

โครงการ การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อลดระดับฝุ่นเล็กสำหรับ

โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

โดย	1. นาย จักรธร สังข์สูงเนิน	B5012459
	2. นายทวีเกียรติ มโนสาร โสภณ	B5025831
	3.นางสาว กนกพร แคมป์จันทิก	B5030293

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อูฑารสกุล

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

ภาคการศึกษา 3/2553

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีนักวิจัยให้ความสนใจการประยุกต์ใช้งานสายอากาศ เก่ง ซึ่งจะทำให้ระบบสื่อสารไร้สายมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากสามารถลดสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางอื่นได้ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นที่นิยมใช้กัน ได้แก่ Butler Matrix ซึ่งมีความซับซ้อนน้อย และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามพู่ข้างที่ได้จาก Butler Matrix ยังมีระดับที่สูง

ดังนั้นโครงการชิ้นนี้จึงมุ่งเน้นที่จะ สร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อ ลดระดับพู่ คลื่นเล็ก ของสายอากาศแบบสวิตซ์ลำคลื่นแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อูฮารสกุล ผู้ที่เป็นเจ้าของแนวคิดเริ่มแรกของการศึกษา การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบการลดระดับฟู คลื่นเล็ก สำหรับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับแนวคิดการดูแลเอาใจใส่ติดตามงาน ชี้แนะข้อบกพร่อง ตลอดจนช่วยฝึกฝนและให้การสนับสนุนคณะผู้จัดทำให้มีความสามารถในการทำโครงการตลอดจนเสนอผลงานให้เป็นที่รู้จักและยอมรับได้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน รวมทั้งพี่บัณฑิตศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกวิศวกรรมโทรคมนาคม และเพื่อน ๆ นักศึกษา สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด สำหรับความช่วยเหลือที่ดีในทุกๆ ด้าน ตลอดจนกำลังใจที่มอบให้แก่คณะผู้จัดทำตลอดมา

คณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวไปแล้วไว้ ณ ที่นี้ สำหรับส่วนดีของโครงการชิ้นนี้ ขออุทิศให้แก่อาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ คณะผู้จัดทำ

ผู้จัดทำ

นาย จักรธร สังข์สูงเนิน

นาย ทวีเกียรติ มโนสาร โสภณ

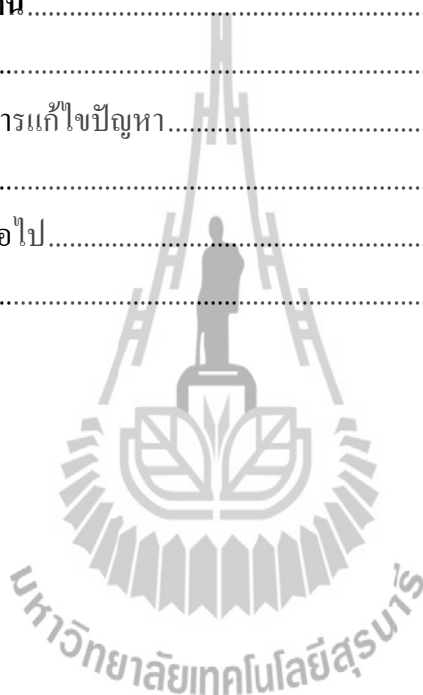
นางสาว กนกพร แก่มจันทิก

สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญภาพ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญแผนภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
หลักการและเหตุผล	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตงาน	2
ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง	4
กล่าวนำ	4
ทฤษฎีสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป	4
ทฤษฎีสายอากาศ	7
ระบบสายอากาศแก่ง	18
โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix	18
ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	26
สายอากาศ	28
ตัววัดสัญญาณ	29
กล่าวสรุป	29
ตัววัดสัญญาณ	29
บทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบ	30
กล่าวนำ	30
โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น	30
ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	42
วงจรก่อรูปลำคลื่นที่เสร็จสมบูรณ์	46
อุปกรณ์เชื่อมต่ออื่น ๆ	53
กล่าวสรุป	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ	54
กล่าวนำ.....	54
ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบการลดระดับพุกคลื่นเล็กของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix	54
การทดสอบตัวต้นแบบในสภาพแวดล้อมจริง	59
กล่าวสรุป.....	66
บทที่ 5 ข้อเสนอของโครงการ.....	67
กล่าวนำ.....	67
ปัญหาและแนวทางในการแก้ไขปัญหา.....	67
ข้อเสนอแนะ	68
แนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	69
กล่าวสรุป.....	69



สารบัญภาพ

ภาพบทที่ 1 บทนำ

ภาพที่ 2.1 สายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix2

ภาพบทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ภาพที่ 2.1 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป.....4

ภาพที่ 2.2 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป5

ภาพที่ 2.3 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป5

ภาพที่ 2.4 สายอากาศโมโนโพล ($\lambda/2$) ที่วางอยู่เหนือแผ่นตัวนำสมบูรณ์8

ภาพที่ 2.5 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ10

ภาพที่ 2.6 ตัวประกอบแถวลำดับและรูปการแผ่กระจายคลื่น.....12

ภาพที่ 2.7 สายอากาศสององค์ประกอบเดียวที่มีการส่งกำลังงาน P114

ภาพที่ 2.8 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P114

ภาพที่ 2.9 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P114

ภาพที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น16

ภาพที่ 2.11 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระยะห่าง (d) ของสายอากาศที่แตกต่างกัน17

ภาพที่ 2.12 วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix19

ภาพที่ 2.13 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา.....21

ภาพที่ 2.14 ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา.....21

ภาพที่ 2.15 ตัวไขว้สัญญาณ23

ภาพที่ 2.16 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (Phase Shifters 45 °)24

ภาพที่ 2.17 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ25

ภาพที่ 2.18 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน26

ภาพที่ 2.19 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน27

ภาพที่ 2.20 สายอากาศความถี่ 1800 MHz28

ภาพที่ 2.21 ตัววัดสัญญาณ29

ภาพบทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบ

ภาพที่ 3.1 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา.....30

ภาพที่ 3.2 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาที่ออกแบบ.....32

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ 3.3	คัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่ปรับค่าแล้ว	33
ภาพที่ 3.4	คัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่เสร็จสมบูรณ์	33
ภาพที่ 3.5	คัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่เสร็จสมบูรณ์	33
ภาพที่ 3.6	ตัวไขว้สัญญาณ	35
ภาพที่ 3.7	ตัวไขว้สัญญาณที่ออกแบบ	36
ภาพที่ 3.8	ตัวไขว้สัญญาณที่ทำการปรับค่าแล้ว	36
ภาพที่ 3.9	ตัวไขว้สัญญาณที่ทำการปรับค่าแล้ว	37
ภาพที่ 3.10	ตัวไขว้สัญญาณที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว	37
ภาพที่ 3.11	ตัวเลื่อนเฟส 45°	39
ภาพที่ 3.12	ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ	39
ภาพที่ 3.13	ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา	40
ภาพที่ 3.14	ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายที่ออกแบบ	40
ภาพที่ 3.15	ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาที่ได้ออกแบบไว้	40
ภาพที่ 3.16	ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาที่เสร็จสมบูรณ์	40
ภาพที่ 3.17	ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	42
ภาพที่ 3.18	ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบ	43
ภาพที่ 3.19	ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบเสร็จแล้ว	43
ภาพที่ 3.20	ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ได้ออกแบบไว้	44
ภาพที่ 3.21	ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูรณ์	44
ภาพที่ 3.22	วงจรถ่ายรูปลำคลื่นที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์	46
ภาพที่ 3.23	วงจรถ่ายรูปลำคลื่นที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์	46
ภาพที่ 3.24	วงจรถ่ายรูปลำคลื่นที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบไว้	49
ภาพที่ 3.25	วงจรถ่ายรูปลำคลื่นที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์	49
ภาพที่ 3.26	ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้น	52
ภาพบทที่ 4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ		
ภาพที่ 4.1	ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบรังผึ้งที่มีการใช้ความถี่ซ้ำเท่ากับ 7	60
ภาพที่ 4.2	การกำหนดตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบตัวต้นแบบ	60

สารบัญตาราง

ตารางบทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ 2.1 แสดงเฟสของสายอากาศ ทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix 19

ตารางบทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบ

ตารางที่ 3.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของของคัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศา 34

ตารางที่ 3.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของของตัวไขว้สัญญาณ 38

ตารางที่ 3.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา 41

ตารางที่ 3.4 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน 45

ตารางที่ 3.5 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรก่อรูปลำคลื่นที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์ 47

ตารางที่ 3.6 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากทฤษฎี 58

ตารางที่ 3.7 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากการวัดค่า 58

ตารางที่ 3.8 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรก่อรูปลำคลื่นที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์ 50

ตารางที่ 3.9 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากทฤษฎี 51

ตารางที่ 3.10 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากการทดลอง 51

ตารางบทที่ 4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

ตารางที่ 4.1 การวัด Pattern ของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 55

ตารางที่ 4.2 ค่าจากการวัดสัญญาณตามสถานที่ต่าง ๆ 62

ตารางที่ 4.2 ค่าจากการวัดสัญญาณตามสถานที่ต่าง ๆ (ต่อ) 63

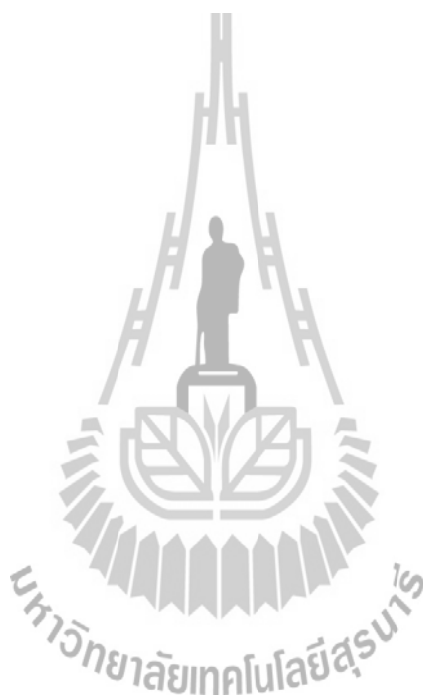
ตารางบทที่ 5 ข้อสรุปของโครงงาน

ตารางที่ 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข 67

สารบัญแผนภาพ

แผนภาพที่ 4 ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

แผนภาพที่ 1 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่1-10.....	64
แผนภาพที่ 2 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่11-20.....	64
แผนภาพที่ 3 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่21-30.....	65
แผนภาพที่ 4 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่31-40.....	65
แผนภาพที่ 5 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่41-50.....	66



บทที่ 1

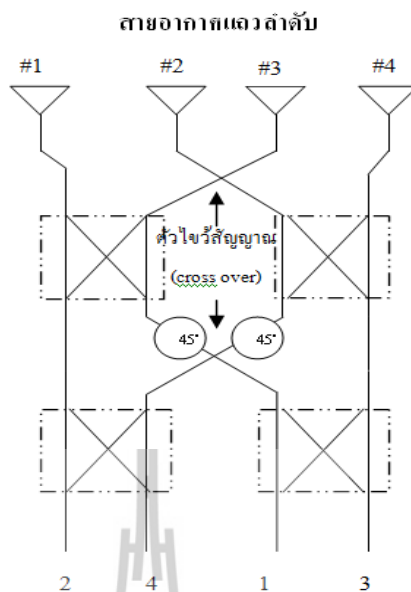
บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารไร้สายมักจะใช้สายอากาศที่มีแบบรูปการแผ่พลังงานในลักษณะรอบทิศทาง ส่งผลให้สูญเสียพลังงานไปในบริเวณที่ไม่มีผู้ใช้งาน และยังทำให้รับสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทิศทางอื่นได้อีกด้วย ดังนั้นจึงได้มีผู้พัฒนาระบบสายอากาศให้กับระบบการสื่อสารไร้สายโดยทำให้สายอากาศมีการแผ่พลังงานในลักษณะจำเพาะเจาะจงทิศทาง ซึ่งถูกเรียกว่า ระบบสายอากาศเก่ง (Smart Antenna Systems) ระบบสายอากาศเก่งจะประกอบด้วยสายอากาศแถวลำดับและโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น แบบ Butler Matrix ซึ่งประกอบด้วยตัวคัปเปอร์ 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 ดังที่แสดงในภาพที่ 1.1

แต่ระดับสัญญาณ พูคลื่นเล็กที่ได้จากการก่อรูปลำคลื่นดังกล่าวมีระดับที่สูง ส่งผลให้ไม่สามารถลดระดับสัญญาณแทรกสอดได้เท่าที่ควรและยังเป็นการลดอัตราขยายของระบบในทิศทางที่ต้องการอีกด้วย

ดังนั้นโครงงานชิ้นนี้จึงได้ สร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อ ลดระดับพูคลื่นเล็กของสายอากาศแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix



ภาพที่ 1.1 สายอากาศแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบสร้างอุปกรณ์ ต้นแบบเพื่อลดระดับพหุคลื่นเล็กเมื่อใช้โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix

1.3 ขอบเขตงาน

1. ศึกษาโปรแกรม Matlab เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบสายอากาศจำนวน 4 ต้นและ 8 ต้นว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร
2. ศึกษาโปรแกรม CST Microwave Studio 5 เพื่อใช้ในการออกแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นและตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน
3. ออกแบบอุปกรณ์จำลองทั้งหมดและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์
4. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบ
5. ทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบสร้างขึ้นเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาโปรแกรม Matlab และทำการเขียนโปรแกรมเพื่อเปรียบเทียบขนาดสัญญาณของสายอากาศ 4 ต้นและ 8 ต้น
2. ศึกษาโปรแกรม CST Microwave Studio 5
3. ออกแบบโครงข่ายท่อรูปลำคลื่นและตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน
4. สร้างอุปกรณ์ต้นแบบและทดสอบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์
5. สรุปผลการทดลอง เขียนรายงาน และนำเสนอโครงงาน



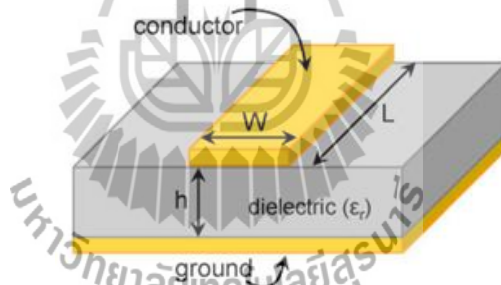
บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

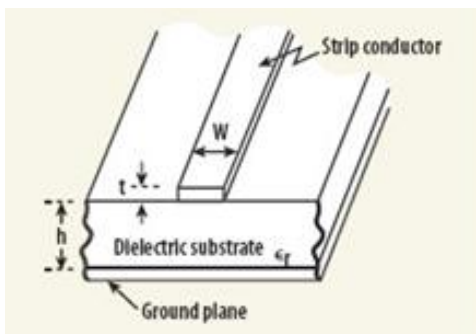
โครงการงานการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อลดระดับพดคลื่นเล็กสำหรับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix นี้ได้มีการประยุกต์ใช้สายอากาศแถวลำดับ (Array Antennas) ร่วมกับวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ซึ่งมีการใช้สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นทั้งหมดจำนวน 8 ต้น และนำมาเชื่อมต่อกับวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler 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

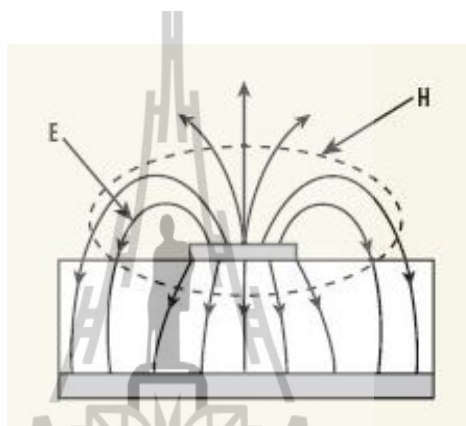


ภาพที่ 2.1 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สายส่งสัญญาณไมโครสตริปประกอบไปด้วย ตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่นและระนาบกราวด์ โดยมีไดอิเล็กทริก อยู่ตรงกลาง ดังภาพที่ 2.1 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป โดยค่าไดอิเล็กทริกนี้จะอยู่ตรงกลางระหว่าง ตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่นและระนาบกราวด์ ในการออกแบบสายส่งสัญญาณ ไมโครสตริปนี้จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น (W) ความสูงของฐานรองรับ (h) ความหนาของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น และค่าของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ (ϵ_r) เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 สายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป



ภาพที่ 2.3 การแผ่กระจายคลื่นของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปดังภาพที่ 2.2 ไม่ได้บรรจุอยู่ในชั้นของฐานรองรับ แต่การแผ่กระจายคลื่นจะแผ่ออกไปข้างนอกของสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริป ดังภาพที่ 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

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

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

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

$$W/d \geq 1$$

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

และที่

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

ผลที่ได้จากการคำนวณคือ ความกว้างของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น (W) ความสูงของฐานรองรับ (h) ความหนาของตัวนำไฟฟ้าแบบแผ่น สามารถนำค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไปใช้ในการออกแบบสายส่งสัญญาณแบบไมโครสตริปได้

2.3 ทฤษฎีสายอากาศ

2.3.1 ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพล

โมโนโพล (Monopole) เป็นสายอากาศเส้นลวดตรงที่มีต้นแบบมาจากสายอากาศไดโพล เพียงแต่นำมาใช้เพียงครึ่งหนึ่งของความยาวไดโพล และมีการป้อนสัญญาณเข้าที่กึ่งกลางของไดโพล โดยเทียบกับระนาบกราวด์ ดังนั้นความยาวของโมโนโพล จึงเท่ากับหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นที่ใช้งาน ($\lambda/4$) การแจกแจงของกระแสที่เกิดขึ้นบนสายอากาศโมโนโพล นี้จะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดป้อนสัญญาณและค่าจะลดลงเรื่อยๆจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์เมื่ออยู่ที่ปลายของโมโนโพล

การแจกแจงของสนามที่เกิดขึ้นในอากาศอิสระครึ่งบน (Upper Half-Space) จะมีลักษณะเหมือนกับที่เกิดขึ้นบนสายอากาศแบบไดโพลที่วางอยู่ในอากาศอิสระแบบเต็มหรือที่ไม่มีการเทียบกับแผ่นกราวด์

