การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก

นาย ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2539

ISBN 974-634-941-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17004934

A THEORETICAL STUDY OF THE EFFECTS OF DIFFRACTION ON THE PERFORMANCE OF THE SINGLE PARABOLIC REFLECTOR ANTENNA SYSTEM

Mr. Supacheat Prempoonwattanasuk

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering
Department of Electrical Engineering
Graduate School
Chulalongkorn University
1996

ISBN 974-634-941-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก
โดย	นายศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก (A THEORETICAL STUDY OF THE EFFECTS OF DIFFRACTION ON THE PERFORMANCE OF THE SINGLE PARABOLIC REFLECTOR ANTENNA SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร, 260 หน้า. ISBN 974-634-941-4

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบเนื่องจากปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนที่ขอบของจานสะท้อนที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก เช่น แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล โพลาไรเซชันร่วม โพลาไรเซชันไขว้ อัตราขยาย และประสิทธิภาพต่าง ๆ และศึกษาผลการเปลี่ยนค่าปัจจัยของระบบสายอากาศที่มีต่อผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่ขอบนี้ โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตและแนวความคิดเกี่ยวกับสเปกตรัมคลื่นระนาบมาวิเคราะห์

จากผลการวิจัยพบว่า ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบของจานสะท้อนทำให้เกิดระลอกขึ้นบนการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าบนระนาบหน้าจานทั้งขนาดและเฟส ซึ่งส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนทางขนาดและตำแหน่งของจุดศูนย์ที่ตำแหน่งเชิงมุมใกล ๆ บนแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกล ส่วนที่ตำแหน่งเชิงมุมใกล้ ๆ นั้นมีการผิดเพี้ยนทางขนาดและตำแหน่งของจุดศูนย์ไม่มากนัก โดยการผิดเพี้ยนดังกล่าวเกิดขึ้นทั้งบนแบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมและโพลาไรเซชันไขว้ นอกจากนี้ยังทำให้อัตราขยายในแนวแกนของสายอากาศ ประสิทธิภาพช่องเปิด และประสิทธิภาพของสายอากาศลดลงด้วย

ผลของการเปลี่ยนค่าปัจจัยของระบบสายอากาศมีผลต่อผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยจากการวิจัยพบว่า เมื่อขนาดทางไฟฟ้าและระดับความเรียวที่ขอบของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกทั้งแบบสมมาตรและไม่สมมาตรเพิ่มขึ้น ผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลง เช่น ขนาดระลอกที่เกิดขึ้นบนการกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าทั้งขนาดและเฟสลดลง การผิดเพี้ยนทางขนาดและตำแหน่งของจุดศูนย์บนแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเชิงมุมไกลขึ้น และการลดลงของอัตราขยายในแนวแกนของสายอากาศ ประสิทธิภาพช่องเปิด และประสิทธิภาพของสายอากาศมีแนวโน้มที่ลดลง ส่วนการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของระยะโฟกัสกับขนาดสายอากาศของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตรนั้น เมื่อค่าอัตราส่วนระยะโฟกัสกับขนาดสายอากาศมีค่าลดลงทำให้ผลกระทบของการเลี้ยวเบนมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน และในกรณีระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตรได้เปลี่ยนมุมเล็งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นพบว่า การลดลงของประสิทธิภาพช่องเปิดและอัตราขยายในแนวแกนของสายอากาศมีแนวโน้มลดลงเมื่อมุมเล็งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น Ψ_f มากขึ้น ส่วนการลดลงของประสิทธิภาพของสายอากาศนั้นมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ โดยมีการลดลงมากที่สุดอยู่ที่มุมเล็งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น Ψ_f ค่าหนึ่ง

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ..... **ลายมือชื่อนิสิต** .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ..... **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา** .....

ปีการศึกษา 2539 ..... **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** .....

C715863 MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: REFLECTOR ANTENNA / DIFFRACTION / GEOMETRICAL OPTICS / GEOMETRICAL THEORY OF DIFFRACTION
SUPACHEAT PREMPOONWATTANASUK : A THEORETICAL STUDY OF THE EFFECTS OF DIFFRACTION ON THE PERFORMANCE OF THE SINGLE PARABOLIC REFLECTOR ANTENNA SYSTEM. THESIS ADVISOR : CHATCHAI WAIYAPATTANAKORN, Ph.D. 260 pp.ISBN 974-634-941-4

This research has the objective of studying the effects of diffraction at the reflector rim on the performance of the single parabolic reflector antenna system eg. the far-field pattern, co-polarization, cross-polarization, gain and efficiency using a GTD based technique and the planewave spectrum concept in the analysis.

