

การวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย



นายศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

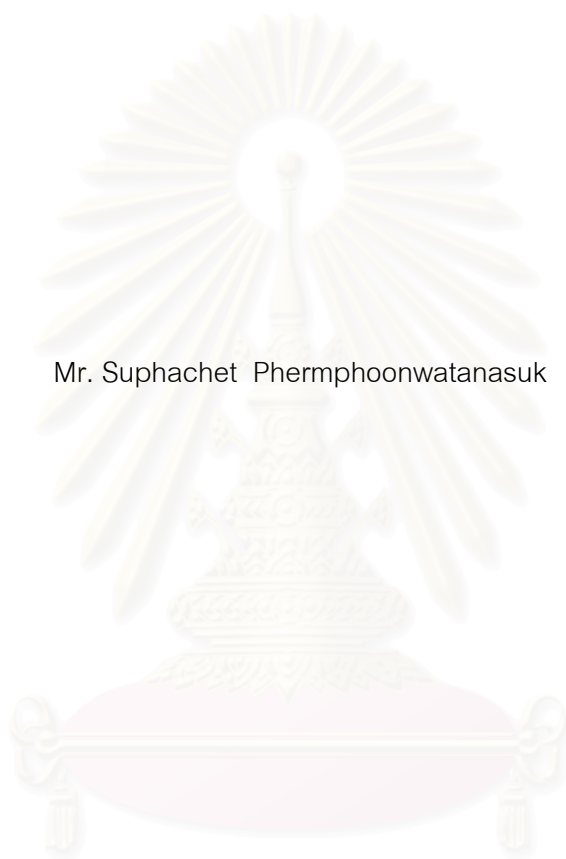
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1282-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF A SMALL FLAT MULTI-PANEL RECONFIGURABLE REFLECTOR ANTENNA

Mr. Suphachet Phermphoonwatanasuk



สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1282-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย  
โดย นายศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยापัทฒนกร

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยापัทฒนกร)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต วิจารณ์านนท์)

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

นายศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข: การวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย (ANALYSIS OF A SMALL FLAT MULTI-PANEL RECONFIGURABLE REFLECTOR ANTENNA) อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร.ฉัตรชัย ไวยาวัฒน์กร, 156 หน้า, ISBN 974-03-1282-9

การปรับเปลี่ยนรูปลักษณะของลำคลื่นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใช้สายอากาศแนวลำดับ สายอากาศชนิดจานสะท้อนที่ใช้สายอากาศป้อนกำลังคลื่นแบบแนวลำดับ และสายอากาศชนิดจานสะท้อนที่สามารถปรับรูปลักษณะของพื้นผิวได้ การใช้ระบบป้อนกำลังคลื่นด้วยสายอากาศแนวลำดับมีข้อเสียคือ ระบบโครงข่ายสร้างลำคลื่นมีน้ำหนักมาก เกิดการสูญเสีย และมีราคาแพง เพื่อขจัดปัญหาเหล่านี้ งานวิจัยนี้ได้เสนอสายอากาศรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย การปรับเปลี่ยนรูปลักษณะของลำคลื่นของสายอากาศชนิดนี้เกิดขึ้นจากการปรับแผ่นย้อยให้ทำมุมต่างๆ อย่างไรก็ตาม สายอากาศชนิดนี้ก็มีข้อเสียเนื่องจากการใช้แผ่นย้อยมาประกอบกันเป็นพื้นผิวสะท้อน เช่น การบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ การบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย้อยแต่ละแผ่น เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบดังกล่าวที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศชนิดนี้ งานวิจัยนี้ได้เสนอระเบียบวิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์ผลกระทบดังกล่าวโดยใช้สมมุติฐานสนามเป็นศูนย์ และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพมาทำนายผลกระทบจากปรากฏการณ์ทั้งสองที่ต่อความสามารถในการเคลื่อนลำคลื่น และการสร้างตำแหน่งศูนย์ นอกจากนี้ได้ประยุกต์การแปลงโดเมนรูปหลายเหลี่ยมไปอยู่บนโดเมนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาคำนวณสนามตามกรรมวิธีที่คณิตศาสตร์กายภาพที่แผ่พลังงานจากแผ่นย้อยรูปหลายเหลี่ยมแบบต่างๆ ที่นำมาใช้ประมาณพื้นผิวสะท้อนเริ่มต้น และได้เสนอวิธีการเข้ารูปพื้นผิวสะท้อนเริ่มต้นด้วยแผ่นย้อยรูปหลายเหลี่ยม

จากผลการคำนวณพบว่า ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมีความสำคัญอย่างมากต่อการเคลื่อนลำคลื่นโดยกรรมวิธีการประมาณเชิงรังสี การแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศไม่ส่งผลกระทบต่อการสังเคราะห์แบบรูปการเคลื่อนลำคลื่นที่มีตำแหน่งศูนย์หรือไม่มีตำแหน่งศูนย์ นอกจากนี้ได้ศึกษาผลกระทบของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบและความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่มีต่อความสามารถในการเคลื่อนลำคลื่นและการสร้างตำแหน่งศูนย์เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศแปรเปลี่ยนไป พบว่าปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดโพลาไรเซชันไขว้คือสนามเนื่องจากระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบของแผ่นย้อย จากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ ระดับโพลาไรเซชันไขว้มากที่สุดที่เกิดขึ้นต่างกับระดับโพลาไรเซชันร่วมมากที่สุดประมาณ -30 dB ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยมีอิทธิพลเล็กน้อยต่อระดับโพลาไรเซชันไขว้ ผลกระทบทั้งสองส่งผลให้ระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ตื้นขึ้นและทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาไรเซชันร่วมที่ตำแหน่งเชิงมุมที่ไกลจากลำคลื่นหลัก แต่ผลกระทบจากการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยมีอิทธิพลมากกว่าผลของการเลี้ยวเบน อัตราขยายแนวโพลาไรเซชันร่วมได้รับอิทธิพลเพียงเล็กน้อยจากผลของการเลี้ยวเบน ผลกระทบจากการบดบังคลื่นมีผลกระทบต่ออย่างมากต่อการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาไรเซชันร่วม ผลการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาไรเซชันร่วมขึ้นอยู่กับรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้และรูปร่างของแผ่นย้อย ยิ่งไปกว่านั้นพบว่า ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของแผ่นย้อยและสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมีอิทธิพลต่อระดับโพลาไรเซชันไขว้

เพื่อตรวจสอบระเบียบวิธีวิเคราะห์ที่เสนอขึ้น งานวิจัยนี้ได้สร้างต้นแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้ขึ้นมาทดสอบ การทดสอบสายอากาศต้นแบบนี้ได้ใช้ยานทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบ ผลการทดสอบพบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาไรเซชันร่วมที่วัดได้มีลักษณะใกล้เคียงเป็นอย่างมากกับการคำนวณทางทฤษฎีในบริเวณลำคลื่นหลัก และมีความแตกต่างกันเล็กน้อยที่พู่ซ่างที่อยู่ไกลๆ ลำคลื่นหลัก ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้น่าจะมาจาก การสะท้อนภายในห้องทดสอบ ส่วนความแตกต่างของแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาไรเซชันไขว้จะเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น โพลาไรเซชันไขว้ของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น การบดบังจากโครงสร้างยึดสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของแผ่นย้อย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

# # 3972896521: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: RECONFIGURABLE REFLECTOR ANTENNA/ EDGE DIFFRACTION/ PANEL BLOCKING/  
EQUIVALENT EDGE CURRENT METHOD/ NULL-FIELD HYPOTHESIS/ PATTERN SYNTHESIS

MR. SUPHACHET PHERMPHOONWATANASUK: DISSERTATION TITLE (ANALYSIS OF A SMALL FLAT  
MULTI-PANEL RECONFIGURABLE REFLECTOR ANTENNA) DISSERTATION ADVISOR: ASSOC. PROF.  
CHATCHAI WAIYAPATTANAKORN, 156 pp. ISBN 974-03-1282-9

Reconfigurable beams can be implemented in a number of ways such as by large aperture arrays, multiple feed reflector antennas, and reflector antennas with adjustable surfaces. The disadvantage of using an array-fed reflector antenna is that the beam-forming network is heavy, lossy, and expensive. To avoid these problems, the small flat multi-panel reconfigurable reflector antenna (SMP-RRA) is proposed. This SMP-RRA has been implemented using an adjustable panel. However, the SMP-RRA has some disadvantages due to the use of a number of small panels to form the reflecting surface. It is thus a matter of great interest to numerically investigate all possible factors affecting the performance of this type of antenna such as neighboring panels blocking, feed blockage, and edge diffraction. In this research, an appropriate analytical procedure is proposed to account for the edge diffraction and the blocking effects. The "null-field hypothesis" and physical theory of diffraction (PTD) are employed to account for the effects of both phenomena on the main beam steering ability and the null synthesis. In addition, the transformation of the polygonal domains into the square domains is applied in calculating the physical optics (PO) radiation field due to the various irregular polygonal flat sections of the arbitrary initial approximate reflector. The methods for fitting the arbitrary initial reconfigurable reflector by irregular polygonal flat sections are introduced.

From the computed results, it is observed that the feed position is very important to the ability of beam steering calculated by using the ray approximation technique. The variation of antenna parameters has no effect on the synthesis of the steering pattern with or without nulls. In addition, the numerical computations illustrate the effects of neighboring panels blocking, feed blockage, edge diffraction, and positioning error on the main beam steering ability and the null synthesis. It is found that the main contribution to the cross polarization is depolarization due to the fringe fields from the edges of the panel. The maximum cross-polar gain predicted using PTD is around -30 dB. The blocking effect has minor influence on the cross polarization. Both effects fill the null level and cause distortion on the co-polar pattern for the observer far from the main beam but blocking has more influence than edge diffraction. The diffraction effect has minor influence on the co-polar gain. The blocking effect has much influence on the variation of co-polar gain. The variation of co-polar gain depends upon the shape of the initial reconfigurable reflector and the shape of the panels. Moreover, it is found that the panel position error and the feed position error have influence on the cross polarization level.

Finally, the prototype of the SMP-RRA is constructed to verify the analytical procedure. In the measurement, the planar near-field antenna test range is employed for the SMP-RRA testing. A reasonable agreement in the main beam region of co-polar pattern is seen between the theory and the measurement while there is some discrepancy in the near-in sidelobes. The high sidelobes adjacent to the main beam may be caused by the effect of multiple reflections in the test range. The difference between the measured and the calculated cross-polar patterns may be formed by several contributions: the cross polarization of the feed horn, the feed structure blockage, and the panel position setting.

Department	Electrical Engineering	Student's signature .....
Field of study	Electrical Engineering	Advisor's signature .....
Academic year	2001	

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย ไวยภาพฒนกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบหัวข้อวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ณรงค์ อยู่ถนอม ศาสตราจารย์ ดร.มงคล เดชนครินทร์ รองศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต โรจน์อารยานนท์ ที่ได้กรุณาใช้เวลาให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณ คุณถาวร สุวรรณกิจที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธारा ชลปรภาณี หัวหน้าห้องปฏิบัติการพื้นฐานอิเล็กทรอนิกส์ที่เอื้ออำนวยให้ใช้สถานที่ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ ดร.สมยศ เจตน์เจริญรักษ์ รองผู้อำนวยการสำนักพัฒนาเทคนิคศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ได้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับระบบควบคุมทางกล และขอขอบคุณพี่ๆ และน้องๆ ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกาย แรงใจจนงานวิจัยสำเร็จด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัท MINEBEA THAI จำกัด ที่บริจาคมอเตอร์แบบขั้น (stepper motor) มาเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ คุณวุฒิชัย อุดมกาญจนันท์ ผู้อำนวยการฝ่ายบุคคล และคุณปวีณา สุมาลัยศักดิ์ รวมทั้งพี่ๆ ฝ่ายวิศวกรรมที่ได้อำนวยความสะดวกในการติดต่อขอตัวอย่างมอเตอร์แบบขั้นมาใช้ทดสอบและดำเนินการผลิตตามข้อมูลทางเทคนิคที่ต้องการ

ขอขอบคุณมูลนิธิกระจกเงาที่ให้ความสนับสนุนทางการเงินกับงานวิจัยและงานสร้างสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอยต้นแบบ และโครงการศิษย์ก้นกุฎีซึ่งเป็นโครงการความร่วมมือเพื่อพัฒนาการศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ความสนับสนุนทางการเงินบางส่วนแก่ผู้วิจัย นอกจากนี้ทุนวิจัยส่วนที่เหลือได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเรียนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญรูป .....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์ .....	ท
บทที่ 1 บทนำ .....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	7
ขอบเขตของการวิจัย .....	8
คำนิยามที่ใช้ในการวิจัย .....	8
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	8
วิธีดำเนินการวิจัย .....	8
ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย .....	9
บทที่ 2 สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย .....	10
ความนำ .....	10
2.1 แนวคิดของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย .....	10
2.1.1 การประมาณพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เริ่มต้นด้วยแผ่นย้อยรูปหลายเหลี่ยม .....	14
2.1.2 รายละเอียดของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ .....	15
2.1.3 รายละเอียดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น .....	17
2.2 ชุดควบคุมทางกลสำหรับปรับแผ่นย้อยและระบบควบคุมการปรับแผ่นย้อยต้นแบบ .....	18
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย .....	29
ความนำ .....	29
3.1 แนวทางการวิเคราะห์ .....	29
3.1.1 กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพกับการกระเจิงบนพื้นผิวของแผ่นย้อย .....	33
3.1.2 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพกับการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย้อย .....	39
3.1.3 สมมติฐานสนามเป็นศูนย์กับการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบและสายอากาศ ป้อนกำลังคลื่น .....	44
3.2 การหาลักษณะสมบัติเกี่ยวกับสมรรถนะของสายอากาศ .....	48



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1 โฟลาโรเซชันร่วมและโฟลาโรเซชันไขว้ .....	48
3.2.2 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ .....	49
<b>บทที่ 4 ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อสมรรถนะของสายอากาศและบทประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้ .....</b>	<b>53</b>
<b>ความนำ .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 ผลของค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ .....</b>	<b>53</b>
4.1.1 ผลของตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น .....	53
4.1.2 ผลของชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น .....	62
<b>4.2 ผลของค่าพารามิเตอร์หลักที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ .....</b>	<b>64</b>
4.2.1 ผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่น .....	64
4.2.2 ผลของรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ .....	67
4.2.3 ผลของขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย .....	70
4.2.4 ผลของรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อย .....	73
<b>4.3 ผลของการบิดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่น และปรากฏการณ์เลี้ยวเบน         ที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น .....</b>	<b>75</b>
<b>4.4 ผลของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ .....</b>	<b>88</b>
4.4.1 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น .....	88
4.4.2 ความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น .....	90
4.4.3 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น .....	92
<b>4.5 บทประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้ .....</b>	<b>96</b>
4.5.1 การเลื่อนลำคลื่นและการสร้างตำแหน่งศูนย์สำหรับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ..	96
4.5.2 การสร้างลำคลื่นครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยสำหรับดาวเทียมค้างฟ้า .....	98
<b>บทที่ 5 การทดสอบสายอากาศ .....</b>	<b>101</b>
<b>ความนำ .....</b>	<b>101</b>
<b>5.1 รายละเอียดของการทดสอบสายอากาศ .....</b>	<b>101</b>
<b>5.2 เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ .....</b>	<b>106</b>
<b>บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>120</b>
<b>6.1 สรุปผลการวิจัย .....</b>	<b>120</b>
<b>6.2 ข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>123</b>



สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการอ้างอิง .....	125
ภาคผนวก .....	130
ภาคผนวก ก. สนามเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบ .....	131
ภาคผนวก ข. ระเบียบวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของปริพันธ์สองชั้นบนโดเมนรูปสามเหลี่ยมใดๆ .....	150
ภาคผนวก ค. ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวและขอบกับระบบพิกัดทั่วไป .....	153
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	156



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญญัตราสาร

ตาราง	หน้า
2.1 ลำดับของการกระตุ้นในการกระตุ้นมอเตอร์แบบขั้นแต่ละแบบ .....	22
4.1 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น .....	60
4.2 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น .....	63
4.3 อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมและมุมที่เลื่อนไปของลำคลื่นที่ต้องการที่ใช้ศึกษา ผลของค่าพารามิเตอร์หลัก .....	64
4.4 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่น .....	66
4.5 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ ปรับรูปลักษณะได้ .....	69
4.6 อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมและมุมที่เลื่อนไปของลำคลื่นและตำแหน่งศูนย์ สำหรับ ศึกษาผลของขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย .....	70
4.7 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย .....	72
4.8 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อย .....	75
4.9 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และการเลี้ยวเบนที่ขอบ .....	80
4.10 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ สำหรับการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์หลักต่างๆ ในกรณี เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่น จากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบน .....	84
4.11 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่นและการเลี้ยวเบนที่ขอบ .....	87
4.12 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อย แต่ละแผ่น .....	89
4.13 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อย แต่ละแผ่น .....	92
4.14 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศ ป้อนกำลังคลื่น .....	96
4.15 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ที่ต้องการในการสังเคราะห์การเลื่อนลำคลื่นและ สร้างตำแหน่งศูนย์ สำหรับประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ .....	97
4.16 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ในกรณีประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานของระบบ โทรศัพท์เคลื่อนที่ .....	98
5.1 ความสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดและค่าตัวประกอบภายในห้องทดสอบ .....	105
5.2 ความสัมพันธ์ของจำนวนจุดข้อมูลที่กวาดวัด ขนาดของระนาบกวาดวัด และองศาที่เชื่อถือได้ .....	114
5.3 เปรียบเทียบสภาพเจาะจงทิศทางของผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ .....	118

## สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย	11
2.2	การประมาณกลุ่มรังสีที่สะท้อนออกจากแผ่นย้อยว่ามีหน้าคลื่นใกล้เคียงกันกับรังสีอ้างอิงที่สะท้อนออกมาจากจุดศูนย์กลางของแผ่นย้อย	12
2.3	การประยุกต์ระเบียบวิธีทำให้เหมาะที่สุดในการสังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงาน	13
2.4	เรขาคณิตของการเข้ารูปพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ (ก) การเข้ารูปด้วยแผ่นย้อยแบนราบรูปสามเหลี่ยม (ข) การเข้ารูปด้วยแผ่นย้อยแบนราบรูปหลายเหลี่ยม	14
2.5	ระบบพิกัดท้องถิ่น (ก) ระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิว (ข) ระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบแบบตายตัว	16
2.6	ต้นแบบของชุดควบคุมทางกลสำหรับปรับแผ่นย้อย (ก) ต้นแบบของชุดควบคุมแผ่นย้อย (ข) ระบบควบคุมการหมุนรอบแกนทิศ (ค) ระบบควบคุมการหมุนรอบแกนยก	18
2.7	ขั้นตอนของการควบคุมแผ่นย้อยแต่ละแผ่น	19
2.8	การทำงานของแผงวงจรควบคุม	20
2.9	เลขที่ของมอเตอร์แบบขั้น (ค่าที่ส่งออกจากพอร์ต A ของพอร์ต 8255)	20
2.10	วงจรขับมอเตอร์แบบขั้นชนิดยูนิโพลาร์หนึ่งตัว	21
2.11	ต้นแบบของแผงวงจรควบคุมการขับมอเตอร์แบบขั้น	22
2.12	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม RRA รุ่น 1.0c	23
2.13	การเรียกดูรูปแบบคำสั่งต่างๆ เมื่อใช้คำสั่ง "H"	23
2.14	การโหลดข้อมูลลงในหน่วยความจำชั่วคราวด้วยคำสั่ง "W"	25
2.15	การปรับแผ่นย้อยแต่ละแผ่นด้วยคำสั่ง "R"	25
2.16	รูปแบบเฉพาะของข้อมูลสำหรับขับมอเตอร์แบบขั้นหนึ่งตัวในหน่วยความจำชั่วคราว	26
2.17	รูปแบบเฉพาะของข้อมูลสำหรับขับมอเตอร์แบบขั้นทั้งหมดในหน่วยความจำชั่วคราว (กรณีแผ่นย้อย 2 แผ่น)	26
2.18	รูปแบบของข้อมูลสำหรับมอเตอร์หนึ่งตัวบนแฟ้มข้อมูลรูปแบบเฉพาะ	27
2.19	ข้อมูลของตัวแปรสายอักขระที่เขียนลงบนแฟ้มข้อมูลรูปแบบเฉพาะจากการเรียกใช้ฟังก์ชัน savefirst.m	28
3.1	การประยุกต์หลักการสมมูลสนามกับปริพันธ์สนามบนช่องเปิด	30
3.2	ขั้นตอนการวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย	32
3.3	ทฤษฎีของความสมมูลทางทัศนศาสตร์กายภาพ	33
3.4	การแบ่งแผ่นย้อยรูปหลายเหลี่ยมออกเป็นรูปสามเหลี่ยมย้อย	35

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.5	พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ที่เกิดจากการจัดเรียงแผ่นตัวนำย่อยในลักษณะแผ่นระนาบ วงกลม ..... 36
3.6	การบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ ..... 44
3.7	การตรวจสอบว่าจุดบนแผ่นย่อยอยู่ในบริเวณเงา ..... 45
3.8	ปริมาตรครอบคลุมโดยรูปหลายเหลี่ยม $S$ สำหรับตรวจสอบบริเวณเงา ..... 46
3.9	ขั้นตอนวิธีของการตรวจสอบบริเวณเงาของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ ..... 47
3.10	การพิจารณาการบดบังในกรณี $\hat{N} \cdot \hat{V} = 0$ ..... 47 (ก) รั้งสี่ $\hat{V}$ วางตัวอยู่เหนือหรือใต้รูปหลายเหลี่ยม $S$ (ข) รั้งสี่ $\hat{V}$ วางตัวอยู่บนระนาบเดียวกับรูปหลายเหลี่ยม $S$
4.1	รูปแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยที่วิเคราะห์ ..... 54 (ก) จัดเรียงในลักษณะแบนราบด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า 19 แผ่น (ข) เข้ารูปรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า $f/D$ เท่ากับ 0.35 ด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยม ด้านเท่า 19 แผ่น
4.2	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ค่าต่างๆ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ) ..... 54 (ก) ไม่ปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ (ข) เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศา (ค) เลื่อนลำคลื่นไป 10 องศา (ง) เลื่อนลำคลื่นไป 20 องศา (จ) เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา (ฉ) เลื่อนลำคลื่นไป 40 องศา (ช) เลื่อนลำคลื่นไป 50 องศา
4.3	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ค่าต่างๆ (กรณีเข้ารูปรูปพาราโบลอยด์) ..... 57 (ก) ไม่ปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ (ข) เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศา (ค) เลื่อนลำคลื่นไป 10 องศา (ง) เลื่อนลำคลื่นไป 20 องศา (จ) เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา (ฉ) เลื่อนลำคลื่นไป 40 องศา (ช) เลื่อนลำคลื่นไป 50 องศา
4.4	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับ สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังต่างๆ (กรณีเข้ารูปรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า $f/D$ เท่ากับ 0.35) ..... 62
4.5	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับ สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังต่างๆ (กรณีเข้ารูปรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า $f/D$ เท่ากับ 0.35) ..... 63
4.6	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นค่าต่างๆ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ) ..... 65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.7	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นค่าต่างๆ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ) ..... 65 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.8	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้รูปแบบต่างๆ ..... 67 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.9	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้รูปแบบต่างๆ . 68 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.10	รูปแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยที่วิเคราะห์ (เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า f/D เท่ากับ 0.35 ด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า 37 แผ่น) 70
4.11	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยค่าต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์) ..... 71 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.12	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยค่าต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์) ..... 71 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.13	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 0 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยค่าต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์) ..... 72 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.14	รูปแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยต่างชนิดกัน ..... 73 (ก) จัดเรียงในลักษณะแบนราบด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า 38 แผ่น (ข) เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า f/D เท่ากับ 0.35 ด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า 38 แผ่น
4.15	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อยแบบต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์) ..... 74
4.16	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อยแบบต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์) ..... 74





สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.25	81
<p>แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลาโดยตัดด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยม ด้านเท่าจำนวน 37 แผ่น) .....</p>	
<p>(ก) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันไขว้</p>	
4.26	81
<p>แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลาโดยตัดด้วยแผ่นย่อยรูปสี่เหลี่ยม ด้านไม่เท่าจำนวน 38 แผ่น) .....</p>	
<p>(ก) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันไขว้</p>	
4.27	82
<p>แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลาโดยตัดด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยม ด้านไม่เท่าจำนวน 38 แผ่น) .....</p>	
<p>(ก) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันไขว้</p>	
4.28	82
<p>แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลาโดยตัดที่มีค่า <math>f/D</math> เท่ากับ 0.25) .....</p>	
<p>(ก) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันไขว้</p>	
4.29	83
<p>แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลาโดยตัดที่มีค่า <math>f/D</math> เท่ากับ 0.35) .....</p>	
<p>(ก) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันไขว้</p>	
4.30	83
<p>แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลาโดยตัดที่มีค่า <math>f/D</math> เท่ากับ 0.60) .....</p>	
<p>(ก) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาไรเซชันไขว้</p>	
4.31	85
<p>แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาไรเซชันร่วมเมื่อไม่มีการปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่น และผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ) .....</p>	





## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.42	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน $y$ ..... 94 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.43	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังคลื่น ไปตามแนวแกน $y$ ..... 94 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.44	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน $z$ ..... 95
4.45	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังคลื่น ไปตามแนวแกน $z$ ..... 95 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.46	แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อมีการเลื่อนลำคลื่นไป และการสร้างตำแหน่งศูนย์มากกว่า หนึ่งทิศทางในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานของระบบ โทรศัพท์เคลื่อนที่ ..... 97 (ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม (ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้
4.47	อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมที่ต้องการบนพื้นที่ให้บริการครอบคลุมประเทศไทย ..... 98
4.48	พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ที่ได้จากการสังเคราะห์พื้นที่ให้บริการครอบคลุมประเทศไทย .... 99
4.49	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมที่สังเคราะห์ได้ที่พื้นที่ให้บริการครอบคลุม ประเทศไทย ..... 99
4.50	แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่สังเคราะห์ได้ที่พื้นที่ให้บริการครอบคลุม ประเทศไทย ..... 99
5.1	ต้นแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอที่นำมาทดสอบ .... 101
5.2	สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดที่ใช้เป็นสายอากาศบ่อนกำลังคลื่น ..... 102
5.3	แบบรูปขนาดในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด ..... 102
5.4	แบบรูปวิภาคในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด ..... 102
5.5	สภาพภายในห้องทดสอบและระนาบกวาดวัดของการทดสอบสายอากาศย่านสนามใกล้ เชิงระนาบ ..... 103
5.6	ระบบพิกัดของสายอากาศทดสอบและระยะต่างๆ ในการติดตั้ง ..... 104
5.7	การติดตั้งและรูปลักษณะของสายอากาศทดสอบกรณีที่ปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ ให้เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก ..... 105





## คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

$\theta_{rot}^e$	มุมที่หมุนไปรอบแกนยกของแผ่นย่อยที่ $e$ ในสถานะหลังการหมุน (rotating state)
$\phi_{rot}^e$	มุมที่หมุนไปรอบแกนทศของแผ่นย่อยที่ $e$ ในสถานะหลังการหมุน
$\hat{n}_{rot}^e$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแผ่นย่อยที่ $e$ ในสถานะหลังการหมุน
$n_{rot,x}^e, n_{rot,y}^e, n_{rot,z}^e$	องค์ประกอบในทิศทาง $x, y, z$ ของ $\hat{n}_{rot}^e$ ในระบบพิกัดทั่วไป (global coordinate)
$\hat{u}_o$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางเลื่อนลำคลื่น
$\hat{s}_{i,e}^c$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรังสีตกกระทบที่จุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยที่ $e$
$\hat{n}_{init}^e$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแผ่นย่อยที่ $e$ ในสถานะเริ่มต้น (initial state)
$n_{init,x}^e, n_{init,y}^e, n_{init,z}^e$	องค์ประกอบในทิศทาง $x, y, z$ ของ $\hat{n}_{init}^e$ ในระบบพิกัดทั่วไป
$\theta_{init}^e, \phi_{init}^e$	มุมของแผ่นย่อยที่ $e$ ในสถานะเริ่มต้น
$F(\theta_{rot}^e, \phi_{rot}^e)$	ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงาน
$G_{cj}$	อัตราขยายที่คำนวณได้ที่จุดตัวอย่างที่ $j$ ในบริเวณครอบคลุม
$G_{dj}$	อัตราขยายที่ต้องการที่จุดตัวอย่างที่ $j$ ในบริเวณครอบคลุม
$w_j$	ค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก (weighting factor)
$p$	ค่าตัวประกอบกำลัง (power factor)
$(x_c, y_c, z_c)$	จุดศูนย์กลางของแผ่นย่อย
$S^e$	พื้นผิวของแผ่นย่อยที่ $e$
$C_e(x_{c,e}, y_{c,e}, z_{c,e})$	จุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยที่ $e$ ในระบบพิกัดทั่วไป และจุดกำเนิดของระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวย่อยที่ $e$
$V_{e,m}(x_{e,m}, y_{e,m}, z_{e,m})$	จุดยอดที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$ ในระบบพิกัดทั่วไป
$x_{rot}^e, y_{rot}^e, z_{rot}^e$	ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนท้องถิ่นของพื้นผิว $S^e$ ในสถานะหลังการหมุน
$\hat{s}'_{e,m}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตกกระทบมายังขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$\hat{s}_{e,m}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางจากขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$ ไปยังจุดสังเกต
$\hat{e}_{e,m}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$\hat{s}'_{e,m}, \hat{\beta}'_{e,m}, \hat{\phi}'_{e,m}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกันในระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบแบบตายตัวของรังสีตกกระทบที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$\hat{s}_{e,m}, \hat{\beta}_{e,m}, \hat{\phi}_{e,m}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกันในระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบแบบตายตัวของรังสีเลี้ยวเบนที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$(s'_{e,m}, \beta'_{e,m}, \phi'_{e,m})$	พิกัดของรังสีตกกระทบในระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบแบบตายตัวที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$(s_{e,m}, \beta_{e,m}, \phi_{e,m})$	พิกัดของรังสีเลี้ยวเบนในระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบแบบตายตัวที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$



### คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\hat{t}_{e,m}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับแผ่นย่อยที่ $e$ และมีทิศพุ่งจากขอบที่ $m$ เข้าหาพื้นผิว
$x_{init}^e y_{init}^e z_{init}^e$	ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนท้องถิ่นของพื้นผิว $S^e$ ในสถานะเริ่มต้น
$(x_{init,m}^e, y_{init,m}^e, z_{init,m}^e)$	จุดยอดที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$ ในระบบพิกัด $x_{init}^e y_{init}^e z_{init}^e$
$(x_{e,m}^{edge}, y_{e,m}^{edge}, z_{e,m}^{edge})$	จุดบนขอบที่ $m$ ในระบบพิกัดทั่วไปในสถานะหลังการหมุน
$(x_{shf}, y_{shf}, z_{shf})$	ตำแหน่งของสายอากาศบ็อนกำลังคลื่นในระบบพิกัดทั่วไป หรือจุดกำเนิดของระบบพิกัดของสายอากาศบ็อนกำลังคลื่น
$X_f Y_f Z_f$	ระบบพิกัดของสายอากาศบ็อนกำลังคลื่น
$X_{f,t} Y_{f,t} Z_{f,t}$	ระบบพิกัดของสายอากาศบ็อนกำลังคลื่นเมื่อเลื่อนจุดกำเนิดไปที่จุด $(x_{shf}, y_{shf}, z_{shf})$
$A_z$	มุมที่หมุนรอบแกน $X_{f,t}$ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
$E_t$	มุมที่หมุนรอบแกน $Y_{f,t}$ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (หลังจากหมุนแกน $X_{f,t}$ ไปเป็นมุม $A_z$ )
$\bar{E}^{feed}$	สนามไฟฟ้าจากสายอากาศบ็อนกำลังคลื่น
$\bar{H}^{feed}$	สนามแม่เหล็กจากสายอากาศบ็อนกำลังคลื่น
$f_E(\theta_f)$	แบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศบ็อนกำลังคลื่น
$f_H(\theta_f)$	แบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศบ็อนกำลังคลื่น
$\bar{J}^{AFIM}$	แหล่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูลบนช่องเปิด
$\bar{M}^{AFIM}$	แหล่งความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลบนช่องเปิด
$\bar{E}^r$	สนามไฟฟ้าสะท้อนจากพื้นผิวสะท้อน
$\bar{E}^i$	สนามไฟฟ้าตกกระทบจากสายอากาศบ็อนกำลังคลื่น
$\bar{H}^r$	สนามแม่เหล็กสะท้อนจากพื้นผิวสะท้อน
$\bar{H}^i$	สนามแม่เหล็กตกกระทบจากสายอากาศบ็อนกำลังคลื่น
$\hat{n}_p$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบช่องเปิด
$\hat{n}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากพุ่งออกของแหล่งกำเนิดบนพื้นผิว
$S^{front}$	พื้นผิวที่อยู่ในบริเวณสาดส่อง
$S^{back}$	พื้นผิวที่อยู่ในบริเวณเงา
$\bar{M}_{S^{front}}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลบนพื้นผิว $S^{front}$
$\bar{J}_{S^{front}}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลบนพื้นผิว $S^{front}$
$\bar{M}_{S^{back}}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลบนพื้นผิว $S^{back}$
$\bar{J}_{S^{back}}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลบนพื้นผิว $S^{back}$

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\vec{E}' / \vec{H}'$	สนามไฟฟ้า/สนามแม่เหล็กส่งผ่านบนพื้นผิว $S^{back}$
$\vec{r}_S$	เวกเตอร์บอกตำแหน่งของแหล่งกำเนิดกระแสสมมูลบนพื้นผิว
$\vec{E}^{PO}$	สนามไฟฟ้ากระเจิงตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ
$\vec{H}^{PO}$	สนามแม่เหล็กกระเจิงตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ
$\vec{J}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลของสนามบนพื้นผิว
$\vec{M}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลของสนามบนพื้นผิว
$\omega$	ความถี่เชิงมุม
$\epsilon, \mu$	สภาพยอมทางไฟฟ้าและสภาพขั้วซึมทางแม่เหล็กของอวกาศว่าง (free space)
$k$	เลขคลื่นในอวกาศว่าง
$\lambda$	ความยาวคลื่นในอวกาศว่าง
$R$	ระยะทางจากแหล่งกำเนิดกระแสสมมูลไปยังจุดสังเกต
$\vec{R}$	เวกเตอร์จากแหล่งกำเนิดกระแสสมมูลไปยังจุดสังเกต
$\vec{r}_{S^e}$	เวกเตอร์บอกตำแหน่งของจุดบนแผ่นย่อยที่ $e$
$\vec{J}_e^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลบนแผ่นย่อยที่ $e$
$\hat{r}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยแสดงทิศทางของจุดสังเกต
$N_e$	จำนวนด้านของแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมที่ $e$
$\bar{I}$	ไดแอดิกเอกลักษณ์ (identity dyadic)
$J(\bullet)$	จาโคเบียนของการแปลง
$(\rho_n^c, \phi_m^c, h)$	ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยที่ $mn$ ในระบบพิกัดทรงกระบอก
$h$	ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเหนือพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้
$\rho_{gap}, \phi_{gap}$	ขนาดช่องว่างตามแนววงแหวนและตามแนวโซน
$\Delta\rho, \Delta\phi$	ความกว้างตามแนววงแหวนและตามแนวโซนของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น
$x_{init}^{mn}, y_{init}^{mn}, z_{init}^{mn}$	ระบบพิกัดท้องถิ่นของแผ่นย่อยที่ $mn$ ในสถานะเริ่มต้น
$x_{rot}^{mn}, y_{rot}^{mn}, z_{rot}^{mn}$	ระบบพิกัดท้องถิ่นของแผ่นย่อยที่ $mn$ ในสถานะหลังการหมุน
$\theta_{rot}^{mn}$	มุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยรอบแกนยกของแผ่นย่อยที่ $mn$
$\phi_{rot}^{mn}$	มุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยรอบแกนทิศของแผ่นย่อยที่ $mn$
$\vec{E}^{PTD}$	สนามไฟฟ้ากระเจิงตามทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ
$\vec{E}^{FW}$	สนามไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องที่ขอบ (fringe field)
$I^T$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูลรวมที่ขอบ
$M^T$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลรวมที่ขอบ
$I^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลที่ขอบ



### คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$M^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลที่ขอบ
$I^{FW}$	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องที่ขอบ
$M^{FW}$	ความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กไม่ต่อเนื่องที่ขอบ
$\bar{E}_e^{FW}$	สนามไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบของแผ่นย่อยที่ $e$
$I_{e,m}^T$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูลรวมที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$I_{e,m}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$I_{e,m}^{FW}$	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$M_{e,m}^T$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลรวมที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$M_{e,m}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$M_{e,m}^{FW}$	ความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กไม่ต่อเนื่องที่ขอบที่ $m$ ของแผ่นย่อยที่ $e$
$\bar{E}_{mn}^{FW}$	สนามไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบของแผ่นย่อยที่ $mn$
$I_{mn,i}^T$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูลรวมที่ขอบที่ $i$ ของแผ่นย่อยที่ $mn$
$I_{mn,i}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลที่ขอบที่ $i$ ของแผ่นย่อยที่ $mn$
$I_{mn,i}^{FW}$	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าไม่ต่อเนื่องที่ขอบที่ $i$ ของแผ่นย่อยที่ $mn$
$M_{mn,i}^T$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลรวมที่ขอบที่ $i$ ของแผ่นย่อยที่ $mn$
$M_{mn,i}^{PO}$	ความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กทัศนศาสตร์กายภาพสมมูลที่ขอบที่ $i$ ของแผ่นย่อยที่ $mn$
$M_{mn,i}^{FW}$	ความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กไม่ต่อเนื่องที่ขอบที่ $i$ ของแผ่นย่อยที่ $mn$
$t_i$	ค่าพารามิเตอร์ทดสอบ
$\bar{R}(t_i)$	เวกเตอร์จากจุดกำเนิดไปยังจุดตัดบนรูปหลายเหลี่ยม $S$
$\hat{N}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับรูปหลายเหลี่ยม $S$
$N_S$	จำนวนด้านของรูปหลายเหลี่ยม $S$
$V_{1s}, V_{2s}, V_{3s}, \dots, V_{N_s}$	จุดยอดของรูปหลายเหลี่ยม $S$
$T$	จุดทดสอบบนแผ่นย่อย
$O$	จุดสังเกตหรือตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น
$C$	จุดศูนย์กลางของรูปหลายเหลี่ยม $S$
$\bar{T}$	เวกเตอร์จากจุดกำเนิดไปยังจุด $T$
$\bar{O}$	เวกเตอร์จากจุดกำเนิดไปยังจุด $O$

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\bar{C}$	เวกเตอร์จากจุดกำเนิดไปยังจุด $C$
$\hat{V}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางจากจุด $T$ ไปยังจุด $O$
$S_i$	รูปสามเหลี่ยมที่เกิดจากจุดสองจุดบนด้านที่ $i$ ของรูปหลายเหลี่ยม $S$ กับจุด $O$
$\hat{N}_{s_i}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับรูปสามเหลี่ยม $S_i$
$Q_{ci}$	จุดศูนย์กลางของรูปสามเหลี่ยม $S_i$
$\hat{R}_c$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางจากจุด $T$ ไปยังจุด $C$
$\hat{R}_m$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางจากจุด $T$ ไปยังจุดยอดที่ $m$ ของรูปสามเหลี่ยม $S$
$\hat{Q}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับ $\hat{R}_c$ และ $\hat{N}$
$Z_o$	อิมพีแดนซ์ของตัวกลางในบริเวณแผ่กระจายคลื่น
$Y_o$	แอดมิตแตนซ์ของตัวกลางในบริเวณแผ่กระจายคลื่น
$f$	ระยะโฟกัสของรูปพาราโบลอยด์
$f/D$	อัตราส่วนระหว่างระยะโฟกัสกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศ
$r_{\max}$	รัศมีของสายอากาศ
ET	ระดับความเร็วที่ขอบของสายอากาศ
$\hat{a}_{cp}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางโพลาริเซชันร่วม
$\hat{a}_{xp}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางโพลาริเซชันไขว้
$E_{cp}$	สนามไฟฟ้าย่านสนามไกลแนวโพลาริเซชันร่วม
$E_{xp}$	สนามไฟฟ้าย่านสนามไกลแนวโพลาริเซชันไขว้
$P_{in}$	กำลังที่ป้อนให้สายอากาศ
$P_{rad}$	ความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานในทิศทางใดๆ
$P_T$	กำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานออกไปจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น
$P_r$	กำลังที่รับได้บนพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้
$P_{cp}$	ความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานแนวโพลาริเซชันร่วม
$P_{xp}$	ความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานแนวโพลาริเซชันไขว้
$G_{cp}$	อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วม
$G_{xp}$	อัตราขยายแนวโพลาริเซชันไขว้
$\eta$	ประสิทธิภาพของสายอากาศ
$\eta_f$	ประสิทธิภาพการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น
$\eta_s$	ประสิทธิภาพของการล้นช่องเปิด
$\eta_A$	ประสิทธิภาพของช่องเปิด
$\eta_{SA}$	ประสิทธิภาพของการล้นระนาบช่องเปิด

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความสามารถในการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานแบบจัดลำคลื่นที่ปรับเปลี่ยนได้ (reconfigurable shaped beams) แบบเลื่อนลำคลื่น (steering beam) และการสร้างตำแหน่งศูนย์ (nulls synthesis) ของระบบสายอากาศสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม อันเนื่องมาจากว่า วิวัฒนาการด้านเทคโนโลยีก้าวหน้าไปอย่างมากทำให้ระบบสื่อสารดาวเทียมมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ส่งผลให้ความน่าจะเป็นที่พื้นที่ให้บริการของดาวเทียมจะเปลี่ยนแปลงมีมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงความต้องการที่เกิดขึ้นนี้ ระบบสายอากาศบนดาวเทียมต้องมีความยืดหยุ่นต่อการปรับเปลี่ยนลำคลื่นครอบคลุมหรือต้านผลกระทบจากแหล่งกำเนิดการรบกวนที่อยู่นอกพื้นที่ให้บริการ นอกจากนี้ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงลำคลื่นยังอาจนำมาใช้แบ่งเบาภาระในการรับส่งข้อมูล ยกตัวอย่างเช่น ดาวเทียมที่มีความหนาแน่นของการรับส่งข้อมูลต่ำสามารถช่วยแบ่งเบาภาระของดาวเทียมอีกดวงหนึ่งซึ่งมีความหนาแน่นของการรับส่งข้อมูลสูงเกินไปได้ ในทำนองกลับกัน สายอากาศภาคพื้นดินก็สามารถเลื่อนลำคลื่นไปเพื่อรับส่งข้อมูลจากดาวเทียมดวงอื่นๆ ได้ ถ้าในขณะนั้นสายอากาศภาคพื้นดินมีความหนาแน่นของการรับส่งข้อมูลในระดับต่ำ เป็นต้น

นอกจากการประยุกต์ใช้งานกับระบบสื่อสารดาวเทียมแล้ว ความสามารถในการปรับเปลี่ยนลำคลื่นของระบบสายอากาศยังนำมาใช้ในสายอากาศภาคพื้นดินเพื่อต้าน หรือชดเชยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากสภาวะแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่ใช้งานเป็นสายอากาศของสถานีฐานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากความถี่ข้างเคียง หรือชดเชยการเปลี่ยนแปลงจากสิ่งกีดขวางรอบๆ สถานีฐาน หรือกรณีที่ต้องการชดเชยการลดทอนเนื่องจากปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเมื่อใช้งานย่านความถี่ Ku โดยเพิ่มอัตราขยายในบริเวณที่ได้รับผลกระทบ และลดอัตราขยายในบริเวณที่ฝนไม่ตก หรือมีปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเล็กน้อย เป็นต้น

ในอดีตสายอากาศที่มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนรูปลักษณะของลำคลื่นมีอยู่หลายชนิด เช่น สายอากาศแถวลำดับเชิงวิถีภาค (phased array antenna) แบบไวงาน (active) และแบบไม่ไวงาน (passive) สายอากาศชนิดจานสะท้อนที่ใช้สายอากาศป้อนกำลังคลื่นแบบแถวลำดับ (array-fed reflector antenna) และสายอากาศชนิดจานสะท้อนที่สามารถปรับพื้นผิวของจานสะท้อนหลัก หรือจานสะท้อนรอง (structural reconfigurable reflector antenna) เป็นต้น

สายอากาศชนิดจานสะท้อนเป็นสายอากาศที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีโครงสร้างที่ง่าย และมีราคาต่อช่องเปิดต่ำ วิธีการหนึ่งที่ทำให้สายอากาศชนิดนี้สามารถปรับเปลี่ยนลำคลื่นได้ก็คือ การใช้ระบบป้อนกำลังคลื่นที่ประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับ และควมกำลังผ่านระบบโครงข่ายสร้างลำคลื่น (beam-forming network, BFN) ที่ซับซ้อนโดยการควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ [1] ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแบ่งกำลัง และตัวปรับเลื่อนวิถีภาค (phase shifter) วิธีการดังกล่าวนี้มีข้อเสียบางประการคือ มีน้ำหนักมาก และเกิดการลดทอนของสัญญาณตั้งแต่ 2 dB ขึ้นไป [2] ข้อเสียในลักษณะนี้เกิดขึ้นเช่นเดียวกันในสายอากาศแถวลำดับเชิงวิถีภาคแบบไม่ไวงาน เพื่อจัดปัญหาเหล่านั้นจึงได้มีการคิดค้นแนวทางใหม่ที่มีความสามารถเหมาะสมต่อการใช้งานที่ต้องการเปลี่ยนแปลงลำคลื่น โดยใช้สายอากาศแถวลำดับเชิงวิถีภาคแบบไวงาน [3] ที่ต้องมีตัวขยายกำลัง (power amplifiers) โดยตรงที่ตำแหน่งแต่ละจุดขององค์ประกอบที่แผ่พลังงานคลื่น และที่ด้านออกของระบบโครงข่ายสร้างลำคลื่น วิธีการดังกล่าวทำให้ลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ก็จริง แต่ต้องมีแหล่งพลังงานที่จ่ายให้แก่วงจรแบบไวงานเหล่านี้ ทำให้มีปัญหาในเรื่องของความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวขยายกำลัง

ดังนั้นจึงต้องมีระบบควบคุมการกระจายของพลังงานความร้อนซึ่งมีราคาสูงมาก นอกจากวิธีการนี้แล้ว สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้ที่ใช้คุณสมบัติของการปรับพื้นผิวสะท้อนโดยควบคุมโครงตาข่าย หรือแผ่นย่อยให้มีพื้นผิวที่เหมาะสม และใช้สายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่มีสมรรถนะสูงเพียงตัวเดียว หรือในจำนวนไม่กี่ตัวมาแทนระบบโครงข่ายสร้างลำคลื่นที่ซับซ้อน ก็เป็นวิธีการแก้ปัญหาอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งมีความเหมาะสมอย่างมากเนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความสามารถพับเก็บและการกางออกได้ในอวกาศ (in-space deployment) พร้อมทั้งสามารถประหยัดพลังงานที่จ่ายให้แก่ระบบเนื่องจากผลของการใช้ระบบควบคุมทางกล และมีราคาต่อช่องเปิดต่ำ

กรรมวิธีการปรับพื้นผิวจานสะท้อนนี้เคยนำมาใช้ในอดีต เพื่อใช้ชดเชยความผิดเพี้ยนของพื้นผิวสะท้อนเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก [4] โดยการปรับพื้นผิวของจานสะท้อนรองของสายอากาศชนิดจานสะท้อนคู่แบบสมมาตรขนาดใหญ่ซึ่งใช้ในงานดาราศาสตร์วิทยุ และยังนำวิธีการนี้มาใช้ชดเชยความผิดเพี้ยนของพื้นผิวที่เกิดขึ้นบนจานสะท้อนหลักของสายอากาศจานสะท้อนคู่แบบไม่สมมาตร [5] นอกจากนั้นยังได้นำมาใช้สร้างลำคลื่นครอบคลุมแบบตายตัวดังนี้

A.R. Cherrette, S.-W. Lee และ R.J. Acosta (1989) [6] ได้เสนอวิธีการสร้างลำคลื่นครอบคลุมจากสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปและสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเพียงตัวเดียว โดยใช้ระเบียบวิธีทำให้เหมาะสมที่สุด (optimization method) มาหาขนาดและวิภาคของสนามบนระนาบช่องเปิดของจานสะท้อน แล้วนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหารูปลักษณะของจานสะท้อน

J.R. Bergmann, F.R. Teixeira และ F.J.S. Moreira (1993) [7] ได้เสนอการสังเคราะห์พื้นผิวจานสะท้อนเดี่ยวตัวรูปเพื่อสร้างลำคลื่นครอบคลุมประเทศบราซิล โดยใช้ระเบียบวิธีทำให้เหมาะสมที่สุดมาหาค่าสัมประสิทธิ์ของการประมาณพื้นผิวจานสะท้อนที่อยู่ในรูปของสมการพหุนามอันดับสอง รวมกับพจน์ฮาร์มอนิกฟูรีเยร์ (Fourier harmonic) และได้เปรียบเทียบผลการสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ (physical optics, PO) กับกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต (geometrical optics, GO) พบว่าการสังเคราะห์ด้วยกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตใช้เวลาน้อยกว่ากรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ แต่แบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพมีความแตกต่างจากแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการน้อยกว่าแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต

งานวิจัยข้างต้น [6], [7] เป็นเพียงการใช้กรรมวิธีการปรับพื้นผิวมาสร้างลำคลื่นครอบคลุมแบบตายตัว เนื่องจากว่าพื้นผิวดัดรูปไม่มีความยืดหยุ่นต่อการปรับรูปลักษณะ สำหรับการสร้างลำคลื่นที่ปรับเปลี่ยนได้โดยอาศัยความสามารถของการปรับรูปลักษณะของพื้นผิวนั้น ได้นำมาใช้เลียนลำคลื่น ปรับเปลี่ยนลำคลื่น และสร้างตำแหน่งศูนย์เพื่อประยุกต์ใช้งานต่างๆ ดังต่อไปนี้

A.C. Schell, P.R. Franchi, W.B. Goggins, Jr. และ G.R. Forbes (1966) [8] กล่าวถึงผลการวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน ประสิทธิภาพของสายอากาศ การแปรเปลี่ยนของอัตราขยายกับการเลื่อนลำคลื่นของสายอากาศชนิดหลายแผ่นโลหะ (multiplate antenna) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะรูปสี่เหลี่ยมขนาด 5 ฟุตจำนวน 220 แผ่น โดยใช้ระเบียบวิธีวัดด้วยมาตรวิทยุ (radiometric methods) จากการวัดพบว่า มีระดับพู่ซ้างที่สูงเกิดขึ้นในแบบรูปการแผ่พลังงาน เนื่องจากช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะ และประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 0.429 ประสิทธิภาพที่วัดได้นี้ประกอบด้วย ประสิทธิภาพเนื่องจากระดับความเร็วของขนาดสนามบนช่องเปิด ความไม่เป็นเอกกรุปทางวิภาค การล้นช่องเปิด ช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะ และการรั่วบนผิวตาข่าย (ในการทดลองใช้ผิวตาข่ายอะลูมิเนียมที่ซึ่งตรงกับกรอบอะลูมิเนียมเป็นแผ่นโลหะ) จากการคำนวณพบว่า ประสิทธิภาพการล้นช่องเปิดเท่ากับ 0.312 ประสิทธิภาพเนื่องจากระดับความเร็วของขนาดสนามบนช่องเปิดคำนวณได้เท่ากับ 0.846 การรั่วบนผิวตาข่าย 0.01 และการสูญเสียเนื่องจากช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะประมาณ 0.078 ดังนั้นประสิทธิภาพเนื่องจากการล้นช่องเปิดรวมกับการรั่วบนผิวตาข่ายและการสูญเสียเนื่องจาก





สอง และเพื่อลดการสูญเสียของอัตราขยายให้เหมือนกับพื้นผิวควบคุมด้วยเส้นลวดพาดบนโครงตาข่ายต้องใช้จุดควบคุมจำนวน 150 จุด

R.C. Brown (1991) [13] ได้เสนอแนวทางอีกแนวหนึ่งในการทำให้พื้นผิวสะท้อนมีความยืดหยุ่นเพื่อที่จะสร้างลำคลื่นครอบคลุมโดยหลีกเลี่ยงปัญหาบางประการที่เกิดขึ้นจากการใช้การปรับรูปลักษณะโดยโครงตาข่าย เช่น ปฏิกิริยาการรบกวนของสายอากาศต้นแบบที่เสนอขึ้นประกอบด้วยแผ่นย่อยจำนวน 69 แผ่น ข้อได้เปรียบของการใช้แผ่นย่อยคือขอบของสายอากาศไม่จำเป็นต้องยึดตายตัว การยึดตายตัวทำให้การสังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานบางรูปแบบทำได้ยาก เมื่อนำสายอากาศต้นแบบมาสังเคราะห์แบบรูปครอบคลุม 2 รูปแบบให้ครอบคลุมอเมริกา และแคนาดาจากวงโคจรค้างฟ้าที่ 307 และ 359 องศาตะวันออก โดยใช้แผ่นย่อยขนาด 3 เท่าของความยาวคลื่นทำให้เกิดพูเออร์ติงอยู่นอกบริเวณครอบคลุมบนโลก อัตราขยายต่ำสุดที่สังเคราะห์ได้ต่ำกว่าที่ตั้งเป้าไว้ 2-3 dB

P.J.B. Clarricoats, A.D. Monk และ H. Zhou (1994) [14] ได้เสนอรูปแบบใหม่ของสายอากาศชนิดจานสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้โดยใช้โครงตาข่ายสำหรับประยุกต์ใช้งานกับยานอวกาศ โดยใช้การปรับรูปลักษณะของพื้นผิวร่วมกับการกระตุ้นด้วยสายอากาศแถวลำดับจำนวนน้อย เพื่อให้มีความยืดหยุ่นต่อการสร้างบริเวณครอบคลุมมากที่สุดจากผลทางทฤษฎีเมื่อพื้นผิวสะท้อนปรับรูปลักษณะเป็นรูปพาราโบลอยด์ ลำคลื่นแตกต่างกัน 19 ลำคลื่นในบริเวณต่างๆ สามารถสร้างได้จากการกระตุ้นที่อย่างอิสระกันของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นจำนวน 19 เอลิเมนต์ ผลของการคู่ควบ (coupling) ระหว่างสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเกิดขึ้นอย่างเบาบาง และการถดถอยของการเลือนลำคลื่นเกิดขึ้นเล็กน้อยแม้ว่าการเลือนลำคลื่นเกิดขึ้นในมุมมองที่ไกลออกไป

A.D. Monk และ P.J.B. Clarricoats (1995) [15] แสดงให้เห็นว่าสายอากาศชนิดจานสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้โดยใช้โครงตาข่ายสามารถใช้สร้างตำแหน่งศูนย์บนแบบรูปการแผ่พลังงาน ถึงแม้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานเดิมในบริเวณนั้นจะมีระดับต่างจากการเกิดศูนย์อย่างมาก จากการใช้สายอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 เท่าของความยาวคลื่น และใช้สายอากาศชนิดปากแตรแบบลูกฟูก (corrugated horn) พบว่า ผลการวัดและผลทางทฤษฎีที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ระดับของตำแหน่งศูนย์กลาง (ต่างจากแบบรูปการแผ่พลังงานเดิม 46.1 dB) ตำแหน่งศูนย์ที่เกิดขึ้นสามารถทำได้ทั้งภายในบริเวณลำคลื่นหลัก และบริเวณพหุขั้ว นอกจากนี้ยังสามารถสร้างบริเวณศูนย์ในบริเวณที่ต้องการ

H.-S. Yoon, G. Washington และ W.H. Theunissen (2000) [16] ได้วิเคราะห์ความสามารถในการเปลี่ยนรูปลักษณะของจานสะท้อนด้วยการใช้เพียโซอิเล็กทริกแอกทิเวเตอร์แบบแถบกว้าง (piezoelectric strip-actuated) กับจานสะท้อนที่มีโครงสร้างแบบความโค้งอันดับสอง (doubly curved) การศึกษาทำให้เห็นว่าสามารถเลือนลำคลื่น และสร้างลำคลื่นแบบจัดรูปได้

W.H. Theunissen, H.T. Yoon, W.D. Burnside และ G.N. Washington (2001) [17] ได้เสนอวิธีการสังเคราะห์ลำคลื่นครอบคลุมที่ปรับรูปลักษณะได้ของสายอากาศชนิดจานสะท้อนคู่ โดยใช้การปรับพื้นผิวทางกลตามการกำหนดพื้นผิวด้วยเอลิเมนต์ขนาดจำกัด (finite-element description) การปรับพื้นผิวทางกลนี้ควบคุมโดยใช้เพียโซอิเล็กทริกแอกทิเวเตอร์ (piezoelectric actuators) ประกอบอยู่ทางด้านหลังของพื้นผิวจานสะท้อนรองที่ตำแหน่งการแบ่งเป็นเอลิเมนต์ที่ยืดหยุ่นได้ โดยที่พื้นผิวสะท้อนหลักไม่สามารถปรับรูปลักษณะได้ พื้นผิวจานสะท้อนรองเป็นพื้นผิวที่ปรับรูปลักษณะได้เพื่อให้ได้บริเวณครอบคลุมที่ต้องการ การศึกษานี้ได้ศึกษาถึงผลกระทบของคุณสมบัติทางกลของจานสะท้อนรอง จำนวน และตำแหน่งการวางของแอกทิเวเตอร์

นอกจากนี้กรรมวิธีการแบ่งพื้นผิวเป็นแผ่นย่อยยังนำมาใช้เพื่อเพิ่มสมรรถนะของการพับเก็บและกางออกในอวกาศให้แก่ระบบสายอากาศสำหรับการใช้งานในระบบสื่อสารดาวเทียม โดย P. K. Agrawal, M. S. Anderson และ M. F. Card (1981) [18] กล่าวถึงแนวคิดสำหรับการประมาณผิวโค้งของพื้นผิวสายอากาศโดยใช้แผ่นย่อย และได้เสนอกรรมวิธีการออกแบบสำหรับหาขนาดแผ่นย่อยเพื่อให้มีความแม่นยำของพื้นผิวตามต้องการเพื่อนำไปใช้งานบนดาวเทียมเพื่อเป็นมาตรวิทยุไมโครเวฟ (microwave radiometer satellite, MRS) จากการศึกษาพบว่า พื้นผิวสะท้อนที่ประมาณด้วยแผ่นราบรูปสี่เหลี่ยมทำให้เกิดระดับพูซังที่สูง ส่วนการประมาณด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมและรูปหกเหลี่ยมไม่ทำให้เกิดระดับพูซังที่สูงขึ้นในบางระนาบ แต่อาจเกิดระดับพูซังที่สูงขึ้นในระนาบอื่น ดังนั้นไม่เพียงการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวในพจน์ของรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองเท่านั้นที่ส่งผลต่อระดับพูซังที่สูงขึ้น แต่ความแตกต่างในการจัดวางแผ่นย่อยยังส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต่างกันไป

A.C. Brown, Jr (1996) [19] กล่าวถึงการใช้คุณสมบัติการแบ่งแผ่นราบเพื่อประมาณพื้นผิวจานสะท้อนรูปพาราโบลอยด์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับนำไปใช้งานเป็นสายอากาศบนดาวเทียมโดยคำนึงถึงคุณสมบัติการกางออกในอวกาศโดยแบ่งจานสะท้อนด้วยแผ่นราบรูปหกเหลี่ยม และแผ่นราบรูปสามเหลี่ยม จากการวิเคราะห์พบว่าการใช้แผ่นราบรูปหกเหลี่ยมด้านไม่เท่า และรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่าโดยแบ่งจำนวนโซนเป็นจำนวนเลขคู่สามารถทำให้ระดับพูเกรตติงลดลง

จากลักษณะที่ได้เห็นหลายประการของสายอากาศชนิดจานสะท้อน และการแบ่งพื้นผิวออกเป็นแผ่นย่อยที่กล่าวมาข้างต้น และเพื่อลดปัญหาบางประการที่เกิดขึ้นในสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้โครงตาข่าย เช่น ผลของการว่าเป็นรูปหมอน [10] และการมีขอบเขตบังคับที่ขอบของสายอากาศในลักษณะที่เป็นระนาบ [11] เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอสายอากาศชนิดใหม่ซึ่งใช้แนวคิดเกี่ยวกับการปรับพื้นผิวด้วยการแบ่งพื้นผิวออกเป็นแผ่นย่อยมาเพิ่มสมรรถนะในด้านการปรับเปลี่ยนลำคลื่นโดยเรียกสายอากาศชนิดนี้ว่า สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย (small flat multi-panel reconfigurable reflector antenna) สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างพื้นฐานเช่นเดียวกับสายอากาศชนิดจานสะท้อน แต่พื้นผิวสะท้อนประกอบด้วยแผ่นย่อยขนาดเล็กที่ปรับตัวได้ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ (reconfigurable reflecting surface) การปรับรูปลักษณะของพื้นผิวนี้ควบคุมผ่านมอเตอร์แบบขั้นและระบบเฟืองตัวหนอน ข้อได้เปรียบของการควบคุมในลักษณะนี้คือ แผ่นย่อยไม่สามารถเคลื่อนที่ หรือไม่มีกระบวนการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวเมื่อไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้าทำให้ประหยัดพลังงานอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับที่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ตลอดเวลาแก่ระบบโครงข่ายสร้างลำคลื่น แผ่นตัวนำย่อยแต่ละแผ่นสามารถหมุนรอบทั้งแกนยก (elevation axis) และแกนทิศ (azimuth axis) ความแม่นยำเชิงตำแหน่งของแผ่นย่อยขึ้นอยู่กับอัตราทดของเฟืองและความสามารถของมอเตอร์แบบขั้น ส่วนการสั่งงานเพื่อปรับตัวแผ่นย่อยโปรแกรมควบคุมบนคอมพิวเตอร์จะสร้างชุดคำสั่งมาขับมอเตอร์แบบขั้น

ลักษณะสมบัติการแผ่พลังงานที่ต้องการของสายอากาศชนิดนี้ เช่น การเลื่อนลำคลื่น การสร้างตำแหน่งศูนย์ การสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานแบบจัดลำคลื่นที่ปรับเปลี่ยนได้ สามารถทำได้โดยปรับตำแหน่งเชิงมุมของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเพื่อให้ได้พื้นผิวที่เหมาะสม ตำแหน่งเชิงมุมของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นที่เหมาะสมสามารถหาได้จากกรรมวิธีต่างๆ เช่น กรรมวิธีการประมาณเชิงรังสี (ray approximation technique) [9], [20], [21] ระเบียบวิธีทำให้เหมาะสมที่สุด [22], [23], [24] เป็นต้น อย่างไรก็ตาม สายอากาศชนิดนี้ก็มีข้อเสียบางประการคือ ระบบควบคุมทางกลที่ซับซ้อน การสูญเสียจากช่องว่างระหว่างแผ่นย่อย (interpanel gap loss) การบดบังจากแผ่นย่อยล้อมรอบ (surrounding or neighboring panels blocking) และผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น



จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีเพียงงานวิจัยของ A.C. Schell [9] เท่านั้นที่ได้วิเคราะห์ผลกระทบบางประการที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย เช่น การสูญเสียเนื่องจากช่องว่างระหว่างแผ่นย้อยแต่ละแผ่นและบริเวณเงาที่เกิดขึ้นจากการบดบังของแผ่นย้อยล้อมรอบ แต่ระเบียบวิธีดังกล่าวไม่ครอบคลุมสมรรถนะที่จะทำนายข้อเสียอื่นๆ ที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างของสายอากาศชนิดนี้ เช่น ผลจากการบดบังของแผ่นย้อยล้อมรอบที่มีต่อแบบรูปการแผ่พลังงาน ผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย้อยแต่ละแผ่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เสนอแนวทางการวิเคราะห์ใหม่ที่เหมาะสมสำหรับทำนายสมรรถนะของสายอากาศให้ถูกต้องยิ่งขึ้น โดยรวมผลกระทบจากการบดบังของแผ่นย้อยล้อมรอบ และผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย้อยแต่ละแผ่น

ในการวิเคราะห์ผลกระทบของการบดบังนั้น มีผู้วิจัยหลายรายได้นำกรรมวิธีและสมมุติฐานต่างๆ มาใช้ทำนายผลกระทบดังกล่าวดังต่อไปนี้

W.L. Ko, R. Mittra และ S.-W. Lee (1984) [25] ได้วิเคราะห์การบดบังบนระนาบช่องเปิดของสายอากาศชนิดจานสะท้อนเนื่องจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นและก้านยึด โดยใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ และคิดผลจากการบดบังของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นโดยเปลี่ยนแปลงขอบเขตของปริพันธ์ให้พื้นผิวสะท้อนบริเวณตรงกลางที่สายอากาศป้อนกำลังคลื่นบังอยู่ทางด้านหน้าไม่มีกระแสไหล ซึ่งสอดคล้องกับสมมุติฐานสนามเป็นศูนย์แบบการกำหนดการบังที่จานสะท้อน (reflector-located blockage) ส่วนผลกระทบจากก้านยึดหาโดยเปลี่ยนแปลงกระแสบนพื้นผิวเนื่องจากว่ามีกระแสส่วนหนึ่งเกิดจากสนามสะท้อนจากก้านยึดมาบนจานสะท้อน และไม่มีกระแสเกิดขึ้นในบริเวณเงาของก้านยึด แล้วหาสนามกระเจิงจากกระแสเหล่านี้มารวมกับสนามกระเจิงที่เกิดจากสนามสะท้อนจากจานสะท้อนมาตกกระทบก้านยึดจากการวิเคราะห์พบว่า การบดบังของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมโดยส่งผลกระทบต่อระดับพูซังแรกซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณ 5 dB ส่วนผลกระทบจากการบดบังของก้านยึดมีต่อองค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้ในบริเวณพูซังใกล้ๆ และมีผลกระทบอ่อนลงในบริเวณพูซังที่ไกลออกไป

W.V.T. Rusch, L.R. Welch และ G.E. Mires (1989) [26] ได้เสนอขั้นตอนวิธี (algorithm) ที่มีประสิทธิภาพที่สามารถนำมาใช้กับปริพันธ์ตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ เพื่อรวมผลของบริเวณเงาเชิงเรขาคณิต (geometrical shadows) ที่ขึ้นอยู่กับจุดสังเกต (observation-point-dependent) และการเลื่อนไปของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น (migrating feed-point dependent) ที่เกิดขึ้นโดยวัตถุกีดขวางในระนาบช่องเปิดของสายอากาศชนิดจานสะท้อนที่สายอากาศป้อนกำลังคลื่นอยู่ต่ำกว่าจุดไฟกัสหรือมีการเลื่อนตำแหน่งไปตามสมมุติฐานสนามเป็นศูนย์ (null-field hypothesis) และได้เสนอสูตรที่สามารถนำมาใช้ตรวจสอบหาบริเวณเงาที่ขึ้นอยู่กับจุดสังเกตเนื่องจากการบดบังของวัตถุกีดขวางรูปร่างต่างๆ เช่น แผ่นกลม แผ่นรูปหลายเหลี่ยมแบบเว้า (convex polygons) รูปทรงหลายเหลี่ยมแบบเว้า (convex polyhedrons) และทรงกระบอก

A. Moldsvor และ P.-S. Kildal (1992) [27] ได้ปรับปรุงระเบียบวิธีที่รวมผลกระทบจากการบดบังในการวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อน โดยใช้สมมุติฐานสนามเป็นศูนย์แต่กระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการบดบังอยู่ที่วัตถุกีดขวาง (obstacle-located blockage) แทนที่จะอยู่ที่จานสะท้อน (reflector-located blockage) หรือบริเวณเงา เนื่องจากการที่กำหนดให้กระแสเป็นศูนย์บนจานสะท้อนซึ่งเป็นบริเวณเงาตรงกลางของการบดบังด้วยสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไม่ถูกต้อง เพราะว่าตำแหน่งการบังที่แท้จริงเกิดขึ้นข้างหน้าจานสะท้อนไม่ใช่บนพื้นผิว ทำให้มีความแตกต่างของระยะทางจากจานสะท้อนไปยังจุดสังเกตกับระยะทางจากตำแหน่งที่กีดขวางจริง (สายอากาศป้อนกำลังคลื่น) ไปยังจุดสังเกต ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนทั้งทางขนาดและวิภาค และส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในแบบรูปการแผ่พลังงาน

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สมมุติฐานสนามเป็นศูนย์แบบขึ้นอยู่กับจุดสังเกต [26] มาวิเคราะห์ผลกระทบจากการบดบังของแผ่นย่อยล้อมรอบ โดยได้เสนอและปรับปรุงเงื่อนไขการตรวจสอบบริเวณเงาที่เกิดจากการบดบังของแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมแบบเว้าเพื่อที่จะสามารถตรวจสอบหาบริเวณเงาที่เกิดขึ้นได้ในทุกกรณีจากการบดบัง

ส่วนการวิเคราะห์ผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น งานวิจัยนี้ได้นำทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ (physical theory of diffraction, PTD) [28], [29], [30] ตามแนวคิดของกรรณวิธีกระแสสมมูลที่ขอบของมิคาเอลลี (Michaeli's equivalent edge currents, EEC) [31], [32], [33] มาใช้เพื่อลดความยุ่งยากในการหาจุดสะท้อนและจุดเลี้ยวเบนจากกรรณวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิต (geometrical optics, GO) และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต (geometrical theory of diffraction, GTD) [34], [35] แนวคิดนี้มีความสอดคล้องกับสมมุติฐานสนามเป็นศูนย์แบบขึ้นอยู่กับจุดสังเกต เพราะว่าระเบียบวิธีวิเคราะห์ผลกระทบทั้งสองขึ้นอยู่กับทิศทางของจุดสังเกตเช่นเดียวกัน

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เสนอการเข้ารหัส (fitting) รูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ โดยใช้แผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยม และเนื่องจากพื้นผิวที่ปรับรูปลักษณะได้สามารถเข้ารหัสได้จากแผ่นย่อยรูปใดๆ เช่น แผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยม ดังนั้นสนามกระเจิงซึ่งหาได้จากปริพันธ์ตามกรรณวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ จะอยู่ในรูปที่คำนวณได้ยากในระบบพิกัดพื้นผิวท้องถิ่น (local surface coordinate) เพื่อให้การคำนวณมีความสะดวกมากขึ้น ในงานวิจัยก่อนหน้าได้้นำการแปลงฟูริเยร์ (Fourier transform) ของฟังก์ชันหน้าตาแบบรูปหลายเหลี่ยมกับการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว (fast Fourier transform, FFT) [36], [37] ขั้นตอนวิธีปริพันธ์ของลูดูวิก (Ludwig integration algorithm) สำหรับบริเวณย่อย (subregions) รูปสามเหลี่ยม [38], [39] หรือระเบียบวิธีการเหนี่ยวนำภาพเสมือน (image induction method) [40] มาใช้ งานวิจัยนี้ได้เสนอการแปลงโดเมนรูปหลายเหลี่ยมใดๆ ไปอยู่ในโดเมนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาหาคำนวณหาสนามการกระเจิงตามกรรณวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ [30]

เพื่อตรวจสอบว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง ในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างสายอากาศต้นแบบขึ้นมาเพื่อตรวจสอบกับแนวทางการวิเคราะห์ที่เสนอขึ้น และได้้นำแนวทางการวิเคราะห์ที่เสนอขึ้นมาใช้ทำนายความสามารถในการสร้างลำคลื่นรูปแบบต่างๆ ตามที่ต้องการ โดยจะพิจารณาถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น จำนวนแผ่นย่อย ขนาดและรูปร่างของแผ่นย่อย และรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ ซึ่งวัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย คำนิยามที่ใช้ในการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และวิธีดำเนินการวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. นำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ใหม่ที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์สายอากาศให้ถูกต้องยิ่งขึ้น
2. ศึกษาสมรรถนะในการสร้างลำคลื่นแบบต่างๆ ของสายอากาศ เช่น การเลื่อนลำคลื่น การสร้างตำแหน่งศูนย์ การสร้างลำคลื่นแบบจัดลำคลื่นหรือซับซ้อน
3. ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะของสายอากาศ เช่น จำนวนแผ่นย่อย ขนาดของแผ่นย่อย รูปร่างของแผ่นย่อย รูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น
4. ศึกษาผลกระทบเนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศที่มีต่อสมรรถนะต่างๆ ของสายอากาศ เช่น การเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น การบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และผลกระทบอื่นๆ

### ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษา รวบรวม ปรับปรุง และคิดค้นความรู้เชิงทฤษฎีสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ
2. วิเคราะห์ และคำนวณผลจากค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น จำนวนแผ่นย่อย ขนาดของแผ่นย่อย รูปร่างของแผ่นย่อย รูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศในการสร้างลำคลื่นรูปแบบต่างๆ
3. วิเคราะห์ และคำนวณผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น การบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และผลกระทบอื่นๆ ที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศในการสร้างลำคลื่นรูปแบบต่างๆ
4. หาขีดจำกัดของสายอากาศ
5. ออกแบบ และสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

### คำนิยามที่ใช้ในการวิจัย

#### ภาษาไทย

สายอากาศชนิดจานสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ กรรมวิธีกระแสสมมูลที่ขอบ การเลี้ยวเบนที่ขอบ การบดบังจากแผ่นย่อย การสังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงาน

#### ภาษาอังกฤษ

Reconfigurable Reflector Antenna, Equivalent Edge Current Method, Edge Diffraction, Panel Blocking, Pattern Synthesis

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทำนายลักษณะสมบัติของการแผ่พลังงานและขีดจำกัดต่างๆ ของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย
2. สามารถออกแบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนลำคลื่น เช่น สำหรับรองรับการเปลี่ยนแปลงความต้องการที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารดาวเทียม และสำหรับด้านหรือชุดเซกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากสภาวะแวดล้อมในระบบสื่อสารไร้สาย

### วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สายอากาศ
2. ศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ และผลกระทบต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ
3. ประยุกต์ใช้กรรมวิธีการประมาณย่านความถี่สูง และข้อสมมุติฐานบางประการ เพื่อนำมาใช้ในการทำนายสมรรถนะของสายอากาศ อธิบายกลไกทางกายภาพของสายอากาศ และเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณ
4. ออกแบบและสร้างสายอากาศต้นแบบ
5. วัดค่าลักษณะสมบัติต่างๆ จากสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นเพื่อเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ทางทฤษฎี
6. สรุปงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

### ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน โดยบทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมา และมูลเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 กล่าวถึงแนวคิดของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย กรรมวิธีการประมาณพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ รายละเอียดของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ รายละเอียดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และรายละเอียดของชุดควบคุมทางกลสำหรับปรับแผ่นย่อยและระบบควบคุมการปรับแผ่นย่อยต้นแบบ ในบทที่ 3 กล่าวถึงระเบียบวิธีวิเคราะห์ที่เสนอขึ้นเพื่อวิเคราะห์สายอากาศ อันประกอบไปด้วย กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพตามแนวความคิดกระแสสมมูลที่ขอบ สมมุติฐานสนามเป็นศูนย์ และการหาลักษณะสมบัติของสายอากาศ เช่น โพลาริเซชันร่วม โพลาริเซชันไขว้ และประสิทธิภาพต่างๆ บทที่ 4 กล่าวถึงผลการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีตามแนวทางการวิเคราะห์ในบทที่ 3 และวิเคราะห์ผลที่ได้ โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ดังนี้คือ หัวข้อย่อยแรกกล่าวถึงผลของค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน เช่น ชนิดและตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น หัวข้อย่อยที่สองกล่าวถึงผลของค่าพารามิเตอร์หลัก เช่น รูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้ ขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย รูปร่างของแผ่นย่อย เป็นต้น หัวข้อย่อยที่สามกล่าวถึงผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ หัวข้อย่อยที่สี่กล่าวถึงผลของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง และหัวข้อย่อยที่ห้ากล่าวถึงการสร้างลำคลื่นแบบต่างๆ เพื่อประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้ ส่วนบทที่ 5 กล่าวถึงรายละเอียดของการทดสอบสายอากาศ และเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ และบทที่ 6 เป็นส่วนของการสรุปและข้อเสนอแนะ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย

#### ความนำ

ในอดีตมีการนำกรรมวิธีปรับพื้นผิวจานสะท้อนมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย เช่น นำมาใช้ชดเชยความผิดเพี้ยนไปของพื้นผิวจานสะท้อนหลักในสายอากาศชนิดจานสะท้อนคู่โดยการปรับพื้นผิวจานสะท้อนรอง [5] หรือนำมาใช้สร้างลำคลื่นครอบคลุมแบบจัดรูปตายตัวทั้งในสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยว [7] และจานสะท้อนคู่ที่ใช้สายอากาศป้อนกำลังคลื่นเพียงตัวเดียว เป็นต้น ในช่วงปี ค.ศ. 1988 ถึง 1995 แนวคิดของกรรมวิธีนี้ได้นำมาใช้เพิ่มสมรรถนะของระบบสายอากาศให้สามารถปรับเปลี่ยนลำคลื่นได้เพื่อรองรับความต้องการในการสื่อสารที่มากขึ้น และลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นของระบบโครงข่ายสร้างลำคลื่น โดยทางวิทยาลัย Queen Mary and Westfield (QMW) [10], [11] ได้เสนอวิธีการที่ทำให้พื้นผิวจานสะท้อนที่เป็นโครงตาข่ายของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบอสมมาตรปรับรูปลักษณะได้ตามต้องการด้วยการควบคุมทางกลและเรียกสายอากาศชนิดนี้ว่า สายอากาศชนิดจานสะท้อนโครงตาข่ายแบบปรับรูปลักษณะได้ นอกจากการปรับพื้นผิวโครงตาข่ายแล้ว ยังมีการปรับพื้นผิวที่ประมาณด้วยแผ่นย้อยเพื่อให้ลำคลื่นครอบคลุมเปลี่ยนแปลงไปด้วย [13] จริงๆ แล้วแนวคิดเช่นนี้เคยนำมาใช้ในงานดาราศาสตร์วิทยุตั้งแตปี ค.ศ. 1966 [8], [9] โดยแบ่งพื้นผิวแบนราบออกเป็นแผ่นย้อยและแผ่นย้อยแต่ละแผ่นสามารถปรับตัวได้

งานวิจัยนี้ได้ใช้แนวคิดเกี่ยวกับการปรับพื้นผิวโดยใช้แผ่นย้อยมาเพิ่มสมรรถนะของสายอากาศชนิดจานสะท้อนในการสร้างลำคลื่นแบบจัดรูป การเลื่อนลำคลื่น และการสร้างตำแหน่งศูนย์ นอกจากนี้ยังคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างของสายอากาศ สายอากาศที่งานวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้นคือ สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย เพื่อแสดงให้เห็นหลักการ โครงสร้างพื้นฐาน และรายละเอียดขององค์ประกอบของสายอากาศชนิดนี้ ในบทนี้จะกล่าวถึง โครงสร้าง การประมาณพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ด้วยแผ่นย้อย รายละเอียดขององค์ประกอบหลักๆ โดยมุ่งสนใจสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวแบบปรับรูปลักษณะได้เป็นหลัก รายละเอียดของระบบควบคุมพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ของสายอากาศต้นแบบ โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้คือ ในหัวข้อแรกกล่าวถึงแนวคิดของสายอากาศซึ่งอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้าง หลักการ กรรมวิธีที่ใช้ในการเลื่อนลำคลื่น และการสังเคราะห์ลำคลื่นครอบคลุม และแบ่งแยกออกเป็นหัวข้อย่อยสามหัวข้อดังนี้คือ หัวข้อย่อยแรกกล่าวถึงการประมาณพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ด้วยแผ่นย้อยรูปหลายเหลี่ยม หัวข้อย่อยที่สองกล่าวถึงรายละเอียดของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ และหัวข้อย่อยสุดท้ายกล่าวถึงรายละเอียดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ส่วนในหัวข้อที่สองกล่าวถึงรายละเอียดของชุดควบคุมทางกลและแผงวงจรควบคุมต้นแบบ

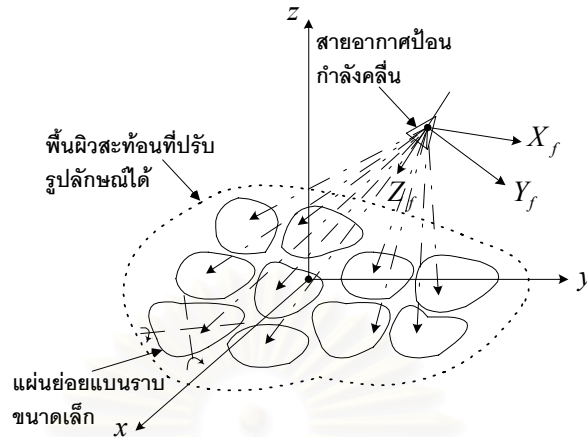
#### 2.1 แนวคิดของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย

สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อยเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างพื้นฐานเช่นเดียวกับสายอากาศชนิดจานสะท้อน แต่พื้นผิวสะท้อนประกอบด้วยแผ่นย้อยขนาดเล็กที่ปรับตัวได้ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ (reconfigurable reflecting surface) ดังรูป 2.1

นอกจากโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศดังรูป 2.1 แล้ว สายอากาศชนิดนี้ยังสามารถจัดเรียงโครงสร้างได้หลากหลายรูปแบบเช่นเดียวกับแนวคิดของสายอากาศชนิดจานสะท้อนเช่น จัดเรียงเป็นสายอากาศชนิดจานสะท้อนรูปหักมุมแบบปรับรูปลักษณะได้ จัดเรียงเป็นสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวแบบปรับรูปลักษณะได้ [20], [21] หรือจัดเรียง



เป็นสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้ [17] เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเพียงสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอย



รูป 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอย

การสร้างลำคลื่นแบบแปรเปลี่ยนได้ของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอยนั้น พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่มาจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเกิดการก่อรูปร่างใหม่ของลำคลื่นให้มีรูปร่างหรือทิศทางตามต้องการโดยการปรับแผ่นยอยด้วยวิธีทางกล กรรมวิธีในการปรับแผ่นยอยทำได้โดยการหมุน หรือการเลื่อน หรือในสองลักษณะ ยกตัวอย่างเช่นในการเลื่อนลำคลื่น A.C. Shell [9] ได้ใช้วิธีเลื่อนแผ่นยอยโดยปรับความสูงของจุดศูนย์กลางของแผ่นยอย เพื่อที่จะทำให้ได้คลื่นที่มีหน้าคลื่นเดียวกันสำหรับความถี่ปฏิบัติการค่าหนึ่ง และใช้วิธีหมุนแผ่นยอยโดยอาศัยแนวคิดเชิงรังสีมาหามุมที่หมุน ที่ต้องทำทั้งการเลื่อนแผ่นยอยและการหมุนแผ่นยอยก็เพราะว่าการหมุนแผ่นยอยเพียงอย่างเดียวอาจไม่ทำให้เกิดคลื่นที่มีวิภาคตรงกัน ทำให้ลำคลื่นมีการเลี้ยวไปไม่ตรงตำแหน่งที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม การเลื่อนแผ่นยอยเป็นสิ่งจำเป็นและเหมาะสมจะนำไปใช้กับสายอากาศที่ประกอบด้วยแผ่นยอยที่มีขนาดทางไฟฟ้าใหญ่จำนวนมาก แต่อาจไม่มีความจำเป็นเท่าไรนักสำหรับสายอากาศขนาดเล็กที่ประกอบด้วยแผ่นยอยที่มีขนาดทางไฟฟ้าเล็กจำนวนไม่มากนักและจัดเรียงในลักษณะที่เหมาะสมเช่น ลักษณะเดียวหนึ่งของวงกลมหรือลักษณะที่ระยะทางที่คลื่นเดินทางมาตกกระทบแผ่นยอยแต่ละแผ่นไม่ต่างกันมากนัก เป็นต้น เพราะว่าความแตกต่างของเส้นทางของการแพร่กระจายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเลื่อนแผ่นยอยอาจจะไม่เด่นชัด จริงๆ แล้วการที่จะสร้างลำคลื่นแบบจัดรูป แบบเลื่อนลำคลื่น หรือการสร้างตำแหน่งศูนย์ให้มีความถูกต้องนั้นสามารถทำได้โดยนาระเบียบวิธีทำให้เหมาะสมที่สุดมาใช้เพื่อหามุมที่หมุนไปของแผ่นยอยแต่ละแผ่น นอกจากนี้การเลื่อนแผ่นยอยยังนำไปสู่ความซับซ้อนของระบบควบคุมทางกลที่มากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเพียงการหมุนแผ่นยอยที่มีต่อการสร้างลำคลื่นแบบต่างๆ

การหมุนแผ่นยอยเพื่อสร้างลำคลื่นแบบเลื่อนลำคลื่น ในงานวิจัยนี้กำหนดให้การหมุนของแผ่นยอยแต่ละแผ่นเกิดขึ้นรอบแกนยกและแกนทิศของแผ่นยอยดังได้กล่าวรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ค. ไปเป็นมุม  $\theta_{rot}^e$  และ  $\phi_{rot}^e$  ตามลำดับ จากการหมุนดังกล่าว มุมที่หมุนไปของแผ่นยอยแต่ละแผ่นยอยสามารถหาได้โดยใช้กรรมวิธีการประมาณเชิงรังสี กรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีนี้มีสมมุติฐานที่ว่า กลุ่มของรังสีสะท้อนมีหน้าคลื่นเหมือนกับรังสีที่สะท้อนออกจากจุดศูนย์กลางของแผ่นยอยดังรูป 2.2 จะเห็นได้ว่าสมมุติฐานดังกล่าวมีความเหมาะสมกับแผ่นยอยที่มีขนาดทางไฟฟ้าไม่ใหญ่มาก และจากกฎการสะท้อน สมการที่สอดคล้องกับกรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีคือ

$$\hat{n}_{rot}^e = \frac{\hat{u}_o - \hat{s}_{i,e}^c}{\|\hat{u}_o - \hat{s}_{i,e}^c\|} \quad (2.1)$$

และเมื่อกำหนดให้  $u = \sin \theta_{rot}^e \cos \phi_{rot}^e$  และ  $v = \sin \theta_{rot}^e \sin \phi_{rot}^e$  แล้วแทนลงในสมการ (ค.10) ในภาคผนวก ค. จะได้

$$n_{rot,x}^e = -v \sin \phi_{init}^e + \cos \phi_{init}^e (u \cos \theta_{init}^e + \sqrt{1-u^2-v^2} \sin \theta_{init}^e) \quad (2.2ก)$$

$$n_{rot,y}^e = v \cos \phi_{init}^e + \sin \phi_{init}^e (u \cos \theta_{init}^e + \sqrt{1-u^2-v^2} \sin \theta_{init}^e) \quad (2.2ข)$$

$$n_{rot,z}^e = \sqrt{1-u^2-v^2} \cos \theta_{init}^e - u \sin \theta_{init}^e \quad (2.2ค)$$

จากสมการ (2.2ก) และ (2.2ข) จะได้

$$v = -n_{rot,x}^e \sin \phi_{init}^e + n_{rot,y}^e \cos \phi_{init}^e \quad (2.3)$$

จากสมการ (2.2ก) และ (2.2ค) จะได้

$$u \cos \phi_{init}^e \sec \theta_{init}^e - v \sin \phi_{init}^e = n_{rot,x}^e - n_{rot,z}^e \tan \theta_{init}^e \cos \phi_{init}^e \quad (2.4)$$

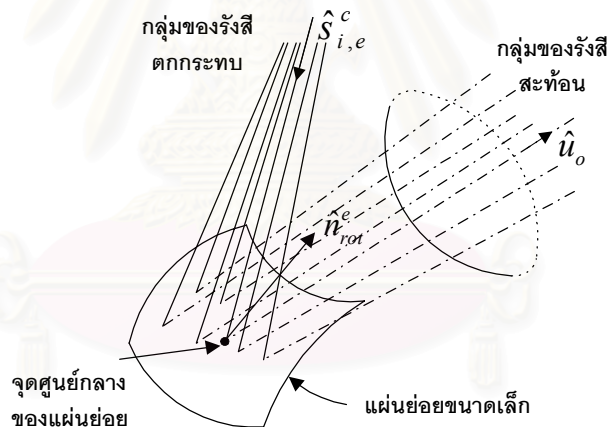
เมื่อแทนสมการ (2.3) ลงในสมการ (2.4) จะได้

$$u = n_{rot,x}^e \cos \theta_{init}^e \cos \phi_{init}^e + n_{rot,y}^e \cos \theta_{init}^e \sin \phi_{init}^e - n_{rot,z}^e \sin \theta_{init}^e \quad (2.5)$$

และมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเป็น

$$\theta_{rot}^e = \arccos(\sqrt{1-u^2-v^2}), \quad \phi_{rot}^e = \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (2.6)$$

โดยที่  $\hat{u}_o = \sin \theta_o \cos \phi_o \hat{x} + \sin \theta_o \sin \phi_o \hat{y} + \cos \theta_o \hat{z}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางเคลื่อนลำคลื่น  $(\theta_o, \phi_o)$ ,  $\hat{s}_{i,e}^c$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของรังสีตกกระทบที่จุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยที่  $e$ ,  $n_{rot,x}^e, n_{rot,y}^e, n_{rot,z}^e$  คือองค์ประกอบในทิศทาง  $x, y, z$  ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแผ่นย่อยที่  $e$  ( $\hat{n}_{rot}^e$ ) ในระบบพิกัดทั่วไป (global coordinate) ตามลำดับ



รูป 2.2 การประมาณกลุ่มรังสีที่สะท้อนออกจากแผ่นย่อยว่ามีหน้าคลื่นใกล้เคียงกันกับรังสีอ้างอิงที่สะท้อนออกมาจากจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อย

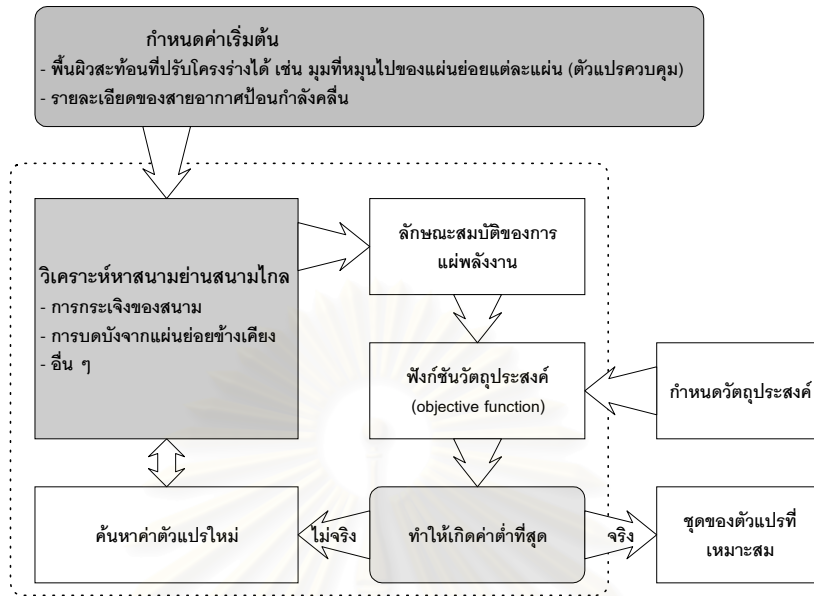
กรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้มีรูปร่างเป็นพื้นผิวแบนราบ ( $\phi_{init}^e = \theta_{init}^e = 0$ ) มุมที่หมุนไปสามารถเขียนอยู่ในรูปอย่างง่ายเป็น

$$\theta_{rot}^e = \arctan\left(\frac{\sqrt{(n_{rot,x}^e)^2 + (n_{rot,y}^e)^2}}{n_{rot,z}^e}\right), \quad \phi_{rot}^e = \arctan\left(\frac{n_{rot,y}^e}{n_{rot,x}^e}\right) \quad (2.7)$$

สำหรับการสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานในรูปแบบเฉพาะเช่น การสร้างตำแหน่งศูนย์ การสร้างลำคลื่นแบบจัดรูป ไม่สามารถหาผลเฉลยอย่างง่ายได้เหมือนกับการเคลื่อนลำคลื่น ดังนั้นเพื่อให้บรรลุจุดประสงค์จำเป็นต้องประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีทำให้เหมาะสมที่สุดดังรูป 2.3 โดยกำหนดให้มุมที่หมุนรอบแกนยกและแกนทิศของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเป็นตัวแปร



ควบคุมของการทำให้เหมาะสมที่สุด ค่าเริ่มต้นของตัวแปรควบคุมนี้เป็นค่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้จำนวนครั้งของการวนซ้ำเข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดน้อยลง อย่างไรก็ตาม การหาค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมกับปัญหานั้นๆ ทำได้ยาก



รูป 2.3 การประยุกต์ระเบียบวิธีทำให้เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงาน

ตามขั้นตอนในรูป 2.3 เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นแล้ว การวนซ้ำเกิดขึ้นภายในกรอบเส้นประโดยลักษณะสมบัติของการแผ่พลังงานที่ต้องการสามารถหาได้จากกรรมวิธีวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆ ที่จะกล่าวไว้ในบทที่ 3 ค่าลักษณะสมบัติของการแผ่พลังงานที่คำนวณได้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าลักษณะสมบัติของการแผ่พลังงานที่กำหนดไว้ ผลต่างที่ได้จะกำหนดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ซึ่งต้องทำให้มีค่าต่ำที่สุด การวนซ้ำจะยุติเมื่อผลลัพธ์ของการเปรียบเทียบเป็นที่น่าพอใจ มิฉะนั้นระเบียบวิธีทำให้เหมาะสมที่สุด เช่น ระเบียบวิธีความชันสังยุค (conjugate gradient method) เป็นต้น จะหาค่าตัวแปรควบคุมชุดใหม่ที่ทำให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ลดน้อยลง และใช้เป็นตัวแปรควบคุมชุดใหม่ในการวนซ้ำครั้งถัดไป นอกจากการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว มุมที่หมุนรอบแกนยกของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยนี้ต้องมีขีดจำกัดในการปรับระดับของแผ่นย่อย ดังนั้นเพื่อไม่ให้มุมที่ได้มีค่าเกินขีดจำกัดที่กำหนดจำเป็นต้องมีฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับ (constraint function) กำหนดไว้ด้วย ในงานวิจัยนี้กำหนดให้มุมที่หมุนรอบแกนยกมีค่าในช่วง  $-45$  ถึง  $45$  องศา เป็นฟังก์ชันเงื่อนไขบังคับ และใช้ฟังก์ชัน `fmincon` ซึ่งเป็นฟังก์ชันในชุดเครื่องมือทำให้เหมาะสมที่สุด (optimization toolbox) ของโปรแกรม MATLAB มาดำเนินการสังเคราะห์ โดยการสังเคราะห์ลำดับแบบครอบคลุมหรือจัดลำดับกำหนดให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็น

$$F(\theta_{rot}^e, \phi_{rot}^e) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_j (G_{cj} - G_{dj})^p \tag{2.8}$$

โดยที่  $G_{cj}$  คืออัตราขยายที่คำนวณได้ที่จุดตัวอย่างที่  $j$  ในบริเวณครอบคลุมจากจุดตัวอย่างทั้งหมดจำนวน  $m$  จุดในพิทักเชิงมุม  $(\theta_j, \phi_j)$  หรือ  $(Az_j, El_j)$  โดยที่  $j = 1, 2, \dots, m$ ,  $G_{dj}$  คืออัตราขยายที่ต้องการที่จุดตัวอย่างที่  $j$  ในบริเวณครอบคลุม,  $w_j$  คือค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) สำหรับจุดตัวอย่างที่  $j$  และ  $p$  คือค่าตัวประกอบกำลัง (power factor) ซึ่งเป็นจำนวนเต็มบวกเลขคู่ ค่าของ  $p$  มีผลต่ออัตราการลู่เข้า (convergence rate) และผลเฉลยสุดท้ายโดยทั่วไปแล้วค่า  $p$  ที่ใช้มักจะเท่ากับ 2

สังเกตว่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการ (2.8) อาจทำให้ค่าที่หาได้มีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่าที่ต้องการ ซึ่งส่งผลให้เกิดเป็นระลอกภายในบริเวณครอบคลุมทำให้ไม่ได้อัตราขยายมากที่สุด ผลดังกล่าวนี้สามารถขจัดออกโดยดัดแปลงสมการ (2.8) เป็นดังนี้

$$F(\theta_{rot}^e, \phi_{rot}^e) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_j f_j \tag{2.9}$$

โดยที่

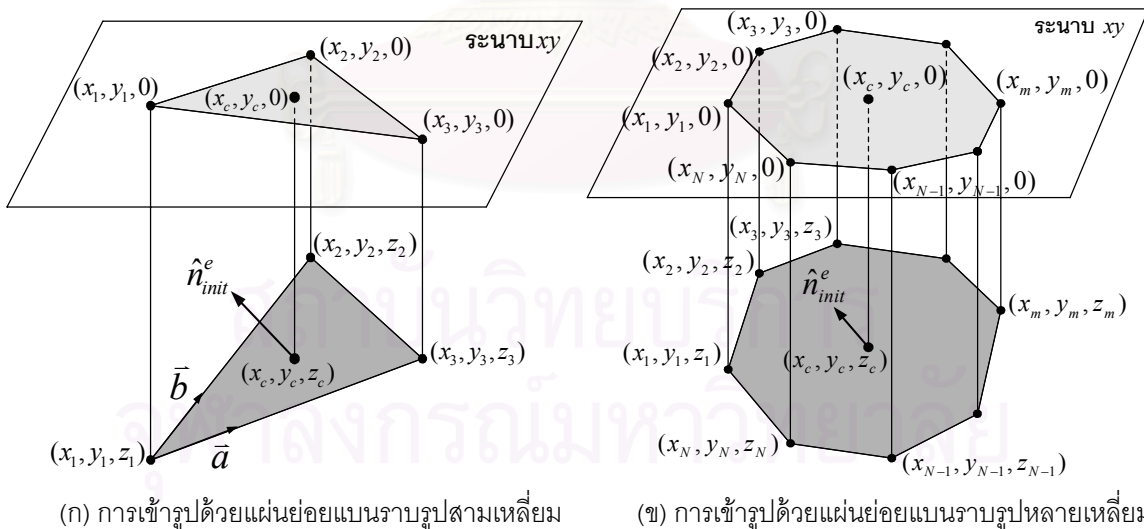
$$f_j = \begin{cases} (G_{cj} - G_{dj})^p, & G_{cj} < G_{dj} \\ 0, & G_{cj} \geq G_{dj} \end{cases} \tag{2.10}$$

และถ้าต้องการลดอัตราขยายในบางบริเวณหรือทิศทางที่ต้องการ เช่น ในบริเวณพู่ข้างหรือตำแหน่งศูนย์ก็ดัดแปลงสมการ (2.10) ในบริเวณและตำแหน่งนั้นเป็น

$$f_j = \begin{cases} (G_{cj} - G_{dj})^p, & G_{cj} > G_{dj} \\ 0, & G_{cj} \leq G_{dj} \end{cases} \tag{2.11}$$

### 2.1.1 การประมาณพื้นผิวสะท้อนเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ด้วยแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยม

พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสายอากาศชนิดนี้ เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการแปรเปลี่ยนของลำคลื่น การสร้างพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้สามารถทำได้หลายวิธีโดยการแบ่งย่อยผิวโค้งอันดับหนึ่งหรืออันดับสอง อย่างเช่น ในกรณีของพื้นผิวสะท้อนรูปพาราโบลอยด์หรือทรงกลม การใช้แผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมหรือรูปหกเหลี่ยมเป็นรูปที่เหมาะสมต่อการแบ่งย่อย [18], [41] นอกจากนี้รูปสามเหลี่ยมหรือรูปหกเหลี่ยมแล้ว ยังมีการใช้รูปหลายเหลี่ยมมาประมาณพื้นผิว [19] สำหรับงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการประมาณพื้นผิวโดยใช้แผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมมาเข้ารูป (fitting) รูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ในสองลักษณะดังรูป 2.4



รูป 2.4 เราคาดคิดของการเข้ารูปพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้

รูป 2.4ก แสดงการใช้แผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมมาเข้ารูปพื้นผิว โดยเริ่มจากกำหนดภาพฉายของจุดยอดของรูปสามเหลี่ยมลงบนระนาบ  $xy$  และส่งจุดทั้งสามไปยังพื้นผิวที่ต้องการเข้ารูป  $z=f(x,y)$  ดังนั้นจุดยอดของแผ่นย่อยกำหนดโดย

$$z_i = f(x_i, y_i), \quad i = 1, 2, 3 \tag{2.12}$$

และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแผ่นย่อยเป็น

$$\hat{n}_{init}^e = \frac{\bar{a} \times \bar{b}}{\|\bar{a} \times \bar{b}\|},$$

$$\bar{a} = (x_3 - x_1)\hat{x} + (y_3 - y_1)\hat{y} + (z_3 - z_1)\hat{z},$$

$$\bar{b} = (x_2 - x_1)\hat{x} + (y_2 - y_1)\hat{y} + (z_2 - z_1)\hat{z} \quad (2.13)$$

โดยที่จุด  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$ ,  $(x_3, y_3, z_3)$  คือจุดยอดของแผ่นย่อยซึ่งมีลำดับของจุดทั้งสามอยู่ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา โดยจะกำหนดได้ตั้งแต่อยู่บนระนาบ  $xy$  และจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยสามารถหาได้ดังสมการ

$$x_c = \sum_{i=1}^3 \frac{x_i}{3}, \quad y_c = \sum_{i=1}^3 \frac{y_i}{3}, \quad z_c = \sum_{i=1}^3 \frac{z_i}{3} \quad (2.14)$$

รูป 2.4ข แสดงการใช้แผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมมาเข้ารูปพื้นผิวที่ต้องการ โดยเริ่มจากกำหนดจุดยอดของภาพฉายของแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมบนระนาบ  $xy$  แล้วคำนวณหาจุดศูนย์กลางของจุดยอดเหล่านั้นดังสมการ

$$x_c = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N}, \quad y_c = \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N} \quad (2.15)$$

โดยที่  $N$  คือจำนวนด้านของแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยม และเพื่อสร้างพื้นผิว  $z=f(x,y)$  การจัดวางแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมเกิดขึ้นโดยวางให้ระนาบของแผ่นย่อยสัมผัสกับพื้นผิวที่จุดศูนย์กลาง  $(x_c, y_c, z_c=f(x_c, y_c))$  ดังนั้นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมกำหนดได้ดังสมการ

$$\hat{n}_{init}^e = \frac{\nabla(z - f(x, y))}{\|\nabla(z - f(x, y))\|_{(x_c, y_c, z_c)}} \quad (2.16)$$

และจุดบนแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมสามารถหาได้ดังสมการ

$$z = p(x, y) = z_c - \frac{n_{init,x}^e}{n_{init,z}^e}(x - x_c) - \frac{n_{init,y}^e}{n_{init,z}^e}(y - y_c) \quad (2.17)$$

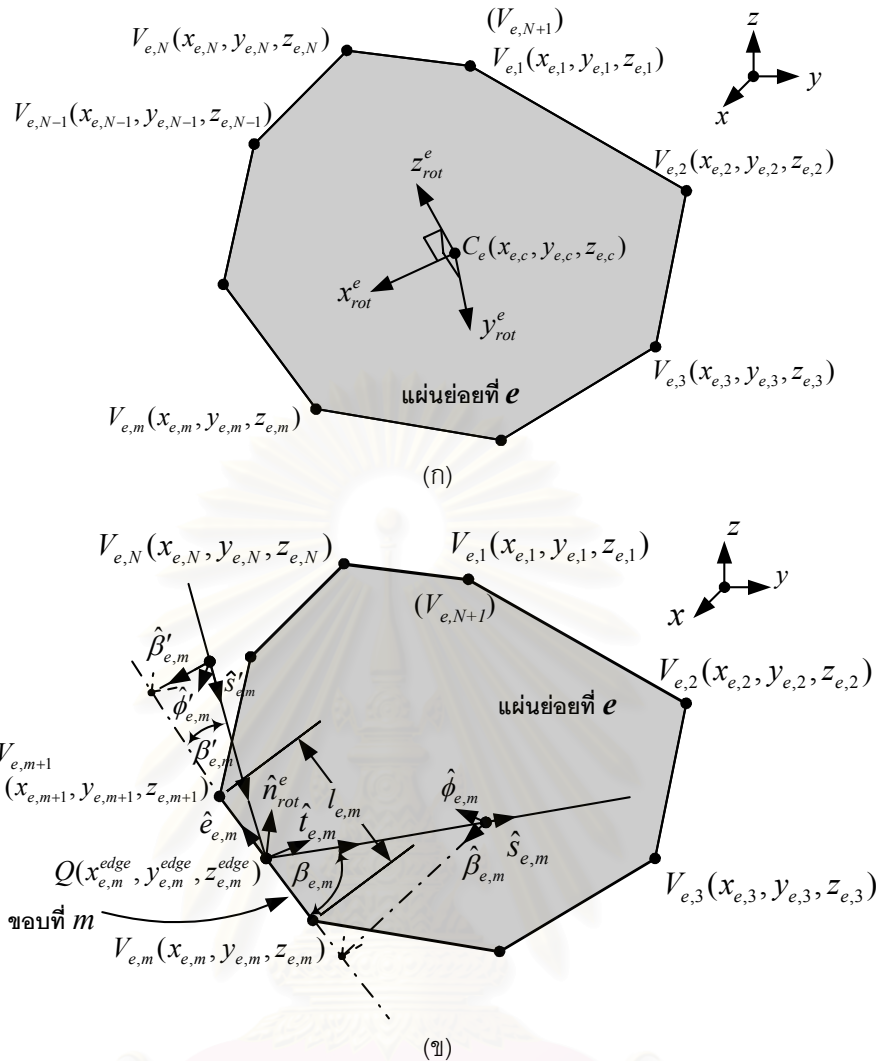
โดยที่  $n_{init,x}^e, n_{init,y}^e, n_{init,z}^e$  คือองค์ประกอบในทิศทาง  $x, y, z$  ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแผ่นย่อยที่  $e$  ( $\hat{n}_{init}^e$ ) ในระบบพิกัดทั่วไปตามลำดับ และจุดยอดของแผ่นย่อยสอดคล้องกับ

$$z_i = p(x_i, y_i), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.18)$$

### 2.1.2 รายละเอียดของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้

พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ประกอบด้วยรูปหลายเหลี่ยมหลายรูป เพื่ออ้างถึงแผ่นย่อยแต่ละรูปปริมาณที่มีดัชนีบน  $e$  กำกับไว้บ่งบอกถึงปริมาณในระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น  $S^e$  และปริมาณที่ไม่มีดัชนีบน  $e$  กำกับไว้บ่งบอกถึงปริมาณในระบบพิกัดทั่วไป

สำหรับแผ่นย่อยที่  $e$  จุดยอดของแผ่นย่อยกำหนดได้ด้วย  $V_{e,1}, V_{e,2}, V_{e,3}, \dots, V_{e,N}$  และจุดกำเนิดของระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวอยู่ที่จุดศูนย์กลาง  $C_e(x_{c,e}, y_{c,e}, z_{c,e})$  ส่วนแกนท้องถิ่น  $x_{rot}^e$  กับแกนท้องถิ่น  $y_{rot}^e$  วางตัวอยู่ในระนาบที่ประกอบด้วยจุดยอดของแผ่นย่อย และแกนท้องถิ่น  $z_{rot}^e$  มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบนั้นดังรูป 2.5ก



รูป 2.5 ระบบพิกัดท้องถิ่น (ก) ระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิว (ข) ระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบแบบตายตัว

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน  $xyz$  เป็นระบบพิกัดทั่วไป ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะหลังการหมุน  $x_{rot}^e y_{rot}^e z_{rot}^e$  กับระบบพิกัดทั่วไป เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแผ่นย่อยที่  $e$  ในสถานะเริ่มต้น และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับแผ่นย่อยที่  $e$  เมื่อแผ่นย่อยหมุนไป (สถานะหลังการหมุน) แสดงในภาคผนวก ค. จุดบนแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมที่  $e$  ในระบบพิกัดทั่วไปสามารถหาได้ดังสมการ

$$z = z_{e,c} - \frac{n_{rot,x}^e}{n_{rot,z}^e}(x - x_{e,c}) - \frac{n_{rot,y}^e}{n_{rot,z}^e}(y - y_{e,c}) \quad (2.19)$$

การอ้างถึงขอบแต่ละขอบของแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมที่  $e$  และการศึกษาพฤติกรรมการเลี้ยวเบนของคลื่นที่ขอบระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบแบบตายตัว (edge-fixed coordinate) เป็นระบบพิกัดอ้างอิงที่เหมาะสม จุดกำเนิดของระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบกำหนดไว้ที่จุดยอดแต่ละจุดของแผ่นย่อยแสดงในรูป ค-1 เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตกกระทบจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมายังขอบที่  $m$  ( $\hat{s}'_{e,m}$ ) เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางจากขอบที่  $m$  ไปยังจุดสังเกต ( $\hat{s}_{e,m}$ ) และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่  $m$  ( $\hat{e}_{e,m}$ ) ที่สอดคล้องกับระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบดังรูป 2.5 ข สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\hat{s}'_{e,m} = \frac{(x_{e,m}^{edge} - x_{shf})\hat{x} + (y_{e,m}^{edge} - y_{shf})\hat{y} + (z_{e,m}^{edge} - z_{shf})\hat{z}}{\sqrt{(x_{e,m}^{edge} - x_{shf})^2 + (y_{e,m}^{edge} - y_{shf})^2 + (z_{e,m}^{edge} - z_{shf})^2}} \quad (2.20)$$

$$\hat{s}_{e,m} = \frac{(x_p - x_{e,m}^{edge})\hat{x} + (y_p - y_{e,m}^{edge})\hat{y} + (z_p - z_{e,m}^{edge})\hat{z}}{\sqrt{(x_p - x_{e,m}^{edge})^2 + (y_p - y_{e,m}^{edge})^2 + (z_p - z_{e,m}^{edge})^2}} \quad (2.21)$$

$$\hat{e}_{e,m} = \frac{(x_{e,m+1} - x_{e,m})\hat{x} + (y_{e,m+1} - y_{e,m})\hat{y} + (z_{e,m+1} - z_{e,m})\hat{z}}{l_{e,m}} \quad (2.22)$$

โดยที่  $l_{e,m} = \sqrt{(x_{e,m+1} - x_{e,m})^2 + (y_{e,m+1} - y_{e,m})^2 + (z_{e,m+1} - z_{e,m})^2}$  และ

$$\hat{\phi}_{e,m} = \frac{\hat{s}_{e,m} \times \hat{e}_{e,m}}{\|\hat{s}_{e,m} \times \hat{e}_{e,m}\|}, \hat{\beta}_{e,m} = \hat{s}_{e,m} \times \hat{\phi}_{e,m}, \hat{\phi}'_{e,m} = \frac{\hat{e}_{e,m} \times \hat{s}'_{e,m}}{\|\hat{e}_{e,m} \times \hat{s}'_{e,m}\|}, \hat{\beta}'_{e,m} = \hat{s}'_{e,m} \times \hat{\phi}'_{e,m} \quad (2.23)$$

$$\beta_{e,m} = \pi - \arccos(\hat{s}_{e,m} \cdot \hat{e}_{e,m}), \beta'_{e,m} = \pi - \arccos(\hat{s}'_{e,m} \cdot \hat{e}_{e,m}) \quad (2.24)$$

$$\phi_{e,m} = \begin{cases} \arccos(\hat{n}_{rot}^e \cdot \hat{\phi}_{e,m}), & \hat{t}_{e,m} \cdot \hat{\phi}_{e,m} \leq 0 \\ 2\pi - \arccos(\hat{n}_{rot}^e \cdot \hat{\phi}_{e,m}), & \hat{t}_{e,m} \cdot \hat{\phi}_{e,m} > 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

$$\phi'_{e,m} = \begin{cases} \arccos(\hat{n}_{rot}^e \cdot \hat{\phi}'_{e,m}), & \hat{t}_{e,m} \cdot \hat{\phi}'_{e,m} \leq 0 \\ 2\pi - \arccos(\hat{n}_{rot}^e \cdot \hat{\phi}'_{e,m}), & \hat{t}_{e,m} \cdot \hat{\phi}'_{e,m} > 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

โดยที่  $\hat{t}_{e,m} = \hat{e}_{e,m} \times \hat{n}_{rot}^e$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสผิวกับแผ่นย่อยที่  $e$  และมีทิศทางจากขอบที่  $m$  เข้าหาพื้นผิว และ จุด  $(x_{e,m}, y_{e,m}, z_{e,m})$  คือจุดยอดที่  $m$  ของแผ่นย่อยที่  $e$  ในระบบพิกัดทั่วไปในสถานะหลังการหมุน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (ค.11) ในภาคผนวก ค. เป็น

$$\begin{bmatrix} x_{e,m} \\ y_{e,m} \\ z_{e,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^T \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{init,m}^e \\ y_{init,m}^e \\ z_{init,m}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{e,c} \\ y_{e,c} \\ z_{e,c} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

จุด  $(x_{init,m}^e, y_{init,m}^e, z_{init,m}^e)$  คือจุดยอดที่  $m$  ของแผ่นย่อยที่  $e$  ในระบบพิกัด  $x_{init}^e, y_{init}^e, z_{init}^e$ , จุด  $(x_{e,m}^{edge}, y_{e,m}^{edge}, z_{e,m}^{edge})$  คือจุดบนขอบที่  $m$  ในระบบพิกัดทั่วไปซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (ค.15) ในภาคผนวก ค. และจุด  $(x_{shf}, y_{shf}, z_{shf})$  คือตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นในระบบพิกัดทั่วไป

### 2.1.3 รายละเอียดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

สายอากาศป้อนกำลังคลื่นวางอยู่ที่จุด  $(x_{shf}, y_{shf}, z_{shf})$  ในระบบพิกัดทั่วไป เพื่ออ้างถึงสนามที่แผ่พลังงานออกมาจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นใช้ระบบพิกัดท้องถิ่น  $X_f, Y_f, Z_f$  เป็นระบบพิกัดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ระบบพิกัดท้องถิ่นนี้เกิดจากการเลื่อนจุดกำเนิดของระบบพิกัดทั่วไปไปที่จุด  $(x_{shf}, y_{shf}, z_{shf})$  และหมุนรอบแกน  $X_{f,t}$  ที่เลื่อนไปเป็นมุม  $A_z$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแล้วหมุนรอบแกน  $Y_{f,t}$  ที่หมุนไปเป็นมุม  $E_l$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตกกระทบเนื่องจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นแบบเชิงเส้นซึ่งมีโพลาริเซชันในแนว  $y_f$  ที่จุดใดๆ  $(r_f, \theta_f, \phi_f)$  ของระบบพิกัดท้องถิ่นเป็น [42]

$$\bar{E}^{feed}(r_f, \theta_f, \phi_f) = \left[ f_E(\theta_f) \sin \phi_f \hat{\theta}_f + f_H(\theta_f) \cos \phi_f \hat{\phi}_f \right] \frac{e^{-jkr_f}}{r_f} \quad (2.28ก)$$

$$\bar{H}^{feed}(r_f, \theta_f, \phi_f) = \left[ \frac{f_E(\theta_f) \sin \phi_f \hat{\phi}_f - f_H(\theta_f) \cos \phi_f \hat{\theta}_f}{Z_o} \right] \frac{e^{-jkr_f}}{r_f} \quad (2.28ข)$$



โดยที่  $f_E(\theta_f)$ ,  $f_H(\theta_f)$  คือแบบรูปการแผ่พลังงานบนระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ โดยปกติแล้วในการวิเคราะห์สนามตกกระทบนี้มักแสดงอยู่ในระบบพิกัดทั่วไป ดังนั้นสนามแม่เหล็กในระบบพิกัดทั่วไปเป็น

$$\begin{bmatrix} H_x^{feed} \\ H_y^{feed} \\ H_z^{feed} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos E_l & 0 & \sin E_l \\ \sin A_z \sin E_l & \cos A_z & -\sin A_z \cos E_l \\ -\cos A_z \sin E_l & \sin A_z & \cos A_z \cos E_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_f \cos \phi_f & \cos \theta_f \cos \phi_f & -\sin \phi_f \\ \sin \theta_f \sin \phi_f & \cos \theta_f \sin \phi_f & \cos \phi_f \\ \cos \theta_f & -\sin \theta_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{r_f}^{feed} \\ H_{\theta_f}^{feed} \\ H_{\phi_f}^{feed} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

และความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดท้องถิ่นของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นกับระบบพิกัดท้องถิ่นเป็น

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos E_l & \sin A_z \sin E_l & -\cos A_z \sin E_l \\ 0 & \cos A_z & \sin A_z \\ \sin E_l & -\sin A_z \cos E_l & \cos A_z \cos E_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_{shf} \\ y - y_{shf} \\ z - z_{shf} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

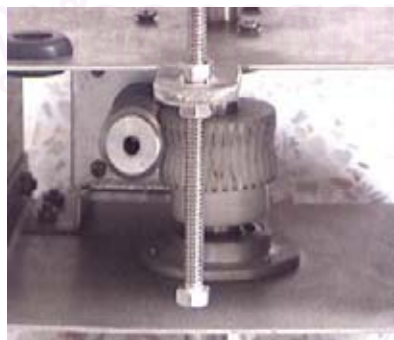
โดยที่  $r_f = \sqrt{x_f^2 + y_f^2 + z_f^2}$ ,  $\theta_f = \arccos(z_f / r_f)$ ,  $\phi_f = \arctan(y_f / x_f)$  ในงานวิจัยนี้ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังต่างๆ ( $f_E(\theta_f) = \cos^{q_e} \theta_f$ ,  $f_H(\theta_f) = \cos^{q_h} \theta_f$ ) และสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น โดยที่  $q_e, q_h$  คือกำลังของโคไซน์ในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายอากาศชนิดโคไซน์

## 2.2 ชุดควบคุมทางกลสำหรับปรับแผ่นย่อยและระบบควบคุมการปรับแผ่นย่อยต้นแบบ

จากหัวข้อที่ผ่านมาพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดจากการปรับตัวของแผ่นย่อย ในงานวิจัยนี้การปรับตัวของแผ่นย่อยของสายอากาศต้นแบบทำได้โดยการควบคุมผ่านมอเตอร์แบบขั้น (stepper motor) และระบบเฟืองตัวหนอน ดังรูป 2.6 ข้อได้เปรียบของการควบคุมในลักษณะนี้ก็คือ แผ่นย่อยจะไม่เคลื่อนที่ ทำให้รูปลักษณะของพื้นผิวสะท้อนไม่เกิดการแปรเปลี่ยนเมื่อไม่มีการจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ต้องจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่ระบบโครงข่ายสร้างลำคลื่นของสายอากาศชนิดแกว่ลำดับแบบไวงานตลอดเวลา การทำงานในลักษณะนี้เหมาะสมมากกับการประยุกต์ใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงลำคลื่นไม่บ่อยครั้งนัก



(ก) ต้นแบบของชุดควบคุมแผ่นย่อย



(ข) ระบบควบคุมการหมุนรอบแกนทิศ



(ค) ระบบควบคุมการหมุนรอบแกนยก

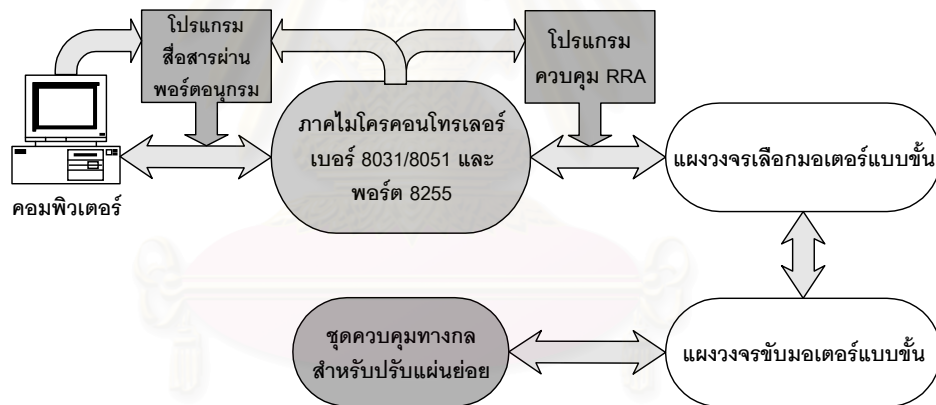
รูป 2.6 ต้นแบบของชุดควบคุมทางกลสำหรับปรับแผ่นย่อย



จากรูป 2.6 แผ่นย่อยแต่ละแผ่นสามารถหมุนรอบทั้งแกนยก (elevation axis) และแกนทิศ (azimuth axis) ความแม่นยำเชิงตำแหน่งของแผ่นย่อยขึ้นอยู่กับอัตราตของเฟืองและความสามารถของมอเตอร์แบบขั้น สำหรับชุดควบคุมทางกลสำหรับปรับแผ่นย่อยต้นแบบนี้ มอเตอร์แบบขั้นที่ใช้มีความละเอียด 1.8 องศาต่อขั้น และระบบเฟืองที่ใช้หมุนรอบแกนทิศประกอบด้วยเฟืองเฉียงกับเฟืองตัวหนอนซึ่งมีอัตราทดรวมเท่ากับ 1 ต่อ 36 ดังรูป 2.6x เพื่อที่จะไม่ให้เกิดการชนกันระหว่างแผ่นย่อยล้อมรอบจึงออกแบบให้แผ่นย่อยไม่มีการหมุนขณะที่มีการหมุนรอบแกนทิศโดยใช้ระบบสปริงเป็นระบบบังคับไม่ให้เกิดการหมุน

ส่วนระบบเฟืองที่ใช้หมุนรอบแกนยกประกอบด้วยเฟืองเฉียงกับเฟืองตัวหนอนที่มีอัตราต 1 ต่อ 12 และเฟืองเฉียงกับเฟืองเฉียงครึ่งวงกลมที่มีอัตราต 1 ต่อ 3 ดังรูป 2.6ค ทำให้มีอัตราตรวมเท่ากับ 1 ต่อ 36 เช่นกัน สำหรับการหมุนรอบแกนยกนั้นแผ่นย่อยจะหมุนไปด้วยรอบจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อย การออกแบบเพื่อให้เกิดการหมุนรอบจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยจำเป็นต้องใช้ระบบเฟืองที่มีการชดเชยให้ตำแหน่งศูนย์กลางของแผ่นย่อยอยู่ที่เดียวกับศูนย์กลางของเฟืองครึ่งวงกลม โดยที่ใช้วิธีทำร่องบังคับให้เฟืองครึ่งวงกลมหมุนรอบจุดศูนย์กลางของชิ้นส่วนที่ยึดไว้ตายตัว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของวงกลมที่มีรัศมีสั้นกว่าของเฟืองครึ่งวงกลม แต่มีจุดศูนย์กลางร่วมกันดังนั้นทำให้เกิดการเลื่อนไปของจุดหมุนจากอัตราตดังกล่าวทำให้ความสามารถของระบบในการหมุนรอบแกนยกและแกนทิศมีความละเอียด 0.05 องศาต่อขั้น

ส่วนการสั่งงานเพื่อปรับตัวแผ่นย่อยนั้น โปรแกรมควบคุมจะสร้างชุดคำสั่งมาขับมอเตอร์แบบขั้นโดยผ่านทางพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนการควบคุมแผ่นย่อยแต่ละแผ่นแสดงดังรูป 2.7

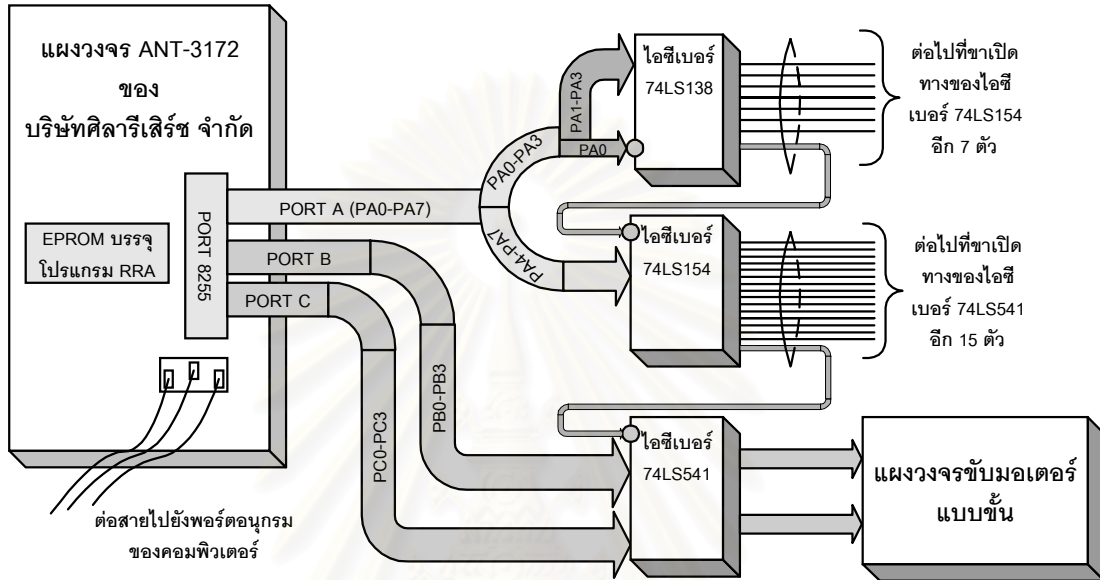


รูป 2.7 ขั้นตอนของการควบคุมแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

จากรูป 2.7 การสั่งงานเพื่อปรับแผ่นย่อยประกอบด้วยองค์ประกอบหลักสองส่วนคือ ส่วนของแผงวงจรควบคุมและส่วนของโปรแกรมควบคุม RRA รุ่น 1.0c

ในส่วนของแผงวงจรควบคุมนั้น แผงวงจรควบคุมประกอบด้วยแผงวงจร 2 แผงดังรูป 2.8 ในแผงวงจรแรกเป็นแผงวงจรเลือกมอเตอร์แบบขั้น ส่วนแผงวงจรอีกแผงหนึ่งเป็นแผงวงจรขับมอเตอร์แบบขั้น การทำงานของแผงวงจรเลือกมอเตอร์ทำงานโดยเริ่มจากรับข้อมูลจากพอร์ต 8255 ของแผงวงจร ANT-3172 ของบริษัท ศิลาเรีเสิร์ช จำกัด ในงานวิจัยนี้ใช้พอร์ต 8255 บนแผงวงจร ANT3172 เพียงหนึ่งพอร์ตจากที่มีทั้งหมด 3 พอร์ต โดยปกติแล้วพอร์ต 8255 หนึ่งพอร์ตประกอบด้วย พอร์ต A พอร์ต B และพอร์ต C โดยที่แต่ละพอร์ตสามารถรับส่งข้อมูลได้ 8 บิต ในที่นี้กำหนดให้ข้อมูล 8 บิตของพอร์ต A เป็นบิตสั่งงานในการเลือกมอเตอร์ โดยไบต์ต่ำ (low byte) ใช้เป็นบิตสั่งงานไอซีเบอร์ 74LS138 ซึ่งเป็นไอซีที่ทำหน้าที่ถอดรหัสแบบเข้า 3 ออก 8 และกำหนดให้บิตขาออก 8 บิตของไอซีนี้ใช้เป็นบิตสั่งงานขาเปิดทาง (enable pin)

ของไอซีเบอร์ 74LS154 ซึ่งเป็นไอซีที่ทำหน้าที่ถอดรหัสแบบเข้า 4 ออก 16 และไบต์สูง (high byte) ใช้เป็นบิตสั่งงานไอซีเบอร์ 74LS154 และกำหนดให้บิตขาออก 16 บิตของไอซีนี้ใช้เป็นบิตสั่งงานขาเปิดทางของไอซีเบอร์ 74LS541 ซึ่งเป็นไอซีที่ทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ 8 บิต ส่วนพอร์ตข้อมูลที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบขั้นส่งมาจากพอร์ต B และพอร์ต C ซึ่งใช้เพียงไบต์ต่ำของแต่ละพอร์ต โดยไบต์ต่ำของพอร์ต B ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ที่หมุนรอบแกนหนึ่ง (แกนยก) และไบต์ต่ำของพอร์ต C ใช้สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ที่หมุนรอบอีกแกนหนึ่ง (แกนทึบ) ส่วนไบต์สูงของพอร์ตทั้งสองนั้นเป็นบิตที่เผื่อไว้ซึ่งอาจนำไปใช้เป็นบิตป้อนกลับเพื่อทำหน้าที่ตรวจรู้ตำแหน่งของการหมุน



รูป 2.8 การทำงานของแผงวงจรควบคุม

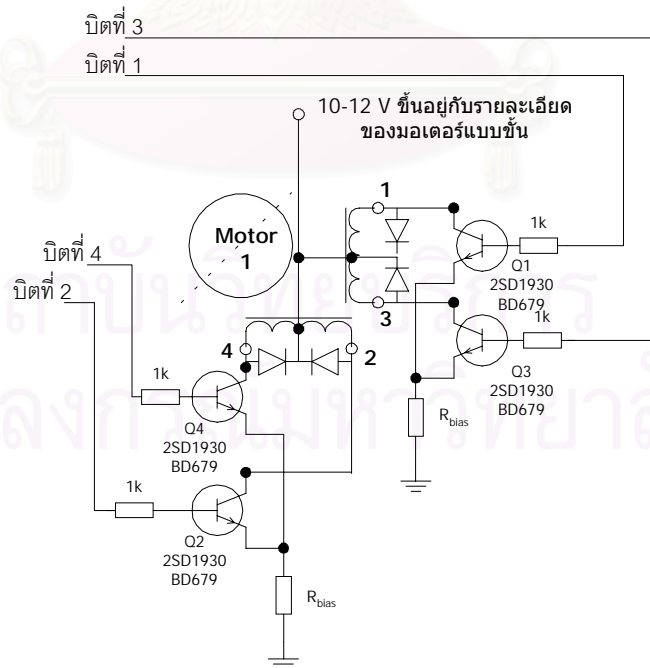
MOTOR ADDRESS (HEX) JUMPER1 shorted	MOTOR ADDRESS (HEX) JUMPER2 shorted	MOTOR ADDRESS (HEX) JUMPER3 shorted	MOTOR ADDRESS (HEX) JUMPER4 shorted
00 (1)	04 (33)	08 (65)	0C (97)
10 (2)	14 (34)	18 (66)	1C (98)
20 (3)	24 (35)	28 (67)	2C (99)
30 (4)	34 (36)	38 (68)	3C (100)
40 (5)	44 (37)	48 (69)	4C (101)
50 (6)	54 (38)	58 (70)	5C (102)
60 (7)	64 (39)	68 (71)	6C (103)
70 (8)	74 (40)	78 (72)	7C (104)
80 (9)	84 (41)	88 (73)	8C (105)
90 (10)	94 (42)	98 (74)	9C (106)
A0 (11)	A4 (43)	A8 (75)	AC (107)
B0 (12)	B4 (44)	B8 (76)	BC (108)
C0 (13)	C4 (45)	C8 (77)	CC (109)
D0 (14)	D4 (46)	D8 (78)	DC (110)
E0 (15)	E4 (47)	E8 (79)	EC (111)
F0 (16)	F4 (48)	F8 (80)	FC (112)
02 (17)	06 (49)	0A (81)	0E (113)
12 (18)	16 (50)	1A (82)	1E (114)
22 (19)	26 (51)	2A (83)	2E (115)
32 (20)	36 (52)	3A (84)	3E (116)
42 (21)	46 (53)	4A (85)	4E (117)
52 (22)	56 (54)	5A (86)	5E (118)
62 (23)	66 (55)	6A (87)	6E (119)
72 (24)	76 (56)	7A (88)	7E (120)
82 (25)	86 (57)	8A (89)	8E (121)
92 (26)	96 (58)	9A (90)	9E (122)
A2 (27)	A6 (59)	AA (91)	AE (123)
B2 (28)	B6 (60)	BA (92)	BE (124)
C2 (29)	C6 (61)	CA (93)	CE (125)
D2 (30)	D6 (62)	DA (94)	DE (126)
E2 (31)	E6 (63)	EA (95)	EE (127)
F2 (32)	F6 (64)	FA (96)	FE (128)

รูป 2.9 เลขที่ของมอเตอร์แบบขั้น (ค่าที่ส่งออกจากพอร์ต A ของพอร์ต 8255)

เมื่อพิจารณาไบต์ต่ำของพอร์ต A บิตแรกใช้เป็นบิตสั่งงานขาเปิดทางของไอซีเบอร์ 74LS138 บิตนี้ต้องเป็นศูนย์ หรือมีสถานะต่ำจึงจะทำให้มีการสั่งงานต่อไปยังขาเปิดทางของไอซีเบอร์ 74LS154 ดังนั้นถ้ามีการสั่งงานไปเลือกมอเตอร์ ตัวใดตัวหนึ่ง บิตแรกนี้ต้องมีค่าเป็นศูนย์ทำให้ค่าในไบต์ต่ำของพอร์ต A มีค่าเป็นไปได้ในระบบเลขฐานสอง 8 ค่าคือ 0000, 0010, 0100, 0110, 1000, 1010, 1100 และ 1110 และเมื่อรวมกับค่าในไบต์สูงของพอร์ต A ซึ่งมีค่าเป็นไปได้ในระบบเลขฐานสอง 16 ค่าคือ 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0101, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110 และ 1111 ข้อมูลที่ได้นี้ทำให้พอร์ต A มีค่าเป็นไปได้ทั้งหมด 128 ค่า ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เป็นเลขที่ของมอเตอร์เพื่อให้อ้างว่าเป็นมอเตอร์ตัวที่เท่าไรดังรูป 2.9

จากการออกแบบแผงวงจรในลักษณะนี้ ทำให้เลขที่ของมอเตอร์ที่ใช้หมุนรอบแกนทิศและแกนยกมีค่าเดียวกัน เนื่องจากว่าเป็นค่าที่เปิดทางให้ข้อมูลจากพอร์ต B และพอร์ต C ส่งผ่านไอซีเบอร์ 74LS541 ออกไปยังแผงวงจรขับมอเตอร์แล้วแต่ที่กำลังเขียนข้อมูลที่ใช้ขับไปยังพอร์ต B หรือพอร์ต C จากวิธีการดังกล่าวทำให้สามารถขับมอเตอร์แบบขั้นได้ถึง 256 ตัว หรือควบคุมแผ่นย่อยได้ 128 แผ่นย่อย

สำหรับการขับมอเตอร์แบบขั้นในงานวิจัยนี้ได้นำมามอเตอร์แบบขั้นชนิดยูนิโพลาร์มาใช้งาน การขับมอเตอร์แบบขั้นให้หมุนนั้นสามารถทำได้โดยการกระตุ้นใน 3 แบบคือ การกระตุ้นแบบหนึ่งขดลวดครึ่งขั้น การกระตุ้นแบบสองขดลวดครึ่งขั้น และการกระตุ้นแบบเต็มขั้น ข้อแตกต่างในการกระตุ้นแต่ละแบบคือ การกระตุ้นแบบสองขดลวดครึ่งขั้นนั้นให้กำลังขับที่สูงกว่าการกระตุ้นแบบหนึ่งขดลวดครึ่งขั้นแต่ก็กินกระแสสูงกว่า ส่วนการกระตุ้นแบบเต็มขั้นจะให้ความละเอียดต่อขั้นเพิ่มเป็นสองเท่าของกรณีการกระตุ้นแบบครึ่งขั้น รายละเอียดเกี่ยวกับการกระตุ้นแบบต่างๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [43] อย่างไรก็ตาม ไม่ว่าจะเป็นการกระตุ้นแบบใดก็ต้องการเพียงลำดับของการกระตุ้นที่ทำให้เกิดกระแสในขดลวดแต่ละขด โดยปกติแล้วมอเตอร์จะประกอบด้วยขดลวดจำนวน 4 ขด ดังนั้นเพื่อขับมอเตอร์แบบขั้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะใช้ข้อมูลเพียง 4 บิตมากระตุ้นให้เกิดกระแสในขดลวดแต่ละขดดังวงจรในรูป 2.10



รูป 2.10 วงจรขับมอเตอร์แบบขั้นชนิดยูนิโพลาร์หนึ่งตัว

ลำดับของการกระตุ้นในการกระตุ้นแต่ละแบบสรุปได้ดังตาราง 2.1 บิตแต่ละบิตทำหน้าที่สั่งงานให้ทรานซิสเตอร์ซึ่งทำงานในสถานะเป็นสวิตช์สำหรับทำให้เปิดหรือปิดกระแสที่ไหลผ่านขดลวดไปลงดิน (ground)

ตาราง 2.1 ลำดับของการกระตุ้นในการกระตุ้นมอเตอร์แบบขั้นแต่ละแบบ

ลำดับของการกระตุ้น	การกระตุ้นแบบหนึ่งขดลวด ครึ่งขั้น	การกระตุ้นแบบสองขดลวด ครึ่งขั้น	การกระตุ้นแบบเต็มขั้น
1	0001	0011	0001
2	0010	0110	0011
3	0100	1100	0010
4	1000	1001	0110
5	-	-	0100
6	-	-	1100
7	-	-	1000
8	-	-	1001

หมายเหตุ ลำดับในตารางข้างต้นเป็นลำดับของการหมุนมอเตอร์แบบขั้นไปในทิศทางหนึ่ง ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทางตรงกันข้าม ลำดับของการกระตุ้นจะสลับจากลำดับ 4 ไปยัง 1 หรือ 8 ไปยัง 1

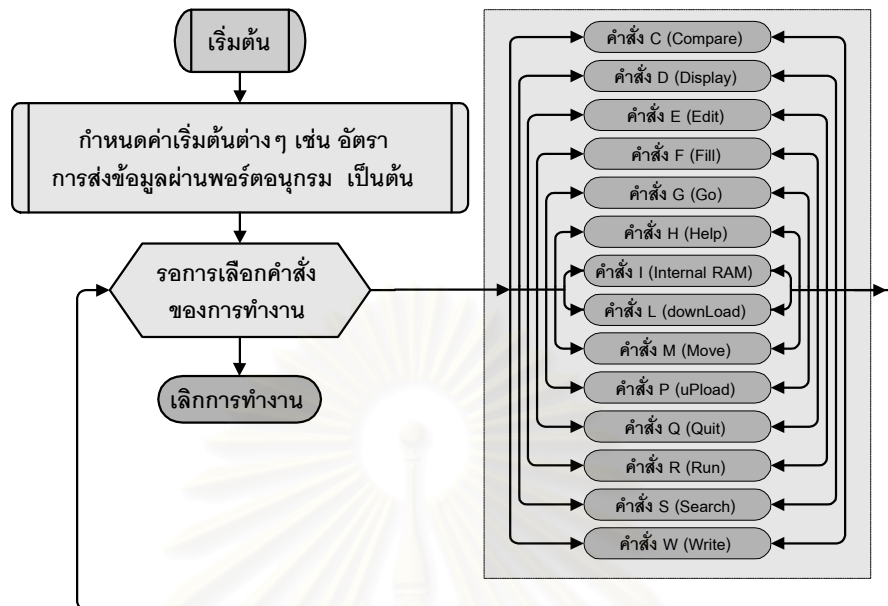
แผงวงจรเลือกมอเตอร์ แผงวงจรขับมอเตอร์ และการเชื่อมโยงสายระหว่างแผงวงจรต่างๆ เมื่อประกอบเสร็จสิ้นแสดงดังรูป 2.11



รูป 2.11 ต้นแบบของแผงวงจรควบคุมการขับมอเตอร์แบบขั้น

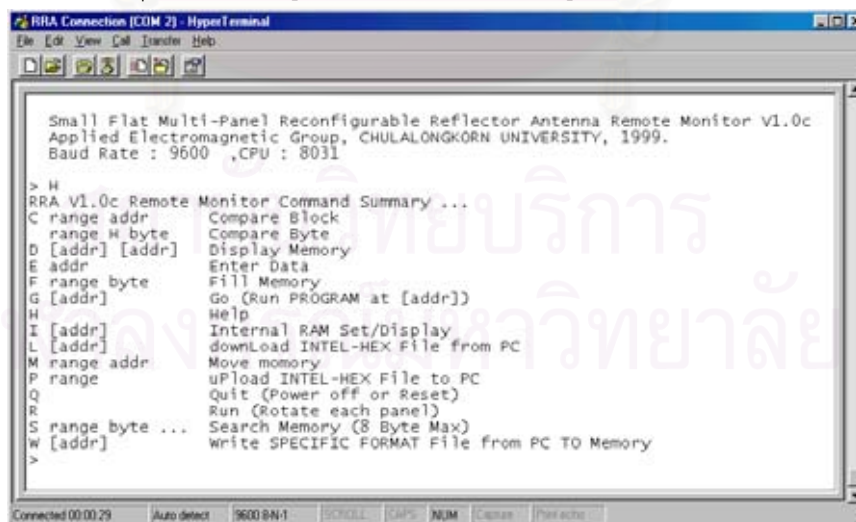
เพื่อให้การสั่งงานไปยังแผงวงจรที่ออกแบบไว้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ ต้องมีตัวจัดการข้อมูลจากการวิเคราะห์หรือการสังเคราะห์คำสั่งงานแผงวงจร ส่วนที่ทำหน้าที่ดังกล่าวคือส่วนของโปรแกรม RRA ซึ่งเป็นโปรแกรมควบคุมการหมุนแผ่นย่อยแต่ละแผ่นที่เขียนขึ้นด้วยภาษาแอสเซมบลีของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 โปรแกรม RRA บรรจุอยู่ในหน่วยความจำอ่านอย่างเดียวแบบโปรแกรมได้ (EPROM) ซึ่งนำไปใช้กับแผงวงจร ANT-3172 โดยพื้นที่ที่ใช้เก็บโปรแกรมนี้อยู่ที่ที่อยู่ (address) 0000H และใช้พอร์ตอนุกรมเป็นตัวสื่อสารกับผู้ใช้ผ่านจอภาพและแป้นพิมพ์ของคอมพิวเตอร์ด้วย

โปรแกรมสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมเช่น โปรแกรม xtalk บนระบบปฏิบัติการ DOS หรือโปรแกรม hyper terminal บนระบบปฏิบัติการ Windows 9x หรือ Windows ME การทำงานของโปรแกรม RRA มีขั้นตอนเป็นดังรูป 2.12



รูป 2.12 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม RRA รุ่น 1.0c

การใช้งานโปรแกรม RRA เริ่มจากผู้ที่ใช้เรียกโปรแกรมสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมขึ้นมาเพื่อเข้าสู่โหมดการสื่อสาร สำหรับในที่นี้จะกล่าวถึงการใช้โปรแกรม hyper terminal ในการติดต่อ เมื่อเข้าสู่โหมดการสื่อสารแล้ว เครื่องจะรอการกดปุ่ม SPACE เมื่อผู้ใช้กดปุ่ม SPACE จะปรากฏข้อความดังรูป 2.13 และมีเครื่องหมาย “\_” แสดงถึงความพร้อมในการใช้งานตามคำสั่งต่างๆ ที่เขียนขึ้น ในการใช้งานคำสั่งต่างๆ ทำได้โดยพิมพ์คำสั่งที่ต้องการต่อท้ายเครื่องหมาย “\_” แล้วกดปุ่ม ENTER รูปแบบของคำสั่งต่างๆ สามารถเรียกดูได้จากการใช้คำสั่ง “H” ดังรูป 2.13



รูป 2.13 การเรียกดูรูปแบบคำสั่งต่างๆ เมื่อใช้คำสั่ง “H”

จากรูป 2.13 โปรแกรม RRA รุ่น 1.0c มีคำสั่งให้ใช้งานทั้งหมด 14 คำสั่ง คำสั่งแต่ละคำสั่งมีหน้าที่ต่อไปนี้



1. คำสั่ง “C” (Compare) ใช้สำหรับเปรียบเทียบข้อมูลในหน่วยความจำชั่วคราว มีรูปแบบคือ C range addr หรือ C range H byte ในรูปแบบแรกเป็นการเปรียบเทียบเป็น BLOCK ส่วนในรูปแบบหลังเป็นการเปรียบเทียบกับค่าหนึ่งไบต์ การเปรียบเทียบนี้จะแสดงที่อยู่และข้อมูลที่ไม่ตรงกันให้ทราบ เช่น C 8100 81FF 8800 หรือ C 8100 81FF H 00 เป็นต้น
2. คำสั่ง “D” (Display) ใช้สำหรับดูข้อมูลในหน่วยความจำชั่วคราว มีรูปแบบคือ D [addr] [addr] ซึ่งแสดงข้อมูลในหน่วยความจำของช่วงที่อยู่ที่กำหนดโดยแสดงเป็นค่าเลขฐานสิบหกและอักขระในขณะเดียวกัน
3. คำสั่ง “E” (Edit) ใช้สำหรับแก้ไขหรือป้อนข้อมูลลงในหน่วยความจำชั่วคราว มีรูปแบบคือ E [addr] การแก้ไขหรือป้อนข้อมูลจะสามารถป้อนเป็นเลขฐานสิบหกได้ทันที โดยคำสั่งนี้จะแสดงค่าที่อยู่พร้อมกับข้อมูลเดิม และรอให้ผู้ป้อนค่าใหม่ที่ต้องการลงไป
4. คำสั่ง “F” (Fill) ใช้สำหรับใส่ข้อมูลหนึ่งค่าลงไปหน่วยความจำชั่วคราวตามช่วงที่อยู่ที่กำหนด มีรูปแบบคือ F range byte เช่น F 8100 87FF FF ก็เป็นการนำค่า FFH ใส่ลงในหน่วยความจำตั้งแต่ที่อยู่ 8100H ถึง 87FFH
5. คำสั่ง “G” (Go) ใช้สำหรับสั่งให้ทำงานตามโปรแกรมที่เขียนไว้ตรงที่อยู่ที่อยู่ต่อท้ายคำสั่ง มีรูปแบบคือ G [addr]
6. คำสั่ง “H” (Help) ใช้สำหรับแสดงชุดคำสั่งของ RRA v1.0c
7. คำสั่ง “I” (Internal RAM) ใช้สำหรับขอและกำหนดค่าของหน่วยความจำภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ มีรูปแบบคือ I [addr] การขอและกำหนดค่าหน่วยความจำภายในขึ้นอยู่กับเบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้
8. คำสั่ง “L” (downLoad) ใช้สำหรับโหลดข้อมูลหรือโปรแกรมจากเครื่องคอมพิวเตอร์ลงแผงวงจร มีรูปแบบคือ L [addr] การโหลดข้อมูลหรือโปรแกรมต้องใช้แฟ้มข้อมูลในรูปแบบ INTEL-HEX ค่าที่อยู่ที่ต้องการให้โหลดลงไปสามารถกำหนดที่อยู่ที่ต้องการต่อท้ายคำสั่ง การโหลดนี้ต้องอาศัยโปรแกรมสื่อสารดังที่กล่าวไว้ข้างต้นร่วมด้วย
9. คำสั่ง “M” (Move) ใช้สำหรับคัดลอกข้อมูลเป็น BLOCK มีรูปแบบคือ M range addr ซึ่งเป็นการคัดลอกข้อมูลหรือโปรแกรมในหน่วยความจำจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่ง เช่น M 8100 81FF 9000 ก็จะคัดลอกข้อมูลจากที่อยู่ตั้งแต่ 8100H ถึง 81FFH ไปยังที่อยู่ 9000H ถึง 90FFH
10. คำสั่ง “P” (uPload) ใช้สำหรับโหลดข้อมูลหรือโปรแกรมจากแผงวงจรขึ้นไปเครื่องคอมพิวเตอร์ มีรูปแบบคือ P range ซึ่งมีขบวนการตรงกันข้ามกับคำสั่ง L (downLoad) โดยที่ range คือช่วงของที่อยู่ที่ต้องการโหลด แฟ้มข้อมูลที่จะโหลดต้องอยู่ในรูปแบบ INTEL-HEX เช่นกัน
11. คำสั่ง “Q” (Quit) ใช้สำหรับหยุดการทำงานโปรแกรม RRA v1.0c คำสั่งนี้จะยกเลิกตัวแปรต่างๆ ที่ได้จำไว้ เช่น อัตราการส่งข้อมูล และเมื่อผู้ใช้กดปุ่ม RESET บนแผงวงจร ก็จะมีสถานะเหมือนกับการเปิดเครื่องครั้งแรกคือจะรอการกดปุ่ม SPACE
12. คำสั่ง “R” (Run) ใช้สำหรับขยับมอเตอร์ขึ้นแต่ละตัวให้หมุนไปตามลำดับ ซึ่งจะอ่านข้อมูลในหน่วยความจำชั่วคราวที่ได้จากการโหลดข้อมูลรูปแบบเฉพาะด้วยคำสั่ง “W” ตั้งแต่ที่อยู่ 9100H ไปทำงาน
13. คำสั่ง “S” (Search) ใช้สำหรับค้นหาตำแหน่งของข้อมูลในหน่วยความจำชั่วคราว มีรูปแบบคือ S range byte ซึ่งการค้นหาจะเปรียบเทียบข้อมูลในหน่วยความจำกับข้อมูลที่กำหนดโดยใส่ได้สูงสุดถึง 8 ไบต์ เช่น S 8100 81FF 12 A5 32 ก็จะค้นหาตำแหน่งของข้อมูลที่มีค่าทั้ง 3 ไบต์คือ 12H A5H และ 32H โดยจะแสดงค่าที่อยู่เริ่มต้นที่ค้นหาได้
14. คำสั่ง “W” (Write) ใช้สำหรับโหลดข้อมูลรูปแบบเฉพาะสำหรับขยับมอเตอร์แบบขึ้น ลงในหน่วยความจำชั่วคราว มีรูปแบบคือ W [addr] ซึ่งจะโหลดข้อมูลต้องอยู่ในรูปแบบเฉพาะสำหรับขยับมอเตอร์ คำสั่งนี้ใช้ร่วมกับคำสั่ง “R” โดยที่อยู่ที่โหลดข้อมูลลงไปจะอยู่ที่ 9100H ดังนั้นค่า [addr] ที่ต่อท้ายคำสั่งต้องระบุเป็น 9100 หรือไม่ต้องระบุก็ได้



เมื่อต้องการปรับแผ่นย่อย ในขั้นต้นเริ่มจากการโหลดข้อมูลรูปแบบเฉพาะสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ลงในหน่วยความจำชั่วคราวก่อน โดยใช้คำสั่ง “W” ซึ่งจะปรากฏข้อความบอกให้เลือกแถบ Transfer แล้วเลือกตัวเลือก Send Text File เพื่อเลือกเพิ่มข้อมูลรูปแบบเฉพาะที่ต้องการโหลด เมื่อโหลดข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้วจะมีลักษณะดังรูป 2.14

```

> W
Download TEXT File from SERIAL PORT to RAM
Use AA and SE Command to Send File (XCross) or Sent Text File (Hyper Terminal)
04000001000900000110090000011009000400070F001300070F101300019100130001
911013

Download Completely
OK
>
> D 9100
9100: 04 00 00 01 00 09 00 00 - 01 10 09 00 00 01 00 09 .....
9110: 00 00 01 10 09 00 04 00 - 07 0F 00 13 00 07 0F 10 .....
9120: 13 00 01 91 00 13 00 01 - 91 10 13 FF FF FF FF FF .....
9130: FF FF FF FF FF FF FF FF - FF FF FF FF FF FF FF FF .....
9140: FF FF FF FF FF FF FF FF - FF FF FF FF FF FF FF FF .....
9150: FF FF FF FF FF FF FF FF - FF FF FF FF FF FF FF FF .....
9160: FF FF FF FF FF FF FF FF - FF FF FF FF FF FF FF FF .....
9170: FF FF FF FF FF FF FF FF - FF FF FF FF FF FF FF FF .....
>
>
>

```

รูป 2.14 การโหลดข้อมูลลงในหน่วยความจำชั่วคราวด้วยคำสั่ง “W”

หลังจากโหลดข้อมูลเสร็จโดยไม่เกิดข้อผิดพลาด ก็ใช้คำสั่ง “R” เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการปรับแผ่นย่อยไปตามข้อมูลที่อยู่ในหน่วยความจำชั่วคราว ขณะที่โปรแกรมกำลังปรับแผ่นย่อยแต่ละแผ่น ก็จะปรากฏข้อความบอกว่ากำลังปรับแผ่นย่อยแผ่นใด ในสถานะใดบนจอภาพของคอมพิวเตอร์ และเมื่อขับเคลื่อนย่อยครบทุกแผ่นก็ปรากฏเครื่องหมาย “\_” ดังรูป 2.15 เพื่อรอคำสั่งที่จะทำต่อไป

```

>
> R
Adjust panels to initial surface
Status : Motor no. 001 (Address 00h, elevation axis).
Action : Rotating in counter clockwise direction.
Status : Motor no. 002 (Address 10h, elevation axis).
Action : Rotating in counter clockwise direction.
Status : Motor no. 001 (Address 00h, azimuthal axis).
Action : Rotating in counter clockwise direction.
Status : Motor no. 002 (Address 10h, azimuthal axis).
Action : Rotating in counter clockwise direction.

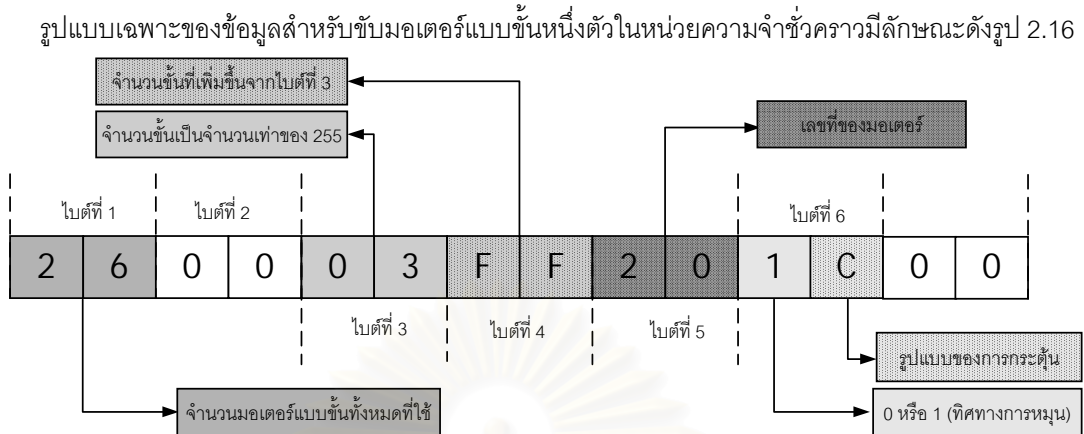
Adjust panels to desired surface
Status : Motor no. 001 (Address 00h, azimuthal axis).
Action : Rotating in clockwise direction.
Status : Motor no. 002 (Address 10h, azimuthal axis).
Action : Rotating in clockwise direction.
Status : Motor no. 001 (Address 00h, elevation axis).
Action : Rotating in clockwise direction.
Status : Motor no. 002 (Address 10h, elevation axis).
Action : Rotating in clockwise direction.
>
>
>

```

รูป 2.15 การปรับแผ่นย่อยแต่ละแผ่นด้วยคำสั่ง “R”

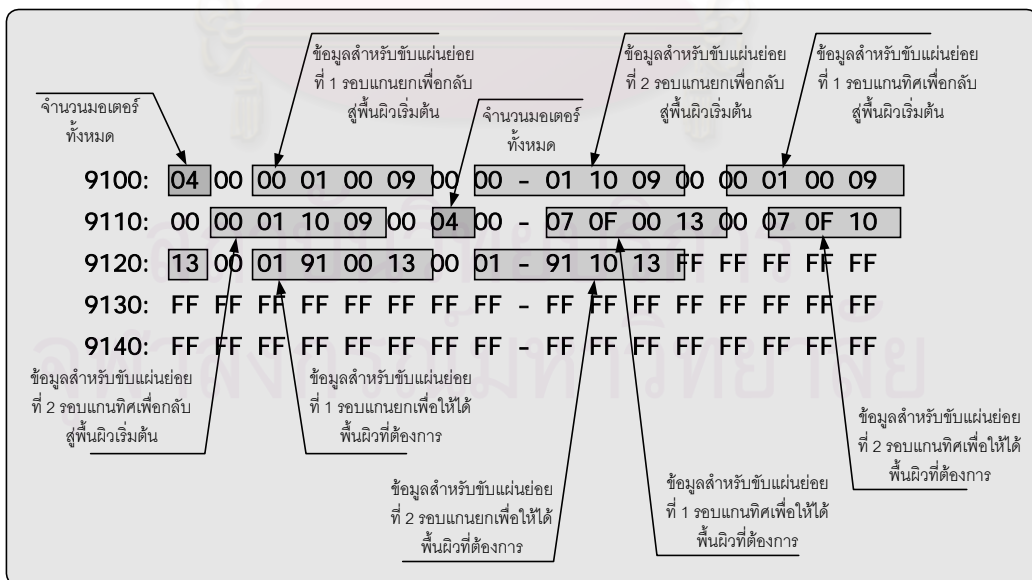
การใช้คำสั่ง “W” ข้อมูลรูปแบบเฉพาะจะส่งผ่านพอร์ตอนุกรมไปเก็บไว้ในหน่วยความจำชั่วคราวของแผงวงจร ANT-3172 ในตำแหน่ง 9100H เป็นต้นไปดังรูป 2.14 โดยที่ข้อมูลที่ส่งไปนั้นประกอบส่วน 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนของ

ข้อมูลสำหรับใช้ปรับแผ่นย่อยให้พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะกลับมาสู่สถานะเริ่มต้น และส่วนที่ 2 เป็นส่วนของข้อมูลสำหรับปรับแผ่นย่อยไปเป็นรูปลักษณะที่ต้องการ



รูป 2.16 รูปแบบเฉพาะของข้อมูลสำหรับขับเคลื่อนหนึ่งตัวในหน่วยความจำชั่วคราว

จากรูป 2.16 ไบต์ที่หนึ่งใช้เก็บจำนวนของมอเตอร์แบบขับเคลื่อนทั้งหมดที่ใช้ (สองเท่าของจำนวนแผ่นย่อย) ไบต์ถัดมาเป็น 00H และ 2 ไบต์ถัดมา (ไบต์ที่ 3 และ 4) ใช้เก็บจำนวนขั้นที่ต้องการหมุนโดยในไบต์แรกเป็นจำนวนเท่าของ 255 ขั้น และไบต์ถัดมาเป็นจำนวนขั้นที่เพิ่มขึ้นจากไบต์แรก ในไบต์ที่ 5 ใช้เก็บเลขที่ของมอเตอร์ที่ต้องการหมุน เช่น 00H, 10H, 20H, 30H, ... เป็นต้น ส่วนในไบต์ที่ 6 ซึ่งเป็นไบต์สุดท้ายของข้อมูลหนึ่งชุดในการขับเคลื่อนหนึ่งตัวจะใช้เก็บรูปแบบการกระตุ้นมอเตอร์และทิศทางการหมุน โดยที่ใน 4 บิตแรกเก็บทิศทางการหมุนคือ ถ้าเป็น 0000 มอเตอร์หมุนในทิศทางหนึ่ง และถ้าเป็น 0001 มอเตอร์หมุนในอีกทิศทางหนึ่ง และใน 4 บิตถัดมาเก็บรูปแบบการกระตุ้นคือ ถ้าเป็น 0001, 0010, 0100, 1000 จะเป็นการกระตุ้นแบบหนึ่งขดลวดครั้งขึ้น และถ้าเป็น 0011, 0110, 1100, 1001 จะเป็นการกระตุ้นแบบสองขดลวดครั้งขึ้น และไบต์ถัดไปเป็น 00H



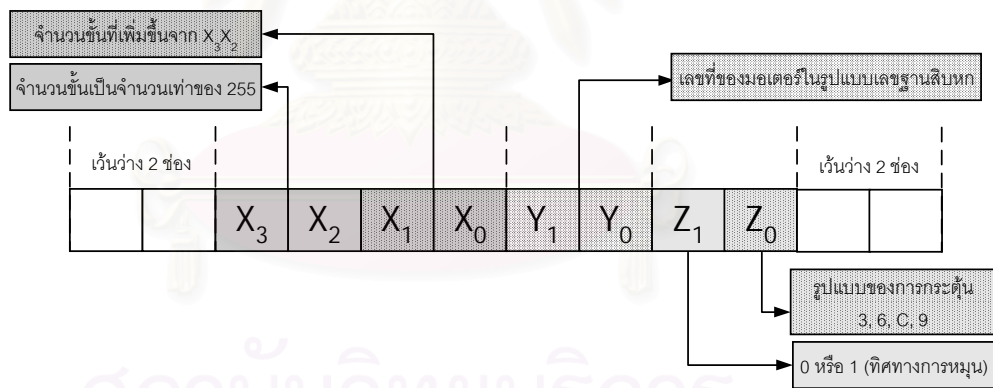
รูป 2.17 รูปแบบเฉพาะของข้อมูลสำหรับขับเคลื่อนทั้งหมดในหน่วยความจำชั่วคราว (กรณีแผ่นย่อย 2 แผ่น)

จากข้างต้นข้อมูลสำหรับขั้วมอเตอร์หนึ่งตัวเก็บอยู่ในหน่วยความจำขนาด 4 ไบต์ โดยเริ่มจากเก็บข้อมูลของมอเตอร์แต่ละตัวที่หมุนรอบแกนยกก่อน โดยแทรก 00H เข้าไป 1 ไบต์ระหว่างข้อมูลของมอเตอร์แต่ละตัว แล้วตามด้วยข้อมูลของมอเตอร์แต่ละตัวที่ใช้หมุนรอบแกนทิศ มาถึงตรงนี้เป็นารเก็บข้อมูลเพื่อใช้ปรับพื้นผิวที่ปรับรูปลักษณะได้ให้กลับมาสู่สถานะเริ่มต้น ต่อจากนั้นก็เก็บข้อมูลของมอเตอร์ในลักษณะเดียวกันกับตอนปรับพื้นผิวมาสู่พื้นผิวเริ่มต้น แต่กลับกันเพียงลำดับของการหมุนมาเป็นเก็บข้อมูลของมอเตอร์แต่ละตัวที่ใช้หมุนรอบแกนทิศก่อน แล้วตามด้วยข้อมูลของมอเตอร์แต่ละตัวที่ใช้หมุนรอบแกนยก ยกตัวอย่างเช่น กรณีขั้วแผ่นย่อย 2 แผ่นให้หมุนรอบแกนทิศและแกนยกเป็นมุม 90 และ 20 องศา ตามลำดับ รูปแบบของข้อมูลที่เก็บในหน่วยความจำชั่วคราวเป็นดังรูป 2.17

เพื่อให้ได้ข้อมูลรูปแบบเฉพาะสอดคล้องกับการทำงานของโปรแกรม RRA ก่อนที่จะอ่านข้อมูลจากพอร์ตอนุกรมมาลงในหน่วยความจำชั่วคราวต้องมีการเตรียมเพิ่มข้อมูลรูปแบบเฉพาะให้เรียบร้อยก่อน เพิ่มข้อมูลรูปแบบเฉพาะนั้นสร้างขึ้นโดยการแปลงมุมที่หมุนไปของมอเตอร์แต่ละตัว ที่หามาได้จากโปรแกรมวิเคราะห์หรือสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปแบบเฉพาะ ขั้นตอนของการสร้างเพิ่มข้อมูลดังกล่าวมีอยู่ 2 ขั้นตอนหลักคือ

1. สร้างเพิ่มข้อมูลรูปแบบเฉพาะสำหรับการติดตั้งระบบสายอากาศครั้งแรก การสร้างเพิ่มข้อมูลชนิดนี้ทำได้โดยเรียกใช้ฟังก์ชัน savefirst(N).m ที่เขียนขึ้นมาใช้งานกับโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชัน savefirst มีตัวแปรที่ต้องส่งผ่านไปคือ จำนวนแผ่นย่อย (N) และมีการทำงานดังนี้

เริ่มจากสร้างเวกเตอร์เก็บมุมที่หมุนรอบแกนยกและแกนทิศโดยกำหนดให้เป็นเวกเตอร์ศูนย์ แล้วสร้างตัวแปรแบบสายอักขระ (string) สำหรับเก็บข้อมูลอักขระโดยเริ่มจากเก็บ ‘.’ แล้วตามด้วยจำนวนมอเตอร์ทั้งหมดซึ่งเท่ากับ 2N ในรูปแบบเลขฐานสิบหก หลังจากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนการแปลงข้อมูลของมอเตอร์ซึ่งประกอบด้วยมุมที่หมุนไป ทิศทางการหมุนไปอยู่ในรูปแบบเฉพาะดังรูป 2.18 โดยเริ่มจากมุมที่หมุนไปและทิศทางการหมุนรอบแกนยกก่อน



รูป 2.18 รูปแบบของข้อมูลสำหรับมอเตอร์หนึ่งตัวบนเพิ่มข้อมูลรูปแบบเฉพาะ

หลังจากสร้างรูปแบบข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้หมุนแผ่นย่อยรอบแกนยกจนครบ N ตัวแล้วก็สร้างรูปแบบข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้หมุนแผ่นย่อยรอบแกนทิศต่อในลักษณะเดียวกันกับของมอเตอร์ที่ใช้หมุนรอบแกนยก เมื่อมาถึงจุดนี้ตัวแปรสายอักขระจะเก็บข้อมูลที่ใส่สร้างพื้นผิวเริ่มต้น หลังจากนั้นก็เป็นารสร้างส่วนที่เป็นข้อมูลที่ใช้ปรับพื้นผิวเป็นรูปลักษณะที่ต้องการ แต่ในที่นี้เป็นการติดตั้งครั้งแรก การสร้างข้อมูลที่ใส่ปรับให้เป็นพื้นผิวที่ต้องการก็เป็นเพียงการกำหนดให้ลำดับการหมุนและทิศทางการหมุนของมอเตอร์แต่ละตัวเป็นลำดับเริ่มแรก ในที่นี้กำหนดเป็น 03H ส่วนการสร้างข้อมูลที่ใส่ปรับให้เป็นพื้นผิวที่ต้องการนั้นต่างกับกรณีที่ปรับเป็นพื้นผิวเริ่มต้นตรงเรื่องลำดับของข้อมูลที่ใส่ขั้วมอเตอร์ โดยเริ่มจากข้อมูลที่ใส่ขั้วมอเตอร์ที่หมุนรอบแกนทิศก่อนแล้วค่อยตามด้วยข้อมูลของมอเตอร์ที่หมุนรอบแกนยก สรุปจากขั้นตอนข้างต้นตัวแปรสายอักขระอยู่ในรูปแบบเฉพาะดังรูป 2.19

```
:04 00000003 00001003 00000003 00001003 04 00010013 00011013 00010013 00011013
```

รูป 2.19 ข้อมูลของตัวแปรสายอักขระที่เขียนลงบนแฟ้มข้อมูลรูปแบบเฉพาะจากการเรียกใช้ฟังก์ชัน savefirst.m

เมื่อได้ตัวแปรสายอักขระที่เก็บข้อมูลทั้ง 2 ช่วงการทำงานแล้ว ก็เขียนตัวแปรนี้ลงแฟ้มข้อมูลชื่อ RRA\_C\_old.txt, RRA\_C\_new.txt และ RRA\_C\_bak.txt โดยแฟ้มข้อมูล RRA\_C\_old.txt เก็บข้อมูลสำหรับนำไปใช้หาลำดับเริ่มต้น ทิศทาง และจำนวนชั้นเพื่อใช้กลับสู่พื้นผิวเริ่มต้น ซึ่งนำไปใช้ในโปรแกรมสำหรับปรับเปลี่ยนรูปลักษณะครั้งต่อไป (savedata.m) และแฟ้มข้อมูล RRA\_C\_bak.txt เป็นแฟ้มข้อมูลสำรองของ RRA\_C\_old.txt เพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการหมุน และแฟ้มข้อมูล RRA\_C\_new.txt เป็นแฟ้มข้อมูลที่ใส่ส่งผ่านพอร์ตอนุกรมไปเก็บไว้ในหน่วยความจำชั่วคราว

2. การสร้างแฟ้มข้อมูลรูปแบบเฉพาะในการปรับรูปลักษณะครั้งต่อไป การสร้างแฟ้มข้อมูลชนิดนี้ทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน savedata(thetae,phie) ที่เขียนขึ้นมาใช้งานกับโปรแกรม MATLAB ฟังก์ชัน savedata.m มีตัวแปรที่ต้องส่งผ่านไปคือ มุมที่หมุนรอบแกนยก (thetae) และมุมที่หมุนรอบแกนทิศ (phie) โดยมีการทำงานคล้ายๆ กับฟังก์ชัน savefirst.m แต่แตกต่างกันตรงที่มุมที่ใช้ในการหมุนเพื่อปรับรูปลักษณะเป็นพื้นผิวเริ่มต้น ทำได้โดยพิจารณาจากข้อมูลของแฟ้มข้อมูล RRA\_C\_old.txt ที่สร้างขึ้นจากฟังก์ชัน savefirst.m หรือ savedata.m ก่อนหน้านี้ และมุมที่หมุนไปเพื่อปรับพื้นผิวเป็นรูปลักษณะที่ต้องการเกิดจากมุม thetae และ phie ที่ส่งผ่านมา และนำมาแปลงให้เป็นจำนวนชั้นที่ใช้หมุนมอเตอร์ สำหรับการเก็บข้อมูลของมอเตอร์แต่ละตัวมีลักษณะเดียวกับที่อธิบายไว้ในฟังก์ชัน savefirst.m เมื่อสร้างตัวแปรสายอักขระที่เก็บข้อมูลใน 2 ช่วงการทำงานเสร็จเรียบร้อยแล้วก็เขียนเป็นแฟ้มข้อมูลในชื่อ RRA\_C\_old.txt, RRA\_C\_new.txt และ RRA\_C\_bak.txt เช่นเดียวกัน

