สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวย 90°
ป้อนด้วยสายอากาศวงแหวนกลม

RADIATION CHARACTERISTICS OF A 90° CONICAL REFLECTOR ANTENNA FED BY A CIRCULAR RING

T 0 6 3 2 7 1

กฤษฎา เกตวัลห์
GITSADA KETWAN

อพ.
ก279ด
2549
เลขหมู่..........
เลขทะเบียน 63271
วัน,เดือน,ปี 25 ส.ค. 2549
b. 11b34 11x
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2404-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RADIATION CHARACTERISTICS OF A 90^{o} CONICAL REFLECTOR ANTENNA FED BY A CIRCULAR RING

GITSADA KETWAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2006

ISBN 974-15-2404-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวย 90° ป้อนด้วยสายอากาศวงแหวนกลม
นักศึกษา	นาย กฤษฎา เกตวัลห์
รหัสนักศึกษา	46064109
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมผล โกศัลวิตร์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวย 90° ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนกลม โดยสายอากาศชนิดนี้เกิดจากการนำสายอากาศวงแหวนวงกลมที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบ สองทิศทาง มาประกอบรวมกับตัวสะท้อนแบบกรวย ซึ่งจะทำให้ได้การแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวและมีอัตราการขยายสูง โดยที่โครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อนทั้งยังมีความสะดวกในการสร้าง ในการคำนวณได้นำเอาวิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกมาใช้คำนวณสายอากาศวงแหวนวงกลมเนื่องจากให้ความแม่นยำ และเมื่อนำสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ได้จากการใช้วิธีดังกล่าวมาประกอบกับตัวสะท้อนแบบกรวย จะนำวิธีการคำนวณการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแบบ 2 มิติ (Uniform Theory of Diffraction) มาร่วมด้วยเพื่อมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นโดยในการวิเคราะห์ได้ทำการพิจารณาคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางสายอากาศ เพื่อยืนยันผลจากการคำนวณ ได้ทำการสร้างสายอากาศขึ้นมาเพื่อทดสอบ และเปรียบเทียบผลที่ได้ว่ามีความสอดคล้องกันเพียงใด ดังนั้นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศวงแหวนวงกลมมีความหนา (d) เท่ากับ 0.20λ ค่ารัศมีของวงแหวน (a) เท่ากับ 0.30λ มีความยาวของโพรบ (l_p) เท่ากับ 0.25λ ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศวงแหวนวงกลมสูงสุดมีค่าเท่ากับ 5.45dBi สำหรับตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวย 90° นั้น มีค่าช่องเปิด (Aperture: D) เท่ากับ 2.0λ ระยะจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสม (S) เท่ากับ 0.5λ ดังนั้นพบว่าสายอากาศตัวสะท้อนมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดเท่ากับ 13.2dBi

ซึ่งผลจากการวิเคราะห์พบว่ามีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้เป็นสายอากาศสำหรับการสื่อสารแบบจุดต่อจุดในระบบการสื่อสารไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Radiation Characteristics of a 90° Conical Reflector Antenna fed by a Circular Ring

Student Mr. Gitsada Ketwan

Student ID. 46064109

Degree Master of Engineering

Programme Telecommunications Engineering

Year 2006

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr. Sompol Kosulvit

Thesis Co-Advisor Asst.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents the analysis and design of a Radiation Characteristics of a 90° Conical Reflector Antenna fed by a Circular Ring. This antenna provides a unidirectional beam pattern with high gain. This unidirectional antenna combines between circular ring antenna and conical reflector. The antenna structure is easy to fabricate. The radiated field of circular ring antenna is calculated by dyadic Green's function and the conical reflector is calculated by using Uniform Theory of Diffraction (UTD). The radiation characteristics such as radiation pattern, beamwidth, side lobe ratio and maximum directivity of the antenna were calculated. In order to verify the theoretical calculation, the prototype of the antenna is fabricated and measurd to compare between experimental results and theoretical calculations.

The optimum parameter for the antenna is obtained follow as the thick of the ring antenna (d) is 0.20λ, the radial (a) of 0.30λ, and the length of the probe (l_p) of 0.25λ that lead to the directivity of ring antenna of 5.45 dBi for 90° conical reflector with diameter of aperture of 2.0λ. The optimum distance of the feed point (S) equal to 0.5λ. It is found that the directivity is 13.2dBi. This antenna is very useful for applying in the point to point communications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีด้วยความสนับสนุนของ รศ.ดร. สมผล โกศัลวิตร์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะ ให้แนวความคิดและให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ สำหรับคำแนะนำต่างๆ ทั้งทางด้านทฤษฎีและทางเทคนิคในทางปฏิบัติที่ใช้ในงานวิจัยของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ สำนักวิจัยการสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ (ReCCIT) สำหรับการทำวิจัย สัมมนา และอภิปราย ขอขอบคุณ คุณศุภชัย เกรียงธนสาร คุณกฤตยา ชวานนท์พิทักษ์ คุณสุธาสินี ละมุลตรี คุณไพโรจน์ วุ่นชุม และสมาชิกห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่านที่คอยให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

สุดท้ายขอกราบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัว ที่ให้คำปรึกษาและคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

กฤษฎา เกตวัลห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญรูป.....VII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....4

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....4

1.4 ขอบเขตการวิจัย.....5

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....5

1.6 งานวิจัยที่มีมาก่อน.....6

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....9

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....10

2.1 บทนำ.....10

2.2 ฟังก์ชันกรีนไดแอดิกของสายอากาศวงแหวนวงกลม.....10

2.2.1 ฟังก์ชันกรีนไดแอดิกบริเวณภายในท่อนำคลื่นทรงกระบอก.....11

2.2.2 การกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณช่องเปิดของวงแหวน.....16

2.2.3 สมการสนามไฟฟ้าระยะไกล.....17

2.3 การออกแบบสายอากาศวงแหวนวงกลม.....20

2.4 การพิจารณาผลของการรวมโหมดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....22

2.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....23

2.6 ตัวสะท้อนแบบกรวยที่มุม 90 องศา.....24

2.7 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต.....25

2.8 บทสรุป.....31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3 การวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม....................32

3.1 บทนำ....................32

3.2 การวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยถูกป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในระนาบสนามไฟฟ้า....................33

3.2.1 สมการการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า....................34

3.3 การวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยถูกป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในระนาบสนามแม่เหล็ก....................41

3.3.1 สมการการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็ก....................43

3.4 ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์....................50

3.4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ....................50

3.5 บทสรุป....................52

บทที่ 4 การทดสอบคุณลักษณะสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณ ด้วยวงแหวนวงกลม....................53

4.1 บทนำ....................53

4.2 การสร้างสายอากาศวงแหวนวงกลม....................53

4.3 การสร้าง และการทดสอบคุณลักษณะสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณ ด้วยวงแหวนวงกลม....................54

4.3.2 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ....................54

4.4 สรุป....................60

บทที่ 5 การทดสอบคุณสมบัติสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม ในย่านสนามระยะไกล....................61

5.1 บทนำ....................61

5.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ....................61

5.3 อัตราขยายและประสิทธิภาพของสายอากาศ....................65

5.4 ทฤษฎีการโพลาไรซ์....................67

5.5 สรุป....................68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ....69

6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม....69

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา....70

เอกสารอ้างอิง....71

ภาคผนวก บทความที่ได้รับการตีพิมพ์....73

ประวัติผู้เขียน....83

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point Communication)....2
1.2 สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม....3
1.6.1 โครงสร้างสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน....6
1.6.2 โครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณโดยโพรบ ภายในวงแหวนวงกลม....7
2.1 การพิจารณาความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กสมมูลและกระแสไฟฟ้าสมมูล....17
2.2 ช่องเปิดแบบวงกลมที่วางอยู่บนช่องว่างอิสระ....17
2.3 สายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม....20
2.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อความหนาของวงแหวนมีขนาดต่าง ๆ....20
2.5 จำนวนของผลการรวมโหมดเมื่อความหนาของวงแหวนมีขนาดต่าง ๆ....21
2.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เมื่อเทียบกับการทดลอง....22
2.7 โครงสร้างของตัวสะท้อนแบบกรวยทั้งสองแบบ....23
2.8 เปรียบเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทางของตัวสะท้อนแบบกรวยทั้งสองแบบ....24
2.9 การแบ่งขอบเขตบริเวณของสนาม....25
2.10 ระบบพิกัดคงค่าที่ขอบ....26
3.1 ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงาในระนาบสนามไฟฟ้า....32
3.2 การพิจารณาโครงสร้างของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า....33
3.3 ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงาในระนาบสนามแม่เหล็ก....40
3.4 การพิจารณาโครงสร้างของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก....42
3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแบบสองมิติในระนาบ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ....49
3.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านหลัง....50
3.7 ค่าความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก....50
4.1 รูปถ่ายของสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ได้สร้างขึ้นจริง....52
4.2 รูปถ่ายของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมที่ ได้สร้างขึ้นจริง....53
4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.5λ....54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.5λ....55
4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.5λ....55
4.6 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.6λ....56
4.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.6λ....56
4.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.6λ....57
4.9 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ....57
4.10 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ....58
4.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ....58
4.12 ค่าอิมพีแดนซ์สายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะจุดป้อนสัญญาณ....60
5.1 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.5λ ในระนาบสนามไฟฟ้า....61
5.2 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.5λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก....61
5.3 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.6λ ในระนาบสนามไฟฟ้า....62
5.4 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.6λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก....62
5.5 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.7λ ในระนาบสนามไฟฟ้า....63
5.6 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.7λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก....63
5.7 แสดงการทดสอบสายอากาศในย่านสนามระยะไกล....64
5.8 แสดงการทดสอบการโพลาไรซ์ของสายอากาศในย่านสนามระยะไกล....66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

สายอากาศนับเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญอย่างมากของระบบที่มีการแผ่พลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และระบบที่ต้องมีการตรวจจับหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่างของระบบดังกล่าวมีอยู่มากมาย เช่น ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ข่ายเชื่อมโยงภาคพื้นดิน (Microwave Terrestrial Link) ระบบตรวจจับและวัดระยะด้วยคลื่นวิทยุ (Radar) มาตรวิทยุสำหรับกิจการอุตุนิยมวิทยา (Meteorological Radiometer) ระบบส่งกระจายข่าวสารด้วยคลื่นวิทยุ เป็นต้น

ลักษณะการทำงานของระบบต่างๆ ดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดความต้องการเกี่ยวกับข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของสายอากาศที่จะประกอบเป็นส่วนหนึ่งของระบบนั้นๆ การทราบข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะทำให้สามารถกำหนดแนวทางในการพัฒนาและออกแบบสายอากาศได้ การออกแบบนั้นหมายถึงการกำหนดโครงสร้าง องค์ประกอบต่างๆ ของสายอากาศ มิติทางเรขาคณิตขององค์ประกอบ ตลอดจนการเลือกวัสดุสำหรับการสร้าง เป็นต้น

หลังจากที่ได้ออกแบบสายอากาศแล้ว ย่อมต้องมีการตรวจสอบคุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ออกแบบ ว่าเป็นไปตามข้อกำหนดคุณลักษณะเฉพาะที่ระบุไว้ในตอนแรกหรือไม่ การดำเนินการดังกล่าวนี้สามารถทำได้ในสองลักษณะ

1. การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์
2. การวัดและทดสอบจริงในย่านทดสอบ

โดยทั่วไปแล้วสมควรดำเนินการทั้งข้อ 1 และข้อ 2 แน่นอนว่าวิธีการตามข้อ 2 จะต้องสิ้นเปลืองมากกว่า แต่ก็สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับสมรรถนะขณะปฏิบัติงานได้ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด อย่างไรก็ตามการทดสอบโดยจำลองสภาพปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในการปฏิบัติงานจริงสามารถส่งผลในทางทำลายต่อตัวสายอากาศได้ในกรณีที่ดำเนินการตามกรรมวิธีในข้อ 2 ดังนั้นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์จึงเป็นทางออกที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่สามารถจัดหาเครื่องคำนวณสมรรถนะสูงได้ การศึกษาโดยวิธีจำลองสถานการณ์จะยังประโยชน์มหาศาล เนื่องจากสามารถสมมติสถานการณ์ที่อาจเป็นไปได้โดยมิต้องกังวลเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายในการดำเนินการณ์เพื่อสร้างสถานการณ์ขึ้นจริง ๆ ในทางปฏิบัติ หลังจากการออกแบบแล้วก็จะวิเคราะห์และศึกษาปัญหาโดยการจำลองสถานการณ์ หลังจากนั้นจึงสร้างและทดสอบจริงในย่านทดสอบโดยให้เกิดผลเสียหายต่อสายอากาศที่สร้างขึ้นน้อยที่สุด และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำที่สุด

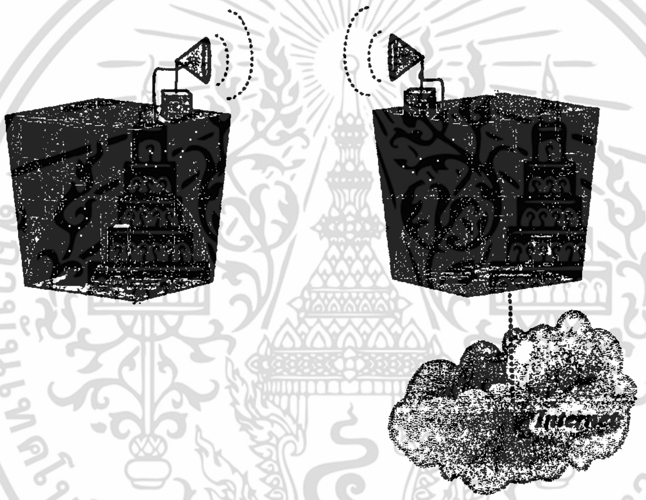
การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์มีวิธีการเฉพาะต่างๆ อยู่มากมาย สำหรับสายอากาศที่ใช้งานในย่านความถี่ต่ำหรือสายอากาศที่มีขนาดทางไฟฟ้าเล็กนั้นมักวิเคราะห์โดยอาศัยระเบียบวิธีโมเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ก็มีการใช้ระเบียบวิธีองค์ประกอบจำกัด (FEM: Finite Element Method) ระเบียบวิธีผลต่างจำกัดเชิงเวลา (FDTD: Finite Difference Time Domain) ในปัญหาบางกรณีเช่นกัน

ดังนั้นระเบียบวิธีสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศที่ปฏิบัติงานในย่านความถี่สูง หรือสายอากาศที่มีขนาดทางไฟฟ้าใหญ่ และการประยุกต์ใช้ ระเบียบวิธีที่นิยมใช้ได้แก่ ระเบียบวิธีที่อิงกับทัศนศาสตร์เรขาคณิตร่วมกับทฤษฎีเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต และทัศนศาสตร์กายภาพร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ

สายอากาศที่นำเสนอนี้จะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งมักจะถูกใช้เป็นสายอากาศของสถานีฐานสำหรับพื้นที่ ที่มีลักษณะเป็นทางตรง เช่น อุโมงค์ ทางเดิน และสามารถนำไปใช้ในระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point Communication) แสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point-to-Point Communication)

ลักษณะของสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สามารถสังเคราะห์ได้จากสายอากาศหลายชนิดเช่น สายอากาศไมโครสตริปที่ทำงานในโหมดพื้นฐาน (Fundamental Mode Microstrip Antenna) [1] สายอากาศปากแตร (Horn Antenna) [2] สายอากาศแบบสะท้อนคลื่น (Reflector Antenna) [3] ฯลฯ รวมทั้งสายอากาศที่นำเสนอ ซึ่งสายอากาศแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้

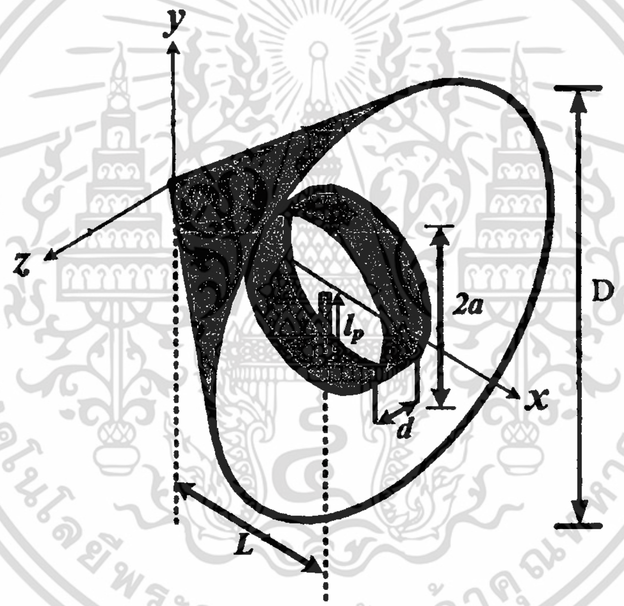
สายอากาศแบบสะท้อนคลื่นมักถูกเลือกใช้เพราะมีคุณลักษณะที่น่าสนใจกล่าวคือ มีอัตราขยายที่สูง และ โครงสร้างที่มีลักษณะไม่ซับซ้อน ตัวสะท้อนคลื่นที่ใช้จะมีหลายแบบ เช่น ตัวสะท้อนคลื่นแบบระนาบตัวนำ ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม ฯลฯ ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมนั้น จะมีทั้งมุม 90 60 45 และ 30 องศา ส่วนใหญ่จะใช้มุมของตัวสะท้อนเท่ากับ 90 องศา เนื่องจากขนาดของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวสะท้อนจะเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมุมอื่นๆ ซึ่งโครงสร้างโดยทั่วไปของสายอากาศสะท้อนคลื่นแบบมุมนั้น ประกอบไปด้วยตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม กับ สายอากาศที่นำมาเป็นตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งสายอากาศสะท้อนคลื่นแบบมุมส่วนใหญ่นิยมใช้สายอากาศไดโพลเป็นตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศแบบมุม วิธีการคือทำการเปลี่ยนตัวป้อนสัญญาณ และหาขนาดของตัวสะท้อนที่เหมาะสม

สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกในการสื่อสารแบบจุดต่อจุดคือระยะทางสูงสุดระหว่างจุดส่งสัญญาณกับจุดรับสัญญาณที่สามารถติดต่อกันได้ ซึ่งตัวแปรที่สำคัญคือค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ หากมีค่ามากจะทำให้ระยะทางในการสื่อสารเพิ่มขึ้น

วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม (A conical reflector antenna fed by circular ring)



รูปที่ 1.2 สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอสายอากาศชนิดใหม่ที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูง เพื่อเพิ่มระยะทางในการสื่อสาร ในกรณีที่กำลังงานในการรับส่งเท่าเดิม หรือลดกำลังงานที่ใช้ในการรับส่งลงในกรณีที่ระยะทางเท่าเดิม ซึ่งสายอากาศชนิดนี้เกิดจากการนำสายอากาศวงแหวนวงกลมมาประกอบรวมกับตัวสะท้อนแบบกรวย แสดงดังรูปที่ 1.2 ข้อดีของสายอากาศชนิดนี้คือ โครงสร้างของสายอากาศมีลักษณะไม่ซับซ้อน สร้างง่าย มีราคาถูก และมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงกว่าสายอากาศแบบสะท้อนคลื่นที่ป้อนสัญญาณโดยสายอากาศไดโพล และยังเป็นงานวิจัยที่ยังไม่มีผู้ใดนำเสนอมาก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการ ออกแบบ สร้าง ทดสอบ และวิเคราะห์ทางทฤษฎีของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz ในระบบที่ต้องการการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว สายอากาศที่ต้องการจะต้องมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูง และมีขนาดที่กะทัดรัด ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศจะพิจารณาจากผลการทดสอบค่าระยะบริการว่าได้มากน้อยเพียงใด ในส่วนของการวิเคราะห์จะใช้วิธีฟังก์ชันกรีนไดแอดิกร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอที่มีความถูกต้องสูง เพื่อนำไปหาค่าขนาดของวงแหวนและตัวสะท้อนแบบกรวยที่เหมาะสม

1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

สายอากาศที่นำเสนอทำได้โดยการนำสายอากาศวงแหวนวงกลมวางใกล้ตัวสะท้อนแบบกรวย ทฤษฎีที่ถูกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จึงประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือ

สายอากาศวงแหวนวงกลมเป็นสายอากาศชนิดสองทิศทาง [4] โดยโครงสร้างของสายอากาศชนิดนี้มีลักษณะไม่ซับซ้อนและมีขนาดกะทัดรัด แต่เนื่องจากสมมติฐานของการกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณช่องเปิดของวงแหวนเพื่อนำไปหาสนามระยะไกลนั้นยังไม่ละเอียด เช่น จะพิจารณาเพียงแหล่งกำเนิดความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กสมมูลที่เกิดจากสนามไฟฟ้าในโหมดพื้นฐาน ดังนั้นเมื่อความหนาของวงแหวนมีค่าน้อย ๆ จะไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากบริเวณใกล้ ๆ โพรบจะเกิดโหมดคลื่นหลายโหมด วิธีการวิเคราะห์สายอากาศสองทิศทางที่ใช้วงแหวนวงกลม โดยใช้วิธีฟังก์ชันกรีนชนิดไดแอดิก [5] ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ให้ความแม่นยำจะนำมาใช้เพื่อคำนวณหาแหล่งกำเนิดความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กสมมูลและกระแสไฟฟ้าสมมูลที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในโหมดรวมตามลำดับ และนำผลที่ได้นี้ไปคำนวณหาสนามไฟฟ้าระยะไกล โดยในการวิเคราะห์นี้ จะทำให้ทราบความหนาของวงแหวนเพื่อให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุด

ในการคำนวณการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยจะใช้ตัวประกอบแถวลำดับ ซึ่งมีข้อจำกัดคือขนาดของตัวสะท้อนต้องมีขนาดอนันต์ ซึ่งในทางปฏิบัติตัวสะท้อนจะมีขนาดที่จำกัด เนื่องจากขนาดที่จำกัดนี้ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นที่บริเวณด้านข้างและด้านหลัง สามารถคำนวณผลที่เกิดจากการเลี้ยวเบนนี้โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอ [6] ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สายอากาศวงแหวนวงกลมวางใกล้ตัวสะท้อนแบบกรวยโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอนี้ จะทำให้ทราบถึงขนาดของตัวสะท้อนแบบกรวยที่เหมาะสมกับความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเพื่อความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นจึงได้จำลองแบบสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมในโปรแกรม Numerical Electromagnetic Code (NEC) ซึ่งจะได้ผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่แม่นยำและออกแบบโครงสร้างได้ตรงตามลักษณะความต้องการใช้งาน เพื่อนำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณและการทดลอง

1.4 ขอบเขตการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม ในมาตรฐานโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11 b/g ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยทำการหาระยะทางสูงสุดที่เครื่องรับสามารถติดต่อกับเครื่องส่ง ซึ่งถูกเรียกว่าระยะบริการสูงสุด โดยใช้สายอากาศที่ออกแบบทำหน้าที่เป็นตัวส่งและรับ

สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมที่ออกแบบจะกำหนดให้มุมของตัวสะท้อนแบบกรวยเท่ากับ 90 องศา

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

เนื่องจากสายอากาศที่นำเสนอเกิดจากการนำสายอากาศวงแหวนวงกลมวางใกล้ตัวสะท้อนแบบกรวย วิทยานิพนธ์นี้จึงเริ่มจากวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศวงแหวนวงกลม การพิสูจน์หาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะใช้วิธีฟังก์ชันกรีนชนิดไดแอดิก โดยเริ่มจากการหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณช่องเปิดของวงแหวนซึ่งจะรวมผลของโพรบร่วมด้วย จากนั้นจะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กสมมูลและกระแสไฟฟ้าสมมูลเพื่อนำไปหาสนามระยะไกล โดยจะทำการเลือกขนาดของรัศมีและความหนาของวงแหวนอย่างเหมาะสมเพื่อให้มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่ดีที่สุด นำค่าที่เลือกไปทำการสร้างและทดสอบ นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันผลกับทางทฤษฎี

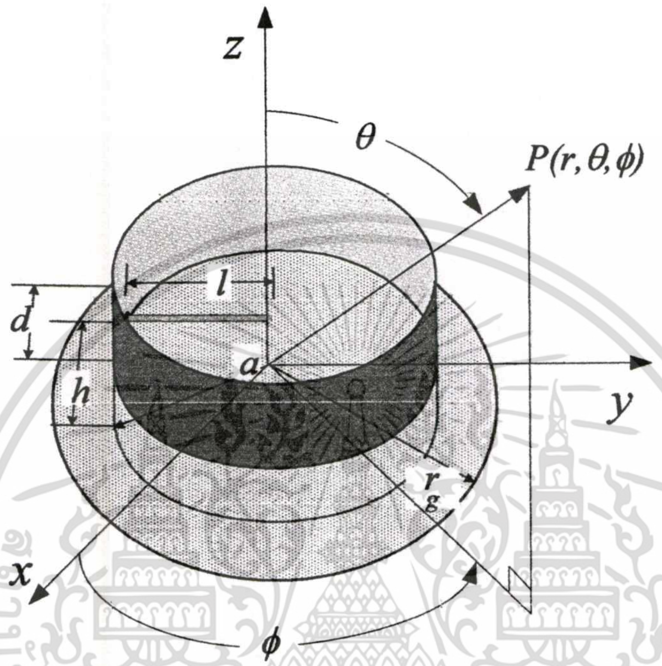
ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมล้อมรอบโพรบ การพิสูจน์หาสมการสนามไฟฟ้าระยะไกลจะใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอ ขนาดความสูงและความกว้างของตัวสะท้อนแบบกรวย และระยะห่างระหว่างสายอากาศวงแหวนวงกลมกับตัวสะท้อนแบบกรวย จะถูกเลือกอย่างเหมาะสมเพื่อให้มีคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นที่ดีที่สุด แล้วจึงทำการสร้างและทดสอบสายอากาศ นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อยืนยันผลกับทางทฤษฎี ในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยหาระยะบริการสูงสุด

1.6 งานวิจัยที่มีมาก่อน

1.6.1 สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อนมีโครงสร้างดังรูปที่ 1.6.1 ซึ่งประกอบด้วยโพรบป้อนสัญญาณมีความยาวเท่ากับ l ถูกล้อมรอบด้วยโลหะรูปวงแหวนวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ a และยาวเท่ากับ d โดยสายอากาศวางอยู่เหนือระนาบสะท้อนวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ r_g และมีระยะห่างเท่ากับ h



รูปที่ 1.6.1 โครงสร้างสายอากาศวงแหวนวงกลมเหนือระนาบสะท้อน

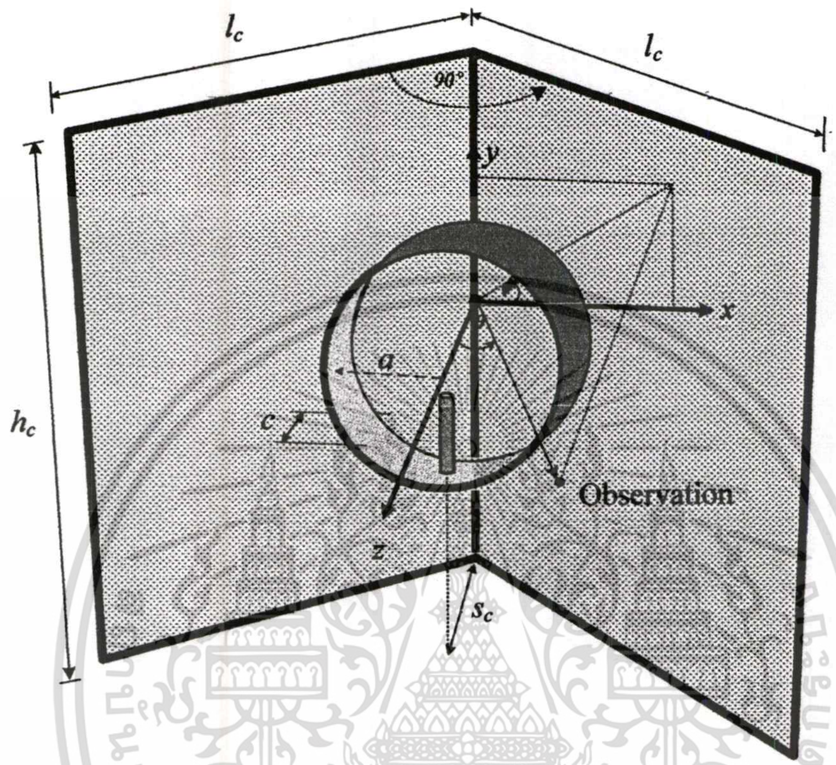
จากโครงสร้างสายอากาศพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะเป็นลักษณะชี้ทิศทาง และจะทำให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง ที่ระยะห่างของสายอากาศวงแหวนวงกลมที่วางเหนือระนาบแผ่นสะท้อนที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้ได้วางระยะห่างที่เหมาะสมเท่ากับ 0.286λ ซึ่งพบว่าได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดเท่ากับ 9.94 dBi

1.6.2 สายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณโดยวงแหวนวงกลมล้อมรอบโพรบ

สายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณโดยโพรบภายในวงแหวนวงกลมเป็นสายอากาศแบบทิศทางเดียวโดยใช้สายอากาศวงแหวนวงกลมวางใกล้ตัวสะท้อนแบบมุม แสดงในรูปที่ 1.6.2 โดยโครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงกลม มีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นวงกลมปลายเปิดทั้งสองด้านประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นสำหรับกระตุ้นมีความยาว l_p วางตามแนวแกน y ยื่นเข้าไปด้านในวงแหวนวงกลมที่มีรัศมี a และ ความหนา c โดยค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ได้จากการวิเคราะห์ คือ โพรบกระตุ้นยาวเท่ากับ 0.25λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดรัศมีวงแหวนเท่ากับ 0.3019λ และความหนาเท่ากับ 0.18λ สำหรับตัวสะท้อนแบบมุมจะมีระยะห่างระหว่างจากจุดยอดมุมกับตัวป้อนสัญญาณ s_c ขนาดความสูงและความกว้างเท่ากับ h_c และ l_c ตามลำดับ

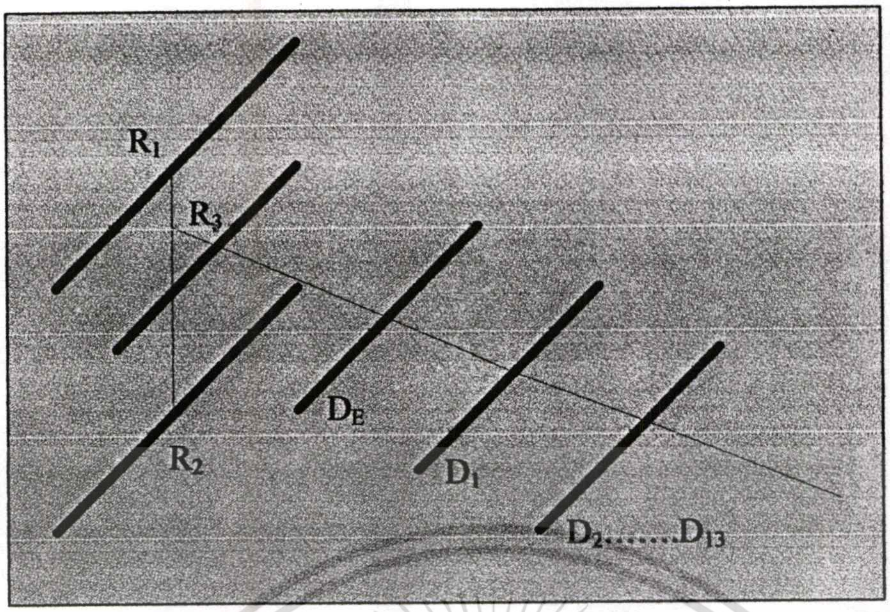


รูปที่ 1.6.2 โครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนแบบมุมที่ป้อนสัญญาณโดยโพรบภายในวงแหวนวงกลม

ระยะห่างระหว่างวงแหวนวงกลมกับตัวสะท้อนมีค่า $S_c = 0.4\lambda$ ถึง $S_c = 0.7\lambda$ โดยความสูงของตัวสะท้อน $h_c = 1\lambda$ และ ความกว้างของตัวสะท้อนเท่ากับ $l_c = 2\lambda$ พบว่าการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ยกเว้นในระนาบสนามไฟฟ้าที่ $S_c = 0.5\lambda$ การแพร่กระจายคลื่นจะไม่เป็นแบบทิศทางเดียว เมื่อพิจารณาในระนาบสนามไฟฟ้าพบว่าที่ระยะ $S_c = 0.4\lambda$ ลำคลื่นจะมีขนาดที่แคบที่สุดและลำคลื่นด้านหลังมีขนาดเล็ก ยังพบอีกว่าเมื่อ S_c มีค่าเพิ่มขึ้นลำคลื่นจะมีกว้างขึ้นและลำคลื่นย่อยด้านข้างเกิดขึ้น ในส่วนของการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนาม พบว่าที่ $S_c = 0.4\lambda$ ลำคลื่นจะมีขนาดที่แคบที่สุดและมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 11.2 dBi

1.6.3 สายอากาศยากิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6.3 สายอากาศยากิ

