



รายงานการวิจัย

การพัฒนาระบบสายอากาศเก่งสำหรับสถานีฐานของไวแมก

Development of Smart Antenna Systems for WiMAX Base Station

ได้รับทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาระบบสายอากาศเก่งสำหรับสถานีฐานของไวแมก

Development of Smart Antenna Systems for WiMAX Base Station

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ธันวาคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับ
โครงการวิจัยนี้



ผู้วิจัย

ธันวาคม 2555

บทคัดย่อ

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 ซึ่งสามารถทำการเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตไร้สายให้กับพื้นที่ห่างไกลที่สายเคเบิลไม่สามารถลากไปไม่ถึงได้เป็นอย่างดีแต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านในการให้บริการในพื้นที่กว้างๆ อย่างเช่น พื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางอยู่ เช่น บ้านเรือนต้นไม้ ภูเขา ตึก ฯลฯ จึงทำให้เกิดปัญหา เช่น สัญญาณคลื่นหลายวิถี การจางหายของสัญญาณสัญญาณแทรกสอด จึงได้มีการคิดค้นระบบที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวนั้นคือระบบสายอากาศแก่ง ซึ่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการและหันจุดศูนย์หรือพุ่งไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ในเวลาเดียวกัน กระบวนการดังกล่าวเรียกว่าการก่อรูปลำคลื่นระบบสายอากาศแก่งที่สนใจในงานวิจัยฉบับนี้คือ สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อย และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ เพื่อรองรับการใช้งานในทุกพื้นที่ของระบบไวแมกซ์สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นควรที่จะสามารถทำงานได้ดีที่ความถี่สามแถบความถี่ที่กล่าวมาในข้างต้น การที่จะนำเอาสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นแบบเดิมที่ทำงานได้ดีกับสัญญาณที่มีความถี่เดียวมาใช้กับสัญญาณที่มีแถบความถี่หลายๆ แถบ ระบบจะไม่สามารถลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดได้ดีเหมือนเดิม ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มีความสนใจที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยออกแบบตัวคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณที่สามารถครอบคลุมได้ทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกซ์ จากนั้นต้นแบบของตัวคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณจะถูกสร้างและทดสอบในห้องปฏิบัติการ

Abstract

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.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบไวเมกซ์	5
2.2.1 มาตรฐานของเทคโนโลยีไวเมกซ์	6
2.2.2 โครงสร้างเครือข่ายไวเมกซ์	7
2.2.3 รูปแบบการเชื่อมต่อของไวเมกซ์	7
2.2.4 ศักยภาพในการให้บริการของไวเมกซ์	8
2.2.5 คุณลักษณะเด่นของเครือข่ายไวเมกซ์	8
2.2.6 ประโยชน์ของไวเมกซ์	9
2.3 สายอากาศแถวลำดับ	9
2.3.1 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้น	10
2.3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ	13
2.4 ระบบสายอากาศเก่ง	16
2.4.1 ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลากลื่น	20
2.4.2 ระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 เทคนิคการหันลำคลื่น.....	23
2.5.1 เครื่องข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์.....	23
2.6 ทฤษฎีการส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....	27
2.7 ผลกระทบของแถบความถี่กับระบบสายอากาศแก่ง.....	30
2.8 กล่าวสรุป.....	34
บทที่ 3 การออกแบบระบบต้นแบบ.....	35
3.1 กล่าวนำ.....	35
3.2 การออกแบบเครื่องข่ายก่อรูปลำคลื่น.....	35
3.2.1 การออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90°	35
3.2.2 การออกแบบวงจรไขว้สัญญาณ.....	50
3.2.3 การออกแบบวงจรเลื่อนเฟส.....	55
3.3 กล่าวสรุป.....	55
บทที่ 4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ.....	56
4.1 กล่าวนำ.....	56
4.2 ผลการทดสอบตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่.....	56
4.3 ผลการทดสอบตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่.....	60
4.4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ.....	63
4.5 กล่าวสรุป.....	94
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	95
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	96
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	101

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภาพระบบไวแมกซ์ 7
2.2	สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น 10
2.3	สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจำนวน 2×2 13
2.4	ระบบสายอากาศเก่ง..... 16
2.5	ระบบสายอากาศเก่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ 17
2.6	โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตซ์ลำคลื่น 22
2.7	โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว 22
2.8	โครงสร้างของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบแบตเตอรี่เมตริกซ์..... 24
2.9	แบบรูปการแผ่พลังงานของทั้ง 4 ลำคลื่นที่ได้จากการก่อรูปลำคลื่นจากแบตเตอรี่เมตริกซ์ 25
2.10	โครงสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° 26
2.11	โครงสร้างตัวไขว้สัญญาณ..... 26
2.12	ตัวเลื่อนเฟส 45° 27
2.13	สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป..... 27
2.14	การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบ ไมโครสตริป 28
2.15	แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ใช้งานความถี่แถบแคบที่ 2 GHz 31
2.16	แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ใช้งานความถี่แถบกว้างที่ 1.5 - 2.5 GHz 32
2.17	โครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้งานในแถบความถี่กว้างโดยอาศัยการประมวลผล เชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว 32
2.18	แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 1.6 - 2.69 GHz 33
2.19	แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 3.49 - 4.21 GHz 33
2.20	แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 4.89 - 5.61 GHz 34
3.1	โครงสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ 36
3.2	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° แบบความถี่แคบ 36
3.3	ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ 37
3.4	ความสูญเสียจากการแยกโคเดเค็ยวของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ 37

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5	โครงสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 38
3.6	กราฟแสดงค่าของ Z_{h1} Z_{h2} และ Z_v ที่อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Collado C., Grau A., and De Flaviis, F.(2006) 39
3.7	ขนาดของวงจรตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.5 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 46
3.8	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่ความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.5 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 48
3.9	ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่ความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.5 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz 48
3.10	ความสูญเสียจากการแยกโคคเคียวของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 49
3.11	มุมเฟสของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 49
3.12	ขนาดของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 52
3.13	ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณ แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 53
3.14	ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโคคเคียวในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 53
3.15	มุมเฟสของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.5 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 54
3.16	ความสัมพันธ์ของค่ามุมเฟสของตัวเลื่อนเฟส..... 55
4.1	ตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่สร้างจริงที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz..... 57

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรถักเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz.....	57
4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรถักเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz	58
4.4 ความสูญเสียจากการแยกโคคเคียวของวงจรถักเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz.....	58
4.5 มุมเฟสของวงจรถักเปลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz.....	59
4.6 ตัวไวสัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่สร้างจริงที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz.....	60
4.7 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรถักเปลอร์แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz.....	61
4.8 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโคคเคียวในแต่ละพอร์ตของวงจรถักเปลอร์แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz.....	61
4.9 มุมเฟสของวงจรถักเปลอร์แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz.....	62
4.10 ระบบต้นแบบเครือข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz	63
4.11 ระบบต้นแบบเครือข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz	64
4.12 ระบบต้นแบบเครือข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz	64
4.13 ระบบต้นแบบเครือข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz	65
4.14 ระบบต้นแบบเครือข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz	65
4.15 ระบบต้นแบบเครือข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz	66
4.16 ระบบต้นแบบเครือข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz	66
4.17 ระบบต้นแบบเครือข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz	67

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลาคลิ้นแบบแบตเตอรี่เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz	67
4.19 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.5 GHz	69
4.20 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.6 GHz	72
4.21 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.69 GHz	74
4.22 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.4 GHz	77
4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.5 GHz	80
4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.6 GHz	82
4.25 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.725 GHz	86
4.26 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.8 GHz	88
4.27 แบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 5.850 GHz	91



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การเปรียบเทียบเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ..... 5
2.2	ทิศทางของพหุคลื่นหลัก ความต่างเฟส และเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ 25
3.1	ค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° 45
3.2	การปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่วงความถี่ต่างๆ ของตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° 46
3.3	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 50
3.4	แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์แบบ 90° แบบสามแถบความถี่ 51
3.5	ค่าพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณ 51
3.6	การปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่วงความถี่ต่างๆ ของตัวไขว้สัญญาณ 54
3.7	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ 55
3.8	แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ 56
4.1	แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์แบบ 90° แบบสามแถบความถี่ 59
4.2	แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ 62
4.3	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.5 GHz 68
4.4	ผลการวัดทิศทางของพหุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz 68
4.5	ผลการออกแบบทิศทางของพหุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz 69
4.6	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.6 GHz 70
4.7	ผลการวัดทิศทางของพหุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz 71
4.8	ผลการออกแบบทิศทางของพหุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz 71
4.9	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.69 GHz 73
4.10	ผลการวัดทิศทางของพหุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น แบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz 73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ผลการออกแบบทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz.....	74
4.12 สรุบทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ.....	75
4.13 สรุบทิศทางของลำคลื่นหลักของการวัด.....	75
4.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.4 GHz.....	76
4.15 ผลการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz.....	76
4.16 ผลการออกแบบทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz.....	77
4.17 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.5 GHz.....	78
4.18 ผลการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz.....	79
4.19 ผลการออกแบบทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz.....	79
4.20 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.6 GHz.....	81
4.21 ผลการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz.....	81
4.22 ผลการออกแบบทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz.....	82
4.23 สรุบทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ.....	83
4.24 สรุบทิศทางของลำคลื่นหลักของการวัด.....	83
4.25 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.725 GHz.....	84
4.26 ผลการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz.....	85
4.27 ผลการออกแบบทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz.....	85
4.28 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.8 GHz.....	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.29 ผลการวัดทิศทางของพுகลิ้นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz	87
4.30 ผลการออกแบบทิศทางของพுகลิ้นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz	88
4.31 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.850 GHz	89
4.32 ผลการวัดทิศทางของพுகลิ้นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz.....	90
4.33 ผลการออกแบบทิศทางของพுகลิ้นหลักและเฟสของสัญญาณขาออก สำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz.....	90
4.34 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ.....	92
4.35 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการวัด	92
4.36 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพูกลิ้นหลักของช่วงแถบความถี่ 2.5 – 2.69 GHz	93
4.37 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพูกลิ้นหลักของช่วงแถบความถี่ 3.4 – 3.6 GHz	93
4.38 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพูกลิ้นหลักของช่วงแถบความถี่ 5.725 – 5.850 GHz	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ ที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การเข้าถึงแบนด์วิดท์แบบไร้สาย (Wireless Broadband Access) กำลังได้รับความสนใจมากในขณะนี้เพราะเป็นการขยายการเข้าถึงเครือข่ายอินเทอร์เน็ต โดยที่ไม่ต้องติดตั้งสายส่งสัญญาณ ในบรรดาเทคนิคต่างๆ ที่สามารถรองรับการเข้าถึงแบนด์วิดท์แบบไร้สายนั้น ไวแมก (WiMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access) ถูกพิจารณาว่าเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมมากที่สุดทั้งในเชิงการวิจัยและการพาณิชย์ สำหรับในประเทศไทยนั้นระบบไวแมกกำลังถูกพิจารณาที่จะนำมาใช้งานในอนาคตเช่นกัน ซึ่งในปัจจุบันมีหลายองค์กรเช่น บริษัท ทศท คอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน) กำลังติดตั้ง และทดสอบระบบไวแมก ร่วมกับบริษัทผู้ผลิตเพื่อศึกษาเสถียรภาพก่อนการนำไปใช้จริง ดังนั้นการวิจัยเกี่ยวกับไวแมกจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ ในโครงการวิจัยที่เสนอนี้จะพัฒนาระบบสายอากาศแก่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบไวแมก โดยที่ชุดระบบสายอากาศในปัจจุบันของไวแมกเป็นแบบกระจายรอบทิศทาง จึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไปในทิศทางที่ไม่จำเป็น โดยเฉพาะเมื่อติดตั้งไวแมกเป็นแบบคงที่ (fixed WiMAX) จุดของการเข้าถึงเครือข่ายจะมีทิศทางที่แน่นอนอยู่แล้ว ดังนั้นระบบสายอากาศแก่งสามารถนำพลังงานที่เสียไปในทิศทางที่ไม่ต้องการไปเพิ่มให้กับทิศทางที่มีจุดของการเข้าถึงเครือข่ายตั้งอยู่ได้ ทำให้ประสิทธิภาพด้านการส่งข้อมูลสูงขึ้นด้วยพลังงานเท่าเดิม นอกจากนี้ประโยชน์อีกอย่างของการใช้สายอากาศแก่งคือสามารถเพิ่มพื้นที่การให้บริการที่ครอบคลุมจุดเข้าถึงเครือข่ายได้กว้างมากขึ้นด้วยพลังงานที่เท่าเดิม ซึ่งประเด็นปัญหาในงานวิจัยนี้ถือว่าสอดคล้องกับนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2554) ในยุทธศาสตร์การวิจัยที่ 1 กลยุทธ์การวิจัยที่ 8 แผนงานวิจัยที่ 1 เรื่องการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มสมรรถนะและพัฒนาศักยภาพขีดความสามารถทางเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร ถึงแม้จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่าระบบสายอากาศแก่งจะถูกนำเสนอในงานวิจัยของระบบอื่นเช่น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ มาแล้วก็ตาม แต่สำหรับไวแมกระบบสายอากาศแก่งจะต้องถูกพัฒนาและออกแบบใหม่เพื่อให้เหมาะกับคุณลักษณะเด่นที่ไวแมกแตกต่างจากระบบอื่นๆ เช่นการเข้าถึงเป็นแบบแบนด์วิดท์ไม่ใช้แบนแคบ การเข้าถึงใช้วิธี OFDMA และมีการมอดูเลตแบบปรับตัว ดังนั้นโครงการนี้จะพัฒนาระบบสายอากาศแก่งให้สอดคล้องกับคุณสมบัติต่างๆ

ที่กล่าวถึงไปแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรองรับการเข้าถึงแบนด์วิธ ทั้งนี้ในการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมา ยังไม่มีการพัฒนาสายอากาศเก่งสำหรับสถานีฐานที่รองรับการเข้าถึงแบนด์วิธเลย ทำให้ผลสำเร็จของโครงการวิจัยนี้ถือว่าการสร้างกระบวนการออกแบบจากเทคโนโลยีใหม่ที่น่าสนใจ ซึ่งสามารถนำไปแข่งขันกับวิธีการอื่นๆ ในต่างประเทศได้ จึงสอดคล้องกับกลุ่มเรื่องที่ควรวิจัยเร่งด่วนตามนโยบายและยุทธศาสตร์การวิจัยของชาติ (พ.ศ. 2551-2554) ในกลุ่มเทคโนโลยีใหม่และเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่ออุตสาหกรรม นอกจากนี้ผลสำเร็จที่ได้ยังเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญในการพัฒนาต่อยอดเพื่อนำไปใช้กับภาคธุรกิจต่างๆ ทำให้ไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ลดการนำเข้าเทคโนโลยีราคาแพงและเสริมสร้างความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจของประเทศในทางอ้อมได้อีกด้วย ประเด็นนี้ถือว่าสอดคล้องกับยุทธศาสตร์การพัฒนาประเทศตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 10 (พ.ศ. 2550-2554) ในยุทธศาสตร์การปรับโครงสร้างเศรษฐกิจให้สมดุลและยั่งยืนเป็นอย่างมาก และยังคงเป็นฐานสำหรับการวิจัยและพัฒนาที่ยั่งยืนในอนาคต ทำให้ตรงกับนโยบายของรัฐบาล นโยบายระยะการบริหารราชการของรัฐบาล ในหัวข้อ 1.1 การสร้างความเชื่อมั่นและกระตุ้นเศรษฐกิจในภาพรวมเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นแก่ภาคประชาชน และ 2.3.5 นโยบายเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาระบบสายอากาศเก่งสำหรับสถานีฐานของไวแมก
2. เพื่อสร้างองค์ความรู้สำหรับเทคโนโลยีสายอากาศเก่งที่เหมาะสมกับระบบไวแมก ทำให้สามารถออกแบบ ติดตั้งสถานีฐานได้ในอนาคต
3. เพื่อสร้างเทคโนโลยีใหม่ที่มีศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศได้

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ศึกษา วิเคราะห์ และออกแบบสายอากาศเก่งด้วยวิธีจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ นำผลการศึกษามาประยุกต์เข้ากับสถานีฐานของไวแมกด้วยวิธีจำลองแบบเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ โดยการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ใช้ระบบสายอากาศเก่ง สร้างชุดทดสอบอย่างง่ายและวัดผลจริงเพื่อยืนยันความสำเร็จของโครงการ

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาการทำงานของระบบสายอากาศแก่ง
2. ศึกษาระบบไวแมก และการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับจุดเข้าถึงเครือข่าย
3. ออกแบบและพัฒนาระบบสายอากาศแก่ง ด้วยการจำลองแบบในโปรแกรม MATLAB
4. ศึกษาแบบจำลองการแพร่กระจายสัญญาณสำหรับสถานีฐานของไวแมก
5. ทดสอบสมรรถนะของการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ เมื่อสถานีฐานใช้ระบบสายอากาศแก่ง
6. เปรียบเทียบผลระหว่างสถานีฐานที่ใช้และไม่ใช้ระบบสายอากาศแก่ง
7. ทดสอบ สร้างและวัดจริงระบบสายอากาศแก่งต้นแบบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองแบบ
8. ปรับปรุง และพัฒนาระบบสายอากาศแก่งเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ
9. เสนอบทความในงานประชุมวิชาการ
10. นำข้อเสนอแนะในงานประชุมวิชาการมาปรับปรุง (ถ้ามี)
11. สรุปผลสำเร็จของโครงการและทำรายงานโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ชุดค่ารูปลักษณ์ต้นแบบสำหรับระบบสายอากาศแก่งสำหรับระบบไวแมก และการเผยแพร่ผลงานวิจัยนี้ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติอย่างน้อย 1 บทความ ซึ่งเป็นการนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้เผยแพร่แก่นักวิจัยที่ทำงานใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับงานวิจัยอื่นๆ ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานงานวิจัยชิ้นนี้ซึ่งแบ่งเป็นทั้งหมดแปดส่วน ส่วนแรกคือการกล่าวนำเข้าสู่เนื้อหา ส่วนที่สองจะเป็นเรื่องของระบบไวแมก โดยจะกล่าวถึงความเป็นมาและหลักการพื้นฐานของระบบ ต่อมาในส่วนที่สามเป็นส่วนของสายอากาศแถวลำดับที่ใช้ในระบบสายอากาศแก่งโดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับทั้งแบบเส้นและแบบระนาบ ในส่วนที่สี่จะกล่าวถึงระบบสายอากาศแก่งซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นสายอากาศแบบสลับลำคลื่นและแบบปรับตัว ในส่วนที่ห้าจะมีเนื้อหาต่อเนื่องกับเนื้อหาของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ต้องมีเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ในส่วนที่หกจะกล่าวถึงทฤษฎีการส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ส่วนที่เจ็ดจะกล่าวถึงผลกระทบของแถบความถี่ที่มีต่อระบบสายอากาศแก่ง และส่วนสุดท้ายในส่วนที่แปดจะเป็นการกล่าวสรุปเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้

2.2 ประวัติและความเป็นมาของระบบไวแมก

ไวแมก (Worldwide Interoperability for Microwave Access : WiMAX) นั้นเป็นการออกแบบโครงสร้างและอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายที่ได้ถูกพัฒนามาจากไวเลสแลนดหรือวายฟาย และเป็นเทคโนโลยีบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงรุ่นใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้นบนมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งได้การอนุมัติออกมาเมื่อเดือนมกราคม พ.ศ. 2547 โดยสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์หรือ IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) ซึ่งต้องการเทคโนโลยีไร้สายเข้ามาตอบสนองการสื่อสารข้อมูลระดับบรอดแบนด์ที่มีความเร็วสูงๆ และระยะทางไกลๆ โดยมาตรฐาน 802.16 ตัวแรกๆ จะเป็นแนวสายตา (Line Of Sight : LOS) ที่ใช้ความถี่แบบความถี่เดียว แต่อาศัยแบนด์กว้างในการสื่อสารข้อมูล หากแต่ก็ทำให้การให้บริการพื้นที่กว้างๆ ในความเป็นจริงในกรณีที่มีปัญหา ยกตัวอย่างเช่น ในพื้นที่ส่วนใหญ่มักจะมึสิ่งกีดขวางอยู่เสมอ เช่น อาคารบ้านเรือน ต้นไม้ ภูเขา ฯลฯ ทำให้การรับส่งแบบแนวสายตา ไม่มี

ประสิทธิภาพเพียงพอ อีกทั้งคลื่นความถี่สูงจะมีปัญหามากในการส่งระยะทางไกลๆ ดังนั้นจึงทำให้มีการปรับปรุงมาตรฐานให้รับส่งแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (Non Line Of Sight : NLOS) ระบบไวแมกมีแถบความถี่ทั้งหมดสามแถบความถี่คือ 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 ไวแมกสามารถให้บริการครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างกว่าระบบโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบ 3 จี มากถึง 10 เท่า ยิ่งกว่านั้นก็ยังมียุทธศาสตร์ความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลสูงสุดถึง 75 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ซึ่งเร็วกว่า 3 จี ถึง 30 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ที่แสดงถึงการเปรียบเทียบเทคโนโลยีไวแมกกับเทคโนโลยีไร้สายแบบต่างๆ

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

2.2.1 มาตรฐานของเทคโนโลยีไวแมก

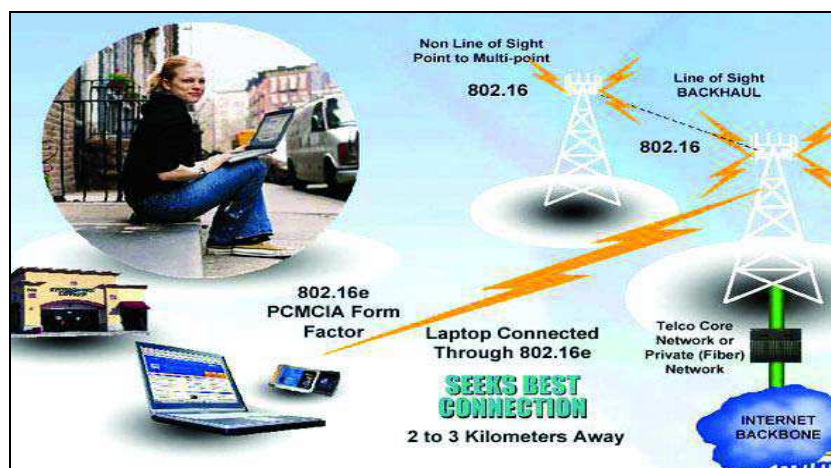
❖ IEEE 802.16 : เป็นมาตรฐานที่ให้ระยะทางการเชื่อมโยง 1.6 - 4.8 กิโลเมตรเป็นมาตรฐานเดียวที่สนับสนุน LOS

