

สายอากาศออสซิลเลเตอร์แนวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง

A SPHERICAL ARRAY SELF-MIXING OSCILLATOR ANTENNA



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-502-4

สายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลล์ลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง

A SPHERICAL ARRAY SELF-MIXING OSCILLATOR ANTENNA



เลขหนังสือ.....  
เลขทะเบียน..... 41499  
วัน, เดือน, ปี..... 19 ก.พ. 2545

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

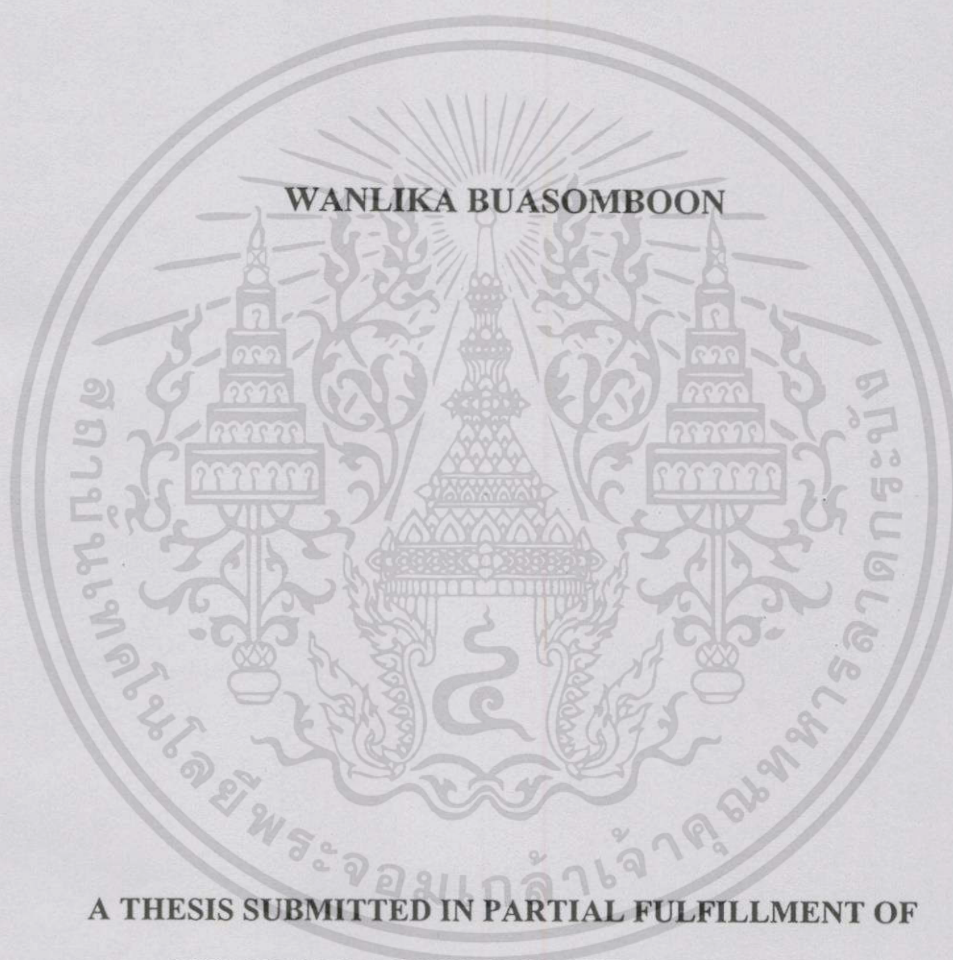
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2544

ISBN 974-648-502-4

# **A SPHERICAL ARRAY SELF-MIXING OSCILLATOR ANTENNA**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2001**

**ISBN 974-648-502-4**



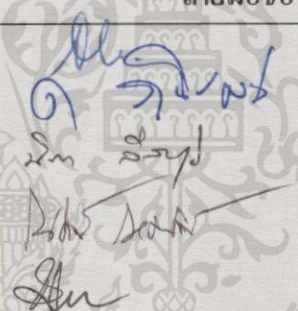
**COPYRIGHT 2001**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง  
A SPHERICAL ARRAY SELF-MIXING OSCILLATOR ANTENNA  
ชื่อนักศึกษา นางสาววัลย์ลิกา บัวสมบุญ  
รหัสประจำตัว 42061025  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สมพล	โกศลวิตร	
ดร.ทองทศ	วานิชศรี	
รศ.นิภา	ดีสารุจิ	
รศ.ณรงค์	เหมกรรณ์	
รศ.ดร.โมไนย	ไกรฤกษ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 24 ตุลาคม 2544 เวลา 13.30-15.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 4 (ห้อง E12-403)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว  
(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัคร)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๙๙.....เดือน.....ตุลาคม.....พ.ศ.....๒๕๔๔.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง
นักศึกษา	นางสาววัลย์ลิกา บัวสมบุรณ์
รหัสประจำตัว	42061025
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2544
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นปากตรงจำนวน 1 องค์กรประกอบวางอยู่ในตำแหน่งตรงกลาง และสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา จำนวน 5 องค์กรประกอบวางอยู่ล้อมรอบ ประกอบรวมกันเป็นสายอากาศแถวลำดับทรงกลม โดยอะเพอร์เจอร์ของแต่ละองค์กรประกอบจะสัมพันธ์กับผิวทรงกลม ภายในแต่ละองค์กรประกอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์แอ็กทิฟ คือ ไดโอดกัมมันต์ ทำหน้าที่เป็นออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องและตัวผสมสัญญาณ สกรูจูนเพื่อใช้ในการปรับอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นให้เหมาะสมกับเงื่อนไขการออสซิลเลต วาเรกเตอร์ไดโอดเพื่อปรับความถี่เชิงอิเล็กทรอนิกส์ และตัวเลื่อนลิควิดจอร์สำหรับช่วยในการปรับความถี่และปรับให้ได้กำลังงานมากที่สุด การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศอันได้แก่ อิมพีแดนซ์ตัวเอง อิมพีแดนซ์ร่วม และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นกระทำได้โดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า และทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วมระหว่างองค์กรประกอบจากค่าอิมพีแดนซ์ร่วม และนำค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วมระหว่างองค์กรประกอบนี้ไปใช้ในการคำนวณหาความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์กรประกอบซึ่งต้องอยู่ในช่วงความถี่อินเจกชันล็อกกิ้งเพื่อใช้ในการปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้ หลังจากนั้นจึงทำการสร้างและทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ ซึ่งสายอากาศนี้สามารถปรับลำคลื่นได้โดยอาศัยเทคนิคการอินเจกชันล็อกกิ้ง และทำการทดสอบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณภายในตัวเอง ได้แก่ การสูญเสียของการแปลงผัน และล็อกกิ้งเบนด์วิคท์

**Thesis Title** A Spherical Array Self-Mixing Oscillator Antenna  
**Student** Miss Wanlika Buasomboon  
**Student ID.** 42061025  
**Degree** Master of Engineering  
**Programme** Electrical Engineering  
**Year** 2001  
**Thesis Advisor** Assoc.Prof.Dr.Monai Krairiksh

## ABSTRACT

This thesis presents a spherical array self-mixing oscillator antenna that the elements are made of open waveguide radiators. The antenna structure consists of one normal aperture waveguide radiator at the center of the configuration and the five elements of the  $15^\circ$  inclined waveguide radiators surrounding the normal aperture waveguide radiator. Their apertures are tangential to the spherical surface of the spherical array. Each element contains an active device such as Gunn diode which serves as local oscillator and self-mixer, tuning screw for matching impedance of the waveguide to reach oscillation condition and sliding short for tuning the frequency and maximizing output power. This configuration also allows the addition of a varactor diode into the waveguide radiators to provide electronic frequency tuning. The Numerical Electromagnetic Code (NEC-2) is applied to analyze the characteristics of the antenna such as self impedance of each element, mutual impedance and radiation pattern. Calculation of mutual coupling between the elements can be derived from mutual impedance. The beam steering of the array can be achieved by applying an injection locking technique by which the frequency of each array element is adjusted within the locking bandwidth of the oscillator antenna. The antenna is fabricated and tested. Additional experiments are performed to study the self-mixing and injection locking performance of the antenna such as conversion loss and locking bandwidth.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความสนับสนุนจากบุคคลต่างๆที่ข้าพเจ้ามีความซาบซึ้งใจในความกรุณาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะ แก้ไขปัญหา และให้คำปรึกษาในทุกสิ่งทุกอย่างที่มีประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สมผล โกศลวิตร สำหรับคำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆที่มีให้แก่ข้าพเจ้า อ.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ คุณชาญชัย ทองโสภา ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ คุณคมศักดิ์ เมฆสมุทร ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆที่จำเป็นต่อการทดลอง แนวความรู้และคำชี้แนะทางด้านต่างๆที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ สมาชิกในห้องปฏิบัติการการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Laboratory) ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและร่วมกันอภิปรายกับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณไพศาล งามจรรยาภรณ์ที่เป็นที่ปรึกษา และให้ความช่วยเหลือในทุกด้านเป็นอย่างดีตลอดมา และขอขอบคุณเพื่อนๆที่ยืมอุปกรณ์ในการทดลอง และแนะนำสิ่งต่างๆ

กราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจในทุกสิ่ง คุณความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบแด่บิดา มารดา และพี่น้อง ซึ่งเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ข้าพเจ้า

วัลย์ลิกา บัวสมบุรณ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ ภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อ ภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทั่วไป.....	4
2.1 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.1.1 วิธีการ โมเมนต์.....	5
2.1.2 สมการอินทิกรัลสำหรับอากาศว่าง.....	7
2.1.2.1 สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า.....	7
2.1.3 การแผ่ขยายกระแสบนเส้นลวด.....	8
2.1.4 การจำลองสายอากาศ.....	9
2.1.4.1 การจำลองแหล่งกำเนิด.....	9
2.1.4.2 การคำนวณสนามที่แพร่กระจาย.....	10
2.1.5 วิธีการจำลองสายอากาศในทางปฏิบัติ.....	10
2.2 สายอากาศเอ็กทิฟ.....	11
2.2.1 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบเอ็กทิฟ.....	12
2.2.2 สายอากาศรวมแบบเอ็กทิฟ.....	13
2.3 ไดโอดกัมมันต์.....	13
2.3.1 โหมดการทำงาน.....	15
2.3.2 วงจรกัมมันต์ออสซิลเลเตอร์.....	17
2.4 ออสซิลเลเตอร์.....	20
2.4.1 เงื่อนไขการออสซิลเลต.....	22
2.4.2 ตัวประกอบคุณภาพ.....	25

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การปรับลำคลื่นของสายอากาศ.....	26
2.5.1 เทคนิคอินเจกชันล็อกกิ้ง.....	29
2.5.1.1 สมการของ Adler.....	29
2.5.1.2 ออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ.....	31
2.6 สรุป.....	33
บทที่ 3 สายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง.....	34
3.1 โครงสร้างของสายอากาศออสซิลเลเตอร์ที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง.....	34
3.2 การจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า.....	39
3.3 วิธีการในการปรับทิศทางของลำคลื่น.....	41
3.3.1 อิมพีแดนซ์ตัวเอง.....	42
3.3.2 ตัวประกอบคุณภาพ.....	47
3.3.3 อิมพีแดนซ์ร่วม.....	47
3.3.4 สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม.....	50
3.3.5 เฟสที่ใช้ในการปรับทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ.....	52
3.3.6 ความถี่ในการปรับทิศทางของลำคลื่น.....	53
3.3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	54
3.4 สรุป.....	56
บทที่ 4 ผลการทดสอบสายอากาศองค์ประกอบ.....	57
4.1 สายอากาศองค์ประกอบต้นแบบ.....	57
4.2 พฤติกรรมการปรับไบอัส.....	58
4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	63
4.4 ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์.....	65
4.4.1 ผลการทดลอง.....	67
4.5 ตัวประกอบคุณภาพภายนอก.....	70
4.6 การสูญเสียของการแปลงผัน.....	71
4.6.1 ผลการทดลอง.....	73
4.7 สรุป.....	74

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดสอบสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณ ในตัวเอง.....	76
5.1 สายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง ต้นแบบ.....	76
5.2 ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์.....	77
5.3 การสูญเสียของการแปลงผัน.....	78
5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	80
5.5 ความไว.....	83
5.6 สรุป.....	83
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์.....	84
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	84
6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา.....	86
เอกสารอ้างอิง.....	88
ประวัติผู้เขียน.....	90

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 จำนวนของสายอากาศสองคู่ประกอบที่จัดวางบนผิวทรงกลม.....	35
3.2 ตำแหน่งการจัดวางของสายอากาศสองคู่ประกอบ.....	37
3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศสองคู่ประกอบ.....	50
3.4 S-parameter.....	51
3.5 ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม.....	51
3.6 ค่าเฟสของกระแสที่สะท้อนให้กับแต่ละสายอากาศสองคู่ประกอบ.....	53
3.7 ความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเพื่อปรับทิศทางของลำคลื่น.....	54
4.1 การปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดกึ่งนำออสซิลเลตความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์.....	60
4.2 การปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดวาทเรกเตอร์ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์.....	62
4.3 ผลการทดลองการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัส.....	63
4.4 ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกของสายอากาศสองคู่ประกอบ.....	71

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผังภูมิในการทำงานของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า.....	11
2.2 อุปกรณ์กั้นนี้.....	14
2.3 ไดโอดกั้นนี้และวงจรสมมูลของออสซิลเลเตอร์.....	15
2.4 วงจรกั้นนี้ออสซิลเลเตอร์อย่างง่ายโดยการใช้โหมดทรานซิด-ไทม์.....	16
2.5 กั้นนี้ออสซิลเลเตอร์ในโหมด LSA.....	16
(ก)กั้นนี้ออสซิลเลเตอร์พื้นฐานที่ทำงานในโหมด LSA.....	16
(ข)แรงดันไฟฟ้าความถี่วิทยุของการออสซิลเลตที่ติดคร่อมอุปกรณ์กั้นนี้ในโหมด.....	17
2.6 คาวิตีที่นำคลื่นอย่างง่ายสำหรับกั้นนี้ออสซิลเลเตอร์.....	18
2.7 คาวิตีที่นำคลื่นที่มีการใช้ตัวแปลงที่นำคลื่นที่ความสูงลดลงเรื่อยๆ.....	19
2.8 คาวิตีของกั้นนี้ออสซิลเลเตอร์ที่มีไดโอดควาแรกเตอร์เพื่อการปรับจูนคาวิตี.....	19
2.9 สเปกตรัมของออสซิลเลเตอร์.....	20
2.10 วงจรออสซิลเลเตอร์ทั่วไป.....	23
2.11 กราฟคุณลักษณะ I-V ของไดโอดกั้นนี้.....	24
2.12 การปรับทิศทางของลำคลื่นเชิงกล.....	27
2.13 ระบบสายอากาศที่ปรับเฟสได้แบบทั่วไป.....	28
2.14 ออสซิลเลเตอร์ที่มีการอินเจ็กชันล็อก.....	30
2.15 ระบบออสซิลเลเตอร์หลายตัว.....	31
3.1 โครงสร้างของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง.....	34
3.2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศแถวลำดับทรงกลม.....	36
(ก)รูปทรงเรขาคณิต.....	36
(ข)ภาพด้านหน้า.....	36
(ค)ภาพด้านบน.....	36
3.3 โครงสร้างภายในของสายอากาศสองคัพประกอบ.....	38
(ก)สายอากาศที่นำคลื่นปากตรง.....	38
(ข)สายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา.....	38
3.4 โครงสร้างของสายอากาศที่นำคลื่น.....	41
(ก)ปากตรง.....	41
(ข)ปากเฉียง 15°.....	41
(ค)แบบจำลองคาข่ายเส้นลวดตัวนำ.....	41

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 อิมพีแดนซ์ตัวเองเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งสกรูจูน.....	43
3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรง.....	44
(ก) ระนาบ XZ.....	44
(ข) ระนาบ YZ.....	44
3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา.....	45
(ก) ระนาบ XZ.....	45
(ข) ระนาบ YZ.....	45
3.8 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำคลื่นที่กระตุ้นด้วยโพรบ.....	46
(ก) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำคลื่นปากตรง.....	46
(ข) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา.....	46
3.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของสายอากาศ.....	47
3.10 การจำลองสายอากาศเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า.....	49
(ก) สายอากาศองค์ประกอบที่ 1 และสายอากาศองค์ประกอบที่ 2.....	49
(ข) สายอากาศองค์ประกอบที่ 1 และสายอากาศองค์ประกอบที่ 3.....	49
(ค) สายอากาศองค์ประกอบที่ 2 และสายอากาศองค์ประกอบที่ 3.....	49
(ง) สายอากาศองค์ประกอบที่ 2 และสายอากาศองค์ประกอบที่ 4.....	49
3.11 พิกัดขององค์ประกอบแฉวลำดับ $(r, \alpha_i, \beta_i)$ บนพื้นผิวทรงกลม.....	52
3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แฉวลำดับทรงกลมที่มีการผสม สัญญาณในตัวเอง.....	55
(ก) ระนาบ XZ ( $\phi_0 = 0^\circ$ ).....	55
(ข) ระนาบ YZ ( $\phi_0 = 90^\circ$ ).....	55
4.1 สายอากาศองค์ประกอบดัดแบบ.....	57
(ก) ภาพถ่ายด้านบน.....	57
(ข) ภาพถ่ายด้านข้าง.....	57
4.2 การทดลองการปรับไบอัสสายอากาศองค์ประกอบ.....	58
4.3 การปรับไบอัสและกำลังงานที่รับได้เทียบกับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดกัมน์.....	59
(ก) ความถี่เทียบกับการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดกัมน์.....	59
(ข) กำลังงานที่รับได้เทียบกับการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดกัมน์.....	59

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 การปรับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดวแรกเตอร์.....	61
(ก) ความถี่ที่วัดได้เทียบกับการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดวแรกเตอร์.....	61
(ข) กำลังงานที่รับได้เทียบกับการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดวแรกเตอร์.....	61
4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นปากตรง.....	64
(ก) ระนาบ YZ.....	64
(ข) ระนาบ XZ.....	64
4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา.....	64
(ก) ระนาบ YZ.....	64
(ข) ระนาบ XZ.....	64
4.7 การวัดค่าอัตราขยายอินเท็กชันลือกกิ่งและค่าอินเท็กชันลือกกิ่งแบนด์วิดท์.....	66
4.8 สเปกตรัมของสัญญาณ.....	67
(ก) สัญญาณขณะที่มีการลือกกัน โดยสัญญาณที่อินเท็กมีความถี่เดียวกับความถี่อิสระ.....	67
(ข) สัญญาณขณะที่มีการลือกกัน โดยสัญญาณที่อินเท็กมีความถี่ 10.00040 กิกะเฮิรตซ์.....	67
(ค) สัญญาณขณะที่มีการหลุดออกจากการลือก.....	67
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลือกกิ่งแบนด์วิดท์และอัตราขยายลือกกิ่ง.....	68
(ก) สายอากาศองค์ประกอบที่ 1.....	68
(ข) สายอากาศองค์ประกอบที่ 2.....	68
(ค) สายอากาศองค์ประกอบที่ 3.....	69
(ง) สายอากาศองค์ประกอบที่ 4.....	69
(จ) สายอากาศองค์ประกอบที่ 5.....	69
(ฉ) สายอากาศองค์ประกอบที่ 6.....	70
4.10 การวัดการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศองค์ประกอบ.....	72
4.11 การสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศองค์ประกอบ.....	73
5.1 สายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองต้นแบบ.....	76
(ก) ภาพถ่ายจากมุมสูง.....	76
(ข) ภาพถ่ายด้านหน้า.....	76
5.2 การวัดค่าอัตราขยายอินเท็กชันลือกกิ่งและค่าอินเท็กชันลือกกิ่งแบนด์วิดท์.....	77
5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลือกกิ่งแบนด์วิดท์และอัตราขยายลือกกิ่ง.....	78

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4 การวัดการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง.....	78
5.5 สัญญาณจากหน้าจอเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม.....	79
(ก) สัญญาณความถี่วิทยุ.....	79
(ข) สัญญาณความถี่กลาง.....	79
5.6 การสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง.....	80
5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	81
(ก) ระนาบ XZ ( $\phi = 0^\circ$ ).....	81
(ข) ระนาบ YZ ( $\phi = 90^\circ$ ).....	81
5.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์เซชันร่วมเปรียบเทียบกับแบบโพลาไรซ์เซชันไขว้ในระนาบ XZ.....	82

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ระบบการสื่อสารไมโครเวฟได้มีการพัฒนาไปเป็นอย่างมากโดยเฉพาะทางด้านเทคโนโลยีต่างๆ ซึ่งเทคโนโลยีทางด้านสายอากาศก็ได้มีการพัฒนาเช่นเดียวกัน ในภาครับ สายอากาศจะทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณความถี่ไมโครเวฟที่ส่งมาจากสายอากาศทางด้านส่ง ซึ่งถ้าระบบการรับส่งสัญญาณเป็นแบบติดตั้งอยู่กับที่ การรับส่งสัญญาณก็จะไม่มีปัญหา แต่ในกรณีที่สายอากาศทางภาครับ หรือ ส่ง มีการเคลื่อนที่ เช่น สายอากาศภาครับที่รับสัญญาณดาวเทียมที่ติดตั้งอยู่บนเรือ ซึ่งอาจจะมีการโคลงเคลงได้ตลอดเวลา ทำให้ประสิทธิภาพในการรับสัญญาณได้ไม่ดีพอ อาจจะได้รับได้ในกรณีที่ลำคลื่นของทางด้านส่งและรับตรงกัน และรับไม่ได้ถ้าลำคลื่นไม่ตรงกัน ทำให้สัญญาณการรับส่งอาจจะขาดหายเป็นช่วงๆ วิธีในการแก้ปัญหาวิธีหนึ่งสามารถทำได้โดยการปรับลำคลื่นของสายอากาศให้ไปในทิศทางที่ต้องการ ในสมัยก่อนใช้วิธีการปรับลำคลื่นทางกลซึ่งจะมีขนาดใหญ่ เทอะทะมาก และช้าในการปรับลำคลื่นไป ต่อมาได้มีการพัฒนาสายอากาศให้สามารถปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้โดยใช้วิธีการเชิงอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะทำให้ระบบมีขนาดเล็ก กะทัดรัด และเร็วในการปรับลำคลื่นแต่มีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวเลื่อนเฟส (phase shifter) ในการปรับเฟสของสายอากาศเพื่อให้ลำคลื่นชี้ไปในทิศทางที่ต้องการได้ แต่การใช้ตัวเลื่อนเฟสนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียเพิ่มขึ้นในระบบ นอกจากนี้แล้วระบบการสื่อสารในภาครับโดยทั่วไปยังประกอบไปด้วยส่วนประกอบของวงจรต่างๆ ที่ต่อเข้ากับสายอากาศทางสายนำสัญญาณ เช่น ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (local oscillator) ตัวผสมสัญญาณ (mixer) วงจรขยาย (amplifier) เป็นต้น ซึ่งการเปลี่ยนสภาพ (transition) ที่สายอากาศและอุปกรณ์ต่างๆ ไปยังสายนำสัญญาณนั้นจะเป็นการเพิ่มขนาด น้ำหนัก และราคาของระบบรวมทั้งหมด การเปลี่ยนสภาพนี้ยังเพิ่มความซับซ้อนของวงจรและทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่อง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสีย (loss) และความถี่ที่จำกัดของการทำงานด้วย อย่างไรก็ตามปัญหาต่างๆ ที่กล่าวมานี้สามารถปรับปรุงแก้ไขได้โดยสายอากาศแอ็กทีฟ (active antenna)

สายอากาศแอ็กทีฟนี้ได้มีผู้ที่ทำการศึกษาและวิจัยมาตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ. 1987 [1] และได้มีการพัฒนาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน ส่วนทางด้านสายอากาศแอ็กทีฟที่สามารถปรับลำคลื่นได้ (Active Steering Antenna) ก็มีผู้วิจัยหลายท่านที่สนใจทำการศึกษาโดยใช้แนวความคิดการอินเจกชันล็อก (injection-lock) ที่เกิดขึ้นภายในออสซิลเลเตอร์ [2]-[3] ซึ่งทำให้สามารถปรับลำคลื่นได้โดยไม่ต้องใช้ตัวเลื่อนเฟส แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการทำวิจัยในกรณีของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นหรือแบบระนาบ ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 M. Krarikh และคณะ ได้ทำการศึกษา

สายอากาศแถวลำดับทรงกลมแบบร่องที่ปรับค่าคลื่นได้ [4] ซึ่งเป็นสายอากาศแบบควอดริโพลที่ทรงกลมที่มีร่องอยู่ด้านบนเป็นองค์ประกอบ และมีการออกแบบออสซิลเลเตอร์โดยใช้อุปกรณ์แอ็กทีฟคือ เฟต (FET) ประกอบอยู่ภายในสายอากาศซึ่งไม่สามารถผสมสัญญาณภายในตัวเองเพื่อให้ได้ความถี่กลางออกมาได้ ทำให้จำเป็นต้องมีตัวผสมสัญญาณอยู่ภายนอกตัวสายอากาศ และเพิ่มความยุ่งยากในการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นการนำเสนอสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง (A Spherical Array Self-Mixing Oscillator Antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีอุปกรณ์แอ็กทีฟคือ ไดโอดกันน์ (Gunn diode) ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง และตัวผสมสัญญาณได้ในตัวมันเองอยู่ภายใน ทำให้สามารถลดขนาด น้ำหนัก ราคา และการสูญเสียที่เกิดจากสายนำสัญญาณลงได้ สายอากาศนี้สามารถปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้โดยใช้เทคนิคการอินเจกชันล็อกกิ้ง (Injection locking technique) [5] ซึ่งทำให้ไม่ต้องใช้ตัวเลื่อนเฟส จึงทำให้ลดการสูญเสียที่จะเกิดขึ้นในระบบได้ นอกจากนี้คุณสมบัติที่พิเศษของสายอากาศแถวลำดับทรงกลมก็คือ จะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ค่อนข้างคงที่มากกว่าสายอากาศแบบเชิงเส้นหรือแบบระนาบเมื่อมีการกวาดลำคลื่นไป

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อทำการศึกษาและออกแบบสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองที่สามารถปรับค่าคลื่นได้ การวิเคราะห์สายอากาศนี้กระทำได้โดยการใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า (Numerical Electromagnetic Code : NEC) ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ อิมพีแดนซ์ ซึ่งประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ตัวเอง และอิมพีแดนซ์ร่วม และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น การสูญเสียของการแปลงผัน (Conversion loss) และการอินเจกชันล็อกกิ้งด้วยเช่นกัน วิธีการและผลการทดลองได้นำเสนอไว้ในบทต่างๆของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังต่อไปนี้

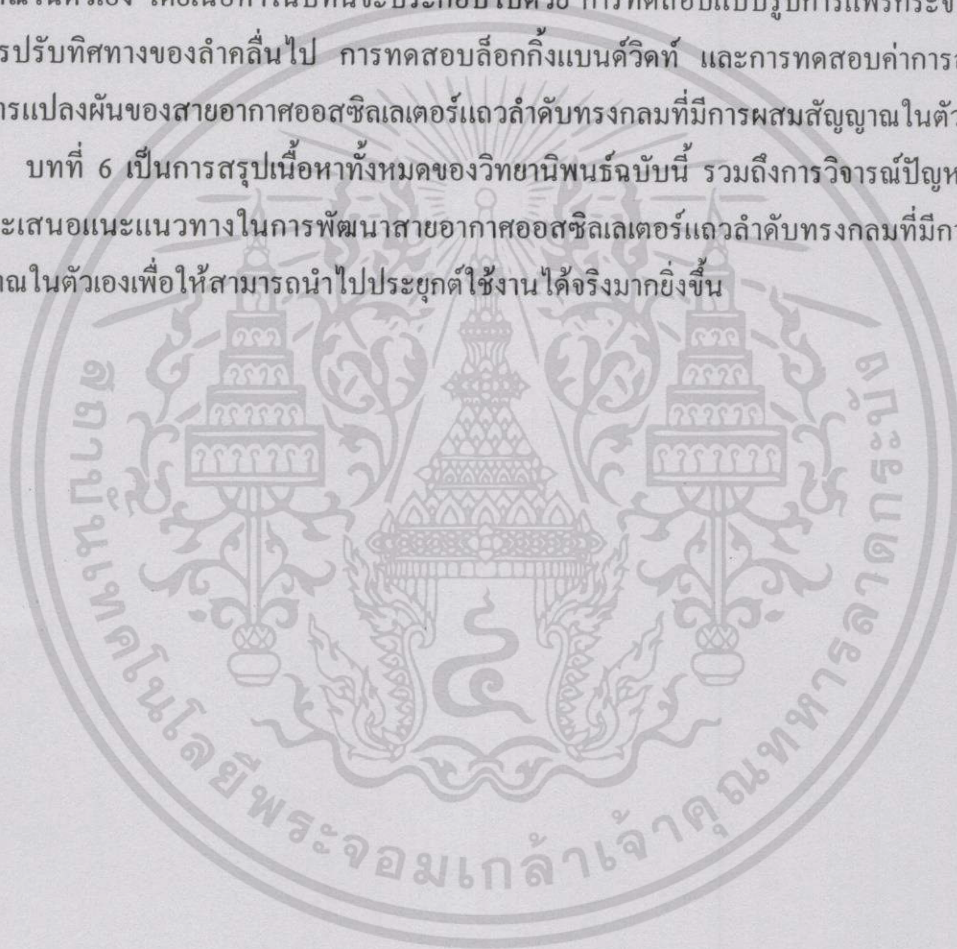
บทที่ 2 เป็นการแนะนำทฤษฎีและวิธีการที่ใช้ในการศึกษาและออกแบบสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง เป็นการอธิบายหลักการของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์สายอากาศและคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ โดยเลือกการจำลองสายอากาศที่ต้องการวิเคราะห์เป็นแบบจำลองดาข่ายเส้นลวดตัวนำ (Wire grid model) การทำงานของไดโอดกันน์ เส้นใยการออสซิลเลต และทฤษฎีการปรับค่าคลื่นของสายอากาศโดยใช้เทคนิคของการอินเจกชันล็อกกิ้งได้นำเสนอไว้ในบทนี้เช่นกัน

บทที่ 3 นำเสนอโครงสร้างของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง การจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า และวิธีการปรับลำคลื่นของสายอากาศไปในทิศทางที่ต้องการ

บทที่ 4 เป็นการนำเสนอผลการทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศองค์ประกอบ อันได้แก่ พฤติกรรมการปรับไบอัสของไดโอดกั้นสัญญาณและไดโอดวาระกเตอร์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ และการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศองค์ประกอบ

บทที่ 5 แสดงผลการทดสอบสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง โดยเนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วย การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีการปรับทิศทางของลำคลื่นไป การทดสอบล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ และการทดสอบค่าการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง

บทที่ 6 เป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงการวิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงมากยิ่งขึ้น



## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการทั่วไป

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีในการวิเคราะห์สายอากาศและหลักการต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องหรืออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลองสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองได้ โดยในหัวข้อแรกเป็นการกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์สายอากาศซึ่งได้แก่โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า (Numerical Electromagnetic Code: NEC) หัวข้อถัดไปจะเป็นการอธิบายเกี่ยวกับสายอากาศแอ็กทีฟ (Active antenna) และหลักการทํางานของอุปกรณ์แอ็กทีฟซึ่งได้แก่ ไดโอดกันน์ (Gunn diode) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับสายอากาศที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากนี้ยังอธิบายถึงหลักการและคุณลักษณะของออสซิลเลเตอร์ หัวข้อสุดท้ายเป็นการอธิบายหลักการในการปรับทิศทางของลำคลื่นหลักไปในทิศทางที่ต้องการ โดยการใช้เทคนิคการอินเจกชันล็อกกิง (Injection locking technique)

### 2.1 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

โดยทั่วไปแล้ว การวิเคราะห์สายอากาศสามารถทำได้หลายวิธี โดยเฉพาะวิธีการเชิงตัวเลข (numerical method) วิธีการเชิงตัวเลขที่เป็นที่รู้จักกันดีได้แก่ วิธีการโมเมนต์ (Method of Moment: MOM) [6] และวิธีการผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา (Finite-Difference Time-Domain method: FDTD) [7] วิธีการโมเมนต์เป็นวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ ให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องและแม่นยำ ใช้เวลาและหน่วยความจำในการคำนวณน้อยกว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องเชิงเวลา โดยปกติแล้วการคำนวณการแพร่กระจายคลื่นของระบบมักจะไม่สามารถคำนวณหาได้โดยตรงจากสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการแก้ปัญหาคือ ใช้สมการของแมกซ์เวลล์ (พร้อมด้วยเงื่อนไขขอบเขตที่เกี่ยวข้องใดๆ) และสืบหาที่มาของสมการอินทิกรัลสมมูลที่แสดงความหมายของปัญหาในเทอมของแหล่งกำเนิดที่รู้ค่าและกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนระบบ หลังจากนั้นทำการแก้สมการหาค่ากระแสเหนี่ยวนำนี้ โดยการใช้วิธีการโมเมนต์เพื่อทำสมการอินทิกรัลนี้ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ เมื่อทราบกระแสแล้วก็จะสามารถหาระดับการแพร่กระจายคลื่นในตำแหน่งที่ต้องการได้ โปรแกรมวิธีการโมเมนต์ที่เป็นที่รู้จักและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดโปรแกรมหนึ่งก็คือ โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ผลตอบสนองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศและโครงสร้างอื่นๆที่ทำจากโลหะที่ประกอบด้วยเส้นลวดและพื้นผิวในอากาศว่างหรือบนระนาบกราวด์ (ground plane) ให้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำสูงและเป็นเครื่องมือที่ใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างในการวิเคราะห์ปัญหาเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การวิเคราะห์โดยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับพื้นฐานของวิธีการโมเมนต์จึงใช้สมการอินทิกรัลเพื่อให้ได้ผลเฉลยเชิงตัวเลขสำหรับกระแสเหนี่ยวนำ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอาศัยโปรแกรมดังกล่าวเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์สายอากาศ ซึ่งหลักการและทฤษฎีพื้นฐานของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าได้แสดงไว้ในส่วนถัดไป

### 2.1.1 วิธีการโมเมนต์

วิธีการโมเมนต์เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้ในการแก้สมการอินทิกรัลเพื่อคำนวณหาความหนาแน่นกระแสเหนี่ยวนำที่ไม่ทราบค่าซึ่งถูกเหนี่ยวนำบนตัวสายอากาศ เมื่อพิจารณาสมการเชิงเส้น

$$Lf = g \quad (2.1)$$

โดยที่  $L$  คือ ตัวดำเนินการเชิงเส้น  $g$  คือ ฟังก์ชันที่ทราบค่า (การกระตุ้น)  $f$  คือ ฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า ฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่านี้สามารถประมาณค่าได้โดยผลรวมแบบจำกัดซึ่งถูกแสดงในเทอมของฟังก์ชันเบซิส (basis function) หรือฟังก์ชันการแผ่ขยาย (expansion function) ดังนี้

$$f = \sum_{i=1}^N a_i f_i \quad (2.2)$$

โดยที่  $a_i$  คือสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าซึ่งต้องทำการคำนวณหา  $f_i$  คือ ฟังก์ชันการแผ่ขยายที่ทราบค่าหรือฟังก์ชันเบซิส เมื่อแทนสมการ (2.2) ลงในสมการ (2.1) จะได้

$$\sum_{i=1}^N a_i Lf_i = g \quad (2.3)$$

หากต้องการผลเฉลยที่ถูกต้องแท้จริงขอบเขตของผลรวมจะมีค่าเป็นอนันต์ ซึ่งผลเฉลยแบบประมาณค่าโดยปกติ แล้วจะมีขอบเขตที่จำกัด โดยทางทฤษฎี ผลเฉลยที่แท้จริงเป็นสิ่งที่ต้องการแต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วมักจะใช้ผลเฉลยแบบประมาณ เนื่องจากวิธีการประมาณนี้จะมีข้อผิดพลาดเหลืออยู่ ดังนั้นขั้นตอนต่อไปของวิธีการโมเมนต์ก็คือการทำให้ข้อผิดพลาดที่เหลืออยู่นี้เป็นศูนย์โดยการถ่วงน้ำหนักซึ่งต้องใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก (weighting function)  $w_j$  เมื่อ  $j = 1, \dots, N$  ที่เหมาะสมโดยการทำผลคูณภายในสมการ (2.3) ด้วยฟังก์ชันถ่วงน้ำหนัก แล้วใช้ความเป็นเชิงเส้นของผลคูณภายใน หลังจากนั้นสมการ (2.3) จะถูกแสดงในเทอมของสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^N a_i \langle w_j, Lf_i \rangle = \langle w_j, g \rangle \quad (2.4)$$

โดยที่สัญลักษณ์  $\langle \rangle$  หมายถึงผลคูณภายใน

สัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า ( $a_i$ ) สามารถคำนวณได้จากผลเฉลยของสมการ (2.4) โดยสมการ (2.4) จะถูกเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้เป็น

$$[L][a] = [g] \quad (2.5)$$

โดยที่

$$L = \begin{bmatrix} \langle w_1, Lf_1 \rangle & \langle w_1, Lf_2 \rangle & \cdots \\ \langle w_2, Lf_1 \rangle & \langle w_2, Lf_2 \rangle & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad g = \begin{bmatrix} \langle w_1, g \rangle \\ \langle w_2, g \rangle \\ \vdots \end{bmatrix}$$

จากที่กล่าวมานี้เป็นหลักการของวิธีการโมเมนต์ในการคำนวณหาค่ากระแสเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าการแพร่กระจายคลื่นได้ ดังนั้นต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงสมการอินทิกรัลที่ใช้ในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะนำไปสู่การวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของสายอากาศหรือโครงสร้างที่ต้องการทำการวิเคราะห์ได้

ในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า ฟังก์ชันเบซิสและฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่ใช้จะแตกต่างกัน โดยฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักที่ใช้คือฟังก์ชันเดลต้า (delta function)  $w_j(\vec{r}) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_j)$  ที่มีกลุ่มของจุดอยู่บนพื้นผิวดำนำไฟฟ้า  $\{F_j\}$

วิธีจำลองโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

1. การจำลองด้วยเส้นลวดตัวนำ (wire modeling) อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยเส้นลวดตัวนำ คือ เซกเมนต์ที่สั้นและตรง
2. การจำลองด้วยพื้นผิวดำนำ (surface modeling) อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในการจำลองโครงสร้างด้วยพื้นผิวดำนำ คือ แพตช์ (patch) ที่แบนเรียบ

การเลือกเซกเมนต์หรือแพตช์ที่เหมาะสมสำหรับการจำลองเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด และจำนวนของเซกเมนต์หรือแพตช์ควรจะน้อยที่สุดเท่าที่จำเป็นเพื่อให้ได้ผลที่มีความถูกต้องแม่นยำ ข้อจำกัดอย่างหนึ่งในการวิเคราะห์สายอากาศที่มีขนาดใหญ่มากคือ เนื่องจากผลเฉลยเชิงตัวเลขต้องการสมการเมตริกซ์ ซึ่งถ้าสายอากาศมีขนาดใหญ่มาก ก็ยังต้องการเมตริกซ์ที่มีขนาดใหญ่มาก ดังนั้นการจำลอง โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่มากจึงต้องอาศัยเวลาและหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ ในการคำนวณมากขึ้นด้วย

