

สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นสำหรับการเพิ่มสมรรถนะ
ของการสื่อสารไร้สาย

SWITCHED BEAM ANTENNA FOR PERFORMANCE
ENHANCEMENT OF WIRELESS COMMUNICATION



T117468

โดย

นายอลงกรณ์ ฐิติรัตนารมย์

นางสาวชยานันท์ ฤทธิยา

นายอานนท์ สกลคณาพงษ์

เลขหมู่.....

117468

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี..... 5 ค.ค. 2554



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับการเพิ่มสมรรถนะ
ของการสื่อสารไร้สาย

SWITCHED BEAM ANTENNA FOR PERFORMANCE
ENHANCEMENT OF WIRELESS COMMUNICATION



นายอลงกรณ์ ฐิติรัตนารมย์ 50011903

นางสาวธยาน์วศา ฤทธิยา 50011905

นายอานนท์ สกตคณาพงษ์ 50011939

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ผศ.ดร.ศรวัฒน์ ชิวปรีชา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

ผ่านการตรวจรูปเล่มแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่เป็นการค้า
(ลงชื่อ) T. Limpho (ลงชื่อ) T. Limpho

ผ่านการตรวจชิ้นงานแล้ว

(ลงชื่อ) T. Limpho (ลงชื่อ) T. Limpho

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับการเพิ่มสมรรถนะของการสื่อสารไร้สาย

SWITCHED BEAM ANTENNA FOR PERFORMANCE ENHANCEMENT OF
WIRELESS COMMUNICATIONS

ผู้จัดทำ

- | | | |
|-------------------|---------------|----------|
| 1. นายอลงกรณ์ | ฐิติรัตนารมย์ | 50011903 |
| 2. นางสาวชานัน์ศา | ฤทธิยา | 50011905 |
| 3. นายอานนท์ | สถลคณาพงษ์ | 50011939 |



(ผศ.ดร.ชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา



(ผศ.ดร.สรวิวัฒน์ ชิวปรีชา)

รองอาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการชิ้นนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา และรศ.ดร.สมผล โกศลวิตร ที่เป็นผู้ที่ให้คำแนะนำในการทำงาน ให้ความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการชิ้นนี้เป็นอย่างมาก พร้อมทั้งการว่ากล่าวตักเตือน สั่งสอนเพื่อให้ชิ้นงานตามเป้าหมายที่ได้ตั้งใจไว้ และนอกจากนี้ยังมีคุณกิตติศักดิ์ เพาบัว, คุณรัชชัย พุ่มพวง และพี่ๆ อีกหลายคนที่ยกยอให้คำแนะนำเพิ่มเติมและการช่วยเหลือในอีกหลายๆอย่าง และขอขอบคุณครอบครัว เพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือทั้งพลังร่างกาย แรงใจที่ช่วยผลักดันจนสำเร็จ



นายอลงกรณ์ ฐิติรัตนารมย์
นางสาวธยานันท์ วสาฤทธิยา
นายอานนท์ สกลคณาพงษ์
ผู้จัดทำ

สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นสำหรับการเพิ่มสมรรถนะของการสื่อสารไร้สาย

SWITCHED BEAM ANTENNA FOR PERFORMANCE
ENHANCEMENT OF WIRELESS COMMUNICATIONS

โดย นายอลงกรณ์ ฐิติรัตนารมย์ 50011903

นางสาวธยานันวศา ฤทธิยา 50011905

นายอานนท์ สกลคณาพงษ์ 50011939

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.สรวิวัฒน์ จิวปรีชา

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาหลักการ การออกแบบ และการทดสอบของสายอากาศแบบชี้ทิศทางที่มีคุณสมบัติในการสวิตช์ลำคลื่น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณของระบบสื่อสาร เช่น GPRS และทดสอบคุณสมบัติสายอากาศด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (NETWORK ANALYZER) และการทดสอบในสภาพการใช้งานจริง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสำหรับสายอากาศตลาดสำหรับระบบสื่อสารสมัยใหม่ต่อไป

ABSTRACT

This project presents the principle study, design and measurement of directional antenna that has switched beam characteristics. This antenna is proposed for performance enhancement of the signal reception of wireless communication systems such as GPRS. Subsequently, the antenna characteristics are measured by the Network Analyzer and tested in the actual environment. This project can be further developed as smart antennas for future modern wireless communications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของ โครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สาขาอากาศแวลลัดบ	3
2.2 สาขาอากาศแ่ง	9
2.3 วงจรแบ่งกำลังงานวิลกินสัน	15
2.4 บอร์ดทดลอง POWER ACEX1K	17
2.5 ประวัติและความเป็นมาของระบบจีพีอาร์เอส	22
บทที่ 3 การออกแบบและการจัดทำโครงการ	27
3.1 การออกแบบ	27
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	50
3.3 การจำลองผลจาก โปรแกรม	50
3.4 การจัดเก็บผลการทดลอง	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	69
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	70
4.2 ขั้นตอนการทดสอบ	71
4.3 ผลการทดสอบ	72
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลการทดลอง	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
บรรณานุกรม	



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 บล็อกไดอะแกรมของโครงการทั้งหมด	2
2.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4×1 [1]	4
2.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4×1 [1]	6
2.3 สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 2×2 [1]	7
2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 2×2 [1]	9
2.5 ระบบสายอากาศกึ่งเอมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาดกกระทบ [1]	11
2.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น [1]	13
2.7 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น Butler matrix [1]	15
2.8 วงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน	16
2.9 บอร์ด POWER ACEX1K-50	18
2.10 เครื่องขยายระบบจีพีอาร์เอส [1]	24
2.11 การรับ-ส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ [1]	25
2.12 รูปแบบการจัดสรรสัญญาณของระบบจีพีอาร์เอส [1]	26
3.1 ลักษณะของตัวแผ่นกระจายคลื่น	27
3.2 สายอากาศแบบระนาบ	30
3.3 ตัวเชื่อมต่อไฮบริด 90°	31
3.4 ขนาดของตัวเชื่อมต่อไฮบริด 90°	34
3.5 ตัวไวสัญญาณ	34
3.6 ขนาดของตัวไวสัญญาณ	36
3.7 รูปแบบของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน	37
3.8 ขนาดของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน	39
3.9 ลักษณะการจัดขาของวงจรรวม MAX4477ASA+	40
3.10 การต่อวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 การต่อวงจรตรวจจับกำลังงานของสัญญาณ	42
3.12 ลักษณะการต่อวงจร RF Switch	43
3.13 ไอซี ADC0820	44
3.14 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลโดยใช้ไอซี ADC0820	45
3.15 วงจรรวมภายในของ FPGA	46
3.16 สายอากาศที่ทำการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio	51
3.17 ค่าสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio	52
3.18 การเลือกค่าความกว้างของตัวแผ่นกระจายคลื่นมีค่าเท่ากับ 7.85 cm.	53
3.19 การเลือกค่าความยาวของตัวแผ่นกระจายคลื่นมีค่าเท่ากับ 3.94 cm.	54
3.20 โครงข่ายถ่วงรูปลำคลื่นจากการจำลองผ่านโปรแกรม	54
3.21 แบบร่าง Schematic ของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน	55
3.22 แบบร่าง Layout ของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน	55
3.23 รูปแบบลายวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง	56
3.24 รูปแบบลายวงจรตรวจจับกำลังงาน	57
3.25 รูปแบบลายวงจร RF Switch	57
3.26 ค่าสูญเสียย้อนกลับพิจารณาที่ค่าความถี่ 1842.5 MHz	58
3.27 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันพิจารณาที่ค่าความถี่ 1842.5 MHz	59
3.28(1) ค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของจำนวนจริงพิจารณาที่ค่าความถี่ 1842.5 MHz	60
3.28(2) ค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของจำนวนจินตภาพพิจารณาที่ค่าความถี่ 1842.5 MHz	60
3.29(1) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า จากโปรแกรม CST Microwave Studio	61
3.29(2) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบสนามแม่เหล็ก จากโปรแกรม CST Microwave Studio	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.30 การจำลองผลโดยให้ A มีค่ามากที่สุด	65
3.31 การจำลองผลโดยให้ B มีค่ามากที่สุด	65
3.32 การจำลองผลโดยให้ C มีค่ามากที่สุด	66
3.33 การจำลองผลโดยให้ D มีค่ามากที่สุด	66
3.34 การจำลองผลโดยให้ A กับ B มีค่าเท่ากันและมากที่สุด	67
3.35 การจำลองผลโดยให้ C กับ D มีค่าเท่ากันและมากที่สุด	67
3.36 การจำลองผลเมื่อพารามิเตอร์ทั้งหมดเท่ากัน	68
4.1 สายอากาศแบบระนาบเดี่ยว	69
4.2 สายอากาศแบบระนาบที่นำมาวางเรียงกัน	69
4.3 โครงข่ายคู่รูปลำคลื่น	70
4.4 ค่าสูญเสียย้อนกลับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการทดลองจริง	73
4.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการทดลองจริง	74
4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการทดลองจริง	76
4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็กเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการทดลองจริง	77
4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ของพอร์ทที่1	79
4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ของพอร์ทที่2	79
4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ของพอร์ทที่3	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ของพอร์ทที่4	80
4.12 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเมื่ออินพุตคือ 1 Volt	81
4.13 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเมื่ออินพุตคือ 2 Volt	82
4.14 วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างจริง	82
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ RF กับไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรตรวจจับกำลังงาน	83
4.16 วงจรตรวจจับกำลังงานที่สร้างจริง	83
4.17 วงจร RF Switch ที่สร้างจริง	84
4.18 สัญญาณนาฬิกา 5kHz	85
4.19 วงจรADC และบอร์ด FPGA ที่ทำการเชื่อมต่อ	86
4.20(1) สัญญาณบิต 00	87
4.20(2) สัญญาณบิต 01	87
4.20(3) สัญญาณบิต 10	88
4.20(4) สัญญาณบิต 11	88

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติต่างๆของชิป FPGA ที่ใช้กับบอร์ด POWER ACEX1K-50	18
2.2(1) ความสัมพันธ์ของ J6 กับตำแหน่ง I/O ของ ACEX1K-50	19
2.2(2) ความสัมพันธ์ของ J7 กับตำแหน่ง I/O ของ ACEX1K-50	19
2.2(3) ความสัมพันธ์ของ J8 กับตำแหน่ง I/O ของ ACEX1K-50	20
2.2(4) ความสัมพันธ์ของ J9 กับตำแหน่ง I/O ของ ACEX1K-50	21
2.3 ความสัมพันธ์ของ T4, T5 กับตำแหน่งขาของ ACEX1K-50	22
2.4 ความสัมพันธ์ของ T1, T2 และ T3 กับแหล่งจ่ายแรงดันภายในบอร์ด	22
2.5 ย่นความถี่มาตรฐานของระบบจีพียูอาร์เอส	23
3.1 ตารางค่าความจริงของวงจรรวม AS204-80	44
3.2 ตารางค่าความจริงของวงจร Comparator	47
3.3 ตารางแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของโครงข่ายก่อร์ูปลาค์ลื่น	62
3.4 ตารางแสดงค่าการสูญเสียจากการแยกโคดเค็ยวของโครงข่ายก่อร์ูปลาค์ลื่น	62
3.5 ตารางแสดงค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านของโครงข่ายก่อร์ูปลาค์ลื่น	63
3.6 ตารางแสดงค่าเฟสของโครงข่ายก่อร์ูปลาค์ลื่น	63
3.7 ตารางแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน	64
3.8 ตารางแสดงค่าการสูญเสียจากการแยกโคดเค็ยวของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน	64
3.9 ตารางแสดงค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน	64
4.1 ค่าสูญเสียย้อนกลับ	73
4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	74
4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า	75
4.4 ค่าอัตราขยาย	78

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่		
4.5	ค่าสูญเสียย้อนกลับ	84
4.6	ค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน	84
4.7	ผลการทดลองชุดวงจรเปรียบเทียบแรงดัน	86



บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวความคิดและที่มาของโครงการ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเชื่อมต่อแบบไร้สายที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง ผู้ใช้งานต้องการความสะดวกสบายในการใช้งาน และยังต้องการความรวดเร็วของการรับส่งข้อมูลที่มากขึ้น แต่การสื่อสารไร้สายยังคงมีปัญหาเรื่องการแทรกสอดจากสัญญาณอื่นๆ ที่ไม่ใช่สัญญาณที่ต้องการ ทำให้เกิดปัญหาเรื่องข้อมูลที่ได้รับ ไม่ตรงกับต้นฉบับที่มาจากต้นทาง เกิดความผิดพลาดในการรับ-ส่งข้อมูล ซึ่งเป็นปัญหาหลักของการสื่อสารแบบไร้สาย การใช้สายอากาศเป็นตัวรับสัญญาณ ก็จะช่วยให้รับส่งสัญญาณได้ระยะไกลยิ่งขึ้น จึงมีแนวคิดที่เพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารแบบไร้สายโดยนำเอาระบบสายอากาศเก่ง (smart antenna systems) มาติดตั้งโดยใช้เป็นสายอากาศรับ

ระบบสายอากาศเก่ง สามารถลดค่าอัตราความผิดพลาดบิตและความน่าจะเป็นการติดขัด (blocking probability) ลงได้ ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถเพิ่มค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Signal-to-Interference plus Noise : SINR) ให้กับระบบได้อีกด้วย เราจึงเลือกใช้สายอากาศแบบชี้ทิศทางที่มีคุณสมบัติในการสวิตช์ลำคลื่น ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยกว่าสายอากาศเก่งแบบปรับตัว ในกรณีที่ระบบใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก ประสิทธิภาพของสายอากาศแบบสลับลำคลื่นจะใกล้เคียงกับสายอากาศแบบปรับตัว และในกรณีที่สัญญาณเป้าหมาย (desired signal) มีระดับที่สูงกว่าสัญญาณแทรกสอด (interference signal) มาก ๆ สายอากาศแบบสลับลำคลื่นจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าสายอากาศแบบปรับตัว โดยในการทดลองเราจะทดสอบระบบที่ใช้ทั้งสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น (linear antenna arrays) และสายอากาศแถวลำดับระนาบ (planar antenna arrays) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งาน

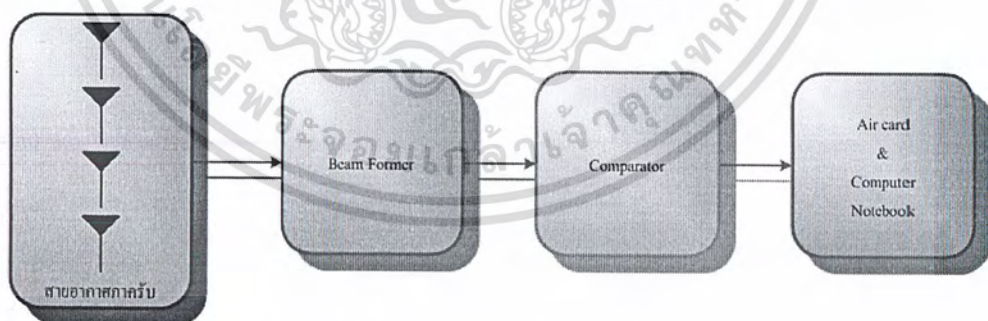
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงาน และคุณลักษณะของสายอากาศแบบสวิตช์ลำคลื่น
- 1.2.2 เพื่อออกแบบสายอากาศที่สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาสำหรับสายอากาศขนาดเล็กสำหรับระบบสื่อสาร
- 1.2.4 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณของระบบสื่อสาร เช่น GPRS

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ออกแบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น โดยอาศัยหลักการของแฉกลำดับ
- 1.3.2 ออกแบบตัวรับเฟสของสายอากาศแต่ละตัวเพื่อสวิตช์ลำคลื่น
- 1.3.3 ทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของสายอากาศ เช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ
- 1.3.4 สรุปและจัดทำรายงาน

Block diagram



รูปที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของโครงการทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) เป็นระบบที่นำเอาสายอากาศมาวางเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ โดยอาจมีการป้อนสัญญาณเข้าที่ตัวสายอากาศต้นเดียวหรือหลายต้นเพื่อแผ่กระจายคลื่นออกไป ระบบสายอากาศเก่งจำเป็นที่จะต้องให้สายอากาศในรูปแบบแถวลำดับเท่านั้น จึงจะสามารถหันพู่คลื่นหลัก (main lobe) ไปยังทิศทางตามสัญญาณที่ต้องการและหันจุดศูนย์ (nulls) และพู่รอง (side lobes) ไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอดด้วยกระบวนการวงน้ำหนัที่สายอากาศแต่ละต้น ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป สายอากาศแถวลำดับจะมีการวางตัวหลายรูปแบบ เช่น แบบเส้นและแบบระนาบ

2.1.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น

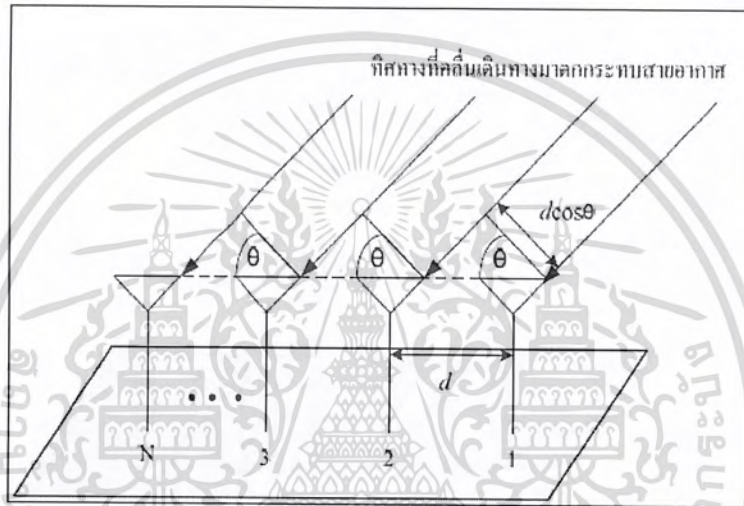
สายอากาศแถวลำดับแบบเส้น (linear array antenna) เป็นสายอากาศแถวลำดับที่พื้นฐานและมีโครงสร้างที่เรียบง่ายที่สุด คือประกอบด้วยสายอากาศแต่ละต้นวางตัวเรียงกันเป็นเส้นตรง ซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นเท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ สายอากาศแถวลำดับในรูปที่ 2.1 เป็นสายอากาศแบบเส้นจำนวน N ต้นหรือ $N \times 1$ ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับ จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ขององค์ประกอบแต่ละองค์ประกอบนั้นด้วย เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นนั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยปรกติแล้ว สายอากาศแต่ละต้นจะวางตัวห่างกันครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละต้นนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1)

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

(2.1)

ถ้าสมมุติให้สายอากาศทุกต้นมีระยะห่างจากต้นข้าง ๆ เท่ากันทุกต้น และมีแอมพลิจูดเท่ากัน แต่สายอากาศแต่ละต้นที่ถัดมาจากต้นที่ 1 หรือต้นอ้างอิงจะมีเฟสมากกว่า เมื่อ

เปรียบเทียบกับต้นก่อนหน้าดังแสดงตามรูปที่ 2.1 ซึ่งสายอากาศแถวลำดับที่มีรูปแบบดังกล่าวจะเรียกว่าแถวลำดับสม่ำเสมอ (uniform array) เราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแถวลำดับนี้จากการคูณกันระหว่างค่าพลังงานของสายอากาศต้นเดียวที่จุดอ้างอิงหรือจุดกำเนิดกับตัวประกอบแถวลำดับ (Array Factor) ตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 สายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4×1 [1]

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

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

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

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

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

แทนสมการ (2.4) ลงใน (2.5) จะสามารถลดรูปของสมการลงเหลือ

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

ย้ายข้างและจัดรูปสมการจะได้

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

ถ้ากำหนดให้จุดอ้างอิงอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของสายอากาศแถวลำดับ ดังนั้นค่าของระยะห่างของสายอากาศ $d=0$ และ $\beta=0$ ดังนั้น $\psi = kd \cos \theta + \beta = 0$ ดังนั้นสมการที่ (2.7) จะสามารถลดรูปลงได้เท่ากับ

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

ค่าของ ψ จะถือว่าน้อยมากๆ ดังนั้นเราสามารถประมาณค่าสมการได้เท่ากับ

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

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

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

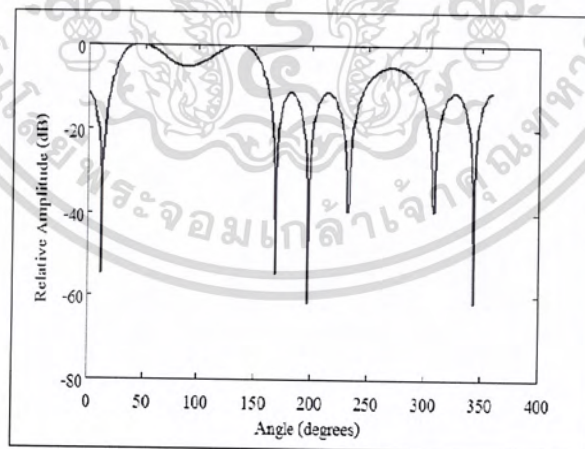
หรือ

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

ดังนั้นเมื่อเรารู้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเราสามารถหาค่าพลังงานของสายอากาศแบบเส้นได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

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

ดังนั้นจากสมการ (2.12) เราสามารถนำมาเขียนจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบเส้น 4×1 เมื่อสายอากาศแต่ละต้นวางตัวห่างกัน $\lambda/2$ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.2



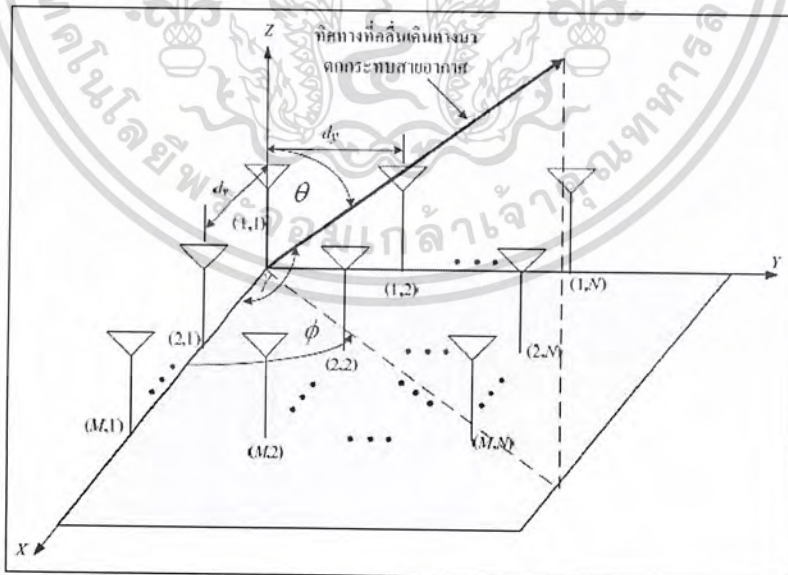
รูปที่ 2.2 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4×1 [1]

2.1.2 สายอากาศแถวลำดับระนาบ

สายอากาศแถวลำดับระนาบ (planar array antenna) เป็นรูปแบบที่ประยุกต์มาจาก รูปแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นที่ได้อธิบายในหัวข้อ 2.1.1 สายอากาศแต่ละตัวถูกจัดวางตัว เป็นสี่เหลี่ยมหรือที่เรียกว่า สายอากาศแถวลำดับระนาบ สายอากาศแถวลำดับระนาบจะมีแบบ รูปการแผ่พลังงานที่ยืดหยุ่นกว่าแบบเส้น ก็สามารถควบคุมและเปลี่ยนแปลงแบบรูปการแผ่ พลังงานได้ ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบมีความเอนกประสงค์มากและสามารถให้แบบ รูปการแผ่พลังงานที่มีความสมดุลและมีพูรองที่ดี ยิ่งไปกว่านั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบ สามารถที่จะหันพหุหลักในมุมเงยและทุก ๆ ทิศรอบตัว 360° ดังนั้นสายอากาศแถวลำดับระนาบจึง เหมาะกับการนำไปใช้ในงานเรดาร์ การชี้ทางระยะไกล (remote sensing) การสื่อสารไร้สายและ รวมถึงระบบสายอากาศเก่งด้วย ตามที่ได้อธิบายไว้ในหนังสือของ B.Allen, M. Ghavami (2005)

เราสามารถคำนวณหาพลังงานของสายอากาศแถวลำดับระนาบโดยใช้สมการที่ (2.12) ได้เช่นเดียวกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้น แต่จะมีค่าตัวประกอบแถวลำดับแตกต่างกัน ซึ่งสามารถหาได้ โดยเริ่มจากพิจารณามุม γ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 จะได้

$$\begin{aligned}\cos \gamma &= \hat{a}_x \cdot \hat{a}_\gamma = \hat{a}_x \cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \\ &= \sin \theta \cos \phi\end{aligned}\quad (2.13)$$



รูปที่ 2.3 สายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 2×2 [1]

เมื่อ $\hat{a}_x$, $\hat{a}_y$, $\hat{a}_z$ และ $\hat{a}_r$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกน x , y , z และ r ตามลำดับ เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับดังนี้

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

เมื่อ I_{m1} คือค่าสัมประสิทธิ์กระแสกระตุ้นของสายอากาศแต่ละต้น d_x คือระยะห่างของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x และ β_x คือค่าความต่างเฟสของสายอากาศแต่ละต้นในแนวแกน x เมื่อพิจารณาเฉพาะแนวแกน y เช่นเดียวกันกับที่พิจารณาแกน x เราจะได้ค่าตัวประกอบแถวลำดับเท่ากับ

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

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

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

ถ้าสมมุติให้แอมพลิจูดของสายอากาศแต่ละต้นทั้งในแกน x และ y มีค่าเท่ากันจะได้

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

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

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

เช่นเดียวกันกับสายอากาศแถวลำดับแบบเส้นเราสามารถทำสมการค่าตัวประกอบให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้โดยใช้ฟังก์ชันไซน์ตามที่แสดงในสมการที่ (2.10) และ (2.11) ซึ่งจะได้เท่ากับ

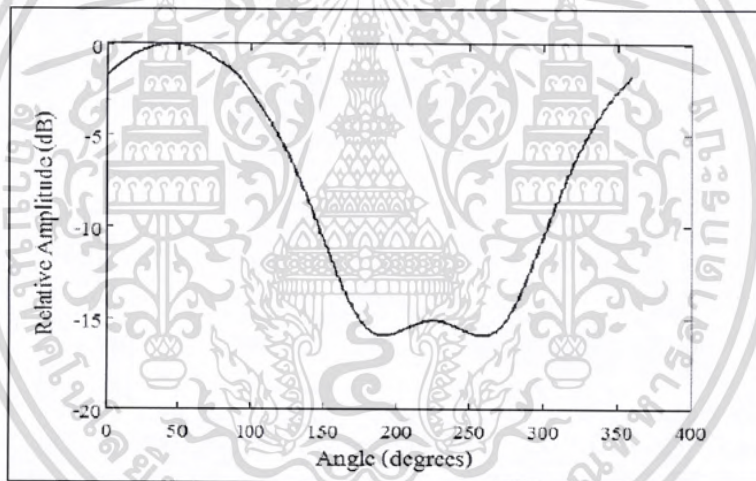
$$AF_n(\theta, \phi) = \left\{ \frac{1}{M} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_x\right)}{\sin\left(\frac{\psi_x}{2}\right)} \right\} \left\{ \frac{1}{N} \frac{\sin\left(\frac{N}{2}\psi_y\right)}{\sin\left(\frac{\psi_y}{2}\right)} \right\} \quad (2.19)$$

เมื่อ

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

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

ดังนั้นจากสมการที่ (2.12) เราสามารถนำมาเขียนจำลองแบบในโปรแกรมเพื่อแสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแบบระนาบ 2×2 เมื่อสายอากาศแต่ละต้นวางตัวห่างกัน $\lambda/4$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบจำนวน 2×2 [1]

2.2 สายอากาศเก่ง

สายอากาศเก่ง (smart antenna) ได้เริ่มพัฒนามาตั้งแต่ในช่วงปี ค.ศ.1980 เป็นต้นมา แต่เดิมระบบสายอากาศเก่งได้ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในระบบเรดาร์ แต่ต่อมาได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับงานสื่อสารไร้สายจนเป็นที่นิยม ซึ่งระบบสายอากาศเก่งจะประกอบด้วยกลุ่มของสายอากาศ