สายอากาศยากิเป็นสายอากาศชี้ทิศทางแบบหนึ่งที่ได้รับความนิยมใช้งานมานานตั้งแต่ก่อนสงครามโลกครั้งที่ 2 และได้รับความนิยมเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมามีผู้พยายามวิจัยเพื่อหาวิธีการออกแบบเพื่อที่จะทำให้สายอากาศยากิมีอัตราขยายต่อความยาว [24]ของบูมมากที่สุด โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ตั้งแต่ระยะห่างระหว่างอีลีเมนท์ต่างๆ จำนวนไดเร็คเตอร์ และเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของอีลีเมนท์ต่างๆ ซึ่งก็พบด้วยว่าขนาดต่างๆ ทั้งหมดเหล่านี้ มีผลกระทบระหว่างกันพอเปลี่ยนตัวหนึ่งก็ต้องเปลี่ยนระยะอีกตัวหนึ่งไปด้วย เพราะทุกอย่างนี้มีผลกระทบถึงอัตราขยาย แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและแถบความถี่ใช้งาน บางการวิจัยใช้การทดลองเป็นหลัก ซึ่งต้องใช้เวลานานมากกว่าจะได้ ผลการทดลองที่สามารถสรุปได้ บางการวิจัยต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่เข้าไปช่วยเพื่อทดสอบผลการทดลองทางคณิตศาสตร์ ว่าสามารถอธิบายพฤติกรรมของสายอากาศได้แม่นยำเพียงใด ซึ่งถ้าพบว่าเชื่อถือได้แล้วก็จะนำมาวิเคราะห์หาระยะห่างและความยาวที่เหมาะสม โดยสายอากาศยากินี้อยู่ในย่านความถี่ HF-UHF มีความยาวบูมตั้งแต่ 0.4λ ถึง4.2λ ซึ่งจะได้อัตราขยายประมาณ 7.1dBd-14.2dBd (9.25 dBi – 16.35dBi) ซึ่งจากรูปที่ 1.6.3 พบว่าสายอากาศยากิก็คือ สายอากาศไดโพลแบบ $\lambda/2$ และพาราซิติกอีลีเมนท์ (Parasitic Element)[23] ซึ่งพาราซิติก อีลีมนท์ก็คือ ส่วนของสายอากาศที่ไม่ได้ต่อโดยตรงกับสายนำสัญญาณ จากเครื่องรับหรือเครื่องส่ง แต่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสหรือแรงดันบนตัวมันได้และสายอากาศที่นำมาใช้งานร่วมกับพาราซิติกเรียกว่า พาราซิติกอาร์เรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ตลอดจนปัญหาที่น่าสนใจของวิทยานิพนธ์ รวมทั้งแนวความคิดที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยที่มีมุม 90 องศา การออกแบบสายอากาศวงแหวนวงกลม คุณลักษณะของสายอากาศวงแหวนวงกลม ฟังก์ชันกรีนไดแอดิกและทฤษฎีการเลี้ยวเบน

บทที่ 3 กล่าวถึงการวิเคราะห์ทางทฤษฎีสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอในระนาบสนามไฟฟ้าและการวิเคราะห์ทางทฤษฎีสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอในระนาบสนามแม่เหล็ก

บทที่ 4 กล่าวถึงผลจากการคำนวณที่ได้และเปรียบเทียบผลจากการจำลองแบบรูปสายอากาศด้วยโปรแกรม Numerical Electromagnetic Code (NEC2)

บทที่ 5 กล่าวถึง ผลการทดสอบและวิเคราะห์

บทที่ 6 กล่าวถึง สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

การขยายโครงข่ายท้องถิ่น (LAN) ด้วยโครงข่ายท้องถิ่นไร้สายแบบจุดต่อจุดจำเป็นต้องใช้สายอากาศที่สามารถชี้ทิศทางไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้ เช่น สายอากาศที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมซึ่งเป็นสายอากาศแบบทิศทางเดียว สำหรับข้อดีของสายอากาศชนิดนี้ คือ การออกแบบและสร้างได้ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน ขนาดกะทัดรัด มีค่าอัตราการขยายสูงและมีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากไม่มีส่วนประกอบใดเป็นไดอิเล็กตริก เนื้อหาบทนี้ได้กล่าวถึง การออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยที่มีมุม 90 องศา การออกแบบสายอากาศวงแหวนวงกลม ฟังก์ชันกรีนไดแอดิกของสายอากาศวงแหวนวงกลม คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศวงแหวนวงกลม และทฤษฎีการเลี้ยวเบน

2.2 ฟังก์ชันกรีนไดแอดิกของสายอากาศวงแหวนวงกลม

ฟังก์ชันของกรีนไดแอดิกแบบไฟฟ้าสามารถจำแนกตามเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับฟังก์ชันได้สองชนิด คือ ฟังก์ชันกรีนไดแอดิกแบบไฟฟ้าชนิดที่หนึ่ง $\overline{\overline{G}}_{e1}$ ซึ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตดิริเคท์ (Dirichlet boundary condition) พบว่าองค์ประกอบของฟังก์ชันกรีนไดแอดิกชนิดที่หนึ่งในแนวสัมผัสกับผิวของปัญหามีค่าเป็นศูนย์ และฟังก์ชันไดแอดิกแบบไฟฟ้าชนิดที่สอง $\overline{\overline{G}}_{e2}$ จะต้องรองรับเงื่อนไขขอบเขตของนอยมานน์ (Neumann boundary condition) พบว่าองค์ประกอบของฟังก์ชันกรีนไดแอดิกชนิดนี้ในแนวตั้งฉากกับผิวของปัญหามีค่าเป็นศูนย์ ในส่วนของฟังก์ชันกรีนไดแอดิกแบบแม่เหล็กใช้เงื่อนไขขอบเขตแบบดิริเคท์และเงื่อนไขขอบเขตนอยม้านน์สามารถแบ่งฟังก์ชันเป็นสองชนิดเช่นเดียวกับฟังก์ชันกรีนไดแอดิกแบบไฟฟ้า

ในปัญหาที่แตกต่างกันจะมีเงื่อนไขขอบเขตที่ต่างกันทำให้ฟังก์ชันกรีนแตกต่างกันตามเงื่อนไขขอบเขตนั้นๆ ดังนั้นหากรู้ฟังก์ชันกรีนไดแอดิกของปัญหานั้นๆ ซึ่งมีแหล่งกำเนิดเป็นฟังก์ชันอิมพัลส์ ดังนั้นการหาคำตอบของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอันเนื่องจากการกระจายกระแสในรูปแบบใดๆ ได้โดยการอินทิเกรตตลอดปริมาตรของแหล่งกำเนิดของผลคูณระหว่างฟังก์ชันกรีนไดแอดิกและการกระจายความหนาแน่นกระแสที่แหล่งกำเนิดนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพิสูจน์หาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกลนั้นจะเริ่มจาก สมการทั่วไปของสนามที่แพร่กระจายออกจากตัวสายอากาศ ซึ่งประกอบด้วย สมการคลื่นแบบเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันกับเวลาและแปรผันกับเวลาแบบฮาร์มอนิกส์ และการหาคำตอบของสมการคลื่นแบบเวกเตอร์สำหรับพิกัดทรงกระบอก หลังจากนั้นคำตอบที่ได้จากสมการคลื่นแบบเวกเตอร์หรือฟังก์ชันเจาะจงในรูปสเกลาร์ที่เหมาะสมมากที่สุด จะนำมาใช้เพื่อหาฟังก์ชันกรีนชนิดไดแอดิกทั้งแบบไฟฟ้าและแม่เหล็กที่เกิดจากความหนาแน่นของกระแส เพื่อนำไปหาสมการของการกระจายสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณช่องเปิดของวงแหวน และทำการแปลงสนามดังกล่าวให้อยู่ในรูปความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูลเพื่อนำไปหาสนามไฟฟ้าระยะไกล

2.2.1 ฟังก์ชันกรีนไดแอดิกบริเวณภายในท่อนำคลื่นทรงกระบอก

ก่อนอื่นเราจะหา $\bar{\bar{G}}_{m2}(\bar{R},\bar{R}')$ เนื่องจากเป็นฟังก์ชันไดแอดิกโซลีนอยด์ (Solenoidal dyadic function) นั่นคือ องค์ประกอบของฟังก์ชันกรีนไดแอดิกชนิดนี้ในแนวตั้งฉากกับผิวของปัญหามีค่าเป็นศูนย์

$$\nabla\cdot\bar{\bar{G}}_{m2}(\bar{R},\bar{R}')=0$$

จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันกรีนไดแอดิกเพื่อหาฟังก์ชันที่เหลือ นั่นคือ $\bar{\bar{G}}_{e1}$, $\bar{\bar{G}}_{e2}$ และ $\bar{\bar{G}}_{m1}$

เราจะประยุกต์ใช้วิธีการ Ohm-Rayleigh [7] เพื่อหาฟังก์ชันกรีนไดแอดิกแบบแม่เหล็กชนิดที่สอง ($\bar{\bar{G}}_{m2}$) สำหรับท่อนำคลื่นเซกเตอร์ทรงกระบอกแกนร่วมซึ่งจะสอดคล้องกับสมการ

$$\nabla\times\nabla\times\bar{\bar{G}}_{m2}(\bar{R},\bar{R}')-k^2\bar{\bar{G}}_{m2}(\bar{R},\bar{R}')=\nabla\times[\bar{\bar{I}}\delta(\bar{R}-\bar{R}')] \qquad (2.1)$$

โดยที่ $\rho=a;\ \phi=\phi_s\ ;\ -c/2\le z\le c/2$ และเงื่อนไขขอบเขตนอยมานน์

$$\hat{n}\times\nabla\times\bar{\bar{G}}_{m2}(\bar{R},\bar{R}')=0 \qquad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ $\rho = a$ และ $\phi = 0, \phi_s$ ซึ่ง $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$

จากสมการ (2.1) ก่อนอื่นเราจะต้องหาฟังก์ชันเจาะจงสำหรับแหล่งกำเนิด $\nabla \times [\bar{\bar{I}}\delta(\bar{R}-\bar{R}')]$ โดยใช้ฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์โซลีนอยด์ (Solenoidal vector wave function) ที่กล่าวถึงในหัวข้อก่อนหน้านี้ ฟังก์ชันที่เหมาะสมคือ $\bar{M}_{\substack{e\\o}n\zeta}(h)$ และ $\bar{N}_{\substack{e\\o}n\chi}(h)$ เนื่องจากเป็นไปตามเงื่อนไขขอบเขตในสมการ (2.2) ดังนั้นเราจะได้

$$\nabla \times [\bar{\bar{I}}\delta(\bar{R}-\bar{R}')] = \int_{-\infty}^{\infty} dh_\zeta \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} [\bar{N}^{(1)}_{\substack{e\\o}n\zeta}(h_\zeta)\bar{A}_{\substack{e\\o}n\zeta}(h_\zeta) + \bar{M}^{(1)}_{\substack{e\\o}n\xi}(h_\xi)\bar{B}_{\substack{e\\o}n\xi}(h_\xi)] \tag{2.3}$$

เมื่อ $\bar{A}_{\substack{e\\o}n\zeta}(h_\zeta)$ และ $\bar{B}_{\substack{e\\o}n\xi}(h_\xi)$ เป็นสัมประสิทธิ์เวกเตอร์ (Vector coefficient) ซึ่งหาได้โดยการอินทิเกรตตลอดปริมาตรในสมการที่ (2.1) หลังจากที่คูณเชิงสเกลาร์ข้างหน้าด้วย $\bar{N}'_{\substack{e\\o}n\xi}(-h_\xi)$ และ $\bar{M}'_{\substack{e\\o}n\zeta}(-h_\zeta)$ และใช้ทฤษฎีเกาส์ไดแอดิก (Dyadic Gauss Theorem) ร่วมกับความสัมพันธ์ออร์โธโกนัล (Orthogonal relation) ระหว่างฟังก์ชันคลื่นเวกเตอร์ ดังนั้น

$$\bar{A}_{\substack{e\\o}n\zeta}(h_\zeta) = \frac{(2-\delta_0)\kappa_\zeta}{4\pi^2\zeta^2 I_\zeta}\bar{M}'_{\substack{e\\o}n\zeta}(-h_\zeta) \tag{2.4}$$

$$\bar{B}_{\substack{e\\o}n\xi}(h_\xi) = \frac{(2-\delta_0)\kappa_\xi}{4\pi^2\xi^2 I_\xi}\bar{N}'_{\substack{e\\o}n\xi}(-h_\xi) \tag{2.5}$$

ดังนั้นเมื่อแทนสัมประสิทธิ์ในสมการ (2.4) และ (2.5) ลงในสมการ (2.3) จะได้

$$\bar{\bar{G}}_{HJ}(\bar{R},\bar{R}') = \bar{\bar{G}}_{M2}(\bar{R},\bar{R}') = \int_{-\infty}^{\infty} dh_\zeta \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{2-\delta_0}{4\pi^2}\left[\frac{\kappa_\zeta}{\zeta^2 I_\zeta(\kappa_\zeta^2-k^2)}\bar{N}^{(1)}_{\substack{e\\o}n\zeta}(h_\zeta)\bar{M}'_{\substack{e\\o}n\zeta}(h_\zeta) + \frac{\kappa_\xi}{\xi^2 I_\psi(\kappa_\xi^2-k^2)}\bar{M}^{(1)}_{\substack{e\\o}n\xi}(h_\xi)\bar{N}'_{\substack{e\\o}n\xi}(h_\xi)\right] \tag{2.6}$$

เมื่อ (1) คือจุดสังเกตใด ๆ ของสนามบริเวณภายในทรงกระบอก และ เครื่องหมายไพร์มแสดงตำแหน่งของแหล่งกำเนิด ซึ่งพิจารณาในระบบพิกัดทรงกระบอก

การอินทิเกรตในสมการ (2.6) จะใช้วิธีการอินทิเกรตคอนทัวร์ เมื่อตำแหน่งขั้ว(pole) $h_\varsigma = \pm k_\varsigma = \pm\sqrt{k^2-\varsigma^2}$ ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันกรีนชนิดไดแอดิกแบบแม่เหล็กที่มีแหล่งกำเนิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงกระบอก ($\bar{\bar{G}}_{HJ}(\bar{R},\bar{R}')$) จะแสดงในรูปของฟังก์ชันคลื่นได้ดังนี้คือ

$$\bar{\bar{G}}_{HJ}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}k\left[c_{\zeta}\bar{N}^{(1)}_{\substack{e\\o}n\zeta}(\pm k_{\zeta})\bar{M}'_{\substack{e\\o}n\zeta}(\mp k_{\zeta})+c_{\xi}\bar{M}^{(1)}_{\substack{e\\o}n\zeta}(\pm k_{\xi})\bar{N}'_{\substack{e\\o}n\xi}(\mp k_{\xi})\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.7}$$

เมื่อ

$$c_{\zeta}=\frac{-j(2-\delta_0)}{4\pi^2\zeta^2 I_{\zeta}k_{\zeta}} \tag{2.8}$$

$$c_{\xi}=\frac{-j(2-\delta_0)}{4\pi^2\xi^2 I_{\xi}k_{\xi}} \tag{2.9}$$

และ

$$I_{\zeta}=\frac{a^2}{2\zeta^2}(\zeta^2-\frac{n^2}{a^2})J_n^2(\zeta a) \tag{2.10}$$

$$I_{\xi}=\frac{a^2}{2\xi^2}\left[\frac{\partial J_n(\xi\rho_1)}{\partial\rho_1}\right]^2\Bigg|_{\rho_1=a} \tag{2.11}$$

จากสมการทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นเราสามารถแตกองค์ประกอบของไดแอดิกได้ทั้งหมด 9 องค์ประกอบด้วยกันยกตัวอย่างเช่น $\bar{\bar{G}}^{\rho\rho}_{HJ}(\bar{R},\bar{R}')$ หมายถึงฟังก์ชันกรีนไดแอดิกในทิศทาง ρ ที่สังเกตที่ตำแหน่ง (ρ,ϕ,z) เกิดจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ในทิศทางแกน ρ อยู่ที่ตำแหน่ง (ρ',ϕ',z') แสดงได้ดังนี้

$$G^{\rho\rho}_{HJ}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}k\left[\begin{array}{l}\dfrac{c_{\zeta}jnk_{\zeta}}{\kappa_{\zeta}}\dfrac{\partial J_n(\zeta\rho_1)}{\partial\rho_1}\dfrac{J_n(\zeta\rho')}{\rho'}\sin\left[n(\phi_1-\phi')\right]\begin{cases}-e^{-jk_{\zeta}(z_1-z')}\\+e^{-jk_{\zeta}(z'-z_1)}\end{cases}\\+\dfrac{jnk_{\xi}c_{\xi}}{\kappa_{\xi}}\dfrac{J_n(\xi\rho_1)}{\rho_1}\dfrac{\partial J_n(\xi\rho')}{\partial\rho'}\sin\left[n(\phi_1-\phi')\right]\begin{cases}-e^{-jk_{\xi}(z_1-z')}\\+e^{-jk_{\xi}(z'-z_1)}\end{cases}\end{array}\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.12}$$

$$G^{\rho\phi}_{HJ}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}k\left[\begin{array}{l}\dfrac{jc_{\zeta}k_{\zeta}}{\kappa_{\zeta}}\dfrac{\partial J_n(\zeta\rho_1)}{\partial\rho_1}\dfrac{\partial J_n(\zeta\rho')}{\partial\rho'}\cos\left[n(\phi_1-\phi')\right]\begin{cases}+e^{-jk_{\zeta}(z_1-z')}\\-e^{-jk_{\zeta}(z'-z_1)}\end{cases}\\+\dfrac{jn^2c_{\xi}k_{\xi}}{\kappa_{\xi}}\dfrac{J_n(\xi\rho_1)}{\rho_1}\dfrac{J_n(\xi\rho')}{\rho'}\cos\left[n(\phi_1-\phi')\right]\begin{cases}+e^{-jk_{\xi}(z_1-z')}\\-e^{-jk_{\xi}(z'-z_1)}\end{cases}\end{array}\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{HJ}^{\rho z}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}k\left[-\frac{n\xi^{2}c_{\xi}}{\kappa_{\xi}}\frac{J_{n}(\xi\rho_{1})}{\rho_{1}}J_{n}(\xi\rho')\sin\left[n(\phi_{1}-\phi')\right]\begin{cases}e^{-jk_{\xi}(z_{1}-z')}\\ e^{-jk_{\xi}(z'-z_{1})}\end{cases}\right],\ z_{1}\gtrless z' \tag{2.14}$$

$$G_{HJ}^{\phi\rho}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}k\left[\begin{array}{l}\dfrac{jn^{2}c_{\zeta}k_{\zeta}}{\kappa_{\zeta}}\dfrac{J_{n}(\zeta\rho_{1})}{\rho_{1}}\dfrac{J_{n}(\zeta\rho')}{\rho'}\cos\left[n(\phi_{1}-\phi')\right]\begin{cases}-e^{-jk_{\zeta}(z_{1}-z')}\\ +e^{-jk_{\zeta}(z'-z_{1})}\end{cases}\\ +\dfrac{jc_{\xi}k_{\xi}}{\kappa_{\xi}}\dfrac{\partial J_{n}(\xi\rho_{1})}{\partial\rho_{1}}\dfrac{\partial J_{n}(\xi\rho')}{\partial\rho'}\cos\left[n(\phi_{1}-\phi')\right]\begin{cases}-e^{-jk_{\xi}(z_{1}-z')}\\ +e^{-jk_{\xi}(z'-z_{1})}\end{cases}\end{array}\right],\ z_{1}\gtrless z' \tag{2.15}$$

$$G_{HJ}^{\phi\phi}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}k\left[\begin{array}{l}\dfrac{jnc_{\zeta}k_{\zeta}}{\kappa_{\zeta}}\dfrac{J_{n}(\zeta\rho_{1})}{\rho_{1}}\dfrac{\partial J_{n}(\zeta\rho')}{\partial\rho'}\sin\left[n(\phi_{1}-\phi')\right]\begin{cases}-e^{-jk_{\zeta}(z_{1}-z')}\\ +e^{-jk_{\zeta}(z'-z_{1})}\end{cases}\\ +\dfrac{jnc_{\xi}k_{\xi}}{\kappa_{\xi}}\dfrac{\partial J_{n}(\xi\rho_{1})}{\partial\rho_{1}}\dfrac{J_{n}(\xi\rho')}{\rho'}\sin\left[n(\phi_{1}-\phi')\right]\begin{cases}-e^{-jk_{\xi}(z_{1}-z')}\\ +e^{-jk_{\xi}(z'-z_{1})}\end{cases}\end{array}\right],\ z_{1}\gtrless z' \tag{2.16}$$

$$G_{HJ}^{\phi z}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}k\left[-\frac{\xi^{2}c_{\xi}}{\kappa_{\xi}}\frac{\partial J_{n}(\xi\rho_{1})}{\partial\rho_{1}}J_{n}(\xi\rho')\cos\left[n(\phi_{1}-\phi')\right]\begin{cases}e^{-jk_{\xi}(z_{1}-z')}\\ e^{-jk_{\xi}(z'-z_{1})}\end{cases}\right],\ z_{1}\gtrless z' \tag{2.17}$$

$$G_{HJ}^{z\rho}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}k\left[\frac{nc_{\zeta}\zeta^{2}}{\kappa_{\zeta}}J_{n}(\zeta\rho_{1})\frac{nJ_{n}(\zeta\rho')}{\rho'}\sin\left[n(\phi_{1}-\phi')\right]\begin{cases}e^{-jk_{\zeta}(z_{1}-z')}\\ e^{-jk_{\zeta}(z'-z_{1})}\end{cases}\right],\ z_{1}\gtrless z' \tag{2.18}$$

$$G_{HJ}^{z\phi}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}k\left[-\frac{c_{\zeta}\zeta^{2}}{\kappa_{\zeta}}J_{n}(\zeta\rho_{1})\frac{\partial J_{n}(\zeta\rho')}{\partial\rho'}\cos\left[n(\phi_{1}-\phi')\right]\begin{cases}e^{-jk_{\zeta}(z_{1}-z')}\\ e^{-jk_{\zeta}(z'-z_{1})}\end{cases}\right],\ z_{1}\gtrless z' \tag{2.19}$$

สำหรับฟังก์ชันกรีนชนิดไดแอดิกแบบไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดเป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับโครงสร้างท่อนำคลื่นทรงกระบอกเมื่ออาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง $\bar{\bar{G}}_{EJ}$ และ $\bar{\bar{G}}_{HJ}$ จะได้

$$\bar{\bar{G}}_{EJ}(\bar{R},\bar{R}')=\frac{1}{k^{2}}\left[-\hat{z}\hat{z}\delta(\bar{R}-\bar{R}')+(\nabla\times\bar{\bar{G}}_{HJ}^{+})U(z_{1}-z')+(\nabla\times\bar{\bar{G}}_{HJ}^{-})U(z'-z_{1})\right] \tag{2.20}$$

ดังนั้นจะได้

$$\bar{\bar{G}}_{EJ}(\bar{R},\bar{R}')=-\frac{1}{k^{2}}\hat{z}\hat{z}(\bar{R}-\bar{R}')+\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[c_{\zeta}\bar{M}_{{}^{e}_{o}n\zeta}(\pm k_{\zeta})\bar{M}'_{{}^{e}_{o}n\zeta}(\mp k_{\zeta})+c_{\xi}\bar{N}_{{}^{e}_{o}n\xi}(\pm k_{\xi})\bar{N}'_{{}^{e}_{o}n\xi}(\mp k_{\xi})\right],\ z_{1}\gtrless z' \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการทฤษฎีดังกล่าวข้างต้นเราสามารถแตกองค์ประกอบของไดแอดิกได้ทั้งหมด 9 องค์ประกอบด้วยกันแสดงได้ดังนี้

$$G_{EJ}^{\rho\rho}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\begin{matrix} n^2 c_\zeta \dfrac{J_n(\zeta\rho_1)}{\rho_1}\dfrac{J_n(\zeta\rho')}{\rho'}\cos\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{matrix}\right. \\ +\dfrac{c_\xi k_\xi^2}{\kappa_\xi^2}\dfrac{\partial J_n(\xi\rho_1)}{\partial\rho_1}\dfrac{\partial J_n(\xi\rho')}{\partial\rho'}\cos\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} e^{-jk_\xi(z_1-z')} \\ e^{-jk_\xi(z'-z_1)} \end{matrix}\right. \end{matrix}\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.22}$$

$$G_{EJ}^{\rho\phi}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\begin{matrix} n c_\zeta \dfrac{J_n(\zeta\rho_1)}{\rho_1}\dfrac{\partial J_n(\zeta\rho')}{\partial\rho'}\sin\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{matrix}\right. \\ +\dfrac{n c_\xi k_\xi^2}{\kappa_\xi^2}\dfrac{\partial J_n(\xi\rho_1)}{\partial\rho_1}\dfrac{J_n(\xi\rho')}{\rho'}\sin\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} e^{-jk_\xi(z_1-z')} \\ e^{-jk_\xi(z'-z_1)} \end{matrix}\right. \end{matrix}\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.23}$$

$$G_{EJ}^{\rho z}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\dfrac{j\xi^2 c_\xi k_\xi}{\kappa_\xi^2}\dfrac{\partial J_n(\xi\rho_1)}{\partial\rho_1}J_n(\xi\rho')\cos\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} -e^{-jk_\xi(z_1-z')} \\ +e^{-jk_\xi(z'-z_1)} \end{matrix}\right.\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.24}$$

$$G_{EJ}^{\phi\rho}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\begin{matrix} -n c_\zeta \dfrac{\partial J_n(\zeta\rho_1)}{\partial\rho_1}\dfrac{J_n(\zeta\rho')}{\rho'}\sin\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{matrix}\right. \\ -\dfrac{n c_\xi k_\xi^2}{\kappa_\xi^2}\dfrac{J_n(\xi\rho_1)}{\rho_1}\dfrac{\partial J_n(\xi\rho')}{\partial\rho'}\sin\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} e^{-jk_\xi(z_1-z')} \\ e^{-jk_\xi(z'-z_1)} \end{matrix}\right. \end{matrix}\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.25}$$

$$G_{EJ}^{\phi\phi}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\begin{matrix} c_\zeta \dfrac{\partial J_n(\zeta\rho_1)}{\partial\rho_1}\dfrac{\partial J_n(\zeta\rho')}{\partial\rho'}\cos\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{matrix}\right. \\ +\dfrac{n^2 c_\xi k_\xi^2}{\kappa_\xi^2}\dfrac{J_n(\xi\rho_1)}{\rho_1}\dfrac{J_n(\xi\rho')}{\rho'}\cos\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} e^{-jk_\xi(z_1-z')} \\ e^{-jk_\xi(z'-z_1)} \end{matrix}\right. \end{matrix}\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.26}$$

$$G_{EJ}^{\phi z}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\dfrac{jn\xi^2 c_\xi k_\xi}{\kappa_\xi^2}\dfrac{J_n(\xi\rho_1)}{\rho_1}J_n(\xi\rho')\sin\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} +e^{-jk_\xi(z_1-z')} \\ -e^{-jk_\xi(z'-z_1)} \end{matrix}\right.\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.27}$$

$$G_{EJ}^{z\rho}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\dfrac{j\xi^2 c_\xi k_\xi}{\kappa_\xi^2}J_n(\xi\rho_1)\dfrac{\partial J_n(\xi\rho')}{\partial\rho'}\cos\left[n(\phi_1-\phi')\right]\left\{\begin{matrix} +e^{-jk_\xi(z_1-z')} \\ -e^{-jk_\xi(z'-z_1)} \end{matrix}\right.\right],\ z_1 \gtrless z' \tag{2.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_{EJ}^{z\phi}(\bar{R},\bar{R}')=\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\frac{jn\xi^2 c_\xi k_\xi}{\kappa_\xi^2}J_n(\xi\rho_1)\frac{J_n(\xi\rho')}{\rho'}\sin\left[n(\phi_1-\phi')\right]\begin{Bmatrix}+e^{-jk_\xi(z_1-z')}\\ -e^{-jk_\xi(z'-z_1)}\end{Bmatrix}\right],\ z_1 \gtrless z' \quad (2.29)$$

$$G_{EJ}^{zz}(\bar{R},\bar{R}')=-\frac{1}{k^2}\hat{z}\hat{z}(\bar{R}-\bar{R}')+\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\left[\frac{\xi^4 c_\xi}{\kappa_\xi^2}J_n(\xi\rho_1)J_n(\xi\rho')\cos\left[n(\phi_1-\phi')\right]\begin{Bmatrix}e^{-jk_\xi(z_1-z')}\\ e^{-jk_\xi(z'-z_1)}\end{Bmatrix}\right],\ z_1 \gtrless z' \quad (2.30)$$

2.2.2 การกระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณช่องเปิดของวงแหวน

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในโครงสร้างรูปทรงกระบอกที่ยาวอนันต์ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดเป็นความหนาแน่นของกระแส แสดงได้ดังนี้คือ

$$\bar{E}(\rho_1,\phi_1,z_1)=-j\omega\mu_0\int_{a-l}^{a}\bar{\bar{G}}_{EJ}(\rho_1,\phi_1,z_1;\rho',\phi_a',z')\cdot J_\rho(\rho',\phi',z')\hat{\rho}d\rho_1 \quad (2.31)$$

$$\bar{H}(\rho_1,\phi_1,z_1)=\int_{a-l}^{a}\bar{\bar{G}}_{HJ}(\rho_1,\phi_1,z_1;\rho',\phi',z')\cdot J_\rho(\rho',\phi',z')\hat{\rho}d\rho_1 \quad (2.32)$$

เมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรบมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น ดังนั้นจะสมมติการกระจายกระแสตามความยาวโพรบในรูปของฟังก์ชันไซน์ได้ดังนี้

$$\bar{J}(\bar{R}')=J_m\sin\left[k(\rho'-a+l)\right]\hat{\rho}\ ;\ a-l\le\rho'\le a,\phi'=\pi/2,z'=0 \quad (2.33)$$

เมื่อ J_m คือค่าสูงสุดของกระแส

ดังนั้นองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัสกับระนาบ z_1 ที่ตำแหน่งใด ๆ จะได้ดังต่อไปนี้

$$E_\rho(\rho_1,\phi_1,z_1)=-j\omega\mu_0\sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty}\begin{bmatrix}c_\zeta n^2\dfrac{J_n(\zeta\rho_1)}{\rho_1}\cos[n(\phi_1-\phi')]E_{a,TE}\begin{Bmatrix}e^{-jk_\zeta(z_1-z')}\\ e^{-jk_\zeta(z'-z_1)}\end{Bmatrix}\\ +c_\xi\dfrac{k_\xi^2}{\kappa_\xi^2}\dfrac{\partial J_n(\xi\rho_1)}{\partial\rho_1}\cos[n(\phi_1-\phi')]E_{a,TM}\begin{Bmatrix}e^{-jk_\zeta(z_1-z')}\\ e^{-jk_\zeta(z'-z_1)}\end{Bmatrix}\end{bmatrix},\ z_1 \gtrless z' \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$E_\phi(\rho_1,\phi_1,z_1) = -j\omega\mu_0 \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} c_\zeta n \dfrac{\partial J_n(\zeta\rho_1)}{\partial\rho_1} \sin[n(\phi_1-\phi')] E_{a,TE} \begin{cases} e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{cases} \\ +c_\xi n \dfrac{k_\xi^2}{\kappa_\xi^2} \dfrac{J_n(\xi\rho_1)}{\rho_1} \sin[n(\phi_1-\phi')] E_{a,TM} \begin{cases} e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{cases} \end{matrix} \right], \; z_1 \gtrless z' \tag{2.35}$$

$$H_\rho(\rho_1,\phi_1,z_1) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} c_\zeta \dfrac{k_\zeta}{\kappa_\zeta}(jnk) \dfrac{\partial J_n(\zeta\rho_1)}{\partial\rho_1} \sin[n(\phi_1-\phi')] H_{a,TE} \begin{cases} -e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ +e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{cases} \\ +c_\xi \dfrac{k_\xi}{\kappa_\xi}(jnk) \dfrac{J_n(\xi\rho_1)}{\rho_1} \sin[n(\phi_1-\phi')] H_{a,TM} \begin{cases} -e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ +e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{cases} \end{matrix} \right], \; z_1 \gtrless z' \tag{2.36}$$

$$H_\phi(\rho_1,\phi_1,z_1) = \sum_{n=0}^{\infty}\sum_{m=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} c_\zeta \dfrac{k_\zeta}{\kappa_\zeta}(jn^2k) \dfrac{J_n(\zeta\rho_1)}{\rho_1} \cos[n(\phi_1-\phi')] H_{a,TE} \begin{cases} -e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ +e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{cases} \\ +c_\xi \dfrac{k_\xi}{\kappa_\xi}(jk) \dfrac{\partial J_n(\xi\rho_1)}{\partial\rho_1} \cos[n(\phi_1-\phi')] H_{a,TM} \begin{cases} -e^{-jk_\zeta(z_1-z')} \\ +e^{-jk_\zeta(z'-z_1)} \end{cases} \end{matrix} \right], \; z_1 \gtrless z' \tag{2.37}$$

เมื่อ

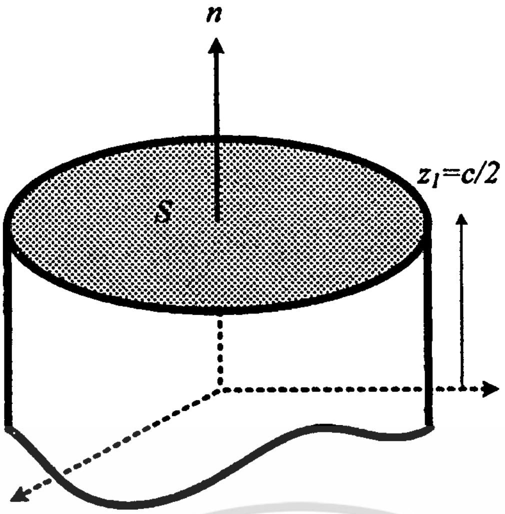
$$E_{a,TE} = H_{a,TE} = \int_{a-l}^{a} \frac{J_n(\zeta\rho')}{\rho'} \sin[k(\rho'-a+l)]d\rho' \tag{2.38}$$

$$E_{a,TM} = H_{a,TM} = \int_{a-l}^{a} \frac{\partial J_n(\xi\rho')}{\partial\rho'} \sin[k(\rho'-a+l)]d\rho' \tag{2.39}$$