### 2.1.2 สมการอินทิกรัลสำหรับอากาศว่าง

โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า (Electric-Field Integral Equation: EFIE) และสมการอินทิกรัลสนามแม่เหล็ก (Magnetic-Field Integral Equation: MFIE) ในการจำลองผลตอบสนองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างทั่วไป แต่ละสมการมีข้อดีสำหรับ โครงสร้างเฉพาะแบบ สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้าเหมาะสำหรับ โครงสร้างแบบเส้นลวดตัวนำ เล็กๆ ในขณะที่สมการอินทิกรัลสนามแม่เหล็กจะไม่เหมาะกับกรณีเส้นลวดตัวนำเล็กๆ แต่จะใช้ได้ ดีกับ โครงสร้างที่มีปริมาตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับ โครงสร้างที่มีพื้นผิวตัวนำเรียบขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามสามารถใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้าในการจำลองพื้นผิวตัวนำได้โดยการจำลองด้วยตาข่ายเส้นลวดตัวนำ (wire grid model) และถูกเลือกใช้สำหรับ โครงสร้างที่มีความบางที่ซึ่งมีระยะห่าง ระหว่างพื้นผิวด้านหน้าและด้านหลังน้อยๆ สำหรับโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยเส้นลวดตัวนำและ พื้นผิวตัวนำ สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้าและสมการอินทิกรัลสนามแม่เหล็กจะถูกใช้ร่วมกัน Poggio และ Miller ได้ทำการสืบหาที่มาของสมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้าและสมการอินทิกรัล สนามแม่เหล็กที่ใช้ใน โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างละเอียดและได้แสดงไว้ใน [8]

เนื่องจากสายอากาศที่ทำการวิเคราะห์นี้มีขนาดเล็กไม่ใหญ่มากจึงใช้วิธีการจำลองด้วยเส้นลวด ตัวนำซึ่งใช้สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้าในการคำนวณ ดังนั้นจึงได้นำเสนอเฉพาะสมการอินทิกรัล สนามไฟฟ้าที่ใช้ใน โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างคร่าวๆ ดังนี้

#### 2.1.2.1 สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า

รูปแบบของสมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้าที่ใช้ใน โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะยึด ตามการสร้างสมการอินทิกรัลสำหรับสนามไฟฟ้าของการแจกแจงกระแสเชิงปริมาตร  $\vec{J}$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_V \vec{J}(\vec{r}') \cdot \vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') dV' \quad (2.6)$$

โดยที่  $\vec{G}(\vec{r}, \vec{r}') = (k^2 \vec{I} + \nabla \nabla) g(\vec{r}, \vec{r}')$

$$g(\vec{r}, \vec{r}') = \exp(-jk|\vec{r} - \vec{r}'|) / |\vec{r} - \vec{r}'|$$

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$\eta = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$$

และแบบแผนทางเวลาคือ  $\exp(j\omega t)$   $\vec{I}$  คือ ไคแอดเอกลักษณะ ( $\hat{x}\hat{x} + \hat{y}\hat{y} + \hat{z}\hat{z}$ ) สมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้าของเส้นลวดตัวนำในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ากระทำโดยการหาสมการอินทิกรัลของพื้นผิวของโครงสร้างความนำสมบูรณ์แล้วสามารถลดรูปให้เป็นสมการอินทิกรัลเชิงสเกลาร์ได้เมื่อพื้นผิวหน้าไฟฟ้า  $S$  เป็นพื้นผิวหน้าไฟฟ้าของเส้นลวดบางแบบทรงกระบอก ซึ่งด้วยวิธีนี้ก็จะทำให้ได้ผลเฉลยที่ง่ายกว่ามากๆ สมมติฐานนี้ประยุกต์ใช้สำหรับเส้นลวดบางที่เรียกว่าการประมาณแบบเส้นลวดบาง (thin-wire approximation) สำหรับเส้นลวดที่มีรัศมีที่ใหญ่มากจะใช้การประมาณเส้นลวดบางแบบขยาย (extended thin-wire approximation) [9] จากการประมาณแบบเส้นลวดบางจะทำให้กระแสบนพื้นผิว  $\vec{J}_s(\vec{r})$  บนเส้นลวดที่มีรัศมี  $a$  สามารถแทนได้ด้วยกระแสเส้นบางๆ (filamentary current)  $I$  โดยที่

$$I(s)\hat{s} = 2\pi a \vec{J}_s(\vec{r})$$

ซึ่ง  $s$  คือ ระยะทางตามแกนเส้นลวดที่  $\vec{r}$  และ  $\hat{s}$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่สัมผัสกับแกนเส้นลวดที่  $\vec{r}$  ดังนั้นสมการอินทิกรัลเชิงเวกเตอร์ของเส้นลวดตัวนำสามารถเขียนได้เป็น

$$-\hat{n}(\vec{r}) \times \vec{E}'(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \hat{n}(\vec{r}) \times \int_L I(s') \left( k^2 \hat{s}' - \nabla \frac{\partial}{\partial s'} \right) g(\vec{r}, \vec{r}') ds' \quad (2.7)$$

โดยที่อินทิเกรตตลอดความยาวของเส้นลวด การบ่งคับเงื่อนไขขอบเขตในทิศทางตามแกนจะลดสมการ (2.7) ให้เป็นสมการสเกลาร์ดังนี้

$$-\hat{s} \cdot \vec{E}'(\vec{r}) = \frac{-j\eta}{4\pi k} \int_L I(s') \left( k^2 \hat{s} \cdot \hat{s}' - \frac{\partial^2}{\partial s \partial s'} \right) g(\vec{r}, \vec{r}') ds' \quad (2.8)$$

เนื่องจากตอนนี้  $\vec{r}'$  เป็นจุดที่  $s'$  บนแกนเส้นลวดขณะที่  $\vec{r}$  เป็นจุดที่  $s$  บนพื้นผิวเส้นลวด  $|\vec{r} - \vec{r}'| \geq a$  และอินทิเกรตแบบมีขอบเขต

### 2.1.3 การแผ่ขยายกระแสบนเส้นลวด

การเลือกฟังก์ชันเบซิสมี่มีความสำคัญมากเพื่อให้ผลเฉลยที่มีความถูกต้องและแม่นยำ โดยควรที่จะเลือกฟังก์ชันที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดที่จะให้การแจกแจงกระแสที่แท้จริง ในกรณีของ

เส้นลวดนั้นเป็นการจำลองโดยการแบ่งเส้นลวดออกเป็นเซกเมนต์ที่ตรงและสั้นซึ่งกระแสนแต่ละเซกเมนต์นี้จะแสดงด้วยเทอมของฟังก์ชันค่าคงที่ ฟังก์ชันไซน์ และฟังก์ชันโคไซน์

กระแสทั้งหมดบนเซกเมนต์ที่  $i$  ในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ามีรูปแบบดังนี้

$$I_i(s) = A_i + B_i \sin k(s - s_i) + C_i \cos k(s - s_i) \quad (2.9)$$

$$|s - s_i| < \Delta_i/2$$

โดยที่  $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$   $s_i$  คือค่าของ  $s$  ที่จุดกึ่งกลางของเซกเมนต์  $i$  และ  $\Delta_i$  คือความยาวของเซกเมนต์  $i$  การคำนวณหาค่ากระแสนี้ใช้วิธีการโมเมนต์ดังที่ได้แสดงในข้างต้น ซึ่งสามารถดูรายละเอียดการคำนวณในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าได้ใน [10] ผลเฉลยต้องการการหาค่าสนามไฟฟ้าที่แต่ละเซกเมนต์อื่นเนื่องมาจากกระแส

ความแม่นยำของการประมาณแบบเส้นลวดบางสำหรับเส้นลวดที่มีรัศมี  $a$  และความยาว  $\Delta$  จะขึ้นอยู่กับ  $ka$  และ  $\Delta/a$  การประมาณแบบเส้นลวดบางจะทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยกว่า 1% สำหรับ  $\Delta/a$  มากกว่า 8 [9] ยิ่งกว่านั้นในผลเฉลยเชิงตัวเลขของสมการอินทิกรัลสนามไฟฟ้า เส้นลวดจะถูกแบ่งเป็นเซกเมนต์ที่มีความยาวน้อยกว่า  $0.1\lambda$  เพื่อจะทำให้ได้การแจกแจงกระแสที่เพียงพอ

## 2.1.4 การจำลองสายอากาศ

### 2.1.4.1 การจำลองแหล่งกำเนิด

การจำลองแหล่งกำเนิดในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ามีให้เลือกหลายแบบด้วยกัน ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 แบบคือ การกระตุ้นสำหรับสายอากาศรับคือ สนามของคลื่นระนาบตกกระทบ และผลตอบสนองที่ต้องการคือ กระแสที่เหนี่ยวนำที่จุดเดียวหรือมากกว่าบน โครงสร้าง ในกรณีของสายอากาศส่ง โดยทั่วไปจะใช้การกระตุ้นเป็นแบบแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าบนเส้นลวด อย่างไรก็ตามแบบจำลองแหล่งกำเนิดที่เป็นประโยชน์ คือ สนามไฟฟ้าเฉพาะที่จุดที่แมตซ์กันเพียงจุดเดียว สำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้า  $V$  บนเซกเมนต์ที่  $i$  องค์กรประกอบในเวกเตอร์การกระตุ้นสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าที่ป้อนที่จุดกึ่งกลางของเซกเมนต์  $i$  จะอยู่ในรูป

$$E_i = \frac{V}{\Delta_i} \quad (2.10)$$

ทิศทางของ  $E_i$  จะเป็นไปในทิศทางบวกของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าเพื่อว่าประจุไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับแหล่งกำเนิด สนามที่จุดแมตซ์อื่นๆจะถูกกำหนดให้เป็นศูนย์ แรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลเป็นการอินทิเกรตของสนามที่ป้อนเข้าไปตลอดเส้นลวด

ในทางอุดมคติ แบบจำลองแหล่งกำเนิดนี้จะป้อนแรงดันไฟฟ้า  $V$  ระหว่างจุดสิ้นสุดของ เซกเมนต์แหล่งกำเนิด ดังนั้นอินพุตแอดมิตแตนซ์ของสายอากาศจะถูกคำนวณเหมือนกระแสที่จุด สิ้นสุดทั้งสองด้านของเซกเมนต์หรือในกรณีที่ไม่วัดจะเป็นค่าเฉลี่ยของกระแสที่จุดสิ้นสุดทั้งสอง ทารด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ในทางปฏิบัติ เซกเมนต์ต้องสั้นเพียงพอที่การเปลี่ยนแปลง ของกระแสตลอดความยาวน้อยและกระแสที่จุดกึ่งกลางจะสามารถถูกใช้ได้แทนที่จะใช้ที่จุดสิ้นสุด เมื่อความยาวเซกเมนต์ในบริเวณแหล่งกำเนิดยาวไม่เท่ากัน อินพุตแอดมิตแตนซ์ที่คำนวณได้อาจจะ ไม่ถูกต้องแม่นยำเนื่องจากความไม่ตรงกันระหว่างแรงดันไฟฟ้าจริงๆกับแรงดันไฟฟ้าที่สมมติ

#### 2.1.4.2 การคำนวณสนามที่แพร่กระจาย

สนามที่แพร่กระจายของสายอากาศถูกคำนวณจากกระแสที่เหนี่ยวนำโดยการใช้รูปแบบที่ ง่ายของสมการ (2.6) การประมาณค่าสนามระยะไกลจะต้องเมื่อระยะทางการแจกแจงกระแสไป ยังจุดสังเกตมีค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นและขนาดของการแจกแจงกระแส สมการ สนามระยะไกลคือ

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}_0) = & \frac{jk\eta}{4\pi} \frac{\exp(-jkr_0)}{r_0} \times \left\{ \int_L [(\hat{k} \cdot \vec{I}(s))\hat{k} - \vec{I}(s)] \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}) ds \right. \\ & \left. + \int_S [(\hat{k} \cdot \vec{J}_s(\vec{r}))\hat{k} - \vec{J}_s(\vec{r})] \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}) dA \right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

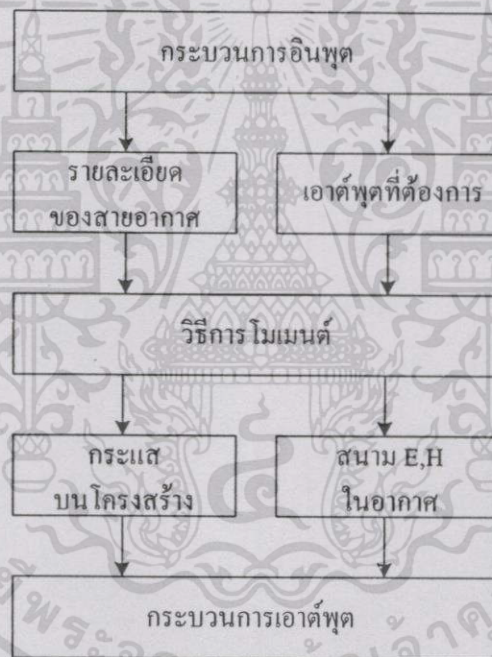
โดยที่  $\vec{r}_0$  คือตำแหน่งของจุดสังเกต  $\hat{k} = \vec{r}_0/|\vec{r}_0|$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  การอินทิเกรตพจน์แรกเป็นการอินทิเกรตตลอดเซกเมนต์ของเส้นลวด และลดรูปให้เป็นผลรวมตลอดเซกเมนต์ของเส้นลวด การอินทิเกรตพจน์ที่สองเป็นผลรวมตลอดแพตช์

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสามารถคำนวณได้โดยการกระตุ้นสายอากาศ ด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า และโดยการใช้สมการ (2.11) เพื่อคำนวณสนามที่แพร่กระจายใน อากาศ

#### 2.1.5 วิธีการจำลองสายอากาศในทางปฏิบัติ

หลักการในการจำลองสายอากาศที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองแบบเส้นลวดที่สำคัญ และต้องจดจำ คือ ความยาวของเซกเมนต์ควรจะน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $0.1\lambda$  เพื่อความแม่นยำในการ คำนวณ รัศมีที่ต่างกันระหว่างเซกเมนต์ที่เชื่อมต่อกันจะทำให้ความแม่นยำลดลง เส้นลวดแต่ละเส้น และเซกเมนต์แต่ละเซกเมนต์ต้องไม่เหลื่อมหรือซ้อนทับกันมิฉะนั้นจะเกิดความผิดพลาดในการ คำนวณเนื่องจากส่วนแบ่งของกระแสระหว่างเซกเมนต์ที่เหลื่อมกันไม่สามารถกำหนดได้ โดยที่เซกเมนต์ที่เหลื่อมกันนี้อาจจะเป็นผลที่ทำให้เกิดสมการเมตริกซ์ซิงกูลาร์ขึ้น

ผังภูมิแสดงการทำงานของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.1 โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าต้องการอินพุตที่อธิบายระบบทางกายภาพที่ต้องการจะวิเคราะห์ (ตำแหน่งที่ตั้งของเส้นลวดและวัตถุซึ่งเป็นตำแหน่งโคออดิเนตเริ่มต้นและสิ้นสุดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน  $(x, y, z)$  และ  $(x', y', z')$  ของเส้นลวดแต่ละเส้นตามลำดับ ความถี่ของแหล่งกำเนิดหรือสนาม ฯลฯ) และเอาต์พุตที่ต้องการ (ความเข้มสนาม ณ ตำแหน่งที่ระบุในอากาศ ฯลฯ) สามารถเลือกเอาต์พุตที่ต้องการได้ซึ่งประกอบด้วยการกระจายกระแสบนเส้นลวดและพื้นผิว สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ณ จุดที่ระบุไว้ทั้งในสนามระยะใกล้และสนามระยะไกล อิมพีแดนซ์ขาเข้า อัตราขยายของสายอากาศ เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนการใส่ข้อมูลและขั้นตอนการวิเคราะห์ของตัวดำเนินการอินพุตและเอาต์พุตสามารถทำให้ง่ายขึ้นซึ่งขึ้นอยู่กับเวอร์ชันของโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีการใส่ข้อมูลเช่น อินพุตและเอาต์พุตที่ต้องการสามารถศึกษาได้จากคู่มือสำหรับผู้ใส่ [11]



รูปที่ 2.1 ผังภูมิในการทำงานของ โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

ทฤษฎีที่จะกล่าวถึงต่อไปเป็นทฤษฎีเกี่ยวกับสายอากาศแบบแอ็กทิฟเนื่องจากสายอากาศที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นสายอากาศฮอสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองซึ่งถือว่าเป็นสายอากาศแอ็กทิฟเช่นกัน

## 2.2 สายอากาศแอ็กทิฟ

E. A. Killick [12] ได้กล่าวเกี่ยวกับสายอากาศแอ็กทิฟไว้ว่า “ถ้าสายอากาศแอ็กทิฟควรจะหมายถึงสายอากาศใดๆที่ซึ่งแหล่งกำเนิดพลังงานวงจรขยายหลักอยู่รวมกลุ่มอย่างใกล้ชิดมากๆ

กับองค์ประกอบการแพร่กระจายคลื่นหรือองค์ประกอบทางด้านรับ ดังนั้นความหมายของสายอากาศแอ็กทีฟดูเหมือนจะเหมาะสมที่สุดเมื่อส่วนประกอบแอ็กทีฟ (active component) ถูกเชื่อมต่อกับโดยตรงกับองค์ประกอบโดยปราศจากการไม่แมตช์กับสายนำสัญญาณใดๆ” ซึ่ง J. A. Navarro และ K. Chang [1] ได้ยึดหลักนิยามสายอากาศแอ็กทีฟตามคำบอกกล่าวของ E. A. Killick แต่อย่างไรก็ตาม ในการสืบค้นคำนิยามของสายอากาศแอ็กทีฟจำนวนมากก็ได้ขยายกว้างรวมไปถึงการรวมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำใดๆไว้ด้วย ซึ่ง J. A. Navarro และ K. Chang ได้ให้ข้อแตกต่างระหว่างสายอากาศรวมแบบแพสซีฟ (passive integrated antenna) และสายอากาศรวมแบบแอ็กทีฟ (active integrated antenna) ไว้ดังนี้

1. สายอากาศรวมแบบแพสซีฟ เป็นสายอากาศที่รวมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบแพสซีฟ และวงจรเข้าไว้ด้วยกันเพื่อการสวิตช์ การปรับจูน การมอดูเลต การผสมสัญญาณ การดีเทกต์ หรือฟังก์ชันอื่นๆ
2. สายอากาศรวมแบบแอ็กทีฟ เป็นสายอากาศที่รวมอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบแอ็กทีฟ และวงจรเข้าไว้ด้วยกันเพื่อขยายหรือผลิตความถี่คลื่นวิทยุ สายอากาศประเภทนี้มักจะต้องการความต้านทานลบสำหรับการผลิตกำลังงานคลื่นวิทยุหรือการขยาย

ในบางกรณี ความแตกต่างนี้เป็นสิ่งที่ยากในการจำแนกเนื่องจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้เกี่ยวข้องกัน ตัวอย่างเช่น ออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์ (transistor) และตัวผสมสัญญาณสามารถถูกรวมกับสายอากาศเพื่อทำเป็นเครื่องรับส่ง (transceiver) ได้

### 2.2.1 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบบแอ็กทีฟ (Active Solid-State Devices)

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. แบบสองเทอร์มินัล ได้แก่ ไดโอดกั้นน้ำ ไดโอดอิมแพค (IMPATT diode) ไดโอดวารกเตอร์ (varactor diode) ไดโอดพิน (PIN diode) และไดโอดชอทกี้-แบร์ริเออร์ (Schottky-barrier diode)
2. แบบสามเทอร์มินัล ได้แก่ ทรานซิสเตอร์ไบโพลาร์จังก์ชัน (Bipolar Junction Transistor : BJT) เมสเฟต (Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor : MESFET) ทรานซิสเตอร์เฮตเทอโรจังก์ชันไบโพลาร์ (Heterojunction Bipolar Transistor : HBT) และ ทรานซิสเตอร์ไฮท์-อิเล็กตรอน-โมบิลิตี (High-Electron-Mobility Transistor : HEMT)

ไดโอดและทรานซิสเตอร์เหล่านี้จะให้ความต้านทานลบ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าสามารถควบคุมค่ารีแอกแตนซ์ได้ แรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าควบคุมค่ารีแอกแตนซ์หรือความต้านทานลบนี้นี้จะทำให้เกิดกลไกในการพัฒนาวงจรซึ่งได้แก่ การจูน การสวิตช์ การผสมสัญญาณ การขยาย หรือ การออสซิลเลต ไดโอดหรือทรานซิสเตอร์ที่เลือกใช้จะเป็นตัวกำหนดราคา กำลังงาน

เอาต์พุต ความถี่ที่ทำงาน ประสิทธิภาพการแปลงผันจากไฟตรงไปเป็นความถี่วิทยุ เสถียรภาพ สัญญาณรบกวน และความต้องการในการไบอัส

ไดโอดเป็นอุปกรณ์สองเทอร์มินัลที่ต้องการการไหลและไบอัสที่ซับซ้อนน้อยกว่า ทรานซิสเตอร์แบบสามเทอร์มินัล แต่อย่างไรก็ตามทรานซิสเตอร์สามารถให้ฟังก์ชันการทำงานที่แตกต่างมากกว่า เช่น การสวิตช์ การจูน และการขยาย ไดโอดจะให้ความถี่ปฏิบัติงานที่สูงกว่าที่มีกำลังงานความถี่วิทยุเอาต์พุตที่สูงกว่าทรานซิสเตอร์ แต่ทรานซิสเตอร์มีประสิทธิภาพการแปลงผันจากไฟตรงไปเป็นความถี่วิทยุที่สูงกว่าและทำงานที่ระดับของสัญญาณไฟตรงอินพุตที่ต่ำกว่า

### 2.2.2 สายอากาศรวมแบบแอ็กทีฟ

สายอากาศรวม (integrated antenna) คือ ตัวแพร่กระจายคลื่นที่รวมกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไดโอดพิน ไดโอดควาเรกเตอร์ หรือไดโอดชอกกี-แบร์ริเออร์ โดยตรงเพื่อให้ฟังก์ชันการสวิตช์ การจูน หรือ การผสมสัญญาณ

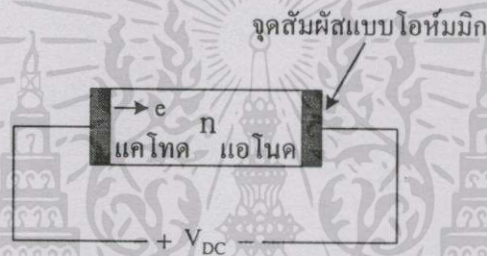
สายอากาศรวมแบบแอ็กทีฟ คือ สายอากาศรวมที่ใช้อุปกรณ์แอ็กทีฟ เช่น ไดโอดกัมน์ เฟต ฯลฯ เพื่อแปลงพลังงานไฟตรงหรือแปลงกำลังงานความถี่วิทยุ (เช่น ออสซิลเลเตอร์ วงจรขยาย ฯลฯ) สายอากาศรวมแบบแอ็กทีฟนี้มีศักยภาพในการลดขนาด น้ำหนัก และราคาของเครื่องส่ง เครื่องรับ และเครื่องรับส่งที่มีมาแต่ดั้งเดิม ซึ่งเป็นออกแบบโดยการรวมฟังก์ชันของส่วนประกอบวงจรที่ปกติแล้วจะทำงาน โดยวงจรที่อยู่ห่างจากสายอากาศเข้าไว้ด้วยกันที่เทอร์มินัลของสายอากาศเลข ซึ่งระบบเครื่องส่ง เครื่องรับ หรือเครื่องรับส่งในสมัยก่อนนั้นจะใช้ส่วนประกอบวงจรที่แตกต่างกันหลายส่วนเชื่อมต่อกับสายอากาศด้วยสายนำสัญญาณ ซึ่งนอกจากระบบจะมีอุปกรณ์หลายอย่างแล้วยังเกิดการสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณด้วย

สายอากาศแอ็กทีฟนั้นมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากสำหรับแหล่งกำเนิดการรวมกำลังงานเชิงอวกาศ (Spatial power combining source) [1] ในย่านคลื่นมิลลิเมตร (Millimeter wave band) และย่านคลื่นมิลลิเมตรย่อย (Submillimeter band) ที่ความถี่สูงเหล่านี้ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะให้กำลังงานที่ต่ำมากและมักจะปราศจากประสิทธิภาพ ดังนั้นเทคนิคการรวมกำลังงานจึงได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อชดเชยสิ่งเหล่านี้ เทคนิคการรวมกำลังงานเชิงอวกาศนี้มีความเหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับสายอากาศแอ็กทีฟเนื่องจากสายอากาศแอ็กทีฟนี้รวมเอาแหล่งกำเนิดการแพร่กระจายคลื่นที่กำลังงานต่ำจำนวนมากเข้าไว้ด้วยกัน

### 2.3 ไดโอดกัมน์ (Diode Gunn)

ผลกระทบการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Transfer electron effect) ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดย J. B. Gunn ซึ่งในปี ค.ศ. 1963 Gunn ได้ทำการทดลองโดยนำผลึกของ GaAs (Gallium Arsenide) แบบ n มาตัดให้เป็นรูปแท่งสี่เหลี่ยมแล้วติดอิเล็กโทรดเข้าไปทั้งสองด้านซึ่งทำให้เกิดจุดสัมผัสแบบ

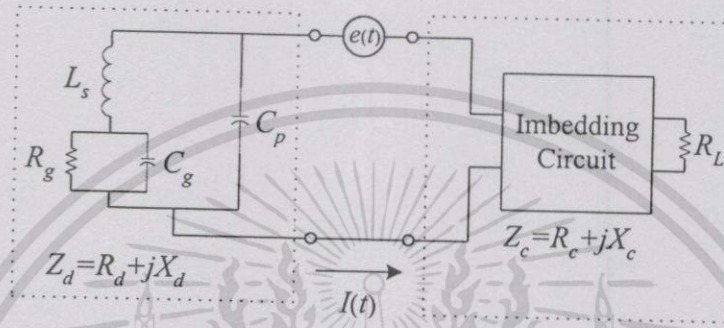
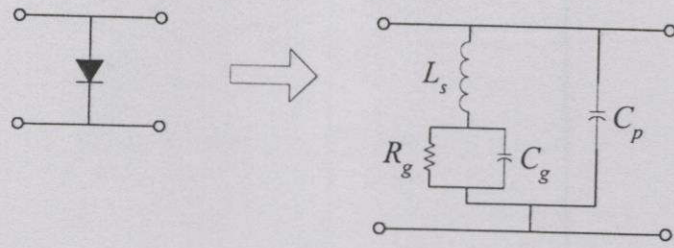
โอห์มมิก (ohmic contact) แสดงดังรูปที่ 2.2 เมื่อป้อนแรงดันไฟตรงให้กับผลึกดังกล่าวนี้ ในช่วงแรกจะมีกระแสไหลในลักษณะเป็นอัตราส่วนกับแรงดัน แต่เมื่อเพิ่มแรงดันจนสนามไฟฟ้าสารกึ่งตัวนำมีค่าเกินค่าจุดเริ่มเปลี่ยน (threshold) ค่าหนึ่ง (กรณีของ GaAs แบบ n สนามไฟฟ้าจุดเริ่มเปลี่ยนจะมีค่าประมาณ 3.4 kV/cm) กระแสที่ไหลจะไม่มีเสถียรภาพและเริ่มออสซิลเลต โดยที่คาบของการออสซิลเลตจะใกล้เคียงกับเวลาที่ใช้ในการส่งผ่านของอิเล็กตรอน (transit time) จากจุดสัมผัสด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง เวลาที่ใช้ในการส่งผ่านดังกล่าวนี้คำนวณจากค่าการเคลื่อนที่หรือโมบิลิตีที่ขณะสนามไฟฟ้าต่ำ (low-field mobility) และสนามไฟฟ้าจุดเริ่มเปลี่ยนดังกล่าวข้างต้น เมื่อทำการตัดความยาวของชิ้นสารกึ่งตัวนำให้เป็นประมาณ  $100\mu\text{m} - 300\mu\text{m}$  จะพบว่าการออสซิลเลตนั้นจะให้ความถี่ไมโครเวฟที่มีคุณสมบัติเชิงโคฮีเรนต์ที่ดีออกมา



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์กันัน์

อุปกรณ์กันัน์ (Gunn device) ซึ่งเรียกตามชื่อหลังของ J. B. Gunn สามารถสร้างจาก GaAs หรือ InP (Indium Phosphide) ซึ่งอุปกรณ์กันัน์จะมีคุณสมบัติความต้านทานลบ ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นออสซิลเลเตอร์และแอมพลิฟายเออร์ได้ นอกจากนี้อุปกรณ์กันัน์ยังถูกเรียกว่าอุปกรณ์ถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Transferred-electron device) อีกด้วย เนื่องจากความต้านทานลบเกิดจากการถ่ายโอนของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานต่ำไปยังแถบพลังงานสูง ไดโอดกันัน์นี้มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางสำหรับเป็นออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่มีสัญญาณรบกวนต่ำและตัวผสมสัญญาณ (Mixer) นอกจากนี้ยังใช้เป็นเครื่องส่งกำลังงานต่ำ (Low-power transmitter) และแหล่งกำเนิดแถบกว้างที่ปรับได้ (Wideband tunable source) ด้วยเช่นกัน InP กันัน์ออสซิลเลเตอร์จะมีประสิทธิภาพและกำลังงานเอาต์พุตสูงกว่า GaAs ออสซิลเลเตอร์ แต่ก็ต้องการแรงดันไฟฟ้าและกระแสไบอัสที่สูงกว่าด้วยเช่นกัน

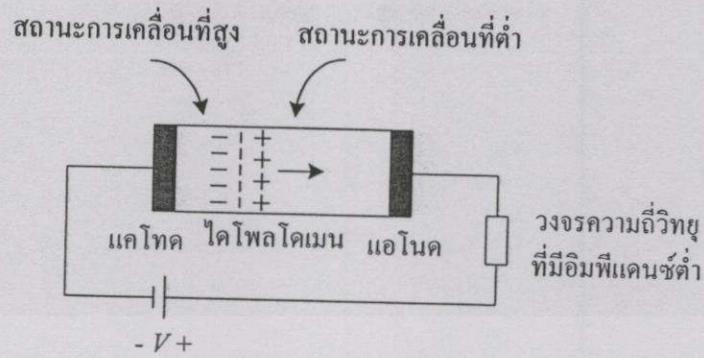
สัญลักษณ์และวงจรสมมูลของไดโอดกันัน์และออสซิลเลเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ไดโอดกัณฑ์และวงจรสมมูลของออสซิลเลเตอร์

2.3.1 โหมดการทำงาน

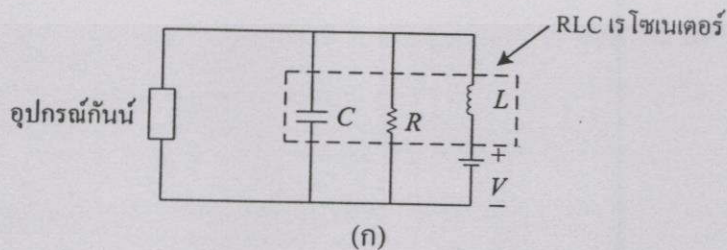
อุปกรณ์กัณฑ์มีโหมดการทำงานขึ้นต้นอยู่ 2 โหมดที่ทำให้เกิดการออสซิลเลตขึ้นในอุปกรณ์กัณฑ์ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปมากกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยน ไดโพลโดเมน (dipole domain) (เป็นบริเวณของการรวมตัวกันและการหมดไปของอิเล็กตรอน) ก็จะก่อตัวขึ้นใกล้กับตอนปลายของแคโทด ส่วนของบริเวณอินพุตนี้อยู่ในสถานะพลังงานต่ำการเคลื่อนที่สูง (Low-energy high-mobility) และอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ออกจากแคโทดด้วยความเร็วสูง ที่ตำแหน่งในเนื้อสารที่แยกสถานะการเคลื่อนที่สูงและสถานะการเคลื่อนที่ต่ำออกจากกัน อิเล็กตรอนจะสะสมอยู่ทางด้านซ้ายและถูกทำให้หมดไปในด้านขวาโดยอาศัยการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน การจัดการไดโพลของประจุนี้แสดงดังรูปที่ 2.4 ไดโพลโดเมนนี้จะเคลื่อนที่ไปและเมื่อไปถึงแอโนด อิเล็กตรอนก็จะอยู่ในสถานะการเคลื่อนที่สูง และไดโพลโดเมนอันใหม่ก็จะก่อตัวขึ้นที่ตอนปลายของแคโทดและเคลื่อนที่ไปยังแอโนด กลไกนี้คือการทำซ้ำด้วยตัวเอง (Self-repeating) และแสดงการออสซิลเลตด้วยช่วงเวลาเท่ากับเวลาที่ใช้ในการส่งผ่านอิเล็กตรอน (Transit time) จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง โหมดของการออสซิลเลตนี้จะมีประสิทธิภาพต่ำ (2-3%) ในการทำให้เกิดกำลังงานและความถี่ที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยวงจรภายนอก โหมดของการออสซิลเลตนี้เรียกว่าโหมดทรานซิท-ไทม์ (Transit-time mode) หรือโหมดกัณฑ์ (Gunn mode)



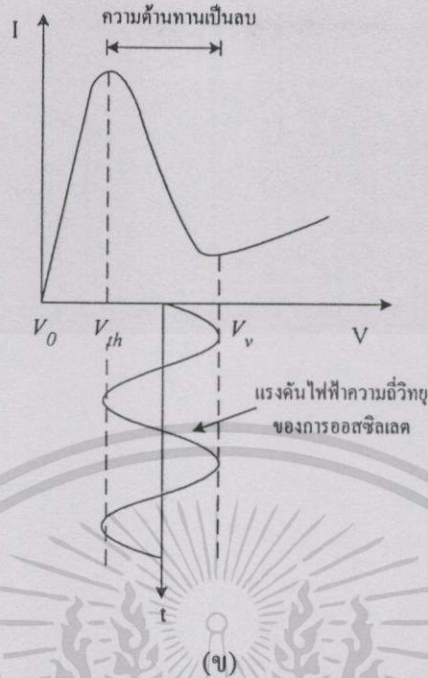
รูปที่ 2.4 วงจรกั่นออสซิลเลเตอร์อย่างง่ายโดยการใช้โหมคทรานซิด-โทม์

โหมคที่สองของการออสซิลเลเตอร์คือ โหมค Limited-space-charge (LSA) การทำงานของกั่นออสซิลเลเตอร์ในโหมค LSA สามารถผลิตกำลังงานได้หลายวัตต์ซึ่งมีประสิทธิภาพในการผลิตกำลังงานประมาณ 20 % หรือมากกว่านั้น กำลังงานเอาต์พุตที่ได้รับจะลดลงตามความถี่และต่ำกว่า 1 วัตต์ที่ความถี่ที่มากกว่า 10 GHz ที่ความถี่ 100 GHz กำลังงานเอาต์พุตที่ได้จะเป็นหลายมิลลิวัตต์

ในโหมค LSA อุปกรณ์กั่นจะถูกรวมเข้าไว้เป็นส่วนหนึ่งของวงจรเรโซแนนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) ความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์ถูกปรับแต่งเพื่อทำให้ความถี่ของวงจรเรโซแนนซ์สูงกว่าความถี่ของโหมคทรานซิด-โทม์หลายเท่า ทำให้ไดโพลโดเมนไม่มีเวลาเพียงพอที่จะก่อตัวขึ้น และอุปกรณ์จะทำงานเป็นอุปกรณ์ความต้านทานลบ กระแสไฟตรงที่ไบอัสถูกปรับให้เป็นค่าที่ค่อนข้างมากกว่าแรงดันไฟฟ้าจุดเริ่มเปลี่ยน แรงดันไฟฟ้าความถี่วิทยุของการออสซิลเลเตอร์จะเพิ่มขึ้นจนค่าจุดสูงสุดถึงจุดสูงสุด (Peak-peak value) มีค่าเท่ากับค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตลอดช่วงที่ค่าความต้านทานของอุปกรณ์เป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) ตัวโหลดของเรโซเนเตอร์ (Resonator loading) แทนด้วยตัวต้านทาน  $R$  ถูกปรับให้เป็นค่าที่มากกว่าค่าความต้านทานลบสูงสุดของอุปกรณ์ประมาณ 20 % ซึ่งจะทำให้มั่นใจว่าการออสซิลเลเตอร์จะเริ่มขึ้น แอมพลิจูดของการออสซิลเลเตอร์จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความต้านทานลบเฉลี่ยของอุปกรณ์กั่นเท่ากับค่าความต้านทาน  $R$  ของเรโซเนเตอร์



รูปที่ 2.5 กั่นออสซิลเลเตอร์ในโหมค LSA



รูปที่ 2.5 (ต่อ)

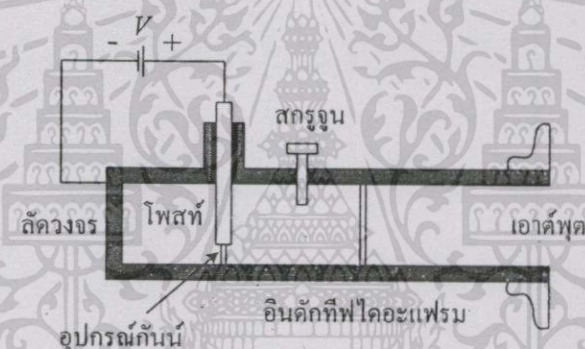
- (ก) กัณน์ออสซิลเลเตอร์พื้นฐานที่ทำงานในโหมด LSA
- (ข) แรงดันไฟฟ้าความถี่วิทยุของการออสซิลเลตที่ตกคร่อมอุปกรณ์กัณน์ในโหมด

ถ้าความถี่ของเรโซเนเตอร์ถูกปรับเป็นค่าความถี่ที่สูงกว่าความถี่ของโหมดทรานซิชัน-ไทม์เพียงเล็กน้อย อุปกรณ์กัณน์ก็จะทำงานเหมือนกับโหมดกัณน์พื้นฐานอย่างมาก แต่ไดโพลโดเมนจะถูกทำให้หมดไปก่อนที่มันจะมาถึงแอโนดโดยแรงดันการออสซิลเลตที่ไปทางลบ (negative-going oscillation voltage) โหมดการทำงานแบบนี้เรียกว่า quenched-domain mode ซึ่งเป็นโหมดการทำงานที่ไดโพลโดเมนถูกระงับ การออสซิลเลตยังสามารถเกิดขึ้นโดยการปรับความถี่ของเรโซเนเตอร์อีกด้วย ในกรณีนี้ไดโพลโดเมนมีเวลาเพียงพอที่จะเคลื่อนที่ไปถึงแอโนดได้ แต่อย่างไรก็ตาม การเริ่มต้นของไดโพลโดเมนอันใหม่จะถูกประวิงไปจนกระทั่งแรงดันไฟฟ้าของการออสซิลเลตเพิ่มสูงขึ้นกว่าค่าจุดเริ่มเปลี่ยน โหมดของการทำงานนี้เรียกว่า โหมดยับยั้ง (inhibited mode) หรือ โหมดประวิง (delayed mode)

### 2.3.2 วงจรกัณน์ออสซิลเลเตอร์ (Gunn Oscillator Circuit)

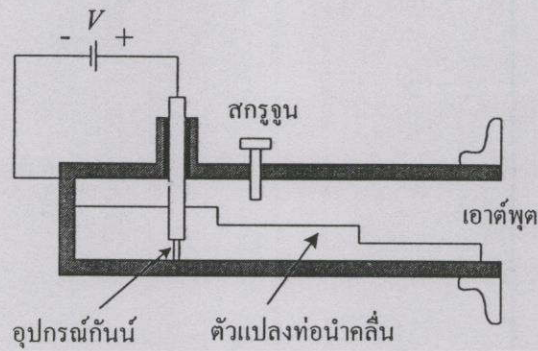
กัณน์ออสซิลเลเตอร์สามารถถูกสร้างได้ในวงจรที่อนาคัส โคเอกเซียล และไมโครสตริป วิธีการทั่วไปในการเชื่อมต่ออุปกรณ์กัณน์เข้าไปในท่อนาคัสสำหรับความถี่ 8 – 94 กิกะเฮิร์ตซ์ คือ การติดตั้งไดโอดแบบแพคเกจ (package diode) อยู่ใต้โพสท์ที่ใช้สำหรับการไบอัสแสดงในรูปที่

