ตัวก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์สามแถบความถี่
สำหรับไวแมกซ์

นางสาววนษา สินจังหรีด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2555

TRI-BAND BUTLER MATRIX BEAMFORMER

FOR WiMAX

Vanasa Sinchangreed

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2012

ตัวก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์สามแถบความถี่สำหรับไวแมกซ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

____

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)
ประธานกรรมการ

____

(ผศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

____

(ผศ. ดร.ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก)
กรรมการ

____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

____

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วนษา สินจังหรีด : ตัวก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์สามแถบความถี่สำหรับไวแมกซ์ (TRI-BAND BUTLER MATRIX BEAMFORMER FOR WiMAX) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล, 106 หน้า.

ไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access : WiMAX) นั้นเป็นเทคโนโลยีที่มีแถบความถี่สามแถบคือ 2.5 GHz (2.5 - 2.69 GHz) 3.5 GHz (3.4 - 3.6 GHz) และ 5.8 GHz (5.725 - 5.850 GHz) แตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ซึ่งสามารถทำการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเตอร์เน็ตไร้สายให้กับพื้นที่ห่างไกลที่สายเคเบิ้ลไม่สามารถลากไปไม่ถึงได้เป็นอย่างดีแต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านในการให้บริการในพื้นที่กว้างๆ อย่างเช่น พื้นที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ เช่น บ้านเรือน ต้นไม้ ภูเขา ตึก ฯลฯ จึงทำให้เกิดปัญหา เช่น สัญญาณคลื่นหลายวิถี การจางหายของสัญญาณ สัญญาณแทรกสอด จึงได้มีการคิดค้นระบบที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวนั่นคือระบบสายอากาศเก่ง ซึ่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการและหันจุดศูนย์หรือพูข้างไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ในเวลาเดียวกัน กระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการก่อรูปลำคลื่น ระบบสายอากาศเก่งที่สนใจในงานวิจัยฉบับนี้คือ สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อย และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ เพื่อรองรับการใช้งานในทุกพื้นที่ของระบบไวแมกซ์สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นควรที่จะสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สามแถบความถี่ที่กล่าวมาในข้างต้น การที่จะนำเอาสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นแบบเดิมที่ทำงานได้ดีกับสัญญาณที่มีความถี่เดียวมาใช้กับสัญญาณที่มีแถบความถี่หลายๆ แถบ ระบบจะไม่สามารถลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดได้ดีเหมือนเดิม ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มีความสนใจที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยออกแบบตัวคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณที่สามารถครอบคลุมได้ทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์ จากนั้นต้นแบบของตัวคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณจะถูกสร้างและทดสอบในห้องปฏิบัติการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม ลายมือชื่อนักศึกษา________________________

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา____________________

VANASA SINCHANGREED : TRI-BAND BUTLER MATRIX BEAMFORMER FOR WiMAX . THESIS ADVISOR : ASST. PROF. MONTHIPPA UTHANSAKUL, Ph.D., 106 PP.

WiMAX/SWITCHED BEAM ANTENNA/90° HYBRID COUPLER/CROSSOVER

So far, WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) has been assigned for three frequency bands: 2.5GHz (2.5 - 2.69 GHz), 3.5GHz (3.4 - 3.6 GHz) and 5.8GHz (5.725 - 5.850 GHz). These frequency bands are allocated in different areas. This technology makes Internet connection possible for remote area or some inaccessible area. However, there is still some limitation for some wide areas as sometimes the transmitted signal is blocked by houses, trees, mountain or building. These can cause some adverse effects such as multipath signal, fading signal and interference signal. So far, smart antenna systems have been envisaged to tackle the mentioned problem as they are able to steer main beam to desired direction while pointing its nulls or sidelobes to direction of interference signal. This process is so called beamforming. This thesis work focuses on switched beam antennas as being the simplest type of smart antennas. These systems are also not complex and costly. To support all frequency bands for WiMAX, switched beam antennas have works well for wideband signal. However, from literatures, most of the work dealing with switched beam antennas cannot works well for wideband signal. According to this, their ability to combat interference signal is degraded when applying to wideband signal. Therefore, this thesis proposes some developed design for hybrid coupler and

crossover as being important component of switched beam antennas. After achieving the developed design, some prototypes are constructed and tested in laboratory.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Telecommunication Engineering Student's Signature ________________

Academic Year 2012 Advisor's Signature ________________

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่างๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมที่คอยแนะนำช่วยเหลือให้คำปรึกษาอย่างดีมาโดยตลอด รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระฉอดนอก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ด้านวิชาการและให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณนางสาวปณิฏฐาท์ อาจหาญ ที่คอยช่วยเหลือทางด้านเอกสารและขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำปรึกษาด้านวิชาการและคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาโดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

วนษา สินจังหรีด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) .... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) .... ข
กิตติกรรมประกาศ .... ง
สารบัญ .... จ
สารบัญตาราง .... ซ
สารบัญรูป .... ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .... ฒ
บทที่
1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 สมติฐานของการวิจัย 3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น 3
1.5 ขอบเขตการวิจัย 3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย 3
1.6.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย 3
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย 4
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย 4
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย 4
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล 4
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล 5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์ 5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6
2.1 กล่าวนำ 6
2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบไวแมกซ์ 6
2.2.1 มาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์ 8
2.2.2 โครงสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ 9
2.2.3 รูปแบบการเชื่อมต่อของไวแมกซ์ 9
2.2.4 ศักยภาพในการให้บริการของไวแมกซ์ 10
2.2.5 คุณลักษณะเด่นของเครือข่ายไวแมกซ์ 10
2.2.6 ประโยชน์ของไวแมกซ์ 11
2.3 สายอากาศแถวลำดับ 11
2.3.1 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น 12
2.3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ 15
2.4 ระบบสายอากาศเก่ง 18
2.4.1 ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น 23
2.4.2 ระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว 24
2.5 เทคนิคการหันลำคลื่น 25
2.5.1 เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ 25
2.5.1.1 ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º 27
2.5.1.2 ตัวไขว้สัญญาณ 28
2.5.1.3 ตัวเลื่อนเฟส 45º 29
2.6 ทฤษฎีการส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป 29
2.7 ผลกระทบของแถบความถี่กับระบบสายอากาศเก่ง 32
2.8 กล่าวสรุป 37
3 การออกแบบระบบต้นแบบ 38
3.1 กล่าวนำ 38
3.2 การออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น 38
3.2.1 การออกแบบตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º 38

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.2 การออกแบบวงจรไขว้สัญญาณ 53
3.2.3 การออกแบบวงจรเลื่อนเฟส 57
3.3 กล่าวสรุป 58
4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ 59
4.1 กล่าวนำ 59
4.2 ผลการทดสอบตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ 59
4.3 ผลการทดสอบตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ 62
4.4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ 65
4.5 กล่าวสรุป 95
5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 96
5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์ 96
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 97
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต 97
รายการอ้างอิง 98
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 100
ประวัติผู้เขียน 106

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ 7
2.2 ทิศทางของพูคลื่นหลัก ความต่างเฟส และเฟสของสัญญาณขาออก
สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์มตริกซ์ 27
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º 48
3.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่วงความถี่ต่างๆ
ของตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º 49
3.3 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรคัปเปลอร์ไฮบริดจ์แบบ 90° แบบสามแถบความถี่ 53
3.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณ 53
3.5 การปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่วงความถี่ต่างๆ ของตัวไขว้สัญญาณ 54
3.6 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ 57
4.1 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรคัปเปลอร์ไฮบริดจ์แบบ 90° แบบสามแถบความถี่ 62
4.2 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ 65
4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.5 GHz 70
4.4 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก
สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz 70
4.5 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก
สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz 71
4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.6 GHz 72
4.7 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก
สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz 73
4.8 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก
สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz 73
4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.69 GHz 75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.10 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz 75
4.11 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz 76
4.12 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ 77
4.13 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการวัด 77
4.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.4 GHz 78
4.15 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz 78
4.16 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz 79
4.17 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.5 GHz 80
4.18 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz 81
4.19 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz 81
4.20 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.6 GHz 83
4.21 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz 83
4.22 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz 84
4.23 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ 85
4.24 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการวัด 85
4.25 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.725 GHz 86
4.26 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz 86

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.27 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz 87
4.28 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.8 GHz 88
4.29 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz 89
4.30 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz 89
4.31 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.850 GHz 91
4.32 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz 91
4.33 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz 92
4.34 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ 93
4.35 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการวัด 93
4.36 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพูคลื่นหลักของช่วงแถบความถี่ 2.5 – 2.69 GHz 94
4.37 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพูคลื่นหลักของช่วงแถบความถี่ 3.4 – 3.6 GHz 94
4.38 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพูคลื่นหลักของช่วงแถบความถี่ 5.725 – 5.850 GHz 94

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 แผนภาพระบบไวแมกซ์ ... 9
2.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน N×1 ต้น ... 12
2.3 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจำนวน 2×2 ... 15
2.4 ระบบสายอากาศเก่ง ... 18
2.5 ระบบสายอากาศเก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ ... 19
2.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น ... 24
2.7 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว ... 25
2.8 โครงสร้างของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ ... 25
2.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 4 ลำคลื่นที่ได้จากการก่อรูปลำคลื่นจากบัตเลอร์เมตริกซ์ ... 27
2.10 โครงสร้างตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° ... 28
2.11 โครงสร้างตัวไขว้สัญญาณ ... 28
2.12 ตัวเลื่อนเฟส 45° ... 29
2.13 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ... 29
2.14 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ... 32
2.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ใช้งานความถี่แถบแคบที่ 2 GHz ... 34
2.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ใช้งานความถี่แถบกว้างที่ 1.5 - 2.5 GHz ... 34
2.17 โครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยอาศัยการประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ... 35
2.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 1.6 - 2.69 GHz ... 35
2.19 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 3.49 - 4.21 GHz ... 36
2.20 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 4.89 - 5.61 GHz ... 36
3.1 โครงสร้างตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ ... 39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90º แบบความถี่แคบ 39

3.3 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบความถี่แคบ 40

3.4 ความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบความถี่แคบ 40

3.5 โครงสร้างตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 41

3.6 กราฟแสดงค่าของ Z_{h1} Z_{h2} และ Z_v ที่อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Collado C., Grau A., and De Flaviis, F.(2006) 42

3.7 ขนาดของวงจรตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.5 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 49

3.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ต ของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ ที่ความถี่2.5 - 2.69 GHz 3.5 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 51

3.9 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่ความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.5 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 51

3.10 ความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 52

3.11 มุมเฟสของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 52

3.12 ขนาดของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.13 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 55
3.14 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโดดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 56
3.15 มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.5 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 56
3.16 ความสัมพันธ์ของค่ามุมเฟสของตัวเลื่อนเฟส 57
4.1 ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่สร้างจริงที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 60
4.2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 60
4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 61
4.4 ความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 61
4.5 มุมเฟสของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 62
4.6 ตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่สร้างจริงที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz	63
4.8	ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโดดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz	64
4.9	มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz	64
4.10	ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz	66
4.11	ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz	66
4.12	ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz	66
4.13	ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz	67
4.14	ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz	67
4.15	ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz	68
4.16	ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz	68
4.17	ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz	69
4.18	ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz	69
4.19	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.5 GHz	71
4.20	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.6 GHz	74
4.21	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.69 GHz	76
4.22	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.4 GHz	79
4.23	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz	82
4.24	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.6 GHz	84
4.25	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.725 GHz	87
4.26	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.8 GHz	90
4.27	แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.850 GHz	92

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

WiMAX	=	Worldwide Interoperability for Microwave Access
LOS	=	Line Of Sight
NLOS	=	Non Line Of Sight
BSS	=	Base Station
SS	=	Subscriber Station
CPE	=	Customer Premises Equipment
PMP	=	Point to Multipoint
PTP	=	Point to Point
λ	=	ความยาวคลื่น
k	=	หมายเลขคลื่นมีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$
β	=	ความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น
I	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของกระแสที่กระตุ้นสายอากาศ
$\mathbf{W}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ
$\mathbf{A}$	=	แอมพลิจูด
ε_r	=	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
$\boldsymbol{Z}$	=	อิมพีแดนซ์

บทที่1
บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการอธิบายถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเข้าถึงสื่อสารไร้สายบรอดแบนด์ได้รับความนิยมในการใช้งานอย่างแพร่หลาย และมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การสื่อสารที่ให้ทั้งความสะดวกรวดเร็ว และมีความถูกต้องมากขึ้นเท่าไร ก็ยิ่งจะตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งานมากขึ้นเท่านั้น แต่การที่จะตอบสนองเพื่อให้เกิดประโยชน์กับผู้ใช้งานได้นั้นยังต้องอาศัยการพัฒนาระบบอย่างต่อเนื่อง ไม่ว่าจะเป็นเรื่องของประสิทธิภาพในการรับและส่งข้อมูลที่สูงขึ้น มีคุณภาพความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดีในระบบ อีกทั้งยังมีพื้นที่ในการให้บริการที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น จากการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีไวแมกซ์นั้น เป็นเทคโนลียีบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงที่ถูกพัฒนาขึ้นมาบนมาตรฐานIEEE 802.16 ที่มีแถบความถี่ทั้งหมดสามแถบความถี่คือ 2.5 GHz (2.50 - 2.69 GHz) 3.5 GHz (3.4 - 3.6 GHz) และ 5.8 GHz (5.725 - 5.850 GHz) ซึ่งสามารถรองรับการใช้งานขณะที่เคลื่อนที่ได้ และยังสามารถกระจายสัญญาณในลักษณะจากจุดเดียวไปยังหลายจุด (Point-to-Multipoint) ได้พร้อมๆกัน โดยมีความสามารถรองรับกับการทำงานแบบที่ไม่อยู่ในระดับสายตา (Non-Line-of-Sight) อีกทั้งยังสามารถส่งข้อมูลได้ไกลถึง 48 กิโลเมตร ซึ่งนั่นหมายความว่าไวแมกซ์สามารถให้บริการครอบคลุมพื้นที่กว้างกว่าระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3 จี มากถึง 10 เท่า ยิ่งกว่านั้นก็ยังมีอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ซึ่งเร็วกว่า 3 จี ถึง 30 เท่าเลยทีเดียว

จากจุดเด่นของการทำงานของไวแมกซ์ที่กล่าวไว้ในข้างต้น ทำให้เทคโนโลยีตัวนี้สามารถตอบสนองความต้องการของการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเตอร์เน็ตให้กับพื้นที่ห่างไกล ที่สายเคเบิ้ลไม่สามารถลากไปถึงได้เป็นอย่างดีตลอดจนเพิ่มความสะดวกสบาย และประหยัดสำหรับการขยายเครือข่ายในเมืองที่มีอยู่แล้วได้เนื่องจากไม่ต้องลงทุนขุดถนนเพื่อวางสายเคเบิลใยแก้วใหม่ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านในการให้บริการในพื้นที่กว้างๆ อย่างเช่น พื้นที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ เช่น บ้านเรือน

ต้นไม้ภูเขา ตึก ฯลฯ จึงทำให้เกิดปัญหา เช่น สัญญาณคลื่นหลายวิถี (multipath signal) การจางหายของสัญญาณ (fading signal) สัญญาณแทรกสอด (interference signal) จึงได้มีการคิดค้นระบบที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวนั่นคือระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ซึ่งสามารถกำหนดทิศทางของลำคลื่นสำหรับการรับส่งสัญญาณระหว่างสถานีฐาน และโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้ ระบบสายอากาศเก่งประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ คือ สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) และระบบประมวลผลสัญญาณ (signal processing systems) สายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ และหันจุดศูนย์ (null) หรือพูข้าง (side lobes) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ในเวลาเดียวกัน กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การก่อรูปลำคลื่น (beamforming) ดังที่แสดงในงานวิจัยของ Herscovicl, N., and Christodoulou, C. (2000) ซึ่งปัจจุบันระบบสายอากาศเก่งได้ถูกนำมาใช้ในเครือข่ายไร้สายอย่างแพร่หลายเนื่องจากสายอากาศเก่งสามารถลดสัญญาณแทรกสอดส่งผลให้ใช้งานได้ดีขึ้นและเพิ่มจำนวนผู้ใช้ในระบบได้ดังเช่นงานที่ถูกตีพิมพ์ในงานวิจัยของ Shani, D., and Mahler, W., Landstorfer, F.M. (2005) ซึ่งเป็นปริทัศน์วรรณกรรมที่ออกแบบสายอากาศเก่งที่ทำงานร่วมกับระบบไวแมกซ์ที่ความถี่เดียว ซึ่งส่งผลทำให้สามารถลดสัญญาณแทรกสอด เพิ่มพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณ ลดพูข้าง เป็นต้น

เนื่องจากแต่ละประเทศทั่วโลกถูกจัดสรรความถี่สำหรับระบบไวแมกซ์ไม่เหมือนกัน เช่น ทวีปอเมริกาเหนือใช้ที่ความถี่ในย่าน 2.5 และ 5.8 GHz ทวีปยุโรปและเอเชียใช้ที่ความถี่ในย่าน 3.5 และ 5.8 GHz เป็นต้น ดังนั้นในการผลิตระบบสายอากาศเก่งเพื่อใช้งานในแต่ละพื้นที่จึงต้องออกแบบใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับความถี่ในแต่ละพื้นที่นั้นๆ เนื่องจากระบบสายอากาศโดยเฉพาะระบบสวิตช์ลำคลื่นจะทำงานได้ดีกับสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบ ซึ่งหากนำไปใช้กับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างจะทำให้เกิดความเสียหายหลายประการเช่น ไม่สามารถชี้ทิศทางที่มีอัตราขยายสูงสุดไปยังผู้ใช้งาน หรือไม่สามารถหันพูคลื่นรองหรือจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ดังที่ได้ถูกตีพิมพ์ในงานวิจัยของ Uthansakul, M., and Bialkowski, M.E. (2004) ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอแนวคิดในการออกแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นซึ่งเป็นหัวใจสำคัญสำหรับสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นให้สามารถทำงานได้ดีสำหรับทั้งสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาระบบไวแมกซ์และระบบสายอากาศเก่งที่สามารถใช้งานได้ดีกับสัญญาณที่มีสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์ คือ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz

1.2.2 เพื่อออกแบบคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º (90 hybrid coupler) และตัวไขว้สัญญาณ (cross over) แบบสามแถบความถี่ ให้สามารถรองรับได้ที่ความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz ของระบบไวแมกซ์

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณสามารถใช้งานได้ดีกับสัญญาณที่มีสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์ที่ความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz

1.3.3 สามารถวิเคราะห์แบบรูปการแผ่พลังงานจากแถบความถี่แคบให้สามารถใช้งานได้ดีกับแถบความถี่กว้าง

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ใช้โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) ในการจำลองผลของรูปการแผ่พลังงาน (radiation pattern) ของความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz

1.4.2 ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองแบบคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90 º และตัวไขว้สัญญาณ ที่ความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz

1.4.3 สร้างแบบคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณ ที่ความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz เพื่อนำไปทดสอบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบไวแมกซ์

1.5.2 ใช้โปรแกรมแมทแลบในการจำลองผลของแบบรูปการแผ่พลังงาน

1.5.3 ออกแบบคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณที่ทำงานได้ในสามแถบความถี่โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio

1.5.4 เสนอแนวคิดในการออกแบบคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณที่ทำงานในสามแถบความถี่สำหรับไวแมกซ์

1.5.5 ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับระบบไวแมกซ์

3) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับระบบสายอากาศเก่ง

4) ออกแบบคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณที่ทำงานที่แถบความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio

5) สร้างคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณที่ทำงานที่สามแถบความถี่สำหรับไวแมกซ์เพื่อนำไปใช้ทดสอบ

6) ใช้โปรแกรมแมทแลบในการจำลองผลของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz.

7) ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

2) ใช้โปรแกรมแมทแลบในการจำลองผลของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz

3) ใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองแบบคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่ความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz

4) สร้างคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณที่ทำงานสามแถบความถี่ที่ความถี่ 2.5 3.5 และ 5.8 GHz เพื่อนำไปใช้ทดสอบจริง

5) ทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต. สุรนารี อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1) โปรแกรม CST Microwave Studio

2) โปรแกรมแมทแลบ (matlab)

3) เครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย (network analyzer)

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

1) เก็บรวบรวมข้อมูลของระบบไวแมกซ์ที่จะใช้ในการทำงานร่วมกับสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio

3) เก็บผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานด้วยโปรแกรมแมทแลบ

4) เก็บผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้จากผลของแบบรูปการแผ่พลังงานและจากกราฟสัมประสิทธ์การสะท้อนกลับและสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้องค์ความรู้ในการออกแบบคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณที่ทำงานในแถบกว้าง

1.7.2 ได้ระบบต้นแบบของตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณของระบบไวแมกซ์ที่ทำงานในแถบกว้าง

1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของระบบไวแมกซ์ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ ทฤษฎีของระบบสายอากาศเก่ง ซึ่งประกอบไปด้วยสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น สายอากาศเก่งแบบปรับตัว เทคนิคการหันลำคลื่น ทฤษฎีสาย่างสัญญาณแบบไมโครสตริป และผลกระทบของแถบความถี่กับระบบสายอากาศเก่ง

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น ผลการจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio และภาพรวมอุปกรณ์ต้นแบบ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบจริงของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผล ข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไข และแนวทางการพัฒนาในอนาคต

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ซึ่งแบ่งเป็นทั้งหมดแปดส่วน ส่วนแรกคือการกล่าวนำเข้าสู่เนื้อหา ส่วนที่สองจะเป็นเรื่องของระบบไวแมกซ์ โดยจะกล่าวถึงความเป็นมาและหลักการพื้นฐานของระบบ ต่อมาในส่วนที่สามจะเป็นส่วนของสายอากาศแถวลำดับที่ใช้ในระบบสายอากาศเก่งโดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับทั้งแบบเส้นและแบบระนาบ ในส่วนที่สี่จะกล่าวถึงระบบสายอากาศเก่งซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสายอากาศแบบสลับลำคลื่นและแบบปรับตัว ในส่วนที่ห้าจะมีเนื้อหาต่อเนื่องกับเนื้อหาของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ต้องมีเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ในส่วนที่หกจะกล่าวถึงทฤษฎีการส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ส่วนที่เจ็ดจะกล่าวถึงผลกระทบของแถบความถี่ที่มีต่อระบบสายอากาศเก่ง และส่วนสุดท้ายในส่วนที่แปดจะเป็นการกล่าวสรุปเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้

2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบไวแมกซ์

ไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access : WiMAX) นั้นเป็นการออกแบบโครงสร้างและอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายที่ได้ถูกพัฒนามาจากไวเลสแลนด์หรือวายฟายและเป็นเทคโนโลยีบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงรุ่นใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นบนมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งได้การอนุมัติออกมาเมื่อเดือนมกราคม พ.ศ. 2547 โดยสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ หรือ IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ซึ่งต้องการเทคโนโลยีไร้สายเข้ามาตอบสนองการสื่อสารข้อมูลระดับบรอดแบนด์ที่มีความเร็วสูงๆ และระยะทางไกลๆ โดยมาตรฐาน 802.16 ตัวแรกๆ จะเป็นแนวสายตา (Line Of Sight : LOS) ที่ใช้ความถี่แบบความถี่เดียว แต่อาศัยแบนด์กว้างในการสื่อสารข้อมูล หากแต่ก็ทำให้การให้บริการพื้นที่กว้างๆ ในความเป็นจริงในกรณีที่มีปัญหา ยกตัวอย่างเช่น ในพื้นที่ส่วนใหญ่มักจะมีสิ่งกีดขวางอยู่เสมอ เช่น อาคารบ้านเรือน ต้นไม้ ภูเขา ฯลฯ ทำให้การรับส่งแบบแนวสายตา ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ อีกทั้งคลื่นความถี่สูงจะมีปัญหามากในการส่งระยะทางไกลๆ ดังนั้นจึงทำให้มีการปรับปรุงมาตรฐานให้รับส่งแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (Non Line Of Sight : NLOS) ระบบไวแมกซ์มีแถบความถี่ทั้งหมดสามแถบความถี่คือ

2.5 GHz (2.50 - 2.69 GHz) 3.5 GHz (3.4 - 3.6 GHz) และ 5.8 GHz (5.725 - 5.850 GHz) ซึ่งมีรัศมีทำการที่ 30 ไมล์ หรือเป็นระยะทางประมาณ 48 กิโลเมตร ซึ่งนั่นหมายความว่า ไวแมกซ์สามารถให้บริการครอบคลุมพื้นที่กว้างกว่าระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3 จี มากถึง 10 เท่า ยิ่งกว่านั้นก็ยังมีอัตราความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ซึ่งเร็วกว่า 3 จี ถึง 30 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ที่แสดงถึงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีไวแมกซ์กับเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ

เทคโนโลยี	มาตรฐาน	เครือข่าย	อัตราความเร็ว	ระยะทาง	ย่านความถี่
Wi-Fi	IEEE 802.11a	WLAN	สูงสุด 54Mbps	100 เมตร	5GHz
Wi-Fi	IEEE 802.11b	WLAN	สูงสุด 11Mbps	100 เมตร	2.4GHz
Wi-Fi	IEEE 802.11g	WLAN	สูงสุด 54Mbps	100 เมตร	2.4GHz
WiMAX	IEEE 802.16d	WMAN	สูงสุด 75Mbps (20MHz BW)	ปกติ 6.4 - 10 กิโลเมตร	Sub 11GHz
WiMAX	IEEE 802.16e	Mobile WWAN	สูงสุด 30Mbps (10MHz BW)	ปกติ 1.6 - 5 กิโลเมตร	2 - 6GHz
WCDMA/ UMTS	3G	WWAN	สูงสุด 2Mbps/ 10Mbps (HSDPA)	ปกติ 1.6 - 5 กิโลเมตร	1800, 1900, 2100MHz
CDMA 2000 1X EV-DO	3G	WWAN	สูงสุด 2.4Mbps	ปกติ 1.6 - 8 กิโลเมตร	400, 800, 900, 1700, 1800, 1900, 2100MHz
EGDE	2.5G	WWAN	สูงสุด 348Kbps	ปกติ 1.6 - 8 กิโลเมตร	1900MHz
UWB	IEEE 802.15.3a	WPAN	สูงสุด 110 - 480 Mbps	10 เมตร	7.5GHz

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2.1 มาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมกซ์

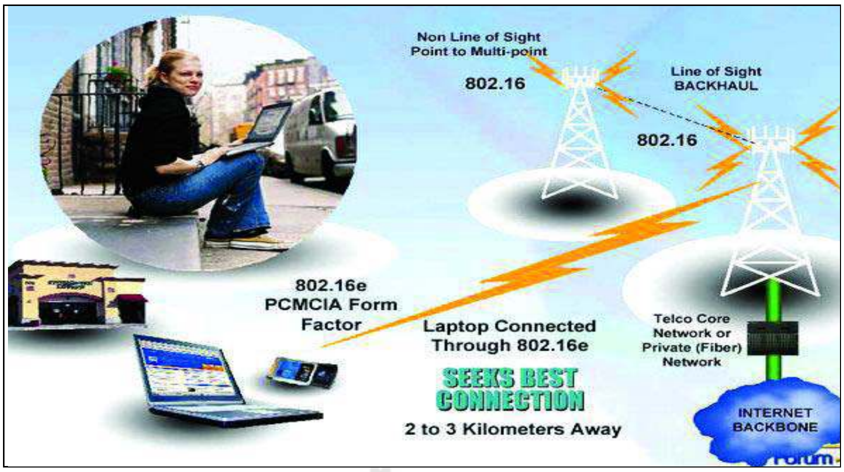
❖ IEEE 802.16 : เป็นมาตรฐานที่ให้ระยะทางการเชื่อมโยง 1.6 - 4.8 กิโลเมตร เป็นมาตรฐานเดียวที่สนับสนุน LOS

❖ IEEE 802.16a : เป็นมาตรฐานที่แก้ไขปรับปรุงจาก IEEE 802.16 เดิม ซึ่งคุณสมบัติเด่นที่ได้รับการแก้ไขจากมาตรฐาน 802.16 เดิม คือคุณสมบัติการรองรับการทำงาน ทั้งยังมีคุณสมบัติการทำงานเมื่อมีสิ่งกีดขวาง อาทิ เช่น ต้นไม้ อาคาร ฯลฯ นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถขยายระบบเครือข่ายเชื่อมต่ออินเตอร์เน็ตไร้สายความเร็วสูงได้อย่างกว้างขวางด้วยรัศมีการทำการที่ไกลถึง 31 ไมล์ หรือประมาณ 48 กิโลเมตร และมีอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ทำให้สามารถรองรับการเชื่อมต่อการใช้งานระบบเครือข่ายของบริษัทที่ใช้สายประเภท ที1 (T1 - type) กว่า 60 รายและการเชื่อมต่อแบบ DSL ตามบ้านเรือนที่พักอาศัยอีกหลายร้อยครัวเรือนได้พร้อมกันโดยไม่เกิดปัญหาในการใช้งาน

❖ IEEE 802.16d : ได้ถูกอนุมัติเมื่อเดือนมิถุนายน ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.16d ได้พัฒนามาจากมาตรฐาน 802.16a โดยส่วนที่ได้เพิ่มเข้าไปนั้น มีจุดประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานสำหรับ 802.16 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของทราฟฟิกของสัญญาณขาขึ้น

