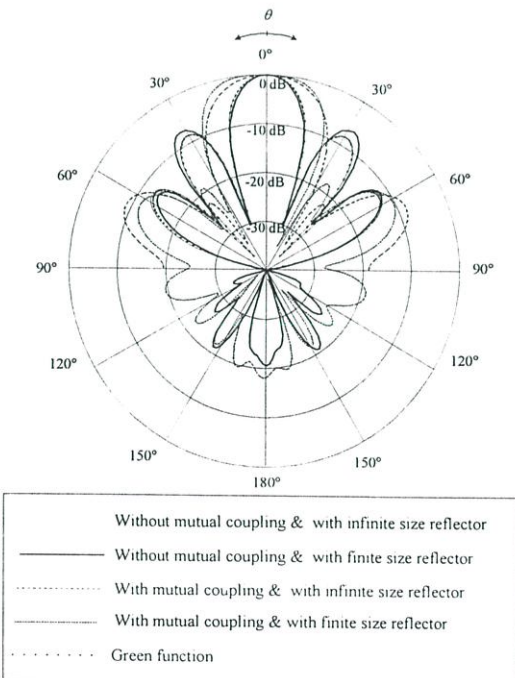


(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

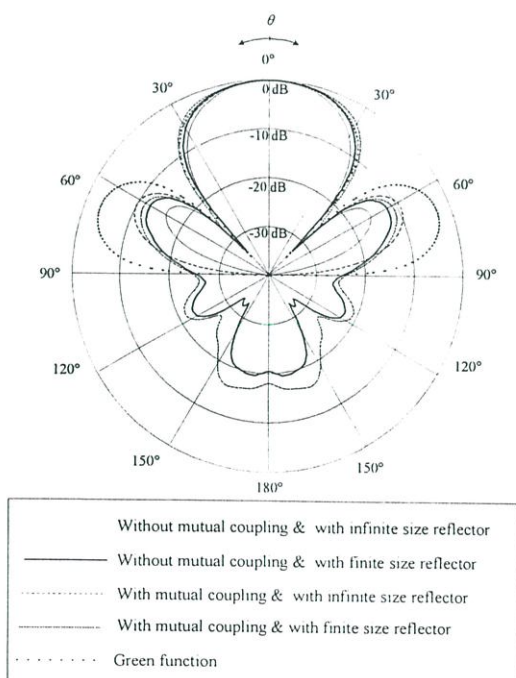


(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของโพรบกระดิ่งวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน x โดย $h = 0.7\lambda$



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

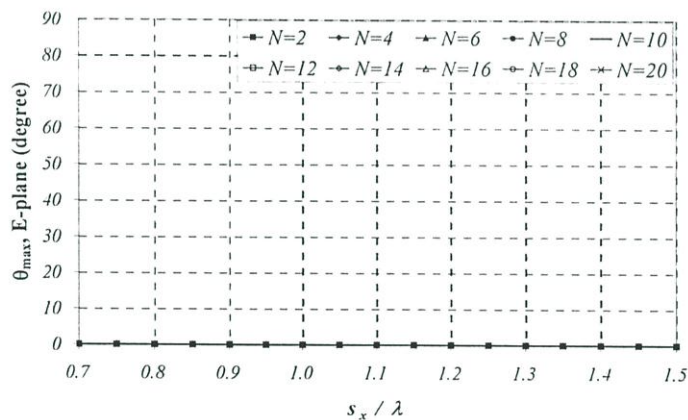
รูปที่ 4.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของโพรบกระดิ่งวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงตามแนวแกน y โดย $h = 0.7\lambda$

นอกจากนี้สามารถแยกพิจารณาเป็นกรณีได้ดังนี้ กรณีที่ตัวสะท้อนมีขนาดอนันต์ กรณีที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดและระหว่างองค์ประกอบ (Without mutual coupling and with infinite reflector) โดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก (พิจารณาโพรบรมด้วย) กรณีพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองด้านและการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับ (With mutual coupling and with infinite reflector) จากโปรแกรม NEC2 พบว่า ในระนาบสนามไฟฟ้านั้นจะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ใกล้เคียงกันมาก โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากโปรแกรม NEC2 จะมีลำคลื่นกว้างกว่ากรณีอื่นๆ ขณะที่วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไดเอดิกจะมีลักษณะความกว้างของลำคลื่นใกล้เคียงกันมาก ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็ก พบว่าเมื่อพิจารณาที่ลำคลื่นหลักของสายอากาศเมื่อไม่เกิดลำคลื่นย่อยด้านข้าง วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกจะให้ลำคลื่นของสายอากาศกว้างกว่ากรณีอื่นๆ แต่หากมีลำคลื่นย่อยด้านข้างเกิดขึ้นพบว่า เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลักจะมีค่าใกล้เคียงกันในทุกกรณี แต่ลำคลื่นย่อยด้านข้างในกรณีที่คำนวณจากฟังก์ชันกรีนไดเอดิกจะมีระดับของลำคลื่นด้านข้างสูงที่สุด และกรณีที่พิจารณาตัวสะท้อนเป็นอนันต์นี้จะไม่เกิดลำคลื่นย่อยด้านหลังขึ้นเลย

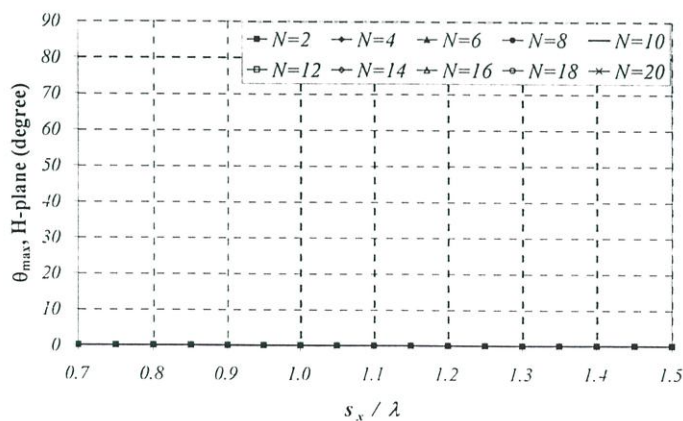
สำหรับการเปรียบเทียบผลที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบของแถวลำดับ แต่พิจารณาตัวสะท้อนขนาดจำกัด (Without mutual coupling and with finite size reflector) ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างองค์ประกอบของแถวลำดับที่พิจารณาตัวสะท้อนให้มีขนาดจำกัด โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2 และตัวประกอบแถวลำดับ การพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบและพิจารณาตัวสะท้อนมีขนาดเป็นอนันต์ (With mutual coupling and with infinite size reflector) และกรณีที่พิจารณาทั้งการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบและขนาดของตัวสะท้อนมีขนาดจำกัด (With mutual coupling and with finite size reflector) จากโปรแกรม NEC2 พบว่าลักษณะลำคลื่นหลักนั้นใกล้เคียงกันมากเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนมีน้อยๆ แต่เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนมากๆ การคำนวณที่พิจารณาการเชื่อมต่อจะมีค่าความกว้างของลำคลื่นหลักมากกว่าวิธีที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อ และพบว่าระดับของลำคลื่นย่อยด้านหลังของสายอากาศที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบจะมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบ แต่ลักษณะการเกิดของลำคลื่นย่อยด้านหลังของทั้งสองกรณีจะมีแนวโน้มที่คล้ายกันและมีระดับไม่แตกต่างกันมาก นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตคือ การจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x และแกน y จะมีผลต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามลำดับ และพบว่ากรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบของแถวลำดับจะมีผลต่อลักษณะความกว้างของลำคลื่นหลักและลำคลื่นย่อยด้านข้างที่อยู่ถัดไปลำคลื่นแรก (จากรูปจะพบว่าระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างที่อยู่ถัดไปลำคลื่นแรกจะถูกกดลงให้ต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีพิจารณา) ส่วนขนาดของตัวสะท้อนจะมีผลต่อการเกิดลำคลื่นย่อยด้านหลังของสายอากาศ

4.3.1.2 ค่ามุมที่สนามสูงสุด

ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาคูณลักษณะของสายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว กล่าวคือ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กคือที่ 0° พร้อมกันทั้งคู่ ซึ่งในการพิจารณาการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นนี้ พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ และจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ ในรูปที่ 4.25 จนถึงรูปที่ 4.28 ได้แสดงค่ามุมที่สนามสูงสุดทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ และ h เท่ากับ 0.7λ เมื่อเปลี่ยนจำนวนองค์ประกอบเป็นค่าต่างๆ ที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x และตามแนวแกน y ตามลำดับ จากรูปพบว่าตลอดระยะห่างระหว่างสายอากาศตั้งแต่ 0.7λ จนถึง 1.5λ นั้นจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวทั้งกรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ และ h เท่ากับ 0.7λ กล่าวคือ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กเท่ากับ 0 และเกิดขึ้นพร้อมกันนั่นเอง

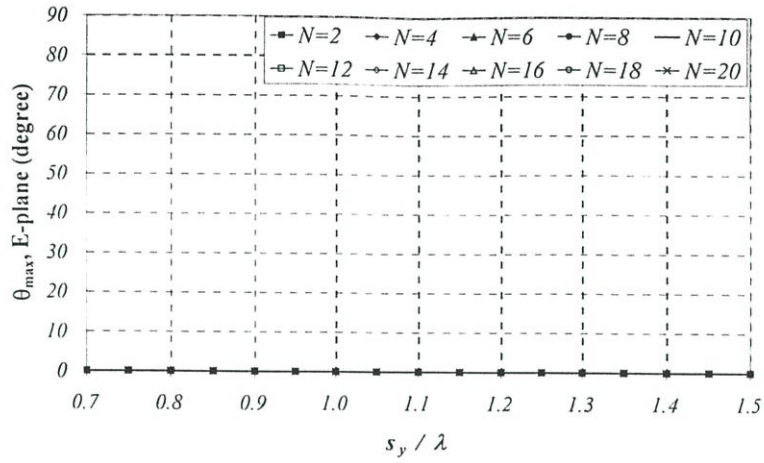


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

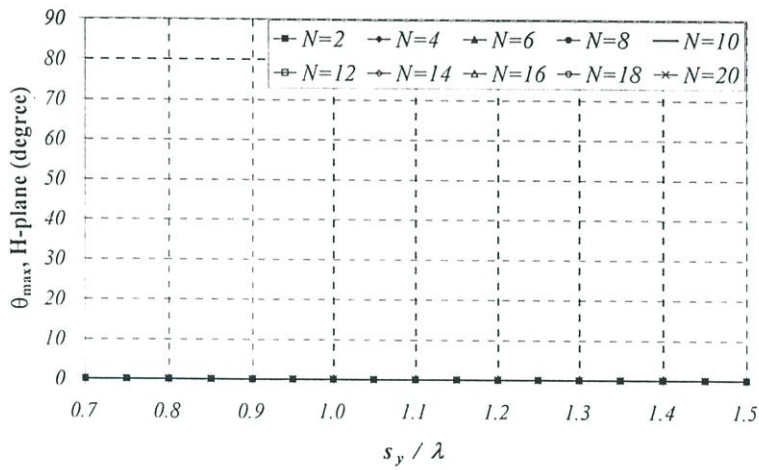


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.25 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$

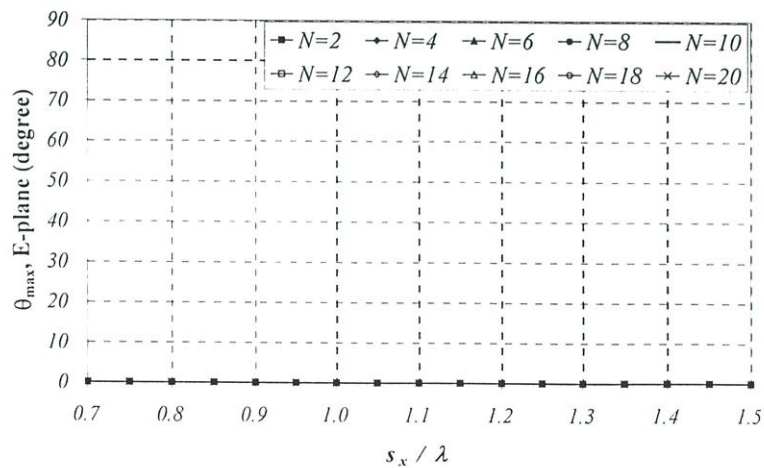


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

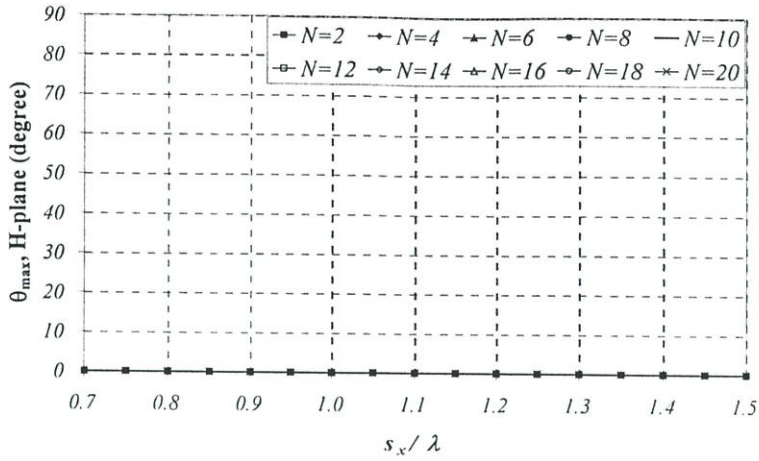


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.26 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$

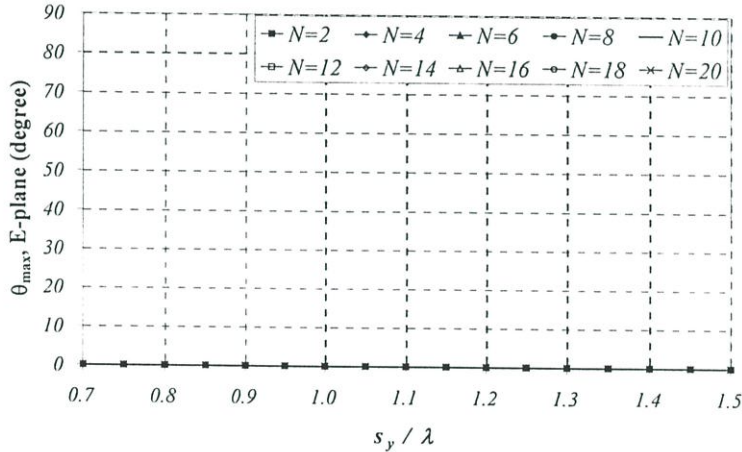


(ค) ระนาบสนามไฟฟ้า

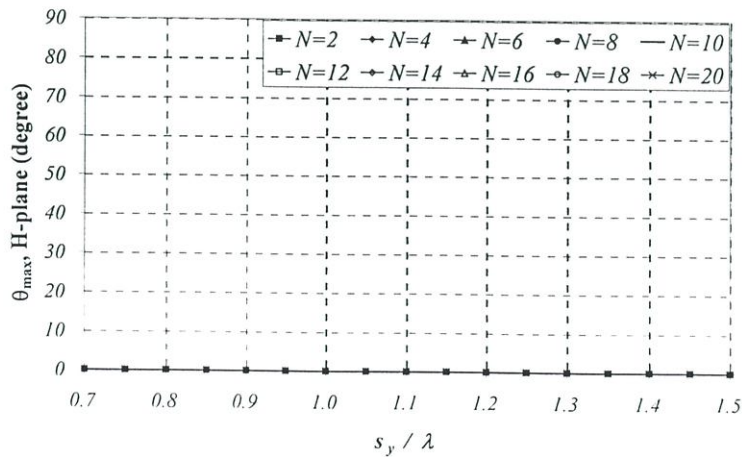


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.27 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$



(ค) ระนาบสนามไฟฟ้า

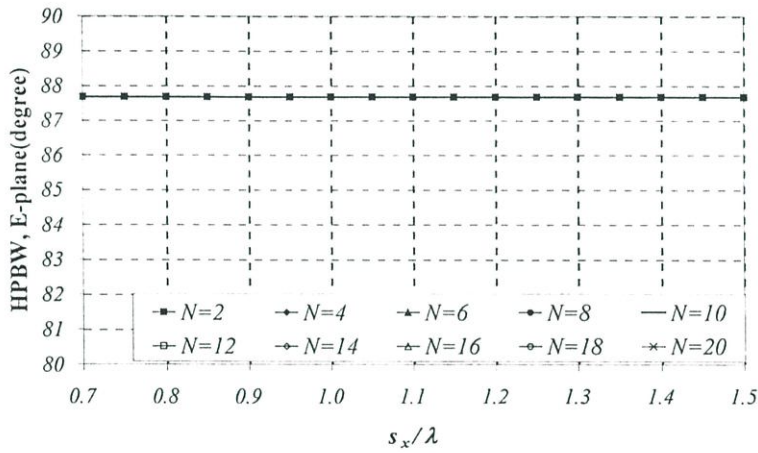


(ง) ระนาบสนามแม่เหล็ก

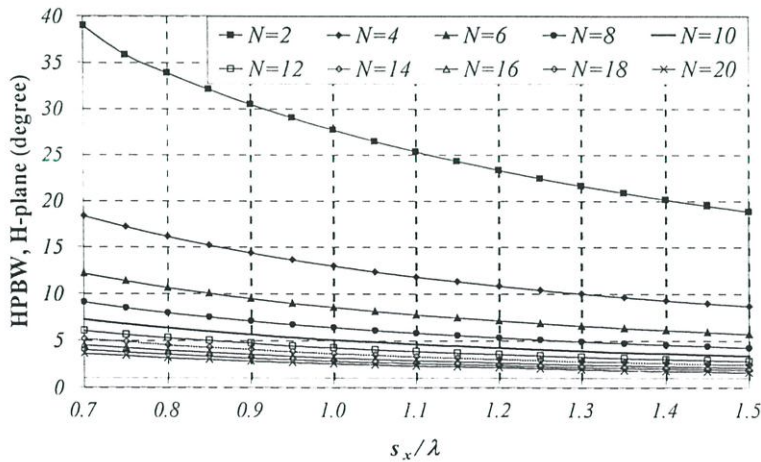
รูปที่ 4.28 ค่ามุมที่สนามสูงสุดที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.7\lambda$

4.3.1.3 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง

สำหรับค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศ ครึ่งที่ h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ ได้แสดงในรูปที่ 4.29 ถึงรูปที่ 4.32 จากรูปพบว่าค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศครึ่งจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และ y จะมีค่าคงที่ที่ค่าหนึ่งคือ 87.67° ในระนาบสนามไฟฟ้า และ 61.67° ในระนาบสนามแม่เหล็กตามลำดับ ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น ในระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และ y ตามลำดับ

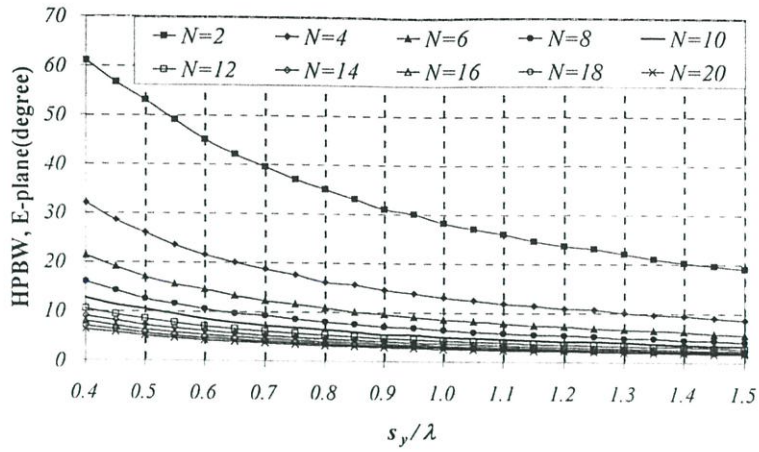


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

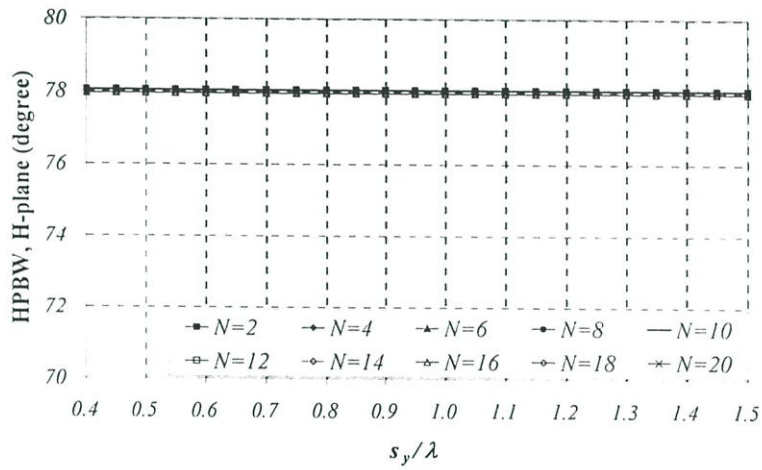


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.29 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$

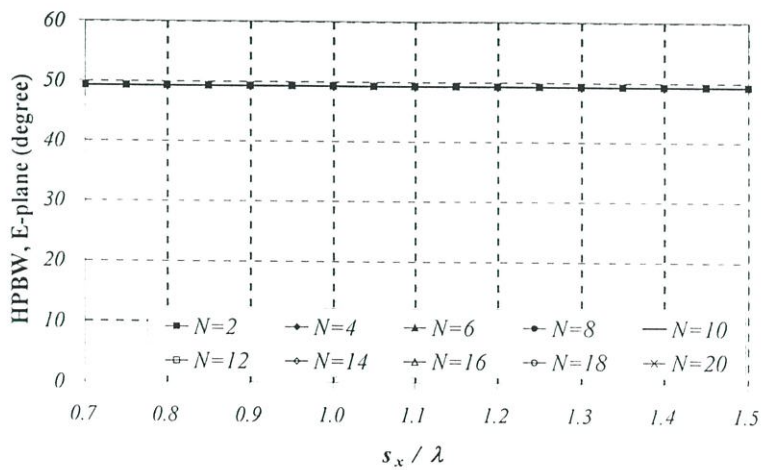


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

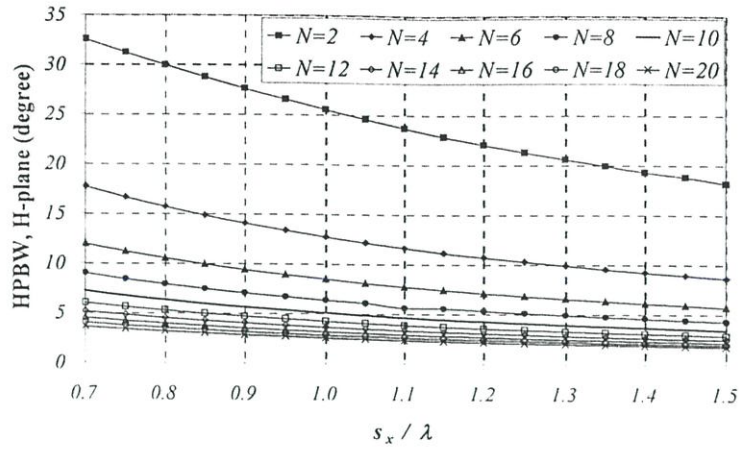


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.30 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$

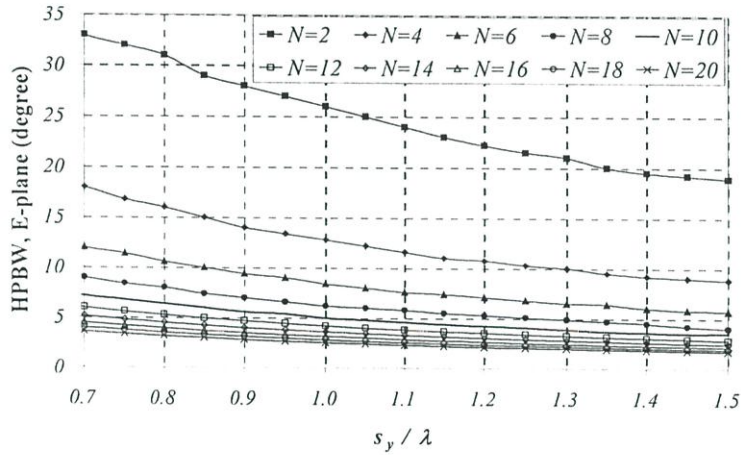


(ค) ระนาบสนามไฟฟ้า

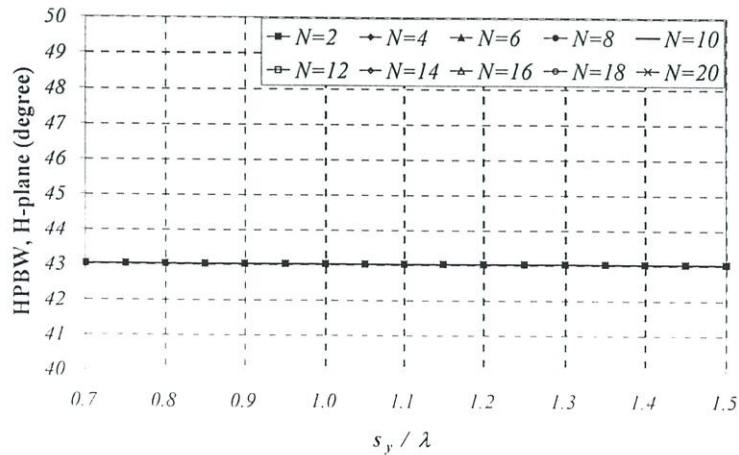


(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.31 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$



(ค) ระบายสนามไฟฟ้า



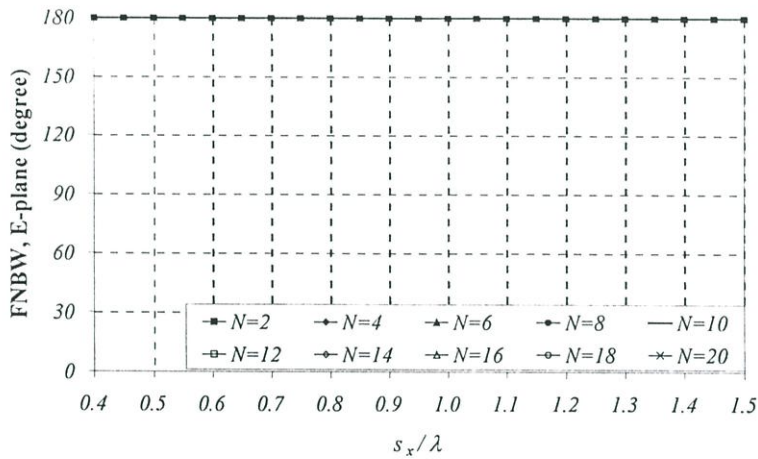
(ง) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.32 ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.7\lambda$

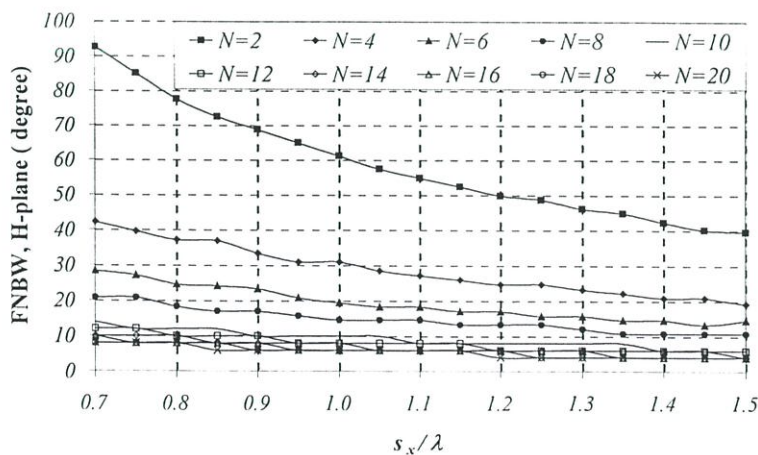
ในทำนองเดียวกันสำหรับกรณีที่ h เท่ากับ 0.7λ ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่ง จะมีค่าคงที่ที่ค่าหนึ่งคือ 49.49° ในระนาบสนามไฟฟ้าและ 18.29° ในระนาบสนามแม่เหล็กเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และ y ตามลำดับ ค่าความกว้างลำคลื่นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น ในระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และ y ตามลำดับ

4.3.1.4 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางคู่แรก

ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางคู่แรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น กรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ ได้แสดงในรูปที่ 4.33 ถึงรูปที่ 4.36

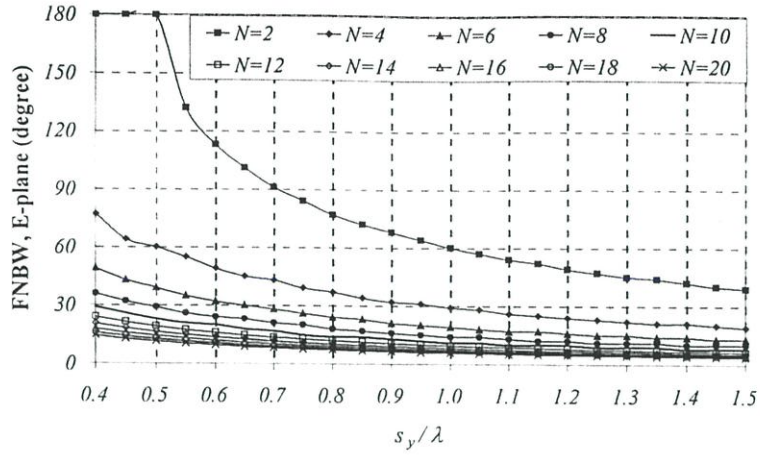


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

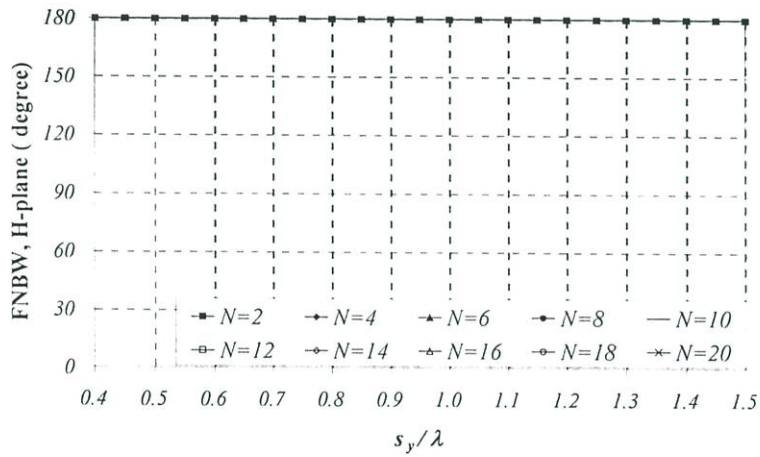


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.33 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางคู่แรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$

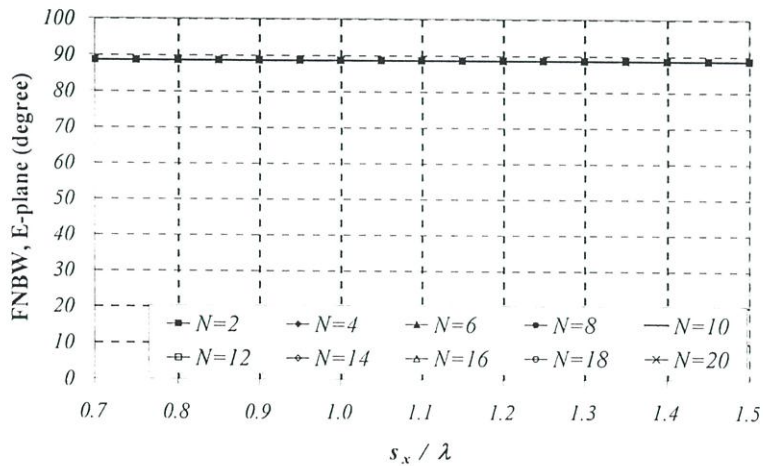


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

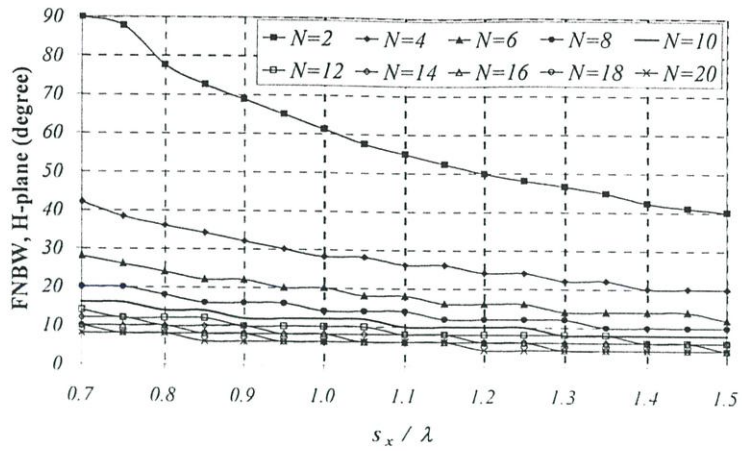


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.34 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์คู่แรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$

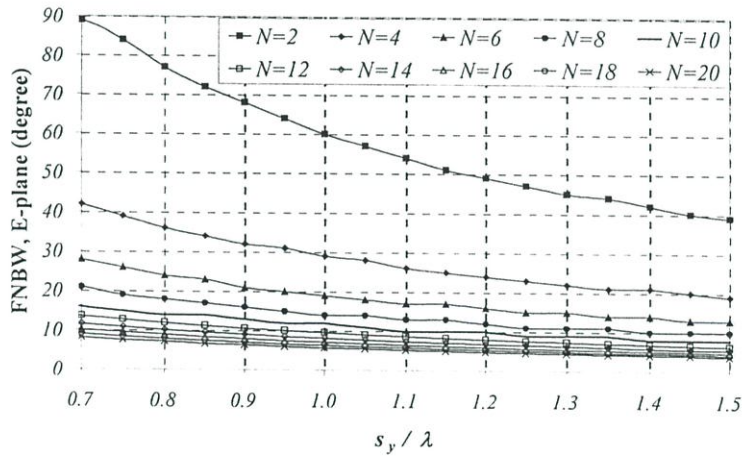


(ค) ระนาบสนามไฟฟ้า

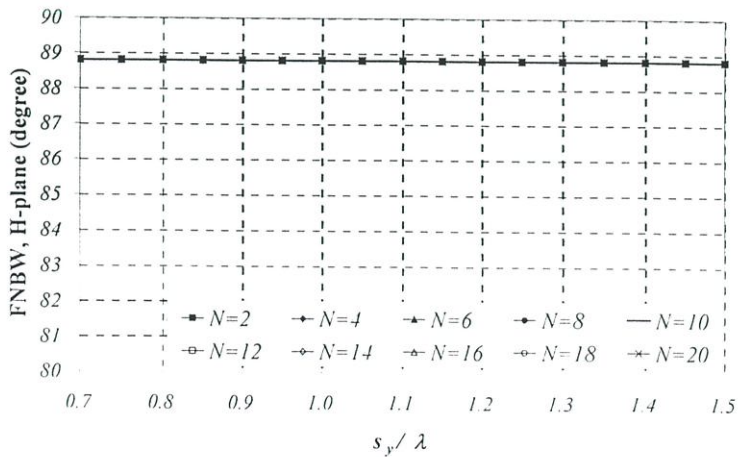


(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.35 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สำคัญเป็นศูนย์แรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า



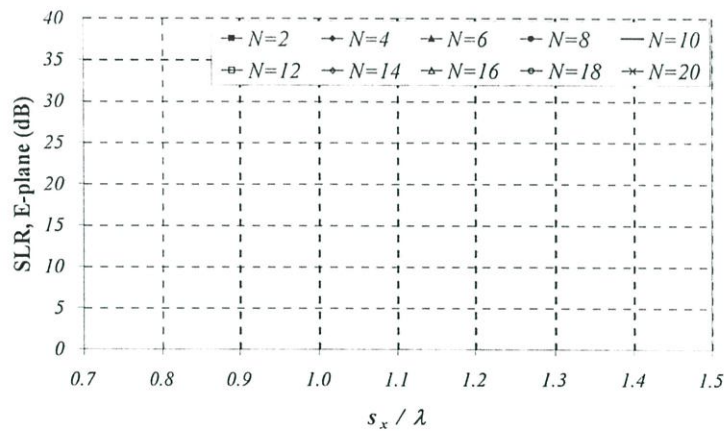
(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.36 ค่าความกว้างลำคลื่นที่สำคัญเป็นศูนย์แรกที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.7\lambda$

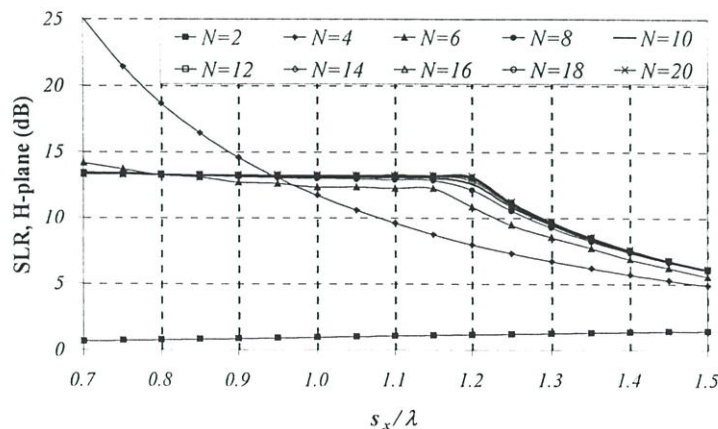
พบว่าในกรณีที่มี h เท่ากับ 0.3λ ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกของสายอากาศจะมีค่าคงที่ที่ 180° ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และ y ตามลำดับ สำหรับ h เท่ากับ 0.7λ จะมีค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกที่ 88° ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และตามแกน y นอกจากนี้พบว่าทั้งกรณีที่มี h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ ค่าความกว้างลำคลื่นที่สัญญาณเป็นศูนย์กลางแรกจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้น ในระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าของแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และ y ตามลำดับ

4.3.1.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ตำแหน่ง h เท่ากับ 0.3λ และ h เท่ากับ 0.7λ แสดงดังรูปที่ 4.37 ถึงรูปที่ 4.40

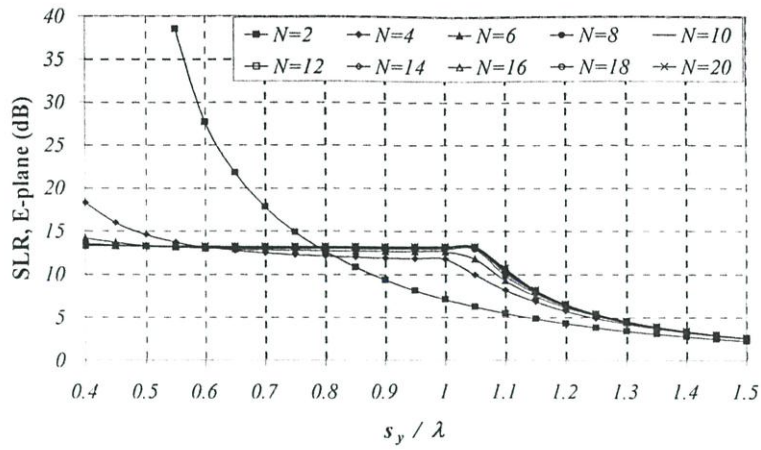


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

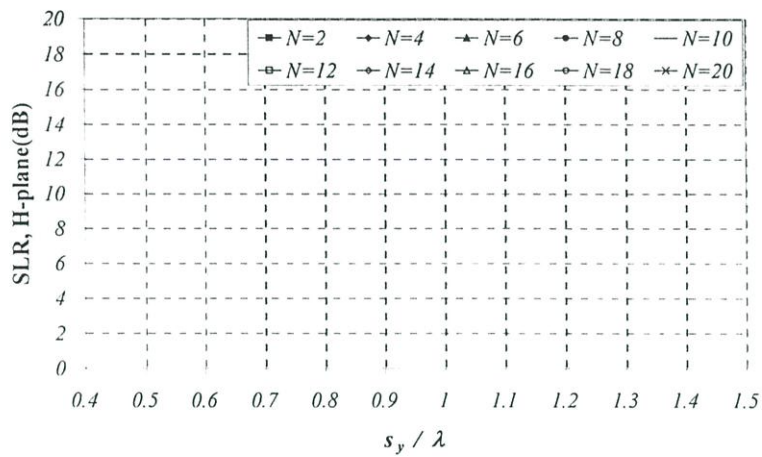


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.37 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$