It is found that the effect of edge diffraction causes ripples on the amplitude and phase distribution of the aperture field which result in lobe structure and null position distortion of the far-out sidelobes. For the near-in sidelobes the distortion is not significant. The distortion appears on both the co-polar and cross-polar gain patterns. Besides the axial gain, aperture efficiency and antenna efficiency all deteriorate.

The variation of the antenna system's parameters affects the influence from edge diffraction. It is shown that as the electrical size and edge taper increase, the edge diffraction effects decrease. This is evident from the reduction of ripples on the amplitude and phase distributions of the aperture field. In addition the lobe structure and null position distortion will occur at further angular position and the reduction of the axial gain, aperture efficiency and antenna efficiency tend to decrease. When the f/D ratio decreases, the edge effects also decrease. In the case of the offset reflector antenna with varying feed angle, the reduction of the axial gain and aperture efficiency decrease when the feed angle increases. The plot of the antenna efficiency reduction against the feed angle is similar to a skewed bell shape.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่อนิสิต**
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**
ปีการศึกษา 2539	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม ศาสตราจารย์ ดร. มงคล เดชนครินทร์ และอาจารย์ ดร.ทับทิม อ่างแก้ว ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการทำวิจัย และขอขอบคุณโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ซึ่งเป็นโครงการความร่วมมือในการพัฒนาการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ความสนับสนุนทางการเงินบางส่วนกับงานวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบพระคุณบิดามารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเรียนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์ ..... ธ

บทที่ 1. บทนำ 1
ความเป็นมา 1
วัตถุประสงค์ 4
ขอบเขตของการวิจัย 4
ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย 5
ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย 5
บทที่ 2. ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก 6
ความนำ 6
ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนคลื่น 6
ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก 11
คุณสมบัติทางเรขาคณิตและค่าปัจจัยที่กำหนดโครงสร้างของพื้นผิวสะท้อนรูปพาราโบลิก 11
ค่าปัจจัยทางเรขาคณิตของพื้นผิวสะท้อนรูปพาราโบลิก 14
ค่าปัจจัยทางเรขาคณิตที่ขอบของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร 23
ค่าปัจจัยทางเรขาคณิตที่ขอบของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร 25
บทที่ 3. กรรมวิธีที่ใช้ศึกษาผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก 28
ความนำ 28
แนวทางในการวิเคราะห์ 28
สายอากาศป้อนกำลังคลื่น 31
กรรมวิธีแสงเชิงเรขาคณิต 40
ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต 61
กรรมวิธีกระแสสมมูลที่ขอบ 106
ขีดจำกัดเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก 110
แบบรูปการแผ่พลังงาน 111

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

โพลาไรเซชันไขว้และโพลาไรเซชันร่วม 122
อัตราขยายและประสิทธิภาพต่าง ๆ 124
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ 136
การตรวจสอบขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ใช้ 136
ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวแบบสมมาตร 139
ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบที่มีต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบสายอากาศ 139
ผลของการเปลี่ยนค่าปัจจัยต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตรที่มีต่อผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบ 147
ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวแบบไม่สมมาตร 171
ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบที่มีต่อคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบสายอากาศ 172
ผลของการเปลี่ยนค่าปัจจัยต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตรที่มีต่อผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบ 180
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 206
สรุปผลการวิจัย 206
ข้อเสนอแนะ 207
รายการอ้างอิง 209
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์เวกเตอร์ ฟังก์ชันเบสเซล และเอกลักษณ์ของฟังก์ชันเบสเซล 213
ภาคผนวก ข. รัศมีความโค้งหลักของรังสีสะท้อนและรังสีการเลี้ยวเบน 227
ภาคผนวก ค. การหากรีนฟังก์ชันของสมการเชิงอนุพันธ์ 243
ภาคผนวก ง. ความสัมพันธ์ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง z อยู่ในรูปเอกซ์โพเนนเชียลในระบบพิกัดทรงกระบอก 251
ภาคผนวก จ. การประมาณค่าฟังก์ชันทรานซิชัน 254
ภาคผนวก ฉ. การตรวจสอบอัลกอริทึมของกรรมวิธีเชิงเลข 256
ประวัติผู้เขียน 260

