

การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

**DESIGN OF BROADBAND RIGHT-ANGLE SLOT ARRAY  
ANTENNA**

อนุชา มาละใจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

อนุชา มาละใจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

|                   |  |
|-------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบความถี่กว้าง |
|                   | Design of Broadband Right-Angle Slot Array Antenna             |
| ชื่อ-นามสกุล      | นายอนุชา มาละใจ  |
| สาขาวิชา          | วิศวกรรมไฟฟ้า  |
| อาจารย์ที่ปรึกษา  | อาจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.                                 |
| ปีการศึกษา        | 2555   |

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(อาจารย์อำนวยการ เรืองวาริ, Dr.-Ing.)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์กนก เจริญพงษ์เวช, D.Eng)

.....กรรมการ  
(อาจารย์นิตราชัย สุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ฝิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2556

|                   |   |
|-------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง |
| ชื่อ - นามสกุล    | นายอนุชา มาละใจ   |
| สาขาวิชา          | วิศวกรรมไฟฟ้า   |
| อาจารย์ที่ปรึกษา  | อาจารย์ไพฑูรย์ รักเหลือ, วศ.ค.                          |
| ปีการศึกษา        | 2555  |

## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศรูปแบบใหม่ ที่ใช้วิธีแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากสำหรับความถี่กว้างบนวัสดุฐานรองแบบแผ่นฟิล์มบาง เพื่อรองรับงานในระบบ Wireless Local Area Network (WLAN) และ Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) สายอากาศดังกล่าวได้สร้างจากวัสดุฐานรองชนิดไมลาร์ฟิล์ม ซึ่งมีคุณสมบัติที่บางโดยมีความหนา 0.4 มิลลิเมตร มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 3.2 และราคาต้นทุนต่ำ โดยสายอากาศที่ออกแบบมีขนาด  $12.75 \times 15$  ตารางมิลลิเมตร

สายอากาศต้นแบบได้ถูกออกแบบและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม IE3D โดยรูปร่างของสายอากาศเป็นรูปแบบที่ออกแบบไม่ซับซ้อน ประกอบด้วย สายนำสัญญาณไมโครสตริป และช่องเปิดแบบมุมฉาก 4 ช่อง ที่มีการจัดเรียงแบบแถวลำดับ ซึ่งมีขนาดและระยะที่เหมาะสมเพื่อควบคุมแถบความถี่กว้างให้ครอบคลุมการใช้งานในระบบ WLAN และ WiMAX

ผลการจำลองและทดสอบสายอากาศช่องลำดับแบบช่องเปิดมีแบนด์วิดท์ 1.02 GHz ระหว่างช่วงความถี่ 2.02 - 3.04 GHz โดยมีอัตราขยายของสายอากาศในช่วงความถี่ใช้งานมีค่าไม่น้อยกว่า 2 dBi จากวิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นว่าสายอากาศรูปแบบใหม่ที่ใช้ไมลาร์ฟิล์มและการออกแบบช่องเปิดมุมฉากแบบแถวลำดับมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับแท็บเล็ตได้

**คำสำคัญ :** สายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉาก แถบกว้าง ไมลาร์ฟิล์ม

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>Thesis Title</b>   | Design of Broadband Right-Angle Slot Array Antenna |
| <b>Name - Surname</b> | Mr.AnuchaMalajai                                   |
| <b>Program</b>        | Electrical Engineering                             |
| <b>Thesis Advisor</b> | Mr. Paitoon Rakluea, D.Eng.                        |
| <b>Academic Year</b>  | 2012   |

## ABSTRACT

This thesis proposes a design of novel Thin-Film Broadband right angle array slot antenna for Wireless Local Area Network (WLAN), and Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX). This antenna is fabricated on Mylar Polyester Film substrate with size of  $12.75 \times 15 \text{ mm}^2$ , thickness of 0.4 mm and dielectric constant of 3.2.

The proposed antenna is designed using IE3D simulation software. The antenna is simple using four right angle slot. For appropriate size and position, achieve wide bandwidth can control the desirable resonant frequency. The length of slot is approximately a half-wavelength at the desirable center frequency in WLAN and WiMAX.

From the simulated and measured results of the proposed antenna, it has bandwidth 1.02 GHz of frequency range 2.02 - 3.04 GHz. The gain of the proposed antenna in operating frequency is more than 2 dBi. From the experiment result, it can conclude that the mylar film antenna suitable for various portable tablet applications.

**Keywords :** right-angle slot array antenna, broadband, mylar film

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาเป็นอย่างสูงจาก ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.อำนาจ เรืองวารี ประธานกรรมการ ผู้ทรงคุณวุฒิ รองศาสตราจารย์ ดร.กนก เจนจิระพงศ์เวช กรรมการวิชาเอก ดร.ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล กรรมการวิชาเอก ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า และให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือ และสถานที่ทำงานวิจัย ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.ศราวุธ ชัยมูล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร คุณชวลิต รักเหลือ และ คุณธนันต์ หงส์นรา นักศึกษาระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ท่านได้ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านเครื่องมือวัด และการทดสอบประสิทธิภาพของวัสดุ Mylar polyester film

ขอขอบคุณ คุณบุญฤทธิ์ คุ่มเขต และนักศึกษาระดับปริญญาโท ห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ท่านได้ให้ความอนุเคราะห์สำหรับข้อมูลการทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และแนวคิดต่าง ๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณสมชาติ มาละใจ คุณอ่องเอี่ยม มาละใจ และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

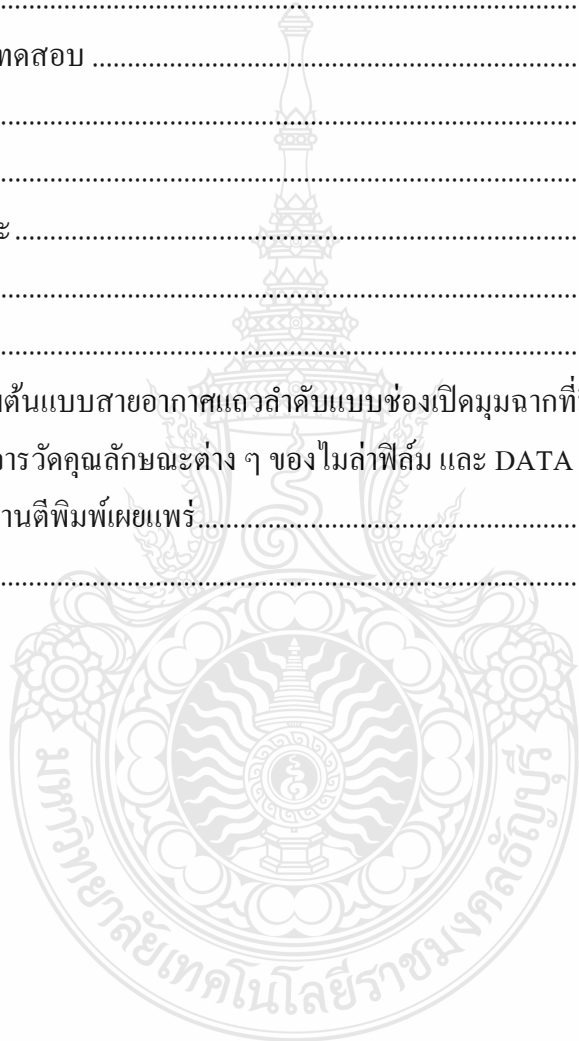
อนุชา มาละใจ

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ค    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | ง    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | จ    |
| สารบัญ.....   | ฉ    |
| สารบัญตาราง.....  | ช    |
| สารบัญภาพ.....  | ฌ    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....  | ฎ    |
| บทที่   |      |
| 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....  | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....  | 2    |
| 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....   | 3    |
| 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 4    |
| 2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป.....   | 4    |
| 2.2 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....  | 6    |
| 2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด.....  | 19   |
| 2.4 ระเบียบวิธีโมเมนต์ (The Moment of Method).....  | 24   |
| 2.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริป.....   | 28   |
| 2.6 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11.....   | 29   |
| 2.7 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.16.....   | 32   |
| 3 การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง.....  | 25   |
| 3.1 การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปที่มีแถบกว้างแบบ 1 ช่อง..... | 34   |
| 3.2 การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปที่มีแถบกว้างแบบ 4 ช่อง..... | 42   |

## สารบัญ (ต่อ)

| บทที่  | หน้า |
|--|------|
| 3.3 สรุปผลการออกแบบของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง .....           | 61   |
| 4 การทดสอบและผลการทดลอง.....   | 62   |
| 4.1 การทดสอบและผลการทดลองของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มี<br>แถบกว้าง ..... | 62   |
| 4.2 สรุปผลการทดสอบ .....   | 76   |
| 5 สรุปผลการวิจัย.....  | 77   |
| 5.1 ข้อเสนอสรุปงาน .....   | 77   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....   | 79   |
| รายการอ้างอิง.....   | 80   |
| ภาคผนวก.....   | 83   |
| ภาคผนวก ก ภาพต้นแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง .....              | 84   |
| ภาคผนวก ข ผลการวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของไมล้าฟิล์ม และ DATA SHEET.....                  | 86   |
| ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....   | 95   |
| ประวัติผู้เขียน.....   | 115  |





## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.1 ขนาดของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก .....  | 41   |
| 3.2 คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก .....  | 42   |
| 3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ .....  | 45   |
| 3.4 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง..                     | 60   |
| 3.5 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง..                     | 61   |
| 4.1 ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการงานจริงของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉาก<br>ที่มีแถบกว้าง ..... | 66   |
| 4.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการวัดจริง.....                         | 75   |
| 4.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการวัดจริง.....                         | 76   |



## สารบัญญภาพ

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 โครงสร้างของไมโครสตริป.....   | 4    |
| 2.2 ลักษณะของคลื่นที่แผ่กระจายในไมโครสตริป.....   | 5    |
| 2.3 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์.....  | 7    |
| 2.4 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....                           | 7    |
| 2.5 สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \gg 1$ .....   | 10   |
| 2.6 สายส่งไมโครสตริปที่มี $w/h \ll 1$ .....   | 10   |
| 2.7 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล .....            | 12   |
| 2.8 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป .....                                   | 13   |
| 2.9 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อ .....                              | 15   |
| 2.10 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก .....                              | 16   |
| 2.11 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบขั้น .....                                | 17   |
| 2.10 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T.....                             | 18   |
| 2.13 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด .....                                      | 19   |
| 2.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบปิดวงจร .....             | 19   |
| 2.15 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบเปิดวงจร .....            | 20   |
| 2.16 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่น .....  | 21   |
| 2.17 การกระจายคลื่นจากช่องเปิด.....   | 22   |
| 2.18 วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ.....             | 22   |
| 2.19 วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น .....   | 23   |
| 2.20 วิธีการหมุนช่องเปิด.....   | 23   |
| 2.21 เส้นลวดนำไฟฟ้าขนาดบงรักษาไว้ที่ศักย์คงตัว.....                                       | 25   |
| 2.22 การแบ่งเส้นลวดออกเป็น N ส่วน.....  | 26   |
| 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณ ไมโคร<br>สตริป.....   | 34   |
| 3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณ ไมโคร<br>สตริป..... | 35   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.3 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S .....  | 39   |
| 3.4 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ r .....  | 40   |
| 3.5 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก .....  | 41   |
| 3.6 โครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป.....  | 42   |
| 3.7 พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก.....   | 43   |
| 3.8 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $S_1$ .....   | 46   |
| 3.9 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $S_3$ .....   | 47   |
| 3.10 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $U_1$ .....  | 48   |
| 3.11 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $U_2$ .....  | 48   |
| 3.12 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $U_3$ .....  | 49   |
| 3.13 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A_1$ และ $B_1$ .....  | 50   |
| 3.14 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ $A_3$ และ $B_3$ .....  | 50   |
| 3.15 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง.....   | 51   |
| 3.16 ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง..   | 52   |
| 3.17 ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบความถี่กว้าง .....   | 53   |
| 3.18 ค่าอัตราขยาย (Gain) ของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบความถี่กว้าง .....   | 54   |
| 3.19 ค่าอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของการแผ่กระจายคลื่นแบบทุกทิศทาง ..... | 54   |
| 3.20 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.1 GHz .....   | 55   |
| 3.21 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่ 2.1 GHz.....   | 55   |
| 3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.3 GHz .....   | 56   |
| 3.23 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่ 2.3 GHz.....   | 56   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่   | หน้า |
|--|------|
| 3.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz .....   | 57   |
| 3.25 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz.....   | 57   |
| 3.26 แบบรูปการแผ่พลังงานสนามของสายอากาศที่ความถี่ 2.6 GHz.....   | 58   |
| 3.27 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่ 2.6 GHz.....  | 58   |
| 3.28 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบที่ความถี่ 2.1 GHz<br>2.3 GHz 2.45 GHz และ 2.6 GHz .....     | 59   |
| 4.1 เครื่องมือวัดวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E8363B.....   | 62   |
| 4.2 วิธีการวัดและวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบความถี่กว้าง ....                                     | 63   |
| 4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ.....   | 63   |
| 4.4 ผลการวัดค่าอัตราส่วนหนึ่งของสายอากาศ .....   | 64   |
| 4.5 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองกับการวัดจริงของ<br>สายอากาศ.....                         | 65   |
| 4.6 การเปรียบเทียบการจำลองของอัตราส่วนคลื่นหนึ่งกับการวัดจริงของสายอากาศ .....   | 66   |
| 4.7 การทดสอบการวัดอัตราขยายของสายอากาศ.....  | 67   |
| 4.8 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าอัตราขยายของสายอากาศ.....   | 68   |
| 4.9 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวระนาบ x-z.....  | 69   |
| 4.10 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวระนาบ y-z.....   | 70   |
| 4.11 การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงกับการจำลองของแบบรูปการแผ่พลังงานของ<br>สายอากาศในระนาบ x-z .....                    | 72   |
| 4.12 การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงกับการจำลองของแบบรูปการแผ่พลังงานของ<br>สายอากาศในระนาบ y-z .....                    | 74   |
| 5.1 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดจริงของสายอากาศ<br>ช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบความถี่กว้าง..... | 78   |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

|                  |   |
|------------------|---|
| $\Delta$         | Delta   |
| $\epsilon_{eff}$ | Effective Dielectric Constant   |
| AES              | Advanced Encryption Standard  |
| Bf               | Band width Factor   |
| BW               | Band Width  |
| C                | Capacitor   |
| CCK              | Complimentary Code Keying   |
| cm               | Centimeter  |
| d                | Distance  |
| dB               | Decibel   |
| dB <i>i</i>      | Decibel Isotropic   |
| DSSS             | Direct Sequence Spread Spectrum   |
| EAP-FAST         | Extensible Authentication Protocol - Flexible Authentication via Secure Tunneling |
| EAP-TLS          | Extensible Authentication Protocol -Transport Layer Security                      |
| $f$              | Frequency   |
| $f_c$            | Frequency Center  |
| $f_h$            | Frequency High  |
| $f_l$            | Frequency Low   |
| $f_r$            | Frequency Resonance   |
| GHz              | Giga Hertz  |
| h                | High  |
| IAPP             | Inter Access Point Protocol   |
| IEEE             | Institute of Electrical and Electronics Engineers                                 |
| ITU              | International Telecommunication Union   |
| L                | Long  |
| LEAP             | Lightweight Extensible Authentication Protocol                                    |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

|                |   |
|----------------|---|
| LoS            | Line of Sight                                   |
| MAC            | Media Access Control                            |
| Mbps           | Mega bit per second                             |
| MHz            | Mega Hertz                                      |
| mm             | Millimeter                                      |
| MMIC           | Monolithic Microwave Integrated Circuit         |
| MOM            | Method of Moment                                |
| NLoS           | Non-Line-of-Sight                               |
| OFDM           | Orthogonal Frequency Division Multiplexing      |
| PEAP           | Protected Extensible Authentication Protocol    |
| Q              | Quality Factor                                  |
| QoS            | Quality of Service                              |
| RF             | Radio Frequency                                 |
| $S_{11}$       | Return Loss                                     |
| TEM            | Transverse Electric-Magnetic                    |
| VoIP           | Voice over IP                                   |
| VSWR           | Voltage Standing Wave Ratio                     |
| W              | Wide  |
| WECA           | Wireless Ethernet Comparability Alliance        |
| WEP            | Wired Equivalent Privacy                        |
| WPA            | Wi-Fi Protected Access                          |
| WLAN           | Wireless Local Area Network                     |
| WiMAX          | Worldwide Interoperability for Microwave Access |
| WiFi           | Wireless Fidelity                               |
| Z <sub>m</sub> | Input Impedance                                 |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอินเทอร์เน็ตและมัลติมีเดียได้รับความนิยมและแพร่หลายมากขึ้น จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระบบการสื่อสารไร้สายได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าอุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile) และคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook) จะต้องต่ออุปกรณ์ไร้สายที่สามารถใช้งานได้หลายๆ ระบบ โดยในแต่ละระบบจะมีความถี่ที่ใช้งานแตกต่างกัน ในปัจจุบันได้มีการกำหนดมาตรฐานเพื่อรองรับย่านความถี่ที่ใช้งานในหลายๆ ระบบของการสื่อสารไร้สาย ตัวอย่างเช่น การสื่อสารท้องถิ่นไร้สาย Wireless Local Area Network (WLAN), ระบบไวแมกซ์ Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) เป็นต้น โดยจะมีช่วงความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐานต่างๆ ที่ถูกกำหนดไว้คือ IEEE802.11a/b/g/h/j/n สำหรับระบบ WLAN และ IEEE802.16 2005 สำหรับระบบ WiMAX มาตรฐานต่างๆ ที่ได้กำหนดย่านความถี่ที่ต่างกันกล่าวคือมาตรฐาน IEEE802.11b/g จะมีย่านความถี่อยู่ในช่วง 2.4-2.4835 GHz ส่วนมาตรฐาน IEEE802.16e ระบบ WiMAX นั้นจะมีย่านความถี่ที่ใช้งานคือ 2.3-2.4 GHz และ 2.5-2.69 GHz ผสมผสานเทคโนโลยีในปัจจุบันเข้าด้วยกัน สามารถการนำเสนอข้อมูล ใช้งานด้านมัลติมีเดีย ส่งผ่านข้อมูลทั้งภาพและเสียงในระบบไร้สายด้วยความเร็วที่สูง เนื่องจากการใช้งานระบบสื่อสารต่างๆ เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการกำหนดมาตรฐานความถี่ต่างๆ ขึ้นมารองรับดังที่กล่าวมา ซึ่งแต่ละประเทศหรือแต่ละพื้นที่จะใช้มาตรฐานความถี่ที่ต่างกันออกไป ฉะนั้นการรับส่งข้อมูลต่างๆ ข้ามระบบไม่สามารถกระทำได้ดังนั้นก็เลยได้มีการคิดค้นสายอากาศที่สามารถใช้งานได้หลายความถี่ขึ้นมาเพื่อที่จะรองรับกับระบบการสื่อสารไร้สายต่างๆ โดยการไร้สายอากาศเพียงตัวเดียวซึ่งจะเป็นการช่วยให้สะดวกต่อการนำไปใช้งาน อีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายอันเกิดจากการเพิ่มอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ

งานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาและวิเคราะห์ออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสำหรับระบบแถบความถี่กว้าง โดยใช้วัสดุฐานรองแบบใหม่ซึ่งมีขนาดที่บางกว่าถูกกว่า FR-4 และสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานในระบบระบบแถบกว้างได้ ซึ่งการออกแบบสายอากาศมีการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป IE3D รวมทั้งทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ โดยสายอากาศที่ออกแบบมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนมีแบบรูปการแพร่กระจายกำลังงานที่ดี มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า

-10 dB และมีอัตราขยายของสายอากาศมากกว่า 2 dBi โดยมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่ 2.1-3 GHz ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารปัจจุบันได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศสำหรับแถบกว้าง
- 1.2.2 ออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับแบบมุมฉากแถบกว้าง
- 1.2.3 วิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ออกแบบสร้างและทดสอบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับแบบมุมฉากกว้าง ที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip Line)
- 1.3.2 วิเคราะห์คุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบสายอากาศที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครือข่ายไร้สาย WLAN และ WiMAX
- 1.3.3 สายอากาศมีความถี่ใช้งาน 2.1-3 GHz มีอัตราขยายของสายอากาศไม่น้อยกว่า 2 dBi ย่านความถี่ใช้งาน

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษางานวิจัยและหนังสือที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 1.4.2 ออกแบบสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับแบบมุมฉากความถี่กว้าง ที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป
- 1.4.3 ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับแบบมุมฉากที่ออกแบบเพื่อวิเคราะห์ตัวแปรของสายอากาศ
- 1.4.4 ทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับแบบมุมฉากแถบกว้าง ที่ความถี่ 2.1 2.3 2.45 และ 2.6 GHz
- 1.4.5 บันทึกผลการทดลองและสรุปผลการทดลองที่ได้จากการดำเนินงานของสายอากาศช่องเปิดแถวลำดับแบบมุมฉากแถบกว้าง ที่ความถี่ 2.1 2.3 2.45 และ 2.6 GHz



## 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

สำหรับรายละเอียดวิทยานิพนธ์นี้ได้รับการออกแบบการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง จำลองผลการทำงานของสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บท โดยสรุปดังนี้

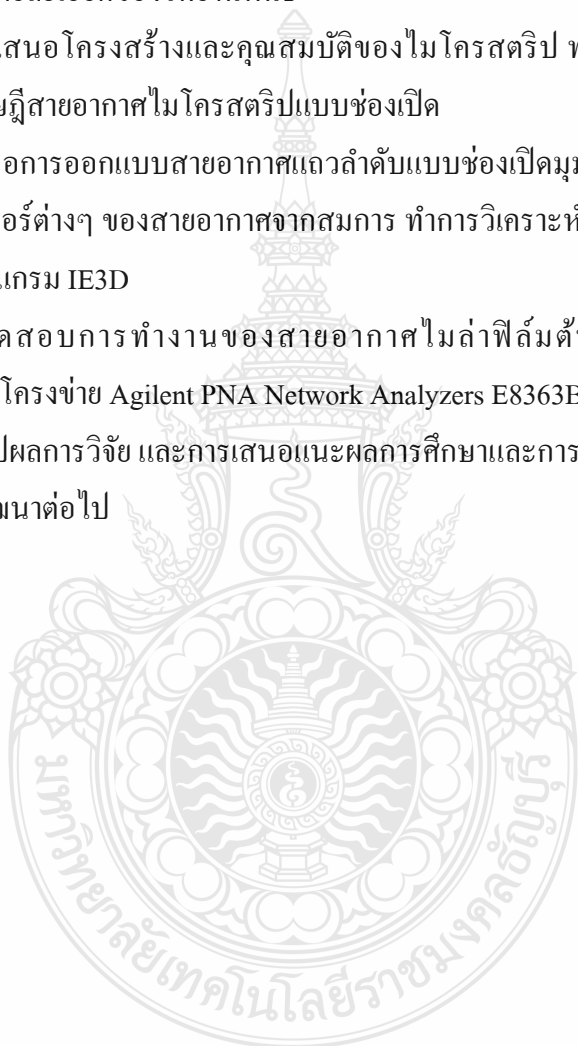
บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาของการวิจัย วัตถุประสงค์ในการทำวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 นำเสนอโครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป และทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด

บทที่ 3 เสนอการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง โดยการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศจากสมการ ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ด้วยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม IE3D

บทที่ 4 ทดสอบการทำงานของสายอากาศไมล้าฟิล์มดินแบบที่กล่าวในบทที่ 3 โดยเครื่องวัดวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzers E8363B

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และการเสนอแนะผลการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ทั้งหมดเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป



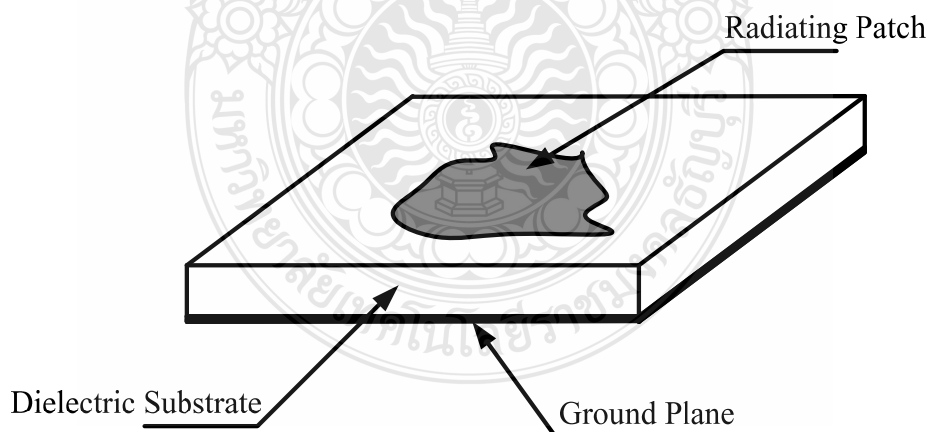
## บทที่ 2

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบและทดสอบการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป และทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด ทั้งนี้รวมถึงเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย WLAN และ WiMAX นอกจากนี้ยังมีวิธีการวิเคราะห์สายอากาศและโปรแกรมจำลองการทำงานของสายอากาศ IE3D

#### 2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของไมโครสตริป [1-7]

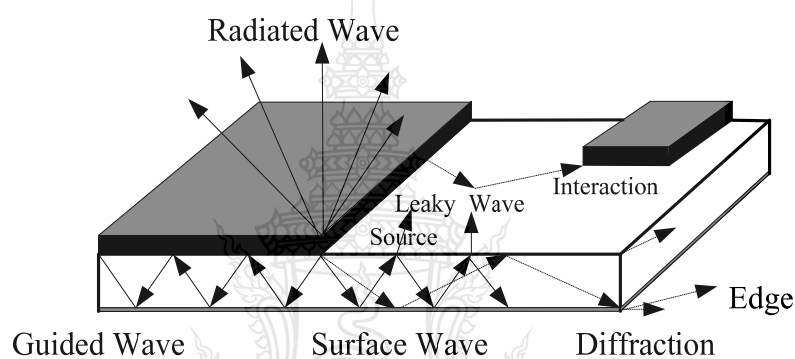
ไมโครสตริปเป็นแผ่นวงจรที่ใช้กันอย่างมากในย่านความถี่ไมโครเวฟโดยที่ลักษณะโครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบไปด้วยแผ่นตัวนำบางๆ ที่มีความสูญเสียพลังงานต่ำวางอยู่บนวัสดุที่เรียกว่าวัสดุฐานรอง (Substrate) และอีกด้านหนึ่งของวัสดุฐานรองจะเรียกว่าระนาบกราวด์ (Ground Plane) โดยโครงสร้างของไมโครสตริปนั้นสามารถจะนำไปเป็นวงจรและสายอากาศที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟและเป็นสายอากาศ



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของไมโครสตริป

### 2.1.1 คลื่นที่แผ่กระจายในไมโครสตริป

คลื่นนำทาง (Guided Wave) สำหรับทิศทางการแผ่กระจายคลื่นของคลื่นนำทางนั้น จะมีลักษณะมุมของการแผ่กระจายทำมุมอยู่ระหว่างช่วง 180-270 องศา โดยลักษณะการแผ่กระจายคลื่นนั้นจะแผ่กระจายอยู่เฉพาะในวัสดุฐานรอง และคลื่นจะสะท้อนไปมาระหว่างตัวนำสองตัว คลื่นนำทางนี้จะนำไปใช้อย่างมากกับสายส่งสัญญาณสำหรับคลื่นแบบนี้มีส่วนในการสะสมพลังงานของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต้องการในสายอากาศแบบแผ่นเมื่อเลือกใช้วัสดุฐานรองที่บางและมีสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) สูงจะทำให้คลื่นแบบนี้มีอิมพีแดนซ์สูง



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของคลื่นที่แผ่กระจายในไมโครสตริป

คลื่นแผ่พลังงาน (Radiated Wave) คลื่นแบบนี้จะมีทิศทางการแผ่กระจายคลื่นเป็นมุมที่อยู่ระหว่างช่วง 0-180 องศา โดยจะมีทิศทางที่แผ่ขึ้นไปบนอากาศที่ไม่มีการปิดกั้นของขอบเขตใดๆ ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะใช้มากในงานเกี่ยวกับสายอากาศ คลื่นแบบนี้จะมีอิมพีแดนซ์สูงเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนา (เปรียบเทียบกับความยาวคลื่น) และค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าต่ำ

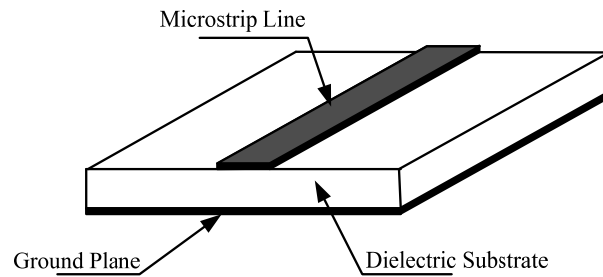
คลื่นรั่ว (Leaky Wave) ลักษณะการแผ่กระจายคลื่นจะอยู่ในช่วง 0-270 องศา โดยคลื่นรั่วจะแผ่กระจายมาจากคลื่นที่สะท้อนมาจากกระนาบกราวด์ และไปยังจุดเชื่อมต่อระหว่างอากาศกับไดอิเล็กตริก เมื่อคลื่นที่สะท้อนมาถึงตำแหน่งนี้จะทำให้เกิดคลื่นที่ถูกส่งไปในอากาศนั้นคือ คลื่นรั่วออกจากคลื่นที่สะท้อนกลับลงไปในวัสดุฐานรอง (Surface Wave) ลักษณะของคลื่นรั่วที่เกิดขึ้นนี้จะนำไปช่วยในการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ ซึ่งจะอยู่ในเงื่อนไขของความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในแต่ละสายอากาศ เช่น ทำให้มีสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) ที่สูง

คลื่นผิว (Surface Wave) มุมในการแผ่กระจายที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าของคลื่นร้าว จึงทำให้เกิดคลื่นที่สะท้อนกลับมายังวัสดุฐานรองซึ่งเรียกคลื่นแบบนี้ว่าคลื่นผิว เมื่อคลื่นผิวถูกส่งมาที่ขอบของโครงสร้างค้ำรูป จะทำให้เกิดการแผ่กระจายคลื่นออกมาจากโครงสร้างคลื่นที่แผ่กระจายออกมานี้ทำให้เกิดผลเสียต่อแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ คือ ทำให้พลังงานในการส่งหรือรับน้อยลง ลักษณะของคลื่นแบบนี้จะมีความสำคัญเมื่อใช้วัสดุฐานรองที่หนาและสภาพยอมทางไฟฟ้ามีค่าสูง

ความต้องการคลื่นในสายส่งสัญญาณและสายอากาศในการแผ่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่งสัญญาณนั้นคลื่นถูกนำทางจะถูกกระตุ้นมากที่สุด ขณะที่จะต้องหลีกเลี่ยงคลื่นแผ่พลังงาน คลื่นร้าว และ คลื่นผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าเป็นสายอากาศนั้นต้องการให้เกิดคลื่นแผ่พลังงานมากที่สุด และจะต้องป้องกันการเกิดคลื่นนำทางในแผ่นตัวนำและคลื่นผิว

## 2.2 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป [8-10]

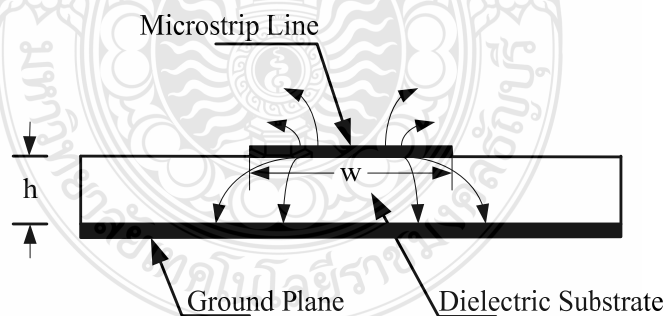
สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป (Microstrip Line) ที่ใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปนั้นจะมีโครงสร้างดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 กล่าวคือ จะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบๆ อยู่บนวัสดุฐานรองซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริก และด้านล่างของวัสดุฐานรองจะเป็นระนาบกราวด์พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในวัสดุฐานรองบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบกับระนาบกราวด์ ความหนาของวัสดุฐานรองและความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) ตามที่ต้องการสำหรับวัสดุฐานรองที่ใช้งานกันทั่วไปนั้นจะมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน และคุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุฐานรองที่นำมาใช้ คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ ( $\epsilon_r$ ) ซึ่งจะเป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติของการเป็นสารไดอิเล็กตริกโดยเทียบกับอากาศว่า ค่านี้จะส่งผลทำให้คุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปมีเปลี่ยนแปลงค่า Lossangent ( $\tan \delta$ ) ที่ความถี่ 10 GHz คือ ค่าที่แสดงอัตราส่วนระหว่างกระแสการนำกับกระแสดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งค่านี้จะแสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีการสูญเสียเนื่องจากการนำกระแสมาก น้อยเพียงใด โดยที่มีค่ายิ่งต่ำก็ยิ่งดีค่าคงตัวของความร้อน (Thermal Conductivity) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าสารไดอิเล็กตริกนั้นมีความสามารถในการระบายความร้อนได้ดีมากน้อยเพียงใด ค่านี้ยิ่งสูงก็ยิ่งดี สุดท้ายค่าความขรุขระของผิวและความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric Strength) ซึ่งความขรุขระของผิวนั้นจัดว่ามีความสำคัญมากเช่นเดียวกันเพราะจะมีผลกระทบต่อ การส่งผ่านของคลื่น ไปตามไมโครสตริป เพราะฉะนั้นความขรุขระน้อยจะดีกว่า สำหรับความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้านั้นจะบอกถึงความสามารถในการรับกำลังคลื่นด้วย ดังนั้นค่าสูงจะดีกว่าค่าต่ำ



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

### 2.2.2 การส่งผ่านคลื่นในสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

ถึงแม้สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะมีโครงสร้างง่ายๆ แต่การวิเคราะห์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปโดยรายละเอียดทางทฤษฎีนั้นเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก ทั้งนี้เป็นเพราะเงื่อนไขขอบเขตของระบบค่อนข้างซับซ้อนเมื่อเทียบกับท่อนำคลื่นหรือสายนำสัญญาณชนิดอื่น อย่างไรก็ตามได้มีผู้ทำการศึกษาทางทฤษฎีและพบว่า คลื่นที่ส่งผ่านไปตามไมโครสตริปนั้นจะใกล้เคียงกับโหมด Quasi-TEM Mode (TEM) มากแต่จะไม่ใช่โหมด TEM เสียทีเดียว จึงเรียกโหมดดังกล่าวนี้ว่าโหมดกึ่ง TEM ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.4 โดยแสดงถึงเส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่ง



ภาพที่ 2.4 เส้นแรงไฟฟ้าในระนาบตามขวางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สัญญาณแบบไมโครสตริปที่คลื่นส่งผ่านในโหมดกึ่ง TEM ซึ่งพอจะใช้ให้เป็นโหมด TEM นี้สามารถใช้หลักการวงจรกระจายในการวิเคราะห์หาคุณลักษณะของสายส่งสัญญาณแบบไมโคร

สตริปได้กล่าวคือ ถ้าเราสามารถหาค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ก็จะนำค่าทั้งสองนี้ไปคำนวณค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ได้ อย่างไรก็ตามการหาค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป จะยุ่งยากกว่าของสายคู่ขนานหรือสายโคแอกเชียล เพราะสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปมีทั้งสารไดอิเล็กตริกและอากาศอยู่ในบริเวณที่พลังงานของคลื่นส่งผ่าน สำหรับการหาค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวนั้นจะไม่ถูกรบกวนจากการมีสารไดอิเล็กตริก

ถึงแม้การหาค่าคาปาซิแตนซ์จะยุ่งยากกว่าปกติ แต่ก็มีวิธีที่ทำให้ง่ายขึ้น โดยใช้วิธีหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล Effective Dielectric Constant ( $\epsilon_{eff}$ ) ของระบบซึ่งจะรวมผลของสารไดอิเล็กตริกและอากาศเข้าด้วยกันและเนื่องจากสารไดอิเล็กตริกทั้งหลายมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ดังนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่หาได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ไปด้วย อย่างไรก็ตามจากการศึกษาทางทฤษฎีและการทดลองของผู้เชี่ยวชาญพบว่าในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่า 2 GHz ลงมา ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงไปอันเนื่องจากกรณีของไฟฟ้าสถิตน้อยมาก จึงสามารถให้ใช้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของไฟฟ้าสถิตได้สำหรับในช่วงความถี่ที่สูงกว่า 2 GHz ก็ต้องคำนึงถึงการปรับแต่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลให้เหมาะสมกับความถี่ที่ใช้งาน

ในการหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของกรณีไฟฟ้าสถิตนั้นจะใช้แนวคิดของวงจรกระจายดังต่อไปนี้ คือเมื่อคลื่นที่ส่งผ่านไปไมโครสตริปเป็นโหมด TEM อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ ( $Z_c$ ) ของสายส่งสัญญาณ จะเขียนในรูปของค่าอินดักแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาว ( $L$ ) และค่าคาปาซิแตนซ์ ( $C$ ) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวได้ในรูปแบบต่อไปนี้

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.1)$$

ในขณะเดียวกันความเร็วเฟส  $V_p$  จะเขียนได้เป็น

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.2 นี้ทำให้เขียน  $Z_c$  ในรูปของ  $V_p$  กับ  $L$  หรือ  $C$  ได้ดังนี้

$$Z_c = V_p L \quad (2.3)$$

ในขั้นต่อไปเราจะพิจารณากรณีที่วัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริกถูกเอาออกไปเหลือแต่  
อากาศเพียงอย่างเดียวที่โอบล้อมสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปอยู่ ในสภาพเช่นนี้ค่าความเร็วเฟส  
ของคลื่น TEM ที่ถูกส่งผ่านจะเท่ากับความเร็วแสง และค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหนึ่งหน่วยความยาวจะ  
เปลี่ยนไป โดยที่ค่าอินดักแตนซ์ไม่ถูกกระทบ ถ้าให้ค่าคาปาซิแตนซ์ที่เปลี่ยนไปนี้มีค่าเป็น  $C_0$  จะได้  
ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_0$  กับความเร็วเฟสในรูปแบบต่อไปนี้

$$C = \frac{1}{\sqrt{LC_0}} \quad (2.4)$$

ในขณะเดียวกันค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ ( $Z_0$ ) ก็จะเขียนได้ดังนี้

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_0}} \quad (2.5)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.4 หาค่าด้วยสมการที่ 2.2 จะได้ผลดังนี้

$$\frac{C}{C_0} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.6)$$

ตามนิยามทั่วไปค่าของ  $C/C_0$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลของสาร  
(ไดอิเล็กตริก) ที่โอบล้อมด้วยระบบเก็บประจุอยู่ ค่านี้จะเปรียบเหมือนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์  
ประสิทธิผลของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองเป็นสารไดอิเล็กตริกและด้านบน  
เป็นอากาศอยู่ นั่นคือ

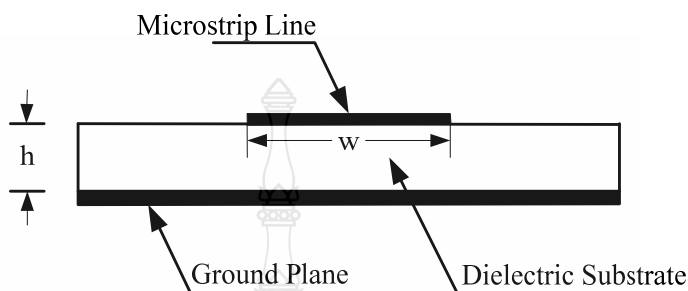
$$\epsilon_{eff} = \left(\frac{c}{v_p}\right)^2 \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.3 ถึงสมการที่ 2.7 จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $Z_c, Z_0$  และ  $\epsilon_{eff}$  ได้ดังนี้

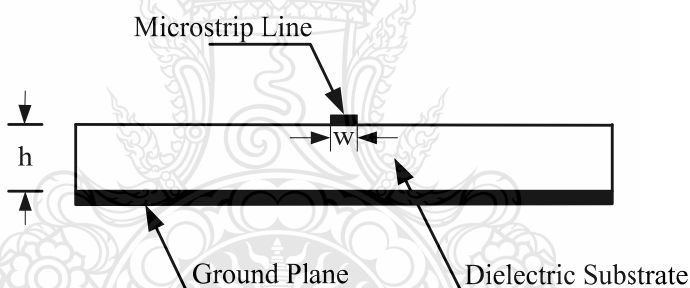
$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.8)$$

$$Z_0 = Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \quad (2.9)$$

$$\epsilon_{eff} = \left( \frac{c}{v_p} \right)^2 \quad (2.10)$$



ภาพที่ 2.5 สายส่งไมโครสตริปที่มี  $w/h \gg 1$



ภาพที่ 2.6 สายส่งไมโครสตริปที่มี  $w/h \ll 1$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น ถ้าเราสามารถรู้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลได้ก็จะทำให้สามารถคำนวณคุณสมบัติอื่น ตามมาได้อย่างไรก็ตามค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงตามความกว้างของไมโครสตริปเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาของวัสดุฐานรอง ซึ่งพิจารณาได้ 2 กรณี ดังต่อไปนี้กรณีแรกคือกรณีที่  $w/h \gg 1$  แสดงได้ดังภาพที่ 2.5 ในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างบริเวณที่มีแถบสทริปกับระนาบกราวด์สภาพดังกล่าวจะส่งผลให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้ค่า  $\epsilon_r$  ของวัสดุฐานรองสำหรับกรณีที่สองคือกรณีที่  $w/h \ll 1$  แสดงได้ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งในกรณีนี้เส้นแรงไฟฟ้าที่จะผ่านวัสดุฐานรองครึ่งหนึ่งและผ่าน



อากาศครึ่งหนึ่งซึ่งจะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลมีค่าเข้าใกล้  $(\epsilon_r + \frac{1}{2})$  จากที่อธิบายมานี้จะเห็นได้ว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะเปลี่ยนแปลงตามค่า  $w/h$  ดังนั้นจึงได้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่สามารถออกแบบได้ดังสมการที่ 2.11

$$\frac{1}{2}(\epsilon_r + 1) \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r \quad (2.11)$$

และเพื่อความสะดวกในการคำนวณและการออกแบบต่อไป ได้มีการเขียนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลดังสมการต่อไปนี้

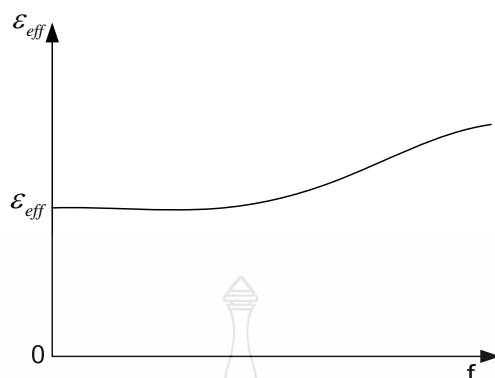
$$\epsilon_{eff} = 1 + q(\epsilon_r - 1); \quad \frac{1}{2} \leq q \leq 1 \quad (2.12)$$