หลาย ๆ ต้น จัดเรียงตัวกันในรูปแบบต่าง ๆ กัน ร่วมกับการประมวลผลสัญญาณทั้งทางเวลาและทางตำแหน่งเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพให้กับระบบสื่อสารไร้สาย เช่น

1. เพิ่มอัตราขยายของสายอากาศจึงขยายพื้นที่ครอบคลุมให้กว้างขึ้น และทำให้ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลสูงขึ้น
2. เนื่องจากระบบสายอากาศเก่งจะหันพู่หลักไปเฉพาะในทิศทางที่ต้องการเท่านั้น จึงไม่สูญเสียพลังงานไปในทิศทางอื่น ทำให้ประหยัดพลังงานและยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่
3. ปรับปรุงเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น
4. ลดสัญญาณแทรกสอด

ระบบสายอากาศเก่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ สายอากาศแถวลำดับและชุดประมวลผลสัญญาณ ซึ่งระบบนี้สามารถลดสัญญาณแทรกสอดได้โดยการก่อรูปลำคลื่นของพู่หลักไปยังทิศทางของสัญญาณที่ต้องการในขณะที่หันจุดศูนย์หรือพูรองไปยังทิศทางของสัญญาณแทรกสอด โดยหลักการเบื้องต้นในการที่จะหั่นลำคลื่น สามารถอธิบายได้โดยการใช้ระบบสายอากาศแถวลำดับแบบระนาบเชิงเส้นจำนวน 2 ต้นตามที่แสดงในรูปที่ 2.5 จากรูป D คือความต่างเฟสของสัญญาณที่มาจากกระแทบสายอากาศแต่ละต้น d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศ W คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสัญญาณ θ_d และ θ_i คือมุมที่มาจากกระแทบสายอากาศของสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตามลำดับจากรูปสัญญาณขาออกคือ

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

และกำหนดให้สัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดตกกระทบบนสายอากาศแต่ละต้นจะได้

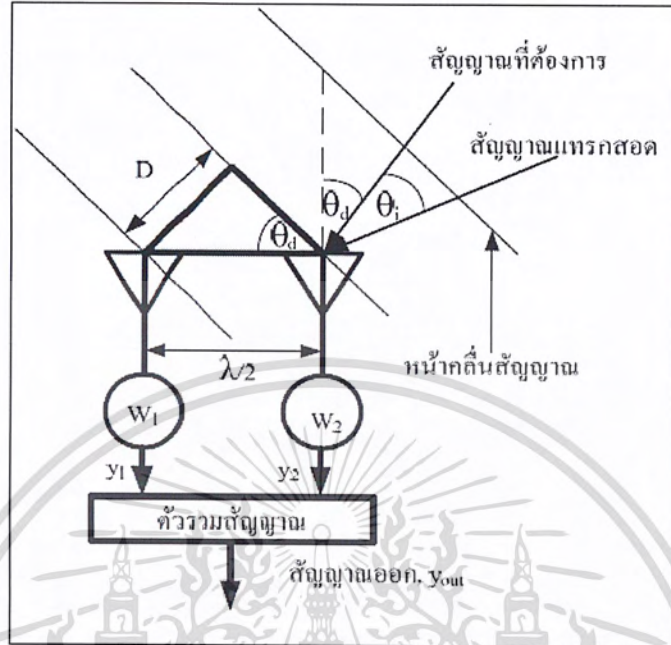
$$y_{2d} = A \quad (2.23)$$

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

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

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

เมื่อ y_{1d} y_{1i} y_{2d} และ y_{2i} คือ สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบบนสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบบนสายอากาศต้นที่ 1 สัญญาณที่ต้องการที่ตกกระทบบนสายอากาศต้นที่ 2 และสัญญาณแทรกสอดที่ตกกระทบบนสายอากาศต้นที่ 2 ตามลำดับ ดังนั้น



รูปที่ 2.5 ระบบสายอากาศกึ่งเมื่อมีสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณแทรกสอดมาตกกระทบ [1]

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

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

แทนค่าสมการที่ (2.8) และ (2.9) ลงในสมการที่ (2.3) จะได้

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

เราต้องการพจน์ของ A_i เท่ากับศูนย์เพื่อกำจัดสัญญาณแทรกสอดให้หมดไปและต้องการพจน์ของ A_d เท่ากับ A_d เพื่อยังคงรักษาสัญญาณที่ต้องการเอาไว้ ดังนั้นต้องทำให้

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

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

เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.30) เราจะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (2.32) ลงใน (2.31) จะได้

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

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

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weighting coefficients) ของสายอากาศต้นที่ 1 เท่ากับ

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

เช่นเดียวกันกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 1 เมื่อย้ายข้างสมการที่ (2.30) เราจะได้

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

แทนสมการที่ (2.35) ลงใน (2.31) จะได้

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

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

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

ดังนั้นเราจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ 2 เท่ากับ

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

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

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

ระบบสายอากาศเก่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้ ระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น (switched beam systems) และระบบสายอากาศแบบปรับตัว (adaptive antenna systems) แต่สำหรับโครงงานนี้จะใช้แค่เพียงแบบสลับลำคลื่นเท่านั้น

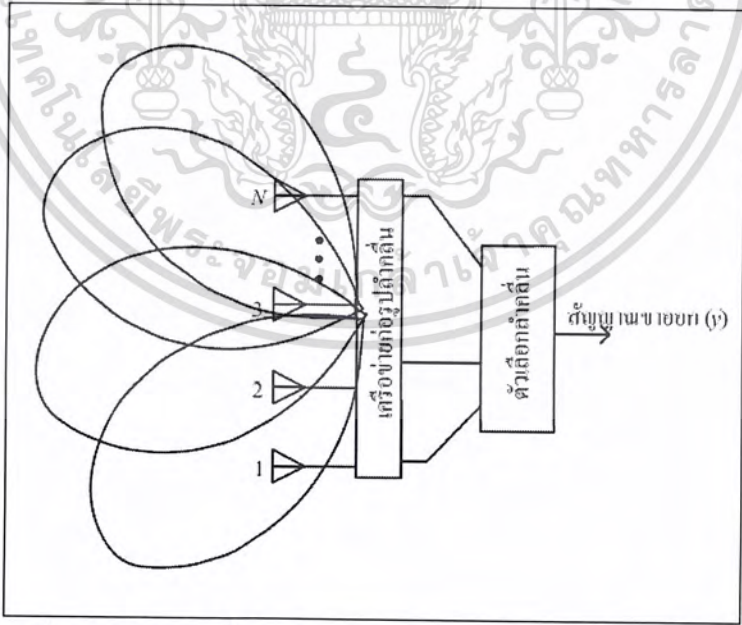
2.2.1 ระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น

ระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น (switched beam antenna systems) ประกอบไปด้วยสายอากาศแถวลำดับ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น (beamforming network) ซึ่งสามารถสร้างลำคลื่นได้ M ลำคลื่นในเวลาเดียวกัน และตัวเลือกลำคลื่น (beam selector) ตามที่แสดงในรูปที่ 2.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่วงน้ำหนัก (weight, T) สำหรับสัญญาณขาออกที่มีลำคลื่นชี้ไปยังทิศทางที่ m^{th} สามารถแสดงในสมการ (2.42) ดังนี้

$$T_m = [w_{0,m} \ w_{1,m} \ ... \ w_{N-1,m}]$$

(2.42)

เมื่อ $w_{n,m}$ คือค่าน้ำหนักของสายอากาศต้นที่ n^{th} สำหรับการก่อรูปลำคลื่นในทิศทางที่ m^{th} ซึ่งสัญญาณขาออกสามารถเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่น [1]

$$y = T^{-1}x \quad (2.43)$$

เมื่อ x คือสัญญาณที่รับเข้ามาจากสายอากาศ ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมทริกซ์การทำงานของสายอากาศแบบสลับลำคลื่นประกอบด้วย 4 ขั้นตอนดังนี้

1. ตรวจสอบทิศทางความแรงของสัญญาณ
2. เลือกลำคลื่นเพียงหนึ่งลำคลื่นที่ถูกเลือกไว้อย่างเหมาะสม
3. ใช้ลำคลื่นในทิศทางที่เลือกเมื่อผู้ใช้ไม่มีการเคลื่อนที่
4. สลับเปลี่ยนลำคลื่นเดิมไปยังลำคลื่นใหม่เมื่อผู้ใช้เคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่น

นอกจากนี้การรวมสัญญาณขาออกของสายอากาศหลาย ๆ ตัวทำให้สายอากาศแบบปรับเลือกลำคลื่นสามารถสร้างรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นได้หลากหลายมากขึ้น ซึ่งทำให้ระบบมีทางเลือกของรูปแบบการแพร่กระจายแบบรูปการแผ่พลังงานที่มากกว่าการใช้สายอากาศต้นเดียว

เราสามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของระบบสายอากาศแบบสลับลำคลื่นได้ดังนี้

ข้อดี

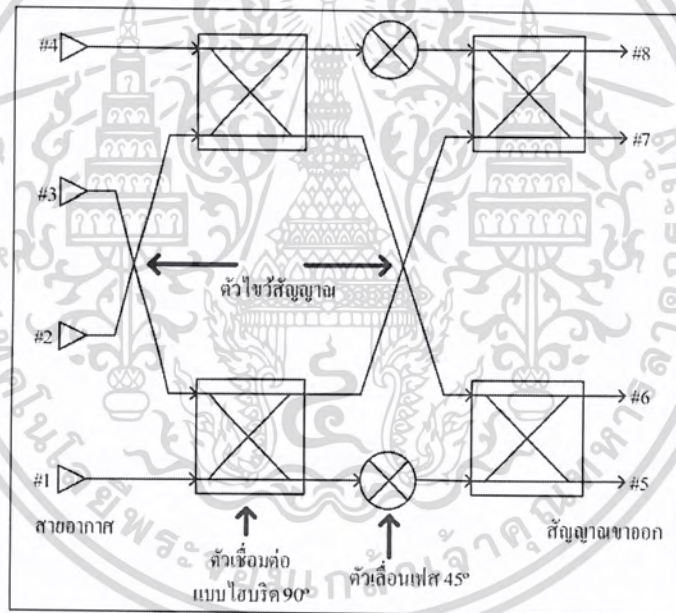
1. มีความซับซ้อนน้อย
2. สามารถติดตามสัญญาณได้รวดเร็วตามอัตราการปรับเปลี่ยนลำคลื่น
3. ในกรณีที่ระบบใช้จำนวนสายอากาศไม่มากนัก ประสิทธิภาพของสายอากาศแบบสลับลำคลื่นจะใกล้เคียงกับสายอากาศแบบปรับลำคลื่น

ข้อเสีย

1. อัตราการขยายสัญญาณต่ำในทิศทางที่อยู่ระหว่างลำคลื่น
2. การลดจำนวนสัญญาณแทรกสอดมีข้อจำกัด
3. ในกรณีที่สัญญาณไม่ชัดเจน มีการบดบังสัญญาณ มีการแทรกสอดของสัญญาณ หรือมีสัญญาณมาถึงในมุมกว้างหลาย ๆ มุม อาจมีความผิดพลาดในการเลือกสัญญาณได้

สัญญาณที่รับมาได้จากสายอากาศแต่ละต้นจะถูกถ่วงน้ำหนักในโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อที่จะสร้างลำคลื่นไปในทิศทางที่ต้องการ และส่วนตัวเลือกลำคลื่นจะทำหน้าที่เลือกลำคลื่นที่ให้สัญญาณที่แรงที่สุดให้กับระบบ ด้วยวิธีการนี้จะส่งผลให้ระบบได้รับสัญญาณแทรกสอด

ลดลง ผลลัพธ์ที่ได้คือระบบจะมีสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งเนื่องมาจากที่โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และตัวเลือกลำคลื่นสามารถใช้งานข่ายการสวิตช์ (switching network) ที่มีความเร็วต่ำ จึงส่งผลให้ระบบสายอากาศแบบสลับคลื่นมีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบสายอากาศแบบปรับตัว เทคนิคที่นิยมนำมาสร้างโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นคือ Butler matrix ตามที่แสดงในรูปที่ 2.7 ประกอบด้วยสายอากาศแบบแถวลำดับแบบเส้นจำนวน 4 ต้น แต่ละต้นวางตัวห่างกัน เมื่อสัญญาณตกกระทบมาที่สายอากาศ สัญญาณจะถูกส่งผ่านไปที่ตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° (90° hybrid coupler) และตัวไขว้สัญญาณ (cross over) ตามที่รูปที่ 2.7 ผลจากการรวมสัญญาณในตัวเชื่อมต่อแบบไฮบริด 90° และตัวไขว้สัญญาณส่งผลให้สามารถสร้างลำคลื่นที่มีพหุหลักชี้ไปที่ 42° 71° 109° และ 138°

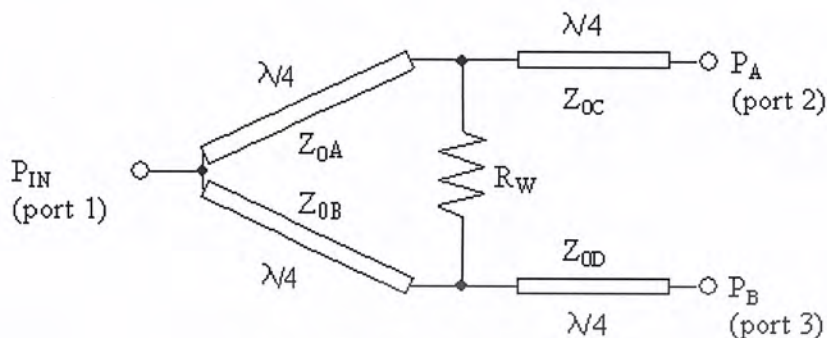


รูปที่ 2.7 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น Butler matrix [1]

2.3 วงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

วงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน (wilkinsons power divider) นั้นมีรูปแบบอย่างง่าย แสดงดังรูปที่ 2.8 โดยจะมีพอร์ตทั้งหมด 3 พอร์ต แบ่งเป็น อินพุต 1 พอร์ตและเอาต์พุต 2 พอร์ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 วงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

หลักการทำงานเป็นตัวแบ่งพลังงานออกเป็นสองทาง โดยเมื่อมีสัญญาณเข้ามาที่พอร์ต 1 แล้ว จะทำการแบ่งสัญญาณที่มีขนาดแอมพลิจูดและเฟสเท่ากัน ออกไปยังพอร์ตที่ 2 และ 3 ซึ่งเหตุผลที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่า ตัวต้านทานที่อยู่ตรงส่วนของรอยแยกระหว่างพอร์ตที่ 2 และ 3 นั้นมีค่าความต้านทานเท่ากัน จึงทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านและถูกแยกออกจากพอร์ตที่ 1 ซึ่งเป็นอินพุต ทำให้จุดปลายของพอร์ตเอาต์พุตและอินพุตขนานกัน เพื่อที่พอร์ตทั้งสองจะโอนถ่ายอินพีแดนซ์ไปยังค่า $2 \times Z_0$ จากอินพุตเพื่อให้รวมกันเป็น Z_0

ตัวถ่ายโอนควอเตอร์เวฟในขาแต่ละข้างจะทำหน้าที่คือ เมื่อไม่มีตัวถ่ายโอนควอเตอร์เวฟ ความต้านทานรวมของเอาต์พุตทั้งสองจะเท่ากับ $\frac{Z_0}{2}$ เพราะฉะนั้นค่าความต้านทานของเส้นควอเตอร์เวฟต้องเท่ากับ $1.414 \times Z_0$ เพื่อที่อินพุตจะต้องตรงกัน เพื่อพอร์ต 2 และ 3 มีค่าสุดท้ายของอินพีแดนซ์เป็น Z_0

ในลักษณะของการเป็นตัวรวมพลังงาน ให้ดูจากสัญญาณอินพุตที่พอร์ต 2 ในกรณีนี้ มันแบ่งระหว่างพอร์ต 1 กับตัวต้านทาน R ที่ไม่ปรากฏอยู่ที่พอร์ต 3 เท่า ๆ กัน ตัวต้านทานทำหน้าที่สำคัญในการแยกพอร์ต 2 และ 3 สังเกตว่าสำหรับสัญญาณอินพุตที่พอร์ต 2 หรือ 3 นั้น พลังงานครึ่งหนึ่งถูกตัวต้านทานลดลงและอีกครึ่งถูกส่งไปยังพอร์ต 1 ทำให้พอร์ต 2 ถึงถูกแยกออกจากพอร์ต 3 และในทางกลับกัน ให้ดูจากสัญญาณที่แยกออกเมื่อเข้าสู่พอร์ต 2 ส่วนหนึ่งไหลไปตามเข็มนาฬิกาผ่านตัวต้านทาน และอีกส่วนไหลทวนเข็มนาฬิกาผ่านแขนตัวบน แล้วแยกออกที่อินพุตพอร์ต แล้วยังไหลทวนเข็มนาฬิกาผ่านแขนตัวล่างเพื่อไปยังพอร์ต 3 การรวมสัญญาณที่พอร์ต 3 ได้ผลออกมาเท่ากับค่าแอมพลิจูด

ในการออกแบบนั้นจะใช้สมการในการออกแบบตามทฤษฎีของสายส่งไมโครสตริป ซึ่งจะมองค่าอิมพีแดนซ์เป็นหลัก โดยจะเป็นดังนี้

$$Z_{0A} = Z_0 \times \left(\left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{-1.5} + \left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{-0.5} \right)^{0.5} \quad (2.44)$$

$$Z_{0B} = Z_0 \times \left(1 + \frac{P_A}{P_B} \right)^{0.5} \left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{0.25} \quad (2.45)$$

$$Z_{0C} = Z_0 \times \left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{-0.25} \quad (2.46)$$

$$Z_{0D} = Z_0 \times \left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{0.25} \quad (2.47)$$

$$R_W = Z_0 \times \left(\left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{0.5} + \left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{-0.5} \right) \quad (2.48)$$

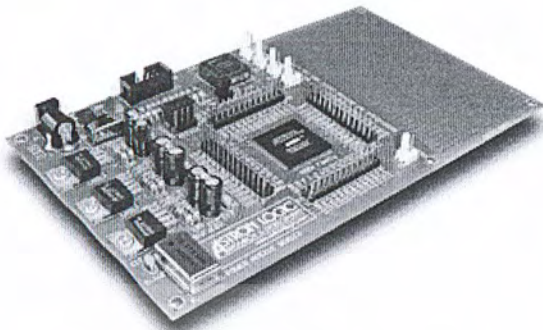
โดยใช้การอ้างอิงจากรูปที่ 2.8 เพื่อใช้ในการออกแบบค่าของอิมพีแดนซ์แต่ละเส้นของสายส่งไมโครสตริป

2.4 บอร์ดทดลอง POWER ACEX1K

บอร์ดทดลอง POWER ACEX1K-50 ภายในบอร์ดจะใช้ชิป FPGA เบอร์ EPIK50TC144 เป็นชิป FPGA ที่มีความจุของเกตประมาณ 50,000 เกต มี Logic Elements (LEs) 2,880 LEs มีหน่วยความจำภายใน (Internal Memory) 40,960 Bits และมีขา I/O ให้สามารถใช้งานได้อย่างอิสระถึง 102 ขา สามารถใช้งานกับ I/O แบบ 5 V, 3.3V หรือ 2.5 V

2.4.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของบอร์ด POWER ACEX1K-50

ส่วนประกอบต่างๆของบอร์ด POWER ACEX1K-50 เป็นดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 บอร์ด POWER ACEX1K-50

2.4.2 คุณสมบัติต่างๆของชิป FPGA ที่ใช้กับบอร์ด POWER ACEX1K-50

บอร์ด POWER ACEX1K-50 มีคุณสมบัติต่างๆ ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติต่างๆของชิป FPGA ที่ใช้กับบอร์ด POWER ACEX1K-50

Feature	POWER ACEX1K-50
ACEX1K Part Number	EP1K50TC144
Typical gates	50,000
Speed Grade	-3
Maximum system gates	199,000
Logic elements (LEs)	2,880
Embedded Array Block (EABs)	10
Total RAM bits (Internal memory)	40,960
Multi Volt I/O Support	2.5V , 3.3V ,5.0V
Maximum Frequency	180MHz
User I/O pins	102
Package	TQFP144

2.4.3 พอร์ตขยายช่องสัญญาณแบบ Header 13x2 ขา จำนวน 4 ตัว

บอร์ด POWER ACEX1K SERIES แต่ละรุ่นจะมีพอร์ตขยายช่องสัญญาณ J6, J7, J8 และ J9 ให้ใช้งานได้อย่างอิสระ 4 พอร์ต แต่ละพอร์ตจะมีขนาด 13x2 ขา ต่อกับขา I/O ของ FPGA โดยตรง ดูได้จากตารางที่ 2.2(1), 2.2(2), 2.2(3) และ 2.2(4)

ตารางที่ 2.2(1) ความสัมพันธ์ของ J6 กับตำแหน่ง I/O ของ ACEX1K-50

J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number	J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number
1	7 (I/O)	2	8 (I/O)
3	9 (I/O)	4	10 (I/O)
5	11 (I/O)	6	12 (I/O)
7	13 (I/O)	8	14 (I/O)
9	17 (I/O)	10	18 (I/O)
11	19 (I/O)	12	20 (I/O)
13	21 (I/O)	14	22 (I/O)
15	23 (I/O)	16	26 (I/O)
17	27 (I/O)	18	28 (I/O)
19	29 (I/O)	20	30 (I/O)
21	31 (I/O)	22	32 (I/O)
23	33 (I/O)	24	36 (I/O)
25	37 (I/O)	26	GND

ตารางที่ 2.2(2) ความสัมพันธ์ของ J7 กับตำแหน่ง I/O ของ ACEX1K-50

J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number	J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number
1	38 (I/O)	2	39 (I/O)
3	41 (I/O)	4	42 (I/O)
5	43 (I/O)	6	44 (I/O)
7	46 (I/O)	8	47 (I/O)

J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number	J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number
9	48 (I/O)	10	49 (I/O)
11	51 (I/O)	12	54 (Ded. Input)
13	56 (Ded. Input)	14	59 (I/O)
15	60 (I/O)	16	62 (I/O)
17	63 (I/O)	18	64 (I/O)
19	65 (I/O)	20	67 (I/O)
21	68 (I/O)	22	69 (I/O)
23	70 (I/O)	24	72 (I/O)
25	73 (I/O)	26	GND

ตารางที่ 2.2(3) ความสัมพันธ์ของ J8 กับตำแหน่ง I/O ของ ACEX1K-50

J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number	J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number
1	78 (I/O)	2	79 (I/O)
3	80 (I/O)	4	81 (I/O)
5	82 (I/O)	6	83 (I/O)
7	86 (I/O)	8	87 (I/O)
9	88 (I/O)	10	89 (I/O)
11	90 (I/O)	12	91 (I/O)
13	92 (I/O)	14	95 (I/O)
15	96 (I/O)	16	97 (I/O)
17	98 (I/O)	18	99 (I/O)
19	100 (I/O)	20	101 (I/O)
21	102 (I/O)	22	109 (I/O)
23	110 (I/O)	24	111 (I/O)
25	112 (I/O)	26	GND

ตารางที่ 2.2(4) ความสัมพันธ์ของ J9 กับตำแหน่ง I/O ของ ACEX1K-50

J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number	J6 Pin Number	ACEX1K Pin Number
1	113 (I/O)	2	114 (I/O)
3	116 (I/O)	4	117 (I/O)
5	118 (I/O)	6	119 (I/O)
7	120 (I/O)	8	121 (I/O)
9	122 (I/O)	10	124 (Ded. Input)
11	126 (Ded. Input)	12	128 (I/O)
13	130 (I/O)	14	131 (I/O)
15	132 (I/O)	16	133 (I/O)
17	135 (I/O)	18	136 (I/O)
19	137 (I/O)	20	138 (I/O)
21	140 (I/O)	22	141 (I/O)
23	142 (I/O)	24	143 (I/O)
25	144 (I/O)	26	GND

2.4.4 Module Oscillators

บอร์ด POWER ACEX1K SERIES มีโมดูลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 25.175 MHz (สามารถถอดและเปลี่ยนเป็นค่าความถี่ที่ต้องการได้) เป็นแหล่งกำเนิดความถี่สำหรับการออกแบบวงจรที่ต้องการการอ้างอิงกับสัญญาณนาฬิกา โดยป้อนเข้าที่ขา 55 (GCLK1) ของ FPGA

2.4.5 Terminal แบบ 2 ขั้ว สำหรับ GCLK1 และ GCLK2

Terminal ตัวผู้แบบ 2 ขั้ว ใช้สำหรับต่อกับสัญญาณนาฬิกาจากภายนอกเพื่อป้อนให้แก่ FPGA ทางขา Global Clock 1 (GCLK1) หรือขา Global Clock 2 (GCLK2) โดยตำแหน่งขา ดูจากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของ T4, T5 กับตำแหน่งขาของ ACEX1K-50

T4 Pin Number	ACEX1K Pin Number	T5 Pin Number	ACEX1K Pin Number
1 (+)	125 (GCLK2)	1 (+)	55 (GCLK1)
2 (-)	GND	2 (-)	GND

2.4.5 Terminal แบบ 2 ขั้ว สำหรับแรงดัน 2.5 โวลต์, 3.3 โวลต์ และ 5 โวลต์

Terminal ตัวผู้แบบ 2 ขั้วสำหรับต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันภายในบอร์ด POWER ACEX1K SERIESเพื่อเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟตรงให้กับวงจรภายนอก โดยมีแรงดันให้เลือกใช้งาน 3 ระดับคือ 2.5 โวลต์, 3.3 โวลต์ และ 5.0 โวลต์ ดูตำแหน่งขาที่ตาราง 2.4

ตารางที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของ T1, T2 และ T3 กับแหล่งจ่ายแรงดันภายในบอร์ด

T1 Pin Number	Volt	T2 Pin Number	Volt	T3 Pin Number	Volt
1 (+)	5 Volt	1 (+)	3.3 Volt	1 (+)	2.5 Volt
2 (-)	GND	2 (-)	GND	2 (-)	GND

2.5 ประวัติและความเป็นมาของระบบจีพีอาร์เอส

ระบบโทรศัพท์ไร้สายจีเอสเอ็ม (Global System for Mobile communications : GSM) เป็นระบบการสื่อสารไร้สายในยุคที่ 2 (2G) ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายกว่า 80% ของตลาดโทรศัพท์ไร้สายทั่วโลก คือมีผู้ใช้งานกว่า 3,000 ล้านคนในกว่า 212 ประเทศทั่วโลก ระบบจีเอสเอ็มได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มวิจัยที่ชื่อว่า European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT) ในปี ค.ศ. 1982 และได้ประกาศใช้อย่างเป็นทางการในปี ค.ศ. 1991 โดยบริษัท Radiolinja ในประเทศฟินแลนด์ ระบบจีเอสเอ็มใช้งานที่ย่านความถี่ 900 (GSM 900) เป็นย่านความถี่หลักที่ใช้ในยุโรปและเอเชียแปซิฟิก ส่วนระบบจีเอสเอ็มใช้งานที่ย่านความถี่ 1800 (GSM 1800) โดยเป็นย่านความถี่หลักที่ใช้ในยุโรปและเอเชีย แต่ไม่มีการนำมาใช้กว้างขวางเหมือน GSM 900 สุดท้ายระบบจีเอสเอ็มที่ใช้งานที่ย่านความถี่ 1900 (GSM 1900) เป็นย่านความถี่หลักที่ใช้ในอเมริกาและแคนาดาซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.5 ระบบ