❖ IEEE 802.16e : เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้สนับสนุนการใช้งานร่วมกับอุปกรณ์พกพาประเภทต่างๆ เช่น PDA และ Notebook เป็นต้น โดยให้รัศมีทำงานที่ 1.6 - 4.8 กิโลเมตร มีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานยังสามารถสื่อสารได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดีและมีเสถียรภาพขณะใช้งานแม้ว่ามีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาก็ตาม

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าเมื่อมีการนำเทคโนโลยีไวแมกซ์มาใช้กันอย่างกว้างขวาง เครือข่ายบนเทคโนโลยีไวแมกซ์ สามารถเชื่อมต่อเครือข่ายอินเตอร์เน็ตด้วยความเร็วสูงไปยังสถานที่ต่างๆ ในรัศมีประมาณ 50 กิโลเมตร ทำให้บริเวณดังกล่าวกลายเป็น WMAN (Wireless MAN) ไปอย่างอัตโนมัติบนเครือข่ายไร้สาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพระบบไวแมกซ์

2.2.2 โครงสร้างเครือข่ายไวแมกซ์

โครงสร้างของเครือข่ายไวแมกซ์ประกอบด้วย

1) สถานีฐาน (Base Station : BSS) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานทั้งหมดใน Cell Site และเชื่อมต่อกับ Wired Internet Backbone

2) สถานีลูกข่าย (Subscriber Station : SS) ทำหน้าที่ติดต่อกับสถานีส่ง โดยผ่านอุปกรณ์ลูกข่ายที่เรียกว่า CPE (Customer Premises Equipment) เป็นเสมือน Hub ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับและส่งข้อมูลกำลังสูงเพื่อให้ติดต่อระยะไกลได้

จากองค์ประกอบเครือข่ายข้างต้น จะเห็นว่าไม่มีความซับซ้อนดังเช่น ในกรณีของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยสถานีฐานไวแมกซ์แต่ละแห่งมีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลได้สมบูรณ์แบบ พร้อมทั้งสามารถบันทึกข้อมูลในการใช้งาน และคำนวณหาเส้นทางในการรับส่งข้อมูลซึ่งอยู่ในรูปของ IP (Internet Protocol) ได้โดยตรง สำหรับการเชื่อมต่อเครือข่ายไวแมกซ์เข้าหากันทำได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการเช่าเครือข่าย IP เพื่อเชื่อมต่อสถานีฐานเข้าด้วยกัน หรือแม้กระทั่งใช้สถานีฐานไวแมกซ์ด้วยกัน ทำการรับส่งสัญญาณแบบ LOS นอกจากนั้นในกรณีที่ผู้ให้บริการเครือข่ายไวแมกซ์มีเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นของตนเองอยู่แล้วก็สามารถใช้ประโยชน์จากวงจรสื่อสัญญาณที่เชื่อมต่ออุปกรณ์เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ดังกล่าว

2.2.3 รูปแบบการเชื่อมต่อของไวแมกซ์

1) รูปแบบการเชื่อมต่อแบบ PTP (Point to Point) เป็นการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างสถานีฐานกับลูกข่าย

2) รูปแบบการเชื่อมต่อแบบ PMP (Point to Multipoint) เป็นการเชื่อมระหว่างสถานีฐานกับหลายๆ สถานีลูกข่ายพร้อมกัน

3) รูปแบบการเชื่อมต่อแบบ Mesh Topology เป็นการเชื่อมในลักษณะใยแมงมุม โดยสถานีฐานติดต่อกับสถานีฐาน สถานีฐานติดต่อกับลูกข่าย ลูกข่ายยังสามารถติดต่อกันได้เองด้วย

2.2.4 ศักยภาพในการให้บริการของไวแมกซ์

ศักยภาพในการให้บริการสื่อสารข้อมูลของไวแมกซ์ หมายถึงขอบเขตการให้บริการในพื้นที่การให้บริการและอัตราความเร็วในส่งข้อมูล ทั้งนี้ในปัจจุบันสถานีไวแมกซ์แต่ละแห่งสามารถให้บริการแบบ NLOS ได้ในรัศมีทำการตั้งแต่ 4 - 9 กิโลเมตร รองรับการสื่อสารด้วยอัตราเร็วสูงสุดในช่วง 8 - 11.3 เมกะบิตต่อวินาที ทั้งในช่วงการส่งสัญญาณจากเครื่องลูกข่าย ไปยังสถานีฐาน และจากสถานีฐานไปสู่เครื่องลูกข่าย สำหรับการใช้ไวแมกซ์ในงานสื่อสารระยะทางไกลในรูปแบบการส่งสัญญาณแบบ LOS จะสามารถส่งสัญญาณได้ในระยะทางถึง 30 - 50 กิโลเมตร ทั้งนี้ได้มีการกำหนดย่านความถี่สำหรับการใช้งานในเขตพื้นที่ต่างๆ ทั่วโลก ดังนี้

❖ ทวีปอเมริกาเหนือ กำหนดให้ใช้ย่าน 2.5 และ 5.8 GHz

❖ ทวีปอเมริกาใต้ กำหนดให้ใช้ย่าน 2.5 3.5 และ 5.8 GHz

❖ ทวีปยุโรปและเอเชีย กำหนดให้ใช้ย่าน 3.5 และ 5.8 GHz

2.2.5 คุณลักษณะเด่นของเครือข่ายไวแมกซ์

❖ **เรื่องของความเร็ว** สำหรับไวแมกซ์นั้นได้ให้อัตราความเร็วในการส่งสัญญาณข้อมูลมากถึง 75 Mbps โดยใช้กลไกการเปลี่ยนคลื่นสัญญาณที่ให้ประสิทธิภาพสูง สามารถส่งสัญญาณออกไปได้ในระยะทางไกลมากถึง 30 ไมล์ หรือ 48 กิโลเมตร ภายใต้คลื่นความถี่ระดับสูงที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ทั้งก็ยังไม่มีปัญหาเรื่องของสัญญาณสะท้อนอีกด้วย นอกจากนั้นแล้วสถานีฐานยังสามารถพิจารณาความเหมาะสมในระหว่างความเร็วและระยะทางได้อีก ตัวอย่างเช่น ถ้าหากการใช้เทคนิคในแบบ 64QAM (Quadarature Amplitude Modulation) ไม่สามารถรองรับการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพได้ การเปลี่ยนไปใช้ 16 QAM หรือ QPSK (Quadarature Phase Shift Key) ซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางในการสื่อสารให้มากขึ้นได้

❖ **การบริการที่ครอบคลุม** นอกจากไวแมกซ์จะใช้เทคนิคของการแปลงสัญญาณที่ให้ความคล่องตัวในการใช้งานสูงและมีประสิทธิภาพแล้ว มาตรฐาน IEEE 802.16a ยังสามารถรองรับการทำงานร่วมกับเทคโนโลยีซึ่งขยายพื้นที่การให้บริการให้กว้างขวางมากขึ้น ตัวอย่างเช่น ระบบเครือข่าย ที่ใช้สถาปัตยกรรมแบบผสมผสาน (Mesh Topology) และเทคนิคการใช้งานกับสายอากาศเก่ง (smart antenna) ช่วยประหยัดต้นทุนและเพิ่มอัตราความเร็วของการรับส่งสัญญาณที่ให้สมรรถนะในการทำงานน่าเชื่อถือสูง

❖ **ระบบรักษาความปลอดภัย** เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยคุณสมบัติการรักษาความลับของข้อมูลและการเข้ารหัสข้อมูลอยู่ในมาตรฐานไวแมกซ์จะช่วยให้การสื่อสารมีความปลอดภัยยิ่งขึ้น แถมยังมีระบบตรวจสอบสิทธิการใช้งานและมีระบบการเข้ารหัสข้อมูลในตัวด้วย

❖ **การจัดลำดับความสำคัญของงานบริการ (QoS - Quality of Service)** สำหรับระบบเครือข่ายไร้สายมาตรฐานไวแมกซ์มีคุณสมบัติด้าน QoS ที่รองรับการทำงานของการบริการสัญญาณเสียงและสัญญาณวิดีโอ ซึ่งต้องการระบบเครือข่ายที่ทำงานด้วยความรวดเร็ว บริการเสียงของไวแมกซ์นี้ อาจจะอยู่ในรูปของบริการ Time Division Multiplexed (TDM) หรือในรูปแบบ Voice over IP (VoIP) ก็ได้ โดยโอเปอเรเตอร์สามารถกำหนดระดับความสำคัญของการใช้งานให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งาน อาทิสำหรับบริการให้องค์กรธุรกิจ ผู้ใช้งานตามบ้านเรือน เป็นต้น

2.2.6 ประโยชน์ของไวแมกซ์

1) ช่วยให้ผู้ให้บริการสามารถขยายพื้นที่ในการให้บริการบรอดแบนด์ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ
2) สามารถขยายโครงข่ายอินเตอร์เน็ตความเร็วสูงโดยไม่มีข้อจำกัดทางภูมิประเทศ
3) เชื่อมต่อแบบจุดหนึ่งไปหลายๆ จุดได้
4) ความคุ้มค่าในการลงทุน

2.3 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) เป็นการนำสายอากาศมาเรียงตัวกันในรูปแบบต่างๆ โดยมีระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นที่แน่นอน ซึ่งสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้นเรียกว่า องค์ประกอบ (element) ซึ่งการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้นทำได้โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลายๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่มาก ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ สายอากาศแถวลำดับจึงเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่จำเป็นมากต่อระบบสายอากาศเก่งที่ทำให้สามารถหันลำคลื่นหลัก (main lobe) ไปยังทิศทางตามสัญญาณที่ต้องการและสามารถหันลำคลื่นรอง (side lobes) หรือจุดศูนย์ (nulls) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยกระบวนการถ่วงน้ำหนักที่สายอากาศแต่ละต้น ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป สายอากาศแถวลำดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นและสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

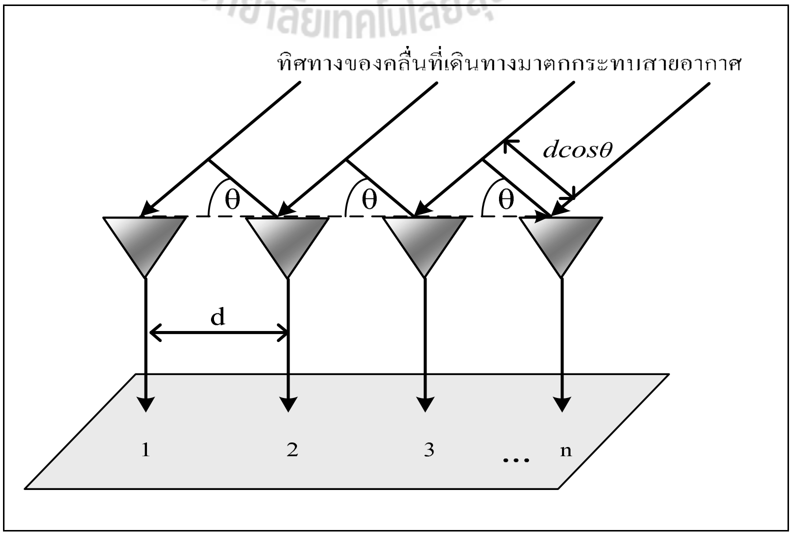
2.3.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear antenna array) เป็นสายอากาศแถวลำดับที่มีการเรียงตัวกันของสายอากาศแต่ละต้นเป็นแนวเส้นตรง ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับในรูปที่ 2.2 เป็นสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N ต้นหรือ N×1 ต้น ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ของแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นได้จากสมการที่ (2.1)

$$d = \frac{\lambda}{2} \tag{2.1}$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น

รูปที่ 2.2 แสดงถึงสายอากาศแบบเชิงเส้น N×1 ต้นโดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้นและมีแอมพลิจูดเท่ากันแต่สายอากาศแต่ละต้นที่ถัดมาจากต้นที่ 1 หรือต้นอ้างอิงจะมีเฟสมากกว่าเมื่อเทียบกับต้นก่อนหน้า ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่าแถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array)



รูปที่ 2.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน N×1 ต้น

เราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับนี้จากการคูณกันระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor : AF) ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$AF = 1 + e^{+j(kd\cos\theta+\beta)} + e^{+j2(kd\cos\theta+\beta)} + \ldots + e^{+j(N-1)(kd\cos\theta+\beta)} \tag{2.2}$$

$$AF = \sum_{n=1}^{n} e^{j(n-1)kd(\cos\theta+\beta)} \tag{2.3}$$

$$AF = \sum_{n=1}^{n} e^{j(n-1)\Psi} \tag{2.4}$$

เมื่อ $\psi = kd\cos\theta + \beta$ k คือหมายเลขคลื่น (wave number) = $2\pi/\lambda$ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นและ β คือ ความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้น จากสมการ (2.4) เราสามารถลดรูปของสมการได้ดังนี้

$$(AF)e^{j\psi} = e^{j\psi} + e^{j2\psi} + e^{j3\psi} + \ldots + e^{j\psi(N-1)} + e^{jN\psi} \tag{2.5}$$

แทนสมการ (2.4) ลงใน (2.5) จะสามารถลดรูปของสมการลงเหลือ

$$(AF)(e^{j\psi} - 1) = (-1 + e^{jN\psi}) \tag{2.6}$$

ย้ายข้างและจัดรูปสมการจะได้

$$AF = \left[\frac{e^{jN\psi} - 1}{e^{j\psi} - 1}\right]$$

$$= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{e^{j(N/2)\psi} - e^{-j(N/2)\psi}}{e^{j(1/2)\psi} - e^{-j(1/2)\psi}}\right]$$

$$= e^{j[(N-1)/2]\psi} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \tag{2.7}$$

ถ้ากำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของสายอากาศแถวลำดับ ดังนั้นค่าของระยะห่างของสายอากาศ $d = 0$ และ $\beta = 0$ ดังนั้น สมการที่ (2.7) จะสามารถลดรูปลงได้เท่ากับ

$$AF = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \tag{2.8}$$

ค่าของ ψ จะถือว่าน้อยมากๆ ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าสมการได้เท่ากับ

$$AF \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{\psi}{2}} \right] \tag{2.9}$$

ค่าสูงสุดของสมการที่ (2.8) และ (2.9) จะมีค่าเท่ากับ N เพื่อที่จะกำหนดให้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเป็นมาตรฐานเราจึงต้องกำหนดให้ค่าสูงสุดของแต่ละสมการเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นสมการมาตรฐานของตัวประกอบแถวลำดับคือ

$$(AF)_n = \frac{1}{N} \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\sin\left(\frac{1}{2}\psi\right)} \right] \tag{2.10}$$

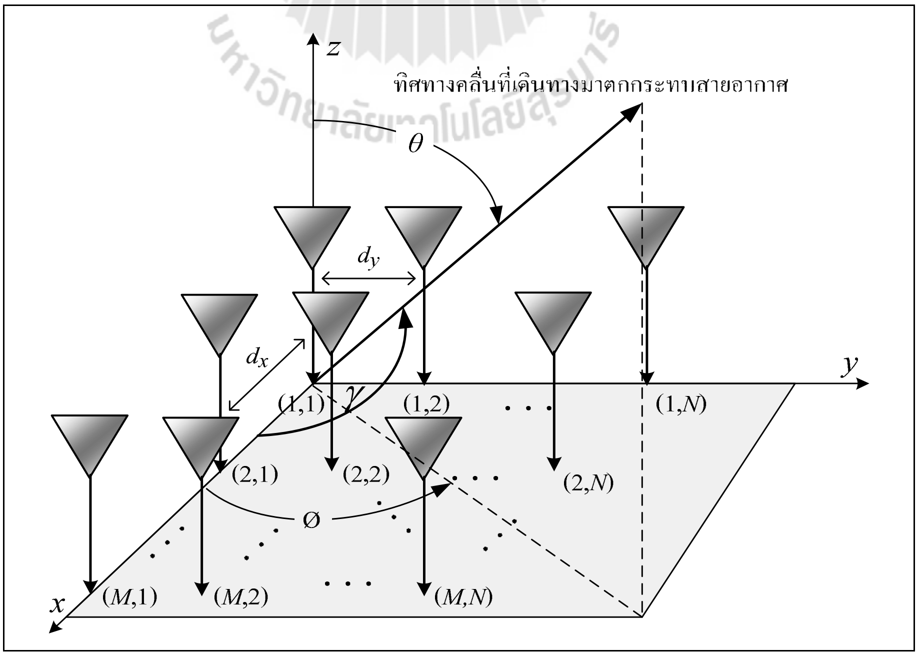
$$(AF)_n \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \tag{2.11}$$

ดังนั้นเมื่อเราทราบค่าตัวประกอบแถวลำดับเราจะสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแบบเชิงเส้นได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

E(ผลรวม) = [**E** (ของสายอากาศต้นเดียว ณ จุดอ้างอิง)] × [ตัวประกอบแถวลำดับ] (2.12)

2.3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ (planar antenna array) เป็นรูปแบบที่ประยุกต์มาจากรูปแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นที่ได้อธิบายใน 2.3.1 สายอากาศแต่ละตัวถูกจัดวางตัวเป็นสี่เหลี่ยมหรือที่เรียกว่าสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบ สายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบเชิงเส้น คือสามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่พลังงานได้ ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับเชิงระนาบมีความเอนกประสงค์มากและสามารถให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบสามารถที่จะหันพูหลักในมุมเงยและทุกๆ ทิศรอบตัว 360° ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานเรดาห์ การชี้ทางระยะไกล (remote sensing) การสื่อสารไร้สายและรวมถึงระบบสายอากาศเก่งด้วย ตามที่ได้อธิบายไว้ในหนังสือของ Allen, B. and Ghavami, M. (2005)



รูปที่ 2.3 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจำนวน 2×2

เราสามารถคำนวณหาพลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบโดยใช้สมการที่ (2.12) ได้เช่นเดียวกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น แต่จะมีค่าตัวประกอบแถวลำดับแตกต่างกัน ซึ่งสามารถหาได้ โดยอ้างอิงจากรูปที่ 2.3 จะได้

$$\cos\gamma = \hat{\mathbf{a}}_x \bullet \hat{\mathbf{a}}_r = \hat{\mathbf{a}}_x \bullet \left(\hat{\mathbf{a}}_x \sin\theta\cos\phi + \hat{\mathbf{a}}_y \sin\theta\sin\phi + \hat{\mathbf{a}}_z \cos\theta\right)$$

$$= \sin\theta\cos\phi \qquad (2.13)$$

เมื่อ $\hat{\mathbf{a}}_x$ $\hat{\mathbf{a}}_y$ $\hat{\mathbf{a}}_z$ และ $\hat{\mathbf{a}}_r$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแกน xyz และ r ตามลำดับ θ คือ มุมที่อ้างอิงในแนวดิ่ง และ ϕ คือ มุมที่อ้างอิงในแนวระนาบ เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับดังนี้

$$AF_x = \sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \cos\gamma + \beta_x)}$$

เมื่อ $\cos\gamma = \sin\theta\cos\phi$

$$= \sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi + \beta_x)} \qquad (2.14)$$

เมื่อ I_{m1} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_x คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ k คือ ค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่นในอากาศ β_x คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ m คือตำแหน่งของสายอากาศที่วางตามแนวแกน x เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน y เช่นเดียวกันกับที่พิจารณาแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเท่ากับ

$$AF_y = \sum_{n=1}^{N} I_{1n} e^{j(m-1)(kd_y \sin\theta\cos\phi + \beta_y)} \qquad (2.15)$$

เมื่อ I_{1n} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_y คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y β_y คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

และ n คือตำแหน่งของสายอากาศที่วางตามแนวแกน y ดังนั้นเราสามารถหาค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y รวมกันหรือที่เรียกว่าแบบระนาบได้ด้วยการคูณค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y เข้าด้วยกันจะได้

$$AF = \sum_{n=1}^{N} I_{1n} \left[\sum_{m=1}^{M} I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi + \beta x)} \right] e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta\cos\phi + \beta_y)} \tag{2.16}$$

ถ้าสมมุติให้แอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละต้นทั้งในแกน x และ y มีค่าเท่ากันจะได้

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1n} \tag{2.17}$$

และกำหนดให้แอมพลิจูดมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วยจะได้ $I_{mn} = I_0$ ดังนั้นเราสามารถลดรูปสมการ (2.16) ลงเหลือเท่ากับ

$$AF = I_0 \sum_{m=1}^{M} e^{j(m-1)(kd_x \sin\theta\cos\phi + \beta x)} \sum_{n=1}^{N} e^{j(n-1)(kd_y \sin\theta\cos\phi + \beta_y)} \tag{2.18}$$

เช่นเดียวกันกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นเราสามารถทำสมการค่าตัวประกอบให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์ตามที่แสดงในสมการที่ (2.10) และ (2.11) ซึ่งจะได้เท่ากับ

$$AF_n(\theta,\phi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{M}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \tag{2.19}$$

เมื่อ

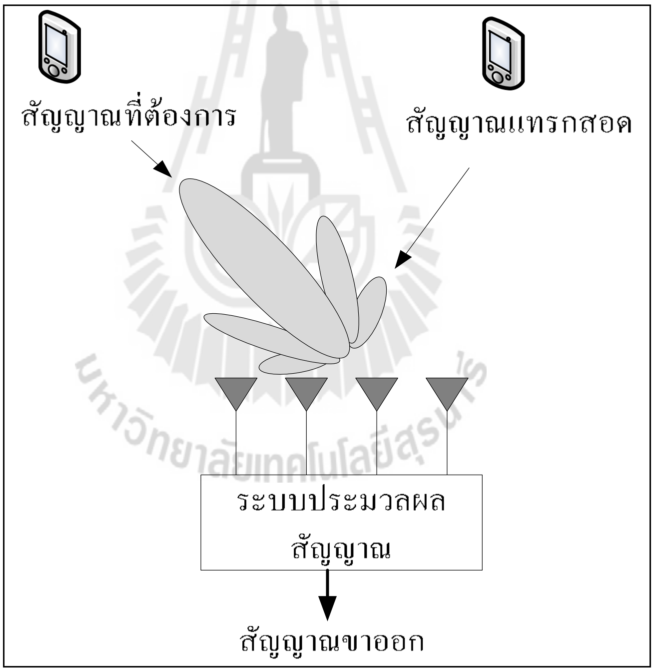
$$\psi_x = kd_x \sin\theta\cos\phi + \beta_x \tag{2.20}$$

$$\psi_y = kd_y \sin\theta\cos\phi + \beta_y \tag{2.21}$$

2.4 ระบบสายอากาศเก่ง

ระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ได้เริ่มพัฒนามาตั้งแต่ในช่วงปี ค.ศ.1980 เป็นต้นมา แต่เดิมระบบสายอากาศเก่งได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในระบบเรดาร์แต่ต่อมาได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับงานสื่อสารไร้สายจนเป็นที่นิยม ซึ่งระบบสายอากาศเก่งจะประกอบด้วยกลุ่มของสายอากาศหลายๆ ต้นจัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่างๆ กัน ร่วมกับการประมวลผลสัญญาณทั้งทางเวลาและทางตำแหน่งเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สายให้ดีขึ้น

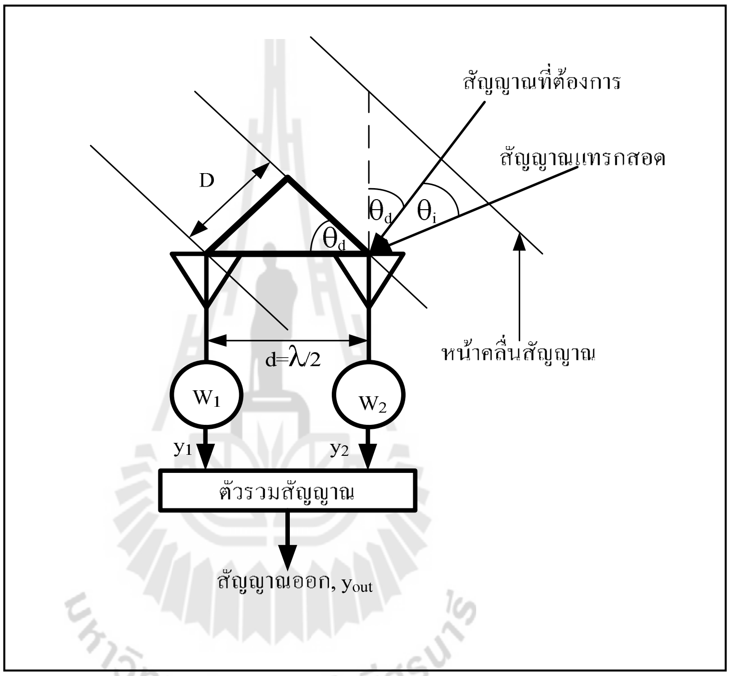
รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศเก่งซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ สายอากาศแถวลำดับและชุดประมวลผลสัญญาณ ซึ่งในระบบประมวลผลจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction of Arrival : DOA) และการคำนวณเพื่อก่อรูปลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในหนังสือของ Liberti, J.J.C. and Rappaport, T.S.(1999)



รูปที่ 2.4 ระบบสายอากาศเก่ง

ในส่วนของการหันลำคลื่น ระบบสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการและจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการปรับเฟส หรือแอมพลิจูดของสัญญาณที่มายังสายอากาศแถวลำดับแต่ละต้น เพื่อหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการและหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งการปรับเฟสหรือแอมพลิจูดนั้นเรียกว่าการถ่วงน้ำหนัก สายอากาศแต่ละต้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันออกไปตามมุม

เฟสของสัญญาณที่มาตกกระทบสายอากาศต้นนั้นๆ โดยหลักการเบื้องต้นของการหันลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 จากรูป D คือระยะทางที่ทำให้เกิดความต่างเฟสของสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 และ 2 d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ W_1 คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศต้นที่ 1 W_2 คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศต้นที่ 2 ส่วนมุม θ_d และ θ_i คือมุมตกกระทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ระบบสายอากาศเก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ

จากรูปสัญญาณขาออกคือ

$$y_{out} = y_1 + y_2 \quad (2.22)$$

เมื่อ y_1 คือสัญญาณขาออกที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 และ y_2 คือสัญญาณขาออกที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 2

และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบสายอากาศแต่ละต้นมีค่าดังนี้

$$y_{2d} = A_d \tag{2.23}$$

$$y_{2i} = A_i \tag{2.24}$$

$$y_{1d} = A_d e^{j\theta_d} \tag{2.25}$$

$$y_{1i} = A_i e^{j\theta_i} \tag{2.26}$$

เมื่อ y_{1d} y_{1i} y_{2d} และ y_{2i} คือ สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 2 และสัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศต้นที่ 2 ตามลำดับ A_d คือ ค่าของสัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบสายอากาศ A_i คือค่าของสัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบสายอากาศ ดังนั้น

$$y_2 = y_{2d} + y_{2i} = w_2\left(A_d + A_i\right) \tag{2.27}$$

$$y_1 = y_{1d} + y_{1i} = w_1\left(A_d e^{j\theta_d} + A_i e^{j\theta_i}\right) \tag{2.28}$$

แทนค่าสมการที่ (2.27) และ (2.28) ลงในสมการที่ (2.22) จะได้

$$y_{out} = A_i\left(w_2 + w_1 e^{j\theta_i}\right) + A_d\left(w_2 + w_1 e^{j\theta_d}\right) \tag{2.29}$$

เราต้องการพจน์ของ A_i เท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดให้หมดไปและต้องการพจน์ของ A_d เท่ากับ A_d เพื่อยังคงรักษาสัญญาณที่ต้องการเอาไว้ ดังนั้นต้องทำให้

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_i} = 0 \tag{2.30}$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \tag{2.31}$$

เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.30) เราจะได้

$$w_2 = -w_1 e^{j\theta_i} \tag{2.32}$$

แทนสมการที่ (2.32) ลงใน (2.31) จะได้

$$-w_1 e^{j\theta_i} + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \tag{2.33}$$

$$w_1 \left(e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i} \right) = 1 \tag{2.34}$$

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) ของสายอากาศต้นที่ 1 เท่ากับ

$$w_1 = \frac{1}{\left(e^{j\theta_d} - e^{j\theta_i} \right)} \tag{2.35}$$

เช่นเดียวกันกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.30) เราจะได้

$$w_1 = \frac{-w_2}{e^{j\theta_i}} \tag{2.36}$$

แทนสมการที่ (2.35) ลงใน (2.31) จะได้

$$w_2 - \frac{w_2 e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} = 1 \tag{2.37}$$

$$w_2 \left(1 - \frac{e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} \right) = 1 \tag{2.38}$$

$$w_2 \left(\frac{e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} \right) = 1 \tag{2.39}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 2 เท่ากับ

$$w_2 = \left(\frac{e^{j\theta_i}}{e^{j\theta_i} - e^{j\theta_d}} \right) \tag{2.40}$$

เมื่อแทนค่าสมการ (2.35) และ (2.40) เข้าไปในสมการที่ (2.29) สุดท้ายเราจะได้สัญญาณขาออกเท่ากับ

$$y_{out} = A_d \tag{2.41}$$

จากสมการที่ (2.41) สัญญาณขาออกมีค่าเท่ากับสัญญาณที่ต้องการ แสดงว่าระบบไม่มีสัญญาณแทรกสอดอีกต่อไป ดังนั้นจึงทำให้ระบบสามารถให้สัญญาณที่ดีที่สุดที่มาจากทิศทางที่ต้องการได้