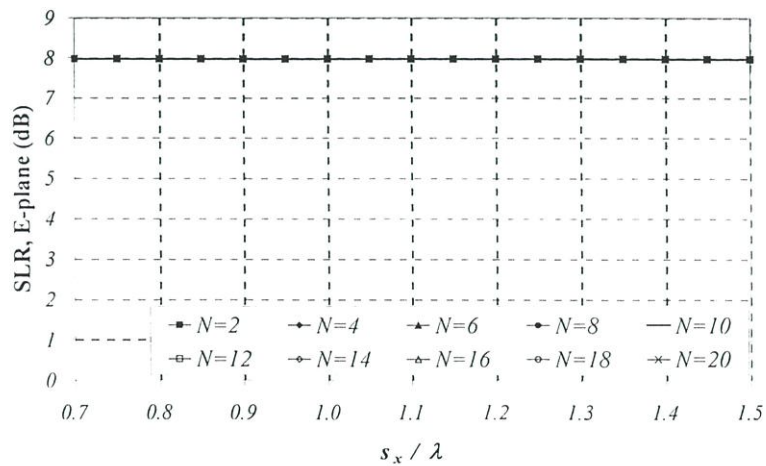


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

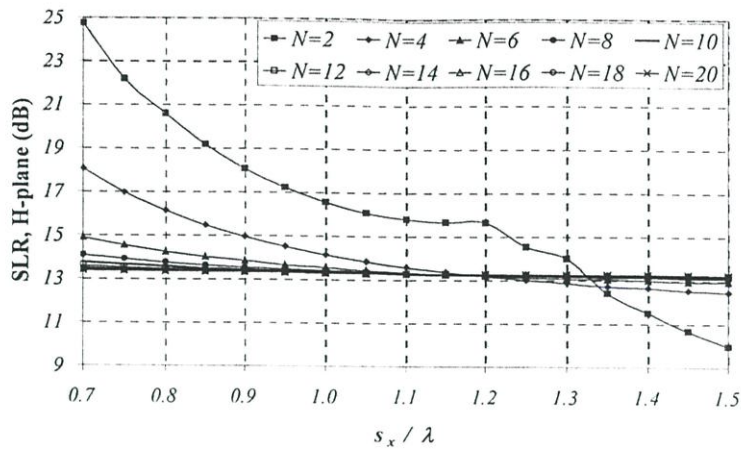


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.38 ค่าอัตราส่วนลอคคลื่นหลักต่อลอคคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$

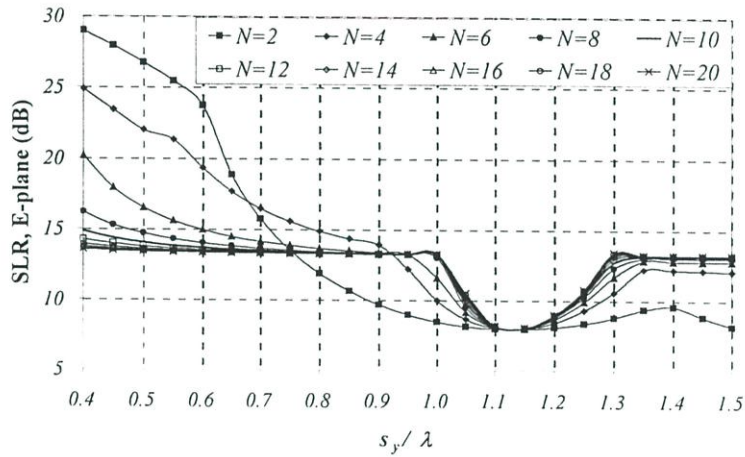


(ค) ระนาบสนามไฟฟ้า

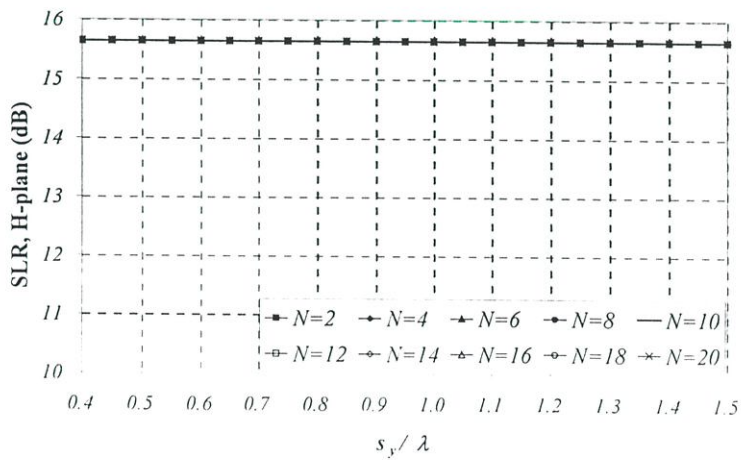


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.39 ค่าอัตราส่วนค่าคลื่นหลักต่อค่าคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$



(ค) ระนาบสนามไฟฟ้า



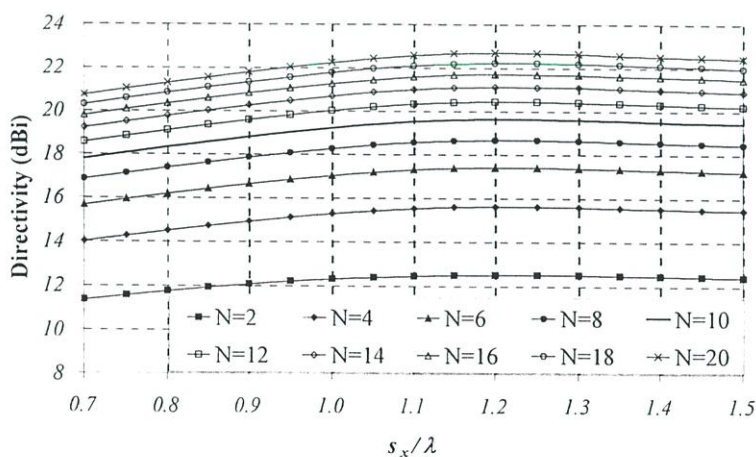
(ง) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 4.40 ค่าอัตราส่วนค่าคลื่นหลักต่อค่าคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.7\lambda$

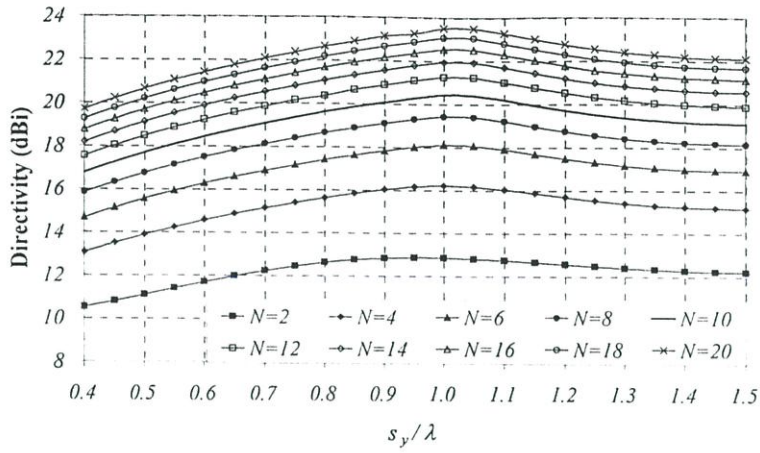
พบว่าสำหรับการจัดเรียงแบบแถวลำดับเชิงเส้นตามแกน x และ แกน y จะเกิดค่าคลื่นย่อยด้านข้างในระนาบสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามลำดับทั้งกรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ และยิ่งเพิ่มระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนคลื่นหลักต่อคลื่นย่อยด้านข้างยังมีแนวโน้มลดลงทั้งคู่ แต่ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของการจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแกน x และแกน y จะไม่เกิดคลื่นย่อยด้านข้างขึ้นเมื่อ h เท่ากับ 0.3λ แต่กรณีที่ h เท่ากับ 0.7λ จะมีค่าคงที่ที่ 7.89 dB ในระนาบสนามไฟฟ้า และ 15.64 dB ในระนาบสนามแม่เหล็กสำหรับการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ

4.3.1.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

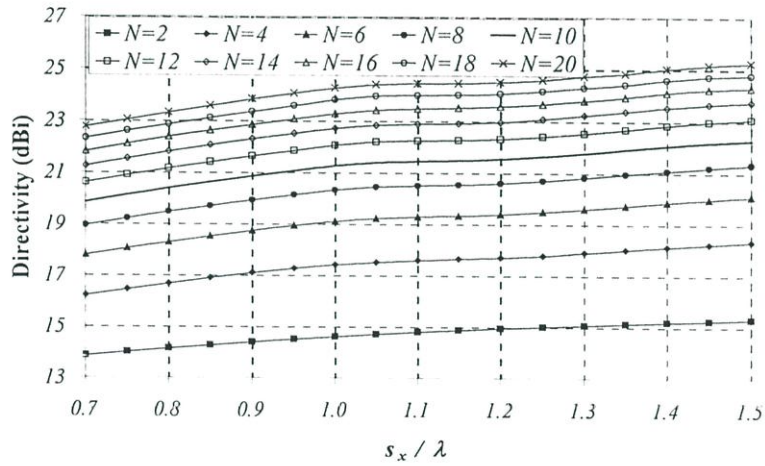
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลที่ได้จากการคำนวณหาค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศเมื่อนำองค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้น ซึ่งค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.341 จนถึงรูปที่ 4.44 ทั้งกรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงที่ระยะหนึ่งจากนั้นค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศจะเริ่มลดลง โดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะมีค่ามากที่สุดที่ระยะประมาณ 1.2λ และ λ เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน x และ แกน y ตามลำดับ สำหรับกรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ และเมื่อพิจารณาที่ h เท่ากับ 0.7λ พบว่าโดยค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะมีค่ามากที่สุดที่ระยะประมาณ 1.5λ ทั้งกรณีที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน x และ แกน y และเมื่อเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศจะยิ่งสูงขึ้น



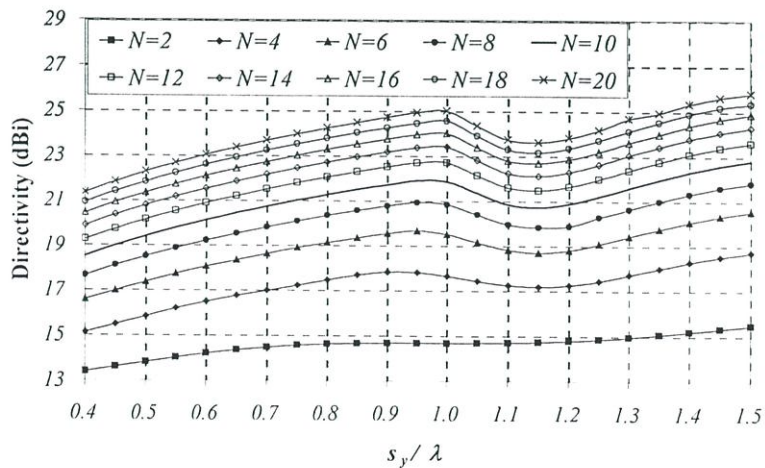
รูปที่ 4.41 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.3\lambda$



รูปที่ 4.42 ค่าสภาพเจาะงทิตทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.3\lambda$



รูปที่ 4.43 ค่าสภาพเจาะงทิตทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x เมื่อ $h = 0.7\lambda$

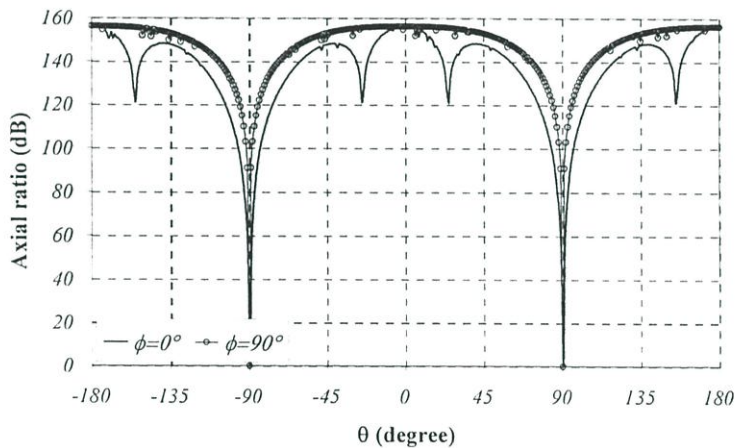


รูปที่ 4.44 ค่าสภาพเจาะงทิตทางของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างสายอากาศ ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y เมื่อ $h = 0.7\lambda$

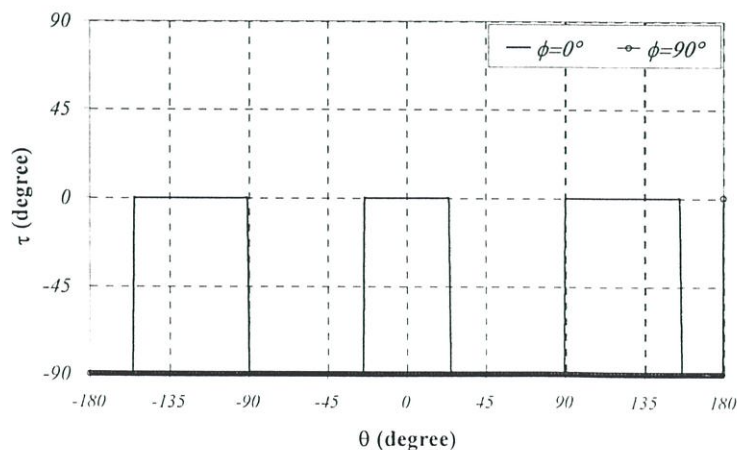
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นเหล่านี้ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับเป็นแนวทางในการจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.3.1.7 คุณลักษณะเชิงการโพลาริซชันของสายอากาศ

สำหรับคุณลักษณะเชิงการโพลาริซชันของสายอากาศ ซึ่งจะแสดงโดยค่าอัตราส่วนแกน และค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยจะพิจารณาทั้งจากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดแอติก และโปรแกรม NEC2 ในกรณีที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นต่างๆ ดังในรูปที่ 4.45 ถึงรูปที่ 4.47 แสดงค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ โดยคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดแอติก และใช้โปรแกรม NEC2 ตามลำดับ เมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเท่ากับ 0.3λ โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศเมื่อจัดเรียงตามแนวแกน x และ แกน y มีค่าเป็น 1.2λ และ 0.95λ ตามลำดับ

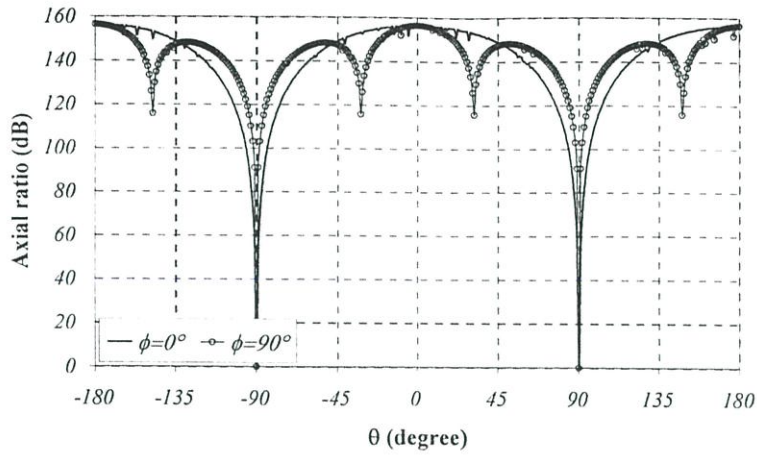


ค่าอัตราส่วนแกน

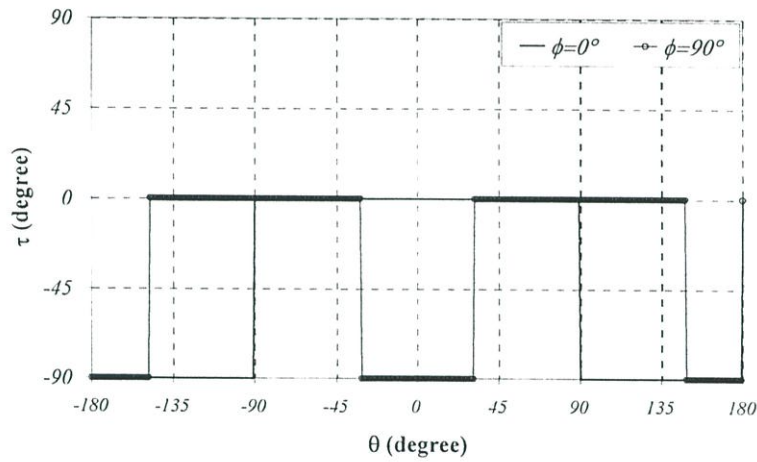


ค่ามุมเอียง

(ก) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x



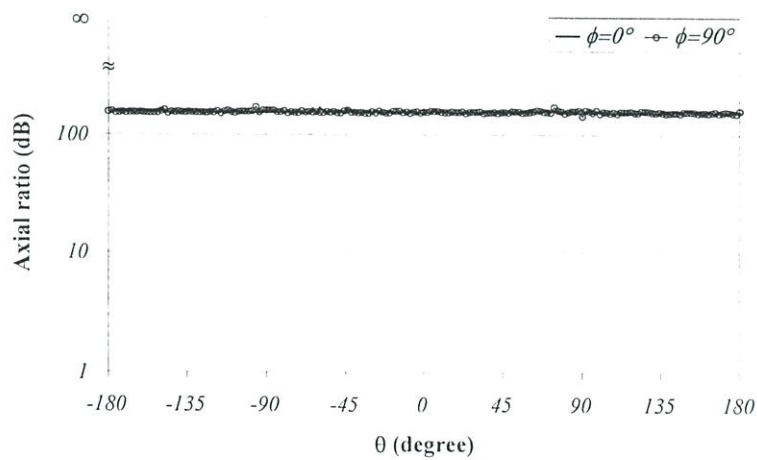
ค่าอัตราส่วนแกน



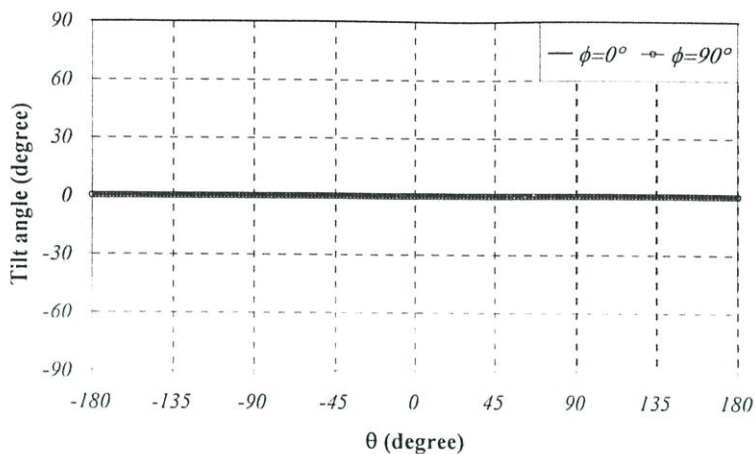
ค่ามุมเอียง

(ข) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y

รูปที่ 4.45 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.3\lambda$) โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์

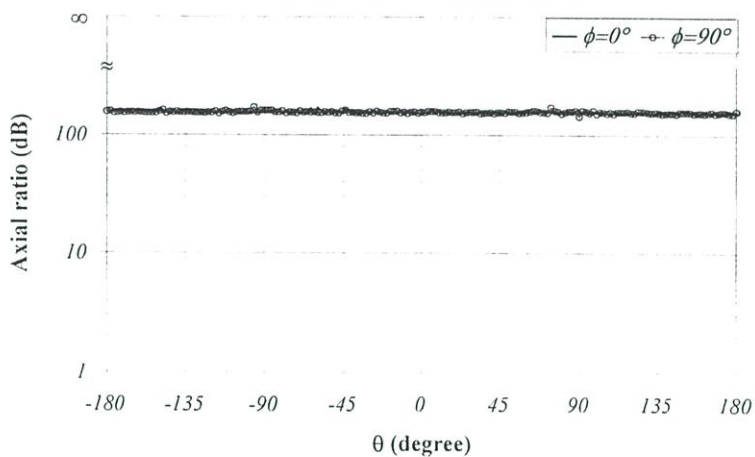


ค่าอัตราส่วนแกน

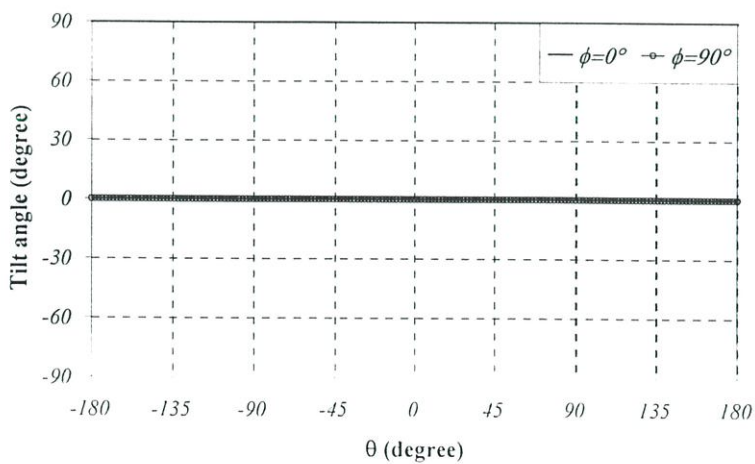


ค่ามุมเอียง

(ก) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x



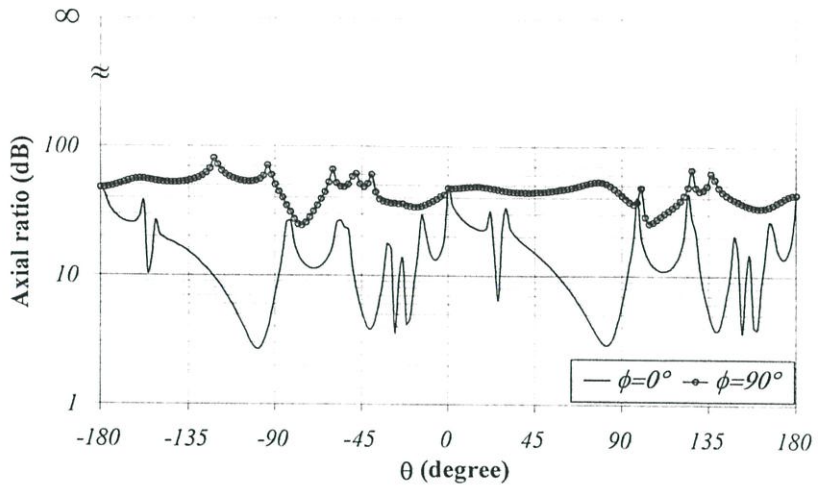
ค่าอัตราส่วนแกน



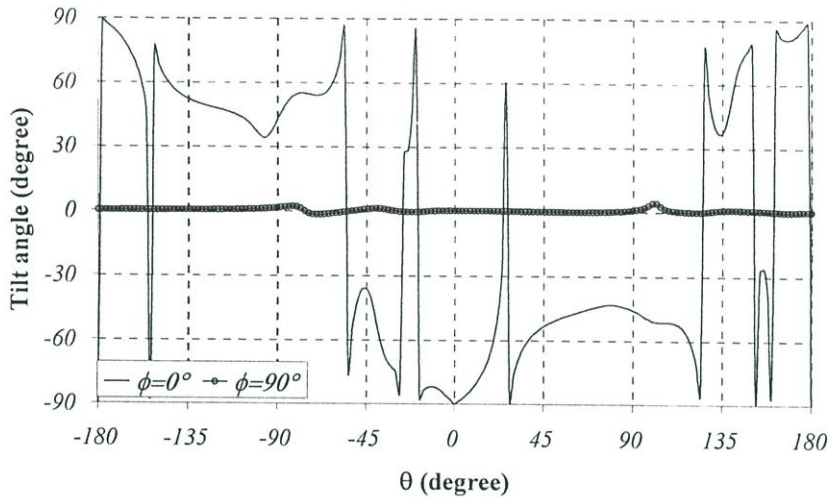
ค่ามุมเอียง

(ข) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y

รูปที่ 4.46 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.3\lambda$) โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก

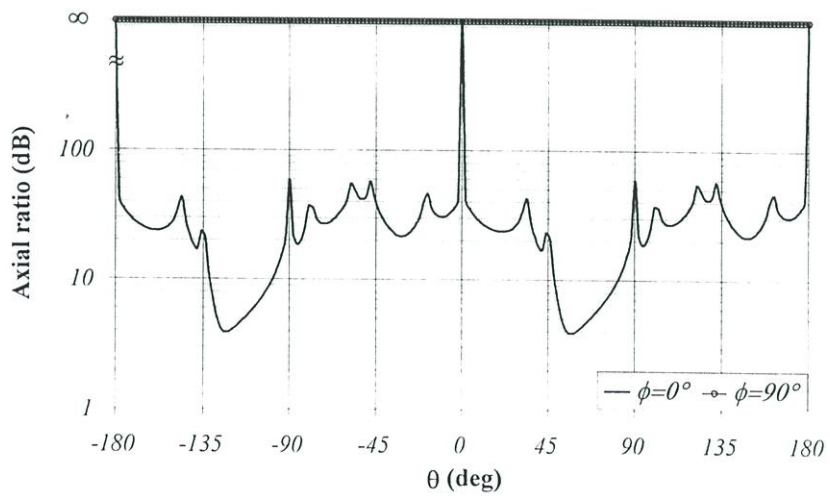


ค่าอัตราส่วนแกน

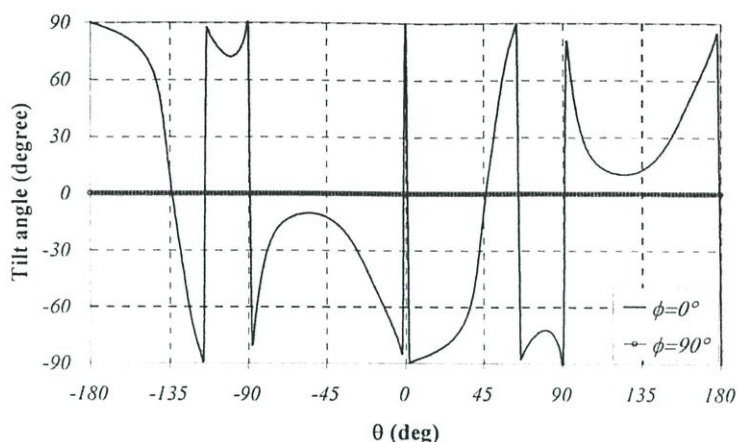


ค่ามุมเอียง

(ก) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x



ค่าอัตราส่วนแกน



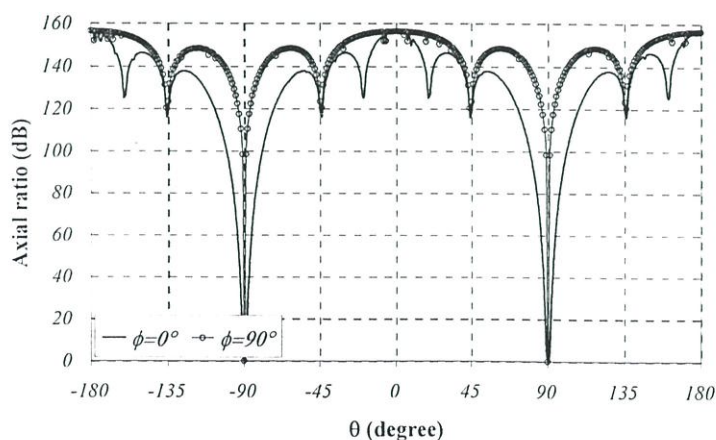
ค่ามุมเอียง

(ข) แกว่งลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y

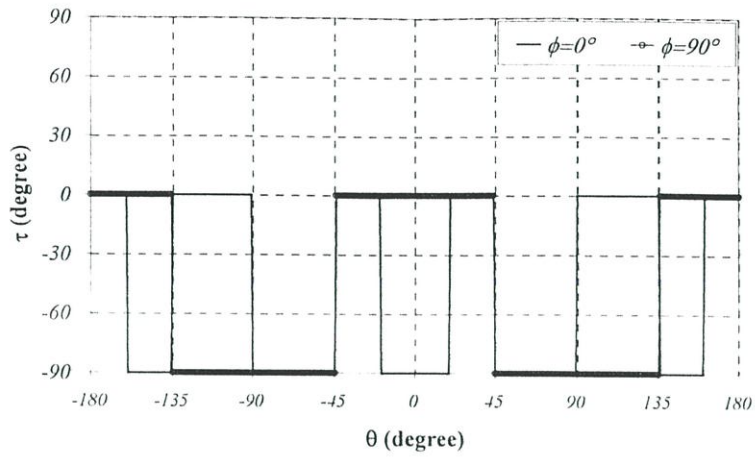
รูปที่ 4.47 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดั๋นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.3\lambda$) โดยใช้โปรแกรม NEC2

พบว่าเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งด้านหน้าของสายอากาศคือ ที่มุม $\theta = 0$ จะได้ว่าผลจากการคำนวณแต่ละวิธี นั้นมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนแกนมีแนวโน้มเข้าสู่ ∞ dB ในทุกกรณีที่จัดเรียงเป็นแกว่งลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน นั่นคือมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นนั่นเอง สำหรับลักษณะการเอียงของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของสายอากาศ พบว่าวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกและโปรแกรม NEC2 มีความสอดคล้องกัน นั่นคือ มีค่ามุมเอียงเป็น 0° และ 90° สำหรับที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ และ $\phi = 0^\circ$ โดยอ้างอิงจากสนามแนวตั้ง นั่นคือ สายอากาศนี้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนตามลำดับ แต่สำหรับวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์นั้น ค่ามุมเอียงจะตรงกันข้ามกับสองวิธีข้างต้น

นอกจากนี้ได้พิจารณากรณีทีระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเท่ากับ 0.7λ ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 4.48 ถึงรูปที่ 4.50

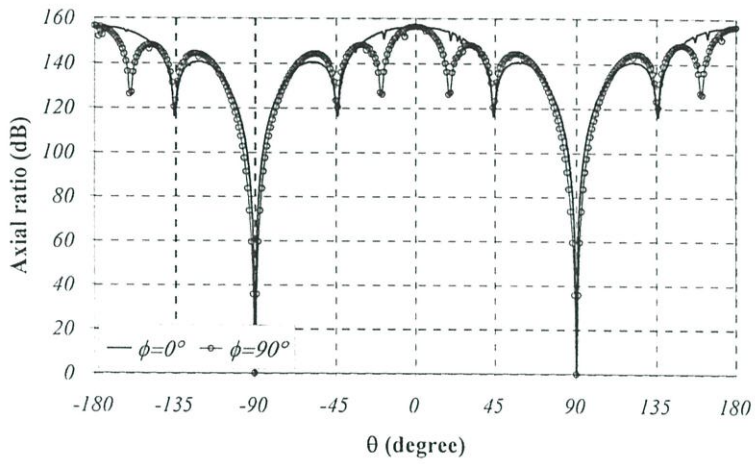


ค่าอัตราส่วนแกน

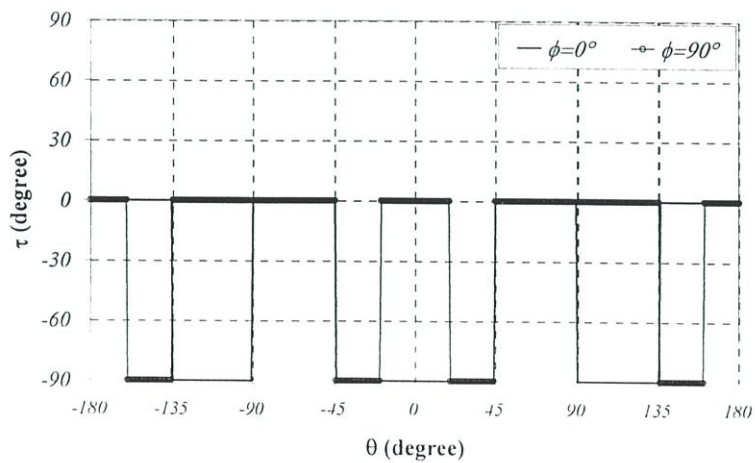


ค่ามุมเอียง

(ก) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x



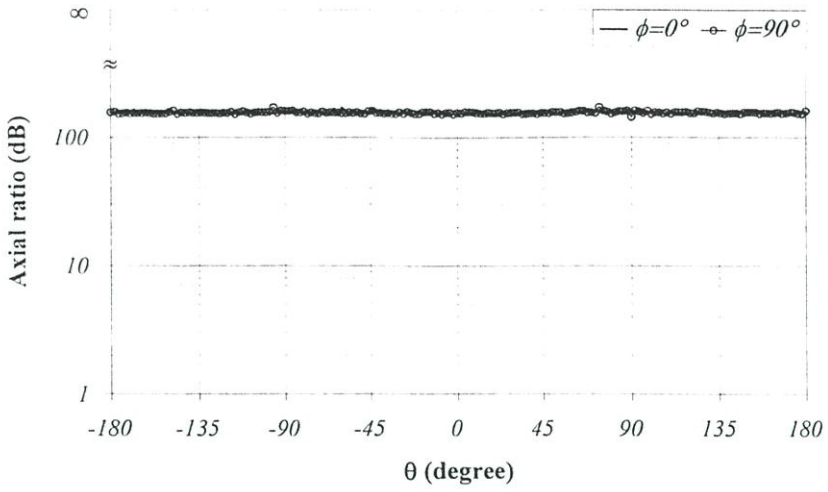
ค่าอัตราส่วนแกน



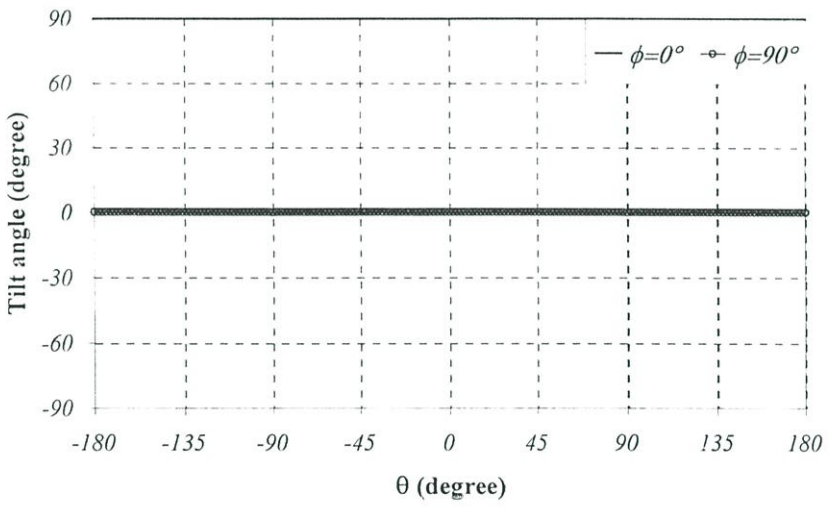
ค่ามุมเอียง

(ข) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y

รูปที่ 4.48 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.7\lambda$) โดยใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์

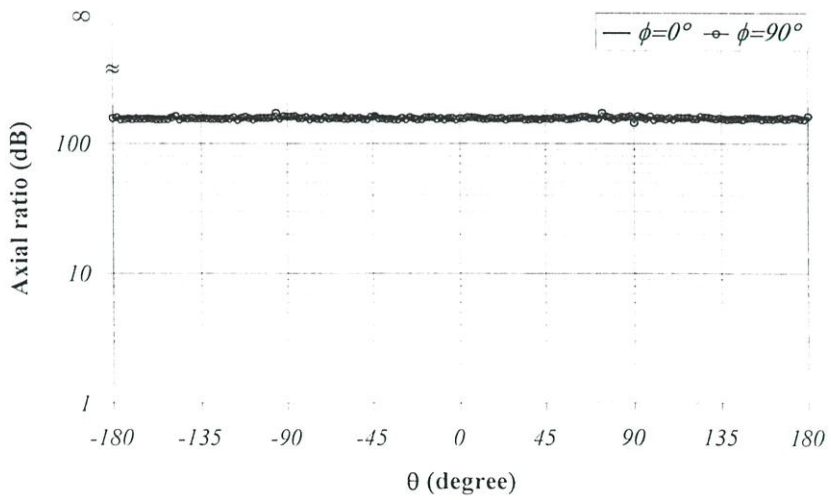


ค่าอัตราส่วนแกน

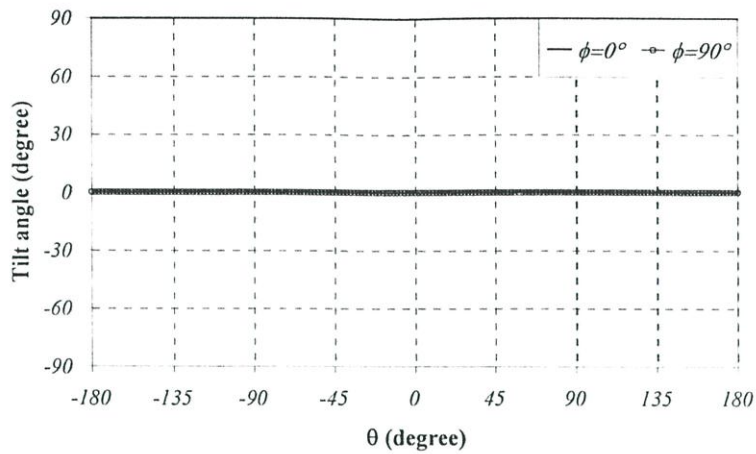


ค่ามุมเอียง

(ก) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x



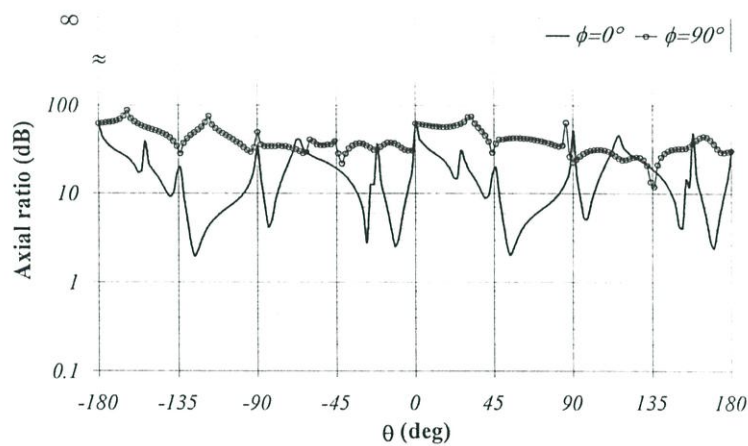
ค่าอัตราส่วนแกน



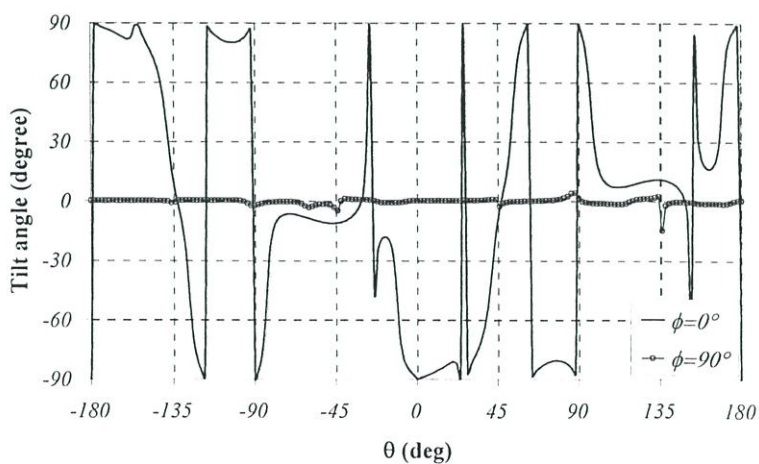
ค่ามุมเอียง

(ข) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y

รูปที่ 4.49 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.7\lambda$) โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก

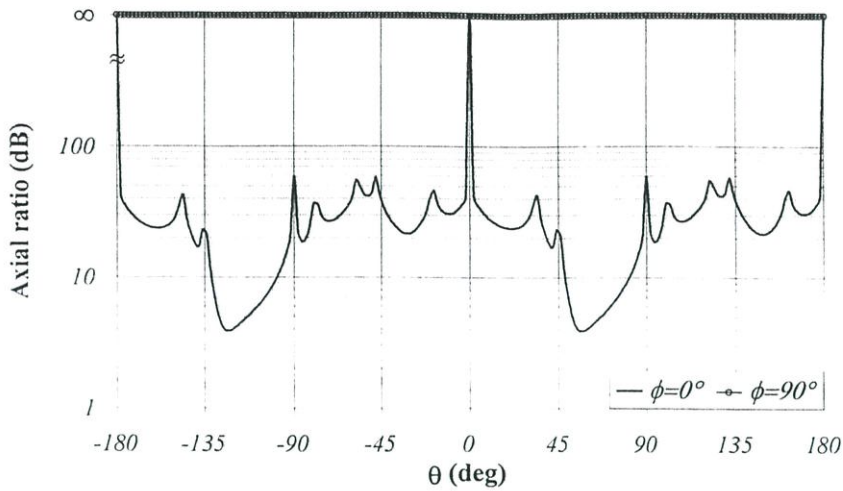


ค่าอัตราส่วนแกน

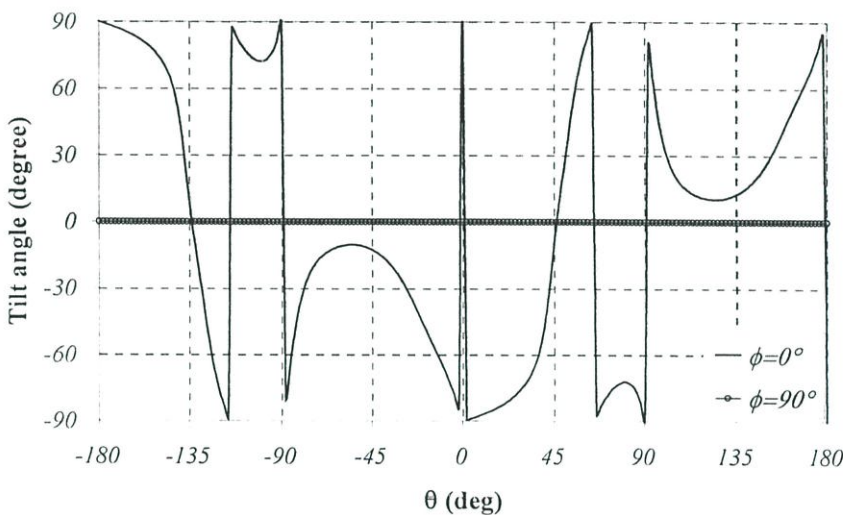


ค่ามุมเอียง

(ค) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x



ค่าอัตราส่วนแกน



ค่ามุมเอียง

(ข) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y

รูปที่ 4.50 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.7\lambda$) โดยใช้โปรแกรม NEC2

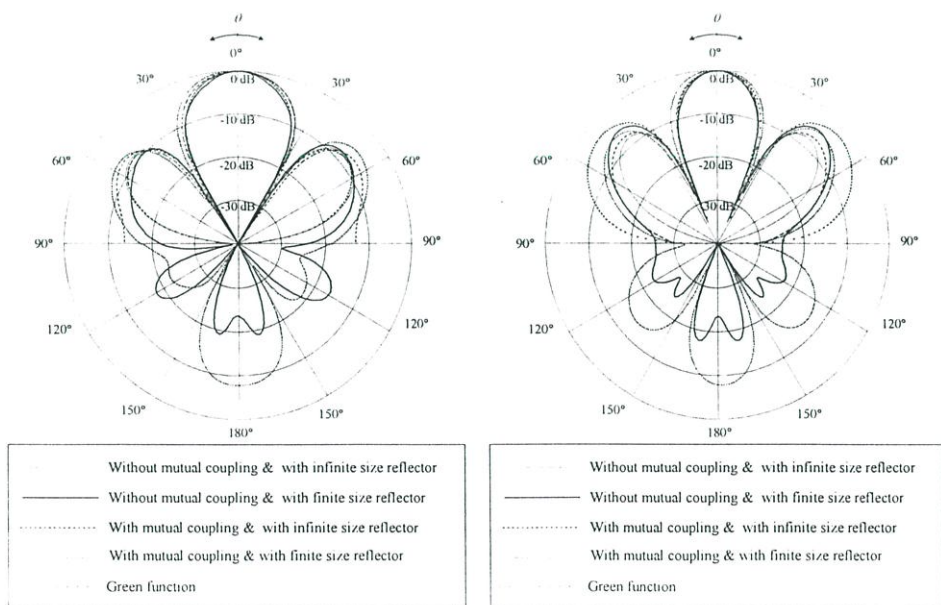
จากรูปพบว่าสายอากาศโพรบระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ นี้ มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้ง ในทุกกรณีที่มีการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x และตามแนวแกน y กล่าวคือ การคำนวณโดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก และโปรแกรม NEC2 จะให้ค่าอัตราส่วนแกนมีแนวโน้มเข้าสู่ ∞ dB และมีค่ามุมเอียงเป็น 0 และ 90 โดยอ้างอิงจากสนามแนวตั้งและแนวนอน สำหรับที่ตำแหน่ง $\phi = 90$ และ $\phi = 0$ ตามลำดับ เมื่อสังเกตจากด้านหน้าของสายอากาศ ซึ่งสอดคล้องกันทุกวิธี

4.3.2 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจัดเรียงสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากในลักษณะแถวลำดับเชิงระนาบ ซึ่งจะพิจารณาจากการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในหัวข้อ 4.3.1 เพื่อเลือกกรณีที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงในแต่ละลักษณะการจัดเรียงตามแนวแกน ซึ่งการจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาในระนาบ xy โดยคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศจะแสดงดังนี้

4.3.2.1 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

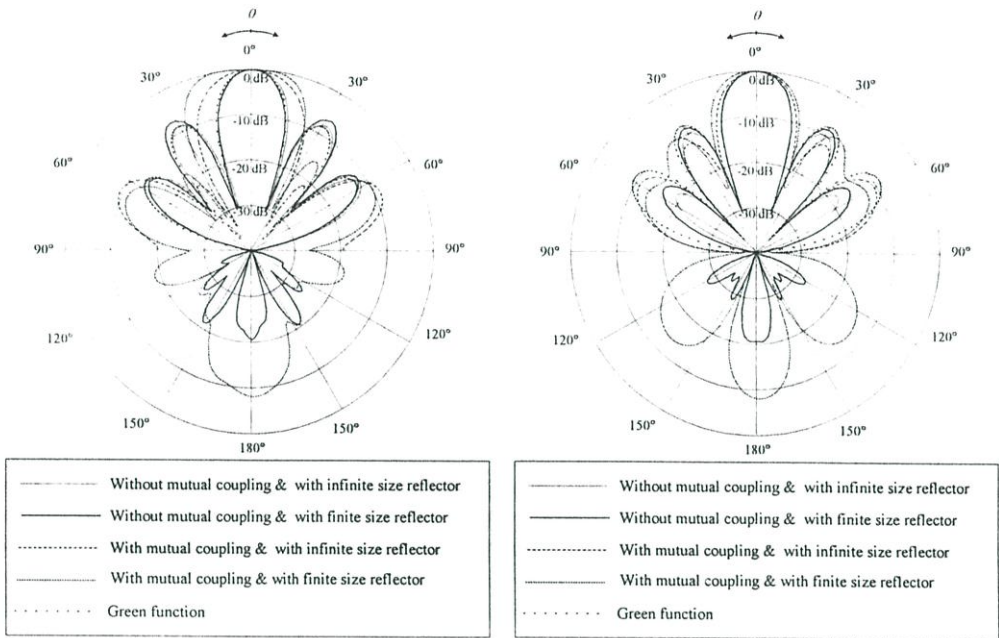
คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่จะพิจารณานี้จะเลือกพิจารณาที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดจากการพิจารณาในข้างต้น โดยที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศยังคงแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.51 ซึ่งเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบลักษณะ 2×2 ที่ h เท่ากับ 0.3λ มีระยะห่างระหว่างสายอากาศตามแนวแกน x เท่ากับ 1.2λ และระยะห่างระหว่างสายอากาศตามแนวแกน y เท่ากับ 0.95λ และสำหรับกรณีที่ h เท่ากับ 0.7λ โดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศตามแนวแกน x และตามแนวแกน y เท่ากับ 1.5λ ดังแสดงในรูปที่ 4.52 จากรูปพบว่า การคำนวณในแต่ละวิธีมีความสอดคล้องกัน และสามารถอธิบายแยกเป็นสองส่วนดังนี้



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4.51 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.3\lambda$)



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4.52 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแฉวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ๋นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ($h = 0.7\lambda$)

ส่วนแรก กรณีที่พิจารณาให้ตัวสะท้อนมีขนาดอนันต์ คือ วิธีที่คำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ ซึ่งวิธีนี้ไม่พิจารณาผลของการเชื่อมต่อทั้งจากช่องเปิดทั้งสองด้านและการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบของแฉวลำดับ (Without mutual coupling and with infinite size reflector) วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก ซึ่งไม่พิจารณาการเชื่อมต่อทั้งจากช่องเปิดทั้งสองด้าน (รวมผลจากโพรบร่วมด้วย) และการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบของแฉวลำดับ และผลจากโปรแกรม NEC2 ที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแฉวลำดับด้วย (With mutual coupling and with infinite size reflector) พบว่าทุกวิธีจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีค่าความกว้างของลำคลื่นหลักใกล้เคียงกันมากทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แต่ค่าลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เกิดขึ้นเมื่อคำนวณจากโปรแกรม NEC2 จะมีระดับสูงกว่าวิธีอื่นในระนาบสนามไฟฟ้า ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นพบว่าวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างสูงกว่ากรณีอื่นๆ นอกจากนี้พบว่าค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศจากการคำนวณโดย NEC2 มีค่ากว้างที่สุดเมื่อพิจารณาลำคลื่นหลัก และเมื่อพิจารณาให้ขนาดของตัวสะท้อนเป็นอนันต์จะไม่เกิดลำคลื่นย่อยด้านหลังขึ้นเลย แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใช้สายอากาศที่มีตัวสะท้อนขนาดจำกัด ดังนั้น ในส่วนที่สองที่พิจารณาคือ ตัวสะท้อนที่มีขนาดจำกัด ซึ่งจะพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด แต่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบ (Without mutual coupling and with finite size reflector) โดยนำการคำนวณองค์ประกอบเดี่ยวจาก NEC2 คู่กับตัวประกอบแฉวลำดับ เปรียบเทียบกับกรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดและการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบ (With mutual coupling

and with finite size reflector) จาก NEC2 พบว่ากรณีที่ไม่พิจารณาผลจากการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีความกว้างลำคลื่นที่แคบกว่า และมีระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างและลำคลื่นย่อยด้านหลังที่ต่ำกว่ากรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแล้ว ลำดับทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้ได้ข้อสังเกตคือ การคำนวณที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบจะมีผลต่อความกว้างของลำคลื่น กล่าวคือ จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีความกว้างของลำคลื่นหลักกว้างกว่ากรณีที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบ ส่วนขนาดของตัวสะท้อนจะมีผลอย่างมากต่อระดับของลำคลื่นย่อยด้านหลัง (จากหัวข้อ 4.3.1 พบว่าระดับของลำคลื่นย่อยด้านหลังของกรณีที่พิจารณาและไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแล้วลำดับ โดยกำหนดขนาดตัวสะท้อนมีขนาดจำกัด จะพบว่าระดับของลำคลื่นย่อยด้านหลังมีค่าใกล้เคียงกัน แต่หัวข้อนี้แตกต่างกันมากทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความละเอียดของการสร้างตัวสะท้อนมีน้อยกว่า เพราะในหัวข้อนี้ต้องใช้จำนวนเซลล์มากกว่าและ NEC2 มีข้อจำกัดเรื่องจำนวนเซลล์) การคำนวณในแต่ละวิธีนี้จะนำไปพิจารณาอีกครั้งในบทต่อไป เพื่อเปรียบเทียบกับทดสอบสายอากาศซึ่งจะกล่าวต่อไป

สำหรับค่าสภาพเงาเชิงทิศทางของสายอากาศ และคุณลักษณะอื่นๆ ของสายอากาศ ได้แก่ ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เมื่อเพิ่มจำนวนองค์ประกอบแล้วลำดับที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ดีที่สุดในการจัดเรียงแต่ละแนวแกน สำหรับ h เท่ากับ 0.3λ (ไม่มีลำคลื่นย่อยด้านข้าง) และ 0.7λ (ให้ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางสูงที่สุด) ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 ตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางของสายอากาศแล้วลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.3λ

N	dx/λ	dy/λ	Directivity (dBi)	N	dx/λ	dy/λ	Directivity (dBi)
2	1.2	0.95	16.00	11	1.2	1	31.62
3	1.2	1	19.78	12	1.2	1	32.39
4	1.2	1	22.44	13	1.2	1	33.13
5	1.2	1	24.49	14	1.2	1	33.76
6	1.2	1	26.16	15	1.2	1	34.44
7	1.2	1	27.56	16	1.2	1	34.90
8	1.2	1	28.77	17	1.2	1	35.42
9	1.2	1	29.83	18	1.2	1	36.10
10	1.2	1	30.78	19	1.2	1	36.61
				20	1.2	1	36.92

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบ
กระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.3λ ในระนาบ
สนามไฟฟ้า

N	dx/λ	dy/λ	θ_{\max} (deg)	HPBW (deg)	FNBW (deg)	SLR (dB)
2	1.2	0.95	0	29.63	63.52	8.11
3	1.2	1	0	17.69	38.96	10.09
4	1.2	1	0	13.01	28.96	11.75
5	1.2	1	0	10.31	23.08	12.29
6	1.2	1	0	8.55	19.2	12.59
7	1.2	1	0	7.31	16.44	12.77
8	1.2	1	0	6.38	14.36	12.88
9	1.2	1	0	5.63	12.76	12.96
10	1.2	1	0	5.10	11.48	13.02
11	1.2	1	0	4.63	10.44	13.06
12	1.2	1	0	4.24	9.56	13.09
13	1.2	1	0	3.94	8.84	13.12
14	1.2	1	0	3.63	8.20	13.14
15	1.2	1	0	3.39	7.64	13.16
16	1.2	1	0	3.18	7.16	13.17
17	1.2	1	0	2.95	6.76	13.18
18	1.2	1	0	2.82	6.36	13.19
19	1.2	1	0	2.67	6.04	13.20
20	1.2	1	0	2.54	5.72	13.20

ตารางที่ 4.3 สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบ กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.3λ ในระนาบ สนามแม่เหล็ก

N	dx/λ	dy/λ	θ_{\max} (deg)	HPBW (deg)	FNBW (deg)	SLR (dB)
2	1.2	0.95	0	22.71	49.24	7.96
3	1.2	1	0	14.54	32.24	10.02
4	1.2	1	0	10.76	24.08	11.08
5	1.2	1	0	8.55	19.20	11.71
6	1.2	1	0	7.10	16.00	12.11
7	1.2	1	0	6.08	13.68	12.39
8	1.2	1	0	5.31	11.92	12.58
9	1.2	1	0	4.72	10.64	12.73
10	1.2	1	0	4.25	9.60	12.81
11	1.2	1	0	3.85	8.72	12.90
12	1.2	1	0	3.53	8.00	13.00
13	1.2	1	0	3.26	7.36	13.09
14	1.2	1	0	3.03	6.80	13.10
15	1.2	1	0	2.82	6.40	13.11
16	1.2	1	0	2.65	6.00	13.12
17	1.2	1	0	2.49	5.60	13.13
18	1.2	1	0	2.35	5.28	13.15
19	1.2	1	0	2.23	5.04	13.16
20	1.2	1	0	2.12	4.80	13.18

จากตารางพบว่า กรณีที่ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนและสายอากาศเท่ากับ 0.3λ เมื่อจำนวนองค์ประกอบแถวลำดับเปลี่ยนไป ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวแกน x จะมีค่าเหมาะสมประมาณ 1.2λ ส่วนระยะห่างที่เหมาะสมตามแนวแกน y จะเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0.95λ และ λ และเมื่อจำนวนองค์ประกอบแถวลำดับมากขึ้นลักษณะความกว้างลำคลื่นจะแคบลงและอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างมากขึ้นด้วย นอกจากนี้พบว่าค่าสภาพเงาเชิงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศเพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับ h เท่ากับ 0.7λ ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศ และคุณลักษณะอื่นๆ ของสายอากาศ ได้แก่ ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เมื่อเพิ่มจำนวนแถวลำดับที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ดีที่สุดในการจัดเรียงแต่ละแนวแกน ได้สรุปไว้ในตารางที่ 4.4 ตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ตามลำดับ ดังนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.7λ

N	dx/λ	dy/λ	Directivity (dBi)		N	dx/λ	dy/λ	Directivity (dBi)
2	1.5	1.5	18.47		11	1.5	1.5	33.39
3	1.5	1.5	22.14		12	1.5	1.5	34.26
4	1.5	1.5	24.65		13	1.5	1.5	34.72
5	1.5	1.5	26.60		14	1.5	1.5	35.53
6	1.5	1.5	28.18		15	1.5	1.5	36.26
7	1.5	1.5	29.51		16	1.5	1.5	36.71
8	1.5	1.5	30.66		17	1.5	1.5	37.04
9	1.5	1.5	31.68		18	1.5	1.5	37.43
10	1.5	1.5	32.60		19	1.5	1.5	37.93
					20	1.5	1.5	38.53

ตารางที่ 4.5 สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบ กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.7λ ในระนาบ สนามไฟฟ้า

N	dx/λ	dy/λ	θ_{\max} (deg)	HPBW (deg)	FNBW (deg)	SLR (dB)
2	1.5	1.5	0	18.29	38.96	8.17
3	1.5	1.5	0	11.66	25.62	10.98
4	1.5	1.5	0	8.62	19.18	12.07
5	1.5	1.5	0	6.85	15.27	12.50
6	1.5	1.5	0	5.69	12.74	12.74
7	1.5	1.5	0	4.86	10.90	12.88
8	1.5	1.5	0	4.25	9.52	12.97
9	1.5	1.5	0	3.77	8.60	13.03
10	1.5	1.5	0	3.39	7.68	13.08
11	1.5	1.5	0	3.08	6.99	13.11
12	1.5	1.5	0	2.83	6.30	13.14
13	1.5	1.5	0	2.61	5.84	13.15
14	1.5	1.5	0	2.42	5.38	13.18
15	1.5	1.5	0	2.26	5.15	13.19
16	1.5	1.5	0	2.12	4.69	13.20
17	1.5	1.5	0	1.99	4.46	13.20
18	1.5	1.5	0	1.88	4.23	13.20
19	1.5	1.5	0	1.78	3.96	13.21
20	1.5	1.5	0	1.69	3.75	13.21

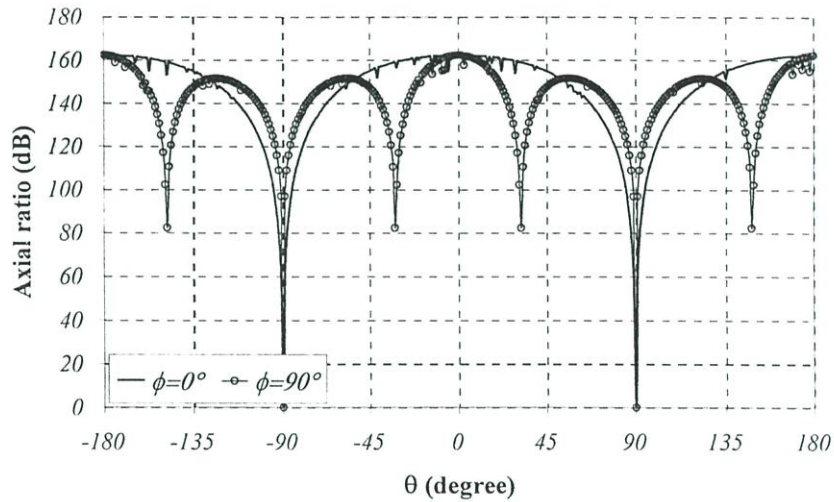
ตารางที่ 4.6 สรุปคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบ กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนที่ h เท่ากับ 0.7λ ในระนาบ สนามแม่เหล็ก

N	dx/λ	dy/λ	θ_{\max} (deg)	HPBW (deg)	FNBW (deg)	SLR (dB)
2	1.5	1.5	0	17.85	38.96	9.99
3	1.5	1.5	0	11.55	25.62	11.84
4	1.5	1.5	0	8.57	19.18	12.46
5	1.5	1.5	0	6.82	15.27	12.75
6	1.5	1.5	0	5.67	12.74	12.91
7	1.5	1.5	0	4.86	10.90	13.00
8	1.5	1.5	0	4.24	9.52	13.06
9	1.5	1.5	0	3.77	8.60	13.11
10	1.5	1.5	0	3.39	7.68	13.13
11	1.5	1.5	0	3.08	6.99	13.15
12	1.5	1.5	0	2.82	6.30	13.17
13	1.5	1.5	0	2.61	5.84	13.19
14	1.5	1.5	0	2.42	5.42	13.21
15	1.5	1.5	0	2.26	5.15	13.21
16	1.5	1.5	0	2.12	4.69	13.22
17	1.5	1.5	0	1.99	4.46	13.24
18	1.5	1.5	0	1.88	4.23	13.22
19	1.5	1.5	0	1.78	4.00	13.24
20	1.5	1.5	0	1.69	3.77	13.25

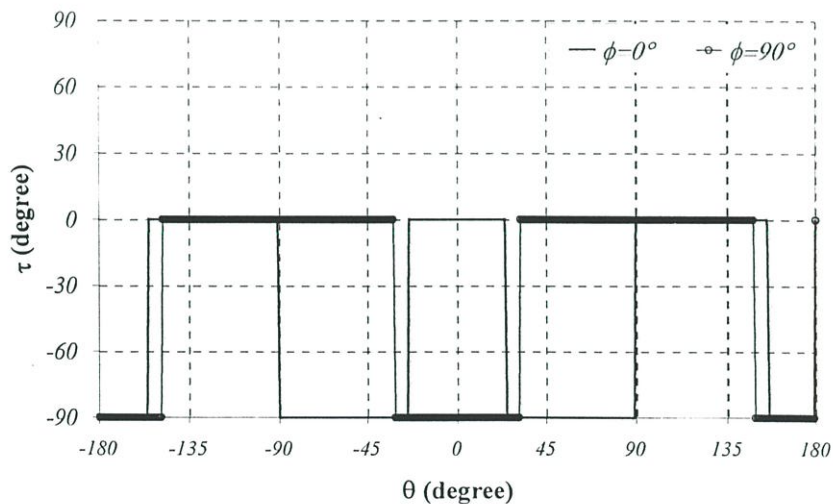
ในทำนองเดียวกัน กรณีที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเท่ากับ 0.7λ พบว่าเมื่อจำนวนองค์ประกอบแถวลำดับเปลี่ยนไป ระยะห่างระหว่างสายอากาศในแนวแกน x และตามแนวแกน y จะมีค่าเหมาะสมประมาณ 1.5λ และพบว่าเมื่อจำนวนแถวลำดับมากขึ้นลักษณะความกว้างลำคลื่นจะแคบลงและอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างมากขึ้น สำหรับค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศเพิ่มขึ้นด้วย

4.3.2.2 คุณสมบัติเชิงการโพลาไรซ์

สำหรับคุณสมบัติเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ ซึ่งจะแสดงโดยค่าอัตราส่วนแกน และ ค่ามุมเอียงของสายอากาศ โดยคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก และ โปรแกรม NEC2 ในกรณีที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.53 ถึงรูปที่ 4.55 เป็นคุณสมบัติเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ โดยคำนวณจากวิธี ฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก และ โปรแกรม NEC2 ตามลำดับ

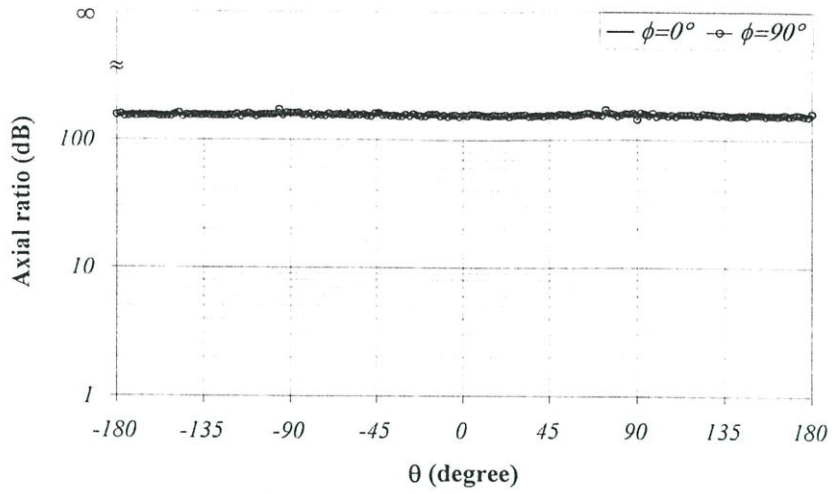


(ก) ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ

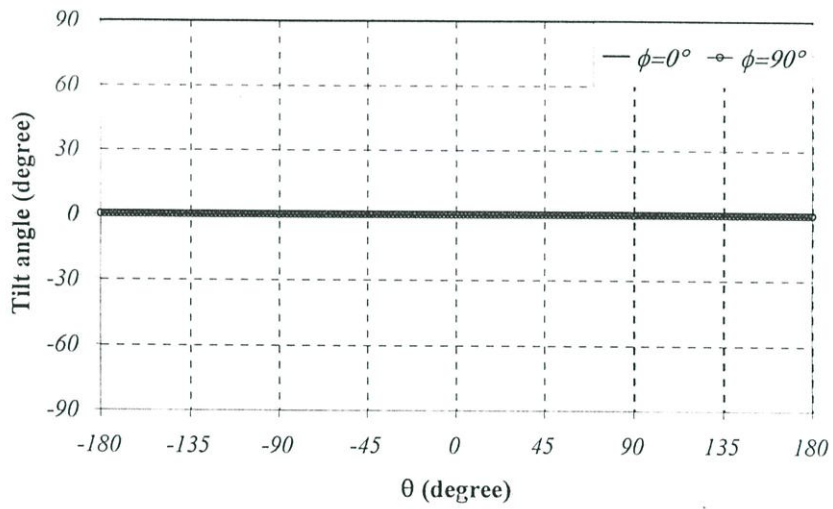


(ข) ค่ามุมเอียงจากแกนอ้างอิง

รูปที่ 4.53 คุณสมบัติเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ โดยคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์

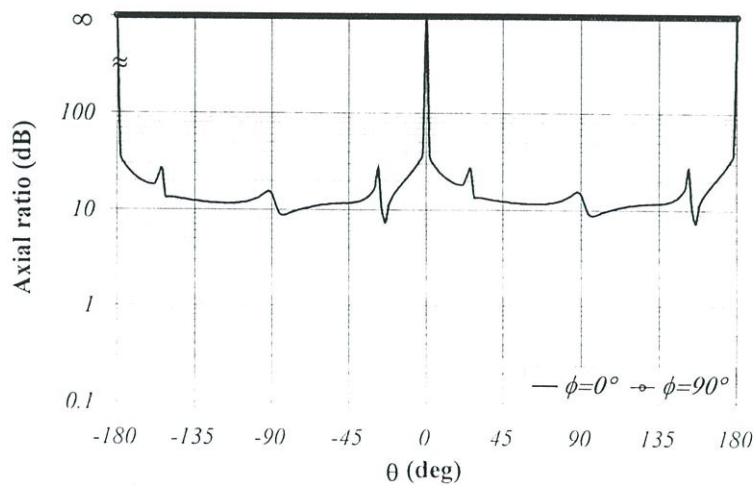


(ก) ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ

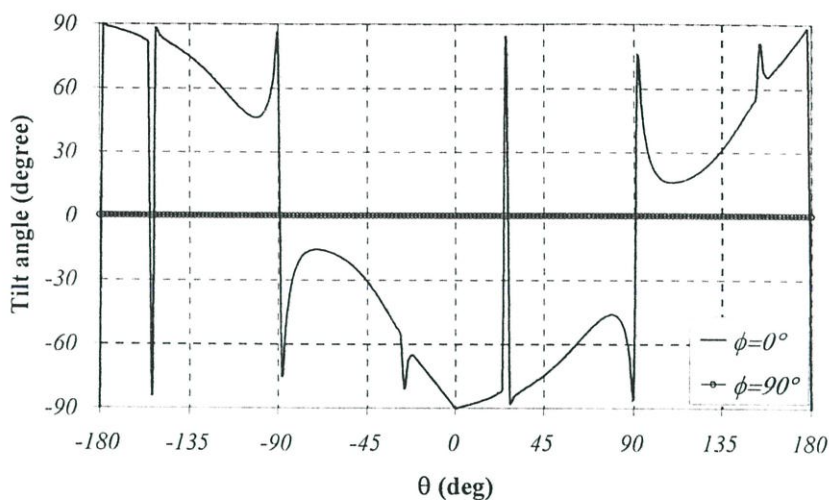


(ข) ค่ามุมเอียงจากแกนอ้างอิง

รูปที่ 4.54 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ โดยคำนวณจากวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก



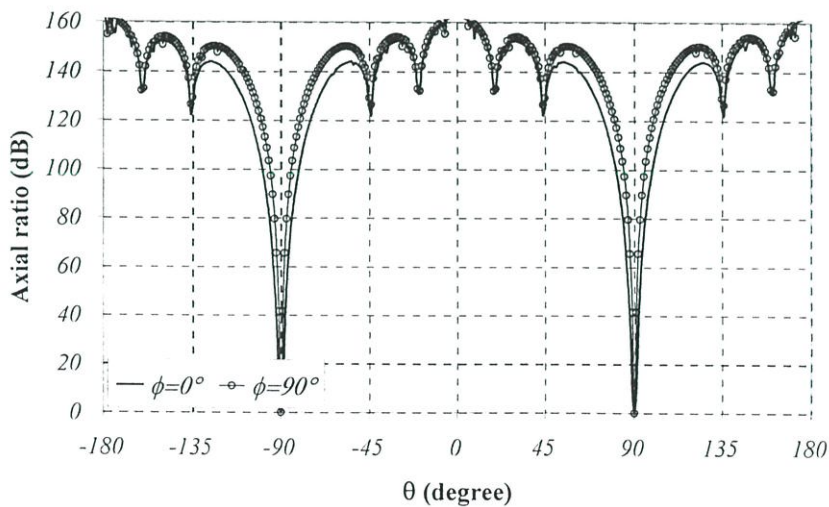
(ค) ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ



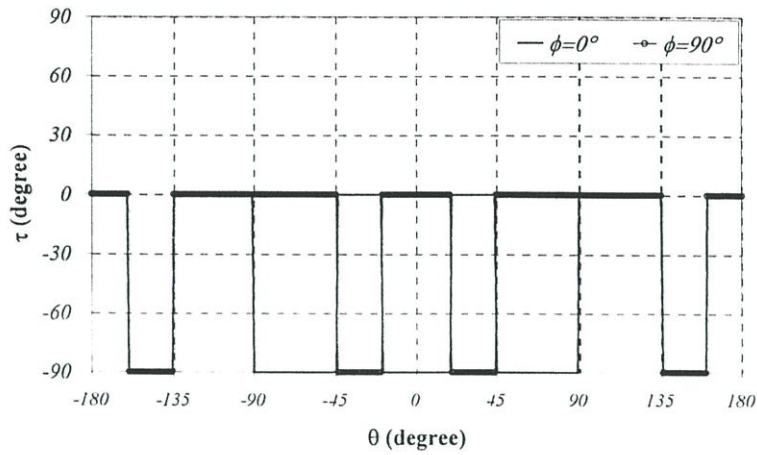
(ข) ค่ามุมเอียงจากแกนอ้างอิง

รูปที่ 4.55 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2

ในรูปที่ 4.56 ถึงรูปที่ 4.58 แสดงคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ โดยคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก และใช้โปรแกรม NEC2 ตามลำดับ โดยจะแสดงคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศด้วย ค่าอัตราแกนและค่ามุมเอียงจากแกนอ้างอิงของสายอากาศ ดังนี้

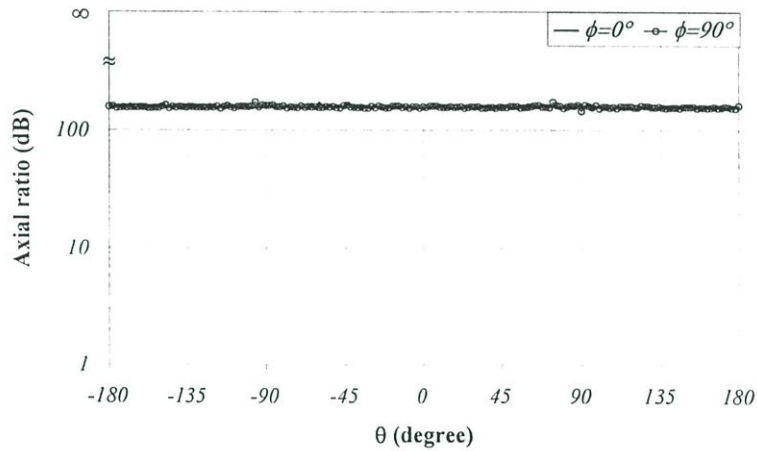


(ก) ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ

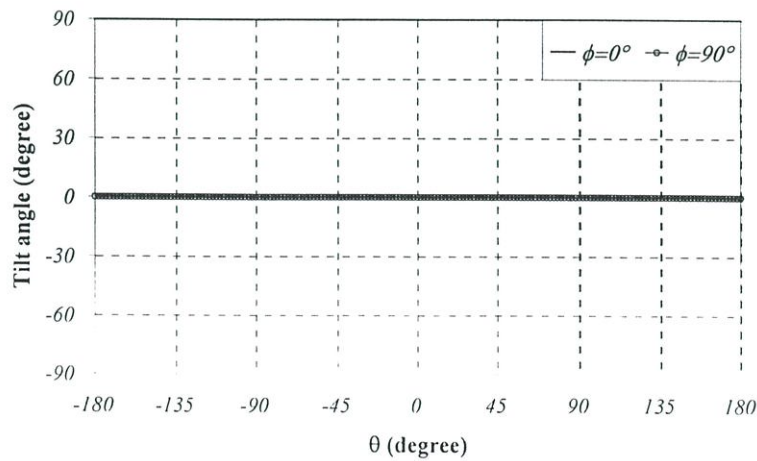


(ข) ค่ามุมเอียงจากแกนอ้างอิง

รูปที่ 4.56 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระดุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ โดยคำนวณจากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์

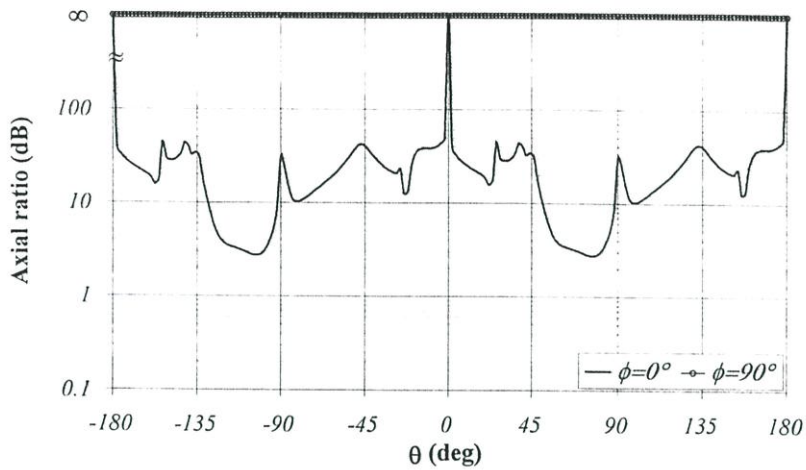


(ก) ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ

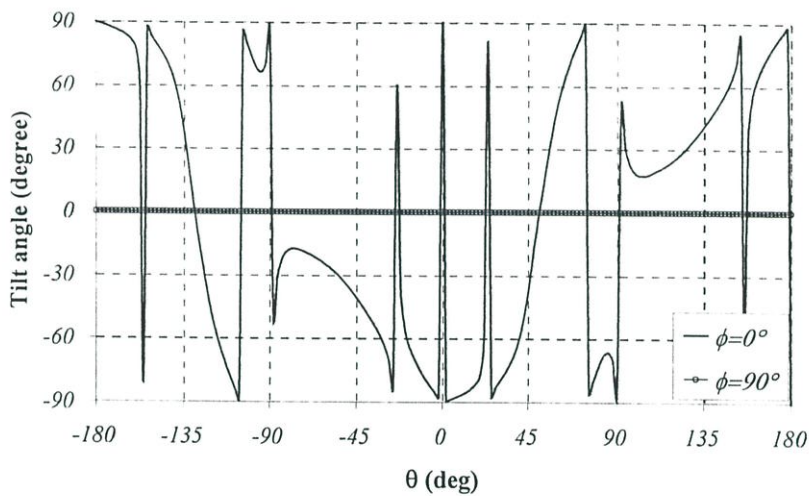


(ข) ค่ามุมเอียงจากแกนอ้างอิง

รูปที่ 4.57 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระดุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ โดยคำนวณจากวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก



(ก) ค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศ



(ข) ค่ามุมเอียงจากแกนอ้างอิง

รูปที่ 4.58 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ โดยคำนวณจากโปรแกรม NEC2

พบว่าเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งด้านหน้าของสายอากาศคือ ที่มุม $\theta = 0^\circ$ จะได้ว่าทั้งผลที่ได้จากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ ฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และใช้โปรแกรม NEC2 นั้นค่าอัตราส่วนแกนมีความสอดคล้องกันคือ ค่าอัตราส่วนแกนมีแนวโน้มเข้าสู่ ∞ dB หรือมีค่าสูงมากในทุกกรณีที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ นั่นคือ การโพลาไรซ์มีแนวโน้มเป็นแบบเชิงเส้นมากนั่นเอง สำหรับลักษณะการเอียงของการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าของสายอากาศนั้น พบว่ากรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ มีความสอดคล้องกันระหว่างผลที่ได้จากวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และโปรแกรม NEC2 คือ มีค่ามุมเอียงเป็น 0 และ 90 สำหรับที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ และ $\phi = 0^\circ$ โดยอ้างอิงจากสนามแนวตั้ง แสดงว่าสายอากาศนี้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้นแนวตั้งและแนวนอนที่ตำแหน่งดังกล่าวนั่นเอง แต่สำหรับผลที่ได้จากวิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์นั้น ค่ามุมเอียงจะตรงกันข้ามกับวิธีอื่น แต่สำหรับกรณีที่ h เท่ากับ 0.7λ พบว่าการคำนวณทุกวิธีมีความสอดคล้องกัน และให้การโพลาไรซ์เป็นแบบ

