

สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปสำหรับพื้นที่ครอบคลุมซับซ้อน

นายวิลาส วงศ์แจ่มบุญ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-446-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A SINGLE SHAPED REFLECTOR ANTENNA FOR COMPLEX COVERAGE

Mr. Wilard Wongchamboon

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2000


ISBN 974-346-446-8


หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศยานสะท้อนเคียวตัวครูปสำหรับพื้นที่ครอบคลุมซับซ้อน
โดย นายวิลาส วงศ์แจ่มบุญ
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร

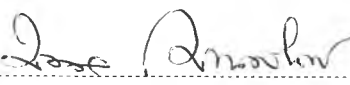
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

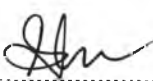

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒนกร)


..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนรินทร์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์)

วิลาศ วงศ์แจ่มบุญ : สายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวตัวครูปสำหรับพื้นที่ครอบคลุมซับซ้อน (A SINGLE SHAPED REFLECTOR ANTENNA FOR COMPLEX COVERAGE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร. ฉัตรชัย วัฒนาพัฒนกร, 118 หน้า, ISBN 974-346-446-8

ในการติดต่อสื่อสารผ่านดาวเทียม อุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการส่งและรับสัญญาณในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือสายอากาศจานสะท้อน ลำคลื่นที่ออกจากสายอากาศดาวเทียมต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ ลดการรบกวนของสัญญาณและลดการสูญเสียของกำลังคลื่นในบริเวณพื้นที่ที่ไม่ต้องการ จึงได้มีการออกแบบให้สายอากาศดาวเทียมสามารถจัดรูปลำคลื่นได้ งานวิจัยนี้เลือกใช้สายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวตัวครูปและสายอากาศป้อนกำลังคลื่นแบบเดี่ยว ซึ่งมีข้อดีคือโครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อน น้ำหนักเบา การลดทอนของกำลังสัญญาณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวพาราโบลิกกับสายอากาศแฉกลำดับจัดรูปลำคลื่น เนื่องจากสัญญาณไม่ต้องผ่านโครงข่ายสร้างลำคลื่น งานวิจัยนี้นำเสนอกรรมวิธีสังเคราะห์สายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวตัวครูปโดยใช้ทัศนศาสตร์กายภาพเนื่องจากสะดวกในการสังเคราะห์ ส่วนการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานได้ใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ถูกต้องยิ่งขึ้น พื้นผิวจานสะท้อนที่สังเคราะห์เป็นพื้นผิวที่เกิดจากการประมาณพื้นผิวด้วยสมการพหุนามอันดับสามรวมกับฮาร์มอนิกฟูรีเยร์ รูปร่างพื้นผิวขึ้นอยู่กับค่าที่เหมาะสมที่สุดของสัมประสิทธิ์แต่ละพจน์ของสมการนี้เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ

ผลการสังเคราะห์พบว่าสายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวตัวครูปสามารถจัดรูปลำคลื่นให้มีรูปร่างทางเรขาคณิตอย่างง่ายได้ ได้แก่ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปสามเหลี่ยม สำหรับพื้นที่ครอบคลุมซับซ้อนได้ยกตัวอย่างพื้นที่ประเทศไทย ผลการสังเคราะห์พบว่าสายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวตัวครูปสามารถจัดรูปลำคลื่นครอบคลุมประเทศไทย สามารถลดการสูญเสียของลำคลื่นในบริเวณอ่าวไทยและลดการรบกวนของลำคลื่นในบริเวณใกล้เคียง นอกจากการหาค่าเหมาะสมที่สุดของสัมประสิทธิ์สมการพื้นผิวจานสะท้อนแล้ว การนำค่าปัจจัยอื่นๆของระบบสายอากาศสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจัดรูปลำคลื่นได้ ได้แก่ ขนาดทางกายภาพของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น มุมเล็งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น เป็นต้น รูปร่างประเทศไทยรวมทั้งอ่าวไทยใกล้เคียงกับรูปร่างวงรี ดังนั้นการใช้สายอากาศจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิกที่มีช่องเปิดเป็นรูปวงรีและการสังเคราะห์พื้นผิวจานสะท้อนโดยช่องเปิดเป็นรูปวงรี สามารถใช้จัดรูปลำคลื่นครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยได้