### บทที่ 3

## ระเบียบวิธีวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย

### ความนำ

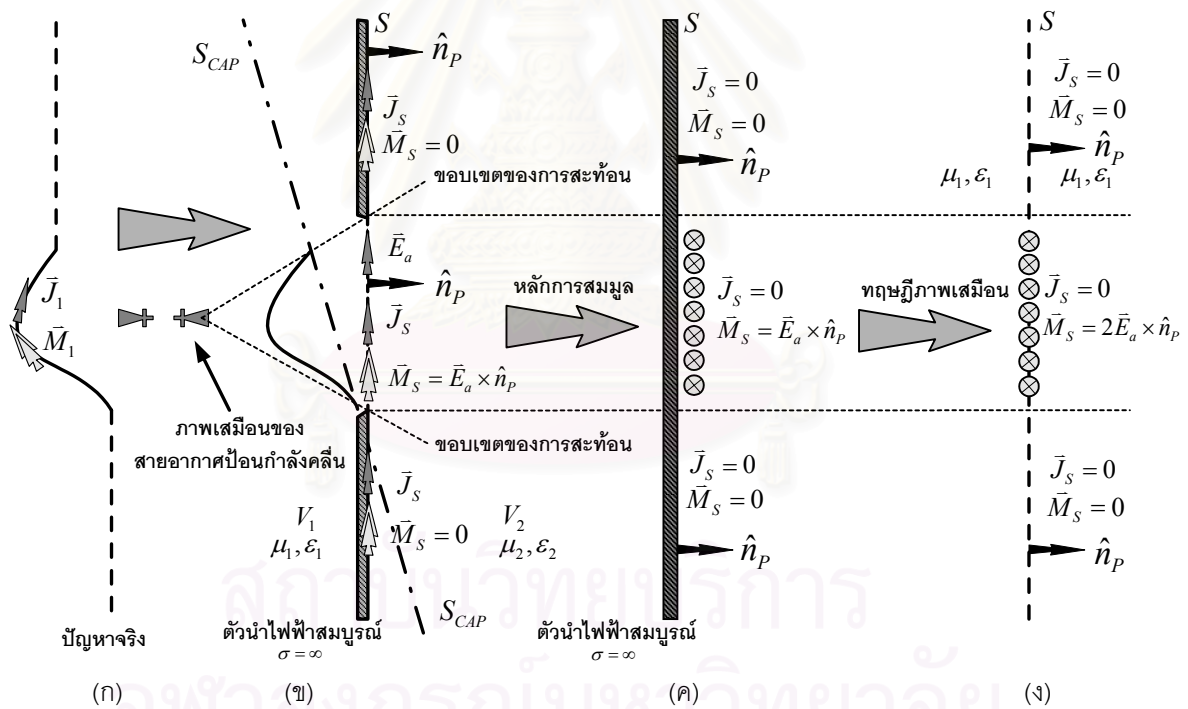
ประสิทธิภาพและความแม่นยำในการวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องมาเป็นเวลานานแล้ว ทำให้มีการประยุกต์ใช้กรรมวิธี สมมุติฐาน และทฤษฎีมากมายเพื่อนำมาวิเคราะห์ปัญหาและผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในสายอากาศชนิดจานสะท้อนรูปแบบต่างๆ ส่งผลให้การทำนายสมรรถนะของสายอากาศชนิดนี้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นและรวดเร็วยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพและทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ [28] กรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตรวมกับระเบียบวิธีปริพันธ์สนามบนช่องเปิด (aperture field integration method, AFIM) และทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต [44] การประยุกต์ใช้การแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็วและขั้นตอนวิธีการซัดตัวอย่าง (sampling algorithm) [45] หรือเทคนิคอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier series technique) [46] กับปริพันธ์ของกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ เป็นต้น วิธีการแต่ละวิธีการก็มีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของสายอากาศรูปแบบต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ประยุกต์กรรมวิธี สมมุติฐาน และทฤษฎีที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย ซึ่งทำให้เห็นกลไกของการบดบังของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น และผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้น โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้คือ หัวข้อแรกกล่าวถึงแนวทางการวิเคราะห์โดยบ่งบอกถึงการเลือกใช้กรรมวิธี สมมุติฐาน และทฤษฎีต่างๆ ที่เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ชี้แจงจำกัดเกี่ยวกับสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย และแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยต่างๆ ดังนี้คือ หัวข้อย่อยแรกกล่าวถึงรายละเอียดของกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการกระเจิงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่พื้นผิวของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น และการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของปริพันธ์สองชั้นบนโดเมนของรูปสามเหลี่ยมใดๆ กับปริพันธ์ของกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ ในหัวข้อย่อยที่สองกล่าวถึงรายละเอียดของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพตามแนวคิดของมิคาเอลลิที่ใช้ศึกษาผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น และในหัวข้อย่อยสุดท้ายกล่าวถึงรายละเอียดของสมมุติฐานสนามเป็นศูนย์แบบขึ้นอยู่กับจุดสังเกต และขั้นตอนวิธีสำหรับหาบริเวณเงาที่เกิดขึ้นจากการบดบังของแผ่นย่อยล้อมรอบหรือสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และหัวข้อที่สองกล่าวถึงรายละเอียดของการหาลักษณะสมบัติของสายอากาศ เช่น อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมและไขว้ และประสิทธิภาพต่างๆ

### 3.1 แนวทางการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เพื่อหาลักษณะสมบัติการแผ่พลังงานของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยสามารถทำได้โดยอาศัยทฤษฎีการวิเคราะห์ย่านความถี่สูง เช่น กรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตรวมกับระเบียบวิธีปริพันธ์สนามบนช่องเปิดและทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต หรือกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพและทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ เป็นต้น กรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตรวมกับระเบียบวิธีปริพันธ์สนามบนช่องเปิดและกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพเป็นระเบียบวิธีที่เหมาะสมต่อการนำมาหาแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในบริเวณพหุหลักและพหุข้างใกล้ๆ และใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อน กรรมวิธีทั้งสองมีแนวคิดพื้นฐานมาจากการสมมูลสนาม (field equivalence principle) [47] โดยการกำหนดให้มีขอบเขตล้อมรอบซึ่งแบ่งบริเวณที่เป็นแหล่งกำเนิดออกจากบริเวณที่มีการแผ่พลังงานซึ่งเป็นบริเวณที่มีขอบเขตไม่จำกัด (unbounded region) และสนามกระเจิง



คำนวณได้จากการค่าปริพันธ์ของความหนาแน่นกระแสสมมูลบนขอบเขตล้อมรอบนั้น สำหรับกรณีของระเบียบวิธีปริพันธ์สนามบนช่องเปิดนั้น ขอบเขตล้อมรอบกำหนดได้ด้วยระนาบเสมือนขนาดอนันต์ดังรูป 3.1 ข สนามที่ก่อกำเนิดขึ้นจากคลื่นที่แผ่พลังงานมาจากพื้นผิวสะท้อน  $\vec{E}^r$  และจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น  $\vec{E}^i$  ในบริเวณด้านหน้าของระนาบเป็นสนามที่ทำให้เกิดแหล่งความหนาแน่นกระแสสมมูลบนช่องเปิดขนาดจำกัด โดยปกติแล้วขนาดจำกัดบนช่องเปิดมักพิจารณาจากขอบเขตการสะท้อนตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตซึ่งครอบคลุมสนามสะท้อนทั้งหมดดังรูป 3.1 และสนามกระเจิงหาได้จากปริพันธ์ของแหล่งความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูล  $\vec{J}^{AFIM} = \hat{n}_p \times (\vec{H}^i + \vec{H}^r)$  และแหล่งความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูล  $\vec{M}^{AFIM} = (\vec{E}^i + \vec{E}^r) \times \hat{n}_p$  บนช่องเปิดนี้ [48] ในบางครั้งแหล่งความหนาแน่นกระแสสมมูลทั้งสองอาจพิจารณาเพียงสนามสะท้อนเมื่อพิจารณาสนามกระเจิงในบริเวณด้านหน้าของระนาบ เพราะว่าความหนาแน่นกระแสสมมูลเนื่องจากสนามตกกระทบมีแนวโน้มหักล้างกันในบริเวณดังกล่าว [49] แต่ถ้าสมมติให้ระนาบเสมือนเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ดังรูป 3.1ค แล้วประยุกต์ใช้ทฤษฎีบทภาพเสมือน (image theorem) ระนาบตัวนำสมบูรณ์สามารถยกออกได้ก็จะเหมือนกับมีแหล่งความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลเป็นสองเท่าดังรูป 3.1ง ดังนั้นสนามที่แผ่พลังงานในบริเวณด้านหน้าสามารถแสดงในรูปปริพันธ์ของแหล่งความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลบนช่องเปิดขนาดจำกัด หรืออีกนัยหนึ่งก็คืออยู่ในรูปของปริพันธ์สนามไฟฟ้าบนช่องเปิดเนื่องจากเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบดังกล่าว ( $\hat{n}_p$ ) มีทิศทางไม่เปลี่ยนแปลง



รูป 3.1 การประยุกต์หลักการสมมูลสนามกับปริพันธ์สนามบนช่องเปิด

จากหลักการดังกล่าวเห็นได้ว่าการวางระนาบขนาดอนันต์ที่ใช้แบ่งพื้นผิวสะท้อนออกเป็นสองบริเวณ มีส่วนสำคัญในการกำหนดขนาดช่องเปิดที่เหมาะสม ในความเป็นจริงแล้วการที่จะครอบคลุมสนามที่แผ่พลังงานออกมาทั้งหมดทำได้ยาก นอกเสียจากว่าระนาบดังกล่าวจะอยู่ใกล้กับจานสะท้อนอย่างมากหรือมีระนาบหลายระนาบมาล้อมปิดพื้นผิวสะท้อนไว้ [48] หรือกลุ่มของคลื่นที่แผ่พลังงานออกมาในบริเวณด้านหน้ามีบริเวณจำกัด สำหรับสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อนั้นการกำหนดบริเวณจำกัดของกลุ่มของคลื่นที่แผ่พลังงานออกมาจากแผ่น

ย่อยแต่ละแผ่นทำได้ยาก ดังนั้นกรรมวิธีที่เหมาะสมมากกว่าสำหรับวิเคราะห์สายอากาศชนิดนี้ก็คือกรรมวิธีทัศนศาสตร์-กายภาพ เนื่องจากว่าสนามที่แผ่พลังงานออกไปสามารถคำนวณหาได้โดยตรงจากกระแสที่เหนี่ยวนำบนพื้นผิวของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น ยิ่งไปกว่านั้น กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพมีการประยุกต์ใช้หลักการของทัศนศาสตร์เรขาคณิตเพียงครั้งเดียวคือ การสอดส่องของสนามจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปยังพื้นผิวของแผ่นย่อย แตกต่างกับกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตรวมกับปริพันธ์สนามบนช่องเปิดที่ต้องประยุกต์ใช้หลักการทัศนศาสตร์เรขาคณิตถึงสองครั้ง ครั้งแรกคือการสอดส่องของสนามจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปยังพื้นผิวของแผ่นย่อย และครั้งที่สองคือการสะท้อนของสนามจากพื้นผิวสะท้อนไปยังช่องเปิด ซึ่งการหาสนามที่สะท้อนจากพื้นผิวของแผ่นย่อยไปยังช่องเปิดนั้นตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตต้องทราบจุดที่เกิดการสะท้อนทำให้ต้องใช้เวลาในการค้นหา และอาจเกิดความล้มเหลวในการหาสนามสะท้อนในบริเวณที่เกิดการตัดตะ (caustic regions) ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพมาวิเคราะห์หาสนามกระเจิงจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ อย่างไรก็ตาม การคำนวณหาสนามกระเจิงตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพนั้นอยู่ในรูปของปริพันธ์บนพื้นผิวของแผ่นย่อย ซึ่งโดยปกติแล้วพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะเกิดจากการเข้ารูปด้วยแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมทำให้การคำนวณในระบบพิกัดพื้นผิวท้องถิ่นทำได้ยาก เพื่อให้การคำนวณมีความสะดวกมากขึ้นงานวิจัยได้นำการแปลงโดเมนรูปหลายเหลี่ยมใดๆ ไปอยู่ในโดเมนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาใช้คำนวณหาสนามกระเจิงตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพดังได้กล่าวรายละเอียดของการแปลงโดเมนไว้ในภาคผนวก ข. และนำมาประยุกต์ใช้กับปริพันธ์บนพื้นผิวตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพในหัวข้อย่อยที่ 3.1.1

นอกจากการกระเจิงของสนามบนพื้นผิวของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นแล้ว ส่วนที่เป็นขอบของแผ่นย่อยก็เป็นตัวก่อกำเนิดสนามเลี้ยวเบนที่มีส่วนสำคัญต่อการสร้างพู่ข้างในบริเวณที่ห่างออกไปจากพู่ข้างหลักและระดับโพลาริเซชันไขว้ การวิเคราะห์ผลของสนามการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นสามารถทำได้โดยอาศัยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต หรือทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตมีข้อเสียในลักษณะเดียวกันกับกรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตคือ ต้องใช้เวลาในการค้นหาจุดที่เกิดการเลี้ยวเบนที่ขอบ และเกิดความล้มเหลวเมื่อหาสนามในบริเวณใกล้จุดตัดตะหรือบริเวณขอบเขตการสะท้อนและขอบเขตเงา ปัญหาที่เกิดขึ้นในบริเวณขอบเขตเรขาคณิตทั้งสองสามารถกำจัดได้โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตแบบเอกกรุป (uniform geometrical theory of diffraction, UTD) [50] อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีที่ได้รับการพัฒนาขึ้นนี้ก็ไม่สามารถหาสนามใกล้จุดตัดตะได้ ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากของการหาจุดเลี้ยวเบนและหลีกเลี่ยงความล้มเหลวที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพตามแนวคิดกระแสสมมูลที่ขอบของมิคาเอลลี (Michaeli's equivalent edge currents) มาหาสนามเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบ (fringe current) ซึ่งเป็นแนวคิดที่ขยายออกมาจากสนามกระเจิงเนื่องจากกระแสทัศนศาสตร์กายภาพ (physical optics current)

นอกจากการกระเจิงและการเลี้ยวเบนของสนามแล้ว ในระบบสายอากาศชนิดนี้ยังต้องคำนึงถึงผลกระทบของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบอีก งานวิจัยนี้ได้ใช้สมมุติฐานสนามเป็นศูนย์มาวิเคราะห์ผลกระทบดังกล่าว ในอดีตแนวคิดของสมมุติฐานสนามเป็นศูนย์ที่นำมาใช้ศึกษาผลกระทบของการบดบังในระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนมีอยู่สามรูปแบบ รูปแบบแรกเป็นการกำหนดการบังหรือบริเวณเงาที่จานสะท้อน สมมุติฐานในลักษณะนี้ให้ผลที่ไม่ถูกต้องมากนัก เนื่องจากตำแหน่งการบังที่แท้จริงเกิดขึ้นข้างหน้าจานสะท้อนไม่ใช่เกิดบนพื้นผิวทำให้มีความแตกต่างของระยะทางจากจานสะท้อนไปยังจุดสังเกตกับระยะทางจากตำแหน่งที่กีดขวางจริงไปยังจุดสังเกต ซึ่งส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนทั้งทางขนาดและวิภาค รูปแบบที่สองเป็นการกำหนดการบังที่จานสะท้อนเช่นเดียวกับในรูปแบบแรก แต่บริเวณเงาที่เกิดขึ้นนั้นจะเป็นไปตามสมมุติฐานสนามเป็นศูนย์แบบขึ้นอยู่กับการบังตำแหน่งจุดสังเกตซึ่งไม่เกิดขึ้นตายตัวเหมือนในรูปแบบแรก

ทำให้ผลที่ได้มีความถูกต้อง อย่างไรก็ตาม การที่บริเวณเงาขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดสังเกตเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดความล่าช้าในการคำนวณ และเนื่องจากบริเวณเงาขึ้นอยู่กับจุดสังเกต ดังนั้นสมมติฐานนี้นำมาใช้ในกรณีที่สายอากาศเป็นสายอากาศส่ง รูปแบบสุดท้ายเป็นการกำหนดบริเวณกีดขวางที่วัตถุกีดขวางให้เป็นบริเวณที่เกิดกระแสทัศนศาสตร์กายภาพซึ่งทำให้เกิดสนามไปหักล้าง การคำนวณในลักษณะนี้บริเวณกีดขวางมีกระแสทัศนศาสตร์กายภาพบนวัตถุกีดขวางไม่แปรเปลี่ยน ยกเว้นแต่เพียงว่ามีการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวสะท้อนเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม สำหรับสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอยนั้น การบดบังอาจเกิดขึ้นบนแผ่นยอยมากกว่าหนึ่งแผ่นในทิศทางต่างๆ ดังนั้นถ้าสมมติฐานในรูปแบบที่สามมาใช้ ก็จำเป็นต้องหากระแสทัศนศาสตร์กายภาพเนื่องจากสนามตกกระทบตามกรรรมวิธีทัศนศาสตร์เรขาคณิตจากแผ่นยอยล้อมรอบบนบริเวณกีดขวางของแผ่นยอยแต่ละแผ่นซึ่งมีความซับซ้อนอย่างมาก ดังนั้นเพื่อประยุกต์เข้ากับกรรรมวิธี และทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์หาสนามกระเจิงและสนามเลี้ยวเบนที่เลือกใช้ข้างต้นได้ง่าย และยังสามารถทำให้เห็นถึงกลไกของการบดบังจากแผ่นยอยล้อมรอบ งานวิจัยนี้จึงได้นำสมมติฐานสนามเป็นศูนย์ในรูปแบบที่สองหรือที่เรียกว่า สมมติฐานสนามเป็นศูนย์แบบขึ้นอยู่กับจุดสังเกตมาใช้ศึกษาผลของการบดบังจากแผ่นยอยล้อมรอบจากแนวความคิดข้างต้นสามารถเขียนเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ดังรูป 3.2

จากรูป 3.2 ในขั้นตอนของขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการกำหนดรายละเอียดของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ เช่น การจัดเรียงรูปร่างเริ่มต้นของจานสะท้อน รูปร่างและจำนวนของแผ่นยอย และมุมที่หมุนไปของแผ่นยอยแต่ละแผ่น การกำหนดรายละเอียดของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้นี้ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 หลังจากนั้นก็เลือกชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ใช้เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่นสามารถหาได้จากแบบรูปการแผ่พลังงานทางทฤษฎีหรือที่ได้จากการวัด



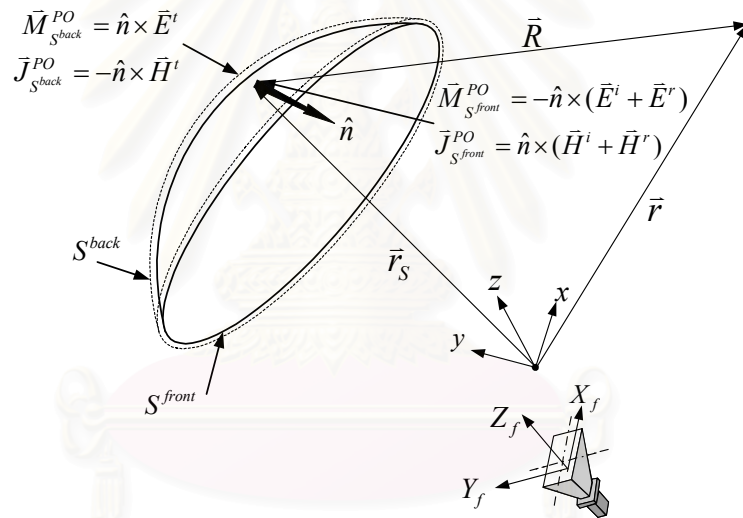
รูป 3.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอย

เมื่อแผ่นยอยมีการหมุนไป แผ่นยอยล้อมรอบจะบดบังสนามที่แผ่พลังงานมาจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และแผ่นยอยล้อมรอบจะบดบังสนามที่แผ่พลังงานออกมาจากแผ่นยอย นอกจากนี้ยังเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นยอยแต่ละแผ่น เพื่อสังเกตผลกระทบเหล่านี้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ที่ได้คำนวณหากระแสทัศนศาสตร์กายภาพบนพื้นผิวของแผ่นยอยและกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบของแผ่นยอย หลังจากนั้นก็เปลี่ยนแปลงกระแสทั้งสองตามสมมติฐานสนามเป็นศูนย์แบบขึ้นอยู่กับจุดสังเกตเพื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นยอยล้อมรอบ ในงานวิจัยนี้สมมติให้พจน์ของการ

แปรเปลี่ยนทางเวลาเป็น  $\exp(j\omega t)$  และไม่ระเบิดไปในการวิเคราะห์ รายละเอียดของการนำกรณวิธี ทฤษฎี และสมมุติฐานมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยมีกล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

### 3.1.1 กรณวิธีทัศนศาสตร์กายภาพกับการกระจิงบนพื้นผิวของแผ่นย่อย

กรณวิธีทัศนศาสตร์กายภาพเป็นหนึ่งในกรณวิธีย่านความถี่สูงที่ใช้หาสนามกระเจิงจากพื้นผิว โดยมีสมมุติฐานที่ว่าไม่มีกระแสเกิดขึ้นในบริเวณเงา (shadow region) หรือบริเวณที่ไม่มีการสอดส่อง และกระแสส่วนย่อยเล็กๆ ที่กระจายบนบริเวณของการสอดส่อง (lit region) ของพื้นผิวนั้นเสมือนกับเป็นกระแสที่เกิดจากการกระตุ้นของสนามตกกระทบที่มีลักษณะเป็นคลื่นระนาบบนระนาบสัมผัสขนาดอนันต์ของส่วนย่อยเล็กๆ ดังนั้นกระแสเหนี่ยวนำบนพื้นผิวจึงประมาณได้ตามแนวคิดเชิงทัศนศาสตร์เรขาคณิต เมื่อใช้หลักการสมมูลสนาม สนามกระเจิงหาได้จากปริพันธ์ของแหล่งความหนาแน่นกระแสสมมูลซึ่งก่อกำเนิดสนามกระเจิงปริมาณจำกัดในทุกๆ ที่ รวมทั้งในบริเวณขอบเขตสะท้อน ขอบเขตเงาและบริเวณจุดตัดตะ กรณวิธีทัศนศาสตร์กายภาพมีพื้นฐานบนทฤษฎีของความสมมูลทางทัศนศาสตร์กายภาพ (theory of PO equivalence) [47] ที่เป็นการขยายแนวคิดของหลักการสมมูลออกไป จากทฤษฎีของความสมมูลทางทัศนศาสตร์กายภาพ เมื่อกำหนดพื้นผิวเสมือนที่ครอบคลุมแหล่งกำเนิดอย่างสมบูรณ์ขึ้นดังรูป 3.3



รูป 3.3 ทฤษฎีของความสมมูลทางทัศนศาสตร์กายภาพ

ความหนาแน่นกระแสสมมูลบนพื้นผิวประกอบด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสมมูลและความหนาแน่นกระแสแม่เหล็กสมมูลที่เป็นผลของสนามทั้งหมดบนพื้นผิวเป็นดังสมการ

$$\vec{M}_{S\text{front}}^{PO}(\vec{r}_S) = -\hat{n} \times [\vec{E}^i(\vec{r}_S) + \vec{E}^r(\vec{r}_S)] \Big|_{S\text{front}} \quad (3.1ก)$$

$$\vec{J}_{S\text{front}}^{PO}(\vec{r}_S) = \hat{n} \times [\vec{H}^i(\vec{r}_S) + \vec{H}^r(\vec{r}_S)] \Big|_{S\text{front}} \quad (3.1ข)$$

$$\vec{M}_{S\text{back}}^{PO}(\vec{r}_S) = \hat{n} \times \vec{E}^i(\vec{r}_S) \Big|_{S\text{back}} \quad (3.1ค)$$

$$\vec{J}_{S\text{back}}^{PO}(\vec{r}_S) = -\hat{n} \times \vec{H}^i(\vec{r}_S) \Big|_{S\text{back}} \quad (3.1ง)$$

โดยที่  $\vec{r}_S$  คือเวกเตอร์บอกตำแหน่งของแหล่งกำเนิดกระแสสมมูลบนพื้นผิว,  $\hat{n}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากพุ่งออกของแหล่งกำเนิดบนพื้นผิว,  $\vec{E}^i / \vec{H}^i$ ,  $\vec{E}^r / \vec{H}^r$  คือสนามไฟฟ้า/สนามแม่เหล็กตกกระทบและสะท้อนบนพื้นผิว  $S\text{front}$  ซึ่งเป็น

พื้นผิวที่อยู่ในบริเวณสาดส่องตามลำดับ และ  $\bar{E}' / \bar{H}'$  คือสนามไฟฟ้า/สนามแม่เหล็กส่งผ่านบนพื้นผิว  $S^{back}$  ซึ่งเป็นพื้นผิวในบริเวณเงา

จาก [51] สนามที่แผ่พลังงานจากแหล่งกำเนิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กบนพื้นผิวไปยังบริเวณที่มีขอบเขตไม่จำกัดเป็น

$$\bar{E}^{PO}(\bar{r}) = -\frac{j}{\omega\epsilon} \int_S [(\bar{J}^{PO}(\bar{r}_S) \cdot \nabla) \nabla + k^2 \bar{J}^{PO}(\bar{r}_S)] \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS - \int_S \bar{M}^{PO}(\bar{r}_S) \times \nabla \left( \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \right) dS \quad (3.2ก)$$

$$\bar{H}^{PO}(\bar{r}) = -\frac{j}{\omega\mu} \int_S [(\bar{M}^{PO}(\bar{r}_S) \cdot \nabla) \nabla + k^2 \bar{M}^{PO}(\bar{r}_S)] \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS + \int_S \bar{J}^{PO}(\bar{r}_S) \times \nabla \left( \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} \right) dS \quad (3.2ข)$$

โดยที่  $\bar{J}^{PO}(\bar{r}_S) = \bar{J}_{S^{front}}^{PO}(\bar{r}_S) + \bar{J}_{S^{back}}^{PO}(\bar{r}_S)$ ,  $\bar{M}^{PO}(\bar{r}_S) = \bar{M}_{S^{front}}^{PO}(\bar{r}_S) + \bar{M}_{S^{back}}^{PO}(\bar{r}_S)$ ,  $\omega$  คือความถี่เชิงมุม,  $\epsilon, \mu$  คือสภาพยอมทางไฟฟ้าและสภาพขั้วซึมทางแม่เหล็กของอวกาศว่าง (free space),  $k$  คือเลขคลื่นในอวกาศว่าง และ  $R$  คือระยะทางจากแหล่งกำเนิดกระแสสมมูลไปยังจุดสังเกต

จากรูป 3.3 ถ้าพื้นผิวที่เป็นแหล่งกำเนิดเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กส่งผ่านในบริเวณเงาเป็นศูนย์ทำให้ไม่เกิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก และเนื่องจากสนามไฟฟ้าองค์ประกอบสัมผัสกับพื้นผิวในบริเวณสาดส่องเป็นศูนย์ทำให้ไม่เกิดความหนาแน่นกระแสแม่เหล็ก คงเหลือแต่เพียงความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าบนบริเวณสาดส่อง ดังนั้นตามการประมาณเชิงทัศนศาสตร์กายภาพ

$$\bar{J}^{PO}(\bar{r}_S) = 2\hat{n} \times \bar{H}^i(\bar{r}_S) \quad (3.3)$$

เมื่อแทนสมการ (3.3) ลงในสมการ (3.2) จะได้

$$\bar{E}^{PO}(\bar{r}) = -jkZ_0 \iint_S [a_1 \bar{J}^{PO}(\bar{r}_S) - a_2 (\bar{J}^{PO}(\bar{r}_S) \cdot \hat{R}) \hat{R}] \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS \quad (3.4)$$

$$\bar{H}^{PO}(\bar{r}) = -jk \iint_S a_3 (\hat{R} \times \bar{J}^{PO}(\bar{r}_S)) \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} dS \quad (3.5)$$

โดยที่  $a_1 = 1 - \frac{1}{(kR)^2} - j\frac{1}{kR}$ ,  $a_2 = 1 - \frac{3}{(kR)^2} - j\frac{3}{kR}$ ,  $a_3 = 1 - j\frac{1}{kR}$ ,  $\bar{R} = \bar{r} - \bar{r}_S$ ,  $R = |\bar{R}|$  และ  $\hat{R} = \frac{\bar{R}}{R}$

สมการ (3.4) และ (3.5) สามารถประยุกต์ใช้กับจุดสังเกตในบริเวณย่านสนามใกล้และสนามไกล แต่ถ้าพิจารณาในบริเวณย่านสนามไกลสามารถประมาณได้ดังสมการ (3.6)

$$\bar{E}^{PO}(\bar{r}) \stackrel{R \rightarrow \infty}{\cong} -\frac{j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} \iint_S [\bar{J}^{PO} - (\bar{J}^{PO} \cdot \hat{r}) \hat{r}] e^{jk(\bar{r}_S \cdot \hat{r})} dS \quad (3.6ก)$$

$$\bar{E}^{PO}(\bar{r}) \stackrel{R \rightarrow \infty}{\cong} -\frac{j\omega\mu e^{-jkr}}{4\pi r} (\bar{I} - \hat{r}\hat{r}) \cdot \iint_S \bar{J}^{PO} e^{jk(\bar{r}_S \cdot \hat{r})} dS \quad (3.6ข)$$

โดยที่  $\bar{I} = \hat{r}\hat{r} + \hat{\theta}\hat{\theta} + \hat{\phi}\hat{\phi}$  คือไดแอดิกเอกลักษณ์ (identity dyadic)

เมื่อนำกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพข้างต้นมาใช้วิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับปรุงลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย โดยพิจารณาสายอากาศป้อนกำลังคลื่นกับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับปรุงลักษณะได้แยกจากกัน แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นซึ่งหาได้จากกรวยวิเคราะห์ หรือจากการวัดจะเป็นแหล่งกำเนิดสนามตกกระทบมาเหนี่ยวนำให้เกิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าบนพื้นผิว ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำสมมูลที่จุด  $\bar{r}_{S^e}$  บนแผ่นย่อย  $S^e$  ประมาณได้ด้วยกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพตามสมการ (3.3) เป็น

$$\bar{J}_e^{PO}(\bar{r}_{S^e}) = 2\hat{n}_{rot}^e \times \bar{H}^{feed}(\bar{r}_{S^e}) \quad (3.7)$$

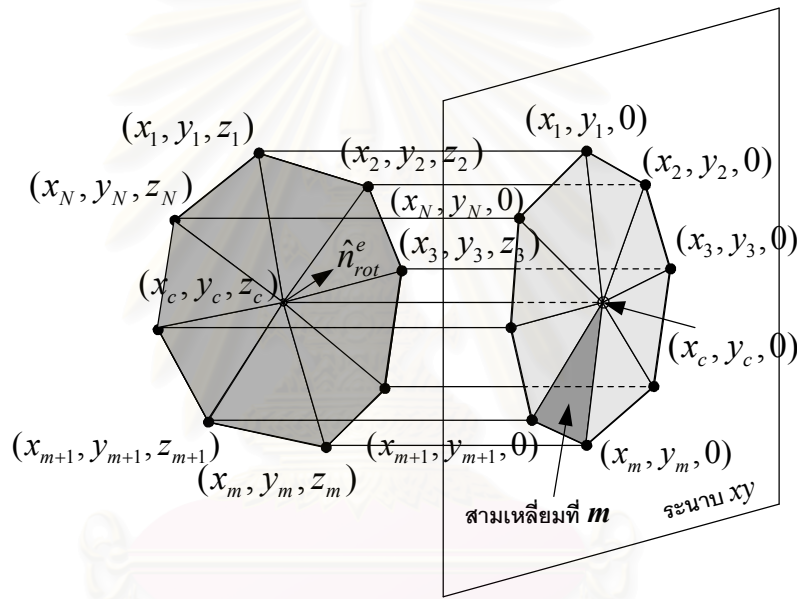


โดยที่  $\hat{n}_{rot}^e$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยพุ่งออกตั้งฉากกับพื้นผิวแผ่นย่อยที่  $e$ ,  $\vec{H}^{feed}$  คือสนามแม่เหล็กจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และเมื่อพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะประกอบกันขึ้นจากแผ่นย่อยจำนวน  $M$  แผ่น จากสมการ (3.6) สนามที่แผ่พลังงานจากแหล่งกระแสสมมูลบนแผ่นย่อยทุกๆ แผ่นไปยังจุดสังเกต  $\vec{r}$  เป็น

$$\vec{E}^{PO}(\vec{r}) \cong -j\omega\mu \frac{e^{-jk r}}{4\pi r} (\vec{I} - \hat{r}\hat{r}) \cdot \sum_{e=1}^M \iint_{S^e} \vec{J}_e^{PO}(\vec{r}_{S^e}) e^{jk\hat{r}\cdot\vec{r}_{S^e}} dS^e \quad (3.8)$$

โดยที่  $\vec{r}_{S^e} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$  คือเวกเตอร์บอกตำแหน่งของจุดบนแผ่นย่อย  $S^e$  และ  $\hat{r}$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยแสดงทิศทางของจุดสังเกต

เนื่องจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้สามารถเข้ารูปร่างด้วยแผ่นย่อยรูปใดๆ เช่น แผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยม ทำให้ปริพันธ์บนพื้นผิวของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นในระบบพิกัดพื้นผิวท้องถิ่นในสมการ (3.8) อยู่ในรูปที่คำนวณได้ยาก วิธีการที่เหมาะสมวิธีการหนึ่งเพื่ออ้างอิงถึงแผ่นย่อยในกรณีที่มีแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมคือ การแบ่งแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมออกเป็นกลุ่มของแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมแล้วส่งรูปสามเหลี่ยมแต่ละรูปไปบนระนาบ  $xy$  ดังรูป 3.4



รูป 3.4 การแบ่งแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมออกเป็นรูปสามเหลี่ยมย่อย

จากการกระทำดังกล่าวปริพันธ์บนพื้นผิว  $S^e$  สามารถทำให้อยู่ในรูปที่คำนวณได้ง่ายโดยใช้ระเบียบวิธีการเปลี่ยนตัวแปรซึ่งทำให้ปริพันธ์ของพื้นผิว  $S^e$  เปลี่ยนไปอยู่ในโดเมนของรูปสามเหลี่ยมดังได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ข. และเนื่องจากพื้นผิวส่วนย่อยของแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมมีความสัมพันธ์กับพื้นผิวของภาพฉายของแผ่นย่อยนั้นบนระนาบ  $xy$  เป็น

$$dS^e = \frac{dxdy}{|\hat{n}_{rot}^e \cdot \hat{z}|} \quad (3.9)$$

ดังนั้นเมื่อใช้การแปลงในภาคผนวก ข. และสมการ (3.9) ปริพันธ์บนพื้นผิว  $S^e$  สามารถเขียนอยู่ในรูปที่คำนวณได้ง่ายเป็น

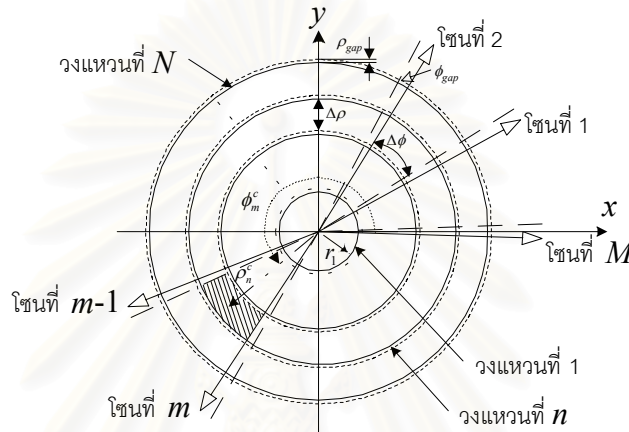
$$\sum_{g=1}^{N_e} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{2\hat{n}_{rot}^e \times \vec{H}^{feed}(\vec{r}_{S^e}) e^{jk\hat{r}\cdot\vec{r}_{S^e}}}{|\hat{n}_{rot}^e \cdot \hat{z}|} \left| J \left( \frac{x, y}{u_g, v_g} \right) \right| \left| J \left( \frac{u_g, v_g}{r_g, s_g} \right) \right| dr_g ds_g \quad (3.10)$$

โดยที่  $N_e$  คือจำนวนด้านของแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมที่  $e$  และเมื่อแทนสมการ (3.10) ลงในสมการ (3.8) จะได้

$$\begin{aligned} \bar{E}^{PO}(\bar{r}) \stackrel{r \rightarrow \infty}{\cong} -j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} (\bar{I} - \hat{r}\hat{r}) \cdot \\ \sum_{e=1}^M \sum_{g=1}^{N_e} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\hat{n}_{rot}^e \times \bar{H}^{feed}(\bar{r}_{S^e}) e^{jk\hat{r} \cdot \bar{r}_{S^e}}}{|\hat{n}_{rot}^e \cdot \hat{z}|} \left| J \left( \frac{x, y}{u_g, v_g} \right) \right| \left| J \left( \frac{u_g, v_g}{r_g, s_g} \right) \right| dr_g ds_g \end{aligned} \quad (3.11)$$

โดยที่  $J(\bullet)$  คือจาโคเบียนของการแปลงกำหนดเป็นดังสมการ (ข.6) และ (ข.10)

ในบางกรณีแผ่นย่อยที่ใช้อาจมีรูปร่างไม่เป็นรูปหลายเหลี่ยม แต่อยู่ในรูปที่สามารถหาปริพันธ์บนระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวได้โดยตรง เพื่อแสดงให้เห็นแนวทางการวิเคราะห์ของแผ่นย่อยในลักษณะนี้ ในงานวิจัยได้แบ่งพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เป็นโครงสร้างอย่างง่ายดังรูป 3.5



รูป 3.5 พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ที่เกิดจากการจัดเรียงแผ่นตัวนำย่อยในลักษณะแผ่นระนาบวงกลม

จากรูป 3.5 พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดจากการแบ่งแผ่นระนาบวงกลมออกเป็นโซน และแบ่งโซนแต่ละโซนออกเป็นวงแหวนย่อย ในการอ้างถึงแผ่นย่อยแต่ละแผ่นนั้น ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเป็นองค์ประกอบสำคัญของการอ้างถึง ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นสามารถกำหนดได้ดังสมการ (3.12)

$$\rho_n^c = \begin{cases} r_1/2 & , n = 1 \\ (n-1)\rho_{gap} + \frac{(2n-3)\Delta\rho}{2} + r_1 & , n > 1 \end{cases} \quad (3.12ก)$$

$$\phi_m^c = \frac{(2m-1)(\phi_{gap} + \Delta\phi)}{2} \quad (3.12ข)$$

โดยที่  $r_1$  คือรัศมีของวงแหวนที่ 1, ดัชนีล่าง  $m, n$  ระบุว่าเป็นแผ่นย่อยที่โซนที่  $m$  และวงแหวนที่  $n$  ตามลำดับ และ  $h$  คือตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเหนือพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ และ  $\phi_{gap}, \rho_{gap}$  คือขนาดช่องว่างตามแนวโซนและตามแนววงแหวนตามลำดับ สำหรับกรณีที่แบ่งให้ความกว้างตามแนวโซนเป็นจำนวน  $M$  เท่ากัน และตามแนววงแหวนเป็นจำนวน  $N$  เท่ากัน ความกว้างตามแนวโซนและตามแนววงแหวนของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเป็น

$$\Delta\rho = \frac{(r_{max} - r_1) - N\rho_{gap}}{N-1} \quad (3.13ก)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi - M\phi_{gap}}{M} \quad (3.13ข)$$

โดยที่  $r_{max}$  คือรัศมีของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้

ในการทำงานเดียวกันกับกรณีแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยม ขั้นแรกต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดท้องถิ่นของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นกับระบบพิกัดทั่วไปก่อนเพื่อความสะดวกในการคำนวณปริพันธ์บนพื้นผิวของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น การ

แบ่งแผ่นย่อยในลักษณะนี้ ระบบพิกัดท้องถิ่นของแผ่นย่อยในสถานะเริ่มต้นประกอบด้วยระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสองระบบ คือ  $x_1^{mn} y_1^{mn} z_1^{mn}$  และ  $x_{init}^{mn} y_{init}^{mn} z_{init}^{mn}$  ระบบพิกัดทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดทั่วไป  $xyz$  ดังนี้

ระบบพิกัด  $x_1^{mn} y_1^{mn} z_1^{mn}$  สอดคล้องกับระบบพิกัดทั่วไปในลักษณะการเลื่อนเชิงตำแหน่งของระบบพิกัด  $xyz$  และระบบพิกัด  $x_{init}^{mn} y_{init}^{mn} z_{init}^{mn}$  เกิดจากการหมุนของระบบพิกัด  $x_1^{mn} y_1^{mn} z_1^{mn}$  ไปเป็นมุม  $\phi_m^c$  รอบแกน  $z_1^{mn}$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้ระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะเริ่มต้นเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} x_1^{mn} \\ y_1^{mn} \\ z_1^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \rho_n^c \cos \phi_m^c \\ \rho_n^c \sin \phi_m^c \\ -h \end{bmatrix} \quad (3.14ก)$$

$$\begin{bmatrix} x_{init}^{mn} \\ y_{init}^{mn} \\ z_{init}^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_m^c & \sin \phi_m^c & 0 \\ -\sin \phi_m^c & \cos \phi_m^c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^{mn} \\ y_1^{mn} \\ z_1^{mn} \end{bmatrix} \quad (3.14ข)$$

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะเริ่มต้น ( $\hat{x}_{init}^{mn}, \hat{y}_{init}^{mn}, \hat{z}_{init}^{mn}$ ) กับระบบพิกัดทั่วไปแสดงได้ในรูปโคไซน์แสดงทิศทาง (direction cosines) เป็น

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{init}^{mn} \\ \hat{y}_{init}^{mn} \\ \hat{z}_{init}^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_m^c & \sin \phi_m^c & 0 \\ -\sin \phi_m^c & \cos \phi_m^c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} \quad (3.14ค)$$

จากระบบพิกัด  $x_{init}^{mn} y_{init}^{mn} z_{init}^{mn}$  สังเกตว่า  $z_{init}^{mn} = 0$  และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากของแผ่นย่อยเท่ากับ  $\hat{z}_{init}^{mn} = \hat{z}$  ต่อมาเมื่อมีการหมุนแผ่นย่อยไปเป็นมุมที่ต้องการแล้ว แผ่นย่อยจะอยู่ในสถานะหลังการหมุน เพื่ออ้างอิงจุดบนแผ่นย่อยในสถานะนี้ได้ใช้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนอีก 4 ระบบคือ  $x_2^{mn} y_2^{mn} z_2^{mn}$ ,  $x_3^{mn} y_3^{mn} z_3^{mn}$ ,  $x_4^{mn} y_4^{mn} z_4^{mn}$  และ  $x_{rot}^{mn} y_{rot}^{mn} z_{rot}^{mn}$  ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดเหล่านี้กับระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะเริ่มต้นกำหนดได้ดังนี้

ระบบพิกัด  $x_2^{mn} y_2^{mn} z_2^{mn}$  สอดคล้องกับการหมุนระบบพิกัด  $x_{init}^{mn} y_{init}^{mn} z_{init}^{mn}$  ไปเป็นมุม  $\phi_{rot}^{mn}$  รอบแกน  $z_{init}^{mn}$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และระบบพิกัด  $x_3^{mn} y_3^{mn} z_3^{mn}$  เกิดจากการหมุนระบบพิกัด  $x_2^{mn} y_2^{mn} z_2^{mn}$  ไปเป็นมุม  $\theta_{rot}^{mn}$  รอบแกน  $y_2^{mn}$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา  $\phi_{rot}^{mn}$ ,  $\theta_{rot}^{mn}$  คือมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยรอบแกนทิศและแกนยกตามลำดับ และเพื่อทำให้การหาจุดยอดของแผ่นย่อยในสถานะหลังการหมุนทำได้ง่ายจึงได้กำหนดระบบพิกัด  $x_4^{mn} y_4^{mn} z_4^{mn}$  ขึ้นมา โดยหมุนระบบพิกัด  $x_3^{mn} y_3^{mn} z_3^{mn}$  ไปเป็นมุม  $\phi_{rot}^{mn}$  รอบแกน  $z_3^{mn}$  ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เพื่อที่จะจัดเรียงแกนอ้างอิงของระบบพิกัดให้มีลักษณะเดียวกันกับระบบพิกัด  $x_{init}^{mn} y_{init}^{mn} z_{init}^{mn}$  และระบบพิกัด  $x_{rot}^{mn} y_{rot}^{mn} z_{rot}^{mn}$  เกิดจากการเลื่อนเชิงตำแหน่งของระบบพิกัด  $x_4^{mn} y_4^{mn} z_4^{mn}$  ไปตามแกน  $x_4^{mn}$  ลงมาเป็นระยะ  $\rho_n^c$  จากความสัมพันธ์ข้างต้นทำให้ระบบพิกัดเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะเริ่มต้นเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} x_2^{mn} \\ y_2^{mn} \\ z_2^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^{mn} & \sin \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ -\sin \phi_{rot}^{mn} & \cos \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{init}^{mn} \\ y_{init}^{mn} \\ z_{init}^{mn} \end{bmatrix} \quad (3.15ก)$$

$$\begin{bmatrix} x_3^{mn} \\ y_3^{mn} \\ z_3^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{rot}^{mn} & 0 & -\sin \theta_{rot}^{mn} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{rot}^{mn} & 0 & \cos \theta_{rot}^{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2^{mn} \\ y_2^{mn} \\ z_2^{mn} \end{bmatrix} \quad (3.15ข)$$

$$\begin{bmatrix} x_4^{mn} \\ y_4^{mn} \\ z_4^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^{mn} & -\sin \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ \sin \phi_{rot}^{mn} & \cos \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3^{mn} \\ y_3^{mn} \\ z_3^{mn} \end{bmatrix} \quad (3.15ค)$$

$$\begin{bmatrix} x_{rot}^{mn} \\ y_{rot}^{mn} \\ z_{rot}^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_4^{mn} \\ x_4^{mn} \\ x_4^{mn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_n^c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15ง)$$

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิว ( $\hat{x}_{rot}^{mn}, \hat{y}_{rot}^{mn}, \hat{z}_{rot}^{mn}$ ) กับ ( $\hat{x}_{init}^{mn}, \hat{y}_{init}^{mn}, \hat{z}_{init}^{mn}$ ) แสดงได้ในรูปโคไซน์ แสดงทิศทางเป็น

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{rot}^{mn} \\ \hat{y}_{rot}^{mn} \\ \hat{z}_{rot}^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^{mn} & -\sin \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ \sin \phi_{rot}^{mn} & \cos \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{rot}^{mn} & 0 & -\sin \theta_{rot}^{mn} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{rot}^{mn} & 0 & \cos \theta_{rot}^{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^{mn} & \sin \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ -\sin \phi_{rot}^{mn} & \cos \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{init}^{mn} \\ \hat{y}_{init}^{mn} \\ \hat{z}_{init}^{mn} \end{bmatrix} \quad (3.15จ)$$

จากระบบพิกัด  $x_{rot}^{mn}, y_{rot}^{mn}, z_{rot}^{mn}$  เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากของแผ่นย่อยในสถานะหลังการหมุนเท่ากับ  $\hat{z}_{rot}^{mn}$  ดังนั้น

$$\hat{n}_{rot}^{mn} = [-\sin \theta_{rot}^{mn} (\sin \phi_{rot}^{mn} \sin \phi_m^c - \cos \phi_{rot}^{mn} \cos \phi_m^c)] \hat{x} + [\sin \theta_{rot}^{mn} (\sin \phi_{rot}^{mn} \cos \phi_m^c + \cos \phi_{rot}^{mn} \sin \phi_m^c)] \hat{y} + \cos \theta_{rot}^{mn} \hat{z} \quad (3.15ข)$$

จากสมการ (3.14ก) (3.14ข) และสมการ (3.15ก)-(3.15ง) จะได้

$$\begin{bmatrix} x_{rot}^{mn} \\ y_{rot}^{mn} \\ z_{rot}^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - \rho_n^c \cos \phi_m^c \\ y - \rho_n^c \sin \phi_m^c \\ z + h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_n^c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^T \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{rot}^{mn} - \rho_n^c \\ y_{rot}^{mn} \\ z_{rot}^{mn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_n^c \cos \phi_m^c \\ \rho_n^c \sin \phi_m^c \\ -h \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

โดยที่

$$P = \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^{mn} & -\sin \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ \sin \phi_{rot}^{mn} & \cos \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{rot}^{mn} & 0 & -\sin \theta_{rot}^{mn} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{rot}^{mn} & 0 & \cos \theta_{rot}^{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^{mn} & \sin \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ -\sin \phi_{rot}^{mn} & \cos \phi_{rot}^{mn} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_m^c & \sin \phi_m^c & 0 \\ -\sin \phi_m^c & \cos \phi_m^c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

และเมื่อแทนสมการ (3.15จ) ลงในสมการ (3.14ค) จะได้

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{rot}^{mn} \\ \hat{y}_{rot}^{mn} \\ \hat{z}_{rot}^{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^T \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{rot}^{mn} \\ \hat{y}_{rot}^{mn} \\ \hat{z}_{rot}^{mn} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

โดยที่ดัชนี  $T$  กำหนดเป็นการสลับเปลี่ยน (transpose) ของเมทริกซ์

จากความสัมพันธ์ของระบบพิกัดท้องถิ่นของแผ่นย่อยกับระบบพิกัดทั่วไปข้างต้น สนามกระเจิงตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพสามารถเขียนอยู่ในของระบบพิกัดท้องถิ่นของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเป็น

$$\bar{E}^{PO}(\bar{r}) \stackrel{r \rightarrow \infty}{\cong} -j\omega\mu \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} (\bar{I} - \hat{r}\hat{r}) \cdot \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^1 \int_{-\Delta\phi/2}^{+\Delta\phi/2} \int_0^{r_1} \hat{n}_{rot}^{mn} \times \bar{H}^{feed}(\bar{r}_{mn}^s) e^{jk(\bar{r}_{mn}^s \cdot \bar{r})} \rho^{mn} d\rho^{mn} d\phi^{mn} + \sum_{m=1}^M \sum_{n=2}^N \int_{-\Delta\phi/2}^{+\Delta\phi/2} \int_{\rho_n^c - \Delta\rho/2}^{\rho_n^c + \Delta\rho/2} \hat{n}_{rot}^{mn} \times \bar{H}^{feed}(\bar{r}_{mn}^s) e^{jk(\bar{r}_{mn}^s \cdot \bar{r})} \rho^{mn} d\rho^{mn} d\phi^{mn} \right] \quad (3.19)$$

โดยที่เวกเตอร์บอกตำแหน่งบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่น  $\bar{r}_{mn}^s$  กำหนดได้ดังสมการ (3.20)

$$\bar{r}_{mn}^s = \begin{bmatrix} P^T \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho^{mn} \cos \phi^{mn} - \rho_n^c \\ \rho^{mn} \sin \phi^{mn} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_n^c \cos \phi_m^c \\ \rho_n^c \sin \phi_m^c \\ -h \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพที่กล่าวมาข้างต้น กระแสทัศนศาสตร์กายภาพให้ค่าประมาณกระแสดิจริงๆ ถูกต้องบนพื้นผิวต่อเนื่องและมีขนาดทางไฟฟ้าใหญ่มาก ส่วนในบริเวณใกล้ๆ ขอบนั้นกระแสทัศนศาสตร์กายภาพมีค่าไม่ถูกต้องนักเนื่องจากในบริเวณนั้นกระแสจะเกิดความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้น ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าสนามเนื่องจากการแอสทัศนศาสตร์-

กายภาพมีความแม่นยำในบริเวณลำคลื่นหลัก และสองถึงสามพูข้างแรก ความแม่นยำดังกล่าวนี้เหมาะสมกับจุดประสงค์ในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงอัตราขยาย และลดระดับพู่ข้างใกล้ๆ สำหรับในบริเวณพู่ข้างใกล้ๆ หรือการทำนายสนามในแนวโพลาริเซชันไขว้ สนามเลี้ยวเบนซึ่งเกิดจากความไม่ต่อเนื่องของกระแสที่บริเวณใกล้ๆ ขอบนั้นจะมีลักษณะโดดเด่น ดังนั้นสนามกระเจิงทั้งหมดต้องรวมสนามเนื่องจากกระแสที่ขอบ (fringe field) เข้าไปด้วย รายละเอียดของการหาสนามเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบมีกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

### 3.1.2 ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพกับการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อย

การวิเคราะห์การกระเจิงจากโครงสร้างที่เป็นตัวนำสมบรูณ์ที่ประกอบด้วยขอบและมุมในย่านความถี่สูงได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทำนายอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัตถุที่มีรูปทรงเรขาคณิต หรือพื้นผิวโค้งได้ เช่น อุปกรณ์เครื่องใช้ ดีก พื้นผิวสะท้อนของสายอากาศ เป็นต้น หนึ่งในกรรมวิธีย่านความถี่สูงที่ใช้กันอย่างกว้างขวางคือ กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อย่อยที่ผ่านมา กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพได้รับความนิยมนอย่างมากในการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศชนิดจานสะท้อน เนื่องจากทำความเข้าใจได้ง่ายและมีความแม่นยำในการทำนายแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณลำคลื่นหลัก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพจะลดลงในการทำนายแบบรูปการแผ่พลังงานในบริเวณที่ห่างไกลออกไปจากลำคลื่นหลัก และโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้น เนื่องจากกระแสทัศนศาสตร์กายภาพมีค่าไม่ถูกต้องนักใกล้ๆ ขอบที่มีปรากฏการณ์เลี้ยวเบนเกิดขึ้น

หนึ่งในกรรมวิธีที่สามารถทำนายสนามที่มุมห่างไกลออกไปจากลำคลื่นหลักและโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบคือ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต [52] แต่ทฤษฎีนี้ก็ล้มเหลวเมื่อหาสนามที่บริเวณขอบเขตเงาและขอบเขตสะท้อน ความล้มเหลวนี้กำจัดได้โดยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตแบบเอกกรุป (uniform geometrical theory of diffraction, UTD) [50] หรือทฤษฎีเชิงเส้นกำกับแบบเอกกรุป (uniform asymptotic theory, UAT) [53] อย่างไรก็ตาม ทฤษฎีเหล่านี้ก็ยังปรากฏความเป็นเอกฐาน (singularity) ที่บริเวณจุดตัดตะ

กรรมวิธีอีกกรรมวิธีหนึ่งที่ใช้ทำนายสนามที่มุมห่างไกลที่เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องที่ขอบได้รับการพัฒนาขึ้นโดยอูฟิมต์เซฟ (Ufimtsev) ในเวลาใกล้ๆ กันกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิตคือ ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ แนวคิดของทฤษฎีนี้กล่าวว่า สนามกระเจิงแสดงอยู่ในรูปของผลรวมของสนามกระเจิงจากกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพและสนามไม่ต่อเนื่องที่ขอบ (fringe field) ที่เป็นผลมาจากการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นที่ขอบดังสมการ (3.21)

$$\bar{E}^{PTD}(\vec{r}) = \bar{E}^{PO}(\vec{r}) + \bar{E}^{FW}(\vec{r}) \quad (3.21)$$

ในปัจจุบันได้มีการขยายแนวคิดของทฤษฎีนี้ออกไปในสองรูปแบบคือ รูปแบบของสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนของความยาวส่วนย่อยของมิตซ์เนอร์ (Mitzner's incremental length diffraction coefficient, ILDC) [54], [55] และรูปแบบของกระแสสมมูลที่ขอบของมิคาเอลลี (Michaeli's equivalent edge current, EEC) [31], [32], [33] มิตซ์เนอร์ได้แสดงสนามไม่ต่อเนื่องที่ขอบในพจน์ของสัมประสิทธิ์การเลี้ยวเบนของความยาวส่วนย่อยคูณกับสนามตกกระทบแล้วหาปริพันธ์สนามแต่ละส่วนย่อยนี้ตามขอบของวัตถุ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพในรูปแบบของกระแสสมมูลของมิคาเอลลีหาสนามไม่ต่อเนื่องที่ขอบที่เกิดขึ้นจากขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น มิคาเอลลีได้แสดงสนามไม่ต่อเนื่องที่ขอบในพจน์ของแหล่งความหนาแน่นกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบที่หาได้จากผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการแมกซ์เวลล์ในกรณีที่มีคลื่นระนาบตกกระทบบนระนาบของรูปสี่เหลี่ยมและกรรมวิธีกระแสสมมูลที่ขอบดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในภาคผนวก ก. จากภาคผนวก ก. ความหนาแน่นกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบพิจารณาจากส่วนย่อยเล็กๆ ของแถบไม่จำกัดความยาว (untruncated



incremental strips) กรณีที่ส่วนย่อยเล็กๆ ของแถบมีความยาวไม่จำกัดนี้ จะเกิดความเป็นเอกฐานที่จุดสังเกตในบางทิศทาง ความเป็นเอกฐานที่เกิดขึ้นพิจารณาได้จากพจน์ความหนาแน่นกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบโดยแบ่งพิจารณาออกเป็นสององค์ประกอบ ในขั้นต้นพิจารณาองค์ประกอบของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพก่อน จากสมการ (ก.113) และ (ก.114) พบว่า  $I^{PO}$  และ  $M^{PO}$  เกิดความเป็นเอกฐานเมื่อ  $\cos \phi' + \mu_1 = 0$  หรือ  $\cos(N\pi - \phi') + \mu_2 = 0$  ซึ่งเมื่อแทน  $\mu_1$  และ  $\mu_2$  ตามสมการ (ก.117) และ (ก.118) ลงไปจะได้

$$\cos \phi' + \frac{\sin \beta \cos \phi + \cot \beta' (\cos \beta - \cos \beta')}{\sin \beta'} = 0 \quad (3.22ก)$$

$$\cos(N\pi - \phi') + \frac{\sin \beta \cos(N\pi - \phi) + \cot \beta' (\cos \beta - \cos \beta')}{\sin \beta'} = 0 \quad (3.22ข)$$

จากภาคผนวก ก. เมื่อพิจารณาพื้นผิวด้านบนของรูปปลั้ม  $\hat{s}' = -\sin \beta' \cos \phi' \hat{x} - \sin \beta' \sin \phi' \hat{y} + \cos \beta' \hat{z}$ ,  $\hat{s} = \sin \beta \cos \phi \hat{x} + \sin \beta \sin \phi \hat{y} + \cos \beta \hat{z}$  และ  $\hat{\sigma}_1 = \sin \beta' \hat{x} + \cos \beta' \hat{z}$

เมื่อพิจารณาพื้นผิวด้านล่างของรูปปลั้ม  $\hat{s}' = -\sin \beta' \cos(N\pi - \phi') \hat{x}_2 - \sin \beta' \sin(N\pi - \phi') \hat{y}_2 - \cos \beta' \hat{z}_2$ ,  $\hat{s} = \sin \beta \cos(N\pi - \phi) \hat{x}_2 + \sin \beta \sin(N\pi - \phi) \hat{y}_2 - \cos \beta \hat{z}_2$  และ  $\hat{\sigma}_2 = \sin \beta' \hat{x}_2 - \cos \beta' \hat{z}_2$  จากความสัมพันธ์นี้ทำให้สมการ (3.22ก) และ (3.22ข) สอดคล้องกับเงื่อนไข

$$\hat{s} \cdot \hat{\sigma}_{1,2} = \hat{s}' \cdot \hat{\sigma}_{1,2} \quad (3.23)$$

สมการ (3.23) เป็นเงื่อนไขของการเกิดความเป็นเอกฐานซึ่งเกิดขึ้นในทิศทางจุดสังเกตสัมผัสผิวกววยที่มี  $\sigma_{1,2}$  เป็นแกนของกรวย โดยที่มุมของกรวยเท่ากับมุมระหว่างทิศทางตกกระทบกระทำกับแกนของกรวยนั้น ความเป็นเอกฐานในลักษณะนี้เกิดขึ้นจากองค์ประกอบของกระแสสมมูลตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพดังนั้นจึงมีชื่อเรียกว่า กรวยเอกฐานของทัศนศาสตร์กายภาพ (PO singularity cone) [56]

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของความหนาแน่นกระแสสมมูลรวม  $I^T$  และ  $M^T$  ตามสมการ (ก.89) และ (ก.90) พบว่าเกิดความเป็นเอกฐานเมื่อ  $\sin \alpha_{1,2} = 0$  หรือ  $\cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) = 0$  หรือ  $\cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) = 0$  ซึ่งสอดคล้องกับ  $\alpha_{1,2} = 0$  และเนื่องจาก  $\sin \alpha_{1,2} = \sqrt{1 - \mu_{1,2}^2}$  ดังนั้น

$$\mu_1 = \frac{\sin \beta' \sin \beta \cos \phi + \cos \beta' \cos \beta - \cos^2 \beta'}{\sin^2 \beta'} = 1 \quad (3.24ก)$$

$$\mu_2 = \frac{\sin \beta' \sin \beta \cos(N\pi - \phi) + \cos \beta' \cos \beta - \cos^2 \beta'}{\sin^2 \beta'} = 1 \quad (3.24ข)$$

เมื่อพิจารณา  $\hat{\sigma}_{1,2}$ ,  $\hat{s}'$  และ  $\hat{s}$  จากที่กล่าวไว้ข้างต้น สมการ (3.24ก) และ (3.24ข) เขียนใหม่เป็น

$$\hat{s}'|_{\phi'=\pi} \cdot \hat{\sigma}_1 = \hat{s} \cdot \hat{\sigma}_1 \quad (3.25ก)$$

$$\hat{s}'|_{\phi'=N\pi-\pi} \cdot \hat{\sigma}_2 = \hat{s} \cdot \hat{\sigma}_2 \quad (3.25ข)$$

และเนื่องจาก

$$\mu_{1,2} = \frac{\cos \gamma_{1,2} - \cos^2 \beta'}{\sin^2 \beta'} = 1 - \frac{2 \sin^2\left(\frac{\gamma_{1,2}}{2}\right)}{\sin^2 \beta'} \quad (3.26)$$

โดยที่  $\cos \gamma_1 = \hat{\sigma}_1 \cdot \hat{s} = \sin \beta' \sin \beta \cos \phi + \cos \beta' \cos \beta$ ,  $\cos \gamma_2 = \hat{\sigma}_2 \cdot \hat{s} = \sin \beta' \sin \beta \cos(N\pi - \phi) + \cos \beta' \cos \beta$  และจากสมการ (3.26)  $\mu_{1,2} = 1$  เมื่อ  $\gamma_{1,2} = 0$  กล่าวคือ  $\hat{\sigma}_{1,2} \cdot \hat{s} = 1$  แสดงว่า  $\hat{\sigma}_1 = \hat{s}$  หรือ  $\hat{\sigma}_2 = \hat{s}$

จากสมการ (3.25) และ  $\hat{\sigma}_1 = \hat{s}$  หรือ  $\hat{\sigma}_2 = \hat{s}$  การเกิดความเป็นเอกฐานเกิดขึ้นเพียงทิศทางเดียวคือเมื่อสนามตกกระทบในทิศทาง  $\phi' = \pi$  (สัมผัสกับพื้นผิวด้านบน) หรือ  $\phi' = N\pi - \pi$  (สัมผัสกับพื้นผิวด้านล่าง) และ  $\hat{s}$  มีทิศทาง

เดียวกับ  $\hat{\sigma}_1$  หรือ  $\hat{\sigma}_2$  ( $\beta = \beta'$ ,  $\phi' = \pi, N\pi - \pi$ ,  $\phi = 0, N\pi$ ) การเกิดความเป็นเอกฐานนี้เรียกว่า เอกฐานของอูฟิมต์เซฟ (Ufimtsev singularity) เพราะว่าอูฟิมต์เซฟเป็นผู้พบเป็นคนแรก

การวิเคราะห์ที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อยนั้น ความหนาแน่นของกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบสามารถลดรูปลงได้เนื่องจากแผ่นย้อยแต่ละแผ่นเป็นแผ่นราบ ทำให้ความหนาแน่นของกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบหาได้โดยแทน  $N=2$  ลงไปในสมการ (ก.115) และ (ก.116) ซึ่งจะได้

$$I^{FW} = I^T - I^{PO} \quad (3.27ก)$$

$$M^{FW} = M^T - M^{PO} \quad (3.27ข)$$

โดยที่

$$I^T = -\frac{2j(\bar{H}^i \cdot \hat{e})(\mu \cot \beta' - \cot \beta \cos \phi)}{k \sin \beta'} \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2 \sin \alpha} \left[ \frac{2 \cos\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right) - \cos^2\left(\frac{\phi'}{2}\right)} \right] \quad (3.28ก)$$

$$-\frac{2jY_o(\bar{E}^i \cdot \hat{e}) \sin\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{k \sin^2 \beta'} \frac{2 \cos\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right)}{2} \left[ \frac{2 \cos\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right) - \cos^2\left(\frac{\phi'}{2}\right)} \right]$$

$$M^T = \frac{2jZ_o(\bar{H}^i \cdot \hat{e}) \sin \phi \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{k \sin \beta' \sin \beta} \frac{2 \cos\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{2 \sin \alpha} \left[ \frac{2 \cos\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right) - \cos^2\left(\frac{\phi'}{2}\right)} \right] \quad (3.28ข)$$

$$I^{PO} = -\frac{2j(\bar{H}^i \cdot \hat{e})}{k \sin \beta'} \frac{\mu \cot \beta' - \cot \beta \cos \phi}{\cos \phi' + \mu} [U(\pi - \phi') - U(\phi' - \pi)] \quad (3.28ค)$$

$$M^{PO} = -\frac{2jZ_o(\bar{H}^i \cdot \hat{e}) \sin \phi}{k \sin \beta' \sin \beta \cos \phi' + \mu} [U(\pi - \phi') - U(\phi' - \pi)] \quad (3.28ง)$$

$$\mu = \frac{\sin \beta \cos \phi + \cot \beta' (\cos \beta - \cos \beta')}{\sin \beta'} \quad (3.28จ)$$

และเนื่องจาก  $\mu = \cos \alpha$  ดังนั้น  $\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \sqrt{\frac{1+\mu}{2}}$ ,  $\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \sqrt{\frac{1-\mu}{2}}$  และ  $\sin \alpha = \sqrt{(1-\mu)(1+\mu)}$  เมื่อแทนลงในสมการ (3.28ก) และ (3.28ข) จะได้

$$I^T = -\frac{2j(\bar{H}^i \cdot \hat{e})(\mu \cot \beta' - \cot \beta \cos \phi)}{k \sin \beta'} \frac{\sqrt{\frac{1+\mu}{2}}}{\sqrt{(1+\mu)(1-\mu)}} \left[ \frac{2 \cos\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{1 + \cos(\pi - \alpha) - 1 - \cos \phi'} \right] - \frac{2jY_o(\bar{E}^i \cdot \hat{e}) \sin\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{k \sin^2 \beta'} \frac{2\sqrt{\frac{1-\mu}{2}}}{1 + \cos(\pi - \alpha) - 1 - \cos \phi'} \quad (3.29ก)$$

$$= \frac{2j(\bar{H}^i \cdot \hat{e})}{k \sin \beta'} \frac{\mu \cot \beta' - \cot \beta \cos \phi}{\cos \phi' + \mu} \frac{\sqrt{2} \cos\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{\sqrt{1-\mu}} + \frac{2jY_o(\bar{E}^i \cdot \hat{e})}{k \sin^2 \beta'} \frac{\sqrt{2} \sin\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{\cos \phi' + \mu} \sqrt{1-\mu}$$

$$M^T = \frac{2jZ_o(\bar{H}^i \cdot \hat{e}) \sin \phi \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{k \sin \beta' \sin \beta \sin \alpha} \left[ \frac{2 \cos\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{1 - \cos(\pi - \alpha) - 1 - \cos \phi'} \right] \quad (3.29ข)$$

$$= \frac{2jZ_o(\bar{H}^i \cdot \hat{e}) \sin \phi \sqrt{2} \cos\left(\frac{\phi'}{2}\right)}{k \sin \beta' \sin \beta \cos \phi' + \mu \sqrt{1 - \mu}}$$

สำหรับกรณีแผ่นย่อยเป็นรูปหลายเหลี่ยมดังรูป 2.5ข สนามเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบสามารถหาได้จากปริพันธ์ของกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบตามขอบของรูปหลายเหลี่ยม จากสมการ (ก.6ค) ทำให้สนามไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบที่แผ่พลังงานจากขอบของแผ่นย่อยที่  $e$  เป็น

$$\bar{E}_e^{FW}(\bar{r}) = jk \sum_{m=1}^{N_e} \int_0^{l_{e,m}} \left[ Z_o I_{e,m}^{FW} \hat{s}_{e,m} \times (\hat{s}_{e,m} \times \hat{e}_{e,m}) + M_{e,m}^{FW} \hat{s}_{e,m} \times \hat{e}_{e,m} \right] \frac{e^{-jks_{e,m}}}{4\pi s_{e,m}} dy_{edge,m}^{e} \quad (3.30)$$

โดยที่  $I_{e,m}^{FW} = I_{e,m}^T - I_{e,m}^{PO}$  และ  $M_{e,m}^{FW} = M_{e,m}^T - M_{e,m}^{PO}$ ,

$$I_{e,m}^T = \frac{2j\bar{H}^{feed} \cdot \hat{e}_{e,m} \mu_{e,m} \cot \beta'_{e,m} - \cot \beta_{e,m} \cos \phi_{e,m} \sqrt{2} \cos\left(\frac{\phi'_{e,m}}{2}\right)}{k \sin \beta'_{e,m} \cos \phi'_{e,m} + \mu_{e,m} \sqrt{1 - \mu_{e,m}}} +$$

$$\frac{2jY_o \bar{E}^{feed} \cdot \hat{e}_{e,m} \sqrt{2} \sin\left(\frac{\phi'_{e,m}}{2}\right)}{k \sin^2 \beta'_{e,m} \cos \phi'_{e,m} + \mu_{e,m} \sqrt{1 - \mu_{e,m}}}$$

$$I_{e,m}^{PO} = \left[ \begin{array}{l} \frac{2j\bar{H}^{feed} \cdot \hat{e}_{e,m} \cot \beta'_{e,m} \cos \phi'_{e,m} + \cot \beta_{e,m} \cos \phi_{e,m}}{k \sin \beta'_{e,m} \cos \phi'_{e,m} + \mu_{e,m}} \\ + \frac{2jY_o \bar{E}^{feed} \cdot \hat{e}_{e,m} \sin \phi'_{e,m}}{k \sin^2 \beta'_{e,m} \cos \phi'_{e,m} + \mu_{e,m}} \end{array} \right] UD$$

$$M_{e,m}^T = -\frac{2jZ_o \bar{H}^{feed} \cdot \hat{e}_{e,m} \sin \phi_{e,m} \sqrt{2} \cos\left(\frac{\phi'_{e,m}}{2}\right)}{k \sin \beta'_{e,m} \sin \beta_{e,m} \cos \phi'_{e,m} + \mu_{e,m} \sqrt{1 - \mu_{e,m}}}$$

$$M_{e,m}^{PO} = -\frac{2jZ_o \bar{H}^{feed} \cdot \hat{e}_{e,m} \sin \phi_{e,m}}{k \sin \beta'_{e,m} \sin \beta_{e,m} \cos \phi'_{e,m} + \mu_{e,m}} UD$$

$$\mu_{e,m} = \frac{\sin \beta_{e,m} \cos \phi_{e,m} + \cot \beta'_{e,m} (\cos \beta_{e,m} - \cos \beta'_{e,m})}{\sin \beta'_{e,m}}$$

$$UD = U(\pi - \phi'_{e,m}) - U(\phi'_{e,m} - \pi)$$

ค่าตัวประกอบต่างๆ ในสมการข้างต้นกำหนดดังสมการ (2.20) ถึง (2.26) จากสมการ (3.11) และ (3.30) สนามไฟฟ้ารวมที่กระเจิงจากสายอากาศชนิดจางสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย ในกรณีแผ่นย่อยเป็นรูปหลายเหลี่ยมตามทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพเป็นดังสมการ

$$\bar{E}^{PTD}(\bar{r}) = \bar{E}^{PO}(\bar{r}) + \sum_{e=1}^M \bar{E}_e^{FW}(\bar{r}) \quad (3.31)$$

สำหรับกรณีแผ่นย่อยไม่เป็นรูปหลายเหลี่ยมดังรูป 3.5 สนามไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบที่แผ่พลังงานจากขอบของแผ่นย่อยที่โซน  $m$  และวงแหวนที่  $n$  เป็น

กรณี  $n \neq 1$

$$\begin{aligned} \bar{E}_{mn}^{FW}(\bar{r}) = jk \sum_{i=1,3} \int_{\rho_i^c - \Delta\rho/2}^{\rho_i^c + \Delta\rho/2} & \left[ Z_o I_{mn,i}^{FW} \hat{s}_{mn,i} \times (\hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i}) + M_{mn,i}^{FW} \hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i} \right] \frac{e^{-jks_{mn,i}}}{4\pi s_{mn,i}} d\rho_i^{mn} + \\ & jk \sum_{i=2,4} \int_{-\Delta\phi/2}^{\Delta\phi/2} \left[ Z_o I_{mn,i}^{FW} \hat{s}_{mn,i} \times (\hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i}) + M_{mn,i}^{FW} \hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i} \right] \frac{e^{-jks_{mn,i}}}{4\pi s_{mn,i}} \rho_i^{mn} d\phi_i^{mn} \end{aligned} \quad (3.32n)$$

กรณี  $n=1$

$$\begin{aligned} \bar{E}_{mn}^{FW}(\bar{r}) = jk \sum_{i=1,3} \int_0^{\rho_i} & \left[ Z_o I_{mn,i}^{FW} \hat{s}_{mn,i} \times (\hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i}) + M_{mn,i}^{FW} \hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i} \right] \frac{e^{-jks_{mn,i}}}{4\pi s_{mn,i}} d\rho_i^{mn} + \\ & jk \sum_{i=4} \int_{-\Delta\phi/2}^{\Delta\phi/2} \left[ Z_o I_{mn,i}^{FW} \hat{s}_{mn,i} \times (\hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i}) + M_{mn,i}^{FW} \hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i} \right] \frac{e^{-jks_{mn,i}}}{4\pi s_{mn,i}} \rho_i^{mn} d\phi_i^{mn} \end{aligned} \quad (3.32\eta)$$

โดยที่  $I_{mn,i}^{FW} = I_{mn,i}^T - I_{mn,i}^{PO}$  และ  $M_{mn,i}^{FW} = M_{mn,i}^T - M_{mn,i}^{PO}$ ,

$$\begin{aligned} I_{mn,i}^T &= \frac{2j\bar{H}^{feed} \cdot \hat{e}_{mn,i}}{k \sin \beta'_{mn,i}} \frac{\mu_{mn,i} \cot \beta'_{mn,i} - \cot \beta_{mn,i} \cos \phi_{mn,i}}{\cos \phi'_{mn,i} + \mu_{mn,i}} \frac{\sqrt{2} \cos\left(\frac{\phi'_{mn,i}}{2}\right)}{\sqrt{1 - \mu_{mn,i}}} + \\ & \frac{2jY_o \bar{E}^{feed} \cdot \hat{e}_{mn,i}}{k \sin^2 \beta'_{mn,i}} \frac{\sqrt{2} \sin\left(\frac{\phi'_{mn,i}}{2}\right)}{\cos \phi'_{mn,i} + \mu_{mn,i}} \sqrt{1 - \mu_{mn,i}} \\ I_{mn,i}^{PO} &= \left[ \begin{array}{l} \frac{2j\bar{H}^{feed} \cdot \hat{e}_{mn,i}}{k \sin \beta'_{mn,i}} \frac{\cot \beta'_{mn,i} \cos \phi'_{mn,i} + \cot \beta_{mn,i} \cos \phi_{mn,i}}{\cos \phi'_{mn,i} + \mu_{mn,i}} \\ \frac{2jY_o \bar{E}^{feed} \cdot \hat{e}_{mn,i}}{k \sin^2 \beta'_{mn,i}} \frac{\sin \phi'_{mn,i}}{\cos \phi'_{mn,i} + \mu_{mn,i}} \end{array} \right] UD \\ M_{mn,i}^T &= -\frac{2jZ_o \bar{H}^{feed} \cdot \hat{e}_{mn,i}}{k \sin \beta'_{mn,i} \sin \beta_{mn,i}} \frac{\sin \phi_{mn,i}}{\cos \phi'_{mn,i} + \mu_{mn,i}} \frac{\sqrt{2} \cos\left(\frac{\phi'_{mn,i}}{2}\right)}{\sqrt{1 - \mu_{mn,i}}} \\ M_{mn,i}^{PO} &= -\frac{2jZ_o \bar{H}^{feed} \cdot \hat{e}_{mn,i}}{k \sin \beta'_{mn,i} \sin \beta_{mn,i}} \frac{\sin \phi_{mn,i}}{\cos \phi'_{mn,i} + \mu_{mn,i}} UD \\ \mu_{mn,i} &= \frac{\sin \beta_{mn,i} \cos \phi_{mn,i} + \cot \beta'_{mn,i} (\cos \beta_{mn,i} - \cos \beta'_{mn,i})}{\sin \beta'_{mn,i}} \end{aligned}$$

$$UD = U(\pi - \phi'_{mn,i}) - U(\phi'_{mn,i} - \pi)$$

โดยที่ค่าตัวประกอบต่างๆ ในสมการ (3.32) สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{s}_{mn,i} &= \frac{(x_{mn,i} - x_{shf})\hat{x} + (y_{mn,i} - y_{shf})\hat{y} + (z_{mn,i} - z_{shf})\hat{z}}{\sqrt{(x_{mn,i} - x_{shf})^2 + (y_{mn,i} - y_{shf})^2 + (z_{mn,i} - z_{shf})^2}} \\ \hat{s}_{mn,i} &= \frac{(x_p - x_{mn,i})\hat{x} + (y_p - y_{mn,i})\hat{y} + (z_p - z_{mn,i})\hat{z}}{\sqrt{(x_p - x_{mn,i})^2 + (y_p - y_{mn,i})^2 + (z_p - z_{mn,i})^2}} \\ \hat{t}_{mn,1} &= \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \hat{x}_{rot}^{mn} + \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \hat{y}_{rot}^{mn}, \quad \hat{t}_{mn,2} = \cos \phi_2^{mn} \hat{x}_{rot}^{mn} + \sin \phi_2^{mn} \hat{y}_{rot}^{mn}, \\ \hat{t}_{mn,3} &= -\sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \hat{x}_{rot}^{mn} + \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \hat{y}_{rot}^{mn}, \quad \hat{t}_{mn,4} = -\cos \phi_4^{mn} \hat{x}_{rot}^{mn} - \sin \phi_4^{mn} \hat{y}_{rot}^{mn} \\ \hat{e}_{mn,i} &= \hat{n}_{rot}^{mn} \times \hat{t}_{mn,i} \end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} x_{mn,i} \\ y_{mn,i} \\ z_{mn,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^T \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_i^{mn} \cos \phi_i^{mn} - \rho_n^c \\ \rho_i^{mn} \sin \phi_i^{mn} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho_n^c \cos \phi_m^c \\ \rho_n^c \sin \phi_m^c \\ -h \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{rot}^{mn} \\ \hat{y}_{rot}^{mn} \\ \hat{z}_{rot}^{mn} \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix}$$

$$\phi_1^{mn} = -\Delta\phi/2, \quad \phi_3^{mn} = \Delta\phi/2$$

$$\rho_2^{mn} = \rho_n^c - \Delta\rho/2, \quad \rho_4^{mn} = \rho_n^c + \Delta\rho/2$$

และ

$$\hat{\phi}_{mn,i} = \frac{\hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i}}{\|\hat{s}_{mn,i} \times \hat{e}_{mn,i}\|}, \quad \hat{\beta}_{mn,i} = \hat{s}_{mn,i} \times \hat{\phi}_{mn,i}, \quad \hat{\phi}'_{mn,i} = \frac{\hat{e}_{mn,i} \times \hat{s}'_{mn,i}}{\|\hat{e}_{mn,i} \times \hat{s}'_{mn,i}\|}, \quad \hat{\beta}'_{mn,i} = \hat{s}'_{mn,i} \times \hat{\phi}'_{mn,i}$$

$$\beta_{mn,i} = \pi - \arccos(\hat{s}_{mn,i} \cdot \hat{e}_{mn,i}), \quad \beta'_{mn,i} = \pi - \arccos(\hat{s}'_{mn,i} \cdot \hat{e}_{mn,i})$$

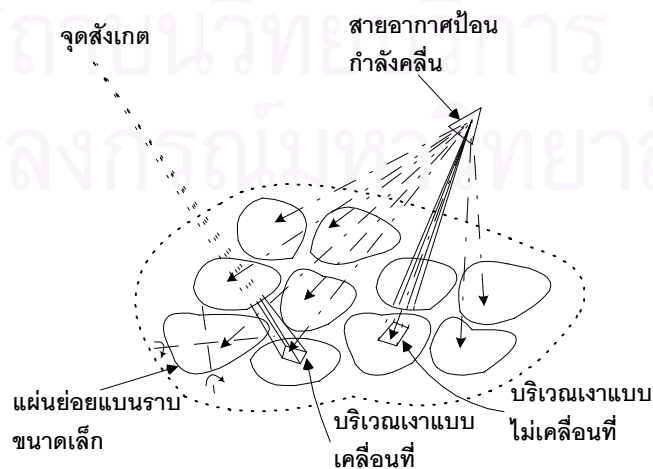
$$\phi_{mn,i} = \begin{cases} \arccos(\hat{n}_{rot}^{mn} \cdot \hat{\phi}_{mn,i}), & \hat{t}_{mn,i} \cdot \hat{\phi}_{mn,i} \leq 0 \\ 2\pi - \arccos(\hat{n}_{rot}^{mn} \cdot \hat{\phi}_{mn,i}), & \hat{t}_{mn,i} \cdot \hat{\phi}_{mn,i} > 0 \end{cases}$$

$$\phi'_{mn,i} = \begin{cases} \arccos(\hat{n}_{rot}^{mn} \cdot \hat{\phi}'_{mn,i}), & \hat{t}_{mn,i} \cdot \hat{\phi}'_{mn,i} \leq 0 \\ 2\pi - \arccos(\hat{n}_{rot}^{mn} \cdot \hat{\phi}'_{mn,i}), & \hat{t}_{mn,i} \cdot \hat{\phi}'_{mn,i} > 0 \end{cases}$$

### 3.1.3 สมมุติฐานสนามเป็นศูนย์กับการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

สมมุติฐานสนามเป็นศูนย์เป็นสมมุติฐานที่กำหนดไว้ตามแนวความคิดที่ว่า เมื่อใดก็ตามที่มีวัตถุบดบังทางเดินของคลื่น คลื่นจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่วัตถุบดบังได้ทำให้สนามในทิศทางนั้นเป็นศูนย์ เสมือนว่าไม่มีแหล่งกระแสที่เป็นต้นกำเนิดคลื่นแผ่พลังงานไปยังจุดสังเกตนั้น

สำหรับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการบดบังของแผ่นย่อยล้อมรอบ เมื่อแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเกิดการปรับตัวเพื่อปรับรูปลักษณะของพื้นผิวของสายอากาศชนิดงานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยนั้น การบดบังคลื่นนี้เองจากแผ่นย่อยเกิดขึ้นได้สองกรณีดังรูป 3.6 คือ

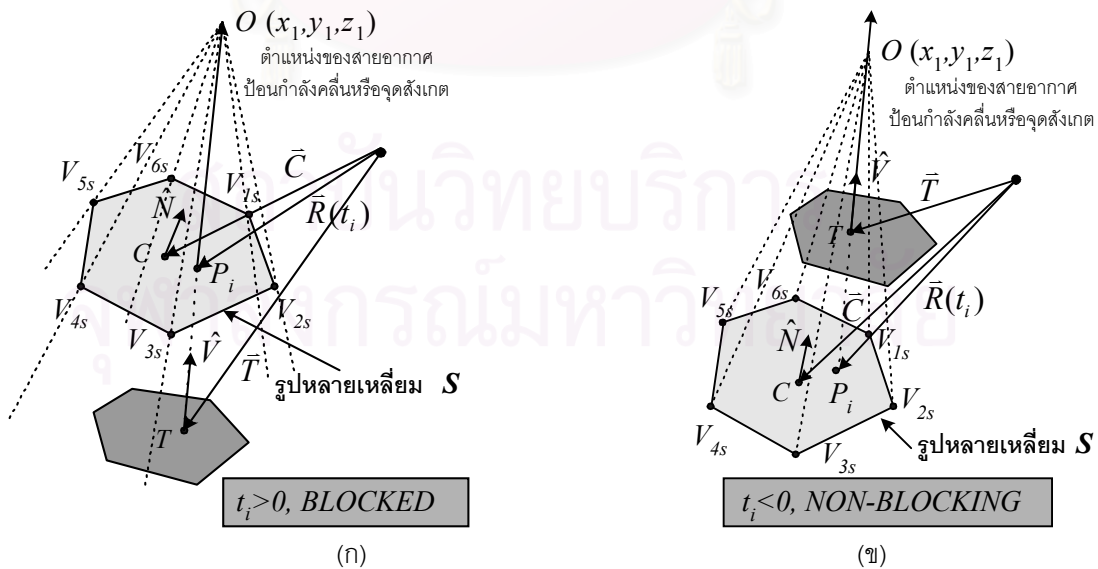


รูป 3.6 การบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ



1. การบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเนื่องจากแผ่นย่อยล้อมรอบ ในกรณีนี้แผ่นย่อยล้อมรอบอาจจะบดบังสนามที่แผ่พลังงานมาจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ซึ่งตามสมมุติฐานสนามเป็นศูนย์ทำให้สนามในทิศทางการบดบังเป็นศูนย์หรือไม่เกิดกระแสเหนี่ยวนำบนบางบริเวณของแผ่นย่อย เสมือนว่ากระแสในบริเวณนั้นเป็นศูนย์ บริเวณที่ไม่เกิดการกระตุ้นนี้เรียกว่า บริเวณเงาแบบตายตัว (fixed shadow) เพราะว่าเป็นบริเวณที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งนั้นตลอดเวลาเนื่องจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นอยู่นิ่ง (ยกเว้นแต่ถ้ามีการเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น) การบดบังในลักษณะนี้เกิดขึ้นจากการบดบังของแผ่นย่อยข้างเคียง (neighboring panels blocking)
2. การบดบังคลื่นที่แผ่พลังงานออกจากแผ่นย่อยไปยังจุดสังเกต ในกรณีนี้แผ่นย่อยล้อมรอบอาจจะกีดขวางสนามที่แผ่พลังงานออกจากแผ่นย่อยทำให้ไม่มีสนามแผ่พลังงานไปยังจุดสังเกต ซึ่งตามสมมุติฐานสนามเป็นศูนย์ทำให้เหมือนกับว่ากระแสที่จุดนั้นไม่แผ่พลังงานไปยังจุดสังเกตหรือกระแสเป็นศูนย์เมื่อมองจากจุดสังเกตนั้น บริเวณที่กระแสไม่แผ่พลังงานนี้เรียกว่า บริเวณเงาแบบเคลื่อนที่ (moving shadow) บริเวณดังกล่าวนี้สอดคล้องกับทิศทางวิถีภาคคงตัว (stationary phase) หรือทิศตามแนววงรีจากบริเวณนั้นไปยังจุดสังเกต การบดบังในลักษณะนี้อาจเกิดจากการบดบังของแผ่นย่อยล้อมรอบทั้งหมด (surrounding panels blocking)

จากสมมุติฐานนี้การประมาณการณัผลกระทบจากการบดบังสามารถหาได้โดยกำหนดให้กระแสทัศนศาสตร์-กายภาพและกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบบนแผ่นย่อยเป็นศูนย์ ถ้ากระแสเหล่านั้นไหลอยู่ในบริเวณบริเวณเงาแบบตายตัวหรือบริเวณเงาแบบเคลื่อนที่ เพื่อที่จะกำหนดว่าบริเวณใดบนแผ่นย่อยเป็นบริเวณเงานั้น ในขั้นต้นสมมุติให้  $T$  เป็นจุดทดสอบบนแผ่นย่อย จุด  $T$  จะอยู่ในบริเวณเงาของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  เมื่อจุดตัด  $P_i$  ของรังสี  $\vec{R}(t_i) = \vec{T} + t_i \hat{V}$  อยู่ด้านหลังของจุด  $T$  และอยู่ในปริมาตรครอบคลุม (volume coverage) ของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  กับจุดสังเกตหรือตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ( $O$ ) ดังรูป 3.7ก แต่ถ้าวัด  $T$  อยู่ในปริมาตรครอบคลุมแต่รูปหลายเหลี่ยม  $S$  อยู่ด้านหลังของจุด  $T$  รูปหลายเหลี่ยม  $S$  จะไม่บดบังจุด  $T$  ดังรูป 3.7ข



รูป 3.7 การตรวจสอบว่าจุดบนแผ่นย่อยอยู่ในบริเวณเงา

การตรวจสอบว่าจุดตัด  $P_i$  อยู่ด้านหน้าของจุด  $T$  หรือไม่นั้น พิจารณาได้จากค่าพารามิเตอร์ทดสอบ (test parameter)  $t_i$  ที่กำหนดดังสมการ

$$t_i = \frac{(\vec{V}_{1s} - \vec{T}) \cdot \hat{N}}{\hat{N} \cdot \hat{V}} \quad (3.33)$$

โดยที่  $\hat{N} = \frac{(\vec{V}_{2s} - \vec{V}_{3s}) \times (\vec{V}_{1s} - \vec{V}_{2s})}{\|(\vec{V}_{2s} - \vec{V}_{3s}) \times (\vec{V}_{1s} - \vec{V}_{2s})\|}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากของรูปหลายเหลี่ยม  $S$ ,  $V_{1s}, V_{2s}, V_{3s}$  คือจุดยอดของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  และ  $\hat{V} = \frac{\vec{O} - \vec{T}}{\|\vec{O} - \vec{T}\|}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยจากจุด  $T$  ไปยังจุด  $O$

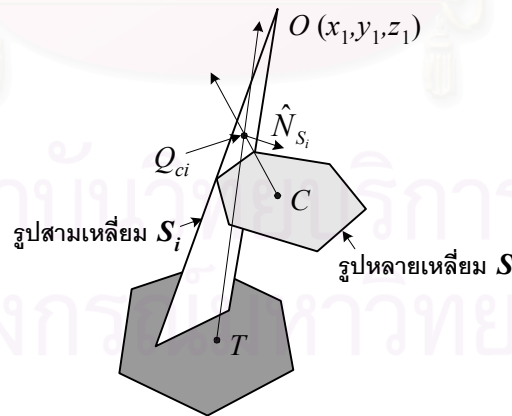
จากสมการ (3.33) ถ้า  $t_i < 0$  จุดตัดของรังสีกับรูปหลายเหลี่ยม  $S$  อยู่ด้านหลังของจุด  $T$  กล่าวคือ รูปหลายเหลี่ยม  $S$  จะไม่บดบังแนวรังสีจากจุด  $T$  ไปยังจุด  $O$  แต่ถ้า  $t_i \geq 0$  จุด  $T$  อาจอยู่ในบริเวณเงาหรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับว่าอยู่ในปริมาตรครอบคลุมหรือไม่

รูป 3.8 แสดงให้เห็นการตรวจสอบว่าจุด  $T$  อยู่ในปริมาตรครอบคลุมโดยรูปหลายเหลี่ยม  $S$  ซึ่งก็คือแผ่นย่อยล้อมรอบ ส่วน  $S_i$  คือรูปสามเหลี่ยมที่เกิดจากจุดสองจุดบนด้านที่  $i$  ของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  กับจุด  $O(x_1, y_1, z_1)$  จุด  $C$  เป็นจุดศูนย์กลางของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  และจุด  $Q_{ci}$  เป็นจุดศูนย์กลางของรูปสามเหลี่ยม  $S_i$

ในงานวิจัยนี้พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดจากแผ่นย่อยรูปหลายเหลี่ยมแบบเว้า (convex polygon) ซึ่งเป็นรูปหลายเหลี่ยมที่จุดใดๆ ภายในรูปหลายเหลี่ยมสามารถเชื่อมถึงกันได้ด้วยเส้นตรงโดยไม่เกิดการตัดกันกับด้านใดๆ ของรูปหลายเหลี่ยม ทำให้จุดศูนย์กลาง  $C$  อยู่บนระนาบของรูปหลายเหลี่ยมและอยู่ภายในขอบเขตของรูปหลายเหลี่ยม ดังนั้นจุด  $T$  จะอยู่ในปริมาตรครอบคลุมโดยรูปหลายเหลี่ยม  $S$  เมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการ

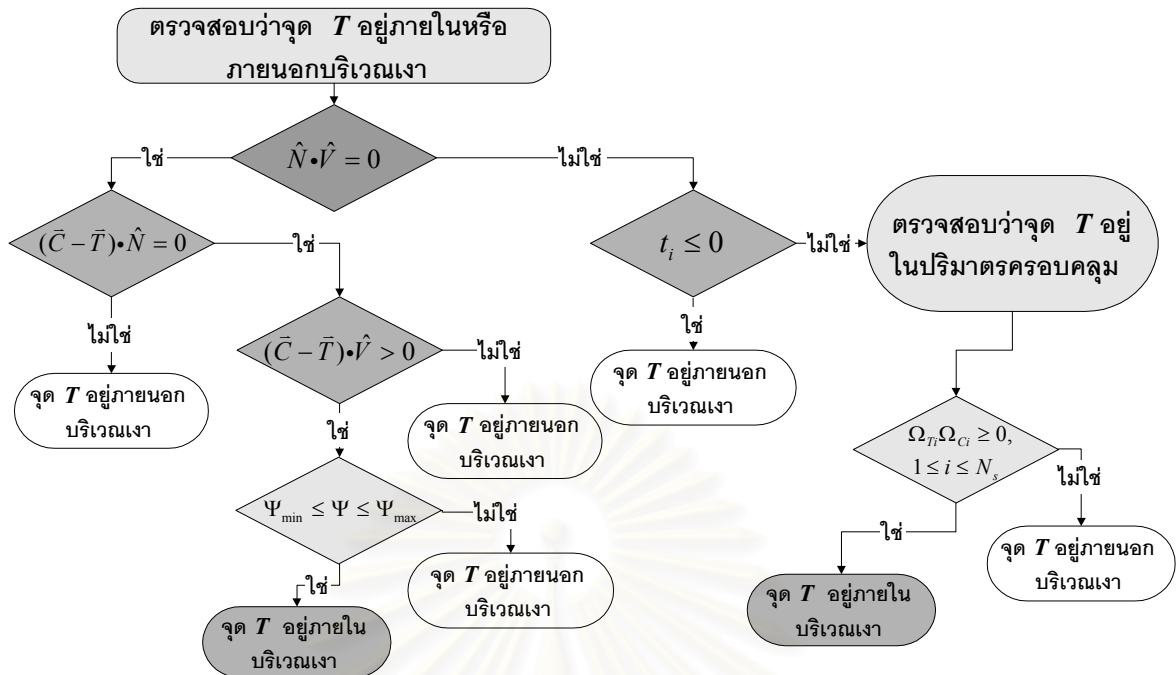
$$\Omega_{Ti} \Omega_{Ci} \geq 0, \dots, 1 \leq i \leq N_s \quad (3.34)$$

โดยที่  $\Omega_{Ti} = \frac{(\vec{Q}_{ci} - \vec{T}) \cdot \hat{N}_{s_i}}{\|\vec{Q}_{ci} - \vec{T}\|}$ ,  $\Omega_{Ci} = \frac{(\vec{Q}_{ci} - \vec{C}) \cdot \hat{N}_{s_i}}{\|\vec{Q}_{ci} - \vec{C}\|}$ ,  $N_s$  คือจำนวนด้านของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  และ  $\hat{N}_{s_i}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตั้งฉากกับรูปสามเหลี่ยม  $S_i$



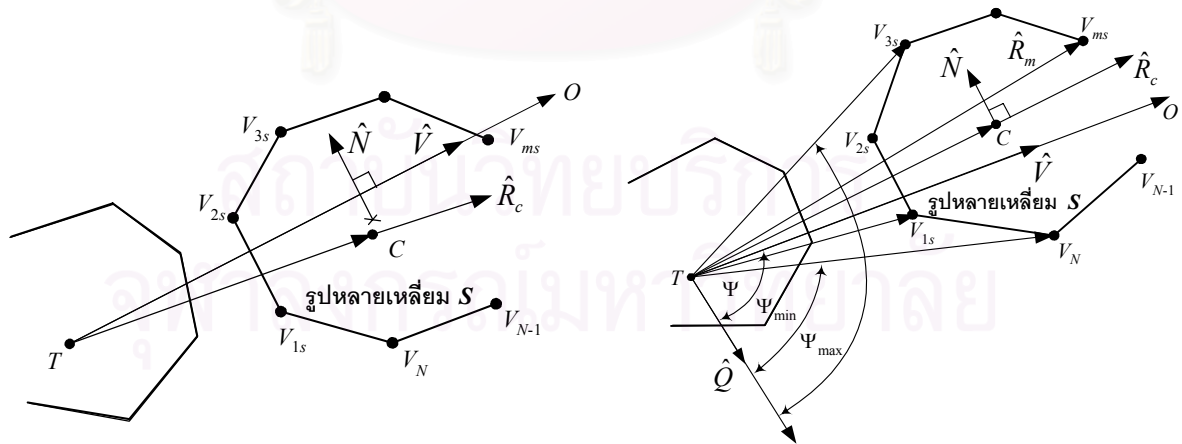
รูป 3.8 ปริมาตรครอบคลุมโดยรูปหลายเหลี่ยม  $S$  สำหรับตรวจสอบบริเวณเงา

เงื่อนไขตามสมการ (3.34) บ่งบอกว่า จุด  $T$  จะอยู่ในปริมาตรครอบคลุมโดยรูปหลายเหลี่ยม  $S$  เมื่อจุด  $T$  อยู่ด้านเดียวกับจุด  $C$  ในทุกๆ ด้านของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  นอกจากนี้เงื่อนไขตามสมการ (3.34) มีประสิทธิภาพกว่าสมการ (12) ใน [26] เพราะสามารถตรวจสอบบริเวณเงาในกรณีที่มีแผ่นย่อยล้อมรอบกับจุดทดสอบอยู่ใกล้กันมากได้ อย่างไรก็ตามเงื่อนไขนี้อาจจะไม่สามารถใช้ได้ ถ้าจุดทดสอบอยู่ใกล้กับแผ่นย่อยล้อมรอบมากๆ ในระดับของ  $10^{-4}$  เมตร



รูป 3.9 ขั้นตอนวิธีของการตรวจสอบบริเวณเงาของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ

ข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้นสามารถเขียนเป็นขั้นตอนวิธีของการตรวจสอบบริเวณเงาดังรูป 3.9 ในรูป 3.9 ถ้า  $\hat{N} \cdot \hat{V} = 0$  รั้งสี่  $\hat{V}$  มีทิศทางขนานกับรูปหลายเหลี่ยม  $S$  ในกรณีนี้รั้งสี่  $\hat{V}$  อาจวางตัวอยู่เหนือหรือใต้รูปหลายเหลี่ยม  $S$  ดังรูป 3.10ก ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากเงื่อนไข  $(\bar{C} - \bar{T}) \cdot \hat{N}$  โดยถ้า  $(\bar{C} - \bar{T}) \cdot \hat{N} \neq 0$  ทำให้จุด  $T$  ไม่อยู่ในบริเวณเงา มิฉะนั้นถ้า  $(\bar{C} - \bar{T}) \cdot \hat{N} = 0$  รั้งสี่  $\hat{V}$  วางตัวอยู่บนระนาบเดียวกับรูปหลายเหลี่ยม  $S$  ในกรณีที่แผ่นย้อยวางตัวอยู่ในระนาบเดียวกับรูปหลายเหลี่ยม  $S$  นั้นจุด  $T$  ไม่อยู่ในบริเวณเงาเมื่อ  $(\bar{C} - \bar{T}) \cdot \hat{V} < 0$  เพราะว่าแผ่นย้อยอยู่ทางด้านหน้าของรูปหลายเหลี่ยมเมื่อมองจากจุดทดสอบไปยังจุดสังเกต แต่ถ้า  $(\bar{C} - \bar{T}) \cdot \hat{V} \geq 0$  จุด  $T$  อาจจะอยู่ในบริเวณเงาหรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับมุมครอบคลุม (angle coverage) ดังรูป 3.10ข ซึ่งจุด  $T$  อยู่ในบริเวณเงาเมื่อ



(ก) รั้งสี่  $\hat{V}$  วางตัวอยู่เหนือหรือใต้รูปหลายเหลี่ยม  $S$       (ข) รั้งสี่  $\hat{V}$  วางตัวอยู่บนระนาบเดียวกับรูปหลายเหลี่ยม  $S$

รูป 3.10 การพิจารณาการบดบังในกรณี  $\hat{N} \cdot \hat{V} = 0$

$$\Psi_{\min} \leq \Psi \leq \Psi_{\max}$$

$$\Psi = \arccos(\hat{V} \cdot \hat{Q}), \Psi_{\min} = \min_{m=1}^{N_s} \arccos(\hat{R}_m \cdot \hat{Q}), \Psi_{\max} = \max_{m=1}^{N_s} \arccos(\hat{R}_m \cdot \hat{Q}) \quad (3.35)$$

$$\text{โดยที่ } \hat{R}_m = \frac{\vec{V}_{ms} - \vec{T}}{\|\vec{V}_{ms} - \vec{T}\|}, \hat{Q} = \frac{\hat{R}_c \times \hat{N}}{\|\hat{R}_c \times \hat{N}\|}, \text{ และ } \hat{R}_c = \frac{\vec{C} - \vec{T}}{\|\vec{C} - \vec{T}\|}$$

มีฉะนั้นจุด  $T$  อยู่ภายนอกบริเวณเงา ถ้า  $\hat{N} \cdot \hat{V} \neq 0$  และจุด  $T$  อยู่ด้านหน้าของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  ( $t_i < 0$ ) จุด  $T$  อยู่ภายนอกบริเวณเงา แต่ถ้า  $t_i \geq 0$  ก็ต้องตรวจสอบต่อว่าจุด  $T$  อยู่ในปริมาตรครอบคลุมตามสมการ (3.34) หรือไม่

สังเกตว่าในกรณีที่รูปหลายเหลี่ยม  $S$  ไม่เป็นรูปหลายเหลี่ยมแบบเว้า จุดศูนย์กลาง  $C$  อาจอยู่หรือไม่อยู่ภายในขอบเขตของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  ถ้าจุดศูนย์กลาง  $C$  อยู่ภายนอกขอบเขตของรูปหลายเหลี่ยม  $S$  ขั้นตอนวิธีสำหรับตรวจสอบบริเวณดังรูป 3.9 ไม่สามารถใช้ได้เพราะว่า เงื่อนไขตามสมการ (3.34) อาจทำให้  $\Omega_{Ti} \Omega_{Ci} < 0, 1 \leq i \leq N_s$  ทั้งหมดที่จุด  $T$  อยู่ในปริมาตรครอบคลุม

### 3.2 การหาลักษณะสมบัติเกี่ยวกับสมรรถนะของสายอากาศ

สมรรถนะของสายอากาศโดยทั่วไปพิจารณาได้จากค่าลักษณะสมบัติต่างๆ เช่น อิมพีแดนซ์ขาเข้า (input impedance) ความกว้างของแถบความถี่ (bandwidth) อัตราขยาย แบบรูปการแผ่พลังงาน โพลาริเซชัน เป็นต้น ขึ้นอยู่กับการนำสายอากาศไปประยุกต์ใช้งาน สำหรับสายอากาศชนิดจานสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอนั้นสามารถนำไปใช้งานเป็นสายอากาศในสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือในการสื่อสารผ่านดาวเทียม ซึ่งมีคุณลักษณะที่พึงประสงค์หลายประการเช่น ระดับพู่ข้างและระดับโพลาริเซชันไขว้ที่ต่ำ การเลือนลัดคลื่นและมีตำแหน่งศูนย์กลางในทิศทางที่ต้องการ ดังนั้นในการศึกษาสมรรถนะของสายอากาศชนิดนี้ งานวิจัยนี้จึงพิจารณาจากแบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยาย ประสิทธิภาพต่างๆ โพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.2.1 โพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้

โพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้เป็นค่าคุณลักษณะที่สำคัญสำหรับบ่งบอกถึงสมรรถนะของสายอากาศที่ส่งสัญญาณแบบโพลาริเซชันคู่ (dual polarization) โดยใช้ความถี่เดียวกันหรือที่เรียกว่า การใช้ความถี่ซ้ำ (frequency reuse) มาเพิ่มความจุของช่องสัญญาณ เนื่องจากถ้าโพลาริเซชันไขว้ของช่องสัญญาณหนึ่งมีระดับสูงก็จะทำให้เกิดการรบกวนกับโพลาริเซชันร่วมของอีกช่องสัญญาณหนึ่งได้ ระดับของความแตกต่างของโพลาริเซชันร่วมกับโพลาริเซชันไขว้ที่เหมาะสมมีค่าขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน เช่น ในการสื่อสารผ่านดาวเทียม ระดับของความแตกต่างของโพลาริเซชันทั้งสองนี้ควรมีค่าน้อยกว่า 30 dB เป็นต้น

การพิจารณาโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้นของสายอากาศนั้น ลูดวิก (Ludwig) [57] ได้ให้คำนิยามไว้ 3 แบบ ในงานวิจัยได้ใช้คำนิยามที่ 3 มาอธิบายโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้น จากคำนิยามที่ 3 ของลูดวิก ถ้ากำหนดให้แกน  $z$  เป็นแกนอ้างอิงของทิศทางแนวเล็งหลัก และจุดอ้างอิงของสายอากาศอยู่ที่จุดศูนย์กลางวัฏภาค (phase center) โพลาริเซชันร่วมกำหนดได้ด้วยเวกเตอร์ในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  ดังสมการ (3.36)

$$\hat{a}_{cp}|_{\theta=0} = \cos \phi_{pol} \hat{x} + \sin \phi_{pol} \hat{y} \quad (3.36)$$

โดยที่  $\phi_{pol}$  คือมุมการวางตัวของโพลาริเซชันร่วมที่วัดจากแกน  $x$  ส่วนโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ในทิศทางอื่นๆ กำหนดได้ด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วยดังสมการ (3.37ก) และ (3.37ข) ตามลำดับ

$$\hat{a}_{cp} = \cos(\phi - \phi_{pol}) \hat{\theta} - \sin(\phi - \phi_{pol}) \hat{\phi} \quad (3.37ก)$$

$$\hat{a}_{xp} = \sin(\phi - \phi_{pol}) \hat{\theta} + \cos(\phi - \phi_{pol}) \hat{\phi} \quad (3.37ข)$$

ดังนั้นองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวโพลาริเซชันร่วมเป็น

$$E_{cp} = \vec{E} \cdot \hat{a}_{cp} = E_\theta \cos(\phi - \phi_{pol}) - E_\phi \sin(\phi - \phi_{pol}) \quad (3.38)$$

และองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าในแนวโพลาริเซชันไขว้เป็น

$$E_{xp} = \vec{E} \cdot \hat{a}_{xp} = E_\theta \sin(\phi - \phi_{pol}) + E_\phi \cos(\phi - \phi_{pol}) \quad (3.39)$$

โดยที่  $\vec{E}$  คือสนามไฟฟ้าในบริเวณย่านสนามไกล และโดยปกติแล้วการกำหนดทิศทางการวางตัวของโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศชนิดงานสะท้อนนั้น ส่วนใหญ่พิจารณาจากโพลาริเซชันของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเป็นหลัก ดังนั้นถ้าสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมีโพลาริเซชันในแนว  $y$  ( $\phi_{pol} = 90^\circ$ ) สนามไฟฟ้าย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้เป็น

$$E_{cp} = E_\theta \sin \phi + E_\phi \cos \phi \quad (3.40ก)$$

$$E_{xp} = -E_\theta \cos \phi + E_\phi \sin \phi \quad (3.40ข)$$

และถ้าสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมีโพลาริเซชันในแนว  $x$  ( $\phi_{pol} = 0^\circ$ ) สนามไฟฟ้าย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้เป็น

$$E_{cp} = E_\theta \cos \phi - E_\phi \sin \phi \quad (3.41ก)$$

$$E_{xp} = E_\theta \sin \phi + E_\phi \cos \phi \quad (3.41ข)$$

### 3.2.2 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ

อัตราขยายของสายอากาศเป็นค่าลักษณะสมบัติสำคัญในการออกแบบสายอากาศ เนื่องจากบ่งบอกถึงความสามารถของการป้อนพลังงานให้แพร่กระจายไปในทิศทางต่างๆ ได้มากน้อยเพียงใด อัตราขยายของสายอากาศสามารถหาได้จากอัตราส่วนของความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานในทิศทางใดๆ เทียบกับความหนาแน่นของกำลังคลื่นจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด (point source) ที่ป้อนกำลังด้วยกำลังงานเดียวกันกับที่ป้อนให้สายอากาศ ดังนั้นอัตราขยายของสายอากาศกำหนดได้ดังสมการ (3.42)

$$G(\theta, \phi) = \frac{P_{rad}(\theta, \phi)}{P_{in} / (4\pi)} = 4\pi \frac{P_{rad}(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (3.42)$$

โดยที่  $P_{rad}$  คือความหนาแน่นของกำลังคลื่นที่แผ่พลังงานในทิศทางใดๆ  $(\theta, \phi)$  มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อสเตอเรเดียน และ  $P_{in}$  คือกำลังที่ป้อนให้สายอากาศมีหน่วยเป็น วัตต์

จากคำนิยามของโพลาริเซชันในหัวข้อย่อยที่ 3.2.1 อัตราขยายของสายอากาศสามารถเขียนอยู่ในองค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ได้เป็น

$$G_{cp}(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P_{cp}(\theta, \phi)}{P_{in}} = 4\pi \frac{r^2 |E_{cp}(\theta, \phi)|^2}{2Z_0 P_{in}} \quad (3.43ก)$$

$$G_{xp}(\theta, \phi) = 4\pi \frac{P_{xp}(\theta, \phi)}{P_{in}} = 4\pi \frac{r^2 |E_{xp}(\theta, \phi)|^2}{2Z_0 P_{in}} \quad (3.43ข)$$

สำหรับค่าคุณลักษณะอื่นๆ นอกเหนือจากอัตราขยายของสายอากาศสามารถพิจารณาได้จากการสูญเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นตอนของการแผ่พลังงาน สำหรับสายอากาศชนิดงานสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยประกอบด้วยสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ ถ้าสมมุติให้กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเป็น  $P_{in}$  ดังนั้นกำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานออกไปจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเป็น



$$\begin{aligned}
P_T = \eta_f P_{in} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (\vec{E}_{feed} \times \vec{H}_{feed}^*) \cdot \hat{r}_f r_f^2 \sin\theta_f d\theta_f d\phi_f \right] \\
&= \frac{1}{2Z_0} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi |\vec{E}_{feed}|^2 r_f^2 \sin\theta_f d\theta_f d\phi_f
\end{aligned} \tag{3.44}$$

โดยที่  $\eta_f$  คือประสิทธิภาพการแผ่พลังงาน (radiation efficiency) ของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ดังนั้นสภาพเจาะจงทิศทาง (directivity) เป็น

$$D(\theta, \phi) = \frac{G(\theta, \phi)}{\eta_f} = 4\pi \frac{P_{rad}(\theta, \phi)}{P_T} \tag{3.45}$$

โดยปกติแล้วกำลังทั้งหมดแพร่กระจายออกมาในทุกทิศทางรอบสายอากาศป้อนกำลังคลื่น แต่มีกำลังเพียงบางทิศทางที่สามารถรับได้บนพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ เนื่องจากมีกำลังบางส่วนเกิดการล้นจากพื้นผิวสะท้อน หรือเกิดการรั่วไปตามช่องว่างระหว่างแผ่นย่อย และเกิดการบดบังจากแผ่นย่อยล้อมรอบ ดังนั้นกำลังที่รับได้จริงๆ บนพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ ( $P_r$ ) สามารถหาได้ดังสมการ

$$P_r = \eta_s P_T = -\sum_{e=1}^M \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[ \iint_{S^e} (\vec{E}^{feed} \times \vec{H}^{feed*}) \cdot \hat{n}_{rot}^e dS^e \right] \tag{3.46}$$

โดยที่  $\eta_s$  คือประสิทธิภาพของการล้นช่องเปิด

จากสมการ (3.9) และการแปลงในภาคผนวก ข. สมการ (3.46) สามารถเขียนอยู่ในรูปที่คำนวณได้ง่ายเป็น

$$P_r = -\frac{1}{2} \sum_{e=1}^M \sum_{g=1}^{N_e} \operatorname{Re} \left[ \iint_{-1}^1 \iint_{-1}^1 \frac{(\vec{E}^{feed*} \times \vec{H}^{feed*}) \cdot \hat{n}_{rot}^e}{|\hat{n}_{rot}^e \cdot \hat{z}|} \left| J \left( \begin{matrix} x, y \\ u_g, v_g \end{matrix} \right) \right| \left| J \left( \begin{matrix} u_g, v_g \\ r_g, s_g \end{matrix} \right) \right| dr_g ds_g \right] \tag{3.47}$$

ถ้าสมมติว่ามีระนาบอยู่หน้าพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ สนามไฟฟ้าที่แผ่พลังงานจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้มาบนระนาบดังกล่าวนี้จะประกอบด้วย สนามกระเจิงซึ่งอาจมีการกระจายไม่คงที่ในองค์ประกอบทางขนาดและวิภาค และยังมีส่วนประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้เกิดขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียของอัตราขยายเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่มีระนาบช่องเปิดมีเพียงสนามไฟฟ้าในองค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม และมีการกระจายอย่างคงที่ที่ทั้งองค์ประกอบทางขนาดและวิภาค การสูญเสียที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาเป็นค่าปัจจัยที่เรียกว่า ประสิทธิภาพของช่องเปิด (aperture efficiency,  $\eta_A$ ) ค่าปัจจัยนี้สามารถหาได้จากอัตราส่วนของความหนาแน่นของกำลังคลื่นในแนวโพลาริเซชันร่วมมากที่สุดต่อสเตเดียน ( $P_{cp}(\theta, \phi)|_{\max}$ ) กับความหนาแน่นของกำลังคลื่นตามแนวแกนของสายอากาศที่เกิดจากสนามไฟฟ้าบนระนาบช่องเปิดที่มีการกระจายอย่างคงที่ที่ทั้งองค์ประกอบทางขนาดและวิภาค และมีโพลาริเซชันเพียงในแนวโพลาริเซชันร่วม ( $P_u$ ) ด้วยกำลังที่เท่ากันดังสมการ

$$\eta_A = \frac{P_{cp}(\theta, \phi)|_{\max}}{P_u(\theta = 0^\circ, \phi = 0^\circ)} \tag{3.48}$$

ถ้าระนาบช่องเปิดมีขนาดจำกัดเท่ากับ  $S_A$  กำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้อาจเกิดการล้นระนาบช่องเปิดทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น ส่งผลให้กำลังทั้งหมดที่รับได้บนระนาบช่องเปิดมีความสัมพันธ์กับกำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เป็น

$$P_A = \eta_{SA} P_r \tag{3.49}$$

โดยที่  $\eta_{SA}$  คือประสิทธิภาพของการล้นระนาบช่องเปิด

ความหนาแน่นของกำลังคลื่นตามแนวแกนของสายอากาศพิจารณาได้จากกำลังทั้งหมดที่รับได้บนระนาบเกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าที่เป็นคลื่นระนาบที่มีโพลาไรเซชันในแนวโพลาไรเซชันร่วมเท่านั้น และมีการกระจายคงที่ที่ทั้งองค์ประกอบทางขนาดและภูมิภาค ( $\bar{E}_A$ ) ดังนั้นกำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานจากระนาบนี้เป็น

$$P_A = \frac{1}{2Z_o} \iint |\bar{E}_A|^2 dS = \frac{1}{2Z_o} \iint E_A^2 dS = \frac{E_A^2 S_A}{2Z_o} \quad (3.50)$$

ทำให้  $\bar{E}_A = \sqrt{2Z_o P_A / S_A} \hat{a}_{cp}$  ซึ่งเมื่อนำมาหาความหนาแน่นของกำลังคลื่นตามแนวแกนของสายอากาศต่อสเตอเรเดียน [42] จะได้

$$P_u(\theta=0^\circ, \phi=0^\circ) = \frac{k^2}{4\pi^2} P_A S_A \quad (3.51)$$

จากการสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นตามขั้นตอนการแผ่พลังงานข้างต้น ทำให้อัตราขยายแนวโพลาไรเซชันร่วมของสายอากาศสามารถเขียนอยู่ในรูปของประสิทธิภาพต่างๆ เป็น

$$G_{cp}(\theta, \phi) = 4\pi \eta_f \eta_s \eta_{SA} \frac{P_{cp}(\theta, \phi)}{P_A} \quad (3.52)$$

และจากสมการ (3.48) และ (3.51) จะได้

$$P_A = 4\pi^2 \frac{P_{cp}(\theta, \phi)|_{\max}}{\eta_A k^2 S_A} \quad (3.53)$$

เมื่อแทนสมการ (3.53) ลงในสมการ (3.52) จะได้

$$G_{cp}(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_A \eta \frac{P_{cp}(\theta, \phi)}{P_{cp}(\theta, \phi)|_{\max}} \quad (3.54)$$

โดยที่  $\eta = \eta_f \eta_s \eta_{SA} \eta_A$  คือประสิทธิภาพของสายอากาศ และเมื่อพิจารณาอัตราขยายแนวโพลาไรเซชันร่วมสูงสุดจะได้

$$G_{cp}^{\max}(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_A \eta \quad (3.55)$$

ในทางทฤษฎีระนาบช่องเปิดสามารถวางไว้ใกล้กับช่องเปิดของสายอากาศมากที่สุด เพื่อที่จะรับกำลังที่แผ่พลังงานจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ทั้งหมด ดังนั้นขนาดของระนาบช่องเปิดจึงเท่ากับขนาดช่องเปิดของสายอากาศ ( $S_{Ant}$ ) สำหรับกรณีช่องเปิดของสายอากาศเป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ  $D$  ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็น

$$\eta = G_{cp}^{\max}(\theta, \phi) \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{4}{\pi D^2} = G_{cp}^{\max}(\theta, \phi) \left( \frac{\lambda}{\pi D} \right)^2 \quad (3.56)$$

สมการ (3.54) สามารถเขียนอยู่ในหน่วย dB ได้เป็น

$$G_{cp}(\theta, \phi) = 10 \log \left( \frac{4\pi}{\lambda^2} S_A \right) + 10 \log \eta + 10 \log \left( \frac{P_{cp}(\theta, \phi)}{P_{cp}(\theta, \phi)|_{\max}} \right) \quad (3.57)$$

เมื่อสังเกตพจน์ต่างๆ ในสมการ (3.57) พบว่า พจน์  $10 \log \left( \frac{4\pi}{\lambda^2} S_A \right)$  บ่งบอกถึงอัตราขยายแนวโพลาไรเซชันร่วมมากที่สุดของสายอากาศเมื่อไม่เกิดความสูญเสียใดๆ และพจน์  $-10 \log(\eta)$  บ่งบอกถึงการสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด ส่วนพจน์  $10 \log \left( \frac{P_{cp}(\theta, \phi)}{P_{cp}(\theta, \phi)|_{\max}} \right)$  เป็นพจน์ที่ปรับบรรทัดฐานอัตราขยายในทิศทางใดๆ กับอัตราขยายมากที่สุด

จากบทที่ 2 สายอากาศบ่อนกำลังคลื่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังต่างๆ และสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด กำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานออกไปจากสายอากาศทั้งสองชนิดนี้สามารถหาอยู่ในรูปแม่นยำได้สำหรับสายอากาศชนิดโคไซน์กำลังต่างๆ กำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานออกไปจากสายอากาศเป็น [42]

$$P_T = \frac{\pi}{2Z_o} \left[ \frac{1}{2q_e + 1} + \frac{1}{2q_h + 1} \right] \quad (3.58)$$

และสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด กำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานออกไปจากสายอากาศเป็น

$$P_T = \frac{ab}{4Z_o} \quad (3.59)$$

โดยที่  $a$  คือขนาดความกว้างของช่องเปิดบนระนาบสนามแม่เหล็ก ( $X_f Z_f$ ) และ  $b$  คือขนาดความกว้างของช่องเปิดบนระนาบสนามไฟฟ้า ( $Y_f Z_f$ )

จากที่กล่าวมาเป็นการหาค่าลักษณะสมบัติที่บ่งบอกถึงสมรรถนะของสายอากาศชนิดงานสะท้อนแบบปรับรูป-ลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย ค่าลักษณะสมบัติเหล่านี้จะใช้ดูผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ผลกระทบจากการบิดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบและสายอากาศบ่อนกำลังคลื่น และปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย้อยแต่ละแผ่นที่จะกล่าวต่อไปในบทผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อสมรรถนะของสายอากาศและบทประยุกต์ที่เป็นไปได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อสมรรถนะของสายอากาศและบทประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้

#### ความนำ

สมรรถนะของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอมนั้นขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ หลายประการตามลักษณะโครงสร้าง และระบบควบคุมการหมุนแผ่นยอมนั้นแต่ละแผ่น ยกตัวอย่างเช่น ความเป็นอิสระในการหมุนแผ่นยอมนั้น รูปร่างของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ รูปร่างของแผ่นยอมนั้นแต่ละแผ่น เป็นต้น สำหรับผลของความเป็นอิสระในการหมุนแผ่นยอมนั้น ผู้วิจัยได้นำเสนอใน [20], [21] และพบว่ากรณีที่มีการหมุนแผ่นยอมนั้นแต่ละแผ่นเกิดขึ้นได้เพียงในสองระนาบรอบจุดหมุนของแผ่นยอมนั้น ความสามารถในการเลื่อนลำคลื่นมีขีดจำกัดอยู่เพียงช่วง  $\pm 20$  องศาจากแนวตั้งหลัก (boresight directions) เพื่อเพิ่มความสามารถของการเลื่อนลำคลื่นขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มความเป็นอิสระในการหมุนแผ่นยอมนั้นแต่ละแผ่นรอบแกนยกและแกนทิศตั้งรายละเอียดในบทที่ 2 และนำมาใช้วิเคราะห์ผลของค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ในบทนี้

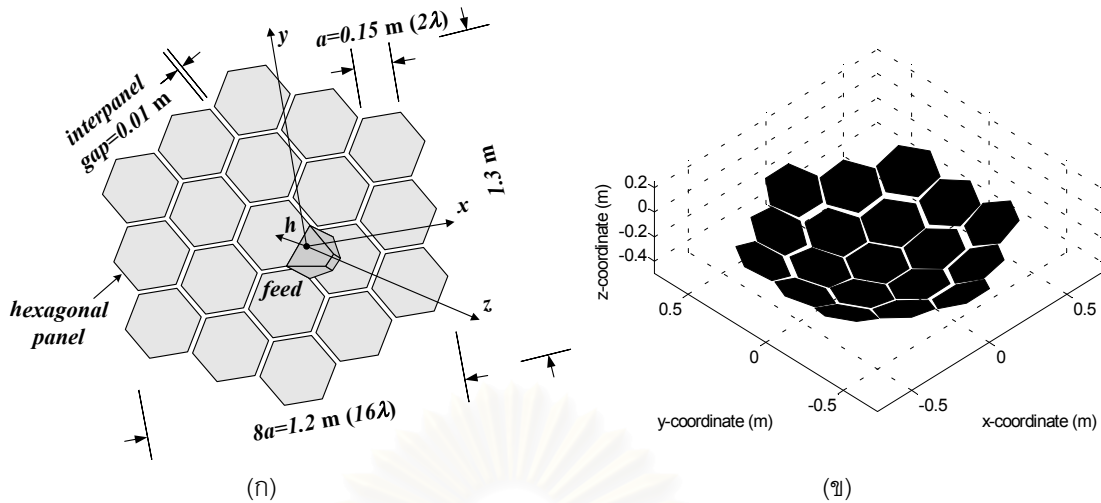
การวิเคราะห์ผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในบทนี้ได้แยกพิจารณาออกเป็น ผลของค่าพารามิเตอร์พื้นฐาน ผลของค่าพารามิเตอร์หลัก ผลของการบิดเบี่ยงจากแผ่นยอมนั้นล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นยอมนั้นแต่ละแผ่น และผลของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง โดยมุ่งเน้นผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อความสามารถของการเลื่อนลำคลื่นและการสร้างตำแหน่งศูนย์เป็นหลัก นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงบทประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้คือการเลื่อนลำคลื่นและการสร้างตำแหน่งศูนย์สำหรับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ [22] และการสร้างลำคลื่นครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยสำหรับดาวเทียมค้างฟ้า

#### 4.1 ผลของค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ

การวิเคราะห์ผลของตำแหน่งและชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นในหัวข้อนี้ ได้ใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพมาคำนวณหาสนามกระเจิง และกรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีมาหาหมุมที่หมุนไปของแผ่นยอมนั้นแต่ละแผ่นเพื่อเลื่อนลำคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการ โดยยังไม่คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากการบิดเบี่ยงคลื่นจากแผ่นยอมนั้นล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่น การวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจาก การเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นยอมนั้นแต่ละแผ่น การบิดเบี่ยงคลื่นจากแผ่นยอมนั้นล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่นได้นำเสนออย่างละเอียดในหัวข้อที่ 4.3

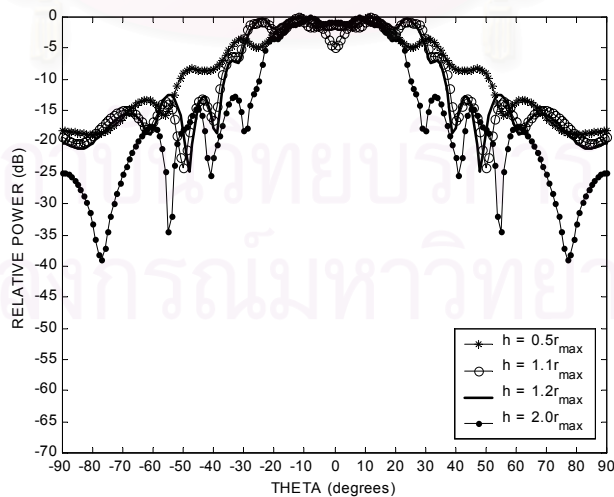
##### 4.1.1 ผลของตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

การวิเคราะห์ผลของตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่มีต่อความสามารถของการเลื่อนลำคลื่น ในหัวข้อนี้ ได้ศึกษาจากสายอากาศที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ในสองรูปแบบคือ รูปแบบที่จัดเรียงในลักษณะแบนราบ และรูปแบบที่เกิดจากการเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวโฟกัสกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศ ( $f/D$ ) เท่ากับ 0.35 และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ มีค่าคงเดิมคือ ขนาดพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เมตร (16  $\lambda$ ) ช่องว่างระหว่างแผ่นยอมนั้นแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร (0.13  $\lambda$ ) และพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ประกอบด้วยแผ่นยอมนั้นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าที่มีขนาดของด้านเท่ากับ 0.15 เมตร (2  $\lambda$ ) จำนวน 19 แผ่นดังรูป 4.1



รูป 4.1 รูปแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยที่วิเคราะห์  
 (ก) จัดเรียงในลักษณะแบนราบด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า 19 แผ่น  
 (ข) เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 ด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า 19 แผ่น

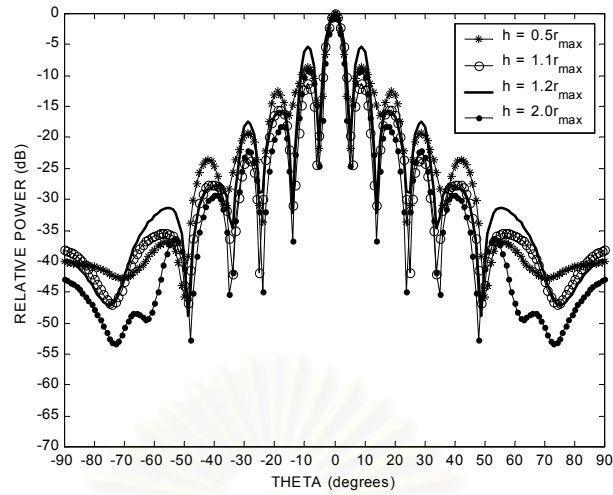
เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่มีต่อความสามารถในการเลื่อนลำคลื่น ในที่นี้ได้พิจารณาผลที่มีต่อการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก โดยกรณีที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบ การเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นทำได้จากการแปรค่าความสูงของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ( $h$ ) ดังรูป 4.1ก ไปเป็น  $0.5r_{max}$ ,  $1.1r_{max}$ ,  $1.2r_{max}$  และ  $2r_{max}$  ตามลำดับ โดยที่  $r_{max}$  คือรัศมีของสายอากาศ (ในที่นี้ใช้รัศมีตามแนวแกน  $x$  ซึ่งเท่ากับ 0.6 เมตร) ส่วนกรณีที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดจากการเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณ การเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นทำได้จากการแปรค่าระยะจากจุดโฟกัสไปตามแนวแกน ( $z_{stf}$ ) ไปเป็น  $0.5r_{max}-f$ ,  $1.1r_{max}-f$ ,  $1.5r_{max}-f$  และ  $2r_{max}-f$  ตามลำดับ ผลของการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่มีต่อการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุมต่างๆ แสดงไว้ในรูป 4.2 และ 4.3



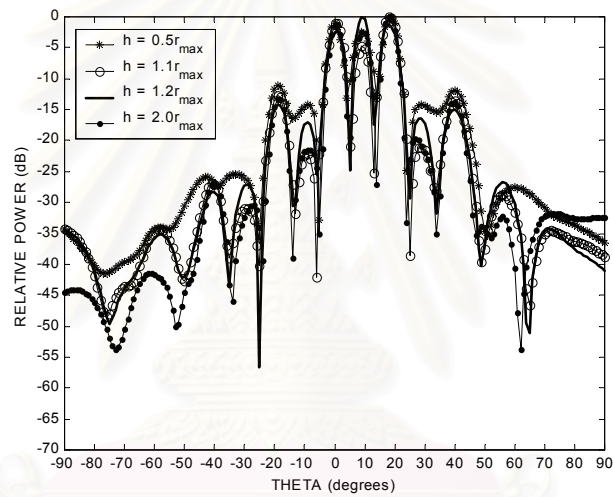
(ก) ไม่ปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้

รูป 4.2 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลารไรเซนชันรวมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นค่าต่างๆ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)

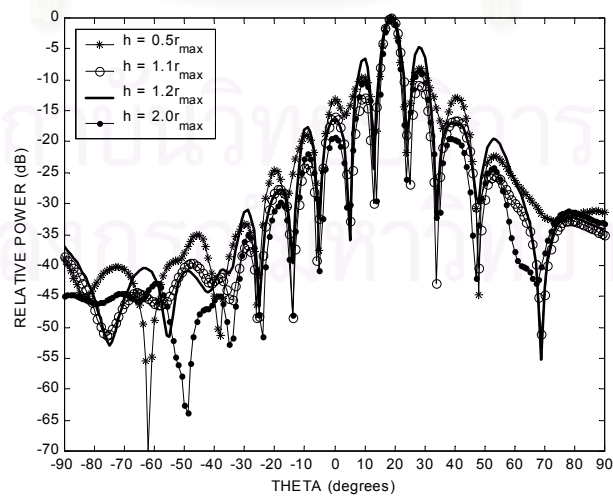




(ข) เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศา

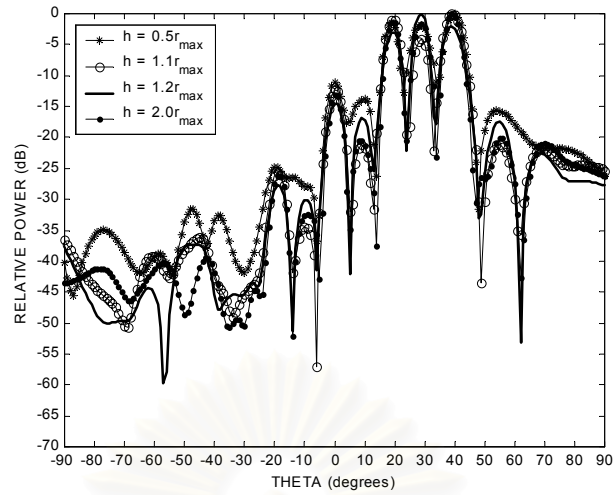


(ค) เลื่อนลำคลื่นไป 10 องศา

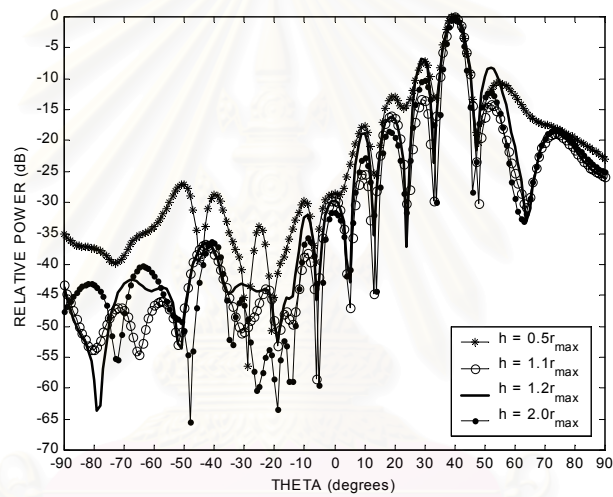


(ง) เลื่อนลำคลื่นไป 20 องศา

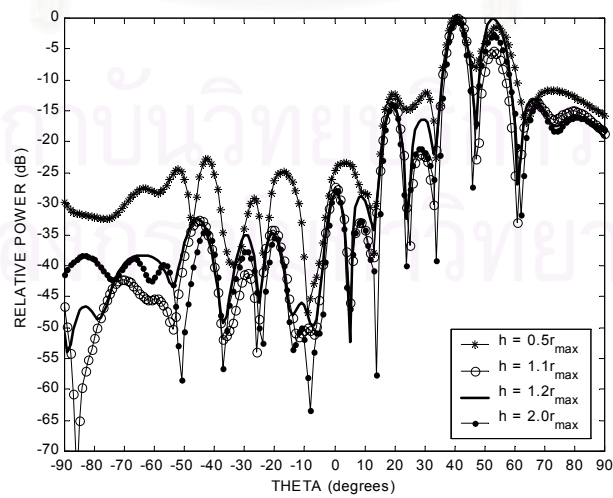
รูป 4.2 (ต่อ) แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นค่าต่างๆ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)



(จ) เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา

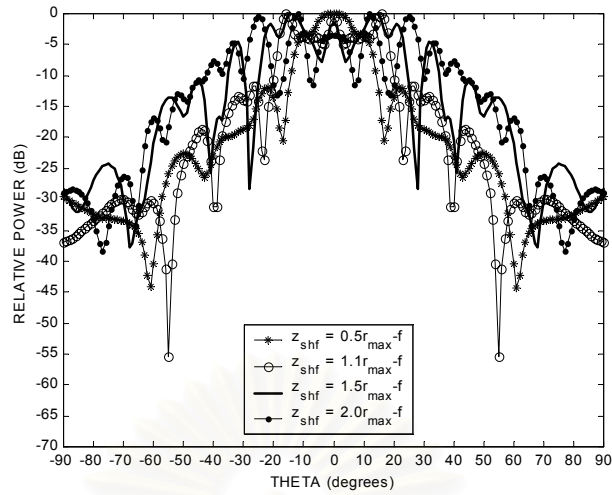


(ข) เลื่อนลำคลื่นไป 40 องศา

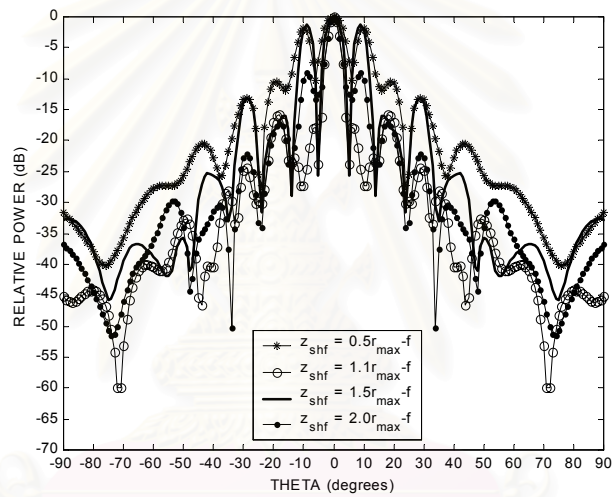


(ค) เลื่อนลำคลื่นไป 50 องศา

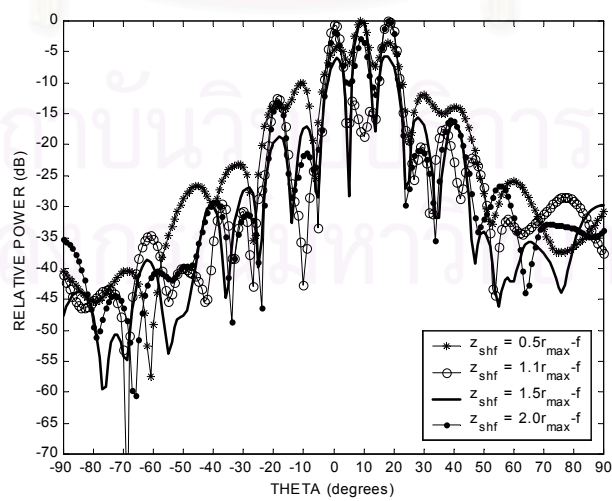
รูป 4.2 (ต่อ) แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นค่าต่างๆ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)



(ก) ไม่ปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้

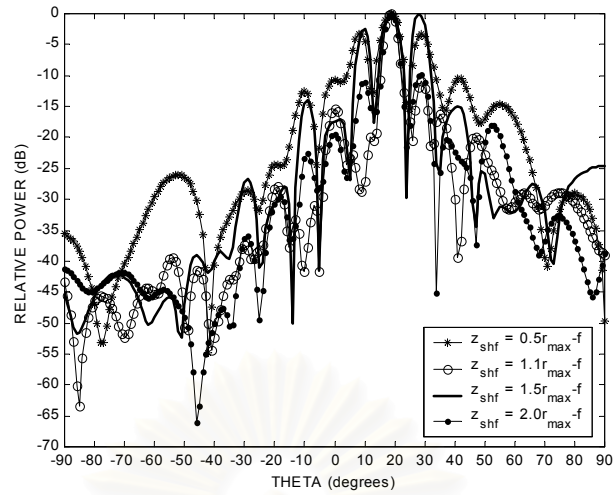


(ข) เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศา

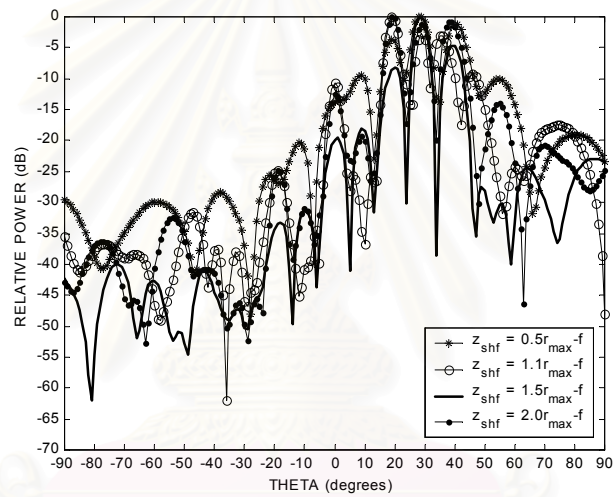


(ค) เลื่อนลำคลื่นไป 10 องศา

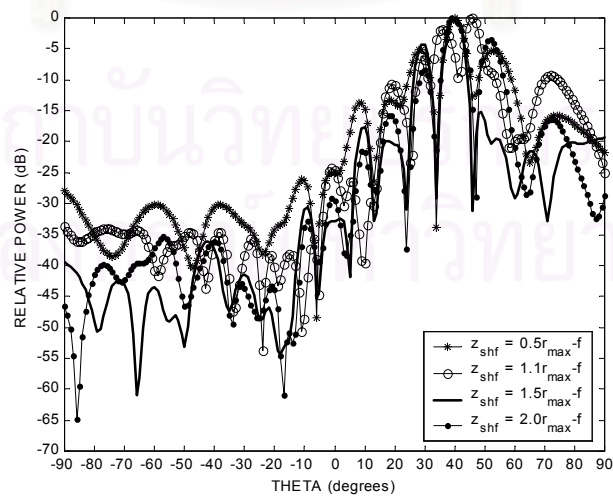
รูป 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับตำแหน่งของสายอากาศบ่อนำกำลังคลื่นค่าต่างๆ (กรณีใช้รูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)



(ง) เลื่อนลำคลื่นไป 20 องศา

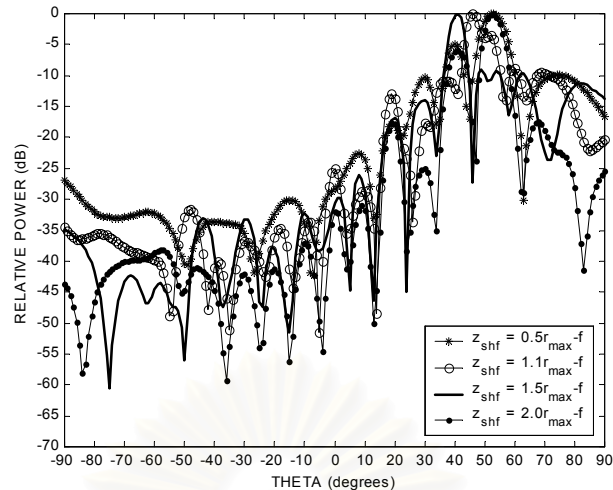


(จ) เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา



(ฉ) เลื่อนลำคลื่นไป 40 องศา

รูป 4.3 (ต่อ) แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา  
 ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังคลื่นค่าต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)



(ข) เลื่อนลำคลื่นไป 50 องศา

รูป 4.3 (ต่อ) แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นค่าต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)

จากรูป 4.2 และ 4.3 เห็นได้ว่า กรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีไม่สามารถเลื่อนลำคลื่นไปในทุกทิศทางที่ต้องการได้ เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นอยู่ที่ใดที่หนึ่ง เนื่องจากกรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีเป็นเพียงระเบียบวิธีที่ใช้บ่งบอกเพียงทิศทางที่เหมาะสมตามกฎการสะท้อนของสนามที่กระเจิงจากแผ่นย่อยแต่ละแผ่น แต่ไม่ได้คำนึงถึงภูมิภาคที่ตรงกันของสนามกระเจิงจากแผ่นย่อยแต่ละแผ่น อย่างไรก็ตาม จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นเห็นได้ว่า กรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบ ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่เหมาะสมอยู่ที่  $h$  มีค่าประมาณ 1.1 ถึง 1.2 เท่าของรัศมีของสายอากาศ และในกรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดจากการเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณ ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่เหมาะสมอยู่ที่  $z_{shf}$  มีค่าประมาณ  $1.1r_{max-f}$  ถึง  $2r_{max-f}$

ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นดังกล่าวนี้เป็นเพียงตำแหน่งที่ทำให้กรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีมีความสามารถต่อการเลื่อนลำคลื่นไปในทิศทางต่างๆ ได้มากกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปดังรูป 4.2 และ 4.3 เห็นได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไป สายอากาศสามารถเลื่อนลำคลื่นไปในทิศทางต่างๆ ได้ครอบคลุมเกือบทุกองศาที่ต้องการ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมีส่วนช่วยขจัดความแตกต่างทางภูมิภาคของสนามที่กระเจิงออกมาจากแผ่นย่อยแต่ละแผ่นให้มีภูมิภาคตรงกันมากขึ้น นอกจากนี้สังเกตว่ากรณีที่พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบ และไม่มีการปรับพื้นผิว ความกว้างของลำคลื่นจะแคบลง เมื่อตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นอยู่ห่างจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้มากขึ้น

การวิเคราะห์ข้างต้นไม่ได้แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้ในระนาบสนามแม่เหล็กของกรณีต่างๆ เพราะว่องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้ในระนาบสนามแม่เหล็กมีระดับต่ำมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีจะสร้างพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ที่มีความสมมาตรในระนาบสนามแม่เหล็กทำให้สนามเลี้ยวเบนที่ขอบเกิดการหักล้างกัน ดังนั้นองค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้จึงไม่ส่งผลโดดเด่นในระนาบสนามแม่เหล็ก แต่จะส่งผลให้เห็นในระนาบอื่นๆ ซึ่งจะแสดงให้เห็นในหัวข้อต่อไป



นอกจากตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นจะมีผลต่อความสามารถของการเคลื่อนลำคลื่นแล้ว ยังส่งผลให้ระดับพู่ขำมีการแปรเปลี่ยนไปด้วย แต่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ยาก ตาราง 4.1 แสดงอัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศ เมื่อแปรเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

ตาราง 4.1 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

พื้นที่วัดเรียงในลักษณะแบนราบ			ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ				
กรณี	$h$ (เมตร)	ET (dB)	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
ก) ไม่ปรับพื้นผิว	$0.5 r_{max}$	-20.97	11.29	$1.523 \times 10^{-3}$	91.36	0.58	0.53
	$1.1 r_{max}$	-7.85	11.04	$1.220 \times 10^{-3}$	73.23	0.69	0.50
	$1.2 r_{max}$	-6.87	10.61	$1.152 \times 10^{-3}$	69.11	0.66	0.46
	$2.0 r_{max}$	-2.91	10.53	$0.684 \times 10^{-3}$	41.05	1.09	0.45
ข) เคลื่อนลำคลื่นไป 0 องศา	$0.5 r_{max}$	-20.97	27.38	$1.606 \times 10^{-3}$	96.39	22.47	21.66
	$1.1 r_{max}$	-7.85	26.21	$1.291 \times 10^{-3}$	77.45	21.33	16.52
	$1.2 r_{max}$	-6.87	24.78	$1.216 \times 10^{-3}$	72.99	16.29	11.89
	$2.0 r_{max}$	-2.91	24.47	$0.708 \times 10^{-3}$	42.51	26.05	11.07
ค) เคลื่อนลำคลื่นไป 10 องศา	$0.5 r_{max}$	-20.97	24.39	$1.637 \times 10^{-3}$	95.91	11.35	10.89
	$1.1 r_{max}$	-7.85	23.05	$1.287 \times 10^{-3}$	77.24	10.35	7.99
	$1.2 r_{max}$	-6.87	23.00	$1.213 \times 10^{-3}$	72.76	10.86	7.90
	$2.0 r_{max}$	-2.91	21.21	$0.713 \times 10^{-3}$	42.35	12.36	5.23
ง) เคลื่อนลำคลื่นไป 20 องศา	$0.5 r_{max}$	-20.97	27.10	$1.581 \times 10^{-3}$	94.84	21.38	20.28
	$1.1 r_{max}$	-7.85	26.01	$1.274 \times 10^{-3}$	76.44	20.67	15.80
	$1.2 r_{max}$	-6.87	24.60	$1.200 \times 10^{-3}$	72.02	15.85	11.41
	$2.0 r_{max}$	-2.91	24.25	$0.698 \times 10^{-3}$	41.88	25.14	10.53
จ) เคลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	$0.5 r_{max}$	-20.97	23.45	$1.556 \times 10^{-3}$	93.36	9.39	8.76
	$1.1 r_{max}$	-7.85	22.04	$1.252 \times 10^{-3}$	75.12	8.43	6.34
	$1.2 r_{max}$	-6.87	22.68	$1.179 \times 10^{-3}$	70.75	10.36	7.33
	$2.0 r_{max}$	-2.91	20.27	$0.685 \times 10^{-3}$	41.12	10.25	4.22
ฉ) เคลื่อนลำคลื่นไป 40 องศา	$0.5 r_{max}$	-20.97	25.63	$1.515 \times 10^{-3}$	90.91	15.94	14.49
	$1.1 r_{max}$	-7.85	25.67	$1.221 \times 10^{-3}$	73.25	19.93	14.60
	$1.2 r_{max}$	-6.87	24.26	$1.150 \times 10^{-3}$	69.00	15.29	10.55
	$2.0 r_{max}$	-2.91	23.92	$0.668 \times 10^{-3}$	40.08	24.34	9.76
ช) เคลื่อนลำคลื่นไป 50 องศา	$0.5 r_{max}$	-20.97	20.47	$1.463 \times 10^{-3}$	87.78	5.02	4.41
	$1.1 r_{max}$	-7.85	22.26	$1.182 \times 10^{-3}$	70.90	9.39	6.66
	$1.2 r_{max}$	-6.87	21.68	$1.113 \times 10^{-3}$	66.81	8.71	5.82
	$2.0 r_{max}$	-2.91	20.23	$0.646 \times 10^{-3}$	38.74	10.78	4.18

หมายเหตุ ET คือระดับความเร็วที่ขอบ

$G_{cp}^{steer}$  คืออัตราขยายแนวโพลาริเซชันรวมในทิศทางเคลื่อนลำคลื่น

ตาราง 4.1 (ต่อ) อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

พื้นผิวเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์			ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ				
กรณี	$z_{shf}$ (เมตร)	ET (dB)	$G_{ep}^{steer}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
ก) ไม่ปรับพื้นผิว	$0.5 r_{max}$ -f	-40.09	19.65	$1.467 \times 10^{-3}$	88.05	4.15	3.65
	$1.1 r_{max}$ -f	-10.06	16.40	$1.316 \times 10^{-3}$	78.98	2.19	1.73
	$1.5 r_{max}$ -f	-5.04	11.11	$1.082 \times 10^{-3}$	64.91	0.79	0.51
	$2.0 r_{max}$ -f	-2.04	10.67	$0.783 \times 10^{-3}$	46.99	0.98	0.46
ข) เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศา	$0.5 r_{max}$ -f	-40.09	18.74	$1.479 \times 10^{-3}$	88.74	3.34	2.96
	$1.1 r_{max}$ -f	-10.06	26.91	$1.298 \times 10^{-3}$	77.90	24.93	19.42
	$1.5 r_{max}$ -f	-5.04	22.98	$1.065 \times 10^{-3}$	63.92	12.29	7.85
	$2.0 r_{max}$ -f	-2.04	23.99	$0.778 \times 10^{-3}$	46.66	21.28	9.93
ค) เลื่อนลำคลื่นไป 10 องศา	$0.5 r_{max}$ -f	-40.09	19.69	$1.462 \times 10^{-3}$	87.71	4.21	3.69
	$1.1 r_{max}$ -f	-10.06	23.31	$1.283 \times 10^{-3}$	77.01	11.01	8.48
	$1.5 r_{max}$ -f	-5.04	25.14	$1.061 \times 10^{-3}$	63.69	20.29	12.92
	$2.0 r_{max}$ -f	-2.04	21.42	$0.775 \times 10^{-3}$	46.49	11.82	5.50
ง) เลื่อนลำคลื่นไป 20 องศา	$0.5 r_{max}$ -f	-40.09	18.97	$1.444 \times 10^{-3}$	86.66	3.60	3.12
	$1.1 r_{max}$ -f	-10.06	26.21	$1.251 \times 10^{-3}$	75.09	22.02	16.54
	$1.5 r_{max}$ -f	-5.04	22.87	$1.038 \times 10^{-3}$	62.30	12.30	7.67
	$2.0 r_{max}$ -f	-2.04	24.53	$0.757 \times 10^{-3}$	45.44	24.72	11.23
จ) เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	$0.5 r_{max}$ -f	-40.09	18.30	$1.431 \times 10^{-3}$	85.89	3.11	2.67
	$1.1 r_{max}$ -f	-10.06	21.14	$1.222 \times 10^{-3}$	73.32	7.01	5.14
	$1.5 r_{max}$ -f	-5.04	25.74	$0.992 \times 10^{-3}$	59.55	24.94	14.58
	$2.0 r_{max}$ -f	-2.04	19.26	$0.717 \times 10^{-3}$	43.05	7.75	3.34
ฉ) เลื่อนลำคลื่นไป 40 องศา	$0.5 r_{max}$ -f	-40.09	19.69	$1.402 \times 10^{-3}$	84.13	4.38	3.68
	$1.1 r_{max}$ -f	-10.06	20.40	$1.194 \times 10^{-3}$	71.65	6.05	4.34
	$1.5 r_{max}$ -f	-5.04	25.02	$0.954 \times 10^{-3}$	57.27	21.95	12.57
	$2.0 r_{max}$ -f	-2.04	21.65	$0.683 \times 10^{-3}$	41.02	14.10	5.78
ช) เลื่อนลำคลื่นไป 50 องศา	$0.5 r_{max}$ -f	-40.09	19.94	$1.359 \times 10^{-3}$	81.57	4.78	3.90
	$1.1 r_{max}$ -f	-10.06	21.03	$1.159 \times 10^{-3}$	69.56	7.22	5.02
	$1.5 r_{max}$ -f	-5.04	21.65	$0.928 \times 10^{-3}$	55.69	10.40	5.79
	$2.0 r_{max}$ -f	-2.04	23.80	$0.662 \times 10^{-3}$	39.72	23.93	9.51

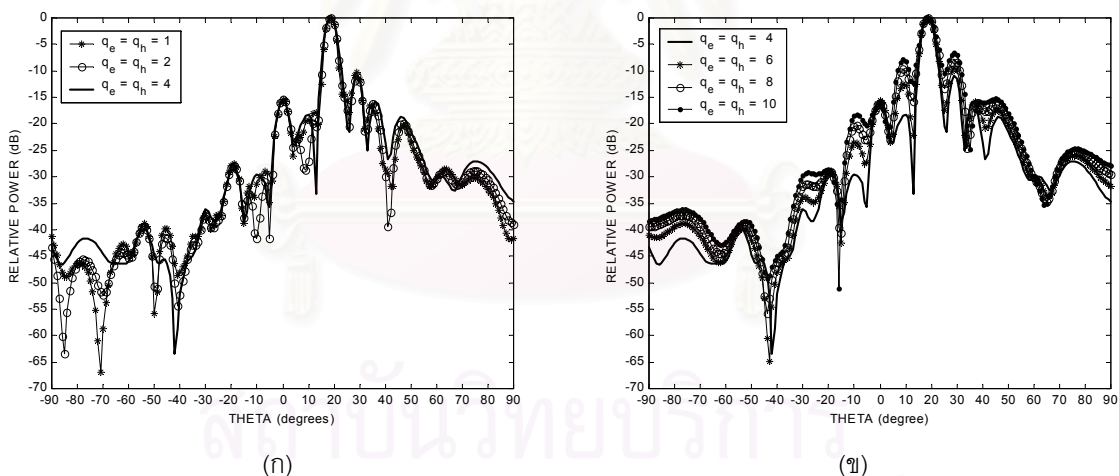
เมื่อพิจารณาอัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ จากตาราง 4.1 พบว่า อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมในทิศทางเลื่อนลำคลื่นมีค่ามากเกิดขึ้นเมื่อตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นอยู่ที่ตำแหน่งที่เหมาะสมตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ทั้งในกรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบและเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณ

จากการวิเคราะห์ข้างต้นได้ข้อสรุปว่า ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเป็นค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเคลื่อนลำคลื่นของสายอากาศชนิดนี้ และเนื่องจากตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นสามารถปรับเปลี่ยนได้ด้วยการควบคุมทางกล ดังนั้นการพิจารณาสมรรถนะของสายอากาศชนิดนี้ในหัวข้อที่ 4.2 ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นจึงเป็นค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่ใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการสังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการเพื่อศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ของสายอากาศชนิดนี้ โดยกำหนดให้ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่เหมาะสมคือ  $h$  มีค่า 1.2 เท่าของรัศมีของสายอากาศ และ  $z_{shf}$  มีค่า  $1.1r_{max}-f$  เป็นค่าเริ่มต้นของตัวแปรควบคุม

#### 4.1.2 ผลของชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

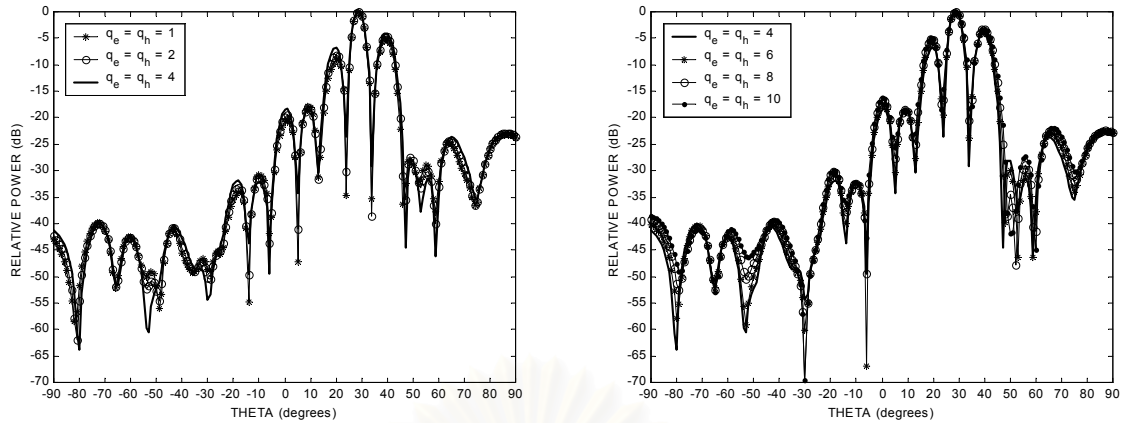
นอกจากตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นแล้ว ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่นำมาพิจารณาอีกค่าหนึ่งก็คือ ชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น เพื่อศึกษาผลของชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ในหัวข้อย่อยนี้ได้เลือกใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังต่างๆ เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดจากการเข้ารูปร่างเป็นรูปพาราโบลาโดยประมาณที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เมตร ( $16\lambda$ ) ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร ( $0.13\lambda$ ) พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ประกอบด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าที่มีขนาดของด้านเท่ากับ 0.15 เมตร ( $2\lambda$ ) จำนวน 19 แผ่นดังรูป 4.1ข

เมื่อพิจารณาความสามารถของการเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศาและ 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็กโดยใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลัง 1, 2, 4, 6, 8, 10 เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่นได้ผลดังรูป 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูป 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็กสำหรับสายอากาศชนิดโคไซน์กำลังต่างๆ (กรณีเข้ารูปร่างเป็นรูปพาราโบลาโดยประมาณที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35)

จากรูป 4.4 และ 4.5 พบว่า สายอากาศป้อนกำลังคลื่นชนิดโคไซน์กำลังต่างๆ (ระดับความเร็วที่ขอบต่างๆ) ไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนลำคลื่นและแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อกำลังของโคไซน์มีค่าไม่มากนักประมาณกำลัง 1 ถึง 6 หรือทำให้เกิดระดับความเร็วที่ขอบตั้งแต่ -5 ถึง -14 dB แต่จะเริ่มมีอิทธิพลมากขึ้นเมื่อใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังตั้งแต่ 8 เป็นต้นไปหรือทำให้เกิดระดับความเร็วที่ขอบตั้งแต่ -19 dB เป็นต้นไป โดยจะส่งผลให้ระดับพู่ข้างยกกระด้างสูงขึ้นจากรูป 4.4ข เห็นได้ว่าระดับพู่ข้างแรกยกกระด้างขึ้นประมาณ 11 dB



รูป 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับสายอากาศชนิดโคไซน์กำลังต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35)

ตาราง 4.2 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

ผลของชนิดสายอากาศป้อนกำลังคลื่น			ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ				
กรณี	$q_e = q_h$	ET (dB)	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
เลื่อนลำคลื่น ไป 20 องศา	1	-5.57	25.94	$1.764 \times 10^{-3}$	63.52	24.48	15.55
	2	-10.06	26.21	$1.251 \times 10^{-3}$	75.09	22.02	16.54
	4	-19.04	25.51	$0.759 \times 10^{-3}$	81.96	17.17	14.07
	6	-28.02	24.54	$0.538 \times 10^{-3}$	83.98	13.39	11.25
	8	-37.00	23.59	$0.416 \times 10^{-3}$	84.97	10.64	9.04
	10	-45.98	22.69	$0.339 \times 10^{-3}$	85.54	8.59	7.34
เลื่อนลำคลื่น ไป 30 องศา	1	-2.58	24.80	$1.250 \times 10^{-3}$	45.01	26.56	11.95
	2	-5.04	25.74	$0.992 \times 10^{-3}$	59.55	24.94	14.85
	4	-9.98	25.97	$0.675 \times 10^{-3}$	72.90	21.51	15.68
	6	-14.92	25.56	$0.499 \times 10^{-3}$	77.85	18.29	14.24
	8	-19.86	24.99	$0.392 \times 10^{-3}$	80.06	15.61	12.50
	10	-24.80	24.43	$0.323 \times 10^{-3}$	81.30	13.52	10.99

เมื่อคำนวณหาค่าอัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนชนิดของสายอากาศไปสรุปได้ดังตาราง 4.2 จากตารางนี้พบว่า กรณีเลื่อนลำคลื่นไป 20 องศาจากแนวเล็งหลัก อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงมากกว่า 0.7 dB ขึ้นไป เมื่อสายอากาศชนิดโคไซน์ที่ใช้เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมีกำลังสูงกว่า 4 และเป็นที่น่าสังเกตอย่างมากว่า อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงถึง 3.5 dB เมื่อใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลัง 10 ส่วนกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาจากแนวเล็งหลัก อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงแต่ไม่เท่ากับกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 20 องศาจากแนวเล็งหลัก โดยจะลดลง 0.98 dB ขึ้นไป เมื่อใช้สายอากาศชนิดโคไซน์มีกำลังสูงกว่า 8 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าระดับความเรียวที่ขอบมากขึ้น เมื่อใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสูง ส่งผลให้เกิดคลื่นที่มีการกระจายทางขนาดไม่คงที่บน

ระนาบซึ่งเกิดการสูญเสียอย่างมาก ดังเห็นได้จากค่าประสิทธิภาพของช่องเปิด ( $\eta_A$ ) ว่ามีค่าลดลงอย่างมาก นอกจากนี้สังเกตว่า ระดับความเรียบที่ขอบที่เหมาะสมควรมีค่าอยู่ประมาณ  $-10$  ถึง  $-11$  dB จึงทำให้ได้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมมากที่สุด ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศป้อนกำลังคลื่นควรมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่วัดได้ต่างจากการคำนวณทางทฤษฎีไม่มากนัก มิฉะนั้นจะทำให้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศชนิดนี้ลดลงอย่างมาก

## 4.2 ผลของค่าพารามิเตอร์หลักที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ

การวิเคราะห์ผลของค่าพารามิเตอร์หลักที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศในหัวข้อนี้ ได้ใช้กรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพมาคำนวณสนามกระเจิงเพื่อศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์หลักอันประกอบด้วย ขนาดของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อย รูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ ขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย และรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อย โดยมุ่งสนใจถึงผลที่มีต่อความสามารถในการเลื่อนลำคลื่นและการสร้างตำแหน่งศูนย์ ซึ่งได้พิจารณาจากการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก และการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก การเลื่อนลำคลื่นและการสร้างตำแหน่งศูนย์ทั้งสองกรณีนี้มุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นหาได้จากระเบียบวิธีทำให้เหมาะที่สุดดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 โดยกำหนดให้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมที่ต้องการเป็นดังตาราง 4.3 ส่วนตัวแปรควบคุมซึ่งประกอบด้วย มุมที่หมุนไปรอบแกนยก มุมที่หมุนไปรอบแกนทิต และตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมีเงื่อนไขบังคับเป็นดังสมการ (4.1)

$$|\theta_{rot}^e| \leq 45^\circ \quad (4.1ก)$$

$$|\phi_{rot}^e| \leq 180^\circ \quad (4.1ข)$$

กรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะจัดเรียงในลักษณะแบนราบ

$$0.5r_{max} \leq h \leq 2r_{max} \quad (4.1ค)$$

และกรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะเข้ารูปร่างเป็นรูปพาราโบลาโดยประมาณ

$$0.5r_{max} - f \leq z_{shf} \leq 2r_{max} - f \quad (4.1ง)$$

ตาราง 4.3 อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมและมุมที่เลื่อนไปของลำคลื่นที่ต้องการที่ใช้ศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์หลัก

กรณี	มุม (องศา)	อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมที่ต้องการ (dB)	ค่า $h$ เริ่มต้น (เมตร)	ค่า $z_{shf}$ เริ่มต้น (เมตร)
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	[29 30 31]	[24 25 24]	$h = 1.2 r_{max}$	$z_{shf} = 1.1 r_{max} - f$
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาและมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา	[10 29 30 31]	[-25 24 25 24]	$h = 1.2 r_{max}$	$z_{shf} = 1.1 r_{max} - f$

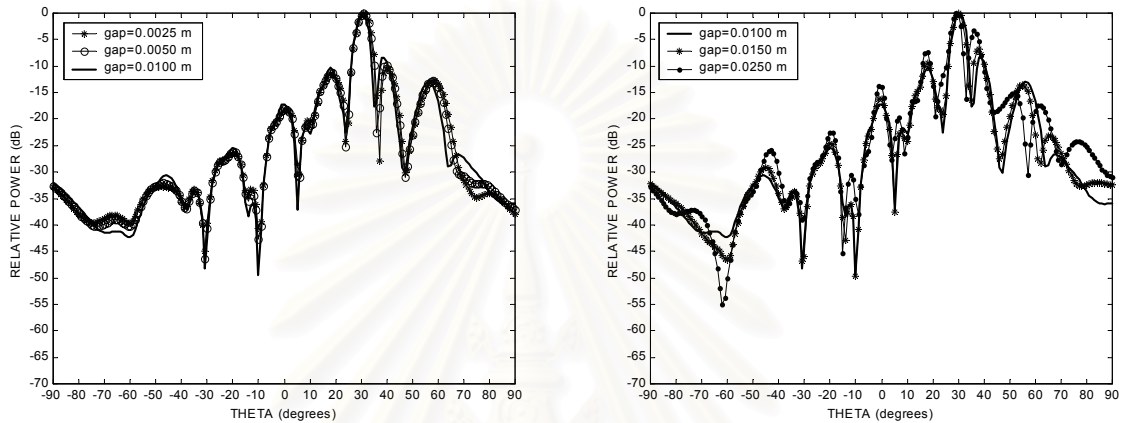
### 4.2.1 ผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

การพิจารณาผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นนั้น ในหัวข้อย่อยนี้ได้วิเคราะห์ผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่น โดยศึกษาจากสายอากาศที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ มีค่าคงเดิมคือ ขนาดพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เมตร (16  $\lambda$ ) ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสองเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ประกอบด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าที่มีขนาดของด้านเท่ากับ 0.15 เมตร (2  $\lambda$ ) จำนวน 19 แผ่นดังรูป 4.1ก

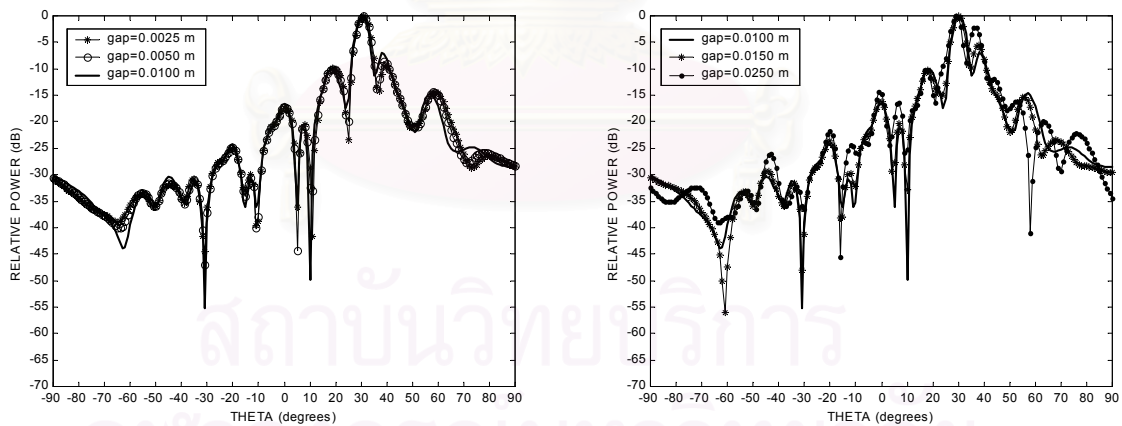


เพื่อให้เห็นถึงผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นของสายอากาศข้างต้น ในที่นี้ได้เปรียบเทียบผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นในสี่กรณีคือ ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.0025 เมตร ( $0.03 \lambda$ ), 0.005 เมตร ( $0.06 \lambda$ ), 0.01 เมตร ( $0.13 \lambda$ ), 0.015 เมตร ( $0.20 \lambda$ ), และ 0.025 เมตร ( $0.33 \lambda$ ) ตามลำดับ โดยมุมที่หมุนไปรอบแกนยกและแกนทิศ และตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นหาได้จากระเบียบวิธีทำให้เหมาะที่สุดโดยกรณีที่กำหนดให้ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร ( $0.13 \lambda$ )

ผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นในสี่กรณีข้างต้นเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา เป็นดังรูป 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูป 4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นค่าต่างๆ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)

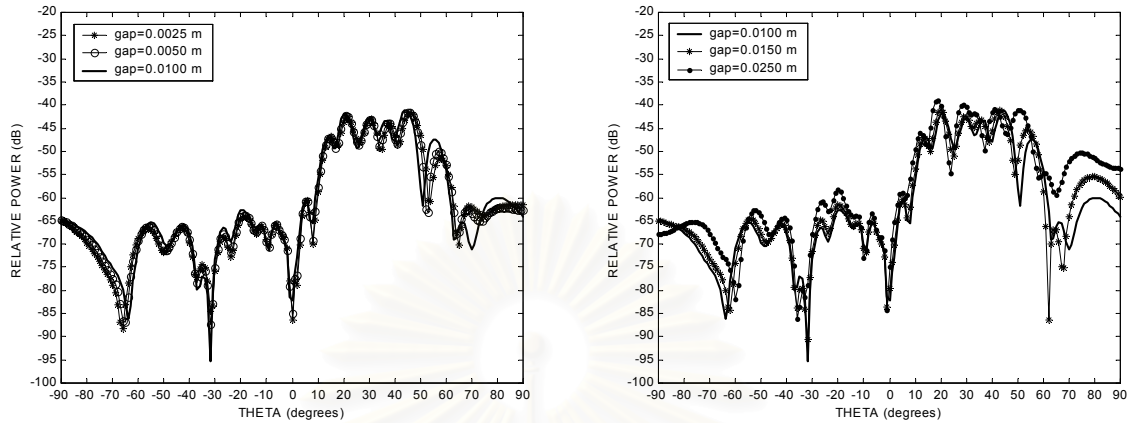


(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

รูป 4.7 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นค่าต่างๆ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)

จากรูป 4.6 และ 4.7 พบว่า ขนาดของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นไม่ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้มากนัก (ระดับโพลาริเซชันไขว้ในรูป 4.6 มีระดับต่ำมากจึงไม่ได้แสดงไว้) ทั้งในบริเวณพหุหลักและพหุข้างไกลๆ รวมไปถึงระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ที่เกิดขึ้น แต่จะปรากฏผลรุนแรงเมื่อช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นมีค่าเท่ากับ 0.025 เมตร ซึ่งเมื่อคิดเทียบกับขนาดของแผ่นย่อยจะมีขนาด  $0.165 \lambda$  ที่ขนาด

ช่องว่างขนาดนี้จะส่งผลทำให้พู่ข่างยกระดับสูงขึ้น แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเกิดการบิดเบี้ยวไปอย่างมาก และระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ก็เพิ่มขึ้น อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนขนาดของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นได้แสดงในตาราง 4.4



(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.7 (ต่อ) แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นค่าต่างๆ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)

ตาราง 4.4 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

ผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อย		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	$gap_{panel}$ (เมตร)	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	0.0025	26.33	-74.41	$1.181 \times 10^{-3}$	70.87	24.01	17.02
	0.0050	26.22	-73.63	$1.181 \times 10^{-3}$	70.87	23.38	16.57
	0.0100	25.69	-72.76	$1.181 \times 10^{-3}$	70.87	20.72	14.68
	0.0150	25.07	-72.40	$1.181 \times 10^{-3}$	70.87	17.93	12.71
	0.0250	22.77	-71.83	$1.181 \times 10^{-3}$	70.87	10.57	7.49
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาและ มีตำแหน่งศูนย์ ที่ 10 องศา	0.0025	25.64	-16.05	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	20.60	14.49
	0.0050	25.46	-16.10	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	19.79	13.92
	0.0100	24.87	-16.29	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	17.26	12.14
	0.0150	24.26	-16.74	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	15.03	10.57
	0.0250	21.98	-17.04	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	8.88	6.24

หมายเหตุ  $gap_{panel}$  คือช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

$G_{xp}^{max}$  คืออัตราขยายแนวโพลาริเซชันไขว้มากที่สุด

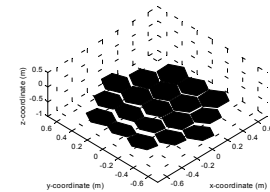
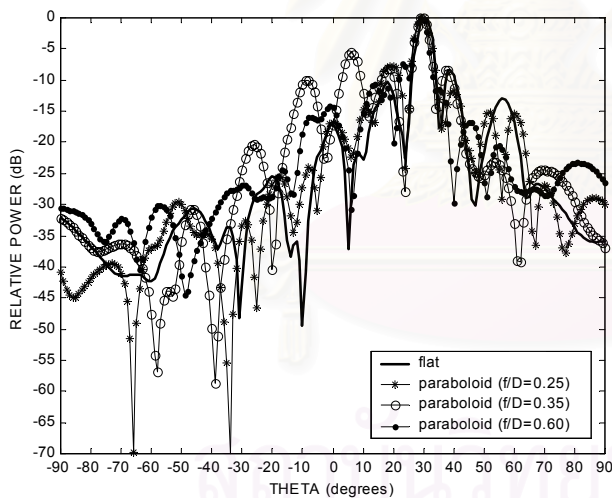
ในการสังเคราะห์ที่กำหนดให้ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร ดังนั้นการพิจารณาค่าอัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ จากตาราง 4.4 จึงได้เปรียบเทียบกับกรณีที่ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมสูงขึ้น เมื่อช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นลดลง และอัตราขยาย

แนวโพลาริเซชันร่วมลดลง เมื่อช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะลดลงอย่างมากถึง 2.92 dB และ 2.88 dB เมื่อช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.025 เมตร ในกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาจากแนวตั้งหลักและในกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้ไม่ได้เกิดจากการสูญเสียของคลื่นที่รั่วผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่น เนื่องจากกำลังที่รับได้บนพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ ( $P_r$ ) มีค่าเท่ากัน แต่มีผลมาจากการสูญเสียบนช่องเปิดสังเกตเห็นได้จากค่าประสิทธิภาพของช่องเปิดในตาราง 4.4

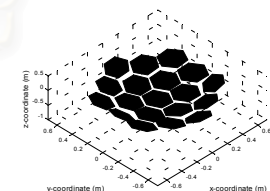
#### 4.2.2 ผลของรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้

การพิจารณาผลของรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้นั้น ในหัวข้อย่อยนี้ได้วิเคราะห์ผลของรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ โดยศึกษาจากสายอากาศที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ในสี่รูปแบบคือ รูปแบบที่จัดเรียงในลักษณะแบนราบ รูปแบบที่เกิดจากการเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณซึ่งมีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.60 ตามลำดับ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ มีค่าคงเดิมคือ ขนาดพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เมตร ( $16\lambda$ ) ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กึ่งวงสองเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร ( $0.13\lambda$ ) และแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าที่มีขนาดของด้านเท่ากับ 0.15 เมตร ( $2\lambda$ ) จำนวน 19 แผ่น

ผลของรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ในสี่รูปแบบข้างต้นเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา เป็นดังรูป 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



จัดเรียงแบบแบนราบ



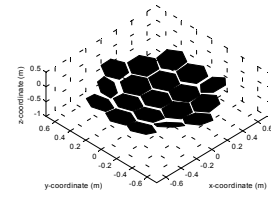
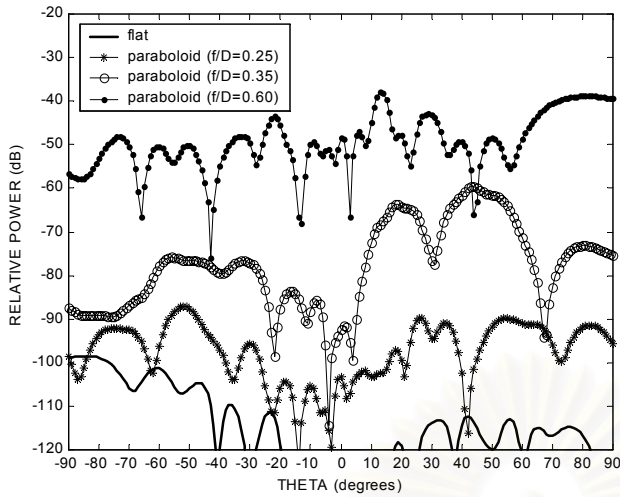
เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D = 0.25$

(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

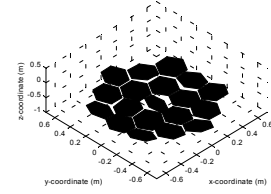
รูป 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

สำหรับรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้รูปแบบต่างๆ

จากรูป 4.8 และ 4.9 รูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ทั้งสี่รูปแบบที่ใช้ศึกษาสามารถเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาจากแนวตั้งหลักและสร้างตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา และพบว่าระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ที่สังเคราะห์ได้ในรูป 4.9ก มีความแตกต่างจากกรณีที่เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาจากแนวตั้งหลักเพียงอย่างเดียวในรูป 4.8 ถึง 22 dB



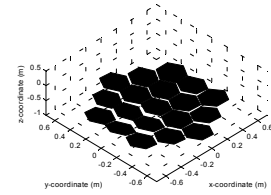
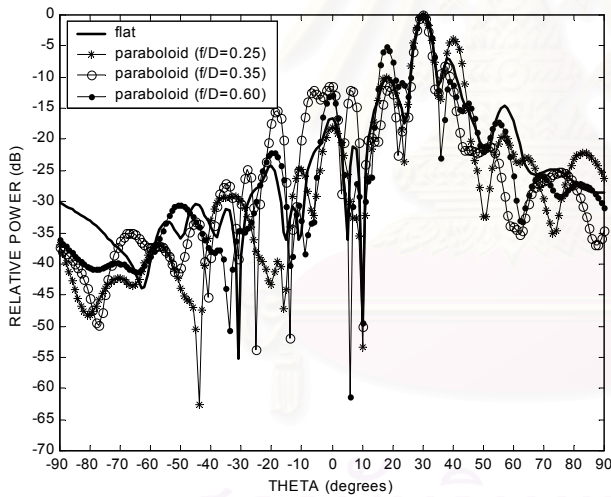
เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D = 0.35$



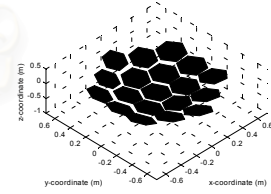
เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D = 0.60$

(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.8 (ต่อ) แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้รูปแบบต่างๆ



จัดเรียงแบบแบนราบ

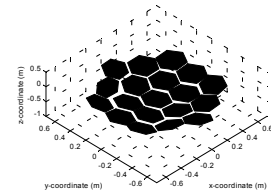
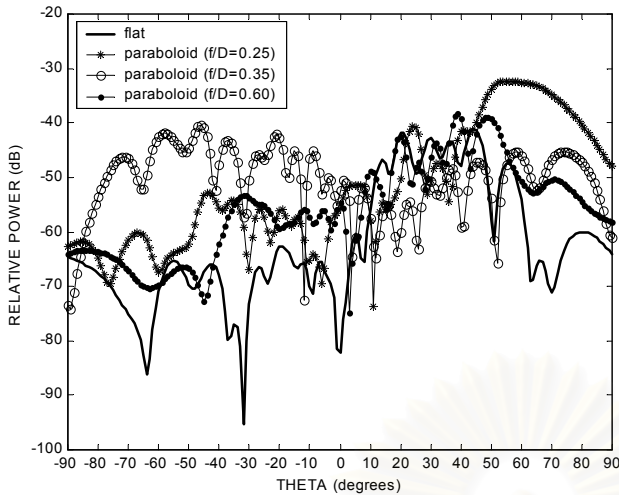


เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D = 0.25$

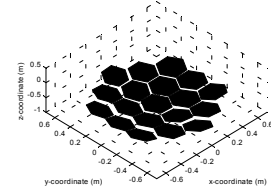
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

รูป 4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้รูปแบบต่างๆ

นอกจากนี้พบว่ารูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ทั้งสี่รูปแบบยังส่งผลกระทบต่อระดับโพลาริเซชันไขว้ที่แตกต่างกัน สำหรับกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาจากแนวเล็งหลักดังรูป 4.8ข ระดับโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้นจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.6 มีระดับสูง (-38 dB) และระดับโพลาริเซชันไขว้จะลดระดับลงอย่างมาก เมื่อค่า  $f/D$  มีค่าต่ำลง และมีระดับที่ต่ำมากๆ สำหรับพื้นผิวสะท้อนที่จัดเรียงในลักษณะแบนราบ



เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D = 0.35$



เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D = 0.60$

(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.9 (ต่อ) แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้รูปแบบต่างๆ

อย่างไรก็ตาม แนวโน้มที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้เกิดเมื่อลำคลื่นเลื่อนไป 30 องศาจากแนวตั้งหลักและมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่า การจัดเรียงของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ในแต่ละรูปร่างเริ่มต้นนั้นมีความไม่สมมาตรเกิดขึ้นเมื่อสังเกตจากระนาบสนามแม่เหล็กพอๆ กัน การแปรเปลี่ยนของระดับโพลาริเซชันไขว้ของรูปร่างเริ่มต้นจะกล่าวไว้อีกครั้งเมื่อรวมผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่ขอบ และการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบในหัวข้อที่ 4.3

อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้แสดงไว้ในตาราง 4.5

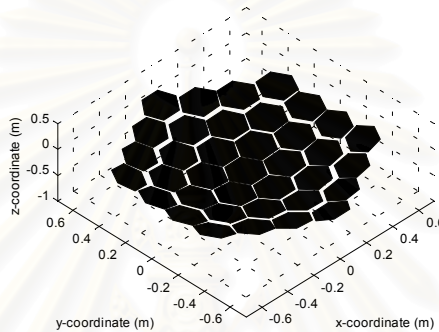
ตาราง 4.5 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้

ผลของรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อน		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	รูปร่างเริ่มต้น	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	แบนราบ	25.69	-72.76	$1.181 \times 10^{-3}$	70.87	20.72	14.68
	พาราโบลอยด์						
	$f/D = 0.25$	25.04	-62.12	$1.281 \times 10^{-3}$	76.89	16.41	12.62
	$f/D = 0.35$	25.07	-34.48	$1.291 \times 10^{-3}$	77.49	16.42	12.72
	$f/D = 0.60$	23.30	-14.58	$1.202 \times 10^{-3}$	72.14	11.73	8.46
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาและมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา	แบนราบ	24.87	-16.29	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	17.26	12.14
	พาราโบลอยด์						
	$f/D = 0.25$	24.51	-7.88	$1.252 \times 10^{-3}$	75.15	14.89	11.19
	$f/D = 0.35$	24.68	-15.76	$1.285 \times 10^{-3}$	77.09	15.07	11.62
	$f/D = 0.60$	24.47	-13.89	$1.317 \times 10^{-3}$	79.03	14.01	11.07



### 4.2.3 ผลของขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย

หัวข้อย่อยนี้ได้วิเคราะห์ผลของขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย โดยศึกษาจากสายอากาศที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ซึ่งเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ มีค่าคงเดิมคือ ขนาดพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เมตร ( $16\lambda$ ) ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสองเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร ( $0.13\lambda$ ) และแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเป็นรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า แต่มีขนาดและจำนวนไม่เท่ากัน เพื่อให้เห็นถึงผลของขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยของสายอากาศข้างต้น ในที่นี้ได้เปรียบเทียบผลของขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าในสองกรณีคือ กรณีแรกประกอบด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมที่มีขนาดของด้านเท่ากับ 0.12 เมตร ( $1.6\lambda$ ) จำนวน 37 แผ่นดังรูป 4.10



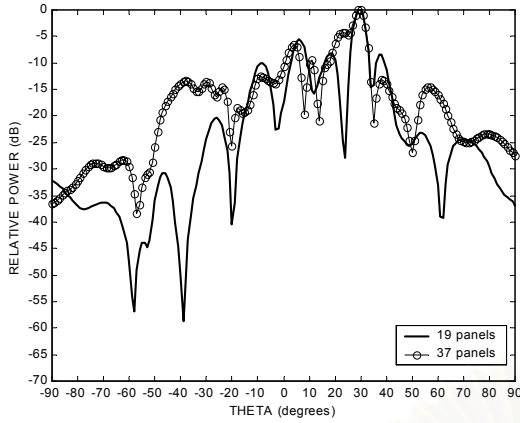
รูป 4.10 รูปแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยที่วิเคราะห์ (เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 ด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า 37 แผ่น)

กรณีที่สองประกอบด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมที่มีขนาดของด้านเท่ากับ 0.15 เมตร ( $2\lambda$ ) จำนวน 19 แผ่นดังรูป 4.11 การศึกษาผลของขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยในที่นี้ได้สังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานให้มีการเลื่อนลำคลื่นและสร้างตำแหน่งศูนย์ในระนาบสนามแม่เหล็กโดยกำหนดให้ค่าอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเป็นดังตาราง 4.6

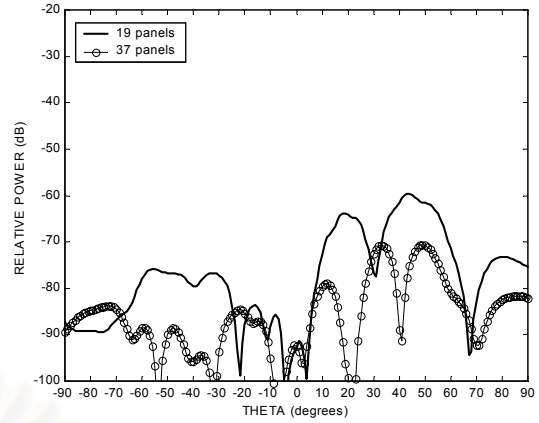
ตาราง 4.6 อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมและมุมที่เลื่อนไปของลำคลื่นและตำแหน่งศูนย์ที่ต้องการ สำหรับศึกษาผลของขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย

กรณี	มุม (องศา)	อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมที่ต้องการ (dB)
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	[29 30 31]	[24 25 24]
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาและมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา	[10 29 30 31]	[-25 24 25 24]
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาและมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 และ 50 องศา	[10 29 30 31 50]	[-15 24 25 24 -15]

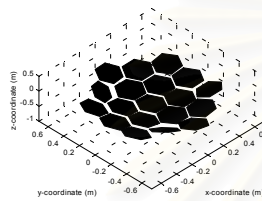
รูป 4.11 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้งสองกรณีเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา รูป 4.12 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้งสองกรณีเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา และรูป 4.13 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้งสองกรณีเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 0 องศา และมุม 50 องศา



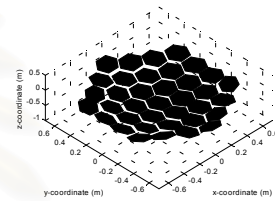
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

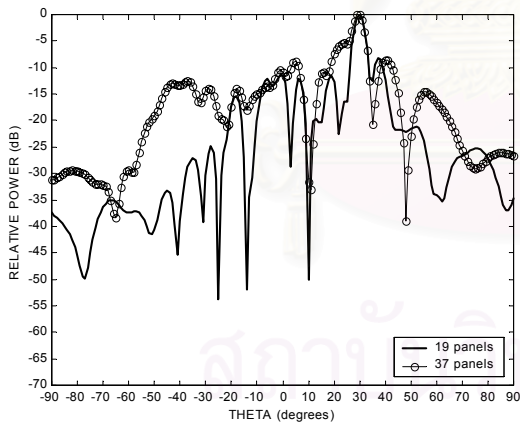


จำนวนแผ่นย่อย 19 แผ่น

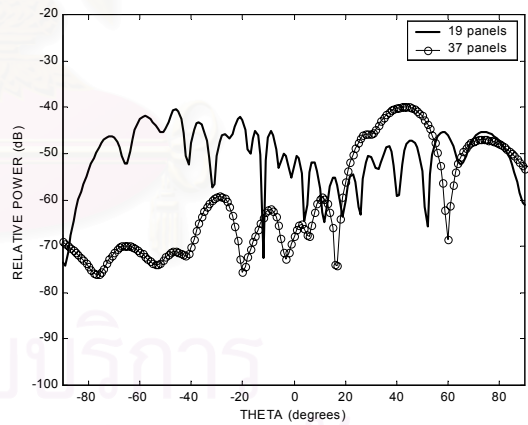


จำนวนแผ่นย่อย 37 แผ่น

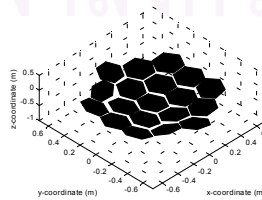
รูป 4.11 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยค่าต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)



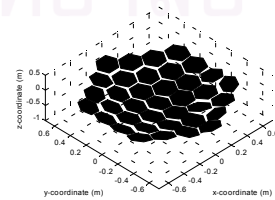
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

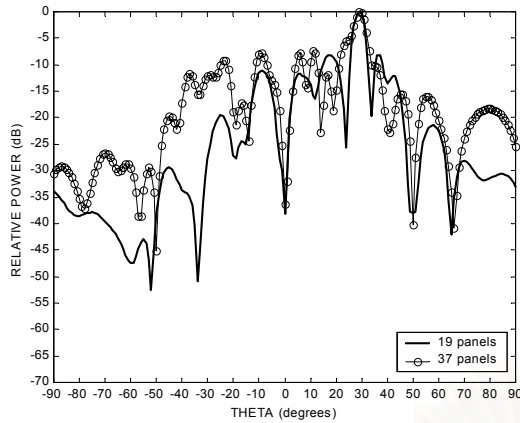


จำนวนแผ่นย่อย 19 แผ่น

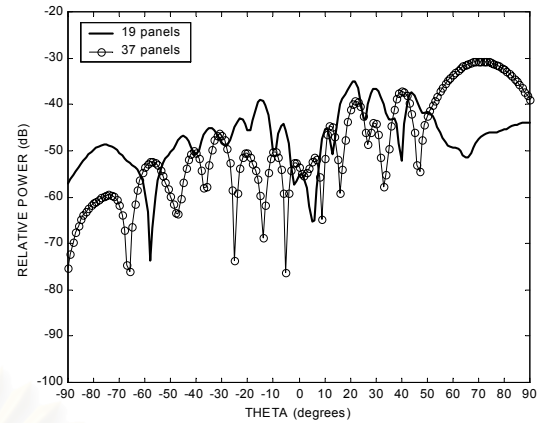


จำนวนแผ่นย่อย 37 แผ่น

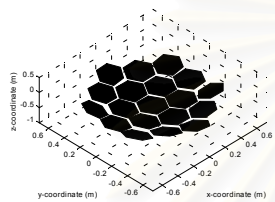
รูป 4.12 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยค่าต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)



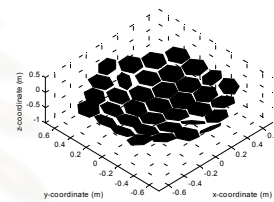
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้



จำนวนแผ่นย่อย 19 แผ่น



จำนวนแผ่นย่อย 37 แผ่น

รูป 4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 0 และ 50 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยค่าต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)

อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศ เมื่อแปรเปลี่ยนขนาดและจำนวนของแผ่นย่อยได้แสดงใน ตาราง 4.7

ตาราง 4.7 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย

ผลของขนาดและจำนวนแผ่นย่อย		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	ขนาดและจำนวน ของแผ่นย่อย	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
เคลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	0.15 เมตร 19 แผ่น	25.07	-34.48	$1.291 \times 10^{-3}$	77.49	16.42	12.72
	0.12 เมตร 37 แผ่น	23.35	-47.23	$1.318 \times 10^{-3}$	79.06	10.83	8.56
เคลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาและ มีตำแหน่งศูนย์ ที่ 10 องศา	0.15 เมตร 19 แผ่น	24.68	-15.76	$1.285 \times 10^{-3}$	77.09	15.07	11.62
	0.12 เมตร 37 แผ่น	23.25	-16.65	$1.343 \times 10^{-3}$	80.58	10.37	8.36
เคลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาและ มีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 และ 50 องศา	0.15 เมตร 19 แผ่น	23.32	-11.60	$1.322 \times 10^{-3}$	79.32	10.72	8.50
	0.12 เมตร 37 แผ่น	21.59	-9.10	$1.330 \times 10^{-3}$	79.78	7.15	5.71

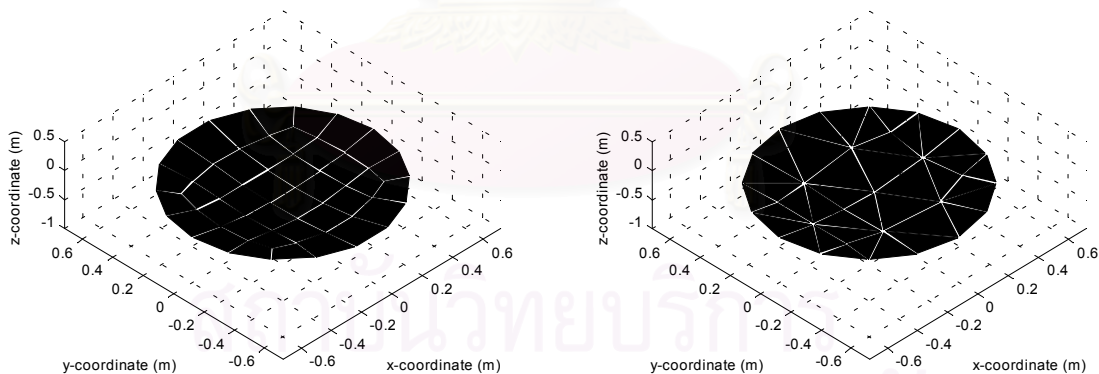
จากรูป 4.11 ถึง 4.13 เมื่อใช้แผ่นย่อยที่มีขนาดและจำนวนต่างกันสามารถเลื่อนลำคลื่นและสร้างตำแหน่งศูนย์ได้ตามตาราง 4.6 แต่พบว่า มีระดับพู่ซ่างที่สูงเกิดขึ้นในรูป 4.11ก และ 4.12ก และเกิดพู่กระตติงจำนวนมากในรูป 4.13ก เมื่อใช้แผ่นย่อยที่มีขนาดเล็กลงแต่มีจำนวนมากกว่า ที่เป็นเช่นนี้น่าจะเป็นผลจากขนาดของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยกับขนาดของแผ่นย่อยมีขนาดแตกต่างกันน้อยลง และเกิดช่องว่างตามแนวแกนสายอากาศมากกว่า นอกจากนี้ระดับโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้นมีระดับที่สูงขึ้น เมื่อใช้แผ่นย่อยขนาดเล็กกว่าและมีจำนวนมากกว่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่ขอบ ข้อสังเกตนี้ควรจะศึกษาต่อไป เพื่อหาข้อสรุปในการเลือกใช้ขนาดและจำนวนของแผ่นย่อย

จกตาราง 4.7 พบว่า เมื่อใช้แผ่นย่อยขนาดเล็กกว่าและมีจำนวนมากกว่า อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมจะลดลงในทั้งสามกรณีของการเลื่อนลำคลื่นและสร้างตำแหน่งศูนย์

#### 4.2.4 ผลของรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อย

การพิจารณาผลของรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อยนั้น ในหัวข้อย่อยนี้ได้วิเคราะห์ผลของรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อย โดยศึกษาจากสายอากาศที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ในรูปแบบที่เกิดจากการเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ มีค่าคงเดิมคือ ขนาดพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เมตร ( $16\lambda$ ) ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสองเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร ( $0.13\lambda$ )

เพื่อให้เห็นถึงผลของรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อยของสายอากาศ ในที่นี้ได้เปรียบเทียบผลของรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อยได้ในสามกรณีคือ กรณีแรกประกอบด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าที่มีขนาดของด้านเท่ากับ 0.12 เมตร ( $1.6\lambda$ ) จำนวน 37 แผ่นดังรูป 4.10 กรณีที่สองประกอบด้วยแผ่นย่อยรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าจำนวน 38 แผ่นดังรูป 4.14ก ส่วนในกรณีที่สามประกอบด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่าจำนวน 38 แผ่นดังรูป 4.14ข



(ก)

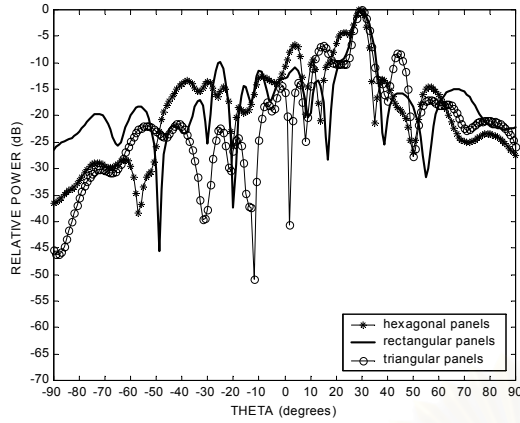
(ข)

รูป 4.14 รูปแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยต่างชนิดกัน

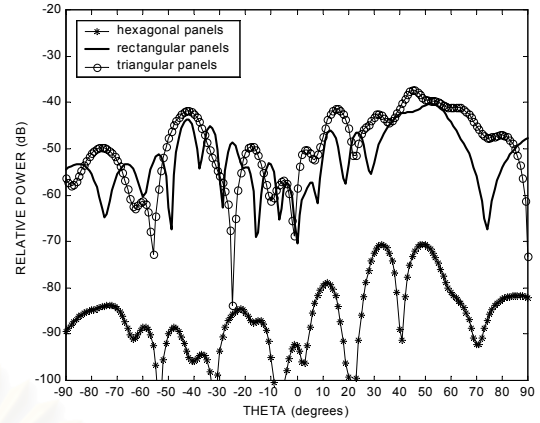
(ก) เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 ด้วยแผ่นย่อยรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า 38 แผ่น

(ข) เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 ด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า 38 แผ่น

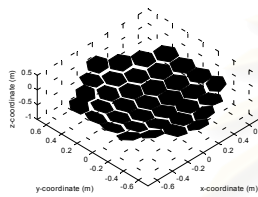
ผลของรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อยในสามกรณีข้างต้นของสายอากาศที่มีพื้นผิวสะท้อนปรับรูปลักษณะได้ที่เกิดจากการเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณซึ่งมีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 เมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา เป็นดังรูป 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ



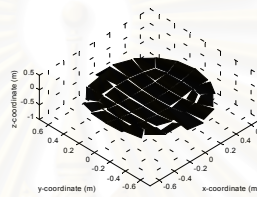
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



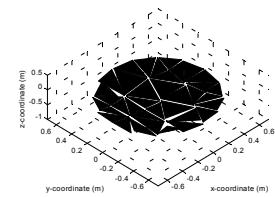
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้



แผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยม

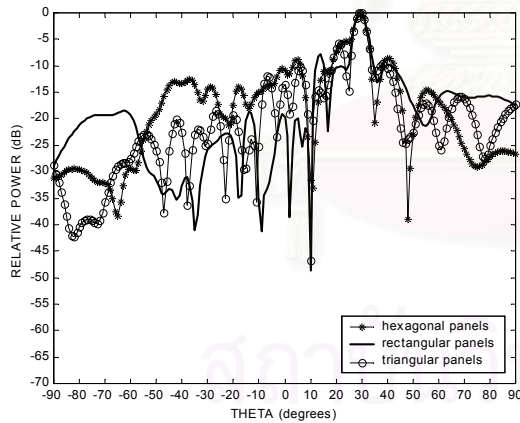


แผ่นย่อยรูปสี่เหลี่ยม

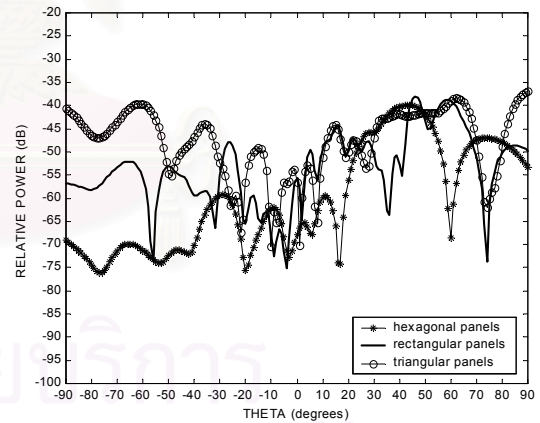


แผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยม

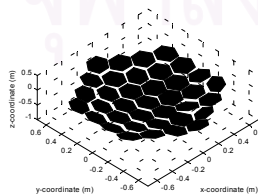
รูป 4.15 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อยแบบต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)



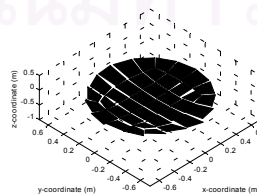
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



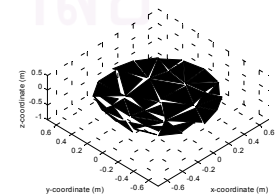
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้



แผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยม



แผ่นย่อยรูปสี่เหลี่ยม



แผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยม

รูป 4.16 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อยแบบต่างๆ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)



ในการสังเคราะห์พื้นผิวที่ปรับรูปลักษณะได้ในหัวข้อนี้เกิดขึ้นจากการจัดเรียงแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า รูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าในจำนวนพอๆ กัน และการจัดเรียงที่เกิดขึ้นจากแผ่นย่อยหกเหลี่ยมด้านเท่ามีลักษณะที่เป็นรอยคาบมากกว่ากรณีที่จัดเรียงด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า และรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า

ผลของรูปร่างและการจัดเรียงดังกล่าวนี้ก่อให้เกิดระดับฟูข้างที่แตกต่างกันดังรูป 4.15k และ 4.16k ระดับฟูข้างที่เกิดขึ้นจากแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่ามีระดับสูงที่สุด รองลงมาเป็นระดับฟูข้างที่เกิดขึ้นจากแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่าและรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดได้จากสองปัจจัยหลักคือ ความเป็นรอยคาบในการจัดเรียงของแผ่นย่อย และระยะห่างของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยตามแนวแกนของสายอากาศ [58] เนื่องจากความเป็นรอยคาบในการจัดเรียงของแผ่นย่อยมีความสัมพันธ์กับการเกิดระดับฟูข้างที่สูงขึ้นในลักษณะเดียวกันกับสายอากาศชนิดแถวลำดับที่มีการจัดเรียงเป็นรอยคาบโดยมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละตัวน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ส่วนระยะห่างของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยตามแนวแกนของสายอากาศทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของกระแสโดยเฉพาะส่วนที่เป็นวงภาคของกระแสซึ่งส่งผลให้ระดับฟูข้างสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อลดระดับฟูข้างที่สูงขึ้นอาจทำได้โดยจัดเรียงแผ่นย่อยในลักษณะที่ไม่เป็นรอยคาบ และลดระยะห่างของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยตามแนวแกนของสายอากาศโดยใช้วัสดุตัวนำที่มีความยืดหยุ่นมาเชื่อมต่อระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่น วิธีการทั้งสองนี้ต้องศึกษาเพิ่มเติมต่อไปเนื่องจากไม่อยู่ในขอบเขตของงานวิจัยนี้

อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศ เมื่อแปรเปลี่ยนรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อยแสดงไว้ในตาราง 4.8

ตาราง 4.8 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อแปรเปลี่ยนรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อย

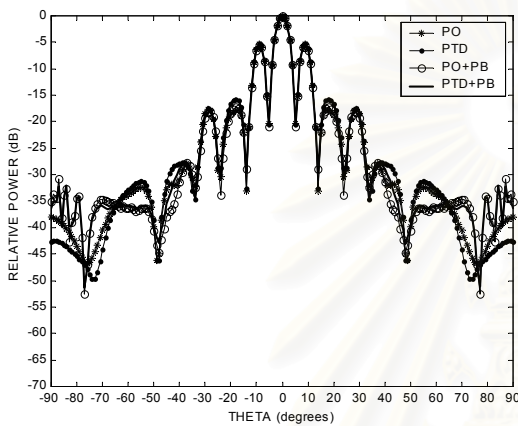
ผลของรูปร่างและการจัดเรียงแผ่นย่อย		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	รูปร่างของแผ่นย่อย	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{Xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	หกเหลี่ยม	23.35	-47.23	$1.318 \times 10^{-3}$	79.06	10.83	8.56
	สี่เหลี่ยม	24.30	-15.98	$1.386 \times 10^{-3}$	83.19	12.79	10.64
	สามเหลี่ยม	24.41	-12.96	$1.360 \times 10^{-3}$	81.61	13.40	10.94
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศาและ มีตำแหน่งศูนย์ ที่ 10 องศา	หกเหลี่ยม	23.25	-16.65	$1.343 \times 10^{-3}$	80.58	10.37	8.36
	สี่เหลี่ยม	23.80	-14.17	$1.282 \times 10^{-3}$	76.92	12.35	9.50
	สามเหลี่ยม	21.91	-15.02	$1.233 \times 10^{-3}$	74.00	8.30	6.14

จากตาราง 4.8 พบว่าระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุด เมื่อใช้แผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่าและรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ามีระดับสูงกว่ากรณีใช้แผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการจัดเรียงด้วยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่าและรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าเกิดขึ้นอย่างไม่มีควมสมมาตรในทุกๆ ระนาบ

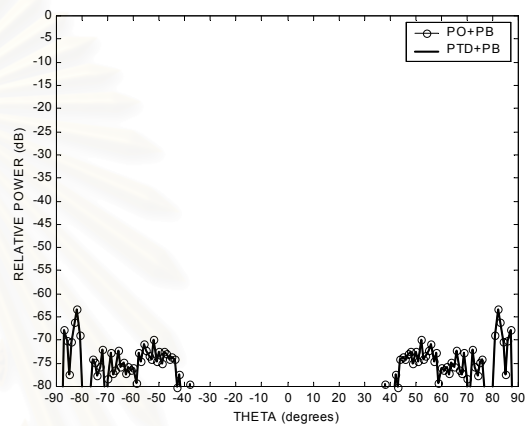
#### 4.3 ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่น และปรากฏการณ์ เลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.2 นั้นเป็นการวิเคราะห์เพื่อดูผลของค่าพารามิเตอร์พื้นฐานและค่าพารามิเตอร์หลักที่มีต่อการเลื่อนลำคลื่น โดยมีได้คำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละ

แผ่น และการบดบังจากแผ่นย่อยล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบจากปรากฏการณ์ทั้งสองที่มีต่อการเคลื่อนลำคลื่น ซึ่งได้พิจารณาจากการเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก การเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก การเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบ  $\phi = 60^\circ$  การเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศา ในระนาบ  $\phi = 60^\circ$  โดยศึกษาจากสายอากาศที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปร่างได้ทั้งสองรูปแบบคือ รูปแบบที่จัดเรียงในลักษณะแบนราบดังรูป 4.1ก โดยวางสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเหนือพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปร่างได้เป็นระยะทาง  $h$  เท่ากับ  $1.2r_{max}$  และรูปแบบที่เกิดจากการเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 ดังรูป 4.1ข ซึ่งวางสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่จุด  $(0,0,z_{shf} = 1.1r_{max}-f)$  ในทั้งสองรูปแบบใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสองเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และมีช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยเท่ากับ 0.01 เมตร



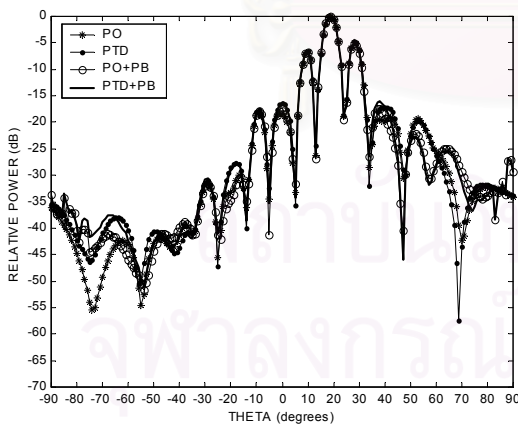
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



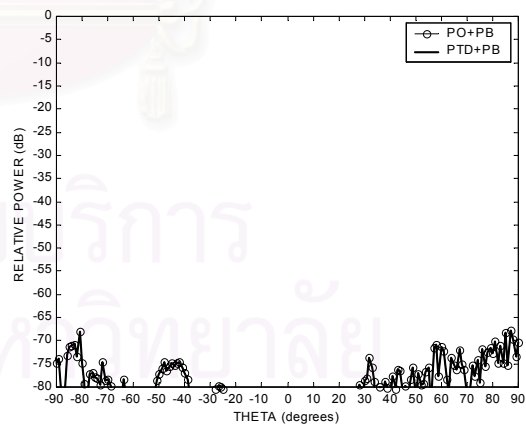
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.17 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



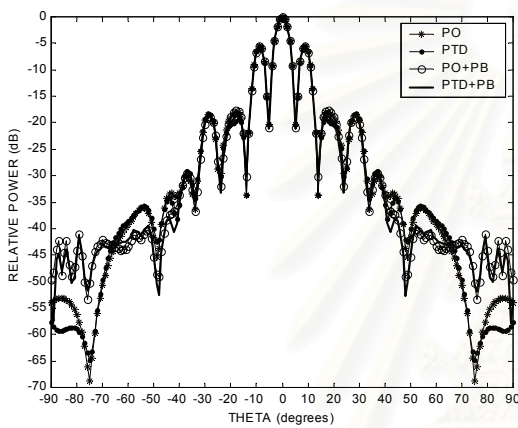
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.18 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

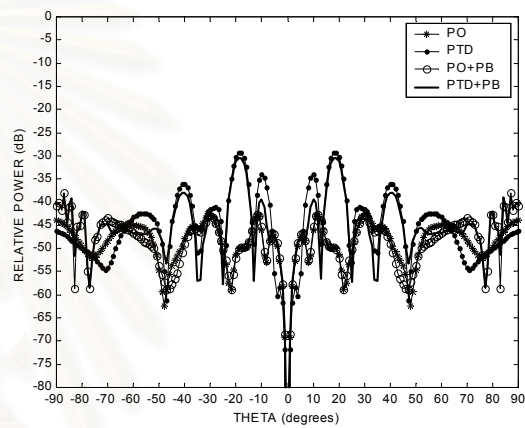
เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)

ผลกระทบของการเลี้ยวเบนและการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบที่มีต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ เมื่อเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 และ 20 องศาจากแนวตั้งหลักในระนาบสนามแม่เหล็กแสดง

ดังรูป 4.17 และ 4.18 สังเกตว่า ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบทำให้ระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดเกิดขึ้นต่ำกว่าระดับโพลาริเซชันร่วมมากที่สุดประมาณ  $-63$  dB (ต่ำมาก) ในขณะที่สนามที่เกิดจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบไม่ส่งผลที่โดดเด่นต่อระดับโพลาริเซชันไขว้ในระนาบนี้ ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าสนามที่เกิดจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบเกิดการหักล้างกันเนื่องจากความสมมาตรของการจัดเรียงของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ และความสมมาตรของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศบ่อนกำลังคลื่น อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ทำให้เกิดความผิดเพี้ยนของแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมที่บริเวณ  $|\theta| > 40^\circ$  ของแบบรูปการแผ่พลังงาน เมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ดังรูป 4.17 และที่บริเวณ  $-90^\circ \leq \theta < -15^\circ$ ,  $40^\circ \leq \theta < 90^\circ$  ของแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศา ดังรูป 4.18 แต่ผลกระทบของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบมีอิทธิพลมากกว่าผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่ขอบ



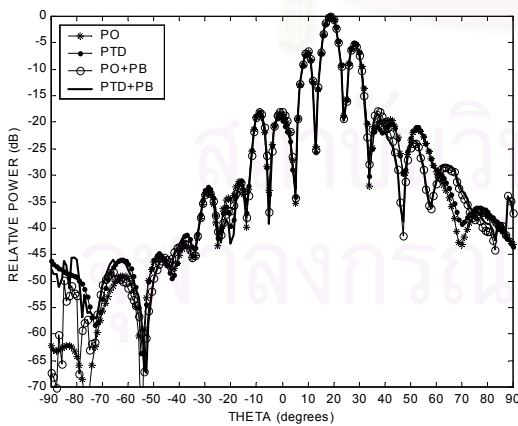
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



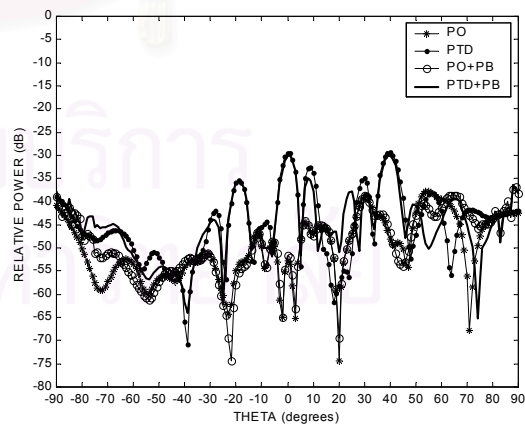
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบ  $\phi = 60^\circ$

เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



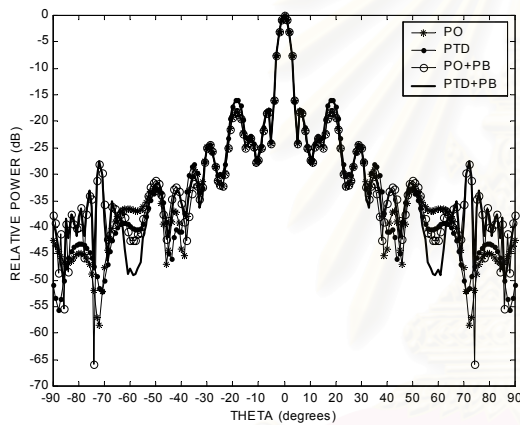
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศา ในระนาบ  $\phi = 60^\circ$

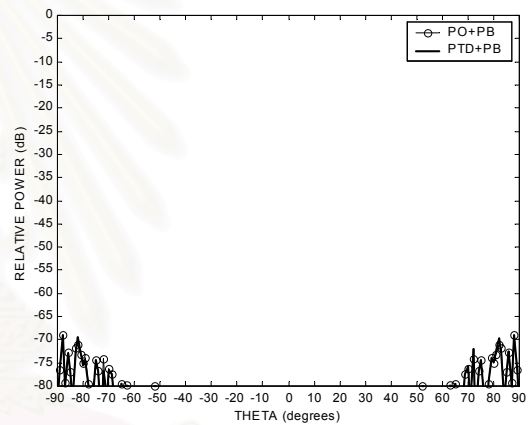
เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)

รูป 4.19 และ 4.20 แสดงให้เห็นผลกระทบของปรากฏการณ์ทั้งสองที่มีต่อแบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 และ 20 องศาจากแนวเล็งหลักในระนาบ  $\phi = 60^\circ$  ตามลำดับ สำหรับในระนาบนี้ระดับโพลาริเซชันไขว้มีระดับสูงซึ่งจนสังเกตได้ ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดระดับโพลาริเซชันไขว้สูงซึ่งนี้เกิดจากความไม่สมมาตรของแหล่งกระแสเมื่อสังเกตจากระนาบนี้และจากผลของสนามที่เกิดจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นที่มีขนาดจำกัดจากรูป 4.19ข และ 4.20ข พบว่าระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดจากการทำนายด้วยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพสูงกว่าที่หาได้จากกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพประมาณ 13 และ 8 dB ตามลำดับ

นอกจากนี้พบว่า องค์ประกอบโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสนามที่เกิดจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบมีความโดดเด่นในบริเวณ  $|\theta| \leq 50^\circ$  มากกว่าผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบอย่างเห็นได้ชัด แต่นอกบริเวณดังกล่าวไปผลของสนามไม่ต่อเนื่องที่ขอบจะมีโดดเด่นน้อยลง และผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบกลับมีอิทธิพลมากกว่าแทน ทำนองเดียวกันกับในระนาบสนามแม่เหล็กพบว่า ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบมีอิทธิพลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมมากกว่าการเลี้ยวเบนที่ขอบดังรูป 4.19ก และ 4.20ก และผลต่างของระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดกับระดับโพลาริเซชันร่วมมากที่สุดมีค่าประมาณ  $-30$  dB



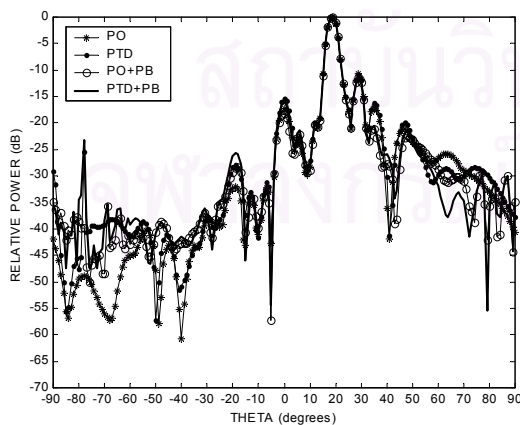
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



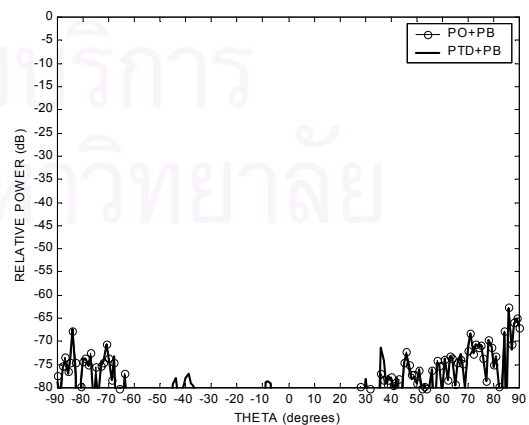
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.21 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)



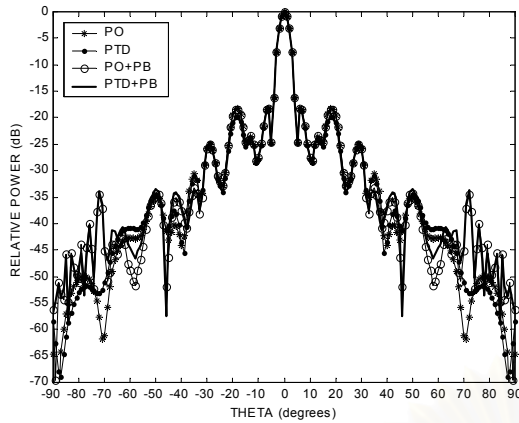
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



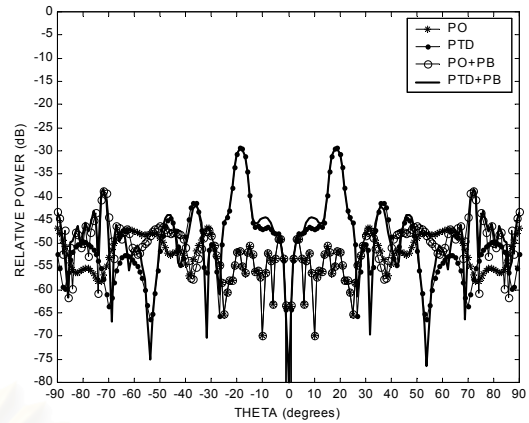
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)



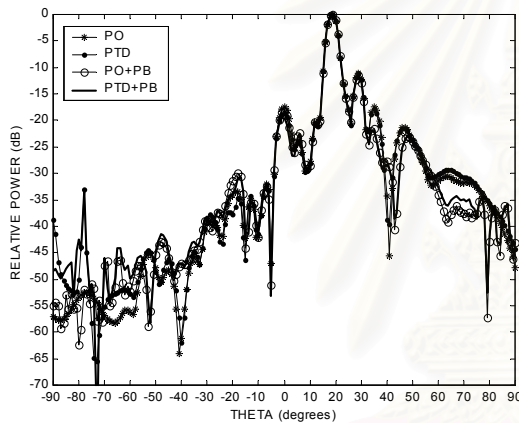
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



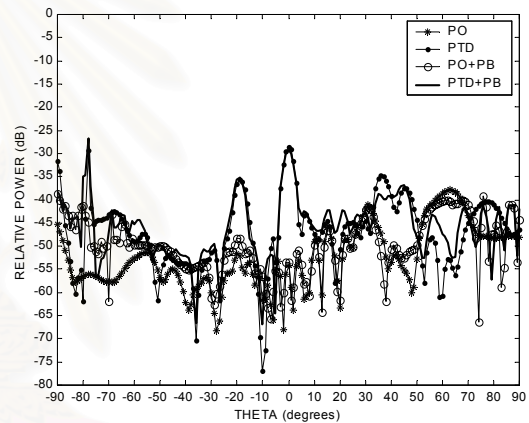
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบ  $\phi = 60^\circ$ 

เมื่อรวมผลของการปรับบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 20 องศา ในระนาบ  $\phi = 60^\circ$ 

เมื่อรวมผลของการปรับบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์)

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากปรากฏการณ์ทั้งสองที่มีต่อความสามารถของการเลื่อนลำคลื่นในกรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ดังรูป 4.21 ถึง 4.24 พบว่าปรากฏการณ์ทั้งสองส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ในลักษณะเดียวกันกับกรณีที่ใช้พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบ ในรูป 4.22 และ 4.24 จุดที่น่าสนใจที่จะชี้ให้เห็นคือ มียอดแหลม (spike) เกิดขึ้นบนแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ ยอดแหลมที่เกิดขึ้นนี้เกิดขึ้นเมื่อรวมสนามที่เกิดจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบเท่านั้น การที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าเกิดความเป็นเอกฐานของอูฟิมต์เซฟขึ้นดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ที่เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณมีระดับพู่ข้างที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ที่จัดเรียงในลักษณะแบนราบ ระดับพู่ข้างสามารถลดลงได้ประมาณ 10 dB อย่างไรก็ตาม ระดับพู่ข้างที่สูงอาจเกิดขึ้นในบางทิศทางขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างขนาดของแผ่นย่อยกับช่องว่างระหว่างแผ่นย่อย ผลกระทบดังกล่าวนี้ควรนำมาศึกษาต่อไปในอนาคต

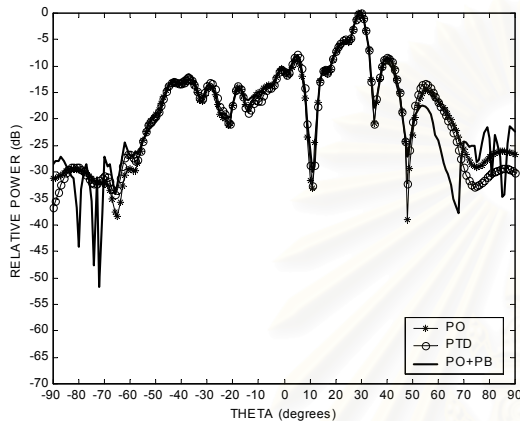


ตาราง 4.9 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อรวมผลของการบดบังจากแผ่นย่อยล้อมรอบและการเลี้ยวเบนที่ชอบ

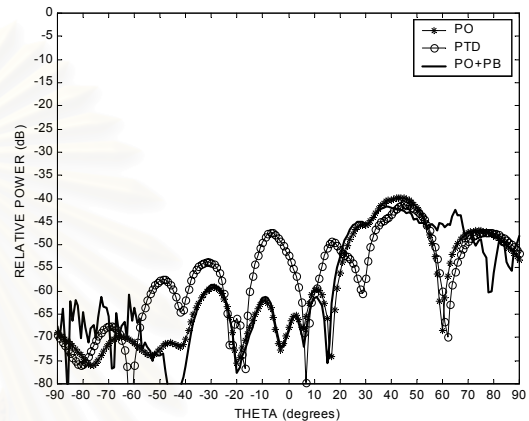
ผลของการบดบังและการเลี้ยวเบน		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
พื้นผิวสะท้อน	ผลกระทบ	$G_{ep}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
แบนราบ	ET = -6.87 dB						
เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศาใน ระนาบ $\phi = 0^\circ$	PO	24.76	-74.49	$1.235 \times 10^{-3}$	74.11	15.99	11.85
	PTD	24.78	-74.49	$1.235 \times 10^{-3}$	74.11	16.04	11.89
	PO+PB	24.74	-38.64	$1.216 \times 10^{-3}$	72.99	16.17	11.80
	PTD+PB	24.76	-38.64	$1.216 \times 10^{-3}$	72.99	16.22	11.84
เลื่อนลำคลื่นไป 20 องศาใน ระนาบ $\phi = 0^\circ$	PO	24.57	-71.62	$1.218 \times 10^{-3}$	73.08	15.52	11.34
	PTD	24.59	-71.62	$1.218 \times 10^{-3}$	73.08	15.60	11.40
	PO+PB	24.52	-43.35	$1.200 \times 10^{-3}$	72.02	15.57	11.20
	PTD+PB	24.50	-43.35	$1.200 \times 10^{-3}$	72.02	15.51	11.17
เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศาใน ระนาบ $\phi = 60^\circ$	PO	24.76	-17.65	$1.235 \times 10^{-3}$	74.11	15.99	11.85
	PTD	24.78	-4.57	$1.235 \times 10^{-3}$	74.11	16.04	11.89
	PO+PB	24.74	-13.25	$1.216 \times 10^{-3}$	72.99	16.17	11.80
	PTD+PB	24.76	-5.69	$1.216 \times 10^{-3}$	72.99	16.22	11.84
เลื่อนลำคลื่นไป 20 องศาใน ระนาบ $\phi = 60^\circ$	PO	24.59	-13.25	$1.218 \times 10^{-3}$	73.08	15.57	11.38
	PTD	24.59	-4.82	$1.218 \times 10^{-3}$	73.08	15.60	11.40
	PO+PB	24.53	-12.32	$1.201 \times 10^{-3}$	72.06	15.60	11.24
	PTD+PB	24.56	-5.47	$1.201 \times 10^{-3}$	72.06	15.71	11.32
พาราโบลอยด์	ET = -10.06 dB						
เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศาใน ระนาบ $\phi = 0^\circ$	PO	26.89	-69.65	$1.298 \times 10^{-3}$	77.90	24.81	19.33
	PTD	26.90	-69.65	$1.298 \times 10^{-3}$	77.90	24.86	19.37
	PO+PB	26.89	-42.05	$1.298 \times 10^{-3}$	77.90	24.86	19.36
	PTD+PB	26.90	-42.05	$1.298 \times 10^{-3}$	77.90	24.91	19.41
เลื่อนลำคลื่นไป 20 องศาใน ระนาบ $\phi = 0^\circ$	PO	26.17	-63.71	$1.280 \times 10^{-3}$	76.80	21.33	16.39
	PTD	26.19	-63.67	$1.280 \times 10^{-3}$	76.80	21.45	16.47
	PO+PB	26.05	-36.68	$1.251 \times 10^{-3}$	75.09	21.22	15.93
	PTD+PB	26.10	-36.77	$1.251 \times 10^{-3}$	75.09	21.47	16.12
เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศาใน ระนาบ $\phi = 60^\circ$	PO	26.89	-19.83	$1.298 \times 10^{-3}$	77.90	24.81	19.33
	PTD	26.90	-2.48	$1.298 \times 10^{-3}$	77.90	24.86	19.37
	PO+PB	26.89	-11.88	$1.298 \times 10^{-3}$	77.90	24.86	19.36
	PTD+PB	26.90	-2.58	$1.298 \times 10^{-3}$	77.90	24.91	19.41
เลื่อนลำคลื่นไป 20 องศาใน ระนาบ $\phi = 60^\circ$	PO	26.19	-11.69	$1.280 \times 10^{-3}$	76.80	21.42	16.45
	PTD	26.18	-2.37	$1.280 \times 10^{-3}$	76.80	21.41	16.44
	PO+PB	26.05	-12.77	$1.251 \times 10^{-3}$	75.09	21.22	15.94
	PTD+PB	26.03	-3.21	$1.251 \times 10^{-3}$	75.09	21.12	15.86

หมายเหตุ PB คือคิดผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ

จากตาราง 4.9 พบว่า การบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบมีอิทธิพลต่ออัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเพียงเล็กน้อย การแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมที่เกิดขึ้นได้รับผลกระทบหลักมาจากการบดบังคลื่นของแผ่นย่อยล้อมรอบซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ ดังจะเห็นได้ว่ากรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบ การแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเกิดขึ้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.07 dB และกรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 การแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเกิดขึ้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.16 dB

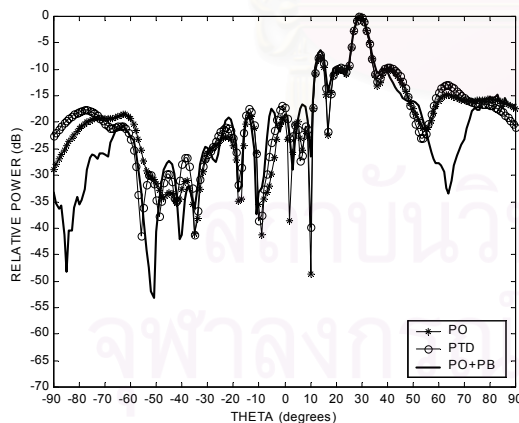


(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

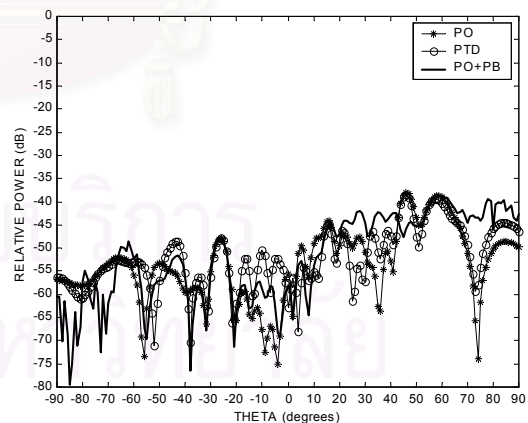


(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าจำนวน 37 แผ่น)

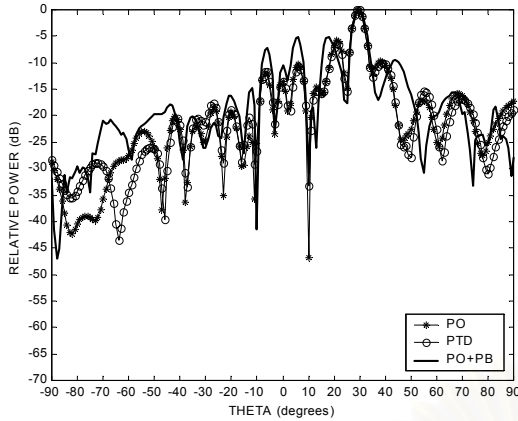


(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

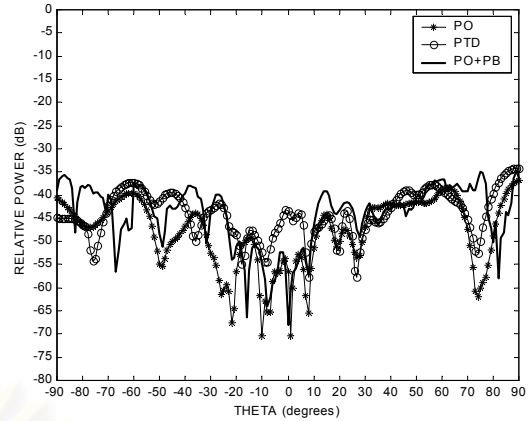


(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ด้วยแผ่นย่อยรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าจำนวน 38 แผ่น)



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

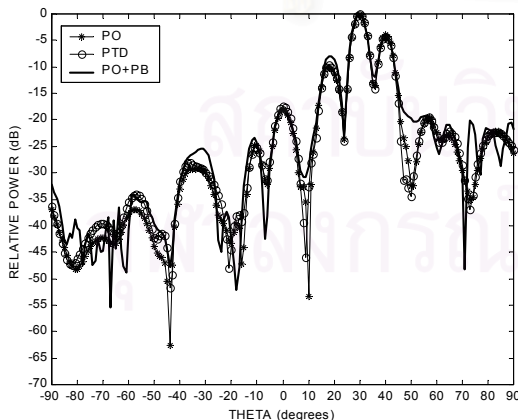


(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

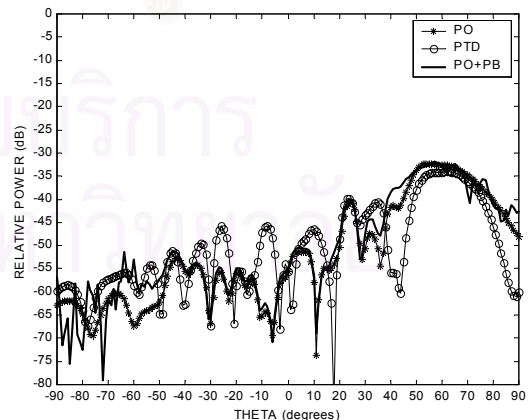
รูป 4.27 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่าจำนวน 38 แผ่น)

รูป 4.25 ถึง 4.27 แสดงให้เห็นผลของการบดบังจากแผ่นย่อยล้อมรอบและการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น เมื่อใช้แผ่นย่อยที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ที่มีต่อการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา จากการสังเกตพบว่า ระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์จะตื้นขึ้นเมื่อรวมผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบและการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ โดยจะแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดเมื่อระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ต่ำมากดังรูป 4.26 และ 4.27 แต่ไม่แสดงผลเท่าใดนักเมื่อระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ไม่ตื้นนักดังรูป 4.25 ระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ที่ตื้นขึ้นได้รับอิทธิพลจากการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบมากกว่าจากการเลี้ยวเบนที่ขอบ

นอกจากนี้เป็นที่น่าสังเกตว่า ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเกิดการบิดเบี้ยวอย่างมากตั้งแต่บริเวณพูซังแรกๆ เมื่อพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่าดังรูป 4.27ก

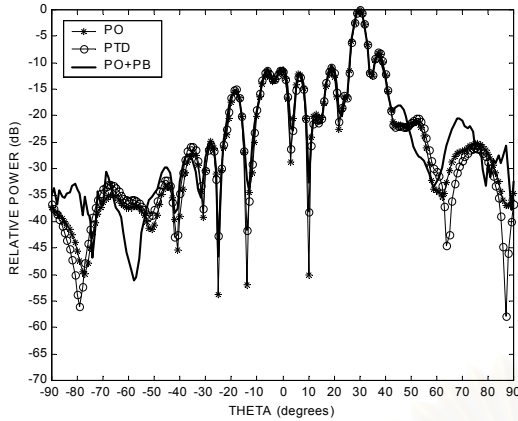


(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

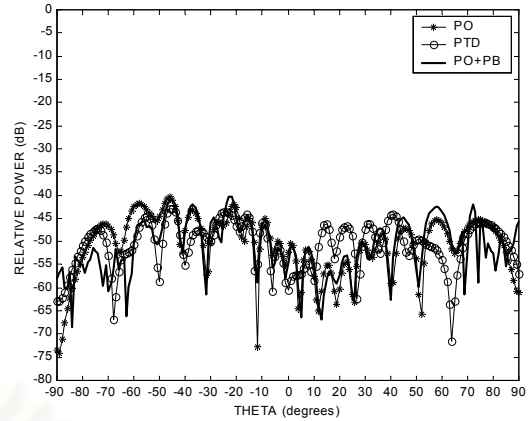


(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.28 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.25)

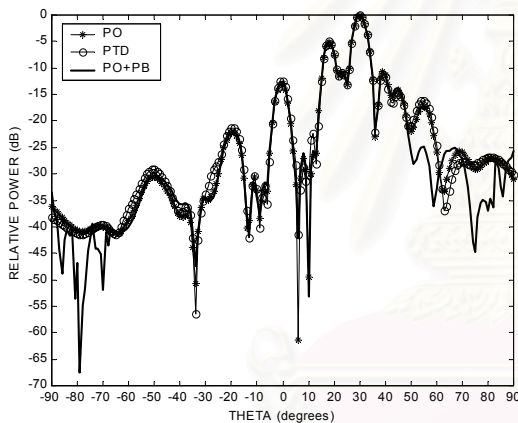


(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

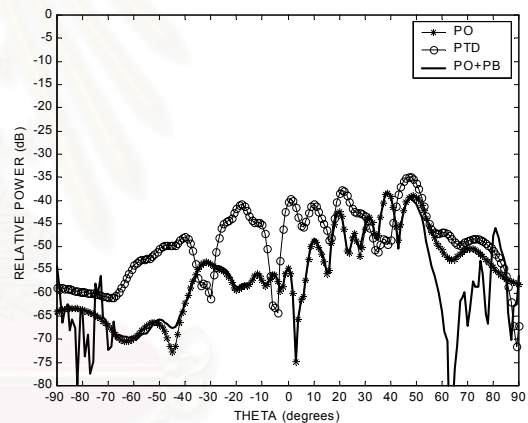


(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.29 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปรูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35)



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.30 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีเข้ารูปรูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.60)

จากรูป 4.28 ถึง 4.30 เมื่อเปลี่ยนรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะโดยเข้ารูปรูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  ต่างๆ ผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบและการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบจะส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันทั้งสองในลักษณะเดียวกันกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และมีระดับโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับพอๆ กัน แต่มีข้อสังเกตว่า ผลกระทบจากปรากฏการณ์ทั้งสองที่มีต่อระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์นั้นจะตื้นขึ้นน้อยลงเมื่อเข้ารูปรูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  มากขึ้น

อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ สำหรับการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์หลักต่างๆ ในกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และผลของการเลี้ยวเบนแสดงไว้ในตาราง 4.10

ตาราง 4.10 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ สำหรับการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์หลักต่างๆ ในกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และผลของการเลี้ยวเบน

ผลของการบดบังและการเลี้ยวเบน		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
แบนราบ		$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
ขนาดและจำนวนแผ่นย่อย	ผลกระทบ						
0.15 เมตร 19 แผ่น (แผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยม)	PTD	24.89	-12.96	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	17.34	12.20
	PO+PB	24.60	-17.16	$1.161 \times 10^{-3}$	69.67	16.38	11.41
พาราโบลอยด์		$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
รูปร่างของแผ่นย่อย	ผลกระทบ						
หกเหลี่ยม 37 แผ่น (ค่า $f/D = 0.35$ )	PTD	23.17	-18.20	$1.343 \times 10^{-3}$	80.58	10.19	8.21
	PO+PB	22.78	-19.04	$1.316 \times 10^{-3}$	78.95	9.50	7.50
สี่เหลี่ยม 38 แผ่น (ค่า $f/D = 0.35$ )	PTD	23.92	-14.59	$1.282 \times 10^{-3}$	76.92	12.70	9.77
	PO+PB	22.24	-16.38	$1.051 \times 10^{-3}$	63.07	10.52	6.63
สามเหลี่ยม 38 แผ่น (ค่า $f/D = 0.35$ )	PTD	22.22	-11.93	$1.233 \times 10^{-3}$	74.00	8.92	6.60
	PO+PB	16.47	-18.23	$0.871 \times 10^{-3}$	52.24	3.33	1.74
พาราโบลอยด์ (แผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยม)		$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
ค่า $f/D$	ผลกระทบ						
0.25 (จำนวน 19 แผ่น)	PTD	24.65	-9.43	$1.252 \times 10^{-3}$	75.15	15.38	11.56
	PO+PB	23.57	-8.40	$1.221 \times 10^{-3}$	73.29	12.28	9.00
0.35 (จำนวน 19 แผ่น)	PTD	24.69	-18.20	$1.285 \times 10^{-3}$	77.09	15.11	11.65
	PO+PB	23.93	-16.42	$1.237 \times 10^{-3}$	74.24	13.17	9.78
0.60 (จำนวน 19 แผ่น)	PTD	24.57	-10.40	$1.317 \times 10^{-3}$	79.03	14.35	11.34
	PO+PB	24.18	-14.01	$1.313 \times 10^{-3}$	78.77	13.16	10.36

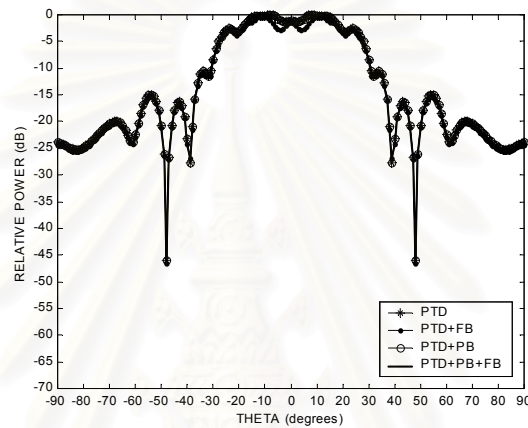
จากตาราง 4.10 การบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบที่มีต่อการเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา มีอิทธิพลมากขึ้นต่อการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วม เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่เลื่อนลำคลื่นไปที่มุมต่างๆ โดยไม่มีการสังเคราะห์ตำแหน่งศูนย์ที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ และเมื่อสังเกตดูพบว่า การจัดเรียงพื้นผิวสะท้อนในลักษณะแบนราบยังคงมีการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมน้อยกว่ากรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ และการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมน้อยลงเมื่อเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  มากขึ้น จากตาราง 4.5 และ 4.10 กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมน้อยลง 0.27 dB และกรณีเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.25, 0.35 และ 0.60 อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมน้อยลง 0.94, 0.75 และ 0.29 dB ตามลำดับ

นอกจากผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบที่พิจารณาจากการจัดเรียงรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้แล้ว ในตาราง 4.8 และ 4.10 ยังพบอีกว่า กรณีที่รูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 แต่ประกอบด้วยแผ่นย่อยที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ก็ยังส่งผลให้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมน้อยลงเนื่องจากการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบที่แตกต่างกันไป โดยอัตราขยายแนวโพลาริเซ-

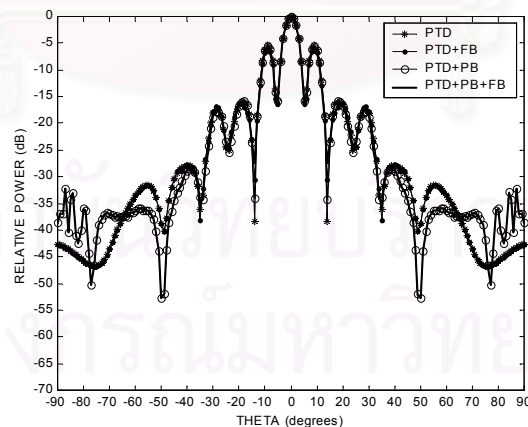


ชั้นร่วมลดลงอย่างมากถึง 5.44 dB เมื่อใช้แผ่นย้อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า และการลดลงของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมจะน้อยลงเมื่อใช้แผ่นย้อยรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า (1.56 dB) และแผ่นย้อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่า (0.47 dB) ตามลำดับ สำหรับผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบส่งผลต่อการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเพียงเล็กน้อย โดยจะมีการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเกิดขึ้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.31 dB

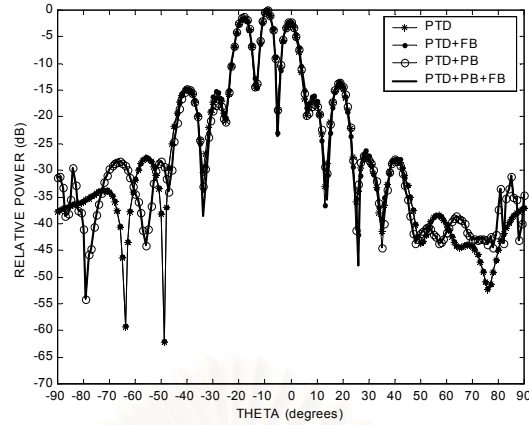
จากข้างต้นเป็นการศึกษาผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ และผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบที่มีต่อการเลื่อนลำคลื่นและการสร้างตำแหน่งศูนย์ รูป 4.31 ถึง 4.35 แสดงให้เห็นผลของการบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นในกรณีที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบดังรูป 4.1ก โดยใช้สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดที่มีขนาดความกว้างของช่องเปิด ( $a$ ) บนระนาบสนามแม่เหล็ก ( $X_f Z_f$ ) เท่ากับ 12.00 เซนติเมตร ขนาดความกว้างของช่องเปิด ( $b$ ) บนระนาบสนามไฟฟ้า ( $Y_f Z_f$ ) เท่ากับ 9.00 เซนติเมตร



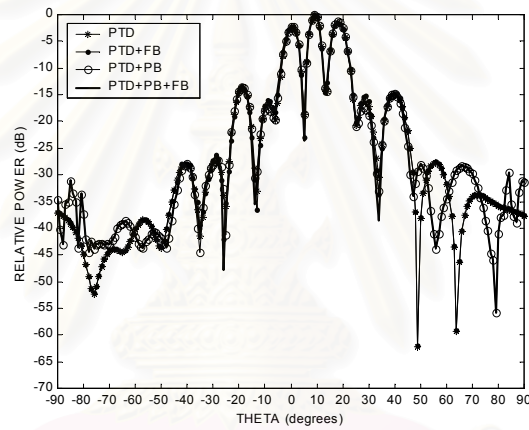
รูป 4.31 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อไม่มีการปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่นและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)



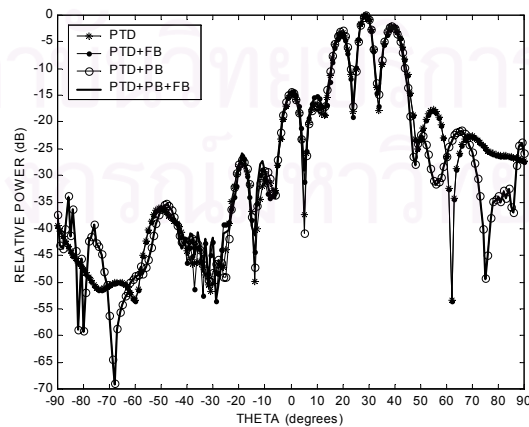
รูป 4.32 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่นและผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)



รูป 4.33 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม  $-10$  องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่นและผลของการเดี่ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)



รูป 4.34 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม  $10$  องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่นและผลของการเดี่ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)



รูป 4.35 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม  $30$  องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่นและผลของการเดี่ยวเบนที่ขอบ (กรณีจัดเรียงในลักษณะแบนราบ)

จากรูป 4.31 ถึง 4.35 พบว่า ผลของการบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นชนิดนี้ไม่ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ (ระดับโพลาริเซชันไขว้มีระดับต่ำมากจึงไม่ได้แสดงไว้) แต่ผลของการบดบังคลื่นจากสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดจะปรากฏอยู่บ้างในบางทิศทางดังเห็นได้จากรูป 4.31 การบดบังคลื่นจากสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดส่งผลในบริเวณพหุหลักโดยทำให้เกิดระลอกในบริเวณนั้น และจากรูป 4.35 ผลของการบดบังจะส่งผลให้เกิดการแกว่งไปแกว่งมาในบริเวณ  $-40^\circ \leq \theta \leq -30^\circ$

อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศ เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่น และผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบแสดงไว้ในตาราง 4.11

ตาราง 4.11 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ สายอากาศป้อนกำลังคลื่น และผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ

ผลของการบดบังและการเลี้ยวเบน		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	ผลกระทบ	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
ไม่ปรับพื้นผิว	- PO	12.04	-90.00	$5.069 \times 10^{-6}$	70.78	0.90	0.63
	- PTD	12.21	-90.00	$5.069 \times 10^{-6}$	70.78	0.93	0.66
	- PTD+FB	12.65	-78.54	$5.069 \times 10^{-6}$	70.78	1.03	0.73
	- PTD+PB	12.21	-90.00	$5.069 \times 10^{-6}$	70.78	0.93	0.66
	- PTD+PB+FB	12.65	-78.54	$5.069 \times 10^{-6}$	70.78	1.03	0.73
เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศา	- PO	24.55	-76.47	$5.333 \times 10^{-6}$	74.47	15.14	11.28
	- PTD	24.56	-76.47	$5.333 \times 10^{-6}$	74.47	15.20	11.32
	- PTD+FB	24.61	-75.50	$5.333 \times 10^{-6}$	74.47	15.35	11.43
	- PTD+PB	24.57	-40.52	$5.267 \times 10^{-6}$	73.55	15.42	11.34
	- PO+PB+FB	24.60	-40.52	$5.267 \times 10^{-6}$	73.55	15.54	11.43
เลื่อนลำคลื่นไป -10 องศา	- PO	22.68	-75.34	$5.314 \times 10^{-6}$	74.20	9.90	7.34
	- PTD	22.74	-75.34	$5.314 \times 10^{-6}$	74.20	10.02	7.43
	- PTD+FB	22.61	-73.02	$5.314 \times 10^{-6}$	74.20	9.72	7.21
	- PTD+PB	22.53	-39.50	$5.250 \times 10^{-6}$	73.30	9.68	7.09
	- PO+PB+FB	22.39	-39.50	$5.250 \times 10^{-6}$	73.30	9.36	6.86
เลื่อนลำคลื่นไป 10 องศา	- PO	22.68	-75.34	$5.314 \times 10^{-6}$	74.20	9.90	7.34
	- PTD	22.74	-75.34	$5.314 \times 10^{-6}$	74.20	10.02	7.43
	- PTD+FB	22.61	-73.02	$5.314 \times 10^{-6}$	74.20	9.72	7.21
	- PTD+PB	22.53	-39.50	$5.250 \times 10^{-6}$	73.30	9.68	7.09
	- PO+PB+FB	22.39	-39.50	$5.250 \times 10^{-6}$	73.30	9.36	6.86
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	- PO	22.34	-72.10	$5.162 \times 10^{-6}$	72.07	9.42	6.79
	- PTD	22.42	-72.10	$5.162 \times 10^{-6}$	72.07	9.58	6.91
	- PTD+FB	22.55	-68.24	$5.162 \times 10^{-6}$	72.07	9.88	7.12
	- PTD+PB	22.06	-37.54	$5.100 \times 10^{-6}$	71.22	8.92	6.35
	- PO+PB+FB	22.18	-37.54	$5.100 \times 10^{-6}$	71.22	9.19	6.54

หมายเหตุ FB คือคิดการบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

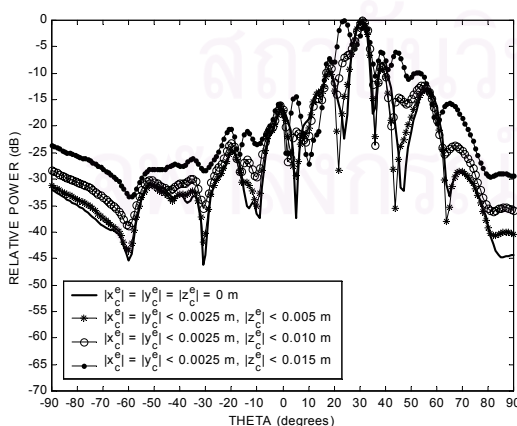
จากตาราง 4.11 นอกจากอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงเนื่องจากการบิดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบแล้ว ผลของการบิดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นยังทำให้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเกิดการแปรเปลี่ยน แต่การแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 0.13 dB) ยกเว้นกรณีที่ไม่ปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ที่มีการแปรเปลี่ยนเกิดขึ้นประมาณ 0.44 dB

#### 4.4 ผลของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ

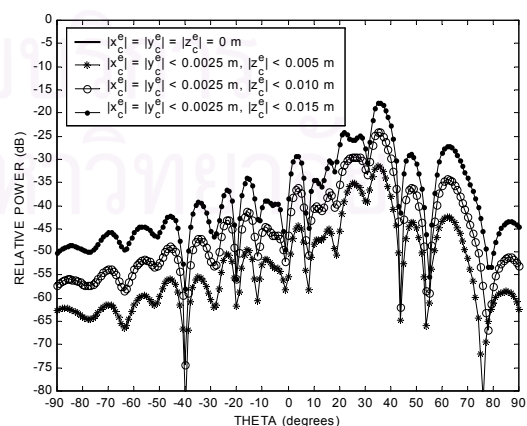
นอกจากค่าพารามิเตอร์และปรากฏการณ์ที่กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้านี้ สมรรถนะของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยอาจได้รับผลกระทบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากการติดตั้งระบบควบคุมทางกลหรือแรงดึงดูดของโลก เป็นต้น ในหัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งโดยแยกพิจารณาออกเป็นสามกรณีคือ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น ความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น และความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และศึกษาจากสายอากาศที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ที่จัดเรียงในลักษณะแบนราบ และกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์อื่นๆ มีค่าคงเดิมคือ ขนาดพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เมตร ( $16\lambda$ ) ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสองเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร ( $0.13\lambda$ ) และประกอบด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าจำนวน 19 แผ่น

##### 4.4.1 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

การพิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นนั้นทำได้โดยสร้างตัวแปรความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นที่เกิดขึ้นตามแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ( $\Delta x_c^e$ ,  $\Delta y_c^e$ ,  $\Delta z_c^e$ ) โดยตัวแปรที่สร้างขึ้นมีการกระจายแบบเอกรูป (uniform distribution) ในช่วง  $\Delta x_c^e = \Delta y_c^e = \pm 0.0025$  เมตร (หนึ่งในสี่ของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อย) และแปรค่า  $\Delta z_c^e$  ในช่วง  $\pm 0.005$ ,  $\pm 0.01$  และ  $\pm 0.015$  เมตรตามลำดับ หลังจากนั้นนำไปบวกเข้ากับจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นที่ไม่มี ความคลาดเคลื่อน ผลของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นที่มีต่อการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก และการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์กลางที่มุม 10 องศา เป็นดังรูป 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ

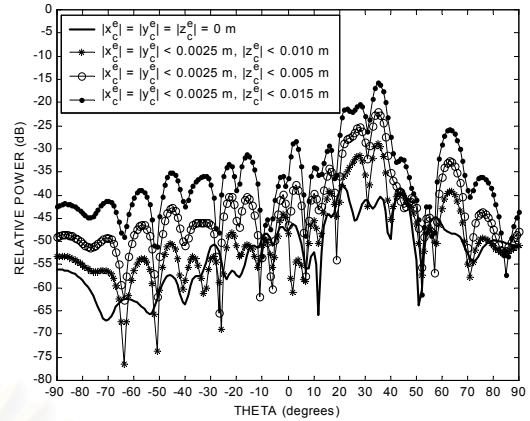
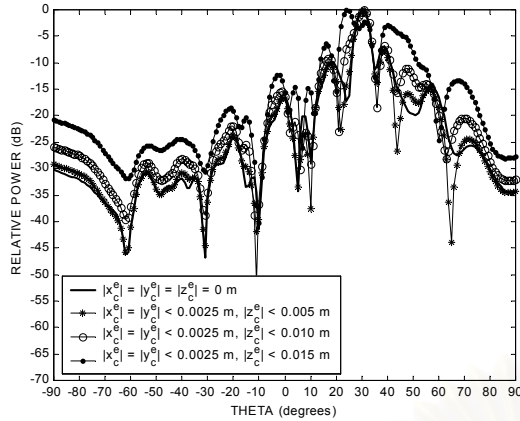


(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.36 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.37 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์กลางที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแต่ละแผ่น

จากรูป 4.36 และ 4.37 พบว่า ความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแต่ละแผ่นตามแนวแกน z (แกนของสายอากาศ) ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วม โดยทำให้พูซังยกระดับสูงขึ้นตั้งแต่พูซังแรกๆ เมื่อ  $|\Delta z_c^e| \leq 0.010$  เมตร ( $0.13\lambda$ ) และแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมผิดเพี้ยนไปมากเมื่อ  $|\Delta z_c^e| \leq 0.015$  เมตร ( $0.2\lambda$ ) นอกจากนี้ยังส่งผลให้ระดับโพลาริเซชันไขว้ยกระดับสูงขึ้นอย่างมาก โดยมีระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดต่ำกว่าระดับโพลาริเซชันร่วมมากที่สุดเพียง 15.80 dB เมื่อ  $|\Delta z_c^e| \leq 0.015$  เมตร

อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศเมื่อมีความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแต่ละแผ่นแสดงไว้ในตาราง 4.12

ตาราง 4.12 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแต่ละแผ่น

ความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อย		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	ระยะคลาดเคลื่อน	$G_{ep}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
เคลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	ไม่มี ความคลาดเคลื่อน	25.69	-72.76	$1.181 \times 10^{-3}$	70.87	20.13	14.68
เคลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และ $( \Delta x_c^e  \leq 0.0025,  \Delta y_c^e  \leq 0.0025)$	ตามแกน z $ \Delta z_c^e  \leq 0.005$	25.15	-6.39	$1.181 \times 10^{-3}$	70.85	18.27	12.94
	$ \Delta z_c^e  \leq 0.010$	22.47	-1.63	$1.180 \times 10^{-3}$	70.82	9.87	6.99
	$ \Delta z_c^e  \leq 0.015$	17.72	-0.07	$1.179 \times 10^{-3}$	70.80	3.31	2.34
เคลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์กลางที่ 10 องศา	ไม่มี ความคลาดเคลื่อน	24.87	-16.29	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	17.34	12.14



ตาราง 4.12 (ต่อ) อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

ความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลาง ของแผ่นย่อย		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	ระยะคลาดเคลื่อน	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และ มีตำแหน่งศูนย์กลาง ที่ 10 องศา และ ( $ \Delta x_c^e  \leq 0.0025$ , $ \Delta y_c^e  \leq 0.0025$ )	ตามแกน $z$ $ \Delta z_c^e  \leq 0.005$	24.18	-4.60	$1.172 \times 10^{-3}$	70.31	14.75	10.37
	$ \Delta z_c^e  \leq 0.010$	21.09	-0.97	$1.171 \times 10^{-3}$	70.28	7.24	5.09
	$ \Delta z_c^e  \leq 0.015$	15.85	0.05	$1.170 \times 10^{-3}$	70.25	2.14	1.52

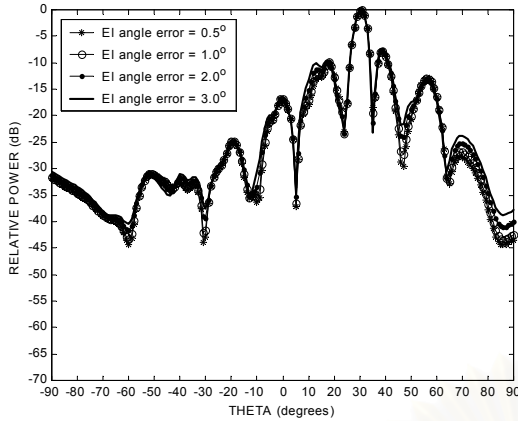
จากตาราง 4.12 อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงอย่างมากเมื่อมีความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเกิดขึ้นตามแนวแกนของสายอากาศ โดยความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นตามแนวแกนในช่วง  $|\Delta z_c^e| \leq 0.005$  เมตร ( $0.06 \lambda$ ) ก็ทำให้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลง 0.54 และ 0.69 dB สำหรับกรณีเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และกรณีเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์กลางที่มุม 10 องศา ตามลำดับ

#### 4.4.2 ความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

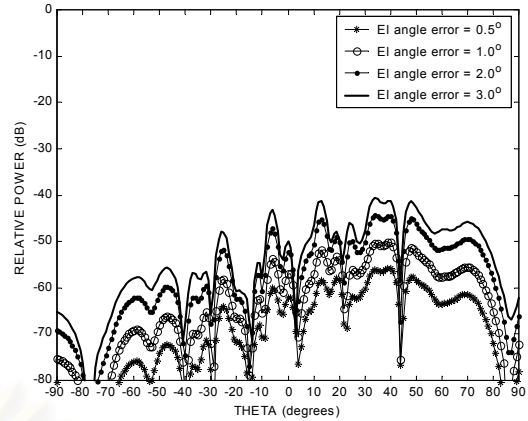
การพิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นนั้น เนื่องจากระบบควบคุมการปรับแผ่นย่อยในงานวิจัยนี้มีความละเอียดของการหมุนแผ่นย่อยเท่ากับ 0.05 องศาต่อขั้น ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไป ในหัวข้อย่อยนี้จึงพิจารณาความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกนทิศและแกนทิศของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น โดยกำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกนทิศมีการกระจายแบบเอกรูปในช่วงความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.25$  องศา และแปรค่าความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกนยกให้มีการกระจายแบบเอกรูปในช่วงความคลาดเคลื่อน  $\pm 0.5$ ,  $\pm 1.0$ ,  $\pm 2.0$  และ  $\pm 3.0$  องศา ตามลำดับ

ผลของความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นที่มีต่อการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 10, 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก และการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์กลางที่มุม 10 องศา เป็นดังรูป 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ

จากรูป 4.38 พบว่า ความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นรอบแกนทิศและแกนยกไม่ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วม แต่จะส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ โดยระดับโพลาริเซชันไขว้มีระดับสูงขึ้น เมื่อช่วงความคลาดเคลื่อนกว้างมากขึ้น สังเกตว่าลักษณะรูปร่างของแบบรูปการแผ่พลังงานในทั้งสองโพลาริเซชันมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดมีการยกระดับขึ้นถึง 14.45 dB เมื่อช่วงความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกนยกเพิ่มขึ้นจาก 0.5 องศา ไปเป็น 3 องศา

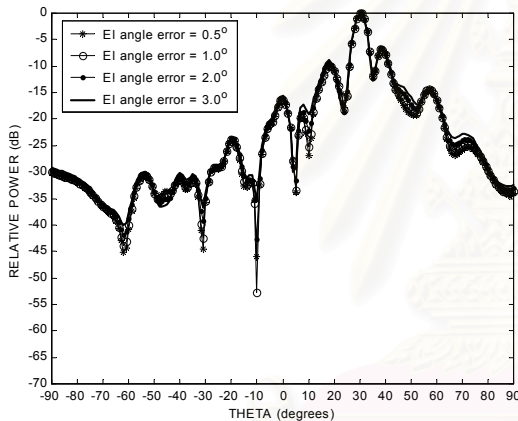


(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

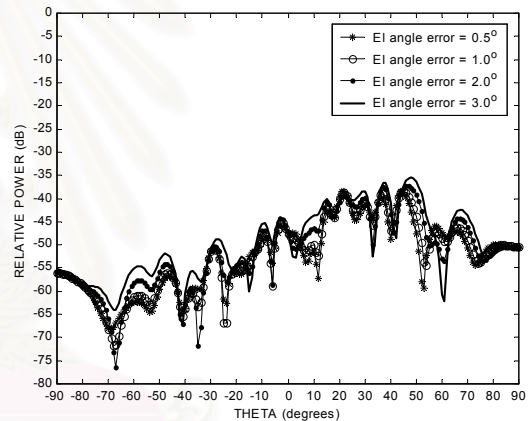


(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.38 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.39 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

สำหรับรูป 4.39 ความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นรอบแกนทิศและแกนยกไม่ทำให้ระดับโพลาริเซชันไขว้ยกกระดับสูงขึ้นเท่าไร เนื่องจากระดับโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้นในกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา มีระดับที่สูงอยู่พอสมควรอยู่แล้ว แต่จะส่งผลต่อระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ โดยระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์จะตื้นขึ้น เมื่อช่วงความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกนยกเพิ่มขึ้น

อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศเมื่อมีความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นแสดงไว้ในตาราง 4.13

ตาราง 4.13 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น

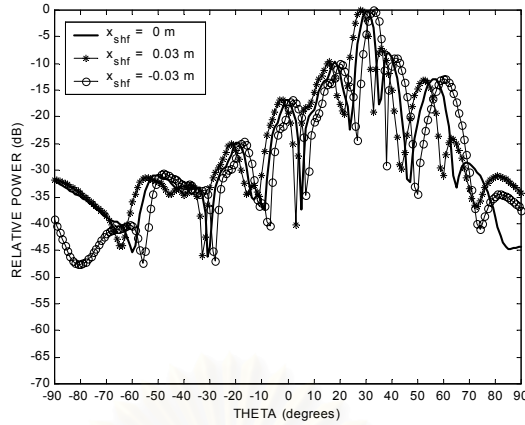
ความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไป ของแผ่นย่อย		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	มุมที่คลาดเคลื่อน	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	ไม่มี ความคลาดเคลื่อน	25.69	-72.76	$1.181 \times 10^{-3}$	70.87	20.13	14.68
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมี ความคลาดเคลื่อน รอบแกนทิศ $ \Delta\phi_{rot}^e  \leq 0.25^\circ$	รอบแกนยก $ \Delta\theta_{rot}^e  \leq 0.5^\circ$	25.55	-30.22	$1.182 \times 10^{-3}$	70.90	20.03	14.20
	$ \Delta\theta_{rot}^e  \leq 1.0^\circ$	25.49	-24.78	$1.182 \times 10^{-3}$	70.93	19.74	14.01
	$ \Delta\theta_{rot}^e  \leq 2.0^\circ$	25.25	-19.12	$1.183 \times 10^{-3}$	70.99	18.68	13.26
	$ \Delta\theta_{rot}^e  \leq 3.0^\circ$	24.86	-15.77	$1.184 \times 10^{-3}$	71.03	17.06	12.12
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และ มีตำแหน่งศูนย์ ที่ 10 องศา	ไม่มี ความคลาดเคลื่อน	24.87	-16.29	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	17.34	12.14
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และ มีตำแหน่งศูนย์ ที่ 10 องศา และมี ความคลาดเคลื่อน รอบแกนทิศ $ \Delta\phi_{rot}^e  \leq 0.25^\circ$	รอบแกนยก $ \Delta\theta_{rot}^e  \leq 0.5^\circ$	24.89	-13.52	$1.173 \times 10^{-3}$	70.37	17.35	12.21
	$ \Delta\theta_{rot}^e  \leq 1.0^\circ$	24.86	-13.57	$1.173 \times 10^{-3}$	70.40	17.23	12.13
	$ \Delta\theta_{rot}^e  \leq 2.0^\circ$	24.70	-12.69	$1.174 \times 10^{-3}$	70.46	16.57	11.67
	$ \Delta\theta_{rot}^e  \leq 3.0^\circ$	24.39	-11.11	$1.175 \times 10^{-3}$	70.51	15.42	10.87

จากตาราง 4.13 จะเห็นได้ว่า อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลง และอัตราขยายแนวโพลาริเซชันไขว้เพิ่มขึ้น เมื่อช่วงความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกนยกเพิ่มมากขึ้น การลดลงของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมนั้นเกิดขึ้นถึง 0.69 dB เมื่อ  $|\Delta\theta_{rot}^e| \leq 3.0^\circ$

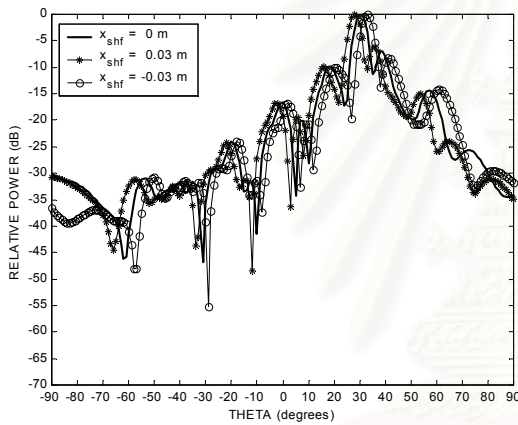
#### 4.4.3 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

ในหัวข้อย่อยนี้ได้ศึกษาผลของการเลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น โดยกำหนดให้ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งเกิดขึ้นตามแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  เป็น  $\Delta x_{shf} = \pm 0.03$ ,  $\Delta y_{shf} = \pm 0.03$  และ  $\Delta z_{shf} = \pm 0.02$  เมตรตามลำดับ

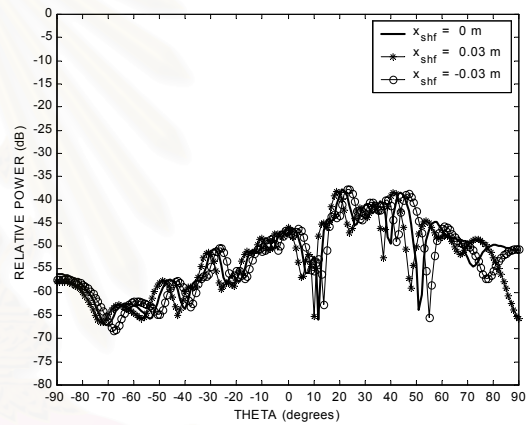
ผลของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นดังกล่าวมีต่อการเลื่อนลำคลื่นไปที่มีมุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก และการเลื่อนลำคลื่นไปที่มีมุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มีมุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็กแสดงดังรูป 4.40 ถึง 4.45



รูป 4.40 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน  $x$



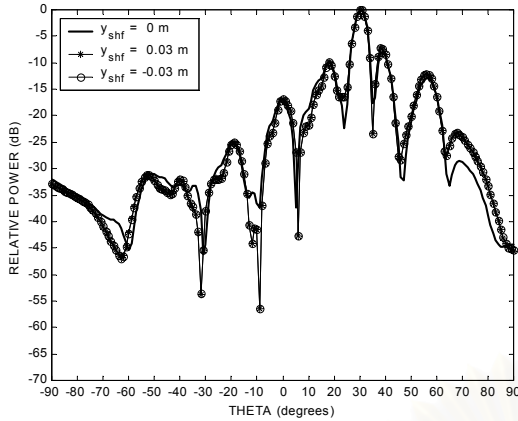
(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



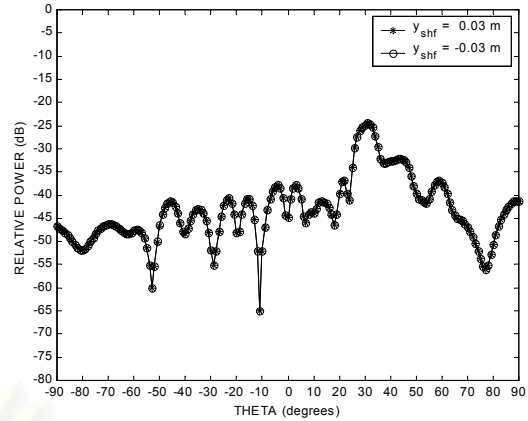
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.41 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน  $x$

จากรูป 4.40 และ 4.41 พบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้เกิดการเลื่อนไปทั้งแบบรูป เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน  $x$  ซึ่งเป็นแกนที่อยู่บนระนาบสนามแม่เหล็กที่มีการเลื่อนของลำคลื่นเกิดขึ้น โดยการเลื่อนไปของแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น จากปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้สร้างรูปร่างลำคลื่นแบบหลายลำคลื่น (multi-beam shape) ได้โดยใช้สายอากาศชนิดแถวลำดับเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

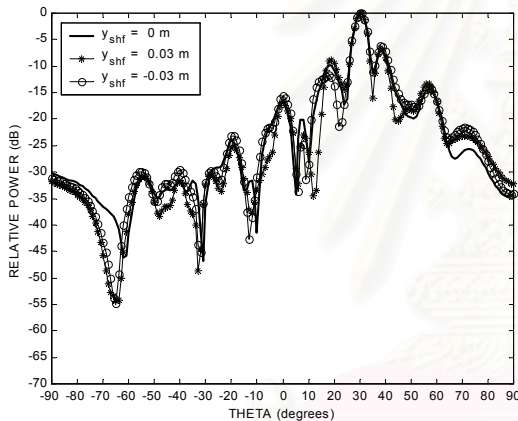


(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

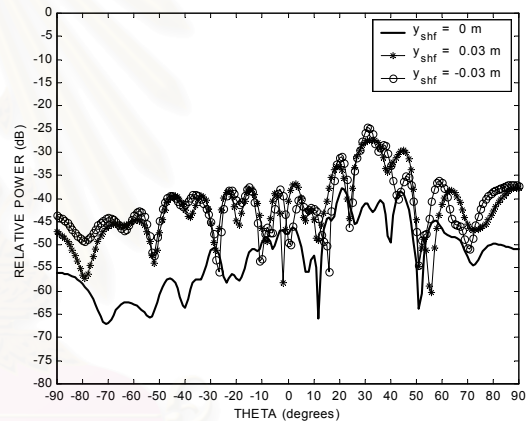


(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.42 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน y



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



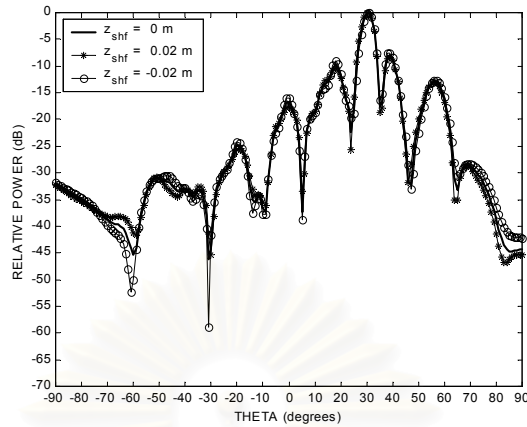
(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.43 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน y

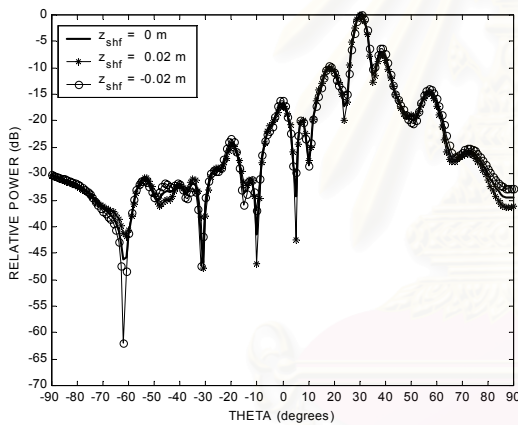
จากรูป 4.42 และ 4.43 พบว่า ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน y ซึ่งเป็นแกนที่ตั้งฉากกับระนาบสนามแม่เหล็กที่มีการเลื่อนไปของลำคลื่นเกิดขึ้น ไม่ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วม แต่จะส่งผลอย่างมากต่อระดับโพลาริเซชันไขว้ดังเห็นได้จากรูป 4.42ข ว่า ในกรณีที่ไม่มี ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน y ( $\Delta y_{shf} = 0$ ) นั้น ระดับโพลาริเซชันไขว้มีระดับต่ำมากจนไม่แสดงในรูป 4.42ข ได้ แต่เมื่อมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ( $\Delta y_{shf} = \pm 0.03$  เมตร) ระดับโพลาริเซชันไขว้ยก ระดับสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดต่ำกว่าระดับโพลาริเซชันร่วมมากที่สุดเพียง 24.46 dB ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกนที่ไม่ได้อยู่ในระนาบที่เกิดการเลื่อนลำคลื่น ส่งผลให้เกิดความไม่สมมาตรของการกระจายกระแสเมื่อสังเกตจากระนาบที่เกิดการเลื่อนลำคลื่น นั้นเนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเกิดความไม่สมมาตร นอกจากนี้จากรูป 4.43ก สังเกต



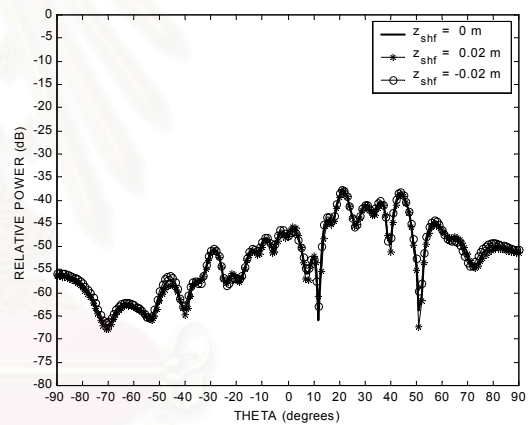
ว่า ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังเคลื่อนไปตามแนวแกน  $y$  ยังส่งผลต่อระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ และทำให้ตำแหน่งศูนย์เคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ต้องการ



รูป 4.44 แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังเคลื่อนไปตามแนวแกน  $z$



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม



(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.45 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังเคลื่อนไปตามแนวแกน  $z$

จากรูป 4.44 และ 4.45 พบว่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังเคลื่อนไปตามแนวแกน  $z$  ไม่ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ แต่ส่งผลบ้างกับระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์

อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังเคลื่อนแสดงไว้ในตาราง 4.14

ตาราง 4.14 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	ระยะคลาดเคลื่อน	$G_{cp}^{steer}$ (dB)	$G_{xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	ไม่มีความคลาดเคลื่อน	25.69	-72.76	$1.181 \times 10^{-3}$	70.87	20.13	14.68
	ตามแกน x						
	$\Delta x_{shf} = 0.03$	25.55	-75.51	$1.186 \times 10^{-3}$	71.15	19.96	14.20
	$\Delta x_{shf} = -0.03$	25.64	-71.42	$1.173 \times 10^{-3}$	70.39	20.61	14.50
	ตามแกน y						
	$\Delta y_{shf} = 0.03$	23.69	-0.77	$1.179 \times 10^{-3}$	70.77	13.08	9.26
	$\Delta y_{shf} = -0.03$	23.69	-0.77	$1.179 \times 10^{-3}$	70.77	13.08	9.26
	ตามแกน z						
	$\Delta z_{shf} = 0.02$	25.69	-72.88	$1.157 \times 10^{-3}$	69.40	21.16	14.69
	$\Delta z_{shf} = -0.02$	25.36	-72.68	$1.206 \times 10^{-3}$	72.34	18.79	13.59
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่ 10 องศา	ไม่มีความคลาดเคลื่อน	24.87	-16.29	$1.172 \times 10^{-3}$	70.33	17.34	12.14
	ตามแกน x						
	$\Delta x_{shf} = 0.03$	24.93	-13.29	$1.177 \times 10^{-3}$	70.59	17.47	12.33
	$\Delta x_{shf} = -0.03$	25.02	-12.69	$1.164 \times 10^{-3}$	69.89	17.99	12.57
	ตามแกน y						
	$\Delta y_{shf} = 0.03$	23.56	-3.83	$1.171 \times 10^{-3}$	70.24	12.79	8.98
	$\Delta y_{shf} = -0.03$	22.51	-2.24	$1.170 \times 10^{-3}$	70.23	10.04	7.05
	ตามแกน z						
	$\Delta z_{shf} = 0.02$	25.15	-12.96	$1.148 \times 10^{-3}$	68.88	18.81	12.96
	$\Delta z_{shf} = -0.02$	24.66	-13.02	$1.196 \times 10^{-3}$	71.78	16.11	11.57

จากตาราง 4.14 ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน y ทำให้อัตราขยายแนวโพลาไรเซชันรวมลดลงประมาณ 2 และ 1.31 dB สำหรับกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และกรณีเลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา และมีตำแหน่งศูนย์ที่มุม 10 องศา ตามลำดับ ส่วนความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกน x และ z ทำให้เกิดการแปรเปลี่ยนอัตราขยายแนวโพลาไรเซชันรวมเพียงเล็กน้อย

#### 4.5 บทประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้

##### 4.5.1 การเลื่อนลำคลื่นและการสร้างตำแหน่งศูนย์สำหรับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

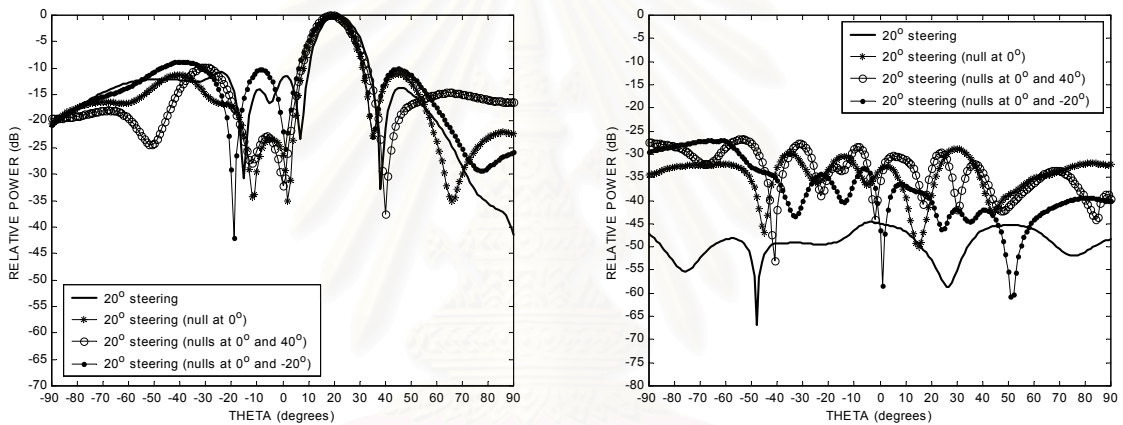
หัวข้อย่อนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการเลื่อนลำคลื่นไป และการสร้างตำแหน่งศูนย์มากกว่าหนึ่งทิศทางเพื่อประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้สายอากาศที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบ และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เมตร ( $7.2\lambda$ ) ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสองเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.01 เมตร ( $0.06\lambda$ ) และประกอบด้วย

แผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าจำนวน 19 แผ่น ทำงานที่ความถี่ 1800 MHz มาสังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีการเลื่อนลำคลื่น และตำแหน่งศูนย์ดังตาราง 4.15

ตาราง 4.15 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ที่ต้องการในการสังเคราะห์การเลื่อนลำคลื่นและสร้างตำแหน่งศูนย์ สำหรับประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

กรณี	ทิศทางเลื่อนลำคลื่น	ตำแหน่งศูนย์ที่ 1	ตำแหน่งศูนย์ที่ 2
1	20 องศา อัตราขยาย 19 dB	-	-
2	20 องศา อัตราขยาย 19 dB	0 องศา อัตราขยาย -20 dB	-
3	20 องศา อัตราขยาย 19 dB	0 องศา อัตราขยาย -20 dB	40 องศา อัตราขยาย -20 dB
4	20 องศา อัตราขยาย 19 dB	0 องศา อัตราขยาย -20 dB	-20 องศา อัตราขยาย -20 dB

จากการสังเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทำให้เหมาะสมที่สุด แบบรูปการแผ่พลังงานที่สังเคราะห์ได้เป็นดังรูป 4.46



(ก) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วม

(ข) องค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้

รูป 4.46 แบบรูปการแผ่พลังงานเมื่อมีการเลื่อนลำคลื่นไป และการสร้างตำแหน่งศูนย์มากกว่าหนึ่งทิศทาง ในระนาบสนามแม่เหล็ก สำหรับประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

แบบรูปการแผ่พลังงานที่สังเคราะห์ได้ดังรูป 4.46 เกิดจากการใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ โดยมีได้รวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ จากรูป 4.46 เห็นได้ว่า สายอากาศที่ใช้สามารถสร้างแบบรูปการแผ่พลังงานได้ตามที่กำหนดไว้ดังตาราง 4.15 และระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดที่ได้มีระดับต่ำกว่าระดับโพลาริเซชันร่วมมากที่สุดประมาณ -25 dB

จากตาราง 4.16 สังเกตว่าในกรณีที่ 3 อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมที่ได้มีค่าต่ำกว่าที่กำหนดไว้อยู่ประมาณ 2.47 dB ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากจำนวนของการวนซ้ำเกินค่ามากที่สุดที่ตั้งไว้ จึงทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้

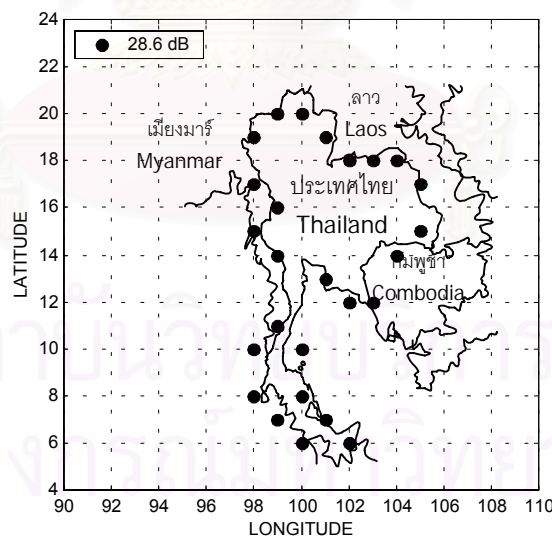
ตาราง 4.16 อัตราขยายและประสิทธิภาพต่างๆ ในกรณีประยุกต์ใช้งานกับสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

บทประยุกต์สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ					
กรณี	ET (dB)	$G_{ep}^{steer}$ (dB)	$G_{Xp}^{max}$ (dB)	$P_r$ (วัตต์)	$\eta_s$ (%)	$\eta_A$ (%)	$\eta$ (%)
1	-17.32	19.34	-25.31	$1.617 \times 10^{-3}$	97.03	17.29	16.78
2	-17.32	18.38	-10.47	$1.504 \times 10^{-3}$	90.27	14.91	13.46
3	-17.32	16.53	-10.15	$1.490 \times 10^{-3}$	89.41	9.83	8.79
4	-17.32	18.12	-8.87	$1.499 \times 10^{-3}$	89.96	14.10	12.68

#### 4.5.2 การสร้างลวดลื่นครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยสำหรับดาวเทียมค้างฟ้า

นอกจากการประยุกต์ใช้งานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แล้ว ในหัวข้อย่อยนี้ได้สร้างลวดลื่นครอบคลุมเพื่อประยุกต์ใช้งานสื่อสารดาวเทียมให้มีพื้นที่ให้บริการครอบคลุมประเทศไทยที่มีพิกัดบนโลกระหว่างละติจูด 5 ถึง 21 องศาเหนือและลองจิจูด 98 ถึง 106 องศาตะวันออก โดยกำหนดให้ตำแหน่งวงโคจรดาวเทียมค้างฟ้าอยู่ที่ลองจิจูด 101 องศาตะวันออก และตำแหน่งมุมเงยของสายอากาศอยู่ที่ละติจูด 14 องศาเหนือ ลองจิจูด 101 องศาตะวันออก ตำแหน่งจุดสังเกตบนโลกแสดงอยู่ในระบบพิกัดละติจูดและลองจิจูด [59]

ค่าปัจจัยต่างๆ ของสายอากาศที่ใช้สังเคราะห์คือ สายอากาศมีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณที่มีค่า  $f/D$  เท่ากับ 0.35 และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.2 เมตร (16  $\lambda$ ) ใช้สายอากาศชนิดโคไซน์กำลังสองเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น โดยกำหนดให้ช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเท่ากับ 0.005 เมตร (0.06  $\lambda$ ) และประกอบด้วยแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าจำนวน 37 แผ่น ทำงานที่ความถี่ 4 GHz และอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมที่ต้องการบนพื้นที่ให้บริการเป็นดังรูป 4.47



รูป 4.47 อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมที่ต้องการบนพื้นที่ให้บริการครอบคลุมประเทศไทย

จากการสังเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทำให้เหมาะสมที่สุด พื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เป็นดังรูป 4.48





แบบรูปการแผ่พลังงานที่สังเคราะห์ได้ดังรูป 4.49 และ 4.50 เกิดจากการใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ จากรูป 4.49 และ 4.50 เห็นได้ว่า สายอากาศที่สังเคราะห์สามารถจัดรูปลำคลื่นครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยตามอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมที่ต้องการ และอัตราขยายแนวโพลาริเซชันไขว้มากที่สุด ในบริเวณพื้นที่ให้บริการมีค่า  $-17.4$  dB ต่ำกว่าอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมมากที่สุด  $47.1$  dB ซึ่งอยู่ในวิสัยที่นำมาใช้งานสื่อสารดาวเทียมได้ตามข้อกำหนดของสถาบัน CCIR



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

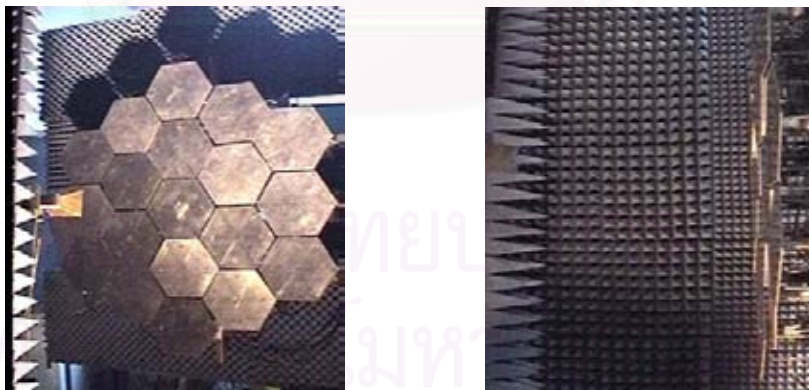
## บทที่ 5 การทดสอบสายอากาศ

### ความนำ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยต้นแบบ ผู้วิจัยได้ทดสอบสมรรถนะของการเลื่อนลำคลื่นเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีวิเคราะห์ที่ได้เสนอไว้ในบทที่ 3 ซึ่งจะให้เห็นความสามารถในการทำนายลักษณะสมบัติของสายอากาศของระเบียบวิธีวิเคราะห์ และสมรรถนะของสายอากาศที่ด้อยลงเนื่องจากค่าพารามิเตอร์บางประการที่ได้วิเคราะห์ไว้ในบทที่ 4 การทดสอบสายอากาศต้นแบบในที่นี่ได้ใช้การทดสอบสายอากาศย่านสนามใกล้เชิงระนาบ [60] การทดสอบด้วยวิธีการนี้อาจไม่สามารถทำให้เห็นรายละเอียดบนแบบรูปการแผ่พลังงานที่มุมมองคาใกล้ๆ ได้ แต่ก็สามารถให้รายละเอียดที่บ่งบอกถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และผลจากค่าพารามิเตอร์บางประการ เช่น ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นได้ในระดับหนึ่ง

### 5.1 รายละเอียดของการทดสอบสายอากาศ

การทดสอบสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยนั้น ต้นแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยที่นำมาทดสอบทำงานที่ความถี่ปฏิบัติการ 4 GHz และจัดเรียงให้พื้นผิวสะท้อนเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้เป็นแผ่นแบนราบมีขนาดประมาณ 1.2 เมตร ( $16\lambda$ ) พื้นผิวสะท้อนเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้นี้ประกอบด้วยแผ่นย่อยอะลูมิเนียมรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าที่มีความยาวแต่ละด้านเท่ากับ 15 เซนติเมตร ( $2\lambda$ ) จำนวน 19 แผ่น และจัดวางให้ศูนย์กลางวงภาค (phase center) ของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นอยู่เหนือขึ้นไปจากจุดกึ่งกลางของพื้นผิวสะท้อนเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้เป็นระยะ 72 เซนติเมตรดังรูป 5.1 โดยใช้สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดดังรูป 5.2 เป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น



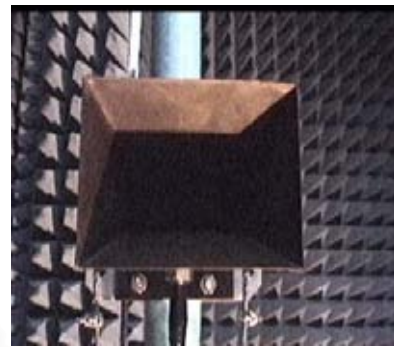
รูป 5.1 ต้นแบบของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยที่นำมาทดสอบ

สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดที่ใช้ทำด้วยทองเหลืองมีลักษณะทางกายภาพเป็นดังนี้คือ ขนาดความกว้างของช่องเปิด ( $a$ ) บนระนาบสนามแม่เหล็ก ( $X_f, Z_f$ ) เท่ากับ 12.00 เซนติเมตร ขนาดความกว้างของช่องเปิด ( $b$ ) บนระนาบสนามไฟฟ้า ( $Y_f, Z_f$ ) เท่ากับ 9.00 เซนติเมตร รัศมีความโค้งของหน้าคลื่นที่ช่องเปิดบนระนาบสนามไฟฟ้า ( $\rho_1$ ) เท่ากับ 9.19 เซนติเมตร รัศมีความโค้งของหน้าคลื่นที่ช่องเปิดบนระนาบสนามแม่เหล็ก ( $\rho_2$ ) เท่ากับ 12.00 เซนติเมตร มีศูนย์กลางวงภาคห่างจากช่องเปิด 2.40 เซนติเมตร และกำหนดให้มีโพลาริเซชันอยู่ตามแนวแกน  $y$  หรือ  $Y_f$  แบบรูปการ

แผ่พลังงานย่านสนามไกลจากการทดสอบในย่านสนามไกลและจากการคำนวณทางทฤษฎี [47] บนระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็กเป็นดังรูป 5.3 และ 5.4

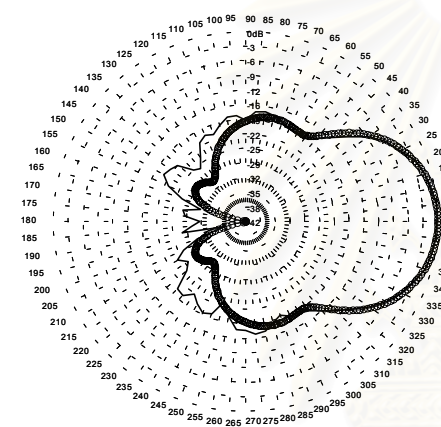


(ก)

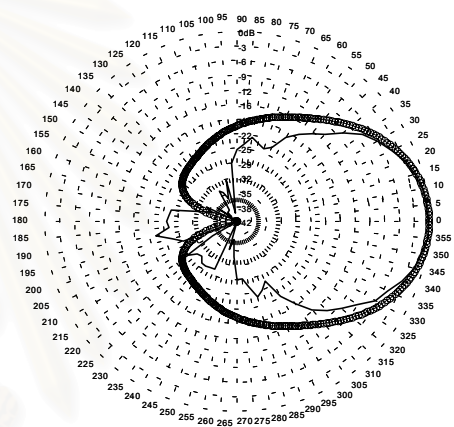


(ข)

รูป 5.2 สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดที่ใช้เป็นสายอากาศบ่อนำคลื่น



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

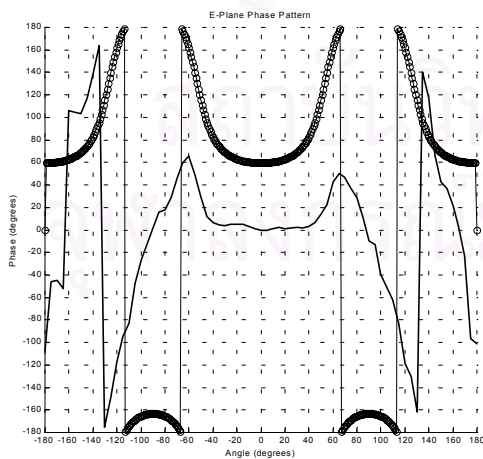


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

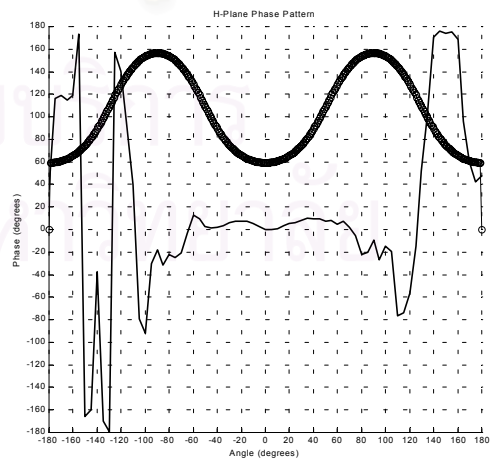
รูป 5.3 แบบรูปขนาดในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด

○ ผลคำนวณทางทฤษฎี

— ผลการวัด



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก

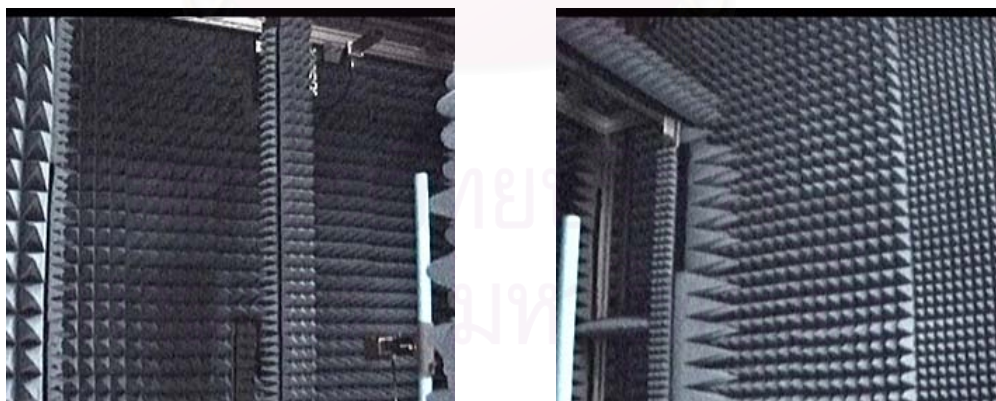
รูป 5.4 แบบรูปวิถีภาคในแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด

○ ผลคำนวณทางทฤษฎี

— ผลการวัด

จากรูป 5.3 และ 5.4 จะเห็นว่า แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลขององค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วมของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดในช่วงองศาตั้งแต่  $-39.80$  ถึง  $39.80$  องศา ซึ่งเป็นช่วงที่สายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดแผ่พลังงานมาตกกระทบพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้สอดคล้องกับผลคำนวณทางทฤษฎีเป็นอย่างดีในแบบรูปขนาด และแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยบนแบบรูปวิถีภาคในระนาบสนามแม่เหล็ก ดังนั้นผลการคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของสายอากาศชนิดจันสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอยที่นำมาเปรียบเทียบกับผลการวัดในทันทีจึงใช้แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดจากผลคำนวณทางทฤษฎี อย่างไรก็ตาม ผลคำนวณทางทฤษฎีไม่สามารถให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่ถูกต้องนักในบริเวณพหุหลัง เนื่องจากว่าในบริเวณพหุหลังของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดได้รับผลกระทบจากสนามเลี้ยวเบนที่ขอบของช่องเปิด สนามเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นนี้มีทั้งองค์ประกอบแนวโพลาริเซชันร่วมและแนวโพลาริเซชันไขว้ ซึ่งองค์ประกอบแนวโพลาริเซชันไขว้จะทำให้ระดับโพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศชนิดจันสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นยอยมีระดับสูงขึ้นและไม่ตรงกับที่คำนวณได้ทางทฤษฎี

จากลักษณะทางกายภาพของสายอากาศทดสอบดังรูป 5.1 สายอากาศทดสอบนี้มีขนาดทางไฟฟ้าใหญ่และมีน้ำหนักมากพอสมควร ทำให้การเคลื่อนย้ายและการทดสอบสายอากาศโดยวิธีการทดสอบในย่านทดสอบสนามไกลทำได้ยาก เนื่องจากต้องมีอุปกรณ์หมุนสายอากาศที่รับน้ำหนักได้และยังต้องใช้ระยะทดสอบไกลมากประมาณ 45 เมตร นอกจากนี้ยังไม่สามารถควบคุมการรบกวนจากสภาพแวดล้อมได้ เพื่อลดปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้การทดสอบสายอากาศย่านสนามใกล้เชิงระนาบ เนื่องจากสามารถลดระยะทดสอบลงและไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์หมุนสายอากาศ อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบสายอากาศด้วยวิธีนี้มีขีดจำกัดคือ ขนาดของระนาบกวาดวัดที่มีขนาดจำกัด ทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลมีความเชื่อถือได้ในช่วงองศาหนึ่งบนแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลที่ได้ องศาที่เชื่อถือได้ ( $\theta_{cov}$ ) บนแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลจากการแปลงข้อมูลสนามไฟฟ้าที่กวาดวัดค่าได้นั้นสามารถหาได้จากมุมที่เกิดจากเส้นที่ลากจากขอบมาตั้งฉากกับระนาบกวาดวัดกับเส้นจากขอบของพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ไปถึงขอบของระนาบกวาดวัด



รูป 5.5 สภาพภายในห้องทดสอบและระนาบกวาดวัดของการทดสอบสายอากาศย่านสนามใกล้เชิงระนาบ

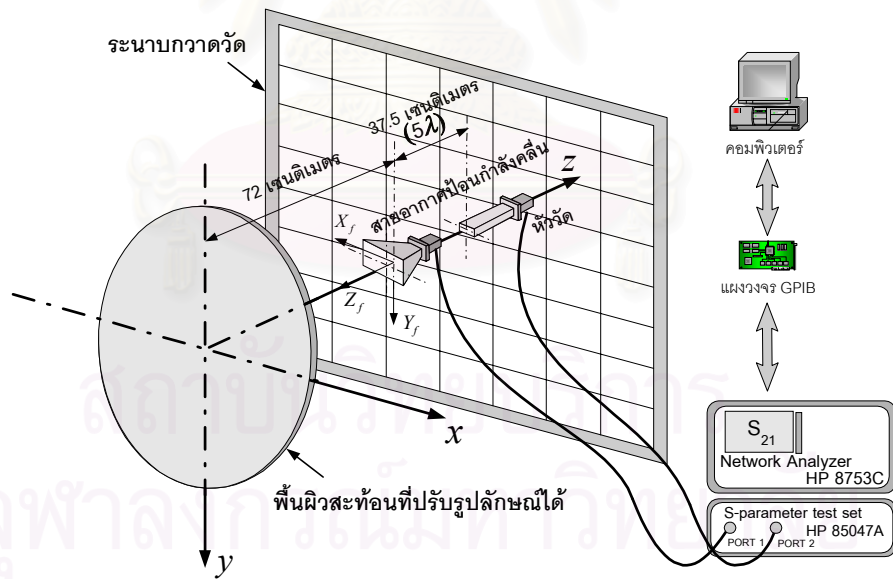
การทดสอบสายอากาศย่านสนามใกล้เชิงระนาบที่ใช้ในที่นี้มีขนาดของระนาบกวาดวัดเท่ากับ  $196.875$  เซนติเมตร  $\times$   $196.875$  เซนติเมตร ติดตั้งอยู่ในห้องทดสอบขนาดความกว้าง  $4.00$  เมตร  $\times$  ความยาว  $6.00$  เมตร  $\times$  ความสูง  $4.00$  เมตรโดยภายในห้องทดสอบติดตั้งชุดดูคลื่นคลื่นดังรูป 5.5 และใช้เครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจร (network analyzer) รุ่น HP8753C ที่ต่ออยู่กับชุดทดสอบค่าพารามิเตอร์เอส (S-parameter test set) รุ่น HP85047A โดยเชื่อมต่อ



กับคอมพิวเตอร์ผ่านแผงวงจร GPIB จากนั้นต่อสายจากพอร์ต 1 ของชุดทดสอบค่าพารามิเตอร์เอสไปยังสายอากาศทดสอบและต่อสายจากพอร์ต 2 ของชุดทดสอบค่าพารามิเตอร์เอสไปยังหัววัด เพื่อวัดค่า  $S_{21}$  และตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรในการทดสอบเป็นดังนี้

1. กำลังคลื่นเป็น 20 dBm และเมื่อต่อผ่านชุดทดสอบค่าพารามิเตอร์เอส กำลังคลื่นตกลงเหลือเพียง -24.26 dBm
2. ความกว้างแถบความถี่กลาง (IF Bandwidth) เป็น 10 Hz เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ
3. ช่วงความถี่บนหน้าจอ (span) เป็นศูนย์ และตั้งค่าความถี่ที่วัดเป็น 4 GHz
4. จำนวนจุดของการกวาดวัดหนึ่งหน้าจอ (number of points) เป็น 3 เพื่อลดเวลาในการกวาดวัด (sweep time) ของเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรส่งผลให้เวลาที่ใช้ทดสอบสายอากาศลดลง (เวลาที่ใช้สำหรับกวาดวัดหนึ่งระนาบประมาณ 10 ชั่วโมง)
5. ตั้งค่าพารามิเตอร์เอสเป็น  $S_{21}$

การกวาดวัดสนามย่านสนามไกลเชิงระนาบได้ใช้สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิด (open-ended waveguide) ที่มีขนาดช่องเปิดเป็น 0.03 เมตร x 0.06 เมตรเป็นหัววัด และกำหนดให้ระยะชักตัวอย่างเป็น 1.875 เซนติเมตร ( $\lambda/4$ ) ซึ่งจะได้จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมดเป็น 106 จุด x 106 จุด และติดตั้งสายอากาศทดสอบให้ระยะห่างจากศูนย์กลางวงภาคของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมายังช่องเปิดของหัววัดเท่ากับ 37.5 เซนติเมตร ( $5\lambda$ ) ระยะห่างขนาดนี้เพียงพอต่อการหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากการสะท้อนหลายครั้งระหว่างสายอากาศทดสอบกับหัววัด ดังนั้นระยะห่างจากพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้มายังช่องเปิดของหัววัดเท่ากับ 109.5 เซนติเมตร ระบบพิกัดของสายอากาศทดสอบและระยะต่างๆ ในการติดตั้งเป็นดังรูป 5.6



รูป 5.6 ระบบพิกัดของสายอากาศทดสอบและระยะต่างๆ ในการติดตั้ง

จากการติดตั้งดังกล่าว เมื่อคำนวณหาองศาที่เชื่อถือได้บนแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลจะได้

$$\theta_{cov} = \arctan\left(\frac{98.44 - 65.00}{109.50}\right) = 16.98^\circ \tag{5.1}$$

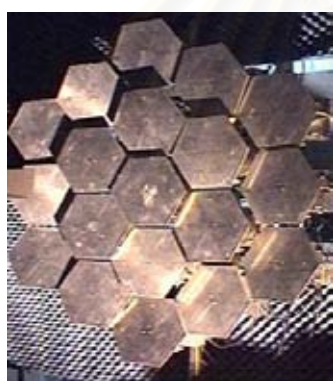
นอกจากค่าต่างๆ ที่กำหนดข้างต้น ค่าอื่นๆ ที่บ่งบอกสภาพแวดล้อมของห้องทดสอบ และระบบการวัด เช่น ความสูญเสียในสาย ระดับสัญญาณรบกวน และการสะท้อนภายในห้องทดสอบได้แสดงในตาราง 5.1



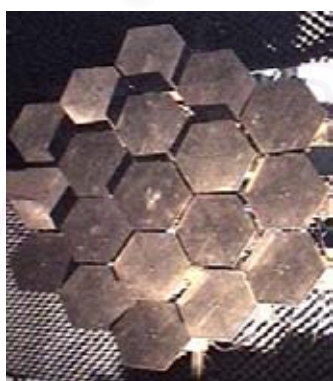
ตาราง 5.1 ความสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดและค่าตัวประกอบภายในห้องทดสอบ

ความสูญเสียและค่าตัวประกอบ	ค่าที่วัดได้
ความสูญเสียในสายทั้งหมด	14.92 dB
ระดับสัญญาณรบกวนพื้น (noise floor) ในห้องทดสอบ	-104.29 dBm
การสะท้อนภายในห้องที่ผนัง	-30 ถึง -20 dB
การสะท้อนภายในห้องที่เพดาน	-30 dB

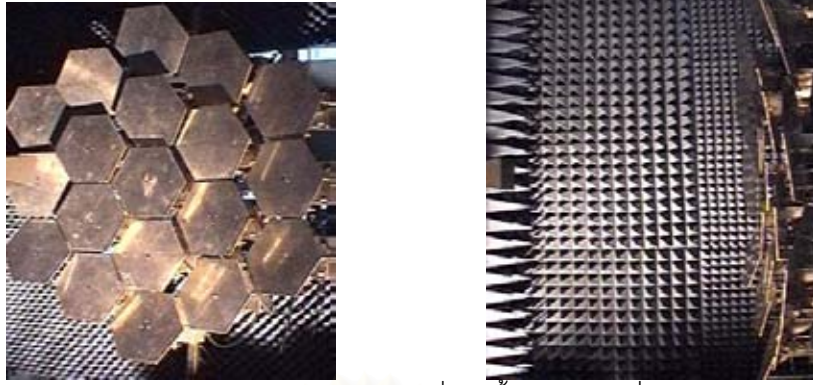
การทดสอบสายอากาศในบ่อน้ำได้ทดสอบสมรรถนะของการเคลื่อนลำคลื่นของสายอากาศ โดยกรณีแรกได้วัดแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในกรณีที่ไม่มีการปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ การติดตั้งและรูปร่างของสายอากาศทดสอบมีลักษณะดังรูป 5.1 หลังจากนั้นได้วัดแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในกรณีที่มีพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เคลื่อนลำคลื่นไปบนระนาบสนามแม่เหล็ก (xz) ที่มุม 0, -10, 10 และ 30 องศาตามลำดับ โดยมีมุมที่หมุนไปรอบแกนยกและแกนทิศของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเป็นไปตามกรรมวิธีการประมาณเชิงรังสี รูปลักษณะของสายอากาศเมื่อปรับรูปลักษณะของพื้นผิวเริ่มต้นไปในกรณีต่างๆ ของการเคลื่อนลำคลื่นมีลักษณะดังรูป 5.7 ถึง 5.10



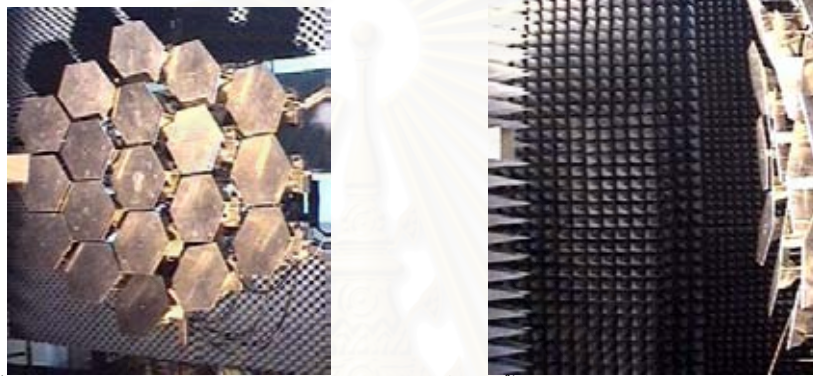
รูป 5.7 การติดตั้งและรูปลักษณะของสายอากาศทดสอบกรณีที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูป 5.8 การติดตั้งและรูปลักษณะของสายอากาศทดสอบกรณีที่มีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม -10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูป 5.9 การติดตั้งและรูปลักษณะของสายอากาศทดสอบกรณีที่ปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูป 5.10 การติดตั้งและรูปลักษณะของสายอากาศทดสอบกรณีที่ปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากสมการ (5.1) จะเห็นว่า ช่วงองศาที่เชื่อถือได้ไม่สามารถครอบคลุมถึงการเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ดังนั้นเพื่อทดสอบสมรรถนะของการเคลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา จึงต้องมีการขยายระนาบกวาดวัด สำหรับในที่นี้ทำการเคลื่อนสายอากาศทดสอบไปตามแกน  $-x$  เพื่อให้ได้องศาที่เชื่อถือได้มากขึ้น จากขนาดห้องทดสอบที่มีขนาดจำกัดทำให้สามารถเคลื่อนสายอากาศทดสอบไปตามแนวแกน  $-x$  ได้อีกเพียง 86.5 เซนติเมตร ซึ่งจะได้จุดข้อมูลเพิ่มเติมเป็น 152 จุด  $\times$  106 จุด และเมื่อคำนวณองศาที่เชื่อถือได้จะได้

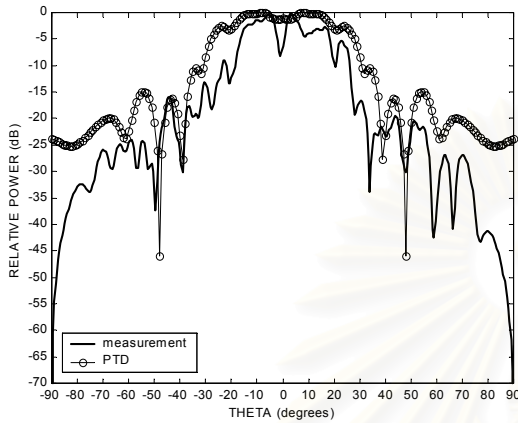
$$\theta_{\text{cov}} = \arctan\left(\frac{184.69 - 65.00}{109.50}\right) = 47.54^\circ \quad (5.2)$$

## 5.2 เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์

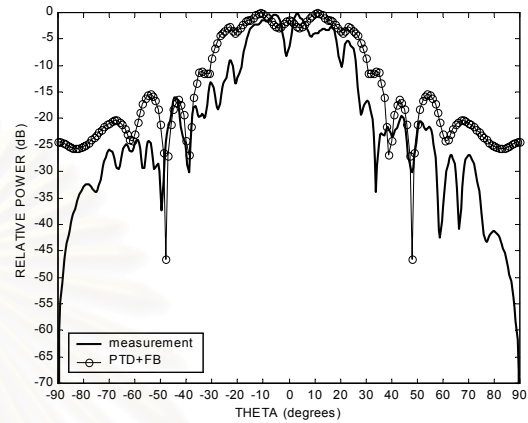
จากการทดสอบสายอากาศในกรณีต่างๆ ตามหัวข้อที่ 5.1 ได้ผลการวัดเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีวิเคราะห์ที่เสนอในบทที่ 3 เป็นดังรูป 5.11 ถึง 5.15 ตามลำดับ

การเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ดังรูป 5.11 ถึง 5.15 ได้แยกการเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น การรบกวนคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และการรบกวนคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น โดยไม่ได้คำนึงผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่ขอบของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นและการกระเจิงจากโครงสร้างยึดสายอากาศป้อนกำลังคลื่น รูป 5.11ก ถึง 5.15ก เป็นการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพโดยไม่ได้รวมผลของการรบกวนคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และการรบกวนคลื่นจากสาย-

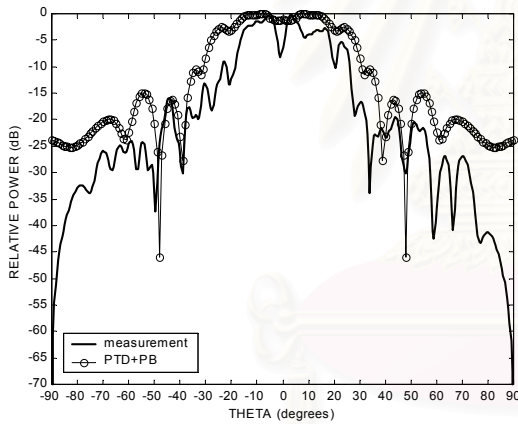
อากาศป้อนกำลังคลื่น รูป 5.11ข ถึง 5.15ข เป็นการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ และรวมผลของการบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น รูป 5.11ค ถึง 5.15ค เป็นการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ และรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ และรูป 5.11ง ถึง 5.15ง เป็นการเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ และรวมผลจากการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่น



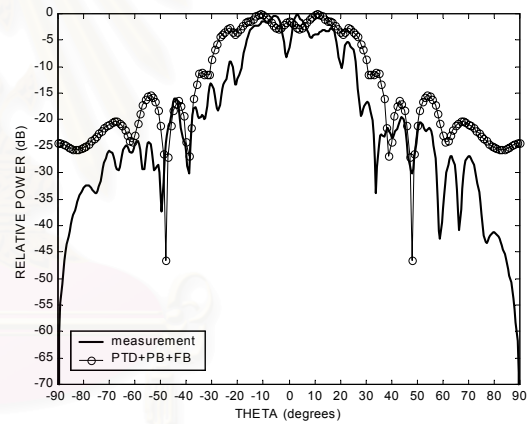
(ข) PTD และผลการวัด



(ค) PTD+FB และผลการวัด



(ง) PTD+PB และผลการวัด

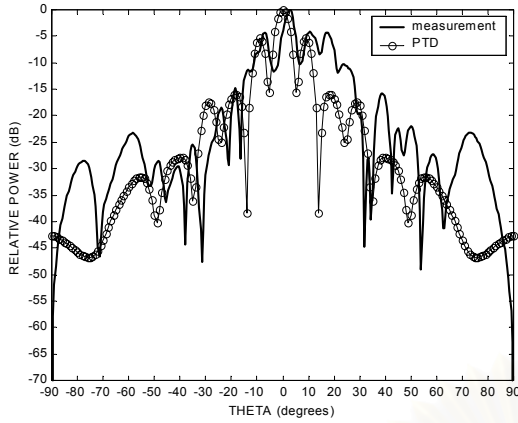


(จ) PTD+PB+FB และผลการวัด

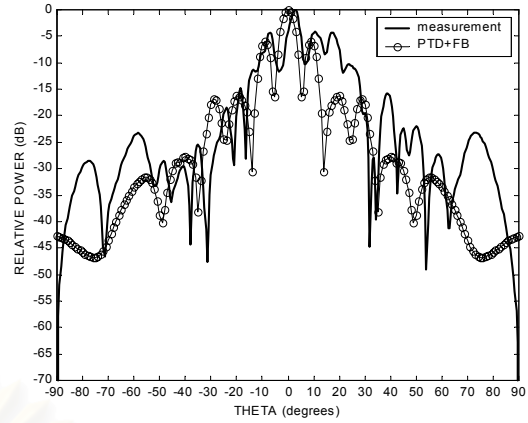
รูป 5.11 เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมในกรณีที่ไม่มีการปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้

หมายเหตุ FB คือคิดผลของการบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

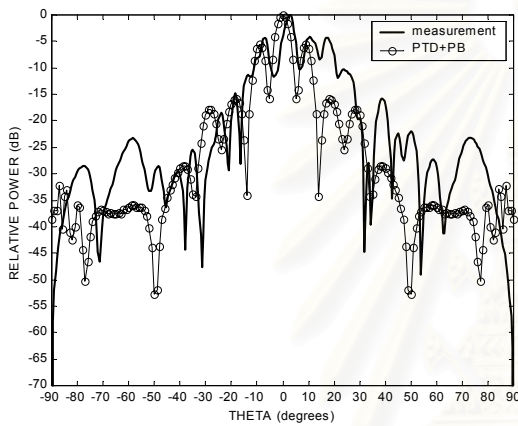
PB คือคิดผลการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ



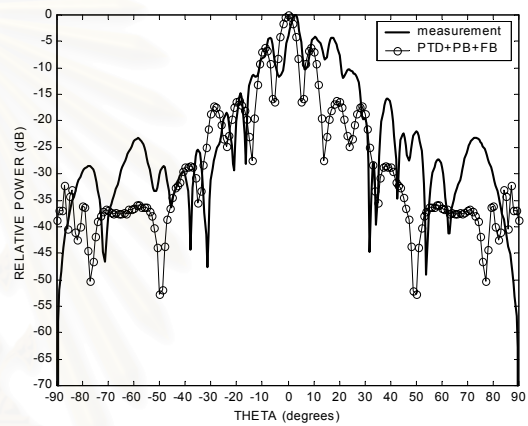
(ก) PTD และผลการวัด



(ข) PTD+FB และผลการวัด

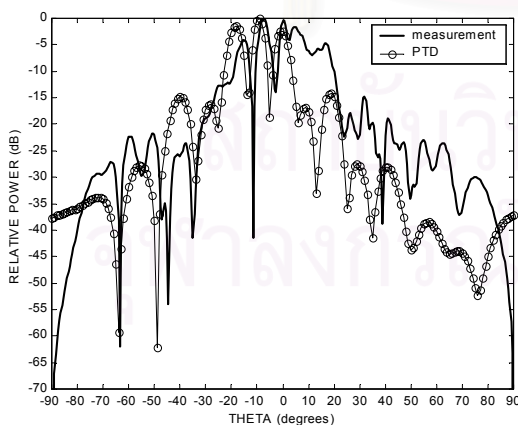


(ค) PTD+PB และผลการวัด

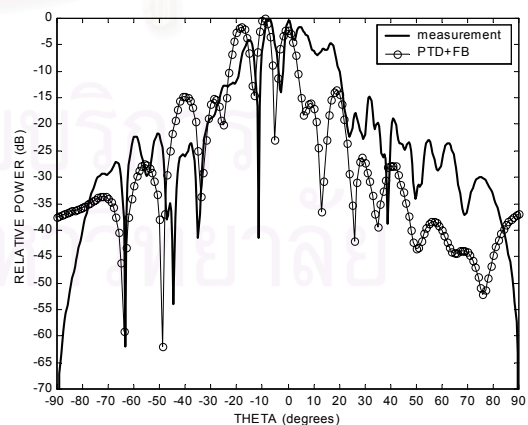


(ง) PTD+PB+FB และผลการวัด

รูป 5.12 เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วม ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลาคืบไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



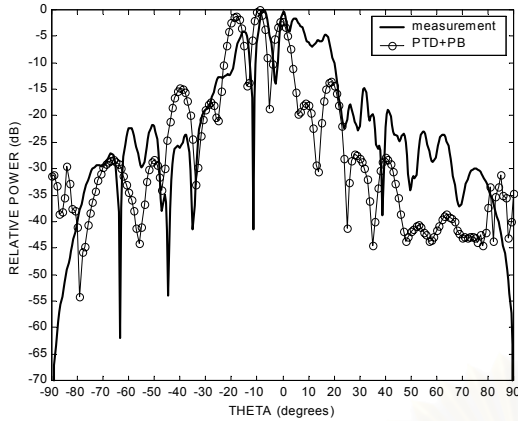
(ก) PTD และผลการวัด



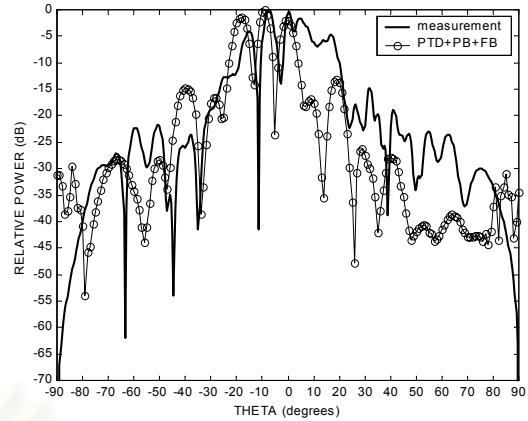
(ข) PTD+FB และผลการวัด

รูป 5.13 เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วม ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลาคืบไปที่มุม -10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



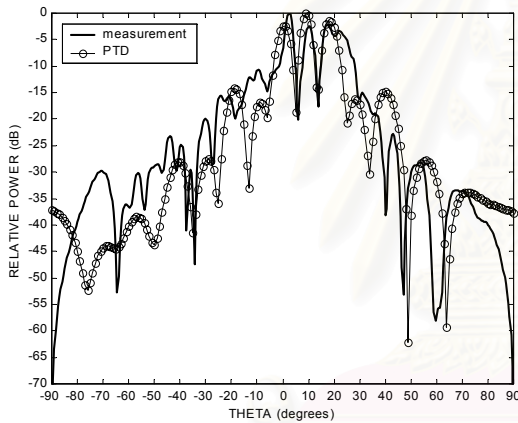


(ค) PTD+PB และผลการวัด

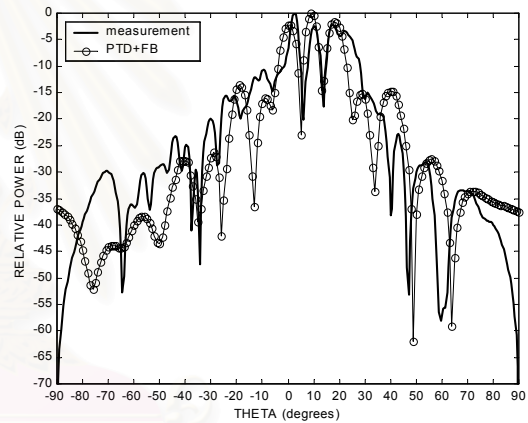


(ง) PTD+PB+FB และผลการวัด

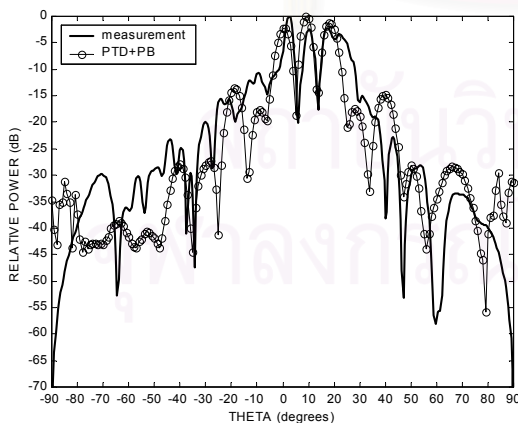
รูป 5.13 (ต่อ) เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วม ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลาคดขึ้นไปทีละ 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



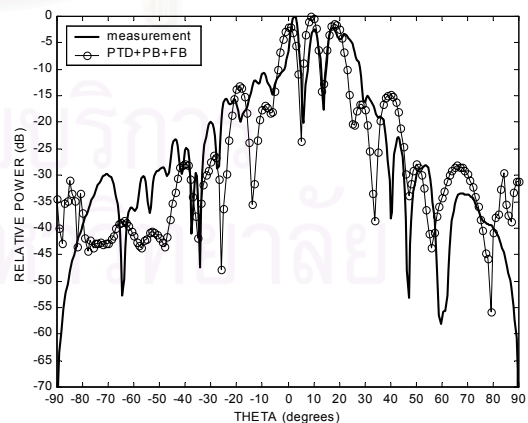
(ก) PTD และผลการวัด



(ข) PTD+FB และผลการวัด



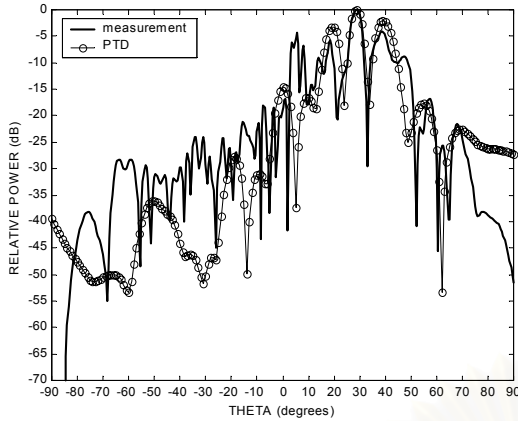
(ค) PTD+PB และผลการวัด



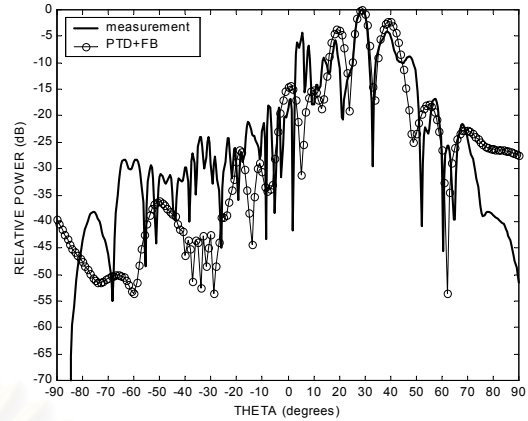
(ง) PTD+PB+FB และผลการวัด

รูป 5.14 เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วม ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลาคดขึ้นไปทีละ 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

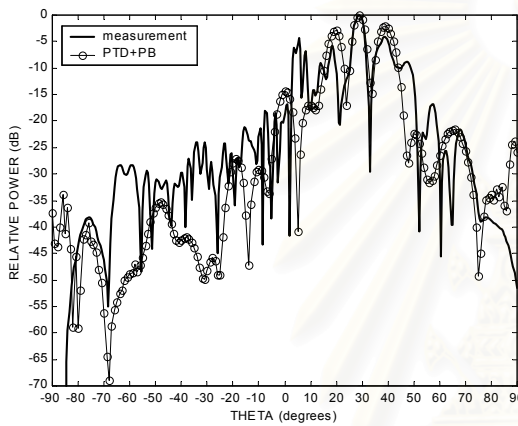




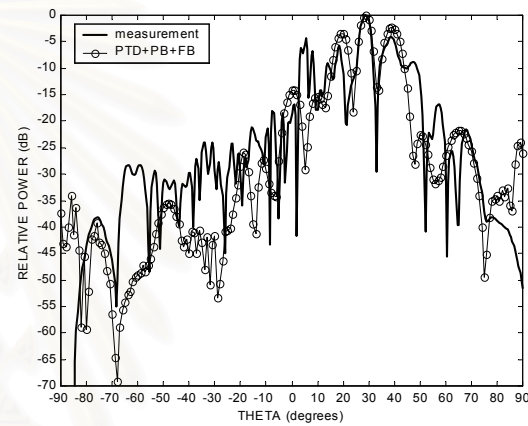
(ก) PTD และผลการวัด



(ข) PTD+FB และผลการวัด



(ค) PTD+PB และผลการวัด

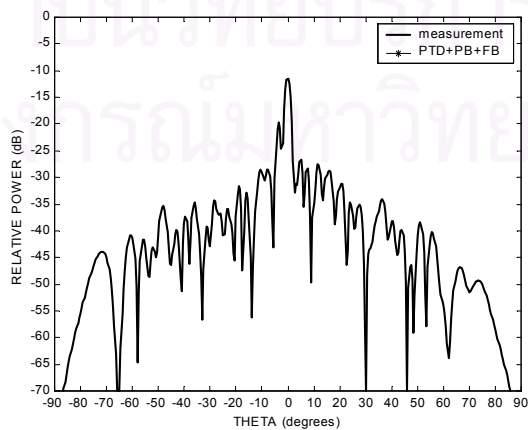


(ง) PTD+PB+FB และผลการวัด

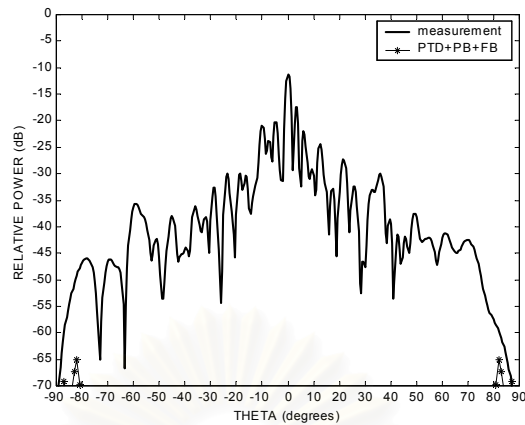
รูป 5.15 เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูป 5.11 ถึง 5.15 จะเห็นว่า แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมที่ได้จากการวัดมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์เป็นอย่างมากในบริเวณพู่หลักและพู่ข้างใกล้ๆ ซึ่งอยู่ภายในมุมองศาที่เชื่อถือได้ของการทดสอบสายอากาศด้วยย่านทดสอบสนามไกลเชิงระนาบ ( $\pm 16.98$  องศา) โดยกรณีที่ไม่มีการปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมที่วัดได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อรวมผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น และผลของการบดบังจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมากที่สุด ผลที่ได้จากการวัดมีลักษณะใกล้เคียงกันกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตั้งแต่มุม  $-50$  ถึง  $50$  องศา และสังเกตว่าในบริเวณแนวเล็งหลัก ผลของการบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นเป็นปัจจัยหลักที่ต้องรวมเข้าไปเพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และกรณีเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม  $0$  องศา แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมที่ได้จากการวัดมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ตั้งแต่มุม  $-20$  ถึง  $12$  องศา ส่วนกรณีเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม  $-10$  และ  $10$  องศา แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมที่ได้จากการวัดมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ตั้งแต่มุม  $-30$  ถึง  $8$  องศา และตั้งแต่มุม  $7$  ถึง  $27$  องศา ตามลำดับ และเมื่อพิจารณากรณีเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม  $30$  องศา แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมที่ได้จากการวัดมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ตั้งแต่มุม  $-17$  ถึง  $70$  องศา สังเกตว่าการรวมผลของการ

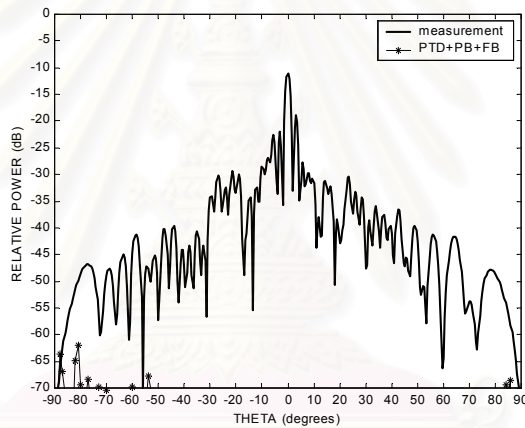
เส้นแวงเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเข้าไปสามารถทำนายแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลได้ถูกต้องมากขึ้นตั้งแต่มุม 50 ถึง 70 องศา อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความแตกต่างเกิดขึ้นบนแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมที่มุมองศาที่ไกลออกไปจากพหุหลัก ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถบ่งบอกถึงความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ได้เนื่องจากอยู่ในบริเวณที่เกินมุมองศาที่เชื่อถือได้ของการทดสอบสายอากาศด้วยย่านทดสอบสนามใกล้เชิงระนาบ แต่ยังคงเห็นว่า ผลการวัดมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่มุมองศาที่ไกลออกไปจากพหุหลักมากขึ้นเมื่อรวมผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และสังเกตว่าความกว้างของลำคลื่นที่ 3 dB ที่ได้จากการวัดก็มีความสอดคล้องกับที่ได้จากการวิเคราะห์เช่นกัน นอกจากนี้จะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลที่วัดได้เกิดการเลื่อนไปจากมุมที่ต้องการเพียงเล็กน้อย การเลื่อนไปของแบบรูปการแผ่พลังงานนี้เกิดจากการติดตั้งสายอากาศบ่อนกำลังคลื่นไม่อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะนี้ได้ดังแสดงไว้ในหัวข้อย่อยที่ 4.4.3 และเป็นที่น่าสังเกตว่าแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมที่วัดได้จะมีพู่ข้างที่สูงอยู่ติดกับพู่ข้างอันดับหนึ่งในทิศทาง  $\theta > 0^\circ$  (แกน +x ในรูป 5.6) ระดับพู่ข้างที่สูงที่เกิดขึ้นนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากการสะท้อนของคลื่นภายในห้องทดสอบที่ส่งผลไปยังหัววัด เนื่องจากการทดสอบนี้ใช้สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิดเป็นหัววัดซึ่งมีลำคลื่นที่กว้างมากทำให้สามารถรับคลื่นที่สะท้อนเข้าไปได้เกือบทุกทิศทาง เพื่อแสดงให้เห็นว่าระดับพู่ข้างที่สูงที่เกิดขึ้นน่าจะมาจากข้อสันนิษฐานดังกล่าว เราสามารถพิจารณาได้จากแบบรูปการแผ่พลังงานที่วัดได้จากการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุมต่างๆ กับกลไกของการสะท้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องทดสอบดังนี้ สำหรับกรณีเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 และ -10 องศา คลื่นที่แผ่พลังงานออกมาจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะนี้ได้จะสะท้อนผนังห้องทางด้านแกน -x เข้าไปบนระนาบกวาดวัดทางด้านแกน +x ส่งผลให้ระดับพู่ข้างที่สูงเกิดขึ้นตามแกน +x ดังรูป 5.12 และ 5.13 และเมื่อพิจารณาการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 10 องศา กำลังของคลื่นสะท้อนที่เกิดขึ้นจากผนังห้องด้านแกน -x น้อยลง เนื่องจากลำคลื่นที่แผ่พลังงานออกมาจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะนี้ได้ที่มีกำลังสูงเกิดการเลื่อนไปทางด้านแกน +x ทำให้คลื่นที่สะท้อนจากผนังด้านแกน +x เข้าไปบนระนาบกวาดวัดทางด้านแกน -x เริ่มมีนัยสำคัญมากขึ้น ส่งผลให้ระดับพู่ข้างด้านแกน -x เริ่มมีระดับสูงขึ้นดังรูป 5.14 ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา คลื่นที่แผ่พลังงานไปทางด้านแกน -x มีระดับต่ำลง ทำให้ผลที่ปรากฏให้ระดับพู่ข้างยกระดับสูงขึ้นทางด้านแกน +x ไม่เกิดขึ้นเท่าไรนัก แต่ในทางกลับกันผลของการสะท้อนจะไปปรากฏทางด้านแกน -x แทน ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะว่าลำคลื่นที่เลื่อนไปทำให้คลื่นที่แผ่พลังงานจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะนี้ได้ไปทางด้านแกน +x มีระดับสูงขึ้น เมื่อสะท้อนกับผนังจึงทำให้มีคลื่นสะท้อนเข้าไปบนระนาบกวาดวัดด้านแกน -x ส่งผลให้ระดับพู่ข้างทางด้านแกน -x มีระดับสูงขึ้นดังรูป 5.15



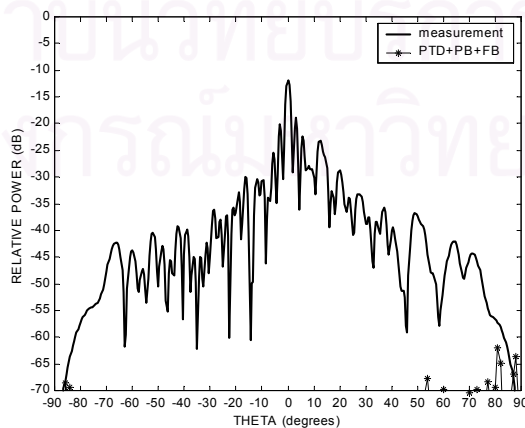
รูป 5.16 การเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ ในกรณีที่ไม่มีกรับปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะนี้ได้



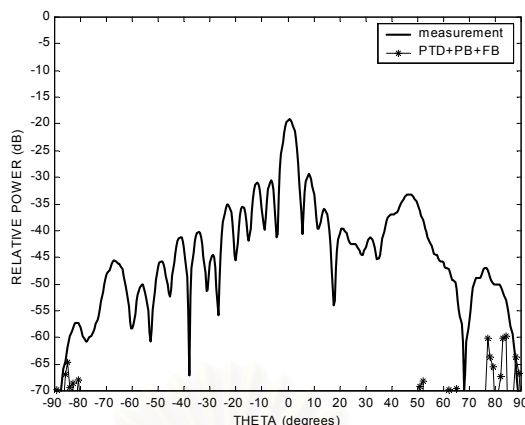
รูป 5.17 การเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูป 5.18 การเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม -10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูป 5.19 การเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูป 5.20 การเปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์ของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

นอกจากนี้ระดับพู่ข่างที่สูงขึ้นอาจเกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของหัววัด [61] และความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นในลักษณะเดียวกับที่แสดงไว้ในหัวข้อย่อยที่ 4.4.1 สำหรับกรณีที่เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา ยังมีจุดน่าสังเกตอีกประการหนึ่งคือ ระดับพู่ข่างที่เกิดขึ้นใกล้ๆ มุม 0 องศา อาจมาจากสนามแนวโพลาริเซชันร่วมในทิศทางพหุหลังของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด

จากการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ระดับโพลาริเซชันไขว้มีค่าต่ำมาก ในรูป 5.16 ระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดจากการวิเคราะห์ทางทฤษฎีมีค่าต่ำกว่าระดับโพลาริเซชันร่วมมากที่สุด 91.19 dB แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระดับโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้นในรูป 5.17 ถึง 5.20 จะเห็นว่าระดับโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้มีความแตกต่างกับผลการวิเคราะห์อย่างมากในทิศทางแนวเล็งหลักและบริเวณใกล้ๆ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นในบริเวณดังกล่าวนี้ น่าจะได้รับผลมาจากโพลาริเซชันไขว้ในบริเวณพหุหลังของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดที่ใช้ เนื่องจากสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดที่ใช้มีระดับโพลาริเซชันไขว้ที่สูงในบริเวณดังกล่าว ส่วนนอกบริเวณดังกล่าวนี้ จะได้รับอิทธิพลของโพลาริเซชันไขว้จากสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดน้อยลง แต่จะได้รับผลกระทบจากความไม่สมมาตรของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดที่ใช้ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นในลักษณะเดียวกันกับที่แสดงในหัวข้อย่อยที่ 4.4.1 และ 4.4.3 สนามเลี้ยวเบนที่ขอบของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด และสนามกระเจิงจากโครงสร้างยึดสายอากาศป้อนกำลังคลื่น ผลกระทบบางประการที่เกิดขึ้น เช่น ความไม่สมมาตรของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิด สามารถแก้ไขได้โดยใช้แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลของสายอากาศปากแตรรูปทรงพีระมิดที่ได้มาจากการวัดมาใช้ในการวิเคราะห์ หรืออาจนำแบบรูปการแผ่พลังงานบริเวณพหุหลังมาชดเชยกับข้อมูลที่วัดได้จากการทดสอบสายอากาศย่านสนามไกลเชิงระนาบ ซึ่งจะทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับผลการวัดมากยิ่งขึ้น

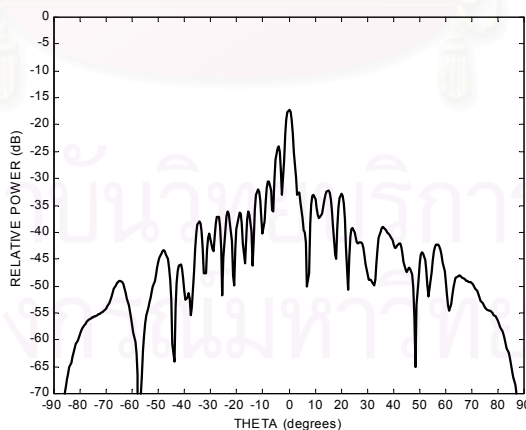
นอกจากเหตุผลที่กล่าวมา ความผิดเพี้ยนของแบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้อาจเกิดขึ้นเนื่องจากองค์ประกอบที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันไขว้ของสนามบนระนาบกวาดวัดที่วัดได้มีค่าระหว่าง -130 ถึง -75 dB ซึ่งมีระดับต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับระดับสัญญาณรบกวนพื้นเฉลี่ยภายในห้องทดสอบ (-104.29 dB) และความไวของเครื่องวิเคราะห์ขยายวงจรถ่าย (-105 dB) ทำให้องค์ประกอบที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันไขว้ของสนามบนระนาบกวาดวัดที่วัดได้มีขนาดและวิภูภาคไม่ถูกต้องเนื่องจากไม่อยู่ในพิสัยพลวัต (dynamic range) ของเครื่องวิเคราะห์ขยายวงจรถ่ายและมีระดับต่างกับองค์ประกอบที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันร่วมของสนามบนระนาบกวาดวัดที่วัดได้ไม่มากตามความเป็นจริง นอกจากนี้ค่าที่

วัดได้อาจมีข้อมูลของสัญญาณรบกวนปนเข้ามา ทำให้ขนาดและวิภาคขององค์ประกอบที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันไขว้ของสนามบนระนาบกวาดวัดที่วัดได้มีค่าไม่เป็นไปตามความเป็นจริง เพื่อแสดงให้เห็นผลของข้อสันนิษฐานนี้ ในงานวิจัยได้ใช้วิธีการของข้อมูลขององค์ประกอบที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันไขว้ของสนามบนระนาบกวาดวัดที่วัดได้ โดยตัดข้อมูลที่วัดได้บนระนาบกวาดวัดที่บริเวณขอบๆ ของระนาบกวาดวัดออก เนื่องจากเป็นบริเวณที่องค์ประกอบที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันไขว้ของสนามบนระนาบกวาดวัดที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับระดับสัญญาณรบกวนพื้นเฉลี่ยภายในห้องทดสอบและความไวของเครื่องวิเคราะห์ช่วยวงจร อย่างไรก็ตาม การตัดข้อมูลที่วัดได้บนระนาบกวาดวัดออกไป ก็จะทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้มีความถูกต้องในช่วงมุมมองที่เชื่อถือได้ที่แคบลง ความสัมพันธ์ของจำนวนจุดข้อมูลที่กวาดวัด ขนาดของระนาบกวาดวัด และองศาที่เชื่อถือได้แสดงดังตาราง 5.2

ตาราง 5.2 ความสัมพันธ์ของจุดข้อมูลที่กวาดวัด ขนาดของระนาบกวาดวัด และองศาที่เชื่อถือได้

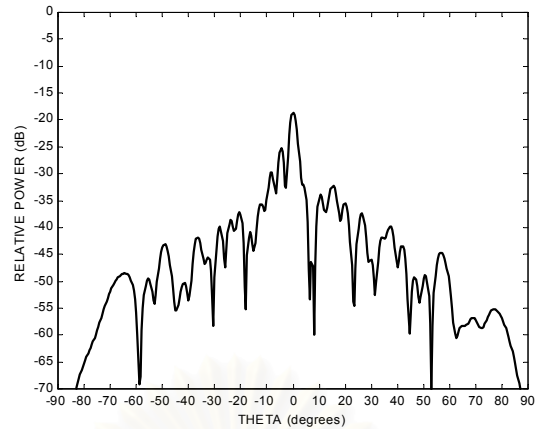
จุดข้อมูลที่กวาดวัด	ขนาดของระนาบกวาดวัด	องศาที่เชื่อถือได้ในระนาบสนามแม่เหล็ก
106 จุด x 106 จุด	196.875 ซม. x 196.875 ซม.	$-16.98^\circ \leq \theta_{cov} \leq 16.98^\circ$
86 จุด x 86 จุด	159.375 ซม. x 159.375 ซม.	$-7.64^\circ \leq \theta_{cov} \leq 7.64^\circ$
76 จุด x 76 จุด	140.625 ซม. x 140.625 ซม.	$-2.78^\circ \leq \theta_{cov} \leq 2.78^\circ$
152 จุด x 106 จุด	283.125 ซม. x 196.875 ซม.	$-16.98^\circ \leq \theta_{cov} \leq 47.54^\circ$
132 จุด x 86 จุด	245.625 ซม. x 159.375 ซม.	$-7.64^\circ \leq \theta_{cov} \leq 42.67^\circ$
122 จุด x 76 จุด	226.875 ซม. x 140.625 ซม.	$-2.78^\circ \leq \theta_{cov} \leq 39.90^\circ$

แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่ได้จากการวัด เมื่อกรองข้อมูลขององค์ประกอบที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันไขว้ของสนามบนระนาบกวาดวัดที่วัดได้ออกตามตาราง 5.2 ในกรณีเปลี่ยนลำคลื่นไปที่มุมต่างๆ เป็นดังรูป 5.21 ถึง 5.30 และตาราง 5.3 แสดงการเปรียบเทียบสภาวะเจาะจงทิศทางของผลการวัดกับผลการวิเคราะห์

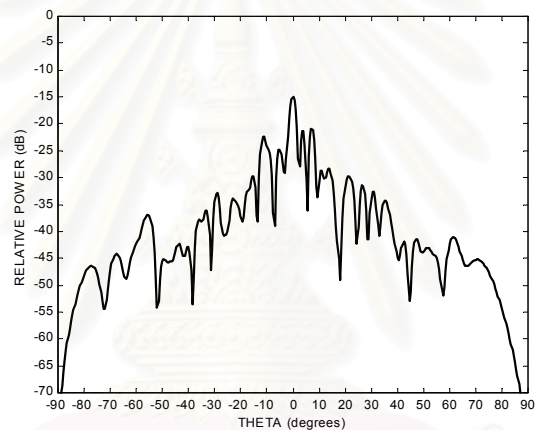


รูป 5.21 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลที่กวาดวัด 86 จุด x 86 จุด ในกรณีที่ไม่มีกรับปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้

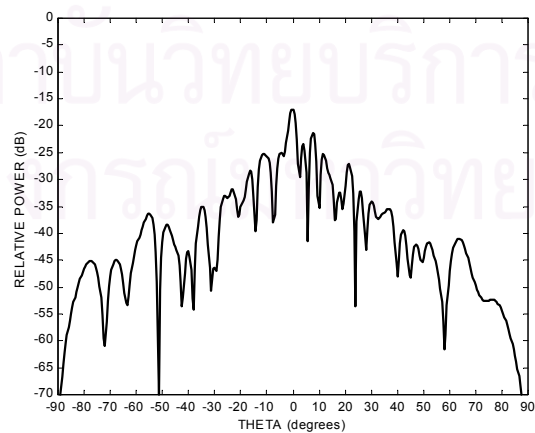




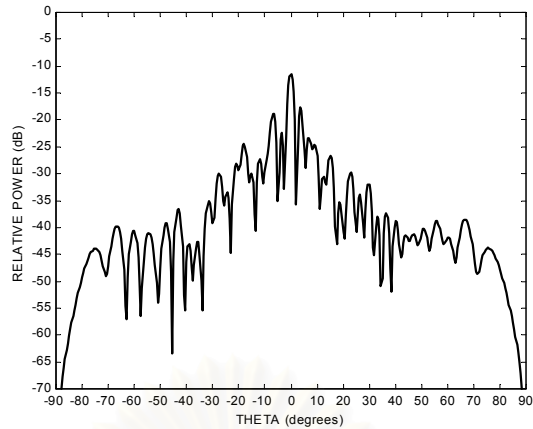
รูป 5.22 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลทีกวาดวัด 76 จุด x 76 จุด ในกรณีที่ไม่มีการปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้



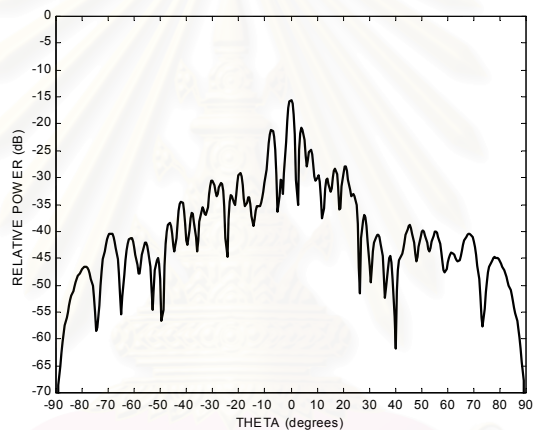
รูป 5.23 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลทีกวาดวัด 86 จุด x 86 จุด ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำดับไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



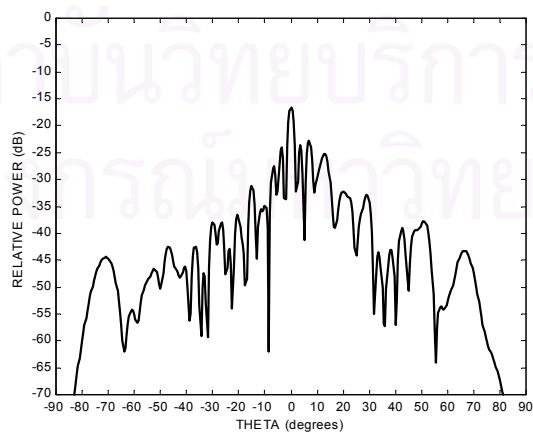
รูป 5.24 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลทีกวาดวัด 76 จุด x 76 จุด ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำดับไปที่มุม 0 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



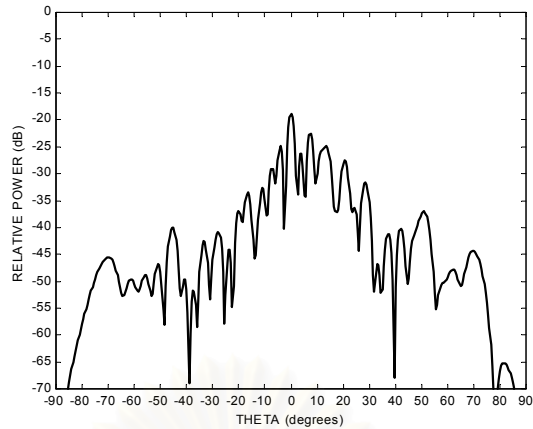
รูป 5.25 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลทีกวาดวัด 86 จุด x 86 จุด ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม -10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



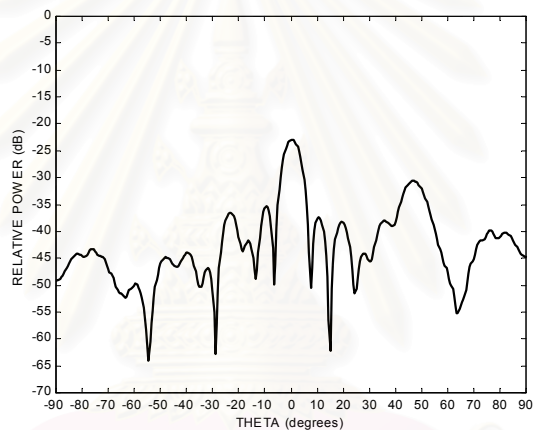
รูป 5.26 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลทีกวาดวัด 76 จุด x 76 จุด ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม -10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



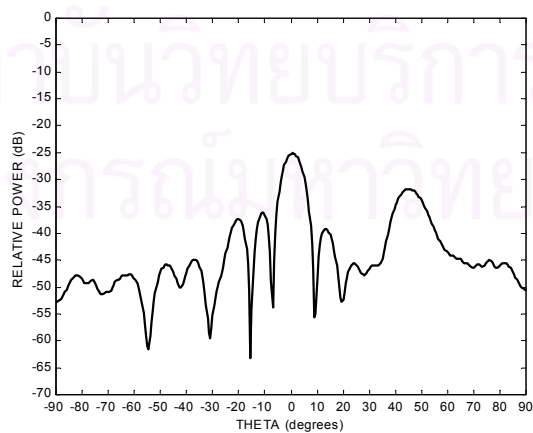
รูป 5.27 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลทีกวาดวัด 86 จุด x 86 จุด ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูป 5.28 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลที่กวาดวัด 76 จุด  $\times$  76 จุด ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลือนลาคขึ้นไปทีละ 10 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูป 5.29 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลที่กวาดวัด 132 จุด  $\times$  86 จุด ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลือนลาคขึ้นไปทีละ 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูป 5.30 แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันไขว้ที่วัดได้ เมื่อใช้จุดข้อมูลที่กวาดวัด 122 จุด  $\times$  76 จุด ในกรณีที่ปรับพื้นผิวเริ่มต้นที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เลือนลาคขึ้นไปทีละ 30 องศา ในระนาบสนามแม่เหล็ก

ตาราง 5.3 เปรียบเทียบสภาพเจาะจงทิศทางของผลการวัดกับผลการวิเคราะห์

เปรียบเทียบผลการวัดกับผลการวิเคราะห์		ลักษณะสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ	
กรณี	ผลกระทบ	$D_{cp}^{steer}$ (dB)	$D_{xp}^{max}$ (dB)
ไม่ปรับพื้นผิว	- PO	12.04	-90.00
	- PTD	12.21	-90.00
	- PTD+FB	12.65	-78.54
	- PTD+PB	12.21	-90.00
	- PTD+PB+FB	12.65	-78.54
	- ผลการวัด	16.04	4.59
เลื่อนลำคลื่นไป 0 องศา	- PO	24.55	-76.47
	- PTD	24.56	-76.47
	- PTD+FB	24.61	-75.50
	- PTD+PB	24.57	-40.52
	- PTD+PB+FB	24.60	-40.52
	- ผลการวัด	23.91	12.62
เลื่อนลำคลื่นไป -10 องศา	- PO	22.68	-75.34
	- PTD	22.74	-75.34
	- PTD+FB	22.61	-73.02
	- PTD+PB	22.53	-39.50
	- PTD+PB+FB	22.39	-39.50
	- ผลการวัด	22.54	11.49
เลื่อนลำคลื่นไป 10 องศา	- PO	22.68	-75.34
	- PTD	22.74	-75.34
	- PTD+FB	22.61	-73.02
	- PTD+PB	22.53	-39.50
	- PTD+PB+FB	22.39	-39.50
	- ผลการวัด	23.37	11.49
เลื่อนลำคลื่นไป 30 องศา	- PO	22.34	-72.10
	- PTD	22.42	-72.10
	- PTD+FB	22.55	-68.24
	- PTD+PB	22.06	-37.54
	- PTD+PB+FB	22.18	-37.54
	- ผลการวัด	23.84	4.75

หมายเหตุ  $D_{cp}^{steer}$  คือสภาพเจาะจงทิศทางแนวโพลาริเซชันร่วมในทิศทางเลื่อนลำคลื่น

$D_{xp}^{max}$  คือสภาพเจาะจงทิศทางแนวโพลาริเซชันไขว้มากที่สุด

$D_{xp}^{max}$  ของผลการวัดในตารางได้จากการใช้จุดข้อมูลที่กวาดวัด 106 จุด x 106 จุด (กรณีไม่ปรับพื้นผิว และ เลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, -10, 10 องศา) และ 152 จุด x 106 จุด (กรณีเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 30 องศา)

จากรูป 5.21 ถึง 5.30 เห็นได้ว่าการกรองข้อมูลที่มีขนาดและวิภูภาคไม่ถูกต้องออกไป ทำให้ระดับโพลาริเซชันไหว้ที่วัดได้มีระดับต่ำลง แต่ระดับที่ต่างกับผลการวิเคราะห์ที่อยู่หน้าจะมาจากผลกระทบอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้น

จริงๆ แล้วผลขององค์ประกอบที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันไหว้ของสนามบนระนาบกวาดวัดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับระดับสัญญาณรบกวนพื้นเฉลี่ยภายในห้องทดสอบและความไวของเครื่องวิเคราะห์ข่ายวงจรมารถแก้ไขได้ ถ้ามีอุปกรณ์ขยายกำลังมาเพิ่มกำลังให้แก่สายอากาศทดสอบ

จากตาราง 5.3 สภาพเจาะจงทิศทางที่ได้จากการวัดหาได้จากปริพันธ์ของสนามที่กวาดวัดได้บนระนาบกวาดวัด [60] ความแม่นยำของการคำนวณหาสภาพเจาะจงทิศทางโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับว่าขนาดของระนาบกวาดวัดที่สามารถรับกำลังที่กระเจิงออกมาจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ไว้ได้มากน้อยเพียงใด เมื่อเปรียบเทียบสภาพเจาะจงทิศทางแนวโพลาริเซชันร่วมที่คำนวณได้จากการวัดกับผลการวิเคราะห์ในกรณีเลื่อนลำคลื่นไปที่มุมต่างๆ พบว่า สภาพเจาะจงทิศทางแนวโพลาริเซชันร่วมในกรณีที่ไม่มี การปรับพื้นผิวที่ปรับรูปลักษณะได้ที่วัดได้แตกต่างจากการคำนวณเมื่อรวมผลกระทบจากการเลี้ยวเบน การบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและสายอากาศบ่อนกำลังคลื่นอยู่ 3.39 dB ความแตกต่างของสภาพเจาะจงทิศทางแนวโพลาริเซชันร่วมที่เกิดขึ้นนี้มาจากกำลังที่ล้นระนาบกวาดวัดไปมีมากเนื่องจากลำคลื่นที่สะท้อนจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดการกระเจิงไปในมุมที่กว้าง ส่งผลให้กำลังที่รับได้บนระนาบกวาดวัดที่ได้จากการวัดต่างจากกำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานจากสายอากาศบ่อนกำลังคลื่นอยู่มาก ดังนั้นสภาพเจาะจงทิศทางแนวโพลาริเซชันร่วมที่ได้จากการวัดจึงมีค่าสูงกว่าที่คำนวณได้ แต่สำหรับกรณีที่ปรับพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ให้เกิดการเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, -10, 10 และ 30 องศา นั้น สภาพเจาะจงทิศทางแนวโพลาริเซชันร่วมที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับที่คำนวณได้แตกต่างกันไม่เกิน 1 dB ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่ากรณีเลื่อนลำคลื่นไปที่มุม 0, -10 และ 10 องศา นั้น ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดการรวมกันไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งบนระนาบกวาดวัดส่งผลให้กำลังที่รับได้บนระนาบกวาดวัดมีค่าไม่แตกต่างกับกำลังทั้งหมดที่แผ่พลังงานมาจากสายอากาศบ่อนกำลังคลื่นมากนัก ส่วนความแตกต่างที่เกิดขึ้นอาจเกิดจากความไม่แม่นยำของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศบ่อนกำลังคลื่นที่ใช้ในการคำนวณ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศบ่อนกำลังคลื่น ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น และการสูญเสียเนื่องจากการบดบังและการกระเจิงของโครงสร้างยึดสายอากาศบ่อนกำลังคลื่น



## บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุปผลการวิจัย

จุดประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้คือ การนำเสนอสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย้อย ซึ่งเป็นสายอากาศอีกรูปแบบหนึ่งที่มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนลำคลื่น และระเบียบวิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสมกับสายอากาศชนิดนี้ ถึงแม้ว่าระเบียบวิธีวิเคราะห์ที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิวสะท้อนที่ต่อเนื่องสามารถประยุกต์ใช้กับสายอากาศชนิดนี้ แต่เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นย้อยหลายๆ แผ่น อันทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแผ่นย้อย และอาจเกิดการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ นอกจากนี้ยังเกิดปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย้อยแต่ละแผ่น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาระเบียบวิธีวิเคราะห์ที่เหมาะสมสำหรับคำนวณหาสนามกระเจิงจากแผ่นย้อยแต่ละแผ่น โดยใช้ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพมาวิเคราะห์ผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่เกิดขึ้น และใช้สมมุติฐานสนามเป็นศูนย์แบบขึ้นอยู่กับตำแหน่งผู้สังเกตมาวิเคราะห์ผลกระทบจากการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

ทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพที่นำมาศึกษาผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นพิจารณาจากสนามที่เกิดขึ้นจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบที่เป็นไปตามแนวคิดกระแสสมมูลที่ขอบของมิคาเอลลี โดยพิจารณาเพียงกระแสสมมูลที่ขอบอันดับหนึ่ง และมีได้คิดผลกระทบจากการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นย้อยแต่ละแผ่น ส่วนการวิเคราะห์ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย้อยล้อมรอบ และสายอากาศป้อนกำลังคลื่นด้วยสมมุติฐานสนามเป็นศูนย์แบบขึ้นอยู่กับตำแหน่งผู้สังเกตนั้น วิทยานิพนธ์นี้ได้มีการปรับปรุงขั้นตอนวิธีของการตรวจสอบบริเวณเงาที่เกิดขึ้นจากการบดบังของรูปหลายเหลี่ยมแบบเว้าในทุกกรณี ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้แม้ว่าแผ่นย้อยล้อมรอบกับจุดทดสอบอยู่ใกล้กันมากในระดับ  $10^{-4}$  เมตร

นอกจากนี้ได้ประยุกต์การแปลงโดเมนรูปหลายเหลี่ยมไปอยู่บนโดเมนรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาคำนวณสนามตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพที่แผ่พลังงานจากแผ่นย้อยรูปหลายเหลี่ยมแบบต่างๆ ที่นำมาใช้ประมาณพื้นผิวสะท้อนเริ่มต้น และได้เสนอวิธีการเข้ารูปพื้นผิวสะท้อนเริ่มต้นด้วยแผ่นย้อยรูปหลายเหลี่ยม และในการสร้างแบบรูปการเลื่อนลำคลื่นได้ใช้กรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีหมุนที่หมุนไปของแผ่นย้อยแต่ละแผ่น และใช้ระเบียบวิธีทำให้เหมาะที่สุดมาสร้างแบบรูปการเลื่อนลำคลื่น และสร้างตำแหน่งศูนย์

จากการใช้กรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีพบว่า กรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีไม่สามารถเลื่อนลำคลื่นไปในทุกทิศทางที่ต้องการได้เมื่อกำหนดให้ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นอยู่ที่ใดที่หนึ่งเนื่องจากกรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีเป็นเพียงระเบียบวิธีที่ใช้บ่งบอกเพียงทิศทางที่เหมาะสมตามกฎการสะท้อนของสนามที่กระเจิงจากแผ่นย้อยแต่ละแผ่น แต่ไม่ได้คำนึงถึงวิถีภาคที่ตรงกันของสนามกระเจิงจากแผ่นย้อยแต่ละแผ่น อย่างไรก็ตาม จากการสังเกตพบว่ากรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบนราบ ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่เหมาะสมอยู่ที่  $h$  มีค่าประมาณ 1.1 ถึง 1.2 เท่าของรัศมีของสายอากาศ และในกรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดจากการเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์โดยประมาณ ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่เหมาะสมอยู่ที่  $z_{sf}$  มีค่าประมาณ  $1.1r_{\max}-f$  ถึง  $2r_{\max}-f$  ตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นดังกล่าวนี้เป็นเพียงตำแหน่งที่ทำให้กรรมวิธีการประมาณเชิงรังสีมีความสามารถต่อการเลื่อนลำคลื่นไปในทิศทางต่างๆ ได้มากกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ และนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นของตัวแปรควบคุมในการสังเคราะห์แบบรูปการเลื่อนลำคลื่น และการสร้างตำแหน่งศูนย์ด้วยระเบียบวิธีทำให้เหมาะที่สุด

จากการสังเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทำให้เหมาะที่สุด สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยสามารถเลื่อนลำคลื่นและสร้างตำแหน่งศูนย์ได้ตามต้องการ และการสร้างตำแหน่งศูนย์นั้นสามารถทำให้ระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ต่ำกว่าทิศทางการเลื่อนลำคลื่นถึง 50 dB

เมื่อพิจารณาดูผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศที่มีต่อการเลื่อนลำคลื่น และการสร้างตำแหน่งศูนย์ตามระเบียบวิธีที่เสนอไว้พบว่า ผลของชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมีส่วนทำให้ระดับพู่ข้างแรกยกกระด้างสูงขึ้นและอัตราขยายแนวโพลาริเซชันรวมลดลงมากกว่าหรือเท่ากับ 0.7 dB เมื่อใช้สายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่ทำให้เกิดระดับความเร็วที่ขอบมากกว่า -19 dB ขึ้นไป ระดับความเร็วที่ขอบนั้นนอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นแล้ว ยังขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นด้วย อย่างไรก็ตาม ระดับความเร็วที่ขอบที่เหมาะสมควรมีค่าประมาณ -10 ถึง -11 dB จึงทำให้ได้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันรวมมากที่สุด

ผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นไม่ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันรวมและโพลาริเซชันไขว้มากนัก ทั้งในบริเวณพู่หลักและพู่ข้างไกลๆ รวมไปถึงระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ที่เกิดขึ้น ผลของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยแต่ละแผ่นจะส่งผลกระทบต่อขนาดของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยโตกว่า 0.165 เท่าของขนาดแผ่นย่อยโดยจะส่งผลทำให้พู่ข้างยกกระด้างขึ้น แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันรวมเกิดการบิดเบี้ยวไปอย่างมาก ระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์จะตื้นขึ้น และอัตราขยายแนวโพลาริเซชันรวมลดลงอย่างมาก

รูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ส่งผลกระทบต่อระดับโพลาริเซชันไขว้ที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน โดยในกรณีที่ระนาบที่สังเกตมองเห็นพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้มีความสมมาตร และใช้สายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสมมาตร ระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดมีระดับต่ำมากในระนาบสังเกตนั้นเมื่อรูปร่างของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้จัดเรียงในลักษณะแบบราบ และระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดมีระดับยกสูงขึ้นเมื่อพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  มากขึ้น

ขนาดของแผ่นย่อยที่เล็กลงและจำนวนของแผ่นย่อยที่มากขึ้นมีผลต่อการเกิดระดับพู่ข้างที่สูง และพู่กระด้างบนแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันรวม โดยผลดังกล่าวได้รับผลมาจากอัตราส่วนของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยกับขนาดของแผ่นย่อยแตกต่างกันน้อยลง และช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยตามแนวแกนที่เกิดขึ้นมากกว่า

ส่วนรูปร่างและการจัดเรียงของแผ่นย่อย การจัดเรียงของแผ่นย่อยมีส่วนทำให้เกิดระดับพู่ข้างที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเป็นรายคาบในการจัดเรียงของแผ่นย่อย และช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยตามแนวแกนที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อลดความเป็นรายคาบในการจัดเรียงของแผ่นย่อยให้สั้นลง ก็จะส่งผลไปยังระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดที่เกิดขึ้นให้มีระดับสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบและสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และผลกระทบจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นพบว่า ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดโพลาริเซชันไขว้คือสนามเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบของแผ่นย่อย จากทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพ ระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดที่เกิดขึ้นต่างกับระดับโพลาริเซชันรวมมากที่สุดประมาณ -30 dB สนามเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบยังส่งผลให้ระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ตื้นขึ้น ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อระดับโพลาริเซชันไขว้ ผลกระทบทั้งสองทำให้เกิดความผิดเพี้ยนบนแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันรวมที่ตำแหน่งไกลออกไปจากพู่หลัก แต่ผลกระทบของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบมีอิทธิพลมากกว่าผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ การแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันรวมขึ้นอยู่กับรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ และรูปร่างของแผ่นย่อย

เมื่อใช้แผ่นย่อยที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์จะเพิ่มขึ้นเมื่อรวมผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบและการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ โดยจะแสดงให้เห็นอย่างเด่นชัดเมื่อระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ต่ำมาก แต่ไม่แสดงผลเท่าใดนักเมื่อระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ไม่ตื้นนัก ระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ที่เพิ่มขึ้นได้รับอิทธิพลจากการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบมากกว่าจากการเลี้ยวเบนที่ขอบ เมื่อพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ด้วยแผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า ผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมเกิดการผิดเพี้ยนอย่างมากตั้งแต่บริเวณพู่ข้างแรกๆ นอกจากนี้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงเนื่องจากการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบแตกต่างกันไป โดยอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงอย่างมากเมื่อใช้แผ่นย่อยรูปสามเหลี่ยมด้านไม่เท่า และการลดลงของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมจะน้อยลงเมื่อใช้แผ่นย่อยรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่า และแผ่นย่อยรูปหกเหลี่ยมด้านเท่าตามลำดับ สำหรับผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบส่งผลต่อการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเพียงเล็กน้อย โดยจะมีการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมเกิดขึ้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.31 dB

เมื่อเปลี่ยนรูปร่างเริ่มต้นของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะโดยเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  ต่างๆ ผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบและการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบจะส่งผลต่อระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ โดยจะทำให้มีระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ตื้นขึ้นน้อยลงเมื่อเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  มากขึ้น และการจัดเรียงพื้นผิวสะท้อนในลักษณะแบนราบยังคงมีการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมน้อยกว่ากรณีพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ และการแปรเปลี่ยนของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงเมื่อเข้ารูปเป็นรูปพาราโบลอยด์ที่มีค่า  $f/D$  มากขึ้น

ผลของการบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไม่ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ แต่ผลของการบดบังคลื่นจากสายอากาศป้อนกำลังคลื่นจะปรากฏอยู่บ้างในบางทิศทางขึ้นอยู่กับขนาดช่องเปิดของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

เมื่อพิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งพบว่า ความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นตามแนวแกน  $z$  (แกนของสายอากาศ) ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วม โดยทำให้พู่ข้างยกระดับสูงขึ้นตั้งแต่พู่ข้างแรกๆ เมื่อ  $|\Delta z_c^e| \leq 0.010$  เมตร ( $0.13 \lambda$ ) และแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมผิดเพี้ยนไปมากเมื่อ  $|\Delta z_c^e| \leq 0.015$  เมตร ( $0.2 \lambda$ ) และส่งผลให้ระดับโพลาริเซชันไขว้ยกระดับสูงขึ้นอย่างมาก โดยมีระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดต่ำกว่าระดับโพลาริเซชันร่วมมากที่สุดเพียง 15.80 dB เมื่อ  $|\Delta z_c^e| \leq 0.015$  เมตร นอกจากนี้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงอย่างมากเมื่อมีความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเกิดขึ้นตามแนวแกนของสายอากาศ ดังนั้นในการติดตั้งควรมีความคลาดเคลื่อนของจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นเกิดขึ้นตามแนวแกนของสายอากาศอยู่ในช่วงไม่เกิน  $0.06 \lambda$

ความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นรอบแกนทิศและแกนยกไม่ส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วม แต่จะส่งผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้ โดยระดับโพลาริเซชันไขว้มีระดับสูงขึ้น และระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์จะตื้นขึ้น เมื่อช่วงความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกนยกเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงและอัตราขยายแนวโพลาริเซชันไขว้เพิ่มขึ้น เมื่อช่วงความคลาดเคลื่อนของมุมที่หมุนรอบแกนยกเพิ่มขึ้น การลดลงของอัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมนั้นเกิดขึ้นถึง 0.69 dB เมื่อ  $|\Delta \theta_{rot}^e| \leq 3.0^\circ$

และเมื่อพิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นพบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้เกิดการเลื่อนไปทั้งแบบรูป เมื่อมีความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกนที่อยู่บนระนาบสนามแม่เหล็กที่มีการเลื่อนของลำคลื่นเกิดขึ้น โดยการเลื่อนไปของแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกนที่ตั้งฉากกับระนาบสนามแม่เหล็กที่มีการเลื่อนไปของลำคลื่นเกิดขึ้น ไม่ส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วม แต่จะส่งผลกระทบต่อดัชนีโพลาริเซชันไขว้ เช่น เมื่อมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ( $\Delta y_{shf} = \pm 0.03$  เมตร) ระดับโพลาริเซชันไขว้ยกกระดับสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีระดับโพลาริเซชันไขว้มากที่สุดต่ำกว่าระดับโพลาริเซชันร่วมมากที่สุดเพียง 24.46 dB นอกจากนี้ อัตราขยายแนวโพลาริเซชันร่วมลดลงอย่างมาก

ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่นไปตามแนวแกนสายอากาศไม่ส่งผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันร่วมและโพลาริเซชันไขว้ แต่ส่งผลบ้างกับระดับความลึกของตำแหน่งศูนย์ ดังนั้นในการติดตั้งสายอากาศชนิดนี้ควรคำนึงถึงความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และพยายามกำจัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ การกำจัดความคลาดเคลื่อนดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบระบบควบคุมและโครงสร้างของสายอากาศเป็นหลัก

จากการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการวัดพบว่า แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมที่ได้จากวัดมีลักษณะใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์เป็นอย่างมากในบริเวณพหุหลักและพหุข้างใกล้ๆ ซึ่งอยู่ภายในมุมองศาที่เชื่อถือได้ของย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามไกลเชิงระนาบ แบบรูปการแผ่พลังงานย่านสนามไกลในแนวโพลาริเซชันร่วมที่วัดได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากวิเคราะห์เมื่อรวมผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น และผลของการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบ และสายอากาศป้อนกำลังคลื่นมากที่สุด ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้น่าจะมาจากการสะท้อนภายในห้องทดสอบ ส่วนความแตกต่างของแบบรูปการแผ่พลังงานในแนวโพลาริเซชันไขว้อาจจะเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น โพลาริเซชันไขว้ของสายอากาศป้อนกำลังคลื่น การบดบังจากโครงสร้างยึดสายอากาศป้อนกำลังคลื่น และความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของแผ่นย่อย

## ข้อเสนอแนะ

1. ความสามารถในการสร้างลำคลื่นรูปแบบต่างๆ ของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อยมีความจำเป็นต้องอาศัยระเบียบวิธีทำให้เหมาะที่สุดเพื่อให้ได้แบบรูปตามที่ต้องการ แต่เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทำให้เหมาะที่สุดขึ้นอยู่กับตัวแปรควบคุมเริ่มต้นที่เหมาะสม ถ้าตัวแปรเริ่มต้นไม่เหมาะสม อาจทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์ลำคลื่นที่ต้องการได้ หรืออาจต้องใช้เวลาอย่างมาก เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยเสนอว่า ระเบียบวิธีโครงข่ายใยประสาท (neural network method) สามารถนำมาใช้เรียนรู้แบบรูปการแผ่พลังงานแต่ละแบบที่จะนำไปใช้งาน ซึ่งทำให้เวลาที่ใช้ในการลู่เข้าสู่แบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการลดน้อยลง แต่ถ้าสายอากาศชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้งานที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของลำคลื่นในจำนวนจำกัด รูปแบบของลำคลื่นเหล่านั้นสามารถสังเคราะห์ไว้และเก็บเป็นฐานข้อมูล และใช้สำหรับปรับเปลี่ยนลำคลื่นไปตามฐานข้อมูลที่มีอยู่เพื่อให้ได้ค่าอัตราส่วนระหว่างระดับสัญญาณที่ต้องการต่อระดับสัญญาณรบกวน (signal to noise ration, S/N) สูงที่สุด ขั้นตอนนี้อาจเกิดขึ้นจากการหาค่าอัตราส่วนดังกล่าวบนคอมพิวเตอร์โดยรับข้อมูลมาจากสายอากาศช่วย (auxiliary antenna) [62] มา



เปรียบเทียบกับแบบรูปที่มีอยู่ในฐานข้อมูล หรือตรวจสอบค่าอัตราส่วนดังกล่าวที่รับได้จริงจากการปรับเปลี่ยนลำดับขึ้นไปตามฐานข้อมูลที่มีอยู่ นอกจากนี้ถ้าต้องการให้ได้แบบรูปการแผ่พลังงานแบบต่างๆ ที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าต่ำสุดจริงๆ ขึ้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm) สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้

2. จากการวิเคราะห์ สายอากาศชนิดนี้มีระดับพู่ข้างที่สูงเกิดขึ้น ซึ่งอาจไม่เหมาะที่นำไปประยุกต์ใช้งานบางอย่างในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงการลดระดับพู่ข้างที่สูงที่เกิดขึ้น แต่มีข้อสันนิษฐานว่าระดับพู่ข้างที่สูงขึ้นนี้อาจเกิดมาจากอัตราส่วนของช่องว่างระหว่างแผ่นย่อยกับขนาดของแผ่นย่อย หรืออาจมาจากความไม่ต่อเนื่องของกระแสระหว่างแผ่นย่อย สาเหตุทั้งสองนี้ควรนำมาศึกษาเพิ่มเติม ซึ่งสามารถพิจารณาได้โดยการสังเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีระดับพู่ข้างที่ต่ำ แล้วสังเกตดูลักษณะการจัดเรียงของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น นอกจากนี้ผู้วิจัยมีข้อเสนอว่า ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้หลายวิธี เช่น ลดมุมมองคาที่หมุนรอบแกนยกของแผ่นย่อยลงเพื่อเป็นการเพิ่มความต่อเนื่องของกระแสระหว่างแผ่นย่อย ใช้วัสดุตัวนำที่มีความยืดหยุ่นมาเชื่อมต่อช่องว่างระหว่างแผ่นย่อย หรือจัดเรียงจานสะท้อนในลักษณะของจานสะท้อนคู่ และใช้เพียงพื้นผิวจานสะท้อนรองที่ปรับรูปลักษณะได้มาสร้างสนามไปตกกระทบบนจานสะท้อนหลักอย่างเหมาะสมแทนการใช้สายอากาศชนิดแถวลำดับ เป็นต้น แนวทางเหล่านี้ควรนำมาศึกษาต่อไป

3. ในบทผลกระทบบของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อสมรรถนะของสายอากาศและบทประยุกต์ใช้งานที่เป็นไปได้ ผู้วิจัยได้แสดงให้เห็นถึงผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย อย่างไรก็ตาม การแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เสนอไว้เป็นเพียงให้เห็นถึงแนวโน้มของผลกระทบที่มีต่อสมรรถนะของสายอากาศ แต่ถ้าจะให้ข้อมูลเพื่อนำไปใช้ออกแบบสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ควรแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้มากกว่านี้จึงจะได้ข้อสรุปที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างเหมาะสม การแปรเปลี่ยนที่ผู้วิจัยคิดว่าควรนำมาศึกษาต่อไปในอนาคตคือ รูปร่างของพื้นผิวสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้เริ่มต้น และจำนวนและขนาดของแผ่นย่อย เนื่องจากเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการกำหนดแบบรูปการแผ่พลังงานที่ต้องการ และลดความซับซ้อนที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมทางกล นอกจากนี้ผู้วิจัยคิดว่ายังมีลักษณะสมบัติบางประการของสายอากาศที่ควรนำมาวิเคราะห์คือ ความกว้างของแถบความถี่ และการสร้างลำดับแบบหลายลำดับโดยใช้สายอากาศชนิดแถวลำดับเป็นสายอากาศป้อนกำลังคลื่น

4. จากการทดสอบสายอากาศ ผลที่ได้จากการทดสอบยังไม่สามารถยืนยันความแม่นยำของระเบียบวิธีที่เสนอไว้ได้เท่าไรนัก เนื่องมาจากการทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบที่ใช้สามารถให้ข้อมูลเพียงในบริเวณลำคลื่นหลัก แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยวเบนที่ขอบของแผ่นย่อยแต่ละแผ่น และการบดบังคลื่นจากแผ่นย่อยล้อมรอบส่งผลในบริเวณพู่ข้างไกลๆ ดังนั้นเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่เสนอนี้ การทดสอบสายอากาศในย่านทดสอบแบบกะทัดรัด (compact antenna test range) ควรนำมาใช้ทดสอบสายอากาศชนิดนี้ในอนาคต นอกจากนี้ยังมีปัญหาบางประการที่ต้องปรับปรุงในห้องทดสอบ เช่น ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของหัววัด กำลังที่ลดลงอย่างมากเมื่อผ่านเครื่องทดสอบค่าพารามิเตอร์เอส เป็นต้น และสายอากาศต้นแบบที่ใช้ทดสอบยังมีข้อบกพร่องบางประการในการออกแบบระบบควบคุมทางกล การติดตั้งสายอากาศ และสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่ใช้ก็ยังมีอัตราส่วนของระดับพู่หน้าต่อพู่หลังที่ต่ำ ปัญหาดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขได้ เช่น มีตัวขยายกำลัง ออกแบบสายอากาศป้อนกำลังคลื่นที่มีอัตราส่วนของระดับพู่หน้าต่อพู่หลังที่สูง วิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากการกระเจิงของโครงสร้างยึดสายอากาศ และปรับปรุงระบบควบคุมทางกลให้ดีขึ้น เป็นต้น



## รายการอ้างอิง

- [1] Y. Hwang. Satellite Antenna. Proceedings of the IEEE vol.80, no.1 (January 1992) : pp.183-193.
- [2] Y.-T. Lo, and S.-W.Lee, Eds. Antenna Handbook. New York: Chapman & Hall, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [3] A.I. Zaghloul, Y. Hwang, R.M. Sorbello, and F.T. Assal. Advance in Multibeam Communications Satellite Antennas. Proceedings of the IEEE vol.78, no.7 (July 1990) : pp.1214-1232.
- [4] S. von Hoerner. The Design of Correcting Secondary Reflectors. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.24, no.5 (May 1976) : pp.336-340.
- [5] D. Duan, and Y. Rahmat-Samii. A Generalized Diffraction Synthesis Technique for High Performance Reflector Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.43, no.1 (January 1995) : pp.27-40.
- [6] A.R. Cherrette, S.-W. Lee, and R.J. Acosta. A Method for Producing a Shaped Contour Radiation Pattern Using a Single Shaped Reflector and a Single Feed. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.37, no.6 (June 1989) : pp.698-705.
- [7] J.R. Bergmann, F.L. Teixeira, and F.J.S. Moreira. Diffraction Synthesis of Reflector Antennas: An Efficient Approach for the Optimization Procedure. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium vol.1 (1993) : pp.266-269.
- [8] A.C. Schell, P.R. Franchi, W.B. Goggins, Jr., and G.R. Forbes. An Experimental Evaluation of Multiplate Antenna Properties. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.14, no.5 (September 1966) : pp.543-550.
- [9] A.C. Schell. The Multiplate Antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.14, no.5 (September 1966) : pp.550-560.
- [10] P.J.B. Clarricoats, and H. Zhou. Design and Performance of a Reconfigurable Mesh Reflector Antenna Part 1: Antenna Design. IEE Proceedings Part H vol.138, no.6 (December 1991) : pp.485-492.
- [11] P.J.B. Clarricoats, and H. Zhou. Design and Performance of a Reconfigurable Mesh Reflector Antenna Part 2: Antenna Performance. IEE Proceedings Part H vol.138, no.6 (December 1991) : pp.493-496.
- [12] K. Pontoppian, J.P. Boisset, and G.A.E. Crone. Reconfigurable Reflector Technology. Proceedings of IEE Colloquium on Satellite Antenna Technology in the 21<sup>st</sup> Century (June 1991) : pp.10/1-10/5.
- [13] R.C. Brown. A Reconfigurable Reflector Using Hinged Panels. Proceedings of IEE International Conference on Antennas and Propagation (1991) : pp.531-534.
- [14] P.J.B. Clarricoats, A.D. Monk, and H. Zhou. Array-Fed Reconfigurable Reflector for Spacecraft Applications. IEE Proceedings Part H vol.141, no.6 (December 1994) : pp.531-535.

- [15] A.D. Monk, and P.J.B. Clarricoats. Reconfigurable Reflector Antenna Producing Pattern Nulls. IEE Proceedings Part H vol.142, no.2 (April 1995) : pp.121-128.
- [16] H.-S. Yoon, G. Washington, and W.H. Theunissen. Analysis and Design of Doubly Curved Piezoelectric Strip-Actuated Aperture Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.48, no.5 (May 2000) : pp.755-763.
- [17] W.H. Theunissen, H.T. Yoon, W.D. Burnside, and G.N. Washington. Reconfigurable Contour Beam-Reflector Antenna Synthesis Using a Mechanical Finite-Element Description of the Adjustable Surface. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.49, no.2 (February 2001) : pp.272-279.
- [18] P.K. Agrawal, M.S. Anderson, and M.F. Card. Preliminary Design of Large Reflectors with Flat Facets. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.29, no.4 (July 1981) : pp.688-694.
- [19] A.C. Brown, Jr. Irregular Segmentation of Paraboloidal Reflector. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (1996) : pp.242-245.
- [20] S. Phermphoonwatanasuk, and C. Waiyapattanakorn. The Flat Reconfigurable Paneled Reflector Antenna. 20<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON20) Bangkok, Thailand (1997) : pp.686-691.
- [21] S. Phermphoonwatanasuk, and C. Waiyapattanakorn. Small Flat Multi-Panel Reconfigurable Reflector Antenna: Theoretical Investigation. Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Nantes, France (July 1998) : pp.346.
- [22] M. Indravuth, C. Waiyapattanakorn, and S. Phermphoonwatanasuk. Smart Antenna versus Structural Reconfigurable Antenna. International Wireless and Telecommunications Symposium/Exhibition (IWTS) Shah Alam, Malaysia vol.1 (May 1999) : pp.128-130.
- [23] P.D. Patel, K.K. Chan. Optimisation of Contoured Beams for Satellite Antennas. IEE Proceedings Part H vol.132, no.6 (October 1985) : pp.400-406.
- [24] O.M. Bucci, G. D'Elia, G. Mazzarella, and G. Panariello. Antenna Pattern Synthesis: A New General Approach. Proceedings of the IEEE vol.82, no.3 (March 1994) : pp.358-371.
- [25] W.L. Ko, R. Mittra, and S.-W. Lee. Aperture Blockage in Reflector Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.32, no.3 (March 1984) : pp.282-287.
- [26] W.V.T. Rusch, L.R. Welch, and G.E. Mires. Observation-Point-Dependent Blocking Shadows on a Reflector Antenna. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.37, no.6 (June 1989) : pp.690-697.
- [27] A. Moldsvor, and P.-S. Kidal. Analysis of Aperture Blockage in Reflector Antennas by Using Obstacle-Located Blockage Currents. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.40, no.1 (January 1992) : pp.100-102.
- [28] P.Y. Ufimtsev. Method of Edge Waves in the Physical Theory of Diffraction. Electromagnetics vol.11 (April-June 1991) : pp. 125-160.

- [29] S. Phermphoonwatanasuk, and C. Waiyapattanakorn. Neighboring Panels Blocking and Diffraction Effects on the Performance of the Small Flat Multi-Panel Reconfigurable Reflector Antenna. Proceedings 2000 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2000) Fukuoka, Japan vol.1 (August 2000) : pp.41-44.
- [30] S. Phermphoonwatanasuk, and C. Waiyapattanakorn. Numerical Study of the Small Multi-Panel Reconfigurable Reflector Antenna's Performance. IEICE Transaction on Communication vol.E84-B, no.9 (September 2001) : pp. 2421-2435.
- [31] A. Michaeli. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.32, no.3 (March 1984) : pp. 252-258.
- [32] A. Michaeli. Elimination of Infinities in Equivalent Edge Currents, Part I: Fringe Current Components. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.34, no.7 (July 1986) : pp. 912-918.
- [33] A. Michaeli. Elimination of Infinities in Equivalent Edge Currents, Part II: Physical Optics Components. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.34, no.8 (August 1986) : pp.1034-1037.
- [34] R. Pokuls, and T.J.F. Pavlasek. A New on Specular Point Determination for Collimating Reflector Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.38, no.9 (September 1990) : pp.1507-1512.
- [35] S.-W. Lee, P. Cramer, Jr., K. Woo, and Y. Rahmat-Samii. Diffraction by an Arbitrary Subreflector: GTD Solution. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.27, no.3 (March 1979) : pp.305-316.
- [36] S.-W. Lee, and R. Mittra. Fourier Transform of a Polygonal Shape Function and Its Application in Electromagnetics. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.31, no.1 (January 1991) : pp.99-103.
- [37] J.P. McKay, and Y. Rahmat-Samii. Compact Range Reflector Analysis Using the Plane Wave Spectrum Approach with an Adjustable Sampling Rate. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.39, no.6 (June 1991) : pp.746-753.
- [38] R.J. Pogorzelski. The Ludwig Integration Algorithm for Triangular Subregions. Proceedings of the IEEE vol.73, no.4 (April 1985) : pp.837-838.
- [39] M.L.X. Dos Santos, and N.R. Rabelo. On the Ludwig Integration Algorithm for Triangular Subregions. Proceedings of the IEEE vol.74, no.10 (October 1986) : pp.1455-1456.
- [40] A.C. Brown, Jr. Comparison of Various Image Induction (II) Methods with Physical Optics (PO) for the Far-Field Computation of Flat-Sectioned Segmented Reflectors. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.44, no.8 (August 1996) : pp.1133-1141.
- [41] G. Cortes-Medellin, and P.F. Goldsmith. Analysis of Active Surface Reflector Antenna for a Large Millimeter Wave Radio Telescope. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.42, no.2 (February 1994) : pp.176-183.

- [42] ศุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข. การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลา. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [43] T. Kenjo. Stepping Motors and Their Microprocessor Controls. New York: Oxford University Press., 1986.
- [44] S.H. Lee, and R.C. Rudduck. Aperture Integration and GTD Techniques Used in the NEC Reflector Antenna Code. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.33, no.2 (February 1985) : pp.189-194.
- [45] O.M. Bucci, G. D'Elia, G. Franceschetti, and R. Pierri. Efficient Computation of the Far Field of Parabolic Reflectors by Pseudo-Sampling Algorithm. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.31, no.6 (November 1983) : pp.931-937.
- [46] C.C. Hung, and R. Mittra. Secondary Pattern and Focal Region Distribution of Reflector Antennas under Wide-angle Scanning. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.31, no.5 (September 1983) : pp.756-763.
- [47] C. A. Balanis. Advanced Engineering Electromagnetics. Singapore: John Wiley & Sons Inc., 1989.
- [48] M. Oodo, and M. Ando. Equivalence of Physical Optics and Aperture Field Integration Method -Integration Surface for Polyhedron Approximate Reflectors-. IEICE Transaction on Electronic vol.E80-C, no.11 (November 1997) : pp. 2421-2435.
- [49] A.D. Yaghjian. Equivalence of Surface Current and Aperture Field Integration for Reflector Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.32, no.12 (December 1984) : pp.1355-1358.
- [50] R.G. Kouyoumjian, and P.H. Pathak. A Uniform Geometrical Theory of Diffraction for and Edge in a Perfectly Conducting Surface. Proceedings of the IEEE vol.62, no.11 (November 1974) : pp.1448-1461.
- [51] S. Silver. Microwave Antenna Theory and Design. New York: McGraw-Hill Book Co., 1949.
- [52] J.B. Keller. Geometrical Theory of Diffraction. Journal of the Optical Society of America vol.52, no.2 (February 1962) : pp.116-130.
- [53] S.-W. Lee. Comparison of Uniform Asymptotic Theory and Ufimtsev's Theory of Electromagnetic Edge Diffraction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.25, no.2 (March 1977) : pp.162-170.
- [54] R.A. Shore, and A.D. Yaghjian. Incremental Diffraction Coefficients for Planar Surfaces. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.36, no.1 (January 1988) : pp.55-70.
- [55] E.F. Knott. The Relationship Between Mitzner's ILDC and Michaeli's Equivalent Currents. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.33, no.1 (January 1985) : pp.112-114.
- [56] M. Ando, T. Murasaki, and T. Kinoshita. Elimination of False Singularities in GTD Equivalent Edge Currents. IEE Proceedings Part H vol.138, no.4 (August 1991) : pp.289-296.

- [57] A.C. Ludwig. The Definitions of Cross Polarisation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.21, no. (1973) pp.116-119, 1973.
- [58] B. Khayatian, and Y. Rahmat-Samii. Characteristics of Dual Reflector Antennas with Gaps Placed on the Subreflector: MoM and PO Analysis. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (1999) : pp.2332-2335.
- [59] วิลาศ วงศ์แจ่มบุญ. สายอากาศจางสะท้อนเดี่ยวตัวรูปสำหรับพื้นที่ครอบคลุมซับซ้อน. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญา-  
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [60] อนล ศาสตร์. ย่านทดสอบสายอากาศชนิดสนามใกล้เชิงระนาบ. วิทยานิพนธ์ระดับปริญญา-  
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [61] R.C. Wittmann, B.K. Alpert, and M.H. Francis. Near-Field Antenna Measurements Using Nonideal Measurement Locations. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.46, no.5 (May 1998) : pp.716-722.
- [62] R.H. Ott, and R.B. Dybdal. The Effects of Reflector Antenna Diffraction on the Interference Cancellation Performance of Coherent Sidelobe Cancellers. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.34, no.3 (March 1986) : pp.432-439.
- [63] A. Michaeli. Equivalent Currents for Second-Order Diffraction by the Edges of Perfectly Conducting Polygonal Surfaces. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.35, no.2 (February 1987) : pp.183-190.
- [64] P.M. Johansen. Uniform Physical Theory of Diffraction Equivalent Edge Currents for Truncated Wedge Strips. IEEE Transactions on Antennas and Propagation vol.44, no.7 (July 1996) : pp.989-995.
- [65] อรุณี เจริญราช. แคลคูลัส เล่ม 3. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

สนามเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบ

การศึกษาปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบทำได้หลายวิธีดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 สำหรับในภาคผนวกนี้จะอธิบายถึงหลักการของทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพตามแนวความคิดของกรรมวิธีกระแสสมมูลที่ขอบของมิคาเอลลี [31] ซึ่งนำไปสู่การหาสนามเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบ ในทำนองเดียวกันกับทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงเรขาคณิต ปรากฏการณ์เลี้ยวเบนที่ขอบที่เป็นเส้นตรงหรือเป็นมุมสามารถศึกษาได้จากทฤษฎีการวิเคราะห์ปัญหาปริภูมิซึ่งมีสายอากาศไดโพลไฟฟ้าและไดโพลแม่เหล็กขนาดสั้นมากที่วางตัวในทิศทาง  $z$  เป็นตัวกระตุ้น ณ ตำแหน่งไกลมาก จากการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าวองค์ประกอบในทิศทาง  $z$  ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระเจิง [42] เป็นดังสมการ

$$H_z = \frac{H_z^i(Q_D)}{4j\pi N} \left\{ \int_L -\cot \left[ \frac{\phi - \phi' + w}{2N} \right] e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw + \int_{L'} \cot \left[ \frac{\phi - \phi' + w}{2N} \right] e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw + \int_L -\cot \left[ \frac{\phi + \phi' + w}{2N} \right] e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw + \int_{L'} \cot \left[ \frac{\phi + \phi' + w}{2N} \right] e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw \right\} e^{jkz \cos \theta'} \quad (ก.1ก)$$

$$E_z = \frac{E_z^i(Q_D)}{4j\pi N} \left\{ \int_L -\cot \left[ \frac{\phi - \phi' + w}{2N} \right] e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw + \int_{L'} \cot \left[ \frac{\phi - \phi' + w}{2N} \right] e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw - \int_L -\cot \left[ \frac{\phi + \phi' + w}{2N} \right] e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw - \int_{L'} \cot \left[ \frac{\phi + \phi' + w}{2N} \right] e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw \right\} e^{jkz \cos \theta'} \quad (ก.1ข)$$

เนื่องจาก  $\int_{L'} e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} \left( \frac{1}{2j} \cot \left[ \frac{\phi \pm \phi' + w}{2N} \right] \right) dw = \int_L e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} \left( \frac{1}{2j} \cot \left[ \frac{\phi \pm \phi' - w}{2N} \right] \right) dw$  สมการ (ก.1) เขียนใหม่ได้เป็น

$$H_z = \frac{H_z^i(Q_D)}{4j\pi N} \left\{ \int_L \left( \cot \left[ \frac{\phi - \phi' - w}{2N} \right] - \cot \left[ \frac{\phi - \phi' + w}{2N} \right] \right) e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw + \int_L \left( \cot \left[ \frac{\phi + \phi' - w}{2N} \right] - \cot \left[ \frac{\phi + \phi' + w}{2N} \right] \right) e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw \right\} e^{jkz \cos \theta'} \quad (ก.2ก)$$

$$E_z = \frac{E_z^i(Q_D)}{4j\pi N} \left\{ \int_L \left( \cot \left[ \frac{\phi - \phi' - w}{2N} \right] - \cot \left[ \frac{\phi - \phi' + w}{2N} \right] \right) e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw - \int_L \left( \cot \left[ \frac{\phi + \phi' - w}{2N} \right] - \cot \left[ \frac{\phi + \phi' + w}{2N} \right] \right) e^{jk\rho \sin \theta' \cos w} dw \right\} e^{jkz \cos \theta'} \quad (ก.2ข)$$

จากเอกลักษณ์  $\cot A - \cot B = \frac{2 \sin(B - A)}{\cos(B - A) - \cos(B + A)}$  ทำให้เขียนสมการ (ก.2) ใหม่ได้เป็น

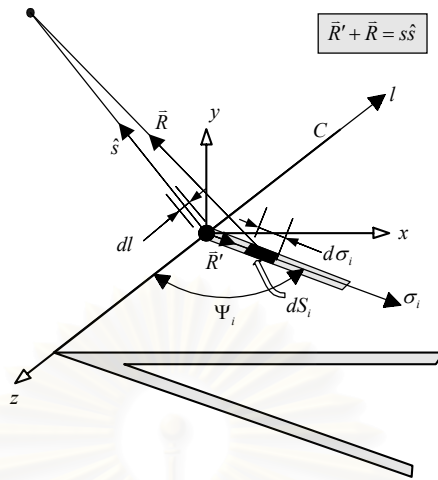
$$H_z = H_z^i(Q_D) [U(X, \phi - \phi') + U(X, \phi + \phi')] e^{jkz \cos \theta'} \quad (ก.3ก)$$

$$E_z = E_z^i(Q_D) [U(X, \phi - \phi') - U(X, \phi + \phi')] e^{jkz \cos \theta'} \quad (ก.3ข)$$

$$\text{โดยที่ } U(X, \Phi) = \frac{1}{2\pi jN} \int_L \left[ \frac{\sin(w/N)}{\cos(w/N) - \cos(\Phi/N)} e^{jX \cos w} \right] dw$$

ตามแนวความคิดของกรรมวิธีกระแสสมมูลที่ขอบของมิคาเอลลี กระแสสมมูลที่ขอบเป็นแหล่งกระแสสมมูลซึ่งสามารถกำเนิดสนามกระเจิงได้เช่นเดียวกับสนามกระเจิงจากแหล่งกระแสจริงตามเงื่อนไขขอบเขต ดังนั้นในการหากระแสสมมูลที่ขอบจึงต้องแยกพิจารณาออกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกพิจารณาสนามที่กระเจิงจากแหล่งกระแสจริงที่ขอบ และขั้นตอนที่สองพิจารณาปัญหาสมมูลของสนามที่กระเจิงจากแหล่งกระแสสมมูล จากขั้นตอนแรกเมื่อพิจารณา

สนามไฟฟ้าที่กระเจิงจากแหล่งกระแสจริงที่ขอบ ตามรูป ก-1 สนามไฟฟ้าที่กระเจิงจากแหล่งกระแสที่ไหลบนแถบเล็กหลายๆ บนขอบ  $C$  [51] สามารถหาได้ดังสมการ



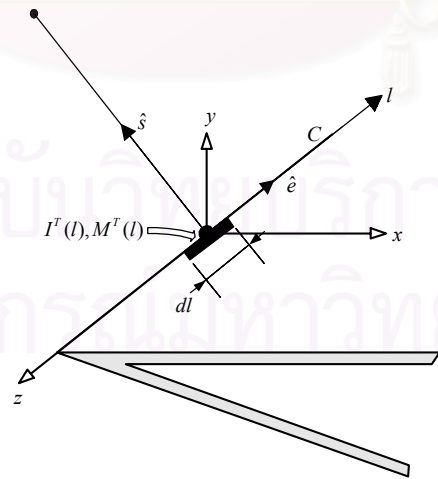
รูป ก-1 การกระเจิงจากแหล่งกระแสที่ไหลบนแถบเล็กหลายๆ บนขอบ  $C$

$$\vec{E} = jkZ_0 \sum_{i=1}^2 \iint_{S_i} \hat{s} \times [\hat{s} \times \vec{J}_i(l, \sigma_i)] G(\vec{R}_i', \vec{R}) dS_i \tag{ก.4}$$

โดยที่  $S_i$  คือพื้นผิวตามเส้นขอบ  $C$  ทั้งพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของรูปสี่เหลี่ยมซึ่งบ่งชี้ด้วยดัชนีล่าง  $i$  ( $i=1$  คือผิวด้านบน และ  $i=2$  คือผิวด้านล่าง) และ  $G(\vec{R}_i', \vec{R}) = \frac{e^{-jk\|\vec{r}-\vec{R}_i'\|}}{4\pi\|\vec{r}-\vec{R}_i'\|}$  คือกรีนฟังก์ชันในอวกาศว่าง (free space)

เมื่อพิจารณาสนามไฟฟ้าที่จุดสังเกตไกลมาก ( $R \rightarrow \infty$ ) พจน์ที่แสดงถึงวัฏภาคและขนาดสามารถประมาณได้เป็น  $\|\vec{r}-\vec{R}_i'\| \approx s - \vec{R}_i' \cdot \hat{s} = s - \sigma_i \hat{\sigma}_i \cdot \hat{s}$  และ  $\|\vec{r}-\vec{R}_i'\| \approx s$  ตามลำดับ ดังนั้นเขียนสมการ (ก.4) ใหม่ได้เป็น

$$\vec{E} \approx jkZ_0 \sum_{i=1}^2 \int_{C_0} \hat{s} \times [\hat{s} \times \vec{J}_i(l, \sigma_i)] \frac{e^{-jks + jk\sigma_i \hat{\sigma}_i \cdot \hat{s}}}{4\pi s} d\sigma_i dl \sin \Psi_i \tag{ก.5}$$



รูป ก-2 การกระเจิงจากแหล่งกระแสสมมูลตามแนวความคิดของกรรมวิธีกระแสสมมูลที่ขอบของมิคาเอลลี

เมื่อพิจารณาแหล่งกระแสสมมูลตามทฤษฎีการเลี้ยวเบนเชิงกายภาพโดยอาศัยแนวความคิดของกรรมวิธีกระแสสมมูลที่ขอบของมิคาเอลลี ซึ่งในที่นี้พิจารณาเพียงกระแสสมมูลที่ขอบอันดับหนึ่ง โดยละเลยกระแสสมมูลที่ขอบอันดับ

สอง สำหรับในกรณีกระแสสมมูลที่ขอบอันดับสองนั้นสามารถศึกษาได้จาก [63] และ [64] จากแนวความคิดดังกล่าว สนามไฟฟ้ากระแสที่เกิดจากกระแสที่ไหลบนขอบ  $C$  ดังรูป ก-2 สามารถหาได้ดังสมการ

$$\bar{E}^{PTD} = \bar{E}^{PO} + \bar{E}^{FW} = jk \int_C [Z_o I^T(l) \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e}) + M^T(l) \hat{s} \times \hat{e}] \frac{e^{-jks}}{4\pi s} dl \quad (ก.6ก)$$

$$\bar{E}^{PO} = jk \int_C [Z_o I^{PO}(l) \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e}) + M^{PO}(l) \hat{s} \times \hat{e}] \frac{e^{-jks}}{4\pi s} dl \quad (ก.6ข)$$

$$\bar{E}^{FW} = jk \int_C [Z_o I^{FW}(l) \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e}) + M^{FW}(l) \hat{s} \times \hat{e}] \frac{e^{-jks}}{4\pi s} dl \quad (ก.6ค)$$

โดยที่  $I^T(l) = \sum_{i=1}^2 I_i^T(l) = \sum_{i=1}^2 [I_i^{PO}(l) + I_i^{FW}(l)]$ ,  $M^T(l) = \sum_{i=1}^2 M_i^T(l) = \sum_{i=1}^2 [M_i^{PO}(l) + M_i^{FW}(l)]$  คือความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสมมูลรวมที่ขอบและกระแสแม่เหล็กสมมูลรวมที่ขอบตามลำดับ ความหนาแน่นของกระแสสมมูลรวมที่ขอบนี้ประกอบด้วย กระแสสมมูลตามกรรมวิธีที่ศตวรรษที่ศตวรรษกายภาพและกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ได้จากสมการ (ก.5) และ (ก.6ก) เป็นสนามไฟฟ้าเนื่องจากแหล่งกระแสที่สมมูลกัน ดังนั้นเมื่อเทียบสมการทั้งสองจะได้

$$Z_o \hat{s} \times \left[ \hat{s} \times \sum_{i=1}^2 \int_0^\infty \bar{J}_i(l, \sigma_i) e^{jk\sigma_i \hat{\sigma}_i \cdot \hat{s}} d\sigma_i \sin \Psi_i \right] = \sum_{i=1}^2 Z_o I_i^T(l) \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e}) + M_i^T(l) \hat{s} \times \hat{e} \quad (ก.7)$$

ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสมมูลรวมและกระแสแม่เหล็กสมมูลรวมที่ขอบบนแต่ละด้านของขอบ  $C$  หาได้โดยการดำเนินการแบบจุดกับสมการ (ก.7) ด้วย  $\hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e})$  และ  $\hat{s} \times \hat{e}$  ตามลำดับดังนี้

$$\|\hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e})\|^2 I_i^T(l) = [\hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e})] \cdot [\hat{s} \times (\hat{s} \times \bar{K}_i)] \quad (ก.8ก)$$

$$\|\hat{s} \times \hat{e}\|^2 M_i^T(l) = Z_o (\hat{s} \times \hat{e}) \cdot [\hat{s} \times (\hat{s} \times \bar{K}_i)] \quad (ก.8ข)$$

โดยที่  $\bar{K}_i = \int_0^\infty \bar{J}_i(l, \sigma_i) e^{jk\sigma_i \hat{\sigma}_i \cdot \hat{s}} d\sigma_i \sin \Psi_i$  และจากเอกลักษณ์เวกเตอร์  $\bar{A} \cdot (\bar{B} \times \bar{C}) = \bar{C} \cdot (\bar{A} \times \bar{B}) = \bar{B} \cdot (\bar{C} \times \bar{A})$  สมการ

(ก.8ก) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\|\hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e})\|^2 I_i^T(l) = \hat{s} \cdot \{ (\hat{s} \times \bar{K}_i) \times [\hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{e})] \} \quad (ก.9)$$

ต่อมาใช้เอกลักษณ์เวกเตอร์  $\bar{A} \times (\bar{B} \times \bar{C}) = (\bar{A} \cdot \bar{C})\bar{B} - (\bar{A} \cdot \bar{B})\bar{C}$  จะได้

$$\|\hat{e} \times \hat{s}\|^2 I_i^T(l) = \hat{s} \cdot \{ [(\hat{s} \times \bar{K}_i) \cdot (\hat{s} \times \hat{e})] \hat{s} - [(\hat{s} \times \bar{K}_i) \cdot \hat{s}] (\hat{s} \times \hat{e}) \} \quad (ก.10)$$

เนื่องจาก  $(\hat{s} \times \bar{K}_i) \cdot \hat{s} = 0$  ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสมมูลรวมที่ขอบแต่ละด้านเป็น

$$I_i^T(l) = \frac{(\hat{s} \times \bar{K}_i) \cdot (\hat{s} \times \hat{e})}{\|\hat{e} \times \hat{s}\|^2} = \frac{\hat{s} \cdot [(\hat{s} \times \hat{e}) \times \bar{K}_i]}{\|\hat{e} \times \hat{s}\|^2} \quad (ก.11)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อใช้เอกลักษณ์เวกเตอร์ข้างต้นกับสมการ (ก.8ข) ความหนาแน่นของกระแสแม่เหล็กสมมูลรวมที่ขอบแต่ละด้านเป็น

$$M_i^T(l) = Z_o \frac{\hat{e} \cdot (\hat{s} \times \bar{K}_i)}{\|\hat{s} \times \hat{e}\|^2} \quad (ก.12)$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้น เมื่อพิจารณานบนผิวด้านบน ( $i=1$ ) ของรูปลิมิตดังรูป ก-3 เวกเตอร์ต่างๆ ที่สอดคล้องกับระบบพิกัดของผิวด้านบนเป็นดังนี้

$$\hat{s} = \sin \theta \cos \phi \hat{x}_1 + \sin \theta \sin \phi \hat{y}_1 + \cos \theta \hat{z}_1 = \sin \theta \cos \phi \hat{x} + \sin \theta \sin \phi \hat{y} + \cos \theta \hat{z} \quad (ก.13ก)$$

$$\hat{e} = -\hat{z}_1 = -\hat{z} \quad (ก.13ข)$$





$$J_{1z} = \frac{j \cos \theta'}{k \sin^2 \theta'} \left[ -\frac{\partial H_z}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \rho} \right]_{\phi=0} - \frac{j \omega \varepsilon}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} \right]_{\phi=0} \quad (\text{ก.22})$$

โดยที่  $X = k \rho \sin \theta'$ ,  $\Phi = \phi \pm \phi'$ , และ  $\frac{\partial X}{\partial \rho} = k \sin \theta'$ ,  $\frac{\partial \Phi}{\partial \phi} = 1$  ดังนั้นเขียนสมการ (ก.22) ใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} J_{1z} &= \frac{j \cos \theta'}{k \sin^2 \theta'} \left[ -\frac{\partial H_z}{\partial X} k \sin \theta' \right]_{\phi=0} - \frac{j \omega \varepsilon}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{k \sin \theta'}{X} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \right]_{\phi=0} \\ &= -j \cot \theta' \frac{\partial H_z}{\partial X} \Big|_{\phi=0} - \frac{j Y_0}{\sin \theta'} \left[ \frac{1}{X} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \right]_{\phi=0} \end{aligned} \quad (\text{ก.23})$$

เมื่อแทนสมการ (ก.3ก) ลงในพจน์  $\frac{\partial H_z}{\partial X} \Big|_{\phi=0}$  จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial X} \Big|_{\phi=0} &= \frac{\partial}{\partial X} \left[ H_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta'} (U(X, \phi - \phi') + U(X, \phi + \phi')) \right]_{\phi=0} \\ &= 2H_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta'} \frac{\partial U(X, \phi')}{\partial X} \end{aligned} \quad (\text{ก.24})$$

เมื่อพิจารณาพจน์  $\frac{1}{X} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \Big|_{\phi=0}$  โดยแทนสมการ (ก.3ข) ลงไปจะได้

$$\frac{1}{X} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \Big|_{\phi=0} = \frac{1}{X} \frac{\partial E_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta'} U(X, \Phi_1)}{\partial \Phi_1} \Big|_{\phi=0} - \frac{1}{X} \frac{\partial E_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta'} U(X, \Phi_2)}{\partial \Phi_2} \Big|_{\phi=0} \quad (\text{ก.25})$$

โดยที่  $\Phi_1 = \phi - \phi'$  และ  $\Phi_2 = \phi + \phi'$  ซึ่งเมื่อพิจารณาพจน์  $\frac{\partial U(X, \Phi)}{\partial \Phi}$  จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial U(X, \Phi)}{\partial \Phi} &= \frac{1}{2\pi jN} \int_L \left[ \frac{-\sin(w/N) e^{jX \cos w}}{[\cos(w/N) - \cos(\Phi/N)]^2} \frac{\sin(\Phi/N)}{N} \right] dw \\ &= -\frac{\sin(\Phi/N)}{2\pi jN^2} \int_L \left[ \frac{\sin(w/N) e^{jX \cos w}}{[\cos(w/N) - \cos(\Phi/N)]^2} \right] dw \end{aligned} \quad (\text{ก.26})$$

จากสมการ (ก.26) พจน์ปริพันธ์ (integral) หาได้โดยอาศัยการหาปริพันธ์โดยแยกส่วน (integration by part) ดังนี้  
ในขั้นต้นกำหนดให้  $u_o = w/N$  ดังนั้น  $dw = N du_o$  และพจน์ปริพันธ์เป็น

$$A = \int \left[ \frac{\sin u_o e^{jX \cos(Nu_o)} N}{[\cos u_o - \cos(\Phi/N)]^2} \right] du_o$$

เมื่อกำหนดให้  $u = Ne^{jX \cos(Nu_o)}$ ,  $du = -jX \sin(Nu_o) N^2 e^{jX \cos(Nu_o)} du_o$ ,  $v = \frac{1}{\cos u_o - \cos(\Phi/N)}$  และ

$dv = \frac{\sin u_o}{[\cos u_o - \cos(\Phi/N)]^2} du_o$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} A &= uv - \int v du = \frac{Ne^{jX \cos(Nu_o)}}{\cos u_o - \cos(\Phi/N)} + \int \left[ \frac{jX \sin(Nu_o) N^2 e^{jX \cos(Nu_o)}}{\cos u_o - \cos(\Phi/N)} \right] du_o \\ &= \frac{Ne^{jX \cos(Nu_o)}}{\cos u_o - \cos(\Phi/N)} + \int \left[ \frac{jX \sin w N e^{jX \cos(Nu_o)}}{\cos u_o - \cos(\Phi/N)} \right] dw \end{aligned} \quad (\text{ก.27})$$

แทนสมการ (ก.27) ลงในสมการ (ก.26) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{X} \frac{\partial U(X, \Phi)}{\partial \Phi} &= -\frac{\sin(\Phi/N)}{2\pi jN X} \frac{e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) - \cos(\Phi/N)} \Big|_{w=\pi/2+j\infty}^{3\pi/2+j\infty} - \frac{\sin(\Phi/N)}{2\pi N} \int_L \left[ \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) - \cos(\Phi/N)} \right] dw \\ &= -\frac{\sin(\Phi/N)}{2\pi N} \int_L \left[ \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) - \cos(\Phi/N)} \right] dw \end{aligned} \quad (ก.28)$$

เมื่อแทน  $\Phi_1 = \phi - \phi'$  และ  $\Phi_2 = \phi + \phi'$  ลงในสมการ (ก.28) จะได้

$$\frac{1}{X} \frac{\partial U(X, \Phi_1)}{\partial \Phi_1} \Big|_{\phi=0} = \frac{\sin(\phi'/N)}{2\pi N} \int_L \left[ \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) - \cos(\phi'/N)} \right] dw \quad (ก.29ก)$$

$$\frac{1}{X} \frac{\partial U(X, \Phi_2)}{\partial \Phi_2} \Big|_{\phi=0} = -\frac{\sin(\phi'/N)}{2\pi N} \int_L \left[ \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) - \cos(\phi'/N)} \right] dw \quad (ก.29ข)$$

และแทนสมการ (ก.29ก) และ (ก.29ข) ลงในสมการ (ก.25) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{1}{X} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \Big|_{\phi=0} &= \frac{2E_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta'}}{X} \frac{\partial U(X, \Phi_1)}{\partial \Phi_1} \Big|_{\phi=0} \\ &= 2E_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta'} \frac{\sin(\phi'/N)}{2\pi N} \int_L \left[ \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) - \cos(\phi'/N)} \right] dw \end{aligned} \quad (ก.30)$$

จากสมการ (ก.19ก) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในทิศทาง  $x$  เป็น

$$J_{1x} = H_z \Big|_{\phi=0} = H_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta'} [U(X, \phi - \phi') + U(X, \phi + \phi')] \Big|_{\phi=0} \quad (ก.31)$$

โดยที่  $X = k\rho \sin \theta' \Big|_{\phi=0} = kx \sin \theta'$  และเนื่องจาก  $U(X, -\phi') = U(X, \phi')$  ดังนั้น

$$J_{1x} = 2H_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta'} U(X, \phi') \quad (ก.32)$$

แทนสมการ (ก.32) ลงใน  $K_{1x}$  จะได้

$$K_{1x} = \int_0^\infty 2H_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta'} U(X, \phi) e^{jk\sigma_1 \hat{\sigma}_1 \cdot \hat{s}} \sin \Psi_1 d\sigma_1 \quad (ก.33)$$

จากรูป ก-3  $\hat{\sigma}_1 = \sin \Psi_1 \hat{x} + \cos \Psi_1 \hat{z}$  ดังนั้น  $\hat{\sigma}_1 \cdot \hat{s} = \sin \Psi_1 \sin \theta \cos \phi + \cos \Psi_1 \cos \theta$  และเนื่องจาก  $z = \sigma_1 \cos \Psi_1$ ,  $x = \sigma_1 \sin \Psi_1$  ทำให้

$$\begin{aligned} K_{1x} &= \int_0^\infty \frac{2H_z^i(Q_D)}{2\pi jN} \int_L \frac{\sin(w/N) e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) - \cos(\phi'/N)} e^{jk\sigma_1 \cos \Psi_1 \cos \theta' + jk\sigma_1 (\sin \Psi_1 \sin \theta \cos \phi + \cos \Psi_1 \cos \theta)} \sin \Psi_1 dw d\sigma_1 \\ &= \frac{2H_z^i(Q_D)}{2\pi jN} \int_0^\infty \int_L \frac{\sin(w/N)}{\cos(w/N) - \cos(\phi'/N)} e^{jk\sigma_1 \sin \Psi_1 \sin \theta' \cos w + jk\sigma_1 \cos \Psi_1 \cos \theta' + jk\sigma_1 (\sin \Psi_1 \sin \theta \cos \phi + \cos \Psi_1 \cos \theta)} \sin \Psi_1 dw d\sigma_1 \end{aligned} \quad (ก.34)$$

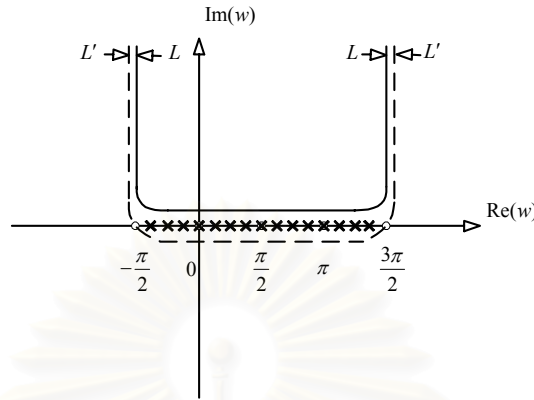
ถ้าให้  $D = k\sigma_1 \sin \Psi_1 \sin \theta'$ ,  $dD = k \sin \Psi_1 \sin \theta' d\sigma_1$  และ  $\mu_1 = \frac{\sin \theta \cos \phi + \cot \Psi_1 (\cos \theta + \cos \theta')}{\sin \theta'}$  ดังนั้น

$$K_{1x} = \frac{2H_z^i(Q_D)}{2\pi jN} \int_0^\infty \int_L \frac{\sin(w/N)}{\cos(w/N) - \cos(\phi'/N)} e^{jD(\cos w + \mu_1)} dw \frac{dD}{k \sin \theta'} \quad (ก.35)$$

เมื่อสลับลำดับของการหาปริพันธ์ จะได้ปริพันธ์บนโดเมน  $D$  เป็น

$$\int_0^\infty e^{jD(\cos w + \mu_1)} dD = \frac{j}{\cos w + \mu_1} \quad (ก.36)$$

จากสมการ (ก.35) มีขั้วเกิดขึ้นเมื่อ  $\cos(\frac{w}{N}) - \cos(\frac{\phi}{N}) = 0$  แต่เส้นทาง  $L$  ไม่ครอบคลุมขั้วที่เกิดขึ้นเหล่านั้น ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมขั้วที่เกิดขึ้นคือ  $-\frac{\pi}{2} < w_p = \phi < \frac{3\pi}{2}$  จึงได้กำหนดเส้นทางใหม่เป็น  $L'$  ซึ่งเป็นเส้นทางที่ทำให้เกิดเป็นวงรอบปิด  $C'$  ที่อนันต์ ดังรูป ก-4



รูป ก-4 เส้นทาง  $L'$  ที่ทำให้เกิดเป็นวงรอบปิด  $C'$  ที่อนันต์

จากรูป ก-4 เมื่อใช้ทฤษฎีบทส่วนตกค้าง (residue theorem) พบว่า  $\oint_{C'} = \int_{L'} - \int_L = 2\pi j \text{Res}(w = w_p)$  ดังนั้น ปริพันธ์บนเส้นทางเดิม  $L$  หาได้โดยหักส่วนตกค้าง (residue) ออกจากปริพันธ์บนเส้นทางใหม่  $L'$  เป็น

$$\int_L \frac{\sin(\frac{w}{N}) e^{jD \cos w}}{\cos(\frac{w}{N}) - \cos(\frac{\phi}{N})} dw = \int_{L'} \frac{\sin(\frac{w}{N}) e^{jD \cos w}}{\cos(\frac{w}{N}) - \cos(\frac{\phi}{N})} dw - 2\pi j \sum_{p=1}^P \frac{N(w = w_p)}{D'(w = w_p)} \tag{ก.37}$$

โดยที่  $N(w = w_p) = \sin(\frac{w}{N}) e^{jD \cos w}$ ,  $D(w = w_p) = \cos(\frac{w}{N}) - \cos(\frac{\phi}{N})$  และอนุพันธ์ของ  $D(w = w_p)$  เป็น

$$D'(w = w_p) = -\frac{\sin(\frac{w}{N})}{N} \tag{ก.38}$$

เมื่อแทนลงในสมการ (ก.37) จะได้

$$\int_L \frac{\sin(\frac{w}{N}) e^{jD \cos w}}{\cos(\frac{w}{N}) - \cos(\frac{\phi}{N})} dw = \int_{L'} \frac{\sin(\frac{w}{N}) e^{jD \cos w}}{\cos(\frac{w}{N}) - \cos(\frac{\phi}{N})} dw - 2\pi j \sum_{p=1}^P N e^{jD \cos w_p} \tag{ก.39}$$

แทนสมการ (ก.39) ลงในสมการ (ก.35) แล้วสลับลำดับของการหาปริพันธ์จะได้

$$K_{1x} = \frac{2H_z^i(Q_D)}{2\pi jN} \frac{1}{k \sin \theta'} \left[ \int_{L'} \frac{\sin(\frac{w}{N})}{\cos(\frac{w}{N}) - \cos(\frac{\phi}{N})} \int_0^\infty e^{jD(\cos w + \mu_1)} dD dw + 2\pi jN \sum_{p=1}^P \int_0^\infty e^{jD(\cos w_p + \mu_1)} dD \right] \tag{ก.40}$$

$$= \frac{2H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta'} \left[ \frac{1}{2\pi N} \int_{L'} \frac{\sin(\frac{w}{N})}{[\cos(\frac{w}{N}) - \cos(\frac{\phi}{N})](\cos w + \mu_1)} dw + j \sum_{p=1}^P \frac{1}{\cos w_p + \mu_1} \right]$$

เส้นทาง  $L'$  อาจพิจารณาว่าเป็นวงปิดที่อนันต์ ซึ่งทำให้ปริพันธ์ลดลงเป็นผลรวมของส่วนตกค้างของขั้วภายในเส้นทางปิด  $L'$  อันประกอบไปด้วยขั้ว  $w_p$  และขั้วที่เป็นรากของสมการ

$$\cos w + \mu_1 = 0 \tag{ก.41}$$

สำหรับค่าจำนวนจริง  $\mu_1$  ใดๆ สมการนี้มีรากเพียงค่าเดียวภายในวงปิด  $L'$  ซึ่งอยู่บนเส้นประในรูป ก-4 รากของสมการ (ก.41) กำหนดโดย  $\pi - \alpha_1$  โดยที่  $\alpha_1 = \cos^{-1} \mu_1 = -j \ln(\mu_1 + \sqrt{\mu_1^2 - 1})$  จากสมการ (ก.40) ผลรวมของส่วนตกค้างของขั้วภายในเส้นทาง  $L'$  เป็น

$$2\pi j \sum_n \frac{N_1(w = w_n)}{D_1'(w = w_n)}$$

โดยที่  $N_1(w = w_n) = \sin\left(\frac{w_n}{N}\right)$ ,  $D_1(w = w_n) = \left[\cos\left(\frac{w_n}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right](\cos w_n + \mu_1)$  และอนุพันธ์ของ  $D_1(w = w_n)$  เป็น

$$D_1'(w = w_n) = -\left[\cos\left(\frac{w_n}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right] \sin w_n - (\cos w_n + \mu_1) \frac{\sin\left(\frac{w_n}{N}\right)}{N} \quad (\text{ก.42})$$

เมื่อแทนลงในปริพันธ์ตามเส้นทาง  $L'$  จะได้

$$\int_{L'} \frac{\sin\left(\frac{w}{N}\right)}{\left[\cos\left(\frac{w}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right](\cos w + \mu_1)} dw = -\sum_{p=1}^P \frac{2\pi jN}{(\cos w_p + \mu_1)} - \frac{2\pi j}{\sin \alpha_1} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{\left[\cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right]} \quad (\text{ก.43})$$

แทนสมการ (ก.43) ลงในสมการ (ก.40) จะได้

$$K_{1x} = -\frac{2jH_z^i(Q_D)}{k \sin \theta'} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{N \left[\cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right] \sin \alpha_1} \right] \quad (\text{ก.44})$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อแทน  $J_{1z}$  ลงใน  $K_{1z}$  จะได้

$$K_{1z} = -2j \cot \theta' H_z^i(Q_D) \int_0^\infty \frac{e^{jkz \cos \theta'}}{2\pi jN} \int_L \frac{j \cos w \sin\left(\frac{w}{N}\right) e^{jX \cos w}}{\cos\left(\frac{w}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} dw e^{jk\sigma_1 \hat{\sigma}_1 \cdot \hat{s}} \sin \Psi_1 d\sigma_1 \\ - \frac{2jY_0 E_z^i(Q_D) \sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{\sin \theta'} \int_0^\infty \frac{e^{jkz \cos \theta'}}{2\pi N} \int_L \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos\left(\frac{w}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} dw e^{jk\sigma_1 \hat{\sigma}_1 \cdot \hat{s}} \sin \Psi_1 d\sigma_1 \quad (\text{ก.45})$$

เมื่อเปลี่ยนแปลงเส้นทางและลำดับของการหาปริพันธ์จะได้

$$K_{1z} = -\frac{2j \cot \theta' H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta'} \left[ \int_{L'} \frac{-\cos w \sin\left(\frac{w}{N}\right)}{2\pi jN \left[\cos\left(\frac{w}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right](\cos w + \mu_1)} dw - \sum_{p=1}^P \frac{\cos w_p}{\cos w_p + \mu_1} \right] \\ - \frac{2jY_0 \sin\left(\frac{\phi'}{N}\right) E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} \left[ \int_{L'} \frac{j \sin w}{2\pi N \left[\cos\left(\frac{w}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right](\cos w + \mu_1)} dw - \sum_{p=1}^P \frac{\sin w_p}{(\cos w_p + \mu_1) \sin\left(\frac{w_p}{N}\right)} \right] \quad (\text{ก.46})$$

จากสมการ (ก.46) พิจารณาพจน์ปริพันธ์บนเส้นทาง  $L'$  ซึ่งพิจารณาว่าเป็นวงปิดที่อนันต์จะได้

$$\int_{L'} \frac{-\cos w \sin\left(\frac{w}{N}\right)}{2\pi jN \left[\cos\left(\frac{w}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right](\cos w + \mu_1)} dw = \sum_{p=1}^P \frac{\cos w_p}{\cos w_p + \mu_1} + \frac{\cos(\pi - \alpha_1) \sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{N \left[\cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right] \sin(\pi - \alpha_1)} \quad (\text{ก.47ก})$$

$$\int_{L'} \frac{j \sin w}{2\pi N \left[\cos\left(\frac{w}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right](\cos w + \mu_1)} dw = \sum_{p=1}^P \frac{\sin w_p}{(\cos w_p + \mu_1) \sin\left(\frac{w_p}{N}\right)} + \frac{\sin(\pi - \alpha_1)}{N \left[\cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right] \sin(\pi - \alpha_1)} \quad (\text{ก.47ข})$$

แทนสมการ (ก.47ก) และ (ก.47ข) ลงในสมการ (ก.46) จะได้

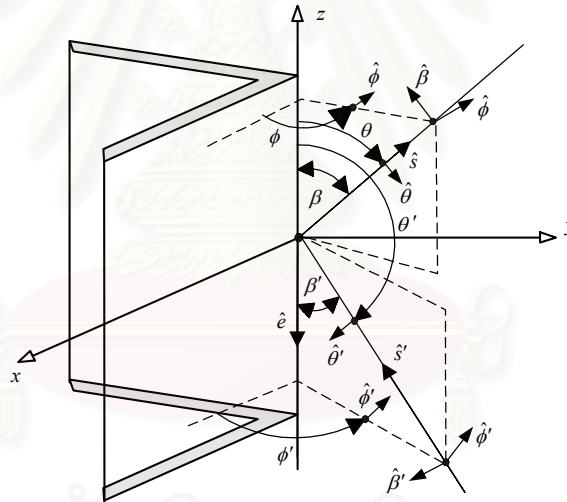
$$K_{1z} = -\frac{2j \cot \theta' H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta' \sin \alpha_1} \frac{-\cos \alpha_1 \sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} - \frac{2j Y_0 E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} \frac{\sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \quad (\text{ก.48})$$

เมื่อแทน  $K_{1x}$  และ  $K_{1z}$  ลงในสมการ (ก.16) จะได้

$$I_1^T = -\frac{2j H_z^i(Q_D) (\mu_1 \cot \theta' + \cot \theta \cos \phi)}{k \sin \theta' \sin \alpha_1} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} + \frac{2j Y_0 E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} \frac{\sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \quad (\text{ก.49})$$

และเมื่อแทน  $K_{1x}$  ลงในสมการ (ก.17) จะได้

$$M_1^T = -\frac{2j Z_0 H_z^i(Q_D) \sin \phi}{k \sin \theta' \sin \theta \sin \alpha_1} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \right] \quad (\text{ก.50})$$



รูป ก-5 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดที่ขบกับระบบพิกัดที่ใช้วิเคราะห์ปัญหารูปปลี

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของระบบพิกัดที่ขบกับระบบพิกัดที่ใช้วิเคราะห์ปัญหารูปปลีดังรูป ก-5 พบว่า

$$\pi - \theta' = \beta' = \pi - \cos^{-1}(\hat{s}' \cdot \hat{e}), \quad \theta = \beta = \pi - \cos^{-1}(\hat{s} \cdot \hat{e}) \quad (\text{ก.51ก})$$

$$\phi = \begin{cases} \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}), & \hat{i} \cdot \hat{\phi} \leq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}), & \hat{i} \cdot \hat{\phi} > 0 \end{cases} \quad (\text{ก.51ข})$$

$$\phi' = \begin{cases} \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}'), & \hat{i} \cdot \hat{\phi}' \leq 0 \\ 2\pi - \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{\phi}'), & \hat{i} \cdot \hat{\phi}' > 0 \end{cases} \quad (\text{ก.51ค})$$

$$\hat{\phi} = \frac{\hat{s} \times \hat{e}}{\|\hat{s} \times \hat{e}\|}, \quad \hat{\beta} = \hat{s} \times \hat{\phi} \quad (\text{ก.51ง})$$

$$\hat{\phi}' = \frac{\hat{e} \times \hat{s}'}{\|\hat{e} \times \hat{s}'\|}, \quad \hat{\beta}' = \hat{s}' \times \hat{\phi}' \quad (\text{ก.51จ})$$

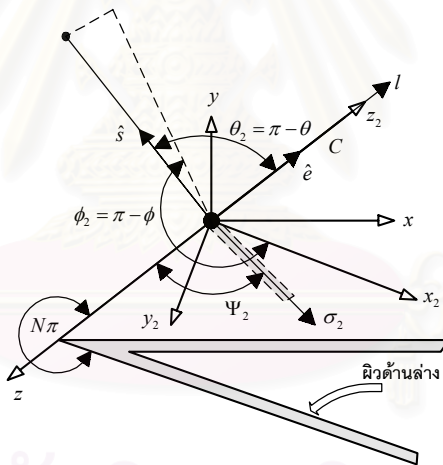


$$H_z^i(Q_D) = -\bar{H}^i \cdot \hat{e}, \quad E_z^i(Q_D) = -\bar{E}^i \cdot \hat{e} \quad (\text{ก.51ข})$$

โดยที่  $\hat{s}'$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางตกกระทบ  $\hat{s}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางกระเจิงไปยังจุดสังเกต  $\hat{e}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับขอบ  $\hat{n}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับผิวด้านบน และ  $\hat{t} = \hat{e} \times \hat{n}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับผิวด้านบนโดยมีทิศพุ่งจากขอบเข้าหาพื้นผิว จากความสัมพันธ์ข้างต้น สมการ (49) และ (50) สามารถเขียนอยู่ในระบบพิกัดที่ขอบได้เป็น

$$I_1^T = -\frac{2j(\bar{H}^i \cdot \hat{e})(\mu_1 \cot \beta' - \cot \beta \cos \phi)}{k \sin \beta' \sin \alpha_1} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} - \frac{2jY_0(\bar{E}^i \cdot \hat{e})}{k \sin^2 \beta'} \frac{\sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \quad (\text{52})$$

$$M_1^T = \frac{2jZ_0 \sin \phi (\bar{H}^i \cdot \hat{e})}{k \sin \beta' \sin \beta \sin \alpha_1} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \right] \quad (\text{53})$$



รูป ก-6 ระบบพิกัดของผิวด้านล่างตามแนวความคิดของกรวมวิธีกระแสสมมูลที่ขอบของมิคาเอลลี

ในการทำงานเดียวกันเมื่อพิจารณาบนผิวด้านล่าง ( $i=2$ ) ของรูปเดิมดังรูป ก-6 เวกเตอร์ต่างๆ ที่สอดคล้องกับระบบพิกัดของผิวด้านล่างเป็นดังนี้

$$\hat{s} = \sin(\pi - \theta) \cos(N\pi - \phi) \hat{x}_2 + \sin(\pi - \theta) \sin(N\pi - \phi) \hat{y}_2 + \cos(\pi - \theta) \hat{z}_2 \quad (\text{ก.54ก})$$

$$= \sin \theta \cos(N\pi - \phi) \hat{x}_2 + \sin \theta \sin(N\pi - \phi) \hat{y}_2 - \cos \theta \hat{z}_2$$

$$\hat{e} = \hat{z}_2 \quad (\text{ก.54ข})$$

ดังนั้น  $\|\hat{s} \times \hat{e}\|^2 = \|\hat{e} \times \hat{s}\|^2 = \sin^2 \theta$  เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า  $\bar{J}_2(l, \sigma_2)$  มีทิศทางการไหลขนานกับผิว ซึ่งถ้ากำหนดให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า  $\bar{J}_2(l, \sigma_2) = J_{2x} \hat{x}_2 + J_{2z} \hat{z}_2$  และเมื่อแทนลงใน  $\bar{K}_2$  จะได้

$$I_2^T(l) = \frac{1}{\sin^2 \theta} \int_0^\infty (J_{2z} \sin^2 \theta + J_{2x} \sin \theta \cos \theta \cos(N\pi - \phi)) e^{jkz_2 \hat{\sigma}_2 \cdot \hat{s}} \sin \Psi_2 d\sigma_2 = K_{2z} + K_{2x} \cot \theta \cos(N\pi - \phi) \quad (\text{ก.55})$$

$$M_2^T(l) = \frac{Z_0}{\sin^2 \theta} \int_0^\infty -J_{2x} \sin \theta \sin(N\pi - \phi) e^{jkz_2 \hat{\sigma}_2 \cdot \hat{s}} \sin \Psi_2 d\sigma_2 = -Z_0 K_{2x} \frac{\sin(N\pi - \phi)}{\sin \theta} \quad (\text{ก.56})$$

จากเงื่อนไขขอบเขตความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า  $\vec{J}_2(l, \sigma_2)$  บนพื้นผิวมีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กรวมบนผิวด้านล่างเป็น

$$\vec{J}_2 = \hat{y}_2 \times \vec{H} \Big|_{\phi_2=0} = \hat{y}_2 \times (H_{\rho_2} \hat{\rho}_2 + H_{\phi_2} \hat{\phi}_2 + H_{z_2} \hat{z}_2) \Big|_{\phi_2=0} \quad (\text{ก.57})$$

ดังนั้น

$$J_{2x} = H_{z_2} \Big|_{\phi_2=0} \quad (\text{ก.58ก})$$

$$J_{2z} = -H_{\rho_2} \Big|_{\phi_2=0} \quad (\text{ก.58ข})$$

เนื่องจาก  $z = -z_2$  ดังนั้นสนามแม่เหล็กรวมจากการวิเคราะห์ปัญหารูปคลื่นขึ้นอยู่กับ  $z_2$  ในรูปของ  $e^{-jkz_2 \cos \theta'}$  ( $k_z = k \cos \theta'$ ) ทำให้องค์ประกอบของสนามแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับทิศทาง  $z_2$  เป็น

$$\vec{H}_{t2} = -\frac{jk \cos \theta'}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{\partial H_{z_2}}{\partial \rho_2} \hat{\rho}_2 + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial H_{z_2}}{\partial \phi_2} \hat{\phi}_2 \right] - \frac{j\omega \epsilon}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{\partial E_{z_2}}{\partial \rho_2} \hat{\phi}_2 - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial E_{z_2}}{\partial \phi_2} \hat{\rho}_2 \right] \quad (\text{ก.59})$$

จากสมการ (ก.58ข) และ (ก.59) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในทิศทาง  $z_2$  เป็น

$$J_{2z} = -\frac{j \cos \theta'}{k \sin^2 \theta'} \left[ -\frac{\partial H_{z_2}}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \rho_2} \right] \Big|_{\phi_2=0} - \frac{j\omega \epsilon}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial E_{z_2}}{\partial \Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi_2} \right] \Big|_{\phi_2=0} \quad (\text{ก.60})$$

โดยที่  $X = k \rho_2 \sin \theta'$ ,  $\Phi = N\pi - \phi_2 - \phi'$  เนื่องจาก  $E_{z_2}^i = -E_z^i$ ,  $H_{z_2}^i = -H_z^i$ ,  $\phi + \phi_2 = N\pi$ ,  $\rho = \rho_2$  ดังนั้น  $\frac{\partial X}{\partial \rho_2} = k \sin \theta'$ ,  $\frac{\partial \Phi}{\partial \phi_2} = -1$  ซึ่งเมื่อแทนลงในสมการ (ก.60) จะได้

$$J_{2z} = -j \cot \theta' \frac{\partial H_z}{\partial X} \Big|_{\phi_2=0} - \frac{jY_0}{\sin \theta'} \left[ \frac{1}{X} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \right] \Big|_{\phi_2=0} \quad (\text{ก.61})$$

เมื่อแทนสมการ (ก.3ก) ลงในพจน์  $\frac{\partial H_z}{\partial X} \Big|_{\phi_2=0}$  จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial X} \Big|_{\phi_2=0} &= \frac{\partial}{\partial X} \left[ H_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta'} (U(X, N\pi - \phi_2 - \phi') + U(X, N\pi - \phi_2 + \phi')) \right] \Big|_{\phi_2=0} \\ &= 2H_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta'} \frac{\partial U(X, N\pi - \phi')}{\partial X} \end{aligned} \quad (\text{ก.62})$$

และเมื่อพิจารณาพจน์  $\frac{1}{X} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \Big|_{\phi_2=0}$  โดยแทนสมการ (ก.3ข) ลงไปจะได้

$$\frac{1}{X} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \Big|_{\phi_2=0} = \frac{1}{X} \frac{\partial E_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta'} U(X, \Phi_1)}{\partial \Phi_1} \Big|_{\phi_2=0} - \frac{1}{X} \frac{\partial E_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta'} U(X, \Phi_2)}{\partial \Phi_2} \Big|_{\phi_2=0} \quad (\text{ก.63})$$

โดยที่  $\Phi_1 = N\pi - \phi_2 - \phi'$  และ  $\Phi_2 = N\pi - \phi_2 + \phi'$  จากสมการ (ก.27) จะได้

$$\frac{1}{X} \frac{\partial U(X, \Phi)}{\partial \Phi} = -\frac{\sin(\frac{\Phi}{N})}{2\pi N} \int_L \left[ \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos(\frac{w}{N}) - \cos(\frac{\Phi}{N})} \right] dw \quad (\text{ก.64})$$

เมื่อแทน  $\Phi_1 = N\pi - \phi_2 - \phi'$  และ  $\Phi_2 = N\pi - \phi_2 + \phi'$  ลงในสมการ (ก.64) จะได้

$$\frac{1}{X} \frac{\partial U(X, \Phi_1)}{\partial \Phi_1} \Big|_{\phi_2=0} = -\frac{\sin(\phi'/N)}{2\pi N} \int_L \left[ \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) + \cos(\phi'/N)} \right] dw \quad (\text{ก.65ก})$$

$$\frac{1}{X} \frac{\partial U(X, \Phi_2)}{\partial \Phi_2} \Big|_{\phi_2=0} = \frac{\sin(\phi'/N)}{2\pi N} \int_L \left[ \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) + \cos(\phi'/N)} \right] dw \quad (\text{ก.65ข})$$

และแทนสมการ (ก.65ก) และ (ก.65ข) ลงในสมการ (ก.63) จะได้

$$\frac{1}{X} \frac{\partial E_z}{\partial \Phi} \Big|_{\phi_2=0} = -2E_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta'} \frac{\sin(\phi'/N)}{2\pi N} \int_L \left[ \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos(w/N) + \cos(\phi'/N)} \right] dw \quad (\text{ก.66})$$

จากสมการ (ก.58ก) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในทิศทาง  $x_2$  เป็น

$$J_{2x} = H_{z_2} \Big|_{\phi_2=0} = -H_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta'} [U(X, N\pi - \phi_2 - \phi') + U(X, N\pi - \phi_2 + \phi')] \Big|_{\phi_2=0} \quad (\text{ก.67})$$

โดยที่  $X = k\rho_2 \sin \theta' \Big|_{\phi_2=0} = kx_2 \sin \theta'$  และเนื่องจาก  $U(X, N\pi - \phi') = U(X, N\pi + \phi')$  ดังนั้น

$$J_{2x} = -2H_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta'} U(X, N\pi - \phi') \quad (\text{ก.68})$$

แทนสมการ (ก.68) ลงใน  $K_{2x}$  จะได้

$$K_{2x} = -\int_0^\infty 2H_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta'} U(X, N\pi - \phi) e^{jk\sigma_2 \hat{\sigma}_2 \cdot \hat{s}} \sin \Psi_2 d\sigma_2 \quad (\text{ก.69})$$

จากรูปที่ ก-6  $\hat{\sigma}_2 = \sin \Psi_2 \hat{x}_2 - \cos \Psi_2 \hat{z}_2$  ดังนั้น  $\hat{\sigma}_2 \cdot \hat{s} = \sin \Psi_2 \sin \theta \cos(N\pi - \phi) + \cos \Psi_2 \cos \theta$  และเนื่องจาก  $z_2 = -\sigma_2 \cos \Psi_2$ ,  $x_2 = \sigma_2 \sin \Psi_2$  ทำให้

$$K_{2x} = \frac{-2H_z^i(Q_D)}{2j\pi N} \int_0^\infty \int_L \frac{\sin(w/N)}{\cos(w/N) + \cos(\phi'/N)} e^{jk\sigma_2 \sin \Psi_2 \sin \theta' \cos w + jk\sigma_2 \cos \Psi_2 \cos \theta' + jk\sigma_2 (\sin \Psi_2 \sin \theta \cos(N\pi - \phi) + \cos \Psi_2 \cos \theta)} \sin \Psi_2 dw d\sigma_2 \quad (\text{ก.70})$$

ถ้าให้  $D = k\sigma_2 \sin \Psi_2 \sin \theta'$ ,  $dD = k \sin \Psi_2 \sin \theta' d\sigma_2$  และ  $\mu_2 = \frac{\sin \theta \cos(N\pi - \phi) + \cot \Psi_2 (\cos \theta + \cos \theta')}{\sin \theta'}$

ดังนั้น

$$K_{2x} = \frac{-2H_z^i(Q_D)}{2\pi jN} \int_0^\infty \int_L \frac{\sin(w/N)}{\cos(w/N) + \cos(\phi'/N)} e^{jD(\cos w + \mu_2)} dw \frac{dD}{k \sin \theta'} \quad (\text{ก.71})$$

เมื่อสลับลำดับของการหาปริพันธ์ จะได้ปริพันธ์บนโดเมน  $D$  เป็น

$$\int_0^\infty e^{jD(\cos w + \mu_2)} dD = \frac{j}{\cos w + \mu_2} \quad (\text{ก.72})$$

จากสมการ (ก.71) มีขั้วเกิดขึ้นเมื่อ  $\cos(w/N) + \cos(\phi'/N) = 0$  แต่เส้นทาง  $L$  ไม่ครอบคลุมขั้วที่เกิดขึ้นเหล่านั้น เพื่อให้ครอบคลุมขั้วที่เกิดขึ้นคือ  $-\frac{\pi}{2} < w_p = \phi' < \frac{3\pi}{2}$  จึงได้กำหนดเส้นทางใหม่เป็น  $L'$  ซึ่งเป็นเส้นทางที่ทำให้เกิดเป็นวงรอบปิด  $C'$  ที่อนันต์ ดังรูป ก-4

จากรูป ก-4 เมื่อใช้ทฤษฎีบทส่วนตกค้างพบว่า  $\oint_{C'} = \int_{L'} - \int_L = 2\pi j \text{Res}(w = w_p)$  ดังนั้นปริพันธ์บนเส้นทางเดิม  $L$  หาได้โดยหักส่วนตกค้างออกจากปริพันธ์บนเส้นทางใหม่  $L'$  เป็น

$$\int_L \frac{\sin(w/N) e^{jD \cos w}}{\cos(w/N) + \cos(\phi'/N)} dw = \int_{L'} \frac{\sin(w/N) e^{jD \cos w}}{\cos(w/N) + \cos(\phi'/N)} dw - 2\pi j \sum_{p=1}^P \frac{N(w = w_p)}{D'(w = w_p)} \quad (\text{ก.73})$$

โดยที่  $N(w = w_p) = \sin(w/N) e^{jD \cos w}$ ,  $D(w = w_p) = \cos(w/N) + \cos(\phi'/N)$  และอนุพันธ์ของ  $D(w = w_p)$  เป็น

$$D'(w = w_p) = -\frac{\sin(w/N)}{N} \quad (\text{ก.74})$$

เมื่อแทนลงในสมการ (ก.73) จะได้

$$\int_L \frac{\sin\left(\frac{w}{N}\right) e^{jD \cos w}}{\cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} dw = \int_L \frac{\sin\left(\frac{w}{N}\right) e^{jD \cos w}}{\cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} dw - 2\pi j \sum_{p=1}^P N e^{jD \cos w_p} \quad (\text{ก.75})$$

แทนสมการ (ก.75) ลงในสมการ (ก.71) แล้วสลับลำดับของการหาปริพันธ์จะได้

$$K_{1x} = -\frac{2H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta'} \left[ \frac{1}{2\pi N} \int_L \frac{\sin\left(\frac{w}{N}\right)}{\left[\cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right] (\cos w + \mu_2)} dw + j \sum_{p=1}^P \frac{1}{\cos w_p + \mu_2} \right] \quad (\text{ก.76})$$

เส้นทาง  $L'$  อาจพิจารณาว่าเป็นวงปิดที่อนันต์ ซึ่งทำให้ปริพันธ์ลดลงเป็นผลรวมของส่วนตกค้างของขั้วภายในเส้นทางปิด  $L'$  อันประกอบไปด้วยขั้ว  $w_p$  และขั้วที่เป็นรากของสมการ

$$\cos w + \mu_2 = 0 \quad (\text{ก.77})$$

สำหรับค่าจำนวนจริง  $\mu_2$  ใดๆ สมการนี้มีรากเพียงค่าเดียวภายในวงปิด  $L'$  ซึ่งอยู่บนเส้นประในรูป ก-4 รากของสมการ (ก.77) กำหนดโดย  $\pi - \alpha_2$  โดยที่  $\alpha_2 = \cos^{-1} \mu_2 = -j \ln(\mu_2 + \sqrt{\mu_2^2 - 1})$  จากสมการ (ก.76) ผลรวมของส่วนตกค้างของขั้วภายในเส้นทาง  $L'$  เป็น

$$2\pi j \sum_n \frac{N_1(w = w_n)}{D_1'(w = w_n)}$$

โดยที่  $N_1(w = w_n) = \sin\left(\frac{w_n}{N}\right)$ ,  $D_1(w = w_n) = \left[\cos\left(\frac{w_n}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right] (\cos w_n + \mu_2)$  และอนุพันธ์ของ  $D_1(w = w_n)$  เป็น

$$D_1'(w = w_n) = -\left[\cos\left(\frac{w_n}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right] \sin w_n - (\cos w_n + \mu_2) \frac{\sin\left(\frac{w_n}{N}\right)}{N} \quad (\text{ก.78})$$

เมื่อแทนลงในปริพันธ์ตามเส้นทาง  $L'$  จะได้

$$\int_{L'} \frac{\sin\left(\frac{w}{N}\right)}{\left[\cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right] (\cos w + \mu_2)} dw = -\sum_{p=1}^P \frac{2\pi j N}{(\cos w_p + \mu_2)} - \frac{2\pi j}{\sin \alpha_2} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{\left[\cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right]} \quad (\text{ก.79})$$

แทนสมการ (ก.79) ลงในสมการ (ก.76) จะได้

$$K_{2x} = \frac{2jH_z^i(Q_D)}{k \sin \theta'} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{N \left[\cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)\right] \sin \alpha_2} \right] \quad (\text{ก.80})$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อแทน  $J_{2z}$  ลงใน  $K_{2z}$  จะได้

$$K_{2z} = -2j \cot \theta' H_z^i(Q_D) \int_0^\infty \frac{e^{-jkz_2 \cos \theta'}}{2\pi j N} \int_L \frac{j \cos w \sin\left(\frac{w}{N}\right) e^{jX \cos w}}{\cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} dw e^{jk\sigma_2 \hat{\sigma}_2 \cdot \hat{s}} \sin \Psi_2 d\sigma_2 \\ + \frac{2jY_0 E_z^i(Q_D) \sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{\sin \theta'} \int_0^\infty \frac{e^{-jkz_2 \cos \theta'}}{2\pi N} \int_L \frac{\sin w e^{jX \cos w}}{\cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} dw e^{jk\sigma_2 \hat{\sigma}_2 \cdot \hat{s}} \sin \Psi_2 d\sigma_2 \quad (\text{ก.81})$$

เมื่อเปลี่ยนแปลงเส้นทางและลำดับการหาปริพันธ์จะได้

$$K_{2z} = -\frac{2j \cot \theta' H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta'} \left[ \int_{L'} \frac{-\cos w \sin\left(\frac{w}{N}\right)}{2\pi jN \left[ \cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right] (\cos w + \mu_2)} dw - \sum_{p=1}^P \frac{\cos w_p}{\cos w_p + \mu_2} \right] \\ + \frac{2jY_0 \sin\left(\frac{\phi'}{N}\right) E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} \left[ \int_{L'} \frac{j \sin w}{2\pi N \left[ \cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right] (\cos w + \mu_2)} dw - \sum_{p=1}^P \frac{\sin w_p}{(\cos w_p + \mu_2) \sin\left(\frac{w_p}{N}\right)} \right] \quad (ก.82)$$

จากสมการ (ก.82) พิจารณาพจน์ปริพันธ์บนเส้นทาง  $L'$  ซึ่งพิจารณาว่าเป็นวงปิดที่อนันต์จะได้

$$\int_{L'} \frac{-\cos w \sin\left(\frac{w}{N}\right)}{2\pi jN \left[ \cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right] (\cos w + \mu_2)} dw = \sum_{p=1}^P \frac{\cos w_p}{\cos w_p + \mu_2} + \frac{\cos(\pi - \alpha_2) \sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right] \sin(\pi - \alpha_2)} \quad (ก.83ก)$$

$$\int_{L'} \frac{j \sin w}{2\pi N \left[ \cos\left(\frac{w}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right] (\cos w + \mu_2)} dw = \sum_{p=1}^P \frac{\sin w_p}{(\cos w_p + \mu_2) \sin\left(\frac{w_p}{N}\right)} + \frac{\sin(\pi - \alpha_2)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right] \sin(\pi - \alpha_2)} \quad (ก.83ข)$$

แทนสมการ (ก.83ก) และ (ก.83ข) ลงในสมการ (ก.82) จะได้

$$K_{2z} = -\frac{2j \cot \theta' H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta' \sin \alpha_2} \frac{-\cos \alpha_2 \sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} + \frac{2jY_0 E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} \frac{\sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \quad (ก.84)$$

เมื่อแทน  $K_{2x}$  และ  $K_{2z}$  ลงในสมการ (ก.55) จะได้

$$I_2^T = \frac{2jH_z^i(Q_D)(\mu_2 \cot \theta' + \cot \theta \cos(N\pi - \phi))}{k \sin \theta' \sin \alpha_2} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} + \frac{2jY_0 E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} \frac{\sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \quad (ก.85)$$

และเมื่อแทน  $K_{2x}$  ลงในสมการ (ก.56) จะได้

$$M_2^T = -\frac{2jZ_0 \sin(N\pi - \phi) H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta' \sin \theta \sin \alpha_2} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \right] \quad (ก.86)$$

สมการ (ก.85) และ (ก.86) สามารถเขียนอยู่ในระบบพิกัดที่ขอบได้เป็น



$$I_2^T = \frac{2j(\bar{H}^i \cdot \hat{e})(\mu_2 \cot \beta' - \cot \beta \cos(N\pi - \phi))}{k \sin \beta' \sin \alpha_2} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} - \frac{2jY_0(\bar{E}^i \cdot \hat{e})}{k \sin^2 \beta'} \frac{\sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \quad (ก.87)$$

$$M_2^T = \frac{2jZ_0(\bar{H}^i \cdot \hat{e}) \sin(N\pi - \phi)}{k \sin \beta' \sin \beta \sin \alpha_2} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{N \left[ \cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right) \right]} \right] \quad (ก.88)$$

จากสมการ (ก.52) (ก.53) (ก.87) และ (ก.88) จะได้กระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลรวมเป็น

$$I^T = \sum_{i=1}^2 I_i^T = \frac{2j(\bar{H}^i \cdot \hat{e})}{k \sin \beta' N} \left[ \frac{\mu_1 \cot \beta' - \cot \beta \cos \phi}{\sin \alpha_1} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{\cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} + \frac{\mu_2 \cot \beta' - \cot \beta \cos(N\pi - \phi)}{\sin \alpha_2} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{\cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} \right] - \frac{2jY_0(\bar{E}^i \cdot \hat{e})}{k \sin^2 \beta' N} \left[ \frac{\sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{\cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} + \frac{\sin\left(\frac{\phi'}{N}\right)}{\cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} \right] \quad (ก.89)$$

$$M^T = \sum_{i=1}^2 M_i^T = \frac{2jZ_0(\bar{H}^i \cdot \hat{e})}{k \sin \beta' \sin \beta N} \left[ \frac{\sin \phi}{\sin \alpha_1} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right)}{\cos\left(\frac{\pi - \alpha_1}{N}\right) - \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} + \frac{\sin(N\pi - \phi)}{\sin \alpha_2} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right)}{\cos\left(\frac{\pi - \alpha_2}{N}\right) + \cos\left(\frac{\phi'}{N}\right)} \right] \quad (ก.90)$$

การวิเคราะห์ข้างต้นเป็นการหาค่ากระแสสมมูลรวมที่เกิดขึ้นที่ขอบ ซึ่งเป็นผลรวมระหว่างกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบกับกระแสสมมูลที่ขอบตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพ ดังนั้นเพื่อหาค่ากระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบจำเป็นต้องทราบกระแสสมมูลที่ขอบตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

พิจารณารูปวิเคราะห์ปัญหารูปสี่เหลี่ยม สนามแม่เหล็กตกกระทบเกิดจากแหล่งกำเนิดไดโพลไฟฟ้าและไดโพลแม่เหล็กขนาดสั้นมากที่ตำแหน่งไกลมากและวางตัวตามแนวแกน  $z$  ดังนั้นองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตกกระทบตามแนวแกน  $z$  บนผิวด้านบนเป็น

$$E_z^i(\rho, \phi, z) = E_z^i(Q_D) \left[ e^{jkz \cos \theta' + jk\rho \sin \theta' \cos(\phi - \phi')} \right] U(\pi - \phi') \quad (ก.91ก)$$

$$H_z^i(\rho, \phi, z) = H_z^i(Q_D) \left[ e^{jkz \cos \theta' + jk\rho \sin \theta' \cos(\phi - \phi')} \right] U(\pi - \phi') \quad (ก.91ข)$$

โดยที่  $U(\bullet)$  คือฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย (unit step function) จากสมการ (ก.91ก) และ (ก.91ข) องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตกกระทบตามแนวแกน  $z$  ขึ้นอยู่กับ  $z$  ในรูป  $e^{jkz \cos \theta'}$  ( $k_z = -k \cos \theta'$ ) ดังนั้นสนามแม่เหล็กตกกระทบในทิศทางตั้งฉากกับองค์ประกอบตามแนวแกน  $z$  เป็น

$$\vec{H}_i^i = \frac{jk \cos \theta'}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{\partial H_z^i}{\partial \rho} \hat{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z^i}{\partial \phi} \hat{\phi} \right] - \frac{j\omega \epsilon}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{\partial E_z^i}{\partial \rho} \hat{\phi} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z^i}{\partial \phi} \hat{\rho} \right] \quad (\text{ก.92})$$

จากเงื่อนไขขอบเขตบนผิวตัวนำสมบูรณ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตามทฤษฎีทัศนศาสตร์กายภาพเป็น

$$\vec{J}_1^{PO} = 2\hat{n} \times \vec{H}_i^i \Big|_{\phi=0} = 2\hat{y} \times \left[ H_\rho^i \hat{\rho} + H_\phi^i \hat{\phi} + H_z^i \hat{z} \right] \Big|_{\phi=0} \quad (\text{ก.93})$$

ดังนั้น

$$J_{1x}^{PO} = 2H_z^i \Big|_{\phi=0} = 2H_z^i(Q_D) e^{jkx \sin \theta' \cos \phi' + jkz \cos \theta'} U(\pi - \phi') \quad (\text{ก.94ก})$$

$$\begin{aligned} J_{1z}^{PO} &= 2 \left[ -H_\rho^i \cos \phi + H_\phi^i \sin \phi \right] \Big|_{\phi=0} = -2H_\rho^i \Big|_{\phi=0} \\ &= -\frac{2jk \cos \theta'}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{\partial H_z^i}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \rho} \right] \Big|_{\phi=0} - \frac{2j\omega \epsilon}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z^i}{\partial \Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} \right] \Big|_{\phi=0} \end{aligned} \quad (\text{ก.94ข})$$

โดยที่  $X = k\rho \sin \theta'$ ,  $\Phi = \phi - \phi'$  ดังนั้น  $\frac{\partial X}{\partial \rho} = k \sin \theta'$ ,  $\frac{\partial \Phi}{\partial \phi} = 1$  ซึ่งเมื่อแทนลงในสมการ (ก.94ข) จะได้

$$\begin{aligned} J_{1z}^{PO} &= -\frac{2j \cos \theta'}{\sin \theta'} \left[ j \cos(\phi - \phi') H_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta' + jk\rho \sin \theta' \cos(\phi - \phi')} U(\pi - \phi') \right] \Big|_{\phi=0} \\ &\quad - \frac{2jY}{\sin \theta'} \left[ -j \sin(\phi - \phi') E_z^i(Q_D) e^{jkz \cos \theta' + jk\rho \sin \theta' \cos(\phi - \phi')} U(\pi - \phi') \right] \Big|_{\phi=0} \\ &= \left[ \frac{2 \cos \theta' \cos \phi' H_z^i(Q_D)}{\sin \theta'} + \frac{2Y \sin \phi' E_z^i(Q_D)}{\sin \theta'} \right] e^{jkz \cos \theta' + jkx \sin \theta' \cos \phi'} U(\pi - \phi') \end{aligned} \quad (\text{ก.95})$$

แทน  $z = \sigma_1 \cos \Psi_1$ ,  $x = \sigma_1 \sin \Psi_1$  และสมการ (ก.95) ลงใน  $K_{1z}^{PO}$  จะได้

$$\begin{aligned} K_{1z}^{PO} &= \int_0^\infty J_{1z}^{PO} e^{jk\sigma_1 \cos \Psi_1} d\sigma_1 \sin \Psi_1 = \left[ \frac{2 \cos \theta' \cos \phi' H_z^i(Q_D)}{\sin \theta'} + \frac{2Y \sin \phi' E_z^i(Q_D)}{\sin \theta'} \right] U(\pi - \phi') \\ &\quad \cdot \int_0^\infty e^{jk\sigma_1 \cos \Psi_1 \cos \theta' + jk\sigma_1 \sin \Psi_1 \sin \theta' \cos \phi' + jk\sigma_1 (\sin \Psi_1 \sin \theta' \cos \phi + \cos \Psi_1 \cos \theta)} d\sigma_1 \sin \Psi_1 \end{aligned} \quad (\text{ก.96})$$

ถ้าให้  $D = k\sigma_1 \sin \Psi_1 \sin \theta'$ ,  $dD = k \sin \Psi_1 \sin \theta' d\sigma_1$  และ  $\mu_1 = \frac{\sin \theta \cos \phi + \cot \Psi_1 (\cos \theta + \cos \theta')}{\sin \theta'}$  ดังนั้น

$$\begin{aligned} K_{1z}^{PO} &= \left[ \frac{2 \cos \theta' \cos \phi' H_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} + \frac{2Y \sin \phi' E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} \right] U(\pi - \phi') \int_0^\infty e^{jD(\cos \phi' + \mu_1)} dD \\ &= \left[ \frac{2j \cot \theta' \cos \phi' H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta' (\cos \phi' + \mu_1)} + \frac{2jY \sin \phi' E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta' (\cos \phi' + \mu_1)} \right] U(\pi - \phi') \end{aligned} \quad (\text{ก.97})$$

และเมื่อแทนสมการ (ก.94ก) ลงใน  $K_{1x}^{PO}$  จะได้

$$K_{1x}^{PO} = \frac{2jH_z^i(Q_D)}{k \sin \theta' (\cos \phi' + \mu_1)} U(\pi - \phi') \quad (\text{ก.98})$$

จากสมการ (ก.97) และ (ก.98) จะได้

$$\begin{aligned} I_1^{PO} &= -K_{1z}^{PO} + K_{1x}^{PO} \cot \theta \cos \phi \\ &= \left[ -\frac{2jH_z^i(Q_D) [\cot \theta' \cos \phi' - \cot \theta \cos \phi]}{k \sin \theta' (\cos \phi' + \mu_1)} - \frac{2jY_0 E_z^i(Q_D) \sin \phi'}{k \sin \theta' (\cos \phi' + \mu_1) \sin \theta'} \right] U(\pi - \phi') \end{aligned} \quad (\text{ก.99})$$

$$M_1^{PO} = \frac{Z_0 K_{1x}^{PO} \sin \phi}{\sin \theta} = \frac{2jZ_0 H_z^i(Q_D) \sin \phi}{k \sin \theta' \sin \theta (\cos \phi' + \mu_1)} U(\pi - \phi') \quad (\text{ก.100})$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อพิจารณาบนผิวด้านล่าง องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตกกระทบตามแนวแกน  $z$  บนผิวด้านล่างเป็น

$$E_z^i(\rho, \phi, z) = E_z^i(Q_D) \left[ e^{jkz \cos \theta' + jk\rho \sin \theta' \cos(\phi - \phi')} \right] U(\phi' - (N-1)\pi) \quad (\text{ก.101ก})$$

$$H_z^i(\rho, \phi, z) = H_z^i(Q_D) \left[ e^{jkz \cos \theta' + jk\rho \sin \theta' \cos(\phi - \phi')} \right] U(\phi' - (N-1)\pi) \quad (\text{ก.101ข})$$

เนื่องจาก  $z = -z_2$  ทำให้องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตกกระทบตามแนวแกน  $z_2$  ขึ้นอยู่กับ  $z_2$  ในรูป  $e^{-jkz_2 \cos \theta'}$  ( $k_z = k \cos \theta'$ ) ดังนั้นสนามแม่เหล็กตกกระทบในทิศทางตั้งฉากกับองค์ประกอบตามแนวแกน  $z_2$  เป็น

$$\bar{H}_{12}^i = -\frac{jk \cos \theta'}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{\partial H_{z_2}^i}{\partial \rho_2} \hat{\rho}_2 + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial H_{z_2}^i}{\partial \phi_2} \hat{\phi}_2 \right] - \frac{j\omega \epsilon}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{\partial E_{z_2}^i}{\partial \rho_2} \hat{\phi}_2 - \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial E_{z_2}^i}{\partial \phi_2} \hat{\rho}_2 \right] \quad (\text{ก.102})$$

จากเงื่อนไขขอบเขตบนผิวตัวนำสมบูรณ์ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพเป็น

$$\bar{J}_2^{PO} = 2\hat{n} \times \bar{H}^i \Big|_{\phi_2=0} = 2\hat{y}_2 \times \left[ H_{\rho_2}^i \hat{\rho}_2 + H_{\phi_2}^i \hat{\phi}_2 + H_{z_2}^i \hat{z}_2 \right] \Big|_{\phi_2=0} \quad (\text{ก.103})$$

ดังนั้น

$$J_{2x}^{PO} = 2H_{z_2}^i \Big|_{\phi_2=0} = -2H_z^i(Q_D) e^{jkx_2 \sin \theta' \cos(N\pi - \phi') - jkz_2 \cos \theta'} U(\phi' - (N-1)\pi) \quad (\text{ก.104ก})$$

$$J_{2z}^{PO} = -2H_{\rho_2}^i \Big|_{\phi_2=0} = \frac{2jk \cos \theta'}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{\partial H_{z_2}^i}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \rho_2} \right] \Big|_{\phi_2=0} - \frac{2j\omega \epsilon}{k^2 \sin^2 \theta'} \left[ \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial E_{z_2}^i}{\partial \Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi_2} \right] \Big|_{\phi_2=0} \quad (\text{ก.104ข})$$

โดยที่  $X = k\rho_2 \sin \theta'$ ,  $\Phi = N\pi - \phi_2 - \phi'$  และเนื่องจาก  $E_{z_2}^i = -E_z^i$ ,  $H_{z_2}^i = -H_z^i$ ,  $\phi + \phi_2 = N\pi$ ,  $\rho = \rho_2$  ดังนั้น  $\frac{\partial X}{\partial \rho_2} = k \sin \theta'$ ,  $\frac{\partial \Phi}{\partial \phi_2} = -1$  ซึ่งเมื่อแทนลงในสมการ (ก.104ข) จะได้

$$\begin{aligned} J_{2z}^{PO} &= -\frac{2j \cos \theta'}{\sin \theta'} \left[ j \cos(N\pi - \phi_2 - \phi') H_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta' + jk\rho_2 \sin \theta' \cos(N\pi - \phi_2 - \phi')} U(\phi' - (N-1)\pi) \right] \Big|_{\phi_2=0} \\ &\quad - \frac{2jY}{\sin \theta'} \left[ -j \sin(N\pi - \phi_2 - \phi') E_z^i(Q_D) e^{-jkz_2 \cos \theta' + jk\rho_2 \sin \theta' \cos(N\pi - \phi_2 - \phi')} U(\phi' - (N-1)\pi) \right] \Big|_{\phi_2=0} \\ &= \left[ \frac{2 \cos \theta' \cos(N\pi - \phi') H_z^i(Q_D)}{\sin \theta'} - \frac{2Y \sin(N\pi - \phi') E_z^i(Q_D)}{\sin \theta'} \right] e^{-jkz_2 \cos \theta' + jkx_2 \sin \theta' \cos(N\pi - \phi')} U(\phi' - (N-1)\pi) \end{aligned} \quad (\text{ก.105})$$

แทน  $z_2 = -\sigma_2 \cos \Psi_2$ ,  $x = \sigma_2 \sin \Psi_2$  และสมการ (ก.105) ลงใน  $K_{2z}^{PO}$  จะได้

$$\begin{aligned} K_{2z}^{PO} &= \int_0^\infty J_{2z}^{PO} e^{jk\sigma_2 \hat{\sigma}_2 \cdot \hat{s}} d\sigma_2 \sin \Psi_2 = \left[ \frac{2 \cos \theta' \cos(N\pi - \phi') H_z^i(Q_D)}{\sin \theta'} + \frac{2Y \sin(N\pi - \phi') E_z^i(Q_D)}{\sin \theta'} \right] U(\phi' - (N-1)\pi) \\ &\quad \cdot \int_0^\infty e^{jk\sigma_2 \cos \Psi_2 \cos \theta' + jk\sigma_2 \sin \Psi_2 \sin \theta' \cos(N\pi - \phi') + jk\sigma_2 (\sin \Psi_2 \sin \theta' \cos(N\pi - \phi) + \cos \Psi_2 \cos \theta)} d\sigma_2 \sin \Psi_2 \end{aligned} \quad (\text{ก.106})$$

ถ้าให้  $D = k\sigma_2 \sin \Psi_2 \sin \theta'$ ,  $dD = k \sin \Psi_2 \sin \theta' d\sigma_2$  และ  $\mu_2 = \frac{\sin \theta \cos(N\pi - \phi) + \cot \Psi_2 (\cos \theta + \cos \theta')}{\sin \theta'}$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
K_{2z}^{PO} &= \left[ \frac{2 \cos \theta' \cos(N\pi - \phi') H_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} - \frac{2Y \sin(N\pi - \phi') E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} \right] U(\phi' - (N-1)\pi) \int_0^\infty e^{iD[\cos(N\pi - \phi') + \mu_2]} dD \\
&= \left[ \frac{2j \cot \theta' \cos(N\pi - \phi') H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta' [\cos(N\pi - \phi') + \mu_2]} - \frac{2jY \sin(N\pi - \phi') E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta' [\cos(N\pi - \phi') + \mu_2]} \right] U(\phi' - (N-1)\pi)
\end{aligned} \tag{ก.107}$$

และเมื่อแทนสมการ (ก.104ก) ลงใน  $K_{2x}^{PO}$  จะได้

$$K_{2x}^{PO} = -\frac{2jH_z^i(Q_D)}{k \sin \theta' [\cos(N\pi - \phi') + \mu_2]} U(\phi' - (N-1)\pi) \tag{ก.108}$$

จากสมการ (ก.107) และ (ก.108) จะได้

$$\begin{aligned}
I_2^{PO} &= K_{2z}^{PO} + K_{2x}^{PO} \cot \theta \cos(N\pi - \phi) \\
&= \left[ \frac{2jH_z^i(Q_D) [\cot \theta' \cos(N\pi - \phi') - \cot \theta \cos(N\pi - \phi)]}{k \sin \theta' [\cos(N\pi - \phi') + \mu_2]} - \frac{2jY_0 E_z^i(Q_D) \sin(N\pi - \phi')}{k \sin^2 \theta' [\cos(N\pi - \phi') + \mu_2]} \right] U(\phi' - (N-1)\pi)
\end{aligned} \tag{ก.109}$$

$$M_2^{PO} = -\frac{Z_0 K_{2x}^{PO} \sin(N\pi - \phi)}{\sin \theta} = \frac{2jZ_0 H_z^i(Q_D) \sin(N\pi - \phi)}{k \sin \theta' \sin \theta [\cos(N\pi - \phi') + \mu_2]} U(\phi' - (N-1)\pi) \tag{ก.110}$$

จากสมการ (ก.99) (ก.100) (ก.109) และ (ก.110) จะได้กระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กสมมูลตามกรรมวิธีทัศนศาสตร์กายภาพเป็น

$$\begin{aligned}
I^{PO} &= \sum_{i=1}^2 I_i^{PO} = \frac{2jH_z^i(Q_D)}{k \sin \theta'} \left[ \frac{[-\cot \theta' \cos \phi' + \cot \theta \cos \phi] U(\pi - \phi')}{\cos \phi' + \mu_1} + \frac{[\cot \theta' \cos(N\pi - \phi') - \cot \theta \cos(N\pi - \phi)] U(\phi' - (N-1)\pi)}{\cos(N\pi - \phi') + \mu_2} \right] \\
&\quad - \frac{2jY_0 E_z^i(Q_D)}{k \sin^2 \theta'} \left[ \frac{\sin \phi' U(\pi - \phi')}{\cos \phi' + \mu_1} + \frac{\sin(N\pi - \phi') U(\phi' - (N-1)\pi)}{\cos(N\pi - \phi') + \mu_2} \right]
\end{aligned} \tag{ก.111}$$

$$M^{PO} = \sum_{i=1}^2 M_i^{PO} = \frac{2jZ_0 H_z^i(Q_D)}{k \sin \theta' \sin \theta} \left[ \frac{\sin \phi U(\pi - \phi')}{\cos \phi' + \mu_1} + \frac{\sin(N\pi - \phi) U(\phi' - (N-1)\pi)}{\cos(N\pi - \phi') + \mu_2} \right] \tag{ก.112}$$

สมการ (ก.111) และ (ก.112) สามารถเขียนอยู่ในระบบพิกัดที่ขอบได้เป็น

$$\begin{aligned}
I^{PO} &= \sum_{i=1}^2 I_i^{PO} = -\frac{2j(\vec{H}^i \cdot \hat{e})}{k \sin \beta'} \left[ \frac{[\cot \beta' \cos \phi' + \cot \beta \cos \phi] U(\pi - \phi')}{\cos \phi' + \mu_1} - \frac{[\cot \beta' \cos(N\pi - \phi') + \cot \beta \cos(N\pi - \phi)] U(\phi' - (N-1)\pi)}{\cos(N\pi - \phi') + \mu_2} \right] \\
&\quad + \frac{2jY_0(\vec{E}^i \cdot \hat{e})}{k \sin^2 \beta'} \left[ \frac{\sin \phi' U(\pi - \phi')}{\cos \phi' + \mu_1} + \frac{\sin(N\pi - \phi') U(\phi' - (N-1)\pi)}{\cos(N\pi - \phi') + \mu_2} \right]
\end{aligned} \tag{ก.113}$$

$$M^{PO} = \sum_{i=1}^2 M_i^{PO} = -\frac{2jZ_0(\vec{H}^i \cdot \hat{e})}{k \sin \beta' \sin \beta} \left[ \frac{\sin \phi U(\pi - \phi')}{\cos \phi' + \mu_1} + \frac{\sin(N\pi - \phi) U(\phi' - (N-1)\pi)}{\cos(N\pi - \phi') + \mu_2} \right] \tag{ก.114}$$

จากสมการ (ก.89) (ก.90) (ก.113) และ (ก.114) สรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้าและกระแสแม่เหล็กไม่ต่อเนื่องที่ขอบหาได้ดังสมการ

$$I^{FW} = I^T - I^{PO} \tag{ก.115}$$

$$M^{FW} = M^T - M^{PO} \quad (\text{ก.116})$$

เพื่อให้สอดคล้องกับกฎการเลี้ยวเบน แหล่งกระแสสมมูลที่ขอบมีทิศทางที่ซึ่ง  $\Psi_1 = \Psi_2 = \beta'$  ดังนั้น

$$\mu_1 = \frac{\sin \beta \cos \phi + \cot \beta' (\cos \beta - \cos \beta')}{\sin \beta'} \quad (\text{ก.117})$$

$$\mu_2 = \frac{\sin \beta \cos(N\pi - \phi) + \cot \beta' (\cos \beta - \cos \beta')}{\sin \beta'} \quad (\text{ก.118})$$

และเมื่อแทนสมการ (ก.115) และ (ก.116) ลงในสมการ (ก.6ค) จะได้สนามเนื่องจากกระแสไม่ต่อเนื่องที่ขอบ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข.

ระเบียบวิธีการเปลี่ยนตัวแปรของปริพันธ์สองชั้นบนโดเมนรูปสามเหลี่ยมใดๆ

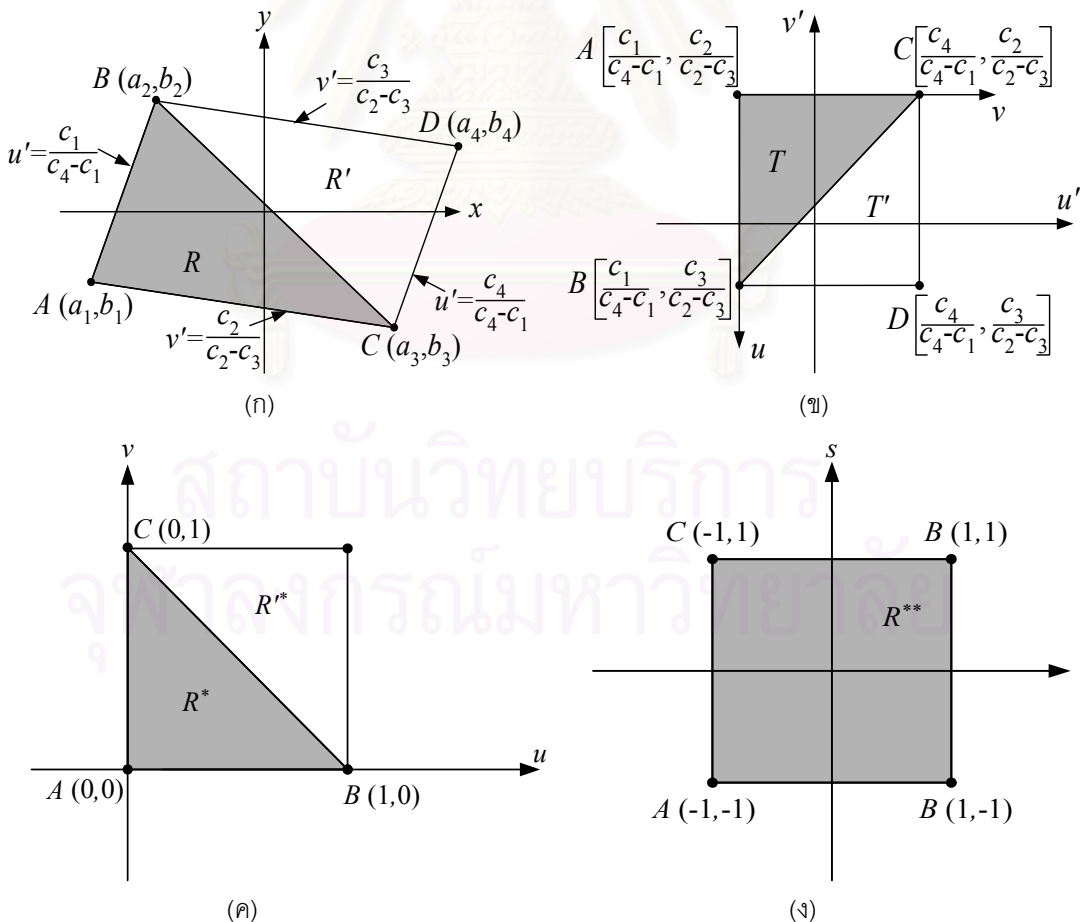
ระเบียบวิธีการเปลี่ยนตัวแปรสามารถชี้แจงแสดงปริพันธ์สองชั้น  $\iint_R f(x,y) dx dy$  ในรูปของปริพันธ์บนตัวแปรใหม่  $(u,v)$  และ  $(r,s)$  ได้โดยการกำหนดฟังก์ชันเวกเตอร์ซึ่งส่งจากระนาบหนึ่งไปยังอีกระนาบหนึ่งเป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งบนเซตของระนาบทั้งสอง [65] ซึ่งจะได้ปริพันธ์หลังจากเปลี่ยนตัวแปรจะแสดงอยู่ในรูปของตัวแปร  $(r,s)$  และ  $dx dy$  แทนด้วย  $dr ds$  คู่กับค่าสัมบูรณ์ของจาโคเบียนเป็น

$$\iint_R f(x,y) dx dy = \iint_{R'} f(r,s) \left| J \left( \frac{x,y}{u,v} \right) \right| \left| J \left( \frac{u,v}{r,s} \right) \right| dr ds \tag{ข.1}$$

สมการ (ข.1) นี้ยังคงใช้ได้ ถ้าบริเวณที่ฟังก์ชันค่าเวกเตอร์ไม่เป็นฟังก์ชันหนึ่งต่อหนึ่งนั้นมีพื้นที่เป็นศูนย์ หรือถ้าจาโคเบียนเท่ากับศูนย์บนบริเวณที่มีพื้นที่เป็นศูนย์

จากวิธีดังกล่าวข้างต้นสามารถนำมาใช้เปลี่ยนตัวแปรจากโดเมนของรูปสามเหลี่ยมใดๆ ไปเป็นตัวแปรบนโดเมนสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้ดังนี้

พิจารณารูปสามเหลี่ยม  $R$  บนสามเหลี่ยมใดๆ ที่ประกอบด้วยจุดยอด  $A(a_1,b_1)$ ,  $B(a_2,b_2)$  และ  $C(a_3,b_3)$  ดังรูป ข-1(ก) ในขั้นต้นกำหนดจุด  $D(a_4,b_4)$  ซึ่งทำให้เกิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน จากรูปร่างของ  $R$ ,  $R'$  เมื่อกำหนดให้ความสัมพันธ์ของตัวแปรในการแปลงเป็น



รูป ข-1 การแปลงบริเวณบนสามเหลี่ยมใดๆ ไปเป็นบริเวณบนสี่เหลี่ยมจัตุรัส

$$u' = \frac{y - m_1 x}{c_4 - c_1}, \quad v' = \frac{y - m_2 x}{c_2 - c_3} \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่  $m_1 = \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1}$  คือความชันของเส้นตรง  $AB$  และ  $CD$ ,  $m_2 = \frac{b_3 - b_1}{a_3 - a_1}$  คือความชันของเส้นตรง  $AC$  และ  $BD$ ,

$c_1 = -m_1 a_1 + b_1$ ,  $c_2 = -m_2 a_1 + b_1$ ,  $c_3 = -m_2 a_2 + b_2$ , และ  $c_4 = -m_1 a_3 + b_3$  คือจุดตัดบนแกน  $y$  ของเส้นตรง  $AB$ ,  $AC$ ,  $BD$  และ  $CD$  ตามลำดับ การแปลงนี้เป็นการส่ง (mapping) จากเซต  $R$ ,  $R'$  บนระนาบ  $xy$  ไปยังเซต  $T$ ,  $T'$  บนระนาบ  $uv$  ซึ่งสอดคล้องกับรูปสี่เหลี่ยมดังรูป ข-1(ข)

จากรูปร่างของ  $T$ ,  $T'$  เมื่อกำหนดให้ความสัมพันธ์ของตัวแปรในการแปลงเป็น

$$u = -v' + \frac{c_2}{c_2 - c_3}, \quad v = u' - \frac{c_1}{c_4 - c_1} \quad (\text{ข.3})$$

การแปลงนี้เป็นการเลื่อนเชิงตำแหน่งและหมุนรูปสี่เหลี่ยม  $T$ ,  $T'$  ไปเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า  $R^*$ ,  $R'^*$  ดังรูป ข-1(ค) และเมื่อแทนสมการ (ข.3) ลงใน (ข.2) จะได้

$$x = \frac{(c_2 - c_3)u + (c_4 - c_1)v + (c_1 - c_2)}{m_2 - m_1} \quad (\text{ข.4})$$

$$y = \frac{(c_2 - c_3)m_1 u + (c_4 - c_1)m_2 v + (c_1 m_2 - c_2 m_1)}{m_2 - m_1} \quad (\text{ข.5})$$

โดยจาโคเบียนของการแปลงเป็น

$$J\left(\frac{x, y}{u, v}\right) = \frac{(c_2 - c_3)(c_4 - c_1)}{m_2 - m_1} \quad (\text{ข.6})$$

ในขั้นตอนสุดท้าย รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส  $R^{**}$  ดังรูป ข-1(ง) คือบริเวณในระนาบ  $rs$  ที่สอดคล้องกับบริเวณ  $R^*$  ในระนาบ  $uv$  และ  $R$  ในระนาบ  $xy$  พิกัดของ  $r$  และ  $s$  สามารถหาได้โดยกำหนดให้

$$u = \frac{1+r}{2}, \quad v = \frac{(1-r)(1+s)}{4} \quad (\text{ข.7})$$

แทนสมการ (ข.7) ลงในสมการ (ข.4) และ (ข.5) จะได้

$$x = \frac{(c_1 - c_4)rs + (c_4 - c_1)s + [c_1 - c_4 + 2(c_2 - c_3)]r + (3c_1 - 2(c_2 + c_3) + c_4)}{4(m_2 - m_1)} \quad (\text{ข.8})$$

$$y = \frac{(c_1 - c_4)m_2 rs + (c_4 - c_1)m_2 s + [(c_1 - c_4)m_2 + 2(c_2 - c_3)m_1]r + (3c_1 + c_4)m_2 - 2(c_2 + c_3)m_1}{4(m_2 - m_1)} \quad (\text{ข.9})$$

และมีจาโคเบียนของการแปลงเป็น

$$J\left(\frac{u, v}{r, s}\right) = \frac{1-r}{8} \quad (\text{ข.10})$$

จากการแปลงข้างต้น ถ้า  $R$  เป็นบริเวณในสามเหลี่ยม สมการ (ข.1) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\iint_R f(x, y) dx dy = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 f(r, s) \left| J\left(\frac{x, y}{u, v}\right) \right| \left| J\left(\frac{u, v}{r, s}\right) \right| dr ds \quad (\text{ข.11})$$

เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยมลำดับที่  $m$  ในรูป 3.4 สามารถแปลงเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูป ข-1(ง) โดยในขั้นแรกส่งจุดยอดของสามเหลี่ยมแต่ละรูปในระบบพิกัดพื้นผิวทั่วไปไปบนระนาบ  $xy$  ทำให้เกิดเป็นภาพฉายของสามเหลี่ยมซึ่งกำหนดด้วยจุดยอดเป็น  $(a_1, b_1)$ ,  $(a_2, b_2)$  และ  $(a_3, b_3)$  ดังนั้นสำหรับภาพฉายของสามเหลี่ยมลำดับที่  $m$  จุดยอด  $(x_c, y_c)$ ,  $(x_m, y_m)$  และ  $(x_{m+1}, y_{m+1})$  กำหนดเป็น  $(a_1, b_1)$ ,  $(a_2, b_2)$  และ  $(a_3, b_3)$  ตามลำดับ หลังจากนั้นส่งภาพฉายของสามเหลี่ยม

ที่มีจุดยอดดังกล่าวไปบนสามเหลี่ยมที่มีจุดยอดเป็น  $(0,0)$ ,  $(1,0)$  และ  $(0,1)$  ในระบบพิกัด  $(u,v)$  โดยใช้การแปลงตามสมการ (ข.4) และ (ข.5) หลังจากนั้นก็ส่งไปบนสี่เหลี่ยมจัตุรัสในระบบพิกัด  $(r,s)$  ตามสมการ (ข.7)

สังเกตว่า  $m_1$  หรือ  $m_2$  อาจมีค่าเป็นอนันต์เมื่อ  $a_2-a_1=0$  หรือ  $a_3-a_1=0$  ตามลำดับ ในกรณีเช่นนี้จุดบนระนาบ  $xy$  ไม่สามารถส่งไปยังจุดในระนาบ  $uv$  ได้ เพื่อแก้ปัญหานี้จำเป็นต้องสลับจุด  $(a_1,b_1)$  กับจุด  $(a_3,b_3)$  หรือ  $(a_2,b_2)$  เมื่อ  $a_2-a_1=0$  หรือ  $a_3-a_1=0$  ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวและขอบกับระบบพิกัดทั่วไป

ในระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนที่ปรับรูปลักษณะได้ พื้นผิวที่ปรับรูปลักษณะได้เกิดจากการนำแผ่นย่อยมาจัดวางเป็นรูปร่างได้หลากหลายรูปแบบ และแผ่นย่อยแต่ละแผ่นยังสามารถหมุนในทิศทางต่างๆ รอบจุดศูนย์กลางของแผ่นย่อยได้ทั้งในมุมยกและมุมทิศ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการอ้างถึงพิกัดของจุดบนแผ่นย่อยแต่ละแผ่นจึงได้สร้างระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิว (local surface coordinate) ระบบพิกัดท้องถิ่นของขอบ (local edge coordinate) ของแผ่นย่อยแต่ละแผ่นขึ้น เพื่อทำหน้าที่เชื่อมโยงกับระบบพิกัดทั่วไป (global coordinate) หรือระบบพิกัดหลัก

ระบบพิกัดท้องถิ่นที่นำมาใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น ระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิว (local surface coordinate) กับระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบ (local edge coordinate) สำหรับระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวสามารถพิจารณาออกเป็น 2 สถานะคือ สถานะเริ่มต้น (initial state) กับสถานะหลังการหมุน (rotating state) ในสถานะเริ่มต้นซึ่งเป็นสถานะที่ยังไม่มีการหมุนของแผ่นย่อย ระบบพิกัดที่ใช้อ้างถึงจุดบนแผ่นย่อยประกอบด้วยระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 3 ระบบคือ  $x_1^e y_1^e z_1^e$ ,  $x_2^e y_2^e z_2^e$  และ  $x_{init}^e y_{init}^e z_{init}^e$  ระบบพิกัดทั้ง 3 นี้มีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดทั่วไป  $xyz$  ดังนี้

ระบบพิกัด  $x_1^e y_1^e z_1^e$  สอดคล้องกับระบบพิกัดทั่วไปในลักษณะการเลื่อนเชิงตำแหน่งของระบบพิกัด  $xyz$  และระบบพิกัด  $x_2^e y_2^e z_2^e$  เกิดจากการหมุนของระบบพิกัด  $x_1^e y_1^e z_1^e$  ไปเป็นมุม  $\phi_{init}^e$  รอบแกน  $z_1^e$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และระบบพิกัด  $x_{init}^e y_{init}^e z_{init}^e$  เกิดจากการหมุนระบบพิกัด  $x_2^e y_2^e z_2^e$  ไปเป็นมุม  $\theta_{init}^e$  รอบแกน  $y_2^e$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ระบบพิกัด  $x_{init}^e y_{init}^e z_{init}^e$  เป็นระบบพิกัดที่ใช้บ่งบอกถึงจุดยอดของแผ่นย่อยในสถานะเริ่มต้น และนำไปใช้หาจุดยอดของแผ่นย่อยเมื่ออยู่ในสถานะหลังการหมุนด้วย จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้ระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะเริ่มต้นเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} x_1^e \\ y_1^e \\ z_1^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{e,c} \\ y_{e,c} \\ z_{e,c} \end{bmatrix} \tag{ค.1}$$

$$\begin{bmatrix} x_2^e \\ y_2^e \\ z_2^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{init}^e & \sin \phi_{init}^e & 0 \\ -\sin \phi_{init}^e & \cos \phi_{init}^e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^e \\ y_1^e \\ z_1^e \end{bmatrix} \tag{ค.2}$$

$$\begin{bmatrix} x_{init}^e \\ y_{init}^e \\ z_{init}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{init}^e & 0 & -\sin \theta_{init}^e \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{init}^e & 0 & \cos \theta_{init}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2^e \\ y_2^e \\ z_2^e \end{bmatrix} \tag{ค.3}$$

เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะเริ่มต้น  $(\hat{x}_{init}^e, \hat{y}_{init}^e, \hat{z}_{init}^e)$  กับระบบพิกัดทั่วไป แสดงได้ในรูปโคไซน์แสดงทิศทาง (direction cosines) เป็น

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{init}^e \\ \hat{y}_{init}^e \\ \hat{z}_{init}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{init}^e \cos \phi_{init}^e & \cos \theta_{init}^e \sin \phi_{init}^e & -\sin \theta_{init}^e \\ -\sin \phi_{init}^e & \cos \phi_{init}^e & 0 \\ \sin \theta_{init}^e \cos \phi_{init}^e & \sin \theta_{init}^e \sin \phi_{init}^e & \cos \theta_{init}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} \tag{ค.4}$$

จากระบบพิกัด  $x_{init}^e y_{init}^e z_{init}^e$  สังเกตว่า  $z_{init}^e = 0$  และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับแผ่นย่อยเท่ากับ  $\hat{z}_{init}^e$  ( $\hat{n}_{init}^e$ ) ดังนั้น

$$\hat{n}_{init}^e = \sin \theta_{init}^e \cos \phi_{init}^e \hat{x} + \sin \theta_{init}^e \sin \phi_{init}^e \hat{y} + \cos \theta_{init}^e \hat{z} \tag{ค.5}$$

ต่อมาเมื่อมีการหมุนแผ่นย่อยไปเป็นมุมที่ต้องการแล้ว แผ่นย่อยจะอยู่ในสถานะหลังการหมุน เพื่ออ้างอิงจุดบนแผ่นย่อยในสถานะนี้ได้ใช้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนอีก 3 ระบบคือ  $x_3^e y_3^e z_3^e$ ,  $x_4^e y_4^e z_4^e$  และ  $x_{rot}^e y_{rot}^e z_{rot}^e$  ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดเหล่านี้กับระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะเริ่มต้นกำหนดได้ดังนี้

ระบบพิกัด  $x_3^e y_3^e z_3^e$  สอดคล้องกับการหมุนระบบพิกัด  $x_{init}^e y_{init}^e z_{init}^e$  ไปเป็นมุม  $\phi_{rot}^e$  รอบแกน  $z_{init}^e$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และระบบพิกัด  $x_4^e y_4^e z_4^e$  เกิดจากการหมุนระบบพิกัด  $x_3^e y_3^e z_3^e$  ไปเป็นมุม  $\theta_{rot}^e$  รอบแกน  $y_3^e$  ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา  $\phi_{rot}^e$ ,  $\theta_{rot}^e$  คือมุมที่หมุนไปของแผ่นย่อยรอบแกนทิศและแกนยกตามลำดับ เพื่อให้หาจุดยอดของแผ่นย่อยในสถานะหลังการหมุนทำได้ง่ายจึงได้กำหนดระบบพิกัด  $x_{rot}^e y_{rot}^e z_{rot}^e$  ขึ้นมา โดยหมุนระบบพิกัด  $x_4^e y_4^e z_4^e$  ไปเป็นมุม  $\phi_{rot}^e$  รอบแกน  $z_4^e$  ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เพื่อที่จะจัดเรียงแกนอ้างอิงของระบบพิกัดให้มีลักษณะเดียวกันกับระบบพิกัด  $x_{init}^e y_{init}^e z_{init}^e$  ดังนั้นจุดยอดของแผ่นย่อยในระบบพิกัด  $x_{rot}^e y_{rot}^e z_{rot}^e$  สามารถแทนได้ด้วยจุดยอดในระบบพิกัด  $x_{init}^e y_{init}^e z_{init}^e$  เพราะค่าจุดยอดเหล่านั้นเป็นค่าเดียวกัน ซึ่งสามารถหาได้โดยแทนจุดยอดของแผ่นย่อยในระบบพิกัดทั่วไปลงในสมการ (ค.1) ถึง (ค.3) จากความสัมพันธ์ข้างต้นทำให้ระบบพิกัดเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะเริ่มต้นเป็นดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} x_3^e \\ y_3^e \\ z_3^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^e & \sin \phi_{rot}^e & 0 \\ -\sin \phi_{rot}^e & \cos \phi_{rot}^e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{init}^e \\ y_{init}^e \\ z_{init}^e \end{bmatrix} \quad (ค.6)$$

$$\begin{bmatrix} x_4^e \\ y_4^e \\ z_4^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{rot}^e & 0 & -\sin \theta_{rot}^e \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{rot}^e & 0 & \cos \theta_{rot}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3^e \\ y_3^e \\ z_3^e \end{bmatrix} \quad (ค.7)$$

$$\begin{bmatrix} x_{rot}^e \\ y_{rot}^e \\ z_{rot}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^e & -\sin \phi_{rot}^e & 0 \\ \sin \phi_{rot}^e & \cos \phi_{rot}^e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4^e \\ y_4^e \\ z_4^e \end{bmatrix} \quad (ค.8)$$

และเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิว ( $\hat{x}_{rot}^e, \hat{y}_{rot}^e, \hat{z}_{rot}^e$ ) กับ ( $\hat{x}_{init}^e, \hat{y}_{init}^e, \hat{z}_{init}^e$ ) แสดงได้ในรูปโคไซน์แสดงทิศทางเป็น

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{rot}^e \\ \hat{y}_{rot}^e \\ \hat{z}_{rot}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^e & -\sin \phi_{rot}^e & 0 \\ \sin \phi_{rot}^e & \cos \phi_{rot}^e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{rot}^e & 0 & -\sin \theta_{rot}^e \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_{rot}^e & 0 & \cos \theta_{rot}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_{rot}^e & \sin \phi_{rot}^e & 0 \\ -\sin \phi_{rot}^e & \cos \phi_{rot}^e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{init}^e \\ \hat{y}_{init}^e \\ \hat{z}_{init}^e \end{bmatrix} \quad (ค.9)$$

จากระบบพิกัด  $x_{rot}^e y_{rot}^e z_{rot}^e$  เวกเตอร์หนึ่งหน่วยตั้งฉากกับแผ่นย่อยในสถานะหลังการหมุนเท่ากับ  $\hat{z}_{rot}^e$  ( $\hat{n}_{rot}^e$ ) ดังนั้น

$$\begin{aligned} \hat{n}_{rot}^e = & [-\sin \theta_{rot}^e (\sin \phi_{rot}^e \sin \phi_{init}^e - \cos \phi_{rot}^e \cos \theta_{init}^e \cos \phi_{init}^e) + \cos \theta_{rot}^e \sin \theta_{init}^e \cos \phi_{init}^e] \hat{x} + \\ & [\sin \theta_{rot}^e (\sin \phi_{rot}^e \cos \phi_{init}^e + \cos \phi_{rot}^e \cos \theta_{init}^e \sin \phi_{init}^e) + \cos \theta_{rot}^e \sin \theta_{init}^e \sin \phi_{init}^e] \hat{y} + \\ & [\cos \theta_{rot}^e \cos \theta_{init}^e - \sin \theta_{rot}^e \cos \phi_{rot}^e \sin \theta_{init}^e] \hat{z} \end{aligned} \quad (ค.10)$$

แทนสมการ (ค.1)-(ค.3) (ค.6) และ (ค.7) ลงในสมการ (ค.8) จะได้

$$\begin{bmatrix} x_{rot}^e \\ y_{rot}^e \\ z_{rot}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ C \\ C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_{e,c} \\ y - y_{e,c} \\ z - z_{e,c} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^T \\ C^T \\ C^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{rot}^e \\ y_{rot}^e \\ z_{rot}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{e,c} \\ y_{e,c} \\ z_{e,c} \end{bmatrix} \quad (ค.11)$$

และเมื่อแทนสมการ (ค.4) ลงในสมการ (ค.9) จะได้

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_{rot}^e \\ \hat{y}_{rot}^e \\ \hat{z}_{rot}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ C \\ C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^T \\ C^T \\ C^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{rot}^e \\ \hat{y}_{rot}^e \\ \hat{z}_{rot}^e \end{bmatrix} \quad (ค.12)$$



โดยที่ดัชนีบน  $T$  กำหนดเป็นการสลับเปลี่ยน (transpose) ของเมทริกซ์

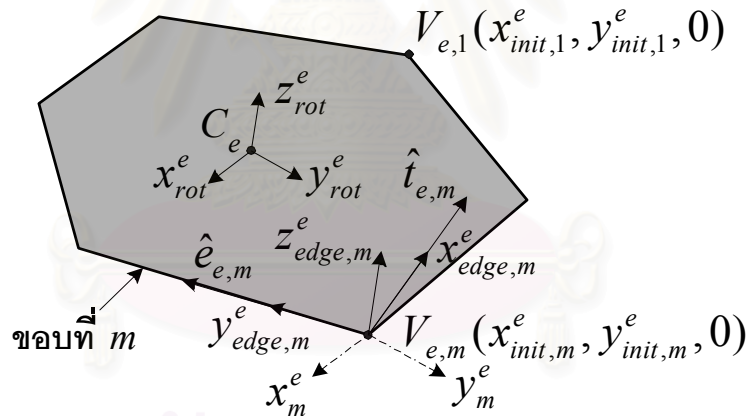
นอกจากระบบพิกัดท้องถิ่นของพื้นผิวในสถานะเริ่มต้นและสถานะหลังการหมุนแล้ว เพื่อสะดวกในการอ้างอิงจุดบนขอบของแผ่นย่อยสำหรับการวิเคราะห์ผลของการเลี้ยวเบนที่ขอบ ระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบของแผ่นย่อยประกอบด้วยระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสองระบบคือระบบพิกัด  $x_m^e, y_m^e, z_m^e$  และ  $x_{edge,m}^e, y_{edge,m}^e, z_{edge,m}^e$  ดังรูป ค-1 กำหนดขึ้นเพื่อใช้อ้างอิงจุดบนขอบที่  $m$  ของแผ่นย่อยที่  $e$  ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดทั้งสองนี้กับระบบพิกัด  $x_{rot}^e, y_{rot}^e, z_{rot}^e$  แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} x_{rot}^e \\ y_{rot}^e \\ z_{rot}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_m^e \\ y_m^e \\ z_m^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{init,m}^e \\ y_{init,m}^e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{ค.13})$$

$$\begin{bmatrix} x_m^e \\ y_m^e \\ z_m^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{rot}^e \cdot \hat{t}_{e,m} & \hat{x}_{rot}^e \cdot \hat{e}_{e,m} & 0 \\ \hat{y}_{rot}^e \cdot \hat{t}_{e,m} & \hat{y}_{rot}^e \cdot \hat{e}_{e,m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{edge,m}^e \\ y_{edge,m}^e \\ z_{edge,m}^e \end{bmatrix} \quad (\text{ค.14})$$

โดยที่จุด  $(x_{init,m}^e, y_{init,m}^e, 0)$  คือพิกัดท้องถิ่นของจุดยอดที่  $m$  ของแผ่นย่อยที่  $e$  ในสถานะเริ่มต้น ระบบพิกัด  $x_m^e, y_m^e, z_m^e$  เกิดจากการเลื่อนเชิงตำแหน่งของระบบพิกัด  $x_{rot}^e, y_{rot}^e, z_{rot}^e$

ระบบพิกัด  $x_{edge,m}^e, y_{edge,m}^e, z_{edge,m}^e$  เกิดจากการหมุนระบบพิกัด  $x_m^e, y_m^e, z_m^e$  รอบแกน  $z_m^e$ ,  $\hat{t}_{e,m} = \hat{e}_{e,m} \times \hat{n}_{rot}^e$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับแผ่นย่อยและมีทิศพุ่งจากขอบที่  $m$  เข้าหาพื้นผิว และ  $\hat{e}_{e,m}$  คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทางสัมผัสกับขอบที่  $m$



รูป ค-1 ระบบพิกัดท้องถิ่นที่ขอบของแผ่นย่อย

สังเกตว่าจุดบนขอบที่  $m$  ของแผ่นย่อยที่  $e$  ในสถานะหลังการหมุนกำหนดด้วยจุดบนแกน  $y_{edge,m}^e$  ( $0 \leq y_{edge,m}^e \leq l_{e,m}$ ;  $x_{edge,m}^e = z_{edge,m}^e = 0$ ) ดังนั้นจุดเหล่านี้สามารถเขียนอยู่ในระบบพิกัดทั่วไปได้โดยแทนสมการ (ค.13) และ (ค.14) ลงในสมการ (ค.11) เป็น

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^T \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \hat{x}_{rot}^e \cdot \hat{t}_{e,m} & \hat{x}_{rot}^e \cdot \hat{e}_{e,m} & 0 \\ \hat{y}_{rot}^e \cdot \hat{t}_{e,m} & \hat{y}_{rot}^e \cdot \hat{e}_{e,m} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ y_{edge,m}^e \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{init,m}^e \\ y_{init,m}^e \\ 0 \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} x_{e,c} \\ y_{e,c} \\ z_{e,c} \end{bmatrix} \quad (\text{ค.15})$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสุภเชษฐ์ เพิ่มพูนวัฒนาสุข เกิดวันที่ 18 มีนาคม พ.ศ. 2515 ที่อำเภอคลองสาน จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2536 และ 2539 ตามลำดับ เมื่อพ.ศ. 2540 ได้เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการศิษย์ก้นกุฏิ ซึ่งเป็นโครงการความร่วมมือในการพัฒนาการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาด้านวิศวกรรมศาสตร์ระหว่างจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

ระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตเขียนวิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับผลกระทบของการเลี้ยวเบนที่มีต่อสมรรถนะของระบบสายอากาศชนิดจานสะท้อนเดี่ยวรูปพาราโบลา

ระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิตเขียนวิทยานิพนธ์เรื่อง การวิเคราะห์สายอากาศชนิดจานสะท้อนแบบปรับรูปลักษณะได้โดยใช้แผ่นย่อย และได้เผยแพร่ผลงานวิจัยที่เกิดขึ้นจากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในที่ประชุมระดับชาติ และระดับนานาชาติดังนี้

- [1] S. Phermphoonwatanasuk, and C. Waiyapattanakorn, "The flat reconfigurable paneled reflector antenna," 20<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference., Bangkok, Thailand, pp.686-691, 1997.
- [2] S. Phermphoonwatanasuk, and C. Waiyapattanakorn, "Small flat multi-panel reconfigurable reflector antenna: theoretical investigation," Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS)., Nantes, France, pp.346, 1998.
- [3] M. Indravuth, C. Waiyapattanakorn, and S. Phermphoonwatanasuk, "Smart antenna versus structural reconfigurable antenna," International Wireless and Telecommunications Symposium/Exhibition (IWTS)., Malaysia, vol.1, pp.128-130, 1999.
- [4] S. Phermphoonwatanasuk, and C. Waiyapattanakorn, "Neighboring panels blocking and diffraction effects on the performance of the small flat multi-panel reconfigurable reflector antenna," Proc. 2000 International Symposium on Antennas & Propag., Fukuoka, Japan, vol.1, pp.41-44, Aug. 2000.

และได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร IEICE Transaction on Communication ฉบับที่ E84-B เลขที่ 9 เดือนกันยายน ปี ค.ศ. 2001 ดังนี้

- [1] S. Phermphoonwatanasuk, and C. Waiyapattanakorn, "Numerical study of the small multi-panel reconfigurable reflector antenna's performance" IEICE Trans. Commun., vol.E84-B, no.9, pp.2421-2435, Sep. 2001.