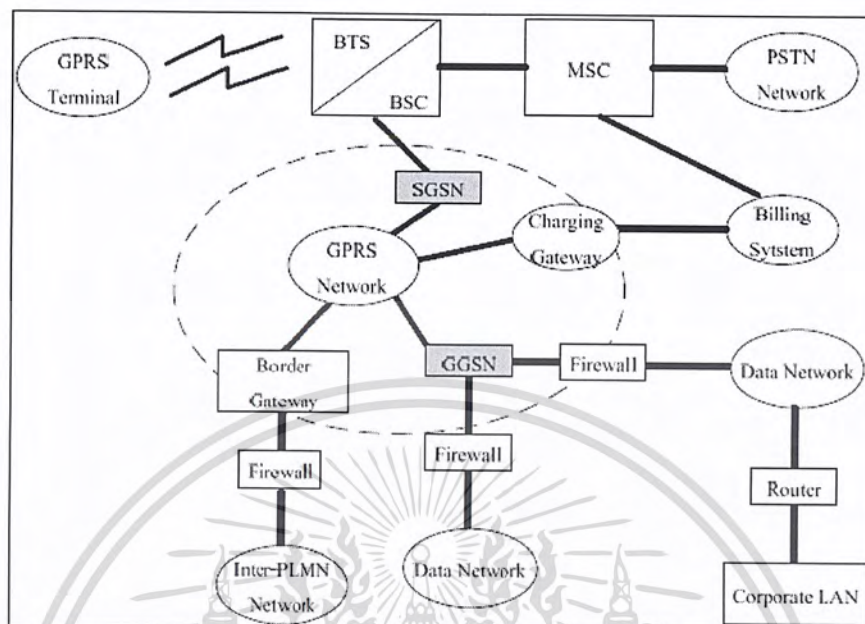
จีเอสเอ็มในยุคที่ 2 เป็นระบบสื่อสารที่มีความเร็วต่ำที่เน้นการสื่อสารในรูปแบบเสียงเท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอต่อการใช้งานรูปแบบใหม่ ๆ เช่น อินเทอร์เน็ต ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบเข้าสู่ยุคที่ 2.5 (2.5G) หรือระบบจีพีอาร์เอส

ตารางที่ 2.5 ย่านความถี่มาตรฐานของระบบจีพีอาร์เอส

ย่านความถี่ (MHz)	สัญญาณขาขึ้น สัญญาณขาลง (MHz)	พื้นที่ที่ใช้งาน
900	880-915, 925-960	ยุโรป, เอเชียแปซิฟิกและแอฟริกา
1800	1710-1785, 1805-1880	ยุโรป, เอเชียแปซิฟิกและแอฟริกา
1900	1850, 1990	อเมริกา

ระบบจีพีอาร์เอสได้ถูกพัฒนามาบนพื้นฐานของระบบจีเอสเอ็ม ส่งผลให้ระบบจีพีอาร์เอสใช้งานที่ความถี่และมีการจัดสรรความถี่แบบเดียวกันกับระบบจีเอสเอ็ม โดยที่เพิ่มเติมขึ้นมาคือระบบจีพีอาร์เอสได้นำเอาระบบการส่งข้อมูลแบบการสลับกลุ่มข้อมูล (packet-switch) มาใช้คือข้อมูลที่ถูกส่งจากต้นทางมาปลายทาง จะถูกแปลงเป็นชุดข้อมูลโดยมีที่อยู่ระบุแบบวิธีสื่อสารอินเทอร์เน็ต (Internet Protocol : IP address) กำกับอยู่ภายใน ซึ่งไม่เหมือนกับระบบเดิมที่เป็นแบบเฟรมวิทยุ (radio frame) ด้วยวิธีการดังกล่าวนี้ระบบสามารถส่งข้อมูลได้สูงที่สุดถึง 160 kbps นอกจากนี้ระบบจีพีอาร์เอสสามารถรองรับบริการในรูปแบบ บริการข้อความมัลติมีเดีย บริการข้อความสั้น (ShortMessage Service : SMS) Push To Talk (PTT) Point-To-Point (P2P) อินเทอร์เน็ต และสามารถที่เชื่อมต่อเครือข่ายและโอนถ่ายข้อมูลพร้อม ๆ กันแม้ในขณะที่มีสายติดต่อเข้ามาก็ตามจึงทำให้การ โอนถ่ายข้อมูลไม่ขาดตอน จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าระบบจีพีอาร์เอสเป็นระบบที่มีข้อดีหลายอย่างคือเป็นระบบสื่อสารไร้สายที่มีความเร็วสูง สามารถรองรับการใช้งานได้หลากหลาย และจากการที่ตั้งอยู่บนมาตรฐานเดียวกับระบบจีเอสเอ็ม จึงส่งผลให้ระบบจีพีอาร์เอสมีพื้นที่ให้บริการที่ครอบคลุมทั่วถึง อีกทั้งในปัจจุบันค่าบริการของระบบจีพีอาร์เอสมีราคาไม่แพงนักเมื่อเปรียบเทียบกับระบบไร้สายความเร็วสูงอื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



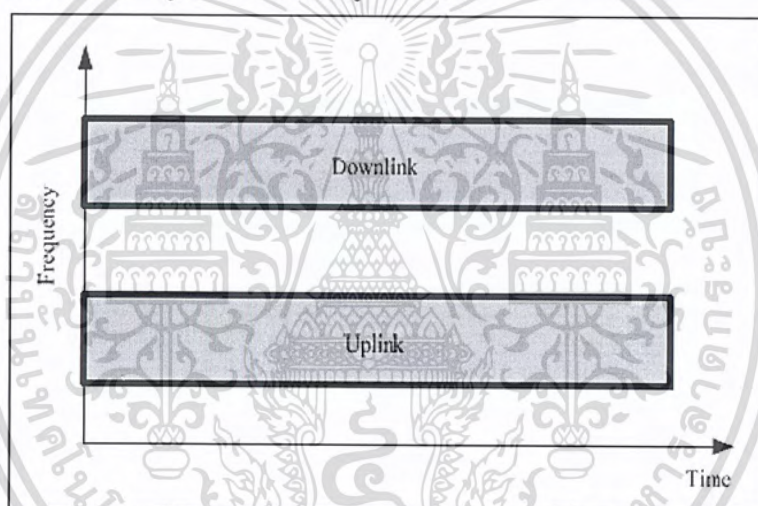
รูปที่ 2.10 เครือข่ายระบบจีพีอาร์เอส [1]

2.5.1 เครือข่ายระบบจีพีอาร์เอส

รูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงเครือข่ายของระบบจีพีอาร์เอส จากรูปจะเห็นว่าการเปลี่ยนจากระบบจีเอสเอ็มในยุคที่ 2 มาเป็นระบบจีพีอาร์เอสใช้อุปกรณ์เพิ่มเพียงเล็กน้อย อุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดคือ โหนดการช่วยเหลือการบริการจีพีอาร์เอส (Serving GPRS Support Node : SGSN) และโหนดการช่วยเหลือทางเข้าออกจีพีอาร์เอส (Gateway GPRS Support Node : GGSN) โดยทั้งสองหน่วยหลักขององค์ประกอบนี้จะถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน โดยมีอุปกรณ์อื่น ๆ เป็นตัวช่วยเพื่อไปร่วมใช้กับอุปกรณ์สัญญาณวิทยุ (Radio Interface) จากสถานีฐานผ่านตัวควบคุมที่เรียกว่าตัวควบคุมชุดข้อมูล (Packet Control Unit : PCU) ที่ติดตั้งไว้ที่ตัวควบคุมที่สถานีฐาน (Base Station Controller : BSC) ทั้งนี้ อาจมองได้ว่าเครือข่ายจีพีอาร์เอสเป็นอีกเครือข่ายหนึ่งที่เข้าถึงตัวลูกข่ายผ่านสัญญาณวิทยุของเครือข่ายจีเอสเอ็ม ส่วนอุปกรณ์เพิ่มเติมอื่น ๆ คือ Inter-PLMN Network และ Border Gateway (BG) อุปกรณ์ตัวนี้ทำหน้าที่ดูแลความปลอดภัยและตรวจสอบสถานะ การเข้าถึงโครงข่าย Inter-PLMN

2.5.2 การส่งสัญญาณในระบบจีพีอาร์เอส

ในระบบจีพีอาร์เอสมีกกลุ่มข้อมูลหนึ่งที่เรียกว่า Packet Data Traffic Channel (PDTCH) กลุ่มข้อมูลนี้ทำหน้าที่กำหนดอัตราการส่งข้อมูล โดยกำหนดในรูปแบบที่เรียกว่า รูปแบบการเข้ารหัส ซึ่งแบ่งเป็น 4 รูปแบบดังนี้ CS-1 CS-2 CS-3 และ CS-4 โดยแต่ละแบบมีวิสัยความสามารถของการส่งข้อมูลเท่ากับ 9.05 13.4 15.6 และ 21.4 kbps ต่อระยะเวลาตามลำดับ โดยมี Link Adaptation (LA) algorithms ทำหน้าที่เลือก CS ที่เหมาะสมตามคุณภาพของสัญญาณที่บ่งชี้ด้วยค่าอัตราส่วนสัญญาณข้อมูลต่อสัญญาณแทรกสอด ว่าระบบจีพีอาร์เอสจะสามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงได้ ถ้าระบบมีค่าอัตราส่วนสัญญาณข้อมูลต่อสัญญาณแทรกสอดที่สูงเพียงพอ ซึ่งการแบ่งความถี่ในการรับส่งข้อมูลนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การรับ-ส่งสัญญาณแบบแบ่งความถี่ [1]

2.5.3 คุณลักษณะของระบบจีพีอาร์เอส

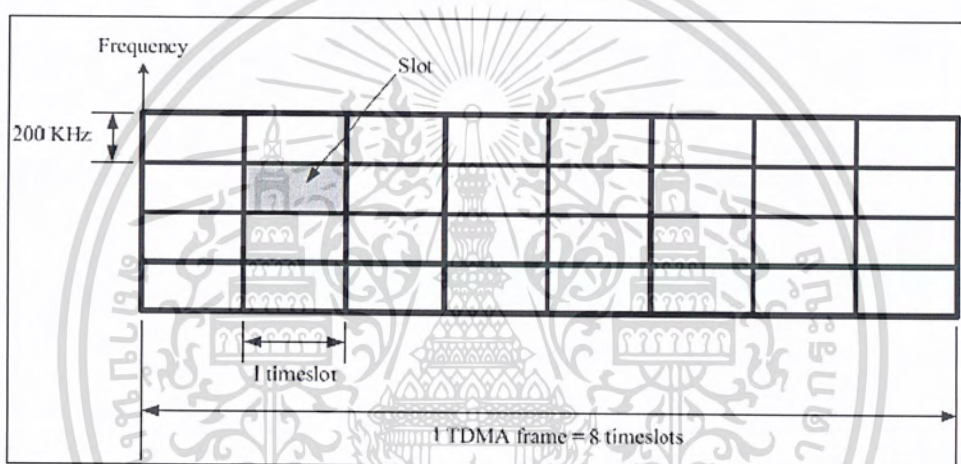
เนื่องจากที่ระบบจีพีอาร์เอสได้ถูกพัฒนามาจากระบบจีเอสเอ็มจึงส่งผลให้ระบบจีพีอาร์เอสมีคุณลักษณะใกล้เคียงกับระบบจีเอสเอ็มมาก เพียงแต่เพิ่มคุณสมบัติในการส่งข้อมูลแบบชุดข้อมูล ซึ่งคุณลักษณะของระบบจีพีอาร์เอสมีดังนี้

1. ใช้งานที่ความถี่ 900 1800 และ 1900 MHz เช่นเดียวกับระบบจีพีอาร์เอส โดยย่านความถี่ขาขึ้น (uplink) และขาลง (downlink) ของทั้ง 3 ย่านความถี่

2. มีการจัดสรรสัญญาณความถี่แบบการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา โดยการส่งสัญญาณจะถูกแบ่งเป็นเฟรม หนึ่งเฟรมจะมีความยาว 4.165 มิลลิวินาที ในแต่ละเฟรมจะมีจำนวนช่องเวลาสูงสุดทั้งหมด 8 ช่อง เวลาและความกว้างของช่องสัญญาณวิทยุแต่ละช่องกว้าง 200 kHz

3. มีการจัดสรรสัญญาณความถี่วิทยุสื่อสารสองทางแบบแบ่งความถี่ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.3 ด้วยวิธีการนี้ส่งผลให้สัญญาณขาขึ้นและขาลงไม่กวนกัน

4. มีรูปแบบการมอดูเลตแบบ Guassian Minimum Shift Keying (GMSK) และรูปแบบในการจัดสรรสัญญาณจะเป็นไปตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปแบบการจัดสรรสัญญาณของระบบจีพีอาร์เอส [1]

บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์

3.1 การออกแบบ

ในโครงงานนี้จะแบ่งส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแบบสลับลำคลื่น ซึ่งแบ่งเป็นส่วนของตัวสายอากาศแบบระนาบ และส่วนของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น โดยที่รายละเอียดต่างๆ ในการออกแบบและสร้าง สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.1.1 การออกแบบและสร้างสายอากาศแบบระนาบ

ในการออกแบบสายอากาศแบบระนาบนั้น จะมีค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการสร้าง ดังต่อไปนี้

ความกว้างของตัวแผ่นกระจายคลื่น (W)

ความยาวของตัวแผ่นกระจายคลื่น (L)

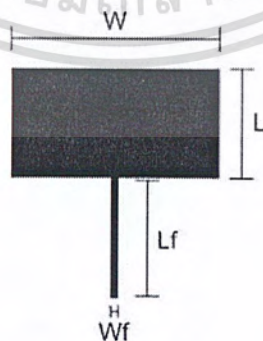
ความกว้างของสายส่ง (Transmission Line) (W_f)

ความยาวของสายส่ง (Transmission Line) (L_f)

ความหนาของไดอิเล็กทริก (Dielectric) (h)

ค่าคงตัวของไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) (ϵ_r)

ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ลักษณะของตัวแผ่นกระจายคลื่น

ในการคำนวณเพื่อการออกแบบ และการสร้างนั้นสามารถเริ่มได้จากสมการดังต่อไปนี้
การคำนวณหาความกว้างของแผ่นกระจายคลื่น

$$\begin{aligned} W &= \frac{v_0}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \\ &= \frac{3 \times 10^8}{2(1.8425 \times 10^9)} \sqrt{\frac{2}{4.3 + 1}} \\ &= 6.5 \text{ cm.} \end{aligned} \quad (3.1)$$

การคำนวณหาค่าไดอิเล็กตริก

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{reff}} &= \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \\ &= \frac{4.3 + 1}{2} + \frac{4.3 - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{0.15}{6.5} \right]^{-1/2} \\ &= 4.11 \end{aligned} \quad (3.2)$$

การคำนวณหาความยาวทั้งหมด

$$\begin{aligned} L_{\text{reff}} &= \frac{v_0}{2f_0 \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \\ &= \frac{3 \times 10^8}{2(1.8425 \times 10^9) \sqrt{4.11}} \\ &= 4.038 \text{ cm.} \end{aligned} \quad (3.3)$$

การคำนวณหาความยาวส่วนต่าง

$$\begin{aligned} \Delta L &= 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \\ &= 0.412(0.15) \frac{(4.11 + 0.3) \left(\frac{6.5}{0.15} + 0.264 \right)}{(4.11 - 0.258) \left(\frac{6.5}{0.15} + 0.8 \right)} \end{aligned} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.07 \text{ cm.}$$

การคำนวณหาความยาวที่ใช้งานได้จริง

$$\begin{aligned} L &= L_{\text{reff}} - 2\Delta L \\ &= 4.038 - 2(0.07) \\ &= 3.8 \text{ cm.} \end{aligned} \quad (3.5)$$

การคำนวณหาความกว้างของสายส่ง ในที่นี้เรากำหนดให้ค่า อิมพีแดนซ์ (Impedance : Z) ให้มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม

$$\frac{W_f}{h} = \frac{2}{\pi} \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right\} \right] \quad (3.6)$$

$$\frac{W_f}{0.15} = \frac{2}{\pi} \left[5.7 - 1 - \ln(2(5.7) - 1) + \frac{4.3 - 1}{2(4.3)} \left\{ \ln(5.7 - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{4.3} \right\} \right]$$

$$W_f = 0.25 \text{ cm.}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } B &= \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\epsilon_r}} \\ &= \frac{377\pi}{2(50)\sqrt{4.3}} \\ &= 5.7 \end{aligned} \quad (3.7)$$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถนำไปคำนวณเพื่อการออกแบบได้ โดยผู้จัดทำต้องการที่จะออกแบบเพื่อนำมาใช้เป็นภาครับ (Receiver) โดยนำมาใช้ในย่านความถี่ GSM 1800 MHz (1805 MHz - 1880 MHz) และได้เลือกใช้แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Epoxy) แบบหนา 2 หน้าที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก 4.3 และความสูงชั้นไดอิเล็กตริก 1.5 mm. และได้กำหนดความยาวของสายส่งเป็น $\frac{1}{4}$ เท่าของความยาวคลื่น และคำนวณความกว้างของสายส่งได้ 0.29 cm.

ผลที่ได้จากการคำนวณที่ค่าความถี่กลางที่ 1842.5 MHz. ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้
ความกว้างของตัวแผ่นกระจายคลื่น $W = 6.5\text{ cm}$.

ความยาวของตัวแผ่นกระจายคลื่น $L = 3.71\text{ cm}$.

ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้จะนำไปใช้เป็นจุดเริ่มต้นเพื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด เพื่อสร้างสายอากาศที่ดีที่สุดก่อนที่จะนำมาเรียงกัน 4 ตัว โดยรูปสายอากาศนั้น สามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 สายอากาศแบบกระบอก

3.1.2 การออกแบบและสร้างโครงข่ายท่อรูปสี่เหลี่ยม

ในการออกแบบ โครงข่ายท่อรูปสี่เหลี่ยมสำหรับโครงงานนี้ จะนำ Butler matrix มาใช้ในการสร้าง ซึ่งรายละเอียดหลักๆ สำหรับภาพรวมนั้น ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 และในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการออกแบบและการสร้าง เพื่อนำไปใช้วัดผลค่าคุณลักษณะของส่วนประกอบต่างๆ ของ Butler matrix และนำไปใช้งานจริงร่วมกับสายอากาศแฉกลำดับแบบระนาบต่อไป โดยในการออกแบบ Butler matrix จำนวนของลำคลื่นจะเท่ากับจำนวนของสายอากาศที่นำมาวางเรียงกันเป็นแฉกลำดับ ซึ่งในโครงงานนี้จะเท่ากับ 4 หมายความว่า จะมีลำคลื่น 4 ลำคลื่นที่จะทำการสลับไปมา

ส่วนประกอบหลักๆ ของ Butler matrix นั้นจะประกอบไปด้วย ไฮบริด 90° (Quadrature Hybrid) ตัวไขว้สัญญาณ (Crossover Coupler) และตัวเลื่อนเฟส 45° (Phase Shifter) ซึ่งจำนวนของแต่ละส่วนประกอบนั้นจะสามารถหาได้จาก

$$\text{NO. of hybrid} = \frac{N}{2} \log_2 N \tag{3.8}$$

$$\text{NO. of Phase Shifters} = \frac{N}{2} (\log_2 N - 1) \tag{3.9}$$

โดยที่ N คือจำนวนของลำคลื่น เมื่อแทนค่าจะได้

NO. of hybrid = $\frac{4}{2}\log_2 4 = 4$

NO. of Phase Shifters = $\frac{4}{2}(\log_2 4 - 1) = 2$

ในส่วนของการคำนวณเพื่อการออกแบบส่วนต่างๆ ของ Butler matrix นั้นจะแบ่งออกเป็นดังนี้

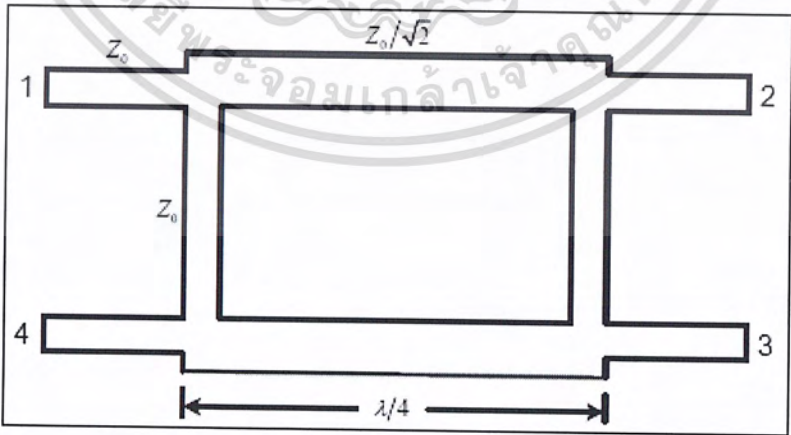
3.1.2.1 ไฮบริด 90°

สำหรับตัวเชื่อมต่อไฮบริด 90° นั้นจะเป็นส่วนแรกของ Butler matrix ซึ่งจะมีลักษณะตามรูปที่ 3.3 โดยใช้ทฤษฎีในการออกแบบจาก [2] และมีหลักการทำงาน คือจะมีค่าความต่างเฟสของ S_{21} เทียบกับ S_{31} เท่ากับ 90° และในกรณีเดียวกัน ค่าความต่างเฟสของ S_{34} เทียบกับ S_{24} ก็จะทำกับ 90° เช่นเดียวกัน สามารถเขียนความสัมพันธ์ของแต่ละพอร์ตรูปเป็นเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{pmatrix}$$

(3.10)

โดยที่การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวเชื่อมต่อไฮบริด 90° สามารถทำได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 ตัวเชื่อมต่อไฮบริด 90°

1) เมื่อ $Z_0 = 50\Omega$, $\epsilon_r = 3.03$, $h = 0.8$ mm. และ $f = 1800$ MHz

จากสมการที่ (3.7) ทำการแทนค่า จะได้

$$B = \frac{377\pi}{2 \times 50 \times \sqrt{3.03}} = 6.8 \quad (3.11)$$

นำค่า B ที่ได้ไปหาค่าความกว้าง W จากสมการที่ (3.6) จะได้

$$\frac{W}{0.8} = \frac{2}{\pi} \left(6.8 - 1 - \ln(2(6.8) - 1) + \frac{3.03 - 1}{2 \times 3.03} (\ln(6.8) - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{3.03} \right)$$

$$W = 2.5 \times 0.8 = 2 \text{ mm.}$$

หาค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จากสมการที่ (3.2) จะได้

$$\epsilon_r = \frac{3.03 + 1}{2} + \frac{3.03 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12}{2.5}}} \right) = 2.44$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_{\text{reff}} \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้สามารถนำไปใช้จริงได้ เพราะฉะนั้น จะสามารถหาความยาวคลื่นได้จาก

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} = \frac{3 \times 10^8}{1.8 \times 10^9 \times \sqrt{2.44}} = 106.7 \text{ mm.} \quad (3.12)$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } \frac{\lambda}{4} = 26.675 \text{ mm.}$$

2) เมื่อ $\frac{Z_0}{\sqrt{2}} = 35.35 \Omega$, $\epsilon_r = 3.03$, $h = 0.8$ mm. และ $f = 1800$ MHz

จากสมการที่ (3.7) ทำการแทนค่า จะได้

$$B = \frac{377\pi}{2 \times 35.35 \times \sqrt{3.03}} = 9.62$$

นำค่า B ที่ได้ไปหาค่าความกว้าง W จากสมการที่ (3.6) จะได้

$$\frac{W}{0.8} = \frac{2}{\pi} \left(9.62 - 1 - \ln(2(9.62) - 1) + \frac{3.03 - 1}{2 \times 3.03} (\ln(9.62) - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{3.03} \right)$$

$$W = 4.14 \times 0.8 = 3.31 \text{ mm.}$$

หาค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จากสมการที่ (3.2) จะได้

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{3.03 + 1}{2} + \frac{3.03 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12}{4.14}}} \right) \\ &= 2.53 \end{aligned}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_{\text{reff}} \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้สามารถนำไปใช้จริงได้ เพราะฉะนั้น จะสามารถหาความยาวคลื่นได้จากสมการที่ (3.12) จะได้

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{3 \times 10^8}{1.8 \times 10^9 \times \sqrt{2.53}} \\ &= 104.78 \text{ mm.} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น $\frac{\lambda}{4} = 26.195 \text{ mm.}$

ดังนั้นจึงสามารถสรุปขนาดของตัวเชื่อมต่อไฮบริด 90° ได้ดังนี้ และเป็นไปตามรูปที่ 3.4

ที่เส้น Z_0 จะมี

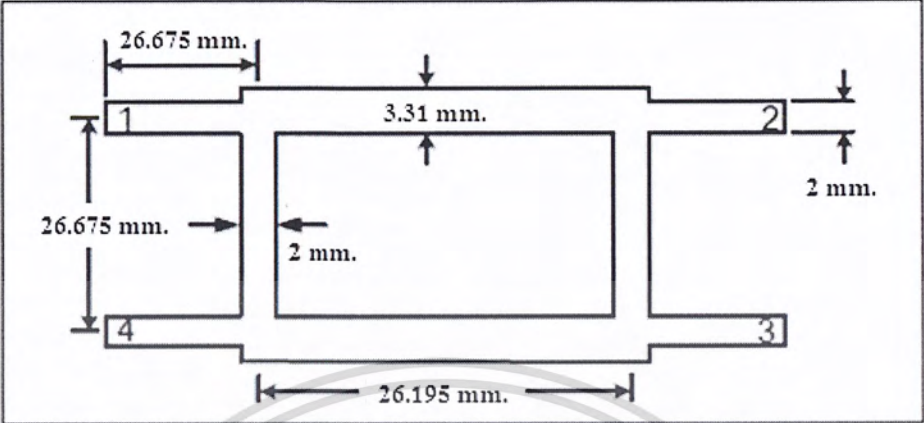
$$\text{ความกว้าง} = 2 \text{ mm.}$$

$$\text{ความยาว} = 26.675 \text{ mm.}$$

ที่เส้น $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ จะมี

$$\text{ความกว้าง} = 3.31 \text{ mm.}$$

$$\text{ความยาว} = 26.195 \text{ mm.}$$



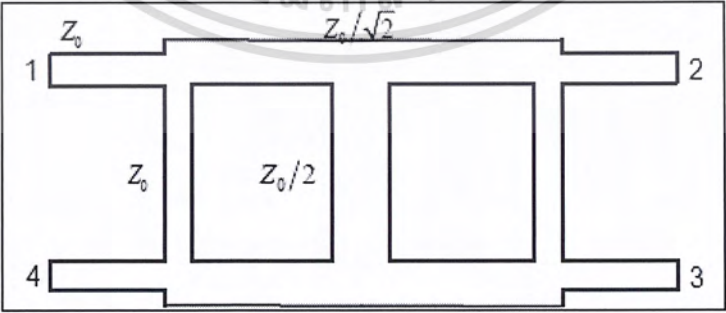
รูปที่ 3.4 ขนาดของตัวเชื่อมต่อไฮบริด 90°

3.1.2.2 ตัวไขว้สัญญาณ

ในส่วน of ตัวไขว้สัญญาณนั้นจะเป็นการนำเอาตัวเชื่อมต่อไฮบริด 90° มาวางต่อกัน 2 ตัว ตามทฤษฎีจาก [2] และ [3] ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของสัญญาณที่ผ่านมาจากไฮบริด 90° โดยสัญญาณที่เข้ามานั้นจะเดินทางในลักษณะไขว้กัน หมายความว่า ถ้าสัญญาณเข้าที่พอร์ต 1 จะเดินทางออกที่พอร์ต 3 และเมื่อสัญญาณเดินทางเข้าที่พอร์ต 4 จะเดินทางออกที่พอร์ต 2 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของแต่ละพอร์ตเป็นเมตริกซ์ได้ดังนี้ และจะมีลักษณะตามรูปที่ 3.5

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j \\ j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(3.13)



รูปที่ 3.5 ตัวไขว้สัญญาณ

โดยที่การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวไขว้สัญญาณสามารถทำได้ดังนี้

เมื่อ $\frac{Z_0}{2} = 25 \, \Omega$, $\epsilon_r = 3.03$, $h = 0.8 \, \text{mm}$. และ $f = 1800 \, \text{MHz}$

จากสมการที่ (3.7) ทำการแทนค่า จะได้

$$B = \frac{377\pi}{2 \times 25 \times \sqrt{3.03}} \\ = 13.61$$

นำค่า B ที่ได้ไปหาค่าความกว้าง W จากสมการที่ (3.6) จะได้

$$\frac{W}{0.8} = \frac{2}{\pi} \left(13.61 - 1 - \ln(2(13.61) - 1) + \frac{3.03 - 1}{2 \times 3.03} (\ln(13.61) - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{3.03} \right)$$

$$W = 6.53 \times 0.8 = 5.22 \, \text{mm}.$$

หาค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จากสมการที่ (3.2) จะได้

$$\epsilon_r = \frac{3.03 + 1}{2} + \frac{3.03 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12}{6.53}}} \right) \\ = 2.62$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_{\text{reff}} \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้สามารถนำไปใช้จริงได้ เพราะฉะนั้น จะสามารถหาความยาวคลื่นได้จากสมการที่ (3.12) จะได้

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1.8 \times 10^9 \times \sqrt{2.62}} \\ = 102.97 \, \text{mm}.$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } \frac{\lambda}{4} = 25.7425 \, \text{mm}.$$

และในส่วนของเส้น Z_0 และเส้น $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ นั้น จะใช้ขนาดเดียวกันกับขนาดของตัวเชื่อมต่อไฮบริด

90° ดังนั้นจึงสามารถสรุปขนาดของตัวไขว้สัญญาณได้เป็นดังนี้ และเป็นไปตามรูปที่ 3.6 ที่เส้น Z_0 จะมี

$$\text{ความกว้าง} = 2 \, \text{mm}.$$

ความยาว = 26.675 mm.