เชิงเส้น กล่าวคือ ค่าอัตราส่วนแกนมีค่ามากๆ เข้าสู่ ∞ dB ขณะที่ค่ามุมเอียงเมื่อสังเกตจากด้านหน้าของสายอากาศมีค่ามุมเอียงเป็น 0° และ 90° โดยอ้างอิงจากสนามแนวตั้ง จะเป็นแบบแนวตั้งและแนวนอนตามลำดับ

4.4 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน โดยคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศ ในการพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศจะเริ่มจากกรณีองค์ประกอบเดี่ยวก่อน เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวที่มีค่าอัตราขยายที่สูง และพบว่าที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเท่ากับ 0.7λ จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงที่สุดที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว แต่มีลำคลื่นย่อยด้านข้างเกิดขึ้นด้วย ขณะที่ตำแหน่ง h เท่ากับ 0.3λ แม้ว่าจะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ต่ำกว่าบ้าง แต่ที่ตำแหน่งนี้จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเช่นกัน โดยไม่เกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างขึ้น ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาที่ระยะห่างทั้งสองควบคู่กันตลอด

จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อกำหนดให้ตัวสะท้อนมีขนาดอนันต์นั้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าจะมีค่าเกือบเท่ากันทุกวิธี (ทั้งกรณีทีพิจารณาและไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองด้านของสายอากาศ) สำหรับในระนาบสนามแม่เหล็กนั้นพบว่าทุกวิธีจะมีแนวโน้มเหมือนกัน แต่จะมีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือ กรณีที่ไม่เกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างขึ้น (h มีค่าน้อยๆ) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดคำนวณด้วยโปรแกรม NEC2 จะมีค่าความกว้างลำคลื่นอยู่ระหว่างวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก โดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์จะได้ค่าความกว้างของลำคลื่นแคบที่สุด ส่วนกรณีที่เกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างด้วยนั้นพบว่าลักษณะของลำคลื่นหลักของสายอากาศจากการคำนวณทุกวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกจะมีระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างสูงที่สุด และเมื่อพิจารณาขนาดตัวสะท้อนให้มีขนาดจำกัด (เฉพาะกรณีที่คำนวณด้วยโปรแกรม NEC2) พบว่ากรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดของสายอากาศและขนาดตัวสะท้อนขนาดจำกัดจะมีผลทำให้ค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศ (พิจารณาลำคลื่นหลัก) กว้างขึ้นและมีผลต่อระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างที่อยู่ถัดไป คือ ระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างแรกที่ถัดจากลำคลื่นหลักมีระดับต่ำลง และเกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างด้วย ซึ่งระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีค่าต่ำลงเมื่อขนาดของตัวสะท้อนใหญ่ขึ้นนั่นเอง สำหรับคุณลักษณะอื่นๆ ของสายอากาศเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก พบว่าทั้งสองกรณีมีแนวโน้ม

เหมือนกัน แต่วิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์จะให้ค่าสถานะเจาะจงทิศทางของสายอากาศสูงกว่าวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก นอกจากนี้ได้ทำการพิจารณาคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศด้วย และพบว่าสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนนี้จะมีคุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้งที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ และ การโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอนที่ตำแหน่ง $\phi = 0^\circ$ โดยคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก (โดยพิจารณาสนามจากองค์ประกอบของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเดี่ยว คู่กับตัวประกอบแถวลำดับที่จัดวางสายอากาศเหนือตัวสะท้อนลักษณะตามแนวนอน) และโปรแกรม NEC2 สำหรับวิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์นั้นพบว่าค่ามุมเอียงที่ได้จะตรงกันข้ามกับด้วยวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิกและโปรแกรม NEC2

จากนั้นได้พิจารณาจัดเรียงเป็นแบบแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน ซึ่งพบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศคือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศและจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ ดังนั้นจะพิจารณาเพื่อหาระยะที่เหมาะสม ที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้องเป็นแบบทิศทางเดียวที่มีค่าความกว้างลำคลื่นแคบๆ อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างมีค่าสูงๆ และให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศสูงๆ นั่นเอง ซึ่งจะนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ไปใช้ในการพิจารณาจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบต่อไป

จากการวิเคราะห์พบว่าในการพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศร่วมด้วยนั้นจะมีผลทำให้ลักษณะความกว้างของลำคลื่นหลักกว้างขึ้นและระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างแรกที่ถัดจากลำคลื่นหลักลดลง เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างพิจารณากรณีที่พิจารณาและไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับโดยกำหนดให้ตัวสะท้อนมีขนาดจำกัด พบว่าลักษณะลำคลื่นหลักของกรณีที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับนี้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีฟังก์ชันศักระยะเวกเตอร์และฟังก์ชันกรีนไดโอดิก (ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับทั้งคู่) คือมีลักษณะความกว้างลำคลื่นแคบกว่านั่นเอง ส่วนระดับของลำคลื่นย่อยด้านหลังพบว่าจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน (หมายความว่าหากต้องการพิจารณาลักษณะของลำคลื่นย่อยด้านหลังของสายอากาศด้วยโปรแกรม NEC2 แต่จำนวนเช็กเมนต์ของสายอากาศมากกว่าข้อจำกัดของ NEC2 อีก สามารถพิจารณาจากการนำสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่ได้จากโปรแกรม NEC2 คู่กับตัวประกอบแถวลำดับได้) สำหรับกรณีที่เป็นแถวลำดับเชิงระนาบวางเหนือตัวสะท้อน พบว่าเมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม NEC2 จะมีระดับลำคลื่นย่อยด้านหลังสูงนั้นอาจเนื่องมาจากความไม่ละเอียดของตัวสะท้อนที่ทำการจำลอง ทั้งนี้เพราะจำนวนเช็กเมนต์ที่จำกัดนั่นเอง นอกจากนี้ได้พิจารณาลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศด้วยค่าอัตราส่วนแกนและค่ามุมเอียง สามารถกล่าวได้ว่าสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเท่ากับ 0.3λ (โดยพิจารณาจากวิธีฟังก์ชันกรีนไดโอดิก และจากโปรแกรม NEC2) และ 0.7λ มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้งที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ และการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอนที่ตำแหน่ง $\phi = 0^\circ$ เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งด้านหน้าของสายอากาศ

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์และผลการทดสอบสายอากาศ

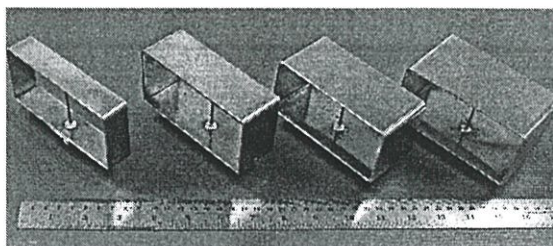
5.1 บทนำ

เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการคำนวณในบทที่ 3 และบทที่ 4 ดังได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้าง และการทดสอบสายอากาศ เพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลจากการคำนวณจากวิธีต่างๆ โดยคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งลักษณะโครงสร้างของสายอากาศ การทดสอบ และผลที่ได้จากการทดสอบนั้นจะได้กล่าวต่อไป

5.2 การสร้างและการทดสอบสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

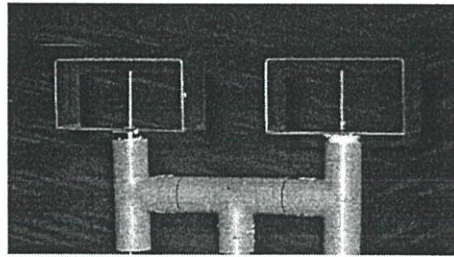
5.2.1 การสร้างและการออกแบบสายอากาศ

สำหรับการสร้างสายอากาศได้ออกแบบที่ความถี่ 1.9 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ของระบบสื่อสารไร้สาย และระบบโทรศัพท์พกพาส่วนบุคคล ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ที่ได้กล่าวมาแล้ว พบว่าเมื่อกำหนดขนาดความกว้างและความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากไว้ที่ค่าหนึ่ง คือ วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากมีความกว้าง a เท่ากับ 0.69λ (10.9 ซม.) มีความสูง b เท่ากับ 0.35λ (5.53 ซม.) พบว่าคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามความยาวของสายอากาศ c ดังนั้น ในการสร้างสายอากาศเพื่อทดสอบและเปรียบเทียบกับผลการคำนวณว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด จึงเลือกขนาดความยาวของสายอากาศ 4 ขนาด กล่าวคือ 0.15λ (2.37 ซม.) 0.25λ (3.95 ซม.) 0.35λ (5.53 ซม.) และ 0.45λ (7.11 ซม.) ส่วนความยาวโพรบพบว่าจะมีผลต่อคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศอย่างมาก เมื่อพิจารณาจากโปรแกรม NEC2 และฟังก์ชันกรีนไดแอติกในบทที่ 3 พบว่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะแมตช์กับสายนำสัญญาณที่สุดที่ความยาวโพรบประมาณ 0.27λ (4.27 ซม.) ในรูปที่ 5.1 ได้แสดงโครงสร้างของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมค่าต่างเปรียบเทียบกัน

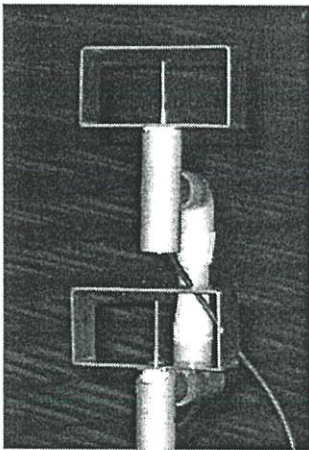


รูปที่ 5.1 สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากขนาดต่างๆ

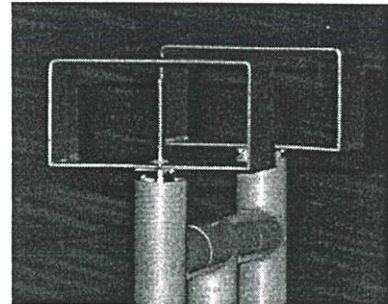
สำหรับโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกนต่างๆ ได้ออกแบบให้แต่ละองค์ประกอบมีระยะห่างกัน เมื่อวัดจากกึ่งกลางสายอากาศหนึ่งถึงกึ่งกลางขององค์ประกอบที่อยู่ถัดไปเป็นค่าต่างๆ โดยพิจารณาจากระยะที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางที่ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงๆ และมีค่าลำคลื่นย่อยด้านต่ำๆ หรือไม่มี ดังนี้ แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x ตามแนวแกน y และตามแนวแกน z มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็น 1.2λ (18.96 ซม.) 0.95λ (15.01 ซม.) และ 0.75λ (11.85 ซม.) ตามลำดับ ดังแสดงในผังรูปที่ 5.2 และแถวลำดับเชิงระนาบ xy มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบตามแนวแกน x และแกน y เท่ากับ 1.2λ (18.96 ซม.) และ 0.95λ (15.01 ซม.) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.3



(ก) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x

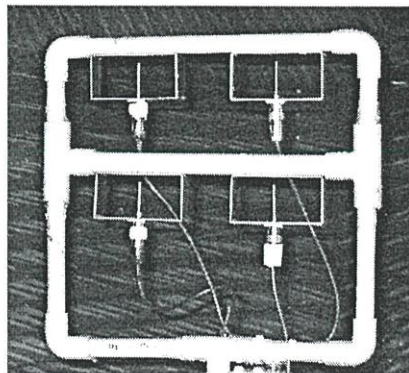


(ข) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y



(ค) แถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z

รูปที่ 5.2 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

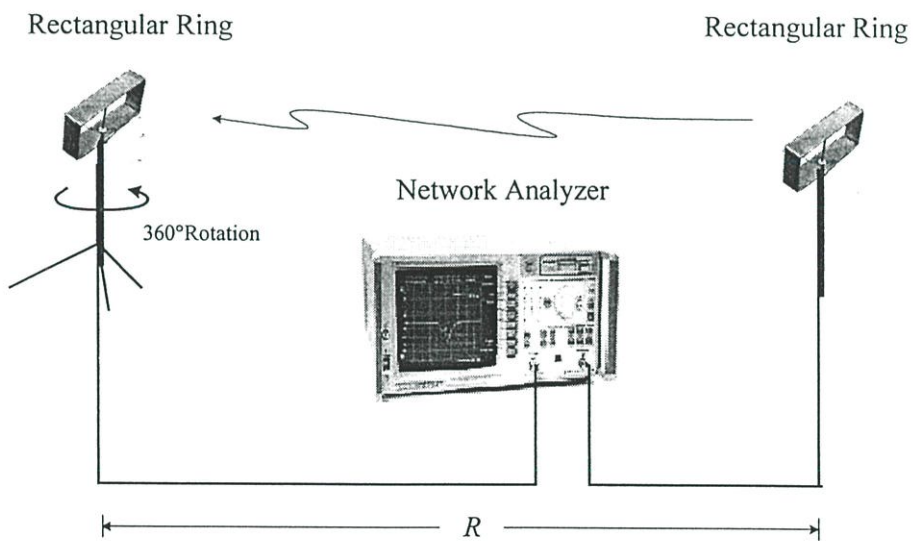


รูปที่ 5.3 สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

สำหรับการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศจะป้อนผ่านตัวเชื่อมต่อชนิด N (N-type connector) สำหรับสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว และผ่านตัวแบ่งกำลังงานแบบตัวเชื่อมต่อที (T connector power divider) แต่ละองค์ประกอบเชื่อมต่อด้วยสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial) RG 58A ที่มีความยาวเป็น จำนวนเท่าของ $\lambda/4$ สำหรับสายอากาศแถวลำดับ

5.2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

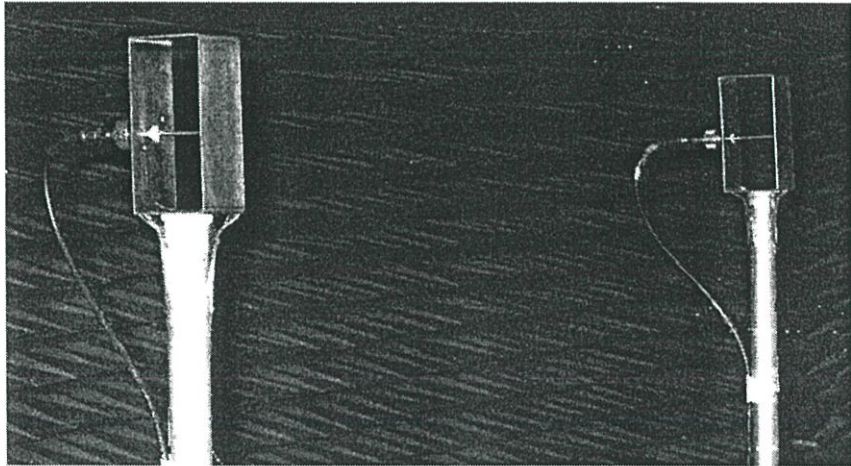
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง ซึ่งทำการทดสอบที่สนามระยะไกล [20] หรือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิด (สายอากาศส่ง) และสายอากาศรับต้องห่างกันมากกว่า $2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ ซึ่งที่สนามระยะไกลนี้การเปลี่ยนแปลงของสนามจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง สำหรับการเตรียมการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 โดยเครื่องมือที่ใช้ทดสอบคือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น 8720c



รูปที่ 5.4 การจัดเตรียมเครื่องมือในการทดสอบสายอากาศ สำหรับสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ในการทดสอบจะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก โดยทดสอบในห้องที่ไม่มีการสะท้อน (Chamber) ซึ่งแสดงการติดตั้งดังรูปที่ 5.5 สายอากาศที่จะทำการทดสอบนั้นจะเป็นสายอากาศรับ ซึ่งต้องหมุนรอบตัวเอง (360) ส่วนสายอากาศส่งต้องเป็นสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่เดียวกันกับสายอากาศรับและต้องมีการโพลาริเซชันที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากดังแสดงในรูป และระดับความสูงของสายอากาศรับและสายอากาศส่งต้องเท่ากันด้วย สำหรับสายอากาศแถวลำดับจึงเส้นตามแนวแกนต่างๆ และ

สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบนั้น ในการจัดเตรียมการทดสอบก็ทำเช่นเดียวกันกับกรณีที่ทดสอบสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว แต่จะจัดตั้งให้มีระยะห่างต่างๆ กันขึ้นอยู่กับขนาดของสายอากาศ โดยได้แสดงระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่น้อยที่สุดในแต่ละกรณีดังตารางที่ 5.1 สำหรับผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศในแต่ละกรณีจะแสดงและเปรียบเทียบกับการคำนวณต่อไป



(ก) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.5 การติดตั้งสายอากาศรับและสายอากาศส่ง

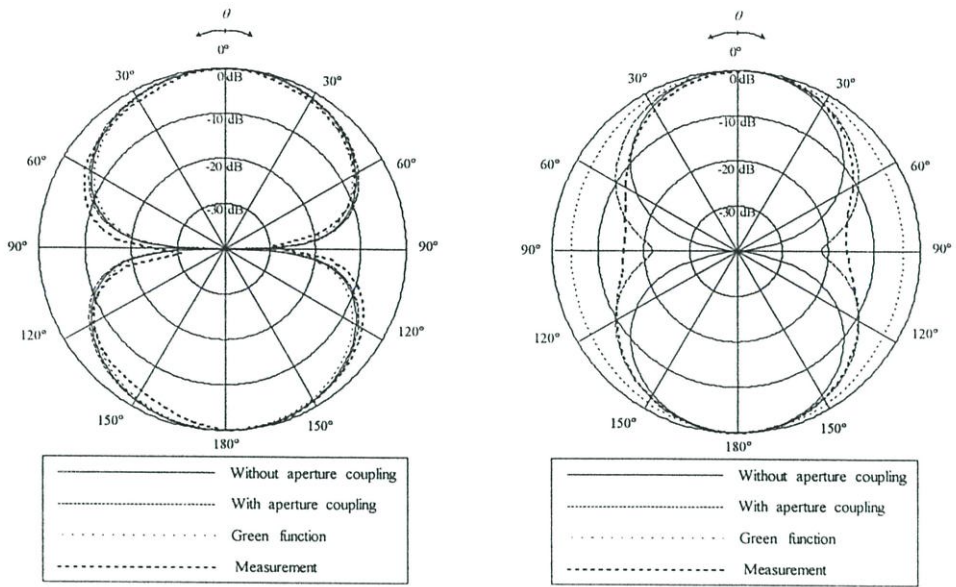
สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เมื่อความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเท่ากับ 0.25λ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองของสายอากาศ (Without aperture coupling) โดยวิธีศักย์เวกเตอร์ และเมื่อพิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองของสายอากาศ (With aperture coupling) จาก

โปรแกรม NEC2 และวิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอดดิก (ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดทั้งสองของสายอากาศ แต่รวมผลของโพรบร่วมด้วย) ได้แสดงในรูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.1 ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่งที่น้อยที่สุด (ที่สนามระยะไกล) ในแต่ละกรณี

สายอากาศรับ		สายอากาศส่ง	ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่น้อยที่สุดหรือที่สนามระยะไกล (เมตร)	ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ทดสอบ (เมตร)	
สายอากาศโพรบ	$c = 0.15\lambda$	สายอากาศโพรบ กระดุนวงแหวน สี่เหลี่ยมมุมฉาก ประกอบเดี่ยว ($c = 0.25\lambda$)	0.82	3.00	
กระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	$c = 0.25\lambda$		0.21	3.00	
ประกอบเดี่ยว	$c = 0.35\lambda$		0.89	3.00	
	$c = 0.45\lambda$		0.92	3.00	
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x			องค์ประกอบเดี่ยว	2.38	3.00
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y				1.60	3.00
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z				1.31	3.00
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ				3.02	4.00

พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็นแบบสองทิศทาง และพบว่าผลที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ ในระนาบสนามไฟฟ้าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากทุกกรณีเกือบเท่ากัน แต่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบนั้นลักษณะของลำคลื่นจะไม่สมมาตรทั้งสองข้างทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากโพรบป้อนสัญญาณและตัวเชื่อมต่อ (Connector) ที่ป้อนสัญญาณจากตำแหน่งด้านล่างของสายอากาศที่มีเพียงด้านเดียว สำหรับระนาบสนามแม่เหล็กพบว่าลักษณะลำคลื่นด้านหน้าและด้านหลังมีความสอดคล้องกันในทุกกรณี สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่คำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์จะมีลักษณะความกว้างของลำคลื่นที่แคบกว่าทุกกรณี ส่วนวิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอดดิกจะให้ลำคลื่นกว้างที่สุด และพบว่าผลจากการทดสอบจะค่าความกว้างอยู่ระหว่างผลจากการคำนวณด้วยวิธีฟังก์ชันกรีน ไดแอดดิก และโปรแกรม NEC2

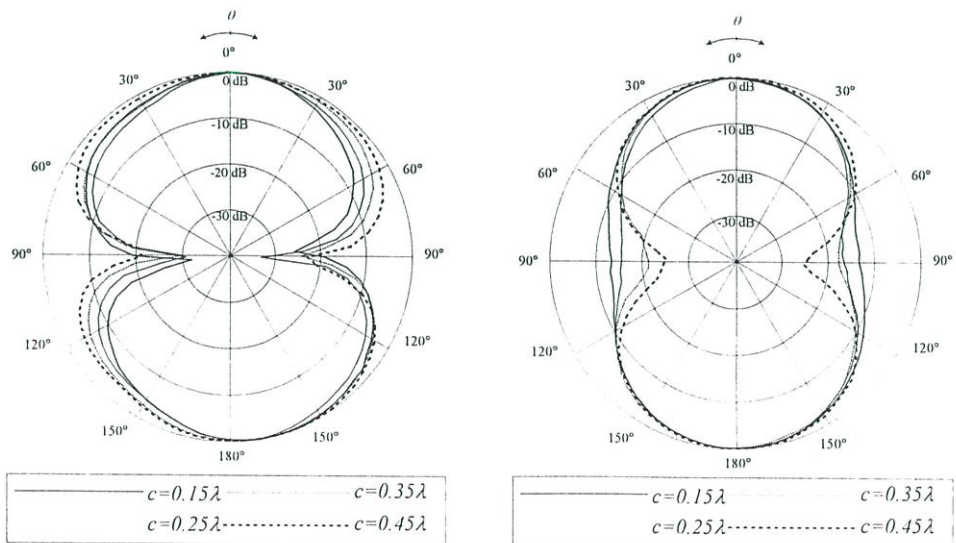


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบ เมื่อ c เท่ากับ 0.25λ

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบสายอากาศกรณที่มีขนาดความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากขนาดต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งพบว่า ในระนาบสนามไฟฟ้านั้นยิ่งความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากยิ่งมากขึ้นค่าความกว้างลำคลื่นยิ่งกว้างขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามสำหรับระนาบสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ ค่าความกว้างของลำคลื่นจะยิ่งแคบลงเมื่อความยาววงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเพิ่มขึ้น ซึ่งผลที่ได้นี้พบว่ามีผลสอดคล้องกับการคำนวณที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

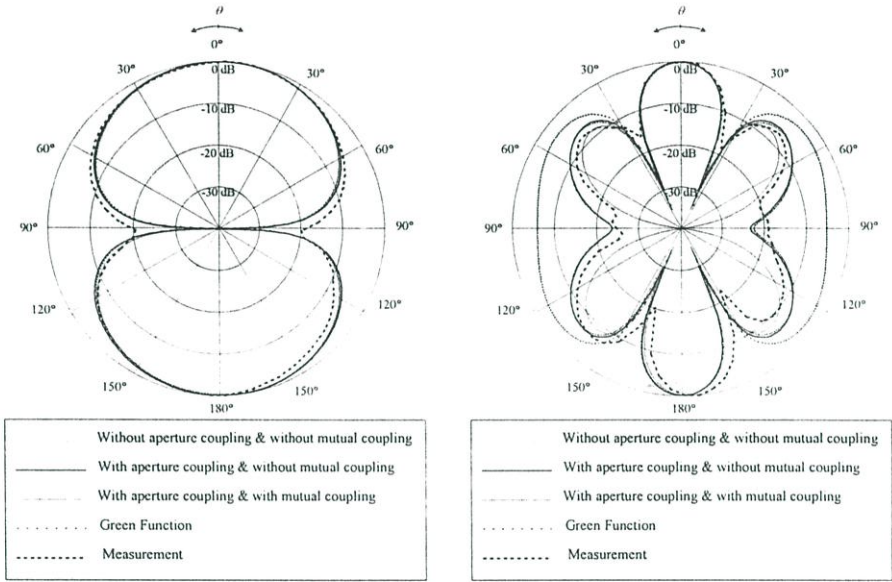


(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อขนาดความยาวของวงแหวนมีค่าต่างๆ

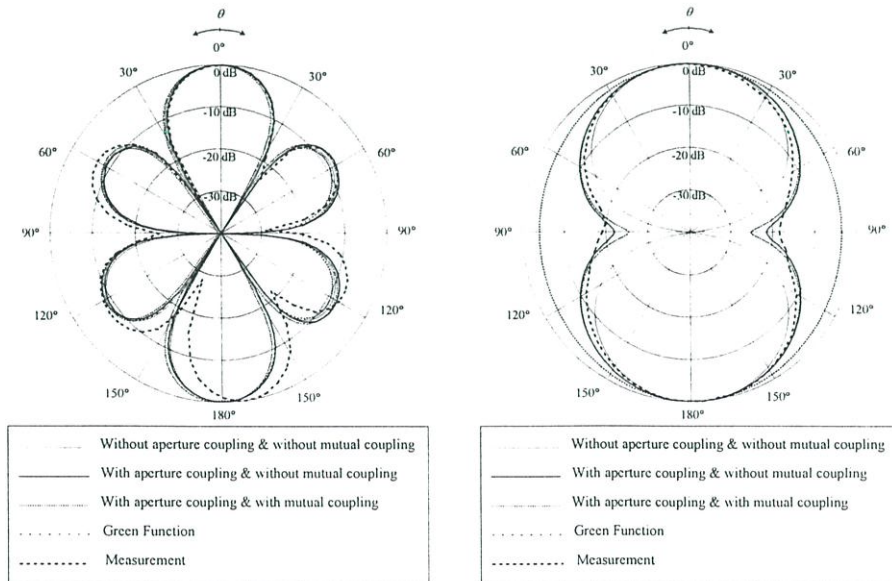
สำหรับสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x แกน y และตามแนวแกน z ดังรูป 5.2 และจัดเตรียมการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 โดยจัดให้สายอากาศรับและสายอากาศส่งวางห่างกันตามตารางที่ 5.1 จากนั้นผลที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณในแต่ละวิธีเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ถึงรูป 5.10



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

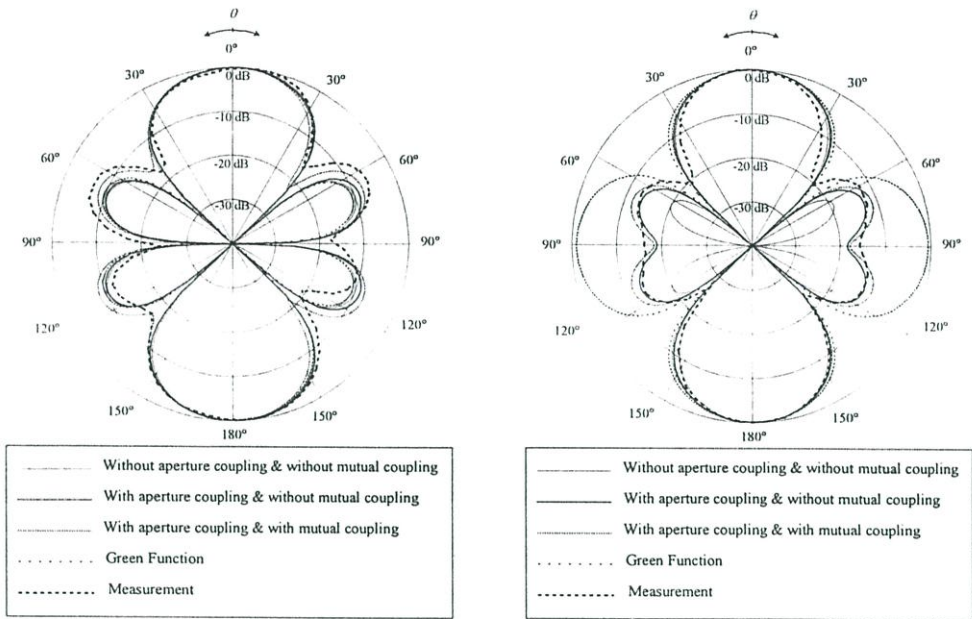
รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน x



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน y



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

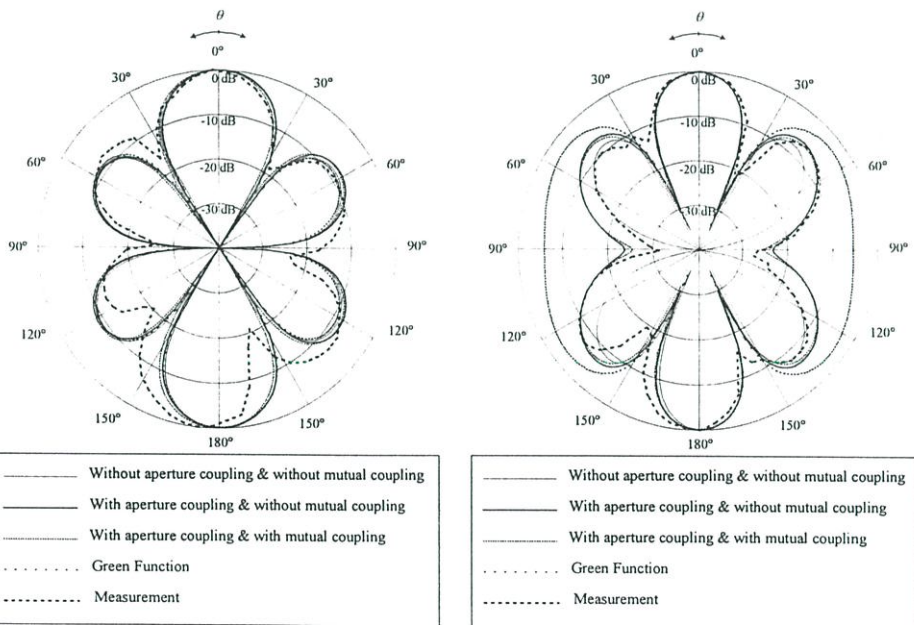
รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน z

จากรูปพบว่า เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการคำนวณและการทดสอบสายอากาศที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกน x แกน y และตามแนวแกน z นั้นมีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาลำคลื่นหลัก (ด้านหน้าและด้านหลัง) นั้นมีความใกล้เคียงกันมากสำหรับการจัดเรียงเป็นแถวลำดับตามแนวแกนต่างๆ เมื่อพิจารณาระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างพบว่า ผลจากการทดสอบจะมีระดับลำคลื่นย่อยสูงกว่ากรณีอื่นๆ นอกจากนี้พบว่าระดับของจุดที่เป็นศูนย์คู่แรกจะมีค่าสูงกว่ากรณีอื่นๆ โดยที่ระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างและจุดที่เป็นศูนย์คู่แรกนี้มีความใกล้เคียงกับผลการคำนวณจากโปรแกรม NEC2 ส่วนลักษณะลำคลื่นที่ไม่สมมาตรกันทั้งสองด้าน (ด้านซ้ายมือและขวามือ) ของการทดสอบนั้น ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากโพรบป้อนสัญญาณและตัวเชื่อมต่อที่อยู่ตำแหน่งด้านล่างของสายอากาศ (วงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก) เพียงด้านเดียว จึงทำให้เกิดการไม่สมมาตรของโครงสร้างขึ้นได้

สำหรับแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น เมื่อพิจารณาที่ลำคลื่นหลักของสายอากาศ พบว่าในทุกกรณีมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อพิจารณาระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศพบว่า วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกจะมีระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างที่สูงกว่ากรณีอื่นๆ ส่วนวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์จะมีระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างต่ำกว่าทุกกรณีมาก สำหรับผลการคำนวณจากโปรแกรม NEC2 ที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับ (With aperture coupling and with mutual coupling) และไม่พิจารณาการเชื่อมต่อ

ต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับ (With aperture coupling and without mutual coupling) นั้น พบว่าระดับลาคี่นย่อยด้านข้างจะมีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบมากกว่ากรณีอื่นๆ

นอกจากนี้ได้พิจารณาจัดเรียงสายอากาศเป็นลักษณะแถวลำดับเชิงระนาบ xy ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และทำการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ ในรูปที่ 5.11 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณมีความสอดคล้องกัน ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ ในระนาบสนามไฟฟ้า เมื่อพิจารณาที่ลาคี่นหลักของสายอากาศทุกกรณีจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ผลที่ได้จากการทดสอบนั้น ลักษณะลาคี่นจะเอียงหรือไม่สมมาตรมากกว่ากรณีที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้น ทั้งนี้อาจเกิดจากการตัวเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบมีมากกว่า (จำนวนองค์ประกอบแถวลำดับมากกว่า) จึงส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมากกว่า และพบว่าลักษณะการเอียงของลาคี่นจะเอียงในทิศทางการวางของโพรบ ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กนั้น เมื่อพิจารณาที่ลาคี่นหลักของสายอากาศพบว่ามีความใกล้เคียงกันทุกกรณี นอกจากนี้พบว่ากรณีที่คำนวณโดยโปรแกรม NEC2 จะมีระดับลาคี่นย่อยด้านข้างใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบมากกว่ากรณีอื่นๆ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

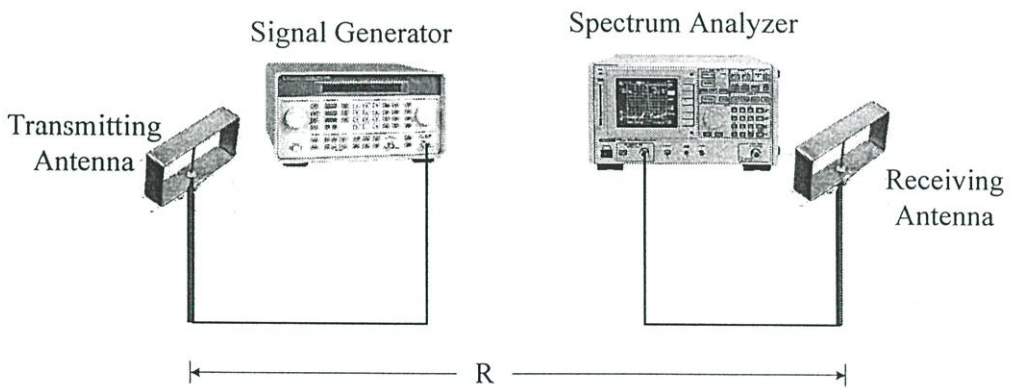
รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ

ผลที่ได้แสดงในแต่ละกรณีข้างต้นจะพบว่า ลักษณะของลาคี่นหลักของสายอากาศจากการคำนวณและการทดสอบมีความสอดคล้องและใกล้เคียงกันทุกกรณี แต่สำหรับระดับของลาคี่นย่อยด้าน

ข้างและจุดที่เป็นศูนย์กลางแรกของสายอากาศนั้น พบว่าผลการทดสอบจะใกล้เคียงกับการคำนวณด้วยโปรแกรม NEC2 ที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับที่สุด ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับจะส่งผลต่อระดับระดับของค่าคลื่นย่อยด้านข้าง (ค่าคลื่นย่อยด้านข้างแรกที่ถัดจากค่าคลื่นหลัก) และจุดที่เป็นศูนย์กลางแรกของสายอากาศนั่นเอง

5.2.3 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ

สิ่งที่ใช้ในการบ่งชี้สมรรถนะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ อัตราการขยายของสายอากาศ [21] ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยวิธีสายอากาศสององค์ประกอบ (Two-Antenna Method) โดยสมมติให้ระบบในการทดสอบมีสถานะเดียวกัน สายอากาศทั้งสองจัดตั้งห่างกันระยะ R ซึ่งจำเป็นต้องวางห่างกันอย่างน้อยมากกว่าระยะสนามระยะไกล และสายอากาศทั้งสอง (สายอากาศส่งและสายอากาศรับ) ต้องมีการโพลาไรซ์ที่เหมือนกันด้วย สำหรับการเตรียมการทดสอบได้แสดงโดยรูปที่ 5.12 โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Generator) จ่ายสัญญาณที่ความถี่ 1.9 GHz ด้วยกำลังส่ง 0 dBm ให้กับสายอากาศส่ง ส่วนสายอากาศรับนั้นต่อกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) ซึ่งกำลังที่รับได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการขยายของสายอากาศต่อไป



รูปที่ 5.12 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดสอบค่าอัตราการขยายของสายอากาศ

ในการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการขยายของสายอากาศนั้น หาได้จากสมการของฟรีส (Friis transmission equation) ดังนี้

$$G(t)_{dBi} + G(r)_{dBi} = P(r)_{dBm} - P(t)_{dBm} + l(r)_{dB} + l(t)_{dB} + l(s)_{dB} \quad (5.1)$$

โดย $G(t)$ คือ ค่าอัตราการขยายของสายอากาศส่งมีหน่วยเป็น dBi

$G(r)$ คือ ค่าอัตราการขยายของสายอากาศรับมีหน่วยเป็น dBi

$P(t)$ คือกำลังงานที่ส่งจากเครื่องส่งมีหน่วยเป็น dBm

$P(r)$ คือกำลังงานที่ส่งจากเครื่องรับมีหน่วยเป็น dBm

$I(t)$ คือการสูญเสียจากสายนำสัญญาณที่ภาคส่งสัญญาณมีหน่วยเป็น dB

$I(r)$ คือการสูญเสียจากสายนำสัญญาณที่ภาครับสัญญาณมีหน่วยเป็น dB

$I(s)$ คือการสูญเสียในช่องว่างอิสระ (Free space) จากระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับมีหน่วยเป็น dB มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$I(s)_{dB} = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) \quad (5.2)$$

สำหรับการสูญเสียในสายนำสัญญาณของภาคส่งและภาครับที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.54 dB และ 1.5 dB ส่วนระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและสายอากาศส่ง และค่าอัตราการขยายของสายอากาศแต่ละกรณีได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.2 โดยในการพิจารณาหาอัตราขยายของสายอากาศ ชั้นแรกพิจารณาหาอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง (สายอากาศที่เหมือนกัน 2 องค์ประกอบ) ซึ่งใช้สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.25λ เป็นสายอากาศอ้างอิง

ตารางที่ 5.2. ค่าอัตราการขยายและประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก		$R(m)$	$I_s(dB)$	$Pr(dBm)$	อัตราการขยาย (dBi)	ประสิทธิภาพของสายอากาศ (%)
สายอากาศ องค์ประกอบ เดี่ยว	$c = 0.15\lambda$	4.5	-51.08	-40.8	6.36	97
	$c = 0.25\lambda$	4.5	-51.08	-41.2	5.96	94
	$c = 0.35\lambda$	4.5	-51.08	-41.9	5.26	88
	$c = 0.45\lambda$	4.5	-51.08	-43.12	4.04	73
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x		13.5	-60.62	-48.7	8.00	85
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y		13.5	-60.62	-47.5	9.20	94
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z		13.5	-60.62	-47.8	8.90	91
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ		13.5	-60.62	-45.4	11.30	88