2.2.3 สมการสนามไฟฟ้าระยะไกล

การหาสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากช่องเปิดจะเริ่มจากการพิจารณาคลื่นที่เดินทาง $+z$ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.6 โดยที่ $\hat{n}$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบช่องเปิด S (ระนาบ $z_1 = c/2$) และช่องเปิดวางอยู่บนช่องว่างอิสระ ดังนั้นเมื่อทราบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัสผิวของระนาบช่องเปิด S ที่ได้จากหัวข้อที่แล้ว ความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กสมมูลและกระแสไฟฟ้าสมมูลก็จะสามารถหาได้ดังสมการ (2.23) และ (2.24)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
63271

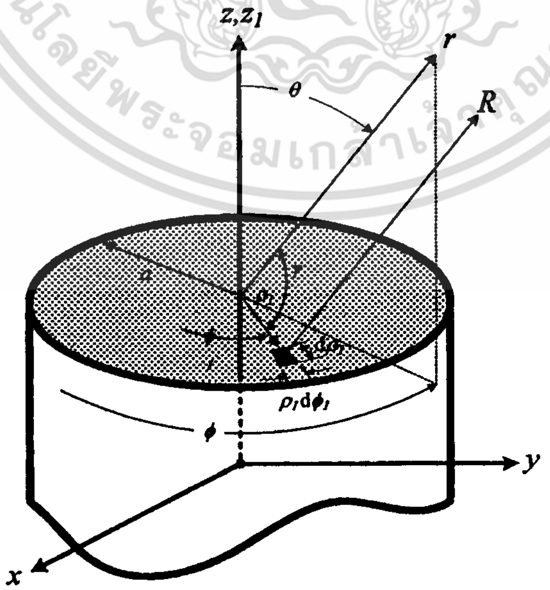


รูปที่ 2.1 การพิจารณาความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กสมมูลและกระแสไฟฟ้าสมมูล

$$\bar{M}_s(\rho_1,\phi_1,z_1)=\bar{E}(\rho_1,\phi_1,z_1)\big|_{z_1=c/2}\times\hat{n}=\bar{E}(\rho_1,\phi_1,z_1)\big|_{z_1=c/2}\times\hat{z} \tag{2.40}$$

$$\bar{J}_s(\rho_1,\phi_1,z_1)=\bar{H}(\rho_1,\phi_1,z_1)\big|_{z_1=c/2}\times(-\hat{n})=\bar{H}(\rho_1,\phi_1,z_1)\big|_{z_1=c/2}(-\hat{z}) \tag{2.41}$$

รูปที่ 2.7 แสดงรูปโครงสร้างเชิงเรขาคณิตของช่องเปิดแบบวงกลมที่วางอยู่บนช่องว่างอิสระ ดังนั้น สนามไฟฟ้าระยะไกลที่หาได้จากเวกเตอร์ของการแพร่กระจายคลื่น แสดงได้ดังสมการ (2.24) และ (2.25)



รูปที่ 2.2 ช่องเปิดแบบวงกลมที่วางอยู่บนช่องว่างอิสระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_{\theta,+z}(r,\theta,\phi) \approx -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}\left\{L_{\phi}(\theta,\phi)+\eta N_{\theta}(\theta,\phi)\right\} \tag{2.42}$$

$$E_{\phi,+z}(r,\theta,\phi) \approx -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}\left\{L_{\theta}(\theta,\phi)-\eta N_{\phi}(\theta,\phi)\right\} \tag{2.43}$$

จากรูปที่ 2.7 เป็นกรณีที่พิจารณาช่องเปิดวางอยู่บนระนาบ $z_1 = 0$ และเมื่อ $z_1 = c/2$ จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$E_{\theta,+z}(r,\theta,\phi) \approx -\frac{jke^{-jk(r-\frac{c}{2}\cos\theta)}}{4\pi r}\left\{L_{\phi}(\theta,\phi)+\eta N_{\theta}(\theta,\phi)\right\} \tag{2.44}$$

$$E_{\phi,+z}(r,\theta,\phi) \approx -\frac{jke^{-jk(r-\frac{c}{2}\cos\theta)}}{4\pi r}\left\{L_{\theta}(\theta,\phi)-\eta N_{\phi}(\theta,\phi)\right\} \tag{2.45}$$

โดยที่องค์ประกอบของเวกเตอร์แพร่กระจายคลื่นคือ

$$N_{\theta} = \int_0^{2\pi}\int_0^{a}\left[J_{\rho}\cos(\theta)\cos(\phi-\phi_1)+J_{\phi}\cos(\theta)\sin(\phi-\phi_1)\right]e^{jk\rho_1\sin\theta\cos(\phi-\phi_1)}\rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \tag{2.46}$$

$$N_{\phi} = \int_0^{2\pi}\int_0^{a}\left[-J_{\rho}\sin(\phi-\phi_1)+J_{\phi}\cos(\phi-\phi_1)\right]e^{jk\rho_1\sin\theta\cos(\phi-\phi_1)}\rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \tag{2.47}$$

$$L_{\theta} = \int_0^{2\pi}\int_0^{a}\left[M_{\rho}\cos(\theta)\cos(\phi-\phi_1)+M_{\phi}\cos(\theta)\sin(\phi-\phi_1)\right]e^{jk\rho_1\sin\theta\cos(\phi-\phi_1)}\rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \tag{2.48}$$

$$L_{\phi} = \int_0^{2\pi}\int_0^{a}\left[-M_{\rho}\sin(\phi-\phi_1)+M_{\phi}\cos(\phi-\phi_1)\right]e^{jk\rho_1\sin\theta\cos(\phi-\phi_1)}\rho_1 d\rho_1 d\phi_1 \tag{2.49}$$

สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากช่องเปิดจะเริ่มจากการพิจารณาคลื่นที่เดินทาง $-z$ หาได้จากทฤษฎีของการเปลี่ยนแกน (Coordinate transformations) เนื่องจากโพรบวางอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความหนาวงแหวน ($z'=0$) โดยที่โพรบวางอยู่ในทิศทาง y และช่องเปิดทั้ง 2 อยู่ห่างจากตำแหน่งการวางของโพรบเป็นระยะทางที่เท่ากันคือ $c/2$ ดังนั้นสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากผลรวมของการแพร่กระจายคลื่นออกจากช่องเปิดในทิศทาง $+z$ กับทิศทาง $-z$ จะได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_\theta(r,\theta,\phi) \approx -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}\left\{\begin{array}{l} e^{jk\frac{c}{2}\cos(\theta)}[L_\phi(\theta,\phi)+\eta N_\theta(\theta,\phi)] \\ +e^{jk\frac{c}{2}\cos(\theta+\pi)}[L_\phi(\theta+\pi,\phi+\pi)+\eta N_\theta(\theta+\pi,\phi+\pi)] \end{array}\right\} \quad (2.50)$$

$$E_\phi(r,\theta,\phi) \approx -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r}\left\{\begin{array}{l} e^{-jk\frac{c}{2}\cos(\theta)}[L_{\theta,1}(\theta,\phi)-\eta N_{\phi,2}(\theta,\phi)] \\ +e^{jk\frac{c}{2}\cos(\theta+\pi)}[L_{\theta,2}(\theta+\pi,\phi)-\eta N_{\phi,2}(\theta+\pi,\phi)] \end{array}\right\} \quad (2.51)$$

การพิจารณาจะให้วงแหวนเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอกกลม สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายคลื่นออกจากช่องเปิดของวงแหวนจะสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยโหมดคลื่นต่าง ๆ มากมายที่อยู่ภายในท่อนำคลื่นทรงกระบอก ดังนั้นรัศมีของท่อนำคลื่นจะถูกออกแบบเพื่อทำให้โหมดคลื่นอื่น ๆ ถูกตัดออกไปให้เหลือเพียงโหมดคลื่นหลัก (Dominant mode: TE_{11}) เพียงโหมดเดียว โดยโหมดคลื่นอื่น ๆ ที่อยู่ติดกับโหมดคลื่นหลักคือ TE_{21} ดังนั้นการเลือกค่ารัศมีจะต้องให้อยู่ใกล้ความถี่ตัด (cut off frequency) ของท่อนำคลื่นมากที่สุดสามารถแสดงได้ดังนี้

$$0.293\lambda < a < 0.486\lambda \quad (2.52)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นที่ความถี่ปฏิบัติการ (Operating frequency) โดยใช้ความถี่ 2.45 GHz

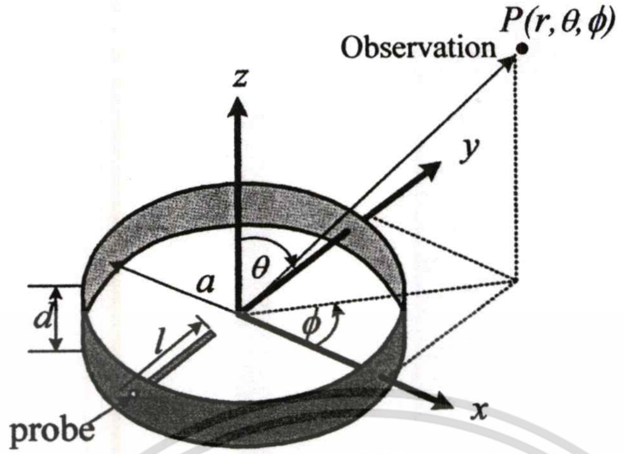
2.3 การออกแบบสายอากาศวงแหวนวงกลม

สายอากาศวงแหวนวงกลมที่นำมาใช้งานทำการออกแบบที่ความถี่ 2.45 GHz โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างขึ้นด้วยการใช้โปรแกรม Numerical Electromagnetic Code (NEC) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้ออกแบบสายอากาศวงแหวนวงกลม ที่จะใช้เป็นตัวป้อนกำลังงาน

โครงสร้างของสายอากาศประกอบไปด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นยาว l_p ยื่นออกมาจากสายนำสัญญาณแกนร่วม (Transmission line) วางในแนวแกน y ที่ตำแหน่ง z เท่ากับศูนย์ โดยโพรบถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนที่มีรัศมีและความหนาเป็น a และ d ตามลำดับ การพิจารณาจะให้วงแหวนเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอกกลมที่วางตามแนวแกน z ดังนั้นการพิสูจน์การสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณช่องเปิดของวงแหวนจะอยู่ในรูปของพิกัดทรงกระบอก สำหรับ

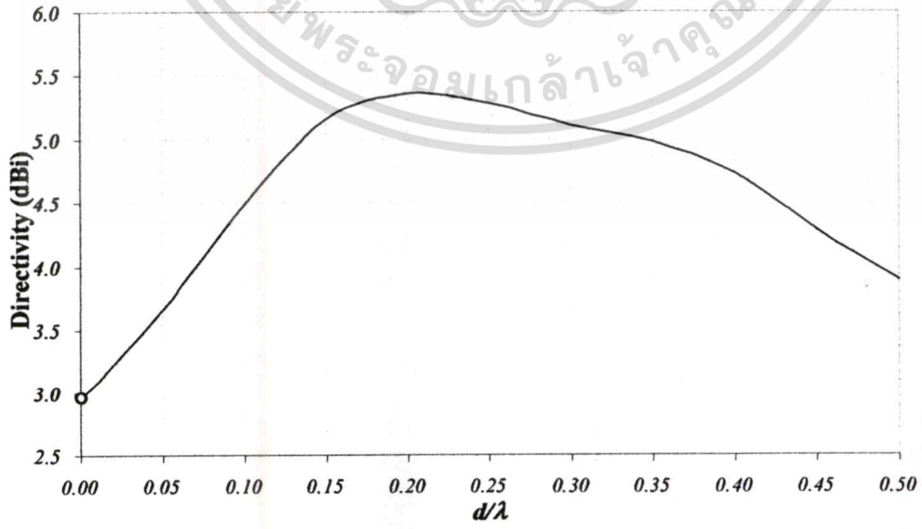
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายคลื่นออกทางช่องเปิดของวงแหวนคือในทิศทาง z และ $-z$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 สายอากาศแบบสองทิศทางโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม

ในการวิเคราะห์จะเลือกใช้รัศมีของวงแหวนที่รัศมีเท่ากับ 0.30λ ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นและวัสดุที่ใช้สามารถหาซื้อได้ง่าย นอกจากนี้ขนาดความหนาของวงแหวนจะต้องเลือกให้เหมาะสมด้วย เพราะที่บริเวณใกล้กับโพรบจะมีโหมดคลื่นอยู่มากมาย เมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรบมีค่ามากขึ้นโหมดคลื่นอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โหมดหลักจะเป็นรูปแบบของคลื่นเรียกว่า คลื่นจางหาย (Evanescent wave) จะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้จะต้องเลือกความหนาของวงแหวนให้เหมาะสม ซึ่งจากรูปกราฟที่ 2.4 ได้แสดงให้เห็นถึงค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อรัศมีและความหนาของวงแหวนมีขนาดต่าง ๆ



รูปที่2.4 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเมื่อความหนาของวงแหวนมีขนาดต่าง ๆ

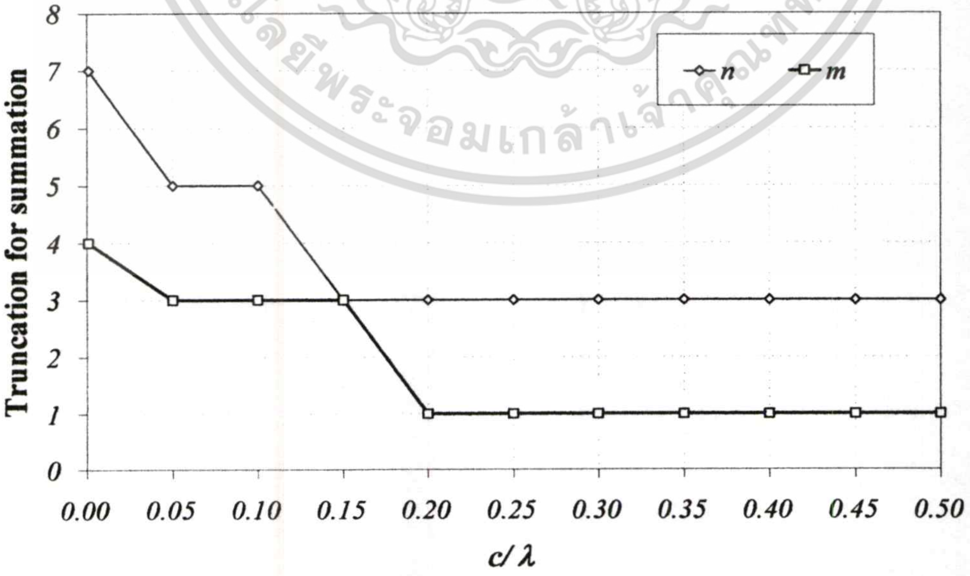
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางของวงแหวนวงกลมจะมีค่าเหมาะสมที่ความหนามีค่าเท่ากับ 0.20λ เนื่องจากเมื่อความหนาของวงแหวนมีค่าน้อย พบว่าระยะทางจะอยู่ใกล้โพรบทำให้เกิดโหมดคลื่นขึ้นหลายโหมดมาแบ่งกำลังงานจากโหมดคลื่นหลัก และเมื่อความหนาของวงแหวนมีค่ามาก จะพบว่ากำลังงานที่เหนี่ยวนำระหว่างช่องเปิดของวงแหวนมีค่าลดลงเนื่องจากช่องเปิดทั้งสองอยู่ห่างกันเกินไป

2.4 การพิจารณาผลของการรวมโหมดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้นจะหาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าระยะไกล ซึ่งเกิดจากผลของการรวมโหมดคลื่นต่าง ๆ ดังนั้นในข้อหัวนี้จะพิจารณาจำนวนของผลการรวมโหมดคลื่นต่าง ๆ เมื่อเปลี่ยนขนาดความหนาของวงแหวน จากสมการสังเกตได้ว่าจะต้องรวมพจน์ของโหมดคลื่นจนถึงค่าอนันต์ แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากบริเวณใกล้กับโพรบจะมีโหมดคลื่นอยู่มากมายแต่เมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรบมีค่ามากขึ้นโหมดคลื่นอื่น ๆ ที่ไม่ใช่โหมดหลักจะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็ว

ดังนั้นเพื่อความรวดเร็วในการคำนวณหาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะใช้ผลของการรวมโหมดคลื่นให้น้อยพจน์ที่สุดแต่ผลที่ได้ยังคงให้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยจำนวนเลขโหมดที่แสดงนั้นหาได้จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนของผลการรวมโหมดแล้วแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแต่ตำแหน่งมุมต่าง ๆ มีค่าเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 0.05 dB

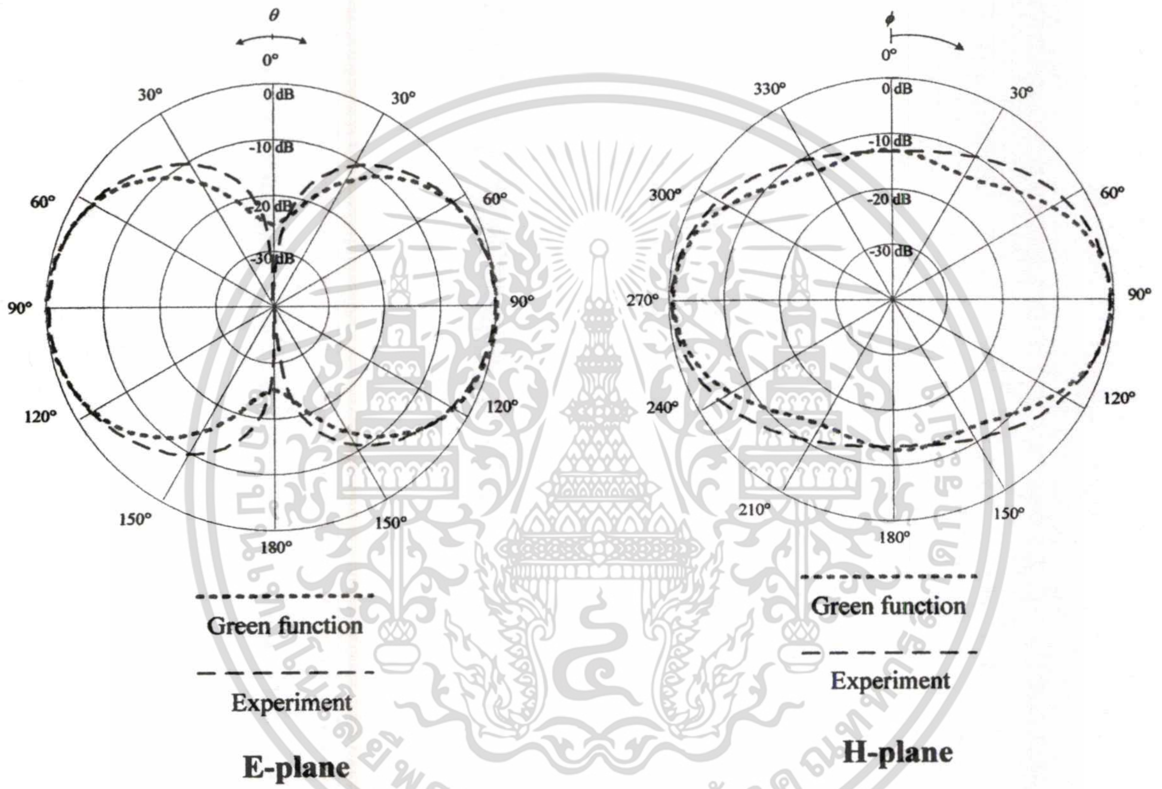


รูปที่ 2.5 จำนวนของผลการรวมโหมดเมื่อความหนาของวงแหวนมีขนาดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปกราฟหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงความเข้มของสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของทิศทางหรือมุม โดยรูปกราฟนี้แบ่งเป็น กราฟเชิงเส้นมุมฉาก (Linear Plot) และกราฟวงกลม (Polar Plot) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แอมพลิจูด (Amplitude) ของกำลังงาน (Power) หรือ สนาม (Field) กับทิศทาง (Direction) ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของมุมในหน่วยองศา (degree) หรือเรเดียน (radian)



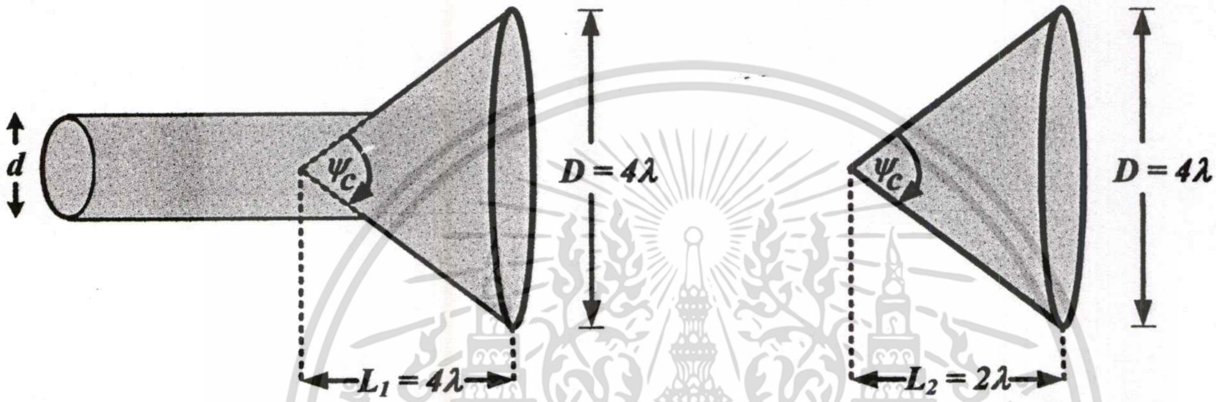
รูปที่2.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเทียบกับการทดลอง

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะเห็นได้ว่า การเลือกค่ารัศมีและความหนาของวงแหวนวงกลม ที่เหมาะสม จะส่งผลให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีด้วย แต่อย่างไรก็ตามรัศมีของวงแหวนต้องอยู่ในช่วงที่กำหนดซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าระนาบสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเมื่อขนาดของรัศมีเปลี่ยนไป ซึ่งจะส่งผลให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อนำไปป้อนกำลังงานให้กับตัวสะท้อนแบบกรวยนั้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เลือกสายอากาศที่มีรัศมีเท่ากับ 0.30λ และความหนาของสายอากาศเท่ากับ 0.20λ โดยได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 5.45 dBi และค่าความกว้างครึ่งกำลังทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเท่ากับ 70 และ 76 องศา ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ตัวสะท้อนแบบกรวยที่มุม 90 องศา

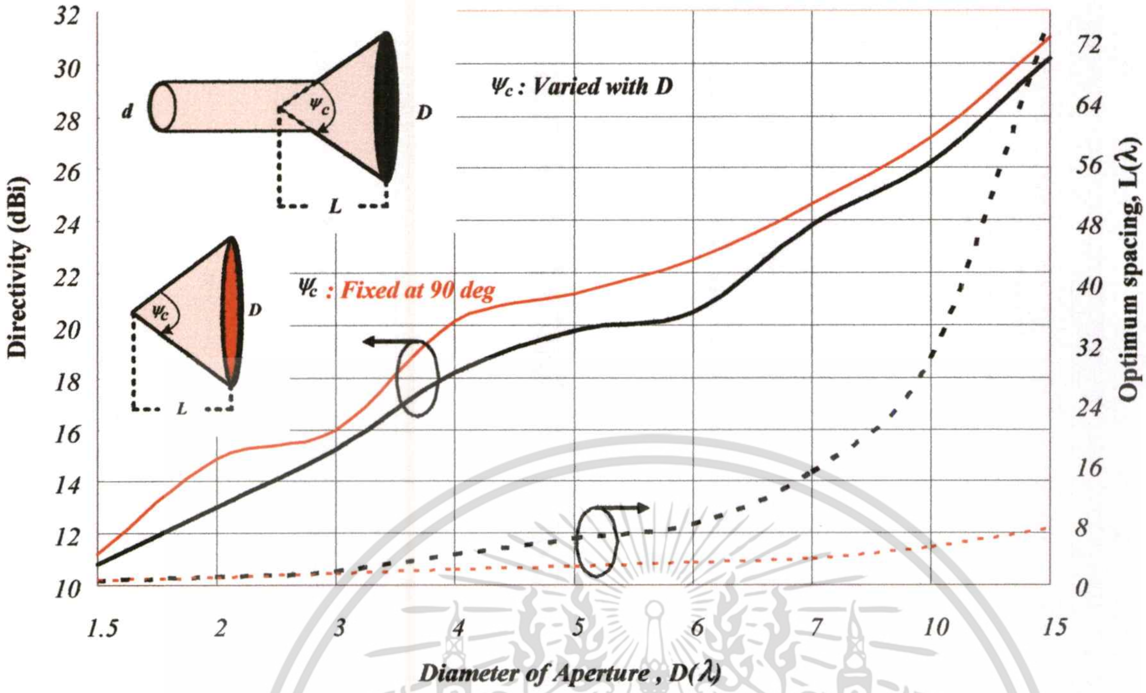
ตัวสะท้อนแบบกรวยเป็นตัวสะท้อนที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดี และออกแบบสร้างได้ง่าย แต่เดิมโดยทั่วไปแล้วจะทำการป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นทรงกลม แต่ในงานวิจัยครั้งนี้ทำการสร้างตัวสะท้อนแบบกรวยที่มีมุมเท่ากับ 90 องศา ดังรูปตามลำดับ



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของตัวสะท้อนแบบกรวยทั้งสองแบบ

จากรูปจะเห็นได้ว่าตัวสะท้อนแบบกรวยที่มุมเท่ากับ 90 องศา มีขนาดที่กะทัดรัดมากกว่าถึงแม้ขนาดของช่องเปิด (Aperture) จะมีขนาดเท่ากัน แต่เนื่องจากว่าในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ตัวป้อนกำลังงานด้วยสายอากาศวงแหวนวงกลม จึงทำให้ได้โครงสร้างของตัวสะท้อนที่เล็กกว่าและมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีกว่าอีกด้วยซึ่งแสดงได้ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบค่าสภาพเจาะจงทิศทางของตัวสะท้อนแบบกรวยทั้งสองแบบ

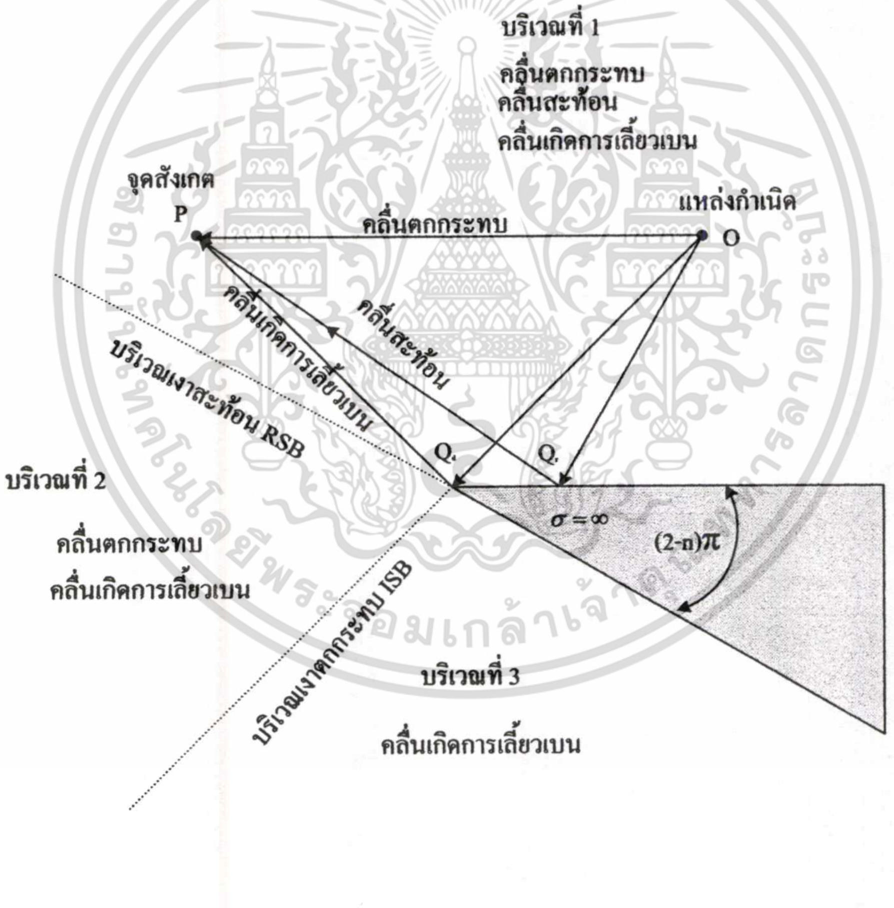
จากรูปจะเห็นได้ว่าสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยทั้งสองแบบเมื่อมีขนาดของช่องเปิดเท่ากันแต่ตัวที่มุมกรวยมีขนาดเท่ากับ 90 องศา และป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมจะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีกว่า ขนาดเล็กกว่า กะทัดรัดกว่า และประหยัดมากกว่าเนื่องจากตัวป้อนสัญญาณเป็นแบบวงแหวนวงกลม จึงออกแบบและสร้างได้ง่ายกว่าท่อนำคลื่นวงกลม

2.7 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต

ในกรณีที่โครงสร้างของปัญหามีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นนั้นจะใช้วิธีการทางด้านความถี่สูงเข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา ในปี 1844 ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต (Geometrical Optics หรือ GO) หรือเรียกว่า ทัศนศาสตร์เชิงลำคลื่น (Ray Optics) ได้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกสำหรับในการวิเคราะห์เกี่ยวกับการกระจายของคลื่นแสง แต่ไม่กล่าวถึงเกี่ยวกับ เฟส การโพลาไรซ์ และการเลี้ยวเบน [9] โดยจะนำมาใช้เฉพาะในกรณีที่เป็นลักษณะเรขาคณิตรูปทรงผิวโค้ง หลังจากนั้นแสงได้ถูกแสดงโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสมการของแมกซ์เวลล์ และปัญหาของการเลี้ยวเบนก็ได้ศึกษาอย่างต่อเนื่อง โดย Lord Rayleigh, Lord Kelvin, Sir George Stokes, Kirchoff, Helmholtz, Mei, Sommerfeld และนักฟิสิกส์ที่มีชื่อเสียง ซึ่งสามารถที่จะหาเฟส การโพลาไรซ์และปริมาณของสนาม วิธีทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตได้ถูกพัฒนามาเพื่อใช้งานกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวิธีนี้เป็นการประมาณค่าของวิธีการทางด้านความถี่สูง จะเป็นการหาสนามที่เกิดจาก คลื่นที่ตกกระทบ คลื่นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากการสะท้อน และคลื่นที่เกิดจากหักเห แต่ข้อบกพร่องสำหรับวิธีนี้คือจะไม่สามารถทำนายคลื่นบริเวณเงาได้อย่างถูกต้องเนื่องจากผลที่เกิดจากบริเวณขอบ การคิดผลของการเลี้ยวเบนบริเวณนี้ถูกขยายผลจากวิธีทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตโดย Joseph Keller ในปี 1953 และทฤษฎีของ Keller เป็นที่รู้จักในนามของทฤษฎีของการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต (Geometrical Theory of Diffraction หรือ GTD) สามารถทำนายสนามที่เลี้ยวเบนบริเวณเงาได้แต่จะมีข้อเสียคือ บริเวณรอยต่อเงาไม่มีความต่อเนื่อง ในปี 1974 Kouyomajian และ Pathak [10] ได้นำเสนอทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอ (Uniform Theory of Diffraction หรือ UTD) ถึงแม้ว่าจะมีข้อบกพร่องอยู่แต่ก็สามารถชดเชยได้อย่างเช่น กระแสสมมูล (Equivalent Current) ใช้ในการคำนวณหาสนามที่จุดแตะรังสี (Caustic) การเลี้ยวเบนแบบชัน (Slope Diffraction) ใช้เมื่อสนามตกกระทบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหรือมีค่าเป็นศูนย์ และคิดรวมผลเนื่องการเลี้ยวเบนลำดับสูงเพื่อให้บริเวณรอยต่อเงามีความต่อเนื่อง



รูปที่ 2.9 การแบ่งขอบเขตบริเวณของสนาม

ลักษณะโดยทั่วไปการแบ่งบริเวณของสนามสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ บริเวณแสงและบริเวณเงา และสามารถแบ่งย่อยออกเป็นสามบริเวณด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือบริเวณแรกและบริเวณที่สองถูกแบ่งโดยบริเวณที่เรียกว่าบริเวณเงาสะท้อน (Reflected Shadow Boundary: RSB) ซึ่งบริเวณแรกจะมีผลที่เกิดจากสนามตกกระทบหรือสนามแนวตรง (Incident หรือ Direct Field) สนามที่เกิดจากการสะท้อน (Reflected Field) และสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนคลื่น (Diffracted Field) บริเวณที่สองนั้นสนามตกกระทบและสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนคลื่นจะมีผลต่อบริเวณนี้ ส่วนบริเวณที่สองและบริเวณที่สามถูกแบ่งโดยบริเวณที่เรียกว่าบริเวณเงาตกกระทบ (Incident Shadow Boundary: ISB) ซึ่งบริเวณที่สามนี้จะมีผลของสนามที่เกิดจากการเลี้ยวเบนคลื่นเท่านั้นในบริเวณนี้ การหาสนามไฟฟ้าที่จุดสังเกตต่างๆ ก็จะมีความแตกต่างกันเนื่องจากขอบเขตที่เกิดขึ้น ซึ่งสนามไฟฟ้ารวมแสดงได้ดังนี้คือ