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

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

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

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าเมื่อมีการนำเทคโนโลยีไวแมกมาใช้กันอย่างกว้างขวางเครือข่ายบนเทคโนโลยีไวแมก สามารถเชื่อมต่อเครือข่ายอินเทอร์เน็ตด้วยความเร็วสูงไปยังสถานที่ต่างๆ ในรัศมีประมาณ 50 กิโลเมตร ทำให้บริเวณดังกล่าวกลายเป็น WMAN (Wireless MAN) ไปอย่างอัตโนมัติบนเครือข่ายไร้สาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพระบบไวแมก

2.2.2 โครงสร้างเครือข่ายไวแมก

โครงสร้างของเครือข่ายไวแมกประกอบด้วย

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 ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับและส่งข้อมูลกำลังสูงเพื่อให้ติดต่อรยะไกลได้

จากองค์ประกอบเครือข่ายข้างต้น จะเห็นว่าไม่มีความซับซ้อนดังเช่น ในกรณีของเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยสถานีฐานไวแมกแต่ละแห่งมีความสามารถในการประมวลผลข้อมูล ได้สมบูรณ์แบบ พร้อมทั้งสามารถบันทึกข้อมูลในการใช้งาน และคำนวณหาเส้นทางในการรับส่งข้อมูลซึ่งอยู่ในรูปของ IP (Internet Protocol) ได้โดยตรง สำหรับการเชื่อมต่อเครือข่ายไวแมกเข้าหากันทำได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการเข้าเครือข่าย IP เพื่อเชื่อมต่อสถานีฐานเข้าด้วยกัน หรือแม้กระทั่งใช้สถานีฐานไวแมกด้วยกัน ทำการรับส่งสัญญาณแบบ LOS นอกจากนี้ในกรณีที่ผู้ให้บริการเครือข่ายไวแมกมีเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นของตนเองอยู่แล้วก็สามารถใช้ประโยชน์จากวงจรสื่อสารสัญญาณที่เชื่อมต่ออุปกรณ์เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ดังกล่าว

2.2.3 รูปแบบการเชื่อมต่อของไวแมก

1) รูปแบบการเชื่อมต่อแบบ PTP (Point to Point) เป็นการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างสถานีฐานกับลูกข่าย

2) รูปแบบการเชื่อมต่อแบบ PMP (Point to Multipoint) เป็นการเชื่อมระหว่างสถานีฐานกับหลายๆ สถานีลูกข่ายพร้อมกัน

3) รูปแบบการเชื่อมต่อแบบ Mesh Topology เป็นการเชื่อมต่อในลักษณะใยแมงมุมโดยสถานีฐานติดต่อกับสถานีฐาน สถานีฐานติดต่อกับลูกข่าย ลูกข่ายยังสามารถติดต่อกันได้เองด้วย

2.2.4 ศักยภาพในการให้บริการของไวแมก

ศักยภาพในการให้บริการสื่อสารข้อมูลของไวแมก หมายถึงขอบเขตการให้บริการในพื้นที่ การให้บริการและอัตราความเร็วในส่งข้อมูล ทั้งนี้ในปัจจุบันสถานีไวแมกแต่ละแห่งสามารถให้บริการแบบ NLOS ได้ในรัศมีทำการตั้งแต่ 4 - 9 กิโลเมตร รองรับการสื่อสารด้วยอัตราเร็วสูงสุดในช่วง 8 - 11.3 เมกะบิตต่อวินาที ทั้งในช่วงการส่งสัญญาณจากเครื่องลูกข่าย ไปยังสถานีฐาน และจากสถานีฐาน ไปสู่เครื่องลูกข่าย สำหรับการใส่ไวแมกในงานสื่อสารระยะทางไกลในรูปแบบการส่งสัญญาณแบบ 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 คุณลักษณะเด่นของเครือข่ายไวแมก

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

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

❖ **ระบบรักษาความปลอดภัย** เป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยคุณสมบัติการรักษาความลับของข้อมูลและการเข้ารหัสข้อมูลอยู่ในมาตรฐาน ไวมกจะช่วยให้การสื่อสารมีความปลอดภัยยิ่งขึ้น แคมยังมีระบบตรวจสอบสิทธิการใช้งานและมีระบบการเข้ารหัสข้อมูลในตัวด้วย

❖ **การจัดลำดับความสำคัญของงานบริการ (QoS - Quality of Service)** สำหรับระบบเครือข่ายไร้สายมาตรฐานไวมกมีคุณสมบัติด้าน QoS ที่รองรับการทำงานของบริการสัญญาณเสียงและสัญญาณวิดีโอ ซึ่งต้องการระบบเครือข่ายที่ทำงานด้วยความรวดเร็ว บริการเสียงของไวมกนี้อาจจะอยู่ในรูปของบริการ Time Division Multiplexed (TDM) หรือ ในรูปแบบ Voice over IP (VoIP) ก็ได้ โดยโอเปอเรเตอร์สามารถกำหนดระดับความสำคัญของการใช้งานให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งาน อาทิ สำหรับบริการห้องค์ธุรกิจ ผู้ใช้งานตามบ้านเรือน เป็นต้น

2.2.6 ประโยชน์ของไวมก

- 1) ช่วยให้ผู้ใช้บริการสามารถขยายพื้นที่ในการให้บริการบรอดแบนด์ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ
- 2) สามารถขยายโครงข่ายอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงโดยไม่มีข้อจำกัดทางภูมิประเทศ
- 3) เชื่อมต่อแบบจุดหนึ่งไปหลายๆ จุดได้
- 4) ความคุ้มค่าในการลงทุน

2.3 สายอากาศแถวลำดับ

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

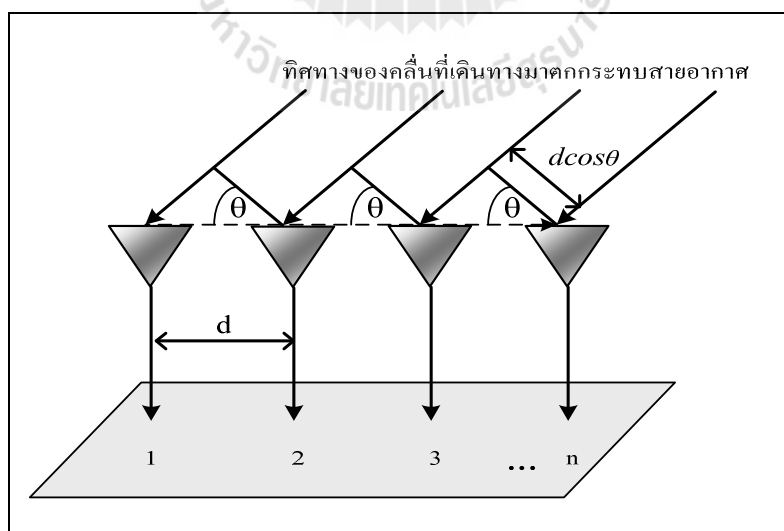
2.3.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear antenna array) เป็นสายอากาศแถวลำดับที่มีการเรียงตัวกันของสายอากาศแต่ละต้นเป็นแนวเส้นตรง ซึ่งระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นจะเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับในรูปที่ 2.2 เป็นสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N ต้นหรือ $N \times 1$ ต้น ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ของแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นได้จากสมการที่ (2.1)

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.1)$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่น

รูปที่ 2.2 แสดงถึงสายอากาศแบบเชิงเส้น $N \times 1$ ต้น โดยที่ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทุกต้นและมีแอมพลิจูดเท่ากันแต่สายอากาศแต่ละต้นที่ถัดมาจากต้นที่ 1 หรือต้นอ้างอิงจะมีเฟสมากกว่าเมื่อเทียบกับต้นก่อนหน้า ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่า แถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array)



รูปที่ 2.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน $N \times 1$ ต้น

เราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับนี้จากการคูณกันระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor : AF) ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

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

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

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

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

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

แทนสมการ (2.4) ลงใน (2.5) จะสามารถลดรูปของสมการลงเหลือ

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

ย้ายข้างและจัดรูปสมการจะได้

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

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

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

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

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

ค่าของ ψ จะถือว่าน้อยมากๆ ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าสมการได้เท่ากับ

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

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

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

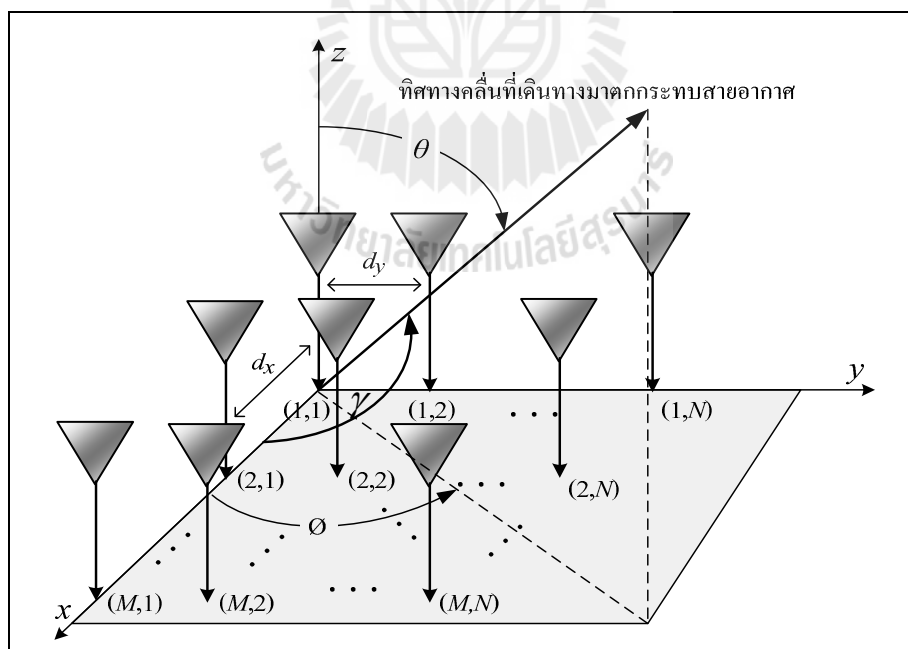
$$(AF)_n \cong \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi\right)}{\frac{N}{2}\psi} \right] \quad (2.11)$$

ดังนั้นเมื่อเราทราบค่าตัวประกอบแถวลำดับเราจะสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแบบเชิงเส้นได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$E(\text{ผลรวม}) = [E(\text{ของสายอากาศต้นเดียว ณ จุดอ้างอิง})] \times [\text{ตัวประกอบแถวลำดับ}] \quad (2.12)$$

2.3.2 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ (planar antenna array) เป็นรูปแบบที่ประยุกต์มาจากรูปแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นที่ได้อธิบายใน 2.3.1 สายอากาศแต่ละตัวถูกจัดวางตัวเป็นสี่เหลี่ยมหรือที่เรียกว่าสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบ สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจะมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบเชิงเส้น คือสามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่พลังงานได้ ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบมีความเอนกประสงค์มากและสามารถให้แบบรูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ต่ำ ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบสามารถที่จะหันพู่หลักในมุมเงยและทุกๆ ทิศรอบตัว 360° ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจึงเหมาะกับการนำไปใช้ในงานเรดาร์ การชี้ทางระยะไกล (remote sensing) การสื่อสารไร้สายและรวมถึงระบบสายอากาศแก๊งด้วย ตามที่ได้อธิบายไว้ในหนังสือของ Allen, B. and Ghavami, M. (2005)



รูปที่ 2.3 สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบจำนวน 2×2

เราสามารถคำนวณหาพลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงระนาบโดยใช้สมการที่ (2.12) ได้ เช่นเดียวกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น แต่จะมีค่าตัวประกอบแถวลำดับแตกต่างกันซึ่งสามารถหาได้ โดยอ้างอิงจากรูปที่ 2.3 จะได้

$$\cos \gamma = \hat{\mathbf{a}}_x \cdot \hat{\mathbf{a}}_r = \hat{\mathbf{a}}_x \cdot (\hat{\mathbf{a}}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{\mathbf{a}}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{\mathbf{a}}_z \cos \theta) = \sin \theta \cos \phi \quad (2.13)$$

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

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

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

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

เมื่อ I_{1n} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_y คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y β_y คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน y และ n คือตำแหน่งของสายอากาศที่วางตามแนวแกน y ดังนั้นเราสามารถหาค่าตัวประกอบแถวลำดับของทั้งแกน x และ y

รวมกันหรือที่เรียกว่าแบบระนาบได้ด้วยการคูณค่าตัวประกอบแกลวลำดับของทั้งแกน x และ y เข้าด้วยกันจะได้

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

ถ้าสมมติให้แอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละต้นทั้งในแกน x และ y มีค่าเท่ากันจะได้

$$I_{mn} = I_{m1} I_{1n} \quad (2.17)$$

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

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

เช่นเดียวกันกับสายอากาศแกลวลำดับแบบเส้นเราสามารถทำสมการค่าตัวประกอบให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์ตามที่แสดงในสมการที่ (2.10) และ (2.11) ซึ่งจะได้เท่ากับ

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

เมื่อ

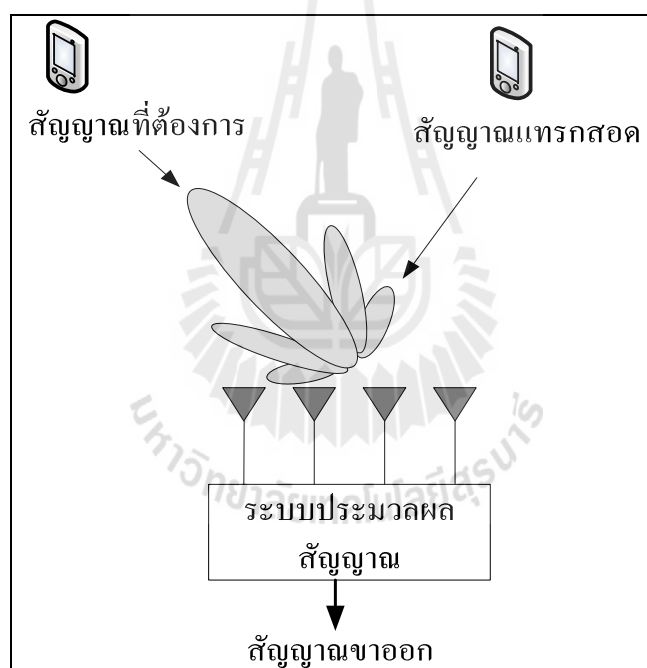
$$\psi_x = kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x \quad (2.20)$$

$$\psi_y = kd_y \sin \theta \cos \phi + \beta_y \quad (2.21)$$

2.4 ระบบสายอากาศเก่ง

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

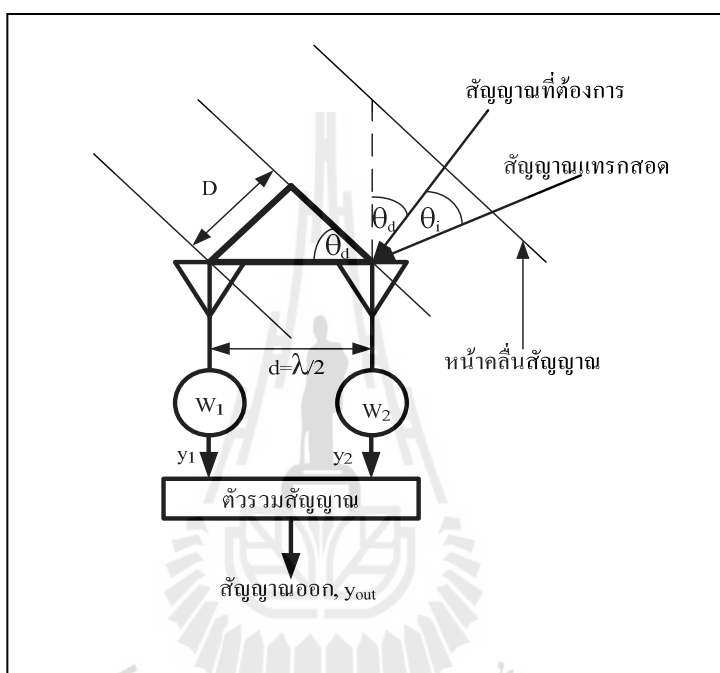
รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของสายอากาศเก่งซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่สายอากาศแถวลำดับและชุดประมวลผลสัญญาณ ซึ่งในระบบประมวลผลจะทำหน้าที่ในการหาทิศทางของสัญญาณที่เข้ามา (Direction of Arrival : DOA) และการคำนวณเพื่อก่อรูปลำคลื่น ตามที่ได้แสดงในหนังสือของ Liberti, J.J.C. and Rappaport, T.S.(1999)



รูปที่ 2.4 ระบบสายอากาศเก่ง

ในส่วนของการหันทิศทาง ระบบสายอากาศเก่งสามารถหันทิศทางหลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการและจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ด้วยการปรับเฟส หรือแอมพลิจูดของสัญญาณที่มายังสายอากาศแถวลำดับแต่ละต้น เพื่อหันทิศทางหลักไปยังทิศทางที่ต้องการและหันทิศทางศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด ซึ่งการปรับเฟสหรือแอมพลิจูดนั้นเรียกว่าการถ่วงน้ำหนัก สายอากาศแต่ละต้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักที่แตกต่างกันออกไปตามมุมเฟสของ

สัญญาณที่มาจากกระทบบสายอากาศต้นนั้นๆ โดยหลักการเบื้องต้นของการหั่นลำคลื่นสามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 จากรูป D คือระยะทางที่ทำให้เกิดความต่างเฟสของสัญญาณที่ตกกระทบบสายอากาศต้นที่ 1 และ 2 เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ W_1 คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศต้นที่ 1 W_2 คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณที่สายอากาศต้นที่ 2 ส่วนมุม θ_d และ θ_i คือมุมตกกระทบบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับ



รูปที่ 2.5 ระบบสายอากาศแถวเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบบ

จากรูปสัญญาณขาออกคือ

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

เมื่อ y_1 คือสัญญาณขาออกที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 และ y_2 คือสัญญาณขาออกที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 2

และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบบสายอากาศแต่ละต้นมีค่าดังนี้

$$y_{2d} = A_d \quad (2.23)$$

$$y_{2i} = A_i \quad (2.24)$$

$$y_{1d} = A_d e^{j\theta_d} \quad (2.25)$$

$$y_{1i} = A_i e^{j\theta_i} \quad (2.26)$$

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

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

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

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

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

เราต้องการพจน์ของ A_i เท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดให้หมดไปและต้องการพจน์ของ A_d เท่ากับ A_d เพื่อยังคงรักษาสัญญาณที่ต้องการเอาไว้ ดังนั้นต้องทำให้

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_i} = 0 \quad (2.30)$$

$$w_2 + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.31)$$

เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.30) เราจะได้

$$w_2 = -w_1 e^{j\theta_i} \quad (2.32)$$

แทนสมการที่ (2.32) ลงใน (2.31) จะได้

$$-w_1 e^{j\theta_i} + w_1 e^{j\theta_d} = 1 \quad (2.33)$$

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

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) ของสายอากาศต้นที่ 1 เท่ากับ

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

เช่นเดียวกันกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 เมื่อย้ายข้างสมการที่(2.30) เราจะได้

$$w_1 = \frac{-w_2}{e^{j\theta_i}} \quad (2.36)$$

แทนสมการที่ (2.35) ลงใน (2.31) จะได้

$$w_2 - \frac{w_2 e^{j\theta_d}}{e^{j\theta_i}} = 1 \quad (2.37)$$

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

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

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 2 เท่ากับ

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

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

$$y_{out} = A_d \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.41) สัญญาณขาออกมีค่าเท่ากับสัญญาณที่ต้องการ แสดงว่าระบบไม่มีสัญญาณแทรกสอดอีกต่อไป ดังนั้นจึงทำให้ระบบสามารถให้สัญญาณที่ดีที่สุดที่มาจากทิศทางที่ต้องการได้

ข้อดีของระบบสายอากาศเก่ง

- 1) เพิ่มพื้นที่ให้บริการ เนื่องจากมีอัตราขยายที่สูงจากการใช้สายอากาศแฉก ลำดับ
- 2) ระบบสายอากาศเก่งสามารถหันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ดังนั้นจึงทำให้

ปัญหาจากสัญญาณแทรกสอดลดน้อยลง

- 3) มีอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนดีขึ้น
- 4) ประหยัดพลังงาน เนื่องจากสายอากาศเก่งสามารถหันลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการใช้งานได้และไม่ต้องทำการส่งในทิศทางของผู้ที่ไม่ต้องการใช้งานจึงทำให้ไม่สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์

ข้อเสียของระบบสายอากาศเก่ง

- 1) ระบบสายอากาศเก่งมีราคาต้นทุนในการผลิตสูง
- 2) สำหรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ สายอากาศจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ยากต่อการติดตั้งสายอากาศแฉก

ลำดับ

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

2.4.1 ระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่น

สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นนั้น เป็นสายอากาศที่มีการเลือกลำคลื่นที่ดีที่สุดไปยังสัญญาณที่ต้องการได้ โดยใช้เพียงเครือข่ายก่อรูปลำคลื่น ที่ถูกกำหนดทิศทางของลำคลื่นหลักไว้แล้ว โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลำคลื่นประกอบไปด้วยสายอากาศแฉก ลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) โดยมีหลักการทำงานดังนี้

- 1) สวิตช์ลำคลื่นเพื่อตรวจหาทิศทางความแรงของสัญญาณ

2) ตัวเลือกลำคี่จะทำกาเลือกลำคี่เพียงหนึ่งลำคี่ในทิศทางที่มีความแรงของสัญญาณแรงที่สุด

3) ใช้ลำคี่ที่ตัวเลือกลำคี่ได้ทำการเลือกไว้เมื่อผู้ใช้งานไม่มีการเคลื่อนที่

4) ทำการปรับเปลี่ยนลำคี่ใหม่เมื่อมีความแรงของสัญญาณมาจากทิศทางอื่นๆ

ข้อดีของระบบสายอากาศแ่งแบบสวิทช์ลำคี่

1) ระบบมีความซับซ้อนน้อยกว่าเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับระบบสายอากาศแ่งแบบปรับลำคี่

