

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบสายอากาศแบบเซกเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้งานที่สถานีฐาน  
Design of Sector Antenna for Base Station Applications



7 10 ผ่านทางหอสมุด  
อิม.

HN



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **62101**  
วัน,เดือน,ปี **3 1 ก.ค. 2549**

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา  
วิศวกรรมโทรคมนาคม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปทำซ้ำ การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสายอากาศแบบเซกเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้งานที่สถานีฐาน  
Design of Sector Antenna for Base Station Applications

โดย

นาย เชาว์วัต จันดี 45015007

นายพิชญพงศ์ คุปตะศิริ 45015022

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

รศ.ดร. สมผล โภคัตติวัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2547

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

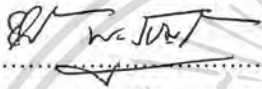
เรื่อง การออกแบบสายอากาศแบบเซกเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้งานที่สถานีฐาน

**Design of Sector Antenna for Base Station Applications**

ผู้จัดทำ

1. นาย เชาว์วัต จันดี 45015007

2. นาย พิษณุพงศ์ คุปตะศิริ 45015022



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผศ.ดร. ชuwat พงศ์เจริญพาณิชย์ )



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบสายอากาศแบบเซกเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้งานที่สถานีฐาน  
Design of Sector Antenna for Base Station Applications

โดย นาย เชาว์วัต จันดี 45015007  
นาย พิชญพงศ์ คุปตะศิริ 45015022

อาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์  
รศ.ดร.สมพล โกศลวิตร

**บทคัดย่อ**

โครงการนี้เป็นกรนำเสนอการออกแบบสายอากาศแบบเซกเตอร์ เพื่อใช้สำหรับติดตั้งเป็นสายอากาศที่สถานีฐานสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายที่ความถี่ 1800 MHz สายอากาศชนิดนี้สามารถใช้ลดการรบกวนในช่องสัญญาณเดียวกันที่สถานีฐาน โดยโครงการนี้นำเสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จากนั้นจะทำการสร้างสายอากาศเพื่อทดสอบหาคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นและคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเพื่อยืนยันว่าสายอากาศสามารถใช้งานได้จริง

**ABSTRACT**

This project proposes the design of the sector antenna for installing at the base station of the wireless communications at the operating frequency of 1800 MHz. This antenna type can be used to reduce the co-channel interference at the base station. This project also presents the analysis of the radiation characteristics to accomplish the suitable parameters. Subsequently, the antenna will be constructed to measure the radiation and impedance characteristics. The results of the experiments can confirm that this antenna can be applied the actual situations.

## สารบัญ

		หน้า
บทที่ 1	บทนำ	1
บทที่ 2	ทฤษฎีและหลักการ	3
	2.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ	3
	2.2 โครงสร้างของสายอากาศ	13
	2.3 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม	16
	2.4 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่	19
บทที่ 3	การวิเคราะห์ คำนวณ และออกแบบ	27
	3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ	27
	3.1.1 การพิจารณาค่าความกว้าง ความสูง และความยาวของสายอากาศวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม	27
	3.1.2 การพิจารณาค่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม	31
	3.1.3 การพิจารณาค่าความยาวโพรบ	34
	3.2 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	36
	3.2.1 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม	36
	3.2.2 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก	37
	3.2.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง	38
	3.2.4 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก	39
	3.2.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง	40
	3.2.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ	42
	3.2.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	42
	3.2.8 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	43
	3.2.9 ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศ	45
	3.2.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ	45
	3.2.11 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านหลังของสายอากาศ	46
	3.2.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ	47
	3.2.13 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	48
	3.2.14 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	48
	3.2.15 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ 3 เซกเตอร์ ตัวสะท้อนคลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การสร้าง และทดสอบ	50
4.1 การสร้าง	50
4.2 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	52
บทที่ 5 การคำนวณและทดสอบ	57
5.1 การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ	57
5.2 การทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	66
5.3 การวัดอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)	85
บทที่ 6 วิจารณ์และสรุป	87
ภาคผนวก	88
กิตติกรรมประกาศ	102
หนังสืออ้างอิง	103



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงระบบ โคออดิเนทที่แสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น	3
รูปที่ 2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบชี้ทิศทางรอบตัว	4
รูปที่ 2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก ระนาบ E และ H ของสายอากาศปากแตร	5
รูปที่ 2.4 (a),(b)แสดงลำคลื่นต่างๆ, บีบวิตซ์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้น ของสายอากาศ	6, 7
รูปที่ 2.5 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน	11
รูปที่ 2.6 สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม	14
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของขนาดกำลังงานที่แพร่กระจายออกไปสำหรับโหมดคลื่น ของ $TE_{10}$ $TE_{01}$ และ $TE_{30}$ (โดยใช้วงแหวนที่ทำจากทองเหลือง ด้วยค่ากว้าง $0.69\lambda$ และความสูง $0.35\lambda$ )	15
รูปที่ 2.8 โครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม	16
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม	16
รูปที่ 2.10 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม $120^\circ$	17
รูปที่ 2.12 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในพื้นที่ที่ห่างกัน	19
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของสถานีฐาน	21
รูปที่ 2.14 อัตราส่วนของ D/R	23
รูปที่ 2.15 แพทเทินแบบต่างๆ ในการนำเอาความถี่มาใช้	24
รูปที่ 3.1 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม	28
รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม	30
รูปที่ 3.3 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม โดยมีขนาดของความยาวเท่ากับสองเท่าของระยะห่าง ระหว่างตัวป้อนสัญญาณกับตัวสะท้อนแบบคลื่นมุมที่มีมุมเท่ากับ $120^\circ$	30
รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์หาความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม โดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15\lambda$ วางใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม $120^\circ$ ในระนาบสนามไฟฟ้า	32
รูปที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์หาความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม โดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวน สี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15\lambda$ วางใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม $120^\circ$ ในระนาบสนามแม่เหล็ก	33
รูปที่ 3.6 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศชนิดของตัวป้อนสัญญาณด้วย วงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$ ที่มีความยาวโพรบ (l) ค่าต่างๆ	34
รูปที่ 3.7 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศชนิดของตัวป้อนสัญญาณด้วย วงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$ ที่มีความยาวโพรบ (l) ค่าต่างๆ	35

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.8 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศชนิดของตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$ ที่มีความยาวโพรบ (1) ค่าต่างๆ	36
รูปที่ 3.9 แสดง ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$	37
รูปที่ 3.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกรณีสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$	39
รูปที่ 3.11 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม	40
รูปที่ 3.12 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$	41
รูปที่ 3.13 อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านหลังของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณ ด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$	41
รูปที่ 3.14 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$	42
รูปที่ 3.15 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวน สี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$	43
รูปที่ 3.16 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม ที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ $0.15 \lambda$	44
รูปที่ 3.17 ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของของตัวสะท้อน (1c)	44
รูปที่ 3.18 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน (1c)	45
รูปที่ 3.19 อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านหลังของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน (1c)	46
รูปที่ 3.20 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน (1c)	47
รูปที่ 3.21 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน (1c)	47
รูปที่ 3.22 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน (1c)	48
รูปที่ 3.23 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ 3 เซกเตอร์ตัวสะท้อนคลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 สายอากาศ 3 เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยม	50
รูปที่ 4.2 สายอากาศ 3 เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากับ ที่ได้ทำการออกแบบ	52
รูปที่ 4.3 การวางสายอากาศ 3 เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยม ส่งสัญญาณด้วย สายอากาศ ไดโพลใน ระนาบสนามไฟฟ้า ภายในห้องทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	53
รูปที่ 4.4 การวางสายอากาศ 3 เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยม ส่งสัญญาณด้วย สายอากาศ ไดโพลในระนาบสนามแม่เหล็ก ภายในห้องทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น	54
รูปที่ 4.5 โหลดอิมพีแดนซ์ขนาด $50\Omega$ ที่ใช้ในการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของ สายอากาศแบบเซกเตอร์	55
รูปที่ 5.1 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	57
รูปที่ 5.2 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 2 ที่มุม 120 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	58
รูปที่ 5.3 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 3 ที่มุม 240 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	59
รูปที่ 5.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	60
รูปที่ 5.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ด้านที่ 2 ที่มุม 120 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	61
รูปที่ 5.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ด้านที่ 3 ที่มุม 240 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	62
รูปที่ 5.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	63
รูปที่ 5.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ด้านที่ 2 ที่มุม 120 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	64
รูปที่ 5.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ด้านที่ 3 ที่มุม 240 องศา จากเครื่อง Network Analyzer	65
รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 1 มุม 0 องศา ที่ความถี่ 1710 MHz	66,67
รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 1 มุม 0 องศา ที่ความถี่ 1785 MHz	68
รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 1 มุม 0 องศา ที่ความถี่ 1805 MHz	69,70
รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 1 มุม 0 องศา ที่ความถี่ 1880 MHz	71
รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 2 มุม 120 องศา ที่ความถี่ 1710 MHz	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 2 มุม 120 องศา ที่ความถี่ 1785 MHz	74, 75
รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 2 มุม 120 องศา ที่ความถี่ 1805 MHz	76
รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 2 มุม 120 องศา ที่ความถี่ 1880 MHz	77, 78
รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 3 มุม 240 องศา ที่ความถี่ 1710 MHz	79
รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 3 มุม 240 องศา ที่ความถี่ 1785 MHz	80, 81
รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 3 มุม 240 องศา ที่ความถี่ 1805 MHz	82
รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 3 มุม 240 องศา ที่ความถี่ 1880 MHz	83, 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดอัตราการขายของสายอากาศแบบ 3 เซกเตอร์ตัวสะท้อนคลื่นมุมแบบ  
วงแหวนสี่เหลี่ยม

86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและวัตถุประสงค์

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ดังจะเห็นได้จากที่มีการให้บริการรูปแบบใหม่ๆ เกิดขึ้นตลอดเวลา เช่น การให้บริการโทรศัพท์ระบบดิจิทัล การให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบเซลลูลาร์ การให้บริการ โทรศัพท์ไร้สายแบบต่างๆ ซึ่งการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย(Wireless communication) มีความคล่องตัวในการใช้งาน สามารถใช้งานได้สะดวก สามารถติดต่อได้ในทุกที่ทุกเวลา สามารถติดต่อสื่อสารไปได้ไกลมากขึ้น และยังมีแนวโน้มจะเกิดการพัฒนาต่ออีกในอนาคต

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ มีความต้องการในการใช้งานมากขึ้นทุกขณะ แต่ความถี่ช่วงที่ใช้งาน มิใช่เพียงพอที่จะรองรับความต้องการของผู้ใช้งาน ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ จึงได้นำความถี่เดิมที่มีการนำไปใช้งานแล้ว กลับมาใช้ใหม่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ความถี่ และเป็นการใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการนำเซลล์ที่มีความถี่เดียวกัน วางให้มีระยะทางที่ห่างกันโดยกำหนดให้ความถี่อื่นที่ใช้เป็นความถี่ข้างเคียงทำงานในพื้นที่ที่คั่นระหว่างความถี่ดังกล่าว แต่ข้อเสียจากการนำเซลล์ที่มีความถี่เดิมกลับมาใช้ใหม่ ก็คือจะเกิดการรบกวนกันในช่องสัญญาณที่มีความถี่เดียวกัน หรือที่เรียกว่า การเกิด“Co-channel interference” ในระบบเซลลูลาร์นี้จะมีสถานีฐาน (Base station) ที่ใช้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบเจาะจงทิศทาง ครอบคลุมพื้นที่ ที่ต้องการใช้งาน

ซึ่งในปฏิญานีพจนานี้ได้ทำการวิเคราะห์ห่ออกแบบสายอากาศที่ใช้เป็นสถานีฐานของระบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อทำให้การนำเซลล์ที่มีความถี่เดิม กลับมาใช้ใหม่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยหาวิธีการเกิดการรบกวนกันของช่องสัญญาณที่มีความถี่เดียวกัน หรือ Co-channel interference โดยการจัดวางสายอากาศเซลล์ที่มีความถี่เดียวกัน ไม่ให้เกิดการรบกวนกัน โดยใช้สายอากาศตัวสะท้อนคลื่นมุมที่ป้อนด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม ซึ่งสายอากาศแบบนี้จะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว (Directional pattern) มาจัดวางเรียงกัน โดยออกแบบให้มี3ทิศทาง เป็นแบบ sector ซึ่งในแต่ละsector จะวางด้วยมุมห่างกัน120 องศา โดยคุณสมบัติ ของสายอากาศแบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่ป้อนด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) และอัตราขยาย (Gain) ที่สูงขึ้น ทำให้เกิดระยะห่างของเซลล์ที่ช่องความถี่เดียวกันมากขึ้น และเพิ่มอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน(Signal-to-Noise Ratio)จากการลดจำนวนทิศทางเซลล์ที่เข้ามารบกวน

การติดตั้งสถานีฐาน (Base station) ในสถานที่ต่างกันจำนวนผู้ต้องการใช้ในแต่ละพื้นที่มีไม่เท่ากัน อีกทั้งสภาพของภูมิประเทศ ที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ทำให้ความต้องการในการติดต่อสื่อสารมากน้อยต่างกันไป อีกทั้งประสิทธิภาพของสายอากาศอาจได้ใช้งานน้อย ซึ่งเมื่อนำไปใช้งานแล้วอาจไม่คุ้มค่ากับการติดตั้ง เพื่อให้การใช้งานเกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด สายอากาศที่มีรูปแบบเจาะจงทิศทาง แพร่กระจายคลื่นตาม sector นี้จะสามารถออกแบบให้แพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่เราต้องการใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

บทที่ 1 จะกล่าวถึงความเป็นมาและวัตถุประสงค์ ขอบเขตของปริญญานิพนธ์นี้ ซึ่งเป็นเนื้อหาโดยรวมที่ได้รวบรวมไว้ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 อธิบายทฤษฎีและหลักการของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมล้อมรอบโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างสายอากาศแบบ Sector โดยอธิบายถึงโครงสร้างของ สายอากาศโครงสร้างของตัวป้อนสัญญาณ ตลอดจนวิธีการหาสนามการแพร่กระจายคลื่นอีกด้วย

บทที่ 3 แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ การคำนวณ และการออกแบบสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม ซึ่งนำมาใช้สร้างสายอากาศ Sector โดยอาศัยทฤษฎีที่ได้จากโปรแกรม คำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศให้ได้ตามความต้องการ โดยได้ทำการวิเคราะห์หาขนาดของวงแหวนสี่เหลี่ยมและขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยพิจารณาร่วมกับระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวน

บทที่ 4 เป็นขั้นตอนการสร้าง การทดสอบ ตัวสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้

บทที่ 5 เป็นการแสดงผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลทั้งหมด ตลอดจนวิจารณ์ และเสนอแนะแนวทางสำหรับการพัฒนาสายอากาศต่อไป

สุดท้ายเป็นภาคผนวกที่รวบรวม โปรแกรมต่างๆที่เกี่ยวข้องในปริญญานิพนธ์นี้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

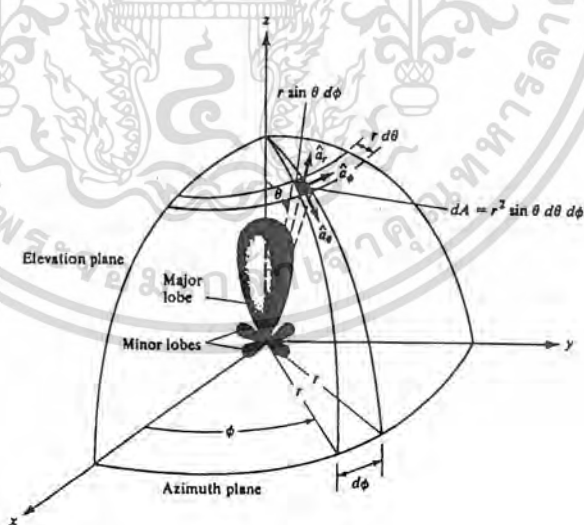
### 2.1 พารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ (Essential Antenna Parameters)

#### 2.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออดิเนต (Space Coordinate) ส่วนใหญ่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้มักคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far Field)

การอธิบายคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น จะอาศัยคุณสมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity), ความเข้มของสนาม (Field Strength), เฟส (Phase) และโพลาไรเซชัน (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกต ที่มีรัศมีคงที่

รูปที่ 2.1 แสดงระบบโคออดิเนตที่ใช้แสดงคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่น สำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่มีชื่อเรียกว่า “แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงกำลังงาน” (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่ มีชื่อเรียกว่า “แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงสนาม” (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น



รูปที่ 2.1 ระบบโคออดิเนตที่แสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก,แบบชี้ทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว  
ตัวแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic Radiator) คือ สายอากาศที่ถูกสมมติขึ้น โดยมีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่าง เช่น พอยท์ซอร์ส (Point Source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริง เกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี ในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omnidirectional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้มีดังแสดงในรูปที่ 2.2



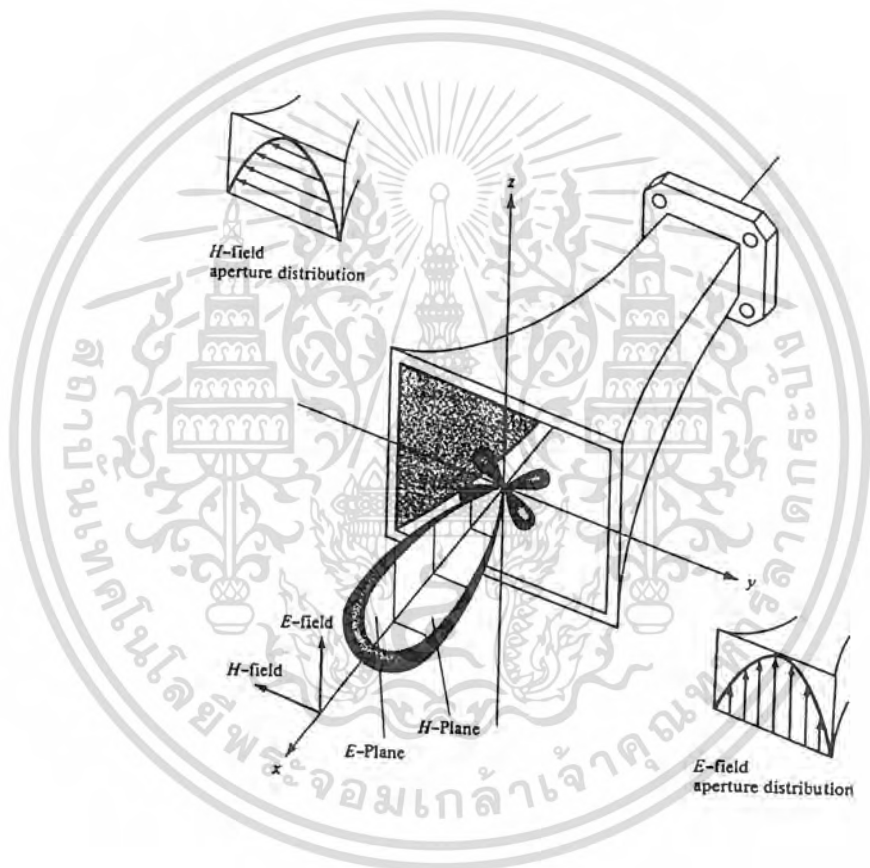
รูปที่ 2.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบชี้ทิศทางรอบตัว

ตามรูป จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบอาซิมุทหรือระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบอิลิเวชันหรือระนาบมุมยก (Elevation Plan) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principle Pattern)

เรามักอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักของสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $H$  สำหรับสายอากาศที่มีโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $E$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้าและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ  $H$  จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ตัวอย่างการแสดงผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักมีดังแสดงใน รูปที่ 2.3 โดยมีระนาบ  $xz$  เป็นระนาบ  $E$  หลัก และมีระนาบ  $xy$  เป็นระนาบ  $H$  หลัก



รูปที่ 2.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก ระนาบ  $E$  และ  $H$  ของสายอากาศปากแตร

### 2.1.1.3 ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น เป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่เกิดเป็นบริเวณ โดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำ รูป 2.4 แสดงลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ ซึ่งแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆ ได้ดังนี้

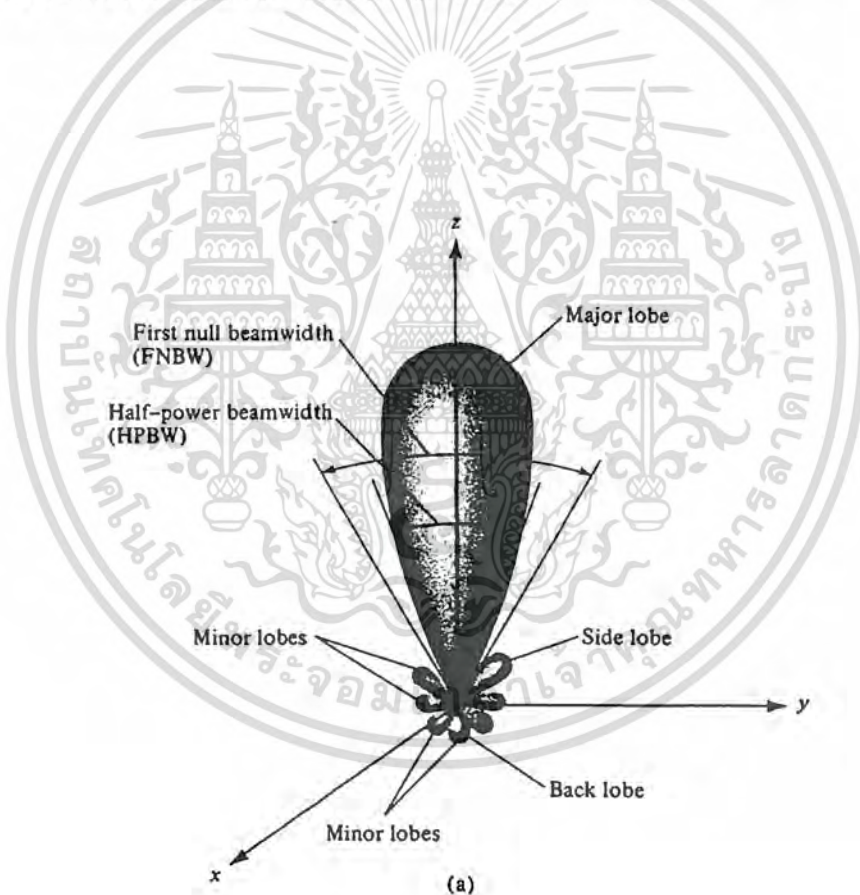
ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นซึ่งอยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ตามรูปที่ 2.4 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง  $\theta$  เท่ากับศูนย์ สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศบางชนิด อาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น (Split-Beam Antenna)

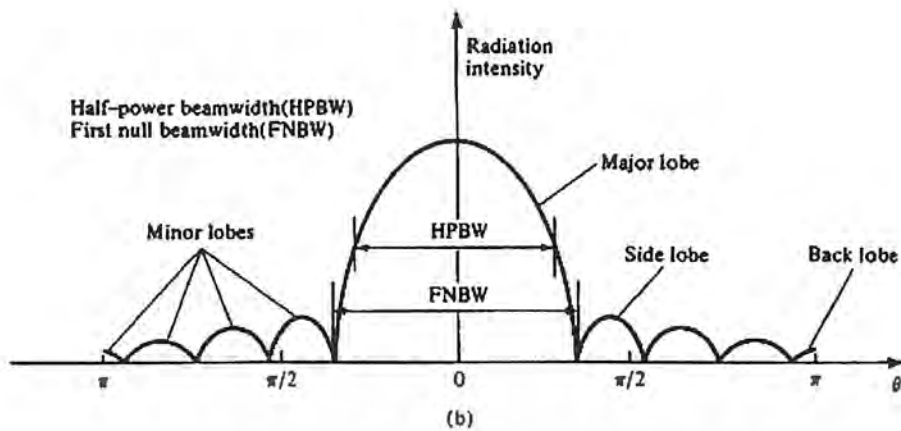
ลำคลื่นย่อย (Minor Lobe) ได้แก่ ลำคลื่นอื่น ๆ นอกเหนือไปจากลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ติดกับลำคลื่นหลัก และอยู่ในทิศทางบนครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก

ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสำหรับสายอากาศที่ติดตั้งกำลังลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของลำคลื่นย่อยมักแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นของพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่า อัตราส่วนของลำคลื่นย่อย (Side Lobe Ratio) หรือระดับของไซด์โลบ (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติ โดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของไซด์โลบน้อยกว่า  $-20$  dB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 (a),(b)แสดงลำคลื่นต่างๆ, บีบวิตซ์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้นของสายอากาศ

### 2.1.2 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กึ่งกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half Power Beamwidth : HPBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด โดยจะวัดในหน่วยองศา ดังในรูป 2.4

### 2.1.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กึ่งกำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก (First Null Beamwidth : FNBW)

คือมุมที่วัดระหว่างจุดที่ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในลำคลื่นหลัก มีค่าลดลงเป็นศูนย์ โดยจะวัดในหน่วยองศา

### 2.1.4 อัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Ratio : SLR)

คือ อัตราส่วนของลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

$$SLR = \text{Main lobe level (dB)} - \text{Side lobe level (dB)} \quad (2.1)$$

### 2.1.5 ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Intensity)

คือกำลังงานที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศต่อหน่วยมุมตัน (ตลอดพื้นผิวทรงกลม) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในการแสดงคุณสมบัติของสายอากาศ เกี่ยวกับสนามระยะไกล ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น สามารถหาได้จากผลคูณของความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น และผลจากการยกกำลังสองของระยะทาง ซึ่งเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้ คือ

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $U$  คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)

$W_{rad}$  คือ ความหนาแน่นของการแพร่กระจายคลื่น (W/M<sup>2</sup>)

ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น ถ้าจะเขียนแสดงความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าของสายอากาศ

เอกสารนี้ ในระยะไกลได้ คือ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 U(\theta, \phi) &= \frac{r^2}{2\eta} \left| \overline{E}(r, \theta, \phi) \right|^2 \\
 &= \frac{r^2}{2\eta} \left[ |E(r, \theta, \phi)|^2 + |E(r, \theta, \phi)|^2 \right] \\
 &= \frac{1}{2\eta} \left[ |E(\theta, \phi)|^2 + |E(\theta, \phi)|^2 \right]
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

- เมื่อ  $\overline{E}$  คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล  
 $E_\theta, E_\phi$  คือ ส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าของสายอากาศในระยะไกล  
 $\eta$  คือ อินทริเนสิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ของตัวกลาง มีค่าประมาณ  $120\pi \Omega$

ดังนั้น แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของกำลังงานก็ใช้เพื่อแสดงถึงความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นได้เช่นกัน

กำลังงานทั้งหมดนี้ หาได้โดยการอินทิเกรตความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ตามสมการ(2.4) ตลอดมุมตัน  $4\pi$  ทั้งหมด ซึ่งจะได้

$$P_{rad} = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin \theta d\theta d\phi \tag{2.4}$$

### 2.1.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งใช้สำหรับอ้างอิง ซึ่งปกติสายอากาศสำหรับใช้อ้างอิงนี้จะใช้ไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (Isotropic Point Source) ส่วนค่าการชี้ทิศทางสูงสุด คือ ค่าการชี้ทิศทางในทิศทางที่มีค่ามากที่สุด หรือกล่าวง่าย ๆ ว่าค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของดันทำเน็ด (สายอากาศ) ที่ไม่เป็นไอโซโทรปิก คือ อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นที่มากที่สุด ต่อ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$D_g = \frac{U}{U_o} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \tag{2.5}$$

$$D_g = \frac{U_{max}}{U_o} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \tag{2.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$D_g$	คือ ค่าการชี้ทิศทาง (ไม่มีหน่วย)
	$D_0$	คือ ค่าการชี้ทิศทางสูงสุด
	$U$	คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)
	$U_{\max}$	คือ ค่าสูงสุดของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น (W/หน่วยมุมตัน)
	$U_0$	คือ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส (W/หน่วยมุมตัน)
	$P_{\text{rad}}$	คือ กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด (W)

จากสมการ (2.5) และ (2.6) เราจะทราบว่า ค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์สมีค่าเป็นหนึ่ง ทั้งนี้เพราะว่า  $U$ ,  $U_{\max}$  และ  $U_0$  ต่างมีค่าเท่ากัน

ค่าการชี้ทิศทางสูงสุดของไอโซโทรปิกพอยท์ซอร์ส มีค่าเท่ากับหนึ่ง เพราะว่ามันแพร่กระจายกำลังงานออกไปใน ทุกทิศทางด้วยค่าที่เท่ากัน แต่สำหรับต้นกำเนิด (สายอากาศ) แบบอื่น ๆ นั้นย่อมมีค่าการชี้ทิศทางเท่ากับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดมากกว่าหนึ่งเสมอ

ข้อสรุปอีกอย่างหนึ่งในที่นี้ก็คือ ค่าของการชี้ทิศทางจะมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์และน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าการชี้ทิศทางสูงสุด ( $0 \leq D_g \leq D_0$ )

โดยทั่วไปสูตรของค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุด อาจจะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุม  $\theta$  และ  $\phi$  ด้วย

ต่อไปลองสมมติให้ ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นอยู่ในลักษณะดังต่อไปนี้คือ

$$U = B_0 F(\theta, \phi) \approx \frac{1}{2\eta} \left[ |E(\theta, \phi)|^2 + |E(\theta, \phi)|^2 \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ  $B$  เป็นค่าคงที่และ  $E_\theta$  และ  $E_\phi$  เป็นส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าที่ระยะไกล ค่าสูงสุดของสมการ(2.7) หาได้คือ

$$U_{\max} = B_0 F(\theta, \phi)|_{\max} = B_0 F_{\max}(\theta, \phi) \quad (2.8)$$

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด หาได้จาก

$$\begin{aligned} P_{\text{rad}} &= \int \int_{\Omega} U(\theta, \phi) d\Omega \\ &= B_0 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะได้สูตรทั่วไปของค่าการชี้ทิศทางและค่าการชี้ทิศทางสูงสุดเป็นดังนี้คือ

$$D_g(\theta, \phi) = \frac{4\pi F(\theta, \phi)}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.10)$$

$$D_o(\theta, \phi) = \frac{4\pi F(\theta, \phi)|_{\max}}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi} \quad (2.11)$$

หรือเขียนสมการ(2.11)ใหม่ได้เป็น

$$D_o(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\left[ \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \right] / F(\theta, \phi)|_{\max}} \quad (2.12)$$

$$= \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

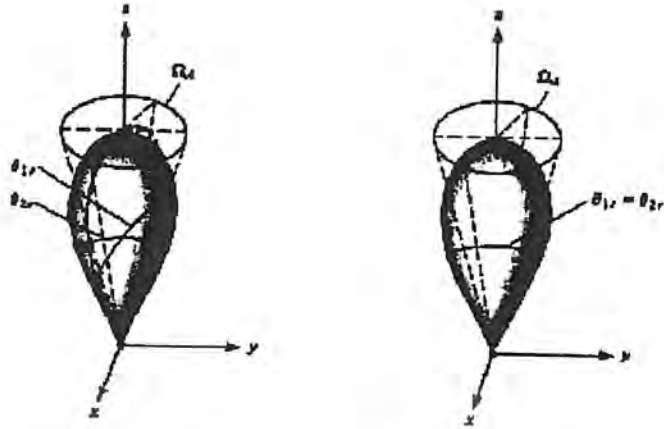
$$\Omega_A = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \quad (2.13)$$

$$F_n(\theta, \phi) = \frac{F(\theta, \phi)}{F(\theta, \phi)|_{\max}} \quad (2.14)$$

$F(\theta, \phi)|_{\max}$  นำมาหารในสมการ (2.14) เพื่อนอร์มอลไลซ์ (Normalize) ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น  $F(\theta, \phi)$  ให้มีค่าสูงสุดเป็นหนึ่ง

มุมตันของลำคลื่น  $\Omega_A$  มีคำจำกัดความว่า คือ มุมตันซึ่งกำลังงานทั้งหมดของสายอากาศ จะไหลผ่านเมื่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นมีค่าคงที่ (และมีค่าเท่ากับค่าสูงสุดของ U) ที่ทุกมุมภายใน  $\Omega_A$  สายอากาศซึ่งมีลำคลื่นหลักแคบๆ เพียงลำคลื่นเดียว และมีลำคลื่นย่อยที่มีขนาดเล็กจนสามารถตัดทิ้งได้ มุมตันของลำคลื่น จะมีค่าประมาณเท่ากับผลของ HPBW ใน 2 ระนาบ ซึ่งตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูป 2.4a) สำหรับแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศที่หุนแล้วสมมาตรกัน โดยรอบ HPBW ในระนาบใด ๆ จะเท่ากัน ดังแสดงในรูป 2.4(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) แพรทเทิน ที่ไม่สมมาตรกัน

(b) แพรทเทิน ที่สมมาตรกัน

รูปที่ 2.5 มุมตันของลำคลื่นซึ่งมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ไม่สมมาตรและสมมาตรกัน

โดยอาศัยการประมาณนี้ สมการ (2.12) จะเขียนใหม่ได้เป็นดังต่อไปนี้

$$D_o \approx \frac{4\pi}{\Omega_A} \approx \frac{4\pi}{\theta_{1r}\theta_{2r}} \tag{2.15}$$

มุมตันของลำคลื่น  $\Omega_A$  ประมาณได้จาก

$$\Omega_A \approx \theta_{1r}\theta_{2r} \tag{2.16}$$

เมื่อ  $\theta_{1r}$  คือ HPBW ในระนาบใด ๆ (เรเดียน)

$\theta_{2r}$  คือ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (เรเดียน)

เมื่อรู้ความกว้างของลำคลื่นเป็นองศา สมการ(2.15) จะดัดแปลงให้เหมาะสมที่จะแทนค่าความกว้างของลำคลื่นนั้นโดยตรง ได้เป็น

$$D_o \approx \frac{4\pi(180\pi)^2}{\theta_{1d}\theta_{2d}} = \frac{41253}{\theta_{1d}\theta_{2d}} \tag{2.17}$$

เมื่อ  $\theta_{1d}$  คือ HPBW ในระนาบใด ๆ (องศา)

$\theta_{2d}$  คือ HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (องศา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) จะประมาณสมการ (2.17) ได้เป็นดังนี้คือ

$$D_o \approx \frac{32400}{\Omega_A^2 (\text{degree})} = \frac{32400}{\theta_{1d} \theta_{2d}} \quad (2.18)$$

สมการ(2.15) และ (2.17) จะใช้ได้ผลดี เมื่อรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นมีเพียงลำคลื่นหลักเพียงลำคลื่นเดียว และลำคลื่นย่อยจะต้องมีขนาดเล็กมากๆ เท่านั้น สำหรับแบบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นซึ่งมี 2 ลำคลื่นหลักที่เหมือนกัน ค่าของค่าการชี้ทิศทางสูงสุดที่หาจากสมการ (2.15)หรือ (2.17) จะเป็น 2 เท่าของค่าจริง ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นย่อยที่มีระดับสูง การหาค่าการชี้ทิศทางโดยใช้สมการ (2.15) หรือ (2.17) ซึ่งตัดลำคลื่นย่อยทิ้ง จะมีค่าสูงเกินความจริง

### 2.1.7 อัตราขยาย (Gain)

ค่าการขยาย เป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากการชี้ทิศทาง โดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ค่าการชี้ทิศทาง จะอธิบายคุณสมบัติ ในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

ค่าการขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้น มีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้น ต่อกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้ว เราจะคิดค่าการขยายกำลังในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

$$Gain \approx \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{ไม่มีหน่วย}) \quad (2.19)$$

$$Gain(dBi) = Efficiency(dB) + Directivity(dBi) \quad (2.20)$$

### 2.1.8 ช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของสายอากาศ ถูกกำหนดให้เป็นช่วงความถี่ ที่สายอากาศมีคุณสมบัติอยู่ในมาตรฐานที่กำหนดให้ อาจเป็นช่วงความถี่ที่สายอากาศมีคุณสมบัติต่างๆ เช่น อินพุทอิมพีแดนซ์, แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น, ความกว้างของลำคลื่น, โพลาริเซชัน, ระดับของไซด์โลบ, ค่าการขยาย, ประสิทธิภาพเอกสารนี้ของกรแพร่กระจายคลื่น ฯลฯ อยู่ในค่าที่ใช้งานได้ คือ ไม่ต่างจากคุณสมบัติที่วัดที่ความถี่ตรงกลางที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบ จนทำให้คุณสมบัติเหล่านี้เสียไปจากข้อกำหนดหรือมาตรฐาน สำหรับสายอากาศแบนด์กว้าง มักจะคิดเป็น อัตราส่วนของความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูงต่อความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำ ยกตัวอย่าง เช่น แบนด์วิดท์ 10 : 1 แสดงว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านสูง มีค่ามากกว่าความถี่ที่ใช้งานได้ด้านต่ำอยู่ 10 เท่า สำหรับสายอากาศแบนด์แคบ แบนด์วิดท์จะเป็นเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างของความถี่ (ความถี่ด้านสูงลบด้วยความถี่ด้านต่ำ)หารด้วยความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น เช่น แบนด์วิดท์ 5 % แสดงว่า ผลต่างของความถี่ของช่วงการทำงานของสายอากาศ เป็น 5 % ของความถี่กลางของแบนด์วิดท์นั้น

เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศที่กล่าวมา จะไม่เปลี่ยนแปลง ตามความถี่ในลักษณะเดียวกันทั้งหมด ดังนั้น จึงไม่สามารถกำหนดแบนด์วิดท์ตามคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งได้ จึงต้องมีการกำหนดข้อบังคับให้เป็นตามการประยุกต์ใช้งานแต่ละอย่าง ปกติแล้ว คุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นกับอินพุทอิมพีแดนซ์ จะมีถูกใช้เป็นตัวกำหนดแบนด์วิดท์ของสายอากาศ

$$\Delta f(\text{Hz}) = f_H(\text{Hz}) - f_L(\text{Hz})$$

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

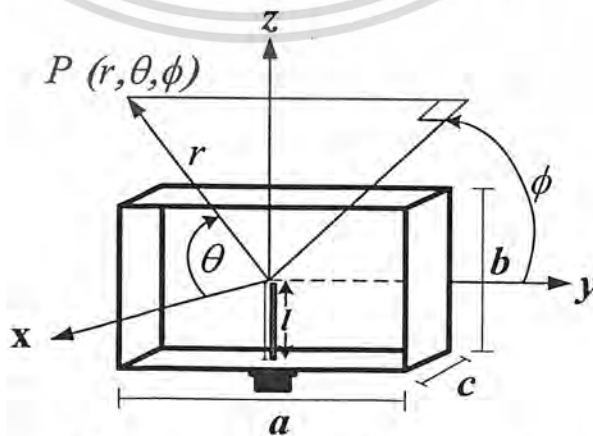
(2.21)

## 2.2 โครงสร้างของสายอากาศ

### 2.2.1 สายอากาศแบบสองทิศทาง (Bidirectional Antenna)

โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนสี่เหลี่ยม

สายอากาศที่วิเคราะห์ประกอบด้วยโพรบไฟฟ้าเชิงเส้นความยาว  $l$  ที่ต่อกับสายนำสัญญาณแบบแกนร่วม (Coaxial) โดยผ่านตัวต่อ (Connector) แบบ N - type และถูกล้อมรอบด้วยวงแหวนรอบสี่เหลี่ยมที่มีโครงสร้างเป็นกรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีความกว้าง ความสูงและความยาวเป็น  $a$   $b$  และ  $c$  ตามลำดับ ซึ่งโพรบจะวางตามแนวแกน  $z$  ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สายอากาศโพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

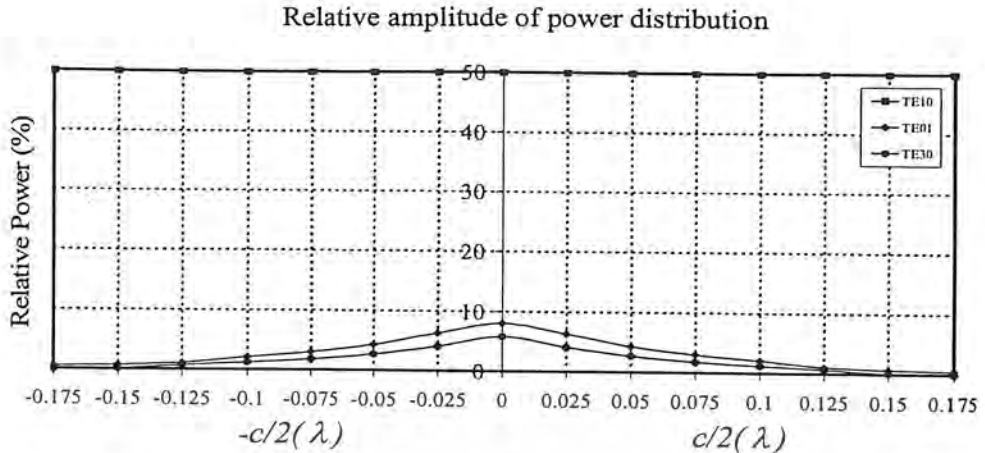
ในการพิจารณาจะพบว่า วงแหวนเป็นส่วนหนึ่งของท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมซึ่งมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่กระจายในทิศทาง  $x$  และ  $-x$  และจะแพร่กระจายออกจากขอบของวงแหวนรอบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ช่องเปิดทั้งสองด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาจากช่องเปิดทั้งสองด้านนี้จะสอดคล้องกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยโหมดคลื่น (Mode) ต่างๆมากมายที่อยู่ภายในท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นในการออกแบบต้องการให้เกิดคลื่นส่งผ่านเพียงโหมดเดียว ซึ่งในที่นี้คือโหมด  $TE_{10}$  เป็นโหมดพื้นฐาน (Dominant Mode) โดยทั่วไปแล้วโหมดคลื่นอื่นๆที่ไม่ใช่โหมดหลักจะเป็นรูปแบบของคลื่นที่เรียกว่า คลื่นจางหาย (Evanescent Wave) และโหมดคลื่นเหล่านี้จะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรบมีค่ามากขึ้น ด้วยเหตุนี้จะต้องเลือกระยะที่ห่างจากโพรบที่ทำให้ขนาดของโหมดคลื่นอื่นๆมีค่าน้อยจนสามารถละเลยได้ เพื่อที่ว่าบริเวณขอบของวงแหวนที่ช่องเปิดทั้งสองด้านซึ่งเป็นจุดที่คลื่นจะเดินทางออกไปนั้นมีเฉพาะโหมดคลื่นที่ต้องการเพียงโหมดเดียวเท่านั้น ดังนั้นจะต้องกำหนดค่าความยาวของกรอบวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการกำหนดค่าความกว้างของ วงแหวนจะต้องทำให้มีค่าความถี่ตัดออฟ (Cut Off Frequency) ที่ต่ำสุด เพื่อให้มีเพียงโหมดคลื่นหลักแพร่กระจายออกจากช่องเปิดทั้งสองด้าน ของกรอบวงแหวนสี่เหลี่ยมผืนผ้าและโหมดคลื่นอื่นๆที่อยู่ติดกับโหมดคลื่นหลักจะต้องถูกตัดออกไป ดังนั้น ค่าความกว้างของวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$0.5\lambda < a < \lambda \quad \text{และ} \quad a = 2b \quad (2.22)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นที่ความถี่ที่ใช้งาน โดยค่าความถี่ที่ใช้งานคือ 1.8 GHz

เมื่อทำการพิจารณารูปที่ 2.6 โพรบไฟฟ้าเชิงเส้นภายในวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมจะขนานกับความสูงของวงแหวนเป็นผลให้คลื่นที่ประกอบไปด้วยโหมดคลื่นต่างๆ ( $TE_{mn}$ ) ถูกปล่อยออกมาในบริเวณใกล้เคียงกับโพรบ นั้นหมายความว่า ความถี่ใช้งานค่าหนึ่งคลื่นจะประกอบไปด้วยโหมดคลื่นต่างๆมากมาย แต่ที่มีความสำคัญต่อการเดินทางของคลื่นสำหรับสายอากาศวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมนั้นคือ โหมดคลื่นของ  $TE_{10}$  ซึ่งเป็นโหมดคลื่นหลัก และมีโหมดคลื่นจางหายที่มีความสำคัญต่อการเดินทางของคลื่นได้แก่  $TE_{01}$  และ  $TE_{30}$

ในขณะที่คลื่นเดินทางออกจากช่องเปิดทั้ง 2 ด้านของวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม คลื่นจะเกิดการลดทอนคลื่นในแต่ละโหมดคลื่นขึ้น ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของขนาดกำลังงานที่แพร่กระจายออกไปของโหมดคลื่นทั้ง 3 รูปแบบได้ดังรูปที่ 2.7 [1]



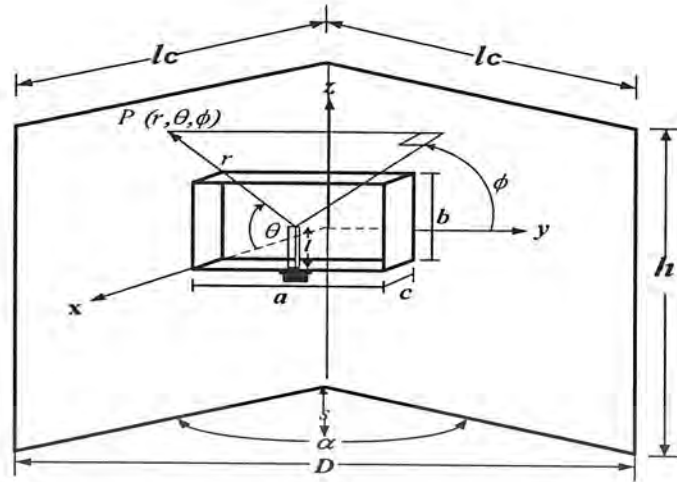
รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของขนาดกำลังงานที่แพร่กระจายออกไปสำหรับโหมดคลื่นของ TE<sub>10</sub> TE<sub>01</sub> และ TE<sub>30</sub> (โดยใช้วงแหวนที่ทำจากทองเหลืองด้วยค่ากว้าง 0.69λ และความสูง 0.35λ)

จากรูปที่ 2.7 บริเวณรูปกราฟของโหมดคลื่นของ TE<sub>01</sub> และ TE<sub>30</sub> จะพิจารณาจุดที่กำลังงานของรูปแบบคลื่นที่มีผลต่อโหมดคลื่นหลักมากที่สุดคือ TE<sub>01</sub> ลดลงในระดับที่น้อยกว่ากำลังงานในโหมดคลื่นหลักในระดับที่สามารถละเลยได้ ส่วนโหมดคลื่นอื่นรวมถึงโหมด TE<sub>30</sub> ก็จะมีค่าน้อยกว่า TE<sub>01</sub> ด้วย จากกราฟจะเห็นว่าค่าความยาวของสายอากาศวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์เท่ากับ 0.25λ

### 2.2.2 สายอากาศแบบทิศทางเดียว (Unidirectional Antenna)

โครงสร้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม

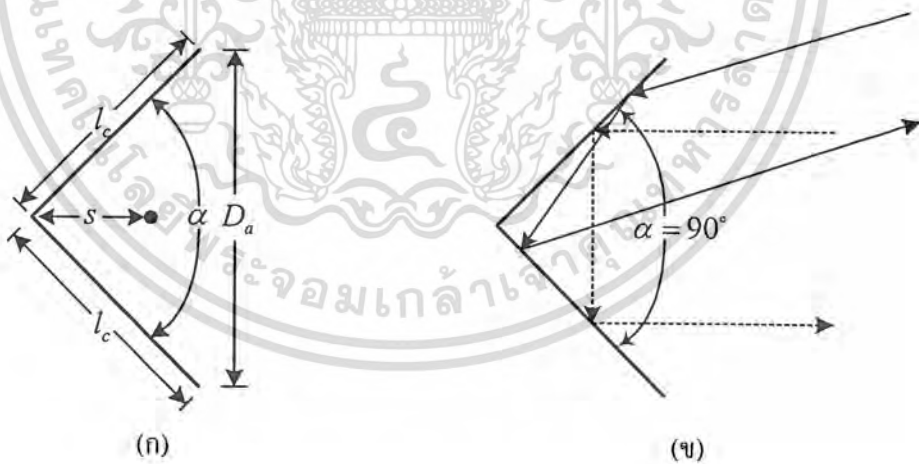
ซึ่งในโครงงานนี้ต้องการนำเสนอสายอากาศแบบทิศทางเดียวที่มีค่าสภาพเงาสูงทิศทางสูงสามารถทำได้โดยนำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมล้อมรอบ โพรบไฟฟ้าเชิงเส้น โดยนำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมเกิดจากแผ่นสะท้อนสองแผ่นมีความยาว  $l_c$  ความสูง  $h$  ทำมุมกัน  $a$  ที่มี ความกว้างที่ยาวที่สุดของตัวสะท้อนเท่ากับ  $D_d$  ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนกับวงแหวนสี่เหลี่ยมเท่ากับ  $s$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งในโครงงานนี้ในการคำนวณหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมและตัวป้อนสัญญาณแบบวงแหวนจะพิจารณาให้ตัวสะท้อนมีขนาด  $l_c$   $h$  และ  $D_d$  เป็นอนันต์ และทำการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างสายอากาศกับวงแหวนเป็นค่าต่างๆ เพื่อหาระยะที่เหมาะสม ซึ่งสายอากาศจะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม



รูปที่ 2.8 โครงสร้างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม

2.3 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม (Corner Reflector)

โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมจะประกอบด้วยแผ่นสะท้อน 2 แผ่น ทำมุมกันดังรูปที่ 2.9(ก) ซึ่งโครงสร้างของตัวสะท้อนแบบมุมจะทำได้ง่าย ซึ่งสัญญาณจะย้อนกลับในทิศทางเดิมที่รับเข้ามา ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.9(ข) คือมุม  $90^\circ$



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม

โดยในทางปฏิบัติตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่นิยมเลือกใช้คือ แผ่นสะท้อน 2 แผ่นทำมุมกัน  $90^\circ$  แต่ก็มีบางงานที่ใช้มุมอื่นๆ โดยประสิทธิภาพของระบบที่ได้จะดูได้จาก ที่ระยะห่างระหว่างจุดยอดมุมกับตัวป้อนสัญญาณ โดยที่ระยะห่างจะเพิ่มขึ้นถ้ามุมของตัวสะท้อนลดลง สำหรับตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์ อัตราขยาย (gain) จะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมระหว่างแผ่นระนาบลดลง อย่างไรก็ตามอาจจะไม่เป็นจริงหากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

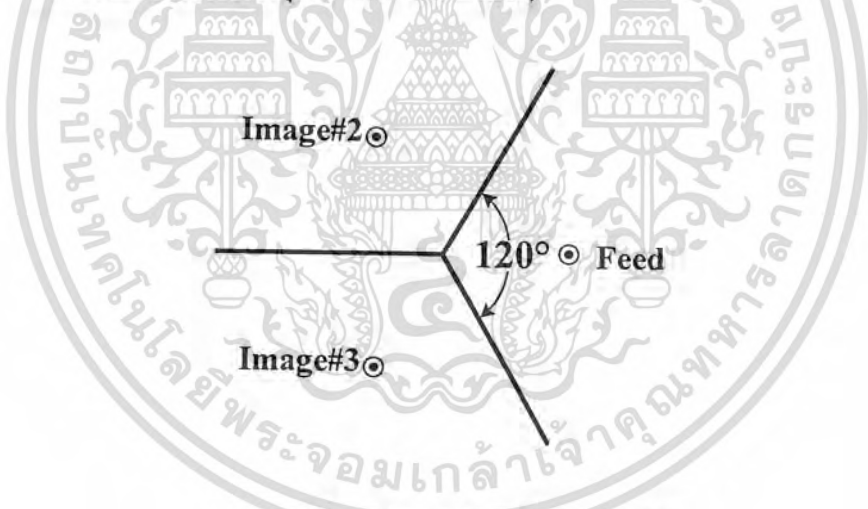
ขนาดของแผ่นเพลท (plate) มีขนาดจำกัด ดังนั้นเพื่อให้ง่ายในการพิจารณาจะให้ให้แผ่นเพลท (plat) มีขนาดอนันต์ ( $l_c = \infty$ ) แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าจำกัด ความยาว ( $l_c$ ) และความสูง ( $h$ )

โดยให้ขนาดความกว้างที่ยาวที่สุดของตัวสะท้อนที่ทำมุม ( $D_0$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $\lambda < D_0 < 2\lambda$  และความยาวของตัวสะท้อนจะมีค่าที่ต่างกันขึ้นกับขนาดของมุมเช่น มุม  $90^\circ$  จะมีความยาวเท่ากับ  $l_c = 2s$  ระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณกับจุดยอดของมุม ( $s$ ) ปกติจะใช้ค่าระหว่าง  $\frac{\lambda}{3} < s < \frac{2\lambda}{3}$  และความสูงของตัวสะท้อนปกติจะใช้ประมาณ 1.2-1.5 เท่าของความยาวทั้งหมดของตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งจะช่วยลดการแพร่กระจายจากด้านหลัง ในการทดลองหากเราเพิ่มขนาดของด้านข้างก็ไม่ได้มีผลต่อความกว้าง คลื่นและค่าสภาพเจาะจงทิศทาง แต่มันจะเพิ่มแบนวิดท์ (Bandwidth) และความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น (radiation resistance) และจะเห็นว่าขนาดของลำคลื่นหลักจากการที่มีขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดจำกัดจะกว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์

เมื่อทำการพิจารณาขนาดมุมของตัวสะท้อน ขนาดของมุมที่จะเกิดขึ้นได้จะมีค่าเท่ากับ  $\alpha = \frac{180^\circ}{n}$

$\alpha$  คือค่ามุมของตัวสะท้อนคลื่น

กรณีที่ตัวสะท้อนคลื่นทำมุมกัน  $120^\circ$  ( $\alpha = 120^\circ$ )



รูปที่ 2.10 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม  $120^\circ$

จากรูปที่ 2.9(ก) แสดงการสะท้อนไปยังที่ตัวสะท้อนและรูปที่ 2.9(ข) แสดงภาพเสมือนของตัวป้อนสัญญาณ สมการของสนามที่แพร่กระจายออกมาสามารถเขียนได้โดยการรวมสมการของตัวป้อนสัญญาณ และสมการของภาพเสมือน ได้ดังนี้คือ

$$E(r, \theta, \phi) = E_1(r_1, \theta, \phi) + E_2(r_2, \theta, \phi) + E_3(r_3, \theta, \phi)$$

ที่สนามระยะไกลสามารถนอร์มอลไลซ์ สมการได้ดังนี้

$$E(r, \theta, \phi) = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} - f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} + f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr_3}}{r_3}$$

$$E(r, \theta, \phi) = [e^{+jks \cos \psi_1} - e^{+jks \cos \psi_2} + e^{+jks \cos \psi_3}] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $\hat{a}_r = \hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta$

โดย  $\cos \psi_1 = \hat{a}_x \cdot \hat{a}_r = \sin \theta \cos \phi$

$$\cos \psi_2 = \hat{a}_y \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi$$

$$\cos \psi_3 = \hat{a}_z \cdot \hat{a}_r = -\frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการสนามที่แพร่กระจายออกจางวงแหวนสี่เหลี่ยม

$$E(r, \theta, \phi) = [e^{jks \sin \theta \cos \phi} - e^{jks(-\frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi)} + e^{jks(-\frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi)}] f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

โดยที่ในสนามอิสระมีการแพร่กระจายคลื่นคือ

$$E_0 = f(\theta, \phi) \frac{e^{-jkr}}{r}$$

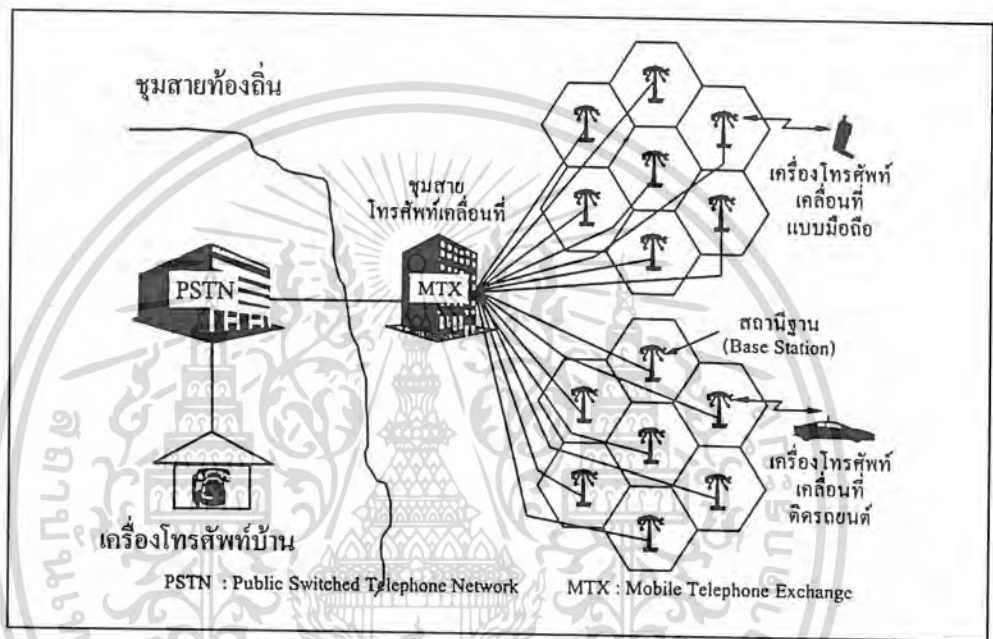
เพราะฉะนั้นจะได้ดังนี้

$$\frac{E}{E_0} = AF(\theta, \phi) = [e^{jks \sin \theta \cos \phi} - e^{jks(-\frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi)} + e^{jks(-\frac{1}{2} \sin \theta \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta \sin \phi)}] \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ในปัจจุบัน ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ หุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (MTX: Mobile Telephone exchange), สถานีฐาน หรือ เซลไซต์ (CS: Cell Site) เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ (MS: Mobile Station) โดยจะมีการเชื่อมโยงกับหุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น ในส่วนของโครงข่ายโทรศัพท์สาธารณะ (PSTN: Public Switched Telephone Network) ด้วย ซึ่งจะทำให้เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่สามารถติดต่อกับโทรศัพท์ธรรมดาได้ ลักษณะของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เบื้องต้นจะแสดงในรูปที่ 2.11



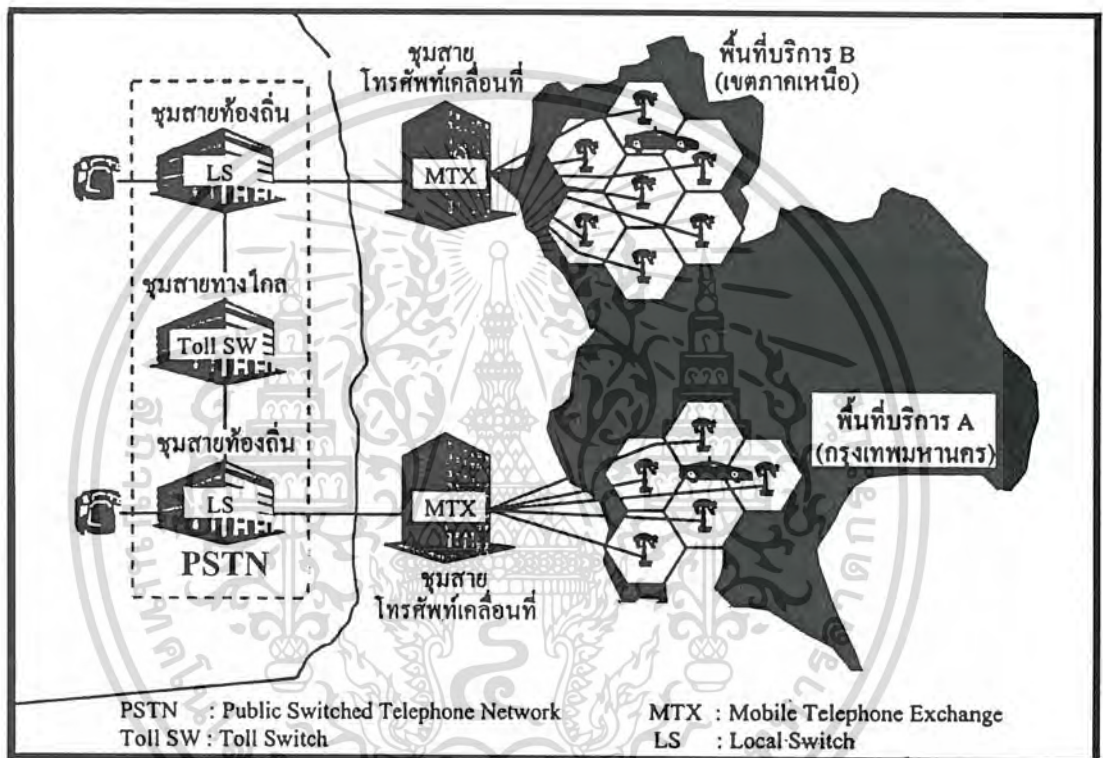
รูปที่ 2.11 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่

จากรูปที่ 2.11 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ประกอบด้วย หุมสาย, โทรศัพท์เคลื่อนที่, สถานีฐาน และเครื่อง โทรศัพท์เคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.1 ขุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่

ขุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นส่วนสำคัญที่สุดในโครงข่าย โดยมีหน้าที่ในการควบคุมการทำงานทั้งหมดของโครงข่าย และเป็นสวิทช์ในการเชื่อมโยงระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ กับ โทรศัพท์ธรรมดาของขุมสายโทรศัพท์ท้องถิ่น (LS: Local Switch) รวมทั้งเชื่อมโยงระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยกัน หน้าที่อีกอย่างหนึ่งก็คือควบคุมการทำงานของสถานีฐาน ซึ่งการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับขุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีทั้งสัญญาณเสียง และสัญญาณข้อมูลอยู่ด้วยกัน



รูปที่ 2.12 โครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ในพื้นที่ที่ห่างกัน

ขุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะเป็นส่วนที่ใช้ในการแบ่งขอบเขตของพื้นที่การให้บริการอีกด้วย ตัวอย่างเช่น ขุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ A จะควบคุมพื้นที่ในเขตกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล ขุมสาย B จะควบคุมพื้นที่ในเขตภาคเหนือ เป็นต้น เนื่องจากพื้นที่การบริการทั้งสองเขตอยู่ห่างกัน จึงไม่สามารถที่จะใช้ขุมสายโทรศัพท์เดียวกันในการควบคุมสถานีฐานทั้ง 2 เขตได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ดังนั้น โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนตัวไปยังอีกเขตพื้นที่หนึ่ง จะเกิดขบวนการหนึ่งที่เรียกว่า การ โรมมิ่ง (Roaming)

ฟังก์ชันการทำงานของขุมสาย โทรศัพท์เคลื่อนที่จะมีหลายอย่าง เช่นการค้นหาเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ถูกเรียก (Paging) การแฮนด์ออฟ (Hand off) หรือการเปลี่ยนเซลล์ การตรวจสอบสถานะการใช้หรือไม่ใช้งาน การสแกนหาช่องสัญญาณ ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ในเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

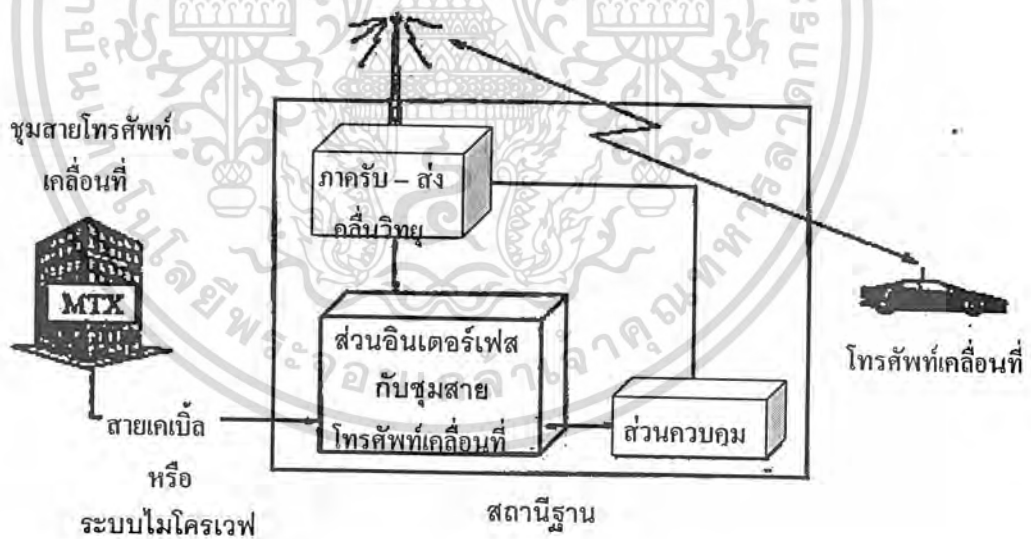
#### 2.4.2 สถานีฐานหรือเซลล์ไซต์

สถานีฐานในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะทำหน้าที่ ในการเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่กับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยส่วนที่ติดต่อกับโทรศัพท์เคลื่อนที่จะใช้การรับส่งสัญญาณทางคลื่นวิทยุเพื่อให้บริการในกรณีที่มีการเรียกเข้า หรือการเรียกจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยกัน ส่วนการเชื่อมโยงกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะใช้การติดต่อผ่านทางคู่สายหรือทางคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะมีทั้งสัญญาณเสียงและสัญญาณควบคุม

สถานีฐาน จะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนของการรับ ส่งคลื่นวิทยุ, ส่วนควบคุม และส่วนอินเตอร์เฟซกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่

ส่วนประกอบการทำงานของสถานีฐาน จะประกอบด้วย

- 1) ส่วนของการรับ ส่งคลื่นวิทยุ ก็คือ เครื่องรับ, เครื่องส่ง และสายอากาศ
  - 2) ส่วนการควบคุม จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงาน
  - 3) มอนิเตอร์ระดับของสัญญาณเพื่อใช้ในการแฮนด์ออฟ
  - 4) การดูแลตรวจตราการเรียก (Supervision of Calls)
  - 5) อินเตอร์เฟซกับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะทำหน้าที่ ในการเชื่อมโยงสัญญาณเสียงและสัญญาณข้อมูลระหว่างสถานีฐาน กับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยผ่านทางสายเคเบิล หรือระบบไมโครเวฟ
- ลักษณะ โครงสร้างของสถานีฐานและการเชื่อมโยงในโครงข่าย แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของสถานีฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่

เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงกับผู้ใช้ ซึ่งจะมีการใช้งานที่คล้ายกับโทรศัพท์ธรรมดา แต่จะแตกต่างกันที่รวมฟังก์ชันของโทรศัพท์กับฟังก์ชันการรับ ส่งคลื่นวิทยุเข้าด้วยกัน ทำให้เครื่องโทรศัพท์ที่ไม่จำเป็นต้องใช้การติดต่อผ่านทางคู่สายเหมือนกับโทรศัพท์ธรรมดา การติดต่อของโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นแบบพลุดูเพล็กซ์ (Full Duplex) โดยในแต่ละการติดต่อ จะใช้ช่องสัญญาณจำนวน 2 ช่อง นั่นคือ จะใช้ความถี่ โดยความถี่หนึ่งจะใช้ในการส่งไปยังสถานีฐาน และอีกความถี่หนึ่งจะใช้ในการรับสัญญาณที่ส่งมาจากสถานีฐาน และมีกำลังส่งที่ไม่สูงมากนัก ซึ่งมีตั้งแต่ 0.6 – 1.0 วัตต์ ตามขนาดของการใช้งาน เช่น โทรศัพท์แบบติดตั้งในรถยนต์ แบบมือถือ หรือแบบมือถือซึ่งมีขนาดเล็กมาก เป็นต้น การส่งสัญญาณจะมีการส่งทั้งสัญญาณเสียงพูดและสัญญาณข้อมูล โดยสัญญาณเสียงจะถูกมอดูเลทในแบบ FM (Frequency Modulation) ส่วนสัญญาณข้อมูลจะมีการมอดูเลทในแบบ FSK (Frequency Shift Keying) สัญญาณข้อมูลนี้จะถูกส่งไปให้ไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่น ควบคุมการร้องขอการเรียก (Origination Request) การบันทึกพื้นที่บริการที่เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้อยู่ ใช้ในการกำหนดสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อข้อความคำสั่งในการแฮนด์ออฟที่ส่งมาจุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ฯลฯ

## 2.5 การวางแผนในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์

### 2.5.1 ลักษณะทั่วไปของปัญหาในการออกแบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์

โดยการยึดหลักแนวความคิดที่จะใช้แถบความถี่ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เพราะฉะนั้นในการออกแบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์นั้น จึงจำเป็นที่จะต้องนำเอาส่วนสำคัญต่างๆ มาพิจารณาอย่างถี่ถ้วน โดยในแต่ละส่วนจะต้องสามารถวิเคราะห์และให้ความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันได้

โดยส่วนต่างๆ ที่จะนำมาพิจารณาจะประกอบด้วยส่วนหลักๆ คือ

1. แนวความคิดในการนำเอาความถี่ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่อีก
2. หาวิธีการรบกวนกันระหว่างช่องความถี่ข้างเคียง
3. ปรับปรุงค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (S/N) ให้มีค่าสูงๆ
4. สร้างระบบการแลกเปลี่ยนความถี่ขณะเปลี่ยนเซลล์ (การแฮนด์ออฟ)
5. กรรมวิธีในการเปลี่ยนเซลล์ หรือการแยกแยะเซลล์ต่างๆ ออกจากกัน

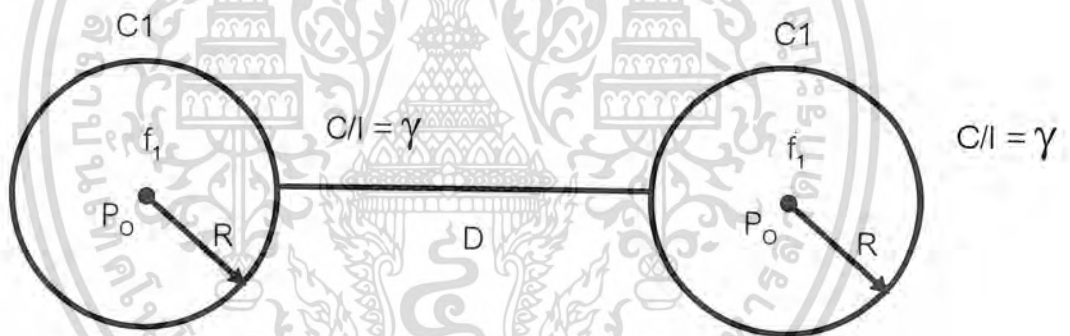
เนื่องจากความถี่นั้นถือได้ว่าเป็นทรัพยากรอย่างหนึ่ง ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นสิ่งที่มีความสำคัญจึงอยู่ที่การให้บริการแก่ลูกค้าให้ได้มากที่สุด โดยให้มีคุณภาพตามที่กำหนด ดังนั้นคำถามที่สำคัญเพื่อที่จะนำไปพิจารณาหาหลักการในการออกแบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ประกอบด้วย

1. จำนวนลูกค้าที่เราสามารถให้บริการได้ในชั่วโมงธุรกิจมีประมาณที่ราย
2. จำนวนผู้เช่าที่เราสามารถรองรับการใช้บริการได้ในระบบของเรามีที่ราย
3. ต้องการใช้อุปกรณ์ความถี่จำนวนเท่าใด จึงจะเพียงพอต่อความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 หลักการในการนำเอาความถี่ที่ใช้แล้วมาใช้ใหม่

ในช่องความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์หนึ่งช่อง จะประกอบไปด้วยช่องความถี่ 2 ช่องคือ ช่องความถี่ในการส่ง 1 ช่อง และช่องความถี่ในการรับอีก 1 ช่อง ซึ่งเป็นลักษณะของการทำงานแบบฟูลดูเพล็กซ์ (Full duplex) นั่นเอง สมมติว่า ถ้ากำหนดให้  $F$ , เป็นความถี่ของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ในการให้บริการในเซลล์  $C$ , โดยเซลล์  $C$ , มีรัศมี  $R$  เมื่อนำความถี่  $F$ , นี้มาใช้กับเซลล์อีกเซลล์หนึ่งที่มีระยะห่างออกไป และมีขนาดเซลล์เหมือน  $C$ , ทุกประการ เราก็จะสามารถใช้ความถี่  $F$ , ได้อีก ตามลักษณะดังรูปที่ 2.14 ในการนำเอาความถี่มาใช้ใหม่นี้เป็นหัวใจของการออกแบบระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ ดังนั้นผู้ที่ใช้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในที่ที่ห่างไกลกัน จึงสามารถใช้ความถี่เดียวกันได้โดยไม่มีปัญหาเพราะเป็นการใช้คนละเซลล์กัน ดูรูป 2.14 ประกอบ จะเห็นว่าระบบการนำเอาความถี่มาใช้ใหม่ (Frequency reuse) นี้ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานแถบความถี่ได้มาก แต่ถ้าระบบออกแบบมาไม่เหมาะสมอาจจะเกิดการรบกวนอย่างรุนแรงขึ้นได้ การรบกวนนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากการใช้ช่องความถี่เดียวกันในเซลล์ที่ต่างกันเราเรียกการรบกวนลักษณะนี้ว่า โคแชนแนลอินเตอร์เฟอเรนซ์ (co-channel interference) ดังนั้นการพิจารณาเรื่องการรบกวนนี้ถือเป็นหลักสำคัญในการออกแบบระบบการนำเอาความถี่มาใช้ใหม่



รูปที่ 2.14 อัตราส่วนของ  $D/R$

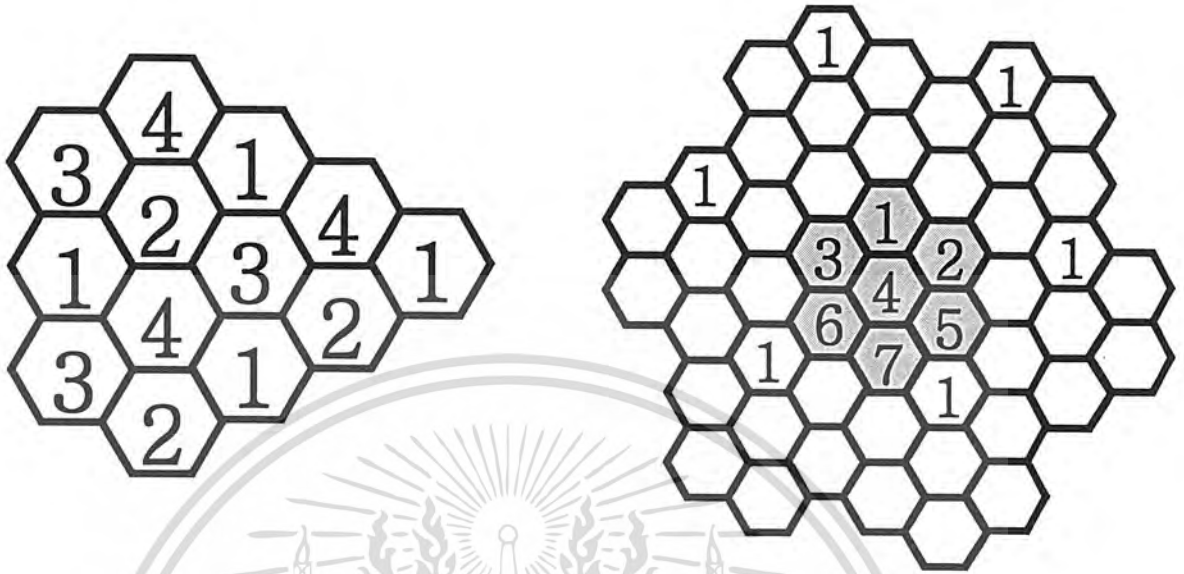
#### 2.5.2.1 แบบแผนของการนำความถี่เดิมมาใช้ใหม่

แนวความคิดเรื่องการนำเอาความถี่เดิมมาใช้ใหม่ สามารถทำได้ 2 วิธีคือ ใช้ในระบบเวลา (Time domain) และในระบบที่ว่าง (Space domain) ในระบบเวลานั้นจะใช้เวลาแบ่งเวลา (Time division multiplex) ออกเป็นช่องเล็ก ๆ (Slot) โดยจะมีจำนวนช่องสัญญาณ 3-8 เท่า ของจำนวนช่องความถี่ และจะใช้ความถี่ที่ซ้ำกันในช่องเวลาที่ต่างกัน เพื่อไม่ให้ความถี่รบกวนกัน ส่วนในระบบแบ่งที่ว่าง (Space Division Multiplex) จะแบ่งออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ

- 1) การจัดความถี่เดียวกันให้ใช้คนละพื้นที่ เช่น การใช้งานวิทยุกระจายเสียงหรือทีวีที่ใช้ความถี่ช่องเดียวกันแต่ให้บริการอยู่คนละจังหวัด และต่างระบบกัน เป็นต้น
- 2) ใช้ความถี่เดียวกันในระบบเดียวกัน และแบ่งเขตพื้นที่กัน โดยกำหนดให้มีความถี่อื่นเป็นความถี่ข้างเคียงทำงานในพื้นที่คั่นระหว่างความถี่ดังกล่าว โดยจะเกาะตัวกันเป็นโครงสร้างของเซลล์จำนวนมากดัง

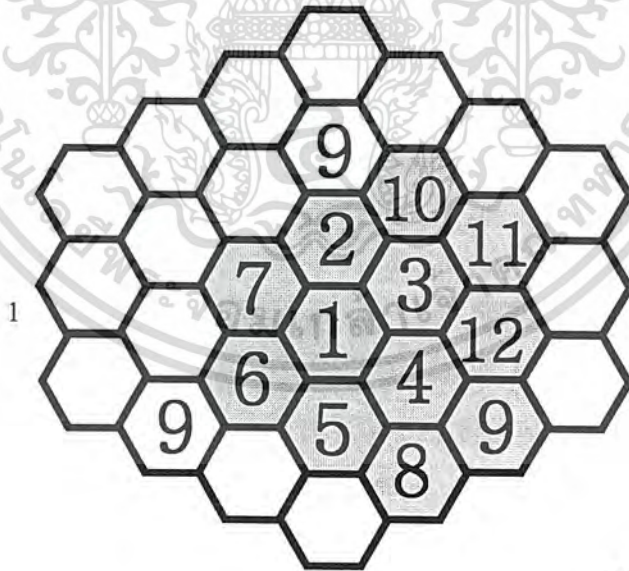
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โทรัสที่ระบบเซลล์ลาร์ และมีจำนวนความถี่ทั้งหมดเป็น K กลุ่ม เช่น ค่า K มีค่าเท่ากับ 4, 7 และ 12 ดังรูปที่ 2.15



$K = 4$   
 $D/R = 3.46$

$K = 7$   
 $D/R = 4.6$



$K = 12$   
 $D/R = 6$

รูปที่ 2.15 แพทเทินแบบต่างๆ ในการนำเอาความถี่มาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2.2 ระยะห่างของการนำเอาความถี่เดิมมาใช้

ระยะทางที่ใกล้ที่สุดในการนำความถี่กลับมาใช้ใหม่นั้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น จำนวนของเซลรอบข้าง ลักษณะทางภูมิศาสตร์ ความไวของเครื่องรับ ความสูง และกำลังส่งของเครื่องส่ง จากสถานีแม่และสถานีลูกข่าย เป็นต้น

ถ้า  $D$  เป็นระยะห่างของการนำเอาความถี่เดิมมาใช้ใหม่ เราสามารถแสดงได้ว่า

$$D = \sqrt{3KR} \quad (2.25)$$

โดยที่  $K$  คือจำนวนรูปแบบของการนำเอาความถี่เดิมมาใช้ใหม่ หรือจำนวนเซลล์ในโครงสร้างหนึ่ง ของระบบเซลล์รูปร่างนั้นเอง และ  $R$  เป็นรัศมีของแต่ละเซลล์จะได้ค่า  $D$  ของแต่ละ โครงสร้างดังนี้คือ

$$D = \begin{cases} 3.46R & \text{เมื่อ } K = 4 \\ 4.6R & \text{เมื่อ } K = 7 \\ 6R & \text{เมื่อ } K = 12 \\ 7.55R & \text{เมื่อ } K = 19 \end{cases}$$

ถ้าเซลล์ข้างเคียงทั้งหมดมีกำลังส่งเท่ากัน เมื่อ  $K$  มีค่าเพิ่มขึ้นระยะทางของการใช้ความถี่ใหม่ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยการที่ค่า  $D$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ลดโอกาสของการเกิดการรบกวนกันในช่องความถี่เดียวกันในแต่ละเซลล์

ในทางทฤษฎีค่า  $K$  ที่มาก ๆ เป็นสิ่งที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามจำนวนของช่องสัญญาณที่กำหนดให้ทั้งหมดมีจำนวนจำกัดตายตัว เมื่อ  $K$  มีค่ามากขึ้นไป จำนวนของช่องสัญญาณในแต่ละเซลล์ก็จะน้อยลง และในทางกลับกันถ้าจำนวนช่องสัญญาณในแต่ละเซลล์มีค่ามากขึ้นไปก็จะเป็นการใช้ช่องสัญญาณ และ ทิ้งคี่อย่างไม่มีประสิทธิภาพ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นการใช้แถบความถี่อย่างไม่มีประสิทธิภาพ เช่น ถ้าแบ่งจำนวนรวมทั้งหมดของความถี่เป็น 2 โคร่งข่ายให้บริการในพื้นที่เดียวกันประสิทธิภาพของการใช้แถบความถี่ก็ลดลงดังได้กล่าวมาแล้ว

ถึงตอนนี้เรื่องที่ทำนายอยู่คือ การที่จะให้ได้ค่า  $K$  น้อยที่สุดและยังคงให้ระบบมีสมรรถนะตามที่กำหนดไว้ได้ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับค่าการรบกวนกันระหว่างความถี่เดียวกันในช่องสัญญาณติดกันว่าทำอย่างไรถึงจะให้ค่าการรบกวนนี้มีค่าต่ำมากๆ เพื่อที่จะนำความถี่เดิมมาใช้ใหม่ให้มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่าต่ำที่สุดของ  $K$  คือ  $K$  เท่ากับ 3 ที่ได้จากการใช้สมการ  $K = i^2 + ij + j^2$  โดยการใช้ค่า  $i$  และ  $j$  เท่ากับ 1

### 2.5.3 การอินเตอร์เฟียร์เรนซ์

จากหลักการนำเอาช่องสัญญาณความถี่กลับมาใช้ใหม่ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบเซลลูลาร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้สเปกตรัมความถี่ที่มีอยู่จำกัด สิ่งที่จะเกิดขึ้นจากผลของเทคนิคนี้คือ มีการรบกวนของสัญญาณจากช่องสัญญาณอื่นๆ แทรกเข้ามา ซึ่งเกิดจากการรบกวนของสัญญาณจากเซลอื่นๆ ที่มีการใช้ช่องสัญญาณความถี่เดียวกัน ซึ่งการรบกวนของสัญญาณเช่นนี้เรียกว่า การอินเตอร์เฟียร์เรนซ์จากช่องสัญญาณที่เหมือนกัน (Co-channel Interference) และการรบกวนของสัญญาณอีกส่วนหนึ่งที่เกิดขึ้นจากช่องสัญญาณที่อยู่ติดกัน การรบกวนของสัญญาณนี้เรียกว่า การอินเตอร์เฟียร์เรนซ์จากช่องสัญญาณข้างเคียง (Adjacent-channel Interference) ดังนั้นในการออกแบบระบบจึงต้องคำนึงถึงปัญหาของการเกิดอินเตอร์เฟียร์เรนซ์นี้ด้วย

#### การอินเตอร์เฟียร์เรนซ์จากช่องสัญญาณที่เหมือนกัน

การอินเตอร์เฟียร์เรนซ์จากช่องสัญญาณที่เหมือนกันเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้โครงสร้างแบบเซลลูลาร์ เพราะว่าช่องสัญญาณที่เหมือนกันจะถูกใช้ในเซลอื่นๆ ที่อยู่ห่างออกไป ดังนั้นค่าการเกิดการอินเตอร์เฟียร์เรนซ์แบบนี้จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเซลที่ใช้ความถี่เดียวกัน ซึ่งถ้าเซลที่ใช้ความถี่เดียวกันมีระยะห่างที่น้อย ค่าการเกิดการอินเตอร์เฟียร์เรนซ์จะมีค่าสูงขึ้นและในทางกลับกันถ้าเซลที่ใช้ความถี่เดียวกันมีระยะห่างที่มาก ค่าการเกิดการอินเตอร์เฟียร์เรนซ์จะมีค่าต่ำลง จึงต้องพยายามหาระยะห่างของเซลที่ใช้ความถี่เดียวกันที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ในค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของการอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ได้ดังนี้

$$q = D/R \quad (2.26)$$

พารามิเตอร์  $q$  จะเรียกว่า แฟคเตอร์ของการอินเตอร์เฟียร์เรนซ์จากช่องสัญญาณที่เหมือนกัน (Co-channel Interference Reduction Factor) ถ้าพารามิเตอร์  $q$  เพิ่มขึ้น การเกิดการอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ของช่องสัญญาณที่เหมือนกันจะเกิดขึ้นน้อยลง จากพารามิเตอร์  $q$  เราสามารถพิจารณาระดับสัญญาณที่ได้รับได้จากเครื่องโทรศัพท์คือค่า  $C/I$  (Carrier-to-Interference Ratio) โดยจะสามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันได้เป็น

$$D = f(K_c, C/I) \quad (2.27)$$

โดยที่  $K_c$  เป็นจำนวนของเซลที่เกิดอินเตอร์เฟียร์เรนซ์จากช่องสัญญาณที่เหมือนกัน

### บทที่ 3

#### ผลการวิเคราะห์

โครงการนี้เป็นการออกแบบสายอากาศ ให้มีคุณสมบัติใช้เป็นสถานีฐาน(Base Station)ของระบบ GSM ที่ย่านความถี่ 1800 MHz เพื่อลดการเกิดการรบกวนกันในแต่ละช่องสัญญาณช่องที่มีความถี่เดียวกัน หรือการเกิด Co-Channel Interference และสามารถเลือกทิศทางที่ต้องการใช้งานได้ โดยได้มีการออกแบบสายอากาศสถานีฐาน โทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยใช้รูปแบบคุณสมบัติของสายอากาศที่เป็นสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นมุม(Conner Reflector Antenna)โดยมีลักษณะของสายอากาศเป็นวงแหวนสี่เหลี่ยม กระจุนด้วยโพรบไฟฟ้าวางตามแนวแกนที่วางตามแนวแกน ยึดติดกับตัวสะท้อนคลื่นมุม ที่ทำมุม  $120^\circ$  ซึ่งในโครงการนี้ได้ทำการวิเคราะห์ สายอากาศสถานีฐานจำนวน3sector เพื่อให้มีการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางเดียวได้3ทิศทางตามต้องการ ทำให้ตัวสะท้อนคลื่นต้องทำมุมซึ่งกันและกันเท่ากับ  $120^\circ$  จำนวน3ด้าน โดยมีขนาดของสายอากาศและขนาดของตัวสะท้อนคลื่นมุมตามผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2)

โดยออกแบบ ให้สายอากาศสามารถทำงาน ได้ตลอดย่านความถี่ ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 1800 MHz ซึ่งมีความถี่ Uplink อยู่ในช่วง1710MHz-1785MHz และความถี่ Downlink ในช่วง1805MHz-1880MHz ดังนั้นสายอากาศต้องสามารถใช้งานได้ที่ความถี่ตั้งแต่ 1710MHz-1880Mhz

#### 3.1 การวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในการออกแบบ

ในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้นจะสนใจในส่วนของ ค่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม ค่าความกว้าง ความสูง และความยาวของตัวป้อนสัญญาณวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม โดยค่าดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดรูปแบบของคลื่นที่ออกมาจากสายอากาศและค่าสภาพเจาะจงทิศทางของตัวสายอากาศ ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมากที่จะต้องพิจารณาเป็นอันดับแรกดังต่อไปนี้ที่จะต้องพิจารณาคือ ความยาวของโพรบที่ใช้กับตัวสายอากาศ โดยจะเป็นตัวกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศ (Impedance) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio) ค่าการสูญเสียเนื่องมาจากการย้อนกลับ (Return loss) และค่าความกว้างของความถี่ที่ใช้งาน (Bandwidth) ของสายอากาศ

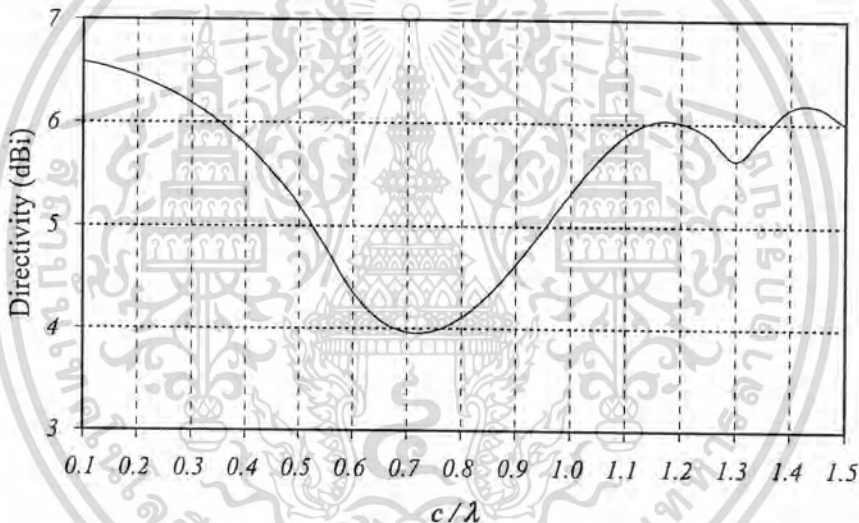
##### 3.1.1 การพิจารณาค่าความกว้าง ความสูง และความยาวของสายอากาศวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม

ในการพิจารณาค่าความกว้างนั้น จะพิจารณาค่าความกว้างของสายอากาศที่ทำให้คลื่นที่ออกจากตัวสายอากาศมีเพียงแบบรูปของคลื่นหลักเท่านั้นที่สามารถเดินทางไปได้ ซึ่งกรณีของตัวสายอากาศแบบโพรบกระจุนวงแหวนสี่เหลี่ยมแบบรูปของคลื่นหลักคือ  $TE_{10}$  เพื่อให้เกิดคลื่นหลักเฉพาะคลื่นโหมด  $TE_{10}$  ค่าความกว้าง ( $a$ ) จะต้องมีค่าน้อยกว่า  $\lambda$  และค่าความสูง ( $b$ ) จะต้องมีค่าน้อยกว่า  $0.5\lambda$  แต่เพื่อให้สามารถนำคลื่น  $TE_{10}$  โหมดได้ ความกว้างของท่อนำคลื่นจะต้องมีค่ามากกว่า  $0.5\lambda$  ดังนั้นค่าความกว้างที่เหมาะสมจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง

$$0.5\lambda < a < \lambda \quad \text{เมื่อ } a = 2b \text{ เท่านั้น}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าความกว้างของตัวสายอากาศที่ออกแบบนี้มี ค่าความกว้างเท่ากับ  $0.69\lambda$  ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กันมากเนื่องจากต่ำกว่า  $\lambda$  มากและสูงกว่า  $0.5\lambda$  มากเช่นกัน เมื่อพิจารณาถึงค่าความสูงของตัวสายอากาศถ้าความสูงมีค่าน้อยจนเกินไปจะทำให้ค่าการลดทอนขนาดสูงขึ้น เนื่องจากการสูญเสียกำลังงานในผนังของท่อนำคลื่น และทำให้กำลังงานที่นำไปโดยท่อนำคลื่นมีค่าลดลงโดยในทางปฏิบัติมักจะทำให้  $b = 0.5a$  ดังนั้นความสูงของสายอากาศที่ออกแบบนี้จึงมีค่าเท่ากับ  $0.35\lambda$  และในการหาค่าความยาวของสายอากาศเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมจะพิจารณาค่าสภาพแอมเพจติคทางของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ค่าสภาพแอมเพจติคทางของสายอากาศโพรบกระตุ่นวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม

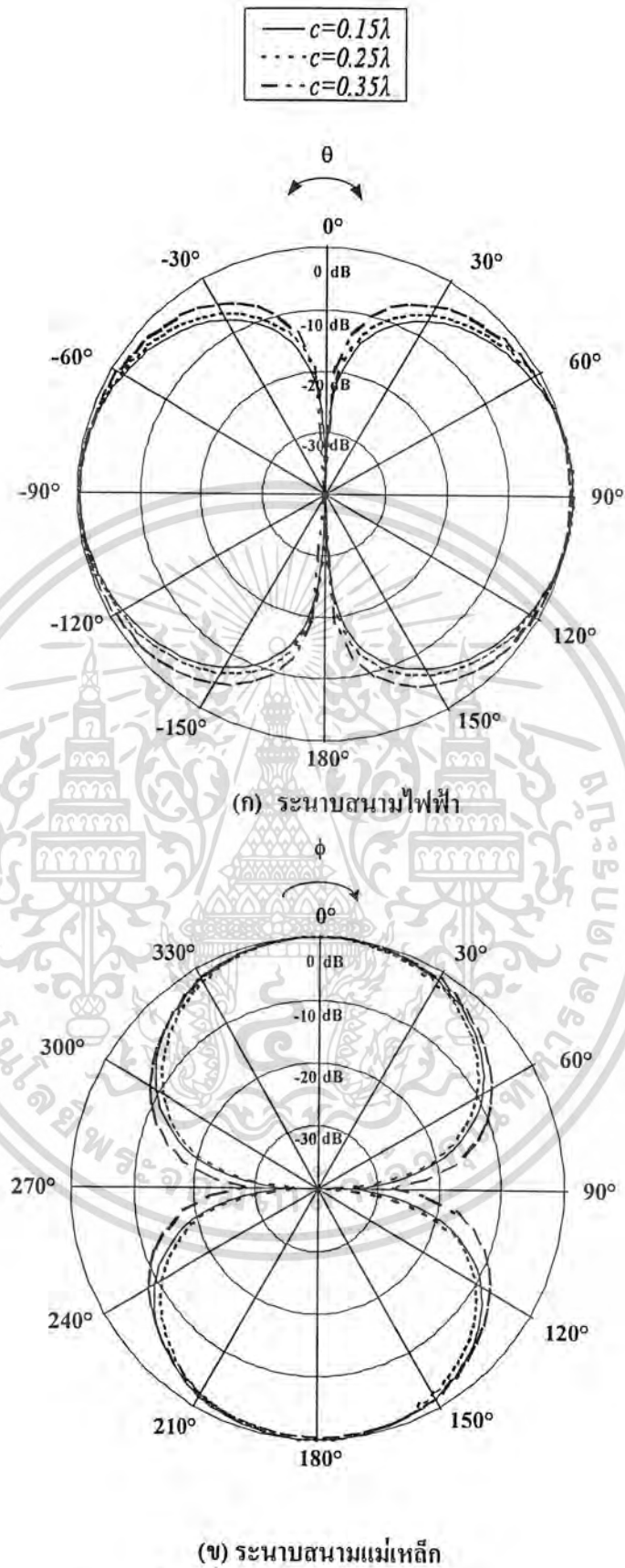
จากรูปที่ 3.1 จะพบว่าค่าความยาวที่เหมาะสมที่จะให้ค่าสภาพแอมเพจติคทางมีค่าสูงที่สุดและทำให้ลำคลื่นออกจากสายอากาศเป็นแบบรูปคลื่นหลัก  $TE_{10}$  นั้นมีค่าเท่ากับ  $0.15\lambda$  แต่ต้องมาพิจารณาที่ค่าพารามิเตอร์อื่นร่วมด้วย ซึ่งในกรณีของวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมจะทำการพิจารณาความยาวของวงแหวนที่มีค่า  $0.25\lambda$  ด้วย เพื่อต้องการทดสอบผลที่เกิดจากโหมดคลื่นอื่นๆ ที่ไม่ใช่โหมดหลักหรือที่เรียกว่า คลื่นจางหาย (evanescent wave) ซึ่งโหมดคลื่นเหล่านี้จะมีขนาดลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะทางที่คลื่นเดินทางออกจากโพรบมีค่ามากขึ้น ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่มีขนาดความยาวของวงแหวนไม่เท่ากันดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 เมื่อทำการเปรียบเทียบกันจะพบว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าจะมีความกว้างของลำคลื่นมากกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของ

สนามแม่เหล็ก และเมื่อความยาวของตัวสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น จะเกิดค่าอัตราส่วนล้าคลื่นหลักต่อล้าคลื่นย่อยด้านข้างขึ้น

ตัวสายอากาศวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่ได้ทำการออกแบบไว้โดยให้ทำงานที่ความถี่เท่ากับ 1.8 GHz ขนาดของตัวสายอากาศวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่ใช้สำหรับปริภูมิพนธ์นี้ คือ มีค่าความกว้างเท่ากับ  $0.69\lambda$  ค่าความสูงเท่ากับ  $0.35\lambda$  โดยจะทำการพิจารณาความยาวของตัวสายอากาศ 2 ขนาด คือ กรณี  $0.15\lambda$  และ  $0.25\lambda$  โดยให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 4.15 dBi และ 4.03 dBi ตามลำดับ



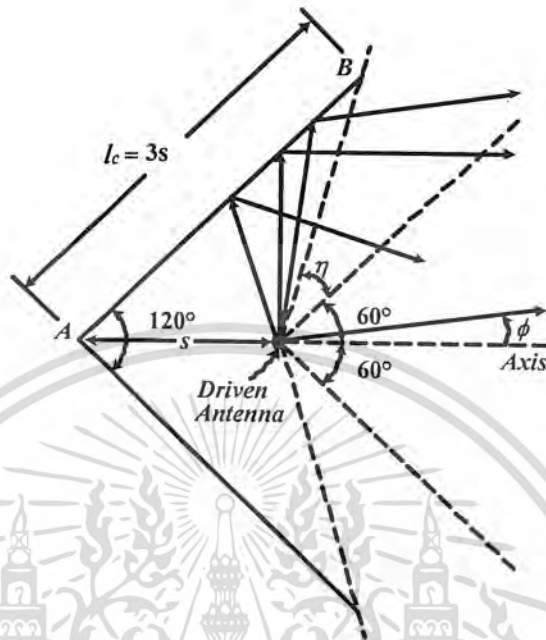
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศโทรทรรศน์วงแหวนสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การพิจารณาค่าขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม



รูปที่ 3.3 ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยมีขนาดของความยาวเท่ากับสองเท่าของระยะห่างระหว่างตัวป้อนสัญญาณกับตัวสะท้อนแบบคลื่นมุมที่มีมุมเท่ากับ  $120^\circ$

จากรูปที่ 3.3 เนื่องจากตัวสะท้อนแบบมุมมีขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์ ซึ่งในการสร้างไม่สามารถสร้างขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดอนันต์ได้ จึงจำเป็นต้องสร้างขนาดของตัวสะท้อนที่มีขนาดจำกัด โดยต้องคำนึงถึงผลที่ได้จากการมีขนาดตัวสะท้อนที่จำกัดต้องไม่เปลี่ยนแปลงไปมากโดยการออกแบบความยาวของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมจะพิจารณาจาก ตำแหน่งที่คลื่นที่ออกจากตัวสายอากาศไปตกกระทบกับตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมแล้วทำให้คลื่นที่สะท้อนขนานกับแกน เมื่อพิจารณากรณีของตัวสะท้อนทำมุม  $120^\circ$  ที่แสดงไว้ดังรูป  $S$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศกับตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม จากจุด  $A$  ไปจนถึงระยะที่จุด  $B$  ให้มีความยาวของตัวสะท้อนเท่ากับ  $l_c = 3S$  ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในทางปฏิบัติสำหรับกรณีของตัวสะท้อนทำมุม  $120^\circ$

ส่วนความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมปกติจะใช้ประมาณ 1.2 - 1.5 เท่าของความสูงทั้งหมดของตัวป้อนสัญญาณ ซึ่งกรณีตัวป้อนสัญญาณเป็นวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมซึ่งมีความสูงเท่ากับ 0.35 $\lambda$  จะใช้ความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมเท่ากับ 0.589 $\lambda$

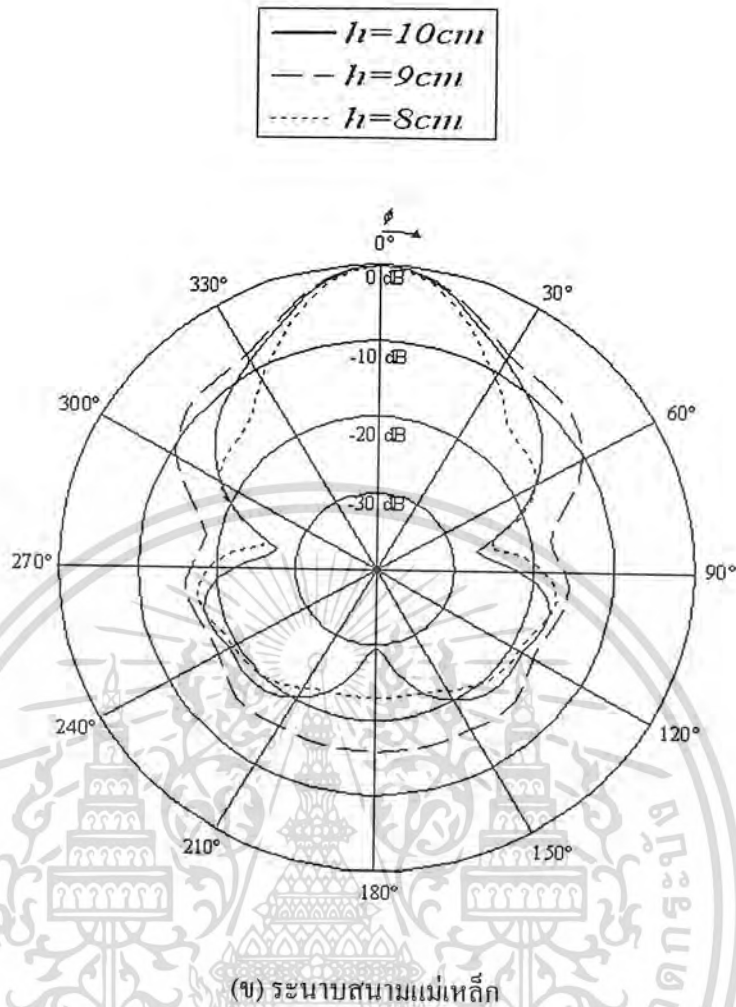
เมื่อเราทราบระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับตัวป้อนสัญญาณที่ต้องการแล้วก็จะสามารถหาขนาดของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมได้ เมื่อทำการพิจารณาผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2) จะเห็นว่าขนาดความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมเมื่อมีขนาดเท่ากับ  $0.589\lambda$  (10 ซม.) จะเกิดลำคลื่นย่อยด้านหลัง (back lobe) สูง จึงได้เพิ่มความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมขึ้นเพื่อให้เกิดลำคลื่นย่อยด้านหลังต่ำ ซึ่งแสดงตัวอย่างผลของลำคลื่นย่อยด้านหลังที่ได้จากการเพิ่มความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมได้ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า

รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์หาความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  วางใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม  $120^\circ$  ในระนาบสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

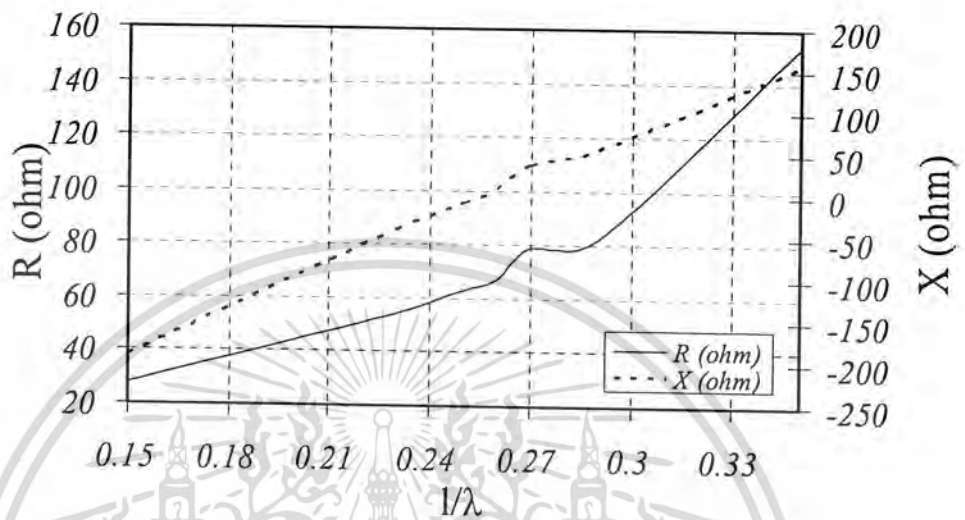


รูปที่ 3.5 ผลการวิเคราะห์หาความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมโดยใช้โปรแกรม NEC2 ในกรณีวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  วางใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม  $120^\circ$  ในระนาบสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 ซึ่งแสดงค่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก จากการทดลองจากการใช้โปรแกรม NEC2 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่มีมุม  $120^\circ$  จะทำให้ลดการเกิด back lobe ได้ซึ่งจะทำให้ทราบว่าเมื่อทำการใช้ความสูงของตัวสะท้อนที่มีความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมเป็น 10cm จะมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้ความสูงของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม ที่ความสูง 8cm และ 9cm ตามลำดับ และขนาดของตัวสายอากาศมีขนาดที่ไม่ใหญ่จนเกินไป

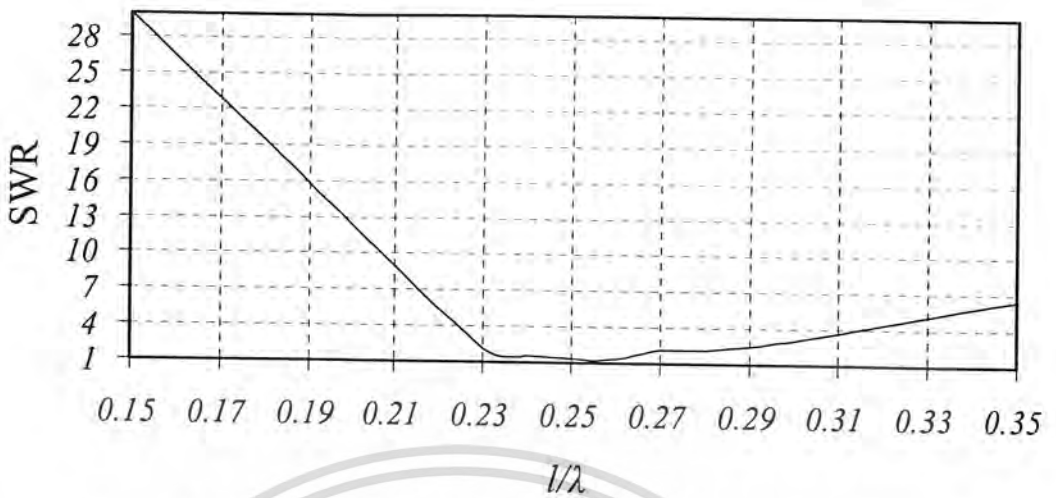
### 3.1.3 การพิจารณาค่าความยาวโพรบ

ค่าความยาวของโพรบที่ได้ทำการวิเคราะห์กับเครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย (Network Analyzer)



รูปที่ 3.6 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศชนิดของตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  ที่มีความยาวโพรบ ( $l$ ) ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 3.6 จะพบว่า ในกรณีของตัวป้อนสัญญาณวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม ค่าความยาวโพรบที่เหมาะสมสำหรับค่าความกว้าง ความสูง และความยาวที่ได้ออกแบบไว้มีค่าประมาณ  $4.25 \text{ cm}$  ( $0.25\lambda$ ) ซึ่งการพิจารณาค่าความยาวโพรบนั้น จะต้องทำให้เข้าใกล้การเกิดรีโซแนนซ์ (resonance) ให้มากที่สุด เพื่อให้คลื่นที่ส่งออกไปมีพลังงานมากที่สุดก็จะทำให้สามารถส่งไปได้ไกล โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ต้องการสำหรับการออกแบบสายอากาศนั้นมีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  เพื่อให้คลื่นที่ออกมาจากสายนำสัญญาณซึ่งมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50 \Omega$  สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้อย่างสมบูรณ์



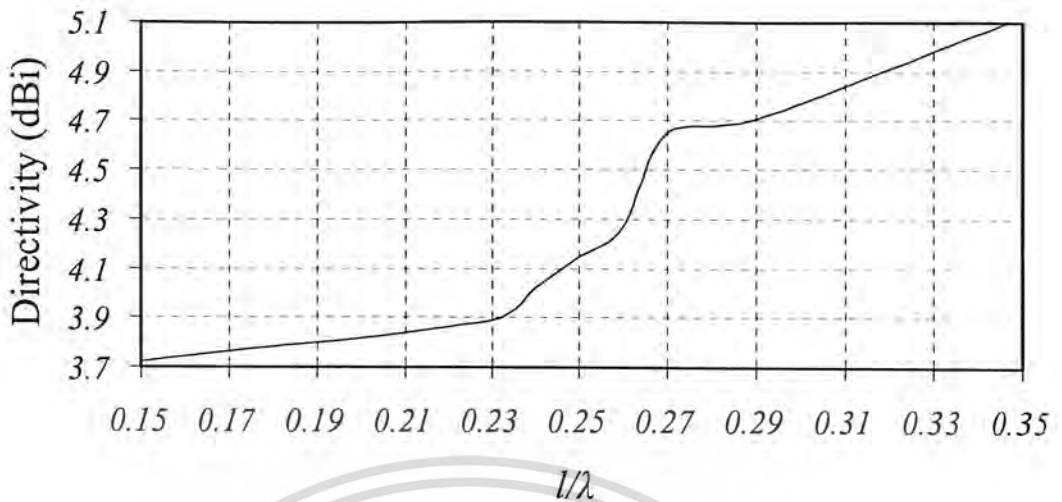
รูปที่ 3.7 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศชนิดของตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  ที่มีความยาวโพรบ (l) ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 3.7 สายอากาศมีค่า VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ไม่ควรมีค่ามากกว่า 2 และค่าการสูญเสียของการสะท้อนกลับ (return loss) จะต้องมีค่าน้อยกว่า  $-9.54$  dB ขึ้นไป ดังนั้นค่าความยาวโพรบที่ได้มานั้นก็ได้มาจากข้อกำหนดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

ส่วนการคำนวณหาความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานนั้น ทำได้โดยการหาความถี่ที่สูงกว่าและต่ำกว่าความถี่กลางที่มีค่า VSWR เท่ากับ 2 จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาช่วงกว้างความถี่ที่ใช้งานได้

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

ซึ่งค่าความกว้างของช่วงความถี่ที่ใช้งานควรจะมีค่ามากกว่า 10% ขึ้นไป



รูปที่ 3.8 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศชนิดของตัวป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  ที่มีความยาวโพรบ ( $l$ ) ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่า ค่า Directivity จะมีค่าค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นตั้งแต่ความยาว  $0.15\lambda$ - $0.23\lambda$  และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ค่า  $0.25\lambda$ - $0.27\lambda$  และจะค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆที่ที่ความยาวของโพรบมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งจากการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่แสดงให้เห็นคุณสมบัติของการหาความยาวของโพรบ จึงทำให้ทราบว่า ค่าความยาวของโพรบที่เหมาะสมที่สุดคือ  $l = 0.25\lambda$  ซึ่งจะมีค่า อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ใกล้ 1:1 และมีค่าความต้านทานที่ใกล้เคียงกับ  $50\Omega$  ค่า Directivity ที่สูง จึงเหมาะที่จะนำมาเป็นความยาวโพรบใช้งาน

### 3.2 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

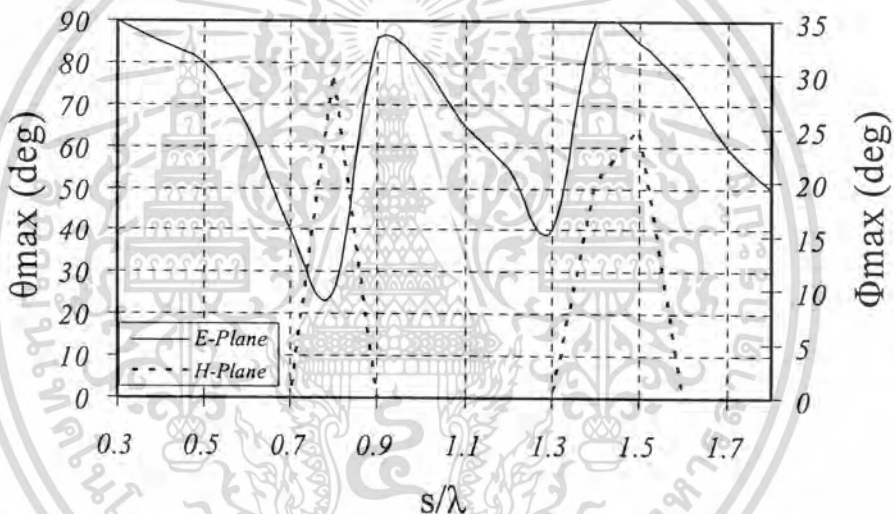
#### 3.2.1 คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศ เมื่อตัวสะท้อนทำมุมกัน  $120^\circ$  โดยที่ค่าต่างๆจะขึ้นอยู่กับขนาดความกว้าง ความสูง และความยาวของวงแหวนในกรณีที่เป็นวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม และยังขึ้นอยู่กับค่ามุมของตัวสะท้อน อีกด้วย

### 3.2.2 ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก

ในการออกแบบสายอากาศแบบทิศทางเดียวนี้ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบมุมยกและระนาบมุมกวาดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องพิจารณา กล่าวคือ หากต้องการให้การแพร่กระจายสนามแรงไปทางด้านหน้าของสายอากาศ ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าต้องมีค่าเท่ากับ  $90^\circ$  ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามแม่เหล็กต้องเท่ากับ  $0^\circ$  และเงื่อนไขนี้ต้องเกิดขึ้นพร้อมกันทั้งสองระนาบด้วย

ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$



รูปที่ 3.9 ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$

จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าจากค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  วงใกล้ตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมนั้นจะเกิดการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว จากเส้นกราฟระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) จะเห็นว่าที่ค่า  $s = 0.3\lambda$  ระนาบสนามไฟฟ้ามีค่า  $90^\circ$  ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของระนาบนี้ เมื่อความยาว  $s$  มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่ามุมระนาบสนามไฟฟ้าค่อยๆ ลดต่ำลง จนถึงค่า  $0.9\lambda$  ค่ามุมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วถึง  $85^\circ$  และลดต่ำลงอีกครั้ง ตามค่า  $s$  ที่เพิ่มขึ้น และกลับมาถึงค่ามุม  $90^\circ$  อีกครั้งที่ค่า  $s = 1.4\lambda$

จากเส้นกราฟที่มุมระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) จะเห็นว่าที่ค่า  $s = 0.3 \lambda$  ถึง  $s = 0.7 \lambda$  ค่ามุมในระนาบนี้มีค่า  $0^\circ$  จนถึงค่า  $s = 0.8 \lambda$  มุมจะเพิ่มขึ้นไปเป็น  $30^\circ$  และกลับเป็น  $0^\circ$  อย่างรวดเร็วที่  $s = 0.9 \lambda$  และจะเป็น  $0^\circ$  ไปเรื่อยจนถึงที่ค่า  $s = 1.4 \lambda$  และ  $s = 1.5 \lambda$  ที่มีค่ามุมเพิ่มขึ้นเป็น  $20^\circ$  และ  $25^\circ$  ตามลำดับหลังจากนั้น มุมระนาบสนามแม่เหล็กจะลดลงเป็น  $0^\circ$

จากคุณลักษณะของกราฟในรูปที่ 3.6 ทำให้สามารถเลือกค่าระยะ  $s$  ที่สามารถใช้ได้อย่างถูกต้อง โดยค่า  $s$  ที่ทำให้มุมระนาบสนามไฟฟ้ามีค่า  $90^\circ$  และมุมระนาบสนามแม่เหล็กมีค่า  $0^\circ$  ซึ่งต้องเกิดขึ้นพร้อมกันนั้นคือค่า  $s = 0.3 \lambda$  ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการสร้างสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนเหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15 \lambda$

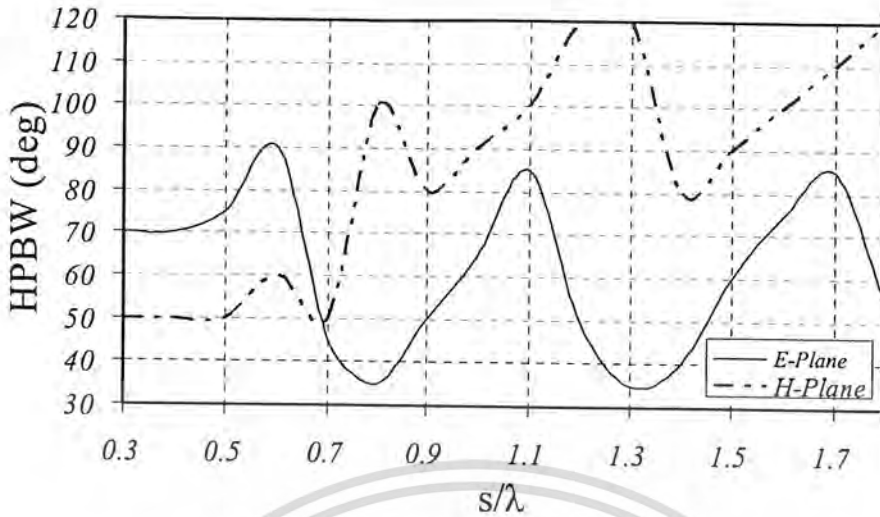
### 3.2.3 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง

ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ โดยค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ต้องการคือ มีลักษณะแคบๆ ทั้งนี้เพื่อให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่นไปยังทิศทางที่ต้องการได้แม่นยำยิ่งขึ้นและมีการสูญเสียกำลังงานในทิศทางอื่นน้อยๆด้วย

ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งกรณีสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15 \lambda$

จากรูปที่ 3.10 แสดงค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศที่พิจารณาจากระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับ โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.13 \lambda$  พบว่าในระนาบสนามไฟฟ้านั้นในช่วงแรกจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึงระยะ  $0.6 \lambda$  จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงระยะ  $0.8 \lambda$  และเพิ่มขึ้นอีกจนถึงระยะ  $1.1 \lambda$  และจะลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งจนถึงระยะ  $1.3 \lambda$

ในระนาบสนามแม่เหล็ก ในช่วงแรกจะคงที่ก่อนจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่  $0.6 \lambda$  และลดลงเล็กน้อยที่  $0.7 \lambda$  จากนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะ  $0.8 \lambda$  และจะลดลงเล็กน้อยที่  $0.9 \lambda$  ก่อนที่จะเพิ่มระยะขึ้นจนถึง  $1.3 \lambda$  จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วที่  $1.4 \lambda$  และเพิ่มสูงขึ้นในค่าต่อไป



รูปที่ 3.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$

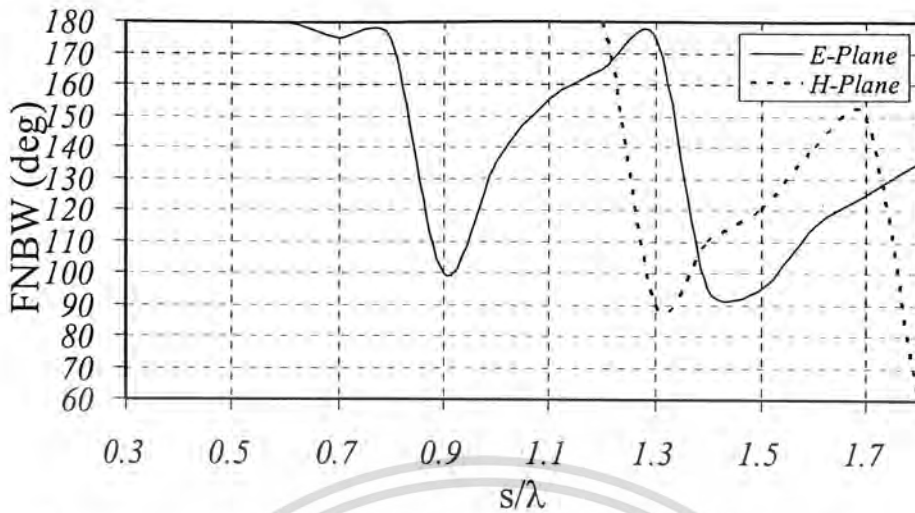
### 3.2.4 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรก

ความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$

จากรูปที่ 3.11 แสดงค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศที่พิจารณาจากระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับ โพรบกระตุ้นวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.13\lambda$  พบว่าในระนาบสนามไฟฟ้า ในช่วงแรกจะมีแนวโน้มของค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศมีค่าอยู่ในช่วงที่สูงมาก จากนั้นจะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็ว ที่ระยะ  $0.9\lambda$  และค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึง  $1.4\lambda$  ค่ามุมที่ได้จะลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง

ในระนาบสนามแม่เหล็ก จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับสนามไฟฟ้า แต่ระยะที่ลดลงของกราฟ จะมีระยะ  $s/\lambda$  ไม่เท่ากับในระนาบสนามไฟฟ้า โดยในช่วงแรกจะมีค่าสูงมากและลดลงอย่างรวดเร็วที่ค่า  $1.3\lambda$  และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึงระยะ  $1.7\lambda$  ก่อนลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง

จากคุณลักษณะของกราฟ ในรูปที่ 3.7 ค่า  $s$  ที่เราต้องการ จะต้องมียุค FNBW อยู่ในค่ามุมที่สูงที่สุดทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า และในระนาบสนามแม่เหล็ก ผลที่ได้จากกราฟนั้นจะเห็นว่าช่วงของ  $s$  ที่มีค่า FNBW สูงสุดพร้อมกันทั้ง 2 ระนาบนั้น จะอยู่ในช่วง  $s$  มีค่า  $0.3-0.6\lambda$  ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการสร้างสายอากาศสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$



รูปที่ 3.11 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานเป็นศูนย์ครั้งแรกของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$

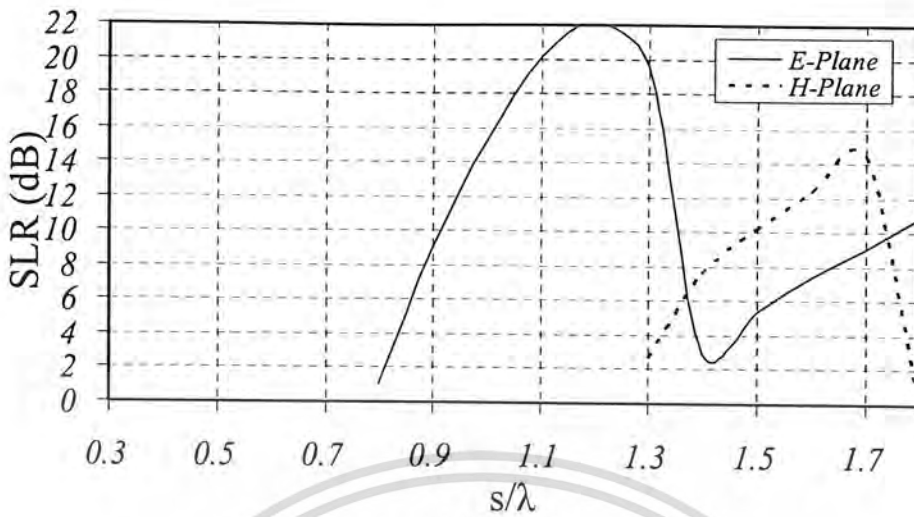
### 3.2.5 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง

ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$

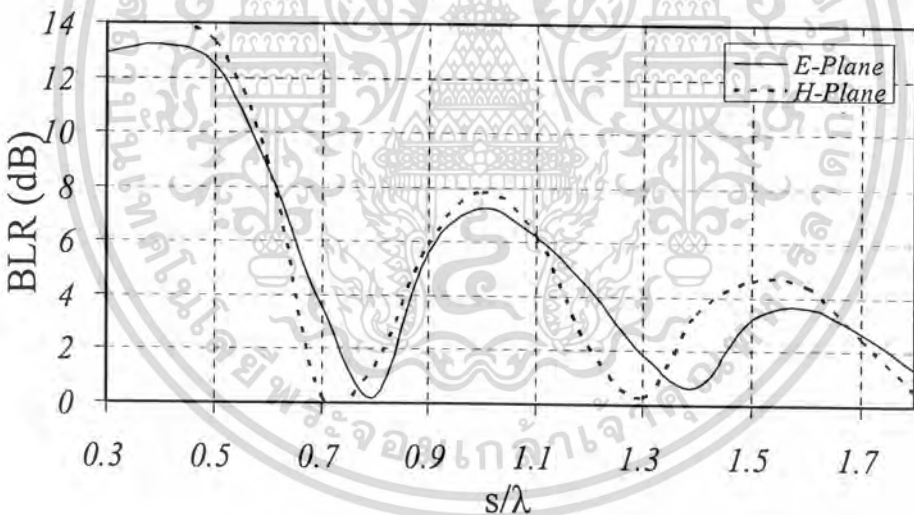
จากรูปที่ 3.12 แสดงค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  พบว่าในระนาบไฟฟ้าช่วงแรกจะไม่สามารถหาค่า SLR ได้จนถึงระยะ  $0.8\lambda$  กราฟจะแสดงค่าระยะ  $s$  ที่ระยะนี้ SLR จะยังมีค่าน้อย เมื่อระยะ  $s$  เพิ่มมากขึ้นค่ากราฟที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระยะ  $1.2\lambda$  และจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงระยะ  $1.4\lambda$  และจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้ง หลังจากระยะ  $1.4\lambda$

ในระนาบสนามแม่เหล็ก ช่วงแรกจะไม่เกิด SLR ขึ้น ซึ่งเกิด SLR ขึ้นในระยะ  $s$  ที่  $1.3\lambda$  และค้อมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงประมาณ  $1.7\lambda$  จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงค่า ระยะ  $s = 1.8\lambda$

จากคุณลักษณะของกราฟในรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าค่าระยะ  $S$  ที่ดีที่สุดในการใช้งาน คือ ช่วง  $0.3\lambda$  จนถึง  $0.8\lambda$  เนื่องจากในการใช้งานสายอากาศ ถ้าเราใช้ค่าระยะที่ไม่มี SLR หรือมีค่าน้อยๆ ทั้งในระนาบไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก ทำให้ไม่มีลำคลื่นในโลบย่อยๆ มารบกวนการทำงาน สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.12 ค่าอัตราส่วนต่ำคลื่นหลักต่อต่ำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$

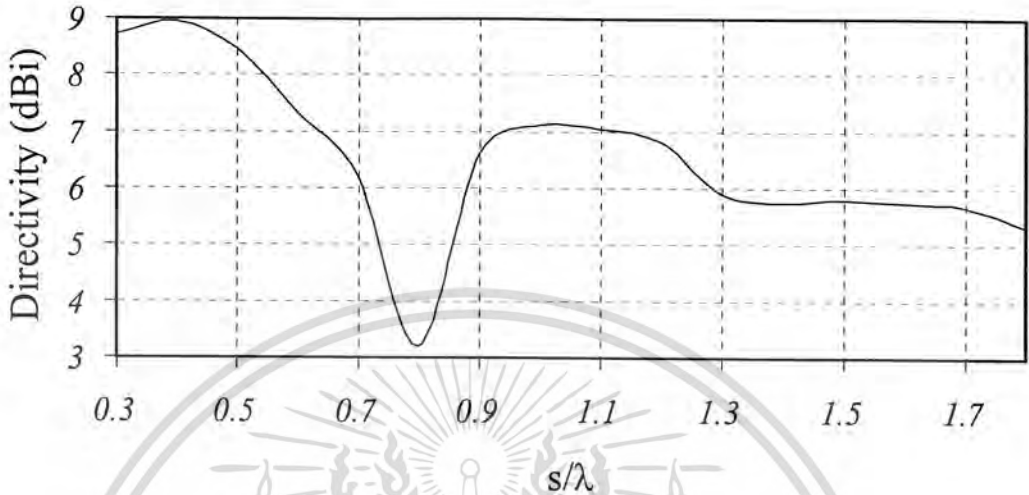


รูปที่ 3.13 อัตราส่วนต่ำคลื่นหลักต่อต่ำคลื่นด้านหลังของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$

จากรูปที่ 3.13 จะพบว่าช่วงที่เกิด BLR (Back Lobe Ratio) ที่มีค่ามากที่สุดคือช่วงที่  $0.3\lambda - 0.5\lambda$  ซึ่งเกิดขึ้นทั้ง 2 ระนาบคือที่ระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบของสนามแม่เหล็ก เป็นค่าที่มีที่สุดที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้งานเนื่องจากมี back lobe ที่เกิดน้อยกว่าในระยะห่างที่ระยะอื่นๆ ตามลำดับ

### 3.2.6 ค่าสภาพเจาะงทิตทางของสายอากาศ

ค่าสภาพเจาะงทิตทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณ  
ด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$



รูปที่ 3.14 ค่าสภาพเจาะงทิตทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$

ค่าสภาพเจาะงทิตทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  แสดงได้ดังรูปที่ 3.10 จะแสดงให้เห็นว่าที่ค่าระยะ  $s = 0.3\lambda$  จนถึง  $s = 0.5\lambda$  ค่าสภาพเจาะงทิตจะมีช่วงที่สูงที่สุดของกราฟ และจะลดลงมาเรื่อยๆจนถึงระยะ  $s = 0.8\lambda$  และจะเพิ่มขึ้นถึงที่  $s = 0.9\lambda$  ค่าสภาพเจาะงทิตจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และลดลงเล็กน้อยที่  $s = 1.3\lambda$  ก่อนจะมีค่าใกล้เคียงกันต่อไปเรื่อยๆ

จากคุณลักษณะของรูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นถึงช่วงระยะ  $s$  ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ ซึ่งค่าที่เหมาะสมจะเป็นช่วงระยะ  $s = 0.3\lambda$  ถึง  $s = 0.5\lambda$  เนื่องจากมีค่าสภาพเจาะงทิตทางที่สูงมาก สามารถนำไปใช้ให้เกิดประสิทธิภาพได้ดี

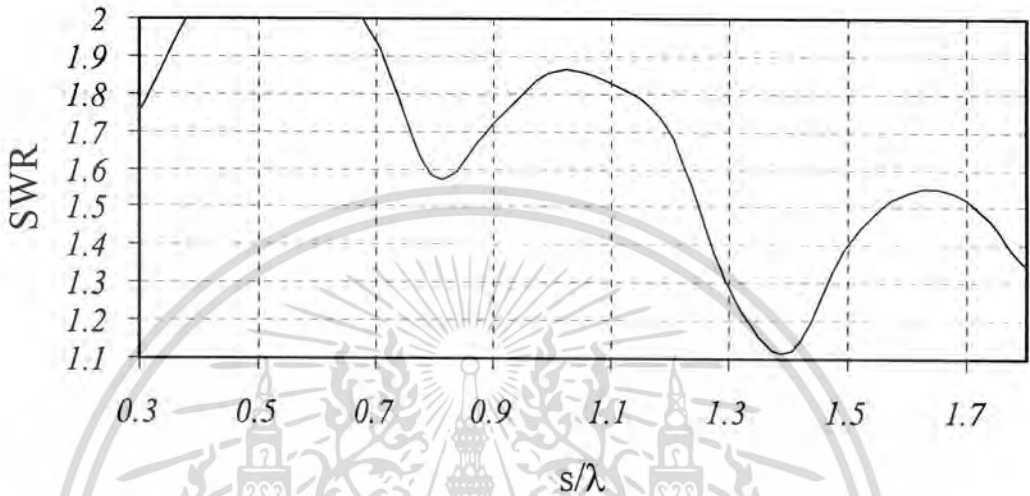
### 3.2.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณ  
ด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$

จากรูปที่ 3.15 แสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  จากกราฟจะพบว่าที่ระยะ  $s$  ในช่วงแรกจะมีค่า SWR ที่ต่ำกว่า 2 เล็กน้อย ก่อนจะเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 ที่  $s = 0.5\lambda$  และลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้งที่  $s = 0.8\lambda$  จากนั้น SWR จะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ที่  $s = 1.0\lambda$  และลดลงอย่างรวดเร็ว จนเกือบถึงค่า SWR = 1 ที่ระยะ  $s = 1.4\lambda$  และเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ก่อนที่จะลดลงเมื่อถึงปลายเส้นกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากคุณลักษณะของค่า SWR ที่เราต้องการนั้น ต้องมีค่าต่ำกว่า 2 และใกล้เคียง 1 มากที่สุดเพื่อให้เกิดรีโซแนนซ์ ทำให้เกิดการสูญเสียย้อนกลับที่น้อยที่สุด จากรูปที่ 3.11 นั้น ค่า S ที่เราสามารถใช้ได้มีหลายช่วงด้วยกัน โดยค่าที่ไม่สามารถนำมาใช้ได้นั้นมีเพียงค่า  $S=0.4 \lambda$  ถึง  $S=0.6 \lambda$  ที่มี SWR มากกว่า 2

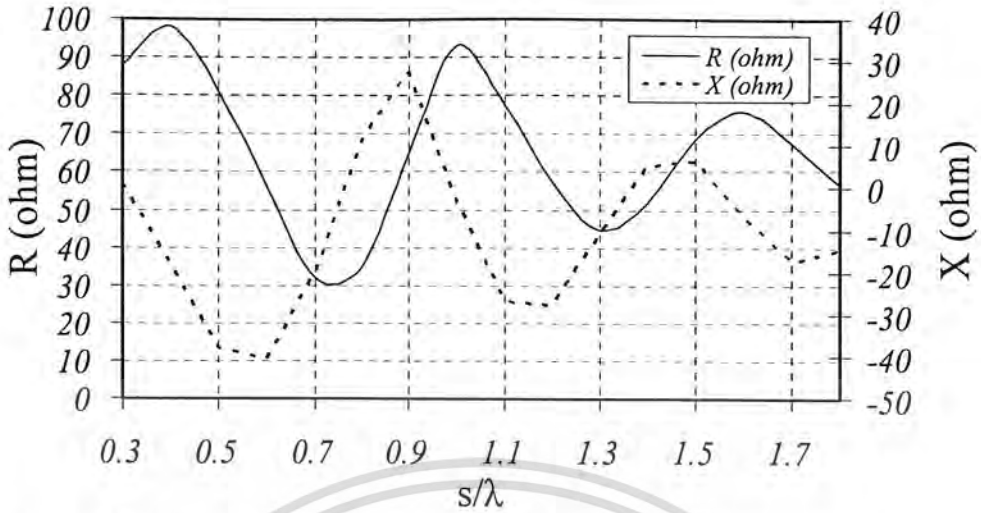


รูปที่ 3.15 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15 \lambda$

### 3.2.8 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

รูปที่ 3.16 เป็นรูปภาพแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยมีกราฟในส่วนของค่า R ที่ระยะ  $S=0.3 \lambda$  ถึง  $0.4 \lambda$  ค่าจะมีค่าสูงและลดต่ำลงอย่างรวดเร็วจนถึงระยะ  $S=0.7 \lambda$  ก่อนเพิ่มขึ้นอีกจนถึงระยะ  $\lambda$  และลดลงอย่างรวดเร็วอีกครั้ง ที่  $S=1.3 \lambda$  ก่อนที่จะเพิ่มขึ้นอีก จนถึงระยะ  $1.6 \lambda$  ก็จะลดลงเล็กน้อย กราฟในส่วนของค่า X นั้นในช่วงแรกจะยังมีค่าเป็น + ก่อนลดต่ำลงมาจนถึง  $S=0.6 \lambda$  จากนั้นเส้นกราฟจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึง  $0.9 \lambda$  และจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงค่า  $S=1.2 \lambda$  และเพิ่มขึ้นอีกครั้งถึงระยะ  $1.5 \lambda$  และจะลดลงจนถึงปลายเส้นกราฟ

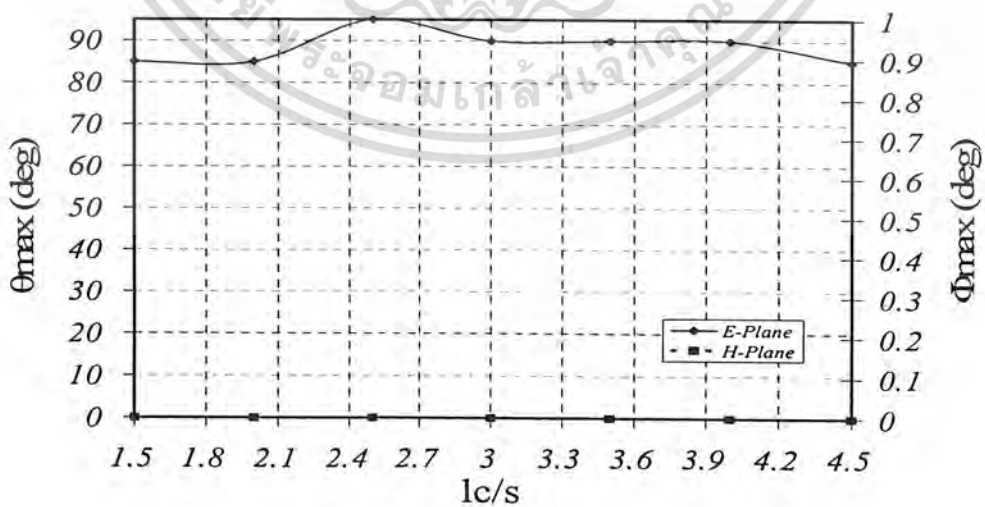
ในการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์นั้น ต้องการให้มีค่าใกล้เคียงกับ  $50 \Omega$  เพื่อให้เกิดการสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุด สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 3.16 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15 \lambda$

การเปรียบเทียบความยาวของตัวสะท้อน (lc)

ความยาวของตัวสะท้อนมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15 \lambda$  ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศได้แก่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่ามุมที่สนามสูงสุดในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก ค่าความกว้างลำคลื่น ค่าอัตราส่วนระหว่างลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นย่อยด้านข้าง และค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดของสายอากาศ เมื่อตัวสะท้อนทำมุมกัน  $120^\circ$  เพื่อหาความยาวของตัวสะท้อนที่จะนำมาใช้งานจริง



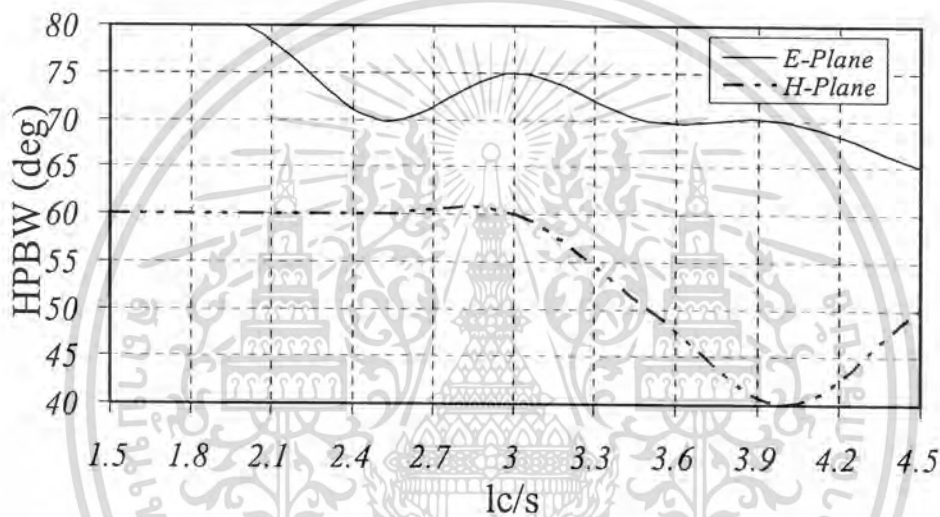
รูปที่ 3.17 ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของของตัวสะท้อน (lc)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.9 ค่ามุมที่สนามสูงสุดของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.17 ที่ระนาบสนามไฟฟ้าจะมีค่ามุมที่สูงที่สุดที่ที่ระนาบสนามไฟฟ้ามีค่ามุม  $90^\circ$  อยู่ความยาวของตัวสะท้อนระหว่าง  $0.3s-0.39s$  ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาทำเป็นสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม

ระนาบสนามแม่เหล็กจะมีค่ามุมที่สูงที่สุดอยู่ที่  $0^\circ$  ตั้งแต่ความยาวของตัวสะท้อนที่  $1.5s-4.5s$  ซึ่งเป็นค่าที่เปรียบเทียบกันในความยาวของตัวสะท้อนที่เท่ากันจะเห็นได้ว่าช่วงที่ดีที่สุดก็คือช่วงที่มีระนาบสนามไฟฟ้ามีค่ามุมเป็น  $90^\circ$  และ ระนาบสนามแม่เหล็กมีค่ามุมที่  $0^\circ$  เพราะฉะนั้นช่วงที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้งานคือช่วง ที่มีความยาวของตัวสะท้อนตั้งแต่  $0.3s-0.39s$  ตามลำดับ



รูปที่ 3.18 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน ( $lc$ )

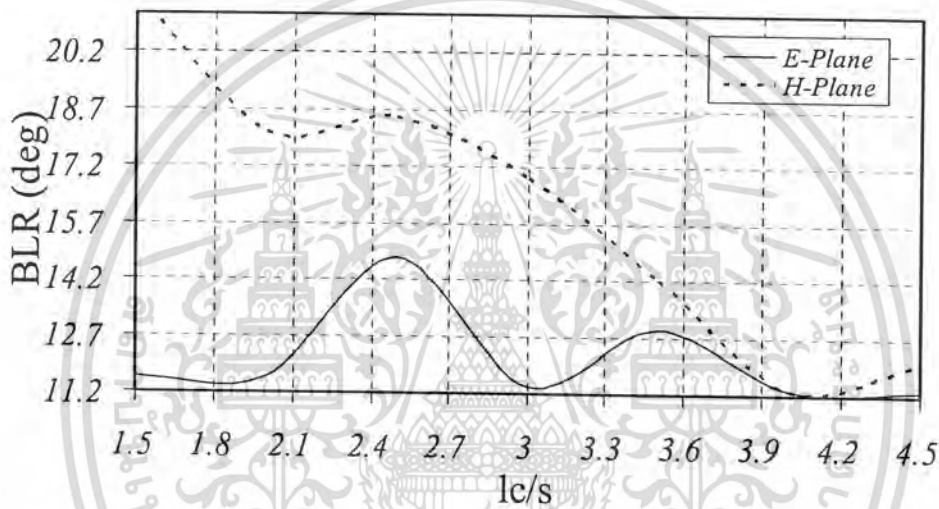
### 3.2.10 ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศ

ค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญของสายอากาศ โดยค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งที่ต้องการคือ มีลักษณะแคบๆ ทั้งนี้เพื่อให้สายอากาศสามารถแพร่กระจายคลื่น ไปยังทิศทางที่ต้องการได้แม่นยำยิ่งขึ้นและมีการสูญเสียกำลังงานในทิศทางอื่นน้อยๆด้วย

ค่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังลดลงครึ่งหนึ่งกรณีสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  จากรูปที่ 3.19 แสดงค่าความกว้างของลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของสายอากาศที่พิจารณาจากความยาวของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.13\lambda$  พบว่า

ในระนาบสนามไฟฟ้าในในช่วงแรกจะคงที่และจะลดลงในช่วง  $2.1s-2.4s$  และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่อีกครั้งที่ความยาวของตัวสะท้อนที่  $2.7s-3s$  จากนั้นก็จะจะมีค่ามุมที่ลดลงเรื่อยๆ

ในระนาบสนามแม่เหล็ก ในช่วงแรกจะคงที่ก่อนจะลดลงที่ความยาวของตัวสะท้อน  $2.7s-3s$  และจากนั้นจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและจะกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่ความยาวของตัวสะท้อนที่  $4.2s$  ตามลำดับ



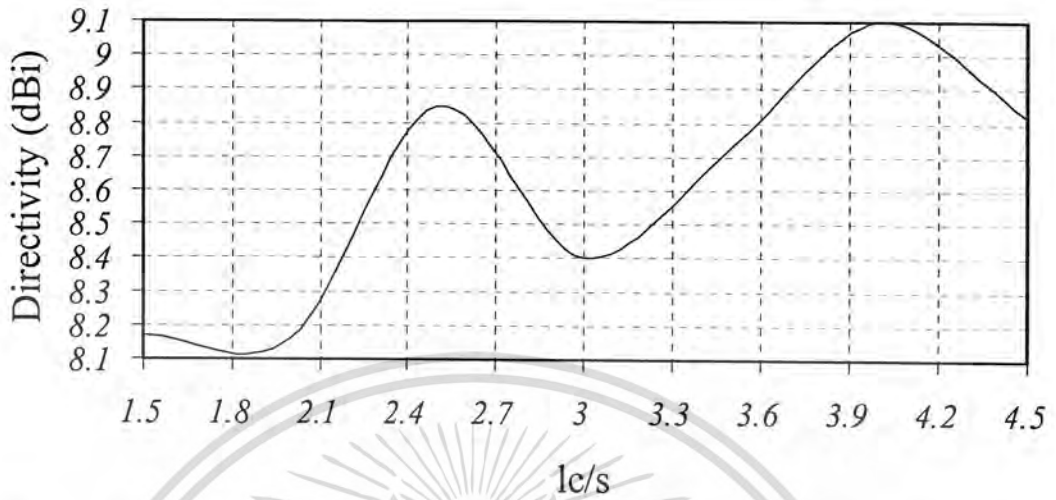
รูปที่ 3.19 อัตรส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านหลังของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน ( $lc$ )

### 3.2.11 ค่าอัตราส่วนลำคลื่นหลักต่อลำคลื่นด้านหลังของสายอากาศ

จากรูปที่ เมื่อพิจารณาที่ระนาบสนามไฟฟ้า จะมีค่า BLR ที่สูงที่สุดที่  $1.5s$  และจะลดลงมาจนถึงที่ระยะ  $2.1s$  ก็จะกลับเพิ่มขึ้นไปอีกไม่มากนักแล้วก็จะลดลงมาเรื่อยๆจนมีค่าต่ำสุดที่ความยาวของตัวสะท้อนที่  $4.2s$

ในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ค่า BLR ในช่วงตั้งแต่  $1.5s-1.8s$  จะมีค่าที่คงที่จนมาที่ความยาวของตัวสะท้อนที่  $2.1s$  ก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนมาที่ความยาวของตัวสะท้อนที่  $2.7s$  ก็จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและกลับเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่  $3.3s$  และลดลงอีกที่ที่ ความยาวของตัวสะท้อนที่  $3.9s$  ตามลำดับ

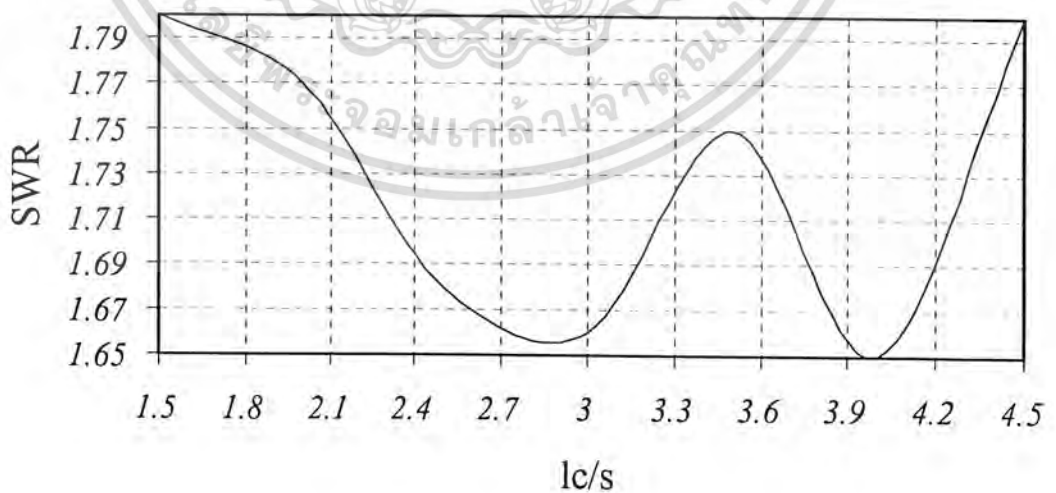
จากผลของกราฟ BLR จะทำให้เราทราบถึงค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ความยาวของตัวสะท้อนคลื่นคือที่มีค่า back lobe ที่น้อยแต่ก็ต้องพิจารณาที่ค่าพารามิเตอร์อื่นๆด้วย



รูปที่ 3.20 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน (lc)

3.2.12 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.20 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความยาวของวงแหวนเท่ากับ  $0.15\lambda$  ที่มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงที่สุดก็คือที่ความยาวของตัวสะท้อนในช่วง 3.9s-4.2s ซึ่งค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่คืนั้น ควรจะมีค่าที่สูงเพราะจะทำให้คลื่นเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เราต้องการได้ไกลขึ้น

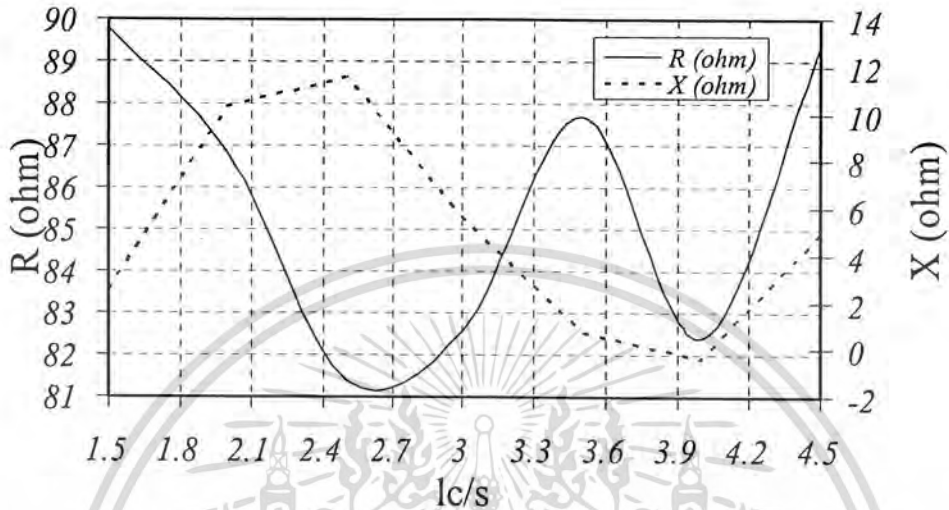


รูปที่ 3.21 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน (lc)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.13 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.21 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่เราต้องการจะต้องมีค่าใกล้เคียงกับค่า 1:1 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้คลื่นเดินทางไปได้โดยไม่สูญเสียพลังงานไปมากนัก จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดคือค่าที่ 3s และ 4.0s ซึ่งมีค่าของ อัตราส่วนคลื่นนิ่งที่เข้าใกล้ 1:1 ที่สุด



รูปที่ 3.22 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวของตัวสะท้อน ( $I_c$ )

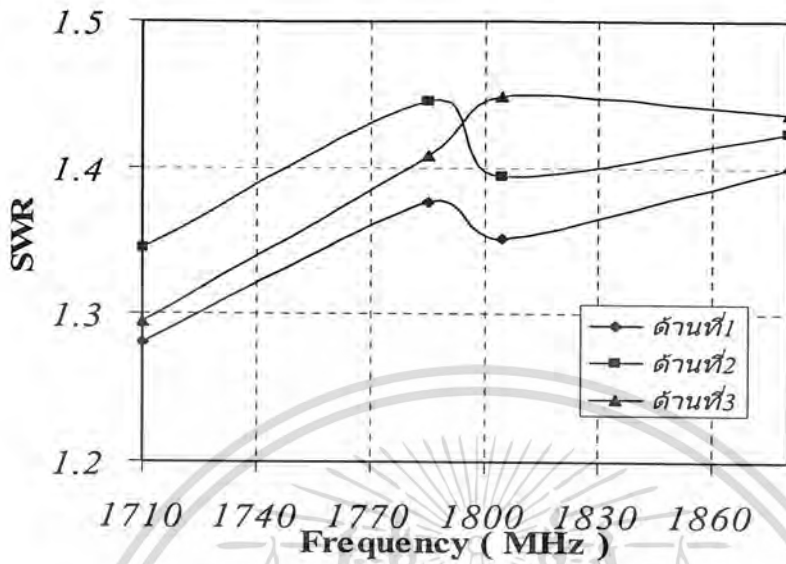
### 3.2.14 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

รูปที่ 3.22 เป็นรูปกราฟแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยมีกราฟในส่วนของค่า R ที่มีค่าที่คิดว่ามีค่าที่เข้าใกล้  $50\Omega$  คือช่วงที่มีความยาวของตัวสะท้อนระหว่าง 2.4s-3s ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้  $50\Omega$  มากที่สุดกราฟในส่วนของค่า X นั้นในช่วงแรกจะยังมีค่าเป็น+ ก่อนและมีค่าเพิ่มสูงขึ้นที่ความยาวของตัวสะท้อนมีค่า 2.4s และค่อยๆลดต่ำลงจนมาต่ำสุดที่ระยะ 3.9s และกลับเพิ่มสูงขึ้นมาอีกครั้ง

ในการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์นั้น ต้องการให้มีค่าใกล้เคียงกับ  $50\Omega$  เพื่อให้เกิดการสูญเสียในสายส่งน้อยที่สุด สามารถส่งผ่านสายอากาศออกไปได้อย่างสมบูรณ์

เพราะฉะนั้นค่าพารามิเตอร์ที่ได้กล่าวไปเพื่อทำการหาความยาวของตัวสะท้อนคลื่นแบบมุม  $120^\circ$  ที่ดีที่สุดคือที่  $I_c = 3s$  เพราะมีค่าพารามิเตอร์โดยรวมที่มีค่าดีกว่าที่ความยาวของตัวสะท้อนที่มีความยาวอื่น จึงได้เลือกความยาวของตัวสะท้อนนี้มาทำเป็นความยาวของตัวสะท้อนของสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนแบบสี่เหลี่ยม

### 3.2.15 อัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ3เซกเตอร์ตัวสะท้อนคลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.23 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ 3 เซกเตอร์ตัวสะท้อนคลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม

จากรูปที่ 3.23 เป็นรูปกราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งหรือ SWR จากสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นมุมที่นำไปประยุกต์เป็นสายอากาศ 3 เซกเตอร์ โดยจะแสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งในแต่ละด้านของสายอากาศมีค่า SWR ไม่เกิน 2 ซึ่งเป็นไปตามหลักการของสายอากาศ โดยสายอากาศแบบเซกเตอร์นี้สามารถทำงานที่ความถี่ up-link และ down-link ของระบบ 1800 MHz ได้ตามต้องการ

## บทที่ 4 การสร้าง และทดสอบ

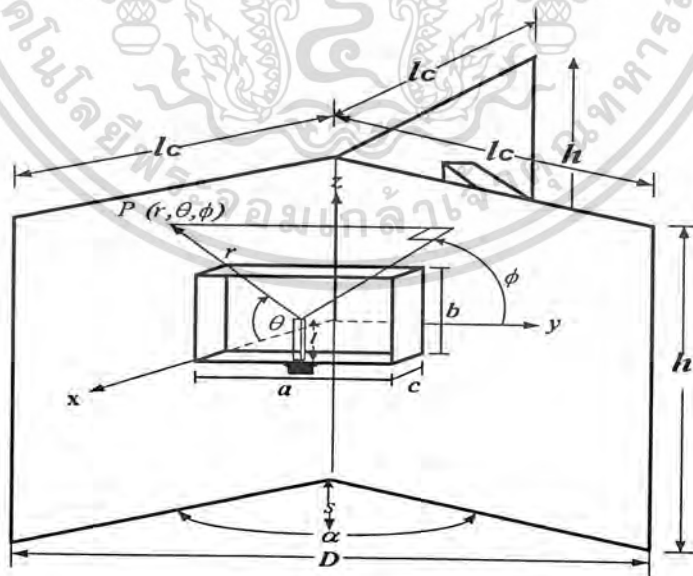
### 4.1 การสร้าง

จากผลการออกแบบและวิเคราะห์ในบทที่ 3 ได้ทำการสร้างสายอากาศตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยสายอากาศทำงานที่ความถี่ 1.8 GHz โดยมีขนาดที่ทำการสร้างเท่ากันทั้ง 3 ด้านดังนี้

ตัวสายอากาศป้อนสัญญาณวงแหวนสี่เหลี่ยมล้อมรอบโพรบไฟฟ้าเชิงเส้น มีค่าความกว้างของวงแหวนเท่ากับ  $0.69 \lambda$  (11.5cm) ค่าความสูงวงแหวนเท่ากับ  $0.35 \lambda$  (5.8cm) และค่าความยาวของวงแหวน ที่เลือกใช้เท่ากับ  $0.15 \lambda$  (2.5 cm) มีค่าความยาวโพรบเท่ากับ  $0.25 \lambda$  (4.2 cm)

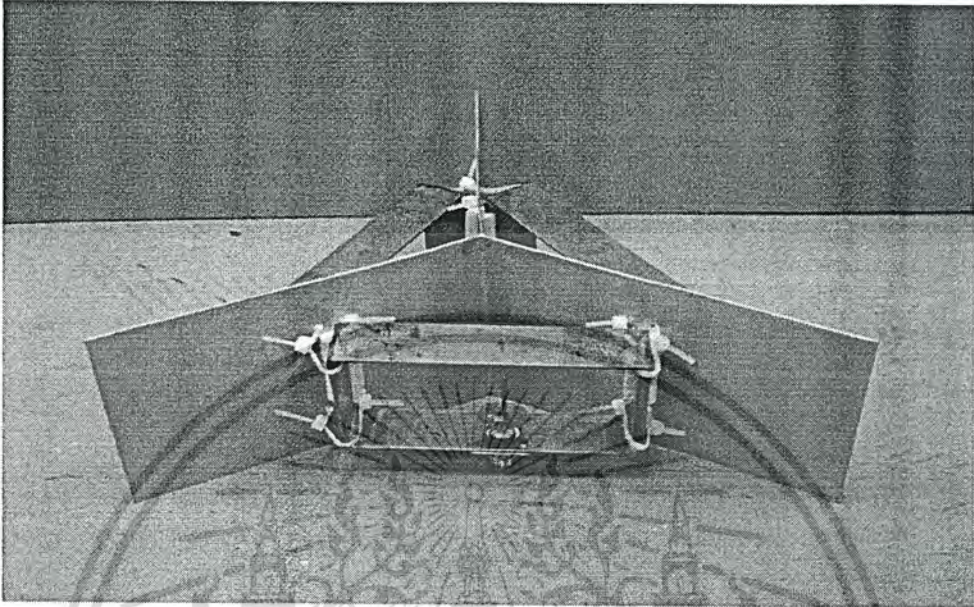
เมื่อทำการออกแบบตัวสะท้อนคลื่นมุม  $120^\circ$  พิจารณาผลการวิเคราะห์ร่วมกับโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2) จะได้ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับตัวป้อนสัญญาณ และขนาดของตัวสะท้อนแบบมุมที่เหมาะสมในการสร้างตามที่กล่าวในบทที่ 3 ซึ่งจะมีค่าตาม que เลือกไว้ประกอบไปด้วย ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นกับตัวป้อนสัญญาณ  $s = 0.3 \lambda$  (5cm) ความยาวของตัวสะท้อน  $l_c = 1.05 \lambda$  (17.5cm) และความสูงของตัวสะท้อนคลื่น  $h = 0.59 \lambda$  (10 cm)

โดยการทดสอบจะใช้การส่งจากสายอากาศแบบไดโพล ที่มีกระแสกระจายคลื่นรอบทิศทางเป็นตัวส่งสัญญาณที่ความถี่ 1.8GHz

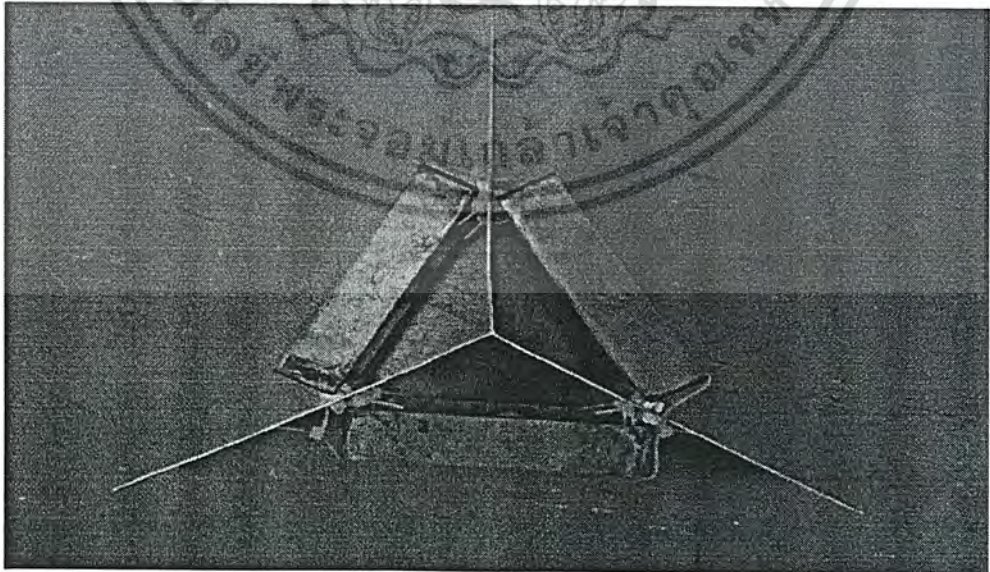


รูปที่ 4.1 สายอากาศ 3 เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

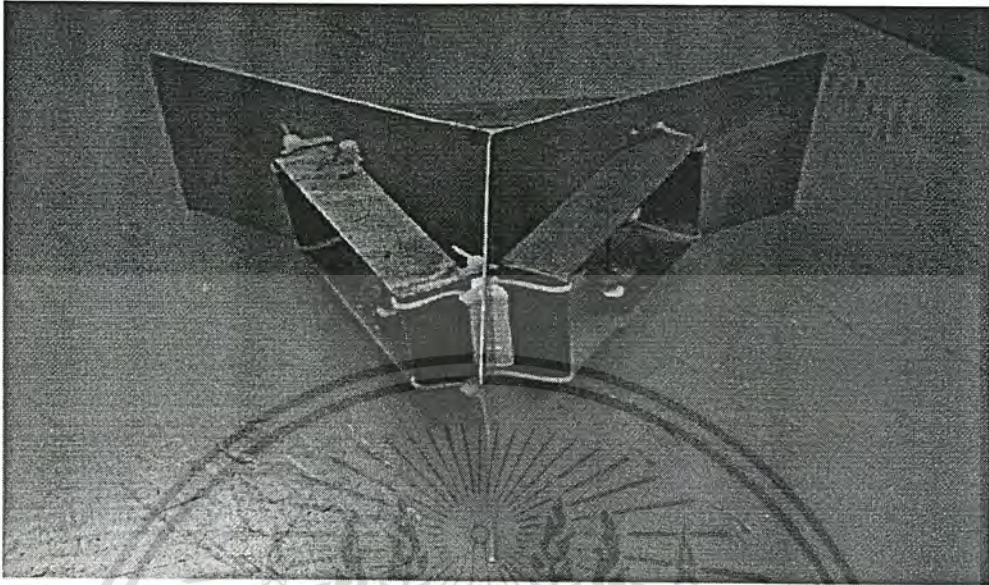


ก) สายอากาศ3เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยมทางด้านหน้า



ข) สายอากาศ3เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยมทางด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค) สายอากาศ 3 เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยมทางด้านข้าง

รูปที่ 4.2 สายอากาศ 3 เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเท่ากับที่ได้ทำการ  
ออกแบบ

#### 4.2 การวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ (Radiation Pattern)

ในการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศจะทำการวัดใน 2 ระนาบ คือ ระนาบ  
สนามไฟฟ้า หรือ ระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) และ ระนาบสนามแม่เหล็ก หรือ ระนาบมุมยก  
(Elevation Plane) โดยการวัดจะต้องมีการวางสายอากาศตัวส่งและตัวรับให้มีระยะห่างที่น้อยที่สุด  
เท่ากับ Far Field สามารถหาได้จากสมการ

$$R = \frac{2D^2}{\lambda}$$

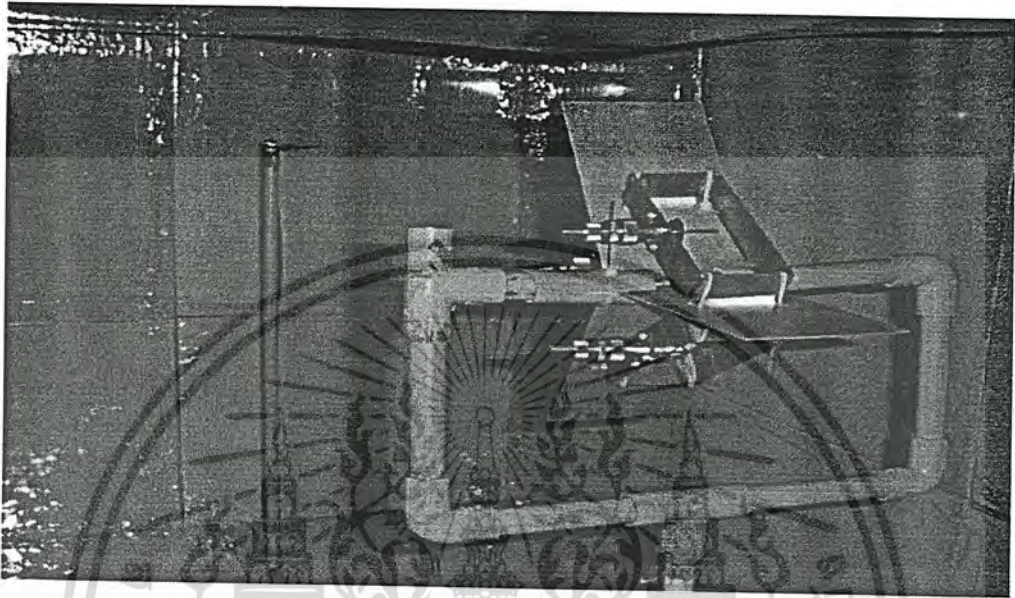
โดย  $R$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศที่น้อยที่สุด (m)

$D$  คือ มิติที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 การวัดในระนาบสนามไฟฟ้า

การวัดในรูปแบบนี้เป็นการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในสนามไฟฟ้า หรือระนาบมุมกวาด(Azimuth Plane) ซึ่งจะพิจารณาในส่วนของระนาบแกน  $xz$  ในแบบสามมิติ จะทำการวางสายอากาศเพื่อทดสอบคังรูป

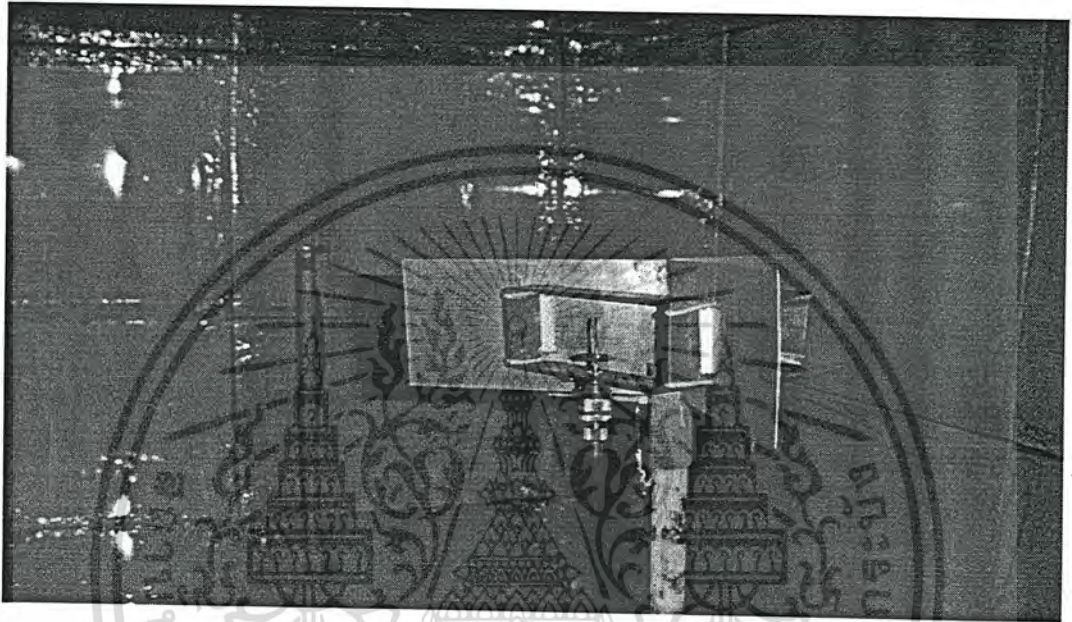


รูปที่4.3 การวางสายอากาศ3เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยม ส่งสัญญาณด้วยสายอากาศไดโพลใน ระนาบสนามไฟฟ้า ภายในห้องทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

จากรูปที่4.3 เป็นการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ3เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยม มุมใช้การส่งทดสอบด้วยสายอากาศแบบไดโพล โดยรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จะจะมีลักษณะออกมาในทิศทางเดียว ตามคุณลักษณะของสายอากาศแบบตัวสะท้อนคลื่นมุม โดยทิศทางของการแพร่กระจายคลื่น จะชี้ไปที่มุม90 องศา

#### 4.2.2 การวัดในระนาบสนามแม่เหล็ก

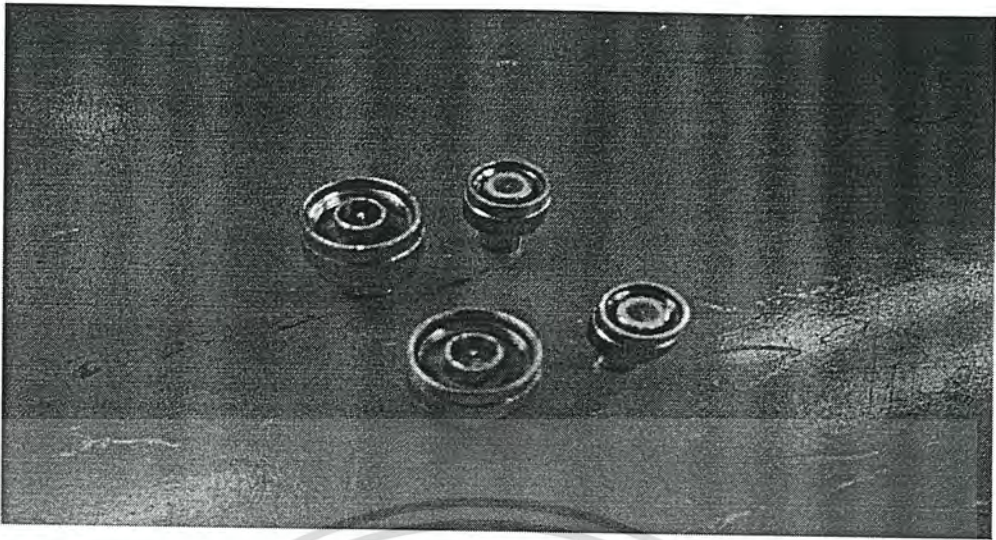
การวัดในรูปแบบนี้เป็นการหารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในสนามแม่เหล็ก หรือระนาบ มุมยก (Elevation Plane) ซึ่งจะพิจารณาในส่วนของระนาบแกน  $xy$  ในแบบสามมิติ จะทำการวาง สายอากาศเพื่อทดสอบดังรูป



รูปที่ 4.4 การวางสายอากาศ 3 เซกเตอร์ แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมวงแหวนสี่เหลี่ยม ส่งสัญญาณด้วย สายอากาศ ไดโพลในระนาบสนามแม่เหล็ก ภายในห้องทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

จากรูปที่ 4.4 เป็นการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 3 เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่น มุมวงแหวนสี่เหลี่ยม มุม ใช้การส่งทดสอบด้วยสายอากาศแบบ ไดโพล โดยรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ ได้จะมีลักษณะออกมาในทิศทางเดียว ตามคุณลักษณะของสายอากาศแบบตัวสะท้อนคลื่นมุม แต่จะมีมุมของ รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นที่ต่างกันเมื่อทำการทดสอบในด้าน

โดยการทดสอบจะทำการส่งด้วยไดโพล และรับด้วยสายอากาศที่ออกแบบ ที่ละด้านจนครบ 3 เซก เตอร์ โดยในด้านที่ยังไม่ได้ทำการรับสัญญาณจะทำการใส่โหลดที่มีอิมพีแดนซ์ขนาด  $50\Omega$  เพื่อผลการ รบกวนกันในแต่ละเซกเตอร์



รูปที่ 4.5 โหลดอิมพีแดนซ์ขนาด  $50\Omega$  ที่ใช้ในการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเซกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

1. เครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย Network Analyzer
2. สายอากาศที่ตัวรับ และสายอากาศตัวส่ง
3. สายนำสัญญาณ
4. เครื่อง Turn Table ที่ใช้ในการหมุนสายอากาศตัวรับ
5. ขาดังสำหรับใช้ในการการติดตั้งสายอากาศ
6. Conector ใช้เชื่อมต่อกับสายแบบต่างๆ
7. Signal Generator

#### 4.2.4 วิธีการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

1. ทำการปรับสภาวะเครื่อง Network Analyzer เป็นแบบ Trans port (S 21) คือ port 1 เป็นสายอากาศตัวส่ง (สายอากาศแบบไดโพล) และ port 2 เป็นสายอากาศรับ
2. ต่อสายนำสัญญาณกับสายอากาศเข้ากับ Signal Generator เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณ
3. กดปุ่ม CENTER เพื่อป้อนความถี่ที่ต้องการคือที่ความถี่ 1.8 GHz
4. กดปุ่ม CAL (Calibration) เลือก Response แล้วเลือก True ตามลำดับ
5. ที่หน้าจอของเครื่องจะมีค่าว่า cor ขึ้นมาถ้าทำการเซตเครื่องอย่างถูกต้อง
6. ทำการหมุนสายอากาศตัวรับที่ติดตั้งบนเครื่อง Turn Table ตั้งแต่ 0 องศาไปจนครบ 360 องศา โดยทำการหมุนทีละ 5 องศา หรือละเอียดกว่านั้น อ่านค่าที่ได้จากเครื่อง Network Analyzer แล้วทำการบันทึกค่าที่ได้จนครบ 360 องศา
7. นำค่าที่วัดได้ของสายอากาศแต่ละค่ามาทำการ Normalize โดยนำค่าที่ได้มาไปเขียนกราฟด้วยโปรแกรม Microsoft Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การคำนวณและการทดสอบ

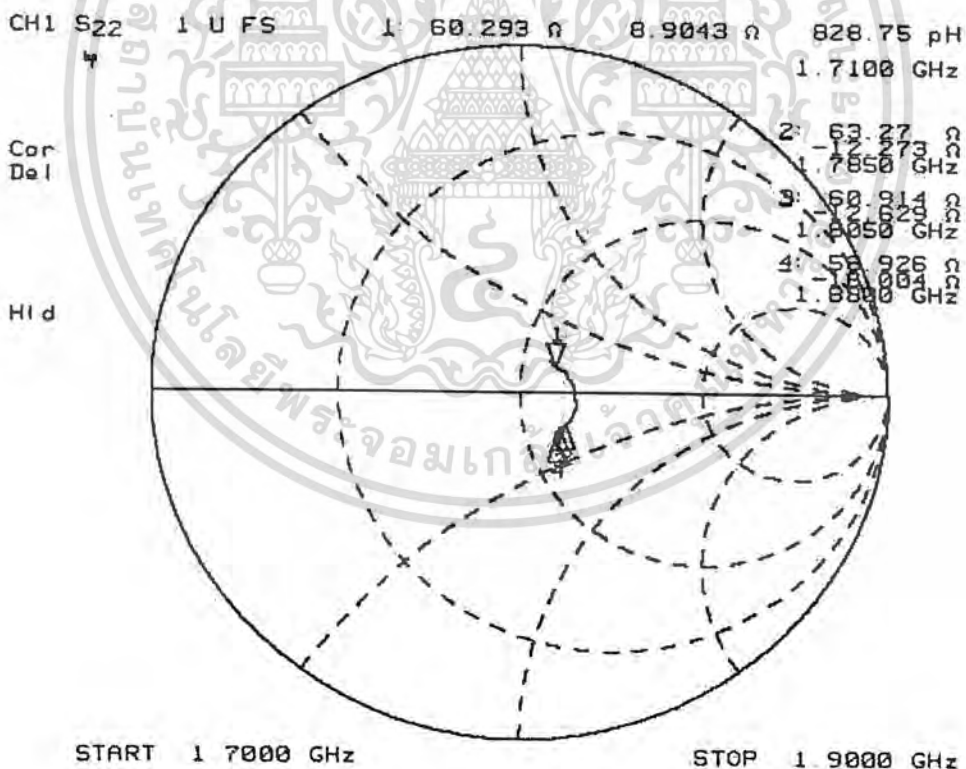
#### 5.1 การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

##### 5.1.1 การทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

การทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ เพื่อที่จะนำมาใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้แมชชิงกับอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณ มีค่าเท่ากับ  $50\Omega$  ซึ่งในการทดสอบควรให้ได้ค่าใกล้เคียงค่า  $50\Omega$  โดยทดสอบกับเครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย (Network analyzer) โดยทำการวัดที่ละด้านจนครบทั้ง 3 ด้านและทำการต่อโหลดขนาด  $50\Omega$  ให้กับสายอากาศในด้านที่ยังไม่ได้ทำการทดสอบ อีก 2 ด้าน

##### ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์

ผลการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบ 3 เซกเตอร์ โดยใช้สายอากาศแบบตัวสะท้อนคลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ในด้านที่ 1 (มุม 0 องศา)



รูปที่ 5.1 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์จากการทดลอง ด้านที่1ที่ความถี่ต่างๆ

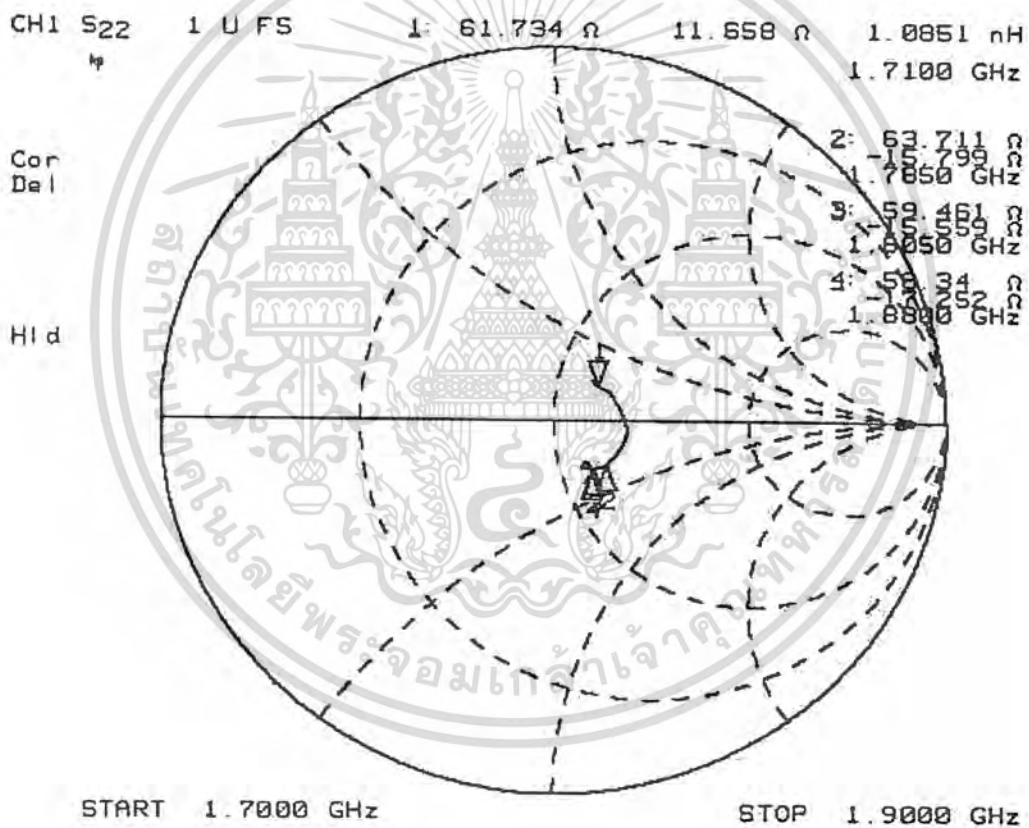
ความถี่ 1710MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $60.293 + j8.904 \Omega$

ความถี่ 1785MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $63.27 - j12.273 \Omega$

ความถี่ 1805MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $60.914 - j12.629 \Omega$

ความถี่ 1880MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $58.926 - j18.004 \Omega$

จากการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบ3เซกเตอร์โดยใช้สายอากาศแบบตัวสะท้อน คลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ในด้านที่2 (มุม 120 องศา)



รูปที่ 5.2 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 2 ที่มุม 120 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์จากการทดลอง ด้านที่2ที่ความถี่ต่างๆ

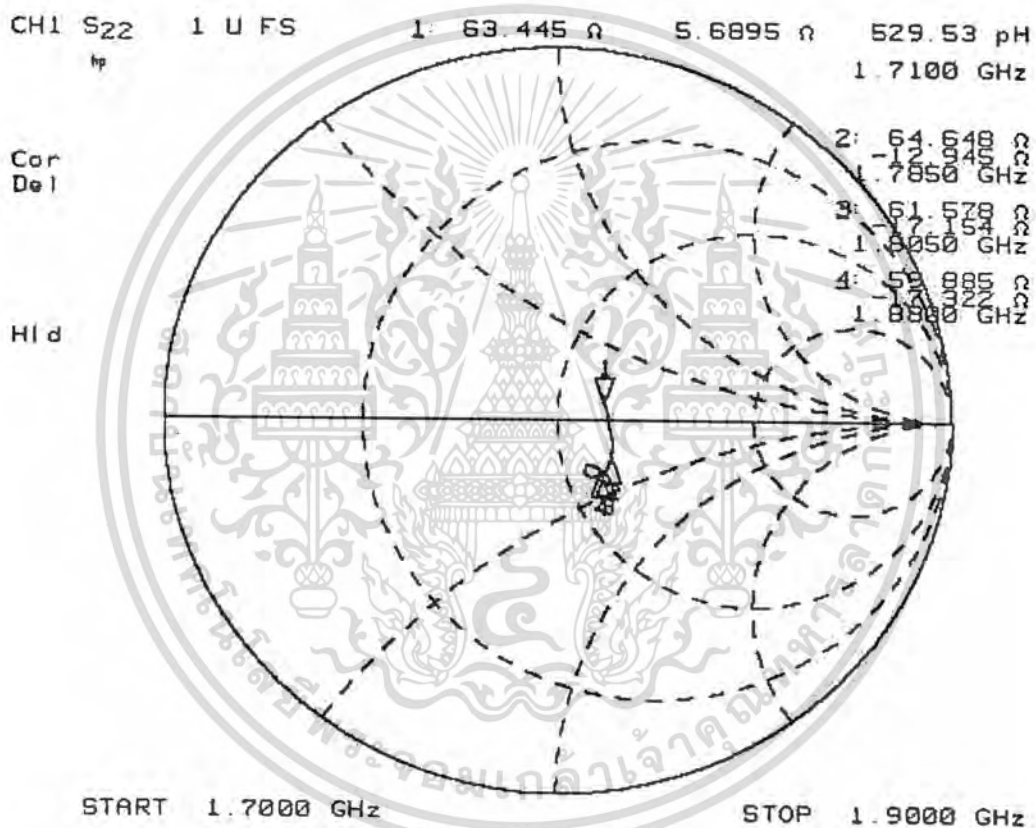
ความถี่ 1710MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $61.734 + j11.658\Omega$

ความถี่ 1785MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $63.711 - j15.799\Omega$

ความถี่ 1805MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $59.463 - j15.559\Omega$

ความถี่ 1880MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $58.340 - j17.752\Omega$

จากการทดสอบวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบ3เซกเตอร์โดยใช้สายอากาศแบบตัวสะท้อน คลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ในด้านที่3 (มุม 240 องศา)



รูปที่ 5.3 ค่า อิมพีแดนซ์ ด้านที่ 3 ที่มุม 240 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

ผลการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์จากการทดลอง ด้านที่3ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่ 1710MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $63.445 + j5.6895\Omega$

ความถี่ 1785MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $64.648 - j12.945\Omega$

ความถี่ 1805MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $61.578 - j17.154\Omega$

ความถี่ 1880MHz มีค่า อิมพีแดนซ์ =  $59.885 - j17.322\Omega$

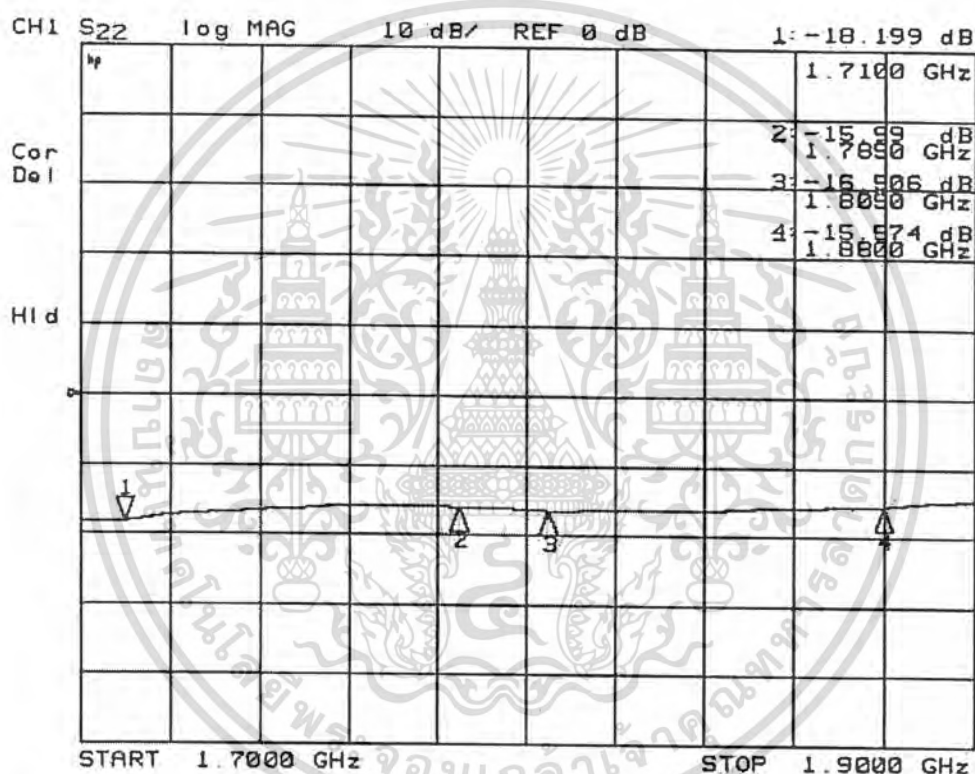
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การทดสอบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss)

โดยทั่วไป ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ที่ยอมรับได้ ควรมีค่าน้อยกว่า -10 dB

ผลการทดสอบค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) ที่ได้ทำการทดสอบกับ เครื่องวิเคราะห์ระบบ โครงข่าย (Network analyzer)

จากการทดสอบวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบ 3 เซกเตอร์ โดยใช้สายอากาศแบบ ตัวสะท้อน กลิ่นมูมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ในด้านที่ 1 (มุม 0 องศา)



รูปที่ 5.4 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบด้านที่ 1 ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

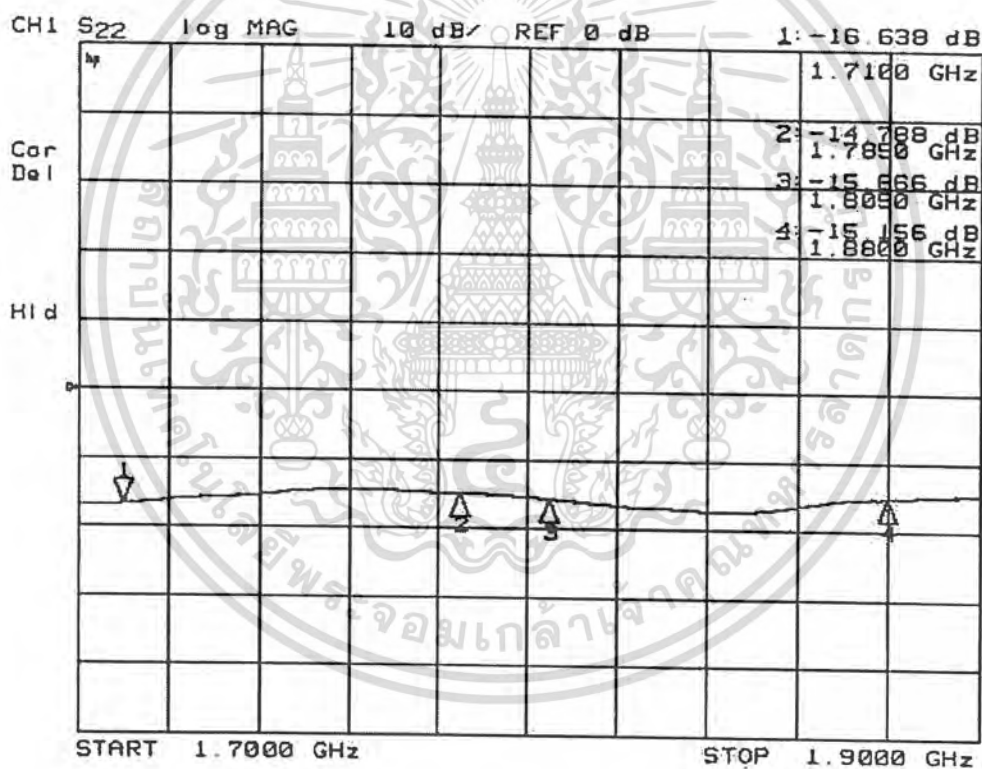
ความถี่ 1710MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -18.199dB

ความถี่ 1785MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -15.99 dB

ความถี่ 1805MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -16.506dB

ความถี่ 1880MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -15.574dB

จากการทดสอบวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบ3เซกเตอร์โดยใช้สายอากาศแบบ  
ตัวสะท้อน คลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ในด้านที่2 (มุม 120 องศา)



รูปที่ 5.5 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ด้านที่ 2 ที่มุม 120 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบด้านที่ 2 ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

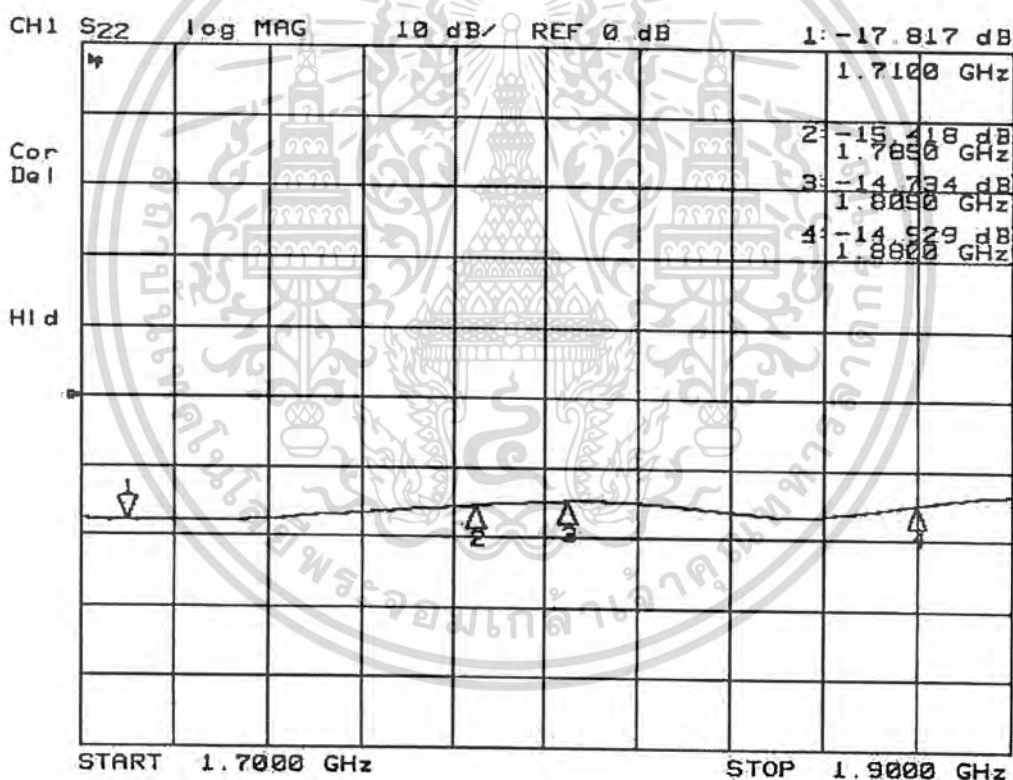
ความถี่ 1710MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -16.638dB

ความถี่ 1785MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -14.788 dB

ความถี่ 1805MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -15.866dB

ความถี่ 1880MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -15.156dB

จากการทดสอบวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบ3เซกเตอร์โดยใช้สายอากาศแบบ  
ตัวสะท้อน คลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ในด้านที่3 (มุม 240 องศา)



รูปที่ 5.6 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ด้านที่ 3 ที่มุม 240 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบด้านที่ 3 ได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ที่ความถี่ต่างๆ ดังนี้

ความถี่ 1710MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -17.817dB

ความถี่ 1785MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -15.418dB

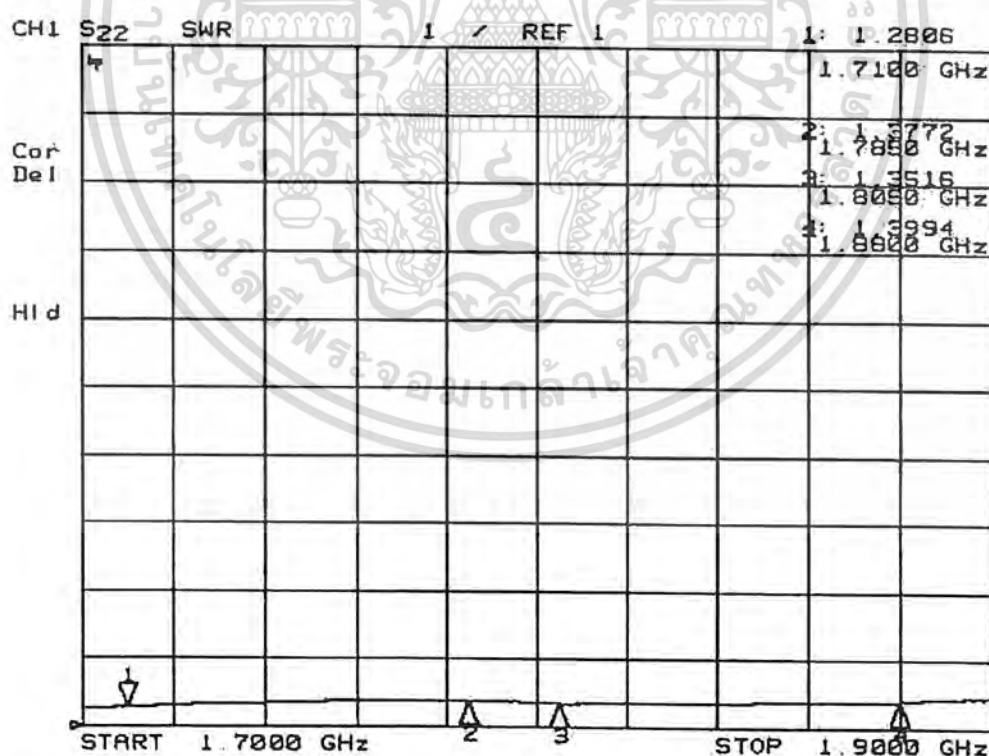
ความถี่ 1805MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -14.734dB

ความถี่ 1880MHz มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ = -14.929dB

### 5.1.3 การทดสอบอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ

อัตราส่วนคลื่นนิ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่ง ที่ใช้พิจารณาว่าสายอากาศที่นำมาทดสอบมี ประสิทธิภาพดีเพียงพอต่อการนำสายอากาศไปใช้งานได้หรือไม่ โดยค่า SWR นี้จะแสดงถึงความแรงของ การแทรกสอดของคลื่นส่งผ่าน และคลื่นที่สะท้อนกลับ นั่นคือถ้า SWR มีค่ามาก แสดงถึงการแทรกสอด เกิดขึ้นสูง ดังนั้นค่า SWR ที่ดีที่สุดคือ SWR ที่ค่า 1:1 ในการใช้งานโดยทั่วไปแล้ว ค่า SWR ตามมาตรฐาน จะยอมให้เกิดขึ้นได้ จะต้องไม่ค่าไม่เกิน 2:1

จากการทดสอบวัดค่า SWR ของสายอากาศแบบ 3 เซกเตอร์ โดยใช้สายอากาศแบบตัวสะท้อน คลื่น มุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ในด้านที่ 1 (มุม 0 องศา)



รูปที่ 5.7 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ด้านที่ 1 ที่มุม 0 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบค่าSWRจากการทดลอง ด้านที่1ที่ความถี่ต่างๆ

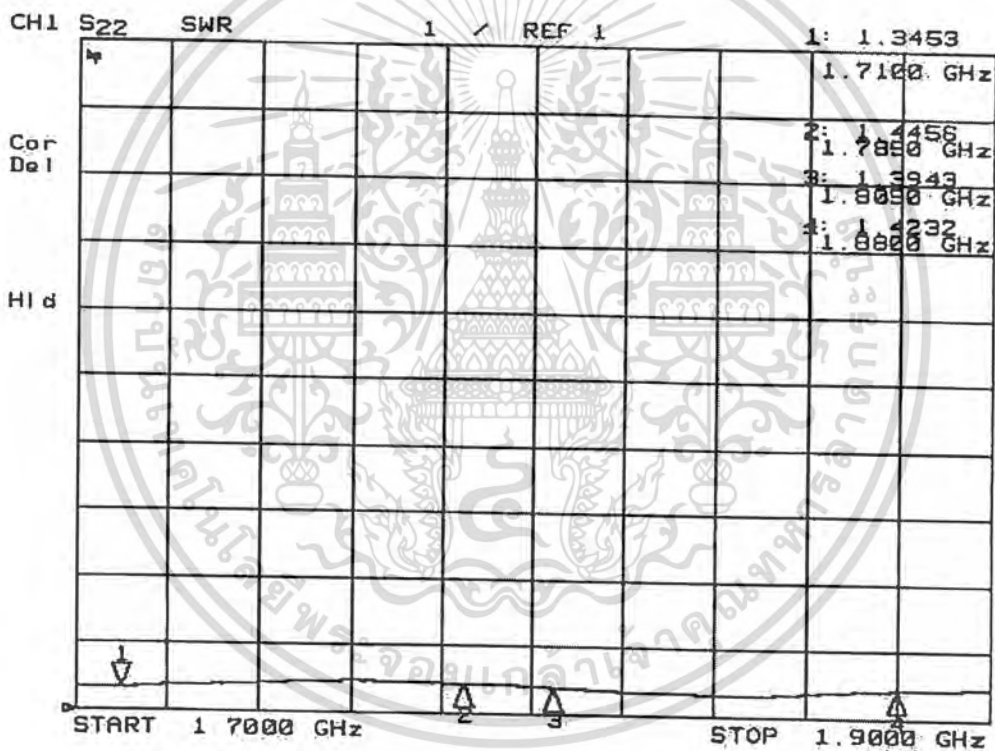
ความถี่ 1710MHz มีค่า SWR = 1.2806:1

ความถี่ 1785MHz มีค่า SWR = 1.3772:1

ความถี่ 1805MHz มีค่า SWR = 1.3516:1

ความถี่ 1880MHz มีค่า SWR = 1.3994:1

จากการทดสอบวัดค่าSWRของสายอากาศแบบ3เซกเตอร์โดยใช้สายอากาศแบบตัวสะท้อน คลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ในด้านที่2 (มุม 120 องศา)



รูปที่ 5.8 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ด้านที่ 2 ที่มุม 120 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

ผลการทดสอบค่าSWRจากการทดลอง ด้านที่2ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่ 1710MHz มีค่า SWR = 1.3453:1

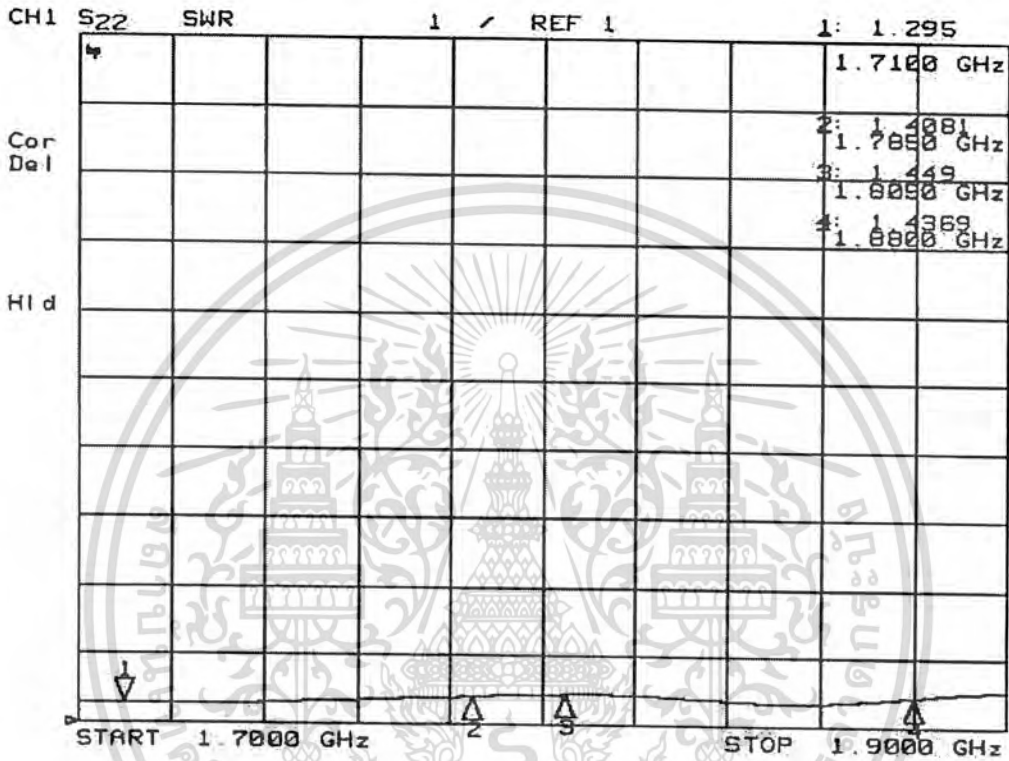
ความถี่ 1785MHz มีค่า SWR = 1.4456:1

ความถี่ 1805MHz มีค่า SWR = 1.3943:1

ความถี่ 1880MHz มีค่า SWR = 1.4232:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบวัดค่าSWRของสายอากาศแบบ3เซกเตอร์โดยใช้สายอากาศแบบตัวสะท้อน คลื่นมุมแบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ในด้านที่2 (มุม 240 องศา)



รูปที่ 5.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ด้านที่ 3 ที่มุม 240 องศา จากเครื่อง Network Analyzer

ผลการทดสอบค่าSWRจากการทดลอง ด้านที่3ที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่ 1710MHz มีค่า SWR = 1.2950:1

ความถี่ 1785MHz มีค่า SWR = 1.4081:1

ความถี่ 1805MHz มีค่า SWR = 1.4490:1

ความถี่ 1880MHz มีค่า SWR = 1.4369:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

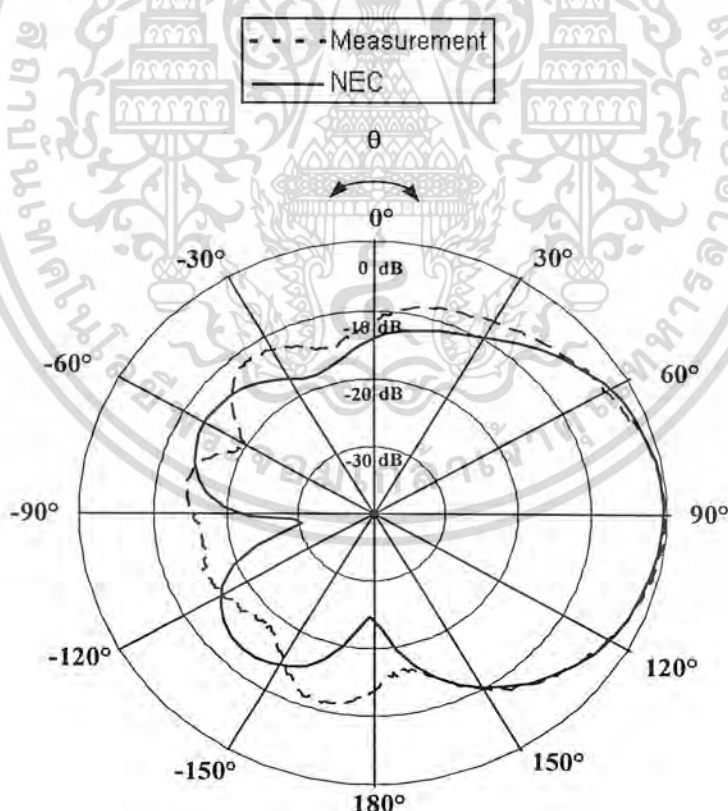
## 5.2 การทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การทดสอบทั้งหมด ได้ทำการทดสอบภายในห้องทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น แสดงค่าได้โดยผ่านเครื่องวิเคราะห์ระบบโครงข่าย (Network Analyzer) และ โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC2) ซึ่งการวิเคราะห์ เพื่อนำไปใช้เป็นฐานข้อมูลในระบบ1800MHz โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าต่างๆที่ความถี่ UP-Link (1710MHz-1785MHz) และ Down-Link (1805MHz-1880MHz) ของระบบ1800MHz

โดยทำการวัดที่ละด้านจนครบทั้ง3ด้านและทำการต่อโหนดขนาด50Ω ให้กับสายอากาศในด้านที่ยังไม่ได้ทำการทดสอบ อีก2ด้าน ในระหว่างการทดสอบ เพื่อหาค่าที่ต้องการโดยนำข้อมูลที่นำมาทำการพล็อตกราฟโดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เปรียบเทียบกัน

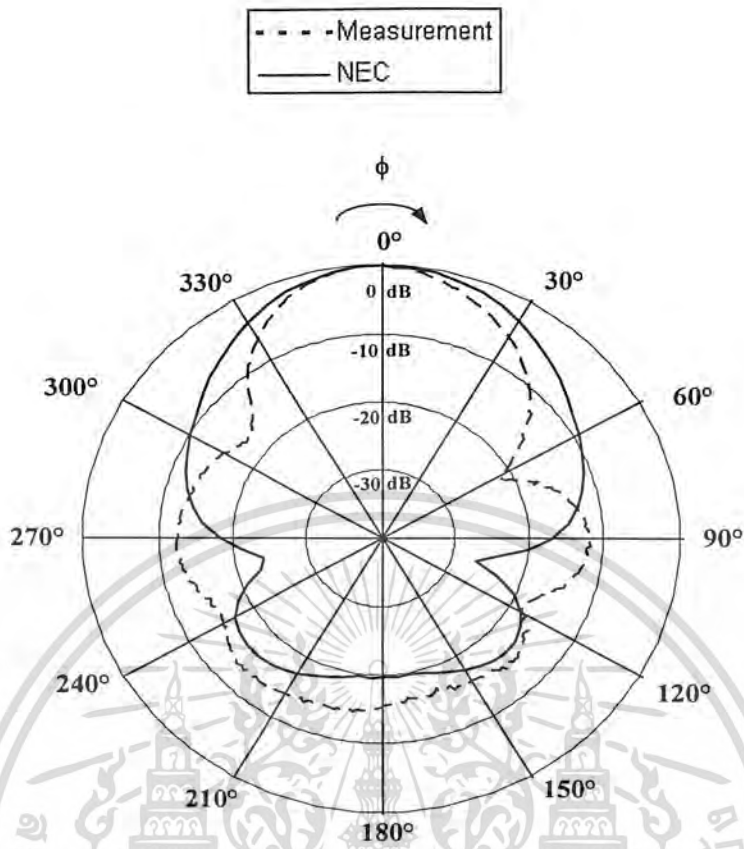
### 5.2.1 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยม ด้านที่1มุม 0องศา

#### 5.2.1.1 ความถี่1710MHz



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1710MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



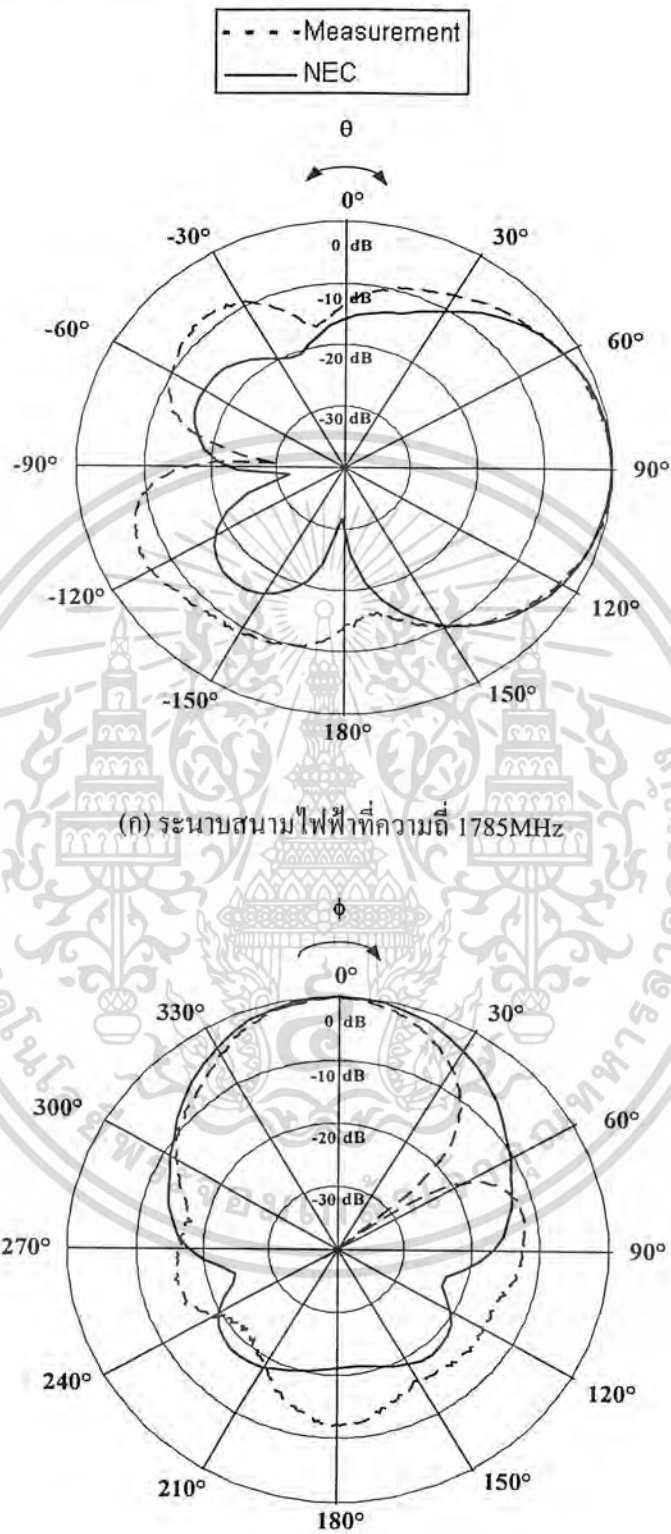
(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1710 MHz

รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 1 มุม 0 องศา ที่ความถี่ 1710 MHz

รูปที่ 5.10 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด 3 เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม 120° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่ 1 มุม 0 องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800 MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระบายสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโบลหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโบลหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่ติดตั้งควรที่จะมีค่าโบลหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม 90 องศา จากรูป (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 0 องศาตามที่ต้องการได้ใกล้เคียงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2.1.2 ความถี่ 1785 MHz



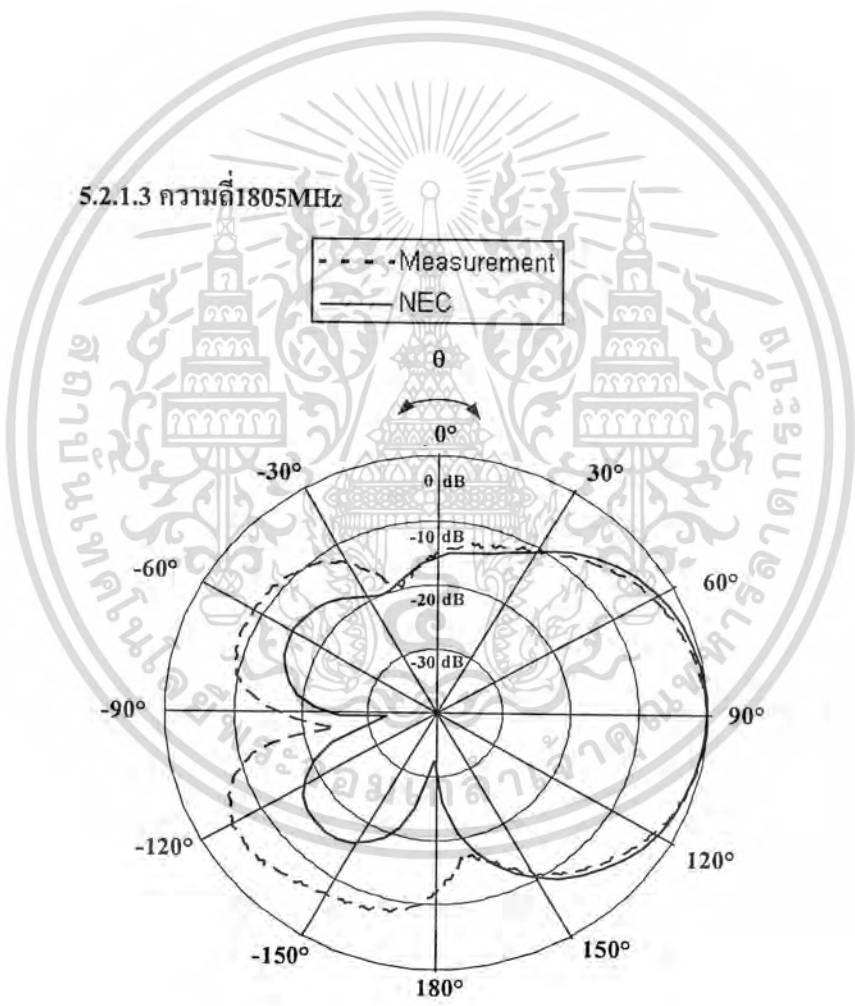
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1785 MHz

(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1785 MHz

## รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 1 มุม 0 องศา

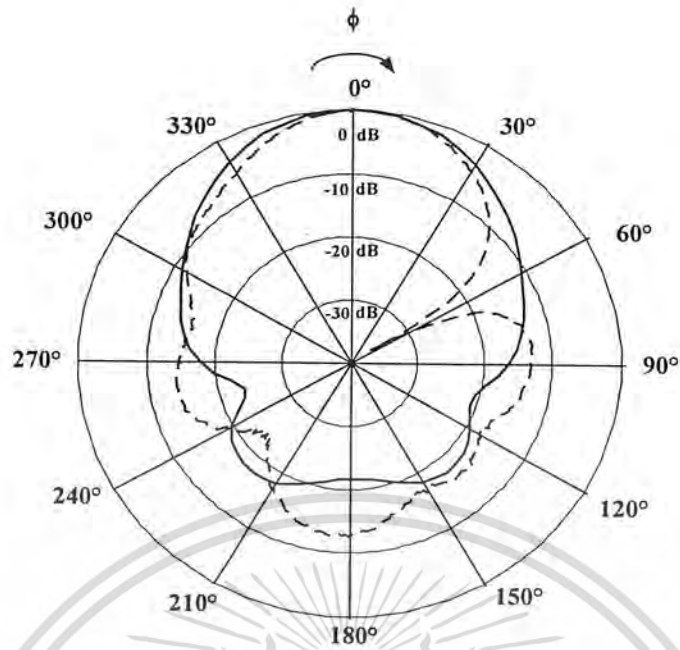
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ที่ความถี่ 1785 MHz เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.11 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด3เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม 120° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่1 มุม0องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโลบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโลบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่คืนั้นควรที่จะมีค่าโลบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม90 องศา จากรูป (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 0 องศาตามที่ต้องการได้ใกล้เคียงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800MHz



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1805MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

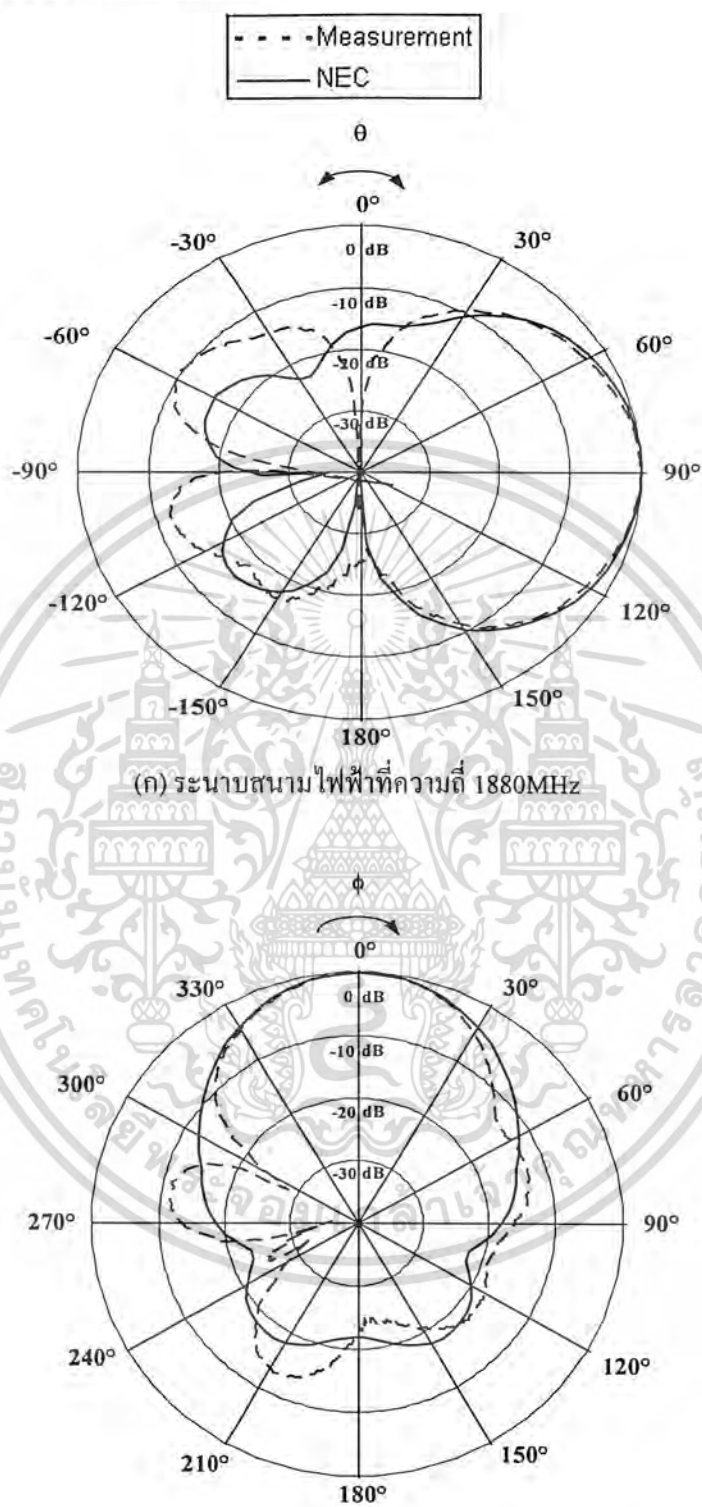


(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1805 MHz

รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 1 มุม 0 องศา ที่ความถี่ 1805 MHz

รูปที่ 5.12 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด 3 เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม  $120^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่ 1 มุม 0 องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800 MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระบายสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโอบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโอบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่ติดตั้งนั้นควรที่จะมีค่าโอบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม 90 องศา จากรูป (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 0 องศาตามที่ต้องการได้ไกลจึงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800 MHz

## 5.2.1.4 ความถี่ 1880 MHz



รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 1 มุม 0 องศา  
ที่ความถี่ 1880 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

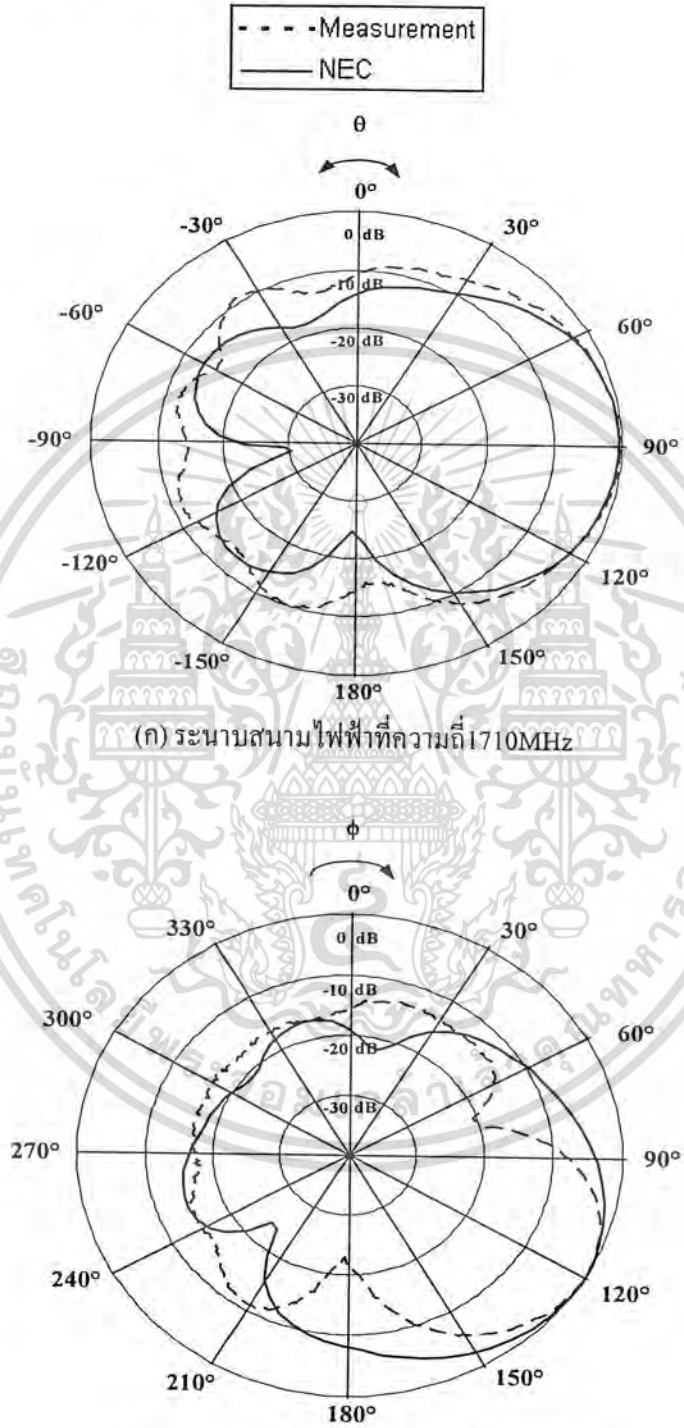
รูปที่ 5.13 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด3เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม  $120^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่1 มุม0องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระบายสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโลบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโลบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่ดีนั้นควรที่จะมีค่าโลบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม90 องศา จากรูป (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 0 องศาตามที่ต้องการได้ใกล้เคียงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800MHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยม  
ด้านที่ 2 มุม 120 องศา

5.2.2.1 ความถี่ 1710 MHz



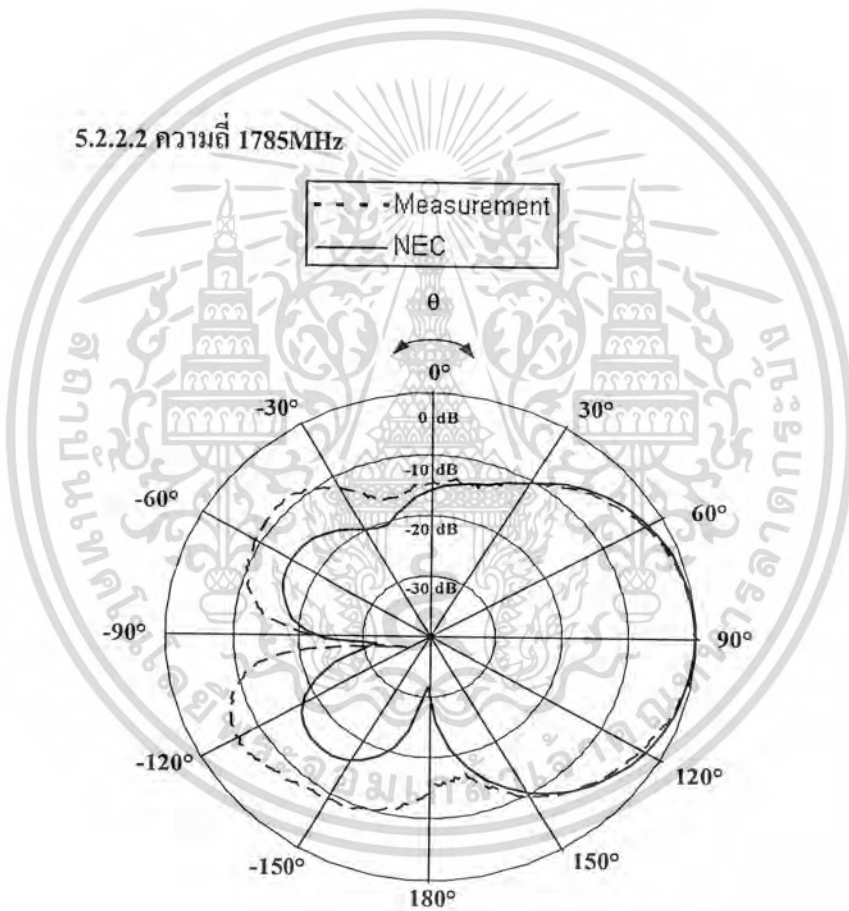
(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1710 MHz

รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 2 มุม 120 องศา  
ที่ความถี่ 1710 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

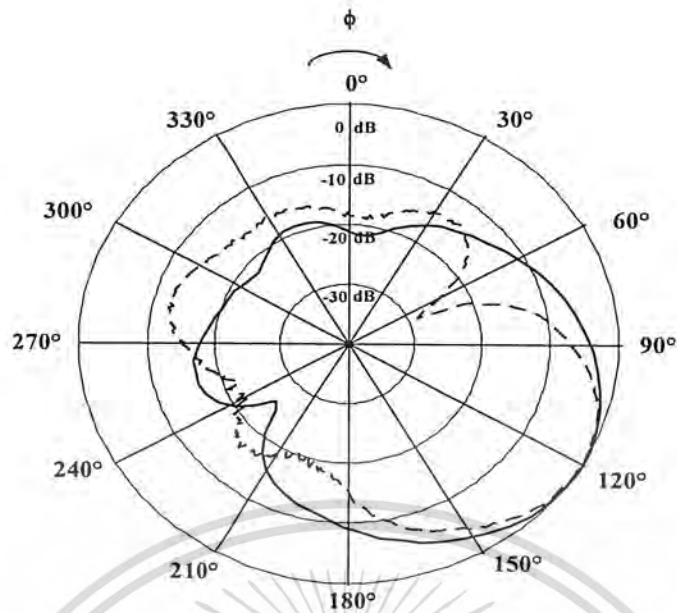
รูปที่ 5.14 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด3เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม 120° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่1 มุม0องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระบุบนสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโลบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโลบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่คั่นควรรที่จะมีค่าโลบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม90 องศา จากรูป (ข) ระบุบนสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 120 องศาตามที่ต้องการได้ไกลจึงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800MHz

5.2.2.2 ความถี่ 1785MHz



(ก) ระบุบนสนามไฟฟ้าที่ความถี่1785MHZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



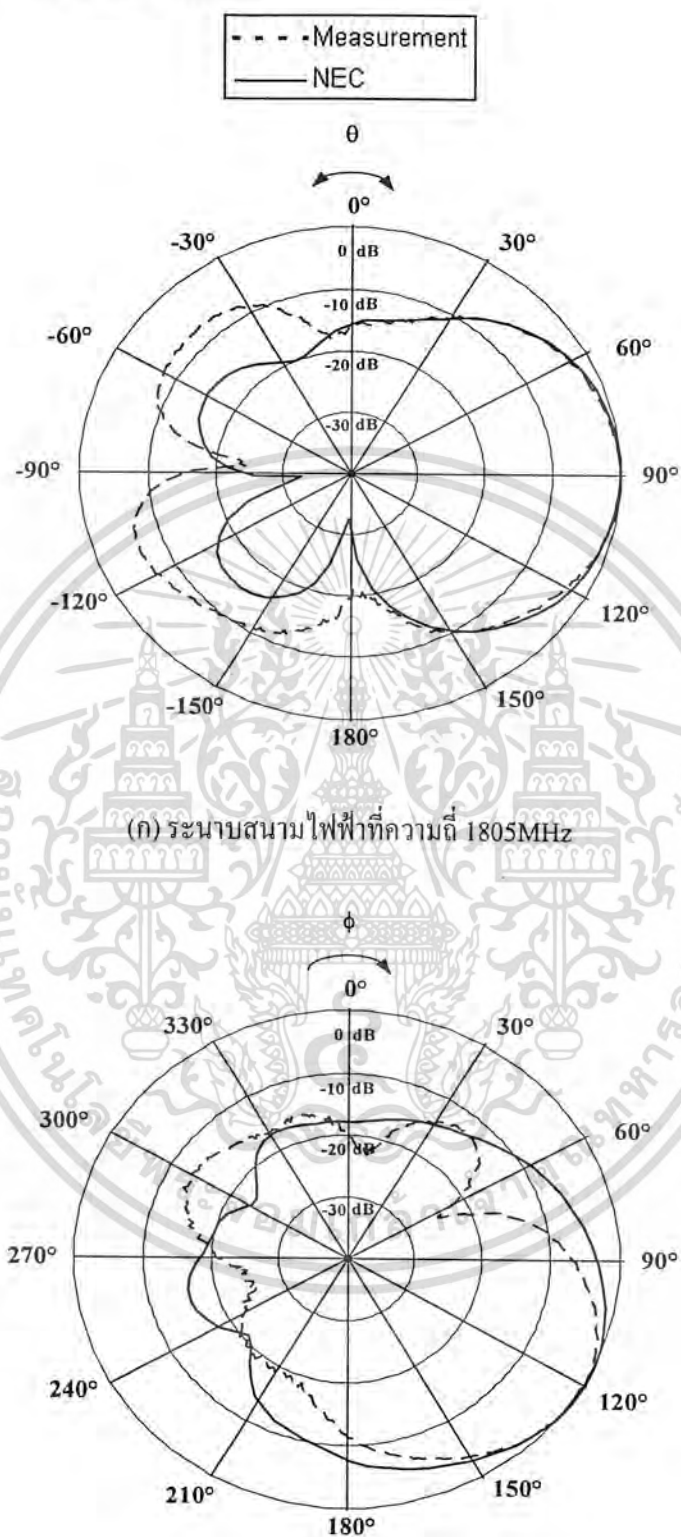
(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1785MHz

รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 2 มุม 120 องศา ที่ความถี่ 1785 MHz

รูปที่ 5.15 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด 3 เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม 120° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่ 1 มุม 0 องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระบายสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโบลหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโบลหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่ติดตั้งควรที่จะมีค่าโบลหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม 90 องศา จากรูป (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 120 องศาตามที่ต้องการได้ไกลจึงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2.2.3 ความถี่ 1805MHz



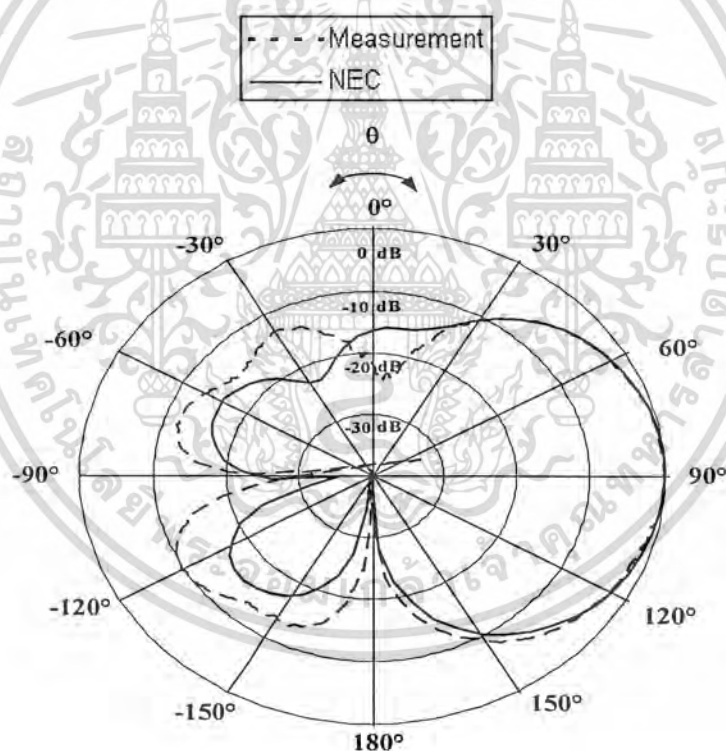
(ข) ระบุสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1805 MHz

รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 2 มุม 120 องศา  
ที่ความถี่ 1805 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

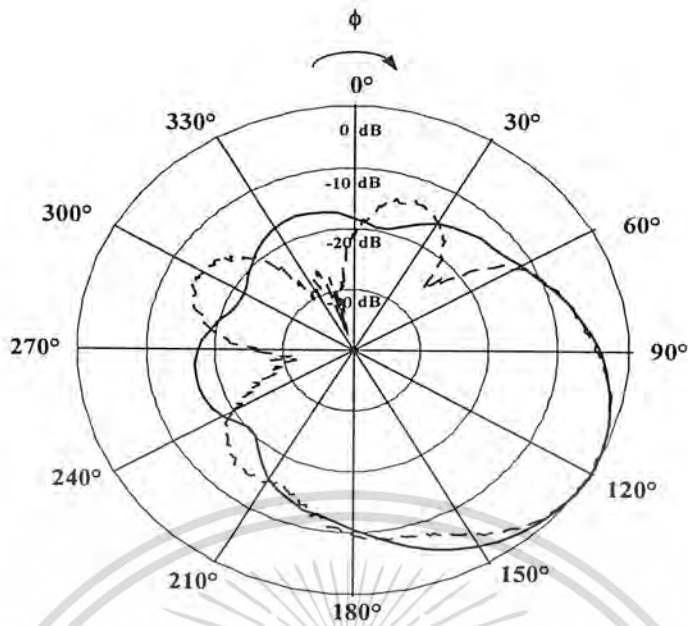
รูปที่ 5.16 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด3เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม  $120^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่1 มุม0องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระบายสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโลบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโลบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่ติดตั้งควรที่จะมีค่าโลบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม90 องศา จากรูป (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 120 องศาตามที่ต้องการได้ใกล้เคียงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800MHz

#### 5.2.2.4 ความถี่ 1880MHz



(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1880MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



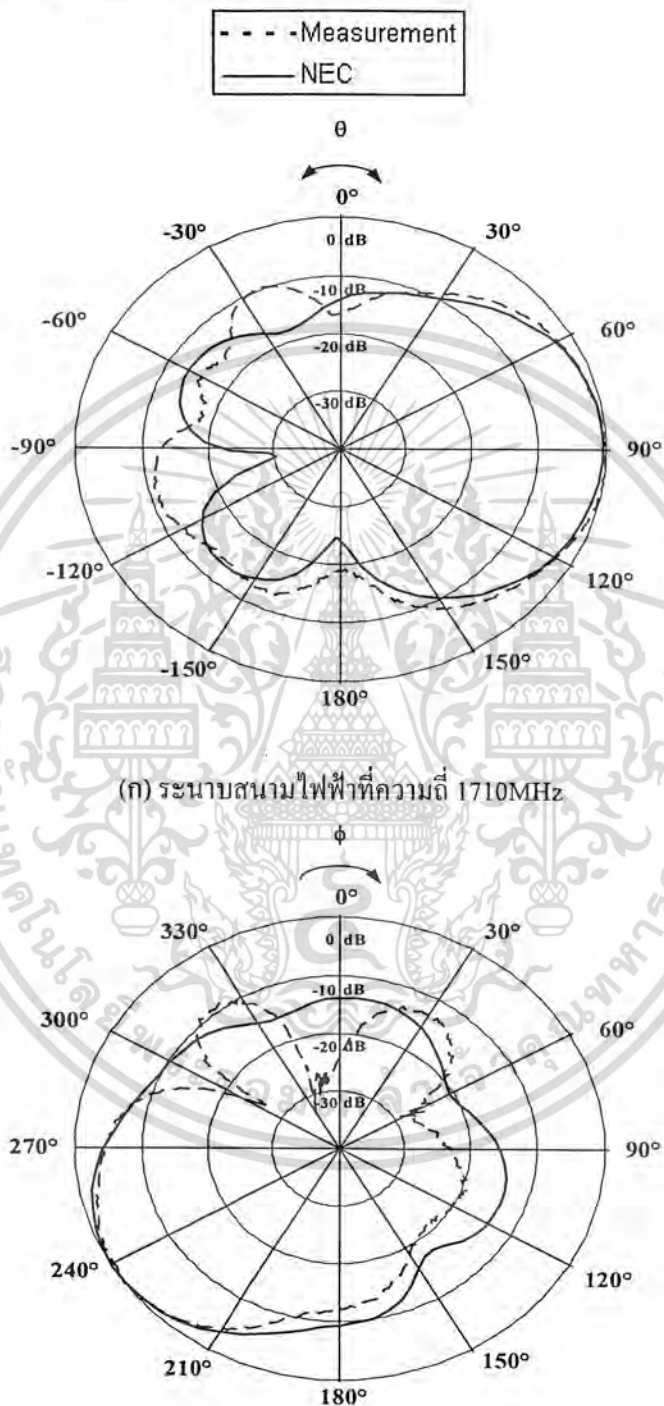
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1880 MHz

รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบสายอากาศเชกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 2 มุม 120 องศา ที่ความถี่ 1880 MHz

รูปที่ 5.17 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด 3 เชกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม 120° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่ 1 มุม 0 องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800 MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโลบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับ โลบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่ติดตั้งควรที่จะมีค่าโลบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม 90 องศา จากรูป (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเงาจะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 120 องศาตามที่ต้องการได้ใกล้เคียงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบเชกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800 MHz

5.2.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยม  
 ด้านที่3 มุม 240องศา

5.2.3.1 ความถี่ 1710MHz



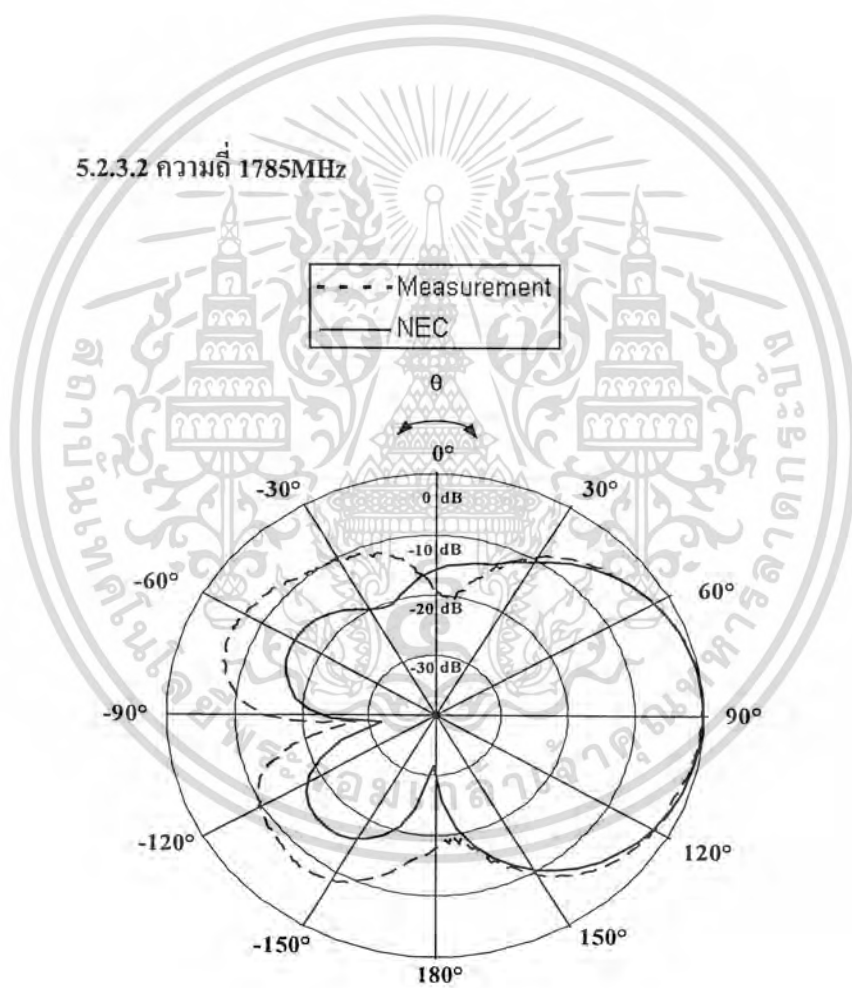
(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1710MHz

(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1710MHz

รูปที่ 5.18 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่3 มุม 240 องศา

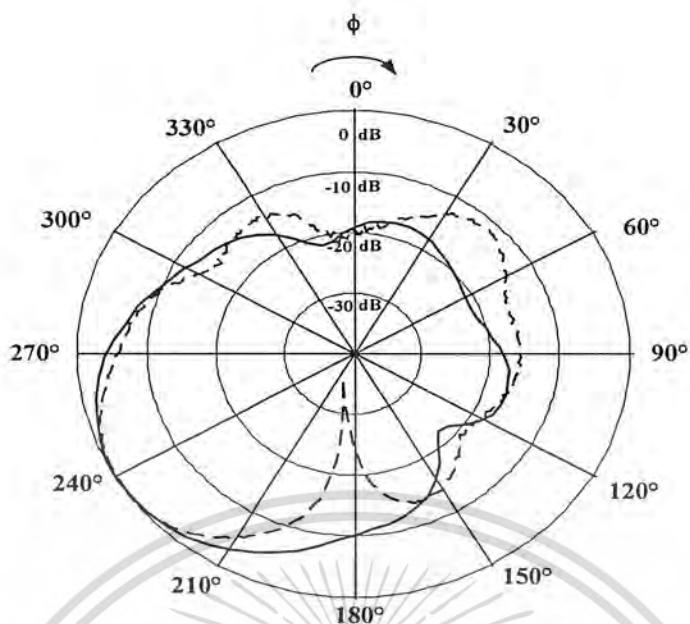
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนที่ความถี่ 1710 MHz เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.18 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด3เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม  $120^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่1 มุมองศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระบุสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโลบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโลบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่คืนันควรที่จะมีค่าโลบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม90 องศา จากรูป (ข) ระบุสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 240 องศาตามที่ต้องการได้ใกล้เคียงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800MHz



(ก) ระบุสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1785MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

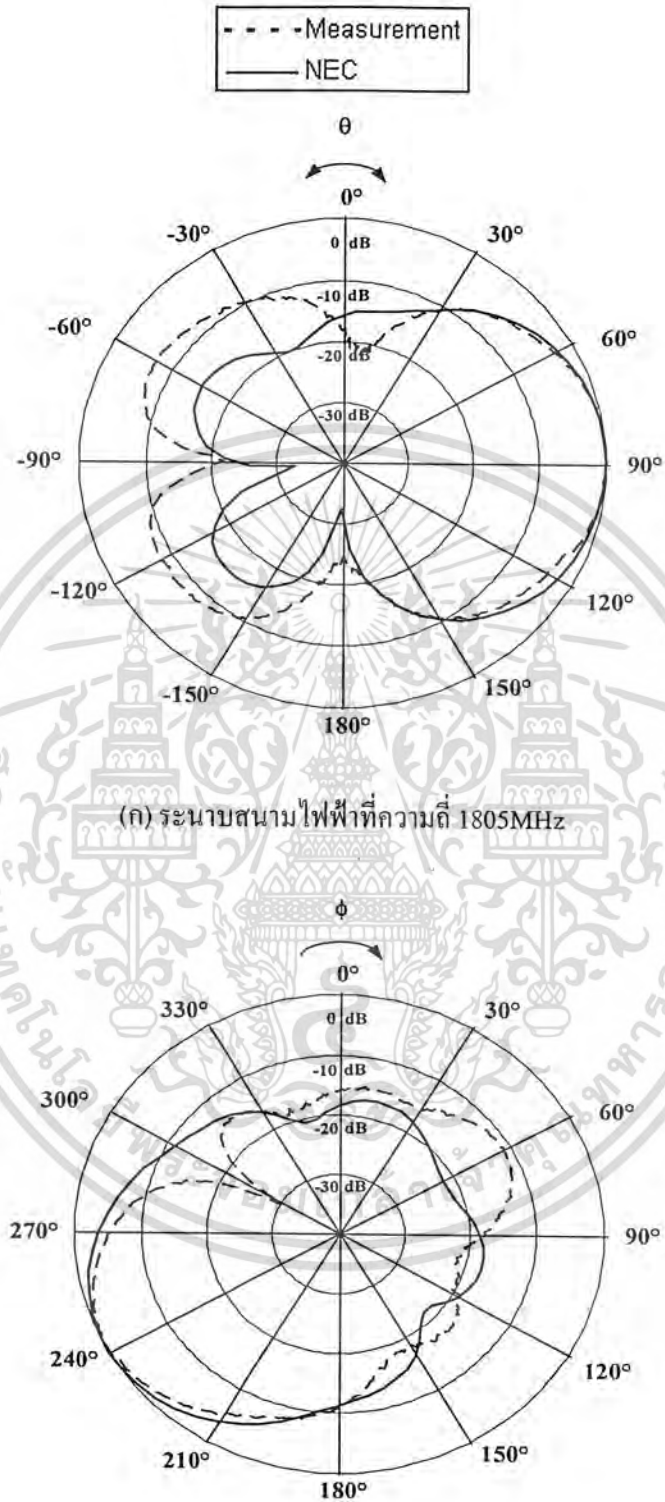


(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1785 MHz

รูปที่ 5.19 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 3 มุม 240 องศา  
ที่ความถี่ 1785 MHz

รูปที่ 5.19 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด 3 เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นที่มีมุม  $120^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่ 1 มุม 0 องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800 MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโลบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโลบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่ติดตั้งควรที่จะมีค่าโลบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม 90 องศา จากรูป (ข) ระนาบสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 240 องศาตามที่ต้องการ ได้ไกลจึงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800 MHz

### 5.2.3.3 ความถี่ 1805MHz



(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1805MHz

(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1805MHz

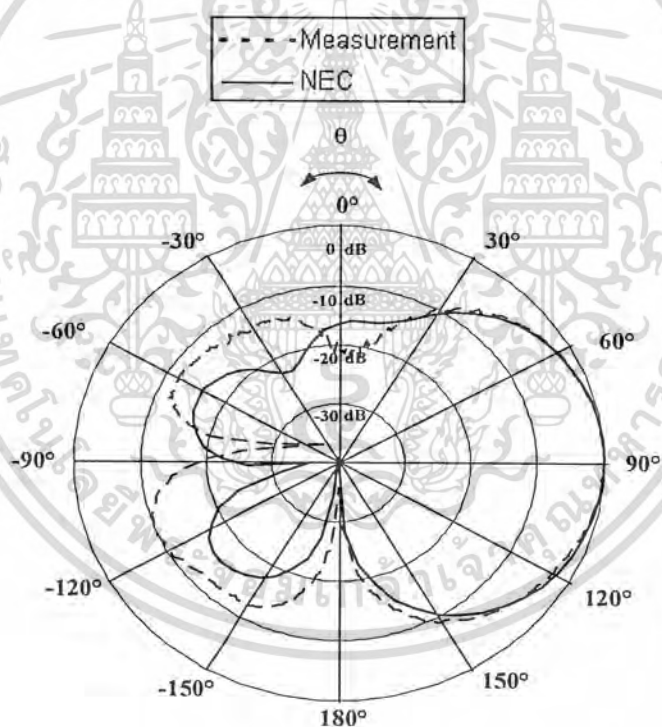
### รูปที่ 5.20 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 3 มุม 240 องศา

#### ที่ความถี่ 1805MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

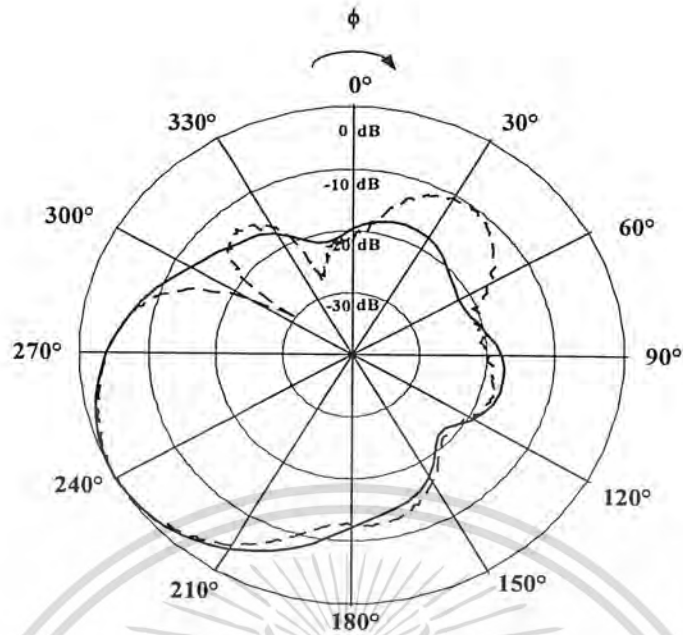
รูปที่ 5.20 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด3เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม  $120^\circ$  ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่1 มุมองศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระบายสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโลบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโลบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่ได้นั้นควรที่จะมีค่าโลบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม90 องศา จากรูป (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 240 องศาตามที่ต้องการได้ใกล้เคียงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800MHz

#### 5.2.3.4 ความถี่ 1880MHz



(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 1880MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 1880 MHz

รูปที่ 5.21 ผลการทดสอบสายอากาศเซกเตอร์แบบวงแหวนสี่เหลี่ยมด้านที่ 3 มุม 240 องศา ที่ความถี่ 1880 MHz

รูปที่ 5.21 แสดงผลของการทดสอบสายอากาศชนิด 3 เซกเตอร์แบบตัวสะท้อนคลื่นมุมที่มีมุม 120° ที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมในด้านที่ 1 มุม 0 องศา ตามความถี่การใช้งานของระบบ 1800 MHz จะเห็นได้ว่าที่ (ก) ระบายสนามไฟฟ้า จะเกิดค่าของโลบหลังที่อยู่ตรงกันข้ามกับโลบหลักมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าจากการวิเคราะห์เพื่อทำการออกแบบด้วยโปรแกรม NEC2 ซึ่งสายอากาศที่ได้นั้นควรที่จะมีค่าโลบหลัง ที่น้อยที่สุด และชี้ในทิศทางมุม 90 องศา จากรูป (ข) ระบายสนามแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่า ช่วงความกว้างของลำคลื่นที่แคบ เป็นการแสดงให้เห็นว่ามีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง คลื่นสามารถเดินทาง ไปในทิศทางมุม 240 องศาตามที่ต้องการได้ใกล้เคียงเหมาะแก่การนำมาใช้ทำเป็นสายอากาศแบบ เซกเตอร์ของสถานีฐานย่านความถี่ 1800 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 การวัดอัตราขยายของสายอากาศ (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศ เป็นสิ่งที่ยากคุณสมบัติที่สำคัญ ของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศซึ่งทดสอบ โดยการวางสายอากาศทั้ง ทางด้านรับ และทางด้านส่ง ห่างกันในระยะ R ซึ่งต้องวางให้มีระยะห่างกันมากกว่าระยะสนามไกล และสายอากาศทั้งสองต้องมีการโพลาไรซ์ที่เหมือนกันด้วย จากนั้นเตรียมการทดสอบ โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Generator) ป้อนให้สายส่ง โดยจ่ายสัญญาณ ที่ความถี่ 1800 MHz ด้วยกำลังส่ง 0 dBm ส่วน สายอากาศทางด้านรับจะต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) โดยค่ากำลังที่ได้รับได้ จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าอัตราขยายของสายอากาศต่อไป

จากสมการของ Friis Free Space Link Equation

$$G_r \text{ (dBi)} = P_r \text{ (dBm)} - P_t \text{ (dBm)} - G_t \text{ (dBi)} + L_r \text{ (dBm)} + L_t \text{ (dBm)} + L_s \text{ (dBm)}$$

เมื่อ คุณสมบัติต่างๆ มีค่าดังนี้

$P_r \text{ (dBm)}$  = กำลังงานทางด้านรับ

(จากเจนเนอเรเตอร์)

$G_r \text{ (dBi)}$  = อัตราขยายทางด้านรับ

$P_t \text{ (dBm)}$  = กำลังงานทางด้านส่ง

มีค่าเท่ากับ 0 dBm

$G_t \text{ (dBi)}$  = อัตราขยายทางด้านส่ง

มีค่าเท่ากับ 4.975 dBi

$L_r \text{ (dBm)}$  = อัตราการสูญเสียของสายนำสัญญาณทางด้านรับ ได้จากเครื่อง Spectrum โดยค่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวของสายเพิ่มขึ้น

$L_t \text{ (dBm)}$  = อัตราการสูญเสียของสายนำสัญญาณทางด้านส่ง ได้จากเครื่อง Spectrum

$L_s \text{ (dBm)}$  = อัตราการสูญเสียจากระยะทาง มีค่าเท่ากับ  $20 \log(4\pi d / \lambda)$

$d$  = ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวรับและตัวส่ง ต้องมากกว่าระยะ Far field ( $\geq 2D^2 / \lambda$ )

เมื่อทำการทดสอบโดยใช้สายอากาศส่งซึ่งมี Gain ( $G_t$ ) = 4.9dBi มาเป็นตัวส่ง และสายอากาศตัวรับเป็นสายอากาศแบบ3เซกเตอร์ โดยให้  $P_t = 0 \text{ dBm}$  และระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศตัวรับส่งห่างกัน3.2 m ซึ่งจะได้ค่า  $L_s = 4.8\text{dBm}$  โดยทำการทดสอบ ที่ความถี่ใช้งานของระบบ 1800MHz และความถี่กลางของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

f (MHz)	$\lambda$ (m)	Lt (dB)	Lr (dB)	Gt (dBi)	Ls (dB)	Gr (dBi)	Pr (dBm)
1710	0.175	3.23	6.36	5.66	43.81	5.98	-41.76
1785	0.168	3.407	6.52	5.54	44.17	5.927	-42.63
1805	0.166	3.44	6.7	5.83	44.27	6.1	-42.48
1880	0.159	3.52	6.9	5.72	44.65	5.55	-43.8

ตารางที่ 5.1 ผลการวัดอัตราขยายของสายอากาศแบบ 3 เซกเตอร์ตัวสะท้อนคลื่นมุมแบบวงแหวน  
สี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### วิจารณ์และสรุป

ปริญญาบัตรนี้ ได้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศ 3 เซกเตอร์ ตัวสะท้อนคลื่นมุมที่ป้อนสัญญาณด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยม สายอากาศชนิดนี้มีการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่เราต้องการ เพื่อนำไปใช้งานที่สถานีฐานของระบบเซลลูลาร์ ออกแบบใช้งานที่ย่านความถี่ 1800 MHz โดยการออกแบบขนาดค่าความกว้างจะมีค่า 11.5 ซม. ความสูงของสายอากาศ 5.8 ซม. และความยาวของวงแหวนเท่ากับ 2.5 ซม. ขนาดของตัวสะท้อนคลื่น จะมีความยาวของตัวสะท้อนเท่ากับ 17.5 ซม. ความสูงของตัวสะท้อนคลื่น 10 ซม. และระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนคลื่นแบบมุมกับตัวป้อนสัญญาณ ห่าง 5 ซม. เท่ากันทั้ง 3 ด้าน จากการพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศที่ทดลองจะพบว่า ค่าต่างๆที่ได้ออกแบบ มีผลต่อการแพร่กระจายคลื่น การเปลี่ยนแปลงค่าความยาวตัวป้อนสัญญาณของสายอากาศจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลง ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง โดยถ้าปรับความยาวของตัวป้อนของสายอากาศใกล้เคียงกับความยาวของตัวสะท้อนคลื่น หรือตัวนำคลื่น จะทำให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งมีค่าสูงขึ้น

สายอากาศแบบ Sector ที่ได้ออกแบบไว้ จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูงเนื่องจากการประยุกต์จากการนำสายอากาศตัวสะท้อนคลื่นมุมที่ป้อนด้วยวงแหวนสี่เหลี่ยมนำมาใช้ในการสร้าง ซึ่งสายอากาศแบบนี้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่สูง มีอัตราการขยายที่ดี สามารถลดการรบกวนกันของช่องความถี่เดิมที่ใช้งานไปแล้ว และสามารถเลือกทิศทางที่ต้องการให้มีการรับส่งสัญญาณได้

ในการทดสอบนั้น จะพบว่ารูปแบบคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ อาจเกิดการผิดเพี้ยนไปเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำสายอากาศ รวมถึงความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด และจะพบว่าค่าอัตราการขยายของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบจะมีค่าน้อยกว่าค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ได้จากการวิเคราะห์เพราะในกระบวนการวิเคราะห์นั้นเราใช้การคิดขนาดของตัวสะท้อนสายอากาศในโปรแกรมการวิเคราะห์ที่มีขนาดอนันต์ ต่างจากการทดลองจริงที่มีค่าขนาดต่างๆตามความเป็นจริง

ภาคผนวก

โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์

โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบและวิเคราะห์ที่ได้จาก โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 (Numerical Electromagnetic Code: NEC)

การวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 NEC2

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงเลขรุ่นที่ 2 หรือ NEC2 เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับทำการวิเคราะห์การตอบสนองของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างที่เป็นโลหะใดๆ โดยจะทำการสร้างโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยเส้นสวด

แสดงตัวอย่างการเขียนโปรแกรม NEC2 ดังนี้

กรณีวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีความกว้าง  $a = 0.69 \lambda$ , ความสูง  $b = 0.35 \lambda$  และ ความยาว  $c = 0.15 \lambda$  โดยทำงานที่ความถี่ 1800 MHz

CM									
CM									
CM									
CM									
CM									
CE									
GW	1	20	0.01276	0.06061	-0.0319	0.01276	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	2	20	0.00957	0.06061	-0.0319	0.00957	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	3	20	0.00638	0.06061	-0.0319	0.00638	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	4	20	0.00319	0.06061	-0.0319	0.00319	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	5	20	0	0.06061	-0.0319	0	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	6	20	0.00319	0.06061	-0.0319	0.00319	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	7	20	0.00638	0.06061	-0.0319	0.00638	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	8	20	0.00957	0.06061	-0.0319	0.00957	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	9	20	0.01276	0.06061	-0.0319	0.01276	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	10	20	0.01276	0.06061	0.0319	0.01276	0.06061	0.0319	0.00048
GW	11	20	0.00957	0.06061	0.0319	0.00957	0.06061	0.0319	0.00048
GW	12	20	0.00638	0.06061	0.0319	0.00638	0.06061	0.0319	0.00048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับกรณีสืบค้นเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GW	13	20	0.00319	0.06061	0.0319	0.00319	0.06061	0.0319	0.00048
GW	14	20	0	0.06061	0.0319	0	0.06061	0.0319	0.00048
GW	15	20	0.00319	0.06061	0.0319	0.00319	0.06061	0.0319	0.00048
GW	16	20	0.00638	0.06061	0.0319	0.00638	0.06061	0.0319	0.00048
GW	17	20	0.00957	0.06061	0.0319	0.00957	0.06061	0.0319	0.00048
GW	18	20	0.01276	0.06061	0.0319	0.01276	0.06061	0.0319	0.00048
GW	19	10	0.01276	0.06061	-0.0319	0.01276	0.06061	0.0319	0.00048
GW	20	10	0.00957	0.06061	-0.0319	0.00957	0.06061	0.0319	0.00048
GW	21	10	0.00638	0.06061	-0.0319	0.00638	0.06061	0.0319	0.00048
GW	22	10	0.00319	0.06061	-0.0319	0.00319	0.06061	0.0319	0.00048
GW	23	10	0	0.06061	-0.0319	0	0.06061	0.0319	0.00048
GW	24	10	0.00319	0.06061	-0.0319	0.00319	0.06061	0.0319	0.00048
GW	25	10	0.00638	0.06061	-0.0319	0.00638	0.06061	0.0319	0.00048
GW	26	10	0.00957	0.06061	-0.0319	0.00957	0.06061	0.0319	0.00048
GW	27	10	0.01276	0.06061	-0.0319	0.01276	0.06061	0.0319	0.00048
GW	28	10	0.01276	0.06061	-0.0319	0.01276	0.06061	0.0319	0.00048
GW	28	10	0.00957	0.06061	-0.0319	0.00957	0.06061	0.0319	0.00048
GW	30	10	0.00638	0.06061	-0.0319	0.00638	0.06061	0.0319	0.00048
GW	31	10	0.00319	0.06061	-0.0319	0.00319	0.06061	0.0319	0.00048
GW	32	10	0	0.06061	-0.0319	0	0.06061	0.0319	0.00048
GW	33	10	0.00319	0.06061	-0.0319	0.00319	0.06061	0.0319	0.00048
GW	34	10	0.00638	0.06061	-0.0319	0.00638	0.06061	0.0319	0.00048
GW	35	10	0.00957	0.06061	-0.0319	0.00957	0.06061	0.0319	0.00048
GW	36	10	0.01276	0.06061	-0.0319	0.01276	0.06061	0.0319	0.00048
GW	37	12	0.01276	0.06061	-0.0319	0.01276	0.06061	-0.0319	0.00018
GW	38	12	0.01276	0.05742	-0.0319	0.01276	0.05742	-0.0319	0.00018
GW	39	12	0.01276	0.05423	-0.0319	0.01276	0.05423	-0.0319	0.00018
GW	40	12	0.01276	0.05104	-0.0319	0.01276	0.05104	-0.0319	0.00018
GW	41	12	0.01276	0.04785	-0.0319	0.01276	0.04785	-0.0319	0.00018
GW	42	12	0.01276	0.04466	-0.0319	0.01276	0.04466	-0.0319	0.00018
GW	43	12	0.01276	0.04147	-0.0319	0.01276	0.04147	-0.0319	0.00018
GW	44	12	0.01276	0.03828	-0.0319	0.01276	0.03828	-0.0319	0.00018
GW	45	12	0	0.06061	-0.0319	0	0.06061	-0.0319	0.00018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คำนวณไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

			0.01276	0.03509			0.03509		
			-	-	-	-	-	-	-
GW	46	12	0.01276	-0.0319	-0.0319	0.01276	-0.0319	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	47	12	0.01276	0.02871	-0.0319	0.01276	0.02871	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	48	12	0.01276	0.02552	-0.0319	0.01276	0.02552	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	49	12	0.01276	0.02233	-0.0319	0.01276	0.02233	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	50	12	0.01276	0.01914	-0.0319	0.01276	0.01914	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	51	12	0.01276	0.01595	-0.0319	0.01276	0.01595	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	52	12	0.01276	0.01276	-0.0319	0.01276	0.01276	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	53	12	0.01276	0.00957	-0.0319	0.01276	0.00957	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	54	12	0.01276	0.00638	-0.0319	0.01276	0.00638	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	55	12	0.01276	0.00319	-0.0319	0.01276	0.00319	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	56	12	0.01276	0	-0.0319	0.01276	0	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	57	12	0.01276	0.00319	-0.0319	0.01276	0.00319	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	58	12	0.01276	0.00638	-0.0319	0.01276	0.00638	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	59	12	0.01276	0.00957	-0.0319	0.01276	0.00957	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	60	12	0.01276	0.01276	-0.0319	0.01276	0.01276	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	61	12	0.01276	0.01595	-0.0319	0.01276	0.01595	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	62	12	0.01276	0.01914	-0.0319	0.01276	0.01914	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	63	12	0.01276	0.02233	-0.0319	0.01276	0.02233	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	64	12	0.01276	0.02552	-0.0319	0.01276	0.02552	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	65	12	0.01276	0.02871	-0.0319	0.01276	0.02871	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	66	12	0.01276	0.0319	-0.0319	0.01276	0.0319	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	67	12	0.01276	0.03509	-0.0319	0.01276	0.03509	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	68	12	0.01276	0.03828	-0.0319	0.01276	0.03828	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	69	12	0.01276	0.04147	-0.0319	0.01276	0.04147	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	70	12	0.01276	0.04466	-0.0319	0.01276	0.04466	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	71	12	0.01276	0.04785	-0.0319	0.01276	0.04785	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	72	12	0.01276	0.05104	-0.0319	0.01276	0.05104	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	73	12	0.01276	0.05423	-0.0319	0.01276	0.05423	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	74	12	0.01276	0.05742	-0.0319	0.01276	0.05742	-0.0319	0.00018
			-	-	-	-	-	-	-
GW	75	12	0.01276	0.06061	-0.0319	0.01276	0.06061	-0.0319	0.00018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิศวกรรมโยธาจัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือแจกจ่ายแก่บุคคลอื่นได้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		0.01276							
GW	76	12	0.01276	0.06061	-0.02871	0.01276	0.06061	0.02871	0.00018
GW	77	12	0.01276	0.06061	-0.02552	0.01276	0.06061	0.02552	0.00018
GW	78	12	0.01276	0.06061	-0.02233	0.01276	0.06061	0.02233	0.00018
GW	79	12	0.01276	0.06061	-0.01914	0.01276	0.06061	0.01914	0.00018
GW	80	12	0.01276	0.06061	-0.01595	0.01276	0.06061	0.01595	0.00018
GW	81	12	0.01276	0.06061	-0.01276	0.01276	0.06061	0.01276	0.00018
GW	82	12	0.01276	0.06061	-0.00957	0.01276	0.06061	0.00957	0.00018
GW	83	12	0.01276	0.06061	-0.00638	0.01276	0.06061	0.00638	0.00018
GW	84	12	0.01276	0.06061	-0.00319	0.01276	0.06061	0.00319	0.00018
GW	85	12	0.01276	0.06061	0	0.01276	0.06061	0	0.00018
GW	86	12	0.01276	0.06061	0.00319	0.01276	0.06061	0.00319	0.00018
GW	87	12	0.01276	0.06061	0.00638	0.01276	0.06061	0.00638	0.00018
GW	88	12	0.01276	0.06061	0.00957	0.01276	0.06061	0.00957	0.00018
GW	89	12	0.01276	0.06061	0.01276	0.01276	0.06061	0.01276	0.00018
GW	90	12	0.01276	0.06061	0.01595	0.01276	0.06061	0.01595	0.00018
GW	91	12	0.01276	0.06061	0.01914	0.01276	0.06061	0.01914	0.00018
GW	92	12	0.01276	0.06061	0.02233	0.01276	0.06061	0.02233	0.00018
GW	93	12	0.01276	0.06061	0.02552	0.01276	0.06061	0.02552	0.00018
GW	94	12	0.01276	0.06061	0.02871	0.01276	0.06061	0.02871	0.00018
GW	95	12	0.01276	0.06061	0.0319	0.01276	0.06061	0.0319	0.00018
GW	96	12	0.01276	0.05742	0.0319	0.01276	0.05742	0.0319	0.00018
GW	97	12	0.01276	0.05423	0.0319	0.01276	0.05423	0.0319	0.00018
GW	98	12	0.01276	0.05104	0.0319	0.01276	0.05104	0.0319	0.00018
GW	99	12	0.01276	0.04785	0.0319	0.01276	0.04785	0.0319	0.00018
GW	100	12	0.01276	0.04466	0.0319	0.01276	0.04466	0.0319	0.00018
GW	101	12	0.01276	0.04147	0.0319	0.01276	0.04147	0.0319	0.00018
GW	102	12	0.01276	0.03828	0.0319	0.01276	0.03828	0.0319	0.00018
GW	103	12	0.01276	0.03509	0.0319	0.01276	0.03509	0.0319	0.00018
GW	104	12	0.01276	0.0319	0.0319	0.01276	0.0319	0.0319	0.00018
GW	105	12	0.01276	0.02871	0.0319	0.01276	0.02871	0.0319	0.00018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไปบนระบบคอมพิวเตอร์เพื่อความสะดวกเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



				0.06061		0.01276	0.06061		
				-		-	-		
GW	136	12	0.01276	0.06061	0.02233	0.01276	0.06061	0.02233	0.00018
				-		-	-		
GW	137	12	0.01276	0.06061	0.01914	0.01276	0.06061	0.01914	0.00018
				-		-	-		
GW	138	12	0.01276	0.06061	0.01595	0.01276	0.06061	0.01595	0.00018
				-		-	-		
GW	139	12	0.01276	0.06061	0.01276	0.01276	0.06061	0.01276	0.00018
				-		-	-		
GW	140	12	0.01276	0.06061	0.00957	0.01276	0.06061	0.00957	0.00018
				-		-	-		
GW	141	12	0.01276	0.06061	0.00638	0.01276	0.06061	0.00638	0.00018
				-		-	-		
GW	142	12	0.01276	0.06061	0.00319	0.01276	0.06061	0.00319	0.00018
				-		-	-		
GW	143	12	0.01276	0.06061	0	0.01276	0.06061	0	0.00018
				-		-	-		
GW	144	12	0.01276	0.06061	-0.00319	0.01276	0.06061	0.00319	0.00018
				-		-	-		
GW	145	12	0.01276	0.06061	-0.00638	0.01276	0.06061	0.00638	0.00018
				-		-	-		
GW	146	12	0.01276	0.06061	-0.00957	0.01276	0.06061	0.00957	0.00018
				-		-	-		
GW	147	12	0.01276	0.06061	-0.01276	0.01276	0.06061	0.01276	0.00018
				-		-	-		
GW	148	12	0.01276	0.06061	-0.01595	0.01276	0.06061	0.01595	0.00018
				-		-	-		
GW	149	12	0.01276	0.06061	-0.01914	0.01276	0.06061	0.01914	0.00018
				-		-	-		
GW	150	12	0.01276	0.06061	-0.02233	0.01276	0.06061	0.02233	0.00018
				-		-	-		
GW	151	12	0.01276	0.06061	-0.02552	0.01276	0.06061	0.02552	0.00018
				-		-	-		
GW	152	12	0.01276	0.06061	-0.02871	0.01276	0.06061	0.02871	0.00018
GW	153	11	0	0	-0.0319	0	0	0.0106	0.00018
				-		-	-		
GW	154	7	0.01276	0.00957	-0.0319	0.01276	0.00957	-0.0319	0.00018
				-		-	-		
GW	155	7	0.01276	0.00957	-0.0319	0.01276	0.00957	-0.0319	0.00018
GE	0								
EK									
LD	5	0	0	0	25600000	0			
EX	0	153	1	0	0	50			
GN	-1								
FR	0	1	0	0	1800	0			
EN									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีวงแหวนแบบสี่เหลี่ยมที่มีมุมสะท้อน  $120^\circ$  ที่มีความกว้าง  $a = 0.69 \lambda$ , ความสูง  $b = 0.35 \lambda$  และ ความยาว  $c = 0.15 \lambda$  และมี ความสูงของตัวสะท้อน  $h = 1.5 \lambda$  และ ความยาวของมุมสะท้อน  $lc = 3s$  โดยทำงานที่ความถี่ 1800 MHz

CM  
CM  
CM  
CM  
CM  
CE

GW	1	20	0.0671	0.06061	-0.0319	0.0671	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	2	20	0.06391	0.06061	-0.0319	0.06391	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	3	20	0.06072	0.06061	-0.0319	0.06072	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	4	20	0.05753	0.06061	-0.0319	0.05753	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	5	20	0.05434	0.06061	-0.0319	0.05434	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	6	20	0.05115	0.06061	-0.0319	0.05115	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	7	20	0.04796	0.06061	-0.0319	0.04796	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	8	20	0.04477	0.06061	-0.0319	0.04477	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	9	20	0.04158	0.06061	-0.0319	0.04158	0.06061	-0.0319	0.00048
GW	10	20	0.0671	0.06061	0.0319	0.0671	0.06061	0.0319	0.00048
GW	11	20	0.06391	0.06061	0.0319	0.06391	0.06061	0.0319	0.00048
GW	12	20	0.06072	0.06061	0.0319	0.06072	0.06061	0.0319	0.00048
GW	13	20	0.05753	0.06061	0.0319	0.05753	0.06061	0.0319	0.00048
GW	14	20	0.05434	0.06061	0.0319	0.05434	0.06061	0.0319	0.00048
GW	15	20	0.05115	0.06061	0.0319	0.05115	0.06061	0.0319	0.00048
GW	16	20	0.04796	0.06061	0.0319	0.04796	0.06061	0.0319	0.00048
GW	17	20	0.04477	0.06061	0.0319	0.04477	0.06061	0.0319	0.00048
GW	18	20	0.04158	0.06061	0.0319	0.04158	0.06061	0.0319	0.00048
GW	19	10	0.0671	0.06061	-0.0319	0.0671	0.06061	0.0319	0.00048
GW	20	10	0.06391	0.06061	-0.0319	0.06391	0.06061	0.0319	0.00048
GW	21	10	0.06072	0.06061	-0.0319	0.06072	0.06061	0.0319	0.00048
GW	22	10	0.05753	0.06061	-0.0319	0.05753	0.06061	0.0319	0.00048
GW	23	10	0.05434	0.06061	-0.0319	0.05434	0.06061	0.0319	0.00048
GW	24	10	0.05115	0.06061	-0.0319	0.05115	0.06061	0.0319	0.00048
GW	25	10	0.04796	0.06061	-0.0319	0.04796	0.06061	0.0319	0.00048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกไปเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GW	26	10	0.04477	0.06061	-0.0319	0.04477	0.06061	0.0319	0.00048
GW	27	10	0.04158	0.06061	-0.0319	0.04158	0.06061	0.0319	0.00048
GW	28	10	0.0671	0.06061	-0.0319	0.0671	0.06061	0.0319	0.00048
GW	28	10	0.06391	0.06061	-0.0319	0.06391	0.06061	0.0319	0.00048
GW	30	10	0.06072	0.06061	-0.0319	0.06072	0.06061	0.0319	0.00048
GW	31	10	0.05753	0.06061	-0.0319	0.05753	0.06061	0.0319	0.00048
GW	32	10	0.05434	0.06061	-0.0319	0.05434	0.06061	0.0319	0.00048
GW	33	10	0.05115	0.06061	-0.0319	0.05115	0.06061	0.0319	0.00048
GW	34	10	0.04796	0.06061	-0.0319	0.04796	0.06061	0.0319	0.00048
GW	35	10	0.04477	0.06061	-0.0319	0.04477	0.06061	0.0319	0.00048
GW	36	10	0.04158	0.06061	-0.0319	0.04158	0.06061	0.0319	0.00048
GW	37	12	0.04158	0.06061	-0.0319	0.0671	0.06061	-0.0319	0.00018
GW	38	12	0.04158	0.05742	-0.0319	0.0671	0.05742	-0.0319	0.00018
GW	39	12	0.04158	0.05423	-0.0319	0.0671	0.05423	-0.0319	0.00018
GW	40	12	0.04158	0.05104	-0.0319	0.0671	0.05104	-0.0319	0.00018
GW	41	12	0.04158	0.04785	-0.0319	0.0671	0.04785	-0.0319	0.00018
GW	42	12	0.04158	0.04466	-0.0319	0.0671	0.04466	-0.0319	0.00018
GW	43	12	0.04158	0.04147	-0.0319	0.0671	0.04147	-0.0319	0.00018
GW	44	12	0.04158	0.03828	-0.0319	0.0671	0.03828	-0.0319	0.00018
GW	45	12	0.04158	0.03509	-0.0319	0.0671	0.03509	-0.0319	0.00018
GW	46	12	0.04158	-0.0319	-0.0319	0.0671	-0.0319	-0.0319	0.00018
GW	47	12	0.04158	0.02871	-0.0319	0.0671	0.02871	-0.0319	0.00018
GW	48	12	0.04158	0.02552	-0.0319	0.0671	0.02552	-0.0319	0.00018
GW	49	12	0.04158	0.02233	-0.0319	0.0671	0.02233	-0.0319	0.00018
GW	50	12	0.04158	0.01914	-0.0319	0.0671	0.01914	-0.0319	0.00018
GW	51	12	0.04158	0.01595	-0.0319	0.0671	0.01595	-0.0319	0.00018
GW	52	12	0.04158	0.01276	-0.0319	0.0671	0.01276	-0.0319	0.00018
GW	53	12	0.04158	0.00957	-0.0319	0.0671	0.00957	-0.0319	0.00018
GW	54	12	0.04158	0.00638	-0.0319	0.0671	0.00638	-0.0319	0.00018
GW	55	12	0.04158	0.00319	-0.0319	0.0671	0.00319	-0.0319	0.00018
GW	56	12	0.04158	0	-0.0319	0.0671	0	-0.0319	0.00018
GW	57	12	0.04158	0.00319	-0.0319	0.0671	0.00319	-0.0319	0.00018
GW	58	12	0.04158	0.00638	-0.0319	0.0671	0.00638	-0.0319	0.00018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้สำหรับยกย่องเพื่อเกียรติยศเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GW	59	12	0.04158	0.00957	-0.0319	0.0671	0.00957	-0.0319	0.00018
GW	60	12	0.04158	0.01276	-0.0319	0.0671	0.01276	-0.0319	0.00018
GW	61	12	0.04158	0.01595	-0.0319	0.0671	0.01595	-0.0319	0.00018
GW	62	12	0.04158	0.01914	-0.0319	0.0671	0.01914	-0.0319	0.00018
GW	63	12	0.04158	0.02233	-0.0319	0.0671	0.02233	-0.0319	0.00018
GW	64	12	0.04158	0.02552	-0.0319	0.0671	0.02552	-0.0319	0.00018
GW	65	12	0.04158	0.02871	-0.0319	0.0671	0.02871	-0.0319	0.00018
GW	66	12	0.04158	0.0319	-0.0319	0.0671	0.0319	-0.0319	0.00018
GW	67	12	0.04158	0.03509	-0.0319	0.0671	0.03509	-0.0319	0.00018
GW	68	12	0.04158	0.03828	-0.0319	0.0671	0.03828	-0.0319	0.00018
GW	69	12	0.04158	0.04147	-0.0319	0.0671	0.04147	-0.0319	0.00018
GW	70	12	0.04158	0.04466	-0.0319	0.0671	0.04466	-0.0319	0.00018
GW	71	12	0.04158	0.04785	-0.0319	0.0671	0.04785	-0.0319	0.00018
GW	72	12	0.04158	0.05104	-0.0319	0.0671	0.05104	-0.0319	0.00018
GW	73	12	0.04158	0.05423	-0.0319	0.0671	0.05423	-0.0319	0.00018
GW	74	12	0.04158	0.05742	-0.0319	0.0671	0.05742	-0.0319	0.00018
GW	75	12	0.04158	0.06061	-0.0319	0.0671	0.06061	-0.0319	0.00018
GW	76	12	0.0671	0.06061	-0.02871	0.04158	0.06061	0.02871	0.00018
GW	77	12	0.0671	0.06061	-0.02552	0.04158	0.06061	0.02552	0.00018
GW	78	12	0.0671	0.06061	-0.02233	0.04158	0.06061	0.02233	0.00018
GW	79	12	0.0671	0.06061	-0.01914	0.04158	0.06061	0.01914	0.00018
GW	80	12	0.0671	0.06061	-0.01595	0.04158	0.06061	0.01595	0.00018
GW	81	12	0.0671	0.06061	-0.01276	0.04158	0.06061	0.01276	0.00018
GW	82	12	0.0671	0.06061	-0.00957	0.04158	0.06061	0.00957	0.00018
GW	83	12	0.0671	0.06061	-0.00638	0.04158	0.06061	0.00638	0.00018
GW	84	12	0.0671	0.06061	-0.00319	0.04158	0.06061	0.00319	0.00018
GW	85	12	0.0671	0.06061	0	0.04158	0.06061	0	0.00018
GW	86	12	0.0671	0.06061	0.00319	0.04158	0.06061	0.00319	0.00018
GW	87	12	0.0671	0.06061	0.00638	0.04158	0.06061	0.00638	0.00018
GW	88	12	0.0671	0.06061	0.00957	0.04158	0.06061	0.00957	0.00018
GW	89	12	0.0671	0.06061	0.01276	0.04158	0.06061	0.01276	0.00018
GW	90	12	0.0671	0.06061	0.01595	0.04158	0.06061	0.01595	0.00018
GW	91	12	0.0671	0.06061	0.01914	0.04158	0.06061	0.01914	0.00018
GW	92	12	0.0671	0.06061	0.02233	0.04158	0.06061	0.02233	0.00018
GW	93	12	0.0671	0.06061	0.02552	0.04158	0.06061	0.02552	0.00018
GW	94	12	0.0671	0.06061	0.02871	0.04158	0.06061	0.02871	0.00018
GW	95	12	0.0671	0.06061	0.0319	0.04158	0.06061	0.0319	0.00018
GW	96	12	0.0671	0.05742	0.0319	0.04158	0.05742	0.0319	0.00018
GW	97	12	0.0671	0.05423	0.0319	0.04158	0.05423	0.0319	0.00018
GW	98	12	0.0671	0.05104	0.0319	0.04158	0.05104	0.0319	0.00018
GW	99	12	0.0671	0.04785	0.0319	0.04158	0.04785	0.0319	0.00018
GW	100	12	0.0671	0.04466	0.0319	0.04158	0.04466	0.0319	0.00018
GW	101	12	0.0671	0.04147	0.0319	0.04158	0.04147	0.0319	0.00018
GW	102	12	0.0671	0.03828	0.0319	0.04158	0.03828	0.0319	0.00018
GW	103	12	0.0671	0.03509	0.0319	0.04158	0.03509	0.0319	0.00018
GW	104	12	0.0671	0.0319	0.0319	0.04158	0.0319	0.0319	0.00018
GW	105	12	0.0671	0.02871	0.0319	0.04158	0.02871	0.0319	0.00018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คำนวณและจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GW 106	12	0.0671	0.02552	0.0319	0.04158	0.02552	0.0319	0.00018
GW 107	12	0.0671	0.02233	0.0319	0.04158	0.02233	0.0319	0.00018
GW 108	12	0.0671	0.01914	0.0319	0.04158	0.01914	0.0319	0.00018
GW 109	12	0.0671	0.01595	0.0319	0.04158	0.01595	0.0319	0.00018
GW 110	12	0.0671	0.01276	0.0319	0.04158	0.01276	0.0319	0.00018
GW 111	12	0.0671	0.00957	0.0319	0.04158	0.00957	0.0319	0.00018
GW 112	12	0.0671	0.00638	0.0319	0.04158	0.00638	0.0319	0.00018
GW 113	12	0.0671	0.00319	0.0319	0.04158	0.00319	0.0319	0.00018
GW 114	12	0.0671	0	0.0319	0.04158	0	0.0319	0.00018
GW 115	12	0.0671	0.00319	0.0319	0.04158	0.00319	0.0319	0.00018
GW 116	12	0.0671	0.00638	0.0319	0.04158	0.00638	0.0319	0.00018
GW 117	12	0.0671	0.00957	0.0319	0.04158	0.00957	0.0319	0.00018
GW 118	12	0.0671	0.01276	0.0319	0.04158	0.01276	0.0319	0.00018
GW 119	12	0.0671	0.01595	0.0319	0.04158	0.01595	0.0319	0.00018
GW 120	12	0.0671	0.01914	0.0319	0.04158	0.01914	0.0319	0.00018
GW 121	12	0.0671	0.02233	0.0319	0.04158	0.02233	0.0319	0.00018
GW 122	12	0.0671	0.02552	0.0319	0.04158	0.02552	0.0319	0.00018
GW 123	12	0.0671	0.02871	0.0319	0.04158	0.02871	0.0319	0.00018
GW 124	12	0.0671	-0.0319	0.0319	0.04158	-0.0319	0.0319	0.00018
GW 125	12	0.0671	0.03509	0.0319	0.04158	0.03509	0.0319	0.00018
GW 126	12	0.0671	0.03828	0.0319	0.04158	0.03828	0.0319	0.00018
GW 127	12	0.0671	0.04147	0.0319	0.04158	0.04147	0.0319	0.00018
GW 128	12	0.0671	0.04466	0.0319	0.04158	0.04466	0.0319	0.00018
GW 129	12	0.0671	0.04785	0.0319	0.04158	0.04785	0.0319	0.00018
GW 130	12	0.0671	0.05104	0.0319	0.04158	0.05104	0.0319	0.00018
GW 131	12	0.0671	0.05423	0.0319	0.04158	0.05423	0.0319	0.00018
GW 132	12	0.0671	0.05742	0.0319	0.04158	0.05742	0.0319	0.00018
GW 133	12	0.0671	0.06061	0.0319	0.04158	0.06061	0.0319	0.00018
GW 134	12	0.0671	0.06061	0.02871	0.04158	0.06061	0.02871	0.00018
GW 135	12	0.0671	0.06061	0.02552	0.04158	0.06061	0.02552	0.00018
GW 136	12	0.0671	0.06061	0.02233	0.04158	0.06061	0.02233	0.00018
GW 137	12	0.0671	0.06061	0.01914	0.04158	0.06061	0.01914	0.00018
GW 138	12	0.0671	0.06061	0.01595	0.04158	0.06061	0.01595	0.00018
GW 139	12	0.0671	0.06061	0.01276	0.04158	0.06061	0.01276	0.00018
GW 140	12	0.0671	0.00957	0.00957	0.04158	0.00957	0.00957	0.00018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตล่วงหน้าไป

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

				0.06061				0.06061		
				-				-		
GW	141	12	0.0671	0.06061	0.00638	0.04158	0.06061	0.00638	0.00018	
				-				-		
GW	142	12	0.0671	0.06061	0.00319	0.04158	0.06061	0.00319	0.00018	
				-				-		
GW	143	12	0.0671	0.06061	0	0.04158	0.06061	0	0.00018	
				-				-		
GW	144	12	0.0671	0.06061	-0.00319	0.04158	0.06061	0.00319	0.00018	
				-				-		
GW	145	12	0.0671	0.06061	-0.00638	0.04158	0.06061	0.00638	0.00018	
				-				-		
GW	146	12	0.0671	0.06061	-0.00957	0.04158	0.06061	0.00957	0.00018	
				-				-		
GW	147	12	0.0671	0.06061	-0.01276	0.04158	0.06061	0.01276	0.00018	
				-				-		
GW	148	12	0.0671	0.06061	-0.01595	0.04158	0.06061	0.01595	0.00018	
				-				-		
GW	149	12	0.0671	0.06061	-0.01914	0.04158	0.06061	0.01914	0.00018	
				-				-		
GW	150	12	0.0671	0.06061	-0.02233	0.04158	0.06061	0.02233	0.00018	
				-				-		
GW	151	12	0.0671	0.06061	-0.02552	0.04158	0.06061	0.02552	0.00018	
				-				-		
GW	152	12	0.0671	0.06061	-0.02871	0.04158	0.06061	0.02871	0.00018	
GW	153	11	0.05434	0	-0.0319	0.05434	0	0.0106	0.00018	
				-				-		
GW	154	7	0.04158	0.00957	-0.0319	0.0671	0.00957	-0.0319	0.00018	
				-				-		
GW	155	7	0.04158	0.00957	-0.0319	0.0671	0.00957	-0.0319	0.00018	
				-				-		
GW	500	18	0	0	0.05104	0	0	0.05104	0.00048	
GW	861	18	0	0	0.05104	0.0832	0.14352	0.05104	0.00048	
GW	502	18	0	0	0.04466	0.0832	0.14352	0.04466	0.00048	
GW	504	18	0	0	0.03828	0.0832	0.14352	0.03828	0.00048	
GW	506	18	0	0	0.0319	0.0832	0.14352	0.0319	0.00048	
GW	508	18	0	0	0.02552	0.0832	0.14352	0.02552	0.00048	
GW	510	18	0	0	0.01914	0.0832	0.14352	0.01914	0.00048	
GW	512	18	0	0	0.01276	0.0832	0.14352	0.01276	0.00048	
GW	514	18	0	0	0.00638	0.0832	0.14352	0.00638	0.00048	
GW	516	18	0	0	0	0.0832	0.14352	0	0.00048	
				-				-		
GW	518	18	0	0	-0.00638	0.0832	0.14352	0.00638	0.00048	
				-				-		
GW	520	18	0	0	-0.01276	0.0832	0.14352	0.01276	0.00048	
				-				-		
GW	522	18	0	0	-0.01914	0.0832	0.14352	0.01914	0.00048	
				-				-		
GW	524	18	0	0	-0.02552	0.0832	0.14352	0.02552	0.00048	
GW	526	18	0	0	-0.0319	0.0832	0.14352	-0.0319	0.00048	
				-				-		
GW	528	18	0	0	-0.03828	0.0832	0.14352	0.03828	0.00048	
				-				-		
GW	530	18	0	0	-0.04466	0.0832	0.14352	0.04466	0.00048	
				-				-		
GW	862	18	0	0	-0.05104	0.0832	0.14352	0.05104	0.00048	
				-				-		
GW	863	18	0	0	0.05104	0.0832	0.14352	0.05104	0.00048	
GW	533	18	0	0	0.04466	0.0832	0.14352	0.04466	0.00048	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น หากท่านมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โทร. 0-2324-6100 หรือ e-mail: info@kmutt.ac.th

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

							0.14352			
							-			
GW	535	18	0	0	0.03828	0.0832	0.14352	0.03828	0.00048	
							-			
GW	537	18	0	0	0.0319	0.0832	0.14352	0.0319	0.00048	
							-			
GW	539	18	0	0	0.02552	0.0832	0.14352	0.02552	0.00048	
							-			
GW	541	18	0	0	0.01914	0.0832	0.14352	0.01914	0.00048	
							-			
GW	543	18	0	0	0.01276	0.0832	0.14352	0.01276	0.00048	
							-			
GW	545	18	0	0	0.00638	0.0832	0.14352	0.00638	0.00048	
							-			
GW	547	18	0	0	0	0.0832	0.14352	0	0.00048	
							-			
GW	549	18	0	0	-0.00638	0.0832	0.14352	0.00638	0.00048	
							-			
GW	551	18	0	0	-0.01276	0.0832	0.14352	0.01276	0.00048	
							-			
GW	553	18	0	0	-0.01914	0.0832	0.14352	0.01914	0.00048	
							-			
GW	555	18	0	0	-0.02552	0.0832	0.14352	0.02552	0.00048	
							-			
GW	557	18	0	0	-0.0319	0.0832	0.14352	-0.0319	0.00048	
							-			
GW	559	18	0	0	-0.03828	0.0832	0.14352	0.03828	0.00048	
							-			
GW	561	18	0	0	-0.04466	0.0832	0.14352	0.04466	0.00048	
							-			
GW	864	18	0	0	-0.05104	0.0832	0.14352	0.05104	0.00048	
							-			
GW	702	18	0.0032	0.00552	0.05104	0.0032	0.00552	0.05104	0.00048	
							-			
GW	704	18	0.0064	0.01104	0.05104	0.0064	0.01104	0.05104	0.00048	
							-			
GW	706	18	0.0096	0.01656	0.05104	0.0096	0.01656	0.05104	0.00048	
							-			
GW	708	18	0.0128	0.02208	0.05104	0.0128	0.02208	0.05104	0.00048	
							-			
GW	710	18	0.016	0.0276	0.05104	0.016	0.0276	0.05104	0.00048	
							-			
GW	712	18	0.0192	0.03312	0.05104	0.0192	0.03312	0.05104	0.00048	
							-			
GW	714	18	0.0224	0.03864	0.05104	0.0224	0.03864	0.05104	0.00048	
							-			
GW	716	18	0.0256	0.04416	0.05104	0.0256	0.04416	0.05104	0.00048	
							-			
GW	718	18	0.0288	0.04968	0.05104	0.0288	0.04968	0.05104	0.00048	
							-			
GW	720	18	0.032	0.0552	0.05104	0.032	0.0552	0.05104	0.00048	
							-			
GW	722	18	0.0352	0.06072	0.05104	0.0352	0.06072	0.05104	0.00048	
							-			
GW	724	18	0.0384	0.06624	0.05104	0.0384	0.06624	0.05104	0.00048	
							-			
GW	726	18	0.0416	0.07176	0.05104	0.0416	0.07176	0.05104	0.00048	
							-			
GW	728	18	0.0448	0.07728	0.05104	0.0448	0.07728	0.05104	0.00048	
GW	730	18	0.048	0.0828	0.05104	0.048	0.0828	0.05104	0.00048	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

									0.05104
GW	732	18	0.0512	0.08832	0.05104	0.0512	0.08832	0.05104	0.00048
GW	734	18	0.0544	0.09384	0.05104	0.0544	0.09384	0.05104	0.00048
GW	736	18	0.0576	0.09936	0.05104	0.0576	0.09936	0.05104	0.00048
GW	738	18	0.0608	0.10488	0.05104	0.0608	0.10488	0.05104	0.00048
GW	740	18	0.064	0.1104	0.05104	0.064	0.1104	0.05104	0.00048
GW	742	18	0.0672	0.11592	0.05104	0.0672	0.11592	0.05104	0.00048
GW	744	18	0.0704	0.12144	0.05104	0.0704	0.12144	0.05104	0.00048
GW	746	18	0.0736	0.12696	0.05104	0.0736	0.12696	0.05104	0.00048
GW	748	18	0.0768	0.13248	0.05104	0.0768	0.13248	0.05104	0.00048
GW	750	18	0.08	0.138	0.05104	0.08	0.138	0.05104	0.00048
GW	752	18	0.0832	0.14352	0.05104	0.0832	0.14352	0.05104	0.00048
GW	802	18	0.0032	0.00552	0.05104	0.0032	0.00552	0.05104	0.00048
GW	804	18	0.0064	0.01104	0.05104	0.0064	0.01104	0.05104	0.00048
GW	806	18	0.0096	0.01656	0.05104	0.0096	0.01656	0.05104	0.00048
GW	808	18	0.0128	0.02208	0.05104	0.0128	0.02208	0.05104	0.00048
GW	810	18	0.016	-0.0276	0.05104	0.016	-0.0276	0.05104	0.00048
GW	812	18	0.0192	0.03312	0.05104	0.0192	0.03312	0.05104	0.00048
GW	814	18	0.0224	0.03864	0.05104	0.0224	0.03864	0.05104	0.00048
GW	816	18	0.0256	0.04416	0.05104	0.0256	0.04416	0.05104	0.00048
GW	818	18	0.0288	0.04968	0.05104	0.0288	0.04968	0.05104	0.00048
GW	820	18	0.032	-0.0552	0.05104	0.032	-0.0552	0.05104	0.00048
GW	822	18	0.0352	0.06072	0.05104	0.0352	0.06072	0.05104	0.00048
GW	824	18	0.0384	0.06624	0.05104	0.0384	0.06624	0.05104	0.00048
GW	826	18	0.0416	0.07176	0.05104	0.0416	0.07176	0.05104	0.00048
GW	828	18	0.0448	0.07728	0.05104	0.0448	0.07728	0.05104	0.00048
GW	830	18	0.048	-0.0828	0.05104	0.048	-0.0828	0.05104	0.00048
GW	832	18	0.0512	0.08832	0.05104	0.0512	0.08832	0.05104	0.00048
GW	834	18	0.0544	0.09384	0.05104	0.0544	0.09384	0.05104	0.00048
GW	836	18	0.0576	0.09936	0.05104	0.0576	0.09936	0.05104	0.00048
GW	838	18	0.0608	0.10488	0.05104	0.0608	0.10488	0.05104	0.00048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ประโยชน์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

				0.10488			0.10488	0.05104	
GW	840	18	0.064	-0.1104	0.05104	0.064	-0.1104	0.05104	0.00048
GW	842	18	0.0672	0.11592	0.05104	0.0672	0.11592	0.05104	0.00048
GW	844	18	0.0704	0.12144	0.05104	0.0704	0.12144	0.05104	0.00048
GW	846	18	0.0736	0.12696	0.05104	0.0736	0.12696	0.05104	0.00048
GW	848	18	0.0768	0.13248	0.05104	0.0768	0.13248	0.05104	0.00048
GW	850	18	0.08	-0.138	0.05104	0.08	-0.138	0.05104	0.00048
GW	852	18	0.0832	0.14352	0.05104	0.0832	0.14352	0.05104	0.00048
GE	0								
EK									
LD	5	0	0	0	25600000	0			
EX	0	153	1	0	0	50			
GN	-1								
FR	0	1	0	0	1800	0			
EN									



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือและ ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี จาก ผศ. ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำเทคนิคต่างๆ ในการทดลอง ขอขอบคุณที่สุธาสิณี ละมุลตรี พี่ไผโรจน์ วุ่นซุ่ม ที่ช่วยเหลือให้คำปรึกษาในด้านการทดสอบสายอากาศ และขอขอบคุณ พี่นักศึกษาปริญญาโท ทุกคนที่ไม่ได้เอ่ยนามในที่นี้ ที่คอยให้คำแนะนำ และช่วยเหลือ ในทุกๆด้าน และขอขอบคุณ เพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดมา

คณะผู้จัดทำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. โมไนย ไกรฤกษ์ และ วิวัฒน์ กิรานนท์, “ทฤษฎีสายอากาศ”, วศ.สจล. 123, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ถวิต พึ่งมา, “ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์”, ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. S.Kosulvit, “A Bidirectional Antenna using a Probe Excited Ring,”  
Doctoral Thesis, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2001.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้