ค่า  $q$  ในสมการที่ 2.12 นี้ ถูกเรียกว่า “ฟิลลิงแฟกเตอร์” (Filling Factor) ซึ่งหมายถึงตัวประกอบที่แสดงให้รู้ว่าวัสดุฐานรองที่เป็นสารไดอิเล็กตริกจะมีผลต่อโครงสร้างไมโครสตรักเจอร์นั้นมากน้อยแค่ไหน เมื่อเขียนค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามสมการที่ 2.12 ค่า  $q$  ก็จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงตามค่า  $w/h$

ในกรณีที่มีความถี่ใช้งานสูงเกินกว่า 2 GHz จะใ้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลที่เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เปลี่ยนไปความเร็วเฟสก็จะเปลี่ยนไปด้วย ซึ่งทำให้ได้ดังสมการ

$$\epsilon_{eff}(f) = \left( \frac{c}{v_p(f)} \right)^2 \quad (2.13)$$

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามสมการที่ 2.13 นี้จะพบว่าในช่วงความถี่ต่ำนั้นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลจะลู่เข้าหากรณีของไฟฟ้าสถิตและเมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นเข้าหาค่าอนันต์ จะทำให้ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลลู่เข้าสู่  $\epsilon_r$  ของวัสดุฐานรอง เพราะความเร็วเฟสจะลู่เข้าสู่ความเร็วของแสงในสารไดอิเล็กตริกที่เป็นวัสดุฐานรอง ดังนั้นโดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลตามความถี่จะเป็นไปตามภาพที่ 2.7 ซึ่งค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผลนั้นจะสูงขึ้นตามความถี่



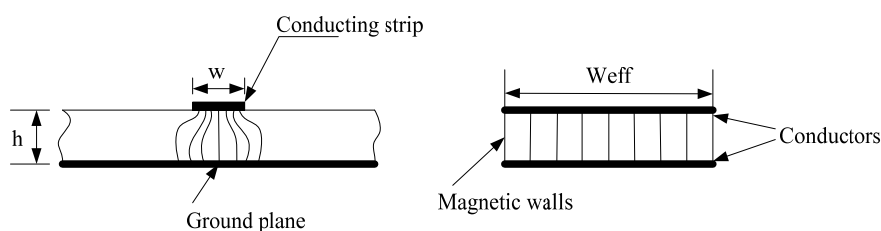
ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

### 2.2.3 การลดทอนกำลังสัญญาณของไมโครสตริป

เนื่องจากไมโครสตริปทำด้วยโลหะที่ไม่สมบูรณ์แบบและมีสารไดอิเล็กตริกคั่นในบริเวณที่คลื่นส่งผ่าน ดังนั้นการลดทอนสัญญาณจึงเกิดจากทั้งสองสาเหตุนี้ เมื่อพิจารณาว่าไมโครสตริปส่งผ่านคลื่นในโหมด TEM เราจะสามารถเขียนค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{R}{2Z_c} + \frac{GZ_c}{2} = \alpha_m + \alpha_d \quad (2.14)$$

โดยที่  $\alpha_m$  และ  $\alpha_d$  เป็นค่าคงที่ของการลดทอนสัญญาณที่เกิดจากโลหะและสารไดอิเล็กตริกตามลำดับ การหาค่า  $\alpha_m$  โดยการวิเคราะห์ให้ละเอียดตามทฤษฎีจะทำได้ลำบากมาก เพราะการกระจายของสนามแม่เหล็กบนผิวโลหะมีความสลับซับซ้อนมากเช่นเดียวกับการกระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่า  $w/h$  และความหนาของแถบสตริป ( $t$ ) อีกด้วย ในทางปฏิบัตินั้นจึงมักใช้วิธีคิดที่ง่ายขึ้น โดยสมมติให้คลื่น TEM ส่งผ่านอยู่ภายในบริเวณข้างใต้ แถบสตริปเท่านั้น ดังที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.15 เสร็จแล้วคำนวณการสูญเสียในเนื้อโลหะในสภาพดังกล่าว แล้วจึงนำผลที่ได้นั้นไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่งเพื่อทำการชดเชยให้มีความถูกต้องมากขึ้นเมื่อให้ค่าคงที่ดังกล่าวเป็น  $K$  จะได้  $\alpha_m$  ในรูปต่อไปนี้



ภาพที่ 2.8 การส่งผ่านของคลื่น TEM แบบอุดมคติในไมโครสตริป

$$\alpha_m = \frac{KR}{2Z_c} = \frac{KR_s}{wZ_c} = \sqrt{\frac{\omega\mu_u}{2\sigma}} \sqrt{\frac{K}{wZ_c}} = \sqrt{\frac{\omega\mu_u}{2 \times 5.8 \times 10^7 \sigma_r}} \cdot \frac{K}{wZ_c} \text{ Nep/m} \quad (2.15)$$

โดยที่  $\sigma_r$  คือค่าคงตัวของกรนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative Conductivity) ที่เทียบเปรียบกับทองแดงซึ่งมี  $\sigma = 5.8 \times 10^7$  S/m ค่า  $K$  นั้นจะขึ้นอยู่กับค่า  $w/h$  และความถี่ โดยที่ในกรณีที่ค่า  $w/h$  มีค่าใหญ่หลายๆ ซึ่งหมายถึงคลื่น TEM จะเข้าใกล้แบบอุดมคติ ค่า  $K$  ก็จะเข้าหา 1 ในกรณีสลับกัน คือ  $w/h \ll 1$  ค่า  $K$  ก็จะเข้าหา 0.5 ในทางปฏิบัตินั้นพบว่ากรณีที่ออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติเป็น  $50 \Omega$  โดยที่  $\epsilon_r = 10$  จะได้ค่า  $K = 0.63$  สำหรับการหาค่า  $\alpha_d$  ก็จะอาศัยหลักการคิดค่า  $\epsilon_{eff}$  ขึ้นมาใหม่ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$\alpha_d = \frac{GZ_c}{2} = \frac{Z_c}{2} (\omega C \tan \delta_{eff}) = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{2cC} (\omega C \tan \delta_{eff}) \quad (2.16)$$

$$= \frac{\pi f \sqrt{\epsilon_{eff}}}{c} \tan \delta_{eff} \text{ Nep/m} \quad (2.17)$$

โดยที่ค่า  $\tan \delta_{eff}$  นั้นเปรียบเหมือนค่า  $\tan \delta$  ประสิทธิภาพ ซึ่งจะสัมพันธ์กับ  $\tan \delta$  ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\tan \delta_{eff}}{\tan \delta} = \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \quad (2.18)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.18 นี้เป็นสิ่งที่สมเหตุสมผลเพราะเมื่อแทนค่า  $\epsilon_{eff}$  ด้วย 1 ซึ่งหมายถึงตัวกลางเป็นอวกาศ ค่า  $\tan \delta_{eff}$  จะเท่ากับ 0 และเมื่อแทนค่า  $\epsilon_{eff} = \epsilon_r$  ซึ่งหมายถึงตัวกลางจะเป็นสารไดอิเล็กตริกทั้งหมด ค่า  $\tan \delta_{eff}$  จะเท่ากับ  $\tan \delta$

เมื่อนำค่า  $\alpha_m$  และ  $\alpha_d$  ในสมการที่ 2.16 และสมการที่ 2.17 แทนกลับไปในสมการที่ 2.14 ก็จะได้ค่า  $\alpha$  ผลรวมออกมา และเนื่องจากเรานิยมเขียนค่า  $\alpha$  ให้อยู่ในหน่วย dB/m เขียนความถี่ที่ใช้ งานให้มีหน่วยเป็น GHz และเขียนความกว้างของแถบสตริปให้มีหน่วยเป็น mm ดังนั้น  $\alpha$  จะเขียนได้ในรูปต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{72K}{wZ_c} \sqrt{\frac{f}{\sigma_r}} + 91f \sqrt{\epsilon_{eff}} \frac{1 - (1/\epsilon_{eff})}{1 - (1/\epsilon_r)} \tan \delta \quad \text{dB/m} \quad (2.19)$$

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่า  $\alpha_m$  แปรตาม  $\sqrt{f}$  ในขณะที่  $\alpha_d$  แปรตาม  $f$  ซึ่งทำให้ดูเหมือนว่า  $\alpha_d$  จะมีค่าสูงกว่า  $\alpha_m$  อย่างไรก็ตามในระยะหลังนี้ได้มีการพัฒนาวัสดุฐานรองที่มีคุณสมบัติดีขึ้น คือ มีค่า  $\tan \delta$  ต่ำมาก ทำให้ในช่วงความถี่ที่  $f < 10$  GHz ค่า  $\alpha_m$  จะใหญ่กว่าค่า  $\alpha_d$  และเป็นค่าสูญเสียหลักของไมโครสตริป

#### 2.2.4 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่อง (Discontinuities in Microstrip)

แบบช่องต่อ (Series Gap) คุณลักษณะของความไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปนั้นถูกมองในลักษณะของค่าคาปาซิแตนซ์ โดยภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปแบบช่องต่อ ในการแปลงเป็นวงจรสมมูลที่บริเวณช่องต่อจะทำการแปลงเป็นวงจรข่ายแบบ  $\pi$  ที่มีแต่ละองค์ประกอบของวงจรเป็นตัวเก็บประจุซึ่งสามารถหาค่าของแต่ละองค์ประกอบในวงจรสมมูลได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$C_1 = \frac{1}{2} C_\epsilon \quad (2.20)$$

$$C_2 = \frac{1}{2} C_0 - \frac{1}{4} C_\epsilon \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$C_0 = w \left( \frac{\epsilon_r}{9.6} \right)^{0.8} \left( \frac{g}{w} \right)^{m_0} e^{K_0} \times 10^{-2} \quad (2.22)$$

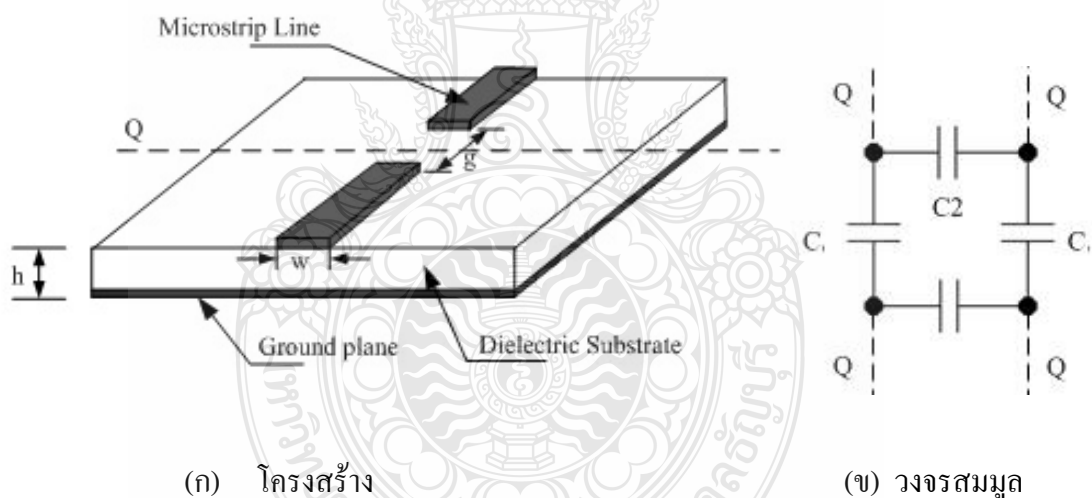
$$C_\epsilon = w \left( \frac{\epsilon_r}{9.6} \right)^{0.8} \left( \frac{g}{w} \right)^{m_0} e^{K_0} \times 10^{-12} \quad (2.23)$$

$$m_0 = \frac{w}{h} \left( 0.619 \log \frac{w}{h} - 0.3853 \right) \quad (2.24)$$

$$m_e = \begin{cases} 0.8675 & ; \text{for } \frac{g}{w} < 0.3 \\ \frac{1.565}{\left(\frac{w}{h}\right)^{0.16}} - 1 & ; \text{for } \frac{g}{w} < 0.3 \end{cases} \quad (2.25)$$

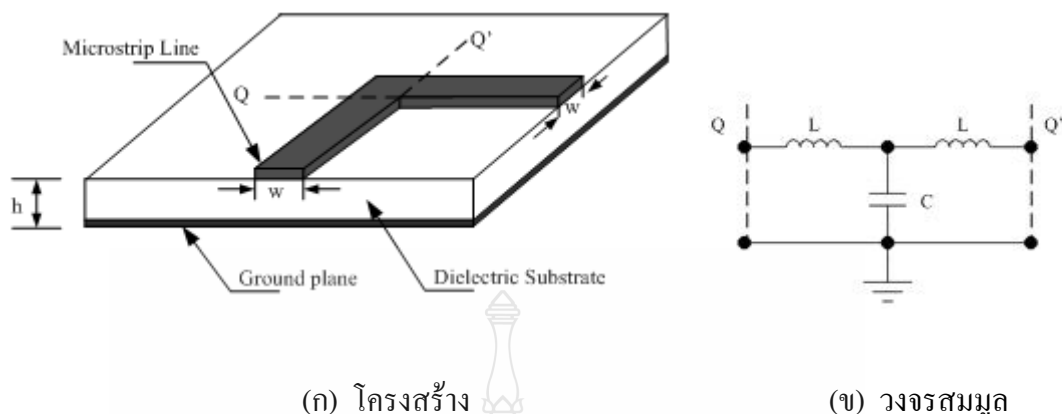
$$K_0 = 4.26 - 1.453 \log \frac{w}{h} \quad (2.26)$$

$$K_e = 2.043 \left( \frac{w}{h} \right)^{0.12} \quad (2.27)$$



ภาพที่ 2.9 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบช่องต่อ

แบบมุมฉาก (Right-Angled) การเปลี่ยนแปลงลักษณะของสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนจากเส้นตรง ให้กลายเป็นมุมแบบมุมฉากนั้นทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องบนสายส่งสัญญาณไมโครสตริป โดยที่การเปลี่ยนรูปร่างในลักษณะนี้ ส่วนใหญ่จากการส่งผ่านสัญญาณหรือการกรองสัญญาณจากภาพที่ 2.10 แสดง โครงสร้างและวงจรสมมูลของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก



(ก) โครงสร้าง

(ข) วงจรสมมูล

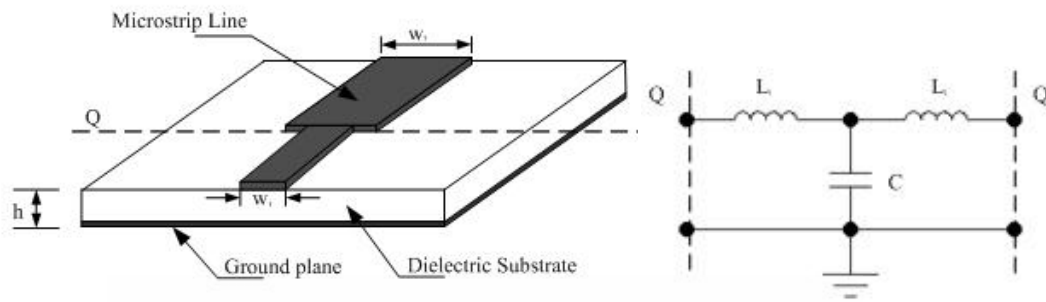
ภาพที่ 2.10 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบมุมฉาก

ในการแปลงวงจรสมมูลที่บริเวณมุมฉากนั้นจะทำการแปลงเป็นวงจรจ่ายแบบ T โดยที่จะมีตัวเหนี่ยวนำสองตัวต่อกัน และมีตัวเก็บประจุต่อขนาน ซึ่งสามารถหาค่าของอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์ของแต่ละองค์ประกอบได้ดังนี้

$$m_e = \begin{cases} w \left[ \frac{(14\epsilon_r + 1)(w/h) - (1.83\epsilon_e - 2.25) + 0.02\epsilon_r}{\sqrt{w/h}} + \frac{0.02\epsilon_r}{w/h} \right] & ; \text{for } \frac{w}{h} < 1 \\ w[(9.5\epsilon_r + 1.25)(w/h) + 5.2\epsilon_r + 7] \times 10^{-12} & ; \text{for } \frac{w}{h} < 1 \end{cases} \quad (2.28)$$

$$L = 100h \left( 4\sqrt{\frac{w}{h}} - 4.21 \right) \times 10^{-9} \quad (2.29)$$

แบบขั้น (Microstrip Step) การที่เปลี่ยนขนาดความกว้างของแผ่นไมโครสตริปจะทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของค่าอิมพีแดนซ์ในสายส่งสัญญาณขึ้น โดยการออกแบบให้แผ่นไมโครสตริปเกิดความไม่ต่อเนื่องแบบเป็นขั้นนี้ ส่วนใหญ่จะทำเมื่อต้องการทำแมตซ์ตัวแปลงสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ และการส่งผ่านสัญญาณ จากภาพที่ 2.11 จะพบว่า การหาค่าทางอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ สามารถพิจารณาได้จากค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลในเทอมของความเหนี่ยวนำ (Inductance) กับความจุ (Capacitance) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.30



(ก) โครงสร้าง

(ข) วงจรสมมูล

ภาพที่ 2.11 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบขั้น

$$L_1 = \frac{L_{w1}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (2.30)$$

$$L_2 = \frac{L_{w2}}{L_{w1} + L_{w2}} L \quad (2.31)$$

$$L = h \left[ 40.5 \left( \frac{w_1}{w_2} - 1 \right) - 75 \left( \frac{w_1}{w_2} \right) + 0.2 \left( \frac{w_1}{w_2} - 1 \right)^2 \right] \times 10^{-9} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $L_{w1}$  และ  $L_{w2}$  เป็นตัวเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาวของสายไมโครสตริปที่มีความกว้างเป็น  $w_1$  และ  $w_2$  ตามลำดับ

$$c = \sqrt{w_1 w_2} \left[ (10.11 \log \epsilon_r + 2.33) \frac{w_1}{w_2} - 12.61 \log \epsilon_r - 3.17 \right] \quad (2.33)$$

แบบรูปตัว T (Microstrip T-Junction) สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T มีโครงสร้างและวงจรสมมูลดังแสดงในภาพที่ 2.12 จากโครงสร้างและวงจรสมมูล จะเห็นได้ว่าแบบรูปตัว T นั้น จะมีลักษณะคล้ายรูปมุมฉาก การออกแบบให้สายส่งสายอากาศไมโครสตริปเกิดความไม่ต่อเนื่องแบบเป็นขั้นนี้ส่วนใหญ่จะใช้ในวงจรไมโครเวฟ เช่น เพื่อต้องการเพิ่มทางนำเข้า (Port) ในการส่งสัญญาณ ตัวเชื่อมต่อสัญญาณ ตัวกรองสัญญาณ การทำแมตซ์เพื่อ

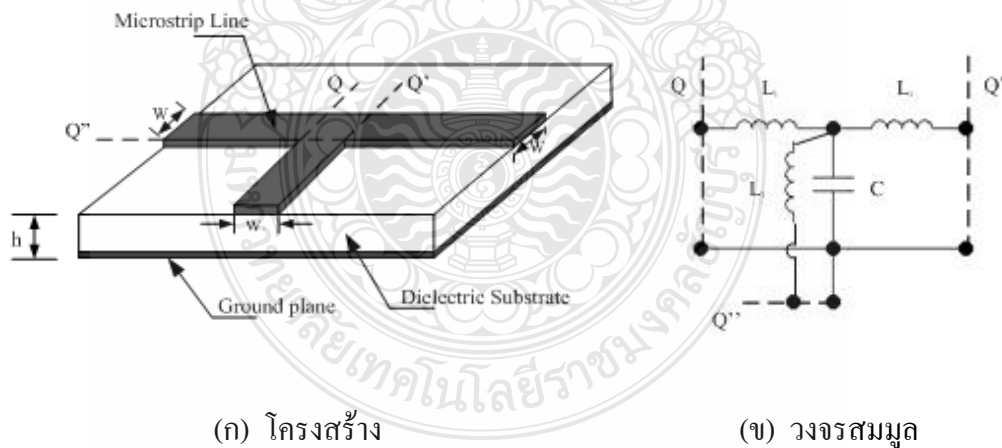
เชื่อมต่อดวงจรหรือนำไปใช้ออกแบบป้อนสัญญาณให้กับสายอากาศไมโครสตริป จากวงจรมุมจะพบว่า การหาค่าคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์นั้นสามารถที่จะพิจารณาในเทอมของความเหนี่ยวนำกับความจุ โดยกำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำที่อยู่พอร์ท  $Q''$  มีค่าเป็น  $L_1$  ส่วนตัวเหนี่ยวนำที่อยู่ทางด้านพอร์ท  $Q$  และพอร์ท  $Q'$  มีค่าอินดักแตนซ์เป็น  $L_2$  และมีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่ซึ่งค่าของแต่ละองค์ประกอบสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$L_1 = hL_w \left[ \left( 0.12 \frac{w}{h} - 0.47 \right) \frac{w}{h} + 0.195 \frac{w}{h} - 0.357 + 0.0283 \sin \left( \pi \frac{w}{h} - 0.75\pi \right) \right] \quad (2.34)$$

$$L_2 = -wL_w \left[ \frac{w}{h} \left( -0.016 \frac{w}{h} + 0.064 \right) + \frac{0.016}{w/h} \right] \quad (2.35)$$

เมื่อ  $L_w$  เป็นค่าอินดักแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของสายส่งไมโครสตริปที่มีความกว้างเป็น  $w$

$$C = w \left[ \frac{100}{\tanh(0.0072Z_0)} + 0.64Z_0 - 261 \right] \times 10^{-12} \quad (2.36)$$



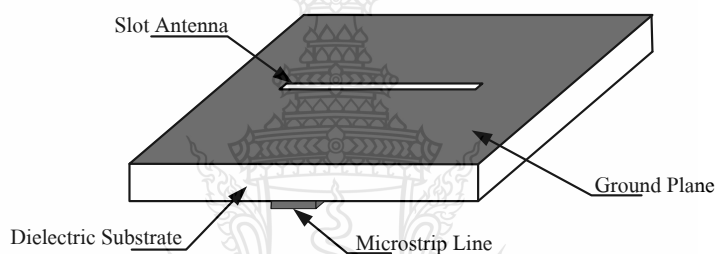
ภาพที่ 2.12 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปที่ไม่ต่อเนื่องแบบรูปตัว T



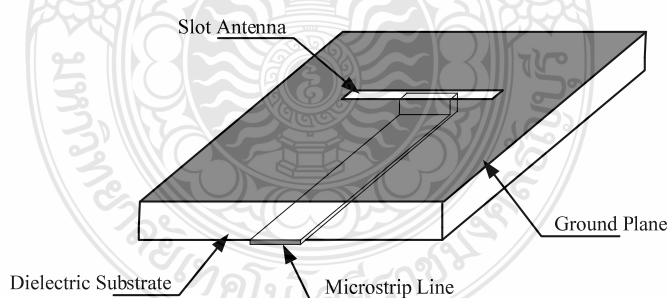
## 2.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด [11-18]

### 2.3.1 โครงสร้างของสายอากาศ

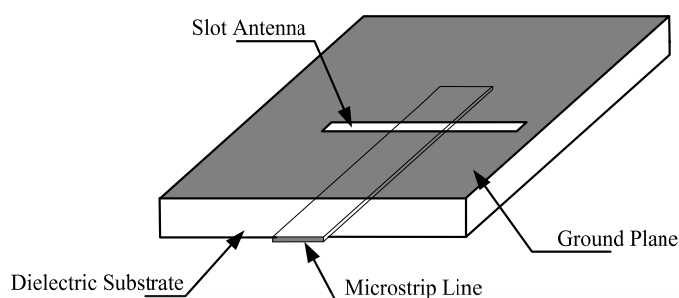
ลักษณะของโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดจะประกอบด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไลน์และสายอากาศแบบช่องเปิดวางตั้งฉากกับไมโครสตริปอยู่บนระนาบกราวด์ โดยมีวัสดุฐานรองเป็นตัวกั้นกลางระหว่างสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปกับสายอากาศแบบช่องเปิด ดังแสดงในภาพที่ 2.13 โดยลักษณะของการส่งผ่านสัญญาณ ของคลื่นนั้นจะมีอยู่ 2 แบบหลักๆ คือ แบบปิดวงจรซึ่งจะเป็นการต่อตัวนำจากสายส่งสัญญาณ ผ่านวัสดุฐานรองไปปิดวงจรที่ขอบของช่องเปิด (Microstrip Terminated in A Short Circuit) ดังภาพที่ 2.14 และอีกวิธีคือแบบเปิดวงจร (Microstrip Terminated in A Open Circuit) ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด



ภาพที่ 2.14 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบปิดวงจร



ภาพที่ 2.15 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดที่ส่งผ่านคลื่นแบบเปิดวงจร

### 2.3.2 การแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบช่องเปิด

สายอากาศแบบช่องเปิดนั้นจะมีการกระจายคลื่นผ่านหลายตัวกลาง ซึ่งเกิดเนื่องจากแหล่งกำเนิดคลื่นนั้นอยู่ที่บริเวณหนึ่ง ส่วนคลื่นที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศจะกระจายไปในอีกบริเวณหนึ่งซึ่งมีตัวกลางที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.16 จากภาพแสดงการเดินทางของคลื่นจากตัวกลางที่ 1 ไปยังตัวกลางที่ 2 โดยที่ตัวกลางที่ 1 ถูกปิดล้อมด้วยผิวปิด  $S'$  มีตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2 มีค่าคงที่ของตัวกลางไม่เหมือนกันหรือมีค่าที่เรียกว่าอินทริซินซิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic Impedance) ไม่เหมือนกัน คลื่นที่เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นเมื่อกระทบกับผิวขอบเขตจะเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเข้าสู่ตัวกลางที่ 1 ส่วนหนึ่ง และส่งผ่านคลื่นเข้าไปในตัวกลางที่ 2 อีกส่วนหนึ่ง ดังนั้นถ้าให้  $\vec{E}^i$  และ  $\vec{H}^i$  เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่น โดยที่  $\vec{E}^r$  และ  $\vec{H}^r$  เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการสะท้อนที่ผิวขอบเขต ส่วน  $\vec{E}^t$  และ  $\vec{H}^t$  เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านเข้าไปในตัวกลางที่ 2 ดังนั้นในตัวกลางที่ 1 คลื่นที่ปรากฏอยู่ก็คือผลบวกระหว่างคลื่นตกกระทบกับคลื่นสะท้อนรวมกัน ส่วนในตัวกลางที่ 2 นั้นก็จะมีเพียงคลื่นที่ส่งผ่าน โดยสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\vec{E}_t^i + \vec{E}_t^r = \vec{E}_t^t \quad (2.37)$$

$$\vec{H}_t^i + \vec{H}_t^r = \vec{H}_t^t \quad (2.38)$$

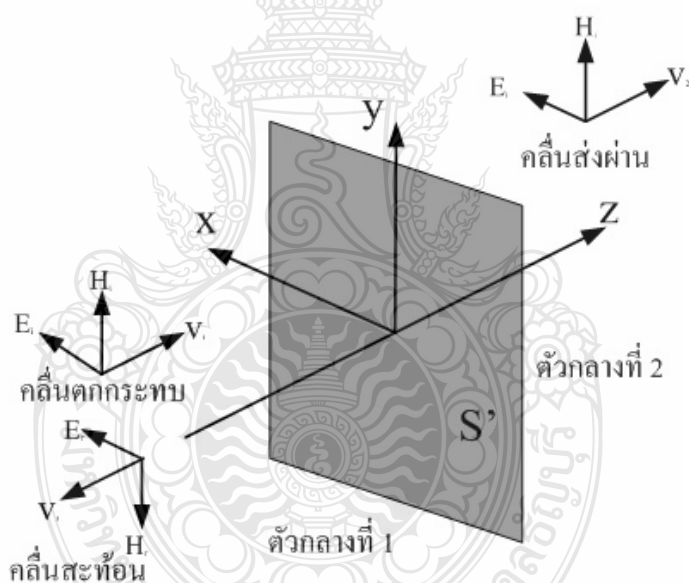
โดยที่ตัวห้อย  $t$  หมายถึง ส่วนประกอบของสนามในแนวขนานกับผิวขอบเขต

เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่ต่อเนื่องที่เกิดขึ้นตรงผิวขอบเขตนั้น เราสามารถคิดได้ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากกระแสไฟฟ้าสมมูล และกระแสแม่เหล็กสมมูลที่กระจายอยู่บนขอบเขตในรูปสมการที่ 2.39, 2.40 ต่อไปนี้

$$\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}_t \quad (2.39)$$

$$\vec{M} = \vec{n} \times \vec{E}_t \quad (2.40)$$

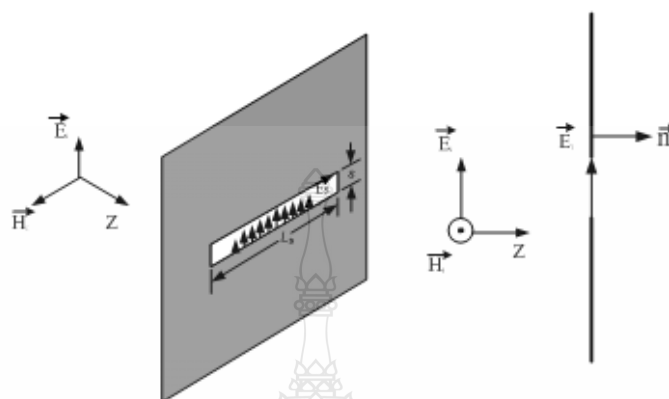
โดยที่  $\vec{J}$  คือ กระแสไฟฟ้าสมมูล  
 $\vec{M}$  คือ กระแสแม่เหล็กสมมูล  
 $\vec{n}$  คือ เวกเตอร์หน่วยที่ผิวขอบเขต



ภาพที่ 2.16 การสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่เข้ากระทบแผ่นตัวนำสมบูรณ์แบบที่มีช่องเปิดแคบๆ ดังภาพที่ 2.17 โดยมีทิศของสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับแนวของช่องเปิด และถ้าให้ความกว้างของช่องเปิด (S) มีค่าน้อยๆ นั้นหมายความว่าช่องเปิดแคบมากๆ กระแสไฟฟ้าสมมูล ( $\vec{J} = \vec{n} \times \vec{H}^i$ ) จะมีขนาดจำกัดและเมื่อให้ค่า S เข้าใกล้ศูนย์ กระแสไฟฟ้าสมมูลที่ว่่านี้อาจตัดทิ้งได้เพราะเนื่องจากมีขนาดเล็กมาก แต่ส่วน

ที่เป็นกระแสแม่เหล็กสมมูล ( $\vec{M} = \vec{n} \times \vec{E}^i$ ) นั้นไม่สามารถที่จะตัดทิ้งได้เพราะเมื่อ S เข้าใกล้จุดศูนย์กลางสนามไฟฟ้าที่ช่องเปิดจะคู่เข้าหอนันต์จึงไม่สามารถตัดทิ้งได้

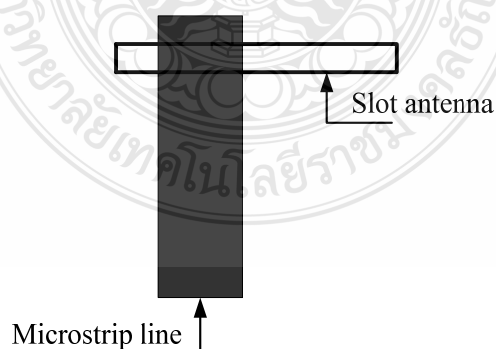


ภาพที่ 2.17 การกระจายคลื่นจากช่องเปิด

### 2.3.3 การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิด

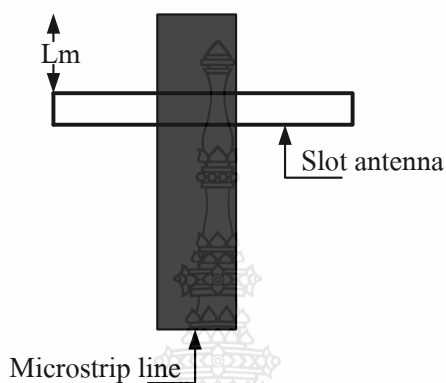
วิธีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดนั้น โดยพื้นฐาน จะมีด้วยกัน 3 วิธี คือ

1) วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ (Offset Microstrip Feeding) เป็นวิธีเลื่อนหรือเปลี่ยนตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป โดยเลื่อนไปทางซ้ายหรือทางขวาเท่านั้นดังภาพที่ 2.18



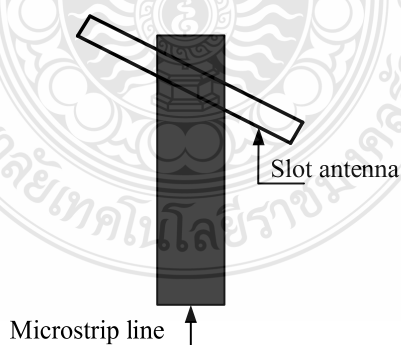
ภาพที่ 2.18 วิธีการเลื่อนจุดกึ่งกลางของช่องเปิดออกจากจุดกึ่งกลางของสายส่งสัญญาณ

2) วิธีการปรับเปลี่ยนความยาวท่อนสั้น (Stub-Turning) โดยวิธีนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของสายส่งสัญญาณ จากภาพที่ 2.19 กำหนดให้  $L_m$  เป็นความยาวของท่อนสั้นวัดเทียบจากขอบของช่องเปิดจนถึงปลายสายส่งสัญญาณ การแมตช์อิมพีแดนซ์วิธีนี้จะมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ด้วย



ภาพที่ 2.19 วิธีการปรับความยาวท่อนสั้น

3) วิธีการหมุนช่องเปิด (Center-Fed But Inclined Microstripline Feed) วิธีการนี้คือ การทำให้ช่องเปิดไม่ตั้งฉากกับสายส่งสัญญาณแสดงดังภาพที่ 2.27 ซึ่งการแมตช์อิมพีแดนซ์วิธีนี้ จะมีความยุ่งยากและไม่ค่อยได้รับความนิยม



ภาพที่ 2.20 วิธีการหมุนช่องเปิด

## 2.4 ระเบียบวิธีโมเมนต์ (The Moment of Method)

ระเบียบวิธีโมเมนต์มีประโยชน์ในเรื่องแนวคิดอย่างง่าย จะนำมาใช้กับการแก้สมการเชิงอินทิกรัล ยกตัวอย่างเช่น สมมติต้องการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ เพื่อแก้สมการของปัวซงส์ผลเฉลยเชิงอินทิกรัลในสมการของปัวซงส์คือ

$$V = \int \frac{\rho_v dv}{4\pi\epsilon_r} \quad (2.41)$$

สมการที่ 2.41 ได้มาจากกฎของคูลอมบ์และการกระจายประจุที่กำหนดมาให้คือ  $\rho_v(x, y, z)$  จะทำให้เราสามารถหาค่าศักย์  $V(x, y, z)$  สนามไฟฟ้า  $E(x, y, z)$  และประจรรวมได้ และอีกนัยหนึ่งถ้าเราทราบค่าศักย์แต่ไม่ทราบการกระจายประจุ เราจะหา  $\rho_v$  จากสมการที่ 2.41 อย่างไรในสถานการณ์นั้นสมการที่ 2.41 จะกลายเป็นสมการที่ถูกเรียกว่า สมการอินทิกรัล (Integral Equation) ซึ่งโดยทั่วไปสมการ Kernel Integral เป็นสมการหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับฟังก์ชันไม่รู้ค่าภายในเครื่องหมายอินทิกรัลซึ่งมีรูปแบบทั่วไปคือ

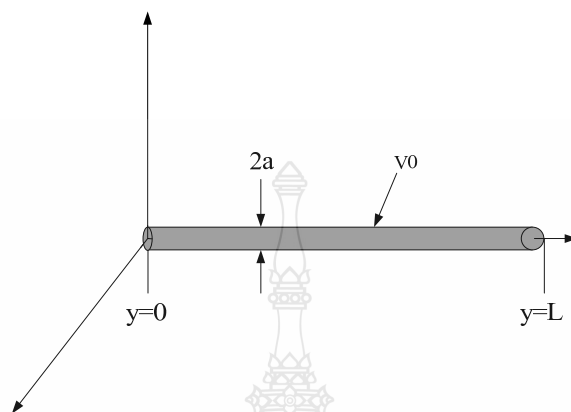
$$V(x) = \int_a^b K(x, t) \rho(t) dt \quad (2.42)$$

เมื่อทราบค่าฟังก์ชัน  $K(x, t)$  ฟังก์ชัน  $V(t)$  และลิมิต  $a$  และ  $b$  ก็หาค่าฟังก์ชันตัวไม่รู้ค่า  $\rho(t)$  ได้ นั่นซึ่งฟังก์ชัน  $K(x, t)$  จะถูกเรียกว่า ส่วนประกอบหลัก (Kernel) ของสมการระเบียบวิธีโมเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขระเบียบวิธีหนึ่งที่ใช้แก้สมการเชิงอินทิกรัลดังเช่นสมการที่ 2.42 ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่อธิบายได้ดีที่สุดเป็นตัวอย่าง

พิจารณาเส้นลวดนำไฟฟ้าขนาดบางที่มีรัศมี  $\alpha$  ความยาว  $L(L_1 a)$  อยู่ที่ตำแหน่งในอากาศว่าง ดังแสดงในภาพที่ 2.21 โดยกำหนดให้เส้นลวดถูกบำรุงรักษาที่ศักย์  $V_0$  เป้าหมายคือหาความหนาแน่นประจุ ตามเส้นลวดโดยใช้ระเบียบวิธีโมเมนต์ เมื่อเราหา  $\rho_L$  ได้แล้ว ก็หาความสัมพันธ์ปริมาณสนามได้ ซึ่ง ณ จุดใดๆ บนเส้นลวด สมการที่ 2.41 จะลดลงเป็นสมการเชิงอินทิกรัลที่มีรูปแบบเป็น

$$V_0 = \int_0^L \frac{\rho_L dl}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2.43)$$

เนื่องจากสมการที่ 2.43 ประยุกต์ใช้กับจุดสังเกตทุกๆ ที่บนเส้นลวด ซึ่งที่จุดตายตัวที่  $y_k$  จะรู้จักกันในนาม จุดเข้าคู่ (Match Point)



ภาพที่ 2.21 เส้นลวดนำไฟฟ้าขนาดบางรักษาไว้ที่ศักย์คงตัว

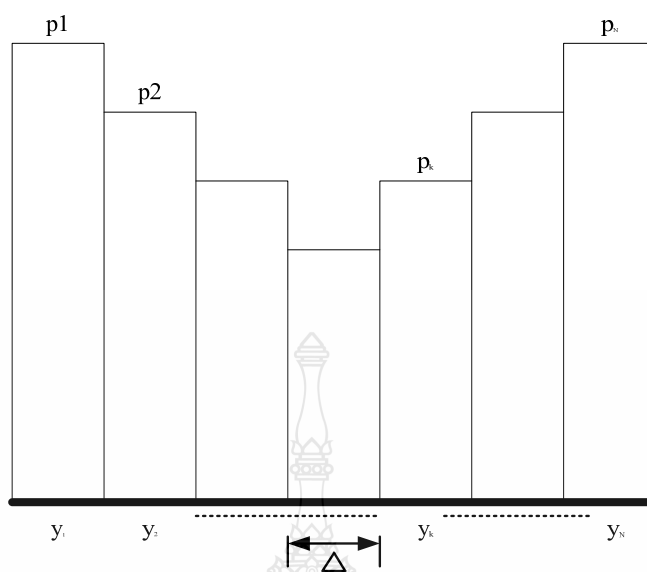
$$V_{0(y)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^L \frac{\rho_L(y) dy}{|y_k - y|} \quad (2.44)$$

การอินทิเกรตเป็นการหาพื้นที่ภายใต้เส้นโค้ง ถ้า  $\Delta y$  มีขนาดเล็กการอินทิเกรต  $f(y)$  ตลอด  $0 < y < L$  จะกำหนดได้โดย

$$\int_0^L f(y) dy = f(y_1)\Delta y + \dots + f(y_N)\Delta y = \sum_{k=1}^N f(y_k)\Delta y \quad (2.45)$$

เมื่อช่วง  $L$  ถูกแบ่งออกเป็น  $N$  หน่วย ซึ่งแต่ละหน่วยมีความยาว  $\Delta y$  สำหรับเส้นลวดที่ถูกแบ่งออกเป็น  $N$  ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนยาวเท่ากับ  $\Delta$  ได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.22 จะทำให้สมการที่ 2.44 จะได้

$$4\pi\epsilon_0 V_0 \cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_k - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_k - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_k - y_N|} \quad (2.46)$$



ภาพที่ 2.22 การแบ่งเส้นลวดออกเป็น  $N$  ส่วน

เมื่อ  $\Delta = L/N = \Delta y$  การสมมติในสมการที่ 2.46 คือความหนาแน่นตัวไม่รู้ค่า  $\rho_k$  บนส่วนที่  $k$  ให้เป็นค่าคงตัว ดังนั้นในสมการที่ 2.46 เรามีค่าคงตัวตัวไม่รู้ค่า  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  เนื่องจากสมการที่ 2.46 ต้องใช้ได้กับทุกจุดบนเส้นลวดเราจึงได้รับ  $N$  คล้ายกับสมการโดยเลือกจุดเข้าสู่  $N$  ที่  $y_1, y_2, \dots, y_n$  บนเส้นลวดดังนั้นเราจะได้รับ

$$4\pi\epsilon_0 V_0 \cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_1 - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_1 - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_1 - y_N|} \quad (2.47a)$$

$$\cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_k - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_k - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_k - y_N|} \quad (2.47b)$$

$$\therefore 4\pi\epsilon_0 V_0 \cong \frac{\rho_1 \Delta}{|y_N - y_1|} + \frac{\rho_2 \Delta}{|y_N - y_2|} + \dots + \frac{\rho_N \Delta}{|y_N - y_N|} \quad (2.47c)$$

ความคิดเรื่องการนำด้านซ้ายมือเข้าสู่กับด้านขวามือของสมการที่ 2.44 ที่จุดเข้าสู่จะคล้ายกับแนวคิดการกำหนดโมเมนต์ในทางกล ซึ่งเป็นการวางเหตุผลว่าทำให้วิธีการนี้จึงถูกเรียกว่าระเบียบวิธีโมเมนต์ จะเห็นได้จากภาพที่ 2.22 ว่าจุดเข้าสู่  $y_1, y_2, \dots, y_n$  ได้ถูกวางไว้ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละส่วนซึ่งสมการที่ 2.47 สามารถนำมาใส่ไว้ในรูปแบบแมทริกซ์จะได้



เมื่อ

$$[B] = [A][\rho] \quad (2.48)$$

$$[B] = 4\pi\epsilon_0 V_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{mn} & \cdot & \cdot & \cdot \\ A_{N1} & A_{N2} & \dots & A_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.50a)$$

$$A_{mn} = \frac{\Delta}{[y_m - y_n]} mn \quad (2.50b)$$

$$[\rho] = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \rho_N \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