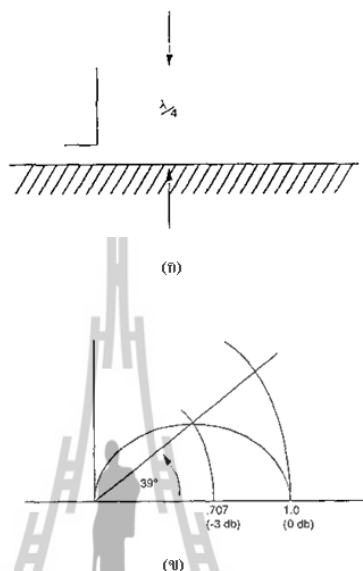
กระแสและประจุที่เกิดขึ้นบนสายอากาศโมโนโพลจะมีลักษณะเหมือนกันกับที่เกิดขึ้นบนแขนด้านบนของสายอากาศไดโพล แต่แรงดันที่เกิดขึ้นที่ขั้วของสายอากาศโมโนโพลจะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลเท่านั้น ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่อินพุตของสายอากาศชนิดนี้จึงมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศแบบไดโพลที่ใช้เปรียบเทียบนั่นคือ

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

ค่ากำลังงานรวมที่แผ่กระจายออกจากสายอากาศโมโนโพลจะมีขนาดเพียงครึ่งหนึ่งของสายอากาศไดโพลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ เนื่องจากมีการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะ บริเวณอากาศอิสระครึ่งบน ทำให้มุมตันลำคลื่น (Beam Solid Angle) ของสายอากาศโมโนโพลนี้มีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของไดโพลที่ใช้ในการเปรียบเทียบด้วยกัน ส่งผลให้มีค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงกว่าของ ไดโพล ถึงสองเท่า นั่นคือ

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

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



ภาพที่ 2.4 สายอากาศโมโนโพล ($\lambda/2$) ที่วางอยู่เหนือแผ่นตัวนำสมบูรณ์

- (ก) ลักษณะทางกายภาพ
- (ข) แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงาน

2.3.2 ทฤษฎีแวลวลำดับของสายอากาศ

แวลวลำดับของสายอากาศ หมายถึง การนำเอาสายอากาศหลายๆ ตัวมาจัดวางเรียงกัน โดยมีระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นที่แน่นอน โดยสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแวลวลำดับนั้นจะเรียกว่า องค์ประกอบ (Element) ซึ่งการนำเอาองค์ประกอบมาจัดวางเรียงเป็นแวลวลำดับนั้นจะให้สมรรถนะคล้ายคลึงกับสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยวที่มีขนาดใหญ่มาก แต่การจัดเรียงแบบแวลวลำดับนั้นจะสามารถจัดปัญหาในเรื่องของกลไกต่างๆ อันเนื่องมาจากขนาดที่ใหญ่เกินไปของสายอากาศได้

ข้อดีของการนำสายอากาศมาจัดเรียงเป็นแวลวลำดับนั้น ทำได้โดยการใช้สายอากาศที่มีลักษณะที่เหมือนกันหลายๆ องค์ประกอบแทนการใช้สายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว จะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ นอกจากนี้สายอากาศแบบแวลวลำดับนั้น ยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูดและเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้แก่แต่ละองค์ประกอบได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่

เราต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทได้ การเปลี่ยนเฟสอย่างต่อเนื่องของสายอากาศเมื่อเทียบกับเวลาจะทำให้สายอากาศสามารถกวาดลำคลื่นออกไปในทิศทางต่าง ๆ ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเรียกแถวลำดับแบบนี้ว่า แถวลำดับแบบปรับเฟส (Phased Array)

แถวลำดับแบบปรับเฟส ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลาย ๆ ประเภท โดยเฉพาะสายอากาศสายอากาศที่ใช้ในงานระบบเรดาร์ การปรับเฟสของแถวลำดับนั้นจะใช้วิธีการปรับเฟสโดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์อีกระดับหนึ่ง เพื่อปรับเฟสให้มีผลทำให้ทิศทางแผ่กระจายกำลังงานสามารถกวาดไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ได้อย่างรวดเร็ว เราสามารถแบ่งจัดเรียงองค์ประกอบของแถวลำดับตามรูปร่างได้หลาย ๆ ประเภท เช่น แถวลำดับแบบเชิงเส้น (Linear Array) จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตร เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมียาระหว่างองค์ประกอบห่างกันหรือไม่เท่ากันก็ได้ ประเภทต่อไปก็คือ แถวลำดับเชิงระนาบ (Planar Array) จะเป็นการจัดเรียงองค์ประกอบในลักษณะสองมิติบนแผ่นระนาบ ซึ่งการจัดเรียงแถวลำดับในลักษณะนี้อาจจัดเรียงในลักษณะของสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือรูปวงกลมก็ได้ โดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ที่มีอยู่ เมื่อพื้นที่ที่ใช้ในการจัดเรียงแถวลำดับมีลักษณะไม่เป็นราบ แถวลำดับแบบนี้จะมีชื่อเรียกว่า แถวลำดับแบบเอนด์ไฟร์ (End-Fire Array)

สายอากาศแบบแถวลำดับ สามารถออกแบบได้โดยอาศัยคุณลักษณะการรวมของสนามที่เกิดขึ้นจากสายอากาศแต่ละตัวที่นำมาทำเป็นแถวลำดับ ซึ่งสายอากาศเหล่านี้จะประกอบด้วยสายอากาศแบบพื้นฐานที่มีลักษณะเหมือนกันมาจัดวางเรียงกัน โดยมีตำแหน่งที่แน่นอนและมีการแผ่กระจายกำลังงานออกมาในแต่ละตัว ลักษณะของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับจะมีลักษณะเฉพาะตัวซึ่งขึ้นอยู่กับแบบการจัดเรียงแถวลำดับนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor)

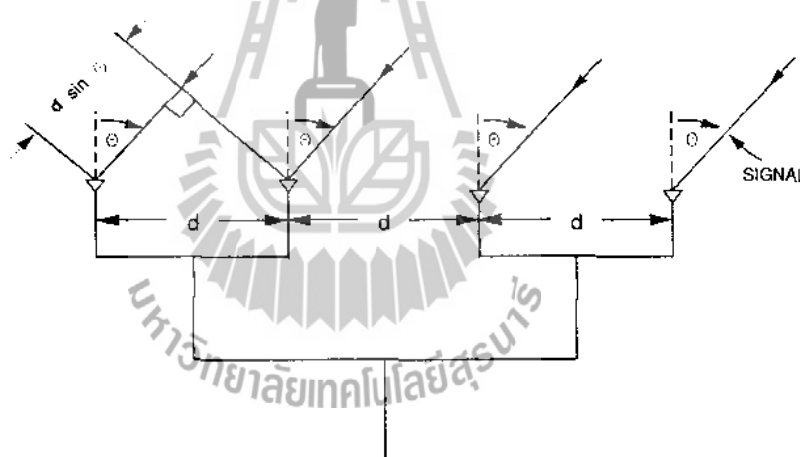
2.3.2.1 ตัวประกอบแถวลำดับ

แบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวประกอบที่แตกต่างกัน ได้แก่ ชนิดขององค์ประกอบที่ใช้และการวางตัวขององค์ประกอบในแถวลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นเฉพาะขององค์ประกอบ ดังนั้นจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานเฉพาะของแต่ละองค์ประกอบเท่านั้น ตัวประกอบอื่น ๆ จะเป็นลักษณะการจัดเรียงตัวของแถวลำดับคือ จำนวนองค์ประกอบของแถวลำดับ ตำแหน่งขององค์ประกอบ รวมทั้งขนาดแอมพลิจูดและเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบนั้น ๆ

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ปัญหาในทางทฤษฎีของแถวลำดับที่กำหนดในเบื้องต้น เราจะไม่พิจารณาผลของแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละ

องค์ประกอบ เนื่องจากต้องการพิจารณาเฉพาะผลที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของแถวลำดับเท่านั้น ซึ่งสามารถทำได้โดยการพิจารณาให้แต่ละองค์ประกอบที่นำมาทำเป็นแถวลำดับเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic Radiator) ที่เป็นมีลักษณะจุด ดังนั้นแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแถวลำดับที่มีองค์ประกอบเป็นแหล่งกำเนิดชนิดจุดแบบไอโซทรอปิกจะเรียกว่า ตัวประกอบแถวลำดับของแถวลำดับภายใต้การวิเคราะห์ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตัวประกอบแถวลำดับซึ่งมีผลกระทบต่อแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานสามารถทำได้เพียงแค่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือลักษณะของแถวลำดับเท่านั้น

เพื่อความเข้าใจในการคำนวณตัวประกอบของแถวลำดับให้มากขึ้นนั้นเราจะพิจารณาในกรณีของแถวลำดับเชิงเส้นที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากันทั้งหมดเท่ากับ d ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งสัญญาณ ที่รับได้จะเป็นสนามระยะไกลและชี้ในทิศทาง บรอดไซด์ (broadside; $\theta = 0$) และระยะห่างระหว่างองค์ประกอบไปยังแหล่งกำเนิดถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากัน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจะเสริมกันเมื่อมีเฟสเหมือนกัน



ภาพที่ 2.5 สายอากาศแถวลำดับเชิงเส้นที่ประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ

ในภาพที่ 2.5 เมื่อ θ มีค่ามากกว่าศูนย์ระยะห่างจะไม่เท่ากัน ซึ่งองค์ประกอบขวามือจะมีระยะมากกว่าองค์ประกอบซ้ายมือที่อยู่ติดกันเป็นระยะ $d \sin \theta$ ซึ่งความแตกต่างของระยะห่างดังกล่าวจะมีผลให้เกิดความแตกต่างของเฟสของกระแสในแต่ละองค์ประกอบนั้น โดยความต่างเฟส ψ จะมีค่าเท่ากัน

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

ตัวประกอบแกลลาคับ AF สำหรับแกลลาคับแบบเชิงเส้นที่ประกอบไปด้วย N องค์ประกอบ สามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

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

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

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

เมื่อ $\psi = 0$ สมการ (2.12) จะมีค่าสูงสุดเป็น $A_0 N$ โดยการหารสมการ (2.12) ด้วยค่าสูงสุดดังกล่าว ค่าตัวประกอบแกลลาคับที่ถูกลอแมลไลซ์ $f(\psi)$ ของตัวประกอบแกลลาคับที่ประกอบด้วย N องค์ประกอบที่มีระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากันและมีการป้อนแหล่งกำเนิดที่มีเฟสเดียวกัน โดยมีจุดศูนย์กลางของแกลลาคับอยู่ที่จุดกำเนิดจะมีค่าดังสมการ

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

กราฟของแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ถูกลอแมลไลซ์แล้วได้แสดงใน ภาพที่ 2.6 (ก) ตัวประกอบแกลลาคับสำหรับ 4 องค์ประกอบ ซึ่งกราฟดังกล่าวจะแสดงการตอบสนองของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของความต่างเฟส ψ ระหว่างองค์ประกอบที่อยู่ติดกันของแกลลาคับ ซึ่งผลการตอบสนองจะมีค่าสูงสุดเมื่อความแตกต่างเฟสเป็นศูนย์ทำให้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นที่ได้ชี้ไปในทิศทางบรอดไซด์

ด้วยวิธีเชิงกราฟ จะได้แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศดังแสดงใน ภาพที่ 2.6 (ข) ซึ่งเป็นแบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบเชิงขั้ว แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบนี้สามารถ

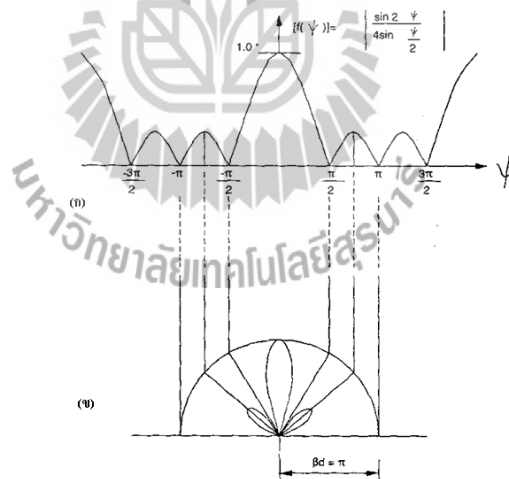
สร้างได้โดยการวาดครึ่งวงกลมที่มี βd ดังแสดงถัดลงมาจากรูปการแผ่กระจายคลื่นแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก

ตัวอย่าง ถ้าระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นคาร์ซีมิจะเป็น

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

เมื่อวาดครึ่งวงกลมเสร็จจะต้องวาดเส้นตรงในแนวตั้งจากจุดบนเส้นตัวประกอบแถวลำดับ ไปยังเส้นรอบวงของครึ่งวงกลมจากจุดตัดของเส้นแนวตั้ง และที่เส้นรอบวงนี้จะลากเส้นอีกเส้นหนึ่งที่อยู่จากจุดกำเนิดของวงกลม ไปยังเส้นรอบวง การลากเส้นสุดท้ายซึ่งเป็นระยะทางจากจุดกำเนิดไปยังจุดบนเส้นรอบวงนี้ จะเรียกว่า แอมพลิจูดของแถวลำดับ

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



ภาพที่ 2.6 ตัวประกอบแถวลำดับและรูปการแผ่กระจายคลื่น

(ก) ตัวประกอบแถวลำดับสำหรับ 4 องค์ประกอบ

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

เมื่อหาค่าตัวประกอบแถวลำดับได้แล้ว ต่อไปจะพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานเฉพาะของ แต่ละองค์ประกอบ จากนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งหมดของแถวลำดับจะสามารถหาได้

โดยใช้หลักการคูณแบบรูปการแผ่พลังงาน (Pattern Multiplication) ซึ่งเป็นการคูณกันระหว่างแบบรูปการแผ่พลังงานของแต่ละองค์ประกอบกับตัวประกอบแถวลำดับ

ตัวอย่าง ถ้าเราพิจารณาสายอากาศแบบร่องบนท่อนำคลื่นซึ่งประกอบด้วยร่องจำนวน 6 ร่อง ซึ่งมีระยะห่างระหว่างร่องเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ และมีการแผ่พลังงานที่มีขนาดและเฟสเท่ากัน ดังนั้นแบบรูปการแผ่พลังงานทั้งหมดจะเท่ากับ

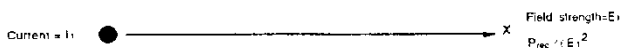
แบบรูปการแผ่พลังงาน ของ สายอากาศแบบร่องบนท่อนำคลื่นที่ประกอบด้วยร่องจำนวน 6 ร่อง	=	แบบรูปการแผ่พลังงาน ของแต่ละองค์ประกอบ	×	ตัวประกอบแถวลำดับสำหรับ 6 องค์ประกอบที่วางห่างกัน $\lambda/2$ และมีการแผ่กระจายกำลังงานที่มีขนาดและเฟสเท่ากัน
---	---	--	---	---

ตัวประกอบแถวลำดับในกรณีนี้จะเป็น แบบรูปการแผ่พลังงาน ของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก 6 ตัว ซึ่งวางห่างกัน $\frac{\lambda}{2}$ และแผ่พลังงานคลื่นด้วยขนาดและเฟสเท่ากัน

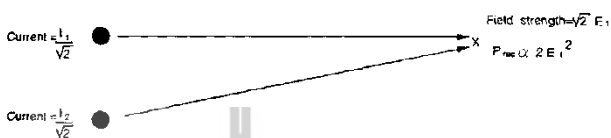
2.3.2.2 ค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางรวมทั้งค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับ มักจะมีค่ามากกว่ากรณีของสายอากาศองค์ประกอบเดี่ยว ซึ่งคุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่างมากทั้งในการส่งและรับสัญญาณ ในการส่งสัญญาณนั้น สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่ดีจะสามารถรวบรวมกำลังงานให้อยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่นๆ ได้ ซึ่งให้ผลเสมือนว่าเกิดการเพิ่มกำลังงานให้กับจุดนั้น ๆ ของเครื่องส่ง ส่วนทางด้านรับ สายอากาศจะทำหน้าที่เสมือนว่าเลือกรับคลื่นที่เข้ามาในทิศทางที่เจาะจง โดยจะไม่เลือกรับสัญญาณที่เราไม่ต้องการรวมทั้งการแทรกสอดจากในทิศทางอื่น ๆ

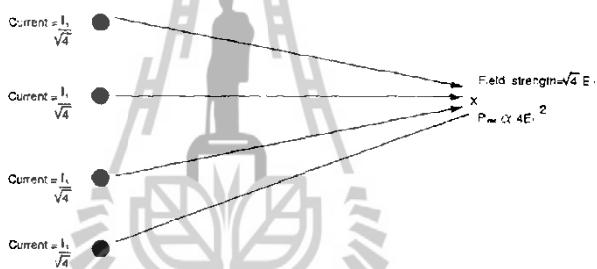
เพื่อความเข้าใจเกี่ยวกับการเพิ่มค่าอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ ในเบื้องต้นจะพิจารณาองค์ประกอบเดี่ยวของสายอากาศไอโซทรอปิกซึ่งมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงาน P_1 ดังแสดงในภาพที่ 2.7 โดยกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศนี้มีค่า I_1 ณ จุดที่ไกลออกไป กำหนดให้เป็นจุด X ค่ากระแสนี้จะสร้างความเข้มของสนาม (ศักดาไฟฟ้า) เป็น E_1 ซึ่งค่านี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบของสายอากาศ



ภาพที่ 2.7 สายอากาศองค์ประกอบเดียวที่มีการส่งกำลังงาน P1



ภาพที่ 2.8 สายอากาศซึ่งมีสององค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P1



ภาพที่ 2.9 สายอากาศซึ่งมีสี่องค์ประกอบที่มีการส่งกำลังงาน P1

ค่ากำลังงานที่รับได้โดยสายอากาศที่จุด X จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของความเข้มสนามทั้งหมด E_T ที่จุดนั้น กล่าวคือ

$$P_{rec} \propto E_T^2 = E_1^2 \tag{2.15}$$

ต่อไปจะแทนองค์ประกอบเดี่ยวด้วยสายอากาศชนิดแฉกลำดับซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบไอโซทรอปิกที่มีลักษณะเหมือนกัน 2 องค์ประกอบ และมีการแผ่กระจายกำลังงานด้วยกำลังงานที่เท่ากันทั้งหมด คือ P_1 ดังแสดงในภาพ ที่ 2.8 ค่ากำลังงานที่แผ่กระจายออกมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเท่ากับ $P_1/2$ แต่เนื่องจากค่าของกระแส จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของกำลังงาน ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในแต่ละองค์ประกอบจึงเท่ากับ $I_1 / \sqrt{2}$

ความเข้มของสนามที่จุด X ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาจากแต่ละองค์ประกอบจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสในองค์ประกอบนั้น ดังนั้นความเข้มของสนามที่จุด X จากแต่ละองค์ประกอบ จะเท่ากับ $E_1/\sqrt{2}$ และถ้าคลื่นจากทั้งสององค์ประกอบมาถึงที่จุด 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 ดังแสดงในภาพที่ 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

เงื่อนไขทั้งสองจะเป็นจริงได้ถ้าเฟสของกระแสแต่ละองค์ประกอบเท่ากัน และจุดสังเกต X ซึ่งไปในทิศทางที่ตั้งฉากโดยตรงกับสายอากาศแถวลำดับและให้สมมุติว่าที่สนามระยะไกลซึ่งมีระยะห่างจากจุด X ของทุกองค์ประกอบมีค่าเท่ากัน ส่วนเงื่อนไขที่สามจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นสำคัญ

สำหรับสายอากาศแถวลำดับในทางปฏิบัติ เงื่อนไขเหล่านี้จะเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น แม้ว่าการสูญเสียซึ่งเกิดจากการป้อนสัญญาณและจากตัวประกอบอื่นๆจะมีส่วนในการ

จำกัดการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราขยาย แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเหล่านี้จะดีขึ้นเมื่อจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปพบว่าค่าอัตราขยายของแถวลำดับจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า (เพิ่มขึ้นประมาณ 3 dB) ทุก ๆ ครั้งที่จำนวนองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเช่นกัน โดยที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบถูกกำหนดไว้ให้คงที่

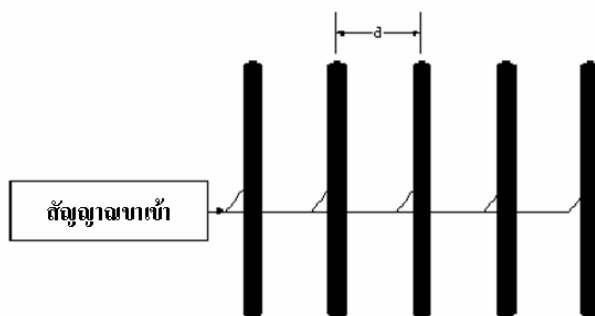
2.3.2.3 แถวลำดับแบบเชิงเส้น

แถวลำดับแบบเชิงเส้น จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบจำนวนมากที่จัดเรียงกันอย่างสมมาตร เมื่อเทียบกับจุดศูนย์กลางของแถวลำดับในแนวเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะระหว่างองค์ประกอบห่างเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้

ในกรณีที่องค์ประกอบห่างเท่ากันทุกองค์ประกอบจะมีการป้อนแอมพลิจูดที่เท่ากันแต่เฟสที่ป้อนให้มันจะแตกต่างกันออกไปดังแสดงใน ภาพที่ 2.10 เรียกว่า แถวลำดับแบบสม่ำเสมอ (Uniform Array) ซึ่งจะมีองค์ประกอบแถวลำดับที่เหมือนกัน กระแสที่ป้อนให้กับทุกองค์ประกอบเท่ากันและจะมีความต่างเฟสเป็นลำดับกันไปอย่างเท่าๆกัน โดยจะมีองค์ประกอบตัวแรกวางที่จุดกำเนิด ซึ่งการหาจุดกำเนิดในการวางองค์ประกอบนั้นจะหาได้จากสมการที่ (2.18)

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

เมื่อ $\psi = kd \cos \theta + \beta$



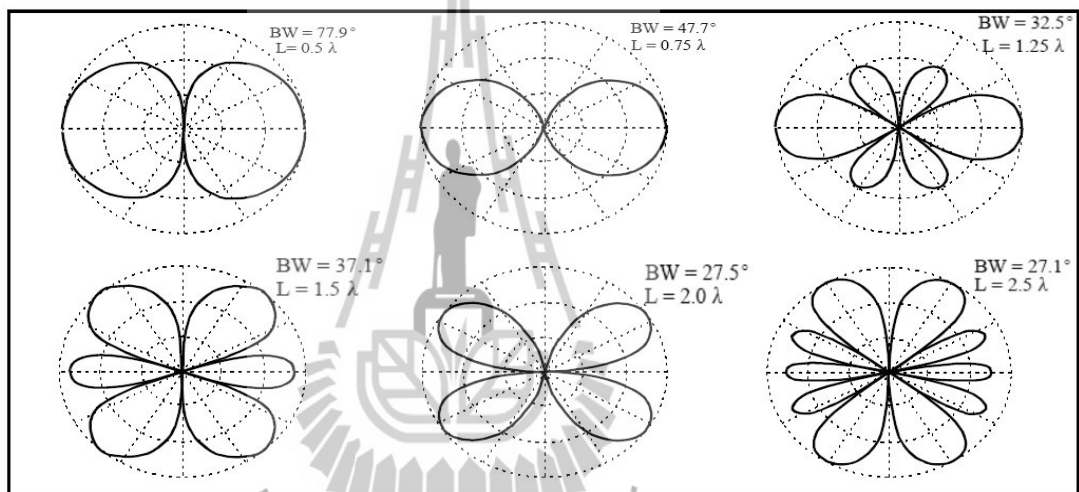
ภาพที่ 2.10 แสดงตัวอย่างของสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น

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

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

เมื่อ $v = f\lambda$;

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



ภาพที่ 2.11 รูปแบบการแผ่กระจายคลื่นในระยะห่าง (d) ของสายอากาศที่แตกต่างกัน

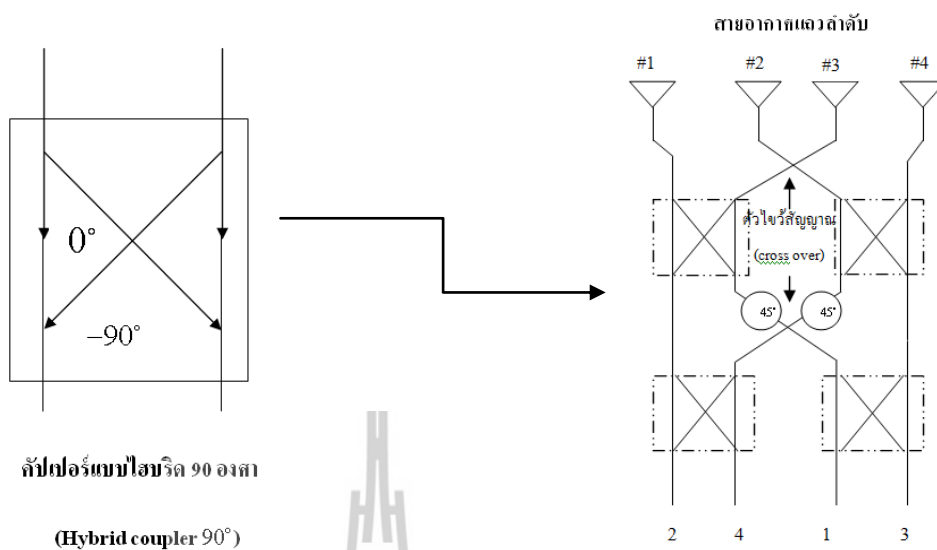
2.4 ระบบสายอากาศเก่ง

ระบบสายอากาศเก่ง (Smart Antenna Systems) คือ ระบบสายอากาศที่มีความสามารถก่อรูปลำคลื่นของพหุหลักไปในทิศทางที่เฉพาะเจาะจงได้ ในขณะที่หันจุดศูนย์ (Nulls) และพหุคลื่นเล็กไปในทิศทางของสัญญาณแทรกสอด (Interference Signal) ได้ ซึ่งทำให้อัตราขยายของระบบเพิ่มสูงขึ้น ระบบสายอากาศเก่งนั้นเป็นระบบสายอากาศแถวลำดับที่ทำงานร่วมกับเทคโนโลยี การประมวลผลสัญญาณโดยใช้กระบวนการค้นหาทิศทางของสัญญาณขาเข้า และนำค่าสัญญาณที่ได้ไปทำการคำนวณค่าแวกเตอร์ของวงจรถูกก่อรูปลำคลื่น เพื่อปรับลำคลื่นของสายอากาศไปยังเป้าหมายที่ต้องการ โดยทั่วไประบบสายอากาศเก่งนั้นจะทำการปรับลำคลื่นเพื่อชี้ทิศทางไปในทิศทางที่สนใจ สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้ และสามารถช่วยลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดระหว่างช่องได้ นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาการประวิงเวลา (Delay) ของสัญญาณ ซึ่งเกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมที่สัญญาณที่มาถึงทางด้านรับมากกว่าหนึ่งเส้นทางเนื่องจากการสะท้อนของสัญญาณกับวัตถุต่าง ๆ แม้จะเป็นสัญญาณเดียวกันมาจากแหล่งเดียวกันแต่มาถึงปลายทางไม่พร้อมกัน ดังนั้นสัญญาณจึงถูกประวิงไปมากน้อยไม่เท่ากันตามเส้นทางที่มีระยะสะท้อนต่างกันสามารถลดปัญหาที่ว่านี้ได้ด้วยการใช้งานสายอากาศเก่งที่มีความสามารถในการปรับลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ ในขณะที่เดียวกันก็สามารถกำหนดไม่ให้รับสัญญาณที่ไม่ต้องการได้เช่นกัน สายอากาศเก่งสามารถแบ่งประเภทได้ ดังต่อไปนี้

2.5 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

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

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



ภาพที่ 2.12 วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

จากภาพที่ 2.12 วงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

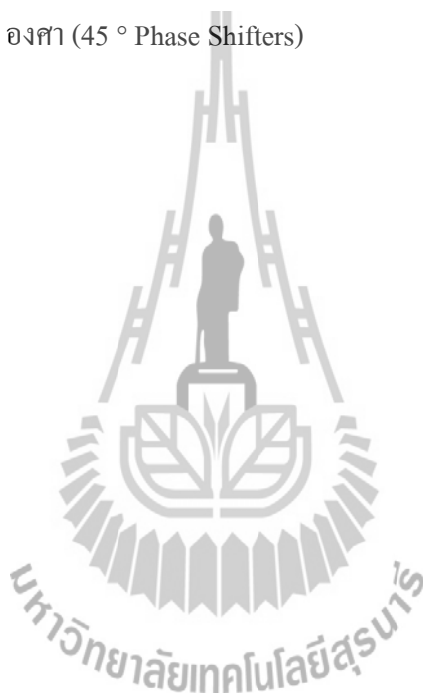
แสดงถึง Block Diagram ขนาด 4x4 ของ Butler Matrix ซึ่งประกอบไปด้วยตัวไขว้สัญญาณจำนวน 2 ตัว สายอากาศจำนวน 4 ต้น และตัวกับเฟอ์แบบไฮบริด 90 องศา จำนวน 4 ตัวการนำตัวเลื่อนเฟส 45 องศาวางอยู่ระหว่างพอร์ต 1 กับพอร์ต 3 และอยู่ระหว่างพอร์ต 2 กับพอร์ต 4 เพื่อทำให้เกิดการก่อรูปลำคลื่นเลื่อนเฟสไป 45 องศา และเมื่อรวมวงจรแล้วจะทำให้ได้ค่าดังตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 แสดงเฟสของสายอากาศ ทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix

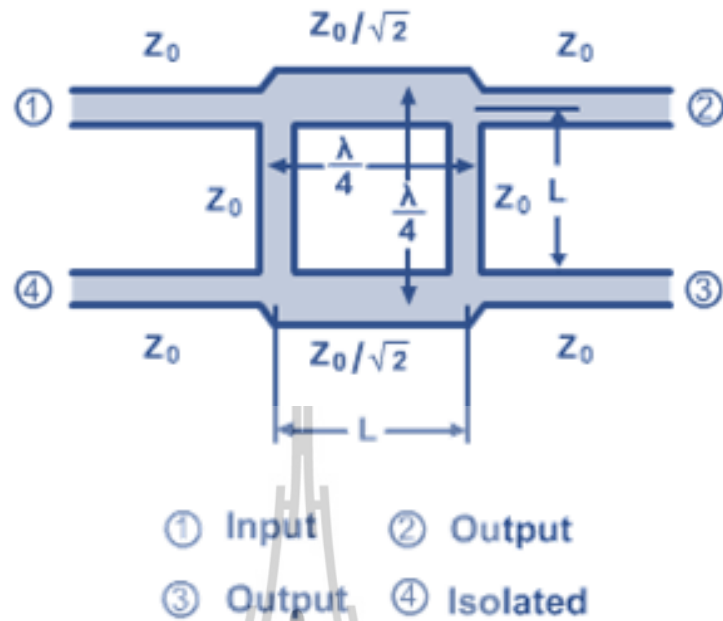
Port No.	Element#1	Element#2	Element#3	Element#4	Beam Direction	Inter-Element Phasing
Port1	-45°	-180°	45°	-90°	138.6°	-135°
Port2	0°	-45°	-90°	-135°	104.5°	-45°
Port3	-135°	-90°	-45°	0°	75.5°	45°
Port4	-90°	45°	-180°	-45°	41.4°	135°

จากตารางที่ 2.1 แสดงถึงเฟสของสายอากาศแต่ละต้น ทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มา จาก Butler Matrix จากรูปที่ 2.13 ตัวอย่าง สายอากาศต้นที่ 1 จะมีค่าเฟส -45° จากพอร์ตที่ 1 ค่าเฟส 0° จากพอร์ตที่ 2 ค่าเฟส -135° จากพอร์ตที่ 3 และค่าเฟส -90° จากพอร์ตที่ 4 เป็นต้น จากวงจรรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix นี้ สามารถแบ่งลักษณะการออกแบบของวงจร ได้ดังนี้

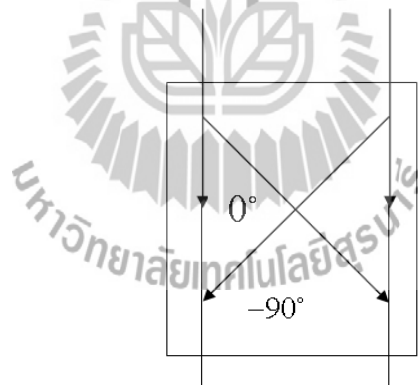
- | | |
|--|-------------|
| 1. ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา (90° Hybrid Coupler) | จำนวน 4 ตัว |
| 2. ตัวไขว้สัญญาณ (Crossover) | จำนวน 1 ตัว |
| 3. ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (45° Phase Shifters) | จำนวน 2 ตัว |



2.5.1 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา



ภาพที่ 2.13 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา



คัปเปอ์แบบไฮบริด 90 องศา

(Hybrid coupler 90°)

ภาพที่ 2.14 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

จากภาพที่ 2.14 ตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันเมื่อเราใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานนั้นจะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมกันระหว่าง พอร์ต P2 และ พอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้ออกมาจากพอร์ต P2 และพอร์ต P3 นั้นจะมีค่าพลังงานลดลง

เป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาทางพอร์ต 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 จะได้อ้างอิง

$P_1 = 0$ ความหมาย คือ พอร์ตเข้าของพลังงาน

$P_2 = -\frac{j}{\sqrt{2}}$ ความหมายคือ พลังงานลดลงครึ่งหนึ่งจากพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P_1

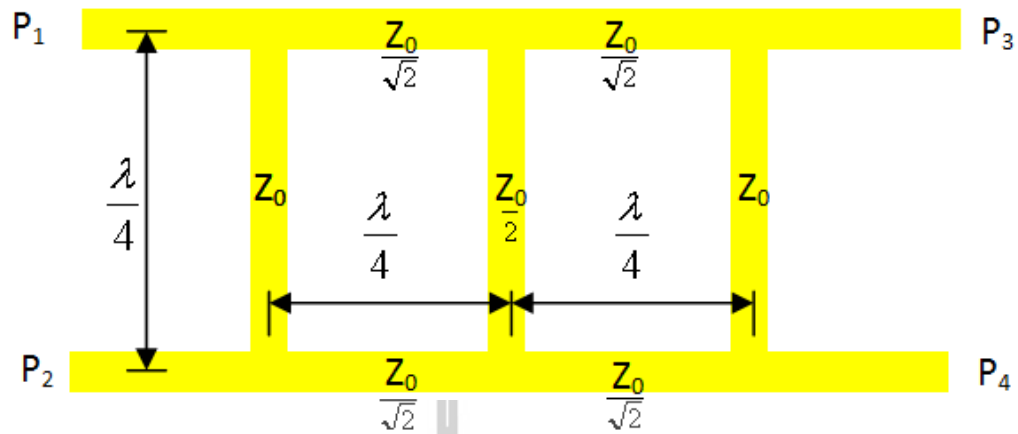
และมีเฟสล่าหลังอยู่ -90 องศาจากพอร์ต P_1 ถึง พอร์ต P_2

$P_3 = -\frac{1}{\sqrt{2}}$ 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



ภาพที่ 2.15 ตัวไขว้สัญญาณ

ภาพที่ 2.15 เป็นตัวไขว้สัญญาณ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_0 แต่ละตำแหน่งจะห่างกันเป็นระยะทางลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้กัน คือ เมื่อมีพลังงานเข้ามาที่พอร์ต P_1 พลังงานนี้จะไหลออกไปที่พอร์ต P_3 และในทำนองเดียวกัน เมื่อพลังงานเข้ามาที่พอร์ต P_2 พลังงานนี้จะไหลออกไปที่พอร์ต P_4 และตัวไขว้สัญญาณนี้มีลักษณะการเชื่อมต่อโดยที่มีสัญญาณมารวมกันโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานและความล่าช้าระหว่างกัน

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

จากวงจรและสมการค่า $[S]$ เมตริกซ์ จะได้ค่าดังนี้

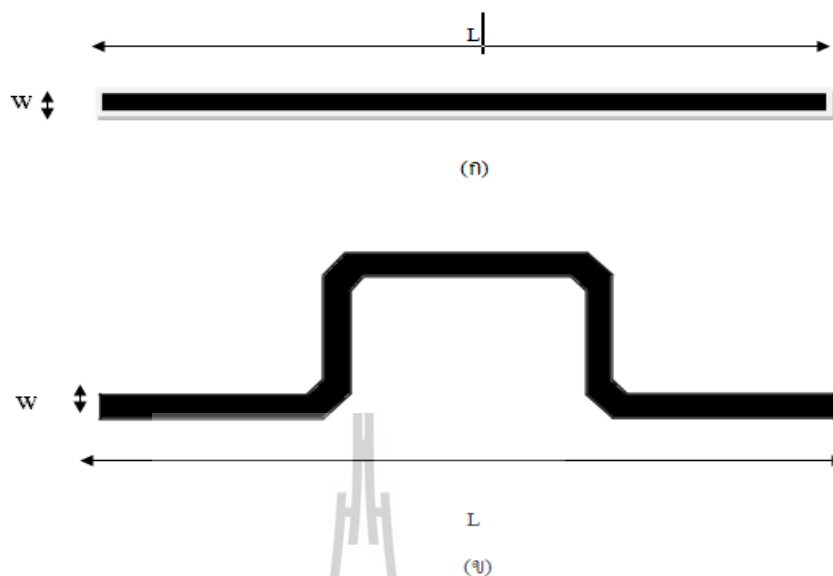
$P_1 = 0$ ความหมายคือ พอร์ตเข้าของพลังงาน

$P_2 = -j$ ความหมายคือ พลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P_4 และมีเฟสล่าช้าอยู่ 0 องศา จากพอร์ต P_4 ถึง พอร์ต P_2

$P_3 = -j$ ความหมายคือ พลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P_1 และมีเฟสล่าช้าอยู่ 0 องศา จากพอร์ต P_1 ถึง พอร์ต P_3

$P_4 = 0$ ความหมายคือ พอร์ตเข้าของพลังงาน

2.5.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา



ภาพที่ 2. 16 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา (Phase Shifters 45 °)

(ก) ตัวเลื่อนเฟสแบบเส้นตรง

(ข) ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

จากวงจรระยะห่าง 45 องศา สร้างมาจากการออกแบบสายส่ง โดยมี W คือ ความกว้างของตัวเลื่อนเฟสในสายส่งแบบไมโครสตริป และมีความยาวเท่ากับ L ซึ่งได้จากการคำนวณในสมการดังต่อไปนี้

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda} L \tag{2.23}$$

$$\frac{w}{d} = \frac{8e^{-A}}{e^{2A} - 2} \tag{2.24}$$

โดยที่

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{2.25}$$

เมื่อ

L คือ ความยาว

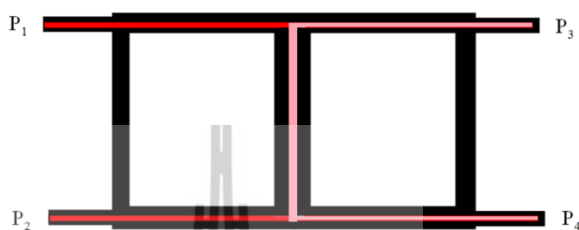
θ คือ มุม

λ คือ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางของสายส่ง

λ_0 คือ ค่าความยาวคลื่นในตัวกลางของอากาศ

W คือ ความกว้างของตัวเลื่อนเฟสในสายส่งแบบไมโครสตริป

ดังนั้นความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ถ้าความยาวมากเกินไปไม่เข้ากับโครงข่ายอื่น จึงมีการคดงอขึ้น โดยการคดงอนั้นทำได้โดยการนำค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ภายในโครงข่ายลบออกจากค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อได้แล้วค่าที่เหลือได้นำค่ามางอขึ้นตามความสวยงามโดยที่ค่าความกว้างจะต้องคงที่ดังภาพที่ 2.16 เพื่อให้เข้ากับโครงข่ายได้



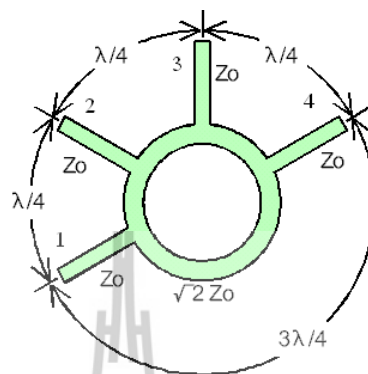
ภาพที่ 2.17 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ

- (ก) โดยสีแดงเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P_1 กับพอร์ต P_2
- (ข) โดยสีชมพูเป็นความยาวระหว่างพอร์ต P_3 กับพอร์ต P_4



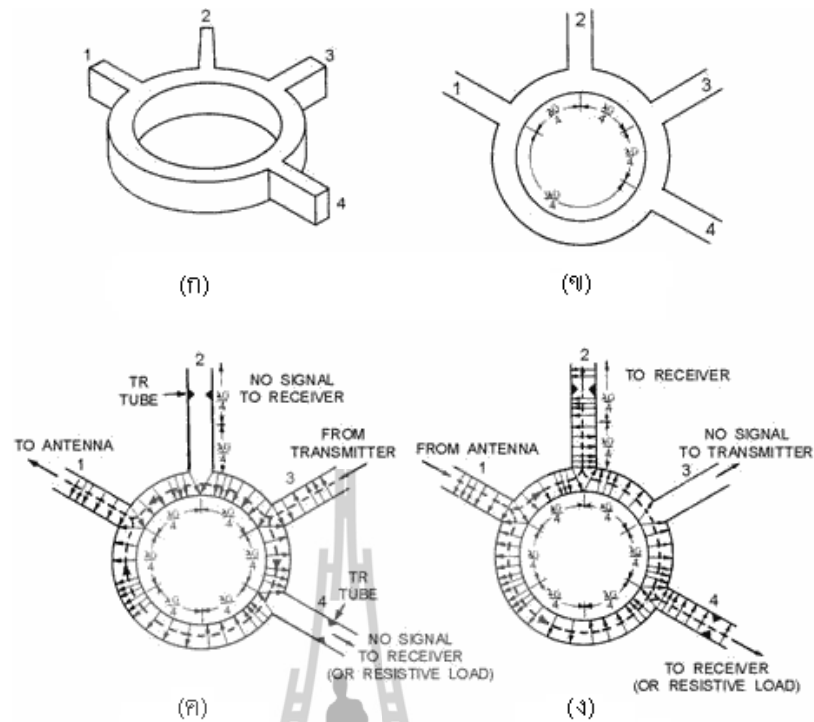
2.6 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน (Hybrid Ring Coupler) บางครั้งอาจเรียกว่า ไฮบริดจ์แบบรางแข่งหนู (Rat race Hybrid) เป็นวงจรที่มีพอร์ต 4 พอร์ต ใช้ทั้งแยกสัญญาณเท่ากันหรือรวมกันสองสัญญาณ



ภาพที่ 2.18 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

เมื่อมีการส่งคลื่นเข้าที่พอร์ตที่ 1 คลื่นจะแยกออกไปทั้งสองด้านเท่าๆกันและมีเฟสตรงกันข้ามหรือมีเฟสต่างกัน 180 องศา ทำให้คลื่นมีการส่งผ่านออกไปที่พอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 4 ได้ เพราะคลื่นที่ปรากฏที่อินพุทของพอร์ตทั้งสองจะมีเฟสตรงกันข้าม ดังภาพที่ 2.19 (ง) สำหรับอินพุทของพอร์ตที่ 3 ดังภาพที่ 2.19 (ค) นั้นคลื่นทั้งสองจะมีเฟสตรงกัน เพราะความยาวของเส้นทางในการเดินทางต่างกันอยู่ 90 องศา จึงไม่มีการคัปปลิง ระหว่างพอร์ตที่ 1 และพอร์ตที่ 3 ในทำนองเดียวกันก็จะไม่มีการคัปปลิงระหว่างพอร์ตที่ 2 และพอร์ตที่ 4



ภาพที่ 2.19 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

- (ก) ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน
 (ข) ด้านบนของตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน
 (ค) การเดินทางของคลื่น โดยมีพอร์ตที่ 3 เป็น Input
 (ง) การเดินทางของคลื่น โดยมีพอร์ตที่ 1 เป็น Input

2.7 สายอากาศ



ภาพที่ 2.20 สายอากาศความถี่ 1800 MHz

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สายอากาศแบบรอบทิศทาง ตามที่แสดงในภาพที่ 2.21 และมีคุณสมบัติอื่น ๆ ดังนี้

1. ช่วงความถี่ที่ใช้งาน : 1800-1900MHz
2. อัตราขยาย : 2 dBi
3. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน (Voltage Standing Wave Ratio : V.S.W.R)น้อยกว่า 2
4. องศาการแพร่คลื่นแนวนอน (Width-H Plane) : 360 องศา
5. องศาการแพร่คลื่นแนวตั้ง (Width-E Plane) : 70 องศา
6. การโพลาไรซ์ : แนวตั้ง (เชิงเส้น)
7. ค่าความต้านทานสัญญาณเข้า : 50 โอห์ม
8. หัวต่อ : เอสเอ็มเอตัวผู้ (Sub Miniature version A : SMA male)
9. ช่วงอุณหภูมิใช้งาน : -20 °C ถึง +70 °C
10. ช่วงอุณหภูมิสะสม : -30 °C ถึง +85 °C

2.8 ตัววัดสัญญาณ



ภาพที่ 2.21 ตัววัดสัญญาณ

คุณสมบัติของชุดทดลอง

1. ใช้ GSM Module ของ Sagem รุ่น HiLo/NC สนับสนุนเครือข่าย GSM ความถี่ 850, 900, 1800, 1900 MHz
2. มีถาดใส่ SIM การ์ดบนบอร์ด
3. ใช้แหล่งจ่ายไฟ DC 9~12Volt
4. สั่งงานผ่านพอร์ต RS232 ความเร็ว 600~115,200 Baud โดยใช้คำสั่ง AT command
5. มีช่องต่อสัญญาณเสียง สามารถต่อหูฟังและไมโครโฟนได้โดยตรง
6. ต่อสายอากาศ 50 โอห์ม ผ่านคอนเน็คเตอร์แบบ SMA
7. ขนาดของบอร์ด 78 x 66 mm

2.9 กล่าวสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีสายส่งแบบไมโครสตริป ทฤษฎีของสายอากาศ ระบบสายอากาศแก่ง และโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix โดยประกอบด้วยวงจรก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ต่อกับสายอากาศแถวลำดับ และได้กล่าวถึงตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน ซึ่งก่อนที่จะทำการออกแบบและประกอบอุปกรณ์ต้นแบบ จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีพื้นฐานในเรื่องดังกล่าวให้มีความเข้าใจเป็นอย่างดี เพราะอุปกรณ์แต่ละชนิดนั้นจะต้องนำมาประกอบเป็นส่วนเดียวกัน เพื่อให้บรรลุผลตามวัตถุประสงค์ของโครงการ

บทที่ 3

การออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบ

3.1 กล่าวนำ

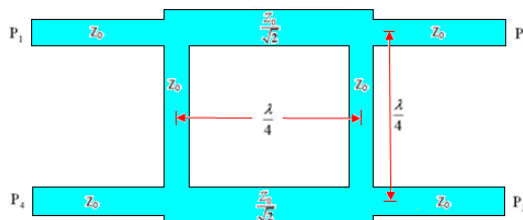
การออกแบบโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นในแต่ละส่วนแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix และส่วนของตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน โดยใช้โปรแกรม CST ในการออกแบบแต่ละส่วนและนำไปทดสอบวัดค่า เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้

3.2 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น

สำหรับวงจรก่อรูปลำคลื่นนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักอยู่ 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°

ดัง ภาพที่ 3.1 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาจะทำหน้าที่ดำเนินการขึ้นพื้นฐานของการแยกเส้นทางของการเชื่อมต่อ ถ้าทุกพอร์ตมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากันและเมื่อเราใส่พลังงานเข้าไปที่พอร์ต P1 พลังงานก็จะถูกแบ่งแยกอย่างเท่าเทียมกันระหว่างพอร์ต P2 และพอร์ต P3 ซึ่งพลังงานที่ได้จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้ามาในพอร์ต P1 พลังงานที่ได้จากพอร์ต P2 และพอร์ต P3 จะล่าหลังกันอยู่ 90 องศาและจะไม่มีพลังงานออกไปที่พอร์ต P4 (พอร์ตโดดเดี่ยว)



ภาพที่ 3.1 คัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา

ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้จากสมการดังต่อไปนี้

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

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

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

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

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

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

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

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

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 $Z_0 = 50\Omega$

$$A = 1.584$$

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

นำค่า A ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ 3.2 ได้ค่า W เท่ากับ

- ที่ $Z_0/\sqrt{2} = 35.355\Omega$

$$A = 1.169$$

$$W/d = 3.0799 > 2$$

ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขตามสมการที่ 3.2 จึงทำการหาค่า B

$$B = 1.169$$

$$W/d = 7.645 \quad \text{เป็นไปตามเงื่อนไขที่ว่า}$$

$$W/d > 2$$

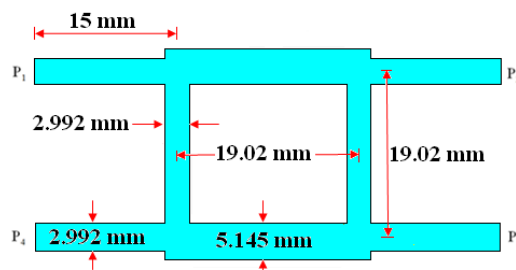
$$W = 5.145\text{mm}$$

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

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

ดังนั้น $\lambda/4 = 19.02\text{mm}$

ผลที่ได้จากการออกแบบ

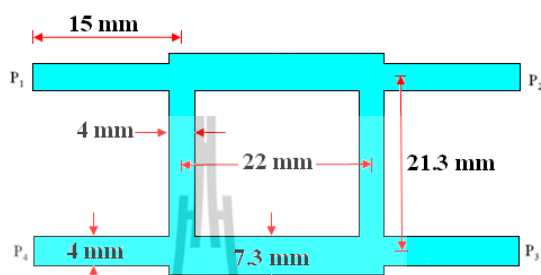


ภาพที่ 3.2 คัปเลอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่ออกแบบ

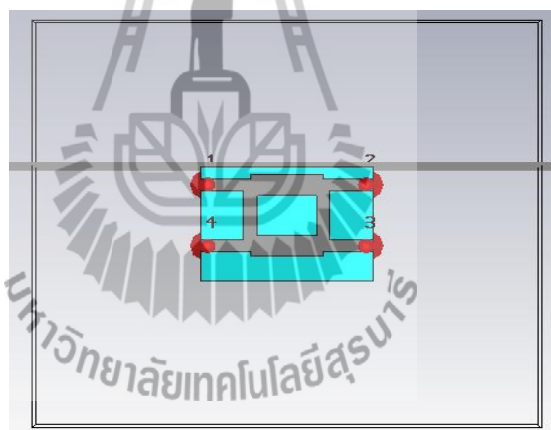
เมื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆจึงนำค่าที่คำนวณได้ดังภาพที่
ในโปรแกรม

3.2 มาออกแบบ

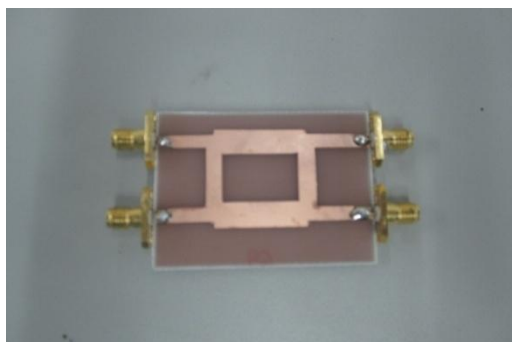
เมื่อนำวงจร คัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่ออกแบบ นั้นไปทำการจำลองผลใน
คอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม CST แล้วไม่ได้ค่าตามที่ต้องการจึง ทำการปรับขนาดและความยาว
ของเส้น ซึ่งจะให้ผลดังที่แสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 คัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่ปรับค่าแล้ว



ภาพที่ 3.4 คัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่เสร็จสมบูรณ์



ภาพที่ 3.5 คัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาที่เสร็จสมบูรณ์

เมื่อสร้าง คัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาแล้วดังรูปที่ 3.5 แล้วทำวัดค่าโดยใช้เครื่อง Network Analyzer เพื่อดูพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของคัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศาว่าเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังที่แสดงไว้ดังนี้

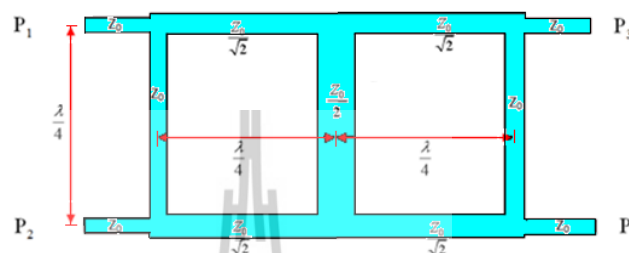
ตาราง 3.1 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของของคัปเปอร์แบบไฮบริด 90 องศา

การสูญเสียย้อนกลับ (dB)			
S11	-21.81		
S22	-21.81		
S33	-21.73		
S44	-21.73		
Output			
	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} ที่ได้นั้น มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1, 2, 3 และ 4 ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.2.2 ตัวไขว้สัญญาณ

ภาพที่ 3.6 ตัวไขว้สัญญาณ เป็น วงจรเชื่อมต่อโดยที่มีสัญญาณมารวมกันโดยไม่มี การสูญเสียพลังงานและความล่าช้าระหว่างกัน ลักษณะการไหลของพลังงานจะเป็นแบบไขว้ คือ เมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P1 พลังงานนั้นก็จะมีออกพอร์ต P3 และเมื่อพลังงานเข้าพอร์ต P4 พลังงานนั้นก็จะมีออกพอร์ต P2



รูปที่ 3.6 ตัวไขว้สัญญาณ

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าตัวไขว้สัญญาณจะมีรูปร่างคล้ายคลึงกับตัวคัปเปอ์ 2 ตัว มาต่อรวมกัน ดังนั้นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวไขว้สัญญาณจะมีลักษณะคล้ายกับการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวคัปเปอ์แบบไฮบริดจ์ 90 องศาที่คำนวณได้ดังต่อไปนี้

- ที่ $Z_0 = 50\Omega$

$A = 1.584$ นำค่า

$W = 2.992\text{mm}$.

A แทนในสมการที่ 3.2 ได้ค่า W เท่ากับ

- 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 $W = 5.145\text{mm} \times 2$

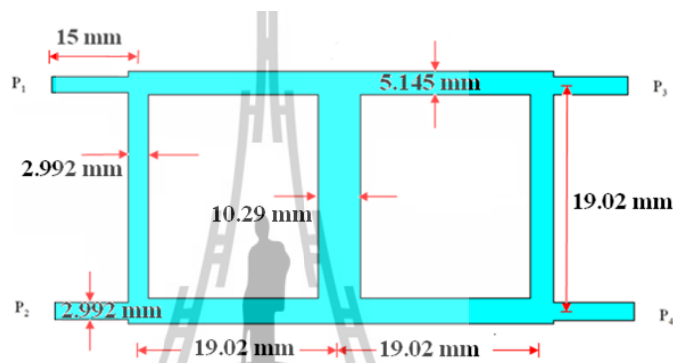
$$= 10.29\text{mm}$$

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

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

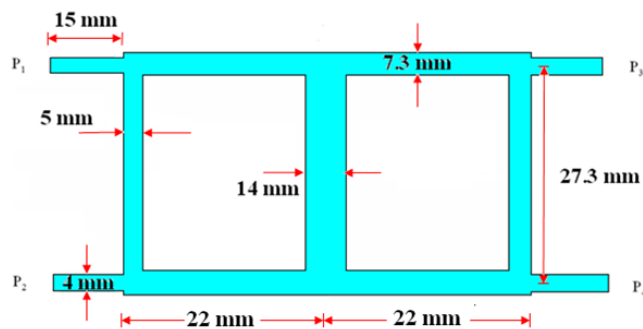
ดังนั้น $\lambda/4 = 19.02\text{mm.}$

ผลที่ได้จากการออกแบบ

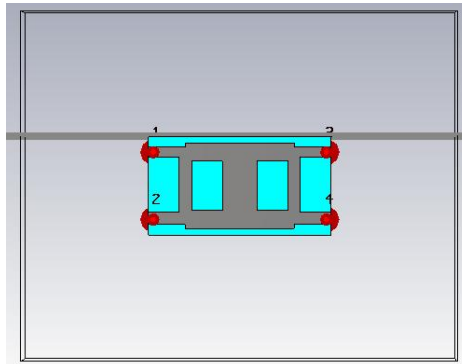


ภาพที่ 3.7 ตัวไขว้สัญญาณที่ออกแบบ

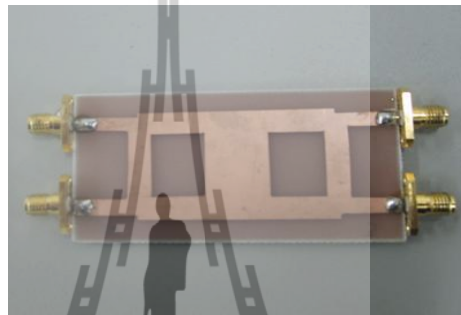
นำตัวไขว้สัญญาณ ที่ออกแบบไว้ดัง ภาพ ที่ 3.7 ไปทำการจำลองผลในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม CST แล้วไม่ได้ค่าตามที่ต้องการจึงทำการปรับขนาดและความยาวของเส้น ซึ่งจะให้ผลดังที่แสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 ตัวไขว้สัญญาณที่ทำการปรับค่าแล้ว



ภาพที่ 3.9 ตัวไขว้สัญญาณที่ปรับค่าแล้ว



ภาพที่ 3.10 ตัวไขว้สัญญาณที่เสร็จสมบูรณ์

เมื่อสร้าง ตัวไขว้สัญญาณดังรูปที่ 3.10 แล้ว ทำการทำวัดค่าโดยใช้เครื่อง Network Analyzer เพื่อดูพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวไขว้สัญญาณว่าเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังที่แสดงดังนี้

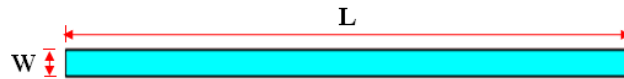
ตาราง 3.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของของตัวไขว้สัญญาณ

การสูญเสียย้อนกลับ(dB)		
S11	-23.57	
S22	-23.24	
S33	-23.57	
S44	-23.24	
Output		
	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	

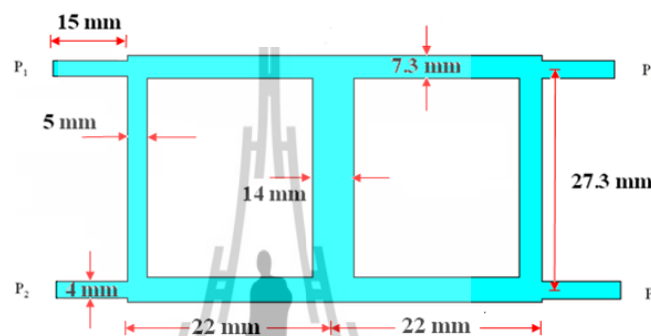
จากตารางที่ 3.2 เมื่อสังเกตที่ค่า s_{11} , s_{22} , s_{33} และ s_{44} ที่นั่น มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1, 2, 3 และ 4 ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.2.3 ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

การคำนวณตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ดังภาพที่ 3.18 คำนวณได้จากความยาวของตัวไขว้สัญญาณ ซึ่งจะช่วยให้ทราบค่าค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45° ภายในโครงข่าย



ภาพที่ 3.11 ตัวเลื่อนเฟส 45°



ภาพที่ 3.12 ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ

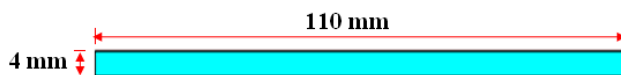
ดังภาพที่ 3.12 จะใช้ความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 ในการสร้างตัวเลื่อนเฟสด้านล่างและใช้ความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับพอร์ต P2 ในการสร้างตัวเลื่อนเฟสด้านบน เพื่อให้มีการเพิ่มเฟส ความยาวของเส้นทางการเดินทางของพลังงานภายในตัวไขว้สัญญาณ ความยาวระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 มีค่าเท่ากับ

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

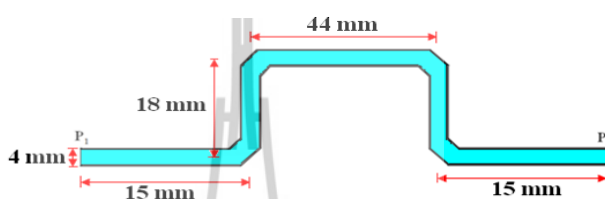
ดังนั้นค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายระหว่างพอร์ต P1 กับพอร์ต P3 มีความยาวเท่ากับ 74 mm และความยาวระหว่างพอร์ต P4 กับ พอร์ต P2 ค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา มีค่าเท่ากับค่าของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายระหว่าง พอร์ต P1 กับ พอร์ต P3

ดังนั้นความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่าย มีค่าเท่ากับ 74 mm แต่เนื่องจากค่าความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 มีความยาวมากเกินไปดังภาพที่ 3.20 ไม่เข้ากับโครงข่ายอื่นจึงทำการคดงอขึ้น โดยการคดงอนั้นทำโดยการนำค่าความยาวของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ลบออกจากค่าความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อได้แล้ว ค่าที่เหลือ

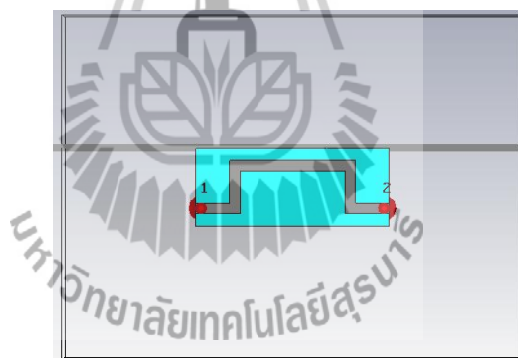
ให้นำค่ามางอขึ้นตามความสวยงาม โดยที่ค่าความกว้างจะต้องคงที่ดัง ภาพที่ 3.143 เพื่อให้เข้ากับโครงข่ายได้ เมื่อทำการออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วจะได้ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายดังภาพที่ 3.14



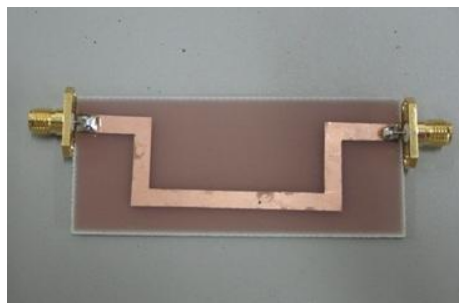
ภาพที่ 3.13 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา



ภาพที่ 3.14 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาภายในโครงข่ายที่ออกแบบ



ภาพที่ 3.15 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาที่ได้ออกแบบไว้



ภาพที่ 3.16 ความยาวที่ตัวเลื่อนเฟส 45 องศาที่เสร็จสมบูรณ์

เมื่อสร้าง ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา ได้ดังภาพที่ 3.16 แล้ว ทำการทำวัดค่าโดยใช้เครื่อง Network Analyzer เพื่อดูพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวเลื่อนเฟส 45 องศาว่าเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังที่แสดงดังนี้

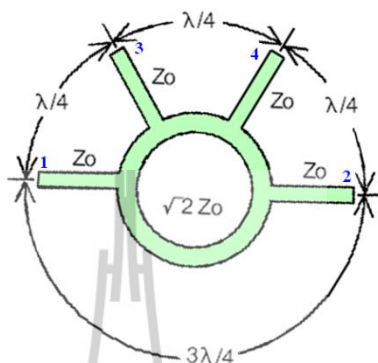
ตาราง 3.3 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของตัวเลื่อนเฟส 45 องศา

การสูญเสียย้อนกลับ			
S11	-19.79		
S22	-19.79		
Output			
	แอมพิจูด (dB)	เฟส (Degree)	
S21	-0.09255	-60.83	
S12	-0.09255	-60.83	

จากตารางที่ 3.3 เมื่อสังเกตที่ค่า S_{11} , S_{22} , S_{33} และ S_{44} ที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎีนั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1 และ 2 ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.3 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนดังภาพที่ 3.17 เมื่อมีพลังงานเข้าที่พอร์ตที่ 1 พลังงานจะแยกออกไปทั้งสองด้านเท่าๆกันและมีเฟสตรงกันข้าม ทำให้พลังมีการส่งผ่านออกไปที่พอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 2 โดยมีเฟสต่างกัน 180 องศา ส่วนพอร์ตที่ 4 จะไม่มีพลังงานออก



ภาพที่ 3.17 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากสมการข้างต้นจะได้ค่าดังต่อไปนี้

- ที่ $Z_0 = 50\Omega$

$A = 1.585$

$B = 5.406$ นาค่า B ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ 3.2 ได้

$W/d = 2.799$ เป็นไปตามเงื่อนไข $W/d > 2$ ตามสมการที่ 3.2 จะได้

$W = 4.66 \text{ mm}$

- ที่ $Z_n \sqrt{2} = 70.71\Omega$

$A = 1.585$ นาค่า A ที่ได้ไปแทนลงในสมการที่ 3.2 ได้

$W/d = 1.79$ เป็นไปตามเงื่อนไข $W/d < 2$ ตามสมการที่ 3.2 ได้

$W = 2.989 \text{ mm}$

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

$\lambda = 76.073 \text{ mm}$

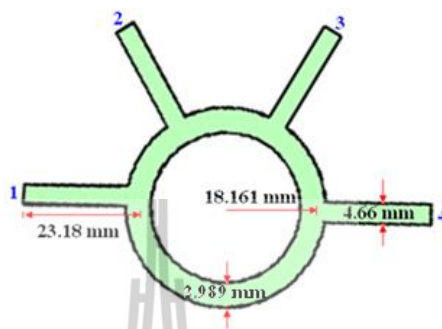
$\lambda/4 = 19.02 \text{ mm}$

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

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

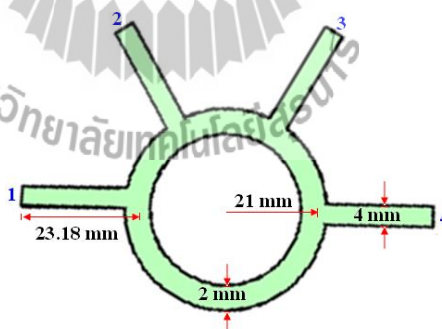
$$\text{จะได้ } r = 18.161 \text{ mm}$$

ผลการออกแบบ

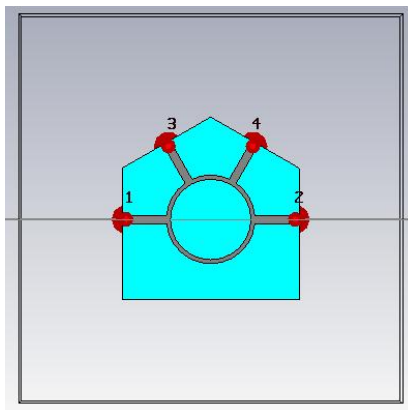


ภาพที่ 3.18 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบ

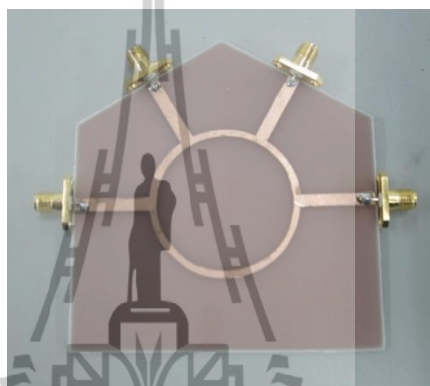
นำ ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบไว้ดังภาพที่ 3.18 นั้น ไปทำการจำลองผลในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม CST แล้วไม่ได้ค่าตามที่ต้องการจึงทำการปรับขนาดและความยาวของเส้น ซึ่งจะให้ผลดังที่แสดงในภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ออกแบบเสร็จแล้ว



ภาพที่ 3.20 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่ได้ออกแบบไว้



ภาพที่ 3.21 ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูรณ์

เมื่อสร้างตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนดังที่ได้ในภาพที่ 3.21 แล้วทำการทำวัดค่าโดยใช้เครื่อง Network Analyzer เพื่อดูพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนว่าเหมาะสมในการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยได้ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

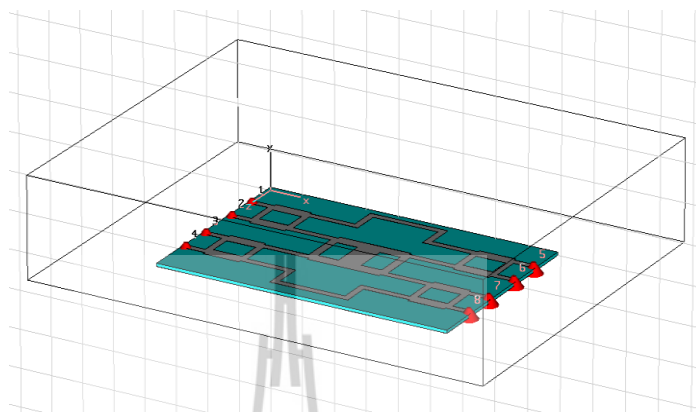
ตาราง 3.4 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของตัวคัปเปอร์ไฮบริคส์แบบวงแหวน

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

จากตารางที่ 3.4 เมื่อสังเกตที่ค่า S_{11} , S_{22} , S_{33} และ S_{44} ที่ได้ นั้น มีค่าต่ำกว่า -10 dB ในทางทฤษฎี นั้นถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ต 1, 2, 3 และ 4 ดังนั้นค่าที่ได้จากการทดสอบนั้นถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

3.4 วงจรก่อรูปลาคี่นที่เสร็จสมบูรณ์

3.4.1 วงจรก่อรูปลาคี่นที่ไม่ได้ต่อกับตัวค้ปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูรณ์



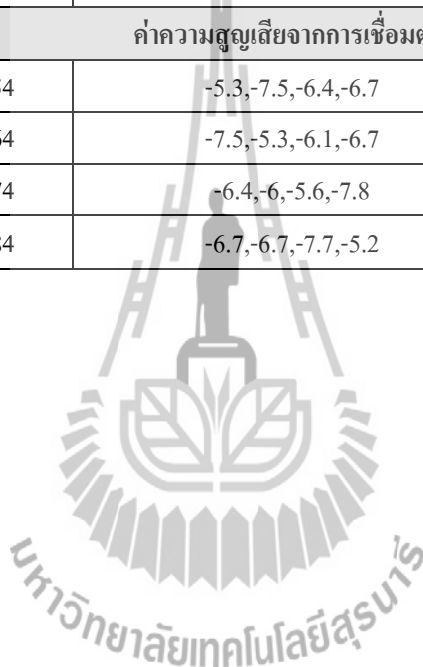
ภาพที่ 3.22 วงจรก่อรูปลาคี่นที่ไม่ได้ต่อกับตัวค้ปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์



ภาพที่ 3.23 วงจรก่อรูปลาคี่นที่ไม่ได้ต่อกับตัวค้ปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์

ตาราง 3.5 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่างๆของวงจรรูปล้าคลื่นที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนเสร็จสมบูรณ์

พารามิเตอร์	จากการออกแบบ(dB)	จากการวัดค่า(dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ		
S11 , S22 , S33 , S44	-29.5,-15.1,-15,-28.9	-13 , -16.2 , -10.2 , -15.1
S55 ,S66, S77 , S88	-29.5,-15.1,-15,-29.9	- 11.2 , -12.5 , -11.6 , -12
ค่าความสูญเสียจากการแยกโคตเดี่ยว		
S12 , S13 , S14	-16,-21.3,-21.6	-14.1 , -13.2 , -14.5
S56 , S57 , S58	-16.3,-21.2,-21.5	-16.3 , -15.2 , -14.4
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ		
S51 , S52 , S53 , S54	-5.3,-7.5,-6.4,-6.7	-7 , -9.6 , -7.4 , -7.2
S61 , S62 , S63 , S64	-7.5,-5.3,-6.1,-6.7	-8.6 , -6.7 , -7 , -7.8
S71 , S72 , S73 , S74	-6.4,-6,-5.6,-7.8	-7.5 , -8.5 , -6.7 , -8.7
S81 , S82 , S83 , S84	-6.7,-6.7,-7.7,-5.2	-6.9 , -8.1 , -9.8 , -7.7



ตาราง 3.6 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากทฤษฎี

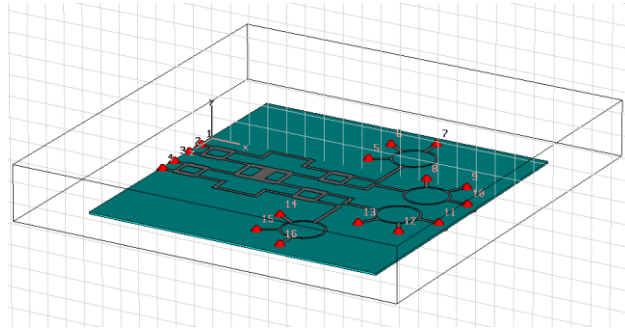
Port No.	Element #1	Element #2	Element #3	Element #4	ทิศทางของเฟส	ความต่างเฟส
#5	-45°	-90°	-135°	-180°	104.5°	-45°
#6	-135°	0	-225°	-90°	41.4°	135°
#7	-90°	-225°	0	-135°	138.6°	-135°
#8	-180°	-135°	-90°	-45°	75.5°	45°

ตาราง 3.7 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากการวัดค่า

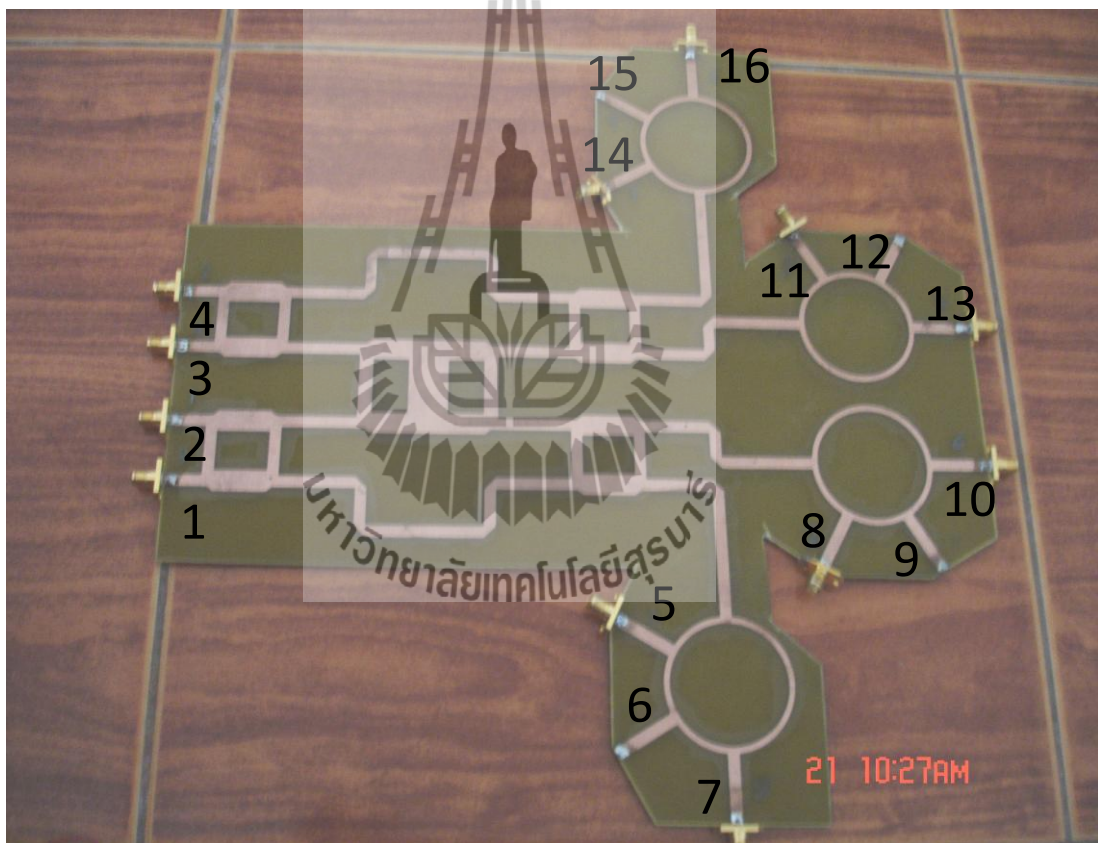
Port No.	Element #1	Element #2	Element #3	Element #4	ทิศทางของเฟส	ความต่างเฟส
#5	90°	48°	7°	-37°	103.5°	-42°
#6	0°	138°	-90°	46°	41.4°	135°
#7	47°	-85°	137°	1°	138.6°	-135°
#8	-36°	6°	47°	89°	76.5°	42°

จากการรวมอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่ออกแบบไว้แล้ว ได้ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม CST และทดสอบโดยวัดค่าจริง เมื่อสังเกตที่ค่า s_{11} , s_{22} , s_{33} , s_{44} , s_{55} , s_{66} , s_{77} และ s_{88} ค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้และเฟสที่วัดค่าจริงตรงตามทฤษฎี

3.4.2 วงจรก่อรูปลาคี่นที่ต่อกับตัวค้ปเปอร์โอบริค้จ้แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูนรณ้



ภาพที่ 3.24 วงจรก่อรูปลาคี่นที่ต่อกับตัวค้ปเปอร์โอบริค้จ้แบบวงแหวนที่ออกแบบไว้



ภาพที่ 3.25 วงจรก่อรูปลาคี่นที่ต่อกับตัวค้ปเปอร์โอบริค้จ้แบบวงแหวนที่เสร็จสมบูนรณ้

ตาราง 3.8 สรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงจรก่อนรูปลำคลื่นที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนสี่จุดสมบูรณ์

พารามิเตอร์	จากการออกแบบ(dB)	จากการวัดค่า(dB)
ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ		
S11 , S22 , S33 , S44	-19.3,-17,-17,-19.3	-13 , -12 , -10 , -13
S55 , S77 , S88	-13,-15.1,-15.7	-10.5 , -11.1 , -13.3
S10 10 , S11 11 , S13 13	-12.5,-12.5,-10.9	-12.3 , -10.8 , -11.9
S14 14 , S16 16	-13.2,-12.7	-10.7 , -12.7
S66 , S99 , S12 12 , S15 15	-0.5,-0.6,-0.9,-1	-0.7 , -0.8 , -1.1 , -1.1
ค่าความสูญเสียจากไอโซเลชันพอร์ต		
S16 , S19 , S1 12 , S1 15	-34,-37.9,-38.7,-33.6	-26 , -43 , -31 , -21
ค่าความสูญเสียจากการเชื่อมต่อ		
S51 , S52 , S53 , S54	-8.3 , - 6.7 , -7.4 , -5.8	-10.1,-10,-8.7,-9.2
S71 , S72 , S73 , S74	-9.4 , -5.1 , -5 , -5.6	-10.4,-10.4,-9,-10.7
S81 , S82 , S83 ,S84	-7.1 , -8.8 , -6.6 , -7	-9.6,-9.7,-10.1,-11
S10 1 , S10 2 , S10 3 , S10 4	-7.1 , -6 , -6.7 , -7.4	-9,-10.2,-10.3,-11.2
S11 1 , S11 2 , S11 3 , S11 4	-6.4 , -8.1 , -6 , -6.6	-11,-10.4,-10.2,-9.9
S13 1 , S13 2 , S13 3 , S13 4	-6.7 , -7.2 , -6.1 , -6.5	-11,-9.9,-9.9,-9.5
S14 1 , S14 2 , S14 3 , S14 4	-5.9 , -5.4 , -8.1 , -8.7	-9.7,-8.7,-10.1,-10.1
S16 1 , S16 2 , S16 3 , S16 4	-6.8,-7.3,-9.4,-7.6	-9.8,-10.4,-10.2,-10.5

ตาราง 3.9 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากทฤษฎี

Port No.	Element #1 (5)	Element #2 (11)	Element #3 (8)	Element #4 (14)	Element #5 (7)	Element #6 (13)	Element #7 (10)	Element #8 (16)	ทิศทางของเฟส	ความต่างเฟส
Port 1	-45	-90	-135	-180	-225	-270	-315	-360	104.5°	-45
Port 2	-135	0	-225	-90	45	180	315	90	41.4°	135
Port 3	-90	-225	0	-135	-270	-45	-180	-315	138.6°	-135
Port 4	-180	-135	-90	-45	0	45	90	135	75.5°	45

ตาราง 3.10 แสดงทิศทางของลำคลื่นและเฟสที่มาจาก Butler Matrix ที่ได้จากการทดลอง

Port No.	Element #1 (5)	Element #2 (11)	Element #3 (8)	Element #4 (14)	Element #5 (7)	Element #6 (13)	Element #7 (10)	Element #8 (16)	ทิศทางของเฟส	ความต่างเฟส
Port 1	22	-23	-65	-111	-157	158	115	67	104.5°	-45
Port 2	-69	68	-158	-24	113	-113	22	156	41.4°	135
Port 3	-23	-160	67	-70	153	22	-116	110	138.6°	-135
Port 4	-112	-65	-24	22	68	114	157	-158	75.5°	44.9

จากการรวมอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่ออกแบบไว้นั้น ได้ทำการทดสอบโดยใช้โปรแกรม CST และทดสอบโดยวัดค่าจริง 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} ซึ่งค่าที่ได้นั้นมีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้และเฟสที่วัดค่าจริงตรงตามทฤษฎี ซึ่งแสดงว่าไม่มีสัญญาณไหลย้อนกลับออกมาที่พอร์ตนั้น

3.4.3 สายอากาศ

โครงการ การสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อลดขนาดพู่คลื่นเล็ก นี้ได้เลือกใช้สายอากาศชนิด โมโนโพล (Monopole Antenna) ที่มีอัตราขยาย 5 dBi อยู่ในช่วงความถี่ 1.8 GHz และเป็นสายอากาศที่มีการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทางวงรีขตอกันแบบแถวลำดับจำนวน 8 ต้น ซึ่งมีการวางเรียงกันดังภาพที่ 3.26 ซึ่งระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นที่นำมาวางเรียงตัวกันสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (3.9)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.10)$$

โดยที่ d หมายถึง ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้น
 v หมายถึง ความเร็ว ซึ่งมีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$
 f หมายถึง ความถี่ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1800 MHz

เมื่อนำค่ามาแทนในสมการเพื่อหาค่า d เราจะได้ว่าค่า d มีค่าเท่ากับ 8.3 เซนติเมตร



ภาพที่ 3.26 ระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้น

3.5 อุปกรณ์เชื่อมต่ออื่น ๆ

ในการทดลอง สร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อลดระดับพุลส์น้ําลึกของโครงข่ายก่อรูปลาคลิ่นแบบ Butler Matrix ที่ได้กล่าวไปแล้วเป็นส่วนประกอบสำคัญ ยังต้องอาศัยอุปกรณ์เชื่อมต่ออื่น ๆ เพื่อให้ระบบจะสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นในส่วนนี้เราจึงจะกล่าวถึงตัววัดสัญญาณซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

3.6 กล่าวสรุป

อุปกรณ์ต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะนำมาประกอบรวมกันเป็นโครงข่ายก่อรูปลาคลิ่น 2 โครงข่าย โดยโครงข่ายแรกจะประกอบไปด้วย

ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา	จำนวน 4 ตัว
ตัวไขว้สัญญาณ	จำนวน 1 ตัว
ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา	จำนวน 2 ตัว
เสาอากาศ	จำนวน 4 ต้น

โครงข่ายที่สองจะประกอบไปด้วย

ตัวคัปเปอร์แบบไฮบริดจ์ 90 องศา	จำนวน 4 ตัว
ตัวไขว้สัญญาณ	จำนวน 1 ตัว
ตัวเลื่อนเฟส 45 องศา	จำนวน 2 ตัว
ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน	จำนวน 4 ตัว
เสาอากาศ	จำนวน 8 ต้น (ซึ่งเสาอากาศแต่ละต้นนั้นจะมี

ระยะห่างต้นละ 8.3 เซนติเมตร)

จากนั้นจะนำโครงข่ายก่อรูปลาคลิ่นที่ได้ทั้งสองโครงข่ายไปทดสอบเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ

บทที่ 4

ผลการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบ

4.1 กล่าวนำ

จากการศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานในบทที่ 2 และ 3 นั้น ทำให้สามารถสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่เสร็จสมบูรณ์พร้อมที่จะนำไปทดสอบการใช้งานจริง เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ

4.2 ผลการทดสอบชุดอุปกรณ์ต้นแบบการลดระดับพหุคลื่นเล็กของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

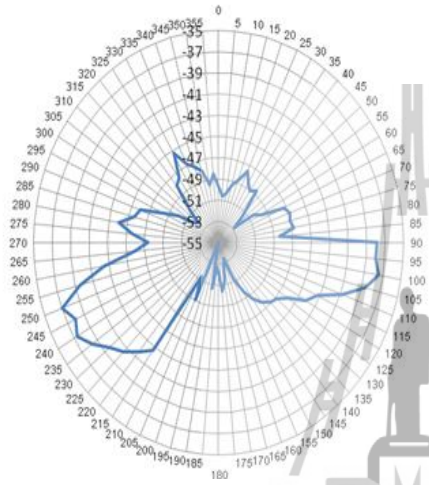
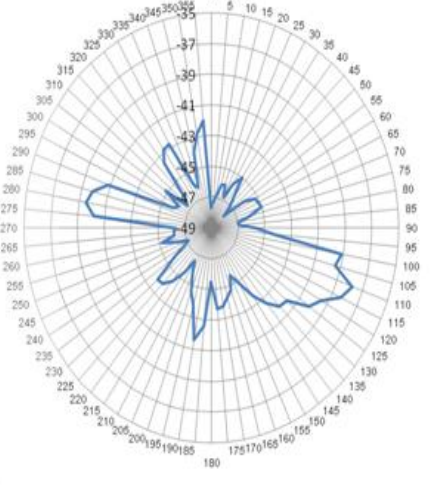
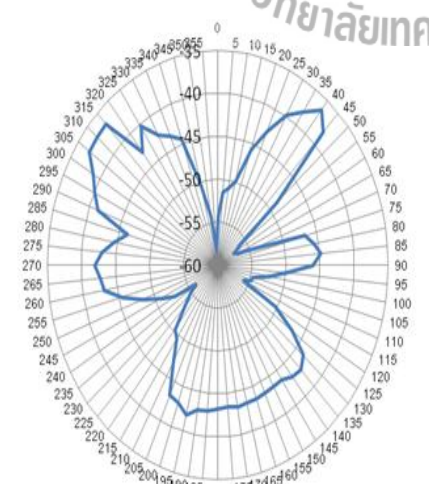
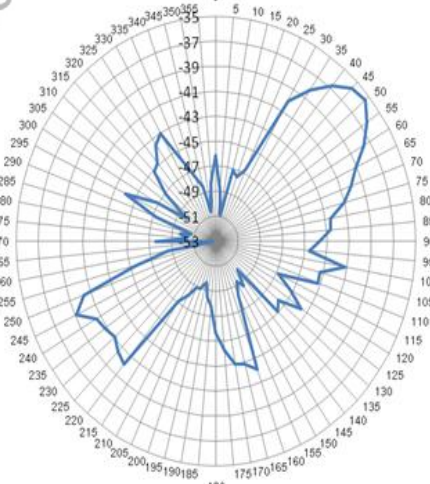
หลังจากการประกอบชุดอุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์ ถัดไปจะเป็นการทดสอบวัด Pattern ของตัวตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์ทั้งแบบติควงแหวนกับไม่ติควงแหวน จากนั้นจะเป็นการวัดการใช้งานจริงในพื้นที่ต่าง ๆ ได้แก่ อาคารวิชาการ และ อาคารเครื่องมือ เป็นต้น

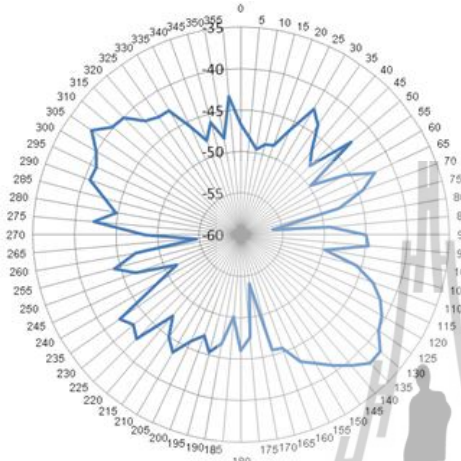
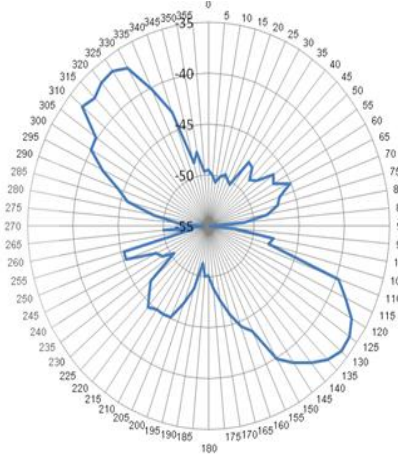
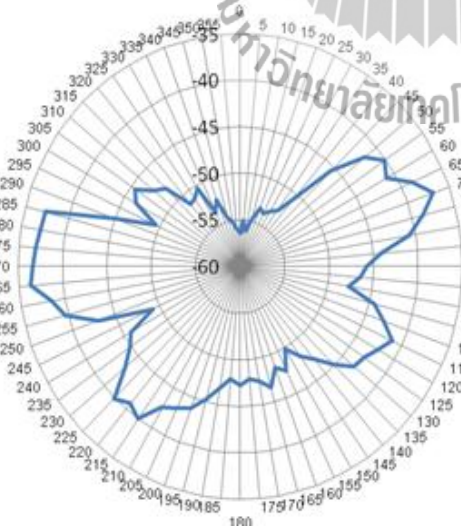
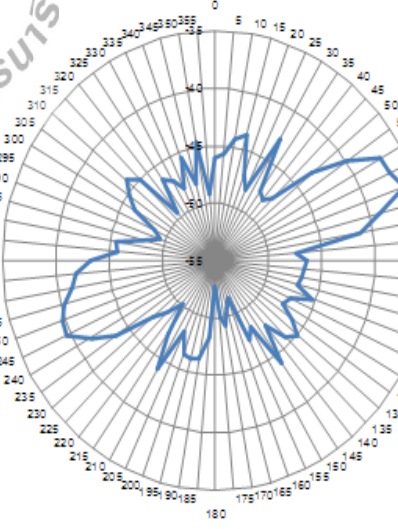
4.2.1 การวัด Pattern ของ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

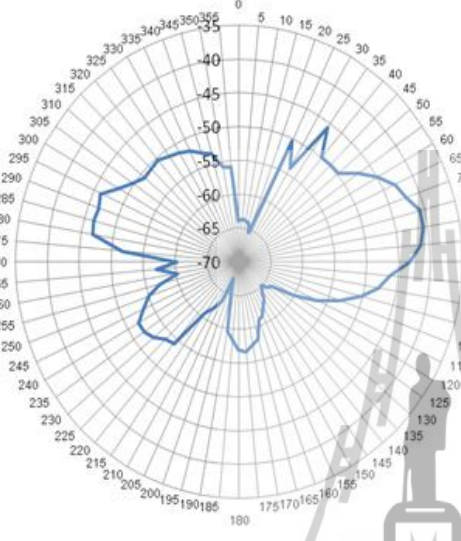
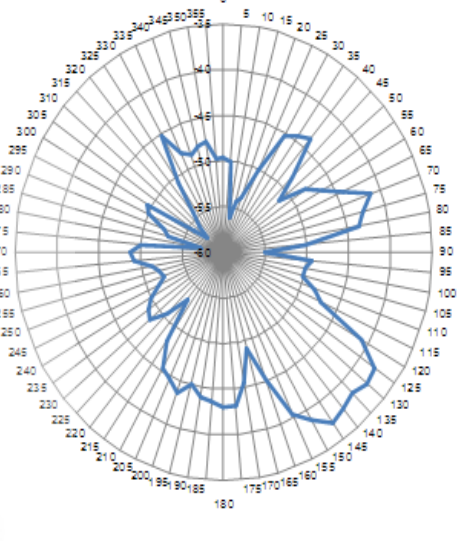
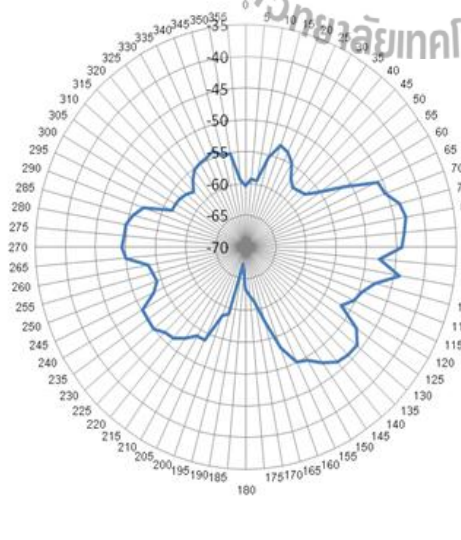
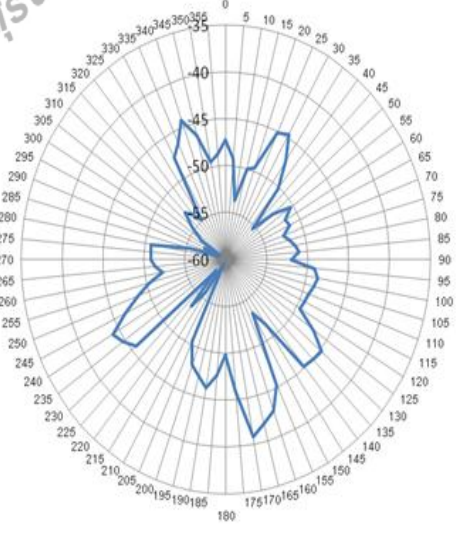
การวัด Pattern นั้นจะวัดทั้งด้าน E-Plane และ H-Plane ซึ่งในการวัด Pattern นั้น เราจะทำการวัดทั้ง 360° ซึ่งจะทำให้การวัดตัวคัปเปอเรอร์ไฮบริดจ์ทั้ง ไม่ได้ติควงแหวนกับติควงแหวน และได้ผลการทดสอบดังนี้

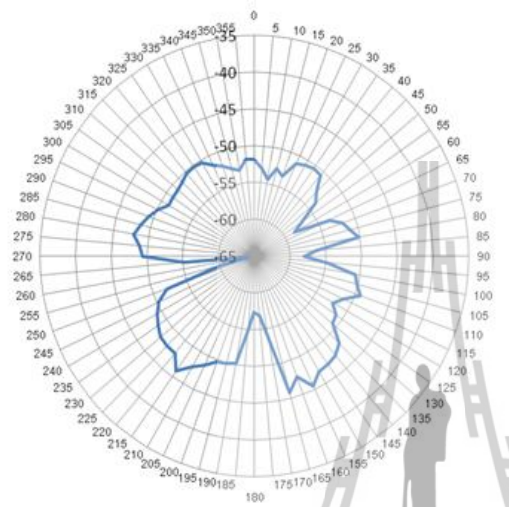
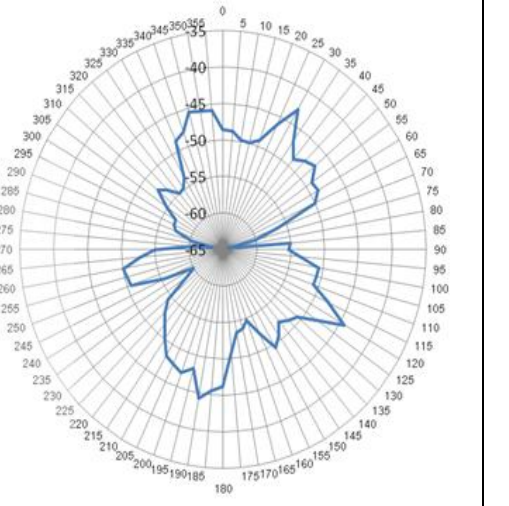
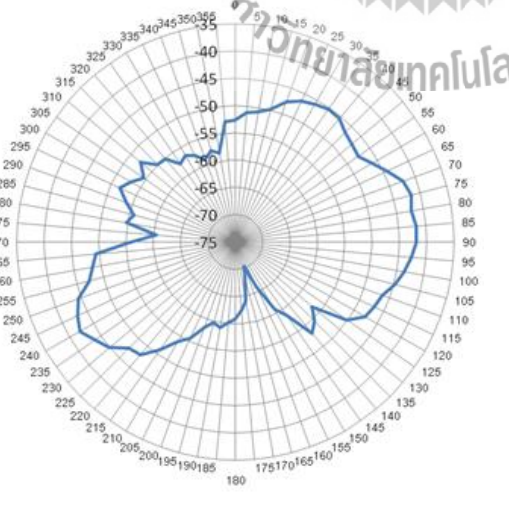
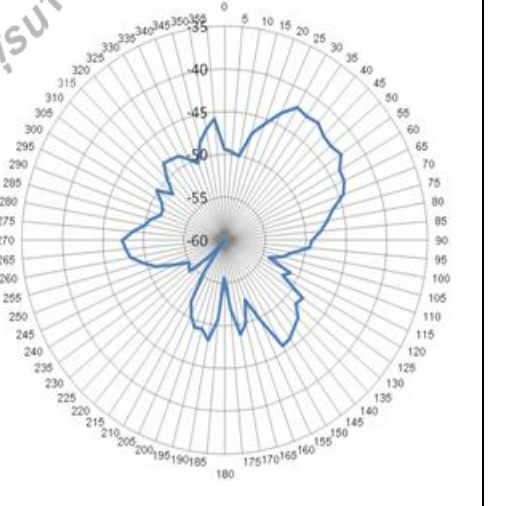
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตาราง 4.1 การวัด Pattern ของ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix

ระนาบ E-plane	
ไม่ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน	ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน
 <p>Port #5 ทิศทางของสัญญาณที่ 104.5°</p>	 <p>Port #1 ทิศทางของสัญญาณที่ 104.5°</p>
 <p>Port #6 ทิศทางของสัญญาณที่ 41.4°</p>	 <p>Port #2 ทิศทางของสัญญาณที่ 41.4°</p>

ระนาบ E-plane (ต่อ)	
ไม่ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน	ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน
 <p data-bbox="395 1131 817 1176">Port #7 ทิศทางของสัญญาณที่ 138.6°</p>	 <p data-bbox="970 1120 1391 1164">Port #3 ทิศทางของสัญญาณที่ 138.6°</p>
 <p data-bbox="402 1892 810 1937">Port #8 ทิศทางของสัญญาณที่ 75.5°</p>	 <p data-bbox="976 1892 1385 1937">Port #4 ทิศทางของสัญญาณที่ 75.5°</p>

ระนาบ H-plane	
ไม่ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน	ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน
 <p data-bbox="395 1182 821 1227">Port #5 ทิศทางของสัญญาณที่ 104.5°</p>	 <p data-bbox="954 1182 1380 1227">Port #1 ทิศทางของสัญญาณที่ 104.5°</p>
 <p data-bbox="395 1930 821 1975">Port #6 ทิศทางของสัญญาณที่ 41.4°</p>	 <p data-bbox="970 1930 1396 1975">Port #2 ทิศทางของสัญญาณที่ 41.4°</p>

ระนาบ H-plane (ต่อ)	
ไม่ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน	ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน
 <p>Port #7 ทิศทางของสัญญาณที่ 138.6°</p>	 <p>Port #3 ทิศทางของสัญญาณที่ 138.6°</p>
 <p>Port #8 ทิศทางของสัญญาณที่ 75.5°</p>	 <p>Port #4 ทิศทางของสัญญาณที่ 75.5°</p>

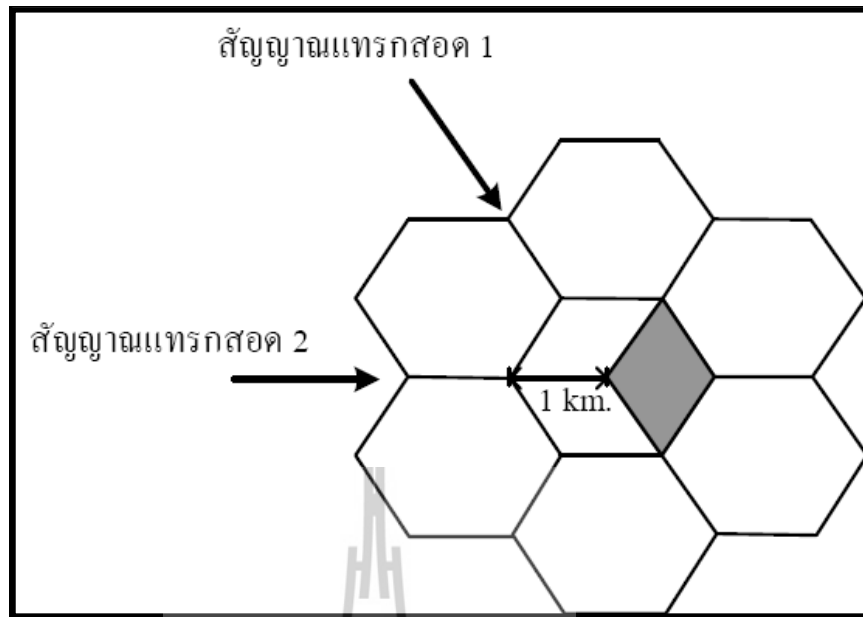
จากการเปรียบเทียบแบบการวัด Pattern ที่ได้จากโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4x4 และ 4x8 จะเห็นว่าจากเดิมโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4x4 จะมีระดับพวคลื่นเล็กที่มีค่ามาก แต่เมื่อมีการปรับปรุงเป็นโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4x8 ระดับของพวคลื่นเล็กจะลดต่ำลง ทำให้มีการฉีที่ศที่ดีขึ้น

4.3 การทดสอบตัวต้นแบบในสภาพแวดล้อมจริง

ในการทดสอบนี้ได้มีการนำโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4x4 และ 4x8 มาทำการทดสอบจากสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งจากการเปรียบเทียบรูปแบบการแผ่พลังงานมาแล้ว นั้น ระดับของพวคลื่นเล็ก ได้ลดลง จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพว่าโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4x8 นั้น มีประสิทธิภาพดีกว่าโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix 4x4

4.3.1 ขั้นตอนในการทดสอบ

1. กำหนดตำแหน่งที่จะทำการทดสอบลงในแผนที่ ในการทดสอบจะพยายามทดสอบให้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริงมากที่สุด โดยการทดสอบได้ทดสอบในรูปแบบเครือข่ายเป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบรังผึ้ง (Cellular Systems) ดังนี้
 - 1) รูปแบบเครือข่ายเป็นระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบรังผึ้ง (Cellular systems)
 - 2) แต่ละเซลล์ถูกแบ่งเป็นเซกเตอร์ (Sector) เซกเตอร์ละ 120° ดังนั้นสัญญาณแทรกสอดจากช่องสัญญาณเดียวกันเข้ามา 2 ทิศทางซึ่งอยู่ห่างจากพื้นที่ที่สนใจประมาณ 3 กม. โดยอ้างอิงจากหนังสือของ T. S. Rapp port (2002)
 - 3) รัศมีของเซลล์เท่ากับ 1 กม. ซึ่งอ้างอิงกับขนาดของเซลล์ขนาดใหญ่ (Macro cell)
 - 4) แบบจำลองเครือข่ายถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 โดยส่วนที่เรเงาเป็นพื้นที่ที่สนใจ



ภาพที่ 4.1 ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบรังผึ้ง (Cellular systems)

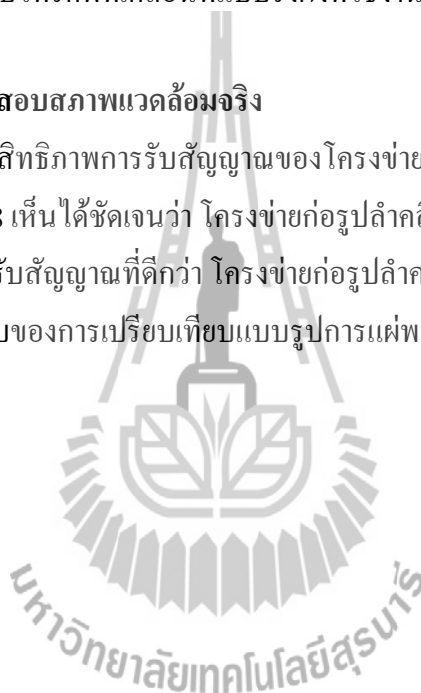


ภาพที่ 4.2 การกำหนดตำแหน่งที่ใช้ในการทดสอบตัวต้นแบบ

2. ในการทดสอบระบบในสภาพแวดล้อมจริง พื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบคือบริเวณในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา โดยบริเวณในมหาวิทยาลัยได้แสดงในภาพที่ 4.2 จากรูปตำแหน่ง BS AIS คือที่ตั้งของสถานีฐานที่กำหนดให้เป็นตัวส่งสัญญาณในเซลล์ (รูปที่ได้บันทึกจากโปรแกรม GOOGLE EART) จากพื้นที่ในภาพ ได้กำหนดจุดในการวัดค่าทั้งหมด 50 จุด โดยแต่ละจุดจะวางตัวห่างกัน 100 ม. ซึ่งวางตัวตามแนวเส้นตรงเส้นละ 10 จุด ดังนั้นแต่ละเส้นจะมีระยะทาง ทั้งหมด 1 กม. ทั้ง 5 เส้นจะสังเกตเห็นได้ว่าทั้ง 5 เส้นจะครอบคลุมพื้นที่เป็นรูปเซกเตอร์ 120° ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับภาพที่ 4.1 ซึ่งเป็นรูปแบบเครือข่ายระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบรังผึ้งที่ใช้งานในประเทศไทย

4.3.2 ผลการทดสอบสภาพแวดล้อมจริง

จากการทดสอบประสิทธิภาพการรับสัญญาณของโครงข่ายก่อรูปลำดับชั้นแบบ Butler Matrix 4×4 และ 4×8 เห็นได้ชัดเจนว่า โครงข่ายก่อรูปลำดับชั้นแบบ Butler Matrix 4×8 มีประสิทธิภาพในการรับสัญญาณที่ดีกว่า โครงข่ายก่อรูปลำดับชั้นแบบ Butler Matrix 4×4 ซึ่งก็ตรงกับผลการทดสอบของการเปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงาน ซึ่งผลการทดสอบมีดังนี้



ตาราง 4.2 ค่าจากการวัดสัญญาณตามสถานที่ต่าง ๆ

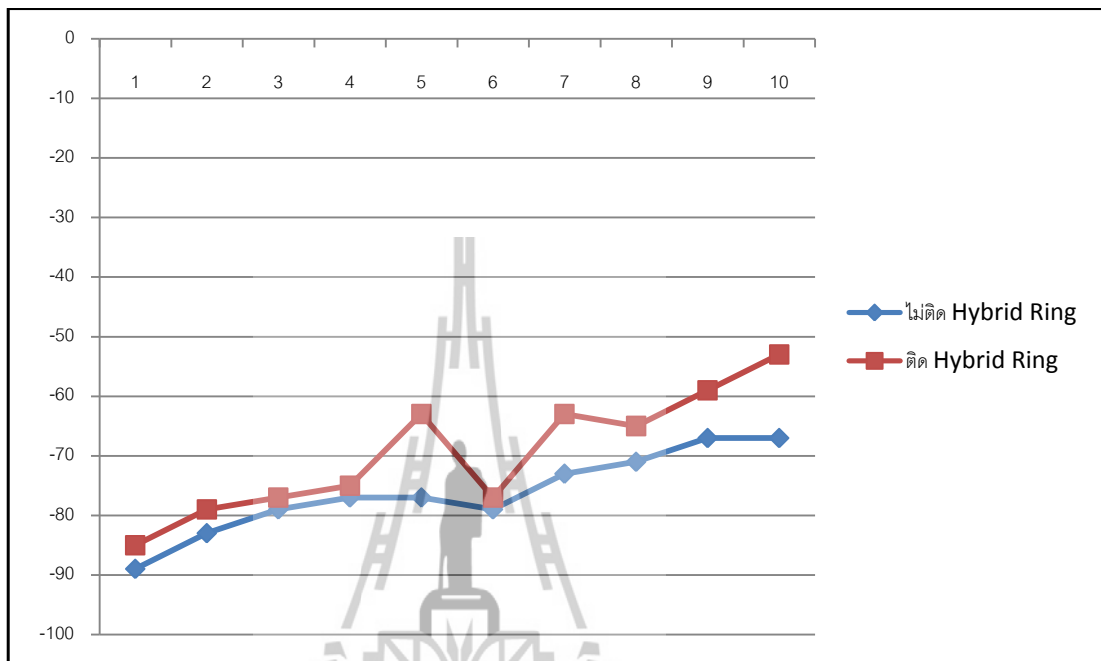
จุดวัดสัญญาณ	ไม่ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน (dbm)	ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน (dbm)
1	-89	-85
2	-83	-79
3	-79	-77
4	-77	-75
5	-77	-63
6	-79	-77
7	-73	-63
8	-71	-65
9	-67	-59
10	-67	-53
11	-87	-79
12	-75	-69
13	-75	-71
14	-73	-63
15	-93	-85
16	-71	-61
17	-75	-73
18	-69	-57
19	-65	-61
20	-69	-51
21	-73	-69
22	-69	-63
23	-81	-79
24	-77	-71
25	-85	-75
26	-75	-67

ตารางที่ 4.2 ค่าจากการวัดสัญญาณตามสถานที่ต่าง ๆ (ต่อ)

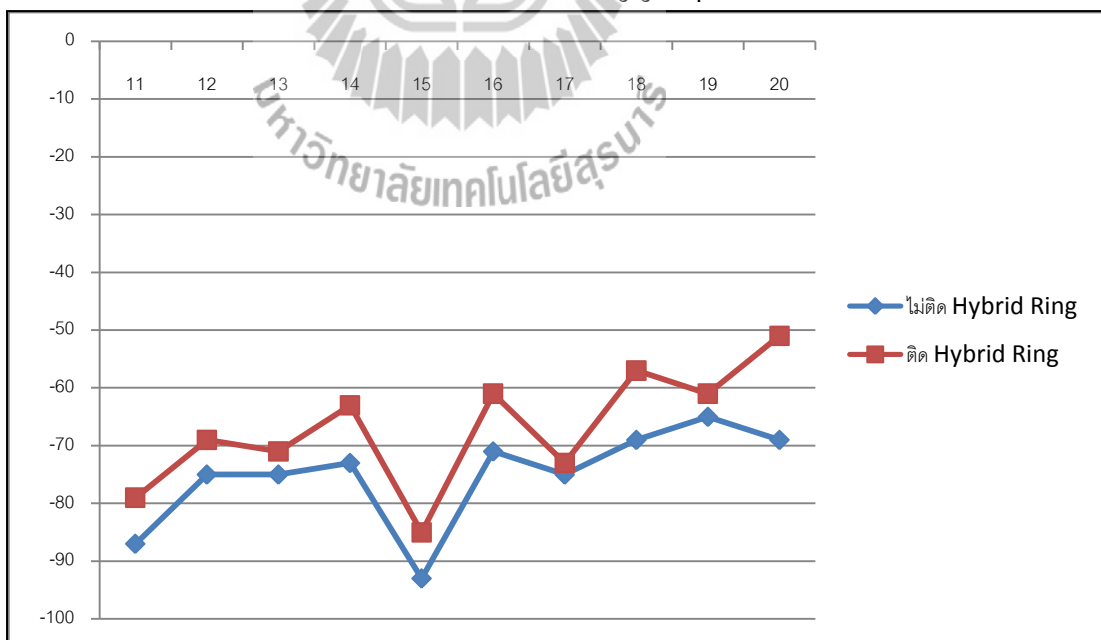
จุดวัดสัญญาณ	ไม้ติดไฮบริดจ์แบบวง แหวน (dbm)	ติดไฮบริดจ์แบบวงแหวน (dbm)
27	-65	-61
28	-67	-59
29	-53	-49
30	-59	-53
31	-85	-77
32	-81	-75
33	-77	-69
34	-65	-63
35	-75	-67
36	-63	-59
37	-65	-61
38	-67	-61
39	-65	-57
40	-65	-55
41	-81	-73
42	-79	-75
43	-71	-69
44	-69	-65
45	-67	-61
46	-73	-71
47	-71	-69
48	-75	-71
49	-69	-61
50	-71	-57
27	-65	-61
28	-67	-59

4.3.3 ผลการทดสอบเมื่อนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบ

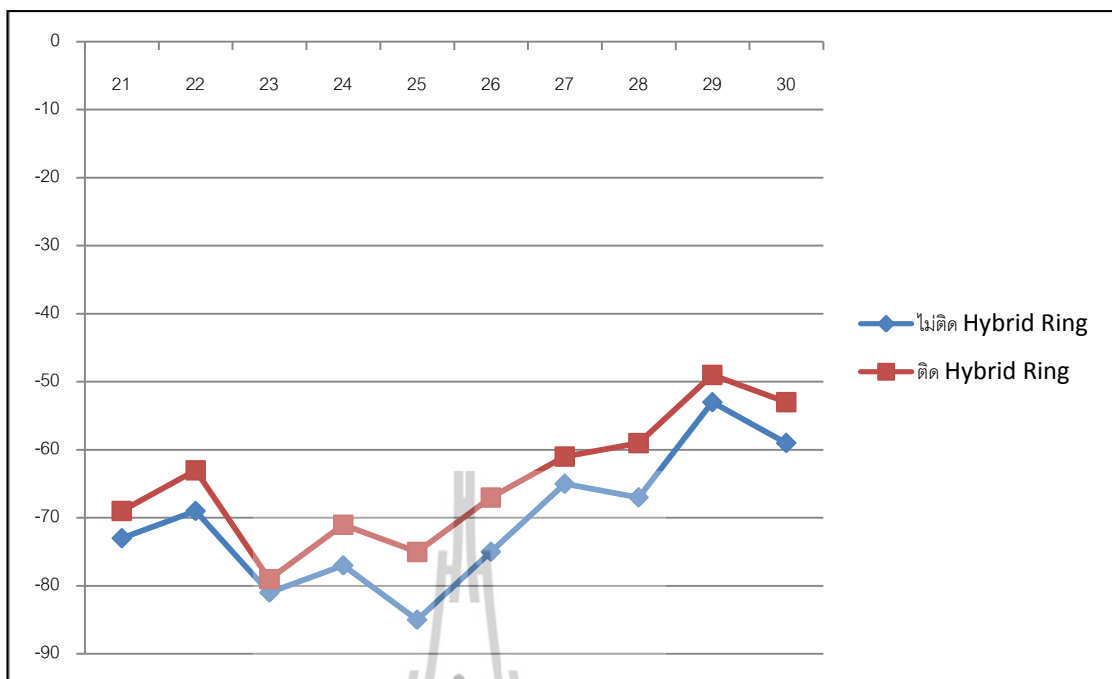
ทำการพล็อตกราฟจากข้อมูลผลการทดสอบ โดยเปรียบเทียบกันในแต่ละตำแหน่งว่า ในการวัดสัญญาณในแต่ละเส้นทาง โดยที่ในหนึ่งเส้นทางมี 10 จุด แต่ละจุดห่างกัน 100 เมตร ว่า มีประสิทธิภาพแตกต่างกันอย่างไร



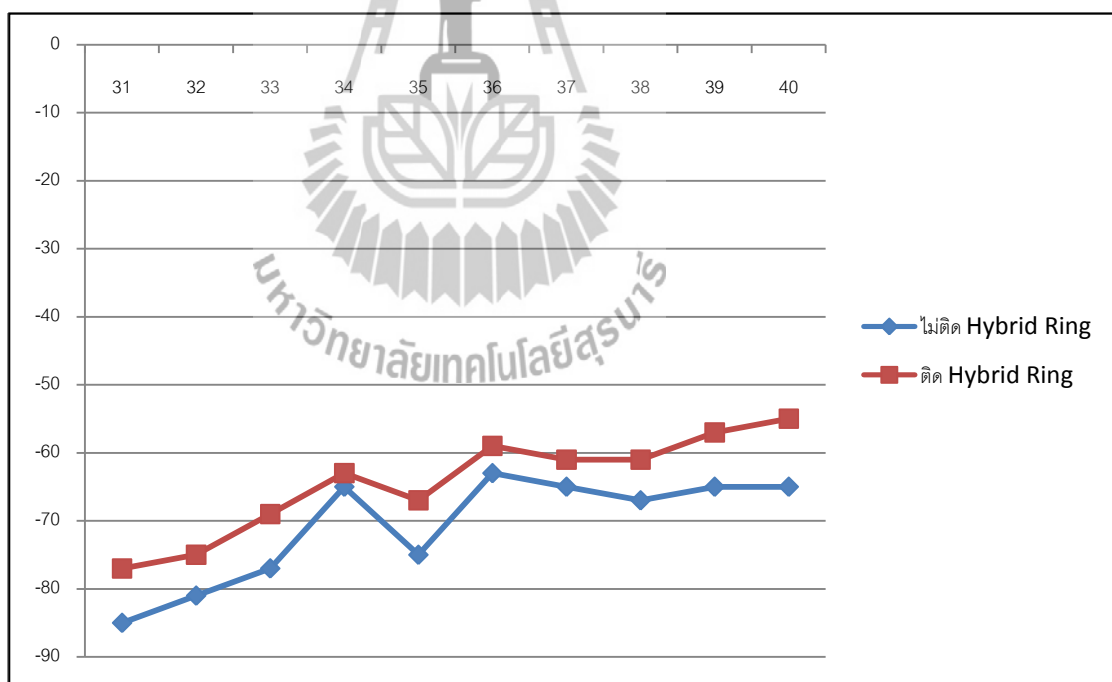
แผนภาพที่ 1 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่ 1-10



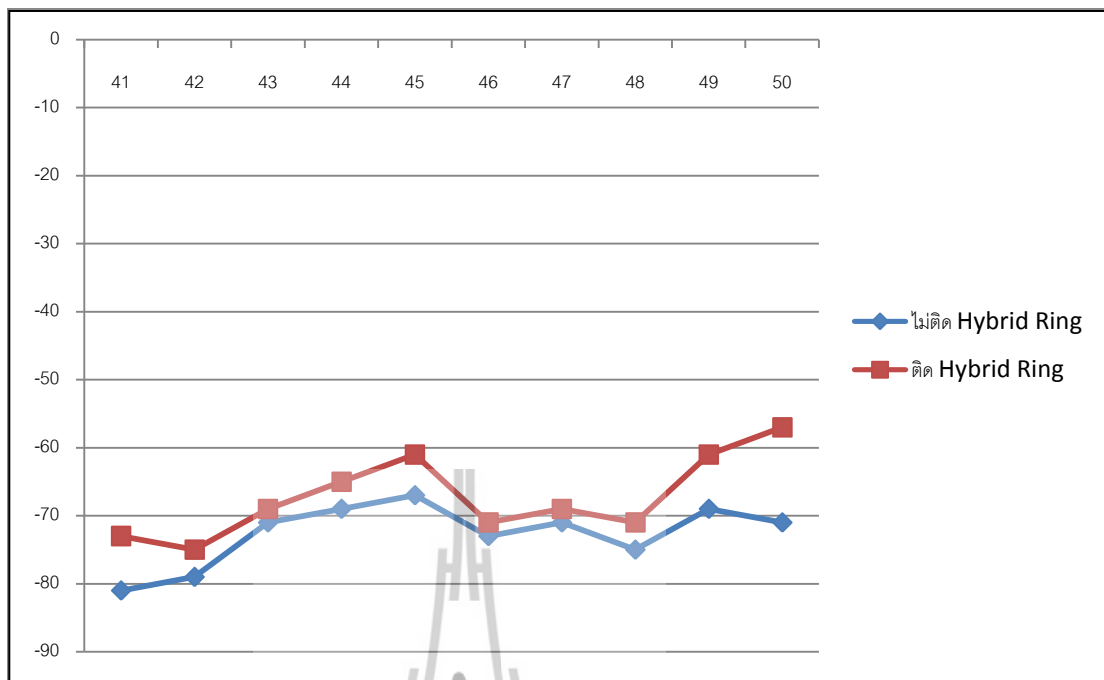
แผนภาพที่ 2 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่ 11-20



แผนภาพที่ 3 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่ 21-30



แผนภาพที่ 4 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่ 31-40



แผนภาพที่ 5 เส้นทางการวัดสัญญาณจุดที่ 41-50

4.4 กล่าวสรุป

หลังจากที่ได้ทำการทดสอบตัวต้นแบบ ทั้งแบบรูปการแผ่พลังงานและทดสอบจากสภาพแวดล้อมจริง พบว่าเมื่อทำปรับปรุงโครงข่ายก่อนรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix จาก 4x4 เป็น 4x8 สามารถลดระดับของพหุคลื่นเล็กน้อยได้ โดยสามารถสังเกตได้จากกราฟเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ณ พอร์ตต่างๆที่ได้ทำการทดสอบ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ลำคลื่นหลักมีการชี้ทิศดีขึ้น และประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณก็ดีขึ้นด้วย ซึ่งสามารถดูได้จากผลการทดสอบทั้งสอง

บทที่ 5

ข้อสรุปของโครงการ

5.1 กล่าวนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการกล่าวถึงบทสรุปของโครงการทดลองทำตัวต้นแบบการลดระดับฝุ่นละอองสำหรับโครงข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ซึ่งประกอบไปด้วยปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน วิธีการแก้ไข ข้อเสนอแนะและวิธีการพัฒนาโครงการต่อไป

5.2 ปัญหาและแนวทางในการแก้ไขปัญหา

ในการทำโครงการทดลองทำตัวต้นแบบการลดระดับฝุ่นละอองสำหรับสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ใช้โครงข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ปรากฏปัญหาที่พบได้บ่อยๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบด้วยตัวปัญหาที่พบ สาเหตุของปัญหารวมทั้งวิธีการแก้ไข

ตาราง 5.1 ปัญหาและสาเหตุที่พบในขณะดำเนินงานและวิธีการแก้ไข

ปัญหาที่พบในขณะดำเนินงาน	สาเหตุและวิธีการแก้ไข
1.การกัดลายวงจร	สาเหตุ เนื่องจากลายที่ออกแบบไว้แล้วเมื่อนำมากัดเป็นลายวงจรจริงอาจเกิดความคลาดเคลื่อนส่งผลให้ค่าที่ได้อาจไม่เป็นไปตามที่ทดสอบไว้ วิธีการแก้ไข ต้องกัดลายวงจรด้วยความประณีต และลายวงจรต้องคม อาจใช้เครื่องมือช่วยในการตัดสติ๊กเกอร์ด้วย
2.ในการประมวลผลของโปรแกรม ใช้เวลานานพอสมควร	สาเหตุ อุปกรณ์ต้นแบบมีจำนวนพอร์ตมาก วิธีการแก้ไข ทำการเลือกเฉพาะพอร์ตที่ต้องการดูผลเท่านั้น ไม่ต้องทำการรันทุกพอร์ต
3.การเชื่อมระหว่างโครงข่ายท่อรูปลำคลื่นแบบ Butler matrix กับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนทำได้ยาก	สาเหตุ เนื่องจากรัศมีของตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน มีค่ามากกว่าความกว้างระหว่างพอร์ตเอาต์พุตของโครงข่ายท่อรูปลำคลื่น วิธีการแก้ไข ควรเพิ่มความยาวพอร์ตเอาต์พุตของโครงข่ายท่อรูปลำคลื่น แล้วทำการหักงอพอร์ตเอาต์พุตเพื่อให้ระยะห่างระหว่างพอร์ตเพิ่มขึ้น

<p>4.ค่าความแรงของสัญญาณในบางจุดมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก</p>	<p>สาเหตุ จำนวนการวัดน้อยจึงอาจทำให้เกิดการคลาดเคลื่อน</p> <p>วิธีการแก้ไข เพิ่มจำนวนการวัดสัญญาณให้มากขึ้น และเพิ่มจำนวนจุดที่ทำการวัดสัญญาณ</p>
---	---

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ตัวโปรแกรม CST มีการใช้งานทรัพยากรของเครื่องสูง

สามารถสังเกตได้จากกราฟการทำงานของหน่วยประมวลผลกลางจาก Task Manager ของ Windows ผู้ใช้งานควรใช้งานโปรแกรมนี้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง และควรหลีกเลี่ยงการเปิดใช้งานร่วมกับโปรแกรมอื่น เพราะอาจทำให้โปรแกรม CST เกิดการขัดข้องได้

5.3.2.1 ในการสร้างลายวงจรด้วยโปรแกรม CST

ควรกำหนดชนิด ของวัสดุที่ใช้ทำการออกแบบ การกำหนดความกว้างและความยาวของชิ้นงานที่ทำการออกแบบ เพราะเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นจะสามารถทำการแก้ไขได้ยากหรืออาจต้องเริ่มทำการออกแบบชิ้นงานนั้นใหม่

5.3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการบางชิ้นมีขนาดเล็กและราคาแพง

ผู้ใช้งานควรใช้งานด้วยความระมัดระวังเป็นอย่างมาก

5.3.2.3 การตัดสติ๊กเกอร์ทำลายวงจรมันควรใช้เครื่องมือที่มีความคมและแม่นยำ ไม่ควรที่จะใช้มือตัดเพราะอาจจะทำให้ลายเกิดความคลาดเคลื่อนได้

5.3.2.4 จำนวนการวัดสัญญาณควรวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง

เพราะตัววัดสัญญาณอาจมีความคลาดเคลื่อนเราจึงควรทำการวัดซ้ำที่จุดเดิมหลายๆครั้ง เพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ย

5.4 แนวทางในการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากโครงการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อลดระดับพายุคลื่นเล็กสำหรับโครงข่ายก่อนรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix นี้ยังมีขนาดใหญ่ หากทำให้เล็กลงได้ และสามารถใช้ในชีวิตประจำวัน จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานดียิ่งขึ้นด้วย

5.5 กล่าวสรุป

โครงการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อลดระดับพายุคลื่นเล็กสำหรับโครงข่ายก่อนรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix มีส่วนประกอบหลักดังนี้

- 1) วงจรก่อนรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix
- 2) ตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

โดยอุปกรณ์เหล่านี้มีหลักการทำงาน คือ วงจรก่อนรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix จะทำการก่อนรูปลำคลื่นแล้วส่งไปยังพอร์ตเอาต์พุตทั้ง 4 พอร์ต ทำให้มีเกิดลำคลื่นหลักที่มีการชี้ทิศเฉพาะเจาะจงที่ทิศใดทิศหนึ่งโดยจะมีระดับพายุคลื่นเล็กเกิดขึ้นสูงด้วย ซึ่งจะทำให้การชี้ทิศของลำคลื่นหลักด้อยลง จึงได้ทำการปรับปรุงวงจรก่อนรูปลำคลื่น โดยการนำตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวนมาต่อเข้ากับพอร์ตเอาต์พุตทั้ง 4 พอร์ต พลังงานจึงมีการแยกออก 2 พอร์ตโดยมีเฟสต่างกัน 180 องศา ทำให้พอร์ตมีเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเป็น 8 พอร์ต โดยที่พอร์ตอินพุตยังคงเป็น 4 พอร์ตเหมือนเดิม ซึ่งการทำเช่นนี้สามารถทำการลดระดับพายุคลื่นเล็กได้ และการชี้ทิศของลำคลื่นหลักจึงดีขึ้น

ซึ่งจากผลการทดสอบจากสถานที่จริงและสภาพแวดล้อมจริงพบว่า ประสิทธิภาพในการรับส่งสัญญาณของโครงข่ายก่อนรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน นั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า โครงข่ายก่อนรูปลำคลื่นแบบ Butler Matrix ที่ไม่ได้ต่อกับตัวคัปเปอร์ไฮบริดจ์แบบวงแหวน

ประวัติผู้เขียน



นายทวีเกียรติ มโนสารโสภณ

เกิดวันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2532

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 1/2 หมู่ 8 ตำบลเบ็กไพร อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนรัตรราษฎร์บำรุง ปีการศึกษา 2549

ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นายจักรธร สังข์สูงเนิน

เกิดวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ.2531

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 290 หมู่ 14 หมู่บ้านธัญญธานี ตำบลจอหอ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนโนนสูงศรีธานี ปีการศึกษา 2549

ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



นางสาวกนกพร แคมจันทิก

เกิดวันที่ 21 กันยายน พ.ศ. 2532

ภูมิลำเนาอยู่บ้านเลขที่ 8 หมู่ 10 ตำบลหนองสาหร่าย อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมตอนปลายจากโรงเรียนปากช่อง ปีการศึกษา 2549

ปัจจุบันกำลังศึกษาชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

Firas Mohammed Ali. (2007). **Estimate Microstrip Substrate Relative Dielectric Constant.**

[ออนไลน์] ได้จาก: <http://mwrf.com/Articles/Index.cfm?Ad=1&ArticleID=17725>

I-Laboratory. (2010). **VII. Passive Circuit Part 2.** [ออนไลน์] ได้จาก:

http://www.rfdh.com/invite/ilab/k7_2.htm

RF Café. (2011). **Radar Principles.** [ออนไลน์] ได้จาก:

<http://www.rfcafe.com/references/electrical/NEETS%20Modules/NEETS-Module-18-2-21-2-30.htm>

T. Halonen. (2003). **GSM, GPRS And EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS 2nd**

edition, Wiley and Sons, England

T. S. Rappaport. (2002). **Wireless Communication: Principles And Practice 2nd edition,** Printice Hall PTR, NJ

บัณฑิต โรจน์. (2536). **วิศวกรรมไมโครเวฟ.** กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หน้า 219

รศ.ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์. (2004). **Antenna Engineering.** [ออนไลน์] ได้จาก:

<http://www.sut.ac.t/e-texts/eng/Antenna>