

การกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง  
โดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอคทีฟ

BEAM SCANNING OF QUASI OPTICAL ANTENNA USING  
ACTIVE ANTENNA ARRAY

สุวรรณ จันทร์อินทร์  
SUWAN JANIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2547

ISBN 974-9700-65-1

การกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง  
โดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอ็กทีฟ

BEAM SCANNING OF QUASI OPTICAL ANTENNA USING  
ACTIVE ANTENNA ARRAY

สุวรรณ จันทร์อินทร์  
SUWAN JANIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-9700-65-1

BEAM SCANNING OF QUASI OPTICAL ANTENNA USING  
ACTIVE ANTENNA ARRAY

SUWAN JANIN

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

2004

ISBN 974-9700-65-1

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | การกวาดลําคํลนของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใชํสายอากาศแถวลําดับชนิดแอกทีฟ |
| นักศึษา                     | นายสุวรรณ จันทรอินทร์   |
| รหัสประจำตัว                | 45061070  |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมโทรคมนาคม   |
| พ.ศ.                        | 2547  |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์  |

### บทคํย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการกวาดลําคํลนของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใชํสายอากาศแถวลําดับชนิดแอกทีฟ ซึ่งมีโครงสร้างเป็นสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงวางในแนวเชิงเส้นจำนวนสี่องค์ประกอบ โดยจะวางอยู่ด้านหน้าสายอากาศแถวลําดับชนิดแอกทีฟสี่องค์ประกอบ โดยที่สายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงแต่ละองค์ประกอบแบ่งออกเป็นสามชั้น (Layer) ชั้นแรกเป็นแพตช์ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่วิทยุ (1.9 GHz) วางบนวัสดุฐานรอง (Substrate) โดยใชํโฟม ชั้นที่สองออกแบบเป็นระบบป้อนสัญญาณโดยใชํท่อนําคํลนแบบโคพลาน่า (Coplanar Waveguide) วางบนวัสดุฐานรอง (โฟม) ซึ่งส่วนปลายของท่อนําคํลนได้ต่อดิโอดชอตตี้-แบร์ริเออร์ (Schottky-barrier diode) ทำหน้าที่เป็นตัวผสมสัญญาณความถี่วิทยุที่รับได้ทางด้านหน้าและสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ที่รับได้ทางด้านหลังแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณความถี่กลาง (Intermediate frequency) ที่ความถี่ 100 MHz ส่งผ่านไปยังตัวรวมกำลังงาน ส่วนชั้นสุดท้ายเป็นแพตช์ออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (1.8 GHz) ใชํรับสัญญาณออสซิลเลเตอร์จากสายอากาศแถวลําดับชนิดแอกทีฟ ซึ่งสามารถควบคุมทิศทางลําคํลนหลักของสายอากาศได้โดยการปรับความถี่ของแต่ละสายอากาศองค์ประกอบของสายอากาศแถวลําดับชนิดแอกทีฟโดยใชํเทคนิคอินเจกชันล็อก โดยผลจากการทดสอบสามารถปรับลําคํลนได้ตั้งแต่ 65 ถึง 115 องศาในระนาบ yz และมีการสูญเสียจากการแปลงผัน (Conversion Loss) เท่ากับ 12.474 dB ซึ่งมีข้อดีตรงที่ส่วนต่างๆของสายอากาศไม่เคลื่อนที่และยังปราศจากวงจรความถี่วิทยุ เช่น วงจรเลื่อนเฟส ดังนั้นระบบการกวาดลําคํลนแบบใหม่นี้จะไม่มีการสูญเสียเนื่องจากวงจรเลื่อนเฟสและสามารถควบคุมตำแหน่งการรับสัญญาณได้โดยการควบคุมทางไฟฟ้า

|                |   |
|----------------|---|
| Thesis Title   | Beam Scanning of Quasi Optical Antenna using Active Antenna Array |
| Student        | Mr.Suwan Janin  |
| Student ID.    | 45061070  |
| Degree         | Master of Engineering   |
| Programme      | Telecommunication Engineering                                     |
| Year           | 2004  |
| Thesis Advisor | Prof.Dr.Monai Krairiksh   |

### ABSTRACT

This thesis presents a research study on a beam scanning of quasi optical antenna using active antenna array. The antenna structure consists of a quasi optical antenna array, which is a four element linear antenna array placed in front of an active antenna array. The configuration of a quasi optical antenna element is a three-layer structure. The first layer is a patch antenna designed to receive the RF signal at 1.9 GHz, the second layer is the coplanar waveguide on which the schottky-barrier diodes used to transform RF to IF signal are connected, and the last layer is a patch antenna designed to receive the LO signal at 1.8 GHz. The IF signals are combined through the four-to-one power combiner. The main beam of the quasi optical antenna array can be controlled by using the injection locking technique which depends on controlling the frequency of each active antenna element. The main beam can be scanned from the angle of  $65^{\circ}$  to  $115^{\circ}$  ( $50^{\circ}$  scanning range) in  $yz$  plane and the conversion loss of the antenna is 12.474 dB. The advantage of this work is that the RF circuit is not needed. Therefore, the novel electrical beam-scanning system with low-loss can be achieved.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความกรุณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ให้คำชี้แนะ ความรู้ ประสบการณ์ และให้คำแนะนำต่างๆ ที่มีประโยชน์ในการวิจัย รวมทั้งฝึกฝนให้ข้าพเจ้ามีทักษะในการนำเสนอตลอดจนดำเนินงานสำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคต่างๆ ในการสร้างสายอากาศ ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต คุณดวงอาทิตย์ ศรีมูล คุณไพศาล งามจรรยาภรณ์ คุณอานนติ เหมือนชู คุณวัลย์ลิกา บัวสมบุญณ์ คุณปานธิศา แก้วสวัสดิ์ คุณไพโรจน์ รุ่มชুম และคุณประสิทธิ์ อินทร์ทอง ผู้ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำด้านวิชาการ และการทดลอง

ขอบคุณ ผศ.ดร. ทองทศ วานิชศรี ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ (ไดโอดผสมสัญญาณ) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการสร้างสายอากาศ

ขอขอบคุณสมาชิกในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Laboratory) ทุกคน ที่ให้ความจริงใจและช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ข้าพเจ้าปฏิบัติงานในห้องวิจัยนี้

กราบขอบพระคุณบิดาและมารดาที่ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านและเป็นพลังที่ผลักดันให้ข้าพเจ้าดำเนินมาถึงทุกวันนี้ สำหรับคุณความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่บิดา มารดา ตลอดจนญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รัก และครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ที่ดีตลอดมา

สุวรรณ จันทร์อินทร์

# สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | III  |
| สารบัญ.....  | IV   |
| สารบัญตาราง.....   | V    |
| สารบัญรูป.....   | VI   |
| บทที่ 1 บทนำ   |      |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                                | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                        | 3    |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....   | 3    |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....                           | 3    |
| 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....   | 4    |
| 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....  | 4    |
| บทที่ 2 สายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง.....                                 | 5    |
| 2.1 กล่าวนำ.....   | 5    |
| 2.2 หลักการปรับลำคลื่นของสายอากาศผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสง.....       | 5    |
| 2.2.1 การจำลองและการวิเคราะห์การกวาดลำคลื่น.....                       | 10   |
| 2.3 ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าป้อนสายอากาศแบบแผ่น.....                      | 14   |
| 2.4 วงจรผสมสัญญาณ.....   | 17   |
| 2.4.1 อัตราการแปลงผันและการสูญเสีย.....                                | 20   |
| 2.4.2 วงจรผสมคลื่นได้ดุลเดียว.....                                     | 21   |
| 2.5 การออกแบบสายอากาศ.....   | 22   |
| 2.6 การทดสอบและผลการทดสอบ.....   | 23   |
| 2.6.1 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสง..... | 23   |
| 2.6.2 ผลการทดสอบ.....  | 26   |
| 2.7 สรุปผล.....  | 27   |

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 สายอากาศแอกทีฟ.....   | 28   |
| 3.1 กล่าวนำ.....  | 28   |
| 3.2 เทคนิคการปรับลำคลื่นโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ.....         | 28   |
| 3.2.1 การจำลองแบบวงจรออสซิลเลเตอร์.....                               | 30   |
| 3.2.2 ทฤษฎีอินжекชันล็อก.....   | 32   |
| 3.2.3 ระบบของออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ.....                      | 34   |
| 3.2.4 ทฤษฎีของออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ.....                     | 37   |
| 3.2.5 สายอากาศไมโครสตริปแบบแอกทีฟ.....                                | 39   |
| 3.3 การคำนวณวงจรออสซิลเลเตอร์.....                                    | 41   |
| 3.4 การออกแบบ.....  | 44   |
| 3.4.1 การออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป.....                         | 44   |
| 3.4.2 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์.....                                 | 46   |
| 3.5 การทดลองและผลการทดลอง.....  | 47   |
| 3.5.1 แถวลำดับสายอากาศต้นแบบ.....                                     | 47   |
| 3.5.2 วงจรออสซิลเลเตอร์ต้นแบบ.....                                    | 49   |
| 3.6 สรุปผล.....   | 50   |
| บทที่ 4 ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ.....                     | 51   |
| 4.1 กล่าวนำ.....  | 51   |
| 4.2 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ.....                       | 51   |
| 4.3 ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ.....                         | 52   |
| 4.3.1 การทดสอบการตอบสนองต่อแรงดันไบอัส.....                           | 52   |
| 4.3.2 การทดสอบล็อกกิ้งแบนด์วิดท์และค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก.....      | 55   |
| 4.4 เฟสที่ใช้ในการปรับทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศ.....                | 60   |
| 4.5 การปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ.....                  | 61   |
| 4.5.1 การคำนวณความถี่ที่ใช้ในการปรับลำคลื่น.....                      | 61   |
| 4.5.2 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ..... | 62   |
| 4.6 สรุปผล.....   | 64   |

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 5 การกวาดลำคูลิ้นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับ |      |
| ชนิดแอกทีฟ.....   | 65   |
| 5.1 กล่าวนำ.....  | 65   |
| 5.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับ           |      |
| ชนิดแอกทีฟ.....   | 65   |
| 5.3 หลักการปรับลำคูลิ้นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้แถวลำดับ         |      |
| สายอากาศแอกทีฟ.....   | 68   |
| 5.4 การทดสอบสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับ               |      |
| ชนิดแอกทีฟ.....   | 71   |
| 5.4.1 การทดสอบการปรับลำคูลิ้น.....  | 71   |
| 5.5 การทดสอบการสูญเสียจากการแปลงผัน.....                                  | 73   |
| 5.6 สรุปผล.....   | 76   |
| <br>  |      |
| บทที่ 6 สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....                                    | 77   |
| 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....  | 77   |
| 6.2 วิจารณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการพัฒนา.....                         | 79   |
| <br>  |      |
| เอกสารอ้างอิง.....  | 81   |
| <br>  |      |
| ประวัติผู้เขียน.....  | 84   |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ขนาดของแวลวลำดับสายอากาศที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสง.....                       | 24   |
| 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม.....  | 46   |
| 4.1 การปรับแรงดันไบอัสของสายอากาศแอกทีฟให้ทำงานที่ความถี่ 1.8 GHz.....                    | 55   |
| 4.2 ผลการทดสอบลือกกิ่งแบนด์วิดท์.....   | 59   |
| 4.3 ผลการคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกจากการทดสอบลือกกิ่งแบนด์วิดท์.....                  | 59   |
| 4.4 ค่าเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบเพื่อใช้ในการกวาด<br>ลำคลื่น..... | 61   |
| 4.5 ความถี่ของสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบจากการคำนวณ.....                                   | 61   |

# สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 หลักการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง.....                               | 5    |
| 2.2 การกำหนดตำแหน่งการวางของสายอากาศ.....   | 6    |
| 2.3 การจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้ $\theta_L = 90^\circ$ .....                | 10   |
| 2.4 ผลของการคำนวณการจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้ $\theta_L = 90^\circ$ .....   | 11   |
| 2.5 การจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้ $\theta_L = 60^\circ$ .....                | 11   |
| 2.6 ผลของการคำนวณการจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้ $\theta_L = 60^\circ$ .....   | 12   |
| 2.7 การจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้ $\theta_L = 120^\circ$ .....               | 12   |
| 2.8 ผลของการคำนวณการจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้ $\theta_L = 120^\circ$ .....  | 13   |
| 2.9 ความสัมพันธ์ของมุม $\theta_L$ ที่มีผลกับมุม $\theta_R$ .....                      | 13   |
| 2.10 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า.....   | 14   |
| 2.11 ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าป้อนสายอากาศแบบไมโครสตริป.....                              | 15   |
| (ก) การเชื่อมร่วมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....   | 15   |
| (ข) การเชื่อมร่วมแบบความจุไฟฟ้า.....  | 15   |
| 2.12 การต่อตัวต่อแชนร่วมกับท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า.....                                 | 16   |
| 2.13 การป้อนโดยใช้ร่องการเชื่อมร่วมแบบวงเพื่อลดการแผ่กำลังงานที่ไม่ต้องการ.....       | 17   |
| 2.14 ความสัมพันธ์ของความถี่เงาจากตัวผสมสัญญาณกับผลตอบสนองของ<br>สัญญาณที่ต้องการ..... | 19   |
| 2.15 วงจรสมมูลของไดโอดผสมสัญญาณ.....  | 21   |
| 2.16 วงจรผสมคลื่นไดคูลเดี่ยว.....   | 22   |
| 2.17 โครงสร้างของแถวลำดับสายอากาศที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสง.....              | 23   |
| 2.18 แถวลำดับสายอากาศที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสงต้นแบบ.....                    | 25   |
| 2.19 สายอากาศองค์ประกอบที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสงต้นแบบ.....                  | 25   |
| 2.20 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง.....                           | 26   |
| 2.21 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง.....                             | 26   |
| 3.1 การแบ่งประเภทของแถวลำดับออกซิลเลเตอร์.....  | 29   |

## สารบัญญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.2 การจำลองวงจรออสซิลเลเตอร์.....   | 30   |
| (ก) การจำลองวงจรออสซิลเลเตอร์แบบขนานแบบอุปกรณ์ความต้านทานลบ.....   | 30   |
| (ข) การวิเคราะห์การแกว่งของแวลลุ่มำดับวงจรง่ายสำหรับวงจรงอสซิลเลเตอร์<br>ที่ทำงานเป็นรายคาบ.....                         | 30   |
| 3.3 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าเฟสระหว่างเอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์<br>กับสัญญาณอินเจ็ทผ่านการทำให้เป็นบรรทัดฐาน..... | 34   |
| 3.4 การแบ่งประเภทของแหล่งป้อนกำลังงาน.....   | 35   |
| 3.5 ชนิดของแวลลุ่มำดับที่มีการเชื่อมต่อ.....   | 36   |
| (ก) ในแต่ละองค์ประกอบจะลือกรวมกับสัญญาณอ้างอิง.....  | 36   |
| (ข) การอินเจ็ทชันลือกข้างเดียวโดยที่แต่ละออสซิลเลเตอร์ทำงานรองจากตัว<br>ออสซิลเลเตอร์ก่อนหน้า.....                       | 36   |
| (ค) การเชื่อมต่อกับองค์ประกอบใกล้เคียงทั้งสองข้าง.....   | 36   |
| 3.6 แบบจำลองของการวิเคราะห์แวลลุ่มำดับออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ.....  | 37   |
| 3.7 สายอากาศแบบแผ่นสี่เหลี่ยมรวมกับไดโอดวาเร็กเตอร์.....   | 40   |
| 3.8 วงจรงอสซิลเลเตอร์ทรานซิลเลเตอร์แบบสองพอร์ต.....  | 41   |
| 3.9 แวลลุ่มำดับสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป 4 องค์ประกอบ.....   | 46   |
| 3.10 วงจรงอสซิลเลเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ GaAs FET เบอร์ MGF1302.....  | 47   |
| 3.11 สายอากาศแวลลุ่มำดับแบบไมโครสตริปต้นแบบ.....   | 48   |
| 3.12 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ.....  | 48   |
| 3.13 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่<br>ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (1.8GHz).....                       | 49   |
| 3.14 วงจรงอสซิลเลเตอร์ต้นแบบ.....  | 49   |
| 3.15 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรงอสซิลเลเตอร์ต้นแบบ.....  | 50   |
| 4.1 สายอากาศแวลลุ่มำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมต่อแบบอ่อนต้นแบบ.....   | 51   |
| 4.2 การทดสอบการตอบสนองต่อแรงดันไบอัส.....  | 52   |
| 4.3 การทดสอบการตอบสนองต่อแรงดันไบอัสในห้องไม่สะท้อนคลื่น.....  | 53   |
| 4.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงจากการปรับแรงดันไบอัส.....   | 53   |
| 4.5 การทดสอบลือกกิ่งแบนดิวิดท์และค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก.....   | 55   |

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.6 สเปกตรัมของสัญญาณ.....   | 56   |
| (ก) สัญญาณอินเจ็ก.....   | 56   |
| (ข) สัญญาณออสซิลเลเตอร์ความถี่เสรี.....  | 56   |
| (ค) สัญญาณความถี่เมื่อเกิดการล็อก.....   | 57   |
| (ง) สัญญาณขณะที่มีการหลุดจากการล็อกโดยความถี่อินเจ็กน้อยกว่าความถี่เสรี.....   | 57   |
| (จ) สัญญาณขณะที่มีการหลุดจากการล็อกโดยความถี่อินเจ็กมากกว่าความถี่เสรี.....  | 58   |
| 4.7 พิกัดขององค์ประกอบแวลวลำดับบนระนาบ $yz$ วางตามแกน $z$ .....  | 60   |
| 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงาน.....   | 62   |
| (ก) การปรับลำคลื่นหลักไปที่มุม $\theta = 60^\circ$ .....   | 62   |
| (ข) การปรับลำคลื่นหลักไปที่มุม $\theta = 90^\circ$ .....   | 63   |
| (ค) การปรับลำคลื่นหลักไปที่มุม $\theta = 120^\circ$ .....  | 63   |
| 5.1 โครงสร้างของระบบการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้<br>สายอากาศแวลวลำดับชนิดแอกทีฟ.....   | 66   |
| 5.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยการเปลี่ยนระยะห่างที่ $0.25 \lambda$ $0.75 \lambda$<br>$1.25 \lambda$ $1.75 \lambda$ $2.25 \lambda$ และ $4 \lambda$ .....     | 67   |
| 5.3 ต้นแบบของระบบการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้<br>สายอากาศแวลวลำดับชนิดแอกทีฟ.....  | 68   |
| 5.4 หลักการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศ<br>แวลวลำดับชนิดแอกทีฟ.....   | 69   |
| 5.5 แสดงผลการคำนวณทิศทางของลำคลื่นหลักในการรับสัญญาณความถี่วิทยุ ( $\theta_R$ )<br>โดยการกำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแวลวลำดับชนิดแอกทีฟ ( $\theta_A$ ) ..... | 70   |
| 5.6 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 100 MHz.....  | 71   |
| 5.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงที่ความถี่ 100 MHz.....   | 72   |
| (ก) กำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแวลวลำดับชนิดแอกทีฟ ( $\theta_A$ ) ที่ 60 องศา....  | 72   |
| (ข) กำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแวลวลำดับชนิดแอกทีฟ ( $\theta_A$ ) ที่ 90 องศา....  | 72   |
| (ค) กำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแวลวลำดับชนิดแอกทีฟ ( $\theta_A$ ) ที่ 120 องศา..   | 73   |
| 5.8 การทดสอบการสูญเสียแปลงผันของสายอากาศแบบหลักกึ่งแสงที่ปรับลำคลื่น<br>ด้วยสายอากาศแวลวลำดับชนิดแอกทีฟ.....   | 74   |

## สารบัญญรูป(ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 5.9 สัญญาณจากจอแสดงผลเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม..... | 75   |
| (ก) สัญญาณความถี่กลาง.....                         | 75   |
| (ข) สัญญาณความถี่วิทยุ.....                        | 75   |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การติดต่อสื่อสารในปัจจุบันมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วตามความต้องการของผู้ใช้ จึงมีการเพิ่มอัตราความเร็วในการส่งข้อมูล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ระบบสายอากาศที่มีความสามารถในการปรับลำคลื่นได้เพื่อรองรับระบบสายอากาศฉลาด (Smart Antenna System) ระบบการปรับลำคลื่นแบบเดิมนั้นใช้ระบบขับเคลื่อนทางกลซึ่งมีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก การตอบสนองทิศทางช้า ต่อมาจึงมีการพัฒนาโดยใช้ตัวเลื่อนเฟสในการควบคุมการปรับลำคลื่นทำให้มีประสิทธิภาพสูง ขนาดเล็ก แต่ข้อเสียของตัวเลื่อนเฟสคือเมื่อต้องการส่งในความถี่ที่สูงขึ้น ความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss) ที่เกิดจากตัวเลื่อนเฟสและวงจรความถี่สูงจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นการประมาณค่าเฟสในการควบคุมลำคลื่นอาจมีความผิดพลาดและในระบบการสื่อสารไร้สายต้องมีการแปลงสัญญาณความถี่วิทยุเป็นสัญญาณความถี่กลาง ซึ่งจำเป็นต้องใช้ตัวผสมสัญญาณและวงจรออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง เมื่อรวมกับตัวเลื่อนเฟสแล้วต้นทุนสูงมาก ต่อมาได้มีการนำเสนอสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงขึ้น ซึ่งสามารถแก้ปัญหาค่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ ข้อดีของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงคือเมื่อรับสัญญาณความถี่วิทยุแล้วจะทำการแปลงสัญญาณเป็นความถี่กลางทันทีที่ตัวสายอากาศโดยสัญญาณที่เอาต์พุตจะไม่เกิดการสูญเสียจากวงจรความถี่สูง สายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงมีการใช้งานหลายด้าน เช่น ใช้ในการรวมกำลังงานในย่านความถี่มิลลิเมตร [1] ตัวอย่างการรวมกำลังงานเช่น [2] เป็นการใช้ตัวเรโซเนเตอร์แบบ InP Gun ซึ่งใช้งานที่ความถี่ 60 GHz มีประสิทธิภาพในการรวมกำลังงาน 54% [3] เป็นการรวมกำลังงานโดยใช้อุปกรณ์ GaAs IMPATT ที่ความถี่ 100 GHz ทดสอบโดยการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบตั้งแต่  $5 \times 5$ ,  $7 \times 7$  และ  $9 \times 9$  ซึ่งกำลังงานรวมที่วัดได้คือ 300 mW, 630 mW และ 800 mW ตามลำดับ [4] เป็นการรวมกำลังงานโดยใช้สายอากาศแบบแอกทีฟแบบแผ่นวางในแนวระนาบ ใช้อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบ MESFET 16 องค์ประกอบทำงานที่ความถี่ในย่าน 8 ถึง 12 GHz (X-band) ให้กำลังงาน 10 W [5] เป็นการรวมกำลังงานโดยใช้สายอากาศแบบแอกทีฟแบบแผ่นวางในแนวระนาบขนาด  $4 \times 4$  ใช้อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบ FET ทำงานที่ความถี่ 6 GHz ให้กำลังงาน 28.2 W [7] เป็นการรวมกำลังงานโดยใช้สายอากาศแอกทีฟแบบร่องเรียว (Notch Antenna) โดยใช้ FET เป็นอุปกรณ์ขนาด  $2 \times 2$  ทำงานที่ย่านความถี่ 5 ถึง 8 GHz ให้กำลังงาน 8.9

mW [8] ใช้สายอากาศแอกทีฟแบบแผ่นวงกลมวางในแนวระนาบขนาด  $2 \times 2$  ที่ความถี่ในย่าน 8 ถึง 12 GHz ให้กำลังงาน 3.8 W

ส่วนการใช้งานเป็นตัวขยายเช่น ตัวขยายแบบหลักการกึ่งแสง (A Quasi-Optical Amplifier) [9] เป็นการขยายกำลังงานโดยใช้สายอากาศปากแตรสองด้านต่อรวมกับอุปกรณ์แอกทีฟมีอัตราขยาย 10.5 dB ที่ความถี่ 5.92 GHz [10] เป็นการป้องกันการป้อนโดยท่อนำคลื่นผ่านตัวขยายเป็นสายอากาศแบบแผ่นที่ใช้ MESFET เป็นอุปกรณ์แอกทีฟทำงานที่ความถี่ 4 GHz อัตราการขยาย 12 dB [11] เป็นตัวขยายแบบย่านความถี่กว้างลักษณะเป็นสายอากาศปากแตรหันหลังชนกัน (Back-to-Back horn) โดยโพรงระหว่างสายอากาศปากแตรติดตัวขยายสัญญาณรบกวนต่ำ (LNA) ซึ่งให้อัตราขยายต่ำสุด 11 dB ตั้งแต่ 86 ถึง 113 GHz และมีอัตราขยายสูงสุด 15.5 dB ที่ความถี่ 94 GHz [12] เป็นทั้งตัวขยายและสามารถปรับล้าคลื่นได้โดยการเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศแบบแผ่นที่ป้อนสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องทางด้านหลัง โดยมีอัตราขยาย 21.7 dB ที่ความถี่ 9.7 GHz

ส่วนการใช้งานเป็นตัวผสมสัญญาณตัวอย่างเช่น [13] ลักษณะเป็นสายอากาศแบบแผ่นที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าตรงกลางมีไดโอดชอตกี-แบร์ริเออร์ (Schottky-barrier diode) แบบ GaAs เป็นตัวผสมสัญญาณ โดยรับสัญญาณความถี่วิทยุที่ด้านหน้าและป้อนสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องผ่านท่อนำคลื่น ซึ่งมีค่าการสูญเสียจากการแปลงผัน 7 dB ที่ความถี่ 127 GHz โดยสัญญาณออสซิลเลเตอร์มีความถี่ 141 GHz [14] เป็นการนำเสนอดัวผสมสัญญาณแบบได้ดุล (Balance Mixer) โดยใช้สายอากาศร่องวงกลม (Slot-Ring Antenna) ที่มีไดโอดผสมสัญญาณติดที่ร่องโดยมีค่าการสูญเสียจากการแปลงผัน 6.5 dB ที่ความถี่ 65 GHz [15] เป็นการนำเสนอดัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศหูกะต่าย (Bowtie Antenna) ร่วมกับไดโอดผสมสัญญาณซึ่งมีค่าการสูญเสียจากการแปลงผัน 8.6 dB ที่ความถี่ 14 GHz โดยมีช่วงการใช้งานกว้างตั้งแต่ 14 ถึง 35 GHz [16] เป็นการนำเสนอสายอากาศแบบร่องที่มีการผสมสัญญาณในตัวเองมีค่าการสูญเสียจากการแปลงผัน 4.5 dB ที่ย่านความถี่ 8 ถึง 12 GHz (X-band) และมีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) 6.5 dB

ส่วนงานในการปรับล้าคลื่น โดยใช้แถวลำดับสายอากาศที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสง [17] ซึ่งในแต่ละสายอากาศองค์ประกอบมีลักษณะเป็นสายอากาศแบบแผ่นหันหลังชนกัน (Back-to-Back) ตรงกลางของสายอากาศเป็นท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า ส่วนปลายของท่อนำคลื่นมีตัวไดโอดผสมสัญญาณ ในการปรับล้าคลื่นทำได้โดยการเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศส่งสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ด้านหลังของสายอากาศ ซึ่งเป็นการนำเสนองานปรับล้าคลื่นแทนการใช้ตัวเลื่อนเฟส

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงมีข้อดีที่สายอากาศทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณความถี่วิทยุเป็นสัญญาณความถี่กลางทันทีที่ได้รับสัญญาณ ทำให้ลดการสูญเสียจากวงจรความถี่สูงได้และทำให้ต้นทุนของระบบในการรับสัญญาณลดลง แต่ในการปรับลำคลื่นใช้การเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศที่ส่งสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง ซึ่งผู้วิจัยมองเห็นหนทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการกวาดลำคลื่นได้ ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาและปรับปรุงสายอากาศชนิดนี้ จึงได้วิเคราะห์หาตัวแปรที่สามารถใช้ควบคุมในการปรับลำคลื่นโดยใช้ข้อดีของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมต่อ ซึ่งสามารถกวาดลำคลื่นได้โดยปรับความถี่ในแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับผ่านเทคนิคอินเจกชันล็อก ทำให้สามารถใช้ควบคุมลำคลื่นของสายอากาศชนิดนี้แทนการเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศที่ส่งสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องโดยใช้ระบบการขับเคลื่อน (มอเตอร์)

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

กระบวนการปรับลำคลื่นในการรับสัญญาณของสายอากาศแบบทั่วไป จะใช้วงจรเลื่อนเฟสทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นในระบบการรับสัญญาณ เนื่องจากวงจรเลื่อนเฟสทำงานที่ความถี่วิทยุ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการพัฒนาระบบการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงใหม่ โดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟในการป้อนสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง ซึ่งสามารถควบคุมลำคลื่นได้ผ่านเทคนิคอินเจกชันล็อกแทนการควบคุมทิศทางด้วยการเลื่อนตำแหน่งสายอากาศ ซึ่งสามารถเพิ่มความเร็วในการควบคุมลำคลื่นหลักของสายอากาศได้ รวมทั้งจะไม่เกิดการสูญเสียขึ้นในระบบเนื่องจากไม่มีทั้งตัวเลื่อนเฟสและวงจรความถี่สูงเนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตจากสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงเป็นสัญญาณความถี่กลาง โดยทำการวิเคราะห์ ออกแบบ และสร้างสายอากาศต้นแบบรวมทั้งทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

## 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคอินเจกชันล็อกเพื่อควบคุมความต่างเฟสของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมต่อแบบอ่อน ซึ่งใช้ปรับทิศทางคลื่นระนาบที่ป้อนไปยังสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง ทำให้ปรับทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศได้ ส่วนการวิเคราะห์ใช้ทฤษฎีของคลื่นระนาบ (Plane Wave) โดยพิจารณาที่สนามระยะไกล (Far Field)

## 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้แสดงแนวคิดใหม่ในการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมต่อแบบอ่อน โดยออกแบบให้รับสัญญาณความถี่วิทยุที่ 1.9 GHz และสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ 1.8 GHz ซึ่งทั้งสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟและสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงมีจำนวนสิ่งองค์ประกอบวางในแนวเชิงเส้น รวมทั้งวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของทิศลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีผลต่อทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง หาระยะห่างของสายอากาศที่เหมาะสมในการวาง ออกแบบสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟและสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงต้นแบบ พร้อมทั้งทดสอบการกวาดลำคลื่นและแสดงผลเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการวิเคราะห์

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนในการวิจัยเริ่มจากศึกษาหลักการในการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงและวิเคราะห์เงื่อนไขในการปรับลำคลื่นหลักของสายอากาศโดยใช้หลักการของคลื่นระนาบที่สนามระยะไกลรวมทั้งหาตัวแปรที่สามารถใช้ในการควบคุมการกวาดลำคลื่น ลำดับต่อมาจึงศึกษาทฤษฎีอินเทกชันล็อกในออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ และหาเงื่อนไขในการควบคุมความต่างเฟสในระบบสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ รวมทั้งหาความสัมพันธ์ของทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแอกทีฟที่มีผลกับลำคลื่นหลักในการรับสัญญาณ จากนั้นจึงวิเคราะห์หาระยะห่างที่เหมาะสม ในการวางสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟจากสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง ลำดับต่อมาได้สร้างระบบการกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงที่ป้อนสัญญาณออสซิลเลเตอร์ด้วยสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ขั้นตอนสุดท้ายจึงทดสอบการปรับลำคลื่น โดยการควบคุมความถี่ในแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟและคุณสมบัติทางไฟฟ้า และนำผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์

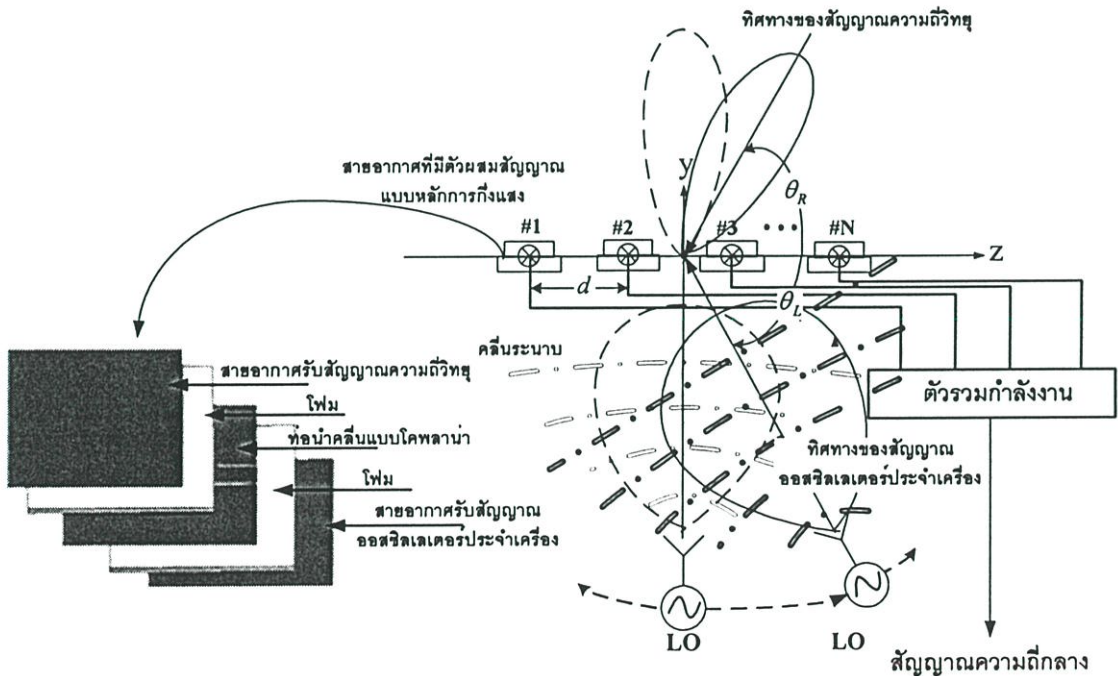
## บทที่ 2

# สายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง

### 2.1 กล่าวนำ

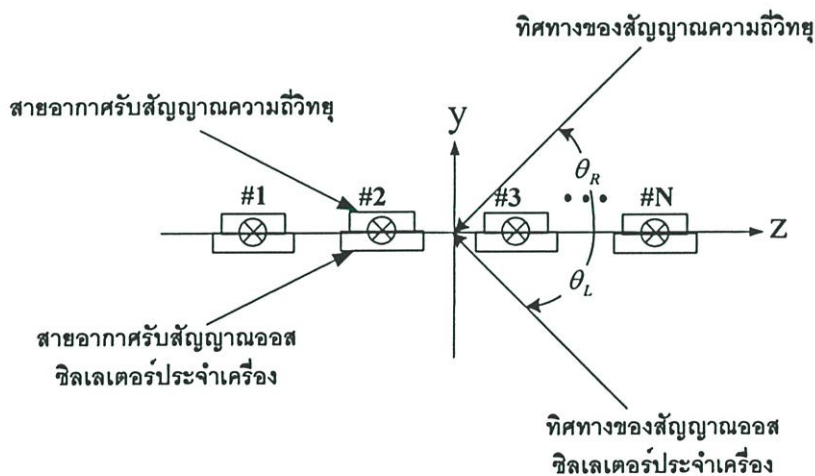
ในการกวาดลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับปกติทำโดยใช้ตัวเลื่อนเฟส ลำคลื่นหลักของสายอากาศถูกควบคุมโดยตัวเลื่อนเฟสซึ่งทำงานที่ความถี่วิทยุ ปัญหาที่พบคือการสูญเสียจากตัวนำของตัวเลื่อนเฟส การสูญเสียนี้จะเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้งานในย่านความถี่มิลลิเมตร การทำงานของตัวเลื่อนเฟสจะเกิดความผิดพลาดเนื่องจากการสูญเสียจากตัวนำ ในบทนี้นำเสนอเทคนิคการกวาดลำคลื่นโดยใช้สายอากาศแถวลำดับที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสงซึ่งสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ รวมทั้งอธิบายหลักการทำงานและแสดงการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศรวมทั้งการทดสอบและผลการทดสอบ