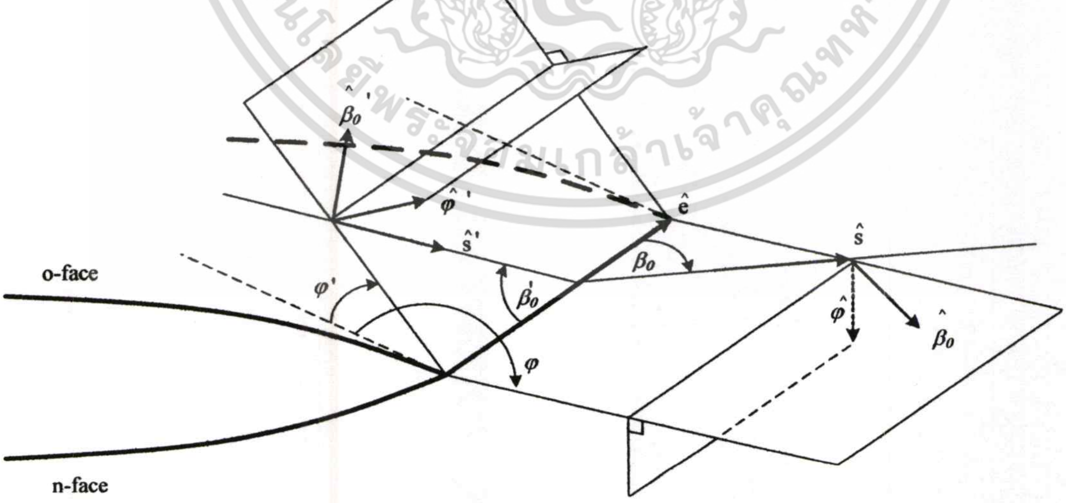
$$\bar{E}_T(r,\theta,\phi) = \bar{E}_T^i(r,\theta,\phi) + \bar{E}_T^r(r,\theta,\phi) + \bar{E}_T^d(r,\theta,\phi) \tag{2.53}$$

โดยที่ $\bar{E}_T^i$ คือสนามไฟฟ้ารวมที่ตกกระทบ

$\bar{E}_T^r$ คือสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากการสะท้อน

$\bar{E}_T^d$ คือสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากการเลี้ยวเบน

การคำนวณสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดจากการเลี้ยวเบน ต้องเริ่มจากการพิจารณาคลื่นที่มาตกกระทบที่ขอบ ซึ่งการพิจารณาในกรณีที่คลื่นที่มาตกกระทบทำมุมใด ๆ กับขอบของพื้นผิวจะใช้ระบบพิกัดคงค่าที่ขอบ (Edge fixed coordinate system) เป็นตัวอ้างอิง แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบพิกัดคงค่าที่ขอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดคลื่นตกกระทบเป็น (s', φ', β_0') และตำแหน่งของจุดสังเกตสนามเป็น (s, φ, β_0) ระนาบของคลื่นตกกระทบสำหรับการเลี้ยวเบนที่ขอบ จะอ้างอิงจากเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับขอบที่จุด Q_d $(\hat{e})$ มุม φ' และ φ เป็นมุมที่วัดจากระนาบ o ไปยังระนาบการตกกระทบ และการเลี้ยวเบนตามลำดับ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{\beta}_0'$ และ $\hat{\varphi}'$ เป็นทิศทางขนานและตั้งฉากกับระนาบของการตกกระทบตามลำดับ และเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{\beta}_0$ และ $\hat{\varphi}$ เป็นทิศทางขนานและตั้งฉากกับระนาบของการเลี้ยวเบนตามลำดับ ในขณะที่มุม β_0' จะเท่ากับมุม β_0 โดยจะวัดจากขอบไปยังลำคลื่นตกกระทบและลำคลื่นสะท้อนตามลำดับ สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\hat{\varphi}' = \frac{\hat{e} \times \hat{s}'}{|\hat{e} \times \hat{s}'|} \tag{2.54}$$

$$\hat{\beta}_0' = \hat{s}' \times \hat{\varphi}' \tag{2.55}$$

$$\hat{\varphi} = \frac{-\hat{e} \times \hat{s}}{|\hat{e} \times \hat{s}|} \tag{2.56}$$

$$\hat{\beta}_0 = \hat{s} \times \hat{\varphi} \tag{2.57}$$

เมื่อ $\hat{e}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับขอบของระนาบกราวด์

สนามที่เลี้ยวเบนอันดับหนึ่งโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแสดงได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} E^d_{\beta_0} \\ E^d_{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_s & 0 \\ 0 & -D_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E^i_{\beta_0'}(Q_d) \\ E^i_{\varphi'}(Q_d) \end{bmatrix} \sqrt{\frac{\rho_c}{s(s+\rho_c)}} e^{-jks} \tag{2.58}$$

เมื่อ $D_{s,h}$ คือสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนแบบอ่อน (soft) และ แข็ง (hard) ตามลำดับ ρ_c คือระยะจุดแตะขอบ (edge caustic distance) และ s คือ ระยะจากจุดการเลี้ยวเบนที่ขอบ Q_d ไปยังจุดสังเกต องค์ประกอบของสนามที่ตกกระทบและสนามที่เลี้ยวเบนเขียนได้ดังนี้

$$\bar{E}^i = E^i_{\beta_0'} \hat{\beta}_0' + E^i_{\varphi'} \hat{\varphi}' \tag{2.59}$$

$$\bar{E}^d = E^d_{\beta_0'} \hat{\beta}_0' + E^d_{\varphi'} \hat{\varphi}' \tag{2.60}$$

สนามตกกระทบที่มีการโพลาไรซ์ใด ๆ เมื่อเทียบอ้างอิงเทียบกับองค์ประกอบของคงค่าที่ขอบ (edge-fixed complements) ได้ดังนี้

$$E^i_{\beta_0'} = \bar{E}^i \cdot \hat{\beta}_0' \tag{2.61}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E^{i}_{\varphi'} = \overline{E}^{i} \cdot \hat{\varphi}' \qquad (2.62)$$

จากสมการ (3.6) แสดงใหม่ในรูปไดแอดิกได้ดังนี้

$$\overline{E}^{d} = \overline{E}^{i} \cdot \overline{\overline{D}} \sqrt{\frac{\rho_c}{s(s+\rho_c)}}\, e^{-jks} \qquad (2.63)$$

เมื่อ

$$\overline{\overline{D}} = -\hat{\beta}'_0 \hat{\beta}_0 D_s + \hat{\varphi}' \hat{\varphi}' D_h \qquad (2.64)$$

สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบน 3 มิติ กำหนดให้เป็น

$$D_{s,h}(L^{i}, L^{ro}, L^{rn}, \varphi, \varphi', \beta_0, n) = D_1 + D_2 \mp (D_3 + D_4) \qquad (2.65)$$

เมื่อ ∓ 1 คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบอ่อนและแข็งของผิวตัวนำสมบูรณ์ของลิ่มที่ขอบตามลำดับ องค์ประกอบของสัมประสิทธิ์แสดงได้ดังนี้

$$D_1 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}\sin\beta_0} \cot\left[\frac{\pi + (\varphi - \varphi')}{2n}\right] F[kL^{i} a^{+}(\varphi - \varphi')] \qquad (2.66)$$

$$D_2 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}\sin\beta_0} \cot\left[\frac{\pi - (\varphi - \varphi')}{2n}\right] F[kL^{i} a^{-}(\varphi - \varphi')] \qquad (2.67)$$

$$D_3 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}\sin\beta_0} \cot\left[\frac{\pi + (\varphi + \varphi')}{2n}\right] F[kL^{rn} a^{+}(\varphi + \varphi')] \qquad (2.68)$$

$$D_4 = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}\sin\beta_0} \cot\left[\frac{\pi - (\varphi + \varphi')}{2n}\right] F[kL^{ro} a^{-}(\varphi + \varphi')] \qquad (2.69)$$

เมื่อ $F(x) = 2j\sqrt{x}e^{jx}\int_{\sqrt{x}}^{\infty} e^{-ju^2}\,du$

โดยที่อาร์กิวเมนต์ของฟังก์ชันจะเป็น

$$a^{\pm}(\varphi - \varphi') = 2\cos^2\left(\frac{2n\pi N - (\beta)}{2}\right) \qquad (2.70)$$

ซึ่ง $N^{\pm}$ เป็นเลขจำนวนเต็มที่ส่วนใหญ่เกือบจะเป็นไปตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$2n\pi N^{+} - (\varphi \pm \varphi') = \pi \tag{2.71ก}$$

และ

$$2n\pi N^{-} - (\varphi \pm \varphi') = -\pi \tag{2.71ข}$$

จะเห็นได้ว่า N^{+} และ N^{-} จะมีค่าแตกต่างกันในแต่ละปัญหา สำหรับการเลี้ยวเบนภายนอกลิ่ม $1 < n \leq 2$ เมื่อ $N^{+} = 0$ หรือ 1 แต่ $N^{-} = -1$ หรือ 0 หรือ 1 อาจตีความหมายทางกายภาพของตัวประกอบ $a^{\pm}(\varphi - \varphi')$ ว่าเป็นการวัดมุมที่แยกระหว่างจุดการหาสนามกับขอบเขตเงาหรือขอบเขตสะท้อน

พารามิเตอร์ระยะทาง (L) สำหรับการเลี้ยวเบน 3 มิติ ประกอบด้วย L^{i} ซึ่งสนับสนุนในบริเวณเงาตกกระทบ (incident shadow boundary) คือ

$$L^{i} = \frac{s(\rho_e^{i} + s)\rho_1^{i}\rho_2^{i}}{\rho_e^{i}(\rho_1^{i} + s)(\rho_2^{i} + s)}\sin^2\beta_0 \tag{2.72}$$

เมื่อ ρ_1^{i} คือ รัศมีรองรับ (principal radius) ของความโค้งของหน้าคลื่นที่ตกกระทบที่จุด Q_d ในระนาบของคลื่นตกกระทบ และ ρ_2^{i} คือ รัศมีรองรับ (principal radius) ของความโค้งของหน้าคลื่นที่ตกกระทบที่จุด Q_d ในระนาบที่ตรงข้ามกับระนาบคลื่นตกกระทบ รัศมีของความโค้งของหน้าคลื่นตกกระทบในระนาบคงค่าที่ขอบของคลื่นตกกระทบคือ ρ_e^{i} ในกรณีที่หน้าคลื่นที่ตกกระทบเป็นแบบทรงกลม $\rho_{1,2}^{i} = \rho_e^{i} = s'$ เมื่อ s' คือ รัศมีของความโค้งของหน้าคลื่นทรงกลม ดังนั้น L^{i} ลดรูปได้เป็น

$$L^{i} = \frac{ss'}{(s + s')}\sin^2\beta_0 \tag{2.73}$$

และ $L^{ro,n}$ ซึ่งสนับสนุนในบริเวณเงาสะท้อน (Reflection shadow boundary) กำหนดโดย

$$L^{ro,n} = \frac{s(\rho_e^{ro,n} + s)\rho_1^{ro,n}\rho_2^{ro,n}}{\rho_e^{ro,n}(\rho_1^{ro,n} + s)(\rho_2^{ro,n} + s)}\sin^2\beta_0 \tag{2.74}$$

เมื่อ $\rho_1^{ro,n}$ และ $\rho_2^{ro,n}$ คือรัศมีรองรับของความโค้งของหน้าคลื่นสะท้อนจากด้านหน้าของ o และ n ตามลำดับ ในกรณีที่แผ่นตัวนำมีลักษณะแบบราบทั้ง 2 ด้าน ดังนั้น $L^{ro,n} = L^{i}$

ระยะจุดแตะที่ขอบ (edge caustic) ซึ่งแสดงในตัวประกอบการกระจาย (spreading factor) ในสมการ (3.11) หาได้ดังนี้

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1}{\rho_e} - \frac{\hat{n}_e \cdot (\hat{s}' - \hat{s})}{|a_e|\sin^2\beta_0} \tag{2.75}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ a_e คือรัศมีของความโค้งของขอบที่จุด Q_d โดยวัดจากตำแหน่งกึ่งกลางของผิวโค้ง และ ρ_e คือรัศมีความโค้งของหน้าคลื่นตกกระทบที่จุด Q_d ในระนาบคงค่าขอบของคลื่นตกกระทบ สำหรับในกรณีของหน้าคลื่นแบบทรงกลม $\rho_e = s'$

ในกรณีที่ $s >> \rho_c$ ดังนั้นตัวประกอบการกระจายแสดงใหม่ได้เป็น

$$A(\rho_c, s) = \sqrt{\frac{\rho_c}{s(\rho_c + s)}}_{s>>\rho_c} \simeq \frac{1}{s}\sqrt{\rho_c} \tag{2.76}$$

2.8 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและการออกแบบวงแหวนวงกลม โดยทางทฤษฎีนั้นได้ทำการวิเคราะห์ด้วยฟังก์ชันกรีนไดแอดิก เนื่องจากให้ความแม่นยำสูงเพราะคิดผลรวมจากหลายโหมดคลื่นที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้ๆ โพรบ จากนั้นทำการออกแบบรัศมีและความหนาของวงแหวนวงกลมเพื่อให้ได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงที่สุดซึ่งค่ารัศมีและความหนาของสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้นมีค่าเท่ากับ 0.30λ และ 0.20λ ตามลำดับ จากนั้นได้กล่าวถึงทฤษฎีที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ตัวสะท้อนแบบกรวย โดยจะใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแบบสองมิติ โดยได้ออกแบบกรวยที่มีมุม 90 องศา เท่านั้นสำหรับในงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าตัวสะท้อนแบบกรวยที่ได้ออกแบบขึ้นมานั้นมีขนาดที่สั้นและกะทัดรัดกว่าสายอากาศปากแตรทรงกรวย ซึ่งจากรูปที่ 2.7 พบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยมีค่าที่สูงกว่าสายอากาศปากแตรทรงกรวย และขนาดที่กะทัดรัดกว่า

ซึ่งการจะนำทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแบบสองมิติมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมนั้นจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม

3.1 บทนำ

เมื่อความถี่ปฏิบัติการที่สนใจของสายอากาศเพิ่มสูงมากขึ้นจนกระทั่งอัตราส่วนความยาวคลื่นต่อขนาดของสายอากาศ $\frac{\lambda}{D}$ มีขนาดเล็กมาก ๆ หรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์นั่นเอง ปรากฏการณ์คลื่นที่เกิดขึ้นจะมีผลเฉพาะในบริเวณจำกัด นั่นคือ ณ จุดที่คลื่นตกกระทบและบริเวณแวดล้อมขนาดเล็กมาก ๆ การที่ธรรมชาติของปรากฏการณ์มีลักษณะที่เกิดขึ้นเฉพาะที่เช่นนี้ ทำให้ไม่อาจใช้วิธีการบรรยายพฤติกรรมการแผ่พลังงานของสายอากาศเมื่อทำงานในย่านความถี่ต่ำด้วยปริพันธ์การแผ่พลังงานของกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดบนสายอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิเคราะห์ปัญหาจำต้องเปลี่ยนแนวทางมาเป็นการพิจารณาความเป็นปรากฏการณ์เฉพาะที่ ซึ่งสามารถกระทำได้ในลักษณะลำรังสีที่แทนสนามซึ่งเกี่ยวข้องกัน

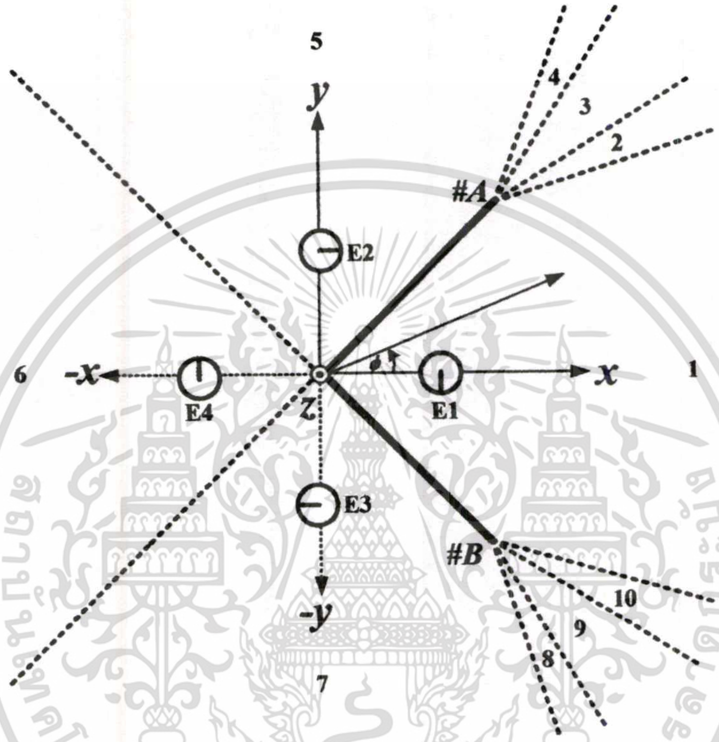
ลำรังสีที่ว่าสื่อการส่งพลังงานคลื่น ไปตามแนวการเคลื่อนตัวของคลื่นที่กำหนดโดยเวกเตอร์ของพอยน์ติง ค่าความเข้มสนาม ณ ตำแหน่งใด ๆ สามารถคำนวณได้จากผลรวมของรังสีที่มาตกกระทบ ณ ตำแหน่งสังเกตที่สนใจ โดยรังสีดังกล่าวอาจเป็นรังสีตกกระทบโดยตรงที่มาจากแหล่งกำเนิดหรือตัวสายอากาศ หรืออาจจะเป็นรังสีที่เนื่องมาจากการสะท้อนหรือการเลี้ยวเบน

พฤติกรรมของรังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนจะเป็นไปตามหลักการของแฟร์มาต์ (Fermat's principle) แนวคิดในการวิจัยและวิเคราะห์โดยใช้รังสีนี้เรียกว่า "ทัศนศาสตร์เรขาคณิต (Geometrical Optics: GO)" วิธีการนี้มีจุดบกพร่องตรงที่ไม่สามารถรวมผลกระทบของสนามเนื่องจากการเลี้ยวเบนได้ รวมทั้ง ณ จุดแตะตัดหรือแนวแตะตัด (Caustics) ของรังสี ค่าที่คำนวณโดยวิธีการนี้จะเป็นอนันต์เกิดภาวะเอกฐาน (singularity) ขึ้น จำเป็นต้องมีวิธีชดเชยผลดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยถูกป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในระนาบสนามไฟฟ้า

การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยถูกป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมนั้นจะพิจารณาสนามไฟฟ้าในระนาบ *xy* โดยสามารถแบ่งขอบเขตได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงาในระนาบสนามไฟฟ้า

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงาในระนาบสนามไฟฟ้าแสดงได้ดังนี้

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 1 $(0 \le \phi \le \frac{\pi}{4} - \varphi_{A,1})$

$$\therefore \overline{E}_T = \overline{E}_1 + \overline{E}_2 + \overline{E}_3 + \overline{E}_4 + \overline{E}^d_{A,1} + \overline{E}^d_{B,1} + \overline{E}^d_{A,3} + \overline{E}^d_{B,2} \tag{3.1}$$

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 2 $(\frac{\pi}{4} - \varphi_{A,1} \le \phi \le \frac{\pi}{4} - \varphi_{A,3})$

$$\therefore \overline{E}_T = \overline{E}_1 + \overline{E}_3 + \overline{E}_4 + \overline{E}^d_{A,1} + \overline{E}^d_{B,1} + \overline{E}^d_{A,3} + \overline{E}^d_{B,2} \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 3 $(\frac{\pi}{4}-\varphi_{A,3} \le \phi \le \frac{\pi}{4}+\varphi_{A,3})$

$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_3 + \vec{E}^d{}_{A,1} + \vec{E}^d{}_{B,1} + \vec{E}^d{}_{A,3} + \vec{E}^d{}_{B,2} \qquad (3.3)$$

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 4 $(\frac{\pi}{4}+\varphi_{A,3} \le \phi \le \frac{\pi}{4}+\varphi_{A,1})$

$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}^d{}_{A,1} + \vec{E}^d{}_{B,1} + \vec{E}^d{}_{A,3} + \vec{E}^d{}_{B,2} \qquad (3.4)$$

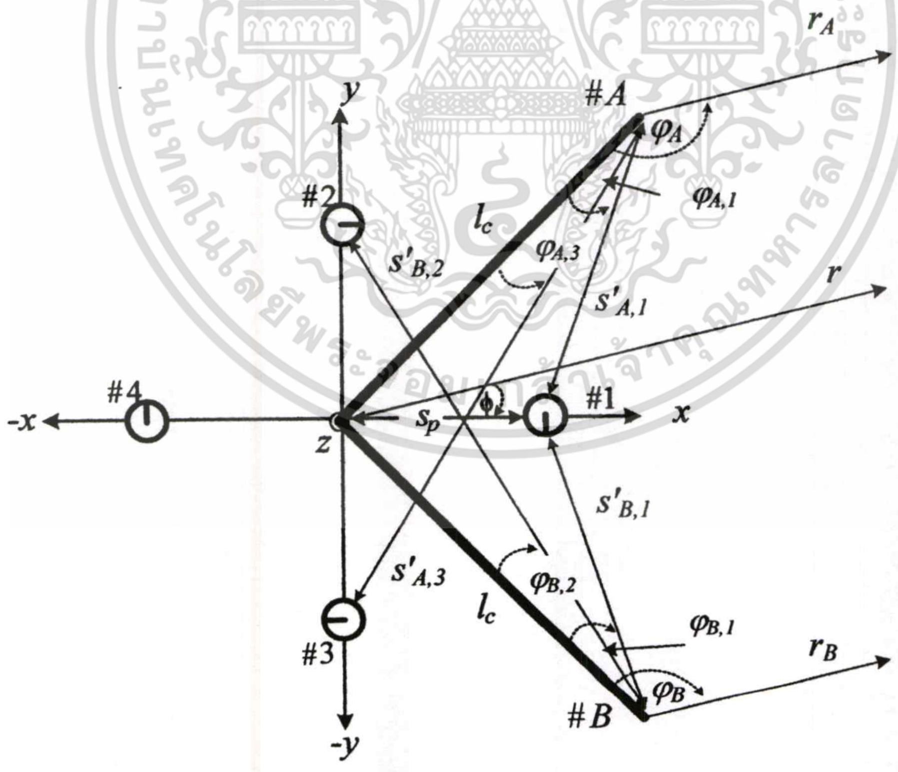
ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 5 $(\frac{\pi}{4}+\varphi_{A,1} \le \phi \le \frac{3\pi}{4})$

$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}^d{}_{A,1} + \vec{E}^d{}_{A,3} \qquad (3.5)$$

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 6 $(\frac{3\pi}{4} \le \phi \le \pi)$

$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}^d{}_{A,1} + \vec{E}^d{}_{B,1} + \vec{E}^d{}_{A,3} + \vec{E}^d{}_{B,2} \qquad (3.6)$$

3.2.1 สมการการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 การพิจารณาโครงสร้างของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบสนามไฟฟ้า $(0 \le \phi \le \pi, \theta = 0)$

$$R = -1, E_T = [E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}] \tag{3.7}$$

$$E_1 = \frac{\left(E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}\right)}{r_1} e^{-jkr_1}, E_2 = \frac{\left(E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}\right)}{r_2} e^{-jkr_2} \tag{3.8}$$

$$E_3 = \frac{\left(E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}\right)}{r_3} e^{-jkr_3}, E_4 = \frac{\left(E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}\right)}{r_4} e^{-jkr_4} \tag{3.9}$$

$$r_A = r - l\cos\left(\frac{\pi}{4} - \phi\right), r_B = r - l\cos\left(\frac{\pi}{4} + \phi\right) \tag{3.10}$$

$$r_1 = r - S_p \cos\phi, r_2 = r - S_p \sin\phi, r_3 = r + S_p \sin\phi, r_4 = r + S_p \cos\phi \tag{3.11}$$

การเลี้ยวเบน

$$L^i = \left.\frac{ss'}{(s+s')}\right|_{s \gg s'} = s', \beta_0 = \frac{\pi}{2} \tag{3.12}$$

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1}{\rho_e} - \frac{\hat{n}_e \cdot (\hat{s}' - \hat{s})}{|a_e| \sin^2 \beta_0}, a_e = \infty \tag{3.13}$$

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1}{\rho_e} = \frac{1}{s'}, \rho_c = s' \tag{3.14}$$

$$A(\rho_c, s) = \sqrt{\frac{\rho_c}{s(\rho_c + s)}}_{s >> \rho_c} \simeq \frac{1}{s}\sqrt{\rho_c} \tag{3.15}$$

$$A(s) = \frac{\sqrt{s'}}{s} = \frac{\sqrt{s_1'}}{r_1} \tag{3.16}$$

พิจารณาที่ขอบ A โดยมีแหล่งกำเนิด 1 เป็นแหล่งกำเนิดสนาม $(\phi = \frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,1}, \theta = 0)$ แสดงค่าค่าเวกเตอร์ที่นำไปคำนวณหาค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดคงค่าที่ขอบได้ดังนี้

$$\hat{e} = \hat{z}, \hat{s} = \hat{x}\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi) \tag{3.17}$$

$$\alpha_A = \frac{3\pi}{4} + \phi \tag{3.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดที่ 1 $(\phi = \frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,1}, \theta = 0)$

$$\hat{e} = \hat{z}\,, \hat{s}_1' = \hat{y}\sin(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,1}) + \hat{x}\cos(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,1})\,, \hat{s} = \hat{x}\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi) \tag{3.19}$$

$$\hat{\varphi}' = \frac{-\hat{e}\times\hat{s}'}{\left|\hat{e}\times\hat{s}'\right|} = \frac{-\hat{z}\times\left(\hat{y}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{A,1}) + \hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{A,1})\right)}{\left|\hat{z}\times\left(\hat{y}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{A,1}) + \hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{A,1})\right)\right|} = -\hat{\theta} \tag{3.20}$$

$$\hat{\varphi} = \frac{\hat{e}\times\hat{s}}{\left|\hat{e}\times\hat{s}\right|} = \frac{\hat{z}\times\left(\hat{x}\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi)\right)}{\left|\hat{z}\times\left(\hat{x}\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi)\right)\right|} = \hat{\theta} \tag{3.21}$$

$$\hat{\beta}_0' = \hat{\varphi}'\times\hat{s}' = \left(\hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{A,1}) - \hat{y}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{A,1})\right)\times \left(\hat{y}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{A,1}) + \hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{A,1})\right) = \hat{\phi} \tag{3.22}$$

$$\hat{\beta}_0 = \hat{\varphi}\times\hat{s} = \left(\hat{y}\cos(\phi) - \hat{x}\sin(\phi)\right)\times\left(\hat{x}\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi)\right) = -\hat{\phi} \tag{3.23}$$

$$\overline{E}^i = E^i_{\beta_0'}\hat{\beta}_0' + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}' \tag{3.24}$$

$$E^i_{1\beta_0'} = \overline{E}^i_1\cdot\hat{\beta}_0' = \frac{\left(E_\theta\hat{\theta} + E_\phi\hat{\phi}\right)}{r}e^{-jkr}\cdot\hat{\phi} = \frac{E_\phi\left(\phi = \pi/4 + \varphi'_{A,1}, \theta = 0\right)}{s_1'}e^{-jks_1'} \tag{3.25}$$

$$E^i_{\varphi'} = \overline{E}^i\cdot\hat{\varphi}' = \frac{\left(E_\theta\hat{\theta} + E_\phi\hat{\phi}\right)}{r}e^{-jkr}\cdot\left(-\hat{\theta}\right) = -\frac{E_\theta\left(\phi = \pi/4 + \varphi'_{A,1}, \theta = 0\right)}{s_1'}e^{-jks_1'} \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}\overline{E}^d_{1A} = \overline{E}^i\cdot\overline{\overline{D}} &= \left[E^i_{\beta_0'}\hat{\beta}_0' + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}'\right]\cdot\left[-\hat{\beta}_0'\hat{\beta}_0 D_s - \hat{\varphi}'\hat{\varphi}' D_h\right] \\ &= \left[E^i_{\beta_0'}\hat{\beta}_0' + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}'\right]\cdot\left[-\hat{\beta}_0'\hat{\beta}_0 D_s - \hat{\varphi}'\hat{\varphi} D_h\right] \\ &= -E^i_{\beta_0'}\hat{\beta}_0 D_s - E^i_{\varphi'}\hat{\varphi} D_h \\ &= E^i_{\beta_0'} D_s\hat{\phi} - E^i_{\varphi'} D_h\hat{\theta}\end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\overline{E}^d_{1,A}(r,\theta,\phi) = \overline{E}^d_{\theta,1,A} + \overline{E}^d_{\phi,1,A} \tag{3.28}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}^{d}_{\theta,1,A} = \frac{E_{\theta}\left(\phi = \pi/4 + \varphi'_{A,1}, \theta = 0\right)}{s'_1} e^{-jks'_1} D_h A(s) \tag{3.29}$$

$$\bar{E}^{d}_{\phi,1,A} = \frac{E_{\phi}\left(\phi = \pi/4 + \varphi'_{A,1}, \theta = 0\right)}{s'_1} e^{-jks'_1} D_s A(s) \tag{3.30}$$

$$\bar{E}^{d}_{1,A}(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks'_1}}{s'_1} \begin{Bmatrix} E^{i}_{\theta}(\phi = \pi/4 + \varphi'_1, \theta = 0)\ D_h(L^i = s', \varphi_A, \varphi'_1, n = 2)\hat{\theta} \\ E^{i}_{\phi}(\phi = \pi/4 + \varphi'_1, \theta = 0)\ D_s(L^i = s', \varphi_A, \varphi'_1, n = 2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \frac{\sqrt{s'_1}}{r_A} e^{-ikr_A} \tag{3.31}$$

ผลลัพธ์

$$\bar{E}^{d}_{1,A}(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks'_1}}{s'_1} \begin{Bmatrix} E^{i}_{\theta}(\phi = \pi/4 + \varphi'_1, \theta = 0)\ D_h(L^i = s'_1, \varphi_A, \varphi'_1, n = 2)\hat{\theta} \\ E^{i}_{\phi}(\phi = \pi/4 + \varphi'_1, \theta = 0)\ D_s(L^i = s'_1, \varphi_A, \varphi'_1, n = 2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \sqrt{s'_1}\ e^{ikl\cos\left(\frac{\pi}{4}-\theta\right)} \tag{3.32}$$

$$s_1{}' = \sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{l}{\sqrt{2}} - S_p\right)^2}\ , \varphi'_1 = \frac{\pi}{4} - \tan^{-1}\left(1 - \frac{\sqrt{2}S_p}{l}\right) \tag{3.33}$$

พิจารณาที่ขอบ A โดยมีแหล่งกำเนิด 3 เป็นแหล่งกำเนิดสนาม $(\phi = \frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,3}, \theta = 0)$ แสดงค่าค่าเวกเตอร์ที่นำไปคำนวณหาค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดคงค่าที่ขอบ ได้ดังนี้

แหล่งกำเนิดที่ 3 $(\phi = \frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,3}, \theta = 0)$

$$\hat{s}'_3 = \hat{y}\sin\left(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,3}\right) + \hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,3}\right) \tag{3.34}$$

$$\hat{e} = \hat{z}\ , \hat{s} = \hat{x}\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi) \tag{3.35}$$

$$\hat{\varphi}' = \frac{-\hat{e}\times\hat{s}'}{\left|\hat{e}\times\hat{s}'\right|} = \frac{-z\times\left(\hat{y}\sin\left(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,3}\right) + \hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,3}\right)\right)}{\left|\hat{z}\times\left(\hat{y}\sin\left(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,3}\right) + \hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{A,3}\right)\right)\right|} = -\hat{\theta} \tag{3.36}$$

$$\hat{\varphi} = \frac{\hat{e}\times\hat{s}}{\left|\hat{e}\times\hat{s}\right|} = \frac{\hat{z}\times\left(x\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi)\right)}{\left|\hat{z}\times\left(\hat{x}\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi)\right)\right|} = \hat{\theta} \tag{3.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{\beta}_0' = \hat{\varphi}' \times \hat{s}' = \left(\hat{x}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi_{A,3}') - \hat{y}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi_{A,3}') \right) \times \left(\hat{y}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{A,3}'\right) + \hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{A,3}'\right) \right) = \hat{\phi} \tag{3.38}$$

$$\hat{\beta}_0 = \hat{\varphi} \times \hat{s} = \left(\hat{y}\cos(\phi) - \hat{x}\sin(\phi)\right) \times \left(\hat{x}\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi)\right) = -\hat{\phi} \tag{3.39}$$

$$\overline{E}_{3,A}^{d}(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks_3'}}{s_3'} \begin{Bmatrix} E_\theta^i(\phi=\pi/4+\varphi_{A,3}',\theta=0)\, D_h(L^i=s_3',\varphi_A,\varphi_3',n=2)\hat{\theta} \\ E_\phi^i(\phi=\pi/4+\varphi_{A,3}',\theta=0)\, D_s(L^i=s_3',\varphi_A,\varphi_3',n=2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \frac{\sqrt{s_3'}}{r_A} e^{-ikr_A} \tag{3.40}$$