ข้อดีของระบบสายอากาศเก่ง

1) เพิ่มพื้นที่ให้บริการ เนื่องจากมีอัตราขยายที่สูงจากการใช้สายอากาศแถวลำดับ

2) ระบบสายอากาศเก่งสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ดังนั้นจึงทำให้ปัญหาจากสัญญาณแทรกสอดลดน้อยลง

3) มีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดีขึ้น

4) ประหยัดพลังงาน เนื่องจากสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการใช้งานได้และไม่ต้องทำการส่งในทิศทางของผู้ที่ไม่ต้องการใช้งานจึงทำให้ไม่สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

ข้อเสียของระบบสายอากาศเก่ง

1) ระบบสายอากาศเก่งมีราคาต้นทุนในการผลิตสูง

2) สำหรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการติดตั้งสายอากาศแถวลำดับ

ระบบสายอากาศเก่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้ ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น (switched beam systems) และระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว (adaptive antenna systems)

2.4.1 ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นนั้น เป็นสายอากาศที่มีการเลือกลำคลื่นที่ดีที่สุดไปยังสัญญาณที่ต้องการได้ โดยใช้เพียงเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่ถูกกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักไว้แล้ว โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) โดยมีหลักการทำงานดังนี้

1) สวิตช์ลำคลื่นเพื่อตรวจหาทิศทางความแรงของสัญญาณ
2) ตัวเลือกลำคลื่นจะทำการเลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นในทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณแรงที่สุด
3) ใช้ลำคลื่นที่ตัวเลือกลำคลื่นได้ทำการเลือกไว้เมื่อผู้ใช้งานไม่มีการเคลื่อนที่
4) ทำการปรับเปลี่ยนลำคลื่นใหม่เมื่อมีความแรงของสัญญาณมาจากทิศทางอื่นๆ

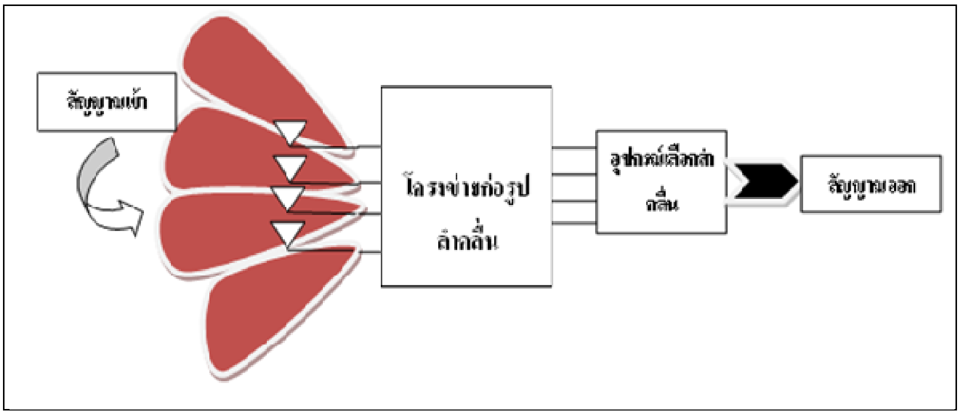
ข้อดีของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

1) ระบบมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบสายอากาศเก่งแบบปรับลำคลื่น
2) ประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนน้อยในกรณีที่ระบบใช้สายอากาศจำนวนไม่มากนัก
3) สามารถติดตามสัญญาณได้รวดเร็วตามอัตราการปรับเปลี่ยนลำคลื่น

ข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

1) มีอัตราการขยายของสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคลื่น
2) ไม่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดที่อยู่ใกล้กับสัญญาณที่ต้องการได้
3) ในการเลือกสัญญาณมีโอกาสผิดพลาด อาจเกิดจากสัญญาณที่เข้ามาไม่ชัดเจน

รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สายอากาศแต่ละต้นจะส่งสัญญาณไปยังโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อทำการถ่วงน้ำหนักเนื่องจากสัญญาณที่มาตกกระทบยังสายอากาศแต่ละต้นมีมุมเฟสที่ต่างกันออกไป และสร้างลำคลื่นหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่แรงที่สุด โดยอาศัยตัวเลือกลำคลื่นทำหน้าที่เลือกลำคลื่นไปยังสัญญาณที่เราต้องการ จึงทำให้สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดได้จากทิศทางของสัญญาณที่เราไม่ต้องการได้ ส่งผลให้ได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการสร้างโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นคือ บัตเลอร์เมตริกซ์ (Butler matrix) ซึ่งจะมีการอธิบายในหัวข้อที่ 2.5.1



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

2.4.2 ระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว

สายอากาศประเภทนี้สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ตลอดเวลา โดยมีหลักการทำงานของสายอากาศประเภทนี้คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีการถ่วงน้ำหนัก โดยอัลกอริทึมแบบรับตัว (adaptive algorithm) ทำหน้าที่คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณแล้วส่งค่ากลับไปที่ตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 โดยระบบจะทำงานแบบวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้

ข้อดีของสายอากาศเก่งแบบปรับตัว

1) มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอด (Signal to Noise Ratio : SNR) ที่ดี

2) สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบได้ดีกว่าระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

ข้อเสียของสายอากาศเก่งแบบปรับตัว

1) มีความซับซ้อนสูงกว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น

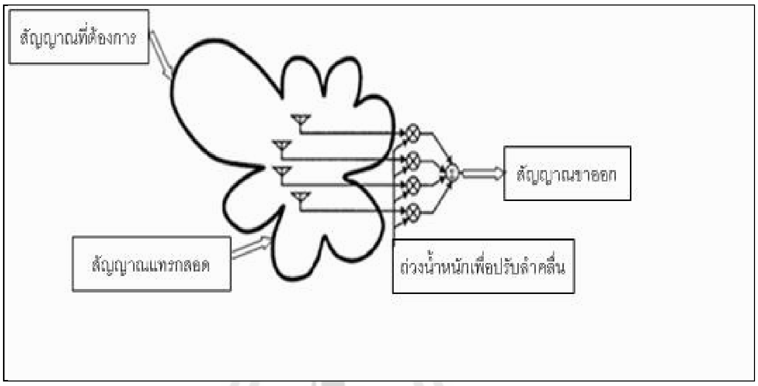
2) ต้องการสัญญาณที่แน่นอนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการหันลำคลื่นหลักไปยังสัญญาณที่ต้องการ

3) ต้องการหน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูง

4) มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนมาก

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นได้อธิบายถึงหลักการทำงานและข้อดีข้อเสียของระบบสายอากาศเก่งทั้งแบบสวิตช์ลำคลื่นและแบบปรับตัวไปแล้ว พบว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นมีความซับซ้อนในการสร้างลำคลื่นและหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัว

นอกจากนี้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นยังไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูงก็สามารถสร้างและหันลำคลื่นได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้าง และติดตั้งสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัว แต่สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นก็ยังมีข้อเสียอยู่ในเรื่องของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นจึงเป็นสายอากาศที่น่าสนใจที่จะกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้น โดยจะนำเสนอเทคนิคการหันลำคลื่นของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นในหัวข้อที่ 2.5



รูปที่ 2.7 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว

2.5 เทคนิคการหันลำคลื่น

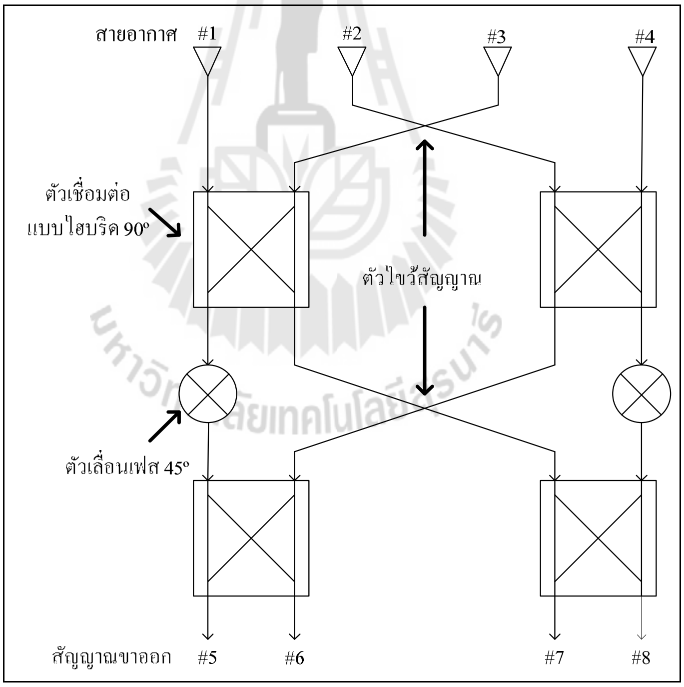
จากที่กล่าวมาข้างต้นข้อดีของระบบสายอากาศเก่งที่สามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ โดยการหันลำคลื่นของระบบสายอากาศเก่งนั้นทำได้หลายเทคนิค เช่น การเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ การลัดวงจรหรือการเปิดวงจร แต่วิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในระบบสายอากาศเก่งคือวิธีแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเทคนิคของบัตเลอร์เมตริกซ์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีต้นทุนการผลิตต่ำซึ่งอาศัยการกัดลายวงจรลงบนแผงวงจรพิมพ์เท่านั้น ดังนั้นจึงเหมาะกับการนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นของงานวิจัยนี้

2.5.1 เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์

ในระบบสายอากาศเก่งประเภทสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นนี้จะมีตัวถ่วงน้ำหนักเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เพื่อที่จะทำหน้าที่เป็นตัวปรับลำคลื่นให้ชี้ไปยังทิศทางที่ต้องการ โดยตัวถ่วงน้ำหนักที่เราได้กล่าวถึงนั้นเรียกว่า เครือข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) นั่นเอง ซึ่งสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นนั้นจะมีเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นเป็นตัวปรับลำคลื่นเพื่อชี้ไปในทิศทางที่ต้องการแบบเจาะจง เครือข่ายก่อรูปลำคลื่นที่กล่าวถึงนั้นอาจมีหลายวิธี

แต่วิธีที่นิยมในระบบสายอากาศเก่งก็คือ วิธีแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Moody, H. (1964) ซึ่งวิธีนี้จะใช้ได้กับสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear array) ที่มีขนาด 4×1 เท่านั้น

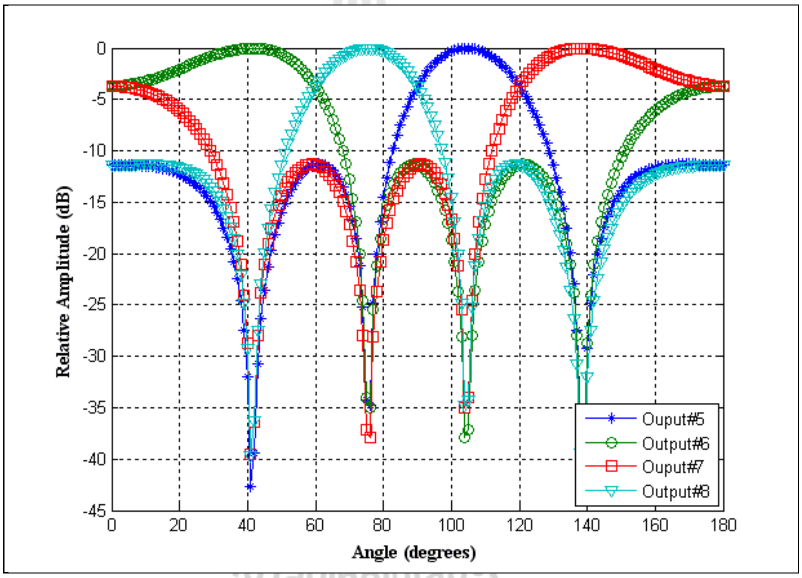
รูปที่ 2.8 ได้แสดงถึงภาพรวมของบัตเลอร์เมตริกซ์ ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแบบแถวลำดับจำนวน 4 ต้น แต่ละต้นวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน เมื่อสัญญาณตกกระทบมาที่สายอากาศ สัญญาณจะถูกส่งผ่านไปที่ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริดจ์ 90º (90º hybrid coupler) จำนวน 4 ตัว ตัวไขว้สัญญาณ (cross over) จำนวน 1 ตัว และตัวเลื่อนเฟส 45º (phase shift 45º) จำนวน 2 ตัว ตามที่ได้แสดงในรูปที่ 2.8 ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงความต่างเฟสระหว่างสายอากาศทั้ง 4 ต้นและสัญญาณขาออกทั้ง 4 พอร์ตซึ่งสัมพันธ์กับทิศทางของพูคลื่นหลัก และรูปที่ 2.9 ให้เห็นถึงแบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 4 ทิศทางที่ได้จากการจำลองผลผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งมีการชี้ทิศของลำคลื่นหลักไปที่ 42º 71º 109º และ 138º ซึ่งสอดคล้องกับค่าในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์

ตารางที่ 2.2 ทิศทางของพูคลื่นหลัก ความต่างเฟส และเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์

	สายอากาศ #1	สายอากาศ #2	สายอากาศ #3	สายอากาศ #4	ทิศทางของพูหลัก	ความต่างเฟส
สัญญาณออก #5	-45°	-90°	-135°	-180°	109°	-45°
สัญญาณออก #6	-135°	0°	-225°	-90°	42°	135°
สัญญาณออก #7	-90°	-225°	0°	-135°	138°	-135°
สัญญาณออก #8	-180°	-135°	-90°	-45°	71°	45°



รูปที่ 2.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 4 ลำคลื่นที่ได้จากการก่อรูปลำคลื่นจากบัตเลอร์เมตริกซ์

2.5.1.1 ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90°

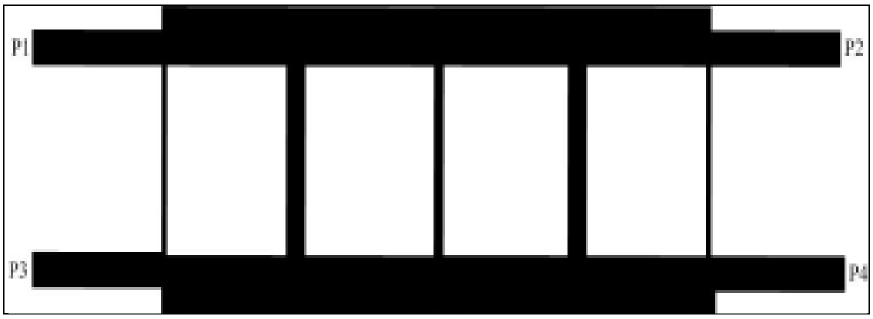
ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° คืออุปกรณ์เชื่อมต่อเกี่ยวกับทิศทาง ทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามายังพอร์ตอินพุต และส่งออกไปยังพอร์ตเอาต์พุตอย่างเท่ากัน โดยพอร์ตเอาต์พุตทั้งสองจะมีความต่างเฟสกัน 90° พอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตอินพุตจะเป็นพอร์ตแยก เช่นเมื่อสัญญาณถูกส่งเข้ามายังพอร์ตที่ 1 สัญญาณจะถูกส่งออกที่พอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 4 อย่างละเท่าๆ กัน มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของกำลังเดิม 3 dB โดยสัญญาณที่พอร์ตทั้ง 2 นี้มีความต่างเฟสกัน 90° พอร์ตที่ 3 เป็นพอร์ตแยก สัญญาณจะออกน้อยมากๆ ประมาณว่าได้ว่าเป็นศูนย์ และในลักษณะเดียวกัน ถ้าป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตอื่น กำลังที่ออกจากด้านตรงข้ามจะถูกแบ่งเหลือ

ครึ่งหนึ่ง แต่พอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับสัญญาณจะไม่ออกเสมือนว่าเป็นศูนย์ ไฮบริดจ์ชนิดนี้สร้างมาจากไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งวิธีการออกแบบใช้วิธีการออกแบบจากงานวิจัยของ Collado C., Grau A., and De Flaviis, F. (2006) โดยจะแสดงการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ถัดไป

รูปที่ 2.10 โครงสร้างตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90°

2.5.1.2 ตัวไขว้สัญญาณ

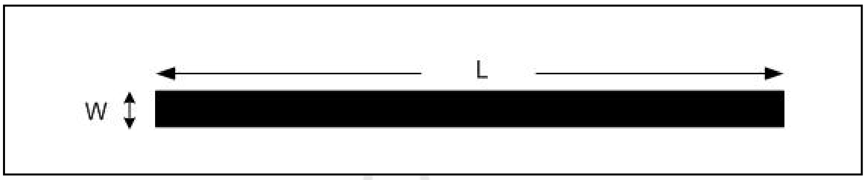
ตัวไขว้สัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกสัญญาณ โดยหน้าที่หลักของตัวไขว้สัญญาณ คือ จะทำหน้าที่ในการไขว้สัญญาณที่ถูกส่งเข้ามา เช่น เมื่อมีสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 1 ไมโครสตริปแบบไขว้สัญญาณจะบังคับให้สัญญาณไปออกที่พอร์ตที่ 4 มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วนที่พอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 เป็นพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออกหรือให้สัญญาณออกน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และในทำนองเดียวกันเมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่พอร์ตที่ 2 ไมโครสตริปแบบไขว้จะบังคับให้สัญญาณไปออกที่พอร์ตที่ 3 มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วนที่พอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 4 เป็นพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออกหรือสัญญาณออกน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยแสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างตัวไขว้สัญญาณ

2.5.1.3 ตัวเลื่อนเฟส 45°

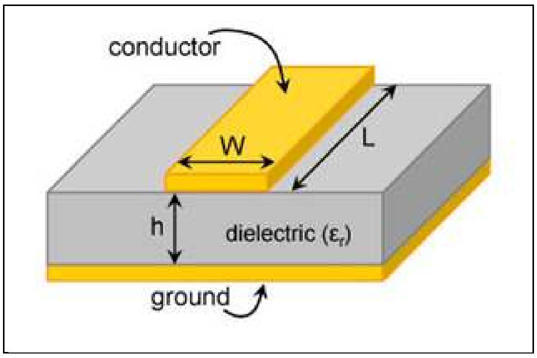
ตัวเลื่อนเฟส 45° ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสัญญาณ โดยมีหลักการการทำงานคือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบที่สายอากาศสัญญาณจะถูกส่งไปยังตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณ จากนั้นสัญญาณอาจผ่านตัวเลื่อนเฟส 45° แล้วจึงถูกส่งผ่านตัวไขว้สัญญาณและตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริดจ์ 90° อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นวงจรเลื่อนเฟสเป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งในการทำงานร่วมกันของวงจรบัตเลอร์เมตริกซ์ โดยแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวเลื่อนเฟส 45°

2.6 ทฤษฎีการส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปประกอบไปด้วยตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และระนาบกราวด์ โดยมีไดอิเล็กตริกอยู่ตรงกลาง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13 โดยค่าไดอิเล็กตริกนี้จะอยู่ตรงกลางระหว่างตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่นและระนาบกราวด์ ในการออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนี้จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น (*W*) ความสูงของฐานรองรับ (*h*) ความยาวของแผ่น (*l*) ความหนาของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และค่าของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ (ε_r) เป็นต้น



รูปที่ 2.13 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไม่ได้บรรจุอยู่ในชั้นของฐานรองรับ แต่การแผ่กระจายคลื่นจะแผ่กระจายคลื่นออกไปข้างนอกของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 ดังนั้นการแผ่กระจายในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะไม่ใช่โหมด TEM แต่จะเป็น Quasi - TEM ความเร็วเฟสของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}} \tag{2.42}$$

เมื่อ ค่าของ c คือ ความเร็วแสง

ค่าของ ε_e คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล

สมการหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.43) และหาค่าอิมพิแดนซ์คุณลักษณะ (characteristics impedance : Z_0) ได้จากสมการที่ (2.44)

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}}\right) \tag{2.43}$$

$$Z_0 = \begin{cases} \dfrac{60}{\varepsilon_e}\ln\left(\dfrac{8h}{W} + \dfrac{W}{4h}\right) & ;\dfrac{W}{h} < 1 \\ \dfrac{120}{\sqrt{\varepsilon_e}\left(\dfrac{W}{h} + 1.393\right) + 0.667\ln\left(\dfrac{W}{h} + 1.444\right)} & ;\dfrac{W}{h} \geq 1 \end{cases} \tag{2.44}$$

โดยที่ W คือ ความกว้างของสายไมโครสตริป

ε_r คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ

h คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง

จากนั้นจะมาคำนวณหาความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.45)

$$\frac{W}{h}=\begin{cases}\dfrac{8e^{A}}{e^{2A}-2} & ;\dfrac{W}{h}<2\\ \dfrac{2}{\pi}\left[B-1-\ln(2B-1)+\dfrac{\varepsilon_r-1}{2\varepsilon_r}\left\{\ln(B-1)+0.39-\dfrac{0.61}{\varepsilon_r}\right\}\right] & ;\dfrac{W}{h}\geq 2\end{cases} \tag{2.45}$$

เมื่อ

$$A=\frac{Z_0}{60}\sqrt{\frac{\varepsilon_r+1}{2}}+\frac{\varepsilon_r-1}{\varepsilon_r+1}\left(0.23+\frac{0.11}{\varepsilon_r}\right) \tag{2.46}$$

$$B=\frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.47}$$

เราจะใช้ A ก็ต่อเมื่อนำค่า A ที่ได้ไปแทนค่าในสูตร (2.45) แล้วได้ $\frac{w}{h}<2$ ถ้าในกรณีที่ $\frac{w}{h}>2$ ให้ใช้ B และคำนวณหาความยาวของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปได้จากสมการที่ (2.48)

$$l=\frac{90^{\circ}\left(\dfrac{\pi}{180^{\circ}}\right)}{\sqrt{\varepsilon_e}k_0} \tag{2.48}$$

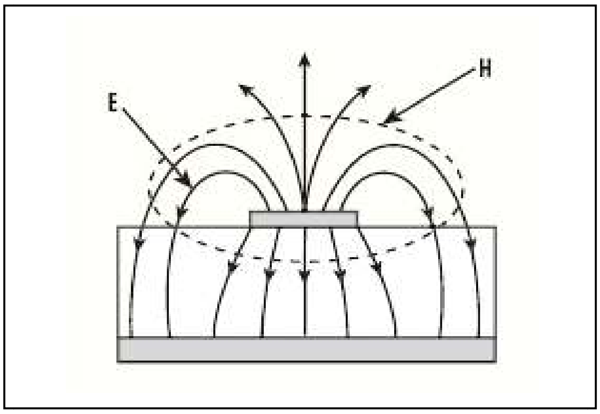
เมื่อ k_0 สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$k_0=\frac{2\pi f}{c} \tag{2.49}$$

โดยที่ k_0 คือ ค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่นในอากาศ

f คือ ความถี่

ผลที่ได้จากการคำนวณ คือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น (W) ความสูงของฐานรองรับ (h) ความยาวของแผ่น (l) ความหนาของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น สามารถนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปได้



รูปที่ 2.14 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

2.7 ผลกระทบของแถบความถี่กับระบบสายอากาศเก่ง

ระบบสายอากาศเก่งที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้งานกับสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบ (narrowband) แต่เนื่องจากผู้ใช้งานในปัจจุบันมีความต้องการระบบการสื่อสารแบบไร้สายในการส่งภาพและเสียงที่มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น รวมทั้งยังต้องการการรับส่งข้อมูลที่เร็วยิ่งขึ้น ซึ่งระบบการสื่อสารแบบไร้สายนั้นจะต้องสามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้าง (wideband) โดยการนิยามแถบความถี่หรือแบนด์วิดท์ (bandwidth) จะนิยามจาก อัตราส่วนของแถบความถี่ที่ใช้งานกับความถี่กลาง หรือที่เรียกว่า เศษส่วนแถบความถี่ (Fractional Bandwidth : FB) ดังสมการที่ (2.50)

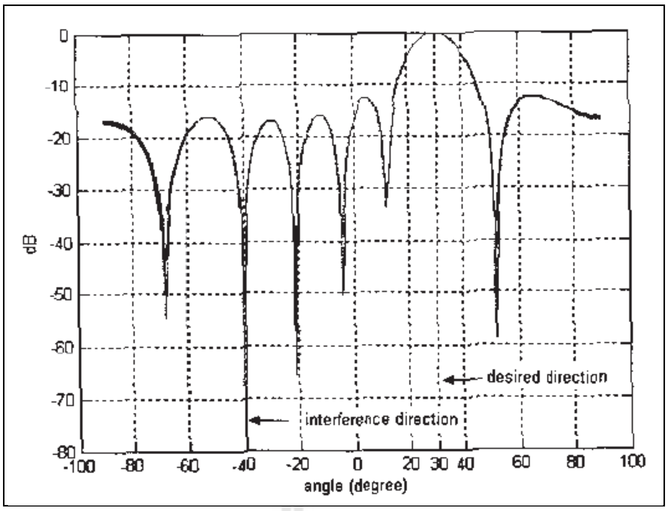
$$FB = \frac{f_h - f_l}{(f_h + f_l)/2} \times 100\% \quad (2.50)$$

เมื่อ f_h และ f_l แทนความถี่สูงสุด และความถี่ต่ำสุดของความถี่ที่ใช้งาน สำหรับสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบจะมีค่า *FB* เพียงเล็กน้อย คือน้อยกว่า 1% ส่วนสัญญาณจะถูกเรียกว่ามีแถบความถี่กว้างก็ต่อเมื่อคำนวณค่า *FB* แล้วมีค่าระหว่าง 1% ถึง 50 % ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Ghavami, M. (2002)

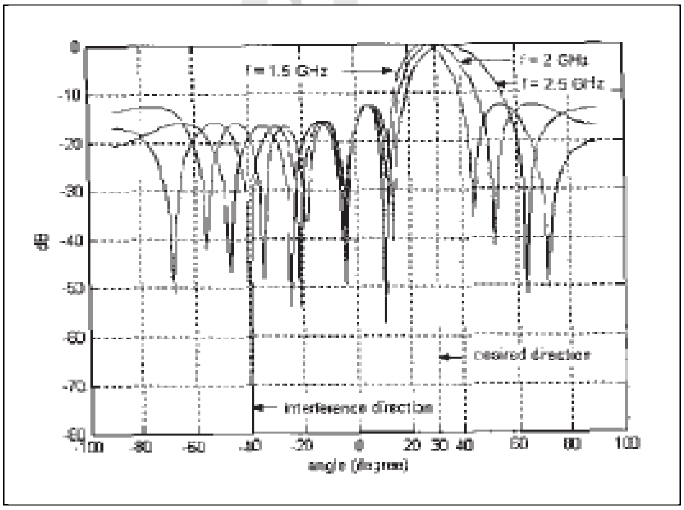
รูปที่ 2.15 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศเก่งที่ใช้สายอากาศแถวลำดับ 7 ต้น และสายอากาศแต่ละต้นมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางและวางห่างกันเท่ากับครึ่งความยาวคลื่นที่ทำงานในแถบความถี่แคบที่ความถี่ 2 GHz มีทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเท่ากับ 30º และสัญญาณแทรกสอด -40º แต่เมื่อได้นำมาใช้งานกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างแสดงดังรูปที่ 2.16 ตั้งแต่แถบความถี่ 1.5 - 2.5 GHz ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่าความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นไปใน

ทิศทางที่ต้องการคือมุมที่ 30º และหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดคือมุมที่ -40º ความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นของระบบลดลงเมื่อสัญญาณมีแถบความถี่กว้างขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากความคลาดเคลื่อนของทิศทางของลำคลื่นหลักซึ่งควรจะคงที่อยู่ที่ตำแหน่ง 30º หรือแม้กระทั่งตำแหน่งจุดศูนย์ซึ่งควรอยู่ที่ตำแหน่ง -40º ตลอดทั้งแถบความถี่ที่ใช้งาน จากผลการทดลองที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Uthansakul, M., and Bialkowski, M.E.(2004) ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเราไม่สามารถนำเอาระบบสายอากาศเก่งที่ทำงานในแถบความถี่แคบมาใช้งานร่วมกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างได้