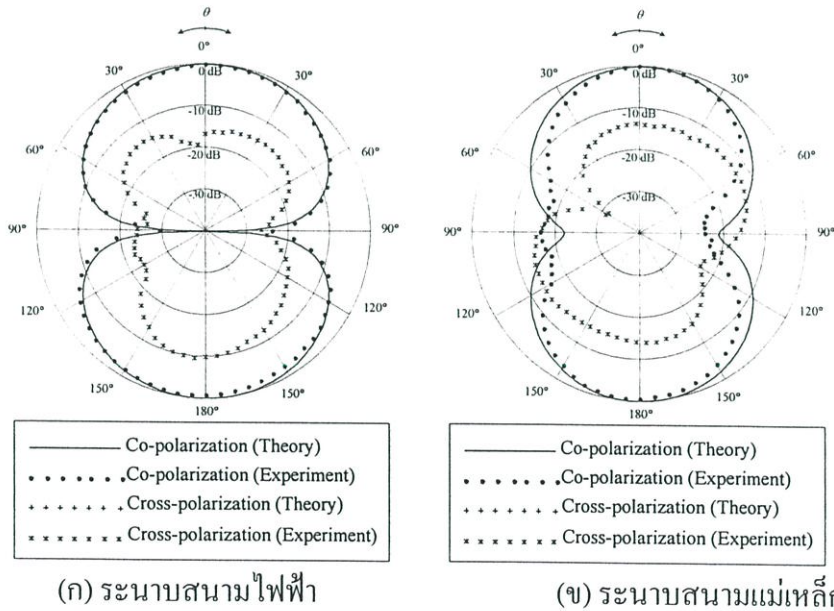
โดยประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation efficiency) [21] หาได้จากสมการ

$$\text{radiation efficiency} = \frac{\text{gain}}{\text{directivity}} \times 100 \quad (5.3)$$

5.2.4 คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ

คุณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศที่พิจารณานี้เป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสนามที่เวลาต่างๆ โดยในการพิจารณานี้จะพิจารณาเป็นการโพลาไรซ์ร่วม (Co-polarization) ซึ่งเป็นการโพลาไรซ์ที่ต้องการ และการโพลาไรซ์ไขว้ (Cross-polarization) ซึ่งเป็นการโพลาไรซ์ที่ไม่ต้องการ

ในการทดสอบใช้ไดโพล (มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์) ที่ออกแบบที่ความถี่ 1.9 GHz เป็นสายอากาศส่งและโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็นสายอากาศรับ ซึ่งถ้าพิจารณาให้สายอากาศส่งมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวตั้ง สายอากาศรับต้องจัดตั้งโดยพิจารณาที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ (จากที่พิจารณาในบทที่ 3 ที่ตำแหน่งนี้จะให้การโพลาไรซ์เชิงเส้นแบบแนวตั้ง) หรือพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระนาบ xz (ระนาบสนามแม่เหล็ก) และเมื่อสายอากาศส่งมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน สายอากาศรับต้องจัดตั้งโดยพิจารณาที่ตำแหน่ง $\phi = 0^\circ$ (จากที่พิจารณาในบทที่ 3 ที่ตำแหน่งนี้จะให้การโพลาไรซ์เชิงเส้นแบบแนวนอน) หรือพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระนาบ yz (ระนาบสนามไฟฟ้า) สำหรับผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับการคำนวณแสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบการโพลาไรซ์ร่วมและการโพลาไรซ์ไขว้จากการคำนวณและการทดสอบ

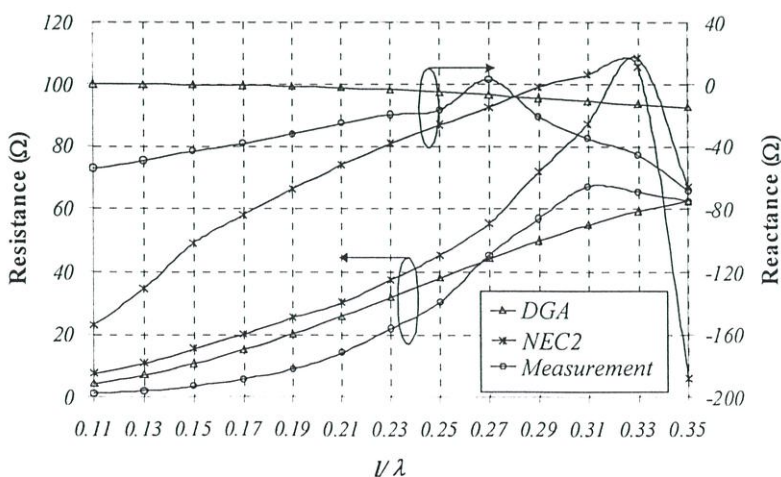
จากรูปพบว่า การโพลาไรซ์ร่วมจากการทดสอบและการคำนวณมีความสอดคล้องกัน และเกือบเท่ากัน ส่วนการโพลาไรซ์ไขว้จากการทดสอบจะมีระดับสูงกว่าการคำนวณ (การคำนวณมีไม่เกิดการโพลาไรซ์ไขว้ จึงไม่สามารถสังเกตเห็น) โดยการโพลาไรซ์ไขว้จะมีระดับต่ำกว่าการโพลาไรซ์ร่วมประมาณ 10 dB และ 13 dB ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กตามลำดับ ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากจะมีการโพลาไรซ์แบบเชิง

เส้นแนวตั้ง เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง $\phi = 90^\circ$ (เมื่อสังเกตโพรบที่ป้อนสัญญาณจั่วตามแนวตั้ง) และมีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นแนวนอน เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง $\phi = 0$ (เมื่อสังเกตโพรบที่ป้อนสัญญาณจั่วตามแนวนอน)

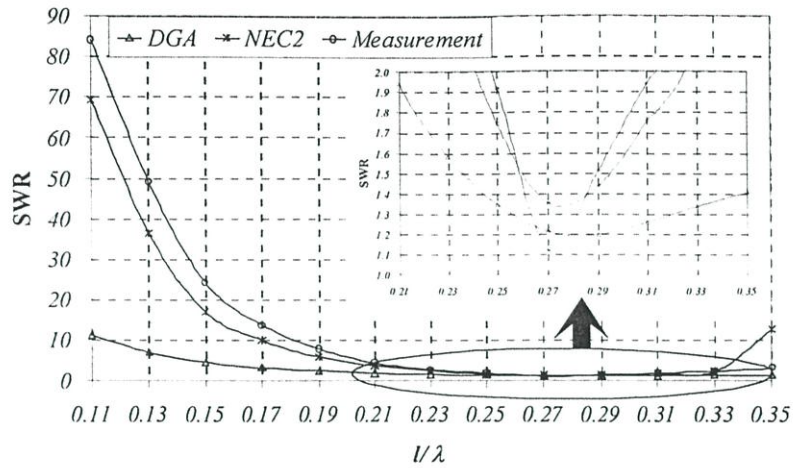
5.2.5 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณาคือคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ทั้งนี้ เพราะเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงความเข้ากันได้ของสายอากาศและสายนำสัญญาณ () โดยจะพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้องมีค่าเท่ากับ 50 โอห์มหรือมีค่าใกล้เคียง และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศต้องมีค่าไม่เกิน 2:1 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ หรือกล่าวได้ว่าจะยอมให้มีการสะท้อนกลับเพียง 11.11% เท่านั้น

ในการพิจารณาคคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศพบว่า ความยาวของโพรบที่ป้อนสัญญาณมีผลต่อคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมากที่สุด และเมื่อพิจารณาคคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ (พิจารณาในกรณีที่คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่ช่องเปิดของสายอากาศไม่แมตช์กับช่องว่างอิสระ หรือ อิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับ 120π โอห์ม) ในบทที่ 3 จากวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกและ NEC2 ดังแสดงในรูปที่ 5.14 พบว่า เมื่อความยาวโพรบเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานและค่าแอดมิตแดนซ์ของสายอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกกรณี ยกเว้นค่าความต้านทานจากวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกซึ่งมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศพบว่า ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศมีแนวโน้มลดลงเมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น และที่ความยาวโพรบประมาณ 0.27λ จะให้คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศดีที่สุดทุกกรณี โดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิกจะมีความใกล้เคียงกับการทดสอบมากที่สุด



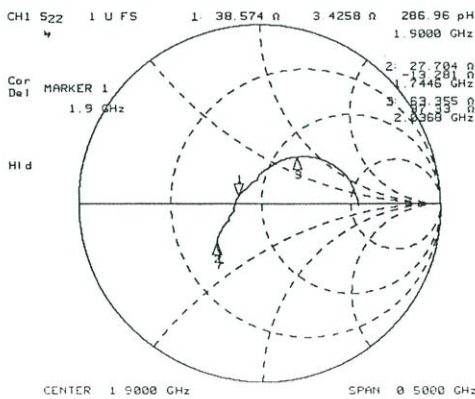
(ก) อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ



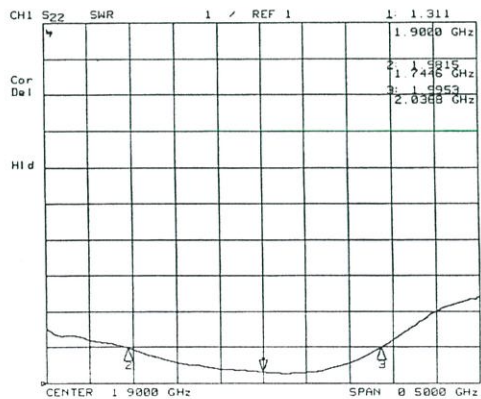
(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความยาวโพรบ จากการคำนวณและการทดสอบ

สายอากาศที่สร้างขึ้นทุกองค์ประกอบต้องทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเป็นอันดับแรกทุกครั้ง ซึ่งสามารถแสดงแต่ละกรณีดังนี้ ในรูปที่ 5.15 ถึงรูปที่ 5.18 แสดงคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากจากองค์ประกอบเดี่ยว ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาย่านความถี่ที่สายอากาศแต่ละกรณีสามารถปฏิบัติการได้ ดังนี้

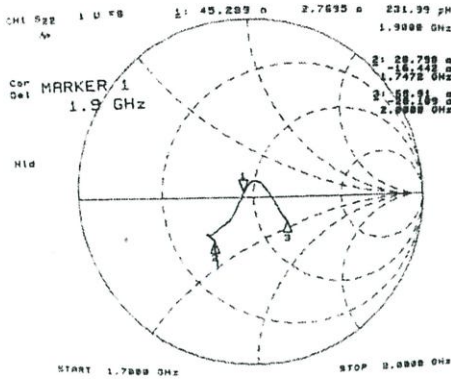


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

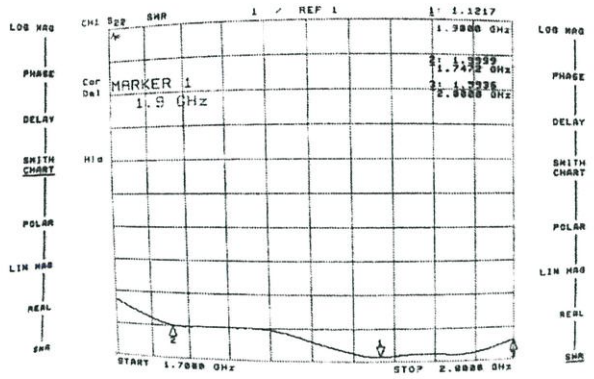


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.15 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.15λ

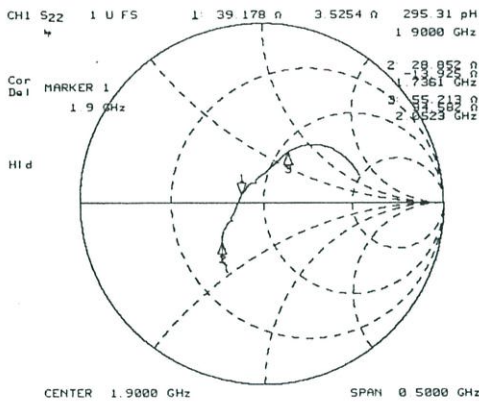


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

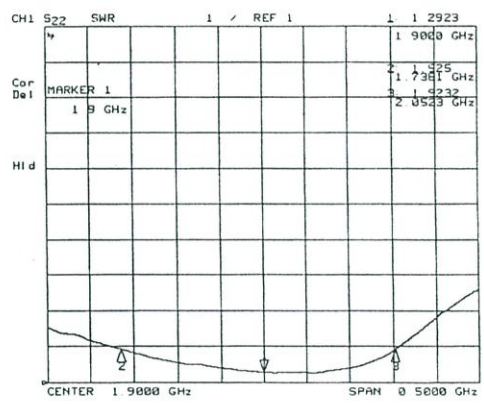


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.16 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.25λ

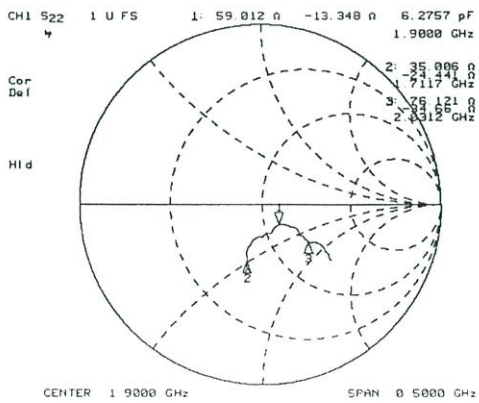


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

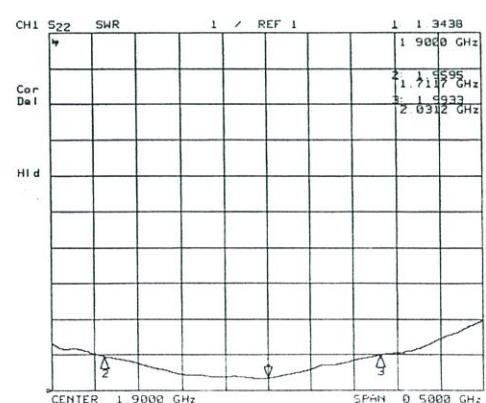


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.17 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.35λ



(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

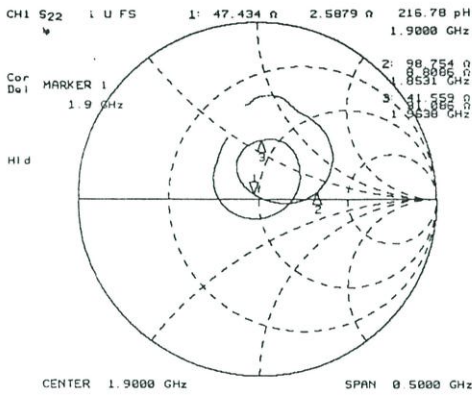


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

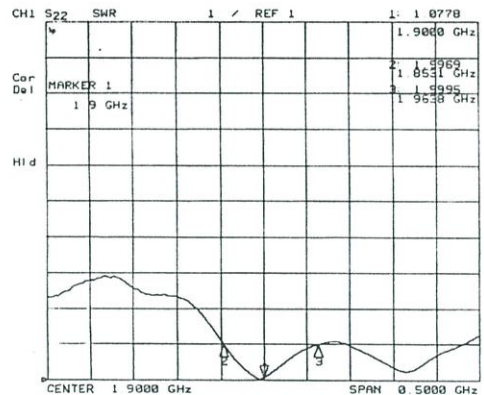
รูปที่ 5.18 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อความยาวของวงแหวนเท่ากับ 0.45λ

สายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากกรณีองค์ประกอบเดียว เมื่อเปลี่ยนค่าความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็นค่าเป็น 0.15λ 0.25λ 0.35λ และ 0.45λ ซึ่งปฏิบัติการที่ความถี่ 1.9 GHz พบว่าทุกกรณีมีคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่ยอมรับได้ ทั้งนี้จะสังเกตได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์เข้าใกล้ 50 โอห์ม และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศมีค่าต่ำกว่า 2:1 ในทุกกรณี

จากนั้นนำสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความยาววงแหวนเท่ากับ 0.25λ มีคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่ยอมรับได้แล้วมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x แกน y แกน z และแถวลำดับเชิงระนาบได้แสดงดังรูปที่ 5.19 ถึงรูปที่ 5.22

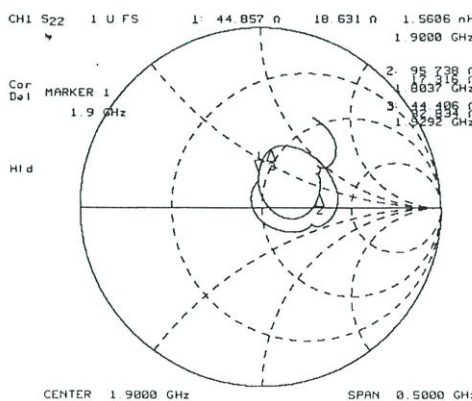


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

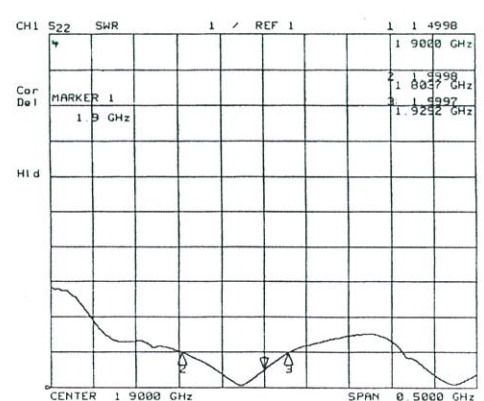


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.19 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x

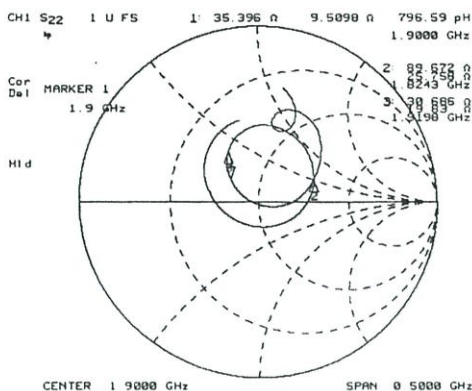


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

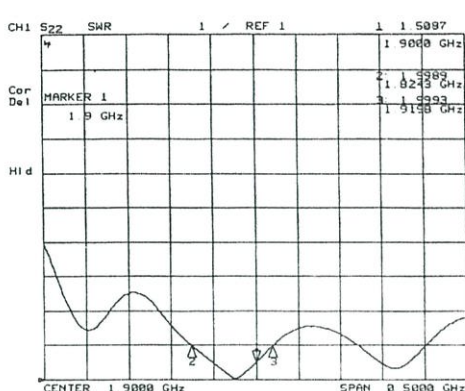


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.20 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y

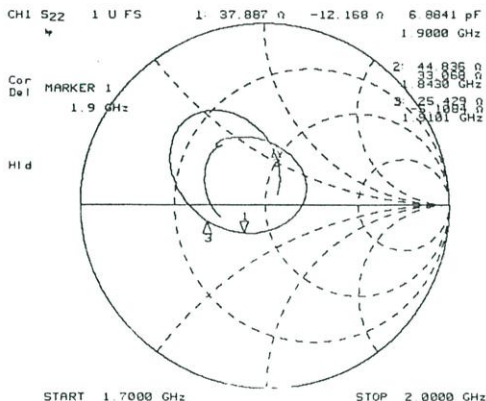


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

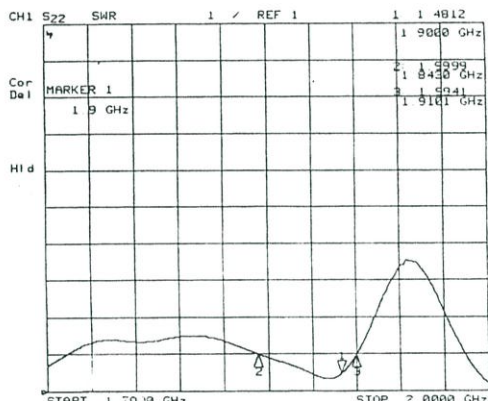


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.21 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z



(ก) ค่าอิมพีแดนซ์



(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.22 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ xy

จากรูปพบว่า สายอากาศเป็นแถวลำดับเชิงเส้นและเชิงระนาบของโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้ ทุกกรณีมีคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่ยอมรับได้ที่ความถี่ปฏิบัติการ การจัดเรียงแต่ละแบบจะมีความสามารถในการปฏิบัติการในช่วงกว้างแถบความถี่ต่างๆ (คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ยังอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำกว่า 2:1) ไม่เท่ากัน โดยการพิจารณาช่วงกว้างแถบความถี่สามารถหาได้จาก

$$\Delta f(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100 \tag{5.4}$$

โดยที่ f_H คือค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้

f_L คือค่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้

f_c คือค่าความถี่ที่ออกแบบ

คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากกรณีต่างๆ รวมทั้ง ช่วงกว้างแถบความถี่ในแต่ละกรณีได้สรุปในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สรุปคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก

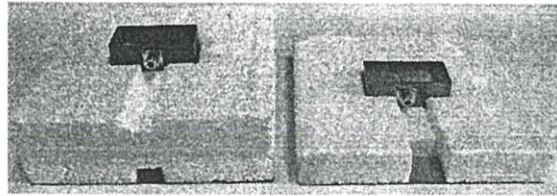
สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก		ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)	ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	ช่วงกว้างแถบความถี่ (%)
สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว	$c = 0.15\lambda$	38.57+j3.43	1.30:1	15.48
	$c = 0.25\lambda$	45.29+j2.77	1.12:1	13.30
	$c = 0.35\lambda$	39.18+j3.53	1.29:1	16.54
	$c = 0.45\lambda$	59.01-j13.34	1.34:1	16.82
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x		47.43+j2.59	1.08:1	5.83
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y		44.86+j18.63	1.50:1	6.60
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน z		35.40+j9.51	1.51:1	5.03
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ		37.89-j12.17	1.48:1	3.53

5.3 การสร้างและการทดสอบสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

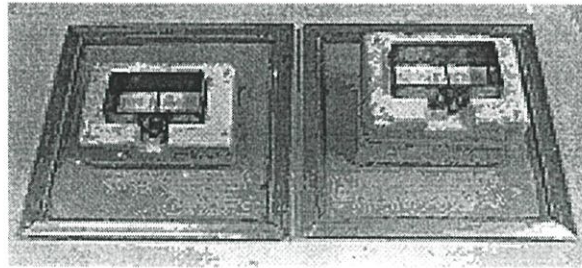
5.3.1 การสร้างและการออกแบบสายอากาศ

สำหรับสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนนั้น โครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะง่ายไม่ซับซ้อน กล่าวคือ นำสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (c เท่ากับ 0.25λ) ที่ได้สร้างไว้แล้ว ดังที่กล่าวในหัวข้อ 5.2 มาวางไว้เหนือตัวสะท้อน (แบบระนาบ) สำหรับกรณีสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวนั้นจะใช้แผ่นวงจรพิมพ์ (Print circuit board) และลดค่าขั้วต่อลูมินีเยมที่มีช่องระหว่างตาข่ายน้อยกว่า 0.1λ [22] เป็นตัวสะท้อน โดยที่ขนาดตัวสะท้อนด้านกว้าง (d_x) ต้องมากกว่าสองเท่าของระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน ($d_x > 2h$) และขนาดของตัวสะท้อนด้านยาวต้องมากกว่า 1.5 เท่าความยาวคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก [22] โดยตัวสะท้อนที่ใช้มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีขนาด $1.9\lambda \times 1.9\lambda$ (30×30 ซม.) สำหรับกรณีสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ดังรูปที่

5.23 และตัวสะท้อนขนาด $3.8\lambda \times 3.8\lambda$ (60×60 ซม.) สำหรับกรณีจัดเรียงเป็นลักษณะแถวลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.24 ตามลำดับ

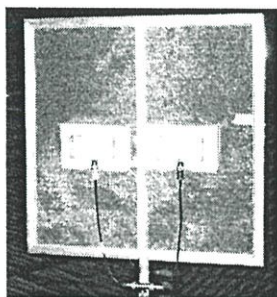


(ก) ตัวสะท้อนที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์

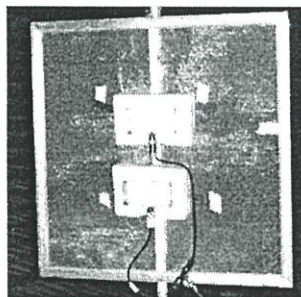


(ข) ตัวสะท้อนที่เป็นลวดตาข่าย

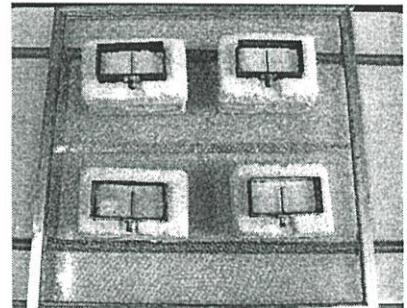
รูปที่ 5.23 โครงสร้างสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน กรณีองค์ประกอบเดียว



(ก) แถวลำดับแนวแกน x



(ข) แถวลำดับตามแนวแกน y



(ค) แถวลำดับเชิงระนาบ xy

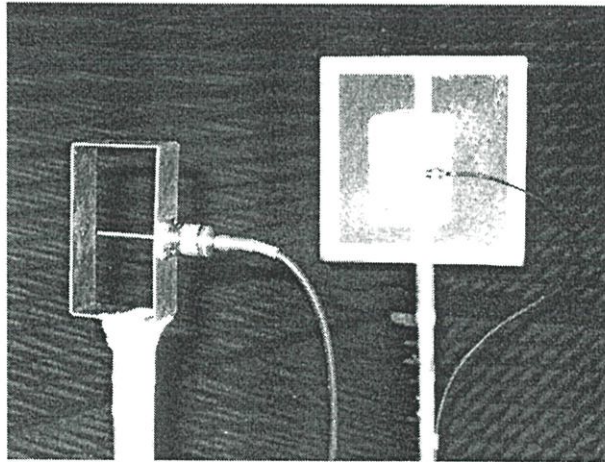
รูปที่ 5.24 โครงสร้างสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน กรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับ

สำหรับการเลือกตัวสะท้อนจะพิจารณาขนาด นำหนัก และความนำ (ต้องการตัวสะท้อนที่มีค่าความนำสูงๆ กล่าวคือยิ่งความนำมีค่ามากจะยิ่งทำให้ตัวสะท้อนสามารถสะท้อนคลื่นได้ดี) ของตัวสะท้อนเป็นสำคัญ ซึ่งตัวสะท้อนที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ (ตัวนำเป็นทองแดง) มีค่าความนำเท่ากับ 5.76×10^7 S/m สำหรับลวดตาข่ายอลูมิเนียมมีค่าความนำเท่ากับ 3.96×10^7 S/m แต่เนื่องจากกรณีที่จัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับนั้น ขนาดของตัวสะท้อนต้องมีใหญ่ขึ้นด้วย ดังนั้นตัวสะท้อนที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์จึงไม่เหมาะเมื่อพิจารณาเรื่องน้ำหนัก ขนาด และราคาของวัสดุที่เป็นตัวสะท้อน จึงพิจารณาตัวสะท้อนที่เป็นลวดตาข่ายอลูมิเนียมแทน

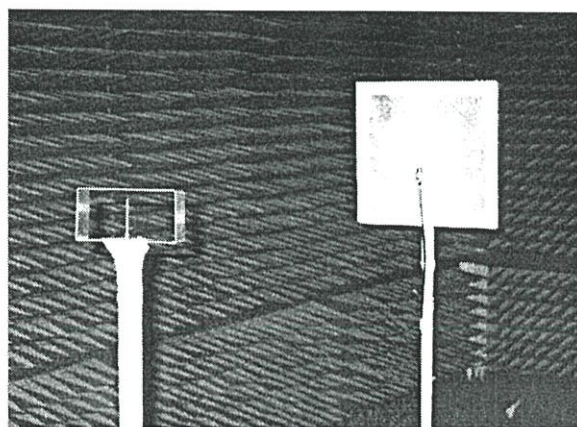
สำหรับการป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศจะป้อนผ่านตัวเชื่อมต่อชนิด N (N-type connector) และตัวแบ่งกำลังงานแบบตัวเชื่อมต่อที (T connector power divider) แต่ละองค์ประกอบเชื่อมต่อด้วยสายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial) RG 58A ที่มีความยาวเป็น จำนวนเท่าของ $\lambda/4$

5.3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

สำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ซึ่งจะพิจารณาทั้งกรณีวางสายอากาศเหนือตัวสะท้อนเป็นระยะเท่ากับ 0.3λ (4.74 ซม.) และ 0.7λ (11.06 ซม.) การจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 5.4 และได้ทดสอบทั้งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ดังแสดงการติดตั้งสายอากาศในรูปที่ 5.25



(ก) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.25 การติดตั้งสายอากาศรับและสายอากาศส่ง สำหรับทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

สำหรับระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับในการทดสอบ และระยะของสนามระยะไกลในแต่ละกรณี ได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.4 ดังนี้

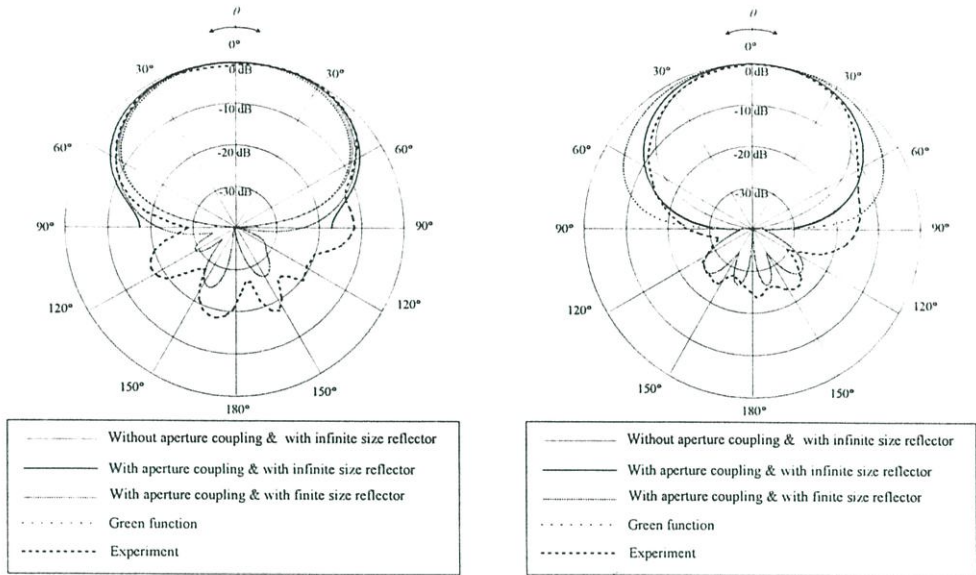
ตารางที่ 5.4 ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับในการทดสอบ และระยะสนามระยะไกล กรณีของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

สายอากาศรับ	สายอากาศส่ง	ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่น้อยที่สุดหรือที่สนามระยะไกล (เมตร)	ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่ทดสอบ (เมตร)
$h = 0.3\lambda$			
สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว	สายอากาศโพรบ	3.78	4.00
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x	กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความยาวเท่ากับ 0.25λ	11.93	13.50
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y		11.93	13.50
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ		11.93	13.50
$h = 0.7\lambda$			
สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว	สายอากาศโพรบ	3.78	13.50
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x	กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความยาวเท่ากับ 0.25λ	11.93	13.50
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y		11.93	13.50
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ		11.93	13.50

ผลที่ได้จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก กรณีสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ แสดงดังรูปที่ 5.26 และ 5.27 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจากแต่ละวิธีพบว่า ลักษณะลำคลื่นหลัก (ลำคลื่นด้านหน้า) ของสายอากาศจะมีความสอดคล้องกันทุกกรณี แต่หากต้องการพิจารณาลักษณะการเกิดลำคลื่นย้อนด้านหลังด้วยต้องพิจารณาขนาดของตัวสะท้อนมีขนาดจำกัด (ใช้

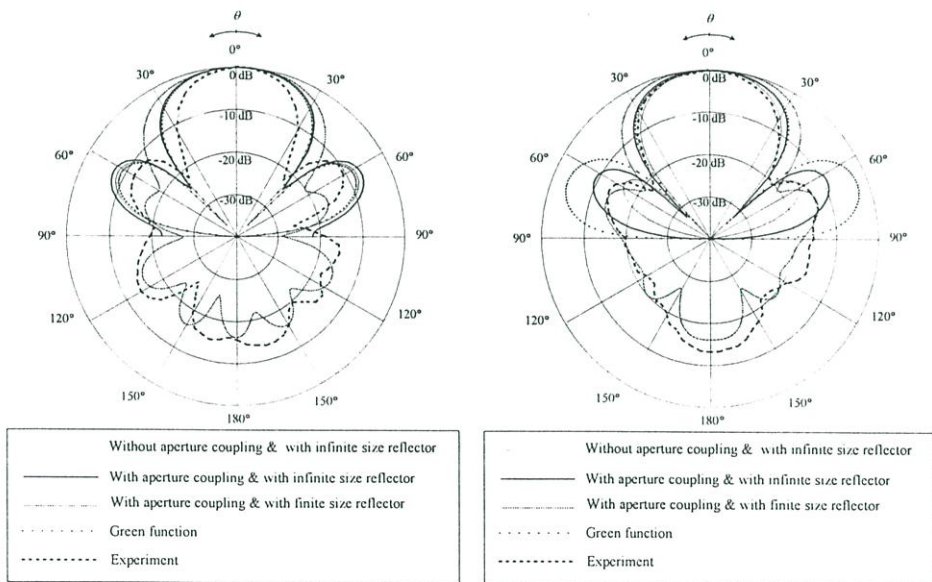
โปรแกรม NEC2) ซึ่งพบว่าผลลักษณะของลวดลื่นย้อยด้านหลังจากการคำนวณ โดย NEC2 และการทดสอบมีความใกล้เคียงกัน แต่ผลจากการทดสอบจะมีระดับสูงกว่าการคำนวณ



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.26 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

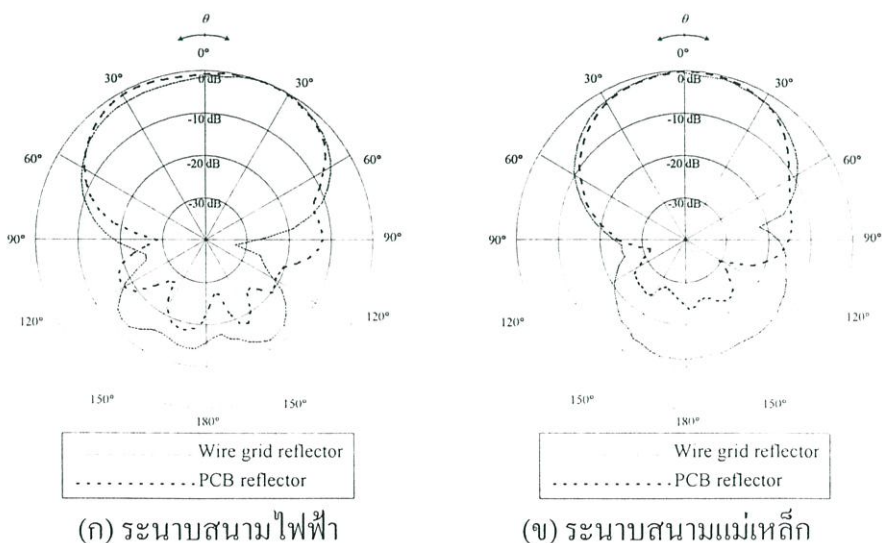
รูปที่ 5.27 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ

สำหรับลักษณะความกว้างของลวดลื่นของสายอากาศในกรณีที่ไม่เกิดลวดลื่นย้อยด้านข้าง ($h = 0.3\lambda$) พบว่าในระบายสนามไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกันทุกกรณี โดยกรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อ

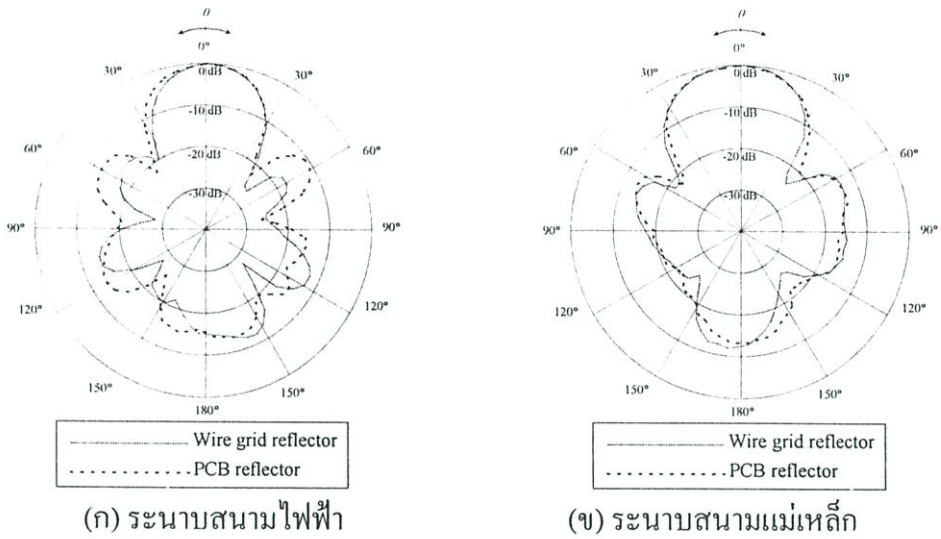
ระหว่างช่องเปิดของสายอากาศทั้งกรณีในตัวสะท้อนเป็นอนันต์และมีขนาดจำกัดจะให้ลำคลื่นที่กว้างที่สุด ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กพบว่าผลจากการทดสอบจะใกล้เคียงกับวิธีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดของสายอากาศ (NEC2) ซึ่งจะมีค่าอยู่กึ่งกลางระหว่างวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอติก โดยวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอติกจะมีลักษณะความกว้างลำคลื่นกว้างที่สุด

สำหรับกรณีที่เกิดลำคลื่นย่อยด้านข้างด้วย ($h = 0.7\lambda$) นั้นพบว่า ในระนาบสนามไฟฟ้า กรณีที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดของสายอากาศ (วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอติก) และกรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดเมื่อขนาดของตัวสะท้อนเป็นอนันต์ (NEC2) ลักษณะความกว้างของลำคลื่นและระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างมีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนกรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดเมื่อขนาดของตัวสะท้อนมีขนาดจำกัด (NEC2) มีค่าความกว้างลำคลื่นของสายอากาศกว้างที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบพบว่า มีลักษณะความกว้างลำคลื่นแคบที่สุด ขณะที่ระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างจะมีค่าอยู่ระหว่างวิธีที่พิจารณาตัวสะท้อนเป็นอนันต์และมีขนาดจำกัด ส่วนในระนาบสนามแม่เหล็กพบว่าลักษณะของลำคลื่นหลักของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่พิจารณาขนาดตัวสะท้อนเป็นอนันต์ ขณะที่ระดับของลำคลื่นย่อยด้านข้างและด้านหลังจะใกล้เคียงกับกรณีที่ตัวสะท้อนมีขนาดจำกัด

เนื่องจากการจัดเรียงสายอากาศเป็นลักษณะแถวลำดับนั้น จะพิจารณาตัวสะท้อนที่มีลักษณะเป็นลวดตาข่ายอลูมิเนียมแทนการใช้แผ่นวงจรพิมพ์ ดังนั้นเพื่อความมั่นใจว่าตัวสะท้อนที่เป็นแผ่นวงจรพิมพ์ และลวดตาข่ายอลูมิเนียมจะให้ผลที่ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงทดสอบสายอากาศโดยใช้ตัวสะท้อนทั้งสองแบบเปรียบเทียบกัน แสดงดังรูปที่ 5.28 และ 5.29 ในกรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ ตามลำดับ