ในสมการที่ 2.51 มี  $[\rho]$  เป็นแมทริกซ์ที่ยังไม่รู้ค่าสมาชิก (Element) เราสามารถหา  $[\rho]$  จากสมการที่ 2.51 โดยใช้หลักเกณฑ์คราเมอร์ (Cramer's rule) โดยที่ใช้การแมทริกซ์ผกผัน (Matrix Inversion) หรือโดยใช่วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian Elimination) ซึ่งสำหรับการใช้การแมทริกซ์ผกผัน คือ

$$[\rho] = [A]^{-1}[B] \quad (2.52)$$

เมื่อ  $[A]^{-1}$  เป็นตัวผกผันของเมทริกซ์  $[A]$  ในสมการที่ 2.47 หรือ 2.50

## 2.5 ประสิทธิภาพของสายอากาศไมโครสตริป [19-26]

สำหรับองค์ประกอบ (Element) ของสายอากาศไมโครสตริปประสิทธิภาพของสายอากาศจะเป็นที่ตัวกำหนดกำลังของการแผ่พลังงาน โดยกำลังที่ได้รับได้ทางอินพุตขององค์ประกอบส่วนประกอบต่างๆ จะเกิดการลดทอนขึ้นที่ตัวนำ การสูญเสียจากโหนดที่รวมอยู่ในแต่ละองค์ประกอบ สำหรับองค์ประกอบไมโครสตริปที่มีประสิทธิภาพอยู่ที่ 80 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์นั้นจะมีลักษณะบาง และมักจะพบว่าเมื่อแผ่นวงจรพิมพ์มีความบางมากๆ จะมีการลดทอนน้อย โดยค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) สามารถแมตซ์ที่ 50 โอห์มได้ แต่จะมีแบนด์วิดท์แคบ และการสูญเสียเนื่องจากอุณหภูมิก็มีจำนวนมากหรือไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง มากขึ้นอย่างรวดเร็ว และเปอร์เซ็นต์การสะท้อนก็จะมากขึ้น โดยการสูญเสียที่เกิดจากสารรองรับจะสามารถถูกกำจัดออกไปโดยใช้สารรองรับที่เป็นอากาศ ( $\epsilon_r \approx 1$ ) ด้วย เมื่อส่วนใหญ่ขององค์ประกอบมีการแยกกันระหว่างองค์ประกอบ และระนาบกราวนด์ สารรองรับจะมีผลต่อคุณสมบัติของสายอากาศไมโครสตริป จากที่ได้ทราบค่าไดเรกทิวิตี และค่าอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปสามารถที่จะกำหนดค่าประสิทธิภาพของสายอากาศหาได้จาก

$$G = \eta D \quad (2.53)$$

โดยที่

- $G$  หมายถึงอัตราขยายของสายอากาศ
- $D$  หมายถึงไดเรกทิวิตี
- $\eta$  หมายถึงประสิทธิภาพของสายอากาศ

การหาอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปนั้น การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปจะต้องออกแบบสายอากาศขึ้นมาจำนวนหนึ่งคู่ โดยมีลักษณะเหมือนกัน ในทางทฤษฎีอัตราขยายของทั้งสองชุดต้องเท่ากัน ดังนั้นสามารถวัดหาอัตราขยายของสายอากาศได้โดยการ

ต่ออุปกรณ์เพื่อทำการหาค่าต่างๆ ที่ใช้ในการหาค่าอัตราขยายจากสมการที่ 2.54 และสมการที่ 2.55

$$P_r = P_t - L_f - L_{line} + G_t + G_r \quad (2.54)$$

$$G_r = P_r - P_t + L_f + L_{line} - G_t \quad (2.55)$$

โดยที่

|            |  |
|------------|--|
| $P_t$      | หมายถึงกำลังงานทางด้านส่ง (dBm)  |
| $P_r$      | หมายถึงกำลังงานทางด้านรับ  |
| $L_{line}$ | หมายถึงกำลังงานที่สูญเสียในสายส่งทางด้านส่งและด้านรับ                              |
| $L_f$      | หมายถึงกำลังงานที่สูญเสียในอากาศ = $20 \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)$ |
| $G_t$      | หมายถึงอัตราขยายของสายอากาศทางด้านส่ง  |
| $G_r$      | หมายถึงอัตราขยายของสายอากาศทางด้านรับ  |

## 2.6 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11

เครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2540 โดยสถาบัน The Institute of Electronics and Electrical Engineers (IEEE) ซึ่งมีข้อกำหนดระบุไว้ว่าผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายในส่วนของ Physical Layer (PHY Layer) นั้นมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่ความเร็ว 1, 2, 5.5, 11 และ 54 Mbps โดยมีสื่อส่งสัญญาณ 3 ประเภทให้เลือกใช้งานอันได้แก่คลื่นวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz, 2.5 GHz และคลื่นอินฟราเรด ส่วนในระดับชั้น Media Access Control Layer (MAC Layer) นั้น ได้กำหนดกลไกของการทำงานแบบ Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ Collision Detection (CSMA/CD) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งนิยมใช้งานบนระบบเครือข่ายแบบใช้สาย โดยมีกลไกในการเข้ารหัสข้อมูล ก่อนแพร่กระจายสัญญาณไปบนอากาศ พร้อมกับมีการตรวจสอบผู้ใช้งานอีกด้วย

มาตรฐาน IEEE 802.11 ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำและยังไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการที่เรียกกันว่า Quality of Service (QoS) ซึ่งมีความสำคัญในสภาพแวดล้อมที่มี (Application) หลากหลายประเภทให้ใช้งาน นอกจากนั้นกลไกในเรื่องการรักษาความปลอดภัยที่นำมาใช้ก็ยังมีข้อบกพร่องจำนวนมากดังนั้นทางด้าน IEEE จึงได้จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกัน เพื่อทำการพัฒนาและปรับปรุงมาตรฐานให้มีศักยภาพเพิ่มสูงขึ้น

### 2.6.1 IEEE 802.11a

เป็นมาตรฐานที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่เมื่อปี พ.ศ. 2542 โดยใช้เทคโนโลยี Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) เพื่อพัฒนาให้ผลิตภัณฑ์การสื่อสารไร้สายมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงสุด 54 Mbps โดยใช้คลื่นวิทยุย่านความถี่ 5 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ไม่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานโดยทั่วไปในประเทศไทยเนื่องจากสงวนไว้สำหรับกิจการทางด้านการทหาร ขีด้อยของผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11a ก็คือมีรัศมีการใช้งานในระยะสั้นและมีราคาแพง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.11a จึงได้รับความนิยมน้อย

### 2.6.2 IEEE 802.11b

เป็นมาตรฐานที่ถูกตีพิมพ์และเผยแพร่ออกมาพร้อมกับมาตรฐาน IEEE 802.11a เมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและได้รับความนิยมในการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบมาให้รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยี ที่เรียกว่า Complimentary Code Keying (CCK) ร่วมกับเทคโนโลยี (Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) เพื่อให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยอัตราความเร็วสูงสุดที่ 11 เมกะบิตต่อวินาที โดยใช้คลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่อนุญาตให้ใช้งานในแบบสาธารณะทางด้านวิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม และการแพทย์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ความถี่ย่านนี้มีหลายชนิดทั้งผลิตภัณฑ์ที่รองรับเทคโนโลยี Bluetooth โทรศัพท์ไร้สายและเตาไมโครเวฟ จึงทำให้การใช้งานนั้น มีปัญหาในเรื่องของสัญญาณรบกวนของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ข้อดีของมาตรฐาน IEEE 802.11b คือ สนับสนุนการใช้งานเป็นบริเวณกว้างกว่ามาตรฐาน IEEE 802.11a ผลิตภัณฑ์มาตรฐาน IEEE 802.11b เป็นที่รู้จักในเครื่องหมายการค้า Wireless-Fidelity (Wi-Fi) ซึ่งกำหนดขึ้นโดย Wireless Ethernet Comparability Alliance (WECA) โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้ผ่านการตรวจสอบและรับรองว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 802.11b ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกันกับผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตรายอื่นๆ ได้

### 2.6.3 IEEE 802.11g

เป็นมาตรฐานที่นิยมใช้งานกันมากในปัจจุบันและได้เข้ามาทดแทนผลิตภัณฑ์ที่รองรับมาตรฐาน IEEE 802.11b เนื่องจากสนับสนุนอัตราความเร็วของการรับส่งข้อมูลในระดับ 54 Mbps โดยใช้เทคโนโลยี OFDM บนคลื่นสัญญาณวิทยุย่านความถี่ 2.4 GHz และให้รัศมีการทำงานที่มากกว่า IEEE 802.11a พร้อมความสามารถในการใช้งานร่วมกันกับมาตรฐาน IEEE 802.11b ได้ (Backward-Compatible)

#### 2.6.4 IEEE 802.11e

เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับการใช้งาน Voice over IP (VoIP) เพื่อควบคุมและรับประกันคุณภาพของการใช้งานตามหลักการ QoS โดยการปรับปรุง MAC Layer ให้มีคุณสมบัติในการรับรองการใช้งานให้มีประสิทธิภาพ

#### 2.6.5 IEEE 802.11f

มาตรฐานนี้เป็นที่รู้จักกันในนาม Inter Access Point Protocol (IAPP) ซึ่งเป็น มาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับจัดการกับผู้ใช้ที่เคลื่อนที่ข้ามเขตการให้บริการของ แอสเซสพอยต์ตัวหนึ่งไปยังแอสเซสพอยต์อีกตัวหนึ่งเพื่อให้บริการในแบบโรมมิ่งสัญญาณ ระหว่างกัน

#### 2.6.6 IEEE 802.11h

มาตรฐานที่ออกแบบมาสำหรับผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่ใช้งานในย่านความถี่ 5 GHz ให้ทำงานถูกต้องตามข้อกำหนดการใช้ความถี่ของประเทศในยุโรป

#### 2.6.7 IEEE 802.1i

เป็นมาตรฐานในด้านการรักษาความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สาย โดยการปรับปรุง MAC Layer เนื่องจากระบบเครือข่ายไร้สายมีปัญหาเกิดขึ้นมากมาย ในการใช้งาน โดยเฉพาะฟังก์ชันการเข้ารหัสของแบบ WEP 64/128 bit ซึ่งใช้คีย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไม่เพียงพอสำหรับสภาพการใช้งานที่ต้องการความมั่นใจ ในการรักษาความปลอดภัยของการสื่อสารระดับสูง มาตรฐาน IEEE 802.11i จึงกำหนดเทคนิคการเข้ารหัสที่ใช้คีย์ชั่วคราวด้วย WPA, WPA2 และ การเข้ารหัสในแบบ Advanced Encryption Standard (AES) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือสูง

#### 2.6.8 IEEE 802.11k

เป็นมาตรฐานที่ใช้จัดการการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย ทั้งจัดการการใช้งานของคลื่นวิทยุให้มีประสิทธิภาพ มีฟังก์ชันการเลือกช่องสัญญาณ การโรมมิ่งและการควบคุมกำลังส่ง นอกจากนี้ยังมีการร้องขอและปรับแต่งค่าให้เหมาะสมกับการทำงาน การหารัศมีการใช้งานสำหรับเครื่องไคลเอนต์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ระบบการจัดการสามารถทำงานจากศูนย์กลางได้

#### 2.6.9 IEEE 802.11n

เป็นมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เครือข่ายไร้สายที่คาดหมายกันว่า จะเข้ามาแทนที่มาตรฐาน IEEE 802.11a, IEEE 802.11b และ IEEE 802.11g ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน โดยให้อัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลในระดับ 100 Mbps

### 2.6.10 IEEE 802.1x

เป็นมาตรฐานที่ใช้งานกับระบบรักษาความปลอดภัย ซึ่งก่อนเข้าใช้งานระบบเครือข่ายไร้สายจะต้องตรวจสอบสิทธิ์ในการใช้งานก่อน โดย IEEE 802.1x จะใช้โปรโตคอลอย่าง LEAP, PEAP, EAP-TLS และ EAP-FAST ซึ่งรองรับการตรวจสอบผ่านเซิร์ฟเวอร์ เช่น RADIUS, Kerberos เป็นต้น

## 2.7 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.16

WiMAX หรือมาตรฐาน IEEE 802.16 คือเทคโนโลยีไร้สายความเร็วสูงล่าสุดที่มีการแยกเวอร์ชันออกมาเป็น IEEE 802.16a ซึ่งได้รับอนุมัติออกมาใช้งานเมื่อเดือนมกราคม 2004 โดยสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ หรือ IEEE มีรัศมีทำการ 30 ไมล์ (ประมาณ 48 กิโลเมตร) และมีความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงสุด 75 Mbps กว้างกว่า 10 เท่าและเร็วกว่า 30 เท่าเทียบกับ 3G

### 2.7.1 มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16

เป็นมาตรฐานที่ให้ระยะทางการเชื่อมโยงในช่วงระยะสั้นๆ แค่ 1.6 – 4.8 กิโลเมตร เป็นมาตรฐานเดียวที่สนับสนุนรูปแบบ “ในระดับสายตา” หรือได้มีการเรียกว่า Line of Sight (LoS) แต่มาตรฐานนี้กลับมีการเปิดใช้งานในช่วงความถี่ที่สูงมากคือ 10-66 GHz เลยทีเดียว

### 2.7.2 มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16a

เป็นมาตรฐานที่แก้ไขปรับปรุงจาก IEEE 802.16 เดิมก่อนหน้านี้ โดยมีการปรับลดระดับความถี่ที่ใช้งาน ให้ลงมาที่ย่านความถี่ 2-11 GHz ซึ่งคุณสมบัติเด่นที่ได้รับการแก้ไขข้อบกพร่องจากมาตรฐาน 802.16 เดิมคือคุณสมบัติการรองรับการทำงานแบบที่ไม่อยู่ในระดับสายตา Non Line of Sight (NLoS) อีกทั้งยังมีคุณสมบัติของการทำงานในส่วนของภาคสัญญาณ เมื่อมีสิ่งกีดขวางตามสภาพแวดล้อมขวางกั้น อาทิเช่น ต้นไม้, อาคาร ฯลฯ

### 2.7.3 มาตรฐาน WiMAX แบบ IEEE 802.16e

เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้สนับสนุนการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์พกพาประเภทต่างๆ เช่น อุปกรณ์พีดีเอ โน้ตบุ๊ก เป็นต้น โดยให้รัศมีทำงานที่ 1.6 – 4.8 กิโลเมตร มีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานยังสามารถสื่อสารได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดีและมีเสถียรภาพขณะใช้งาน แม้จะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา

### บทที่ 3

## การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

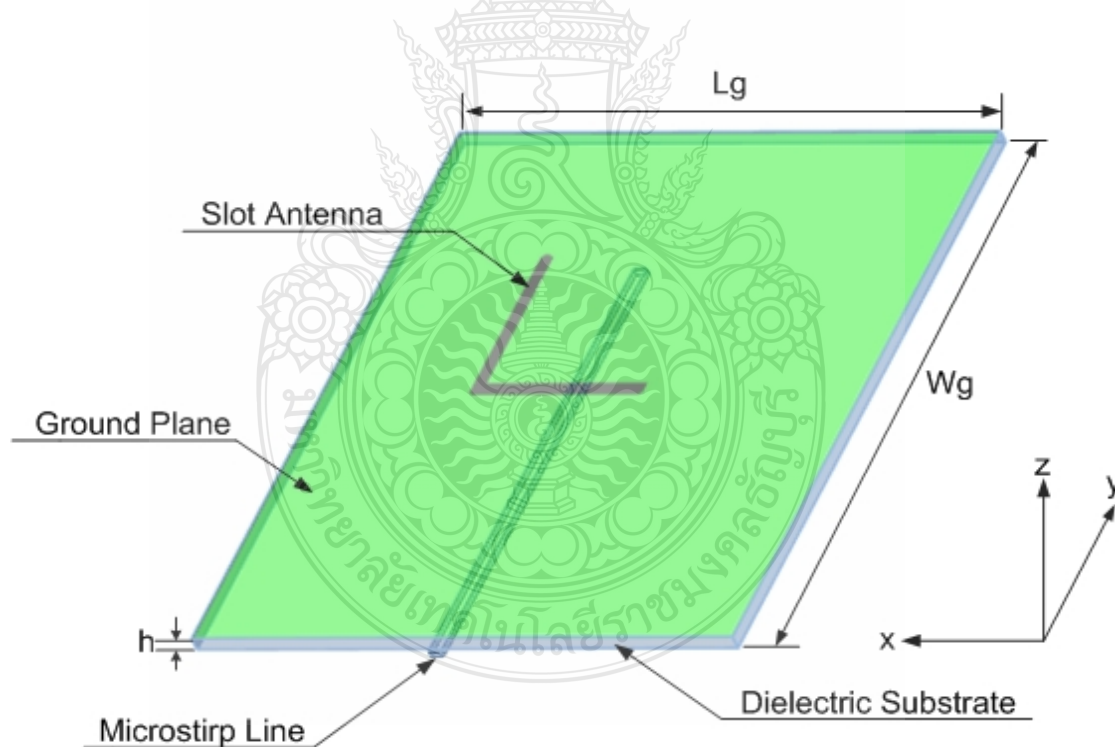
ในปัจจุบันวิวัฒนาการทางเทคโนโลยีในด้านการสื่อสารได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว เช่น การสื่อสาร ไร้สาย การสื่อสารดาวเทียม และการสื่อสาร โทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น ซึ่งระบบสื่อสารเหล่านี้จะใช้งานที่ย่านความถี่ไมโครเวฟเพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลข่าวสารต่างๆ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาในส่วนของการรับและแผ่กระจายคลื่นสัญญาณให้มีความเหมาะสม เช่นเดียวกัน โดยสายอากาศที่นิยมใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟและได้มีการศึกษาพัฒนาอย่างกว้างขวางชนิดหนึ่งก็คือ สายอากาศไมโครสตริป เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีรูปร่างไม่ซับซ้อน ออกแบบและสร้างได้ง่าย ต้นทุนต่ำ ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปที่นิยมใช้งานทั่วไปได้แก่ สายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ (Microstrip Patch Antenna) สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิด (Microstrip Slot Antenna) และสายอากาศไมโครสตริปไดโพล (Microstrip Dipole Antenna) โดยสายอากาศแต่ละชนิดต่างมีข้อได้เปรียบและเสียเปรียบแตกต่างกันไป ซึ่งการพิจารณาเลือกใช้สายอากาศชนิดใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของลักษณะการใช้งาน

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้างมีแบนด์วิดท์ 1.02 GHz โดยการนำเอาพื้นฐานในการออกแบบที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์คุณลักษณะที่สำคัญต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นจะทำการจำลองโครงสร้างของสายอากาศโดยใช้ซอฟต์แวร์ IE3D

### 3.1 การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปที่มีแถบกว้างแบบ 1 ช่อง

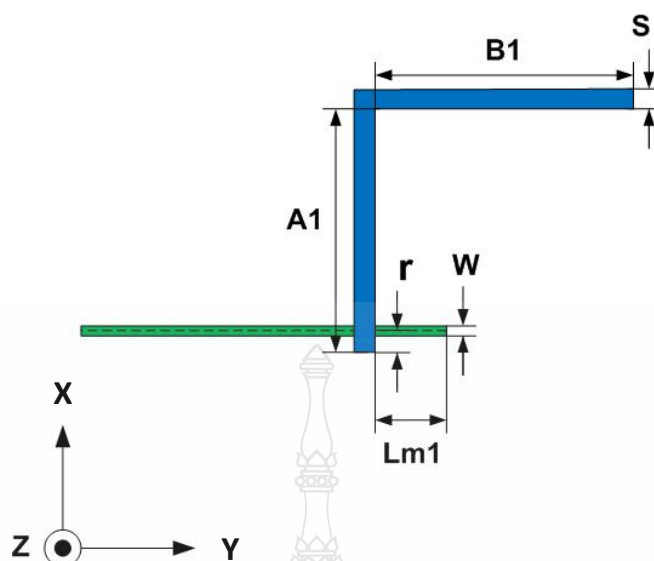
#### 3.1.1 โครงสร้างของการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

จากสมมุติฐานในการออกแบบของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนั้น เริ่มต้นจากแนวความคิดมาจากการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปพื้นฐาน ที่มีโครงสร้างของสายอากาศไม่ซับซ้อน รวมทั้งยังให้คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่ดี จากข้อดีต่างๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดพื้นฐานนั้นจึงได้ถูกพัฒนามาเป็นสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก จากการเปรียบเทียบในลักษณะทางโครงสร้างของสายอากาศทั้งสองแบบ จะเห็นได้ว่าสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากสามารถลดขนาดโครงสร้างลงจากสายอากาศแบบช่องเปิดพื้นฐานลงมา รวมทั้งยังสามารถจัดวางรูปแบบของช่องเปิดได้หลายรูปแบบเพื่อที่จะรองรับต่อการออกแบบสายอากาศหลายความถี่เช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป





ภาพที่ 3.2 พารามิเตอร์ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป

จากภาพที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป โดยโครงสร้างจะประกอบไปด้วยช่องเปิดมุมฉากวางอยู่บนระนาบกราวด์ ที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปสำหรับระนาบกราวด์มีความกว้าง  $Wg$  และความยาว  $Lg$  รวมทั้งสายอากาศมีความหนาของวัสดุฐานรอง (Substrate)  $h$  ในส่วนของพารามิเตอร์อื่นๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากแสดงดังภาพที่ 3.2 ประกอบไปด้วย

- A1 คือ ความยาวแนวอนที่อยู่ด้านในของช่องเปิด
- B1 คือ ความยาวแนวตั้งที่อยู่ด้านในของช่องเปิด
- W คือ ความกว้างของสายส่งไมโครสตริป
- S คือ ความกว้างของช่องเปิด
- Lm1 คือ ระยะห่างระหว่างขอบแนวอนของช่องเปิดมุมฉากถึงปลายเปิดของสายส่ง
- r คือ ระยะห่างแกนกลางของความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปถึงปลายขอบของช่องเปิดแบบมุมฉากในแนวแกนตั้ง

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของสายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้เน้นการออกแบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายในย่านความถี่ 1 GHz ถึง 4 GHz ดังนั้นจะทำการกำหนดวัสดุฐานรองที่นำมาออกแบบคือ ไมลาร์ฟิล์ม (Mylar Polyester Film) ที่ประกอบด้วยคุณสมบัติดังนี้

|                       |                |   |        |
|-----------------------|----------------|---|--------|
| ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก  | $(\epsilon_r)$ | = | 3.2    |
| ความหนาของวัสดุฐานรอง | $(h)$          | = | 0.3 mm |

|                       |                  |   |                       |
|-----------------------|------------------|---|-----------------------|
| ค่าความนำของทองแดง    | ( $\sigma$ )     | = | $5.8 \times 10^7$ S/m |
| ค่าความหนาของทองแดง   | ( $t$ )          | = | 0.1 mm                |
| ค่าตัวประกอบการกระจาย | ( $\tan\delta$ ) | = | 0.009                 |

ในการออกแบบสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉากสิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ การออกแบบสายส่งไมโครสตริปให้มีอิมพีแดนซ์ ( $Z_c$ ) 50 โอห์ม ในย่านความถี่ที่ออกแบบดังนั้นจึงต้องคำนวณหาความกว้างของสายส่งไมโครสตริป ( $W$ ) จากสมการที่ 3.1 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) และความหนาของวัสดุฐานรอง ( $h$ )

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} [\ln(B - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \quad (3.1)$$

เมื่อ  $B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$

โดยสมการที่ 3.1 ใช้เมื่อ  $Z_c \sqrt{\epsilon_{eff}} \leq 89.91$

นำค่า  $\epsilon_r$  ของวัสดุฐานรอง = 3.2 และค่า  $Z_c = 50$  โอห์ม แทนลงในสมการที่ 3.2 จะได้

$$B = \frac{60\pi^2}{50\sqrt{3.2}} = 7$$

นำค่าของ  $B$  แทนลงในสมการที่ 3.1 จะได้

$$\begin{aligned} \frac{W}{0.3} &= \frac{2}{\pi} \left\{ 7 - 1 - \ln(2(7) - 1) + \frac{3.2 - 1}{2(3.2)} [\ln(7 - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{3.2} \right\} \\ &= \frac{2}{\pi} \{ 7 - 1 - 2.6 + 0.62 + 0.39 - 0.19 \} \\ &= \frac{2}{\pi} \times 4.22 \end{aligned}$$

$$Wm = 0.8mm (\approx 1mm)$$

ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดมุมฉากนั้น พารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดให้ได้มาซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ ( $f_r$ ) ที่ต้องการ คือ ความยาวรวมของ  $A1+B1$  โดยเราที่จะต้องทำการออกแบบให้มีความยาวประมาณ  $0.5\lambda_g$  ของความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ รวมทั้งกำหนดให้ขนาดความยาวของ  $A1 = B1$  เช่นกัน ซึ่งพารามิเตอร์  $A1$  และ  $B1$  จะสอดคล้องกับสมการในการออกแบบหาความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศดังสมการที่ 3.3

$$f_r = \frac{0.5c}{(A1 + B1)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2} \quad (3.4)$$

และความยาวคลื่นสัมพันธ์คำนวณได้จาก

$$\lambda_g = \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3.5)$$

โดยที่  $c$  คือ ความเร็วแสง (ประมาณ  $3 \times 10^8$  m/s)  
 $f_r$  คือ ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการออกแบบ (GHz)  
 $\epsilon_{eff}$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลเท่ากับ 2.6

จากสมการที่ 3.3 และ 3.4 เป็นการประมาณค่าเริ่มต้นในการคำนวณหาความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก ซึ่งสามารถทำให้การออกแบบสายอากาศง่ายยิ่งขึ้นในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉาก นั้นพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวกำหนดให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการคือ ความยาวทั้งสองด้านของสายอากาศช่องเปิด ซึ่งได้แก่ ความยาว  $A1$  และความยาว  $B1$  โดยที่ความยาวของสายอากาศช่องเปิด ในแต่ละความถี่ของวิทยานิพนธ์นี้ จะนำเอาไปเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นสัมพันธ์ ( $\lambda_g$ ) เพื่อที่จะหาความยาวที่เหมาะสมในการออกแบบสายอากาศ ดังนั้นสมการพื้นฐานในการหา ( $\lambda_g$ ) ในวิทยานิพนธ์นี้แสดงดังสมการที่ 3.5 เมื่อทำการ

ออกแบบให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการและใช้ค่าตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ที่กำหนดไว้จะได้ความยาวคลื่นสัมพัทธ์ ( $\lambda_g$ )

หาค่าความยาวคลื่นสัมพัทธ์ ( $\lambda_{g2.45}$ ) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.45 GHz

$$\begin{aligned}\lambda_g &= \frac{c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \\ &= \frac{3 \times 10^8}{(2.45 \times 10^9) \sqrt{2.6}} \\ &= 75.94 \text{ mm.}\end{aligned}$$

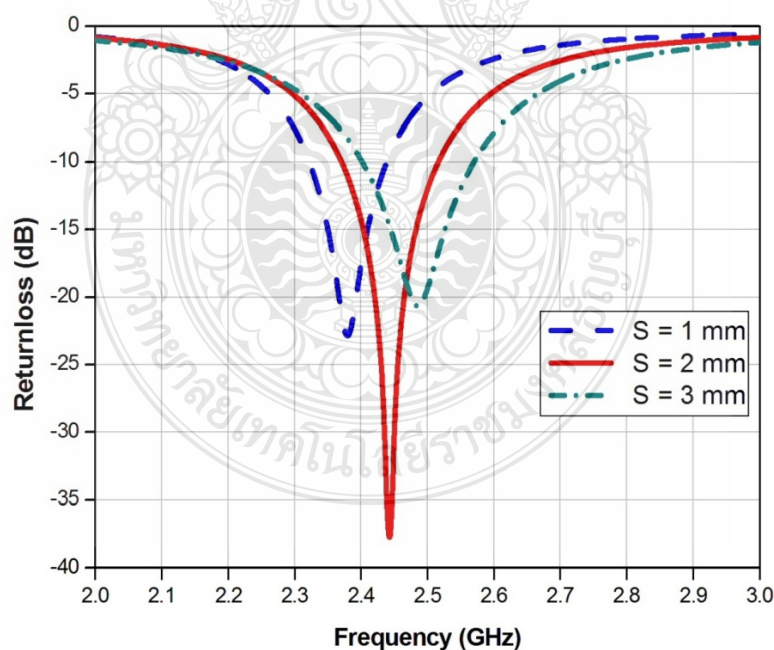
ดังที่กล่าวมาว่าความยาวของสายส่งไมโครสตริปจะมีความยาวมากกว่า  $0.5 \lambda_g$  ซึ่งความยาวของสายส่งไมโครไมโครสตริปจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉาก เนื่องจากสายอากาศยังมีความยาวเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีพื้นที่ที่ไม่ถูกใช้ในการแผ่กระจายคลื่นเพิ่มมากขึ้นและจะมีการลดทอนของสัญญาณมากขึ้นด้วย จึงทำให้มีการรับ-ส่งสัญญาณของสายอากาศนั้นจะมีประสิทธิภาพลดลงและต้องคำนึงถึงผลกระทบเนื่องจากการขยายตัวตามความยาวของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบแผ่นแผ่กระจายคลื่นด้วย

ความยาวของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากจะแปรผกผันกับความยาวของคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์ คือ ถ้าความยาวของช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากนั้น มีความยาวเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำลง แต่ถ้าความยาวของช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากนั้นมีความยาวที่สั้นลง จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์สูงขึ้น ส่วนความกว้างของช่องเปิดของ สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากจะแปรผกผันกับความยาวคลื่นของความถี่เรโซแนนซ์ ถ้าความกว้างของช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากแคบลงจะทำให้มีความถี่เรโซแนนซ์ที่สูงขึ้น และถ้าความกว้างของ ช่องเปิด ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากนั้นมีความกว้างเพิ่มขึ้นจะทำให้มีความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำลงที่ความยาวของช่องเปิดเดียวกัน ความกว้างของช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากนั้นมีความสัมพันธ์กับแบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากคือ เมื่อความกว้างของช่องเปิดของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากมีขนาดกว้างขึ้น จะทำให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากนั้นกว้างขึ้นด้วย และเมื่อความกว้างของแบนด์วิดท์ของ

สายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากเพิ่มขึ้น จะทำให้มีอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากนั้นเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าความกว้างของ ช่องเปิด ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากมีขนาดที่แคบลงก็จะทำให้แบนด์วิธของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากนั้นแคบลงด้วยเป็นผลทำให้อัตราการขยายของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากนั้นลดลงด้วย

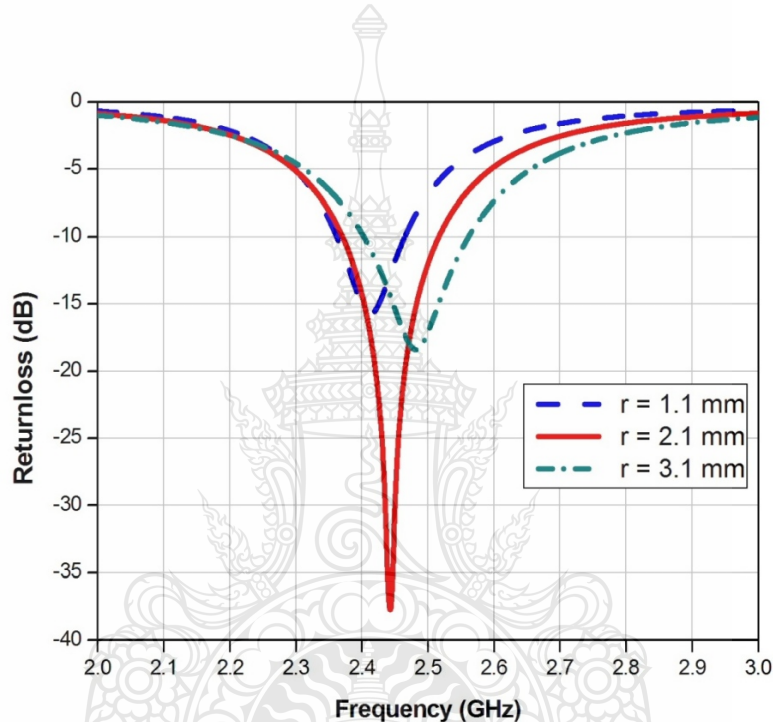
### 3.1.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากที่ถูกกระตุ้นด้วยสายสัญญาณไมโครสตริป

ในการออกแบบในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปโดยจะประกอบไปด้วย พารามิเตอร์ S และ r โดยในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ จะกำหนดความถี่ใช้งาน (Operating Frequency) ที่ 2.45 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.11 b/g ที่มีแบนด์วิธที่ใช้งานอยู่ระหว่างความถี่ 2.4-2.4835 GHz ซึ่งเหมาะสำหรับการสื่อสารไร้สายเครือข่าย สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ได้กำหนดความยาวของช่องเปิดมุมฉากที่เหมาะสมสำหรับความถี่ใช้งาน 2.45 GHz คือ  $A1+B1 = 55.2 \text{ mm}$  ( $0.72 \lambda_g$ ) และกำหนดให้ความยาว  $A1 = B1 = 27.6 \text{ mm}$  ( $0.36 \lambda_g$ )



ภาพที่ 3.3 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S

จากภาพที่ 3.3 แสดงการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) ที่มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ S เป็น 1 mm ( $0.01 \lambda_g$ ) 2 mm ( $0.02 \lambda_g$ ) และ 3 mm ( $0.03 \lambda_g$ ) จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ S มีผลกระทบอย่างมากต่อแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยโดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเลื่อนจากความถี่ต่ำไปความถี่สูงเมื่อ S มีค่ามากขึ้น และยังกระทบกับการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth) ของสายอากาศอีกด้วย ดังนั้น S ที่เหมาะสมในความถี่นี้ จะมีความกว้างเท่ากับ 2 mm ( $0.02 \lambda_g$ )

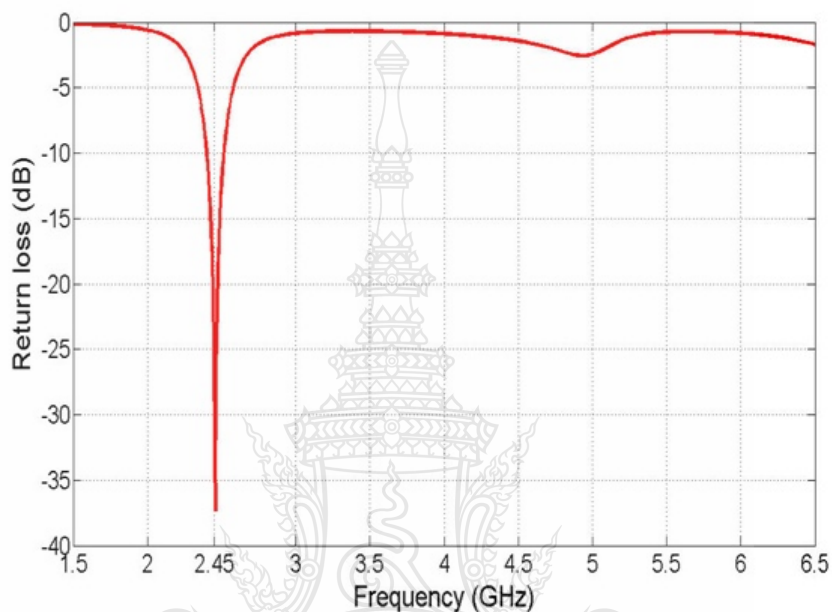


ภาพที่ 3.4 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ r

พารามิเตอร์ r ถูกวิเคราะห์ในระยยะ r เท่ากับ 1.1 mm 2.1 mm และ 3.1 mm ดังภาพที่ 3.4 จะเห็นได้ว่า r จะมีผลกระทบอย่างมากกับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และกระทบกับความถี่เรโซแนนซ์ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงน้อย จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ทำให้ได้พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ณ ความถี่ใช้งานที่ 2.45 GHz ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก

| พารามิเตอร์ | $A1+B1$                         | $S$                          | $r$    |
|-------------|---------------------------------|------------------------------|--------|
| ขนาด        | 55.2 mm<br>( $0.72 \lambda_g$ ) | 2 mm<br>( $0.02 \lambda_g$ ) | 2.1 mm |



ภาพที่ 3.5 การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก

จากภาพที่ 3.5 แสดงการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับตามโครงสร้างในตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 2.45 GHz ถึง 6 GHz นั้น จะมีความถี่เรโซแนนซ์เพียง ความถี่เดียวตลอดทั้งย่านความถี่ จากขนาดที่เหมาะสมของสายอากาศจะให้ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำสุดประมาณ -38 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz และมีแบนด์วิดท์อยู่ระหว่างความถี่ 2.4 – 2.5 GHz (100 MHz) โดยวัดที่การสูญเสียย้อนกลับที่ -10 dB (Return Loss < -10 dB) ซึ่งคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศจะแสดงดังตารางที่ 3.2

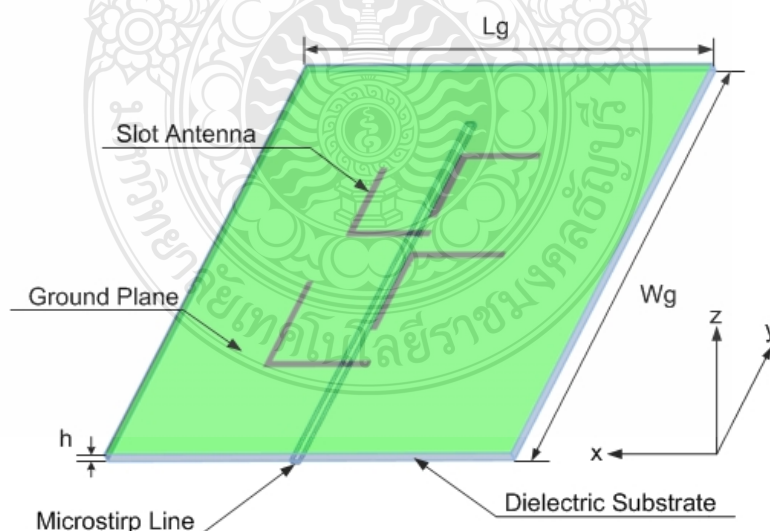
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติต่างๆ ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก

| คุณลักษณะของสายอากาศ             | ความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.45 GHz |
|----------------------------------|------------------------------|
| การสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) | -38 dB                       |
| แบนด์วิดท์ (Impedance Bandwidth) | 2.4-2.5 GHz (100 MHz)        |

### 3.2 การออกแบบสายอากาศแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริปที่มีแถบกว้างแบบ 4 ช่อง

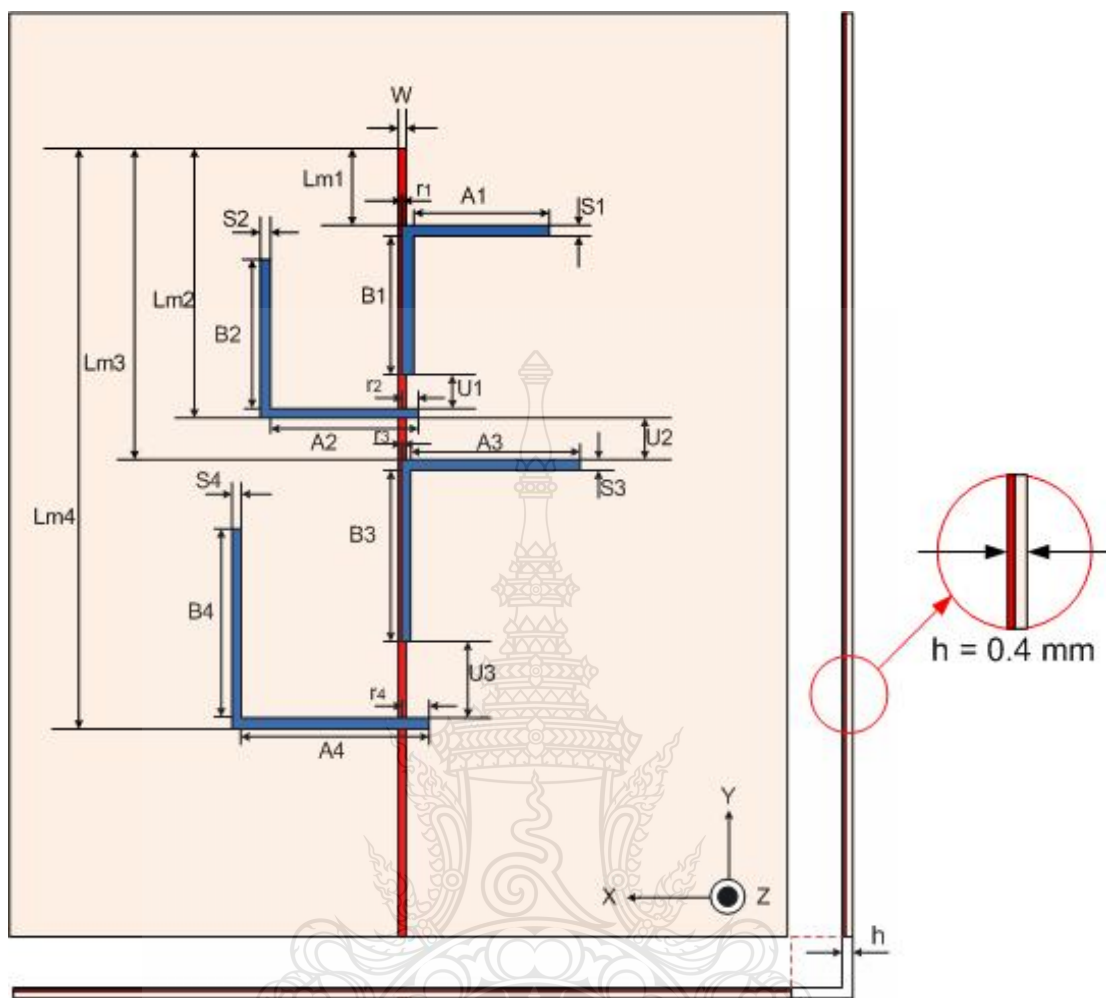
#### 3.2.1 โครงสร้างของสายอากาศแฉวลำดับช่องเปิดแบบมุมฉาก

ในการออกแบบของสายอากาศแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริปนั้น จะมีวิธีการออกแบบและใช้วัสดุฐานรองเหมือนกันกับสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก ดังนั้นค่าความกว้างของสายส่งไมโครสตริปเท่ากับ 1 mm การออกแบบสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับเครือข่ายไร้สายนั้น จะมีโครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบ มุมฉากหนึ่งความถี่ โดยจะทำการวางสายอากาศแบบแฉวลำดับ โดยใช้สายอากาศไมโครสตริป ช่องเปิดแบบมุมฉาก 4 ตัว แบบกลับด้าน นำมาวางบนวัสดุฐานรองเดียวกันและใช้ตัวป้อนสายส่งสัญญาณเดียวกันในการป้อนสัญญาณด้วยสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป



ภาพที่ 3.6 โครงสร้างของสายอากาศแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป





ภาพที่ 3.7 พารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศแบบห้องเปิดมุมฉาก

- W คือ ความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปไลน์
- L คือ ความยาวของสายอากาศไมโครสตริปไลน์
- h คือ ความหนาของสายอากาศ
- $A_1$  คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของสายอากาศตัวที่ 1
- $B_1$  คือ ความยาวในแนวแกนนอนของสายอากาศตัวที่ 1
- $A_2$  คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของสายอากาศตัวที่ 2
- $B_2$  คือ ความยาวในแนวแกนนอนของสายอากาศตัวที่ 2
- $A_3$  คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของสายอากาศตัวที่ 3
- $B_3$  คือ ความยาวในแนวแกนนอนของสายอากาศตัวที่ 3

- $A_4$  คือ ความยาวในแนวแกนตั้งของสายอากาศตัวที่ 4
- $B_4$  คือ ความยาวในแนวแกนนอนของสายอากาศตัวที่ 4
- $S_1$  คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.8 GHz ของสายอากาศตัวที่ 1
- $S_2$  คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.55 GHz ของสายอากาศตัวที่ 2
- $S_3$  คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.2 GHz ของสายอากาศตัวที่ 3
- $S_4$  คือ ความกว้างของช่องเปิดความถี่ 2.05 GHz ของสายอากาศตัวที่ 4
- $Lm_1$  คือ ระยะห่างระหว่างขอบแนวนอนของช่องเปิดมุมฉากถึงปลายเปิดสายส่งของสายอากาศตัวที่ 1
- $Lm_2$  คือ ระยะห่างระหว่างขอบแนวนอนของช่องเปิดมุมฉากถึงปลายเปิดสายส่งของสายอากาศตัวที่ 4
- $Lm_3$  คือ ระยะห่างระหว่างขอบแนวนอนของช่องเปิดมุมฉากถึงปลายเปิดสายส่งของสายอากาศตัวที่ 3
- $Lm_4$  คือ ระยะห่างระหว่างขอบแนวนอนของช่องเปิดมุมฉากถึงปลายเปิดสายส่งของสายอากาศตัวที่ 4
- $U_1$  คือ ระยะจากขอบทางขวาของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดของสายอากาศตัวที่ 1 กับช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดของสายอากาศตัวที่ 2
- $U_2$  คือ ระยะจากขอบทางขวาของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดของสายอากาศตัวที่ 2 กับช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดของสายอากาศตัวที่ 3
- $U_3$  คือ ระยะจากขอบทางขวาของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดของสายอากาศตัวที่ 3 กับช่องเปิดในแนวแกนตั้งของช่องเปิดของสายอากาศตัวที่ 4
- $r_1$  คือ ระยะห่างระหว่างเส้นกึ่งกลางของสายส่งไมโครสตริปถึงขอบปลายของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.8 GHz ของสายอากาศตัวที่ 1
- $r_2$  คือ ระยะห่างระหว่างเส้นกึ่งกลางของสายส่งไมโครสตริปถึงขอบปลายของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.55 GHz ของสายอากาศตัวที่ 2

$r_3$  คือ ระยะห่างระหว่างเส้นกึ่งกลางของสายส่งไมโครสตริปถึงขอบปลายของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.2 GHz ของสายอากาศตัวที่ 3

$r_4$  คือ ระยะห่างระหว่างเส้นกึ่งกลางของสายส่งไมโครสตริปถึงขอบปลายของช่องเปิดในแนวแกนตั้งของความถี่ 2.05 GHz ของสายอากาศตัวที่ 4

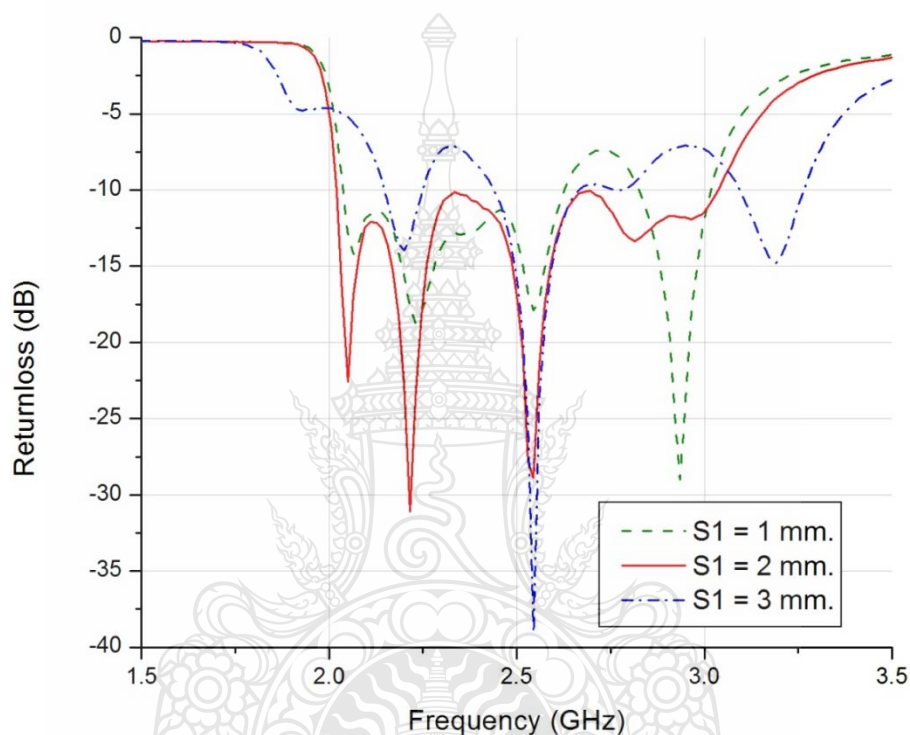
สายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้างสามารถทำได้โดยการเลือกสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉาก ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 2.05 GHz 2.2 GHz 2.55 GHz และ 2.8 GHz โดยนำเอาคุณสมบัติของสายอากาศที่ออกแบบมาแล้ววางบนวัสดุฐานรองเดียวกันแล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์อีกเพียงเล็กน้อยโดยใช้หลักการปรับช่องเปิด ที่ละความถี่ เพื่อไม่ให้เกิดการรบกวนมากเกินไป แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ได้รูปแบบของการแผ่กระจายที่เหมาะสมกับสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีแถบกว้างมากที่สุด จากการจำลองยังได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้างดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ

| สายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง |                                |       |   |
|--|--------------------------------|-------|---|
| $A_1$  | 22.5 (0.34 $\lambda_{2.8}$ )   | $S_3$ | 1.7 (0.023 $\lambda_{2.2}$ )  |
| $B_1$  | 22.5 (0.34 $\lambda_{2.8}$ )   | $S_4$ | 1.7 (0.25 $\lambda_{2.05}$ )  |
| $A_2$  | 24.3 (0.335 $\lambda_{2.55}$ ) | $U_1$ | 5.7 (0.086 $\lambda_{2.8}$ )  |
| $B_2$  | 24.3 (0.335 $\lambda_{2.55}$ ) | $U_2$ | 7.1 (0.097 $\lambda_{2.55}$ )   |
| $A_3$  | 28.27 (0.335 $\lambda_{2.2}$ ) | $U_3$ | 12.7 (0.15 $\lambda_{2.2}$ )  |
| $B_3$  | 28.27 (0.335 $\lambda_{2.2}$ ) | $r_1$ | 1.95 (0.029 $\lambda_{2.8}$ )   |
| $A_4$  | 31 (0.34 $\lambda_{2.05}$ )    | $r_2$ | 2.65 (0.036 $\lambda_{2.55}$ )  |
| $B_4$  | 31 (0.34 $\lambda_{2.05}$ )    | $r_3$ | 1.602 (0.019 $\lambda_{2.2}$ )  |
| $S_1$  | 2 (0.0301 $\lambda_{2.8}$ )    | $r_4$ | 4.54 (0.05 $\lambda_{2.05}$ )   |
| $S_2$  | 1.7 (0.02 $\lambda_{2.55}$ )   | W     | 1 (0.015 $\lambda_{2.8}$ , 0.014 $\lambda_{2.55}$ ,<br>0.012 $\lambda_{2.2}$ และ 0.011 $\lambda_{2.05}$ ) |

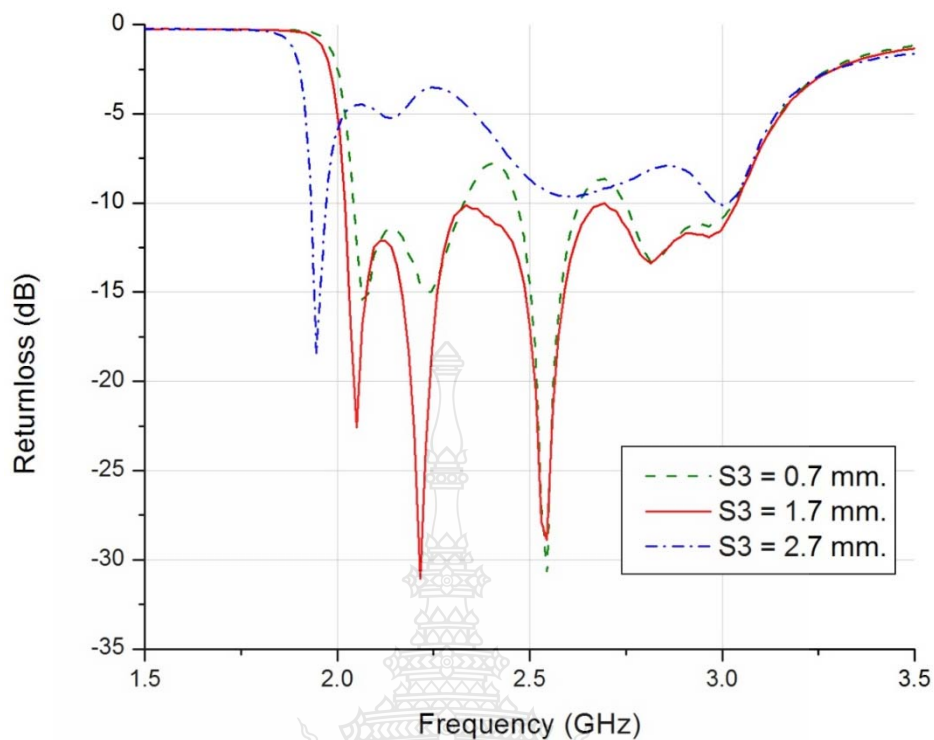
### 3.2.2 ผลการจำลองของการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

เมื่อได้โครงสร้างของสายอากาศและขนาดต่างๆ โดยการคำนวณแล้ว เราสามารถจำลองและหาผลตอบสนองความถี่ของสายอากาศที่เหมาะสมได้โดยการจำลองสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง โดยใช้โปรแกรม IE3D โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวสายอากาศที่กำหนดแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้ได้แบบรูปการแผ่กระจายที่เหมาะสมมากที่สุด



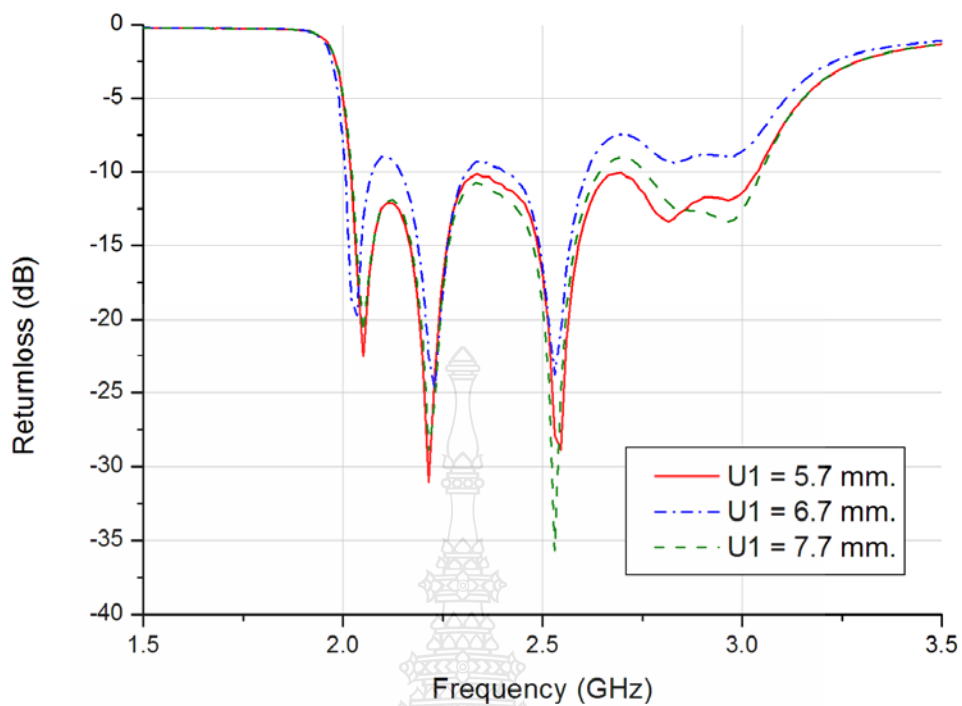
ภาพที่ 3.8 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $S_1$

จากภาพที่ 3.8 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $S_1$  เป็น 1 mm 2 mm และ 3 mm จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์  $S_1$  มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ ของสายอากาศเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีผลกระทบกับแมตซ์อิมพีแดนซ์เช่นเดียวกัน จากภาพเมื่อ  $S_1$  มีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าค่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะมีผลกระทบทั้งแบนด์วิดท์และการแมตซ์อิมพีแดนซ์ ดังเราต้องหาค่าที่เหมาะสม ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของสายอากาศนี้ จะมีความกว้าง 2 mm

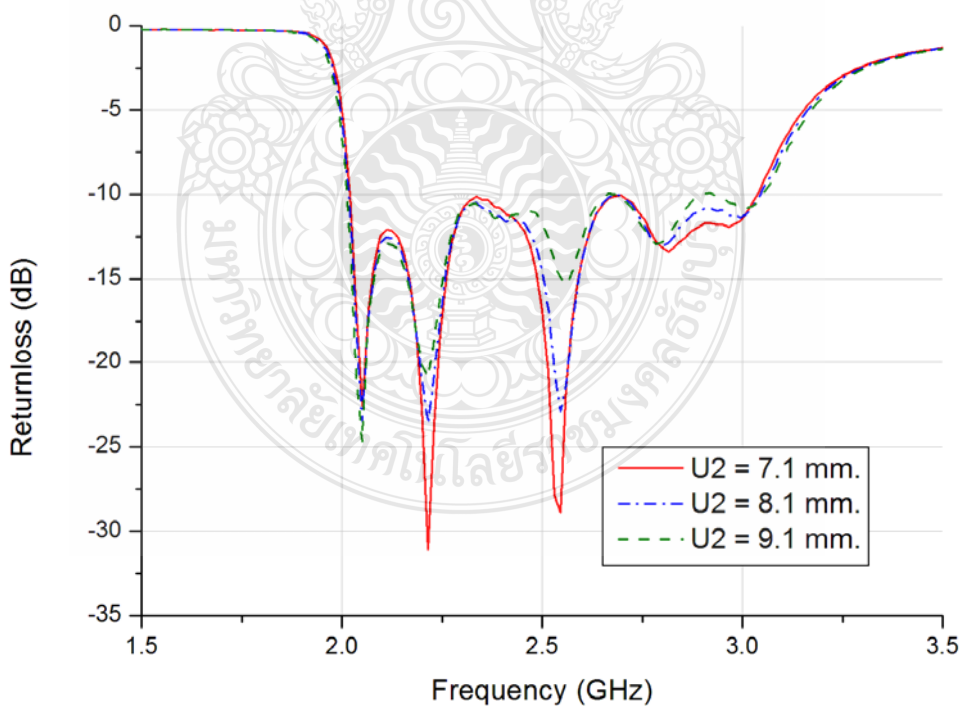


ภาพที่ 3.9 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $S_3$

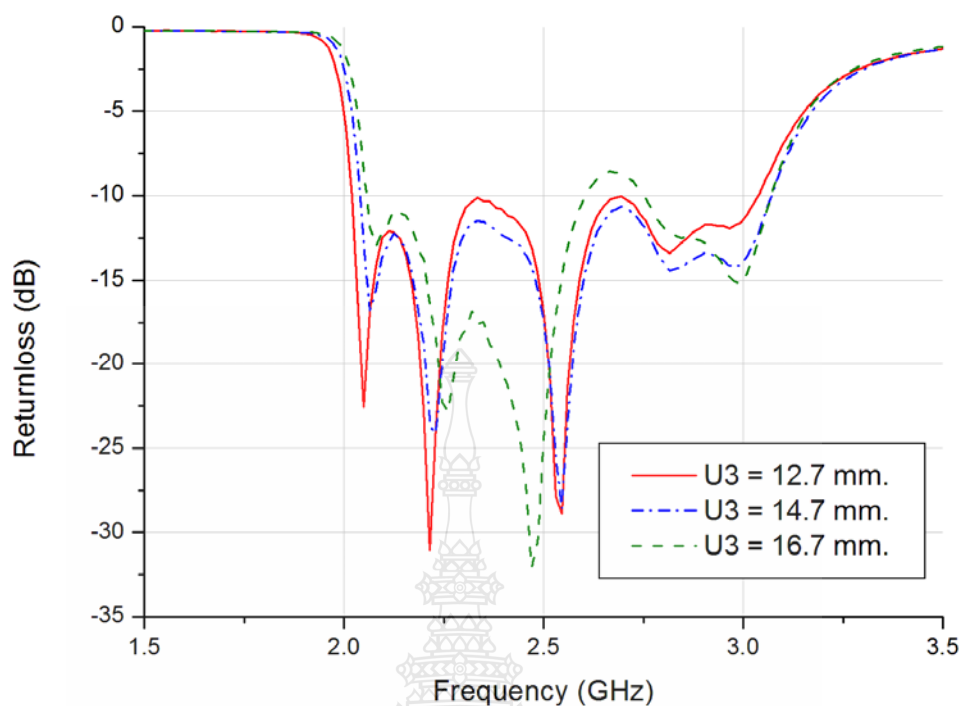
จากภาพที่ 3.9 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ ต่อความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $S_3$  เป็น 0.7 mm 1.7 mm และ 2.7 mm จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์  $S_3$  มีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ ของสายอากาศเป็นอย่างมาก แต่ก็ยังมีผลกระทบการแมตซ์อิมพีแดนซ์เช่นเดียวกัน จากภาพเมื่อ  $S_3$  มีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าค่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะมีผลกระทบทั้งแบนวิดท์และกับแมตซ์อิมพีแดนซ์ ดังเราต้องหาค่าที่เหมาะสม ดังนั้นค่าที่เหมาะสมของสายอากาศนี้ จะมีความกว้าง 1.7 mm



ภาพที่ 3.10 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $U_1$

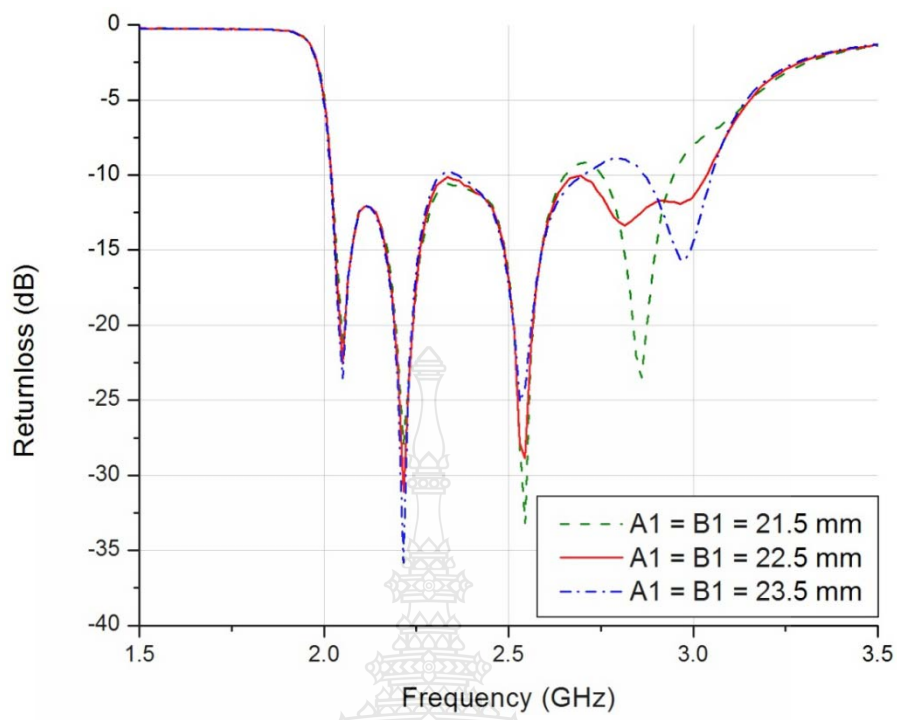


ภาพที่ 3.11 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $U_2$

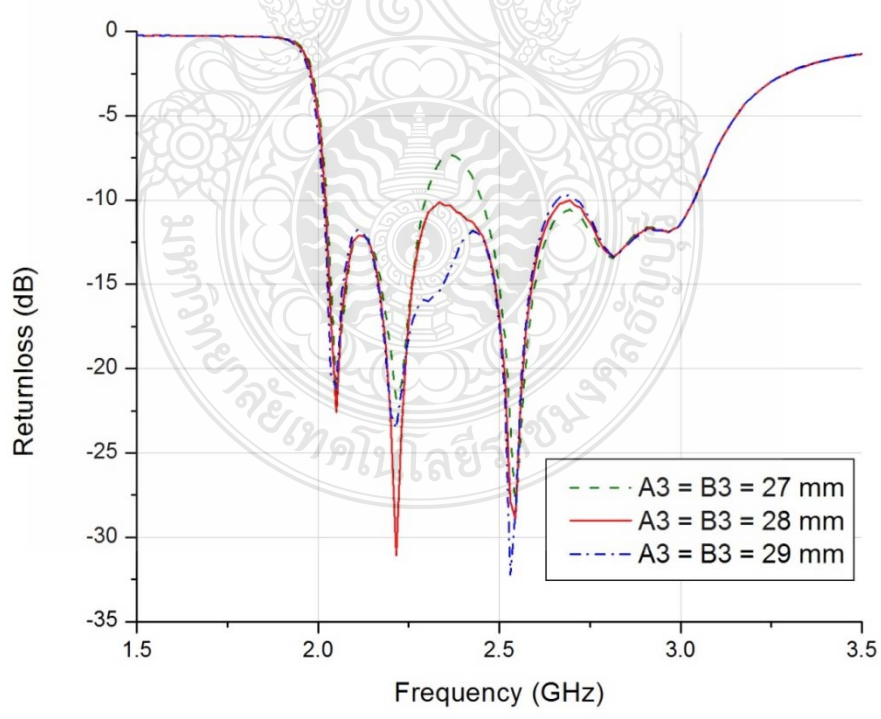


ภาพที่ 3.12 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $U_3$

พารามิเตอร์  $U_1$  จะมีผลกระทบต่อแบนด์วิดท์ในแต่ละช่วงความถี่ของสายอากาศแบบช่องเปิดมุมฉาก ดังภาพที่ 3.10 แสดงให้เห็นว่า  $U_1$  มีผลกระทบทอการแมตซ์อิมพีแดนซ์ เมื่อ  $U_1$  มีเพิ่มจะทำให้มีความกว้างของแบนด์วิดท์ลดลง ดังนั้น  $U_1$  ที่เหมาะสมของสายอากาศนี้将有ความยาว 5.7 mm ภาพที่ 3.11 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อ การสูญเสียย้อนกลับเมื่อ  $U_2$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้การสูญเสียย้อนเพิ่มมากขึ้นไปด้วย ส่วนด้านแบนด์วิดท์ไม่มีผลกระทบเลย ดังนั้น  $U_2$  ที่เหมาะสมในความถี่นี้将有ความยาว 7.1 mm และ ภาพที่ 3.12 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อ แบนด์วิดท์เมื่อ  $U_3$  มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แบนด์วิดท์เลื่อนไปทางความถี่สูง ดังนั้น  $U_3$  ที่เหมาะสมในความถี่นี้将有ความยาว 12.7 mm



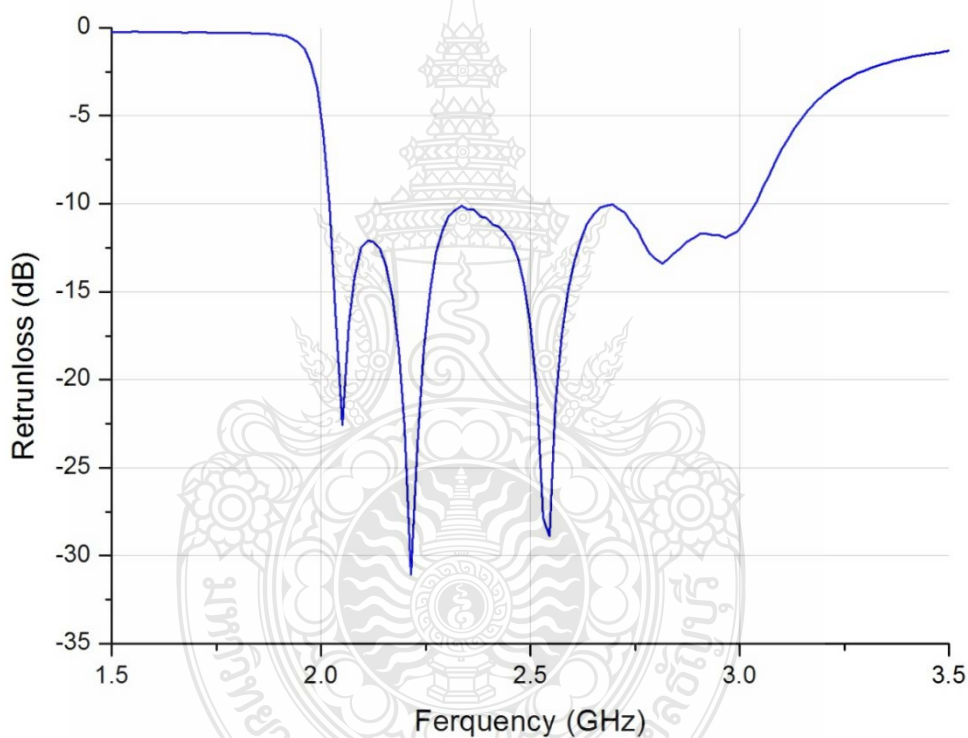
ภาพที่ 3.13 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $A_1$  และ  $B_1$



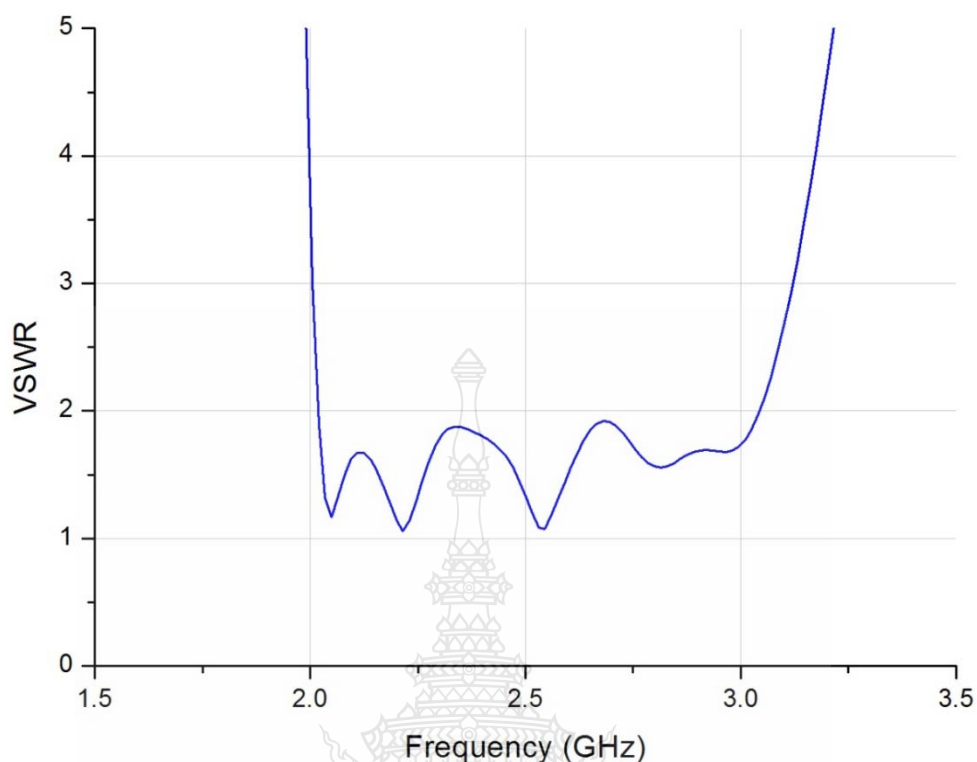
ภาพที่ 3.14 การสูญเสียย้อนกลับเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $A_3$  และ  $B_3$



จากภาพที่ 3.13 แสดงการสูญเสียย้อนกลับต่ออิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $A_1$  และ  $B_1$  เป็น 21.5 mm 22.5 mm และ 23.5 mm จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์  $A_1$  และ  $B_1$  เพิ่มขึ้นและลดลงมีผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงในความถี่สูงของสายอากาศ ทำให้ใช้งานไม่ได้ในความถี่สูงของสายอากาศ และ จากภาพที่ 3.14 แสดงการสูญเสียย้อนกลับ ต่อแบนด์วิดท์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $A_3$  และ  $B_3$  เป็น 27 mm 28 mm และ 29 mm จะเห็นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์  $A_3$  และ  $B_3$  ลดลงมีผลกระทบทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าสูญเสียย้อนกลับที่ความถี่ 2.4 GHz เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบนด์วิดท์ของสายอากาศ ณ ความถี่นั้นหายไป และเมื่อค่า  $A_3$  และ  $B_3$  เพิ่มขึ้นไม่มีผลกระทบต่อแบนด์วิดท์

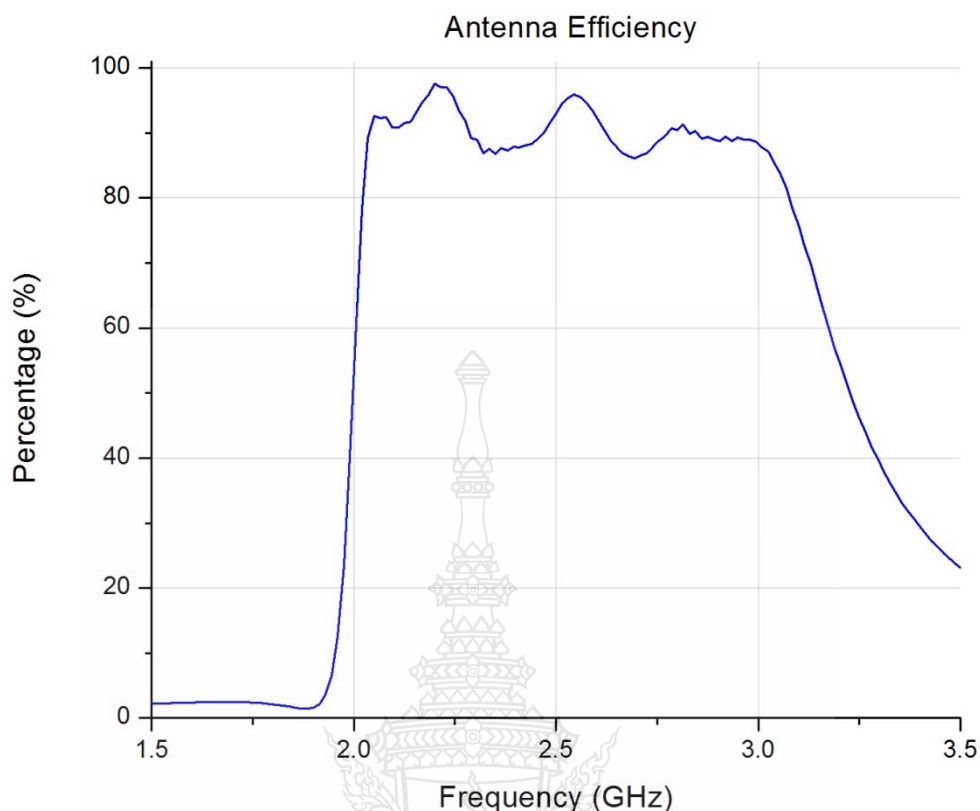


ภาพที่ 3.15 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง



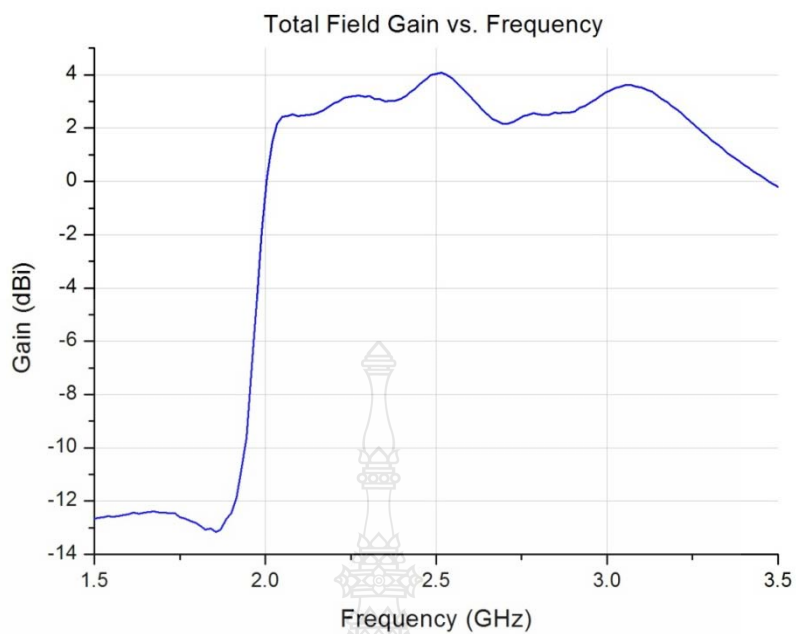
ภาพที่ 3.16 ค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งของสายอากาศแกลวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

จากภาพที่ 3.15 แสดงการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับสำหรับสายอากาศแกลวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบ กว้าง โดยมีการสูญเสียย้อนที่ความถี่ 2.1 GHz เท่ากับ -12.33 dB ที่ความถี่ 2.3 GHz เท่ากับ -10.61 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ -12.05 dB และที่ความถี่ 2.6 GHz เท่ากับ -13.4 dB โดยมีแบนด์วิดท์อยู่ระหว่างความถี่ 2.02 – 3.04 GHz (1.02 GHz) และจากภาพที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 2.1 GHz ได้ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง = 1.63 ที่ความถี่ 2.3 GHz ค่า VSWR = 1.81 ที่ความถี่ 2.45 GHz ค่า VSWR = 1.66 และที่ความถี่ 2.6 GHz ค่า VSWR = 1.58

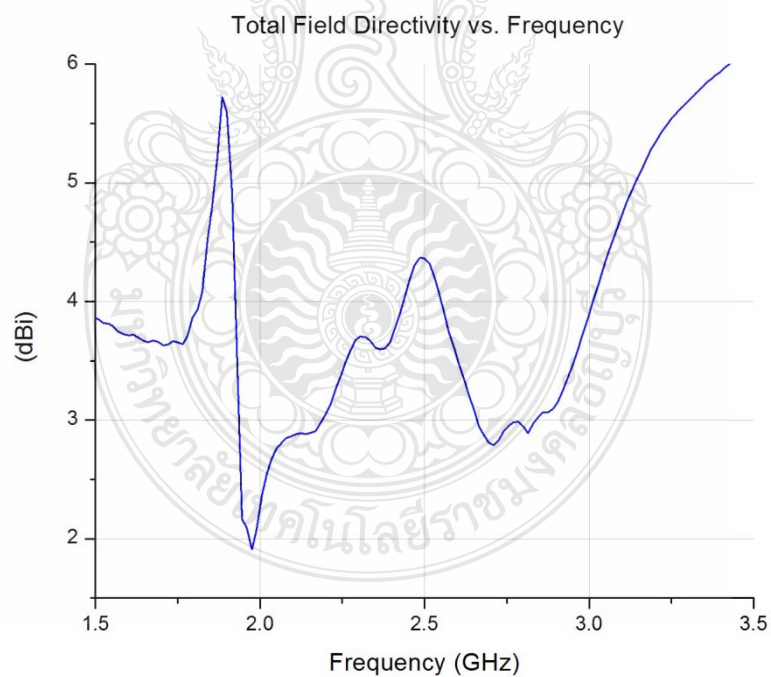


ภาพที่ 3.17 ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

จากภาพที่ 3.17 ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง (Antenna Efficiency) จะบอกถึงค่าความสูญเสียต่างๆ และภายใน โครงสร้างของสายอากาศที่ความถี่ 2.1 GHz มีค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 90.89% ที่ความถี่ 2.3 GHz มีค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 89.06% ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 89.94% และที่ความถี่ 2.6 GHz มีค่าประสิทธิภาพของสายอากาศเท่ากับ 92.26% ซึ่งที่ความถี่นี้เป็นค่าประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และจากภาพที่ 3.18 ค่าอัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากไดเรกทิวิตีและค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยที่อัตราขยายของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับ  $4\pi$  คูณกับอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่มากที่สุด ต่อกำลังงานทั้งหมด ที่ป้อนให้สายอากาศ โดยเทียบกับอัตราขยายของการแผ่กระจายคลื่นแบบทุกทิศทาง (Isotropic) จากรูปค่าอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปที่ได้ออกแบบ ที่ความถี่ 2.1 GHz โดยมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 2.46 dBi ที่ความถี่ 2.3 GHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 3.19 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 3.64 dBi และที่ความถี่ 2.6 GHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 3.15 dBi

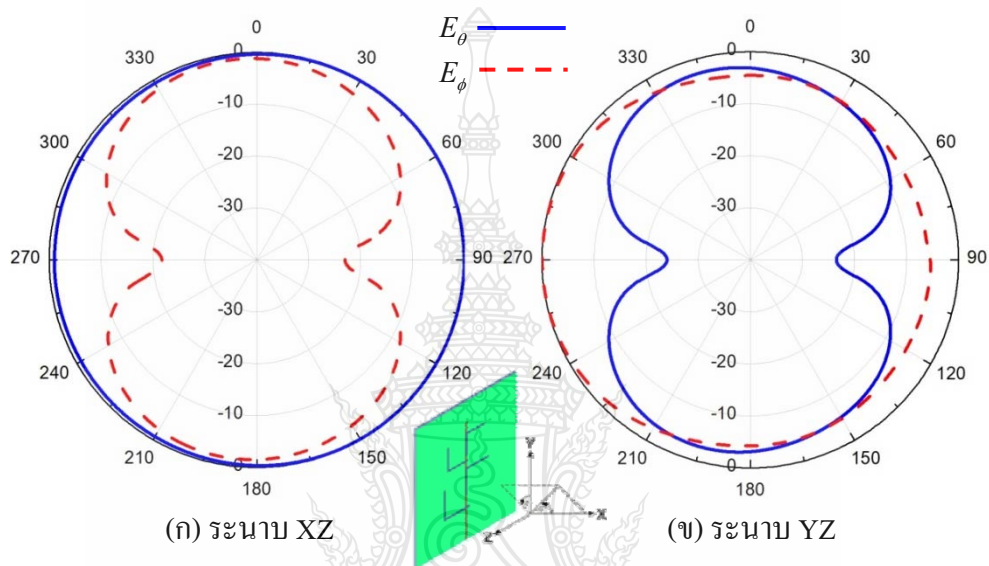


ภาพที่ 3.18 ค่าอัตราการขยาย (Gain) ของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

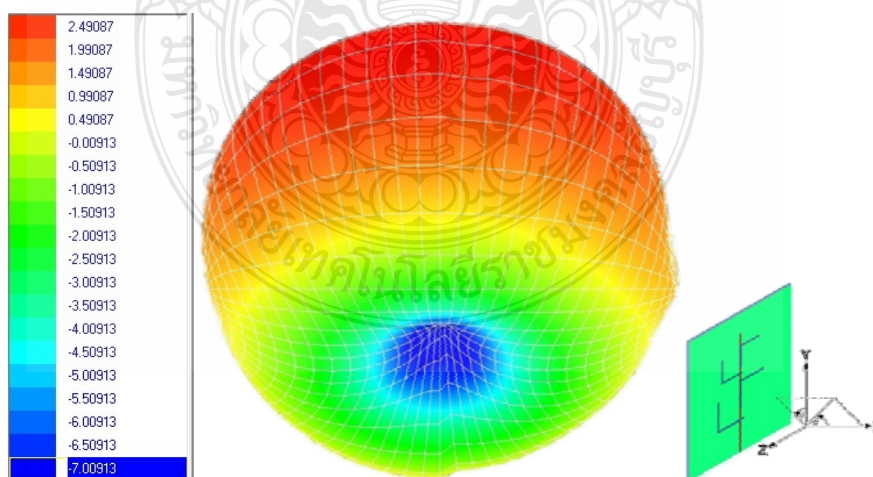


ภาพที่ 3.19 ค่าอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นในทิศทางที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของการแผ่กระจายคลื่นแบบทุกทิศทาง

จากภาพที่ 3.19 ค่าอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น ในทิศทางที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นของ Isotropic แบบจุดประจุของสายอากาศซึ่งได้ออกแบบที่ความถี่ 2.1 GHz มีค่าอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเท่ากับ 2.87 dBi และที่ความถี่ 2.3 GHz มีค่าเท่ากับ 3.69 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่นเท่ากับ 4.15 dBi และที่ความถี่ 2.6 GHz มีค่าเท่ากับ 3.49 dBi