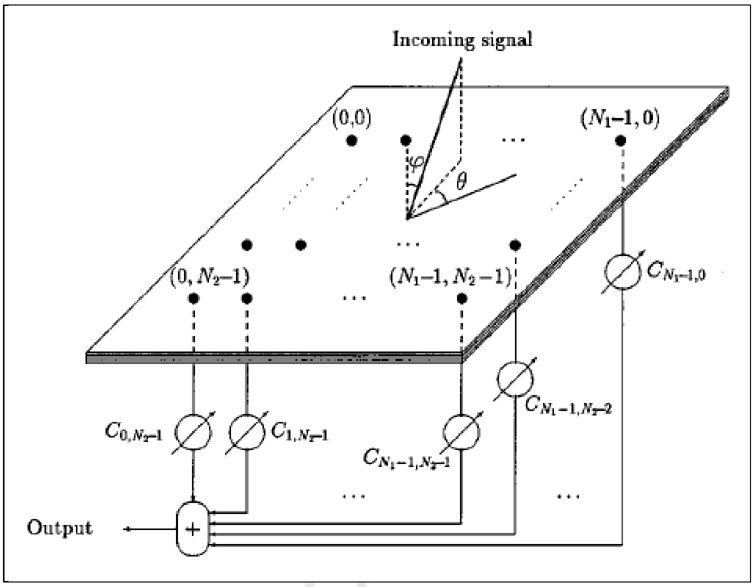
จากงานวิจัยของ Ghavami, M. (2002) เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับสายอากาศเก่งที่ใช้งานกับแถบความถี่กว้างโดยใช้สายอากาศแถวลำดับแบบ 4×4 แบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้วิธีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวในการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยวิธีนี้จะอาศัยหลักการของผลการแปลงฟูเรียร์ผกผันของสัญญาณเวลาดิสครีต (TDFT) มาประยุกต์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักเมื่อสัญญาณตกกระทบที่สายอากาศแถวลำดับ สัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศแต่ละต้นจะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยตัวถ่วงน้ำหนัก และถูกรวมกันออกเป็นสัญญาณขาออก ซึ่งได้จำลองผลแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งในช่วงของความถี่ทั้งหมดสามแถบความถี่ คือ แถบแรกที่ความถี่ 1.61 - 2.69 GHz แถบที่สองที่ความถี่ 3.49 - 4.21 GHz และแถบที่สามที่ความถี่ 4.89 - 5.61 GHz ดังแสดงรูปที่ 2.18 ถึง 2.20 จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละความถี่ไม่มีความคลาดเคลื่อนของทิศทางของลำคลื่นหลักซึ่งทำให้ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพของระบบ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านระบบค่อนข้างมีขนาดใหญ่และซับซ้อนยากต่อการออกแบบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอวิธีการออกแบบตัวคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณแล้วนำมาประกอบรวมกันเป็นเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่สามารถรองรับสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์



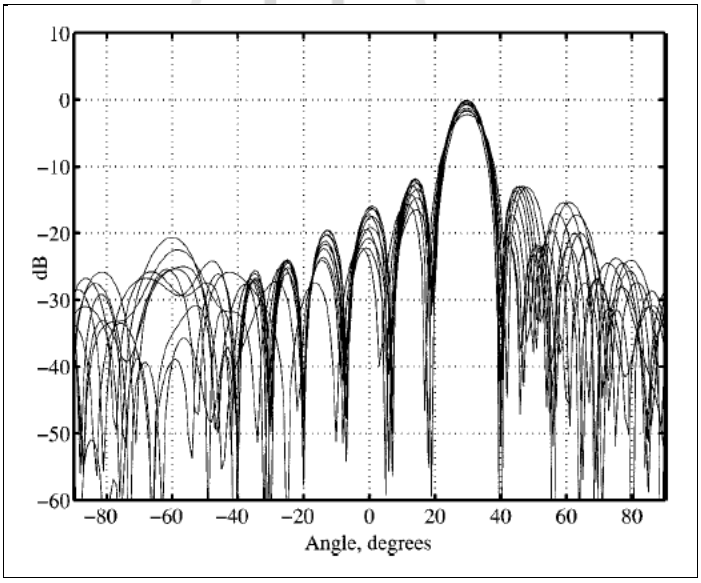
รูปที่ 2.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ใช้งานความถี่แถบแคบที่ 2 GHz



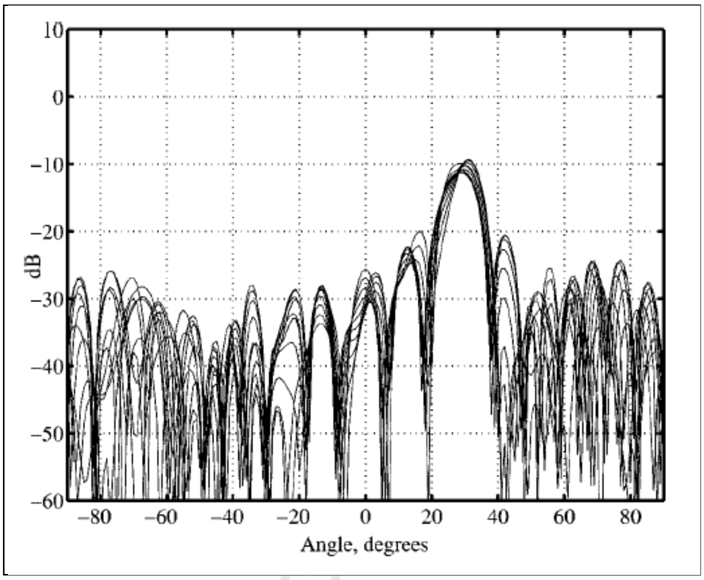
รูปที่ 2.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ใช้งานความถี่แถบกว้างที่ 1.5 - 2.5 GHz



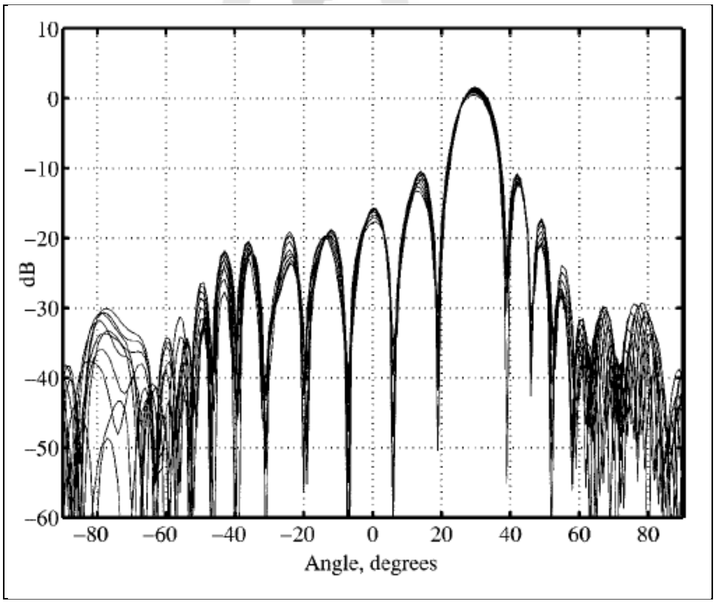
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้งานในแถบความถี่กว้าง
โดยอาศัยการประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 1.6 - 2.69 GHz



รูปที่ 2.19 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 3.49 - 4.21 GHz



รูปที่ 2.20 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 4.89 - 5.61 GHz

2.8 กล่าวสรุป

จากเนื้อหาข้างต้นในบทนี้จะเห็นได้ว่าผู้ใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันต้องการการส่งข้อมูล ภาพและเสียงที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้นและต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วยิ่งขึ้นซึ่งไวแมกซ์ก็เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองในความต้องการของผู้ใช้งานได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านของสัญญาณแทรกสอดจึงได้นำระบบสายอากาศเก่งมาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอีกด้านหนึ่งของระบบสายอากาศเก่งคือ สายอากาศเก่งได้ถูกออกแบบมาให้ใช้ได้ดีในแถบความถี่แคบหรือได้เพียงความถี่เดียวเท่านั้น แต่ระบบไวแมกซ์นั้นมีความถี่ทั้งหมดสามแถบความถี่ อย่างไรก็ตามเมื่อนำเอาระบบสายอากาศเก่งแบบเดิมที่ทำงานในแถบความถี่แคบมาทำงานกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างขึ้น ทำให้ระบบสูญเสียความสามารถในการก่อรูปลำคลื่น ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของการส่งข้อมูลลดลงตามไปด้วย ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตตริกซ์ที่สามารถรองรับได้ทั้งหมดสามแถบความถี่มาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวในข้างต้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
การออกแบบระบบต้นแบบ

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณที่ใช้งานในระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น เพื่อนำไปใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีไวแมกซ์แบบสามแถบความถี่ ซึ่งการออกแบบระบบต้นแบบนี้เพื่อให้ทำงานในแถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz ในการออกแบบดังกล่าวจะใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองผล

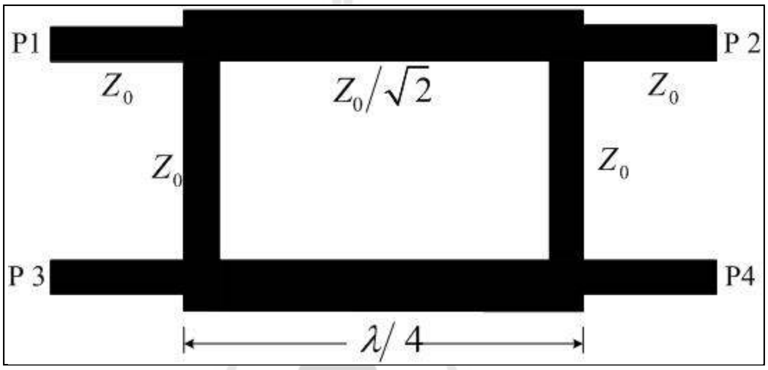
3.2 การออกแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น

จากที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 เราสามารถสร้างเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นโดยนำบัตเลอร์เมตริกซ์มาใช้ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการออกแบบแค่ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณเท่านั้น ซึ่งนำมากัดลายวงจรบนแผงวงจรพิมพ์แบบ FR4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ε_r เท่ากับ 4.8 และมีความหนาของแผ่นไดอิเล็กตริก d เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร โดยจะแสดงวิธีการออกแบบดังต่อไปนี้

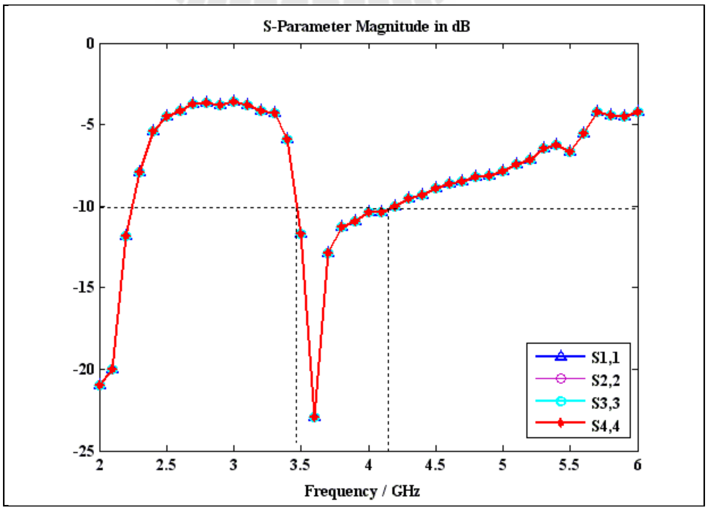
3.2.1 การออกแบบตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º

จากที่กล่าวมาข้างต้นการออกแบบวงจรเชื่อมแบบไฮบริดจ์ 90º นั้นต้องอาศัยหลักการในการออกแบบโดยใช้ทฤษฎีสายส่งสัญญาณอ้างอิงมาจากหนังสือของ David M. Pozar (1998) โดยวงจรเชื่อมแบบไฮบริดจ์ 90º คือ อุปกรณ์เชื่อมต่อเกี่ยวกับทิศทางทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามายังพอร์ตขาเข้าและส่งออกไปยังพอร์ตขาออกอย่างเท่ากัน โดยที่พอร์ตขาออกทั้งสองจะมีความต่างเฟสกัน 90º พอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าจะเป็นพอร์ตแยกสัญญาณ เช่น เมื่อสัญญาณถูกส่งเข้ามาที่พอร์ต 1 สัญญาณจะถูกส่งเข้าไปที่พอร์ต 2 และพอร์ต 4 อย่างละเท่าๆ กัน โดยสัญญาณที่พอร์ตทั้งสองมีความต่างเฟสกัน 90º พอร์ตที่ 3 จะเป็นพอร์ตแยกโดดเดี่ยว (isolation port) ซึ่งเป็นพอร์ตที่ไม่ควรจะมีสัญญาณออกเลย ไฮบริดจ์ชนิดนี้มักสร้างมาจากไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นโครงสร้างของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบความถี่แคบ สังเกตเห็นได้ว่าวงจรเชื่อมชนิดนี้จะสมมาตรกันแต่ละพอร์ตสามารถใช้เป็นพอร์ตขาเข้าได้ และพอร์ตขาออกจะเป็นพอร์ตที่อยู่ตรงกันข้ามกับพอร์ตที่เป็นพอร์ตขาเข้าเสมอ ส่วนพอร์ตแยกเป็นพอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าเช่นกัน

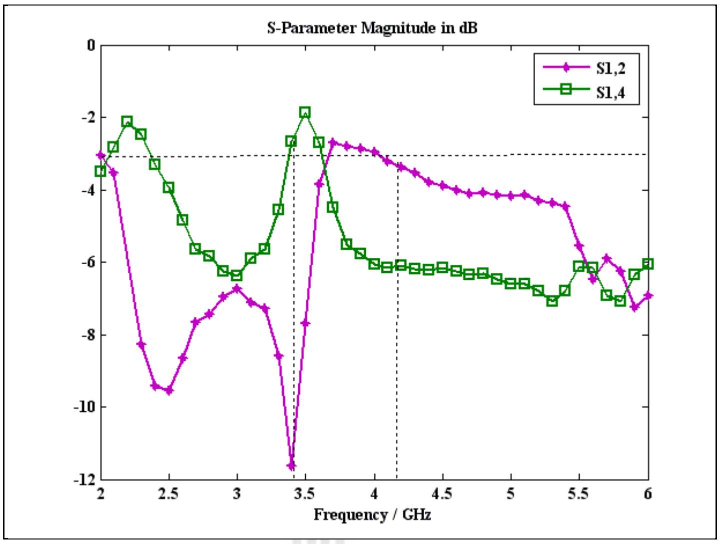
จากรูปที่ 3.2 แสดงถึงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB ที่อยู่ในช่วงความถี่ 3.48 - 4.1 GHz รูปที่ 3.3 แสดงถึงค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ 3.48 - 4.1 GHz ความสามารถในการส่งสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไป 2 และ 4 มีค่าไม่ใกล้เคียงกัน มีแค่ความถี่ที่ 3.6 GHz เท่านั้นที่สามารถส่งผ่านได้ เนื่องจากมีค่าค่อนข้างที่จะใกล้เคียงกัน ซึ่งในความเป็นจริงน่าจะสามารถส่งผ่านได้ตั้งแต่ความถี่ 3.48 - 4.1 GHz นอกจากนั้นในรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าจะไม่มีสัญญาณส่งผ่านจากพอร์ตที่ 1 ไปพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 2 ไปพอร์ตที่ 4 ที่ความถี่ 3.48 - 4.1 GHz แต่ผลที่ได้นั้นกลับไม่มีสัญญาณส่งผ่านที่ความถี่ 3.48 - 3.65 GHz เท่านั้น



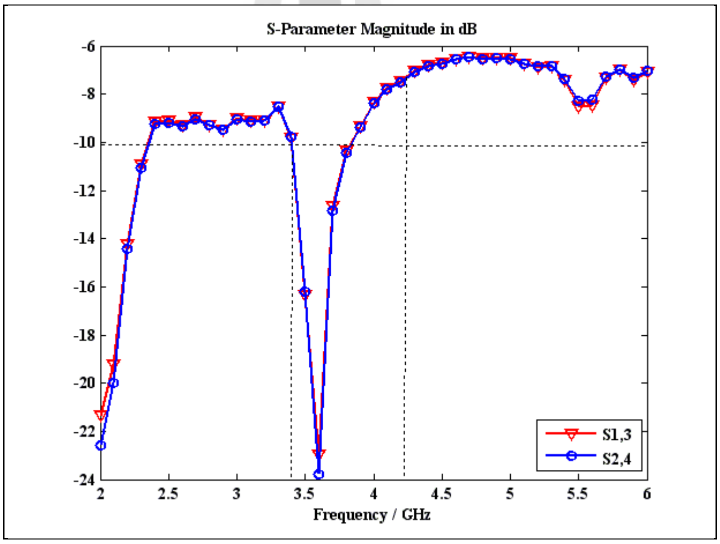
รูปที่ 3.1 โครงสร้างตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ



รูปที่ 3.2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° แบบความถี่แคบ



รูปที่ 3.3 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ



รูปที่ 3.4 ความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ

จากการวิเคราะห์ผลเราจะเห็นได้ว่าเราไม่สามารถนำตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบมาใช้ในการออกแบบได้เลย เราจึงต้องทำการออกแบบโดยใช้ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบแถบความถี่กว้าง ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบแถบความถี่กว้าง อย่างเช่น ในงานวิจัยของ Ibrahim, S.Z., and Bialkowski, M.E. (2009) และงานวิจัยของ Nedil, M., Denidni, T.A., and Talbi, L. (2006) การออกแบบตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° มีวัสดุหลายชั้นโดยต้องมีการเจาะช่องร่วมระหว่างชั้น (slot - coupled multi section)

ซึ่งมีข้อเสียตรงที่ในการสร้างนั้นจะยากกว่าการใช้วัสดุที่ทำแบบชั้นเดียว นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Chun, Y-H. (2006) คือ เป็นการใช้วงจรอินทริเกรต (monolithic-microwave integrated-circuit : MMIC) เพื่อทำให้แถบความถี่กว้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการเพิ่มสตับในลายวงจร ซึ่งทำให้เกิดความซับซ้อนในการออกแบบ นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ทำการออกแบบที่สองแถบความถี่ในงานวิจัยของ Hsu, C-L. (2010) ซึ่งใช้เทคนิคที่ง่ายต่อการสร้างโดยใช้วัสดุชั้นเดียว แต่เมื่อลองนำมาใช้ออกแบบในงานวิจัยของผู้วิจัย พบว่าช่วงความถี่ที่ได้ไม่กว้างมากพอ อีกวิธีหนึ่งในงานวิจัยของ Liou, C-Y. and Wu, M-S. (2009) เป็นการออกแบบที่สามแถบความถี่โดยใช้สตับเข้ามาช่วยในการออกแบบแต่ก็ยังมีข้อจำกัดตรงที่โครงสร้างและลายวงจรค่อนข้างยากและไม่มีสมการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ออกแบบที่ความถี่อื่นๆ ได้

ดังนั้นเพื่อให้ตอบสนองทางวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้เราจึงได้นำเสนอวิธีการดัดแปลงวิธีการออกแบบตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º ให้สามารถครอบคลุมทั้งสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์ โดยใช้วิธีการออกแบบที่อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Collado C., Grau A., and De Flaviis, F. (2006) เนื่องจากมีความง่ายในการออกแบบมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการสร้างด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยเรากำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

Z_0 คือ ค่าอิมพิแดนซ์ของสายนำสัญญาณของขา l_0

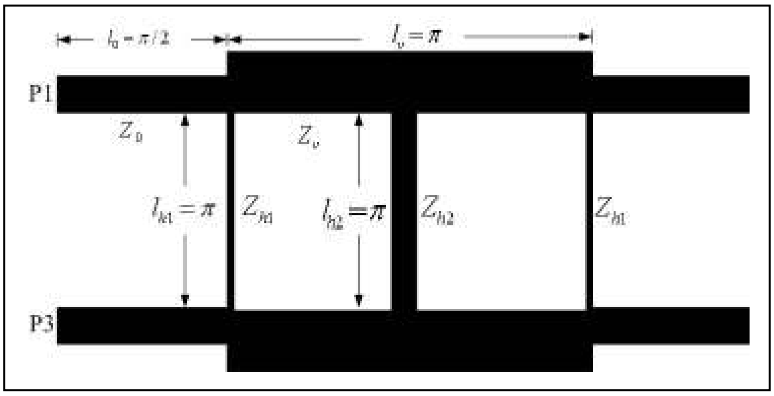
Z_v คือ ค่าอิมพิแดนซ์ของสายนำสัญญาณของขา l_v

Z_{h1} คือ ค่าอิมพิแดนซ์ของสายนำสัญญาณของขา l_{h1}

Z_{h2} คือ ค่าอิมพิแดนซ์ของสายนำสัญญาณของขา l_{h2}

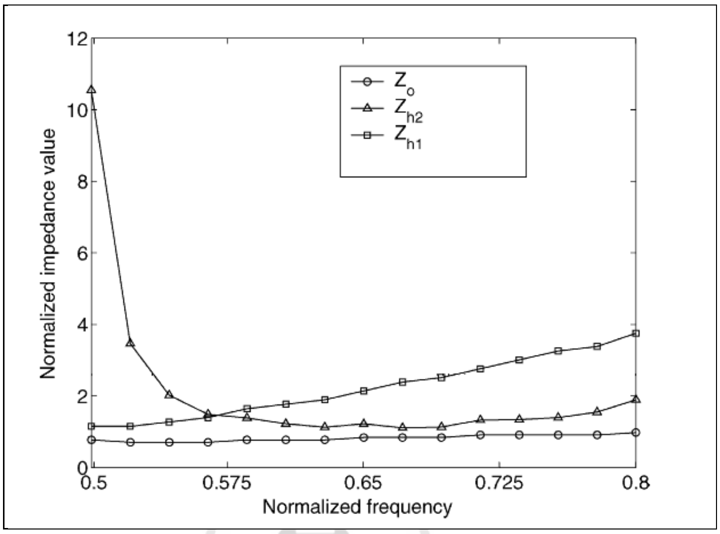
ซึ่ง $l_{h1} = l_{h2}$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.5 โครงสร้างตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

ในการออกแบบเราทำการหาค่า Z อิมพิแดนซ์ต่างๆ ได้จากกราฟในรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการหาค่าของ Z_{h1} Z_{h2} และ Z_v โดยอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Collado C., Grau A., and De Flaviis, F. (2006) โดยเราจะออกแบบที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz ดังนั้นเราสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงค่าของ Z_{h1} Z_{h2} และ Z_v ที่อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Collado C., Grau A., and De Flaviis, F.(2006)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทำการคำนวณหาค่า Ω_1 เพื่อนำไปเปรียบเทียบหาค่าของ Z_{h1} Z_{h2} และ Z_v จากกราฟในรูปที่ 3.6 หาได้จาก

$$\Omega_1 = \frac{f_1}{f_0} \tag{3.1}$$

และ

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2} \tag{3.2}$$

เมื่อ f_0 คือ ความถี่กลาง

f_1 คือ ความถี่กลางของแถบความถี่ช่วงแรก

f_2 คือ ความถี่กลางของแถบความถี่ช่วงที่สอง

กำหนดให้แถบความถี่ช่วงความถี่ 2.5 - 2.69 GHz และ 3.4 - 3.6 GHz เป็นความถี่ในช่วงแรก และแถบความถี่ 5.725 - 5.850 GHz เป็นความถี่ในช่วงที่สอง จากสมการที่ (3.2) จะได้

$$f_0 = \frac{3+5.8}{2} = 4.4$$

เมื่อได้ค่า f_0 = 4.4 แล้วนำไปแทนค่าใน (3.1) เพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบในกราฟในรูปที่ 3.6

$$\Omega_1 = \frac{3}{4.4} = 0.68$$

แล้วนำค่า 0.68 ไปเทียบหาค่า Z_{h1} Z_{h2} และ Z_v ซึ่งจะได้ค่าดังนี้

$Z_v = 0.9 = 0.9 \times 50 = 45\Omega$

$Z_{h1} = 2.4 = 2.4 \times 50 = 120\Omega$

$Z_{h2} = 1.1 = 1.1 \times 50 = 55\Omega$

$Z_0 = 50\Omega$

เมื่อได้ค่า Z พารามิเตอร์ครบแล้วเราจึงทำการคำนวณหาความกว้างของไมโครสตริป (W) จากสมการ (3.3)

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \dfrac{8e^{A}}{e^{2A}-2} & ; \dfrac{W}{d} < 2 \\ \dfrac{2}{\pi}\left[B-1-\ln(2B-1)+\dfrac{\varepsilon_r-1}{2\varepsilon_r}\left\{\ln(B-1)+0.39-\dfrac{0.61}{\varepsilon_r}\right\}\right] & ; \dfrac{W}{d} \geq 2 \end{cases} \quad (3.3)$$

เมื่อ 1) $Z_0 = 50\Omega$ จาก

$$A = \frac{Z_0}{60}\sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}\left(0.23 + \frac{0.11}{\varepsilon_r}\right) \tag{3.4}$$

แทนค่าจะได้ $A = \frac{50}{60}\sqrt{\frac{4.8+1}{2}} + \frac{4.8-1}{4.8+1}\left(0.23 + \frac{0.11}{4.8}\right) = 1.582$

นำค่า A ที่ได้แทนค่าลงใน (3.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^{1.582}}{e^{2(1.582)} - 2} = 1.796$$

จะเห็นได้ว่า $\frac{W}{d} < 2$ เป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น

$W = d(1.796) = (1.6)(1.796) = 2.87 \approx 3$ มิลลิเมตร

จาก
$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}}\right) \tag{3.5}$$

เมื่อแทนค่าจะได้

$$\varepsilon_e = \frac{4.8+1}{2} + \frac{4.8-1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1+12(1.6)/3}}\right) = 3.584$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

ทำการหาค่าความยาวของ Z_0 จากสมการ (3.6)

จาก $$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_e}(f)} \tag{3.6}$$

$$=\frac{3\times10^{8}}{\sqrt{3.584}(4.4\times10^{9})}=36.0 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น l_0 เท่ากับ

$$\frac{\lambda}{4}=\frac{36.01}{4}=9.0025 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อ 2) Z_v= 45Ω จาก

$$B=\frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3.7}$$

แทนค่าในสมการ (3.7) จะได้

$$B=\frac{377\pi}{2(45)\sqrt{4.8}}=6.006$$

จาก $$\frac{W}{d}=\frac{2}{\pi}\left[B-1-\ln(2B-1)+\frac{\varepsilon_r-1}{2\varepsilon_r}\left\{\ln(B-1)+0.39-\frac{0.61}{\varepsilon_r}\right\}\right] \qquad ;\frac{W}{d}>2$$

นำค่า B ที่ได้แทนลงในสมการที่ (3.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\frac{W}{d}=\frac{2}{\pi}\left[6.006-1-\ln(2(6.006)-1)+\frac{4.8-1}{2(4.8)}\left\{\ln(6.006-1)+0.39-\frac{0.61}{4.8}\right\}\right]$$

$\frac{W}{d}=2.138$; $\frac{W}{d}>2$ จะเห็นได้ว่าเป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น

$$W=d(2.138)=(1.6)(2.138)=3.6 \text{ มิลลิเมตร}$$

จากสมการ (3.5) แทนค่าจะได้

$$\varepsilon_e = \frac{4.8+1}{2} + \frac{4.8-1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1+12(1.6)/2.138}}\right) = 3.5014$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

จากสมการที่ (3.6) แทนค่าหาความยาวของ Z_v จะได้

$$\lambda = \frac{3\times10^8}{\sqrt{3.5014}(4.4\times10^9)} = 36 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น l_v เท่ากับ

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{36}{2} = 18 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อ 3) $Z_{h1} = 120\Omega$

จากสมการที่ (3.4) แทนค่าจะได้

$$A = \frac{120}{60}\sqrt{\frac{4.8+1}{2}} + \frac{4.8-1}{4.8+1}\left(0.23+\frac{0.11}{4.8}\right) = 3.571$$

นำค่า A ที่ได้แทนค่าลงใน (3.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^{3.571}}{e^{2(3.571)}-2} = 0.2253$$

จะเห็นได้ว่า $\frac{W}{d} < 2$ เป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น

$$W = d(0.2253) = (1.6)(0.2253) = 0.36 \text{ มิลลิเมตร}$$

จากสมการที่ (3.5) เมื่อแทนค่าจะได้

$$\varepsilon_e = \frac{4.8+1}{2} + \frac{4.8-1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1+12(1.6)/0.36}}\right) = 3.157$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

จากสมการที่ (3.6) เมื่อแทนค่าหาความยาวของ Z_{h1} จะได้

$$\lambda = \frac{3\times10^8}{\sqrt{3.157(4.4\times10^9)}} = 38.37 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น l_{h1} เท่ากับ

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{38.37}{2} = 19.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

เมื่อ 4) $Z_{h2} = 55\Omega$

จากสมการที่ (3.4) แทนค่าจะได้

$$A = \frac{55}{60}\sqrt{\frac{4.8+1}{2}} + \frac{4.8-1}{4.8+1}\left(0.23 + \frac{0.11}{4.8}\right) = 1.726$$

นำค่า A ที่ได้แทนค่าลงใน (3.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

$$\frac{W}{d} = \frac{8e^{1.726}}{e^{2(1.726)} - 2} = 1.52$$

จะเห็นได้ว่า $\frac{W}{d} < 2$ เป็นไปตามเงื่อนไขเพราะฉะนั้น

$$W = d(1.52) = (1.6)(0.2253) = 2.6 \text{ มิลลิเมตร}$$

จากสมการที่ (3.5) เมื่อแทนค่าจะได้

$$\varepsilon_e = \frac{4.8+1}{2} + \frac{4.8-1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{1+12(1.6)/2.6}}\right) = 3.55$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\varepsilon_e \neq \varepsilon_r$ และ $1 < \varepsilon_e < \varepsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

จากสมการที่ (3.6) เมื่อแทนค่าหาค่าความยาวของ Z_{h2} จะได้

$$\lambda = \frac{3\times10^8}{\sqrt{3.55}(4.4\times10^9)} = 38.38 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น l_{h2} เท่ากับ

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{36.18}{2} = 19.5 \text{ มิลลิเมตร}$$

เราจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณสรุปลงในตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
W_0	3
W_v	3.6
W_{h1}	0.36
W_{h2}	2.6
l_0	9.0025
l_v	18
l_{h1}	19.5
l_{h2}	19.5