ผลลัพธ์

$$\overline{E}_{3,A}^{d}(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks_3'}}{s_3'} \begin{Bmatrix} E_\theta^i(\phi=\pi/4+\varphi_{A,3}',\theta=0)\, D_h(L^i=s_3',\varphi_A,\varphi_3',n=2)\hat{\theta} \\ E_\phi^i(\phi=\pi/4+\varphi_{A,3}',\theta=0)\, D_s(L^i=s_3',\varphi_A,\varphi_3',n=2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \sqrt{s_3'}\; e^{ikl\cos\left(\frac{\pi}{4}-\theta\right)} \tag{3.41}$$

$$s_3' = \sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{l}{\sqrt{2}}+S_p\right)^2}\,,\varphi_3' = \frac{\pi}{4} - \tan^{-1}\left(\frac{l}{l+\sqrt{2}S_p}\right) \tag{3.42}$$

พิจารณาที่ขอบ B โดยมีแหล่งกำเนิด 1 เป็นแหล่งกำเนิดสนาม $(\phi=-\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,1}'\right),\theta=0)$ แสดงค่าเวกเตอร์ที่นำไปคำนวณหาค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดคงค่าที่ขอบได้ดังนี้

$$\alpha_B = \frac{3\pi}{4} - \phi \tag{3.43}$$

แหล่งกำเนิดที่ 1 $(\phi=-\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,1}'\right),\theta=0)$

$$r_1 = r - S_p\cos\phi\,, s_1' = \sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{l}{\sqrt{2}}-S_p\right)^2} \tag{3.44}$$

$$\hat{e} = \hat{z}\,, \hat{s}_1' = -\hat{y}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,1}') + \hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,1}')\,, \hat{s} = \hat{x}\cos(\phi) + \hat{y}\sin(\phi) \tag{3.45}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{\varphi}' = \frac{-\hat{e}\times\hat{s}'}{\left|\hat{e}\times\hat{s}'\right|} = \frac{-\hat{z}\times\left(-\hat{y}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{B,1})+\hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{B,1})\right)}{\left|\hat{z}\times\left(-\hat{y}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{B,1})+\hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{B,1})\right)\right|} = -\hat{\theta} \tag{3.46}$$

$$\hat{\varphi} = \frac{\hat{e}\times\hat{s}}{\left|\hat{e}\times\hat{s}\right|} = \frac{\hat{z}\times\left(\hat{x}\cos(\theta)+\hat{y}\sin(\theta)\right)}{\left|\hat{z}\times\left(\hat{x}\cos(\theta)+\hat{y}\sin(\theta)\right)\right|} = \hat{\theta} \tag{3.47}$$

$$\hat{\beta}'_0 = \hat{\varphi}'\times\hat{s}' = \left(-\hat{x}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{B,1})-\hat{y}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{B,1})\right)\times \left(-\hat{y}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{B,1})+\hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{B,1})\right) = \hat{\phi} \tag{3.48}$$

$$\hat{\beta}_0 = \hat{\varphi}\times\hat{s} = \left(\hat{y}\cos(\phi)-\hat{x}\sin(\phi)\right)\times\left(\hat{x}\cos(\phi)+\hat{y}\sin(\phi)\right) = -\hat{\phi} \tag{3.49}$$

$$\overline{E}^i = E^i_{\beta'_0}\hat{\beta}'_0 + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}' \tag{3.50}$$

$$E^i_{1\beta'_0} = \overline{E}^i_1\cdot\hat{\beta}'_0 = \frac{\left(E_\theta\hat{\theta}+E_\phi\hat{\phi}\right)}{r}e^{-jkr}\cdot\hat{\phi} = \frac{E_\phi\left(\phi=\pi/4+\varphi'_1,\theta=0\right)}{s'_1}e^{-jks'_1} \tag{3.51}$$

$$E^i_{\varphi'} = \overline{E}^i\cdot\hat{\varphi}' = \frac{\left(E_\theta\hat{\theta}+E_\phi\hat{\phi}\right)}{r}e^{-jkr}\cdot\left(-\hat{\theta}\right) = -\frac{E_\theta\left(\phi=\pi/4+\varphi'_1,\theta=0\right)}{s'_1}e^{-jks'_1} \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned}\overline{E}^d_{B,1} = \overline{E}^i\cdot\overline{\overline{D}} &= \left[E^i_{\beta'_0}\hat{\beta}'_0+E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}'\right]\cdot\left[-\hat{\beta}'_0\hat{\beta}_0D_s-\hat{\varphi}'\hat{\varphi}'D_h\right]\\ &= \left[E^i_{\beta'_0}\hat{\beta}'_0+E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}'\right]\cdot\left[-\hat{\beta}'_0\hat{\beta}_0D_s-\hat{\varphi}'\hat{\varphi}D_h\right]\\ &= -E^i_{\beta'_0}\hat{\beta}_0D_s-E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}D_h\\ &= E^i_{\beta'_0}D_s\hat{\phi}-E^i_{\varphi'}D_h\hat{\theta}\end{aligned} \tag{3.53}$$

$$\overline{E}^d_{B,1}(r,\theta,\phi) = \overline{E}^d_{\theta,1,B}+\overline{E}^d_{\phi,1,B} \tag{3.54}$$

$$\overline{E}^d_{\theta,B,1} = \frac{E_\theta\left(\phi=\pi/4+\varphi'_{B,1},\theta=0\right)}{s'_1}e^{-jks'_1}D_hA(s) \tag{3.55}$$

$$\overline{E}^d_{\phi,B,1} = \frac{E_\phi\left(\phi=\pi/4+\varphi'_{B,1},\theta=0\right)}{s'_1}e^{-jks'_1}D_sA(s) \tag{3.56}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}^d_{B,1}(r,\theta,\phi)=\frac{e^{-iks_1'}}{s_1'}\begin{Bmatrix}E^i_\theta(\phi=-(\pi/4+\varphi_1'),\theta=0)\ D_h(L^i=s',\varphi_B,\varphi_1',n=2)\hat{\theta}\\ E^i_\phi(\phi=-(\pi/4+\varphi_1'),\theta=0)\ D_s(L^i=s',\varphi_B,\varphi_1',n=2)\hat{\phi}\end{Bmatrix}\ \frac{\sqrt{s_1'}}{r_B}e^{-ikr_B} \tag{3.57}$$

ผลลัพธ์

$$\bar{E}^d_{B,1}(r,\theta,\phi)=\frac{e^{-iks_1'}}{s_1'}\begin{Bmatrix}E^i_\theta(\phi=-(\pi/4+\varphi_1'),\theta=0)\ D_h(L^i=s',\varphi_B,\varphi_1',n=2)\hat{\theta}\\ E^i_\phi(\phi=-(\pi/4+\varphi_1'),\theta=0)\ D_s(L^i=s',\varphi_B,\varphi_1',n=2)\hat{\phi}\end{Bmatrix}\ \sqrt{s_1'}\ e^{ikl\cos\left(\frac{\pi}{4}+\theta\right)}$$

$$r_1=r-S_p\cos\phi,\ s_1'=\sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2+\left(\frac{l}{\sqrt{2}}-S_p\right)^2} \tag{3.58}$$

$$\varphi_1'=\frac{\pi}{4}-\tan^{-1}\left(1-\frac{\sqrt{2}S_p}{l}\right) \tag{3.59}$$

พิจารณาที่ขอบ B โดยมีแหล่งกำเนิด 2 เป็นแหล่งกำเนิดสนาม $(\phi=-\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_2'\right),\theta=0)$ แสดงค่าเวกเตอร์ที่นำไปคำนวณหาค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดคงค่าที่ขอบ ได้ดังนี้

แหล่งกำเนิดที่ 2 $(\phi=-\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_2'\right),\theta=0)$

$$\hat{s}_2'=-\hat{y}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right),\ s_2'=\sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2+\left(\frac{l}{\sqrt{2}}-S_p\right)^2} \tag{3.60}$$

$$\hat{\varphi}'=\frac{-\hat{e}\times\hat{s}'}{|\hat{e}\times\hat{s}'|}=\frac{-\hat{z}\times\left(-\hat{y}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right)\right)}{\left|\hat{z}\times\left(-\hat{y}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right)\right)\right|} \tag{3.61}$$

$$=-\hat{\theta}$$

$$\hat{\beta}_0'=\hat{\varphi}'\times\hat{s}'=\left(-\hat{x}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right)-\hat{y}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right)\right)\times$$

$$\left(-\hat{y}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{B,2}'\right)\right) \tag{3.62}$$

$$=\hat{\phi}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\bar{E}^{d}_{2,B}(r,\theta,\phi)=\frac{e^{-iks_2'}}{s_2'}\begin{Bmatrix} E^{i}_{\theta}(\phi=-(\pi/4+\varphi_2'),\theta=0)\ D_h(L^i=s_2',\varphi_B,\varphi_2',n=2)\hat{\theta} \\ E^{i}_{\phi}(\phi=-(\pi/4+\varphi_2'),\theta=0)\ D_s(L^i=s_2',\varphi_B,\varphi_2',n=2)\hat{\phi} \end{Bmatrix}\frac{\sqrt{s_2'}}{r_B}e^{-ikr_B} \tag{3.63}$$

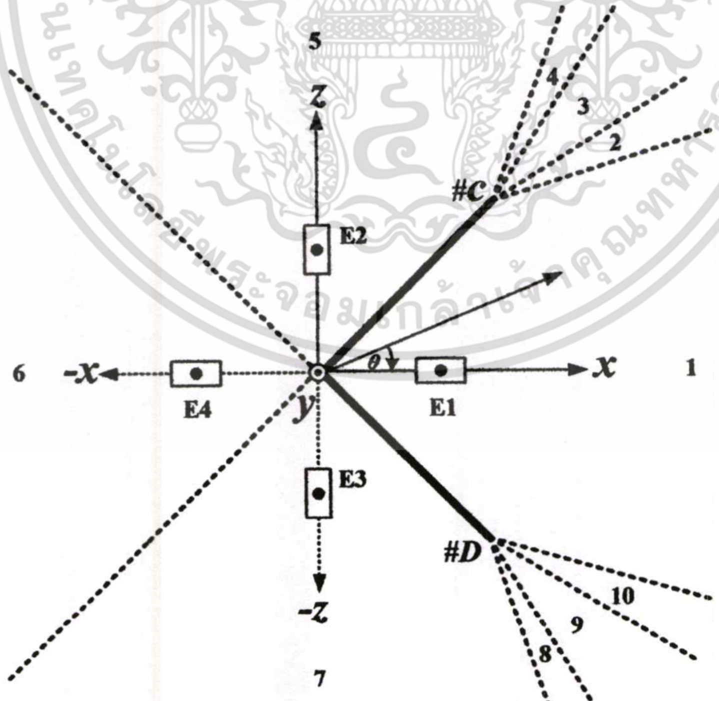
ผลลัพธ์

$$\bar{E}^{d}_{2,B}(r,\theta,\phi)=\frac{e^{-iks_2'}}{s_2'}\begin{Bmatrix} E^{i}_{\theta}(\phi=-(\pi/4+\varphi_2'),\theta=0)\ D_h(L^i=s_2',\varphi_B,\varphi_2',n=2)\hat{\theta} \\ E^{i}_{\phi}(\phi=-(\pi/4+\varphi_2'),\theta=0)\ D_s(L^i=s_2',\varphi_B,\varphi_2',n=2)\hat{\phi} \end{Bmatrix}\sqrt{s_2'}\ e^{ikl\cos\left(\frac{\pi}{4}+\theta\right)}$$

$$s_2'=\sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2+\left(\frac{l}{\sqrt{2}}+S_p\right)^2}\ ,\varphi_2'=\frac{\pi}{4}-\tan^{-1}\left(\frac{l}{l+\sqrt{2}S_p}\right) \tag{3.64}$$

3.3 การวิเคราะห์สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยถูกป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตในระนาบสนามแม่เหล็ก

การวิเคราะห์การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยถูกป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมนั้นจะพิจารณาสนามแม่เหล็กในระนาบ *xz* โดยสามารถแบ่งขอบเขตได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงาในระนาบสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงาในระนาบสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังนี้

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 1 $(0 \le \theta \le \frac{\pi}{4} - \varphi_{c,1})$

$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 + \vec{E}^d{}_{C,1} + \vec{E}^d{}_{D,1} + \vec{E}^d{}_{C,3} + \vec{E}^d{}_{D,2} \quad (3.65)$$

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 2 $(\frac{\pi}{4} - \varphi_{C,1} \le \theta \le \frac{\pi}{4} - \varphi_{C,3})$

$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4 + \vec{E}^d{}_{C,1} + \vec{E}^d{}_{D,1} + \vec{E}^d{}_{C,3} + \vec{E}^d{}_{D,2} \quad (3.66)$$

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 3 $(\frac{\pi}{4} - \varphi_{C,3} \le \theta \le \frac{\pi}{4} + \varphi_{C,3})$

$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}_3 + \vec{E}^d{}_{C,1} + \vec{E}^d{}_{D,1} + \vec{E}^d{}_{C,3} + \vec{E}^d{}_{D,2} \quad (3.67)$$

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 4 $(\frac{\pi}{4} + \varphi_{C,3} \le \theta \le \frac{\pi}{4} + \varphi_{C,1})$

$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}_1 + \vec{E}^d{}_{C,1} + \vec{E}^d{}_{D,1} + \vec{E}^d{}_{C,3} + \vec{E}^d{}_{D,2} \quad (3.68)$$

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 5 $(\frac{\pi}{4} + \varphi_{C,1} \le \theta \le \frac{3\pi}{4})$

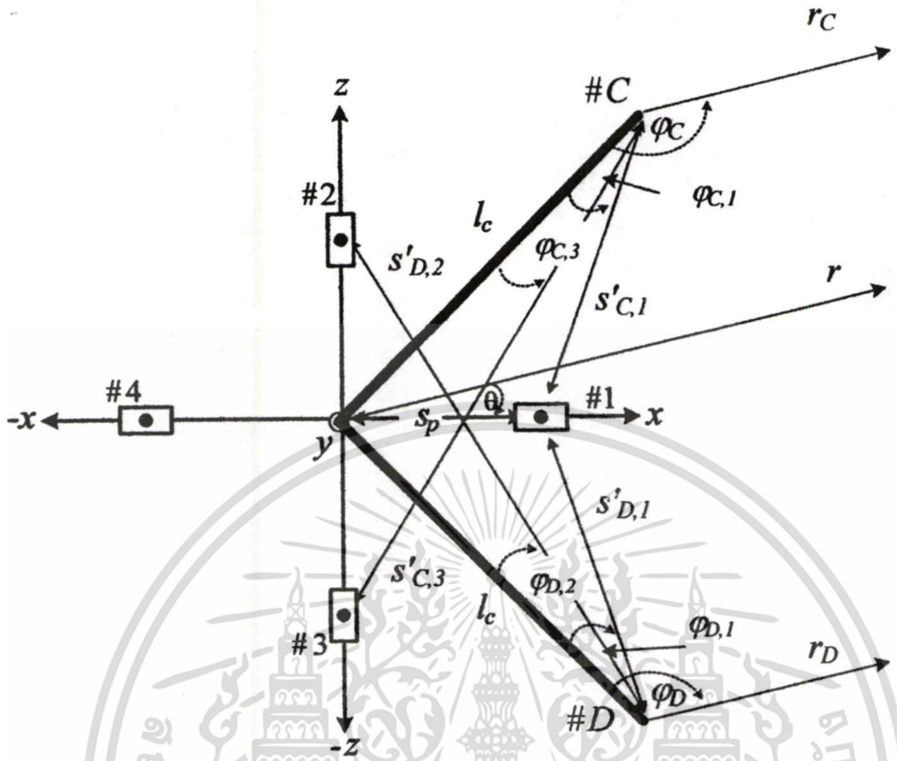
$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}^d{}_{C,1} + \vec{E}^d{}_{C,3} \quad (3.69)$$

ขอบเขตบริเวณรอยต่อเงา 6 $(\frac{3\pi}{4} \le \theta \le \pi)$ (3.70)

$$\therefore \vec{E}_T = \vec{E}^d{}_{C,1} + \vec{E}^d{}_{D,1} + \vec{E}^d{}_{C,3} + \vec{E}^d{}_{D,2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 สมการการแพร่กระจายคลื่นระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.4 การพิจารณาโครงสร้างของสายอากาศในระนาบสนามแม่เหล็ก

ระนาบสนามแม่เหล็ก $(0 \le \theta \le \pi, \phi = 0)$

$$R = -1, E_T = [E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}]\widehat{ABC} \tag{3.71}$$

$$E_1 = \frac{\left(E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}\right)}{r_1} e^{-jkr_1}, E_2 = \frac{\left(E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}\right)}{r_2} e^{-jkr_2} \tag{3.72}$$

$$E_3 = \frac{\left(E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}\right)}{r_3} e^{-jkr_3}, E_4 = \frac{\left(E_\theta \hat{\theta} + E_\phi \hat{\phi}\right)}{r_4} e^{-jkr_4}$$

$$r_C = r - l\cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right), r_D = r - l\cos\left(\frac{\pi}{4} + \theta\right) \tag{3.73}$$

$$r_1 = r - S_p \cos\theta, r_2 = r - S_p \sin\theta, r_3 = r + S_p \sin\theta, r_4 = r + S_p \cos\theta \tag{3.74}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลี้ยวเบน

$$L^i = \left.\frac{ss'}{(s+s')}\right|_{s\gg s'} = s', \beta_0 = \frac{\pi}{2} \tag{3.75}$$

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1}{\rho_e} - \frac{\hat{n}_e\cdot(\hat{s}'-\hat{s})}{|a_e|\sin^2\beta_0}, a_e = \infty \tag{3.76}$$

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1}{\rho_e} = \frac{1}{s'}, \rho_c = s' \tag{3.77}$$

$$A(\rho_c, s) = \sqrt{\frac{\rho_c}{s(\rho_c+s)}}_{s>>\rho_c} \simeq \frac{1}{s}\sqrt{\rho_c} \tag{3.78}$$

$$A(s) = \frac{\sqrt{s'}}{s} = \frac{\sqrt{s_1'}}{r_1} \tag{3.79}$$

พิจารณาที่ขอบ C โดยมีแหล่งกำเนิด 1 เป็นแหล่งกำเนิดสนาม ($\theta = \frac{\pi}{4} + \varphi'_{C,1}, \phi = 0$) แสดงค่าเวกเตอร์ที่นำไปคำนวณหาค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดคงค่าที่ขอบได้ดังนี้

$$\hat{e} = \hat{y}, \hat{s} = \hat{x}\cos(\theta) + \hat{z}\sin(\theta) \tag{3.80}$$

$$\alpha_C = \frac{3\pi}{4} + \theta \tag{3.81}$$

แหล่งกำเนิดที่ 1 ($\theta = \frac{\pi}{4} + \varphi'_{C,1}, \phi = 0$)

$$\hat{e} = \hat{y}, \hat{s}_1' = \hat{z}\sin(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{C,1}) + \hat{x}\cos(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{C,1}), \hat{s} = \hat{x}\cos(\theta) + \hat{z}\sin(\theta) \tag{3.82}$$

$$\hat{\varphi}' = \frac{-\hat{e}\times\hat{s}'}{|\hat{e}\times\hat{s}'|} = \frac{-\hat{y}\times\left(\hat{z}\cos(\frac{\pi}{4} - \varphi'_{C,1}) + \hat{x}\cos(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{C,1})\right)}{\left|\hat{y}\times\left(\hat{z}\cos(\frac{\pi}{4} - \varphi'_{C,1}) + \hat{x}\cos(\frac{\pi}{4} + \varphi'_{C,1})\right)\right|} = -\hat{\theta} \tag{3.83}$$

$$\hat{\varphi} = \frac{\hat{e}\times\hat{s}}{|\hat{e}\times\hat{s}|} = \frac{\hat{y}\times\left(\hat{x}\cos(\theta) + \hat{z}\sin(\theta)\right)}{\left|\hat{y}\times\left(\hat{x}\cos(\theta) + \hat{z}\sin(\theta)\right)\right|} = \hat{\theta} \tag{3.84}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{\beta}_0' = \hat{\varphi}' \times \hat{s}' = \left(\hat{x}\cos(\frac{\pi}{4} - \varphi_{C,1}') - \hat{z}\cos(\frac{\pi}{4} + \varphi_{C,1}') \right) \times \left(\hat{z}\cos(\frac{\pi}{4} - \varphi_{C,1}') + \hat{x}\cos(\frac{\pi}{4} + \varphi_{C,1}') \right) = \hat{\phi} \tag{3.85}$$

$$\hat{\beta}_0 = \hat{\varphi} \times \hat{s} = \left(\hat{z}\cos(\theta) - \hat{x}\sin(\theta)\right) \times \left(\hat{x}\cos(\theta) + \hat{z}\sin(\theta)\right) = -\hat{\phi} \tag{3.86}$$

$$\overline{E}^i = E^i_{\beta_0'}\hat{\beta}_0' + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}' \tag{3.87}$$

$$E^i_{1\beta_0'} = \overline{E}^i_1 \cdot \hat{\beta}_0' = \frac{\left(E_\theta\hat{\theta} + E_\phi\hat{\phi}\right)}{r} e^{-jkr} \cdot \hat{\phi} = \frac{E_\phi\left(\theta = \pi/4 + \varphi_{C,1}', \phi = 0\right)}{s_1'} e^{-jks_1'} \tag{3.88}$$

$$E^i_{\varphi'} = \overline{E}^i \cdot \hat{\varphi}' = \frac{\left(E_\theta\hat{\theta} + E_\phi\hat{\phi}\right)}{r} e^{-jkr} \cdot \left(-\hat{\theta}\right) = -\frac{E_\theta\left(\theta = \pi/4 + \varphi_{C,1}', \phi = 0\right)}{s_1'} e^{-jks_1'} \tag{3.89}$$

$$\overline{E}^d_{C,1} = \overline{E}^i \cdot \overline{\overline{D}} = \left[E^i_{\beta_0'}\hat{\beta}_0' + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}' \right] \cdot \left[-\hat{\beta}_0'\hat{\beta}_0 D_s - \hat{\varphi}'\hat{\varphi}' D_h \right] \tag{3.90}$$

$$\begin{aligned} &= \left[E^i_{\beta_0'}\hat{\beta}_0' + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}' \right] \cdot \left[-\hat{\beta}_0'\hat{\beta}_0 D_s - \hat{\varphi}'\hat{\varphi} D_h \right] \\ &= -E^i_{\beta_0'}\hat{\beta}_0 D_s - E^i_{\varphi'}\hat{\varphi} D_h \\ &= E^i_{\beta_0'} D_s\hat{\phi} - E^i_{\varphi'} D_h\hat{\theta} \end{aligned} \tag{3.91}$$

$$\overline{E}^d_{C,1}(r,\theta,\phi) = \overline{E}^d_{\theta,1,C} + \overline{E}^d_{\phi,1,C} \tag{3.92}$$

$$\overline{E}^d_{\theta,1,C} = \frac{E_\theta\left(\theta = \pi/4 + \varphi_{C,1}', \phi = 0\right)}{s_1'} e^{-jks_1'} D_h A(s) \tag{3.93}$$

$$\overline{E}^d_{\phi,1,C} = \frac{E_\phi\left(\theta = \pi/4 + \varphi_{C,1}', \phi = 0\right)}{s_1'} e^{-jks_1'} D_s A(s) \tag{3.94}$$

$$\overline{E}^d_{1,C}(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks_1'}}{s_1'} \begin{Bmatrix} E^i_\theta(\theta = \pi/4 + \varphi_1', \phi = 0)\ D_h(L^i = s', \varphi_C, \varphi_1', n = 2)\hat{\theta} \\ E^i_\phi(\theta = \pi/4 + \varphi_1', \phi = 0)\ D_s(L^i = s', \varphi_C, \varphi_1', n = 2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \frac{\sqrt{s_1'}}{r_A} e^{-ikr_A} \tag{3.95}$$

ผลลัพธ์

$$\overline{E}^d_{1,C}(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks_1'}}{s_1'} \begin{Bmatrix} E^i_\theta(\theta = \pi/4 + \varphi_1', \phi = 0)\ D_h(L^i = s_1', \varphi_C, \varphi_1', n = 2)\hat{\theta} \\ E^i_\phi(\theta = \pi/4 + \varphi_1', \phi = 0)\ D_s(L^i = s_1', \varphi_C, \varphi_1', n = 2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \sqrt{s_1'}\ e^{ikl\cos\left(\frac{\pi}{4} - \theta\right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$s_1' = \sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{l}{\sqrt{2}} - S_p\right)^2}\ , \varphi_1' = \frac{\pi}{4} - \tan^{-1}\left(1 - \frac{\sqrt{2}S_p}{l}\right) \tag{3.96}$$

พิจารณาที่ขอบ C โดยมีแหล่งกำเนิด 3 เป็นแหล่งกำเนิดสนาม ($\theta = \frac{\pi}{4} + \varphi_{C,3}', \phi = 0$) แสดงค่าเวกเตอร์ที่นำไปคำนวณหาค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดคงค่าที่ขอบได้ดังนี้

แหล่งกำเนิดที่ 3 ($\theta = \frac{\pi}{4} + \varphi_{C,3}', \phi = 0$)

$$\hat{s}_3' = \hat{z}\sin\left(\frac{\pi}{4} + \varphi_{C,3}'\right) + \hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4} + \varphi_{C,3}'\right) \tag{3.97}$$

$$\hat{e} = \hat{y}\ , \hat{s} = \hat{x}\cos(\theta) + \hat{z}\sin(\theta) \tag{3.98}$$

$$\hat{\varphi}' = \frac{-\hat{e}\times\hat{s}'}{|\hat{e}\times\hat{s}'|} = \frac{-\hat{y}\times\left(\hat{z}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{C,3}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{C,3}'\right)\right)}{\left|\hat{y}\times\left(\hat{z}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{C,3}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{C,3}'\right)\right)\right|} = -\hat{\theta} \tag{3.99}$$

$$\hat{\varphi} = \frac{\hat{e}\times\hat{s}}{|\hat{e}\times\hat{s}|} = \frac{\hat{y}\times\left(x\cos(\theta)+\hat{z}\sin(\theta)\right)}{\left|\hat{y}\times\left(\hat{x}\cos(\theta)+\hat{z}\sin(\theta)\right)\right|} = \hat{\theta} \tag{3.100}$$

$$\hat{\beta}_0' = \hat{\varphi}'\times\hat{s}' = \left(\hat{x}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi_{C,3}') - \hat{z}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi_{C,3}')\right)\times \left(\hat{z}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{C,3}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{C,3}'\right)\right) = \hat{\phi} \tag{3.101}$$

$$\hat{\beta}_0 = \hat{\varphi}\times\hat{s} = \left(\hat{z}\cos(\theta) - \hat{x}\sin(\theta)\right)\times\left(\hat{x}\cos(\theta)+\hat{z}\sin(\theta)\right) = -\hat{\phi} \tag{3.102}$$

$$\overline{E}_{3,C}^d(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks_3'}}{s_3'}\begin{Bmatrix} E_\theta^i(\theta=\pi/4+\varphi_{C,3}',\phi=0)\ D_h(L^i=s_3',\varphi_C,\varphi_3',n=2)\hat{\theta} \\ E_\phi^i(\theta=\pi/4+\varphi_{C,3}',\phi=0)\ D_s(L^i=s_3',\varphi_C,\varphi_3',n=2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \frac{\sqrt{s_3'}}{r_A}e^{-ikr_A} \tag{3.103}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลลัพธ์

$$\bar{E}^d_{3,C}(r,\theta,\phi)=\frac{e^{-iks_3'}}{s_3'}\begin{Bmatrix}E^i_\theta(\theta=\pi/4+\varphi'_{C,3},\phi=0)\ D_h(L^i=s_3',\varphi_C,\varphi_3',n=2)\hat{\theta}\\ E^i_\phi(\theta=\pi/4+\varphi'_{C,3},\phi=0)\ D_s(L^i=s_3',\varphi_C,\varphi_3',n=2)\hat{\phi}\end{Bmatrix}\sqrt{s_3'}\ e^{ikl\cos\left(\frac{\pi}{4}-\theta\right)}$$

$$s_3'=\sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2+\left(\frac{l}{\sqrt{2}}+S_p\right)^2}\ ,\varphi_3'=\frac{\pi}{4}-\tan^{-1}\left(\frac{l}{l+\sqrt{2}S_p}\right) \tag{3.104}$$

พิจารณาที่ขอบ D โดยมีแหล่งกำเนิด 1 เป็นแหล่งกำเนิดสนาม $(\theta=-\left(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1}\right),\phi=0)$ แสดงค่าเวกเตอร์ที่นำไปคำนวณหาค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดคงค่าที่ขอบได้ดังนี้

$$\alpha_D=\frac{3\pi}{4}-\theta \tag{3.105}$$

แหล่งกำเนิดที่ 1 $(\theta=-\left(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1}\right),\phi=0)$

$$r_1=r-S_p\cos\theta\ ,s_1'=\sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2+\left(\frac{l}{\sqrt{2}}-S_p\right)^2} \tag{3.106}$$

$$\hat{e}=\hat{y}\ ,\hat{s}_1'=-\hat{z}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1})+\hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1}),\hat{s}=\hat{x}\cos(\theta)+\hat{z}\sin(\theta) \tag{3.107}$$

$$\hat{\varphi}'=\frac{-\hat{e}\times\hat{s}'}{|\hat{e}\times\hat{s}'|}=\frac{-\hat{y}\times\left(-\hat{z}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1})+\hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1})\right)}{\left|\hat{y}\times\left(\hat{z}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1})+\hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1})\right)\right|}=-\hat{\theta} \tag{3.108}$$

$$\hat{\varphi}=\frac{\hat{e}\times\hat{s}}{|\hat{e}\times\hat{s}|}=\frac{\hat{y}\times(\hat{x}\cos(\theta)+\hat{z}\sin(\theta))}{|\hat{y}\times(\hat{x}\cos(\theta)+\hat{z}\sin(\theta))|}=\hat{\theta} \tag{3.109}$$

$$\hat{\beta}_0'=\hat{\varphi}'\times\hat{s}'=\left(-\hat{x}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1})-\hat{z}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1})\right)\times\left(-\hat{z}\sin(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1})+\hat{x}\cos(\frac{\pi}{4}+\varphi'_{D,1})\right)=\hat{\phi} \tag{3.110}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{\beta}_0 = \hat{\varphi} \times \hat{s} = \left(\hat{z}\cos(\theta) - \hat{x}\sin(\theta)\right) \times \left(\hat{x}\cos(\theta) + \hat{z}\sin(\theta)\right) \\ = -\hat{\phi} \tag{3.111}$$

$$\overline{E}^i = E^i_{\beta'_0}\hat{\beta}'_0 + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}' \tag{3.112}$$

$$E^i_{1\beta'_0} = \overline{E}^i_1 \cdot \hat{\beta}'_0 = \frac{\left(E_\theta\hat{\theta} + E_\phi\hat{\phi}\right)}{r} e^{-jkr} \cdot \hat{\phi} = \frac{E_\phi\left(\theta = \pi/4 + \varphi'_1, \phi = 0\right)}{s'_1} e^{-jks'_1} \tag{3.113}$$

$$E^i_{\varphi'} = \overline{E}^i \cdot \hat{\varphi}' = \frac{\left(E_\theta\hat{\theta} + E_\phi\hat{\phi}\right)}{r} e^{-jkr} \cdot \left(-\hat{\theta}\right) = -\frac{E_\theta\left(\theta = \pi/4 + \varphi'_1, \phi = 0\right)}{s'_1} e^{-jks'_1} \tag{3.114}$$

$$\begin{aligned} \overline{E}^d_{D,1} = \overline{E}^i \cdot \overline{\overline{D}} &= \left[E^i_{\beta'_0}\hat{\beta}'_0 + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}'\right] \cdot \left[-\hat{\beta}'_0\hat{\beta}_0 D_s - \hat{\varphi}'\hat{\varphi}' D_h\right] \\ &= \left[E^i_{\beta'_0}\hat{\beta}'_0 + E^i_{\varphi'}\hat{\varphi}'\right] \cdot \left[-\hat{\beta}'_0\hat{\beta}_0 D_s - \hat{\varphi}'\hat{\varphi} D_h\right] \\ &= -E^i_{\beta'_0}\hat{\beta}_0 D_s - E^i_{\varphi'}\hat{\varphi} D_h \\ &= E^i_{\beta'_0} D_s\hat{\phi} - E^i_{\varphi'} D_h\hat{\theta} \end{aligned} \tag{3.115}$$

$$\overline{E}^d_{D,1}(r,\theta,\phi) = \overline{E}^d_{\theta,1,D} + \overline{E}^d_{\phi,1,D} \tag{3.116}$$

$$\overline{E}^d_{\theta,D,1} = \frac{E_\theta\left(\theta = \pi/4 + \varphi'_{D,1}, \phi = 0\right)}{s'_1} e^{-jks'_1} D_h A(s) \tag{3.117}$$

$$\overline{E}^d_{\phi,D,1} = \frac{E_\phi\left(\theta = \pi/4 + \varphi'_{D,1}, \phi = 0\right)}{s'_1} e^{-jks'_1} D_s A(s) \tag{3.118}$$

$$\overline{E}^d_{D,1}(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks'_1}}{s'_1} \begin{Bmatrix} E^i_\theta(\theta = -(\pi/4 + \varphi'_1), \phi = 0)\, D_h(L^i = s', \varphi_D, \varphi'_1, n = 2)\hat{\theta} \\ E^i_\phi(\theta = -(\pi/4 + \varphi'_1), \phi = 0)\, D_s(L^i = s', \varphi_D, \varphi'_1, n = 2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \frac{\sqrt{s'_1}}{r_B} e^{-ikr_B} \tag{3.119}$$

ผลลัพธ์

$$\overline{E}^d_{D,1}(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks'_1}}{s'_1} \begin{Bmatrix} E^i_\theta(\theta = -(\pi/4 + \varphi'_1), \phi = 0)\, D_h(L^i = s', \varphi_D, \varphi'_1, n = 2)\hat{\theta} \\ E^i_\phi(\theta = -(\pi/4 + \varphi'_1), \phi = 0)\, D_s(L^i = s', \varphi_D, \varphi'_1, n = 2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \sqrt{s'_1}\; e^{ikl\cos\left(\frac{\pi}{4}+\theta\right)} \tag{3.120}$$

$$r_1 = r - S_p\cos\phi,\; s_1{}' = \sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{l}{\sqrt{2}} - S_p\right)^2} \quad \varphi'_1 = \frac{\pi}{4} - \tan^{-1}\left(1 - \frac{\sqrt{2}S_p}{l}\right) \tag{3.121}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาที่ขอบ D โดยมีแหล่งกำเนิด 2 เป็นแหล่งกำเนิดสนาม $(\theta = -\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_2'\right), \phi = 0)$ แสดงค่าเวกเตอร์ที่นำไปคำนวณหาค่าเวกเตอร์ในระบบพิกัดคงค่าที่ขอบได้ดังนี้

แหล่งกำเนิดที่ 2 $(\theta = -\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_2'\right), \phi = 0)$

$$\hat{s}_2' = -\hat{z}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right), s_2' = \sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2+\left(\frac{l}{\sqrt{2}}-S_p\right)^2} \tag{3.122}$$

$$\hat{\varphi}' = \frac{-\hat{e}\times\hat{s}'}{|\hat{e}\times\hat{s}'|} = \frac{-\hat{y}\times\left(-\hat{z}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right)\right)}{\left|\hat{y}\times\left(\hat{z}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right)\right)\right|} \tag{3.123}$$

$$= -\hat{\theta}$$

$$\hat{\beta}_0' = \hat{\varphi}'\times\hat{s}' = \left(-\hat{x}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right)-\hat{z}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right)\right)\times$$
$$\left(-\hat{z}\sin\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right)+\hat{x}\cos\left(\frac{\pi}{4}+\varphi_{D,2}'\right)\right) \tag{3.124}$$

$$= \hat{\phi}$$

$$\overline{E}_{2,D}^d(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks_2'}}{s_2'}\begin{Bmatrix} E_\theta^i(\theta=-(\pi/4+\varphi_2'),\phi=0)\ D_h(L^i=s_2',\varphi_D,\varphi_2',n=2)\hat{\theta} \\ E_\phi^i(\theta=-(\pi/4+\varphi_2'),\phi=0)\ D_s(L^i=s_2',\varphi_D,\varphi_2',n=2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \frac{\sqrt{s_2'}}{r_B}e^{-ikr_B} \tag{3.125}$$

ผลลัพธ์

$$\overline{E}_{2,D}^d(r,\theta,\phi) = \frac{e^{-iks_2'}}{s_2'}\begin{Bmatrix} E_\theta^i(\theta=-(\pi/4+\varphi_2'),\phi=0)\ D_h(L^i=s_2',\varphi_D,\varphi_2',n=2)\hat{\theta} \\ E_\phi^i(\theta=-(\pi/4+\varphi_2'),\phi=0)\ D_s(L^i=s_2',\varphi_D,\varphi_2',n=2)\hat{\phi} \end{Bmatrix} \sqrt{s_2'}\ e^{ikl\cos\left(\frac{\pi}{4}+\theta\right)} \tag{3.126}$$

$$s_2' = \sqrt{\left(\frac{l}{\sqrt{2}}\right)^2+\left(\frac{l}{\sqrt{2}}+S_p\right)^2}, \varphi_2' = \frac{\pi}{4}-\tan^{-1}\left(\frac{l}{l+\sqrt{2}S_p}\right) \tag{3.127}$$

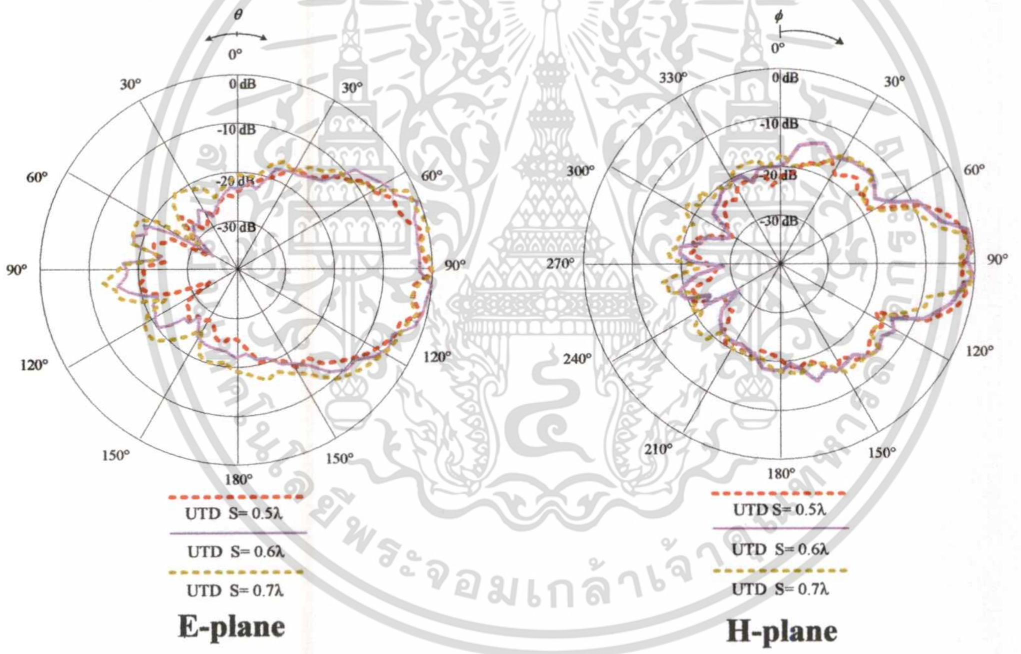
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์

ผลเฉลยเชิงวิเคราะห์เป็นการแสดงคุณลักษณะของสายอากาศ โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าที่สำคัญซึ่งประกอบไปด้วย ระยะห่างระหว่างวงแหวนวงกลมกับตัวสะท้อนแบบกรวย ความสูงของตัวสะท้อน และความกว้างของตัวสะท้อน เพื่อที่จะหาค่าที่เหมาะสมที่ทำให้สายอากาศมีคุณลักษณะที่ตรงกับการใช้งาน

3.4.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

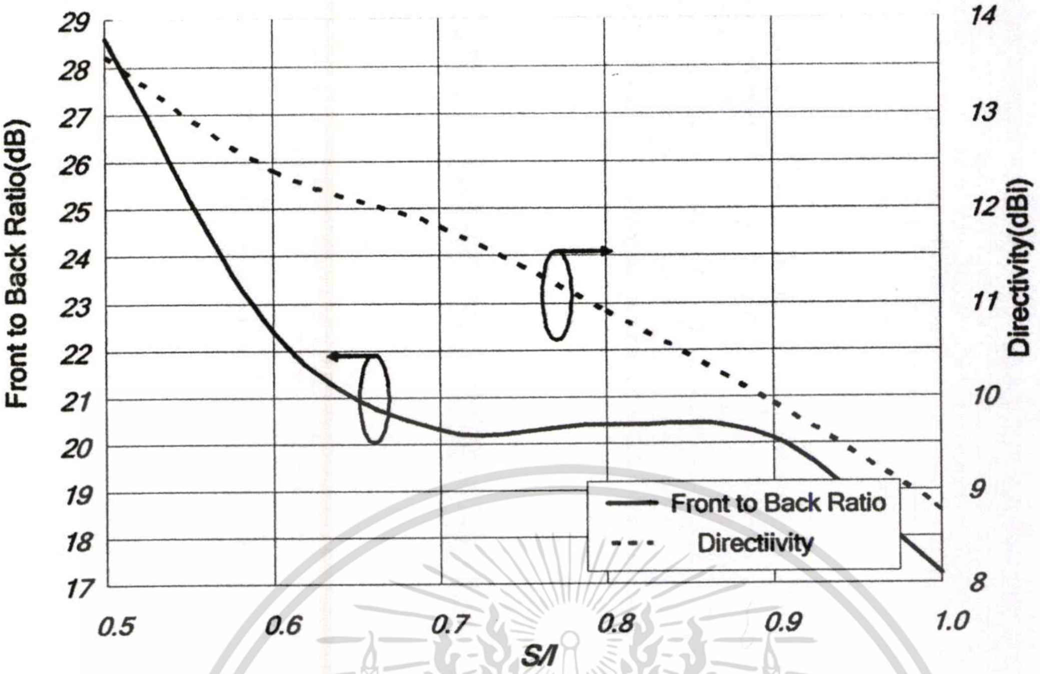
จากผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมานั้นทำให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยช่องเปิด (Aperture) มีขนาดเท่ากับ 2λ และทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวงแหวนวงกลมกับตัวสะท้อนคลื่นแบบกรวยเพื่อศึกษาถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการป้อนสัญญาณในตัวสะท้อนแบบกรวย



รูปที่ 3.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแบบสองมิติในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ

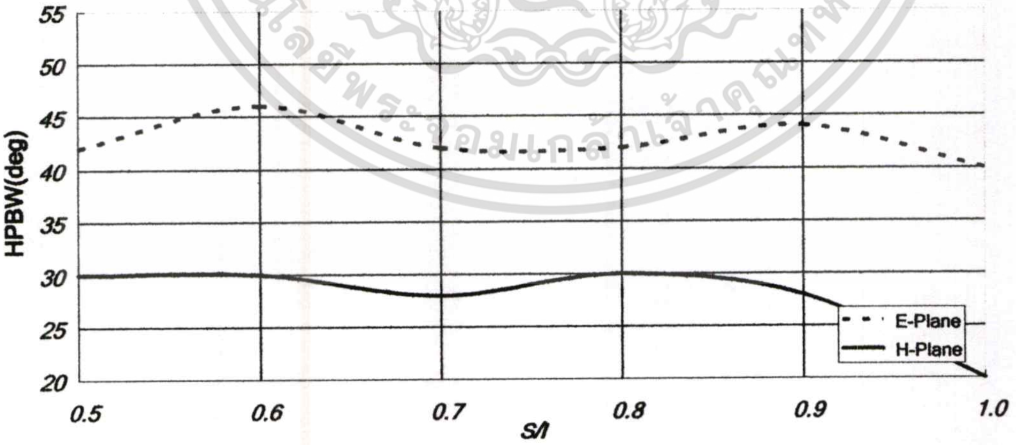
จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนั้นได้มาจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแบบสองมิติซึ่งได้ทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ระยะทางเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาสมและค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีที่สุด ซึ่งพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ค่าอัตราส่วนคลื่นด้านหน้าต่อคลื่นด้านหลัง และค่าความกว้างที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านหลัง

จากรูปที่ 3.6 พบว่าเมื่อเปลี่ยนระยะจุดป้อนสัญญาณของสายอากาศตั้งแต่ 0.5λ จนถึง 1.0λ จะพบว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านหลังมีค่าลดลงตามลำดับ ดังนั้นระยะจุดป้อนสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมคือ 0.5λ



รูปที่ 3.7 ค่าความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

และจากรูปที่ 3.6 และ 3.7 พบว่า ระยะจุดป้อนสัญญาณนั้นจะเริ่มตั้งแต่ 0.5λ จนถึง 1.0λ เนื่องจากโครงสร้างของวงแหวนกลมไม่สามารถเข้าไปในก้นกรวยมากกว่า 0.5λ และไม่เกิน1.0λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการคำนวณในทางทฤษฎีของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมไว้อย่างละเอียดโดยใช้ระบบพิกัดคงค่าที่ขอบ ร่วมกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต เพื่อนำมาทำนายแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้หาค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เพื่อนำผลที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบระหว่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2 และผลการทดลอง ซึ่งระยะช่องเปิดของสายอากาศที่เราเลือกใช้เท่ากับ 2λ และระยะป้อนสัญญาณที่เหมาะสมคือ 0.5λ โดยได้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงที่สุดเท่ากับ 13.2 dBi และค่าความกว้างกำลังลดลงครึ่งหนึ่งในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 42 และ 30 องศา ตามลำดับ

ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแบบ 2 มิติ นั้นพบว่าค่าที่ได้จะมีความถูกต้องพอสมควรเนื่องจากคิดการเลี้ยวเบนบริเวณขอบของช่องเปิดสายอากาศ แต่ยังไม่ถูกต้องทั้งหมดเนื่องจากขอบบริเวณอื่นของสายอากาศก็เกิดการเลี้ยวเบนเช่นกัน แต่ในการพิจารณาเราจะพิจารณาตามระนาบที่เราสนใจเท่านั้นเช่นถ้าเราพิจารณาในระนาบสนามไฟฟ้าระนาบที่สนใจคือระนาบ xy และระนาบสนามแม่เหล็ก xz ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาระนาบสนามไฟฟ้าก็จะมีการเลี้ยวเบนจากระนาบสนามแม่เหล็กเข้ามากวน ดังนั้นถ้าจะชดเชยผลที่เกิดขึ้นได้อย่างดีควรใช้การเลี้ยวเบนแบบ 3 มิติร่วมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

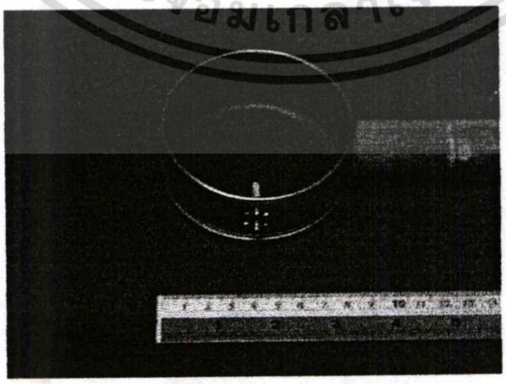
การทดสอบคุณลักษณะสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม

4.1 บทนำ

จากบทที่ 2 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ได้จากฟังก์ชันกรีนชนิดไดแอดิก และบทที่ 3 ซึ่งเป็นการการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลที่ได้จากการคำนวณว่ามีความแม่นยำและถูกต้องมากน้อยเพียงใด ซึ่งการทดสอบสายอากาศได้ออกแบบสร้างที่ความถี่ 2.45 GHz ซึ่งความถี่ใช้งานของระบบการสื่อสารโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) และมีช่วงกว้างแถบความถี่เท่ากับ 4835 MHz หรือเท่ากับ 3.4% (2.4 – 2.4835 GHz)

4.2 การสร้าง สายอากาศวงแหวนวงกลม

จากผลการคำนวณได้ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดคือ ใช้รัศมีของวงแหวนเท่ากับ 4.25 ซ.ม. (0.347λ) ความหนาของวงแหวนเท่ากับ 3.55 ซ.ม. (0.290λ) และความยาวของโพรบเท่ากับ 3.06 ซ.ม. (0.25λ) ซึ่งพบว่าสายอากาศชนิดนี้จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสายอากาศเท่ากับ 5.29 dBi ความกว้างของลำคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กและระนาบสนามไฟฟ้าเท่ากับ 70 และ 76 องศา ตามลำดับ รูปถ่ายของสายอากาศที่ได้สร้างขึ้นจริงดังแสดงในรูปที่ 4.1

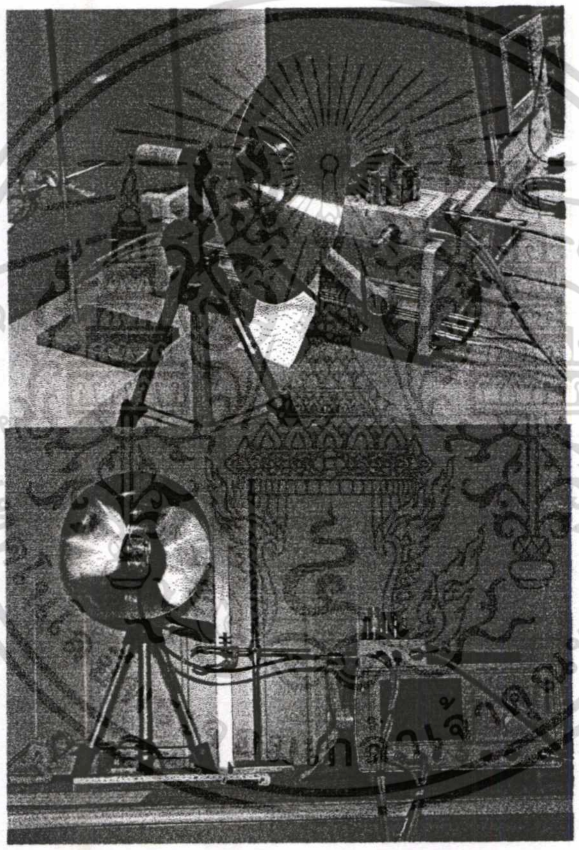


รูปที่ 4.1 รูปถ่ายของสายอากาศวงแหวนวงกลมที่ได้สร้างขึ้นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การสร้าง และการทดสอบคุณลักษณะสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม

ในการออกแบบสายอากาศแบบทิศทางเดียว กล่าวคือค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดจะต้องชี้ที่ 0° พร้อมกัน สายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยที่ออกแบบมีค่ามุมตัวสะท้อนเท่ากับ 90° ระยะห่างระหว่างวงแหวนวงกลมกับตัวสะท้อนแบบกรวยเท่ากับ 6.12 ซ.ม. (0.5λ) 7.347 ซ.ม. (0.6λ) 8.57 ซ.ม. (0.7λ) ช่องเปิด (Aperture) ของตัวสะท้อนแบบกรวยเท่ากับ 24.5 ซม. (2λ) เนื่องจากจะให้ค่าความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังที่แคบที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 45° ในระนาบสนามไฟฟ้าและ 30° ในระนาบ สนามแม่เหล็กตามลำดับ



รูปที่ 4.2 รูปถ่ายของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมที่ได้สร้างขึ้นจริง

4.3.2 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่ได้ทำการทดสอบ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยทั่วไปค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะใช้ระบบ 50 โอห์ม แต่ในปฏิบัติไม่สามารถทำได้ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้มีค่าใกล้เคียง และเมื่อพิจารณาค่าที่ใกล้เคียงนั้นในรูปของอัตราส่วนคลื่นนิ่งของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ (SWR) ไม่ควรเกิน 1.5:1 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้หรือพิจารณาในรูปของกำลังงานที่สะท้อนกลับคือประมาณ 4% เท่านั้น ดังนั้นได้ทำการแสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศและค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ที่ระยะห่างระหว่างวงแหวนวงกลมกับตัวสะท้อนแบบกรวยมีค่าเท่ากับ 0.5λ, 0.6λ และ0.7λ ตามลำดับ การพิจารณาช่วงกว้างแถบความถี่ของสายอากาศสามารถหาได้จาก

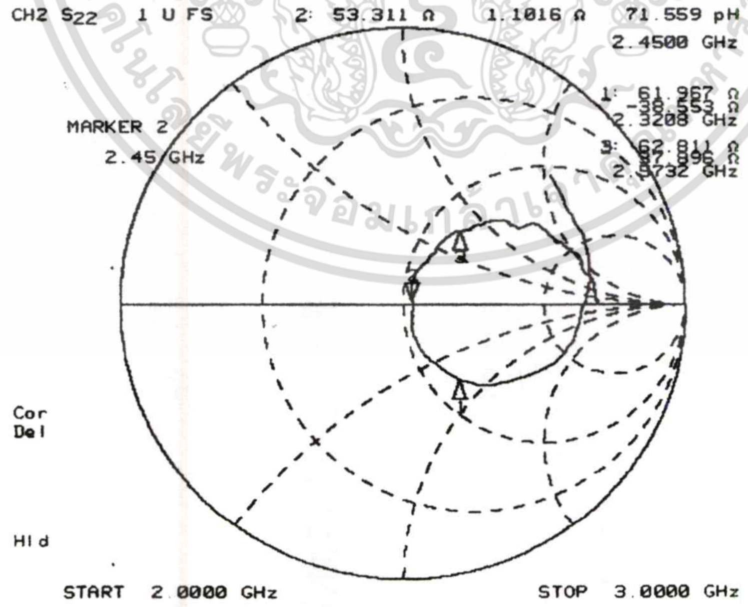
$$\Delta f(\%) = \frac{f_H - f_L}{f_c} \times 100 \tag{4.1}$$

โดยที่ f_H คือค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้

f_L คือค่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้

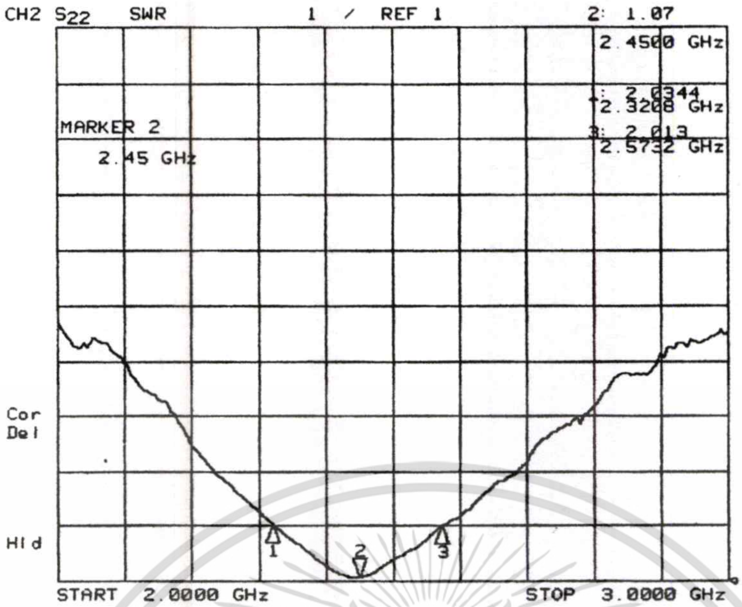
f_H คือค่าความถี่ที่ออกแบบ

สำหรับการแสดงตัวชี้ต่าง ๆ (marker) โดยตัวชี้ที่ 1 คือ ความถี่ทางต่ำที่สุดของสายอากาศที่ยังคงให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 1.5:1 ตัวชี้ที่ 2 คือ ความถี่ทางด้านต่ำของระบบการสื่อสารท้องถิ่นไร้สาย ตัวชี้ที่ 3 คือ ความถี่กลาง (ความถี่ออกแบบ) ตัวชี้ที่ 4 คือ ความถี่ทางด้านสูงของระบบการสื่อสารท้องถิ่นไร้สาย และตัวชี้ที่ 5 คือ ความถี่ทางด้านสูงที่สุดของสายอากาศที่ยังคงให้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 1.5:1

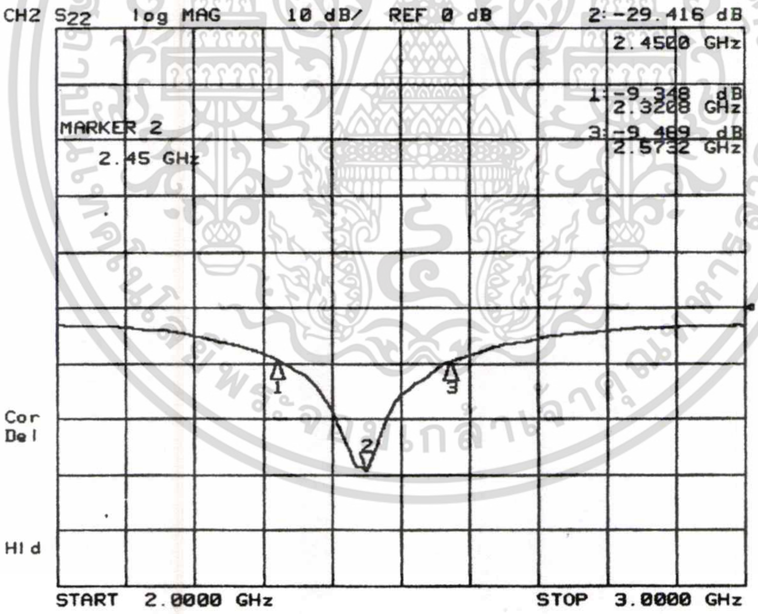


รูปที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.5λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

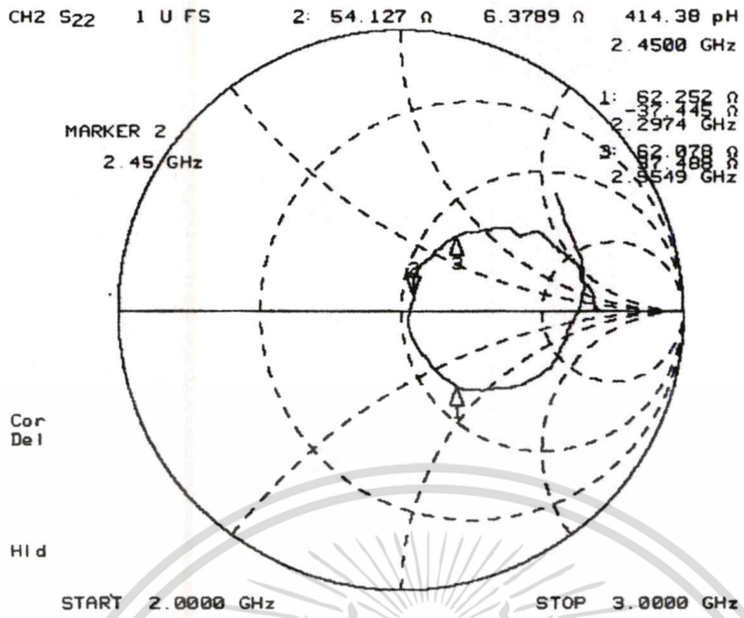


รูปที่ 4.4 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.5λ

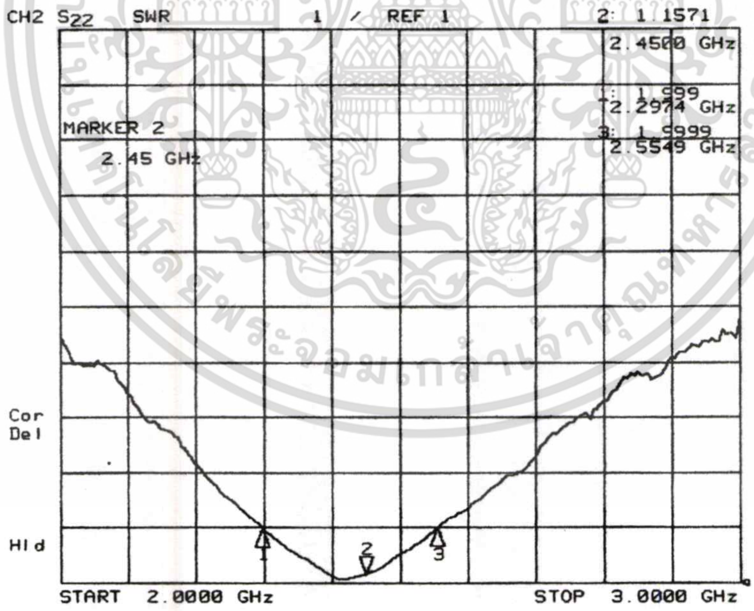


รูปที่ 4.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.5λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

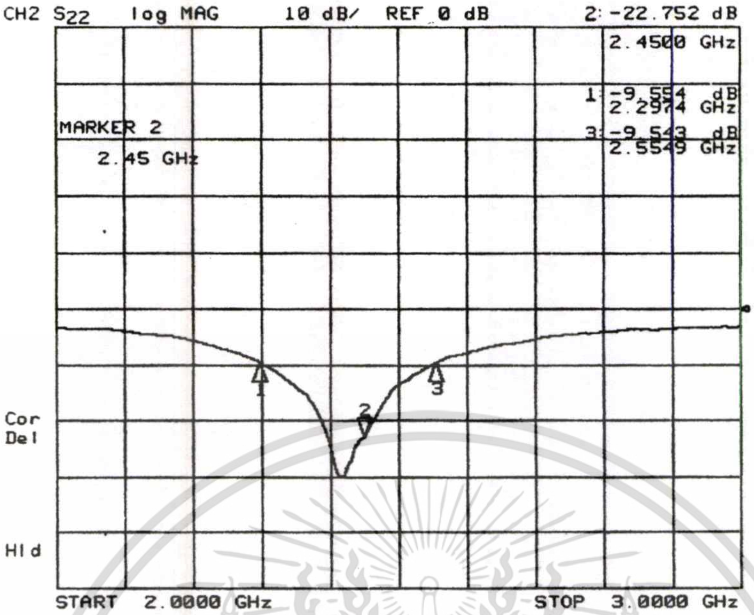


รูปที่ 4.6 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.6λ

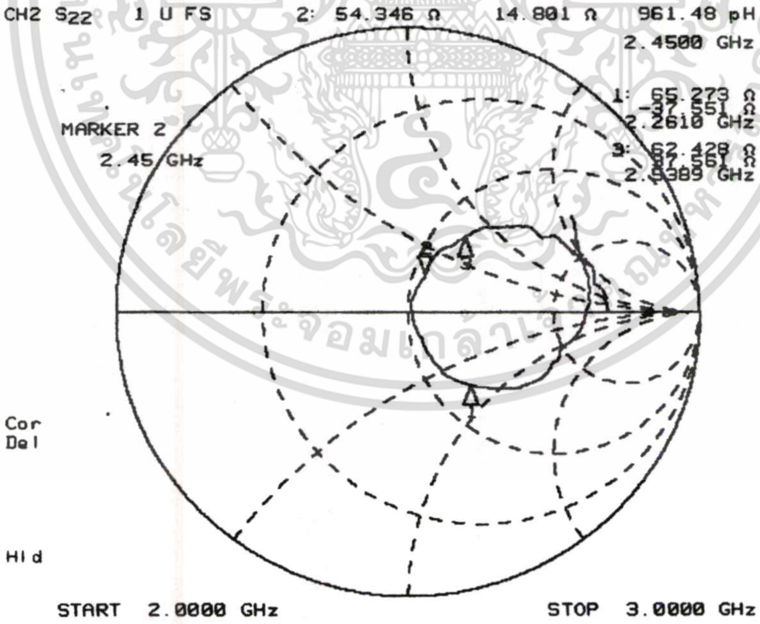


รูปที่ 4.7ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.6λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

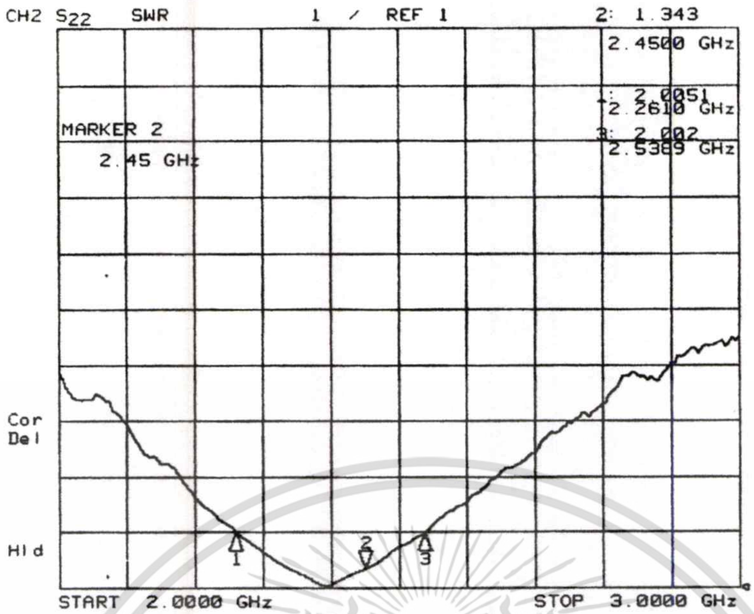


รูปที่ 4.8 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.6λ

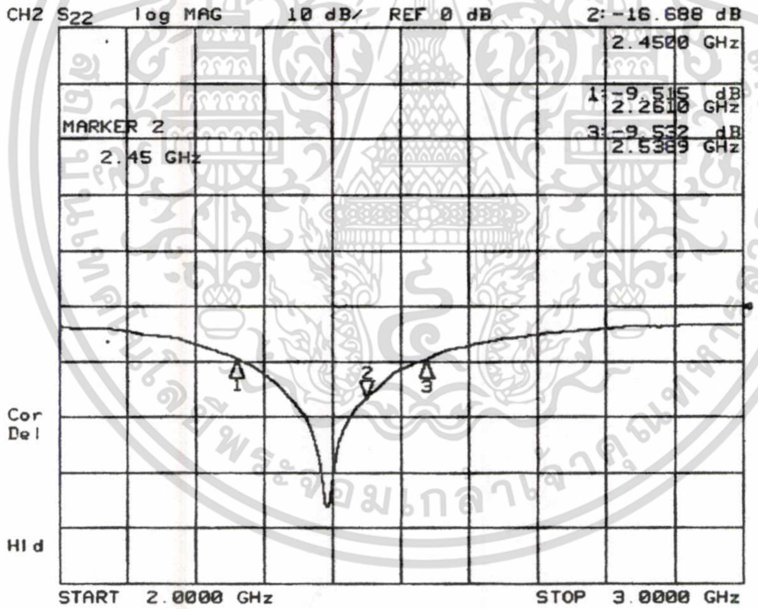


รูปที่ 4.9 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ



รูปที่ 4.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการทดสอบสายอากาศที่ระยะห่างเท่ากับ 0.7λ

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม และการออกแบบสายอากาศวงแหวนวงกลม ดังนั้นจะพบว่าได้ทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างวงแหวนวงกลมกับตัวสะท้อนแบบกรวยเป็นระยะทางต่างๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น และพบว่าค่าที่ได้ทำการออกแบบนั้นมีความเหมาะสมกับตัวสายอากาศและการทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยได้กำหนดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งอยู่ที่ 2:1 ซึ่งค่าที่ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศนั้นแสดงได้ดังตารางที่ 1 แถบความถี่ใช้งานตารางที่ 2

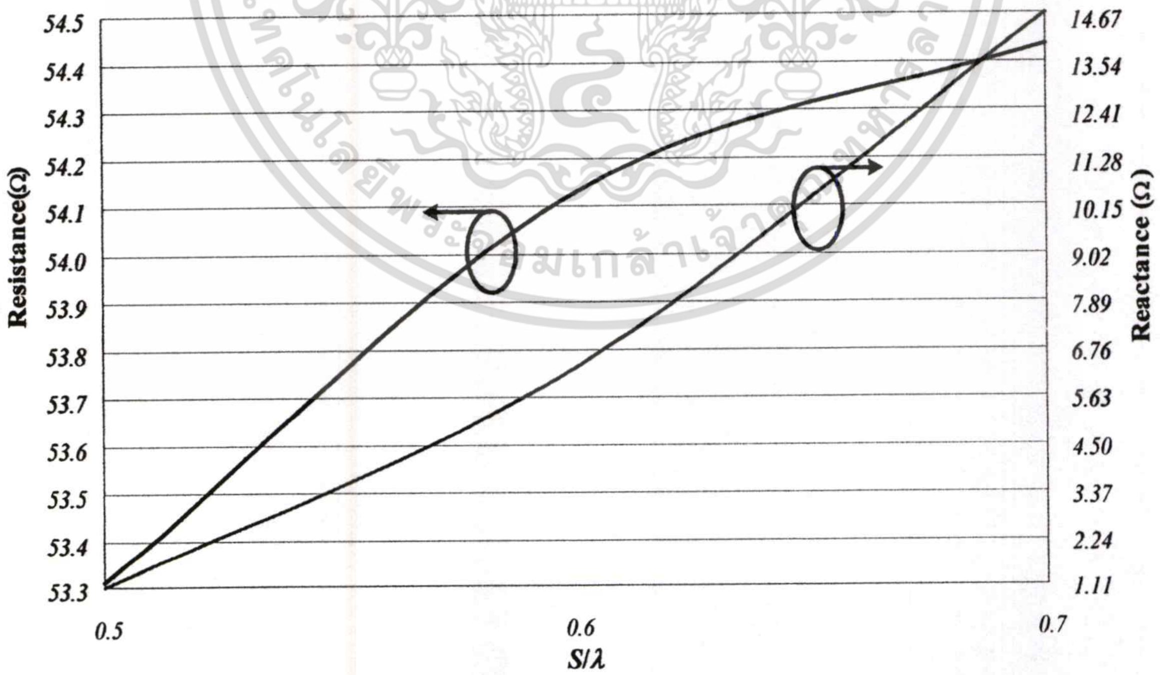
ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ค่าการทดสอบคุณลักษณะสายอากาศ

ระยะจุดป้อนสัญญาณ	Input Impedance	SWR	Reflected Power
0.5λ	53.311+j1.106 Ω	1.07	0.11%
0.6λ	54.127+j6.3789Ω	1.1571	0.53%
0.7λ	54.436+j14.801Ω	1.343	2.14%

ตารางที่ 2 แถบความถี่ใช้งาน

ระยะจุดป้อนสัญญาณ	แถบความถี่ใช้งาน
0.5λ	10.30%
0.6λ	10.51%
0.7λ	27.79%



รูปที่ 4.12 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนระยะจุดป้อนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดสอบคุณสมบัติสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมในย่านสนามระยะไกล

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมในย่านสนามระยะไกลซึ่งก็คือการหาค่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยายของสายอากาศ และค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ซึ่งผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2 เพื่อหาแนวโน้มที่ควรจะเป็นในทางเดียวกันเนื่องจากสายอากาศชนิดนี้เป็นสายอากาศแบบใหม่

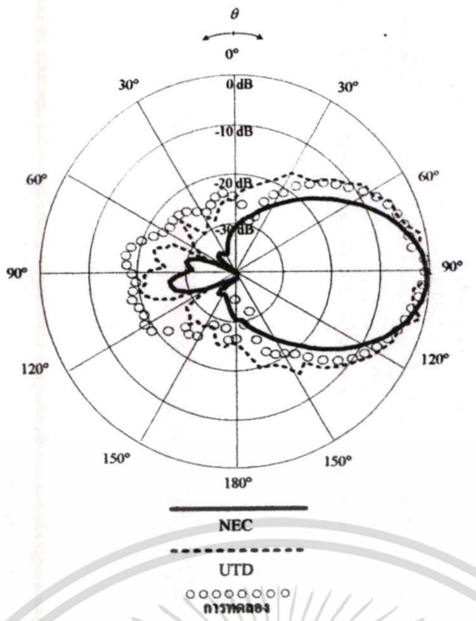
5.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังชันก์ของทิศทาง ซึ่งทำการทดสอบที่สนามระยะไกล หรือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิด (สายอากาศส่ง) และสายอากาศรับต้องห่างกันมากกว่า $2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ ซึ่งที่สนามระยะไกลนี้การเปลี่ยนแปลงของสนามจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง

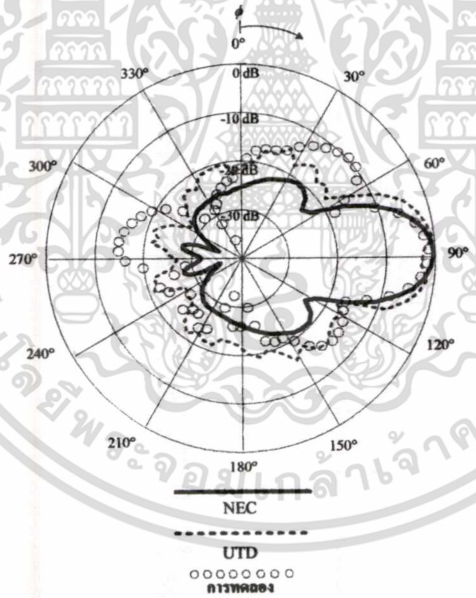
รูปที่ 5.1, 5.2 และ 5.3 เป็นการแสดงถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ทำการทดลองในย่านสนามระยะไกล ซึ่งผลที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี และการวิเคราะห์ทางโปรแกรม NEC2 พบว่าผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

จากรูปพบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีโดยใช้วิธีทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต แลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2 แสดงให้เห็นได้ว่าทั้งสามวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



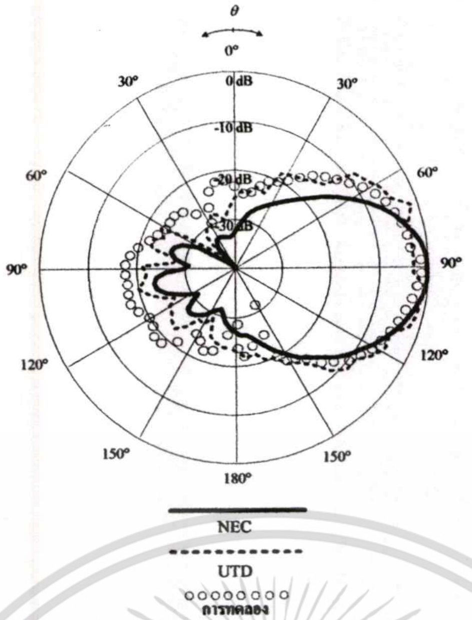
รูปที่ 5.1 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.5λ ในระนาบสนามไฟฟ้า



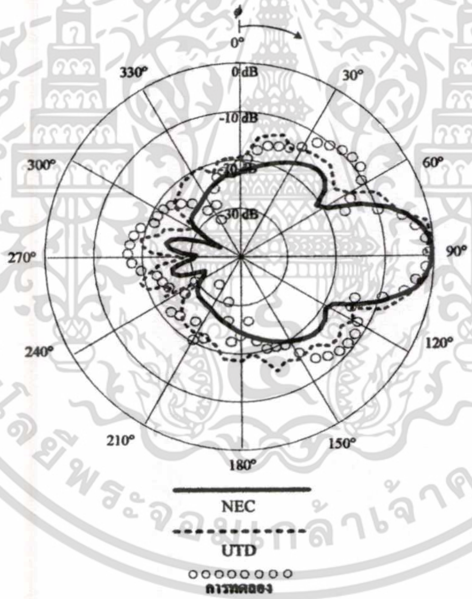
รูปที่ 5.2 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.5λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากผลที่ได้พบว่าทั้งการคำนวณจากทฤษฎี การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2 และการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยได้ค่าอัตราขยายเท่ากับ 11.443 dBi ประสิทธิภาพเท่ากับ 86.6% ค่าความกว้างครึ่งกำลัง (HPBW) ทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 42 และ 30 องศา ตามลำดับ และค่าอัตราส่วนของลำคลื่นด้านหน้ากับลำคลื่นด้านหลังเท่ากับ 34 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



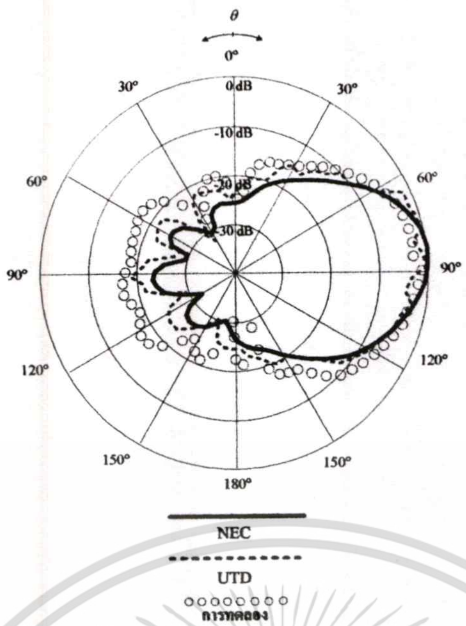
รูปที่ 5.3 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.6λ ในระนาบสนามไฟฟ้า



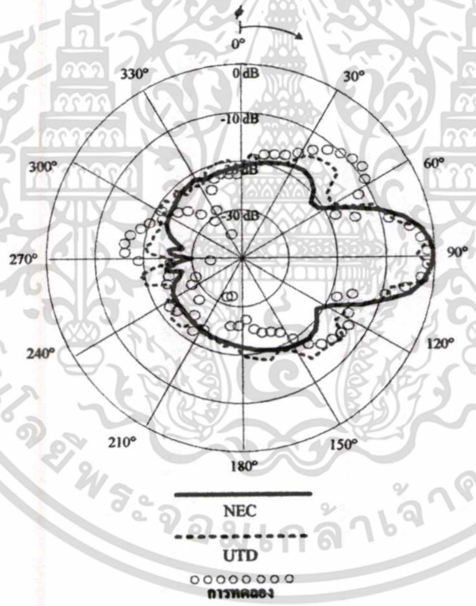
รูปที่ 5.4 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.6λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากผลที่ได้พบว่าทั้งการคำนวณจากทฤษฎี การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2 และการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยได้ค่าอัตราขยายเท่ากับ 10.283 dBi ประสิทธิภาพเท่ากับ 82.3% ค่าความกว้างครึ่งกำลัง (HPBW) ทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 46 และ 30 องศา ตามลำดับ และค่าอัตราส่วนของลำคลื่นด้านหน้ากับลำคลื่นด้านหลังเท่ากับ 33.4 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.7λ ในระนาบสนามไฟฟ้า



รูปที่ 5.6 ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและโปรแกรม NEC2 ที่ระยะห่าง 0.7λ ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากผลที่ได้พบว่าทั้งการคำนวณจากทฤษฎี การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2 และการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยได้ค่าอัตราขยายเท่ากับ 9.018 dBi ประสิทธิภาพเท่ากับ 74.5% ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (HPBW) ทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 42 และ 28 องศา ตามลำดับ และค่าอัตราส่วนของลำคลื่นด้านหน้ากับลำคลื่นด้านหลังเท่ากับ 30.3 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่ได้จะพบว่าการคิดผลของการเลี้ยวเบนคลื่นร่วมด้วยทำให้สามารถทำนายคลื่นบริเวณขอบด้านหลังตัวสะท้อนแบบกรวยได้เนื่องจากจะพบว่าการคิดด้วยวิธีทาง UTD จะมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากโปรแกรม NEC2 จะมีค่าผิดพลาด เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างโดยอาศัยเส้นลวดตัวนำมาสานต่อกันเป็นโครงสร้างของสายอากาศผลที่ได้ถึงจะรวมผลของการเลี้ยวเบนคลื่นร่วมด้วย แต่ก็ยังไม่สมบูรณ์ เพราะโครงสร้างจริงเป็นวัสดุตัวนำ

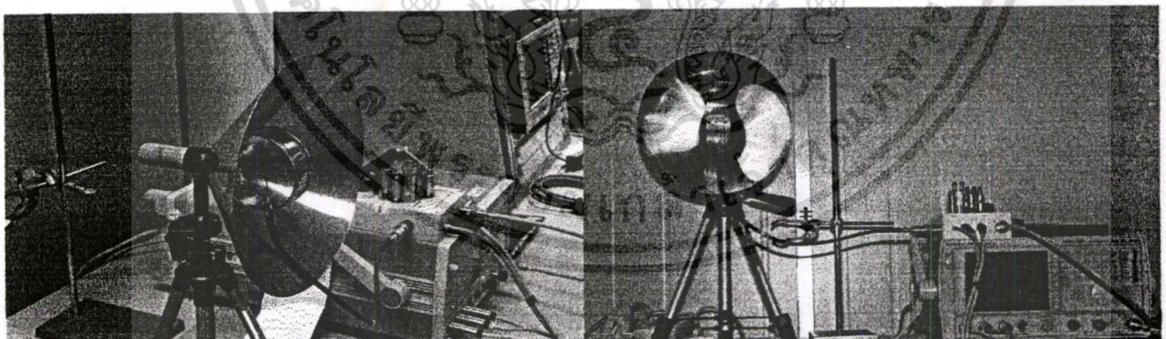
5.3 อัตราขยายและประสิทธิภาพของสายอากาศ

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการหาค่าอัตราขยายของสายอากาศและประสิทธิภาพรวมไว้ด้วย แสดงโดยสมการของฟริส (Friis Transmission Equation) ดังนี้

$$2G(dBi) = P_r(dBm) - P_t(dBm) + L_{f_1}(dB) + L_{f_2}(dB) + L_S(dB) \quad (5.1)$$

เมื่อ

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



รูปที่ 5.7 แสดงการทดสอบสายอากาศในย่านสนามระยะไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ ที่ทำการทดสอบ

ระยะจุดป้อนสัญญาณ (λ)	กำลังงานรับ Pr(dBm)	กำลังงานส่ง Pt(dBm)	ค่าสูญเสียสายส่งเส้นที่ 1 Lf1 (dB)	ค่าสูญเสียสายส่งเส้นที่ 2 Lf2 (dB)	ค่าสูญเสียในชั้นบรรยากาศ Ls(dB)
0.5	-31.00	0	0.8	0.8	55.788
0.6	-33.33	0	0.8	0.8	55.788
0.7	-35.83	0	0.8	0.8	55.788

เมื่อนำค่าต่างๆจากการทดสอบมาแทนในสมการที่ (5.1) และ (5.2) จะได้ค่าอัตราขยายและประสิทธิภาพเมื่อทำการเปลี่ยนระยะจุดป้อนสัญญาณดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4 อัตราขยายเมื่อทำการเปลี่ยนระยะจุดป้อนสัญญาณ

ระยะจุดป้อนสัญญาณ (λ)	อัตราการขยาย (dBi)	ประสิทธิภาพ (%)
0.5	11.433	86.6
0.6	10.283	82.3
0.7	9.018	74.5

5.4 ทฤษฎีการโพลาไรซ์

5.4.1 นิยามของการโพลาไรซ์

จาก [14], [15] สามารถสรุปได้ว่าการโพลาไรซ์ (Polarization) ของการแพร่กระจายคลื่นจะพิจารณาขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ถ้าลักษณะของการกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีลักษณะเป็นอย่างไรแล้วก็จะกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้านั้นมีการโพลาไรซ์แบบนั้น ซึ่งการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะได้แก่ การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงกลมซึ่งจะเรียกลักษณะสนามแบบนี้ว่าสนามไฟฟ้า

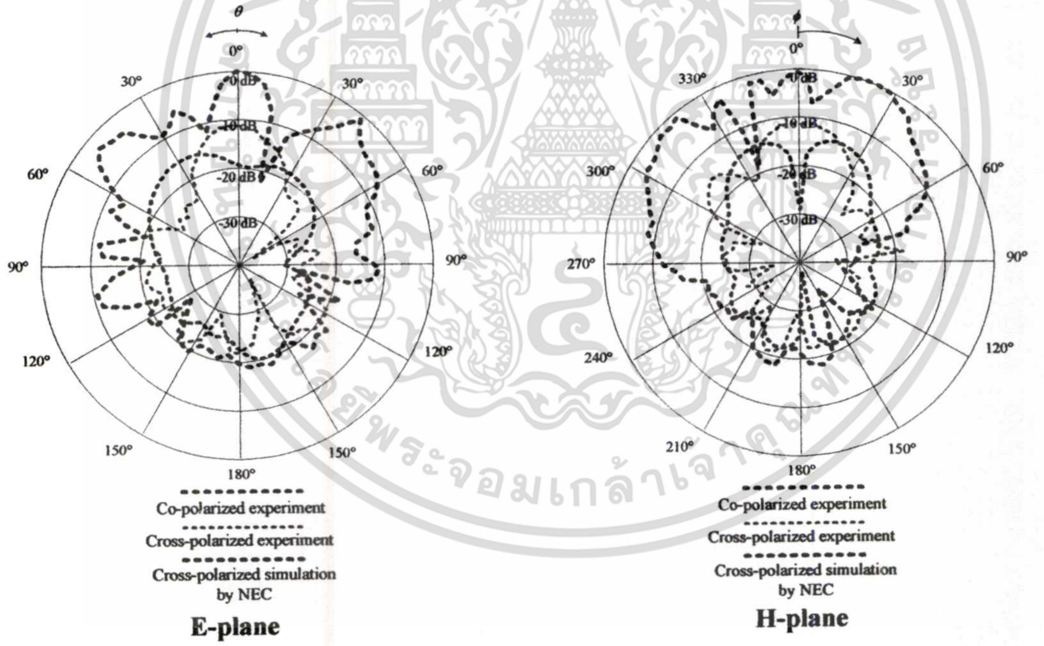
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม (Circular Polarization) การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นวงรี ก็จะเรียกว่าสนามไฟฟ้ามีการโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical Polarization) และการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นแนวเส้นตรงตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นก็จะเรียกว่าสนมไฟฟ้ามีลักษณะการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear Polarization)

ในกรณีของการโพลาไรซ์แบบวงกลม และแบบวงรีนั้นการกวาดหรือการหมุนไปของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ การกวาดหรือการหมุนของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าไปทางขวามือหรือ เรียกว่าเป็นการหมุนตามเข็มนาฬิกา และการกวาดหรือการหมุนขอเวกเตอร์ไปทางซ้ายมือหรือเรียกว่าเป็นการหมุนทวนเข็มนาฬิกา

5.4.2 การโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวย 90° ด้วยสายอากาศวงแหวนกลม

จากทฤษฎีของการโพลาไรซ์สามารถสรุปได้ว่าสายอากาศมีการโพลาไรซ์ทั้งแบบแนวตรง (Linear Polariation) แบบวงกลม (Circular Polarization) และแบบวงรี (Elliptical Polarization) ดังนั้นเราจะทำการพิจารณาสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยว่ามีโพลาไรซ์ในแบบใด



รูปที่ 5.8 แสดงการทดสอบการโพลาไรซ์ของสายอากาศในย่านสนามระยะไกล

ซึ่งจากการทดลองได้ใช้สายอากาศไดโพลเป็นตัวส่งและสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยเป็นตัวรับเนื่องจากต้องการโพลาไรซ์ที่เป็นเชิงเส้นอย่างแท้จริง และยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับโปรแกรม NEC2 เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของการโพลาไรซ์ ซึ่งพบว่า Cross-polarization ทั้งจากการทดลองและจากโปรแกรม NEC2 มีค่าน้อยกว่าการทดลองถึง 10 dB และ 20 dB ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบซึ่งทำให้ได้มาซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแบบ 2 มิติ (Uniform Theory of Diffraction) และการวิเคราะห์โดยโปรแกรม NEC2 ซึ่งพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันทั้งสามแบบ แต่ในโปรแกรม NEC2 ได้ทำการคิดโครงสร้างจากเส้นลวดมาสานต่อกันเป็นโครงสร้างสายอากาศดังนั้นจึงยังมีความผิดพลาดอยู่บ้างเมื่อคิดผลจากการเลี้ยวเบนคลื่นร่วมด้วย

ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทรงกลมแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมนั้นมีลักษณะชี้ทิศทาง และเมื่อเปลี่ยนระยะจุดป้อนทั้งสามจุดก็พบว่าค่าอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 11.433dBi, 10.283dBi และ 9.018dBi และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 86.6%, 82.3% และ 74.5% ตามลำดับ และยังได้ทำการวิเคราะห์ถึงการโพลาไรซ์ของสายอากาศ ซึ่งสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยมีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ข้อเสนอแนะต่างๆ และแนวทางในการพัฒนาต่อสำหรับวิทยานิพนธ์

6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงสายอากาศชนิดใหม่ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสื่อสารแบบไร้สายที่ความถี่ 2.45 GHz ในพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นทางตรง เช่น อุโมงค์ ทางเดิน และสามารถนำไปใช้ในระบบการสื่อสารแบบจุดต่อจุด ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้จะมีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว ซึ่งมักจะถูกใช้เป็นสายอากาศของสถานีฐาน โครงสร้างของสายอากาศสายอากาศเกิดจากการนำสายอากาศวงแหวนวงกลมที่มีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางมาวางไกล้กับตัวสะท้อนแบบกรวย จากโครงสร้างจึงถูกเรียกว่าสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม

เนื่องจากสายอากาศที่นำเสนอเกิดขึ้นจากสายอากาศวงแหวนวงกลม ในการวิเคราะห์จึงทำการทั้งสายอากาศที่นำเสนอและสายอากาศวงแหวนวงกลม ในบทที่ 2 จึงได้อธิบายเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีที่สำคัญและการวิเคราะห์สายอากาศวงแหวนวงกลม ที่ใช้วิธีฟังก์ชันกรีนชนิดไดแอดิก ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นถูกต้องมากกว่าวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์ และได้ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดคือ โดยได้รัศมีของวงแหวนเท่ากับ 3.67 ซ.ม. หรือ 0.30λ ความหนาของวงแหวนเท่ากับ 2.45 ซ.ม. หรือ 0.20λ และความยาวของโพรบเท่ากับ 3.06 ซ.ม. หรือ 0.25λ ซึ่งพบว่าสายอากาศชนิดนี้จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางสายอากาศเท่ากับ 5.45 dBi เพื่อยืนยันผลการคำนวณจึงได้ทดสอบสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบแสดงในบทที่ 2 พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ทดสอบมีค่าใกล้เคียงและแม่นยำกับการคำนวณ โดยวิธีฟังก์ชันกรีนชนิดไดแอดิกมากกว่าการคำนวณ โดยวิธีฟังก์ชันศักย์เวกเตอร์

ในส่วนของสายอากาศชนิดใหม่ที่นำเสนอหรือสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลมซึ่งในบทที่ 3 ได้แสดงทฤษฎีและหลักการที่สำคัญสำหรับการคำนวณคุณลักษณะของสายอากาศ วิธีการหาผลเฉลยของสนามโดยวิธีทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมออย่างละเอียด และทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยกำหนดมุมของตัวสะท้อนเท่ากับ 90 องศา ระยะห่างระหว่างวงแหวนวงกลมกับตัวสะท้อนแบบกรวยเท่ากับ 0.5λ, 0.6λ, 0.7λ ตามลำดับ ช่องเปิดสายอากาศมีค่าเท่ากับ 2λ ซึ่งจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียวที่มีค่าความกว้างของลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสนามแม่เหล็กเท่ากับ 45 และ 30 องศา ตามลำดับ และค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 13.2dBi, 10.6dBi และ 9.6dBi ที่ระยะจุดป้อนสัญญาณเท่ากับ 0.5λ, 0.6λ และ 0.7λ ตามลำดับเพื่อยืนยันผลการคำนวณในส่วนนี้จึงได้ทำการทดสอบสายอากาศที่สร้างขึ้นจากพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวข้างต้น พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของผลการคำนวณกับผลการทดสอบ มีความสอดคล้องกัน

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ในส่วนของสายอากาศวงแหวนวงกลม การคำนวณจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดสอบ แต่จะหาได้เฉพาะแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไม่สามารถคำนวณอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ การพิจารณาหากระแสที่โพรบโดยใช้วิธีโมเมนต์ร่วมด้วยจะทำให้สามารถอธิบายคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้แม่นยำขึ้น

เนื่องจากความซับซ้อนในการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนแบบกรวยที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนวงกลม จึงคำนวณเฉพาะที่มุมของตัวสะท้อนเท่ากับ 90 องศา เท่านั้น ดังนั้นการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มุมต่างๆ จึงมีความน่าสนใจเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมุมของตัวสะท้อนจะทำให้คุณลักษณะของสายอากาศเปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะค่าสภาพเจาะจงทิศทาง

จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีการเลี้ยวเบนสม่ำเสมอแบบ 2 มิติ พบว่าการพิจารณาจะพิจารณาบริเวณขอบที่อยู่ในระนาบที่สังเกตเท่านั้น ดังนั้นแล้วการพิจารณาอาจมีความผิดพลาดอยู่บ้างเนื่องจากในความเป็นจริงทุกๆ ขอบมีผลต่อการเลี้ยวเบนทั้งสิ้นดังนั้นแล้ว ถ้าจะพิจารณาให้ละเอียดยิ่งขึ้นควรพิจารณาในระนาบ 3 มิติ ร่วมด้วย ซึ่งจะสามารถหาผลกระทบจากทุกๆ ขอบที่เกิดขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] J.R. James and P.S. Hall , *Handbook of Microstrip Antennas*, Peter Peregrines. 1989.

[2] C.A. Balanis, *Antenna Handbook: Theory Application and Design*, New York; (Y.T.Lo and S.W.Lee, eds.), Van No strand Reinhold Co. 1988.

[3] A.W. Love (ed.), "*Reflector Antennas*", New York; IEEE Press. 1978.

[4] S. Kosulvit, M. Krariksh, C. Phongcharoenpanich, and T. Wakabayashi, " A Simple and Cost-Effective Bidirectional Antenna using a Probe Excited Circular Ring" IEICE Trans.Electronics, vol. E84-C no.4. Apr. 2001. pp.443-450.

[5] C.T. Tai, *Dyadi c Green Function in Electromagnetic Theory*, New York ; IEE Press. 1993.

[6] D. A. McNamara, C. W. I. Pistorius and J. A. G. Melherbe, *Introduction to the Uniform Geometrical Theory of Diffraction*, Boston London; Artech House. 1990.

[7] K.F. Sander and G. A. L. Reed, *Transmission and Propagation of Electromagnetic Waves*, Cambridge University Press. 1986

[8] Y. Ohba. " On the Radiation Pattern of a Corner Reflector Finite in Width " IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1963. pp. 127

[9] O. M. Bucci and G. Pelosi, "From Wave Theory to Ray Optics", IEEE Antennas Propagate. Mag, vol, 36 no 4. Aug. 1994. pp.35-42.

[10] R. G. Kouyoumjian and P. H. Pathak, "A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface", Proc.IEEE. vol. 62 no. 11, Aug.1994. pp. 1448-1461

[11] ฉัตรชัย ไวยพัฒนกร, *การวิเคราะห์สายอากาศ*, กรุงเทพ, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ.2547.

[12] C.A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & sons, 1997

[13] A.P. King, "The Radiation Characteristics of Conical Horn Antennas," Proc. IRE, Vol. 38, pp. 249-251, March 1950.

[14] R.S. Elliott, "The Far-Field Integral, Reciprocity, Directivity," Chapter 1 in *Antenna Theory and design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981.

[15] C.A. Balanis, "Wave Propagation and Polarization," Chapter 4 in *Advance Engineering Electromagnetic*, John Wiley & Sons, New York, 1989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[16] Phairote Wounchoum, "Analysis of Characteristics of Slot Array Antenna on Conducting Cylindrical Surface," Master Thesis, 2004.

[17] C. Ludwig, "Conical Reflector Antenna", Proc. IEEE. Vol. AP-20, No.2, March 1972

[18] Ghassan Yassin, Martin Robson, and Peter J. Duffett-Smith, " The Electrical Characteristics of a Conical Horn-Reflector Antenna Employing a Corrugated Horn," Proc. IEEE. Vol. 41, No. 3, March 1993.

[19] Harry E. Green, "Radiation from a Monopole Excited Cone," Proc. IEEE. Vol. AP-17, No. 6, November 1969.

[20] S. Adachi, R.G. Kouyoumjian, and R.G. Van Sickle, "The Finite Conical Antenna," Proc. IRE. December

[21] S. Adachi, "A Theoretical Analysis of Semi-Infinite Conical Antenna," Proc. IRE. November

[22] Sompol Kosulvit, "A Bidirectional Antenna Using A Probe Excited Ring," Doctoral Thesis, 2001

[23] วิสันต์ อาชาเดโชพล, "*สายอากาศและเทคนิคการติดตั้ง*", สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์

[24] ทนง โชติสรยุทธ์, "*วิทยุสมัครเล่น*", ซีเอ็ดยูเคชั่น

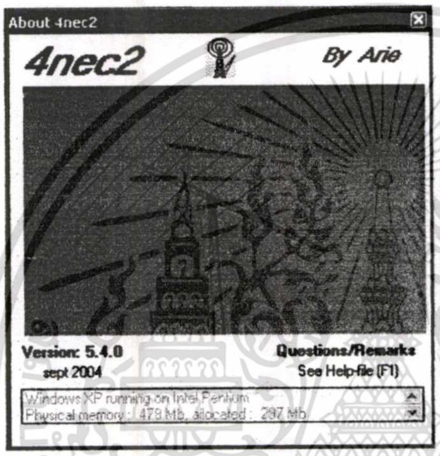
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

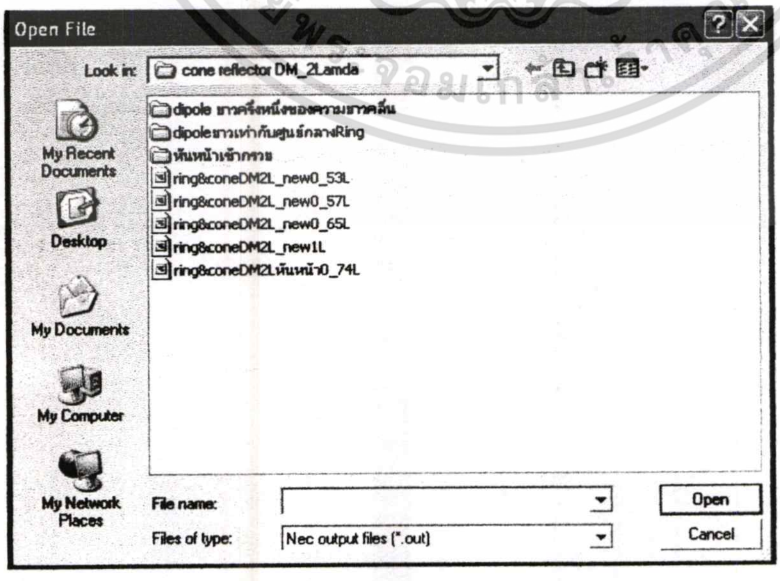
การใช้งานโปรแกรม Numerical Electromagnetic Code

Version 5.4.2

1. ทำการเปิดโปรแกรม 4nec2x เพื่อเริ่มการใช้งาน

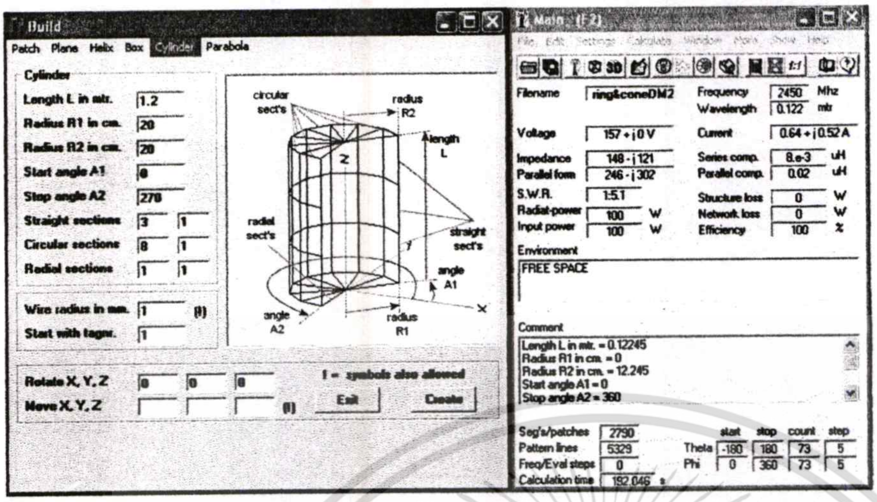


2. เปิดไฟล์ที่เราต้องการแก้ไขหรือทำการสร้างขึ้นใหม่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างหลักของการสร้างตัวสายอากาศ



ในโปรแกรมนี้สามารถสร้างสายอากาศได้หลายรูปแบบดังนี้ Patch , Plane, Helix, Box, Cylinder และ Parabora แต่ในกรณีนี้จะขอกล่าวเฉพาะ Cylinder

โดยในส่วนของพารามิเตอร์วงแหวนวงกลมที่เรากำหนดขึ้นนั้นมีค่าดังนี้

Length L in mtr. = 0.035

Radius R1 in cm. = 4.25

Radius R2 in cm. = 4.25

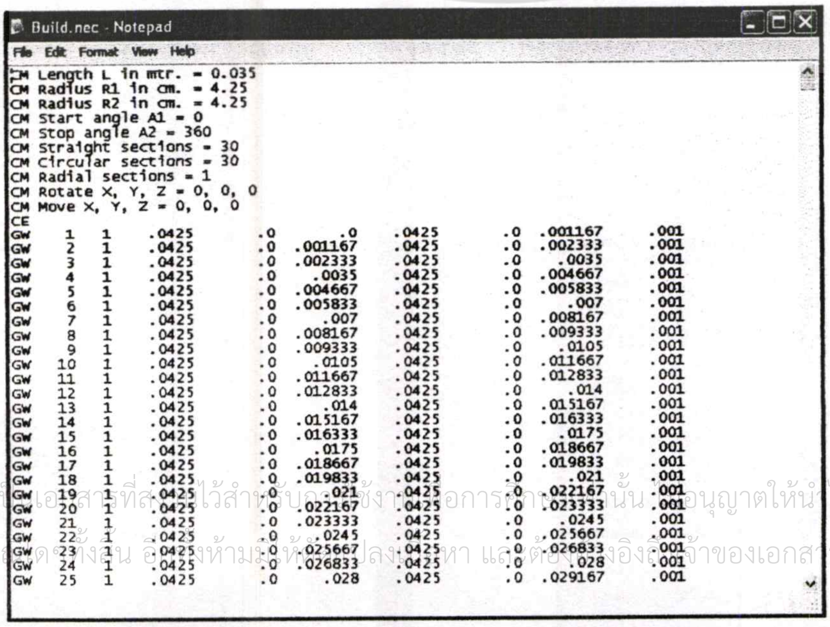
Start angle A1 = 0

Start angle A2 = 360

Straight sections = 30

Circular sections = 30

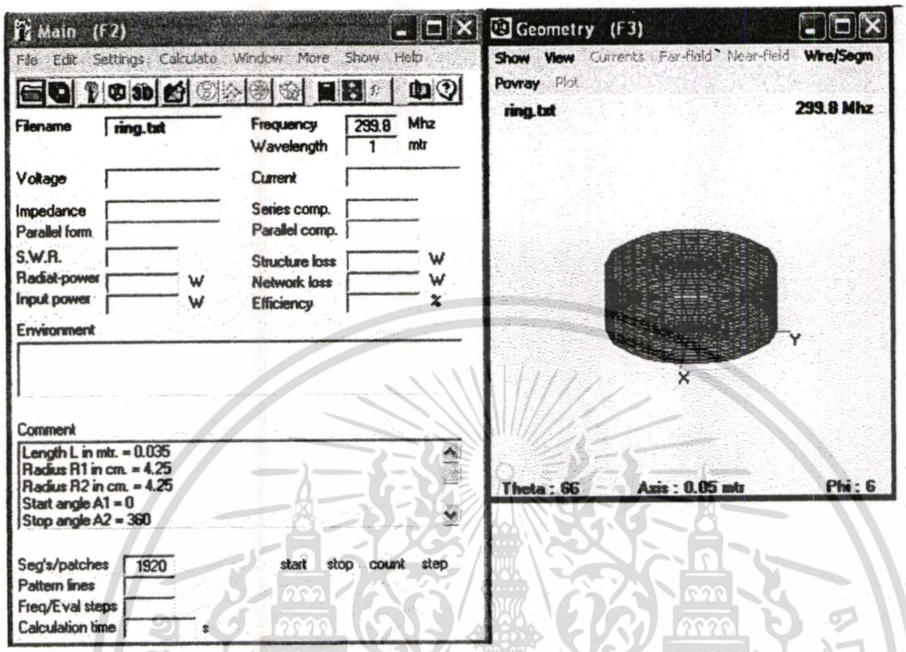
จากนั้นกดปุ่ม Create


```
CM Length L in mtr. = 0.035
CM Radius R1 in cm. = 4.25
CM Radius R2 in cm. = 4.25
CM Start angle A1 = 0
CM Stop angle A2 = 360
CM Straight sections = 30
CM Circular sections = 30
CM Radial sections = 1
CM Rotate X, Y, Z = 0, 0, 0
CM Move X, Y, Z = 0, 0, 0
CE
GW   1  1  .0425  .0  .0        .0425  .0  .001167  .001
GW   2  1  .0425  .0  .001167   .0425  .0  .002333  .001
GW   3  1  .0425  .0  .002333   .0425  .0  .0035    .001
GW   4  1  .0425  .0  .0035     .0425  .0  .004667  .001
GW   5  1  .0425  .0  .004667   .0425  .0  .005833  .001
GW   6  1  .0425  .0  .005833   .0425  .0  .007     .001
GW   7  1  .0425  .0  .007      .0425  .0  .008167  .001
GW   8  1  .0425  .0  .008167   .0425  .0  .009333  .001
GW   9  1  .0425  .0  .009333   .0425  .0  .0105    .001
GW  10  1  .0425  .0  .0105     .0425  .0  .011667  .001
GW  11  1  .0425  .0  .011667   .0425  .0  .012833  .001
GW  12  1  .0425  .0  .012833   .0425  .0  .014     .001
GW  13  1  .0425  .0  .014      .0425  .0  .015167  .001
GW  14  1  .0425  .0  .015167   .0425  .0  .016333  .001
GW  15  1  .0425  .0  .016333   .0425  .0  .0175    .001
GW  16  1  .0425  .0  .0175     .0425  .0  .018667  .001
GW  17  1  .0425  .0  .018667   .0425  .0  .019833  .001
GW  18  1  .0425  .0  .019833   .0425  .0  .021     .001
GW  19  1  .0425  .0  .021      .0425  .0  .022167  .001
GW  20  1  .0425  .0  .022167   .0425  .0  .023333  .001
GW  21  1  .0425  .0  .023333   .0425  .0  .0245    .001
GW  22  1  .0425  .0  .0245     .0425  .0  .025667  .001
GW  23  1  .0425  .0  .025667   .0425  .0  .026833  .001
GW  24  1  .0425  .0  .026833   .0425  .0  .028     .001
GW  25  1  .0425  .0  .028      .0425  .0  .029167  .001
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

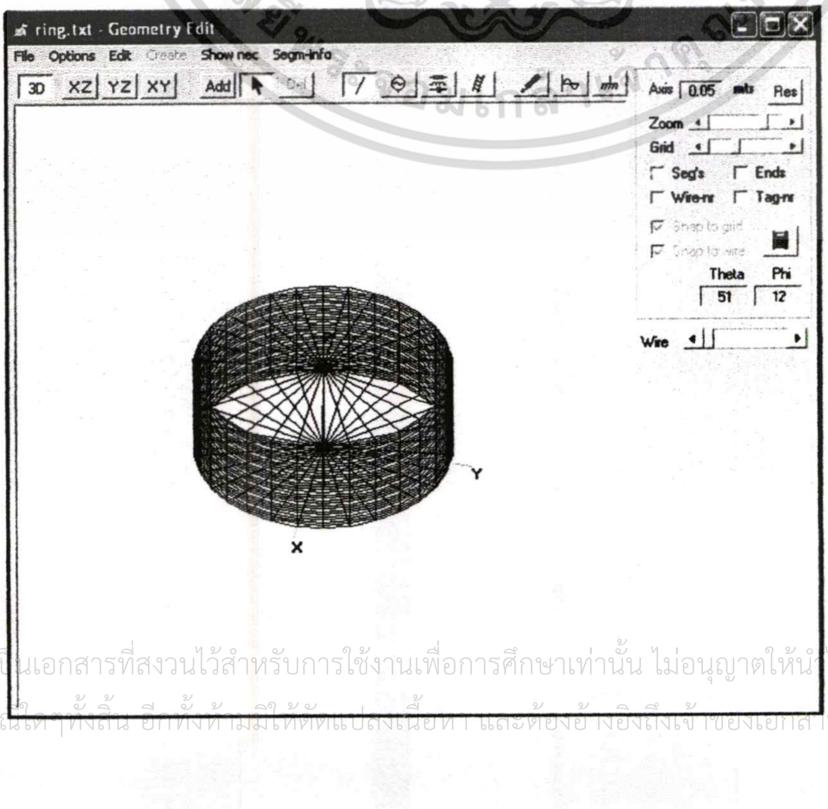
จะได้ไฟล์ที่แสดงผลในลักษณะเชิงตัวเลขจากนั้นทำการ save ชื่อไฟล์ที่เราต้องการ

4. จากนั้นทำการเปิดไฟล์ที่เราทำการ save ไว้



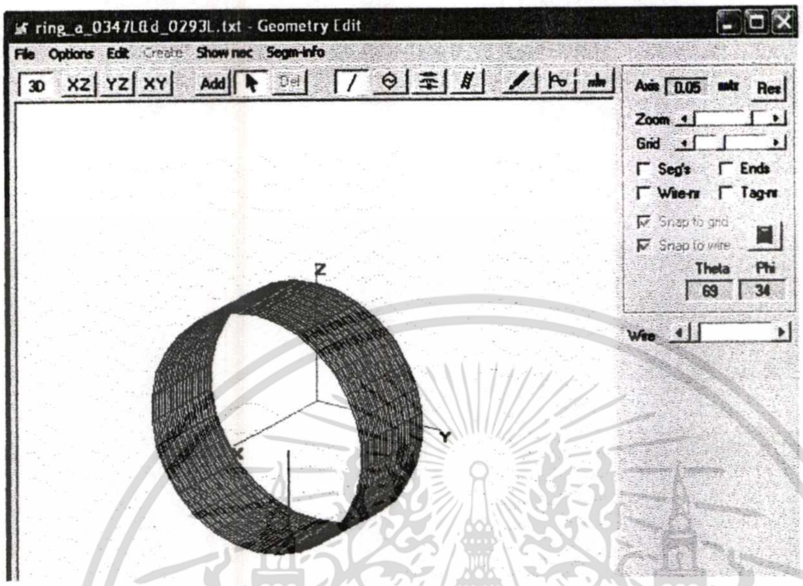
จะได้รูปทรงทางเรขาคณิตของสายอากาศวงแหวนวงกลม (F3) แต่ในหน้าจอนี้ไม่สามารถดัดแปลงตัวสายอากาศได้

5. ทำการกด F6 เพื่อดัดแปลงตัวสายอากาศ

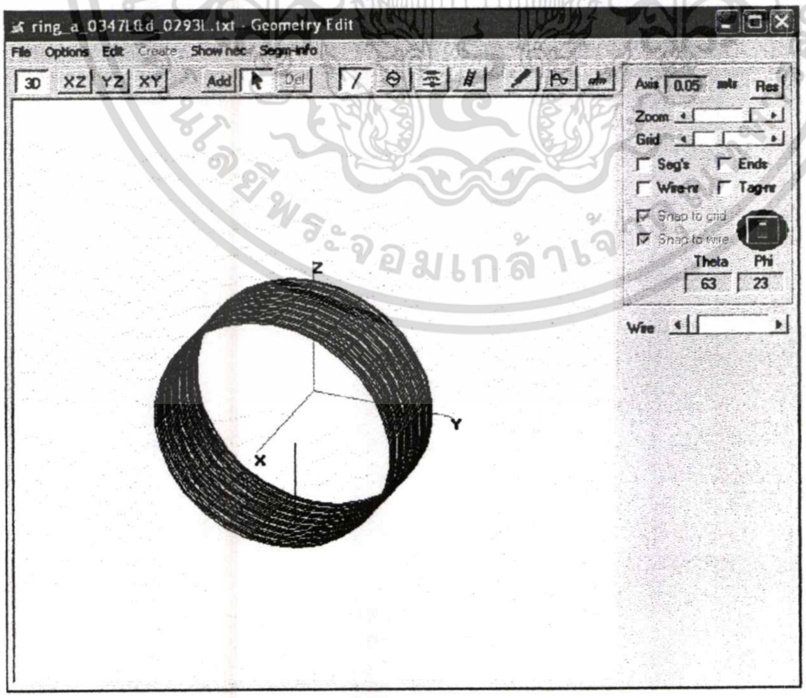


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหน้าจอนี้สามารถดัดแปลงสายอากาศได้ โดยจะทำการเพิ่มหรือลดจำนวน segments ของสายอากาศ กำหนดความถี่ที่เหมาะสม เพิ่มโพรบที่นำมาป้อนกำลังงานให้กับสายอากาศ ดังนั้นเมื่อทำการดัดแปลงรูปทรงสายอากาศแล้วจะได้ออกมาดังนี้

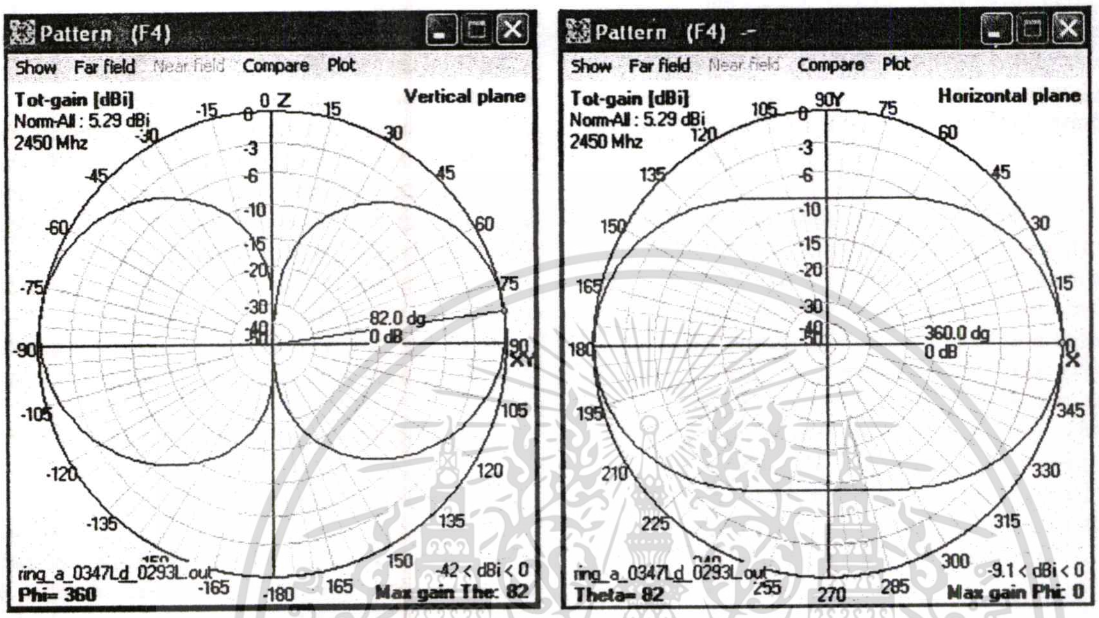


6. กดปุ่มที่มีลักษณะคล้ายเครื่องคิดเลขเพื่อทำการ run โปรแกรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จะได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

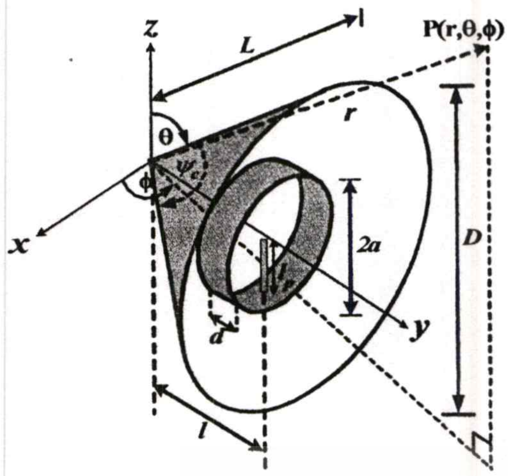


Fig. 2 A conical reflector fed by circular ring with face-directed to vertex

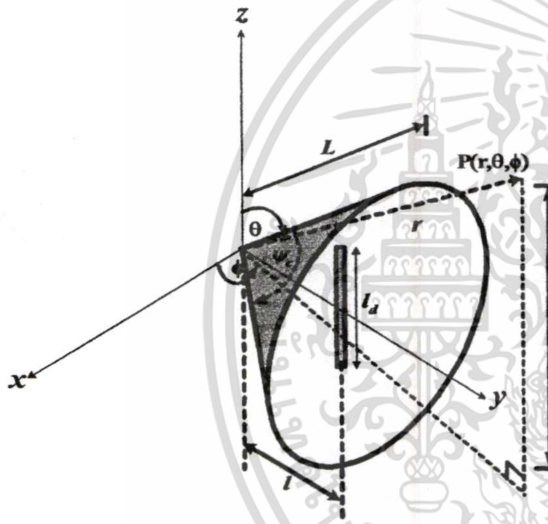


Fig. 3 A conical reflector fed by dipole

Table 1 shows the antenna parameters of all three structures. The antennas are designed to operate at 2.45 center frequency.

Table 1. Antenna parameters

Parameters	Electrical size	Physical size
ψ_c	90 deg	90 deg
D	4.00λ	48.98 cm
L	2.80λ	34.63 cm
l	2.00λ	24.49 cm
d	0.29λ	3.50 cm
a	0.35λ	4.25 cm
l_d	0.70λ	8.50 cm
l_p	0.16λ	2.00 cm

3. Antenna Characteristics

The radiation pattern of the side-directed and face-directed to vertex of the circular ring feeder and dipole feeder in E-plane and H-plane are illustrated in Fig.4 and Fig.5, respectively. It can be seen that the ring fed with the side-directed to vertex possesses the narrowest beamwidth both in E-plane and H-plane. The beamwidth of dipole fed is narrower than that of the ring fed with face-directed to vertex. These radiation patterns are corresponding to the reflected wave from the conical reflector with different feeders.

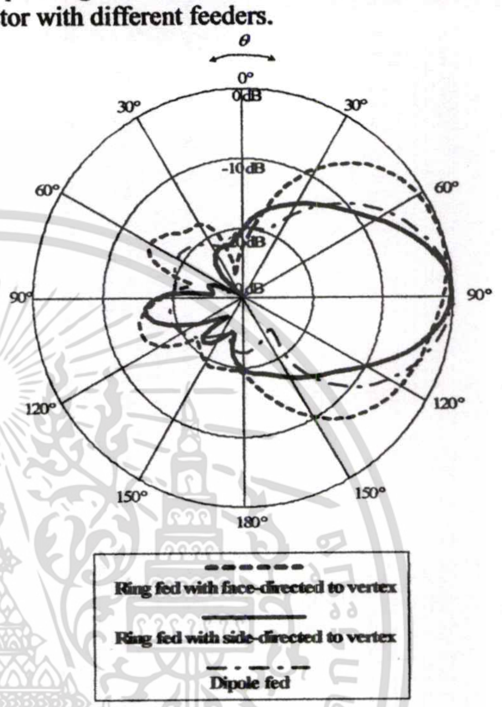


Fig. 4 E-plane pattern with $l = \lambda$

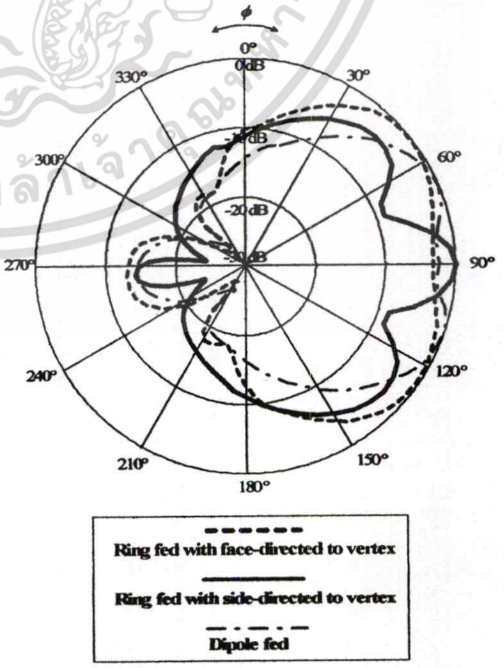


Fig. 5 H-plane pattern with $l = \lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

From the results of the radiation patterns, it is evident that the side-directed to vertex is the suitable structure to realize the narrowest beamwidth.

In order ot know the maximum beam peak of the antenna that directs to the destination, the beam peak in both elevation plane (E-plane) and azimuth plane (H-plane) are illustrated in fig.6 and Fig.7, respectively. The beam in E-plane will be slightly shifted from the broadside around 5-10 degrees. This beam shift is due to the orientation of the probe in vertical direction. The beam peak in azimuth plane is 90 degrees due to the symmetrical structure in horizontal direction.

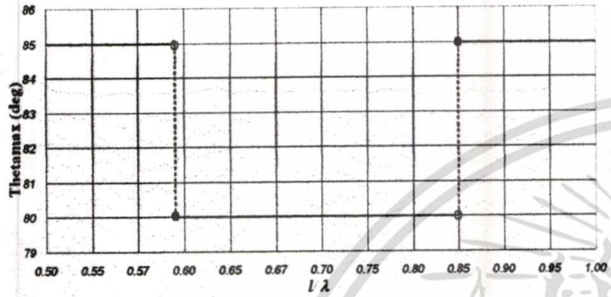


Fig. 6 Beampeak in E-Plane

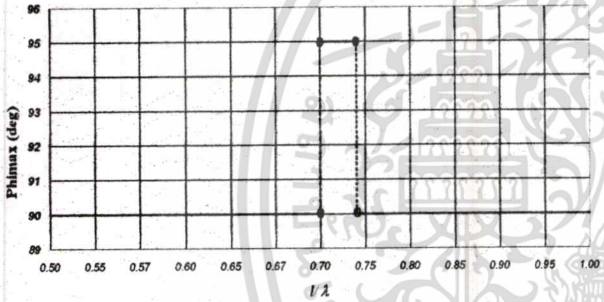


Fig. 7 Beampeak in H-Plane

The half power beamwidth of the antenna for various l us shown in Fig.8. It is obvious that the narrowest beamwidth in E-plane and H-plane will be occurred at $l=0.875\lambda$ and 0.7λ, respectively. The front to back ratio and directivity of the antenna for various l are also shown in Fig.9. It is obvious that the optimum front to back ratio and directivity will be achieved when $l=0.55\lambda$ and $l=0.50\lambda$, respectively. This result of the analysis is very useful for further antenna design.

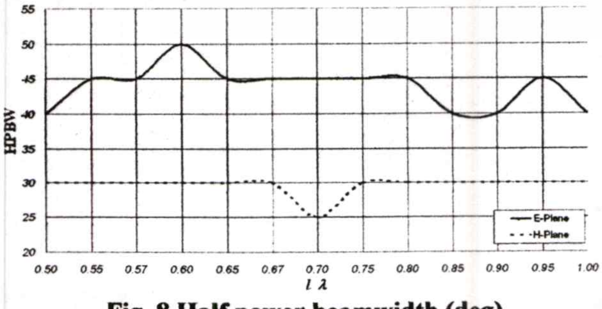


Fig. 8 Half power beamwidth (deg)

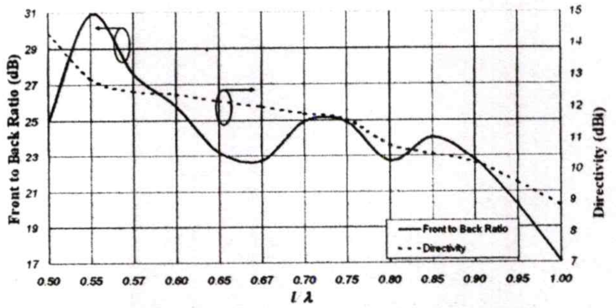


Fig. 9 Front to back ratio and directivity

4. Experiment

The antenna prototype is fabricated and its photograph is depicted in Fig.10.

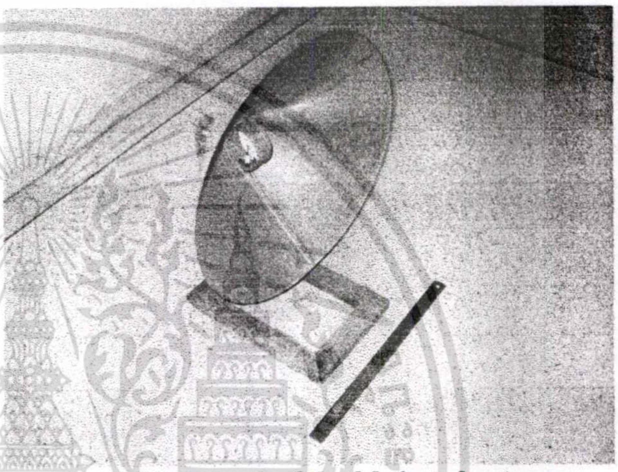


Fig. 10 Photograph of the fabricated antenna prototype

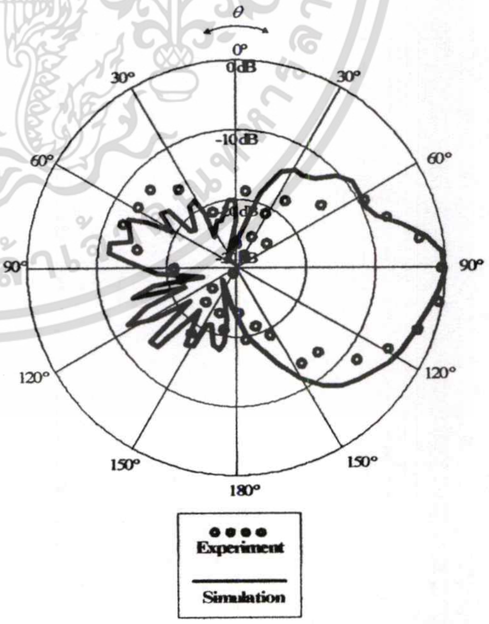


Fig. 11 Compared E-plane pattern with $D=4\lambda$, $L=2.8\lambda$, $l=0.7\lambda$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The radiation pattern in E-plane and H-plane are measured and compared with the theoretical predictions as illustrated in Fig.11 and Fig.12, respectively. It is found that the results are in good agreement. However, the discrepancy is due to the diffracted field that has pronounced effect in the experiment while this influence is ignored in the simulation. The obtained beamwidth in E-plane nad H-plane are 25 and 20 degress, respectively. The directivity is 15.6 dBi.

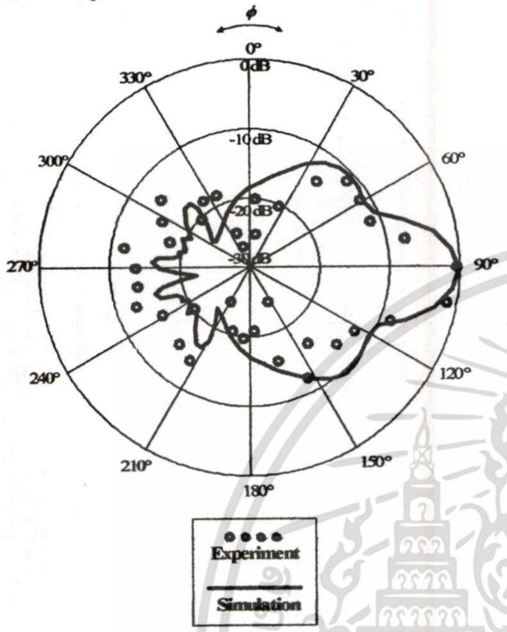


Fig. 12 Compared H-plane pattern with D=4λ L= 2.8 λ, l= 0.7λ

The input impedance and standing wave ratio of the antenna are also measured. The results are shown in Fig.13 and Fig.14, respectively. The input impedance at the operating frequency is 51.54-j9.86 Ω and the standing wave ratio is 1.22:1. The bandwidth of the SWR less than 1.5:1 is from 2290 to 2610 MHz, which is equal to 320 MHz or 13.06%.

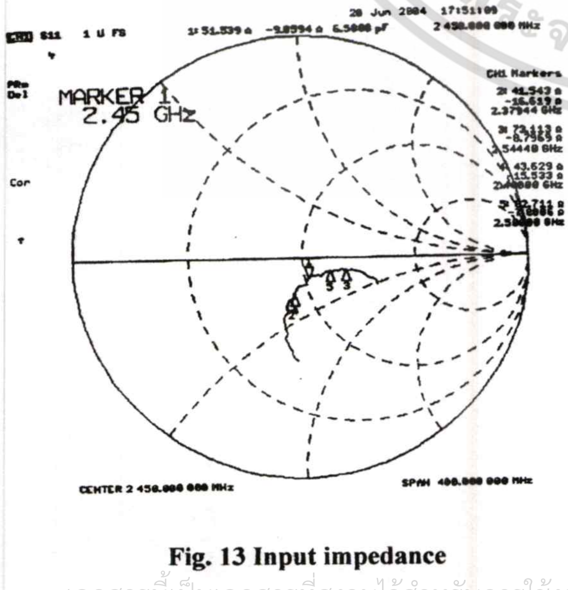


Fig. 13 Input impedance

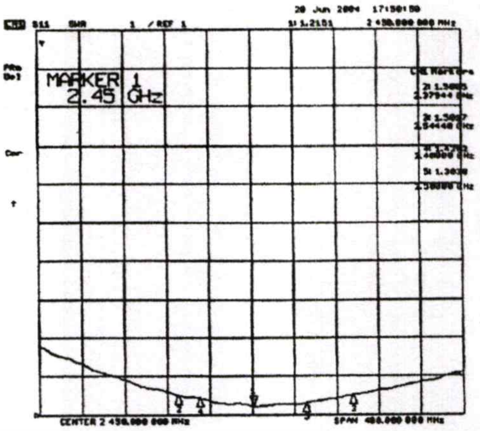


Fig. 14 SWR

5. Conclusions

A wideband antenna radiating unidirectional beam is proposed by using a conical reflector excited by a circular ring. The radiation characteristics such as radiation pattern and directivity are simulated using Numerical Electromagnetic Code based on Method of Moments. The impedance characteristics are measured to clarify the impedance bandwidth. The experimental results of radiation pattern are compared with the theoretical results. From the results of the investigation, it is obvious that the efficient directivity with wide bandwidth is achieved. This antenna is very useful in the case that the wide bandwidth applications are necessary

References

[1] C.A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1997

[2] R. J. Mailloux, "The Long Yagi-Uda Array," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-14, pp. 128-137, Mar 1996.

[3] J. D. Kraus, "A 50-Ohm Input Impedance for Helical Beam Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-25, No. 6, p. 913, Nov 1997.

[4] Y.T. Lo, D. Solomon, and W. F. Richards, "Theory and Experiment on Microstrip Antenna," *IEEE Trans. Antennas propagat.*, Vol. AP-27, No. 2, pp.137-145, Mar 1979.

[5] A. W. Love (ed.), Reflector Antennas, IEEE press, New York, 1978.

[6] C.Phongcharoenpanich, S.Lamultree, S.Kosulvit, and M.Krairiksh, "A Unidirectional Antenna using a Probe Excited Circular Ring above the Reflector," *Proceedings of the 2002 International Technical Conference on Circuits/Systems Computers and Communications*, Phuket, vol.2, pp.545-548, July 2002.

[7] Y. Obha, "On the Radiation of a Corner Reflector Finite in Width," *IEEE Trans Propagat.*, Vol. AP-11, No. 2, pp. 127-132, Mar 1963.

[8] A. W. Rudge, "Offset-Parabolic-Reflector Antennas: A Review," *Proc. IEEE*, Vol. 66, No. 12, pp. 1592-1618, December 1978.

[9] T. Li,"A Study of Spherical Reflectors as Wide-Angle Scanning Antennas," *IRE Trans. Antennas*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Propagat., Vol. AP-7, No. 3, pp. 223-226, July 1959.

[10] S.Kosulvit, **C.Phongcharoenpanich**, M.Krairiksh and T.Wakabayashi, "Design of a Bidirectional Antenna Using a Probe Excited Circular Ring," *Proceedings of the 1999 Thailand-Japan Joint Symposium on Microwaves*, Pattaya, pp. 55-59, Sept. 1999.

Gitsada Ketwan was born in Bangkok, Thailand, in 1979. He received his Bachelor degree in Telecommunication Engineering from Mahanakorn University of Technology in 2003. He became a system engineer at the Department of Calibration Laboratory, Aeronautical Radio of Thailand since 2004. Now he is studying at the Department of Telecommunication Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL).

Chuwong Phongcharoenpanich was born on Sept. 11, 1974. He received B.Eng., M.Eng. and D.Eng. from Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) in 1996, 1998 and 2001, respectively. He is currently a lecturer at the Department of Telecommunication Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) and serves as the assistant leader of Wireless Communication Laboratory, Research center for Communications and Information Technology at the same institute. His research interests are antennas for mobile and wireless communications, conformal antennas and array theory. He is a member of ECTI, IEICE and IEEE.

Sompol Kosulvit was born in Ubonratchathani. He received B.Eng. and M.Eng. from Tokai University and D.Eng. from King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang in 1971, 1976 and 2001, respectively. He is currently an assistant professor at the Department of Telecommunication Engineering, King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) and serves as the assistant reader of Wireless Communication Laboratory Research for Communications and Information Technology at the same institute. His research interests are antennas for mobile communication and microwave applications. He is a member of IEICE.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นาย กฤษฎา เกตวัลห์
วัน เดือน ปีเกิด	20 กรกฎาคม 2522 กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ประวัติการทำงาน	2546 – ปัจจุบัน ปฏิบัติงาน ณ วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด ตำแหน่ง วิศวกรระบบ สังกัด กองปรับมาตรฐานเครื่องมือวัด (มว.) สังกัด ฝ่ายพัฒนาวิศวกรรมจราจรทางอากาศ (พว.)
ส่วนงานที่รับผิดชอบ	สอบเทียบเครื่องมือวัดทางด้านความถี่สูง (High Frequency)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. Gitsada Ketwan, Chuwong Phongcharoenpanich and Sompol Kosulvit, “A Wideband Unidirectional Antenna Using Conical Reflector Fed by Circular Ring”, Proceeding of the International Conference on Electromagnetic Compatiblity, Phuket, Thailand, pp.6C-4, July 2005

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้