ควาวิตี้ที่ใช้สำหรับเรโซเนเตอร์นั้นโดยทั่วไปแล้วต้องมีคุณสมบัติการแปลงอิมพีแดนซ์ (Impedance-transforming property) เพื่อที่จะลดค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงของท่อนำคลื่นให้เป็นค่าที่ต่ำพอเหมาะกับอุปกรณ์กั้น ตัวอย่างของโครงสร้างควาวิตี้ที่ง่ายแสดงดังรูปที่ 2.6 อุปกรณ์กั้นนี้จะอยู่ที่โพสท์ในท่อนำคลื่น ควาวิตี้จะเรโซแนนซ์ความถี่ที่ต้องการได้โดยการปรับตำแหน่งการลัดวงจร (Short-circuit position) ระดับของการเชื่อมต่อ (Coupling) กับท่อนำคลื่นภายนอกถูกปรับได้โดยการเปลี่ยนการเปิดช่องหน้าต่างในอินดักทีฟไดอะแฟรม (Inductive diaphragm) ที่ติดตั้งอยู่ที่ด้านหน้าของควาวิตี้ ส่วนบนของโพสท์ถูกกั้นด้วยฉนวนแยกจากท่อนำคลื่น แรงดันไบอัสไฟตรง (โดยทั่วไปประมาณ 12 โวลต์) ถูกป้อนให้กับโพสท์ มันจะมีความจุที่เพียงพอระหว่างโพสท์และท่อนำคลื่นที่ล้อมรอบเพื่อที่จะให้ความจุไฟฟ้าบายพาสความถี่วิทยุที่มีอิมพีแดนซ์เพียงพอ และดังนั้นกระแสความถี่วิทยุจะไม่ไหลผ่านแหล่งจ่ายแรงดันไบอัส การปรับจูนที่ดีของควาวิตี้ทำได้โดยใช้สกรูปรับอิมพีแดนซ์ (Tuning screw)



รูปที่ 2.6 ควาวิตี้ท่อนำคลื่นอย่างง่ายสำหรับกั้นออสซิลเลเตอร์

ตัวอย่างควาวิตี้ท่อนำคลื่นที่มีการใช้ตัวแปลงท่อนำคลื่นที่ความสูงลดลงเรื่อยๆ (Reduced-height waveguide transformer) ในการปรับอิมพีแดนซ์ที่ต่ำของอุปกรณ์ให้แมตช์กับอิมพีแดนซ์ที่สูงของท่อนำคลื่นถูกแสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งนอกจากที่จะใช้ตัวแปลงท่อนำคลื่นที่ความสูงลดลงเรื่อยๆแล้วยังสามารถใช้โพสท์ โคแอกเซียลเซกชัน (Coaxial section) และแค็ปเรโซเนเตอร์ (Cap resonator) [13] ช่วยในการแมตช์อิมพีแดนซ์ได้โดยง่ายและเพื่อควบคุมความถี่ที่ออสซิลเลตได้อีกด้วย

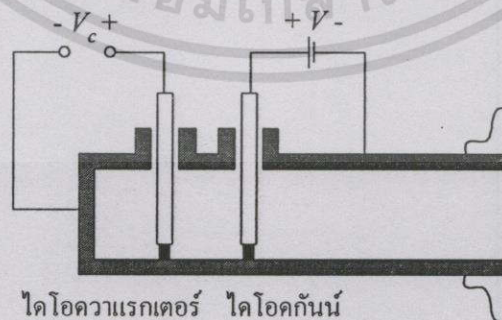


รูปที่ 2.7 คาวิตีท่อนำคลื่นที่มีการใช้ตัวแปลงท่อนำคลื่นที่ความสูงลดลงเรื่อยๆ

ในวงจรทั้งหมดเหล่านี้จะมีตัวเลื่อนลัดวงจร (sliding short) อยู่ที่ปลายของท่อนำคลื่นด้านหนึ่ง ทำให้ท่อนำคลื่นกระทำตัวเป็นวงจรเรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถปรับความถี่เรโซแนนซ์และใช้ในการปรับเพื่อให้ได้กำลังงานเอาต์พุตมากที่สุดได้โดยปรับระยะของตัวเลื่อนลัดวงจร

คาวิตีที่แสดงในรูปที่ 2.6 นั้นเป็น โครงสร้างคาวิตีที่ง่ายในการที่จะทำเป็นวงจรกั้นออสซิลเลเตอร์ที่ปรับค่าความถี่เชิงอิเล็กทรอนิกส์ หรือเรียกว่า ออสซิลเลเตอร์ควบคุมแรงดัน (Voltage controlled oscillator) ซึ่งจะประกอบด้วย กั้นออสซิลเลเตอร์ ส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมค่าความจุไฟฟ้าของวงจร และโหลด โดยส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมค่าความจุไฟฟ้านี้จะใช้ไดโอดวาร์กเตอร์ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก น้ำหนักเบา สามารถตอบสนองต่อความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ดี และสามารถปรับความถี่ได้ในช่วงกว้างพอสมควร

โดยในคาวิตีจะสามารถทำการปรับปรุงให้มี 2 โปสต์ โปสต์อีกหนึ่งสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์กั้น และโปก์ที่อีกอันหนึ่งใช้สำหรับติดตั้งไดโอดวาร์กเตอร์ (Varactor diode) ความจุไฟฟ้าของไดโอดวาร์กเตอร์เป็นฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมได้  $V_c$  ความถี่เรโซแนนซ์ของคาวิตีสามารถปรับค่าได้โดยการปรับ  $V_c$  รูปที่ 2.8 แสดงภาคตัดขวางของคาวิตี

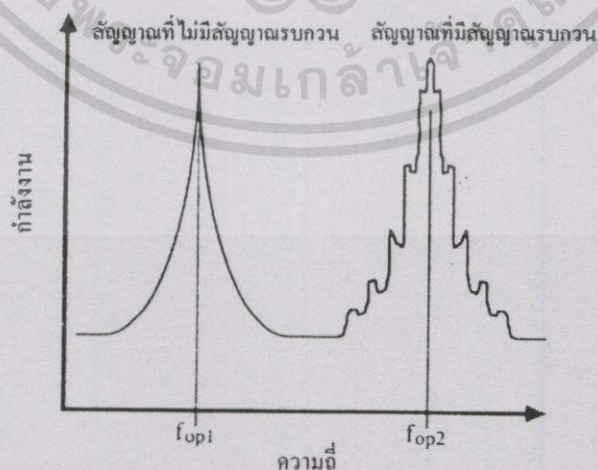


รูปที่ 2.8 คาวิตีของกั้นออสซิลเลเตอร์ที่มีไดโอดวาร์กเตอร์เพื่อการปรับจูนคาวิตี

## 2.4 ออสซิลเลเตอร์

ในหัวข้อต่อไปนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่สำคัญและคุณลักษณะต่างๆของออสซิลเลเตอร์ นอกจากนี้ยังอธิบายถึงคุณสมบัติเชิงสเปกตรัม เช่น ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor) ด้วย มีคุณลักษณะหลายอย่างที่ใช้ในการอธิบายออสซิลเลเตอร์ดังนี้

1. ความมีเสถียรภาพ (Stability) : ความมีเสถียรภาพเป็นความสามารถของออสซิลเลเตอร์ในการที่จะกลับมายังจุดการออสซิลเลตดั้งเดิมหลังจากที่พบกับการรบกวนทางไฟฟ้าหรือทางกลแม้เพียงเล็กน้อย
2. สัญญาณรบกวน (Noise) : รูปที่ 2.9 แสดงออสซิลเลเตอร์เชิงสเปกตรัมที่สามารถแสดงได้บนหน้าจอเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) สัญญาณที่ความถี่  $f_{op1}$  เป็นสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวน ในขณะที่สัญญาณที่  $f_{op2}$  เป็นสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนนี้มักจะวัดในหน่วย dBc/Hz
  - สัญญาณรบกวน AM (AM noise) เป็นการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดในสัญญาณเอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์
  - สัญญาณรบกวน FM (FM noise) เป็นการเปลี่ยนแปลงระยะสั้น (short-term variation) ของความถี่ออสซิลเลเตอร์เอาต์พุต การมอดูเลตทางความถี่แบบบังเอิญ (incidental FM) เป็นการเปลี่ยนแปลงของความถี่พาห้ซึ่งทำให้เกิดขึ้นโดยแหล่งกำเนิดภายนอก
  - สัญญาณรบกวนเฟส (Phase noise) เป็นการมอดูเลตของเฟสของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของออสซิลเลเตอร์ โดยปกติแล้วสัญญาณรบกวนเฟสจะเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเอง



รูปที่ 2.9 สเปกตรัมของออสซิลเลเตอร์

3. ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor : Q) : แบ่งออกเป็น
  - ขณะไม่มีโหลด (unloaded) : อธิบายเฉพาะการสูญเสียของเรโซเนเตอร์  $R_{loss}$  เท่านั้น
  - ภายนอก (External) : อธิบายเฉพาะตัวต้านทานโหลด  $R_{load}$  เท่านั้นและสมมติให้  $R_{loss} = 0$
  - ขณะมีโหลด (loaded) : อธิบายทั้งการสูญเสียของเรโซเนเตอร์และการโหลดภายนอก
4. ความถี่ : แบ่งออกเป็น
  - การกระโดดความถี่ (Frequency Jumping) เป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่ต่อเนื่องของความถี่เอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์อันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นในอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ การกระโดดมีได้หลายสาเหตุ เช่น การเปลี่ยนแปลงในการไบอัสไฟตรงของอุปกรณ์ อุณหภูมิของอุปกรณ์ หรือการเปลี่ยนแปลงในอิมพีแดนซ์ของวงจร
  - การดึงความถี่ (Frequency Pulling) เป็นการเปลี่ยนแปลงในอิมพีแดนซ์ของโหลดซึ่งกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่การออสซิลเลตโดยการทำให้อิมพีแดนซ์ของวงจรเปลี่ยนไป การดึงความถี่นี้สามารถทำให้มีค่าต่ำที่สุดได้โดยการใส่ไอโซเรเตอร์เข้าไประหว่างออสซิลเลเตอร์กับโหลด หรือโดยการใส่เรโซเนเตอร์ที่มีตัวประกอบคุณภาพสูงๆเข้าไปในวงจรออสซิลเลเตอร์
  - การดันความถี่ (Frequency Pushing) เป็นการเปลี่ยนแปลงในความถี่การออสซิลเลตที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงการไบอัสไฟตรง ตัวเลขพุชซิ่ง (pushing figure) (Hz/V) จะสัมพันธ์กับความไวของความถี่เอาต์พุตที่จะเปลี่ยนไปตามแรงดันไฟตรงที่ไบอัสเข้าไป การใช้เร็กกูเลเตอร์ในแหล่งจ่ายไบอัสไฟตรงก็จะสามารถทำให้การดันความถี่นี้ต่ำที่สุดได้ การดันความถี่นี้อาจจะเป็นข้อได้เปรียบในกรณีของออสซิลเลเตอร์ควบคุมแรงดันหรือวีซีโอ
5. สัญญาณปลอมเทียม (Spurious Signals) : คือสัญญาณเอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์ที่ความถี่อื่นที่ไม่ใช่ความถี่พาทที่ต้องการ
6. โปสท์-จูนนิ่ง ดริฟท์ (Post-Tuning Drift : PTD) (Hz/s) : คือการขยับเลื่อนของความถี่และกำลังงานของออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานในสถานะอยู่ตัวอันเนื่องมาจากความร้อนของอุปกรณ์ สารกึ่งตัวนำ ขณะที่อุณหภูมิของตัวอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้น อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ก็จะเปลี่ยนไป ดังนั้นความถี่เอาต์พุต (และกำลังงานเอาต์พุตในบางครั้ง) ก็จะเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน
7. เสถียรภาพเชิงความร้อน (Thermal Stability) : เป็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างกำลังงานเอาต์พุตและความถี่เอาต์พุตเทียบกับอุณหภูมิ เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์เป็น

ฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำให้การเปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆของระดับกำลังงานเอาต์พุตและความถี่เอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์น้อยที่สุด

#### 2.4.1 เงื่อนไขการออสซิลเลต

วงจรออสซิลเลตสัญญาณไซน์โดยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Solid-State Sinusoidal Oscillators) เป็นวงจรเรโซแนนซ์ที่รวมกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแอ็กทีฟซึ่งแปลงพลังงานกระแสไฟตรงไปเป็นกำลังงานความถี่วิทยุ วงจรเรโซแนนซ์หรือเรโซเนเตอร์นั้นมีความสำคัญอย่างมากในวงจรออสซิลเลเตอร์ ที่ความถี่สูง ออสซิลเลเตอร์กำลังงานสูงมักจะใช้เรโซเนเตอร์แบบท่อนำคลื่น (Waveguide resonator) ในสายอากาศรวมแบบแอ็กทีฟนั้น สายอากาศจะทำหน้าที่เป็นวงจรเรโซแนนซ์ได้เช่นเดียวกับที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น (Radiator) ในกรณีของสายอากาศแอ็กทีฟ โหลดก็คือตัวสายอากาศที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่นนั่นเอง สายอากาศแบบนี้จะมีการไบอัสกระแสไฟตรงเพื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าและกระแสที่เหมาะสมให้แก่อุปกรณ์แอ็กทีฟเพื่อผลิตพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการออสซิลเลตจะเกิดขึ้นที่ความถี่ที่ค่ารีแอกแตนซ์รวมของวงจรมีค่าเป็นศูนย์

การเริ่มต้นการออสซิลเลตจะเกิดขึ้นเนื่องจากสัญญาณรบกวน (Noise) หรือการไบอัสกระแส ระดับกำลังงานจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุปกรณ์แอ็กทีฟอยู่ในสภาวะอิ่มตัว อุปกรณ์จะได้รับความสมดุลในสถานะอยู่ตัว (Steady-state) โดยการนำกำลังงานที่ส่งเข้าไปและถูกใช้ไปในวงจรกลับมาใช้ใหม่อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์เป็นฟังก์ชันของกระแสความถี่วิทยุ ดังนั้นความถี่การออสซิลเลตอาจจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในขณะที่อุปกรณ์เข้าสู่สถานะอยู่ตัว ซึ่งความถี่ของออสซิลเลตในอุดมคติจะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อออสซิลเลตทำงานที่สถานะอยู่ตัว ความถี่การออสซิลเลตและแอมพลิจูดจะยังคงไม่เปลี่ยนแปลงที่ภาวะสมดุล สำหรับออสซิลเลเตอร์ที่มีความถี่ออสซิลเลตเสถียรซึ่งอยู่ในสถานะอยู่ตัวนั้น ผลรวมของอิมพีแดนซ์ของวงจรและอุปกรณ์แอ็กทีฟต้องเท่ากับศูนย์ที่จุดปฏิบัติการของอุปกรณ์ดังแสดง

$$Z_D(V_{dc}, I_{dc}, \omega_n, I_{RF}, T) + Z_C(\omega_n) = 0 \quad (2.12)$$

โดยที่  $Z_D(V_{dc}, I_{dc}, \omega_n, I_{RF}, T)$  คือ อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์แอ็กทีฟ และ  $Z_C(\omega_n)$  คือ อิมพีแดนซ์ของวงจร

ในการศึกษาออสซิลเลเตอร์นั้น Kurokawa ได้ใช้ความต้านทานลบ (Negative resistance) ในโครงข่ายสองเทอร์มินัล (Two-terminal network) เพื่ออธิบายคุณลักษณะต่างๆของออสซิลเลเตอร์ [14] ในที่นี้จะทำการอธิบายเงื่อนไขการออสซิลเลตโดยสรุป ส่วนในการหาที่มาของการออสซิลเลตนั้นสามารถทำการศึกษาเพิ่มเติมได้จาก [1]

ในอุปกรณ์แอ็กทีฟแบบสองเทอร์มินัล (Two-terminal active device) สามารถแสดงในเอกพจน์ของอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ในช่วงความถี่ของการปฏิบัติการ อิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ของอุปกรณ์แอ็กทีฟจะมีส่วนจริงที่มีค่าเป็นลบในช่วงความถี่ที่สนใจ

อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่ความถี่พื้นฐานสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$Z_D = -R_D + jX_D \quad \text{โดยที่ } R_D > 0 \quad (2.13)$$

อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์แอ็กทีฟเป็นฟังก์ชันของความถี่ ( $f$ ) จุดปฏิบัติการไฟตรง ( $V_{dc}$ ,  $I_{dc}$ ) กระแสความถี่วิทยุ ( $I_{RF}$ ) และอุณหภูมิ ( $T$ ) ดังนั้น

$$Z_D = Z_D(f, V_{dc}, I_{dc}, I_{RF}, T) \quad (2.14)$$

สามารถเขียนแอดมิตแตนซ์ของอุปกรณ์ได้ในลักษณะเดียวกัน

วงจรออสซิลเลเตอร์โดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 2.10 โดยที่  $Z_D$  เป็นอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์แอ็กทีฟ และ  $Z_C$  เป็นอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มองเข้าไปที่เทอร์มินัลของอุปกรณ์ (driving point) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

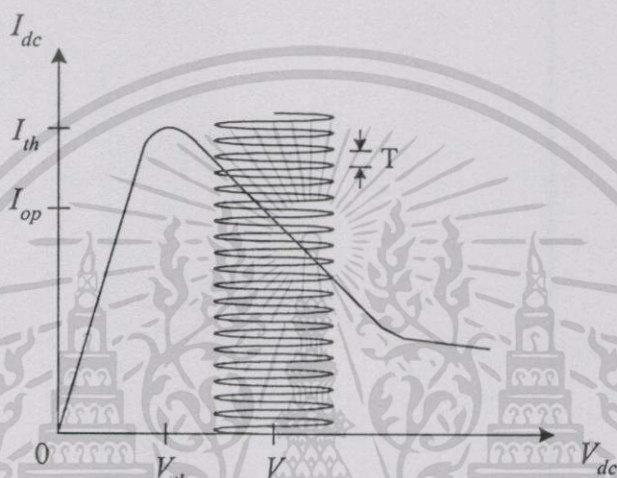
$$Z_C(f) = R_C(f) + jX_C(f) \quad (2.15)$$



รูปที่ 2.10 วงจรออสซิลเลเตอร์ทั่วไป

ความถี่ที่ออสซิลเลตถูกกำหนดโดยความถี่ที่เรโซแนนซ์ของวงจรทั้งหมด เมื่ออยู่ในภาวะเรโซแนนซ์ ค่ารีแอกแตนซ์ (หรือแอดมิตแตนซ์) ทั้งหมดจะเท่ากับศูนย์ เงื่อนไขอีกอย่างหนึ่งของการออสซิลเลตคือ จำเป็นต้องมีค่าความต้านทาน (หรือ ค่าความนำ) ของวงจรเป็นลบ ค่าความต้านทานลบเป็นคุณลักษณะสามัญของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแอ็กทีฟแบบสองเทอร์มินัล กราฟคุณลักษณะ I-V โดยทั่วไปของอุปกรณ์กัณฑ์ที่มีความต้านทานลบแสดงดังรูปที่ 2.11 อุปกรณ์นี้จะ

ประพจน์ตัวเป็นตัวต้านทานธรรมดาๆ จนกระทั่งแรงดันกระแสตรง ( $V_{dc}$ ) เพิ่มขึ้นจนถึงระดับแรงดันจุดเริ่มเปลี่ยน ( $V_{th}$ ) เมื่อแรงดันกระแสตรงสูงกว่าแรงดันจุดเริ่มเปลี่ยน อุปกรณ์กั้นนี้จะประพจน์ตัวเป็นความต้านทานลบจนกระทั่งถึงจุดที่จำกัด เช่น การสูญเสียกำลังงาน จะทำให้อุปกรณ์กลับมาอยู่ในสถานะความต้านทานปกติ โดยทั่วไปนอกจากความต้านทานลบแล้ว อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะมีค่ารีแอคแตนซ์  $X_d$  ที่ไม่เป็นศูนย์ด้วย ดังนั้นรีแอคแตนซ์ก็จะเป็นฟังก์ชันของเงื่อนไขการไบอัสด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.11 กราฟคุณลักษณะ I-V ของไดโอดกั้น

เงื่อนไขการออสซิลเลต 2 เงื่อนไขสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\text{Im}(Z_D) = -\text{Im}(Z_C) \tag{2.16}$$

$$|\text{Re}(Z_D)| \geq \text{Re}(Z_C) \tag{2.17}$$

Im และ Re หมายถึงส่วนจินตภาพและส่วนจริง ตามลำดับ ดังนั้นที่ความถี่ที่ออสซิลเลต  $f_0$

$$R_C(f_0) \leq R_D(f_0, I_0, I_{RF}, T) \tag{2.18}$$

$$X_C(f_0) = -X_D(f_0, I_0, I_{RF}, T) \tag{2.19}$$

ดังนั้นสำหรับออสซิลเลเตอร์ในสถานะอยู่ตัวและความถี่ออสซิลเลตเสริที่จะทำงานได้นั้น ขนาด (magnitude) ของความต้านทานที่เป็นลบของอุปกรณ์เอ็กทีฟจะต้องเท่ากับความต้านทาน

ของวงจร และความถี่การออสซิลเลตจะเกิดขึ้นที่ค่ารีแอกแตนซ์เป็นศูนย์ เงื่อนไขสำหรับการออสซิลเลตเหล่านี้ก็ได้ทำการสรุปไว้ดังสมการข้างต้น

สมการ (2.19) สามารถใช้คำนวณความถี่ที่ออสซิลเลตได้ ส่วนเงื่อนไขในสมการ (2.18) จะควบคุมกำลังงานเอาต์พุต โดยทั่วไปอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ไม่ได้เป็นฟังก์ชันของความถี่เท่านั้นแต่ยังขึ้นอยู่กับกระแสไฟตรงที่ไบอัส กระแสความถี่วิทยุ และอุณหภูมิด้วย ดังนั้นสมการ (2.18) และ (2.19) จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์เหล่านี้ด้วย

เราสามารถเปลี่ยนความถี่ที่ออสซิลเลตได้โดยเปลี่ยนกระแสไบอัสไฟตรง ( $I_{dc}$ ) ซึ่งเรียกว่าการปรับโดยการไบอัส (bias tuning) อีกวิธีหนึ่งก็คือ สามารถเปลี่ยนความถี่โดยการเลื่อนตัวลัดวงจร (sliding short) ซึ่งก็จะเป็นการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ของวงจร ( $Z_C$ ) วิธีนี้เรียกว่าการปรับเชิงกล (mechanical tuning)

แม้ว่าการปรับไบอัสจะสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ออสซิลเลตของกันน้ออสซิลเลเตอร์ได้ แต่กำลังงานเอาต์พุตก็ไม่คงที่และมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างตลอดการไบอัส ดังนั้นจึงมีการใช้วงจรที่ปรับจูนด้วยวาแรกเตอร์เพื่อแก้ปัญหานี้ ออสซิลเลเตอร์ที่ใช้วาแรกเตอร์ปรับจูนจะให้กำลังงานเอาต์พุตที่ค่อนข้างคงที่ ช่วงการปรับจูนความถี่กว้าง และมีการตอบสนองเร็ว [15] ซึ่งวาแรกเตอร์นี้สามารถเปลี่ยนความถี่ได้โดยการควบคุมแรงดัน ออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน (Voltage-Controlled Oscillators: VCOs) สามารถใช้สำหรับแหล่งกำเนิดเอฟเอ็ม ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ปรับได้ของเครื่องรับ และการประยุกต์ใช้งานอื่นๆ

กันน้ออสซิลเลเตอร์ที่ปรับด้วยวาแรกเตอร์นี้ได้มีการสร้างในท่อนำคลื่น สายส่งแกนร่วม และไมโครสตริป ซึ่งในท่อนำคลื่นจะให้ตัวประกอบคุณภาพที่สูงแต่มีช่วงการปรับจูนที่ต่ำกว่าในไมโครสตริป

#### 2.4.2 ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor)

ตัวประกอบคุณภาพนั้นเป็นค่าที่นิยามขึ้นเพื่อแสดงคุณสมบัติของวงจรเรโซแนนซ์ในเชิงของชนิดของการสูญเสียที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นภายในวงจรออสซิลเลต (oscillating circuit) ตัวประกอบคุณภาพของโครงข่ายเชิงเส้นจะเป็นสัดส่วนกันกับอัตราส่วนของพลังงานที่เก็บไว้ต่อรอบกับพลังงานที่กระจายหรือสูญเสียไปต่อรอบ ซึ่งค่าตัวประกอบคุณภาพนี้จะสัมพันธ์กับสัญญาณที่เป็นสัญญาณแท้ๆที่มีความเสถียรและมีค่าการสูญเสียต่ำ โดยทั่วไปแล้วค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรมันจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้งาน โครงข่ายโหลด (load network) และความชันระหว่างค่ารีแอกแตนซ์ทั้งหมดกับความถี่ ดังนี้

$$Q = 2\pi f_0 \frac{\left\{ \text{พลังงานเฉลี่ยที่สะสมอยู่ในระบบ} \right\}}{\left\{ \text{พลังงานที่สูญเสียต่อวินาทีในระบบ} \right\}} = 2\pi f_0 \frac{\left\{ \frac{1}{4} (\partial X_0 / \partial \omega) I_0^2 \right\}}{\left\{ \frac{1}{2} R_{loss} I_0^2 \right\}} = \frac{\omega_0}{2R_{loss}} \frac{\partial X_0}{\partial \omega} \quad (2.20)$$

โดยที่  $X_0$  คือค่ารีแอกแตนซ์ของวงจรทั้งหมด และ  $R_{loss}$  คือ ความต้านทานการสูญเสีย

ตัวประกอบคุณภาพแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ ตัวประกอบคุณภาพขณะไม่มีโหลด ( $Q_u$ ) ตัวประกอบคุณภาพภายนอก ( $Q_{ext}$ ) และตัวประกอบคุณภาพขณะมีโหลด ( $Q_l$ ) ตัวประกอบคุณภาพขณะมีโหลดนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบคุณภาพภายนอกและตัวประกอบคุณภาพขณะไม่มีโหลด ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$\frac{1}{Q_l} = \frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_{ext}} \quad (2.21)$$

โดยที่ตัวประกอบคุณภาพขณะไม่มีโหลด และตัวประกอบคุณภาพภายนอกแสดงได้ดังสมการ

$$Q_u = \frac{\omega_0}{2R_{loss}} \frac{\partial(X_d(A, \omega) + X_c(\omega))}{\partial\omega} \quad (2.22)$$

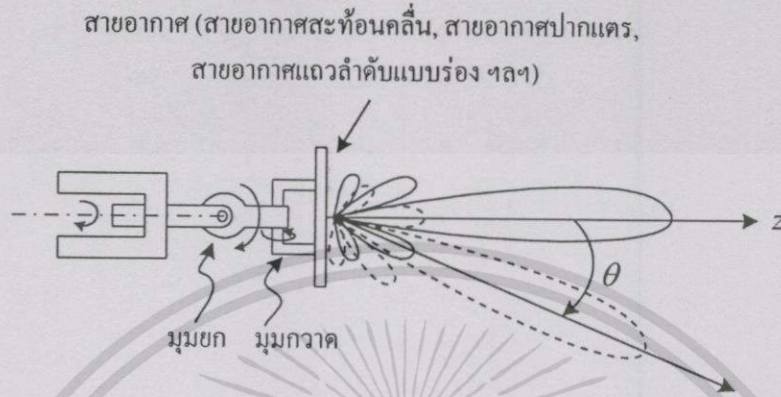
$$Q_{ext} = \frac{\omega_0}{2R_{load}} \frac{\partial(X_d(A, \omega) + X_c(\omega))}{\partial\omega} \quad (2.23)$$

ค่าตัวประกอบคุณภาพจะเปลี่ยนแปลงตามจุดปฏิบัติการไฟตรง (dc operating point) เนื่องจากรีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ ( $X_d$ ) เป็นฟังก์ชันของกระแสของออสซิลเลเตอร์ โดยปกติแล้วความต้านทานโหลด ( $R_{load}$ ) มักจะกำหนดไว้ที่ 50 โอห์มซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับเครื่องมือทดสอบคลื่นวิทยุ และ  $R_{loss}$  เป็นความต้านทานการสูญเสียซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานที่กระจายหรือสูญเสียไปในวงจร สำหรับตัวประกอบคุณภาพที่มีค่าสูงนั้นจะต้องมีค่าความต้านทานการสูญเสียที่ต่ำ และค่า  $\partial(X_d(A, \omega) + X_c(\omega))/\partial\omega$  ที่สูงในบริเวณความถี่ที่ทำงาน

## 2.5 การปรับลำคลื่นของสายอากาศ

ในระบบการสื่อสารไมโครเวฟจำนวนมากต้องการกำลังงานเอาต์พุตสูงและสายอากาศขนาดใหญ่ที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีค่าการชี้กำลังสูง ในการประยุกต์ใช้งาน เช่น งานทางด้านเรดาร์ การเชื่อมโยงการสื่อสาร สายอากาศอาจจะทำหน้าที่เป็นเครื่องส่ง เครื่องรับ หรือเป็นทั้งเครื่องส่งและเครื่องรับได้ ซึ่งสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อให้ลำคลื่นรูปดินสอด (pencil beam) ก็คือ สายอากาศสะท้อนคลื่น (reflector antenna) ซึ่งลำคลื่นแบบนี้มักจะต้องการให้ชี้ไปในทิศทางต่างๆหลายทิศทาง โดยวิธีที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นนั้นมีอยู่ 2 วิธีหลักๆ คือ

1. การปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นเชิงกล
2. การปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นเชิงอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.12 การปรับทิศทางของลำคลื่นเชิงกล

รูปที่ 2.12 แสดงถึงโครงสร้างทางกลที่ใช้ในการปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางต่างๆ ซึ่งเป็นวิธีในการปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นเชิงกล วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีราคาค่อนข้างไม่แพง และประสิทธิภาพของสายอากาศไม่เสียไปตลอดการกวาดลำคลื่น แต่วิธีการนี้มีข้อเสียตรงที่มีขนาดใหญ่ เทอะทะ และมีการตอบสนองในการปรับทิศทางของลำคลื่นช้า

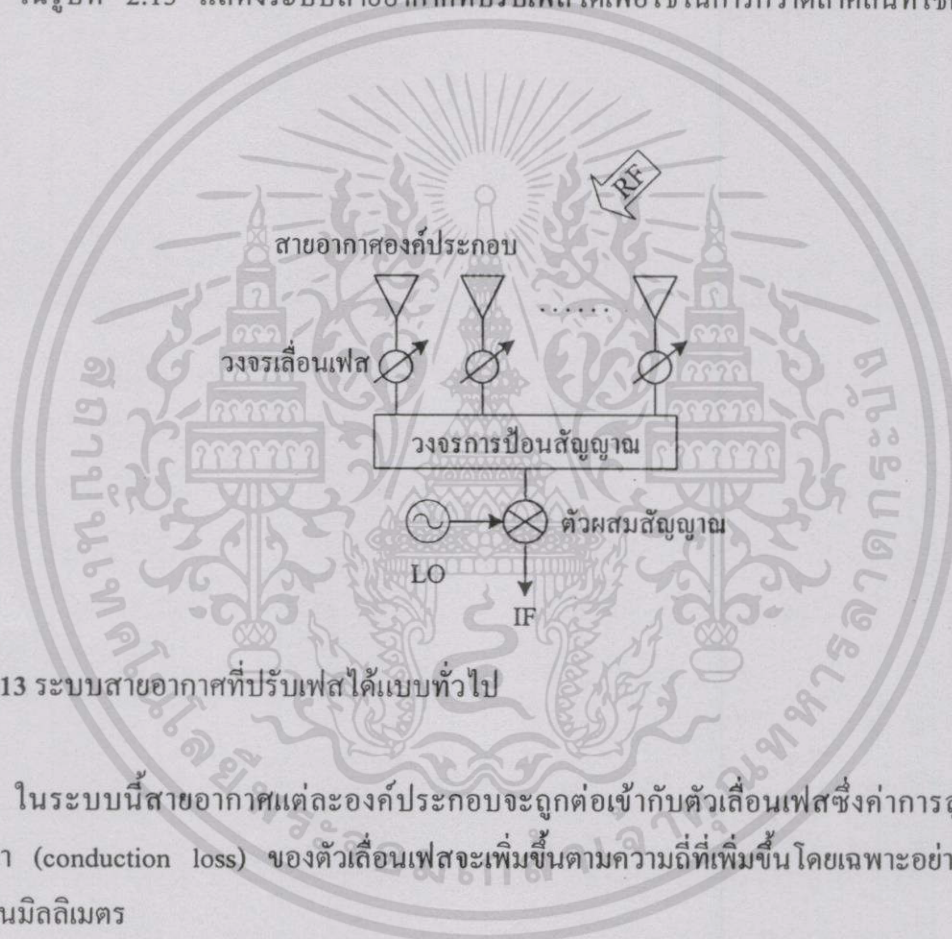
ต่อมาจึงได้มีการนำสายอากาศแบบแถวลำดับมาใช้ ซึ่งจะมีขนาดที่ไม่ใหญ่เทอะทะเมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศสะท้อนคลื่น แต่สายอากาศแบบแถวลำดับนี้มักจะจำเป็นต้องใช้ระบบการป้อนสัญญาณที่ซับซ้อน แม้ว่าระบบการป้อนสัญญาณนี้จะเพิ่มความซับซ้อน ราคา และการสูญเสียในอะพอร์เจอร์รับของแถวลำดับ แต่มันก็สามารถรวมอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นเชิงอิเล็กทรอนิกส์ได้

แม้ว่าวิธีการปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นเชิงอิเล็กทรอนิกส์นี้จะเพิ่มความยุ่งยากและราคาแพง แต่วิธีการนี้ก็สามารถจัดลำดับของขนาด (magnitude) ของลำคลื่นได้เร็วกว่าวิธีเชิงกล วิธีการเชิงอิเล็กทรอนิกส์นี้สามารถทำได้โดยการใช้การกวาดความถี่ (frequency scanning) การสวิตช์ลำคลื่น (beam switching) การประวิงเวลา (time delay) หรือ การประวิงเฟส (phase delay) เนื่องจากมีความซับซ้อนมากขึ้นจึงทำให้สูญเสียอัตราขยายและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแผ่ลงที่มุมกวาดที่กว้าง แต่ในการประยุกต์ใช้งานหลายๆแบบ (เช่น ระบบเรดาร์ทางทหาร) ความว่องไวและความเร็วในการกวาดลำคลื่นเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ดังนั้นการจะเลือกใช้วิธีการปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นแบบใดก็ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานด้วย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกการปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นโดยใช้วิธีการเชิงอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้เทคนิคของการอินเจกชันล็อกกิ้ง ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

การปฏิบัติการที่เหมาะสมของสายอากาศแถวลำดับที่ปรับค่าคลื่นได้นั้นจำเป็นที่จะต้องกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของพลังงานไมโครเวฟของสายอากาศองค์ประกอบแต่ละตัว ถ้าต้องการให้ลำคลื่นปรับเปลี่ยนทิศทางไป เฟสของสายอากาศแต่ละตัวจะต้องถูกปรับด้วยวิธีเชิงอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีปัญหาที่สำคัญ 2 ประการที่เป็นอุปสรรค คือ

1. แหล่งกำเนิดกำลังงานสารกึ่งตัวนำจะให้กำลังงานเอาต์พุตที่ค่อนข้างต่ำ จึงทำให้ต้องใช้วงจรรวมกำลังงานที่ยุ่งยากซับซ้อน
2. วงจรเลื่อนเฟส (phase-shifting circuit) โดยทั่วไปจะให้การสูญเสียที่สูง

ทั่วไป



รูปที่ 2.13 ระบบสายอากาศที่ปรับเฟสได้แบบทั่วไป

ในระบบนี้สายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะถูกต่อเข้ากับตัวเลื่อนเฟสซึ่งค่าการสูญเสียความนำ (conduction loss) ของตัวเลื่อนเฟสจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านคลื่นมิลลิเมตร

สายนำสัญญาณระหว่างสายอากาศกับตัวผสมสัญญาณ (mixer) เป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับระบบในภาครับที่มีมาแต่ดั้งเดิม และสายนำสัญญาณเหล่านี้ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียจำนวนมากเมื่อความถี่สูงขึ้น นี่ก็เป็นปัญหาที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการออกแบบเพื่อให้ได้ค่าการสูญเสียต่ำในระบบความถี่สูง ซึ่งในทางอุดมคติสายนำสัญญาณควรจะถูกนำออกไปจากระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง ซึ่งเป็นสายอากาศแถวลำดับที่สายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีอุปกรณ์แอ็กทีฟคือ ไดโอดกันน์ (Gunn diode) อยู่ภายใน ไดโอดกันน์สามารถทำหน้าที่เป็นทั้งออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องและตัวผสมสัญญาณได้ภายในตัวเอง ดังนั้นจึงไม่ต้องมีสายนำสัญญาณระหว่างสายอากาศกับตัว

ผสมสัญญาณทำให้ไม่เกิดการสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ และสายอากาศนี้ใช้เทคนิคการอินเจกชันล็อกกิ้งในการกวาดลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเลื่อนเฟส ดังนั้นจึงสามารถแก้ปัญหาการสูญเสียและความผิดพลาดที่เกิดจากตัวเลื่อนเฟสได้

### 2.5.1 เทคนิคอินเจกชันล็อกกิ้ง

การทำงานที่ซึ่งโครน์สกันระหว่างสายอากาศองค์ประกอบแบบแถวลำดับกระทำได้โดยการใช้เทคนิคอินเจกชันล็อกกิ้ง และเทคนิคนี้สามารถจัดการควบคุมการแจกแจงเฟสได้โดยไม่ต้องใช้วงจรเลื่อนเฟส ซึ่งทำให้ได้ระบบการกวาดลำคลื่นที่ราคาต่ำ เทคนิคนี้มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าสายอากาศแถวลำดับแบบปรับเฟส (phased array antenna) ในสมัยก่อนมาก ในการใช้งานนั้นจะใช้เทคนิคนี้ในการปรับลำคลื่นของสายอากาศโดยอาศัยการปรับเฟสของสายอากาศซึ่งทำได้โดยการปรับความถี่ของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แต่ละองค์ประกอบ

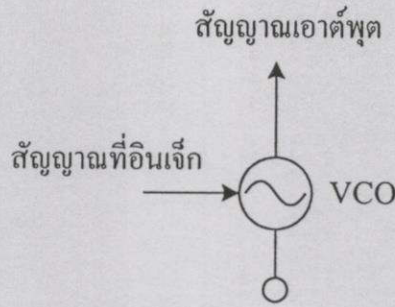
ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม สัญญาณความถี่วิทยุจากภายนอกที่ป้อนเข้าไปในอินพุตของออสซิลเลเตอร์ความถี่เสรี (free-running oscillator) จะทำให้ความถี่ของออสซิลเลเตอร์เลื่อนหรือล็อก (lock) เข้ากับความถี่ของสัญญาณที่ป้อนเข้าไป ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า อินเจกชันล็อกกิ้ง และเมื่อสัญญาณจากภายนอกถูกนำออกไป ออสซิลเลเตอร์ก็จะกลับมาที่โหมดความถี่อิสระอีกครั้ง (free-running mode)