ที่เส้น $\frac{Z_0}{\sqrt{2}}$ จะมี

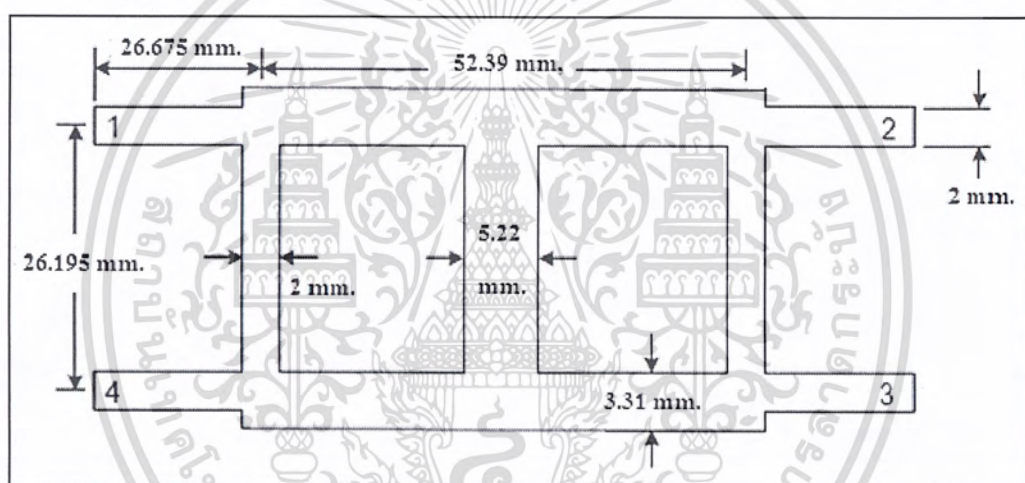
ความกว้าง = 3.31 mm.

ความยาว = 26.195 mm.

ที่เส้น $\frac{Z_0}{2}$ จะมี

ความกว้าง = 5.22 mm.

ความยาว = 25.7425 mm.



รูปที่ 3.6 ขนาดของตัวไขว้สัญญาณ

3.1.2.3 ตัวเลื่อนเฟส 45°

สำหรับตัวเลื่อนเฟส 45° นั้น จะใช้ทฤษฎีสายส่งแบบไมโครสตริป [3] มาทำให้เกิดการเลื่อนเฟสออกไป ซึ่งหลักในการออกแบบนั้น จะใช้ความยาวของเส้นไมโครสตริปเป็นตัวกำหนด ซึ่งจะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นที่วิ่งบนเส้นไมโครสตริป โดยจะใช้เส้นที่มี $Z_0 = 50\Omega$ ซึ่งจากการคำนวณที่ผ่านมาจะได้ $\lambda = 13.3375$ mm. และการที่จะหาว่าที่เฟส 45° จะตรงกับค่าความยาวคลื่นเท่าไรนั้น สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\phi = \frac{2L\pi}{\lambda} \quad (3.14)$$

เมื่อแทนค่า $\phi = 45^\circ$, $\lambda = 13.3375$ mm. และ $\pi = 180^\circ$ จะได้

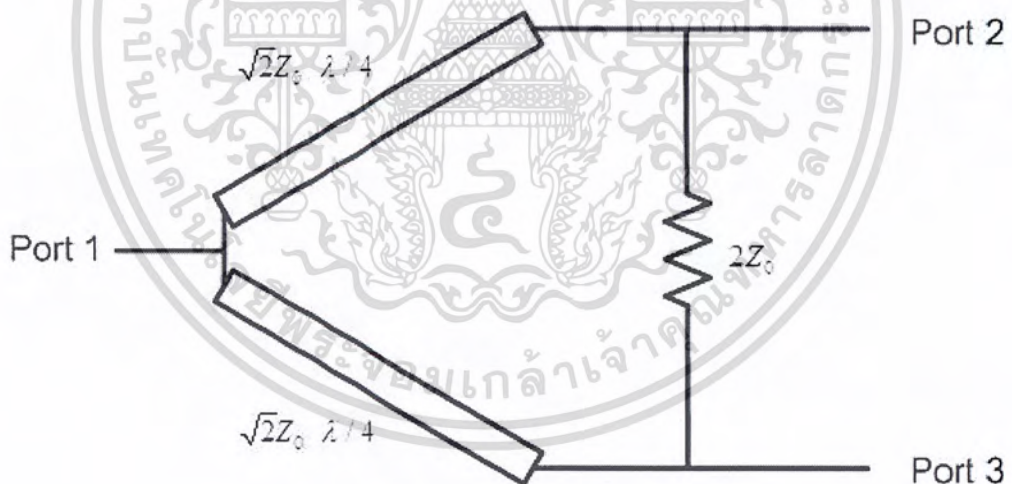
$$L = \frac{45^\circ \times 13.3375}{2 \times 180^\circ} = 16.67 \text{ mm.}$$

จากการคำนวณทำให้ทราบได้ว่าการจะเลื่อนเฟสไป 45° จะต้องใช้ความยาวของเส้นไมโครสตริป ประมาณ 13.3375 mm. หรือ $n\lambda + 13.3375 \text{ mm.}$ โดยที่ n คือเลขจำนวนเต็มบวก ซึ่งในโครงงานนี้จะให้ $n=1$ เพื่อให้ความยาวของตัวเลื่อนเฟสพอดีกันกับส่วนประกอบอื่นๆ เมื่อนำมาต่อรวมกันในภายหลังต่อไป

3.1.3 การออกแบบและสร้างวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

สำหรับการออกแบบตัวแบ่งกำลังงานนั้นจะใช้ทฤษฎีในการออกแบบของวิลคินสันมาเป็นหลักการพื้นฐานในการออกแบบ โดยจะให้กำลังงานที่ออกไปนั้นเหลืออยู่ครึ่งหนึ่งของกำลังงานที่ป้อนเข้าไป ซึ่งรูปแบบพื้นฐานของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสันนั้นจะเป็นไปตามรูปที่

3.7



รูปที่ 3.7 รูปแบบของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

จากรูปที่ 3.7 นั้นจะเห็นได้ว่าวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสันจะมีสายส่งที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ $\sqrt{2}Z_0$ ซึ่งจะใช้การคำนวณแบบเดียวกันกับการออกแบบโครงข่ายก่อร์ปลำดับ โดยที่การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสันสามารถทำได้ดังนี้

เมื่อ $\sqrt{2}Z_0 = 70.71 \, \Omega$, $\epsilon_r = 3.03$, $h = 0.8 \, \text{mm}$. และ $f = 1800 \, \text{MHz}$

$$\begin{aligned} A &= \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \\ &= \frac{70.71}{60} \sqrt{\frac{3.03 + 1}{2}} + \frac{3.03 - 1}{3.03 + 1} \left(0.23 + \frac{0.11}{3.03} \right) \\ &= 1.81 \end{aligned} \quad (3.15)$$

นำค่า A ที่ได้ไปหาค่าความกว้าง W จาก

$$\begin{aligned} \frac{W}{h} &= \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} \\ \frac{W}{0.8} &= \frac{8e^{1.81}}{e^{3.62} - 2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$W = 1.39 \times 0.8 = 1.11 \, \text{mm}.$$

หาค่าไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์จากสมการที่ (3.2) จะได้

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{3.03 + 1}{2} + \frac{3.03 - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12}{1.39}}} \right) \\ &= 2.34 \end{aligned}$$

เมื่อทำการเปรียบเทียบจาก $\epsilon_{\text{reff}} \neq \epsilon_r$ และ $1 < \epsilon_{\text{reff}} < \epsilon_r$ แสดงว่าค่าที่ได้สามารถนำไปใช้จริงได้ เพราะฉะนั้น จะสามารถหาความยาวคลื่นได้จากสมการที่ (3.12) จะได้

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{3 \times 10^8}{1.8 \times 10^9 \times \sqrt{2.34}} \\ &= 108.95 \, \text{mm}. \end{aligned}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } \frac{\lambda}{4} = 27.2375 \, \text{mm}.$$

และในส่วนของเส้น Z_0 นั้น จะใช้ขนาดเดียวกันกับขนาดของตัวเชื่อมต่อไฮบริด 90° ดังนั้นจึงสามารถสรุปขนาดของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสันได้เป็นดังนี้ และเป็นไปตามรูปที่ 3.8

ที่เส้น Z_0 จะมี

ความกว้าง = 2 mm.

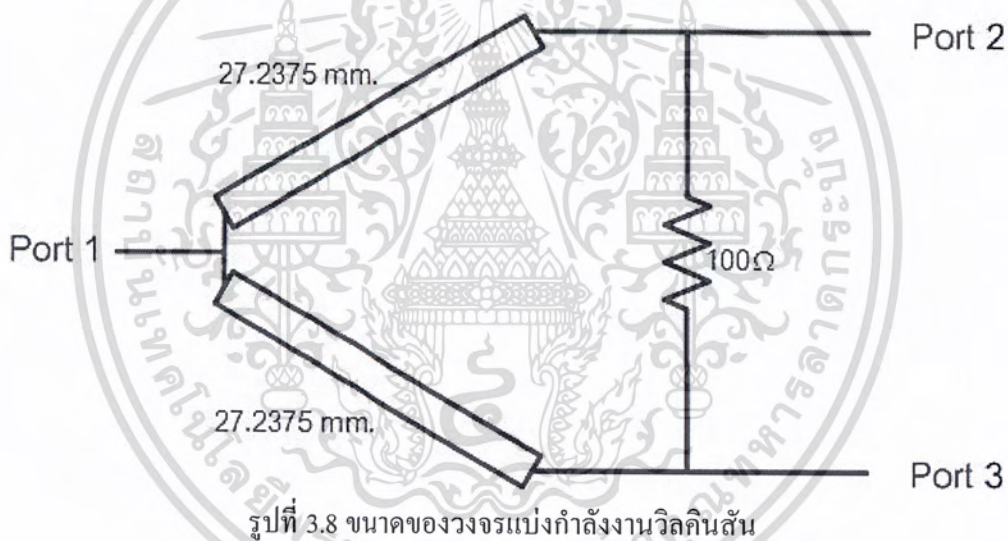
ความยาว = 26.675 mm.

ที่เส้น $\sqrt{2}Z_0$ จะมี

ความกว้าง = 1.11 mm.

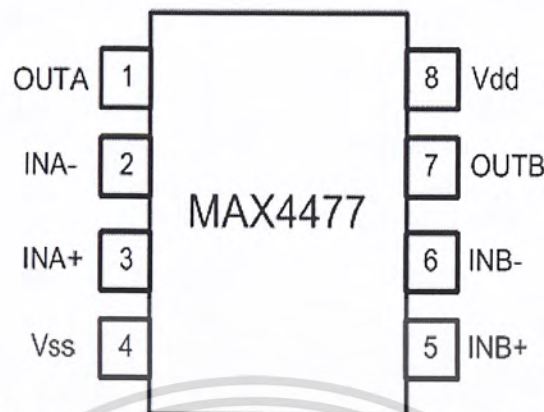
ความยาว = 27.2375 mm.

และจากขนาดของตัวต้านทานที่อยู่ตรงกลางนั้นจะมีค่าเป็น $2Z_0$ โดยที่ $Z_0 = 50\Omega$ เพราะฉะนั้นค่าขนาดของตัวต้านทานที่อยู่ตรงกลางนั้นจะมีค่าเท่ากับ 100Ω



3.1.4 วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะใช้วงจรรวมลำเร้าของ บริษัท MAXIM เบอร์ MAX4477ASA+ ซึ่งจะมีความสามารถในการลดทอนสัญญาณรบกวนและการผิดเพี้ยนของสัญญาณได้ด้วย แต่ก็ต้องแลกมาด้วยราคาที่ค่อนข้างแพงพอสมควร โดยที่ภายในวงจรรวมจะมีตัวขยายสัญญาณอยู่ถึง 2 ตัว ทำให้ได้ค่ากำลังขยายค่อนข้างสูง โดยตัววงจรรวมจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะการจัดขาของวงจรรวม MAX4477ASA+

จากรูปจะอธิบายตำแหน่งขาของวงจรรวมแต่ละขาว่าทำงานอย่างไรบ้าง ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

- ขาที่ 1 เป็นขาสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวขยายสัญญาณตัวแรก
- ขาที่ 2 เป็นขาสัญญาณอินพุตแบบลบของตัวขยายสัญญาณตัวแรก
- ขาที่ 3 เป็นขาสัญญาณอินพุตแบบบวกของตัวขยายสัญญาณตัวแรก
- ขาที่ 4 เป็นขาสำหรับป้อนไฟเลี้ยงแบบลบหรือกราวด์
- ขาที่ 5 เป็นขาสัญญาณอินพุตแบบบวกของตัวขยายสัญญาณตัวที่สอง
- ขาที่ 6 เป็นขาสัญญาณอินพุตแบบลบของตัวขยายสัญญาณตัวที่สอง
- ขาที่ 7 เป็นขาสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวขยายสัญญาณตัวที่สอง
- ขาที่ 8 เป็นขาสำหรับป้อนไฟเลี้ยงแบบบวก 5V

ในการต่อวงจรเพื่อนำไปใช้งานจริงนั้นจะต้องใช้วงจรขยายสัญญาณเพื่อให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุตซึ่งสัญญาณอินพุตนั้นจะเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง โดยในการต่อวงจรนั้น จะใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อร่วมกับวงจรรวมสำเร็จซึ่งรูปวงจรในตอนนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

สำหรับส่วนของการคำนวณหาค่าขนาดของตัวต้านทานและค่าขนาดของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจรนั้น จะกำหนดให้ $R_f = R_g = 10k\Omega$ และจะคำนวณหาค่าขนาดของตัวเก็บประจุ C_z ได้จากสมการ

$$C_z = 10 \times \left(\frac{R_f}{R_g} \right)$$

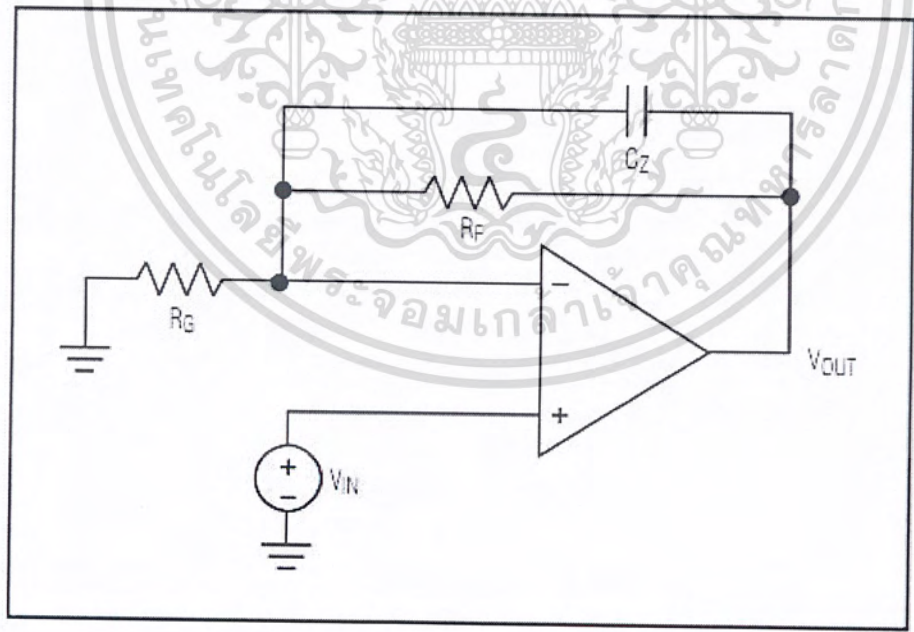
(3.17)

$$\begin{aligned} &= 10 \times \left(\frac{10k\Omega}{10k\Omega} \right) \\ &= 10 \text{ pF} \end{aligned}$$

เมื่อนำค่าขนาดของตัวต้านทานและค่าขนาดของตัวเก็บประจุมาแทนลงในสมการของความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตและเอาต์พุตจะได้สมการเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{in} \left(1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \\ &= V_{in} \left(1 + \frac{10k\Omega}{10k\Omega} \right) \\ &= 2V_{in} \end{aligned} \tag{3.18}$$

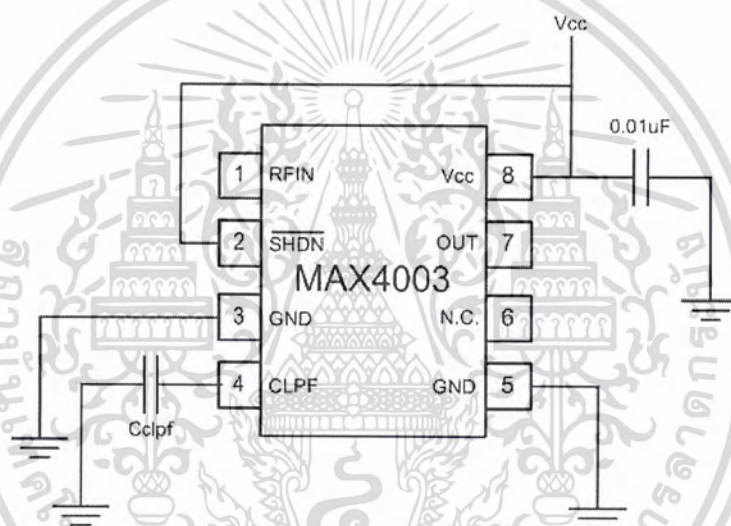
จากสมการที่ 3.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการแทนค่าขนาดของตัวต้านทานและค่าขนาดของตัวเก็บประจุแล้ว จะได้ว่าขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะเป็นสองเท่าของสัญญาณอินพุตเสมอ ซึ่งในที่นี้สัญญาณทั้งสองนั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงธรรมดา



รูปที่ 3.10 การต่อวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

3.1.5 วงจรตรวจจับกำลังงานของสัญญาณ

การออกแบบสร้างวงจรตรวจจับกำลังงานของสัญญาณนี้จะใช้วงจรรวมของบริษัท MAXIM เช่นกัน โดยจะเป็นเบอร์ MAX4003EUA ซึ่งการทำงานของวงจรรวมนี้จะเป็นการแปลงสัญญาณความถี่วิทยุไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงธรรมดาโดยที่ขนาดของไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะขึ้นอยู่กับกำลังงานของสัญญาณความถี่วิทยุที่เข้ามาที่ตัววงจรรวมและค่าของไฟฟ้ากระแสตรงจะไม่เกินขนาดของไฟเลี้ยงที่ใช้ป้อนให้วงจรรวมทำงานได้ โดยที่การจัดตำแหน่งขาของวงจรรวมและการต่อเพื่อนำไปใช้งาน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การต่อวงจรตรวจจับกำลังงานของสัญญาณ

จากรูปจะอธิบายตำแหน่งขาของวงจรรวมแต่ละขาว่าทำงานอย่างไรบ้าง ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

- ขาที่ 1 เป็นขาของสัญญาณอินพุตที่เป็นสัญญาณความถี่วิทยุ
- ขาที่ 2 เป็นขาสำหรับสั่งหยุดการทำงานของสัญญาณอินพุตเมื่อเป็น logic 0
- ขาที่ 3 เป็นขาสำหรับต่อกับกราวด์
- ขาที่ 4 เป็นขาที่ใช้สำหรับต่อกับ passive LPF เพื่อทำให้เป็น control loop bandwidth
- ขาที่ 5 เป็นขาสำหรับต่อกับกราวด์
- ขาที่ 6 ไม่มีการเชื่อมต่อกับขาอื่น
- ขาที่ 7 เป็นขาของไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นเอาต์พุต
- ขาที่ 8 เป็นขาสำหรับจ่ายไฟเลี้ยง 5V ให้วงจรรวมทำงานได้

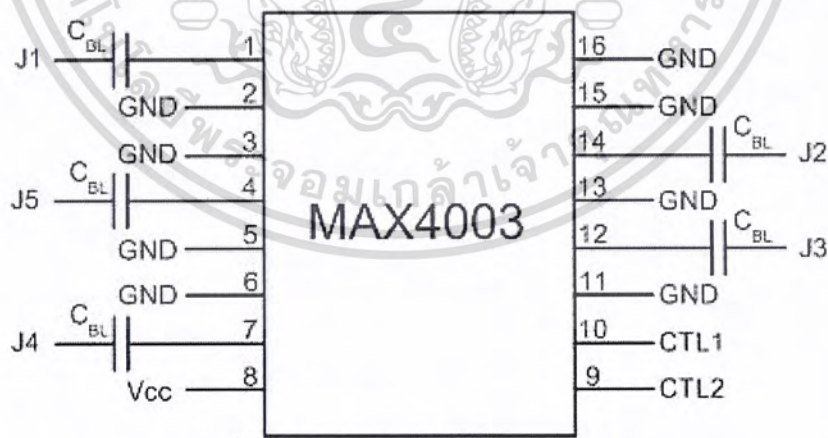
ในการออกแบบลายไมโครสตริปก็จะต้องมีอิมพีแดนซ์ของสัญญาณอินพุตเป็น 50 โอห์มเช่นกัน เนื่องจากวงจรรวมนี้ รองรับสัญญาณอินพุตที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์มเท่านั้น

3.1.6 วงจร RF Switch

มีหน้าที่ในการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดออกไปเพียงสัญญาณเดียว จากหลายๆ สัญญาณ โดยเงื่อนไขในการเลือกนั้นจะดูจากความแรงของสัญญาณว่าสัญญาณไหนมีความแรงมากกว่ากัน และให้สัญญาณที่แรงที่สุดนั้นถูกสวิตช์ออกไป โดยในงานนี้จะเป็นแบบเข้าสี่ออกหนึ่ง หมายถึงมีสัญญาณอินพุตเข้ามา 4 สัญญาณและมีสัญญาณเอาต์พุตออกไปเพียงสัญญาณเดียว ซึ่งการออกแบบนั้นจะใช้วงจรรวมของบริษัท SKYWORKS เบอร์ AS204-80 โดยที่รูปลักษณะของวงจรที่ใช้งานจะเป็นไปตามรูปที่ 3.12

จากรูปนั้นขาที่ 9 และ 10 คือขาที่มีหน้าที่ในการควบคุมการสวิตช์ภายในวงจรรวม ซึ่งจะเป็นสัญญาณดิจิทัล 1 บิต โดยมีการใช้หลักการในการเลือกสวิตช์สัญญาณโดยใช้ ตารางค่าความจริงซึ่งเป็นไปตามตารางที่ 3.1

จากตารางนั้นจะเห็นได้ว่าการสวิตช์สัญญาณอินพุตขึ้นอยู่กับบิตควบคุมที่จะป้อนเข้ามา CTL1 และ CTL2 เท่านั้น และจะมีเพียงแค่สัญญาณเดียวเท่านั้นด้วยที่จะสามารถนำไปออกเป็นเอาต์พุตได้



รูปที่ 3.12 ลักษณะการต่อวงจร RF Switch

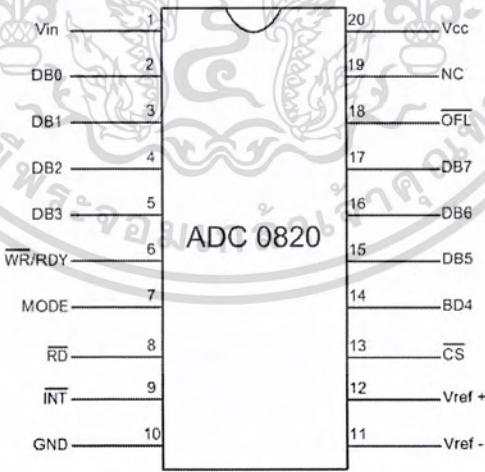
และจากรูปที่ 3.12 ค่าขนาดของตัวเก็บประจุ C_{BL} จะเท่ากับ 47 pF ซึ่งหน้าที่ของมันคือการบล็อกสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงไม่ให้ออกไปที่พอร์ตต่างๆ นั่นเอง

ตารางที่ 3.1 ตารางค่าความจริงของวงจรรวม AS204-80

ตำแหน่งของขาอินพุต ที่จะทำการสวิตช์	ขาสัญญาณบิตควบคุม	
	CTL1	CTL2
J_2	0	0
J_3	1	0
J_4	0	1
J_5	1	1

3.1.7 การออกแบบวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล

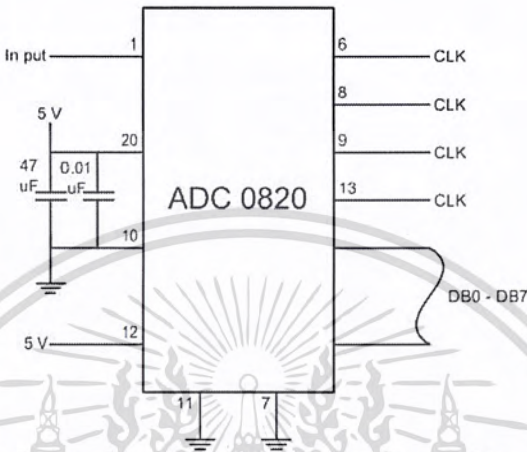
สำหรับการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลนั้นจะใช้ไอซี ADC0820 ในการสร้างวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล โดยจะใช้ในการแปลงสัญญาณ Baseband เป็น Digital 8 บิต ลักษณะของไอซี ADC0820 เป็นดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ไอซี ADC0820

โดยที่การจัดตำแหน่งขาของวงจรรวมและการต่อเพื่อนำไปใช้งาน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 อินพุตที่เข้ามาเป็นสัญญาณ Baseband ที่มาจากวงจร power detector โดยสัญญาณ

นาฬิกาที่ใช้มีขนาดสัญญาณ 5 kHz ที่มาจากบอร์ด FPGA สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมานั้นจะเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีขนาด 8 บิต



รูปที่ 3.14 วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล โดยใช้ไอซี ADC0820

3.1.8 วิธีการออกแบบ code VHDL

เมื่อได้สัญญาณดิจิทัลออกมาแล้ว จากนั้นเป็นส่วนของการเปรียบเทียบความแรงสัญญาณที่เข้ามา ซึ่งมีทั้งหมด 4 สัญญาณ ถ้าสัญญาณใดมีความแรงสูงกว่าก็จะถูกเลือกออกเป็นสัญญาณเอาต์พุต โดยจะมีรูปแบบวงจรรวมภายในดังรูปที่ 3.15 วงจรทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ Comparator, Multiplex และ Decoder สัญญาณอินพุตที่เข้ามานั้นจะถูกเปรียบเทียบความแรงของสัญญาณ เมื่อได้สัญญาณที่มีความแรงกว่าแล้ว จะถูกเลือกนำไปส่งต่อ เข้าสู่ส่วนของ Decoder เพื่อแปลงสัญญาณออกมาในรูปของบิตดิจิทัล โดยจะมีค่าความจริงตามตารางที่ 3.2

3.1.8.1 Comparator

เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณขาเข้าที่เข้ามาสู่ comparator โดยมีสัญญาณขาเข้าเข้ามา 2 สัญญาณ เปรียบเทียบสัญญาณทั้งสอง ถ้าสัญญาณ $ip1 > ip2$ ก็จะมีค่าออกมาเป็นบิต 1 แต่ถ้าไม่ใช่ก็จะออกมาเป็นบิต 0

Code ที่ใช้

```
library ieee ;
```

```
use ieee.std_logic_1164.all ;
```

entity comp is

```
port (ip1, ip2 : in std_logic_vector (7 downto 0) ;
```

```
op : out std_logic) ;
```

```
end;
```

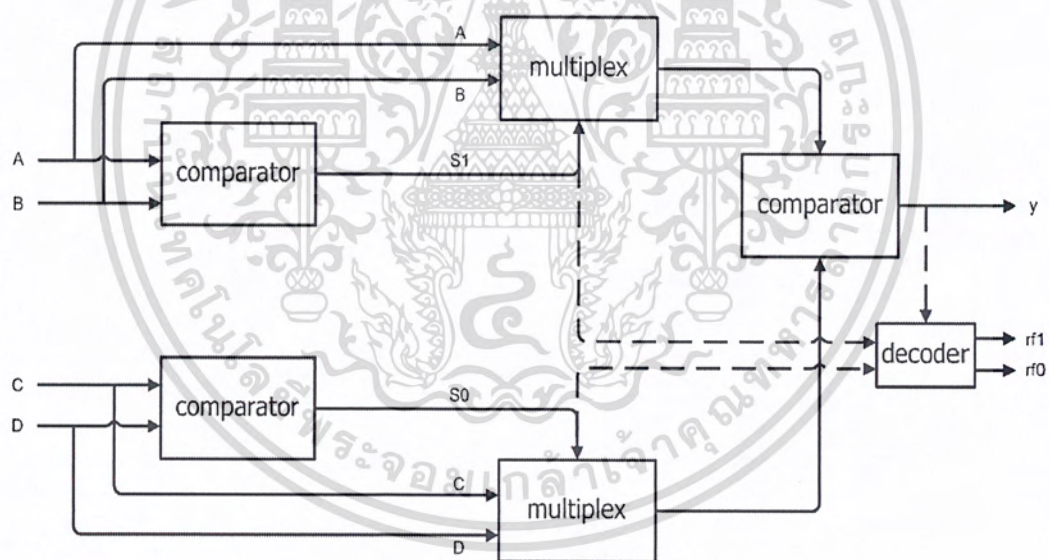
architecture rtl of comp is

```
begin
```

```
op <= '1' when ip1 > ip2 else
```

```
'2' ;
```

```
end;
```



รูปที่ 3.15 วงจรรวมภายในของ FPGA

3.1.8.2 Multiplex

เป็นการเลือกสัญญาณที่จะส่งออกเอาต์พุต โดยสัญญาณที่เข้ามาสู่ตัว

Multiplex นั้นจะมี ip1, ip2 และสัญญาณ select โดยสัญญาณ select (s_1, s_0) นั้นจะเป็นตัวเลือกว่า

สัญญาณที่จะส่งผ่านออกไปเป็น ip1 หรือ ip2 ซึ่งสัญญาณ select นั้นจะมาจากการเปรียบเทียบสัญญาณจาก comparator

ตารางที่ 3.2 ตารางค่าความจริงของวงจร Comparator

s1	s0	y	rf1	rf0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	1	0	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0

Code ที่ใช้

```
library ieee ;
use ieee.std_logic_1164.all ;

entity mux2 is
    port (ip1, ip2 : in std_logic_vector (7 downto 0) ;
          sel : in std_logic;
          op : out std_logic_vector (7 downto 0)) ;
end;

architecture rtl of mux2 is
begin
    op <= '1' when sel= '1' else
        '2' ;
```

end;

3.1.8.3 Decoder

เป็นการถอดรหัสจากสัญญาณ โดยมีสัญญาณอินพุตคือ s_1, s_0, y และ สัญญาณเอาต์พุตคือ $rf1, rf0$ โดยค่าที่จะออกมานั้น จะเปรียบเทียบโดยบูลีน ซึ่งค่าเอาต์พุตที่ ออกมานั้น จะถูกกำหนดโดยเงื่อนไข โดยจะเป็น $rf1$ เมื่อไม่ใช่ y และ จะเป็น $rf0$ เมื่อ $\overline{s_1}y + \overline{s_0}y$

Code ที่ใช้

```
library ieee ;
use ieee.std_logic_1164.all ;

entity decode is
    port (s1, s0, y : in std_logic ;
          rf1, rf0 : out std_logic) ;
end;
architecture rtl of decode is
begin
    rf1 <= not y
    rf0 <= (not(s0) and not(y)) or (not(s1) and y) ;
end;
```

3.1.8.4 Clock Divider

เป็นวงจรที่ใช้หารความถี่จากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ได้จากบอร์ด FPGA ให้ต่ำลงมาเพื่อนำไปใช้กับวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล โดยที่จะทำการหารความถี่ จาก 9.6MHz ไปเป็น 5kHz

Code ที่ใช้

```
library ieee;
```



```

use ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.std_logic_arith.all;
use ieee.std_logic_unsigned.all;

```

```

entity clock_divider is

```

```

    port(sys_clk : in std_logic;
          clk_5kHz : out std_logic);

```

```

end clock_divider;

```

```

architecture Behavioral of clock_divider is

```

```

    signal count1 : integer range 0 to 1919;

```

```

begin

```

```

    process(sys_clk)

```

```

    begin

```

```

        if sys_clk' event and sys_clk = '1' then

```

```

            if count1 /= 1919 then

```

```

                count1 <= count1+1;

```

```

            else count1 <= 0;

```

```

            end if;

```

```

            if count1 < 960 then

```

```

                clk_5kHz <= '1';

```

```

            else clk_5kHz <= '0';

```

```

            end if;

```

```

        end if;

```

```

    end process;

```

```

end Behavioral;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่อง Network Analyzer รุ่น HP8720C 50MHz – 20GHz
- 2) ชุดคาร์ิเบรท 85022 B. 3.5 mm.
- 3) SMA connector (male-female)
- 4) แผ่น Epoxy 2 หน้าแบบหนา 1.5 mm.
- 5) แผ่น Epoxy 2 หน้าแบบบาง 0.8 mm.
- 6) ตะกั่ว
- 7) หัวแร้ง
- 8) ตะไบเหล็ก
- 9) สติกเกอร์
- 10) กรรไกร คัตเตอร์
- 11) Digital Multi meter
- 12) แผ่น dry film
- 13) กรดกัดแผ่นปริ้น
- 14) เบสล้างฟิล์ม

3.3 การจำลองผลจากโปรแกรม

3.3.1 การจำลองผลของสายอากาศแบบระนาบ

ในการวิเคราะห์รูปแบบของสายอากาศนั้น จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญมากที่จำเป็นที่จะต้องนำมาพิจารณา เช่น ค่าสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

ค่าสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) คือค่าของสัญญาณในส่วนที่สะท้อนกลับเนื่องจากสัญญาณบางส่วนวิ่งผ่านรอยต่อไปบางส่วนเจอรอยต่อในมุมต่างกันก็สะท้อนกลับ ซึ่งสายอากาศที่ดีควรมีค่าสูญเสียย้อนกลับที่น้อยกว่า -10

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (VSWR) คืออัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ ซึ่งสายอากาศที่ดีควรจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง 1-1.5 หรือ 1-2

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ คือคุณสมบัติของการดูดซับพลังงานที่ป้อนเข้าสู่สายอากาศก่อนที่จะทำการส่งออก ซึ่งในที่นี้จำเป็นที่จะต้องเข้าใกล้ 50 โอห์ม เพราะอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อนั้นๆ มีค่าของอิมพีแดนซ์ที่ 50 โอห์ม

โดยการทดลองออกแบบนั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้คำนวณมาแล้วข้างต้น โดยใช้โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อทำการวัดคำนวณค่าคุณลักษณะต่างๆ ก่อนที่จะนำไปทดลองและสร้างจริงต่อไป ซึ่งหน้าต่างในส่วนของโปรแกรม และชิ้นงานที่จะทำการคำนวณนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 สายอากาศที่ทำการจำลองใน โปรแกรม CST Microwave Studio

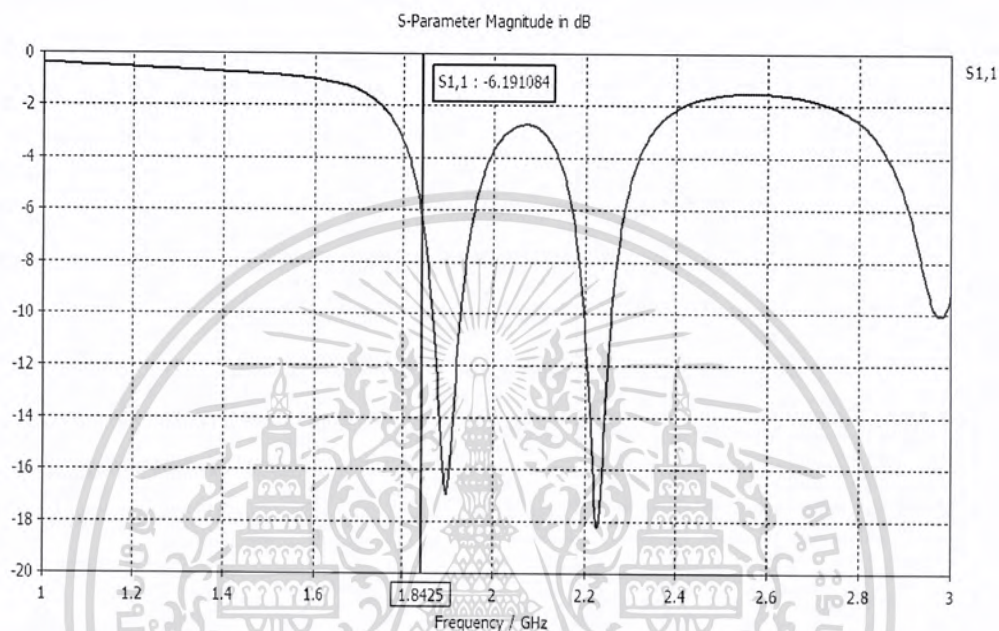
และเมื่อทำการจำลองออกแบบโดยใช้โปรแกรม โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจากการคำนวณโดยผู้จัดทำนั้นได้ให้ความสำคัญของค่าสูญเสียย้อนกลับ มาประกอบกับการพิจารณาในการออกแบบสายอากาศ ซึ่งค่าสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17

ซึ่งเราสนใจที่ความถี่กลางคือ 1842.5 MHz ซึ่งมีค่าสูญเสียย้อนกลับดังนี้ -6.191084 dB ซึ่งยังไม่สามารถใช้งานได้ เราจึงจำเป็นที่จะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ใหม่ เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ครอบคลุมทั้งย่านความถี่ 1800 MHz ให้มากที่สุด

3.3.1.1 การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

เป็นการเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์ตัวๆที่เราจะทำการพิจารณา โดยที่ค่า

ของพารามิเตอร์ตัวอื่นๆยังคงค่าเดิม แล้วทำการเทียบผลซึ่งจะทำให้เห็นถึงแนวโน้มของค่าพารามิเตอร์ของตัวนั้นๆ เพื่อทำให้ได้มาซึ่งค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.17 ค่าสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio

1) การปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง

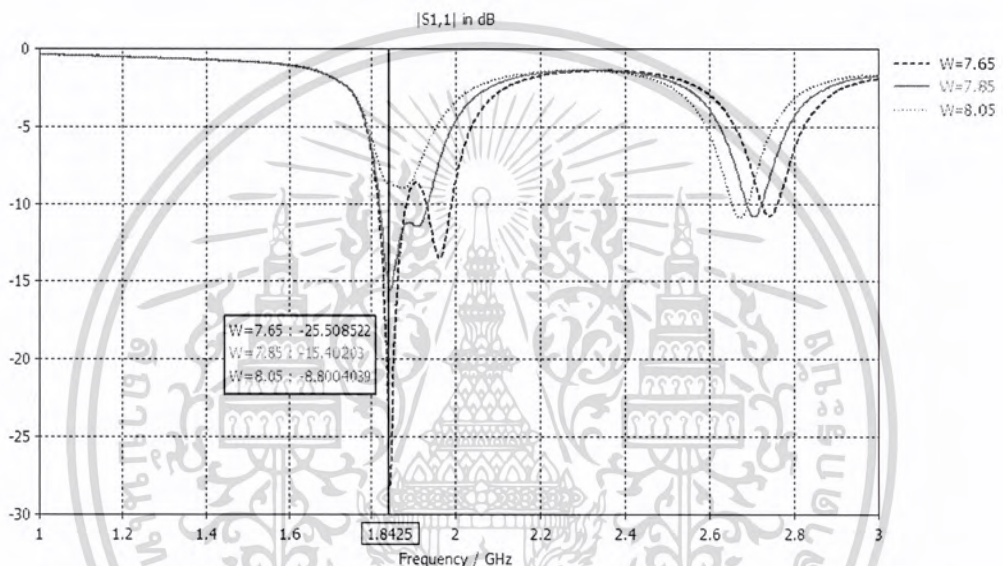
จากที่คำนวณข้างต้นนั้นค่าความกว้างของตัวแผ่นกระจายคลื่นมีค่าเท่ากับ 6.5 cm. ซึ่งใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการปรับเปลี่ยนค่าความกว้าง ซึ่งผู้จัดทำได้ทำการปรับเปลี่ยนค่ามากมายหลายค่าจนได้ค่าที่มีแนวโน้มที่จะให้ค่าสูญเสียย้อนกลับที่ดีที่สุด คือเลือกใช้ค่าความกว้างของตัวแผ่นกระจายคลื่นที่มีค่าเท่ากับ 7.85 cm. ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 จากโปรแกรม CST Microwave Studio

2) การปรับเปลี่ยนค่าความยาว

จากที่คำนวณข้างต้นนั้นค่าความยาวของตัวแผ่นกระจายคลื่นมีค่าเท่ากับ 3.71 cm. ซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการปรับเปลี่ยนค่าความยาว ซึ่งผู้จัดทำได้ทำการปรับเปลี่ยนค่ามากมายหลายค่าจนได้ค่าที่มีแนวโน้มที่จะให้ค่าสูญเสียย้อนกลับที่ดีที่สุด คือเลือกใช้ค่าความ

ยาวของตัวแผ่นกระจายคลื่นมีค่าเท่ากับ 3.94 cm. ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 จากโปรแกรม CST Microwave Studio

จากผลที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่ามา ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการสร้าง คือค่าความกว้างของแผ่นกระจายคลื่นเป็น 7.85 cm. และค่าความยาวของแผ่นกระจายคลื่นเป็น 3.94 cm.



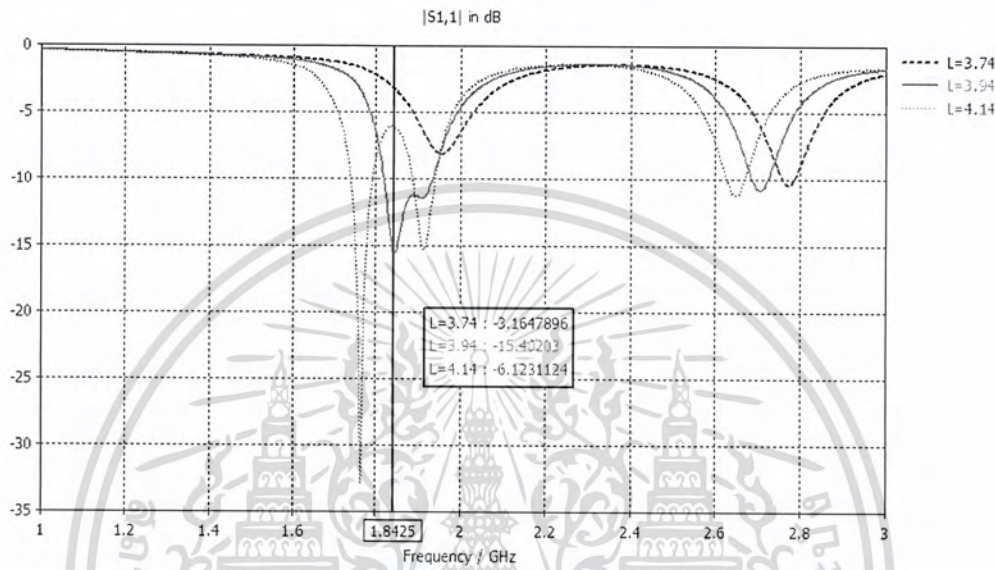
รูปที่ 3.18 การเลือกค่าความกว้างของตัวแผ่นกระจายคลื่นมีค่าเท่ากับ 7.85 cm.

3.3.2 การจำลองผลของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น

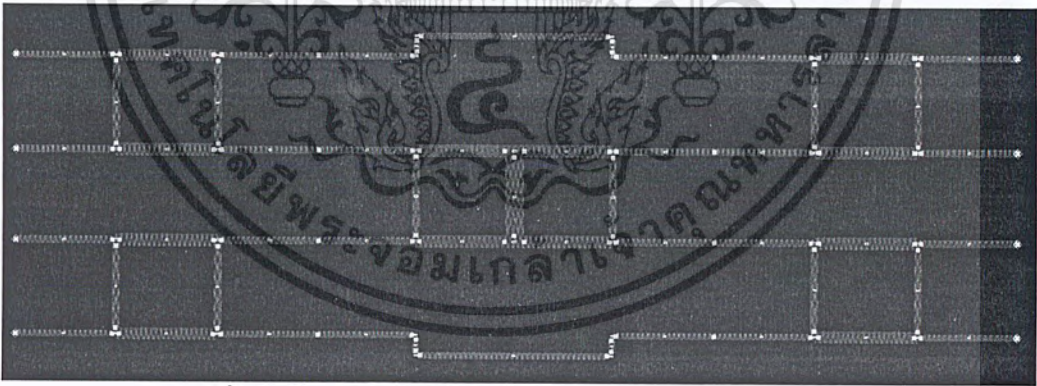
ในการจำลองผลโดยใช้โปรแกรม Advance Design Systems นั้นจะเป็นการรวมส่วนประกอบย่อยๆ ของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น ไม่ว่าจะเป็น ไฮบริด 90° ตัวไขว้สัญญาณ และตัวเลื่อนเฟส 45° เข้าด้วยกันจนกลายเป็น โครงสร้างของ Butler Matrix แล้วนั้น ยังจะพิจารณาการสูญเสียย้อนกลับ ค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน (Transmission Loss) ค่าการสูญเสียจากการแยกโคเดเดี่ยว (Isolation Loss) และค่าเฟส เป็นหลัก เพื่อให้มีการปรับลำคลื่นไปที่เฟสต่างๆ ให้เหมาะสมกับจำนวนของลำคลื่น และมีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากการคำนวณที่ผ่านมา เราสามารถนำค่าของพารามิเตอร์ที่ได้ มาทำการสร้างและจำลองผลลงในโปรแกรม เพื่อทดสอบถึงคุณลักษณะต่างๆ ที่สำคัญก่อนที่จะทำการสร้างจริง

ซึ่งสามารถแสดงรูปที่ทำการจำลองได้ดังรูปที่ 3.20



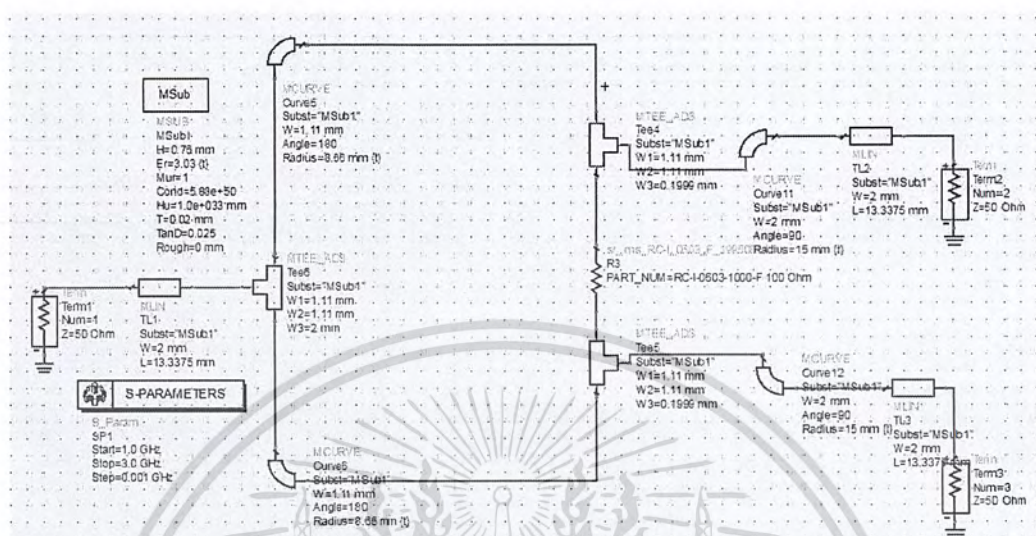
รูปที่ 3.19 การเลือกค่าความยาวของตัวแผ่นกระจายคลื่นมีค่าเท่ากับ 3.94 cm.



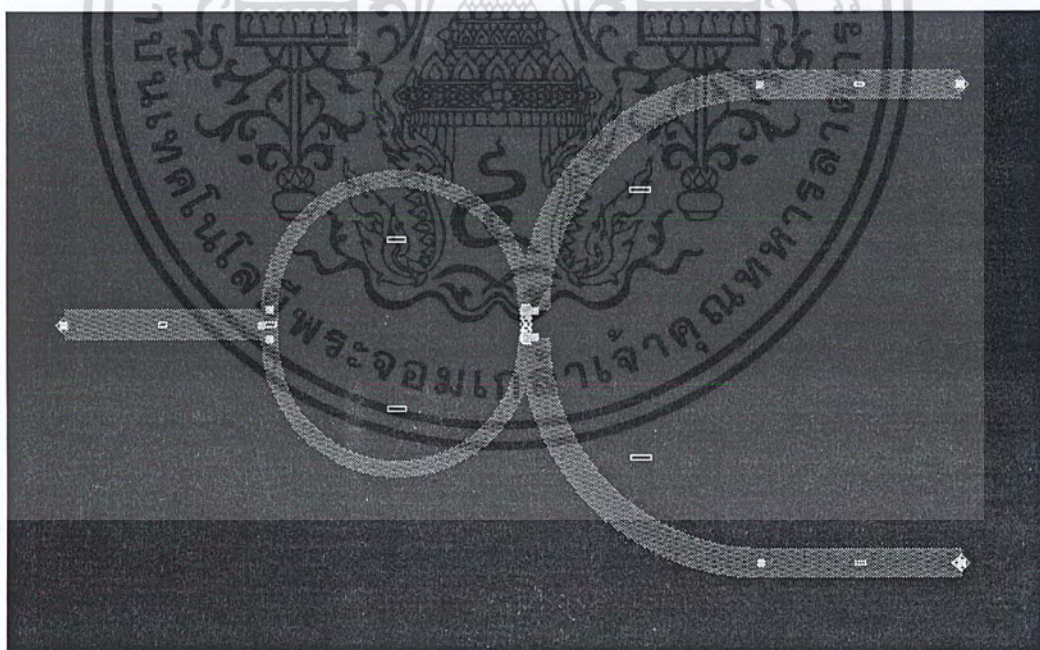
รูปที่ 3.20 โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นจากการจำลองผ่านโปรแกรม

3.3.3 การจำลองผลของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

สำหรับวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสันนั้นจะใช้โปรแกรม Advance Design Systems เป็นโปรแกรมในการออกแบบเช่นเดียวกันกับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นซึ่งจะมีรูปแบบของการเชื่อมต่อแบบ Schemetric และ Layout ของวงจร โดยจะเป็นไปตามรูปที่ 3.21 และ 3.22



รูปที่ 3.21 แบบร่าง Schematic ของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

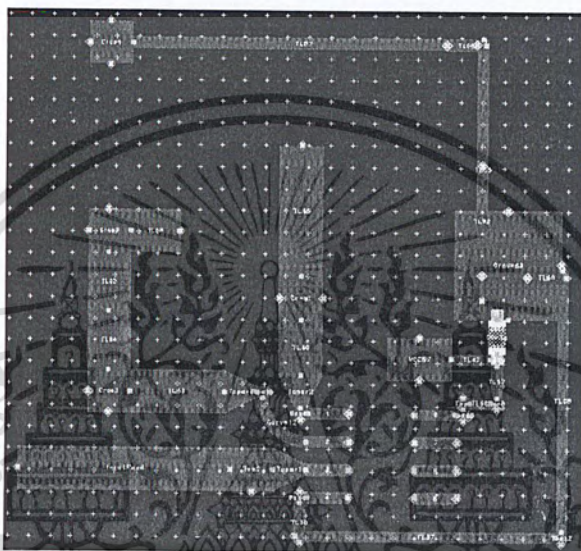


รูปที่ 3.22 แบบร่าง Layout ของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การจำลองรูปแบบลายของวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

ในการออกแบบสร้างลายของวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะออกแบบลายให้เป็นแบบใดก็ได้เนื่องจากเป็นเพียงสัญญาณไฟฟ้าธรรมดา โดยจะใช้โปรแกรม Advance Design Systems ในการออกแบบ และ Layout ของวงจรจะเป็นไปตามรูปที่ 3.23



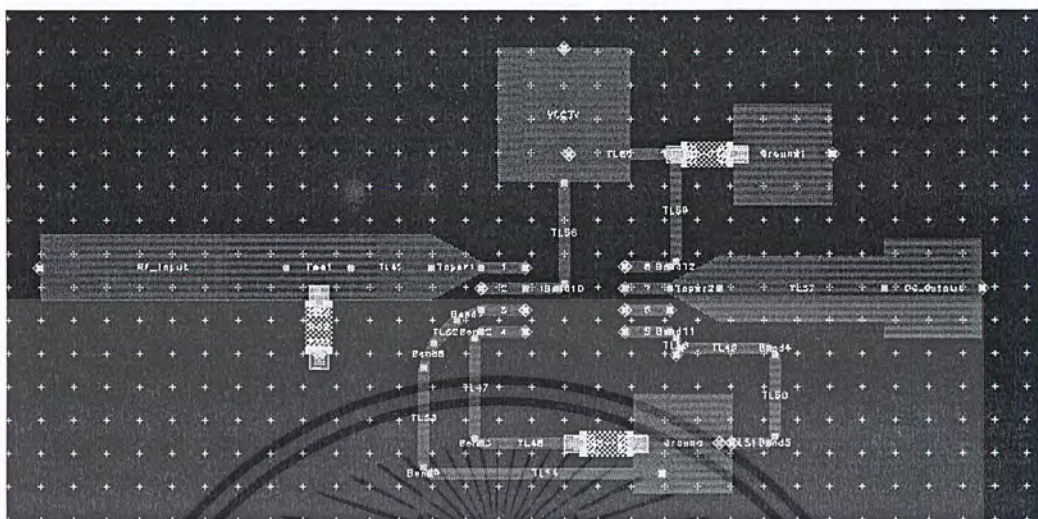
รูปที่ 3.23 รูปแบบลายวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

3.3.5 การจำลองรูปแบบลายของวงจรตรวจจับกำลังงาน

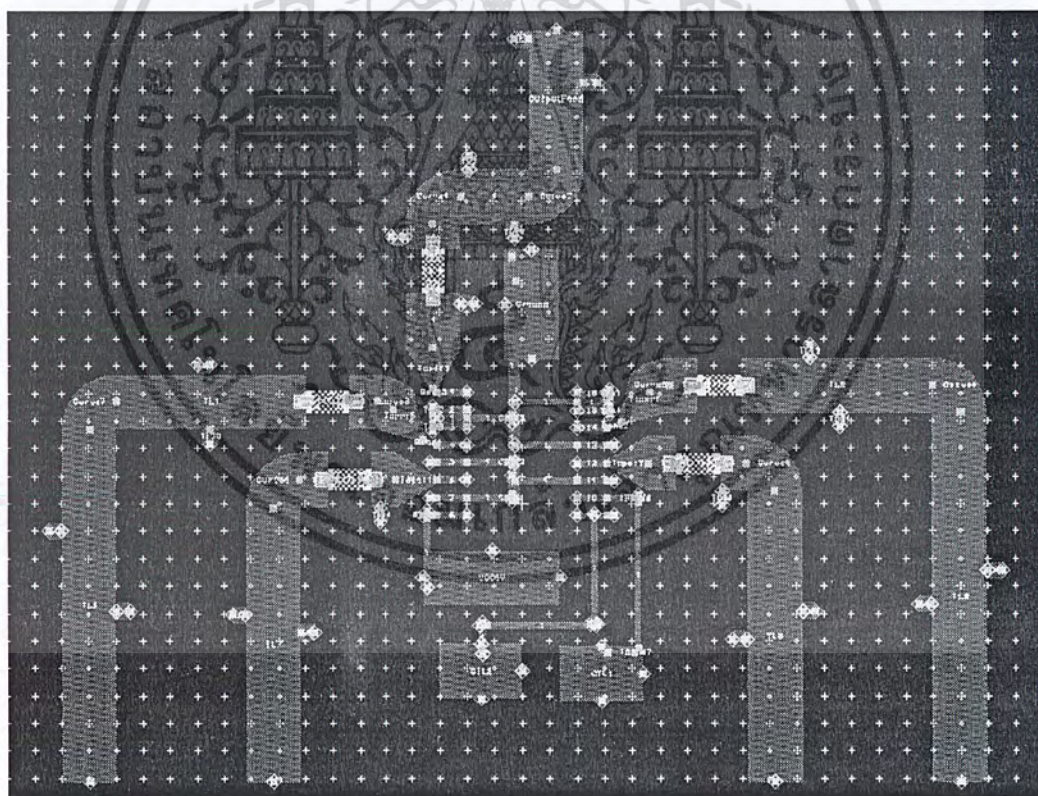
สำหรับการออกแบบลายของวงจรตรวจจับกำลังงานนั้นจะใช้หลักการเดียวกันกับวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสันเช่นกัน และใช้โปรแกรม Advance Design Systems ในการออกแบบ โดยที่ Layout ของวงจรเป็นไปตามรูปที่ 3.24

3.3.6 การจำลองรูปแบบลายของวงจร RF Switch

ในการออกแบบวงจร RF Switch นั้นจะใช้หลักการเดียวกันกับทั้งสองวงจรที่กล่าวมาแล้วด้านบน คือจะใช้โปรแกรม Advance Design Systems ในการออกแบบ Layout ของวงจร โดยจะเป็นไปตามรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.24 รูปแบบลายวงจรตรวจจับกำลังงาน



รูปที่ 3.25 รูปแบบลายวงจร RF Switch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

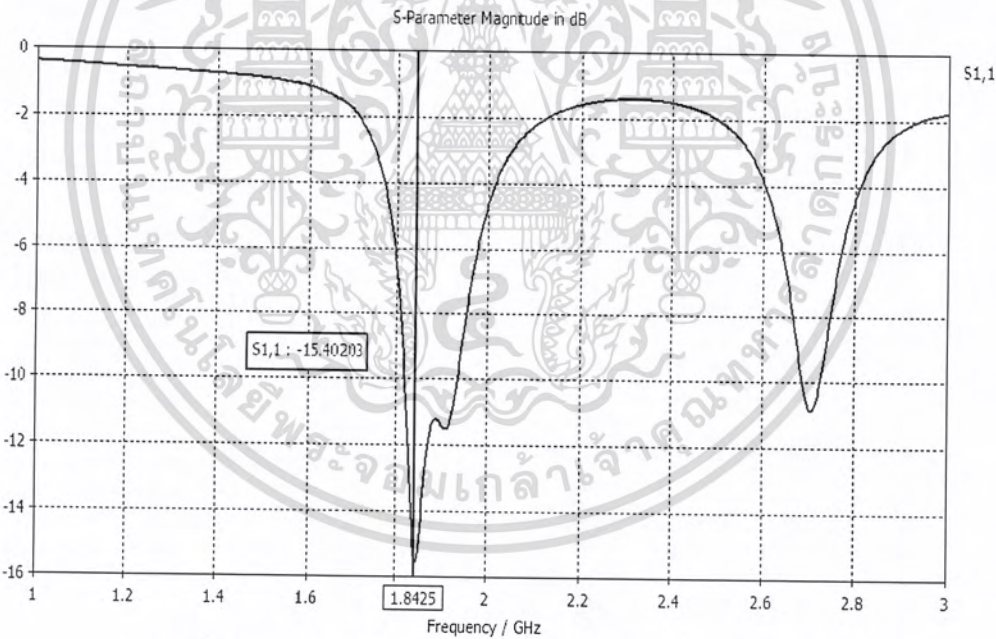
3.4 การจัดเก็บผลการทดลอง

3.4.1 การจัดเก็บผลการทดลองของสายอากาศแบบระนาบ

3.4.1.1 พิจารณาค่าการสูญเสียย้อนกลับ

การพิจารณาค่าดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องมีย่านความถี่ที่น้อยกว่า -10 dB เพื่อให้สามารถเกิดการแพร่กระจายคลื่นออกมาได้ โดยเมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่กลางที่ 1842.5 MHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.26 โดยลักษณะกราฟของค่าสูญเสียย้อนกลับนั้นได้ครอบคลุมส่วนใหญ่ของแบนวิธ (Bandwidth) ย่านความถี่ 1800 MHz

ซึ่งจากรูปที่ 3.26 นั้นได้บอกให้ทราบถึงค่าสูญเสียย้อนกลับที่ค่าความถี่กลางที่ 1842.5 MHz มีค่าเป็น -15.40203 dB



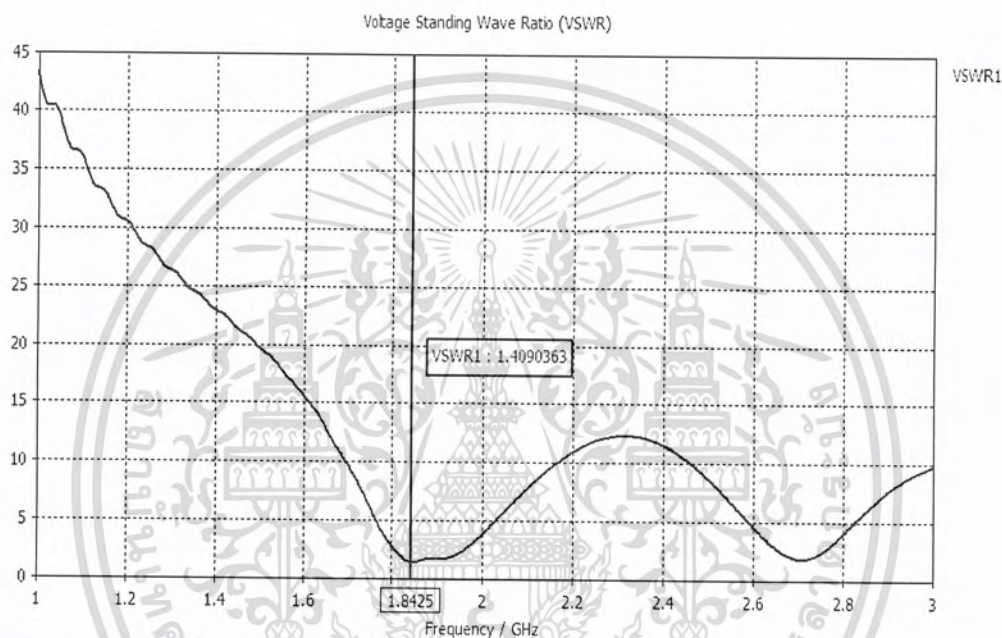
รูปที่ 3.26 ค่าสูญเสียย้อนกลับพิจารณาที่ค่าความถี่ 1842.5 MHz

3.4.1.2 พิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน

ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดัน คือ ค่าแรงดันที่มากที่สุด และค่าแรงดันที่น้อยที่สุดของคลื่น ที่ได้มาจากการรวมกันของคลื่นตกกระทบ และคลื่นสะท้อน ที่มีเฟสตรงกัน

และมีเฟสตรงข้ามกัน ตามลำดับ ซึ่งควรจะมีค่าที่ไม่เกิน 2 แต่จะให้ดีกว่าอยู่ระหว่าง 1 - 1.5 โดยเมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่กลางที่ 1842.5 MHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18

ซึ่งจากรูปที่ 3.27 นั้น ได้ออกให้ทราบถึงค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันที่ค่าความถี่กลางที่ 1842.5 MHz มีค่าเป็น 1.4090363

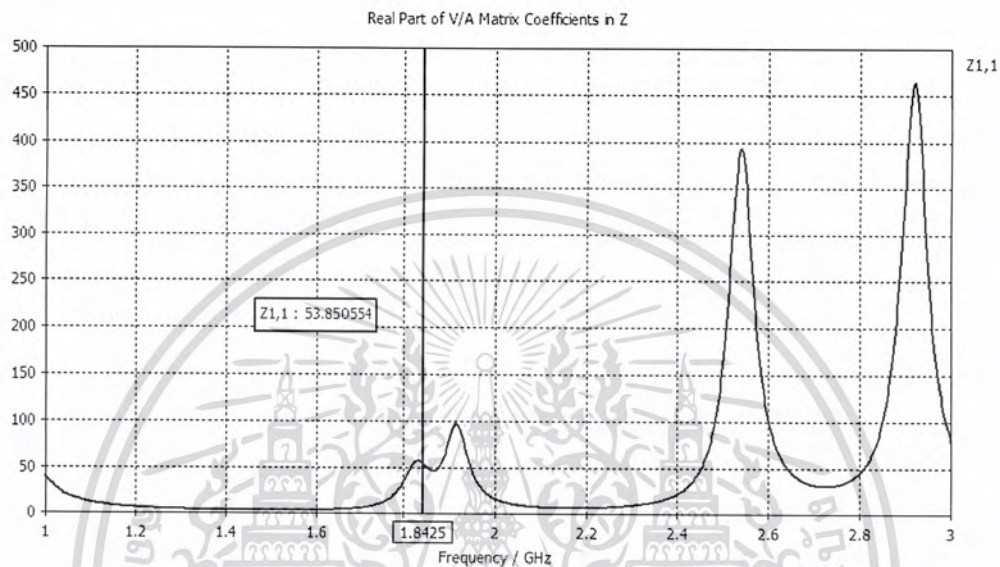


รูปที่ 3.27 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของแรงดันพิจารณาที่ค่าความถี่ 1842.5 MHz

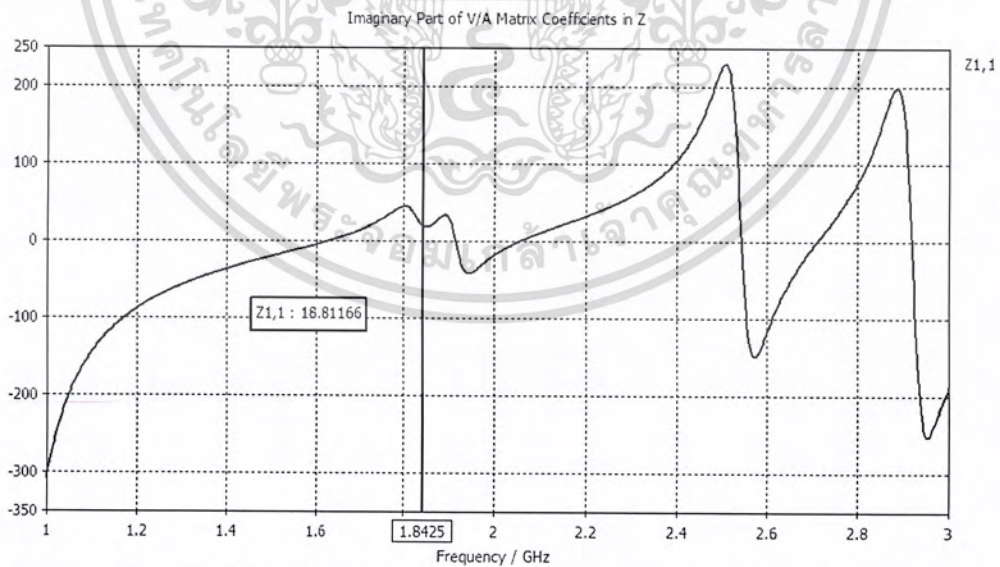
3.4.1.3 พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์

การที่พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์นั้นเราจำเป็นที่จะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าและการจำลองค่าให้ได้ค่าของอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์ม เพราะโดยส่วนใหญ่ในตัวอุปกรณ์ที่มีไว้สำหรับการเชื่อมต่อต่างๆ จะถูกออกแบบและสร้างขึ้นมาเป็นมาตรฐาน ฉะนั้นการที่เราสร้างสายอากาศ หรือให้มีที่ใกล้เคียงมากที่สุด ก็เพื่อทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณจากสายอากาศไปสู่อุปกรณ์เชื่อมต่อให้น้อยที่สุด โดยเมื่อพิจารณาที่ค่าความถี่กลางที่ 1842.5 MHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.28

ซึ่งจากรูปที่ 3.28(1) และ รูปที่ 3.28(2) นั้นได้บอกให้ทราบถึงค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของจำนวนจริง และจำนวนจินตภาพ ที่ค่าความถี่กลางที่ 1842.5 MHz มีค่าเป็น $53.850554 + j18.81166$ โอห์ม ตามลำดับ



รูปที่ 3.28(1) ค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของจำนวนจริงพิจารณาที่ค่าความถี่ 1842.5 MHz



รูปที่ 3.28(2) ค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนของจำนวนจินตภาพพิจารณาที่ค่าความถี่ 1842.5 MHz

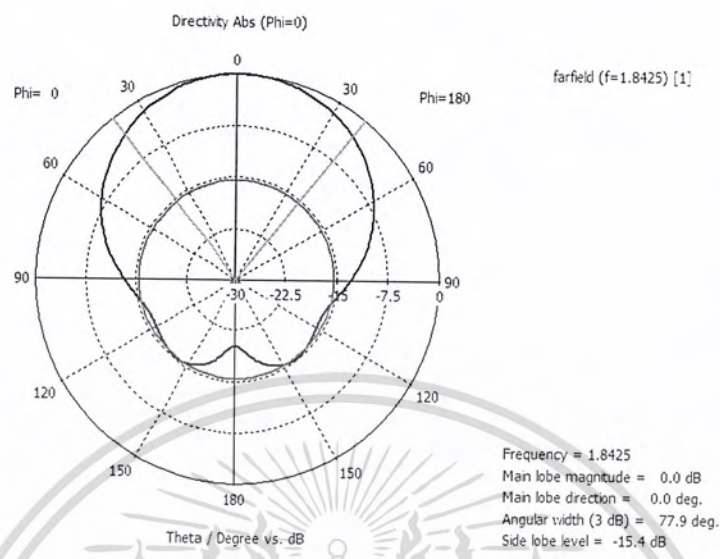
3.4.1.4 พิจารณาค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แสดงทิศทางของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า และระนาบสนามแม่เหล็ก ซึ่งนั่นเป็นการบ่งบอกถึงทิศทางที่การแพร่กระจายคลื่นนั้นแพร่ไปใน ทิศทางใด โดยเป็นการแสดงแบบการพล็อตกราฟในลักษณะของโพลาร์ (Polar Plot) โดยเป็น การพิจารณาที่ค่าความถี่กลางที่ 1842.5 MHz ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.29



3.4.2 การจัดเก็บผลการทดลองของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น

ในการจัดเก็บผลการทดลองนั้นจะใช้การจำลองผลจากโปรแกรม Advance Design Systems เป็นต้นแบบก่อนที่จะทำการสร้างชิ้นงานจริง ซึ่งค่าคุณลักษณะต่างๆ ที่จะพิจารณานั้นจะ ประกอบไปด้วย ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าการสูญเสียแยกโคเคเดียว ค่าการสูญเสียจากการ ส่งผ่าน และค่าเฟส ซึ่งการจำลองทั้งหมดนี้จะใช้พื้นฐานการคำนวณจากสมการต่างๆ ดังที่ได้ กล่าวไปแล้ว เพื่ออ้างอิงถึงแหล่งที่มาของค่า พารามิเตอร์แต่ละตัวว่ามีที่มาที่ไปอย่างไร โดยค่า คุณลักษณะต่างๆ ที่ทำการจำลองได้นั้นจะสรุปได้ดังตารางที่ 3.3 , 3.4, 3.5 และ 3.6 ตามลำดับ



รูปที่ 3.29(2) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งในระนาบสนามแม่เหล็ก
จากโปรแกรม CST Microwave Studio

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของโครงข่ายก่อร์ูปปลาคลิ้น

ค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss)		
พารามิเตอร์	การจำลองจากโปรแกรม (dB)	การวัดจริง (dB)
S[1,1], S[2,2], S[3,3], S[4,4]	-52.701, -37.281, -37.281, -52.701	-33.30, -10.25, -10.65, -27.72
S[5,5], S[6,6], S[7,7], S[8,8]	-52.701, -37.281, -37.281, -52.701	-27.36, -11.13, -10.50, -34.61

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่าการสูญเสียจากการแยกโคเคเดี่ยวของโครงข่ายก่อร์ูปปลาคลิ้น

ค่าความสูญเสียจากการแยกโคเคเดี่ยว (Isolation Loss)		
พารามิเตอร์	การจำลองจากโปรแกรม (dB)	การวัดจริง (dB)
S[2,1], S[3,1], S[4,1]	-23.911, -21.184, -19.313	-8.40, -13.65, -23.95
S[3,2], S[4,2], S[4,3]	-23.478, -21.184, -23.911	-11.21, -16.97, -9.38
S[6,5], S[7,5], S[8,5]	-23.911, -21.184, -19.313	-10.25, -17.17, -23.38
S[7,6], S[8,6], S[8,7]	-23.478, -21.184, -23.911	-12.35, -16.64, -10

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น

ค่าความสูญเสียจากการส่งผ่าน (Transmission Loss)		
พารามิเตอร์	การจำลองจากโปรแกรม (dB)	การวัดจริง (dB)
S[5,1], S[6,1], S[7,1], S[8,1]	-8.158, -8.002, -8.701, -8.707	-9.13, -7.70, -8.93, -8.60
S[5,2], S[6,2], S[7,2], S[8,2]	-8.002, -7.928, -8.709, -8.701	-10.13, -10.89, -10.58, -8.86
S[5,3], S[6,3], S[7,3], S[8,3]	-8.701, -8.709, -7.928, -8.002	-8.02, -10.75, -10.73, -8.73
S[5,4], S[6,4], S[7,4], S[8,4]	-8.707, -8.701, -8.002, -8.158	-7.02, -9.26, -8.45, -9.01

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงค่าเฟสของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น

พอร์ตสัญญาณขาออก	พอร์ตสัญญาณขาเข้า 1	พอร์ตสัญญาณขาเข้า 2	พอร์ตสัญญาณขาเข้า 3	พอร์ตสัญญาณขาเข้า 4	ความต่างเฟส
5	-92.84 °	-175.17 °	124.73 °	28.62 °	-45 °
6	-163.47 °	87.42 °	-148.27 °	109.11 °	135 °
7	116.72 °	-150.417 °	73.76 °	-169.32 °	-135 °
8	20.47 °	113.88 °	-171.177 °	-83.11 °	45 °

จากตารางทั้งสี่ตารางข้างต้นนั้น จะแสดงว่าคุณลักษณะต่างๆ เทียบกันระหว่างการจำลองจากโปรแกรมและจากการวัดผลชิ้นงานจริง โดยที่ค่าการสูญเสียย้อนกลับนั้นควรจะมีค่าต่ำกว่า -10 dB ส่วนค่าการสูญเสียแยกโดคเตียนนั้นก็ควรจะมีค่าต่ำกว่า -15 dB และค่าความสูญเสียจากการส่งผ่านนั้นก็ควรจะมีค่ามากกว่า -10 dB ซึ่งจากการสังเกตจะเห็นว่าค่าที่ได้นั้นมีทั้งใกล้เคียงกันและแตกต่างกันบ้าง ทั้งนี้เนื่องจากความผิดพลาดในการสร้างชิ้นงานจริงๆ นั้นมีตัวแปรอื่นๆ ที่ทางโปรแกรมจำลองผลมองไม่เห็นหรือไม่รู้จัก จึงทำให้การสร้างชิ้นงานจริงนั้นมีความคลาดเคลื่อนออกไปบ้าง ซึ่งก็ถือว่าเป็นเรื่องปกติของการสร้างชิ้นงานจริงขึ้นมา แต่ถึงอย่างไรค่าคุณลักษณะที่วัดได้นั้นก็ยังถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และสร้างสามารถใช้งานได้จริงตามที่ต้องการ

3.4.3 การจัดเก็บผลการทดลองของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

สำหรับวงจรแบ่งกำลังงานนั้นจะใช้โปรแกรม Advance Design Systems มาใช้ในการจำลองผลเช่นเดียวกันกับโครงข่ายก่อร์ูปลำคลื่น ซึ่งค่าคุณลักษณะที่จะพิจารณานั้นจะมี ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าการสูญเสียจากการแยกโคคเคียว ค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน ซึ่งจะแสดงได้ดังตารางที่ 3.7 , 3.8 และ 3.9

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

ค่าความสูญเสียจากการย้อนกลับ (Return Loss)		
พารามิเตอร์	การจำลองจากโปรแกรม (dB)	การวัดจริง (dB)
S[1,1], S[2,2], S[3,3]	-41.652, -35.461, -35.461	-25.87, -27.671, -33.84

ตารางที่ 3.8 ตารางแสดงค่าการสูญเสียจากการแยกโคคเคียวของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

ค่าความสูญเสียจากการแยกโคคเคียว (Isolation Loss)		
พารามิเตอร์	การจำลองจากโปรแกรม (dB)	การวัดจริง (dB)
S[2,3], S[3,2]	-39.584, -39.584	-30.18, -30.18

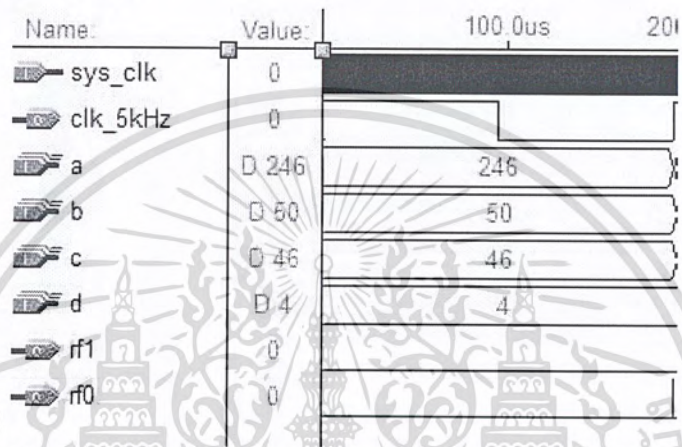
ตารางที่ 3.9 ตารางแสดงค่าการสูญเสียจากการส่งผ่านของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน

ค่าความสูญเสียจากการส่งผ่าน (Transmission Loss)		
พารามิเตอร์	การจำลองจากโปรแกรม (dB)	การวัดจริง (dB)
S[2,1], S[3,1]	-3.479, -3.479	-3.378, -3.378

จากตารางที่แสดงด้านบนนั้นจะเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างผลของการจำลองจากโปรแกรมและการวัดจริงซึ่งจะเห็นว่า ค่าได้ทั้งนั้นมีค่าใกล้เคียงกันบ้างเป็นบางค่า และบางค่ายังดีกว่าค่าที่ได้จากการจำลองผลอีกด้วย แต่ก็ยังมีบางค่าที่ลดลงไปจากการจำลองผลพอสมควร แต่ถึงอย่างไรค่าคุณลักษณะที่ได้นั้นก็ถือว่าอยู่ในระดับที่ยอมรับได้อยู่เช่นกัน

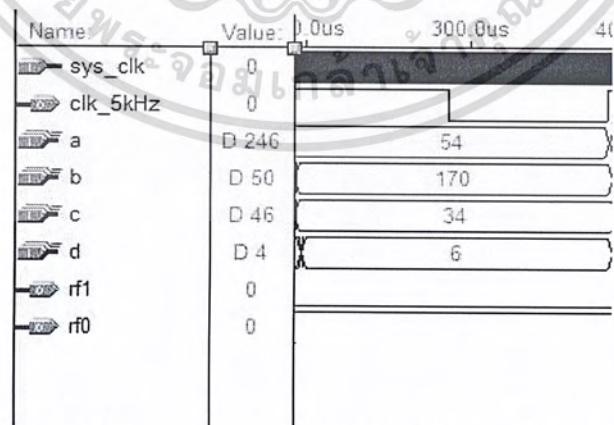
3.4.4 การจัดเก็บผลการทดลองของบอร์ด FPGA

การเก็บผลจากการจำลองผ่านโปรแกรม MAX+plus II นั้นจะใช้ภาษา VHDL เป็นตัวออกแบบและสังเคราะห์วงจรให้ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งหลักในการออกแบบนั้นได้อธิบายไปในหัวข้อก่อนหน้านี้แล้ว ซึ่งการจำลองผลการทำงานของวงจรที่ทำการสังเคราะห์นั้นเป็นไปตามรูปที่ 3.30 , 3.31 , 3.32 และ 3.33



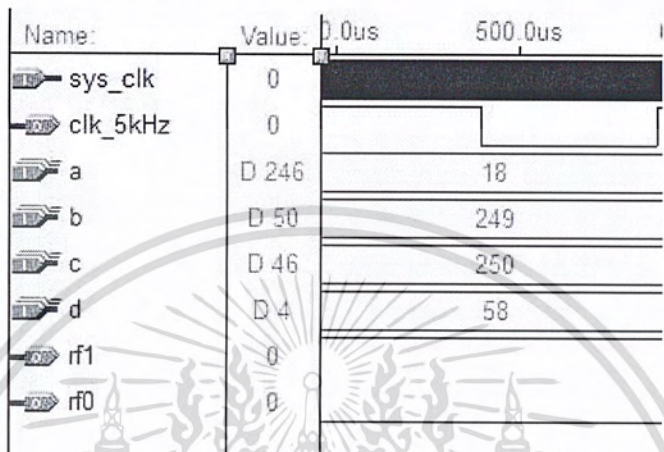
รูปที่ 3.30 การจำลองผลโดยให้ A มีค่ามากที่สุด

จากรูปที่ 3.30 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบค่าว่าหากค่าใดในพารามิเตอร์สี่ตัวคือ A B C และ D มีค่ามากที่สุดแล้ว จะทำการแสดงบิตสองบิตคือ rf1 และ rf0 ให้ออกมาสอดคล้องกับหัวข้อที่เคยกล่าวไว้แล้วในบทที่สอง ซึ่งตามรูป A จะมีค่ามากที่สุด ดังนั้น บิต rf1 และ rf0 จะเป็น 0 0 ตามลำดับ



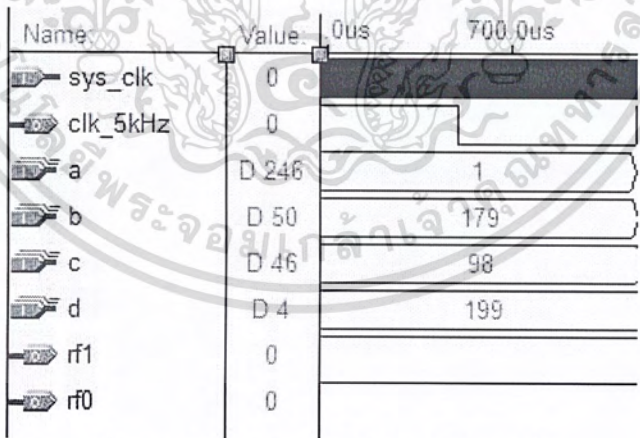
รูปที่ 3.31 การจำลองผลโดยให้ B มีค่ามากที่สุด

จากรูปที่ 3.31 แสดงให้เห็นว่าค่าของ B มีค่ามากที่สุด ทำให้บิต rf1 และ rf0 แสดงผลออกมาเป็นค่าบิต 0 1 ตามลำดับ



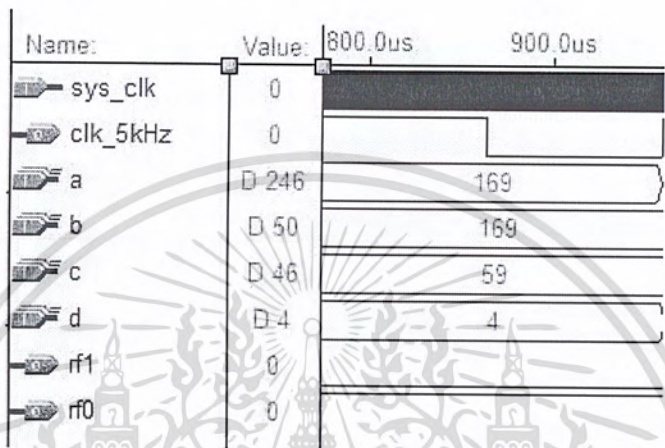
รูปที่ 3.32 การจำลองผลโดยให้ C มีค่ามากที่สุด

จากรูปที่ 3.32 แสดงให้เห็นว่าค่าของ C มีค่ามากที่สุด ทำให้บิต rf1 และ rf0 แสดงผลออกมาเป็นค่าบิต 1 0 ตามลำดับ



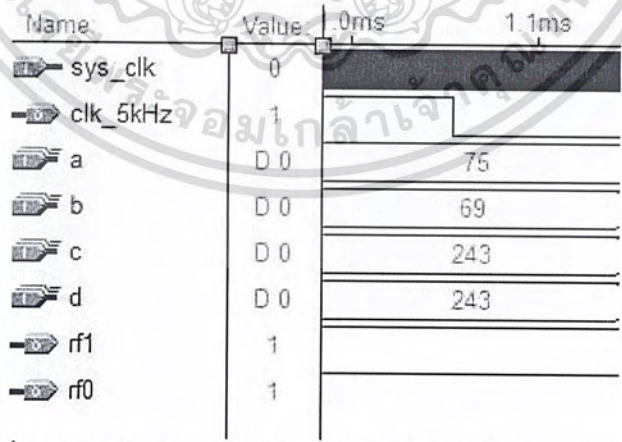
รูปที่ 3.33 การจำลองผลโดยให้ D มีค่ามากที่สุด

จากรูปที่ 3.33 แสดงให้เห็นว่าค่าของ D มีค่ามากที่สุด ทำให้บิต rf1 และ rf0 แสดงผลออกมาเป็นค่าบิต 1 1 ตามลำดับ หลังจากนั้นจะทำการจำลองผลเมื่อเกิดการเท่ากันของค่าพารามิเตอร์สองตัว ซึ่งจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.34 และ 3.35 ตามลำดับ



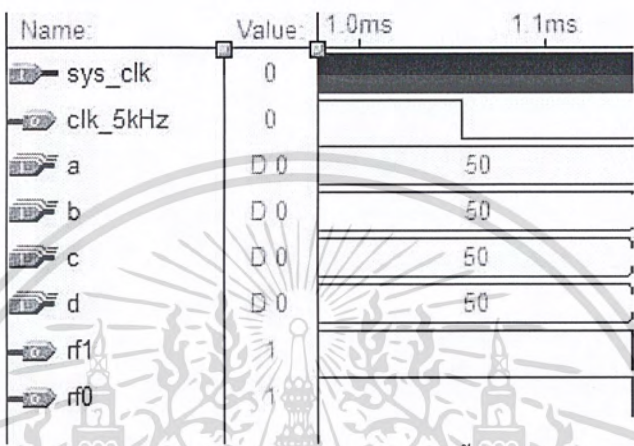
รูปที่ 3.34 การจำลองผลโดยให้ A กับ B มีค่าเท่ากันและมากที่สุด

จากรูปที่ 3.34 จะเห็นว่าเมื่อ A และ B มีค่าเท่ากันและมากที่สุดแล้วนั้น ตามหลักการที่กล่าวไว้ในบทที่สอง จะหมายความว่าให้เลือกตัวใดตัวหนึ่งแทนซึ่งในตัวโปรแกรมนั้น จะทำการเลือกค่า B แทนเสมอตามโค้ดที่ได้ทำการออกแบบไว้



รูปที่ 3.35 การจำลองผลโดยให้ C กับ D มีค่าเท่ากันและมากที่สุด

จากรูปที่ 3.35 นั้นจะมีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 3.34 ซึ่งก็คือจะทำการเลือก ค่าตัวใดตัวหนึ่งแทนซึ่งจากโค้ดของโปรแกรมจะทำการเลือกค่า D ไว้ให้เป็นค่าปกติเช่นเดียวกัน และเมื่อค่าพารามิเตอร์ทั้งสี่ตัวเท่ากันหมดนั้น จะได้ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 3.36



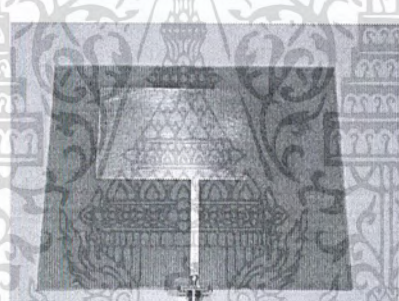
รูปที่ 3.36 การจำลองผลเมื่อพารามิเตอร์ทั้งหมดเท่ากัน

จากรูปที่ 3.36 นั้นจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าพารามิเตอร์ทั้งสี่เท่ากันแล้วนั้น บิตที่ออกมาจะเป็นค่าของบิตของค่า D นั่นก็หมายความว่าโปรแกรมนี้อาจจะรองรับค่าของ D มากกว่าค่าอื่นๆ ถ้าหากค่าเท่ากันทุกพารามิเตอร์ ซึ่งก็เป็นไปตามโปรแกรมที่ได้ออกแบบไว้

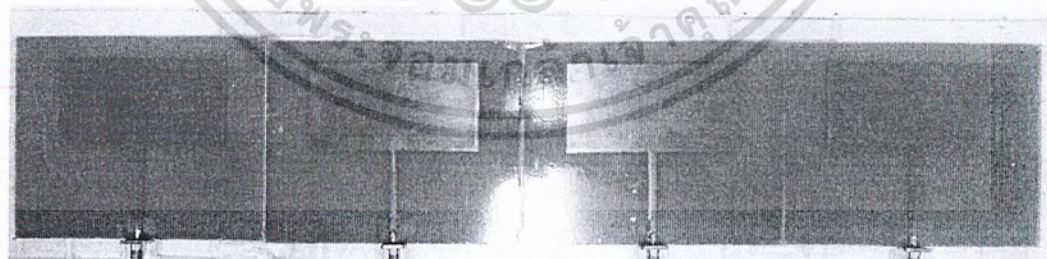
บทที่ 4

ผลการทดลอง

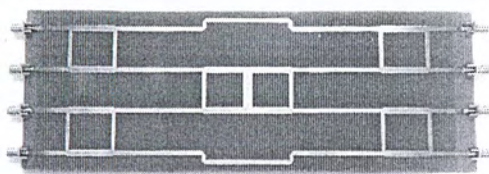
จากการวิเคราะห์ การออกแบบ เพื่อที่ต้องการสร้างสายอากาศแบบระนาบและส่วนประกอบย่อยต่างๆ ของโครงข่ายท่อรูปสี่เหลี่ยม ทำให้เราได้ทราบถึงขนาดและส่วนประกอบต่างๆ ของตัวสายอากาศและส่วนประกอบของโครงข่ายท่อรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งจะนำมาใช้ในระบบสื่อสารในช่วงของย่านความถี่ 1800 MHz โดยตัวสายอากาศระนาบแบบเดี่ยวที่ได้ทำการสร้างเสร็จแล้วนั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 พร้อมทั้งสายอากาศที่ได้นำมาเรียงกันซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และส่วนของโครงข่ายท่อรูปสี่เหลี่ยมที่สร้างเสร็จแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 สายอากาศแบบระนาบเดี่ยว



รูปที่ 4.2 สายอากาศแบบระนาบที่นำมาวางเรียงกัน



รูปที่ 4.3 โครงข่ายก่อรูปลาคัล

สำหรับการทดสอบและวัดค่าคุณลักษณะต่าง ๆ นั้น เราได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer: รุ่น HP 8720C 50 MHz - 20 GHz) ซึ่งการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายนี้ สามารถวัดและแสดงรูปสัญญาณพร้อมค่าคุณลักษณะต่างๆ โดยละเอียด ซึ่งจำเป็นต้องใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้แก่ หัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศหรือสายส่งกับเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่เป็นชนิด SMA

ในการทดลองจะประกอบไปด้วย การวัดและทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ อัตราส่วนคลื่นนิ่ง ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าการสูญเสียย้อนกลับ ค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน ค่าการสูญเสียจากการแยกโคเดเคียว และค่าเฟส โดยค่าที่ได้จากการทดลองจะนำไปสู่การวิเคราะห์ เพื่อตรวจสอบความใกล้เคียงกับการจำลองผลจากโปรแกรม CST Microwave Studio

4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย Network Analyzer: รุ่น HP 8720C 50 MHz-20 GHz
2. ชุดคาร์เบรท 85022 B. 3.5 mm.
3. เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม Spectrum Analyzer
4. เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูง
5. ออสซิลโลสโคป
6. พาวเวอร์ซัพพลาย

7. สายอากาศแบบระนาบ
8. โครงข่ายก่อรูปลำคลื่น
9. วงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน
10. วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง
11. วงจรตรวจจับกำลังงาน
12. วงจร RF Switch
13. วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล
14. บอร์ดทดลอง ACEX1K
15. Aircard Sierra Wireless 750
16. สายโคแอกเชียล RG-316

4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. ทำการคาร์ิเบรทเครื่อง Network Analyzer ด้วยชุดคาร์ิเบรท 85022 B. 3.5 mm.
2. เลือกช่วงความถี่ที่ต้องการใช้ในการวิเคราะห์ โดยเริ่มต้นที่ 1 GHz ถึง 3 GHz
3. ทำการต่อสายอากาศแบบระนาบเข้ากับเครื่อง Network Analyzer
4. ทำการทดสอบวัดค่าคุณลักษณะของสายอากาศแบบระนาบ
5. ทำการทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบระนาบ
6. ทำการต่อ โครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเข้ากับเครื่อง Network Analyzer
7. ทำการทดสอบวัดค่าคุณลักษณะต่างๆ ของโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น
8. นำสายอากาศแบบระนาบต่อรวมกับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นให้เป็นระบบ

สายอากาศ

9. ทำการทดสอบวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของระบบสายอากาศ
10. ทำการต่อวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสันกับเครื่อง Network Analyzer
11. ทำการทดสอบวัดค่าคุณลักษณะต่างๆ ของวงจรแบ่งกำลังงานวิลคินสัน
12. ทำการวัดสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

โดยใช้ฮอสซิลโลสโคป

13. ทำการป้อนสัญญาณความถี่สูงให้กับวงจรตรวจจับกำลังงานและวัดค่าเอาต์พุตของวงจร
14. ทำการทดสอบวงจร RF Switch โดยใช้เครื่องป้อนสัญญาณความถี่สูงและใช้เครื่อง Spectrum Analyzer เป็นตัวแสดงผลที่ออกมา
15. ทำการทดสอบวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลโดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงและสังเกตลักษณะของบิตเอาต์พุต
16. ทำการทดสอบบอร์ดทดลอง ACEX1K โดเนการต่อวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกและดิจิทัลพร้อมทั้งจ่ายไฟและสังเกตผลจากหลอดไฟ LED
17. ทำการนำระบบสายอากาศและวงจรทูกวงจรรวมเข้าด้วยกัน
18. ทำการต่อสาย RG-316 เข้ากับ Aircard
19. ทำการทดสอบผลของการใช้งานจากการใช้งาน Internet ในคอมพิวเตอร์

4.3 ผลการทดสอบ

4.3.1 ผลการทดสอบจากสายอากาศแบบระนาบ

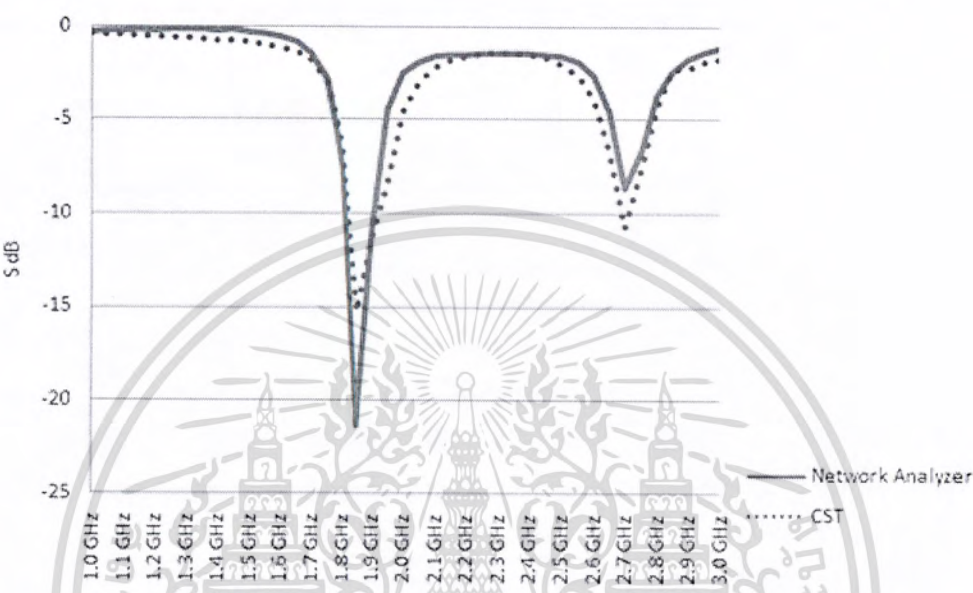
4.3.1.1 การวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับ

เป็นการแสดงค่าเปรียบเทียบผลให้เห็นระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม และผลจากการทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่กลางที่ 1842.5 MHz. โดยมีค่าที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม คือ -15.402 dB และค่าที่ได้จากเครื่องทดสอบโครงข่าย คือ -25.85 dB ซึ่งผลจากการทดสอบนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 และสามารถแสดงค่าสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศทั้งหมดที่ได้มาจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายดังตารางที่ 4.1

4.3.1.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

การแสดงค่าที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio และ ค่าที่ได้จากการทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่ 1842.5 MHz นั้นได้นำเสนอเพียงหนึ่งตัวจากสายอากาศทั้ง4ตัว เนื่องจากมีความคล้ายคลึงกันที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยค่าที่ได้จากการจำลองคือ 1.409 และจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย คือ 1.1258 และการแสดงตารางเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศทั้งหมด

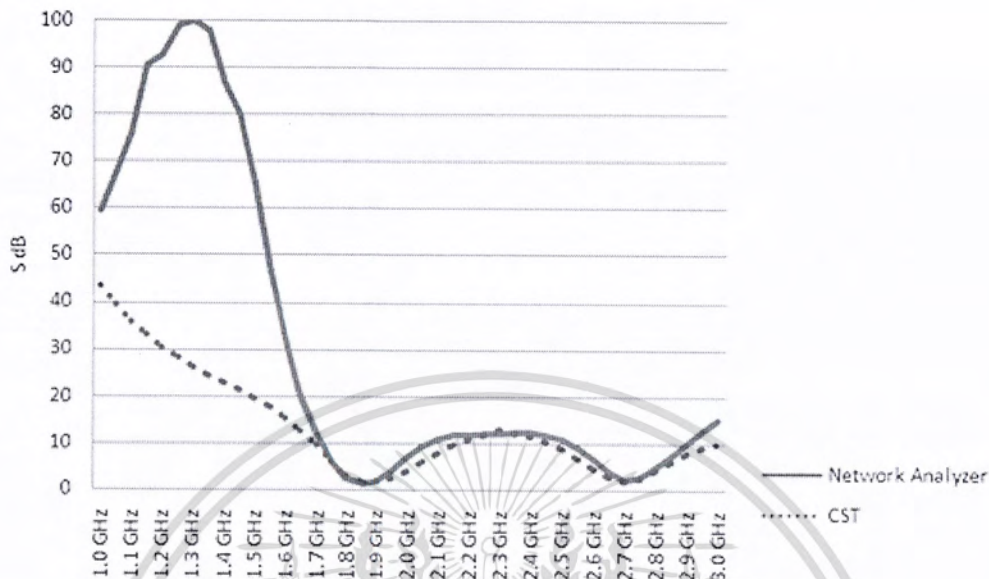
ที่เปรียบเทียบค่าที่ได้จากโปรแกรมจำลอง และค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 ค่าสูญเสียย้อนกลับ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการทดลองจริง

ตารางที่ 4.1 ค่าสูญเสียย้อนกลับ

สายอากาศตัวที่		1	2	3	4
ค่าสูญเสียย้อนกลับ	โปรแกรมจำลอง	-15.402 dB			
	เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	-25.85 dB	-19.48 dB	-26.72 dB	-20.97 dB
	ค่าความคลาดเคลื่อนจากการจำลอง และการทดลองจริง	167.84 %	126.48 %	173.48 %	136.15 %



รูปที่ 4.5 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการทดลองจริง

ตารางที่ 4.2 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง

สายอากาศตัวที่		1	2	3	4
ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง	โปรแกรมจำลอง	1.409			
	เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	1.1258	1.2424	1.0975	1.1994
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการจำลอง และการทดลองจริง		79.9 %	88.18 %	77.89 %	85.12 %

4.3.1.3 ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า

โดยได้แสดงค่าที่ได้จากโปรแกรมจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายซึ่งสามารถแสดงให้เห็น ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้า

สายอากาศตัวที่		1	2	3	4
ค่าอิมพี- แดนซ์ขาเข้า	โปรแกรม จำลอง	53.85+j18.81			
	เครื่องวิเคราะห์	45.29	42.08	53.06	59.04
	โครงข่าย	+j3.28	+j5.44	+j0.48	+j1.13
ค่าความคลาดเคลื่อนจาก การจำลอง และการทดสอบจริง		84.1 %	78.14 %	98.53 %	109.64 %

4.3.1.4 การทดสอบหาค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จำเป็นที่จะต้องทดสอบในห้องที่มีผลกระทบจากสภาพแวดล้อมที่น้อยที่สุด ที่สามารถทำในห้องไร้คลื่นสะท้อนที่เป็นห้องสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยเป็นการวัดสายอากาศที่สนามระยะไกล ซึ่งเป็นระยะการแพร่ของสนามไฟฟ้าของสายอากาศที่ใช้วัดในมุมต่างๆ โดยสามารถเริ่มจากการคำนวณที่สนามระยะไกลจากสมการ

$$R = \frac{2D^2}{\lambda}$$

(4.1)

โดยที่ R =ระยะห่างระหว่างสายอากาศรับ กับสายอากาศส่ง (m.)
 D =มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ (m.)
ซึ่งเราใช้ระยะที่ทำการทดสอบระหว่างสายอากาศ และ ใช้ค่าความถี่ 1842.5 MHz
ทำให้ได้ค่า $D=0.0894$ m.
 $\lambda=0.1628$ m.
แทนค่า $R = \frac{2(0.0894)^2}{0.1628} = 0.098$ m.

ทำให้ในการทดลองจำเป็นที่จะต้องทดสอบสายอากาศที่สนามระยะไกล โดยมีระยะ 0.098 m. ซึ่งเป็นระยะที่น้อยที่สุดที่สามารถแพร่กระจายคลื่นออกไปได้

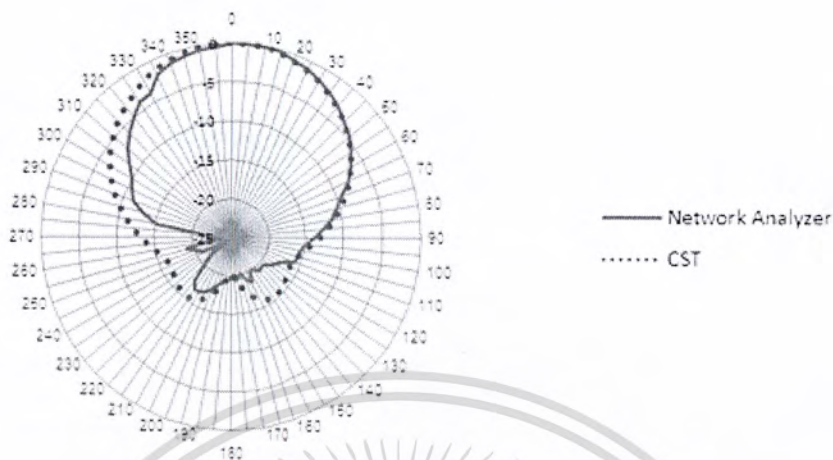
โดยการวัดในระนาบของสนามไฟฟ้า จะทำได้โดยการจัดวางสายอากาศในส่วนของ โพรบให้ขนานกับพื้นระนาบทั้งสายอากาศรับ และสายอากาศส่ง โดยนำสายอากาศส่งติดตั้งบนแท่น และสายอากาศรับไปติดตั้งบนแท่นหมุนที่ควบคุมด้วยเครื่องหมุนอัตโนมัติโดยการหมุนทีละ 5 องศา พร้อมกับการบันทึกค่าของกำลังสนามในแต่ละองศาจนครบ 360 องศา โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายช่วยในการวิเคราะห์

และการวัดในระนาบของสนามแม่เหล็ก จะต่างจากการวัดในระนาบของสนามไฟฟ้า คือการวางโพรบให้ตั้งฉากกับพื้นระนาบทั้งสายอากาศรับ และสายอากาศส่ง

โดยการแสดงค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองจากโปรแกรม CST Microwave Studio และ ค่าที่ได้จากการทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ซึ่งพิจารณาที่ความถี่กลาง คือ 1842.5 MHz โดยได้นำเสนอผลเพียงสายอากาศตัวเดียวเนื่องจากมีความคล้ายคลึงกันหมด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้า
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการทดลองจริง



รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามแม่เหล็ก
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองกับการทดลองจริง

4.3.1.5 การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ

การทดสอบหาอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งในที่นี้เราได้ใช้สายอากาศที่ได้มาจากการออกแบบเป็นตัวรับ และใช้สายอากาศคู่เหมือนเป็นตัวส่ง โดยนำมาวางให้มีระยะที่มากกว่าสนามระยะไกล คือ 1.5 m. แล้วใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายช่วยในการวิเคราะห์และการคำนวณ ซึ่งสัญญาณที่ได้รับนั้นจะมีค่าเท่ากับ $10 \log \frac{P_r}{P_t}$ โดยที่ค่าอัตราขยายของสายอากาศทั้งภาครับ และ ภาคส่งเสมือนว่ามีค่าเท่ากัน ซึ่งทำให้สามารถหาค่าอัตราขยายของสายอากาศตัวรับได้ โดยคำนวณได้จากสมการ

$$G_t \text{ (dB)} = G_r \text{ (dB)} = \frac{1}{2} \left[20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right) + 10 \log \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \right] \quad (4.2)$$

เมื่อ

G_t = เกนของสายอากาศส่ง (dB)

G_r = เกนของสายอากาศรับ (dB)

P_t = กำลังงานด้านส่ง (dB)

P_r = กำลังงานด้านรับ (dB)

R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับ (m)

เมื่อกำหนดค่าความถี่ที่ใช้งานคือ 1842.5 MHz และ $R=1.5\text{ m}$. จะสามารถหาอัตราขยายของสายอากาศรับแต่ละตัวได้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าอัตราขยาย

สายอากาศตัวที่		1	2	3	4
ค่าอัตราขยาย	โปรแกรมจำลอง	5.131 dB			
	เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย	3.75 dB	3.21 dB	3.3 dB	3.62 dB
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการจำลอง และการทดลองจริง		73.09 %	62.56 %	64.31 %	70.55 %

4.3.2 ผลการทดสอบจากสายอากาศแบบระนาบที่ต่อร่วมกับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่น
ผลการทดลองที่จะนำเสนอต่อไปนี้นี้เป็นผลการทดลองที่ได้จากการต่อร่วมกับโครงข่ายก่อรูปลำคลื่นเพื่อสนใจผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่สามารถนำเสนอดังต่อไปนี้

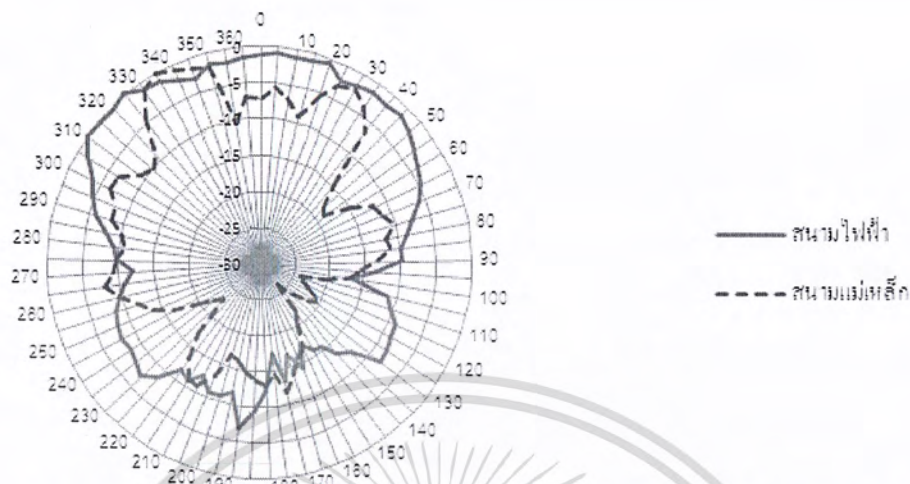
4.3.2.1 การทดสอบหาค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ในการทดสอบการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศนั้น สามารถกระทำได้เช่นเดียวกับการทดสอบของสายอากาศแบบระนาบเดียว โดยใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานเป็นสายอากาศส่ง และใช้สายอากาศแบบระนาบที่นำมาวางเรียงกันเป็นสายอากาศรับ

โดยการวัดในระนาบของสนามไฟฟ้า จะทำได้โดยการจัดวางสายอากาศในส่วนของ โพรบให้ขนานกับพื้นระนาบทั้งสายอากาศรับ และสายอากาศ

และการวัดในระนาบของสนามแม่เหล็ก จะต่างจากการวัดในระนาบของสนามไฟฟ้า คือการวางโพรบให้ตั้งฉากกับพื้นระนาบทั้งสายอากาศรับ และสายอากาศส่ง

ซึ่งการแสดงค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ค่าที่ได้จากการทดสอบจากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ที่ได้พิจารณาที่ความถี่กลาง คือ 1842.5 MHz ซึ่งผลการทดลองมีทั้งหมด 4 พอร์ต สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ

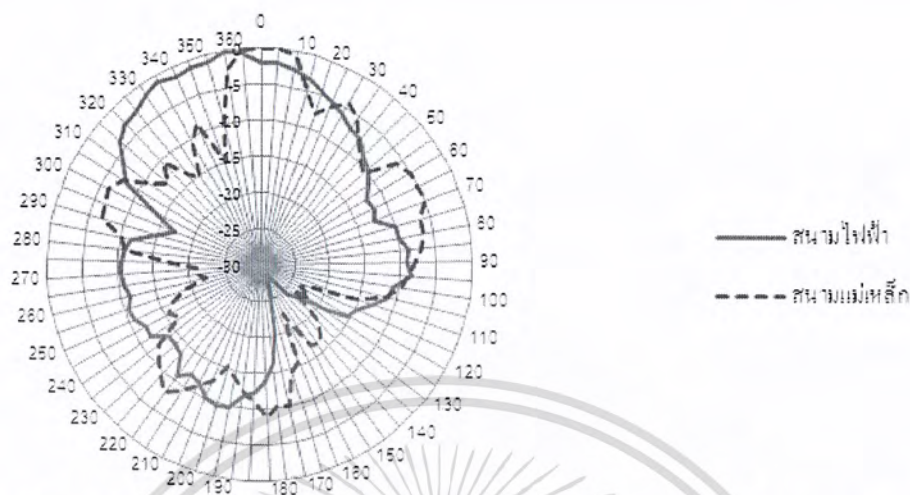


รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ของพอร์ตที่1



รูปที่ 4.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ของพอร์ตที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ของพอร์ทที่3



รูปที่ 4.11 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ของพอร์ทที่4

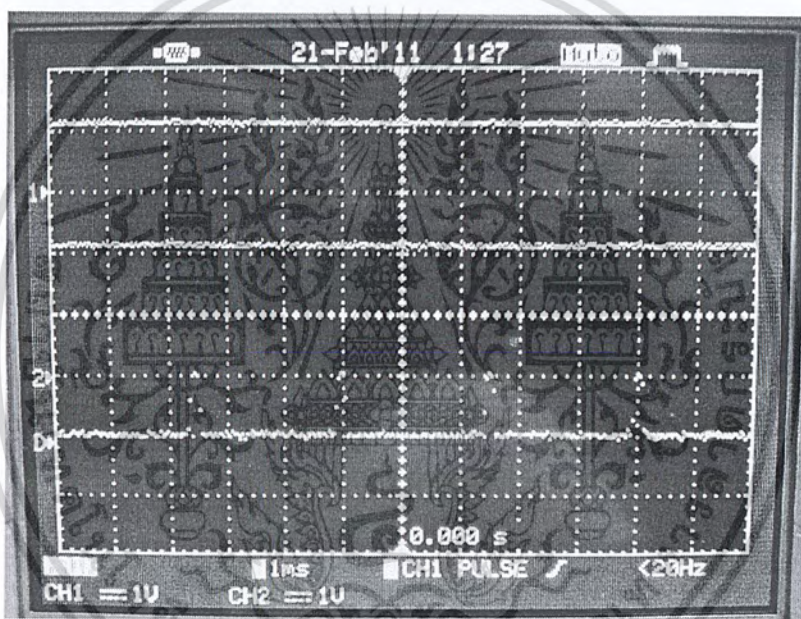
4.3.3 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง

ในการทดสอบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะใช้การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่อินพุตของวงจรและวัดค่าเอาต์พุตของวงจรซึ่งจะมีอยู่สองแบบคือ จ่ายไฟเข้าที่อินพุตมีขนาด 1V และ 2V ซึ่งผลการทดลองนั้นเป็นไปตามรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับและสำหรับรูปวงจรที่สร้างเสร็จเป็นชิ้นงานแล้วนั้นจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.14 โดยในโครงการนี้จะต้องสร้างวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงทั้งหมด 4 วงจรด้วยกัน

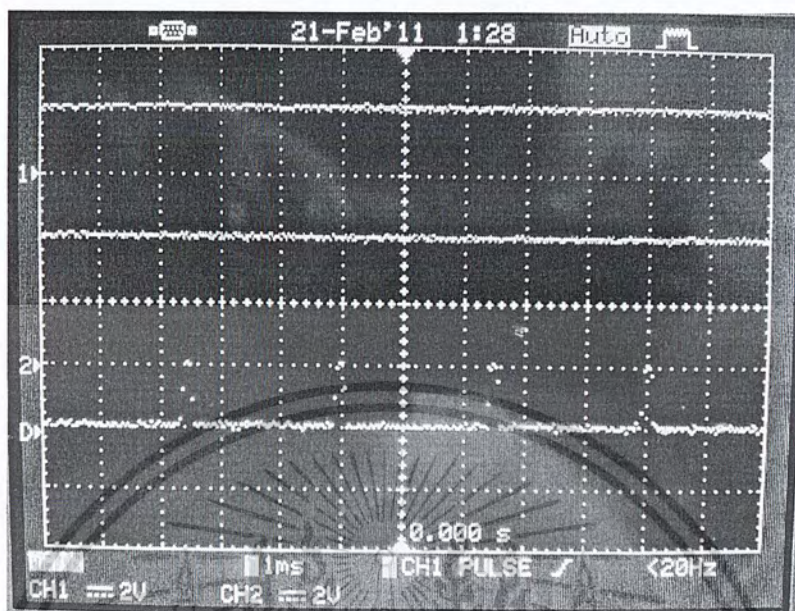
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการทดสอบวงจรตรวจจับกำลังงาน

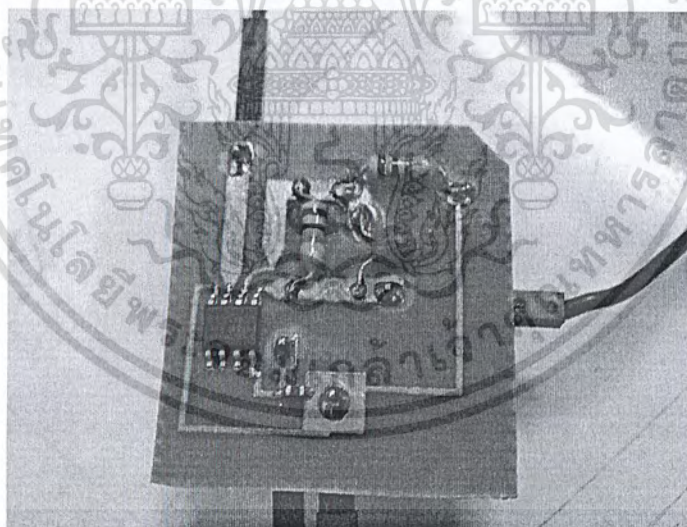
การทดสอบวงจรตรวจจับกำลังงานนั้น จะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงป้อนสัญญาณ RF ที่มีความถี่ 1.8 GHz เข้าที่อินพุตของวงจรและทำการวัดค่าไฟฟ้ากระแสตรงจากเอาต์พุตของวงจรและนำมาพล็อตกราฟเทียบกับความแรงของสัญญาณ RF ซึ่งวงจรรวม MAX4003EUA นั้นจะทำงานในช่วง 0 dBm ถึง -45 dBm โดยจะต้องทำการสร้างวงจรและวัดผลด้วยกันทั้งหมด 4 วงจร ซึ่งกราฟความสัมพันธ์จะแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และวงจรที่ทำการสร้างจริงแสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเมื่ออินพุตคือ 1 Volt

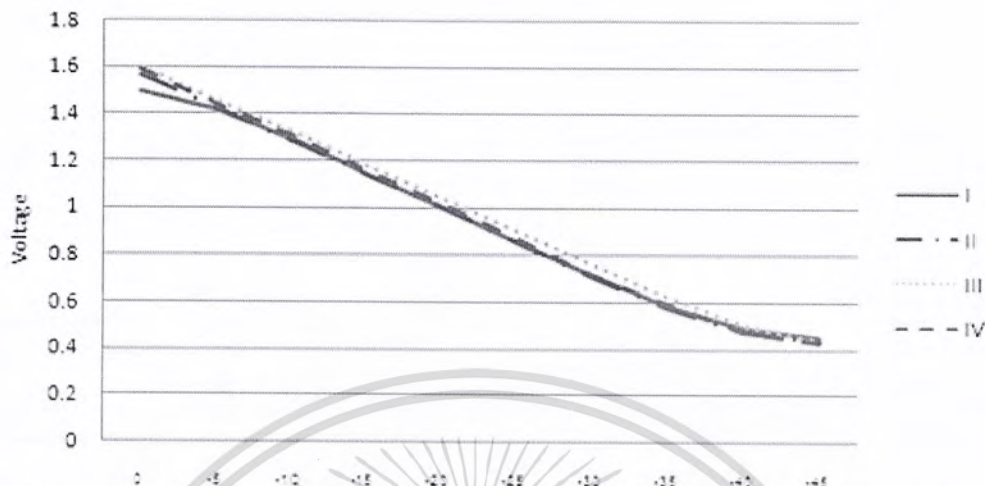


รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเมื่ออินพุตคือ 2 Volt



รูปที่ 4.14 วงจรขยายสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงที่สร้างจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ RF กับไฟฟ้ากระแสตรงของวงจรตรวจจับกำลังงาน



รูปที่ 4.16 วงจรตรวจจับกำลังงานที่สร้างจริง

4.3.5 ผลการทดสอบวงจร RF Switch

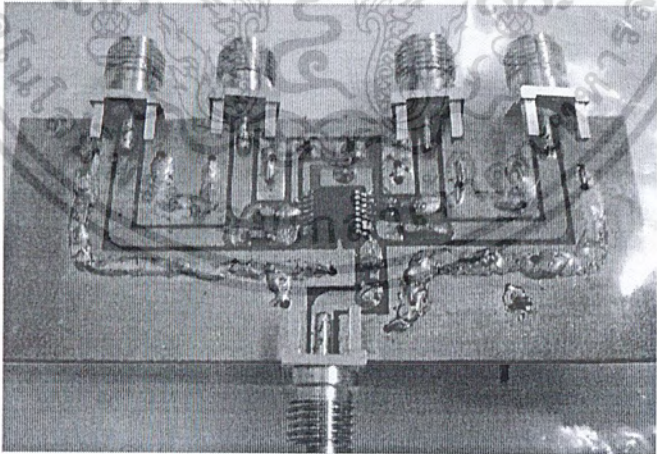
ในการทดสอบวงจร RF Switch นั้น จะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่สูงป้อนสัญญาณ RF ขนาด 0 dBm ที่ความถี่ 1.8 GHz เข้าที่อินพุตของวงจรและใช้เครื่อง Spectrum Analyzer ต่อเข้ากับเอาต์พุตของวงจรเพื่อดูขนาดของแอมพลิจูดที่ความถี่ 1.8 GHz โดยที่จะต้องทำการกำหนดพอร์ตที่จะทำการสวิตช์ด้วยโดยใช้บิตดิจิตอล 2 บิตเป็นตัวกำหนดซึ่งค่าคุณลักษณะต่างๆ นั้นจะแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ สำหรับวงจรที่ทำการสร้างจริงนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.5 ค่าสูญเสียย้อนกลับ

พอร์ท	สูญเสียย้อนกลับ (dB)
เอาต์พุต	-10.14
A	-2.65
B	-4.33
C	-10.03
D	-7.27

ตารางที่ 4.6 ค่าการสูญเสียจากการส่งผ่าน

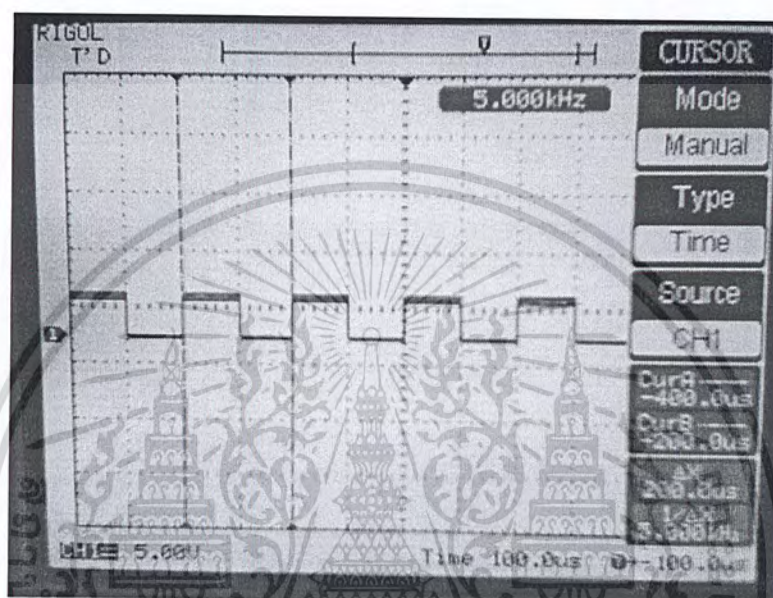
Bits\Port	A	B	C	D
00	-3.99 dB	-17.84 dB	-16.80 dB	-17.02 dB
01	-20.4 dB	-3.22 dB	-17.10 dB	-15.60 dB
10	-16.20 dB	-14.78 dB	-3.01 dB	-14.18 dB
11	-16.79 dB	-15.75 dB	-15.40 dB	-3.04 dB



รูปที่ 4.17 วงจร RF Switch ที่สร้างจริง

4.3.6 ผลการทดสอบวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา

ในการทดลอง เราวัดสัญญาณนาฬิกาจากบอร์ดทดลอง POWER ACEX1K ซึ่งมีค่า 9.6 MHz นำมาหารให้เหลือค่าที่ต้องการใช้คือ 5 kHz ได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 สัญญาณนาฬิกา 5kHz

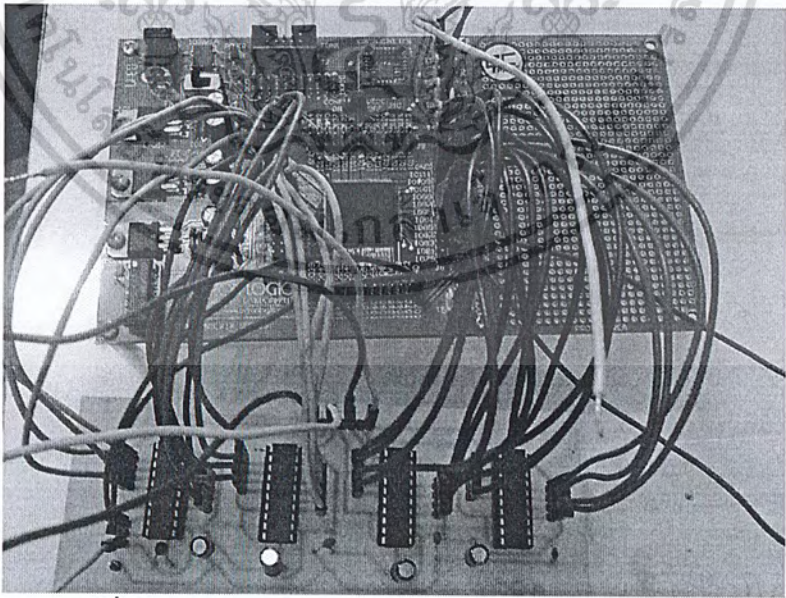
4.3.7 ผลการทดสอบบอร์ดทดลอง FPGA

เป็นการรวมกันระหว่างวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล และชุดบอร์ดทดลอง POWER ACEX1K ซึ่งหน้าที่หลักๆของวงจรเปรียบเทียบแรงดันคือ สัญญาณที่มาจากวงจรตรวจจับกำลังงานจะเป็น สัญญาณอนาล็อกจะถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อเข้าไปประมวลผลเพื่อเลือกพอร์ตเอาต์พุตที่มีความแรงของสัญญาณแรงดันที่มากที่สุดในบอร์ดทดลอง POWER ACEX1K ซึ่งในการทดสอบคือ การจ่ายไฟที่เป็นกระแสตรงที่มีความแรงแตกต่างกันเข้าไปที่วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลทั้ง 4 ชุดแล้วค่อยนำไปเปรียบเทียบแรงดันเพื่อเลือก พอร์ตเอาต์พุตที่แรงที่สุดออกมาใช้งานต่อไปซึ่งผลการทดลองนั้นสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.7 และรูปการต่อวงจรนั้นเป็นไปดังรูปที่ 4.19

สำหรับบิตควบคุมสองบิตที่ออกมาจากบอร์ดทดลอง FPGA นั้นจะมีทั้งหมด 4 แบบด้วยกันคือ 00 01 10 11 ซึ่งรูปสัญญาณแสดงได้ดังรูปที่ 4.20

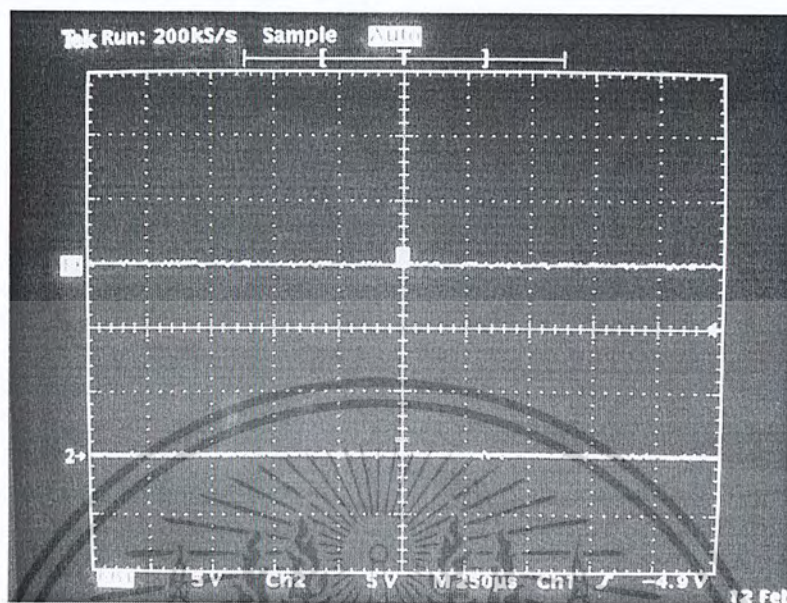
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองชุดวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

Input (Volt)				Output	
A	B	C	D	Port	Bit
5	2.5	3.3	GND	A	00
2.5	5	3.3	GND	B	01
2.5	3.3	5	GND	C	10
2.5	3.3	0	5	D	11
5	5	2.5	3.3	B	01
5	2.5	5	3.3	C	10
2.5	5	5	3.3	C	10
2.5	3.3	5	5	D	11
GND	5	5	5	D	11
5	GND	5	5	D	11
5	5	GND	5	D	11
5	5	5	GND	C	10

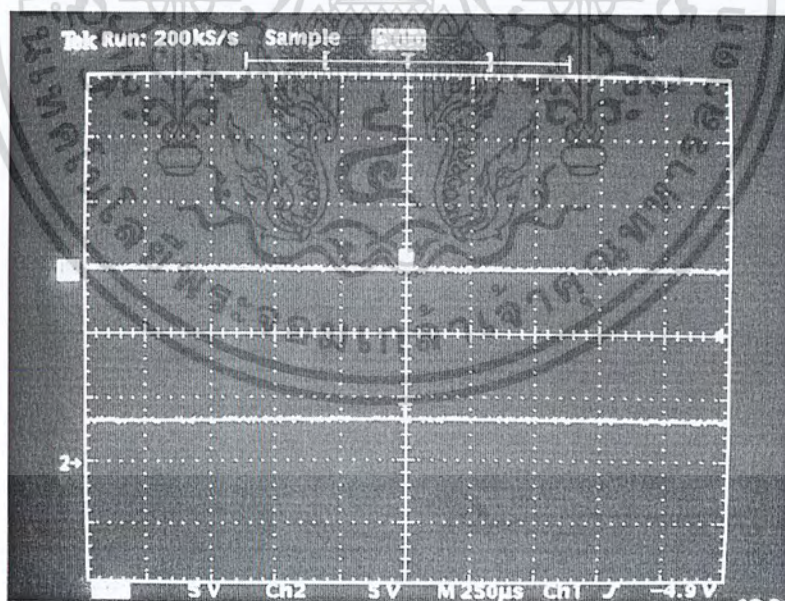


รูปที่ 4.19 วงจรADC และบอร์ด FPGA ที่ทำการเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

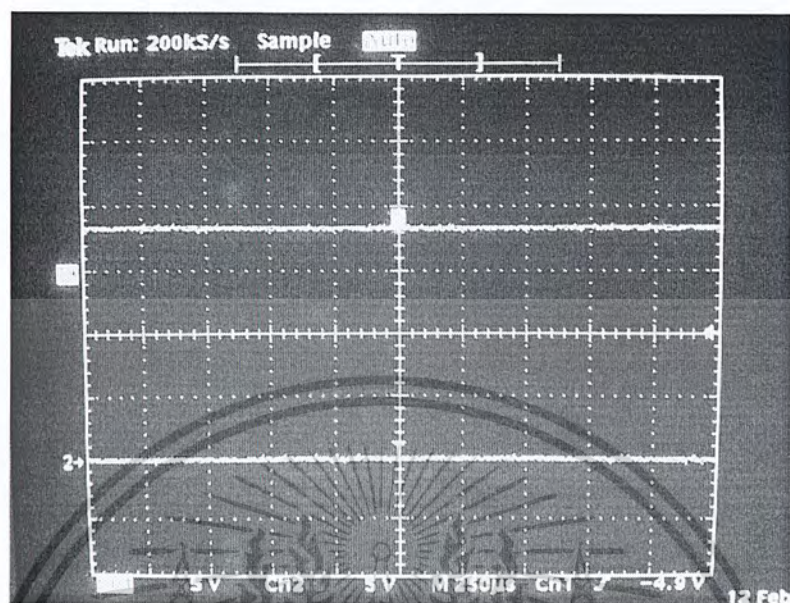


รูปที่ 4.20 (1) สัญญาณบิต 00

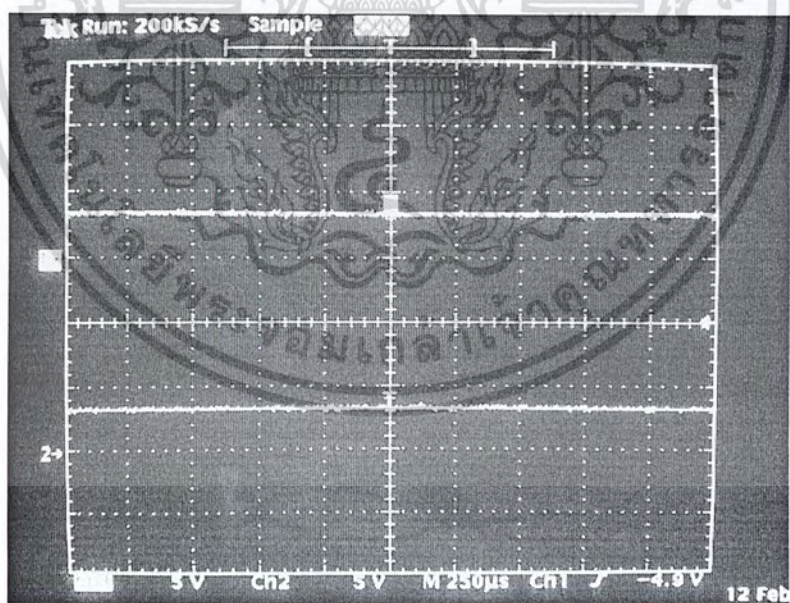


รูปที่ 4.20 (2) สัญญาณบิต 01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 (3) สัญญาณบิต 10



รูปที่ 4.20 (4) สัญญาณบิต 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างชิ้นงานและเก็บผลการทดลอง ทำให้ทางคณะผู้จัดทำได้ทราบว่า ในทางทฤษฎีกับทางปฏิบัตินั้นยังมีความแตกต่างกัน และมีปัญหาบางประการ จำเป็นต้องใช้ความพยายามในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

5.1 สรุปผล

สรุปผลการทดลองในส่วนของสายอากาศ ในการออกแบบสายอากาศโดยใช้โปรแกรมจำลองนั้น ได้ผลที่คลาดเคลื่อนจากการสร้างจริงอยู่บ้างในบางส่วน คือถึงแม้จะใช้แม่แบบในการสร้างแบบเดียวกัน แต่พอนำมาสร้างจริงหลายๆ อันนั้น ค่าคุณลักษณะบางค่าของสายอากาศที่ออกมายังมีความคลาดเคลื่อนจากที่ได้ออกแบบไว้อยู่บ้าง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวัดค่าคุณลักษณะของสายอากาศพบว่า ค่าคุณลักษณะส่วนใหญ่อยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับได้ และเมื่อนำไปทดลองจริง พบว่าสายอากาศทั้งหมดนั้นสามารถใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ได้คาดหวังไว้

สรุปผลการทดลองในส่วนของโครงข่ายก่อร์ูปค่าคลื่น โดยในการออกแบบโดยใช้โปรแกรมในการจำลองเพื่อให้เห็นถึงค่าคุณลักษณะต่างๆ นั้น พบว่ามีความแตกต่างจากการทดลองค่อนข้างมาก เนื่องจากตัวแปรและปัจจัยหลายๆ อย่าง ในสภาพแวดล้อมจริงนั้นไม่สามารถสร้างได้ในโปรแกรม รวมทั้งลายของวงจรที่ใหญ่และรายละเอียดที่ซับซ้อน ทำให้การสร้างลายทำได้ไม่เหมือนกับต้นฉบับจริงๆ อีกทั้งยังเกิดจากวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างชิ้นงานนั้นไม่สามารถทราบค่าที่แน่ชัดของพารามิเตอร์ ที่มีผลโดยตรงต่อการออกแบบและการสร้างชิ้นงานทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของคุณลักษณะระหว่างการจำลองจากโปรแกรม และการสร้างจริง แต่ว่าค่าคุณลักษณะต่างๆ ก็ยังจัดให้อยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้

สรุปผลการทดลองในส่วนของวงจรแบ่งกำลังงาน สำหรับการออกแบบโดยใช้โปรแกรมจำลองกับการสร้างจริงนั้นพบว่ามีค่าคุณลักษณะที่ใกล้เคียงกันมากพอสมควร เนื่องจากรูปแบบของวงจรไม่ยุ่งยากซับซ้อนเกินไป จึงสามารถทำลายวงจรออกมาได้ใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้มาก

สรุปผลการทดลองในส่วนของวงจรแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอลและบอร์ดทดลอง POWER ACEX1K-50 ในส่วนของการทดสอบโปรแกรมในบอร์ดนั้น ได้ผลตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการ และสามารถนำมาใช้ต่อร่วมกับส่วนอื่นๆของงานได้ด้วย และส่วนการแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอลนั้นก็สามารถทำงานได้ดี แม้จะใช้เวลาในการแก้ไขอยู่พอสมควรก็ตาม

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของสายอากาศ การสร้างสายอากาศเพื่อการใช้งานจริงจะแตกต่างจากการทฤษฎีมาก ถึงแม้จะใช้โปรแกรมมาช่วยในการจำลองสายอากาศ ซึ่งจำเป็นต้องใช้เพื่อเป็นแนวทางในการช่วยสร้างสายอากาศแต่อย่างไรก็ตามไม่ควรเชื่อมั่นในผลที่ได้จากการทดลองจากโปรแกรมมากนัก แต่ควรจะใช้เพื่อดูแนวโน้มในของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อปรับปรุงให้สายอากาศที่ออกแบบมีค่าคุณลักษณะของสายอากาศที่ตรงตามความต้องการและสามารถนำไปใช้งานได้จริง

สำหรับโครงข่ายคอมพิวเตอร์นั้นปัญหาหลักๆ ที่ได้เจอจากการทดลองนั้นก็คือ การใช้ dummy load ที่ไม่ได้คุณภาพ ทำให้ผลการทดลองที่เก็บนั้น ไม่ตรงตามความเป็นจริง ซึ่งส่งผลให้ต้องเสียเวลาในการทำชิ้นงานใหม่หลายรอบทั้งๆ ที่ยังไม่รู้ค่าคุณลักษณะที่แท้จริงของชิ้นงานที่ได้ทำมา ส่งผลให้ต้องสูญเสียอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดสอบให้ละเอียดรอบคอบมากขึ้นยิ่งกว่าเดิม

ส่วนของวงจรแบ่งกำลังงานนั้น ในเรื่องของการออกแบบจะมีความหลากหลายค่อนข้างมาก ทำให้สามารถออกแบบลายได้อย่างมากมาย แต่ก็มีผลต่อค่าคุณลักษณะต่างๆ ด้วย ซึ่งการไม่รู้ความสำคัญของลายแบบต่างๆ ทำให้ต้องตัดสินใจลองผิดลองถูก เพื่อสร้างเป็นชิ้นงานเพื่อให้ได้ค่าที่ตรงตามความต้องการ ซึ่งต้องใช้เวลาในการทดลองเป็นระยะเวลานานพอสมควร

ในส่วนของวงจรแปลงอนาลอกเป็นดิจิทัลและบอร์ดทดลอง POWER ACEX1K-50 นั้น ถึงแม้ว่าผลที่ได้จะออกมาตามที่ได้อ้างอิงไว้ก็ตาม แต่ก็ต้องยอมแลกมาด้วยเวลาในการทดลองผิดลองถูกเช่นเดียวกัน เนื่องจากการที่ยังไม่ชำนาญในการทดลองและทำการแก้ปัญหาต่างๆ ของตัวบอร์ดแล้วยังรวมถึงการเขียนโปรแกรมภาษา VHDL อีกด้วย ซึ่งยังไม่ชำนาญมากพอที่จะเขียนได้อย่างดีเยี่ยม แต่ก็สามารถทำให้สำเร็จได้ ด้วยการสอบถามจากผู้ที่มีชำนาญและนำมาปรับปรุงแก้ไขจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] นายพงษ์นรินทร์ ศรีพลอย. “การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานระบบจีพีอาร์ เอสสำหรับ
ตัวลูกข่ายเคลื่อนที่โดยใช้สายอากาศแบบสลับลำคลื่น.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2552 .
- [2] C.A. Balanis, Antenna Theory Analysis and Design, 3rd ed. : John Wiley & Sons, Inc.,
2005 .
- [3] D.M. Pozar, Microwave Engineering, 3rd ed. : John Wiley & Sons, Inc., 2005 .
- [4] E.H. Fooks, Microwave Engineering using microstrip circuits. : Prentice Hall New York,
1990 .