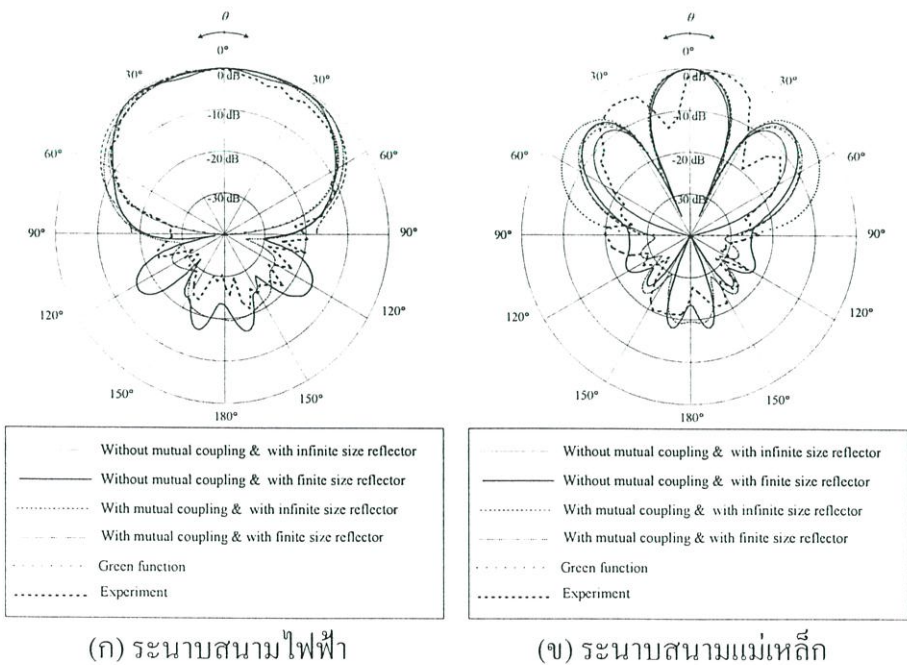


รูปที่ 5.28 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อตัวสะท้อนเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ และ ลวดตาข่ายอลูมิเนียม เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ

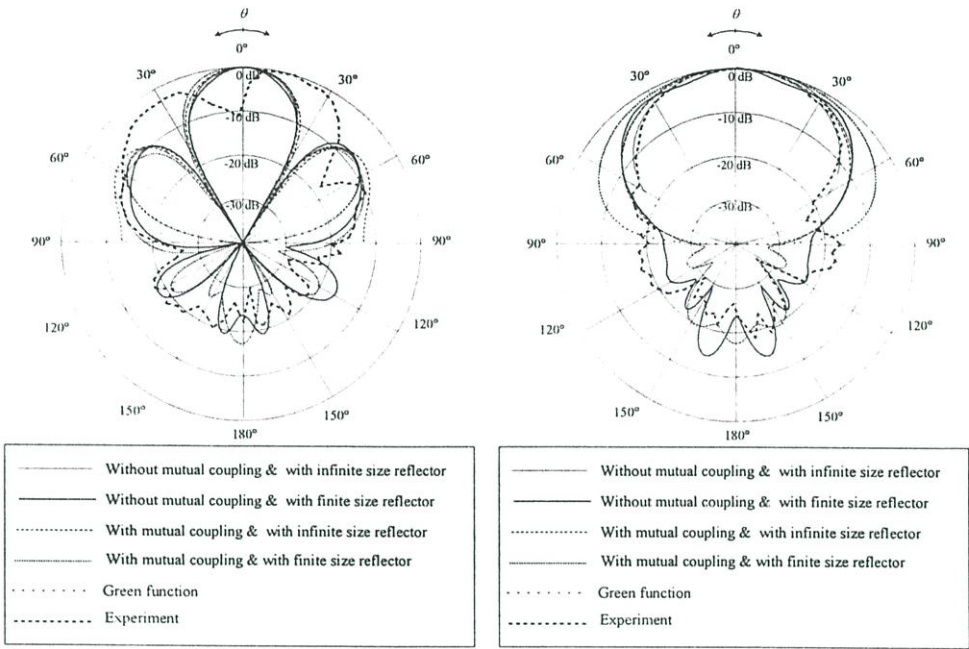


รูปที่ 5.29 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เมื่อตัวสะท้อนเป็นแผ่นวงจรมีพีพิมพ์ และ ลวดตาข่ายอลูมิเนียม เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ

จากรูปจะพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยใช้ตัวสะท้อนทั้งสองแบบมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก กรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศพิจารณาลำคลื่นหลักนั้น ไม่แตกต่างกันมาก แต่ลำคลื่นย่อยด้านหลังจะมีระดับที่สูงเมื่อใช้ตัวสะท้อนเป็นลวดตาข่ายอลูมิเนียม ส่วนกรณีที่ h เท่ากับ 0.7λ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก



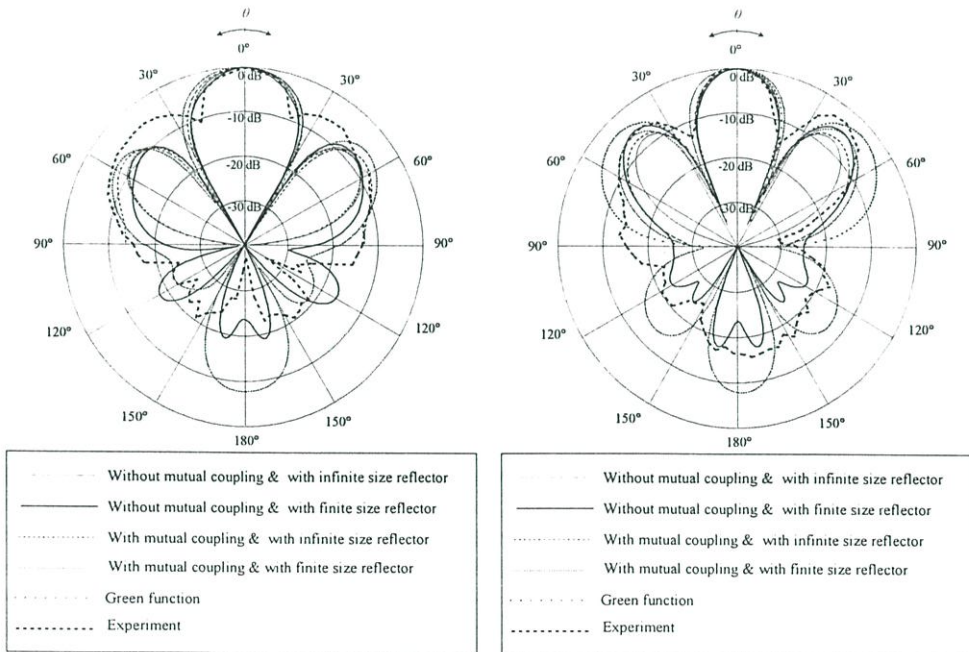
รูปที่ 5.30 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

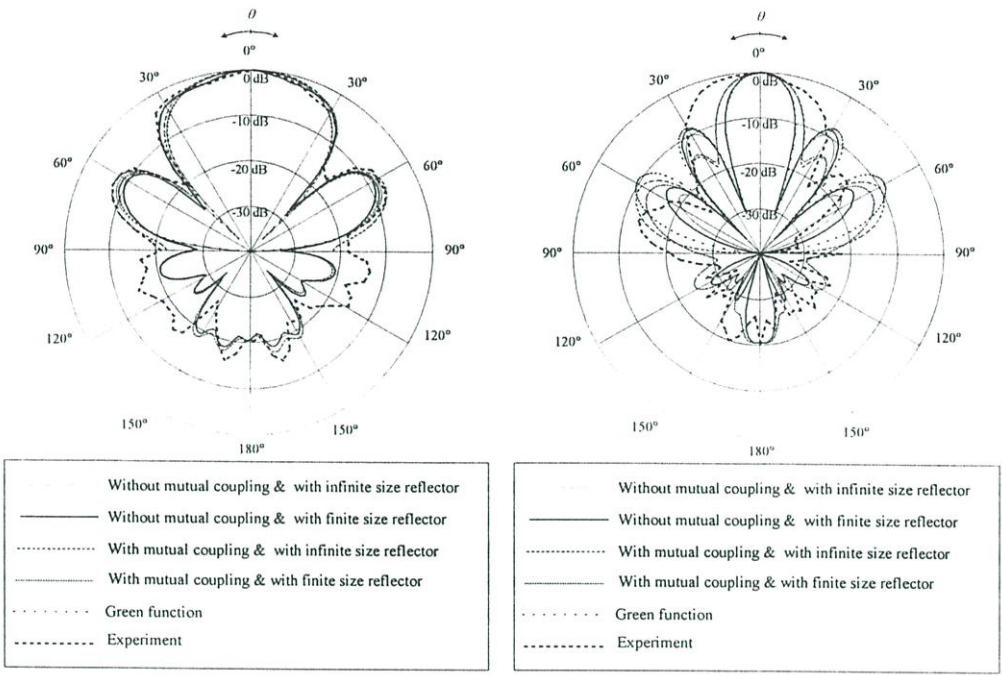
รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

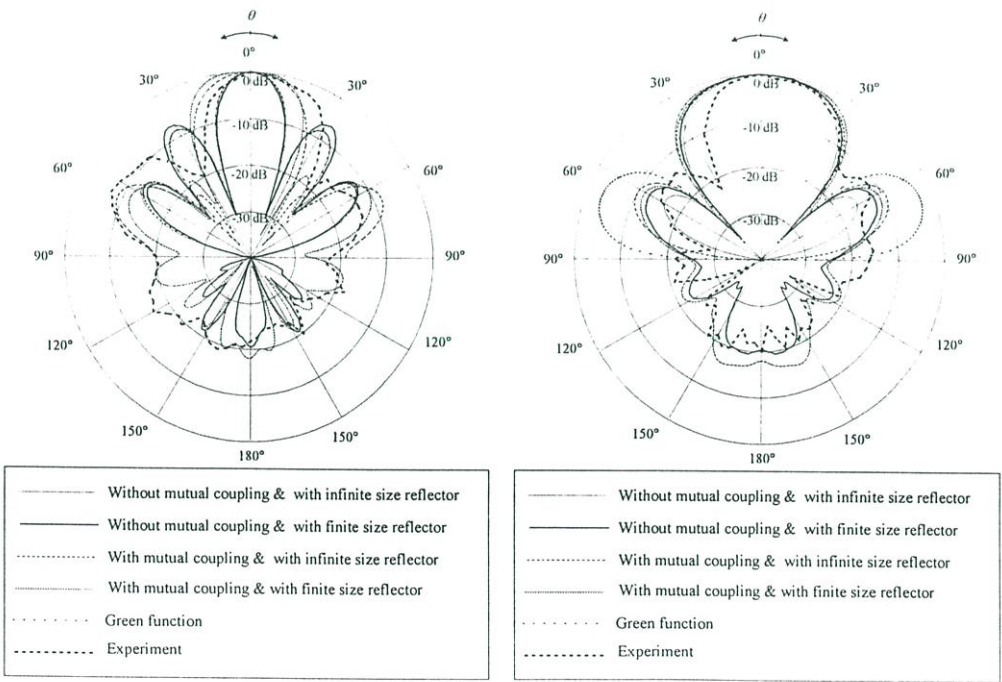
รูปที่ 5.32 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

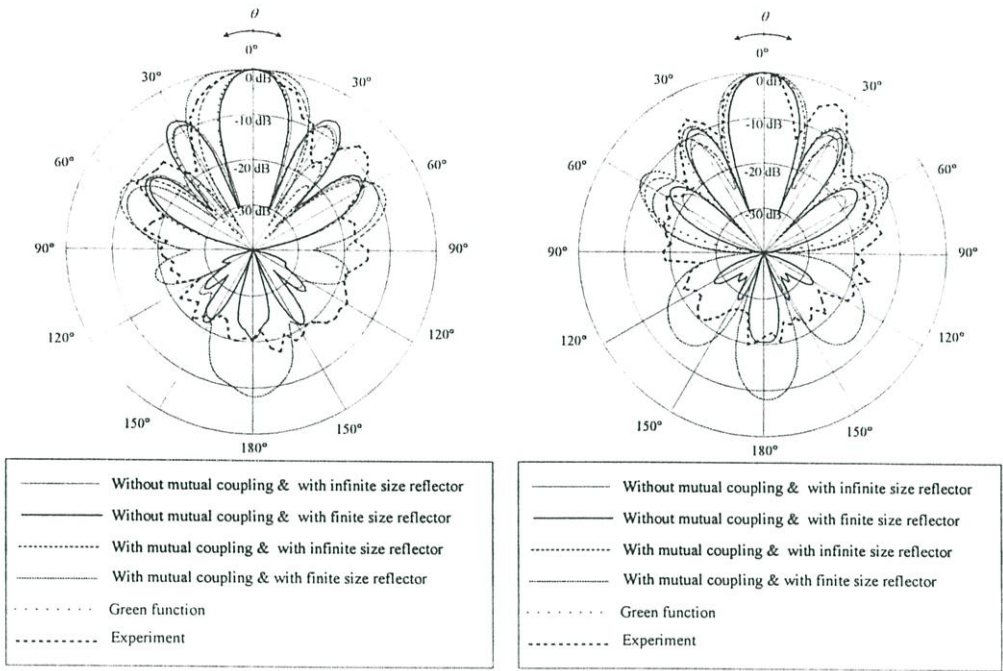
รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ



(ก) ระบายสนามไฟฟ้า

(ข) ระบายสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.34 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y ของโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 5.35 เปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ ของโพรบ กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ

รูปที่ 5.30 ถึงรูปที่ 5.35 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับ กรณีที่ h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ ตามลำดับ เนื่องจากในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะต้องจัดให้สายอากาศส่งและสายอากาศรับวางห่างกันอย่างน้อยเท่ากับระยะของสนามระยะไกล ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามขนาดของสายอากาศ สำหรับสายอากาศโพรบ กระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับวางเหนือตัวสะท้อนนั้นจะต้องวางสายอากาศรับและสายอากาศส่งมีระยะห่างมาก จึงไม่สามารถทดสอบให้ห้องที่ไม่มีการสะท้อนได้ ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจึงจัดตั้งในบริเวณนอกอาคารที่มีพื้นที่ค่อนข้างโล่ง ดังนั้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจึงบิดเบี้ยวไปบ้างแต่ยังคงยอมรับได้

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันระหว่างการคำนวณและการทดสอบพบว่า ผลการคำนวณและการทดสอบนั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อพิจารณาลำคลื่นหลักนั้นมีความสอดคล้องกันทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก โดยกรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับ (With mutual coupling) ที่ใช้โปรแกรม NEC2 จะมีลักษณะความกว้างลำคลื่นใกล้เคียงกับการทดสอบที่สุด

เมื่อพิจารณาลำคลื่นย่อยด้านหลังนั้นพบว่า ผลที่ได้จากการทดสอบจะมีลักษณะค่อนข้างเกิดการกระเพื่อมถี่มาก นั่นอาจเป็นผลจากการการสะท้อนจากพื้นดินด้วย ทั้งนี้เพราะในการจัดตั้งไม่สามารถตั้งสายอากาศสูงมากๆ ได้ เนื่องจากปัญหาเรื่องน้ำหนักและเรื่องสภาพอากาศ เช่น ลม

เป็นต้น แต่เมื่อพิจารณาระดับของลาคลื่นย่อยด้านหลังที่เกิดขึ้นนั้น พบว่ามีความใกล้เคียงกับการคำนวณที่พิจารณาขนาดของตัวสะท้อนขนาดจำกัด ทั้งที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับ (With mutual coupling and with finite size reflector) และไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับ (Without mutual coupling and with finite size reflector) ในกรณีจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้น แต่กรณีจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับเชิงระนาบนั้น พบว่าวิธีที่ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบแถวลำดับนั้นระดับลาคลื่นย่อยด้านหลังจะใกล้เคียงกว่ากรณีที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างองค์ประกอบ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะข้อจำกัดของเซกเมนต์สำหรับโปรแกรม NEC2 ที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างสายอากาศได้ไม่เกิน 5000 เซกเมนต์ ดังนั้นในการสร้างตัวสะท้อนจึงไม่สามารถสร้างได้ละเอียดมาก (ตัวสะท้อนมีช่องว่างมาก) ทำให้เกิดลาคลื่นย่อยด้านหลังสูงนั่นเอง

5.3.3 ค่าอัตราการขยายของสายอากาศ

สำหรับอัตราการขยายของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน สามารถหาได้โดยการทดสอบได้ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อย่อย 5.2.3 โดยสายอากาศส่งได้ใช้สายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีความยาววงแหวนเท่ากับ 0.25λ ที่มีค่าอัตราการขยายเท่ากับ 5.96 dBi เป็นสายอากาศส่ง ซึ่งค่าอัตราการขยาย และประสิทธิภาพของสายอากาศแต่ละกรณีสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.5 ดังนี้

ตารางที่ 5.5 ค่าอัตราการขยาย และประสิทธิภาพของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนแบบระนาบ

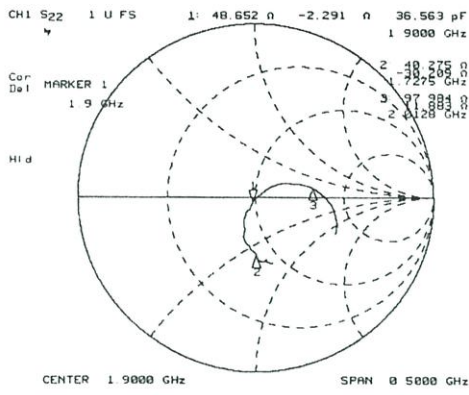
สายอากาศรับ		$R(m)$	$l_s(dB)$	$Pr(dBm)$	อัตรา การขยาย (dBi)	ประสิทธิภาพ ของสาย อากาศ (%)
$h = 0.3\lambda$						
สายอากาศ องค์ประกอบ เดี่ยว	ตัวสะท้อนเป็น แผ่นวงจรมิมพ์	4.5	-51.08	-38.70	7.46	91
	ตัวสะท้อนเป็น ลวดตาข่าย	4.5	-51.08	-39.70	8.46	78
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน x		13.5	-60.62	-45.80	11.00	86
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน y		13.5	-60.62	-45.70	11.20	90
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ		13.5	-60.62	-42.70	14.00	88

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) ค่าอัตราการขยาย และประสิทธิภาพของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อนแบบ

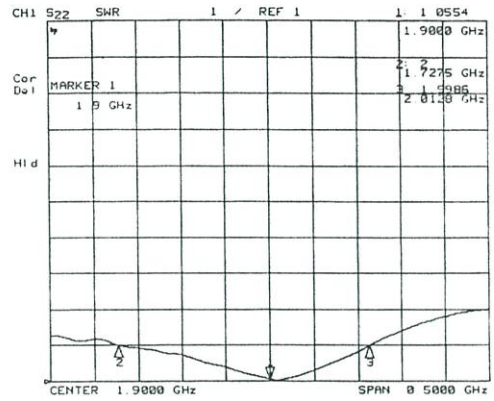
สายอากาศรับ		$R(m)$	$l_s(dB)$	$Pr(dBm)$	อัตรา การขยาย (dBi)	ประสิทธิภาพ ของสาย อากาศ (%)
$h = 0.7\lambda$						
สายอากาศ องค์ประกอบ เดี่ยว	ตัวสะท้อนเป็น แผ่นวงจรมิมพ์	4.5	-51.08	-44.90	11.80	96
	ตัวสะท้อนเป็น ลวดตาข่าย	4.5	-51.08	-45.00	11.70	95
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน x		13.5	-60.62	-43.60	13.10	86
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน y		13.5	-60.62	-43.30	13.40	87
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ		13.5	-60.62	-40.50	16.20	88

5.3.4 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

สำหรับคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ทั้งกรณี h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ จะแสดงโดยจะพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของความถี่ ทั้งนี้เพื่อพิจารณาความสามารถในการปฏิบัติการของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆ ด้วย โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต้องมีค่าเท่ากับ 50 โอห์มหรือมีค่าใกล้เคียง และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) ของสายอากาศต้องมีค่าไม่เกิน 2:1 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ หรือกล่าวได้ว่าจะยอมให้มีการสะท้อนกลับเพียง 11.11% เท่านั้น ในรูปที่ 5.36 ถึงรูปที่ 5.39 แสดงคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ สำหรับคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเมื่อ h เท่ากับ 0.7λ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.40 ถึงรูปที่ 5.43 โดยจะเริ่มจากกรณีองค์ประกอบเดี่ยว กรณีจัดเรียงสายอากาศเป็นแถวลำดับเชิงเส้นและเชิงระนาบตามลำดับ ดังนี้

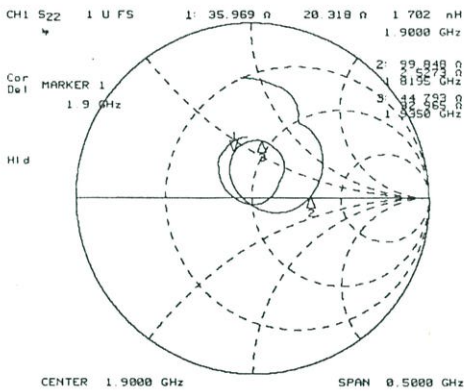


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

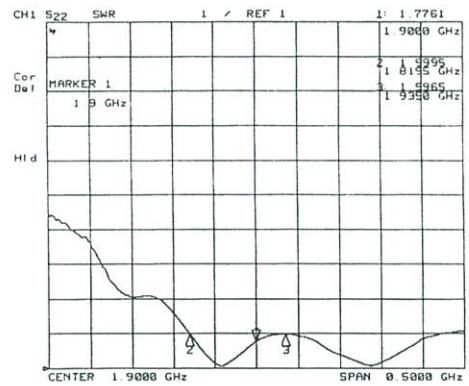


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.36 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.3λ กรณีองค์ประกอบเดียว

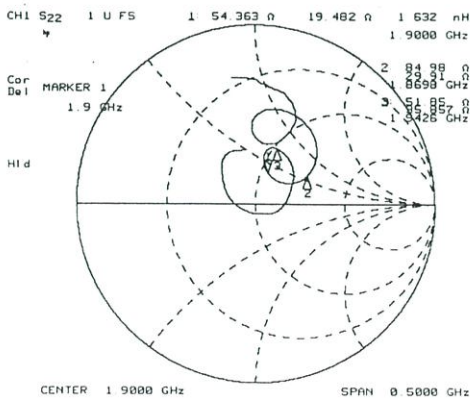


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

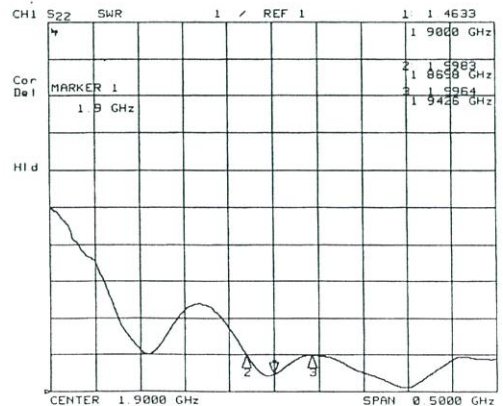


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.37 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x ที่ h เท่ากับ 0.3λ

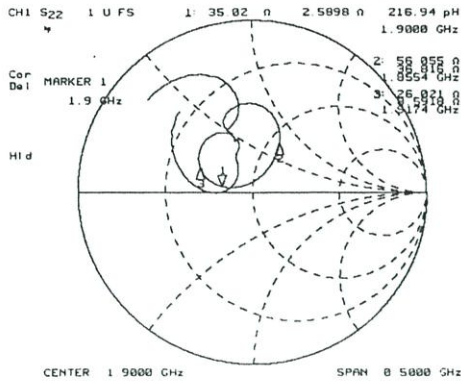


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

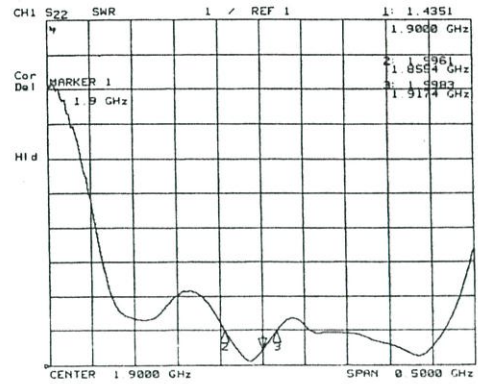


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.38 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y ที่ h เท่ากับ 0.3λ

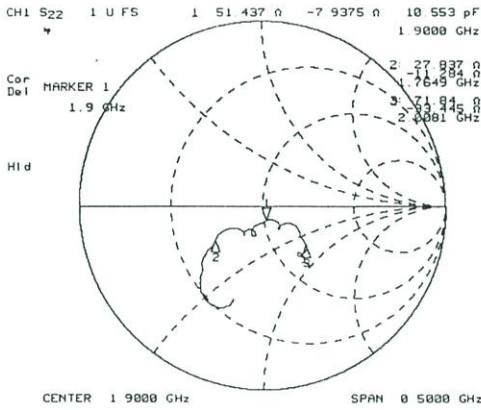


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

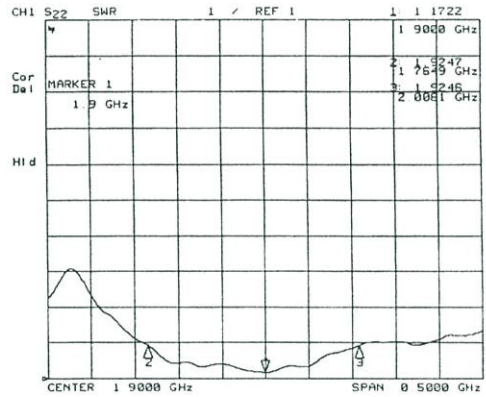


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.39 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ ที่ h เท่ากับ 0.3λ

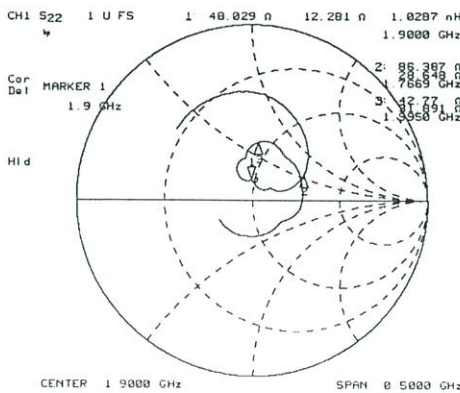


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

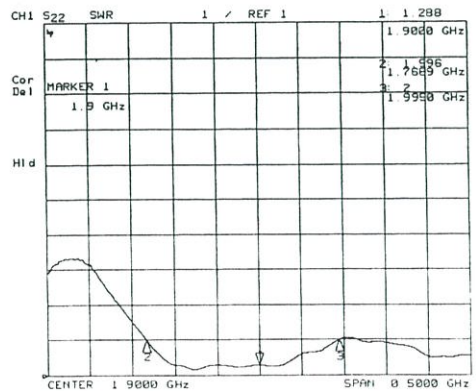


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.40 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อ h เท่ากับ 0.7λ กรณีองค์ประกอบเดียว

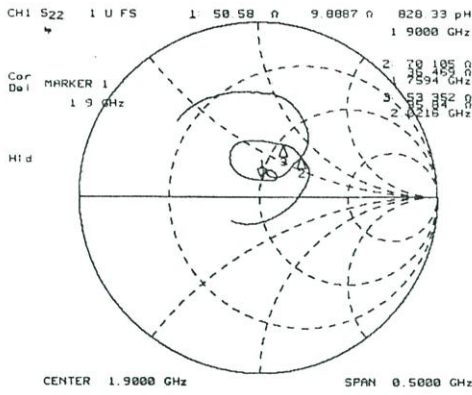


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

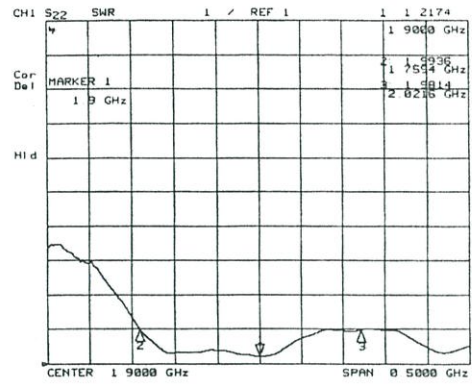


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.41 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระตุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน x ที่ h เท่ากับ 0.7λ

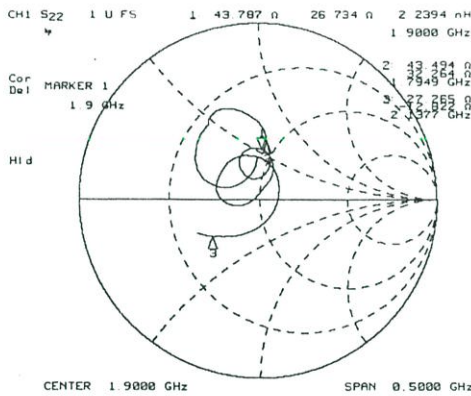


(ก) ค่าอิมพีแดนซ์

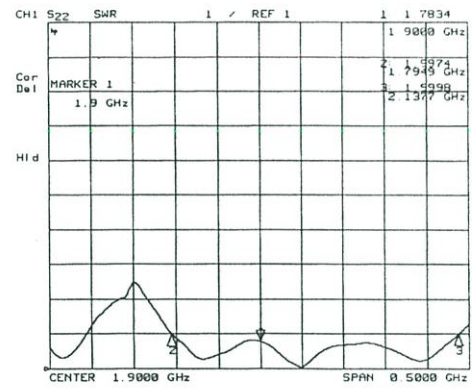


(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.42 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงเส้นตามแนวแกน y ที่ h เท่ากับ 0.7λ



(ก) ค่าอิมพีแดนซ์



(ข) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

รูปที่ 5.43 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับเชิงระนาบ ที่ h เท่ากับ 0.7λ

ทุกกรณีนั้นเมื่อพิจารณาที่ความถี่ปฏิบัติการพบว่า คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่ายอมรับได้ กล่าวคือ ค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50 โอห์ม และค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าต่ำกว่า 2:1 นอกจากนี้ยังพบว่า สายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากเมื่อวางห่างตัวสะท้อนเท่ากับ 0.7λ จะสามารถทำงานได้ในช่วงกว้างแถบความถี่ที่กว้างกว่ากรณีที่มีระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อนเท่ากับ 0.3λ สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง และช่วงกว้างแถบความถี่ของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ได้แสดงในตารางที่ 5.6 ดังนี้

ตารางที่ 5.6 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์และช่วงกว้างแถบความถี่ของสายอากาศโพรบกระตุ้นวง
แหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน

สายอากาศโพรบกระตุ้นวง แหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก	ค่าอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)	ค่าอัตราส่วน คลื่นนิ่ง	ช่วงกว้างแถบ ความถี่ (%)
$h = 0.3\lambda$			
สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว	48.65-j2.29	1.06:1	15.02
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน x	35.97+j20.32	1.78:1	6.29
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน y	54.36+19.48	1.46:1	3.83
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ	35.02+2.59	1.44:1	3.26
$h = 0.7\lambda$			
สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว	51.44-j7.94	1.17:1	12.80
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน x	48.03+j12.28	1.29:1	12.11
สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น ตามแนวแกน y	50.58+j9.89	1.22:1	13.80
สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ	43.79+j26.73	1.78:1	18.00

5.4 สรุป

ในบทนี้เป็นการแสดงการออกแบบ การสร้าง และการทดสอบสายอากาศ ทั้งนี้เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่พิจารณาได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ค่าอัตราขยายของสายอากาศ คุณลักษณะเชิงการโพลาริซชันของสายอากาศ และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณนั้นมีความสอดคล้องกัน โดยแต่ละวิธีจะมีความถูกต้องมากน้อยต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะข้อจำกัดและความละเอียดในการคำนวณของแต่ละวิธีนั่นเอง ซึ่งพบว่าลักษณะของลำคลื่นหลักของสายอากาศนั้นทุกวิธีที่คำนวณมีความใกล้เคียงกับการทดสอบ แต่สำหรับลักษณะของลำคลื่นย่อยนั้นพบว่า การคำนวณที่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดของสายอากาศ (NEC2) เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่พิจารณา (วิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์และวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิก) จะให้ค่าคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกันมาก แต่สังเกตได้ชัดเจนในระนาบสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ วิธีที่

พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดจะมีระดับลำคลื่นย่อยด้านข้างที่ใกล้เคียงกับการทดสอบมากกว่าวิธีอื่นๆ ส่วนลักษณะของลำคลื่นย่อยด้านหลังนั้นต้องพิจารณาขนาดของตัวสะท้อนร่วมด้วยจะทำให้ผลที่มีความแม่นยำมากขึ้น สำหรับการคำนวณแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียต่างกันดังนี้

วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ วิธีนี้พิจารณาโครงสร้างของสายอากาศเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากสององค์ประกอบจัดวางในลักษณะแถวลำดับที่หันหน้าเข้าหากัน การคำนวณวิธีนี้ไม่พิจารณาโพรบร่วมด้วย และไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด ดังนั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะมีลักษณะความกว้างลำคลื่นแคบทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางของสายอากาศมีค่าสูงกว่าวิธีอื่นๆ การคำนวณวิธีนี้เนื่องจากการสมมติที่ค่อนข้างมากเพื่อให้คำนวณง่าย ดังนั้นนิพจน์ของสมการการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจึงมีลักษณะง่ายไม่ซับซ้อน เวลาที่ใช้ในการประมวลผลน้อยทำให้สะดวกในการวิเคราะห์ที่ต้องการผลที่รวดเร็ว แต่วิธีนี้ไม่สามารถคำนวณคุณลักษณะของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ สำหรับการพิจารณาออกแบบสายอากาศด้วยวิธีนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบสายอากาศโดยชดเชยค่าความผิดพลาดของอัตราขยายที่ต้องการประมาณ -2 dBi

วิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก วิธีนี้พิจารณาโครงสร้างของสายอากาศเป็นช่องเปิดสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีโพรบอยู่ตรงกลางระหว่างช่องเปิดทั้งสองด้าน ซึ่งการพิจารณาผลของโพรบร่วมด้วยนี้จะมีผลต่อแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็กมากกว่าระนาบสนามไฟฟ้า โดยแบบรูปของสายอากาศการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะมีลำคลื่นที่ค่อนข้างกว้าง เป็นผลให้ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางของสายอากาศต่ำ และเนื่องจากวิธีนี้ไม่พิจารณาการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิดด้วย ทำให้ค่าสภาพเงาเชิงทิศทางของสายอากาศที่ได้จากวิธีนี้ต่ำกว่าวิธีอื่นๆ วิธีนี้สามารถคำนวณคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้และมีความใกล้เคียงการทดสอบมากที่สุด การพิจารณาออกแบบสายอากาศด้วยวิธีนี้ จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบสายอากาศโดยชดเชยค่าความผิดพลาดของอัตราขยายที่ต้องการประมาณ $+3$ dBi

โปรแกรม NEC2 วิธีนี้จะต้องจำลองสายอากาศให้มีสภาพเหมือนจริงมากที่สุดโดยใช้เส้นลวด ซึ่งจะพิจารณาทั้งโพรบและการเชื่อมต่อระหว่างช่องเปิด วิธีนี้จะให้ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศใกล้เคียงกับการทดสอบมากที่สุด และสามารถคำนวณคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้ด้วย แต่วิธีนี้จะมีข้อจำกัดเรื่องจำนวนเซ็กเมนต์ที่ใช้ในการจำลอง ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะสำหรับโครงสร้างที่จำเป็นต้องใช้ความละเอียดและมีขนาดใหญ่หลายๆ และการประมวลผลโดยวิธีนี้ต้องใช้เวลาค่อนข้างมาก

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ข้อเสนอแนะต่างๆ และแนวทางในการพัฒนาต่อสำหรับวิทยานิพนธ์

6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 นั้น วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษา วิเคราะห์ สร้าง และทดสอบสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก สายอากาศชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างไม่ซับซ้อน และมีความแข็งแรง วัสดุที่ใช้สร้างสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนี้จะแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง คือ มีการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางหน้าและด้านหลัง ดังนั้น การประยุกต์ใช้งานของสายอากาศชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับระบบการสื่อสารที่ให้บริการในบริเวณพื้นที่ที่แคบตามแนวยาว เช่น บนทางด่วน ในอุโมงค์ และ บริเวณรถไฟใต้ดิน เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อนำสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากวางเหนือตัวสะท้อน ในระยะที่เหมาะสมจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวที่ให้ค่าอัตราการขยายสูงขึ้น ด้วยคุณลักษณะนี้ของสายอากาศจึงเหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่นระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด ได้แก่ ระบบการสื่อสารไร้สาย และระบบการสื่อสารดาวเทียม เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบจะมีความต้องการของคุณลักษณะของสายอากาศไม่เหมือนกัน ดังนั้น การเลือกใช้หรือออกแบบจึงอาจจะแตกต่างกันไป โดยแนวทางในการออกแบบสายอากาศนั้นได้แสดงไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4

สำหรับทฤษฎีต่างๆ ที่นำมาใช้ในอธิบายถึงคุณลักษณะของสายอากาศ ตลอดจนวิธีการได้มาของผลเฉลยของสมการสนามที่แพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยการประยุกต์ใช้หลักการสนามสมมูลและเงื่อนไขของโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อสร้างสมการอินทิกรัลที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าแสดงในสมการนี้ นั่นคือ กระแสแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่ช่องเปิดและที่โพรบตามลำดับ โดยขั้นตอนในการหากระแสแม่เหล็กไฟฟ้าที่อาศัยฟังก์ชันกรีนไดโอดิกซึ่งเป็นผลตอบสนองอิมพัลส์สำหรับโครงสร้างของสายอากาศ เพื่อนำไปพิจารณาหาสนามที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อไป นอกจากนี้ในการแสดงคุณลักษณะของสายอากาศยังใช้วิธีฟังก์ชันศักร์เวกเตอร์ และใช้โปรแกรม NEC2 ที่เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ได้จากการพิจารณาโดยวิธีโมเมนต์ด้วย สำหรับทฤษฎีเหล่านี้ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2

สำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก ในขั้นแรกจะพิจารณาเฉพาะกรณีองค์ประกอบเดียวก่อน เพื่อพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ ค่าความกว้างวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉาก (a) ค่าความสูงของวงแหวน (b) และค่าความยาวของวงแหวน (c) โดยจะพิจารณาให้เกิดโหมด TE_{10} ที่เป็นโหมดเป็นใหญ่ในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งพบว่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดโหมดในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากคือ ค่าความกว้างและความสูงของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากนั่นเอง โดยเงื่อนไขที่เกิดโหมด TE_{10} คือ $\lambda/2 < a < \lambda$ ($b = a/2$) ดังนั้นจึงเลือกที่ค่าหนึ่งคือ a เท่ากับ 0.69λ และ b เท่ากับ 0.35λ ดังนั้นสามารถหาความยาวของวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากได้ โดยเลือกเงื่อนไขที่ให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศสูงๆ สำหรับความยาวของโพรบเชิงเส้นที่ป้อนสัญญาณจะมีผลอย่างมากต่อคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ ในการพิจารณาหาความยาวที่เหมาะสมนั้นพิจารณาจากวิธีฟังก์ชันกรีนไดเอดิก และ โปรแกรม NEC2 พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ ความยาวโพรบเชิงเส้นประมาณ 0.27λ จะทำให้สายอากาศแมตซ์กับสายนำสัญญาณดีที่สุด (เมื่อพิจารณาภายหลังพบที่ตำแหน่งนี้สายอากาศไม่แมตซ์กับช่องว่างอากาศ ดังนั้นทำให้ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต่ำ) จากนั้นจะพิจารณาการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นลักษณะแถวลำดับ พารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะของสายอากาศ คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ และ จำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ด้วย โดยคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์นั้น ได้แก่ ค่ามุมที่สนามสูงสุด ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศ นอกจากนี้ได้พิจารณาคูณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วย ซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 3