ทฤษฎีการอินเจกชันล็อกกิ้งนี้ Van der Pol ได้ทำการคิดค้นเป็นคนแรกในช่วงทศวรรษที่ 1920 ต่อมาในปี 1946 Adler [16] ซึ่งเป็นผู้หนึ่งที่ศึกษาปรากฏการณ์ล็อกกิ้งของออสซิลเลเตอร์ได้ออสซิลเลเตอร์ได้พัฒนาสูตรสำหรับช่วงความถี่ที่ออสซิลเลเตอร์ยังคงล็อกกับสัญญาณที่อินเจกต์ด้วยเฟสเดียวกัน และในปี 1973 Kurokawa [17] ก็ได้พัฒนาทฤษฎีสำหรับออสซิลเลเตอร์ความถี่ด้านทานลบที่มีการอินเจกชันล็อก (negative resistance injection-locked oscillator) ซึ่ง Kurokawa ได้ศึกษาเกี่ยวข้องกับแง่ต่างๆของการอินเจกชันล็อกกิ้งของออสซิลเลเตอร์หลายตัวซึ่งใช้อุปกรณ์แอ็กทิฟแบบสองเทอร์มินัลหนึ่งตัวหรือมากกว่านั้น และได้อธิบายเชิงคณิตศาสตร์ของปรากฏการณ์การล็อกกิ้งที่สังเกตได้จากการทดลองอีกด้วย

ทฤษฎีการอินเจกชันล็อกกิ้งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการของ Adler ซึ่งสมการของ Adler นี้ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการอินเจกชันล็อกกิ้ง

#### 2.5.1.1 สมการของ Adler (Adler's Equation)

ในทางปฏิบัติ การใช้ออสซิลเลเตอร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อการควบคุมเฟสนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของปรากฏการณ์การอินเจกชันล็อกกิ้งซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการของ Adler [16] โดยสมการของ Adler เป็นการอธิบายการอินเจกชันล็อกกิ้งที่เกิดกับออสซิลเลเตอร์เพียงตัวเดียว แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ออสซิลเลเตอร์ที่มีการอินเจกชันล็อก

เฟสเอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์ที่มีสัญญาณอินเจกชันเข้ามาแสดงได้ด้วยสมการ

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q} \frac{A_{inj}}{A} \sin(\theta_{inj} - \theta) \quad (2.24)$$

สมการ (2.24) คือ สมการของ Adler ที่อธิบายเกี่ยวกับเฟสที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาของออสซิลเลเตอร์เมื่อเกิดการอินเจกชันล็อก โดยที่  $\omega_0$  คือ ความถี่เสรีของออสซิลเลเตอร์  $Q$  คือ ตัวประกอบคุณภาพของวงจรเรโซแนนซ์ของออสซิลเลเตอร์  $A$  และ  $\theta$  คือแอมพลิจูดและเฟสของการออสซิลเลต  $A_{inj}$  และ  $\theta_{inj}$  คือแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณอินเจกชัน สมการข้างต้นนี้เป็นหัวใจสำคัญของการอินเจกชันล็อกกึ่ง และเป็นหลักให้กับระบบออสซิลเลเตอร์แบบหลายตัว [18] ถ้าผลเฉลยอยู่ในสถานะอยู่ตัวซึ่งจะพบว่า  $d\theta/dt = 0$  นั้นหมายความว่าออสซิลเลเตอร์ถูกทำให้ซิงโครไนซ์กับสัญญาณอินเจกชันเข้ามา เมื่อออสซิลเลเตอร์ล็อกเข้ากับสัญญาณอินเจกชันในสถานะอยู่ตัวนั้นคือ  $d\theta/dt = \omega_{inj}$  และสมการ (2.24) จะกลายเป็น

$$\omega_{inj} - \omega_0 = \Delta\omega_{lock} \sin \Delta\theta$$

โดยที่

$$\Delta\omega_{lock} = \frac{\omega_0}{2Q} \frac{A_{inj}}{A} \quad (2.25)$$

$\Delta\omega_{lock}$  คือล็อกกึ่งแบนด์วิดท์ของออสซิลเลเตอร์ และ  $\Delta\theta$  คือความต่างเฟสในสถานะอยู่ตัวระหว่างออสซิลเลเตอร์กับสัญญาณอินเจกชัน การแก้สมการหาความต่างเฟสในสถานะอยู่ตัวระหว่างออสซิลเลเตอร์กับสัญญาณอินเจกชันเข้ามา ( $\Delta\theta = \theta_{inj} - \theta$ ) แสดงได้ดังนี้

$$\Delta\theta = \sin^{-1} \left( \frac{\omega_{inj} - \omega_0}{\Delta\omega_{lock}} \right) \quad (2.26)$$

ซึ่งเป็นการระบุว่าผลของการอินเจกชันล็อกจะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อความถี่ของสัญญาณที่อินเจกชันอยู่ในช่วงการล็อกกิ้ง (locking range) ของออสซิลเลเตอร์  $\omega_0 \pm \Delta\omega_{lock}$  เท่านั้น (สังเกตว่า  $\Delta\omega_{lock}$  มักจะถูกอ้างอิงว่าเป็นช่วงการล็อกกิ้ง แต่ในทางกายภาพแล้วจะหมายถึงครึ่งหนึ่งของช่วงการล็อกกิ้ง) ขณะที่ความถี่สัญญาณที่อินเจกชันอยู่ในช่วงการล็อกกิ้ง ความต่างเฟสระหว่างออสซิลเลเตอร์และสัญญาณที่อินเจกชันจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง  $\pm\pi/2$  ตามสมการ (2.26) การเลื่อนเฟสนี้เป็นพฤติกรรมที่มีประโยชน์สำหรับการกวาดลาคัลลันสำหรับแวลวลำดับแบบปรับเฟสได้โดยการใช้การอินเจกชันล็อกกิ้ง สังเกตว่าช่วงการล็อกกิ้งเป็นสัดส่วนกับความเข้มของสัญญาณที่อินเจกชัน และเป็นส่วนกลับกับค่าตัวประกอบคุณภาพ ระบบในทางปฏิบัติต้องการช่วงการล็อกกิ้งที่กว้าง ดังนั้นออสซิลเลเตอร์ที่ค่าตัวประกอบคุณภาพต่ำและมีความเข้มของสัญญาณที่อินเจกชันมากจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ

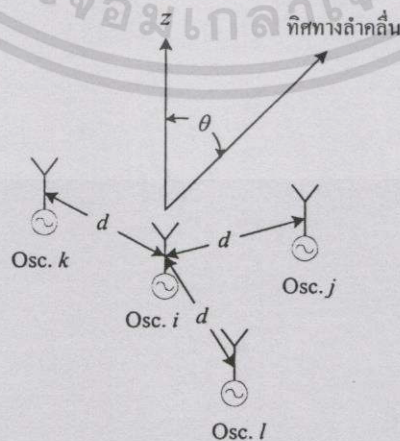
จากที่อธิบายมาข้างต้นเป็นการอธิบายโดยการใช้แบบจำลองออสซิลเลเตอร์เพียงตัวเดียวซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับระบบที่มีออสซิลเลเตอร์หลายตัว

### 2.5.1.2 ออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ

ระบบที่มีออสซิลเลเตอร์หลายตัวแสดงดังรูปที่ 2.15 โดยออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวจะมีการเชื่อมต่อกันกับองค์ประกอบของแวลวลำดับข้างเคียงถูกนำเสนอครั้งแรกโดย K. D. Stephan [3] ซึ่งการกระทำร่วมระหว่างกันของออสซิลเลเตอร์  $i$  และ  $j$  อธิบายได้ด้วยสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม (Coupling coefficient) :  $K_{ij}$  ซึ่งมีค่าขนาดและเฟสดังนี้

$$K_{ij} \equiv \varepsilon_{ij} e^{-j\Phi_{ij}}$$

โดยที่  $\varepsilon_{ij}$  และ  $\Phi_{ij}$  คือ ขนาด และเฟส ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 ระบบออสซิลเลเตอร์หลายตัว

จากทฤษฎีภาวะย้อนกลับ (reciprocity) ในแถวลำดับส่วนใหญ่จะทำให้ได้  $K_{ij} = K_{ji}$  พารามิเตอร์การเชื่อมร่วมนี้ไม่มีหน่วยและถูกนิยามในระบบ  $N$  ออสซิลเลเตอร์ ดังนั้นสัญญาณที่อินเจ็ทที่ออสซิลเลเตอร์ที่  $i$  สามารถเขียนได้ดังนี้

$$V_{inj} = \sum_{j=1}^N K_{ij} V_j \quad (2.27)$$

โดยที่  $V_i$  คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตเชิงซ้อนของออสซิลเลเตอร์ตัวที่  $i$  สมการแอมพลิจูดและเฟสของออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาแสดงดังสมการ [1]

$$\frac{dA_i}{dt} = \frac{\mu\omega_i}{2Q} (\alpha_i^2 - A_i^2) A_i + \frac{\omega_i}{2Q} \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} A_j \cos(\Phi_{ij} + \theta_i - \theta_j) \quad (2.28ก)$$

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i - \frac{\omega_i}{2Q} \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} \frac{A_j}{A_i} \sin(\Phi_{ij} + \theta_i - \theta_j) \quad (2.28ข)$$

$i = 1, 2, \dots, N$

เมื่อ  $\varepsilon_{ij} = 0$  แสดงว่าออสซิลเลเตอร์ไม่มีการเชื่อมร่วมและสมการ (2.28) จะลดเหลือเป็นเซตของออสซิลเลเตอร์ไขว้ขอยด์ที่ไม่ขึ้นต่อกันที่มีแอมพลิจูด  $A_i = \alpha_i$  และความถี่  $\omega_i$  อย่างไรก็ตามเมื่อ  $\varepsilon_{ij} \ll 1$  แอมพลิจูดของออสซิลเลเตอร์จะยังคงใกล้เคียงค่าแอมพลิจูดอิสระเดิมอยู่ ( $A_i \approx \alpha_i$ ) และเฟสที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาจะมีความสำคัญมากกว่าแอมพลิจูดที่เป็นฟังก์ชันกับเวลา ดังนั้นจึงใช้เพียงเฟสที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาในการอธิบาย

ถ้าความถี่อิสระเหล่านี้อยู่ในล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ (locking bandwidth) ของออสซิลเลเตอร์ และระดับการเชื่อมร่วมน้อยกว่าในอัตราขยายล็อกกิ้ง (locking gain) ก็จะทำให้ความถี่ของออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวอื่นล็อกกันเป็นความถี่เดียว ( $d\theta_i/dt = \omega$ ) นี่เป็นหลักสำคัญสำหรับการรวมกำลังงานเชิงอวกาศโดยที่ความถี่ที่รวมกันแสดงได้ดังสมการ

$$\omega = \omega_i \left[ 1 - \frac{1}{2Q} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \varepsilon_{ij} \frac{A_j}{A_i} \sin(\Phi_{ij} + \theta_i - \theta_j) \right], \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.29)$$

สมการ (2.29) เป็นกลุ่มของสมการ  $N$  สมการและค่าที่ไม่รู้  $N$  ค่า ซึ่งเป็นสมการที่ใช้หาความถี่ซิงค์โครไนซ์ในสถานะอยู่ตัวและการแจกแจงเฟส

## 2.6 สรุป

ในบทนี้อธิบายทฤษฎีและหลักการที่ใช้กับสายอากาศซิลิเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง ซึ่งประกอบด้วย โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า สายอากาศเอ็กทิฟไดโอดกันน์ หลักการของออสซิลเลเตอร์ และการปรับลำคลื่นของสายอากาศ

การวิเคราะห์สายอากาศกระทำโดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่บนพื้นฐานของวิธีการโมเมนต์ ในการจำลองสายอากาศเพื่อทำการวิเคราะห์นั้นเลือกใช้การจำลองแบบเส้นลวดตัวนำ ซึ่งต้องจำลองสายอากาศที่ต้องการวิเคราะห์ตามสภาพจริง โดยคุณลักษณะที่ต้องการทำการวิเคราะห์คือ อิมพีแดนซ์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จะถูกทำการวิเคราะห์โดยวิธีการโมเมนต์

นิยามของสายอากาศเอ็กทิฟ และอุปกรณ์เอ็กทิฟที่ใช้ในสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองคือ ไดโอดกันน์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องและตัวผสมสัญญาณภายในตัวเองได้ถูกอธิบายไว้ในบทนี้ โดยได้อธิบายเกี่ยวกับหลักการทำงานของไดโอดกันน์ คุณลักษณะต่างๆของออสซิลเลเตอร์ที่อาจจะพบได้ในการทดลองของสายอากาศตัวนี้ และเงื่อนไขการออสซิลเลตที่จะทำให้สายอากาศนี้ทำงานที่ความถี่ที่ต้องการได้

สุดท้ายได้อธิบายถึงหลักการในการปรับลำคลื่นของสายอากาศให้ไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการอินเจกชันล็อกกิ้งในการปรับลำคลื่นของสายอากาศ

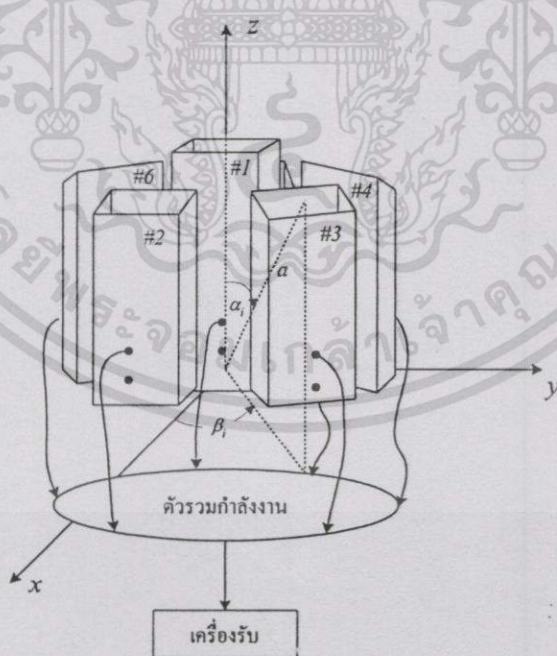
### บทที่ 3

## สายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลม

### ที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง

บทที่ 3 นี้แนะนำสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง เป็นการนำเสนอแนวความคิดในการนำท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉาก (rectangular waveguide) มาทำเป็นสายอากาศองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับทรงกลม โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วย โครงสร้างของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง ซึ่งมีสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากเป็นสายอากาศองค์ประกอบ การจำลองสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้วิธีการจำลองแบบตาข่ายเส้นลวดตัวนำ และ วิธีการ ในการปรับค่าคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะได้แนะนำในรายละเอียดต่อไป

#### 3.1 โครงสร้างของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง

โครงสร้างของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยสายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมมุมฉากจำนวน 6 องค์ประกอบ มาประกอบรวมกันเป็นสายอากาศแถวลำดับทรงกลม (spherical array antenna) จำนวนและตำแหน่งการจัดวางของสายอากาศองค์ประกอบของแถวลำดับบนผิวทรงกลมนั้นจะต้องเหมาะสมเพื่อรักษาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่คงที่เมื่อมีการกวาดลำคลื่นไปในทิศทางใดๆ D. L. Sengupta และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับจำนวนและตำแหน่งการจัดวางของสายอากาศองค์ประกอบบนผิวทรงกลมเพื่อจุดประสงค์ในการกวาดลำคลื่น โดยใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติที่สมมาตรของโครงสร้างแบบไอโคซาฮีดรอน (icosahedron geometry) ซึ่งเป็นรูปทรงสามมิติที่มี 20 ด้านและจุดยอด (vertices) 12 จุด แต่ละด้านเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า สายอากาศองค์ประกอบจะวางที่ตำแหน่งที่มีระยะห่างที่เท่ากันบนพื้นผิวของไอโคซาฮีดรอน ทรงกลมก็จะเขียนล้อมรอบไอโคซาฮีดรอนอยู่ และองค์ประกอบทั้งหมดก็จะถูกนำมาซึ่งพื้นผิวของทรงกลม ซึ่ง D. L. Sengupta และคณะได้ทำการศึกษาและสรุปได้ดังตารางที่ 3.1

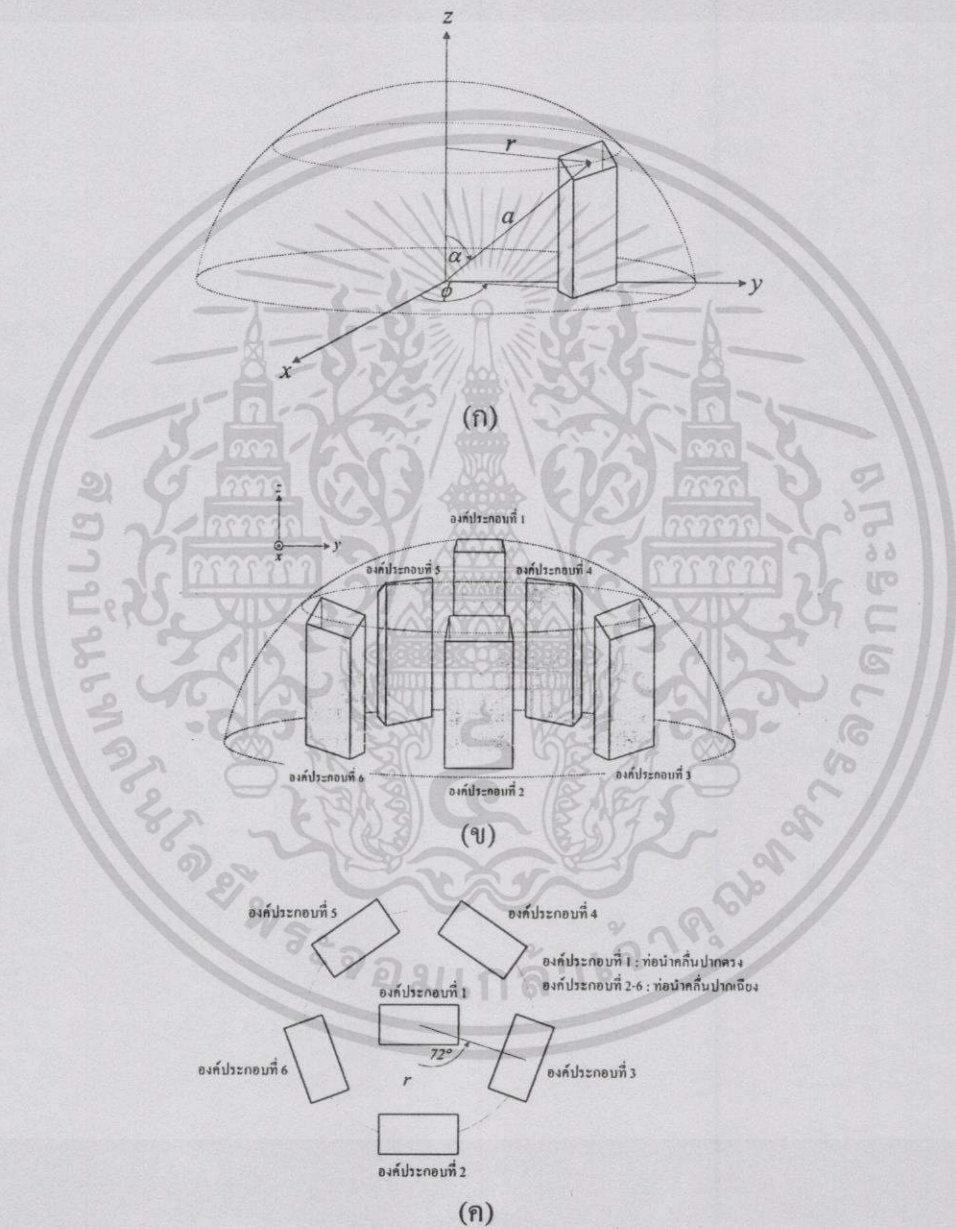
ตารางที่ 3.1 จำนวนของสายอากาศองค์ประกอบที่จัดวางบนผิวทรงกลม

$\alpha$	จำนวนของสายอากาศองค์ประกอบ
$90^\circ$	91
$75^\circ$	71
$60^\circ$	51
$45^\circ$	31
$30^\circ$	16
$15^\circ$	6

โดยที่  $\alpha$  คือ มุมในการจัดวางสายอากาศองค์ประกอบบนผิวทรงกลมที่ทำมุมจากแนวแกน  $z$  แสดงดังรูปที่ 3.2 (ก)

ในการออกแบบสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้เลือกในกรณีที่จำนวนสายอากาศองค์ประกอบเท่ากับ 6 ซึ่งมุม  $\alpha$  จะเท่ากับ  $15^\circ$  องศา เนื่องจากเป็นจำนวนที่พอเหมาะที่จะทำการศึกษาและวิจัยได้ สายอากาศท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมทั้ง 6 องค์ประกอบนี้จะมีปลายด้านหนึ่งเป็นปลายปิด และปลายอีกด้านหนึ่งเป็นปลายเปิดโดยสายอากาศองค์ประกอบจำนวน 5 องค์ประกอบจะมีปลายเปิดที่ตัดเฉียงทำมุม  $15^\circ$  องศา และอีกหนึ่งองค์ประกอบจะมีปลายเปิดตัดตรงทำมุม  $0^\circ$  องศากับผิวทรงกลมเพื่อให้อะเพอร์เจอร์ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบสัมผัสกับผิวทรงกลมเสมือนเป็นผิวโค้งของทรงกลม โดยที่สายอากาศท่อนำคลื่นปากตรง (normal aperture waveguide radiator) จะเป็นสายอากาศองค์ประกอบที่อยู่ตรงกลาง และล้อมรอบ

ด้วยสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียงทำมุม 15 องศา (15° inclined aperture waveguide radiator) ซึ่งตำแหน่งและการจัดวางของสายอากาศองค์ประกอบเพื่อประกอบรวมกันเป็นสายอากาศแถวลำดับทรงกลมแสดงดังในรูปที่ 3.2(ข) และ 3.2(ค) ซึ่งแสดงถึงภาพด้านหน้าและด้านบนของโครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศแถวลำดับทรงกลม ตามลำดับ และตำแหน่งการจัดวางแสดงดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างทางเรขาคณิตของสายอากาศแถวลำดับทรงกลม

- (ก) รูปทรงเรขาคณิต
- (ข) ภาพด้านหน้า
- (ค) ภาพด้านบน

ตารางที่ 3.2 ตำแหน่งการจัดวางของสายอากาศองค์ประกอบ

องค์ประกอบที่	$\alpha$	$\phi$
1	$0^\circ$	$0^\circ$
2	$15^\circ$	$0^\circ$
3	$15^\circ$	$72^\circ$
4	$15^\circ$	$144^\circ$
5	$15^\circ$	$216^\circ$
6	$15^\circ$	$288^\circ$

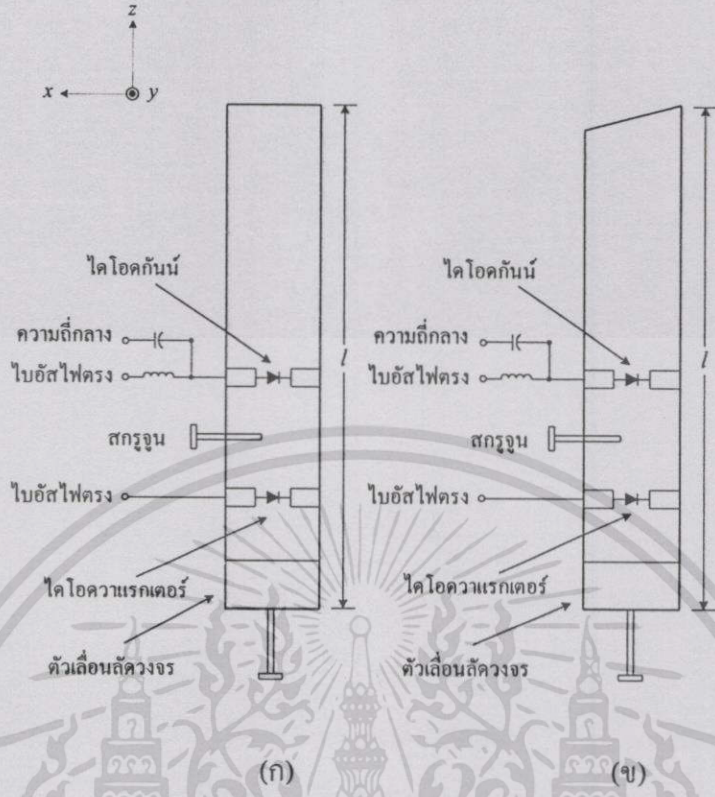
รัศมีของทรงกลม ( $a$ ) หาได้จาก

$$a = \frac{r}{\sin \alpha} \quad (3.1)$$

โดยที่  $r$  คือ รัศมีวงกลมที่สายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศาตั้งอยู่ล้อมรอบสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรง และ  $\alpha$  ในที่นี้เท่ากับ 15 องศา

ระยะห่างโดยเฉลี่ยระหว่างสายอากาศองค์ประกอบ  $s$  มีค่าประมาณ  $0.3a$  [19] ซึ่งควรจะมีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่น โดยที่  $a$  คือรัศมีของทรงกลม ระยะห่างระหว่างสายอากาศองค์ประกอบนี้มีความสำคัญต่อลักษณะของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและค่าการเชื่อมต่อร่วม นั่นคือ ถ้าระยะห่างระหว่างสายอากาศองค์ประกอบมากจะทำให้เกิดโลบของคลื่นที่ไม่ต้องการสูง (grating lobe) และมีค่าการเชื่อมต่อร่วมที่ต่ำซึ่งจะทำให้มุมในการกวาดลำคลื่นน้อยลง ดังนั้นระยะห่างระหว่างสายอากาศองค์ประกอบควรจะมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้

ภายในสายอากาศแต่ละองค์ประกอบแสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะประกอบด้วยไดโอดกัมมันต์ซึ่งเป็นอุปกรณ์แอ็กทีฟ และไดโอดควาเรกเตอร์ ไดโอดกัมมันต์ทำหน้าที่เป็นทั้งออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องและตัวผสมสัญญาณได้ภายในตัวมันเองซึ่งในกรณีที่ใช้เป็นสายอากาศรับจะสามารถผสมสัญญาณความถี่วิทยุที่รับเข้ามากับความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องโดยใช้ไดโอดกัมมันต์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวผลิตความถี่และตัวผสมสัญญาณ ทำให้ได้ความถี่กลาง (Intermediate Frequency : IF) ออกมาทันที ส่วนไดโอดควาเรกเตอร์ทำหน้าที่ช่วยในการปรับความถี่เชิงอิเล็กทรอนิกส์ โดยจะมีวงจรไบอัสสัญญาณไฟตรงให้กับไดโอดกัมมันต์และไดโอดควาเรกเตอร์อยู่ภายนอกสายอากาศ ซึ่งการปรับความถี่ของไดโอดกัมมันต์และไดโอดควาเรกเตอร์เพื่อใช้ในการปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการนั้นสามารถทำได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดโอดทั้งสอง นอกจากนี้ยังมีสกรูจูน (Tuning screw) ทำหน้าที่ในการปรับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศท่อนำคลื่นให้อยู่ในเงื่อนไขการออสซิลเลต และตัวเลื่อนลัดวงจร (Sliding short) ซึ่งจะช่วยในการปรับอิมพีแดนซ์และช่วยในการปรับเพื่อให้ได้กำลังงานมากที่สุด ตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆนี้ จะทำการวิเคราะห์โดยการใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า ดังจะได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.3 โครงสร้างภายในของสายอากาศสองคัพประกอบ  
 (ก) สายอากาศท่อนำคลื่นปากตรง  
 (ข) สายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา

เนื่องจากสายอากาศฮอสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้ทำงานที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นในการกำหนดขนาดของท่อนำคลื่นจะต้องคำนึงถึงความถี่คัทออฟ (cut-off frequency) ของท่อนำคลื่นด้วย ซึ่งท่อนำคลื่นที่จะแพร่กระจายคลื่นออกมาได้นั้นจะต้องมีความถี่คัทออฟที่ต่ำกว่าความถี่ที่ใช้งาน ในที่นี้ใช้ท่อนำคลื่นขนาดมาตรฐานคือ มีด้านกว้าง (a) เท่ากับ 1.6 เซนติเมตร และมีด้านแคบ (b) เท่ากับ 0.8 เซนติเมตร โดมิแนนท์โหมด (dominant mode) ในที่นี้คือ โหมด TE<sub>10</sub> ดังนั้นความถี่คัทออฟของท่อนำคลื่นสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$f_{c,mn} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad \begin{matrix} m = 0, 1, 2 \\ , n = 0, 1, 2 \\ m = n \neq 0 \end{matrix} \quad (3.1)$$

- โดยที่  $f_{c,mn}$  คือ ความถี่คัทออฟของคลื่นโหมด TE<sub>mn</sub>
- $\mu$  คือ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กได้ (permeability) ของตัวกลาง
- $\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอม (permittivity) ของตัวกลาง

- a คือ ด้านกว้างของท่อนำคลื่น  
b คือ ด้านแคบของท่อนำคลื่น ( $a > b$ )

ให้คลื่นเดินทางในอากาศ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3.1) ใหม่ได้เป็น

$$f_{c,10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \quad (3.2)$$

โดยที่  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  เฮนรีต่อเมตร

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  ฟารัดต่อเมตร

จากการคำนวณ พบว่าความถี่คัทออฟของท่อนำคลื่นขนาด  $1.6 \times 0.8$  นี้มีค่าเท่ากับ 9.375 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งน้อยกว่าความถี่ที่ใช้งานคือ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นเราจึงสามารถใช้ท่อนำคลื่นขนาดมาตรฐานนี้มาทำการสร้างเป็นสายอากาศองค์ประกอบได้

### 3.2 การจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว และสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลม โดยอาศัยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ

การวิเคราะห์โครงสร้างของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวซึ่งได้แก่ สายอากาศท่อนำคลื่นปากตรงและสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา ทำได้โดยการจำลองโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยการจำลองแบบตาข่ายเส้นลวดตัวนำ ในการจำลองโครงสร้างของสายอากาศด้วยแบบจำลองตาข่ายเส้นลวดตัวนำนั้นจะประกอบด้วยเส้นลวดตัวนำจำนวนมากซึ่งแต่ละเส้นจะแบ่งออกเป็นเซกเมนต์ย่อยๆ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการจำลองโครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์ คือ ความยาวของเซกเมนต์และรัศมีของเส้นลวดควรจะมีค่าน้อยกว่า  $0.1\lambda$  เพื่อความแม่นยำในการคำนวณ [11] เนื่องจากสายอากาศนี้ทำงานที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) จะมีค่า

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{10 \times 10^9} = 0.03 \quad \text{เมตร}$$

ความยาวคลื่นภายในท่อนำคลื่น ( $\lambda_g$ )

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (f_c/f)^2}} = 0.088 \quad \text{เมตร}$$

ดังนั้นความยาวของเซกเมนต์และรัศมีของเส้นลวดจึงควรมีค่าน้อยกว่า 0.003 เมตร

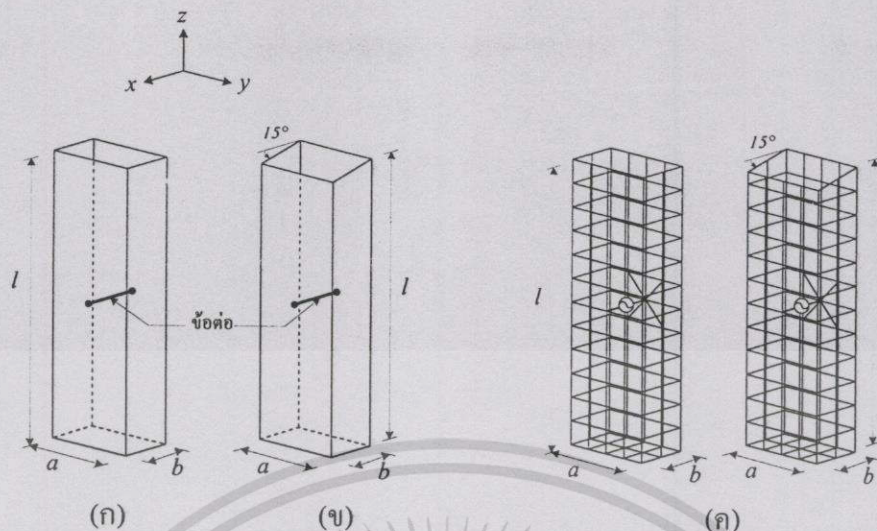
ในการวิเคราะห์สายอากาศนั้น เราต้องทำการวิเคราะห์หาขนาดของสายอากาศที่นำคลื่นและตำแหน่งของอุปกรณ์ภายในสายอากาศองค์ประกอบที่เหมาะสมที่จะทำให้สายอากาศนี้ทำงานได้

เพื่อทำการวิเคราะห์หาขนาดของที่นำคลื่นและตำแหน่งของอุปกรณ์ที่เหมาะสมที่จะทำให้ไดโอดกั้นเกิดการออสซิลเลตที่ความถี่ใช้งาน 10 กิกะเฮิรตซ์ได้ตามทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.4 ดังนั้นในการจำลองโครงสร้างนี้จึงได้กำหนดด้านกว้างและด้านแคบของที่นำคลื่นตามขนาดที่นำคลื่นมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้คือ  $1.6 \times 0.8$  เซนติเมตร และรัศมีของเส้นลวดที่นำมาจำลองเป็นสายอากาศที่นำคลื่นจะกำหนดตามความหนาของที่นำคลื่น (ควรจะน้อยกว่า  $0.1\lambda$ ) ส่วนเส้นลวดที่จำลองไดโอดกั้นนั้นก็กำหนดตามขนาดของไดโอดกั้นตามขนาดจริง

การจำลองจุดป้อนสัญญาณนั้นเป็นการจำลองเพื่อรองรับไดโอดกั้น ดังนั้นจึงเป็นการจำลองในลักษณะของข้อต่อ (junction) ดังแสดงในรูปที่ 3.4(ก) และ 3.4(ข) และเลือกแบบจำลองการป้อนสัญญาณเป็นแบบเดลต้าแกป (delta gap feed model) โดยเลือกการกระตุ้นเป็นแบบแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า (electric field source)

ในการจำลองนั้นจะต้องกำหนดจุดกำเนิด  $(x, y, z)$  และจุดสิ้นสุด  $(x', y', z')$  ของเส้นลวดตัวนำที่นำมาจำลองตามขนาดโครงสร้างจริงทุกเส้น และแบ่งเส้นลวดแต่ละเส้นให้เป็นเซกเมนต์ย่อยๆตามเงื่อนไขที่กล่าวไว้ข้างต้น ในการกำหนดจุดกำเนิดและจุดสิ้นสุดของเส้นลวดนั้นต้องกำหนดตามสภาพโครงสร้างของสายอากาศที่เป็นจริง ซึ่งในกรณีของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้เป็นสายอากาศแถวลำดับทรงกลมที่มีรัศมีทรงกลม  $(a)$  นั้น ตำแหน่ง  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$  ต้องอยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลม ดังนั้นอะเพอร์เจอร์ของสายอากาศที่นำคลื่นปากตรงต้องอยู่ที่ตำแหน่ง  $(x', y', z') = (0, 0, a)$  และสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียงแต่ละองค์ประกอบก็ต้องจำลองจุดกำเนิดและจุดสิ้นสุดให้อยู่ในตำแหน่งและมุมตามสภาพที่เป็นจริง โดยการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ เช่น ตำแหน่งของไดโอดกั้น ตำแหน่งและขนาดของสกรูจูน เพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศอันได้แก่อิมพีแดนซ์ประจำตัว และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่เหมาะสมซึ่งในที่นี้ค่าอิมพีแดนซ์ประจำตัวของสายอากาศที่นำคลื่นที่เหมาะสมจะต้องมีค่าที่อยู่ในเงื่อนไขการออสซิลเลต

โครงสร้างของสายอากาศองค์ประกอบที่จำลองด้วยตาข่ายเส้นลวดตัวนำแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของสายอากาศท่อนำคลื่น

(ก) ปากตรง (ข) ปากเฉียง  $15^\circ$  (ค) แบบจำลองตาข่ายเส้นลวดตัวนำ

### 3.3 วิธีการในการปรับทิศทางของลำคลื่น

การปรับลำคลื่นของสายอากาศเอ็กซีทีฟ สามารถกระทำได้โดยการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ เมื่อผลต่างระหว่างความถี่ที่ออสซิลเลตด้วยตัวเองของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบอยู่ในล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ สายอากาศองค์ประกอบจะอินเจกชันล็อกที่ความถี่ที่ออสซิลเลตความถี่เดียว ผลต่างระหว่างความถี่ที่ออสซิลเลตด้วยตัวเองของสายอากาศองค์ประกอบแต่ละตัวกับสัญญาณที่อินเจกชันล็อกจะทำให้เกิดการเลื่อนของเฟส เฟสที่เลื่อนนี้จะถูกใช้ในการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบแถวลำดับ โดยเฟสมีการเปลี่ยนแปลง ทิศทางของลำคลื่นก็จะมีเปลี่ยนแปลงไป

จากหลักการที่กล่าวข้างต้น เราจะนำมาใช้เป็นแนวทางในการปรับลำคลื่นของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองไปในทิศทางที่ต้องการได้โดยการปรับเฟสของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบให้เหมาะสม ซึ่งการปรับเฟสนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยาก ดังนั้นเราจึงใช้วิธีการปรับความถี่ที่ออสซิลเลตของสายอากาศองค์ประกอบแทน โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างเฟสกับความถี่ที่ว่าเมื่อความถี่เปลี่ยน เฟสก็เปลี่ยน โดยที่ความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ  $\omega$  ทิศทางของลำคลื่นที่ต้องการปรับไปสามารถคำนวณได้ดังนี้ [1]

$$\omega_i = \omega_o \left[ 1 - \frac{1}{2Q} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \varepsilon_{ij} \frac{A_j}{A_i} \sin(\Phi_{ij} + \theta_i - \theta_j) \right], \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

โดยที่  $\omega_0$  คือ ความถี่เชิงมุมอิสระของออสซิลเลเตอร์

$Q$  คือ ตัวประกอบคุณภาพ

$\varepsilon_{ij}$  และ  $\Phi_{ij}$  คือ ขนาดและเฟสของค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศองค์ประกอบที่  $i$  และ  $j$

$\theta_i$  และ  $\theta_j$  คือ เฟสที่ใช้ในการปรับทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบที่  $i$  และ  $j$

สังเกตว่าความถี่ของสายอากาศองค์ประกอบที่  $i$  ในแถวลำดับจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศองค์ประกอบที่  $i$  และ  $j$  และค่าตัวประกอบคุณภาพ ซึ่งค่าเหล่านี้สามารถหาได้จากค่าอิมพีแดนซ์ร่วม และค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองของสายอากาศองค์ประกอบ

### 3.3.1 อิมพีแดนซ์ตัวเอง (Self-Impedance)

อิมพีแดนซ์ตัวเองเป็นคุณลักษณะพื้นฐานของสายอากาศโดยทั่วไป สำหรับในกรณีของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณ ในตัวเองที่มีสายอากาศองค์ประกอบเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นที่มีไดโอดกั้นซึ่งทำหน้าที่เป็นออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องอยู่ในอิมพีแดนซ์ตัวเองมีความสำคัญในการที่จะทำให้สายอากาศออสซิลเลตตามเงื่อนไขการออสซิลเลต ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องคำนวณและปรับแต่งอิมพีแดนซ์ตัวเองของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบให้อยู่ในเงื่อนไขของการออสซิลเลต โดยในการวิเคราะห์นั้นจะทำการวิเคราะห์หาขนาดของสายอากาศที่จะทำให้สายอากาศมีอิมพีแดนซ์ตัวเองที่อยู่ในเงื่อนไขการออสซิลเลต ซึ่งจะพิจารณาที่ค่าความต้านทานประมาณ 0-12 โอห์ม และค่ารีแอคแตนซ์ประมาณ 0 ถึง  $\pm 12$  โอห์ม เนื่องจากเป็นอิมพีแดนซ์ของไดโอดกั้นโดยทั่วไป [1], [15] ค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองของสายอากาศคำนวณได้จากอัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่อกระแสที่จุดป้อนสัญญาณ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Z_{self} = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (3.4)$$