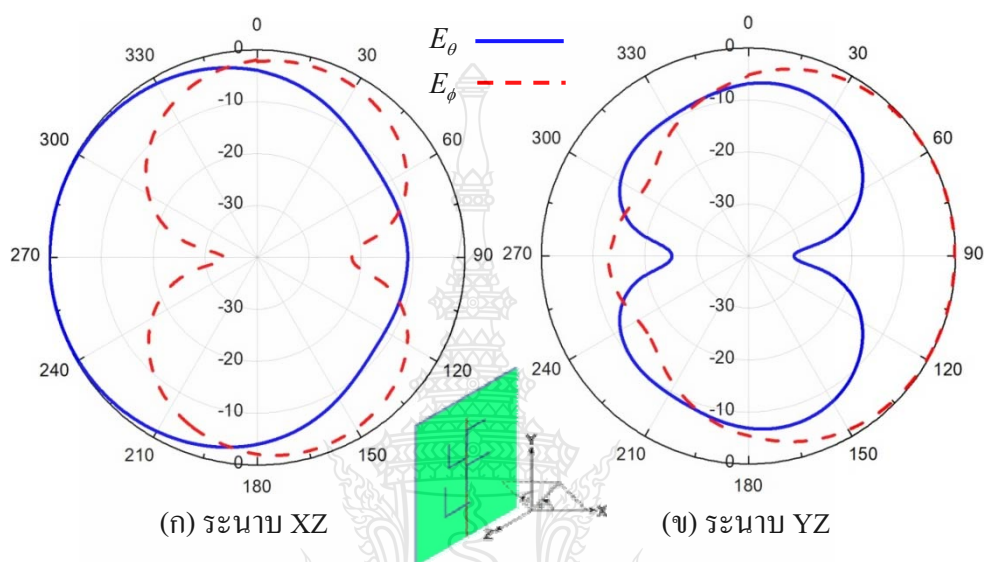


ภาพที่ 3.20 แบบรูปแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.1 GHz

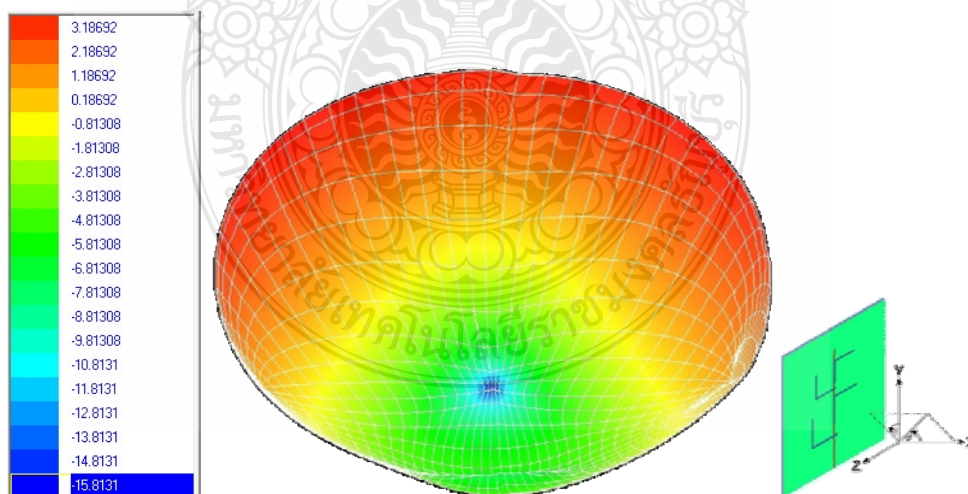


ภาพที่ 3.21 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่ 2.1 GHz

จากภาพที่ 3.20 (ก) 3.20 (ข) และ 3.21 แสดงรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ ของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ที่ความถี่ 2.1 GHz ทั้งในระนาบ x-z (ระนาบ  $E$ ) และในระนาบ y-z (ระนาบ  $H$ ) ตามลำดับ ลักษณะการแผ่กระจายคลื่นจะเป็นแบบทิศทางเดียว (Uni-directional)

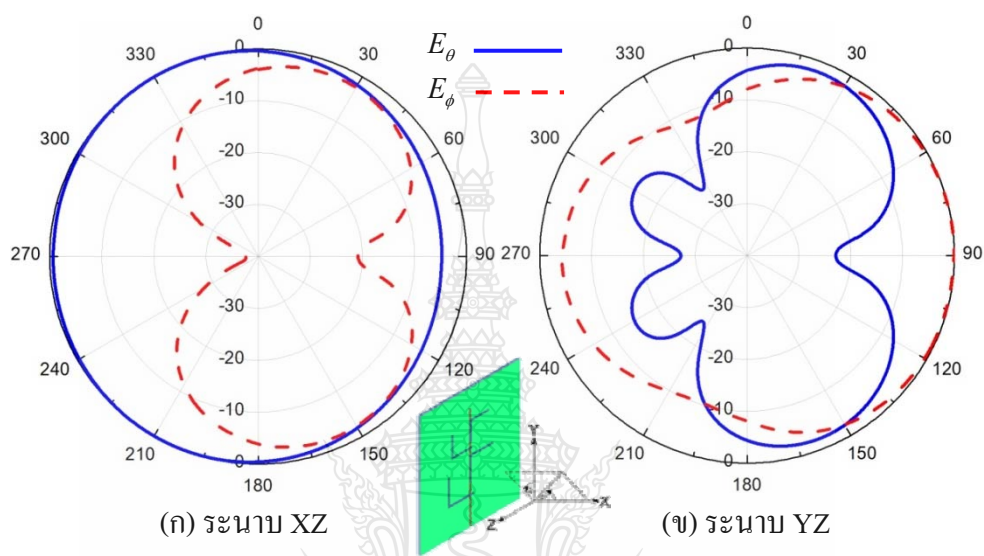


ภาพที่ 3.22 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.3 GHz

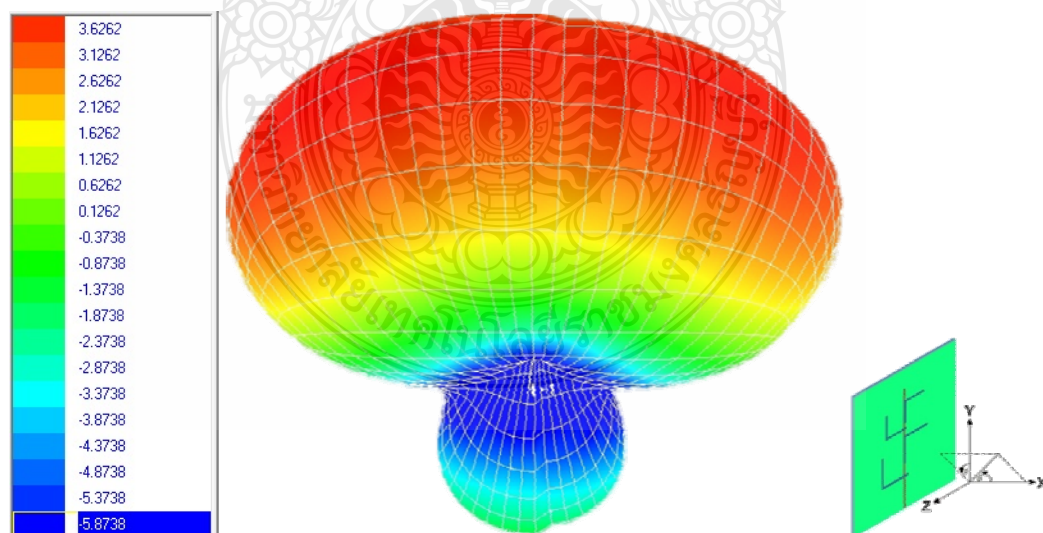


ภาพที่ 3.23 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่ 2.3 GHz

จากภาพที่ 3.22 (ก) 3.22 (ข) และ 3.23 แสดงรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ ของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ที่ความถี่ 2.45 GHz ทั้งในระนาบ x-z (ระนาบ  $E$ ) และในระนาบ y-z (ระนาบ  $H$ ) ตามลำดับ ลักษณะการแผ่กระจายคลื่นจะเป็นแบบสองทิศทาง (Bi-directional)

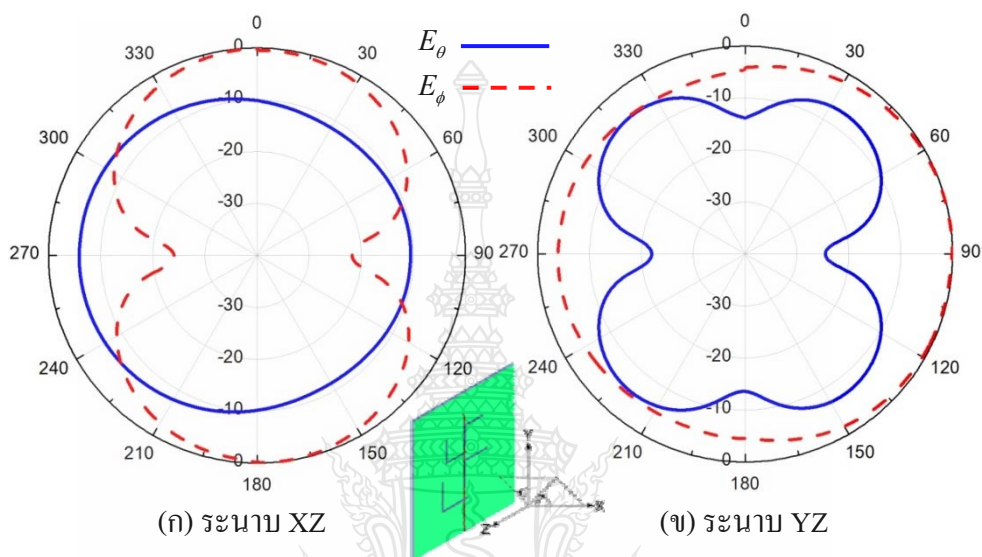


ภาพที่ 3.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

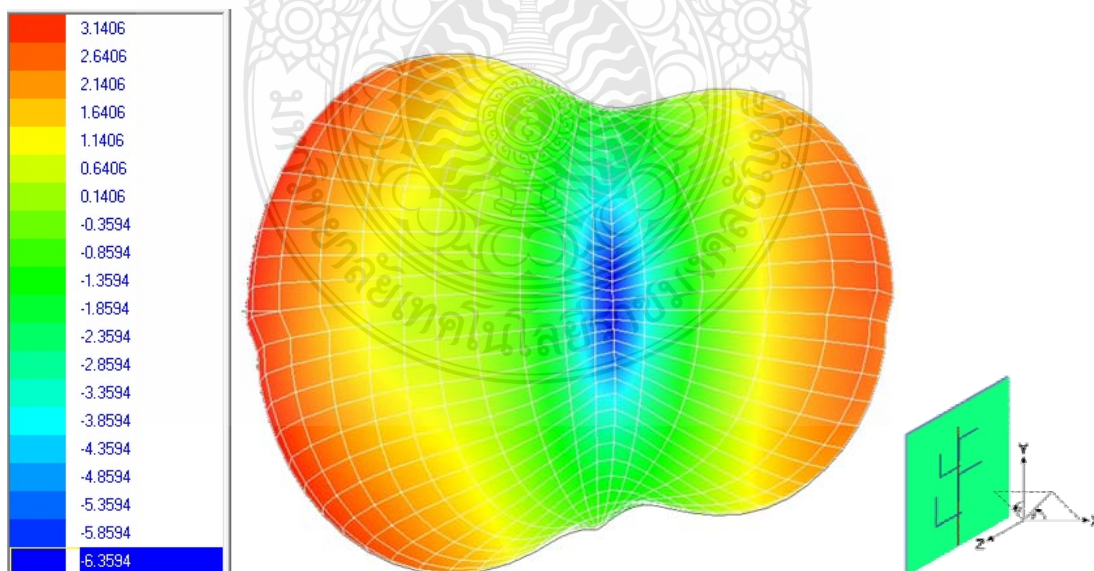


ภาพที่ 3.25 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz

จากภาพที่ 3.24 (ก) 3.24 (ข) และ 3.25 แสดงรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ ของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ที่ความถี่ 2.45 GHz ทั้งในระนาบ x-z (ระนาบ  $E$ ) และในระนาบ y-z (ระนาบ  $H$ ) ตามลำดับ ลักษณะการแผ่กระจายคลื่นจะเป็นแบบทิศทางเดียว



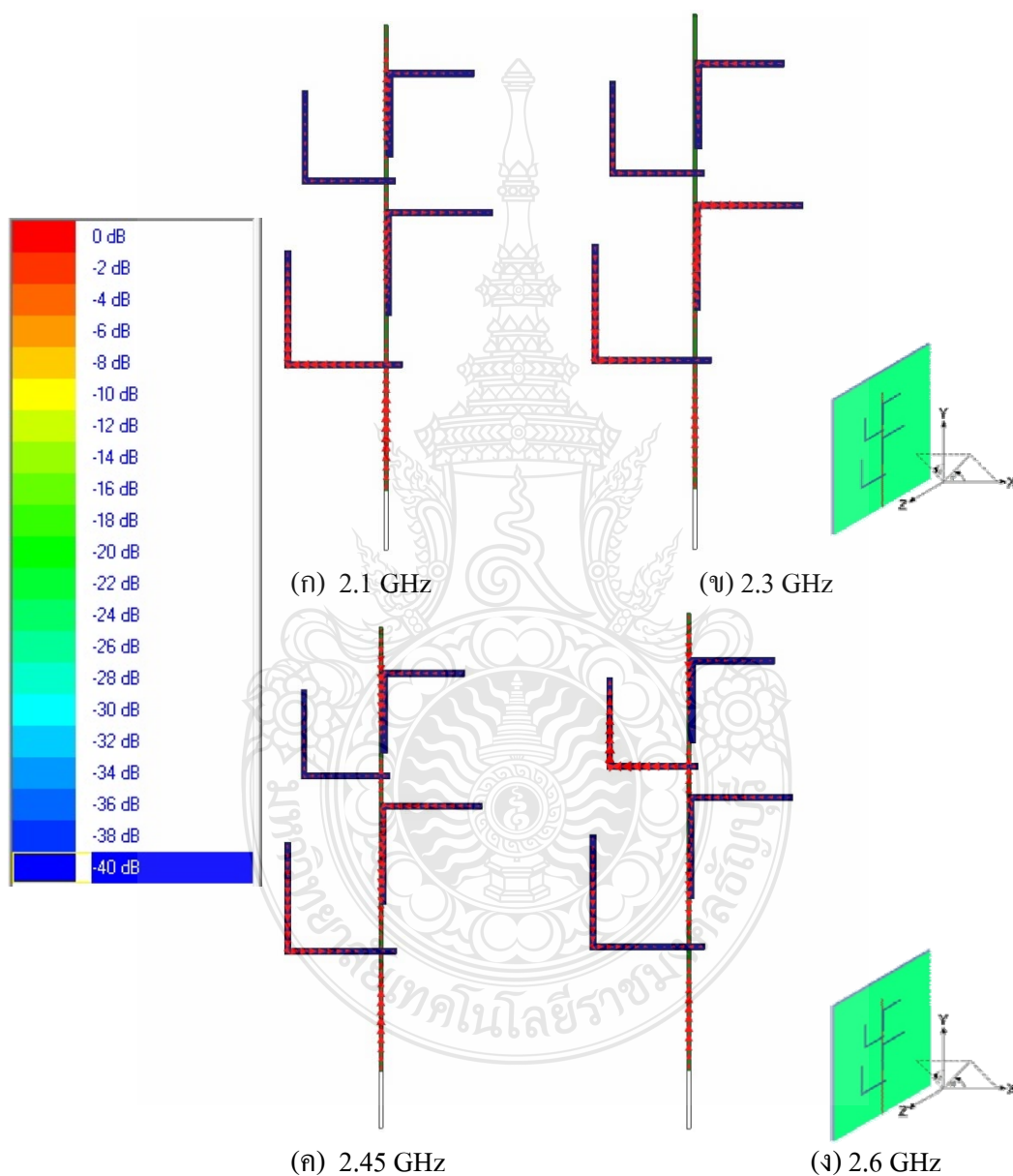
ภาพที่ 3.26 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศที่ความถี่ 2.6 GHz



ภาพที่ 3.27 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบ 3 มิติ ของสายอากาศที่ความถี่ 2.6 GHz



จากภาพที่ 3.26 (ก) 3.26 (ข) และ 3.27 แสดงรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นแบบ 2 มิติ และแบบ 3 มิติ ของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ที่ความถี่ 2.6 GHz ทั้งในระนาบ x-z (ระนาบ  $E$ ) และในระนาบ y-z (ระนาบ  $H$ ) ตามลำดับ ลักษณะการแผ่กระจายคลื่นจะเป็นแบบสองทิศทาง



ภาพที่ 3.28 ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปที่ออกแบบที่ความถี่ 2.1 GHz 2.3 GHz 2.45 GHz และ 2.6 GHz

จาก 3.28 (ก) 3.28 (ข) 3.28 (ค) และ 3.28 (ง) แสดงความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 2.1 GHz, 2.3 GHz, 2.45 GHz, 2.6 GHz ตามลำดับ จากรูปสังเกตได้ว่า มีการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวคลื่น A4+B4 ของความถี่แรกที่ 2.1 GHz นอกจากนี้ที่ความยาวคลื่น (A2+B2) และ (A3+B3) มีการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของความถี่ที่ 2.3 GHz และ 2.45 GHz ส่วนที่ความถี่ 2.6 GHz มีการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ A3+B3 ซึ่งผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้างโดยใช้โปรแกรม IE3D ซึ่งจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

| คุณลักษณะของสายอากาศ                     | ผลที่ได้จากการจำลองแบบ     |                     |                      |                     |
|--|----------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
|  | ย่านความถี่ 2.1 GHz        | ย่านความถี่ 2.3 GHz | ย่านความถี่ 2.45 GHz | ย่านความถี่ 2.6 GHz |
| การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ           | -12.33 dB                  | -10.61 dB           | -12.05 dB            | -13.4 dB            |
| อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง                 | 1.63 : 1                   | 1.81 : 1            | 1.66 : 1             | 1.58 : 1            |
| ประสิทธิภาพของสายอากาศ                   | 90.89%                     | 89.06%              | 89.94%               | 92.26%              |
| อัตราขยายของสายอากาศ                     | 2.46 dBi                   | 3.198 dBi           | 3.64 dBi             | 3.15 dBi            |
| อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น | 2.87 dBi                   | 3.69 dBi            | 4.15 dBi             | 3.49 dBi            |
| แบนด์วิดท์                               | 2.02 – 3.04 GHz (1.02 GHz) |                     |                      |                     |

ตารางที่ 3.5 ผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

| คุณลักษณะของสายอากาศ                     | ผลที่ได้จากการจำลองแบบ     |                     |                     |                     |
|--|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|  | ย่านความถี่ 2.7 GHz        | ย่านความถี่ 2.8 GHz | ย่านความถี่ 2.9 GHz | ย่านความถี่ 3.0 GHz |
| การสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ           | -10.13 dB                  | -13.18 dB           | -11.72 dB           | -11.4 dB            |
| อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง                 | 1.91 : 1                   | 1.56 : 1            | 1.7 : 1             | 1.74 : 1            |
| ประสิทธิภาพของสายอากาศ                   | 86.56%                     | 90.4%               | 88.81%              | 87.78%              |
| อัตราขยายของสายอากาศ                     | 2.16 dBi                   | 2.51 dBi            | 2.62 dBi            | 3.38 dBi            |
| อัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น | 2.79 dBi                   | 2.94 dBi            | 3.14 dBi            | 3.92 dBi            |
| แบนด์วิดท์                               | 2.02 – 3.04 GHz (1.02 GHz) |                     |                     |                     |

### 3.3 สรุปผลการออกแบบของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

ในบทนี้ได้กล่าวการออกแบบและการวิเคราะห์สายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป ซึ่งทำการออกแบบสายอากาศให้มีแบนด์วิดท์ 2.02 – 3.04 GHz (1.02 GHz) โดยผลที่นำมาวิเคราะห์จะได้มาจากแบบจำลองโครงสร้างของสายอากาศซึ่งคำนวณโดยใช้สมการการออกแบบและซอฟต์แวร์ IE3D สำหรับตัวโครงสร้างแบบสี่ช่องเปิดของสายอากาศจะถูกออกแบบให้มีช่องเปิดหนึ่งช่องเปิด ต่อหนึ่งความถี่ซึ่งจากการวิเคราะห์สายอากาศทำให้เห็นได้ว่าช่องเปิดมุมฉากที่ถูกออกแบบ นั้นจะมีความยาวของช่องเปิดมุมฉากที่เหมาะสมสำหรับความถี่ใช้งานคือ  $A1+B1 = 45 \lambda_{g2.8}$   $(A2+B2) = 48.6 \lambda_{g2.55}$   $(A3+B3) = 56.54 \lambda_{g2.2}$  และ  $(A4+B4) = 62 \lambda_{g2.05}$  ดังนั้นในการออกแบบสายอากาศแถบกว้างนั้นจะต้องออกแบบให้มีสี่ช่องเปิด เพื่อให้ช่องเปิดแต่ละช่องเปิดมีความถี่ เรโซแนนซ์ที่ใกล้เคียงกันเพื่อให้ได้แบนด์วิดท์ตามที่เราต้องการ

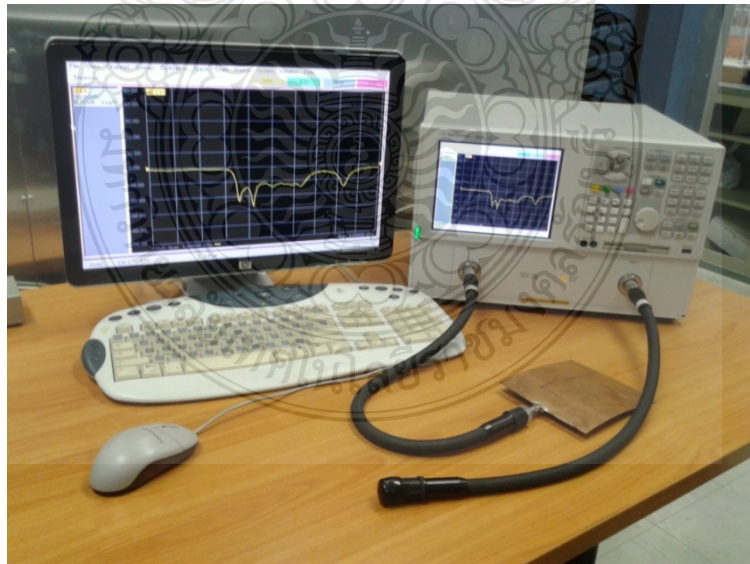
## บทที่ 4

### การทดสอบและผลการทดลอง

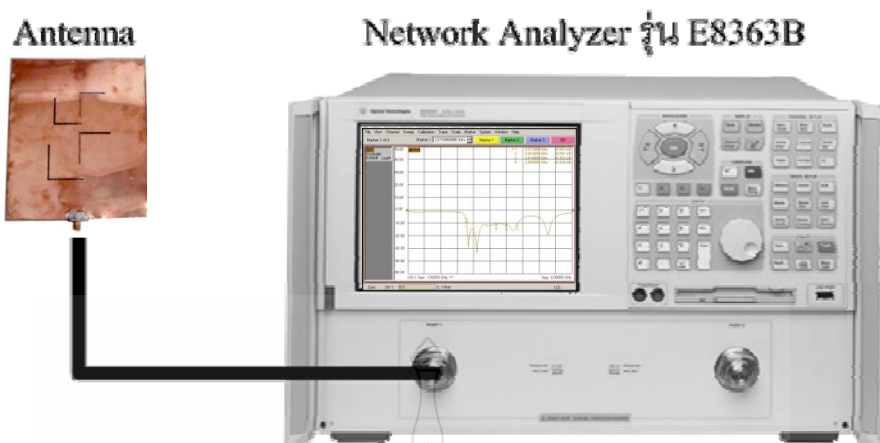
สำหรับการทดสอบและวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศที่ได้ทำการสร้างขึ้นในแบบแถบความถี่กว้าง จะมีการทดสอบประสิทธิภาพต่างๆ ของสายอากาศ คือ การทดสอบวัดค่าความสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง อัตราการขยายและอิมพีแดนซ์ รวมถึงการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

#### 4.1 การทดสอบและผลการทดลองของสายอากาศแวลลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

ในการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะและประสิทธิภาพของสายอากาศนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการทดสอบคือ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Agilent PNA Network Analyzers รุ่น E8363B แสดงได้ดังภาพที่ 4.1 ในการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ Reflection Coefficient ( $S_{11}$ ) จะมีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ ( $Z_{in}$ ) อัตราส่วนคลื่นนิ่ง อัตราการขยาย ของสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับเครือข่ายไร้สาย ซึ่งการต่อสายอากาศเข้ากับ เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) เพื่อวัดผลการทดสอบของสายอากาศที่สร้างขึ้นแสดงดังภาพที่ 4.2

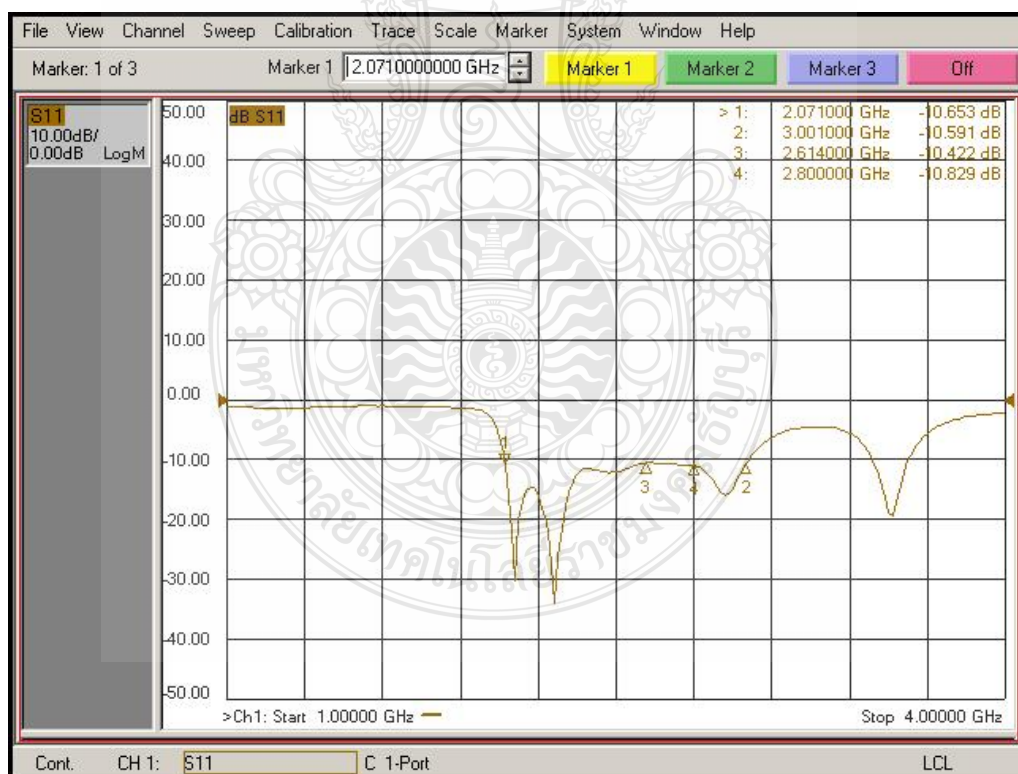


ภาพที่ 4.1 เครื่องมือวัดวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E8363B



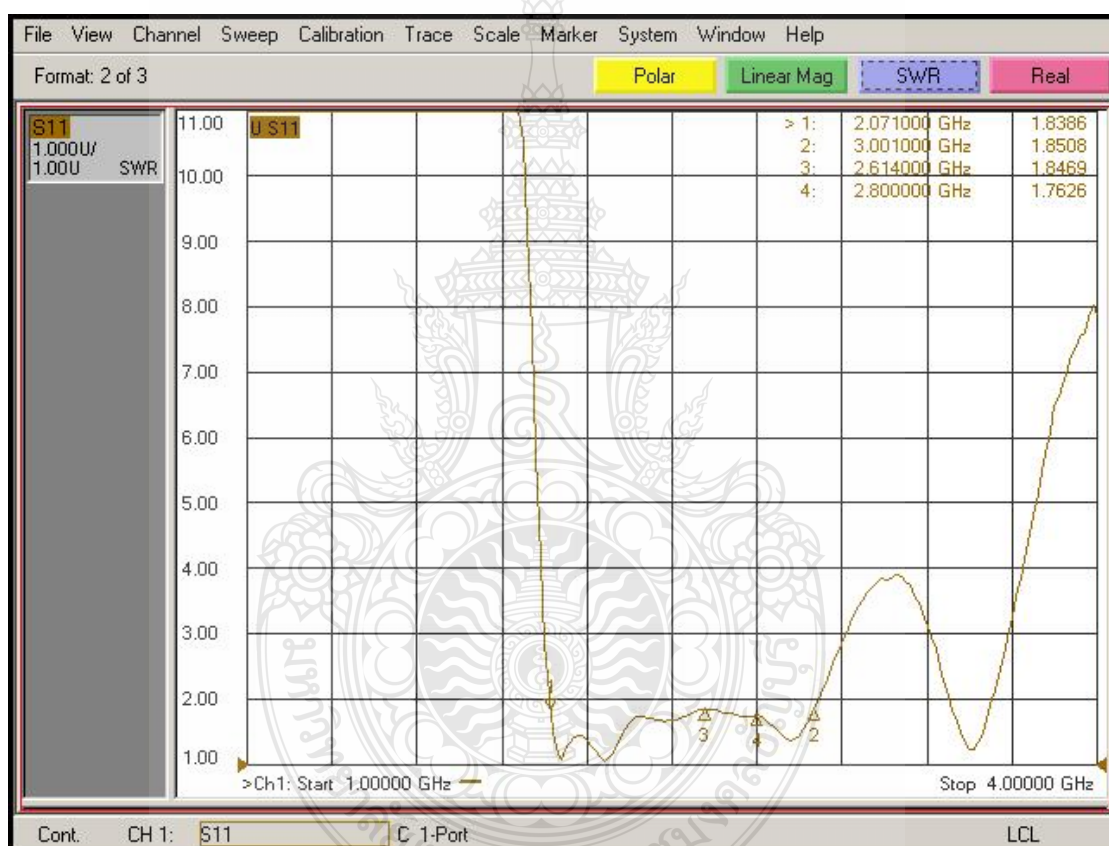
ภาพที่ 4.2 วิธีการวัดและวิเคราะห์สายอากาศแวลวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

#### 4.1.1 ผลการทดสอบการอิมพีแดนซ์และอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ



ภาพที่ 4.3 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ

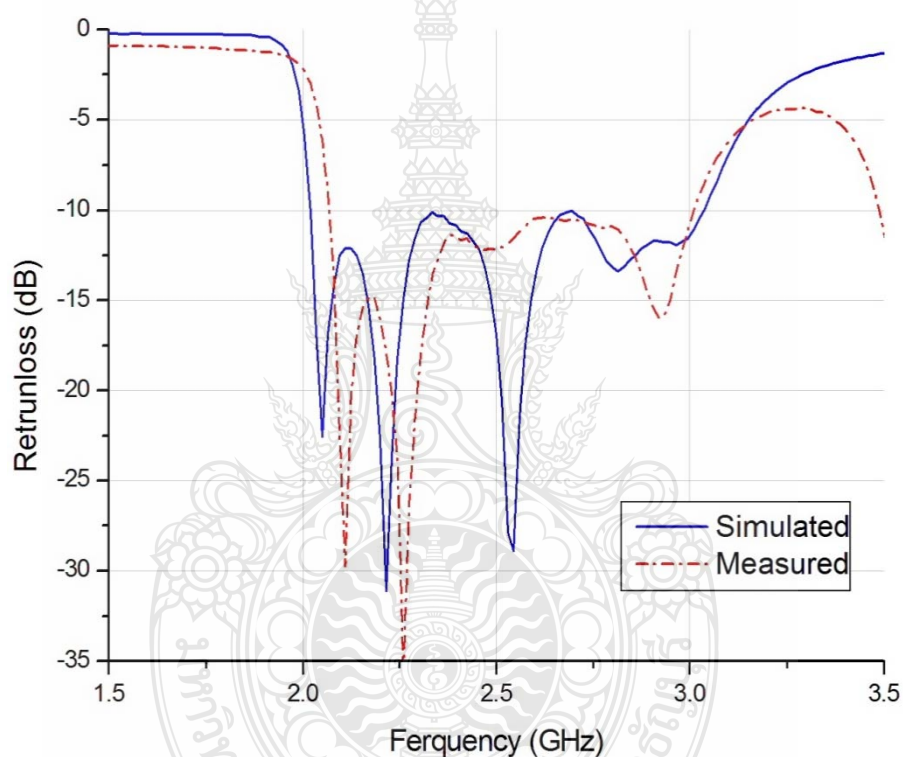
จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ แถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้างตามที่ได้ออกแบบไว้ ณ ช่วงความถี่ระหว่าง 1.0 – 4.0 GHz ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ตั้งแต่ 2.071 – 3.001 GHz มีความถี่งาน 2.1 GHz 2.3 GHz 2.45 GHz และ 2.6 GHz ตามลำดับ โดยในส่วนของผลการวัดค่า VSWR ของสายอากาศ แถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ณ ช่วงความถี่ระหว่าง 1.0 – 4.0 GHz ที่ความถี่ 2.1 GHz 2.3 GHz 2.45 GHz และ 2.6 GHz ตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งมีค่า VSWR ต่ำกว่า 2 ในย่านความถี่ตั้งแต่ 2.06 – 3.01 GHz ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ผลการวัดค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของของสายอากาศ

#### 4.1.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานกับการวัดจริงของสายอากาศ

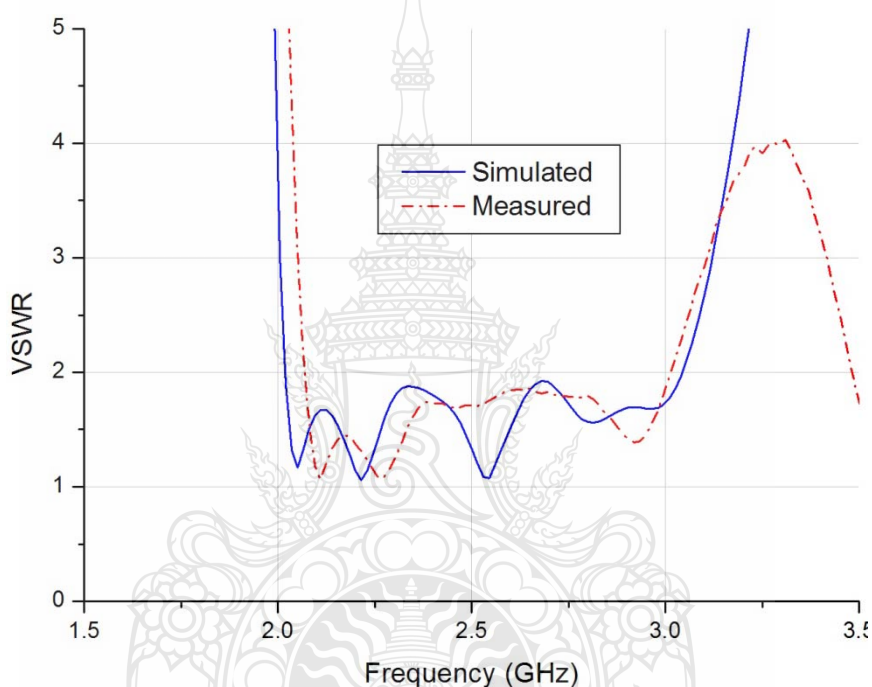
เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกัน โดยผลจากการวัดชิ้นงานจริงสายอากาศที่ความถี่ 2.1 GHz มีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่ -29.75 dB ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จากการจำลอง ที่ความถี่ที่ 2.3 GHz มีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่ -17.97 dB สูงกว่าค่าที่ได้จากการจำลอง ที่ความถี่ที่ 2.45 GHz มีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่ -12.06 dB ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย และที่ความถี่ที่ 2.6 GHz มีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่ -10.46 dB ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการจำลอง



ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับที่ได้จากการจำลองกับการวัดจริงของสายอากาศ

ตารางที่ 4.1 ผลเปรียบเทียบการจำลองกับการวัดชิ้นงานจริงของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

| สายอากาศไมล่ำฟิล์ม                | $f_{max} - f_{min}$ (GHz) | $f_c$ (GHz) | Bandwidth |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------|-----------|
| ผลการจำลองการทำงาน (Simulated)    | 2.03 – 3.04               | 2.54        | 39.76 %   |
| ผลจากการวัดชิ้นงานจริง (Measured) | 2.071 – 3.001             | 2.54        | 36.65 %   |



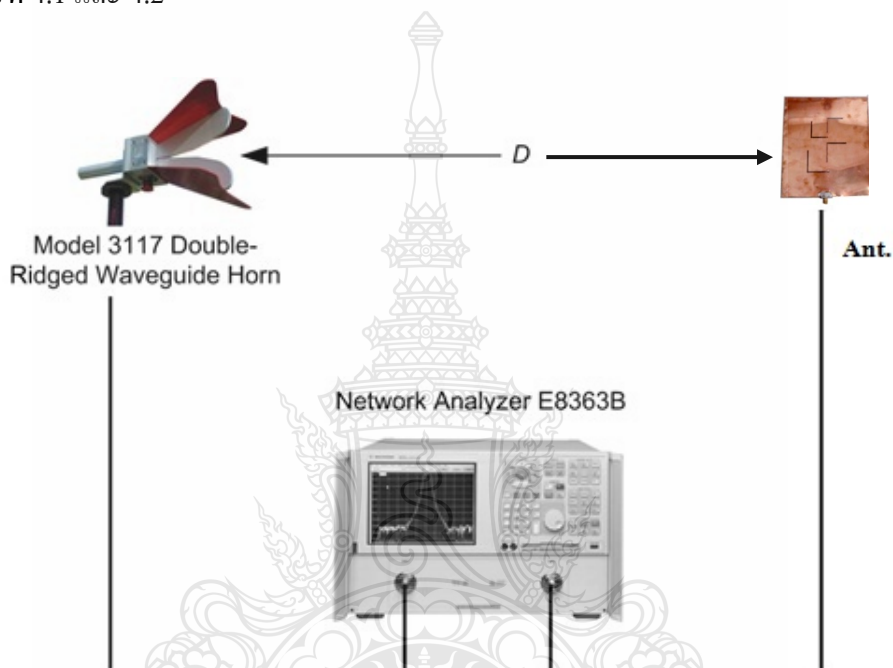
ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบการจำลองของอัตราส่วนคลื่นนิ่งกับการวัดจริงของสายอากาศ

จากภาพที่ 4.6 ผลที่ได้จากการวัดจริงและผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของอัตราส่วนคลื่นนิ่งมีความสอดคล้องกัน เช่นเดียวกับผลของการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ซึ่งค่าที่ได้จากการวัดชิ้นงานจริงจะมีแบนด์วิดท์ลดลง อาจเป็นเพราะมีการคลาดเคลื่อนของค่าตัวเลขทศนิยมในการสร้างชิ้นงานจริง ที่ไม่ละเอียดเท่ากับการจำลองการทำงาน หรืออาจจะเป็นเพราะค่าคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาสร้างมีค่าไม่คงที่เท่าที่ควร จึงมีผลให้ค่าจากการวัดทดสอบคลาดเคลื่อนไป แต่แถบความถี่ที่ได้นั้นก็ยังอยู่ในช่วงของการใช้งาน



### 4.1.3 ผลการทดสอบการวัดค่าอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบการวัดอัตราขยายของสายอากาศแกลวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง เป็นวิธีการวัดวิเคราะห์คุณสมบัติและประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยการนำสายอากาศรูปฮอร์นที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งและสายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากสำหรับเครื่องข่ายซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับต่อเข้ากับเครื่องมือวัดวิเคราะห์ดังภาพที่ 4.7 และยังสามารถคำนวณหาอัตราขยายได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.2



ภาพที่ 4.7 การทดสอบการวัดอัตราขยายของสายอากาศ

$$P_r = P_t - L_f - L_{line} + G_t + G_r \quad (4.1)$$

หรือ

$$G_r = P_r - P_t + L_f + L_{line} - G_t \quad (4.2)$$

โดยที่

$P_r$  คือ กำลังที่ได้รับ

$P_t$  คือ กำลังที่ส่งออก

$L_{line}$  คือ กำลังที่สูญเสียในสายนำสัญญาณทั้งทางด้านส่งและด้านรับ

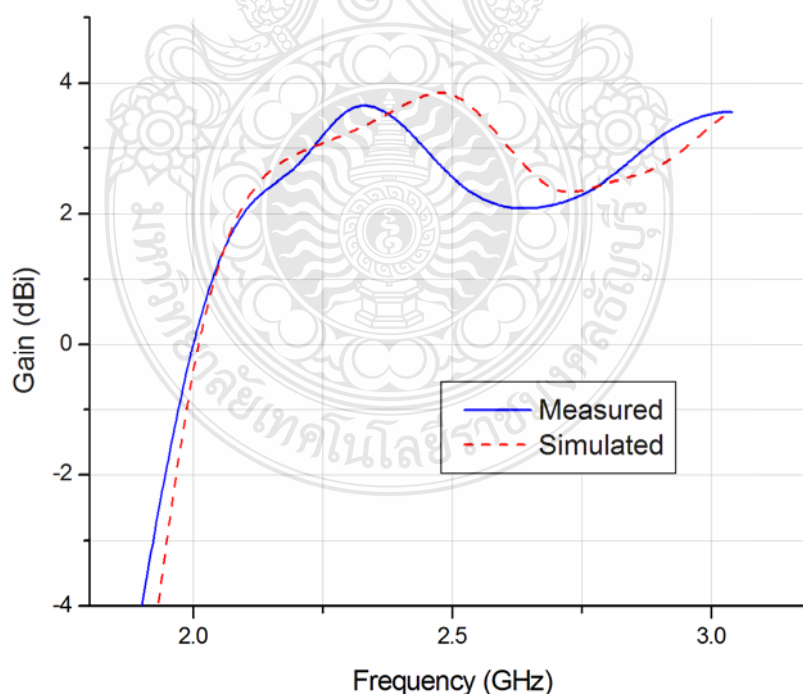
$L_f$  คือ การสูญเสียในอากาศ  $20 \text{ LOG } \frac{4\pi D}{\lambda}$

$D$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ 2 เมตร

$G_t$  คือ อัตราการขยายของสายอากาศด้านส่ง

$G_r$  คือ อัตราการขยายของสายอากาศด้านรับ

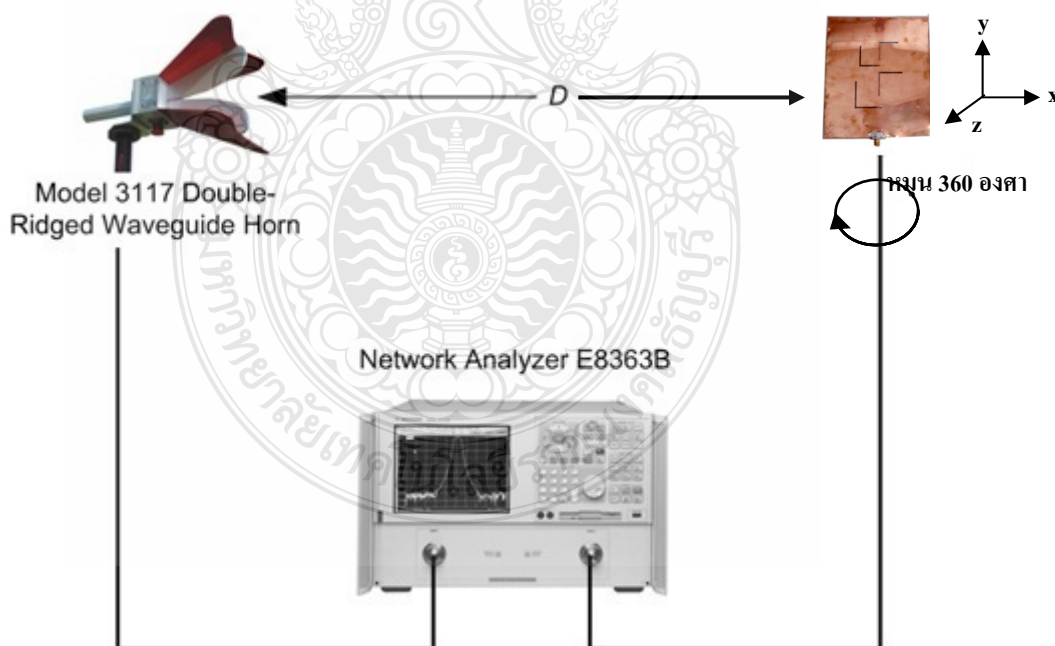
ในส่วนของการเปรียบเทียบของค่าอัตราขยายจากการจำลองกับผลการวัดของสายอากาศ สายอากาศแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้างที่ความถี่ 2.1 GHz มีค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลองเท่ากับ 2.31 dBi ค่าที่ได้จากการวัดจริงเท่ากับ 2.45 dBi ที่ความถี่ 2.3 GHz มีค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลองเท่ากับ 3.85 dBi และค่าที่ได้จากการวัดจริงเท่ากับ 3.2 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลองเท่ากับ 3.48 dBi และค่าที่ได้จากการวัดจริงเท่ากับ 3.63 dBi ที่ความถี่ 2.6 GHz มีค่าอัตราขยายจากการจำลองเท่ากับ 2.03 dBi และค่าที่ได้จากการวัดจริงเท่ากับ 3.08 dBi ดังภาพที่ 4.8