### 2.2 หลักการปรับลำคลื่นของสายอากาศผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสง



รูปที่ 2.1 หลักการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง

หลักการในการกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงในรูปที่ 2.1 จากรูปเมื่อมองในระนาบ  $yz$  ตัวสายอากาศจะวางเรียงกันตามแกน  $z$  โดยมีจำนวน  $N$  องค์ประกอบ ในแต่ละองค์ประกอบมีลักษณะเป็นสายอากาศแบบแผ่น ซึ่งมีชั้นของตัวนำ (ทองแดง) อยู่ 3 ชั้นคือ ชั้นบนสุดออกแบบให้รับสัญญาณความถี่วิทยุ ชั้นกลางเป็นท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า (Coplanar-waveguide) ส่วนปลายของท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าจะมีตัวผสมสัญญาณแบบไดโอด (Mixer Diode) ใช้ผสมสัญญาณความถี่วิทยุกับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องให้เป็นความถี่กลาง ชั้นสุดท้ายออกแบบให้รับสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง โดยสัญญาณความถี่กลางที่รับได้จะผ่านสายนำสัญญาณและมารวมกันที่ตัวรวมกำลังงาน โดย  $\theta_R$  คือทิศทางของลำคลื่นหลักของสายอากาศ ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศที่ใช้ส่งสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง โดยค่า  $\theta_L$  คือทิศทางของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่รับได้ การกำหนดตำแหน่งและการจัดวางสายอากาศองค์ประกอบในแต่ละองค์ประกอบมีลักษณะเดียวกันวางอยู่ตามแนวแกน  $z$  ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.2 โดยจำนวนของสายอากาศองค์ประกอบเป็น  $N$  ซึ่งจุดกำเนิดจะเป็นจุดกึ่งกลางของแถวลำดับเพื่อง่ายต่อการพิจารณาจะพิจารณาในระนาบ  $yz$  สมมุติมุมในการตกกระทบจากการสังเกตนามโดยไม่คำนึงถึงผลกระทบของการเชื่อมต่อร่วมระหว่างองค์ประกอบ มุมการตกกระทบของสัญญาณวิทยุอยู่ในส่วนครึ่งบน ( $y > 0$ ) และสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องอยู่ที่ส่วนล่าง ( $y < 0$ ) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การกำหนดตำแหน่งการวางของสายอากาศ

มุมตกกระทบของสัญญาณความถี่วิทยุมีค่า  $\theta_R$  ในขณะที่มุมตกกระทบของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องมีค่า  $\theta_L$  โดยขนาดของสัญญาณทั้งหมดที่รับได้หาได้จาก

$$E_{R,n} = S_{R,n} \times D_{R,n} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $S_{R,n}$  เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าของสัญญาณที่ตำแหน่งองค์ประกอบ  $n$  และ  $D_{R,n}$  เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศองค์ประกอบ  $n$  ในทำนองเดียวกันขนาดของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องบนสายอากาศองค์ประกอบ  $n$  คือ  $E_{L,n}$  แสดงได้ดังนี้

$$E_{L,n} = S_{L,n} \times D_{L,n} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $S_{L,n}$  เป็นความเข้มสนามไฟฟ้าของสัญญาณที่ตำแหน่งองค์ประกอบ  $n$  และ  $D_{L,n}$  เป็นแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศองค์ประกอบ  $n$  ความแตกต่างเฟสระหว่างสายอากาศองค์ประกอบของสัญญาณความถี่วิทยุกับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องคือ  $\varphi_R$  และ  $\varphi_L$  ตามลำดับ โดยนิยามดังนี้

$$\varphi_R = k_R \cdot d \cdot \cos \theta_R \quad (2.3)$$

$$\varphi_L = k_L \cdot d \cdot \cos \theta_L \quad (2.4)$$

โดยที่  $k_R$  และ  $k_L$  เป็นหมายเลขของคลื่น สำหรับสัญญาณความถี่วิทยุและสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องตามลำดับและ  $d$  เป็นค่าระยะห่างระหว่างสายอากาศสององค์ประกอบซึ่งต้องมีระยะเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นของสัญญาณความถี่วิทยุในอากาศว่างในการกำหนดค่าเฟสอ้างอิง ดังนั้นขนาดของสัญญาณความถี่กลางคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} I_n &= E_{R,n} \cdot \cos(\omega_R t - n\varphi_R) \otimes E_{L,n} \cdot \cos(\omega_L t - n\varphi_L) \\ &= \frac{1}{2} K_n E_{R,n} E_{L,n} \times [\cos\{(\omega_R - \omega_L)t - n(\varphi_R - \varphi_L) + \beta_{n-}\} \\ &\quad + \cos\{(\omega_R + \omega_L)t - n(\varphi_R - \varphi_L) + \beta_{n+}\}] \\ &= A_n [\cos(\Omega_- t - n\Psi_- + \beta_{n-}) + \cos(\Omega_+ t - n\Psi_+ + \beta_{n+})] \end{aligned} \quad (2.5)$$

โดยที่  $\omega_R$  ,  $\omega_L$  เป็นความถี่เชิงมุมของสัญญาณความถี่วิทยุและสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง  $K_n$  เป็นอัตราขยายการแปลงผัน และกำหนดให้

$$A_n = \frac{1}{2} K_n E_{R,n} E_{L,n} \quad (2.6)$$

$$\Omega_- = \omega_R - \omega_L \quad (2.7)$$

$$\Omega_+ = \omega_R + \omega_L \quad (2.8)$$

$$\psi_- = \varphi_R - \varphi_L \quad (2.9)$$

$$\psi_+ = \varphi_R + \varphi_L \quad (2.10)$$

ค่าเฟสจะเปลี่ยนแปลงหลังจากการผสมสัญญาณ และความยาวของสายนำสัญญาณที่แตกต่างกันมีค่า  $\beta_{n-}$  และ  $\beta_{n+}$  สัญลักษณ์  $\otimes$  คือ กระบวนการผสมสัญญาณซึ่งกำหนดให้เป็นการทำการคูณตัวแปรทั้งสองข้างของสัญลักษณ์ซึ่งแปรผันตามเกณฑ์ ดังนั้นความถี่กลางที่เอาท์พุตถูกนำมารวมที่ตัวรวมกำลังงาน โดยพิจารณาแบบอุดมคติ เช่นตัวรวมกำลังงานแบบวิลคินสัน [18] ดังนั้นผลรวมของสัญญาณความถี่กลางทั้งหมดหาได้จาก

$$I_{sum} = c \cdot \sum_{n=1}^{N-1} I_n \quad (2.11)$$

เมื่อค่า  $c$  เป็นค่าคงที่โดยขึ้นอยู่กับจำนวนของสายอากาศองค์ประกอบ เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ จะพิจารณาโดยจะสมมุติ ดังนี้

- ขนาดของสัญญาณและการแปรผันตามเกณฑ์ในแต่ละตัวของตัวผสมสัญญาณมีค่าเท่ากันคือ

$$A_n = A \quad \text{สำหรับ } n = 0, 1, \dots, N-1$$

- ถ้าเฟสด้านออกไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านการผสมสัญญาณ

$$\beta_{n-} = \beta_{n+} = 1 \quad \text{สำหรับ } n = 0, 1, \dots, N-1$$

ในการอ้างอิงการเลื่อนเฟสจะย้ายตัวแปร  $\psi$  ไปยังตัวประกอบแถวลำดับ (Array-factor) ทำให้สมการที่ (2.11) เปลี่ยนรูปเป็น

$$IF_{SUM} = IF_{dc} \cos(\Omega_- t) + IF_{uc} \cos(\Omega_+ t) \quad (2.12)$$

ในที่นี้เราใช้ในการรับสัญญาณที่ได้จากการแปลงความถี่จากสัญญาณความถี่วิทยุเป็นสัญญาณความถี่กลาง จากสมการที่ (2.12) พจน์หลังสามารถละได้เนื่องจากเราสนใจในกรณีของการแปลงผันลง ดังนั้นสมการจะลดรูปเป็น

$$IF_{SUM} = E_{down(n)} \cos(\Omega_t) \quad (2.13)$$

โดยที่  $E_{down(n)}$  คือขนาดของสัญญาณความถี่กลางที่รับได้จากค่าของมุมตกกระทบของสัญญาณความถี่วิทยุกับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง เนื่องจาก  $f_R$  และ  $f_L$  มีค่าอยู่ในตัวแปร  $\psi_-$  ขนาดของสัญญาณความถี่กลางที่รับได้หาได้จาก แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศองค์ประกอบคู่กับค่าตัวประกอบแถวลำดับแสดงได้ดังนี้

$$IF_{SUM} = E_{(\text{single element} \times \text{Array factor})} \cos(\Omega_t) \quad (2.14)$$

- แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศองค์ประกอบหาได้จาก สมการแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบแผ่นในระนาบสนามแม่เหล็กแสดงได้ดังนี้ [19]

$$E_{\text{single element}} = +j \frac{2V_0 e^{-jk_0 r}}{\pi r} \left[ \sin \theta \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \cos \theta\right)}{\cos \theta} \right] \cos\left(\frac{k_0 L}{2} \sin \phi\right) \quad (2.15)$$

เมื่อ  $V_0$  เป็นแรงดันระหว่างร่องมีค่า  $hE_0$ ,  $h$  คือความหนาของวัสดุฐานรอง (substrate), มุม  $\phi = 0$  องศา, มุม  $\theta$  มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศา  $W$  เป็นความกว้าง และ  $L$  คือความยาวของสายอากาศองค์ประกอบ

- แบบรูปการแผ่กำลังงานของตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor:  $AF$ ) หาได้จาก สมการแบบรูปการแผ่พลังงานของลักษณะการวางสายอากาศในแนวเชิงเส้น [20]

$$AF(\text{linear}) = \sum_{i=1}^n e^{j(n-1)\psi_-} \quad (2.16)$$

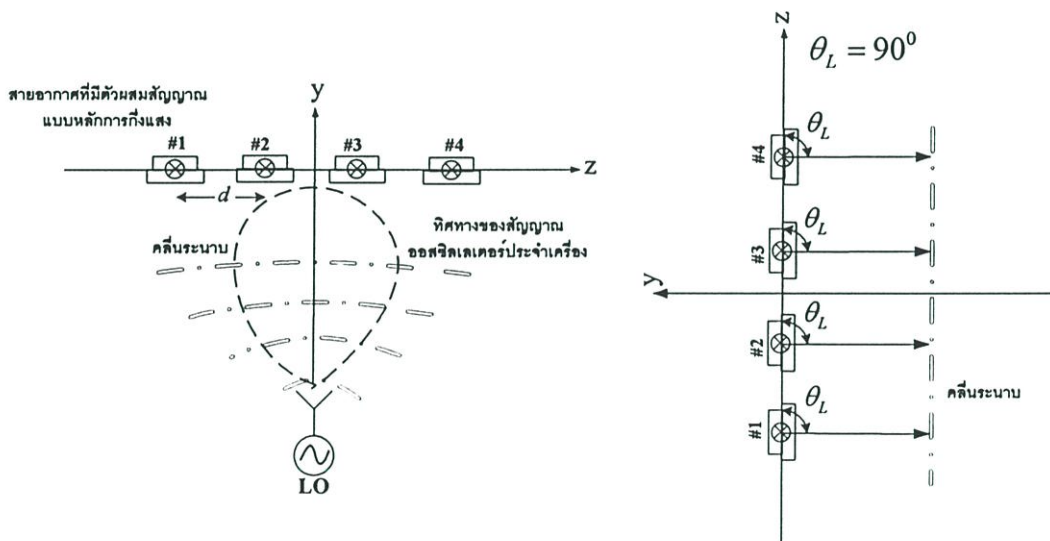
จากสมการที่ (2.9), (2.3) และ (2.4) หาค่าของตัวประกอบแถวลำดับได้จาก

$$AF = \sum_{i=1}^n e^{j(n-1)(k_R d_R \cos \theta_R - k_L d_L \cos \theta_L)} \quad (2.17)$$

ซึ่งข้อเท็จจริงตำแหน่งในการรับความถี่วิทยุ  $\theta_R$  สามารถควบคุมได้จากการปรับค่าตัวแปร  $d_L$ ,  $d_R$  และ  $\theta_L$  แต่ในความเป็นจริงแล้วนั้นเรากำหนดระยะห่าง  $d_L$  เท่ากับ  $d_R$  เพื่ออำนวยความสะดวกสร้างดังนั้นเราจึงใช้การควบคุมมุม  $\theta_L$  เพียงอย่างเดียว

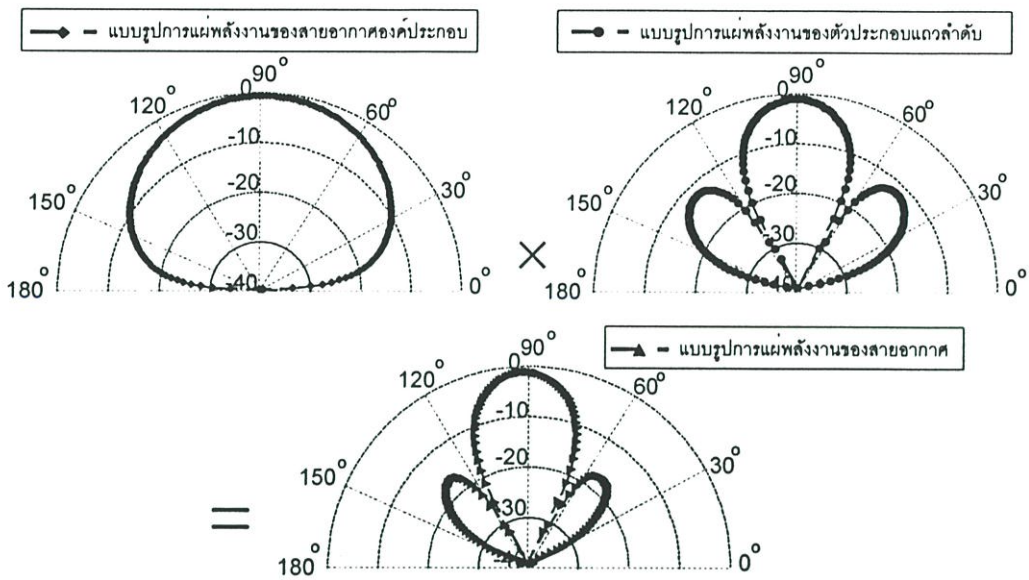
### 2.2.1 การจำลองและการวิเคราะห์การกวาดลำคลื่น

การจำลองโดยให้จำนวนของสายอากาศองค์ประกอบมีค่า  $N$  เท่ากับ 4 และให้สัญญาณความถี่วิทยุที่ 1.9 GHz ความถี่ของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องเท่ากับ 1.8 GHz ตามลำดับ ส่วนระยะห่างระหว่างสายอากาศองค์ประกอบมีค่า  $d$  เท่ากับ  $0.5\lambda$  ที่ความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องและค่าของมุมตกกระทบ  $\theta_L$  มีค่า 90 องศา



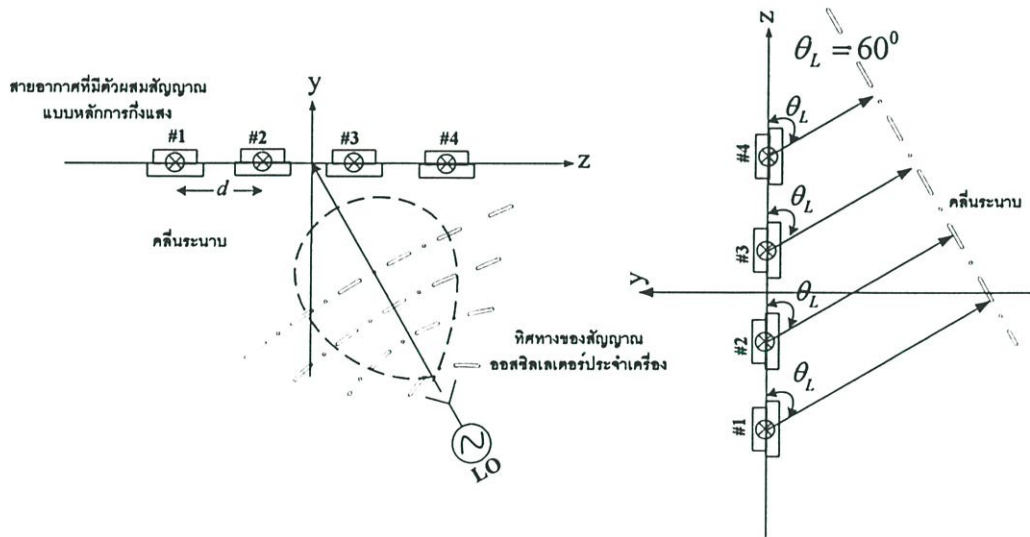
รูปที่ 2.3 การจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้  $\theta_L = 90^\circ$

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้จากการจำลองทิศทางตำแหน่งของสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ตามรูปที่ 2.3 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.14) มีแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 2.4



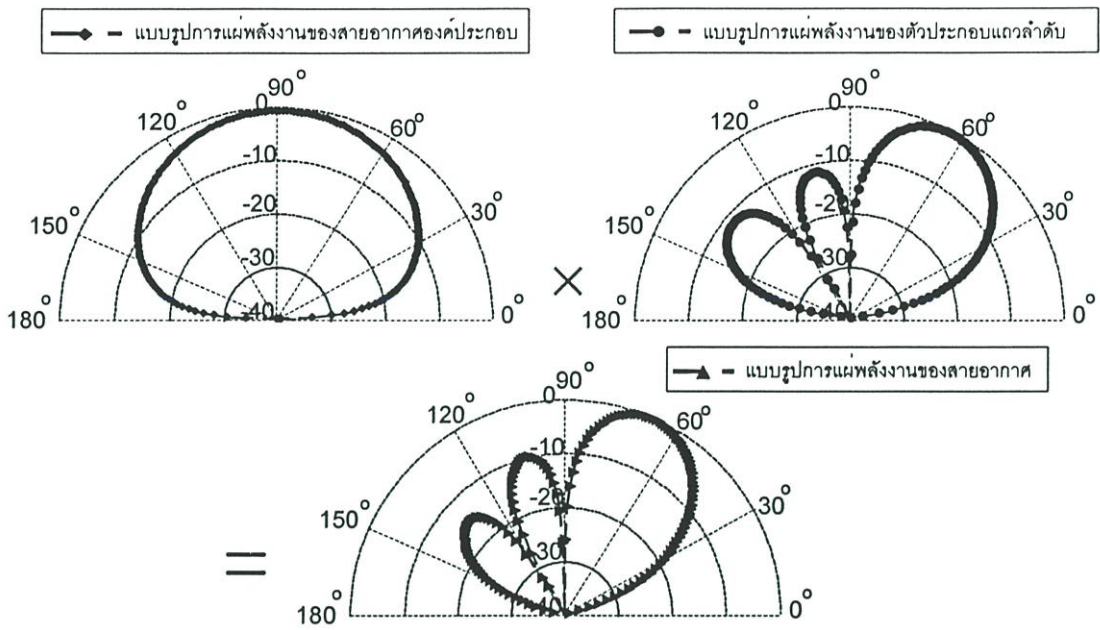
รูปที่ 2.4 ผลของการคำนวณการจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้  $\theta_L = 90^\circ$

และเมื่อเปลี่ยนทิศทางของมุม  $\theta_L = 60^\circ$  จำลองแบบได้ดังรูปที่ 2.5



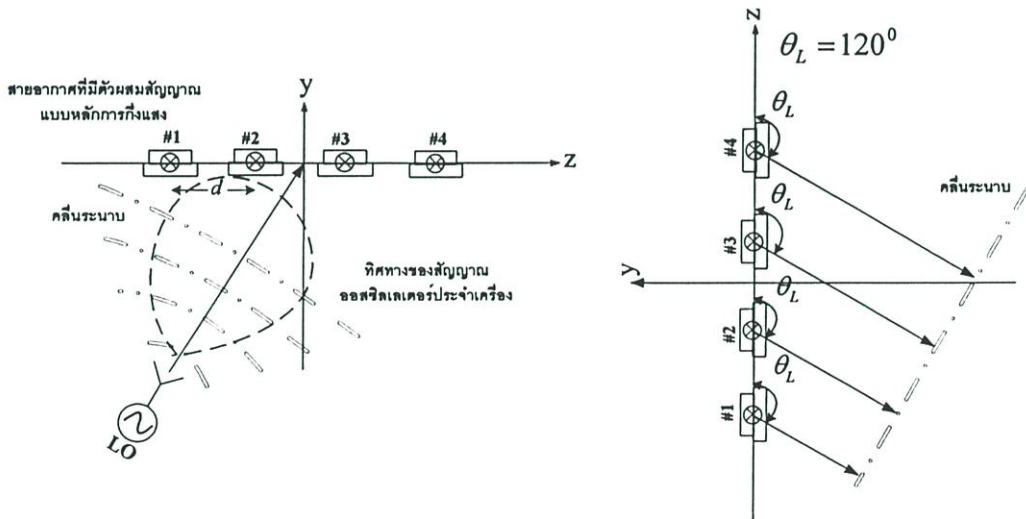
รูปที่ 2.5 การจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้  $\theta_L = 60^\circ$

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้จากการจำลอง ซึ่งมีทิศทางตำแหน่งของสัญญาณ ความถี่ออสซิลเลเตอร์ตามรูปที่ 2.5 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.14) มีแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



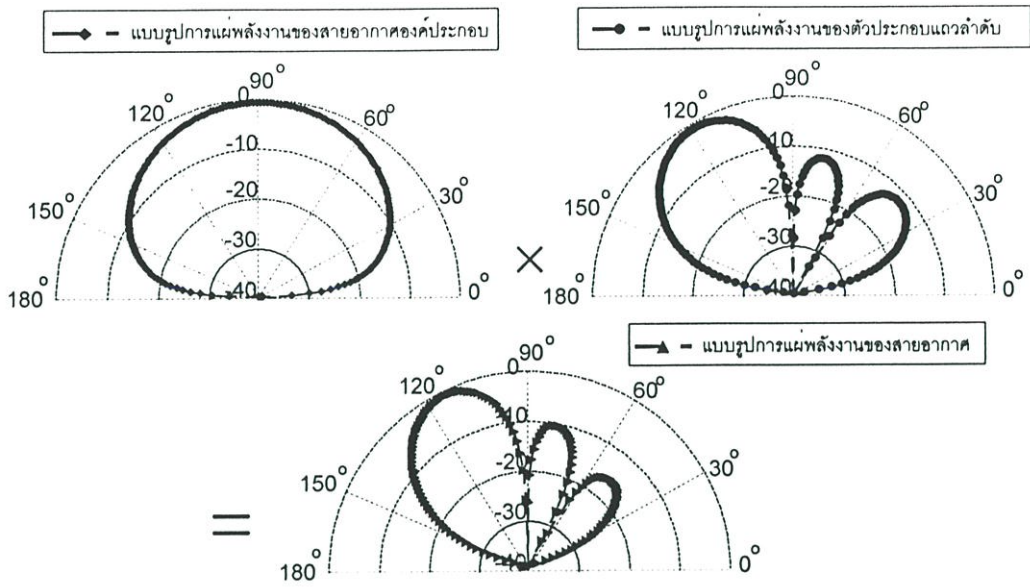
รูปที่ 2.6 ผลของการคำนวณการจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้  $\theta_L = 60^\circ$

และเมื่อเปลี่ยนทิศทางของมุม  $\theta_L = 120^\circ$  จำลองได้ดังรูปที่ 2.7



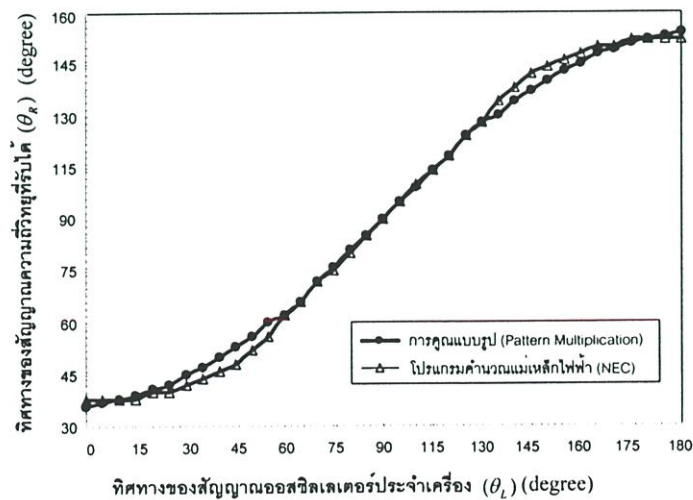
รูปที่ 2.7 การจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้  $\theta_L = 120^\circ$

แบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศที่ได้จากการจำลองทิศทางตำแหน่งของสัญญาณความถี่ ออกซิเลเตอร์ตามรูปที่ 2.7 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.14) มีแบบรูปการแผ่พลังงานของ สายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ผลของการคำนวณการจำลองทิศทางของคลื่นระนาบโดยกำหนดให้  $\theta_L = 120^\circ$

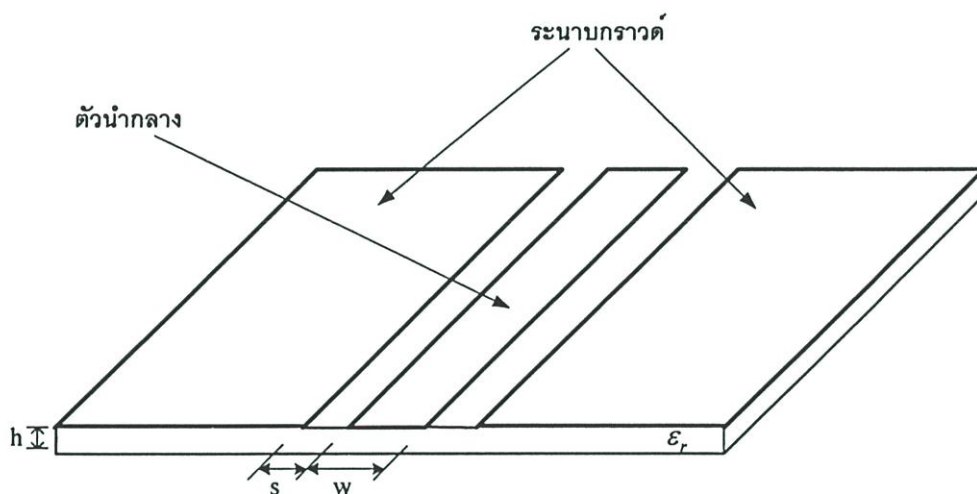
จากรูปสังเกตได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศทั้งหมดจะได้จาก แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศองค์ประกอบคูณกับ แบบรูปการแผ่กำลังงานของตัวประกอบแถวลำดับ ดังนั้นการปรับลำคลื่นทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่กำลังงานของตัวประกอบแถวลำดับซึ่งถูกควบคุมโดยการปรับค่า  $\theta_L$  จึงสามารถคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของสัญญาณออกสวิตเลเตอร์ประจำเครื่องที่รับได้ ( $\theta_L$ ) กับทิศทางการรับสัญญาณความถี่วิทยุ ( $\theta_R$ ) และเปรียบเทียบกับ การคำนวณแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากโปรแกรมคำนวณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (NEC) แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของมุม  $\theta_L$  ที่มีผลกับมุม  $\theta_R$

ผลที่ได้คือค่าของมุม  $\theta_r$  ที่ตอบสนองกับค่ามุม  $\theta_L$  มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณโดยใช้การคูณกันของแบบรูปการแผ่พลังงาน (Pattern Multiplication) ซึ่งการคูณกันของแบบรูปการแผ่พลังงานนั้นจะไม่รวมผลของการเชื่อมต่อกัน (Mutual coupling) ในแต่ละสายอากาศองค์ประกอบ ส่วนค่าอัตราขยายของสายอากาศที่คำนวณได้จากโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่า 12.8 dBi และมุมในการปรับลำคลื่นอยู่ในช่วง 36 ถึง 144 ในระนาบ  $yz$

### 2.3 ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าป้อนสายอากาศแบบแผ่น



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า

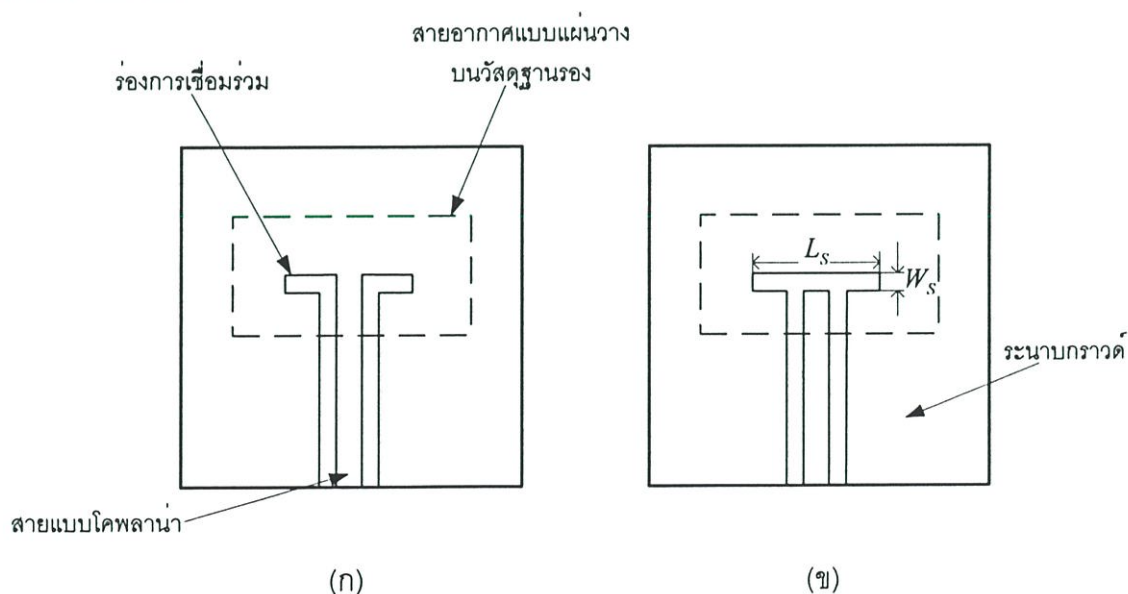
แม้ว่าสายไมโครสตริปและสายแถบแคบ (Strip line) ถูกใช้มาเป็นเวลานานซึ่งส่วนใหญ่ใช้เป็นตัวกลางส่งสัญญาณย่านความถี่ไมโครเวฟที่เป็นแบบแผ่นวงจรพิมพ์ โดยทั้งหมดนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาไม่นานมานี้ซึ่งหนึ่งในการพัฒนานั้นคือท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า [21] โดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 สายนำสัญญาณทั้งหมดจะอยู่บนวัสดุฐานรอง (substrate) โดยจะมีช่องว่างของตัวนำที่ถูกตัดออกจากตัวนำกลางมีความกว้างเท่ากับ  $w$  ระยะขอบของตัวนำกลางจากขอบของระนาบกราวด์มีขนาดเป็น  $s$  ในส่วนของตัวนำที่เหลือคือระนาบกราวด์ และมีทิศทางการเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าข้ามผ่านช่องว่างซึ่งเป็นผลจากการชาร์จของสนามไฟฟ้าจากตัวนำกลางไปสู่ระนาบกราวด์ด้านข้าง ส่วนทิศทางของสนามแม่เหล็กจะเป็นวงรอบตัวนำกลาง

หนึ่งในการใช้ประโยชน์การไหลของกระแสในท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าคือ ง่ายในการต่อกรรวมกับอุปกรณ์ทั้งแบบอนุกรมและขนาน [22] ผู้ออกแบบสามารถต่อตัวอุปกรณ์แบบอนุกรมได้โดยการตัดตัวนำกลางและวางอุปกรณ์ผ่านช่องว่างที่ตัด ส่วนการต่อแบบขนานทำได้โดยการวางตัวอุปกรณ์ผ่านช่องว่าง ระหว่างตัวนำกลางกับระนาบกราวด์ซึ่งเป็นความสามารถที่ทำได้ยาก

ในการใช้โครงสร้างสายแบบนำสัญญาณ ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าถูกสร้างขึ้นเพื่อวงจรแบบติดตั้งด้านผิวบน (surface-mount) ซึ่งการติดตั้งแบบขนานนี้ทำได้ยากหากใช้สายส่งแบบไมโครสตริป และมีประโยชน์ในการแทนการเจาะลงกราวด์ (Via Hole) ในกรณีการต่อแบบขนาน แต่ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่านี้มีข้อเสียคือ การมีสายส่งอยู่กับระนาบกราวด์จึงทำให้สนามทั้งหมดไม่ถูก “หุ้ม” ในด้านที่เป็นระนาบกราวด์ โดยคุณสมบัติของสายหรือขนาด ของท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับตัวนำที่อยู่ด้านบนและด้านข้างของท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าและคุณสมบัติของวัสดุฐานรอง ซึ่งขึ้นอยู่กับกรอกแบบ

ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า จะเป็นตัวแปรตามขนาดของความกว้างของตัวนำกลาง ระยะห่างของช่องว่าง ค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง และความหนาของวัสดุฐานรอง ตัวอย่างเช่น เมื่อเราให้ค่าของความกว้างของตัวนำกลางมีค่าคงที่ ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดของระยะห่าง  $s$  และอิมพีแดนซ์จะลดลงเมื่อเพิ่มค่าไดอิเล็กตริกหรือความหนาของวัสดุฐานรอง

ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าสามารถใช้ในการป้อนสายอากาศแบบแผ่น [23] ซึ่งจะวางอยู่ในชั้นเดียวกับระนาบกราวด์ ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยในรูป (ก) เป็นการเชื่อมร่วมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งตัวนำกลางจะต่อโดยตรงกับระนาบกราวด์และมีช่องว่างอยู่ด้านข้าง ความยาวของตัวนำกลางจะยาวเท่ากับกึ่งกลางของสายอากาศแบบแผ่นที่วางอยู่ด้านบนเพื่อประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำ



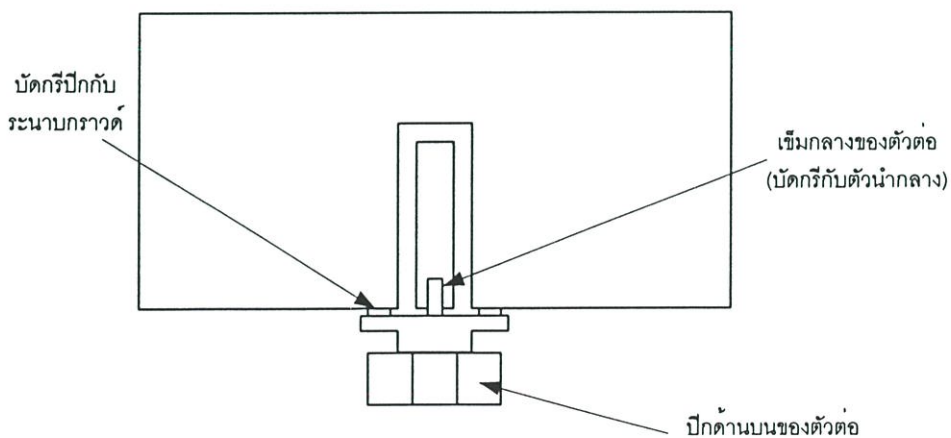
รูปที่ 2.11 ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าป้อนสายอากาศแบบไมโครสตริป