โดยที่สามารถคำนวณกระแสได้โดยการแก้สมการอินทิกรัลซึ่งกระทำโดยใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการวางตำแหน่งของไดโอดกั้นนั้นจะวางที่ตำแหน่งที่เกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดในท่อนำคลื่น ซึ่งตำแหน่งที่เกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดนั้นอยู่ห่างจากปลายปิดของท่อนำคลื่นเป็นจำนวนเท่าของ  $\lambda_g/4$  [20] ดังนั้นกำหนดตำแหน่งของไดโอดกั้นที่ระยะห่างจากปลายปิดของท่อนำคลื่นเท่ากับ  $\lambda_g/4$  แล้วทำการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ตัวเอง

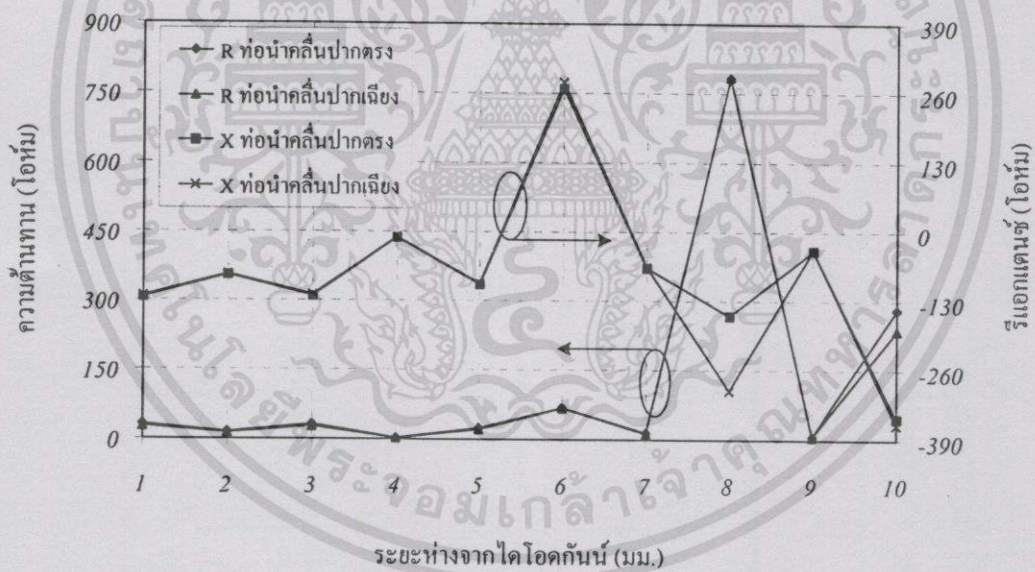
สำหรับการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นั้นจะกำหนดให้ความยาวของท่อนำคลื่น ( $l$ ) เท่ากับ 6.6 เซนติเมตร ( $3\lambda_g/4$ ) (ซึ่งปลายเปิดของท่อนำคลื่นจะอยู่ที่ตำแหน่ง  $3\lambda_g/4$  ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ให้ค่าสนามไฟฟ้าสูงที่สุด) และตำแหน่งของไดโอดกั้นอยู่ที่ 2.2 เซนติเมตร ( $\lambda_g/4$ ) ห่างจาก

ปลายปิด และจำลองจุดป้อนสัญญาณในลักษณะของข้อต่อ (junction excited) และกระตุ้นด้วยแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้า

จากการคำนวณพบว่า สายอากาศองค์ประกอบที่เป็นสายอากาศท่อนำคลื่นปากตรงและสายอากาศองค์ประกอบที่เป็นสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา มีค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองเท่ากับ  $69.4304 - j186.293$  โอห์ม และ  $58.1383 - j182.307$  โอห์ม ตามลำดับ

ค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองที่คำนวณได้นี้มีค่าที่สูงเกินกว่าเงื่อนไขการออสซิลเลต ซึ่งในกรณีที่สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองสูงเกินไปจะทำให้สายอากาศไม่สามารถออสซิลเลตได้ เราสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยการเพิ่มสกรูจนเข้าไปในสายอากาศท่อนำคลื่นเพื่อทำการปรับอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นที่สูงให้แมตช์กับอิมพีแดนซ์ของไดโอดกัมมันต์

ในการวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสกรูจนเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม โดยจะพิจารณาที่ค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบ ในรูปที่ 3.5 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองเมื่อทำการเปลี่ยนตำแหน่งสกรูจนเป็นระยะทางห่างจากไดโอดกัมมันต์

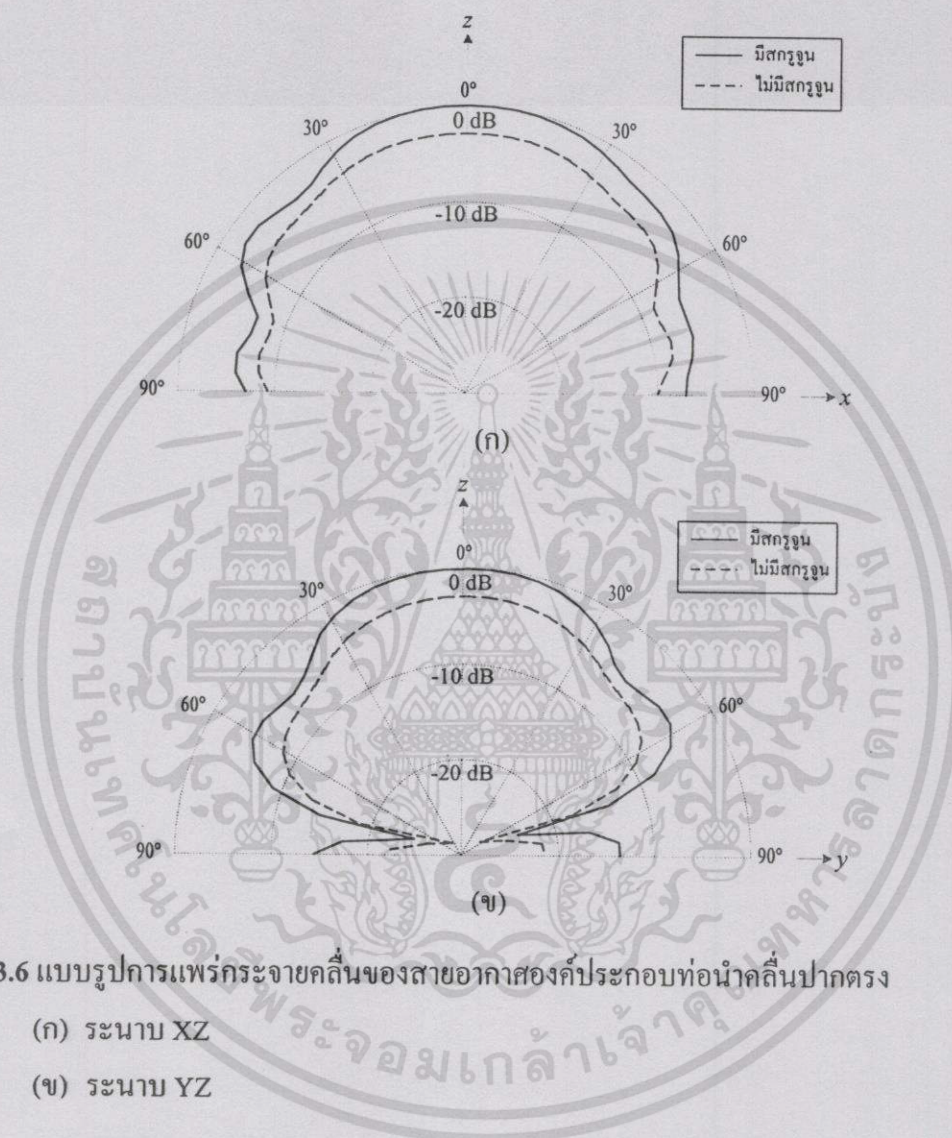


รูปที่ 3.5 อิมพีแดนซ์ตัวเองเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งสกรูจน

จากผลการคำนวณ พบว่าตำแหน่งของสกรูจนห่างจากไดโอดกัมมันต์เป็นระยะทาง 7 มิลลิเมตร เป็นตำแหน่งที่สามารถปรับอิมพีแดนซ์ตัวเองของสายอากาศองค์ประกอบให้ลดลงจนเข้าใกล้เงื่อนไขการออสซิลเลตได้ ซึ่งในขณะเดียวกันก็ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอื่นๆ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรงและสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศาที่ได้จากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.6 และ

รูปที่ 3.7 ตามลำดับ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในกรณีที่มีสกรูจูนกับกรณีที่ไม่มีสกรูจูน โดยจะแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นใน 2 ระนาบคือ ระนาบ XZ และระนาบ YZ



รูปที่ 3.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสองค้ำประกอบท่อนำคลื่นปากตรง

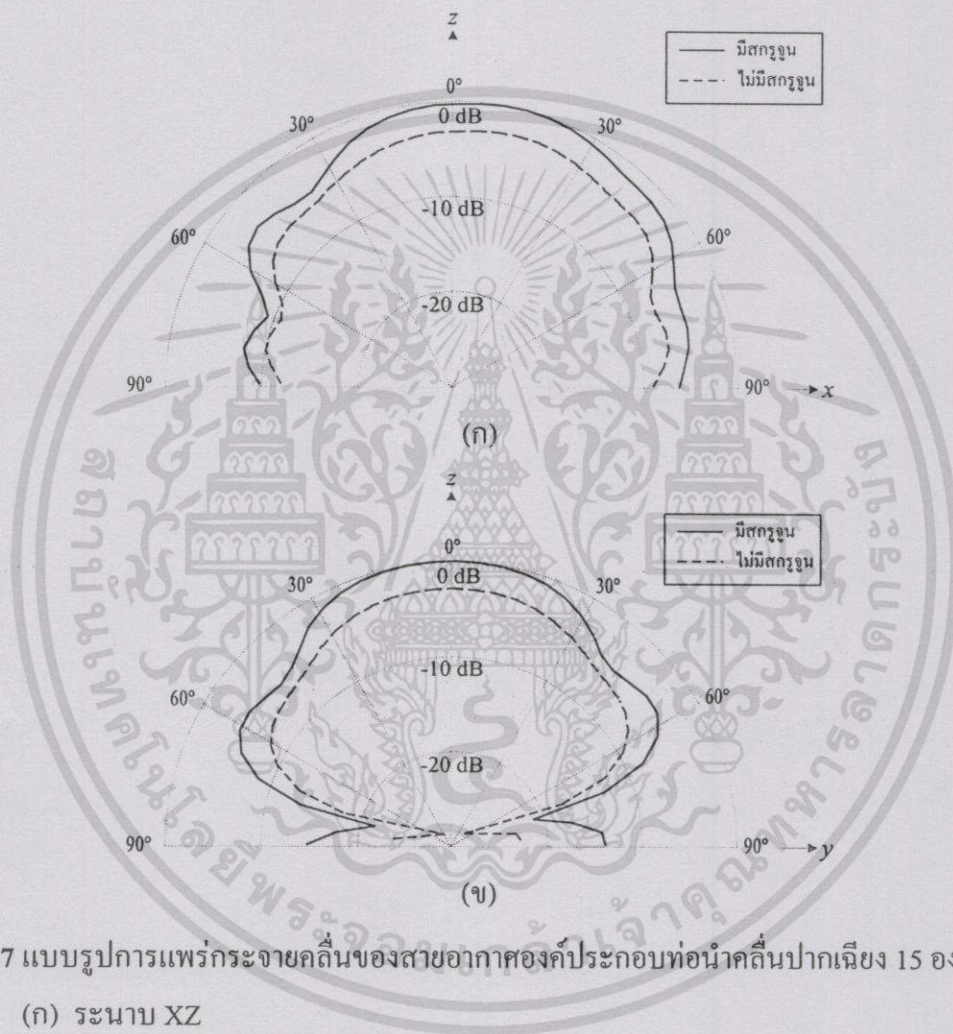
(ก) ระนาบ XZ

(ข) ระนาบ YZ

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสองค้ำประกอบท่อนำคลื่นปากตรงดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งกรณีที่มีสกรูจูนและไม่มีสกรูจูนนั้นจะมีรูปร่างที่เหมือนกัน แต่ในกรณีที่สายอากาศไม่มีสกรูจูนนั้นนอกจากจะมีค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองที่สูงเกินไปดังที่คำนวณได้ในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้วยังมีกำลังงานที่แพร่กระจายต่ำกว่าในกรณีที่สายอากาศมีสกรูจูนอยู่ด้วย โดยในกรณีที่สายอากาศไม่มีสกรูจูนนั้นจะมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 5.49 dBi แต่เมื่อทำการปรับค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองโดยการใส่สกรูจูนเข้าไป นอกจากค่าอิมพีแดนซ์ตัวเองจะลดลงจนเข้าใกล้เงื่อนไขการออสซิลเลตแล้วยังทำให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นด้วยกำลังงานที่สูงกว่าด้วย ซึ่ง

จากการคำนวณพบว่าสายอากาศสององค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรงในกรณีที่มีสกรูจูนจะมีอัตราขยายเท่ากับ 6.07 dBi

จากรูปที่ 3.6 จะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้ง 2 ระนาบคือ ระนาบ XZ และระนาบ YZ มีทิศทางของลำคลื่นหลักชี้ไปในทิศ  $\theta = 0^\circ$  โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XZ จะมีความกว้างลำ (beamwidth) ที่กว้างกว่าในระนาบ YZ

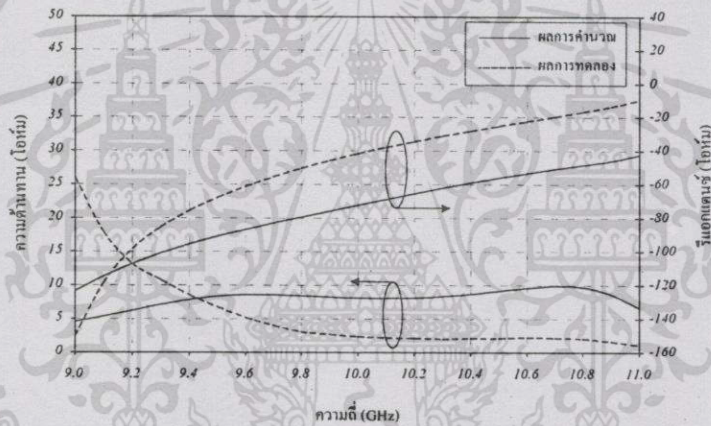


รูปที่ 3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสององค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา  
 (ก) ระนาบ XZ  
 (ข) ระนาบ YZ

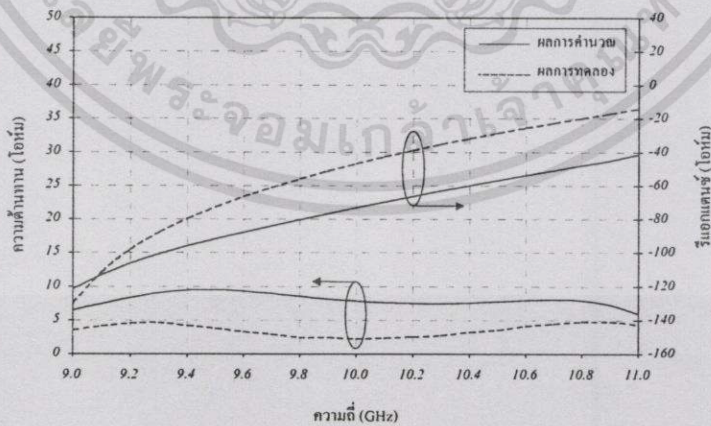
รูปที่ 3.7(ก) และ 3.7(ข) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสององค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศาในระนาบ XZ และ YZ ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายในกรณีที่มีสกรูจูนและไม่มีสกรูจูนจะมีรูปร่างที่เหมือนกันในแต่ละระนาบ และในกรณีที่สายอากาศไม่มีสกรูจูนซึ่งจะมีอิมพีแดนซ์ตัวเองที่สูงเกินเงื่อนไขการออสซิลเลต จะมีการทำงานที่แพร่กระจายต่ำกว่าในกรณีที่สายอากาศมีสกรูจูนในการปรับอิมพีแดนซ์ ซึ่งจากการคำนวณพบว่าสายอากาศสององค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา ในกรณีที่ไม่มีสกรูจูนจะมีค่าอัตราขยายเท่า

กับ 5.76 dBi และในกรณีที่มีสกรูจนจะมีอัตราขยายที่สูงกว่าซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 6.43 dBi นอกจากนี้ยังพบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XZ จะชี้ทิศทางหลักที่  $\theta = 15^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 3.7(ก)

เพื่อเป็นการยืนยันผลการคำนวณว่ามีความถูกต้องและเชื่อถือได้ สายอากาศที่นำคลื่นปากตรงและปากเฉียงจึงถูกสร้างขึ้นและทำการทดสอบ โดยทำการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำคลื่นทั้งสองแบบ แต่เพื่อให้ง่ายต่อการสร้างและทดสอบจึงอาศัยการกระตุ้นสัญญาณให้ที่นำคลื่นด้วยโพรบแทนการกระตุ้นด้วยข้อต่อ และทำการคำนวณเพิ่มเติมในเรื่อง impedance matching เพื่อทำการเปรียบเทียบ พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองมีแนวโน้มและค่าที่ใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นผลวิจัยที่ได้นำเสนอใน [21] ดังนั้นผลการคำนวณในกรณีของการกระตุ้นด้วยข้อต่อที่ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเดียวกันนี้ จึงเป็นผลการคำนวณที่ค่อนข้างถูกต้อง



(ก)



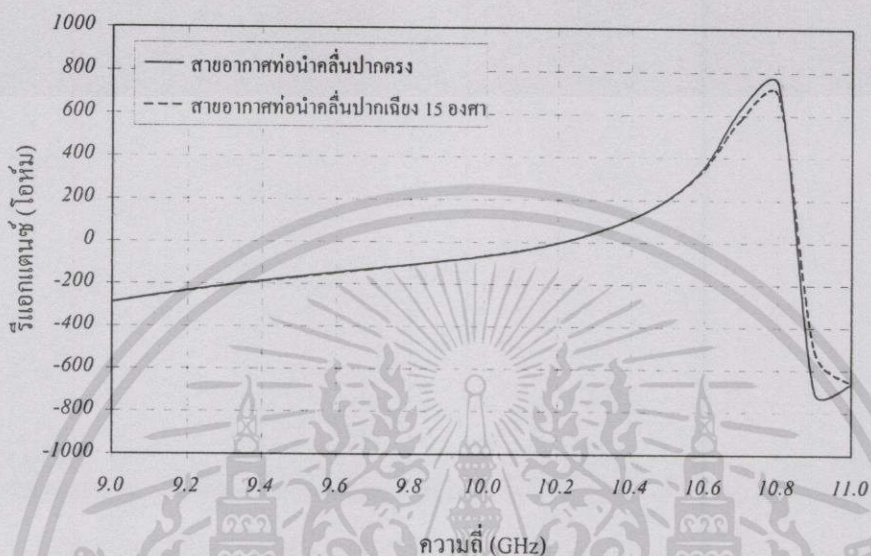
(ข)

รูปที่ 3.8 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำคลื่นที่กระตุ้นด้วยโพรบ

- (ก) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำคลื่นปากตรง
- (ข) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา

### 3.3.2 ตัวประกอบคุณภาพ

กราฟแสดงผลตอบสนองทางความถี่ (Frequency response) ของสายอากาศองค์ประกอบที่คำนวณได้แสดงดังรูปที่ 3.9 เพื่อนำมาคำนวณหาค่าตัวประกอบคุณภาพที่แสดงดังสมการ (3.5)



รูปที่ 3.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของสายอากาศ

$$Q = \frac{f_0}{2R_A} \frac{\partial x_0}{\partial f} \quad (3.5)$$

โดยที่  $f_0$  คือ ความถี่ปฏิบัติการ  $x_0$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่ปฏิบัติการ และ  $R_A$  คือ ความต้านทานสูญเสียของสายอากาศ

จากการคำนวณพบว่าตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรงและสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องค์มีค่าเท่ากับ 85.89 และ 103.57 ตามลำดับ ซึ่งค่าตัวประกอบคุณภาพที่คำนวณได้นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความถี่ที่ใช้ในการปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ

### 3.3.3 อิมพีแดนซ์ร่วม

ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ตัวเองของสายอากาศเดี่ยวซึ่งไม่มีสายอากาศองค์ประกอบข้างเคียง แต่ในกรณีที่สายอากาศมีองค์ประกอบข้างเคียง ซึ่งทำให้อิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศแต่ละตัวเปลี่ยนไปจากอิมพีแดนซ์ตัวเอง โดยกลายเป็นอิมพีแดนซ์จุดขับ (driving point impedance) ค่าอิมพีแดนซ์จุดขับนี้จะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ตัวเองและ

อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศข้างเคียง อิมพีแดนซ์ร่วมจึงเป็นคุณลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของสายอากาศแถวลำดับ อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้คือ

1. ชนิดของสายอากาศ
2. การจัดวางของสายอากาศแต่ละตัว
3. ลักษณะการป้อนกระแสให้แก่สายอากาศแต่ละตัว

ในกรณีที่สายอากาศ 2 ตัวมีโครงสร้างและลักษณะการป้อนสัญญาณที่เหมือนกันทุกประการ อิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศ 2 ตัวนี้คือ  $Z_{12}$  และ  $Z_{21}$  จะเป็นไปตามทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ (Reciprocity theorem) นั่นคือ  $Z_{12} = Z_{21}$  [22] แต่ถ้าสายอากาศ 2 ตัวมีโครงสร้างที่ไม่เหมือนกัน ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศ 2 ตัวนี้จะไม่เท่ากัน ( $Z_{12} \neq Z_{21}$ )

ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์จุดจับและอิมพีแดนซ์ตัวเองดังสมการ

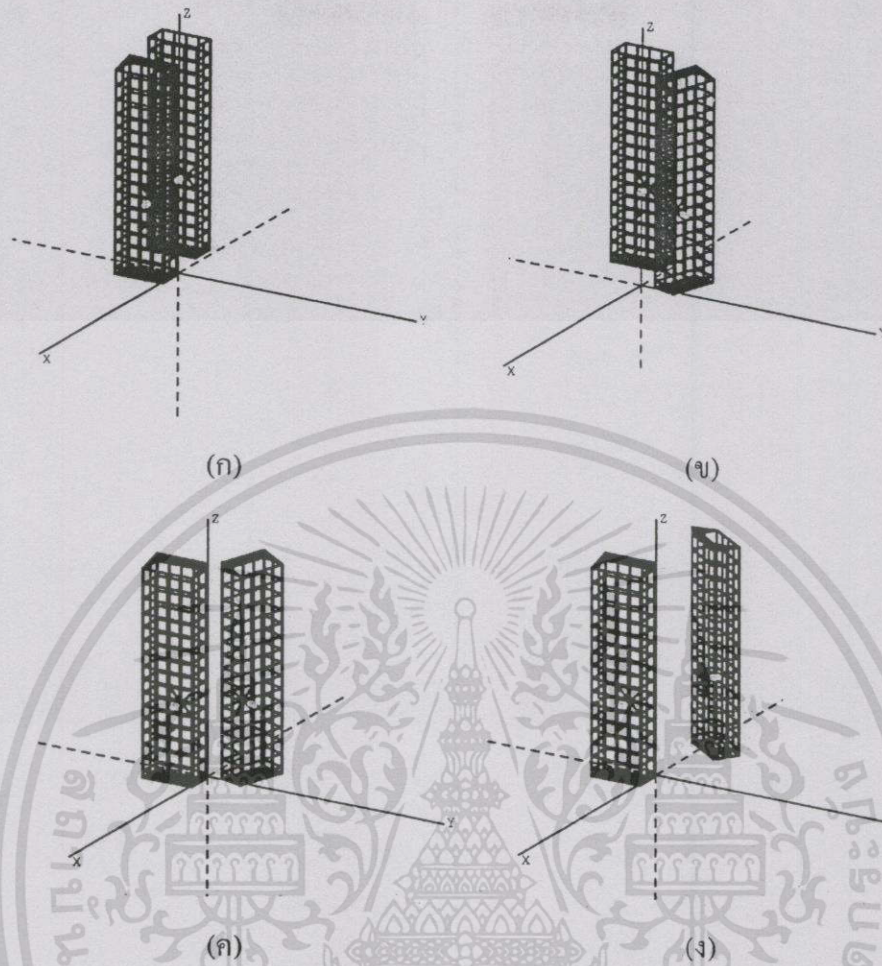
$$Z_{mutual} = Z_{drive} - Z_{self} \quad (3.6)$$

โดยที่  $Z_{drive}$  คือ อิมพีแดนซ์จุดจับ และ  $Z_{self}$  คือ อิมพีแดนซ์ตัวเอง สมการนี้เป็นจริงเมื่อกำหนดให้แต่ละองค์ประกอบมีการออสซิลเลตด้วยขนาดที่เท่ากัน

ค่าอิมพีแดนซ์จุดจับคำนวณจากอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสายอากาศเมื่อมีสายอากาศข้างเคียง ในขณะที่อิมพีแดนซ์ตัวเองคำนวณจากสายอากาศตัวเดียวที่ไม่มีสายอากาศข้างเคียง

ในการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนั้น ทำได้โดยการจำลองสายอากาศองค์ประกอบโดยการจัดเรียงตัวในลักษณะของแถวลำดับทรงกลม แล้ววิเคราะห์แยกสายอากาศองค์ประกอบออกเป็นคู่ๆ สายอากาศแต่ละองค์ประกอบวางห่างกัน 2.1 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะทางที่น้อยที่สุดที่สายอากาศที่สร้างจริงสามารถวางห่างกันได้ และจากค่าอิมพีแดนซ์ร่วมนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม (Coupling coefficient) ต่อไป

ในการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศที่นำคลื่นปากตรงกับสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง  $15^\circ$  และ ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง  $15^\circ$  กับสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง  $15^\circ$  ด้วยกันเอง ตัวอย่างลักษณะในการจำลองสายอากาศเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมในบางลักษณะแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การจำลองสายอากาศเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

- (ก) สายอากาศสองคู่ประกอบที่ 1 และสายอากาศสองคู่ประกอบที่ 2
- (ข) สายอากาศสองคู่ประกอบที่ 1 และสายอากาศสองคู่ประกอบที่ 3
- (ค) สายอากาศสองคู่ประกอบที่ 2 และสายอากาศสองคู่ประกอบที่ 3
- (ง) สายอากาศสองคู่ประกอบที่ 2 และสายอากาศสองคู่ประกอบที่ 4

จากการจำลองสายอากาศเพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ร่วมทั้งหมด 30 ลักษณะ ที่ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 2.1 เซนติเมตร ทำให้สามารถคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศสองคู่ประกอบได้ดังตารางที่ 3.3

ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศแต่ละคู่จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วมในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายอากาศองค์ประกอบ

องค์ประกอบหลัก (i)	# 1		# 2		# 3		# 4		# 5		# 6	
องค์ประกอบข้างเคียง (j)	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X	R	X
# 1	-	-	-0.649	2.720	-0.559	0.793	0.451	-2.376	0.451	-2.376	-0.559	0.793
# 2	-0.929	3.369	-	-	-0.537	-0.299	1.007	0.947	1.007	0.947	-0.537	-0.299
# 3	-0.515	1.210	-0.537	-0.299	-	-	-0.537	-0.299	1.007	0.947	1.007	0.947
# 4	0.575	-2.420	1.007	0.947	-0.537	-0.299	-	-	-0.537	-0.299	1.007	0.947
# 5	0.575	-2.420	1.007	0.947	1.007	0.947	-0.537	-0.299	-	-	-0.537	-0.299
# 6	-0.515	1.210	-0.537	-0.299	1.007	0.947	1.007	0.947	-0.537	-0.299	-	-

จากผลการคำนวณพบว่า ในกรณีที่สายอากาศมีโครงสร้างเหมือนกันคือ ระหว่างสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียงกับสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมเท่ากัน นั่นคือ  $Z_{ij} = Z_{ji}$  แต่สำหรับกรณีที่สายอากาศมีโครงสร้างต่างกัน คือ ระหว่างสายอากาศที่นำคลื่นปากตรงกับสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง ค่าอิมพีแดนซ์ร่วมที่ได้จะมีค่าไม่เท่ากัน นั่นคือ  $Z_{ij} \neq Z_{ji}$  ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีบทภาวะย้อนกลับ

### 3.3.4 สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม

สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศองค์ประกอบนี้มีความสำคัญในการปรับค่าคลื่นของสายอากาศไปในทิศทางที่ต้องการ โดยเป็นตัวแปรหนึ่งในสมการการหาความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเพื่อที่จะปรับค่าคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งการเชื่อมต่อร่วม (Mutual coupling) นี้จะใช้เพื่อรักษาการอินเจกชันคือกึ่งระหว่างสายอากาศองค์ประกอบ ดังนั้นมุมในการกวาดค่าคลื่นจึงถูกจำกัดโดยระดับการเชื่อมต่อร่วมที่ต่ำ การทำให้การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็นการช่วยรักษาการอินเจกชันคือกึ่งตลอดช่วงความถี่ที่กว้างขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้มุมในการกวาดค่าคลื่นกว้างขึ้น [1] วิธีการเพิ่มค่าการเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศองค์ประกอบทำได้โดยการลดระยะห่างระหว่างสายอากาศองค์ประกอบ

สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วมระหว่างสายอากาศองค์ประกอบที่  $i$  และ  $j$  ถูกกำหนดให้เป็น  $S_{ij}$  โดยที่  $S_{ij}$  และ  $S_{ji}$  คือ ขนาดและเฟสของสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม ตามลำดับ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อคำนวณได้จากอิมพีแดนซ์ร่วม โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง Z-parameter และ S-parameter [13]

(3.7)

ซึ่งจะได้ค่า S-parameter เป็นค่าเชิงซ้อน โดยแสดงเป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพดังในตารางที่ 3.4 และจากค่า S-parameter นี้ทำการหาขนาดและเฟสซึ่งก็จะได้เป็นขนาดและเฟสของค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วมดังแสดงในตารางที่ 3.5

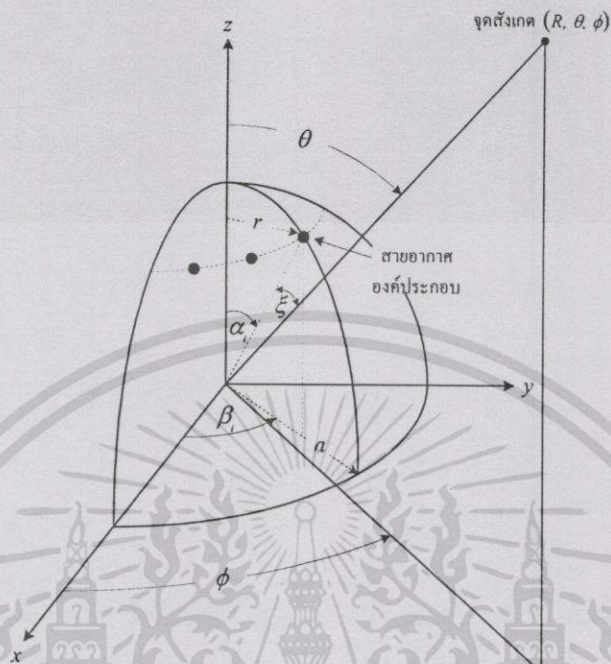
ตารางที่ 3.4 S-parameter

$S_{ij}$	#1		#2		#3		#4		#5		#6	
	Re	Im	Re	Im	Re	Im	Re	Im	Re	Im	Re	Im
#1	-	-	-0.0047	-0.0098	-0.0002	-0.0038	0.0044	0.0083	0.0044	0.0083	-0.0002	-0.0038
#2	-0.0054	-0.0125	-	-	0.0024	-0.0004	-0.0054	-0.0004	-0.0054	-0.0004	0.0024	-0.0004
#3	-0.0014	-0.0049	0.0024	-0.0004	-	-	0.0024	-0.0004	-0.0054	-0.0004	-0.0054	-0.0004
#4	0.0041	0.0087	-0.0054	-0.0004	0.0024	-0.0004	-	-	0.0024	-0.0004	-0.0054	-0.0004
#5	0.0041	0.0087	-0.0054	-0.0004	-0.0054	-0.0004	0.0024	-0.0004	-	-	0.0024	-0.0004
#6	-0.0014	-0.0049	0.0024	-0.0004	-0.0054	-0.0004	-0.0054	-0.0004	0.0024	-0.0004	-	-

ตารางที่ 3.5 ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม

	#1		#2		#3		#4		#5		#6	
	ขนาด	เฟส (rad)	ขนาด	เฟส (rad)	ขนาด	เฟส (rad)	ขนาด	เฟส (rad)	ขนาด	เฟส (rad)	ขนาด	เฟส (rad)
#1	-	-	0.011	1.129	0.004	1.509	0.009	1.082	0.009	1.082	0.004	1.509
#2	0.014	1.164	-	-	0.002	-0.168	0.005	0.079	0.005	0.079	0.002	-0.168
#3	0.005	1.298	0.002	-0.168	-	-	0.002	-0.168	0.005	0.079	0.005	0.079
#4	0.010	1.128	0.005	0.079	0.002	-0.168	-	-	0.002	-0.168	0.005	0.079
#5	0.010	1.128	0.005	0.079	0.005	0.079	0.002	-0.168	-	-	0.002	-0.168
#6	0.005	1.298	0.002	-0.168	0.005	0.079	0.005	0.079	0.002	-0.168	-	-

### 3.3.5 เฟสที่ใช้ในการปรับทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ



รูปที่ 3.11 พิกัดขององค์ประกอบแถวลำดับ  $(r, \alpha_i, \beta_i)$  บนพื้นผิวทรงกลม

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น  $F(\theta, \phi)$  ของสายอากาศแถวลำดับทรงกลมสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N I_i e^{j\psi_i} e^{jka \cos \xi} \quad (3.8)$$

โดยที่  $I_i$  และ  $\psi_i$  คือ แอมพลิจูดและเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศองค์ประกอบที่มีตำแหน่งอยู่ที่  $(r, \alpha_i, \beta_i)$  และ  $\xi$  คือ มุมระหว่างเส้นที่เชื่อมจุดกึ่งกลางของทรงกลมไปยังสายอากาศองค์ประกอบและเส้นที่เชื่อมจุดกึ่งกลางของทรงกลมไปยังสนามที่จุดสังเกต  $(R, \theta, \phi)$  (ดูรูปที่ 3.11) ในที่นี้  $\alpha_i = 15^\circ$  และ  $\beta_i = 0^\circ, 72^\circ, 144^\circ, 216^\circ, 288^\circ$

$\cos \xi$  แสดงในเทอมของพิกัดทรงกลม (spherical coordinate) ได้ดังนี้

$$\cos \xi = \sin \theta \sin \alpha_i \cos(\phi - \beta_i) + \cos \theta \cos \alpha_i \quad (3.9)$$

เฟส  $\psi_i$  ของกระแสถูกปรับเพื่อว่าสายอากาศจะมีลำคลื่นหลักไปในทิศทางที่ต้องการ  $(\theta_0, \phi_0)$  เราสามารถเขียนสมการเฟส  $\psi_i$  ได้ว่า

$$\psi_i = -ka[\sin \theta_o \sin \alpha_i \cos(\phi_o - \beta_i) + \cos \alpha_i \cos \theta_o] \quad (3.10)$$

โดยที่  $k = 2\pi/\lambda$  และ  $a$  คือ รัศมีของทรงกลมซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.114 เซนติเมตร โดยที่  $r = 2.1$  เซนติเมตร

จากสมการ (3.10) สามารถคำนวณค่าเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับแต่ละสายอากาศองค์ประกอบเพื่อปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ  $(\theta_o, \phi_o)$  ได้ดังแสดงเป็นตัวอย่างในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับแต่ละสายอากาศองค์ประกอบ

ทิศทางของลำคลื่นหลัก	#1	#2	#3	#4	#5	#6
$(\theta_o, \phi_o)$	เฟส (rad)	เฟส (rad)	เฟส (rad)	เฟส (rad)	เฟส (rad)	เฟส (rad)
(-30,0)	14.719	12.018	13.5378	15.9968	15.9968	13.5378
(-20,0)	15.971	13.9223	14.9619	16.644	16.644	14.9619
(-10,0)	16.7378	15.4036	15.9314	16.7855	16.7855	15.9314
(0,0)	16.996	16.4169	16.4169	16.4169	16.4169	16.4169
(10,0)	16.7378	16.9313	16.4035	15.5495	15.5495	16.4035
(20,0)	15.971	16.9313	15.8917	14.2097	14.2097	15.8917
(30,0)	14.719	16.4169	14.8971	12.4381	12.4381	14.8971
(-30,90)	14.719	14.2174	12.1256	12.9246	15.5102	16.3092
(-20,90)	15.971	15.4268	13.996	14.5425	16.3112	16.8577
(-10,90)	16.7378	16.1675	15.441	15.7185	16.6165	16.894
(10,90)	16.7378	16.1675	16.894	16.6165	15.7185	15.441
(20,90)	15.971	15.4268	16.8577	16.3112	14.5425	13.996
(30,90)	14.719	14.2174	16.3092	15.5102	12.9246	12.1256

### 3.3.6 ความถี่ในการปรับทิศทางของลำคลื่น

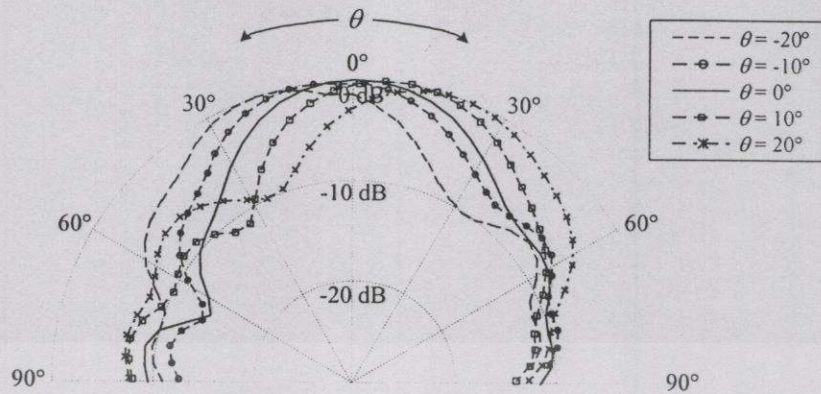
หลังจากที่ทำการคำนวณหาค่าตัวประกอบคุณภาพ ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม และเฟสที่ใช้เพื่อการปรับทิศทางลำคลื่นของสายอากาศได้แล้ว จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเพื่อใช้ในการปรับทิศทางของลำคลื่นตามสมการ (3.3) ซึ่งค่าความถี่ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเพื่อปรับทิศทางของลำคลื่น

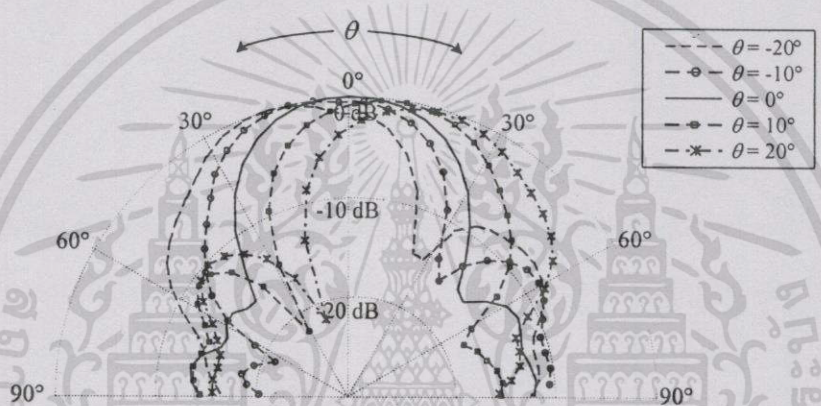
ทิศทางของลำคลื่นหลัก ( $\theta_0, \phi_0$ )	#1 ความถี่ (GHz)	#2 ความถี่ (GHz)	#3 ความถี่ (GHz)	#4 ความถี่ (GHz)	#5 ความถี่ (GHz)	#6 ความถี่ (GHz)
(-30,0)	10.00033	10.00040	10.00004	9.99967	9.99967	10.00004
(-20,0)	9.99912	10.00088	10.00017	9.99912	9.99912	10.00017
(-10,0)	9.99802	10.00076	10.00010	9.99907	9.99907	10.00010
(0,0)	9.99754	9.99972	9.99985	9.99978	9.99978	9.99985
(10,0)	9.99792	9.99889	9.99960	10.00060	10.00060	9.99960
(20,0)	9.99897	9.99919	9.99954	10.00080	10.00080	9.99954
(30,0)	10.00017	10.00002	9.99968	10.00050	10.00050	9.99968
(-30,90)	9.99919	9.99966	10.00009	10.00047	9.99941	10.00013
(-20,90)	9.99842	9.99969	10.00057	10.00061	9.99912	9.99950
(-10,90)	9.99779	9.99971	10.00059	10.00038	9.99922	9.99924
(10,90)	9.99779	9.99971	9.99924	9.99922	10.00038	10.00059
(20,90)	9.99842	9.99969	9.99950	9.99912	10.00061	10.00057
(30,90)	9.99919	9.99966	10.00013	9.99941	10.00047	10.00009

### 3.3.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

จากการปรับเฟสของสายอากาศองค์ประกอบแต่ละตัวตามที่กำหนดได้ในตารางที่ 3.6 ทำให้สามารถคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการตามสมการ (3.8) ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยรูปที่ 3.12 (ก) เป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการในระนาบ XZ คือ  $\phi_0 = 0^\circ$  และ รูปที่ 3.12 (ข) คือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการในระนาบ YZ คือ  $\phi_0 = 90^\circ$  ในที่นี้นำเสนอตัวอย่างของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ปรับทิศทางไปที่ค่า  $\theta_0$  ต่างๆ ทั้งหมด 5 ทิศทางเพื่อเป็นแนวทางในแต่ละระนาบด้วยกันคือ  $(\phi_0, \theta_0) = (0^\circ, 0^\circ), (\pm 10^\circ, 0^\circ), (\pm 20^\circ, 0^\circ)$  และ  $(\phi_0, \theta_0) = (0^\circ, 90^\circ), (\pm 10^\circ, 90^\circ), (\pm 20^\circ, 90^\circ)$



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แฉวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง  
 (ก) ระนาบ XZ ( $\phi_0 = 0^\circ$ )  
 (ข) ระนาบ YZ ( $\phi_0 = 90^\circ$ )

ผลจากการคำนวณจะเห็นว่าสายอากาศออสซิลเลเตอร์แฉวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้สามารถปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้โดยให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ค่อนข้างคงที่เมื่อมีการปรับลำคลื่นไป และจากการคำนวณสายอากาศนี้มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 11.05 dBi

จากที่นำเสนอมาทั้งหมดนี้เป็นวิธีการในการปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการโดยใช้เทคนิคการอินเจกชันล็อกกิ้งของสัญญาณของสายอากาศองค์ประกอบแต่ละตัว ซึ่งจากวิธีการข้างต้นนี้จะใช้เป็นแนวทางเพื่อทำการทดลองต่อไป

### 3.4 สรุป

ในบทนี้เป็นการแสดงสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง โครงสร้างของสายอากาศเป็นสายอากาศแวลวลำดับทรงกลมซึ่งมีคุณสมบัติคือ ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ค่อนข้างคงที่เมื่อมีการปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางใดๆ โดยมีสายอากาศองค์ประกอบที่ทำจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมปลายเปิดตัดตรง 1 องค์ประกอบ และปลายเปิดตัดเฉียงทำมุม 15 องศาจำนวน 5 องค์ประกอบ ภายในแต่ละองค์ประกอบมีอุปกรณ์สำคัญคือ ไดโอดกัมมันต์ซึ่งทำหน้าที่เป็นออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องและตัวผสมสัญญาณได้ภายในตัวเอง และ ไดโอดควาเรกเตอร์ที่ทำหน้าที่ในการปรับจูนความถี่อย่างละเอียด

ในการวิเคราะห์ แบบจำลองของสายอากาศองค์ประกอบได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อการวิเคราะห์ โดยการใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นการจำลองโครงสร้างของสายอากาศโดยใช้ตาข่ายเส้นลวดตัวนำ ในการจำลองต้องทำการกำหนดจุดเริ่มต้น  $(x, y, z)$  และจุดสิ้นสุด  $(x', y', z')$  ของเส้นลวดแต่ละเส้น และทำการแบ่งเส้นลวดออกเป็นเซกเมนต์ย่อยๆตามเงื่อนไขที่กำหนด ในการวิเคราะห์ต้องกำหนดความถี่ในการใช้งานของสายอากาศ ลักษณะการกระตุ้นสายอากาศ โดยเลือกการกระตุ้นเป็นแบบแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าโดยทำการจำลองจุดป้อนสัญญาณเป็นแบบขั้วต่อซึ่งมีลักษณะเป็นเคลด้าแก่เพื่อรองรับไดโอดกัมมันต์ และในการวิเคราะห์สายอากาศนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ทำให้สายอากาศองค์ประกอบมีคุณลักษณะอันได้แก่ อิมพีแดนซ์ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม หลังจากนั้นจึงพิจารณาตัวแปรต่างๆได้แก่ ตัวประกอบคุณภาพ สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม เฟส และความถี่สำหรับการปรับทิศทางของลำคลื่นสำหรับสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองสามารถปรับได้โดยการเปลี่ยนความถี่ของแต่ละสายอากาศองค์ประกอบ โดยจากผลการคำนวณนี้จะนำไปใช้เป็นแนวทางในการทดลองสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองต่อไป

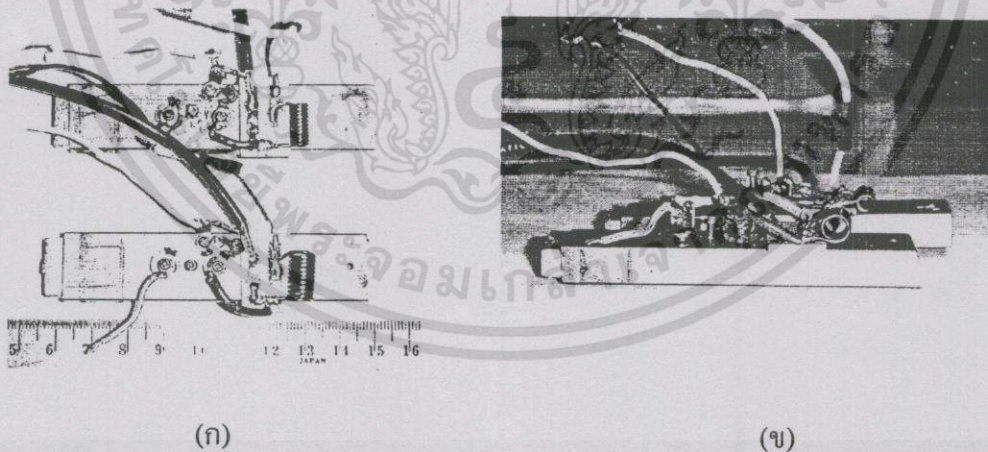
## บทที่ 4

### ผลการทดสอบสายอากาศองค์ประกอบ

ในบทนี้เป็นการทดสอบคุณลักษณะทั่วไปของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ เนื่องจากสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้เสมือนเป็นออสซิลเลเตอร์ที่มีการแพร่กระจายคลื่น (radiating oscillator) ดังนั้นการทดสอบและคุณลักษณะต่างๆของวงจรออสซิลเลเตอร์ เช่น ความถี่ กำลังงาน ช่วงการปรับไบอัส ตัวประกอบคุณภาพภายนอก แบนด์วิดท์และอัตราการขยายของการอินเจกชันล็อกกิ้ง ค่าการสูญเสียของการแปลงผัน เป็นต้น ก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองได้เช่นกัน ในขณะที่โครงสร้างที่แพร่กระจายคลื่นก็สามารถนิยามหรือทำการทดลองเพิ่มเติมได้ในเชิงของคุณลักษณะของสายอากาศทั่วไป

#### 4.1 สายอากาศองค์ประกอบต้นแบบ

เพื่อที่จะทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศองค์ประกอบที่ได้ทำการวิเคราะห์และออกแบบ ดังนั้นสายอากาศต้นแบบของสายอากาศองค์ประกอบจึงถูกสร้างขึ้นและทำการทดสอบสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 สายอากาศองค์ประกอบต้นแบบ

(ก) ภาพถ่ายด้านบน

(ข) ภาพถ่ายด้านข้าง

สายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรงและสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา ที่เป็นสายอากาศต้นแบบทำมาจากท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีด้านกว้าง 1.6 เซนติเมตร

ด้านแคบ 0.8 เซนติเมตร และมีความยาว 9 เซนติเมตร ซึ่งตามการคำนวณแล้วสายอากาศจะต้องมีความยาวเท่ากับ 6.6 เซนติเมตร ( $3\lambda/4$ ) แต่เนื่องจากสายอากาศที่สร้างขึ้นจริงอาจจะต้องมีการปรับจูนด้วยตัวเลื่อนลัดวงจร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเผื่อความยาวของท่อนำคลื่นไว้ซึ่งความยาวที่เผื่อนี้จะไม่นำมาพิจารณา โดยจะพิจารณาความยาวท่อนำคลื่นที่ 6.6 เซนติเมตร สายอากาศองค์ประกอบมีไดโอดกัณฑ์ติดตั้งอยู่ภายในท่อนำคลื่นที่ระยะทางห่างจากปลายปิดของท่อนำคลื่นที่พิจารณาเท่ากับ 2.2 เซนติเมตร ( $\lambda/4$ ) ตำแหน่งของสกรูจูน และไดโอดควาแรกเตอร์อยู่ห่างจากปลายปิดของท่อนำคลื่นที่ 1.5 และ 0.8 เซนติเมตร ตามลำดับ

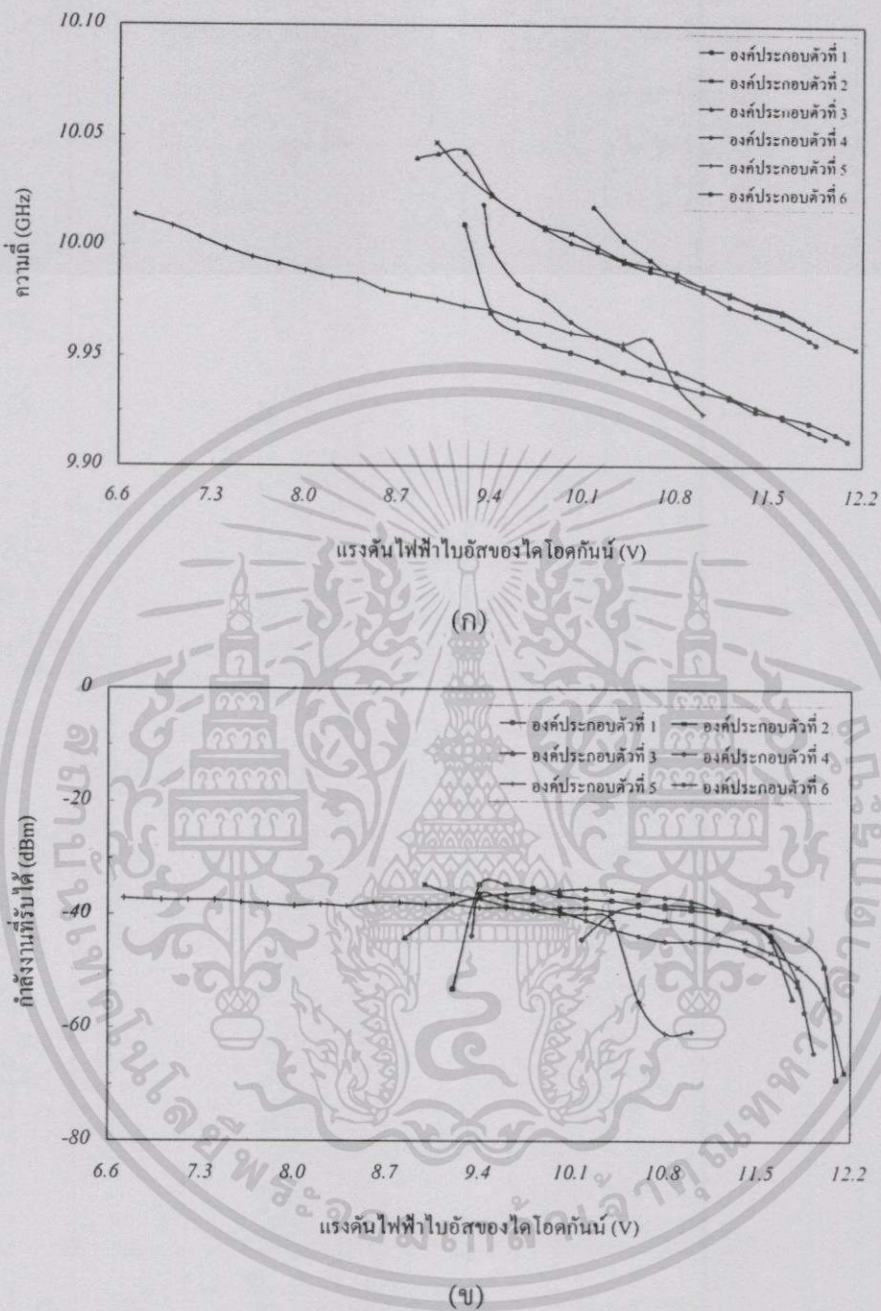
#### 4.2 พฤติกรรมการปรับไบอัส (Bias Tuning Performance)

เพื่อเป็นการศึกษาความสามารถในการออสซิลเลตของสายอากาศออสซิลเลเตอร์ที่ใช้เป็นสายอากาศองค์ประกอบแต่ละตัวว่ามีความสามารถในการออสซิลเลตที่ความถี่ต่างๆสัมพันธ์กับแรงดันไฟฟ้าอย่างไร นั่นคือ จะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าเท่าไรจึงจะทำให้สายอากาศออสซิลเลตความถี่ที่ต้องการได้ และออสซิลเลตออกมาด้วยกำลังงานเท่าไร ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาคูสมบัติเฉพาะตัวในการออสซิลเลตของสายอากาศองค์ประกอบแต่ละตัว จึงได้ทำการทดลองภายในห้องทดสอบสายอากาศที่พัฒนาขึ้นเอง (In house chamber) โดยใช้สายอากาศองค์ประกอบที่ต้องการทดสอบเป็นสายอากาศส่ง สายอากาศรับคือสายอากาศท่อนำคลื่นปลายเปิดด้านหนึ่งเป็นสายอากาศอ้างอิง อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) รุ่น IFR AN930A และแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supply) วิธีการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศท่อนำคลื่นอ้างอิงที่ใช้เป็นสายอากาศรับกับสายอากาศองค์ประกอบเท่ากับ 1 เมตร



รูปที่ 4.2 การทดลองการปรับไบอัสสายอากาศองค์ประกอบ

ผลการทดลองแบ่งออกเป็นสองกรณีคือ พฤติกรรมในการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดกัณฑ์ และการปรับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดควาแรกเตอร์ โดยในกรณีแรกเป็นการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่ป้อนให้กับไดโอดกัณฑ์กับความถี่และกำลังงานที่ออสซิลเลตจากสายอากาศองค์ประกอบ โดยที่ยังไม่มีการปรับไบอัสให้กับไดโอดควาแรกเตอร์ ผลการทดลองในกรณีดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การปรับไบอัสและกำลังงานที่รับได้เทียบกับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดกัมมันต์

(ก) ความถี่เทียบกับการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดกัมมันต์

(ข) กำลังงานที่รับได้เทียบกับการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดกัมมันต์

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าจนถึงระดับหนึ่ง สายอากาศจะเกิดการออสซิลเลตและแพร่กระจายคลื่นออกมา ความถี่ที่ออสซิลเลตจะลดลงขณะที่แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

เมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง การออสซิลเลตจะหายไป ดังนั้นความถี่ในการออสซิลเลตจะเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้า

สายอากาศสององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบสามารถทำงานที่ความถี่ที่ต้องการ คือ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ได้โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในการป้อนให้กับไดโอดกัณฑ์ต่างกัน สายอากาศสององค์ประกอบตัวที่ 1 ซึ่งเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นปากตรงทำงานที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ กำลังงานส่ง ( $P_t$ ) เท่ากับ 11.58 dBm โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 9.2 โวลต์

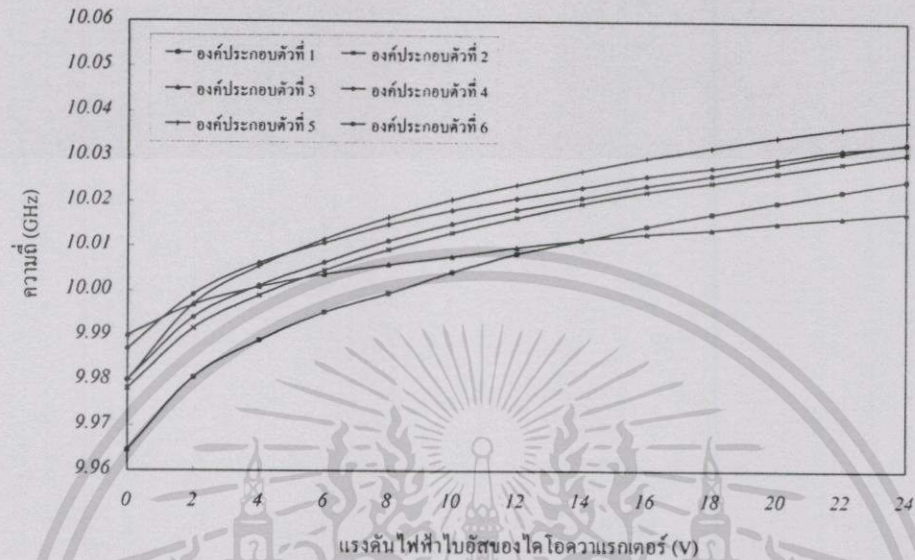
สำหรับสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียงทั้ง 5 องค์ประกอบในทางอุดมคติแล้ว สายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะต้องแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ที่ต้องการได้โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่เท่ากัน และมีกำลังงานส่งที่เท่ากัน เนื่องจากสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียงทั้ง 5 องค์ประกอบใช้ไดโอดกัณฑ์เบอร์เดียวกัน นอกจากนี้สายอากาศยังมีขนาดและตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ภายในท่อนำคลื่นที่เหมือนกันทุกประการ แต่จากผลการทดลองพบว่าที่ความถี่ที่ใช้งาน 10 กิกะเฮิร์ตซ์ สายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียงทั้ง 5 องค์ประกอบใช้แรงดันไฟฟ้าไบอัสไม่เท่ากัน และให้กำลังงานส่งที่ไม่เท่ากันดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผลที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากความผิดพลาดทางกายภาพของสายอากาศท่อนำคลื่นซึ่งสายอากาศแต่ละองค์ประกอบที่สร้างขึ้นนี้อาจจะมีขนาดและตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ไม่เท่ากันพอดีเหมือนในทางอุดมคติ นอกจากนี้แล้ว ยังมีผลที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิต่างๆที่มีผลต่อการออสซิลเลตของสายอากาศ ซึ่งเราไม่สามารถควบคุมตัวแปรต่างๆเหล่านี้ได้หมดในขณะที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 4.1 การปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดกัณฑ์ออสซิลเลตความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์

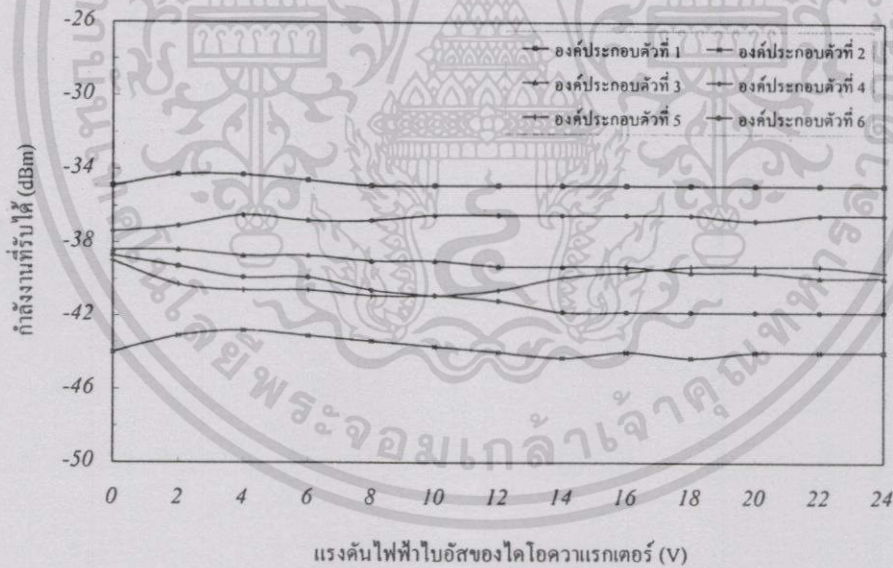
สายอากาศสององค์ประกอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5	ตัวที่ 6
แรงดันไฟฟ้าไบอัส (V)	9.2	10.2	10.0	9.4	7.4	10.4
กำลังแผ่ประสิทธิภาพแบบไอโซโทรปิก (EIRP) (dBm)	17.65	14.67	17.77	17.17	15.96	13.77
กำลังงานที่ส่ง ( $P_t$ ) (dBm)	11.58	8.24	11.34	10.74	9.55	7.34

ในกรณีที่สองเป็นการทดลองโดยเพิ่มการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดควาแรกเตอร์ การทดลองจะเริ่มจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับไดโอดกัณฑ์เพื่อให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ที่ใกล้เคียงกับความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการปรับแรงดันไฟฟ้าให้กับไดโอดควาแรกเตอร์ และทำการบันทึกค่าความถี่และกำลังงานที่รับได้เทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

ให้กับไดโอดควาเรกเตอร์ ซึ่งค่าความถี่และกำลังงานที่ได้จากการทดลองจะมีความสัมพันธ์กับค่าแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดควาเรกเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) และ 4.4(ข)



(ก)



(ข)

#### รูปที่ 4.4 การปรับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดควาเรกเตอร์

(ก) ความถี่ที่วัดได้เทียบกับการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดควาเรกเตอร์

(ข) กำลังงานที่รับได้เทียบกับการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของไดโอดควาเรกเตอร์

จากผลการทดลองพบว่า ความถี่ที่ออสซิลเลตของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดโอดควาแรกเตอร์ และกำลังงานที่สายอากาศรับได้เมื่ออ่านค่าจากหน้าจอเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมพบว่า กำลังงานที่รับได้มีค่าที่ค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการปรับไบอัส โดยมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก และสามารถปรับความถี่ในการออสซิลเลตได้ละเอียดกว่าการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่ป้อนให้กับไดโอดกัณน์ แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายกำลังที่ใช้ในการทดลองมีข้อจำกัด คือ ให้แรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 24 โวลต์ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงปรับแรงดันไฟฟ้าให้กับไดโอดควาแรกเตอร์ได้สูงสุดเพียง 24 โวลต์ โดยที่การออสซิลเลตยังไม่มีแนวโน้มที่จะหายไป ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดลองการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดควาแรกเตอร์เพื่อให้สายอากาศแพร่กระจายคลื่นที่มีความถี่ 10 กิกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.2 การปรับแรงดัน ไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดควาแรกเตอร์ที่ความถี่ 10 กิกะเฮิรตซ์

สายอากาศองค์ประกอบ	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3	ตัวที่ 4	ตัวที่ 5	ตัวที่ 6
แรงดันไฟฟ้าไบอัส (V)	10	6	4	4	2	4
กำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP) (dBm)	18.64	10.28	14.71	16.86	13.08	13.47
กำลังงานที่ส่ง (P <sub>t</sub> ) (dBm)	12.57	3.85	8.28	10.43	6.65	7.04

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองทั้งหมด โดยแสดงช่วงการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัส และช่วงความถี่ที่ออสซิลเลตที่ได้จากการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่ป้อนให้กับไดโอดกัณน์และไดโอดควาแรกเตอร์ และได้แสดงช่วงของกำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิกและกำลังงานที่ส่งที่ได้ในช่วงของการออสซิลเลตทั้งหมด โดยจะพบว่าในกรณีที่ 1 คือ กรณีที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดกัณน์เพียงอย่างเดียวจะทำให้ได้กำลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงมากตลอดช่วงการปรับไบอัส แต่เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดควาแรกเตอร์ด้วย จะพบว่ากำลังงานที่ได้จะมีการเปลี่ยนแปลงต่ำตลอดช่วงการปรับไบอัส คือจะมีการเปลี่ยนแปลงประมาณ  $\pm 1$  dBm เท่านั้น

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัส

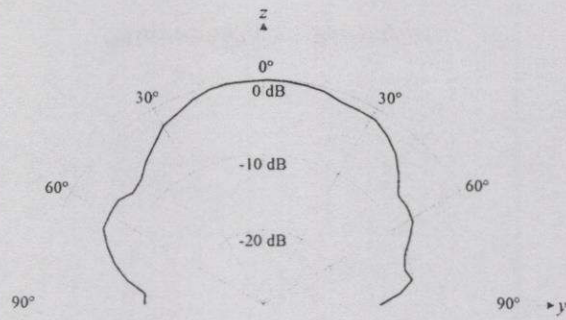
สายอากาศองค์ประกอบ	ตัวที่ 1		ตัวที่ 2		ตัวที่ 3		ตัวที่ 4		ตัวที่ 5		ตัวที่ 6	
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
แรงดันไฟฟ้าไบอัส (V)	9-12	0-24	9-12	0-24	8.8-11.76	0-24	9.3-12	0-24	6.7-11	0-24	10.2-12	0-24
ความถี่ (GHz)	9.91-10.02	9.96-10.03	9.95-10.05	9.97-10.04	9.96-10.04	9.99-10.02	9.91-10.02	9.98-10.04	9.92-10.01	9.98-10.04	9.95-10.02	9.98-10.04
กำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP) (dBm)	13.46±5	18.91±1	12.87±6	9.59±1	15.15±5	14.16±1	11.04±6	16.66±0.6	14.97±1.5	13.4±1	13.1±3	12.76±1.3
กำลังงานที่ส่ง (dBm)	7.39±5	12.84±1	6.44±6	3.16±1	8.72±5	7.73±1	4.61±6	10.23±0.6	8.54±1.5	6.97±1	6.67±3	6.33±1.3

หมายเหตุ กรณีที่ 1 คือ การป้อนแรงดันไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดกั้นนี้เพียงอย่างเดียว

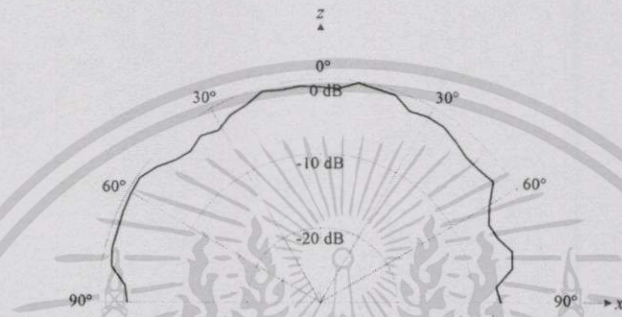
กรณีที่ 2 คือ การป้อนแรงดันไฟฟ้าไบอัสให้กับไดโอดควาเรกเตอร์ร่วมด้วย

### 4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

การทดลองถูกสร้างขึ้นเพื่อวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ สายอากาศส่งและสายอากาศรับวางห่างกันเป็นระยะทาง 1.2 เมตร สายอากาศองค์ประกอบทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง และตัวแปลงจากสายนำคลื่นแกนร่วมไปเป็นท่อนำคลื่น P281C (coaxial waveguide adapter) เป็นสายอากาศรับ สายอากาศองค์ประกอบมีไดโอดกั้นนี้ซึ่งทำหน้าที่เป็นออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องจะทำการผลิตพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ออกมาเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้า และการปรับจูนที่เหมาะสม สายอากาศรับจะต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม รุ่น IFR AN930A เพื่อรับสัญญาณที่ส่งมาจากสายอากาศองค์ประกอบ โดยสายอากาศส่งจะติดตั้งอยู่บนแท่นหมุนสายอากาศซึ่งในการทดลองจะทำการหมุนสายอากาศส่งไปทั้งหมด 180 องศาโดยหมุนไปทีละ 2 องศา รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบที่เป็นสายอากาศท่อนำคลื่นปากตรง และสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา ตามลำดับ



(ก)

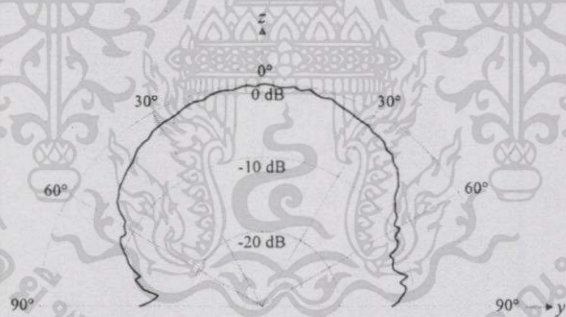


(ข)

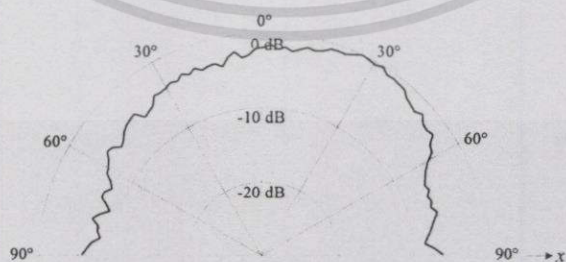
รูปที่ 4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำคลื่นปากตรง

(ก) ระนาบ YZ

(ข) ระนาบ XZ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องค์

(ก) ระนาบ YZ

(ข) ระนาบ XZ

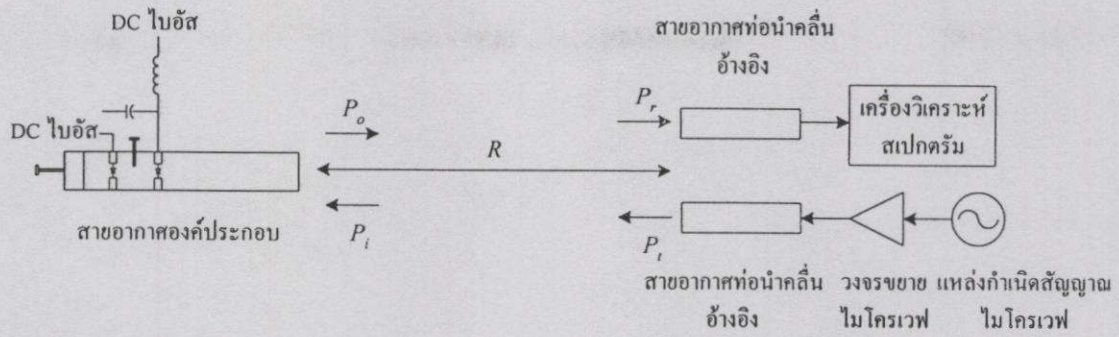
จากผลการทดลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ YZ สำหรับสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรงและสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา พบว่าลำคลื่นชี้ไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  และมีความกว้างลำคลื่น (beamwidth) ที่แคบกว่าในการคำนวณ ส่วนในระนาบ XZ จะเห็นว่าความกว้างลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะกว้างกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ YZ ทั้งในกรณีของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรงและสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา นอกจากนี้ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XZ ของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรงยังคงชี้ไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XZ ของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา จะมีลำคลื่นชี้ไปในทิศทาง  $\theta = 26^\circ$  และมีความกว้างลำคลื่นที่แคบกว่าในกรณีของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรง ในขณะที่ผลการคำนวณจะชี้ไปที่มุม  $\theta = 15^\circ$

เนื่องจากสายอากาศจำเป็นต้องใช้สัญญาณคลื่นวิทยุอินพุต ดังนั้นจึงต้องการแหล่งกำเนิดคลื่นวิทยุที่เสถียรเพื่อให้ผลที่แม่นยำ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงในค่าที่ออสซิลเลเตอร์ เช่น ความถี่ออสซิลเลเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาของออสซิลเลเตอร์ อุณหภูมิ หรือ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมรอบข้าง ก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดแบบสุ่มขึ้นในแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งค่าที่ออสซิลเลเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงนี้สามารถแก้ไขได้โดยวิธีอินเจกชันล็อกกิ้ง

#### 4.4 ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์

จากทฤษฎีในบทที่ 2 ในการปรับลำคลื่นของสายอากาศโดยการปรับความถี่ของการออสซิลเลเตอร์ให้ใกล้เคียงกันภายในช่วงความถี่ที่ล็อกกันของออสซิลเลเตอร์ หรือเรียกว่าการอินเจกชันล็อกกิ้ง ซึ่งจะช่วยให้เฟสของสายอากาศมีความเหมาะสมที่จะปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้นั้น เรามีความจำเป็นที่จะต้องทราบล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ของสายอากาศซึ่งจะทำให้ทราบถึงช่วงกว้างของความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบที่มากที่สุดที่สามารถล็อกกันได้เพื่อที่จะทราบความสามารถในการปรับทิศทางของลำคลื่น ซึ่งการที่จะปรับทิศทางของลำคลื่นไปได้มากเท่าใดนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าการเชื่อมต่อกันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับล็อกกิ้งแบนด์วิดท์และค่าตัวประกอบคุณภาพด้วย ซึ่งค่าเหล่านี้เป็นค่าที่มีความเกี่ยวเนื่องกันคือ ถ้าค่าการเชื่อมต่อกันมากจะทำให้ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์มากขึ้นด้วย นั่นก็หมายความว่าตัวประกอบคุณภาพจะต้องมีค่าต่ำ ซึ่งก็จะทำให้มุมในการกวาดลำคลื่นเพิ่มมากขึ้น

วิธีการทดลองการอินเจกชันล็อกกิ้งแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การวัดค่าอัตราขยายอินเจ็ทชันล็อกกิ้งและค่าอินเจ็ทชันล็อกกิ้งแบนด์วิดท์

รูปที่ 4.7 เป็นการแสดงรูปแบบการทดลองวัดแบนด์วิดท์และอัตราขยายของการอินเจ็ทชันล็อกกิ้งของสายอากาศองค์ประกอบ ค่าตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศสามารถคำนวณได้ภายหลังจากการวัดล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ ( $2\Delta f$ ) และอัตราขยายล็อกกิ้ง (locking gain)

เมื่อสัญญาณภายนอกที่ความถี่  $f_i$  และมีกำลังงาน  $P_i$  ถูกส่งมาที่ออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานอย่างอิสระ (free-running oscillator) ที่ทำงานที่ความถี่  $f_o$  และมีกำลังงานเอาต์พุต  $P_o$  เมื่อ  $f_i$  เข้าใกล้  $f_o$  ออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานอย่างอิสระจะอินเจ็ทชัน-ล็อกเข้ากับสัญญาณภายนอกและกำลังงานเอาต์พุตทั้งหมดจะอยู่ที่ความถี่  $f_i$  [13], [15] เรียกอัตราส่วน ( $P_o/P_i$ ) ว่า อัตราขยายล็อกกิ้ง ผลต่างของความถี่ระหว่าง  $f_o$  และ  $f_i$  คือ แบนด์วิดท์ของการอินเจ็ทชันล็อกกิ้งด้านเดียว ช่วงการล็อกกิ้งขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก ( $Q_e$ ) ของออสซิลเลเตอร์และกำลังงานของระบบ ถ้าค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกยิ่งสูงช่วงแบนด์วิดท์ของการอินเจ็ทชันล็อกกิ้งก็จะยิ่งแคบ ดังสมการ

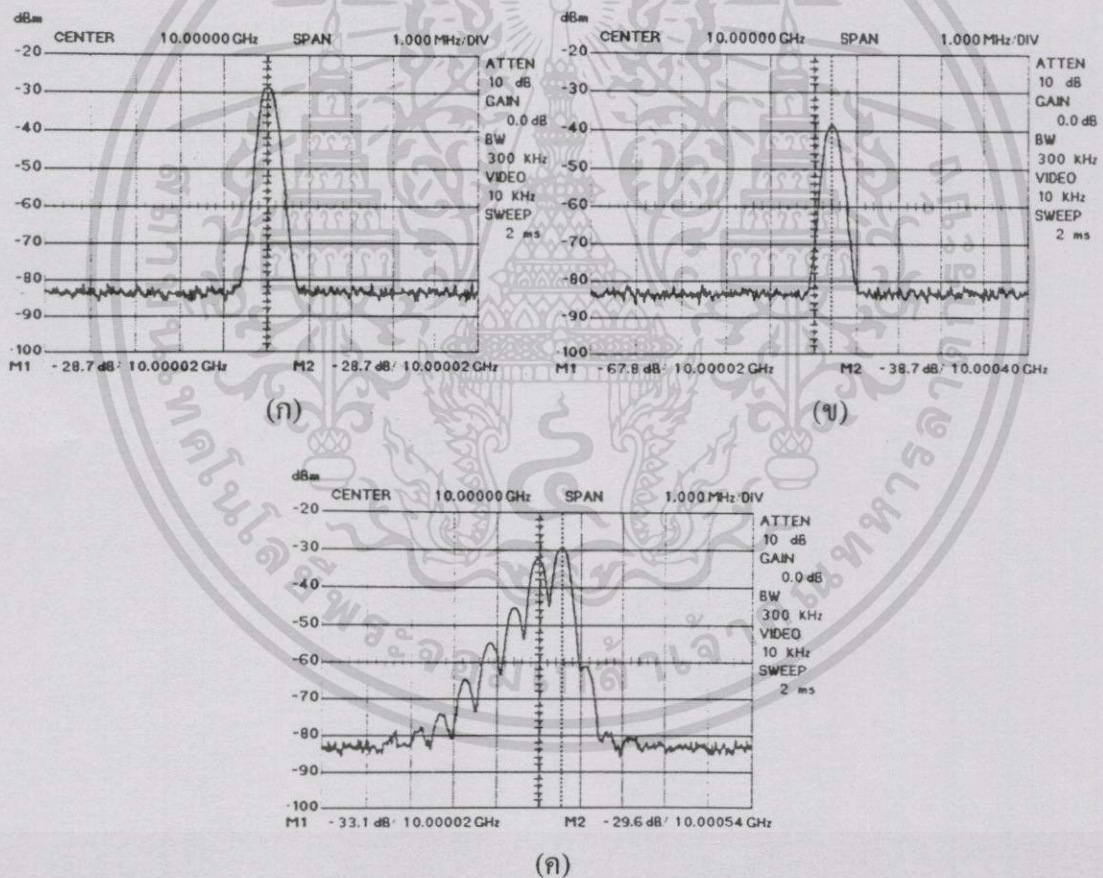
$$\frac{2\Delta f}{f_o} = \frac{2}{Q_e} \left( \frac{P_o}{P_i} \right)^{-1/2} \tag{4.2}$$

โดยที่  $\Delta f$  คือ ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ด้านเดียว และ  $2\Delta f$  คือล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ทั้งหมด โดยการประมาณให้ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ด้านสูงและล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ด้านต่ำมีค่าเท่ากัน  $f_o$  คือ ความถี่ที่ใช้ งาน  $P_o$  คือ กำลังงานของออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานอย่างอิสระ และ  $P_i$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่อินเจ็ท โดยที่  $P_i$  และ  $P_o$  คำนวณได้จาก  $P_r$  และ  $P_r$  โดยการใช้อนุกรมการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) อัตราขยายล็อกกิ้งในหน่วย dB นิยามได้เป็น

$$G_L = 10 \log \frac{P_o}{P_i} \tag{dB} \tag{4.3}$$

#### 4.4.1 ผลการทดลอง

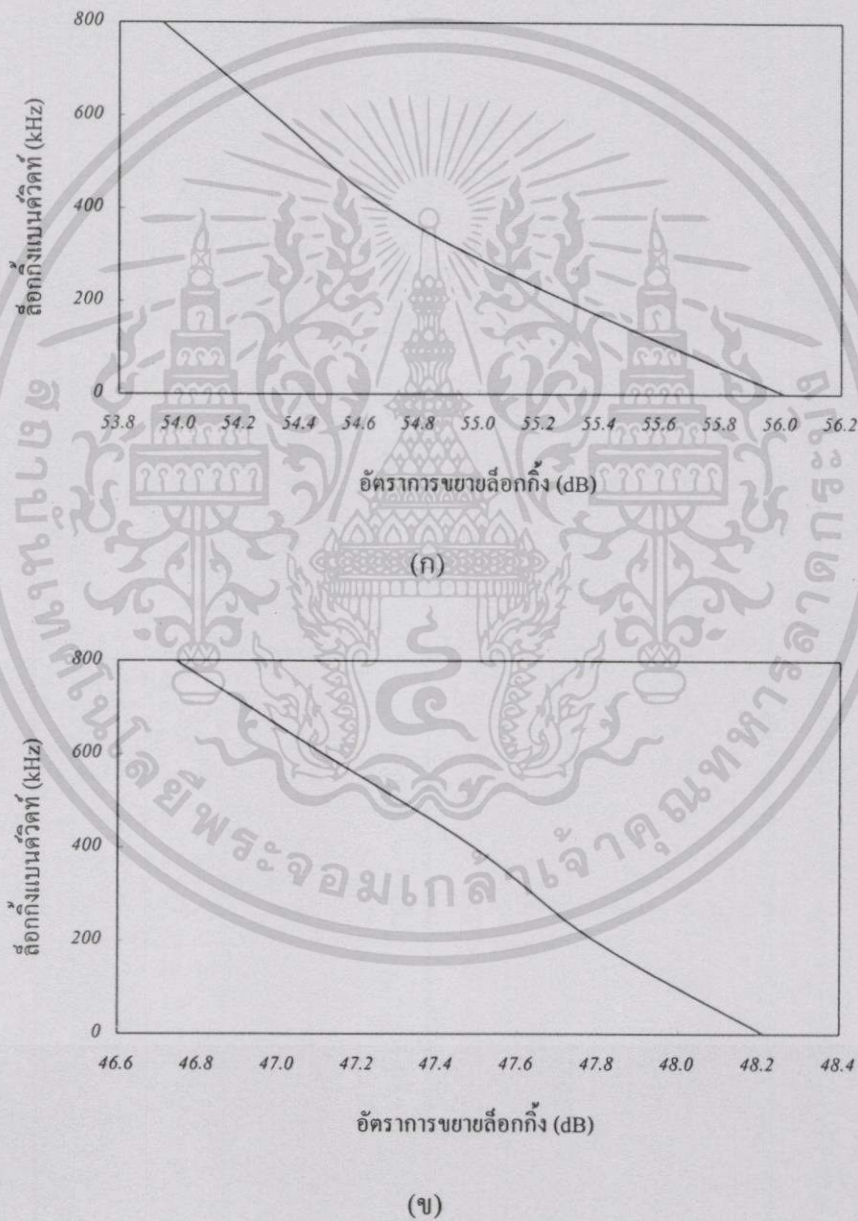
ถ้าสัญญาณที่อินเจ็ทเข้ามามีความถี่อยู่ในช่วงล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ก็จะทำให้ความถี่ของสัญญาณที่อินเจ็ทและความถี่อิสระของสายอากาศสองคู่ประกอบล็อกเข้ากันได้กลายเป็นความถี่เดียว โดยที่ความถี่อิสระของสายอากาศสองคู่ประกอบจะเป็นตัวที่เลื่อนเข้ามาล็อกกลายเป็นความถี่เดียวกับความถี่ที่อินเจ็ท ซึ่งแสดงได้จากหน้าจอเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม โดยที่สัญญาณความถี่อิสระ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.8(ก) เลื่อนเข้ามาล็อกกับสัญญาณความถี่ที่อินเจ็ท 10.0004 กิกะเฮิร์ตซ์ กลายเป็นสัญญาณความถี่เดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.8(ข) ถ้าสัญญาณที่อินเจ็ทเข้ามาไม่อยู่ในช่วงล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ ก็จะทำให้เกิดการหลุดออกจากการล็อกกลายเป็น 2 ความถี่คือความถี่อิสระและความถี่ที่อินเจ็ท โดยที่ความถี่อิสระก็จะกลับมาที่ความถี่เดิมก่อนที่จะมีการล็อก รูปที่ 4.8 (ค) แสดงสัญญาณที่มีการหลุดออกจากการล็อก



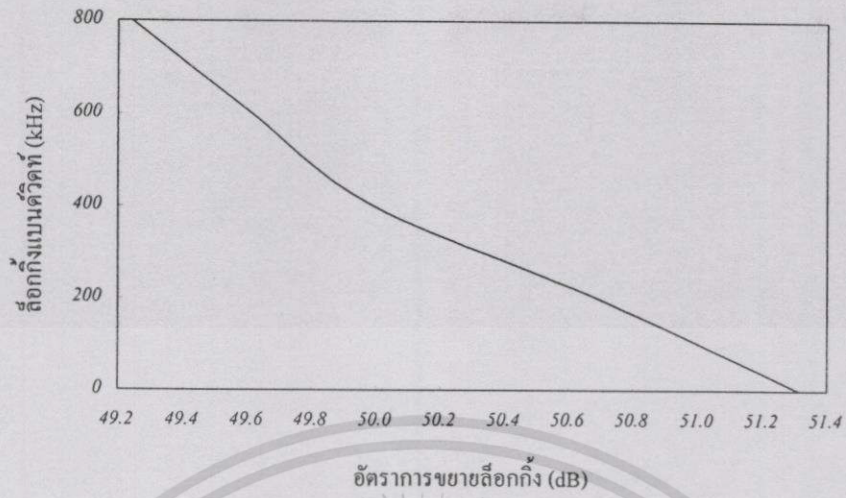
รูปที่ 4.8 สเปกตรัมของสัญญาณ

- (ก) สัญญาณขณะที่มีการล็อกกัน โดยสัญญาณที่อินเจ็ทมีความถี่เดียวกับความถี่อิสระ
- (ข) สัญญาณขณะที่มีการล็อกกัน โดยสัญญาณที่อินเจ็ทมีความถี่ 10.00040 กิกะเฮิร์ตซ์
- (ค) สัญญาณขณะที่มีการหลุดออกจากการล็อก

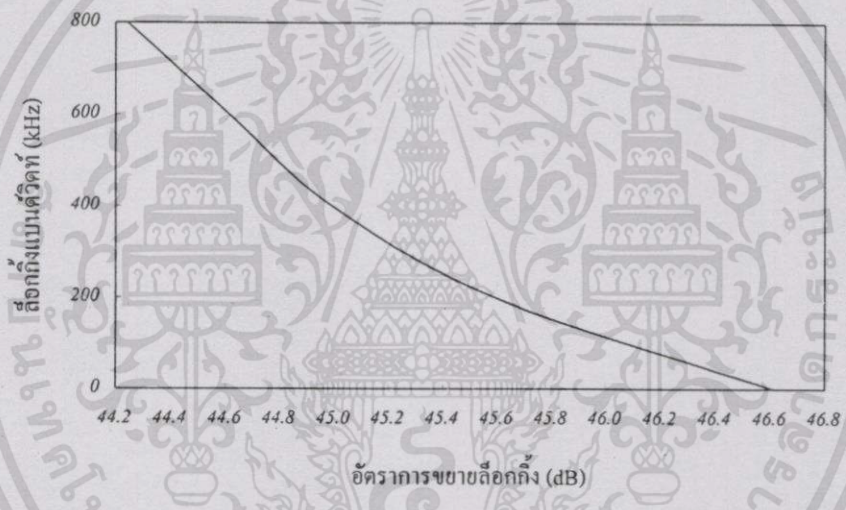
จากการทดลองพบว่าสายอากาศองค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบมีช่วงถี่อ็อกกิ่งแบนด์วิดท์ 800 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งหมายความว่าสายอากาศแต่ละองค์ประกอบสามารถถี่อ็อกเข้ากับสัญญาณที่อินเจ็ทเข้ามาจากภายนอกได้ในช่วงความถี่ 800 กิโลเฮิร์ตซ์ จากความถี่อิสระ ซึ่งจะพบว่าความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบที่คำนวณได้ในตารางที่ 3.7 ในบทที่ 3 นั้นจะมีผลต่างของความถี่อยู่ในช่วงถี่อ็อกกิ่งแบนด์วิดท์ที่ทดลองนี้ด้วย กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างถี่อ็อกกิ่งแบนด์วิดท์และอัตราขยายถี่อ็อกกิ่งของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



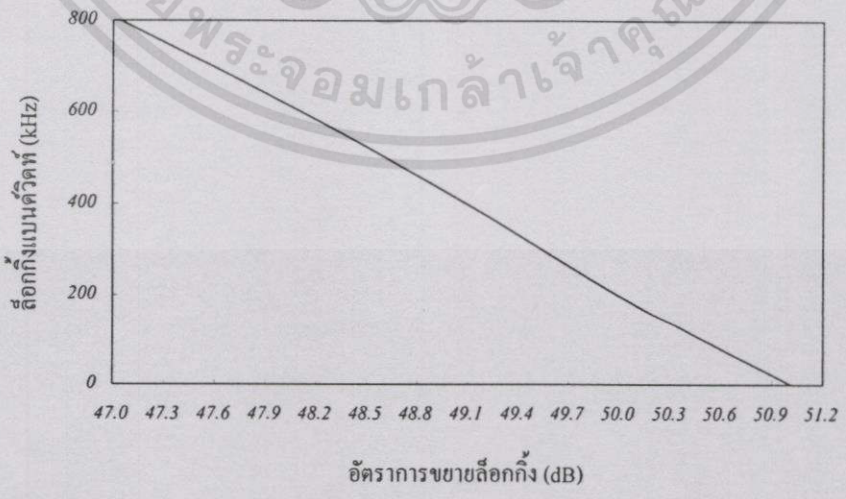
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างถี่อ็อกกิ่งแบนด์วิดท์และอัตราขยายถี่อ็อกกิ่ง



(ค)

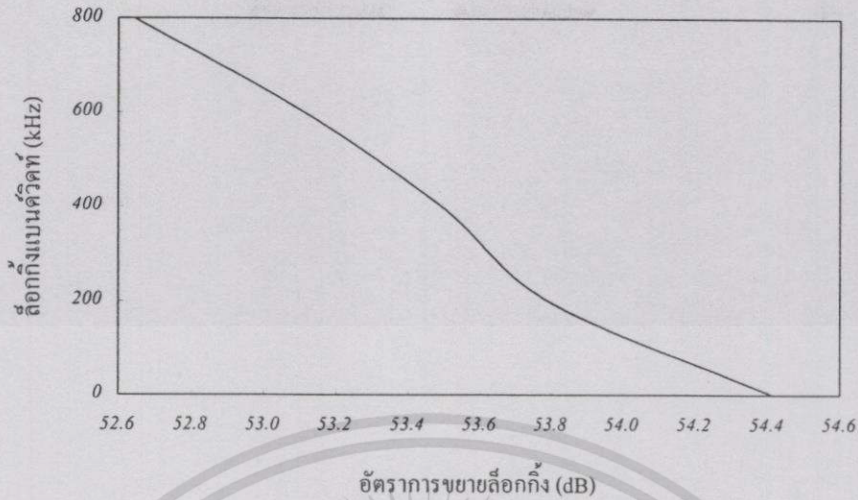


(ง)



(จ)

รูปที่ 4.9 (ต่อ)



(ข)

รูปที่ 4.9 (ต่อ)

- (ก) สายอากาศสองคัพประกอบที่ 1
- (ข) สายอากาศสองคัพประกอบที่ 2
- (ค) สายอากาศสองคัพประกอบที่ 3
- (ง) สายอากาศสองคัพประกอบที่ 4
- (จ) สายอากาศสองคัพประกอบที่ 5
- (ฉ) สายอากาศสองคัพประกอบที่ 6

จากกราฟจะพบว่าสื่อกึ่งแบนด์วิดท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราขยายสื่อกึ่งมีค่าต่ำลง กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราขยายสื่อกึ่งกับสื่อกึ่งแบนด์วิดท์นี้มีความสำคัญเป็นพิเศษสำหรับสายอากาศเอ็กทิฟเนื่องจากจะได้รับผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมได้ง่าย

#### 4.5 ตัวประกอบคุณภาพภายนอก

ตัวประกอบคุณภาพเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีความสำคัญกับการปรับทิศทางของลำคลื่น ซึ่งนอกจากค่าการเชื่อมต่อนี้ที่ควรจะมีค่ามากแล้ว ค่าตัวประกอบคุณภาพนี้ควรจะมีค่าน้อยด้วย จึงจะทำให้สามารถรักษาการอินเจกชันสื่อกเอาไว้ได้ และทำให้มุมในการกวาดลำคลื่นกว้างมากขึ้น ด้วย จากการทดลองสื่อกึ่งแบนด์วิดท์ทำให้สามารถคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศ ซึ่งแสดงเป็นค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกได้จากสมการ

$$Q_e = \left( \frac{f_o}{\Delta f} \right) / \left( \sqrt{\frac{P_o}{P_i}} \right) \quad (4.4)$$

ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบที่คำนวณได้โดยอาศัยค่า ล็อกกิ้งเบนคีวิตท์ที่ได้จากการทดลองและสมการ (4.4) แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกของสายอากาศองค์ประกอบ

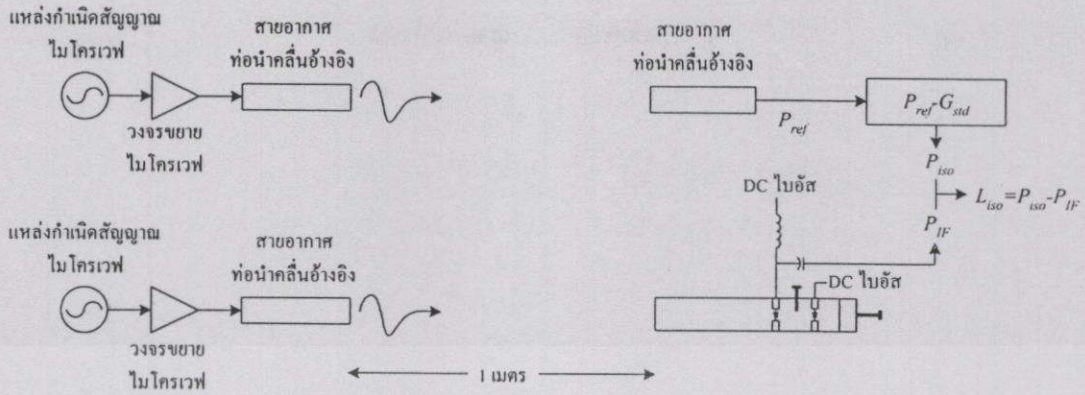
สายอากาศองค์ประกอบ	ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก
องค์ประกอบที่ 1	50.2
องค์ประกอบที่ 2	115.02
องค์ประกอบที่ 3	86.26
องค์ประกอบที่ 4	153.39
องค์ประกอบที่ 5	111.12
องค์ประกอบที่ 6	58.32

จากตารางที่ 4.4 จะพบว่าค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบ มีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีค่าอัตราขยายล็อกกิ้งไม่เท่ากัน ซึ่งเกิด จากสายอากาศให้ค่ากำลังงานเอาต์พุต ( $P_o$ ) ไม่เท่ากัน

#### 4.6 การสูญเสียของการแปลงผัน (Conversion loss)

ประสิทธิภาพการแปลงผันจากสัญญาณไฟตรง ไปเป็นสัญญาณความถี่วิทยุ นั้นเป็น พารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศแเอ็กทิฟซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้ด้วย สายอากาศ ออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้เป็นสายอากาศรับซึ่งเมื่อรับ สัญญาณที่ส่งมาแล้วจะสามารถให้สัญญาณความถี่กลางออกมาได้ทันทีโดยใช้ไดโอดกั้นนี้เพียงตัว เดียว ดังนั้นจึงสนใจประสิทธิภาพการแปลงผันจากความถี่วิทยุไปเป็นความถี่กลางซึ่งเป็น พารามิเตอร์หนึ่งที่แสดงถึงประสิทธิภาพของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการ ผสมสัญญาณในตัวเอง โดยค่าการสูญเสียของการแปลงผันเป็นสิ่งที่ตัดสินคุณภาพของตัวผสม สัญญาณ

การแปลงผันของออสซิลเลเตอร์ในสายอากาศแเอ็กทิฟที่แท้จริงนั้นเป็นสิ่งที่ยากที่จะทราบ ค่า เนื่องจากในทางกายภาพสายอากาศไม่สามารถแยกออกจากตัวอุปกรณ์แเอ็กทิฟได้ ซึ่งวิธีการวัด ประสิทธิภาพการผสมสัญญาณในตัวเองของสายอากาศแเอ็กทิฟ [15] นั้นได้ทำการทดลองหาค่าการ สูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศแเอ็กทิฟโดยใช้สายอากาศไอโซโทรปิกเป็นสายอากาศอ้างอิง วิธีการทดลองหาค่าการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบแสดงดังรูปที่



รูปที่ 4.10 การวัดการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศองค์ประกอบ

สายอากาศส่งและสายอากาศรับวางห่างกันเป็นระยะทาง 1 เมตร แต่เนื่องจากสายอากาศไอโซโทรปิกไม่สามารถสร้างได้จริง ดังนั้นในการทดลองนี้จึงนำสายอากาศท่อนำคลื่นปลายเปิดด้านหนึ่งที่มีอัตราขยาย 4.54 dB ที่ความถี่ 10.4 กิกะเฮิรตซ์ มาใช้เป็นสายอากาศอ้างอิงเพื่อใช้ในการวัดกำลังงานระดับอ้างอิง ( $P_{ref}$ ) แทน ซึ่ง  $P_{ref}$  ถูกวัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ซึ่งทำให้สามารถคำนวณค่ากำลังงานที่รับได้ของสายอากาศรับในกรณีที่เป็นสายอากาศไอโซโทรปิก ( $P_{iso}$ ) ได้ดังสมการ

$$P_{iso} = P_{ref} - G_{std} \tag{4.5}$$

โดยที่  $G_{std}$  คือ อัตราขยายของสายอากาศอ้างอิงซึ่งในที่นี้คือสายอากาศท่อนำคลื่นอ้างอิง การสูญเสียของการแปลงผันในกรณีไอโซโทรปิก ( $L_{iso}$ ) สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$L_{iso} = P_{iso} - P_{IF} \tag{4.6}$$

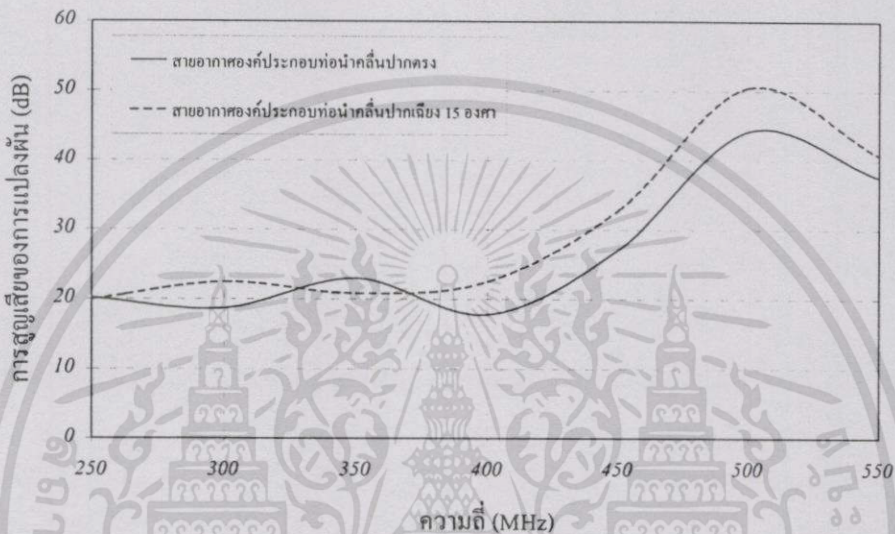
โดยที่  $P_{IF}$  คือ กำลังงานที่ความถี่กลาง และ  $P_{iso}$  คือ กำลังงานที่รับได้ของสายอากาศรับในกรณีที่เป็นสายอากาศไอโซโทรปิก ค่ากำลังงานความถี่กลางวัดได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม การสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศองค์ประกอบคำนวณได้จาก

$$L_c = L_{iso} + G_{aa} \tag{4.7}$$

โดยที่  $G_{aa}$  คือ อัตราการขยายของสายอากาศเอ็กทิฟที่ต้องการหาค่าการสูญเสียของการแปลงผัน

#### 4.6.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองวัดค่าการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศองค์ประกอบซึ่งได้แก่สายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรง และสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา ในช่วงความถี่กลาง 250-550 เมกะเฮิร์ตซ์ แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กลางกับค่าการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศ



รูปที่ 4.11 การสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศองค์ประกอบ

จากการทดลองในกรณีสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรง  $P_{ref}$  ถูกวัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมได้ค่ากำลังงานเท่ากับ  $-22.1$  dBm แต่ในการวัด  $P_{ref}$  นั้นต้องมีการต่อสายส่งแกนร่วมจากสายอากาศรับมาเข้าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยดังนั้น  $P_{ref}$  ที่แท้จริงต้องมีการชดเชยการสูญเสียในสายด้วย ซึ่งจะได้ค่า  $P_{ref}$  ที่แท้จริงเท่ากับ  $-19.39$  dBm ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า  $P_{iso}$  ได้เท่ากับ  $-23.93$  dBm สำหรับกำลังงานที่ความถี่กลางของสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรงที่ความถี่ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ วัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมได้ค่า  $-35.9$  dBm ซึ่งต้องมีการชดเชยการสูญเสียในสายส่งแกนร่วมด้วย ทำให้ได้กำลังงานที่ความถี่กลาง ( $P_{IF}$ ) ที่แท้จริงเท่ากับ  $-35.63$  dBm ค่าการสูญเสียของการแปลงผันในกรณีไอโซโทรปิก ( $L_{iso}$ ) จึงเท่ากับ  $11.69$  dBm ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (4.6) ดังนั้นค่าการสูญเสียของการแปลงผัน ( $L_c$ ) ของสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรงจะเท่ากับ  $17.76$  dB ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (4.7) โดยที่อัตราขยายของสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรง ( $G_{aa}$ ) เท่ากับ  $6.07$  dB

ในกรณีสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศานั้นก็ทำการทดลองในลักษณะเดียวกับสายอากาศองค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรง โดยที่  $P_{ref}$  ถูกวัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมได้ค่ากำลังงานเมื่อมีการชดเชยค่าการสูญเสียในสายส่งแกนร่วมแล้วเท่ากับ  $-19.39$  dBm

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า  $P_{iso}$  ได้เท่ากับ  $-23.93$  dBm สำหรับกำลังงานที่ความถี่กลางของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศาที่ความถี่ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ วัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมได้ค่า  $-40.3$  dBm ซึ่งต้องมีการชดเชยการสูญเสียในสายส่งแกนร่วมด้วย ทำให้ได้กำลังงานที่ความถี่กลาง ( $P_{IF}$ ) ที่แท้จริงเท่ากับ  $-40.03$  dBm ค่าการสูญเสียของการแปลงผันในกรณีไอโซโทรปิก ( $L_{iso}$ ) จึงเท่ากับ  $16.09$  dBm ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (4.6) ดังนั้นค่าการสูญเสียของการแปลงผัน ( $L_c$ ) ของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศาจะเท่ากับ  $22.52$  dB ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (4.7) โดยที่อัตราขยายของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา ( $G_{aa}$ ) เท่ากับ  $6.43$  dB

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.11 จะพบว่าในช่วงความถี่กลาง 250-550 เมกะเฮิร์ตซ์นี้ สายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรงและสายอากาศที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา จะมีค่าการสูญเสียของการแปลงผันที่ค่อนข้างต่ำทั้ง 2 องค์ประกอบที่ความถี่กลาง 400 เมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจึงเลือกที่ความถี่กลาง 400 เมกะเฮิร์ตซ์นี้เพื่อใช้ในการจัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองในบทที่ 5 ต่อไป

#### 4.7 สรุป

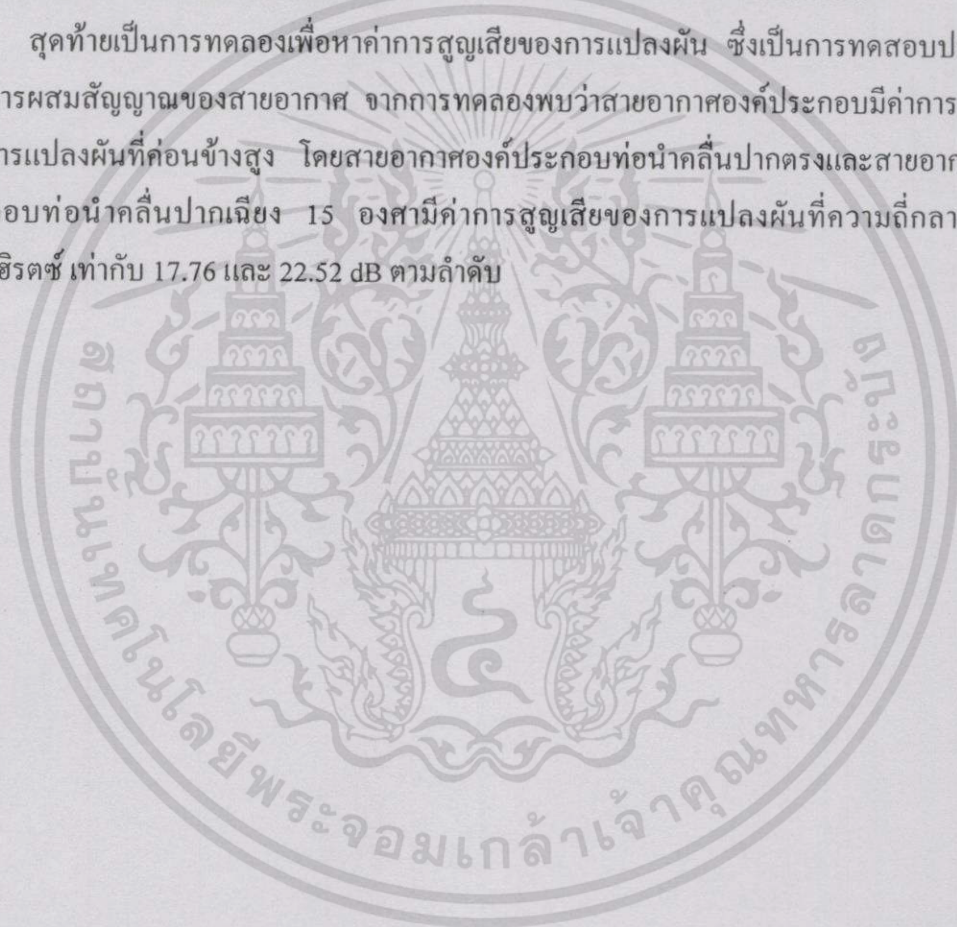
ในบทนี้ได้นำเสนอผลการทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรงและสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา อันได้แก่ พฤติกรรมการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับไดโอดกัมมันต์และไดโอดวารีแอกเตอร์ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ และค่าการสูญเสียของการแปลงผัน

การปรับความถี่ของสายอากาศสามารถทำได้โดยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดโอดกัมมันต์และไดโอดวารีแอกเตอร์ ซึ่งความถี่ที่สายอากาศออสซิลเลตเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับไดโอดกัมมันต์เพียงอย่างเดียวจะให้กำลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการไบอัส ในขณะที่เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับไดโอดวารีแอกเตอร์ด้วยสายอากาศจะออสซิลเลตที่ความถี่ต่างๆตามการป้อนแรงดันไฟฟ้าโดยให้กำลังงานที่ค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงการปรับไบอัส ซึ่งการทดสอบพฤติกรรมในการปรับไบอัสให้กับไดโอดกัมมันต์และไดโอดวารีแอกเตอร์นี้จะช่วยให้ทราบว่าสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าและให้กำลังงานเท่าไรที่ความถี่ที่ต้องการ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศองค์ประกอบได้ถูกนำเสนอไว้ในบทนี้ด้วย โดยจากการทดลองสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรงจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ XZ และ YZ ที่มีลำคลื่นชี้ไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  ในขณะที่สายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นชี้ไปในทิศทาง  $\theta = 0^\circ$  และ  $26^\circ$  ในระนาบ YZ และ XZ ตามลำดับ

ในการปรับลำคลื่นของสายอากาศไปในทิศทางที่ต้องการ โดยใช้เทคนิคการอินเท็กชันล็อกกิ้งนั้น ความถี่ของสายอากาศองค์ประกอบจะต้องล็อกเป็นความถี่เดียวกัน ดังนั้นความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะต้องอยู่ในช่วงล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อที่จะทดสอบว่าสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีแบนด์วิดท์ของการล็อกกิ้งเท่าใด ซึ่งจากการทดลองพบว่าสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีล็อกกิ้งแบนด์วิดท์เท่ากับ 800 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ที่เพียงพอที่ความถี่สายอากาศแต่ละองค์ประกอบที่คำนวณได้ในบทที่ 3 จะรวมกันเป็นความถี่เดียวกันได้เพื่อปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ และค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกของสายอากาศองค์ประกอบก็สามารถคำนวณได้โดยอาศัยการทดลองล็อกกิ้งแบนด์วิดท์

สุดท้ายเป็นการทดลองเพื่อหาค่าการสูญเสียของการเปล่งผืน ซึ่งเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการผสมสัญญาณของสายอากาศ จากการทดลองพบว่าสายอากาศองค์ประกอบมีค่าการสูญเสียของการเปล่งผืนที่ค่อนข้างสูง โดยสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากตรงและสายอากาศองค์ประกอบที่นำคลื่นปากเฉียง 15 องศา มีค่าการสูญเสียของการเปล่งผืนที่ความถี่กลาง 400 เมกะเฮิร์ตซ์ เท่ากับ 17.76 และ 22.52 dB ตามลำดับ



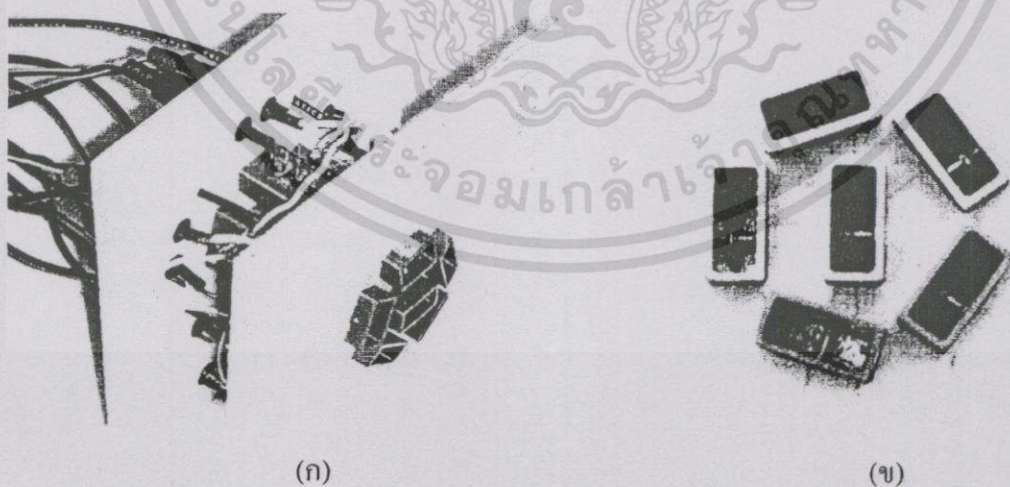
## บทที่ 5

# ผลการทดสอบสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มี การผสมสัญญาณในตัวเอง

จากบทที่แล้วได้แสดงผลการทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศองค์ประกอบ ดังนั้นเนื้อหาในบทนี้จึงเป็นการแสดงผลการทดสอบในกรณีของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง โดยแบ่งออกเป็นการทดสอบล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ การทดสอบค่าการสูญเสียของการแปลงผันเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผสมสัญญาณของสายอากาศ และสุดท้ายเป็นการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองที่มีการปรับลำคลื่นไปในทิศทางต่างๆได้ ซึ่งอาศัยวิธีการปรับลำคลื่นของสายอากาศที่เสนอไว้ในบทที่ 3 เป็นแนวทางในการทดสอบ

### 5.1 สายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองต้นแบบ

สายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองถูกสร้างขึ้นเป็นสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.1 เป็นการนำสายอากาศองค์ประกอบมาประกอบรวมกันเป็นสายอากาศแถวลำดับทรงกลม โดยสายอากาศองค์ประกอบจะจัดวางตามตำแหน่งที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3



รูปที่ 5.1 สายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองต้นแบบ

(ก) ภาพถ่ายจากมุมสูง

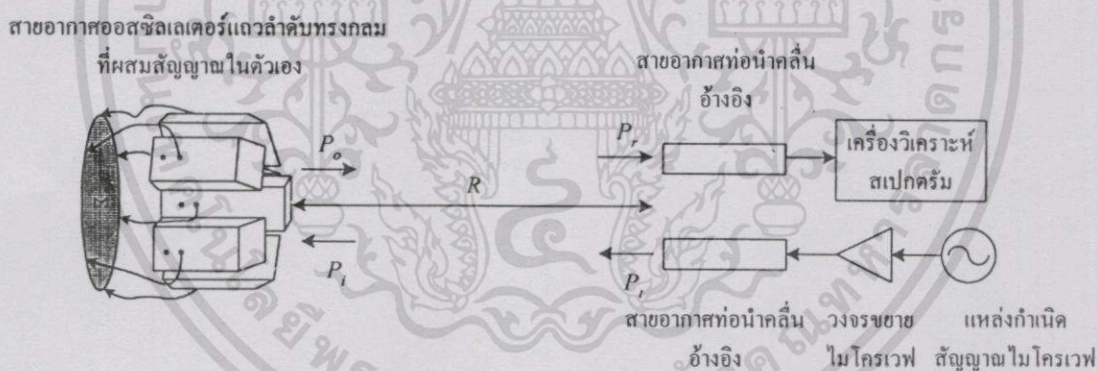
(ข) ภาพถ่ายด้านหน้า

โดยสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะมีสายส่งแกนร่วม RG174 เป็นพอร์ตเอาต์พุตสำหรับ สัญญาณความถี่กลางที่ได้จากการผสมสัญญาณระหว่างความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ได้จาก ไดโอดกันนำกับสัญญาณความถี่วิทยุที่ส่งมาจากสายอากาศส่ง ซึ่งสายส่งแกนร่วมทั้ง 6 เส้นนี้จะต่อ เข้ากับตัวรวมกำลังงานเพื่อทำการรวมกำลังงานของความถี่กลางจากสายอากาศทั้ง 6 องค์ประกอบ

คุณลักษณะของสายอากาศที่จะทำการทดสอบในบพนี้ ได้แก่ ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ ค่าการสูญเสียของการแปลงผันซึ่งเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการผสมสัญญาณภายในตัวเอง และแบบ รูปการแพร่กระจายคลื่นซึ่งเป็นการทดสอบการปรับลำคลื่นของสายอากาศ โดยจะทำการทดสอบ ภายในห้องทดสอบสายอากาศที่พัฒนาขึ้นเอง

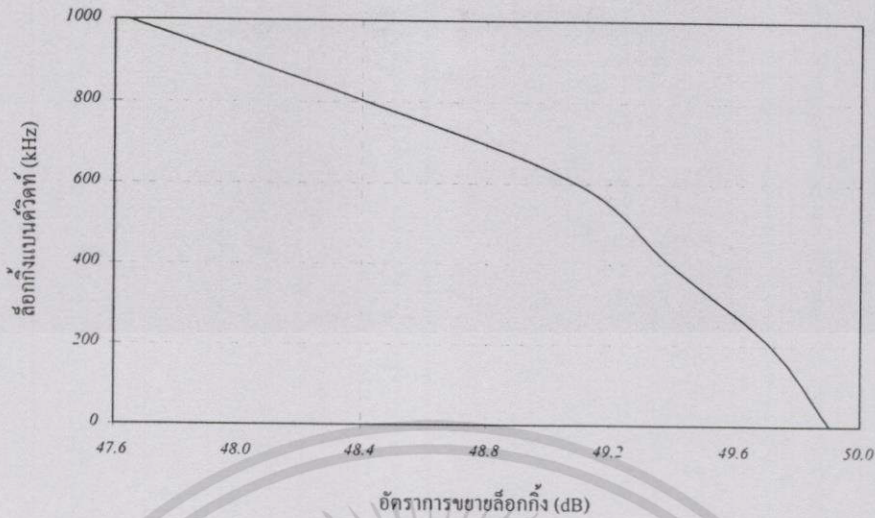
## 5.2 ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์

วิธีการทดสอบเพื่อหาค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แฉวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้ก็จะกระทำในลักษณะเดียวกับสายอากาศองค์ประกอบในบพที่ 4 โดยเปลี่ยนจากสายอากาศองค์ประกอบมาเป็นสายอากาศแบบแฉวลำดับทรงกลม การทดลองแสดง ดังรูปที่ 5.2 โดยที่ระยะทาง  $R$  เท่ากับ 0.5 เมตร



รูปที่ 5.2 การวัดค่าอัตราขยายอินเจ็กชันล็อกกิ้งและค่าอินเจ็กชันล็อกกิ้งแบนด์วิดท์

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์และอัตราขยายล็อกกิ้งของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แฉวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.3

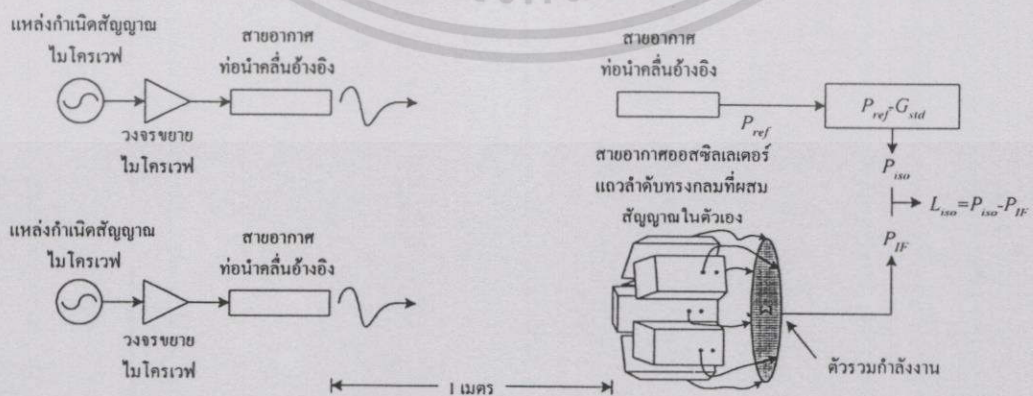


รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์และอัตราขยายล็อกกิ้ง

จากการทดลองพบว่าสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองมีค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์เท่ากับ 1 เมกะเฮิรตซ์ จากค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ทำให้สามารถคำนวณหาค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกได้เท่ากับ 82.96 ซึ่งการที่สายอากาศจะมีช่วงล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ที่กว้างนั้นค่าตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศจะต้องต่ำ และความเข้มของสัญญาณที่อินพุตจะต้องมีค่าสูง เทคนิคการอินพุตล็อกกิ้งนี้จะมีส่วนช่วยในการทำให้ความถี่มีการชิง โคร ในซ้กัน ความถี่เอาต์พุตที่ได้นิ่งขึ้น และทำให้สัญญาณรบกวนลดลง [23]

### 5.3 การสูญเสียของการแปลงผัน

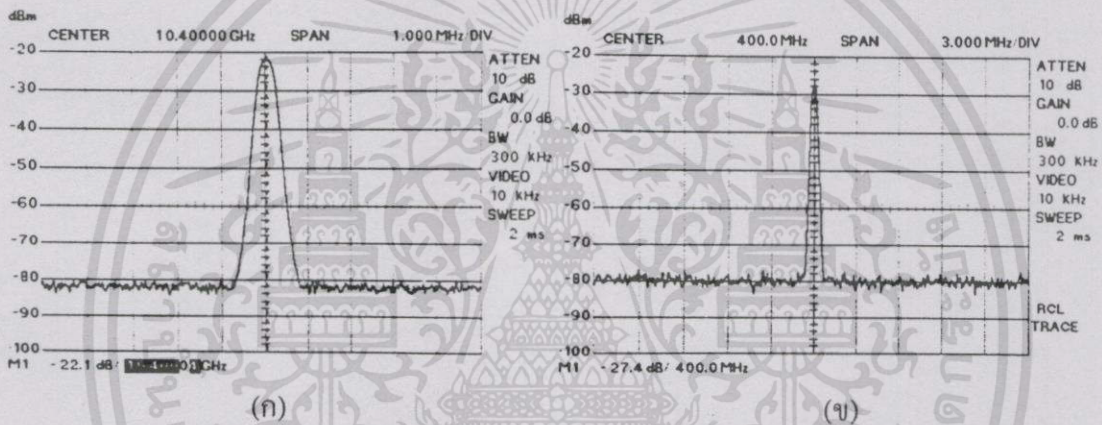
การทดสอบค่าการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองแสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 การวัดการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง

การทดลองกระทำในลักษณะเดียวกับการทดลองสายอากาศสองคู่ประกอบในบทที่ 4 โดยที่สายอากาศส่งและสายอากาศรับวางห่างกันเป็นระยะทาง 1 เมตร ในการทดลองใช้สายอากาศท่อนำคลื่นปลายเปิดด้านหนึ่งที่มีอัตราขยาย 4.54 dB ที่ความถี่ 10.4 กิกะเฮิรตซ์ เป็นสายอากาศอ้างอิงเพื่อใช้ในการวัดกำลังงานระดับอ้างอิง ( $P_{ref}$ )

จากการทดลอง  $P_{ref}$  ถูกวัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่ความถี่ 10.4 กิกะเฮิรตซ์ได้ค่ากำลังงานเท่ากับ  $-22.1$  dBm แสดงดังรูปที่ 5.5(ก) แต่ในการวัด  $P_{ref}$  นั้นต้องมีการต่อสายส่งแแกนร่วมจากสายอากาศรับมาเข้าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยดังนั้น  $P_{ref}$  ที่แท้จริงต้องมีการชดเชยการสูญเสียในสายด้วย ซึ่งจะได้อ่า  $P_{ref}$  ที่แท้จริงเท่ากับ  $-19.39$  dBm ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า  $P_{iso}$  ได้เท่ากับ  $-23.93$  dBm

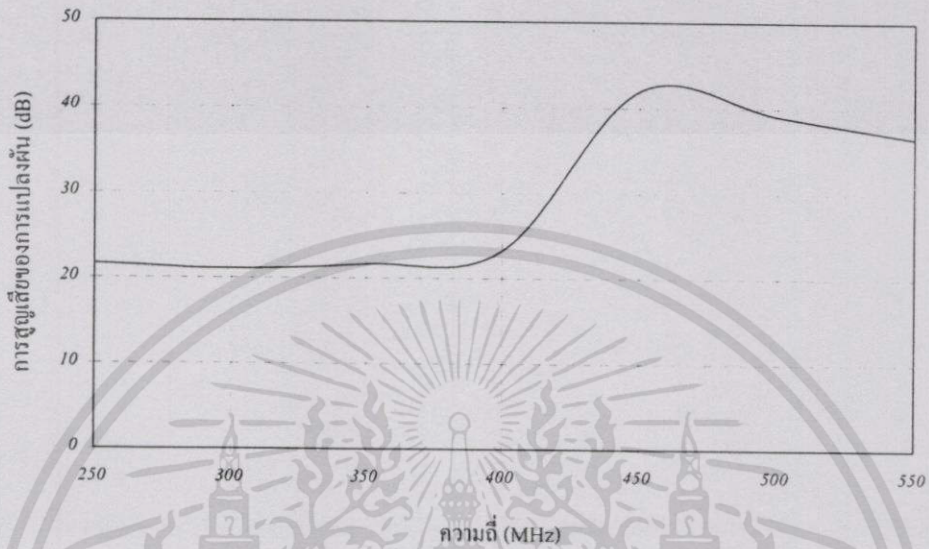


รูปที่ 5.5 สัญญาณจากหน้าจอเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

- (ก) สัญญาณความถี่วิทยุ
- (ข) สัญญาณความถี่กลาง

สำหรับกำลังงานที่ความถี่กลางของสายอากาศสองชุดสวิตเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนั้นต้องมีการรวมกำลังงานของสัญญาณความถี่กลางของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบโดยใช้ตัวรวมกำลังงาน (Power combiner) ดังนั้นที่ความถี่กลาง 400 เมกะเฮิรตซ์ วัดโดยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมได้ค่ากำลังงานเท่ากับ  $-27.4$  dBm ดังแสดงในรูปที่ 5.5(ข) ซึ่งต้องมีการชดเชยตัวขยายสัญญาณความถี่กลาง การสูญเสียในสายส่งแแกนร่วมและตัวรวมกำลังงานด้วย ดังนั้นจึงทำให้ได้กำลังงานที่ความถี่กลาง ( $P_{IF}$ ) ที่แท้จริงเท่ากับ  $-36.13$  dBm ทำให้คำนวณค่าการสูญเสียของการแปลงผันในกรณีไอโซโทรปิก ( $L_{iso}$ ) ได้เท่ากับ 12.19 dBm ดังนั้นค่าการสูญเสียของการแปลงผัน ( $L_c$ ) ของสายอากาศสองชุดสวิตเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองจึงเท่ากับ 23.24 dB โดยที่อัตราขยายของสายอากาศ ( $G_{ant}$ ) เท่ากับ 11.05 dB

ผลการทดลองวัดค่าการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศนี้ในช่วงความถี่กลาง 250-550 เมกะเฮิร์ตซ์ แสดงดังรูปที่ 5.6 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กลางกับค่าการสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศ



รูปที่ 5.6 การสูญเสียของการแปลงผันของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง

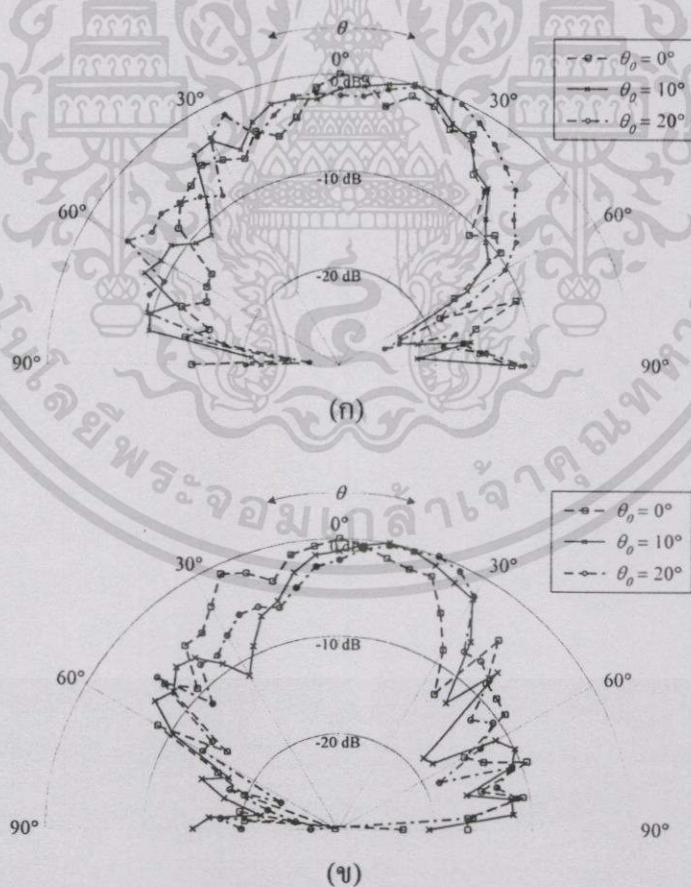
#### 5.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้เป็นการทดสอบการปรับทิศทางลำคลื่นของสายอากาศซึ่งกระทำในห้องทดสอบสายอากาศที่พัฒนาขึ้นเอง ระบบการทดสอบประกอบด้วยสายอากาศที่นำคลื่นอ้างอิงซึ่งใช้เป็นสายอากาศส่ง และสายอากาศที่ต้องการทดสอบคือสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองเป็นสายอากาศรับ สายอากาศส่งและสายอากาศรับวางห่างกันเป็นระยะทาง 1 เมตร ในการทดสอบนี้กำหนดให้สายอากาศส่งทำงานที่ความถี่ 10.4 กิกะเฮิร์ตซ์ และสายอากาศรับคือสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองทำงานที่ความถี่ 10 กิกะเฮิร์ตซ์

ในการทดสอบ สายอากาศรับจะติดตั้งอยู่บนแท่นหมุนสายอากาศซึ่งทำงานด้วยระบบการควบคุมระยะไกล (Remote control) ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดให้มีการหมุนไปที่ละ 5 องศา โดยจะทำการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองที่ความถี่กลาง 400 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งความถี่กลางนี้ได้จากสายอากาศรับทันทีเนื่องจากสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองสามารถรับสัญญาณความถี่วิทยุจากสายอากาศส่งและทำการผสมสัญญาณเข้ากับความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องเป็นความถี่กลางได้ทันทีโดยการทำงานของไดโอดกัมน์ที่อยู่ภายในสายอากาศแต่ละองค์

ประกอบ โดยที่สัญญาณความถี่กลางจากแต่ละสายอากาศองค์ประกอบจะรวมกันโดยตัวรวมกำลังงานเข้าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อทำการบันทึกค่ากำลังงานที่วัดได้ในแต่ละองศา

ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองในแต่ละทิศทางของลำคลื่นที่มีการปรับเปลี่ยนทิศทางไปนั้น สายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะต้องออสซิลเลตความถี่ที่เหมาะสมตามวิธีการปรับทิศทางของลำคลื่นที่นำเสนอเป็นแนวทางไว้ในบทที่ 3 และสัญญาณจากสายอากาศแต่ละองค์ประกอบจะต้องล็อกเป็นความถี่เดียวกันตลอดช่วงการหมุนสายอากาศไปครบ 180 องศา โดยในการทดสอบกระทำโดยการปรับความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบตามความถี่ที่ได้คำนวณไว้ และทำการปรับจูนเล็กน้อยในกรณีที่มีความถี่ของสายอากาศไม่ล็อกกันดี เพื่อให้ความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบรวมกัน โดยที่ให้กำลังงานที่มากที่สุด ในทิศทางที่ต้องการ หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการทดสอบ ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองแสดงดังรูปที่ 5.7 โดยรูปที่ 5.7(ก) และ 5.7(ข) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีการปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางต่างๆ ในระนาบ XZ และ YZ ตามลำดับ



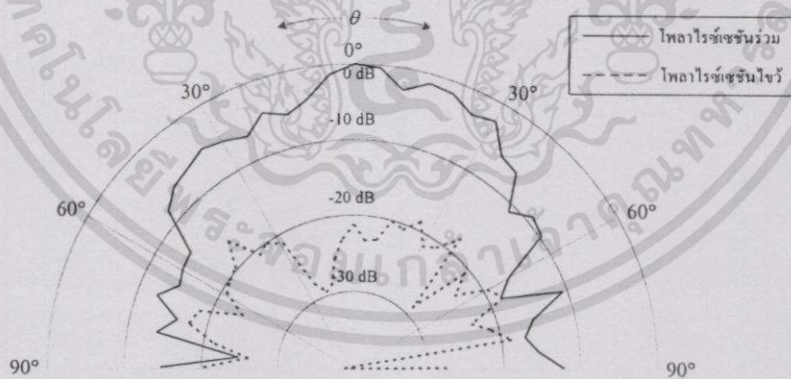
รูปที่ 5.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

(ก) ระนาบ XZ ( $\phi_0 = 0^\circ$ )

(ข) ระนาบ YZ ( $\phi_0 = 90^\circ$ )

จากแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่แสดงในรูปที่ 5.7(ก) และ 5.7(ข) เป็นการแสดงว่าสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้สามารถปรับทิศทางของลำคลื่นไปได้โดยที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นค่อนข้างคงที่เมื่อมีการปรับทิศทางของลำคลื่นไปจากการทดลอง สายอากาศนี้ได้แสดงให้เห็นการปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทาง  $(\theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ), (10^\circ, 0^\circ), (20^\circ, 0^\circ)$  และ  $(\theta, \phi) = (0^\circ, 90^\circ), (10^\circ, 90^\circ), (20^\circ, 90^\circ)$  โดยวิธีการปรับความถี่ที่ออสซิลเลเตอร์ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบให้เหมาะสมในการที่จะให้ลำคลื่นชี้ไปในทิศทางที่ต้องการ โดยความถี่ที่ออสซิลเลเตอร์ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบต้องอยู่ภายในช่วงล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ด้วยจึงจะทำให้สัญญาณจากสายอากาศแต่ละองค์ประกอบไม่หลุดออกจากการล็อก

ในรูปที่ 5.8 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีลำคลื่นชี้ไปในทิศ  $\theta = 0^\circ$  ในระนาบ XZ ( $\phi = 0^\circ$ ) ซึ่งเป็นการทดลองวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์เซชันร่วม (Co-polarization) เปรียบเทียบกับแบบโพลาไรซ์เซชันไขว้ (Cross-polarization) โดยนำเสนอเพียงแบบรูปเดียวเพื่อเป็นตัวอย่าง ในการทดลองวัดโพลาไรซ์เซชันร่วมจะกำหนดให้สายอากาศที่นำคลื่นอ้างอิงที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองที่เป็นสายอากาศรับ ส่งสัญญาณและรับสัญญาณในระนาบเดียวกันคือระนาบ XZ สำหรับในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์เซชันไขว้นั้นจะทำการตั้งสายอากาศที่นำคลื่นอ้างอิงให้ส่งสัญญาณในระนาบ YZ ในขณะที่สายอากาศรับจะวางตัวเพื่อรับสัญญาณในระนาบ XZ



รูปที่ 5.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบโพลาไรซ์เซชันร่วมเปรียบเทียบกับแบบโพลาไรซ์เซชันไขว้ในระนาบ XZ

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5.8 พบว่าสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองมีระดับโพลาไรซ์เซชันไขว้ต่ำกว่าระดับของโพลาไรซ์เซชันร่วมประมาณ 22 dB ซึ่งแสดงว่าสายอากาศนี้สามารถรับสัญญาณที่มีโพลาไรซ์ไม่ตรงกันได้น้อย

## 5.5 ความไว (Sensitivity)

ความไวของสายอากาศรับเป็นการวัดระดับแอมพลิจูดความถี่คลื่นวิทยุที่ต่ำที่สุดที่สายอากาศสามารถรับได้ โดยในการทดสอบจะเป็นการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field strength) ที่ต่ำที่สุดที่สายอากาศออสซิลเลเตอร์แอมป์ดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้สามารถรับได้ ในการทดสอบ ใช้สายอากาศที่นำคลื่นอ้างอิงเป็นสายอากาศส่ง ต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดไมโครเวฟ สายอากาศส่งวางห่างจากสายอากาศรับคือสายอากาศออสซิลเลเตอร์แอมป์ดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองเป็นระยะทาง 1 เมตร สายอากาศรับนี้ต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมเพื่อทำการวัดระดับสัญญาณที่ความถี่กลาง 400 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยมีการใช้วงจรถายความถี่กลางเพื่อทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณความถี่กลางก่อนเข้าเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม วิธีการทดสอบกระทำโดยการปรับระดับกำลังงานของความถี่วิทยุที่ส่งจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายจนกระทั่งเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมไม่สามารถแสดงระดับกำลังงานของความถี่กลางที่ได้จากสายอากาศออสซิลเลเตอร์แอมป์ดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองได้ แล้วทำการคำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดที่สายอากาศนี้สามารถรับได้ ซึ่งก็เป็นค่าที่แสดงความไวของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แอมป์ดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนั่นเอง

จากการทดสอบพบว่า สายอากาศออสซิลเลเตอร์แอมป์ดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้สามารถรับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ต่ำที่สุดได้เท่ากับ  $6.97 \times 10^{-4}$  โวลต์ต่อเมตร โดยวงจรถายความถี่กลางที่ใช้นั้นมีอัตราขยายเท่ากับ 25 dB

## 5.6 สรุป

สายอากาศออสซิลเลเตอร์แอมป์ดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองค้นแบบนี้นี้สามารถปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้ทั้งสองระนาบคือระนาบ XZ ( $\phi = 0^\circ$ ) และ YZ ( $\phi = 90^\circ$ ) โดยได้แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแต่ละระนาบที่ปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศ  $\theta_0 = 0^\circ$ ,  $10^\circ$  และ  $20^\circ$  โดยการปรับความถี่ของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบซึ่งสายอากาศให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ค่อนข้างคงที่เมื่อมีการปรับทิศทางของลำคลื่นไป และมีระดับของโพลาไรซ์เซชันไขว้ที่ต่ำกว่าระดับโพลาไรซ์เซชันร่วม 22 dB โดยที่ค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ของสายอากาศนี้มีค่าเท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ นอกจากนี้พบว่าสายอากาศออสซิลเลเตอร์แอมป์ดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองมีการสูญเสียของการแปลงผันเท่ากับ 23.24 dB ที่ความถี่กลาง 400 เมกะเฮิร์ตซ์ และสามารถรับความเข้มสนามไฟฟ้าได้ต่ำที่สุดเท่ากับ  $6.97 \times 10^{-4}$  โวลต์ต่อเมตร โดยใช้วงจรถายความถี่กลางที่มีอัตราขยายเท่ากับ 25 dB

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์

#### 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง ซึ่งนำเสนอให้เป็นสายอากาศรับที่สามารถผสมสัญญาณได้ภายในตัวเองและสามารถปรับทิศทางของลำคลื่นได้โดยที่แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นยังคงที่ สายอากาศนี้มีลักษณะจำเพาะที่ประกอบด้วยสายอากาศสองคู่ประกอบจำนวน 6 องค์ประกอบโดยแบ่งออกเป็นสายอากาศท่อนำคลื่นปากตรงและสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา ระยะห่างระหว่างสายอากาศองค์ประกอบเท่ากับ 2.1 เซนติเมตร และสายอากาศมีขนาดรัศมีทรงกลมเท่ากับ 8.114 เซนติเมตร ภายในสายอากาศสองคู่ประกอบนั้นประกอบด้วยไดโอดกัมมันต์ ไดโอดควาแรกเตอร์ สกรูจูน และตัวเลื่อนลัดวงจร ซึ่งสายอากาศนี้สามารถรับสัญญาณความถี่วิทยุและผสมสัญญาณความถี่วิทยุที่รับเข้ามากับความถี่ของออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องได้เป็นความถี่กลางโดยใช้ไดโอดกัมมันต์ สายอากาศนี้ทำงานหรือออสซิลเลตความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ และทำการศึกษาค่าความถี่กลาง 400 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งคุณลักษณะเฉพาะตัวของสายอากาศนี้คือ

1. สามารถปรับทิศทางของลำคลื่นไปใน 2 ระนาบที่ทำการศึกษา คือ ระนาบ XZ และระนาบ YZ ในทิศตามมุม  $\theta$  ที่มีค่า  $0^\circ$   $10^\circ$  และ  $20^\circ$
2. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีค่าที่ค่อนข้างคงที่เมื่อมีการปรับทิศทางของลำคลื่น
3. สายอากาศมีค่าลอคกิ้งแบนด์วิดท์เท่ากับ 1 เมกะเฮิร์ตซ์
4. ความเข้มสนามไฟฟ้าต่ำที่สุดที่สายอากาศสามารถรับได้มีค่าเท่ากับ  $6.97 \times 10^{-4}$  โวลต์ต่อเมตร โดยใช้วงจรขยายความถี่กลางที่มีอัตราขยายเท่ากับ 25 dB
5. อัตราขยายของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองมีค่าเท่ากับ 11.05 dBi
6. ค่าการสูญเสียของการแปลงผันที่ความถี่กลาง 400 เมกะเฮิร์ตซ์เท่ากับ 23.24 dB

ความน่าสนใจและวัตถุประสงค์ของการศึกษาสายอากาศนี้ได้เสนอไว้ในบทที่ 1 สำหรับวิธีการวิเคราะห์สายอากาศนั้นได้ใช้โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิธีการโมเมนต์ในการคำนวณ โปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้านี้เป็นโปรแกรมที่สนับสนุนการวิเคราะห์ผลตอบสนองของปัญหาทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 2 โดยเป็นบททฤษฎีและหลักการทั่วไปที่นำมาใช้วิเคราะห์และอธิบายเกี่ยวกับสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองได้ นอกจากโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว ในบทที่ 2 ยังประกอบด้วยเนื้อหาบางส่วนที่เกี่ยวกับสายอากาศเอ็กทิฟ เงื่อนไขในการออสซิลเลต

เนื่องจากสายอากาศที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดอยู่ในจำพวกสายอากาศแบบแอ็กทิฟด้วยเช่นกัน โดยอุปกรณ์แอ็กทิฟที่นำมาใช้กับสายอากาศนี้คือ ไดโอดกัมมันต์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องและตัวผสมสัญญาณได้ในตัวเอง สุกท้ายในบทที่ 2 เป็นการอธิบายเทคนิคที่จะนำมาช่วยในการปรับทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ ในบทที่ 3 เป็นการอธิบายโครงสร้างของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศสององค์ประกอบจำนวน 6 องค์ประกอบโดยสายอากาศสององค์ประกอบที่ 1 เป็นสายอากาศท่อนำคลื่นปากตรงเป็นองค์ประกอบที่วางอยู่ตรงกลาง และล้อมรอบด้วยสายอากาศท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา จำนวน 5 องค์ประกอบ โดยการวิเคราะห์สายอากาศด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้วิธีการจำลองโครงสร้างที่ต้องการทำการวิเคราะห์ด้วยตาข่ายเส้นลวดตัวนำซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าได้นำเสนอไว้ในบทนี้ด้วยซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่ทำกรวิเคราะห์คือ อิมพีแดนซ์ตัวเอง อิมพีแดนซ์ร่วม และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น จากการวิเคราะห์ทำให้ได้สายอากาศสององค์ประกอบที่มีขนาดและตำแหน่งของอุปกรณ์ภายในที่เหมาะสมที่จะทำให้สายอากาศนี้ทำงานที่ความถี่ที่ต้องการคือ 10 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยสายอากาศแต่ละองค์ประกอบต้องมีการปรับอิมพีแดนซ์ตัวเองที่สูงเกินเงื่อนไขการออสซิลเลตให้ต่ำลงโดยการปรับสกรูจน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศสององค์ประกอบก็ได้แสดงไว้ โดยจากการคำนวณพบว่าสายอากาศสององค์ประกอบท่อนำคลื่นปากตรงและสายอากาศสององค์ประกอบท่อนำคลื่นปากเฉียง 15 องศา มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 6.07 dBi และ 6.43 dBi ตามลำดับ นอกจากนี้ในบทที่ 3 ยังได้แสดงวิธีการปรับทิศทางลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้โดยการปรับความถี่ของสายอากาศสององค์ประกอบให้เหมาะสม เพื่อให้สายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีเฟสที่เหมาะสมในการที่จะทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีการปรับทิศทางไปได้ โดยที่ความถี่ที่ปรับของแต่ละสายอากาศสององค์ประกอบจะต้องอยู่ภายในล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ ซึ่งจากการคำนวณพบว่าสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้สามารถปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการได้โดยมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ค่อนข้างคงที่ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 สำหรับอัตราขยายในกรณีของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองมีค่าเท่ากับ 11.05 dBi หลังจากที่ทำกรคำนวณเสร็จแล้ว สายอากาศสององค์ประกอบต้นแบบจึงได้ถูกสร้างขึ้นและทำการทดสอบ โดยผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศสององค์ประกอบได้ถูกนำเสนอไว้ในบทที่ 4 แล้วจึงนำสายอากาศสององค์ประกอบมาประกอบรวมกันเป็นสายอากาศแบบแถวลำดับทรงกลมต้นแบบโดยนำเสนอไว้ในบทที่ 5 ซึ่งเป็นการแสดงผลการทดสอบสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง จากการทดลองได้แสดงผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ปรับทิศทางของลำคลื่นไปในระนาบ XZ ( $\phi_0 = 0^\circ$ ) และระนาบ YZ ( $\phi_0 = 90^\circ$ ) 3 มุม คือ  $\theta_0 = 0^\circ$   $10^\circ$  และ  $20^\circ$  ทั้งสองระนาบ โดยสายอากาศนี้มีค่าการ

สูญเสียของการแปลงผันในการแปลงคลื่นความถี่วิทยุที่รับมาจากสายอากาศส่งให้เป็นความถี่กลางที่ 400 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าเท่ากับ 23.24 dB นอกจากนี้ยังทำการทดสอบความไวของสายอากาศด้วย

## 6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนา

สิ่งสำคัญในการทดสอบสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนี้คือ ความมีเสถียรภาพในการออสซิลเลตของไดโอดกันัน ซึ่งการออสซิลเลตของไดโอดกันันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับไดโอดกันัน อุณหภูมิ เป็นต้น แหล่งจ่ายกำลังจะต้องมีเสถียรภาพสูงไม่เช่นนั้นแรงดันไฟฟ้าไบอัสที่ป้อนให้กับไดโอดกันันจะมีการแกว่ง ซึ่งมีผลทำให้ความถี่เอาต์พุตมีการแกว่งไปด้วย และระดับกำลังงานจะมีการกระเพื่อม ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นอกจากจะใช้ไดโอดควาเรกเตอร์เพื่อช่วยในการปรับความถี่ละเอียดและทำให้ระดับกำลังงานมีค่าที่ค่อนข้างคงที่แล้ว ยังใช้เบตเตอร์ช่วยในการป้อนแรงดันไฟฟ้าด้วยซึ่งเบตเตอร์นี้เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงที่นิ่งและเรียบ ดังนั้นจึงทำให้ความถี่เอาต์พุตนิ่งขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิก็มีส่วนสำคัญต่อความถี่ที่ออสซิลเลตของไดโอดกันันด้วย เนื่องจากอุณหภูมิเป็นตัวแปรหนึ่งของอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ ดังนั้นเมื่อความร้อนของตัวอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเมื่อมีการทำงาน ก็จะมีผลทำให้มีการขยับเลื่อนของความถี่เอาต์พุตและกำลังงานเอาต์พุตเปลี่ยนไปด้วย ดังนั้นจึงควรมีการควบคุมอุณหภูมิและสภาพแวดล้อมต่างๆ ในขณะที่มีการทดสอบสายอากาศ การที่ความถี่ถูกรบกวนเหล่านี้ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเกิดความผิดพลาดขึ้น ซึ่งเป็นข้อเสียอย่างหนึ่งของสายอากาศแบบเอ็กทิฟลี้จะทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นลดลง

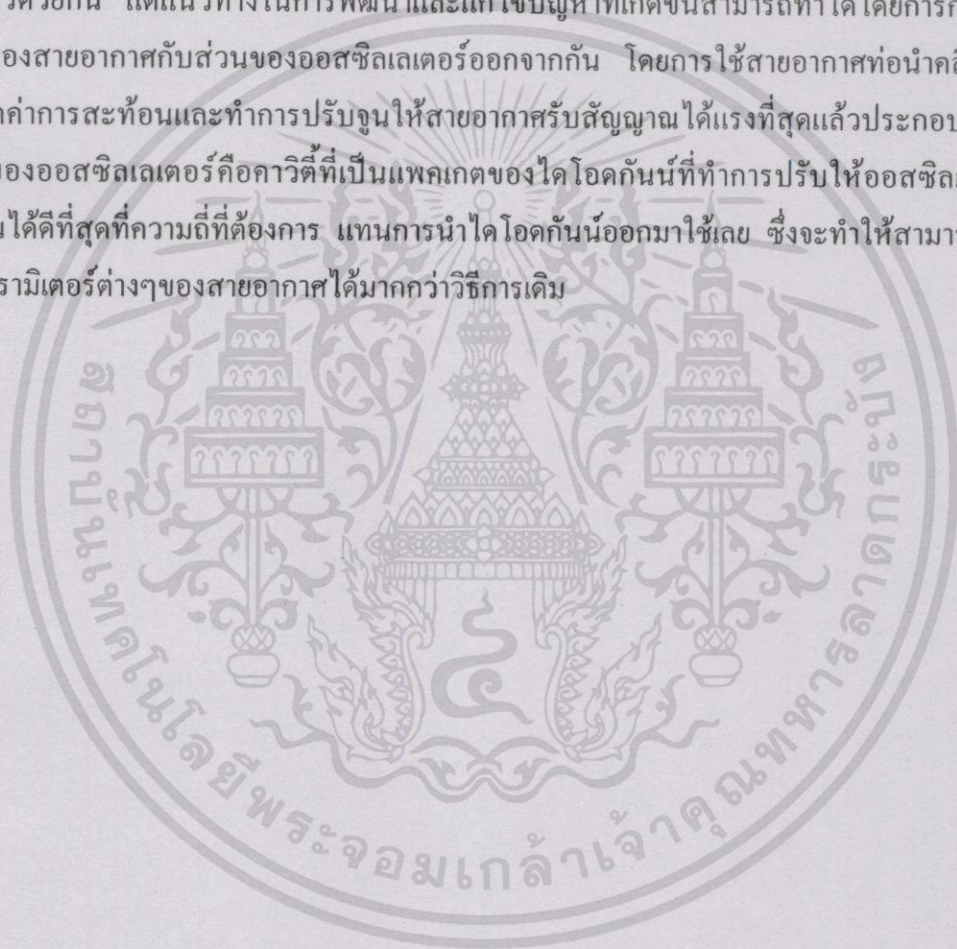
นอกจากนี้ ผลจากการคำนวณอาจจะแตกต่างจากผลการทดลองไปบ้างเนื่องจากในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์รวมจะกำหนดให้แอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละองค์ประกอบเท่ากัน ซึ่งจะทำให้ค่าการเชื่อมต่อยุบรวมระหว่างองค์ประกอบเท่ากัน แต่ในการทดลองจะพบว่าแอมพลิจูดที่ได้ของสายอากาศองค์ประกอบไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องมีการปรับจูนความถี่ของสายอากาศองค์ประกอบไปบ้างเล็กน้อยเพื่อให้ความถี่มีการซิงโครไนซ์กัน ผลที่ได้จึงมีความคลาดเคลื่อนไปจากการคำนวณบ้าง

ข้อจำกัดในการปรับทิศทางของลำคลื่นได้แก่ ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ และช่วงการปรับแรงดันไฟฟ้าไบอัสของออสซิลเลเตอร์ในแวลวลำดับ แนวทางในการแก้ปัญหาคือ การลดค่าตัวประกอบคุณภาพและเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อยุบรวมให้มากขึ้น โดยการวางสายอากาศให้ชิดกันมากขึ้น และปรับขนาดควาดีของสายอากาศนอกเหนือจากการใช้ไดโอดควาเรกเตอร์เพื่อช่วยในการทำให้ช่วงแบนด์วิดท์ในการปรับจูนกว้างขึ้น

การทดสอบค่าการสูญเสียของการแปลงผันนั้นเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการผสมสัญญาณของสายอากาศออสซิลเลเตอร์แวลวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเอง จากการ

ทดสอบนั้นพบว่าสายอากาศนี้มีค่าการสูญเสียของการแปลงผันที่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุด้วยกัน คือ การไม่แมตซ์กันของควาวิตี หรือเกิดจากกระบวนการผสมสัญญาณของไดโอดกัณฑ์เอง เป็นต้น การไม่แมตซ์กันอาจเกิดจากการสร้างสายอากาศนี้ซึ่งเป็นการสร้างโดยการนำตัวไดโอดกัณฑ์จากควาวิตีเดิมออกมาใส่ในท่อนำคลื่น ซึ่งทำให้ไม่สามารถวัดค่าการสะท้อนที่เกิดขึ้นในสายอากาศได้

แนวทางในการพัฒนาสายอากาศออสซิลเลเตอร์แถวลำดับทรงกลมที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการสร้างแบบรวมส่วนของสายอากาศและส่วนของออสซิลเลเตอร์ไว้ด้วยกัน แต่แนวทางในการพัฒนาและแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นสามารถทำได้โดยการการแยกส่วนของสายอากาศกับส่วนของออสซิลเลเตอร์ออกจากกัน โดยการใช้สายอากาศท่อนำคลื่นที่ทำการวัดค่าการสะท้อนและทำการปรับจูนให้สายอากาศรับสัญญาณได้แรงที่สุดแล้วประกอบเข้ากับส่วนของออสซิลเลเตอร์คือควาวิตีที่เป็นแพคเกจของไดโอดกัณฑ์ที่ทำการปรับให้ออสซิลเลเตอร์ทำงานได้ดีที่สุดที่ความถี่ที่ต้องการ แทนการนำไดโอดกัณฑ์ออกมาใช้เลย ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศได้มากกว่าวิธีการเดิม



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Navarro J. A. and Chang K. **Integrated Active Antennas and Spatial Power Combining**. John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- [2] Al-Ani A. H., Cullen A. L. and Forrest J. R., "A Phase-Locking Method for Beam Steering in Active Array Antennas," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol. 22, no. 6, pp. 698-703, June 1974.
- [3] Stephan K. D., "Inter-Injection-Locked Oscillators for Power Combining and Phased Arrays," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol. MTT-34, no. 10, pp. 1017-1025, Oct. 1986.
- [4] Krairiksh M., Thongsopa C., Phongcharoenpanich C., Khoomwong E. and Leekpai C., "A Steerable Spherical Slot Array Antenna," **Journal of the Science Society of Thailand**, vol. 25, no. 4, pp. 231-236, Dec. 1999.
- [5] York R. A. and Itoh T., "Injection- and Phase-Locking Techniques for Beam Control," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol. 46, pp. 1920-1929, Nov. 1998.
- [6] Balanis C. A. **Advanced Engineering Electromagnetics**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1989.
- [7] Sadiku M. N. O. **Numerical Techniques in Electromagnetics**. CRC Press Inc., 1992.
- [8] Poggio A. J. and Miller E. K., "Integral Equation Solutions of Three-Dimensional Scattering Problems," **Chapt. IV in Computer Techniques for Electromagnetics**, edited by R. Mittra, Pergamon Press, New York, 1973.
- [9] Poggio A. J. and Adams R. W., "Approximations for Terms Related to the Kernel in Thin-Wire Integral Equations," UCRL-51985, Lawrence Livermore Lab., CA, Dec. 19, 1975.
- [10] Burke G. J. and Poggio A. J. **Numerical Electromagnetics Code (NEC)-Method of Moments Part I : Program Description – Theory**. Lawrence Livermore Lab., Jan. 1981.
- [11] Burke G. J. and Poggio A. J., **Numerical Electromagnetic Code (NEC) – Method of Moments Part III**, Lawrence Livermore Nat. Lab., 1981.
- [12] Killick E. A. "Scanning and Active Antennas," **European Microwave Conference**, pp. 122-123, Sept. 1969.
- [13] Chang K. **Microwave Solid-State Circuits and Applications**. John Wiley & Sons, Inc. 1994.

- [14] Kurokawa K., "Some basic Characteristics of Broadband Negative Resistance Oscillator Circuits," **Bell System Technical Journal**, vol. 48, no. 6, pp. 1937-1955, July-August 1996.
- [15] Montiel C. M., Fan L. and Chang Kai, "A Novel Active Antenna with Self-Mixing and Wideband Varactor-Tuning Capabilities for Communication and Vehicle Identification Applications" **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol. 44, pp.2421-2430, Dec. 1996.
- [16] Adler R., "A Study of Locking Phenomena in Oscillators," **Proceeding of the IEEE**, pp. 1380-1385, vol. 61, no. 10, Oct. 1973.
- [17] Kurokawa K., "Injection Locking of Microwave Solid-State Oscillators," **Proceeding of the IEEE**, pp. 1386-1410, vol. 61, no. 10, Oct. 1973.
- [18] York R. A., "Nonlinear analysis of phase relationships in quasi-optical oscillator arrays," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol. 41, pp. 1799-1809, Oct. 1993.
- [19] Sengupta D. L., Smith T. M. and Larson R. W., "Radiation Characteristics of a Spherical Array of Circularly Polarized Elements," **IEEE Trans. Antennas Propagat.**, vol. AP-16, no. 1, pp.2-7, Jan. 1968.
- [20] Collin R. E. **Foundation for Microwave Engineering**. 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill, Inc, 1992.
- [21] วัลย์ลิกา บัวสมบุญ, ไพศาล งามจรรยาภรณ์ และ โมไนย ไกรฤกษ์, "อิมพีแดนซ์ของสายอากาศท่อนำคลื่นที่กระตุ้นด้วยข้อต่อ" การประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 23 ม.เชียงใหม่, หน้า 317-320, พฤศจิกายน 2543.
- [22] Balanis C. A. **Antenna Theory : Analysis and Design**. 2<sup>nd</sup> edition. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [23] Chang K., Hummer K. A. and Klein J. L., "Experiments on Injection Locking of Active Antenna Elements for Active Phased Arrays and Spatial Power Combiners," **IEEE Trans. Microwave Theory Tech.**, vol. 37, no. 7, July 1989.

## ประวัติผู้เขียน

นางสาววัลย์ลิกา บัวสมบุญ เกิดเมื่อวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2541

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

1. วัลย์ลิกา บัวสมบุญ, ไพศาล งามจรรยาภรณ์ และ โมไนย ไกรฤกษ์, “อิมพีแดนซ์ของสายอากาศท่อนำคลื่นที่กระตุ้นด้วยข้อต่อ” การประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 23 ม.เชียงใหม่, หน้า 317-320, พฤศจิกายน 2543.
2. W. Buasomboon, P. Ngamjanyaporn and M. Krairiksh, “Characteristics of Junction-Excited Waveguide Radiators,” *Proceedings of the 2000 Asia-Pacific Symposium on Broadcasting and Communications*, Bangkok, Thailand, pp. 274-277, Dec. 2000.