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	ข้อดีและข้อเสียของกรรมวิธีและทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนคลื่น	29
3.2	อัตราขยายของระบบสายอากาศภาคพื้นดินตามมาตรฐานที่กำหนดโดยสถาบัน CCIR (Recommendation 465-2)	124
4.1	ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่มีต่ออัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตรขนาด 10 เท่าของความยาวคลื่น และใช้สายอากาศชนิดเอกรูปเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น	146
4.2	ผลของการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของขนาดของจานสะท้อนต่อความยาวคลื่นที่ใช้งานกับอัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร (ในกรณีที่ไม่คิดผลจากสนามการเลี้ยวเบนที่ขอบ)	155
4.3	ผลของการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของขนาดของจานสะท้อนต่อความยาวคลื่นที่ใช้งานกับอัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร (ในกรณีที่คิดผลจากสนามการเลี้ยวเบนที่ขอบ)	155
4.4	ผลของการเปลี่ยนระดับความเรียวที่ขอบกับอัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร (ไม่คิดผลจากสนามการเลี้ยวเบนที่ขอบ)	163
4.5	ผลของการเปลี่ยนระดับความเรียวที่ขอบกับอัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร (คิดผลจากสนามการเลี้ยวเบนที่ขอบ)	163
4.6	ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่มีต่ออัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตรขนาด 26.67 เท่าของความยาวคลื่น และใช้สายอากาศชนิดเอกรูปเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น	180
4.7	ผลของการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของขนาดของจานสะท้อนต่อความยาวคลื่นที่ใช้งานกับอัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร (ในกรณีที่ไม่คิดผลจากสนามการเลี้ยวเบนที่ขอบ)	189
4.8	ผลของการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนของขนาดของจานสะท้อนต่อความยาวคลื่นที่ใช้งานกับอัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร (ในกรณีที่คิดผลจากสนามการเลี้ยวเบนที่ขอบ)	189
4.9	ผลของการเปลี่ยนระดับความเรียวที่ขอบกับอัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร (ไม่คิดผลจากสนามการเลี้ยวเบนที่ขอบ)	197
4.10	ผลของการเปลี่ยนระดับความเรียวที่ขอบกับอัตราขยายในแนวแกนและประสิทธิภาพต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร (คิดผลจากสนามการเลี้ยวเบนที่ขอบ)	197