สายอากาศสร้างขึ้นมาจากการกัดผิวไม้แดงเพื่อให้ได้พื้นผิวที่ต้องการโดยเครื่องจักร CNC แล้วจึงนำมาเคลือบผิวจานสะท้อนด้วยแผ่นอะลูมิเนียมบางเพื่อให้ผิวสามารถสะท้อนคลื่นได้ การทดสอบสายอากาศใช้ย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบเนื่องจากมีความสะดวกในการทดสอบสายอากาศโดยไม่ต้องใช้เนื้อที่สำหรับการทดสอบมาก ผลการทดสอบพบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการวัดใกล้เคียงกับแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากการคำนวณโดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ ส่วนความผิดพลาดของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากวัดมีสาเหตุจากความผิดพลาดของตำแหน่งสายอากาศ ความผิดพลาดจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ความผิดพลาดจากสภาพแวดล้อมภายในห้องทดสอบ ความผิดพลาดจากการไม่เข้าคู่ระหว่างสายส่งกับสายอากาศจานสะท้อน และความสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นในระบบสายอากาศ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่อนิลิต.....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2543ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4070423421:MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: SINGLE SHAPED REFLECTOR / PO SYNTHESIS/SATELLITE ANTENNA

WILARD WONGCHAMBOON : A SINGLE SHAPED REFLECTOR ANTENNA FOR
COMPLEX COVERAGE . THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. CHATCHAI
WAIYAPATTANAKORN. Ph.D.

118 pp. ISBN 974-346-446-8

A shaped beam is required for a satellite antenna to cover the main region and reduce radiation level in the nearby regions. Such a coverage shape may easily be achieved with the use of an array feed at the cost of weight and loss inherent in the beam forming network. In order to avoid such cost, a shaped reflector type antenna is proposed. In this method, the shaped reflector antenna can be achieved by the use of all the optimized coefficients of the polynomial Fourier series (PFS) to produce the desired radiation pattern. Physical optics(PO) is employed in the synthesis stage and physical theory of diffraction (PTD) is employed to calculate the accurate far field pattern in the analysis stage.

The shaped reflector antenna is designed to produce the coverage beam for the simple coverage such as a rectangle and a triangle. In a complex coverage such as the geopolitical area of Thailand, it is found that the shaped reflector antenna can produce a beam to cover the region with a reduced radiation pattern level in the nearby regions such as Burma, Cambodia and the Gulf of Thailand. Furthermore, other antenna parameters can be used in the optimization procedure for enhancing the performance of the synthesized antenna, for instance, the physical dimension of the feed, the pointing angle of the feed. Because the geopolitical area of Thailand is like an ellipse, a shaped reflector antenna can be achieved by an elliptical aperture design for producing the radiation pattern.

The fabricated shaped reflector antenna is made of wood(xylia kerrii) by CNC machining. Thin aluminium sheet is attached on the reflector surface for reflection. In this research, the shaped reflector antenna is synthesized to produce the coverage of Thailand. The planar near-field antenna test range is used for the shaped reflector antenna testing. The measured pattern agrees well with the calculated pattern. However, there are some errors arising from the antenna position setting, the difference between the measured and the calculated radiation patterns from the feed, multiple reflection in the test range and loss in the antenna system.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature.....
Field of study.....Electrical Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year.....2000..... Co-advisor's signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยาพัฒน์กร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือในด้านวิชาการ โดยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยรวมทั้งให้การสนับสนุนการเงินใน ส่วนของค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับงานสร้างสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป นอกจากนี้ทุนวิจัยส่วนที่ เหลือได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ ด้วย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม เป็น หน่วยงานภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งได้ให้ความร่วมมือในส่วนของสร้างพื้นผิวสาย อากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข และ คุณธีรศักดิ์ อนันตกุล ที่ให้คำปรึกษา เกี่ยวกับความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบสายอากาศงานสะท้อน และการใช้เครื่องมือวัดสายอากาศ ตลอดจนคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้อย่างดียิ่ง

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณบิดามารดา ซึ่งได้ให้การสนับสนุนด้านการเงิน และกำลังใจแก่ผู้วิจัย เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งพี่ๆ และเพื่อนๆ ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกายแรงใจจนงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 แนวเหตุผล.....	1
1.2 พัฒนาการของสายอากาศงานสะท้อนคักรูป.....	3
1.3 วัตถุประสงค์.....	7
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	7
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	7
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2 การสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อน.....	8
2.1 การสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อน.....	8
2.2 ระเบียบวิธีวิเคราะห์สำหรับการคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงาน.....	13
2.3 ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบสายอากาศงานสะท้อน.....	17
2.4 ระบบพิกัดของจุดสังเกต.....	21
2.5 การตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด.....	22
3 ผลการสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อน.....	26
3.1 ผลการสังเคราะห์สำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตอย่างง่าย..	26
3.2 ผลการสังเคราะห์สำหรับพื้นที่ครอบคลุมซับซ้อน.....	32
3.3 ค่าปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อการสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อน.....	46
3.4 สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวสำหรับลำคลื่นรูปวงรี.....	57
3.5 สรุป.....	62

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4	การสร้างและทดสอบสายอากาศ..... 64
4.1	ผลการสังเคราะห์พื้นผิวงานสะท้อนจากกรรมวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด..... 64
4.2	การสร้างสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป..... 72
4.3	การทดสอบและผล..... 74
4.4	เปรียบเทียบผลการวัดและผลการสังเคราะห์..... 83
4.5	สาเหตุที่ทำให้ผลการวัดแตกต่างกับผลการคำนวณ..... 85
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... 88
5.1	สรุปผลการวิจัย..... 88
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 91
	รายการอ้างอิง..... 93
	ภาคผนวก..... 95
	ภาคผนวก ก..... 96
	ภาคผนวก ข..... 100
	ภาคผนวก ค..... 102
	ภาคผนวก ง..... 114
	ภาคผนวก จ..... 115
	ประวัติผู้เขียน..... 118

สารบัญรูป

รูป	หน้า
1.1	วิธีจัดรูปล้าคลิ่นครอบคลุมเฉพาะพื้นที่
	ก. สายอากาศป้อนแบบแถวลำดับกับงานสะท้อนรูปพาราโบลิก
	ข. สายอากาศแบบแถวลำดับแผ่พลังงานโดยตรง
	ค. งานสะท้อนแบบเดี่ยวจัดรูปและใช้สายอากาศป้อนกำลังคลื่นแบบเดี่ยว 2
1.2	การเปรียบเทียบการสูญเสียของการหาค่าตอบในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด
	ระหว่างพหุนาม QPS, PFS, JPSE 5
2.1	ขั้นตอนการหาสัมประสิทธิ์สมการพื้นผิวของงานสะท้อนโดยกรรมวิธีหาค่า
	เหมาะสมที่สุด 9
2.2	สายอากาศป้อนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้
	ก. โครงสร้างของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด
	ข. ภาพฉายของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดในระนาบสนามไฟฟ้า
	และสนามแม่เหล็ก 11
2.3	ลักษณะการปรับตัวของพื้นผิวงานสะท้อน 12
2.4	เรขาคณิตสำหรับการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยระเบียบ
	วิธีทัศนศาสตร์กายภาพ 13
2.5	ระบบสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวจัดรูปแบบไม่สมมาตร 19
2.6	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของพื้นผิวพาราโบลิก..... 23
2.7	การกำหนดจุดสังเกตลงบนรูป 2.6 24
2.8	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของพื้นผิวแผ่นวงกลมแบน..... 24
2.9	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของพื้นผิวดัดรูป..... 25
3.1	รูปร่างพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า 27
3.2	เรขาคณิตของสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวพาราโบลิก 27

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.3	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวคักรูป
	ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวคักรูป
	ข. แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวคักรูป 29
3.4	รูปร่างพื้นที่สามเหลี่ยม 30
3.5	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวคักรูป 30
3.6	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวคักรูป 31
3.7	รูปร่างประเทศไทยและที่ตั้ง 32
3.8	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของระบบสายอากาศ งานสะท้อนพาราโบลิกจากตำแหน่งดาวเทียมค้างฟ้าที่ 101 องศาตะวันออก 33
3.9	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของระบบสายอากาศ งานสะท้อนพาราโบลิกจากตำแหน่งดาวเทียมค้างฟ้าที่ 101 องศาตะวันออก 34
3.10	ตำแหน่งของจุดสังเกตที่ต้องการให้มีอัตราขยายในแนวโพลาริเซชันร่วม 30 dB .. 35
3.11	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวคักรูป 36
3.12	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวคักรูป 36
3.13	พื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้
	ก. พื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้
	ข. ภาพตัดพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ในระนาบ x-z
	ค. ภาพตัดพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ในระนาบ y-z 37

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.14 ตำแหน่งของจุดสังเกตที่ต้องการให้มีอัตราขยายในแนวโพลาริเซชัน ร่วมในบริเวณประเทศไทย 30 dB และบริเวณประเทศกัมพูชา 0 dB	39
3.15 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป(กรณีลดการรบกวนประเทศกัมพูชาน้อยที่สุด).....	40
3.16 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป(กรณีลดการรบกวนประเทศกัมพูชาน้อยที่สุด).....	40
3.17 พื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ <ul style="list-style-type: none"> ก. พื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ ข. ภาพตัดพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ในระนาบ x-z ค. ภาพตัดพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ในระนาบ y-z 	41
3.18 ตำแหน่งของจุดสังเกตที่ต้องการให้มีอัตราขยายในแนวโพลาริเซชันร่วม บริเวณพื้นที่ประเทศไทย 30 dB และบริเวณประเทศพม่า 0 dB	43
3.19 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป (กรณีลดการรบกวนประเทศพม่าน้อยที่สุด).....	44
3.20 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป (กรณีลดการรบกวนประเทศพม่าน้อยที่สุด).....	44
3.21 พื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ <ul style="list-style-type: none"> ก. พื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ ข. ภาพตัดพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ในระนาบ x-z ค. ภาพตัดพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ในระนาบ y-z 	45
3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศงาน สะท้อนเดี่ยวตัวรูป(กรณีกำหนดพื้นผิวแรกเริ่มเป็นพาราโบลิก)	49
3.23 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศงาน สะท้อนเดี่ยวตัวรูป(กรณีกำหนดพื้นผิวแรกเริ่มเป็นพาราโบลิก)	49
3.24 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศงาน สะท้อนเดี่ยวตัวรูป(กรณีกำหนดพื้นผิวแรกเริ่มเป็นดังรูป 3.13)	50

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
3.25	
แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศ	
จานสะท้อนเดี่ยวตัดรูป(กรณีกำหนดพื้นผิวแรกเริ่มเป็นดังรูป 3.13)	50
3.26	
แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น($a_1=0.12$ เมตร	
$b_1=0.09$ เมตร $\rho_1=0.091982$ เมตร $\rho_2=0.12004$ เมตร)	
ก. แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น	
ในระนาบสนามไฟฟ้า	
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นใน	
ระนาบสนามแม่เหล็ก	51
3.27	
แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น($a_1=0.1695$ เมตร	
$b_1=0.1223$ เมตร $\rho_1=0.1994$ เมตร $\rho_2=0.2351$ เมตร)	
ก. แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น	
ในระนาบสนามไฟฟ้า	
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น	
ในระนาบสนามแม่เหล็ก	52
3.28	
แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น($a_1=0.1273$ เมตร	
$b_1=0.1006$ เมตร $\rho_1=0.1345$ เมตร $\rho_2=0.1621$ เมตร)	
ก. แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น	
ในระนาบสนามไฟฟ้า	
ข. แบบรูปแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น	
ในระนาบสนามแม่เหล็ก	53
3.29	
แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศ	
จานสะท้อนเดี่ยวตัดรูป (การหาค่าเหมาะสมที่สุดของสมการพื้นผิว-	
ร่วมกับปัจจัยอื่นๆของระบบสายอากาศ).....	55
3.30	
แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศ	
จานสะท้อนเดี่ยวตัดรูป (การหาค่าเหมาะสมที่สุดของสมการพื้นผิว-	
ร่วมกับปัจจัยอื่นๆของระบบสายอากาศ).....	55

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า	
3.31		
แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น($a_1=0.1581$ เมตร $b_1=0.0805$ เมตร $\rho_1=0.1124$ เมตร $\rho_2=0.2398$)		
ก. แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ในระนาบสนามไฟฟ้า		
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ในระนาบสนามแม่เหล็ก	56	
3.32	เรขาคณิตสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลิคโดยรูปร่างช่องเปิดเป็นรูปวงรี ...	57
3.33	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศงานสะท้อน พาราโบลิกรูปร่างช่องเปิดเป็นรูปวงรี.....	58
3.34	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศงานสะท้อน พาราโบลิกรูปร่างช่องเปิดเป็นรูปวงรี	59
3.35	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศงานสะท้อน เดี่ยวตัดรูปโดยรูปร่างช่องเปิดเป็นรูปวงรี	60
3.36	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศงานสะท้อน เดี่ยวตัดรูปโดยรูปร่างช่องเปิดเป็นรูปวงรี	60
3.37		
แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น($a_1=0.2369$ เมตร $b_1=0.2350$ เมตร $\rho_1=0.2427$ เมตร $\rho_2=0.3663$ เมตร)		
ก . แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ในระนาบสนามไฟฟ้า		
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ในระนาบสนามแม่เหล็ก	61	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.1	
แบบรูปการแผ่พลังงานในย่านสนามไกลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด	
ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในย่านสนามไกลที่ได้จากการคำนวณ ทางทฤษฎีในระนาบสนามไฟฟ้า	
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานในย่านสนามไกลที่ได้จากการคำนวณ ทางทฤษฎีในระนาบสนามแม่เหล็ก	66
4.2	
วิฎภาคที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี	
ก. วิฎภาคที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบสนามไฟฟ้า	
ข. วิฎภาคที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีในระนาบสนามแม่เหล็ก.....	67
4.3	
แบบรูปการแผ่พลังงานในย่านสนามไกลที่ได้จากการวัดของสายอากาศ ปากแตรรูปทรงพีระมิด	
ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในย่านสนามไกลที่ได้จากการวัด ในระนาบสนามไฟฟ้า	
ข. แบบรูปการแผ่พลังงานในย่านสนามไกลที่ได้จากการวัด ในระนาบสนามแม่เหล็ก	68
4.4	
วิฎภาคที่ได้จากการวัดของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด	
ก. วิฎภาคที่ได้จากการวัดในระนาบสนามไฟฟ้า	
ข. วิฎภาคที่ได้จากการวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก	69
4.5	
สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวดักรูปที่สังเคราะห์ได้	
ก. ภาพ 3 มิติของพื้นผิวสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวดักรูปที่สังเคราะห์ได้	
ข. ภาพตัดพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ในระนาบ x-z	
ค. ภาพตัดพื้นผิวงานสะท้อนที่สังเคราะห์ได้ในระนาบ y-z	70
4.6	
ส่วนประกอบแต่ละชิ้นส่วนของสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวดักรูป	72
4.7	
สายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวดักรูปที่สร้างขึ้น	73
4.8	
ตัวจับยึดพื้นผิวสายอากาศ	73
4.9	
สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดที่สร้างขึ้น	74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.10	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปสำหรับการวัดครั้งแรก
	ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป
	ข. แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลที่ได้จากการวัดในแนวโพลาริเซชันร่วม 77
4.11	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศงาน สะท้อนเดี่ยวตัวรูปสำหรับการวัดครั้งแรก
	ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป
	ข. แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลที่ได้จากการวัดในแนวโพลาริเซชันไขว้ 78
4.12	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ(กรณีแรก) 79
4.13	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดเปรียบเทียบกับการคำนวณ โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ(กรณีแรก) 79
4.14	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปสำหรับการวัดครั้งที่ 2
	ก. แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป
	ข. แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลที่ได้จากการวัดในแนวโพลาริเซชันร่วม.... 80

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป	หน้า
4.15	เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปสำหรับการวัดครั้งที่ 2
	ก แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป
	ข แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลที่ได้จากการวัดในแนวโพลาริเซชันไขว้..... 81
4.16	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวัด เปรียบเทียบกับค่าคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ(กรณีที่ 2) 82
4.17	แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในระนาบสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัด เปรียบเทียบกับค่าคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ(กรณีที่ 2)..... 82
4.18	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศ งานสะท้อนเดี่ยวตัวรูป(กรณีขาดเซชความสูญเสียแล้ว)..... 87
ก.1	การประมาณลำรังสีขนานในย่านสนามไกล (แหล่งกำเนิดและจุดสังเกตอยู่ในระนาบ x-z) 97
ค.1	ระบบพิกัดของงานสะท้อนสัมพันธ์กับจุดสังเกต 102
ค.2	การกำหนดอัตราขยายของระบบสายอากาศตามระบบพิกัด(U,V) 103
ค.3	จุดสังเกตบนโลกในระบบพิกัดดาวเทียมได้แก่มุมกวาดและมุมเงย ก. มุมมองจากระบบพิกัดดาวเทียมมายังจุดสังเกตบนโลก ข. การกำหนดมุมเงยและมุมกวาดของระบบดาวเทียม 105
ค.4	วงโคจรค้างฟ้าที่มีเส้นทางวงโคจรเป็นวงกลมและวางอยู่บนระนาบศูนย์สูตร โดยมีระยะสูง $h=35,786$ กิโลเมตรจากเส้นศูนย์สูตร 106
ค.5	ระนาบหน้าตัดวงรีของโลก 107
ค.6	รูปร่างของโลกโดยมองจากมุมมองของสายอากาศบนดาวเทียมค้างฟ้า 108
ค.7	ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดฉาก(x,y,z) และชุดของเวกเตอร์ $\hat{U}, \hat{V}, \hat{W}$ 110
ค.8	ระนาบสามเหลี่ยม ES-L-S 110
ค.9	ระนาบสามเหลี่ยม L-O-S 111

สารบัญรูป(ต่อ)

รูป		หน้า
ค.10	ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดของระบบสายอากาศงานสะท้อน (x,y,z) กับระบบพิกัด ดาวเทียม (x _s ,y _s ,z _s)	112
ง.1	มุมมองด้านข้างสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวคักรูป	114
ง.2	ภาพตัดขวางตามแนวแกนสายอากาศงานสะท้อนเดี่ยวคักรูป	114