(ก) การเชื่อมร่วมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

(ข) การเชื่อมร่วมแบบความจุไฟฟ้า

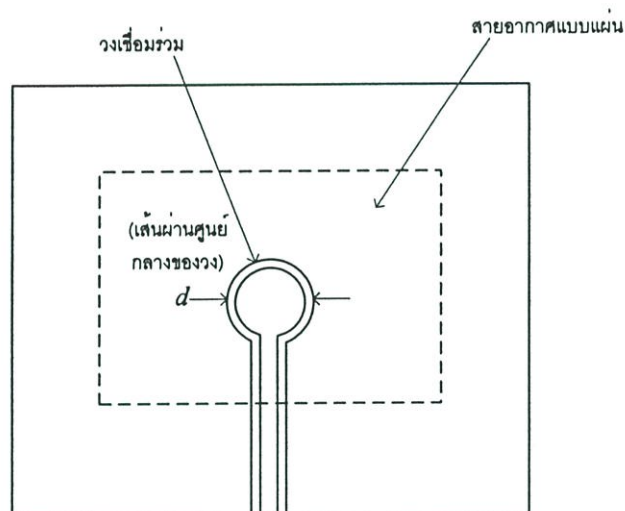
ส่วนในแบบที่สองแสดงในรูป (ข) เป็นการเชื่อมร่วมแบบความจุไฟฟ้า โดยความยาวของร่องมีความสำคัญต่อการเชื่อมร่วม โดยผลจากการทดสอบใน [24] แสดงการเพิ่มขนาดของร่อง ในการทดสอบใช้วัสดุฐานร่องมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 2.22 มีความยาวของร่องที่เหมาะสมที่  $0.245\lambda_g$  เมื่อ  $\lambda_g$  คือค่าความยาวคลื่นบนร่องซึ่งหาได้จากการประมาณค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผลในร่อง  $\epsilon_{eff} \approx (1 + \epsilon_r)/2$  ทำให้ได้ค่าการเชื่อมร่วมที่ร่องนำไปสู่การเหนี่ยวนำไฟฟ้า และทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแบบแผ่นลดลง ในกรณีของการเชื่อมร่วมแบบการเหนี่ยวนำไฟฟ้า ความถี่เรโซแนนซ์ที่ลดลงนี้มีค่าประมาณ 3.2% ส่วนในกรณีของการเชื่อมร่วมแบบความจุไฟฟ้า ความยาวของร่องจะอยู่ในช่วง  $0.250\lambda_g$  จนถึง  $0.288\lambda_g$  ค่าการลดลงของความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วง 14% จนถึง 24% จากการสังเกตอย่างแน่ชัดแล้วนั้นจะเห็นว่าในการป้อนโดยใช้การเชื่อมร่วมแบบความจุไฟฟ้าจะลดค่าความถี่เรโซแนนซ์มากกว่าแบบการเชื่อมร่วมแบบการเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยค่าแบนด์วิดท์ของการเชื่อมร่วมแบบความจุไฟฟ้ามีค่า SWR เท่ากับ 2.0:1 ที่ประมาณ 3.5% ส่วนการเชื่อมร่วมแบบการเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีค่า 2.8%

ในการออกแบบสายอากาศชนิดนี้ ในตอนแรกให้หาขนาดของสายอากาศแบบแผ่นที่วางอยู่บนวัสดุฐานร่องก่อนโดยออกแบบให้เรโซแนนซ์ที่ความถี่ในการออกแบบ จากนั้นจึงค่อยหาขนาดของร่องโดยออกแบบให้มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50\Omega$  ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่ออกแบบซึ่งการป้อนสัญญาณแบบนี้มีข้อดีคือ ง่ายในการต่อรวมกับตัวต่อแชนร่วมโดยแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 โดยปีกของตัวต่อสามารถต่อได้โดยวางติดกับระนาบกราวด์บนวัสดุฐานร่อง แต่ต้องดูให้แน่ใจว่าตัวนำกลางของท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่ามีความกว้างน้อยกว่าเมื่อเทียบกับความกว้างของไดอิเล็กตริกของตัวต่อแชนร่วม เพื่อป้องกันการช็อตกันของตัวนำกลางกับระนาบกราวด์



รูปที่ 2.12 การต่อตัวต่อแชนร่วมกับท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า

ข้อเสียของการป้อนโดยใช้ท่อนำคลื่นแบบโคพแลนนี่คือการแผ่กำลังงานที่ไม่ต้องการ จากตัวร่องซึ่งผลค่อนข้างต่ำเมื่อ เปรียบเทียบกับอัตราส่วนหน้าต่อหลังของระดับการแผ่กำลังงาน ในด้านระนาบกราวด์มีค่าเท่ากับ 9 dB ถึง 10 dB ต่ำกว่าค่าสูงสุดของระดับการแผ่กำลังงานทางด้านหน้าของสายอากาศแบบแผ่น ปัญหานี้เกิดขึ้นเนื่องจากความยาวของร่องและตัวนำระหว่างร่องทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่แผ่กำลังงานได้ดี ถ้าทำการออกแบบร่องให้มีลักษณะเป็นวงจะทำให้ขนาดของร่องลดลงรวมทั้งยังสามารถลดการแผ่กำลังงานที่ไม่ต้องการได้อีกด้วย ดังรูปที่ 2.13 แสดงรูปการป้อนโดยใช้ร่องแบบวง จากผลการทดสอบที่ได้จากการสร้างบนวัสดุฐานร่องที่มีค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับ 10.8 และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของร่อง  $d$  มีค่าประมาณ  $0.095\lambda_0$  โดยที่  $\lambda_0$  เป็นค่าความยาวคลื่นบนร่อง โดยวงจะอยู่ตรงกลางใต้สายอากาศแบบแผ่น



รูปที่ 2.13 การป้อนโดยใช้ร่องการเชื่อมร่วมแบบวงเพื่อลดการแผ่กำลังงานที่ไม่ต้องการ

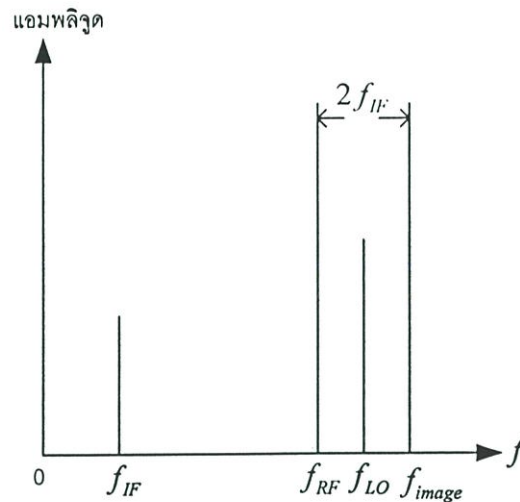
## 2.4 วงจรผสมสัญญาณ

การสื่อสารทางคลื่นวิทยุจำเป็นต้องการเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลแถบฐานไปเป็นความถี่ที่เหมาะสมในการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังปลายทางที่ต้องการ ที่ปลายทางหรือเครื่องรับต้องทำการกลับกระบวนการโดยการเปลี่ยนจากสัญญาณความถี่วิทยุที่รับได้กลับไปเป็นสัญญาณแถบฐานโดยผ่านกระบวนการกู้ข้อมูลที่บรรจุมาด้วย การทำงานนี้เรียกว่า "การผสมสัญญาณ [25]" โดยผ่านตัวใช้งานเรียกว่า "ตัวผสมสัญญาณ" อุปกรณ์หลายชนิดที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถใช้เป็นตัวผสมสัญญาณได้ ผลที่ได้จะเป็นความถี่ใหม่ดังนั้นตัวผสมสัญญาณมีความสำคัญทั้งในทางด้านส่งและด้านรับ

ถึงแม้ว่าตัวผสมสัญญาณมีความสำคัญในระบบการสื่อสารไร้สายทั้งทางด้านส่งและรับจาก เดิมตัวผสมสัญญาณได้เริ่มใช้ก่อนในเครื่องรับ การทำงานคือต้องมีสัญญาณความถี่วิทยุ (RF) ป้อนเข้าที่อินพุตของช่องสัญญาณความถี่วิทยุและสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (LO) ป้อนเข้าที่อินพุตของช่องสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง ผลของการผสมสัญญาณที่ได้จาก ตัวผสมสัญญาณเรียกว่า "สัญญาณความถี่กลาง (IF)" โดยเมื่อต้องการให้ความถี่ของสัญญาณ ความถี่กลางสูงกว่าสัญญาณความถี่วิทยุการทำงานลักษณะนี้ตัวผสมสัญญาณถูกเรียกว่า "ตัว แปลงผันขึ้น" และเมื่อต้องการให้ความถี่ของสัญญาณความถี่กลางต่ำกว่าสัญญาณความถี่วิทยุ การทำงานลักษณะนี้ตัวผสมสัญญาณถูกเรียกว่า "ตัวแปลงผันลง" ตัวแปลงผันนี้จะอยู่ในพจน์ของ สถานการณ์การทำงานโดยสังเกตได้จากผลของความถี่ที่ได้จากตัวผสมกับสัญญาณ ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง

สำหรับในกรณีของสัญญาณความถี่วิทยุ ในตัวผสมทางอุดมคติกับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ ประจำเครื่องแบบสมบูรณ์ (นั่นคือสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ไม่มีฮาร์มอนิกและ สัญญาณรบกวน) ผลที่ได้คือสัญญาณความถี่กลางสองความถี่ โดยความถี่แรกคือผลรวมของ ความถี่วิทยุกับความถี่ของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง และความถี่ที่สองคือผลต่างของ ความถี่วิทยุกับความถี่ของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง ความแตกต่างระหว่างความถี่ทั้ง สองนี้เราสามารถนำวงจรกรองสัญญาณมาใช้เพื่อเลือกความถี่ของสัญญาณความถี่กลางที่ ต้องการได้ รวมทั้งยังสามารถกำจัดสัญญาณที่ไม่ต้องการที่เรียกว่า "ความถี่เงาของสัญญาณ ความถี่กลาง (IF image) ได้

สัญญาณเอาต์พุตที่เกิดพร้อมกันนี้ ( $LO+RF$  และ  $LO-RF$ ) เป็นผลตอบสนองที่เรียกว่า "ความถี่เงาของความถี่วิทยุ (RF image) ดังนั้นเมื่อให้กระบวนการการรวมกันของสัญญาณ RF กับ LO สัญญาณเอาต์พุตที่ได้เป็นสัญญาณความถี่กลางสองสัญญาณ ( $LO+RF$  และ  $LO-RF$  หรือ IF และ ความถี่เงาของ IF) ตัวผสมสัญญาณจะผลิตเอาต์พุตที่สัญญาณความถี่กลางตามที่ ออกแบบ ( $LO+RF$  หรือ  $LO-RF$ ) โดยมีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอินพุตดังแสดงในรูปที่ 2.14 ผลตอบสนองที่ไม่ต้องการหรือความถี่เงาของความถี่วิทยุมีค่าในช่วง  $2f_{IF}$  ห่างจากการตอบสนอง ที่ต้องการ โดยการลดการตอบสนองความถี่เงาของตัวผสมสัญญาณนี้มีความสำคัญมากเนื่องจาก สัญญาณรบกวนจะปนมากับความถี่เงาที่ผ่านมาจากสายอากาศจนถึงตัวผสมสัญญาณ ซึ่งทำให้ อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณลดกวนลดลง สามารถใช้กระบวนการกรองสัญญาณเพื่อลดการ ตอบสนองความถี่เงาของสัญญาณ RF และ IF ได้



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ของความถี่จากตัวผสมสัญญาณกับผลตอบสนองของสัญญาณที่ต้องการ

ในการพิจารณาทฤษฎีพื้นฐานของตัวผสมสัญญาณ การผสมสัญญาณเกิดจากการป้อนสัญญาณสองสัญญาณที่มีความถี่ต่างกันสู่อุปกรณ์แบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งการตอบสนองขึ้นกับคุณสมบัติของตัวอุปกรณ์ที่ใช้ อย่างไรก็ตามเราสามารถแสดงให้เห็นอยู่ในรูปของ

$$I = K(V + v_1 + v_2)^n \quad (2.18)$$

โดยที่ตัวแปรยกกำลัง  $n$  เป็นค่าคงที่  $V$  เป็นค่าแรงดันออฟเซตกระแสตรง ส่วนแรงดัน  $v_1 = V_1 \sin(\omega_1 t)$  และแรงดัน  $v_2 = V_2 \sin(\omega_2 t)$  โดยกำหนดให้  $n = 2$  สมการที่ (2.18) เปลี่ยนรูปเป็น

$$I = K[V + V_1 \sin(\omega_1 t) + V_2 \sin(\omega_2 t)]^2 \quad (2.19)$$

ต่อมาทำการกระจายสมการที่ (2.19) จะได้

$$I = K[V^2 + V_1^2 \sin^2(\omega_1 t) + V_2^2 \sin^2(\omega_2 t) + 2VV_1 \sin(\omega_1 t) + 2VV_2 \sin(\omega_2 t) + 2V_1V_2 \sin(\omega_2 t) \sin(\omega_1 t)] \quad (2.20)$$

สัญญาณที่เอาต์พุตจะประกอบไปด้วย สัญญาณกระแสตรงและกระแสสลับจำนวนมาก ซึ่งเราจะสนใจในพจน์ของกระแสที่ทำให้เกิดสัญญาณความถี่กลาง เราจึงกำจัดพจน์ที่ไม่มีการรวมกันของ  $V_1$  กับ  $V_2$  ที่ทิ้งไป ดังนั้นสมการที่ (2.20) จะลดรูปเหลือ

$$I_{IF} = 2KV_1V_2 \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t)$$

$$I_{IF} = KV_1V_2 \{ \cos[(\omega_2 - \omega_1)t] - \cos[(\omega_2 + \omega_1)t] \} \quad (2.21)$$

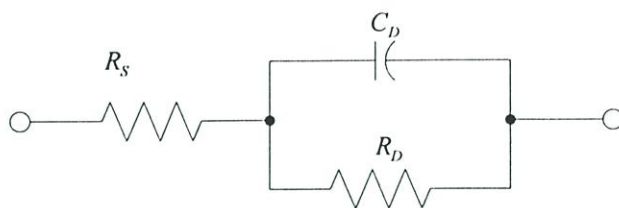
สมการที่ (2.21) แสดงสัญญาณความถี่กลางที่เอาต์พุตซึ่งจะมีทั้งผลรวมและผลต่างของสัญญาณและเราสามารถเลือกสัญญาณที่ต้องการได้โดยการใช้ตัวกรองความถี่กลาง (IF filter)

#### 2.4.1 อัตราการแปลงผันและการสูญเสีย

การทำงานของตัวผสมสัญญาณซึ่งจะแปรผันตามความถี่ กระบวนการทำงานนี้เรียกว่าเกณฑ์การแปลงผัน และสามารถแบ่งได้เป็นสองลักษณะคือ แบบบวกหรือแบบลบ การแปลงผันแบบลบการทำงานของตัวผสมแบบนี้เรียกว่า “ความสูญเสียจากการแปลงผัน (Conversion Loss)” ในกรณีของตัวผสมแบบไดโอด (diode mixer) และความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss) สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{ค่าการสูญเสีย (dB)} &= \text{ความสูญเสียแปลงผัน} + \text{การสูญเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิก} \\ &+ \text{การสูญเสียจากตัวไดโอด} \end{aligned} \quad (2.22)$$

ในทางอุดมคติค่าของการสูญเสียเนื่องจากการแปลงผันมีค่าเท่ากับ 3 dB โดยสังเกตได้จากค่าแอมพลิจูดของความถี่แถบข้างด้านสูงและต่ำ (Upper and Lower sideband) มีขนาดน้อยกว่าสัญญาณอินพุตอยู่ 3 dB และการสูญเสียเนื่องจากการเกิดฮาร์มอนิกมีค่าเท่ากับ 1 dB ส่วนค่าการสูญเสียเนื่องจากตัวไดโอดสาเหตุเกิดจากตัวต้านทานที่อนุกรมในตัวของไดโอด ดังรูปที่ 2.15 แสดงวงจรสมมูลของไดโอดซึ่งภายในประกอบไปด้วย ตัวต้านทานอนุกรม  $R_s$  ตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งเรียกว่า “ความต้านทานจากการแพร่ (diffusion resistance)” คือ  $R_D$  และตัวเก็บประจุ  $C_D$



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของไดโอดผสมสัญญาณ

ซึ่งค่าการสูญเสียจากตัวไดโอดสามารถหาได้จาก

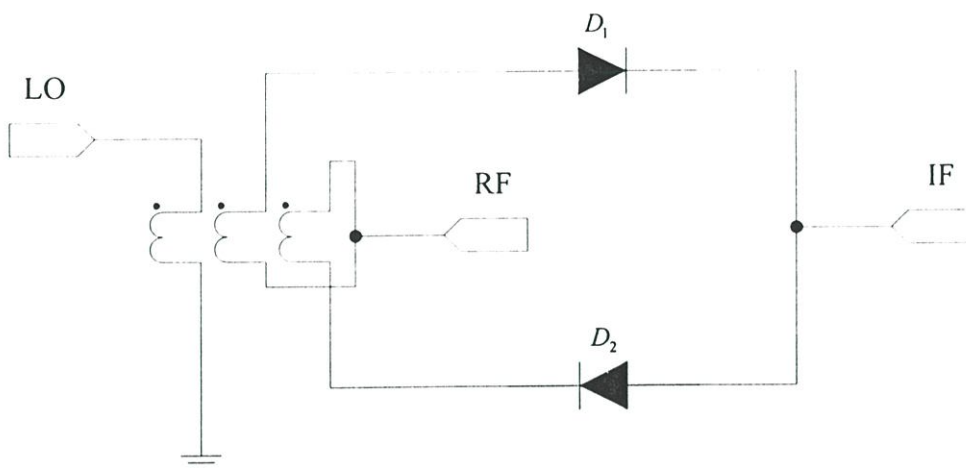
$$\text{ค่าการสูญเสียจากตัวไดโอด(dB)} = \log_{10} \left( \frac{50 + (2 \times R_s)}{50} \right) \quad (2.23)$$

ในงานวิจัยนี้ใช้ไดโอดผสมสัญญาณเบอร์ HSMS-2810 จาก Data sheet ได้ระบุค่า  $R_s$  มีค่าเท่ากับ  $10 \Omega$  และเลือกใช้การรวมผสมคลื่นได้ดุลเดียว (Single-Balanced Mixer) เนื่องจากง่ายในการประกอบบนท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า เนื่องจากใช้ไดโอดจำนวนสองตัวทำให้ต้องพิจารณาค่าการสูญเสียจากตัวไดโอดเป็นสองเท่า ดังนั้นค่าการสูญเสียทั้งหมดมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ค่าการสูญเสีย (dB)} &= 3\text{dB} + 1\text{dB} + 2\text{dB} \\ &= 6\text{dB} \end{aligned}$$

#### 2.4.2 วงจรผสมคลื่นได้ดุลเดียว (Single-Balanced Mixer)

รูปที่ 2.16 แสดงวงจรผสมคลื่นได้ดุลเดียว (SBM) รูปแบบของการทำงานของวงจรคือจะทำการคูณสัญญาณความถี่วิทยุกับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง สองสัญญาณนี้จะป้อนเข้าที่พอร์ตต่างกัน โดยจะผ่านไปยังหม้อแปลงแบบได้ดุล (Balanced transformer) วงจรนี้นิยมใช้ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า  $1 \text{ GHz}$  โดยวงจรจะคล้ายคลึงกับวงจรแยกเฟส ใน ทางอุดมคติจะไม่มีสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง ปรากฏที่พอร์ตสัญญาณความถี่กลางและพอร์ตสัญญาณความถี่วิทยุ แต่จะมีเพียงแค่การลดทอนของสัญญาณความถี่วิทยุไปยัง สัญญาณความถี่กลางเท่านั้น



รูปที่ 2.16 วงจรผสมคลื่นได้ดุลเดียว (Single-Balanced Mixer)

## 2.5 การออกแบบสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศเริ่มจากการหาความกว้างของสายอากาศแบบแผ่น ซึ่งความกว้างนี้ไม่ค่อยมีผลกับความถี่ที่เรโซแนนซ์และแบบรูปการแผ่พลังงาน แต่มีผลกับค่าความต้านอินพุตและแบนด์วิดท์ของสายอากาศ เมื่อความกว้างของสายอากาศแบบแผ่นเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานอินพุต ๓ ความถี่เรโซแนนซ์ลดลง ค่าแบนด์วิดท์ของสายอากาศเพิ่มขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพการแผ่กำลังงานของสายอากาศ ข้อกำหนดในการเลือกความกว้าง  $W$  ควรมีค่ามากกว่าความยาวของสายอากาศแบบแผ่น  $L$  แต่เมื่อเพิ่มความกว้าง  $W$  มากจนเกินไปจะทำให้ลำคลื่นของสายอากาศแตกหรือเรียกว่า "Grating Lobe" และมีผลกับการแยกแยะโพลาไรเซชันไขว้ (Cross-polarization) ควรเลือกความกว้างสายอากาศแบบแผ่นให้เหมาะสมกับประสิทธิภาพและแบบรูปการแผ่พลังงานซึ่งควรมีขนาดประมาณ  $1 < W/L < 2$  [19]

ความยาวของสายอากาศแบบแผ่นเป็นตัวกำหนดความถี่เรโซแนนซ์และเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบ ซึ่งในธรรมชาติของสายอากาศแบบแผ่นค่อนข้างมีแบนด์วิดท์แคบ โดยในการประมาณค่าความยาว  $L$  ในโหมด  $TM_{10}$  หาได้จาก

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.24)$$

โดยค่าตัวแปร  $c$   $f_r$  และ  $\epsilon_r$  คือค่าความเร็วของแสง ความถี่ที่เรโซแนนซ์และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองตามลำดับ ส่วนความหนาของวัสดุฐานรอง  $h$  หาได้จาก

$$0.0065 \leq h/\lambda_d \leq 0.1292 \quad (2.25)$$

ส่วนความยาวคลื่นบนวัสดุฐานรอง  $\lambda_d$  หาได้จาก

$$\lambda_d = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.26)$$

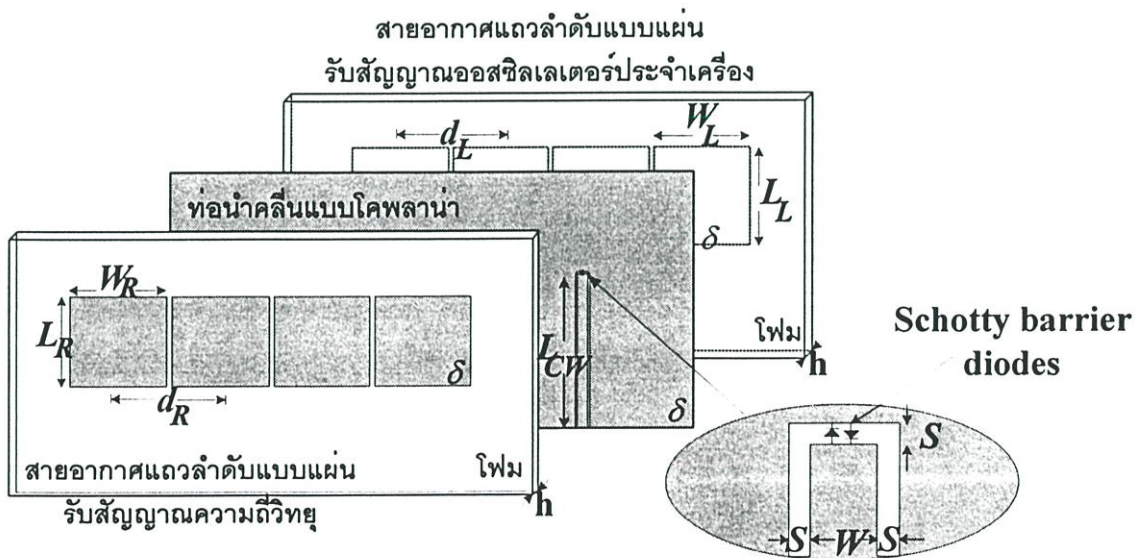
และความกว้างของสายอากาศแผ่น  $W$  มีความจำเป็นในการกำหนดค่าความต้านทานอินพุตให้มีค่าเท่ากับ  $50 \Omega$  ซึ่งสามารถหาได้จาก

$$W = \sqrt{h\lambda_d} [\ln(\lambda_d/h) - 1] \quad (2.27)$$

## 2.6 การทดสอบและผลการทดสอบ

### 2.6.1 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสง

โครงสร้างของการออกแบบสายอากาศแถวลำดับที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสงแสดงในรูปที่ 2.17 โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ สายอากาศแถวลำดับรับความถี่วิทยุ ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า และสายอากาศแถวลำดับรับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง



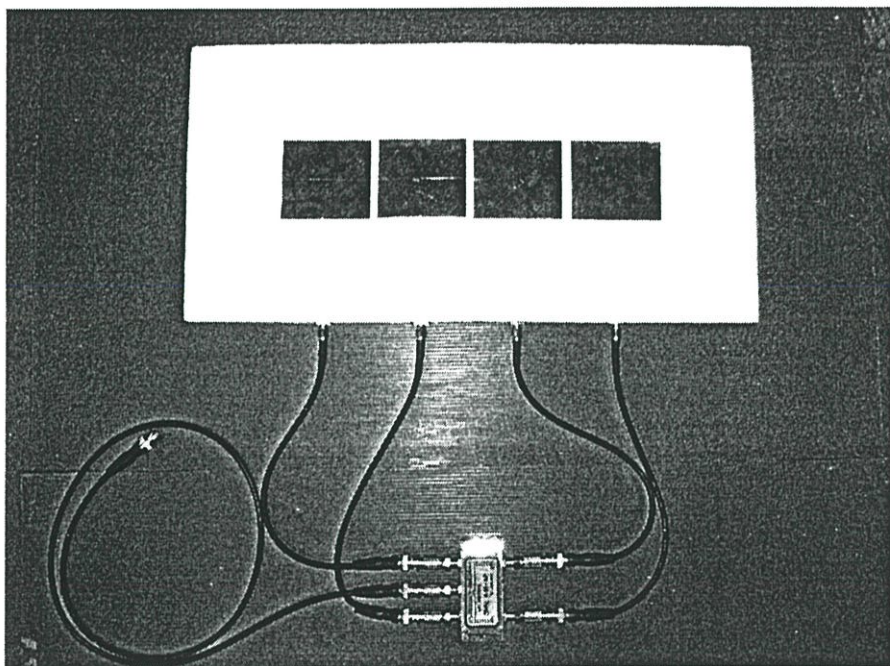
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสง

ซึ่งใช้โฟมเป็นวัสดุฐานรอง (substrate) เนื่องจากราคาถูกและที่สำคัญค่าแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent) น้อย ส่วนขนาดของสายอากาศรวมทั้งคุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศ แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

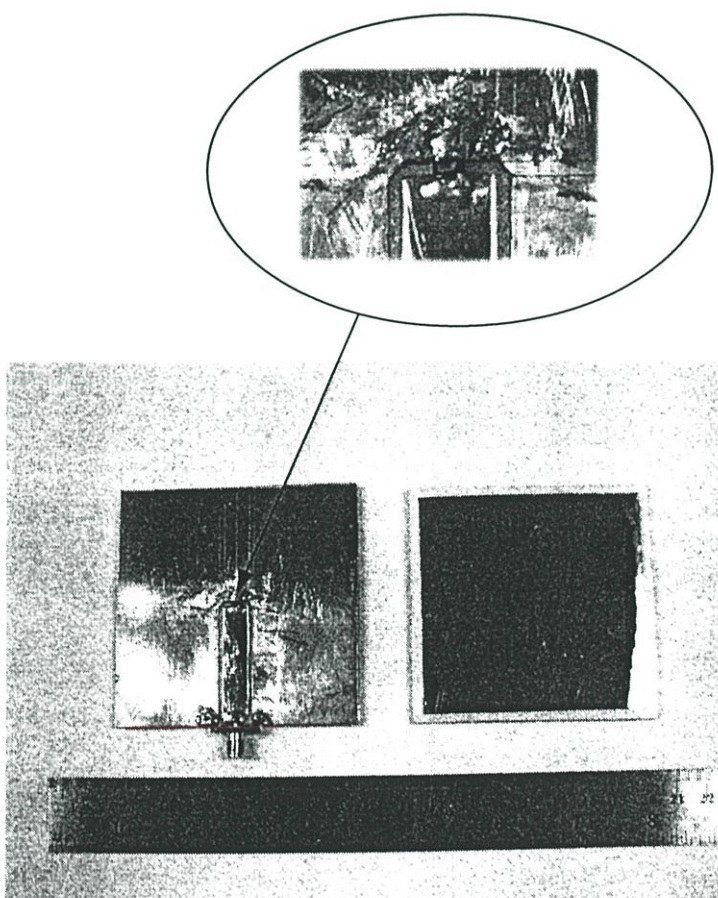
ตารางที่ 2.1 ขนาดของสายอากาศแถวลำดับที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสง

| คุณสมบัติ                    | สายอากาศรับสัญญาณ<br>ความถี่วิทยุ | สายอากาศรับสัญญาณ<br>ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง |
|------------------------------|-----------------------------------|--|
| ความถี่ (GHz)                | $f_R = 1.9$                       | $f_L = 1.8$                                    |
| ความยาว(cm)                  | $L_R = 6.87$                      | $L_L = 7.27$                                   |
| ความกว้าง(cm)                | $W_R = 7.5$                       | $W_L = 7.5$                                    |
| ระยะห่าง(cm)                 | $d_R = 7.9$                       | $d_L = 7.9$                                    |
| ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า        |                                   |  |
| ความยาว [ $L_{CW}$ ]<br>(cm) | ความกว้าง [ $W$ ]<br>(cm)         | ระยะห่าง [ $S$ ]<br>(cm)                       |
| 12                           | 0.82                              | 0.15   |
| วัสดุฐานรอง (โฟม)            |                                   |  |
| $\epsilon_r$                 | $\tan \delta$                     | $h$ (cm)                                       |
| 1.03                         | 0.0001                            | 0.35   |

ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าปลายเปิดสร้างบนแผ่นระนาบกรวดตีซึ่งเป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ความต้านทาน  $50 \Omega$  ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่ามีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมเนื่องจากง่ายต่อการสร้างส่วนปลายของท่อนำคลื่นต่อกับ ไดโอดผสมสัญญาณเบอร์ HSMS 2810 schottky barrier diodes โดยตัวไดโอดทำหน้าที่ผสมสัญญาณระหว่างสัญญาณความถี่วิทยุที่ความถี่ 1.9GHz กับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ความถี่ 1.8 GHz ที่เหนี่ยวนำตามช่องว่างของท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า และทำการแปลงผันลง (Down conversion) ไปเป็นสัญญาณความถี่กลางที่ความถี่ 100 MHz โดยขนาดต่างๆ ได้ทำการปรับให้มีค่าที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม IE3D แล้วทำการสร้างสายอากาศต้นแบบดังแสดงในรูปที่ 2.18 ส่วนรูปต้นแบบของสายอากาศองค์ประกอบรวมทั้งแสดงการเชื่อมต่อไดโอดผสมสัญญาณที่ปลายท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าแสดงได้ในรูปที่



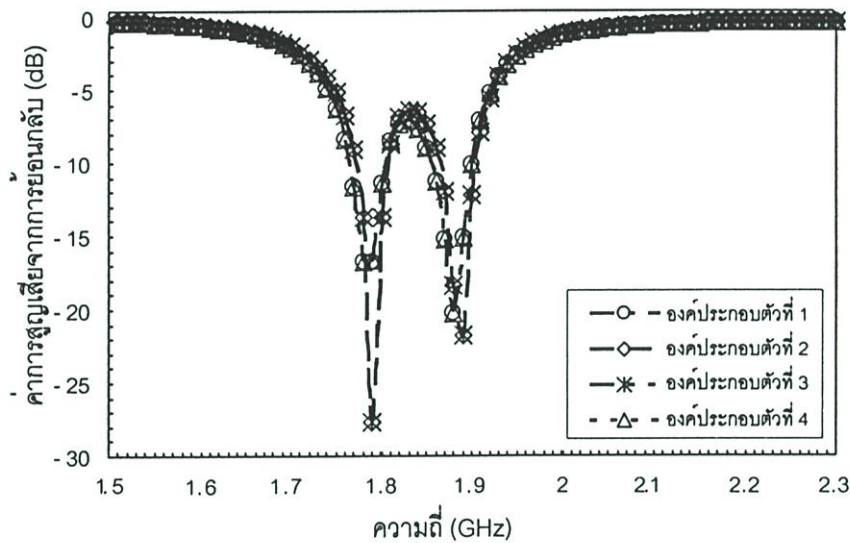
รูปที่ 2.18 สายอากาศแถวลำดับที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสงต้นแบบ



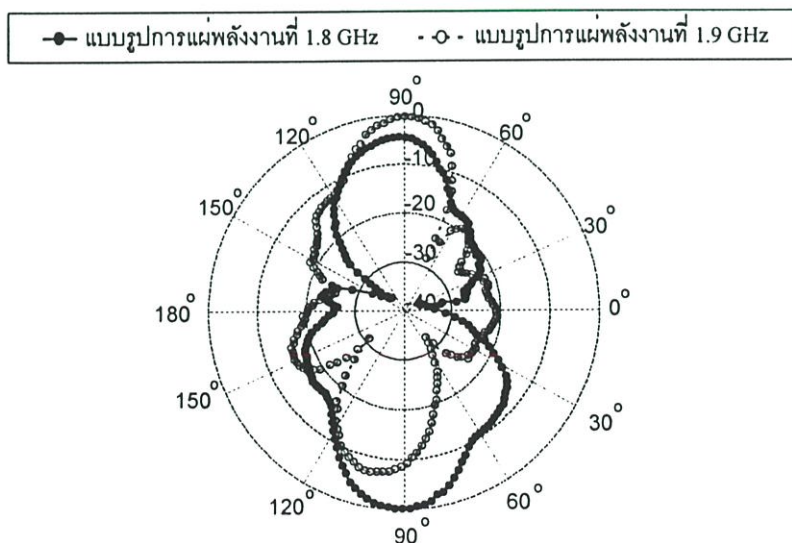
รูปที่ 2.19 สายอากาศองค์ประกอบที่มีตัวผสมสัญญาณแบบหลักการกึ่งแสงต้นแบบ

### 2.6.2 ผลการทดสอบ

ได้ทำการวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP8518A โดยทำการวัดที่ละพอร์ตส่วนปลายพอร์ตที่เหลือต่อด้วยโหลด 50  $\Omega$  ผลการทดสอบแสดงได้ดังในรูปที่ 2.20 จากรูปสามารถครอบคลุมความถี่ใช้งานคือ 1.8 ถึง 1.9 GHz โดยพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ -10 dBซึ่งในแต่ละองค์ประกอบมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนการทดสอบแบบรูปการแผ่กำลังงานได้ทำการทดสอบในห้องไม่สะท้อนคลื่น ผลการทดสอบแสดงได้ดังในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.20 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง



รูปที่ 2.21 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง

จากรูปที่ 2.21 แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นไปตามการใช้งานคือ ใช้รับสัญญาณความถี่วิทยุทางด้านหน้าและรับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องทางด้านหลัง ส่วนอัตราขยายของสายอากาศในการรับสัญญาณความถี่วิทยุที่ 1.9 GHz มีค่า 12.3 dBi ส่วนอัตราขยายของสายอากาศในการรับสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ 1.8 GHz มีค่า 11.4 dBi ตามลำดับ