สำหรับบทที่ 4 เป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระดุนวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน ซึ่งจะพิจารณาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกรณีองค์ประกอบเดียวก่อน นั่นคือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศและตัวสะท้อน (h) พบว่าจะมีบางตำแหน่งเท่านั้นที่ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ในการวิเคราะห์จะพิจารณาทั้งกรณี h เท่ากับ 0.3λ และ 0.7λ ทั้งนี้เพราะที่กรณี h เท่ากับ 0.3λ จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางเดียวที่ไม่มีลำคลื่นย่อยด้านข้าง ส่วนกรณี h เท่ากับ 0.7λ จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางเดียวที่มีลำคลื่นย่อยด้านข้างแต่ให้ค่าอัตราการขยายสูงกว่ากรณีแรก ดังนั้นจึงเลือกทั้งสองกรณีพิจารณาพร้อมๆ กัน จากนั้นจะพิจารณากรณีที่น่าสายอากาศมาจัดเรียงเป็นลักษณะแถวลำดับ โดยคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ ค่ามุมที่สนามสูงสุด ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่มากที่สุดของสายอากาศ นอกจากนี้ได้พิจารณาคูณลักษณะเชิงการโพลาไรซ์ของสายอากาศด้วย

เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการคำนวณจากวิธีต่างๆ ในบทที่ 3 และ บทที่ 4 ดังนั้น ในบทนี้จะแสดงการสร้าง การทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบ และการคำนวณในแต่ละวิธี ซึ่งพบว่าผลการทดสอบและการคำนวณนั้นมีความสอดคล้องกัน แต่อย่างไรก็ดียังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดทางการคำนวณ และความไม่พร้อมของเครื่องมือในการสร้างและการทดสอบ ในวิทยานิพนธ์นี้มีบางส่วนที่มีการสมมติเพื่อลดความยุ่งยากและความซับซ้อนลง แต่ยังคงให้ผลการคำนวณที่ยอมรับได้

และเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจเรื่องการเกิดโหนดในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก ส่วนภาคผนวก ข จะกล่าวถึงพีชคณิตของฟังก์ชันไคแอดิก และการเขียนสมการแมกซ์เวลล์ในรูปของไคแอดิก และภาคผนวก ค จะเป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้แล้วในบทที่ผ่านมาจะพบว่า การคำนวณจะให้ผลที่ยอมรับได้จริง แต่ถ้าพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศให้ละเอียดมากขึ้น การพิจารณาหากระแสที่โพรบโดยใช้วิธีโมเมนต์ร่วมด้วยจะทำให้สามารถอธิบายคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้แม่นยำขึ้น และการพิจารณาการแมตซ์ระหว่างสายอากาศและช่องว่างอากาศเพื่อเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมของสายอากาศร่วมด้วย จะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพในการแพร่กระจายคลื่นมากขึ้น สำหรับสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมมุมฉากที่วางเหนือตัวสะท้อน พบว่าการทำนายลักษณะของลำคลื่นย้อนด้านหลังจำเป็นต้องพิจารณาขนาดของตัวสะท้อนร่วมด้วย แม้ว่าโปรแกรม NEC2 จะสามารถอธิบายคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดสอบ แต่โปรแกรม NEC2 ก็มีข้อจำกัดของจำนวนเซกเมนต์ และระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งหากต้องการความละเอียดและต้องการให้สภาพเหมือนจริงนั้นต้องใช้จำนวนเซกเมนต์มากๆ และใช้เวลาในการประมวลผลนาน (สามารถแก้ไขได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยความจำสูงๆ) ดังนั้นจำเป็นต้องพิจารณาโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอ (Uniform Theory of Diffraction :UTD) ร่วมด้วย หรือถ้าจะพิจารณาการใช้งานจริงซึ่งอาจมีราโดม (Radome) ครอบสายอากาศเพื่อให้สายอากาศมีลักษณะที่เรียบร้อย หรือป้องกันสายอากาศจากสภาวะแวดล้อม เช่น ฝุ่น หรือ ฝน เป็นต้น ก็ต้องคำนวณราโดมร่วมด้วยเพื่อความละเอียดมากขึ้น

ระบบป้อนสัญญาณเป็นสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ สำหรับสายอากาศที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับ ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ระบบป้อนสัญญาณด้วยตัวแบ่งกำลังงานที่เป็นตัวเชื่อมต่อแบบทีโดยผ่านสายนำสัญญาณแบบแกนร่วมที่มีความยาวเป็นจำนวนเท่าของ $\lambda/4$ เท่ากันทุกสายนั้น พบว่าหากจำนวนขององค์ประกอบในแถวลำดับเพิ่มขึ้น จำนวนของสายนำสัญญาณและตัวเชื่อมต่อก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้น หากพัฒนาระบบการป้อนสัญญาณให้มีการสูญเสียน้อยลงจะยิ่งทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] R.C.Johnson and H.Jasik (eds.), *Antenna Engineering Handbook*, New York: McGraw-Hill, 1984, ch.2.
- [2] K.Cho and T.Hori, "Bidirectional rod antenna composed of narrow patches," *Proc.IEEE Antenna Propagat. Soc. Symp.*, pp.174-177, June 1994.
- [3] T. Hori, K. Cho, and K. Kagoshima, "Bidirectional base station antenna illuminating a street microcell for personal communication system," *Proc. 9th Inst. Elect. Eng. Conf. Antennas Propagat.*, pp.419-422, Apr.1995.
- [4] H. Arai and K. Kohzu, "A bidirectional notch antenna," *Proc. IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp.*, pp.42-45, July 1996.
- [5] K. Kohzu and H. Arai, "Dual band bidirectional antenna," *Proc. 1996 Asia-Pacific Microwave Conf.*, pp.856-859, Dec. 1996.
- [6] T. Mukaiyama, H. Arai, and Y. Ebine, "Bi-directional notch and crank-shaped antenna," *Proc. 1997 Asia-Pacific Microwave Conf.*, pp.417-420, Dec. 1997.
- [7] J.R.James and P.S.Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*, vol.1-3, Peter Peregrinus, 1989.
- [8] C.A.Balanis, "Horn Antennas," Chapter 8 in *Antenna Handbook: Theory, Applications and Design*, 2nd ed., John Wiley & Son, Inc., 1997.
- [9] S.Kosulvit, "A Bidirectional Antenna using a Probe Excited Ring," Doctoral Thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2001.
- [10] S.Ramo, J.R.Whinney and T.V.Duzer, *Field and wave in communication electronics*, 2nd ed. John Wiley & Son, Inc., 1984.
- [11] C.A.Balanis, "Radiation Integrals and Auxiliary Potential Functions," Chapter 3 in *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Son, Inc., 1997.
- [12] C.A.Balanis, "Aperture Antenna," Chapter 12 in *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Son, Inc., 1997.
- [13] C.T.Tai, *Dyadic Green Functions in Electromagnetic Theory*, 2nd ed., IEEE Press, 1994.
- [14] C.A.Balanis, "Linear Wire Antenna," Chapter 4 in *Antenna Handbook: Theory, Applications and Design*, 2nd ed., John Wiley & Son, Inc., 1997.
- [15] G.J.Burke and A.J.Poggio. Numerical Electromagnetics Code (NEC). Lawrence Livermore Nat. Lab., Livermore, CA, 1981.
- [16] R.F.Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, 1961.
- [17] R.S.Elliott, "Transverse Electric and Transverse Magnetic Guide Waves: Part I," Chapter 4 in *An Introduction to Guide Waves and Microwave Circuits*, Prentice-Hall, Inc., 1993.

- [18] C.S.Lee, S.W.Lee and S.L.Chuang, "Plot of Modal Field Distribution in Rectangular and Circular Waveguides," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-33, no.3, pp.271-274, March 1985.
- [19] C.A.Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Son, Inc., 1989.
- [20] J.H.Cook, Jr., L.H. Hemming, and T.D.Smith, "Antenna Pattern Measurements," Chapter 6 in *Microwave Antenna Measurements*, Scientific-Atlanta, July 1970.
- [21] C.A.Balanis, "Antenna Measurements," Chapter 16 in *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Son, Inc., 1997.
- [22] C.A.Balanis, "Reflector Antenna," Chapter 15 in *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Son, Inc., 1997.
- [23] K.R.Demarest, *Engineering Electromagnetics*, Prentice Hall, Inc., 1998.
- [24] บัณฑิต วิจารณ์อารยานนท์ วิศวกรรมไมโครเวฟ พิมพ์ครั้งที่ 2 สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โหมดในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ในบทนี้จะอธิบายถึงท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก โดยมุ่งเน้นในเรื่องการเกิดโหมดคลื่นต่างๆ ในท่อนำคลื่น ก่อนที่จะกล่าวถึงสนามและการเกิดโหมดในท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากนั้น จะกล่าวถึงสมการทั่วไปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าก่อน จากนั้นจะอธิบายถึงการกำหนดเงื่อนไขเพื่อให้ได้สนามในโหมดต่างๆ

การสร้างสมการคลื่น [23]

เมื่อกำหนดให้ทิศทางการส่งผ่านคลื่นอยู่ในทิศ z ค่าคงที่การส่งผ่านเป็น γ และสมมติให้ความหนาแน่นกระแสในฉนวนไดอิเล็กตริกและความนำกระแสรวมในค่าสภาพยอม ดังนั้น $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$ เป็นจำนวนเชิงซ้อน สมการคลื่นลดรูปสมการเฮล์มโฮลทซ์เป็นสนามเฟสเซอร์ (Phasor field)

$$\nabla^2 \bar{E} = -k^2 \bar{E}$$

และ

$$\nabla^2 \bar{H} = -k^2 \bar{H}$$

∇^2 สามารถแยกเป็นสองส่วน

$$\nabla^2 \bar{E} = \nabla_t^2 \bar{E} + \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2}$$

พจน์สุดท้ายเป็นการแยก ∇^2 จากแนวแกน ส่วนพจน์แรกเป็นลาปลาเซียนสองมิติ (Two-dimensional Laplacian) ในระนาบการเคลื่อนที่ ส่วนตัวห้อย t แสดงว่าฟังก์ชันของระนาบที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ และสมมติให้ฟังก์ชันการส่งผ่าน $e^{-\gamma z}$ ในทิศแนวแกน

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} = \gamma^2 \bar{E}$$

สมการคลื่นที่กล่าวมาข้างต้นอาจเขียนเป็น

$$\nabla_t^2 \bar{E} = -(\gamma^2 + k^2) \bar{E} \quad (\text{ก.1})$$

$$\nabla_t^2 \bar{H} = -(\gamma^2 + k^2) \bar{H} \quad (\text{ก.2})$$

สมการที่ (1) และ (2) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ต้องสอดคล้องกับขอบเขตไดอิเล็กตริกของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก เงื่อนไขขอบเขตจะกำหนดสนามจากโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของขอบเขต

จากโครงสร้างของท่อนำคลื่นโดยทั่วไปจะหาสนาม \vec{E} และ \vec{H} ขององค์ประกอบ z ที่สอดคล้องกับสมการคลื่นในสมการที่ (ก.1) และ (ก.2) และเงื่อนไขขอบเขต ส่วนสนามในองค์ประกอบอื่นๆ สามารถหาได้โดยใช้สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) และเพื่อความสะดวกก็สามารถแสดงองค์ประกอบอื่นๆ ในรูปของความสัมพันธ์กับองค์ประกอบสนาม \vec{E}_z และ \vec{H}_z และฟังก์ชันของเวลาสมมติเป็น $e^{(-j\omega t - \gamma z)}$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + \gamma E_y = -j\omega\mu H_x \quad (\text{ก.3})$$

$$-\gamma E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -j\omega\mu H_y \quad (\text{ก.4})$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \quad (\text{ก.5})$$

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega\epsilon\vec{E}$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + \gamma H_y = j\omega\epsilon E_x \quad (\text{ก.6})$$

$$-\gamma H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\omega\epsilon E_y \quad (\text{ก.7})$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \quad (\text{ก.8})$$

จากสมการข้างต้นสามารถหาองค์ประกอบของสนามอื่นๆ โดย \vec{E}_z และ \vec{H}_z ได้เช่น H_x หาได้จากสมการที่ (ก.3) และ (ก.7) ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ก็สามารถหาโดยวิธีเดียวกันนี้

$$E_x = -\frac{1}{\gamma^2 + k^2} \left(\gamma \frac{\partial E_z}{\partial x} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (\text{ก.9})$$

$$E_y = \frac{1}{\gamma^2 + k^2} \left(-\gamma \frac{\partial E_z}{\partial y} + j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (\text{ก.10})$$

$$H_x = \frac{1}{\gamma^2 + k^2} \left(j\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \gamma \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (\text{ก.11})$$

$$H_y = -\frac{1}{\gamma^2 + k^2} \left(j\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \gamma \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (\text{ก.12})$$

สำหรับคลื่นส่งผ่านนั้นเพื่อความสะดวก จะแทน $\gamma = j\beta$ เมื่อ β เป็นค่าจริงเมื่อไม่มีการลดทอน ดังนั้นสมการข้างบนสามารถเขียนใหม่เป็น

$$E_x = -\frac{j}{k_c^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (\text{ก.13})$$

$$E_y = \frac{j}{k_c^2} \left(-\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (\text{ก.14})$$

$$H_x = \frac{j}{k_c^2} \left(\omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} - \beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (\text{ก.15})$$

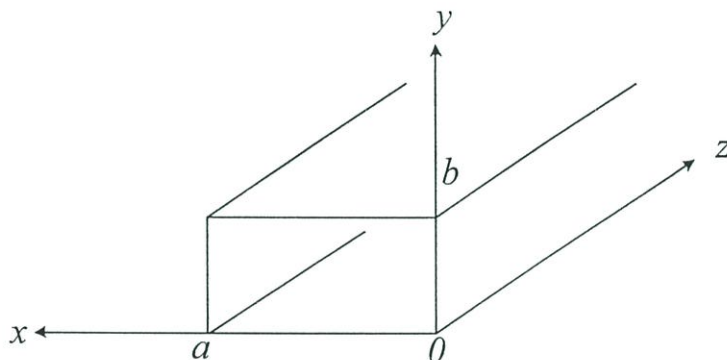
$$H_y = -\frac{j}{k_c^2} \left(\omega \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} + \beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (\text{ก.16})$$

$$\nabla_t^2 E_z = -k_c^2 E_z \quad (\text{ก.17})$$

$$\nabla_t^2 H_z = -k_c^2 H_z \quad (\text{ก.18})$$

เมื่อ

$$k_c^2 \triangleq \gamma^2 + k^2 = k^2 - \beta^2 \quad (\text{ก.19})$$



รูปที่ ก.1 ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

โหมดของคลื่น

เนื่องจากการส่งคลื่นไปตามสัญญาณซึ่งส่วนใหญ่จะมีเงื่อนไขขอบเขตที่เกิดจากโครงสร้างของสายนำสัญญาณ จึงทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นมีรูปแบบเฉพาะเท่านั้น จากรูปโครงสร้างท่อนำคลื่นในรูปที่ ก.1 นั่นคือ E_z และ H_z ซึ่งเรียกว่าสนามในแนวแกน (Axial components) และ E_x , E_y , H_x และ H_y ซึ่งเรียกว่าสนามในแนวขวาง (Transverse electromagnetic fields) จะมีการกระจายในระนาบตั้งฉากในรูปฟังก์ชันของ x และ y แต่ในแนวแกน z การเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของ $e^{-\gamma z}$ เท่านั้น ซึ่งเป็นลักษณะที่คลื่นเดินทางในทิศ z สภาพที่คลื่นไฟฟ้าที่มีรูปแบบเฉพาะดังที่กล่าวมานี้เรียกว่า “โหมด” (Mode) สายนำสัญญาณแบบท่อนำคลื่นโดยทั่วไปจะสามารถให้โหมดส่งผ่านไปได้หลายโหมด โดยขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับขนาดของท่อนำคลื่น

ในทางปฏิบัตินั้น โหมดที่ส่งผ่านไปตามสายนำสัญญาณไม่จำเป็นต้องมีส่วนประกอบของสนามทุกองค์ประกอบ เช่น คลื่นที่ส่งผ่านไปตามสายคู่ขนานนั้นจะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแนวขวางเท่านั้น คือไม่มีทั้ง E_z และ H_z และคลื่นที่ส่งผ่านไปในท่อนำคลื่นนั้นโดยทั่วไปพบว่า $E_z \neq 0$ หรือ $H_z \neq 0$ ดังนั้นจึงแบ่งรูปแบบของคลื่นออกเป็นแบบหลักๆ 3 แบบดังนี้

- (1) คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามขวาง (Transverse electromagnetic waves: TEM) คือ คลื่นที่มี $E_z = H_z = 0$ และมีเฉพาะส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระนาบตั้งฉากกับการส่งผ่าน หรือ ในแนวขวางเท่านั้น
- (2) คลื่นสนามไฟฟ้าตามขวาง (Transverse electric waves: TE) คลื่นนี้จะมีเฉพาะองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวขวางเท่านั้น คือ $E_z = 0$ แต่ $H_z \neq 0$ และองค์ประกอบในแนวขวางจะสามารถหาได้จาก H_z ตามที่ได้แสดงไว้ในสมการ (ก.11)-(ก.16)
- (3) คลื่นสนามแม่เหล็กตามขวาง (Transverse magnetic waves: TM) คลื่นนี้จะมีเฉพาะองค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในระนาบตั้งฉากเท่านั้น คือ $H_z = 0$ แต่ $E_z \neq 0$ และองค์ประกอบในแนวขวางจะสามารถหาได้จาก E_z ตามที่ได้แสดงไว้ในสมการ (ก.11)-(ก.16)

ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากโดยทั่วไปจะมีรูปหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงไว้ในรูปที่ ก.1 ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมจัดว่าเป็นสายนำสัญญาณของคลื่น ไมโครเวฟที่มีใช้กว้างขวางมากที่สุดแบบหนึ่ง ข้อดีของท่อนำคลื่นเมื่อเปรียบเทียบกับสายโคแอกเซียลก็คือมีการลดทอนสัญญาณต่ำกว่า และสามารถทนต่อกำลังคลื่นได้สูงกว่า ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม โดยพิจารณาท่อนำคลื่นที่สภาวะช่องอากาศอิสระที่ไม่มีการสูญเสียของตัวกลางอยู่ คือ $\sigma = 0$ และแกนของท่อนำคลื่นเป็นเส้นตรง และรูปหน้าตัดของท่อนำคลื่นไม่เปลี่ยนแปลงตามแนวแกน z จากโครงสร้างของท่อนำคลื่นเป็นตัวนำเนื้อเดียวกันนั้น โหมด TEM จะไม่เกิด จะมีเฉพาะคลื่น TE และ TM เท่านั้น และเนื่องจากท่อนำคลื่นถูกวางในแนวแกน z ดังนั้นจึงมีเฉพาะโหมด TE^z และ TM^z

คลื่นสนามตามขวาง TE

ในกรณีของคลื่น TE นี้เนื่องจาก $E_z = 0$ เพราะฉะนั้นสมการคลื่น H_z จากสมการที่ (ก.18) สมการสำหรับ H_z สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\nabla_t^2 H_z = \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} = -k_c^2 H_z \quad (\text{ก.20})$$

โดยที่

$$k_c^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu \epsilon = \gamma^2 + k^2 \quad (\text{ก.21})$$

จากวิธีแยกตัวแปรดังนั้น

$$H_z = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y)e^{\pm \gamma z} \quad (\text{ก.22})$$

สำหรับสนามในแนวขวางนั้น สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ (ก.13)-(ก.16) ดังนั้นจะได้

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (\text{ก.23})$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (\text{ก.24})$$

$$H_x = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (\text{ก.25})$$

$$H_y = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (\text{ก.26})$$

โดยที่ $\gamma = j\beta$ เพราะ $\alpha = 0$ เมื่อ $\sigma = 0$

การหาผลเฉลยนั้นพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังของท่อนำคลื่น โดยกำหนดให้ท่อนำคลื่นเป็นตัวนำสมบูรณ์ เพราะฉะนั้นเงื่อนไขขอบเขตสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสกับท่อนำคลื่นที่ผิวของท่อนำคลื่นต้องเป็นศูนย์ และเขียนสมการได้เป็น

$$E_x|_{y=0,b} = 0 \quad (\text{ก.27})$$

$$E_y|_{x=0,a} = 0 \quad (\text{ก.28})$$

เมื่อแทน (ก.22) ลงในสมการ (ก.23) จะได้ E_x ในรูปต่อไปนี้

$$E_x = -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} (A \cos k_x x + B \sin k_x x) (-C k_y \sin k_y y + D k_y \cos k_y y) e^{-\gamma z} \quad (\text{ก.29})$$

จะเห็นได้ว่า E_x จะเท่ากับ 0 ที่ $y=0$ ก็ต่อเมื่อ $D=0$ และ E_x จะเท่ากับ 0 ที่ $y=b$ ก็ต่อเมื่อ

$$k_y b = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{ก.30})$$

สำหรับ E_y สามารถหาได้จากสมการ (ก.22) และ (ก.24) ดังนั้น

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{k_c^2} (-A k_x \sin k_x x + B k_x \cos k_x x) (C \cos k_y y + D \sin k_y y) e^{\pm j\beta z} \quad (\text{ก.31})$$

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตสมการ (ก.28) E_y จะเป็นศูนย์ที่ $x=0$ ก็ต่อเมื่อ $B=0$ และ E_y จะเป็นศูนย์ที่ $x=a$ ก็ต่อเมื่อ

$$k_x a = m\pi \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{ก.32})$$

จากสมการที่ (ก.29)-(ก.32) สามารถหาผลเฉลยของ H_z ได้ในรูปต่อไปนี้

$$\begin{aligned} H_{zmn} &= AC \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \\ &= A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \end{aligned} \quad (\text{ก.33})$$

โดย $A_{mn} = AC$ ซึ่งถูกกำหนดจากกำลังคลื่นที่ส่งผ่าน สำหรับ β_{mn} หาได้จากสมการที่ (ก.21) (ก.30) และ (ก.32) ดังนี้

$$\gamma_{mn}^2 = (j\beta_{mn})^2 = k_{c_{mn}}^2 - \omega^2 \mu \epsilon = k_{c_{mn}}^2 - k^2 \quad (\text{ก.34})$$

โดยที่

$$k_{cmn}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad (\text{ก.35})$$

และค่าคงที่การเดินทางของคลื่น (Propagation constant) γ_{mn} และ ความถี่ตัด (Cutoff frequency) f_{cmn} สำหรับโหมด TE เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma_{mn} &= \alpha_{mn} + j\beta_{mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \omega^2\mu\epsilon} \\ &= j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{1 - \left(\frac{f_{cmn}}{f}\right)^2} \end{aligned} \quad (\text{ก.36})$$

และ

$$f_{cmn} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (\text{ก.37})$$

และสนามทั้งหมดแสดงได้ดังนี้

$$E_{xmn} = \frac{j\omega\mu}{k_{cmn}^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (\text{ก.38})$$

$$E_{ymn} = -\frac{j\omega\mu}{k_{cmn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (\text{ก.39})$$

$$H_{xmn} = \mp \frac{j\beta_{mn}}{k_{cmn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (\text{ก.40})$$

$$H_{ymn} = \mp \frac{j\beta_{mn}}{k_{cmn}^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (\text{ก.41})$$

สำหรับอิมพีแดนซ์คลื่นสำหรับคลื่นส่งผ่านไปในทิศ z จะได้

$$Z_{hmn} = \frac{E_{xmn}}{H_{ymn}} = -\frac{E_{ymn}}{H_{xmn}} = \frac{\omega\mu}{\beta_{mn}} = \frac{k}{\beta_{mn}} \eta \quad (\text{ก.42})$$

ในช่องว่างอิสระ สมการที่ (ก.34) และ (ก.42) จะเป็น

$$\beta_{mn}^2 = k_0^2 - k_{cmn}^2 = k_0^2 - \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right] \quad (\text{ก.43})$$

สำหรับความเร็วเฟสของคลื่นโหมดต่างๆ นั้นเขียนได้ดังนี้

$$v_{pmn} = \frac{\omega}{\beta_{mn}} = \frac{k_0}{\beta_{mn}} c = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{k_{cmn}}{k_0}\right)^2}} \quad (\text{ก.44})$$

และความยาวของคลื่นที่ส่งผ่านในแกน z จะเป็นดังนี้

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{\beta_{mn}} = \frac{2\pi}{\sqrt{k_0^2 - k_{cmn}^2}} \quad (\text{ก.45})$$

คลื่นแม่เหล็กตามขวาง (TM)

คลื่นแม่เหล็กตามขวางเกิดจาก $H_z = 0$ เพราะฉะนั้นสมการคลื่นของ E_z หากจากสมการ (ก.17) โดยกำหนดให้ $\sigma = 0$ ตามเงื่อนไขของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$\nabla_t^2 E_z = \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} = -k_c^2 E_z \quad (\text{ก.46})$$

สมการคลื่น (ก.46) มีผลเฉลยทั่วไปของ E_z ดังนี้

$$E_z = (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y)e^{\pm \gamma z} \quad (\text{ก.47})$$

สำหรับสนามในแนวขวางนั้น เมื่อ $\sigma = 0$ และ $\gamma = j\beta$ จะเป็นดังนี้

$$E_x = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (\text{ก.48})$$

$$E_y = -\frac{\gamma}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} = -\frac{j\beta}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (\text{ก.49})$$

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (\text{ก.50})$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{k_c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (\text{ก.51})$$

การหาผลเฉลยเฉพาะนั้นทำได้โดยการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ผนังของท่อนำคลื่น กรณีนี้อาจพิจารณาได้จาก E_z ได้โดยตรง โดยให้ E_z ที่ผนังของท่อนำคลื่นเป็น 0 ดังต่อไปนี้

$$E_z|_{x=0,a} = 0 \quad (\text{ก.52})$$

$$E_z|_{y=0,b} = 0 \quad (\text{ก.53})$$

เมื่อพิจารณา E_z ในสมการ (ก.47) ร่วมกับเงื่อนไขขอบเขต (ก.52) และ (ก.53) พบว่า E_z เป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง $x=0$ เมื่อ $A=0$ และ E_z จะเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง $x=a$ เมื่อ

$$k_x a = m\pi \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{ก.54})$$

ในทำนองเดียวกัน E_z จะเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง $y=0$ เมื่อ $C=0$ และ E_z จะเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง $y=b$ เมื่อ

$$k_y b = n\pi \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (\text{ก.55})$$

ดังนั้นผลเฉลยของ E_z จะได้

$$\begin{aligned} E_{zmn} &= BD \sin k_x x \sin k_y y e^{\pm j\beta_{mn} z} \\ &= B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) e^{\pm j\beta_{mn} z} \end{aligned} \quad (\text{ก.56})$$

โดยที่ $B_{mn} = BD$ ถูกกำหนดจากกำลังคลื่นที่ส่งผ่าน และ β_{mn} จะมีค่าเหมือนกับในสมการ (ก.43) สำหรับสมการแนวขวาง โดยแทนสมการที่ (ก.56) ลงในสมการ (ก.48)-(ก.51) จะได้

$$E_{xmn} = -\frac{j\beta_{mn}}{k_{cmn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (\text{ก.57})$$

$$E_{ymn} = -\frac{j\beta_{mn}}{k_{cmn}^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (\text{ก.58})$$

$$H_{xmn} = \mp \frac{j\omega\varepsilon}{k_{cmn}^2} \left(\frac{n\pi}{b}\right) B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (\text{ก.59})$$

$$H_{ymn} = \mp \frac{j\omega\varepsilon}{k_{cmn}^2} \left(\frac{m\pi}{a}\right) B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{\pm j\beta_{mn}z} \quad (\text{ก.60})$$

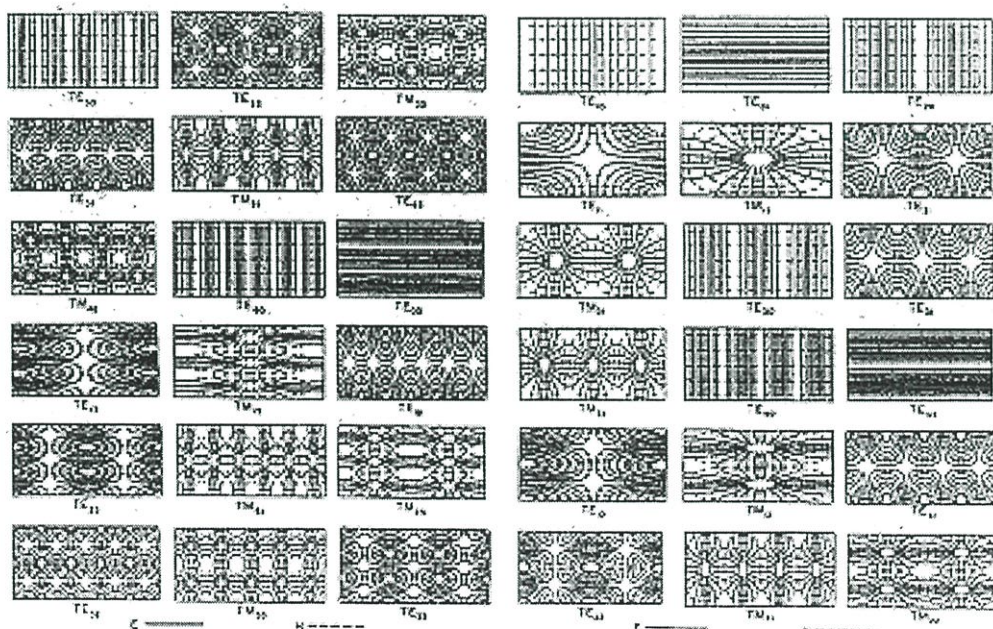
เมื่ออิมพีแดนซ์คลื่นสำหรับคลื่นที่ส่งผ่านไปในทิศ z เป็น

$$Z_{emn} = \frac{E_{xmn}}{H_{ymn}} = -\frac{E_{ymn}}{H_{xmn}} = \frac{\beta_{mn}}{\omega\varepsilon} = \frac{\beta_{mn}}{k} \eta \quad (\text{ก.61})$$

ในช่องว่างอิสระจะได้

$$Z_{emn} = \frac{\beta_{mn}}{k_0} \eta_0 \quad (\text{ก.62})$$

เมื่อเปรียบเทียบ Z_{emn} และ Z_{hmn} จะพบว่าได้ค่าไม่เท่ากัน และค่าของ Z_c และ Z_h ก็ยังเปลี่ยนแปลงไปตามอันดับของโหมด m และ n ด้วย อย่างไรก็ตามค่า $Z_{hmn}Z_{emn} = \eta_0^2$ เสมอเพราะ β_{mn} ของโหมด TE_{mn} และ TM_{mn} มีค่าเท่ากัน



รูปที่ ก.2 การกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่น TE และ คลื่น TM กรณี ($a = 2b$)

จากที่ได้แสดงสมการคลื่นส่งผ่านไปตามท่อนำคลื่นนั้น จะมีคลื่นไฟฟ้าตามขวางและคลื่นแม่เหล็กตามขวาง ซึ่งคลื่นทั้งสองนี้จะมีผลเฉลยเฉพาะที่มีรูปแบบการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ ก.2 [18] ซึ่งรูปแบบการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของคลื่นไฟ

ฟ้าตามขวางและคลื่นแม่เหล็กตามขวางในโหมดต่างๆ จะพบว่าสนามไฟฟ้าที่ผนังโลหะจะตั้งฉากกับผนังโลหะเสมอ สำหรับการระบุชนิดและอันดับของโหมดนั้นโดยทั่วไประบุในรูป TE_{mn} (หรือ H_{mn}) และ TM_{mn} (หรือ E_{mn}) ซึ่งหมายถึงโหมด TE อันดับ mn และโหมด TM อันดับ mn ตามลำดับ จากสนามแม่เหล็กที่แสดงในสมการ (ก.33) และ (ก.42) สำหรับโหมด TE จะพบว่า m กับ n นั้นด้านใดจะเป็นศูนย์ก็ได้ แต่ต้องไม่เป็นศูนย์พร้อมกัน เพราะ H_z จะมีค่าคงที่และทำให้องค์ประกอบอื่นๆ เป็นศูนย์หมด สำหรับ TM นั้น m และ n จะต้องไม่เป็นศูนย์ ไม่เช่นนั้น E_z จะเป็นศูนย์ ทำให้ส่วนประกอบอื่นๆ เป็นศูนย์หมด

โหมดส่งผ่านและโหมดตัด (Transmission mode and cut-off modes)

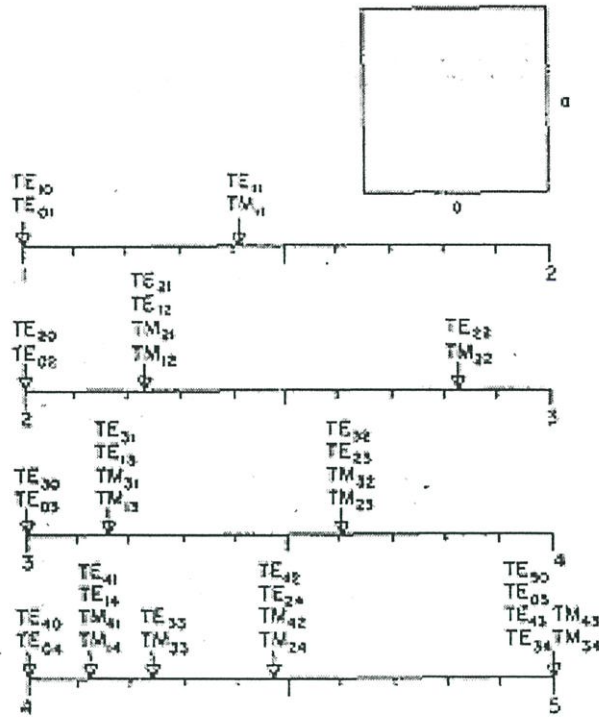
จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นในเรื่องผลเฉลยเฉพาะของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นไปได้มีอยู่หลายรูปแบบด้วยกัน อย่างไรก็ตามผลที่ได้นี้ไม่ได้หมายความว่าคลื่นที่มีแบบแผนหรือโหมดอันดับต่างๆ เหล่านี้จะผ่านไปได้หมด คลื่นที่ส่งผ่านไปได้จะต้องมีค่า β_{mn} เป็นค่าจริง เพราะหาก β_{mn} เป็นจำนวนจินตภาพแล้ว การเปลี่ยนแปลงในทิศ z จะเขียนได้เป็น $e^{-|\beta_{mn}|z}$ ซึ่งหมายถึงสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีขนาดเล็กลงอย่างรวดเร็วในทิศ z โดยที่เฟสของสนามไม่เปลี่ยนแปลงตาม z ดังนั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ก็ไม่ใช่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะผ่านไปในทิศ z ได้ โหมดของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในสภาพดังกล่าวเรียกว่า โหมดจางหาย (Evanescent mode) โหมดจางหายนี้ถึงแม้ไม่อาจส่งไปได้ แต่จะเกิดขึ้นเสมอในบริเวณที่มีความไม่สม่ำเสมอในท่อนำคลื่น เช่น ตำแหน่งที่มีฉากโลหะ (Diaphragm) หรือ เสาโลหะ (Post)

ในการพิจารณาเงื่อนไขของขนาดท่อนำคลื่นและความถี่ที่กำหนดให้ นั้นว่าจะเกิดโหมดใดบ้าง สามารถพิจารณาค่า β_{mn} ตามสมการ (ก.43) เนื่องจาก $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = \omega/c = 2\pi f/c$ และ $k_{c_{mn}}^2 = (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2$ ดังนั้นเมื่อกำหนดขนาดของท่อนำคลื่นคือ a และ b ให้ จะสามารถหาค่า $k_{c_{mn}}$ สำหรับโหมดอันดับ mn ได้ ซึ่งทำให้ทราบ k_0 ที่ทำโหมด mn ส่งผ่านได้นั้นต้องสูงกว่า $k_{c_{mn}}$ ถ้า $k_0 < k_{c_{mn}}$ จะทำให้ β_{mn} เป็นค่าจินตภาพและโหมดนั้นก็จะกลายเป็นโหมดจางหาย ค่า $k_{c_{mn}}$ จึงถูกเรียกว่า เลขคลื่นตัด (Cut-off wave number) ของโหมด mn ไป

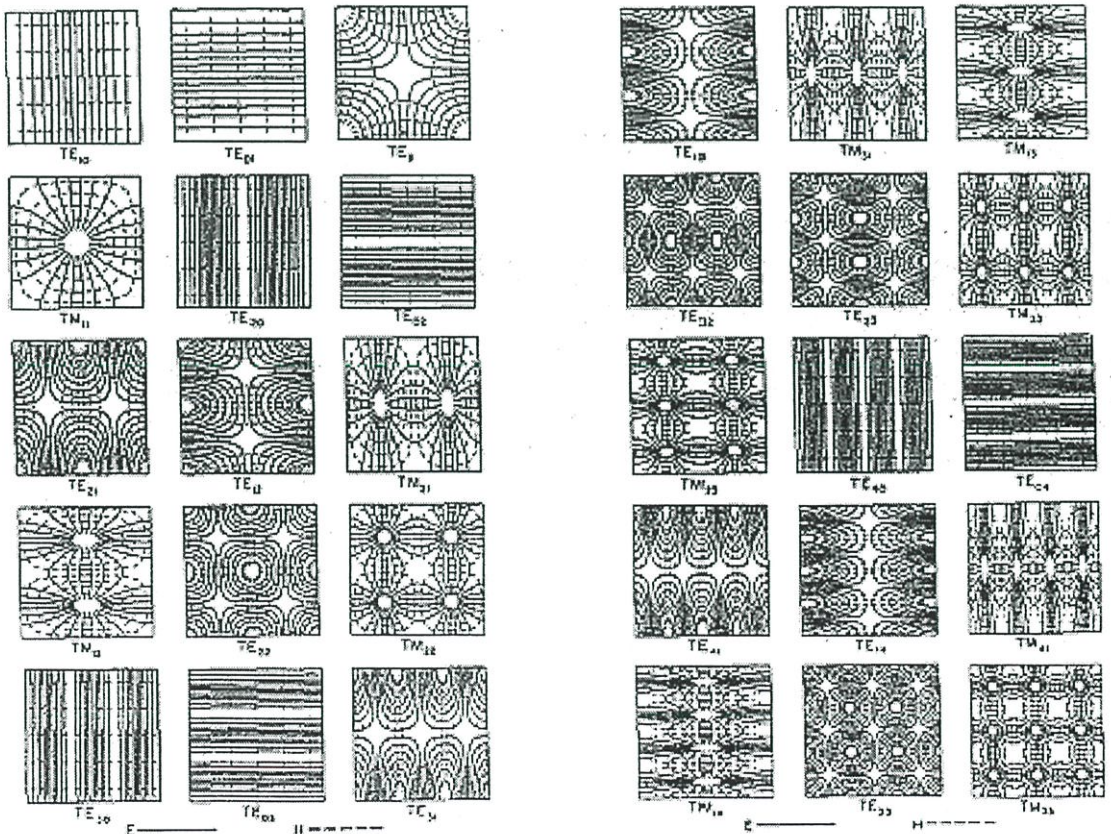
สามารถแสดงสมการคลื่นตัด ความถี่ตัด (Cut-off frequency) และความยาวคลื่นตัด (Cut-off wavelength) ของโหมดอันดับต่างๆ ในรูปของขนาดของท่อนำคลื่นได้ดังนี้

$$k_{c_{mn}} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (\text{ก.63})$$

$$\lambda_{c_{mn}} = \frac{2\pi}{k_{c_{mn}}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}} \quad (\text{ก.64})$$