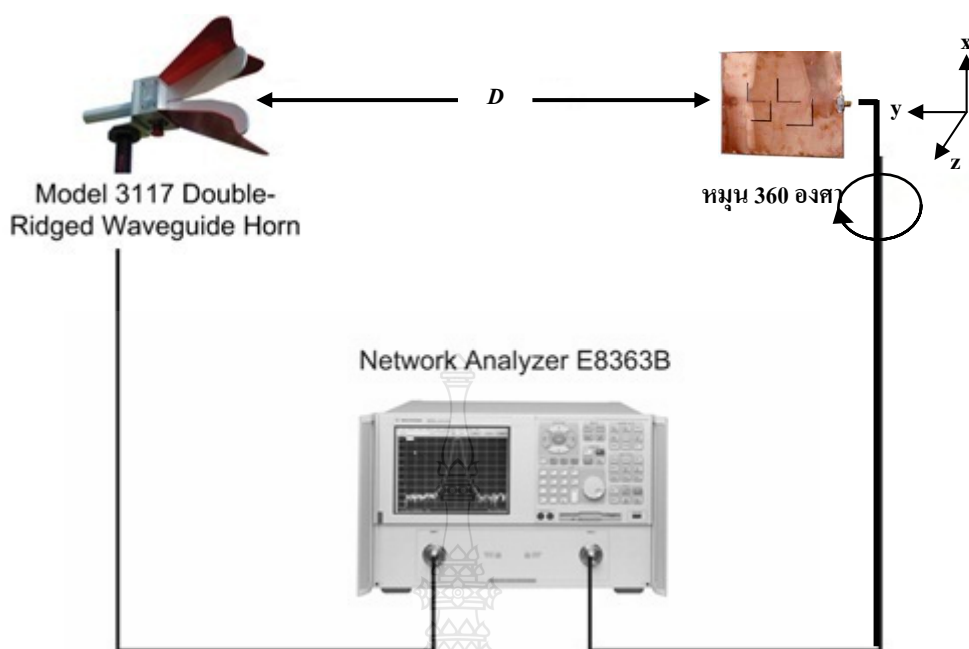
ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบผลการวัดและการจำลองแบบของค่าอัตราขยายของสายอากาศ

#### 4.1.4 การทดสอบการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

แบบรูปการแผ่พลังงานสำหรับสายอากาศแฉกลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้างในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีการใช้งานย่านความถี่สำหรับสำหรับแถบความถี่กว้าง โดยความถี่ที่ใช้งานในการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานได้แก่ ความถี่ที่ 2.1 GHz 2.3 GHz 2.45 GHz และ 2.6 GHz ในของส่วนเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดจะประกอบด้วย เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E8363B ร่วมกับโปรแกรมแสดงค่าการแผ่พลังงานสามารถวัดได้ทั้งกำลังและความถี่ในย่านแถบความถี่ที่ออกแบบโดยปรับความถี่รับที่ความถี่ 2.1 GHz 2.3 GHz 2.45 GHz และ 2.6 GHz โดยการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานแบบสนามไฟฟ้าระยะไกลของสายอากาศแบบระนาบร่วมแบบบนพื้นที่โล่ง โดยที่สายอากาศส่ง และสายอากาศรับอยู่ในระนาบเดียวกัน ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับประมาณ 2 เมตร สายนำสัญญาณทั้งด้านส่งและรับยาวด้านละ 5 เมตร โดยจะทำการหมุนสายอากาศทดสอบตั้งแต่ 0 องศา จนครบรอบ 360 องศา ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 โดยใช้การปรับระนาบที่ด้านรับครั้งละ 5 องศาเพื่อดูค่าความแตกต่าง ของสัญญาณที่สายอากาศสามารถรับได้ในแต่ละระนาบ โดยจะทำการทดสอบของสายอากาศแฉกลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้างทั้งระนาบ x-z และระนาบ y-z

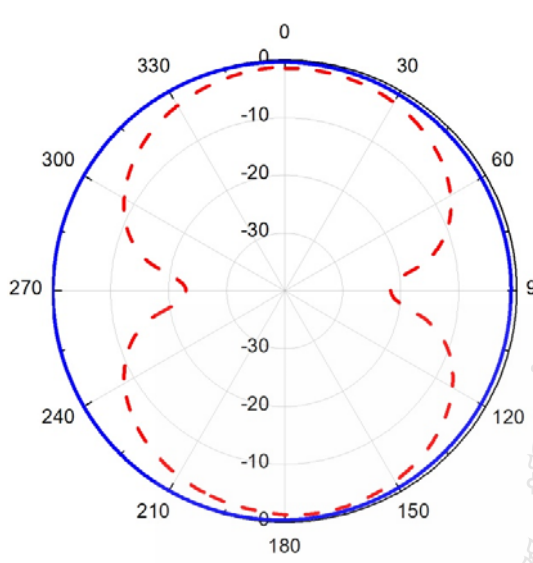


ภาพที่ 4.9 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวระนาบ x-z

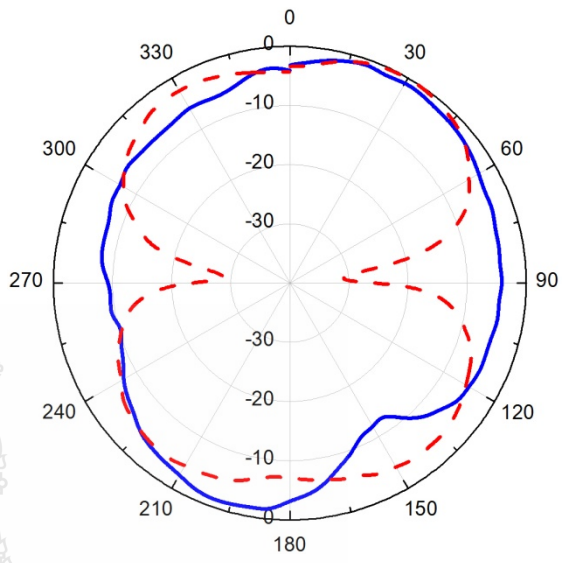


ภาพที่ 4.10 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในแนวระนาบ  $y-z$

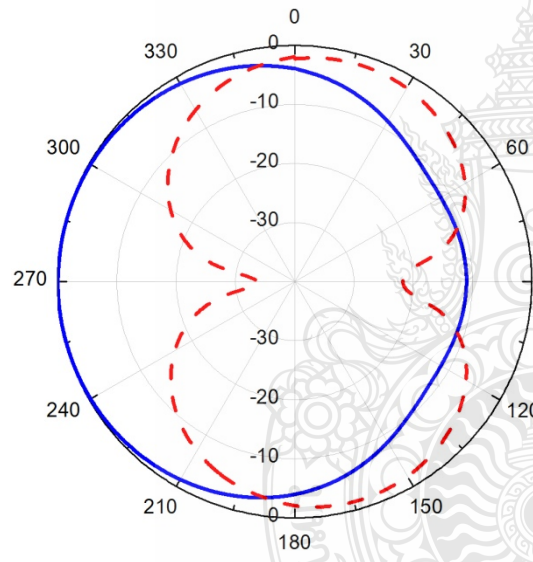
จากภาพที่ 4.11 และ ภาพที่ 4.12 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ในระนาบ  $x-z$  (ระนาบ  $E$ ) และระนาบ  $y-z$  (ระนาบ  $H$ ) โดยที่รูปด้านซ้ายจะแสดงถึงแบบจำลอง ส่วนรูปด้านขวาแสดงถึง ผลที่ได้จากการวัดทดสอบ โดยภาพที่ (ก) (ข) (ค) และ (ง) แสดงความถี่ที่ 2.1 GHz 2.3 GHz 2.45 GHz และ 2.6 GHz ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบกันระหว่างการจำลองและการวัดทดสอบจะเห็นได้ว่า การจำลองมีความราบเรียบของแบบรูปการแผ่พลังงานมากกว่าการวัดทดสอบ เนื่องจากมีผลจากสภาพแวดล้อมของการทดสอบ รวมทั้งสายอากาศสามารถที่จะแผ่พลังงานได้ทั้งโพลาไรซ์แบบแนวตั้ง ( $E_\theta$ ) และโพลาไรซ์แบบแนวนอน ( $E_\phi$ ) ทั้งสองระนาบนั้นสร้างสายอากาศที่วัดจริงได้ไม่เท่าขนาดที่ออกแบบไว้ สำหรับอัตราขยายของสายอากาศที่ได้จากการวัด ณ ความถี่ 2.1 GHz เท่ากับ 2.45 dBi ที่ความถี่ 2.3 GHz เท่ากับ 3.19 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz เท่ากับ 3.63 dBi และที่ความถี่ 2.6 GHz เท่ากับ 3.08 dBi จะเป็นการแผ่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง (Bi-directional) ที่ความถี่ 2.1 GHz 2.3 GHz 2.45 GHz และ 2.6 GHz



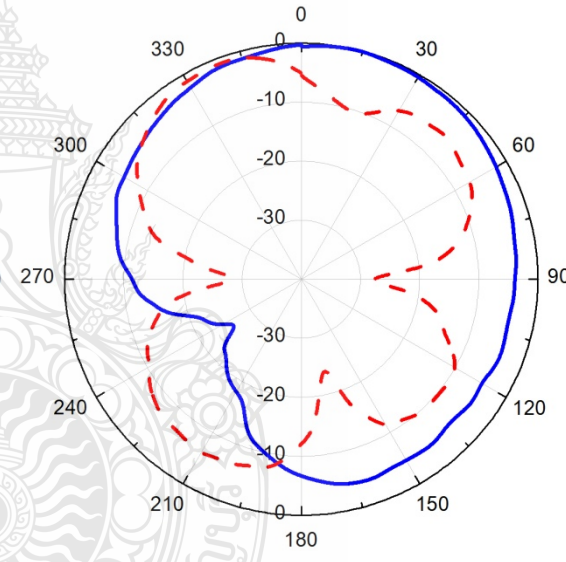
(ก) ผลการจำลอง 2.1 GHz



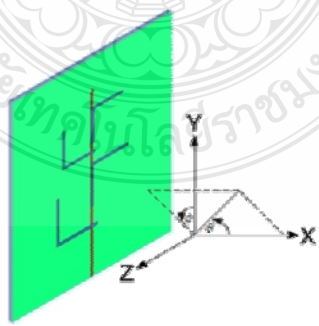
(ข) ผลการวัด 2.1 GHz



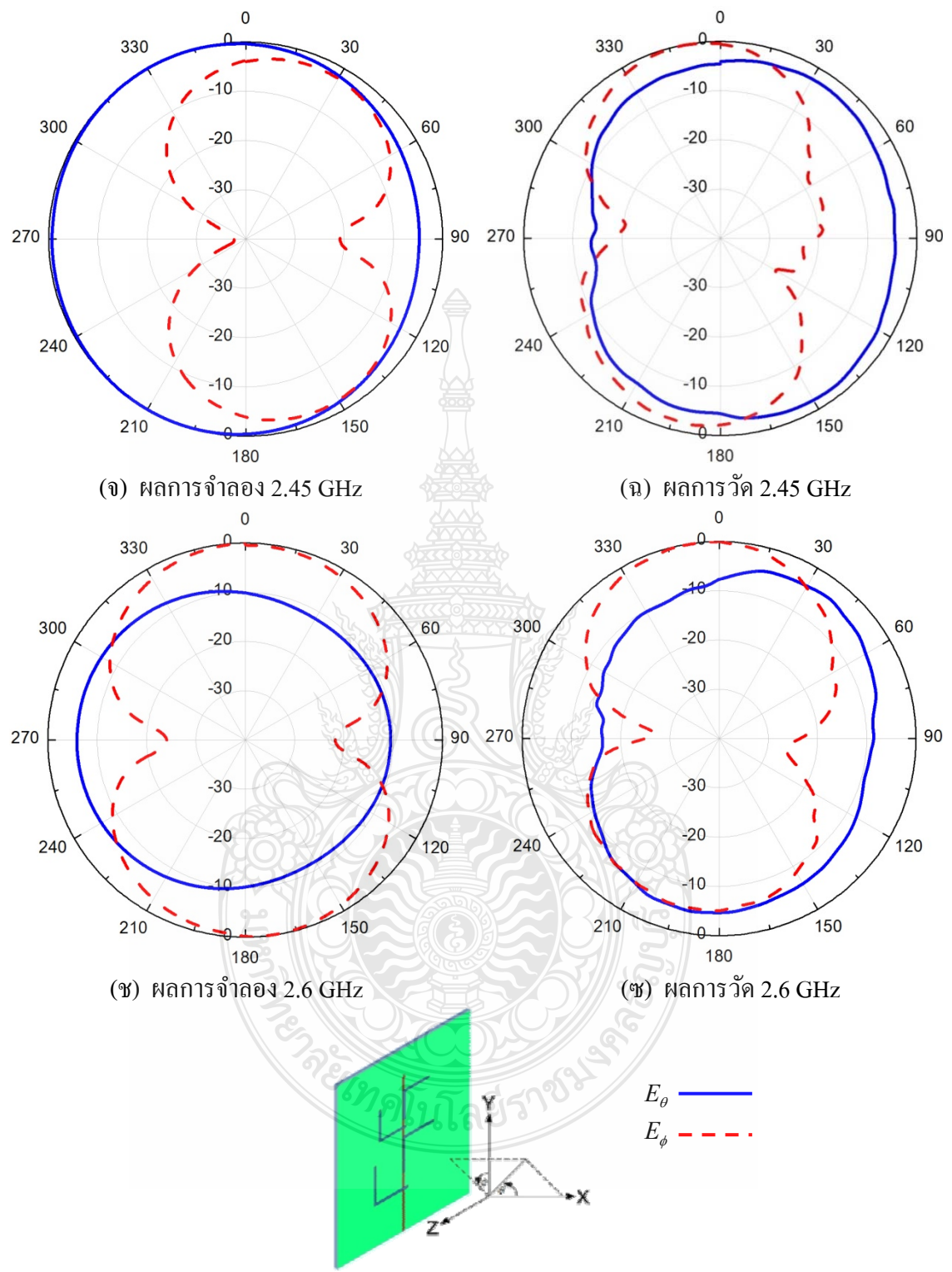
(ค) ผลการจำลอง 2.3 GHz



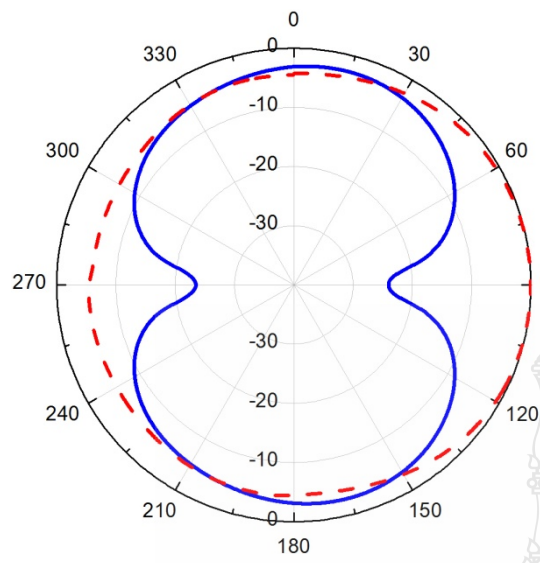
(ง) ผลการวัด 2.3 GHz



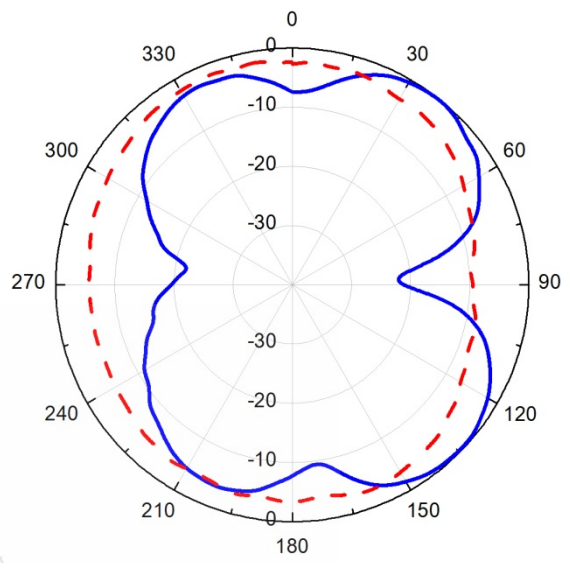
$E_\theta$  ———  
 $E_\phi$  - - -



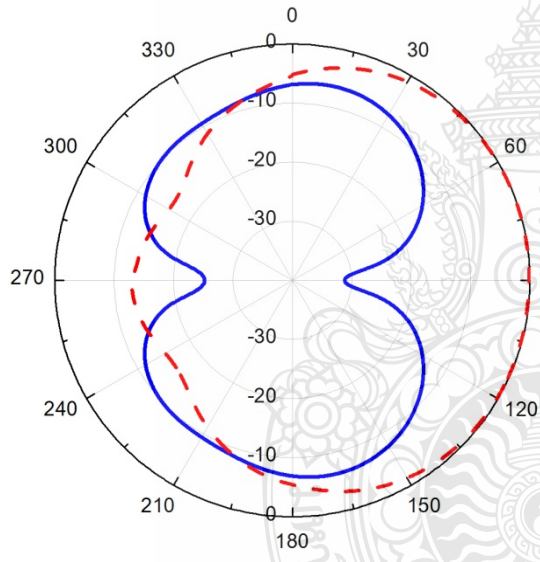
ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงกับการจำลองของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ x-z



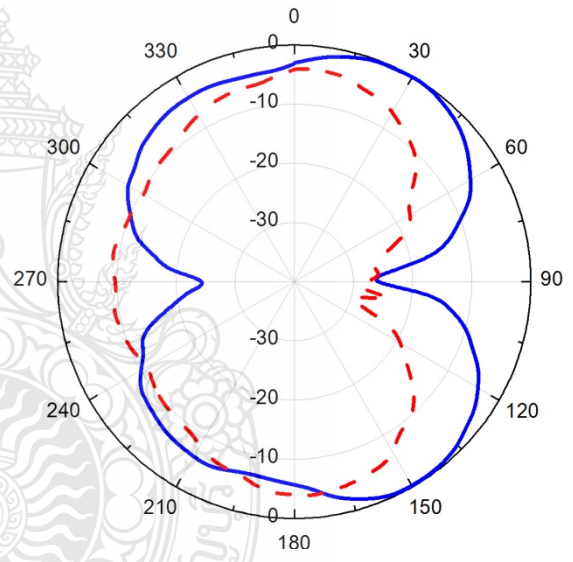
(ก) ผลการจำลอง 2.1 GHz



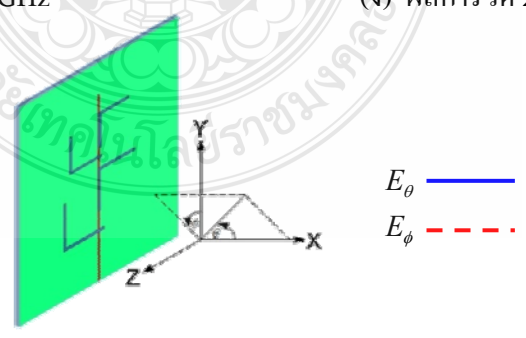
(ข) ผลการวัด 2.1 GHz

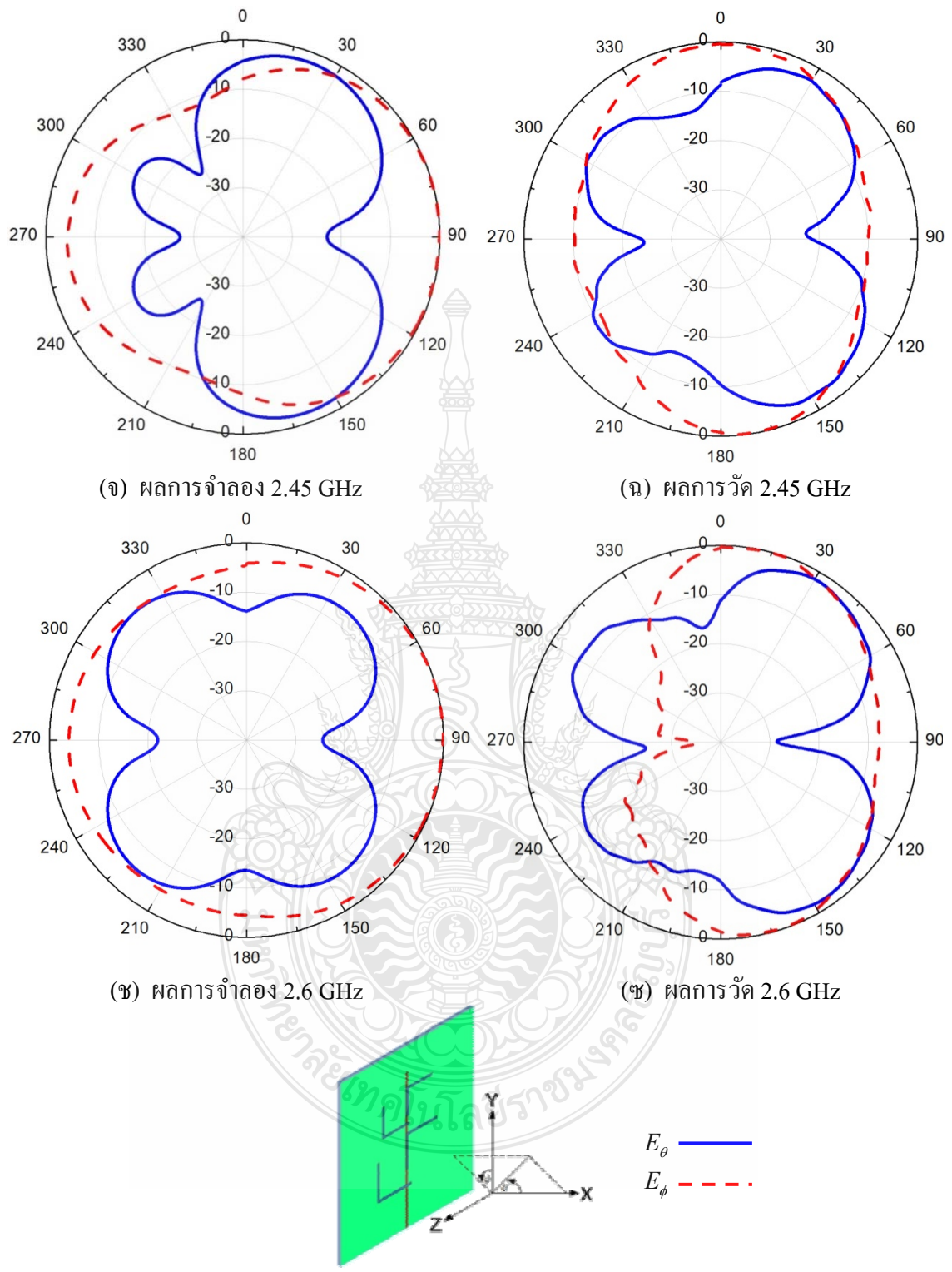


(ค) ผลการจำลอง 2.3 GHz



(ง) ผลการวัด 2.3 GHz





ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบระหว่างการวัดจริงกับการจำลองของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศในระนาบ y-z



ผลการจำลองการทำงานของสายอากาศพบว่า มีการสูญเสียย้อนกลับที่ -29.75 dB ที่ความถี่ 2.1 GHz, -17.97 dB ที่ความถี่ 2.3 GHz, -12.06 dB ที่ความถี่ 2.45 GHz และ -10.46 dB ที่ความถี่ 2.6 GHz ในขณะที่ผลจากการวัดจริงของสายอากาศจะมีการสูญเสียย้อนกลับที่ -12.33 dB, -10.61 dB, -12.05 dB, -13.4 dB ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดจริงของสายอากาศทั้งสองความถี่ นอกจากนี้ยังพบว่าผลการจำลองการทำงานของสายอากาศจาก IE3D ได้ความกว้างแบนด์วิดท์ที่ 2.02 – 3.04 GHz (1.02 GHz) ที่ความถี่ 2.1 GHz อัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.63:1 อัตราการขยายเท่ากับ 2.46 dBi ที่ความถี่ 2.3 GHz อัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.81:1 อัตราการขยายเท่ากับ 3.198 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz อัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.66:1 อัตราการขยายเท่ากับ 3.64 dBi และ ที่ความถี่ 2.6 GHz อัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.58:1 อัตราการขยายเท่ากับ 3.15 dBi ในขณะที่ผลจากการวัดจริงความกว้างแบนด์วิดท์อยู่ที่ 2.071 – 3.001 GHz (930 MHz) อัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.15:1 1.24:1 1.71 และ 1.85:1 อัตราการขยายเท่ากับ 2.45 dBi, 3.2 dBi, 3.63 dBi และ 3.08 dBi ตามลำดับ ซึ่งได้แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของสายอากาศที่ได้จากการวัดและการจำลองสายอากาศ

**ตารางที่ 4.2** การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการวัดจริง

| ผลการตอบสนอง                        | ความถี่ 2.1 GHz                         |  | ความถี่ 2.3 GHz                         |  |
|-------------------------------------|---|--|---|--|
|                                     | ค่าที่ได้<br>จากการจำลอง<br>(Simulated) | ค่าที่ได้<br>จากการวัดจริง<br>(Measured) | ค่าที่ได้<br>จากการจำลอง<br>(Simulated) | ค่าที่ได้<br>จากการวัดจริง<br>(Measured) |
| การสูญเสียย้อนกลับ<br>(Return loss) | -12.33 dB                               | -29.75 dB                                | -10.61 dB                               | -17.97 dB                                |
| อัตราส่วนคลื่นนิ่ง<br>(VSWR)        | 1.63 : 1                                | 1.15 : 1                                 | 1.81 : 1                                | 1.24 : 1                                 |
| อัตราการขยาย<br>(Gain)              | 2.46 dBi                                | 2.45 dBi                                 | 3.198 dBi                               | 3.2 dBi                                  |
| แบนด์วิดท์<br>(Bandwidth)           | 2.071 – 3.001 GHz<br>(930 MHz)          |  |   |  |

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศที่ได้จากการจำลองและการวัดจริง

| ผลการตอบสนอง                        | ความถี่ 2.45 GHz                        |  | ความถี่ 2.6 GHz                         |  |
|-------------------------------------|---|--|---|--|
|                                     | ค่าที่ได้<br>จากการจำลอง<br>(Simulated) | ค่าที่ได้<br>จากการวัดจริง<br>(Measured) | ค่าที่ได้<br>จากการจำลอง<br>(Simulated) | ค่าที่ได้<br>จากการวัดจริง<br>(Measured) |
| การสูญเสียย้อนกลับ<br>(Return loss) | -12.05 dB                               | -12.06 dB                                | -13.4 dB                                | -10.46 dB                                |
| อัตราส่วนคลื่นนิ่ง<br>(VSWR)        | 1.66 : 1                                | 1.7 : 1                                  | 1.58 : 1                                | 1.85 : 1                                 |
| อัตรการขยาย<br>(Gain)               | 3.64 dBi                                | 3.63 dBi                                 | 3.15 dBi                                | 3.06 dBi                                 |
| แบนด์วิทท์<br>(Bandwidth)           | 2.071 – 3.001 GHz<br>(930 MHz)          |  |   |  |

#### 4.2 สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ที่ถูกกระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป ประกอบด้วยความถี่ที่ความถี่ 2.1 GHz 2.3 GHz 2.45GHz และ 2.6 GHz ที่มีการแผ่กระจายคลื่นเป็นแบบสองทิศทางค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับเท่ากับ -29.75 dB ที่ความถี่ 2.1 GHz, -17.97 dB ที่ความถี่ 2.3 GHz, -12.06 ที่ความถี่ 2.45 GHz และ -10.46 ที่ความถี่ 2.6 GHz อัตราส่วนคลื่นนิ่ง เท่ากับ 1.15:1 ที่ความถี่ 2.1 GHz, 1.24:1 ที่ความถี่ 2.3 GHz, 1.7:1 ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 1.85:1 ที่ความถี่ 2.6 GHz แบนด์วิทท์เท่ากับ 2.071 – 3.001 GHz (930 MHz) และอัตรการขยายเท่ากับ 2.45 dBi ที่ความถี่ 2.1 GHz, 3.2 dBi ที่ความถี่ 2.3 GHz, 3.63 dBi ที่ความถี่ 2.45 GHz และ 3.08 dBi ที่ความถี่ 2.6 GHz ซึ่งจากผลการวัดด้วยการทดสอบสายอากาศจากโครงสร้างจริงนั้นพิสูจน์ให้เห็นได้ว่ามีแบนด์วิทท์ที่ใกล้เคียงกับผลการจำลอง

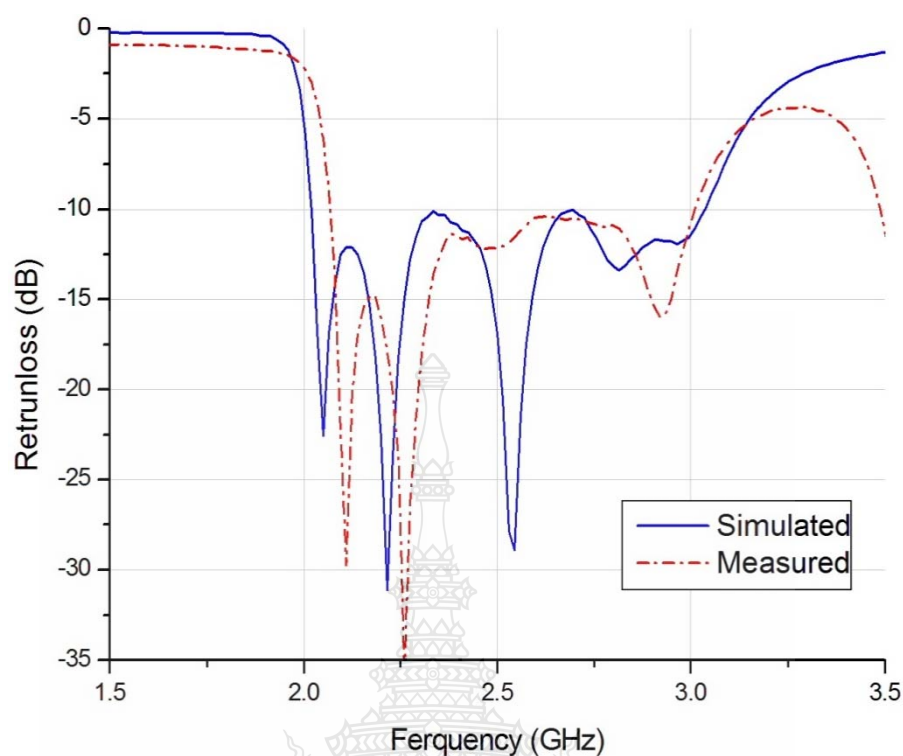
## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปการวิจัยของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากแบบไมลาร์ฟิล์มที่มีแถบความถี่กว้าง ที่กระตุ้นด้วยสายส่งสัญญาณไมโครสตริป กับรูปแบบการแผ่พลังงานแบบสองทิศทาง ตามที่ได้ทำการศึกษา ออกแบบและวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติ ทางพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งในบทนี้ จะทำการสรุปคุณสมบัติของสายอากาศดังกล่าว ที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม IE3D และการสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อทำการวัดวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสายอากาศแบบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว

#### 5.1 ข้อสรุปงาน

การศึกษาและการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดมุมฉากแบบไมลาร์ฟิล์มที่มีแถบความถี่กว้างในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอโครงสร้างของสายอากาศ ที่ง่ายต่อการออกแบบ ไม่ซับซ้อน รวมทั้งสายอากาศจะถูกออกแบบให้มีช่องเปิดที่มีขนาดและตำแหน่งในการจัดวางที่เหมือนกัน 2 ชุดวางอยู่บนระนาบกราวด์เดียวกันกับวัสดุฐานรอง ไมลาร์ฟิล์ม ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 3.2 และมีความหนา 0.4 mm โดยหลักในการออกแบบสายอากาศนี้มีข้อดี คือ ช่องเปิดมุมฉากแต่ละอันสามารถที่จะผลิตย่านความถี่ที่ต้องการได้อิสระจากกัน แต่เราได้ทำการออกแบบให้ช่องเปิดมุมฉากมีความถี่ได้ใกล้เคียงกันเพื่อให้เกิดเป็นแถบความถี่กว้าง ทั้งยังได้คุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศที่ดี เช่น แมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ดี มีแบบรูปการแผ่พลังงาน แบบสองทิศทางที่ความถี่ 2.1 GHz 2.3 GHz 2.45 GHz และ 2.6 GHz รวมทั้งมีอัตราขยาย ที่ยอมรับได้ ( $\text{Gain} \geq 2 \text{ dBi}$ ) เป็นต้น แต่สายอากาศแบบนี้จะเกิดสัญญาณแทรกข้าม (Crosstalk) ของช่องเปิดแต่ละอันขึ้น ทำให้เกิดผลกระทบกับคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ ณ ความถี่ต่างๆ ซึ่งเกิดขึ้นตามลักษณะของการจัดวางช่องเปิดของสายอากาศ นอกจากนี้สายอากาศที่นำเสนออื่น ยังได้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการและมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมกับย่านความถี่ใช้งานตามมาตรฐาน WLAN และ WiMax



ภาพที่ 5.1 การเปรียบเทียบการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองและการวัดจริงของสายอากาศช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง

จากโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบกว้าง ที่ได้นำเสนอมาแล้วนั้น จะเห็นว่าโครงสร้างของสายอากาศที่ออกแบบสามารถสร้างได้ง่าย มีราคาถูก และมีขนาดที่บางกว่าสายอากาศที่ใช้วัสดุฐานรองแบบ FR4 จึงเหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบ WLAN และ WiMax ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้อาศัยการจำลองการทำงานและการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ นอกจากนี้ยังมีค่าการสูญเสียย้อนกลับ อัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง อัตราการขยายของสายอากาศ รูปแบบการแผ่กระจายของสายอากาศ และ การแผ่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยโปรแกรม IE3D รวมไปถึงอาศัยเครื่องมือวัดวิเคราะห์ผลโครงข่าย Agilent PNA Network Analyzers E8363B เพื่อทำการวัดวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศที่สร้างขึ้น ซึ่งผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะให้ผลที่น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การพัฒนาโครงสร้างสายอากาศในอนาคต ควรศึกษาโครงสร้างสายอากาศลักษณะอื่นๆ เพื่อเพิ่มความกว้างของแบนด์วิดท์ของสายอากาศให้ครอบคลุมย่านความถี่อื่นๆ เช่น โทรศัพท์มือถือ, Third Generation Mobile Network (3G)

5.2.2 ควรศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบจากการโค้งงอของสายอากาศต่อความถี่เรโซแนนซ์

5.2.3 ควรศึกษาวิเคราะห์ผลกระทบขนาดกราวด์ของสายอากาศ



## รายการอ้างอิง

- [1] Roberto Caso, Student Member, IEEE, Andrea A. Serra, Marcos Rodriguez-Pino, Paolo Nepa, Member, IEEE, and Giuliano Manara, Fellow, IEEE, “**A Wideband Slot-Coupled Stacked-Patch Array for Wireless Communications,**” *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, Vol. 9, 2010., pp 986-989
- [2] Lev Pazin and Yehuda Leviatan, “Inverted-F Laptop Antenna With Enhanced Bandwidth for Wi-Fi/WiMAX Applications,” **IEEE Transaction on Antennas and Propagation**, Vol.59, No.3, March 2011., pp 1065-1068
- [3] Y. Sung, “A Printed Wide-Slot Antenna With a Modified L-Shaped Microstrip Line for Wideband Applications,” **IEEE Transaction on Antennas and Propagation**, Vol.59, No.10, October 2011., pp 3918-3921
- [4] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, Paitoon Rakluea and T. Wakabayashi, “Design of Right Angle Slot Antenna for Dual Band and Dual Polarized with Wireless Network,” **International Conference on Control, Automation and Systems 2010**, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 27-30, 2010 in KINTEX., pp 1958-1961
- [5] Hossein Eskandari, Mahmood Rafaei Booket, Manouchehr Kamyab, and Mehdi Veysi, Student Member, IEEE, “**Investigations on a Class of Wideband Printed Slot Antenna,**” *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, Vol. 9, 2010., pp 1221-1224
- [6] Thinnawat Jangjing, Paitoon Rakluea, Wanchalerm Chanwattanapong, and Sarawuth Chaimool, “A Novel Dual Band and Dual Pattern Right Angle Slot Antenna.” **Thailand-Japan Microwave 2011(TJMW2011)**, Bangkok, Thailand, 10-12 Aug, 2011., pp 61-64
- [7] Thinnawat Jangjing, Wanchalerm Chanwattanapong, Paitoon Rakluea, Numyoot Songthanapitak, “Study of Dual-Directional Pattern Right Angle Slot Antenna for Dual-Band Applications,” **The Japan Society for Simulation Technology (JSST 2011)**, Tokyo, JAPAN, October 22-23, 2011.

- [8] ไพฑูรย์ รักเหลือ. “สายอากาศหลายความถี่แบบช่องเปิดมุมฉากที่กระตุ้นด้วยสายส่งไมโครสตริป.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.
- [9] กฤตพล นาคเจริญ. “การวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแบบช่องเปิดสองความถี่” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [10] วัชรพล นาคทอง “การเพิ่มแบนด์วิดท์และลดขนาดของสายอากาศโมโนโพลแบบระนาบด้วยเทคนิคการเจาะร่อง,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาไฟฟ้า แขนงวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [11] เอกรัฐ หล่อพิเชียร “สายอากาศช่องเปิดระนาบร่วมแถบความถี่กว้างสำหรับระบบเครือข่ายไร้สาย,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [12] ประกาศิต ต้นตือลงกร และ จิระศักดิ์ ช่างชัย, “สายอากาศร่องสี่เหลี่ยมที่ป้อนด้วยสายนำสัญญาณระนาบร่วมแบบสองความถี่โดยใช้ร่องคู่รูปตัวแอล,”วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, ปีที่ 6, ฉบับที่ 2, กรกฎาคม - ธันวาคม 2553.
- [13] Y. Yoshimura, “A Microstrip Line Slot Antenna,” **IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques**, Vol. MTT-20, 1972., pp. 760-762
- [14] D. M. Pozar, “Reciprocity Method of Analysis for Printed Slot and Slot-Coupled Micro-strip Antenna,” **IEEE Trans. Antennas Propag**, Vol. AP-46, 1996., pp. 1439-1446
- [15] B. N. Das, and K. K. Joshi, “Impedance of a Radiating Slot in the Ground Plane of a Microstrip Line,” **IEEE Trans. Antennas Propag**, Vol. AP-30, 1982., pp. 922-926
- [16] S. K. Sharma, L. Shafai, and N. Jacob, "Investigation of Wide-Band Microstrip Slot Antenna," **IEEE Trans. Antennas Propag**, Vol. 52, no. 3, Mar. 2004., pp. 865-872
- [17] Rakluea, P. Multiband Microstrip-Fed Right Angle Slot Antenna Design for Wireless Communication Systems., **ETRI Journal.**, Vol.31., No.3., (June 2009)., pp 271-281.
- [18] Yong, S.-L.S., Kishk, A.A. and Lee, K.-F. “Wideband Circularly Polarized Antenna with L-Shaped Slot,” **IEEE Trans on Antenna and Prog.**, Vol.56., No.6., (June 2008)., 1780-1783.

- [19] Lin, S.-K. and Lin, Y.-C. "A Compact Sequential Rotation Array. **IEEE Trans on Antenna and Prop.**, Vol.59., No.7., (July 2011)., pp 2721-2724
- [20] P. Rakluea , V. Pirajnanchai, N. Anantrasirichai, K. Janchitrapongveg, and T. Wakabayashi. "CHARACTERISTICS OF RIGHT ANGLE MICROSTRIP SLOT ANTENNA FOR DUAL FREQUENCY," **Proceedings of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems**, December 13-16 2005 Hong Kong, pp 705-708
- [21] P. Rakluea, K. Janchitrapongveg, N. Anantrasirichai, and T. Wakabayashi "Analysis of Right Angle Microstrip Slot Antenna," **TENCON 2005**, 2005 IEEE Region 10, 21-24 Nov. 2005.
- [22] P. Rakluea, and N. Anantrasirichai, "A Dual Band Right Angle Microstrip Slot Antenna," **Communications Circuits and Systems Proceedings**, 2006 International Conference on, 25-28 June, 2006, pp. 1407-1410
- [23] A. Pomsathit, C. Benjangkaprasert, N. Anantrasirichai, V. Chutchavong', and T. Wakabayashi, "Circularly Polarized Right Angle Slot Antennas for WLAN of IEEE 802.11b/g," **Microwave Conference**, 2005 European., Vol. 1., 4-6 Oct., 2005., pp 46-50
- [24] K.Kumar, and N.Gunasekaran, "A Novel Wide Band Planar n Shaped Base Station Antenna," **Communications and Signal Processing (ICCSP)**, 2011 International Conference on, 10-12 Feb. 2011., pp. 294-296.
- [25] X.D. Huang, C.H. Cheng and L. Zhu, "Wideband antenna using a multiple-mode slotline radiator: proposal and implementation," **IET Microw. Antennas Propag.**, 2011, Vol. 5, Iss. 14, pp. 1773-1778



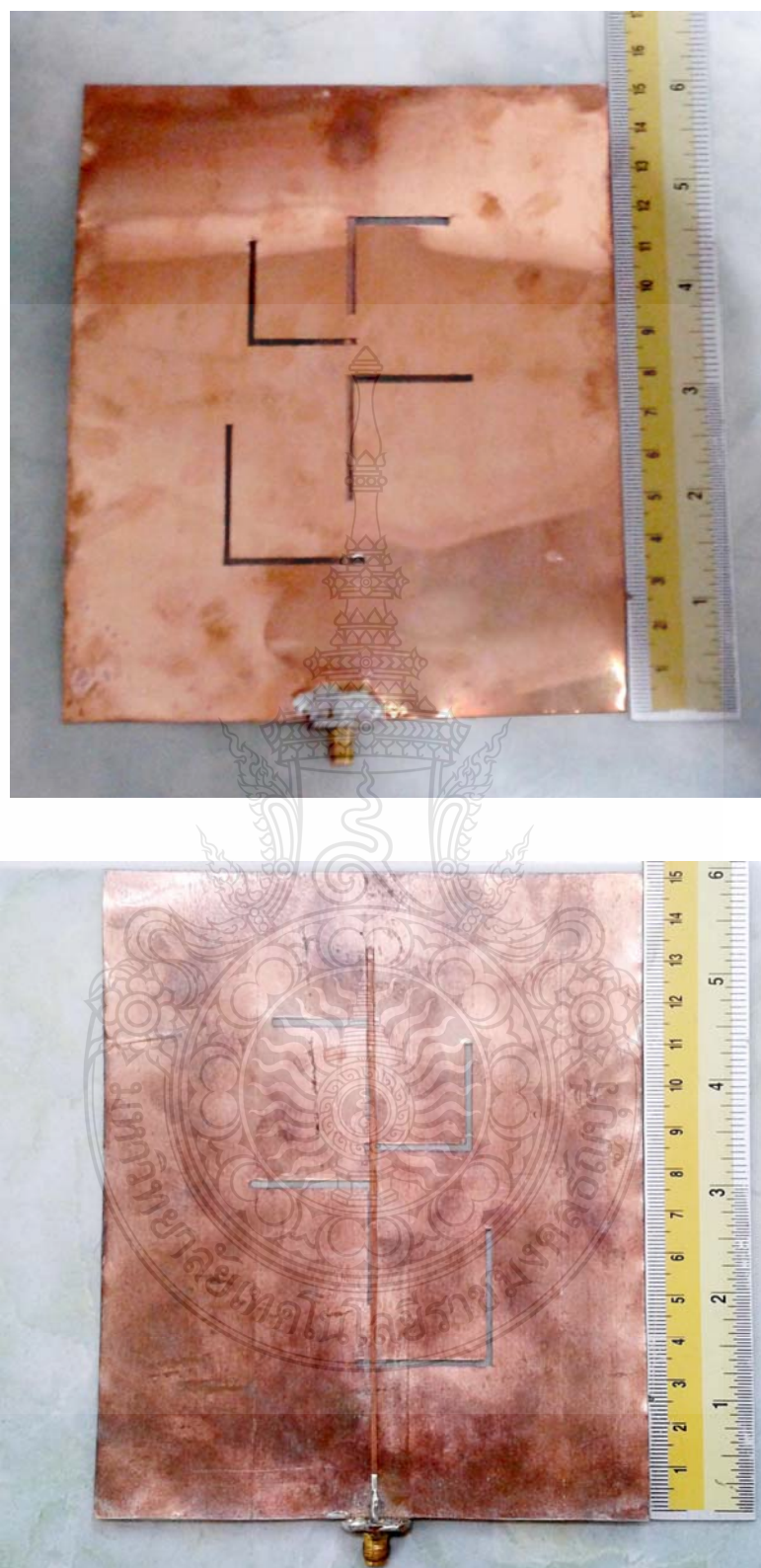


ภาคผนวก



**ภาคผนวก ก**

ภาพต้นแบบ สายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบความถี่กว้าง



ภาพที่ ก. 1 ภาพต้นแบบสายอากาศแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากที่มีแถบความถี่กว้าง

**ภาคผนวก ข**

ผลการวัดคุณลักษณะต่าง ๆ ของไมค่าฟิล์ม และ DATA SHEET



## FEATURES

- Good dimensional stability.
- Soldering reliability has been bettered
- Good electrical properties
- High density automatic mounting can be carried out

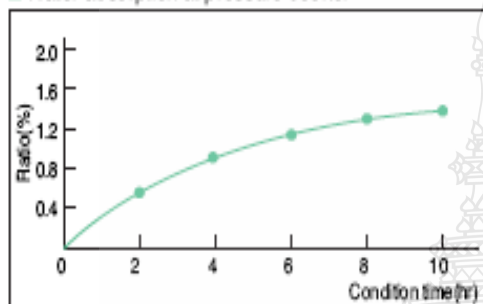
## APPLICATIONS

Computer, Instrumentation, VCR, Television, Electronic Toy, etc.,

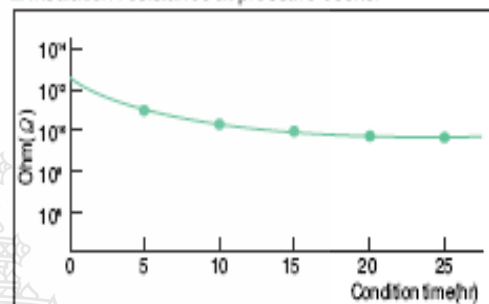
## INTERNATIONAL STANDARD RECOGNITION

- UL : E103670
- CSA : LS-93237
- BSI : 6741
- VDE : VDE-Reg-Nr. 4945

### Water absorption at pressure cooker

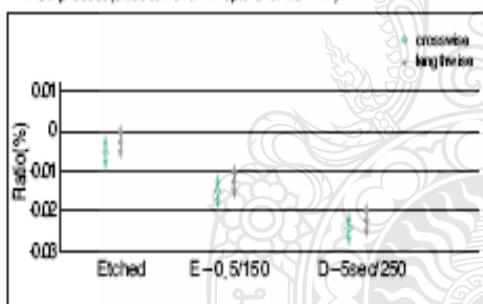


### Insulation resistance at pressure cooker



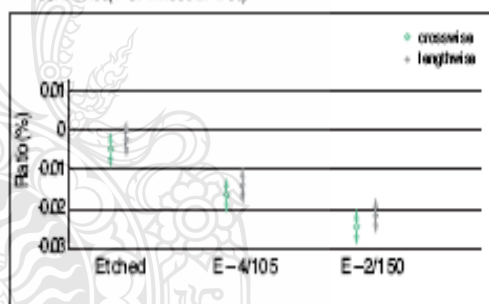
### Dimensional stability

PCB process (size 360X310mm span 310X254mm)

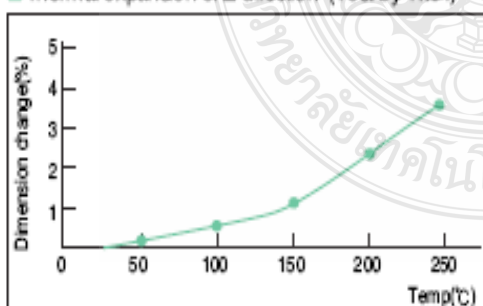


### Dimensional stability

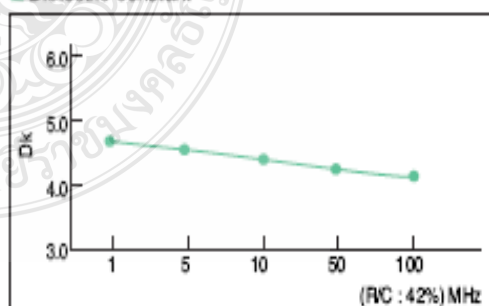
Test method (PC-TM6502.4.38)



### Thermal expansion of Z-direction (Test by TMA)



### Dielectric constant



## GENERAL PROPERTIES

|                                |                                    |                                     | Designation  | DS-7405   |
|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|---|
|                                |                                    |                                     | ANSI Grade   | FR-4  |
| Test Item                      | Unit                               | Treatment Condition                 | Property Data  |   |
|                                |                                    |                                     | Standard Value   | Guaranteed Value                                  |
| Tg                             | °C                                 | DSC<br>TMA<br>DMA                   | 135<br>135<br>165  | above 130<br>above 130<br>above 160               |
| CTE x-axis<br>y-axis<br>z-axis | ppm/°C                             | Ambient to Tg                       | 18<br>13<br>55   | less than 20<br>less than 15<br>less than 60      |
| Flammability                   | -                                  | UL-94                               | V-0  | V-0   |
| Insulation Resistance          | ohm                                | C-96/20/65<br>C-96/20/65+D-2/100    | $1 \times 10^9 - 1 \times 10^9$<br>$1 \times 10^9 - 1 \times 10^9$       | above $5 \times 10^9$<br>above $1 \times 10^9$    |
| Volume Resistivity             | ohm-cm                             | C-96/20/65<br>C-96/20/65+C-96/40/90 | $1 \times 10^{10} - 1 \times 10^{10}$<br>$5 \times 10^9 - 5 \times 10^9$ | above $1 \times 10^{10}$<br>above $5 \times 10^9$ |
| Surface Resistance             | ohm                                | C-96/20/65<br>C-96/20/65+C-96/40/90 | $5 \times 10^9 - 5 \times 10^9$<br>$1 \times 10^9 - 1 \times 10^9$       | above $1 \times 10^{10}$<br>above $1 \times 10^9$ |
| Arc Resistance                 | min.seconds                        |                                     | 110  | above 60  |
| Dielectric Constant<br>(1 MHz) | -                                  | C-96/20/65<br>C-96/20/65+D-48/50    | 4.5 - 4.8<br>4.6 - 5.2   | less than 5.5<br>less than 5.8                    |
| Dissipation Factor<br>(1 MHz)  | -                                  | C-96/20/65<br>C-96/20/65+D-48/50    | 0.015 - 0.020<br>0.018 - 0.023   | less than 0.035<br>less than 0.045                |
| Comparative Tracking Index     | volt                               | IEC Method                          | -  | -   |
| Solder Float(260°C)            | sec                                | A                                   | above 180  | above 120   |
| Peel Strength                  | Cu.foil 1oz<br>(0.035mm)<br>kgf/cm | A                                   | 1.8 - 2.2  | above 1.43  |
| Flexural Strength              | kgf/mm <sup>2</sup>                | A                                   | 40 - 50  | above 32.7  |
| Water Absorption               | %                                  | E-24/50+D-24/23                     | 0.10 - 0.15  | less than 0.25                                    |

Specimen Thickness : 1.6mm

## PURCHASING INFORMATION

- Copper foil : 0.5 oz/ft<sup>2</sup>(0.018 mm), 1 oz/ft<sup>2</sup>(0.035 mm), 2 oz/ft<sup>2</sup>(0.070 mm) available.
- Thickness : 0.4mm to 3.2mm

| Standard Size               |                           | Tolerance(mm) |
|-----------------------------|---------------------------|---------------|
| 1,020 X 1,220mm (40" X 48") | 915 X 1,220mm (36" X 48") | +3            |
| 1,070 X 1,220mm (42" X 48") | 970 X 1,220mm (38" X 48") | -0            |
| 1,020 X 1,020mm (40" X 40") |                           |               |

※ Other sheet size and thickness could be available upon request.

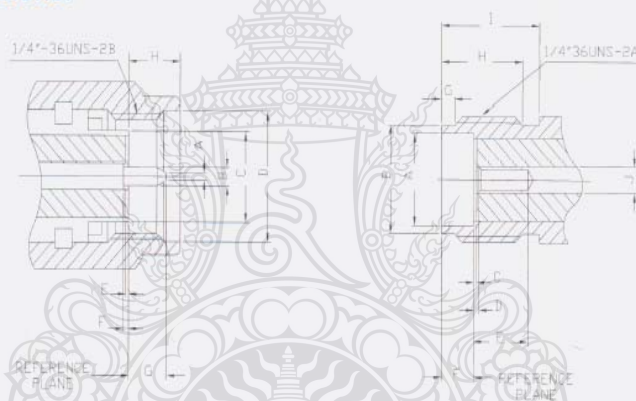
# SMA

## 50 ohm 0-18 GHz

SMA connectors are semi-precision, subminiature devices that provide repeatable electrical performance from DC to 12.4 GHz with flexible cable. Semi-rigid cabling extends the frequency range of the device to 18 GHz. These devices offer broadband performance with low reflection and constant 50 ohm impedance. These properties, along with minimum attenuation and low VSWR have made the SMA extremely popular in the microwave community.

The SMA design has been broadened to accommodate many interconnect requirements and is available in pressure crimp, clamp and solder terminal attachments. SMA design parameters have incorporated the considerations of balancing cost, size, weight and performance to yield the best value in your microwave system. Among typical applications are components, such as dividers, mixers, amplifiers, trimmers and attenuators. SMA connectors are also used to provide interconnections from printed circuit board striplines to coaxial cable.

### Interface Dimensions:



#### PLUG

| Letter | Millimeters (Inches) |              |
|--------|----------------------|--------------|
|        | Minimum              | Maximum      |
| A      | 0.00 (.000)          | 0.38 (.015)  |
| B      | 0.90 (.0355)         | 0.94 (.037)  |
| C      | —                    | 4.59 (.1808) |
| D      | 6.35 (.250)          | —            |
| E      | 0.00 (.000)          | 0.18 (.007)  |
| F      | 0.00 (.000)          | 0.25 (.010)  |
| G      | —                    | 2.54 (.100)  |
| H      | —                    | 3.43 (.135)  |

#### JACK

| Letter | Millimeters (Inches) |              |
|--------|----------------------|--------------|
|        | Minimum              | Maximum      |
| A      | 4.60 (.1810)         | 4.67 (.1837) |
| B      | 5.28 (.208)          | 5.49 (.216)  |
| C      | 0.00 (.000)          | 0.18 (.007)  |
| D      | 0.00 (.000)          | 0.25 (.010)  |
| E      | 2.92 (.115)          | —            |
| F      | 1.88 (.074)          | 1.98 (.078)  |
| G      | 0.38 (.015)          | 1.14 (.045)  |
| H      | 4.32 (.170)          | —            |
| I      | 5.54 (.218)          | —            |
| J      | 1.24 (.049)          | 1.30 (.051)  |



EMC Antennas  
**Double-Ridged  
 Waveguide Horn**  
 Model 3117

#### Features:

- Maintains Single Lobe Radiation Pattern Over Frequency
- Ultra Broadband: 1 GHz - 18 GHz
- 300 W Power Input Capacity
- Optimized High Frequency Gain
- Low VSWR



ETS-Lindgren's Model 3117 Double-Ridged Waveguide Horn  
 PATENT PENDING

The Model 3117 Double-Ridged Waveguide is the latest addition to a family of double-ridged waveguide horn antennas for microwave and EMC measurement from ETS-Lindgren. Users of this antenna benefit from uniform illumination of target surfaces and accurate gain measurement. In addition, the Model 3117 exhibits high gain and low VSWR across its frequency band, accepting moderate power input of 300 watts.

The electrical characteristics of this antenna were designed and modeled using powerful workstations running electromagnetic simulation software. Equally important, experienced RF

engineers worked with our manufacturing team to produce a practical and affordable realization of the modeling process. On completion, the antenna was tested and calibrated at our A2LA accredited lab facility. All production units are individually calibrated at this facility.

#### Features

##### Single Lobe Radiation Pattern

The Model 3117 maintains a single main lobe pattern in the direction of the horn axis over its frequency range. This characteristic is essential for even distribution of electromagnetic energy on a target surface, and accurate

measurement of gain and vector information. The Model 3117's unique design suppresses the propagation of high order modes. The result is an antenna with a well-defined single lobe radiation pattern that outperforms other antennas in its class.

##### Ultra Broadband

The Model 3117 sweeps from 1 GHz to 18 GHz without stopping for band breaks, making it ideal for automated testing. It has the widest usable frequency range of any antenna in its class, with no performance degradation from high order modes.





## EMC Antennas Double-Ridged Waveguide Horn Model 3117

### Power Input

The Model 3117 uses a Type N connector and accepts up to 300 watts of continuing input power with up to 400 watts of peak power. The antenna's high gain and low VSWR over its operating frequency translates into efficient amplifier use and high field strengths.

### Uniform Gain, Low VSWR

The Model 3117 has a more uniform gain and antenna factor because of the better behavior of its radiation pattern. Since the pattern is stable over frequency, the gain and the AF also remain stable. Similar antennas of this class exhibit large variations of the gain and the AF as the frequency increases.

### Construction

An antenna constructed to maximize structural integrity is better able to maintain its electrical properties. The benefits are better measurement repeatability, lower uncertainty values and longer calibration validity. The Model 3117 is constructed to be a rugged antenna that thrives in an environment of constant use. This antenna includes both tripod and rear "stinger" mounts. The stinger mount permits on-axis rotation/polarization.

### Standard Configuration

- Antenna Assembly
- Mounting bracket drilled to accept ETS-Lindgren or other tripod mounts with 1/4 in x 20 threads
- Rear "stinger" for use with on-axis mount positioners
- Individually calibrated at 1 m per SAE ARP 958 at our A2LA accredited lab. 3 m calibration per ANSI C63.5 available at additional cost. Actual antenna factors and a signed Certificate of Calibration Conformance included with manual

### Options

- Antenna Mast
- Antenna Tripod

### Applications

| FCC-15 | FCC-18 | IEC/CISPR/EN | SAE J1112 | SAE J661 | MIL-STD-461E | MIL-STD 285 | NACSIM |
|--------|--------|--------------|-----------|----------|--------------|-------------|--------|
| RE     | RE     | RE, RI       | RE, RI    | RE, RI   | RE, RI       | TX, RX      | RE     |

### Electrical Specifications

| MODEL | FREQUENCY RANGE | VSWR RATIO (AVG)                | MAXIMUM CONTINUOUS POWER | PEAK POWER | IMPEDANCE (NOMINAL) | CONNECTORS |
|-------|-----------------|---------------------------------|--------------------------|------------|---------------------|------------|
| 3117  | 1 GHz - 18 GHz  | 3.5:1 max<br><2:1 above 1.5 GHz | 300 W                    | 400 W      | 50 Ω                | Type N     |

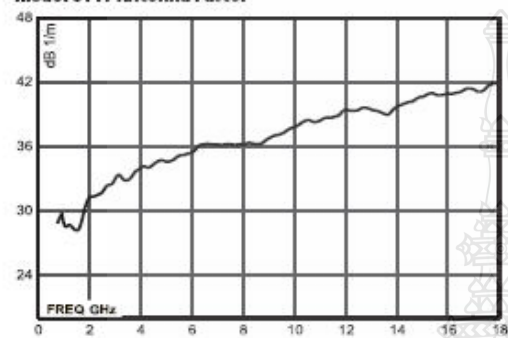
### Physical Specifications

| MODEL | WIDTH             | DEPTH  | HEIGHT            | WEIGHT            |
|-------|-------------------|--|-------------------|-------------------|
| 3117  | 17.1 cm<br>6.0 in | 17.3 cm + 10.1 cm mount<br>6.8 in + 4.0 in mount | 15.5 cm<br>6.1 in | 1.13 kg<br>2.5 lb |

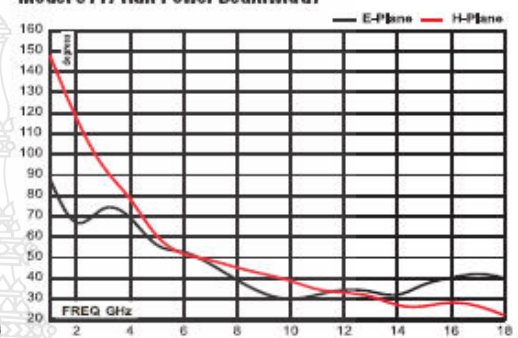


# EMC Antennas Double-Ridged Waveguide Horn Model 3117

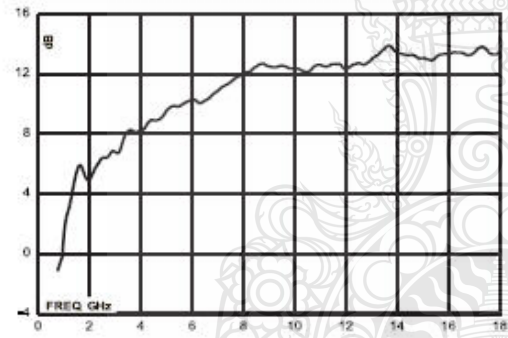
Model 3117 Antenna Factor



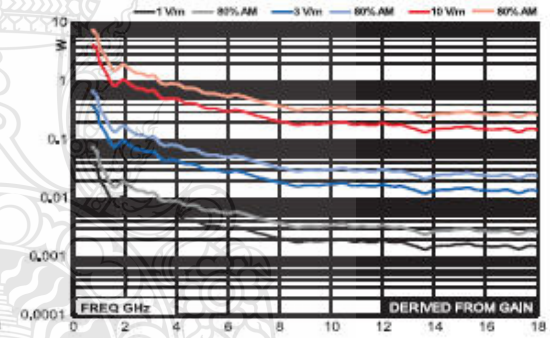
Model 3117 Half Power Beamwidth



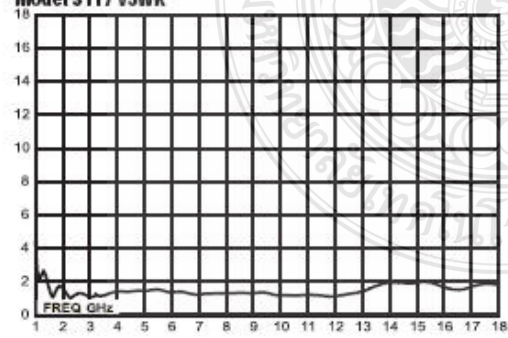
Model 3117 Gain



Model 3117 Forward Power @ 1 m



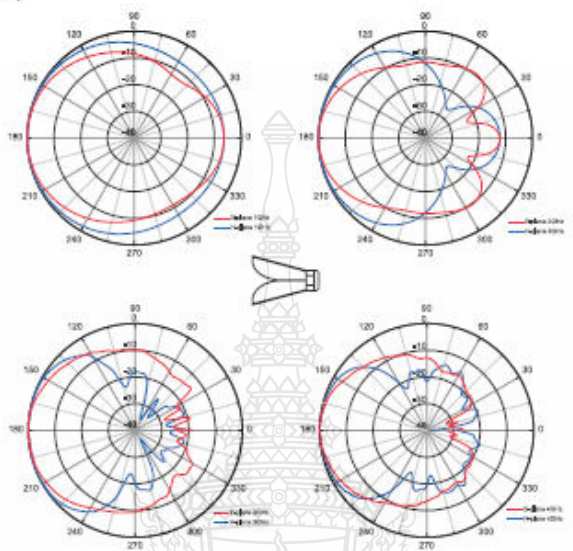
Model 3117 VSWR



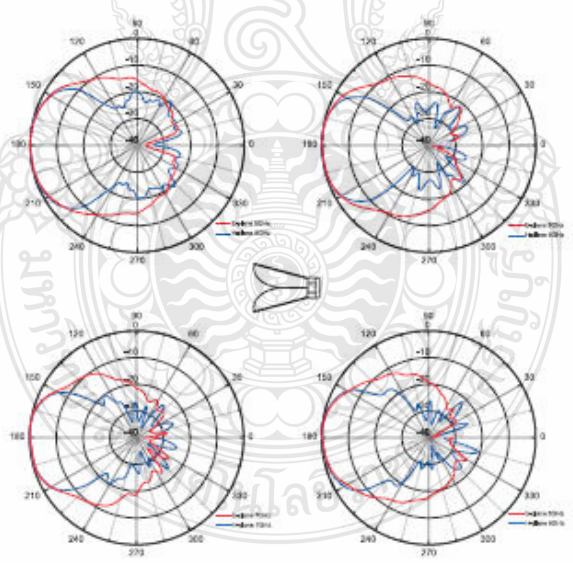


EMC Antennas  
**Double-Ridged Waveguide Horn**  
Model 3117

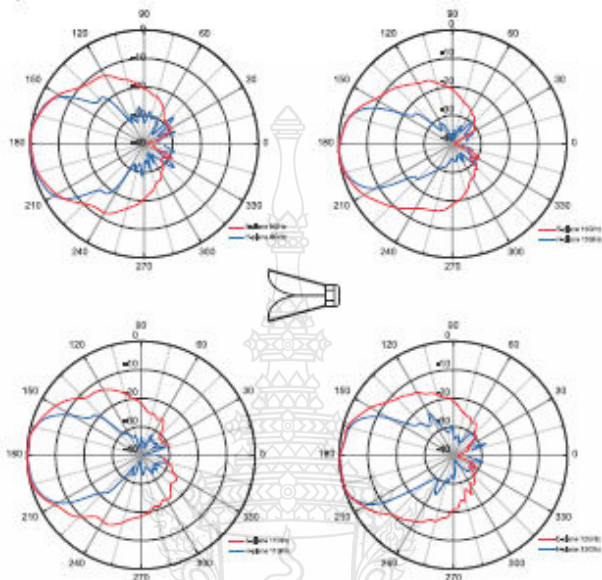
**Model 3117 (1 GHz - 4 GHz)**



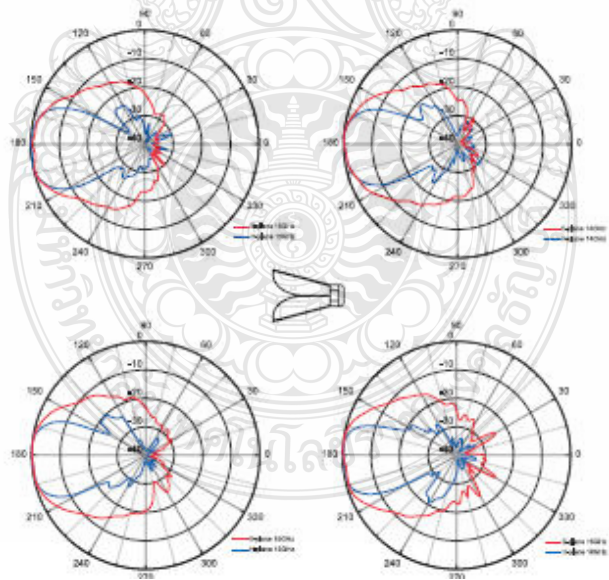
**Model 3117 (5 GHz - 8 GHz)**



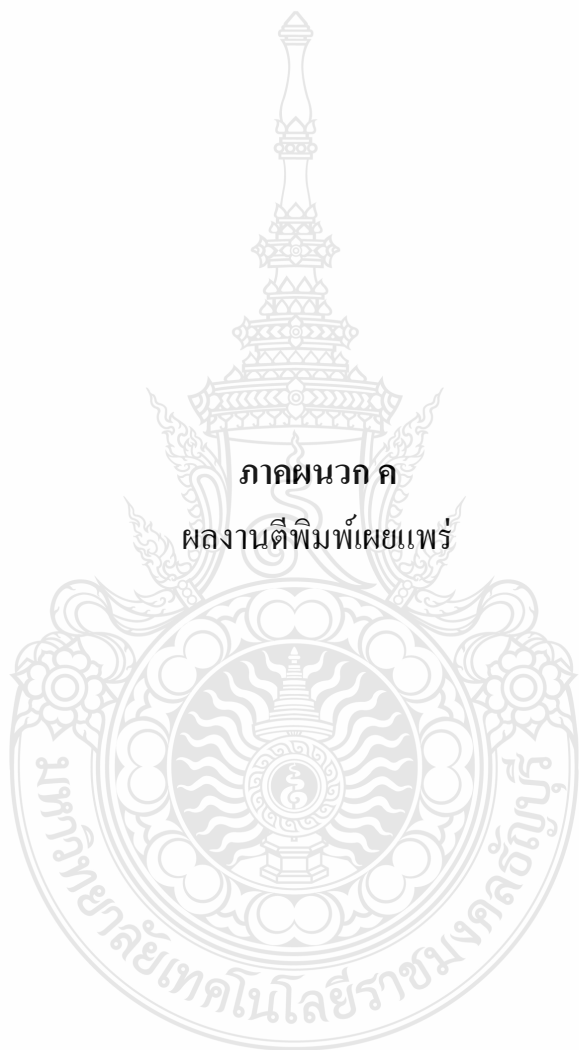
**Model 3117 (9 GHz - 12 GHz)**



**Model 3117 (13 GHz - 16 GHz)**

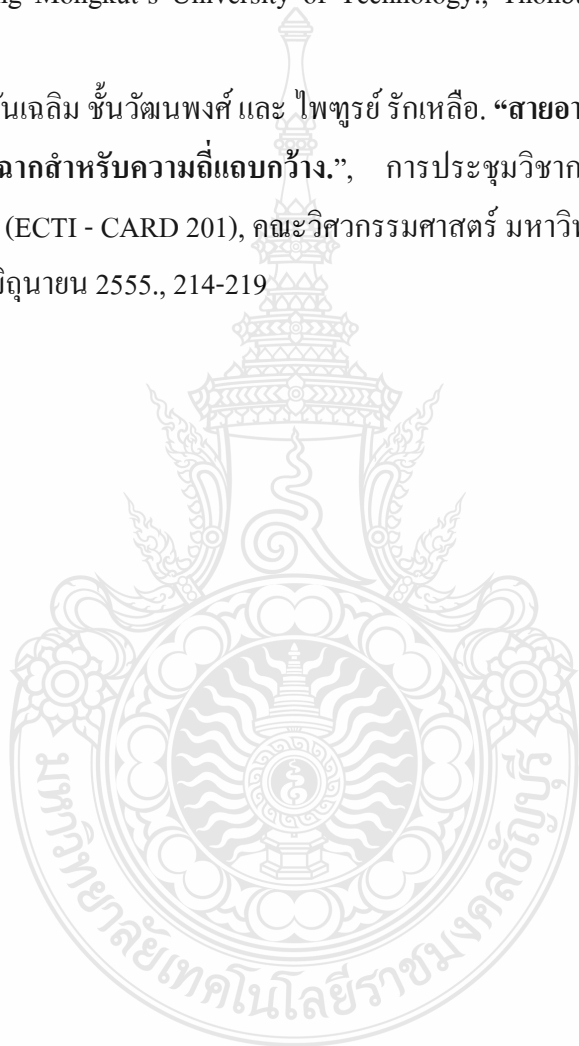


ภาคผนวก ค  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



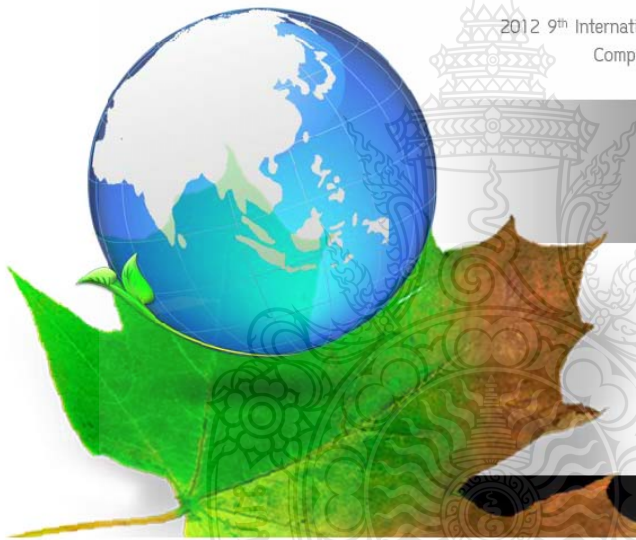
## ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Anucha Malajai, Wanchalerm Chanwattanapong, and Paitoon Rakluea. “A Novel **Thin-Film Wideband Right Angle Slot Antenna.**”, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2012), King Mongkut’s University of Technology., Thonburi., Thailand, May 16-18, 2012.
- [2] อнуชา มาละใจ, วันเฉลิม ชันวัฒนพงศ์ และ ไพฑูรย์ รักเหลือ. “สายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากสำหรับความถี่แถบกว้าง.”, การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 4 (ECTI - CARD 201), คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี., 21 - 22 มิถุนายน 2555., 214-219





2012 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering/Electronics,  
Computer, Telecommunications and Information Technology.



# ECTI-CON 2012

16-18 MAY 2012  
PHETCHABURI, THAILAND

[Author Index](#)   [Content](#)

ISBN: 978-1-4673-2024-5  
IEEE Catalog Number: CFP1206E-CDR

Computer Engineering Department  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Tel: (+66) 0-2470-9083, 0-2470-9085, and 0-2470-9382  
Fax: (+66) 0-2872-5050  
Admin@cpe.kmutt.ac.th



The image shows a digital menu for ECTI-CON 2012. At the top left, there is a 'BACK' button with a globe icon. To its right is the text 'ECTI-CON 2012'. On the far right of the top bar is the word 'CONTENT'. Below this is a vertical list of categories on the left, with 'Printed Antennas' selected and highlighted in green. To the right of this list, the 'Printed Antennas' section is expanded, showing a list of papers with their IDs and titles. At the bottom of the menu, contact information for the Computer Engineering Department at King Mongkut's University of Technology Thonburi is provided.

**BACK**  **ECTI-CON 2012** **CONTENT**

- Electric Machines
- Power Electronics
- Pattern Analysis and Graphics
- Computer Networks
- Knowledge and IT
- MEMS and nanotechnology
- Modern Antennas & RF Technology
- Antennas & Propagation**
- Printed Antennas**
- Microwave Devices

**Printed Antennas**

- 1133 A Dual Wideband CPW-Fed Planar Monopole Antenna with Single Band Notched
- 1167 Miniaturized Triple-band USB Dongle Antenna Using Loaded-Fractal Loop Monopole with Shorted Loop and Fractal Loop Resonator
- 1215 Miniaturized Microstrip Patch Antenna Printed on Magneto-Dielectric
- 1223 A Novel Thin-Film Wideband Right Angle Slot Antenna
- 1234 A Wideband Circular Polarization Antenna with Tuning Rectangular Slot fed by CPW
- 1321 A Highly Directive Antenna using EBG Materials as Superstrate

Computer Engineering Department  
 King Mongkut's University of Technology Thonburi  
 Tel: (+66) 0-2470-9083, 0-2470-9085, and 0-2470-9382  
 Fax: (+66) 0-2872-5050  
 Admin@cpe.kmutt.ac.th




**Khao Daeng**

## Main Menu

[Home](#)

[Call For Paper](#)

[Committees](#)

[Important Dates](#)

[Paper Submission](#)

[Schedule](#)

[Registration](#)

[Keynote Speakers](#)

[Venue and Accommodation](#)

[Contact Us](#)

## Travel

[About Hua Hin](#)

[Conference Tours](#)

[Travel Information](#)

## Committee

### Advisory Committee

Monai Krairiksh  
 Booncharoen Sirinaoekul  
 KosinChamnongthai  
 Anawach Sangswang  
 Pakorn Kaewtrakulpong

### General Chair

Prabhas Chongstitvatana (CU)  
 Monai Krairiksh (KMILT)

### General Co-Chair

Tiranees Achalaku (KMUTT)

### General Secretary

Nuttanart Facundes (KMUTT)  
 Marong Phadoongsidhi (KMUTT)

### Local Arrangement Chairs

Jumpol Polvichai (KMUTT)  
 Jaturon Hamsomburana (KMUTT)

### Registration & Finance Chairs

Peerapon Siripongwutikom (KMUTT)  
 Songrit Mangewongvatana (KMUTT)  
 Rujipan Sampanna (BU)  
 Pairin Kaewkuay (ECTI)

### Publicity Chairs

Suthep Madarasmi (KMUTT)

### Publication Chairs

Natasha Dejdumrong (KMUTT)  
 Naruemon Wattanapongsakorn (KMUTT)

### Steering Committee

Banlue Srisuchinwong (12) (SIIT)  
 Prayoot Akkaraekthalin (12) (KMUTNB)  
 Jitkasame Ngarnnil (12) (MUT)

### Technical Program Committees

Prayoot Akkaraekthalin (KMUTNB) : TPC Chair  
 Kosin Chamnongthai (KMUTT) : TPC Co-chair

#### Area: Circuits and Systems

Apinunt Thanachayanont (KMILT) : Area Chair  
 Songphol Kanjanachuchai (CU)  
 Pasin Isarasena (NECTEC)  
 Jirayuth Mahattanakul (MUT)

#### Area: Computers and Information Technology

Anan Phonphoem (KU) : Area Chair  
 Sansanee Auephanwiryakul (CMU)  
 Chotipat Pornavelai (KMILT)  
 Chalermek Intanagonwiwat (CU)

#### Area: Communication Systems

Chuwong Phongcheroenpanich (KMILT) : Area Chair  
 Kamol Kaemarungsri (NECTEC)  
 Titipong Lertwiriya-prapa (KMUTNB)  
 Phumin Kirawanich (MU)

#### Area: Controls

David Banjerdpongchai (CU) : Area Chair  
 Diew Koolpiruck (KMUTT)  
 Kasemsak Uthaichana (CMU)  
 Itthisek Nilkhamhang (SIT)

#### Area: Electrical Power Systems

Issarachai Ngamroo (KMILT) : Area Chair  
 Komsan Hongesombut (KU)  
 Surapong Suwankewin (CU)  
 Panida Jirutitijaroen (NUS)

#### Area: Signal Processing

Matthew Dailey (AIT) : Area Chair  
 Sanparith Marukatat (NECTEC)  
 Wuttipong Kumwilaisak (KMUTT)

### Website & Information System Chair

Rajchawit Sarochawikasit (KMUTT)

Vara Varavithya (12) (KMUTNB)  
Vutipong Areekul (12) (KU)  
Wanlop Surakamponom (12) (KMITL)  
Tuptim Angkaew (13) (CU)  
Chaiwut Chat-uthai (13) (KMITL)  
Monai Krainksh (13) (KMITL)  
Tirane Achalaku (13) (KMUTT)  
Nipon Theera-Umpon (13) (CMU)  
Sansanee Auephanwiyakul (13) (CMU)  
Anan Phonphoem (13) (KU)  
Putchong Uthayopes (13) (KU)  
Werachet Khan-ngen (13) (KMITL)  
Thumrongrat Amomraksa (13) (KMUTT)  
Kanda Runapongsasaikaew (14) (KKU)

Last Updated on Tuesday, 01 May 2012 10:18

---

Contact Address: [ecticon2012@cpe.kmutt.ac.th](mailto:ecticon2012@cpe.kmutt.ac.th), <http://www.ecticon2012.cpe.kmutt.ac.th>, <http://www.ecti-thailand.org>  
Computer Engineering Department, KMUTT  
126 Pracha-Uttd Road, Thung-Kru, Bangkok, 10140, Thailand

Copyright©2011 All Reserved. Design by P.PoLYcomXIX



# A Novel Thin-Film Wideband Right Angle Slot Antenna

Anucha Malajai, Wanchalerm Chanwattanapong, Paitoon Raklua  
 Department of Electronics and Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, Thailand  
 E-mail: anucha\_aong@hotmail.com

**Abstract**— This paper presents a novel Thin-Film wideband right angle slot antenna for WLAN, WiMAX and 3G applications. This antenna is printed on Mylar® Polyester Film substrate with size of  $12.75 \times 15$  mm<sup>2</sup>, and thickness of 0.4 mm, and dielectric constant of 3.2. The proposed antenna is designed by using IE3D simulation software. This antenna is simple to design using four right angle slot size at appropriate position to achieve wideband which can control the desirable resonant frequency. The length of slot is approximately a half-wavelength at the desirable center frequency. The antenna operated in the frequency range 2.02 – 3.04 GHz with impedance bandwidth are 1.02 GHz (Return loss < -10 dB) working in the 3G (2.1 GHz), WLAN (2.4-2.5 GHz), WiMAX (2.3-2.7 GHz).

**Keywords**— wideband, slot antenna, thin-Film, right angle

## I. INTRODUCTION

Wideband technology has undergone many significant developments in recent years. However, there still remain many challenges in making this technology alive up to its full potential. Which have received increasing attention in Wideband application since they exhibit very attractive merits such as wide impedance bandwidth, simple structure, and radiation pattern. The microstrip or printed antennas have become popular because of small size, light weight, and ease of manufacture. Most of the research will design wideband antenna [1]-[5].

In this paper, we propose a study of wideband pattern right angle slot antenna for WLAN, WiMAX and 3G applications. This antenna is simple to design using four right angle slot size at appropriate position to achieve wideband which can control the desirable resonant frequency. The proposed antenna was analyzed by using IE3D software. The proposed antenna is achieved cover in the frequency range 2.02 - 3.04 GHz with impedance bandwidth (Returnloss < 10dB) with first frequency at 2.1 GHz (3G), the second at 2.4-2.5 GHz (WLAN band), and the third at 2.3-2.7GHz (WiMAX band). This antenna is printed on a Mylar® Polyester Film substrate with size of  $12.75 \times 15$  cm<sup>2</sup>, and thickness 0.4 mm. The antenna was developed to be used for WLAN, WiMAX such as 3G, which are applied in many devices, such as in-building tablet. These are obviously becoming the most important factors for the applications of antennas in both contemporary and future communication systems.

## II. ANTENNA DESIGN

Fig.1. shows the geometry of the proposed antenna. The antenna consists of four right angle slots  $s$  sizes at various appropriate positions on the ground plane of the microstrip line. The Mylar® Polyester Film substrate has a dielectric constant = 3.2 and a thickness  $h = 0.4$  mm. For efficient excitation of the slots, the microstrip line terminates in an open circuit. The proposed antenna was determined using design equation, and IE3D simulation software. Which lengths of the slot are approximately a half-wavelength at the desirable center frequency. Based on the operating frequency, the overall effective inner slot length ( $A+B$ ) is designed by (1). Lengths  $A$  and  $B$  are equalized.

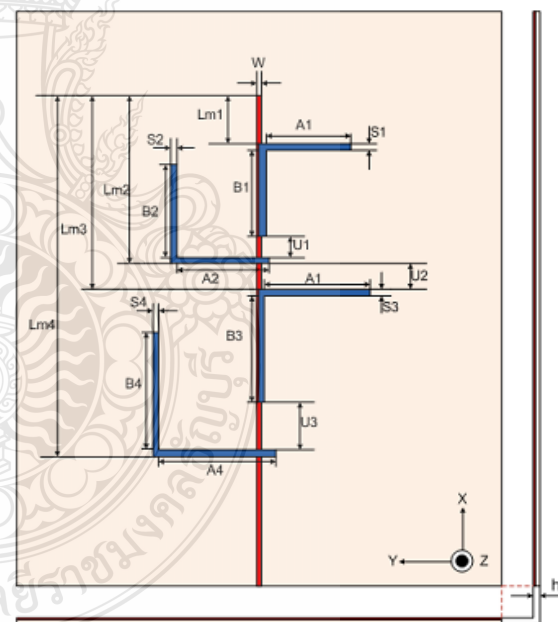


Fig.1. Geometry of the proposed antenna

$$f_r = \frac{0.5c}{(A+B)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (1)$$

When

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

Where  $\epsilon_{eff}$  is the effective dielectric constant and  $c$  is the speed of light.

The wideband is designed  $\{(A1+B1)$  and  $(A2+B2)\}$ ,  $\{(A3+B3)$  and  $(A4+B4)\}$  in the frequency range 2.02 – 3.04 GHz with impedance bandwidth are 1.02 GHz.

### III. RESULTS AND DISCUSSION

The analysis and performance of the proposed antenna is explored by using IE3D for the better impedance matching. The analysis of the antenna carried out by tuning parameter is studied and keeping other parameters constant. The optimal parameter values of the antenna. The simulated of the proposed antenna is shown in Fig. 2, which clearly indicates that the impedance bandwidth of the antenna from 2.02 GHz - 3.04 GHz for Return loss less than -10 dB. Proper geometrical selection of the antenna parameters result in variation of field distribution, which in turn affects the characteristics of the proposed antenna.

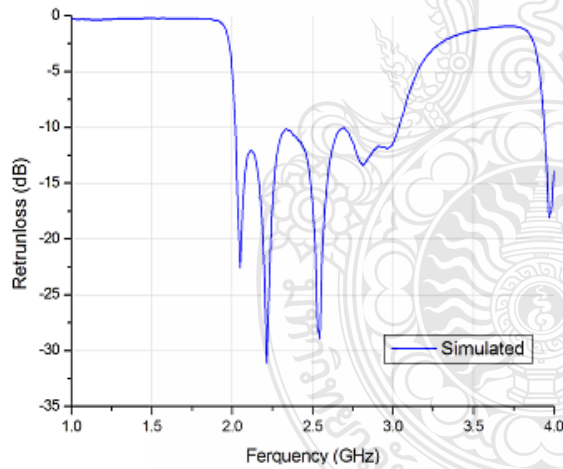


Fig.2 Simulated Return loss of the proposed antenna

Fig. 2 shows the simulated return loss for the propose antenna with low return loss in the frequency range 2.02 – 3.04 GHz with impedance bandwidth are 1.02 GHz (Returnloss < -10 dB) if the value of the signal return loss less the better.

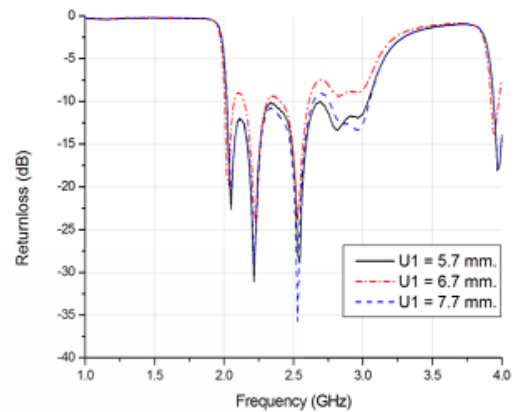


Fig.3 Effect of length ( $U1$ ) on the Return loss of the proposed antenna

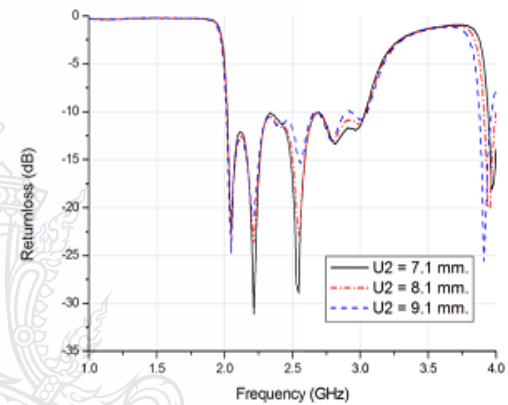


Fig.4 Effect of length ( $U2$ ) on the Return loss of the proposed antenna

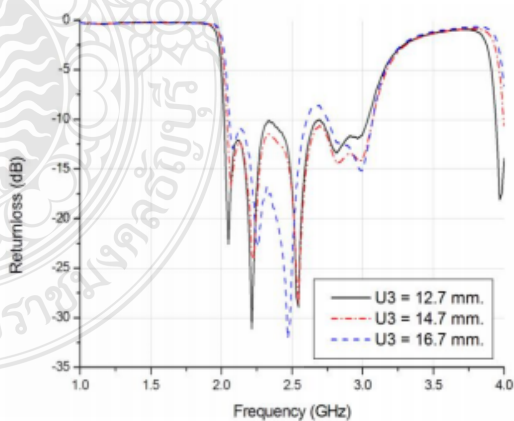


Fig.5 Effect of length ( $U3$ ) on the Return loss of the proposed antenna

Fig 3, Fig 4 and Fig 5 show the effect of the various strip lengths on the Return loss versus frequency. It is clearly seen that the length of  $U1$ ,  $U2$  and  $U3$  are significant effect on the impedance bandwidth of the antenna from 2.03 GHz -3.03 GHz. Fig.6. illustrates the simulated current distributions of the proposed antenna at 2.1 GHz, 2.3 GHz, 2.45 GHz and 2.6 GHz, respectively. It can be seen that current flow at slot length  $A4+B4$  which operate first resonant frequency 2.1 GHz. The next sequence a slot length  $\{(A3+B3)$  and  $(A4+B4)\}$  have current flow which operate second resonant frequency 2.3 GHz. Also, The slot length  $\{(A3+B3)$  and  $(A4+B4)\}$  have current flow which operate Third resonant frequency 2.45 GHz. And the slot length  $A2+B2$  have current flow which operate fourth resonant frequency 2.6 GHz

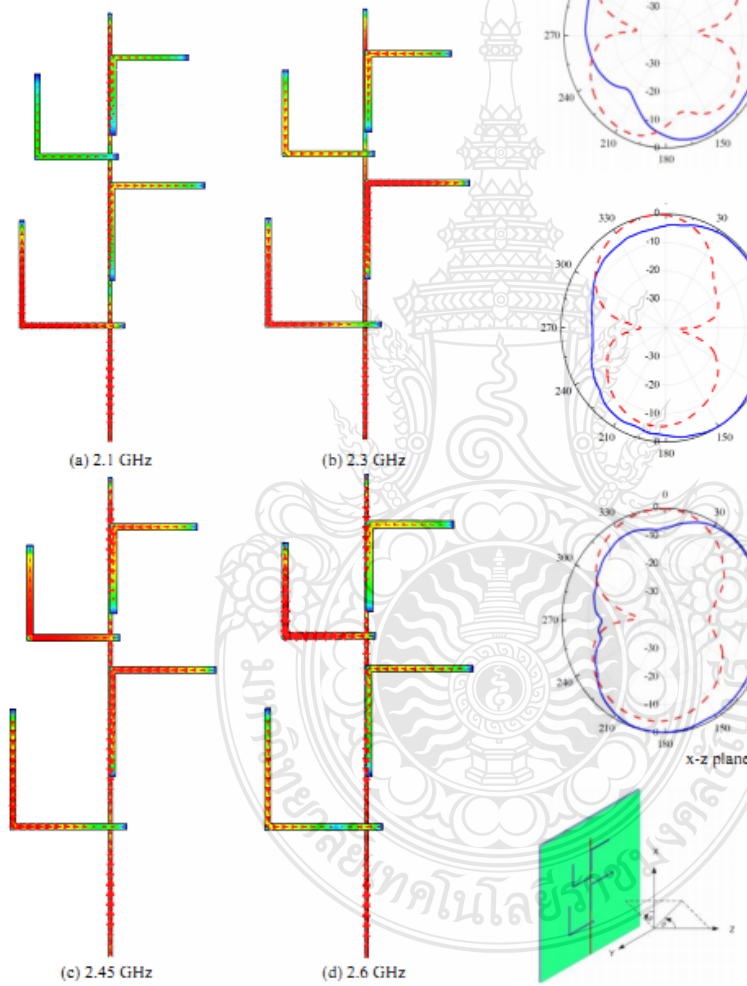


Fig.6. Current distributions of the antenna

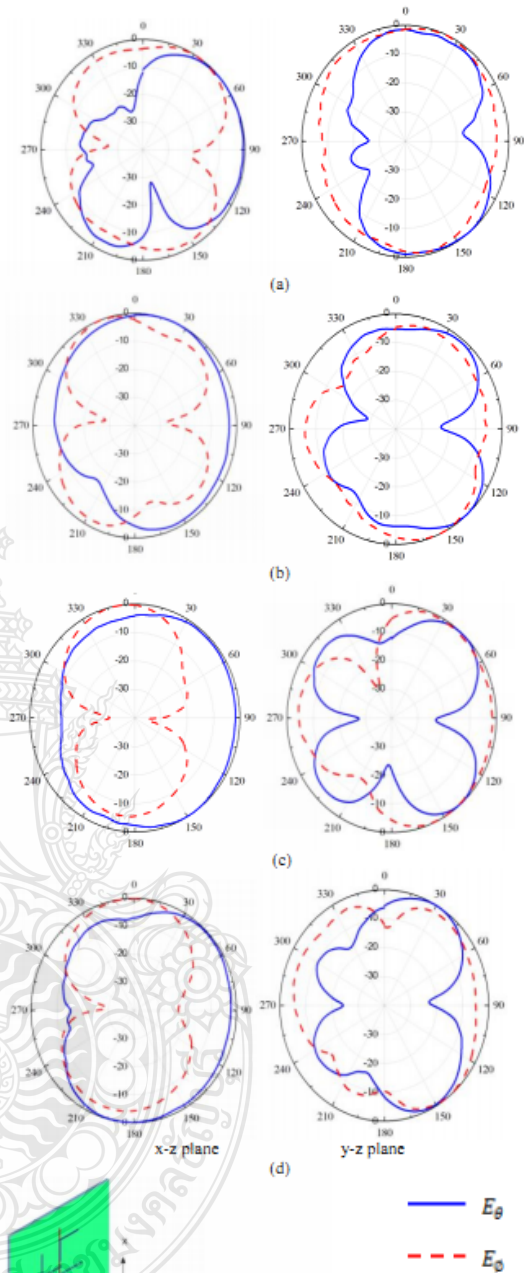


Fig.7. Measured radiation patterns of wideband thin-film antenna (a) 2.1 GHz (b) 2.3 GHz (c) 2.45GHz (d) 2.6 GHz

The above Figures shows the Measured radiation patterns with elevation and azimuth at different. The Measured radiation patterns of antenna proposed in the E-plane (XZ-plane) and H-plane (YZ-plane) for four different center frequencies 2.1 GHz, 2.3 GHz, 2.45GHz, 2.6 GHz are shown in fig. 7. (a), (b), (c), (d) respectively.

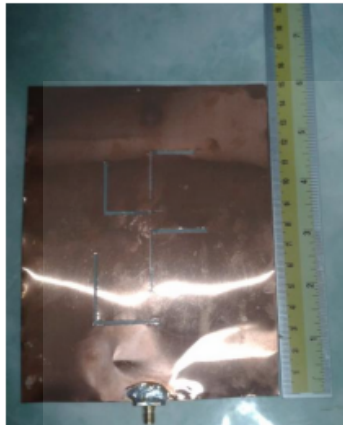


Fig.9. photograph of the fabricated antenna prototype

Fig.9 shows photos of a fabricated wideband right angle slot antenna. The ground plane size ( $W_g \times L_g$ ) is  $12.75 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ . The measured results of the resonant frequencies correlate well with the simulated results. The measured impedance bandwidths are 0.96 GHz (2.07 GHz to 3.03 GHz), which cover the WLAN, WiMAX and 3G applications.

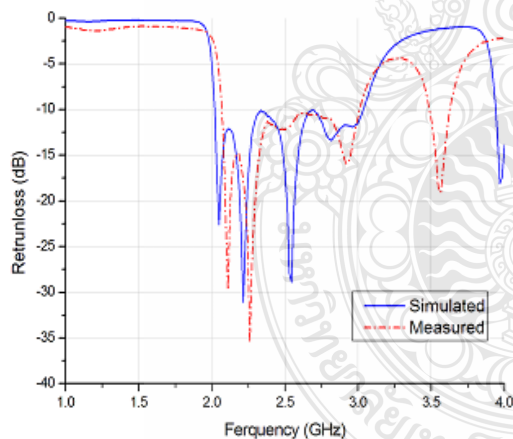


Fig.10. Comparison between simulated and measured return loss for the proposed antenna

Fig. 10 shows comparison between simulated and measured return loss for the proposed antenna. The simulated and measured show that the proposed antenna achieved wideband antenna are the frequency range 2.02 – 3.04 GHz with impedance bandwidth cover WLAN, WiMAX and 3G application.

#### IV. CONCLUSION

We proposed Wideband antenna using independent controllable bandwidth characteristics design for promising Wide-band for WLAN, WiMAX and 3G applications. The parametric studying are showed that the slot length can control the bandwidth of the Wide-bands. The length of the slots are about a half guide wavelength corresponding to the resonant frequency. The thin-film wideband antenna are successfully designed, simulated, and measured, which shown good impedance bandwidth covered between 2.02 to 3.04 GHz in simulated and 2.07 to 3.03 GHz in measured GHz with impedance bandwidth cover WLAN, WiMAX 3G application. The antenna is determined using design equation, and IE3D electromagnetic simulation software and is verified experimentally.

#### REFERENCES

- [1] Roberto Caso, Student Member, IEEE, Andrea A. Serra, Marcos Rodriguez-Pino, Paolo Nepa, Member, IEEE, and Giuliano Manara, Fellow, IEEE, "A Wideband Slot-Coupled Stacked-Patch Array for Wireless Communications," *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, Vol. 9, 2010.
- [2] Lev Pazin and Yehuda Leviatan, "Inverted-F Laptop Antenna With Enhanced Bandwidth for Wi-Fi/WiMAX Applications," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol.59, No.3, March 2011.
- [3] Y. Sung, "A Printed Wide-Slot Antenna With a Modified L-Shaped Microstrip Line for Wideband Applications," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol.59, No.10, October 2011.
- [4] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, Paitoon Rakluea and T. Wakabayashi, "Design of Right Angle Slot Antenna for Dual Band and Dual Polarized with Wireless Network," *International Conference on Control, Automation and Systems 2010, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 27-30, 2010 in KINTEX*.
- [5] Hossein Eskandari, Mahmood Rafaei Booket, Manouchehr Kamyab, and Mehdi Veysi, Student Member, IEEE, "Investigations on a Class of Wideband Printed Slot Antenna," *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, Vol. 9, 2010.



**ECTI**  
Association

**ECTI-CARD 2012**  
การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 4

21 – 22 มิถุนายน 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปทุมธานี

## Committee

### Steering Committee

รศ.ดร.ประยูทธ อัครเอกผาติ (KMUTNB)

รศ.ดร.โกสินทร์ จ่านงไทย (KMUTT)

รศ.ดร.วุฒิพงษ์ อารีกุล (KU)

### General Chair

ศ.ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ (KMITL)

ศ.ดร.ประภาส จงสถิตวัฒนา (CU)

### General Co-Chairs

รศ.ดร.นำยุทธ สงค์ธนาพิทักษ์ (RMUTT)

ผศ.ดร.สมหมาย ผิวสอาด (RMUTT)

### Technical Program Chair

รศ.ดร.ชาติ เจริญลาภนพรัตน์ (SIIT)

### Technical Program Co-Chair

ผศ.จินตนา นาคะสุวรรณ (RMUTT)

### Local Arrangement Chair

ดร.ไพฑูรย์ รักเหลือ (RMUTT)

### Publication Chair

ผศ.ธนะพงศ์ นพวงศ์ ณ อยุธยา (RMUTT)

### Publicity Chair

มาโนช ประชา (RMUTT)

### Finance Chairs

วิโรจน์ พิราจนนชัย (RMUTT)

รุจิพรรณ สัมปันณา (BU)

ไพริน แก้วกวย (ECT1)

### Exhibition Chair

สมชาย เบียนสูงเนิน (RMUTT)

### Workshop Chair

ดร.ฉัตรชัย สุภพิทักษ์สกุล (RMUTT)

### General Secretary

ดร.วิสิทธิ์ ล้อธรรมจักร (RMUTT)

### General Assistant Secretary

ผศ.วัฒนา พันธุ์ลำเจียก (RMUTT)

### Technical Program Committee

ผศ.ดร.ปิยะ ไควรินทร์วิวัฒน์ (NPRU)

ดร.จีรนุช เสี่ยมศักดิ์ (KKU)

รศ.ดร.อภิวัฒน์ ธนชยานนท์ (KMITL)

ดร.กสิณ วิเชียรชม (KMITL)

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ (RMUTI)

ดร.ก้องภพ อยู่เย็น (NASA)

รศ.ดร.กนก เชนจิระพงศ์เวช (KMITL)

ดร.วันวิสา ชัชวงษ์ (KMITL)

รศ.ดร.ธำรงรัตน์ อมรรักษ์ (KMUTT)

รศ.ดร.จันทนา จันทราพรชัย (SU)

ดร.สุภาภรณ์ เกียรติสิน (MU)

ดร.กิติวัฒน์ นิ่มเกิดผล (RMUTT)

รศ.ณรงค์ บวบทอง (TU)

ดร.วินัย วิชัยพาณิชย์ (RMUTT)

ผศ.ดร.พงษ์ศักดิ์ กิริติวินทกร (KMUTNB)

ดร.กมล เขมะรังษี (NECTEC)

ดร.มัชฌิกา อ่องแดง (DPU)

ดร.ตามพัสเมษ บุญยะเวศ (TU)



รศ.ดร.ชวลิต เบญจางคประเสริฐ (KMITL)

ดร.ณัฐพงศ์ ศรีรัตน์ (Skyworks)

ผศ.ดร.ดวงอาทิตย์ ศรีมูล (RSU)

รศ.เวก วิเวก (KMUTNB)

ดร.สมมาตร แสงเงิน (MUT)

ดร.ศราวุธ ชัยมูล (KMUTNB)

ผศ.ดร.เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์ (KMUTT)

ดร.อิทธิเสก นิลกำแหง (SIIT)

รศ.ดร.เดวิด บรรเจิดพงศ์ชัย (CU)

ดร.พีระยศ แสนโกชณ์ (KU)

ผศ.ดร.จิรวัดน์ คชสาร (RMUTT)

ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ (RMUTT)

ผศ.ดร.ณัฐภพ นิ่มปิติวาน (BU)

ผศ.ดร.ธวัชชัย เตชะชอนันต์ (CU)

ผศ.ดร.ปานจิต คำราษฎร์ (KU)

ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง (RMUTT)

ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม (RMUTT)

ดร.สุรินทร์ แห่งมงาม (RMUTT)

รศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ (KMITL)

ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไครรัตน์ (RMUTI)

ผศ.ดร.สมเกียรติ ฤกษ์วีระบุญ (KMITL)

ผศ.ดร.ยุพิน สรรพคุณ (KMUTNB)

ดร.สมเกียรติ อุดมทรัพย์กุล (RMUTSB)

ดร.จักรี ศรีนนท์มิตร (RMUTT)

Mr.Lin M.M. Myint (SIU)

ดร.วิสิทธิ์ ส้อธรรมจักร (RMUTT)

## สารบัญ

### Game and Living

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 1075 | Virtual treasures collection game on Android for marketing and tourism support | 180 |
| 1034 | ระบบสแกนวัตถุสามมิติด้วยอุปกรณ์เคลื่อนที่                                      | 184 |
| 1014 | ยุทธการพระพิรุณ: เกมฝึกสมองบนระบบปฏิบัติการไอโอเอส                             | 190 |
| 1039 | การประยุกต์ใช้สัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลายเพื่อควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าระยะไกล        | 196 |
| 1041 | โป้แงปะ : เกมค้นหาแบบหลายผู้เล่น   | 201 |

### Antenna design

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1079 | สายอากาศไมโครสตริปแบบไมล่ำฟิล์มช่องสี่เหลี่ยมมุมโค้ง<br>สำหรับระบบอัลตราไวด์แบนด์   | 208 |
| 1074 | สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากสำหรับความถี่แถบกว้าง                    | 214 |
| 1069 | สายอากาศช่องเปิดแบบมุมฉากที่มีการแผ่พลังงานสองทิศทาง                                | 220 |
| 1065 | An Improved Method for DOA Estimation   | 226 |
| 1016 | สายอากาศต้นทูนต่ำอัตราขยาย 10.5 dBi ที่แผ่คลื่นแบบชี้ทิศทาง<br>ในย่าน 1.7 – 2.7 GHz | 231 |

### Healthcare Technology

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1029 | ซอฟต์แวร์จำลองสถานการณ์การให้บริการของโรงพยาบาล<br>ทางจิตเวชโดยใช้ทฤษฎีแถวคอย | 238 |
| 1047 | สเตปโคส โคลปไร้สาย  | 244 |
| 1049 | ระบบวัดอัตราการเต้นของหัวใจผ่านเครือข่ายโทรศัพท์มือถือ                        | 250 |
| 1003 | โปรแกรมบนโทรศัพท์เคลื่อนที่อัจฉริยะ สำหรับกิจกรรมประจำวันของผู้สูงอายุ        | 256 |

### Software and Algorithm

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1048 | การปรับเพิ่มส่วนประสานกับผู้ใช้สำหรับโปรแกรมมูเดิ้ล                                       | 264 |
| 1050 | ระบบรายงานการเข้าใช้เครือข่ายคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้   | 270 |
| 1038 | การตรวจจับ Malware สำหรับระบบตรวจสอบสถานะเว็บไซต์   | 276 |
| 1092 | เทคนิคการปรับปรุงอัลกอริทึมอาณานิคมมดเพื่อการหา<br>ระยะทางการเจาะแผ่นวงจรที่เหมาะสมที่สุด | 282 |

# สายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากสำหรับความถี่ แถบกว้าง

อนุชา มาละใจ วันเฉลิม ชื่นวัฒน์พงษ์ ไพฑูรย์ รักเหลือ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

E-mail: anucha\_aong@hotmail.com

## บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอสายอากาศที่แปลกใหม่โดยใช้ฟิล์มบางแฉวลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากสำหรับความถี่แถบกว้าง สำหรับการใช้งาน WLAN, WIMAX และ 3G สายอากาศนี้ได้สร้างชั้นสเตรต (substrate) ไมลาร์ฟิล์ม (Mylar® Polyester Film) ที่มีขนาดของ  $12.75 \times 15$  มิลลิเมตร, มีความหนาเพียง 0.4 มิลลิเมตร ซึ่งบางมากและมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (dielectric) 3.2 งานวิจัยได้ออกแบบและจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรม IE3D สายอากาศนี้ออกแบบได้ไม่ยากโดยใช้ช่องเปิดแบบมุมฉาก ช่อง 4 ในขนาดและระยะที่เหมาะสมเพื่อควบคุมแถบความถี่กว้างที่เราต้องการ สายอากาศทำงานในช่วงความถี่ 3.04-2.02GHz ที่มีแบนด์วิดท์ 1.02GHz (Return loss < -10 dB) ที่ใช้งานในระบบ 3G (2.1GHz), WLAN(2.5-2.4 GHz), WIMAX(2.7-2.3) GHz)

## Abstract

This paper presents a novel Thin-Film wideband right angle array slot antenna for WLAN, WIMAX and 3G applications. This antenna is printed on Mylar® Polyester Film substrate with size of  $12.75 \times 15$  mm<sup>2</sup>, thickness of 0.3 mm, and dielectric constant of 3.2. The proposed antenna is designed by using IE3D simulation software. This antenna is simple to design using four right angle slot size at appropriate position to achieve wideband which can control the desirable resonant frequency. The length of slot is approximately a half-wavelength at the desirable center frequency. The antenna operated in the frequency range 2.02 – 3.04 GHz with impedance bandwidth are 1.02 GHz (Return loss < -10 dB) working in the 3G (2.1 GHz), WLAN (2.4-2.5 GHz), WIMAX (2.3-2.7 GHz).

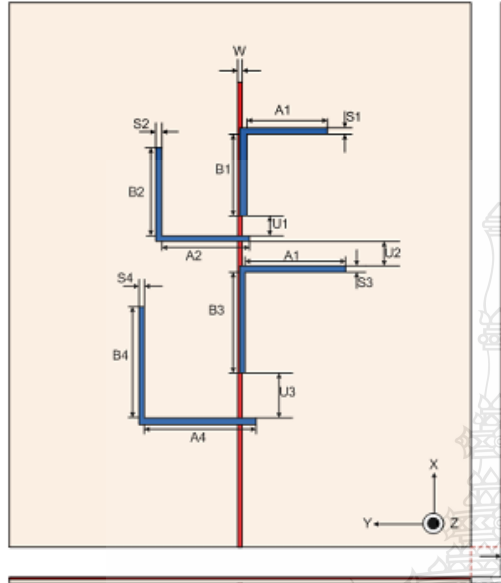
## คำสำคัญ

แถบความถี่กว้าง, ช่องเปิด, ฟิล์มบาง, แฉวลำดับ, ไมลาร์ฟิล์ม

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันวิวัฒนาการทางเทคโนโลยีด้านการสื่อสารได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และมีการเติบโตอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงมีการพัฒนาในส่วนของการรับและแพร่กระจายคลื่นสัญญาณให้มีความเหมาะสม โดยสายอากาศที่นิยมใช้ในด้านการศึกษาและพัฒนาอย่างกว้างขวางชนิดหนึ่งก็คือสายอากาศไมโครสตริปเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการคือ มีน้ำหนักเบา มีรูปร่างไม่ซับซ้อน ออกแบบและสร้างได้ง่าย ราคาไม่สูงมากนัก และสามารถออกแบบให้สายอากาศสามารถตอบสนองของสัญญาณแถบความถี่กว้างได้อย่างไม่ยากนัก ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแฉวลำดับช่องเปิดแบบมุมฉาก [1] - [5] ด้วยโปรแกรม IE3D ในช่วงความถี่ 2.02-3.04 GHz ที่มีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) 1.02 GHz (Return loss < -10 dB) ด้วยความถี่ที่หนึ่ง 3G (2.1 GHz), ความถี่ที่สอง WLAN (2.4-2.5 GHz), ความถี่ที่สาม WIMAX (2.3-2.7GHz) สร้างบนวัสดุฐานรองชนิดไมลาร์ฟิล์มที่มีขนาดของ  $12.75 \times 15$  mm. , มีความหนาของ 0.4 mm. และมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก 3.2 สายอากาศได้รับการพัฒนาเพื่อใช้งานสำหรับ WLAN, WIMAX และ 3G ซึ่งถูกนำไปใช้กันอย่างมากกับแท็บเล็ต (Tablet) จะเห็นได้ชัดว่ากลายเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการใช้ระบบการสื่อสารงานของสายอากาศทั้งในปัจจุบันและในอนาคต

2. โครงสร้างสายอากาศและการออกแบบ



รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศที่ออกแบบ

โครงสร้างของสายอากาศจะมีรูปร่างเป็นสตริปหรือแถบโลหะแคบๆ อยู่บนชั้นสเตรต ซึ่งเป็นสารไดอิเล็กตริกและด้านล่างของชั้นสเตรตเป็นผิวโลหะ พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผ่านอยู่ในชั้นสเตรตบริเวณที่อยู่ระหว่างแถบโลหะแคบๆ กับผิวโลหะด้านล่าง ความกว้างของสตริปนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ลักษณะสมบัติที่ต้องการ ขึ้นอยู่กับการใช้เทคโนโลยีแบบพีลล์บาง หรือแบบพีลล์หนาในการสร้างสตริปนั้นในการออกแบบสายไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากที่สามารถรับและส่งได้แบบแถบความถี่กว้างนั้นสามารถทำได้ไม่ยากนัก ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบไปที่ละช่องจนครบทั้ง 4 ช่อง ก่อนนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตำแหน่งที่ดีที่สุด และนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้วางไว้ในสายอากาศเดียวกันเพื่อที่จะสามารถรับส่งได้แบบแถบความถี่กว้าง ในบทความนี้ใช้วัสดุฐานรองชนิดไมลาร์พีลล์มีขนาดของ  $12.75 \times 15$  มิลลิเมตร มีความหนาของ 0.4 มิลลิเมตร และมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.2 สายนำสัญญาณแบบไมโครสตริปที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม สำหรับแมตซ์อิมพีแดนซ์สามารถที่จะคำนวณหาค่า

ความกว้างของสายนำสัญญาณ (W) จากสมการที่ (1) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) และความหนาของหรือความสูงของวัสดุฐานรอง (h)

$$\frac{W}{3.175} = \frac{2}{\pi} \left\{ 6.62 - 1 - \ln(13.24 - 1) + \frac{3.2 - 1}{6.4} [\ln(6.62 - 1)] + 0.39 - \frac{0.61}{3.2} \right\} \quad (1)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_0 \sqrt{\epsilon_r}} = 6.62 \quad (2)$$

$$f_r = \frac{0.5c}{(A+B)\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3)$$

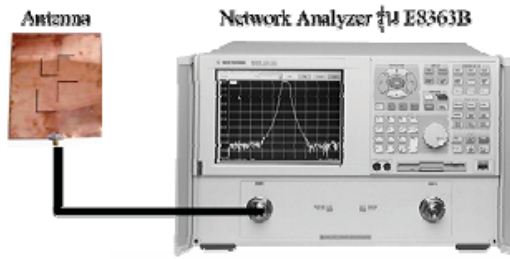
$$\text{เมื่อ } \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W}\right)^{-1/2}, \quad \frac{W}{h} > 1 \quad (4)$$

ที่  $\epsilon_{eff}$  ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลและความเร็วแสง (c) เท่ากับ  $3 \times 10^8$  เมตร/วินาที สามารถคำนวณความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเท่ากับ  $0.78 \approx 1\text{mm}$ . เราสามารถคำนวณหาขนาดความยาวของช่องเปิดได้จากสมการที่ (3)

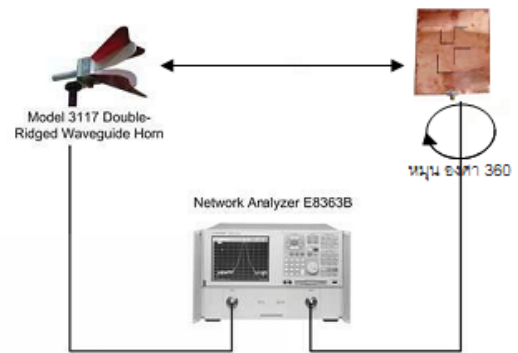
การออกแบบแถบความถี่กว้างโดยใช้ช่อง ((A1+B1) และ (A2+B2)); ((A3+B3) และ (A4+B4)) ได้ความถี่ในช่วง 2.02–3.04 และมีแบนด์วิดธ์ 1.02 GHz

3. ผลการวิเคราะห์และการอภิปรายผล

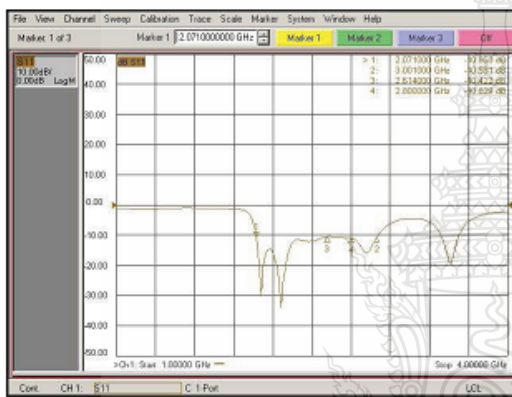
การการออกแบบส่วนประกอบต่างๆ ของสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากแบบแถบความถี่กว้าง ที่จำลองแบบโครงสร้างในโปรแกรม IE3D ทำการปรับค่าตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยงานวิจัยได้แบนด์วิดธ์ 0.94 GHz ที่วัดมาจาก (Network Analyzer) รุ่น E8363B ดังรูปที่ 3 ในช่วงความถี่ 2.07-3.01 GHz โดยมีค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB และมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง (VSWR) ต้องไม่เกิน 2 แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งก็ครอบคลุมในช่วงความถี่ 2.07-3.01 GHz รวมไปถึงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)



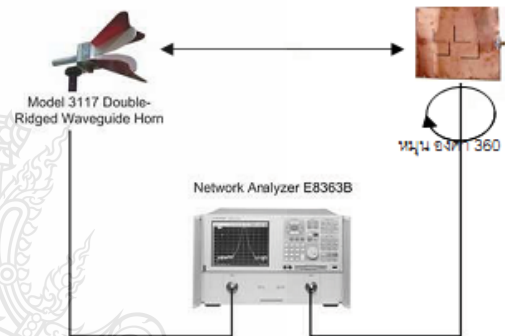
รูปที่ 2 วิธีการวัดและวิเคราะห์สายอากาศไมโครสตริปแฉว ลำดับแบบช่องเปิดมุมฉากสำหรับความถี่แถบกว้าง



รูปที่ 6 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของ สายอากาศในแนวระนาบ x-z



รูปที่ 3 ผลการวัดการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ

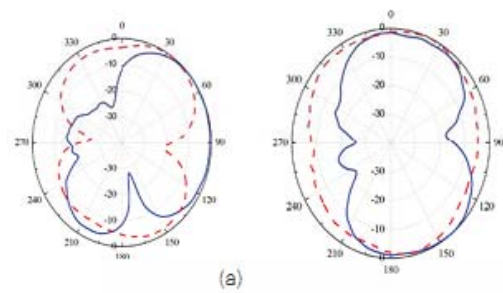


รูปที่ 7 การต่ออุปกรณ์วัดแบบรูปการแผ่พลังงานของ สายอากาศในแนวระนาบ y-z

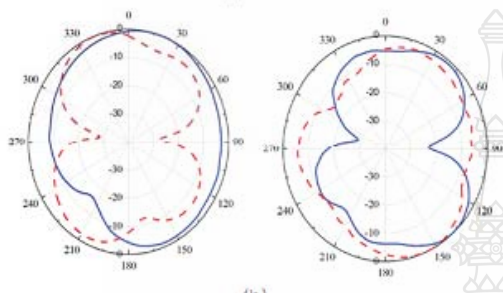


รูปที่ 4 ผลการวัดอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่ง

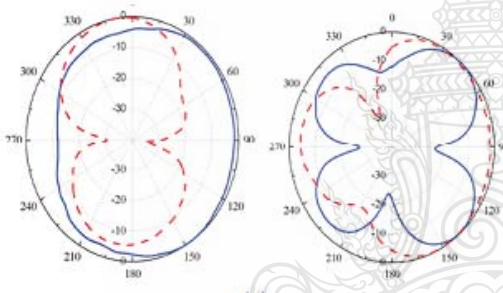
ในข้างต้นที่กล่าวมาแสดงให้เห็นผลการวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นมุมเงย (Elevation) และมุมกวาด (Azimuth) ที่หลากหลาย การวัดแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นในสนามไฟฟ้า (E-plane) และสนามแม่เหล็ก H (H-plane) ใน 4 ความถี่ที่แตกต่างกัน 2.1 GHz, 2.3 GHz, 2.45GHz, 2.6 GHz แสดงในรูปที่ 8 (a), (b), (c), (d) ตามลำดับ



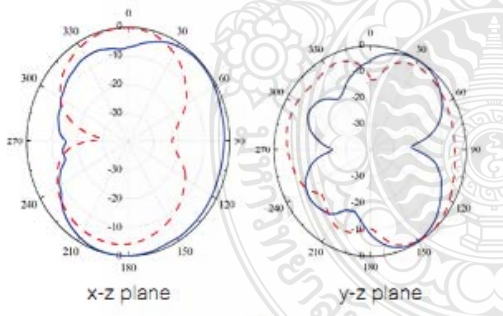
(a)



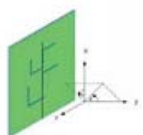
(b)



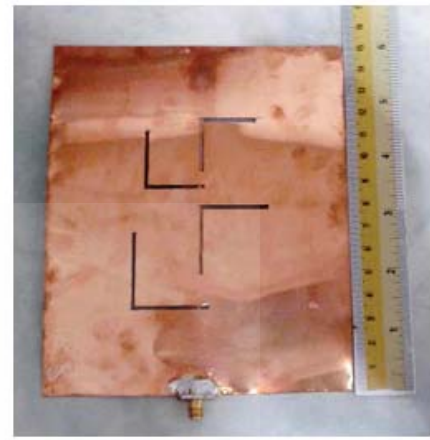
(c)



(d)



รูปที่ 8 แสดงแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ xz และ ระนาบ yz (a) 2.1 GHz (b) 2.3 GHz (c) 2.45GHz (d) 2.6 GHz



รูปที่ 9 รูปถ่ายตัวต้นแบบที่สร้างจริงของสายอากาศ ด้านกรวดเฟลอน

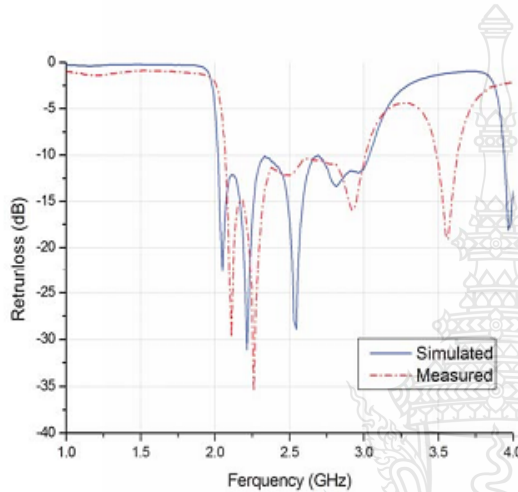


รูปที่ 10 รูปถ่ายตัวต้นแบบที่สร้างจริงของสายอากาศ ด้านไมโครสตริป

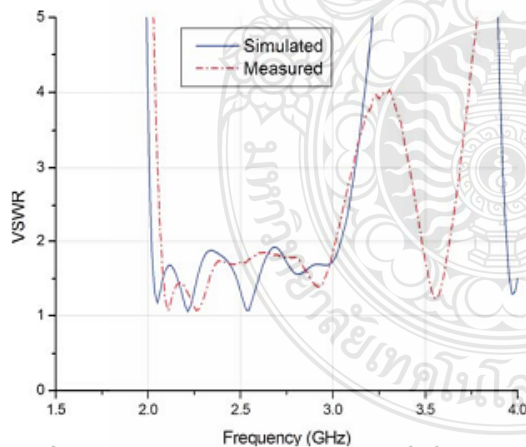


รูปที่ 11 รูปถ่ายแสดงความหนาของสายอากาศ

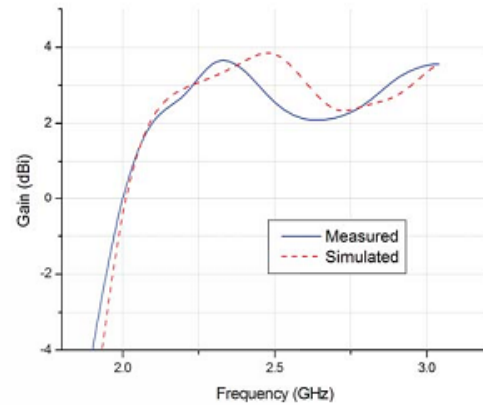
ภาพถ่ายสายอากาศไมโครสตริปช่องเปิดแบบมุมฉากแถบความถี่กว้างที่สร้างจริงแสดงในรูปที่ 10 มีขนาดระนาบกราวด์ (ground plane) 12.75 cm. × 15 cm. ( $W_g \times L_g$ ) ซึ่งมีการวัดแบนด์วิดท์ได้ 0.96 GHz (2.07 GHz - 3.03 GHz) มีการทำงานที่ครอบคลุม WLAN, WIMAX และ 3G ซึ่งสามารถนำไปใช้กับแท็บเล็ต เนื่องจากแท็บเล็ตมีขนาดที่สามารถใส่สายอากาศนี้ได้



รูปที่ 12 การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับระหว่างผลจากการจำลองและการวัดของสายอากาศ



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งระหว่างผลจากการจำลองและการวัดของสายอากาศ



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบค่าอัตราขยายระหว่างผลจากการจำลองและการวัดของสายอากาศ

การเปรียบเทียบค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับระหว่างผลจากการจำลองและการวัดของสายอากาศแสดงในรูปที่ 12 ผลจากการจำลองมีแบนด์วิดท์ 1.02 GHz ในช่วงความถี่ 2.02-3.04 GHz ส่วนผลการวัดมีแบนด์วิดท์ 0.96 GHz ในช่วงความถี่ 2.07- 3.03 GHz ผลที่ออกมาใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงความถี่สูงนั้นผลที่จะแตกต่างกันออกไปอันเนื่องมาจากการสร้างสายอากาศ ที่ไม่ได้ขนาดตามการจำลอง ซึ่งยังครอบคลุมสามารถนำไปใช้งาน WLAN, WIMAX และ 3G

แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งระหว่างผลจากการจำลองและการวัดของสายอากาศในรูปที่ 13 ต้องไม่เกิน 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงที่ 2.07-3.01 GHz มีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งน้อยกว่า 2 ทั้งผลจากการจำลองและการวัดผลที่ได้นั้นจะสอดคล้องกับค่าการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับทั้งผลการจำลองและการผล

แสดงการเปรียบเทียบค่าการขยายระหว่างผลจากการจำลองและการวัดของสายอากาศในรูปที่ 14 จะเห็นได้ว่าผลจากการจำลองและวัดจึงใกล้เคียงกัน อัตราการขยายน้นมากกว่า 2 dBi ณ ความถี่ที่ใช้ WLAN 2.45 GHz, WIMAX 2.3 - 2.69 GHz และ 3G 2.1 GHz

#### 4. บทสรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศวงลำดับช่องเปิดแบบมุมฉากเป็นสายอากาศที่มีรูปร่างที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการออกแบบและสร้างจริง ในการศึกษาทดลองนั้นระยะห่างระหว่างช่องเปิดมีผลกระทบต่อความกว้างของแบนด์วิดท์ จึงนำค่าที่ได้ทำการออกแบบและการสร้างจริงโดยที่สายอากาศมีขนาดของ  $12.75 \times 15$  มิลลิเมตร, มีความหนาเพียง 0.4 มิลลิเมตร ซึ่งมีแบนด์วิดท์ในการจำลองผลในช่วงความถี่ 1.02 GHz (3.04-2.02GHz) แล้วนำค่าคุณสมบัติจากการออกแบบ สร้างเป็นสายอากาศจริงมีผลของแบนด์วิดท์ในช่วงความถี่ 0.96GHz (3.0-2.071 GHz) และมีค่าอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งไม่เกิน 2 (3.0-2.071 GHz) จะเห็นได้ว่าผลใกล้เคียงจากการจำลองโดยโปรแกรม IE3D ทั้งการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับและอัตราส่วนแรงดันคลื่นนิ่งเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานกับ WLAN, WIMAX และ 3G ซึ่งครอบคลุมความถี่ที่ใช้งาน ด้วยขนาดของสายอากาศและความบางแล้วเหมาะสมกับการนำไปใช้ในแท็บเล็ต

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ด้านสถานที่เครื่องมือที่ใช้ในการวัดและค่าชี้แจงแนะในการทำวิจัยฉบับนี้

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Roberto Caso, Student Member, IEEE, Andrae A. Serra, Marcos Rodriguez-Pino, Paolo Nepa, Member, IEEE, and Giuliano Manara, Fellow, IEEE, "A Wideband Slot-Coupled Stacked-Patch Array for Wireless Communications," IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, Vol. 9, 2010.
- [2] Lev Pazin and Yehuda Leviatan, "Inverted-F Laptop Antenna With Enhanced Bandwidth for Wi-Fi/WiMAX Applications," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol.59, No.3, March 2011.
- [3] Y. Sung, "A Printed Wide-Slot Antenna With a Modified L-Shaped Microstrip Line for Wideband Applications," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol.59, No.10, October 2011.

[4] A. Pomsathit, C. Benjangkprasert, N. Anantrasirichai, Paltoon Rakluea and T. Wakabayashi, "Design of Right Angle Slot Antenna for Dual Band and Dual Polarized with Wireless Network," International Conference on Control, Automation and Systems 2010, Gyeonggi-do, Korea, Oct. 27-30, 2010 in KINTEX.

[5] Hossein Eskandari, Mahmood Rafaeel Booket, Manouchehr Kamyab, and Mehdi Veysi, Student Member, IEEE, "Investigations on a Class of Wideband Printed Slot Antenna," IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, Vol. 9, 2010.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล

นายอนุชา มาละใจ

วัน เดือน ปีเกิด

12 มกราคม 2530

ที่อยู่

39/284 หมู่ 1 ต. คลองเจ็ด อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี

การศึกษา

พ.ศ. 2552

สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