2) ประหยัดในเรื่องของค่าใช้จ่ายเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนน้อยในกรณีที่ใช้สายอากาศจำนวนไม่มากนัก

3) สามารถติดตามสัญญาณได้รวดเร็วตามอัตราการปรับเปลี่ยนลำคี่

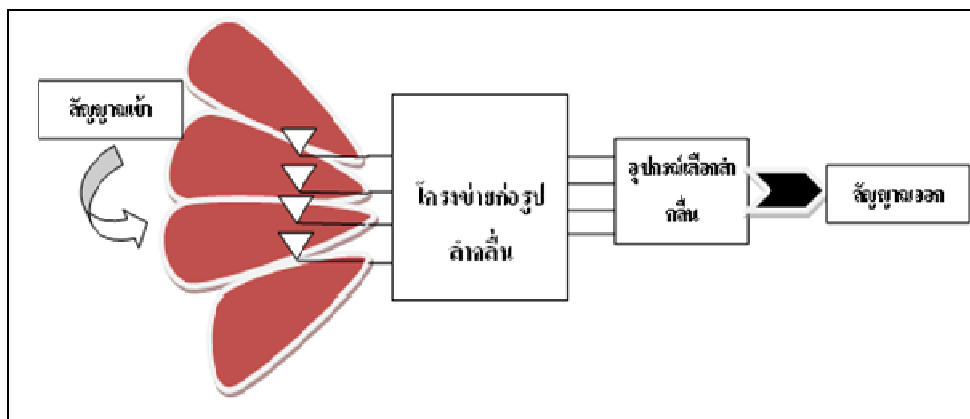
ข้อเสียของระบบสายอากาศแ่งแบบสวิทช์ลำคี่

1) มีอัตราการขยายของสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคี่

2) ไม่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดที่อยู่ใกล้กับสัญญาณที่ต้องการได้

3) ในการเลือกสัญญาณมีโอกาสผิดพลาด อาจเกิดจากสัญญาณที่เข้ามาไม่ชัดเจน

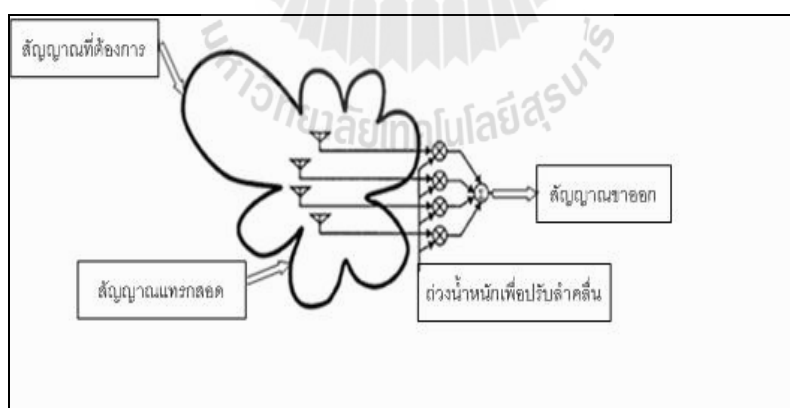
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ สายอากาศแต่ละต้นจะส่งสัญญาณไปยังโครงข่ายก่อรูปลำคี่เพื่อทำการถ่วงน้ำหนักเนื่องจากสัญญาณที่มาตกกระทบยังสายอากาศแต่ละต้นมีมุมเฟสที่ต่างกันออกไป และสร้างลำคี่หลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่แรงที่สุด โดยอาศัยตัวเลือกลำคี่ทำหน้าที่เลือกลำคี่ไปยังสัญญาณที่เราต้องการ จึงทำให้สามารถลดผลกระทบจากสัญญาณแทรกสอดได้จากทิศทางของสัญญาณที่เราไม่ต้องการได้ ส่งผลให้ได้รับสัญญาณที่มีคุณภาพดีขึ้น โดยวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการสร้างโครงข่ายก่อรูปลำคี่คือ บัตเลอร์เมตริกซ์ (Butler matrix) ซึ่งจะมีการอธิบายในหัวข้อที่ 2.5.1



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศเก่งแบบสวิทช์ค่าลิ้น

2.4.2 ระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว

สายอากาศประเภทนี้สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางของลำคลื่นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการได้ตลอดเวลา โดยมีหลักการทำงานของสายอากาศประเภทนี้คือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบสายอากาศ ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีการถ่วงน้ำหนัก โดยอัลกอริทึมแบบปรับตัว (adaptive algorithm) ทำหน้าที่คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณแล้วส่งค่ากลับไปให้ตัวถ่วงน้ำหนักเพื่อคูณเข้ากับสัญญาณที่ตกกระทบสายอากาศ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 โดยระบบจะทำงานแบบวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนสามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดได้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างและองค์ประกอบของระบบสายอากาศเก่งแบบปรับตัว

ข้อดีของสายอากาศเก่งแบบปรับตัว

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

2) สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เข้ามาในระบบได้ดีกว่าระบบสายอากาศแบบ สวิตช์ลาคลิ้น

ข้อเสียของสายอากาศแบบปรับตัว

1) มีความซับซ้อนสูงกว่าสายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้น
2) ต้องการสัญญาณที่แน่นอนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการหันลาคลิ้นหลักไปยัง สัญญาณที่ต้องการ

3) ต้องการหน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูง

4) มีค่าใช้จ่ายสูงเนื่องจากระบบมีความซับซ้อนมาก

จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้นได้อธิบายถึงหลักการทำงานและข้อดีข้อเสียของระบบสายอากาศ เก่งทั้งแบบ สวิตช์ลาคลิ้น และแบบปรับตัวไปแล้ว พบว่าสายอากาศแบบ สวิตช์ลาคลิ้น มีความซับซ้อนในการสร้างลาคลิ้นและหาทิศทางของสัญญาณน้อยกว่าสายอากาศแบบปรับตัว นอกจากนี้ สายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้นยังไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูงก็สามารถสร้างและหันลาคลิ้นได้ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้าง และติดตั้งสายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้นต่ำกว่าสายอากาศแบบปรับตัว แต่สายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้นก็ยังมีข้อเสียอยู่ในเรื่องของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้น สายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้นจึงเป็นสายอากาศที่น่าสนใจที่จะกำจัดสัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้น โดยจะ นำเสนอเทคนิคการหันลาคลิ้นของสายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้นในหัวข้อที่ 2.5

2.5 เทคนิคการหันลาคลิ้น

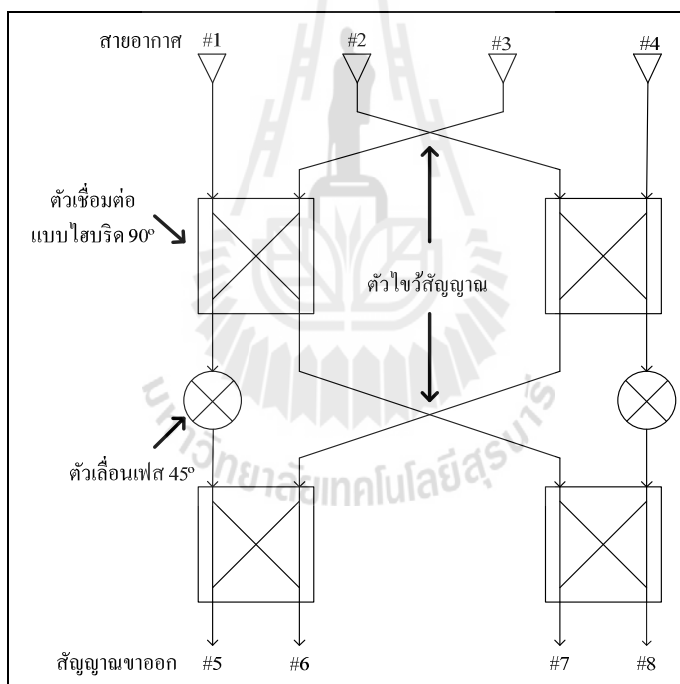
จากที่กล่าวมาข้างต้นข้อดีของระบบสายอากาศเก่งที่สามารถหันลาคลิ้นหลักไปยังทิศทางที่ต้องการ ได้ โดยการหันลาคลิ้นของระบบสายอากาศเก่งนั้นทำได้หลายเทคนิค เช่น การเปลี่ยนจุดป้อนสัญญาณ การ ลัดวงจรหรือการเปิดวงจร แต่วิธีที่ได้รับความนิยมนำมาใช้ในระบบสายอากาศเก่งคือ วิธีแบบบัตเลอร์ เมตริกซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเทคนิคของบัตเลอร์เมตริกซ์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีต้นทุนการผลิตต่ำซึ่ง อาศัยการกัลดายวงจรลงบนแผงวงจรพิมพ์เท่านั้น ดังนั้นจึงเหมาะกับการนำมาใช้งานร่วมกับสายอากาศแบบ สวิตช์ลาคลิ้นของงานวิจัยนี้

2.5.1 เครือข่ายก่อรูปลาคลิ้นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์

ในระบบสายอากาศเก่งประเภทสายอากาศเก่งแบบสวิตช์ลาคลิ้นนี้จะมีตัวถ่วงน้ำหนักเป็น องค์ประกอบที่สำคัญ เพื่อที่จะทำหน้าที่เป็นตัวปรับลาคลิ้นให้ชี้ไปยังทิศทางที่ต้องการ โดยตัวถ่วงน้ำหนักที่ เราได้กล่าวถึงนั้นเรียกว่า เครือข่ายก่อรูปลาคลิ้น (beamforming network) นั่นเอง ซึ่งสายอากาศเก่งแบบ สวิตช์ลาคลิ้นนั้นจะมีเครือข่ายก่อรูปลาคลิ้นเป็นตัวปรับลาคลิ้นเพื่อชี้ไปในทิศทางที่ต้องการแบบ

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

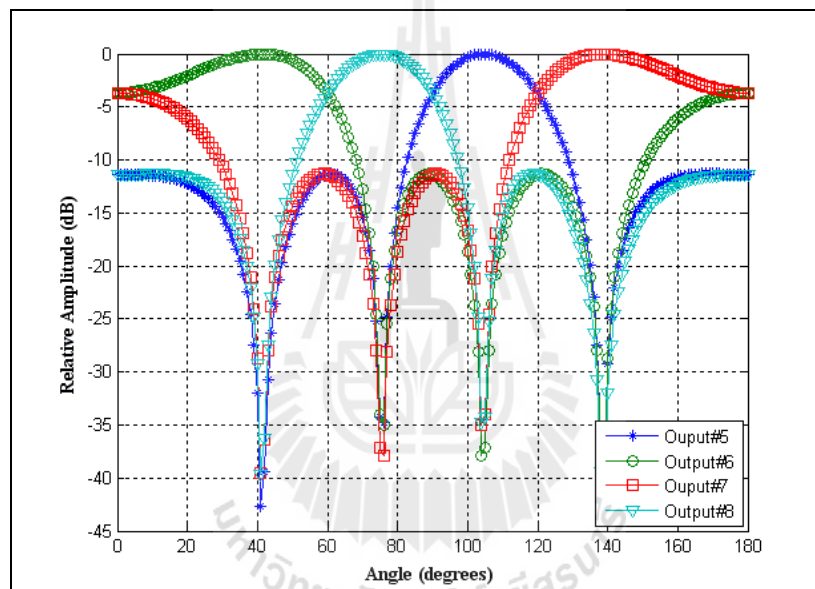
รูปที่ 2.8 ได้แสดงถึงภาพรวมของบัตเลอร์เมตริกซ์ ซึ่งประกอบด้วยสายอากาศแบบแถวลำดับจำนวน 4 ต้น แต่ละต้นวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน เมื่อสัญญาณตกกระทบมาที่สายอากาศ สัญญาณจะถูกส่งผ่านไปที่ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริดจ์ 90° (90° hybrid coupler) จำนวน 4 ตัว ตัวไขว้สัญญาณ (cross over) จำนวน 1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



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์

ตารางที่ 2.2 ทิศทางของพหุคลื่นหลัก ความต่างเฟส และเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
 ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์

	สายอากาศ #1	สายอากาศ #2	สายอากาศ #3	สายอากาศ #4	ทิศทาง ของพหุหลัก	ความ ต่างเฟส
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 ตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90°

ตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° คืออุปกรณ์เชื่อมต่อเกี่ยวกับทิศทาง ทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามายังพอร์ตอินพุต และส่งออกไปยังพอร์ตเอาต์พุตอย่างเท่ากัน โดยพอร์ตเอาต์พุตทั้งสองจะมีความต่างเฟสกัน 90° พอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตอินพุตจะเป็นพอร์ตแยก เช่นเมื่อสัญญาณถูกส่งเข้ามายังพอร์ตที่ 1 สัญญาณจะถูกส่งออกที่พอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 4 อย่างละเท่าๆ กัน มีกำลังงานลดลงครึ่งหนึ่งของกำลังเดิม 3 dB โดยสัญญาณที่พอร์ตทั้ง 2 นี้มีความต่างเฟสกัน 90° พอร์ตที่ 3 เป็นพอร์ต

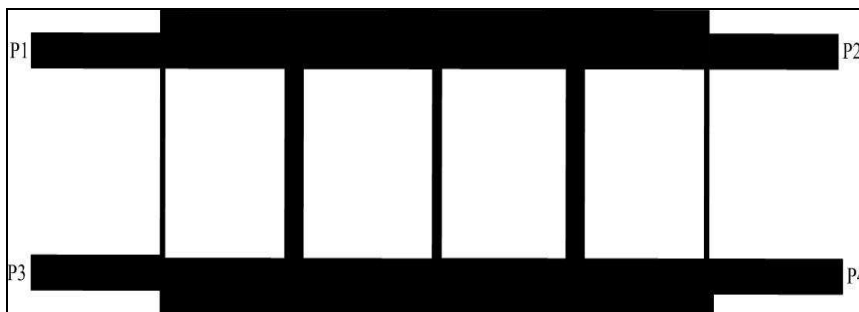
แยก สัญญาณจะออกน้อยมากๆ ประมาณว่าได้ว่าเป็นศูนย์ และในลักษณะเดียวกัน ถ้าป้อนสัญญาณเข้าที่พอร์ตอื่น กำลังที่ออกจากด้านตรงข้ามจะถูกแบ่งเหลือครึ่งหนึ่ง แต่พอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับสัญญาณจะไม่ออกเสมือนว่าเป็นศูนย์ ไฮบริดจ์ชนิดนี้สร้างมาจากไมโครสตริปดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งวิธีการออกแบบใช้วิธีการออกแบบจากงานวิจัยของ Collado C., Grau A., and De Flaviis, F. (2006) โดยจะแสดงการวิเคราะห์ในบทที่ 3 ถัดไป



รูปที่ 2.10 โครงสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90°

2.5.1.2 ตัวไขว้สัญญาณ

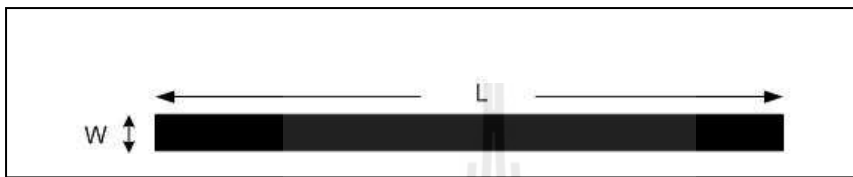
ตัวไขว้สัญญาณเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกสัญญาณ โดยหน้าที่หลักของตัวไขว้สัญญาณคือ จะทำหน้าที่ในการไขว้สัญญาณที่ถูกส่งเข้ามา เช่น เมื่อมีสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 1 ไมโครสตริปแบบไขว้สัญญาณจะบังคับให้สัญญาณไปออกที่พอร์ตที่ 4 มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ส่วนที่พอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 เป็นพอร์ตที่ไม่ควรมีสัญญาณออกหรือให้สัญญาณออกน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และในทำนองเดียวกันเมื่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



รูปที่ 2.11 โครงสร้างตัวไขว้สัญญาณ

2.5.1.3 ตัวเลื่อนเฟส 45°

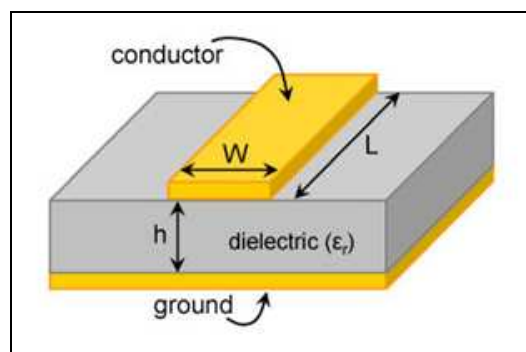
ตัวเลื่อนเฟส 45° ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสัญญาณ โดยมีหลักการการทำงานคือ เมื่อมีสัญญาณมาตกกระทบที่สายอากาศสัญญาณจะถูกส่งไปยังตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณ จากนั้นสัญญาณอาจผ่านตัวเลื่อนเฟส 45° แล้วจึงถูกส่งผ่านตัวไขว้สัญญาณและตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริดจ์ 90° อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นวงจรเลื่อนเฟสเป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งในการทำงานร่วมกันของวงจรบัตเลอร์เมตริกซ์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



รูปที่ 2.12 ตัวเลื่อนเฟส 45°

2.6 ทฤษฎีการส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปประกอบไปด้วยตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และระนาบกราวด์ โดยมีไดอิเล็กทริกอยู่ตรงกลาง ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13 โดยค่าไดอิเล็กทริกนี้จะอยู่ตรงกลางระหว่างตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่นและระนาบกราวด์ ในการออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนี้จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น (W) ความสูงของฐานรองรับ (h) ความยาวของแผ่น (L) ความหนาของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และค่าของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ (ϵ_r) เป็นต้น



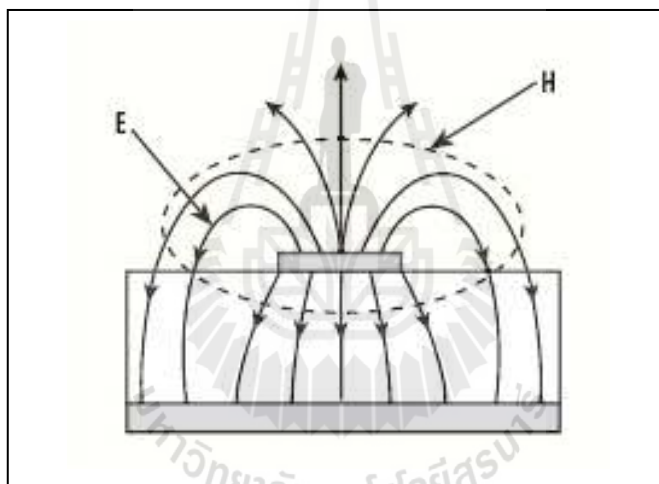
รูปที่ 2.13 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปไม่ได้บรรจุอยู่ในชั้นของฐานรองรับ แต่การแผ่กระจายคลื่นจะแผ่กระจายคลื่นออกไปข้างนอกของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 ดังนั้นการแผ่กระจายในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะไม่ใช้โหมด TEM แต่จะเป็น Quasi - TEM ความเร็วเฟสของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$V_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}} \quad (2.42)$$

เมื่อ ค่าของ c คือ ความเร็วแสง

ค่าของ ϵ_e คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล



รูปที่ 2.14 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

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

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \right) \quad (2.43)$$

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

โดยที่ W คือ ความกว้างของสายไมโครสตริป
 ε_r คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ
 h คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง

จากนั้นจะมาคำนวณหาความกว้างของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.45)

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

เมื่อ

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

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.47)$$

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

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

เมื่อ k_0 สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$k_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (2.49)$$

โดยที่ k_0 คือ ค่าคงที่การแผ่กระจายคลื่นในอากาศ
 f คือ ความถี่

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

2.7 ผลกระทบของแถบความถี่กับระบบสายอากาศแก่ง

ระบบสายอากาศแก่งที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้งานกับสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบ (narrowband) แต่เนื่องจากผู้ใช้งานในปัจจุบันมีความต้องการระบบการสื่อสารแบบไร้สายในการส่งภาพและเสียงที่มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น รวมทั้งยังต้องการการรับส่งข้อมูลที่เร็วยิ่งขึ้น ซึ่งระบบการสื่อสารแบบไร้สายนั้นจะต้องสามารถทำงานได้ดีในแถบความถี่กว้าง (wideband) โดยการนิยามแถบความถี่ หรือแบนด์วิดท์ (bandwidth) จะนิยามจาก อัตราส่วนของแถบความถี่ที่ใช้งานกับความถี่กลาง หรือที่เรียกว่า เศษส่วนแถบความถี่ (Fractional Bandwidth : FB) ดังสมการที่ (2.50)

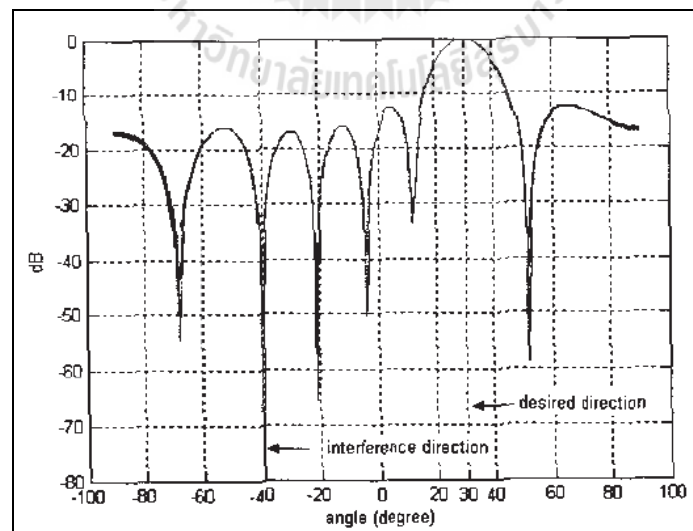
$$FB = \frac{f_h - f_l}{(f_h + f_l)/2} \times 100\% \quad (2.50)$$

เมื่อ f_h และ f_l แทนความถี่สูงสุด และความถี่ต่ำสุดของความถี่ที่ใช้งาน สำหรับสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบ จะมีค่า FB เพียงเล็กน้อย คือ น้อยกว่า 1% ส่วนสัญญาณจะถูกเรียกว่ามีแถบความถี่กว้างก็ต่อเมื่อคำนวณค่า FB แล้วมีค่าระหว่าง 1% ถึง 50% ตามที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Ghavami, M. (2002)

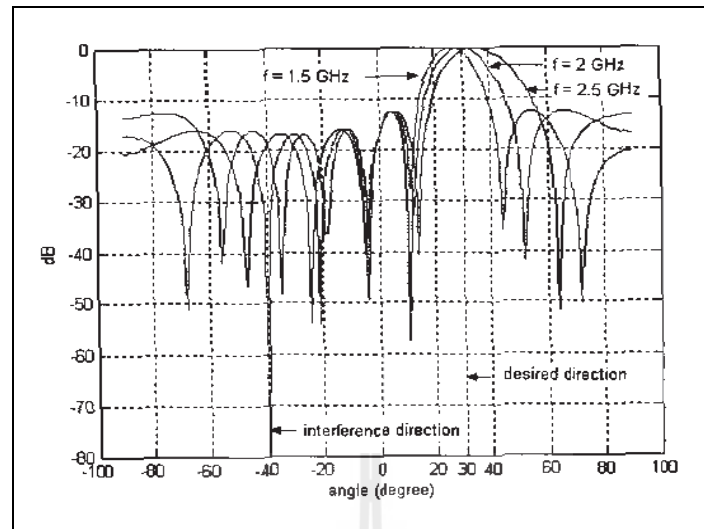
รูปที่ 2.15 แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแก่งที่ใช้สายอากาศแถวลำดับ 7 ต้น และสายอากาศแต่ละต้นมีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางและวางห่างกันเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ที่ทำงานในแถบความถี่แคบที่ความถี่ 2 GHz มีทิศทางของสัญญาณที่ต้องการเท่ากับ 30° และสัญญาณแทรกสอด -40° แต่เมื่อได้นำมาใช้งานกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างแสดงดังรูปที่ 2.16 ตั้งแต่แถบความถี่ 1.5 - 2.5 GHz ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่าความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการคือมุมที่ 30° และ

หันจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดคือมุมที่ -40° ความสามารถในการก่อรูปลำคลื่นของระบบลดลงเมื่อสัญญาณมีแถบความถี่กว้างขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากความคลาดเคลื่อนของทิศทางของลำคลื่นหลักซึ่งควรจะคงที่อยู่ตำแหน่ง 30° หรือแม้กระทั่งตำแหน่งจุดศูนย์ซึ่งควรอยู่ที่ตำแหน่ง -40° ตลอดทั้งแถบความถี่ที่ใช้งาน จากผลการทดลองที่ได้แสดงในงานวิจัยของ Uthansakul, M., and Bialkowski, M.E.(2004) ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าเราไม่สามารถนำเอาระบบสายอากาศเก่งที่ทำงานในแถบความถี่แคบมาใช้งานร่วมกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างได้

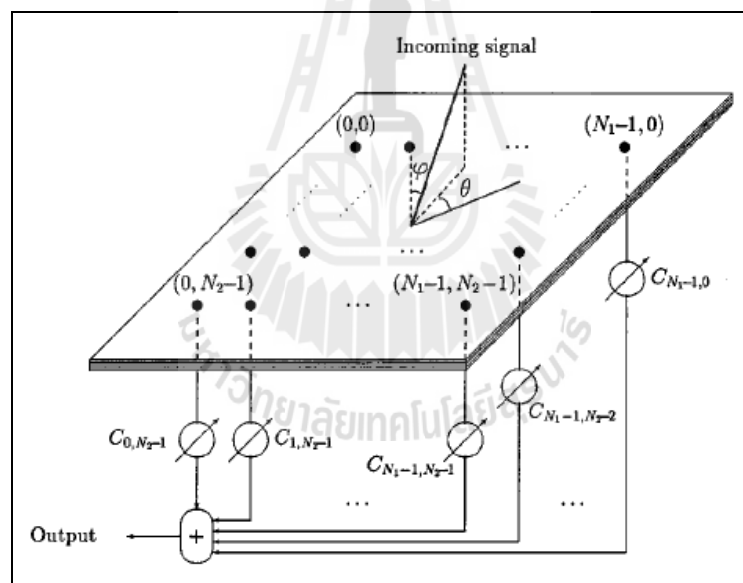
จากงานวิจัยของ Ghavami, M. (2002) เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับสายอากาศเก่งที่ใช้งานกับแถบความถี่กว้างโดยใช้สายอากาศแถวลำดับแบบ 4×4 แบบแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้วิธีการประมวลผลสัญญาณเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียวในการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยวิธีนี้จะอาศัยหลักการของผลการแปลงฟูเรียร์ผกผันของสัญญาณเวลาดิสครีต (TDFT) มาประยุกต์ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักเมื่อสัญญาณตกกระทบที่สายอากาศแถวลำดับ สัญญาณที่ได้รับจากสายอากาศแต่ละต้นจะถูกถ่วงน้ำหนักด้วยตัวถ่วงน้ำหนัก และถูกรวมกันออกเป็นสัญญาณขาออกซึ่งได้จำลองผลแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งในช่วงของความถี่ทั้งหมดสามแถบความถี่ คือ แถบแรกที่มีความถี่ 1.61 - 2.69 GHz แถบที่สองที่มีความถี่ 3.49 - 4.21 GHz และแถบที่สามที่มีความถี่ 4.89 - 5.61 GHz ดังแสดงรูปที่ 2.18 ถึง 2.20 จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่า แบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละความถี่ไม่มีความคลาดเคลื่อนของทิศทางของลำคลื่นหลักซึ่งทำให้ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพของระบบ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านระบบค่อนข้างมีขนาดใหญ่และซับซ้อนยากต่อการออกแบบ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้เสนอวิธีการออกแบบตัวคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณแล้วนำมาประกอบรวมกันเป็นเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่สามารถรองรับสามแถบความถี่ของระบบไวแมก



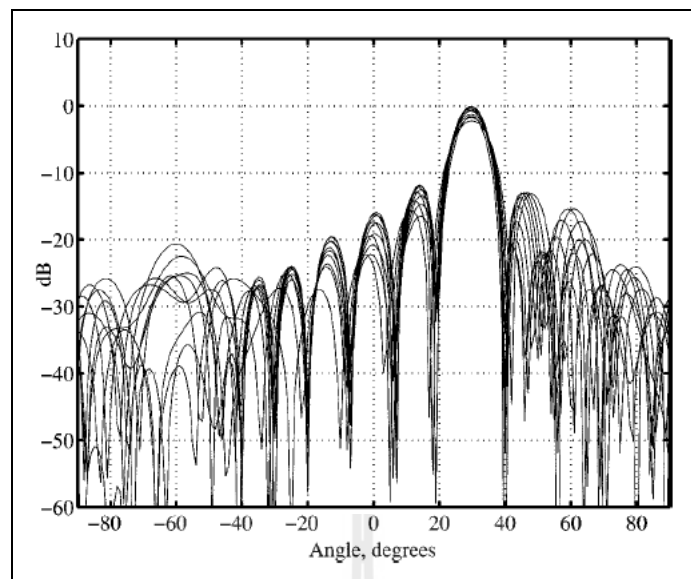
รูปที่ 2.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ใช้งานความถี่แถบแคบที่ 2 GHz



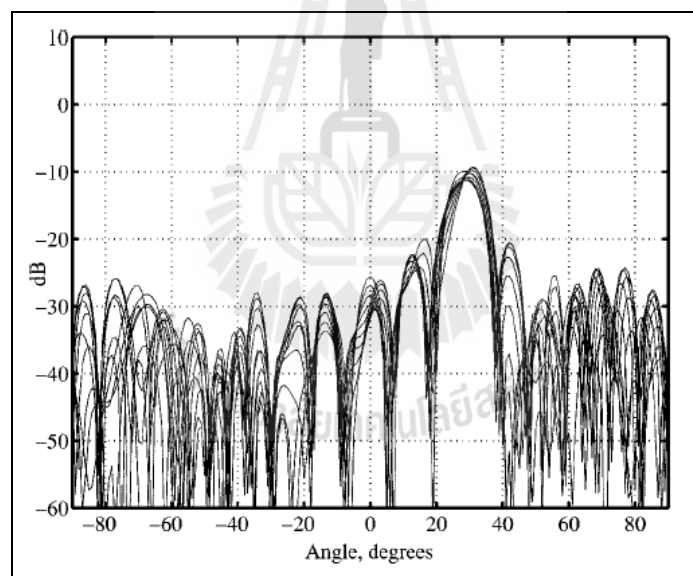
รูปที่ 2.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ใช้งานความถี่แถบกว้างที่ 1.5 - 2.5 GHz



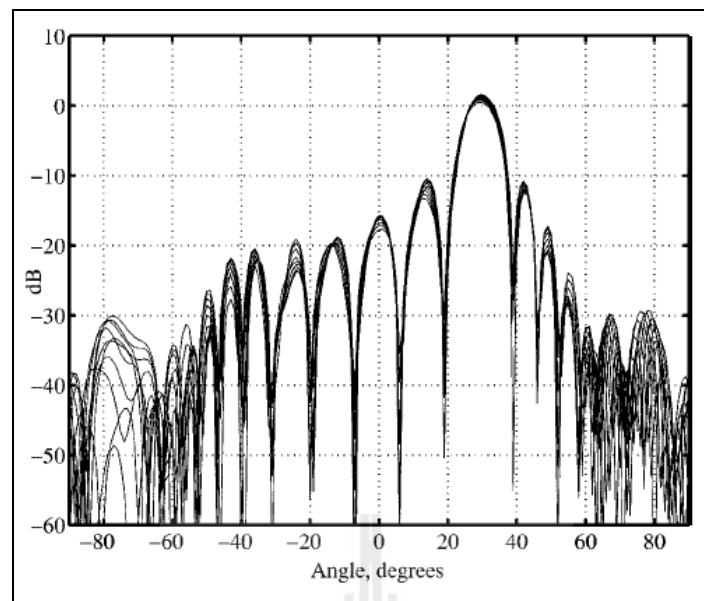
รูปที่ 2.17 โครงสร้างของตัวก่อรูปลำคลื่นที่ใช้งานในแถบความถี่กว้าง โดยอาศัยการประมวลผลเชิงตำแหน่งเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 2.18 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศแก่งที่ความถี่ 1.6 - 2.69 GHz



รูปที่ 2.19 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศแก่งที่ความถี่ 3.49 - 4.21 GHz



รูปที่ 2.20 แบบรูปการแผ่พลังงานของระบบสายอากาศเก่งที่ความถี่ 4.89 - 5.61 GHz

2.8 กล่าวสรุป

จากเนื้อหาข้างต้นในบทนี้จะเห็นได้ว่าผู้ใช้งานระบบการสื่อสารไร้สายในปัจจุบันต้องการการส่งข้อมูล ภาพ และเสียงที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้น และต้องการอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วยิ่งขึ้น ซึ่งไวแมกก็เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองในความต้องการของผู้ใช้งานได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดทางด้านของสัญญาณแทรกสอดจึงได้นำระบบสายอากาศเก่งมาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอีกด้านหนึ่งของระบบสายอากาศเก่งคือ สายอากาศเก่งได้ถูกออกแบบมาให้ใช้ได้ดีในแถบความถี่แคบหรือได้เพียงความถี่เดียวเท่านั้น แต่ระบบไวแมกนั้นมีความถี่ทั้งหมดสามแถบความถี่ อย่างไรก็ตามเมื่อนำเอาระบบสายอากาศเก่งแบบเดิมที่ทำงานในแถบความถี่แคบมาทำงานกับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างขึ้น ทำให้ระบบสูญเสียความสามารถในการก่อรูปลำคลื่น ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของการส่งข้อมูลลดลงตามไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่สามารถรองรับได้ทั้งหมดสามแถบความถี่มาใช้ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวในข้างต้น

บทที่ 3

การออกแบบระบบต้นแบบ

3.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณที่ใช้งานในระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลาคลิ้น เพื่อนำไปใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีไวแมกแบบสามแถบความถี่ ซึ่งการออกแบบระบบต้นแบบนี้เพื่อให้ทำงานในแถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz ในการออกแบบดังกล่าวจะใช้โปรแกรม CST Microwave Studio ในการจำลองผล

3.2 การออกแบบเครือข่ายก่อรูปลาคลิ้น

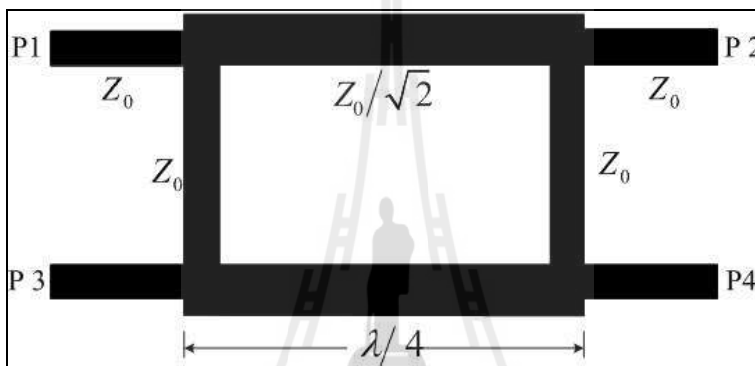
จากที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 เราสามารถสร้างเครือข่ายก่อรูปลาคลิ้น โดยนำบัตรเลเซอร์เมตริกซ์มาใช้ โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการออกแบบแค่ตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณเท่านั้น ซึ่งนำมาคัดลายวงจรบนแผงวงจรพิมพ์แบบ FR4 มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ϵ_r เท่ากับ 4.8 และมีความหนาของแผ่นไดอิเล็กตริก d เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร โดยจะแสดงวิธีการออกแบบดังต่อไปนี้

3.2.1 การออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90°

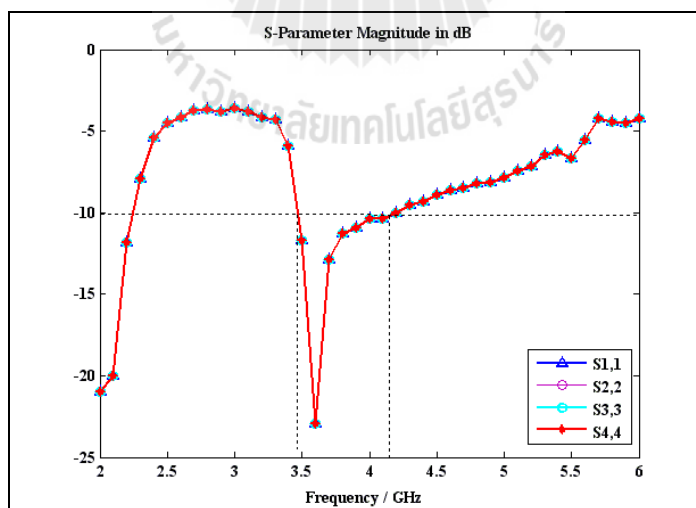
จากที่กล่าวมาข้างต้นการออกแบบวงจรเชื่อมแบบไฮบริดจ์ 90° นั้นต้องอาศัยหลักการในการออกแบบโดยใช้ทฤษฎีสายส่งสัญญาณอ้างอิงมาจากหนังสือของ David M. Pozar (1998) โดยวงจรเชื่อมแบบไฮบริดจ์ 90° คือ อุปกรณ์เชื่อมต่อเกี่ยวกับทิศทางทำหน้าที่ในการแยกสัญญาณที่ถูกส่งเข้ามายังพอร์ตขาเข้าและส่งออกไปยังพอร์ตขาออกอย่างเท่ากัน โดยที่พอร์ตขาออกทั้งสองจะมีความต่างเฟสกัน 90° พอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าจะเป็นพอร์ตแยกสัญญาณ เช่น เมื่อสัญญาณถูกส่งเข้ามาที่พอร์ต 1 สัญญาณจะถูกส่งเข้าไปที่พอร์ต 2 และพอร์ต 4 อย่างละเท่าๆ กัน โดยสัญญาณที่พอร์ตทั้งสองมีความต่างเฟสกัน 90° พอร์ตที่ 3 จะเป็นพอร์ตแยกโดดเดี่ยว (isolation port) ซึ่งเป็นพอร์ตที่ไม่ควรจะมีสัญญาณออกเลย ไฮบริดจ์ชนิดนี้มักสร้างมาจากไมโครสตริป ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นโครงสร้างของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ สังเกตเห็นได้ว่าวงจรเชื่อมชนิดนี้จะสมมาตรกันแต่ละพอร์ตสามารถใช้เป็นพอร์ตขาเข้าได้ และ

พอร์ตขาออกจะเป็นพอร์ตที่อยู่ตรงกันข้ามกับพอร์ตที่เป็นพอร์ตขาเข้าเสมอ ส่วนพอร์ตแยกเป็นพอร์ตที่อยู่ด้านเดียวกันกับพอร์ตขาเข้าเช่นกัน

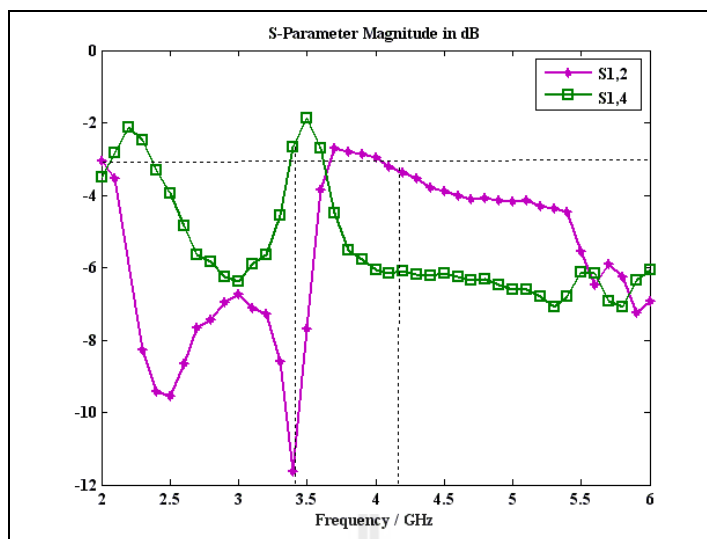
จากรูปที่ 3.2 แสดงถึงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับซึ่งมีค่าต่ำกว่า -10 dB ที่อยู่ในช่วงความถี่ 3.48 - 4.1 GHz รูปที่ 3.3 แสดงถึงค่าความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อจะเห็นได้ว่าในช่วงความถี่ 3.48 - 4.1 GHz ความสามารถในการส่งสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไป 2 และ 4 มีค่าไม่ใกล้เคียงกัน มีแค่ความถี่ที่ 3.6 GHz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



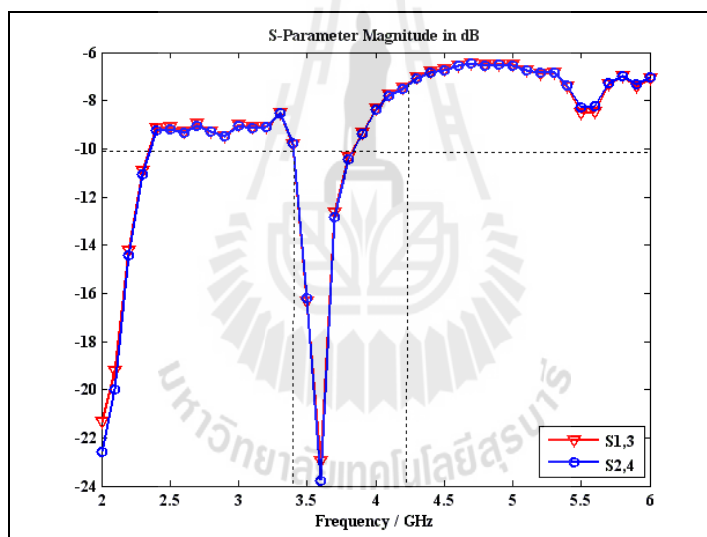
รูปที่ 3.1 โครงสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ



รูปที่ 3.2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรเชื่อมแบบไฮบริด 90° แบบความถี่แคบ



รูปที่ 3.3 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ



รูปที่ 3.4 ความสูญเสียจากการแยกโคคเคี้ยวของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบ

จากการวิเคราะห์ผลเราจะเห็นได้ว่าเราไม่สามารถนำตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบความถี่แคบมาใช้ในการออกแบบได้เลย เราจึงต้องทำการออกแบบโดยใช้ตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบแถบความถี่กว้าง ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ได้นำเสนอเกี่ยวกับตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบแถบความถี่กว้าง อย่างเช่น ในงานวิจัยของ Ibrahim, S.Z., and Bialkowski, M.E. (2009) และงานวิจัยของ Nedil, M., Denidni, T.A., and Talbi, L. (2006) การออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° มีวัสดุหลายชั้น โดยต้องมีการเจาะช่องร่วมระหว่างชั้น (slot - coupled multi section) ซึ่งมีข้อเสียตรงที่ในการสร้างนั้นจะ

ยากกว่าการใช้วัสดุที่ทำแบบชั้นเดียว นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Chun, Y-H. (2006) คือ เป็นการใช้วงจรรวมอินทรีเกรต (monolithic-microwave integrated-circuit : MMIC) เพื่อให้แถบความถี่กว้างขึ้น โดยใช้เทคนิคการเพิ่มสแตปในสายวงจร ซึ่งทำให้เกิดความซับซ้อนในการออกแบบ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ทำการออกแบบที่สองแถบความถี่ในงานวิจัยของ Hsu, C-L. (2010) ซึ่งใช้เทคนิคที่ง่ายต่อการสร้างโดยใช้วัสดุชั้นเดียว แต่เมื่อลองนำมาใช้ออกแบบในงานวิจัยของผู้วิจัย พบว่าช่วงความถี่ที่ได้ไม่กว้างมากพอ อีกวิธีหนึ่งในงานวิจัยของ Liou, C-Y. and Wu, M-S. (2009) เป็นการออกแบบที่สามแถบความถี่โดยใช้สแตปเข้ามาช่วยในการออกแบบแต่ก็ยังมีข้อจำกัดตรงที่โครงสร้างและสายวงจรค่อนข้างยากและไม่มีสมการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ออกแบบที่ความถี่อื่นๆ ได้

ดังนั้นเพื่อให้ตอบสนองทางวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้เราจึงได้นำเสนอวิธีการคัดแปลงวิธีการออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° ให้สามารถครอบคลุมทั้งสามแถบความถี่ของระบบไวแมก โดยใช้วิธีการออกแบบที่อ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Collado C., Grau A., and De Flaviis, F. (2006) เนื่องจากมีความง่ายในการออกแบบมีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการสร้างด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยเรากำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

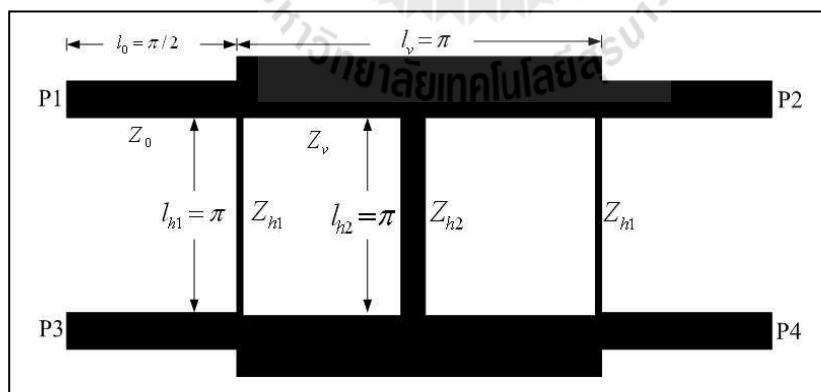
Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณของขา I_0

Z_v คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณของขา I_v

Z_{h1} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณของขา I_{h1}

Z_{h2} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณของขา I_{h2}

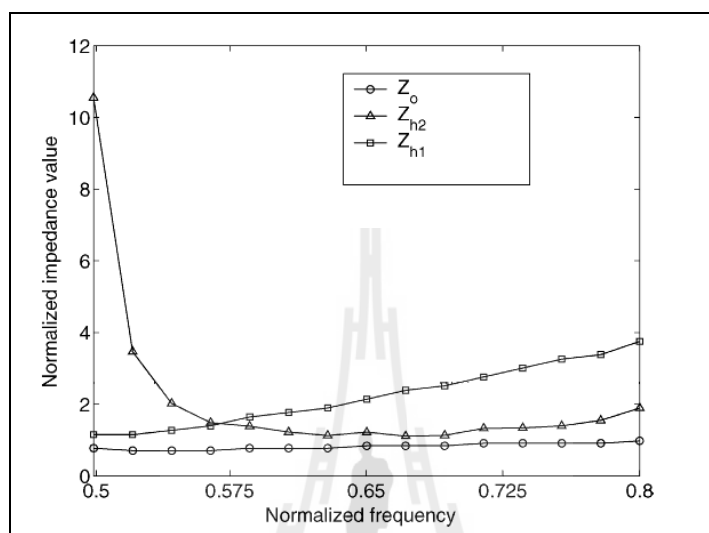
ซึ่ง $l_{h1} = l_{h2}$



รูปที่ 3.5 โครงสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่

2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

ในการออกแบบเราทำการหาค่า Z อิมพีแดนซ์ต่างๆ 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)

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

$$\Omega_1 = \frac{f_1}{f_0} \quad (3.1)$$

และ

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (3.2)$$

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 เป็นความถี่ในช่วงแรกและแถบความถี่ 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)

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

เมื่อ 1) $Z_0 = 50\Omega$ จาก

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

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

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

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

$$\text{จาก } \epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12h/W}} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อแทนค่าจะได้

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

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_e \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

ทำการหาค่าความยาวของ Z_0 จากสมการ (3.6)

$$\text{จาก } \lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e}(f)} \quad (3.6)$$

$$= \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.584}(4.4 \times 10^9)} = 36.0 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น l_0 เท่ากับ

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

เมื่อ 2) $Z_v = 45\Omega$ จาก

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.7)$$

แทนค่าในสมการ (3.7) จะได้

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

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

นำค่า B ที่ได้แทนลงในสมการที่ (3.3) เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขดังนี้

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

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

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

จากสมการ (3.5) แทนค่าจะได้

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

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_e \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง
จากสมการที่ (3.6) แทนค่าหาความยาวของ Z_v จะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.5014(4.4 \times 10^9)}} = 36 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น l_v เท่ากับ

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

เมื่อ 3) $Z_{hi} = 120 \Omega$

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

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

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_e \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง
จากสมการที่ (3.6) เมื่อแทนค่าหาความยาวของ Z_{hl} จะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.157(4.4 \times 10^9)}} = 38.37 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น l_{hl} 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

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

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_e \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$ แสดงว่าเป็นค่าที่ใช้ได้จริง

จากสมการที่ (3.6) เมื่อแทนค่าหาความยาวของ Z_{h2} จะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{3.55(4.4 \times 10^9)}} = 38.38 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น l_{h2} เท่ากับ

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{38.38}{2} = 19.19 \text{ มิลลิเมตร}$$

เราจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณสรุปลงในตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90°

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

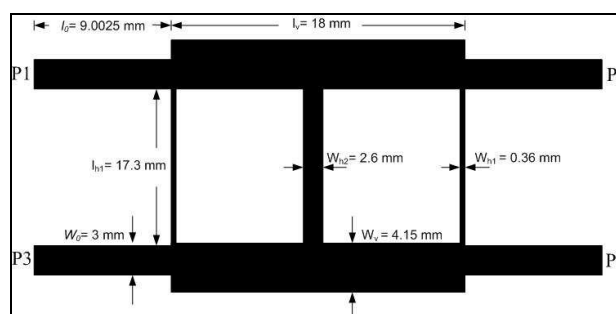
จากค่าในตารางที่ 3.1 เป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° เมื่อนำมาจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio ทำให้ผลของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับไม่ตอบสนองทางวัตถุประสงค์ คือไม่ครอบคลุมทั้งหมดตามแถบความถี่ของระบบไวแมก คือที่แถบความถี่ 2.5 -

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

ตารางที่ 3.2 การปรับค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อช่วงความถี่ต่างๆ ของตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90°

พารามิเตอร์	ช่วงแถบความถี่		
	2.5 GHz	3.5 GHz	5.8 GHz
$l_{hl} = 19.5$ มิลลิเมตร	1.9 - 3.36 GHz	1.9 - 3.36 GHz	4.43 - 6.25 GHz
$l_{hl} = 17.3$ 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_{hl} และ W_v ค่าแรกๆ เริ่มต้นในการปรับคือค่า $l_{hl} = 9.5$ มิลลิเมตรซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นที่ได้จากคำนวณ จากค่าในตารางนั้นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับครอบคลุมแค่สองช่วงของแถบความถี่คือ ช่วงแถบความถี่ที่ 2.5 GHz และ 5.8 GHz จึงเปลี่ยนค่า $l_{hl} = 17.3$ มิลลิเมตรซึ่งแถบความถี่ช่วง 3.5 GHz นั้นมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับครอบคลุมแค่ความถี่ 2.125 - 3.54 GHz เราจึงทำการเปลี่ยนจากการปรับพารามิเตอร์ l_{hl} เป็นการปรับค่า W_v โดย $W_v = 3.6$ มิลลิเมตรและ $W_v = 4.15$ มิลลิเมตรจากค่าในตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อ $W_v = 4.15$ มิลลิเมตร มีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับครอบคลุมทั้งหมดตามแถบความถี่ของระบบไวแมกคือช่วงแถบความถี่ที่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz และสรุปขนาดของวงจรถักคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° ในรูปที่ 3.7 ดังนี้



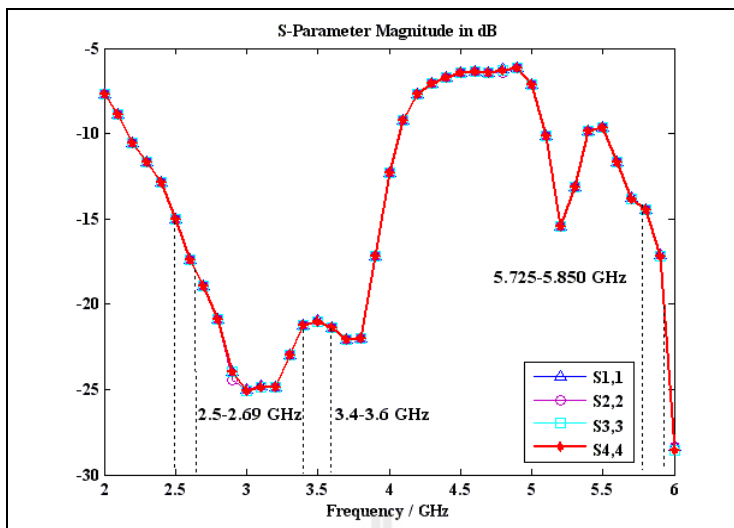
รูปที่ 3.7 ขนาดของวงจรถักคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่

2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

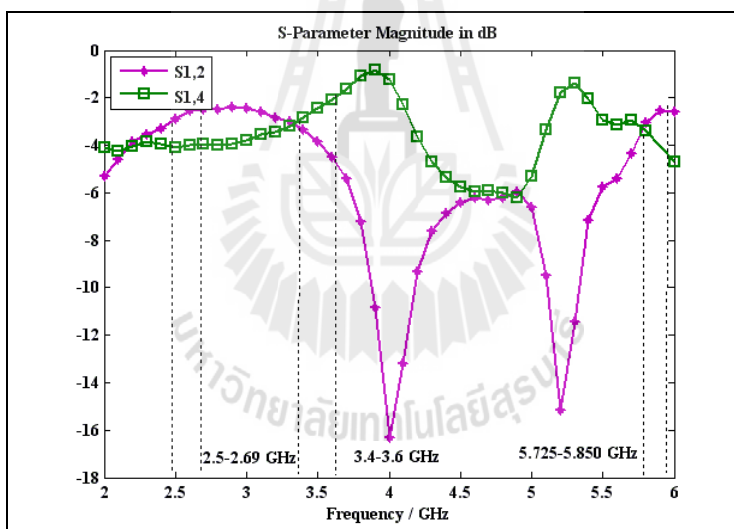
จากนั้นค่าที่ได้จากการจำลองผลในตารางที่ 3.2 นั้นได้ทำการสรุปพารามิเตอร์ของตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° ที่มีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ เมื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่าเมื่อลดและเพิ่มค่าพารามิเตอร์บางตัวจะมีผลดังต่อไปนี้

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

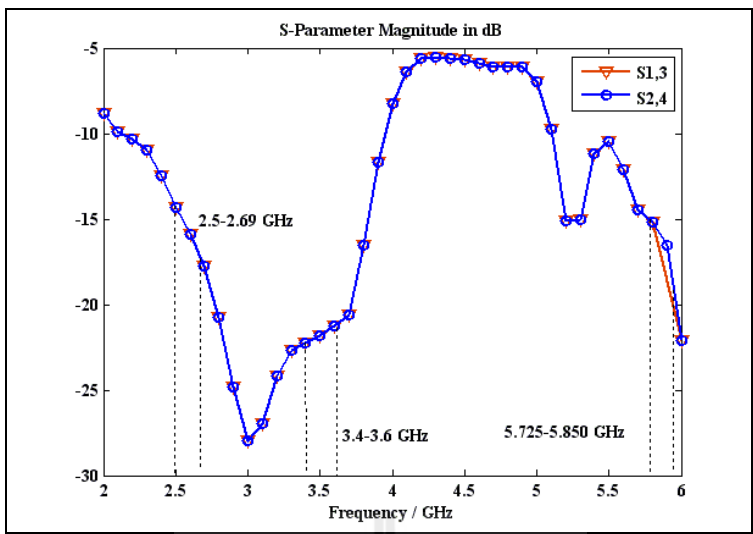
เมื่อได้ขนาดตามวงจรในรูปที่ 3.7 แล้วนำมาจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio แล้วจะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.8 ถึง 3.11 ในรูปที่ 3.8 คือค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในพอร์ตที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับของวงจรตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ จากค่าที่ได้พบว่าอุปกรณ์ของเรานั้นมีค่าการสะท้อนกลับของสัญญาณอยู่ในค่าที่รับได้ 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 แสดงว่ามีการแมตซ์ค่าที่ดีดังแสดงใน 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 นั้นหมายความว่าอุปกรณ์ที่เราออกแบบนั้นจะต้องมีค่าสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับเท่ากับ -10 dB จึงจะทำให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งอยู่ในค่าที่สามารถรับได้ จากรูปที่ 3.9 จะเห็นว่าสามารถส่งผ่านสัญญาณได้และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 4 ได้มากและมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งสองพอร์ต และสัญญาณจะไม่มีการส่งผ่านไปอยู่ที่พอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 2 ไปยังพอร์ตที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 3.10 นอกจากนี้มุมเฟสของสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 3.11 เมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าพอร์ตที่ 1 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 2 และ 4 นั้นจะมีค่าความต่างเฟสที่ได้อาจจะไม่ตรง 90° มากนัก ซึ่งสามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ได้ว่าตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° ที่เราได้ออกแบบไว้สามารถใช้งานได้ตลอดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกคือ $2.5 - 2.69$ GHz $3.4 - 3.6$ GHz และ $5.725 - 5.850$ GHz และค่าเอสพารามิเตอร์ในแต่ละความถี่ของรูปที่ 3.8 ถึง 3.11 นั้นจะแสดงในตารางที่ 3.3 ดังนี้



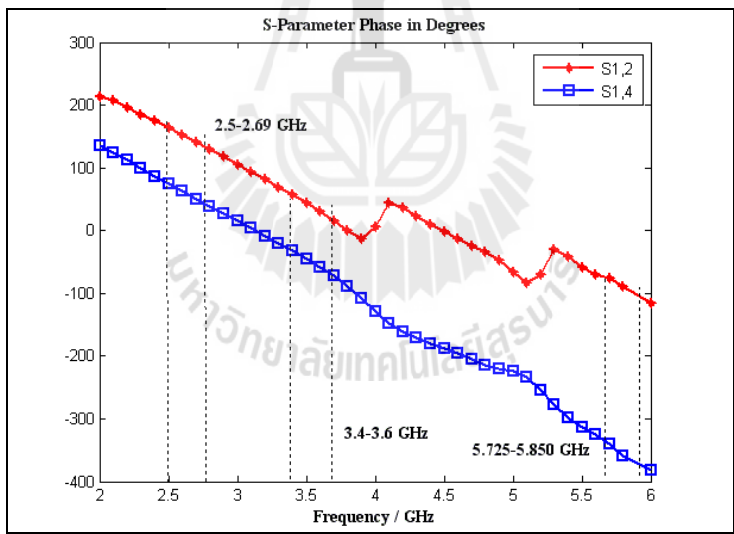
รูปที่ 3.8 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่มีความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 3.9 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่มีความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 3.10 ความสูญเสียจากการแยก โดดเดี่ยวของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 3.11 มุมเฟสของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์แบบ 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) ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคี้ยว (S1,3)	-14.32 dB	-21.78 dB	-15.18 dB
5) ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคี้ยว (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 ในการออกแบบนั้นเป็นการนำวงจรคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° มาต่อกันสองตัวก็จะได้เป็นวงจรไขว้สัญญาณ และมีการแสดงค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.4 ดังนี้

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

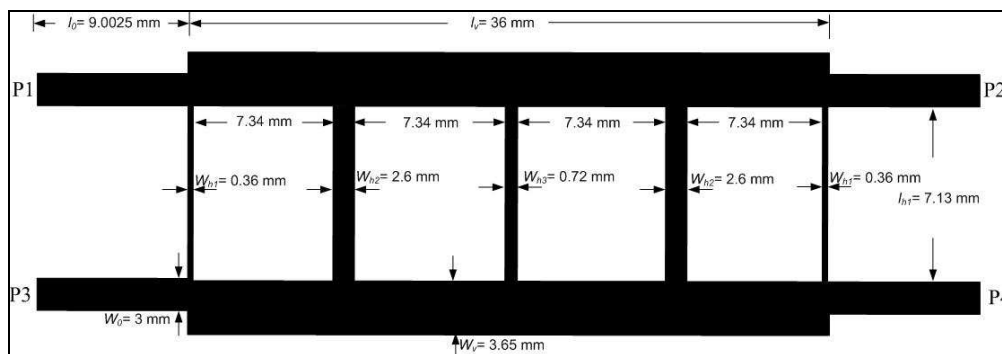
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณ

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

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

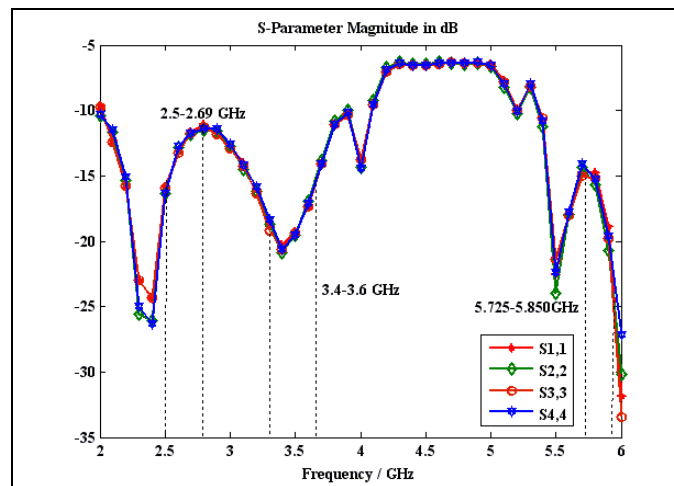
จากตารางที่ 3.5 เป็นตารางแสดงถึงการปรับค่าพารามิเตอร์ W_v โดยเริ่มปรับค่า $W_v = 4.15$ มิลลิเมตร จากค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่ได้ในตารางที่ 3.5 นั้นไม่ครอบคลุมช่วงแถบความถี่ที่ 2.5 - 2.69 GHz เราจึงทำการเปลี่ยนค่าจาก $W_v = 4.15$ มิลลิเมตร เป็น $W_v = 3.65$ มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกคื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



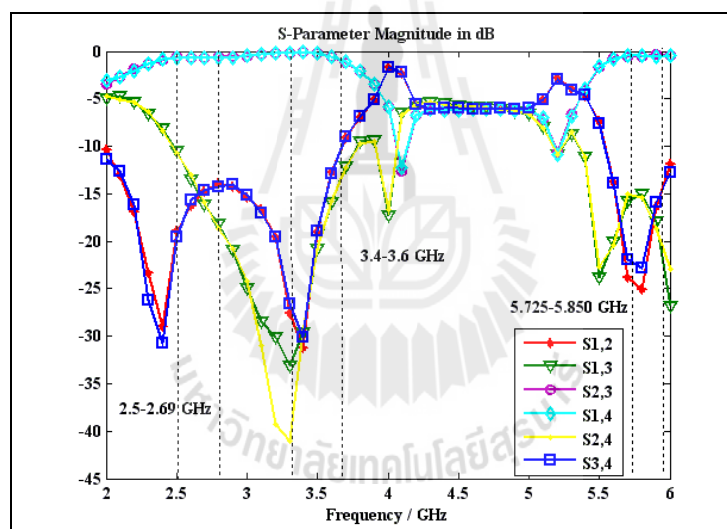
รูปที่ 3.12 ขนาดของวงจรรังไข่สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่
2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

จากนั้นค่าที่ได้จากการจำลองผลในตารางที่ 3.5 นั้นได้ทำการสรุปพารามิเตอร์ของตัวไข่สัญญาณที่มีผลต่อค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ เมื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่าเมื่อลดความกว้างของ W_c ลงทำให้ช่วงความถี่ปฏิบัติการขยับไปทางด้านความถี่สูงขึ้นและค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำลง

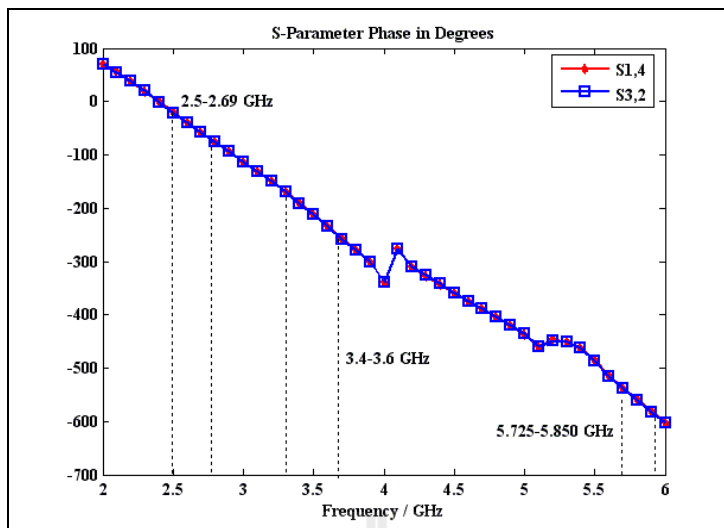
เมื่อได้ขนาดตามวงจรรูปที่ 3.12 แล้วนำมาจำลองผลด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio แล้วจะได้ผลการจำลองดังรูปที่ 3.13 ถึง 3.15 จากรูปที่ 3.13 แสดงให้เห็นว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรรังไข่สัญญาณนี้สามารถส่งผ่านสัญญาณได้เนื่องจากมีค่าต่ำกว่า -10 dB ตลอดช่วงความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 4 และสัญญาณจากพอร์ตที่ 3 ไปยังพอร์ตที่ 2 ได้มาก ซึ่งแสดงว่าสัญญาณสามารถเดินทางผ่านได้มาก โดยที่สัญญาณจะไม่มี การส่งผ่านจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 นอกจากนี้มุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 1 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 4 นั้นมีมุมเฟสเท่ากับมุมเฟสของสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 3 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.15 จากรูปที่ 3.13 ถึง 3.15 เราสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบตัวไข่สัญญาณนั้นสามารถใช้งานได้ตลอดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกคือ 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 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโคคเค็ดซ์ว
ในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz
3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



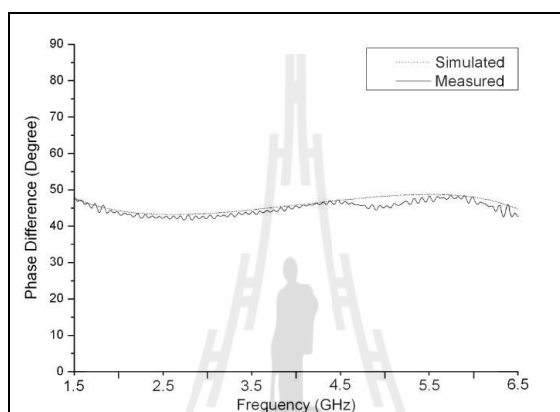
รูปที่ 3.15 มุมเฟสของวงจรไม้วัดสัญญาณแบบสามแถบความถี่
ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรไม้วัดสัญญาณแบบสามแถบความถี่

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) ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคี้ยว (S1,3)	-10.51 dB	-20.8 dB	-14.961 dB
7) ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคี้ยว (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

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



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของค่ามุมเฟสของตัวเลื่อนเฟส

เมื่อได้ออกแบบวงจรคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่แล้ว เราสามารถนำไปสร้างและวัดผลการทดลอง โดยจะแสดงผลการทดสอบในบทที่ 4 ต่อไป

3.3 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบวงจรคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ของระบบไวแมก ซึ่งจะแสดงผลที่ได้อยู่ในรูปของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ ค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโคคเคียว และค่ามุมเฟส ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าอุปกรณ์เหล่านี้มีความสามารถในการใช้งานได้ครอบคลุมได้สามแถบความถี่ของระบบไวแมกและเราสามารถนำอุปกรณ์เหล่านี้ไปทำการสร้างและวัดผลจริงได้ โดยจะนำเสนอในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

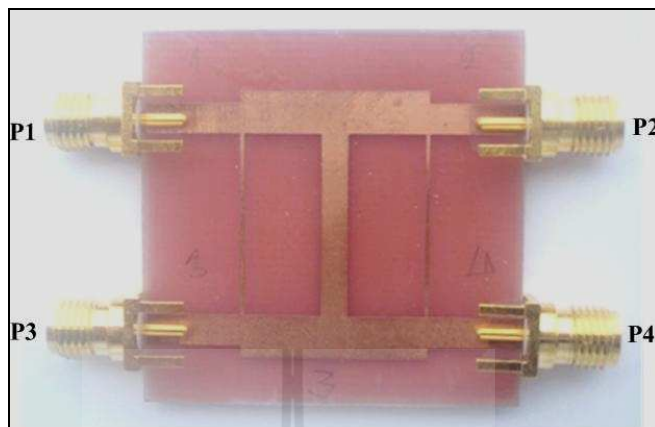
4.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการสร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณที่ครอบคลุมแบบสามแถบความถี่ที่ได้มีการออกแบบในบทที่ 3 จากนั้นจะวัดและทดสอบค่าอยู่ในรูปของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการแยกโคเคเดี่ยว ค่ามัมเฟส และผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการในการวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของระบบและในส่วนสุดท้ายของบทนี้คือกล่าวสรุป

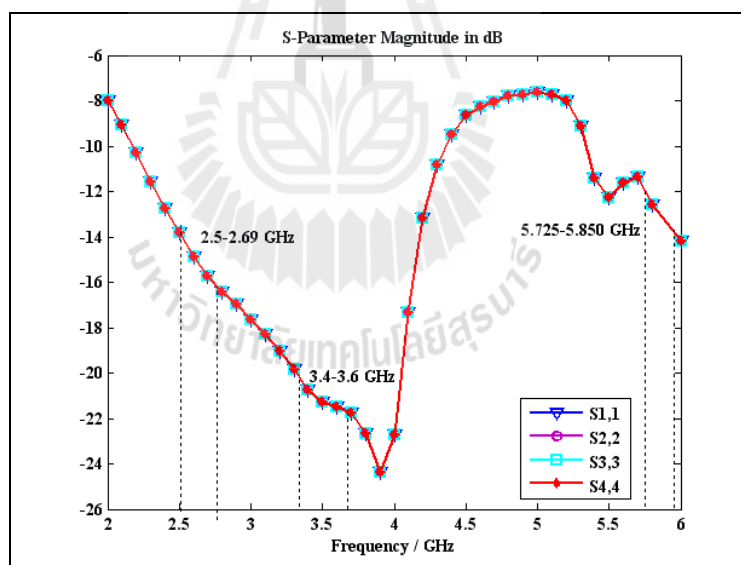
4.2 ผลการทดสอบตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่

จากการออกแบบตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.2.1 เราได้สร้างตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ตามที่ได้ออกแบบคือที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz วัสดุแผงวงจรพิมพ์ที่มีทองแดงอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างชั้นกลางด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แผงวงจรพิมพ์แบบ FR4 ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เท่ากับ 4.8 และมีความหนาของแผ่นวงจรพิมพ์เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ซึ่งตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่ได้สร้างไว้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 สำหรับผลการวัดมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้และสามารถนำไปใช้งานได้ ดังที่แสดงผลในรูปที่ 4.2 ส่วนความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าสามารถส่งผ่านสัญญาณได้และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และจากพอร์ตที่ 1 ไปพอร์ตที่ 4 ได้และสัญญาณจะไม่มีส่งผ่านจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 2 ไปยังพอร์ตที่ 4 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และมัมเฟสของสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าพอร์ตที่ 1 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 2 และ 4 นั้นจะมีค่าความต่างเฟสที่ได้อาจจะไม่ตรง 90° มากนัก ซึ่งสามารถสรุปตามวัตถุประสงค์ได้ว่าตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่ได้สร้างไว้สามารถใช้งานได้ตลอดสามแถบความถี่ของระบบ

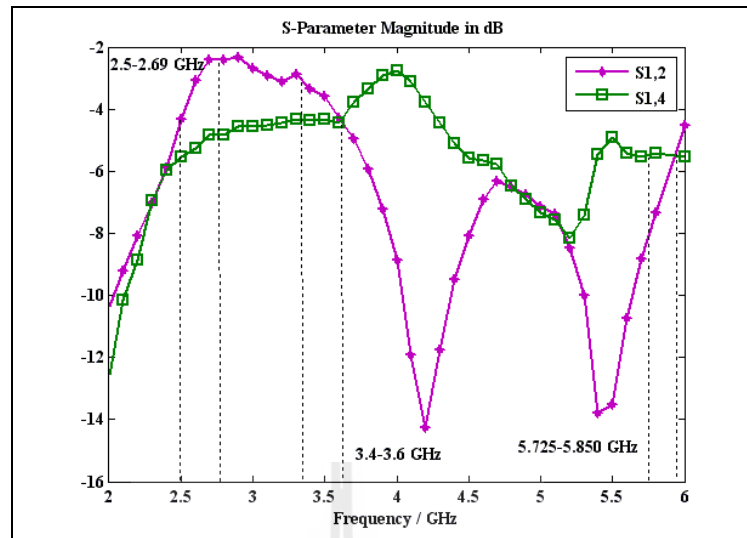
ไวแมกคือ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz และค่าเอสพารามิเตอร์ในแต่ละความถี่ของรูปที่ 4.2 ถึง 4.4 นั้นจะแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนี้



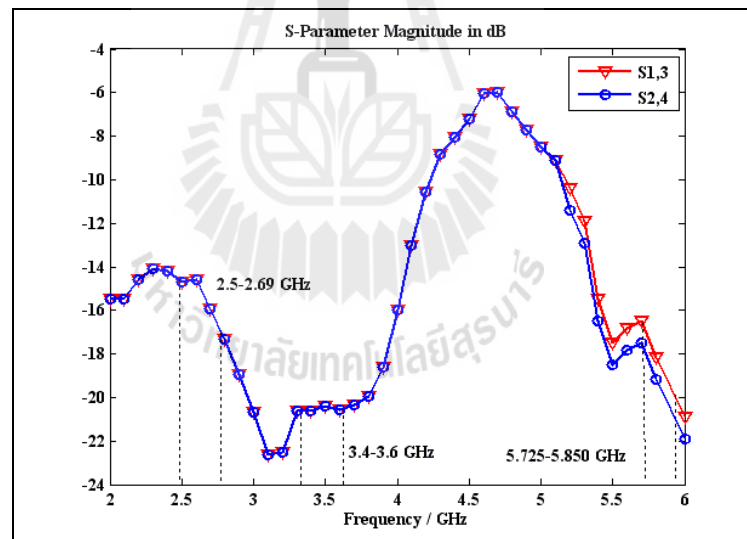
รูปที่ 4.1 ตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่สร้างจริง ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



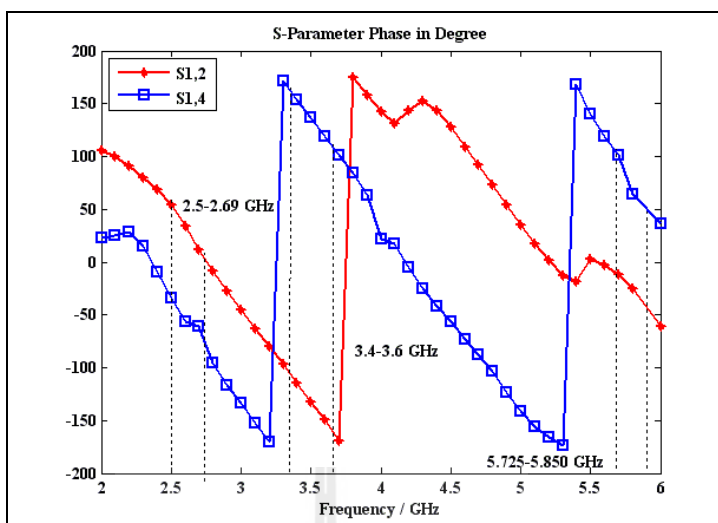
รูปที่ 4.2 ความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับในแต่ละพอร์ตของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 4.3 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบ ความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



รูปที่ 4.4 ความสูญเสียจากการแยกโดดเดี่ยวของวงจรคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° แบบสามแถบ ความถี่ที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz 3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



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

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าเอสพารามิเตอร์ของวงจรถับเพลอร์ไฮบริดจ์แบบ 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) ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเค์เดี่ยว (S1,3)	-14.715 dB	-20.375 dB	-18.147 dB
5) ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเค์เดี่ยว (S2,4)	-14.5 dB	-20.7 dB	-21.1 dB
6) ค่าความต่างเฟสระหว่าง (S1,2) กับ (S1,4)	87.661°	90.61°	-89.578°

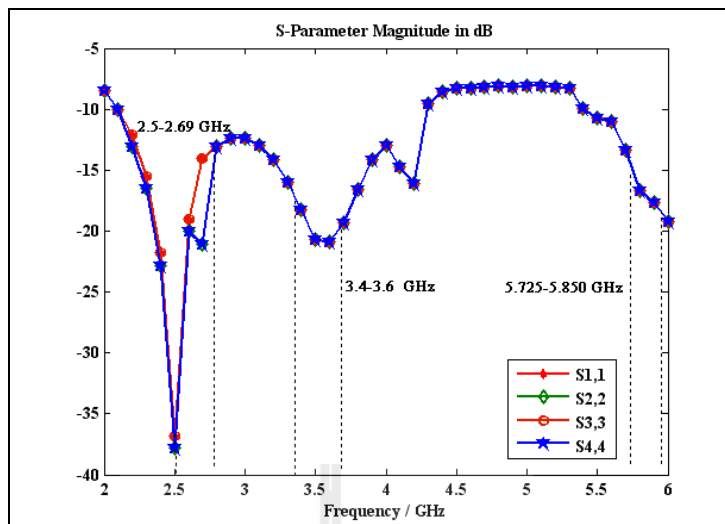
4.3 ผลการทดสอบตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่

จากการออกแบบตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.2.2 เราได้สร้างตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สำหรับผลการวัดมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และมีการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 4 และส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 3 ไปยังพอร์ตที่ 2 ได้มาก ซึ่งแสดงว่าสัญญาณสามารถเดินทางผ่านได้มาก โดยที่สัญญาณจะไม่มี การส่งผ่านจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และมุมเฟสของสัญญาณเมื่อมีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 1 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 4 นั้นมีมุมเฟสเท่ากับมุมเฟสของสัญญาณที่มีการส่งสัญญาณเข้าที่พอร์ตที่ 3 ผ่านไปออกที่พอร์ตที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 เราสามารถสรุปได้ว่าจากการสร้างตัวไขว้สัญญาณนั้นสามารถใช้งานได้ตลอดสามแถบความถี่ของระบบไวแมกคือ 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

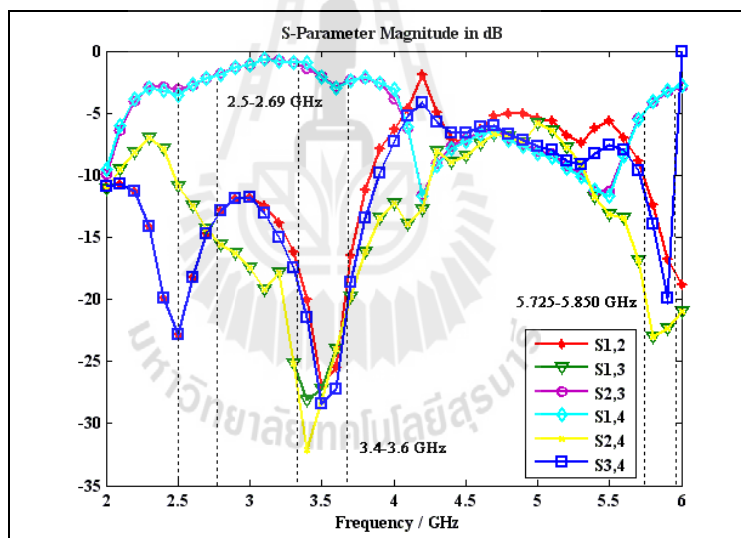


รูปที่ 4.6 ตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่สร้างจริงที่แถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz

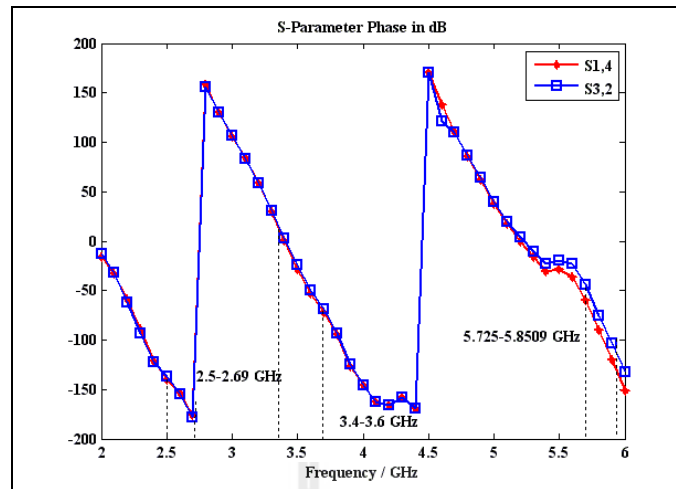
3.4 - 3.6 GHz และ 5.725 - 5.850 GHz



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



รูปที่ 4.8 ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อและค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโดดเดี่ยวในแต่ละพอร์ตของวงจรไขว้สัญญาณแบบสามแถบความถี่ที่แถบความถี่ 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) ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคียว (S1,3)	-10.934 dB	-26.241 dB	-23.027 dB
7) ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคียว (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

จากอุปกรณ์ที่เราได้สร้างขึ้นนั้นเรานำเอาตัวคัปเปิลเลอร์ 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 มารวมกันเป็นวงจรก่อรูปลาคี่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แล้วนำเอาไปวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ห้วงจรข่ายในการวัดผล ซึ่งจะทำการแสดงผลทีละช่วงของแต่ละแถบความถี่ดังต่อไปนี้

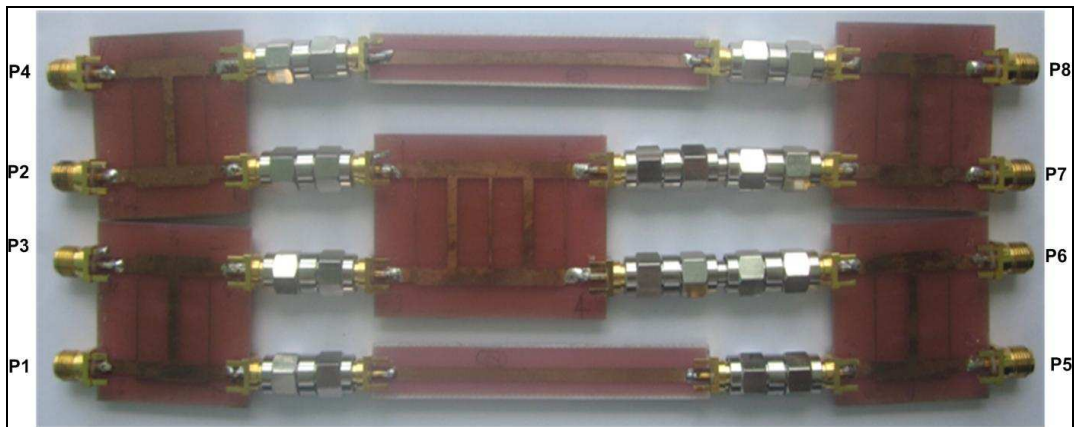
ช่วงแถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz ซึ่งทำการวัดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- ที่ความถี่ 2.5 GHz

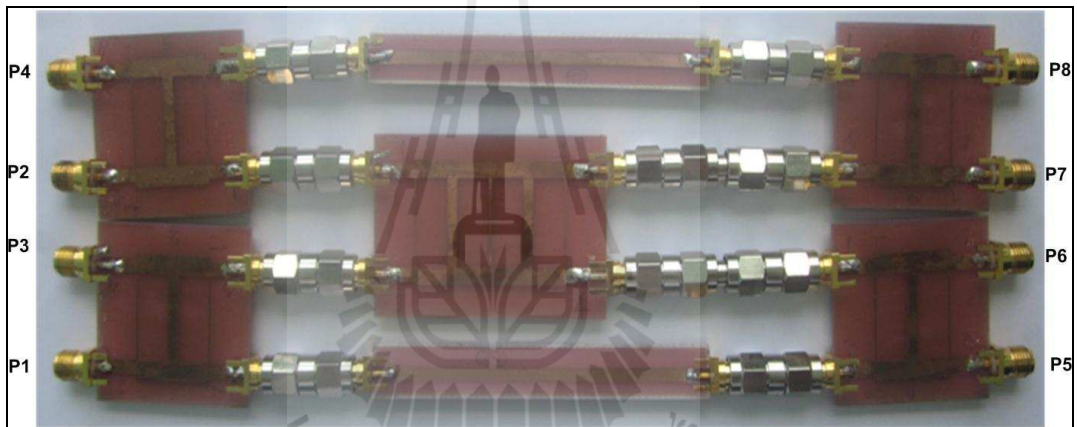
เริ่มจากการวัดค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ คือค่าการสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกมาจากพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไปซึ่งควรมีค่าต่ำกว่า -10 dB นั้นแสดงว่าอุปกรณ์ที่เราสร้างขึ้นมาสามารถส่งผ่านได้ดี ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคียว คือค่าความสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนกลับออกจากอีกพอร์ตหนึ่งที่อยู่ข้างเคียงกับพอร์ตที่ป้อนสัญญาณเข้าไป โดยจะต้องมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ คือค่าความสูญเสียที่เกิดจากการส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตขาเข้าไปยังพอร์ตขาออก ซึ่งควรมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่งพบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎี



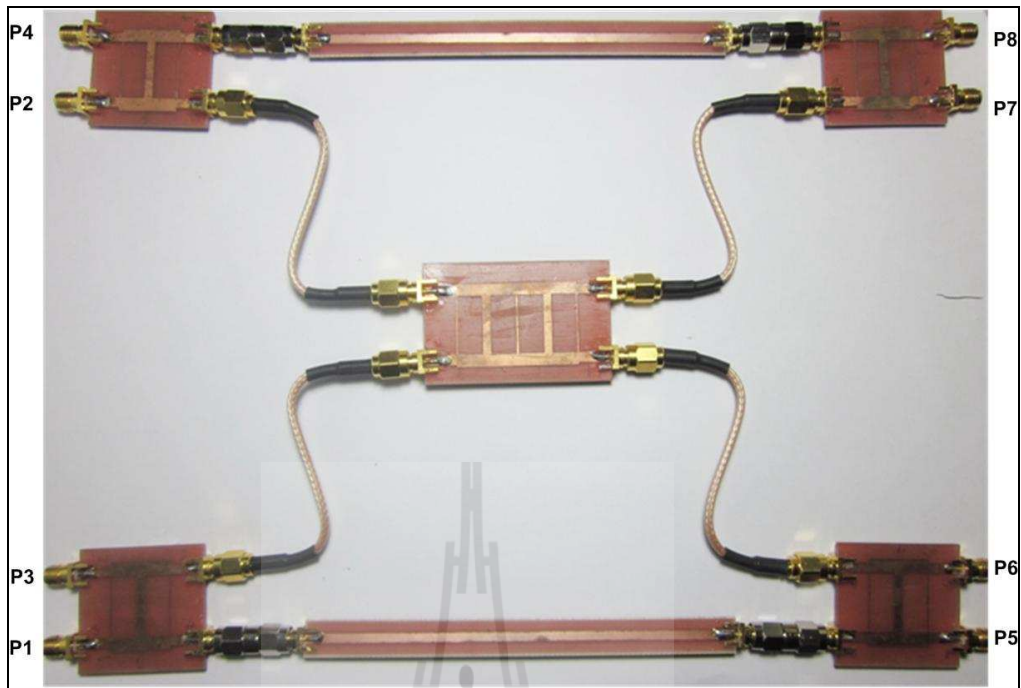
รูปที่ 4.10 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลาคี่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz



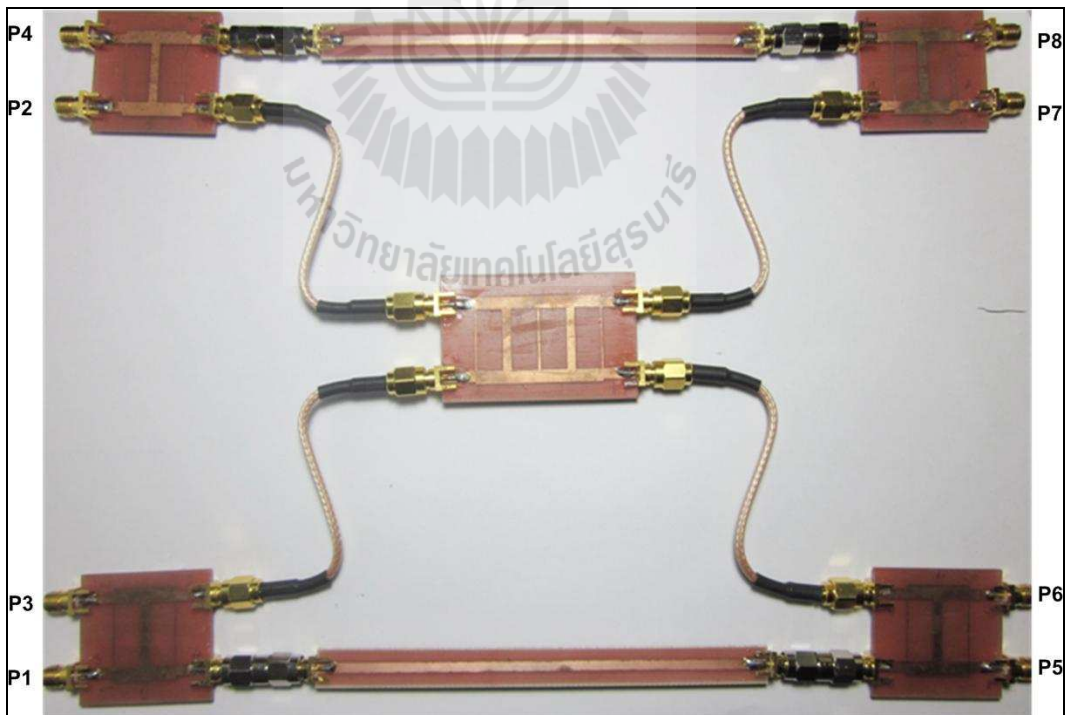
รูปที่ 4.11 ระบบต้นแบบเครื่องข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz



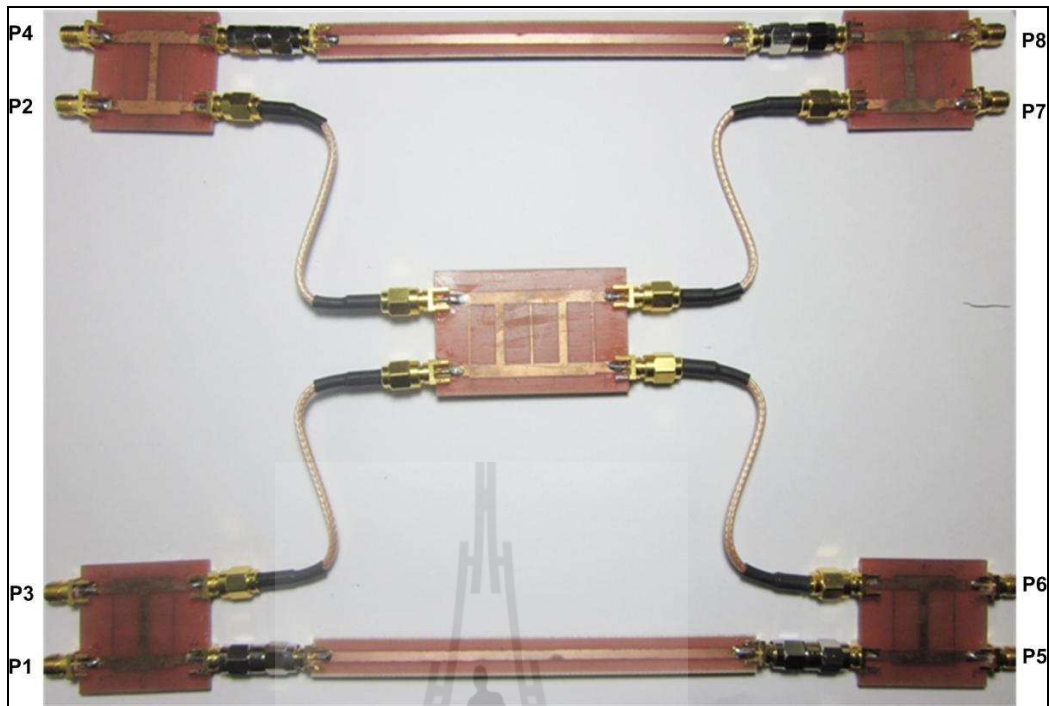
รูปที่ 4.12 ระบบต้นแบบเครื่องข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz



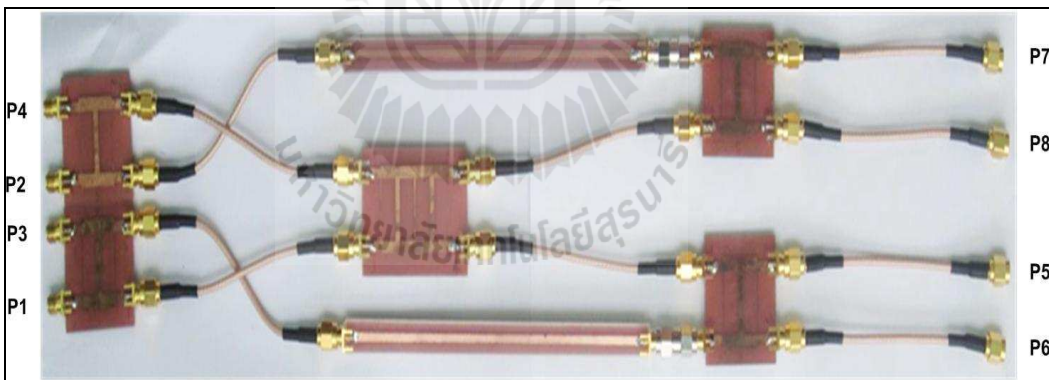
รูปที่ 4.13 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz



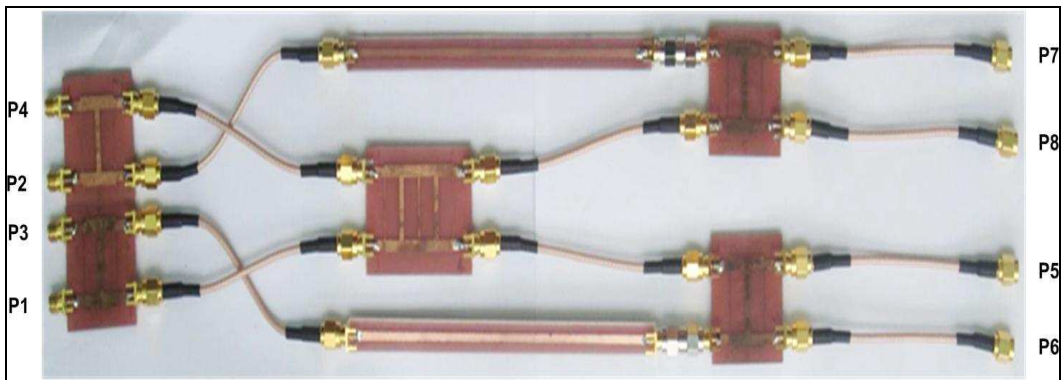
รูปที่ 4.14 ระบบต้นแบบเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz



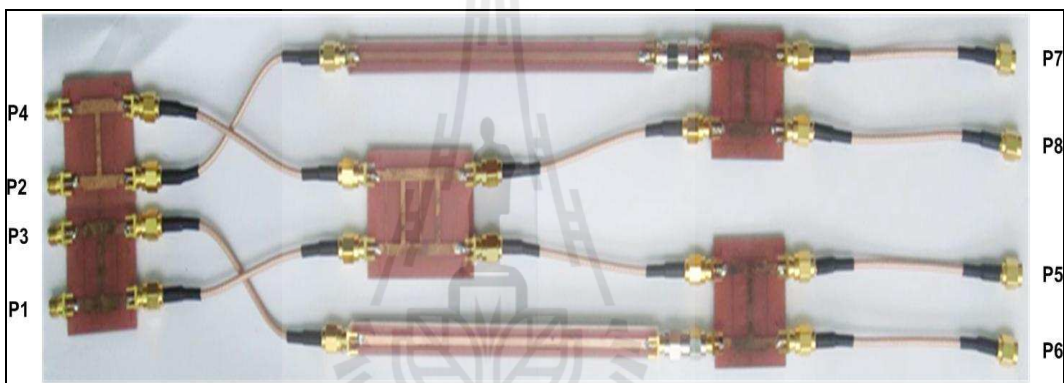
รูปที่ 4.15 ระบบต้นแบบเครื่องข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz



รูปที่ 4.16 ระบบต้นแบบเครื่องข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz



รูปที่ 4.17 ระบบต้นแบบเครื่องข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz



รูปที่ 4.18 ระบบต้นแบบเครื่องข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz

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

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.5 GHz

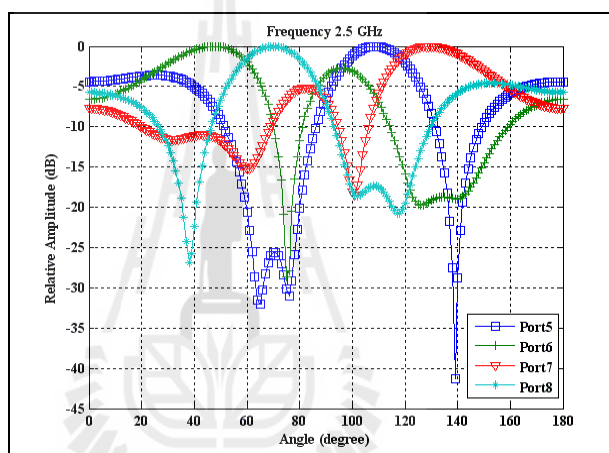
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-11.876, -13.061, -10.706, -10.335
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-10.964, -12.194, -11.616, -11.281
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-30.936, -25.075, -30.733
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-27.464, -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 ผลการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูป
ลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz

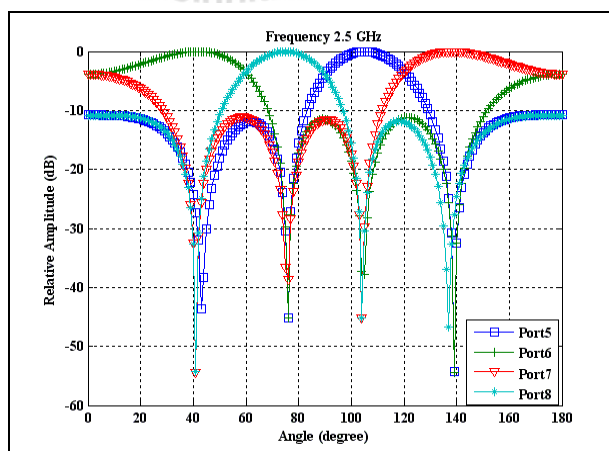
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พู่หลัก
5	-107.74°	146.07°	157.26°	57.15°	109°
6	-175.32°	-116.78°	83.366°	165.03°	48°
7	139.24°	89.561°	-74.703°	173.75°	129°
8	40.335°	126.85°	130.03°	-116.82°	70°

ตารางที่ 4.5 ผลการออกแบบทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
 ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.5 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พู่หลัก
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 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยวและค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อที่ได้จากการวัด พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.7 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมทริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อยซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้ และลำคลื่นหลักของพอร์ตที่ 6 และพอร์ตที่ 7 นั้นมีลำคลื่นรองค่อนข้างสูง กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 2.6 GHz

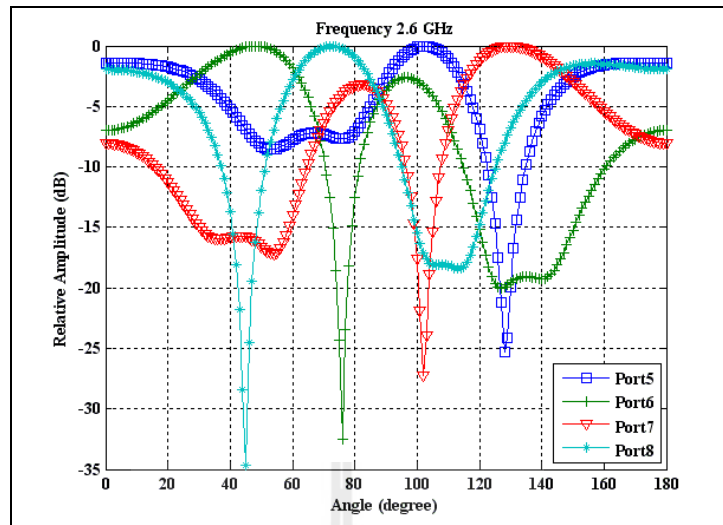
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-10.142, -14.683, -17.681, -10.166
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-12.31, -26.527, -11.636, -17.135
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-26.26, -17.099, -34.229
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-17.012, -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 ผลการวัดทิศทางของพุดสั้นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูป
ลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz

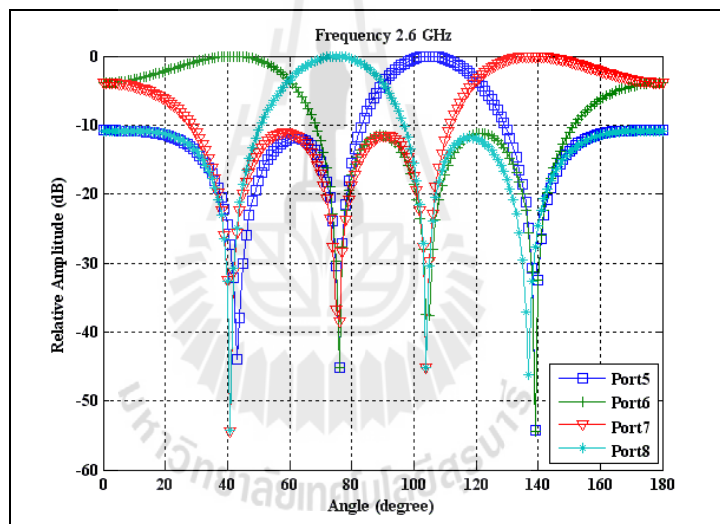
พอร์ตสัญญาณขา ออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
5	143.88°	85.724°	140.04°	1.34°	102°
6	109.57°	-171.33°	28.045°	84.913°	48°
7	85.612°	1.46°	173.22°	122.56°	130°
8	32.662°	134.97°	96.439°	-137.45°	73°

ตารางที่ 4.8 ผลการออกแบบทิศทางของพุดสั้นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.6 GHz

พอร์ตสัญญาณขา ออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
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 ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเคเดียมมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพุดล้นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุม

เฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 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

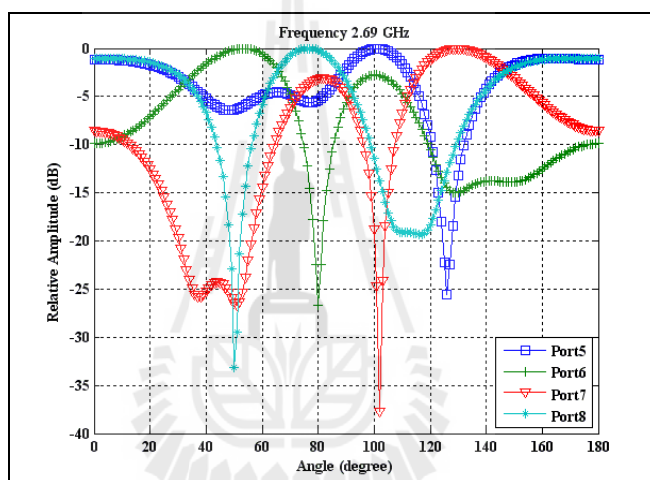
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-11.88, -18.129, -14.501, -12.197
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-14.148, -14.636, -15.528, -17.161
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-26.841, -18.122, -26.537
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-15.299, -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 ผลการวัดทิศทางของพหุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz

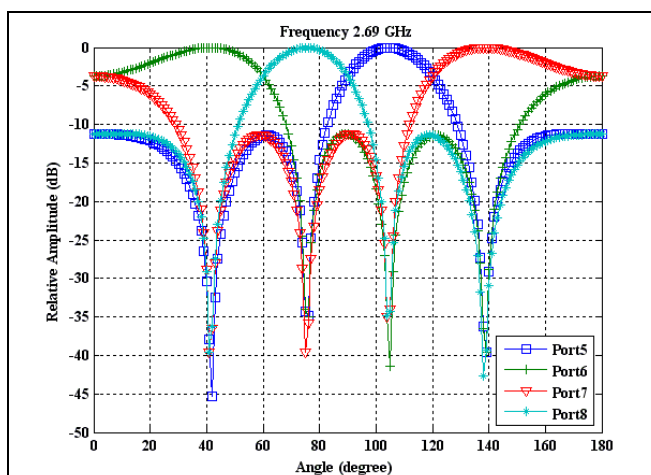
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พหุหลัก
5	-177.98°	34.067°	97.14°	53.128°	101°
6	83.559°	119.74°	-55.044°	22.544°	53°
7	30.664°	-40.526°	130.67°	70.192°	130°
8	-20.052°	74.711°	19.206°	134.64°	77°

ตารางที่ 4.11 ผลการออกแบบทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
 ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 2.69 GHz

พอร์ตสัญญาณขา ออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
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)	ทิศทางของ พู่หลัก 1	ทิศทางของ พู่หลัก 2	ทิศทางของ พู่หลัก 3	ทิศทางของ พู่หลัก 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)	ทิศทางของ พู่หลัก 1	ทิศทางของ พู่หลัก 2	ทิศทางของ พู่หลัก 3	ทิศทางของ พู่หลัก 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 ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดียมมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.15 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อนรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ขึ้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ก) เมื่อ

เรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.16 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.22 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อยซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้ และลำคลื่นหลักของพอร์ตที่ 6 นั้นมีลำคลื่นรองค่อนข้างสูงกรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์

ตารางที่ 4.14 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.4 GHz

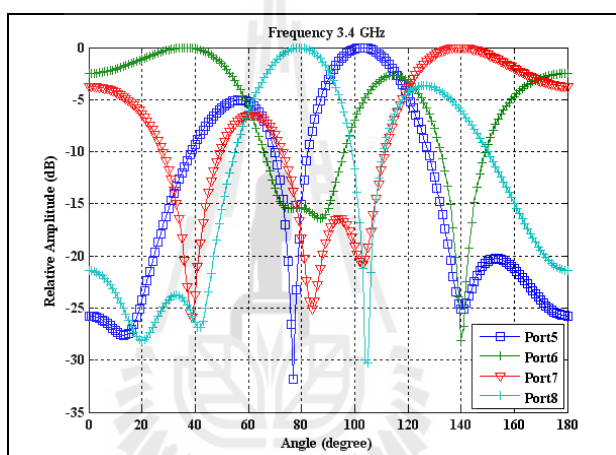
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-10.142, -17.111, -26.353, -21.866
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-19.353, -26.394, -22.819, -24.828
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-29.875., -25.691, -28.201
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-23.542, -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 ผลการวัดทิศทางของพหุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz

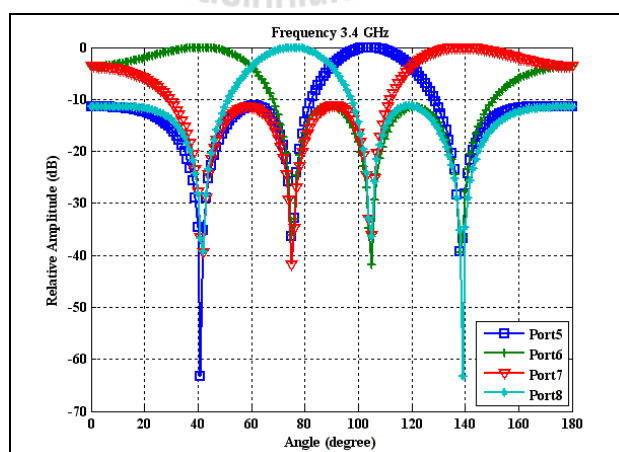
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พหุหลัก
5	89.522°	78.941°	-14.532°	-12.265°	103°
6	-23.972°	-170.1°	-103.53°	75.95°	36°
7	-13.708°	172.33°	75.713°	-75.34°	139°
8	-9.72°	-26.087°	75.162°	68.567°	79°

ตารางที่ 4.16 ผลการออกแบบทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
 ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.4 GHz

พอร์ตสัญญาณขา ออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
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 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยวและค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อที่ได้จากการวัด พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.18 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ก) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.19 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.23 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.17 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.5 GHz

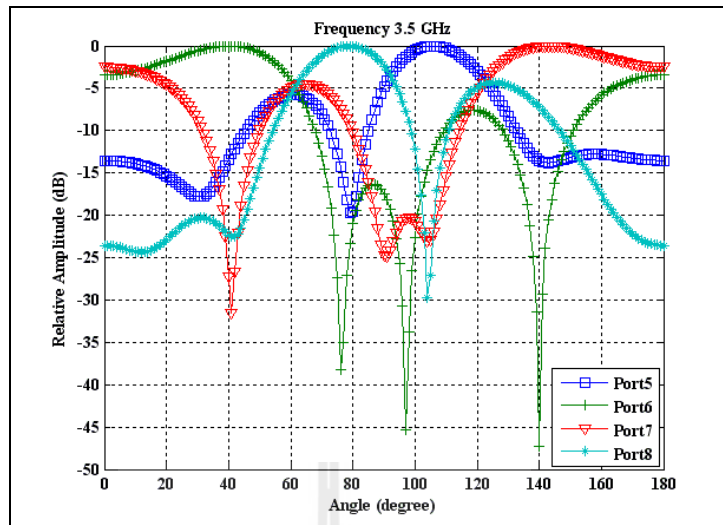
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-10.142, -24.051, -14.41, -15.715
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-12.31, -26.527, -11.636, -17.135
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-30.334, -22.834, -33.531
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-28.538, -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 ผลการวัดทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูป
ลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz

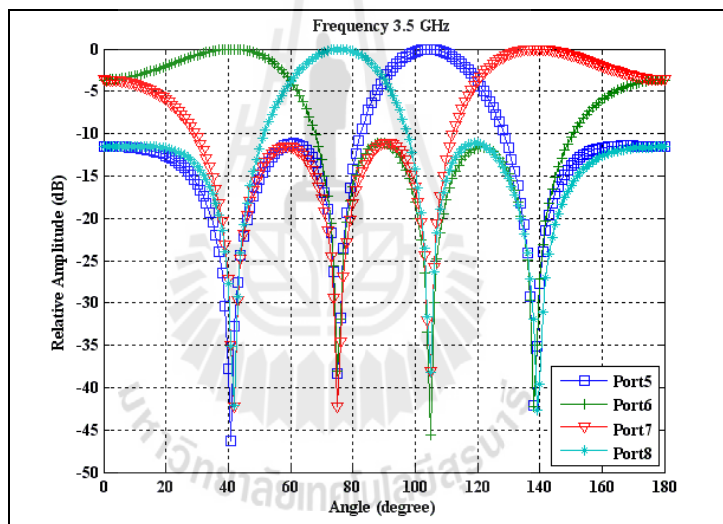
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
5	89.522°	78.941°	-14.532°	-12.265°	103°
6	-23.972°	-170.1°	-103.53°	75.95°	36°
7	136.77°	-27.712°	-74.802°	45.085°	139°
8	-9.72°	-26.087°	75.162°	68.567°	79°

ตารางที่ 4.19 ผลการออกแบบทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.5 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
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 ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเคเดียมมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.21 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุม

เฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.22 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.20 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 3.6 GHz

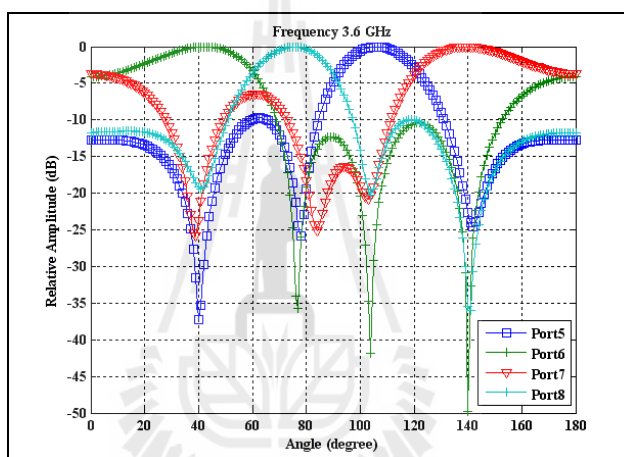
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-10.142, -14.388, -17.467, -23.626
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-18.882, -12.641, -16.17836, -19.604
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-31.509, -13.661, -49.848
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-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 ผลการวัดทิศทางของพหุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz

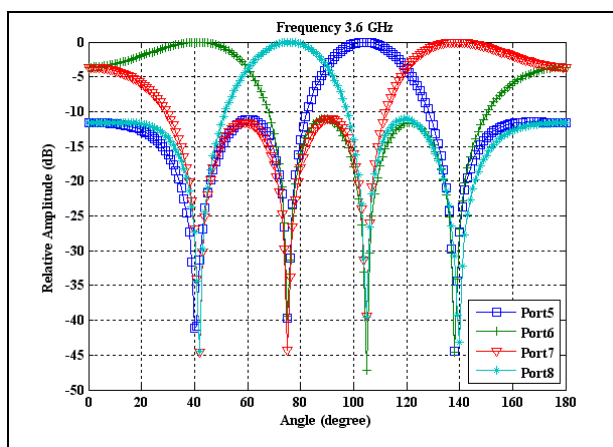
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พหุหลัก
5	23.335°	-28.121°	-89.21°	-122.89°	106°
6	-72.666°	64.471°	-169.14°	-31.505°	42°
7	-13.708°	172.33°	75.713°	-75.34°	139°
8	-112.41°	-88.36°	-36.606°	20.535°	76°

ตารางที่ 4.22 ผลการออกแบบทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
 ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 3.6 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
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 แล้วทิศทางของลำคลื่นหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบแถบความถี่กว้างที่ได้จะ ไม่มีการเลื่อนจะมีตำแหน่งอยู่ที่เดิม แต่ผลที่ได้จากในตารางพบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักของแต่ละความถี่มีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าผลของแบบรูปการแผ่พลังงานจากการวัดในรูปแบบที่ 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°

ช่วงแถบความถี่ 5.725 - 5.850 GHz ซึ่งทำการวัดค่าพารามิเตอร์ดังนี้

- **ที่ความถี่ 5.725 GHz**

จากตารางที่ 4.25 พบว่าค่าแอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.26 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ขึ้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.25 (ก) เมื่อนำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.27 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.25 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.25 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.725 GHz

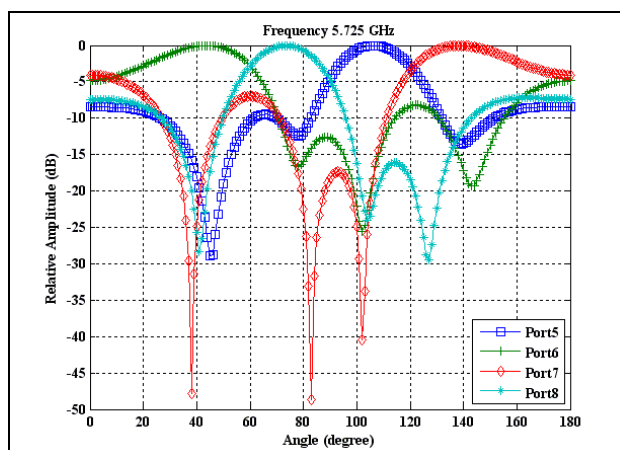
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-15.302, -13.429, -14.028, -10.335
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-11.646, -13.114, -11.273, -15.284
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-29.027, -19.468, -26.436
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-14.598, -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 ผลการวัดทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูป
ลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz

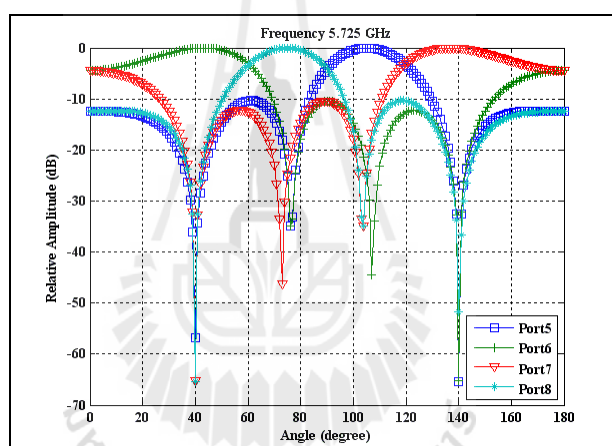
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
5	141.41°	49.734°	8.37°	-11.698°	106°
6	-4.022°	160.7°	-90.695°	32.908°	44°
7	69.355°	-87.793°	173.2°	14.911°	138°
8	-9.98°	71.177°	89.512°	154.23°	73°

ตารางที่ 4.27 ผลการออกแบบทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.725 GHz

พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
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)



(ข)

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

- ที่ความถี่ 5.8 GHz

จากตารางที่ 4.28 พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเคเดี่ยมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต้อมีค่าไม่สูงคือ ไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.29 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้นั้นไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.30 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไป

จำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.28 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.8 GHz

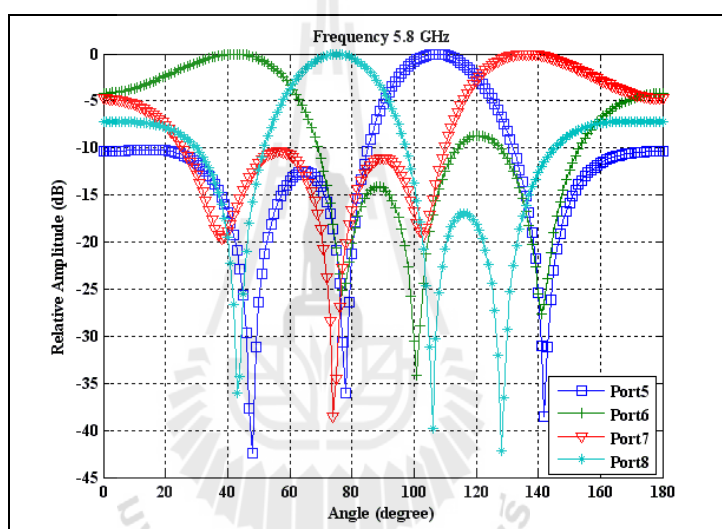
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-13.143, -12.205, -14.609, -11.455
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-14.304, -11.468, -13.711, -10.064
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-27.9, -20.186 -33.005
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-14.241, -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 ผลการวัดทิศทางของพหุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูป
ลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz

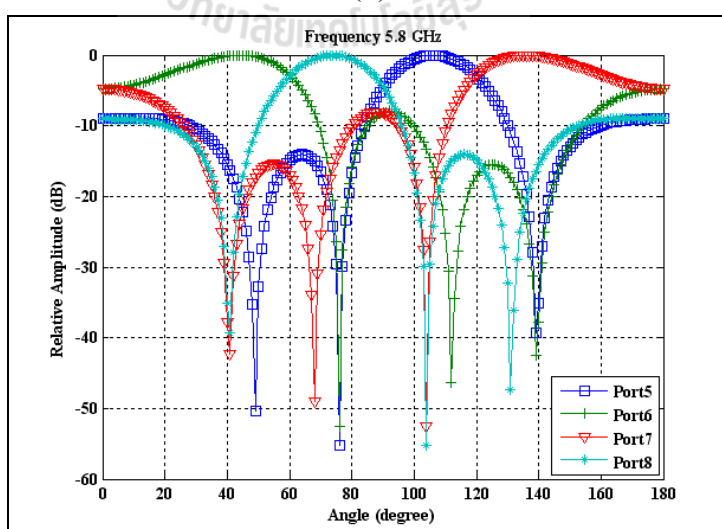
พอร์ตสัญญาณขาออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พหุหลัก
5	157.27°	96.503°	51.588°	-5.111°	107°
6	47.785°	-158.1°	-44.882°	93.685°	42°
7	103.74°	-45.215°	-171.85°	73.727°	136°
8	50.518°	120.29°	133.18°	-159.63°	75°

ตารางที่ 4.30 ผลการออกแบบทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
 ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.8 GHz

พอร์ตสัญญาณขา ออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
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 แสดงค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยวและค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อที่ได้จากการวัด พบว่าค่าเอสพารามิเตอร์ที่วัดได้เป็นไปตามทฤษฎีคือ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับมีค่าต่ำกว่า -10 dB ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยวมีค่าต่ำมากหรือต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อมีค่าไม่สูงคือไม่เกิน -10 dB หลังจากนั้นเราทำการวัดมุมเฟสของแต่ละพอร์ตที่พอร์ตขาออกจะได้ค่าดังตารางที่ 4.32 ซึ่งเป็นผลของการวัดทิศทางของพู่คลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ก) เมื่อเรานำเอามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 4.33 ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการออกแบบ แล้วนำค่ามุมเฟสที่ได้ไปจำลองแบบในคอมพิวเตอร์เพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ข) พบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักที่ได้จากการวัดค่อนข้างเบี่ยงเบนไปจากผลที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย กรณีของความผิดพลาดนี้อาจเกิดมาจากขั้นตอนในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าสามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.31 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงที่ความถี่ 5.850 GHz

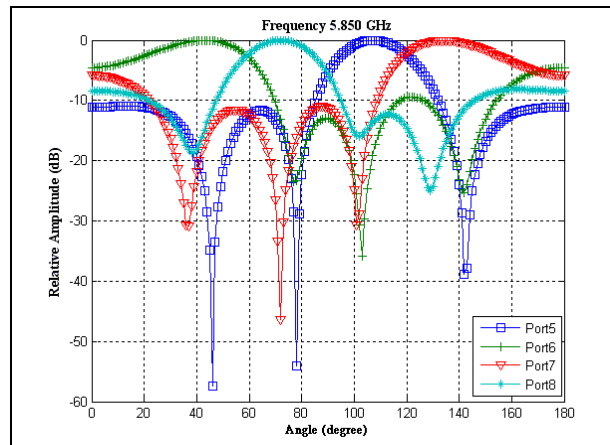
พารามิเตอร์	การวัด (dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ	
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-13.514, -12.539, -15.605, -10.63
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-17.623, -13.439, -15.726, -11.255
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคดเดี่ยว	
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-30.637, -16.153, -36.322
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-13.28, -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 ผลการวัดทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูป
ลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz

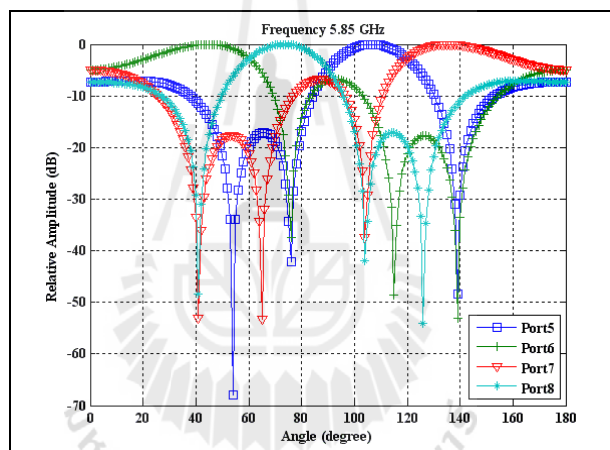
พอร์ตสัญญาณขา ออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
5	92.276°	37.408°	-13.258°	-68.004°	107°
6	-13.23°	136.45°	-105.83°	24.57°	43°
7	28.507°	-99.588°	133.39°	13.821°	134°
8	-32.716°	58.806°	92.655°	139.62°	72°

ตารางที่ 4.33 ผลการออกแบบทิศทางของพุดคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่าย
ก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ที่ความถี่ 5.850 GHz

พอร์ตสัญญาณขา ออก	สายอากาศ ต้นที่ 1	สายอากาศ ต้นที่ 2	สายอากาศ ต้นที่ 3	สายอากาศ ต้นที่ 4	ทิศทางของ พุดหลัก
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 แล้วทิศทางของลำคลื่นหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานแบบแถบความถี่กว้างที่ได้จะไม่มีกรณีอื่นจะมีตำแหน่งอยู่ที่เดิม แต่ผลที่ได้จากในตารางพบว่าทิศทางของลำคลื่นหลักของแต่ละความถี่มีค่าใกล้เคียงกัน กรณีของความผิดพลาดนี้อาจจะเกิดจากขั้นตอนของการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในทางปฏิบัติถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

ตารางที่ 4.34 สรุปทิศทางของลำคลื่นหลักของการออกแบบ

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

จากทั้งสามแถบความถี่ของการทดสอบนั้น เราจะได้แบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละช่วงความถี่ ซึ่งเราจะทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละพอร์ตจากสมการ (4.1) และจะใช้ค่าทิศทางของพู่คลื่นหลักของแต่ละช่วงแถบความถี่ในการออกแบบเป็นค่าในทางทฤษฎีในการอ้างอิงดังตารางที่ 4.36 - 4.38 ดังต่อไปนี้

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

เมื่อ $\%error$ คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน

Y_n คือ ค่าที่ได้จากทางทฤษฎี

X_n คือ ค่าที่ได้จากการวัด

ช่วงแถบความถี่ 2.5 - 2.69 GHz

ตารางที่ 4.36 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพุดิ้นหลักของช่วงแถบความถี่

2.5 - 2.69 GHz

ความถี่ (GHz)	พุดิ้นหลัก 1	พุดิ้นหลัก 2	พุดิ้นหลัก 3	พุดิ้นหลัก 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 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพุดิ้นหลักของช่วงแถบความถี่

3.4 - 3.6 GHz

ความถี่ (GHz)	พุดิ้นหลัก 1	พุดิ้นหลัก 2	พุดิ้นหลัก 3	พุดิ้นหลัก 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 ตารางเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของพุดิ้นหลักของช่วงแถบความถี่

5.725 - 5.850 GHz

ความถี่ (GHz)	พุดิ้นหลัก 1	พุดิ้นหลัก 2	พุดิ้นหลัก 3	พุดิ้นหลัก 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%

จากการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแบบรูปการแผ่พลังงานของพุดิ้นหลักของแต่ละพอร์ตในแต่ละแถบความถี่นั้นพบว่าในช่วงแถบความถี่ที่ 2.5 - 2.69 GHz นั้นจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแถบความถี่อื่นๆ เนื่องจากค่าความต่างเฟสของตัวคัปเปิลอร์แบบไฮบริดจ์ 90° ที่ได้ทำการสร้างจริงนั้นมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.59% ซึ่งมากกว่าที่ช่วงแถบความถี่ 3.5 GHz และ 5.8 GHz ที่มีค่าเท่ากับ 0.67% และ 0.468% ตามลำดับ

4.5 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการสร้างวงจรคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณแบบสามแถบ ความถี่ของระบบไวแมก และตัวเลื่อนเฟสที่ความถี่เดียว เมื่อนำมารวมวงจรเป็นเครือข่ายก่อรูป ลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์แล้วจะแสดงผลที่ได้อยู่ในรูปของความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ความสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อ ค่าสูญเสียเนื่องจากการแยกโคตเดี่ยว และค่ามุมของทิศทางของ พุคลื่นหลักและเฟสของสัญญาณขาออกสำหรับเครือข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบบัตเลอร์เมตริกซ์ของแต่ละ ความถี่ แล้วนำค่ามุมที่ได้ไปใส่ในโปรแกรมจำลองแบบจะเห็นว่าแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้ ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีและการออกแบบซึ่งสามารถสรุปได้ว่าไม่ว่าจะเปลี่ยนความถี่เป็นความถี่ใดๆ ทิศทางของลำคลื่นหลักของแบบรูปพลังงานที่ได้จะไม่มีการเลื่อนจะมีตำแหน่งอยู่ที่เดิม



บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้นและมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีความต้องการการบริการที่รวดเร็วทั้งภาพและเสียงของผู้ใช้บริการ ซึ่งส่งผลให้การสื่อสารด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่สูงเป็นที่ต้องการอย่างมาก หรือพูดอีกนัยหนึ่งว่าการส่งข้อมูลในระบบไร้สายในอนาคตนั้นต้องการแถบความถี่ใช้งานที่กว้างมากกว่าที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งไวแอมก็เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีไร้สายที่มีความเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูง 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) จากจุดเด่นของไวแอมที่สามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการให้บริการในพื้นที่กว้างๆ อย่างเช่น การเกิดสัญญาณคลื่นหลายวิถี การเกิดสัญญาณแทรกสอด เป็นต้น ซึ่งระบบสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณได้ดีขึ้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดตรงที่ระบบสายอากาศโดยเฉพาะระบบสวิตช์ลำคลื่นจะสามารถทำงานได้ดีกับสัญญาณที่มีแถบความถี่แคบ ซึ่งหากนำไปใช้กับสัญญาณที่มีแถบความถี่กว้างจะทำให้เกิดความเสียหายหลายประการเช่น ไม่สามารถชี้ทิศทางที่มีอัตราขยายสูงสุดไปยังผู้ใช้งาน หรือไม่สามารถหันพู่คลื่นรองหรือจุดศูนย์ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการออกแบบตัวคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไวสัญญาณ ที่สามารถครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแอม โดยทำการออกแบบในโปรแกรม CST Microwave Studio และจากนั้นทำการสร้างอุปกรณ์จริงแล้วนำอุปกรณ์ที่ได้ไปวัดผลในห้องปฏิบัติการแล้วนำค่ามัมเฟสที่วัดได้ไปจำลองแบบเพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งจากผลการออกแบบและการทดสอบทำให้เราสามารถสามารถสรุปได้ว่าไม่ว่าจะเปลี่ยนความถี่เป็นความถี่ใดๆ ทิศทางของลำคลื่นหลักของแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จะไม่มีกรณีอื่นจะมีตำแหน่งอยู่ที่เดิมและสามารถชี้ทิศทางที่มีอัตราขยายสูงสุดไปยังผู้ใช้งานได้ส่วนพู่คลื่นรองก็สามารถชี้ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดได้เช่นเดียวกัน

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันยังไม่มีเทคโนโลยีไวแมกใช้งานได้จริง ซึ่งในการวัดทดสอบประสิทธิภาพของระบบของงานวิจัยที่ได้ในบทที่ 4 นั้น จึงต้องทำการวัดผลในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ในอนาคตเมื่อมีเทคโนโลยีไวแมกใช้แล้วเราจึงนำระบบของงานวิจัยนี้ไปทดสอบผลเพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบของเราใช้งานกับเทคโนโลยีไวแมกได้จริง

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้เสนอการออกแบบตัวคัปเปิลอร์ไฮบริดจ์ 90° และตัวไขว้สัญญาณ ที่สามารถครอบคลุมทั้งหมดสามแถบความถี่ของระบบไวแมก แต่ยังคงขาดตัวเลื่อนเฟสแบบแถบความถี่กว้างเนื่องจากอุปกรณ์ที่นำมาทำวงจรเลื่อนเฟสแบบแถบความถี่กว้างนั้น มีราคาสูงและตัวเลื่อนเฟสที่ขายตามท้องตลาดมีคุณสมบัติไม่ตรงตามที่เราต้องการ ในอนาคตอาจจะมีการออกแบบตัวเลื่อนเฟสแบบแถบความถี่กว้างขึ้นมาใช้งานต่อไป และจากผลการทดสอบพบว่าค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อจะมีค่อนข้างสูง ดังนั้นควรเพิ่มการพัฒนาการออกแบบโครงข่ายก่อรูปค่าคลื่นให้เบ็ดเสร็จในอุปกรณ์ชิ้นเดียว เพื่อไม่ให้เกิดค่าการสูญเสียเนื่องจากการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ และควรมีการเปรียบเทียบกับค่าอัตราขยายของสายอากาศเก่งเพื่อให้เห็นถึงสมรรถนะจริงของระบบต่อไป



บรรณานุกรม

- 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.
- Herscovici, 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.

ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

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



ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีเมื่อปี พ.ศ. 2540 และวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2542 จากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และได้ลาศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 ณ University of Queensland ประเทศออสเตรเลีย และสำเร็จการศึกษาเมื่อปี พ.ศ. 2549 จากนั้นได้กลับเข้ามาปฏิบัติหน้าที่อาจารย์ตามเดิม ผู้วิจัยมีเชี่ยวชาญในด้านระบบ Narrowband/Wideband Smart Antenna, Phased Array Processing, DOA Estimation Method, Null Steering Scheme จนถึงปัจจุบันตีพิมพ์วารสารวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 24 บทความ และบทความในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 40 บทความ และในปี 2551 ได้เป็นผู้เขียน Book Chapter ในหนังสือ Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks, IGI GLOBAL, USA ในบทเรื่อง Wideband Smart Antenna avoiding Tapped-Delay Lines and Filters

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ได้รับรางวัลที่สองของ Young Scientist Contest Award จากงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 16th International Conference Microwaves, Radar and Wireless Communications ปี พ.ศ. 2549 ณ ประเทศโปแลนด์ และได้รับรางวัล Highly Recommended prize in the Student Presentation Competition จากงานประชุมวิชาการนานาชาติ 9th Australian Symposium on Antenna ปี พ.ศ. 2548 ณ ประเทศออสเตรเลีย