## 2.7 สรุปผล

ในบทนี้ได้ศึกษาทฤษฎีของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงและหลักการในการปรับลำคลื่น ทั้งยังอธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และผลจากการทดสอบสายอากาศ โดยคุณสมบัติมีค่าเป็นไปตามต้องการคือ มีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 1.9 GHz มีทิศทางของลำคลื่นหลักไปทางด้านหน้าซึ่งออกแบบให้รับความถี่วิทยุ และมีค่าอัตราขยายของสายอากาศอยู่ที่ 12.3 dBi ส่วนแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 1.8 GHz มีทิศทางของลำคลื่นหลักไปทางด้านหลังซึ่งออกแบบให้รับสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องและมีค่าอัตราขยายอยู่ที่ 11.4 dBi แนวทางการพัฒนาในอนาคตเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการแผ่พลังงานของสายอากาศให้สมมาตร โดยทำการปรับปรุงพัฒนากระบวนการสร้างสายอากาศ ควรจะใช้เครื่องมือตัดขนาดของตัวสายอากาศที่แม่นยำเพื่อลดค่าการผิดพลาดของขนาดและควรคำนึงผลของตัวไดโอดผสมสัญญาณในการออกแบบ

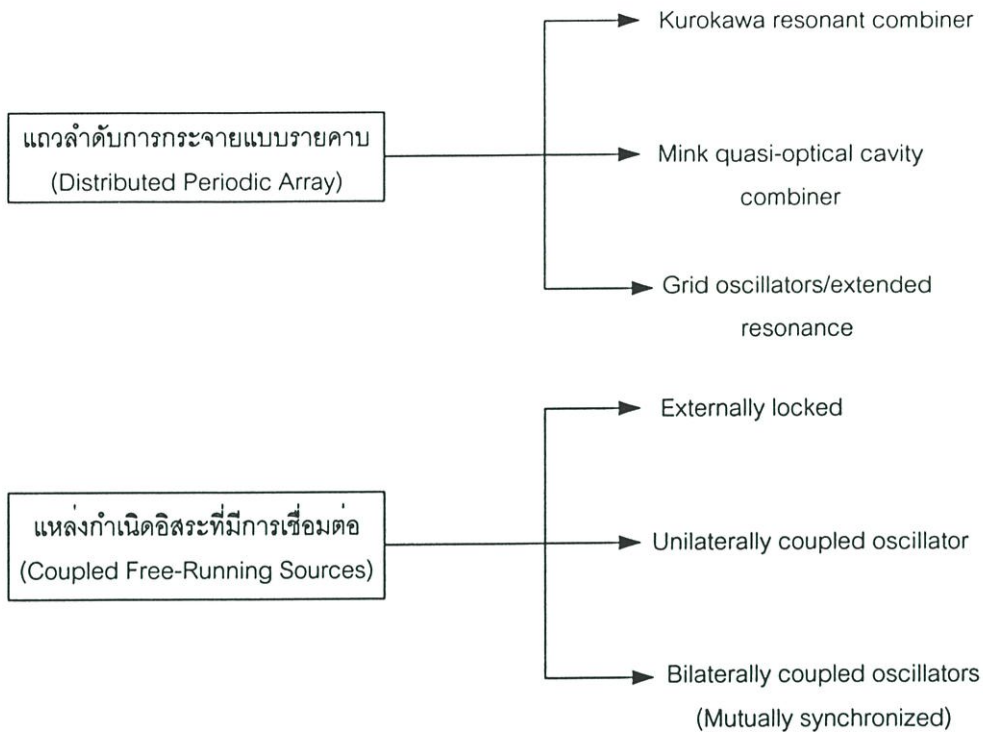
## สายอากาศแอกทีฟ

### 3.1 กล่าวนำ

เทคนิคการรวมกำลังงานในที่ว่างหรือการรวมกำลังงานแบบหลักการกึ่งแสง (Spatial or Quasi-Optical Combining Techniques) สามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดกำลังงานสูงในย่านความถี่ไมโครเวฟและย่านความถี่มิลลิเมตรจากอุปกรณ์ให้กำลังงานต่ำได้ โดยการใช้เทคนิคอินเจกชันล็อกแบบข้างเดียวหรือสองข้าง เทคนิคทั้งสองเป็นวิธีการทำงานที่ซึ่งใคร่ในซึกันและสามารถใช้ในการควบคุมการกระจายเฟสระหว่างองค์ประกอบได้โดยปราศจากการใช้ตัวเลื่อนเฟสซึ่งเป็นแนวทางของการออกแบบระบบการกวาดลำคลื่นและการรวมกำลังงานราคาถูก ในบทนี้จะอธิบายวิธีการวิเคราะห์และการแบ่งประเภทของแถวลำดับออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานแบบหลักการกึ่งแสงและกระบวนการอินเจกชันล็อก รวมถึงการออกแบบสายอากาศแบบแอกทีฟ วงจรออสซิลเลเตอร์ และแสดงผลการทดสอบ

### 3.2 เทคนิคการปรับลำคลื่นโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ

แนวคิดแบบใหม่ของระบบการรวมกำลังงานแบบหลักการกึ่งแสง (quasi-optical power-combining system) ได้ถูกค้นพบโดย Mink ซึ่งได้อธิบายระบบของการออสซิลเลทที่ความถี่หลักมูลระบบประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟแบบโพรงช่องเปิด ซึ่งวงจรออสซิลเลเตอร์ทำงานคล้ายกับท่อนำคลื่น แนวความคิดของ Mink สามารถแยกประเภทแถวลำดับออสซิลเลเตอร์ซึ่งมีการทำงานในลักษณะของโพรงแบบหลักการกึ่งแสง (quasi-optical cavity) ตามหัวข้อดังแสดงในรูปที่ 3.1 แบ่งเป็นสองกลุ่มพื้นฐานคือ กลุ่มโครงสร้างแถวลำดับการกระจายแบบรายคาบซึ่งประกอบด้วยออสซิลเลเตอร์แบบตะแกรง (grid-oscillator) การทำงานเป็นแบบกระบวนการขยายรีโซแนนซ์ (extend-resonance method) และกลุ่มของการเชื่อมต่อร่วมประกอบด้วยออสซิลเลเตอร์แบบอินเจกชันล็อกและสายอากาศแบบวงจรรวม ซึ่งการทำงานทั้งคู่จะเปลี่ยนแปลงตามผลของตัวอุปกรณ์แอกทีฟที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อควบคุมสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วมที่มีความสัมพันธ์กับความถี่รวมขององค์ประกอบทั้งหมดผ่านการทำงานที่ซึ่งใคร่ในซึกัน (Synchronize) โดยผ่านที่ว่างระหว่างองค์ประกอบหรือใช้วงจรเชื่อมต่อ

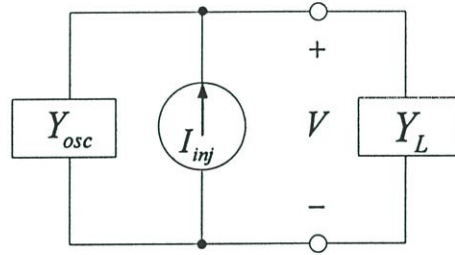


รูปที่ 3.1 การแบ่งประเภทของแถวลำดับออสซิลเลเตอร์

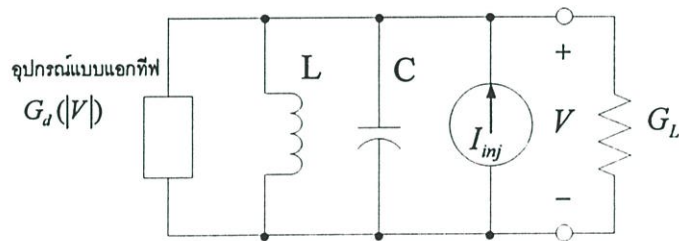
หลักการพื้นฐานของการซิงโครไนซ์ที่เป็นผลจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่าอินเจกชันล็อก (injection-locking) ถูกค้นพบจากการสังเกตการณ์ทำงานของออสซิลเลเตอร์คล้ายกับการแกว่งของลูกตุ้มต่อมาจึงได้วิเคราะห์ทฤษฎีของแถวลำดับออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่องาน โดยรวมอยู่ในการศึกษาทฤษฎีอินเจกชันล็อก การนำแนวคิดของการอินเจกชันล็อกจากการเชื่อมต่อไปใช้ในการทำงานที่ซิงโครไนซ์ของออสซิลเลเตอร์ที่มากกว่าหนึ่งตัว เพื่อการรวมกำลังงานเชิงอวกาศ (spatial power-combining) โดยค้นพบในเวลาใดเรียกว่าการค้นพบของ Mink ต่อมา Stephan ได้อธิบายหลักการและการวิเคราะห์การออสซิลเลทพร้อมที่ความถี่ต่ำ โดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมต่อ ต่อมาไม่นาน Dinger ได้นำเสนอผลของการซิงโครไนซ์กันของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟในย่าน X-band การวิเคราะห์การออสซิลเลทแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้นำเสนอโดย Kurokawa [26]

### 3.2.1 การจำลองแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ (Oscillator Modeling)

Kurokawa พิจารณาวงจรสมมูลของวงจรออสซิลเลเตอร์ในโดเมนความถี่ แล้วแปลงไปเป็นโดเมนเวลาภายใต้การสมมุติที่ไม่ซับซ้อนเพื่อสร้างสมการการเปลี่ยนแปลงอย่างง่าย แบบจำลองทั่วไปของวงจรออสซิลเลเตอร์แสดงได้ในรูปที่ 3.2 (ก) ค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_{osc}$  ของตัวอุปกรณ์แบบแอกทีฟที่ไม่เป็นเชิงเส้นเชื่อมต่อกับโหลด  $Y_L$  โดยสมมุติให้อุปกรณ์แบบแอกทีฟที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน  $I(V)$  ในโดเมนของเวลา



(ก)



(ข)

### รูปที่ 3.2 การจำลองวงจรออสซิลเลเตอร์

- (ก) การจำลองวงจรออสซิลเลเตอร์แบบขนานแบบอุปกรณ์ความต้านทานลบ
- (ข) การวิเคราะห์การแกว่งของแอมพลิจูดวงจรอย่างง่ายสำหรับวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ทำงานเป็นรายคาบ

ส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นของค่าแอดมิตแตนซ์จากตัวอุปกรณ์ซึ่งแปลงผันตามความถี่และเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต  $|V|$  การทำงานที่เป็นเชิงเส้นค่าของความนำอาจถูกควบคุมโดยสัญญาณที่อินเจ็ทจากภายนอกซึ่งจะรวมผ่านตัวแปรกระแสอิสระ  $I_{inj}$  จากกฎกระแสของเคอร์ชอฟ (Kirchhoff's Current Law) อธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\tilde{I}_{inj}(\omega) = \tilde{V}(\omega)Y_t(\omega, |V|) \quad (3.1)$$

ดังนั้นจะหาผลลัพธ์ของแอดมิตแตนซ์ได้จาก

$$Y_t(\omega, |V|) = [Y_{osc}(\omega, |V|) + Y_L(\omega)] \quad (3.2)$$

โดยที่สัญลักษณ์  $(\sim)$  แทนตัวแปรในโดเมนของความถี่ ต่อไปเป็นการสมมุติการวิเคราะห์ตัวออสซิลเลเตอร์เพื่อการออกแบบการทำงานที่เป็นรายคาบที่ความถี่  $\omega_0$  โดยการทำงานนี้เรียกว่า การทำงานของความถี่อิสระหรือความถี่ที่เริ่มออสซิลเลท ในความจริงการออกแบบออสซิลเลเตอร์ ส่วนใหญ่สามารถทำได้ตามขั้นตอนดังนี้คือ ขั้นแรกจำลองแบบโดยใช้วงจรสมมูลกับข้อกำหนด เริ่มต้นจากการริโซแนนซ์ที่ความถี่  $\omega_0$  ซึ่งมีค่า  $Q$  ที่สูง ( $Q > 10$ ) ต่อไปจึงจำลองตัวอุปกรณ์ทำงานในช่วงอัตราขยายต่ำขณะที่เกิดการริโซแนนซ์ โดยที่แรงดันเอาท์พุทที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถเขียนในรูปของจำนวนเชิงซ้อนคือ

$$\begin{aligned} V(t) &= A(t)e^{j[\omega_r t + \phi(t)]} \\ &= A(t)e^{j\theta(t)} \\ &= V'(t)e^{j\omega_r t} \end{aligned} \quad (3.3)$$

ตัวแปร  $A$  และ  $\phi$  เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดและเฟส กำหนดให้  $V' = Ae^{(j\phi)}$  เป็นแรงดันที่เอาท์พุทและ  $\theta(t) = \omega_r t + \phi(t)$  เป็นเฟสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา  $\omega_r$  เป็นความถี่อ้างอิงซึ่งเป็นการสมมุติให้มีการเปลี่ยนแปลงไปสู่  $\omega_0$  โดยการกำหนดค่า  $V(t)$  อยู่ในพจน์ของความถี่อ้างอิง ซึ่งสามารถพิจารณาโดยกำหนดให้เป็นการเปลี่ยนแปลงของฮาร์มอนิกเพื่อให้เป็นค่าอ้างอิงกับการเปลี่ยนแปลงทางเวลาของตัวแปร  $\phi$  เมื่อระบบการออสซิลเลทถูกรบกวนไปจากสถานะของความถี่อิสระซึ่งการเปลี่ยนแปลงสามารถหาได้จากการคำนวณค่าจริงในสมการที่ (3.3)

ต่อมาทำการแปลงฟูริเยร์ผกผัน (Inverse Fourier transform) สมการที่ (3.1) โดยการสมมุติการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดและเฟสแสดงได้ดังนี้

$$I_{inj}(t) = V(t) \left[ Y_t(\omega_r, A) + \frac{\partial Y_t(\omega_r, A)}{\partial \omega} \left( \frac{d\phi}{dt} - j \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} \right) \right] \quad (3.4)$$

จากรูปที่ 3.2 (ข) แอดมิตแตนซ์เมื่อเกิดการรีโซแนนซ์มีค่า

$$Y_i(\omega, A) = G_d(A) + G_L + 2jC(\omega - \omega_0) \quad (3.5)$$

โดย  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  เป็นค่าความถี่เรโซแนนซ์ ส่วนค่า  $Q$  ของออสซิลเลเตอร์หาได้จาก  $Q = \omega_0 C / G_L$

### 3.2.2 ทฤษฎีอินเจกชันล็อก (Injection-locking Theory)

เมื่อป้อนสัญญาณอินเจกชันจากภายนอก ผลการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดและเฟสแสดงได้ในสมการที่ (3.6)

$$F(A, \phi) = \frac{\omega_0}{2Q} \left[ \mu S(A) + \frac{I_{inj}}{G_L V} \right] + j(\omega_0 - \omega_r) \quad (3.6)$$

โดยที่  $S(A) = (1 - A^2/\alpha^2)$  และสัญญาณที่อินเจกชันคือ

$$I_{inj} = \rho G_L e^{j\omega_{inj}t + \psi(t)} \quad (3.7)$$

เมื่อใช้สมการที่ (3.4) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดและเฟสโดยมีค่า

$$\frac{dA}{dt} = \mu \frac{\omega_0}{2Q} AS(A) + \rho \frac{\omega_0}{2Q} \cos[(\omega_{inj} - \omega_r)t + (\psi - \phi)] \quad (3.8)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega_0 + \omega_r + \frac{\rho}{A} \frac{\omega_0}{2Q} \sin[(\omega_{inj} - \omega_r)t + (\psi - \phi)] \quad (3.9)$$

โดยที่  $\rho$  คือค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่อินเจกชันเพื่อให้ง่ายในการพิจารณากำหนดให้ความถี่เรโซแนนซ์อ้างอิง  $\omega_r$  มีค่าเท่ากับค่าความถี่ของสัญญาณที่อินเจกชัน  $\omega_{inj}$  สมการ (3.8) และ (3.9) อธิบายหลักการของอินเจกชันล็อก ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความแรงของสัญญาณที่อินเจกชัน ( $\rho$ ) เมื่อค่าความแรงของสัญญาณที่อินเจกชันมีค่าน้อยกว่าความแรงของความถี่อิสระมาก ( $\rho \ll A$ ) ดังนั้นความถี่ของออสซิลเลเตอร์จะมีค่าเท่ากับค่าความถี่อิสระ (free-running frequency) เนื่องจากพจน์หลังของสมการทั้งสองจะมีค่าน้อยมากหรือเท่ากับศูนย์จึงทำให้ความถี่เรโซแนนซ์กลับมาเป็นค่า

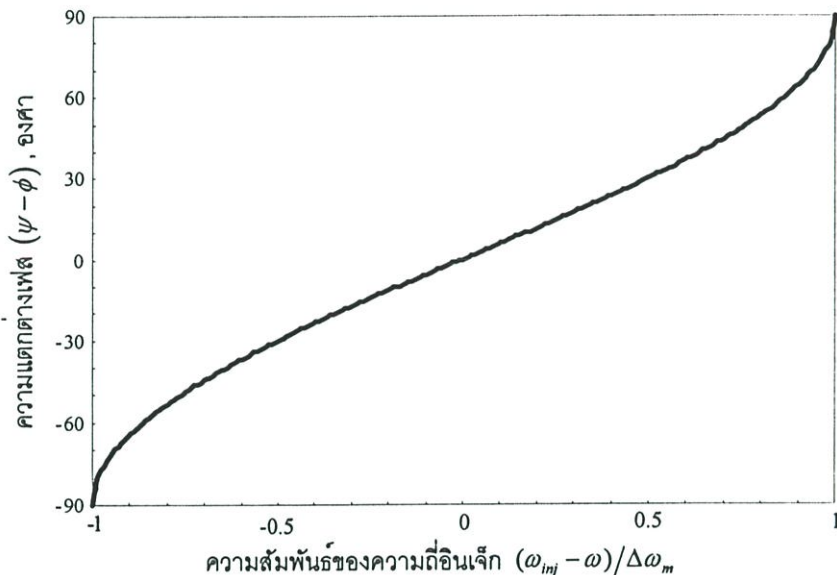
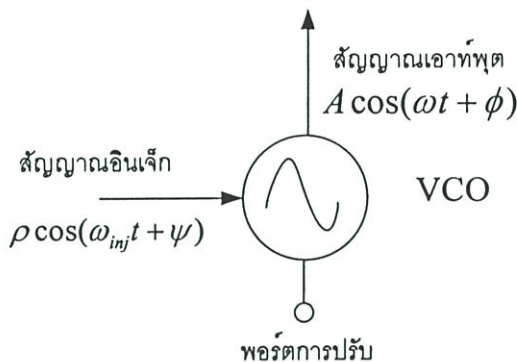
เท่ากับค่าความถี่อิสระ ในทำนองเดียวกันเมื่อความถี่ของสัญญาณที่อินเจ็ท มีค่ามากหรือเท่ากับ ความถี่อิสระ ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “อินเจ็ทชันล็อก” การทำงานของออสซิลเลเตอร์แบบนี้ได้ถูกนำเสนอโดย Adler [27] ซึ่งอธิบายได้ ดังสมการ

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega_0 - \omega_{inj} + \underbrace{\frac{\rho}{\alpha} \frac{\omega_0}{2Q}}_{\Delta\omega_m} \sin(\psi - \phi) \quad (3.10)$$

สมการนี้เป็นกุญแจสำคัญในการเกิดปรากฏการณ์ “อินเจ็ทชันล็อก” ซึ่งค่าของผลเฉลยของ สมการสามารถหาได้จาก กรณีที่  $\frac{d\phi}{dt} = 0$  ซึ่งในทางปฏิบัติกล่าวได้ว่าไม่มีความต่างเฟส นั่นหมายถึงความถี่อิสระเป็นความถี่เดียวกับความถี่ที่อินเจ็ท หรือออสซิลเลเตอร์ทำงานที่ซิงโครไนซ์ กันซึ่งค่าความแตกต่างของเฟสของออสซิลเลเตอร์กับความถี่ที่อินเจ็ทหาได้จาก

$$\Delta\phi = \sin^{-1}\left(\frac{\omega_{inj} - \omega_0}{\Delta\omega_m}\right) \quad (3.11)$$

สมการนี้จะเป็นจริงเมื่อความถี่ของสัญญาณที่อินเจ็ทอยู่ในช่วง “ช่วงของการล็อก (locking range)” ของออสซิลเลเตอร์ โดยที่  $\omega_0$  คือความถี่อิสระ  $\omega_{inj}$  คือความถี่อินเจ็ทและ  $\Delta\omega_m$  คือช่วง ของการล็อกซึ่งค่าความแตกต่างของเฟสจะอยู่ในช่วง  $-\frac{\pi}{2}$  ถึง  $\frac{\pi}{2}$  แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็น ผลการคำนวณค่าความแตกต่างเฟสของความถี่อิสระกับสัญญาณที่อินเจ็ทโดยปรับค่าของความถี่ ที่ใช้อินเจ็ทตลอดช่วงของการล็อกให้เป็นบรรทัดฐาน (normalize) ผลที่ได้คือกระบวนการปรับเฟส ที่เป็นไปได้เพื่อใช้ประโยชน์ในระบบการปรับลำคลื่นผ่านเทคนิคอินเจ็ทชันล็อก ข้อสังเกตคือช่วง ของการล็อกมีความสัมพันธ์โดยแปรผันตามความถี่ของสัญญาณที่อินเจ็ท และแปรผกผันกับ ค่าตัวประกอบคุณภาพ ( $Q$  factor)

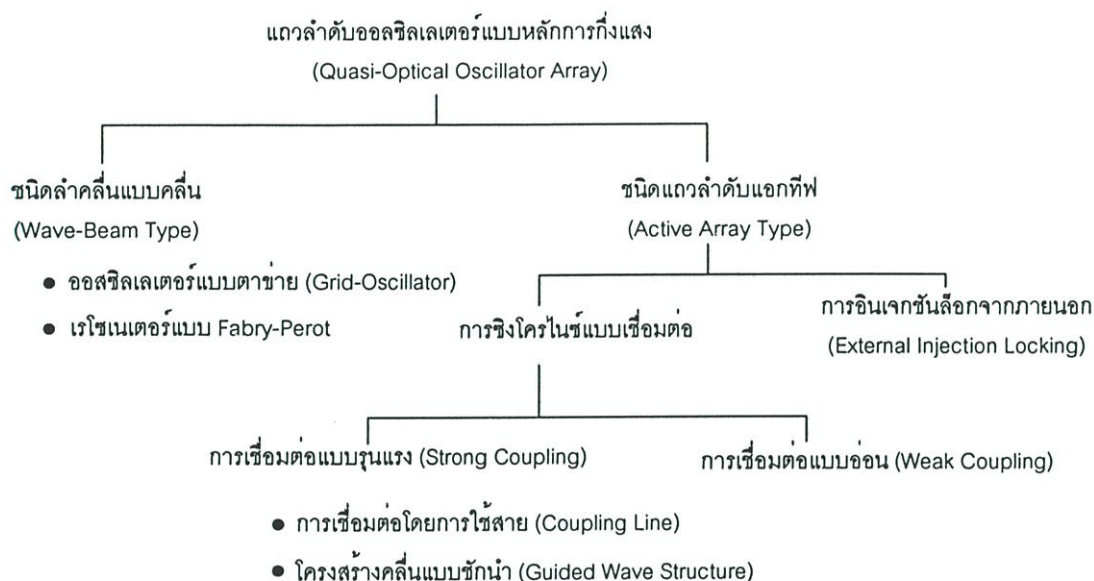


รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าเฟสระหว่างเอาต์พุตของออสซิลเลเตอร์กับสัญญาณอินเจ็คผ่านการทำให้เป็นบรรทัดฐาน

### 3.2.3 ระบบของออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ (System of Coupled Oscillator)

Itoh [28] ได้แบ่งแวลด์ำดับออสซิลเลเตอร์ออกเป็น 2 กลุ่มโดยการทำงานของอุปกรณ์แอกทีฟทั้งหมดต้องทำงานที่ความถี่เดียวกันและสามารถควบคุมความสัมพันธ์ของเฟสได้ (ส่วนมากใช้ในการควบลำคลื่น) การจำแนกประเภทของแวลด์ำดับออสซิลเลเตอร์แสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งแบ่งตามชนิดของแวลด์ำดับแอกทีฟที่เชื่อมต่อแบบซิงโครไนซ์ โดยเริ่มจากแนวคิดของ Stephan [29] เทคนิคนี้ตัวออสซิลเลเตอร์ถูกเชื่อมต่อผ่านวงจรข่ายการเชื่อมต่อ (coupling network) โดยได้แสดงการใช้ตัวแปรของวงจรเชื่อมต่อแบบ  $N$ -พอร์ต ซึ่งการเชื่อมต่อนี้ทำให้ออสซิลเลเตอร์ทำงานซิงโครไนซ์กันผ่านปรากฏการณ์อินเจ็คชันล็อก ปรากฏการณ์นี้ Stephan ได้นิยามใน "inter-injection-locking" โดยออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวใช้การป้อนรวมกันกับสายอากาศแบบระนาบ ดังนั้นกำลังงานถูกรวมในลักษณะเชิงแสง ซึ่งในบางกรณีความสัมพันธ์ของออสซิลเลเตอร์มี

ลักษณะแบบหลักการกึ่งแสงผ่านการกระจายระหว่างสายอากาศองค์ประกอบหรือผ่านการกระตุ้นจากภายนอก การทำงานทั้งหมดนี้ผ่านการรวมกำลังงานแบบหลักการกึ่งแสง

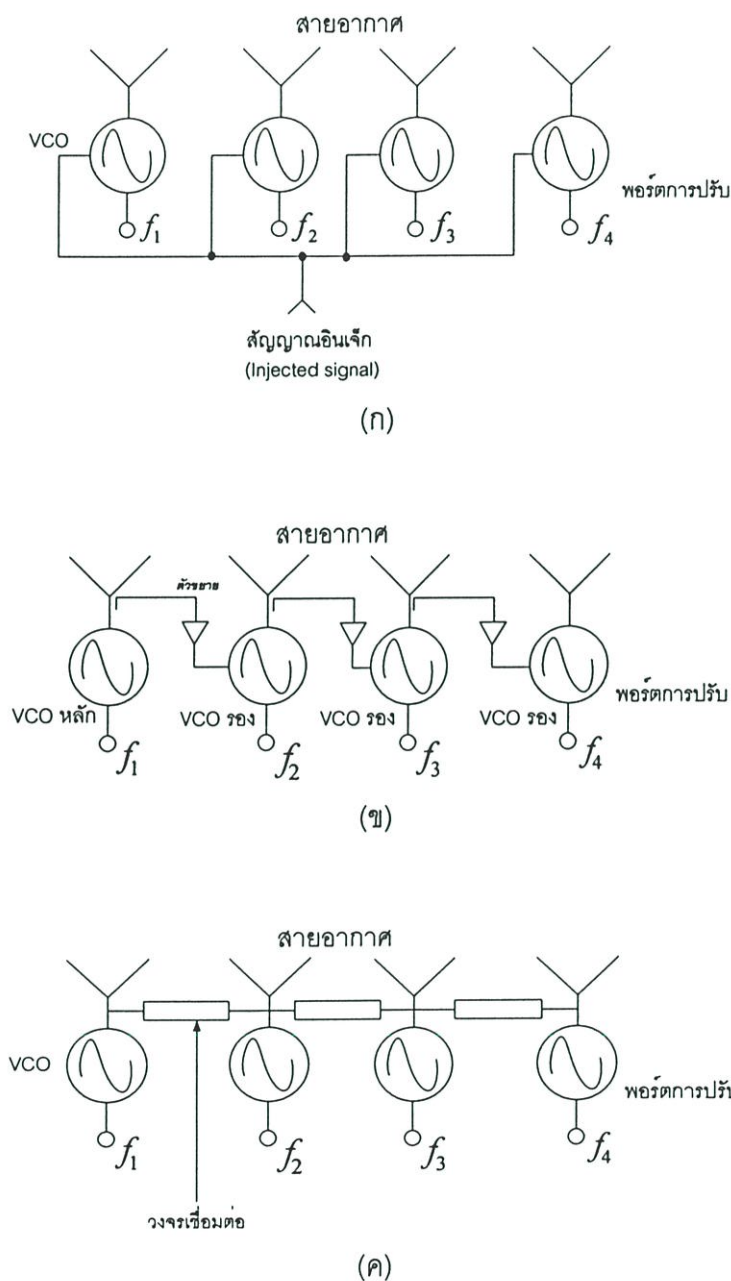


รูปที่ 3.4 การแบ่งประเภทของแหล่งป้อนกำลังงาน

ส่วนใหญ่สายอากาศแบบแอคทีฟถูกพัฒนาเพื่อให้เหมาะที่นำมาใช้ในการสร้างแถวลำดับออสซิลเลเตอร์แบบเชื่อมต่อ โดยการออกแบบใช้ทั้งอุปกรณ์สองหรือสามขั้วต่อซึ่งต่อโดยตรงกับสายอากาศแบบแผ่นหรือสายอากาศแบบร่องป้อนด้วยท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าและสายอากาศช่องเรียวหรือสายอากาศแบบนอดซ์ (tapered-slot or notch antenna)

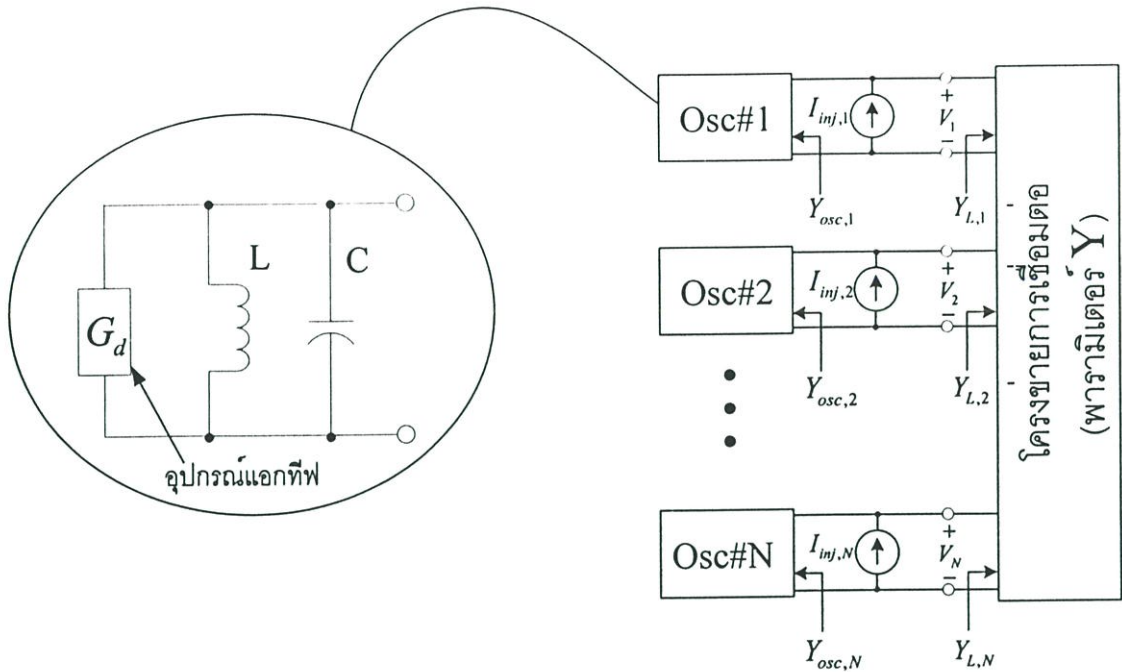
เมื่อไม่นานมานี้แถวลำดับออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อแบบหลักการกึ่งแสง (quasi-optical coupling oscillator array) โดยใช้การเชื่อมต่อแบบอ่อน (Weak Coupling) ผ่านที่ว่างระหว่างองค์ประกอบด้านข้างของแถวลำดับ เพื่อการทำงานแบบเชื่อมต่อที่ชิงโครโนส [30] โดยเฉพาะอย่างยิ่งถูกใช้ในการสร้างแถวลำดับออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อที่สามารถควบคุมความต่างเฟสในแต่ละองค์ประกอบได้อย่างแม่นยำ ซึ่งความหมายของการเชื่อมต่อร่วมแบบอ่อนคือ การเกิดปรากฏการณ์อินเจกชันล็อกผ่านที่ว่าง (spatially injection-locking) ระหว่างสายอากาศองค์ประกอบ การเชื่อมต่อนี้ทำให้เกิดการทำงานแบบชิงโครโนส หาได้จากการสมการของ Adler ทั้งยังสามารถควบคุมเฟสในแต่ละสายอากาศองค์ประกอบได้ ส่วนระบบของตัวออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อจากการสืบทอดจาก [31] แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งประกอบไปด้วยแถวลำดับการล็อกจากภายนอกผ่านการป้อนร่วม การอินเจกชันจากองค์ประกอบด้านข้างทาง

เดี่ยวและ "inter-injection-locking" หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า "การซิงโครไนซ์ร่วม (mutually synchronized)" โดยเป็นการอินเจ็ทผ่านองค์ประกอบด้านข้างทั้งสองด้าน



รูปที่ 3.5 ชนิดของแถวลำดับที่มีการเชื่อมต่อ

- (ก) ในแต่ละองค์ประกอบจะล็อกรวมกับสัญญาณอ้างอิง
- (ข) การอินเจ็ทชันล็อกข้างเดียวโดยที่แต่ละออสซิลเลเตอร์ทำงานรองจากตัวออสซิลเลเตอร์ก่อนหน้า
- (ค) การเชื่อมต่อกับองค์ประกอบใกล้เคียงทั้งสองข้าง



รูปที่ 3.6 แบบจำลองของการวิเคราะห์แวลำดับออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ

การจำลองแบบซึ่งรวมไปถึงตัวอย่างที่แสดงที่ได้กล่าวมาแล้วแสดงได้ในรูปที่ 3.6 ซึ่งในแต่ละวงจรออสซิลเลเตอร์เป็นการเชื่อมต่อในวงจรข่าย  $N$  พอร์ต การเชื่อมต่อนี้ได้อธิบายในพจน์ของตัวแปร  $Y$  เพื่อการจำลองออสซิลเลเตอร์แบบขนาน  $N$  พอร์ต โดยรวมการเชื่อมต่อทั้งวงจรและโหลด ซึ่งตัวแปรทั้งหมดนี้ในแต่ละพอร์ตอิสระจากแหล่งกำเนิด เพื่อการจำลองแบบการอินเจกชันลือกจากภายนอก แวลำดับการลือกจากภายนอกนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 (ก) โดยการจำลองแบบในกรณีแรก คือวงจรข่ายการเชื่อมต่อในแนวขวาง ( $Y_{ij} = 0$  โดยที่  $i = j$ ) ซึ่งเป็นการนำเสนอค่าโหลดที่เป็นอิสระ (สายอากาศไม่มีค่าการเชื่อมต่อ) ส่วนในวิธีที่สองที่แสดงในรูปที่ 3.5 (ข) เป็นกลุ่มการทำงานที่ซึ่งโคโรไนซ์กับการอินเจกชันผ่านการกระจายของแอมพลิจูดและเฟส โดยเป็นแวลำดับการเชื่อมต่อทางเดียวซึ่งเราสมมุติค่าการเชื่อมต่อ ( $Y_{ij} \neq Y_{ji}$ ) ซึ่งทั้งหมดเป็นตัวแปรอิสระ และการจำลองแบบที่สามคือแวลำดับการเชื่อมต่อทั้งสองข้าง ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.5 (ค) ซึ่งเป็นแบบการอินเจกชันผ่านค่าการเชื่อมต่อร่วม (Mutual Coupling) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การเชื่อมต่อร่วมอ่อนเนื่องจาง่ายในการออกแบบและมีความสามารถปรับลำคลื่นในช่วง  $\pm 30^\circ$  จากแนวเล็ง (boresight)

### 3.2.4 ทฤษฎีของออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ (Coupled Oscillator Theory)

ผลเฉลยที่ได้จากทฤษฎีของออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ [32] เพื่อใช้ทำนายความสัมพันธ์ของเฟสในสภาวะคงตัว (steady-state) ในแวลำดับเพื่อการทำงานที่มีเสถียรภาพ เริ่มจากการ

วิเคราะห์การรวมกำลังงานของแถวลำดับออสซิลเลเตอร์ ซึ่งได้แสดงการทำงานของแถวลำดับออสซิลเลเตอร์โดยอธิบายการเชื่อมต่อจากสมการของ Van der Pol วิธีการนี้ตัวออสซิลเลเตอร์ได้ถูกจำลองในวงจรที่มีส่วนประกอบเป็น RLC แหล่งจ่ายแรงดัน สัญญาณอินเจ็ทและค่าความต้านทานลบเพื่อให้สอดคล้องกับการจำลองตัวอุปกรณ์เป็นสมการอนุพันธ์ (Differential Equation) โดยอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าแอมพลิจูดและเฟสของออสซิลเลเตอร์แปรผันตามค่าการเชื่อมต่อร่วม (Mutual Coupling) ระหว่างออสซิลเลเตอร์แต่ละตัว ในพจน์ของค่าสัมประสิทธิ์จำนวนเชิงซ้อนซึ่งเป็นค่าการเชื่อมต่อร่วมระหว่างออสซิลเลเตอร์  $i$  และ  $j$  แสดงอยู่ในรูป  $\varepsilon_{ij}e^{j\Phi_{ij}}$  โดยหาค่าการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดและเฟสจาก

$$\frac{dA_i}{dt} = \frac{\omega_i}{2Q} \mu (\alpha_i^2 - A_i^2) A_i + \frac{\omega_i}{2Q} \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} A_j \cos(\Phi_{ij} + \theta_i - \theta_j) \quad (3.12)$$

และ

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i - \frac{\omega_i}{2Q} \sum_{j=1}^N \varepsilon_{ij} \frac{A_j}{A_i} \sin(\Phi_{ij} + \theta_i - \theta_j) \quad (3.13)$$

โดยที่  $i = 1, 2, \dots, N$  และ  $A_i$  คือค่าแอมพลิจูดที่เปลี่ยนแปลง  $\alpha_i$  คือค่าแอมพลิจูดของความถี่อิสระ ส่วน  $\theta_i = \omega_i t + \phi_i$  คือค่าเฟสของออสซิลเลเตอร์  $i$  ที่เปลี่ยนแปลง  $\mu$  คือค่าตัวแปรที่ได้จากการสังเกต โดยอธิบายอัตราขยายในการเกิดปรากฏการณ์การอินเจ็ทชันล็อกของออสซิลเลเตอร์และค่า  $Q$  เป็นค่าตัวประกอบคุณภาพของวงจรภายในตัวออสซิลเลเตอร์ เมื่อค่าการเชื่อมต่อ  $\varepsilon_{ij} = 0$  คือไม่เกิดการเชื่อมต่อที่ตัวออสซิลเลเตอร์จากสมการที่ (3.12) และ (3.13) จะลดรูปไปเป็นสมการของออสซิลเลเตอร์อิสระรายคาบ โดยมีค่าของแอมพลิจูดเปลี่ยนจาก  $A_i = \alpha_i$  และความถี่กลายเป็น  $\omega_i$  ในกรณีทั่วไปออสซิลเลเตอร์แต่ละตัวสามารถเชื่อมต่อร่วมทั้งหมดในแถวลำดับอย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ใช้การเชื่อมต่อแบบอ่อน (Weak Coupling) ซึ่งมีเงื่อนไข  $\varepsilon/2Q \gg 1$  โดยเกิดการเชื่อมต่อที่บริเวณช่องว่างขององค์ประกอบของสายอากาศแยกทีฟ โดยค่าความแรงของการเชื่อมต่อนี้แปรผันตามระยะห่างขององค์ประกอบสายอากาศ ค่าการเชื่อมต่อนี้มีผลมากกับองค์ประกอบข้างเคียง โดยตัวออสซิลเลเตอร์วางเรียงอยู่ในแนวเชิงเส้น (Linear array) สามารถอธิบายการทำงานของแถวลำดับออสซิลเลเตอร์ได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i - \frac{\varepsilon\omega_i}{2Q} \sum_{\substack{j=i-1 \\ j \neq i}}^{i+1} \frac{A_j}{A_i} \sin(\Phi + \theta_i - \theta_j) \quad (3.14)$$

โดยที่  $i = 1, 2, \dots, N$

ในทางปฏิบัติความแตกต่างความถี่สูงสุดในกรณีที่ออสซิลเลเตอร์สองตัวทำงานที่ซิงโครไนซ์กันมีค่าเท่ากับ

$$\Delta\omega_m = \frac{\omega_i}{2Q} \frac{A_{inj}}{A_i} \quad (3.15)$$

โดยที่  $A_{inj}$  และ  $A_i$  แสดงถึงค่าแอมพลิจูดของสัญญาณอินเจ็กและแอมพลิจูดของออสซิลเลเตอร์ตัวที่  $i^{th}$  ตามลำดับซึ่งออสซิลเลเตอร์สามารถอินเจ็กชั้นล็อกภายใต้ขอบเขตของช่วง  $\mp\Delta\omega_m$  รอบค่าของความถี่อิสระโดยค่าความถี่ของออสซิลเลเตอร์ทั้งหมดจะรวมกันอยู่ในแบนด์วิดท์ของการล็อก ทำที่ที่สุดความถี่จะซิงโครไนซ์กันอยู่ที่ความถี่  $\omega_f$  โดยที่  $d\theta_i/dt = \omega_f$  ในกรณีการทำงานในสภาวะคงตัวซึ่งการรวมกันของความถี่ทั้งหมดนี้หาได้จาก

$$\omega_f = \omega_i \left[ 1 - \frac{\varepsilon}{2Q} \sum_{\substack{j=i-1 \\ j \neq i}}^{i+1} \frac{A_j}{A_i} \sin(\Phi + \theta_i - \theta_j) \right] \quad (3.16)$$

เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, N$

โดยที่  $\theta_i - \theta_j$  คือค่าความต่างเฟสของออสซิลเลเตอร์ในแต่ละตัว โดยเป็นตัวแปรตามความถี่อิสระและการเชื่อมต่อกัน ความแตกต่างเฟสของออสซิลเลเตอร์จะอยู่ในช่วง  $-90^\circ < \Delta\theta < 90^\circ$  ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (3.11) โดยแสดงความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.3

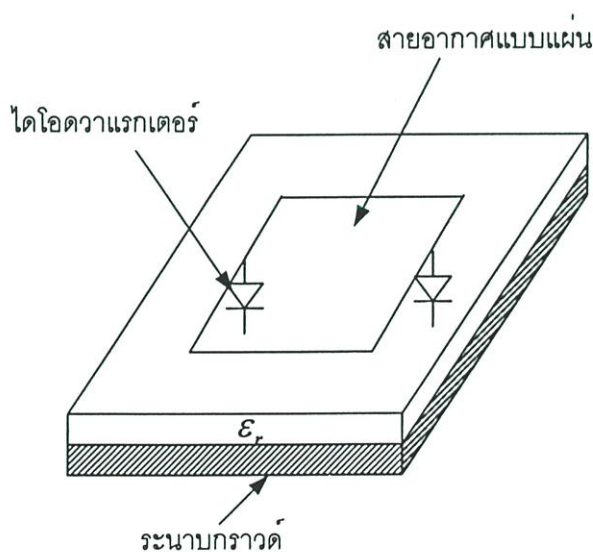
### 3.2.5 สายอากาศไมโครสตริปแบบแอกทีฟ

เรื่องราวของสายอากาศวงจรรวมแบบแอกทีฟ [33] เริ่มจากการใช้สายอากาศต่อรวมกับทรานซิสเตอร์ในปี ค.ศ. 1970 ใช้เพื่อการรวมวงจรรวมกับสายอากาศในย่านความถี่ไมโครเวฟและย่านความถี่มิลลิเมตร ขณะที่เทคโนโลยีของอุปกรณ์ยังไม่ทันสมัยพอ ในการติดตามงานของ Maclean, Ramsdale และ Armstrong และคณะ ซึ่งทดลองการใช้สายอากาศแบบแอกทีฟเดี่ยวในการตรวจจับการดอปเพลอร์ในปี ค.ศ. 1980 โดยแบบรูปการแผ่พลังงานของออสซิลเลเตอร์เป็นแบบคลื่นปิ่งโดยตรงไปสู่อากาศว่าง (free-space) ซึ่งมีความไวต่อสภาพแวดล้อมใกล้เคียง (ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ และอัตราการเคลื่อนไหว) โดยจะแสดงการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทำงาน การเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้เกิดแนวความคิดสำหรับการตรวจจับการเกิดดอปเพลอร์ โดยใช้

ตัวไดโอดแบบอิมแพค (IMPATT diode) ต่อกับสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปและใช้ผสมสัญญาณในการออกสวิตช์จากตัวมันเอง การรวมกันทำให้เกิดการทดลองใช้เทคโนโลยีสายอากาศไมโครสตริปแบบแอกทีฟเพื่อการใช้งาน โดยการใช้งานสายอากาศแอกทีฟเป็นจุดสนใจในการนำไปประยุกต์ใช้หลายด้าน สายอากาศไมโครสตริปแบบแอกทีฟนี้เป็นผลของสายอากาศแอกทีฟในแนวคิดว่ามีขนาดเล็กและต้นทุนต่ำ โดยใช้ในการตรวจจับวัตถุซึ่งไม่ต้องใช้กำลังงานมาก รวมทั้งยังสามารถใช้ในระบบประตูอัตโนมัติและทางการค้า

ในระหว่างปี ค.ศ. 1980 มีการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและเทคนิควงจรรวมเพื่อรองรับการทำงานในย่านความถี่มิลลิเมตรแบบวงจรรวมเพื่อใช้ประโยชน์ในหลายด้านและเริ่มมีการนำวงจรแบบโมโนลิธิก (Monolithic) มาใช้แทนวงจรรวมแบบไฮบริดในบางการใช้งานเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างสายอากาศแบบวงจรรวม

ในปี ค.ศ. 1982 ได้มีการนำเสนอสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปใช้งานร่วมกับการปรับไดโอดวารีแวกเตอร์ นำเสนอโดย Bhartia และ Bahl แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นการเพิ่มแบนด์วิดท์จาก 2% ไปเป็น 30% และสามารถปรับค่าของวารีแวกเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดแนวความคิดที่จะใช้ในระบบเครื่องรับที่สามารถเปลี่ยนความถี่ได้ จากการเปลี่ยนคุณสมบัติของโหนดโดยทำให้ค่าความต้านทานอินพุตของตัวสายอากาศเปลี่ยนแปลง รวมทั้งสามารถนำไปใช้ระบบการกวาดลำคลื่นของระบบเฟสอาร์เรย์



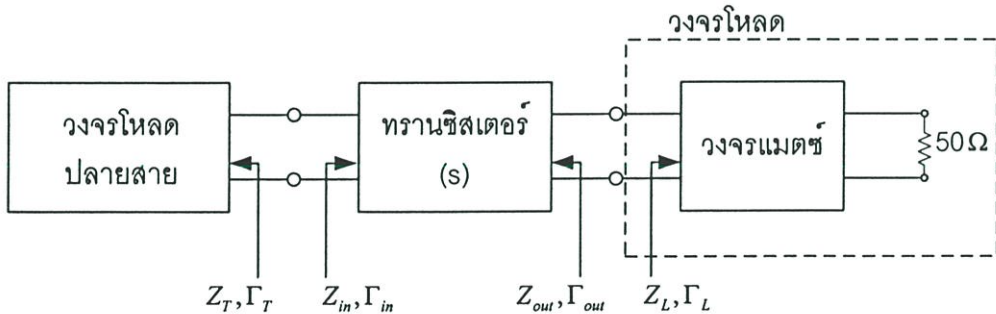
รูปที่ 3.7 สายอากาศแบบแผ่นสี่เหลี่ยมรวมกับไดโอดวารีแวกเตอร์

ในปี ค.ศ. 1983 Waldinger และ Nalbandian ได้มีแนวคิดจากคุณสมบัติของเรโซเนเตอร์แบบโพรงเปิดสำหรับการรวมกำลังงาน ซึ่งนำไปสู่การรวมกำลังงานแบบหลักการกึ่งแสง

ในปี ค.ศ. 1984 ได้มีการรวมไดโอดกันน์ (Gunn) กับท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าเพื่อป้องกันสายอากาศแบบแผ่น ต่อมาได้มีการสร้างวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่เชื่อมต่อกับสายอากาศแบบร่องเรียว (tapered-slot antenna) เพื่อใช้ในการทดสอบ ในเดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 1985 Thomas และคณะ ได้พัฒนาสายอากาศแอกทีฟแบบใหม่ ซึ่งเป็นสายอากาศแบบแผ่นที่ต่อรวมกับไดโอดกันน์ (Gunn) ที่ทำงานในย่านความถี่ X-band และเป็นวิวัฒนาการของสายอากาศแบบแอกทีฟซึ่งพัฒนาภายใต้จุดประสงค์ที่ต้องการสร้างเครื่องส่งที่ราคาถูกลงสำหรับการใช้งานหรือการรวมกำลังงานที่ความถี่สูง

### 3.3 การคำนวณวงจรรอสซิลเลเตอร์

ถึงแม้ว่าทรานซิสเตอร์มีมากมายหลายชนิด เช่น Bipolar, MOSFET, MESFET, HEMT, HBT ฯลฯ ในกระบวนการออกแบบ [34] โดยใช้ตัวแปร  $S$  ของตัวทรานซิสเตอร์และสามารถใช้งานโดยมีรูปแบบคล้ายกันทั้งหมด ค่าตัวแปร  $S$  ของทรานซิสเตอร์สามารถสืบค้นได้จากเอกสารข้อมูล (datasheet) จากผู้ผลิตหรือจากผู้ขายหรือได้จากการวัดคุณสมบัติในย่านความถี่วิทยุของระบบ รูปที่ 3.8 แสดงตัวทรานซิสเตอร์สองพอร์ตในวงจรรอสซิลเลเตอร์และวงจร  $Z_L = (R_L + jX_L)$  ซึ่งเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด  $Z_T$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดปลายสาย หาได้จากตัวทรานซิสเตอร์ และ  $Z_{out} = (R_{out} + jX_{out})$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่เอาต์พุตของทรานซิสเตอร์



รูปที่ 3.8 วงจรรอสซิลเลเตอร์ทรานซิสเตอร์แบบสองพอร์ต

ในวงจรรอสซิลเลเตอร์ (Terminating Network) ต้องอยู่ในเงื่อนไข  $|\Gamma_{out}| > 1$  หรือ  $(R_{out} < 0)$  ซึ่งจำเป็นสำหรับการเริ่มออสซิลเลชัน วงจรรอสซิลเลเตอร์เป็นตัวกำหนดความถี่ของออสซิลเลเตอร์ โดยทั้งหมดคำนวณที่โหลด 50 Ω และค่าตัวแปร  $S$  ของทรานซิสเตอร์หาได้จาก

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

และตัวประกอบเสถียรภาพ  $K$  หาได้จาก

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}|^2}{2|S_{12}S_{21}|} \quad (3.18)$$

ถ้าต้องการให้เกิดการออสซิลเลทที่ความถี่  $f_0$  ต้องทำตามเงื่อนไข

$$|R_{out}(V, f_0)| > R_L(f_0) \quad (3.19)$$

$$X_{out}(V, f_0) + X_L(f_0) = 0 \quad (3.20)$$

โดยที่  $R_{out}$  เป็นค่าความต้านทานลบ ซึ่งสมการ (3.19) ต้องอยู่ในเงื่อนไข  $|\Gamma_{out}| > 1$  และสมการ (3.20) เป็นตัวกำหนดความถี่ของการออสซิลเลท ค่า  $|R_{out}(V, f_0)|$  แปรผันตามค่าแรงดัน  $V$  และมีค่ามากกว่า  $R_L$  เมื่อปฏิบัติตามเงื่อนไขทั้งหมดนี้วงจรสามารถทำให้เกิดการออสซิลเลทได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อป้อนแหล่งจ่ายแรงดัน ( $V_{ds}, V_{gs}$ ) ให้อุปกรณ์แบบ MOSFET เริ่มทำงานโดยการทำงานของวงจรออสซิลเลทเตอร์เริ่มจากสร้างระดับสัญญาณรบกวน (noise level) แอมพลิจูดของเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นจนถึงระดับค่าคุณสมบัติตามอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนั้นความสามารถของทรานซิสเตอร์ในการออสซิลเลทในวงจรจะถูกกำหนดโดยระดับของสัญญาณรบกวน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคสัญญาณขนาดเล็ก (small-signal technique) โดยเงื่อนไขของการออสซิลเลทสามารถแสดงได้ดังนี้

$$K < 1 \quad (3.21)$$

$$\Gamma_{in}\Gamma_T = 1 \quad (3.22)$$

$$\Gamma_{out}\Gamma_L = 1 \quad (3.23)$$

โดย  $|\Gamma_L|$  และ  $|\Gamma_T|$  ต้องมีค่าน้อยกว่า 1 สมการที่ (3.22) กับ (3.23) หมายถึง  $|\Gamma_m| > 1$  และ  $|\Gamma_{out}| > 1$  โดยที่  $\Gamma_T$  และ  $\Gamma_L$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การย้อนกลับของวงจรโหลดปลายสาย และโหลด ซึ่งค่าของ  $\Gamma_{in}$  กับ  $\Gamma_{out}$  หาได้จาก

$$\Gamma_{in} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (3.24)$$

$$\Gamma_{out} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_T}{1 - S_{11}\Gamma_T} \quad (3.25)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.23) และ (3.25) จะได้

$$\Gamma_L = \frac{1}{\Gamma_{out}} = \frac{1 - S_{11}\Gamma_T}{S_{22} - \Delta\Gamma_L} \quad (3.26)$$

โดยที่  $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$

เมื่อแทนสมการที่ (3.24) ในสมการ (3.22) จะได้

$$\Gamma_T = \frac{1 - S_{22}\Gamma_L}{S_{11} - \Delta\Gamma_L} \quad (3.27)$$

และเมื่อแทนสมการที่ (3.25) ในสมการ (3.23) จะได้

$$\Gamma_{in} = \frac{S_{11} - \Delta\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (3.28)$$

ลำดับขั้นตอนที่ใช้ในการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์สรุปได้ดังนี้

1. เลือกอุปกรณ์ที่มีการทำงานไม่เสถียรภาพ ณ ความถี่ที่ต้องการให้ออสซิลเลท ( $K < 1$ ) ถ้า ( $K > 1$ ) ต้องใช้องค์ประกอบป้อนกลับ (feedback element) เพื่อทำให้เกิดการทำงานที่ไม่เสถียร หรือเปลี่ยนโหมดการทำงานของอุปกรณ์
2. ออกแบบวงจรโหลดปลายสาย  $Z_T$  หรือ  $\Gamma_T$  เพื่อให้  $|\Gamma_{out}| > 1$  โดยการเลือกค่า  $Z_T$  หรือ  $\Gamma_T$  ในบริเวณที่ไม่เสถียรของวงกลมเสถียรภาพ (stability circle)
3. เมื่อทราบค่า  $Z_T$  และค่าตัวแปร  $S$  ของตัวทรานซิสเตอร์แบบสัญญาณขนาดเล็กแล้ว คำนวณ  $\Gamma_{out}$  จากสมการ (3.25) และอยู่ในเงื่อนไข  $|\Gamma_{out}| > 1$
4. เลือกค่าของโหลดเพื่อให้เกิดเงื่อนไขการออสซิลเลทได้จาก

$$X_L(f_0) = -X_{out}(f_0) \quad (3.29)$$

$$\text{และ } R_L(f_0) = \frac{1}{3} |R_{out}(0, f_0)| \quad (3.30)$$

ในการเลือกค่าของ  $Z_L$  ซึ่งค่านี้เป็นตัวทำให้เกิดการออสซิลเลทถ้าค่าความถี่ของการออสซิลเลทที่วัดได้เลื่อนไปจากการออกแบบ สามารถแก้ไขได้จากการปรับค่า  $X_{out}(f_0)$  ซึ่งค่านี้ใช้เพื่อกำหนดความถี่ของการออสซิลเลท  $f_0$  และการทำงานทั้งหมดจะเป็นค่าที่แปรผันตามแรงดัน  $V$

5. ออกแบบวงจรโหลดปลาย  $Z_L$  โดยพิจารณาที่  $50 \Omega$

### 3.4 การออกแบบ

#### 3.4.1 การออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป

จากบทที่ 2 ได้ออกแบบสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงซึ่งใช้ในการรับความถี่วิทยุที่ความถี่ 1.9 GHz และต้องการสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ความถี่ 1.8 GHz ดังนั้นผู้วิจัยจึงออกแบบสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปทำงานที่ความถี่ 1.8 GHz โดยใช้โฟมเป็นวัสดุฐานรอง (substrate) เนื่องจากหาง่ายและราคาถูกซึ่งโฟมมีคุณสมบัติดังนี้มีค่า  $\epsilon_r = 1.03$   $h = 0.35$  cm และ  $\tan \delta = 0.0001$  ส่วนตัวสายอากาศและระนาบกรวดที่ใช้ทองแดงซึ่งมีค่าความนำ  $5.76 \times 10^7 \text{ S/m}$  และเลือกการป้อนแบบสายสตริป (strip line) เนื่องจากในการสร้างจริงต้องต่อรวมกับวงจรออสซิลเลเตอร์ซึ่งจะอธิบายบทถัดไป โดยการออกแบบเริ่มจากหาค่าความกว้างของสายอากาศ ( $W$ ) จาก

$$\begin{aligned} W &= \frac{v}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \\ &= \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.8 \times 10^9} \sqrt{\frac{2}{1.03 + 1}} \\ &= 0.082 \end{aligned} \quad (3.31)$$

ดังนั้นจึงได้ค่าความกว้างของสายอากาศ ( $W$ ) มีค่าเท่ากับ 8.2 cm ลำดับต่อมาจึงคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ( $\epsilon_{eff}$ ) ซึ่งหาได้จาก

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1.03+1}{2} + \frac{1.03-1}{2} \left[ 1 + 12 \frac{0.035}{0.082} \right]^{-1/2} \\
&= 1.073
\end{aligned}$$

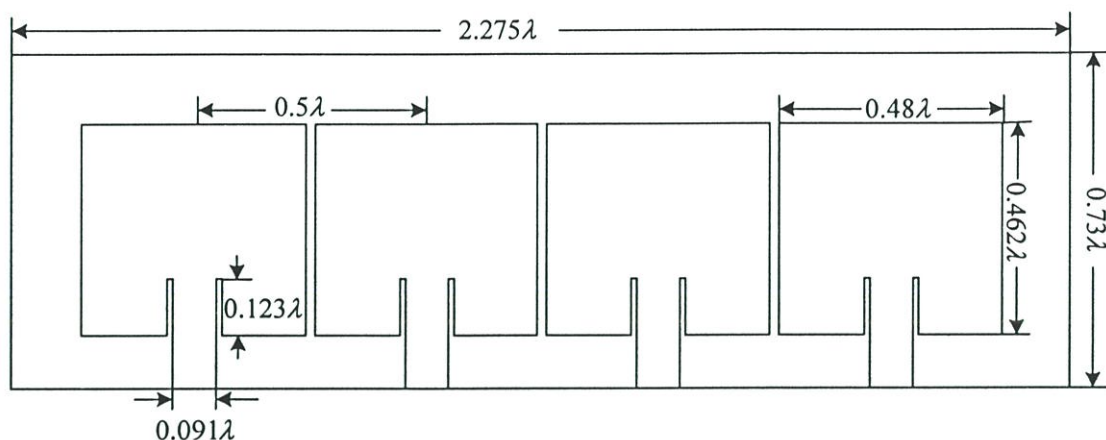
เมื่อทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ( $\epsilon_{eff}$ ) แล้วจึงนำไปหาค่าความยาวที่ขยายออกจากขอบ ( $\Delta L$ ) เนื่องจากผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ( $\epsilon_{eff}$ ) หาได้จาก

$$\begin{aligned}
\Delta L &= 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3.33) \\
&= 0.412(0.035) \frac{(1.073 + 0.3) \left( \frac{0.082}{0.035} + 0.264 \right)}{(1.073 - 0.258) \left( \frac{0.082}{0.035} + 0.8 \right)} \\
&= 0.002376
\end{aligned}$$

หลังจากได้ความยาวที่ขยายออกจากขอบ ( $\Delta L$ ) เนื่องจากผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ( $\epsilon_{eff}$ ) แล้วหาความยาวของสายอากาศได้จาก

$$\begin{aligned}
L &= \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (3.34) \\
&= \frac{1}{2(1.8 \times 10^9) \sqrt{1.073} \sqrt{\left( \frac{10^7}{4\pi} \right) (8.854 \times 10^{-12})}} - 2(0.002376) \\
&= 0.076
\end{aligned}$$

จึงได้ความยาวของสายอากาศแบบแผ่น ( $L$ ) มี ค่า 7.6 cm ลำดับต่อมาได้จำลองแบบสายอากาศโดยใช้โปรแกรม IE3D เพื่อปรับแต่งให้เหมาะสมและหาค่าของสัมประสิทธิ์การย้อนกลับและค่าการเชื่อมต่องานซึ่งจะใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ของสายอากาศแอกทีฟ (ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 4) ในแต่ละตัวบนปรากฏการณ์อินเจกชันล็อกเพื่อใช้ในการปรับลำคลื่น โดยโครงสร้างของสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริปนี้มีขนาดเดียวกันทั้งหมดวางในแนวเชิงเส้นจำนวน 4 องค์ประกอบ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แฉวลำดับสายอากาศแบบแผ่นไมโครสตริป 4 องค์ประกอบ

รวมทั้งแสดงขนาดทั้งหมดของสายอากาศในหน่วยของความยาวคลื่น ซึ่งคำนวณที่ความถี่ 1.8 GHz โดยมีระยะห่างจากกึ่งกลางของตัวสายอากาศองค์ประกอบเท่ากับ  $0.5\lambda$  เนื่องจากเป็นระยะที่เหมาะสมในการใช้คุณสมบัติการเชื่อมต่อร่วมแบบอ่อน ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยผลการคำนวณของการเชื่อมต่อร่วมได้แสดงในตารางที่ 3.1 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณความถี่ในการปรับลำคลื่น

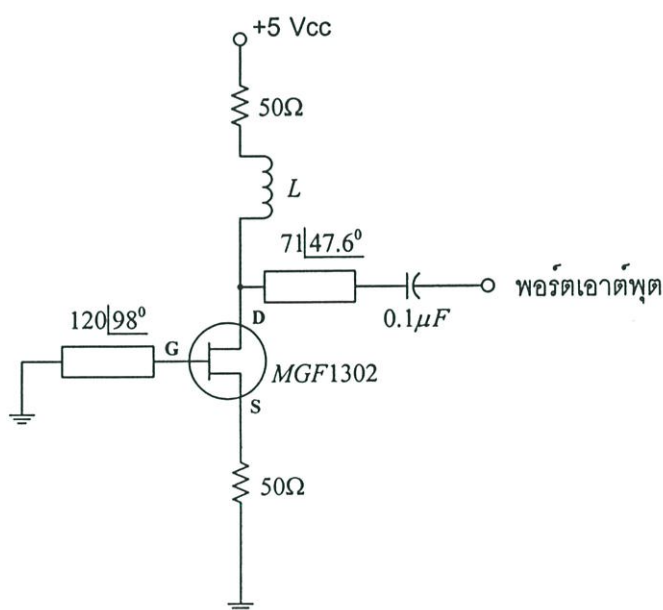
ตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อร่วม

| $S_{ij}$ | #1       |                       | #2      |                       | #3      |                       | #4       |                       |
|----------|----------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|-----------------------|----------|-----------------------|
|          | ขนาด     | เฟส<br>( $^{\circ}$ ) | ขนาด    | เฟส<br>( $^{\circ}$ ) | ขนาด    | เฟส<br>( $^{\circ}$ ) | ขนาด     | เฟส<br>( $^{\circ}$ ) |
| #1       | -        | -                     | 0.2393  | 20.49                 | 0.06955 | -137.5                | 0.008363 | 152.5                 |
| #2       | 0.2393   | 20.49                 | -       | -                     | 0.2498  | 22.15                 | 0.06907  | -135.3                |
| #3       | 0.06955  | -137.5                | 0.2498  | 22.15                 | -       | -                     | 0.2388   | 23.43                 |
| #4       | 0.008363 | 152.5                 | 0.06907 | -135.3                | 0.2388  | 23.43                 | -        | -                     |

#### 3.4.2 การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์

ในการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้อุปกรณ์ชนิด GaAs เบอร์ MGF1302 เนื่องจากให้ค่าการรบกวนทางเฟสต่ำ โดยการออกแบบเริ่มจากหาค่า  $K$  จากสมการที่ (3.18) โดยการคำนวณที่ความถี่ใช้งาน (1.8GHz) ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ให้ค่าพารามิเตอร์  $S_{11}$  เท่ากับ  $0.938|-38.71^{\circ}$   $S_{21}$  เท่ากับ  $3.59|143.5^{\circ}$   $S_{12}$  เท่ากับ  $0.037|61.67^{\circ}$  และ  $S_{22}$  เท่ากับ  $0.627|-28.46^{\circ}$  ที่แรงดัน  $V_{DS}$  เท่ากับ 3 โวลต์ และกระแส  $I_D$  เท่ากับ 10 มิลลิแอมป์ ค่าดังกล่าว

ได้จากการจัดไบอัสโดยเพิ่มตัวต้านทาน  $50\ \Omega$  ที่ขาเดรนและขาซอร์สต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน 5 โวลต์ ดังนั้นค่า  $K$  จึงมีค่าเท่ากับ 0.32 ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขตามสมการที่ (3.21) ลำดับต่อมาจึงทำการเลือกค่าวงจรโหลดปลายสาย  $\Gamma_T$  เพื่อให้  $|\Gamma_{out}| > 1$  โดยการเลือกค่า  $\Gamma_T$  ในบริเวณไม่เสถียรของวงกลมเสถียรภาพโดยมีค่าเท่ากับ  $1.1|45^\circ$  ลำดับต่อมาจึงหาค่าวงจรโหลดปลายสาย  $\Gamma_{in}$  และ  $\Gamma_{out}$  จากสมการที่ (3.24) กับ (3.25) ซึ่งหาค่าวงจรข่ายการโหลดปลายสาย  $\Gamma_T$  กับ  $\Gamma_L$  ได้จากสมการที่ (3.22) กับ (3.23) ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรออกสซิลเลเตอร์ คือ  $-143.6 - j52.5\ \Omega$  ลำดับสุดท้ายเลือกค่าของโหลดเพื่อให้เกิดเงื่อนไขการออกสซิลเลตได้จากสมการที่ (3.30) กับ (3.31) ซึ่งวงจรโหลดปลายสาย  $Z_L$  มีค่า  $71|47.6^\circ$  และวงจรโหลดปลายสาย  $Z_T$  มีค่า  $120|98^\circ$  เมื่อได้ค่าของวงจรโหลดปลายสายสองครบแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรข่ายโหลดปลายสายที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบสายส่งแบบไมโครสตริป ซึ่งได้ทำการออกแบบและคำนวณโดยใช้โปรแกรม ADS2001 [35] โดยวงจรออกสซิลเลเตอร์ที่คำนวณได้แสดงในรูปที่ 3.10



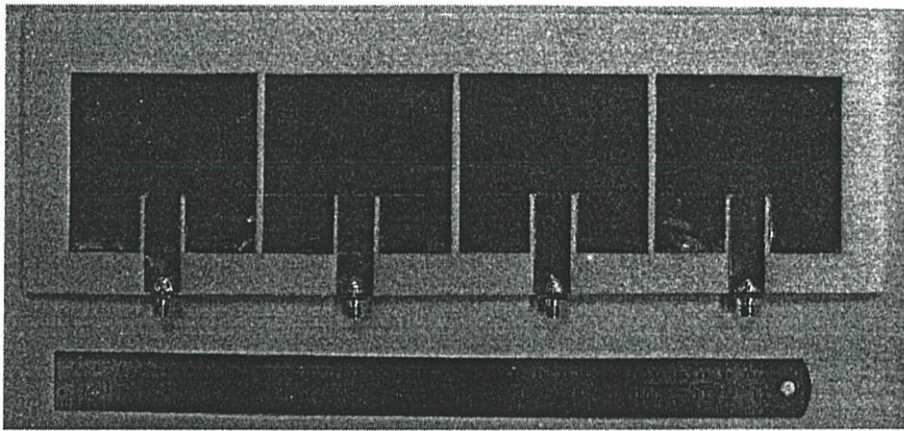
รูปที่ 3.10 วงจรออกสซิลเลเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ GaAs FET เบอร์ MGF1302

### 3.5 การทดลองและผลการทดลอง

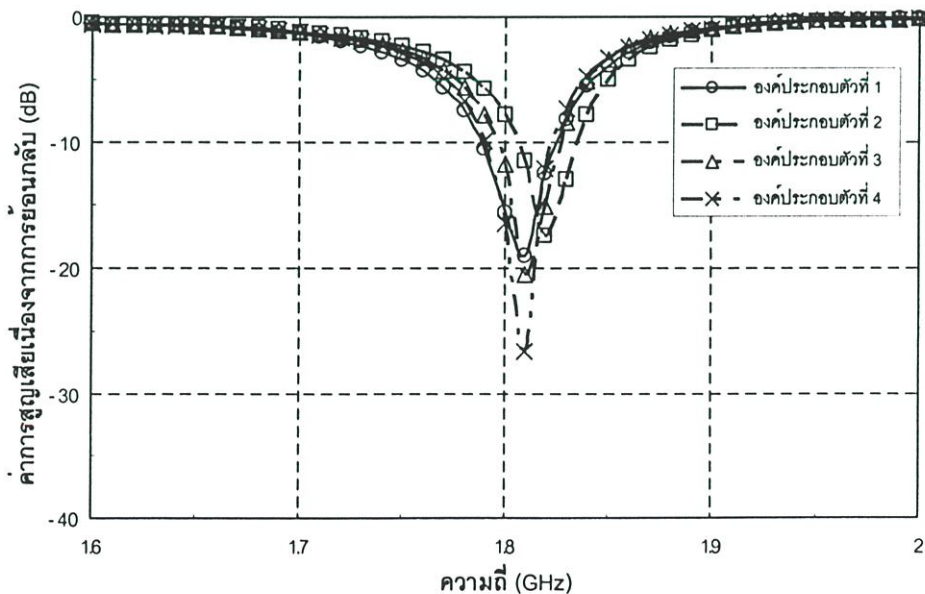
#### 3.5.1 สายอากาศแถวลำดับต้นแบบ

จากการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นสี่เหลี่ยมประกอบในหัวข้อ 3.4.1 จึงได้สร้างสายอากาศต้นแบบโดยใช้ทองแดงเป็นตัวนำและระนาบกราวด์ ใช้โฟมเป็นวัสดุฐานรองเนื่องจากราคาถูกและมีค่าการสูญเสียต่ำ ซึ่งได้สร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการทดสอบ ดังรูปที่ 3.11 สายอากาศมีระยะห่างวัดจากกึ่งกลางในแต่ละองค์ประกอบเท่ากับ 8.3 cm ความกว้างของสายอากาศ

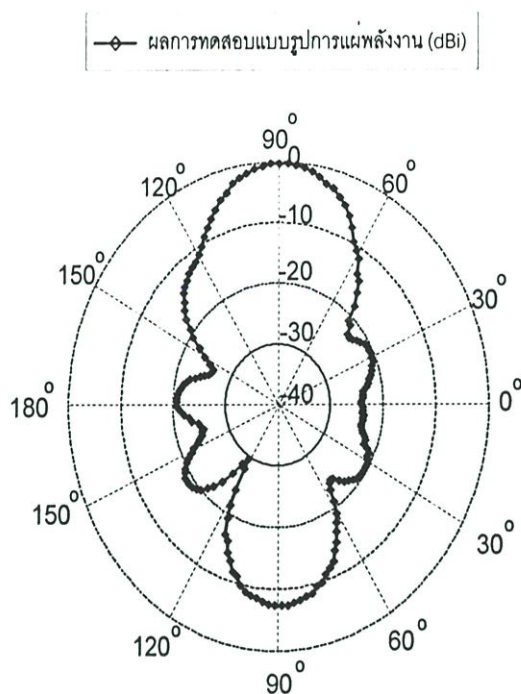
องค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 7.7 cm ความกว้างรวมของสายอากาศต้นแบบเท่ากับ 12.2 cm และความยาวของสายอากาศทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 38 cm และได้ทดสอบสายอากาศโดยวัดค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) ได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น HP8510B โดยวัดที่ละพอร์ตส่วนปลายพอร์ตที่เหลือต่อด้วยโหลด 50  $\Omega$  ผลการทดสอบแสดงได้ดังในรูปที่ 3.12 จากรูปสามารถครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานที่ 1.8 GHz โดยพิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ -10 dB ซึ่งในแต่ละ องค์ประกอบมีค่าใกล้เคียงกันส่วนผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปมีอัตราขยาย 13.2 dBi ส่วนการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานในห้องไม่สะท้อนคลื่น ผลการทดสอบแสดงได้ดังในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.11 สายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริปต้นแบบ



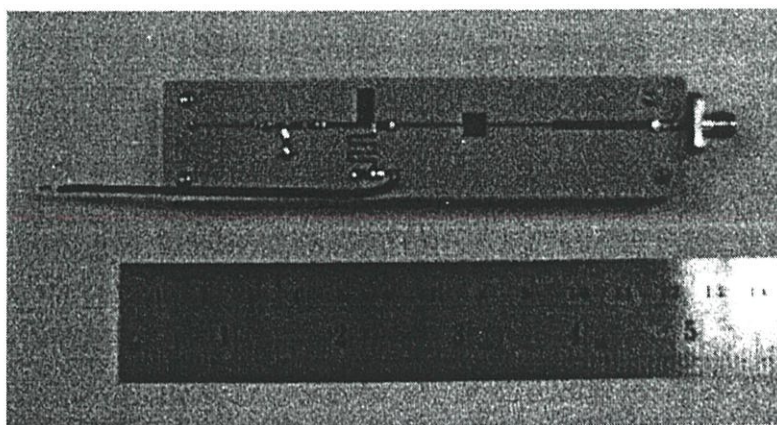
รูปที่ 3.12 ผลการทดสอบค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ



รูปที่ 3.13 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ออกซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (1.8GHz)

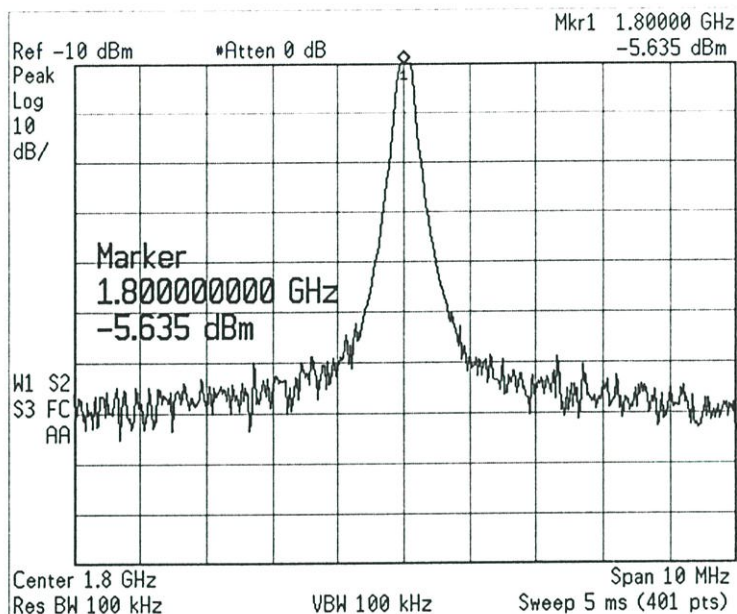
### 3.5.2 วงจรออกซิลเลเตอร์ต้นแบบ

จากการออกแบบวงจรออกซิลเลเตอร์ในหัวข้อ 3.4.2 จึงได้สร้างวงจรออกซิลเลเตอร์ต้นแบบ โดยสร้างบนวัสดุฐานรอง RO3003 ของบริษัท ROGERS ซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 3 ค่าแทนเจนต์การสูญเสีย ( $\tan \delta$ ) เท่ากับ 0.0013 และความหนา ( $h$ ) เท่ากับ 0.762 mm ส่วนความหนาของทองแดงเท่ากับ 0.035 mm โดยวงจรออกซิลเลเตอร์ต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.14 กำลังงานเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 4.365 dBm ที่ความถี่ออกซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (1.8 GHz)



รูปที่ 3.14 วงจรออกซิลเลเตอร์ต้นแบบ

ลำดับต่อมาทดสอบเอาต์พุตของตัวออสซิลเลเตอร์จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม E4403B ของบริษัท Agilent ทั้งยังได้ต่อตัวลดทอน 10 dB โดยสเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตแสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรออสซิลเลเตอร์ต้นแบบ

### 3.6 สรุปผล

ในบทนี้ได้ศึกษาทฤษฎีของสายอากาศแบบแอกทีฟและหลักการในการปรับลำคลื่น จากเทคนิคอินเจกชันล็อกซึ่งความต่างเฟสที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วง  $\pm 90^\circ$  ดังนั้นในทางทฤษฎีสามารถปรับลำคลื่นหลักของสายอากาศได้ไม่เกิน  $\pm 30^\circ$  จากแนวเดิม ลำดับต่อมาได้อธิบายทฤษฎีของออสซิลเลเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ รวมถึงความเป็นมาของสายอากาศไมโครสตริบแบบแอกทีฟ ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศ เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบของสายอากาศแอกทีฟและหลักการออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ ลำดับต่อมาเป็นการแสดงผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริบซึ่งได้อัตราขยาย 13.2 dBi สุดท้ายได้ออกแบบและสร้างวงจรออสซิลเลเตอร์ต้นแบบซึ่งกำลังงานเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 4.365 dBm ที่ความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (1.8 GHz)

## บทที่ 4

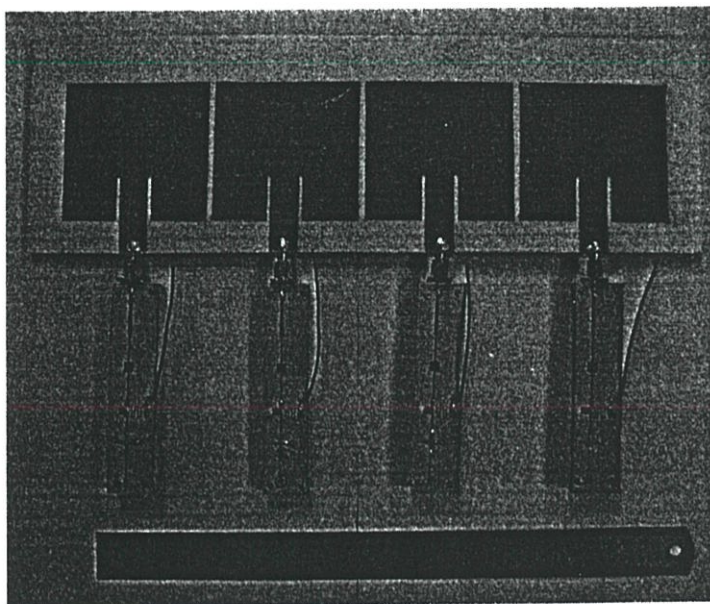
# ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ

### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของ สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ โดยการทดสอบประกอบไปด้วยการทดสอบความถี่ใช้งาน กำลังงานที่เอาต์พุต ผลตอบสนองต่อการปรับแรงดันไบอัส ตัวประกอบคุณภาพภายนอก ล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ แบบรูปการแผ่พลังงานในการปรับลำคลื่น โดยการคำนวณจากค่าตัวประกอบคุณภาพและค่าสัมประสิทธิ์ในการเชื่อมต่อนร่วม เพื่อกำหนดความถี่ในแต่ละองค์ประกอบในการควบคุมความต่างเฟสในแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ

### 4.2 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ

จากการคำนวณและการออกแบบที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ต่อมาได้สร้างสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริป 4 องค์ประกอบและวงจรออสซิลเลเตอร์ขึ้น และเชื่อมต่อกันระหว่างวงจรออสซิลเลเตอร์ไปยังสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริป 4 องค์ประกอบโดยตรง ผ่านตัวต่อแบบ SMA ซึ่งไม่ใช่สายนำสัญญาณ รูปของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมรวมแบบอ่อนแสดงต้นแบบดังรูปที่ 4.1



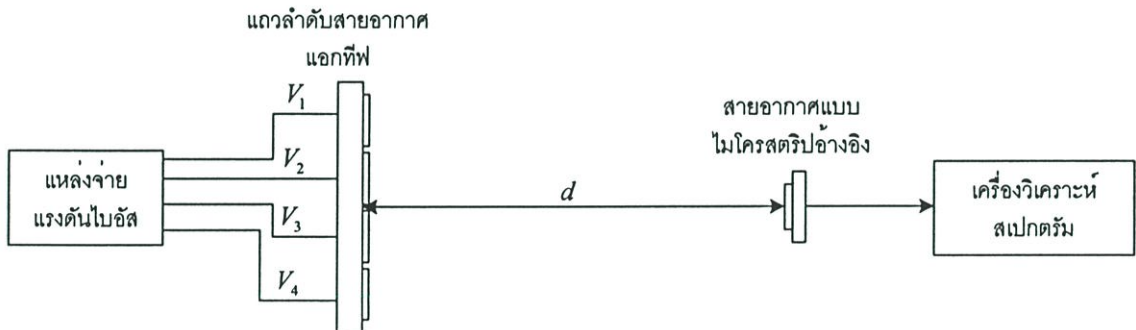
รูปที่ 4.1 สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมต่อนแบบอ่อนต้นแบบ

จากรูปสายอากาศต้นแบบนี้สังเกตได้ว่าการปรับแต่งวงจร เนื่องจากผลของการเชื่อมต่อกัน (Mutual coupling) ของแต่ละองค์ประกอบในการวางในแนวเชิงเส้น ซึ่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแต่ละตัวไม่เท่ากัน ในการปรับลำคลื่นโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมต่อกันแบบนี้จำเป็นต้องให้องค์ประกอบของสายอากาศในแต่ละตัว มีระยะห่างที่ใกล้เคียงกันเพื่อทำให้เกิดปรากฏการณ์อินเทอเฟอเรนซ์ล็อกดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

### 4.3 ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ

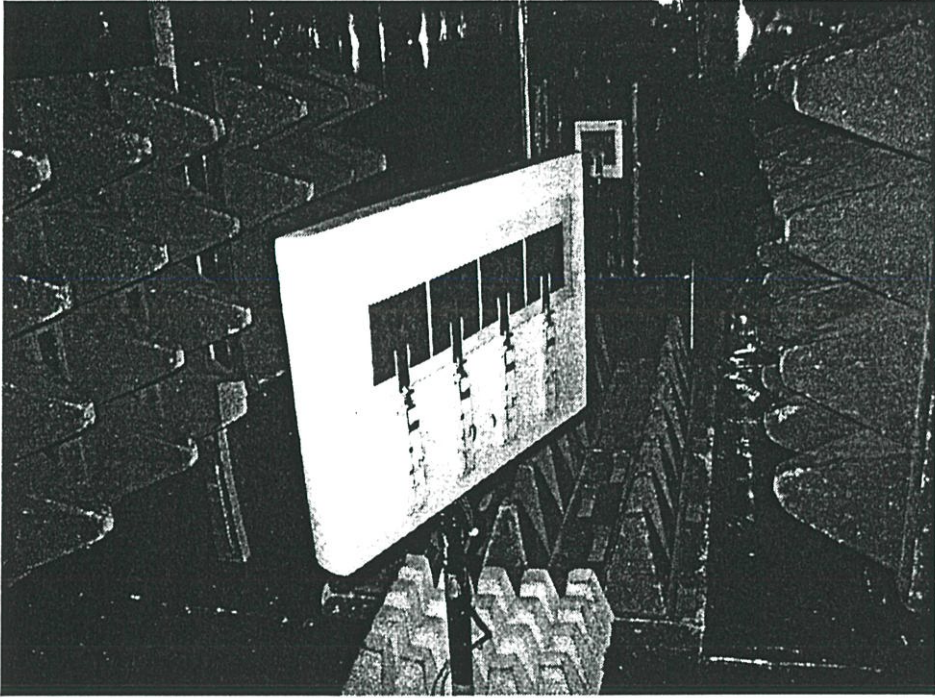
#### 4.3.1 การทดสอบการตอบสนองต่อแรงดันไบอัส

เพื่อการทดสอบประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อการปรับแรงดันไบอัส ซึ่งเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของความถี่และกำลังเอาต์พุต กับแรงดันไบอัสของสายอากาศแอกทีฟ ดังนั้นได้ทดสอบในห้องไม่สะท้อนคลื่น โดยใช้สายอากาศแบบไมโครสตริปที่ทำงานในความถี่ 1.8 GHz ที่สร้างขึ้นเองต่อกับเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) รุ่น E4403B ของบริษัท Agilent และแหล่งจ่ายกำลัง (Power Supply) ซึ่งวิธีการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศไมโครสตริปกับสายอากาศแอกทีฟเท่ากับ 1.5 เมตร

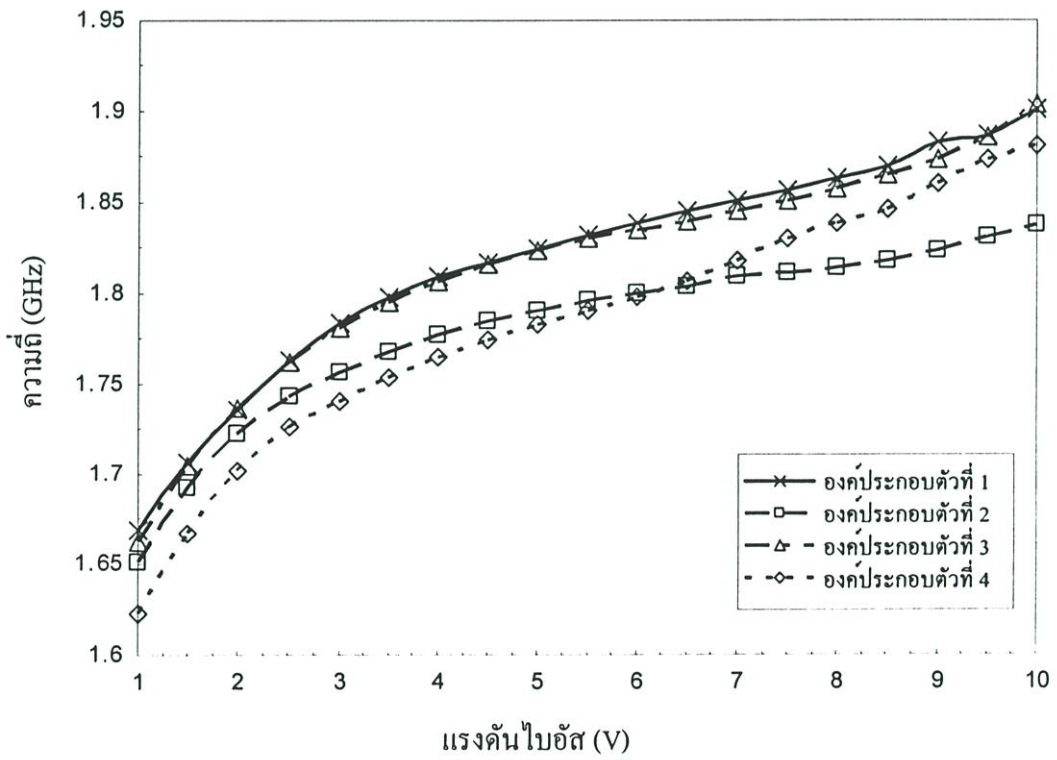


รูปที่ 4.2 การทดสอบการตอบสนองต่อแรงดันไบอัส

ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟได้ค่าความสัมพันธ์สองกรณีคือ ความสัมพันธ์ของแรงดันไบอัสกับความถี่ และแรงดันไบอัสกับกำลังงานเอาต์พุตของสายอากาศ ทดสอบโดยการป้อนแรงดันไบอัสที่ละองค์ประกอบ ผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.4

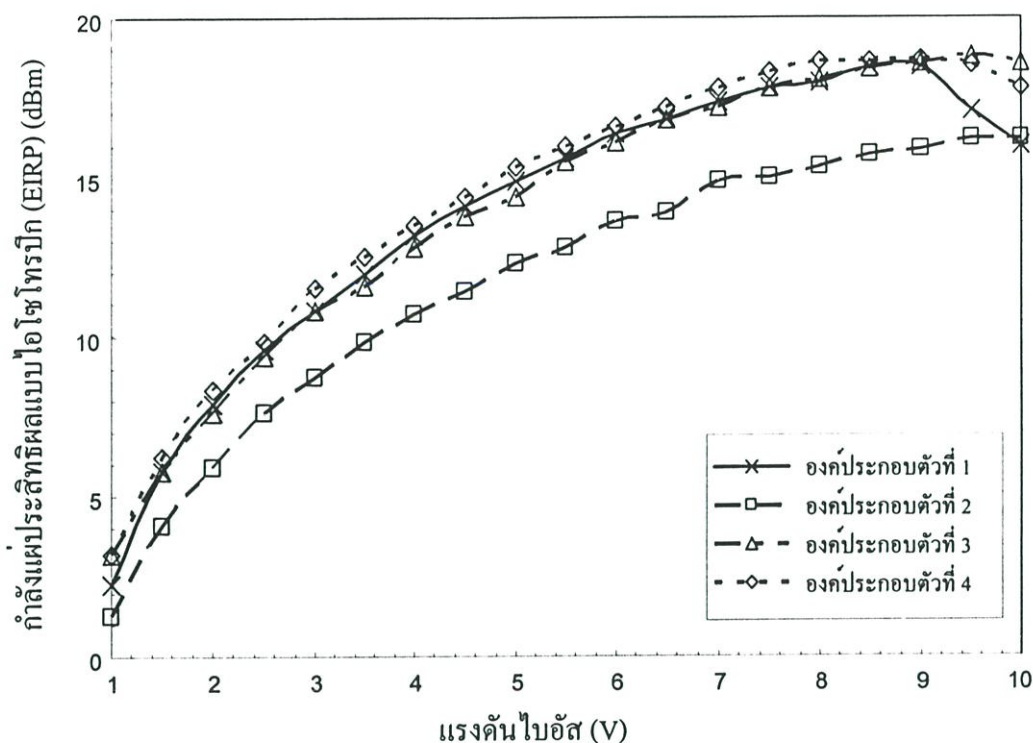


รูปที่ 4.3 การทดสอบการตอบสนองต่อแรงดันไม้อัลสในห้องไม้อัลสที่นอนคลีน



(ก)

รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงจากการปรับแรงดันไม้อัลส



(ข)

## รูปที่ 4.4 (ต่อ)

(ก) ความถี่เทียบกับการปรับแรงดันไบอัสสายอากาศแอกทีฟ

(ข) กำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิกเทียบกับการปรับแรงดันไบอัส

จากการทดสอบโดยเพิ่มแรงดันไบอัสตั้งแต่ 1 จนถึง 10 โวลต์ พบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสให้กับสายอากาศแอกทีฟ ทำให้ความถี่และกำลังงานที่เอาต์พุตเพิ่มขึ้นจนถึงจุดการทำงานที่อิมิตที่แรงดันไบอัส 9 โวลต์ความถี่จะลดลง จากผลที่ได้นี้เป็นที่ยากที่องค์ประกอบสายอากาศชนิดแอกทีฟแต่ละตัวมีการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกัน โดยการทดสอบมีข้อจำกัดคือ จากข้อมูลของอุปกรณ์ (Data Sheet) แรงดันในการไบอัสไม่ควรเกิน 12 โวลต์เนื่องจากการป้องกันการเสียหายของตัวอุปกรณ์ ดังนั้นจึงกำหนดให้แรงดันไบอัสสูงสุดเพียง 10 โวลต์ ในการใช้งานจริงระบบต้องการสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่ความถี่ 1.8 GHz จึงทดสอบ โดยป้อนแรงดันไบอัสดังแสดงในตารางที่ 4.1

ค่ากำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP) ในแต่ละสายอากาศองค์ประกอบที่ได้มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งมีความสำคัญในการนำไปใช้คำนวณความถี่ในแต่ละสายอากาศองค์ประกอบเพื่อการปรับลำคลื่นผ่านเทคนิคอินเจกชันล็อก

ตารางที่ 4.1 การปรับแรงดันไบอัสของสายอากาศแอกทีฟให้ทำงานที่ความถี่ 1.8 GHz

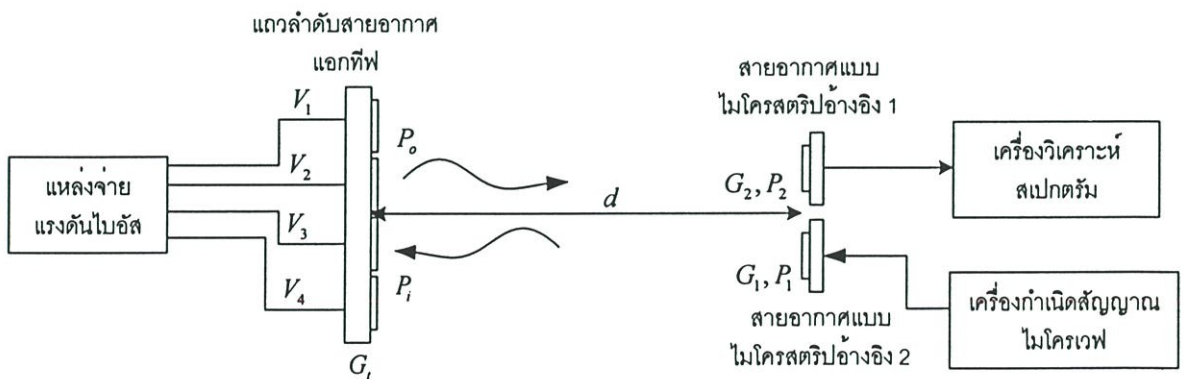
| สายอากาศ<br>องค์ประกอบ                              | ตัวที่ 1 | ตัวที่ 2 | ตัวที่ 3 | ตัวที่ 4 |
|---|----------|----------|----------|----------|
| แรงดันไบอัส (V)                                     | 3.62     | 5.98     | 3.71     | 6.14     |
| กำลังแผ่ประสิทธิผล<br>แบบไอโซโทรปิก<br>(EIRP) (dBm) | 13.09    | 13.59    | 12.78    | 17.2     |

#### 4.3.2 การทดสอบล็อกกิ้งแบนด์วิดท์และค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก

รูปที่ 4.5 แสดงวิธีจัดเตรียมการทดสอบล็อกกิ้งแบนด์วิดท์และค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก ภายนอก ซึ่งค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกนี้หาได้ภายหลังจากการวัดล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ ( $2\Delta f_{\max}$ ) โดยการคำนวณจากสมการ

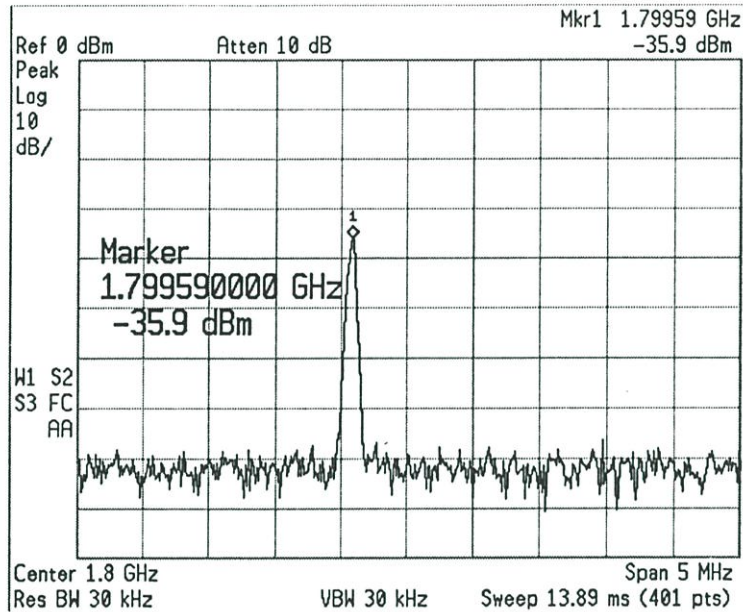
$$Q = \frac{f_0}{\Delta f_{\max}} \sqrt{\frac{P_i}{P_o}} \quad (4.1)$$

กำหนดให้  $Q$  ค่าตัวประกอบภายนอก  $f_0$  เป็นความถี่ที่ใช้งาน  $\Delta f_{\max}$  เป็นค่าของล็อกกิ้งแบนด์วิดท์  $P_i$  เป็นค่ากำลังงานของสัญญาณอินพุต  $P_o$  เป็นค่ากำลังงานของออกซิลเลเตอร์เสรี โดยค่ากำลังงาน  $P_i$  และ  $P_o$  คำนวณได้จากการวัดค่า  $P_1$  และ  $P_2$  โดยการใช้สมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation)

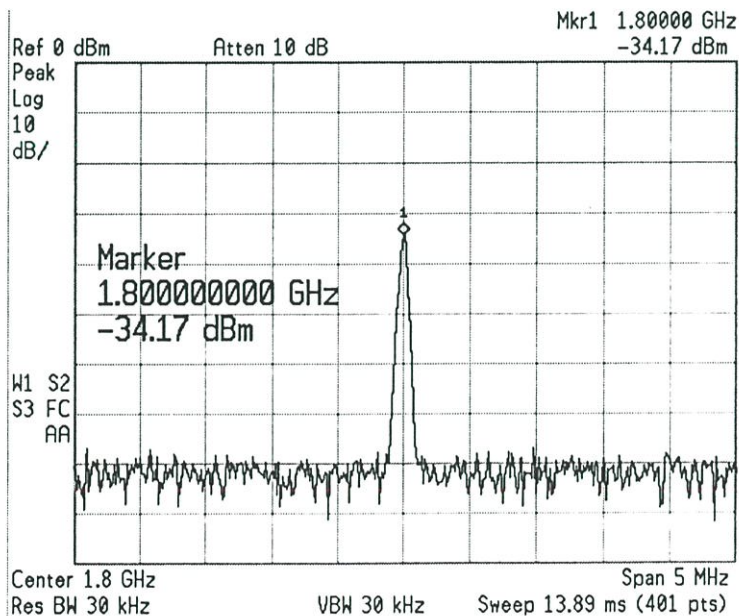


รูปที่ 4.5 การทดสอบล็อกกิ้งแบนด์วิดท์และค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก

จากการเตรียมการทดสอบตามรูปที่ 4.5 โดยให้สายอากาศแบบไมโครสติปอ้างอิงตัวที่สองทำหน้าที่ป้อนสัญญาณอินเจ็ค ส่วนสายอากาศแบบไมโครสติปอ้างอิงตัวที่หนึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณ ในการเกิดปรากฏการณ์อินเจ็คชันล็อก (ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3) โดยแสดงผลที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมดังรูปที่ 4.6

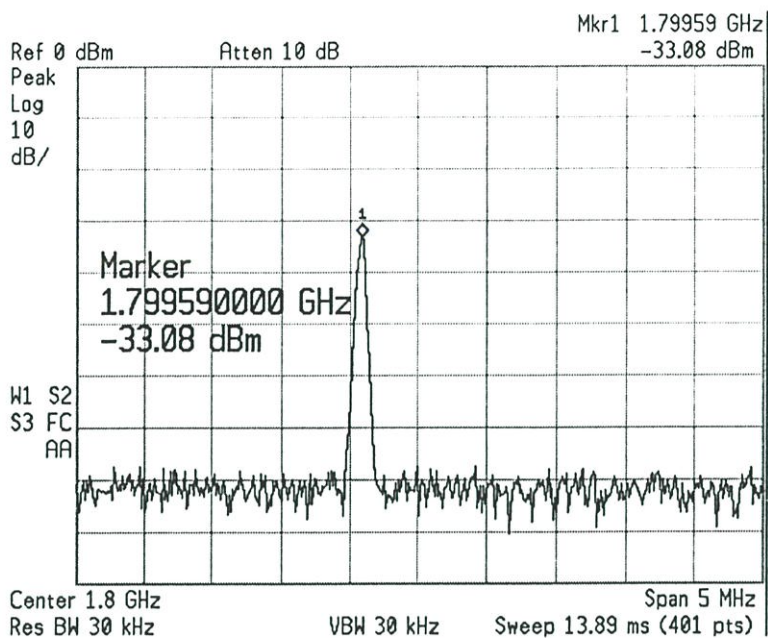


(ก)

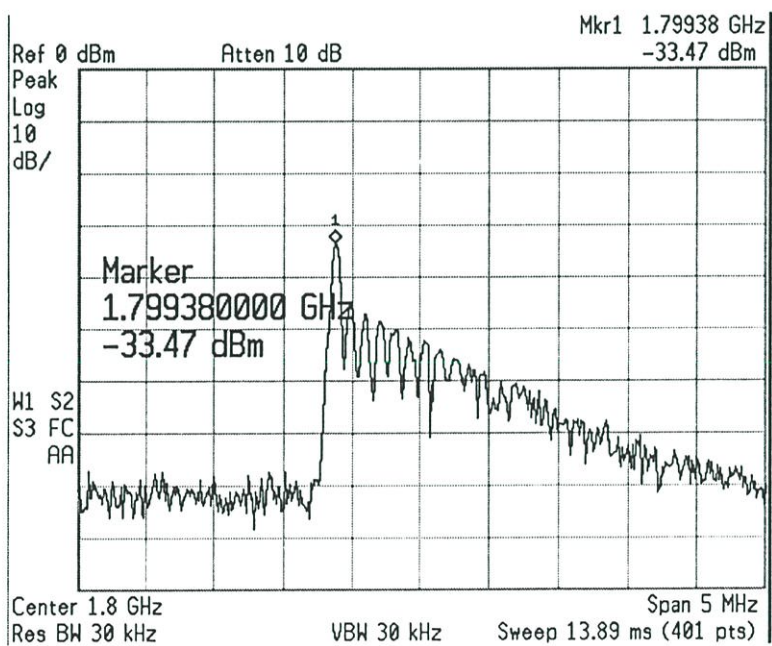


(ข)

รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของสัญญาณ

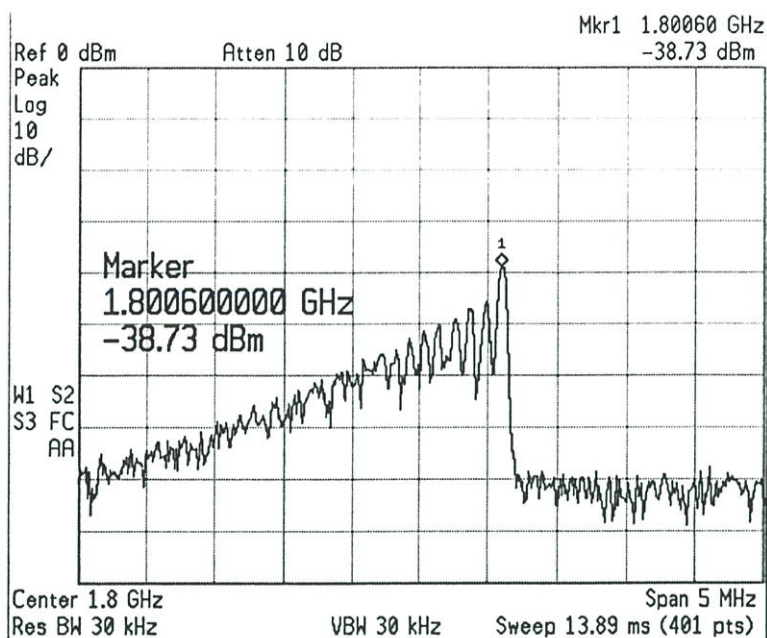


(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 (ต่อ)



(จ)

## รูปที่ 4.6 (ต่อ)

- (ก) สัญญาณอินเจ็ก
- (ข) สัญญาณออสซิลเลเตอร์ความถี่เสรี
- (ค) สัญญาณความถี่เมื่อเกิดการล็อก
- (ง) สัญญาณขณะที่มีการหลุดออกจากการล็อกโดยความถี่อินเจ็กน้อยกว่าความถี่เสรี
- (จ) สัญญาณขณะที่มีการหลุดออกจากการล็อกโดยความถี่อินเจ็กมากกว่าความถี่เสรี

กำหนดให้สัญญาณที่อินเจ็กมีความถี่ 1.79959 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก) สัญญาณออสซิลเลเตอร์เสรีที่ความถี่ 1.8 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข) ทำให้เกิดการล็อกที่ความถี่ 1.79989 GHz ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ค) และเมื่อทำการปรับค่าความถี่ของสัญญาณอินเจ็กให้มีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นจนกระทั่งไม่เกิดการล็อกดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ง) และ 4.6 (จ) ลำดับต่อมาวัดค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ในแต่ละองค์ประกอบแสดงดังตารางที่ 4.2

จากการทดสอบค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์โดยมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากค่าของกำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP) ไม่เท่ากัน ส่วนค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกของสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบแสดงดังตารางที่ 4.3 ซึ่งผลที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์และกำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบล็อกกิ้งแบนด์วิดท์

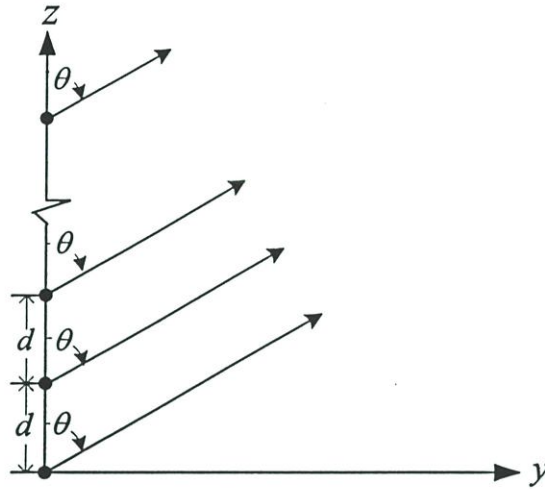
| สายอากาศองค์ประกอบ | ค่าของล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ (MHz) |
|--------------------|--------------------------------|
| องค์ประกอบที่ 1    | 0.75                           |
| องค์ประกอบที่ 2    | 0.52                           |
| องค์ประกอบที่ 3    | 1.18                           |
| องค์ประกอบที่ 4    | 1.4                            |

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกจากการทดสอบล็อกกิ้งแบนด์วิดท์

| สายอากาศองค์ประกอบ | ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอก ( $\times 10^3$ ) |
|--------------------|--|
| องค์ประกอบที่ 1    | 1.876                                      |
| องค์ประกอบที่ 2    | 2.555                                      |
| องค์ประกอบที่ 3    | 1.234                                      |
| องค์ประกอบที่ 4    | 0.621                                      |

ผลที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์และกำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP) จากการสังเกตผลที่ได้ สรุปได้ว่าค่าตัวประกอบคุณภาพจะแปรผกผันกับกำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP) และค่าล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ ซึ่งค่าคุณสมบัติทั้งสามนี้มีความสำคัญในการคำนวณความถี่ของสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบเพื่อการปรับลำคลื่นผ่านเทคนิคอินเจกชันล็อก

#### 4.4 เฟสที่ใช้ในการปรับทิศทางของลำคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 4.7 พิกัดขององค์ประกอบแถวลำดับบนระนาบ  $yz$  วางตามแกน  $z$

แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยพิจารณาให้การแผ่พลังงานขององค์ประกอบแบบอุดมคติวางในแนวเชิงเส้นตามแกน  $z$  แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^N I_i e^{j(i-1)\psi} \quad (4.2)$$

โดยที่  $I_i$  และ  $\psi$  คือค่าแอมพลิจูดและความต่างเฟสในแต่ละสายอากาศองค์ประกอบ โดยมีตำแหน่งเริ่มที่จุดเริ่มต้น (origin) ค่าของเฟสที่เพิ่มขึ้นจากองค์ประกอบก่อนหน้าสามารถคำนวณได้จาก

$$\psi = kd \cos \theta + \beta \quad (4.3)$$

กำหนดให้  $k$ ,  $d$ ,  $\theta$  และ  $\beta$  คือหมายเลขคลื่น ระยะห่างระหว่างสายอากาศองค์ประกอบ ทิศทางการมาของสัญญาณ และเฟสการกระตุ้นเฟสของกระแสนำหน้าที่เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบก่อนหน้าตามลำดับ ซึ่งตัวแปรนี้เป็นตัวแปรสำคัญในการปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟผ่านเทคนิคอินเจกชันล๊อค จากสมการที่ (4.3) สามารถคำนวณค่าของเฟสในแต่ละองค์ประกอบเพื่อปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ ( $\theta_0$ ) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบเพื่อใช้ในการกวาดลำคลื่น

| ทิศทางของลำคลื่นหลัก<br>( $\theta_0$ ) ( $^\circ$ ) | องค์ประกอบตัวที่ 1 | องค์ประกอบตัวที่ 2 | องค์ประกอบตัวที่ 3 | องค์ประกอบตัวที่ 4 |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|   | เฟส ( $^\circ$ )   | เฟส ( $^\circ$ )   | เฟส ( $^\circ$ )   | เฟส ( $^\circ$ )   |
| 60  | 0                  | -90                | -180               | -270               |
| 90  | 0                  | 0                  | 0                  | 0                  |
| 120   | 0                  | 90                 | 180                | 270                |

การปรับความต่างเฟสนี้จะอยู่ในช่วง  $-90^\circ < \psi < 90^\circ$  เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของเทคนิคอินเจกชันล็อกตามสมการที่ (3.11)

#### 4.5 การปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทิฟ

##### 4.5.1 การคำนวณความถี่ที่ใช้ในการปรับลำคลื่น

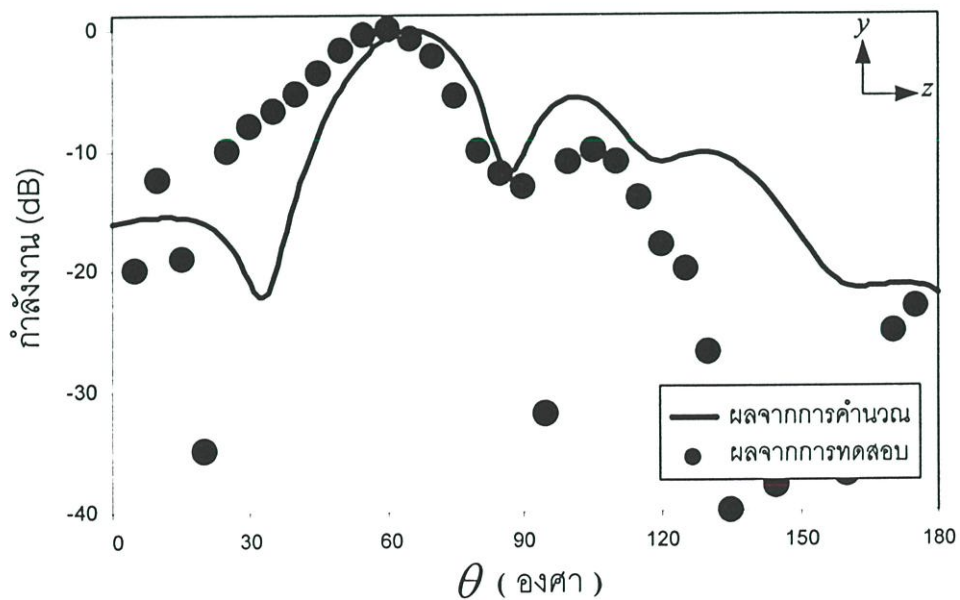
จากการทดสอบค่ากำลังแม่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP) และล็อกกิ่งแบนด์วิดท์แล้วจึงได้ค่าตัวประกอบคุณภาพภายนอกในแต่ละองค์ประกอบ โดยต้องคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อรวม (ตารางที่ 3.1(กล่าวมาแล้วในบทที่ 3)) ในการคำนวณความถี่แต่ละองค์ประกอบผ่านเทคนิคอินเจกชันล็อก เริ่มจากหาค่าความต่างเฟสในแต่ละสายอากาศองค์ประกอบจากการกำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศที่ต้องการจากสมการที่ (4.3) ลำดับต่อมาค่าของความถี่ในแต่ละสายอากาศองค์ประกอบสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.16) ซึ่งค่าความถี่ทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ความถี่ของสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบจากการคำนวณ

| ทิศทางของลำคลื่นหลัก<br>( $\theta_0$ ) ( $^\circ$ ) | ความต่างเฟส $\Delta\phi$<br>( $\theta_i - \theta_j$ ) ( $^\circ$ ) | องค์ประกอบตัวที่ 1 | องค์ประกอบตัวที่ 2 | องค์ประกอบตัวที่ 3 | องค์ประกอบตัวที่ 4 |
|---|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|   |  | ความถี่ (GHz)      | ความถี่ (GHz)      | ความถี่ (GHz)      | ความถี่ (GHz)      |
| 60  | -90  | 1.80015104         | 1.800037515        | 1.80028429         | 1.800148500        |
| 90  | 0  | 1.80002892         | 1.800013779        | 1.80024107         | 1.800015779        |
| 120   | 90   | 1.79989104         | 1.800042720        | 1.79978923         | 1.799909329        |

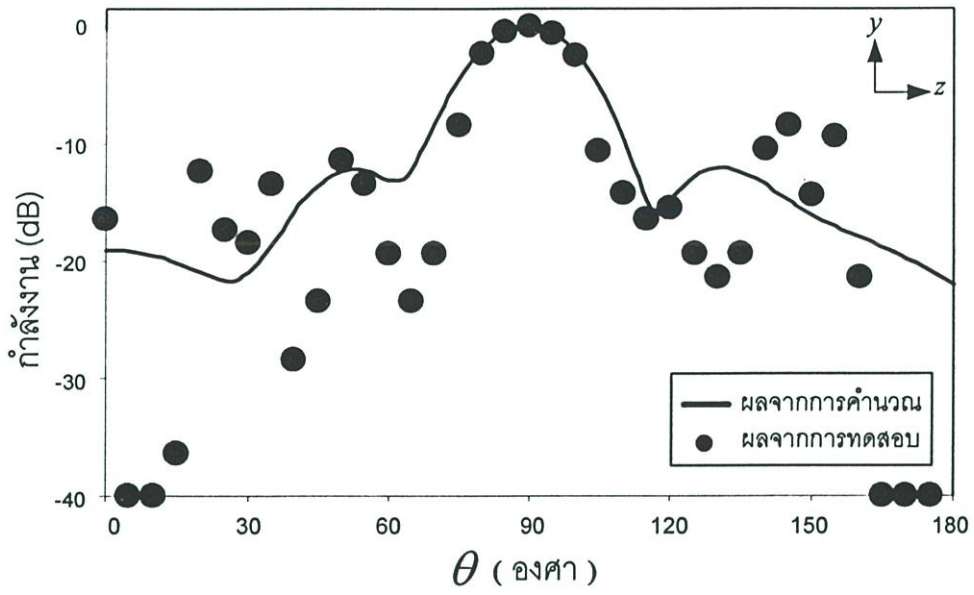
4.5.2 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับชนิดเอกทิฟ  
 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับชนิดเอกทิฟนี้เป็นการทดสอบ  
 การปรับลำคลื่นของสายอากาศซึ่งดำเนินการในห้องไม่สะท้อนคลื่น ระบบการทดสอบ  
 ประกอบด้วย สายอากาศแบบไมโครสตริปอ้างอิงต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมโดย  
 สายอากาศอ้างอิงนี้วางอยู่ห่างจากสายอากาศแกลวลำดับชนิดเอกทิฟ 1.5 เมตร ส่วนสายอากาศ  
 แกลวลำดับชนิดเอกทิฟต่อกับแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งวางอยู่บนแท่นหมุนสายอากาศซึ่งทำงานด้วย  
 ระบบควบคุมระยะไกล (Remote control) การทดสอบโดยหมุนทีละ 5 องศา โดยทำการวัดแบบ  
 รูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแกลวลำดับชนิดเอกทิฟซึ่งใช้เป็นสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์  
 ประจำเครื่องที่ความถี่ 1.8 GHz ของระบบกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงด้วย  
 สายอากาศแกลวลำดับชนิดเอกทิฟ (ดังจะกล่าวต่อไปในบทที่ 5)

ในการทดสอบการปรับลำคลื่นโดยทำการกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักเป็นไปตามตารางที่  
 4.5 ซึ่งความถี่ทั้งหมดล็อกกันอยู่ที่ความถี่ 1.8 GHz โดยแบบรูปการแผ่พลังงานแสดงดังรูปที่ 4.8  
 ซึ่งเป็นผลของการวัดเทียบกับการคำนวณโดยใช้โปรแกรม IE3D จากการกำหนดค่าแอมพลิจูดใน  
 แต่ละองค์ประกอบให้สอดคล้องกับค่ากำลังแผ่ประสิทธิภาพแบบไอโซโทรปิก (EIRP) ตามตารางที่  
 4.1 โดยที่รูป (ก) เป็นการแสดงการปรับลำคลื่นไปที่ตำแหน่งมุม 60 องศา รูป (ข) เป็นการแสดง  
 การปรับลำคลื่นไปที่ตำแหน่งมุม 90 และรูป (ค) เป็นการแสดงการปรับลำคลื่นไปที่ตำแหน่งมุม  
 120 องศา

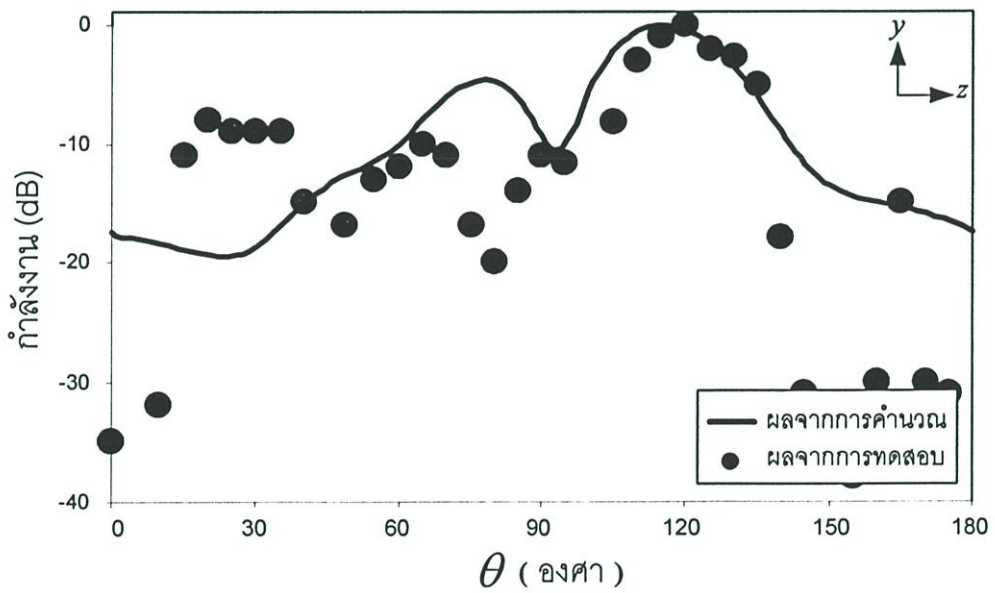


(ก)

รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงาน



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.8 (ต่อ)

- (ก) การปรับลำคลื่นหลักไปที่มุม  $\theta = 60^\circ$
- (ข) การปรับลำคลื่นหลักไปที่มุม  $\theta = 90^\circ$
- (ค) การปรับลำคลื่นหลักไปที่มุม  $\theta = 120^\circ$

จากรูปที่ 4.8 แสดงการปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทิฟด้วยการกำหนดความถี่ของสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบโดยใช้เทคนิคอินเจกชันล็อก แต่แบบรูปการแผ่พลังงานไม่สมมาตรสาเหตุมาจาก ค่าแอมพลิจูดหรือค่ากำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP) ในสายอากาศแต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน และมีข้อจำกัดคือสายอากาศสามารถปรับทิศทางได้ในช่วง 60 ถึง 120 องศา เนื่องจากเทคนิคอินเจกชันล็อกนี้สามารถให้ค่าความต่างเฟสได้ในช่วง  $\pm 90$  องศา (กล่าวมาแล้วในบทที่ 3)

#### 4.6 สรุปผล

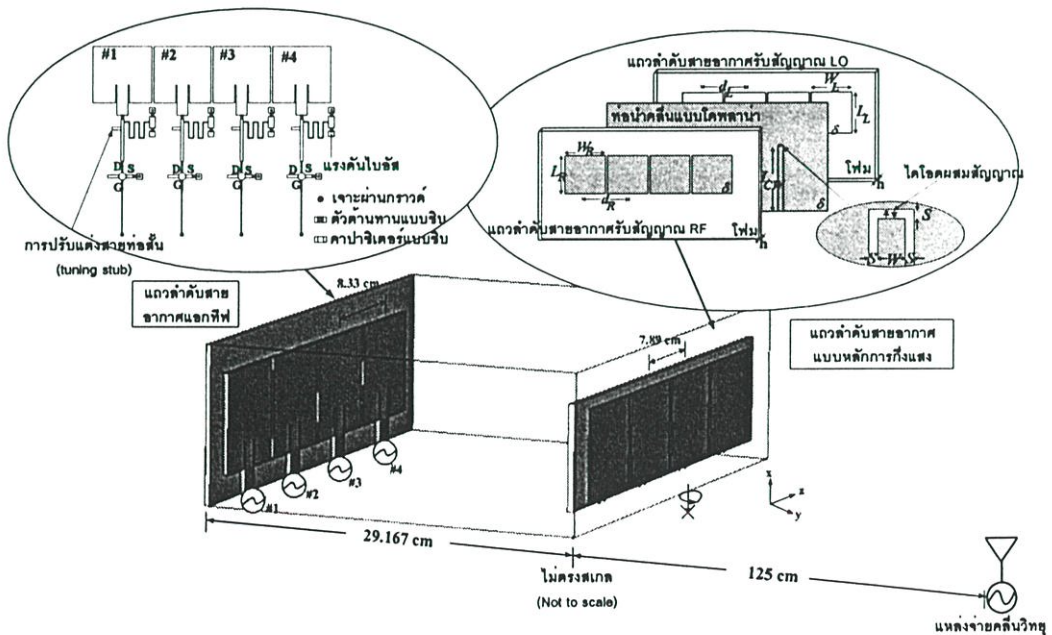
จากการทดสอบสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทิฟโดยใช้หลักการในการปรับลำคลื่นจากเทคนิคอินเจกชันล็อก สามารถปรับลำคลื่นหลักของสายอากาศได้  $\pm 30$  องศาจากแนวเล็ง (boresight) โดยการปรับความถี่ของสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบภายในล็อกกึ่งแบนดิวิดท์ ซึ่งแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ได้ไม่สมมาตร เนื่องจากในสายอากาศแต่ละองค์ประกอบมีค่ากำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิกไม่เท่ากัน ส่วนค่ากำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิกขณะที่เกิดการล็อกที่คำนวณได้จากสมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) มีค่าเท่ากับ 15.64 dBm และมีค่าลดลง  $\pm 0.5$  dB

# การกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ

## 5.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง โดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ซึ่งเป็นการปรับปรุงกระบวนการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงเดิมที่มีอยู่ การทดสอบค่าการสูญเสียจากการแปรผัน (Conversion Loss) รวมทั้งแสดงผลการคำนวณทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ที่มีผลต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง ซึ่งใช้ในการรับสัญญาณความถี่วิทยุ และแสดงผลการทดสอบการปรับลำคลื่น โดยการกำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ

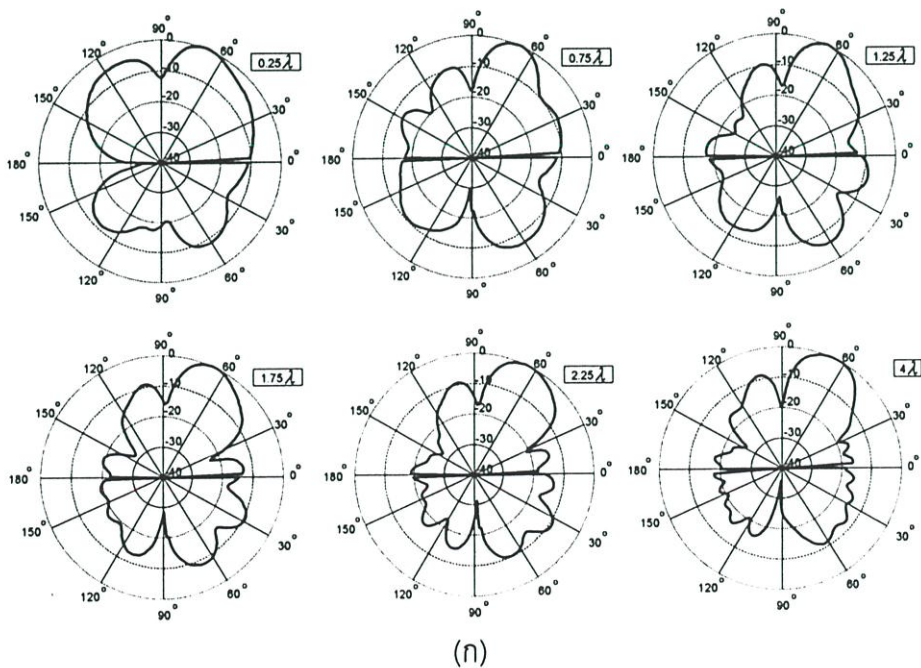
## 5.2 โครงสร้างของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ



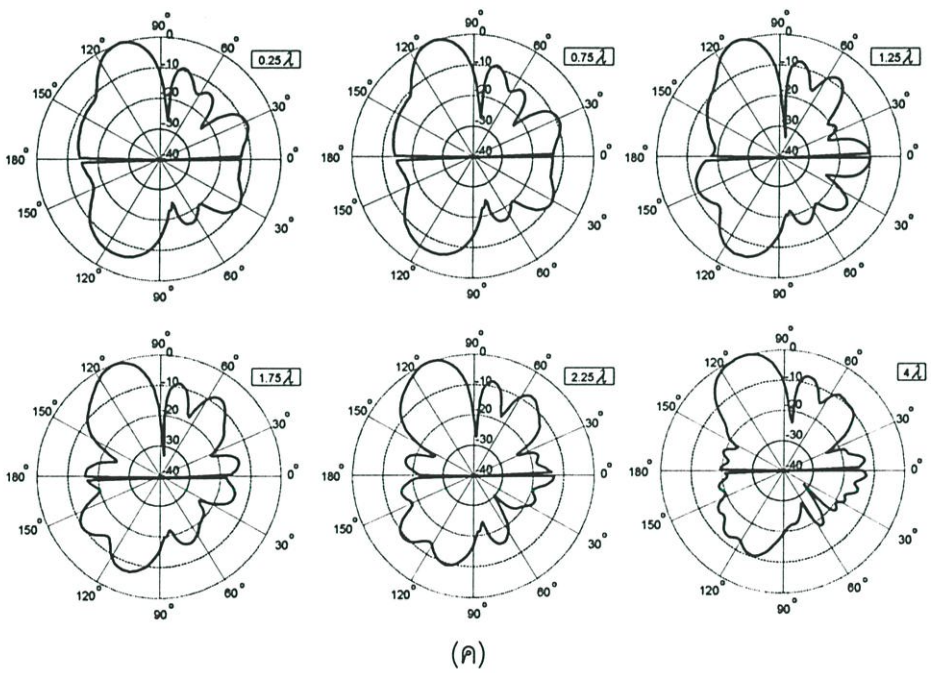
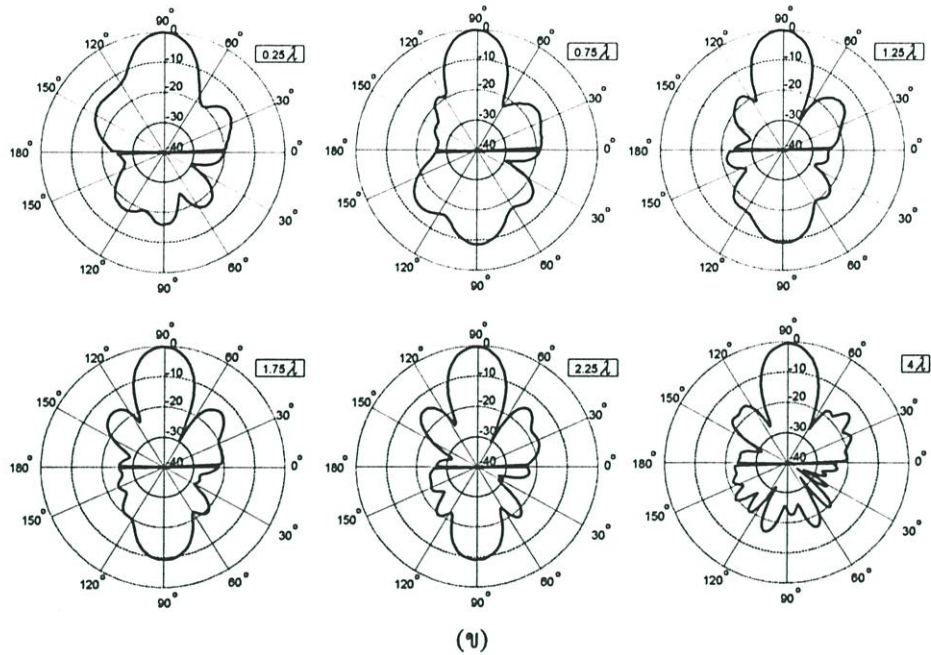
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของระบบการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ

จากการคำนวณและการออกแบบสายอากาศหลักการกึ่งแสงที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เพื่อใช้รับสัญญาณความถี่วิทยุทางด้านหน้า และรับสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องทางด้านหลังของสายอากาศ โดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟทำหน้าที่ป้อนสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง โครงสร้างของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งระยะห่างจากสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟกับสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงมีค่าเท่ากับ  $29.167 \text{ cm}$  หรือ  $1.75 \lambda$  ที่ความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง ค่าดังกล่าวนี้ได้จากการวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงกับสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟเพื่อหาระยะที่เหมาะสมในการสร้างต้นแบบ โดยคำนวณจากโปรแกรม IE3D ซึ่งเป็นการจำลองแบบของสายอากาศในการปรับลำคลื่นที่ได้จากการกำหนดค่าความต่างเฟสของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่  $-90^\circ$  และ  $+90^\circ$  องศา และวิเคราะห์ที่ระยะห่าง  $0.25 \lambda$   $0.75 \lambda$   $1.25 \lambda$   $1.75 \lambda$   $2.25 \lambda$  และ  $4 \lambda$  ผลการวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานแสดงดังรูปที่ 5.2

จากรูปที่ 5.2 สังเกตได้ว่าเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศเพิ่มขึ้นทำให้ค่าของพู่หลัง (back lobe) ของแบบรูปการแผ่กำลังงานของสายอากาศ ลดลงจนค่าที่ดีที่สุดอยู่ที่ระยะ  $4 \lambda$  หรือระยะของแบบรูปสนามระยะไกล (far-field pattern) แต่ในการใช้งานจริงต้องการขนาดสายอากาศที่เล็กและคงสภาพการใช้งานได้ดี ผู้วิจัยจึงเลือกระยะห่างที่  $1.75 \lambda$  ซึ่งเป็นระยะที่เหมาะสมในการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยระบบการกวาดลำคลื่นโดยใช้สายอากาศแถวลำดับแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟต้นแบบแสดงได้ดังรูปที่ 5.3

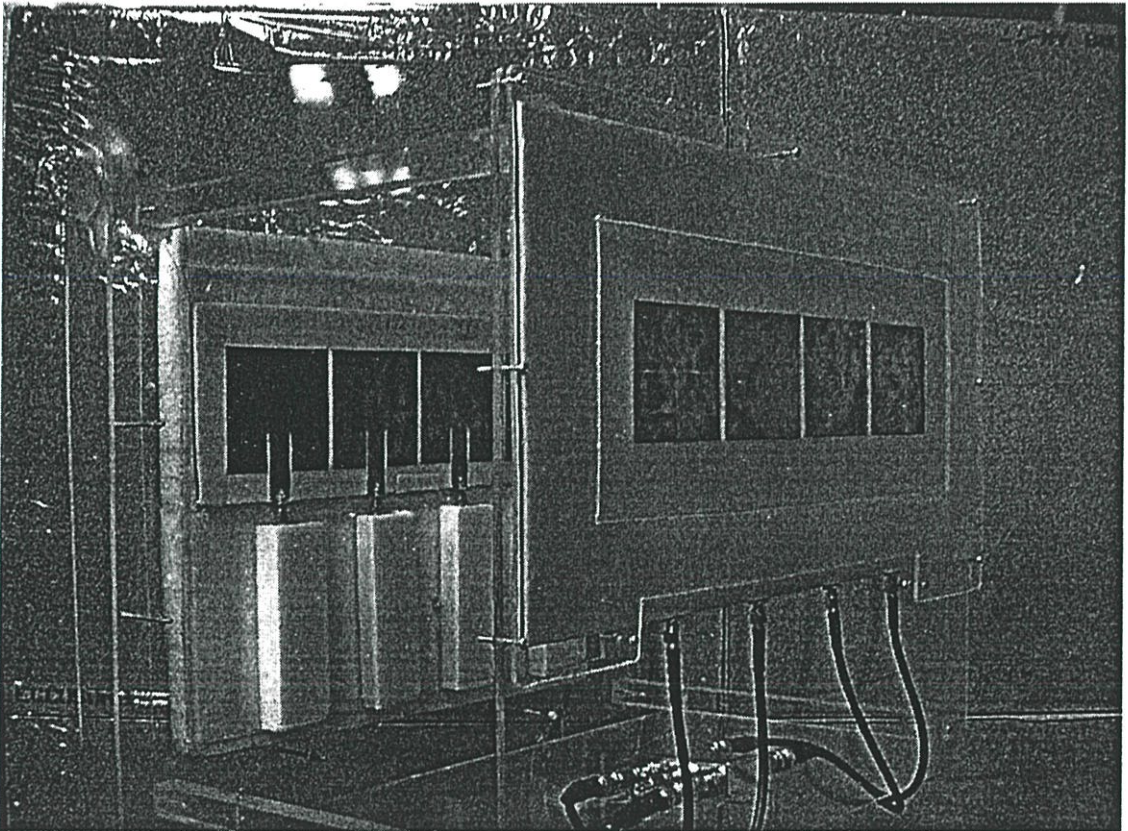


รูปที่ 5.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศโดยการเปลี่ยนระยะห่างที่  $0.25 \lambda$   $0.75 \lambda$   $1.25 \lambda$   $1.75 \lambda$   $2.25 \lambda$  และ  $4 \lambda$



รูปที่ 5.2 (ต่อ)

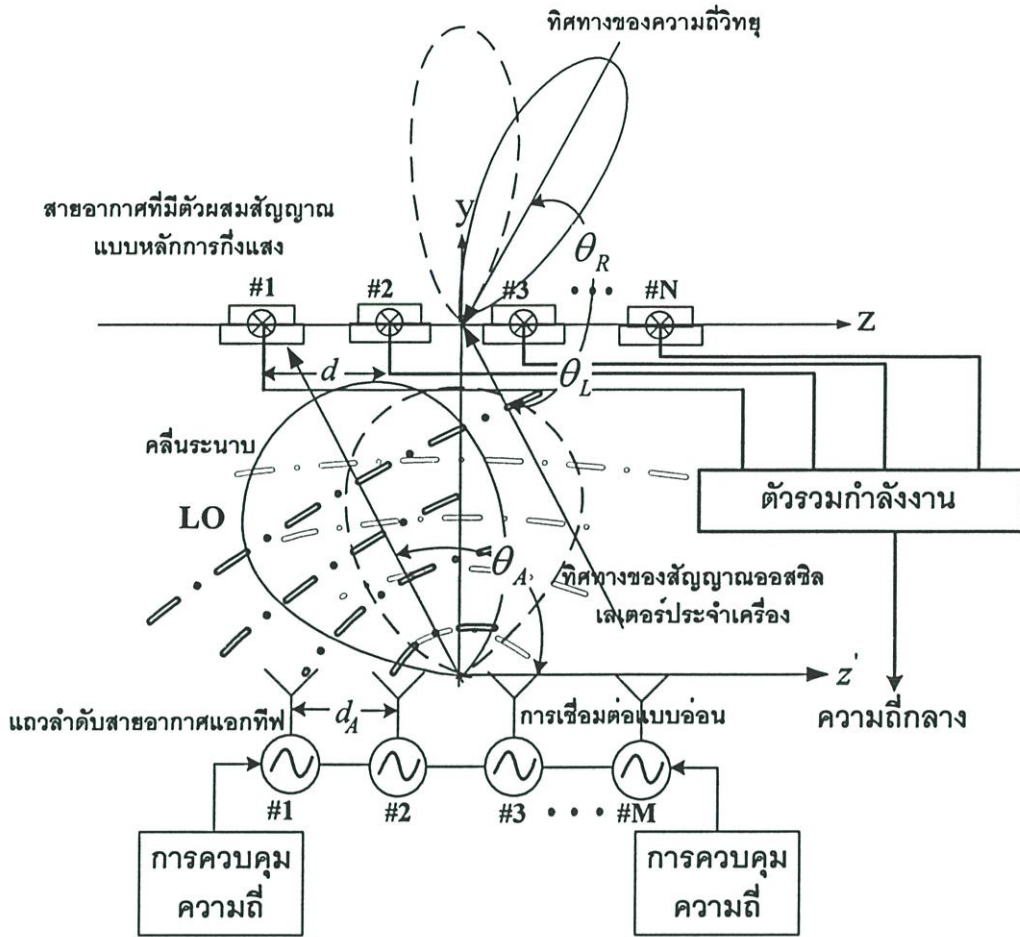
- (ก) การปรับลำคลื่นหลักไปที่มุม  $\theta = 65^\circ$
- (ข) การปรับลำคลื่นหลักไปที่มุม  $\theta = 90^\circ$
- (ค) การปรับลำคลื่นหลักไปที่มุม  $\theta = 115^\circ$



รูปที่ 5.3 ต้นแบบของระบบการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศ  
แถวลำดับชนิดแอกทีฟ

### 5.3 หลักการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศ แถวลำดับชนิดแอกทีฟ

จากทฤษฎีการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง (ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2) ทำได้โดยการเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบของสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง ( $\theta_L$ ) จากการเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศที่ใช้ส่งสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง (LO) ด้วยระบบการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ซึ่งมีข้อเสียในการตอบสนองจากการควบคุม ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพในการปรับลำคลื่น โดยการใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ (ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และบทที่ 4) แทนการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ โดยหลักการปรับลำคลื่นนี้ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 หลักการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ

จากรูปแสดงความสัมพันธ์ของทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟซึ่งมีผลกับมุมตกกระทบของสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง ( $\theta_L$ ) สามารถแสดงได้จากสมการ

$$\theta_L + \theta_A = 180^\circ \quad (5.1)$$

ดังนั้นค่าของมุมตกกระทบของสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ ( $\theta_L$ ) หาได้จาก

$$\theta_L = 180^\circ - \theta_A \quad (5.2)$$

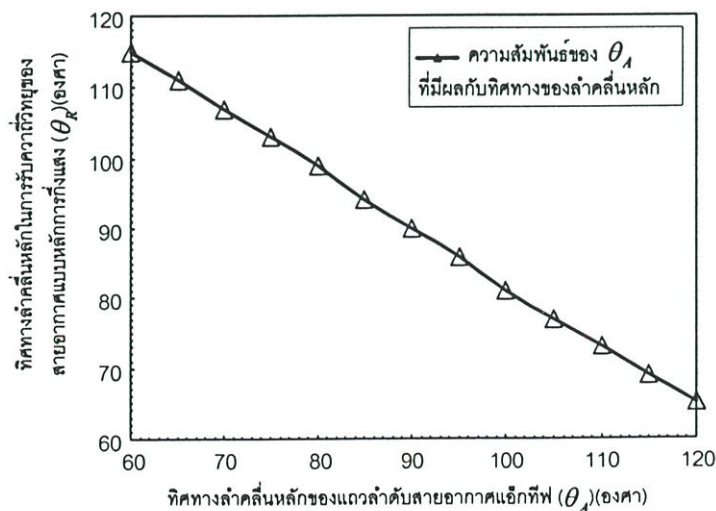
โดยที่  $\theta_A$  คือทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ จากความสัมพันธ์นี้ จึงแทนลงในสมการที่ (2.19) (ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2) ซึ่งค่าตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor:  $AF$ ) เปลี่ยนรูปเป็น

$$AF = \sum_{i=1}^N e^{j(i-1)(k_R d_R \cos \theta_R - k_L d_L \cos(180^\circ - \theta_A))} \quad (5.3)$$

ซึ่งแบบรูปแม่พลังงานของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงที่ใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟทำหน้าที่ป้อนสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง สามารถคำนวณได้โดยการนำสมการที่ (5.3) ไปคูณกับแบบรูปการแม่พลังงานของสายอากาศองค์ประกอบ (สมการที่ (2.17)) โดยทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ( $\theta_A$ ) หาได้จาก

$$\theta_A = \cos^{-1} \left[ \frac{\theta_i - \theta_j}{k_A d_A} \right] \quad (5.4)$$

โดยที่ค่า  $\theta_i - \theta_j$  คือค่าความต่างเฟสที่ใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ของสายอากาศในแต่ละองค์ประกอบผ่านเทคนิคอินเจกชันล็อกดังสมการที่ (3.16) ส่วนค่า  $k_A$  และ  $d_A$  คือหมายเลขคลื่นและระยะห่างระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ซึ่งความสัมพันธ์ของทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ( $\theta_A$ ) ที่มีผลกับทิศทางของการรับสัญญาณความถี่วิทยุแสดงได้ดังรูปที่ 5.5

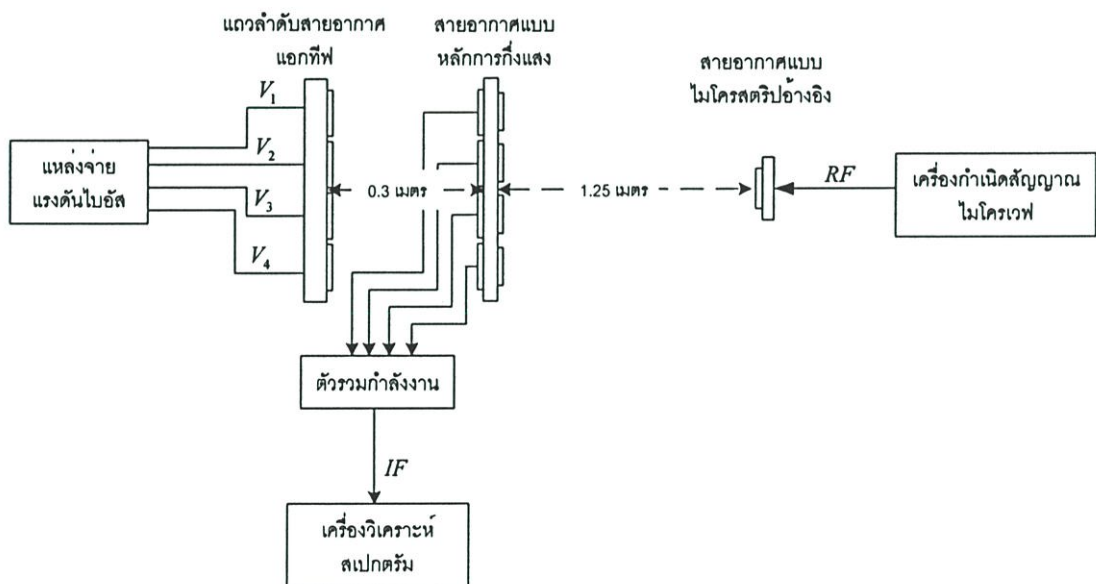


รูปที่ 5.5 แสดงผลการคำนวณทิศทางของลำคลื่นหลักในการรับสัญญาณความถี่วิทยุ ( $\theta_R$ ) โดยการกำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ( $\theta_A$ )

## 5.4 การทดสอบสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ

### 5.4.1 การทดสอบการปรับลำคลื่น

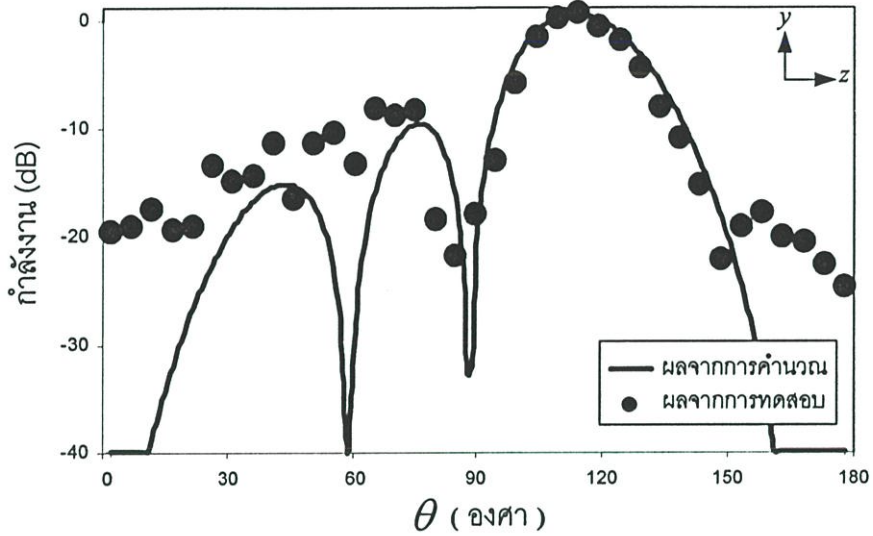
การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟนี้เป็นการทดสอบการปรับลำคลื่นของสายอากาศซึ่งดำเนินการในห้องไม่สะท้อนคลื่น ซึ่งวิธีการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 โดยระบบการทดสอบประกอบด้วย สายอากาศแบบไมโครสตริปอ้างอิงต่อไปยังเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ (Signal Generator) ซึ่งใช้เป็นแหล่งจ่ายคลื่นวิทยุ (RF Source) ที่ความถี่ 1.9 GHz สายอากาศอ้างอิงนี้วางอยู่ทางด้านหน้า ห่างจากสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง 1.25 เมตร ส่วนสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันโดยวางทางด้านหลัง ห่างจากสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง 0.3 เมตร ทั้งสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงและสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟวางอยู่บนแท่นหมุน สายอากาศซึ่งทำงานด้วยระบบควบคุมระยะไกล (Remote control) การทดสอบโดยหมุนที่ละ 5 องศา โดยทำการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงที่สัญญาณความถี่กลาง (100 MHz) ผ่านตัวรวมพลังงานซึ่งแสดงผลที่เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม



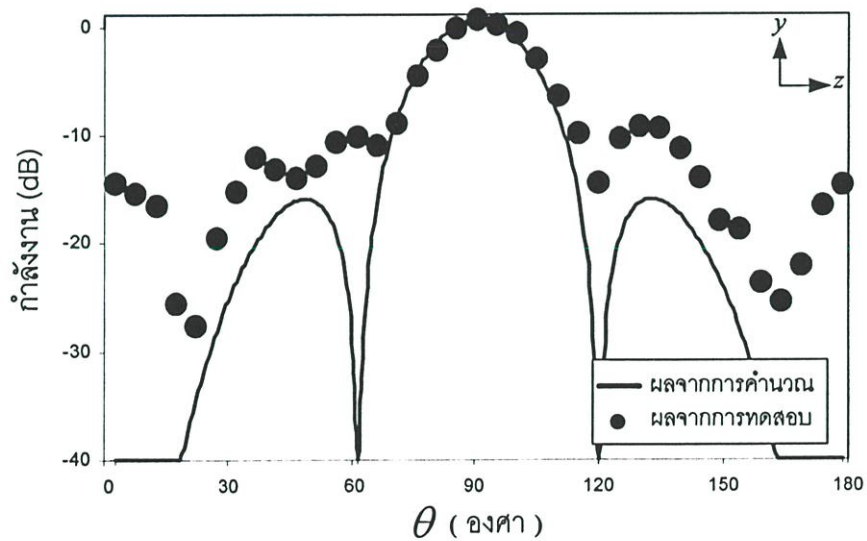
รูปที่ 5.6 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 100 MHz

ในการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยปรับความถี่ตามตารางที่ 4.5 (ในบทที่ 4) ซึ่งเป็นการกำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ( $\theta_A$ ) ในมุม 60 90 และ 120 องศา ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.7 โดยเป็นผลการทดสอบ

แอกทีฟ ( $\theta_A$ ) ในมุม 60 90 และ 120 องศา ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.7 โดยเป็นผลการทดสอบ เทียบกับผลจากการคำนวณ โดยใช้ค่าตัวประกอบแอมพลิจูดตามสมการที่ (5.2) คู่กับแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศองค์ประกอบ (สมการที่ (2.17) ในบทที่ 2)

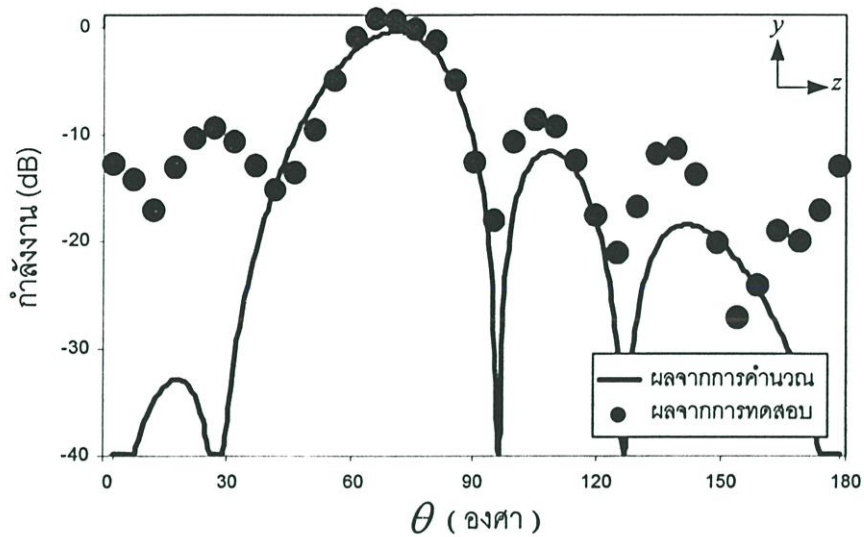


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงที่ความถี่ 100 MHz



(ค)

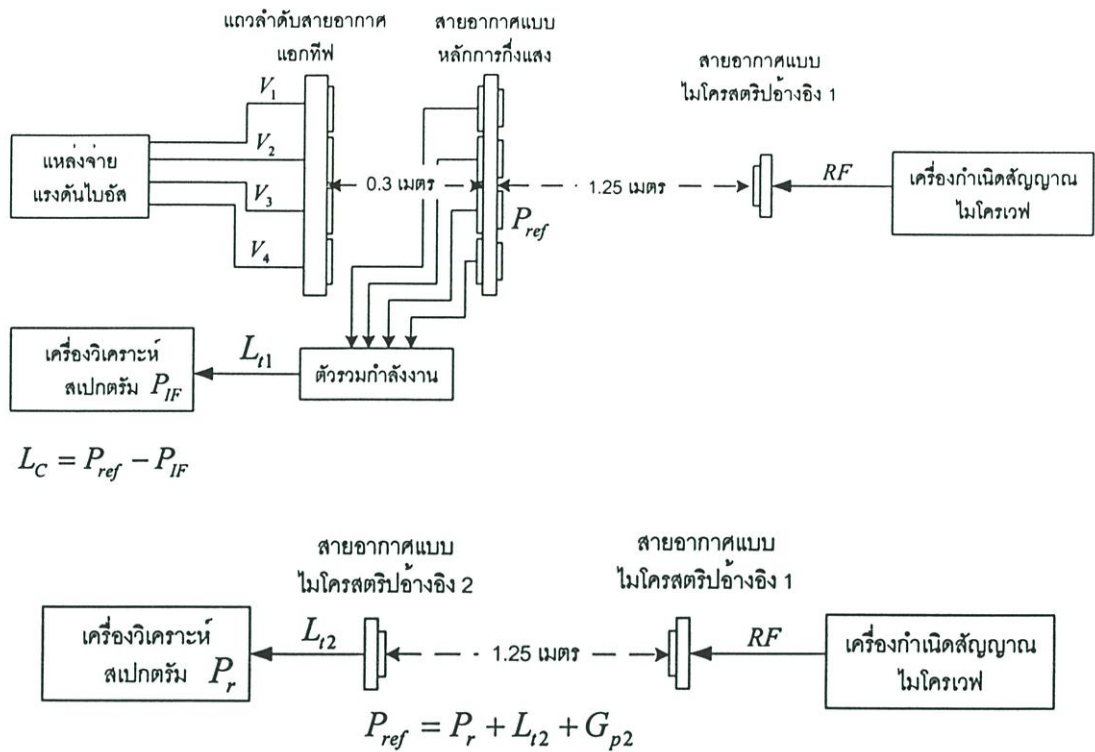
### รูปที่ 5.7 (ต่อ)

- (ก) กำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแฉกลำดับชนิดเอกที่ฟ  $(\theta_A)$  ที่ 60 องศา
- (ข) กำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแฉกลำดับชนิดเอกที่ฟ  $(\theta_A)$  ที่ 90 องศา
- (ค) กำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแฉกลำดับชนิดเอกที่ฟ  $(\theta_A)$  ที่ 120 องศา

จากการสังเกตจากรูป 5.7 (ก) กำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแฉกลำดับชนิดเอกที่ฟ  $(\theta_A)$  ที่ 60 องศา ลำคลื่นหลักของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงมีค่ามากที่สุดที่ 115 องศา ส่วนรูป 5.7 (ข) กำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแฉกลำดับชนิดเอกที่ฟ  $(\theta_A)$  ที่ 90 องศา ลำคลื่นหลักของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงมีค่ามากที่สุดที่ 90 องศา และรูป 5.7 (ค) กำหนดทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศแฉกลำดับชนิดเอกที่ฟ  $(\theta_A)$  ที่ 120 องศา ลำคลื่นหลักของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงมีค่ามากที่สุดที่ 65 องศา ผลที่ได้นี้แสดงว่าสามารถควบคุมการกวาดลำคลื่นโดยใช้สายอากาศแฉกลำดับชนิดเอกที่ฟผ่านเทคนิคอินเจกชันล็อกทิศทางลำคลื่นหลักของสายอากาศที่ได้มีความสอดคล้องจากผลการคำนวณในรูปที่ 5.5

## 5.5 การทดสอบการสูญเสียจากการแปลงผัน

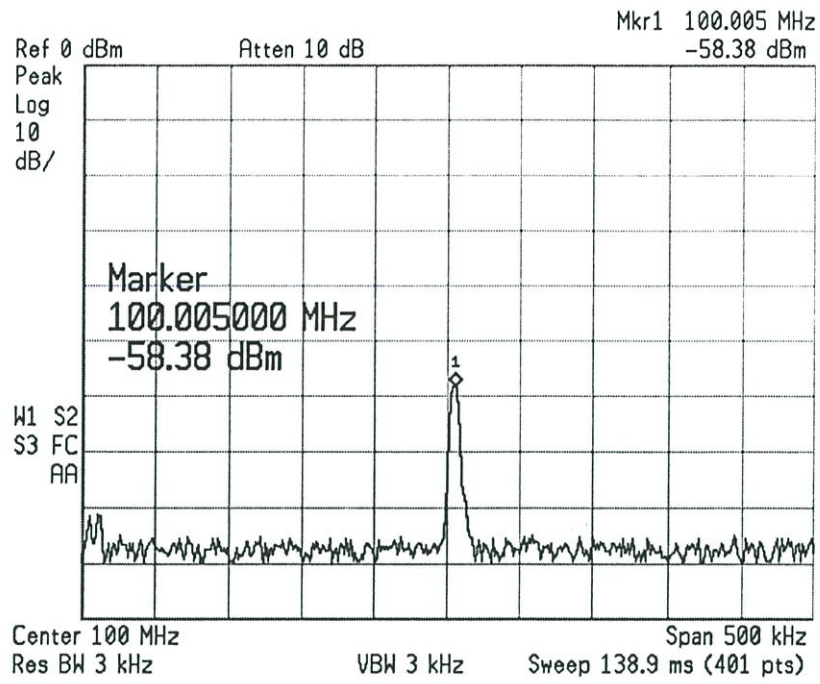
จากการทดสอบการปรับลำคลื่นในการรับสัญญาณความถี่วิทยุ ต่อมาได้ทำการวัดค่าการสูญเสียจากการแปลงผัน (Conversion Loss) ซึ่งวิธีการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



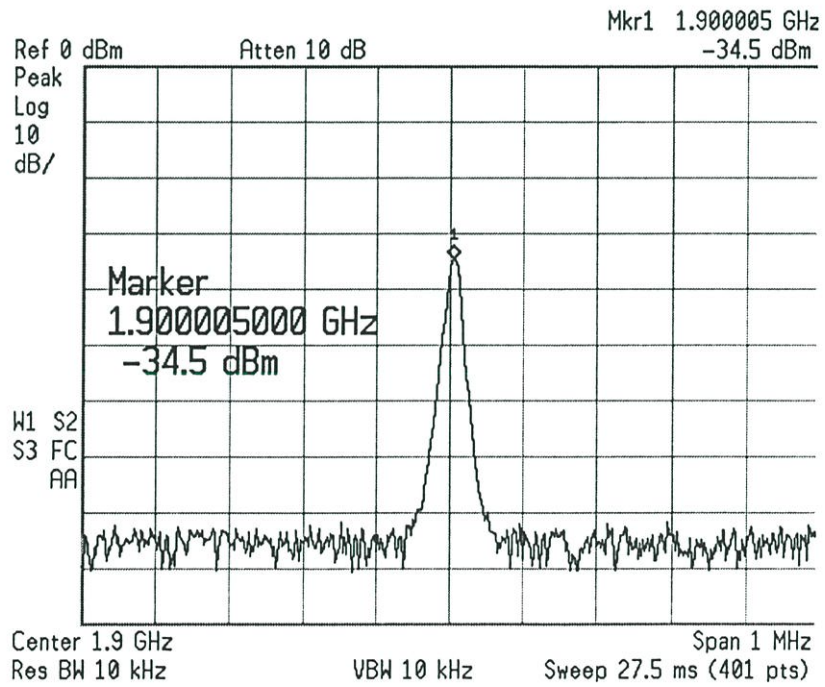
รูปที่ 5.8 การทดสอบการสูญเสียจากการแปลงผันของสายอากาศแบบหลักกิ่งแสงที่ปรับลำคลื่น สายอากาศแถวลำดับชนิดเอกทีฟ

จากรูปการทดสอบค่ากำลังงานของความถี่วิทยุที่รับได้ ( $P_r$ ) จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมที่ความถี่วิทยุ (1.9 GHz) ได้แสดงดังรูปที่ 5.8 มีค่าเท่ากับ -34.5 dBm แต่กำลังงานที่วัดได้นี้ไม่ใช่ค่ากำลังงานจริงที่รับได้ ณ ตำแหน่งสายอากาศ ( $P_{ref}$ ) ดังนั้นจึงหาค่า  $P_{ref}$  ได้จากการชดเชยการสูญเสียในสาย ( $L_{t2}$ ) และอัตราขยายของสายอากาศอ้างอิง 2 ( $G_{p2}$ ) ซึ่งค่า  $P_{ref}$  ที่คำนวณได้คือ -36.546 dBm

ส่วนค่ากำลังงานของสัญญาณความถี่กลาง  $P_{IF}$  (100 MHz) ที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 5.8 (ข) มีค่าเท่ากับ -58.38 dBm แต่ค่าที่แท้จริงต้องชดเชยค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณ ( $L_{t1}$ ) ด้วย ดังนั้นค่า  $P_{IF}$  ที่แท้จริงมีค่า -49.02 dBm ทำให้สามารถหาค่าการสูญเสียจากการแปรผันของสายอากาศโดยมีค่าเท่ากับ 12.474 dB ซึ่งเมื่อปรับลำคลื่นของสายอากาศไปที่มุม 65 และ 115 องศา ค่าการสูญเสียจากการแปรผันนี้มีค่า 13.174 และ 12.674 dB ตามลำดับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.9 สัญญาณจากจอแสดงผลเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม

(ก) สัญญาณความถี่กลาง

(ข) สัญญาณความถี่วิทยุ

## 5.6 สรุป

จากการทดสอบการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถว ลำดับชนิดแอกทีฟต้นแบบนี้ สามารถปรับทิศทางของลำคลื่นหลักได้ในระนาบ  $yz$  ( $\phi = 90^\circ$ ) โดยทิศทางของลำคลื่นหลักสามารถปรับได้ในช่วง 65 ถึง 115 องศาโดยมีค่าการสูญเสียจากการแปลงผัน 12.474 dB แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟในการปรับปรุงระบบการกวาดลำคลื่นที่ใช้การเคลื่อนที่สายอากาศส่งสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องจากระบบมอเตอร์ได้ แต่การปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงนี้มีข้อจำกัดที่มุมในการปรับลำคลื่นขึ้นอยู่กับความสามารถในการปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ

## สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเทคนิคการกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงแบบใหม่โดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทิฟ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมลำคลื่นหลักของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสง ซึ่งโดยปกติข้อดีของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงคือ ลดการสูญเสียของวงจรรวมที่สูงหรือตัวเลื่อนเฟสที่ใช้ในระบบการกวาดลำคลื่นทั่วไป เนื่องจากสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงทำหน้าที่คล้ายตัวผสมสัญญาณ โดยการทำงานของสายอากาศชนิดนี้จะทำการเปลี่ยนสัญญาณความถี่วิทยุเป็นสัญญาณความถี่กลางทันทีเมื่อได้รับสัญญาณความถี่วิทยุ แต่มีข้อเสียตรงที่การปรับลำคลื่นทำได้โดยการเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศที่ใช้ป้อนสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ การเปลี่ยนมุมตกกระทบของสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่องที่รับได้ โดยการปรับทิศทางหรือมุมตกกระทบของสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง จากเดิมนั้นใช้ระบบขับเคลื่อนทางกล (มอเตอร์) ทำให้มีการตอบสนองต่อทิศทางในการปรับลำคลื่นที่ช้า ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะแก้ไขและปรับปรุงระบบการกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงนี้ใหม่ เพื่อให้มีการตอบสนองที่ดีขึ้นจึงเป็นจุดมุ่งหมายของงานวิจัยชิ้นนี้

การดำเนินงานเริ่มจากการศึกษาทฤษฎีของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงซึ่งได้กล่าวในบทที่ 2 รวมไปถึงการวิเคราะห์ตัวแปรที่สามารถควบคุมลำคลื่นของสายอากาศได้ และวิเคราะห์ความสามารถในการปรับลำคลื่นของสายอากาศชนิดนี้ ในการวิเคราะห์ทั้งการใช้วิธีการคูณของแบบรูป (Pattern multiplication) และโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า (NEC) ซึ่งความสามารถในการปรับลำคลื่นจะอยู่ในช่วง 38 ถึง 142 องศาในระนาบ yz ต่อมาจึงออกแบบสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงสี่องค์ประกอบโดยวางในแนวเชิงเส้น ซึ่งแต่ละสายอากาศองค์ประกอบแบ่งออกเป็นสามชั้น (Layer) ชั้นบนสุดเป็นตัวนำออกแบบให้ทำงานที่ความถี่วิทยุ (1.9 GHz) วางบนวัสดุฐานรอง (Substrate) โดยใช้โฟม ส่วนชั้นที่สองออกแบบเป็นระบบป้อนสัญญาณโดยใช้ท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า (Coplanar Waveguide) วางบนวัสดุฐานรอง (Substrate) โดยใช้โฟม ซึ่งส่วนปลายของท่อนำคลื่นได้ต่อไดโอดชอตตี้-แบร์ริเออร์ (Schottky-barrier diode) ทำหน้าที่เป็นตัวผสมสัญญาณความถี่วิทยุและสัญญาณความถี่ออสซิลเลเตอร์ที่รับได้แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณความถี่กลาง ชั้นสุดท้ายเป็นแผ่นตัวนำออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ออสซิลเลเตอร์ประจำเครื่อง

(1.8 GHz) การออกแบบและผลการทดสอบได้อธิบายในบทที่สอง เมื่อทราบถึงข้อจำกัดและขนาดของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงต้นแบบแล้ว ต่อมาจึงได้ศึกษาทฤษฎีการปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมต่อ (ในบทที่ 3) โดยการใช้เทคนิคอินเจกชันล็อกและวิเคราะห์ข้อจำกัดและเงื่อนไขการเกิดปรากฏการณ์อินเจกชันล็อก จากการสืบค้นความต่างเฟสในแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศอยู่ในช่วง  $\pm 90$  องศาเทียบกับตัวก่อนหน้า ทำให้การปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟทำได้เพียง  $\pm 30$  องศาจากแนวเล็ง ต่อมาได้ออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์และสร้างสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟขึ้น เพื่อควบคุมทิศทางของสัญญาณออสซิลเลเตอร์ประจำตำแหน่งการเลื่อนตำแหน่งของสายอากาศ ต่อมาในบทที่ 4 ได้ทดสอบสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟที่มีการเชื่อมต่อแบบอ่อนซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้คือ

1. สามารถปรับความถี่ได้ตั้งแต่ 1.63 ถึง 1.9 GHz ในแต่ละสายองค์ประกอบโดยการปรับแรงดันไบอัสตั้งแต่ 1 ถึง 10 โวลต์ และกำลังแผ่ประสิทธิผลแบบไอโซโทรปิก (EIRP) ในแต่ละสายอากาศองค์ประกอบอยู่ในช่วง 1 ถึง 19 dBm ค่าทั้งหมดนี้แปรผันตามแรงดันไบอัส
2. ค่าของล็อกกิ้งแบนด์วิดท์ขององค์ประกอบแรกถึงสุดท้ายคือ 0.75, 0.52, 1.18 และ 1.4 MHz ตามลำดับ
3. ค่าของตัวประกอบคุณภาพภายนอกขององค์ประกอบแรกถึงสุดท้ายคือ 1,876, 2,555, 1,234 และ 621 ตามลำดับ
4. สามารถปรับลำคลื่นในช่วง  $\pm 30$  องศาจากแนวเล็งโดยการปรับความถี่ของแต่ละสายอากาศองค์ประกอบ

เมื่อผ่านขั้นตอนการสร้างสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ต่อมาได้ประกอบระบบการกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟขึ้น รวมทั้งวิเคราะห์ระยะห่างระหว่างสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงกับสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟให้เหมาะสมต่อการสร้างสายอากาศต้นแบบซึ่งรวมอยู่ในบทที่ 5 และได้อธิบายหลักการในการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ รวมทั้งการวิเคราะห์ความสามารถในการปรับลำคลื่น ซึ่งการปรับลำคลื่นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ขั้นตอนต่อมาจึงทดสอบสายอากาศโดยมีคุณสมบัติดังนี้

1. สามารถปรับลำคลื่นหลักตั้งแต่ 65 ถึง 115 องศาในระนาบ  $yz$  โดยการปรับความถี่ในแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ
2. การสูญเสียจากการแปรผันของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 12.474 dB และเมื่อปรับลำคลื่นของสายอากาศไปที่มุม 65 และ 115 องศา ค่าการสูญเสียจากการแปลงผันนี้มีค่า

13.174 และ 12.674 dB ตามลำดับ

ทั้งหมดเป็นการทำเสนอวิธีปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้แถวลำดับ แอททิฟที่มีการเชื่อมร่วมแบบอ่อนผ่านเทคนิคอินเจกชันล็อก ผลที่ได้สามารถพัฒนาในด้าน ความเร็วในการปรับลำคลื่นของสายอากาศชนิดนี้ได้

## 6.2 วิจัยรณปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการพัฒนา

หัวใจสำคัญในการทดสอบการปรับลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้ สายอากาศแถวลำดับชนิดแอททิฟ คือความเสถียรภาพของสายอากาศแถวลำดับชนิดแอททิฟ เนื่องจากสายอากาศแอททิฟมีความไวต่อปัจจัยกระตุ้นภายนอก เช่น สภาพแวดล้อม อุณหภูมิของ ตัวอุปกรณ์ แหล่งจ่ายแรงดัน และความถี่รบกวนจากภายนอก ดังนั้นในการทดสอบผู้วิจัยได้ ทดสอบในห้องไม่สะท้อนคลื่นทำให้มีการกวนจากสัญญาณภายนอกน้อยมาก และแหล่งจ่าย แรงดันไบอัสที่ป้อนให้กับสายอากาศแถวลำดับชนิดแอททิฟมีเสถียรภาพดี รวมทั้งได้ออกแบบ วงจรในการปรับแรงดันไบอัสที่ละเอียด ทำให้สามารถควบคุมความถี่ในแต่ละองค์ประกอบ สายอากาศได้อย่างแม่นยำ

นอกจากนี้ผลการทดสอบที่แตกต่างไปจากการคำนวณเช่น พูซ้าง (Side lobe) เนื่องจาก ปัจจัยหลักคือ ห้องไม่สะท้อนคลื่นที่ใช้ในการทดสอบมีระยะไม่พอ ซึ่งระยะของสนามในระยะไกล (Far field) มีขนาดมากกว่าขนาดของห้องไม่สะท้อนคลื่นมากและระยะของสายอากาศแบบ หลักการกึ่งแสงกับสายอากาศแถวลำดับชนิดแอททิฟนั้นมีระยะที่ไม่เป็นสนามระยะไกล ผลที่ วิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์ที่สนามระยะไกล ดังนั้นผลทางการทดสอบจึงแตกต่างจากผลการ วิเคราะห์บ้าง

ข้อจำกัดในการปรับลำคลื่นได้แก่ ความสามารถในการปรับลำคลื่นของสายอากาศแถวลำดับ ชนิดแอททิฟโดยปรับได้ในช่วง  $\pm 30$  องศาจากแนวเล็งผลจากการปรับค่าความต่างเฟสของแต่ละ สายอากาศองค์ประกอบอยู่ที่  $\pm 90$  องศา ซึ่งแนวทางแก้ไขคือลดขนาดของสายอากาศลงโดย ออกแบบและสร้างสายอากาศบนวัสดุฐานรองที่มีค่าไดอิเล็กตริกสูง ซึ่งทำให้ขนาดของสายอากาศ เล็กดังนั้นสามารถลดระยะห่างระหว่างสายอากาศแถวลำดับชนิดแอททิฟ ( $d_A$ ) ได้จากสมการที่ (5.4) เช่นเมื่อระยะห่างระหว่างสายอากาศองค์ประกอบลดลงจาก  $0.5\lambda$  เหลือ  $0.25\lambda$  ทำให้แบบ รูปของค่าตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) ปรับลำคลื่นได้ตั้งแต่ 0 ถึง 180 องศาในระนาบ yz หรือใช้เทคนิคของวงจรคูณความถี่สองเท่า (frequency doublers) [58] ซึ่งสามารถเพิ่มมุมใน การกวาดลำคลื่นได้

การทดสอบค่าการสูญเสียจากการแปลงผันเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศ แบบหลักการกึ่งแสง ในการผสมสัญญาณระหว่างสัญญาณความถี่วิทยุกับสัญญาณ

ออกซิลเลเตอร์ประจำเครื่องและแปลงเป็นสัญญาณความถี่กลาง จากการทดสอบพบว่าที่ค่าการสูญเสียจากการแปลงผันค่อนข้างสูงสาเหตุเนื่องจากการไม่แมตช์กัน ระหว่างตัวไดโอดชอตตี้-แบร์ริเออร์ (Schottky-barrier diode) กับท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่า

แนวทางแก้ไขในการพัฒนาระบบการกวาดลำคลื่นของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงโดยใช้สายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟนี้คือ ในการออกแบบท่อนำคลื่นแบบโคพลาน่าควรคำนึงถึงผลของตัวไดโอดชอตตี้-แบร์ริเออร์ (Schottky-barrier diode) โดยเพิ่มชุดแมตช์ซึ่งระหว่างตัวไดโอดกับท่อนำคลื่น และในส่วนของระยะห่างของสายอากาศแบบหลักการกึ่งแสงกับสายอากาศแถวลำดับชนิดแอกทีฟ ควรที่จะเพิ่มให้ได้สนามระยะไกลหรืออาจออกแบบให้ทำงานในย่านที่สูงขึ้น เช่นในย่านความถี่มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ขนาดของสายอากาศเล็กลง ส่วนในการควบคุมแรงดันพัฒนาได้โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมเพื่อการปรับลำคลื่นที่แม่นยำและการทำงานที่เร็วยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Harvey, E.R. Brown, D.B. Rutledge and R.A. York, "Spatial Power Combining for High-Power Transmitters," *IEEE Microwave Magazine*, Dec. 2000.
- [2] L. Wandinger and V. Nalbandian, "Millimeter-Wave Power Combiner Using Quasi-Optical Techniques," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-31, No. 2, February 1983.
- [3] James W. Mink, "Quasi-Optical Power Combining of Solid-State Millimeter-Wave Sources," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-34, No. 2, February 1986.
- [4] Robert A. York and Richard C. Compton, "Quasi-Optical Using Mutually Synchronized Oscillator Arrays," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 39, No. 6, June 1991.
- [5] J. Birkeland and T. Itoh, "A 16 Element Quasi-Optical Oscillator Power Combining Array with External Injection Locking," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 40, No. 3, March 1992.
- [6] W. Kent, X. Wu and K. Chang "FET Active Slotline Notch Antennas for Quasi-Optical Power Combining," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 41, No. 9, September 1993.
- [7] W. Kent, X. Wu and K. Chang "Novel Active FET Circular Patch Antennas Array for Quasi-Optical Power Combining," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 42, No. 5, May 1994.
- [8] J. Lin and T. Itoh, "Two-Dimensional Quasi-Optical Power-Combining Arrays Using Strongly Coupled Oscillators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 42, No. 4, April 1994.
- [9] C. Chi and M. Rebeiz, "A Quasi-Optical Amplifier," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol. 3, No. 6, June 1993.
- [10] N. J. Koliias and R. C. Compton, "A Microstrip-Based Unit Cell for Quasi-Optical Amplifier Array," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol. 3, No. 9, September 1993.

- [11] T. P. Budka, M. W. Trippe, S. Weinreb and G. M. Rebeiz, "A 75 GHz to 115 GHz Quasi-Optical Amplifier," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 42, No. 5, May 1994.
- [12] J. Schoenberg, T. Mader, B. Shaw and Z. B. Popovic, "Quasi-Optical Antenna Array Amplifier," *IEEEEMIT-S Digest*, 1995.
- [13] L. Yuan, J. Paul and P. Yen, "140 GHz Quasi-Optical Planar Mixer," *IEEEEMIT-S Digest*, 1982.
- [14] K. D. Stephan, N. Camilleri and T. Itoh, "A Quasi-Optical Polarization-Duplexed Balanced Mixer for Millimeter-Wave Applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-31, No. 2, February 1983.
- [15] K. D. Stephan and T. Itoh, "A Planar Quasi-Optical Subharmonically Pumped Mixer Characterized by Isotropic Conversion Loss," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-32, No. 1, January 1984.
- [16] V. D. Hwang and T. Itoh, "Quasi-Optical HEMT and MESFET Self-Oscillating Mixers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 36, No. 12, December 1988.
- [17] T. Nishimura, N. Ishii and K. Itoh, "Beam Scan Using the Quasi-Optical Antenna Mixer Array," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 47, No. 7, July 1999.
- [18] E. Wilkinson, "An N-way hybrid power divider," *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-8, pp. 116–118, Jan. 1960.
- [19] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1997, ch. 14.
- [20] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1997, ch. 6.
- [21] Wen, C. P., "Coplanar Waveguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Non-Reciprocal Gyromagnetic Device Application" *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, Vol. 17, No. 12, Dec. 1969, pp. 1087-1090.
- [22] Gupta, K. C., R. Garg, and I. J. Bahl, *Microstrip Lines and Slotlines*, Norwood, MA: Artech House, Inc., 1979, Chap. 7.

- [23] Menzel, W., and W. Grabherr, "A Microstrip Patch Antenna With Coplanar Feed Line," *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, Vol. 1, No. 11, Nov. 1991.
- [24] Smith, R. L., and J. T. Williams, "Coplanar Waveguide Feed Microstrip Patch Antennas," *Electron. Lett.*, Vol. 28, No. 25, Dec. 1992.
- [25] U. L. Rohde and D. P. Newkirk, *RF/Microwave Design for Wireless Applications*, John Wiley & Sons, Inc., 2000, ch. 4.
- [26] K. Kurokawa, "Injection-locking of solid-state microwave oscillators," *Proc. IEEE*, Vol. 61, pp. 1386-1409, Oct. 1973.
- [27] R. Adler, "A study of locking phenomena in oscillators," *Proc. IEEE*, Vol. 61, pp. 1380-1385, Oct. 1973.
- [28] R. A. York, "Integrated Antennas and Quasi-Optical Device Array," *Proc. IEEE*, 1995.
- [29] K. D. Stephan, "Inter-Injection-Locked Oscillators for Power Combining and Phased Array," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. MTT-34, No. 10, October 1986.
- [30] P. Liao and R. A. York, "A New Phase-Shifterless Beam-Scanning Technique Using Array of Coupled Oscillators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 41, No. 10, October 1993.
- [31] K. C. Gupta and P. S. Hall, *Analysis and Design of Integrated Circuit-Antenna Modules*, John Wiley & Sons, Inc., 2000, ch. 7.
- [32] J. A. Navarro and K. Chang, *Integrated Active Antennas and Spatial Power Combining*, John Wiley & Sons, Inc., 1996, ch. 12.
- [33] J. A. Navarro and K. Chang, *Integrated Active Antennas and Spatial Power Combining*, John Wiley & Sons, Inc., 1996, ch. 6.
- [34] K. Chang, I. Bahl and V. Nair, *RF and Microwave Circuit Design for Wireless Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2001, ch. 10.
- [35] *Advanced Design System (ADS2001)*, Agilent Technologies, 2001.

## ประวัติผู้เขียน

นายสุวรรณ จันทร์อินทร์ เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีโทรคมนาคม สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2545

### บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

S. Janin, P. Ngamjanyaporn, C. Phongcharoenpanich and M. Krairiksh, "Beam Scanning System of Quasi-Optical Antenna Mixer Array using Active Array Antenna," *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Information and Computer Engineering Postgraduate Workshop 2004*, Phuket, pp. 10-14, 22<sup>nd</sup> – 23<sup>rd</sup> January 2004.