สารบัญรูป

รูป		หน้า
1.1	การรบกวนจากโครงข่ายดาวเทียมและโครงข่ายไมโครเวฟภาคพื้นดิน	1
2.1	การจำแนกชนิดของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนคลื่น	7
2.2	ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนคลื่นที่นำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในระบบสื่อสารด้วยไมโครเวฟ	8
2.3	ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นที่ขอบของจานสะท้อนของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนคลื่น	10
2.4	คุณสมบัติทางเรขาคณิตของพื้นผิวสะท้อนรูปพาราโบลิก	11
2.5	ค่าปัจจัยต่าง ๆ ของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร	13
2.6	ค่าปัจจัยทางเรขาคณิตของพื้นผิวโค้งใด ๆ	14
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งหลักของพื้นผิวกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับพื้นผิว	20
2.8	ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตรและค่าปัจจัยทางเรขาคณิตที่ขอบของจานสะท้อน	24
2.9	ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตรและค่าปัจจัยทางเรขาคณิตที่ขอบของจานสะท้อน	25
3.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์หาขีดจำกัดเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก	30
3.2	สายอากาศชนิดฮอยเกนหรือแหล่งกำเนิดแบบฮอยเกน	35
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดของจานสะท้อน xyz กับระบบพิกัดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $x'y'z'$	36
3.4	ลำรังสีที่ใช้อธิบายความเข้มของคลื่นที่ตำแหน่งใด ๆ โดยหลักการอนุรักษ์พลังงานภายในลำรังสีเล็ก ๆ	41
3.5	การพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของรังสีใด ๆ จากรัศมีความโค้งของรังสี	48
3.6	ลำรังสีที่ใช้แทนการเคลื่อนที่ไปของคลื่นในตัวกลางเอกพันธุ์ที่ไม่มีการสูญเสีย	50
3.7	ทิศทางและโพลาไรเซชันของสนามไฟฟ้าที่ตกกระทบและที่สะท้อนจากจุด Q_R บนพื้นผิวสะท้อน	52
3.8	ลำรังสีที่ใช้แทนหน้าคลื่นและการเคลื่อนที่ไปของสนามตกกระทบและสนามสะท้อนที่พื้นผิวสะท้อนในตัวกลางเอกพันธุ์ที่ไม่มีการสูญเสีย	55
3.9	ค่าปัจจัยทางเรขาคณิตต่าง ๆ บนพื้นผิวสะท้อนเพื่อใช้หารัศมีความโค้งหลักของหน้าคลื่นสะท้อนที่จุดสะท้อน	57
3.10	การหาสนามไฟฟ้าบนระนาบหน้าจานของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิก	58
3.11	แนวรังสีของสนามเนื่องจากการเลี้ยวเบนที่ขอบเมื่อแนวรังสีของสนามที่มาตกกระทบทำมุม β กับแกนที่สัมผัสกับขอบในบริเวณที่เป็นตัวกลางเอกพันธุ์ตามเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต	61
3.12	ลำรังสีของสนามไฟฟ้าตกกระทบและสนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบนที่จุดขอบ Q_D	62
3.13	รูปลิ่มตัวนำมีความยาวอนันต์ตามแกน z ถูกกระตุ้นด้วยไดโพลไฟฟ้าขนาดสั้นมาก ($L << \lambda$)	64
3.14	เส้นทาง C ในระนาบเชิงซ้อน h และในระนาบเชิงซ้อน α	70
3.15	เส้นทาง steepest descent ในระนาบเชิงซ้อน α	71
3.16	ไดโพลไฟฟ้าขนาดสั้นมากเมื่อวางอยู่ที่ตำแหน่งไกล ๆ	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
3.17	เส้นทาง L และ L' ของฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งในระนาบเชิงซ้อน w	75
3.18	เส้นทาง steepest descent $SDP_{\pm\pi}$ เส้นทางวงปิด L_T และเส้นทาง L และ L' ของฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่ง	77
3.19	ขอบเขตเงาของการตกกระทบและการสะท้อน	82
3.20	ขนาดและเฟสของฟังก์ชันทรานซิชัน	84
3.21	ความสัมพันธ์ของ N^+, N^-, n และ $\phi \pm \phi'$ สำหรับรูปลิ่มที่ $1 \le n \le 2$	84
3.22	ระยะตัดกันของรังสีของรูปลิ่มตัวนำที่มีขอบเป็นสันตรงยาวอนันต์ตามทฤษฎีภาพเสมือน	88
3.23	ระบบพิกัดที่ขอบของรังสีตกกระทบและรังสีเลี้ยวเบนสำหรับรูปลิ่มตัวนำ	92
3.24	เวกเตอร์พื้นผิวที่จุดขอบ $\hat{t}, \hat{e}, \hat{n}$ ที่ใช้หามุมและทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกันของระบบพิกัดที่ขอบ	95
3.25	กรณีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการตกกระทบที่ขอบของรูปลิ่มตัวนำ	96
3.26	กรณีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยวเบนที่ขอบของรูปลิ่มตัวนำ	96
3.27	บริเวณเล็ก ๆ รอบจุดขอบโค้งที่จุดขอบของจานสะท้อน	98
3.28	ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร	99
3.29	ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร	105
3.30	แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าและแม่เหล็กสมมูลแบบเส้นที่วางตัวตามแนวสัมผัสกับขอบ	106
3.31	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของระบบสายอากาศ	111
3.32	การแทนคลื่นที่มีหน้าคลื่นใด ๆ ด้วยกลุ่มของคลื่นระนาบในทิศทางต่าง ๆ	112
3.33	สนามไฟฟ้าบนระนาบหน้าจาน S_a	112
3.34	การหาแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลจากสนามบนระนาบหน้าจานของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร	120
3.35	การหาแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลจากสนามบนระนาบหน้าจานของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร	121
3.36	ระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกและระนาบหน้าจาน	125
3.37	การหากำลังที่จานสะท้อนรับได้โดยพิจารณาจากโดเมนภาพฉายของจานสะท้อน	126
4.1	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร (สายอากาศชนิดไดโพลขนาดสั้นมากเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น) ที่มา : M. S. A. Sanad และ L. Shafi (1986)	137
4.2	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร (สายอากาศชนิดฮอยเกนเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น) ที่มา : M. S. A. Sanad และ L. Shafi (1986)	137

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.3	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร (สายอากาศชนิดไดโพลขนาดสั้นมากเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น) ตามขั้นตอนการวิเคราะห์ดังรูป 3.1	138
4.4	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร (สายอากาศชนิดฮอยเกนเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น) ตามขั้นตอนการวิเคราะห์ดังรูป 3.1	138
4.5	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจาน เมื่อไม่คิดสนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบน	139
4.6	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจาน เมื่อคิดสนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบน	140
4.7	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว x บนระนาบหน้าจาน เมื่อคิดสนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบน	140
4.8	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$	141
4.9	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน x $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$	142
4.10	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$	143
4.11	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 45^\circ$ $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$	143
4.12	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 90^\circ$ $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$	144
4.13	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันไขว้ในระนาบ $\phi = 45^\circ$ $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$ (ใช้สายอากาศชนิดไดโพลขนาดสั้นมากเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น)	144
4.14	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว x บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$	145
4.15	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันไขว้ในระนาบ $\phi = 45^\circ$ $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$ (ใช้สายอากาศชนิดเอกรูปเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น)	146
4.16	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 6.67,\ f/D = 0.42)$	147
4.17	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 6.67,\ f/D = 0.42)$	148
4.18	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$	148
4.19	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.42)$	149
4.20	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	150