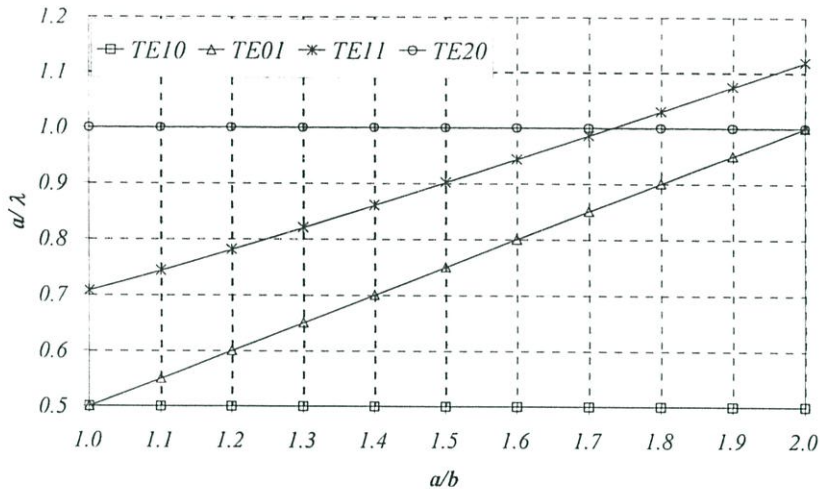


รูปที่ ก.5 นอร์แมลไลซ์โหมดความถี่ตัดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ($a = b$)



รูปที่ ก.6 การแพร่กระจายคลื่นในโหมดต่างๆ ($a = b$)

สำหรับเงื่อนไขเพื่อให้เกิดโหมดเป็นใหญ่นั้น แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความกว้างต่อความสูงของท่อนำคลื่น (a/b) และขนาดของความกว้างท่อนำคลื่นที่เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น a/λ ดังแสดงในรูปที่ ก.7 พบว่าเมื่อพิจารณาอัตราส่วนเริ่มจาก 1:1 ถึง 2:1 พบว่าเงื่อนไขที่ทำให้เกิดเฉพาะ โหมดเป็นใหญ่นั้น ขนาดของความกว้างต้องมีค่า $\frac{\lambda}{2} < a < \lambda$



รูปที่ ก.7 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความกว้างต่อความสูงของท่อนำคลื่นและขนาดของความกว้างท่อนำคลื่นที่เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น

จากที่กล่าวมาข้างต้นได้ข้อสังเกต เมื่อขนาดท่อ $a = 2b$ ว่า [24]

- (1) เมื่อ $k_0 \rightarrow \infty$ β_{mn} จะมีค่าเข้าสู่ k_0
- (2) ในช่วง $k_{c10} < k_0 < k_{c20}$ จะมีโหมด TE_{10} เท่านั้นที่ส่งผ่านไปได้
- (3) มีโหมดบางโหมดที่มีค่า β_{mn} เท่ากันเช่น TE_{20} กับ TE_{01} TE_{11} กับ TM_{11} เป็นต้น
- (4) ค่า β_{mn} จะเป็นฟังก์ชันของความถี่

จากข้อสังเกตที่ (1) นั้นสามารถอธิบายปรากฏการณ์ทางกายภาพได้ว่า การที่ $k_0 \rightarrow \infty$ นั่นคือ $f \rightarrow \infty$ หรือ $\lambda \rightarrow 0$ นั่นคือ พิจารณาจากความยาวคลื่นจะพบว่าท่อนำคลื่นมีขนาดใหญ่มาก ฉะนั้นคลื่นที่ส่งผ่านอยู่ในท่อนำคลื่นนั้นจะเหมือนกับคลื่นทรงกลม (Spherical wave) ที่แพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปในอากาศโดยรอบ ในสถานะนี้ค่าคงที่เฟสของโหมดต่างๆ ที่มองไปในทิศ z ก็จะเข้าสู่ค่า k_0 ซึ่งเป็นค่าคงที่เฟสของคลื่นทรงกลมนั้น

จากข้อสังเกตที่ (2) นั้นสำคัญมากเพราะในทางปฏิบัตินั้น ความต้องการก็คือให้เกิดคลื่นส่งผ่านได้เพียงโหมดเดียว ซึ่งในกรณีนี้คือ โหมด TE_{10} ทั้งนี้เพื่อให้พลังงานของคลื่นทั้งหมดส่งผ่านไป ในโหมดนี้ โหมด TE_{10} จัดว่าเป็นโหมดพื้นฐานหรือโหมดเป็นใหญ่ (Fundamental หรือ Dominant mode) ของคลื่นที่ส่งผ่านไปในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมนี้ ในการออกแบบท่อนำคลื่นโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของท่อนำคลื่นและความถี่ใช้งานในลักษณะดังที่กล่าวนี้

ถ้าเงื่อนไขไม่เป็นจริงคือ ถ้า $k_0 < k_{c10}$ ก็จะไม่มีการคลื่นโหมดใดๆ ส่งผ่านไปได้เลย และถ้า $k_0 > k_{c20}$ (หรือ k_{c01}) ก็จะทำให้โหมด TE_{20} (หรือ TE_{01}) ส่งผ่านไปได้ด้วย ในสถานะที่มีคลื่นส่งผ่านได้พร้อมกันหลายโหมดเช่นนี้ เนื่องจากความเร็วกลุ่มแต่ละโหมดไม่เท่ากัน ดังนั้นพลังงานคลื่นที่ถูกพาไปในแต่ละโหมดจะไปถึงปลายทางไม่เท่ากัน และเป็นสาเหตุของการเกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) ของสัญญาณ สาเหตุของการบิดเบี้ยวลักษณะนี้เรียกว่า โหมดการกระจายความถี่ (Modal dispersion) ซึ่งมีผลทำให้สัญญาณที่เครื่องรับมีรูปร่างบิดเบี้ยวไป

จากข้อสังเกตที่ (3) เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอในท่อนำคลื่นแบบต่างๆ โดยเฉพาะในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมที่กำลังพิจารณาอยู่นี้ β_{mn} ของโหมด TE_{mn} จะเท่ากันเสมอ (ยกเว้นกรณีที่ m หรือ n เท่ากับศูนย์) การที่ β เท่ากันนี้เรียกว่า ดีเจนเนอเรชันของโหมด (Degeneration of mode) ซึ่งหมายถึงโหมดที่มี β เท่ากัน ซึ่งจะมีเลขตัดหรือความถี่ตัดที่เท่ากัน และมีความเร็วเฟสและความเร็วกลุ่มที่เท่ากัน แต่ไม่จำเป็นต้องมีการลดทอนสัญญาณที่เท่ากันเพราะการกระจายของสนามไม่เหมือนกัน การเกิดดีเจนเนอเรชันของโหมดนั้นส่วนใหญ่จะเป็นผลเสีย เพราะพลังงานของคลื่นถึงแม้จะถูกพาไปในโหมดที่ที่มีความเร็วเท่ากัน แต่ถ้ามีการลดทอนสัญญาณไม่เท่ากัน ก็ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณได้เช่นกัน

สำหรับข้อสังเกตที่ (4) นั้น การที่ β ของโหมดพื้นฐานเป็นฟังก์ชันของความถี่นั้นหมายความว่า ถึงแม้จะมีโหมดพื้นฐานส่งผ่านไปได้อย่างเดียวก็จะมีเกิดการบิดเบี้ยวเกิดขึ้น เพราะสเปกตรัมของสัญญาณจะถูกส่งจะส่งผ่านไปด้วยความเร็วกลุ่มที่ต่างกัน การบิดเบี้ยวในลักษณะดังกล่าวเรียกว่า การกระจายความถี่ในท่อนำคลื่น (Waveguide dispersion) ซึ่งจะเกิดขึ้นในท่อนำคลื่นทุกประเภท

การกระจายความถี่ที่สำคัญอีกอย่างก็คือ การกระจายความถี่ของตัวกลาง หรือการกระจายความถี่ของวัสดุ (Material dispersion) ตัวกลางที่อยู่ในท่อนำคลื่นนั้น ส่วนใหญ่เป็นแก้วหรือสารไดอิเล็กตริก ซึ่งสารเหล่านี้มีคุณสมบัติเชิงแม่เหล็กไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ที่ทั้งนั้น เพราะฉะนั้นคลื่นที่ประกอบด้วยหลายๆ สเปกตรัมก็จะส่งผ่านไปด้วยความเร็วกลุ่มที่ต่างกันด้วย นั่นคือสิ่งที่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของสัญญาณระหว่างการส่งผ่านได้

เมื่อเปรียบเทียบผลกระทบของการกระจายความถี่ทั้งสามแบบที่กล่าวมานั้น โดยทั่วไปโหมดการกระจายความถี่จะมีผลกระทบมากที่สุด อันดับรองลงมาจะเป็น การกระจายความถี่ในท่อนำคลื่นและการกระจายความถี่ของวัสดุตามลำดับ ดังนั้นจึงนิยมส่งแบบโหมดเดียว (Single mode transmission) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาของโหมดการกระจายของโหมด

สรุป

ในบทนี้เป็นการอธิบายเกี่ยวกับการเกิดโหนดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก สมการคลื่นของโหนดต่างๆ ตลอดจนตัวอย่างของการกระจายคลื่นในโหนดต่างๆ ได้อธิบายไว้ นอกจากนี้ได้กล่าวถึงการผลิตเฟสของสัญญาณในท่อนำคลื่นด้วย

ภาคผนวก ข

ฟังก์ชันไดแอดิก

เพื่อให้เกิดความรู้และความเข้าใจในหลักการและความหมายของฟังก์ชันกรีนไดแอดิก ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงพีชคณิตของฟังก์ชันไดแอดิก และการเขียนสมการแมกซ์เวลล์ในรูปของไดแอดิก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้สนามมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเป็นฮาร์มอนิกซึ่งแสดงด้วยฟังก์ชัน $e^{-j\omega t}$

พีชคณิตไดแอดิก

ในหัวข้อนี้จะแสดงสูตรที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ไดแอดิก เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ในระดับสูงขึ้นไป ฟังก์ชันเวกเตอร์ หรือ เวกเตอร์ \bar{F} จะแสดงในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ซึ่งนิยามไว้ว่า

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^3 F_i \hat{x}_i \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ F_i แสดงองค์ประกอบสเกลาร์ของ \bar{F} โดยที่ตัวอักษร “ i ” เป็นครรรชนีบอกจำนวนครั้งในการบวกของฟังก์ชัน โดยปกติจะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 3

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันเวกเตอร์ที่ต่างหรือเป็นอิสระกันสามฟังก์ชัน แสดงได้โดย

$$\bar{F}_j = \sum_i F_{ij} \hat{x}_i \quad i=1,2,3 \quad (\text{ข.2})$$

จากนั้นฟังก์ชันไดแอดิก (Dyadic function) หรือเรียกสั้นๆ ว่า ไดแอดิก (Dyadic) นิยามโดย $\bar{\bar{F}}$ แสดงได้ดังนี้

$$\bar{\bar{F}} = \sum_{j=1}^3 \bar{F}_j \hat{x}_j \quad (\text{ข.3})$$

เมื่อ \bar{F}_j ประกอบด้วย $j=(1,2,3)$ แสดงฟังก์ชันเวกเตอร์ที่ต่างหรือเป็นอิสระกันสามฟังก์ชันของ $\bar{\bar{F}}$ ในสมการ (ข.3) ตำแหน่งของ \bar{F}_j และ \hat{x}_j จะต้องเรียงลำดับตามนี้และไม่สามารถสลับตำแหน่งสองเวกเตอร์นี้ได้ กล่าวอีกนัยหนึ่งคือกฎแห่งการสลับที่ไม่สามารถนำมาใช้กับสมการ (ข.3) เมื่อแทนสมการ (ข.2) ลงในสมการ (ข.3) จะได้

$$\bar{\bar{F}} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 F_{ij} \hat{x}_i \hat{x}_j \quad (\text{ข.4})$$

โดยอาศัยกฎแห่งการกระจายในการเปลี่ยนสมการ (ข.3) ให้เป็นสมการ (ข.4) กล่าวได้ว่าสมการ (ข.3) ถึง (ข.4) เป็นสมการที่แสดงนิยามของไดแอดิกในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน จะเห็นว่า $\bar{\bar{F}}$ มีทั้งหมด 9 องค์ประกอบสเกลาร์ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยคู่ (Doublet) ซึ่งเป็นการนำเอาเวกเตอร์หนึ่งหน่วย

สองตัวมาวางติดกัน นั่นคือ $\hat{x}_i \hat{x}_j$ ซึ่ง $i, j = (1, 2, 3)$ เราเรียกว่า ไดแอดส์ (Dyads) ซึ่งจะมีได้ทั้งหมด 9 องค์ประกอบเช่นกัน ตัวอย่างองค์ประกอบไดแอดิก เช่น $F_{23} \hat{x}_2 \hat{x}_3$ ซึ่งไดแอดส์ จะทำการสลับตำแหน่งไม่ได้ นั่นคือ

$$\hat{x}_i \hat{x}_j \neq \hat{x}_j \hat{x}_i \quad (\text{ข.5})$$

ทรานสโพส (Transpose)

ทรานสโพส ของไดแอดิก $\overline{\overline{F}}$ กำหนดเป็น $[\overline{\overline{F}}]^T$ นิยามโดย

$$[\overline{\overline{F}}]^T = \sum_j \hat{x}_j \overline{\overline{F}}_j = \sum_i \sum_j F_{ij} \hat{x}_j \hat{x}_i = \sum_i \sum_j F_{ji} \hat{x}_i \hat{x}_j \quad (2.6)$$

พิจารณาเปรียบเทียบสมการ (ข.6) กับ (ข.3) และ (ข.4) จะเห็นว่าตำแหน่งของ $\overline{\overline{F}}_j$ และ \hat{x}_j ใน $\overline{\overline{F}}$ สลับตำแหน่งกันอยู่ หรือฟังก์ชัน F_{ij} ใน $\overline{\overline{F}}$ ถูกแทนที่ด้วย F_{ji} ใน $(\overline{\overline{F}})^T$ ดังนั้นจึงเรียกใหม่ว่า ทรานสโพส

ไดแอดิกสมมาตรและอสมมาตร

ไดแอดิกสมมาตร (Symmetrical dyadic) นิยามด้วย $\overline{\overline{F}}_s$ มีคุณลักษณะดังนี้

$$[\overline{\overline{F}}_s]^T = \overline{\overline{F}}_s \quad (\text{ข.7})$$

นั่นคือ ไดแอดิกสมมาตรจะมีแค่ 6 องค์ประกอบสเกลาร์ที่แตกต่างกัน เพราะ $F_{ij} = F_{ji}$ ส่วนไดแอดิกอสมมาตร (Antisymmetric dyadic) $\overline{\overline{F}}_a$ กำหนดเป็น

$$[\overline{\overline{F}}_a]^T = -\overline{\overline{F}}_a \quad (\text{ข.8})$$

ดังนั้น

$$F_{ij} = -F_{ji} \quad (\text{ข.9})$$

จากสมการ (ข.9) ดังนั้น

$$F_{ii} = 0, \quad \text{เมื่อ } i=1, 2, 3 \quad (\text{ข.10})$$

ดังนั้น $\overline{\overline{F}}_a$ จะมีองค์ประกอบสเกลาร์ที่แตกต่างกันเพียง 3 องค์ประกอบเท่านั้น หากไม่พิจารณาเครื่องหมายลบในสมการ (ข.9) กรณีพิเศษหนึ่งของไดแอดิกสมมาตรเมื่อ $F_{ij} = 0$ สำหรับ $i \neq j$ และ $F_{ij} = 1$ สำหรับ $i = j$ คุณสมบัติสองอย่างนี้สามารถแสดงได้ ดังนี้

$$F_{ij} = \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (\text{ข.11})$$

โดย δ_{ij} คือ ฟังก์ชันเดลตาโครเนคเคอร์ (Kronecker delta function) เราเรียกไดแอดิกนี้ว่า ตัวประกอบไอดีม (Idem factor) หรือ ไดแอดไอดีม (idem-dyad) ซึ่งแทนด้วย $\overline{\overline{I}}$ สามารถแสดงได้ เป็น

$$\overline{\overline{I}} = \sum_i \hat{x}_i \hat{x}_i \quad (\text{ข.12})$$

ผลคูณเชิงสเกลาร์ของเวกเตอร์และไดแอตริก

ผลคูณเชิงสเกลาร์ระหว่างเวกเตอร์และไดแอตริกมีอยู่สองแบบ นั่นคือ ผลคูณเชิงสเกลาร์ข้างหน้า (Anterior scalar product) และผลคูณเชิงสเกลาร์ข้างหลัง (Posterior scalar product) ผลคูณเชิงสเกลาร์ข้างหน้า ($\bar{b} \cdot \bar{F}$) นิยามโดย

$$\begin{aligned}\bar{b} \cdot \bar{F} &= \sum_j (\bar{b} \cdot \bar{F}_j) \hat{x}_j = \sum_i \sum_j (\bar{b} \cdot F_{ij} \hat{x}_i) \hat{x}_j \\ &= \sum_i \sum_j (b_i F_{ij}) \hat{x}_j\end{aligned}\quad (\text{ข.13})$$

ผลลัพธ์จากการคูณจะเป็นเวกเตอร์ ถ้าแทนผลคูณนี้ด้วยเวกเตอร์ \bar{c} จะได้

$$c_j = \sum_i b_i F_{ij} \quad \text{เมื่อ } j = 1, 2, 3 \quad (\text{ข.14})$$

ส่วนผลคูณเชิงสเกลาร์ข้างหลังของเวกเตอร์และไดแอตริก ($\bar{F} \cdot \bar{b}$) แสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\bar{F} \cdot \bar{b} &= \sum_j \bar{F}_j (\hat{x}_j \cdot \bar{b}) = \sum_i \sum_j F_{ij} \hat{x}_i (\hat{x}_j \cdot \bar{b}) \\ &= \sum_i \sum_j (b_j F_{ij}) \hat{x}_i\end{aligned}\quad (\text{ข.15})$$

ผลที่ได้จะเป็นเวกเตอร์เช่นกัน ถ้าแทนผลคูณที่ได้ด้วยเวกเตอร์ \bar{d} จะได้

$$d_i = \sum_j b_j F_{ij} \quad \text{เมื่อ } j = 1, 2, 3 \quad (\text{ข.16})$$

เปรียบเทียบสมการ (ข.14) ถึง (ข.16) จะพบว่าในกรณีทั่วไป $c_j \neq d_j$ ยกเว้นในกรณีของไดแอตริกสมมาตร นั่นคือ

$$\bar{b} \cdot \bar{F}_s = \bar{F}_s \cdot \bar{b} \quad (\text{ข.17})$$

และ

$$\bar{b} \cdot \bar{I} = \bar{I} \cdot \bar{b} = \bar{b} \quad (\text{ข.18})$$

สมการ (ข.18) เป็นคุณลักษณะสำคัญของตัวประกอบไอเดม สืบเนื่องจากการทรานสโพสของไดแอตริกที่แสดงในสมการ (ข.6) และพิจารณาสมการ (ข.13) จะทำให้ได้ว่า

$$\bar{b} \cdot \bar{F} = [\bar{F}]^T \cdot \bar{b} \quad (\text{ข.19})$$

หรือ

$$\bar{F} \cdot \bar{c} = \bar{c} \cdot [\bar{F}]^T \quad (\text{ข.20})$$

ซึ่งความสัมพันธ์นี้สำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์ไดแอตริก

ผลคูณเชิงเวกเตอร์ของเวกเตอร์และไดแอตริก

สามารถแบ่งผลคูณเชิงเวกเตอร์ระหว่างเวกเตอร์และไดแอตริกได้สองแบบอีกเช่นกัน นั่นคือ ผลคูณเชิงเวกเตอร์ข้างหน้า (Anterior vector product) และผลคูณเชิงเวกเตอร์ข้างหลัง (Posterior vector product) แสดงได้ในสมการ (ข.21) และ (ข.22) ตามลำดับ

$$\bar{b} \times \bar{F} = \sum_j (\bar{b} \times F_j) \hat{x}_j = \sum_i \sum_j F_{ij} (\bar{b} \times \hat{x}_i) \hat{x}_j \quad (\text{ข.21})$$

และ

$$\bar{F} \times \bar{b} = \sum_j F_j (\hat{x}_j \times \bar{b}) = \sum_i \sum_j F_{ij} \hat{x}_i (\hat{x}_j \times \bar{b}) \quad (\text{ข.22})$$

จากสมการ (ข.21) และ (ข.22) จะเห็นว่าผลคูณทั้งคู่จะเป็นไคแอติก โดยทั่วไปแล้วจะได้

$$\bar{b} \times \bar{F} \neq -\bar{F} \times \bar{b} \quad (\text{ข.23})$$

และ

$$\bar{b} \times \bar{F} \neq [\bar{F}]^T \times \bar{b} \quad (\text{ข.24})$$

แต่จะเป็น

$$\bar{b} \times \bar{F} \neq -\{[\bar{F}]^T \times \bar{b}\}^T \quad (\text{ข.25})$$

ในกรณีพิเศษของตัวประกอบไอเคม จะได้

$$\bar{b} \times \bar{I} = -[\bar{I} \times \bar{b}]^T$$

ผลคูณสามชั้น

ในพีชคณิตเวกเตอร์ จะมีเอกลักษณ์หนึ่งที่ว่า

$$\bar{b} \cdot (\bar{c} \times \bar{d}) = \bar{d} \cdot (\bar{b} \times \bar{c}) = \bar{c} \cdot (\bar{d} \times \bar{b}) \quad (\text{ข.26})$$

สามารถสร้างเอกลักษณ์ที่คล้ายกันนี้สำหรับไคแอติกโดยอ้างอิงจากสมการ (2.26) เริ่มพิจารณาเอกลักษณ์สามชุดซึ่งเกี่ยวข้องกับเวกเตอร์ที่แตกต่างกันสามเวกเตอร์ \bar{d}_j เมื่อ $j = (1,2,3)$ นั่นคือ

$$\bar{b} \cdot (\bar{c} \times \bar{d}_j) = (\bar{b} \times \bar{c}) \cdot \bar{d}_j = -\bar{c} \cdot (\bar{b} \times \bar{d}_j) \quad (\text{ข.27})$$

จากนั้นวางเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{x}_j ติดกับตำแหน่งหลังสุดของแต่ละพจน์ในสมการ (ข.27) และรวมองค์ประกอบทั้งหมดของไคแอติกทั้งสามพจน์ จะได้เป็น

$$\bar{b} \cdot (\bar{c} \times \bar{d}) = (\bar{b} \times \bar{c}) \cdot \bar{d} = -\bar{c} \cdot (\bar{b} \times \bar{d}) \quad (\text{ข.28})$$

แต่ละพจน์ในสมการ (ข.28) เป็นเวกเตอร์เพราะว่าเป็นผลคูณเชิงสเกลาร์ระหว่างเวกเตอร์กับไคแอติก ดังนั้นสรุปได้ว่าผลคูณสามชั้นของเวกเตอร์สามารถเปลี่ยนรูปเป็นหนึ่งไคแอติก ($\bar{c} \times \bar{d}$, \bar{d} , หรือ $\bar{b} \times \bar{d}$) กับ หนึ่งเวกเตอร์ (\bar{b} , $\bar{b} \times \bar{c}$ หรือ $-\bar{c}$) ตามสมการ (ข.28) นั่นเอง อย่างไรก็ตามสมการ (ข.28) ก็ยังเป็นเวกเตอร์ เราสามารถทำให้ \bar{c} อยู่ในรูปไคแอติกได้ โดยพิจารณาสองพจน์สุดท้ายในสมการ (ข.28) และใช้คุณลักษณะในสมการ (ข.19) และ (ข.20) ตามลำดับ จะได้

$$[\bar{d}]^T \cdot (\bar{b} \times \bar{c}_j) = -[\bar{b} \times \bar{d}]^T \cdot \bar{c}_j \quad ; j = 1,2,3 \quad (\text{ข.29})$$

เมื่อรวมองค์ประกอบทั้งหมดของไคแอติก \bar{c} หลังจากนำเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{x}_j ไปวางติดข้างหลัง \bar{c}_j สุดท้ายจะได้เอกลักษณ์ไคแอติก คือ

$$[\bar{d}]^T \cdot (\bar{b} \times \bar{c}) = -[\bar{b} \times \bar{d}]^T \cdot \bar{c} \quad (\text{ข.30})$$

ซึ่งแต่ละพจน์ในสมการ (ข.30) ล้วนเป็นไคแอติก

ไดเวอร์เจนซ์และเคิร์ลของฟังก์ชันไคแอติก และเกรเดียนต์ของฟังก์ชันเวกเตอร์

ไดเวอร์เจนซ์ของฟังก์ชันไคแอติก \vec{F} ซึ่งแสดงโดยสมการ (ข.3) ถึง (ข.4) ในหัวข้อก่อนหน้า นี้ แทนด้วย $\nabla \cdot \vec{F}$ ถูกนิยามได้โดย

$$\nabla \cdot \vec{F} = \sum_j (\nabla \cdot \vec{F}_j) \hat{x}_j = \sum_i \sum_j \frac{\partial F_{ij}}{\partial x_i} \hat{x}_j \quad (\text{ข.31})$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันเวกเตอร์ สำหรับเคิร์ลของฟังก์ชันไคแอติก \vec{F} แสดงโดย $\nabla \times \vec{F}$ และนิยามได้เป็น

$$\nabla \times \vec{F} = \sum_j (\nabla \times \vec{F}_j) \hat{x}_j = \sum_i \sum_j (\nabla F_{ij} \times \hat{x}_i) \hat{x}_j \quad (\text{ข.32})$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันไคแอติกเช่นกัน ในการพิสูจน์สมการ (ข.32) เราจะใช้สัญลักณ์เวกเตอร์

$$\nabla \times (F_{ij} \hat{x}_j) = \nabla F_{ij} \times \hat{x}_j \quad (\text{ข.33})$$

ต่อมาพิจารณาเกรเดียนต์ของฟังก์ชันเวกเตอร์เป็น แสดงโดย $\nabla \vec{F}$ ซึ่งสามารถนิยาม ดังนี้

$$\nabla \vec{F} = \sum_j (\nabla F_j) \hat{x}_j = \sum_i \sum_j \frac{\partial F_{ij}}{\partial x_i} \hat{x}_i \hat{x}_j \quad (\text{ข.34})$$

ซึ่งผลที่ได้ยังคงเป็นไคแอติก

เมื่อฟังก์ชันไคแอติก \vec{F} ประกอบด้วยตัวประกอบไอเดม \vec{I} และฟังก์ชันสเกลาร์ f ในรูปของ

$$\vec{F} = f\vec{I}$$

เราจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{F} &= \nabla \cdot (f\vec{I}) = \sum_i \nabla \cdot (f\hat{x}_i) \hat{x}_i = \sum_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \hat{x}_i \\ &= \nabla f \end{aligned} \quad (\text{ข.35})$$

และ

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{F} &= \nabla \times (f\vec{I}) = \sum_i \nabla \times (f\hat{x}_i) \hat{x}_i \\ &= \sum_i (\nabla f \times \hat{x}_i) \hat{x}_i = \nabla f \times \vec{I} \end{aligned} \quad (\text{ข.36})$$

ซึ่งทั้งสองจะให้ฟังก์ชันไคแอติก

สมการแมกซ์เวลล์ในรูปไคแอติกและฟังก์ชันกรีนไคแอติกแบบไฟฟ้าและแบบแม่เหล็ก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมการแมกซ์เวลล์และฟังก์ชันไคแอติกนั่นก็คือ การเขียนสมการแมกซ์เวลล์ในรูปแบบของไคแอติก โดยพิจารณาจากสนามสามชุดที่เกิดขึ้นอย่างสอดคล้องกันด้วยความถี่และภายใต้เงื่อนไขเวกเตอร์เดียวกัน โดยสนามแต่ละชุดจะเกิดจากการกระจายของกระแสที่แตกต่างกัน นั่นคือ \vec{J}_j เมื่อ $j = (1,2,3)$ สมการแมกซ์เวลล์สำหรับสนามเหล่านี้สามารถเขียนได้เป็น

$$\nabla \times \bar{E}_j = -j\omega\mu_0\bar{H}_j \quad (\text{ข.37ก})$$

$$\nabla \times \bar{H}_j = \bar{J}_j + j\omega\varepsilon_0\bar{E}_j \quad (\text{ข.37ข})$$

$$\nabla \cdot \bar{J}_j = -j\omega\rho_j \quad (\text{ข.37ค})$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0\bar{E}_j) = \rho_j \quad (\text{ข.37ง})$$

$$\nabla \cdot (\mu_0\bar{H}_j) = 0 \quad (\text{ข.37จ})$$

โดยสมมติให้ตัวกลางภายใต้เงื่อนไขที่พิจารณาเป็นอากาศ สำหรับตัวกลางเอกพันธ์อื่นๆ สามารถแทนค่าคงที่ μ_0 และ ε_0 ด้วย μ และ ε ก่อนอื่นจะขอเปลี่ยน (x, y, z) เป็น (x_1, x_2, x_3) เพื่อความสะดวกและให้ง่ายต่อความเข้าใจ จากนั้นนำเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \hat{x}_j วางติดข้างหลัง (Juxtapose) ของสมการ (ข.37ก) ถึง (ข.37จ) และรวมสมการแมกซ์เวลล์ทั้งสามชุดเข้าด้วยกัน จะทำให้ได้ สมการแมกซ์เวลล์ในรูปแบบของไดแอดิก แสดงได้ดังนี้

$$\nabla \times \bar{\bar{E}} = -j\omega\mu_0\bar{\bar{H}} \quad (\text{ข.38ก})$$

$$\nabla \times \bar{\bar{H}} = \bar{\bar{J}} + j\omega\varepsilon_0\bar{\bar{E}} \quad (\text{ข.38ข})$$

$$\nabla \cdot \bar{\bar{J}} = -j\omega\bar{\rho} \quad (\text{ข.38ค})$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0\bar{\bar{E}}) = \bar{\rho} \quad (\text{ข.38ง})$$

$$\nabla \cdot (\mu_0\bar{\bar{H}}) = 0 \quad (\text{ข.38จ})$$

โดยที่

$$\bar{\bar{E}} = \sum_j \bar{E}_j \hat{x}_j = \sum_i \sum_j E_{ij} \hat{x}_i \hat{x}_j \quad (\text{ข.39ก})$$

$$\bar{\bar{H}} = \sum_j \bar{H}_j \hat{x}_j = \sum_i \sum_j H_{ij} \hat{x}_i \hat{x}_j \quad (\text{ข.39ข})$$

$$\bar{\bar{J}} = \sum_j \bar{J}_j \hat{x}_j = \sum_i \sum_j J_{ij} \hat{x}_i \hat{x}_j \quad (\text{ข.39ค})$$

$$\bar{\rho} = \sum_j \rho_j \hat{x}_j \quad (\text{ข.39ง})$$

จากการนิยามของไดแอดิกที่กล่าวไว้ข้างต้น สามารถอธิบายฟังก์ชันไดแอดิก $\bar{\bar{E}}$ ได้ว่า ประกอบด้วยสามองค์ประกอบเวกเตอร์ นั่นคือ \bar{E}_j ซึ่ง $j=(1,2,3)$ และฟังก์ชันเวกเตอร์ความหนาแน่นประจุ ($\bar{\rho}$) ประกอบด้วยการกระจายประจุเชิงสเกลาร์ที่แตกต่างกันสามชุด พิจารณาการกระจาย

กระแสสามชุดที่สอดคล้องกับไดโพลไฟฟ้าจิวสามตัว ณ ตำแหน่ง $\bar{R} = \bar{R}'$ และวางในทิศทาง $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ หรือ $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ ดังนี้

$$\bar{J}_j = c_j \delta(\bar{R} - \bar{R}') \hat{x}_j \quad j = 1, 2, 3 \quad (\text{ข.40})$$

ซึ่ง c_j คือ โมเมนต์กระแสของไดโพล (Current moment of dipole) นั่นคือ

$$\iiint \bar{J}_j dv = c_j \hat{x}_j \quad (\text{ข.41})$$

เราจะนอร์มอลไลซ์โมเมนต์กระแสให้เป็น

$$-j\omega\mu_0 c_j = 1 \quad (\text{ข.42})$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} -j\omega\mu_0 \bar{J}_j &= -j\omega\mu_0 c_j \delta(\bar{R} - \bar{R}') \hat{x}_j \\ &= \delta(\bar{R} - \bar{R}') \hat{x}_j \end{aligned} \quad (\text{ข.43})$$

ภายใต้เงื่อนไขนี้ เราจะกำหนดตัวแปรใหม่ สำหรับฟังก์ชันไดแอดิกต่างๆ นั่นคือ

$$\bar{E} = \bar{G}_e \quad (\text{ข.44ก})$$

$$-j\omega\mu_0 \bar{H} = \bar{G}_m \quad (\text{ข.44ข})$$

$$-j\omega\mu_0 \bar{J} = \bar{I} \delta(\bar{R} - \bar{R}') \quad (\text{ข.44ค})$$

$$\begin{aligned} \bar{\rho} &= \frac{1}{-j\omega} \nabla \cdot \bar{J} = \frac{-1}{\omega^2 \mu_0} \nabla \cdot [\bar{I} \delta(\bar{R} - \bar{R}')] \\ &= \frac{-\epsilon_0}{k^2} \nabla \delta(\bar{R} - \bar{R}') \end{aligned} \quad (\text{ข.44ง})$$

ซึ่ง $k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{\omega}{c}$

$c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ = ความเร็วของแสงในอากาศ

เมื่อแทนตัวแปรใหม่เหล่านี้ลงในสมการ (ข.38ก), (ข.38ข), (ข.38ง) และ (ข.38จ) จะได้ว่า

$$\nabla \times \bar{G}_e = \bar{G}_m \quad (\text{ข.45ก})$$

$$\nabla \times \bar{G}_m = \bar{I} \delta(\bar{R} - \bar{R}') + k^2 \bar{G}_e \quad (\text{ข.45ข})$$

$$\nabla \cdot \bar{G}_e = -\frac{1}{k^2} \nabla \delta(\bar{R} - \bar{R}') \quad (\text{ข.45ค})$$

$$\nabla \cdot \bar{G}_m = 0 \quad (\text{ข.45ง})$$

กำหนดให้ \bar{G}_e คือฟังก์ชันกรีนไดแอดิกแบบไฟฟ้า (Electric dyadic Green function) และ \bar{G}_m คือฟังก์ชันกรีนไดแอดิกแบบแม่เหล็ก (Magnetic dyadic Green function) ซึ่งจะเขียนตามนิยามของไดแอดิก จะได้ดังนี้

$$\bar{\bar{G}}_e = \sum_j \bar{G}_{ej} \hat{x}_j \quad (\text{ข.46ก})$$

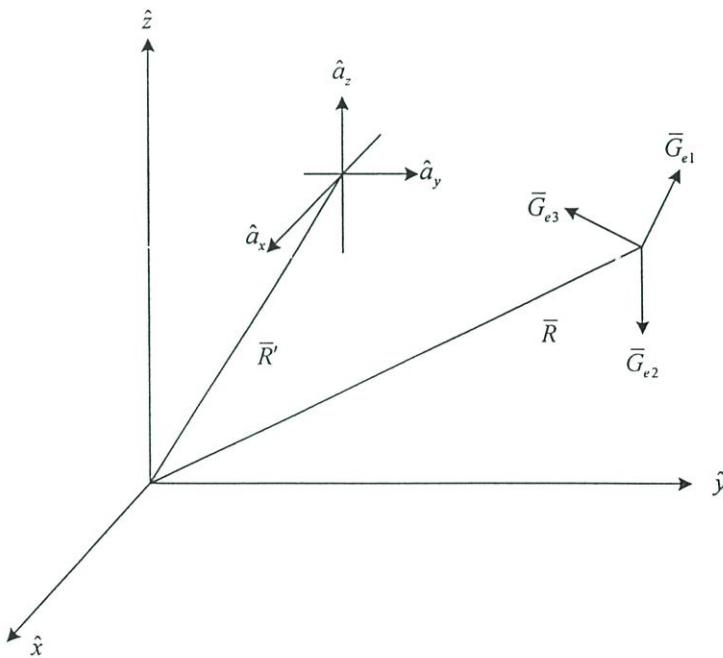
$$\bar{\bar{G}}_m = \sum_j \bar{G}_{mj} \hat{x}_j \quad (\text{ข.46ข})$$

ดังนั้น \bar{G}_{ej} และ \bar{G}_{mj} คือ เวกเตอร์ฟังก์ชันกรีนแบบไฟฟ้า (Vector Green function of electric type) และเวกเตอร์ฟังก์ชันกรีนชนิดแม่เหล็ก (Vector Green function of magnetic type) ตามลำดับ สามารถมองทางกายภาพได้ว่า \bar{G}_{ej} แสดงถึงสนามไฟฟ้าอันเกิดจากไดโพลไฟฟ้าจิวซึ่งวางอยู่ในทิศ \hat{x}_j และอยู่ที่ตำแหน่ง $\bar{R} = \bar{R}'$ นั่นคือ

$$\bar{\bar{G}}_e = \bar{\bar{G}}_e(\bar{R}, \bar{R}') \quad (\text{ข.47ก})$$

$$\bar{\bar{G}}_m = \bar{\bar{G}}_m(\bar{R}, \bar{R}') \quad (\text{ข.47ข})$$

โดยที่ \bar{R} คือตำแหน่งเวกเตอร์ของจุดสนาม และ \bar{R}' คือตำแหน่งเวกเตอร์ของแหล่งกำเนิด หากรู้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดจากไดโพลไฟฟ้าจิวที่ตั้งฉากกัน นั่นคือรู้ $\bar{\bar{G}}_e$ และ $\bar{\bar{G}}_m$ สามารถที่จะหาสนามอันเนื่องจากการกระจายกระแสรูปแบบใดๆ ได้ และในรูปที่ ข.1 แสดงความหมายทางกายภาพของเวกเตอร์ฟังก์ชันกรีนทั้งสาม \bar{G}_{ej}



รูปที่ ข.1 แสดงสนามไฟฟ้าอันเนื่องจากแหล่งกำเนิดไดโพลไฟฟ้าจิวสามตำแหน่งที่วางอยู่ที่ \bar{R}' ในทิศทาง xy และ z

ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] "Characteristics of a Helical Antenna on the Ground Plane Radiating Circularly Polarized Omnidirectional Beam," *Kasetsart Engineering Journal*, vol.16, pp.106-116, Apr.-July 2002.
- [2] "A Unidirectional Antenna using a Probe Excited Circular Ring above the Reflector," *Proceedings of the 2002 International Conference on Circuits/Systems Computers and Communications*, Phuket, vol.2, pp.545-548, July 2002.
- [3] "A Unidirectional Antenna using a Probe Excited Rectangular Ring near the Reflector," *Proceedings of the 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Beijing, pp.389-392, Aug. 2002.
- [4] "On-axis Linear Array of a Probe Excited Rectangular Ring Radiating Bidirectional Pattern," *Proceedings of the 12th International Symposium on Antennas*, Nice, pp.415-418, Nov.2002.
- [5] "Considerations of Array Arrangement of a Bidirectional Antenna Using a Probe Excited Rectangular Ring," *Proceedings of the 2002 Asia-Pacific Microwave Conference*, vol.2, pp.1275-1278, Nov.2002.
- [6] "A Space Diversity Bidirectional Antenna using Probe Excited Circular Ring," *Proceedings of the 2002 Interim International Symposium on Antennas and Propagation*, pp.65-68, Nov.2002.
- [7] "Design and Experiment of a Circularly Polarized Conical Beam Helical Array Antenna," *Proceedings of the 2002 International Symposium on Communications and Information Technology*, pp.325-328, Oct.2002.
- [8] "Comparative Study of Bidirectional Antennas using a Probe Excited Circular and Rectangular Rings," *Proceedings of the Proceedings of the 2002 International Symposium on Communications and Information Technology*, pp.163-166, Oct.2002.
- [9] "Analysis of Vertical and Horizontal Space Diversity Antennas using a Probe Excited Rectangular Ring for Bidirectional Beam Radiation," *Proceedings of the 2002 International Symposium on Communications and Information Technology*, pp.221-224, Oct.2002.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุชาสินี ละมุลตรี เกิดเมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2520 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2542 และเมื่อปีการศึกษา 2544 เข้าศึกษาในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง