



การศึกษาการลดระดับพู่ข้างสำหรับสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้
โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

โดย

1. นางสาวชญากรณ์ แหยมเกิด รหัสประจำตัว B5000852
2. นางสาวจิรวัดนา ทาค่อย รหัสประจำตัว B5003242

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2546
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ประจำภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2553

การศึกษาการลดระดับพู่ข้างสำหรับสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่าย
ก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

คณะกรรมการสอบโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล)
กรรมการ/อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร. ประโยชน์ คำสวัสดิ์)
กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พีระพงษ์ อุฑารสกุล)
กรรมการ



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุตินา พรหมมาก)
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับรายงานโครงการฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม วิชา 427499 โครงการวิศวกรรมโทรคมนาคม ประจำปีการศึกษา 2553

โครงการน การลดระดับพู่ข้างสำหรับสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่าย

ก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

โดย 1. นางสาวชญากรณ์ แหมมเกิด รหัสประจำตัว B5000852

2. นางสาวจิรวัดนา ทาค่อย รหัสประจำตัว B5003242

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. มนต์ทิพย์ภา อูทวารสกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาคการศึกษา 1/2553

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีนักวิจัยให้ความสนใจการประยุกต์ใช้งานสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น ซึ่งจะทำให้ระบบสื่อสารไร้สายมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากสามารถลดสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางอื่นได้ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่นิยมใช้กัน ได้แก่ Butler matrix ซึ่งมีความซับซ้อนน้อย และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามพู่ข้างที่ได้จาก Butler matrix ยังมีระดับที่สูง ดังนั้นโครงการชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาวิธีการลดระดับพู่ข้างของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดเริ่มแรกของการศึกษารลดระดับพู่ข้างสำหรับสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับแนวคิดการดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ชี้นำข้อบกพร่องตลอดจนช่วยฝึกฝนและให้การสนับสนุนคณะผู้จัดทำให้มีความสามารถในการทำโครงการตลอดจนเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำ รวมทั้งพี่บัณฑิตศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกวิศวกรรมโทรคมนาคมมาโดยตลอด โดยเฉพาะนางสาวปาลีรัตน์ วงจำปา ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเป็นอย่างดี และเพื่อนนักศึกษสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกคนที่เป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวไปแล้วไว้ ณ ที่นี้ สำหรับส่วนดีของโครงการชิ้นนี้ ขออุทิศให้แก่อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

นางสาวชญากรณ์ แหมมเกิด
นางสาวจิรวัดนา ทาต้อย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญรูป	ณ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการงาน	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กล่าวนำ	4
2.2 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	4
2.3 ทฤษฎีสายอากาศ	7
2.3.1 ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล	7
2.3.2 ทฤษฎีแฉวลำดับของสายอากาศ	8
2.3.2.1 ตัวประกอบแฉวลำดับ	10
2.3.2.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแฉวลำดับ	14
2.3.2.3 แฉวลำดับแบบเชิงเส้น	17
2.4 ระบบสายอากาศแก่ง	18
2.4.1 สายอากาศแก่งชนิดสวิทช์ลำคลื่น	19
2.5 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix	20
2.5.1 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ตัวไขว้สัญญาณ	24
2.5.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา	25
2.6 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน (hybrid ring coupler)	27
2.6 กล่าวสรุป	28
บทที่ 3 การออกแบบโครงข่ายท่อรูปสี่เหลี่ยม	
3.1 กล่าวนำ	29
3.2 โครงข่ายท่อรูปสี่เหลี่ยม	29
3.2.1 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา	29
3.2.2 ตัวไขว้สัญญาณ	37
3.2.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา	43
3.3 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	48
3.4 วงจรท่อรูปสี่เหลี่ยมที่เสร็จสมบูรณ์	53
3.4.1 วงจรท่อรูปสี่เหลี่ยมที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน ที่เสร็จสมบูรณ์	53
3.4.2 วงจรท่อรูปสี่เหลี่ยมที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน ที่เสร็จสมบูรณ์	54
3.5 กล่าวสรุป	55
บทที่ 4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ	
4.1 กล่าวนำ	56
4.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์	56
4.2.1 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบด้วยการจำลองแบบในโปรแกรม CST	56

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.1.1 โครงข่ายก่อรูปลำดับชั้นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับ ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	56
4.2.1.2 โครงข่ายก่อรูปลำดับชั้นแบบ Butler Matrix ที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	58
4.2.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบด้วยการจำลองแบบ ในโปรแกรม MATLAB	60
4.2.2.1 โครงข่ายก่อรูปลำดับชั้นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับ ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	63
4.2.1.2 โครงข่ายก่อรูปลำดับชั้นแบบ Butler Matrix ที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	65
4.3 กล่าวสรุป	70
บทที่ 5 ข้อสรุปของโครงการ	
5.1 ข้อสรุปโครงการ	71
5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไขปัญหา	71
5.3 ข้อเสนอแนะ	72
5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป	72
ประวัติผู้เขียน	74
บรรณานุกรม	75

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix	2
รูปที่ 2.1 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	4
รูปที่ 2.2 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	5
รูปที่ 2.3 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	5
รูปที่ 2.4 สายอากาศโมนโพล ($\lambda/2$) ที่วางอยู่เหนือแผ่นตัวนำสมบรูณ์	
(ก) ลักษณะทางกายภาพ	8
(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน	8
รูปที่ 2.5 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ	11
รูปที่ 2.6 [2] (ก) ตัวประกอบแถวลำดับสำหรับ 4 องค์ประกอบ	13
(ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น $d = \frac{\lambda}{2}$	13
รูปที่ 2.7 สายอากาศองค์ประกอบเดียวที่มีการส่งกำลังงาน $P_1[2]$	15
รูปที่ 2.8 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน $P_1[2]$	15
รูปที่ 2.9 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน $P_1[2]$	15
รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น [2]	17
รูปที่ 2.11 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระยะห่าง (d) ของสายอากาศที่แตกต่างกัน [2]	18
รูปที่ 2.12 สายอากาศเก็งชนิดสวิตช์ลำคลื่น	19
รูปที่ 2.13 วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix	21
รูปที่ 2.14 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา	22
รูปที่ 2.15 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา	23
รูปที่ 2.16 ตัวไขว้สัญญาณ	24
รูปที่ 2.17 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45 °)	
(ก) ตัวเลื่อนเฟสแบบเส้นตรง	25

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
(ข) ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา	25
รูปที่ 2.18 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ	
(ก) โดยสี่แดงเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P_1 กับพอร์ต P_2	26
(ข) โดยสี่ชมพูเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P_3 กับพอร์ต P_4	26
รูปที่ 2.19 ตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน[3]	27
รูปที่ 2.20[5] (ก) ตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	28
(ข) ด้านบนของตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	28
(ค) การเดินทางของคลื่น โดยมีพอร์ตที่ 3 เป็นอินพุต	28
(ง) การเดินทางของคลื่น โดยมีพอร์ตที่ 1 เป็นอินพุต	28
รูปที่ 3.1 คัปเปอเรอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา	30
รูปที่ 3.2 คัปเปอเรอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่ออกแบบ	32
รูปที่ 3.3 โปรแกรม CST	33
รูปที่ 3.4 คัปเปอเรอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่ปรับค่าแล้ว	33
รูปที่ 3.5 คัปเปอเรอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่เสร็จสมบูรณ์	34
รูปที่ 3.6 ค่า S พารามิเตอร์	34
รูปที่ 3.7 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต	35
รูปที่ 3.8 ค่า S พารามิเตอร์ในไอโซเลคพอร์ต	35
รูปที่ 3.9 เฟสของคัปเปอเรอร์แบบไฮบริด 90 องศา	36
รูปที่ 3.10 ตัวไขว้สัญญาณ	37
รูปที่ 3.11 ตัวไขว้สัญญาณที่ออกแบบ	39
รูปที่ 3.12 ตัวไขว้สัญญาณที่ทำการปรับค่าแล้ว	39
รูปที่ 3.13 ตัวไขว้สัญญาณที่เสร็จสมบูรณ์	40
รูปที่ 3.14 ค่า S พารามิเตอร์	40

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.15 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต	41
รูปที่ 3.16 ค่า S พารามิเตอร์ของไอโซเลคพอร์ต	41
รูปที่ 3.17 เฟสของตัวไขว้สัญญาณ	42
รูปที่ 3.18 ตัวเลื่อนเฟส 45°	43
รูปที่ 3.19 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ	43
รูปที่ 3.20 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา	44
รูปที่ 3.21 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายที่ออกแบบ	45
รูปที่ 3.22 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาที่เสร็จสมบูรณ์	45
รูปที่ 3.23 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต	46
รูปที่ 3.24 ค่า S พารามิเตอร์ของไอโซเลคพอร์ต	46
รูปที่ 3.25 เฟสของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา	47
รูปที่ 3.26 ตัวคัปเปอรีไฮบริคจ์แบบวงแหวน	48
รูปที่ 3.27 ตัวคัปเปอรีไฮบริคจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบ	49
รูปที่ 3.28 ตัวคัปเปอรีไฮบริคจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบเสร็จแล้ว	50
รูปที่ 3.29 ตัวคัปเปอรีไฮบริคจ์แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูรณ์	50
รูปที่ 3.30 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต	51
รูปที่ 3.31 ค่า S พารามิเตอร์ที่เป็นเอาท์พุท	51
รูปที่ 3.32 เฟสของตัวคัปเปอรีไฮบริคจ์แบบวงแหวน	52
รูปที่ 3.33 วงจรก่อรูปลักษณะที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอรีไฮบริคจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์	53
รูปที่ 3.34 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต	54
รูปที่ 3.35 วงจรก่อรูปลักษณะที่ต่อกับตัวคัปเปอรีไฮบริคจ์แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูรณ์	54
รูปที่ 3.36 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต	55
รูปที่ 4.1 โครงข่ายก่อรูปลักษณะแบบ Butler Matrix แบบ 4x4	57

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix แบบ 4x8	58
รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของอินพุทพอร์ตที่ 1 ซีทีสที่ 104.5 องศา	63
รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 2 ซีทีสที่ 41.4 องศา	63
รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 3 ซีทีสที่ 138.6 องศา	64
รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 4 ซีทีสที่ 75.5 องศา	64
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 1 ซีทีสที่ 104.5 องศา	65
รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 2 ซีทีสที่ 41.4 องศา	66
รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 3 ซีทีสที่ 136.6 องศา	66
รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 4 ซีทีสที่ 75.5 องศา	67
รูปที่ 4.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 1 ซีทีสที่ 104.5 องศา	68
รูปที่ 4.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 2 ซีทีสที่ 41.4 องศา	68
รูปที่ 4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 3 ซีทีสที่ 138.6 องศา	69
รูปที่ 4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 4 ซีทีสที่ 75.5 องศา	69

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสของสายอากาศ ทิศทางของลำคลื่น และเฟสที่มาจาก Butler Matrix	21
ตารางที่ 3.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของของคัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศา	36
ตารางที่ 3.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของของตัวไขว้สัญญาณ	42
ตารางที่ 3.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา	47
ตารางที่ 3.4 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	52
ตารางที่ 4.1 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากทฤษฎี	57
ตารางที่ 4.2 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากจาก การออกแบบ	58
ตารางที่ 4.3 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากทฤษฎี	59
ตารางที่ 4.4 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากจาก การออกแบบ	59
ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้	71

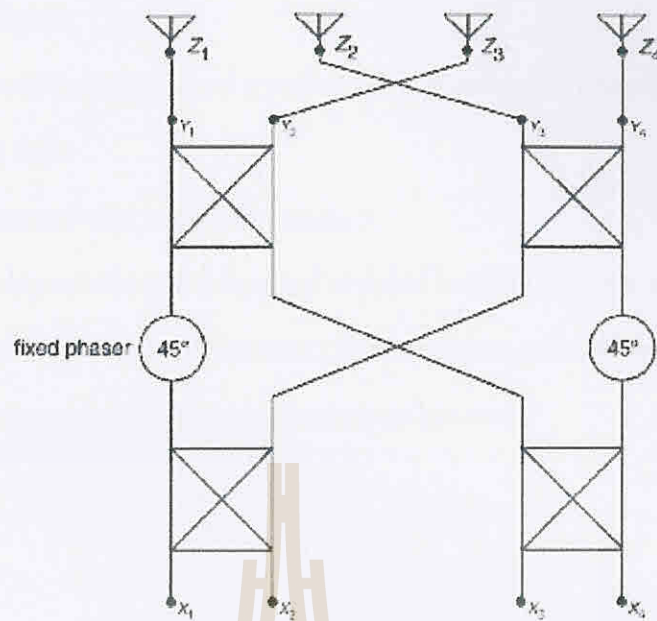


บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายมักจะใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานในลักษณะรอบทิศทาง ส่งผลให้สูญเสียพลังงานไปในบริเวณที่ไม่มีผู้ใช้งาน และยังทำให้รับสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางอื่นได้อีกด้วย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบสายอากาศให้กับระบบการสื่อสารไร้สายโดยทำให้สายอากาศมีการแผ่พลังงานในลักษณะจำเพาะเจาะจงทิศทาง ซึ่งถูกเรียกว่า ระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) ระบบสายอากาศเก่งจะประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับและโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น สายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่น (switched beam antennas) เป็นสายอากาศประเภทหนึ่งของระบบสายอากาศเก่งที่มีความซับซ้อนน้อย และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สายได้ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นสำหรับสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่นิยมใช้ในปัจจุบันได้แก่ Butler matrix ซึ่งประกอบด้วย ตัวคัปเปิลอร์ 90 องศา จำนวน 4 ตัว ตัวไขว้สัญญาณจำนวน 1 ตัว และตัวเลื่อนเฟส 45 องศา จำนวน 2 ตัว โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix นี้สามารถก่อรูปลำคลื่นไปยังทิศทางทั้งหมด 4 ทิศทางได้แก่ 138.6 องศา, 104.5 องศา, 75.5 องศา และ 41.4 องศา ดังที่แสดงในรูปที่ 1.1 อย่างไรก็ตามพู่ข้างที่ได้จากการก่อรูปลำคลื่นดังกล่าวมีระดับที่สูง ส่งผลให้ไม่สามารถลดระดับสัญญาณแทรกสอดได้เท่าที่ควร และยังเป็นการลดอัตราขยายของระบบในทิศทางที่ต้องการอีกด้วย ดังนั้น โครงงานชิ้นนี้จึงได้ศึกษาวิธีการ ลดระดับพู่ข้างของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นเมื่อใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix โดยการออกแบบและจำลองแบบในคอมพิวเตอร์ ทดสอบสมรรถนะเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี



รูปที่ 1.1 สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการลดระดับพู่ข้างของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นเมื่อใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

1.3 ขอบเขตงาน

1. ศึกษาโปรแกรม Matlab เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสายอากาศจำนวน 4 ต้นและ 8 ต้นว่าแตกต่างกันอย่างไร
2. ศึกษาโปรแกรม CST Microwave Studio 5 เพื่อใช้ในการออกแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นและ ตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน
3. ออกแบบอุปกรณ์จำลองทั้งหมดและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์
4. นำอุปกรณ์จำลองมาประกอบเข้ากันเป็นแบบจำลอง
5. ทดสอบแบบจำลองที่จำลองขึ้นเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาโปรแกรม Matlab และทำการเขียน โปรแกรมเพื่อเปรียบเทียบขนาดสัญญาณของสายอากาศ 4 ต้นและ 8 ต้น
2. ศึกษาโปรแกรม CST Microwave Studio 5
3. ออกแบบ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นและตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน
4. นำอุปกรณ์จำลองทั้งหมดมาประกอบรวมกันและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์
5. สรุปผลการทดลอง เขียนรายงาน และนำเสนอ โครงการงาน



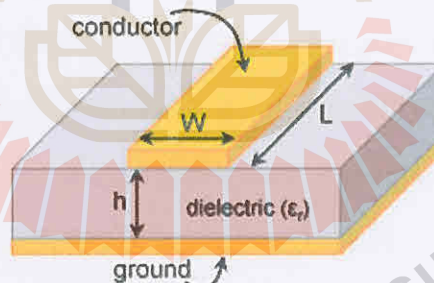
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

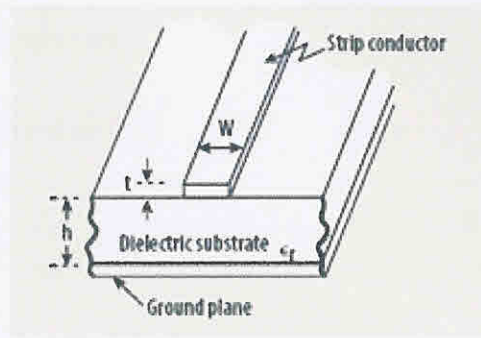
โครงการการศึกษาการลดระดับพู่สำหรับสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix นี้ได้มีการประยุกต์ใช้สายอากาศแถวลำดับ (array antennas) ร่วมกับวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ซึ่งมีการใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นทั้งหมดจำนวน 8 ต้น และนำมาเชื่อมต่อกับวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ในวงจร Butler matrix นี้ประกอบไปด้วยตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (90° Hybrid coupler) จำนวน 4 ตัว ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) จำนวน 1 ตัว และตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (45° phase shifter) จำนวน 2 ตัว ซึ่งทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ในแต่ละส่วนดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

2.2 ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

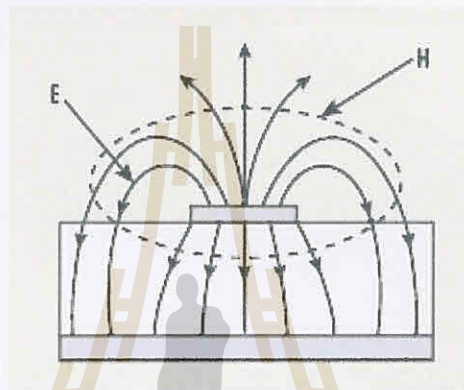


รูปที่ 2.1 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณ ไมโครสตริปประกอบไปด้วย ตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่นและระนาบกราวด์ โดยมีไดอิเล็กตริก อยู่ตรงกลาง ดังรูปที่ 2.1 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป โดยค่าไดอิเล็กตริกนี้จะอยู่ตรงกลางระหว่าง ตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่นและระนาบกราวด์ ในการออกแบบสายส่งสัญญาณไมโครสตริปนี้จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญ คือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น (W) ความสูงของฐานรองรับ (h) ความหนาของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และค่าของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ (ϵ_r) เป็นต้น



รูปที่ 2.2 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป[1]



รูปที่ 2.3 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป[1]

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปดังรูปที่ 2.2 ไม่ได้บรรจุอยู่ในชั้นของฐานรองรับ แต่การแผ่กระจายคลื่นจะแผ่ออกไปข้างนอกของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปดังรูปที่ 2.3 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ดังนั้นการแผ่กระจายในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปจะไม่ใช่โหมด TEM แต่จะเป็น Quasi-TEM ความเร็วเฟสของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (2.1)$$

เมื่อ ค่าของ c คือ ความเร็วแสง

ค่าของ ϵ_{re} คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ

การหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด

1. นำค่าต่างๆ แทนลงในสมการดังต่อไปนี้

$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\left((e_r + 1) \frac{1}{2}\right) + \left\{ \frac{e_r - 1}{e_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{e_r}\right) \right\}} \quad (2.2)$$

$$B = \frac{377p}{2Z_0 \sqrt{e_r}} \quad (2.3)$$

2. นำค่าที่ได้เหล่านี้แทนลงในสมการ (W/d)

เมื่อ $W/d \leq 1$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln(8h/w + 0.25w/h) \quad (2.4)$$

และที่

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[(1 + 12h/w)^{-1/2} + 0.04(1 - w/h)^2 \right] \quad (2.5)$$

และเมื่อ $W/d \geq 1$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{re}} \left[w/h + 1.393 + 0.667 \ln(w/h + 1.44) \right]} \quad (2.6)$$

และที่

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} (1 + 12h/w)^{-1/2} \quad (2.7)$$

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

2.3 ทฤษฎีสายอากาศ

2.3.1 ทฤษฎีสายอากาศโมนโพล

โมนโพล (monopole) เป็นสายอากาศเส้นลวดตรงที่มีต้นแบบมาจากสายอากาศไดโพลเพียงแต่นำมาใช้เพียงครึ่งหนึ่งของความยาวไดโพล และมีการป้อนสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางของไดโพลโดยเทียบกับระนาบกราวด์ ดังนั้นความยาวของโมนโพลจึงเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นที่ใช้งาน ($\lambda/4$) การแจกแจงของกระแสที่เกิดขึ้นบนสายอากาศโมนโพลนี้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดป้อนสัญญาณและค่าจะลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ที่ปลายของโมนโพล

การแจกแจงของสนามที่เกิดขึ้นในอากาศอิสระครึ่งบน (upper half-space) จะมีลักษณะเหมือนกับที่เกิดขึ้นบนสายอากาศแบบไดโพลที่วางอยู่ในอากาศอิสระแบบเต็มหรือที่ไม่มี การเทียบกับแผ่นกราวด์

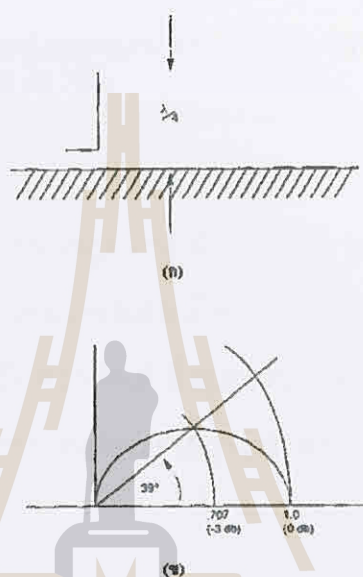
กระแสและประจุที่เกิดขึ้นบนสายอากาศโมนโพลจะมีลักษณะเหมือนกันกับที่เกิดขึ้นบนแขนด้านบนของสายอากาศไดโพล แต่แรงดันที่เกิดขึ้นที่ขั้วของสายอากาศโมนโพลจะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลเท่านั้น ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของสายอากาศชนิดนี้จึงมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบไดโพลที่ใช้เปรียบเทียบนั่นคือ

$$Z_{in}^{monopole} = 0.5 Z_{in}^{dipole} \quad (2.8)$$

ค่ากำลังงานรวมที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศโมนโพลจะมีขนาดเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ เนื่องจากมีการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะบริเวณอากาศอิสระครึ่งบน ทำให้มุมตันลำคลื่น (beam solid angle) ของสายอากาศโมนโพลนี้มีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของไดโพลที่ใช้ในการเปรียบเทียบด้วยกัน ส่งผลให้มีค่าสภาพจะงกติกทางสูงกว่าของไดโพลถึงสองเท่า นั่นคือ

$$D_0^{\text{monopole}} = \frac{4\pi}{\Omega_A^{\text{monopole}}} = \frac{4\pi}{0.5\Omega_A^{\text{monopole}}} = 2D_0^{\text{dipole}} \quad (2.9)$$

รูปที่ 2.4 แสดงถึงสายอากาศแบบโมโนโพลที่มีความยาว 1 ใน 4 ของความยาวคลื่น ($\lambda/4$) ที่คิดจากความถี่ปฏิบัติการวางเหนือแผ่นตัวนำสมบูรณ์ที่มีความยาวของสายอากาศเป็นครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ($\lambda/2$)



รูปที่ 2.4 สายอากาศโมโนโพล ($\lambda/2$) ที่วางอยู่เหนือแผ่นตัวนำสมบูรณ์ [2]

(ก) ลักษณะทางกายภาพ

(ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

2.3.2 ทฤษฎีแฉวลำดับของสายอากาศ

แฉวลำดับของสายอากาศ หมายถึง การนำเอาสายอากาศหลายๆตัวมาจัดวางเรียงกัน โดยมีระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นที่แน่นอน โดยสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแฉวลำดับนั้นจะเรียกว่า องค์ประกอบ (element) ซึ่งการนำเอาองค์ประกอบมาจัดวางเรียงเป็นแฉวลำดับนั้นจะให้สมรรถนะคล้ายคลึงกับสายอากาศสององค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่่มาก แต่การจัดเรียงแบบแฉวลำดับนั้นจะสามารถขจัดปัญหาในเรื่องของกลไกต่างๆอันเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่เกินไปของสายอากาศได้

ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับนั้น ทำได้โดยการใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลายๆองค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดียว จะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะงทศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ นอกจากนี้สายอากาศแบบแถวลำดับนั้น ยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้แก่ละองค์ประกอบได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่เราต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทได้ การเปลี่ยนเฟสอย่างต่อเนื่องของสายอากาศเมื่อเทียบกับเวลาจะทำให้สายอากาศสามารถกวาดลำคลื่นออกไปในทิศทางต่างๆได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกแถวลำดับแบบนี้ว่า แถวลำดับแบบปรับเฟส (phased array)

แถวลำดับแบบปรับเฟส ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายๆประเภท โดยเฉพาะสายอากาศสายอากาศที่ใช้ในงานระบบเรดาร์ การปรับเฟสของแถวลำดับนั้นจะใช้วิธีการปรับเฟสโดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์อีกระดับหนึ่ง เพื่อปรับเฟสให้มีผลทำให้ทิศทางแผ่กระจายกำลังงานสามารถกวาดไปยังตำแหน่งต่างๆได้อย่างรวดเร็ว

เราสามารถแบ่งจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับตามรูปร่างได้หลายๆประเภท เช่น แถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear array) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตร เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะระหว่างองค์ประกอบห่างกันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ประเภทต่อไปก็คือ แถวลำดับเชิงระนาบ (planar array) จะเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบในลักษณะสองมิติบนแผ่นระนาบ ซึ่งการจัดเรียงแถวลำดับในลักษณะนี้อาจจัดเรียงในลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปวงกลมก็ได้โดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีอยู่ เมื่อพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเรียงแถวลำดับมีลักษณะไม่แบนราบ เช่น ที่ส่วนหัวของจรวดหรือเครื่องบิน การจัดเรียงแถวลำดับก็ต้องมีรูปร่างเป็นไปตามลักษณะของพื้นที่ดังกล่าวด้วย แถวลำดับแบบนี้จะมีชื่อเรียกว่า แถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์ (end-fire array)

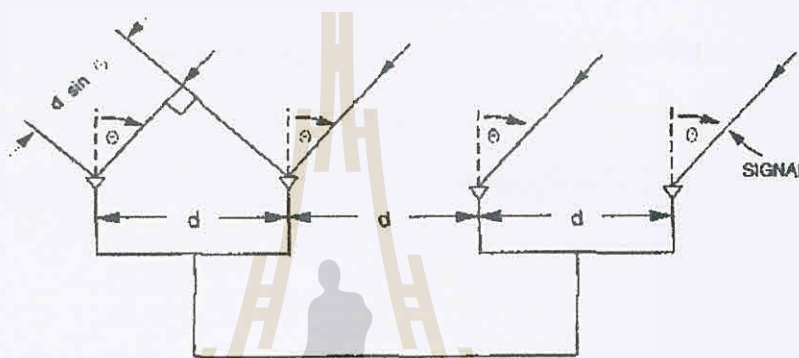
สายอากาศแบบแถวลำดับ สามารถออกแบบได้โดยอาศัยคุณลักษณะการรวมของสนามที่เกิดขึ้นจากสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาทำเป็นแถวลำดับ ซึ่งสายอากาศเหล่านี้จะประกอบด้วยสายอากาศแบบพื้นฐานที่มีลักษณะเหมือนกันมาจัดวางเรียงกัน โดยมีตำแหน่งที่แน่นอนและมีการแผ่กระจายกำลังงานออกมาในแต่ละตัว หนึ่งลักษณะของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับจะมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งขึ้นอยู่กับแบบการจัดเรียงแถวลำดับนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับ (array factor)

2.3.2.1 ตัวประกอบแถวลำดับ

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบที่แตกต่างกันบางตัวประกอบประกอบ ได้แก่ ชนิดขององค์ประกอบที่ใช้ และการวางตัวขององค์ประกอบในแถวลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นเฉพาะขององค์ประกอบ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบเท่านั้น ตัวประกอบตัวอื่นๆ จะเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของแถวลำดับนั้นคือ จำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ ตำแหน่งขององค์ประกอบ รวมทั้งขนาดแอมพลิจูดและเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบนั้นๆ

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาในทางทฤษฎีของแถวลำดับที่กำหนดในเบื้องต้น เราจะไม่พิจารณาผลของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบ เนื่องจากต้องการพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของแถวลำดับเท่านั้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการพิจารณาให้แต่ละองค์ประกอบที่นำมาทำเป็นแถวลำดับเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก (isotropic radiator) ที่เป็นมีลักษณะจุด ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแถวลำดับที่มีองค์ประกอบเป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุดแบบไอโซทรอปิกจะเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับภายใต้การวิเคราะห์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตัวประกอบแถวลำดับซึ่งมีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน สามารถทำได้เพียงแต่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือลักษณะของแถวลำดับเท่านั้น

เพื่อความเข้าใจในการคำนวณตัวประกอบของแวลวลำดับให้มากขึ้นนั้นเราจะพิจารณาในกรณีของแวลวลำดับเชิงเส้นที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ d ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สายอากาศแวลวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบซึ่งสัญญาณที่รับได้จะเป็นสนามระยะไกลและชี้ในทิศทางบรอดไซด์ (broadside; $\theta = 0$) และระยะห่างระหว่างองค์ประกอบไปยังแหล่งกำเนิดถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจะเสริมกันเมื่อมีเฟสเหมือนกัน



รูปที่ 2.5 สายอากาศแวลวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ [2]

ในรูปที่ 2.5 สายอากาศแวลวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ เมื่อ θ มีค่ามากกว่าศูนย์ระยะห่างจะไม่เท่ากัน ซึ่งองค์ประกอบขวามือจะมีระยะมากกว่าองค์ประกอบซ้ายมือที่อยู่ติดกันเป็นระยะ $d \sin \theta$ ซึ่งความแตกต่างของระยะห่างดังกล่าวจะมีผลให้เกิดความแตกต่างของเฟสของกระแสในแต่ละองค์ประกอบนั้น โดยความต่างเฟส ψ จะมีค่าเท่ากัน

$$\psi = \beta d \sin \theta \quad (2.10)$$

ตัวประกอบแวลวลำดับ AF สำหรับแวลวลำดับแบบเชิงเส้นที่ประกอบไปด้วย N องค์ประกอบ สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$AF = e^{j(N-1)\psi/2} \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (2.11)$$

ตัวประกอบ $e^{j(N-1)\psi/2}$ จะแสดงถึงการเลื่อนเฟสของแวลลำดับจากจุดศูนย์กลางเมื่อเทียบกับจุดกำเนิดเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งตัวประกอบเฟสสามารถตัดทิ้งได้ ผลที่ได้จะกลายเป็น

$$AF = A_0 \frac{\sin(N\psi/2)}{\sin(\psi/2)} \quad (2.12)$$

เมื่อ $\psi = 0$ สมการ (2.12) จะมีค่าสูงสุดเป็น $A_0 N$ โดยการหารสมการ(2.12) ด้วยค่าสูงสุดดังกล่าว ค่าตัวประกอบแวลลำดับที่ถูกนอร์มัลไลซ์ $f(\psi)$ ของตัวประกอบแวลลำดับที่ประกอบด้วย N องค์ประกอบที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากันและมีการป้อนแหล่งกำเนิดที่มีเฟสเดียวกัน โดยมีจุดศูนย์กลางของแวลลำดับอยู่ที่จุดกำเนิดจะมีค่าดังสมการ

$$f(\psi) = \frac{\sin(N\psi/2)}{N \sin(\psi/2)} \quad (2.13)$$

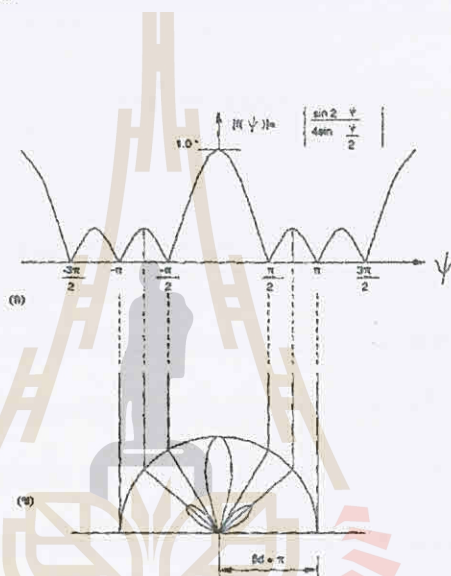
กราฟของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ถูกนอร์มัลไลซ์แล้วได้แสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ตัวประกอบแวลลำดับสำหรับ 4 องค์ประกอบ ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงการตอบสนองของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความต่างเฟส ψ ระหว่างองค์ประกอบที่อยู่ติดกันของแวลลำดับ ซึ่งผลการตอบสนองจะมีค่าสูงสุดเมื่อความแตกต่างเฟสเป็นศูนย์ทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้ชี้ไปในทิศทางบรอดไซด์

ด้วยวิธีเชิงกราฟ เราจะได้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งเป็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบเชิงขั้ว แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบนี้สามารถสร้างได้โดยการวาดครึ่งวงกลมที่มี βd ดังแสดงถัดลงมาจากรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉากตัวอย่างเช่นถ้าระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นค่ารัศมีจะเป็น

$$\beta d = (2\pi/\lambda)(\lambda/2) = \pi \quad (2.14)$$

เมื่อวาดครึ่งวงกลมเสร็จจะต้องวาดเส้นตรงในแนวตั้งจากจุดบนเส้นตัวประกอบแถวลำดับไปยังเส้นรอบวงของครึ่งวงกลมจากจุดตัดของเส้นแนวตั้ง และที่เส้นรอบวงนี้จะลากเส้นอีกเส้นหนึ่งที่อยู่จากจุดกำเนิดของวงกลมไปยังเส้นรอบวง การลากเส้นสุดท้ายซึ่งเป็นระยะทางจากจุดกำเนิดไปยังจุดบนเส้นรอบวงนี้ จะเรียกว่า แอมพลิจูดของแถวลำดับ

ตัวอย่างเช่น $\psi = \frac{\pi}{2}$ ตัวประกอบของแถวลำดับจะเป็นศูนย์เนื่องมาจากจุดบนกราฟเชิงขั้วจะอยู่ที่จุดกำเนิดระหว่าง $\psi = \frac{\pi}{2}$ และ $\psi = \pi$ จะมีจุดสูงสุดของตัวประกอบแถวลำดับ ซึ่งเป็นจุดสูงสุดของกราฟเชิงขั้วด้วย



รูปที่ 2.6 [2] (ก) ตัวประกอบแถวลำดับสำหรับ 4 องค์ประกอบ

(ข) แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น $d = \frac{\lambda}{2}$

เมื่อหาค่าตัวประกอบแถวลำดับได้แล้ว ต่อไปจะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบ จากนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งหมดของแถวลำดับจะสามารถหาได้โดยใช้หลักการคูณแบบรูปการแผ่พลังงาน (pattern multiplication) ซึ่งเป็นการคูณกันระหว่างแบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละองค์ประกอบกับตัวประกอบแถวลำดับ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราพิจารณาสายอากาศแบบร่องบนท่อนำคลื่นซึ่งประกอบด้วยร่องจำนวน 6 ร่อง ซึ่งมีระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ และมีการแผ่พลังงานที่มีขนาดและเฟสเท่ากัน ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งหมดจะเท่ากับ

แบบรูปการแผ่พลังงาน ของสายอากาศแบบร่อง บนท่อนำคลื่นที่ ประกอบด้วยร่องจำนวน 6 ร่อง	=	แบบรูปการแผ่ พลังงานของแต่ละ ละองค์ประกอบ	×	ตัวประกอบแวลวลำดับสำหรับ 6 องค์ประกอบที่วางห่างกัน 1/2 และมีการแผ่กระจายกำลัง งานที่มีขนาดและเฟสเท่ากัน
-----------------------------------------------------------------------------------------------	---	-------------------------------------------------	---	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

ตัวประกอบแวลวลำดับในกรณีนี้จะเป็นแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก 6 ตัว ซึ่งวางห่างกัน $\frac{\lambda}{2}$ และแผ่พลังงานคลื่นด้วยขนาดและเฟสเท่ากัน

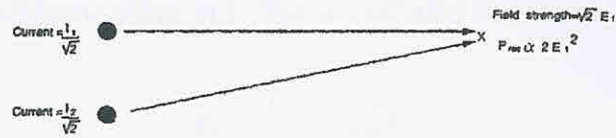
2.3.2.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแวลวลำดับ

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางรวมทั้งค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานของสายอากาศแวลวลำดับ มักจะมีค่ามากกว่ากรณีของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งคุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่างมากทั้งในการส่งและรับสัญญาณ ในการส่งสัญญาณนั้น สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีจะสามารถรวบรวมกำลังงานให้อยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ได้ ซึ่งให้ผลเสมือนว่าเกิดการเพิ่มกำลังงานให้กับ จุดนั้นๆ ของเครื่องส่ง ส่วนทางด้านรับ สายอากาศจะทำหน้าที่เสมือนว่าเลือกรับคลื่นที่เข้ามาในทิศทางที่เจาะจง โดยจะไม่เลือกรับสัญญาณที่เราไม่ต้องการรวมทั้งการแทรกสอดจากในทิศทางอื่นๆ

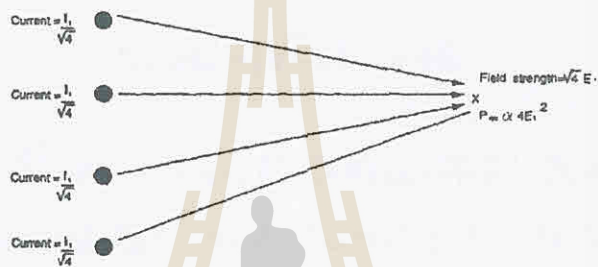
เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับการเพิ่มค่าอัตราขยายของสายอากาศแวลวลำดับ ในเบื้องต้นจะพิจารณาองค์ประกอบเดี่ยวของสายอากาศไอโซทรอปิกซึ่งมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงาน P_1 ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีการส่งกำลังงาน P_1 โดยกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศนี้มีค่า I_1 ณ จุดที่ไกลออกไป กำหนดให้เป็นจุด X ค่ากระแสนี้จะสร้างความเข้มของสนาม (ศักดาไฟฟ้า) เป็น E_1 ซึ่งค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศ



รูปที่ 2.7 สายอากาศองค์ประกอบเดียวที่มีการส่งกำลังงาน P_1 [2]



รูปที่ 2.8 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1 [2]



รูปที่ 2.9 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P_1 [2]

ค่ากำลังงานที่รับได้โดยสายอากาศที่จุด X จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเข้มสนามทั้งหมด E_T ที่จุดนั้น กล่าวคือ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = E_1^2 \quad (2.15)$$

ต่อไปจะแทนองค์ประกอบเดี่ยวด้วยสายอากาศชนิดแถวลำดับ ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบไอโซทรอปิกที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 องค์ประกอบ และมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงานที่เท่ากันทั้งหมด คือ P_1 ดังแสดงใน รูปที่ 2.7 สายอากาศองค์ประกอบเดียวที่มีการส่งกำลังงาน P_1 ค่ากำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $P_1/2$ แต่เนื่องจากค่าของกระแสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของกำลังงาน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจึงเท่ากับ $I_1/\sqrt{2}$

ความเข้มของสนามที่จุด X ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบนั้น ดังนั้นความเข้มของสนามที่จุด X จากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $E_1/\sqrt{2}$ และถ้าเคลื่อนจากทั้งสององค์ประกอบมาถึงที่จุด X โดยมีเฟสตรงกันอย่างสมบูรณ์ความเข้มของสนามทั้งหมด E_T ที่จุด X จะเป็นผลรวมของความเข้มของสนามดังนี้

$$E_T = \frac{2E_1}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}E_1 \quad (2.16)$$

และกำลังงานทั้งหมดที่รับได้จะมีค่าเท่ากับ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = (\sqrt{4}E_1)^2 = 4E_1^2 \quad (2.17)$$

ดังนั้นค่าของ E_T^2 และค่ากำลังงานที่รับได้ทั้งหมดก็จึงมีค่าเป็นสองเท่าหากทำการเพิ่มจำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับเป็นสองเท่า ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ก็จะได้แถวลำดับที่มีขนาด 4 องค์ประกอบ ซึ่งทำหน้าที่ในการแผ่พลังงานทั้งหมดเป็น P_1 กระแสในแต่ละองค์ประกอบจะมีค่าเป็น $\frac{I_1}{\sqrt{4}}$ ดังนั้นความเข้มของสนามที่ถูกสร้างขึ้นจากแต่ละองค์ประกอบจึงกลายเป็น $\frac{E_1}{\sqrt{4}}$

ความสัมพันธ์ที่กล่าวมาทั้งหมดในตัวอย่างจะถูกพิจารณาภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. องค์ประกอบของสายอากาศทุกตัวจะต้องมีลักษณะเหมือนกันและมีกระแสเท่ากัน
2. สนามที่แผ่กระจายออกจากองค์ประกอบของสายอากาศทั้งหมดจะต้องมีเฟสตรงกันที่จุดรับ
3. กระแสที่เหนี่ยวนำในแต่ละองค์ประกอบจะไม่ถูกนำมาพิจารณา

เงื่อนไขที่สองจะเป็นจริงได้ถ้าเฟสของกระแสแต่ละองค์ประกอบเท่ากัน และจุดสังเกต X ซึ่งไปในทิศทางที่ตั้งฉากโดยตรงกับสายอากาศแถวลำดับ และให้สมมุติว่าที่สนามระยะไกลซึ่งมีระยะห่างจากจุด X ของทุกองค์ประกอบมีค่าเท่ากัน ส่วนเงื่อนไขที่สามจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นสำคัญ

สำหรับสายอากาศแถวลำดับในทางปฏิบัติ เงื่อนไขเหล่านี้จะเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น แม้ว่าการสูญเสียซึ่งเกิดจากการป้อนสัญญาณและจากตัวประกอบอื่นๆจะมีส่วนในการจำกัด

การเพิ่มขึ้นของค่าอัตราขยาย แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเหล่านี้จะดีขึ้นเมื่อจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปพบว่าค่าอัตราขยายของแวลลำดับจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า (เพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB) ทุกๆ ครั้งที่จำนวนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเช่นกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบถูกกำหนดไว้ให้คงที่

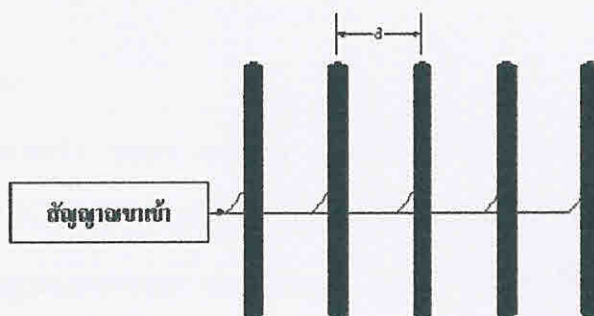
2.3.2.3 แวลลำดับแบบเชิงเส้น

แวลลำดับแบบเชิงเส้น จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตร เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแวลลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะระหว่างองค์ประกอบห่างเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้

ในกรณีที่องค์ประกอบห่างเท่าๆกันทุกองค์ประกอบจะมีการป้อนแอมพลิจูดที่เท่ากัน แต่เฟสที่ป้อนให้มันจะแตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.10 เรียกว่า แวลลำดับแบบสม่ำเสมอ (uniform array) ซึ่งจะมียุทธ์ประกอบแวลลำดับที่เหมือนกัน กระแสที่ป้อนให้กับทุกๆองค์ประกอบเท่ากันและจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกันไปอย่างเท่าๆกัน โดยจะมียุทธ์ประกอบตัวแรกวางที่จุดกำเนิด ซึ่งการหาจุดกำเนิดในการวางองค์ประกอบนั้นจะหาได้จากสมการที่ (2.18)

$$AF = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\Psi} \quad (2.18)$$

เมื่อ $\Psi = kd \cos \theta + \beta$



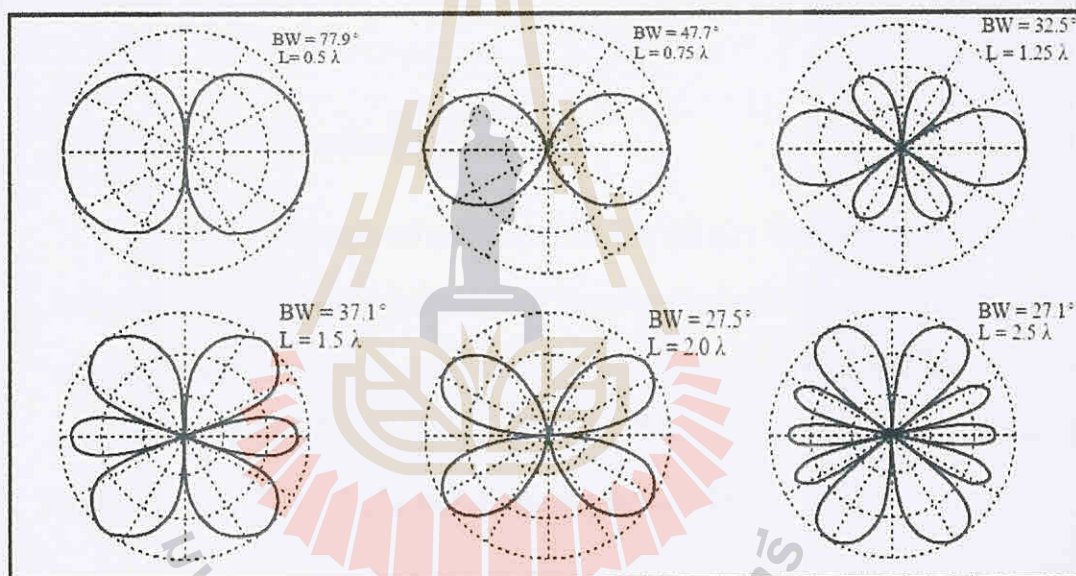
รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสายอากาศแวลลำดับแบบเชิงเส้น [2]

จากรูปที่ 2.10 ในการวางองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นขององค์ประกอบ ซึ่งการคำนวณหาระยะห่างของแต่ละองค์ประกอบนั้นจะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.19)

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.19)$$

เมื่อ $v = f\lambda$;

$$\lambda = \frac{v}{f}$$



รูปที่ 2.11 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระยะห่าง (d) ของสายอากาศที่แตกต่างกัน [2]

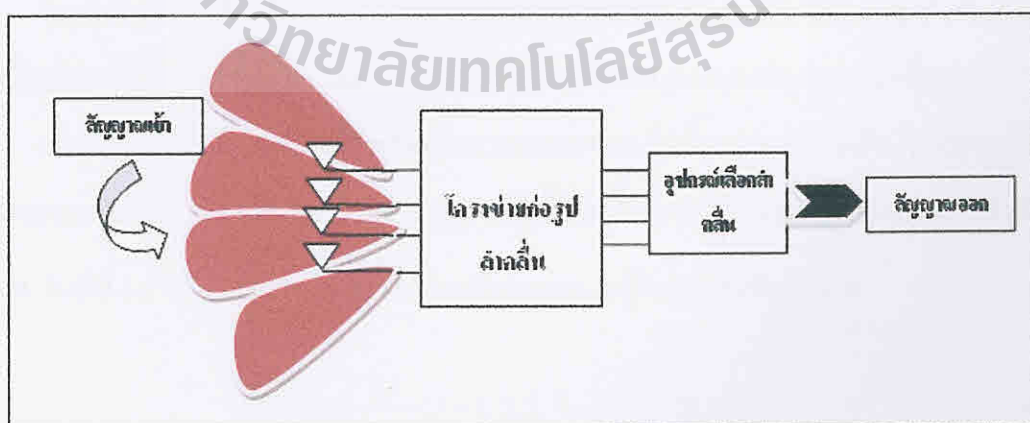
2.4 ระบบสายอากาศแก่ง

ระบบสายอากาศแก่ง (smart antenna systems) คือ ระบบสายอากาศที่มีความสามารถก่อรูปลำคลื่นของพหุหลักไปในทิศทางที่เฉพาะเจาะจงได้ ในขณะที่หันจุดศูนย์ (nulls) และพหุรองไปในทิศทางของสัญญาณแทรกสอด (interference signal) ได้ ซึ่งทำให้อัตราขยายของระบบเพิ่มสูงขึ้น ระบบสายอากาศแก่งนั้นเป็นระบบสายอากาศแถวลำดับที่ทำงานร่วมกับเทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณโดยใช้กระบวนการค้นหาทิศทางของสัญญาณขาเข้า และนำค่าสัญญาณ

ที่ได้ไปทำการคำนวณค่าแวกเตอร์ของวงจรถูรูปลำคลื่น เพื่อปรับลำคลื่นของสายอากาศ ไปยังเป้าหมายที่ต้องการ โดยทั่วไประบบสายอากาศเก่งนั้นจะทำการปรับลำคลื่นเพื่อชี้ทิศทางไปในทิศทางที่สนใจ สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้ และสามารถช่วยลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดระหว่างช่องได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาการประวิงเวลา (delay) ของสัญญาณ ซึ่งเกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมที่สัญญาณที่มาถึงทางด้านรับมากกว่าหนึ่งเส้นทาง เนื่องจากการสะท้อนของสัญญาณกับวัตถุต่างๆ เช่น กำแพง ประตู กระจก เป็นต้น แม้จะเป็นสัญญาณเดียวกันมาจากแหล่งเดียวกันแต่มาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ดังนั้นสัญญาณจึงถูกประวิงไปมาไม่น้อยไม่เท่ากันตามเส้นทางที่มีระยะสะท้อนต่างกันสามารถลดปัญหาที่ว่านี้ได้ด้วยการใช้งานสายอากาศเก่งที่มีความสามารถในการปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ ในขณะที่เดียวกันก็สามารถกำหนดไม่ได้รับสัญญาณที่ไม่ต้องการได้เช่นกัน สายอากาศเก่งสามารถแบ่งประเภทได้ดังต่อไปนี้

2.4.1 สายอากาศเก่งชนิดสวิตซ์ลำคลื่น

ระบบสายอากาศเก่งชนิดสวิตซ์ลำคลื่น ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นระบบสายอากาศแถว ลำดับที่ทำงานร่วมกับเทคโนโลยีการประมวลผลสัญญาณ โดยใช้กระบวนการค้นหาทิศทางของสัญญาณขาเข้า มีการกำหนดระยะห่างของสายอากาศแต่ละคันที่แน่นอน โดยขณะใช้งานระบบจะเลือกลำคลื่นหนึ่งจากหลายๆ ลำคลื่น เพื่อใช้ในการรับและการส่งสัญญาณ โดยทั่วไปลำคลื่นที่ถูกเลือก คือ ลำคลื่นที่มีทิศทางของสัญญาณที่แรงที่สุด



รูปที่ 2.12 สายอากาศเก่งชนิดสวิตซ์ลำคลื่น

ขั้นตอนการทำงานของระบบสายอากาศแก่งชนิดสวิตช์ลำคลื่น ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบความแรงของสัญญาณในแต่ละลำคลื่น
2. ทำการเลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่น ที่มีความแรงสูงสุด
3. ใช้ลำคลื่นในทิศทางที่เลือกไว้จากข้อ 2 เมื่อผู้ใช้ไม่มีการเคลื่อนที่
4. สลับเปลี่ยนลำคลื่นเดิมไปยังลำคลื่นใหม่เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่น

นอกจากนี้ การรวมสัญญาณขาออกของสายอากาศหลายๆ ตัว ทำให้สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นสามารถสร้างรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้หลากหลายมากขึ้น ซึ่งทำให้ระบบมีทางเลือกของรูปแบบการแพร่กระจายแบบรูปการแผ่พลังงานที่มากกว่าการใช้สายอากาศต้นเดียว

เราสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น ได้ดังนี้

ข้อดี

- 1) มีความซับซ้อนน้อย
- 2) สามารถติดตามสัญญาณได้รวดเร็วตามอัตราการปรับเปลี่ยนลำคลื่น

ข้อเสีย

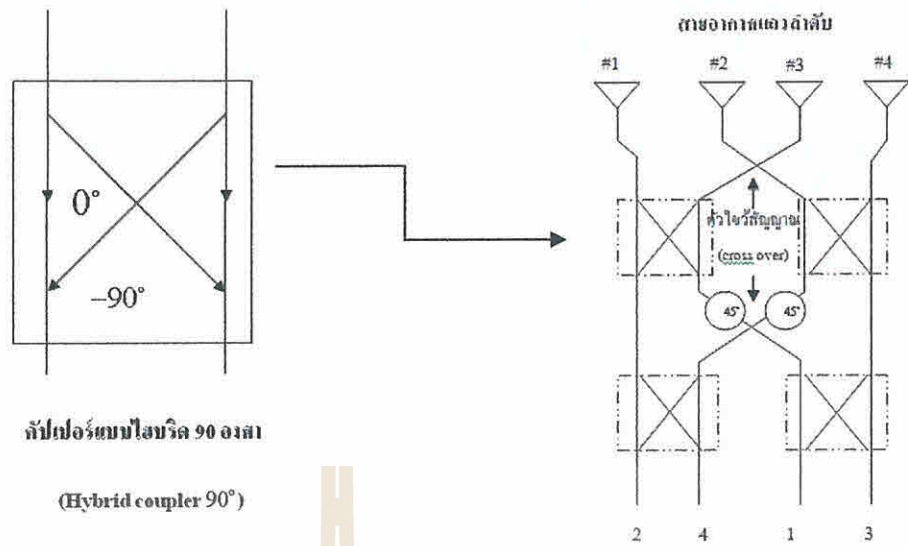
- 1) อัตราการขยายสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคลื่น
- 2) การลดจำนวนสัญญาณแทรกมีข้อจำกัด
- 3) ในกรณีที่สัญญาณไม่ชัดเจนมีการบดบังสัญญาณมีการแทรกสอดของสัญญาณ หรือมีสัญญาณมาถึงในมุมกว้างหลายนมุม อาจมีความผิดพลาดในการเลือกสัญญาณได้

2.5 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นของระบบสายอากาศแก่งชนิดสวิตช์ลำคลื่นได้มีความสัมพันธ์กับวงจรก่อรูปลำคลื่น Butler matrix ในการเลือกใช้ลำคลื่นที่มีความแรงของสัญญาณมากที่สุด

Butler matrix คือ เมตริกซ์ที่สร้างขึ้นมาจากเซตของเส้นตั้งฉากของลำคลื่นในอากาศด้วยการประมวลผลสัญญาณจากสายอากาศจำนวน N ตัว ที่มีช่องว่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันทั้งหมด ในที่นี้ ($d = \frac{\lambda}{2}$) โดยการชี้ทิศของลำคลื่นจะแสดงอยู่ในรูปของฟังก์ชัน θ

$$\sin \theta_i = \pm \frac{i\lambda}{2Na}; i = 1, 3, 5, 7, \dots, (N-1) \quad (2.20)$$



ตัวไขว้แบบไฮบริด 90 องศา
(Hybrid coupler 90°)

รูปที่ 2.13 วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

จากรูปที่ 2.13 วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix แสดงถึง block diagram ขนาด 4x4 ของ Butler matrix ซึ่งประกอบไปด้วยตัวไขว้สัญญาณจำนวน 2 ตัว สายอากาศจำนวน 4 ต้น และตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา จำนวน 4 ตัวการนำคลื่นเฟส 45 องศา วางอยู่ระหว่างพอร์ต 1 กับพอร์ต 3 และอยู่ระหว่างพอร์ต 2 กับพอร์ต 4 เพื่อทำให้เกิดการก่อรูปลำคลื่นเลื่อนเฟสไป 45 องศา และเมื่อรวมวงจรแล้วจะทำให้ได้ค่าดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2. 1 แสดงเฟสของสายอากาศ ทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix

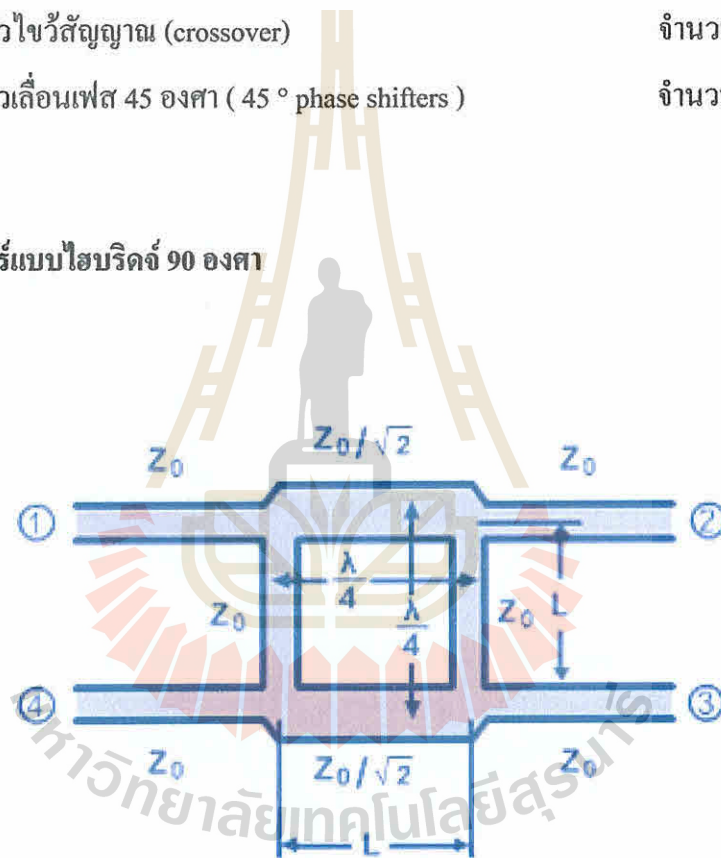
	Element #1	Element #2	Element #3	Element #4	Beam Direction	Inter-Element Phasing
Port1	-45°	-180°	45°	-90°	138.6°	-135°
Port2	0°	-45°	-90°	-135°	104.5°	-45°
Port3	-135°	-90°	-45°	0°	75.5°	45°
Port4	-90°	-45°	-180°	-45°	41.4°	135°

จากตารางที่ 2.1 แสดงถึงเฟสของสายอากาศแต่ละต้น ทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler matrix จากรูปที่ 2.13 ยกตัวอย่างเช่น สายอากาศต้นที่ 1 จะมีค่าเฟส -45° จากพอร์ตที่ 1 0° จากพอร์ตที่ 2 -135° จากพอร์ตที่ 3 และ -90° จากพอร์ตที่ 4 เป็นต้น

จากวงจรกรุปลำคลื่นแบบ Butler Matrix นี้ สามารถแบ่งลักษณะการออกแบบของวงจรได้ดังนี้

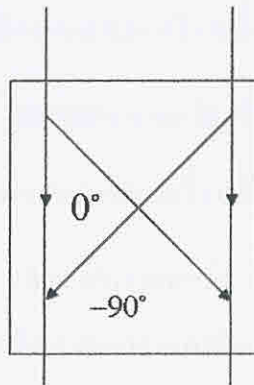
- | | |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|
| 2.5.1 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (90° Hybrid coupler) | จำนวน 4 ตัว |
| 2.5.2 ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) | จำนวน 1 ตัว |
| 2.5.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (45° phase shifters) | จำนวน 2 ตัว |

2.5.1 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา



- | | |
|----------|------------|
| ① Input | ② Output |
| ③ Output | ④ Isolated |

รูปที่ 2.14 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา



สับเฟอ์แบบไฮบริด 90 องศา

(Hybrid coupler 90°)

รูปที่ 2.15 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

จากรูปที่ 2.14 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันเมื่อเราใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานนั้นจะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมกันระหว่าง พอร์ต P2 และ พอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้ออกมาจากพอร์ต P2 และ พอร์ต P3 นั้นจะมีค่าพลังงานลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาทางพอร์ต P1 และสัญญาณที่ได้จากพอร์ต P2 และ พอร์ต P3 จะล่าหลังกันอยู่ 90 องศา และจะไม่มีพลังงานออกมาจากพอร์ต P4

$$[S] = -\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

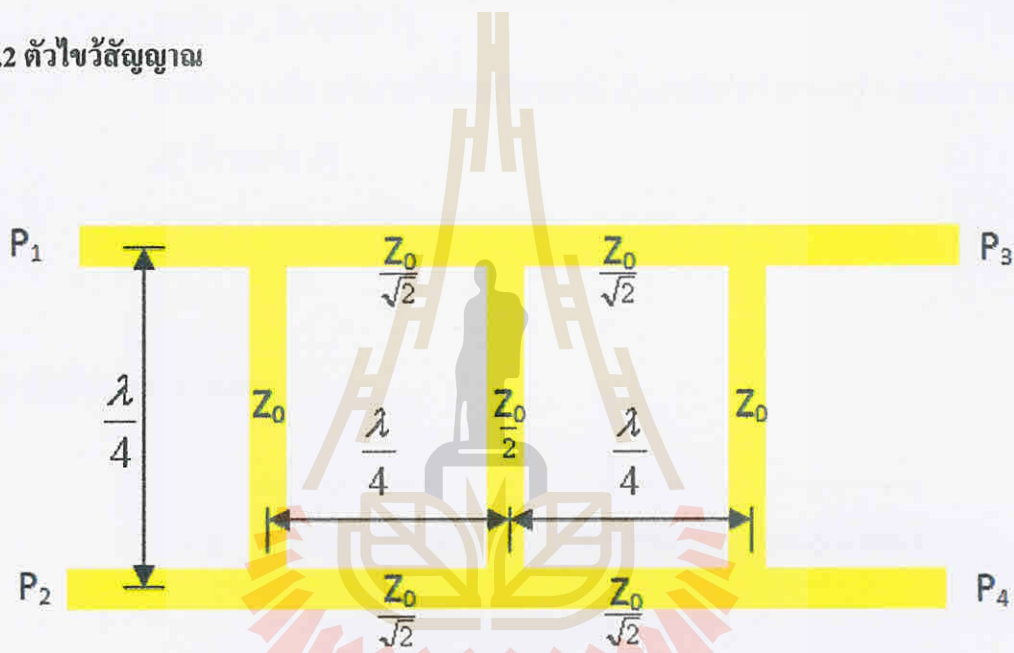
จากวงจรและสมการค่า $[S]$ เมตริกซ์ จะได้ค่าดังนี้

$$P_1 = 0$$

ความหมาย คือ พอร์ตเข้าของพลังงาน

- $P_2 = -\frac{j}{\sqrt{2}}$ ความหมายคือ พลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P_1
 และมีเฟสล่าหลังอยู่ -90 องศาจากพอร์ต P_1 ถึง พอร์ต P_2
- $P_3 = -\frac{1}{\sqrt{2}}$ ความหมาย คือ พลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P_1
 และมีเฟสล่าหลังอยู่ -180 องศาจากพอร์ต P_1 ถึง พอร์ต P_3
- $P_4 = 0$ ความหมายคือ ไม่มีพลังงานออกจากพอร์ต P_4

2.5.2 ตัวไขว้สัญญาณ



รูปที่ 2.16 ตัวไขว้สัญญาณ

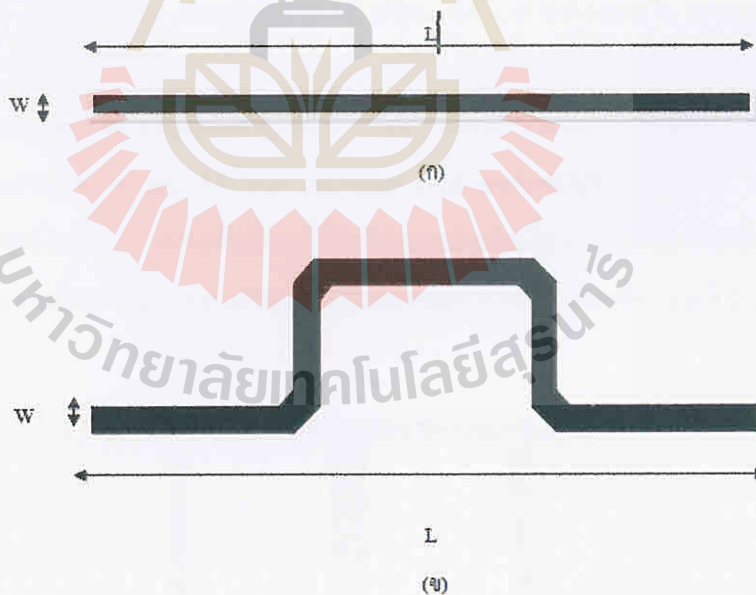
รูปที่ 2.16 เป็นตัวไขว้สัญญาณ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_0 แต่ตำแหน่งจะห่างกันเป็นระยะทางลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้กัน คือ เมื่อมีพลังงานเข้ามาที่พอร์ต P_1 พลังงานนี้จะไหลออกไปที่พอร์ต P_3 และในทำนองเดียวกัน เมื่อพลังงานเข้ามาที่พอร์ต P_2 พลังงานนี้จะไหลออกไปที่พอร์ต P_4 และตัวไขว้สัญญาณนี้มีลักษณะการเชื่อมต่อโดยที่มีสัญญาณมารวมกัน โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความล่าหลังระหว่างกัน

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j \\ j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

จากวงจรและสมการค่า $[S]$ เมตริกซ์ จะได้ค่าดังนี้

- $P_1 = 0$ ความหมายคือ พอร์ตเข้าของพลังงาน
- $P_2 = -j$ ความหมายคือ พลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P_4 และมีเฟสล้าหลังอยู่ 0 องศาจาก
พอร์ต P_4 ถึง พอร์ต P_2
- $P_3 = -j$ ความหมายคือ พลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P_1 และมีเฟสล้าหลังอยู่ 0 องศาจากพอร์ต
 P_1 ถึง พอร์ต P_3
- $P_4 = 0$ ความหมายคือ พอร์ตเข้าของพลังงาน

2.5.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา



รูปที่ 2.17 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (phase shifters 45 °)

(ก) ตัวเลื่อนเฟสแบบเส้นตรง

(ข) ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

จากวงจรระยะห่าง 45 องศา สร้างมาจากการออกแบบสายส่ง โดยมี W คือความกว้างของตัวเลื่อนเฟสในสายส่งแบบไมโครสตริป และมีความยาวเท่ากับ L ซึ่งได้จากการคำนวณในสมการดังต่อไปนี้

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} L \quad (2.23)$$

$$\frac{w}{d} = \frac{8e^{-A}}{e^{2A} - 2} \quad (2.24)$$

โดยที่

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.25)$$

เมื่อ

L คือ ความยาว

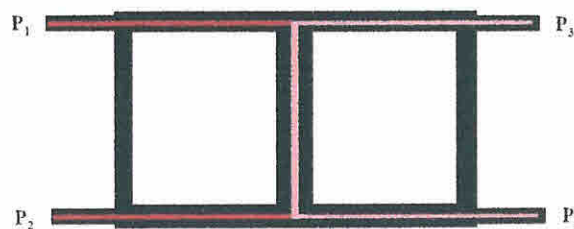
θ คือ มุม

λ คือ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางของสายส่ง

λ_0 คือ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางของอากาศ

W คือ ความกว้างของตัวเลื่อนเฟสในสายส่งแบบไมโครสตริป

ดังนั้นความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ถ้าความยาวมากเกินไปไม่เข้ากับโครงข่ายอื่นจึงมีการคดงอขึ้น โดยการคดงอนั้นทำได้โดยการนำค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่ายลบออกจากค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อได้แล้วค่าที่เหลือได้นำค่ามางอขึ้นตามความสวยงาม โดยที่ค่าความกว้างจะต้องคงที่ดังรูปที่ 2.18 เพื่อให้เข้ากับโครงข่ายได้



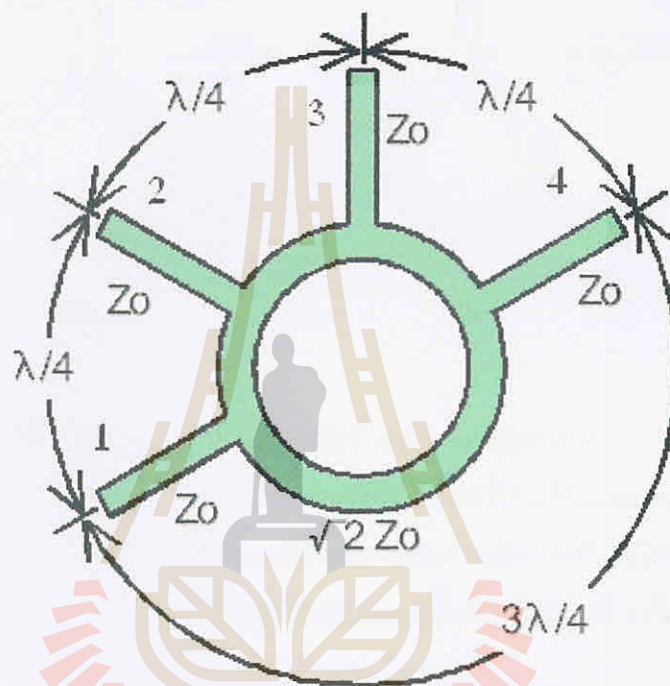
รูปที่ 2.18 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ

(ก) โดยสีแดงเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P_1 กับพอร์ต P_2

(ข) โดยสีชมพูเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P_3 กับพอร์ต P_4

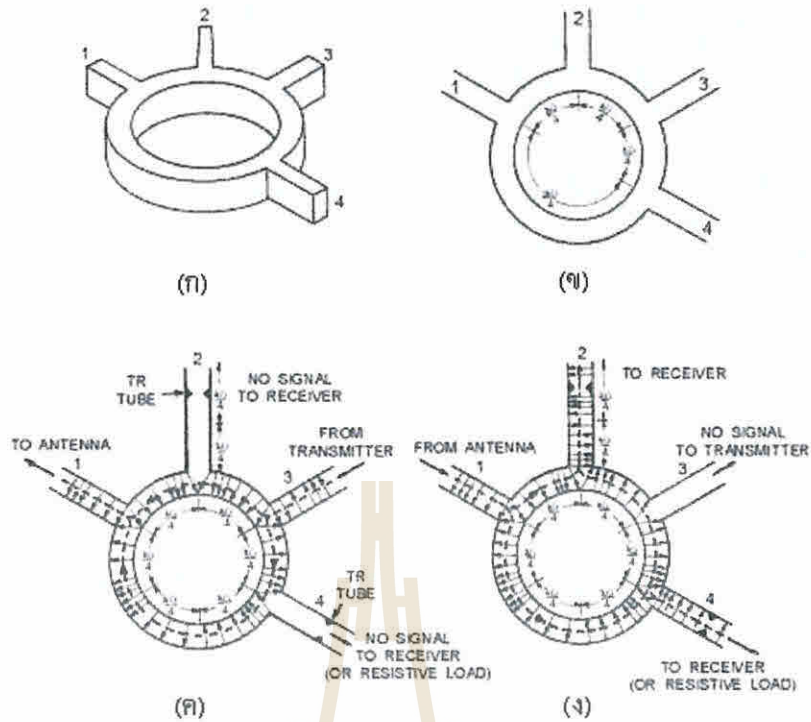
2.6 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน (hybrid ring coupler) บางครั้งอาจเรียกว่า ไฮบริดจ์แบบรางแข่งหนู (rattace hybrid) เป็นวงจรที่มีพอร์ต 4 พอร์ต ใช้ทั้งแยกสัญญาณเท่ากันหรือรวมกันสองสัญญาณ



รูปที่ 2.19 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน [3]

เมื่อมีการส่งคลื่นเข้าที่พอร์ตที่ 1 คลื่นจะแยกออกไปทั้งสองด้านเท่าๆกันและมีเฟสตรงกันข้ามหรือมีเฟสต่างกัน 180 องศา ทำให้คลื่นมีการส่งผ่านออกไปที่พอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 4 ได้ เพราะคลื่นที่ปรากฏที่อินพุทของพอร์ตทั้งสองจะมีเฟสตรงกันข้ามดังรูปที่ 2.20 (ง) สำหรับอินพุทของพอร์ตที่ 3 ดังรูปที่ 2.20 (ค) นั้นคลื่นทั้งสองจะมีเฟสตรงกัน เพราะความยาวของเส้นทางในการเดินทางต่างกันอยู่ 90 องศา จึงไม่มีการคัปปลิงระหว่างพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 3 ในทำนองเดียวกันก็จะไม่มีการคัปปลิงระหว่างพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 4 [4]



- รูปที่ 2. 20[5]
- (ก) ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน
 - (ข) ด้านบนของตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน
 - (ค) การเดินทางของคลื่น โดยมีพอร์ตที่ 3 เป็นอินพุต
 - (ง) การเดินทางของคลื่น โดยมีพอร์ตที่ 1 เป็นอินพุต

2.6 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีสายส่งแบบไมโครสตริป ทฤษฎีของสายอากาศ ระบบสายอากาศ เก่ง และโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix โดยประกอบด้วย วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix ที่ต่อกับสายอากาศแถวลำดับ และได้กล่าวถึงตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน ซึ่งก่อนที่จะทำการออกแบบและประกอบอุปกรณ์ต้นแบบ จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในเรื่องดังกล่าวให้มีความเข้าใจเป็นอย่างดี เพราะอุปกรณ์แต่ละชนิดนั้นจะต้องนำมาประกอบเป็นส่วนเดียวกัน เพื่อให้บรรลุผลตามวัตถุประสงค์ของโครงการ

บทที่ 3

การออกแบบโครงข่ายกรองรูปลาคลิ้น

3.1 กล่าวนำ

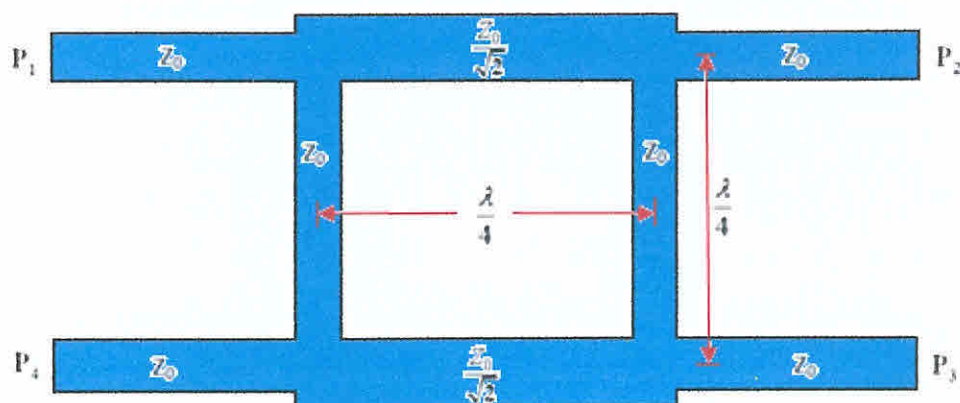
การออกแบบโครงข่ายกรองรูปลาคลิ้นในแต่ละส่วนแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนของโครงข่ายกรองรูปลาคลิ้นแบบ Butler matrix และส่วนของตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน โดยใช้โปรแกรม CST ในการออกแบบแต่ละส่วน เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้

3.2 โครงข่ายกรองรูปลาคลิ้น

สำหรับวงจรกรองรูปลาคลิ้นนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักอยู่ 3 ชนิด คือ คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (hybrid coupler 90°) ตัวไขว้สัญญาณ (crossover) และตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (45° phase shifter) ซึ่งทั้ง 3 ชนิดนี้มีหน้าที่แตกต่างกันออกไปดังต่อไปนี้

3.2.1 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90°

ดังดังรูปที่ 3.1 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาจะทำหน้าที่ดำเนินการขึ้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อ ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันและเมื่อเราใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานก็จะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมกันระหว่างพอร์ต P2 และพอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต P2 และพอร์ต P3 จะล้าหลังกันอยู่ 90 องศา และจะไม่มีพลังงานออกไปที่พอร์ต P4 (พอร์ต โคลด์เดี่ยว)



รูปที่ 3.1 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{8d}{W} + \frac{W}{4d} \right); & \frac{W}{d} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_r} \left[W/d + 1.393 + 0.667 \ln(W/d + 1.444) \right]}; & \frac{W}{d} \geq 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\frac{W}{d} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}; & \frac{W}{d} < 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right]; & \frac{W}{d} > 2 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\text{เมื่อ } A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (3.3)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.4)$$

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12d/W}} \quad (3.5)$$

$$K_0 = \frac{2\pi f}{c} \quad (3.6)$$

$$l = \frac{90^\circ \left(\frac{\pi}{180^\circ} \right)}{\sqrt{\epsilon_r} k_0} \quad (3.7)$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{1}{f} \quad (3.8)$$

กำหนดให้ $Z_0 = 50\Omega$

$$Z_0/\sqrt{2} = 35.355\Omega$$

$$\epsilon_r = 4.8$$

$$f = 1.8\text{GHz}$$

$$d = 1.67\text{mm.}$$

$$c = 3 \times 10^8$$

นำค่าที่กำหนดให้มาทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการข้างต้นจะได้ค่าดังต่อไปนี้

- ที่ $Z_0 = 50\Omega$

$$A = 1.584$$

นำค่า A ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ 3.2 ได้ค่า W เท่ากับ

$$W = 2.992\text{mm.}$$

- ที่ $Z_0/\sqrt{2} = 35.355\Omega$

$$A = 1.169$$

$W/d = 3.0799 > 2$ ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขตามสมการที่ 3.2 จึงทำการหาค่า B

$$B = 1.169$$

$W/d = 7.645$ เป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่า $W/d > 2$

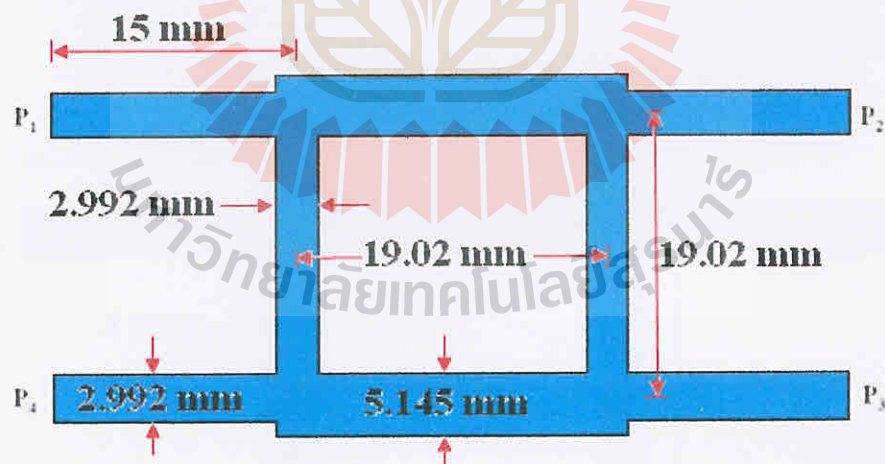
$$W = 5.145 \text{ mm}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{1}{f}$$

$$\lambda = 76.072 \text{ mm.}$$

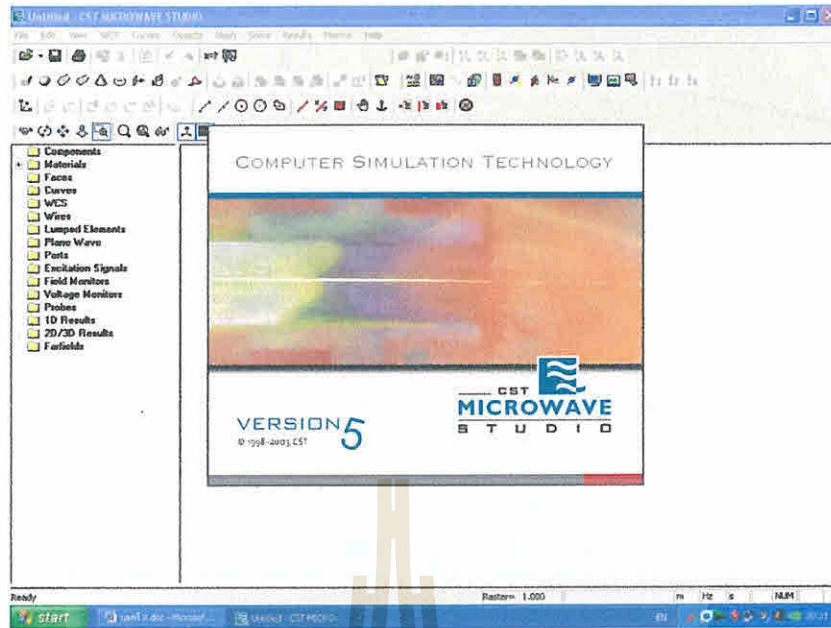
ดังนั้น $\lambda/4 = 19.02 \text{ mm.}$

ผลที่ได้จากการออกแบบ



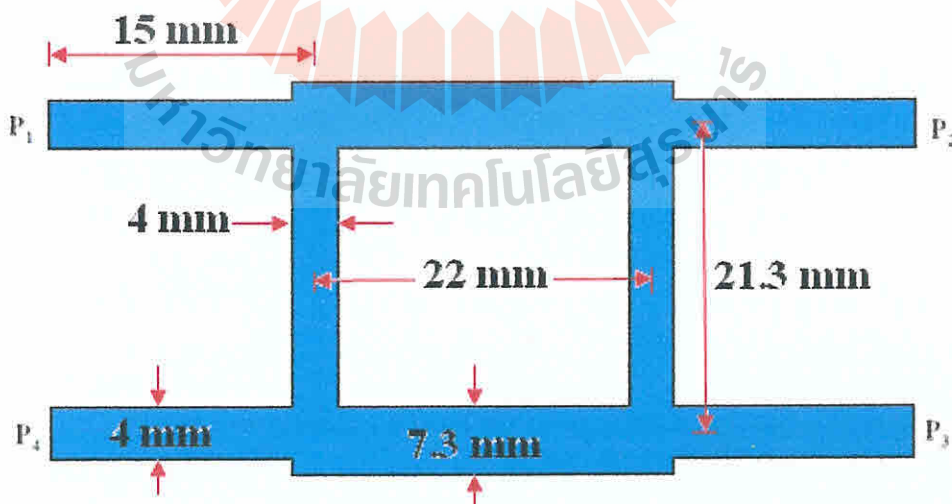
รูปที่ 3.2 คัปเปอเรอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่ออกแบบ

เมื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจึงนำค่าที่คำนวณได้ดังรูปที่ 3.2 มาออกแบบในโปรแกรม CST เพื่อพิจารณาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบ ดังนี้

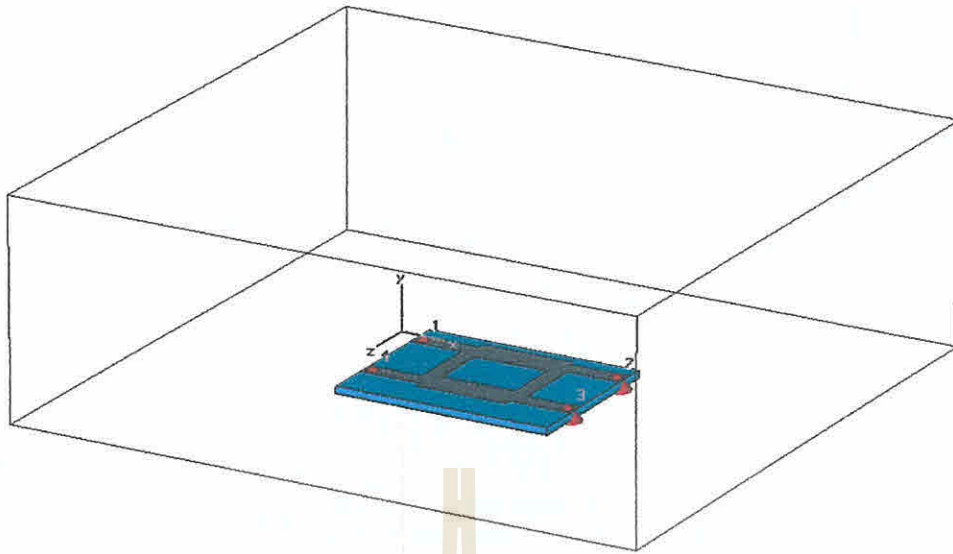


รูปที่ 3.3 โปรแกรม CST

เมื่อนำวงจรคัปเปอ์แบบไฮบริด 90 องศาที่ออกแบบนั้นไปทำการจำลองผลในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม CST แล้วไม่ได้ค่าตามที่ต้องการจึงทำการปรับขนาดและความยาวของเส้น ซึ่งจะให้ผลดังที่แสดงในรูปที่ 3.4

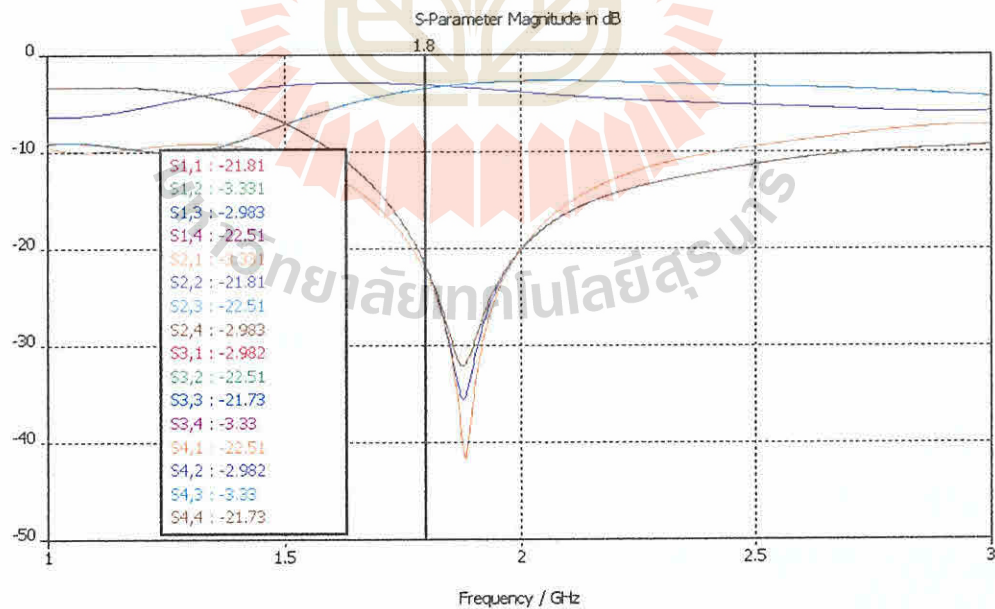


รูปที่ 3.4 คัปเปอ์แบบไฮบริด 90 องศาที่ปรับค่าแล้ว

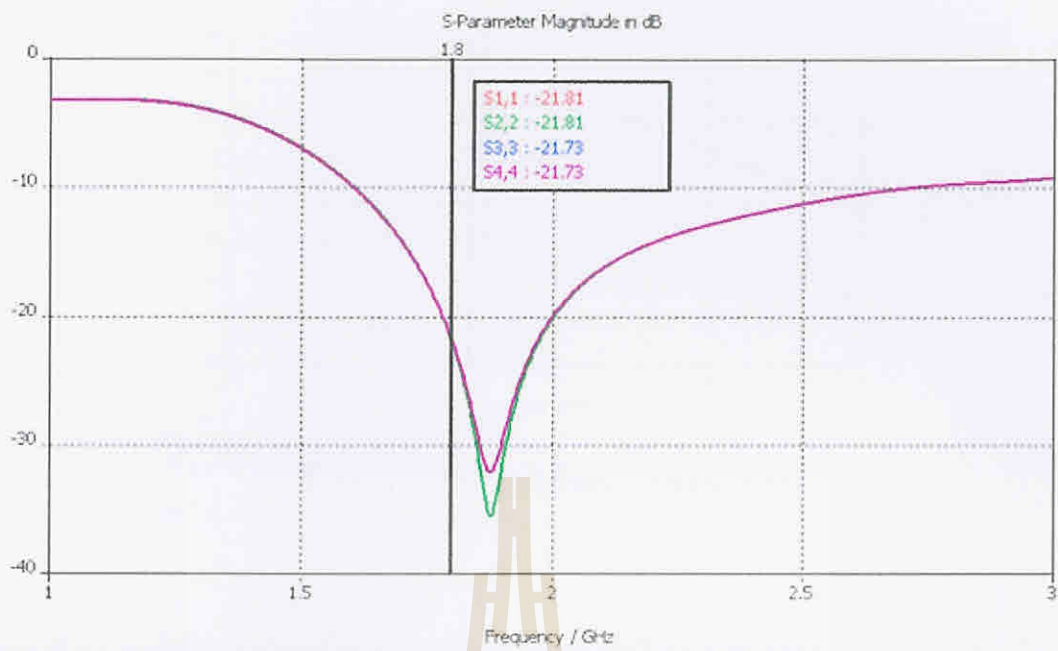


รูปที่ 3.5 คัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่เสร็จสมบูรณ์

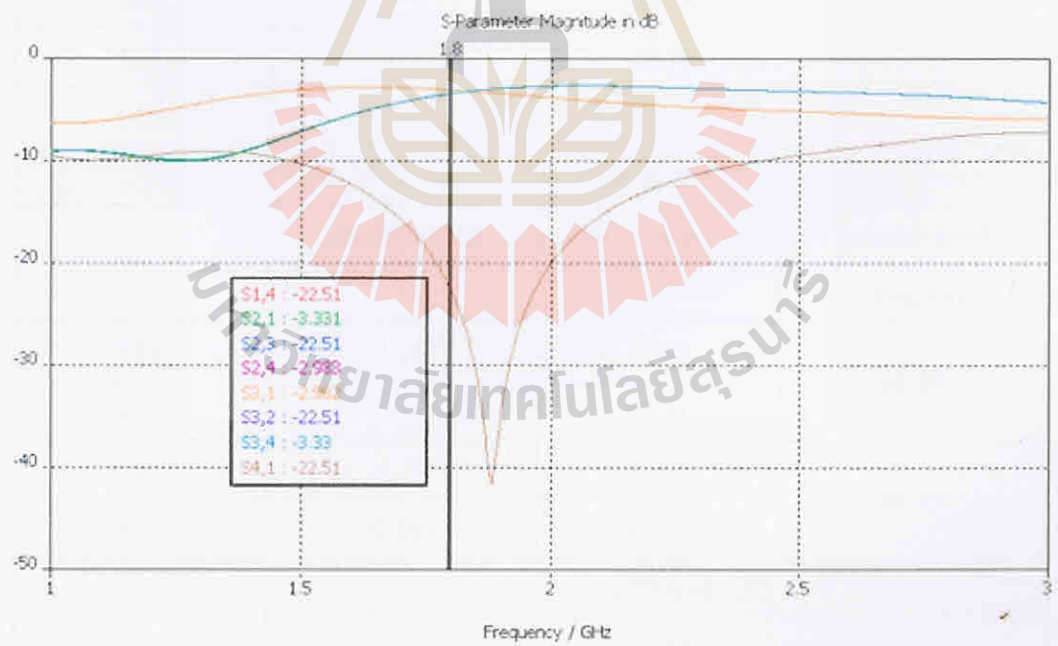
เมื่อสร้างคัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาแล้วดังรูปที่ 3.5 แล้วทำการรัน โปรแกรมเพื่อดูพารามิเตอร์ต่างๆ ของคัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาว่าเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังที่แสดงไว้ดังนี้



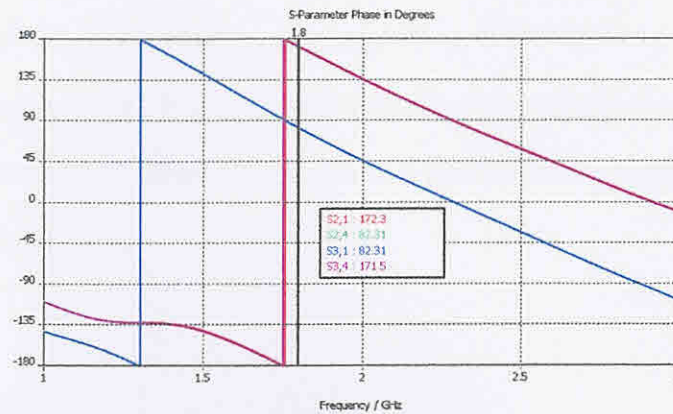
รูปที่ 3.6 ค่า S พารามิเตอร์



รูปที่ 3.7 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต



รูปที่ 3.8 ค่า S พารามิเตอร์ในไอโซเลเตอร์



รูปที่ 3.9 เฟสของคัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศา

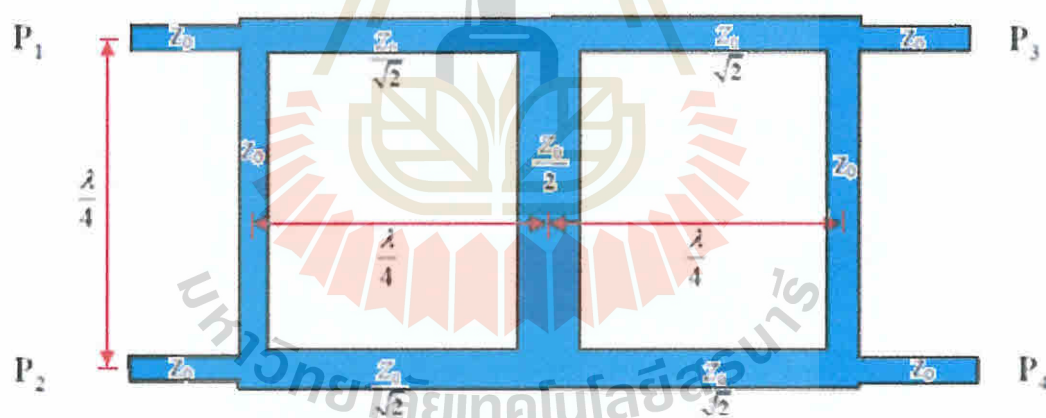
ตารางที่ 3.1 สรุปลค่าพารามิเตอร์ต่างๆของคัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศา

		การสูญเสียย้อนกลับ (dB)	
S11		-21.81	
S22		-21.81	
S33		-21.73	
S44		-21.73	
เอาต์พุต			
	แอมพิจูด (dB)	เฟส (Degree)	ความต่างเฟส (Degree)
S21	-3.331	172.3	89.99
S31	-2.982	82.31	
S34	-3.33	171.5	89.19
S24	-2.983	82.31	
ไอโซเลชันพอร์ต (dB)			
S14		-22.51	
S41		-22.51	
S23		-22.51	
S32		-22.51	

จากตารางที่ 3.1 เมื่อสังเกตที่ค่า s_{11} , s_{22} , s_{33} และ s_{44} ที่ได้จากรูปที่ 3.6, 3.7, 3.8 และ 3.8 ซึ่งค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1, 2, 3 และ 4 ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.2.2 ตัวไขว้สัญญาณ

รูปที่ 3.10 ตัวไขว้สัญญาณ เป็นวงจรเชื่อมต่อโดยที่มีสัญญาณมารวมกันโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความล่าช้าระหว่างกัน ลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้ คือเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P1 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P3 และเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P4 พลังงานนั้นก็จะออกพอร์ต P2



รูปที่ 3.10 ตัวไขว้สัญญาณ

จากรูปที่ 3.10 จะเห็นได้ว่าตัวไขว้สัญญาณจะมีรูปร่างคล้ายคลึงกับตัวคัปเปอเรอร์ 2 ตัวมาต่อรวมกัน ดังนั้นการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวไขว้สัญญาณจะมีลักษณะคล้ายกับการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปอเรอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาที่คำนวณได้ดังต่อไปนี้

- ที่ $Z_0 = 50\Omega$

$$A = 1.584$$

นำค่า A แทนในสมการที่ 3.2 ได้ค่า W เท่ากับ

$$W = 2.992\text{mm.}$$

- ที่ $Z_0/\sqrt{2} = 35.355\Omega$

$$A = 1.169$$

$$W/d = 3.0799 > 2$$

ไม่ตรงเงื่อนไขตามสมการที่ 3.2 จึงทำการหาค่า B

$$B = 7.645$$

$$W/d = 3.018\text{ mm}$$

เป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่า $W/d > 2$

$$W = 5.145\text{mm}$$

- ที่ $Z_0/2 = 25$

จาก $W = 5.145\text{mm}$

ดังนั้น $W = 5.145\text{mm} \times 2$

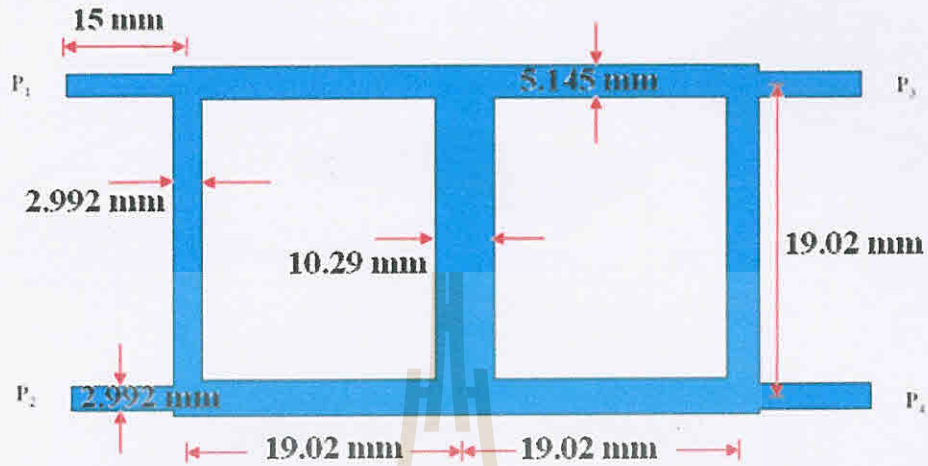
$$= 10.29\text{mm}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{1}{f}$$

$$\lambda = 76.072\text{mm.}$$

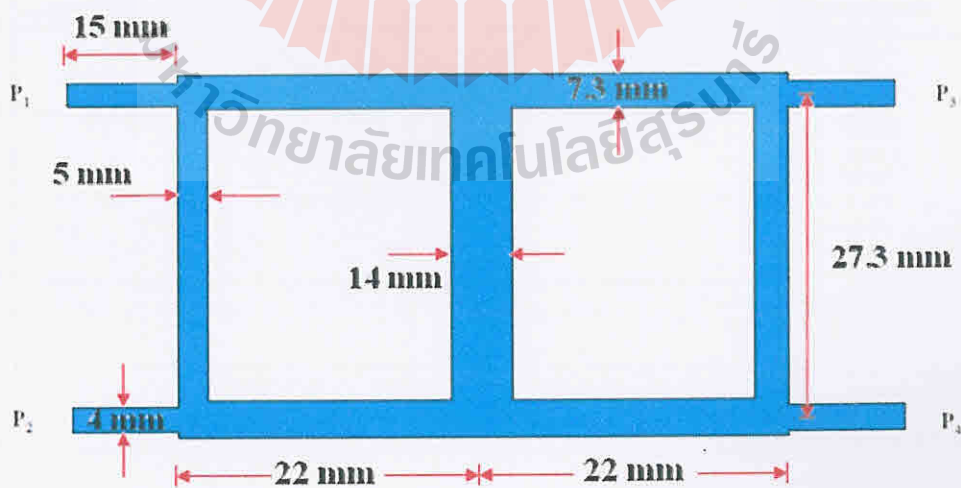
ดังนั้น $\lambda/4 = 19.02\text{mm.}$

ผลที่ได้จากการออกแบบ

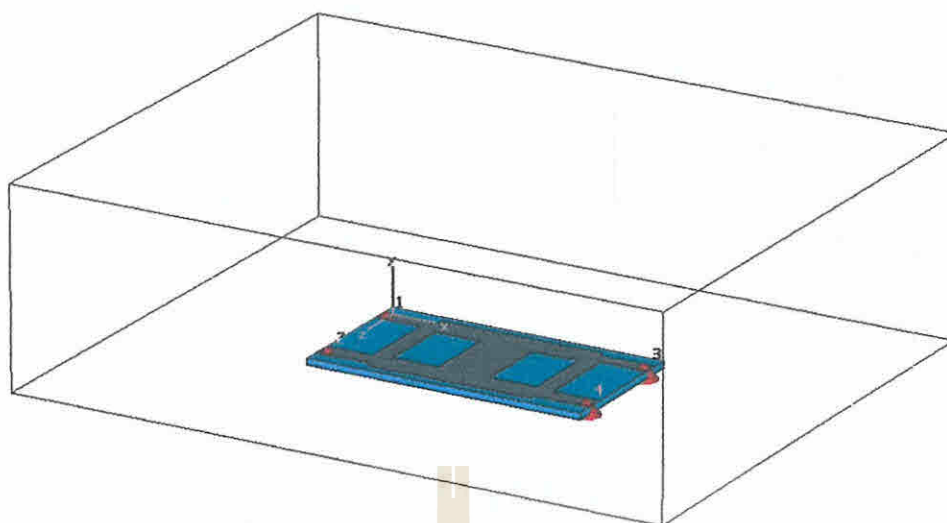


รูปที่ 3.11 ตัวไขว้สัญญาณที่ออกแบบ

นำตัวไขว้สัญญาณที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.11 ไปทำการจำลองผลในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม CST แล้วไม่ได้ค่าตามที่ต้องการจึงทำการปรับขนาดและความยาวของเส้น ซึ่งจะให้ผลดังที่แสดงในรูปที่ 3.12

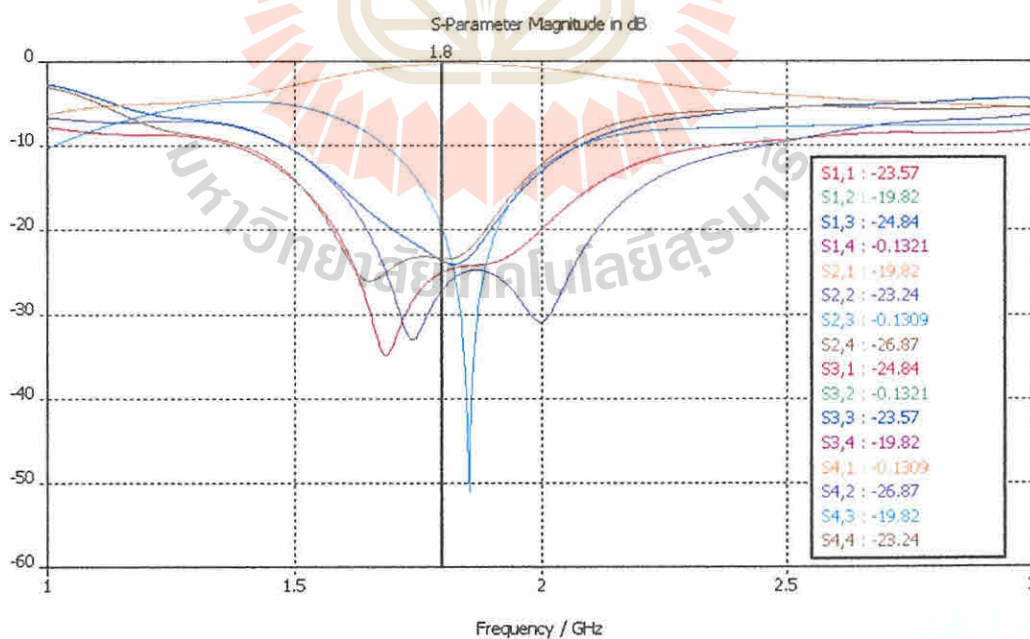


รูปที่ 3.12 ตัวไขว้สัญญาณที่ทำการปรับค่าแล้ว

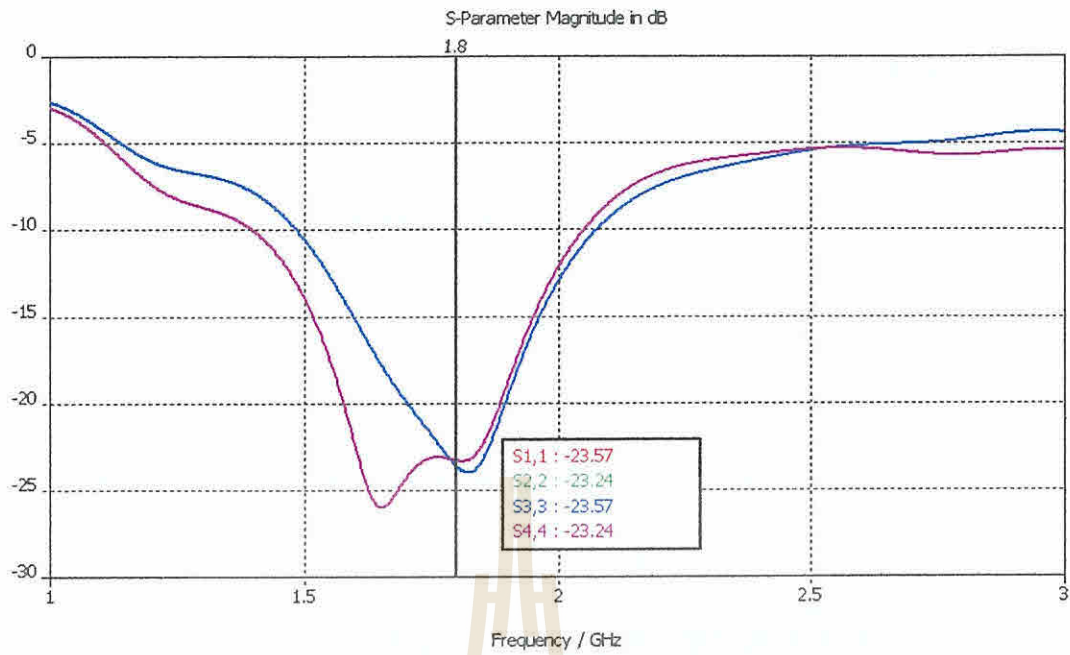


รูปที่ 3.13 ตัวไขว้สัญญาณที่เสร็จสมบูรณ์

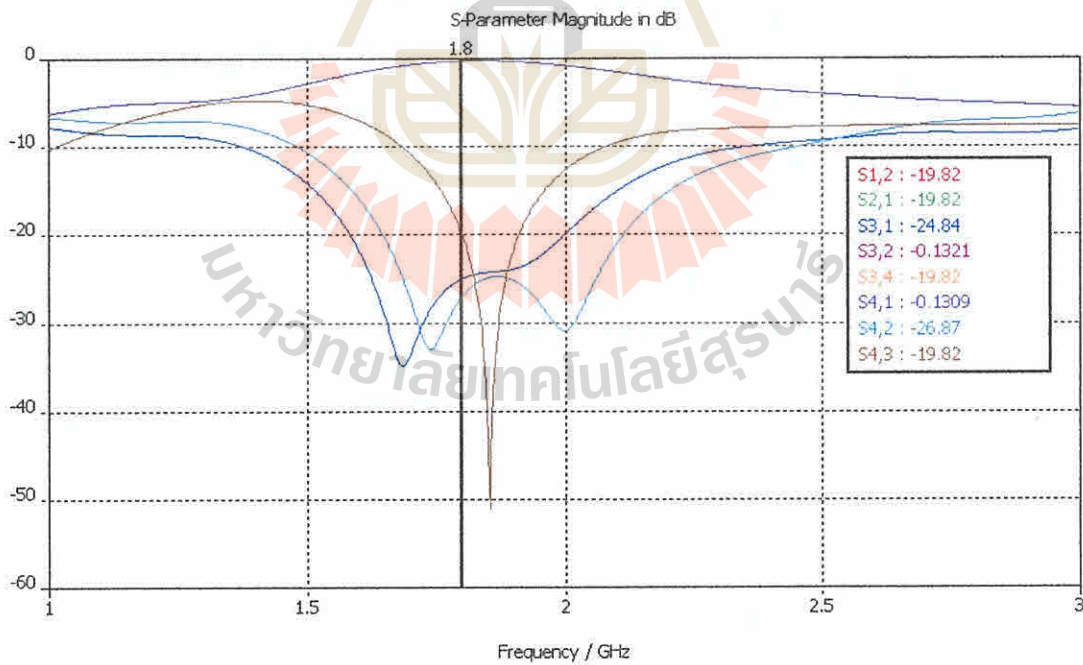
เมื่อสร้างตัวไขว้สัญญาณดังรูปที่ 3.13 แล้ว ทำการรัน โปรแกรมเพื่อดูพารามิเตอร์ต่างๆของตัวไขว้สัญญาณว่าเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังที่แสดงดังนี้



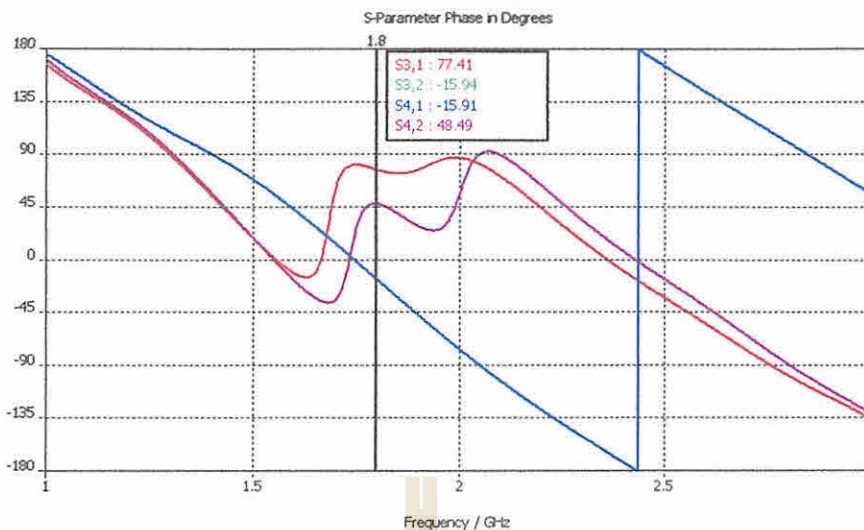
รูปที่ 3.14 ค่า S พารามิเตอร์



รูปที่ 3.15 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต



รูปที่ 3.16 ค่า S พารามิเตอร์ของไอโซเลตเตอร์



รูปที่ 3.17 เฟสของตัวไวสัญญาณ

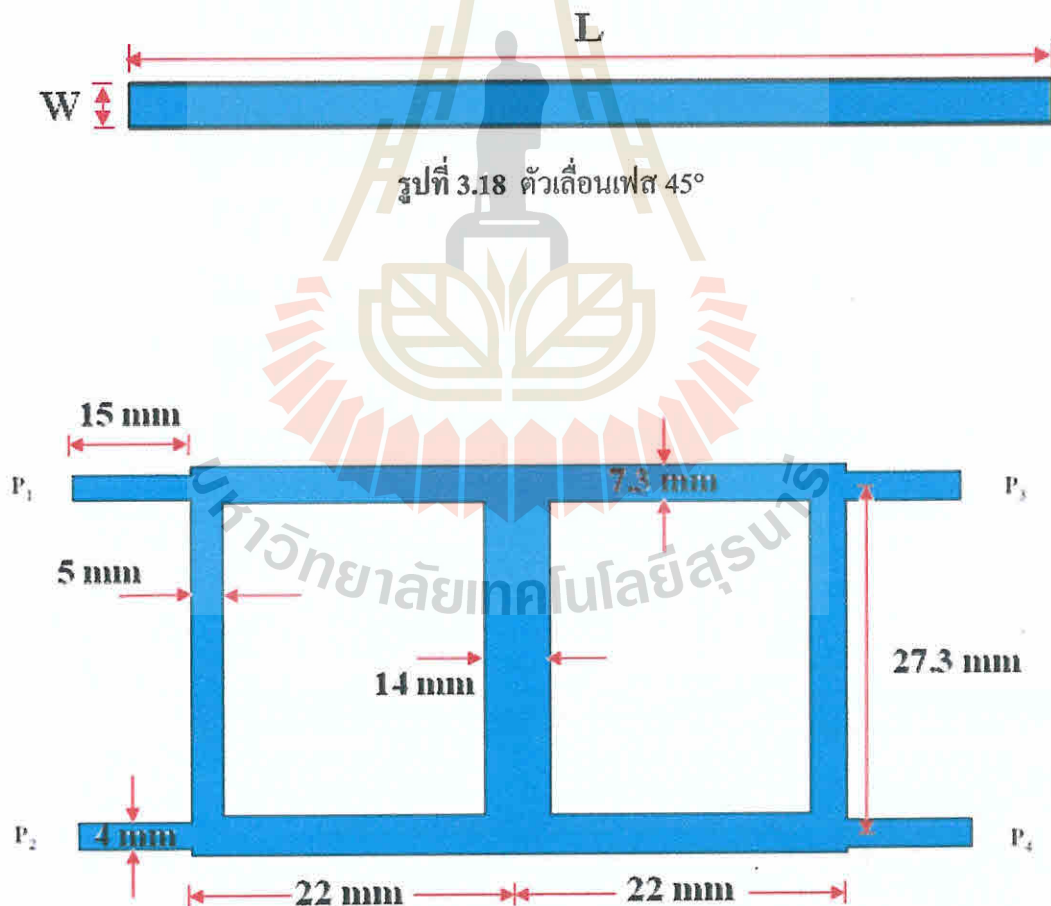
ตารางที่ 3.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของของตัวไวสัญญาณ

การสูญเสียย้อนกลับ(dB)		
S11	-23.57	
S22	-23.24	
S33	-23.57	
S44	-23.24	
เอาต์พุต		
	แอมพิจูด (dB)	เฟส (Degree)
S41	-0.1309	-15.91
S32	-0.1321	-15.94
ไอโซเลชันพอร์ต		
S31	Amplitude (dB) = -24.84	Phase (Degree) = 77.41
S42	Amplitude (dB) = -26.87	Phase (Degree) = 48.49
S21	-19.82 dB	
S12	-19.82 dB	
S34	-19.82 dB	
S43	-19.82 dB	

จากตารางที่ 3.2 เมื่อสังเกตที่ค่า s_{11} , s_{22} , s_{33} และ s_{44} ที่ได้จากรูปที่ 3.14, 3.15 และ 3.16 ซึ่งค่าที่ได้นั้น มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้รู้ว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1, 2, 3 และ 4 ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.2.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

การคำนวณตัวเลื่อนเฟส 45 องศาจากรูปที่ 3.18 คำนวณได้จากความยาวของตัวไขว้สัญญาณ ซึ่งจะช่วยให้ทราบค่าค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45° ภายใน โครงข่าย



รูปที่ 3.19 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ

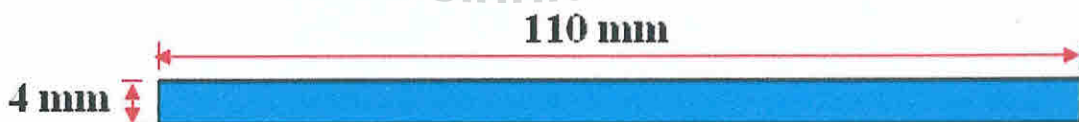
ดังภาพที่ 3.19 จะใช้ความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 ในการสร้างตัวเลื่อนเฟส ด้านล่างและใช้ความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต P2 ในการสร้างตัวเลื่อนเฟสด้านบนเพื่อให้เกิดการเพิ่มเฟส

จากรูปที่ 3.19 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ ความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 มีค่าเท่ากับ

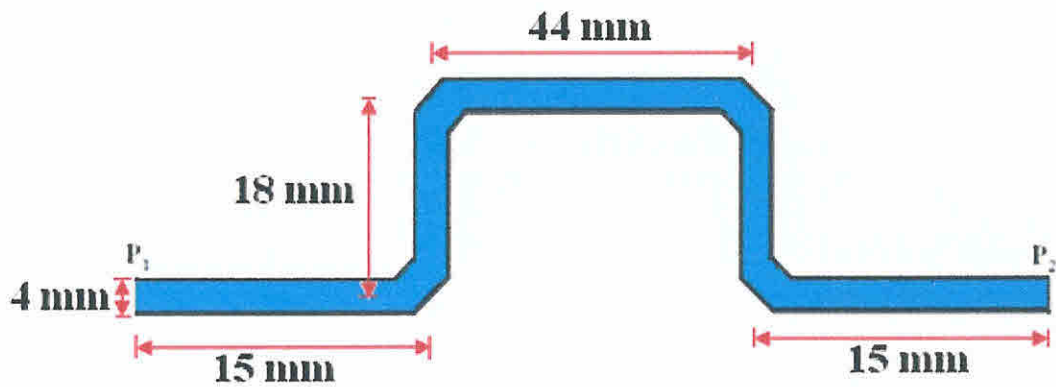
$$15+22+22+15 = 74 \text{ mm}$$

ดังนั้นค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 มีความยาวเท่ากับ 74 mm และความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 ค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา มีค่าเท่ากับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายใน โครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3

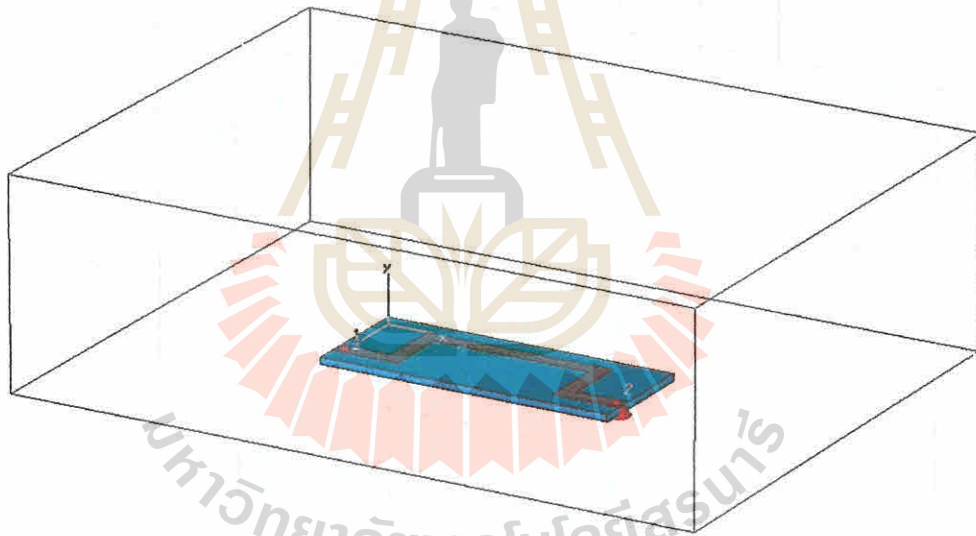
ดังนั้นความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายใน โครงข่าย มีค่าเท่ากับ 74 mm แต่เนื่องจากค่าความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 มีความยาวมากเกินไปดังรูปที่ 3.20 ไม่เข้ากับโครงข่ายอื่นจึงทำการ คัดงอขึ้น โดยการคดงอนั้นทำโดยการนำค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ลบออกจากค่าความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายใน โครงข่ายสามารถเชื่อมต่อได้แล้ว ค่าที่เหลือให้นำค่ามางอขึ้นตามความสวยงาม โดยที่ค่าความกว้างจะต้องคงที่ดังรูปที่ 3.21 เพื่อให้เข้ากับโครงข่ายได้ เมื่อทำการออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วจะได้ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายใน โครงข่ายดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

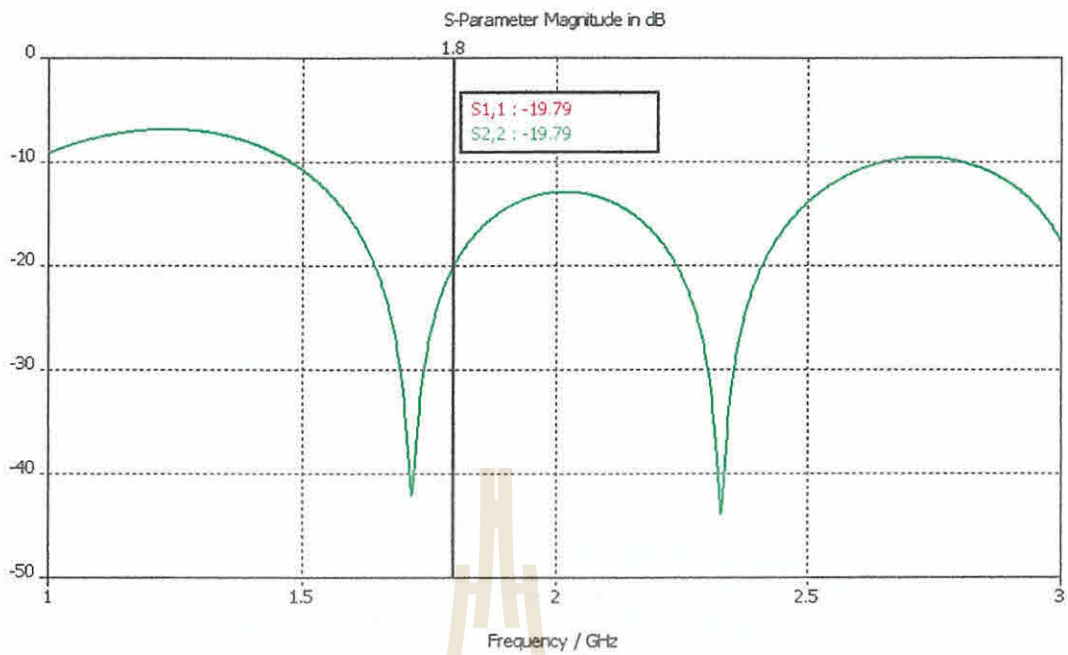


รูปที่ 3.21 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายใน โครงข่ายที่ออกแบบ

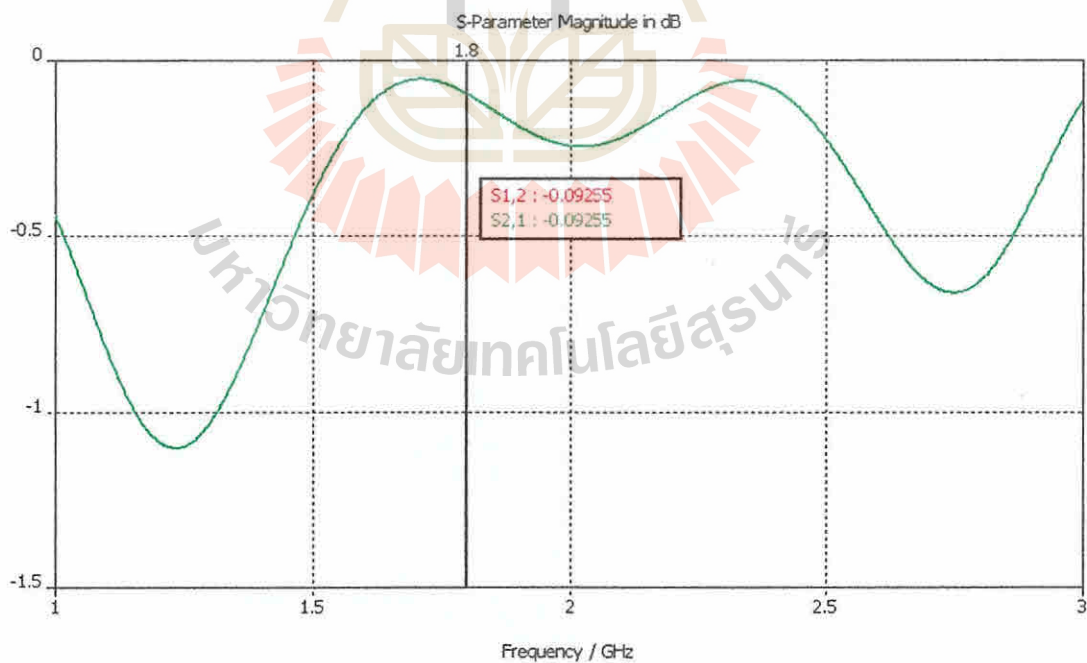


รูปที่ 3.22 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาที่เสร็จสมบูรณ์

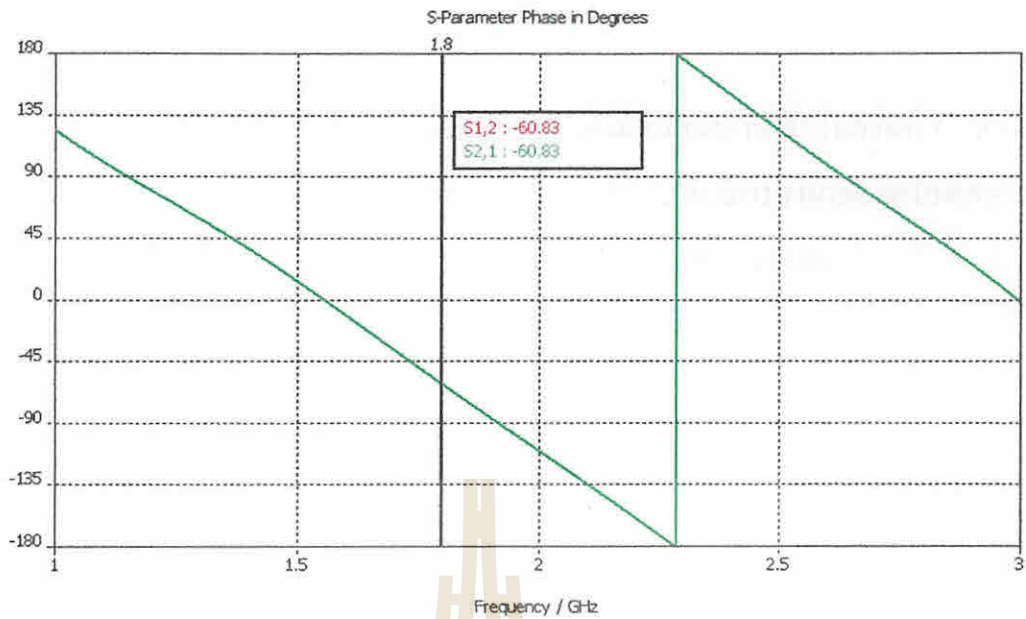
เมื่อสร้างตัวเลื่อนเฟส 45 องศาได้ดังรูปที่ 3.22 แล้ว ทำการรันโปรแกรมเพื่อดูพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาว่าเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังที่แสดงดังนี้



รูปที่ 3.23 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต



รูปที่ 3.24 ค่า S พารามิเตอร์ของไอโซเลตพอร์ต



รูปที่ 3.25 เฟสของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

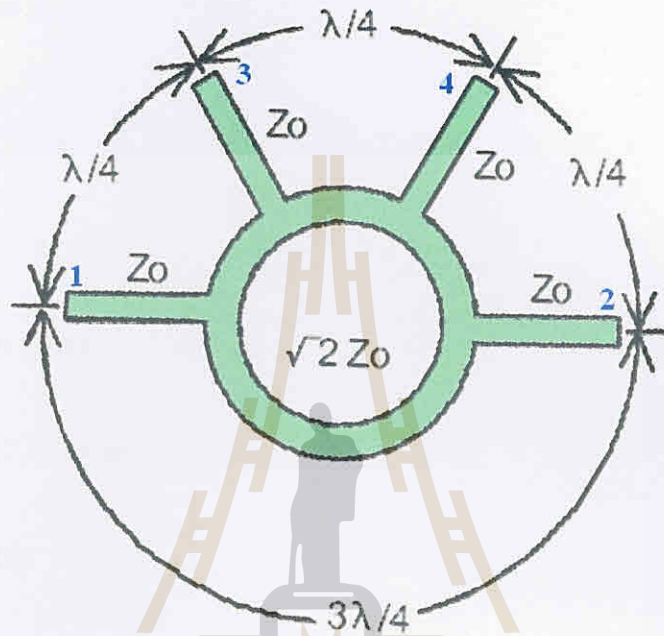
ตารางที่ 3.3 สรุปลำพารามิเตอร์ต่างๆของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

การสูญเสียย้อนกลับ		
S11 (dB)		-19.79
S22 (dB)		-19.79
เอาต์พุต		
	Amplitude (dB)	Phase (Degree)
S21	-0.09255	-60.83
S12	-0.09255	-60.83

จากตารางที่ 3.3 เมื่อสังเกตที่ค่า s_{11} , s_{22} , s_{33} และ s_{44} ที่ได้จากรูปที่ 3.23 และ 3.24 ซึ่งค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 และ 2 ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.3 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนดังรูปที่ 3.26 เมื่อมีพลังงานเข้าที่พอร์ตที่ 1 พลังงานจะแยกออกไปทั้งสองด้านเท่าๆกันและมีเฟสตรงกันข้าม ทำให้พลังมีการส่งผ่านออกไปที่พอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 2 โดยมีเฟสต่างกัน 180 องศา ส่วนพอร์ตที่ 4 จะไม่มีพลังงานออก



รูปที่ 3.26 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการข้างต้นจะได้ค่าดังต่อไปนี้

- ที่ $Z_0 = 50\Omega$

$$A = 1.585$$

$$B = 5.406$$

$$W/d = 2.799$$

$$W = 4.66 \text{ mm}$$

นำค่า B ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ 3.2 ได้

เป็นไปตามเงื่อนไข $W/d > 2$ ตามสมการที่ 3.2 จะได้

$$\text{- ที่ } Z_0 \sqrt{2} = 70.71 \Omega$$

$$A = 1.585$$

นำค่า A ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ 3.2 ได้

$$W/d = 1.79$$

เป็นไปตามเงื่อนไข $W/d < 2$ ตามสมการที่ 3.2 ได้

$$W = 2.989 \text{ mm}$$

จาก
$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{1}{f}$$

$$\lambda = 76.073 \text{ mm}$$

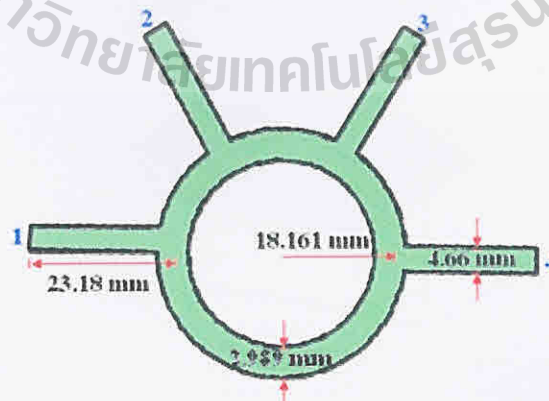
$$\lambda / 4 = 19.02 \text{ mm}$$

$$3\lambda / 4 = 57.054 \text{ mm}$$

$$6\lambda / 4 = 2\pi r$$

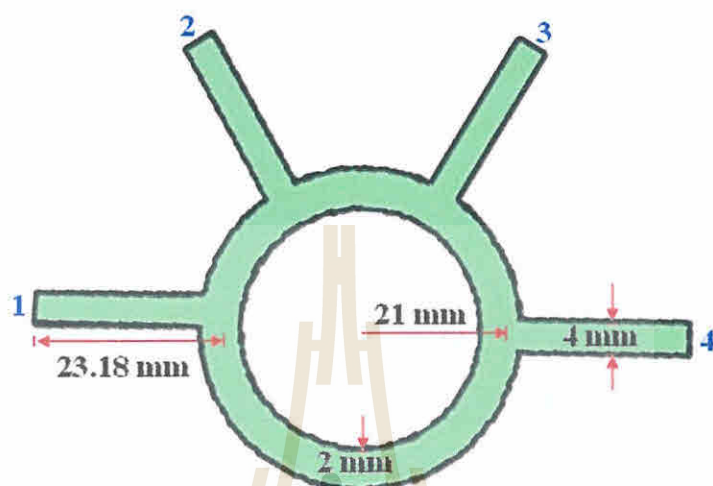
จะได้ $r = 18.161 \text{ mm}$

ผลการออกแบบ

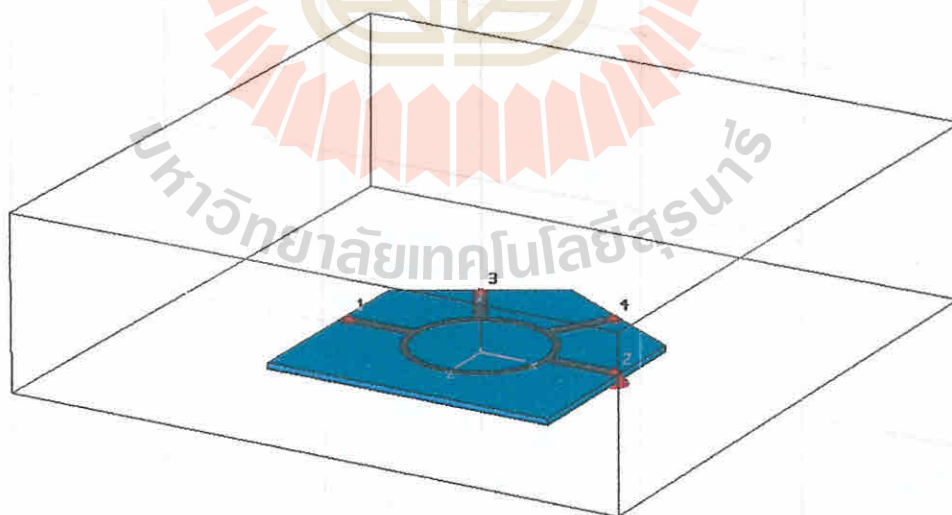


รูปที่ 3.27 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบ

นำตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.27 นั้น ไปทำการจำลองผลในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม CST แล้วไม่ได้ค่าตามที่ต้องการจึงทำการปรับขนาดและความยาวของเส้น ซึ่งจะให้ผลดังที่แสดงในรูปที่ 3.30

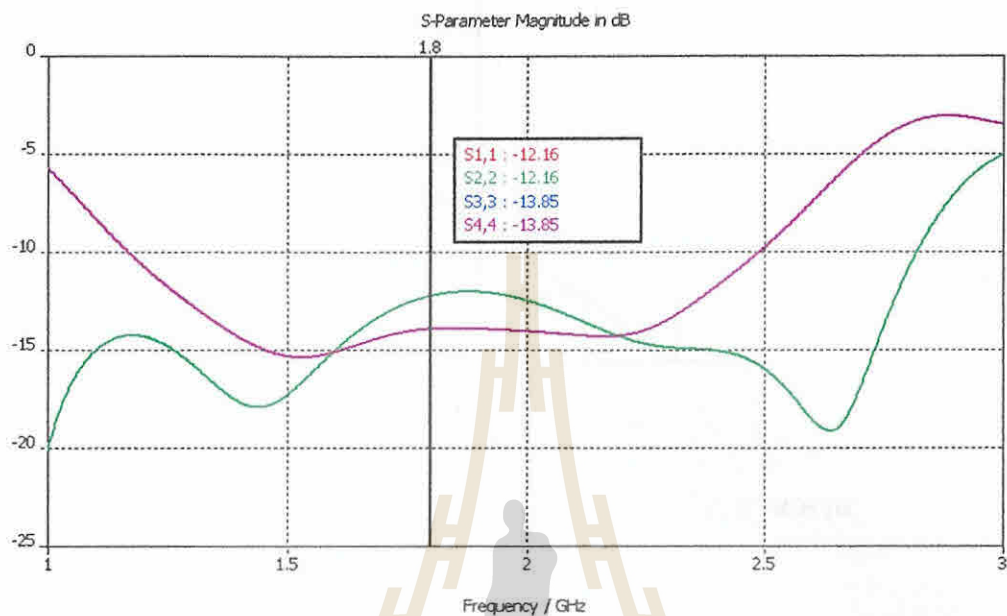


รูปที่ 3.28 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบเสร็จแล้ว

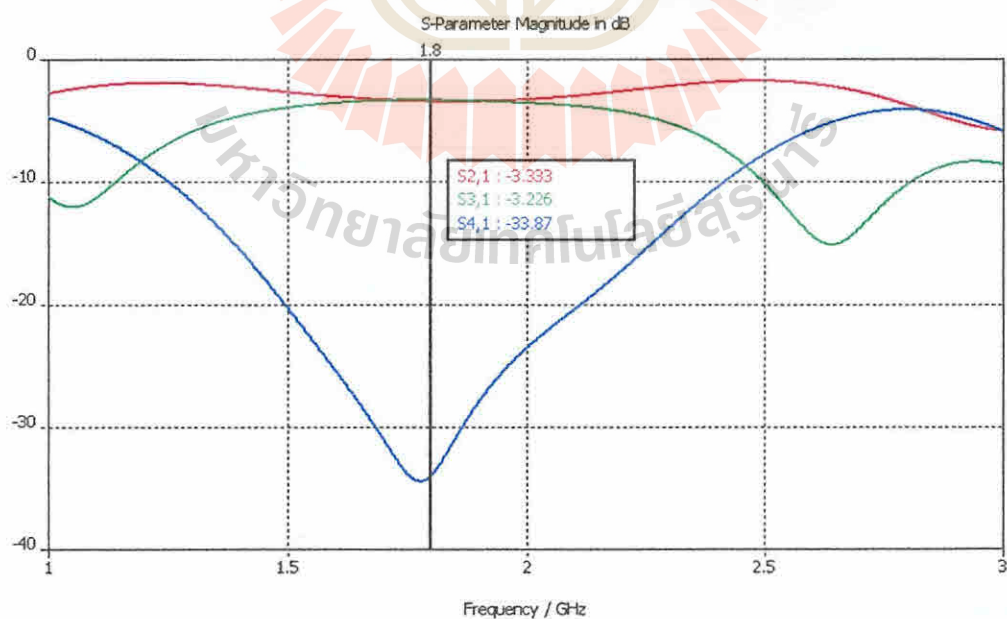


รูปที่ 3.29 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูรณ์

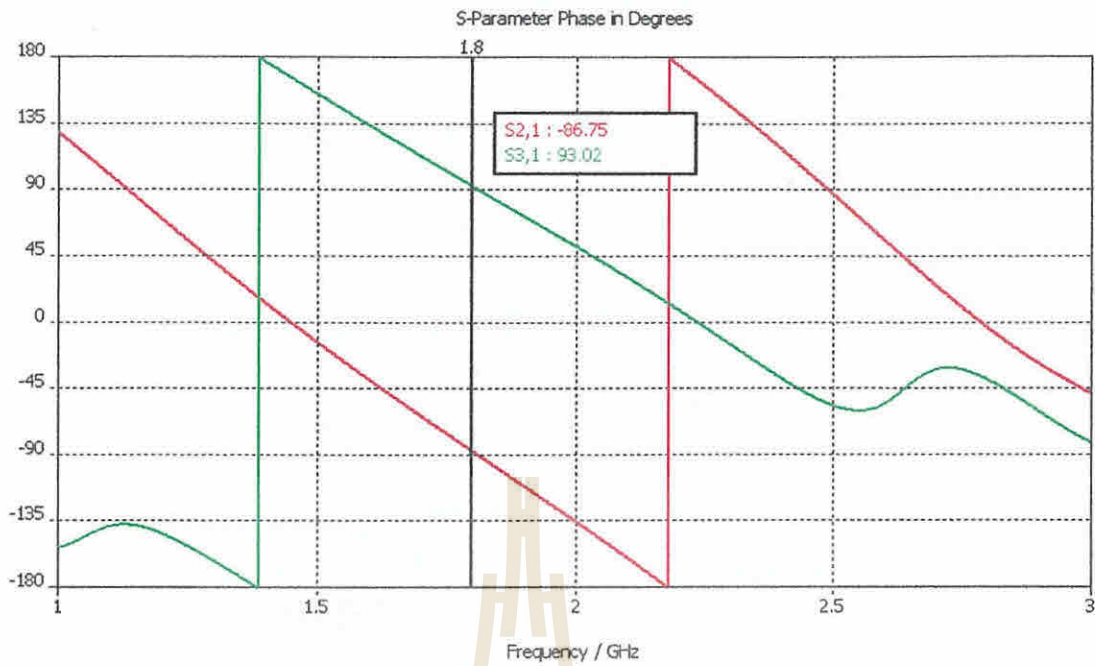
เมื่อสร้างตัวคัปเปอร์ไฮบริคส์แบบวงแหวนดังที่ได้ในรูปที่ 3.29 แล้ว ทำการรันโปรแกรมเพื่อดูพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวคัปเปอร์ไฮบริคส์แบบวงแหวนว่าเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 3.30 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต



รูปที่ 3.31 ค่า S พารามิเตอร์ที่เป็นเอาท์พุท



รูปที่ 3.32 เฟสของตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

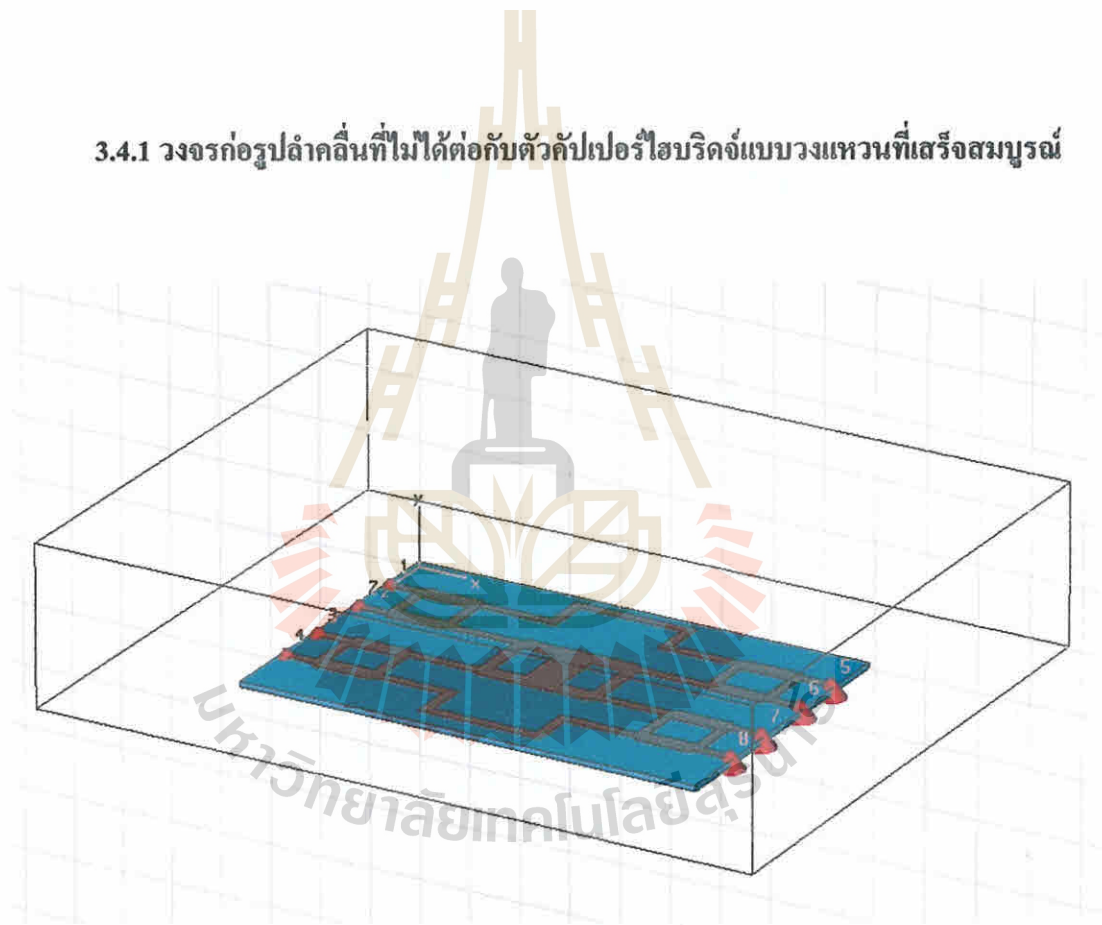
ตารางที่ 3.4 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

การสูญเสียย้อนกลับ (dB)			
S11	-12.16		
S22	-12.16		
S33	-13.85		
S44	-13.85		
เอ๊าท์พุท			
	แอมพิจูด (dB)	เฟส (Degree)	ความต่างเฟส (Degree)
S21	-3.333	-86.75	179.77
S31	-3.226	93.02	
ไอโซเลชัน (dB)			
S41	-33.87		

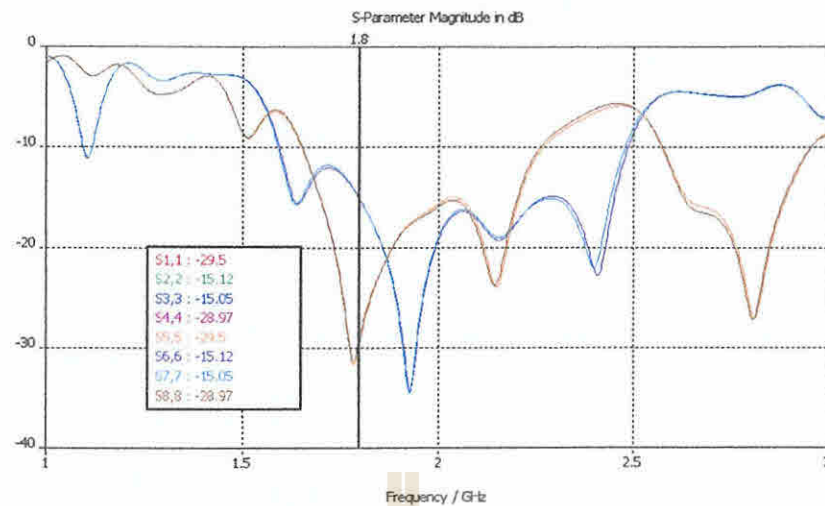
จากตารางที่ 3.4 เมื่อสังเกตที่ค่า s_{11} , s_{22} , s_{33} และ s_{44} ที่ได้จากรูปที่ 3.30 และ 3.31 ซึ่งค่าที่ได้ นั้น มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มี สัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1, 2, 3 และ 4 ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็น ค่าที่สามารถยอมรับได้

3.4 วงจรก่อรูปลาคลื่นที่เสร็จสมบูรณ์

3.4.1 วงจรก่อรูปลาคลื่นที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูรณ์



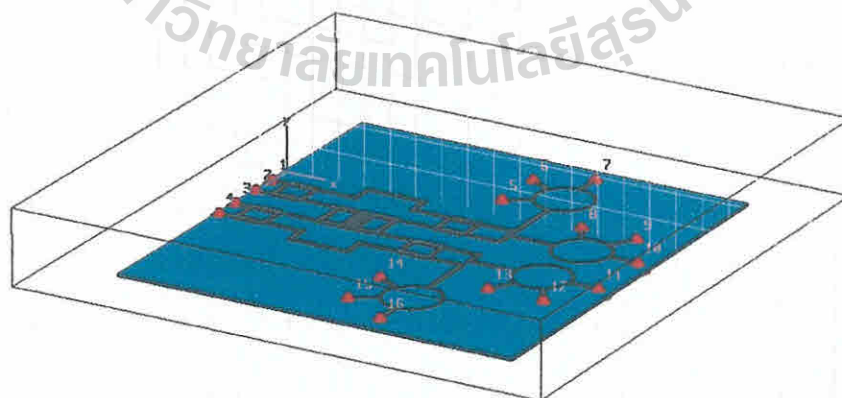
รูปที่ 3. 33 วงจรก่อรูปลาคลื่นที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์



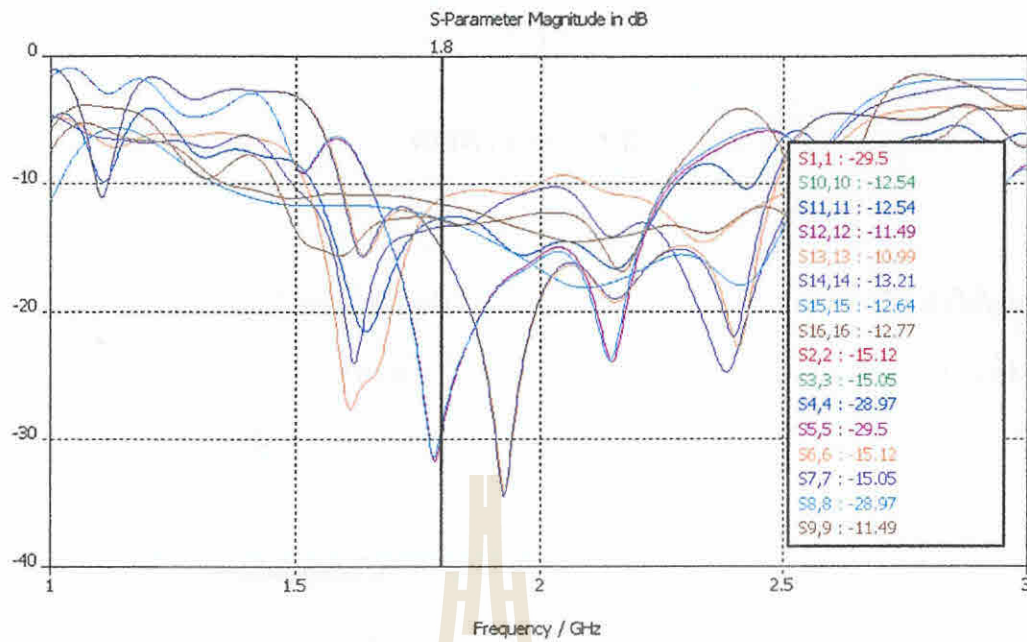
รูปที่ 3.34 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต

จากการรวมอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่ออกแบบไว้แล้ว ได้ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม CST เมื่อสังเกตที่ค่า s_{11} , s_{22} , s_{33} , s_{44} , s_{55} , s_{66} , s_{77} และ s_{88} ดังที่แสดงในรูปที่ 3.34 ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งแสดงว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ตนั้น

3.4.2 วงจรก่อรูปลาคัสที่ต่อกับตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 3. 35 วงจรก่อรูปลาคัสที่ต่อกับตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 3.36 ค่า S พารามิเตอร์ของแต่ละพอร์ต

จากการรวมอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่ออกแบบไว้นั้น ได้ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม CST เมื่อสังเกตที่ค่า S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{44} , S_{55} , S_{66} , S_{77} , S_{99} , S_{1010} , S_{1111} , S_{1212} , S_{1313} , S_{1414} , S_{1515} , และ S_{1616} ดังที่แสดงในรูปที่ 3.36 ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งแสดงว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ตนั้น

3.5 กล่าวสรุป

อุปกรณ์จำลองต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นจะนำมาประกอบรวมกันเป็นโครงข่ายก่อนรูปลาคลิ้น 2 โครงข่าย โดยโครงข่ายแรกจะประกอบไปด้วยตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาจำนวน 4 ตัว ตัวไขว้สัญญาณจำนวน 1 ตัว และตัวเลื่อนเฟส 45 องศาจำนวน 2 ตัว และโครงข่ายที่สองจะประกอบไปด้วยตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาจำนวน 4 ตัว ตัวไขว้สัญญาณจำนวน 1 ตัว ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาจำนวน 2 ตัว และตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนจำนวน 4 ตัว จากนั้นจะนำโครงข่ายก่อนรูปลาคลิ้นที่ได้ทั้งสองโครงข่ายไปทดสอบเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ

บทที่ 4

ผลการจำลองแบบ

4.1 กล่าวนำ

จากการศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 และ 3 นั้น ทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์จำลองที่เสร็จสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปทดสอบการใช้งานจริง เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ

4.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์จำลองด้วยการจำลองแบบในคอมพิวเตอร์

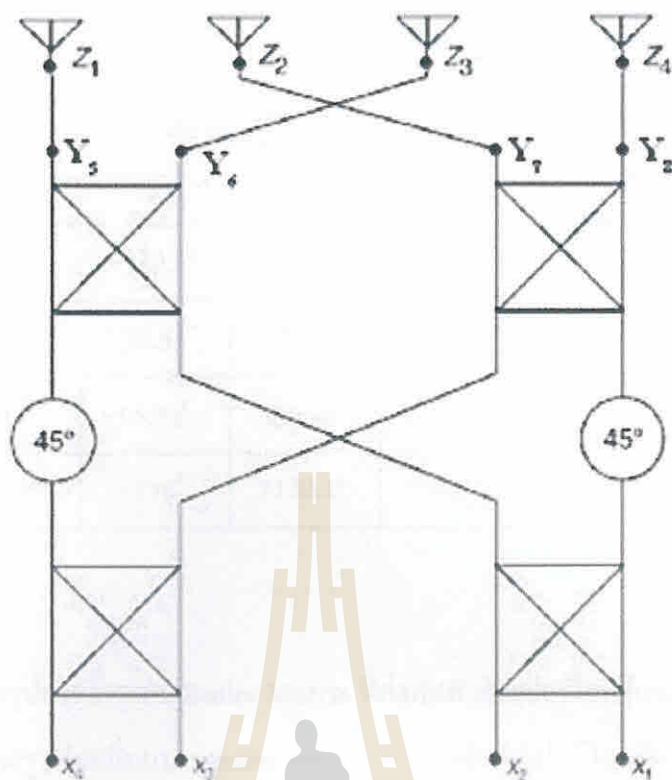
หลังจากได้อุปกรณ์จำลองที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว ถัดไปจะเป็นการทดสอบทิศทางของลำคลื่นเฟสและแอมพลิจูดของอุปกรณ์จำลอง โดยจะทำการทดสอบด้วยโปรแกรม 2 โปรแกรม คือ โปรแกรม CST และ โปรแกรม MATLAB

4.2.1 ผลการทดสอบอุปกรณ์จำลองด้วยการจำลองแบบในโปรแกรม CST

ทดสอบอุปกรณ์จำลองด้วยการจำลองแบบในโปรแกรม CST จะเป็นการทดสอบทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่ได้จาก Butler Matrix

4.2.1.1 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน จะมีพอร์ตอินพุต 4 พอร์ต คือ พอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ส่วนเอาต์พุตจะมี 4 พอร์ต คือ พอร์ตที่ 5, 6, 7 และ 8 ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix แบบ 4x4

ตารางที่ 4.1 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากทฤษฎี

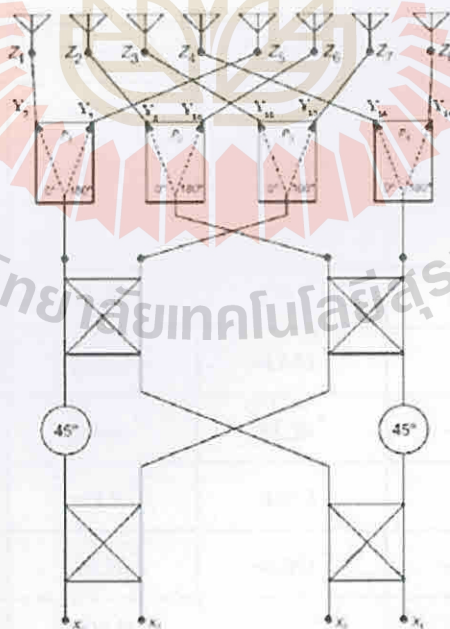
	Element 1	Element 2	Element 3	Element 4	Beam Direction	Inter-Element Phasing
Port1	180°	135°	90°	45°	104.5°	-45°
Port2	90°	225°	0°	135°	41.4°	135°
Port3	135°	0°	225°	90°	138.6°	-135°
Port4	45°	90°	135°	180°	75.5°	45°

ตารางที่ 4.2 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากการออกแบบ

	Element 1	Element 2	Element 3	Element 4	Beam Direction	Inter-Element Phasing
Port1	-84.41°	-130.1°	-174.5°	139.6°	104.5°	-45°
Port2	-174.6°	-39.35°	96.87°	-130°	41.4°	135°
Port3	-130°	95.34°	-39.34°	174.1°	138.6°	-135°
Port4	139.6°	-176°	-130.1°	-86°	75.5°	45°

4.2.1.2 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน จะมีพอร์ตอินพุต 4 พอร์ต คือ พอร์ตที่ 1, 2, 3 และ 4 ส่วนเอาต์พุตจะมี 8 พอร์ต คือ พอร์ตที่ 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14 และ 16 ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix แบบ 4x8

ตารางที่ 4.3 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากทฤษฎี

	Port1	Port2	Port3	Port4
Element 1	180 °	90 °	135 °	45 °
Element 2	135 °	225 °	0 °	90 °
Element 3	90 °	0 °	225 °	135 °
Element 4	45 °	135 °	90 °	180 °
Element 5	360 °	270 °	315 °	225 °
Element 6	315 °	45 °	180 °	270 °
Element 7	270 °	180 °	45 °	315 °
Element 8	225 °	315 °	270 °	360 °
Beam Direction	104.5°	41.4°	138.6°	75.5°
Inter-Element Phasing	-45°	135°	-135°	45°

ตารางที่ 4.4 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากการออกแบบ

	Port1	Port2	Port3	Port4
Element 1	-142.8°	129.6 °	173.2 °	81.26 °
Element 2	172°	-96.88 °	40.63 °	131.7 °
Element 3	131.7°	40.62 °	-96.88 °	172 °
Element 4	81.24°	173.2 °	129.6 °	-142.8 °
Element 5	39.96°	-47.53 °	-3.802 °	-95.95 °
Element 6	-9.648 °	83.29 °	-140.3 °	-48.9 °
Element 7	-48.9 °	-140.3 °	83.3 °	-9.643 °
Element 8	-96.16 °	-4.061 °	-47.46 °	39.76 °
Beam Direction	104.5°	41.4°	138.6°	75.5°
Inter-Element Phasing	-45°	135°	-135°	45°

จากการทดสอบอุปกรณ์จำลองด้วยการจำลองแบบในโปรแกรม CST จะทำให้ได้ทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่ได้จาก Butler Matrix ดังตารางที่ 4.1 4.2 4.3 และ 4.4

4.2.2 ผลการทดสอบอุปกรณ์จำลองด้วยการจำลองแบบในโปรแกรม MATLAB

การทดสอบอุปกรณ์จำลองด้วยการจำลองแบบในโปรแกรม MATLAB จะเป็นการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น ซึ่งโปรแกรมมีดังนี้

```

clc
clear all
th=0:1:180;

angwt=[180 135 90 45; ...
        90 225 0 135;...
        135 0 225 90;...
        45 90 135 180];
wt=exp(j*angwt*pi/180);
for i1=1:length(th)
    youtt(:,i1)=wt*exp(-j*[0 1 2 3 ].'*pi*cos(th(i1)*pi/180));
end
yabt=abs(youtt);
ydBt=20*log10(yabt./max(max(yabt)));

angt=[180 135 90 45 360 315 270 225; ...
        90 225 0 135 270 45 180 315;...
        135 0 225 90 315 180 45 270;...
        45 90 135 180 225 270 315 360];

```



```

w1t=exp(j*angt*pi/180);
for i1=1:length(th)
    yout1t(:,i1)=w1t*exp(-j*[0 1 2 3 4 5 6 7].*pi*cos(th(i1)*pi/180));
    yout3t=yout1t*pi*cos(pi/180);
end
yab1t=abs(yout3t);
ydB1t=20*log10(yab1t./max(max(yab1t)));

angw=[-84.41 -130.1 -174.5 139.6; ...
       -174.6 -39.35 96.87 -130;...
       -130 95.34 -39.34 -174.1;...
       139.6 -176 -130.1 -86];

p1=[0.43848 0.48445 0.49539 0.49215; ...
     0.49854 0.46190 0.48311 0.48200;...
     0.48234 0.48311 0.46190 0.49825;...
     0.49215 0.49517 0.48401 0.43818];

w=exp(j*angw*pi/180);
pc=p1.*w;

for i1=1:length(th)
    yout(:,i1)=pc*exp(-j*[0 1 2 3].*pi*cos(th(i1)*pi/180));
end
yab=abs(yout);
ydB=20*log10(yab./max(max(yab)));

```

```

ang=[-142.8 172 131.7 81.24 39.96 -9.648 -48.9 -96.16; ...
      129.6 -96.88 40.62 173.2 -47.53 83.29 -140.3 -4.061;...
      173.2 40.63 -96.88 129.6 -3.802 -140.3 83.3 -47.46;...
      81.26 131.7 172 -142.8 -95.95 -48.9 -9.643 39.76];

p2=[0.30514 0.29275 0.31651 0.32255 0.30234 0.31117 0.33982 0.32003; ...
     0.32244 0.29716 0.30760 0.35375 0.32218 0.31296 0.32404 0.35220;...
     0.35403 0.30760 0.29716 0.32225 0.35257 0.32407 0.31332 0.32195;...
     0.32266 0.31659 0.29275 0.30478 0.32018 0.33985 0.31117 0.30234];

w1=exp(j*ang*pi/180);
pc2=p2.*w1;

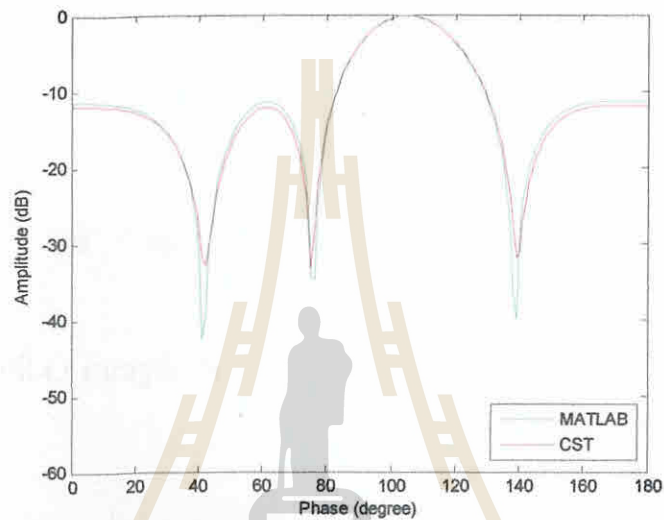
for i1=1:length(th)
    yout1(:,i1)=pc2*exp(-j*[0 1 2 3 4 5 6 7].*pi*cos(th(i1)*pi/180));
    yout3=yout1*pi*cos(pi/180);
end
yab1=abs(yout3);
ydB1=20*log10(yab1./max(max(yab1)));
plot(th,ydBt(4,:),'g')
hold on
plot(th,ydB(4,:),'r')

%plot(th,ydB1t(3,:),'g')
hold on
%plot(th,ydB1(4,:),'b')
axis([0 180 -60 0])

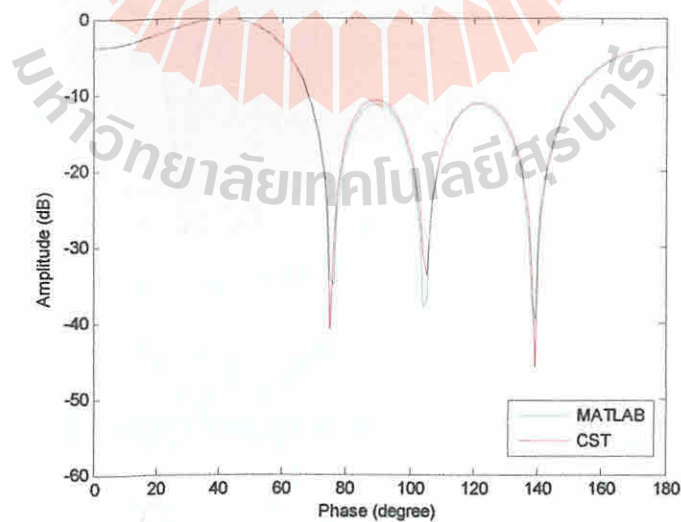
```

4.2.2.1 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

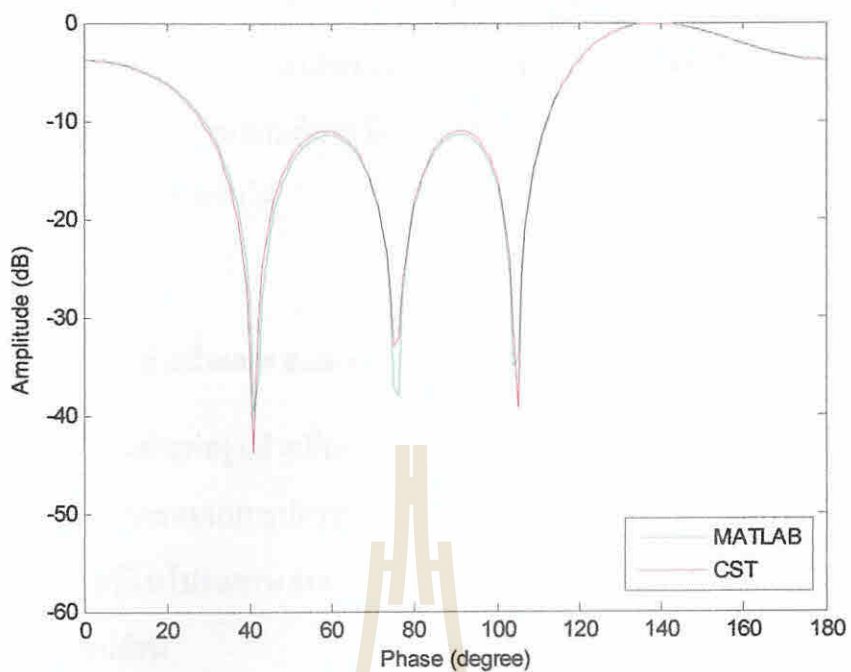
ทดสอบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน จะเป็นการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4x4 ที่ได้จากทฤษฎีในโปรแกรม MATLAB และที่ได้จากการออกแบบในโปรแกรม CST ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังนี้



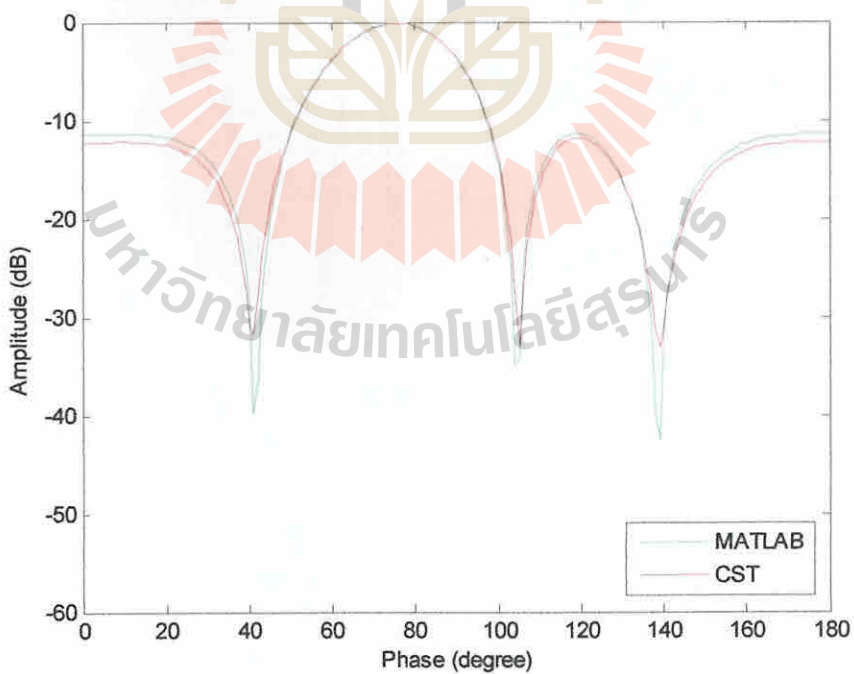
รูปที่ 4.3 แบบรูปการแผ่พลังงานของอินพุทพอร์ตที่ 1 ซีทีซีที่ 104.5 องศา



รูปที่ 4.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 2 ซีทีซีที่ 41.4 องศา



รูปที่ 4.5 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์คที่ 3 ซี่ทึคที่ 138.6 องศา

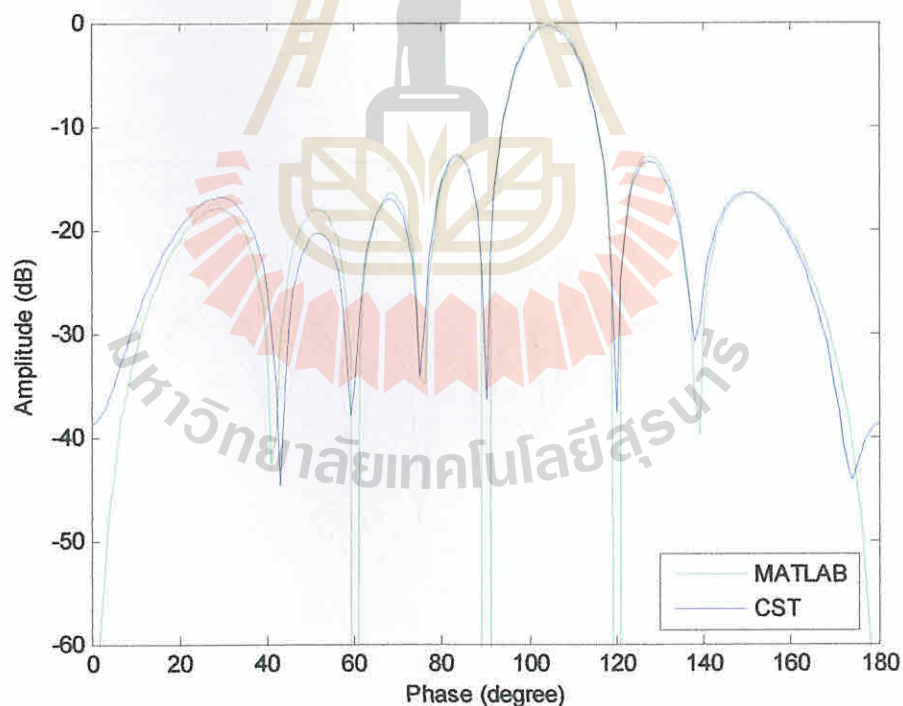


รูปที่ 4.6 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์คที่ 4 ซี่ทึคที่ 75.5 องศา

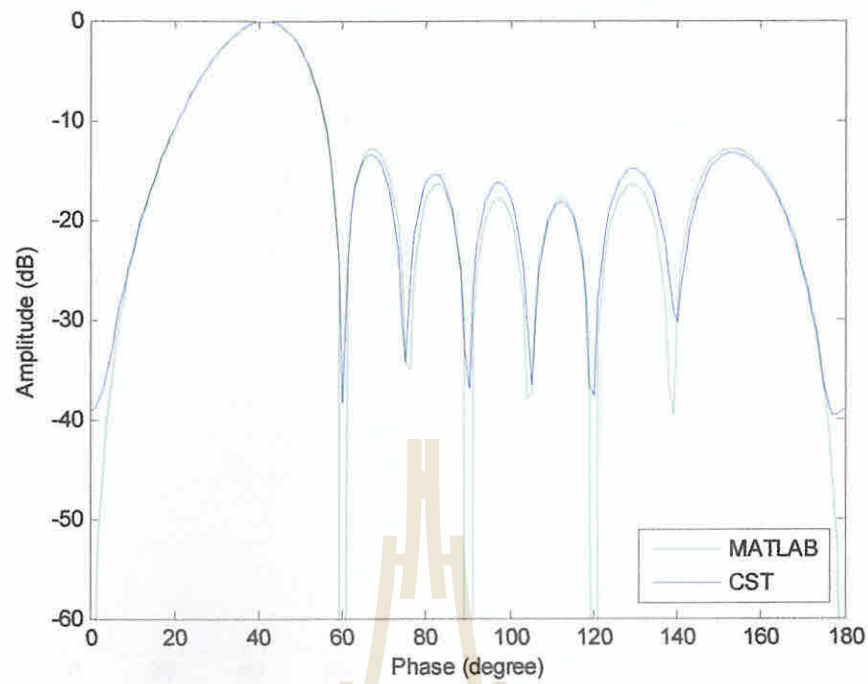
ผลที่ได้จากการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนดังรูปที่ 4.3, 4.4, 4.5 และ 4.6 ผลที่ได้จากการออกแบบมีค่าที่ใกล้เคียงกับทฤษฎีมาก มีการชี้ทิศตรงกับทฤษฎี และระดับพ่วงก็ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถยอมรับได้

4.2.1.2 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

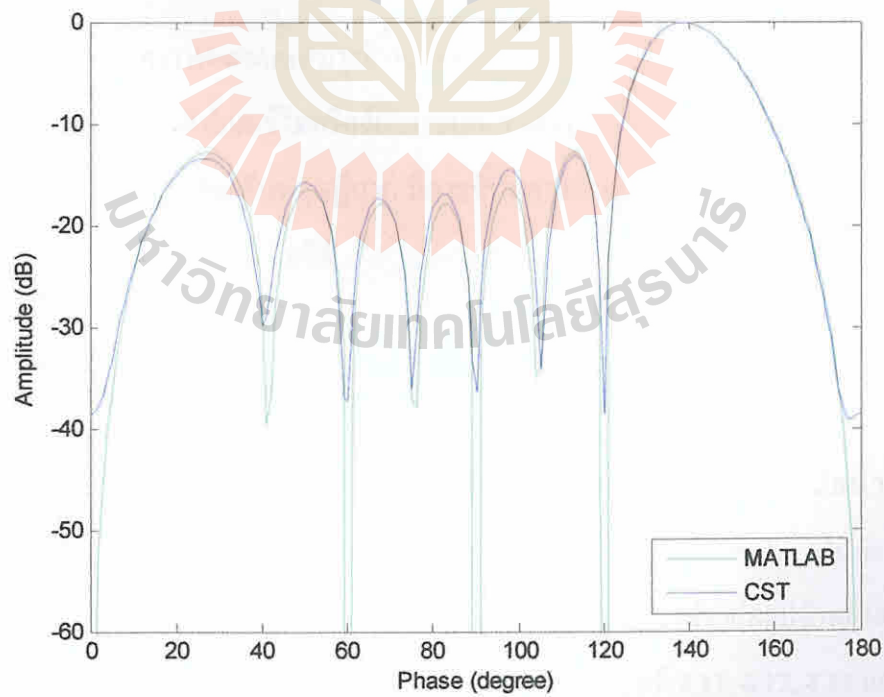
ทดสอบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน จะเป็นการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4x8 ที่ได้จากทฤษฎีในโปรแกรม MATLAB และที่ได้จากการออกแบบในโปรแกรม CST ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังนี้



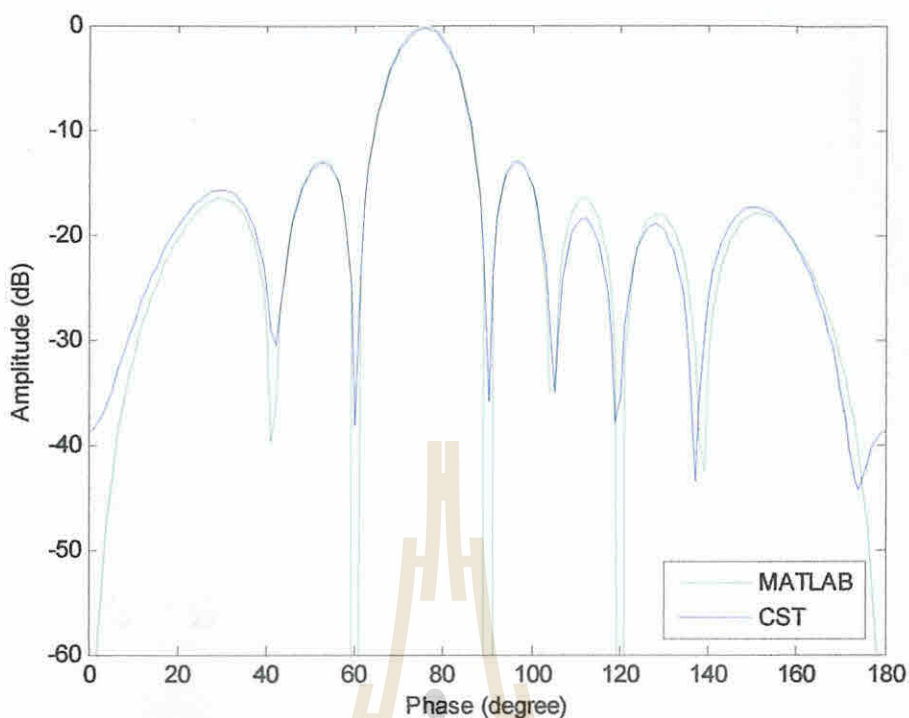
รูปที่ 4.7 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 1 ชี้ทิศที่ 104.5 องศา



รูปที่ 4.8 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์คที่ 2 ซึ่ทศที่ 41.4 องศา



รูปที่ 4.9 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์คที่ 3 ซึ่ทศที่ 136.6 องศา

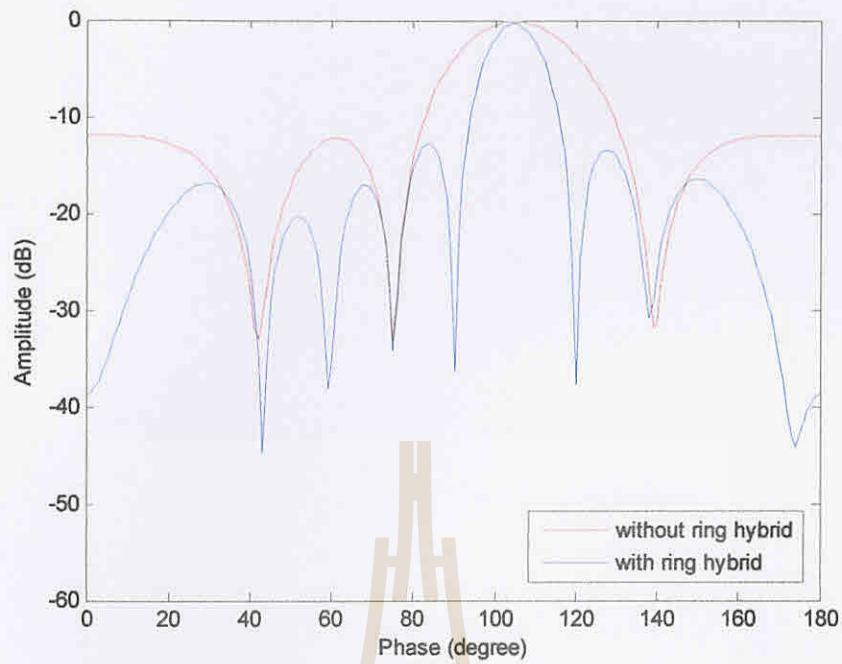


รูปที่ 4.10 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 4 ซีทีซีที่ 75.5 องศา

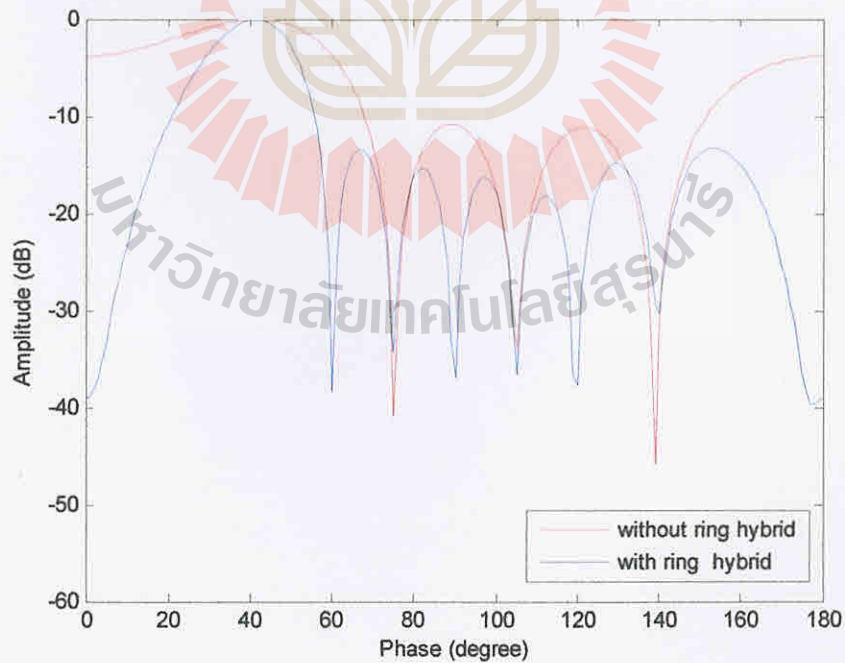
ผลที่ได้จากการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนดังรูปที่ 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 ผลที่ได้จากการออกแบบมีผลที่ใกล้เคียงกับทฤษฎีมาก มีการชี้ทิศตรงกับทฤษฎี และระดับพ่วงข้างก็ต่ำกว่า -10 dB ซึ่งในทางทฤษฎีสามารถยอมรับได้

การเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงาน

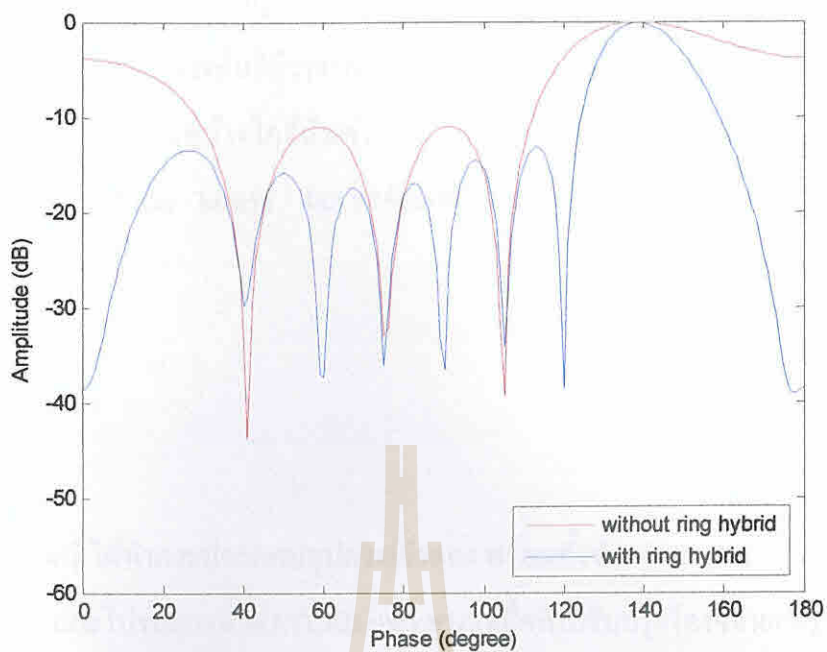
จากผลการทดสอบด้วยการจำลองแบบในโปรแกรม MATLAB เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบระหว่างแบบรูปการแผ่พลังงาน โครงข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนและแบบรูปการแผ่พลังงาน โครงข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 4.11, 4.12, 4.13 และ 4.14



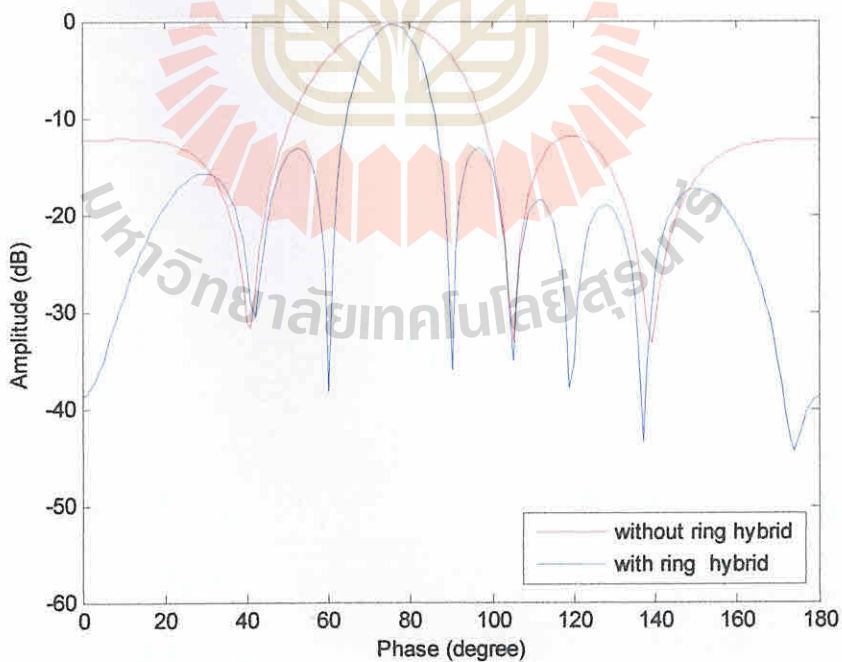
รูปที่ 4.11 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 1 ซีทีสที่ 104.5 องศา



รูปที่ 4.12 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 2 ซีทีสที่ 41.4 องศา



รูปที่ 4.13 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 3 ซีทีซีที่ 138.6 องศา



รูปที่ 4.14 แบบรูปการแผ่พลังงานของพอร์ตที่ 4 ซีทีซีที่ 75.5 องศา

จากการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ได้จากโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4×4 และ 4×8 จะเห็นได้ว่าจากเดิมโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4×4 จะมีระดับแอมพลิจูดของพู่ข้างใกล้เคียงกับค่า -10 dB มาก แต่เมื่อมีการปรับปรุงเป็นโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4×8 ระดับแอมพลิจูดของพู่ข้างจะลดต่ำลงน้อยกว่า -10 dB ทำให้มีการชี้ทิศที่ดีขึ้น

4.3 กล่าวสรุป

หลังจากที่ได้ทำการประกอบอุปกรณ์จำลอง พร้อมทั้งทำการทดสอบอุปกรณ์จำลองโดยโปรแกรม CST และ โปรแกรม MATLAB แล้ว พบว่าเมื่อทำปรับปรุงโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix จาก 4×4 เป็น 4×8 สามารถลดระดับแอมพลิจูดของพู่ข้างให้ต่ำกว่า -10 dB โดยสามารถสังเกตได้จากกราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ณ พอร์ตต่างๆที่ได้ทำการทดสอบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ลำคลื่นหลักมีการชี้ทิศดีขึ้น

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	1
1.4 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	2
บทที่ 2 ข้อมูลพื้นฐาน	
2.1 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับโทรทัศน์	3
2.1.1 ประวัติโทรทัศน์ (television)	3
2.1.2 โทรทัศน์	5
2.2 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการแพร่ภาพและอัดรายการ	6
2.2.1 การแพร่ภาพโทรทัศน์ (Television Broadcasting)	6
2.2.2 การส่งสัญญาณ โทรทัศน์ภาคพื้นดิน	6
2.2.3 การส่งสัญญาณ โทรทัศน์ผ่านช่องนำสัญญาณ	7
2.2.4 ระบบการส่งสัญญาณ โทรทัศน์ในประเทศไทย	7
2.2.5 ค่าอัตราขยาย Forward Gain	12
2.3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศชนิดไมโครสตริป	12
2.3.1 คุณสมบัติที่พิเศษกว่าสายอากาศชนิดอื่นๆ	13
2.3.2 ข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป	14
2.4 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับสายอากาศชนิดโมโนโพล	14
บทที่ 3 การออกแบบ CST MICROWAVE STUDIO	
3.1 บทนำ CST MICROWAVE STUDIO	15
3.2 ขั้นตอนการออกแบบ Antenna microstrip ในโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO	16
บทที่ 4 การวัดและการสร้างจริง	
4.1 วัสดุอุปกรณ์	27
4.2 ขั้นตอนการออกแบบ	28
4.3 ผลการวัด	36
4.3.1 ผลการวัดการ Polarization	36
4.3.2 ผลการวัด Pattern	37
4.3.3 ผลการวัด S parameter (S 11)	39

<p>3.การเชื่อมระหว่างโครงข่าย ก่อรูปลำดับชั้นแบบ Butler matrix กับตัวคัปเปอร์ ไฮบริดจ์แบบวงแหวนทำได้ ยาก</p>	<p>สาเหตุ เนื่องจากรัศมีของตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน มีค่ามากกว่าความกว้างระหว่างพอร์ตเอาต์พุตของโครงข่าย ก่อรูปลำดับชั้น วิธีการแก้ไข ควรเพิ่มความยาวพอร์ตเอาต์พุตของโครงข่าย ก่อรูปลำดับชั้น แล้วทำการหักงอพอร์ตเอาต์พุตเพื่อให้ ระยะห่างระหว่างพอร์ตเพิ่มขึ้น</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ตัวโปรแกรม CST มีการใช้งานทรัพยากรของเครื่องสูง สามารถสังเกตได้จากกราฟการทำงานของหน่วยประมวลผลกลางจาก Task manager ของ windows ผู้ใช้งานควรใช้งานโปรแกรมนี้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง และควรหลีกเลี่ยงการเปิดใช้งานร่วมกับโปรแกรมอื่น เพราะอาจทำให้โปรแกรม CST เกิดการขัดข้องได้

5.3.2 ในการสร้างลายวงจรด้วยโปรแกรม CST ควรมีความรอบคอบการกำหนดชนิดของวัสดุที่ใช้ทำการออกแบบ การกำหนดความกว้างและความยาวของชิ้นงานที่ทำการออกแบบ เพราะเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจะสามารถทำการแก้ไขได้ยากหรืออาจต้องเริ่มทำการออกแบบชิ้นงานนั้นใหม่

5.4 แนวทางการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากโครงการงานการศึกษาการลดระดับพู่ข้างสำหรับสายอากาศแบบสวิทช์ลำดับชั้นที่ใช้โครงข่ายก่อรูปลำดับชั้นแบบ Butler matrix นี้ยังไม่ได้สร้างจริง เพียงแค่ทำการออกแบบในโปรแกรม CST และวัดผลด้วยโปรแกรม CST และโปรแกรม Matlab เท่านั้น ถ้านำโครงการนี้ไปสร้างเป็นชิ้นงานที่มีการต่อกับสายอากาศจริงๆ จะทำให้โครงการนี้ใช้งานได้จริงและสามารถนำไปพัฒนาให้ดีขึ้นได้

5.5 กล่าวสรุป

โครงการงานการศึกษาการลดระดับพู่ข้างสำหรับสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix มีส่วนประกอบหลักดังนี้

- 1) วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix
- 2) ตัวคัปเปอ์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

โดยอุปกรณ์เหล่านี้มีหลักการทำงาน คือ วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix จะทำการก่อรูปลำคลื่นแล้วส่งไปยังพอร์ตเอาต์พุตทั้ง 4 พอร์ต ทำให้มีเกิดลำคลื่นหลักที่มีการชี้ทิศเฉพาะเจาะจงที่ทิศใดทิศหนึ่งโดยจะมีระดับพู่ข้างเกิดขึ้นสูงด้วย ซึ่งจะทำให้การชี้ทิศของลำคลื่นหลักค่อยลง จึงได้ทำการปรับปรุงวงจรก่อรูปลำคลื่น โดยการนำตัวคัปเปอ์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนมาต่อเข้าที่พอร์ตเอาต์พุตทั้ง 4 พอร์ต พลังงานจึงมีการแยกออก 2 พอร์ต โดยมีเฟสต่างกัน 180 องศา ทำให้พอร์ตมีเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเป็น 8 พอร์ต โดยที่พอร์ตอินพุตยังคงเป็น 4 พอร์ตเหมือนเดิม ซึ่งการทำเช่นนี้สามารถทำการลดระดับพู่ข้างได้ประมาณ 6.115 dB การชี้ทิศของลำคลื่นหลักจึงดีขึ้น

ประวัติผู้เขียน



นางสาวชฎาภรณ์ แหยมเกิด เกิดวันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 155 หมู่ 3 ตำบลบ้านหม้อ อำเภอฟิชัย จังหวัดอุตรดิตถ์ สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนพิชัย ปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นางสาวจิววัฒนา ทาด่อย เกิดวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 21/36 หมู่ 12 ตำบลบ้านกล้วย อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย จบการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนอุดมครุณี ปีการศึกษา 2550 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

- [1] <http://mwrf.com/Articles/Index.cfm?Ad=1&ArticleID=17725>
- [2] รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์ Antenna engineering <http://www.sut.ac.t/e-texts/eng/Antenna,2004>
- [3] http://www.rfdh.com/invite/ilab/k7_2.htm
- [4] บัณฑิต โรจน์ “วิศวกรรมไมโครเวฟ”, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, พ.ศ. 2536.(219)
- [5] <http://www.rfcafe.com/references/electrical/NEETS%20Modules/NEETS-Module-18-2-21-2-30.htm>