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.21	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	151
4.22	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 40,\ f/D = 0.42)$	151
4.23	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 40,\ f/D = 0.42)$	152
4.24	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 80,\ f/D = 0.42)$	153
4.25	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 80,\ f/D = 0.42)$	154
4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในแนวแกนที่ลดลงกับอัตราส่วน D/λ	156
4.27	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพที่ลดลงกับอัตราส่วน D/λ	156
4.28	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดเอกรูป (ระดับความเรียวที่ขอบ -2.63 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	157
4.29	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดเอกรูป (ระดับความเรียวที่ขอบ -2.63 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	158
4.30	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดฮอยเกน (ระดับความเรียวที่ขอบ -5.27 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	158
4.31	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดฮอยเกน (ระดับความเรียวที่ขอบ -5.27 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	159
4.32	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสี่ (ระดับความเรียวที่ขอบ -28.37 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	160
4.33	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสี่ (ระดับความเรียวที่ขอบ -28.37 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	161
4.34	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์ก~ $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	161
4.35	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังห้า (ระดับความเรียวที่ขอบ -41.24 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 26.67,\ f/D = 0.42)$	162
4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในแนวแกนที่ลดลงกับระดับความเรียวที่ขอบ	164
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพที่ลดลงกับระดับความเรียวที่ขอบ	164
4.38	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสอง (ระดับความเรียวที่ขอบ -28.79 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 10,\ f/D = 0.32)$	165

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป หน้า

4.39 แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดชนิดโคไซน์กำลังสอง (ระดับความเรียวที่ขอบ -28.79 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ f/D = 0.32$) 166

4.40 การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสอง (ระดับความเรียวที่ขอบ -14.06 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ f/D = 0.44$) 166

4.41 แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดชนิดโคไซน์กำลังสอง (ระดับความเรียวที่ขอบ -14.06 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ f/D = 0.44$) 167

4.42 การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสอง (ระดับความเรียวที่ขอบ -9.25 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ f/D = 0.54$) 168

4.43 แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดชนิดโคไซน์กำลังสอง (ระดับความเรียวที่ขอบ -9.25 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ f/D = 0.54$) 169

4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพต่าง ๆ ของสายอากาศกับ f/D (ไม่คิดผลจากการเลี้ยวเบน) 169

4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพต่าง ๆ ของสายอากาศกับ f/D (คิดผลจากการเลี้ยวเบน) 170

4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในแนวแกนของสายอากาศกับ f/D 170

4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของประสิทธิภาพต่าง ๆ ของสายอากาศกับ f/D 171

4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของอัตราขยายในแนวแกนของสายอากาศกับ f/D 171

4.49 การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจาน เมื่อไม่คิดสนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบน 172

4.50 การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว x บนระนาบหน้าจาน เมื่อไม่คิดสนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบน 173

4.51 การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจาน เมื่อไม่คิดสนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบน 173

4.52 การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว x บนระนาบหน้าจาน เมื่อไม่คิดสนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบน 174

4.53 การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ($D/\lambda = 26.67$) 174

4.54 การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน x ($D/\lambda = 26.67$) 175

4.55 การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว x บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ($D/\lambda = 26.67$) 176

4.56 แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ($D/\lambda = 26.67$) 177

4.57 แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 45^\circ$ ($D/\lambda = 26.67$) 177

4.58 แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ($D/\lambda = 26.67$) 178

4.59 แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันไขว้ในระนาบ $\phi = 45^\circ$ ($D/\lambda = 26.67$) 179

4.59 แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันไขว้ในระนาบ $\phi = 90^\circ$ ($D/\lambda = 26.67$) 179

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.61	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 6.67,\ f/D_p = 0.42)$	181
4.62	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42)$	182
4.63	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 6.67,\ f/D_p = 0.42)$	182
4.64	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42)$	183
4.65	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 26.67,\ f/D_p = 0.42)$	184
4.66	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 26.67,\ f/D_p = 0.42)$	185
4.67	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 40,\ f/D_p = 0.42)$	185
4.68	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 40,\ f/D_p = 0.42)$	186
4.69	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y $(D/\lambda = 80,\ f/D_p = 0.42)$	187
4.70	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ $(D/\lambda = 80,\ f/D_p = 0.42)$	188
4.71	ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของอัตราขยายในแนวแกนกับอัตราส่วน D/λ	190
4.72	ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของประสิทธิภาพกับอัตราส่วน D/λ	190
4.73	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดเอกรูป (ระดับความเรียวที่ขอบบน -1.73 dB ขอบล่าง 0.86 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42)$	191
4.74	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดเอกรูป (ระดับความเรียวที่ขอบบน -1.73 dB ขอบล่าง 0.86 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42)$	192
4.75	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสี่ (ระดับความเรียวที่ขอบบน -5.13 dB ขอบล่าง -3.80 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42)$	192
4.76	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสี่ (ระดับความเรียวที่ขอบบน -5.13 dB ขอบล่าง -3.80 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น $(D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42)$	193

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
4.77	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังแปด (ระดับความเรียวที่ขอบบน -8.53 dB ขอบล่าง -8.47 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42$)	194
4.78	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังแปด (ระดับความเรียวที่ขอบบน -8.53 dB ขอบล่าง -8.47 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42$)	195
4.79	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสิบหก (ระดับความเรียวที่ขอบบน -15.32 dB ขอบล่าง -17.79 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42$)	195
4.80	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสิบหก (ระดับความเรียวที่ขอบบน -15.32 dB ขอบล่าง -17.79 dB) เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ f/D_p = 0.42$)	196
4.81	ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของอัตราขยายในแนวแกนกับระดับความเรียวที่ขอบ	198
4.82	ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของประสิทธิภาพกับระดับความเรียวที่ขอบ	198
4.83	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสี่ เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ \Psi_f = 28^\circ$)	199
4.84	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดชนิดโคไซน์กำลังสี่ เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ \Psi_f = 28^\circ$)	200
4.85	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสี่ เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ \Psi_f = 34^\circ$)	200
4.86	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดชนิดโคไซน์กำลังสี่ เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ \Psi_f = 34^\circ$)	201
4.87	การกระจายความเข้มของสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานตามแนวแกน y ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสี่ เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ \Psi_f = 46^\circ$)	202
4.88	แบบรูปอัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วมในระนาบ $\phi = 0^\circ$ ใช้สายอากาศชนิดชนิดโคไซน์กำลังสี่ เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ($D/\lambda = 10,\ \Psi_f = 46^\circ$)	203
4.89	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพต่าง ๆ ของสายอากาศกับ Ψ_f (ไม่คิดผลจากการเลี้ยวเบน)	203
4.90	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพต่าง ๆ ของสายอากาศกับ Ψ_f (คิดผลจากการเลี้ยวเบน)	204
4.91	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายในแนวแกนของสายอากาศกับ Ψ_f	204
4.92	ความสัมพันธ์ระหว่างการลดลงของประสิทธิภาพต่าง ๆ ของสายอากาศกับ Ψ_f	205

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป หน้า

ก.1 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 214
ก.2 ระบบพิกัดทรงกระบอก 215
ก.3 ระบบพิกัดทรงกลม 216
ก.4 พื้นผิว S กับเส้นวงปิด C 218
ก.5 เส้นทางการอินทิเกรตของฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งในระนาบเชิงซ้อน w 224
ก.6 เส้นทาง L ของฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งในระนาบเชิงซ้อน w' 225
ก.7 เส้นทาง L' ของฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งในระนาบเชิงซ้อน w' 226
ข.1 ลำรังสีที่ใช้แทนการเคลื่อนที่ไปของคลื่นในตัวกลางเอกพันธุ์ที่ไม่มีการสูญเสีย 227
ข.2 การประมาณเฟสบนหน้าคลื่นที่จุด $(x_1, x_2, z = 0)$ 228
ข.3 ลำรังสีตกกระทบและค่าปัจจัยทางเรขาคณิตของพื้นผิว $\sum$ 229
ข.4 เฟสของลำรังสีตกกระทบที่จุดบนพื้นผิว $\sum$ 230
ข.5 แกนของลำรังสีสะท้อน 232
ข.6 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่บอกตำแหน่งตามขวางในระบบพิกัดเดิมกับในระบบพิกัดใหม่ 238
ข.7 ลำรังสีตกกระทบ ลำรังสีเลี้ยวเบน และค่าปัจจัยทางเรขาคณิตของขอบ Γ 239
ค.1 บริเวณปิด V ที่ถูกล้อมรอบด้วยพื้นผิว S 243
ฉ.1 การแบ่งส่วนย่อยของสนามบนระนาบหน้าจานเพื่อคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลโดยวิธีการของซิมป์สัน ซึ่งแบ่งส่วนย่อยของการอินทิเกรตเป็น $\lambda/2$, $\lambda/4$, $\lambda/6$ และ $\lambda/8$ 256
ฉ.2 การประมาณการอินทิเกรต 2 ชั้นเพื่อคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลโดยวิธีการของซิมป์สัน ซึ่งแบ่งส่วนย่อยเท่ากับ $\lambda/2$ (- - - - - - -) เปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นตรง (———) 257
ฉ.3 การประมาณการอินทิเกรต 2 ชั้นเพื่อคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลโดยวิธีการของซิมป์สัน ซึ่งแบ่งส่วนย่อยเท่ากับ $\lambda/4$ (- - - - - - -) เปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นตรง (———) 257
ฉ.4 การประมาณการอินทิเกรต 2 ชั้นเพื่อคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลโดยวิธีการของซิมป์สัน ซึ่งแบ่งส่วนย่อยเท่ากับ $\lambda/6$ (- - - - - - -) เปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นตรง (———) 258
ฉ.5 การประมาณการอินทิเกรต 2 ชั้นเพื่อคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลโดยวิธีการของซิมป์สัน ซึ่งแบ่งส่วนย่อยเท่ากับ $\lambda/8$ (- - - - - - -) เปรียบเทียบกับผลเฉลยแม่นตรง (———) 258