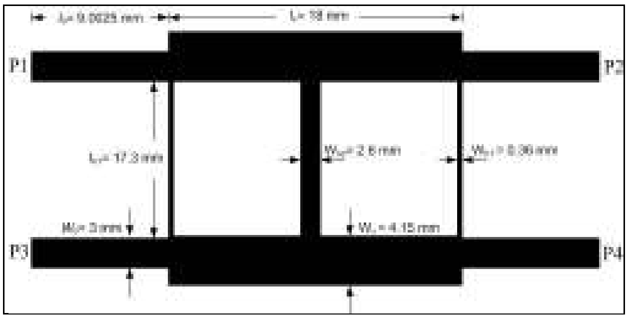
จากค่าในตารางที่ 3.1 เป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º เมื่อนำมาจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ทำให้ผลของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับไม่ตอบสนองทางวัตถุประสงค์ คือไม่ครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์

คือที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz จึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์บางพารามิเตอร์เพื่อให้ตอบสนองทางวัตถุประสงค์ดังตารางที่ 3.2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่วงความถี่ต่างๆ ของตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º

พารามิเตอร์	ช่วงแถบความถี่		
	2.5 GHz	3.5 GHz	5.8 GHz
l_{h1} = 19.5 มิลลิเมตร	1.9 - 3.36 GHz	1.9 - 3.36 GHz	4.43 - 6.25 GHz
l_{h1} = 17.3 มิลลิเมตร	2.125 - 3.54 GHz	2.125 - 3.54 GHz	4.67 - 6.48 GHz
$W_v = 3.6$ มิลลิเมตร	2.125 - 3.54 GHz	2.125 - 3.54 GHz	4.67 - 6.48 GHz
W_v = 4.15 มิลลิเมตร	2.157 - 4.08 GHz	2.157 - 4.08 GHz	5.46 - 7.62 GHz

จากตารางที่ 3.2 เป็นตารางแสดงถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ l_{h1} และ W_v ค่าแรกที่เริ่มต้นในการปรับคือค่า l_{h1} = 9.5 มิลลิเมตรซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นที่ได้จากคำนวณ จากค่าในตารางนั้นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับครอบคลุมแค่สองช่วงของแถบความถี่คือ ช่วงแถบความถี่ที่ 2.5 GHz และ 5.8 GHz จึงเปลี่ยนค่า l_{h1} = 17.3 มิลลิเมตรซึ่งแถบความถี่ช่วง 3.5 GHz นั้นมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับครอบคลุมแค่ความถี่ 2.125 - 3.54 GHz เราจึงทำการเปลี่ยนจากการปรับพารามิเตอร์ l_{h1} เป็นการปรับค่า W_v โดย W_v = 3.6 มิลลิเมตรและ W_v = 4.15 มิลลิเมตรจากค่าในตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อ W_v = 4.15 มิลลิเมตร มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์คือช่วงแถบความถี่ที่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz และสรุปขนาดของวงจรคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90º ในรูปที่ 3.7 ดังนี้

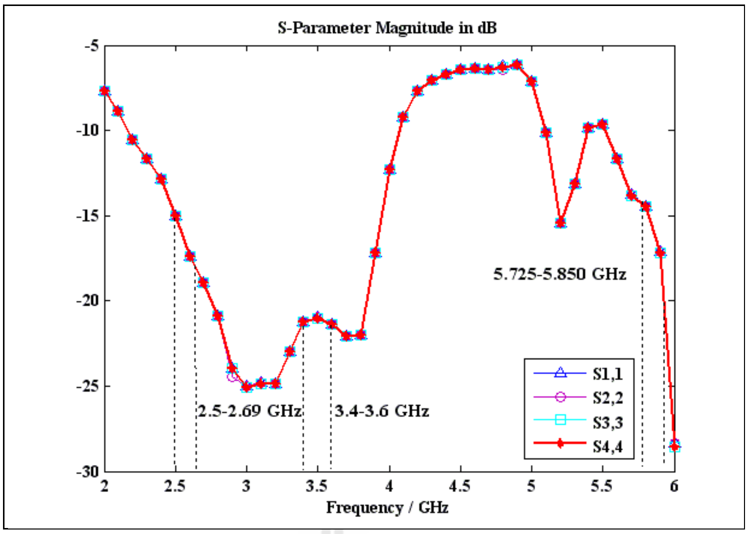


รูปที่ 3.7 ขนาดของวงจรตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

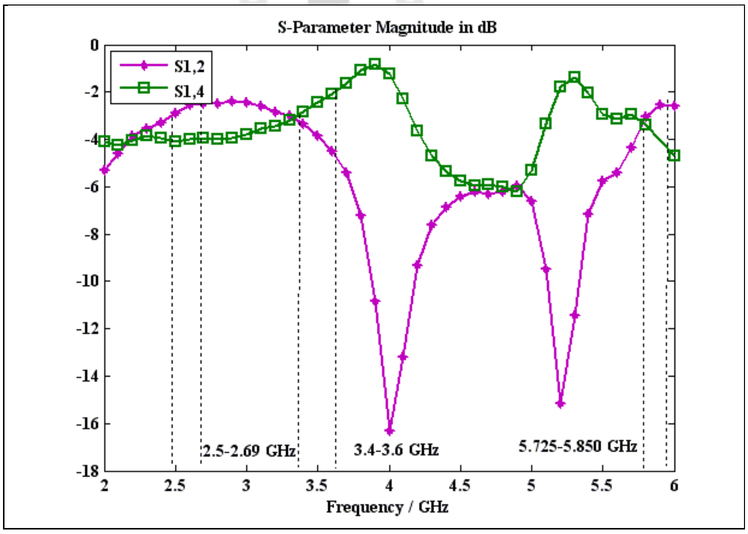
จากนั้นค่าที่ได้จากการจำลองผลในตารางที่ 3.2 นั้นได้ทำการสรุปพารามิเตอร์ของตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º ที่มีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ เมื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่าเมื่อลดและเพิ่มค่าพารามิเตอร์บางตัวจะมีผลดังต่อไปนี้

พารามิเตอร์ตัวแรกที่สังเกตคือ ความยาวของสายนำสัญญาณขา l_{h1} พบว่าเมื่อลดความยาวของ l_{h1} ลงทำให้ช่วงความถี่ปฏิบัติการขยับไปทางด้านความถี่สูงขึ้น และพารามิเตอร์ตัวที่สองคือ ความกว้างของ W_v เมื่อเพิ่มความกว้างของ W_v ขึ้นทำให้ช่วงความถี่ปฏิบัติการขยับไปทางด้านความถี่สูงขึ้นและค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำลง

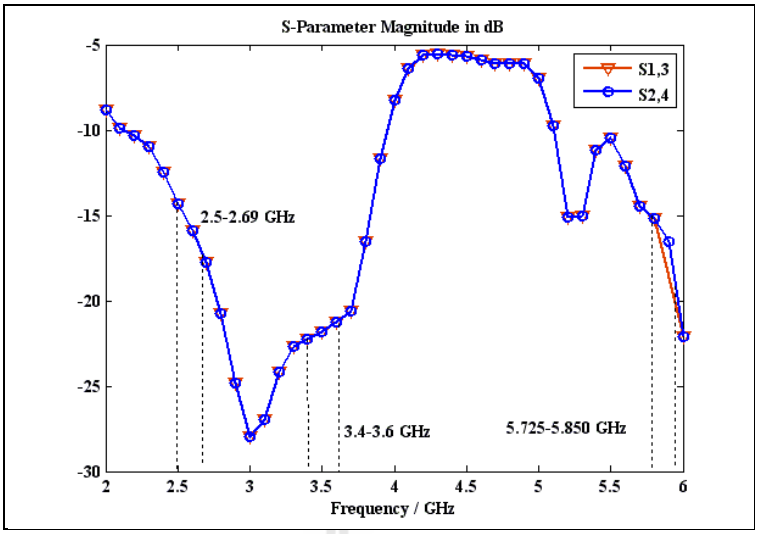
เมื่อได้ขนาดตามวงจรในรูปที่ 3.7 แล้วนำมาจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio แล้วจะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.8 ถึง 3.11 ในรูปที่ 3.8 คือค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในพอร์ตที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับของวงจรตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ จากค่าที่ได้พบว่าอุปกรณ์ของเรานั้นมีค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณอยู่ในค่าที่รับได้ คือมีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) เท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า แสดงว่ามีการแมตช์ค่าที่ดีดังแสดงใน Barrick, D., and Benmoussa, Z. (2006) จาก $VSWR = \frac{(1+\Gamma)}{(1+\Gamma)}$ เมื่อแทนค่า VSWR = 2 จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ Γ เท่ากับ 0.33 และนำมาแทนค่าเพื่อหาค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ R_L จาก $R_L = -20\log|\Gamma|$ แทนค่า $\Gamma = 0.33$ ได้ค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -10 dB นั่นหมายความว่าอุปกรณ์ที่เราออกแบบนั้นจะต้องมีค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -10 dB จึงจะทำให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งอยู่ในค่าที่สามารถรับได้ จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าสามารถส่งผ่านสัญญาณได้และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 4 ได้มากและมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งสองพอร์ต และสัญญาณจะไม่มีการส่งผ่านไปยังที่พอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 2 ไปยังพอร์ตที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 นอกจากนี้มุมเฟสของสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 3.11 เมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าพอร์ตที่ 1 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 2 และ 4 นั้นจะมีค่าความต่างเฟสที่ได้อาจจะมีค่าไม่ตรง 90º มากนัก ซึ่งสามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ได้ว่าตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º ที่เราได้ออกแบบไว้สามารถใช้งานได้ตลอดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์คือ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz และค่าเอสพารามิเตอร์ในแต่ละความถี่ของรูปที่ 3.8 ถึง 3.11 นั้นจะแสดงในตารางที่ 3.3 ดังนี้



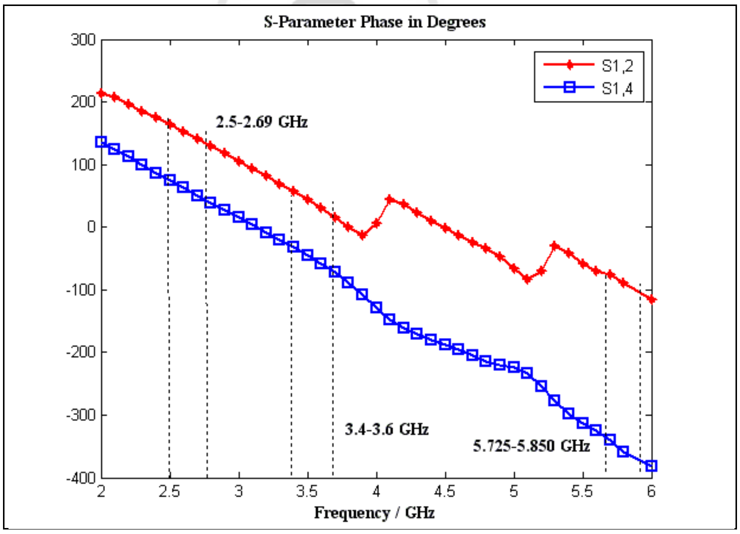
รูปที่ 3.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่ความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 3.9 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่ความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 3.10 ความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 3.11 มุมเฟสของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรคัปเปลอร์ไฮบริดจ์แบบ 90° แบบสามแถบความถี่

ความถี่	2.5 GHz	3.5 GHz	5.8 GHz
1) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S1,1 S2,2 S3,3 และ S4,4)	-15 dB	-20.98 dB	-14.43 dB
2) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S1,2)	-2.87 dB	-3.86 dB	-3.03 dB
3) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S1,4)	-4.09 dB	-2.95dB	-3.41 dB
4) ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (S1,3)	-14.32 dB	-21.78 dB	-15.18 dB
5) ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (S2,4)	-14.35 dB	-21.8 dB	-15.5 dB
6) ค่าความต่างเฟสระหว่าง (S1,2) กับ (S1,4)	92°	88.83°	-93.25°

3.2.2 การออกแบบวงจรไขว้สัญญาณ

ในส่วนที่เรียกว่าตัวไขว้สัญญาณจะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสัญญาณ โดยสัญญาณที่เข้ามานั้นจะเดินทางในลักษณะไขว้ คือเมื่อสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 1 จะเดินทางออกที่พอร์ตที่ 4 และเมื่อสัญญาณเข้ามาที่พอร์ตที่ 3 จะเดินทางออกที่พอร์ตที่ 2 ในการออกแบบนั้นเป็นการนำวงจรคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90° มาต่อเข้ากันสองตัวก็จะได้เป็นวงจรไขว้สัญญาณ และมีการแสดงค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณ

พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
W_0	3
W_v	4.15
W_{h1}	0.36
W_{h2}	2.6
W_{h3}	0.72
l_0	9.0025
l_v	36
l_{h1}	17.3
l_{h2}	17.3
l_{h3}	17.3

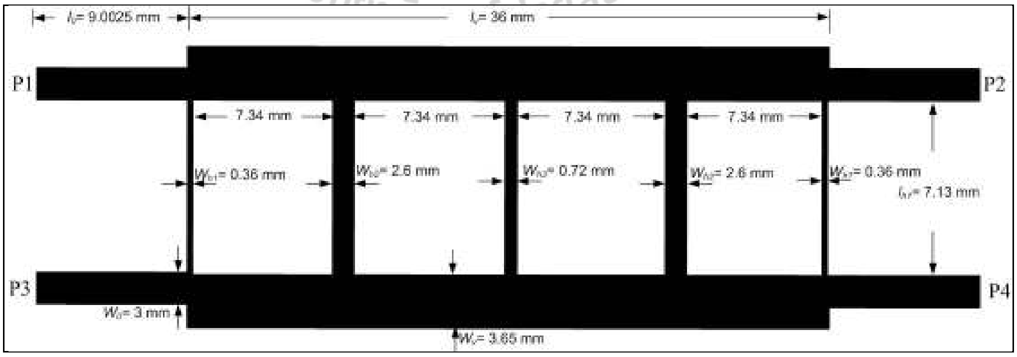
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากค่าในตารางที่ 3.4 เป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบวงจรตัวไขว้สัญญาณ เมื่อนำมาจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ทำให้ผลของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับไม่ตอบสนองทางวัตถุประสงค์ คือไม่ครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์ คือที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz จึงทำการปรับค่าพารามิเตอร์บางพารามิเตอร์เพื่อให้ตอบสนองทางวัตถุประสงค์ดังตารางที่ 3.5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.5 การปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่วงความถี่ต่างๆ ของตัวไขว้สัญญาณ

พารามิเตอร์	ช่วงแถบความถี่		
	2.5 GHz	3.5 GHz	5.8 GHz
W_v = 4.15 มิลลิเมตร	1.52 - 2.58 GHz	2.78 - 4.11 GHz	5.24 - 7.19 GHz
W_v = 3.65 มิลลิเมตร	2.0028 - 3.96 GHz	2.0028 - 3.96 GHz	5.37 - 7.22 GHz

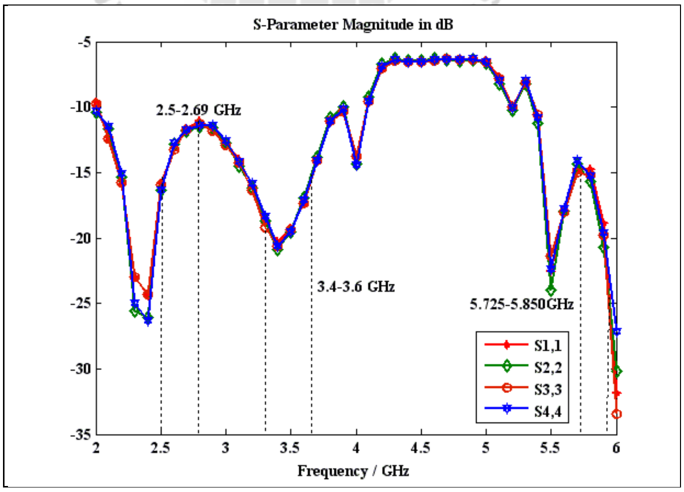
จากตารางที่ 3.5 เป็นตารางแสดงถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ W_v โดยเริ่มปรับค่า W_v = 4.15 มิลลิเมตร จากค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้ในตารางที่ 3.5 นั้นไม่ครอบคลุมช่วงแถบความถี่ที่ 2.5 - 2.69 GHz เราจึงทำการเปลี่ยนค่าจาก W_v = 4.15 มิลลิเมตร เป็น W_v = 3.65 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์คือ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz และสรุปขนาดของวงจรตัวไขว้สัญญาณในรูปที่ 3.12 ดังนี้



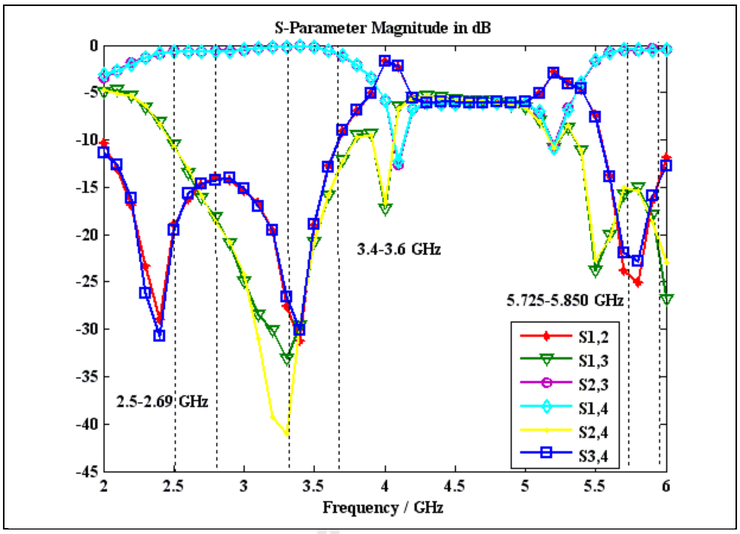
รูปที่ 3.12 ขนาดของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่
2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

จากนั้นค่าที่ได้จากการจำลองผลในตารางที่ 3.5 นั้นได้ทำการสรุปพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณที่มีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ เมื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่าเมื่อลดความกว้างของ W_v ลงทำให้ช่วงความถี่ปฏิบัติการขยับไปทางด้านความถี่สูงขึ้นและค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำลง

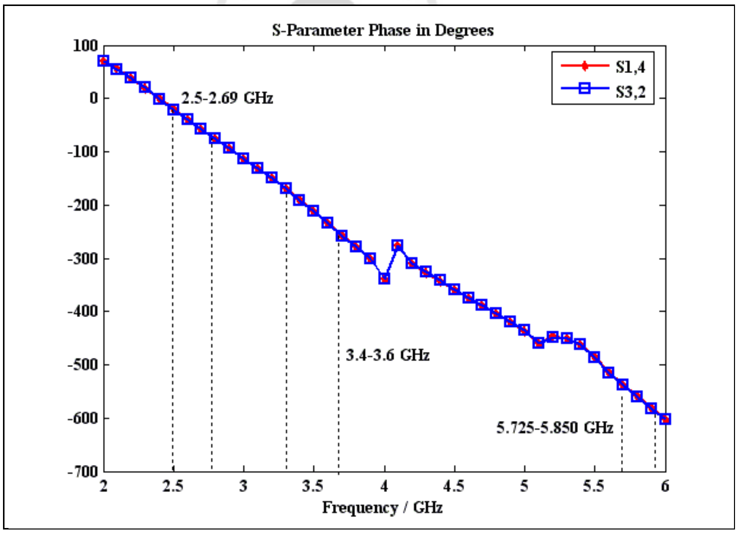
เมื่อได้ขนาดตามวงจรในรูปที่ 3.12 แล้วนำมาจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio แล้วจะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.13 ถึง 3.15 จากรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณนี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้เนื่องจากมีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 4 และสัญญาณจากพอร์ตที่ 3 ไปยังพอร์ตที่ 2 ได้มาก ซึ่งแสดงว่าสัญญาณสามารถเดินทางผ่านได้มาก โดยที่สัญญาณจะไม่มีการส่งผ่านจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 นอกจากนี้มุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 1 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 4 นั้นมีมุมเฟสเท่ากันกับมุมเฟสของสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 3 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.15 จากรูปที่ 3.13 ถึง 3.15 เราสามารถสรุปได้ว่าจากการออกแบบตัวไขว้สัญญาณนั้นสามารถใช้งานได้ตลอดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์คือ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าเป็นไปตามทฤษฎีและสามารถนำไปใช้สร้างจริงได้ และสุดท้ายได้แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ในแต่ละความถี่ในตารางที่ 3.6 ดังนี้



รูปที่ 3.13 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 3.14 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโดดเดี่ยว ในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



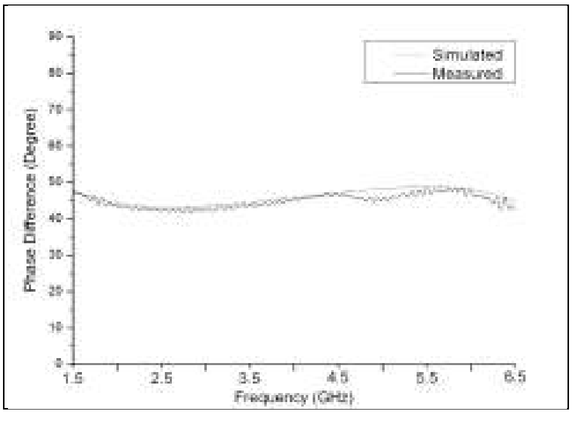
รูปที่ 3.15 มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่

ความถี่	2.5 GHz	3.5 GHz	5.8 GHz
1) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ(S1,1 S2,2 S3,3 และ S4,4)	-15.82 dB	-19.27 dB	-14.75 dB
2) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S1,2)	-18.9 dB	-19.09 dB	-25.04 dB
3) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S2,3)	-0.62 dB	-0.14 dB	-0.56 dB
4) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S1,4)	-0.74 dB	-0.18 dB	-0.44 dB
5) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S3,4)	-19.55 dB	-18.92 dB	-22.83 dB
6) ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (S1,3)	-10.51 dB	-20.8 dB	-14.961 dB
7) ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (S2,4)	-10.68 dB	-20.77 dB	-15.41 dB
8) ค่ามุมเฟสของ (S1,4)	-20.31°	-211.287°	-558.89°
9) ค่ามุมเฟสของ (S3,2)	-20.79°	-211.675°	-559.88°

3.2.3 การออกแบบวงจรเลื่อนเฟส

เนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาทำตัวเลื่อนเฟสแบบแถบกว้างนั้นค่อนข้างมีราคาสูงและตัวเลื่อนเฟสที่ขายตามท้องตลาดมีคุณสมบัติไม่ตรงตามที่เราต้องการ งานวิจัยฉบับนี้จึงต้องมีการออกแบบตัวเลื่อนเฟสแบบความถี่แคบ โดยอ้างอิงค่ามุมของตัวเลื่อนเฟสแบบแถบกว้างมาจากงานวิจัยของ Zheng, S.Y., Chan, W.S., Tang, K.S. and Man, K.F. (2008) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของค่ามุมเฟสของตัวเลื่อนเฟสเพื่อนำมาใช้งานร่วมกับตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณ ที่ครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของค่ามุมเฟสของตัวเลื่อนเฟส

เมื่อได้ออกแบบวงจรคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่แล้ว เราสามารถนำไปสร้างและวัดผลการทดลองโดยจะแสดงผลการทดสอบในบทที่ 4 ต่อไป

3.3 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบวงจรคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะแสดงผลที่ได้อยู่ในรูปของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ ค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโดดเดี่ยว และค่ามุมเฟส ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์เหล่านี้มีความสามารถในการใช้งานได้ครอบคลุมได้สามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์และเราสามารถนำอุปกรณ์เหล่านี้ไปทำการสร้างและวัดผลจริงได้ โดยจะนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

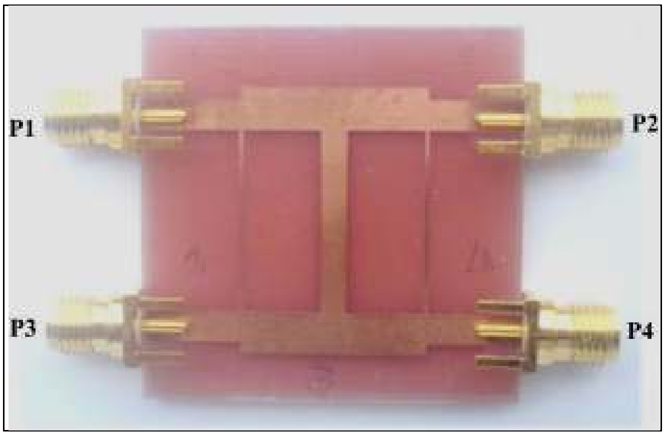
บทที่ 4
ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

4.1 กล่าวนำ

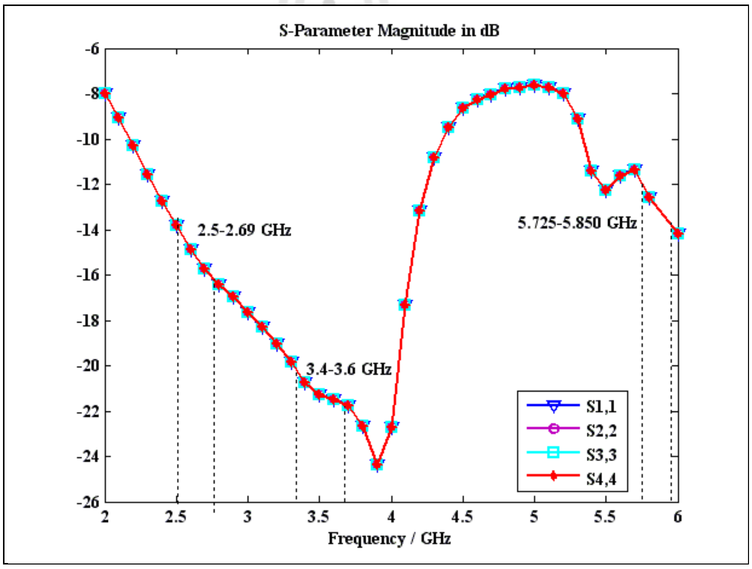
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการสร้างตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º และตัวไขว้สัญญาณที่ครอบคลุมแบบสามแถบความถี่ที่ได้มีการออกแบบในบทที่ 3 จากนั้นจะวัดและทดสอบค่าอยู่ในรูปของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการแยกโดดเดี่ยว ค่ามุมเฟส และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบและในส่วนสุดท้ายของบทนี้คือกล่าวสรุป

4.2 ผลการทดสอบตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่

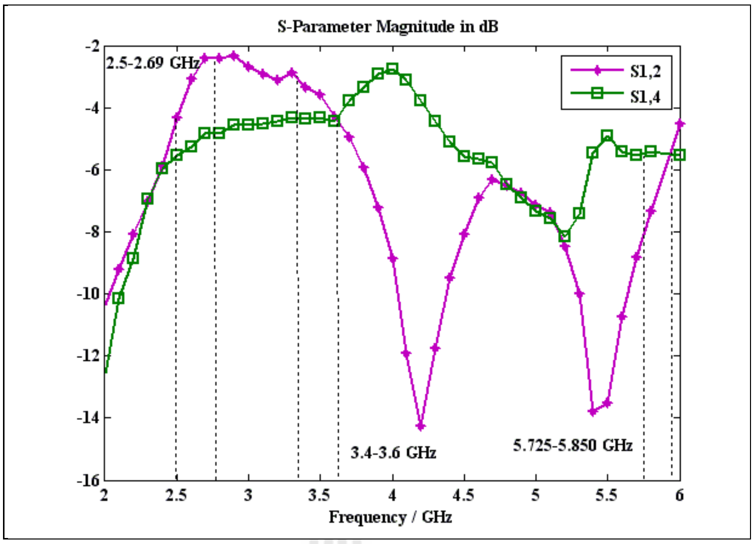
จากการออกแบบตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.2.1 เราได้สร้างตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ตามที่ได้ออกแบบคือที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz ไว้ด้วยแผงวงจรพิมพ์ที่มีทองแดงอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างขั้นกลางด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แผงวงจรพิมพ์แบบ FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ε_r) เท่ากับ 4.8 และมีความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่ได้สร้างไว้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 สำหรับผลการวัดมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้และสามารถนำไปใช้งานได้ ดังที่แสดงผลในรูปที่ 4.2 ส่วนความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสามารถส่งผ่านสัญญาณได้และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และจากพอร์ตที่ 1 ไปพอร์ตที่ 4 ได้และสัญญาณจะไม่มีการส่งผ่านจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 2 ไปยังพอร์ตที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และมุมเฟสของสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าพอร์ตที่ 1 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 2 และ 4 นั้นจะมีค่าความต่างเฟสที่ได้อาจจะมีค่าไม่ตรง 90º มากนัก ซึ่งสามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ได้ว่าตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่ได้สร้างไว้สามารถใช้งานได้ตลอดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์คือ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz และค่าเอสพารามิเตอร์ในแต่ละความถี่ของรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 นั้นจะแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้



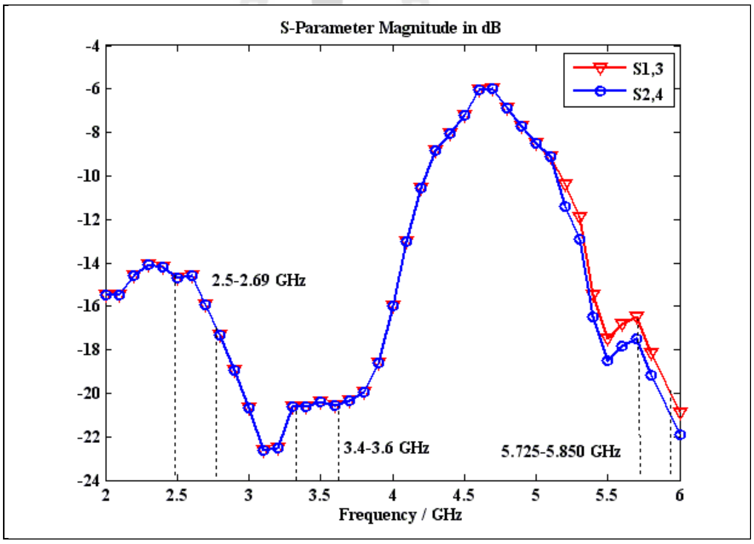
รูปที่ 4.1 ตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่สร้างจริง ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



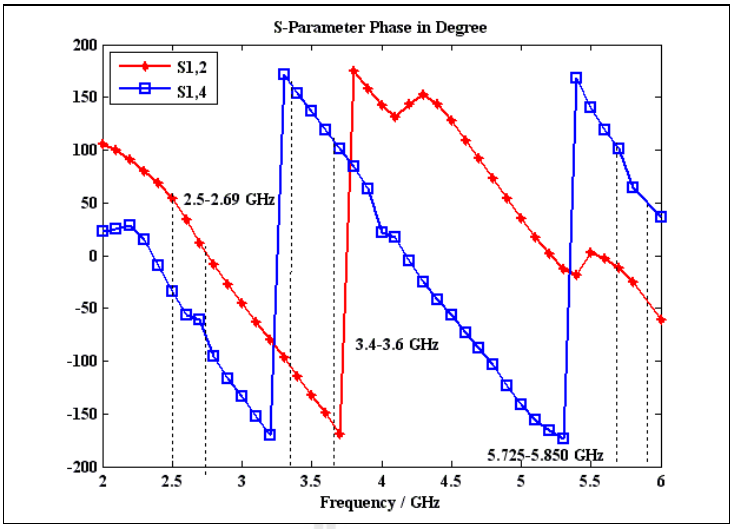
รูปที่ 4.2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90º แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 4.4 ความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 4.5 มุมเฟสของวงจรคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

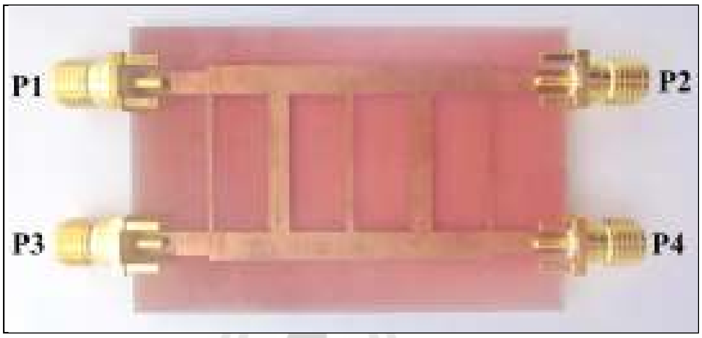
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรคัปเปลอร์ไฮบริดจ์แบบ 90° แบบสามแถบความถี่

ความถี่	2.5 GHz	3.5 GHz	5.8 GHz
1) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (S1,1 S2,2 S3,3 และ S4,4)	-13.83 dB	-21.305 dB	-12.608 dB
2) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S1,2)	-4.309 dB	-3.586 dB	-7.341 dB
3) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S1,4)	-5.526 dB	-4.311 dB	-5.439 dB
4) ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (S1,3)	-14.715 dB	-20.375 dB	-18.147 dB
5) ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (S2,4)	-14.5 dB	-20.7 dB	-21.1 dB
6) ค่าความต่างเฟสระหว่าง (S1,2) กับ (S1,4)	87.661°	90.61°	-89.578°

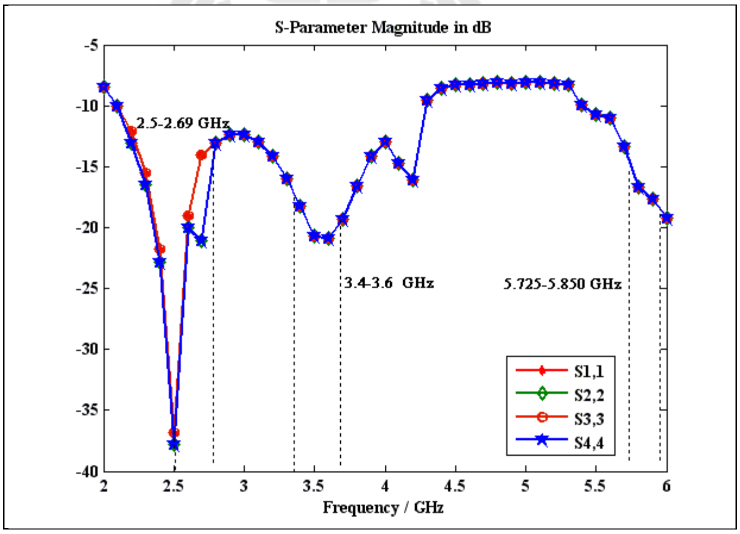
4.3 ผลการทดสอบตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่

จากการออกแบบตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.2.2 เราได้สร้างตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สำหรับผลการวัดมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 4 และส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 3 ไปยังพอร์ตที่ 2 ได้มาก ซึ่งแสดงว่าสัญญาณสามารถเดินทางผ่านได้มาก โดยที่สัญญาณจะไม่มีการส่งผ่านจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 1

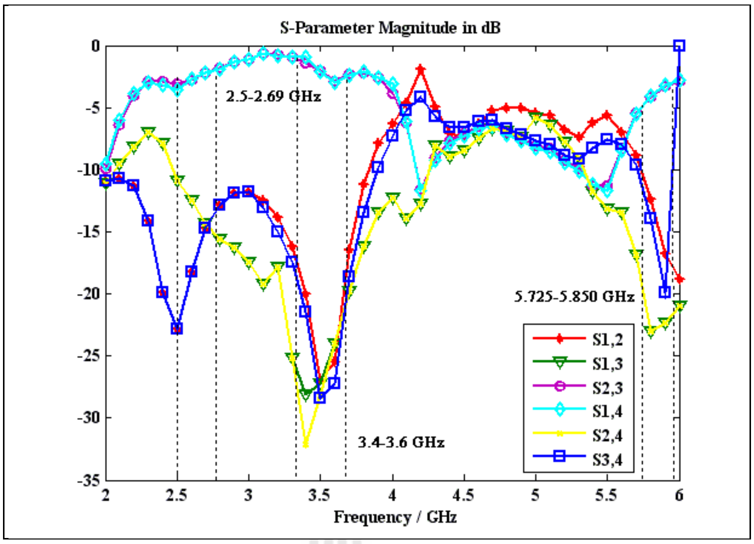
ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 4 นั้นมีมุมเฟสเท่ากันกับมุมเฟสของสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 3 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 เราสามารถสรุปได้ว่าจากการสร้างตัวไขว้สัญญาณนั้นสามารถใช้งานได้ตลอดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์คือ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าเป็นไปตามทฤษฎีและการออกแบบและสามารถนำไปใช้สร้างจริงได้ และสุดท้ายได้แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ในแต่ละความถี่ของรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 ในตารางที่ 4.2 ดังนี้



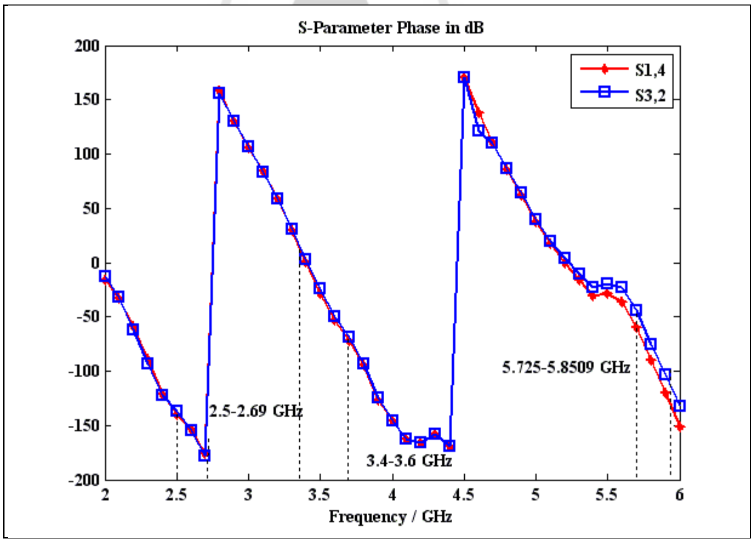
รูปที่ 4.6 ตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่สร้างจริงที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 4.7 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 4.8 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโดดเดี่ยวในแต่ละพอร์ต ของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 4.9 มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่

ความถี่	2.5 GHz	3.5 GHz	5.8 GHz
1) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ(S1,1 S2,2 S3,3 และ S4,4)	-36.786 dB	-20.695 dB	-16.658 dB
2) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S1,2)	-22.819 dB	-26.974 dB	-22.321 dB
3) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S2,3)	-3.112 dB	-1.377 dB	-4.136 dB
4) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S1,4)	-3.527 dB	-2.115 dB	-4.099 dB
5) ค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ (S3,4)	-27.915 dB	-28.426 dB	-13.898 dB
6) ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (S1,3)	-10.934 dB	-26.241 dB	-23.027 dB
7) ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว (S2,4)	-10.934 dB	-28.241 dB	-23.027 dB
8) ค่ามุมเฟสของ (S1,4)	-139.67°	-28.148°	-90.22°
9) ค่ามุมเฟสของ (S3,2)	-137.4°	-24.255°	-95.83°

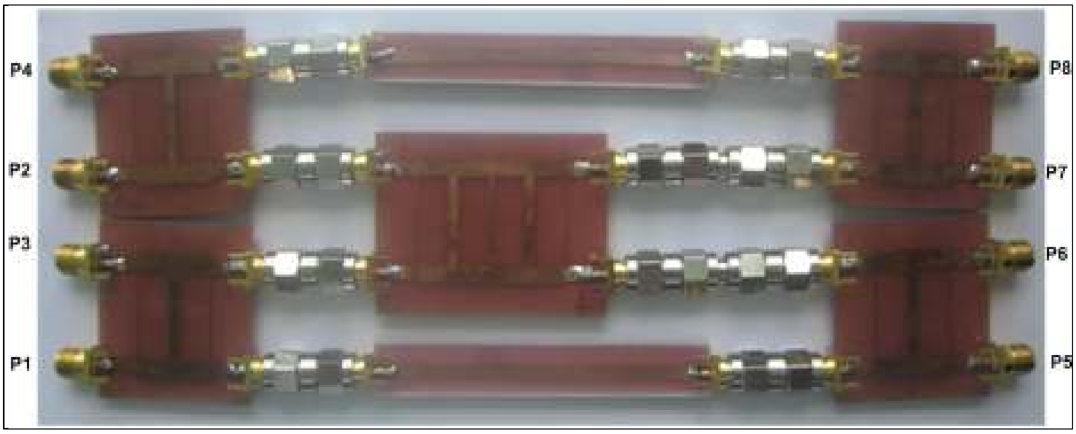
4.4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

จากอุปกรณ์ที่เราได้สร้างขึ้นนั้นเรานำเอาตัวคัปเปลอร์ 90° ตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz และตัวเลื่อนเฟสที่แถบความถี่เดียวที่ 2.5 GHz 2.6 GHz 2.69 GHz 3.4 GHz 3.5 GHz 3.6 GHz 5.725 GHz 5.8 GHz และ 5.850 GHz มารวมกันเป็นวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง 4.18 แล้วนำเอาไปวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์วงจรข่ายในการวัดผล ซึ่งจะทำการแสดงผลทีละช่วงของแต่ละแถบความถี่ดังต่อไปนี้

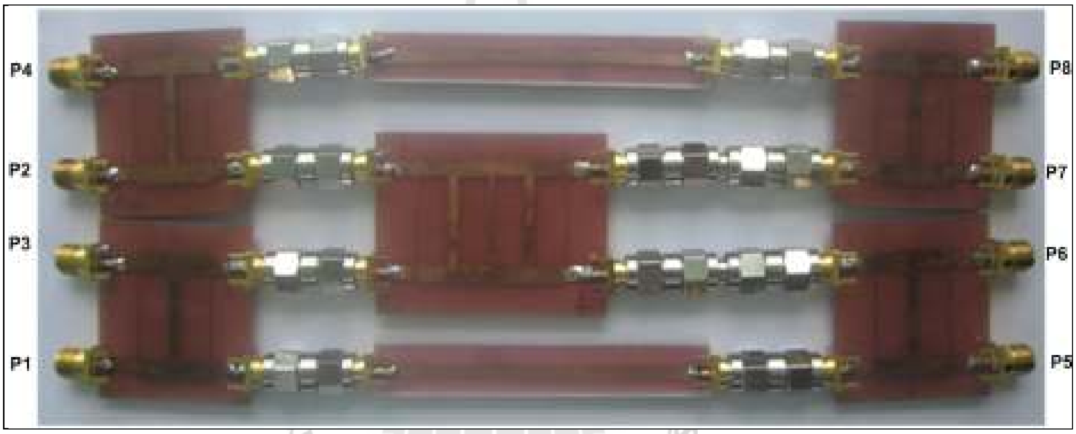
<u>ช่วงแถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz</u> ซึ่งทำการวัดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- **ที่ความถี่ 2.5 GHz**

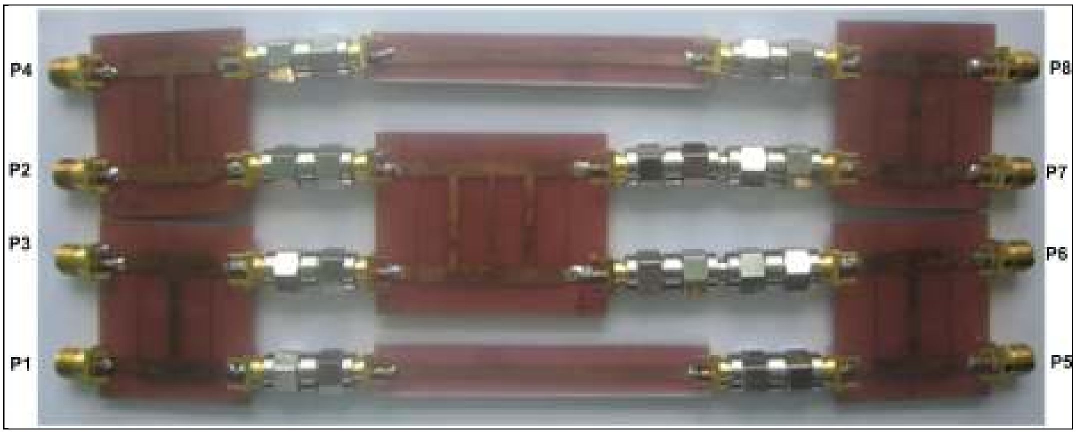
เริ่มจากการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกมาจากพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไปซึ่งควรมีค่าต่ำกว่า -10 dB นั้นแสดงว่าอุปกรณ์ที่เราสร้างขึ้นมาสามารถส่งผ่านได้ดี ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว คือค่าความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกจากอีกพอร์ตหนึ่งที่อยู่ข้างเดียวกันกับพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไป โดยจะต้องมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ คือค่าความสูญเสียที่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตขาเข้าไปยังพอร์ตขาออก ซึ่งควรจะมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎี



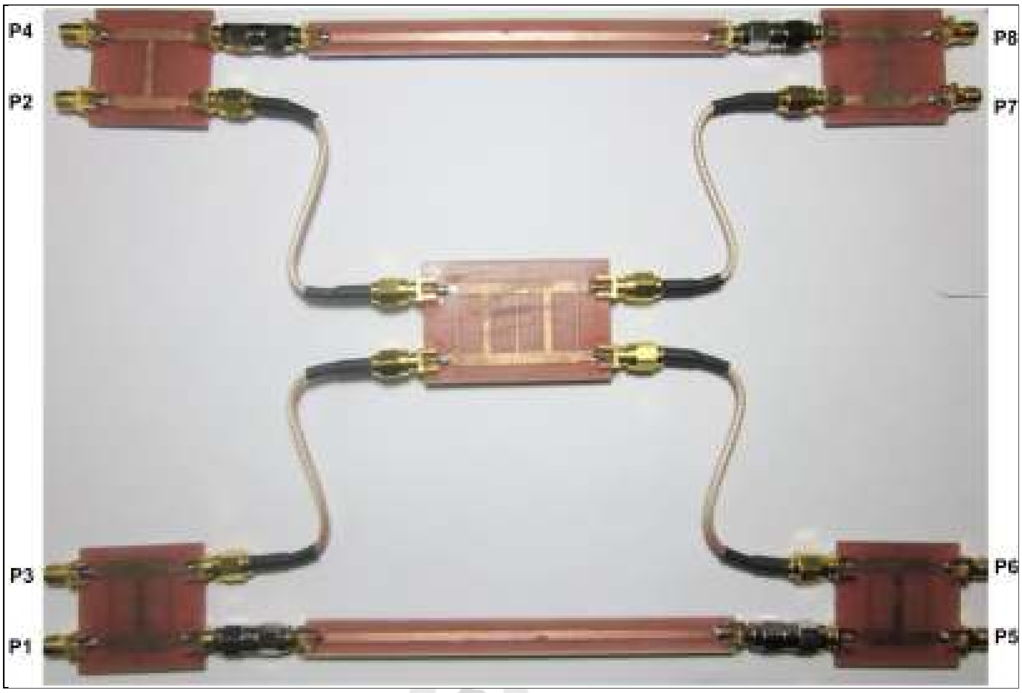
รูปที่ 4.10 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz



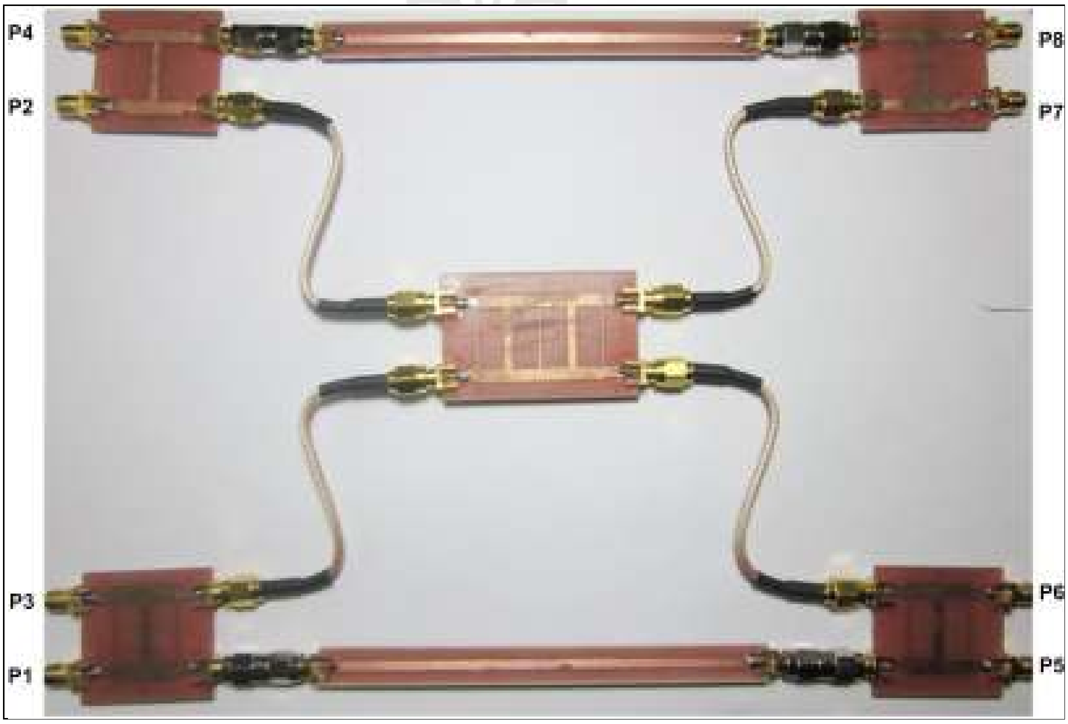
รูปที่ 4.11 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz



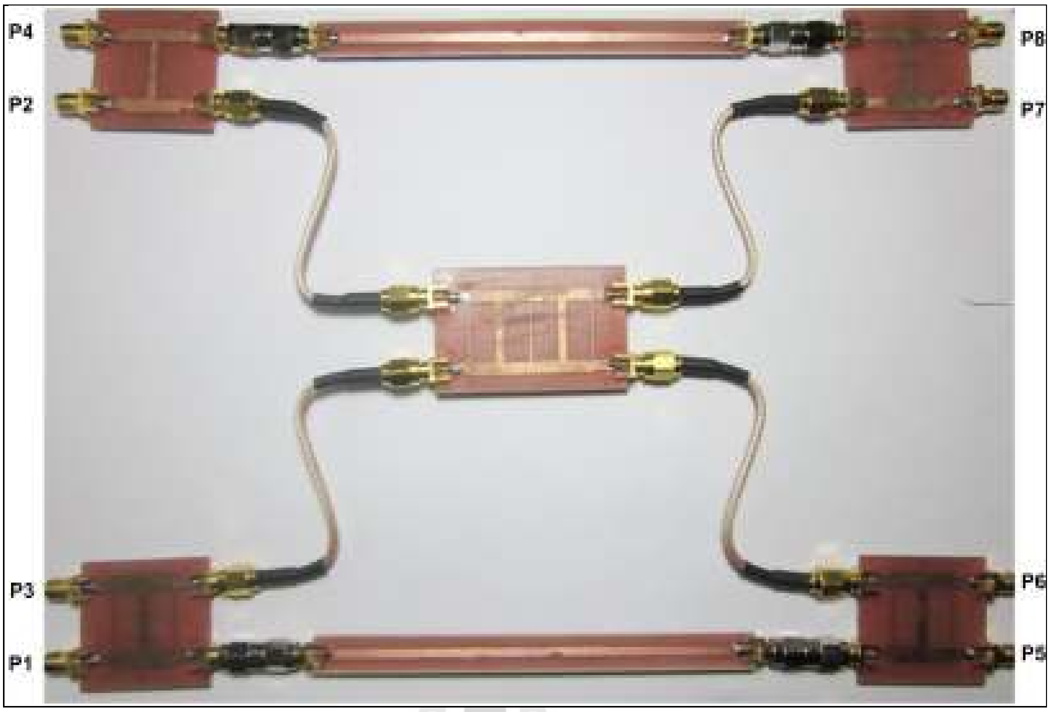
รูปที่ 4.12 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz



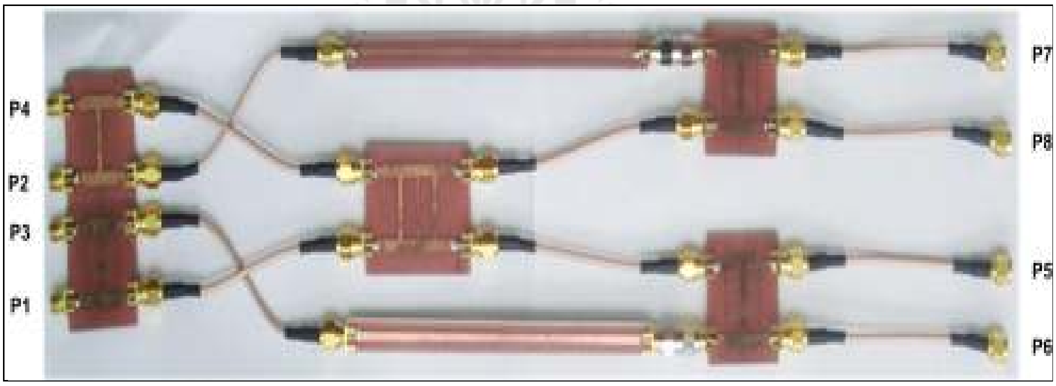
รูปที่ 4.13 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz



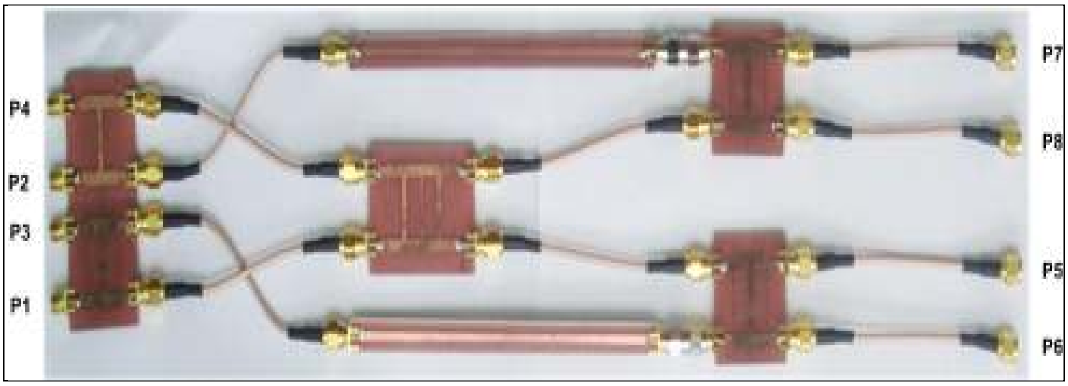
รูปที่ 4.14 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz



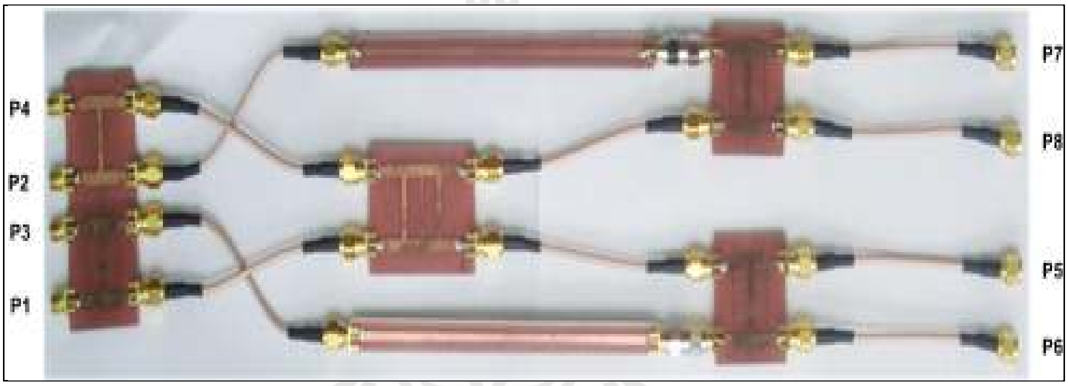
รูปที่ 4.15 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz



รูปที่ 4.16 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz



รูปที่ 4.17 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz



รูปที่ 4.18 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz

เมื่อเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.5 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.19 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อยซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้ และลำคลื่นหลักของพอร์ตที่ 6 นั้นมีลำคลื่นรองค่อนข้างสูง กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.5 GHz

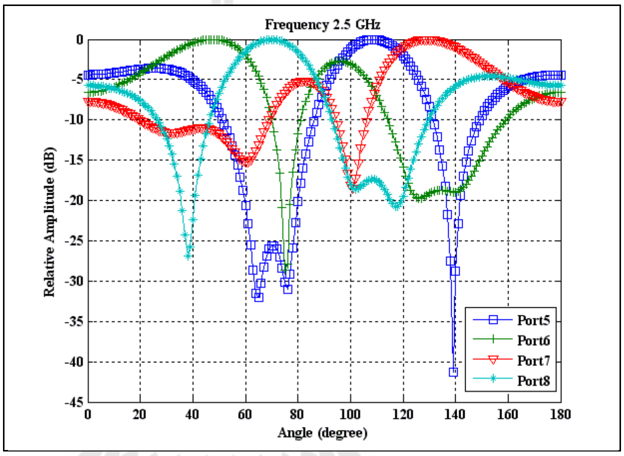
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-11.876, -13.061, -10.706, -10,335
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-10.964, -12.194, -11.616,-11.281
ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-30.936, -25.075 -30.733
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-27.464, -19.566, -19.724
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ	
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-6.773, -5.817, -6.188, -7.452
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-6.96, -6.232, -6.24, -5.814
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-7.833, -6.63., -5.719, -7.393
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-5.41, -7.685, -5.29, -7.382

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz

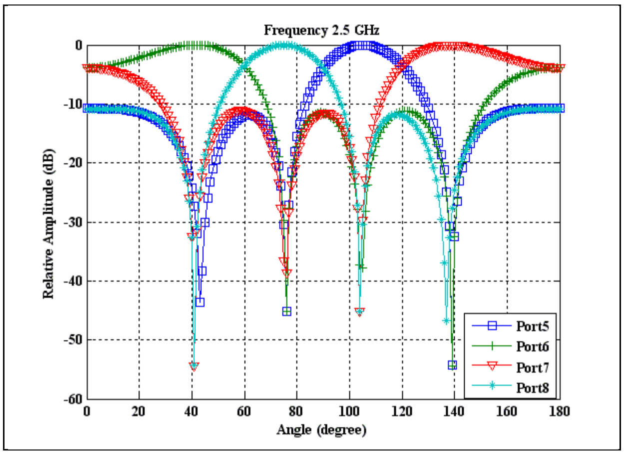
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	-107.74°	146.07°	157.26°	57.15°	109º
6	-175.32°	-116.78°	83.366°	165.03°	48º
7	139.24°	89.561°	-74.703°	173.75°	129º
8	40.335°	126.85°	130.03°	-116.82°	70º

ตารางที่ 4.5 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	264.42°	215.31°	172.42°	123.31°	105°
6	172.42°	307.31°	80.42°	215.31°	42°
7	215.42°	80.31°	307.42°	172.31°	138°
8	123.42°	172.31°	215.42°	264.31°	75°



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.5 GHz (ก) ผลการวัด (ข) ผลการออกแบบ

- **ที่ความถี่ 2.6 GHz**

จากตารางที่ 4.6 แสดงค่าความสูญเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวและค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อที่ได้จากการวัด พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อยซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้ และลำคลื่นหลักของพอร์ตที่ 6 และพอร์ตที่ 7 นั้นมีลำคลื่นรองค่อนข้างสูง กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.6 GHz

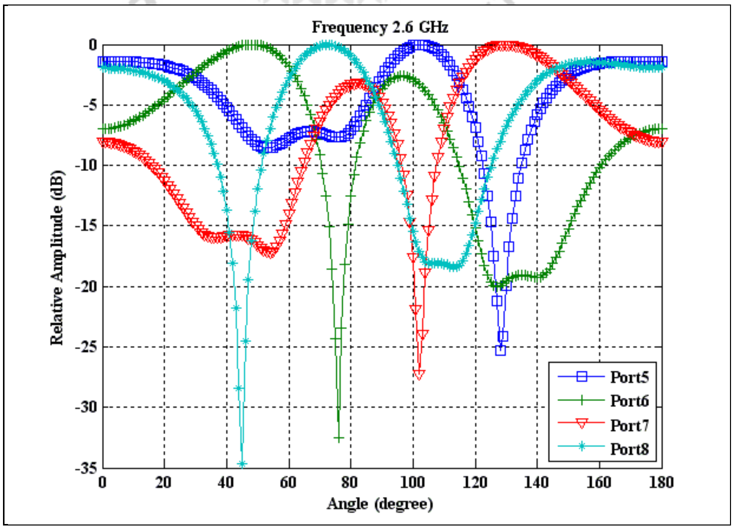
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-10.142, -14.683, -17.681, -10.166
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-12.31, -26.527, -11.636,-17.135
ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-26.26, -17.099, -34.229
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-17.012, -25.632, -17.012
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ	
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-6.28, -6.128, -7.588, -5.954
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-5.814, -7.06, -7.729, -6.443
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-7.532, -7.577, -6.729, -7.925
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-7.818, -7.278, -6.518, -5.391

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz

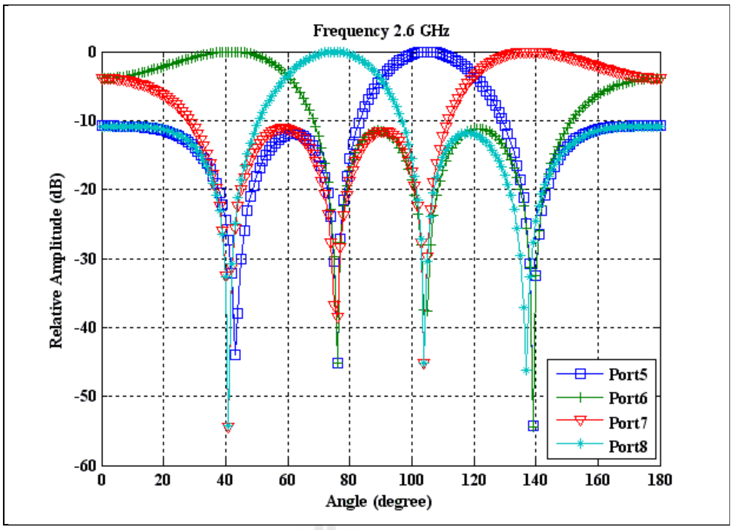
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	143.88°	85.724°	140.04°	1.34°	102º
6	109.57°	-171.33°	28.045°	84.913°	48º
7	85.612°	1.46°	173.22°	122.56°	130º
8	32.662°	134.97°	96.439°	-137.45°	73º

ตารางที่ 4.8 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	222.58°	173.5°	130.58°	81.5°	105°
6	130.58°	265.5°	38.58°	173.5°	42°
7	173.58°	38.5°	265.58°	130.5°	138°
8	81.58°	130.5°	173.58°	222.5°	75°



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.6 GHz (ก) ผลการวัด (ข) ผลการออกแบบ

- **ที่ความถี่ 2.69 GHz**

จากตารางที่ 4.9 พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.11 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.21 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อยซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้ และลำคลื่นหลักของพอร์ตที่ 6 และพอร์ตที่ 7 นั้นมีลำคลื่นรองค่อนข้างสูง กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.69 GHz

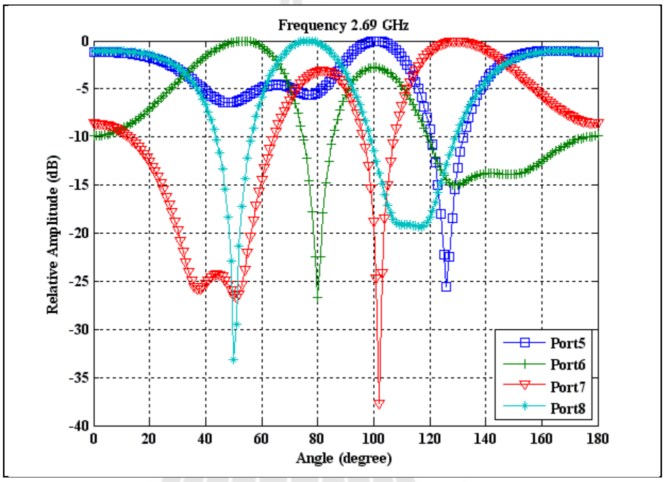
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-11.88, -18.129, -14.501, -12.197
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-14.148, -14.636, -15.528,-17.161
ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-26.841, -18.122, -26.537
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-15.299, -23.542, -20.786
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ	
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-8.025, -7.37, -6.425, -6.402
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-5.244, -7.15, -6.924, -7.217
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-8.237, -7.761, -5.931, -6.923
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-6.171, -5.233, -7.949, -6.774

ตารางที่ 4.10 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz

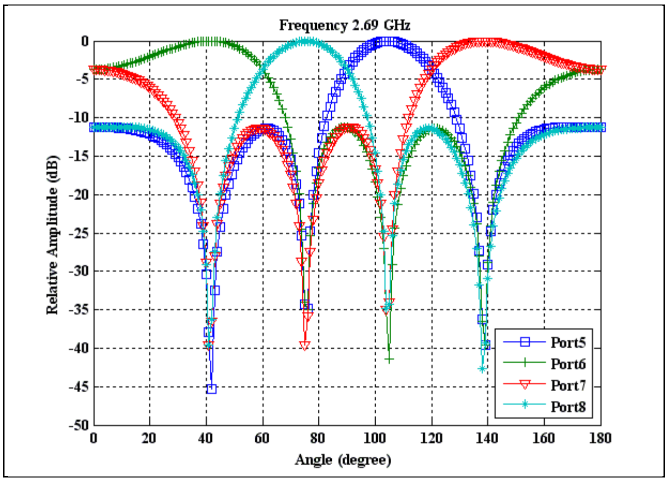
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	-177.98°	34.067°	97.14°	53.128°	101°
6	83.559°	119.74°	-55.044°	22.544°	53°
7	30.664°	-40.526°	130.67°	70.192°	130°
8	-20.052°	74.711°	19.206°	134.64°	77°

ตารางที่ 4.11 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	180.94°	135.33°	90.94°	45.33°	105°
6	90.94°	225.33°	0.94°	135.33°	41°
7	135.44°	0.83°	225.44°	90.83°	139°
8	45.44°	90.83°	135.44°	180.83°	75°



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.21 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.69 GHz (ก) ผลการวัด (ข) ผลการออกแบบ

จากผลของช่วงแถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz เราสามารถสรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของแต่ละความถี่ของการออกแบบและการวัดดังแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 ซึ่งในทางทฤษฎีในขณะที่เราเปลี่ยนความถี่เป็นความถี่ใดๆ แล้วทิศทางของลำคลื่นหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบแถบความถี่กว้างที่ได้จะไม่มีการเลื่อนจะมีตำแหน่งอยู่ที่เดิม แต่ผลที่ได้จากในตารางพบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักของแต่ละความถี่มีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าผลของแบบรูปการแผ่พลังงานจากการวัดในรูปที่ 4.19 ถึง 4.21 มีทิศทางของลำคลื่นรองที่สูงในบางพอร์ต กรณีของความผิดพลาดนี้อาจจะเกิดจากขั้นตอนของการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.12 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ

ความถี่ (GHz)	ทิศทางของพูหลัก 1	ทิศทางของพูหลัก 2	ทิศทางของพูหลัก 3	ทิศทางของพูหลัก 4
2.5	105°	42°	138°	75°
2.6	105°	42°	138°	75°
2.69	105°	42°	138°	75°

ตารางที่ 4.13 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการวัด

ความถี่ (GHz)	ทิศทางของพูหลัก 1	ทิศทางของพูหลัก 2	ทิศทางของพูหลัก 3	ทิศทางของพูหลัก 4
2.5	109°	48°	129°	70°
2.6	102°	48°	130°	73°
2.69	101°	53°	130°	77°

ช่วงแถบความถี่ 3.4 - 3.6 GHz ซึ่งทำการวัดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- **ที่ความถี่ 3.4 GHz**

จากตารางที่ 4.14 พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.15 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก) เมื่อ

เรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.16 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อยซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้ และลำคลื่นหลักของพอร์ตที่ 6 นั้นมีลำคลื่นรองค่อนข้างสูง กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์

ตารางที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.4 GHz

พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-10.142, -17.111, -26.353, -21.866
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-19.353, -26.394, -22.819,-24.828
ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-29.875., -25.691, -28.201
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-23.542, -25.532, -31.135
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ	
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-5.822, -7.799, -7.012, -5.012
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-7.345, -5.692, -6.239, -7.422
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-6.624, -6.88, -5.426, -7.153
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-5.936, -7.404, -6.032, -6.498

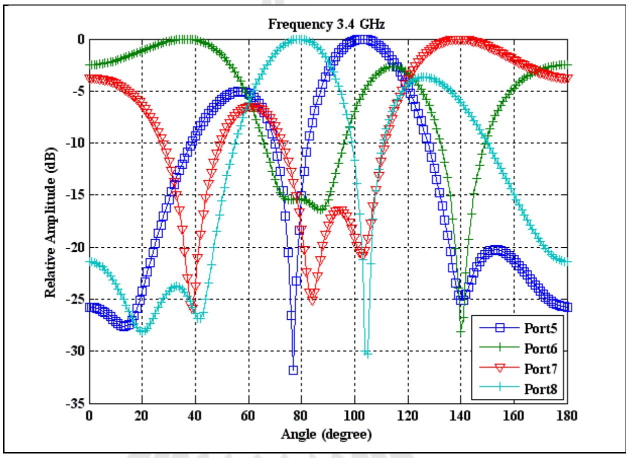
ตารางที่ 4.15 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	89.522°	78.941°	-14.532°	-12.265°	103°
6	-23.972°	-170.1°	-103.53°	75.95°	36°
7	-13.708°	172.33°	75.713°	-75.34°	139°
8	-9.72°	-26.087°	75.162°	68.567°	79°

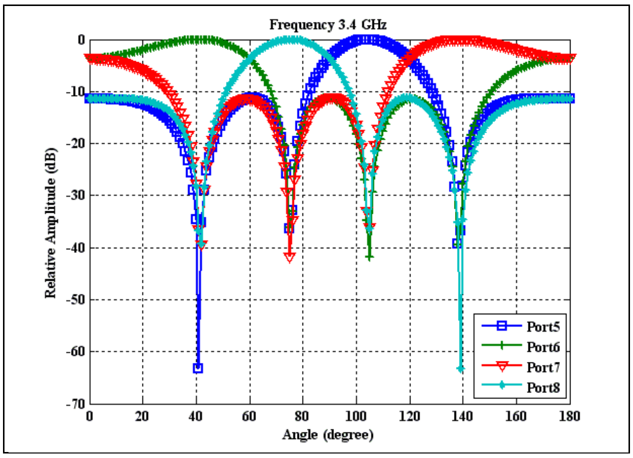
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.16 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	237.26°	193.06°	148°	103.74°	104°
6	148°	282.38°	58.74°	193.06°	41°
7	193.06°	58.74°	282.38°	148°	139°
8	103.74°	148°	193.06°	237.26°	76°



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.4 GHz (ก) ผลการวัด (ข) ผลการออกแบบ

- **ที่ความถี่ 3.5 GHz**

จากตารางที่ 4.17 แสดงค่าความสูญเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวและค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อที่ได้จากการวัด พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.18 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.19 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.5 GHz

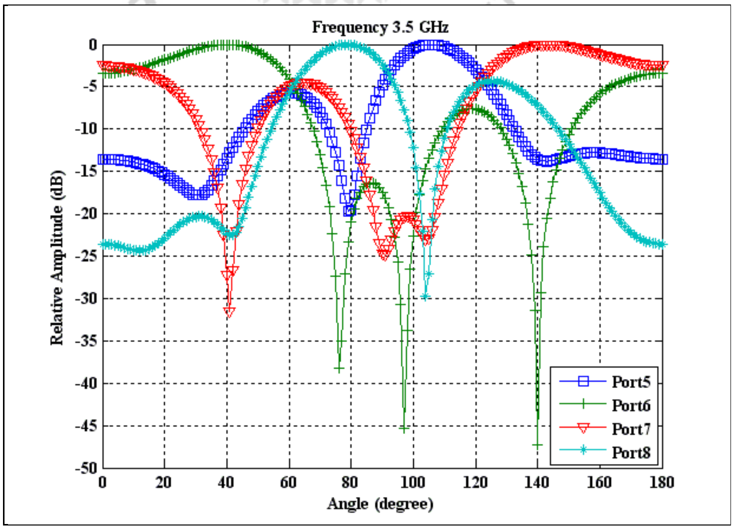
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-10.142, -24.051, -14.41, -15.715
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-12.31, -26.527, -11.636,-17.135
ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-30.334, -22.834, -33.531
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-28.538, -24.497, -35.393
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ	
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-5.09, -6.073, -7.959, -7.623
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-5.6, -7.917, -6.386, -7.068
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-7.067, -6.858, -6.154, -7.913
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-6.827, -7.361, -5.016, -7.068

ตารางที่ 4.18 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz

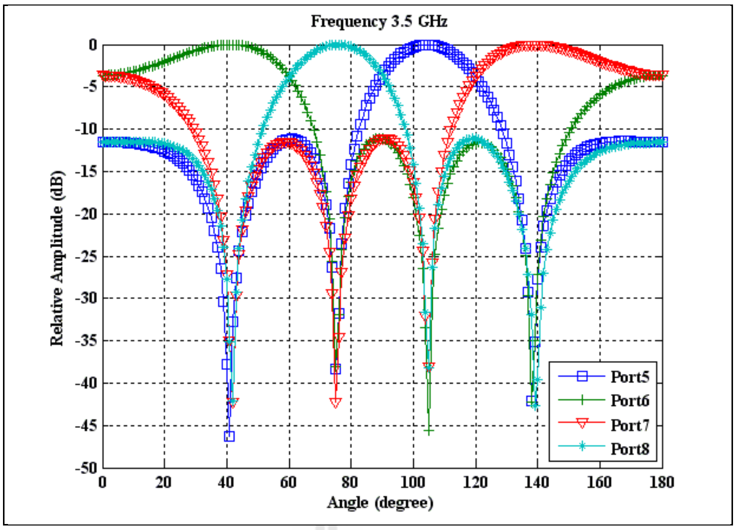
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	89.522°	78.941°	-14.532°	-12.265°	103°
6	-23.972°	-170.1°	-103.53°	75.95°	36°
7	136.77°	-27.712°	-74.802°	45.085°	139°
8	-9.72°	-26.087°	75.162°	68.567°	79°

ตารางที่ 4.19 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	189.23°	145.66°	100.45°	56.83°	104°
6	100.45°	234.49°	11.67°	145.66°	41°
7	145.8°	11.53°	234.63°	100.31°	139°
8	56.97°	100.31°	145.8°	189.09°	76°



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz (ก) ผลการวัด (ข) ผลการออกแบบ

- **ที่ความถี่ 3.6 GHz**

จากตารางที่ 4.20 พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.21 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.22 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.20 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.6 GHz

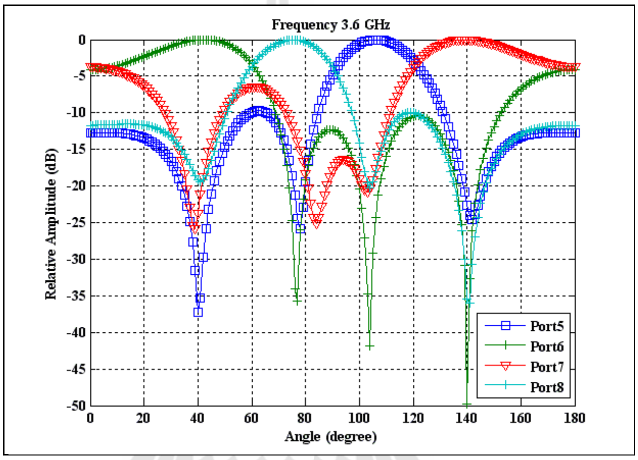
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-10.142, -14.388, -17.467, -23.626
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-18.882, -12.641, -16.17836,-19.604
ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-31.509, -13.661, -49.848
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-27.271, -24.52, -30.211
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ	
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-6.883, -7.58, -5.441, -6.37
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-7.568, -6.395, -6.315, -5.28
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-6.277, -5.524, -7.612, -6.314
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-5.208, -6.261, -6.677, -7.28

ตารางที่ 4.21 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz

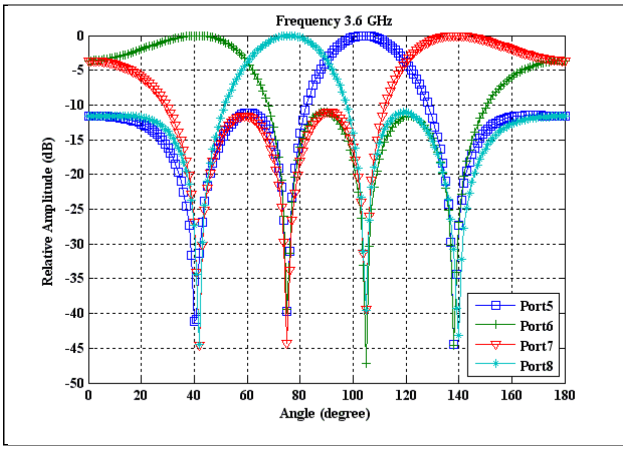
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	23.335°	-28.121°	-89.21°	-122.89°	106°
6	-72.666°	64.471°	-169.14°	-31.505°	42°
7	-13.708°	172.33°	75.713°	-75.34°	139°
8	-112.41°	-88.36°	-36.606°	20.535°	76°

ตารางที่ 4.22 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	138.8°	95.69°	50.29°	7.18°	104°
6	50.29°	184.2°	-38.22°	95.69°	41°
7	95.79°	-38.32°	184.3°	50.19°	139°
8	7.28°	50.19°	95.79°	138.7°	76°



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.6 GHz (ก) ผลการวัด (ข) ผลการออกแบบ

จากผลของช่วงแถบความถี่ 3.4 - 3.6 GHz เราสามารถสรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของแต่ละความถี่ของการออกแบบและการวัดดังแสดงในตารางที่ 4.23 และ 4.24 ซึ่งในทางทฤษฎีในขณะที่เราเปลี่ยนความถี่เป็นความถี่ใดๆ แล้วทิศทางของลำคลื่นหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบแถบความถี่กว้างที่ได้จะไม่มีการเลื่อนจะมีตำแหน่งอยู่ที่เดิม แต่ผลที่ได้จากในตารางพบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักของแต่ละความถี่มีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าผลของแบบรูปการแผ่พลังงานจากการวัดในรูปที่ 4.22 มีทิศทางของลำคลื่นรองที่สูงในบางพอร์ต กรณีของความผิดพลาดนี้อาจจะเกิดจากขั้นตอนของการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.23 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ

ความถี่ (GHz)	ทิศทางของ พูหลัก 1	ทิศทางของ พูหลัก 2	ทิศทางของ พูหลัก 3	ทิศทางของ พูหลัก 4
3.4	104°	41°	139°	76°
3.5	104°	41°	139°	76°
3.6	104°	41°	139°	76°

ตารางที่ 4.24 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการวัด

ความถี่ (GHz)	ทิศทางของ พูหลัก 1	ทิศทางของ พูหลัก 2	ทิศทางของ พูหลัก 3	ทิศทางของ พูหลัก 4
3.4	103°	36°	139°	79°
3.5	106°	40°	143°	79°
3.6	106°	42°	139°	76°

<u>ช่วงแถบความถี่ 5.725 - 5.850 GHz</u> ซึ่งทำการวัดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- **ที่ความถี่ 5.725 GHz**

จากตารางที่ 4.25 พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.26 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.25 (ก) เมื่อ

เรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.27 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.25 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.25 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.725 GHz

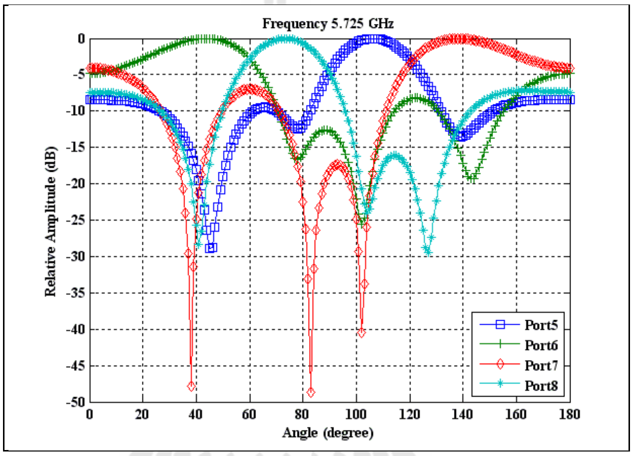
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-15.302, -13.429, -14.028, -10,335
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-11.646, -13.114, -11.273,-15.284
ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-29.027, -19.468 -26.436
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-14.598, -30.719, -24.883
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ	
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-6.261, -7.288, -5.981, -6.252
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-7.024, -5.557,-6.245, -5.227
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-6.317, -5.984, -5.811, -7.466
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-5.438, -6.943, -7.996, -6.877

ตารางที่ 4.26 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	141.41°	49.734°	8.37°	-11.698°	106°
6	-4.022°	160.7°	-90.695°	32.908°	44°
7	69.355°	-87.793°	173.2°	14.911°	138°
8	-9.98°	71.177°	89.512°	154.23°	73°

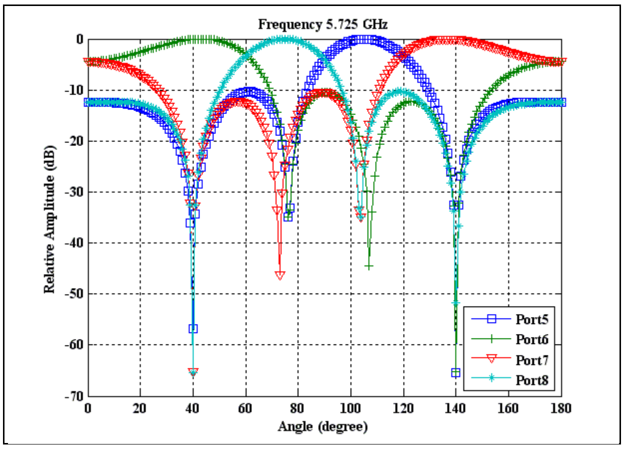
ตารางที่ 4.27 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	76.64°	203.31°	-19.06°	107.64°	105°
6	-19.03°	299.01°	-114.73°	203.34°	43°
7	203.47°	-114.73°	299.14°	-19.03°	137°
8	107.77°	-19.06°	203.44°	76.64°	75°



(ก)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ข)

รูปที่ 4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.725GHz (ก) ผลการวัด (ข) ผลการออกแบบ

- **ที่ความถี่ 5.8 GHz**

จากตารางที่ 4.28 พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.29 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.30 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.28 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.8 GHz

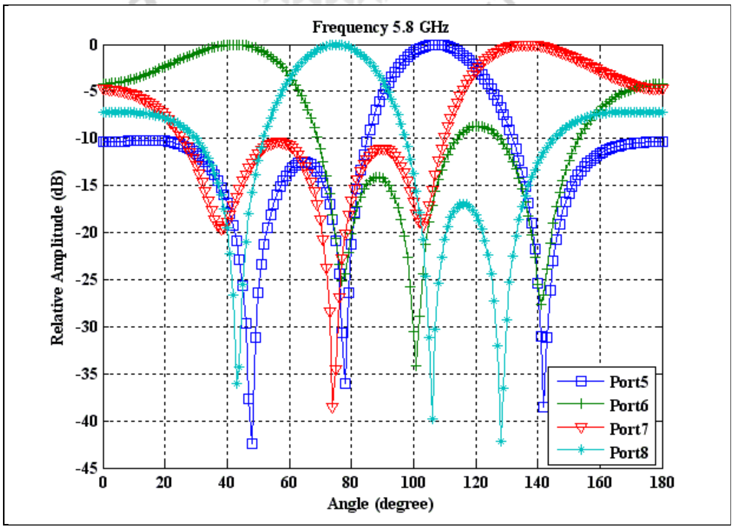
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-13.143, -12.205, -14.609, -11.455
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-14.304, -11.468, -13.711,-10.064
ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-27.9, -20.186 -33.005
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-14.241, -20.121, -28.371
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ	
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-6.404, -6.94, -7.35, -5.42
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-7.675, -5.994, -7.049, -6.187
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-6.723, -5.899, -5.454, -7.221
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-5.791, -6.81, -7.635, -6.35

ตารางที่ 4.29 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz

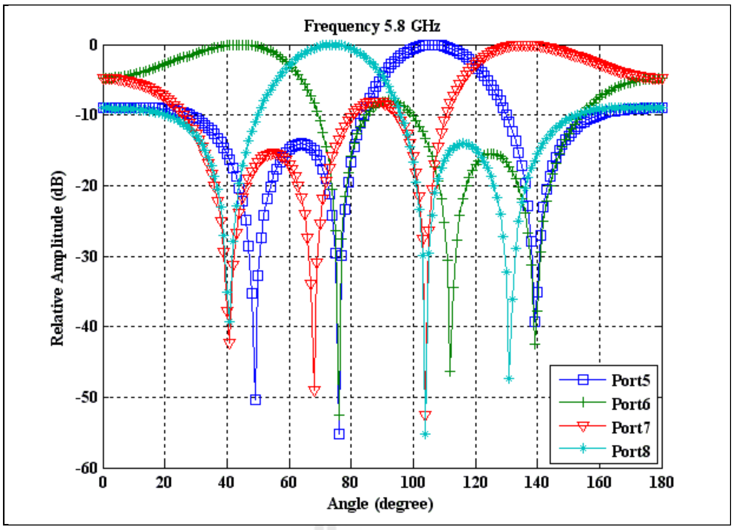
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	157.27°	96.503°	51.588°	-5.111°	107°
6	47.785°	-158.1°	-44.882°	93.685°	42°
7	103.74°	-45.215°	-171.85°	73.727°	136°
8	50.518°	120.29°	133.18°	-159.63°	75°

ตารางที่ 4.30 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	56.52°	168.49°	-36.73°	75.28°	106°
6	-36.69°	261.74°	-129.94°	168.53°	44°
7	168.68°	-129.94°	261.89°	-36.69°	136°
8	75.43°	-36.73°	168.64°	56.52°	74°



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.8 GHz (ก) ผลการวัด (ข) ผลการออกแบบ

- **ที่ความถี่ 5.850 GHz**

จากตารางที่ 4.31 แสดงค่าความสูญเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวและค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อที่ได้จากการวัด พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.32 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.33 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.31 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.850 GHz

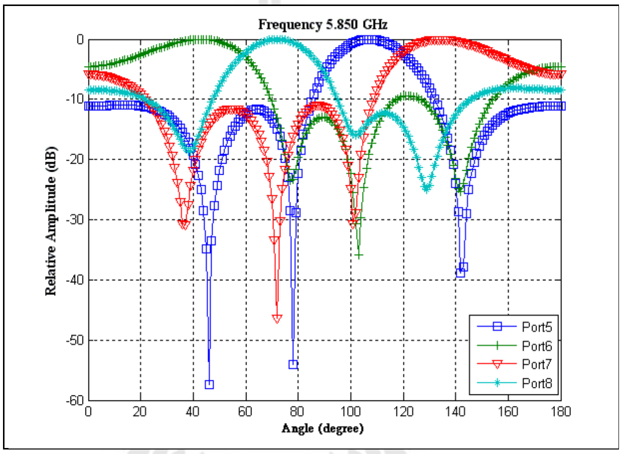
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-13.514, -12.539, -15.605, -10.63
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-17.623, -13.439, -15.726,-11.255
ค่าความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-30.637, -16.153, -36.322
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-13.28, -32.716, -32.557
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ	
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-5.879, -6.282., -7.52, -5.45
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-7.244, -5.655, -7.85, -6.007
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-6.451, -5.895, -5.027, -6.171
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-5.052, -16.832., -7.052, -6.815

ตารางที่ 4.32 ผลการวัดทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz

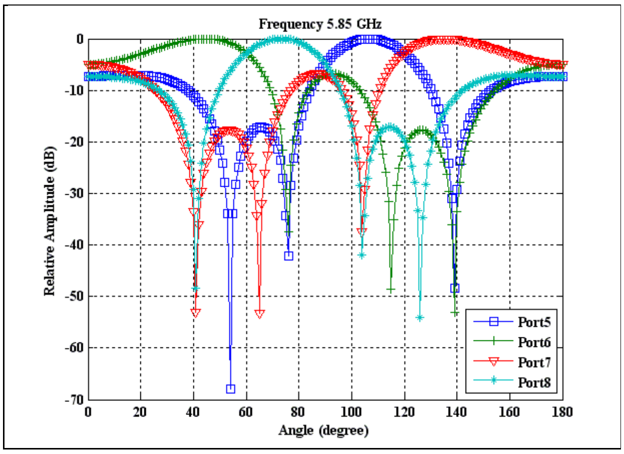
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	92.276°	37.408°	-13.258°	-68.004°	107°
6	-13.23°	136.45°	-105.83°	24.57°	43°
7	28.507°	-99.588°	133.39°	13.821°	134°
8	-32.716°	58.806°	92.655°	139.62°	72°

ตารางที่ 4.33 ผลการออกแบบทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศต้นที่ 1	สายอากาศต้นที่ 2	สายอากาศต้นที่ 3	สายอากาศต้นที่ 4	ทิศทางของพูหลัก
5	40.902°	144.331°	-50.319°	53.15°	45°
6	-50.279°	235.552°	-141.5°	144.371°	107°
7	144.571°	-141.5°	235.752°	-50.279°	73°
8	53.35°	-50.319°	144.531°	40.902°	135°



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.27 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.850 GHz (ก) ผลการวัด (ข) ผลการออกแบบ

จากผลของช่วงแถบความถี่ 5.725 - 5.850 GHz เราสามารถสรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของแต่ละความถี่ของการออกแบบและการวัดดังแสดงในตารางที่ 4.34 และ 4.35 ซึ่งในทางทฤษฎีในขณะที่เราเปลี่ยนความถี่เป็นความถี่ใดๆ แล้วทิศทางของลำคลื่นหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบแถบความถี่กว้างที่ได้จะไม่มีการเลื่อนจะมีตำแหน่งอยู่ที่เดิม แต่ผลที่ได้จากในตารางพบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักของแต่ละความถี่มีค่าใกล้เคียงกัน กรณีของความผิดพลาดนี้อาจจะเกิดจากขั้นตอนของการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.34 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ

ความถี่ (GHz)	ทิศทางของพูหลัก 1	ทิศทางของพูหลัก 2	ทิศทางของพูหลัก 3	ทิศทางของพูหลัก 4
5.725	105°	43°	137°	75°
5.8	106°	44°	136°	74°
5.850	107°	45°	135°	73°

ตารางที่ 4.35 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการวัด

ความถี่ (GHz)	ทิศทางของพูหลัก 1	ทิศทางของพูหลัก 2	ทิศทางของพูหลัก 3	ทิศทางของพูหลัก 4
5.725	106°	44°	138°	73°
5.8	107°	42°	136°	75°
5.850	107°	43°	134°	72°

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากทั้งสามแถบความถี่ของการทดสอบนั้น เราจะได้แบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละช่วงความถี่ ซึ่งเราจะทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละพอร์ตจากสมการ (4.1) และจะใช้ค่าทิศทางของพูคลื่นหลักของแต่ละช่วงแถบความถี่ในการออกแบบเป็นค่าในทางทฤษฎีในการอ้างอิงดังตารางที่ 4.36 - 4.38 ดังต่อไปนี้

$$\%error = \left| \frac{Y_n - X_n}{Y_n} \right| \times 100\% \tag{4.1}$$

เมื่อ $\%error$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

Y_n คือ ค่าที่ได้จากทางทฤษฎี

X_n คือ ค่าที่ได้จากการวัด

ช่วงแถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz

ตารางที่ 4.36 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพูคลื่นหลักของช่วงแถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz

ความถี่ (GHz)	พูคลื่นหลัก 1	พูคลื่นหลัก 2	พูคลื่นหลัก 3	พูคลื่นหลัก 4
2.5	3.8%	14.28%	6.52%	6.67%
2.6	2.85%	14.28%	5.79%	2.67%
2.69	3.81%	10.42%	5.79%	2.67%

ช่วงแถบความถี่ 3.4 - 3.6 GHz

ตารางที่ 4.37 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพูคลื่นหลักของช่วงแถบความถี่ 3.4 - 3.6 GHz

ความถี่ (GHz)	พูคลื่นหลัก 1	พูคลื่นหลัก 2	พูคลื่นหลัก 3	พูคลื่นหลัก 4
3.4	0.96%	12.19%	0%	3.94%
3.5	1.92%	2.43%	2.87%	3.94%
3.6	1.92%	2.43%	0%	0%

ช่วงแถบความถี่ 5.725 - 5.850 GHz

ตารางที่ 4.38 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพูคลื่นหลักของช่วงแถบความถี่ 5.725 - 5.850 GHz

ความถี่ (GHz)	พูคลื่นหลัก 1	พูคลื่นหลัก 2	พูคลื่นหลัก 3	พูคลื่นหลัก 4
5.725	0.95%	2.32%	0.73%	2.67%
5.8	0.94%	4.54%	0%	1.35%
5.850	0%	4.44%	0.74%	1.37%

จากการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแบบรูปการแผ่พลังงานของพูคลื่นหลักของแต่ละพอร์ตในแต่ละแถบความถี่นั้นพบว่าในช่วงแถบความถี่ที่ 2.5 - 2.69 GHz นั้นจะมีค่า

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแถบความถี่อื่นๆ เนื่องมาจากค่าความต่างเฟสของตัวคัปเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° ที่ได้ทำการสร้างจริงนั้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.59% ซึ่งมีค่ามากกว่าที่ช่วงแถบความถี่ 3.5 GHz และ 5.8 GHz ที่มีค่าเท่ากับ 0.67% และ 0.468% ตามลำดับ

4.5 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการสร้างวงจรคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์ และตัวเลื่อนเฟสที่ความถี่เดียว เมื่อนำมารวมวงจรเป็นเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์แล้วจะแสดงผลที่ได้อยู่ในรูปของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ ค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโดดเดี่ยว และค่ามุมของทิศทางของพูคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ของแต่ละความถี่ แล้วนำค่ามุมที่ได้ไปใส่ในโปรแกรมจำลองแบบจะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีและการออกแบบซึ่งสามารถสรุปได้ว่าไม่ว่าจะเปลี่ยนความถี่เป็นความถี่ใดๆ ทิศทางของลำคลื่นหลักของแบบรูปพลังงานที่ได้จะไม่มีการเลื่อนจะมีตำแหน่งอยู่ที่เดิม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้นและมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีความต้องการการบริการที่รวดเร็วทั้งภาพและเสียงของผู้ใช้บริการ ซึ่งส่งผลให้การสื่อสารด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่สูงเป็นที่ต้องการอย่างมาก หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าการส่งข้อมูลในระบบไร้สายในอนาคตนั้นต้องการแถบความถี่ใช้งานที่กว้างมากกว่าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งไวแมกซ์ก็เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีไร้สายที่มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูง ครอบคลุมการให้บริการในพื้นที่กว้าง และมีแถบความถี่ทั้งหมดสามแถบความถี่คือแถบความถี่ที่ 2.5 GHz (2.5 - 2.69 GHz) 3.5 GHz (3.4 - 3.6 GHz) และ 5.8 GHz (5.725 - 5.850 GHz) จากจุดเด่นของไวแมกซ์ที่สามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการให้บริการในพื้นที่กว้างๆ อย่างเช่น การเกิดสัญญาณคลื่นหลายวิถี การเกิดสัญญาณแทรกสอด เป็นต้น ซึ่งระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณได้ดีขึ้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดตรงที่ระบบสายอากาศโดยเฉพาะระบบสวิตช์ลำคลื่นจะสามารถทำงานได้ดีกับสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบ ซึ่งหากนำไปใช้กับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างจะทำให้เกิดความเสียหายหลายประการเช่น ไม่สามารถชี้ทิศทางที่มีอัตราขยายสูงสุดไปยังผู้ใช้งาน หรือไม่สามารถหันพูคลื่นรองหรือจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการออกแบบตัวคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณ ที่สามารถครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์โดยทำการออกแบบที่แถบความถี่ 2.5 GHz (2.5 - 2.69 GHz) 3.5 GHz (3.4 - 3.6 GHz) และ 5.8 GHz (5.725 - 5.850 GHz) โดยทำการจำลองแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio และจากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์จริงแล้วนำอุปกรณ์ที่ได้ไปวัดผลในห้องปฏิบัติการแล้วนำค่ามุมเฟสที่วัดได้ไปจำลองแบบเพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งจากผลการออกแบบและการทดสอบทำให้เราสามารถสามารถสรุปได้ว่าไม่ว่าจะเปลี่ยนความถี่เป็นความถี่ใดๆ ทิศทางของลำคลื่นหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จะไม่มีการเลื่อนจะมีตำแหน่งอยู่ที่เดิมและสามารถชี้ทิศทางที่มีอัตราขยายสูงสุดไปยังผู้ใช้งานได้ส่วนพูคลื่นรองก็สามารถชี้ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้เช่นเดียวกัน

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันยังไม่มีเทคโนโลยีไวแมกซ์ใช้งานได้จริง ซึ่งในการวัดทดสอบประสิทธิภาพของระบบของงานวิจัยที่ได้ในบทที่ 4 นั้น จึงต้องทำการวัดผลในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ในอนาคตเมื่อมีเทคโนโลยีไวแมกซ์ใช้แล้วเราจึงนำระบบของงานวิจัยนี้ไปทดสอบผลเพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบของเราใช้งานกับเทคโนโลยีไวแมกซ์ได้จริง

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้เสนอการออกแบบตัวคัปเปลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณ ที่สามารถครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์ แต่ยังขาดตัวเลื่อนเฟสแบบแถบความถี่กว้าง เนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาทำวงจรเลื่อนเฟสแบบแถบความถี่กว้างนั้น มีราคาสูงและตัวเลื่อนเฟสที่ขายตามท้องตลาดมีคุณสมบัติไม่ตรงตามที่เราต้องการ ในอนาคตอาจจะมีการออกแบบตัวเลื่อนเฟสแบบแถบความถี่กว้างขึ้นมาใช้งานต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

Allen, B. and Ghavami, M. (2005) **adaptive array system : Fundamentals and Applications.** John Wiley & Sons LTd, 2005.

Chun, Y - H. (2006). **Compact Wide – Band Branch – Line Hybrids.** IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, No. 2, pp.704 - 709, 2006

Collado C., Grau A., and De Flaviis, F.(2006) **Dual – Band Planar Quadrature Hybrid With Enhanced Bandwidth Response.** IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,Vol. 54, pp.180 - 188, 2006.

David M. Pozar (1998) **Microwave Engineering 2nd Edition**, John Wiley & Sons, Inc. 1998

Ghavami, M. (2002) **Wideband Smart Antenna Theory using Rectangular Array Structures.** IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 50, No.9, pp.2143 - 2151, 2002.

Herscovicl, N. and Christodoulou,C. (2000) **Smart Antennas**. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 42, No.3, pp.129 - 136, June 2000.

Hsu, C - L. (2010) **Design of Quadrature Hybrid With Closely Separated Dual - Passband Using Three – Branch Line Coupler.** IEEE Asia pacific Microwave Conference Proceedings.pp. 1232 - 1235, 2010

Ibrahim, S.Z., and Bialkowski, M.E (2009) **Wideband butler matrix in microstrip – slot technology** IEEE Asia pacific Microwave Conference. pp. 2104 - 2107, 2009.

Liberti Jr, J.J.C. and T.S. Rappaport (1999) **Smart Antennas for Wireless Communications : IS – 95 and Third Generation CDMA Applications,** Wiley and Sons, English, 2003.

Liou, C - Y., Chun, J., Chueh, Y - Z., Mao, S - G. and Wu, M - S. (2009) **A Novel Triple - Band Microstrip Branch – Line Coupler With Arbitrary Operating Frequencies. IEEE** Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 19, No.11, pp.683 - 685, June 2009.

Mahler, W and Landstorfer, F.M. (2005) **Design and Optimisation of an antenna array for wimax base station.** IEEE Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics., pp.1006 - 1009, 2005.

Moody, H. (1964) **The systematic design of the Butler matrix.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 12, pp. 786 - 788, Nov. 1964.

Nedil, M., Denidni, T.A., and Talbi, L. (2006) **Novel Butler Matrix Using CPW Multilayer Technology.** IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 54, No. 1, pp 499 - 507, 2006

Shani, D. (2005) **Smart Antenna for WiMAX Base Stations.** www mtiwe com. pp.1 - 8., 2005.

Uthansaku, M. and Bialkowski, M.E. (2004) **Impact of wideband signal on smart antenna system.** IEEE Microwaves, Radar and Wireless Communications, vol. 2, pp.501 - 504, 2004.

Zheng, S.Y., Chan, W.S., Tang, K.S. and Man, K.F. (2008) **Broadband Parallel Stubs Phase Shifter Using Defected Ground Structure.** IEEE Asia pacific Microwave Conference. pp.1 - 4, 2008

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1) Vanasa Sinchangreed, Monthippa Uthansakul, and Peerapong Uthansakul, (2011). **Design of Tri-Band Quadrature Hybrid coupler for WiMAX Applications.** 2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), Changmai, Thailand

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) December 7-9, 2011

Design of Tri-Band Quadrature Hybrid coupler for WiMAX Applications

Varasa Sinchangreed
School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
NakhonRatchasima,Thailand
m5240104@g.sut.ac.th

Monthippa Uthansakul
School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
NakhonRatchasima,Thailand
mtp@sut.ac.th

Peerapong Uthansakul
School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
NakhonRatchasima, Thailand
uthansakul@sut.ac.th

***Abstract*—As a quadrature hybrid is one important component in Butler matrix being a beamforming network for switched-beam antennas, this paper proposes a new design for quadrature hybrid coupler for WiMAX applications. To avoid the variation of different frequencies in different areas, the proposed design cover three frequency bands for WiMAX: 2.5 GHz (2.5-2.69 GHZ), 3.5 GHz (3.4-3.6 GHz) and 5.8 GHz (5.725-5.850 GHz). The proposed structure is relatively simple as it can be simply fabricated on single layer printed circuit board. The prototype is also constructed and tested to confirm its performance over the designated frequency bands.**

Keyword; Beamforming network, Butler matrix, quadrature hybrid coupler; three-branch-line (3-BL) quadrature hybrid; WiMAX.

I. Introduction

Currently, users in wireless communication systems require a high-speed data transmission to support modern applications such as video on demand, video conference and high speed down loading. WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access) [1]-[2] is one wireless communication technology which can support high speed data transferring. This technology was developed from the WLANs or Wi-Fi based on IEEE802.16 standard which provides high speed Internet up to 75 Mbps. Its coverage is 30 miles or 50 kilometers. The operating frequencies have been assigned for three bands: 2.5GHz (2.5-2.69 GHz), 3.5GHz (3.4-3.6 GHz) and 5.8GHz (5.725-5.850 GHz). These frequency bands are allocated in different areas. To improve the performance of WiMAX systems, smart antennas are envisaged to be employed as they can give rise to Signal-to-Interference plus Noise Ratio while situating in an environment having co-channel interference and multipath. One typical type of smart antennas is switched-beam antennas. A Butler matrix being one type of beamforming network for switched-beam antennas have been considerably popular nowadays as it is simple but effective [3]-[5]. To support WiMAX operation without limitation of area, the beamforming network must be able to operate for all tri-ban: 2.5, 3.5 and 5.8 GHz.

From literatures, many attempts have been paid to developing some components in Butler matrix in order to fit in the designated applications. In the work presented in [6], a new branch-line hybrid coupler with arbitrary power division ratio has been proposed. Also the authors of the work presented in [7] have designed a compact multilevel folded-line RF coupler using two-level C-sections and branch-line hybrids with single and cascaded C-sections. This exhibits a significant reduction in foot print compared with the conventional design. In authors of the work presented in [8] have proposed introducing the open stubs at the symmetry-planes in order to avoid low-impedance line for two-arm branchline which can increase the operating bandwidth. The novel design right/left-hand miniaturized dual-band directional coupler has been shown in the work presented in [9]. Also, the work presented in [10] has shown the design including measured result for a dual band hybrid coupler employing rectangular patch for WLANs.

From literatures [6]-[10], we can see that the new design has been complex, hence manufacturing is impractical. Another one point is that they cannot support tri-band for WiMAX. Therefore, this paper presents tri-band quadrature hybrid coupler. This hybrid coupler can operate in three frequency bands for WiMAX: 2.5, 3.5 and 5.8 GHz. The proposed structure is not complex as it can be fabricated on single layer printed circuit board. Its prototype is constructed and tested to reflect the true performance covering three frequency bands for WiMAX.

The remainder of paper is organized as follows. Section II describes the design of proposed tri-Band quadrature hybrid coupler. It is for WiMAX applications covering frequencies at 2.5 GHz (2.50-2.69 GHz), 3.5 GHz (3.4-3.6 GHz) and 5.8 GHZ (5.725-5.850 GHz). Also, this section presents the fabricated prototype for the proposed hybrid. The prototype is tested and its measurement results are shown in Section III. Finally, Section IV concludes the paper.

II. Design of Proposed Tri-Band Quadrature Hybrid

Quadrature hybrid couplers are 3 dB directional couplers with a 90° phase difference between the outputs of the through and coupled arms [11], and are often made in microstrip form. As shown in Fig. 1(a), all four ports are input (P1), direct (P2), coupled (P4) and isolated (P3). The behavior of quadrature hybrid coupler is as follows, when feeding the input signal at P1.

978-1-4577-2166-3/11/$26.00 ©2011 IEEE

2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) December 7-9, 2011

- Signal will go to port P2 and P4 with equal power.
- Signals at P2 and P4 have phase difference of 90°.
- In ideal case, P3 is supposed to be isolated.

The optimal characteristic impedances can be found using graph of characteristic impedances Z_{a1}, Z_{a2}, Z_b in [12]. The characteristics impedances are $Z_0 = 50\,\Omega$, $Z_{a1} = 80\,\Omega$, $Z_{a2} = 121\,\Omega$, $Z_b = 37.4\,\Omega$ and the overall size of the main substrate is 44.17×20.02×1.67 mm^3.

Figure 1 shows the layout of the proposed hybrid. Its size and dimension can be found in Table I. Please note that the design is performed in CST Microwave Studio.

III. Measurement Results

After completing the design in last section, a prototype of coupler is constructed. The photograph of the proposed prototype is shown in Figure 2. This was fabricated on single layer printed-circuit board having dielectric constant of 4.8 and substrate thickness of 1.6 mm. Then, the prototype is tested using network analyzer to see its response in terms of S-parameters.

Figures 3 show the simulated compared with measured result return loss of proposed prototype. As we can see, the return loss less than -10 dB is obtained covering the designated frequency bands as follows. We obtain the return loss values of -10.143 to -10.327 dB, -20.090 to -15.249 dB, -13.451 to -16.871and the measured return loss values of -13.676 to -12.502 dB, -18.422 to -15.338 dB, -23.596 to-18.79 dB for 2.5, 3.5 and 5.8 bands, respectively.

Figure 4 shows the simulated and measured insertion loss of proposed prototype. Please note that these results are for the through port. We obtain approximately -1.145 to -1.285 dB, -0.119 to -0.197 dB, -2.712 to -3.237 dB from simulation and -4.959 to -1.168 dB, -1.45 to -3.188 dB, -4.003 to -4.114 dB from measurement for 2.5, 3.5 and 5.8 bands, respectively. For the coupled port shown in Figure 5, we obtain approximately -1.090 to -1.284 dB, -0.667 to -0.118 dB, -2.7119 to -3.436 dB from simulation and -4.393 to -2.24 dB, -3.982 to -2.135 dB , -6.75 4 to -4.895 dB from measurement for 2.5, 3.5 and 5.8 band, respectively.

The simulated and measured result for the isolation port of proposed prototype is shown in Figure 6. From the result, the simulated isolation values are -10.143 to -10.133 dB, -23.051 to -17.573 dB and 12.537 to -14.854 dB and also , from the measurement, -10.967 to -10.157 dB, -18.437 to -15.912 dB and -23.742 to -19.79 dB for 2.5, 3.5 and 5.8 bands, respectively.

Also the phase difference between through and coupled ports is very important. Figures 7-8 show that we obtain phase difference from simulation of 87.308°, -88.418°, -92.5369° and, also from measurement, -89.79°, -90.009°, -94.884° for 2.5, 3.5 and 5.8 bands, respectively.

In addition, Table II concludes the important values obtained from experiments. However, there is some deviation between the results in some cases because of some manufacturing error. As we can see, this confirms that the proposed hybrid can operate in three bands of WiMAX.

IV. Conclusion

This paper has proposed a new design for tri-band quadrature hybrid coupler for WiMAX applications. The designated band covers frequencies from 2.5 GHz (2.5-2.69 GHz), 3.5 GHz (3.4-3.6 GHz) and 5.8 GHz (5.725-5.850 GHz) for WIMAX applications. The reason for tri-band design is to cover all areas operating different frequency bands. The prototype of proposed hybrid is constructed and tested to confirm its performance throughout the designated band.

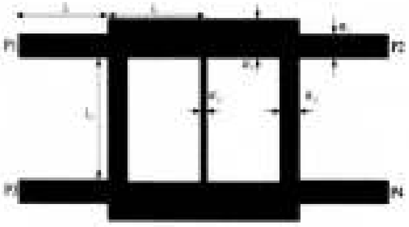


Figure 1. Layout of proposed tri-band hybrid.

TABLE I. Tri-band Quadrature Hybrid Dimensions

Parameters	Size (mm)
W_0	5
W_{a1}	1.4
W_{a2}	0.1
W_b	3
l_{a1}	9.98
l_{a2}	9.98
l_b	9.98
l_0	13.14

2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS) December 7-9, 2011

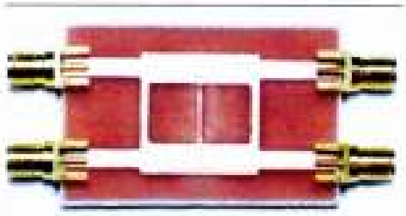


Figure 2. Photograph of the fabricated coupler.

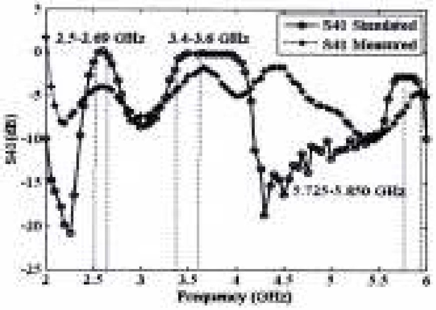


Figure 5. Measured and Simulated of coupled port S_{41} (dB)

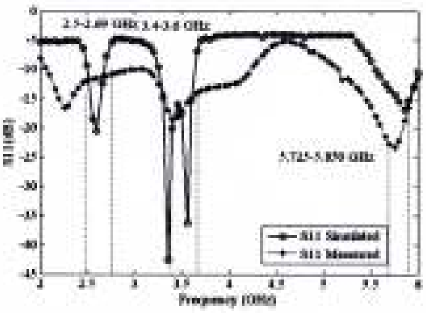


Figure 3. Measured and Simulated of return loss S_{11}(dB).

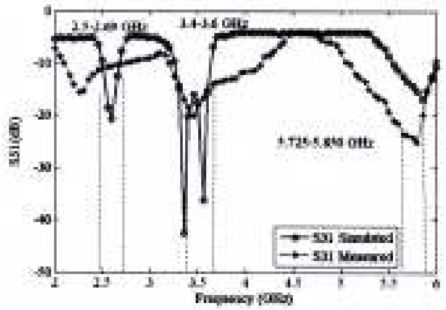


Figure 6. Measured and Simulated of isolation S_{31}(dB)

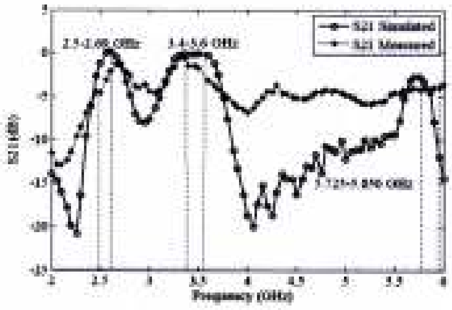


Figure 4. Measured and Simulated of insertion loss S_{21} (dB)

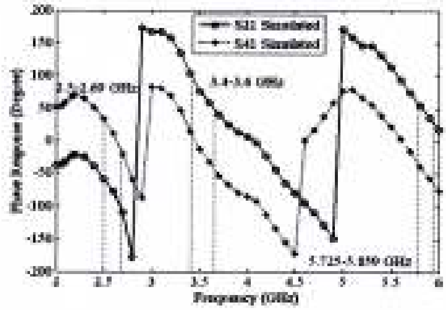


Figure 7. Simulated phase response between S_{21} and S_{41} (dB)

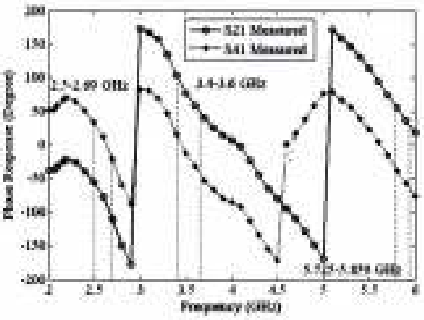


Figure 8. Measured phase response between S_{21} and S_{41} (dB)

TABLE II. MEASURED PERFORMANCE OF TRI-BAND QUADRATURE HYBRID COUPLER

Frequency	2.5 GHz	3.5 GHz	5.8 GHz
Insertion loss (S_{21}) Simulated	-1.145 dB	-0.0856 dB	-3.237 dB
Coupled port (S_{41}) Simulated	-1.145 dB	-0.0412 dB	-2.711 dB
Insertion loss (S_{21}) Measured	-4.595 dB	-1.684 dB	-4.072 dB
Coupled port (S_{41}) Measured	-4.393 dB	-1.684 dB	-6 dB
Phase (S_{21}) Simulated	36.727°	-8.413°	-33.9139°
Phase (S_{41}) Simulated	-50.581°	80.005°	58.623°
Phase (S_{21}) Measured	33.954°	-12.587°	-37.752°
Phase (S_{41}) Measured	-55.836°	77.422°	56.132°

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge the financial support from Suranaree University of Technology, Thailand.

REFERENCES

[1] http://www.siamwimax.com
[2] WiMAX Forum releases
[3] C. H. Tseng, C. Chen, and T. Chu, "A Low-Cost 60-GHz Switched-Beam Patch Antenna Array With Butler Matrix Network," IEEE Antennas and wireless propagation letters, vol. 7, pp.432-435.
[4] S. Jeong and T. W. Kim, "Design and Analysis of Swapped Port Coupler and Its Application in a Miniaturized Butler Matrix," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 58, no. 4, pp. 764-770, April 2010.
[5] C. W. Wang, Student Member, "A New Planar Artificial Transmission Line and Its Applications to a Miniaturized Butler Matrix," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 55, November 2007.
[6] C. Owon, K. Choi, I. Na, J. Lim, Y. Kim, D. Ahn and K. Kim, "A New Branch-Line Hybrid Coupler with Arbitrary Power Division Ratio," IEEE Microwave Conference Asia Pacific, pp. 1-4, 2007.
[7] R. K. Settaluri, S Weisshaar, C. LIM and V. K, "Design of Compact Multilevel Folded-Line RF Couplers," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, pp. 2331-2339, 1999.
[8] B. Mayer and R. Knochel, "Branchline-couplers with improved design flexibility and broad bandwidth," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 47, pp. 2331-2339, 1999.
[9] P. L. Chi and T. Itoh, "Miniaturized Dual-Band Directional Couplers Using Composite Right/Left-Handed Transmission Structures and Their Applications in Beam Pattern Diversity Systems," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 57, pp. 1207-1215.
[10] S. Y. Zhen, S. H. Yeung, K. Fung, S. H. Leung ang Q. Xue, "Dual-band rectangular patch hybrid cou," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 56, pp. 1721-1728, 2008.
[11] D.M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed. New York: Wiley, 1998.
[12] C. L. Hsu, "Design of quadrature hybrid with closely dual-passband using three-branch line coupler," IEEE Microwave Conference Asia Pacific, pp. 1233-2010.

ประวัติผู้เขียน

นางสาววนษา สินจังหรีด เกิดเมื่อวันที่ 3 มีนาคม 2530 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายจากโรงเรียนมารีย์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2552 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อ ในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โดยขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโทได้มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ระดับนานาชาติจำนวน 1 ฉบับ ดังนี้

Vanasa Sinchangreed, Monthippa Uthansakul, and Peerapong Uthansakul, (2011) **Design of Tri - Band Quadrature Hybrid coupler for WiMAX Applications**. 2011 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), Changmai, Thailand, December 7 - 9, pp. 1 - 4.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี