

ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมนอปัลส์ : ส่วนรับสัญญาณและวิเคราะห์สัญญาณ

MONOPULSE TRACKING SYSTEM

: SIGNAL RECEIVING UNIT AND SIGNAL ANALYSIS UNIT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

เลขหน้.....  
เลขทะเบียน..... 27861  
วัน, เดือน, ปี 26 ส.ย. 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ : ส่วนรับสัญญาณและวิเคราะห์สัญญาณ

MONOPULSE TRACKING SYSTEM

: SIGNAL RECEIVING UNIT AND SIGNAL ANALYSIS UNIT

โดย

นางสาววรรณวิไล สุขภักตร์ รหัส 36014374

นางสาวหฤทัย แย้มกลีกร รหัส 36014533

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

ปฏิญานិพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2539


ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ : ส่วนรับสัญญาณและวิเคราะห์สัญญาณ

MONOPULSE TRACKING SYSTEM : SIGNAL RECIVING UNIT AND SIGNAL ANALYSIS UNIT

- ผู้จัดทำ
1. นางสาววรรณวิไล สุขภักตร์ 36014374
  2. นางสาวหฤทัย แย้มกลสิกร 36014533

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รศ.ดร. ไม่นาย ไกรฤกษ์ )

ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ : ส่วนรับสัญญาณและวิเคราะห์สัญญาณ  
MONOPULSE TRACKING SYSTEM : SIGNAL RECEIVING UNIT AND SIGNAL ANALYSIS UNIT

โดย นางสาววรรณวิไล สุขภักดิ์ 36014374  
นางสาวหทัย แย้มกลีกร 36014533

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. ไมโนย ไกรฤกษ์

**บทคัดย่อ**

ปริญญาโทฉบับนี้นำเสนอการศึกษา การสร้างและทดสอบระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ โดยได้ศึกษาในส่วนของภาครับสัญญาณและภาควิเคราะห์สัญญาณ โดยได้ออกแบบภาครับสัญญาณที่ความถี่ 12.66 GHz ในลักษณะสายอากาศปากแตรสองตัววางขนานชิดกัน ซึ่งจะมีผลให้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งสองนั้นเหลื่อมซ้อนกัน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณที่รับได้ โดยมีเมจิกที่เป็นอุปกรณ์เปรียบเทียบเฟสของสัญญาณที่ได้มาจากภาครับสัญญาณ และจากการทดลองเพื่อหาทิศทางกับขนาดของมุมที่ผิดพลาดไปจากเป้าหมายนั้น เนื่องจากผลการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศปากแตร พบว่ามีช่วงของมุมที่สามารถใช้งานได้ประมาณ 14 องศา ในลักษณะการใช้งานจริงของการหาขนาดของมุมที่ผิดพลาดนั้นยังไม่สามารถทำได้ เนื่องจากวงจรตรวจจับเฟสมีความไวไม่พอที่จะใช้ตรวจจับสัญญาณผลรวมกับสัญญาณผลต่าง

**ABSTRACT**

This thesis concerns about the construction and testing of receiving signal unit and analysis unit of monopulse tracking system. The receiving unit is designed at 12.66 GHz by using two conical horn by installing parallel and close together. It causes the antenna pattern to overlap for amplitude comparing of the received signal. The magic-T is used as a signal comparator for constructing the signal summing and signal difference. The signal analysis unit is used as a phase detector that has hybrid ring to be a signal comparator. The experimental result can find the direction and angle-error from the target, according to testing of the radiation pattern of the conical horn. The available range of angle about 14 degree. In practical it is able to find the angle-error and it can not be done because of the insufficient of phase detector sensitivity. So it can not detect the signal summing and difference signal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ	2
2.2 เทคนิคการวัดค่ามุมผิดพลาดในระบบโมโนพัลส์	11
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	
3.1 ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยขนาด	27
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดลองที่ 1	42
4.2 การทดลองที่ 2	44
4.3 การทดลองที่ 3	45
4.4 การทดลองที่ 4	51
บทที่ 5 บทสรุปและบทวิจารณ์	56
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	

## สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบติดตามสัญญาณแบบอัตโนมัติ	2
รูปที่ 2.2	รูปแบบของสายอากาศการสลับพหุคลื่นและสัญญาณที่บอกความผิดพลาดใน 1 มิติ	3
รูปที่ 2.3	หลักการทำงานของวิธีการกวาดแบบกรวย	4
รูปที่ 2.4	บล็อกไดอะแกรมของวิธีการกวาดแบบกรวย	5
รูปที่ 2.5	บล็อกไดอะแกรมของตัววิเคราะห์สัญญาณผิดพลาดสำหรับระบบติดตามแบบใช้โปรแกรม	6
รูปที่ 2.6	วิธีการติดตามเป้าหมายแบบใช้หลายฮอรัน	7
รูปที่ 2.7	การจัดวางตัวแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 ตัว	8
รูปที่ 2.8	การจัดวางตัวแพร่กระจายคลื่นของตัวแพร่กระจายคลื่นปฐมภูมิ	8
รูปที่ 2.9	สัญญาณผลบวกและสัญญาณผลต่าง	9
รูปที่ 2.10	การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผลบวกและสัญญาณผลต่างเมื่อมุม $\theta$ เปลี่ยนไป	9
รูปที่ 2.11	โหมดอันดับสูงที่ใช้สำหรับการติดตามเป้าหมาย	10
รูปที่ 2.12	รูปโหมดโดมิแนนท์และโหมดอันดับสูง	10
รูปที่ 2.13	สัญญาณติดตามผิดพลาด	11
รูปที่ 2.14	แสดงการเปรียบเทียบด้วยเฟส	12
รูปที่ 2.15	แสดงบล็อกไดอะแกรมของการเปรียบเทียบด้วยเฟส	12
รูปที่ 2.16	แสดงการเปรียบเทียบด้วยขนาด	13
รูปที่ 2.17	แสดงรูปแบบของสายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบด้วยขนาด	13
รูปที่ 2.18	บล็อกไดอะแกรมของระบบโมโนพัลส์ที่ใช้การเปรียบเทียบด้วยขนาด	14
รูปที่ 2.19	แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบฮอรัน	15
รูปที่ 2.20	แสดงข้อต่อแบบทีในระนาบของสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็ก	18
รูปที่ 2.21	แสดงข้อต่อไฮบริดแบบที	19
รูปที่ 2.22	แสดงไฮบริดริงหรือไฮบริดแบบวงกลม	20
รูปที่ 2.23	แสดงไดเรกชันนัลคัปเปิลอร์แบบ 4 พอร์ต	21
รูปที่ 2.24	แสดงโครงสร้างการทำงานของชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ	22
รูปที่ 2.25	แสดงถึงวงจรของตัวตรวจจับเฟสแบบบาลานซ์เวคเตอร์	23
รูปที่ 2.26	แสดงเวคเตอร์ไดอะแกรมคิกดาไฟฟ้าของตัวตรวจจับเฟส	24
รูปที่ 2.27	แสดงผลตอบสนองของตัวตรวจจับเฟส	25
รูปที่ 3.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์เพียงระนาบเดียว	27
รูปที่ 3.2	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าของสายอากาศฮอรันแบบกรวย	29
รูปที่ 3.3	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กของสายอากาศฮอรันแบบกรวย	30

รูปที่ 3.4	การโค้งงอในระนาบไฟฟ้าและการโค้งงอในระนาบแม่เหล็ก	31
รูปที่ 3.5	การโค้งงอแบบ Single Mitered Waveguide และแบบ Double-Mitered Corner	31
รูปที่ 3.6	แสดงสายอากาศรับ 2 ตัวที่ต่อกับเมจิกทีโดยมีท่อทองเหลืองเป็นตัวยึดไว้	32
รูปที่ 3.7	แสดงขนาดของท่อทองเหลืองที่ออกแบบไว้ใช้ยึดสายอากาศกับตัวเมจิกที	33
รูปที่ 3.8	กราฟแสดงสนามผลรวมของสายอากาศ 2 ตัวที่วางห่างกัน 9.8 เซนติเมตร	34
รูปที่ 3.9	กราฟแสดงสนามผลต่างของสายอากาศ 2 ตัวที่วางห่างกัน 9.8 เซนติเมตร	34
รูปที่ 3.10	ส่วนของสายอากาศรับและมิทเซอร์	35
รูปที่ 3.11	แสดงการหาตำแหน่งของเป้าหมายขณะที่อยู่ทางซ้ายหรือทางขวา	36
รูปที่ 3.12	แสดงวงจรมูลุขของเมจิกที	37
รูปที่ 3.13	แถบสตริปขนาดเท่าของจริงของวงจรมูลุขจริงที่สร้างขึ้นที่ได้จากการคำนวณ	39
รูปที่ 3.14	ส่วนที่ได้ทำการออกแบบด้วยไมโครสตริป	40
รูปที่ 3.15	ตัวแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน	40
รูปที่ 3.16	แถบสตริปที่ได้ออกแบบขนาดเท่าของจริง	41
รูปที่ 3.17	แสดงชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาจากที่ได้ออกแบบไว้	41
รูปที่ 4.1	วิธีทดสอบวงจรตรวจจับเฟส	42
รูปที่ 4.2	ท่อนำคลื่นทองเหลืองจำนวน 3 ชิ้นที่ได้สร้างขึ้นมาจากการออกแบบ	44
รูปที่ 4.3	แสดงการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ	46
รูปที่ 4.4	สายอากาศและอุปกรณ์ที่ใช้ทางด้านส่งในการทดลอง	46
รูปที่ 4.5	การจัดสายอากาศทางด้านรับที่จะวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบผลรวม	48
รูปที่ 4.6	การจัดสายอากาศทางด้านรับที่จะวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบผลต่าง	48
รูปที่ 4.7	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบผลรวมของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบ	49
รูปที่ 4.8	รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบผลต่างของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบ	50
รูปที่ 4.9	บล็อกไดอะแกรมแสดงการจัดอุปกรณ์ในการทดลองที่ 4	51
รูปที่ 4.10	แสดงการจัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 4	52

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารด้านต่างๆได้เข้ามามีบทบาทต่อการดำรงชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นรูปแบบการสื่อสารที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากกาที่ประเทศไทยมีดาวเทียมไทยคมเป็นของตนเองและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มบทบาทมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบที่เป็นระบบการสื่อสารที่มีสถานีทวนสัญญาณ (ดาวเทียม) อยู่ที่ระดับสูงมากจนแทบจะไม่มีสิ่งที่เป็นอุปสรรคมา กีดขวางเส้นทางการสื่อสาร รูปแบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมในประเทศไทยที่มีใช้กันมากในขณะนี้ คือการแพร่กระจายภาพและเสียงในความถี่ย่าน C (C-Band : 4.0~8.0 GHz) และย่าน Ku (Ku-Band : 12.4~18.0 GHz) อุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการรับและส่งสัญญาณดาวเทียมก็คือ สายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วในระบบสายอากาศ กรณีที่จะรับสัญญาณเข้ามานั้นจะต้องทำการหันสายอากาศไปให้ตรงกับทิศทางหรือตำแหน่งที่สัญญาณส่งมา เพื่อให้สามารถรับสัญญาณนั้นได้อย่างเต็มที่ ซึ่งสำหรับในกรณีที่ตำแหน่งการส่งสัญญาณอยู่กับที่ การรับสัญญาณจะไม่มีปัญหาเกิดขึ้นโดยที่จานสายอากาศรับจะอยู่ในตำแหน่งที่คงที่ก็สามารถรับสัญญาณได้อย่างเต็มที่ก็ได้ แต่สำหรับในกรณีที่ตำแหน่งของการส่งสัญญาณมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา จะต้องทำการหันจานสายอากาศรับไปยังตำแหน่งที่ทำการรับสัญญาณสูงสุดตลอดเวลาเพื่อให้รับสัญญาณได้เต็มที่ หรือปรับทิศทางและตำแหน่งของการส่งสัญญาณนั้นให้กลับมาที่เดิม

ระบบที่สามารถรับสัญญาณได้ตลอดเวลาโดยการหมุนจานสายอากาศให้ไปรับสัญญาณอย่างอัตโนมัติ เรียกว่า ระบบการติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ (Autotracking System) ซึ่งมีใช้ทั่วไปในระบบเรดาร์ (Radar System) และในการรับสัญญาณดาวเทียมของสถานีภาคพื้นดิน สำหรับการติดตามตำแหน่งของดาวเทียม

ปริญญาโทนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษา,ออกแบบและทดลองใช้ระบบการติดตามการรับสัญญาณอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ ในส่วนของภาครับสัญญาณและภาควิเคราะห์สัญญาณ กรณีที่ต้องการจะรับสัญญาณจากดาวเทียม ซึ่งตามปกติแล้วตำแหน่งของดาวเทียมนั้นจะดูคล้ายกับว่ามีตำแหน่งอยู่กับที่เมื่อเทียบจากพื้นโลก ส่วนตำแหน่งในการรับสัญญาณนั้นจะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาคือจานสายอากาศรับเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาตัวเอง เช่น จานสายอากาศที่ติดอยู่บนหลังคารถยนต์

เนื่องจากรถยนต์มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจะต้องมีการปรับจานสายอากาศรับ ให้หันหน้าไปยังตำแหน่งของดาวเทียม จึงต้องใช้ระบบการติดตามการรับสัญญาณดาวเทียมแบบอัตโนมัติ เพื่อที่จะหมุนจานสายอากาศให้รับสัญญาณได้แรงที่สุด

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ระบบการติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ

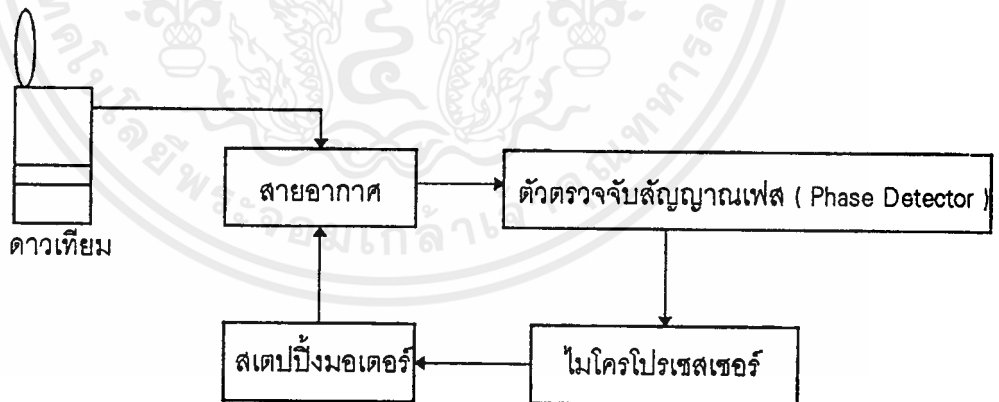
ระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ คือ ระบบที่สามารถรับสัญญาณได้ตลอดเวลาโดยการหมุนจานสายอากาศให้ไปรับสัญญาณได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งจะมีใช้โดยทั่วไปเช่นในระบบเรดาร์และในการรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีภาคพื้นดิน

ระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติมีส่วนประกอบ 3 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ภาครับสัญญาณ ได้แก่ ส่วนของสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณจากดาวเทียม
2. ภาควิเคราะห์สัญญาณ เป็นส่วนของการตรวจจับสัญญาณ (Detector) ที่ได้มาจากภาครับสัญญาณ โดยจะนำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งของดาวเทียมเพื่อให้ได้ความแม่นยำมากที่สุด แล้วจึงส่งต่อไปให้ยังภาคควบคุมสายอากาศ

3. ภาคควบคุมสายอากาศ เป็นส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่ของสายอากาศทั้งหมดโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) และสเต็ปป์มอเตอร์ (Stepping Motor) ให้มีการขับเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการโดยใช้สัญญาณที่ได้จากภาควิเคราะห์สัญญาณ

ส่วนต่างๆของระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบติดตามสัญญาณแบบอัตโนมัติ

ระบบติดตามเป้าหมาย หรือระบบติดตามสัญญาณที่ใช้ในระบบเรดาร์นั้นจะใช้หาตำแหน่งของเป้าหมาย (Target) และใช้ทำนายตำแหน่งในอนาคตของเป้าหมายนั้น โดยใช้มุมเงย (Elevation Angle), มุมทิศ (Azimuth Angle) และทุกๆ เส้นทางเดิน หรือเส้นทางเดินเดียวของเรดาร์ที่ไปยังเป้าหมายนั้น ๆ

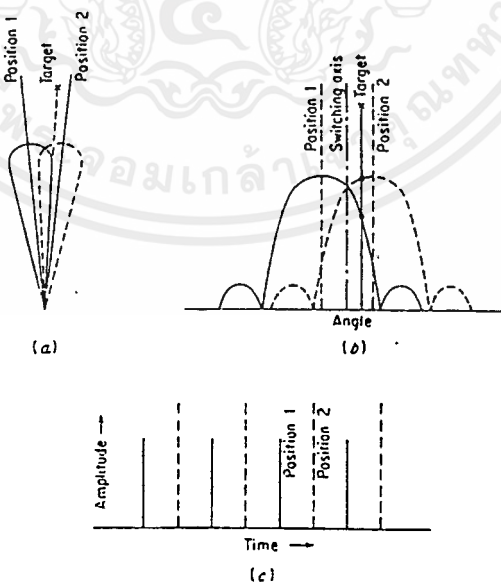
รูปแบบ (Pattern) ของสายอากาศที่ใช้ในระบบการติดตามเป้าหมาย จะถูกนำมาใช้หามุมและตำแหน่งที่ผิดพลาดไป (Error Signal) ซึ่งวิธีการหามุม และตำแหน่งที่ผิดพลาดไปนี้สามารถหาได้หลายวิธี ดังนี้

### 2.1.1 วิธีการสร้างฟูเป็นลำดับ (Sequential Lobing) [1]

รูปแบบของสายอากาศตามปกติที่ใช้กับระบบการติดตามเป้าหมาย ในระบบเรดาร์นั้นเป็นแบบลำคลื่นรูปปลายดินสอ (Pencil Beam) ที่สมมาตรซึ่งความกว้างของลำคลื่น (Beamwidth) ทางด้านมุมเงยและมุมทิศจะมีค่าเท่ากัน

ตามแนวแกนหลักของสายอากาศ ความแตกต่างระหว่างตำแหน่งของเป้าหมาย และทิศทางอ้างอิง คือ มุมที่ผิดพลาดไป (Angle Error) ในระบบการติดตามสัญญาณของเรดาร์จะพยายามหาตำแหน่งสายอากาศที่ทำให้ มุมที่ผิดพลาดไปนั้นเป็นศูนย์ คือไม่มีมุมที่ผิดพลาดนั่นเอง และเมื่อมุมที่ผิดพลาดเป็นศูนย์แล้วเป้าหมายก็จะอยู่ในตำแหน่งทิศอ้างอิง (Switching Axis)

วิธีหนึ่งที่จะใช้หาทิศทาง และขนาดของมุมที่ผิดพลาดที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งนั้นโดยการเลือกลำคลื่นที่ทำการสวิตช์ระหว่างตำแหน่ง 2 ตำแหน่ง ตามรูปที่ 2.2 ซึ่งเรียกว่า การสลับฟูคลื่น (Lobe Switching) หรือ การสร้างฟูคลื่นเป็นลำดับ



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบของสายอากาศการสลับฟูคลื่น

และสัญญาณที่บอกความผิดพลาดใน 1 มิติ

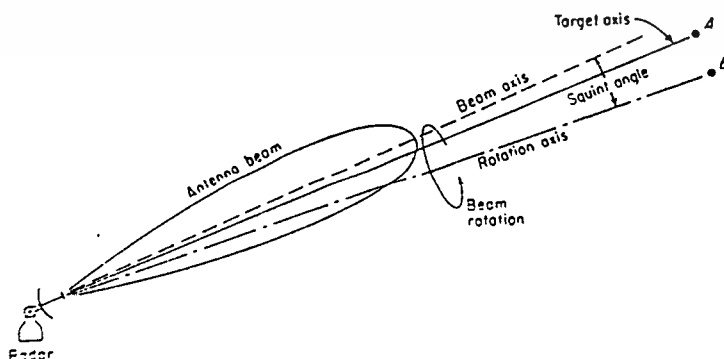
รูปที่ 2.2 (a) แสดงลำคลื่นของสายอากาศพิกัดเชิงขั้ว (Polar) ที่มีพูข้าง (Side Lobe) น้อยที่สุดใน การสลับไป 2 ตำแหน่ง ส่วนรูปที่ 2.2 (b) แสดงลำคลื่นของสายอากาศพิกัดเชิงสี่เหลี่ยม (Rectangular Coordinate) และในรูปที่ 2.2 (c) แสดงสัญญาณบอกความผิดพลาดที่หาได้จากการที่เป้าหมายไม่อยู่บนทิศ อ้างอิงความแตกต่างของขนาดศักดาไฟฟ้าที่หาได้ของทั้ง 2 ตำแหน่งที่ทำการสลับก็คือ มุมที่คลาด เคลื่อนไปจากเป้าหมายจากทิศอ้างอิง และเมื่อต้องการให้ตรงกับเป้าหมายจะต้องเคลื่อนที่สายอากาศไป จนกว่าศักดาไฟฟ้าของทั้ง 2 ตำแหน่งนั้นจะมีค่าเท่ากัน นั่นคือค่าของสัญญาณที่ผิดพลาดจะมีค่าเท่ากับ ศูนย์แล้วเป้าหมายก็จะอยู่บนแกนทิศอ้างอิง และตำแหน่งของเป้าหมายก็จะถูกหาได้ในที่สุด

### 2.1.2 วิธีการกวาดแบบกรวย (Conical Scan) [1]

เป็นการติดตามแบบอัตโนมัติ ซึ่งสัญญาณผิดพลาดถูกตรวจจับโดยการหมุนของตัวแพร่คลื่นปฐมภูมิ (Primary Radiator) รอบๆ แกนของตัวสะท้อน (Scan Axis) กับค่าคงที่ของการเปลี่ยนตำแหน่งจากจุด ไฟกัล

#### หลักการของวิธีการกวาดแบบกรวย

ตามภาพที่แสดงหลักการในรูปที่ 2.3 และบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.4 เมื่อลำคลื่นของสาย อากาศถูกหมุนไปรอบๆ แกนหมุนหลัก B ขนาดของสัญญาณที่ได้รับบนแกนของลำคลื่นคือ ระดับ สัญญาณ A และระดับสัญญาณ B ดังรูปที่ 2.3 ถ้าเป้าหมายไม่ได้อยู่บนแกนหลัก จะพบว่าพลังงานที่ได้ รับเมื่อ ตัวแพร่คลื่นอยู่ทางด้านเดียวกันกับเป้าหมายจะมีค่ามากกว่าเมื่ออยู่ตรงกันข้ามดังนั้น สัญญาณที่ บอกความผิดพลาด (Tracking Error) จะมอดูเลต (Modulation) สัญญาณที่ได้รับโดยทำการเปรียบเทียบกับ อัตราการกวาด (Scan Rate) การมอดูเลตขั้นนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงซึ่งถูกสร้างจาก การหมุนโครงสร้างทางกลไปในทิศทางของเป้าหมาย โดยที่ขนาดของการมอดูเลตจะแปรผันตรงกับ สัญญาณที่บอกความผิดพลาด และสัญญาณที่บอกความผิดพลาดนี้จะนำไปใช้ในตัวขยายแบบเซอร์โว (Servo Amplifier) เพื่อที่จะขับสายอากาศไปในทิศทางที่ต้องการนั่นคือทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์

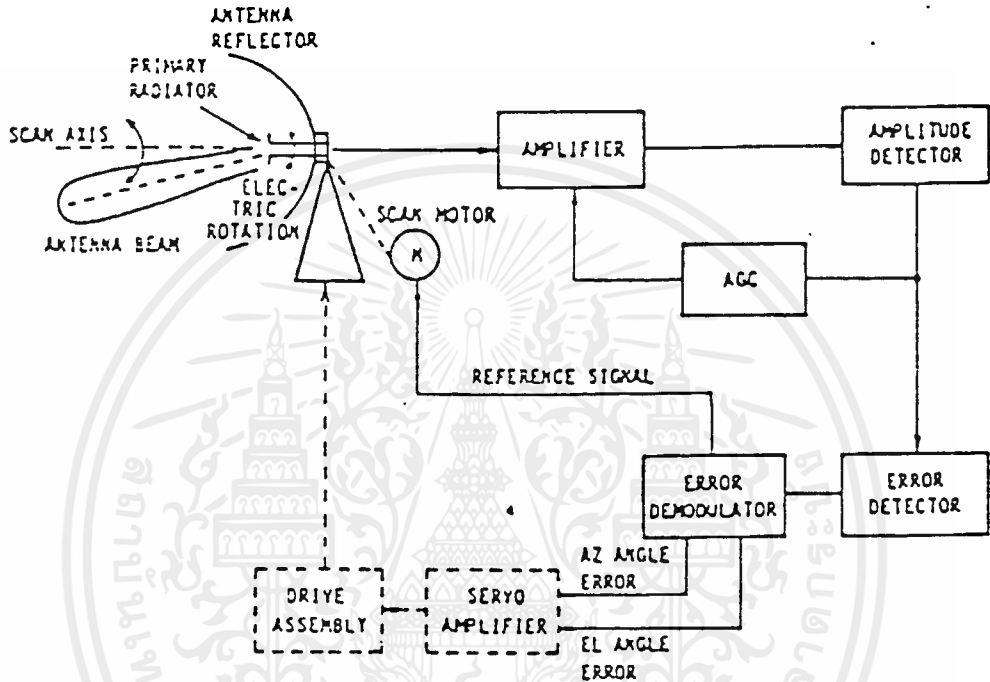


รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของวิธีการกวาดแบบกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเป้าหมายอยู่ในตำแหน่งแกนหลัก ตัวแพร่กระจายคลื่นปฐมภูมิจะได้รับพลังงานเท่ากันในการหมุนทุกๆ ตำแหน่ง

พารามิเตอร์ (Parameter) หลักของสายอากาศแบบการกวาดแบบกรวยคือมุมเฉ (Squint Angle) ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนหมุนกับแกนของลำคลื่นของสายอากาศ (Antenna Beam) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในการเลือกมุมเฉจะพิจารณาระหว่างการสูญเสียตัดข้าม (Crossover Loss) และการเพิ่มของมุมที่ผิดพลาดวิธีนี้ใช้กับเรดาร์ที่ใช้ติดตามสัญญาณขนาดเล็ก



รูปที่ 2.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวิธีการกวาดแบบกรวย

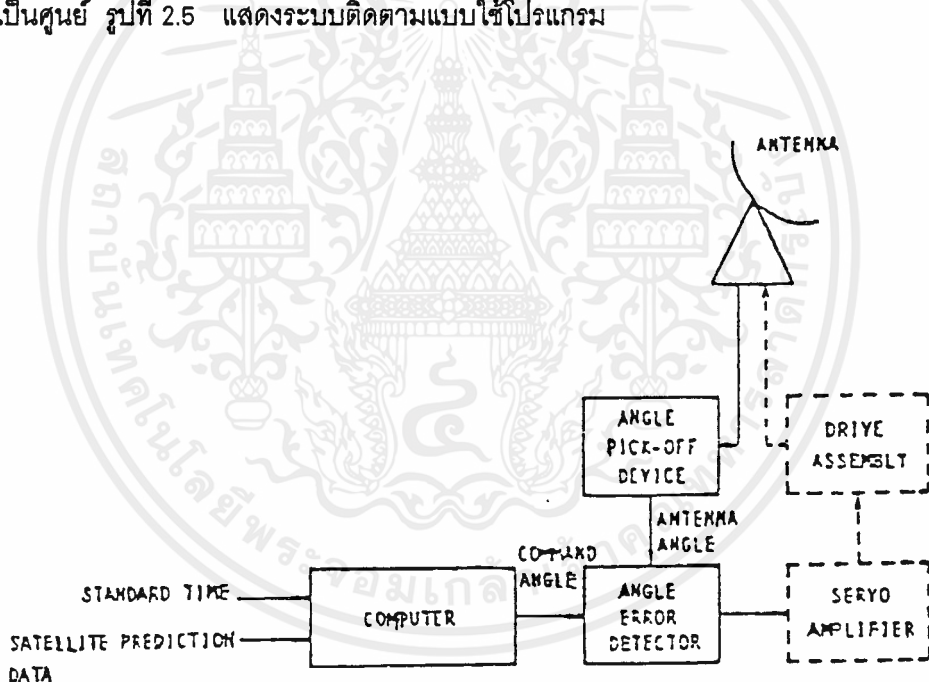
### 2.1.3 ระบบติดตามแบบขั้น (Step Track System)

เป็นวิธีการค้นหาระดับสูงสุดของสัญญาณโดยการปรับตำแหน่งของสายอากาศแบบทีละขั้น และทำการเปรียบเทียบระดับสัญญาณที่ได้รับก่อนและหลังของแต่ละขั้น วิธีนี้เรียกว่า การไต่ระดับ (Hill Climbing) เป็นการอธิบายขบวนการของระดับสัญญาณสูงสุด สัญญาณที่ได้รับถูกตรวจจับโดยเครื่องรับสัญญาณ และดีซีเฮดท์จะถูกแปลงกลับเป็นข้อมูลแบบดิจิตอล โดยตัวแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอล ข้อมูลในรีจิสเตอร์ที่หนึ่ง คือ ระดับสัญญาณที่ถูกส่งตัวอย่างก่อน และข้อมูลในรีจิสเตอร์ที่สอง เป็นระดับสัญญาณที่ถูกส่งทีหลัง แล้วนำข้อมูลที่อยู่ในทั้งสองรีจิสเตอร์มาเปรียบเทียบกันเพื่อตรวจสอบว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขั้นตอนต่อไปก็จะกำหนดทิศทางโดยทำการพิจารณาค่าลอจิก แล้วกำหนดให้เป็นทิศทางเดียวกันสำหรับระดับที่เพิ่มขึ้น และทิศทางตรงกันข้ามสำหรับระดับที่ลดลงหรือเท่ากัน มุมผิดพลาดระหว่างค่ามุมที่อ่านได้จากสายอากาศ และค่ามุมที่ต้องการจะถูกตรวจจับโดยอุปกรณ์ตรวจจับค่าความผิดพลาดของมุม (Angle-error Detector) และสายอากาศถูกเบนไปยังตำแหน่งที่ต้องการโดยระบบควบคุมแบบป้อนกลับ และจะทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ในแนวของอะซิมุทและอีเลเวชัน เพื่อที่จะชี้ลำคลื่นของสายอากาศให้อยู่ในทิศ

ทางตรงกับตำแหน่งของดาวเทียม การหมุนของสายอากาศจะหมุนไปข้างหน้าและถอยหลังอย่างช้าๆทีละชั้นในแนวแกนอะซิมุทและอิเลเวชันรอบๆตำแหน่งสูงสุดของลำคลื่นและสายอากาศจะหยุดตรงตำแหน่งสูงสุดโดยการตรวจจับการเคลื่อนที่นี้การติดตามจะถูกทำซ้ำอีกหลังจากกำหนดระยะห่างของการติดตามวิธีนี้ถูกพัฒนาสำหรับการติดตามสัญญาณของสถานีภาคพื้นดินที่มีจานสายอากาศขนาดเล็ก การติดตามวิธีนี้จะมีผลทำให้เกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากการแกว่งไปมาของระดับสัญญาณที่ได้รับดังนั้นจึงได้มีการนำเอาค่าของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณที่ได้รับมาเป็นตัวควบคุม เพื่อไม่ให้เกิดการผิดพลาด

**2.1.4 ระบบการติดตามแบบใช้โปรแกรม (Program Track System)**

ในระบบนี้จะทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศในทิศทางของดาวเทียมโดยอาศัยข้อมูลจากวงโคจรที่ได้จากการทำนาย คอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณค่าของมุมที่แตกต่างระหว่างมุมที่วัดจากสายอากาศจริงกับมุมที่ได้จากดาวเทียมบังคับการทันทีทันใด ซึ่งทำการตรวจจับโดยอุปกรณ์เข้ารหัสมุม(Angle Encoder) สัญญาณความผิดพลาดจะไปกระตุ้นตัวขยายแบบเซอร์โว ให้ขับสายอากาศโดยมีค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ รูปที่ 2.5 แสดงระบบติดตามแบบใช้โปรแกรม



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของตัววิเคราะห์สัญญาณผิดพลาดสำหรับระบบติดตามแบบใช้โปรแกรม

วิธีนี้จะให้ G/T สูง ความแน่นอนของการติดตามขึ้นอยู่กับความแน่นอนในการคำนวณวงโคจรและความแน่นอนในการชี้ตำแหน่งของสายอากาศเองด้วย ซึ่งนิยมใช้ในการติดตั้งและติดตามดาวเทียมแบบวงโคจรและยังใช้สำหรับการติดตามเป้าหมายที่ไม่สามารถติดตามสัญญาณที่ได้รับได้

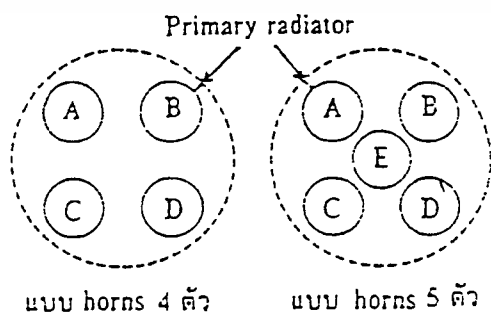
### 2.1.5. ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ (Monopulse Tracking System) [2]

ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ คือ ระบบติดตามเป้าหมายโดยการหาตำแหน่งด้วยการวัดจากความสัมพันธ์ของเฟส หรือขนาด ซึ่งจะเรียกข้อมูลที่ได้รับนี้ว่า มุมที่มีความผิดพลาดไป (Angle Error) ซึ่งหาได้จากพัลส์ที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายเพียงพัลส์เดียว จึงเรียกว่าโมโนพัลส์ เทคนิคนี้เรียกว่า การติดตามแบบโมโนพัลส์ ตั้งโดยห้องปฏิบัติการเบลเทลเลโฟน (Bell Telephone Laboratory) ในปี 1946 อย่างไรก็ตามรู้จักกันมาแต่เดิมว่าเป็น การหาทิศทางใช้พู่เหลื่อม (Simultaneous Lobing) ซึ่งอาจจะเป็นคำอธิบายที่ดีกว่าและมันเป็นผลการทดลองในปี 1928 การติดตามแบบโมโนพัลส์สามารถทำได้โดยใช้ข้อมูลทางขนาดจากจานสายอากาศ, ข้อมูลทางเฟส หรือทั้งสองแบบ เพื่อให้การคาดคะเนที่ดีกว่าแบบก่อนๆ คือ วิธีการสร้างพู่เป็นลำดับและวิธีการกวาดแบบกรวย ประโยชน์ของเรดาร์แบบโมโนพัลส์ (Monopulse Radar) คือ ตามหลักการแล้วสามารถบอกตำแหน่งเป้าหมายได้จากการวัดพัลส์เดียวซึ่งจะมีประโยชน์มาก เมื่อเรดาร์ถูกรบกวนจากสัญญาณอื่น และการกวาดผ่านเพียงครั้งเดียวก็รู้ตำแหน่งเป้าหมายได้ การตรวจวัดค่ามุมของเป้าหมาย คือ กระบวนการหาทิศทางของเป้าหมายเป็นหน้าที่หลักของเรดาร์ (เครื่องหาวัตถุในระยะไกลโดยส่งวิทยุคลื่นสั้นให้สะท้อนกลับมา)

จะพิจารณารายละเอียดเกี่ยวกับการชี้ตำแหน่งติดตามเป้าหมายของจานสายอากาศแบบโมโนพัลส์ การติดตามแบบโมโนพัลส์นั้น แบ่งได้เป็นวิธีการแบบหลายฮอร์น (Multi Horn) และวิธีการแบบโหมดอันดับสูง (Higher Mode)

#### 1. ระบบติดตามโมโนพัลส์แบบหลายฮอร์น ( Multihorn Monopulse Track System ) [3]

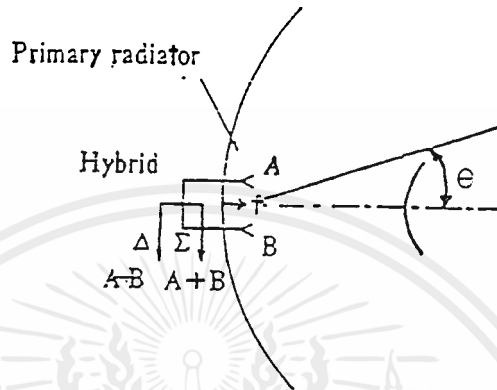
วิธีนี้จะใช้สายอากาศไมโครเวฟแบบฮอร์นเล็กๆ 4 หรือ 5 ตัว เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นปฐมภูมิและเอาต์พุตของสายอากาศเล็กๆเหล่านี้ถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้โวลเตจที่ผิดพลาดไปในการทำมุมกับเป้าหมาย สายอากาศฮอร์นเล็กๆเหล่านี้ถูกวางให้ห่างจากแกนกลางของจานสายอากาศเล็กน้อย แต่จะสมมาตรซึ่งกันและกันเมื่อเทียบกับแกนของจานสายอากาศ มุมของจานสายอากาศที่ผิดพลาดไปสามารถรู้ได้โดยการเปรียบเทียบเฟสหรือขนาดของสัญญาณที่รับได้ของแต่ละสายอากาศรูปฮอร์น 1 อัน (Horn Antenna)



รูปที่ 2.6 วิธีการติดตามเป้าหมายแบบใช้หลายฮอร์น

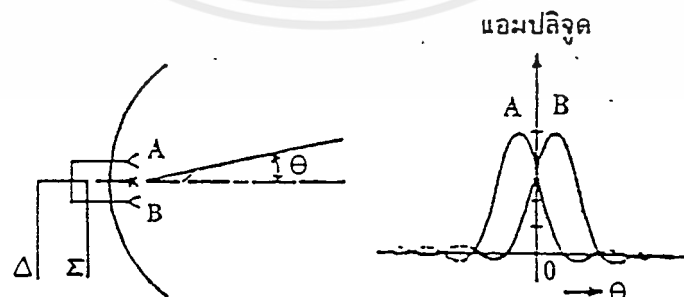
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้เข้าใจง่าย เราจะลองพิจารณาเฉพาะสายอากาศแบบฮอร์น 2 อัน ซึ่งเป็นตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiator) สายอากาศ A และ B ถูกจัดวางอย่างสมมาตรกันบนสองข้างของโฟกัส F ของจานสายอากาศ ถ้าเอาเอาต์พุตของ A และ B มาผสมกัน จะได้สัญญาณรวม  $A+B$  (หรือ  $\Sigma$  signal) และสัญญาณผลต่าง  $A-B$  (หรือ  $\Delta$  signal)



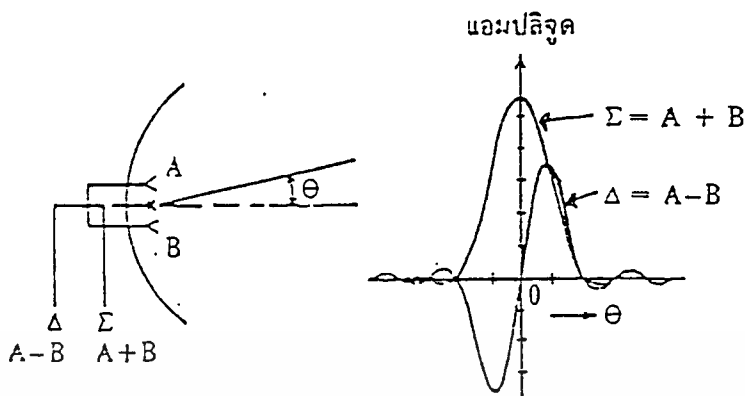
รูปที่ 2.7 การจัดวางตัวแพร่กระจายคลื่นแบบ 2 ตัว

จากรูป 2.8 เป็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเมื่อตัวแพร่กระจายคลื่นปฐมภูมิ 2 ตัว วางอยู่ทั้งสองข้างของแนวแกนกลางของจานสายอากาศ (Boresight Axis) เส้นโค้ง A แสดงรูปแบบลำคลื่น (Beam Pattern) ที่สร้างขึ้นโดยตัวแพร่กระจายคลื่นปฐมภูมิ A และโค้ง B สร้างโดยตัวแพร่กระจายคลื่นปฐมภูมิ B เมื่อตัวแพร่กระจายคลื่นปฐมภูมิถูกแยกห่างเล็กน้อยจากจุดโฟกัส ลำคลื่นของสายอากาศจะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากทิศทางของแกนจานสายอากาศ



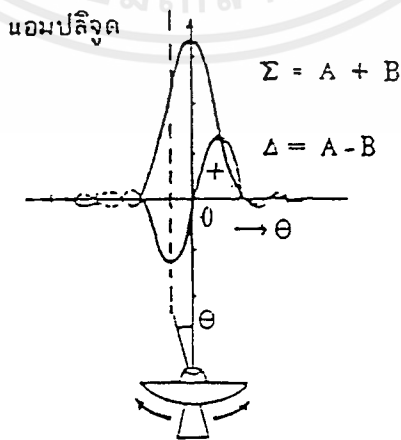
รูปที่ 2.8 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของตัวแพร่กระจายคลื่นปฐมภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 สัญญาณผลบวกและสัญญาณผลต่าง

รูปที่ 2.9 เป็นรูปแบบที่ได้จากการรวมลำคลื่น A และ B จะเห็นได้ว่า สัญญาณผลบวก ได้จากการบวกโวลเตจ A และ B ส่วนสัญญาณผลต่างได้จากผลต่างระหว่างโวลเตจ A และ B เมื่อสัญญาณผลต่างเป็นศูนย์ และสัญญาณผลบวกซึ่งรวมถึงสัญญาณที่ใช้เพื่อการติดต่อสื่อสารจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ตรงกับทิศทางของเป้าหมายนั่นคือ มุม  $\theta$  เป็นศูนย์ และถ้ามุม  $\theta$  อยู่ทางด้านซ้ายมือของศูนย์กลาง สัญญาณผลต่างจะมีค่าเป็นลบ แต่เมื่อมุม  $\theta$  อยู่ทางด้านขวามือ สัญญาณผลต่างจะมีค่าเป็นบวก โดยที่สัญญาณผลบวกมีขนาดลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อมุม  $\theta$  อยู่ใกล้ทิศทางของเป้าหมาย ดังนั้นเป้าหมายจึงสามารถถูกชี้ตำแหน่งติดตามได้โดยการขับเคลื่อนจานสายอากาศในทิศทางที่สัญญาณผลต่าง มีค่าเป็นศูนย์เสมอ

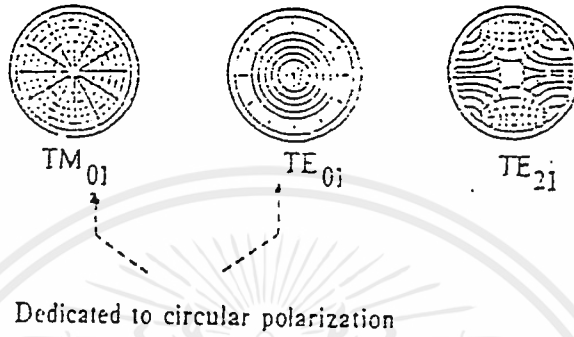


รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณผลบวกและสัญญาณผลต่างเมื่อมุม  $\theta$  เปลี่ยนไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

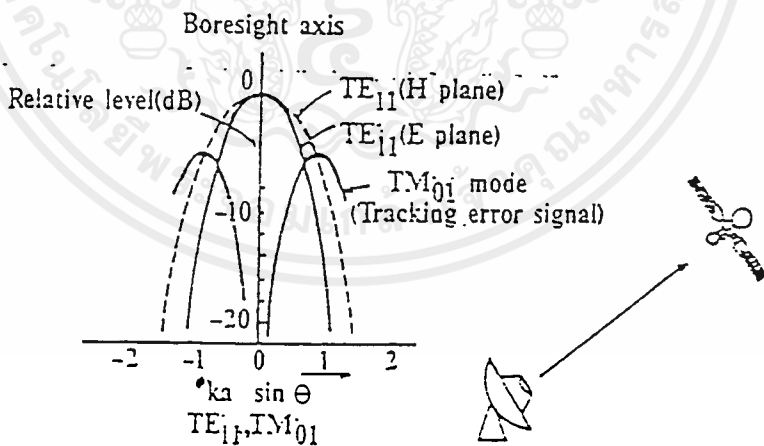
2. ระบบติดตามโมโนพัลส์แบบโหมดอันดับสูง (Higher Mode Monopulse Track System)

โหมดอันดับสูงของคลื่นที่ใช้สำหรับให้ทิศทางจนวนสายอากาศติดตามเป้าหมายนั้น ได้แก่  $TM_{01}$ ,  $TE_{01}$  และ  $TE_{21}$  สำหรับท่อนำคลื่นกลม อย่างไรก็ตามเมื่อโพลาริเซชันแบบวงกลมถูกใช้สำหรับการสื่อสาร กรณีนี้  $TM_{01}$  หรือ  $TE_{01}$  จะใช้สำหรับการติดตามเป้าหมาย



รูปที่ 2.11 โหมดอันดับสูงที่ใช้สำหรับการติดตามเป้าหมาย

ในกรณีการรวมระหว่างโพลาริเซชันแบบวงกลมและแบบเชิงเส้น จะใช้การรวมของโหมด  $TM_{01}$  และ  $TE_{01}$  หรือใช้การรวมของสองโหมด  $TE_{21}$  (คือ  $TE_{21}$  และ  $TE_{21}$ ) ซึ่งเป็นโหมดตั้งฉากกันทางไฟฟ้าซึ่งกันและกัน เป็นโหมดสำหรับการติดตามดาวเทียมของจนวนสายอากาศ

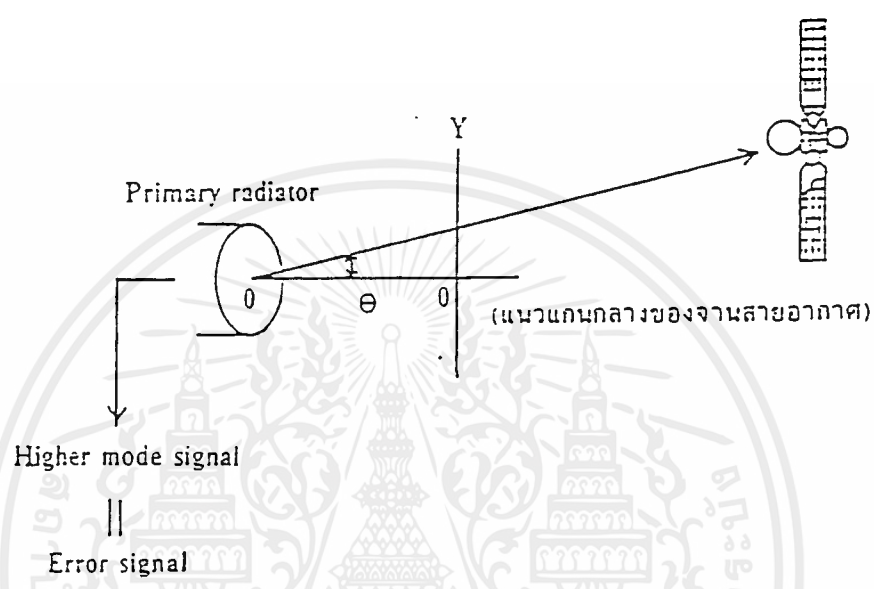


รูปที่ 2.12 รูปแบบโหมดโดมิแนนท์ และโหมดอันดับสูง

ดังแสดงในรูปซึ่งเป็นรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในโหมด  $TE_{11}$  ซึ่งเป็นโหมดโดมิแนนท์ และรูปแบบในโหมด  $TM_{01}$  ซึ่งเป็นโหมดอันดับสูงอันหนึ่งที่แกนกลาง  $\theta = 0$  องศา ในทิศทางนี้โหมด  $TM_{01}$  สัญญาณติดตามผิดพลาด (Tracking Error Signal) จะมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่โหมดโดมิแนนท์ คือ โหมด

$TE_{11}$  มีค่าสูงสุด เราสามารถเข้าใจได้โดยง่ายว่า เมื่อจานสายอากาศชี้ในทิศทางของแนวแกนกลางของจานสายอากาศจะไม่มีโหมด  $TM_{01}$  ในระบบการรับของจานสายอากาศ

เมื่อจานสายอากาศชี้ทิศทางเบี่ยงเบนไปจากแกนแนวแกนกลางของจานสายอากาศ โหมด  $TM_{01}$  จะถูกรับได้ขณะที่ระดับของ  $TE_{11}$  ลดลงเล็กน้อย ดังนั้นถ้าจะให้โหมดโดมิแนนท์ที่มีค่าสูงสุดอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาจะต้องปรับทิศทางจานสายอากาศเพื่อให้โหมดอันดับสูงมีสัญญาณติดตามผิดพลาดเป็นศูนย์เสมอ



รูปที่ 2.13 สัญญาณติดตามผิดพลาด

วิธีนี้เหมาะสำหรับสายอากาศแบบแคสซีเกรน (Cassegrain) และเหมาะสำหรับนำไปใช้กับสายอากาศตามสถานีภาคพื้นดิน

### 2.2 เทคนิคการวัดค่ามุมผิดพลาดในระบบโมโนพัลส์

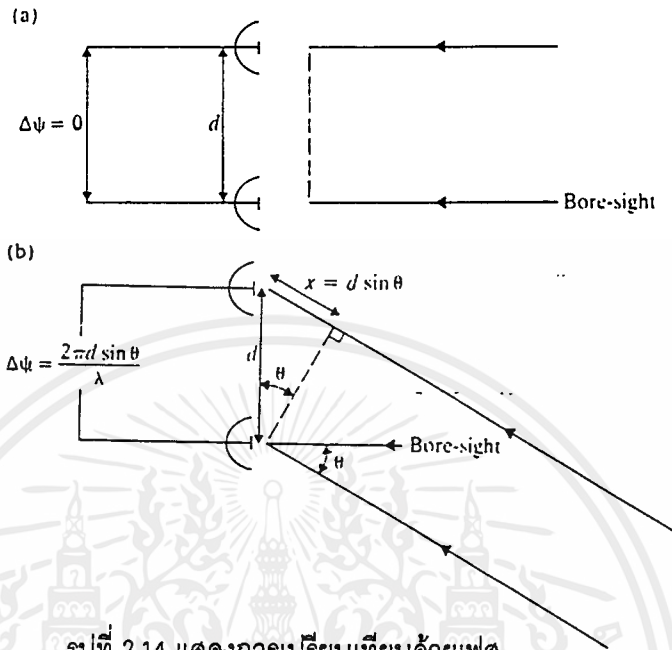
1. การเปรียบเทียบด้วยเฟส ( Phase - Comparison )
2. การเปรียบเทียบด้วยขนาด ( Amplitude - Comparison )
3. การเปรียบเทียบโดยใช้ทั้งขนาดและเฟส ( Amplitude - Phase - Comparison )

โดยพิจารณาแต่ละวิธีดังนี้

#### 2.2.1 การเปรียบเทียบด้วยเฟส [2]

จะใช้สายอากาศ 2 ตัวแบบอยู่ที่วางติดกัน และแต่ละอันต้องขนานกันด้วย โดยการเปรียบเทียบความต่างเฟสของทั้งสองของเอาต์พุตเพื่อนำมาเป็นข้อมูลของมุมที่ผิดพลาดไปเมื่อสัญญาณสะท้อนกลับมา ในแนวแกนกลางของจานสายอากาศของสายอากาศ สัญญาณทั้งสองจะมาถึงพร้อมๆ กันรวมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.14 (a) แต่ถ้าสัญญาณสะท้อนกลับมาทำมุม  $\theta$  กับแนวแกนกลางของจานสายอากาศของสายอากาศ สัญญาณจะมาถึงสายอากาศอันหนึ่งช้ากว่าอีกอัน เพราะมันมีการเดินทางที่มากกว่าเป็นระยะ  $X$  โดยที่  $X = d \sin \theta$  ตามรูปที่ 2.14 (b)

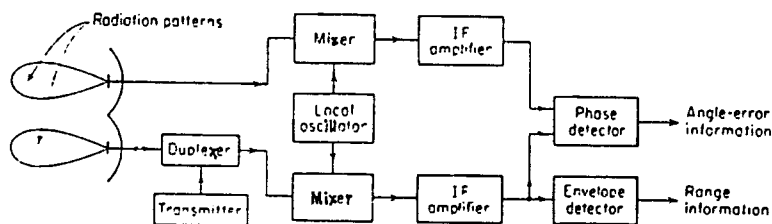


รูปที่ 2.14 แสดงการเปรียบเทียบด้วยเฟส

เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างของสายอากาศ ในหน่วยเป็นเมตร แล้วระยะ  $X$  จะถูกแสดงในรูปของเศษส่วนของความยาวคลื่นเรดาร์ ( $\lambda$ ) กับความต่างเฟส ( $\Delta\psi$ ) ระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็นดังนี้

$$\Delta\psi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (\text{radians}) \quad (2.1)$$

ขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายจะมีค่าเท่ากัน แต่จะมีเฟสแตกต่างกัน และความต่างเฟสนี้สามารถวัดได้ด้วยเฟสชิฟเตอร์ (Phase Shifter) แล้วเซอร์โวลูป (servo loop) จะจัดการกับเอาต์พุตของเฟสชิฟเตอร์จนกระทั่งความต่างเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ จำนวนของการชิฟเฟสที่ต้องทำให้ความต่างเฟสมีค่าเป็นศูนย์นี้ก็คือการวัดค่าของมุมที่ผิดพลาดไปนั่นเอง

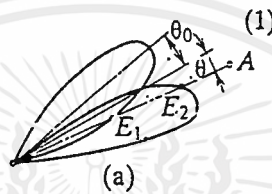


รูปที่ 2.15 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการเปรียบเทียบด้วยเฟส

ประโยชน์ที่ได้จากวิธีนี้ค่อนข้างมีข้อจำกัด เพราะจะมีปัญหาเกี่ยวข้องกับความคลุมเครือของตำแหน่งของมุมที่เรียกว่า เกรตติงโลบ (Grating Lobe) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อนำสายอากาศที่มีช่องว่างๆ 2 ช่องมาใช้ แต่ก็สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการใช้สายอากาศหลายๆ ตัว (Phase Antenna Array)

2.2.2 การเปรียบเทียบด้วยขนาด [2],[4]

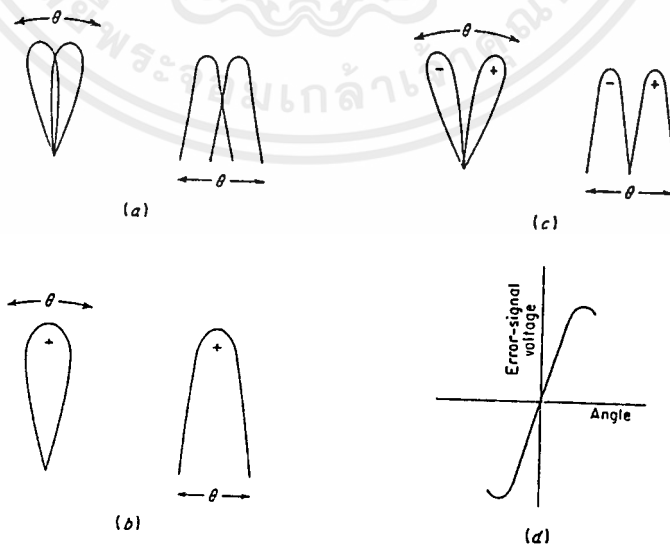
ในการใช้การตรวจวัดค่ามุมโดยการเปรียบเทียบด้วยขนาด(Amplitude-Comparison Angle Sensing) จะประกอบด้วยการพิจารณาจากรูปแบบลำคลื่นของสายอากาศที่เหลื่อมกันเล็กน้อย (Overlapping) และมีขนาดที่เท่ากัน โดยมีค่ามุม  $\theta_0$  จากแกนสมมาตร (Equisignal Axis: แกนที่ลากตามยาวที่ตัดจุดที่ทำให้ขนาดของทั้งสองลำคลื่นมีค่าเท่ากัน) ดังแสดงตามรูปที่ 2.16



(1) equisignal

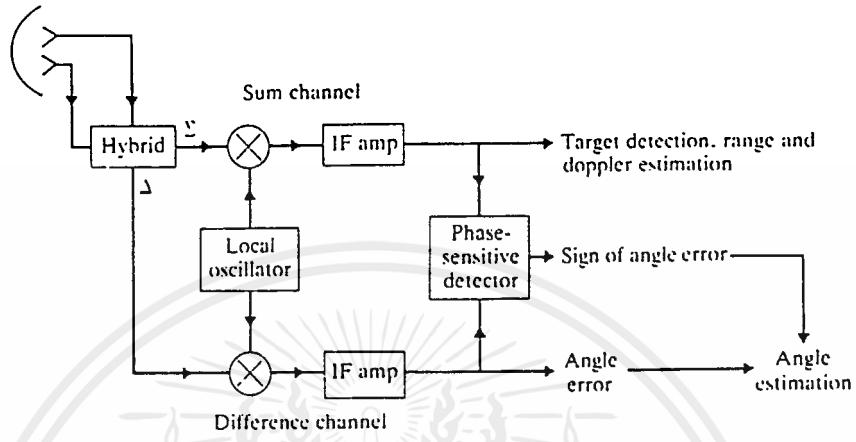
รูปที่ 2.16 แสดงการเปรียบเทียบด้วยขนาด

จากรูปที่ 2.16 เป้าหมาย A จะทำมุมห่างจากแกนสมมาตรเป็นมุม  $\theta$  พบว่าสัญญาณที่ได้รับในลำคลื่นที่ 1 (E1) จะมีขนาดต่ำกว่าลำคลื่นที่ 2 (E2) ซึ่งขนาดที่ต่างกันของสองลำคลื่นนี้ จะเป็นตัวกำหนดขนาดของมุมออฟเซตจากแกนสมมาตรกับเป้าหมาย เครื่องหมายของผลต่างจะแสดงถึงทิศทางของเป้าหมายในการวัดระบบพิกัด เช่น ขึ้น,ลง จากแกนในกรณีของอิลเวชั่น



รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบของสายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบด้วยขนาด

สองลำคลื่นจากจานสายอากาศถูกต่อเข้ากับไฮบริดซึ่งจะให้สัญญาณผลรวมของกำลังคลื่นของสองลำคลื่นแสดงตามภาพ 2.17 (b) และสัญญาณผลต่างตามภาพ 2.17 (c) โดยมีรูปแบบของสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณตามภาพ 2.17(a) สัญญาณเหล่านี้จะป้อนให้กับเครื่องรับทั้งสองที่แมตช์กันเพื่อจะนำสัญญาณมามิกซ์กันให้กลายเป็นความถี่ที่ต่ำลงและถูกขยายด้วย ตามรูป 2.18



รูปที่ 2.18 บล็อกไดอะแกรมของระบบโมโนพัลส์ที่ใช้การเปรียบเทียบด้วยขนาด

ลำคลื่นผลรวมใช้สำหรับการตรวจวัดหาเป้าหมายและเพื่อวัดข้อมูลทางระยะทาง อัตราการขยายของผลรวมลำคลื่นซึ่งมีทิศทางตรงกับเป้าหมายจะให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าเป้าหมายที่ในแนวแกนกลางของจานสายอากาศ (Boresight) อย่างไรก็ตามลำคลื่นผลรวมจะกว้างกว่าลำคลื่นของสัญญาณแต่ละตัว ดังนั้นจะไม่ใช้วัดมุม

สำหรับทางด้านของผลต่างก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากความผิดพลาด(error voltage)ซึ่งเป็นสัดส่วนอย่างคร่าวๆ กับมุมที่เบี่ยงเบนไปจากเป้าหมายในแนวแกนกลางของจานสายอากาศ และไม่มีเอาต์พุตเมื่อขนาดของทั้งสองที่สะท้อนกลับมาเท่ากัน การจางหายของสัญญาณสะท้อนกลับสามารถเกิดขึ้นได้เท่าๆ กันในทั้ง 2 ลำคลื่นของสายอากาศซึ่งมันจะไม่มีผลต่อการเปรียบเทียบนี้ นอกจากนี้จะมีอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำๆ ดังนั้นจึงใช้สัญญาณทางด้านผลต่างมาหามุมที่ผิดพลาด

ตัวตรวจจับเฟส (Phase sensitive detector) ตามรูปที่ 2.18 ใช้หาศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากความผิดพลาดที่จะนำมาใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว (Servo motors) ให้ไปขับเคลื่อนสายอากาศไปทางซ้ายหรือทางขวาให้มีทิศทางตรงกับตำแหน่งของเป้าหมาย

ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ตามรูปที่ 2.18 มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนซึ่งทั้ง 2 ส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

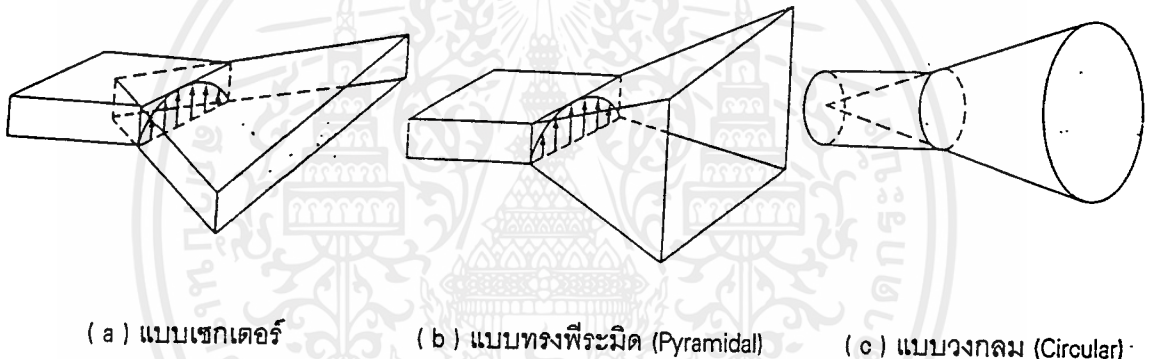
**ภาครับสัญญาณ**

ประกอบด้วยสายอากาศที่มีลำคลื่นรูปปลายดินสอจำนวน 2 ตัว วางชิดกันและขนานกันเพื่อให้ได้รูปแบบของสายอากาศที่มีลักษณะเหลี่ยมล้ำกันเล็กน้อยซึ่งในบริเวณนี้พบนี้ได้เลือกใช้สายอากาศฮอร์น

## ทฤษฎีเบื้องต้นของสายอากาศฮอร์น [5]

เนื่องจากถ้าใช้ท่อแบบสี่เหลี่ยมเป็นตัวแพร่พลังงานออกไปสู่อากาศนั้น จะเห็นว่าจะเกิดข้อเสียหลายอย่าง เช่น จะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่น เพราะเกิดสภาพไม่แมตช์ ระหว่างปากของท่อกับอากาศ และข้อเสียอีกอย่างคือ จะเกิดการหักเห (Diffraction) ที่ขอบของท่อทำให้ลำคลื่นไม่เป็นรูปแบบที่มีทิศทาง (Direction Pattern) ปัญหาเหล่านี้อาจแก้ได้โดยทำการขยายปากของท่อให้กว้างขึ้นเป็นฮอร์น โดยการเริ่มหักท่อนำคลื่นมาเทอร์มินेटด้วยฮอร์น ตามแบบใดแบบหนึ่งดังรูปที่ 2.19 จะทำให้พลังงานจากฮอร์นส่งตรงไปยังอากาศได้ เพราะเกิดการแมตช์จากฮอร์นกับอากาศ ทำให้ทิศทางดีขึ้นและการหักเหลดลง

ลักษณะของฮอร์นมีด้วยกันหลายแบบ แต่ที่แสดงในรูปที่ 2.19 ทั้งสามแบบเป็นแบบที่นิยมใช้กันมาก ฮอร์นแบบเซกเตอร์ (Sectoral Horn) นั้น ปากจะบานออกในทิศทางเดียวโดยจะบานทางแนวราบซึ่งคล้ายกับตัวสะท้อนพาราโบลิกแบบฟิลล์บ็อกซ์ (Pillbox Parabolic Reflector)



( a ) แบบเซกเตอร์ ( b ) แบบทรงพีระมิด (Pyramidal) ( c ) แบบวงกลม (Circular)

รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบฮอร์น

แบบทรงพีระมิด ปากจะบานออกทั้งสองทิศทาง รูปร่างคล้ายพีระมิดที่ถูกตัดยอดออก ส่วนแบบรูปกรวย ได้รับท่อนำคลื่นแบบกลมลักษณะจึงเป็นรูปกรวย ถ้าพิจารณารายละเอียดให้มากขึ้นอีกในรูปที่ 2.19 (a) มุมบาน (Flare Angle)  $\phi$  ถ้ามีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้หน้าคลื่น (Wavefront) ที่ออกไปมีลักษณะเป็นเชิงทรงกลม (Spherical) แทนที่จะเป็นคลื่นระนาบ (Plane Wave) ดังนั้นแบบนี้จะเรียกชื่อเฉพาะว่าชาลโรลฮอร์น (Shallow Horn) มีผลเสียในทางการชี้ทิศทาง ในทางปฏิบัติถ้าค่ามุม  $\phi$  มีค่า  $40^\circ$ ,  $L / \lambda$  เท่ากับ 6 จะให้ความกว้างลำคลื่น  $66^\circ$  ณ ระนาบของฮอร์น, ค่าไดเรกทิฟแกนที่สูงสุด (Maximum Directive Gain) เท่ากับ 120 เป็นต้น

การใช้แบบพีระมิด หรือ รูปกรวยจะทำให้การชี้ทิศทางทั้งหมดดีขึ้น เพราะโครงสร้างของมันที่มีการบานออกมากกว่าหนึ่งทิศทาง ตัวสายอากาศฮอร์นเองจะให้ค่าการชี้ทิศทางสู่สายอากาศที่ประกอบด้วยตัวสะท้อนแบบพาราโบลิก (Parabolic Reflector) ไม่ได้ แต่การชี้ทิศทางก็อยู่ในเกณฑ์ดี และมีแบนวิดท์พอประมาณ และการสร้างทำได้ง่าย และยังสามารถใช้กับท่อนำคลื่นได้ง่าย ซึ่งบางครั้งอาจใช้เดี่ยวๆ บาง

ครั้งก็ใช้ร่วมกับตัวสะท้อนแบบพาราโบลา ซึ่งสายอากาศฮอร์นขณะนี้เป็นสายอากาศปฐมภูมิ (สายอากาศซึ่งตัวมันเองทำการแพร่กระจายคลื่นออกมา) นั่นเอง

**การจัดวางสายอากาศฮอร์นที่ใช้ทดสอบในระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์**

ในระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยขนาดนั้น ต้องใช้สายอากาศที่มีลักษณะรูปปลายดินสอจำนวน 2 ตัววางชิดกันและขนานกันแล้วนำไปต่อกับอุปกรณ์เปรียบเทียบเมจิกที่ให้เอาต์พุตที่ได้จากอุปกรณ์เมจิกที่นั้นมีลักษณะเป็นสนามไฟฟ้าผลรวมและสนามไฟฟ้าผลต่าง ซึ่งจะไปเป็นอินพุตของวงจรตัวตรวจจับเฟสเพื่อใช้วิเคราะห์ทิศทางของแหล่งกำเนิดสัญญาณต่อไป ซึ่งในการทดสอบได้เลือกใช้สายอากาศฮอร์นแบบกรวยเป็นสายอากาศรับซึ่งมีคุณสมบัติตามที่กล่าวข้างต้น และสนามไฟฟ้าผลรวมกับสนามไฟฟ้าผลต่างสามารถพิจารณาจากผลการคำนวณที่ได้จากสมการต่อไปนี้

$$E(\text{total}) = [E(\text{single element at reference point})] * [AF] \quad (2.2)$$

โดยที่  $E(\text{total})$  คือ สนามไฟฟ้าผลรวม หรือ สนามไฟฟ้าผลต่าง

$E(\text{single element at reference point})$  คือ สนามไฟฟ้าของสายอากาศแต่ละอันที่นำมาเรียงเป็นอาเรย์ ในที่นี้ก็คือ สนามไฟฟ้าของสายอากาศฮอร์นแบบกรวยเพียงตัวเดียว นั่นเอง

AF คือ อาเรย์แฟคเตอร์ (Array Factor)

**สนามไฟฟ้าของสายอากาศฮอร์นแบบกรวย**

E-plane

$$E_\theta = \frac{jka^2 E_o e^{-jkr}}{r} \left[ \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \quad (2.3)$$

$$E_{\theta_n} = \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (2.4)$$

H-plane

$$E_\phi = \frac{jka^2 E_o e^{-jkr}}{r} \left\{ \cos \theta \left[ \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \right\} \quad (2.5)$$

$$E_{\phi_n} = \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (2.6)$$

เนื่องจากสนามไฟฟ้าทั้งระนาบ E และระนาบ H หลังจากที่ทำกรอนอมาไลซ์แล้วมีค่าเท่ากัน จึงคิดเพียงระนาบใดระนาบหนึ่ง

ดังนั้นจะได้ว่า  $E(\text{single element at reference point})$  มีค่าเท่ากับ

$$\frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ a คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ 0.4λ

k คือ 2π / λ

ดังนั้นจึงได้เป็น 
$$\frac{J_1(251 \sin \theta)}{251 \sin \theta} \tag{2.8}$$

ส่วน AF ของสนามไฟฟ้าผลรวมและสนามไฟฟ้าผลต่างจะมีค่าต่างกันดังนี้คือ [6]

1. AF ของสนามไฟฟ้าผลรวม

เมื่อ 2N คือ จำนวนเอเลเมนต์ในอาเรย์

d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ

θ<sub>0</sub> คือ มุมที่อยู่ตรงกลางรูปแบบ ดังภาพ



สำหรับสัญญาณผลรวม (Sum)

สำหรับสัญญาณผลต่าง (Diff)

$$\begin{aligned} S(\theta) &= 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{I_1} \cos \left[ (2n-1) \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right) (\cos \theta - \cos \theta_0) \right] \\ &= 2 \frac{I_n}{I_1} \cos \left[ (1) \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right) (\cos \theta - 1) \right] \\ \therefore S(\theta)_n &= \cos \left[ \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right) (\cos \theta - 1) \right] \end{aligned} \tag{2.9}$$

2. AF ของสนามไฟฟ้าผลต่าง (N = 1, θ<sub>0</sub> = 0)

$$\begin{aligned} D(\theta) &= 2j \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{I_1} \sin \left[ (2n-1) \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right) (\cos \theta - \cos \theta_0) \right] \\ &= 2j \frac{I_n}{I_1} \sin \left[ (1) \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right) (\cos \theta - 1) \right] \\ \therefore D(\theta)_n &= \sin \left[ \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right) (\cos \theta - 1) \right] \end{aligned} \tag{2.10}$$

เพราะฉะนั้นจึงหาค่าสนามไฟฟ้าผลรวมและสนามไฟฟ้าผลต่างได้ดังนี้

สนามไฟฟ้าผลรวม คือ

$$E_{\text{sum}} = \frac{J_1(251 \sin \theta)}{251 \sin \theta} \times \cos \left[ \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right) (\cos \theta - 1) \right] \tag{2.11}$$

และสนามไฟฟ้าผลต่าง คือ

$$E_{\text{diff}} = \frac{J_1(2.51 \sin \theta)}{2.51 \sin \theta} \times \sin \left[ \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right) (\cos \theta - 1) \right] \quad (2.12)$$

## ภาควิเคราะห์สัญญาณ

### ตัวเปรียบเทียบ (Comparator) [7]

ในระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์จะใช้อุปกรณ์ไมโครเวฟแบบพาสซีฟ (Passive Microwave) ในการแยกสัญญาณผลต่าง กับสัญญาณผลรวม เรียกว่า ตัวเปรียบเทียบแบบโมโนพัลส์ (Monopulse Comparator) ซึ่งโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นอุปกรณ์ 4 พอร์ต (Port) ซึ่งมีอินพุต 2 ทาง และเอาต์พุต 2 ทางแต่ละเอาต์พุตจะมีศักดาไฟฟ้ารวมกันทางหนึ่งและมีศักดาไฟฟ้าหักล้างกันที่อีกเอาต์พุตหนึ่ง

อุปกรณ์เหล่านี้มีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 พวกใหญ่ๆ คือ

1. แบบข้อต่อไฮบริด (Hybrid Junction)
2. แบบคัปเปิลเลอร์แบบมีทิศทาง (Directional Coupler)

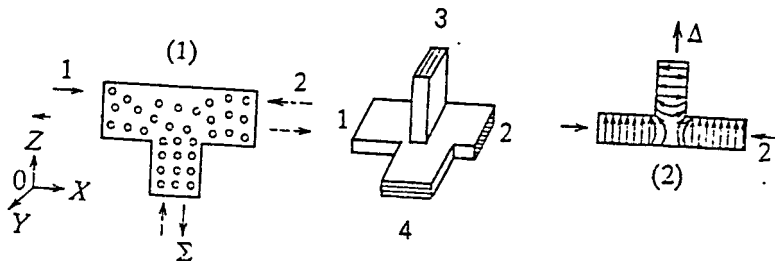
รูปแบบที่สำคัญของอุปกรณ์ต่างๆ จะอธิบายได้ดังนี้

#### 1. แบบข้อต่อไฮบริด

ในข้อต่อแบบไฮบริด มีคุณสมบัติเป็นโหลดที่แมตช์กับปลายสาย (Terminations Matched) เมื่อสัญญาณที่เข้ามาทางอินพุตทั้ง 2 ทางนี้ จะถูกแบ่งกำลังงาน (Power) ออกเท่าๆ กันระหว่างเอาต์พุตทั้ง 2 ทาง โดยสัญญาณที่ออกมาจะมีความสัมพันธ์กับเฟสของสัญญาณที่เข้ามาทางทั้ง 2 ทางเข้า ดังนั้นสัญญาณที่ออกมาทั้ง 2 สัญญาณจะมีคุณสมบัติเป็นผลรวมและผลต่างของมัน ความสัมพันธ์ทางเฟสจะขึ้นอยู่กับแต่ละชนิดของข้อต่อแบบไฮบริด โดยปกติจะเป็น  $0^\circ$  หรือ  $90^\circ$  แล้วผลรวมกับผลต่างทางด้านเอาต์พุตพอร์ตอาจจะมีเฟสตรงกัน หรือมีเฟสต่างกันได้ ตัวอย่างของข้อต่อแบบไฮบริด ได้แก่ ข้อต่อแบบแมจิกที (Magic-T Junction)

##### 1.1 ข้อต่อแบบแมจิกที

ในด้านไมโครเวฟ ได้นำไฮบริดมาประยุกต์ใช้ครั้งแรกเป็น ข้อต่อแบบแมจิกที มีลักษณะเป็นการรวมกันของข้อต่อแบบที (T-Junction) ระหว่างระนาบของสนามไฟฟ้า (E-plane) กับระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-plane) ตามรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงข้อต่อแบบที ในระนาบของสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็ก

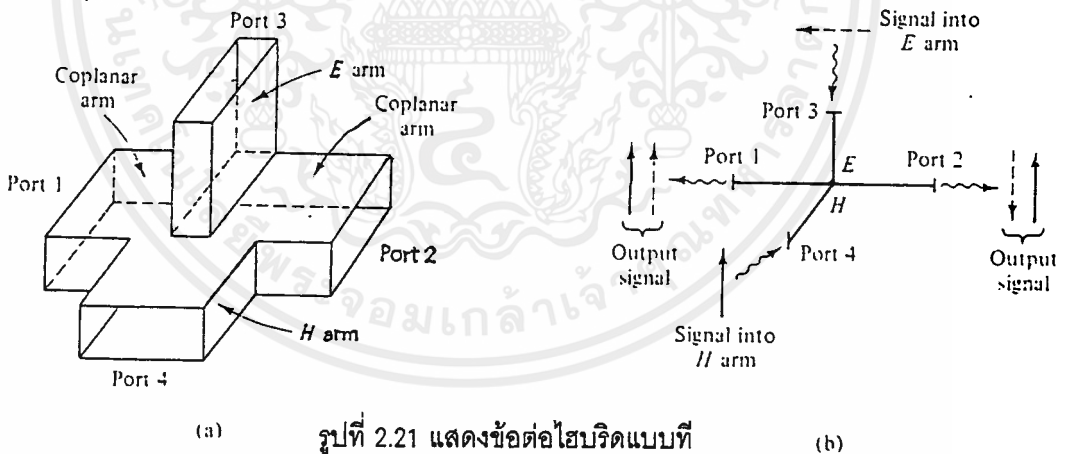
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### หลักการทํางานของข้อต่อแบบที่ [8]

สำหรับระนาบของสนามแม่เหล็ก ถ้ามีกำลังงานเข้ามาทางแขนที่ 4 จะถูกแบ่งกำลังงานออกเท่าๆ กันระหว่างแขนที่ 1 และแขนที่ 2 โดยที่มีเฟสตรงกันแต่ระยะทางจากจุดศูนย์กลางของข้อต่อต้องเท่ากันด้วย

สำหรับระนาบของสนามไฟฟ้า จะมีหลักการทํางานคล้ายๆ กับระนาบของสนามแม่เหล็ก คือ ถ้ามีกำลังงานเข้ามาทางแขนที่ 3 จะถูกแบ่งกำลังงานออกเท่าๆ กันระหว่างแขนที่ 1 และแขนที่ 2 แต่จะมีลักษณะของเฟสตรงข้ามกัน

ดังนั้นเมื่อนำระนาบของสนามไฟฟ้ามารวมกับระนาบของสนามแม่เหล็กตามรูปที่ 2.21 จะเรียกว่าข้อต่อไฮบริดแบบที่ (Hybrid T-Junction) ซึ่งมีหลักการ คือ เมื่อมีคลื่นหรือสัญญาณเข้ามาทางแขนที่ 4 จะมีคลื่นขนาดเท่ากันและมีเฟสตรงกันออกมาทางแขนที่ 1 กับแขนที่ 2 และจะไม่มีคลื่นไปออกที่แขนที่ 3 ในทางกลับกัน ภายใต้สภาวะที่แมตซ์กัน เมื่อมีคลื่นหรือสัญญาณเข้ามาทางแขนที่ 3 จะมีคลื่นขนาดเท่ากันแต่มีเฟสต่างกันไปออกที่แขนที่ 1 กับแขนที่ 2 และก็จะไม่มีคลื่นไปออกที่แขนที่ 4 นั่นคือ แขนที่ 3 กับแขนที่ 4 จะแยกการเชื่อมร่วมนกัน (Decouple) ในทำนองเดียวกันแขนที่ 1 กับแขนที่ 2 ก็จะเป็นการแยกการเชื่อมร่วมนเช่นเดียวกัน และมีหลักการคล้ายกับที่ได้กล่าวมาแล้วคือ คลื่นที่เข้ามาที่แขนที่ 2 จะถูกแบ่งออกเท่าๆ กันระหว่างแขนที่ 3 กับแขนที่ 4 โดยจะไม่ไปออกที่แขนที่ 1 และถ้ามีคลื่นเข้ามาทางแขนที่ 1 ก็จะถูกแบ่งออกเท่าๆ กันที่แขนที่ 3 และแขนที่ 4 โดยจะไม่ไปออกที่แขนที่ 2 เช่นกัน



เราจะเรียกไฮบริดที่ แมตซ์กันว่า แมจิกที (Magic T) และมีคุณสมบัติเป็น 3 dB คือกำลังงานที่เข้ามาจะลดลงเป็นครึ่งหนึ่งทางด้านทางออก โดยถ้ากำหนดให้  $V_1$  และ  $V_2$  เป็นศักดาไฟฟ้าขาเข้า (Input Voltage) ที่ด้านพอร์ตที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แล้วศักดาไฟฟ้าขาออก (Output Voltage) ที่พอร์ตที่ 3 และ 4 จะเป็นผลต่าง ผลรวมดังสมการที่ (2.13) และ (2.14) ตามลำดับดังนี้

$$V_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(V_1 - V_2) \quad (2.13)$$

$$V_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}(V_1 + V_2) \quad (2.14)$$

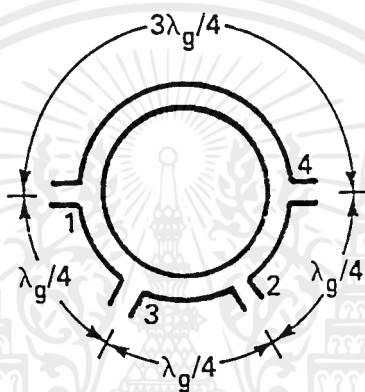
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของ  $V_3$  และ  $V_4$  นี้อาจจะถูกเปลี่ยนแปลงก็ได้ขึ้นอยู่กับความสะดวกของอินพุท แต่ในทั้ง 2 กรณี โดยกรณีใดกรณีหนึ่งเอาต์พุทหนึ่งจะเป็นสัดส่วนกันระหว่างผลรวมและผลต่าง เหตุผลของ  $1/2$  ก็คือผลรวมของกำลังงานที่ออกมาจะต้องเท่ากับผลรวมของกำลังที่เข้ามา (ไม่รวมพวกความสูญเสียในอุปกรณ์) ยกกำลังสองทั้งสองข้างและบวกกันจะได้ดังนี้

$$V_3^2 + V_4^2 = V_1^2 + V_2^2 \quad (2.15)$$

## 1.2 แบบไฮบริดริง (Hybrid ring Junction ) หรือ (Rat-Race)

ไฮบริดริง เรียกว่า ไฮบริดแบบวงกลม (Circular Hybrid หรือ Rat-Race) ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงไฮบริดริง หรือ ไฮบริดแบบวงกลม

มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับ ข้อต่อไฮบริดแบบเมจิกที่ แต่จะต่างกันตรงที่ข้อต่อแบบเมจิกที่ทำด้วยท่อ นำคลื่น แล้วไฮบริดริง จะทำด้วยไมโครสตริป

### หลักการของไฮบริดริง

สัญญาณอินพุทที่พอร์ตที่ 1 มาถึงเอาต์พุทที่พอร์ตที่ 4 โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ทางเดิน (ทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา) ซึ่งมีระยะทาง  $3\lambda_g/4$  เท่ากันทั้งสองเส้นทาง เมื่อ  $\lambda_g$  เป็นความยาวคลื่น สัญญาณที่แยกออกเป็น 2 ทางจะไปทำการเพิ่มกำลังงานที่พอร์ตที่ 4 และสัญญาณอินพุทเดิมที่มาจากพอร์ตที่ 3 โดยผ่านเส้นทาง 2 เส้นทาง ที่มีความยาว  $\lambda_g/4$  กับ  $5\lambda_g/4$  ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความต่างกันเท่ากับ  $\lambda_g$  ดังนั้นจึงไปทำการเพิ่มกำลังงานที่พอร์ตที่ 3 เช่นกัน ในทางตรงกันข้าม ความยาวของเส้นทาง 2 เส้นทาง จากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 มีความแตกต่างกันเท่ากับ  $\lambda_g/2$  คือมีเฟสตรงข้ามกัน ดังนั้นจึงไม่มีเอาต์พุทปรากฏที่พอร์ตที่ 2 ในทำนองเดียวกันถ้ามีสัญญาณอินพุทที่พอร์ตที่ 2 มันก็จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กันที่พอร์ตที่ 3 และ 4 แต่ไม่ออกที่พอร์ตที่ 1

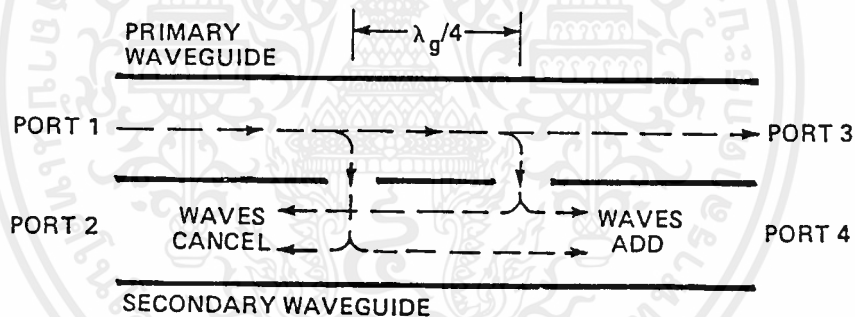
และในทางกลับกัน ถ้ามีสัญญาณ 2 สัญญาณที่มีเฟสเหมือนกันเป็นอินพุทของพอร์ตที่ 1 กับ 2 จะพบว่าพอร์ตที่ 3 จะเป็นผลรวมของสัญญาณทั้งสอง และพอร์ตที่ 4 จะเป็นผลต่างของสัญญาณทั้งสอง โดยที่อินพุทกับเอาต์พุทสามารถสลับกันได้

เพราะความสัมพันธ์ของเฟสเป็นผลมาจากส่วนของความยาวคลื่นที่ใช้ คือจะสามารถใช้ได้เฉพาะความถี่หนึ่งเท่านั้น ดังนั้นอุปกรณ์นี้สามารถนำมาใช้ได้ในแถบความถี่ที่จำกัด และความสัมพันธ์ของอินพุทกับเอาต์พุท สำหรับอุปกรณ์ชนิดนี้เหมือน เมจิกที

## 2. แบบไดเร็กชันนัลคัปเปิลเลอร์

โดยทั่วไป คัปเปิลเลอร์ คือ อุปกรณ์ซึ่งเป็นเศษส่วนของกำลังงาน ที่ไหลผ่านท่อนำคลื่น (Transmission Line) อันแรกไปยังท่อนำคลื่นอันที่ 2 อัตราส่วนของกำลังงานที่เข้ามาทางปฐมภูมิ (Primary) ไปยังกำลังงานที่ออกมาทางทุติยภูมิ (Secondary) เรียกว่า คัปปลิงแฟกเตอร์ (Coupling Factor) หรือ (Simply the coupling) ปกติจะใช้ในหน่วย dB ตัวอย่างเช่น 20 dB coupler คือ 1/100 ของกำลังงานทางด้านอินพุท จะปรากฏที่ทุติยภูมิเอาต์พุท ถ้าเป็น 3 dB coupler ทำให้ปฐมภูมิและทุติยภูมิเอาต์พุทมีกำลังงานเท่ากัน

คัปเปิลเลอร์จะมีตั้งแต่ 3 พอร์ตหรือมากกว่านั้น คือ จะมี 2 เส้นทางเป็นปฐมภูมิ และทุติยภูมิ แต่คัปเปิลเลอร์ที่ใช้ในระบบโมโนพัลส์โดยปกติจะมี 4 พอร์ตตามรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงไดเร็กชันนัลคัปเปิลเลอร์แบบ 4 พอร์ต

ไดเร็กชันนัลคัปเปิลเลอร์มีส่วนประกอบง่ายๆคือ ท่อนำคลื่นทางด้านปฐมภูมิ และท่อนำคลื่นทางด้านทุติยภูมิ กับรู (Slot) ที่ผนังท่อ ในรูปจะมีรู 2 รู ซึ่งห่างกัน  $\lambda_g/4$  อินพุทที่พอร์ตที่ 1 จะทำให้มีเอาต์พุทที่พอร์ตที่ 3 และจะมีกำลังของอินพุทบางส่วนไปออกที่ท่อนำคลื่นทุติยภูมิ (ด้านล่าง) แต่จะรูจะปล่อยคลื่นออกเป็นคู่ๆ ในท่อนำคลื่นทุติยภูมิ คลื่นหนึ่งจะเดินทางไปทางขวา และอีกคลื่นจะเดินทางไปทางซ้าย คลื่นจากทั้ง 2 รูจะไปเสริมกันเนื่องจากมีระยะเส้นทางเดินเท่ากัน ทางด้านขวา เป็นผลให้มีเอาต์พุทที่พอร์ตที่ 4 แต่เพราะรูห่างกัน  $\lambda_g/4$  ทำให้คลื่นไม่ออกไปทางด้านซ้ายเนื่องจากมีระยะเส้นทางเดินไม่เท่ากัน โดยต่างกันเท่ากับ  $\lambda_g/2$  เอาต์พุทที่พอร์ตที่ 2 จึงเป็นศูนย์ ในทิศทางกลับกัน ถ้ามีอินพุทที่พอร์ตที่ 3 จะมีเอาต์พุทที่พอร์ตที่ 1 และ 2 แต่ไม่มีคลื่นไปออกที่พอร์ตที่ 4

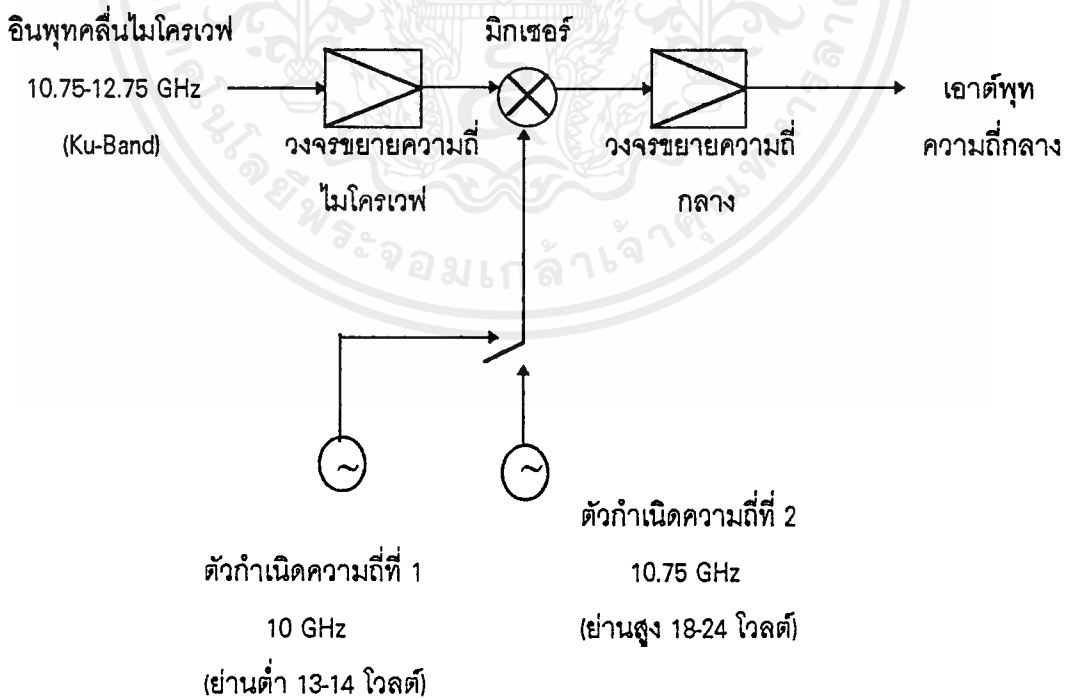
คัปเปิลเลอร์ชนิดที่นำมาใช้ในระบบโมโนพัลส์ และระบบเรดาร์ คือ ไดเร็กชันนัลชนิด 3-dB พิจารณาจากรูปที่ 2.23 อินพุตที่พอร์ตที่ 1 จะถูกแบ่งออกเท่าๆกันที่พอร์ตที่ 3 และ 4 โดยไม่มีกำลังคลื่นออกที่พอร์ตที่ 2 จากโครงสร้างที่ได้ส่วนกันระหว่างท่อนำคลื่นปฐมภูมิ และทุติยภูมิสามารถเปลี่ยนกันได้ แต่ถ้านำไดเร็กชันนัลคัปเปิลเลอร์มาเป็นตัวเปรียบเทียบต้องทำให้อินพุตที่พอร์ตหนึ่งมีเฟสนำอินพุตของอีกพอร์ตหนึ่ง จึงต้องใช้เอาต์เฟสชิฟเตอร์

**ชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (LNB : Low Noise Blockdown Converter)**

ใช้แปลงความถี่สัญญาณไมโครเวฟให้เป็นความถี่กลาง (Intermediate Frequency : IF) ในย่านความถี่ L (1.0~2.0 GHz) พร้อมกับขยายสัญญาณด้วย คือทั้งสัญญาณผลรวมและสัญญาณผลต่าง สัญญาณไมโครเวฟที่ได้รับจากดาวเทียมมักจะมีกำลังต่ำมาก จึงทำการขยายเพื่อให้มีกำลังแรงขึ้น

**หลักการทํางาน**

หลักการทํางานของชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำนั้นสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 2.24 คือ ถ้ามีสัญญาณไมโครเวฟความถี่ 11.75 GHz เข้ามา ก็จะถูกขยายสัญญาณโดย วงจรขยายสัญญาณไมโครเวฟ (Microwave Amplification)จากนั้นจะถูกนำไปมิกซ์กับสัญญาณที่ได้มาจากตัวกำเนิดความถี่ (Oscillator) ส่วนจะเป็นตัวกำเนิดความถี่ที่ตัวไหนนั้นก็ขึ้นอยู่กับว่าได้อ่อนไฟเลี้ยงให้ชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำเท่าไร



รูปที่ 2.24 แสดงโครงสร้างการทํางานของชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ

กรณีที่ 1 ถ้าป้อนไฟเลี้ยงในช่วง 18-24 โวลต์หรือเรียกว่าย่านสูง (High Band) ตัวกำเนิดความถี่ตัวที่ 2 ก็จะทำงานโดย กำเนิดความถี่ 10.75 GHz ออกมามิกซ์กับสัญญาณไมโครเวฟ (ซึ่งการมิกซ์ก็จะให้ผลเหมือนกับการหักลบความถี่กันก็คือ 11.75 GHz - 10.75 GHz ) ซึ่งจะได้ความถี่กลาง 1 GHz

กรณีที่ 2 ถ้าป้อนไฟเลี้ยงในช่วง 13-14 โวลต์ หรือเรียกว่าย่านต่ำ (Low Band) ตัวกำเนิดความถี่ตัวที่ 1 ก็จะทำงาน กำเนิดความถี่ 10.00 GHz ออกมามิกซ์กับสัญญาณไมโครเวฟ ได้ความถี่กลาง 1.75 GHz

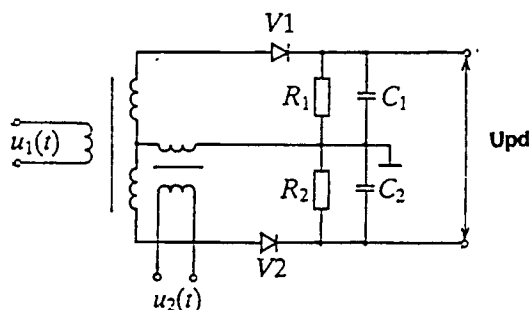
จากนั้นความถี่กลางก็จะถูกขยายอีก โดยวงจรขยายความถี่กลาง (Intermediate Frequency Amplification : IF Amp) แล้วจึงส่งออกไปเป็นสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะมีความแรงมากกว่าสัญญาณอินพุตประมาณ 100,000 เท่า (50 dB)

ชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำนั้นมีอยู่หลายแบบ ซึ่งจะมีย่านความถี่ที่ทำงานแตกต่างกันออกไปในแบบที่ใช้งานนี้ จะทำงานในย่านความถี่ 10.75-12.75 GHz ซึ่งถ้ามีความถี่นอกย่านที่กำหนดเข้ามา ชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำก็ไม่สามารถขยาย และแปลงสัญญาณได้ ก็คือจะไม่มีเอาต์พุตออกมา

เมื่อได้สัญญาณที่มีความถี่กลางที่ออกมาแล้วก็จะถูกส่งไปยังตัวตรวจจับเฟส ซึ่งจะเป็นตัวเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณผลรวม กับสัญญาณผลต่าง โดยความต่างเฟสที่ได้จะถูกแปลงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะส่งไปยังมอดูเลเตอร์ เพื่อควบคุมสายอากาศต่อไป ในส่วนของมอดูเลเตอร์นั้น จะมีไมโครโปรเซสเซอร์ซึ่งจะวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงนี้ว่าจะส่งให้มอดูเลเตอร์หมุน ซ้าย ขวา ตามต้องการ

#### ตัวตรวจจับเฟส ( Phase Detector ) [4]

ส่วนสำคัญในระบบโมโนพัลส์ที่ใช้วิเคราะห์เฟสและมุมของผลรวมกับผลต่างก็คือ ตัวตรวจจับเฟส ซึ่งมุมของเป้าหมายจะสามารถหาได้จากวงจรของตัวตรวจจับเฟสแบบบาลานซ์เวกเตอร์ แสดงตามรูปที่ 2.25 ซึ่ง  $R_1=R_2$  และ  $C_1=C_2$  มีไดโอดทำหน้าที่เป็นเรกติไฟเออร์ และในวงจรนี้ RC จะทำหน้าที่เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำ (Low pass filter) กล่าวคือ สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากไดโอด (คุณสมบัติของไดโอดได้แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 1) จะเป็นสัญญาณที่มีองค์ประกอบของสัญญาณความถี่เดิมซึ่งเป็นความถี่สูง และองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ซึ่งมีความถี่เป็นศูนย์ ดังนั้นวงจรกรองความถี่ต่ำจะยอมให้เฉพาะสัญญาณที่มีองค์ประกอบของ ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านเท่านั้น ส่วนสัญญาณอื่นจะถูกกรองทิ้งไป



รูปที่ 2.25 แสดงถึงวงจรของตัวตรวจจับเฟสแบบบาลานซ์เวกเตอร์

อินพุทของตัวตรวจจับสนัย V1 คือ ผลรวมของศักดาไฟฟ้า  $U_1(t)$  และ  $U_2(t)$  และอินพุทของตัวตรวจจับสนัย V2 คือ ผลต่างของศักดาไฟฟ้า  $U_1(t)$  และ  $U_2(t)$  สำหรับในกรณีของตัววิเคราะห์มุมแบบผลรวมและผลต่าง ค่าของ  $U_1(t)$  และ  $U_2(t)$  เป็นค่าของศักดาที่ถูกนอมอลไลซ์ค่าผลบวกและผลต่าง และสำหรับกรณีตัวตรวจจับสนัยเฟสค่า  $U_1(t)$  และ  $U_2(t)$  จะเป็นค่าเอาต์พุทของ ตัวขยายที่ความถี่กลางเชิงเส้น (Linear IF Amplification)

โดยที่

$U_1(t)$  คือ ผลต่างที่ได้จากตัวเปรียบเทียบในภาควิเคราะห์สัญญาณ

$U_2(t)$  คือ ผลรวมที่ได้จากตัวเปรียบเทียบในภาควิเคราะห์สัญญาณ

ซึ่งมีค่าดังนี้

$$U_1(t) = U_1 \sin(\omega_c t + \theta_1) \quad (2.16)$$

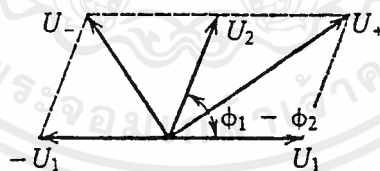
$$U_2(t) = U_2 \sin(\omega_c t + \theta_2) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\omega_c$  คือค่าความถี่ที่ถูกแปลงลงมา

ค่าศักดาไฟฟ้าเวกเตอร์อินพุทตามรูปที่ 2.26 ซึ่งแสดงค่า ศักดาไฟฟ้าที่ถูกตรวจจับสนัย ที่ V1 และ V2 โดยค่า ศักดาไฟฟ้าเหล่านี้ จะแสดงในรูปผลบวกทางเวกเตอร์

$$U_+ = U_1 + U_2 \quad (2.18)$$

$$U_- = -U_1 + U_2 \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.26 แสดงเวกเตอร์ไดอะแกรมศักดาไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนัยเฟส

ตัวตรวจจับสนัยที่เป็นเชิงเส้นจะตอบสนองศักดาไฟฟ้าเอาต์พุทของตัวตรวจจับสนัยเฟส จะเป็นดังนี้

$$U_{pd} = K_{pd} [ |U_+| - |U_-| ] \quad (2.20)$$

เมื่อ  $K_{pd}$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการตรวจจับสนัย

จากรูปที่ 2.26 จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$|U_+| = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)} \tag{2.21}$$

$$\begin{aligned} |U_-| &= \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos[180^\circ - (\phi_1 - \phi_2)]} \\ &= \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)} \end{aligned} \tag{2.22}$$

นำสมการที่ (2.21) และ (2.22) ไปแทนใน (2.19) จะได้ดังนี้

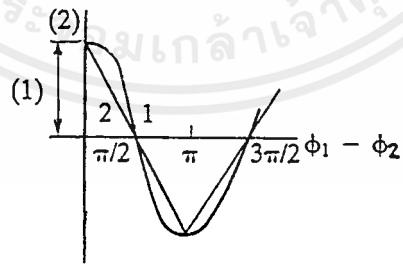
$$\begin{aligned} U_{pd} &= K_{pd} \left[ \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - 2U_1U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)} \right] \end{aligned} \tag{2.23}$$

ถ้า  $U_1 \ll U_2$  จะเป็นจริงสำหรับระบบโมโนฟาส์ ซึ่งใช้การวิเคราะห์มุมแบบผลรวมและผลต่าง ถ้าขยายสมการของ  $U_{pd}$  เป็นอนุกรมกำลัง (Power Series) แล้วเหลือเทอมอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 ไว้ จะได้

$$\begin{aligned} U_{pd} &= 2K_{pd} \frac{U_1U_2}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2}} \cos(\phi_1 - \phi_2) \\ &= 2K_{pd}U_1 \cos(\phi_1 - \phi_2) \end{aligned} \tag{2.24}$$

และถ้า  $U_1 = U_2 = U$  คือมีขนาดของสัญญาณเท่ากัน ศักไฟฟ้าของตัวตรวจจับเฟสจะมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} U_{pd} &= K_{pd} \left\{ \sqrt{2U^2 [1 + \cos(\phi_1 - \phi_2)]} - \sqrt{2U^2 [1 - \cos(\phi_1 - \phi_2)]} \right\} \\ &= 2K_{pd}U_1 \left[ \sqrt{\frac{1 + \cos(\phi_1 - \phi_2)}{2}} - \sqrt{\frac{1 - \cos(\phi_1 - \phi_2)}{2}} \right] \\ &= 2K_{pd}U_1 \left( \frac{\cos(\phi_1 - \phi_2)}{2} - \frac{\sin(\phi_1 - \phi_2)}{2} \right) \end{aligned} \tag{2.25}$$



1. สำหรับ  $U_1 \ll U_2$  (ตามสมการที่ 2.24)
  2. สำหรับ  $U_1 = U_2$  (ตามสมการที่ 2.25)
- (1)  $2K_{pd}U_1$   
 (2)  $U_{pd}$

รูปที่ 2.27 แสดงผลตอบสนองของตัวตรวจจับเฟส

จากรูปที่ 2.27 แสดงค่าที่เปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าเอาต์พุต กับเอาต์เฟสชิฟ สำหรับทั้งสองกรณี โดยที่  $U_1 \ll U_2$  (หรือ  $U_2 \ll U_1$ ) ค่าของศักดาไฟฟ้าเอาต์พุตแสดงในรูปของโคไซน์ที่ขึ้นอยู่กับการเอาต์เฟสชิฟ และสำหรับในกรณีที่  $U_1 = U_2$  โดยที่เอาต์เฟสชิฟ อยู่ในช่วง 0 ถึง  $\pi$  จะแปรผันเป็นเส้นตรง

จากการตีเทคเตอร์ขนาดตามกฎกำลังสอง (Square-Law amplification Detector) ค่าศักดาไฟฟ้าของตัวตรวจจับเฟส จะเป็นสัดส่วนกับค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด

$$\begin{aligned} U_{pd} &= K_{pd} \left\{ [U_1(t) + U_2(t)]^2 + [U_1(t) - U_2(t)]^2 \right\} \\ &= K_{pd} \overline{U_1(t) U_2(t)} \end{aligned} \quad (2.26)$$

แทนค่า  $U_1(t)$  และ  $U_2(t)$

$$\begin{aligned} U_{pd} &= K_{pd} U_1 U_2 \overline{\sin(\omega_c t + \phi_1) \sin(\omega_c t + \phi_2)} \\ &= \frac{1}{2} K_{pd} U_1 U_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \end{aligned} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ผ่านมา ตัวตรวจจับเฟสที่ใช้ไดโอดซึ่งผลตอบสนองที่เป็นสมการกำลังสองจะทำการคูณธรรมดา (ไม่คิดฮาร์โมนิคสูงๆ :  $\omega_c$ ) และศักดาไฟฟ้าเอาต์พุตแสดงในรูปโคไซน์ที่ขึ้นอยู่กับการเอาต์เฟสชิฟ

ข้อบกพร่องของตัวตรวจจับเฟสคือ มันจะจำกัดค่าอินพุตของเอาต์เฟสชิฟในช่วง  $180^\circ$  ซึ่งจะทำให้ การชิฟจริงๆ เกิดความคลุมเครือกับมุมที่ตรวจจับได้ อาจจะทำให้ออกนอกระยะทางได้

### 2.2.3 การเปรียบเทียบด้วยขนาดและเฟส

เป็นการรวมรูปแบบที่ 1 และ รูปแบบที่ 2 ซึ่งในการเปรียบเทียบนี้ค่าของมุมที่ได้ จะหาได้จากการเปรียบเทียบของขนาดและเฟสของสัญญาณที่ได้รับสายอากาศทั้งสอง

## บทที่ 3

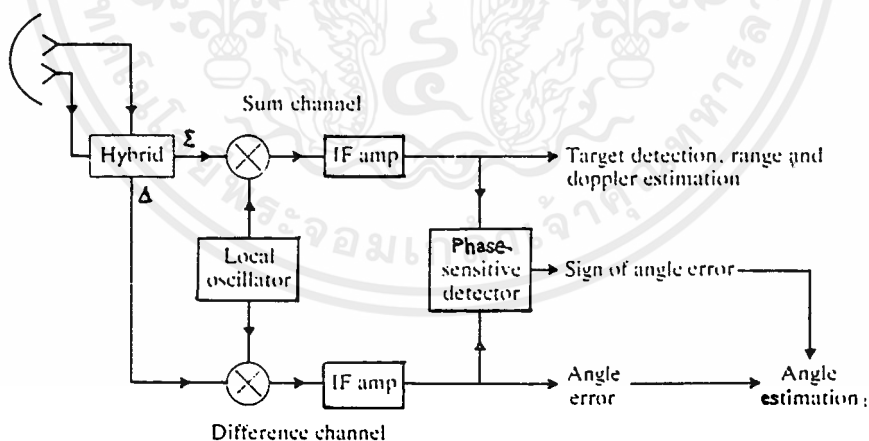
### การคำนวณ และการสร้าง

จากแนวทางตามทฤษฎีในบทที่ 2 ที่ตามที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เราจะเลือกใช้ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยขนาดมาใช้ในการติดตามสัญญาณดาวเทียมที่ความถี่ประมาณ 10.75-12.75 GHz (ย่าน Ku-Band) โดยที่สายอากาศรับจะติดอยู่บนรถยนต์ซึ่งมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ได้รับสัญญาณสูงสุดจึงจำเป็นต้องทำให้สายอากาศมีตำแหน่งที่ตรงกับตำแหน่งของดาวเทียมอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นเราจึงนำระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัตินี้มาใช้

เหตุผลที่เลือกใช้ระบบนี้ก็คือ ระบบโมโนพัลส์เป็นระบบที่ส่งสัญญาณนั้นส่งสัญญาณมาเพียงพัลส์เดียว ก็สามารถวิเคราะห์สัญญาณและปรับสายอากาศรับได้ ซึ่งมีความรวดเร็วกว่าระบบอื่นๆที่ได้กล่าวมาแล้วในบทก่อน

#### 3.1 ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยขนาด

เนื่องจากในขณะที่รถยนต์เคลื่อนที่ไปนั้นมุมอะซิมุม ระหว่างดาวเทียมกับสายอากาศก็จะเปลี่ยนไป โดยที่มุมเงยนั้นยังคงตรงกับตำแหน่งของดาวเทียมอยู่ ดังนั้นเราจึงเลือกระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์เพียงระนาบเดียวแบบเปรียบเทียบด้วยขนาดมาใช้ คือ ใช้หาเพียงแค่มุมอะซิมุมที่ผิดพลาดไปเท่านั้น โดยมีบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติ  
โมโนพัลส์เพียงระนาบเดียว

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยขนาดนั้น จะทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างเพียง 2 ส่วนซึ่งจะได้อธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.1.1 ภาครับสัญญาณ

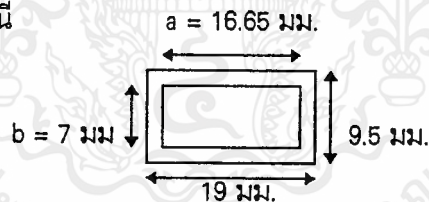
เป็นส่วนของสายอากาศรับสัญญาณดาวเทียม โดยดาวเทียมจะสามารถส่งสัญญาณได้ใน 2 ย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ C และย่านความถี่ Ku ซึ่งสายอากาศรับนี้จะเลือกรับในย่านความถี่ Ku เนื่องจากความถี่ในย่านนี้มีความถี่ที่สูงกว่า ย่านความถี่ C ดังนั้นจานสายอากาศรับจึงมีขนาดเล็กกว่าซึ่งก็เป็นการสะดวกในการที่จะนำไปติดตั้งบนหลังคารถยนต์ตามที่เรากำลังต้องการ และในปริภูมิงานพอร์นนี้เลือกความถี่ ( $f_0$ ) 12.66 GHz ซึ่งเป็นความถี่กลางของการแพร่กระจายคลื่นย่านความถี่ Ku ของดาวเทียมไทยคม

สายอากาศนั้นจะใช้สายอากาศฮอร์นรูปกรวยซึ่งออกแบบให้มีรูปแบบในมุมเฉยให้มีขนาดกว้าง เพื่อรับสัญญาณได้ตลอด ส่วนในมุมอะซิมุทนั้นจะต้องมีการปรับหมุนจานสายอากาศให้รับสัญญาณได้ถูกต้องจะมีการรับสัญญาณ และวิเคราะห์สัญญาณโดยใช้บล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 3.1 โดยรูปแบบของสายอากาศมีลักษณะเป็นลำคลื่นแบบดินสอ ซึ่งมีการซ้อนทับกันเพียงเล็กน้อยโดยการวางสายอากาศ 2 ตัวให้ใกล้กันมากที่สุด เพื่อนำมาหามุมที่ผิดพลาดไปนั่นเอง

การออกแบบท่อนำคลื่นที่ใช้ต่อระหว่างสายอากาศกับตัวเตรียมเทียบเมจิกที่

สายอากาศที่นำมาใช้เป็นสายอากาศฮอร์นแบบกรวยจำนวน 2 ตัว โดยที่แต่ละตัวจะมีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบไฟฟ้า และในระนาบแม่เหล็กตามรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 โดยมีวิธีการวัดเหมือนการทดลองที่ 3 ในบทที่ 4 ซึ่งอาจมีความผิดพลาดไปจากทฤษฎีบ้าง เนื่องจากสถานที่ทำการวัดมีผนังอยู่ทางด้านหลังจึงทำให้มีโลบหลังเพิ่มขึ้นมาเพราะสัญญาณไปสะท้อนผนังนั้นสายอากาศจึงรับสัญญาณด้านหลังได้

ท่อนำคลื่นที่ใช้จะเป็นท่อทองเหลือง เนื่องจากตัวเปรียบเทียบเป็นเมจิกที่ซึ่งทำมาจากท่อทองเหลือง และท่อทองเหลืองนั้นมีขนาดดังนี้



โดยที่ ค่าความถี่คัทออฟ (Cut-off frequency) :  $f_c$  ของคลื่นโหมด  $TE_{10}$  ในท่อนำคลื่นจะหาได้จาก

$$\lambda_c = 2a$$

$$f_c = c / \lambda_c$$

$$\text{ดังนั้น } f_c = c / 2a$$

∴ ความถี่คัทออฟจะมีค่าเท่ากับ 9.06 GHz

ค่าความยาวคลื่นในท่อนำคลื่น (Guided Wavelength) :  $\lambda_g$  จะหาได้จาก

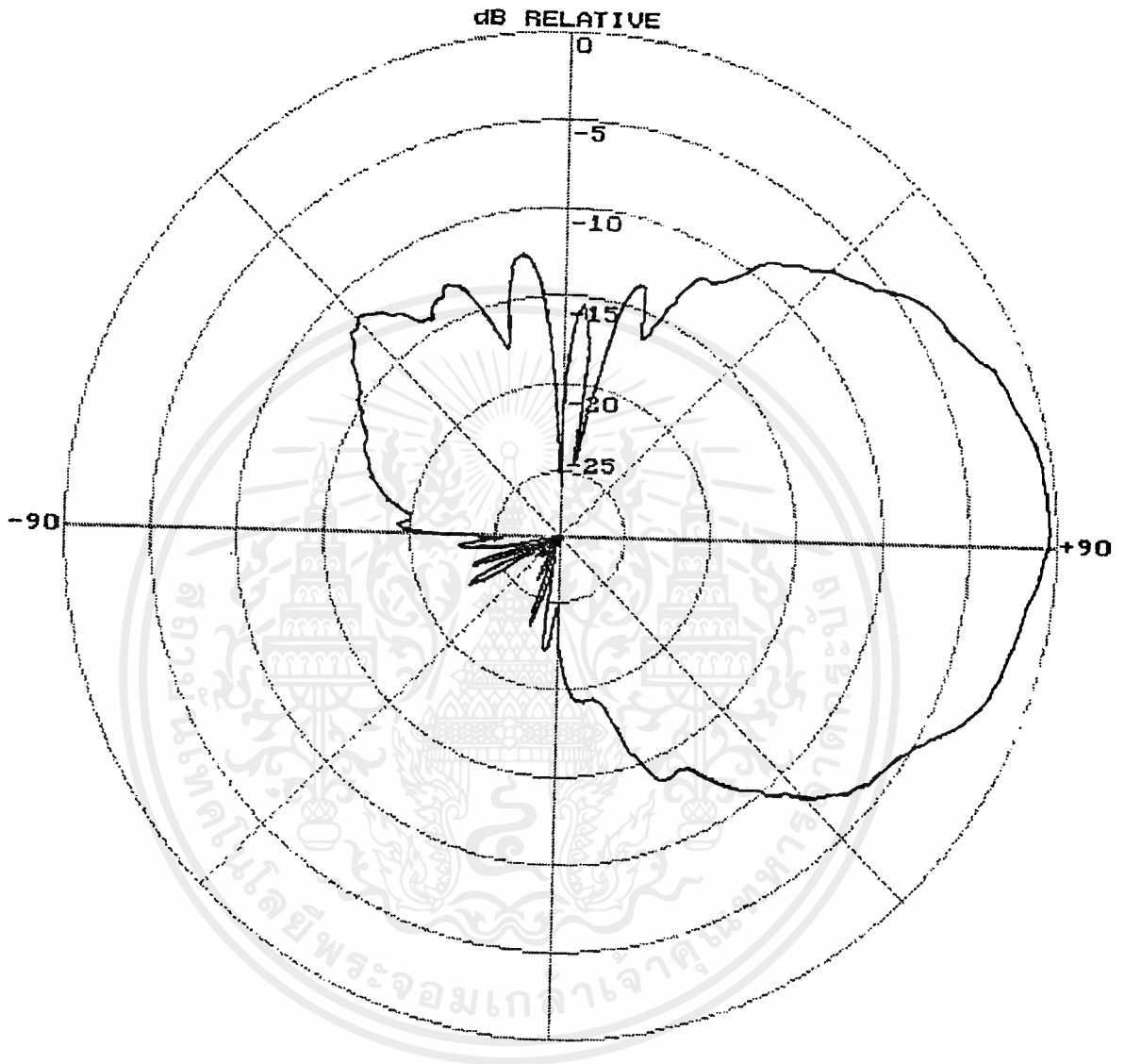
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2a}\right)^2}}$$

(3.1)

เมื่อ  $\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ  $c/f$

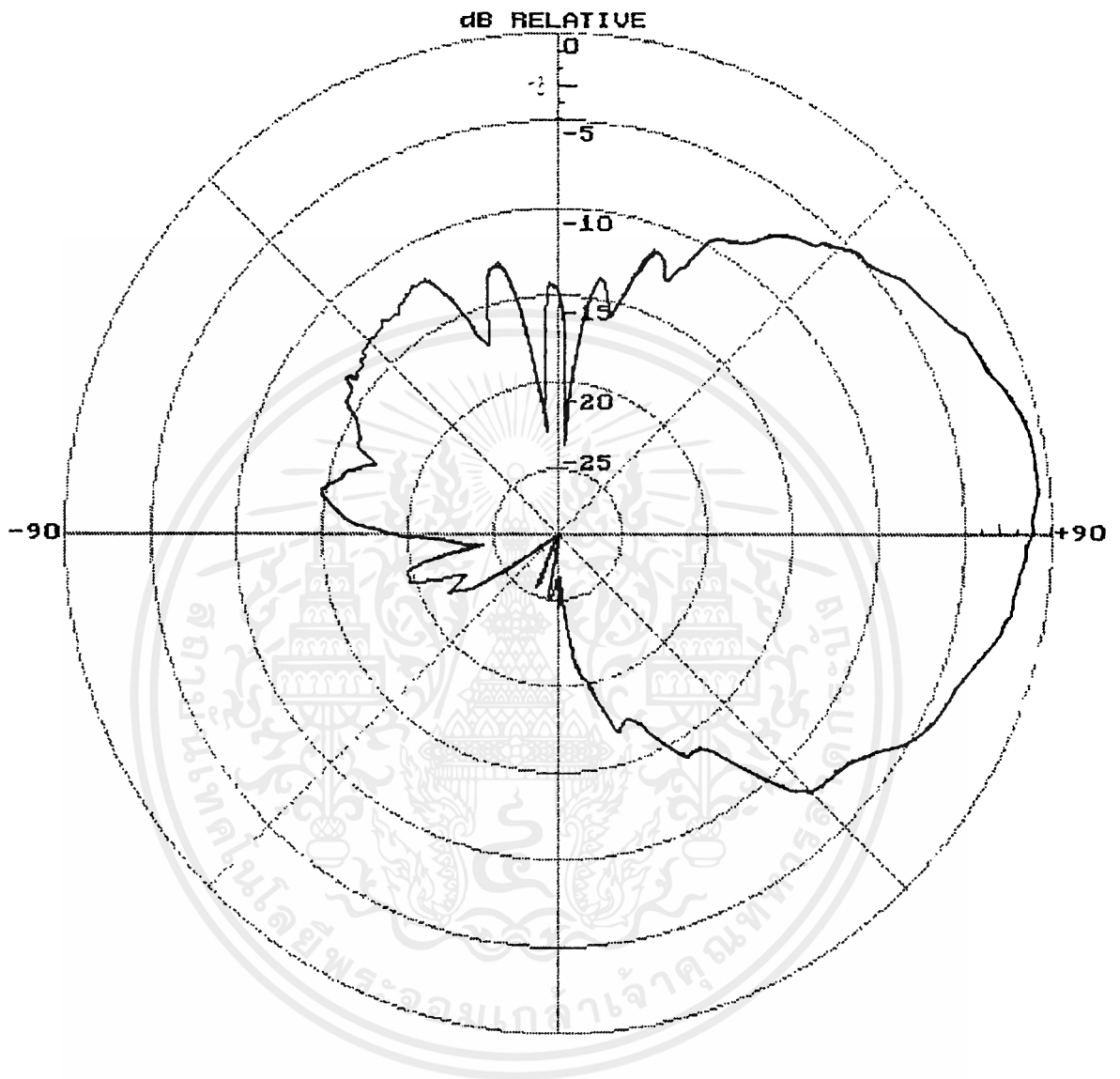
$$\lambda_0 = 2.35 \text{ เซนติเมตร } (c : 3 \times 10^8 \text{ และ } f : 12.66 \times 10^9)$$

∴ ความยาวคลื่นในท่อนำคลื่นจะมีค่าเท่ากับ 3.37 เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบไฟฟ้าของสายอากาศฮอร์นแบบกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในระนาบแม่เหล็กของสายอากาศฮอร์นแบบกรวย

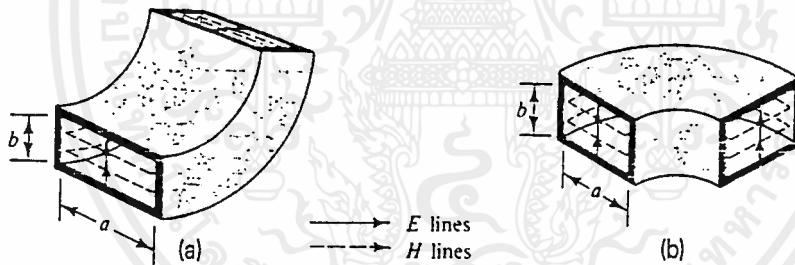
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และที่สำคัญคือท่อนำคลื่นนี้จะมีความถี่คัทออฟของคลื่นโหมด  $TE_{20}$  ( $f_{c,20}$ ) เป็น 18.1 GHz ความถี่คัทออฟของคลื่นโหมด  $TE_{01}$  ( $f_{c,01}$ ) เป็น 21.4 GHz และความถี่คัทออฟของคลื่นโหมด  $TE_{11}$  และ  $TM_{11}$  ( $f_{c,11}$ ) เป็น 23.3 GHz ซึ่งจะเห็นว่าความถี่คัทออฟของคลื่นโหมดอันดับสูงถัดจากโหมด  $TE_{10}$  นั้นอยู่สูงกว่าความถี่ 12.66 GHz มาก ซึ่งความถี่คัทออฟของคลื่นโหมด  $TE_{10}$  ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 9.06 GHz มีค่าต่ำกว่า 12.66 GHz ดังนั้นจะสรุปได้ว่าที่ความถี่ 12.66 GHz จะมีเฉพาะคลื่นโหมด  $TE_{10}$  เท่านั้นที่เดินทางได้ในท่อนำคลื่นขนาดนี้ เนื่องจากความถี่คัทออฟ คือ ความถี่ต่ำที่สุดที่คลื่นสามารถเดินทางไปในท่อนำคลื่นได้

จากค่า  $\lambda_g$  มีค่าเท่ากับ 3.32 ซม. ซึ่งจะนำมาใช้ในการออกแบบท่อนำคลื่นที่ใช้ยึดสายอากาศกับตัวเปรียบเทียบเมจิกที โดยความยาวของท่อจะต้องเป็นจำนวนเท่าของ  $\lambda_g$  และในการจัดวางสายอากาศนั้น ต้องวางให้ใกล้กันมากที่สุด เพื่อให้ได้รูปแบบสายอากาศตามรูปที่ 3.2 หรือ รูปที่ 3.3 ที่มีลักษณะเลื่อมล้ำกันเล็กน้อย ดังนั้นจึงต้องมีการโค้งงอท่อทองเหลือง (Waveguide Bend) จึงส่งผลให้เกิด การสูญเสียแบบสะท้อนกลับ (Reflection Loss) ซึ่งสิ่งนี้จำเป็นอย่างยิ่งในการที่จะนำมาพิจารณาในการออกแบบ เพื่อให้เกิดการสูญเสียดังกล่าวให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

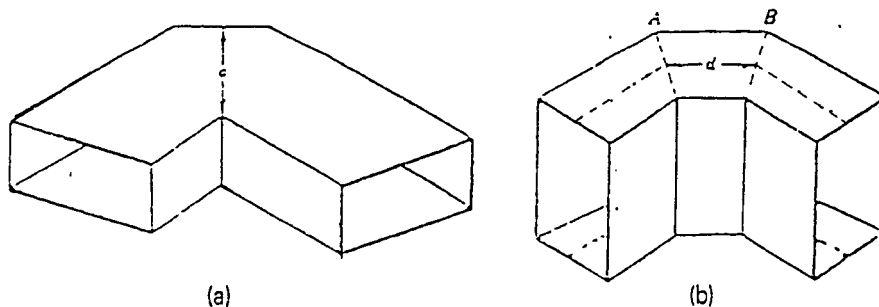
การโค้งงอ และการหักมุมท่อนำคลื่น มี 2 ลักษณะ คือ

1. การโค้งงอในระนาบไฟฟ้า (E-plane Bend)
2. การโค้งงอในระนาบแม่เหล็ก (H- plane Bend)



รูปที่ 3.4 การโค้งงอในระนาบไฟฟ้า และการโค้งงอในระนาบแม่เหล็ก

การโค้งงอในระนาบไฟฟ้า หมายถึง การงอของท่อนำคลื่นในแนวอน (Longitudinal) ตามระนาบที่มีสนามไฟฟ้าเดิมอยู่แล้ว ดังรูปที่ 3.4 (a) และในทำนองเดียวกัน การโค้งงอในระนาบแม่เหล็กแสดงดังรูปที่ 3.4 (b) ซึ่งจะโค้งงอท่อนำคลื่นอย่างสม่ำเสมอ (Smooth) ตามระนาบที่เกิดสนามแม่เหล็กเดิมอยู่แล้ว



รูปที่ 3.5 การโค้งงอแบบ Single Mitered Waveguide และแบบ Double-Mitered Coner

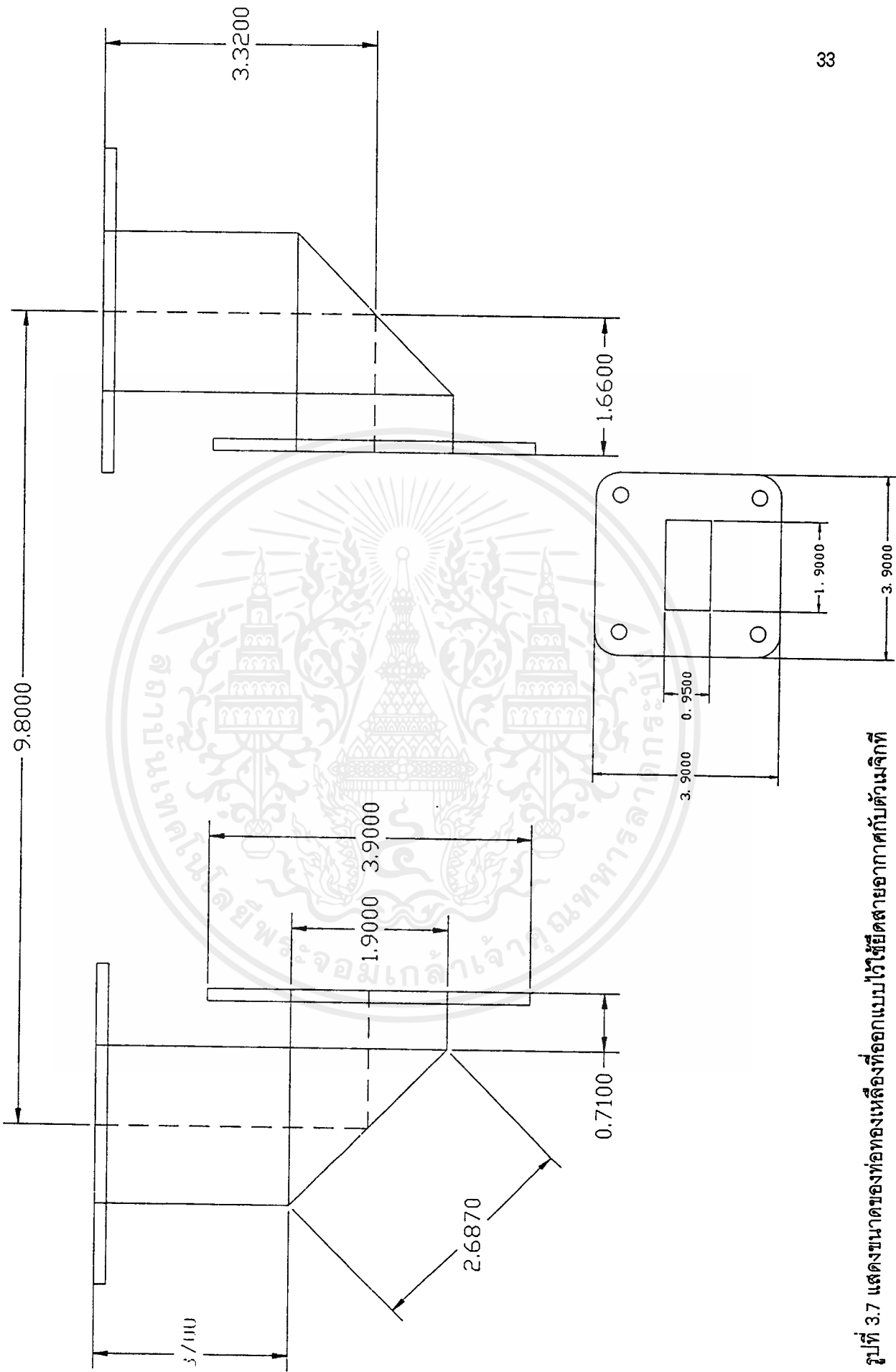
แต่ถ้าหากมีความจำเป็นจะต้องโค้งงออย่างทันที (Sharp Bend) แล้ว ก็ย่อมทำให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนสูง วิธีการที่จะลดค่าความสูญเสียนี้กระทำได้โดยบากที่มุมข้างหนึ่ง ส่วนอีกมุมให้คงไว้  $90^\circ$  ท่อนำคลื่นแบบนี้เรียกว่า Single Mitered Waveguide ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (a) แต่ถ้าต้องการทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนต่ำ ก็สามารถกระทำได้โดยการบากมุมทั้งสอง ซึ่งที่มุมทั้งสองนี้เรียกว่า Double-Mitered Coner ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (b) โดยถ้ามีการจัดระยะ  $d$  ให้เท่ากับ  $\lambda_g/4$  แล้ว การเกิดการสะท้อนจากมุม A และ มุม B จะหักล้างกันไปหมด ซึ่งย่อมทำให้ ขึ้นอยู่กับความถี่ด้วย โดยปกตินิยมใช้ในการโค้งงอในระนาบแม่เหล็ก มากกว่าการโค้งงอในระนาบไฟฟ้า

ซึ่งในการออกแบบท่อทองเหลืองที่ใช้ยึดระหว่างสายอากาศทั้ง 2 ตัวนี้ได้ใช้การโค้งงอท่อนำคลื่นแบบ Single Mitered Waveguide ซึ่งเป็นลักษณะการโค้งงอท่อในระนาบไฟฟ้า และเลือกใช้ความยาวของท่อซึ่งมีขนาดเป็น  $\lambda_g$  กับ  $\lambda_g/4$  ซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 3.7 และในรูปที่ 3.6 ได้แสดงชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยต่อกับสายอากาศครบ 2 ตัวและเมจิกที่ ในทำนองเดียวกันนี้ยังได้ออกแบบท่อทองเหลืองที่จะนำมาใช้ต่อกับเมจิกที่และส่วนของชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ โดยมีลักษณะการโค้งงอท่อในระนาบแม่เหล็กเพิ่มขึ้นมาอีก 1 ชั้นด้วย ท่อทองเหลืองทั้ง 3 ชั้นนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 ในบทที่ 4



รูปที่ 3.6 แสดงสายอากาศครบ 2 ตัวที่ต่อกับเมจิกที่โดยมีท่อทองเหลืองเป็นตัวยึดไว้

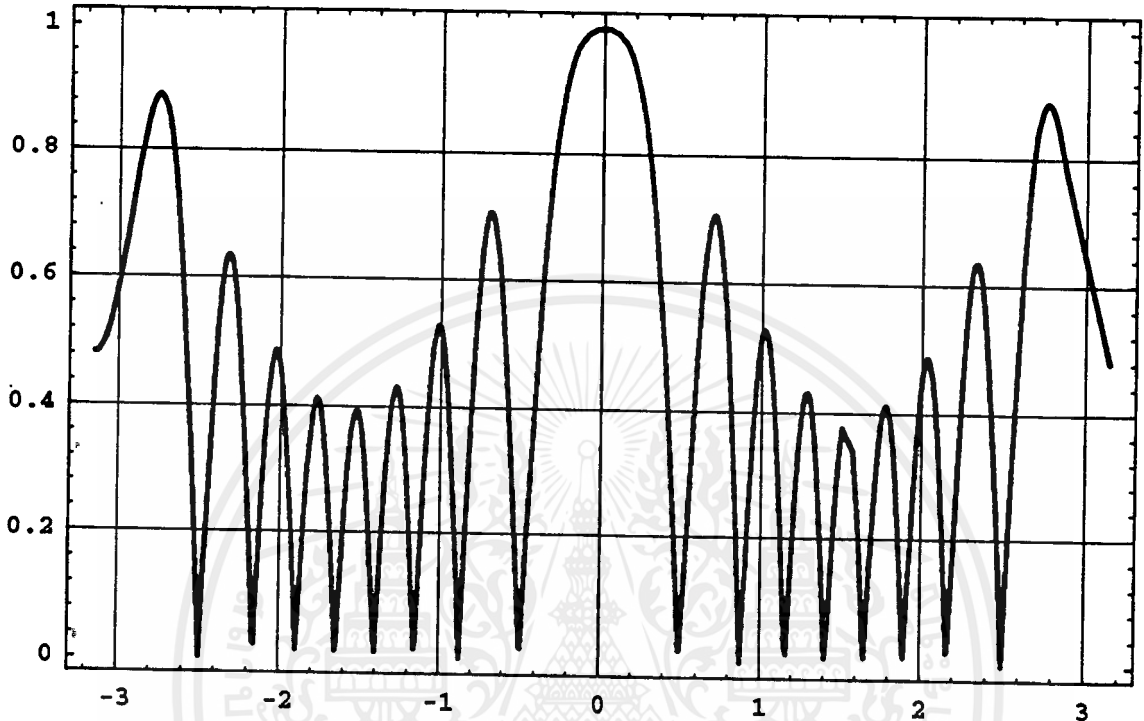
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงขนาดของท่อทองเหลืองที่ออกแบบไว้ใช้ยึดสายอากาศกับตัวแมจิกที

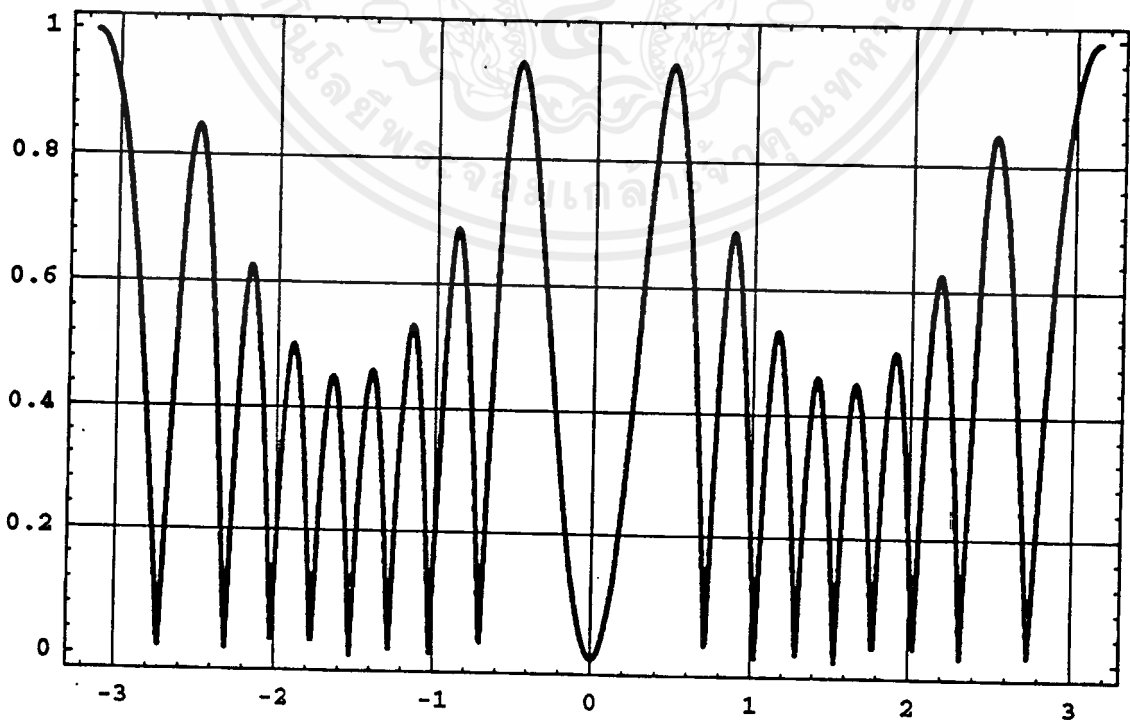
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำสายอากาศมาติดกับเมจิกที่แล้วพบว่าจะถูกวางห่างกัน 9.8 ซม. ซึ่งเป็นระยะที่ใกล้กันที่สุด เมื่อนำค่า 9.8 ซม. ไปแทน  $d$  ในสมการหาสนามผลรวมที่ (2.11) และสมการสนามผลต่างที่ (2.12) ตามที่ได้ อธิบายไว้ในเรื่องการจัดวางสายอากาศในบทที่ 2 จะได้ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงสนามผลรวมของสายอากาศ 2 ตัวที่วางห่างกัน 9.8 เซนติเมตร

จากกราฟข้างบน พบว่าที่ตำแหน่ง  $0^\circ$  จะมีขนาดของสนามสูงที่สุดซึ่งเป็นลักษณะของสนามผลรวม



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงสนามผลต่างของสายอากาศ 2 ตัวที่วางห่างกัน 9.8 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปขอประโยชน์ด้านการค้า  
 จากกราฟข้างบน พบว่าที่ตำแหน่ง  $0^\circ$  จะมีขนาดของสนามต่ำที่สุดซึ่งเป็นลักษณะของสนามผลต่าง  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกแห่งที่ปรากฏในเอกสาร

### 3.1.2 ภาควิเคราะห์สัญญาณ

เมื่อสัญญาณที่รับได้เข้ามาทางสายอากาศรับที่มีรูปแบบมุมแหลมกันเล็กน้อยทั้ง 2 แล้ว สัญญาณทั้ง 2 จะถูกส่งเข้าอุปกรณ์เปรียบเทียบสัญญาณ ซึ่งก็มีให้เลือกใช้ 3 ชนิดดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

#### อุปกรณ์เปรียบเทียบสัญญาณ

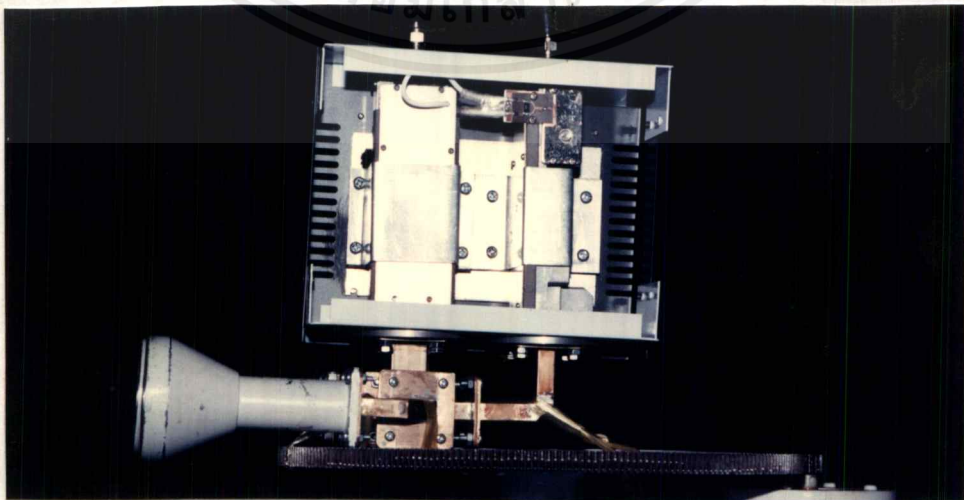
เราจะเลือกใช้ เมจิกที เหตุผลที่เลือกใช้มีดังนี้

1. เมจิกทีเป็นท่อนำคลื่น จึงมีการลดทอนน้อยกว่าไฮบริด ริง ซึ่งเป็นไมโครสตริป ข้อดีของท่อนำคลื่นก็คือไม่จำเป็นต้องใช้สารไดอิเล็กทริก ซึ่งส่งผลให้มีการสูญเสียต่ำ ก็คือมีสัญญาณรบกวนต่ำด้วย และสามารถรับกำลังคลื่นได้สูง คุณสมบัติ 2 ประการนี้นับว่าเป็นสิ่งจำเป็นมาก

2. ไฮบริด ริง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ได้ในความถี่เพียงความถี่เดียวถ้าเปลี่ยนความถี่ขนาดของแถบสตริปก็จะต้องเปลี่ยนไปด้วย ในขณะที่เมจิกทีตัวเดียวสามารถใช้ได้กับความถี่ที่เป็นช่วงๆ ได้ซึ่งเหมาะที่จะนำมาใช้กับการใช้เป็นย่านความถี่ เช่น ในย่านความถี่ Ku

3. ไดเรกชันนัลคัปเปิลอร์ก็นำคลื่นเหมือนกับเมจิกที แต่จะนิยมใช้เป็นมอนิเตอร์กำลังงานของคลื่นตกกระทบ และกำลังงานของคลื่นสะท้อนกลับมากกว่านำมาใช้เป็นอุปกรณ์ผลรวม ผลต่างถ้านำมาใช้ เป็นอุปกรณ์ผลรวม ผลต่างจะต้องทำให้อินพุทพอร์ตมีความแตกต่างกันทางเฟสก่อน คือต้องมีตัวเลื่อนเฟสต่อกับอินพุทพอร์ตด้านใดด้านหนึ่งนั่นเอง จะเห็นได้ว่ามีความยุ่งยากมากกว่าการใช้เมจิกที

เมื่อสัญญาณผ่านตัวเปรียบเทียบมาแล้วจะได้สัญญาณออกมา 2 สัญญาณ คือสัญญาณที่เป็นผลรวมของสัญญาณอินพุทและสัญญาณที่เป็นผลต่างของสัญญาณอินพุท โดยที่สัญญาณที่เป็นผลรวมจะเป็นสัญญาณที่เราต้องการรับเพื่อใช้ต่อไป (เป็นสัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้) จากนั้นสัญญาณทั้ง 2 จะถูกผสมด้วยมิกเซอร์(Mixer) จากโลกออสซิลเลเตอร์ (Local Oscillator) ซึ่งจะแปลงสัญญาณจาก ความถี่ในย่านความถี่วิทยุ (RF) เป็นความถี่ในย่านความถี่กลาง (IF) ซึ่งในส่วนนี้จะถูกรวมอยู่ในชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (LNB:Low Noise Blockdown Converter) ส่วนต่างๆ ดังกล่าวนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 แล้วก็จะส่งสัญญาณที่มีความถี่กลางนี้ไปยังตัวตรวจจับเฟสต่อไป

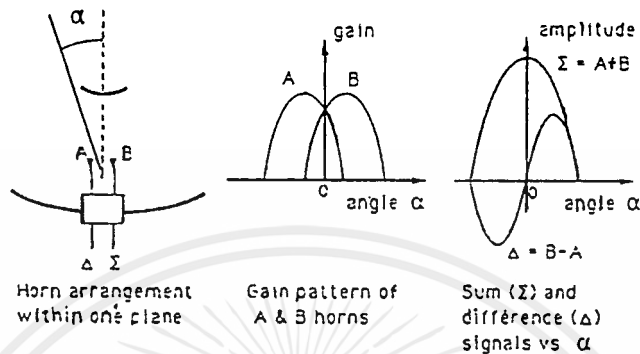


รูปที่ 3.10 ส่วนของสายอากาศรับ และมิกเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตัวตรวจจับเฟส

เป็นตัววิเคราะห์หาทิศทาง และมุมที่มีการผิดพลาดไป จากการเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณผลรวมกับเฟสของสัญญาณผลต่าง เพื่อตรวจจับว่าตำแหน่งของเป้าหมายอยู่ทางซ้ายหรืออยู่ทางขวาของแกนกลางสายอากาศ และสัญญาณผลต่างจะเป็นตัวบอกขนาดของมุมที่ผิดพลาดไป ตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงการหาตำแหน่งของเป้าหมายขณะที่อยู่ทางซ้าย หรือทางขวา

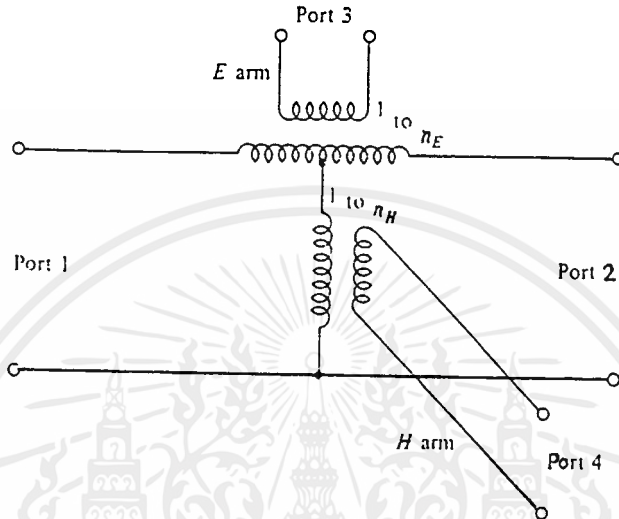
จากรูปที่ 3.11 ถ้าเป้าหมายอยู่ทางด้านซ้ายของแกนกลางของสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน (Reflector axis) สัญญาณผลต่างจะมีเฟสต่างกับสัญญาณผลรวมอยู่  $180^\circ$  หรือสัญญาณผลต่างมีค่าเป็นติดลบ ในขณะที่สัญญาณผลรวมมีค่าเป็นบวกนั่นเอง ถ้าเป้าหมายอยู่ทางด้านขวาของแกนกลางของสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน สัญญาณผลต่างจะมีเฟสตรงกันกับสัญญาณผลรวม หรือสัญญาณผลต่างมีค่าเป็นบวกเหมือนสัญญาณผลรวม และถ้าเป้าหมายอยู่ในตำแหน่งตรงกับที่เราต้องการคือตรงกับแกนกลางของสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อนสัญญาณผลรวมจะมีขนาดสูงสุด ในขณะที่สัญญาณผลต่างมีขนาดต่ำที่สุด

และเมื่อพิจารณาจากบทที่ 2 ดูเอาต์พุตจากวงจรตัวตรวจจับเฟสในรูปที่ 2.25 ที่ได้ตั้งกราฟในรูปที่ 2.27 ซึ่งในแกนนอนคือค่าความต่างเฟสของทั้ง 2 สัญญาณ และในแกนตั้งคือขนาดของ  $U_{pd}$  ถ้า  $U_{pd}$  มีค่าสูงสุด ค่าความต่างเฟสมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือไม่มีความต่างเฟส ดังนั้นจึงแสดงว่าเป้าหมายตรงกับตำแหน่งที่เราต้องการ ถ้า  $U_{pd}$  มีค่าลดลงมาเรื่อยๆ เป็นค่าติดลบที่ต่ำสุด นั่นคือเมื่อมีค่าความต่างเฟสของทั้ง 2 สัญญาณเป็น  $180^\circ$  สรุปก็คือถ้า  $U_{pd}$  มีค่าเป็นบวกแสดงว่าเป้าหมายอยู่ทางด้านซ้ายของแกนกลางของสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน และถ้า  $U_{pd}$  มีค่าเป็นลบแสดงว่าเป้าหมายอยู่ทางด้านขวาของแกนกลางของสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นตัวสะท้อน และจากค่าของความต่างเฟสนี้เองจะได้นำไปหามุมที่คลาดเคลื่อนต่อไปจากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจึงทำให้เราสามารถรู้ว่าจะต้องหมุนสายอากาศไปทาง ซ้าย หรือขวา กับมุมที่จะทำการหมุน โดยจะนำสัญญาณนี้ไปบังคับสายอากาศเพื่อให้หมุนในขั้นตอนต่อไป

ซึ่งในปริิฎยงานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษา และสร้างวงจรของตัวเปรียบเทียบเฟสโดยใช้ไฮบริด ริง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### วงจรของตัวเปรียบเทียบเฟสโดยใช้ไฮบริด ริง

จากรูปที่ 2.25 ในบทที่ 2 จะพบว่าตรงไฮบริดคอยล์ มีวงจรสมมูลเป็นเมจิกที่ ตามรูปที่ 3.12 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์ผลรวม ผลต่างคล้ายกับไฮบริด ริง ในรูปที่ 2.22 จึงเลือกใช้ไฮบริด ริงมาแทนไฮบริดคอยล์ โดยออกแบบและสร้างเป็นแบบไมโครสตริปซึ่งใช้กับความถี่ในย่าน L ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.8 GHz ที่ผ่านมาจากชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ และใช้ค่าตัวต้านทานเท่ากับ 3 K $\Omega$  ค่าตัวเก็บประจุเท่ากับ 1  $\mu$ F



รูปที่ 3.12 แสดงวงจรสมมูลของเมจิกที่

### การออกแบบไฮบริด ริง จักรัณ

รูปลักษณะของสายทองแดงของไฮบริด ริง จักรัณบนไมโครสตริปจะเป็นดังรูป 3.13 เพื่อให้ให้สะดวกในการแมตชิ่งซึ่ง จะให้ค่า  $Z_0$  มีค่า 50 โอห์ม ส่วนความยาวคลื่น  $\lambda$  ที่ใช้ จะใช้ค่าความยาวคลื่นในไมโครสตริป จากรูปที่ 3.13 ค่าความต้านทาน  $Z_0$  ของอินพุทพอร์ทมีค่า 50 โอห์มซึ่งจะต้องคำนวณหาค่าความกว้าง  $w$  ของสายส่งไมโครสตริป โดยใช้สมการที่ (3.1)

$$\frac{W}{h} = \frac{8}{e^A - 2e^{-A}} \quad (3.2)$$

$$A = \frac{Z_0 \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.1} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2(\epsilon_r + 1)} \left\{ 0.4516 + \frac{0.2416}{\epsilon_r} \right\} \quad (3.3)$$

โดยที่  $Z_0$  คือ ค่าคาแรคเตอริสติกอิมพีแดนซ์ (Characteristic Impedance)

$\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) ซึ่งเท่ากับ 4.122 (ของสารอีพอกซี)

$w$  คือ ค่าความกว้างของแถบตัวนำบนไมโครสตริป

$h$  คือ ค่าความหนาของซับสเตรท ซึ่งเท่ากับ 1.33 มิลลิเมตร

ค่าความยาวคลื่นของไมโครสตริป ( $\lambda$ )

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.4)$$

โดยที่  $\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศ

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (3.5)$$

c คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$

f คือ ความถี่ที่ใช้ ซึ่งเท่ากับ 1.8 GHz

$\epsilon_{eff}$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant) หาได้จาก

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left\{ 1 + \frac{12h}{W} \right\}^{-0.5} \quad (3.6)$$

คำนวณหาค่า A จากสมการที่ (3.3) ได้ค่า  $A = 1.492$  นำไปแทนในสมการที่ (3.2) ได้ค่า  $w = 2.65$  มิลลิเมตร สำหรับในส่วนของวงแหวนจะมีค่าความต้านทานเท่ากับ  $\sqrt{2} Z_0 = 70.7$  โอห์ม นำไปแทนในสมการที่ (3.7)

$$A = \frac{Z_0 \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2(\epsilon_r + 1)} \left\{ 0.46 + \frac{0.22}{\epsilon_r} \right\} \quad (3.7)$$

จะได้ค่า  $A = 2.05$ ,  $w = 1.42$  มิลลิเมตร

จะหาค่าความยาวคลื่นของไมโครสตริป ( $\lambda$ ) จากสมการที่ (3.4)

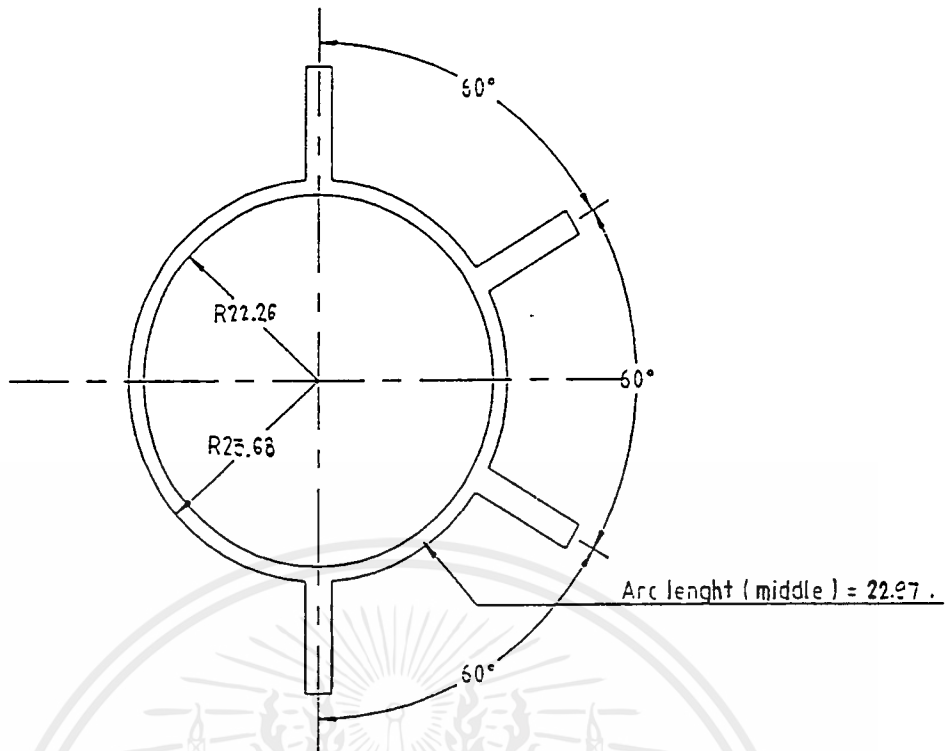
ต้องหาค่าความยาวคลื่นแสงจากสมการที่ 4 ได้  $\lambda_0 = 166.667$  มิลลิเมตร และ

ต้องหาค่า  $\epsilon_{eff}$  จากสมการที่ 5 ได้  $\epsilon_{eff} = 3.00$  เพราะฉะนั้นจะได้ค่า  $\lambda = 96.22$  มิลลิเมตร

สามารถหาค่ารัศมีของวงจอร์ไฮบริดริงได้เท่ากับ 22.97 มิลลิเมตร

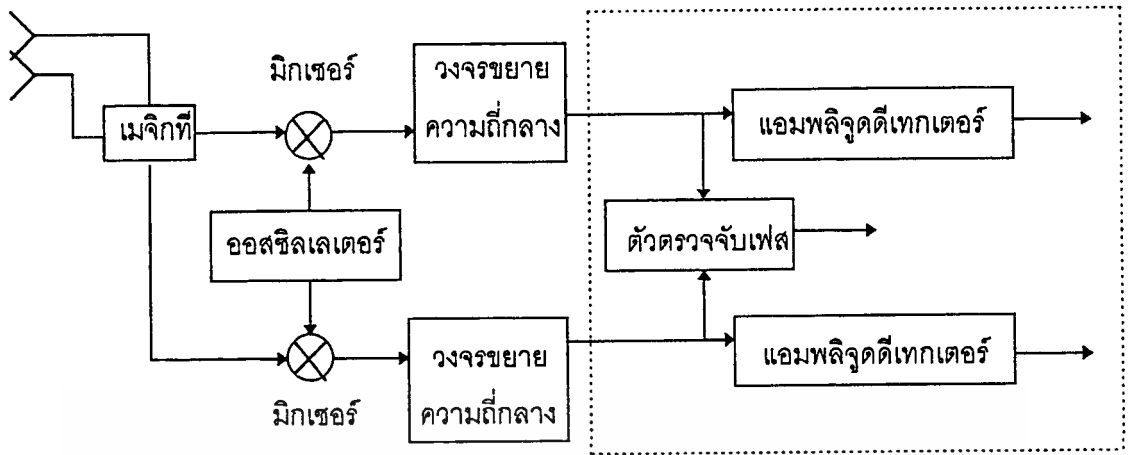
ค่ารัศมีวงนอกของวงจอร์ไฮบริดริงเท่ากับ 23.68 มิลลิเมตร

ค่ารัศมีวงในของวงจอร์ไฮบริดริงเท่ากับ 22.26 มิลลิเมตร



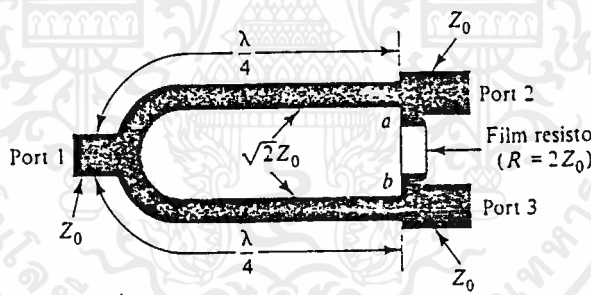
รูปที่ 3.13 แถบสตริปขนาดเท่าของจริงของวงจรถ่ายไฮบริดริงจิ้งจันที่ได้จากการคำนวณ

จากนั้นก็นำไปสร้างวงจรถ่ายจับเฟส และแอมพลิฟายด์เทคเตอร์ทางด้านสัญญาณผลต่างกับทางด้านสัญญาณผลรวมซึ่งสัญญาณผลรวมที่ได้จากตัวเปรียบเทียบเมจิกทีและถูกแปลงให้เป็นความถี่กลางแล้วนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะส่งไปยังแอมพลิฟายด์เทคเตอร์ทางด้านสัญญาณผลรวม และอีกส่วนหนึ่งจะส่งไปยังตัวตรวจจับเฟสดังนั้นจะต้องผ่านตัวแบ่งกำลังงาน (Power Divider) ในทำนองเดียวกันนี้สัญญาณผลต่างที่ได้จากตัวเปรียบเทียบเมจิกทีและถูกแปลงให้เป็นความถี่กลางแล้วนั้นจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน คือ ส่วนแรกจะส่งไปยังแอมพลิฟายด์เทคเตอร์ทางด้านสัญญาณผลต่างเพื่อนำเอาสัญญาณมาเป็นตัวบอกขนาดของมุมที่ผิดพลาดไป และอีกส่วนหนึ่งจะส่งไปยังตัวตรวจจับเฟส เพื่อทำการเปรียบเทียบกับเฟสของสัญญาณผลรวมดังที่ได้เคยกล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้ ดังนั้นเอาต์พุตของตัวตรวจจับเฟสจึงสามารถบอกทิศทางของเป้าหมายได้ว่าอยู่ทางด้านซ้าย หรืออยู่ทางด้านขวา และในการแบ่งสัญญาณผลต่างออกเป็น 2 ส่วนนี้ก็จำเป็นต้องใช้ตัวแบ่งกำลังงานเช่นเดียวกัน ที่ได้อธิบายผ่านมาทั้งหมดนี้เป็นการออกแบบ และสร้างเฉพาะในบล็อกที่อยู่ในรูปที่ 3.14 นั่นเอง



รูปที่ 3.14 ส่วนที่ได้ทำการออกแบบด้วยไมโครสตริป (ในกรอบสี่เหลี่ยม)

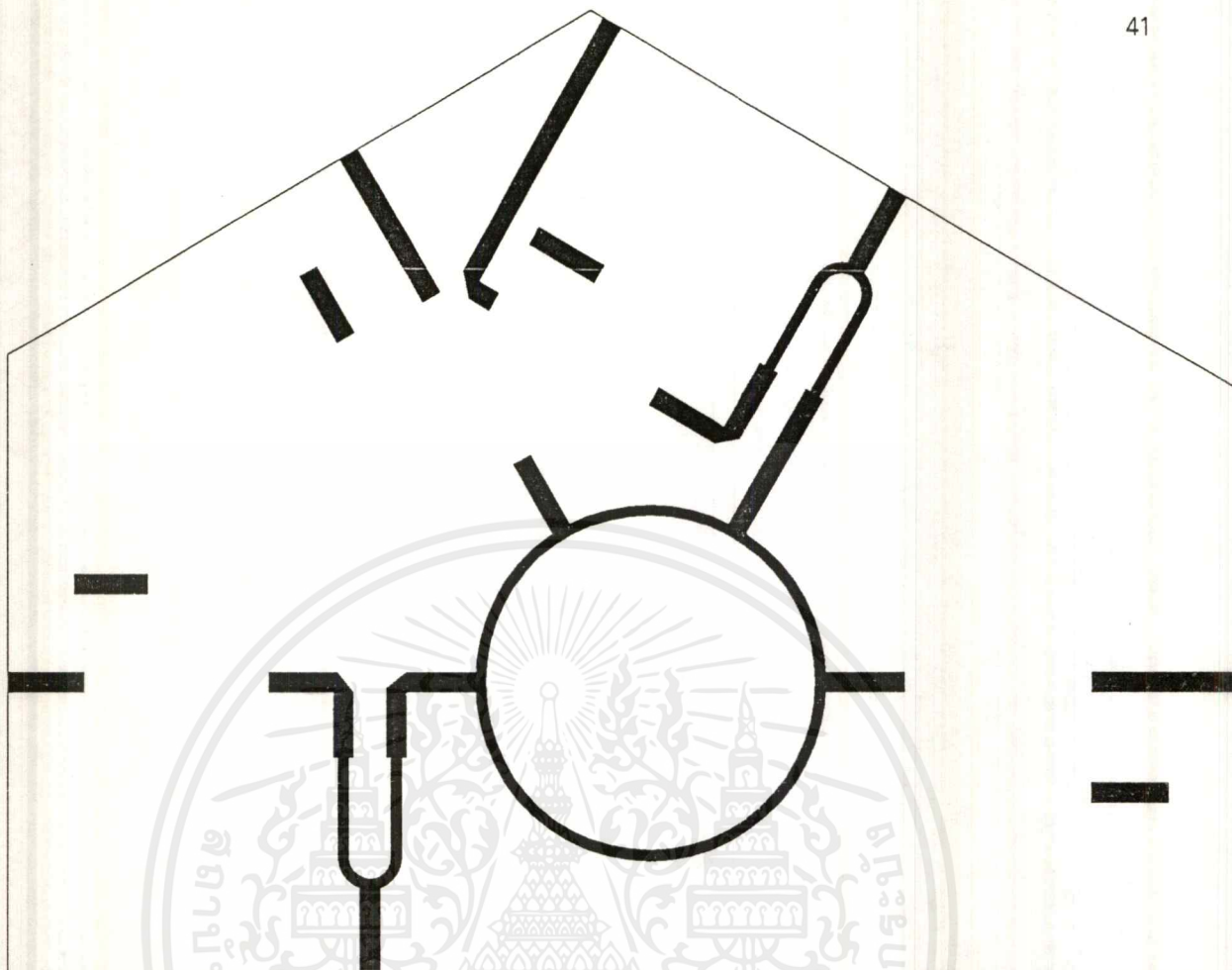
ส่วนตัวแบ่งกำลังงานที่ได้เลือกนำมาใช้นั้นก็คือ ตัวแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน (Wilkinson Power Divider) ซึ่งเป็นวงจรที่ทำการแบ่งกำลังงานที่เข้ามาทางอินพุตออกเป็นสองส่วนที่เท่ากันทางเอาต์พุตซึ่งสามารถออกแบบเป็นแถบไมโครสตริปได้ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.15



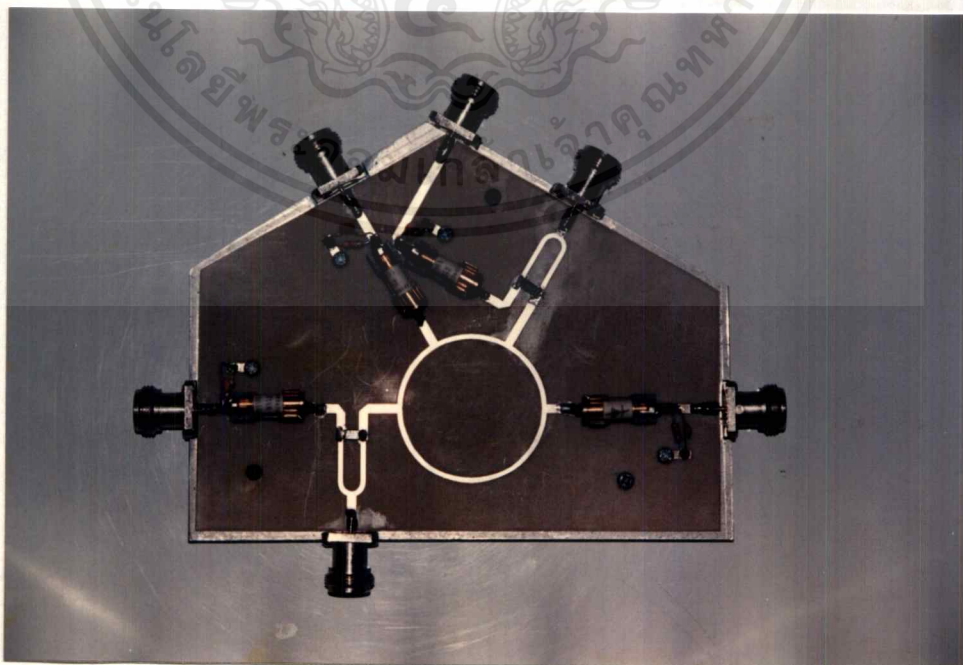
รูปที่ 3.15 ตัวแบ่งกำลังงานแบบวิลคินสัน

ในการออกแบบแถบสตริปจะเหมือนวิธีการออกแบบของวงจรตัวตรวจจับเฟส โดยที่ความกว้างของแถบสตริปที่มีความต้านทานเท่ากับ  $Z_0$  จะมีความกว้างเท่ากับ 2.65 มิลลิเมตร และในด้านที่มีความต้านทานเท่ากับ  $Z_0/2$  จะมีความกว้างเท่ากับ 1.42 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแล้วพบว่าเมื่อให้พอร์ตที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเป็นอินพุตให้พอร์ตที่ 1 ของตัวแบ่งกำลังงาน และวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการส่งผ่าน (Transmission Loss):  $S_{21}$  ทางพอร์ตที่ 2 และ 3 ของตัวแบ่งกำลังงานตามลำดับจะได้ค่าประมาณ -3 dB นั่นก็คือ มันสามารถแบ่งกำลังงานที่เข้ามาทางอินพุตออกเป็นครึ่งหนึ่งเท่าๆกันทางพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 ได้นั่นเอง

จากนั้นก็นำไปสร้างเป็นไมโครสตริปรวมกันทั้งหมดได้ตามรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 แถบสตริปที่ได้ออกแบบขนาดเท่าของจริง



รูปที่ 3.17 แสดงชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาจากที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

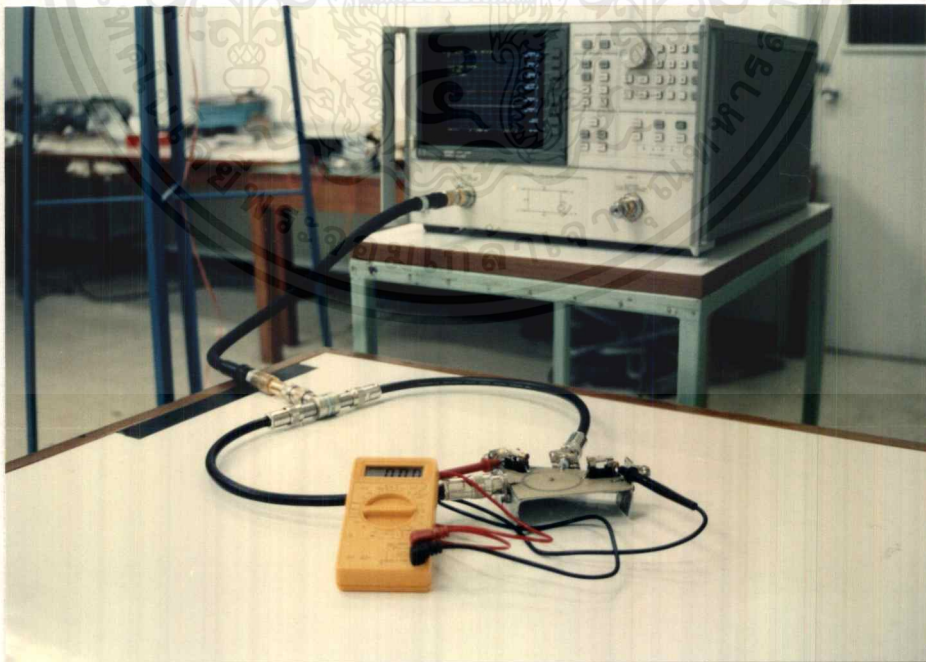
### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองที่ 1

เป็นการทดสอบวงจรตรวจจับสนุติในภาควิเคราะห์สัญญาณซึ่งอยู่ในระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติ ไมโครพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยขนาด เพื่อใช้เป็นตัวบอกทิศทางของเป้าหมาย ซึ่งออกแบบโดยใช้ไฮบริด ริง เป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณ ที่ความถี่ย่าน L โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP7820C เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่ย่าน L 1.8 GHz และเป็นอุปกรณ์ในการวัดความต่างเฟส ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. จากวงจรตรวจจับสนุติที่มี 4 พอร์ต โดยที่มีพอร์ต 2 พอร์ต เป็นอินพุต ในการทดลองนี้ จะต่อกับพอร์ตที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อเป็นตัวกำเนิดสัญญาณที่มีความถี่เป็น 1.8 GHz โดยที่ผ่านตัวแบ่งกำลัง (power divider) ก่อน เพื่อที่จะนำไปเป็นสองอินพุตของวงจรตรวจจับสนุติ

2. วัดขนาดของศักดาไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรตรวจจับสนุติโดยใช้โวลต์มิเตอร์ กรณีที่อินพุตทั้งสองมีค่าความต่างเฟสเท่ากันโดยใช้สายโคแอกเซียลที่มีความยาวเท่ากัน และเมื่อ 2 อินพุตมีค่าความเฟสไม่เท่ากันโดยใช้สายส่งที่มีความยาวคงที่ค่าหนึ่ง กับเฟสชิฟเตอร์เพื่อเปลี่ยนค่าความต่างเฟสตามที่ต้องการ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเป็นอุปกรณ์ในการวัดค่าความต่างเฟส ซึ่งมีวิธีการตามภาคผนวกที่ 2



รูปที่ 4.1 วิธีทดสอบวงจรตรวจจับสนุติ

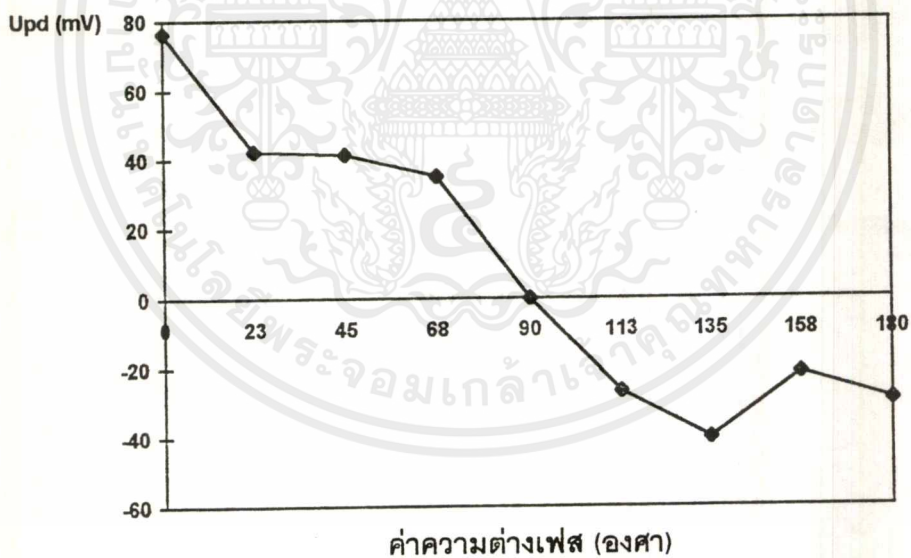
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.1 ผลการทดลองที่ 1

ตารางบันทึกผลการทดลองที่ 1

ความต่างเฟส( $\Delta\phi$ ):องศา	เอาต์พุตของวงจรตรวจจับเฟส ( $U_{pd}$ ):mV
0	76.4
23	42.4
45	41.3
68	35
90	-0.08
113	-26.8
135	-40.1
158	-21.5
180	-29.3

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามตารางการทดลองที่ 1 มาเขียนเป็นกราฟจะได้ดังนี้  
กราฟที่ได้จากการทดลองที่ 1



#### 4.1.2 สรุปผลการทดลองที่ 1

ในการทดลองที่ 4.1 นั้นเป็นการทดสอบวงจรตรวจจับเฟสเพิ่มเติมจากตอนที่แล้ว ซึ่งมีการเพิ่มความต่างเฟสหลายค่ามากขึ้นโดยนำตัวชิปเฟสมาใช้ จึงทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความละเอียดมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่นำมาเขียนเป็นกราฟ ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกราฟในรูปที่ 2.27 แล้วพบว่า มีลักษณะใกล้เคียงกัน นั่นคือผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี แต่ก็อาจมีค่าที่ผิดพลาดไปบ้างเป็นบางครั้งก็เป็นส่วนน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดลองที่ 2

เป็นการทดสอบหาค่าความสูญเสียในการส่งผ่าน (Transmission Loss) และหาค่าความต้านทานของท่อนำคลื่นทำจากทองเหลืองที่ได้ออกแบบไว้ตามรูปที่ 3.7 ซึ่งใช้ต่อระหว่างสายอากาศรับกับแมจิกที โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเป็นเครื่องมือวัด มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการปรับเทียบ (Calibrate) สายนำสัญญาณก่อนทำการวัด
2. นำท่อนำคลื่นที่ต้องการวัดมาต่อกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเพื่อทำการวัดค่าความสูญเสียในการส่งผ่าน โดยต่อพอร์ตที่ 1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายกับอินพุทพอร์ตของท่อนำคลื่น และต่อพอร์ตที่ 2 ของเครื่องกับเอาต์พุทพอร์ตของท่อนำคลื่น
3. วัดค่าความสูญเสียจากค่า Log Mag ของ  $S_{21}$  และ  $S_{12}$
4. วัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR: Standing Wave Ratio) ของท่อจาก  $S_{21}$  และ  $S_{12}$
5. วัดค่าความต้านทานของท่อนำคลื่น โดยดูจาก Smith Chart ของ  $S_{11}$  และ  $S_{22}$
6. ทำการบันทึกผลการทดลองที่ได้

### 4.2.1 ผลการทดลองที่ 2

ผลการทดลองสำหรับคุณสมบัติของท่อนำคลื่นจำนวน 3 ชั้นดังรูปที่ 4.2 ซึ่งใช้ต่อระหว่างสายอากาศรับที่วางขนานกัน



รูปที่ 4.2 ท่อนำทองเหลืองจำนวน 3 ชั้นที่ได้สร้างขึ้นมาจากการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางผลการทดลองที่ 2

สิ่งที่ จะทำการวัด	ท่อทองเหลือง		
	ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ชั้นที่ 3
ค่าสูญเสียในการส่งผ่าน(dB): $S_{21}$	-7.079	-6.534	-4.332
	$S_{12}$ -6.937	-6.811	-3.946
ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR) : $S_{21}$	2.5594	2.7988	4.1296
	$S_{12}$ 2.6757	2.714	4.5337
ค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ ) : $S_{11}$	84.93	90.484	28.398
	$S_{22}$ 83.645	82.605	23.721

ค่าที่ได้ต่างๆ เหล่านี้ แสดงไว้ในภาคผนวกที่ 3

#### 4.2.2 สรุปผลการทดลองที่ 2

ผลจากการทดสอบของท่อทองเหลืองทั้ง 3 ชั้นนี้พบว่ามี ค่าความสูญเสียในการส่งผ่าน โดยที่ชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าประมาณ -6 dB ชั้นที่ 3 มีค่าประมาณ -4 dB ส่วนค่าของอัตราส่วนคลื่นนิ่ง ชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าประมาณ 2.7 ชั้นที่ 3 มีค่าประมาณ 4 และค่าของอินพุทอิมพีแดนซ์ ชั้นที่ 1 และ 2 มีค่าประมาณ 85.42 โอห์ม ชั้นที่ 3 มีค่าประมาณ 26.06 โอห์ม

จะเห็นได้ว่าถ้าหากมีการส่งคลื่นผ่านท่อทองเหลืองทั้ง 3 นั้นจะมีความสูญเสียของคลื่นบ้าง และเมื่อดูจากอัตราส่วนคลื่นนิ่งก็จะพบว่าคลื่นไม่สามารถส่งผ่านไปได้หมดจะมีการสะท้อนกลับ การส่งผ่านจึงทำได้ไม่เต็มที่ และเมื่อสังเกตดูค่าอินพุทอิมพีแดนซ์จะมีค่าไม่เท่ากับ 50 โอห์มซึ่งเป็นค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ในท่อทองเหลืองจึงเป็นสาเหตุของการสะท้อนกลับของคลื่นเช่นกัน เนื่องจากว่าเกิดความไม่แมตช์ (Matched) กันภายในท่อ จากค่าความสูญเสียต่างๆนี้ถึงจะเกิดขึ้น แต่คลื่นก็ยังสามารถส่งผ่านไปในท่อได้ถึงแม้ต้องเสียกำลังงานไปบ้าง

#### 4.3 การทดลองที่ 3

เป็นการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่ความถี่ 12.66 GHz การจัดวางเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งได้ทดสอบบนดาดฟ้าตึกสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ 4.3 แสดงการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดสอบ

มีขั้นตอนดังนี้

1. ภาคส่งจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย รุ่น HP8720C ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟซึ่งจะตั้งให้ทำงานที่โหมดส่งคลื่นต่อเนื่อง (Continuous Wave : CW) มีกำลังส่ง  $10 \text{ dB}_m$  (10 mW) ที่ความถี่ 12.66 GHz สายอากาศส่งเป็นสายอากาศปากแตรลูกฟูก (Corrugated Horn) ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สายอากาศ และอุปกรณ์ที่ใช้ทางด้านส่งในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ส่วนภาครับประกอบด้วยสายอากาศทดสอบติดตั้งอยู่บนแท่นหมุน (Turn Table) ตัวสายอากาศทดสอบจะต่อกับ LNB เพื่อแปลงความถี่ไมโครเวฟที่รับได้ลงในย่านแอล (L-Band : 1-2 GHz) และขยายความแรงของสัญญาณด้วย เนื่องจากระยะทางจากสายอากาศทดสอบไปยังเครื่องรับต้องใช้สายนำสัญญาณยาวถึง 10 เมตร ดังนั้นถ้าส่งผ่านสัญญาณที่ความถี่ไมโครเวฟเลยจะมีการสูญเสียในสายส่งมาก จึงต้องแปลงความถี่ลงเพื่อลดการสูญเสียในสายส่ง เพื่อให้ LNB ทำงานต้องมีไฟกระแสตรง 18 โวลต์ ไปเลี้ยงจึงต้องมีตัวป้อนไฟเลี้ยง (ไม่ได้แสดงในภาพ) ย้อนกลับเข้าไปในสายส่ง แต่สัญญาณที่จะเข้าเครื่องรับจะต้องมีเฉพาะสัญญาณ L (ห้ามไฟกระแสตรงเข้าเด็ดขาด) จึงต้องมีวงจรกันไฟกระแสตรง (D.C. Cutter) ไม่ให้เข้าเครื่องรับซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) จากนั้นทำการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นทั้งสองแบบคือ รูปแบบผลรวม และรูปแบบผลต่าง

3. ในการหาระยะสนามระยะไกล (Far Field : R) ของสายอากาศเพื่อหาระยะทดสอบ (Test Range) ที่เหมาะสม จะหาจาก

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda_0}$$

เมื่อ D คือ มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศ

$\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอากาศที่ความถี่ 12.66 GHz

สนามระยะไกลของสายอากาศปากแตรลูกฟูก  $R_c \geq 0.64$  m. เมื่อ  $D_c = 87$  mm.

สนามระยะไกลของสายอากาศทดสอบ  $R_s \geq 2.35$  m. เมื่อ  $D_s = 167$  mm.

(มิติที่ใหญ่ที่สุดของสายอากาศทดสอบ ( $D_s$ ) วัดในแนวทะแยงมุม)

ระยะทดสอบที่น้อยที่สุดที่จะสามารถทำการทดสอบได้ (Minimum Test Range) ก็คือ สนามระยะไกลที่มีค่ามากที่สุดของสายอากาศส่งหรือรับตัวใดตัวหนึ่ง ซึ่งในที่นี้ก็คือระยะ 2.35 เมตร และในการทดสอบนี้ใช้ระยะทดสอบ 38 เมตร

4. เมื่อเริ่มทำการวัด ตัวควบคุมการหมุนจะสั่งให้แท่นหมุนไปที่ละ 1 องศา จนครบ 360 องศา

5. ขณะทำการวัดรูปแบบผลรวม (Sum Pattern) จะต่อพอร์ตผลรวมของเมจิกที่กับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมส่วนพอร์ตผลต่างจะเทอร์มินเนตไว้ตามรูปที่ 4.5

6. เมื่อจะวัดรูปแบบผลต่าง (Diff pattern) จะจัดวางเครื่องมือในทำนองเดียวกับข้อ 4 คือ ต่อพอร์ตผลต่างของเมจิกที่กับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ตามรูปที่ 4.6

7. บันทึกค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ทุก ๆ 1 องศา เพื่อนำไปพล็อตกราฟซึ่งจะแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบผลรวมและรูปแบบผลต่าง ทั้งในระนาบสนามไฟฟ้าและในระนาบสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.5 แสดงการจัดสายอากาศทางด้านรับที่จะทำการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบผลรวม

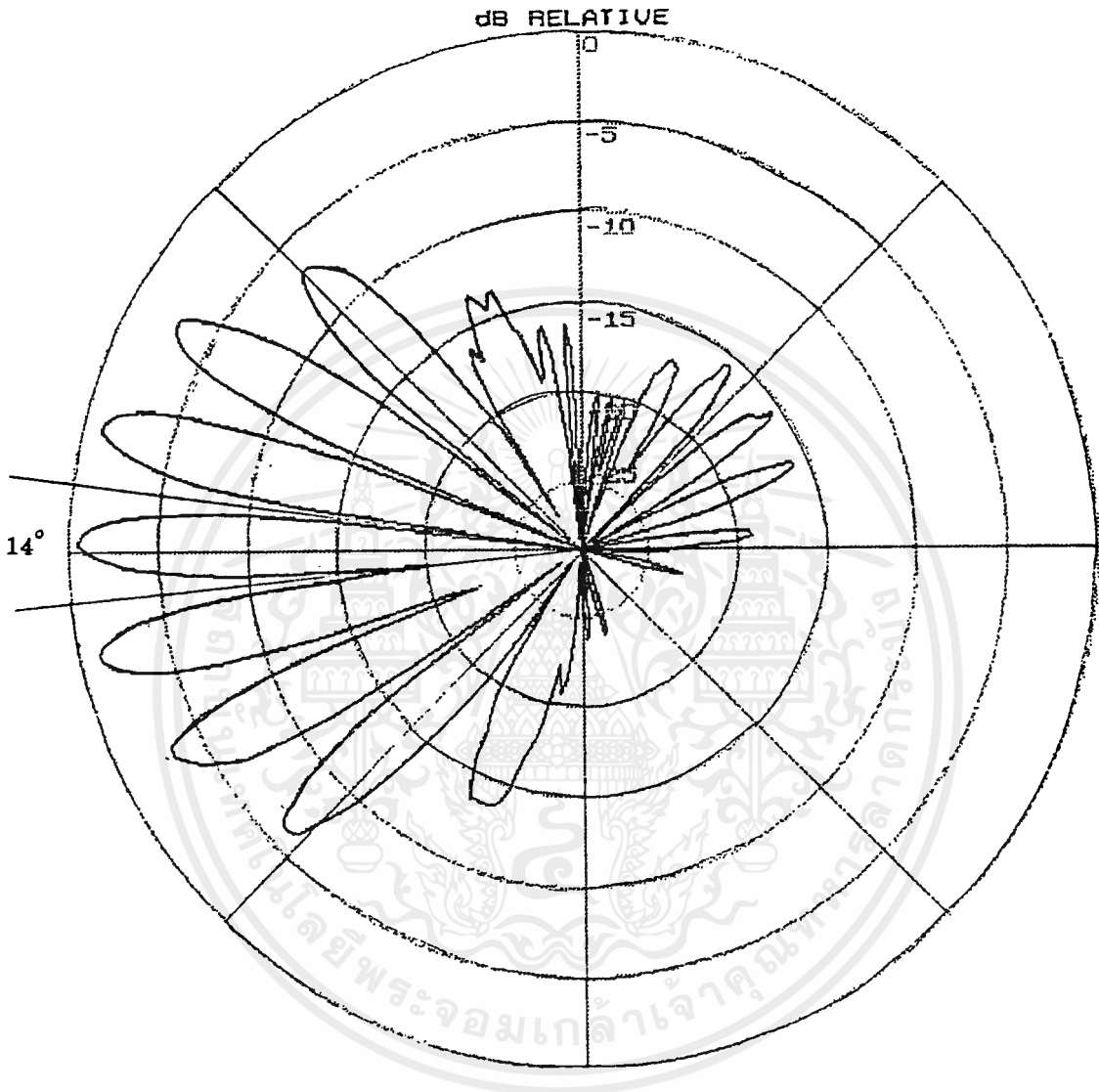


รูปที่ 4.6 แสดงการจัดสายอากาศทางด้านรับที่จะทำการวัดรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบผลต่าง

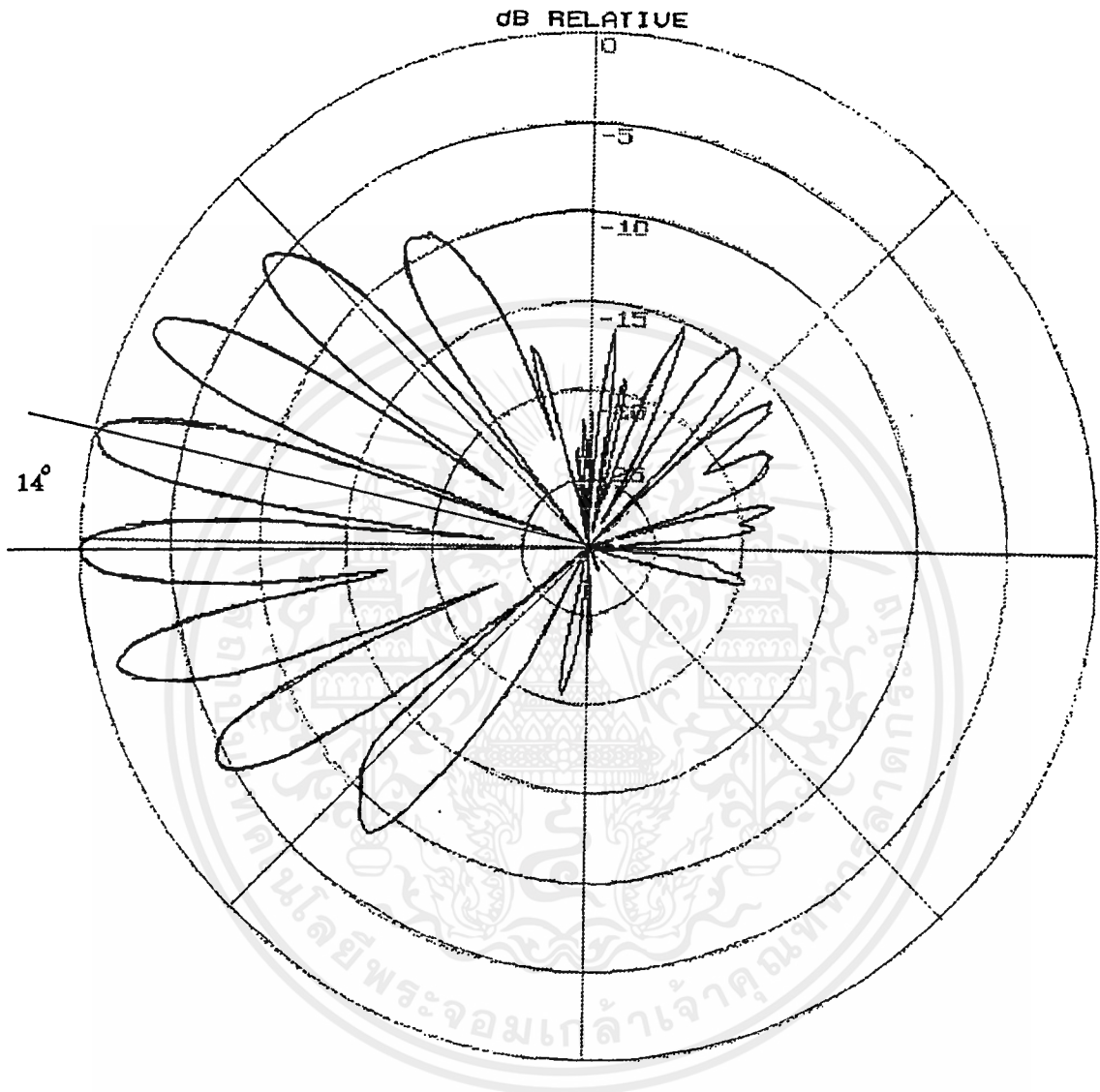
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3.1 ผลการทดลองที่ 3

แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทดสอบในรูปแบบผลรวมและรูปแบบผลต่างตามรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับดังนี้



รูปที่ 4.7 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบผลรวมของสายอากาศที่ได้จากการนำไปทดสอบ



รูปที่ 4.8 รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นในรูปแบบผลต่างของสายอากาศที่ได้จากการนำไปทดสอบ

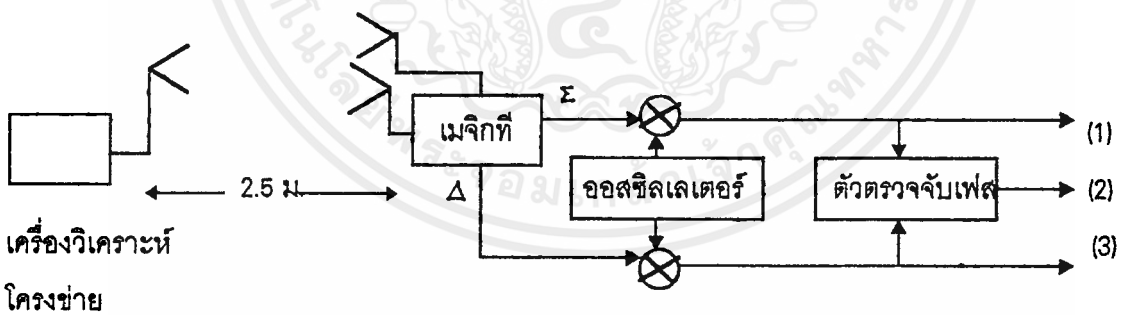
### 4.3.2 สรุปผลการทดลองที่ 3

จากการจัดวางสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 เมื่อนำไปวัดรูปแบบของสายอากาศตามการทดลองที่ 3 แล้วได้ผลออกมาตามรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 ซึ่งในรูปที่ 4.7 เป็นรูปแบบผลรวมของสายอากาศที่วัดได้จากพอร์ตผลรวมของเมจิกที และในรูปที่ 4.8 เป็นรูปแบบผลต่างของสายอากาศที่วัดได้จากพอร์ตผลต่างของเมจิกที เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสนามผลรวม และสนามผลต่างจากที่คำนวณได้ตามรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9 ในบทที่ 3 แล้วพบว่ามิลักษณะใกล้เคียงกัน ซึ่งจะมีเกรตติ้งโหลบ (Grating Lobe) เกิดขึ้นมาจำนวนหนึ่งเนื่องมาจากการจัดวางสายอากาศไม่สามารถทำให้ระยะห่างของสายอากาศมีระยะน้อยกว่าความยาวคลื่นในอากาศได้ และเมื่อดูที่ 0 องศา (ตำแหน่งของสายอากาศส่งตรงกับตำแหน่งของสายอากาศรับ) จะพบว่าในรูปแบบผลรวมจะมีค่าสูงสุด และในรูปแบบผลต่างจะมีค่าต่ำสุดเช่นกัน ซึ่งก็สอดคล้องกับทฤษฎีของสายอากาศที่จะนำไปใช้ในระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยขนาด

เมื่อนำสายอากาศนี้ไปใช้งานในระบบโมโนพัลส์จะต้องเลือกเพียงโหลบหลัก (Main Lobe) เพียงโหลบเดียวเท่านั้น คือจะต้องตัดเกรตติ้งโหลบออกไป ดังนั้นการใช้งานจริงๆ ในระบบโมโนพัลส์จึงมีช่วงของการใช้งานเพียง 14 องศา คือจากแกนกลางของสายอากาศไปทางขวา และซ้ายอย่างละ 7 องศา

### 4.4 การทดลองที่ 4

เป็นการทดลองของระติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยขนาดในส่วนของภาครับสัญญาณ ซึ่งได้แก่ส่วนของสายอากาศ และภาควิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งได้แก่ส่วนของตัวตรวจจับเฟส ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมดังนี้



- โดยที่ (1) คือ เอาต์พุตของแอมพลิจูดดีเทกเตอร์ทางด้านผลรวม  
 (2) คือ เอาต์พุตของตัวตรวจจับเฟส  
 (3) คือ เอาต์พุตของแอมพลิจูดดีเทกเตอร์ทางด้านผลต่าง

รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมแสดงการจัดอุปกรณ์ในการทดลองที่ 4

จากการทดลองเราได้จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงการจัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 4

จากบล็อกไดโอดแกรมในส่วนของภาคส่งจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเป็นตัวกำเนิดคลื่นที่มีความถี่ 12.56 GHz สาเหตุที่เลือกใช้ความถี่ 12.56 GHz ส่งนั้น เนื่องจากการทดลองจริงต้องใช้อุปกรณ์ในส่วนของการขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำทางด้านรับที่มีกลุ่มโครงงานอีกกลุ่มหนึ่งได้ทำการออกแบบไว้โดยมีจุดประสงค์ที่จะนำมาใช้ร่วมกันในระบบนี้ โดยชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำจะมีหน้าที่ลดความถี่ที่ส่งมาให้เป็นความถี่กลางในย่านความถี่ L (1.8 GHz) พร้อมทั้งขยายสัญญาณที่รับเข้ามาด้วย ซึ่งถ้าหากใช้ความถี่ที่ส่งมา 12.56 GHz จะสามารถลดความถี่ลงให้ได้ใกล้เคียงกับ ความถี่ย่าน L ได้มากที่สุด คือ 1.795 GHz เพื่อให้แมตช์กับในส่วนของตัวตรวจจับสัญญาณที่ได้ออกแบบด้วยไมโครสตริปไว้ตามได้อธิบายในบทที่ 3

#### 4.4.1 การทดลองที่ 4.1

ในส่วนของตัวตรวจจับเฟส และแอมพลิจูดดีเทกเตอร์ทั้ง 2 ตัว ที่อยู่ในภาควิเคราะห์สัญญาณนั้นที่ส่วนประกอบหลักคือคริสตอลไดโอดดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อเป็นการทดสอบคุณสมบัติในการทำงานของคริสตอลไดโอดซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

1. ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเป็นตัวกำเนิดคลื่นที่ความถี่ย่าน L 1.8 GHz ส่งไปตามสายส่งสัญญาณผ่านตัวคริสตอลไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปลี่ยนค่ากำลังงานที่ใช้ส่ง จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจาก 10 dB<sub>m</sub> ซึ่งเป็นค่ากำลังงานที่สูงที่สุดที่เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายสามารถกำเนิดได้ แล้วลดลงไปเรื่อยๆ

3. ใช้มิเตอร์วัดค่าศักดาไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของตัวคริสตรอลไดโอด ทุกครั้งที่ทำการลดกำลังงานลง จากทดลองนี้ได้ทดลองใช้คริสตรอลไดโอดจำนวน 2 ตัว ซึ่งได้ผลการทดลองตามตารางข้างล่างดังนี้

#### ผลการทดลองที่ 4.1

กำลังงานของคลื่นที่ส่งมา (dB <sub>m</sub> )	ค่าศักดาไฟฟ้าทางเอาต์พุตของคริสตรอลไดโอด
10	62.31 mV
9	55.27 mV
8	48.12 mV
7	42.10 mV
6	34.20 mV
5	30.44 mV
4	25.39 mV
3	19.62 mV
2	16.52 mV
1	14.03 mV
0	10.95 mV
-1	7.64 mV
-2	4.89 mV
-3	2.648 mV
-4	1.406 mV
-5	93.70 μV
-6	-

### สรุปผลการทดลองที่ 4.1

จากตารางผลการทดลองจะพบว่าต้องมีกำลังงานอย่างน้อย  $-5 \text{ dB}_m$  ขึ้นไป คริสตรอลไดโอดจึงจะสามารถตีเทกสัญญาณนั้นให้ออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสตรงได้ แต่ถ้าหากน้อยกว่า  $-5 \text{ dB}_m$  คริสตรอลไดโอดก็จะไม่สามารถทำงานได้ นั่นคือจะไม่สามารถวัดค่าศักดาไฟฟ้าที่เอาต์พุทของคริสตรอลไดโอดได้

#### 4.4.2 การทดลองที่ 4.2

เป็นการวัดสัญญาณที่รับได้จากส่วนของสายอากาศรับ ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.9 แล้วนำสัญญาณนั้นมาผ่านเมจิกที่ได้เป็นสัญญาณด้านผลรวม และสัญญาณด้านผลต่าง ผ่านชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำจำนวน 2 ตัวต่อละด้านพร้อมๆ กัน และวัดสัญญาณที่ได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม จะทำการวัดสัญญาณโดยการวางระยะห่างของสายอากาศทางด้านส่งห่างจากทางด้านรับเป็น 2 ระยะ คือ ระยะสนามระยะไกลเท่ากับ 2.5 เมตร และระยะที่ใกล้ๆ ประมาณ 80 เซนติเมตร

#### ผลการทดลองที่ 4.2

ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับกับสายอากาศส่ง	ระดับสัญญาณที่วัดได้ ( $\text{dB}_m$ )
2.5 เมตร	-66
80 เซนติเมตร	-42

#### สรุปผลการทดลองที่ 4.2

จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่รับได้ก่อนที่จะส่งไปยังส่วนตรวจจับสัญญาณนั้นมีค่าต่ำมากๆ ตามระยะห่างระหว่างสายอากาศรับกับสายอากาศส่ง

จากการทดสอบคุณสมบัติของคริสตรอลไดโอดซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของส่วนตรวจจับสัญญาณ ตามการทดลองที่ 4.1 นั้นพบว่าคริสตรอลไดโอดจะทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีกำลังงานมากกว่า  $-5 \text{ dB}_m$  ขึ้นไปแต่สัญญาณที่วัดได้ในกรทดลองที่ 4.2 ซึ่งจะเป็นสัญญาณอินพุทให้กับคริสตรอลไดโอดนั้นมีค่ามากที่สุดที่ระยะห่างของสายอากาศรับกับสายอากาศส่ง 80 เซนติเมตรมีค่าเท่ากับ  $-42 \text{ dB}_m$  และยิ่งวางให้ระยะห่างมากขึ้นไปอีกที่ระยะสนามระยะไกล 2.5 เมตร สัญญาณก็จะยิ่งมีค่าต่ำลงอีกมากๆ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $-66 \text{ dB}_m$  จะพบว่าสัญญาณที่รับได้นี้มีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้คริสตรอลไดโอดทำการตีเทกสัญญาณให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรงได้ จึงไม่สามารถที่จะทำการวัดค่าศักดาไฟฟ้าในตำแหน่งที่ (1),(2),(3) ตามที่ได้แสดงไว้ในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.9 แต่ถ้าหากสามารถทำการขยายสัญญาณที่รับได้นี้ให้มีค่ามากพอที่จะทำให้คริสตรอลไดโอดทำงานได้นั้น ก็จะสามารถหาค่าศักดาไฟฟ้าในตำแหน่งที่ (1),(2),(3) เหล่านั้นได้ และจากค่าศักดาไฟฟ้าในตำแหน่งที่ (1) ซึ่งเป็นเอาต์พุทของแอมพลิฟิไคร์ตีเทกเตอร์ทางด้านผลรวมซึ่งเป็นสัญญาณที่รับมาเพื่อนำเอาไปใช้งานได้เป็น

ข้อมูลแบบภาพ หรือเสียงก็ได้ ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าในตำแหน่งที่ (2) นั้น คือค่าเอาต์พุทของตัวตรวจจับเฟสจะเป็นค่าที่ใช้บอกทิศทางของเป้าหมายที่จะทำการติดตามว่าขณะนี้อยู่ทางซ้าย หรือทางขวาของแกนกลางของสายอากาศ ซึ่งในส่วนนี้ได้ทำการทดลองแยกออกไปเป็นส่วนเฉพาะของตัวตรวจจับเฟสแล้วตามการทดลองที่ 1 ส่วนค่าศักดาไฟฟ้าในตำแหน่งที่ (3) นั้น คือค่าเอาต์พุทของแอมพลิจูดดีเทกเตอร์ทางด้านผลต่าง จะเป็นค่าที่ใช้สำหรับบอกขนาดของมุมในขณะที่เป้าหมายอยู่ห่างไปจากแกนกลางของสายอากาศว่ามีค่ากี่องศาโดยที่แต่ละองศาจะมีค่าศักดาไฟฟ้าขนาดต่างๆ กันไป

จากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่าในส่วนของสายอากาศรับและในส่วนของการตรวจจับสัญญาณที่ได้ออกแบบนั้นสามารถที่จะนำมาใช้ในระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบเปรียบเทียบด้วยขนาดได้ โดยที่ในส่วนของสายอากาศรับนั้นจะมีช่วงระยะในการใช้งานเพียง 14 องศาเท่านั้น ถ้าหากเกินออกไปมากกว่านี้ก็จะไม่สามารถที่จะทำการติดตามเป้าหมายได้เลย และในส่วนของการตรวจจับสัญญาณนั้นก็สมารถที่จะนำมาใช้ได้เช่นกัน แต่จะต้องมีกำลังงานที่สูงเพียงพอที่จะทำให้คริสตอลไดโอดสามารถที่จะทำงานได้ นั่นคือสัญญาณที่รับได้ต้องมีค่ามากกว่า  $-5 \text{ dB}_m$  ขึ้นไป



## บทที่ 5

### บทวิจารณ์ และบทสรุป

#### 5.1 บทสรุป

ในการสื่อสารโดยทั่วไป การที่จะรับสัญญาณได้อย่างเต็มทีนั้นจะต้องทำการหันสายอากาศรับให้ตรงกับตำแหน่ง และทิศทางของสัญญาณที่ส่งมา แต่สำหรับกรณีของการสื่อสารในกรณีที่สายอากาศรับมีการเคลื่อนที่ จะต้องใช้ระบบติดตามในการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติมาช่วยติดตามสัญญาณเพื่อทำให้การรับสัญญาณนั้นรับได้ชัดเจนที่สุด

ซึ่งในปริวิตยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติโมโนพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยขนาด ในส่วนของภาครับสัญญาณ และภาควิเคราะห์สัญญาณ

โดยในภาครับสัญญาณนั้นได้ออกแบบการจัดวางสายอากาศฮอร์นแบบกรวยที่มีลำคลื่นรูปปลายดินสอจำนวน 2 ตัว ในลักษณะชิดกัน และขนานกันให้มากที่สุด เพื่อให้ได้รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศทั้งสองมีลักษณะเหลื่อมล้ำกันเล็กน้อยซึ่งจะนำมาใช้เป็นสายอากาศรับสัญญาณที่มีความถี่ 12.66 GHz โดยมีเมจิกที่เป็นอุปกรณ์เปรียบเทียบเพื่อให้ได้สัญญาณผลรวม กับสัญญาณผลต่างออกมา เพื่อส่งต่อไปยังส่วนวิเคราะห์สัญญาณ และจากการทดลองวัดรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่นในรูปของผลรวมกับผลต่างของสายอากาศที่ได้ออกแบบนั้น พบว่ามีคุณสมบัติสามารถนำมาใช้ในระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติได้แต่ยังมีข้อจำกัดอยู่ คือจะสามารถใช้งานได้เฉพาะในช่วง 14 องศาหรือจากแกนกลางของสายอากาศไปทางด้านซ้าย และทางด้านขวา ด้านละ 7 องศา

ส่วนในภาควิเคราะห์สัญญาณ ได้ออกแบบวงจรตรวจจับเฟสที่ความถี่กลางในย่าน L 1.8 GHz โดยใช้ไมโครสตริป เป็นไฮบริด ริง ทำการเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณผลรวมกับสัญญาณผลต่างเพื่อใช้ในการหาทิศทางของเป้าหมายว่าอยู่ทางด้านซ้าย หรือทางด้านขวา และผลจากการทดลองเฉพาะตรวจจับเฟสโดยใช้อินพุทจากเครื่องวิเคราะห์โคจรข่ายโดยตรงพบว่าสามารถที่จะนำมาใช้งานในระบบนี้ได้ดูจากกราฟที่ได้จากการทดลองเทียบกับกราฟตามทฤษฎี โดยถ้าเอาต์พุทออกมาเป็นบวกแสดงว่าสัญญาณผลรวมกับสัญญาณผลต่างมีเฟสตรงกันซึ่งก็สามารถบอกได้ว่าเป้าหมายอยู่ทางซ้ายมือ และถ้าเอาต์พุทออกมาเป็นลบแสดงว่าสัญญาณผลรวมกับสัญญาณผลต่างมีเฟสต่างกัน 180 องศา ซึ่งก็จะสามารถบอกได้ว่าเป้าหมายนั้นอยู่ทางขวามือได้เช่นกัน

และเมื่อนำทั้งส่วนภาครับสัญญาณมาต่อรวมกันกับภาควิเคราะห์สัญญาณโดยก่อนที่จะนำสัญญาณที่รับมาเข้าภาควิเคราะห์สัญญาณจะต้องผ่านชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำโดยจะทำการลดความถี่ลง และขยายสัญญาณให้เพิ่มขึ้นพร้อมๆ กันด้วย จากการทดลองพบว่าสัญญาณที่ผ่านออกมาจากชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำที่วัดได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม เมื่อวางสายอากาศทาง

ด้านส่งและสายอากาศทางด้านรับทั้งให้อยู่ห่างกันในระยะสนามระยะไกล หรือแม้กระทั่งให้อยู่ใกล้ๆ กันมากที่สุด สัญญาณที่วัดได้ก็ยังมีค่าต่ำมากๆ ประมาณ  $-66 \text{ dB}_m$  และ  $-42 \text{ dB}_m$  ตามลำดับ ซึ่งในส่วนตรวจจับสัญญาณที่จะต้องมารับสัญญาณที่ได้จากตรงนี้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อหามุมและขนาดของมุมที่ผิดพลาดต่อไปนั้น ได้แก่วงจรตรวจจับเฟสและแอมพลิจูดดีเทกเตอร์อีกจำนวน 2 ตัวของทางด้านสัญญาณผลรวม กับทางด้านสัญญาณผลต่างซึ่งวงจรเหล่านี้ต่างก็มีส่วนประกอบหลักคือคริสตอลไดโอด และจากการทดลองนั้น คริสตอลไดโอดจะเริ่มทำการดีเทกสัญญาณได้ต้องมีกำลังงานมากกว่า  $-5 \text{ dB}_m$  ขึ้นไป ซึ่งสัญญาณที่เข้ามา นั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้คริสตอลไดโอดนั้นทำงานได้ จึงไม่สามารถวัดค่าศักดาไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกมาได้ ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมดสามารถบอกได้ว่าถ้าหากสัญญาณที่รับได้มีค่ามากพอที่จะทำให้คริสตอลไดโอดทำงานได้แล้ว วงจรตรวจจับเฟสก็จะสามารถบอกได้ว่าขณะนี้เป้าหมายอยู่ทางด้านซ้าย หรือด้านขวาของแกนกลางของสายอากาศรับ และแอมพลิจูดดีเทกเตอร์ทางด้านสัญญาณผลต่างก็จะสามารถบอกเป็นค่าศักดาไฟฟ้าของแต่ละมุมที่มีความผิดพลาดไปโดยแต่ละมุมก็จะมีค่าไม่เท่ากัน ส่วนแอมพลิจูดดีเทกเตอร์ทางด้านสัญญาณผลรวมก็จะเป็นสัญญาณที่รับมาแล้วนำไปใช้ได้ ซึ่งอาจจะเป็นข้อมูล ภาพ หรือเสียงก็ได้

เมื่อได้สัญญาณที่วิเคราะห์ว่าเป้าหมายอยู่ทางซ้าย หรืออยู่ทางขวา และอยู่ในตำแหน่งที่เป็นมุมเท่าใดนั้นก็ยังสามารถส่งไปให้ในส่วนของการควบคุมสายอากาศ เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางลอจิกแล้วส่งไปให้ไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อไปควบคุมมอเตอร์ให้หมุนสายอากาศกลับมาตรงกับตำแหน่งที่สามารถรับสัญญาณได้สูงสุดเหมือนเดิม

## 5.2 บทวิจารณ์ และแนวทางแก้ปัญหาเพื่อพัฒนาต่อไป

ในส่วนของภาครับสัญญาณที่ออกแบบ พบว่าสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วง 14 องศาและมีเกรดติงโหลบนั้น เนื่องจากว่าในการจัดวางสายอากาศไม่สามารถทำให้สายอากาศฮอร์นแบบกรวยที่เลือกใช้เพียงแคตัวเดียวก็มีขนาดกว้างมากกว่าความยาวคลื่นในอากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.36 เซนติเมตร นอกจากนี้ยังต้องมีเมจิกที่อยู่ตรงกลางระหว่างสายอากาศทั้งสองอีก ซึ่งก็ยิ่งทำให้มีค่ามากกว่าความยาวคลื่นในอากาศไปอีกดังนั้นจึงไม่มีทางเลือก จึงต้องมีเกรดติงโหลบเกิดขึ้นอย่างแน่นอน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้เฉพาะโหลบหลักเพียงโหลบเดียว ซึ่งก็มีช่วงที่ใช้งานประมาณ 14 องศา แต่ถ้าหากต้องการให้มีช่วงที่ใช้งานมากไปกว่านี้ก็ทำได้โดยการออกแบบสายอากาศให้มีความกว้างลำ (Beamwidth) มากกว่านี้

ส่วนในภาควิเคราะห์สัญญาณนั้นพบว่าสัญญาณที่รับได้มีค่าต่ำมากๆแม้ว่าจะได้ผ่านชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำก็ตาม ก็ยังไม่สามารถเพิ่มกำลังงานของสัญญาณให้มากพอที่จะทำให้คริสตอลไดโอดที่เป็นส่วนประกอบหลักในส่วนตรวจจับสัญญาณสามารถทำงานได้ จึงไม่สามารถวัดค่าต่างๆ ในส่วนของภาควิเคราะห์สัญญาณในขณะที่นำแต่ละส่วนมารวมกันได้ แต่ถ้าหากแยกทดสอบในแต่ละส่วนก็พบว่าทำงานได้ สามารถนำมาใช้ในระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์นี้ได้ด้วย

ปัญหาที่ทำให้สัญญาณที่รับได้มีขนาดของกำลังงานต่ำมากๆ ก็คือ

- มีการสูญเสียของกำลังงานไปในส่วนของอุปกรณ์ส่งผ่านคลื่น เช่น สายส่ง และท่อนำคลื่น
- มีการสูญเสียของกำลังงานไปในอากาศ (Free space Loss)
- การสูญเสียของกำลังงานในส่วนของชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ เนื่องจากใช้ LNB จำนวน 2 ตัว ซึ่งมีออสซิลเลเตอร์อยู่ในตัวมันเอง แต่นำของตัวหนึ่งมาถอดออกไป เพื่อใช้ออสซิลเลเตอร์ตัวที่เหลือร่วมกับอีกตัวหนึ่งโดยการใช้ตัวแบ่งกำลังงานมาแบ่งสัญญาณจากออสซิลเลเตอร์ซึ่งก็จะทำให้กำลังงานที่ได้เหลือเพียงครึ่งเดียว จึงทำให้มีกำลังงานไม่เพียงพอที่จะไปทำให้วงจขยายสัญญาณในตัวมันเองขยายได้อย่างเต็มที่ ซึ่งปกติจะสามารถขยายได้ 50 dB<sub>m</sub> และจากการนำไปทดลองวัดพบว่าสามารถขยายสัญญาณได้เพียง 30 dB<sub>m</sub> เท่านั้น แล้วสัญญาณที่รับมาได้ก็ยังมีค่าต่ำมากๆ ดังนั้นจึงไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้งานได้

ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวทางในการแก้ไขปัญหาเพื่อพัฒนาต่อไปดังนี้คือ

- สร้างตัวขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำเพิ่มลงไปเพื่อให้กำลังงานมีค่ามากพอที่จะทำให้คริสตอลไดโอดสามารถที่จะทำงานได้
- ต้องออกแบบ และสร้างในส่วนของชุดขยายสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนต่ำให้มีเอาต์พุตออกมาโดยที่มีกำลังงานขยายได้เต็มที่ เพื่อที่จะได้ไม่ต้องไปทำตัวขยายสัญญาณเพิ่มอีก
- ออกแบบส่วนของการตรวจจับสัญญาณให้มีความไวในการดีเทกสัญญาณต่ำมากๆ ได้

ถ้าหากสามารถแก้ไขปัญหาต่างๆ เหล่านี้ได้ก็จะทำให้ระบบสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะนำไปใช้ประโยชน์สำหรับการสื่อสารในอนาคตได้

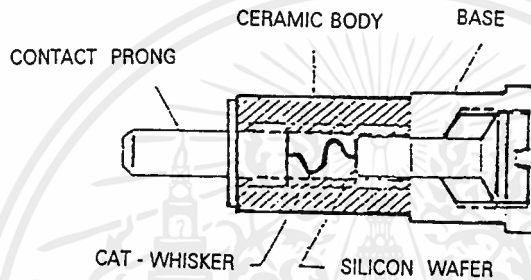
# ภาคผนวก

## ภาคผนวกที่ 1

### คุณลักษณะของคริสตอลไดโอด (Crystal Diode)

คริสตอลไดโอด เป็นชิ้นส่วนที่ใช้กันมากในงานไมโครเวฟ เนื่องจากมีความไว (Sensitivity) สูง และรูปร่างกะทัดรัดนำไปใช้ได้สะดวก เมื่อป้อนคลื่นไมโครเวฟที่ไม่มีสัญญาณอะไรมอดูเลตเข้ามา มันจะให้ดีซีออกมา ถ้าป้อนคลื่นไมโครเวฟที่ทำการมอดูเลตด้วยสัญญาณภาพหรือเสียง (สัญญาณ AC) มันจะให้กระแส AC ความถี่ต่ำ (สูงขึ้นไปนับสิบบางเมกะเฮิร์ตซ์ หรือมากกว่า) ออกมา

### โครงสร้าง



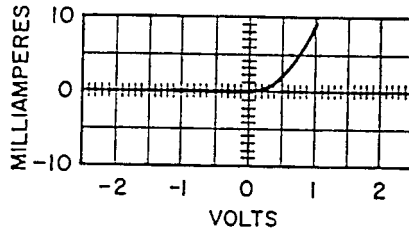
รูปที่ 1 คริสตอลไดโอดแบบแท่งซีรามิก

คริสตอลไดโอดที่ใช้กันทั่วไปมี 2 แบบ คือ แบบแท่งซีรามิก (Ceramic Cartridge) และแบบโคแอกเซียล (Coaxial Type)

แบบแท่งซีรามิก มีส่วนประกอบสำคัญได้แก่ ฐานซิลิกอนและลวดทังสเตนเล็กๆ เรียกว่า ลวดทังสเตน (Cat-Whisker) และมีกระเบื้องหุ้มเพื่อป้องกันชิ้นที่ส่วนภายในเดือยสัมผัสจะไขเกลียวลงไปในปลอกกระเบื้อง ส่วนที่ใหญ่ของตัว เรียกว่า ฐาน (Base) โดยปกติแล้วฐานจะเป็นกราวด์เสมอ เมื่อนำเอาคริสตอลไดโอดไปใช้ในวงจร อย่างไรก็ดีฐานอาจจะแยกต่างหาก ตัวคริสตอลไดโอดจึงมีเดือยทั้งสองข้าง เมื่อนำไปใช้อาจจะเสียบเดือยใดเข้าที่ฐานก็ได้ แบบนี้อาจใช้ได้ทั้งขั้วตรง (Forward Polarity) และขั้วกลับ (Reverse Polarity) สำหรับแบบแท่งซีรามิกแล้ว ชิ้นส่วนที่เป็นเดือยและฐานจะทำด้วยทองเหลืองหรือเคลือบทอง เพื่อป้องกันสนิม (ให้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี)

คุณสมบัติการเรกติไฟเออร์ของคริสตอลไดโอด ขึ้นอยู่กับความจริงที่ว่าอิเล็กตรอนสามารถเดินทางผ่านเขตต่อระหว่างซิลิกอนกับลวดทังสเตนในทิศทางหนึ่งได้ง่ายกว่าอีกทิศทางหนึ่ง ข้อต่อระหว่างโลหะที่ยึดฐานซิลิกอนนั้นไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทาน เพราะมีพื้นที่ใหญ่ แต่บริเวณเล็กๆที่เป็นจุดสัมผัสระหว่างซิลิกอน-ทังสเตน จะมีความต้านทาน และดังนั้นความต้านทานระหว่างเดือยทั้งสองจึงอยู่ระหว่าง 100 โอห์ม หรือน้อยกว่า เมื่อมีกระแสไหลผ่านในทิศทางหนึ่ง แต่ในอีกทิศทางหนึ่งจะมีความต้านทาน 10,000 โอห์ม จึงเป็นความต้านทานต่อกระแสที่ไหลกลับ คุณลักษณะดีซีของคริสตอลไดโอด แสดงในรูปที่ 2 ทิศทางที่อ้างอิงในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่คริสตอลไดโอดลงไปในรูใส่ (Crystal Mount) จะมีกระแสไหล ถ้าหากฐานของมันเป็นบวกเมื่อเทียบกับ  
 ทีเดียวเล็ก



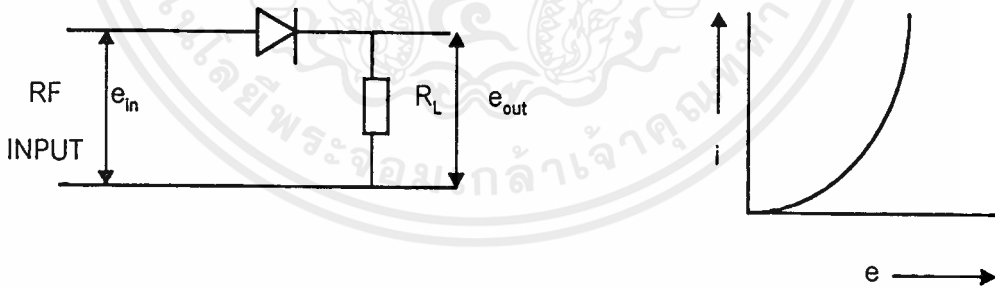
รูปที่ 2 คุณลักษณะของซิลิกอนคริสตอล

การใช้คริสตอลไดโอดเป็นคริสตอลดีเทคเตอร์ (Crystal Detector)

ในเครื่องรับไมโครเวฟแบบง่ายที่สุด สัญญาณไมโครเวฟที่เข้ามาจะถูกตีמודูเลตเอาสัญญาณที่ต้องการ  
 มาได้โดยตรงที่คริสตอลดีเทคเตอร์ แล้วนำสัญญาณเหล่านี้ไปเข้าเครื่องหรือวงจรที่ต้องการใช้งานอื่นๆ

ถ้ามีโหลด  $R_L$  ต่อคร่อมขั้วทางออกของคริสตอลดีเทคเตอร์ ได้วงจรสมมูลดังรูปที่ 3 จากกฎของ  
 โอมห์ จะได้โวลเตจทางออกได้จากสมการ

$$e_{out} = iR_L \quad (1)$$



รูปที่ 3 วงจรดีเทคเตอร์แบบง่ายและคุณลักษณะโวลท์-แอมแปร์

แต่คุณลักษณะของคริสตอลดีเทคเตอร์ มีกราฟของโวลท์-แอมแปร์ไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear)  
 กระแสที่ไหลในวงจรจึงแสดงด้วยอนุกรมกำลังต่อไปนี้

$$i = a_0 + a_1e + a_2e^2 + a_3e^3 + \dots + a_n e^n \quad (2)$$

ถ้าโวลเตจที่ป้อนเข้ามา  $e$  เป็น 0 วงจรดีเทคเตอร์ก็จะมีกระแสไหล ดังนั้นเทอม  $a_0$  จึงเท่ากับ 0 ถ้ามี  
 โวลเตจของความถี่ไมโครเวฟในรูปของ

$$e_{in} = A \cos \omega t \quad \text{เข้ามา}$$

ในที่นี้  $e_{in}$  คือ โวลเตจชั่วขณะของความถี่วิทยุที่ป้อนเข้า  
 $A$  คือ ค่าที่สูงสุดโวลเตจ  
 $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  คือ ความถี่ไมโครเวฟ

กระแสจะมีค่า

$$i = a_1 A \cos \omega t + a_2 (A \cos \omega t)^2 + a_3 (A \cos \omega t)^3 + \dots + a_n (A \cos \omega t)^n \quad (3)$$

ถ้าหากสัญญาณที่เข้ามามีกำลังอ่อนมาก (ระดับต่ำมาก) เทอมทั้งหมดในอนุกรมดังกล่าวอาจตัดทิ้งไปได้ ยกเว้นเทอมแรก

$$i = a_1 A \cos \omega t \quad (4)$$

สมการ (4) ซึ่งให้เห็นว่ากระแสที่ไหลในวงจรเป็นปฏิภาคตรงกับโวลเตจที่ป้อนเข้ามา ในกรณีนี้คริสตอลดีเทคเตอร์จะแสดงตัวเป็นตัวความต้านทานธรรมดาหรือพูดได้ว่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในคริสตอลดีเทคเตอร์ตัวมันเองมีขนาดแรงพอที่จะกลบสัญญาณอ่อนๆที่เข้ามาได้

อย่างไรก็ตาม ถ้าสัญญาณที่ป้อนเข้ามามีขนาดแรงกว่าเดิม โดยมีระดับสูงกว่าสัญญาณรบกวน เทอมที่สองพวกอนุกรมสมการ (3) ต้องรวมเข้าด้วย เพื่อให้ได้ค่าถูกต้องยิ่งขึ้น จะได้

$$i = a_1 (A \cos \omega t) + a_2 (A \cos \omega t)^2$$

จาก  $\cos^2 \omega t = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\omega t$

$$i = a_1 (A \cos \omega t) + \left( \frac{a_2 A^2}{2} \right) (1 + \cos 2\omega t)$$

$$i = \frac{a_2 A^2}{2} + a_1 A \cos \omega t + \frac{a_2 A^2}{2} (\cos 2\omega t)$$

จะเห็นว่า  $i$  ประกอบด้วยกระแสตรง  $\frac{a_2 E^2}{2}$

$$i_{dc} = \frac{a_2 E^2}{2} \quad (5)$$

ขนาดของ  $i_{dc}$  เป็นปฏิภาคตรงกับค่าสูงสุดโวลเตจไมโครเวฟที่ป้อนเข้ามายกกำลังสอง ในย่านที่โวลเตจทางเข้าทำให้เกิดผลอันนี้เราเรียกว่า ทำงานอยู่ในย่านกฎกำลังสอง (Square-law region)

ถ้าสัญญาณที่เข้ามามีขนาดแรงกว่าเดิม เทอมต่างๆในสมการ (3) ต้องเพิ่มเข้าไปอีก ในกรณีที่สัญญาณเข้าแรง คริสตอลดีเทคเตอร์จะไม่ทำงานอยู่ในย่านกฎกำลังสองต่อไป ในทางปฏิบัติเราแก้ได้โดยใส่ตัวลดทอนเข้าไปในระบบเพื่อลดขนาดสัญญาณลง ดังนั้นย่านกฎกำลังสองจะเป็นย่านทำงานปกติของคริสตอลดีเทคเตอร์เกือบทั้งหมด

## ภาคผนวกที่ 2

การเปลี่ยนค่าของความต่างเฟสโดยใช้ตัวชิปเฟส (Phase Shifter) สามารถทำได้ดังนี้

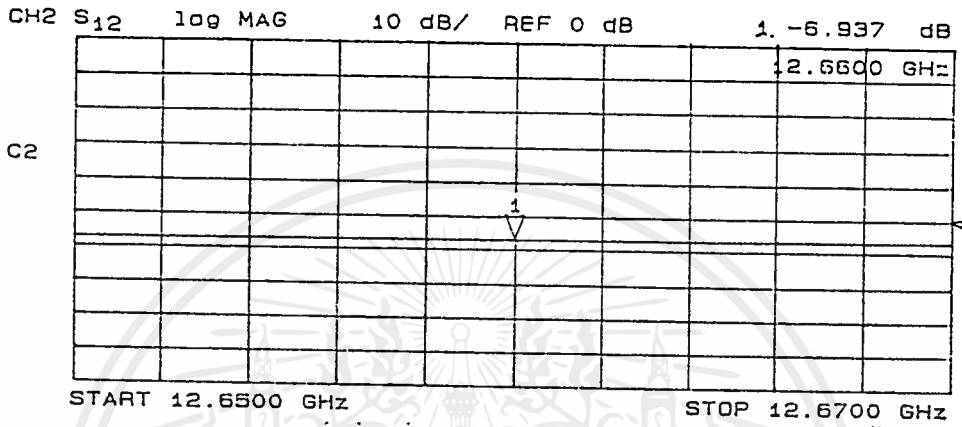
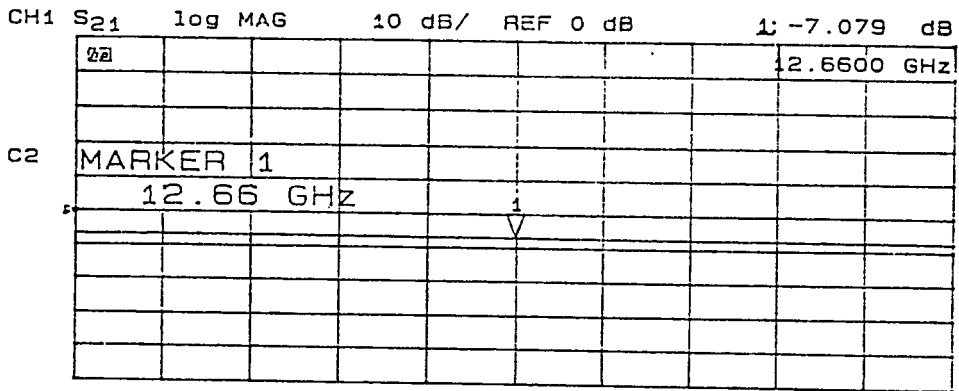
1. ในการวัดเฟสจะใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย โดยการปรับเทียบสายก่อนทำการวัด ซึ่งจะใช้สายโคแอกเซียลที่มีความยาวคงที่ค่าหนึ่ง จากนั้นก็ดูค่าความต่างเฟสที่  $s_{21}$  ในเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งจะได้ประมาณ  $0^\circ$  หรือ  $m^\circ$
2. เปลี่ยนสายโคแอกเซียลในข้อที่ 1 เป็นตัวชิปเฟสซึ่งแสดงตามภาพที่ 4 แล้วดึงเข้า หรือออกโดยดูค่าความต่างเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปจาก  $s_{21}$  ในเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



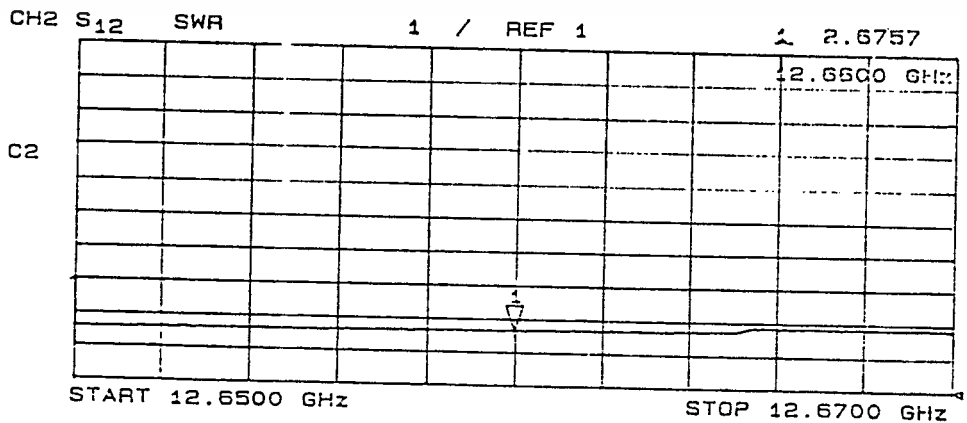
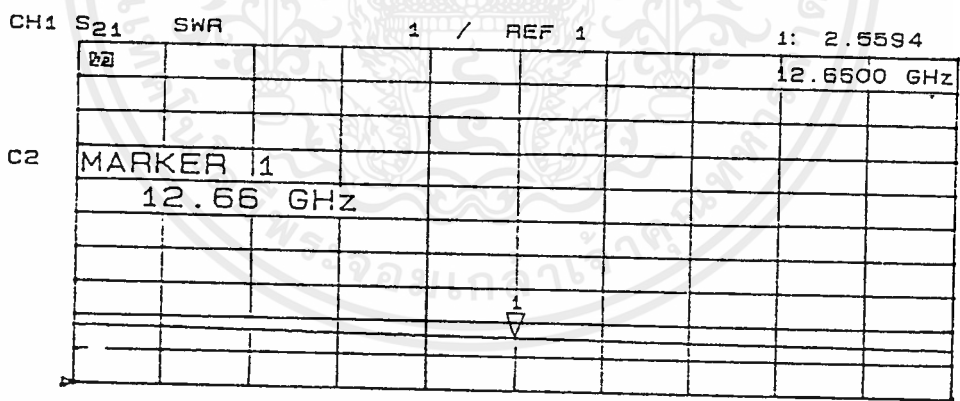
ภาพที่ 4 ตัวชิปเฟส

3. เมื่อดึงตัวชิปเฟสได้ค่าความต่างเฟสตามที่ต้องการแล้วจึงนำไปทำการทดลองตามการทดลองที่ 1 ในบทที่ 4 ต่อไปได้

ค่าความต่างเฟสต่างๆ ที่เปลี่ยนไปโดยใช้ตัวชิปเฟส ได้แสดงโดย  $s_{21}$  จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายมีดังต่อไปนี้



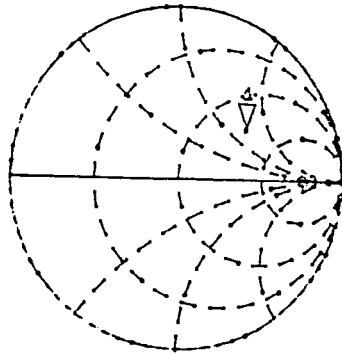
กราฟแสดงค่าสูญเสียในการส่งผ่าน S<sub>21</sub> และ S<sub>12</sub> ของท่อทองเหลืองชิ้นที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

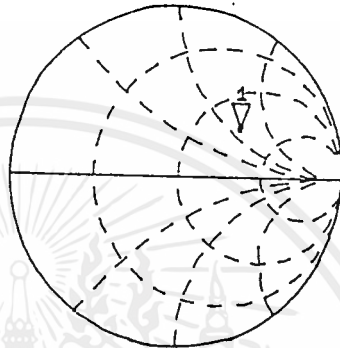
CH1 S<sub>11</sub> 1 U FS 1: 84.93  $\Omega$  67.711  $\Omega$  851.23 pH  
 12.6600 GHz

C2 MARKER 1  
 12.66 GHz



CH2 S<sub>22</sub> 1 U FS 1: 83.645  $\Omega$  61.418  $\Omega$  772.11 pH  
 12.6600 GHz

C2



START 12.6500 GHz STOP 12.6700 GHz

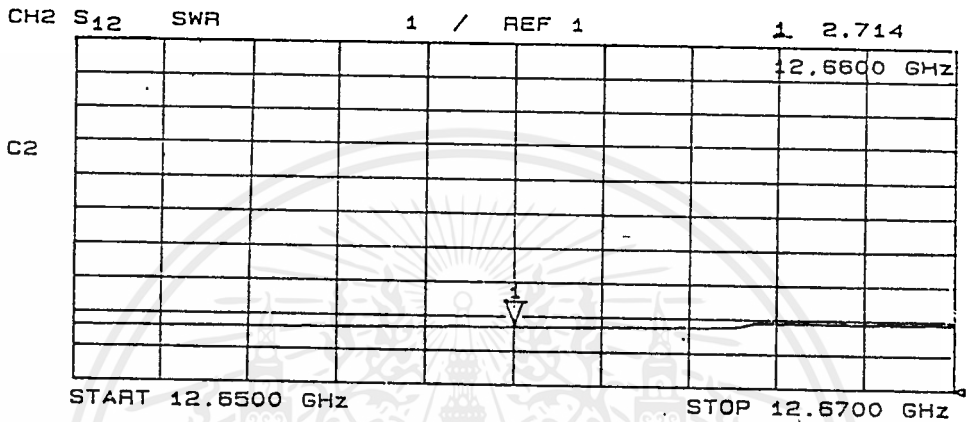
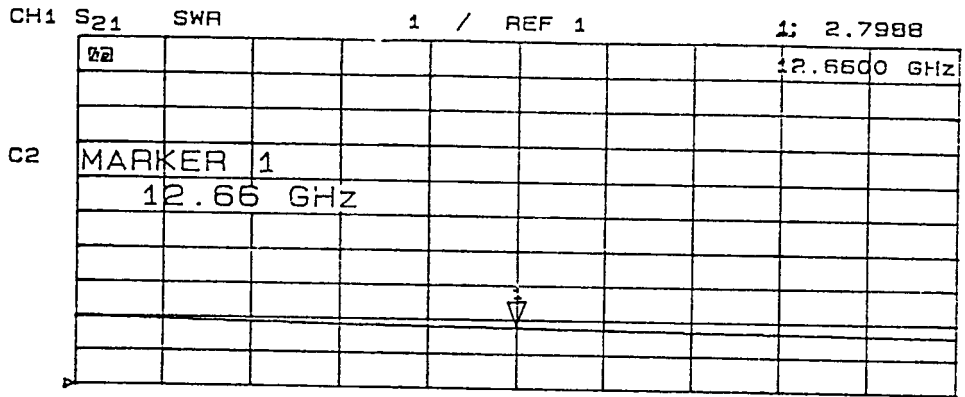
กราฟแสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ S<sub>11</sub> และ S<sub>22</sub> ของท่อทองเหลืองชิ้นที่ 1

CH1 S<sub>21</sub> log MAG 10 dB/ REF 0 dB 1: -6.534 dB

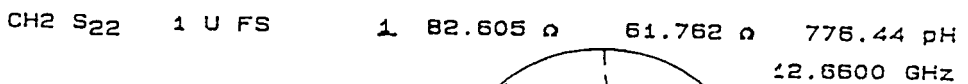
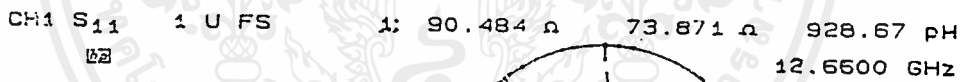
12.6600 GHz									
C2 MARKER 1									
12.66 GHz									

CH2 S<sub>12</sub> log MAG 10 dB/ REF 0 dB 1: -6.811 dB


START 12.6500 GHz STOP 12.6700 GHz



กราฟแสดงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง S<sub>21</sub> และ S<sub>12</sub> ของท่อทองเหลืองชิ้นที่ 2



START 12.6500 GHz

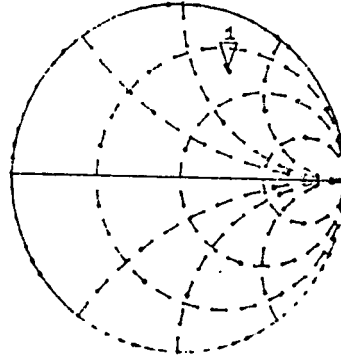
STOP 12.6700 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 กราฟแสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ S<sub>11</sub> และ S<sub>22</sub> ของท่อทองเหลืองชิ้นที่ 2  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



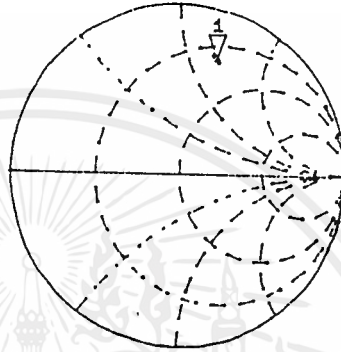
CH1 S<sub>11</sub> 1 U FS 1: 28.398 Ω 58.773 Ω 86.158 pF  
12.6600 GHz

C2 MARKER 1  
12.66 GHz



CH2 S<sub>22</sub> 1 U FS 1: 23.721 Ω 63.912 Ω 803.47 pF  
12.6600 GHz

C2



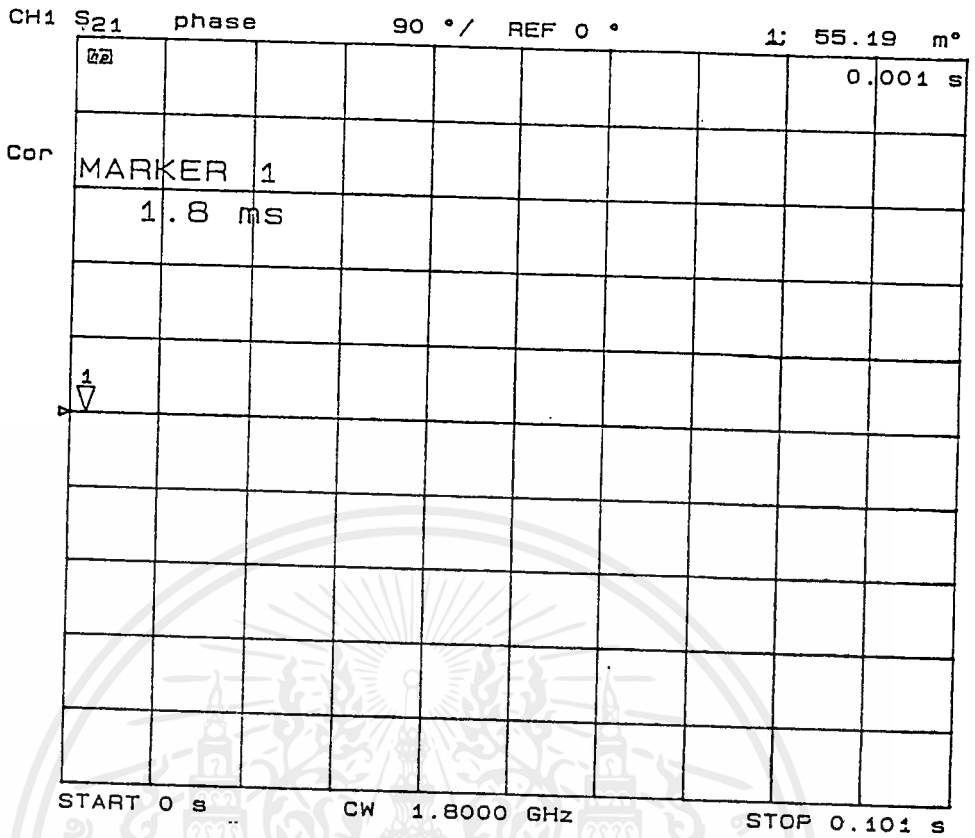
START 12.6500 GHz

STOP 12.6700 GHz

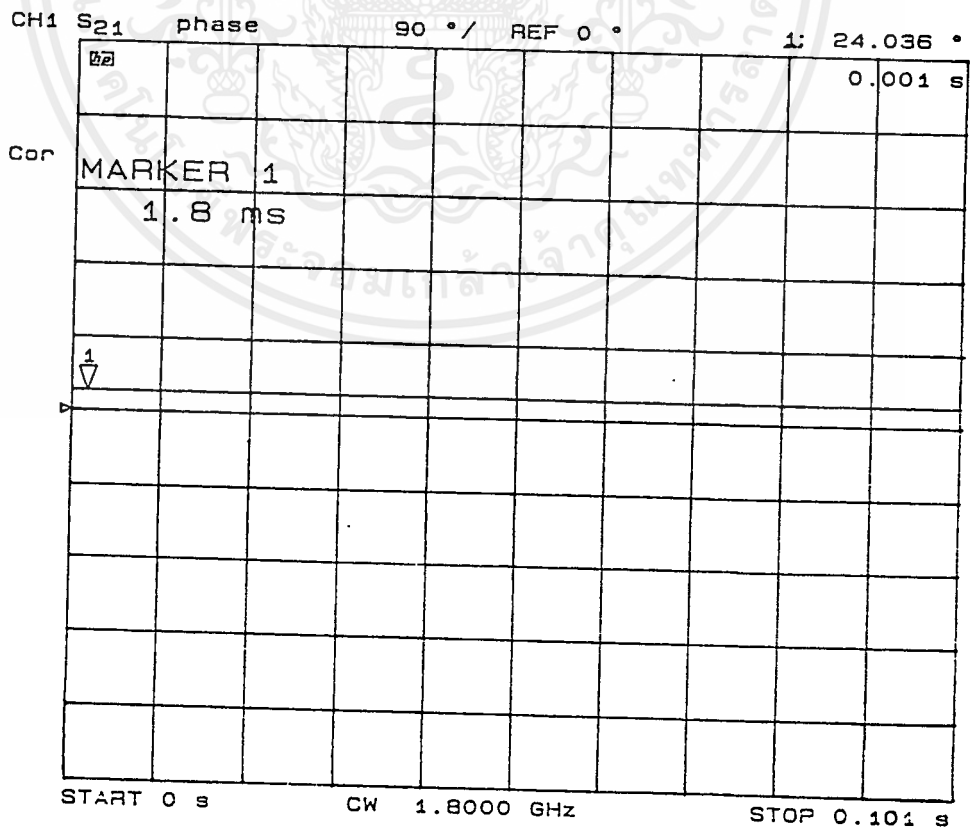
กราฟแสดงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ S<sub>11</sub> และ S<sub>22</sub> ของท่อทองเหลืองชั้นที่ 3

### ภาคผนวกที่ 3

แสดงค่าสูญเสียในการส่งผ่าน S<sub>21</sub> และ S<sub>12</sub>, ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง S<sub>21</sub> และ S<sub>12</sub>, และค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ S<sub>11</sub> และ S<sub>22</sub> ของท่อทองเหลืองจำนวน 3 ชั้น ตามการทดลองที่ 2 ในบทที่ 4 ซึ่งได้แสดงเป็นกราฟต่างๆ ดังต่อไปนี้

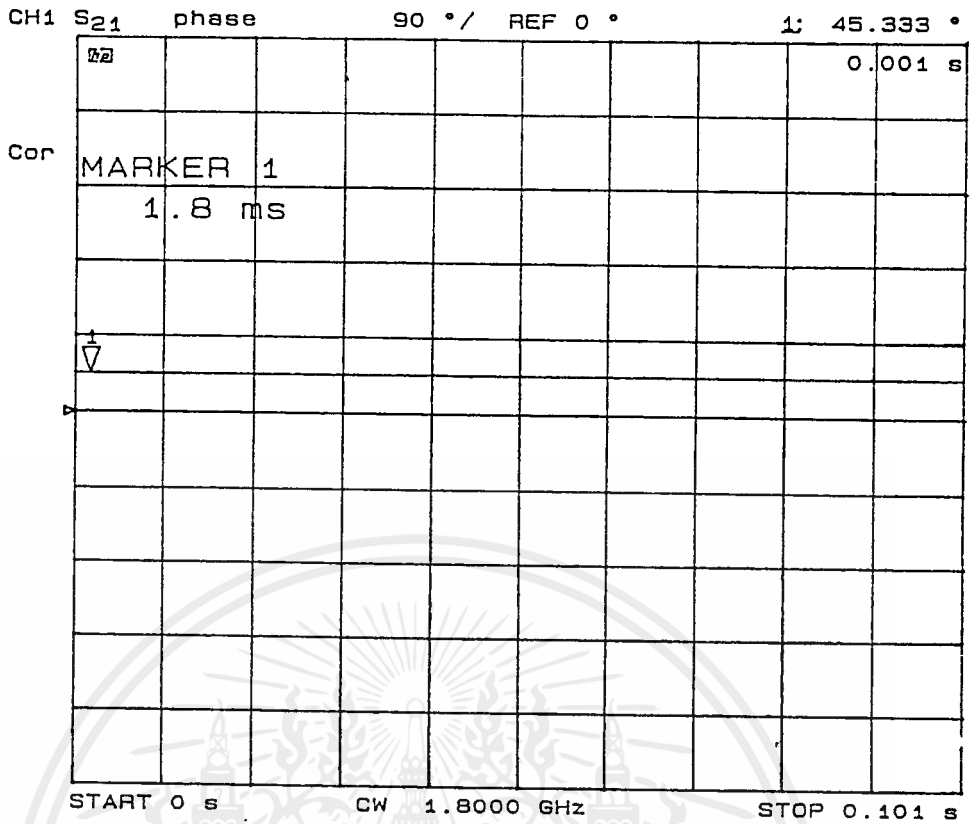


กราฟแสดงค่าความต่างเฟส 55.190 m หรือ 0°

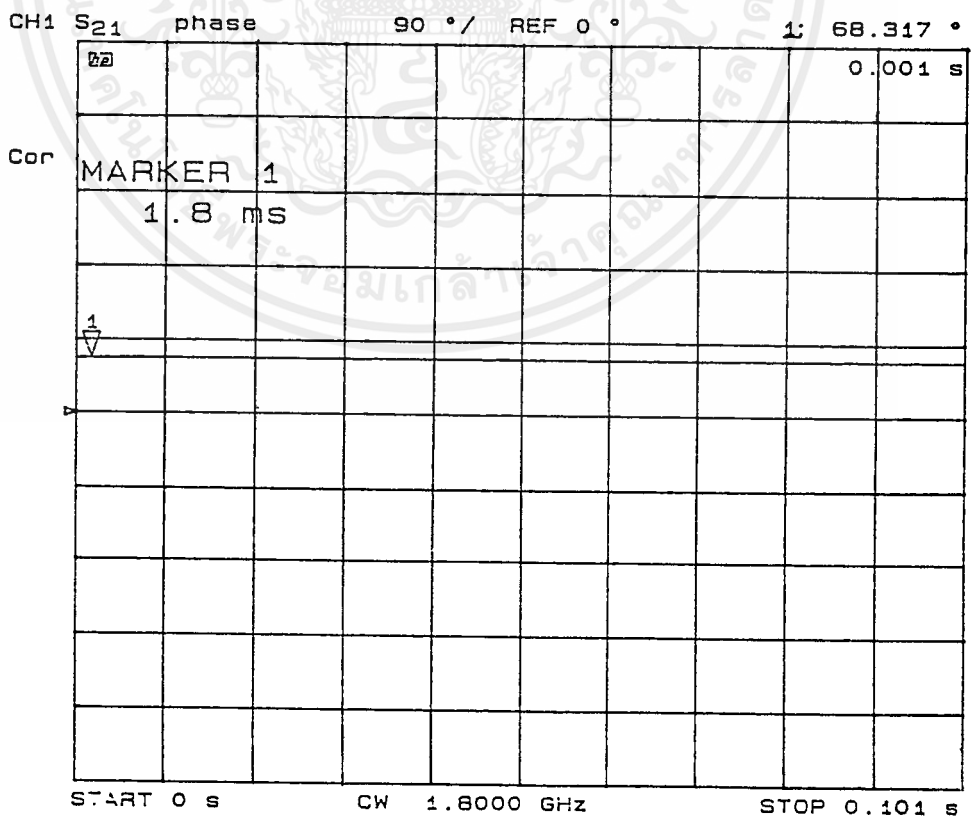


กราฟแสดงค่าความต่างเฟส 24.036°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

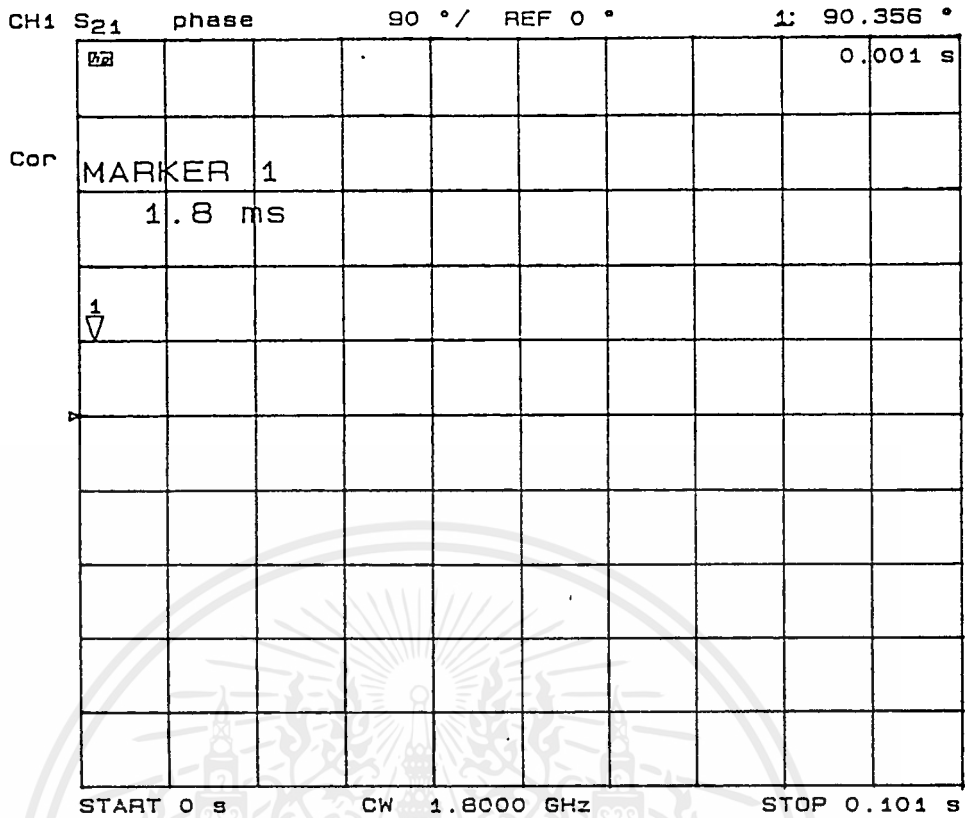


กราฟแสดงค่าความต่างเฟส 45.333°

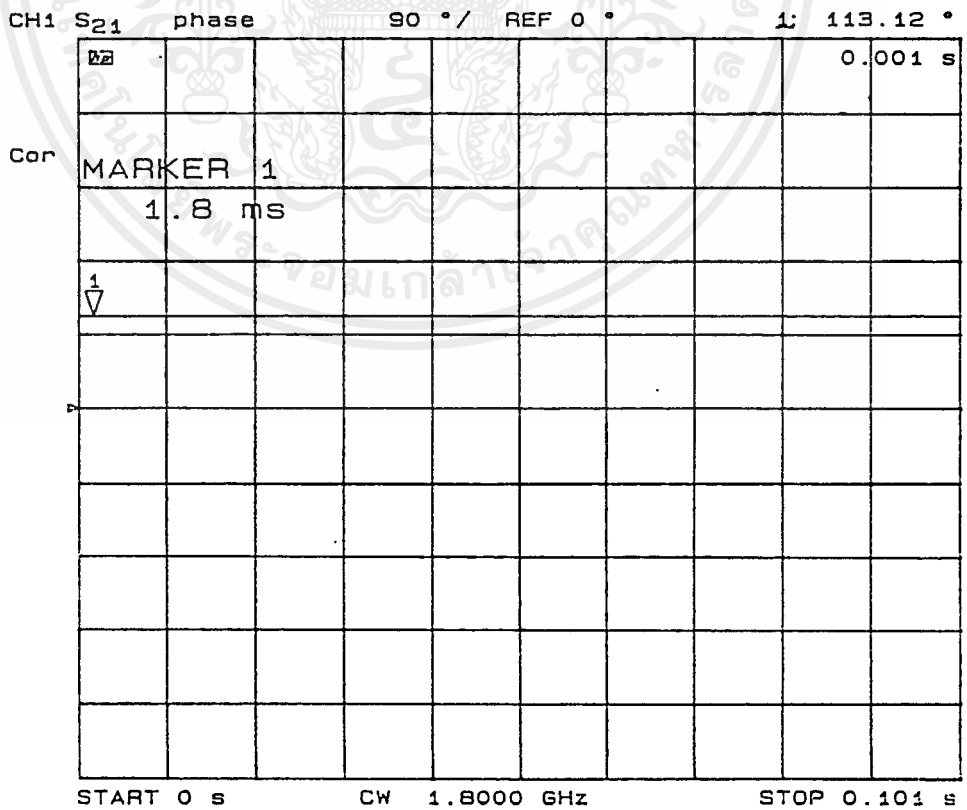


กราฟแสดงค่าความต่างเฟส 68.317°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

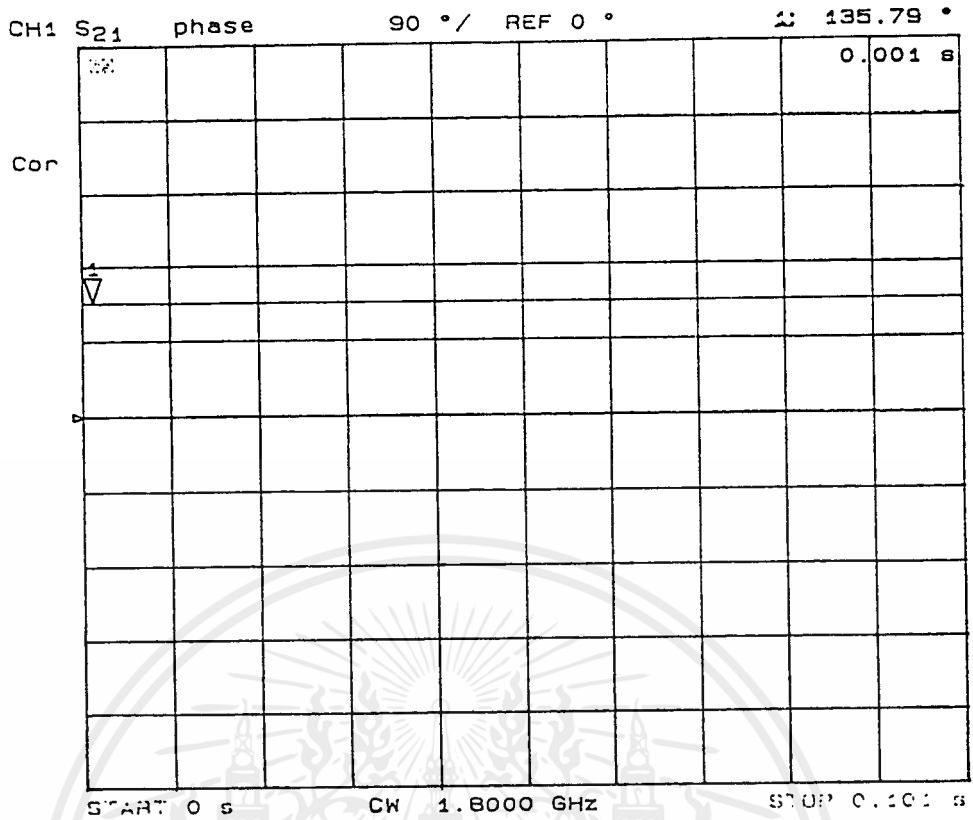


กราฟแสดงค่าความต่างเฟส 90.356°

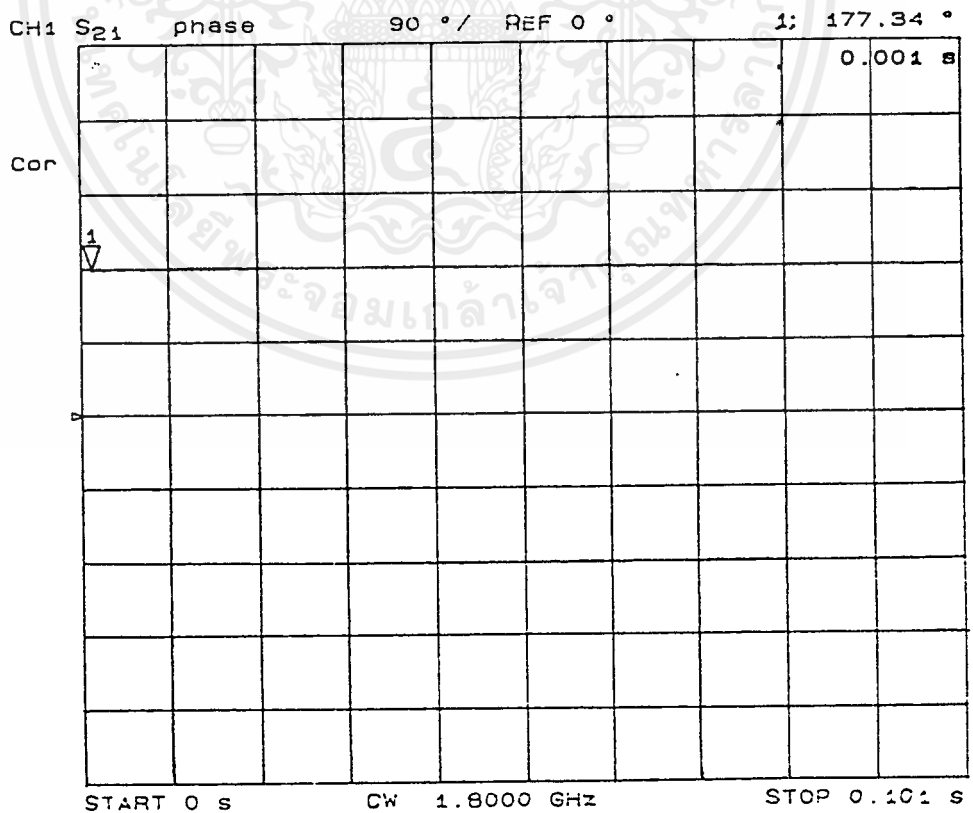


กราฟแสดงค่าความต่างเฟส 113.12°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงค่าความต่างเฟส 135.790°



กราฟแสดงค่าความต่างเฟส 177.340°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำความรู้และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จากหลายท่านดังนี้

รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์	อาจารย์ที่ปรึกษา
คุณมนตรี ธนภควัต	ให้คำปรึกษาในการทำงาน
คุณคมศักดิ์ เมฆสมุทร	ให้คำปรึกษาในการทำงาน
คุณชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์	ให้คำปรึกษาในการทำงาน
คุณมณฑา เทียมเมือง	ให้ความช่วยเหลือในการทำชิ้นงาน
คุณมงคล ศรีเศรษฐนิล	

ห้องปฏิบัติการ EMI สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สจล. ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบรูปแบบการแพร่กระจายคลื่น

จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Merrill L. Skolnik, "Introduction to radar system", McGraw-Hill, Inc, pp.152-186, 1980.
- [2] Simon Kingsley and Shaun Quegan, "Understanding Radar System", McGraw-Hill, Company, pp.49-53, 1992.
- [3] ณรงค์ เหมกรณ์, "การสื่อสารดาวเทียม", ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้าที่ 171-175, 2533.
- [4] A.I. Leonov & K.I. Fomichev, "Monopulse Radar", Artech House, Inc, 1984.
- [5] Constantinea. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", John Wiley & Sons, pp.478-481, pp.532, 1982.
- [6] Samuel M. Sherman, Ph.D., "Monopulse Principles and Techniques", Artech House, pp.67-72.
- [7] Robert S. Elliott, "Antenna Theory and Design", Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, pp.142-143, 1985
- [8] Peter A. Rizzi, "Microwave Engineering Passive Circuits", Prentice-Hall International, Inc, pp.267, pp.306-307, pp.358-359, 1988.