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
f	ระยะโฟกัสของจานสะท้อนรูปพาราโบลิก
D	เส้นผ่านศูนย์กลางของภาพฉายจานสะท้อนรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร
D_p	เส้นผ่านศูนย์กลางของภาพฉายจานสะท้อนรูปพาราโบลิกแบบสมมาตรก่อนถูกตัดด้วยระนาบ
f/D	อัตราส่วนระหว่างระยะโฟกัสกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาพฉายจานสะท้อนรูปพาราโบลิก
f/D_p	อัตราส่วนระหว่างระยะโฟกัสกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาพฉายจานสะท้อนรูปพาราโบลิกก่อนถูกตัดด้วยระนาบ
Ψ_o	มุมกว้างของจานสะท้อนรูปพาราโบลิก
h	ระยะออฟเซต
Ψ_U	มุมกว้างของขอบบนในระนาบออฟเซตของจานสะท้อนรูปพาราโบลิก
Ψ_L	มุมกว้างของขอบล่างในระนาบออฟเซตของจานสะท้อนรูปพาราโบลิก
Ψ_f	มุมเล็งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น
Ψ_C	มุมเล็งที่ศูนย์กลางของภาพฉายของจานสะท้อน
$\vec{k}_n$	เวกเตอร์ความโค้งในแนวตั้งฉาก
$\vec{k}_g$	เวกเตอร์ความโค้งในแนวสัมผัส
k_n	ความโค้งในแนวตั้งฉาก
k_g	ความโค้งในแนวสัมผัส
M	ความโค้งเฉลี่ย
K	ความโค้งแบบเกาส์
$\hat{u}_1, \hat{u}_2$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางหลักของพื้นผิว
R_1, R_2	รัศมีความโค้งหลักของพื้นผิว
R_E	รัศมีความโค้งหลักของขอบที่จุดขอบ
$\hat{e}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่จุดขอบ
$\hat{n}_e$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับขอบที่จุดขอบมีทิศพุ่งออกจากศูนย์กลางความโค้ง
$\hat{b}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากคู่กับขอบที่จุดขอบ
$\bar{E}^{feed}$	สนามไฟฟ้าจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น
$f_E(\theta'')$	สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการวัดรอบแกนของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า
$f_H(\theta'')$	สนามไฟฟ้าที่เกิดจากการวัดรอบแกนของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
ET	ระดับความเรียวที่ขอบของจานสะท้อนของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบสมมาตร
ET_U	ระดับความเรียวที่ขอบบนของจานสะท้อนของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร
ET_L	ระดับความเรียวที่ขอบล่างของจานสะท้อนของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกแบบไม่สมมาตร
ψ	ฟังก์ชันอีโคนัล
$\hat{e}_i^{\perp}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบ
$\hat{e}_i^{\parallel}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับระนาบการตกกระทบ
$\hat{s}_i$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของการตกกระทบ
s_i	ระยะทางจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดสะท้อนหรือจุดเลี้ยวเบนตามแนวของรังสีตกกระทบ
$\hat{e}_r^{\perp}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบการสะท้อน
$\hat{e}_r^{\parallel}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับระนาบการสะท้อน
$\hat{s}_r$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของการสะท้อน
s_r	ระยะทางจากจุดสะท้อนไปยังจุดสังเกตตามแนวของรังสีสะท้อน
$\bar{R}$	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแบบไดแอดิก
R_h	สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากสนามไฟฟ้าตกกระทบที่มีโพลาไรเซชันในทิศขนานกับระนาบการตกกระทบ
R_s	สัมประสิทธิ์การสะท้อนเนื่องจากสนามไฟฟ้าตกกระทบที่มีโพลาไรเซชันในทิศตั้งฉากกับระนาบการตกกระทบ
$\bar{E}^i$	สนามไฟฟ้าตกกระทบ
$\bar{E}^r$	สนามไฟฟ้าเนื่องจากการสะท้อน
$\bar{E}^d$	สนามไฟฟ้าเนื่องจากการเลี้ยวเบน
ρ_1^i, ρ_2^i	รัศมีความโค้งหลักของหน้าคลื่นตกกระทบ
ρ_1^r, ρ_2^r	รัศมีความโค้งหลักของหน้าคลื่นสะท้อนที่จุดสะท้อน
θ_i	มุมตกกระทบ
θ_r	มุมสะท้อน
θ_1, θ_2	มุมระหว่างเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของการตกกระทบกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางหลักของพื้นผิวสะท้อน
ρ_1^d, ρ_2^d	รัศมีความโค้งหลักของหน้าคลื่นเลี้ยวเบนหรือระยะตัดกันของล่ารังสีเลี้ยวเบนล่าดับที่หนึ่งและล่าดับที่สอง

ค่าอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
β_i	มุมระหว่างเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของการตกกระทบกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่จุดขอบ
β_d	มุมระหว่างเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางของการเลี้ยวเบนกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่จุดขอบ
β_o	มุมตกกระทบหรือมุมเลี้ยวเบน
$F[x]$	ฟังก์ชันทรานซิชัน
L', L''	ค่าปัจจัยทางระยะทาง
ρ_e'	รัศมีความโค้งหลักของหน้าคลื่นตกกระทบที่จุดเลี้ยวเบนในระนาบการตกกระทบ
ρ_e''	รัศมีความโค้งหลักของหน้าคลื่นสะท้อนที่จุดเลี้ยวเบนในระนาบการสะท้อน
(s_i, β_i, ϕ_i)	ระบบพิกัดของรังสีตกกระทบที่จุดขอบ
$\hat{s}_i, \hat{\beta}_i, \hat{\phi}_i$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกันของระบบพิกัดของรังสีตกกระทบที่จุดขอบ
(s_d, β_d, ϕ_d)	ระบบพิกัดของรังสีเลี้ยวเบนที่จุดขอบ
$\hat{s}_d, \hat{\beta}_d, \hat{\phi}_d$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกันของระบบพิกัดของรังสีเลี้ยวเบนที่จุดขอบ
$\tilde{D}_H, \tilde{D}_E$	สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนแบบไดแอดิก
D_h	สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์หรือสำหรับโพลาไรเซชันแบบแข็ง
D_s	สัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขตแบบดิริชเลต์หรือสำหรับโพลาไรเซชันแบบอ่อน
$\hat{t}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับพื้นผิวที่จุดขอบและมีทิศทางพุ่งจากจุดขอบเข้าหาพื้นผิว
J_o	แหล่งกระแสไฟฟ้าสมมูลที่จุดขอบ
M_o	แหล่งกระแสแม่เหล็กสมมูลที่จุดขอบ
$\bar{E}_o$	สนามไฟฟ้าบนระนาบหน้าจาน
$\Im$	ตัวดำเนินการที่ใช้แทนการแปลงฟูริเยร์
k_x, k_y, k_z	ค่าคงตัวการแผ่กระจายคลื่นในทิศทาง x, y และ z ตามลำดับ
$\bar{f}(k_x, k_y)$	สเปกตรัมคลื่นระนาบ
$f_x(k_x, k_y)$	สเปกตรัมคลื่นระนาบซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าในแนว x บนระนาบหน้าจานมารวมกันในทิศทาง k_x และ k_y
$f_y(k_x, k_y)$	สเปกตรัมคลื่นระนาบซึ่งเกิดจากสนามไฟฟ้าในแนว y บนระนาบหน้าจานมารวมกันในทิศทาง k_x และ k_y
$\bar{a}_{cp}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางโพลาไรเซชันร่วม
$\bar{a}_{xp}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางโพลาไรเซชันไขว้

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
E_{cp}	สนามไฟฟ้าย่านสนามไกลในแนวโพลาไรเซชันร่วม
E_{xp}	สนามไฟฟ้าย่านสนามไกลในแนวโพลาไรเซชันไขว้
P_{in}	กำลังที่ป้อนให้ระบบสายอากาศ
P_T	กำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานออกไปจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น
P_r	กำลังที่รับได้บนพื้นผิวจานสะท้อน
P_a	กำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานออกจากระนาบหน้าจาน
P_{cp}	ความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานในแนวโพลาไรเซชันร่วม
P_{xp}	ความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานในแนวโพลาไรเซชันไขว้
G_{cp}	อัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันร่วม
G_{xp}	อัตราขยายในแนวโพลาไรเซชันไขว้
η	ประสิทธิภาพของสายอากาศ
η_s	ประสิทธิภาพเนื่องจากการล้นจาน
$\eta_{sa}\eta_A$	ประสิทธิภาพช่องเปิด