

สายอากาศแถวลำดับแบบสวิตช์ลำคลื่น  
SWITCHED BEAM ARRAY ANTENNA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแถวลำดับแบบสวิตช์ลำคลื่น  
SWITCHED BEAM ARRAY ANTENNA



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2567

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2567

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง สายอากาศแถวลำดับแบบสวิตซ์ลำคลื่น

SWITCHED BEAM ARRAY ANTENNA

ผู้จัดทำ

- |    |                |         |          |
|----|----------------|---------|----------|
| 1. | นางสาวแสงตะวัน | หอมจำปี | 64010949 |
| 2. | นางสาวอรจิรา   | ขุนหอม  | 64010982 |
| 3. | นางสาวอรนุช    | ฤโสภา   | 64010985 |

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ศ.ดร.ชวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง “สายอากาศแถวลำดับแบบสวิตช์ลำคลื่น” จะไม่สามารถสำเร็จจุล่งไปได้ หากไม่ได้รับความอนุเคราะห์อย่างยิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ศ. ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนวทางการแก้ไขปัญหาลดระยะเวลาในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ รวมทั้งสนับสนุนสถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการระหว่างการจัดทำปริญญาานิพนธ์ ขอขอบพระคุณในความห่วงใยและความหวังดีที่มีให้แก่คณะผู้จัดทำเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน อาทิ บิดา มารดา รุ่นพี่และเพื่อนนักศึกษา ที่คอยสนับสนุน แนะนำ ช่วยเหลือ และให้กำลังใจแก่คณะผู้จัดทำเสมอมา จนกระทั่งปริญญาานิพนธ์สำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี

นางสาวแสงตะวัน	หอมจำปี
นางสาวอรจิรา	ขุนหอม
นางสาวอรนุช	ฤโสภา
	ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแถวลำดับแบบสวิตช์ลำคลื่น  
SWITCHED BEAM ARRAY ANTENNA

โดย	นางสาวแสงตะวัน	หอมจำปี	64010949
	นางสาวอรจิรา	ขุนหอม	64010982
	นางสาวอรนุช	ฤโสภา	64010985

อาจารย์ที่ปรึกษา ศ. ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เรื่องสายอากาศแถวลำดับแบบสวิตช์ลำคลื่น นี้จะแสดงการออกแบบสายอากาศแถวลำดับที่สามารถสวิตช์ลำคลื่น ระบบสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นนี้ประกอบด้วยสายอากาศไมโครสตริปทำงานที่ความถี่ 1.8 GHz จำนวน 8 องค์ประกอบกันเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ โดยจะเริ่มออกแบบจากการศึกษาสายอากาศไมโครสตริปที่มีการป้อนสัญญาณผ่าน Microstrip Feed ทำการกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ โดยอ้างอิงค่าจากการคำนวณด้วยสูตรทางทฤษฎี จากนั้นทำการจำลองผลเพื่อประมวลผลลัพธ์ ด้วยโปรแกรม CST Studio Suite และทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่เหมาะสมต่อการนำไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ และทดสอบการทำงานของเฟสชิฟเตอร์ การเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมเฟสชิฟเตอร์เพื่อกำหนดโหมดการทำงานของสายอากาศ และสร้างเป็นวงจรรวมสมบูรณ์ของสายอากาศแถวลำดับแบบสวิตช์ลำคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

This report present the design of a switched beam array antenna. The antenna system consists of 8 microstrip patch antennas operating at 1.8 GHz, arranged in a linear array to enhance performance. The design will begin with the study of a microstrip patch antenna fed by a microstrip line. Initial antenna parameters will be determined based on theoretical calculations. Then, simulations will be performed using CST Studio Suite to process the results. Antenna parameters will be adjusted to obtain the desired characteristics for prototyping. The report will also cover the design and testing of a phase shifter, programming to control the phase shifter, defining antenna operating modes, and the creation of a complete integrated circuit of the switched beam array antenna.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	XI
<b>บทที่ 1</b>	
<b>บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
<b>บทที่ 2</b>	
<b>ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง</b>	3
2.1 ความหมายของสายอากาศ	3
2.1.1 ประเภทของสายอากาศ	3
2.1.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อสายอากาศ	7
2.1.3 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ	8
2.2 สายอากาศไมโครสตริป	10
2.2.1 โครงสร้างของไมโครสตริป	11
2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป	12
2.3 การสวิตช์ลำคลื่นของสายอากาศ (Waveguide switch theory)	13
2.4 อุปกรณ์และโปรแกรมที่ใช้งาน	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
บทที่ 3	การออกแบบและจัดทำปฏิญญานิพนธ์	24
	3.1 การออกแบบวงจรระบบสายอากาศ	24
	3.1.1 ภาพรวมวงจร	24
	3.1.2 ออกแบบวงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่กับเฟสชิฟเตอร์	25
	3.1.3 ออกแบบวงจรรวมของระบบสายอากาศ	26
	3.1.4 การกำหนดบิตของเฟสชิฟเตอร์	27
	3.2 ออกแบบสายอากาศ	28
	3.3 การจำลอง และการปรับปรุงสายอากาศ	29
	3.3.1 พิจารณารูปแบบการวางตำแหน่งขององค์ประกอบสายอากาศ	29
	3.3.2 พิจารณาจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ	36
	3.4 การสร้างสายอากาศ	48
	3.5 โปรแกรมควบคุมวงจรการเปลี่ยนเฟส	49
บทที่ 4	ผลการทดลอง	50
	4.1 ผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ	50
บทที่ 5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	62
	5.1 สรุปเนื้อหาของปฏิญญานิพนธ์	62
	5.2 ข้อเสนอแนะ	63
	บรรณานุกรม	64
	ภาคผนวก	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สายอากาศชนิดเส้นลวดอีลีเมนต์แบบเส้นตรง แบบบ่วง และแบบเกลียว ตามลำดับ	3
2.2 สายอากาศชนิดช่องเปิดอีลีเมนต์เดี่ยวแบบปากแตรรูปทรงต่าง ๆ	4
2.3 สายอากาศแผ่นพิมพ์ในรูปแบบทางเรขาคณิตต่าง ๆ	5
2.4 สายอากาศแบบคลื่นร้ว	5
2.5 สายอากาศแบบเลนส์ซึ่งแบ่งตามรูปร่างและวัสดุ	6
2.6 ตัวอย่างสายอากาศแบบแถวลำดับที่สร้างจากสายอากาศพื้นฐานชนิดต่าง ๆ	7
2.7 การแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก	9
2.8 การแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง	9
2.9 การแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง	10
2.10 แพทช์ลักษณะต่าง ๆ	10
2.11 ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป	11
2.12 บอร์ด Arduino Mega 2560	14
2.13 ขาต่อการใช้งานของบอร์ด Arduino Mega 2560	15
2.14 คีย์แพด 4x4	16
2.15 Power divider (Input 1 Output 4)	17
2.16 RF Digital Phase Shifter Module	17
2.17 RF Digital Phase Shifter (PE44820)	18
2.18 ออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (VCO)	21
2.19 Vector network analyzer	21
2.20 Spectrum analyzer	22
2.21 ห้องไร้การสะท้อน	23
3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจร	24
3.2 วงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่เชื่อมต่อกับเฟสชิฟเตอร์	25
3.3 การจำลองภาพรวมของวงจร	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ภาพจำลองการเปลี่ยนมุมชี้ทิศทางของสายอากาศ	26
3.5 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป	28
3.6 จำลองสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น	30
3.7 ผล S-parameters ของสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น	30
3.8 ผลค่าอัตราขยายของสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น	31
3.9 จำลองสายอากาศรูปแบบเชิงระนาบ	32
3.10 ผล S-parameters ของสายอากาศรูปแบบแนวระนาบ	32
3.11 ผลค่าอัตราขยายของสายอากาศรูปแบบแนวระนาบ	34
3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศเชิงเส้น	34
3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศแนวระนาบ	34
3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของสายอากาศเชิงเส้น	35
3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของสายอากาศแนวระนาบ	35
3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของสายอากาศเชิงเส้น	35
3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของสายอากาศแนวระนาบ	35
3.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของสายอากาศเชิงเส้น	36
3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของสายอากาศแนวระนาบ	36
3.20 การจำลองไมโครสตริปแถวลำดับ 8 องค์ประกอบ	37
3.21 ผล S-parameters ของสายอากาศ 8 องค์ประกอบ	37
3.22 การอัตราขยายของการจำลองสายอากาศ 8 องค์ประกอบ	39
3.23 การจำลองไมโครสตริปแถวลำดับ 16 องค์ประกอบ	39
3.24 ผล S-parameters ของสายอากาศ 16 องค์ประกอบ	39
3.25 ค่าอัตราขยายของการจำลองสายอากาศ 16 องค์ประกอบ	41
3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศ 4 องค์ประกอบ	41
3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศ 8 องค์ประกอบ	41
3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศ 16 องค์ประกอบ	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของสายอากาศ 4 องค์ประกอบ	42
3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของสายอากาศ 8 องค์ประกอบ	42
3.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของสายอากาศ 16 องค์ประกอบ	42
3.32 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของสายอากาศ 4 องค์ประกอบ	42
3.33 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของสายอากาศ 8 องค์ประกอบ	42
3.34 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของสายอากาศ 16 องค์ประกอบ	42
3.35 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของสายอากาศ 4 องค์ประกอบ	43
3.36 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของสายอากาศ 8 องค์ประกอบ	43
3.37 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของสายอากาศ 16 องค์ประกอบ	43
3.38 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่ผ่านการเปลี่ยนเฟส	44
3.39 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 8 องค์ประกอบ ที่ผ่านการเปลี่ยนเฟส	44
3.40 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 16 องค์ประกอบ ที่ผ่านการเปลี่ยนเฟส	44
3.41 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ มุม 0 องศา	45
3.42 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ มุม +6 องศา	46
3.43 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ มุม -6 องศา	46
3.44 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ มุม +12 องศา	46
3.45 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ มุม -12 องศา	47
3.46 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ มุม +17 องศา	47
3.47 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ มุม -17 องศา	47
3.48 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ มุม +25 องศา	48
3.49 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ มุม -25 องศา	48
3.50 สายอากาศต้นแบบ 8 องค์ประกอบ	48
3.51 ภาพวงจรรวม	49
4.1 ค่า S-parameter จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบ	51
4.2 กราฟอัตราขยายจากการทดลองของสายอากาศต้นแบบ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศระหว่างการจำลองและการทดลอง	53
4.4 การติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการวัดค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเดี่ยว	53
4.5 สายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 1	54
4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 1	54
4.7 สายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 2	54
4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 2	54
4.9 สายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 3	55
4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 3	55
4.11 สายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 4	55
4.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 4	55
4.13 ภาพการติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการวัดผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อสัญญาณผ่านวงจรเปลี่ยนเฟส	56
4.14 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มุมอ้างอิง (มีมุมชี้ทิศทาง 25 deg)	57
4.15 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มุม 30 (เบี่ยงจากมุมอ้างอิง +5 deg)	57
4.16 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มุม 20 (เบี่ยงจากมุมอ้างอิง -5 deg)	58
4.17 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มุม 35 (เบี่ยงจากมุมอ้างอิง +10 deg)	58
4.18 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มุม 15 (เบี่ยงจากมุมอ้างอิง -10 deg)	59
4.19 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มุม 40 (เบี่ยงจากมุมอ้างอิง +15 deg)	59
4.20 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มุม 10 (เบี่ยงจากมุมอ้างอิง -15 deg)	60
4.21 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มุม 45 (เบี่ยงจากมุมอ้างอิง +20 deg)	60
4.22 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น มุม 5 (เบี่ยงจากมุมอ้างอิง -20 deg)	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino Mega 2560	14
2.2 ข้อมูลขบวนการต่อใช้งาน	15
2.3 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ PE44820	18
2.4 ข้อมูลขาอุปกรณ์ PE44820	18
3.1 รูปแบบการกำหนดเฟสชิฟเตอร์	27
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ	28
3.3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มของสายอากาศ	28
3.4 ค่า S-parameter ของสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น	30
3.5 ค่า S-parameter ของสายอากาศรูปแบบแนวระนาบ	32
3.6 เปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างสายอากาศเชิงเส้นและแนวระนาบ	34
3.7 ค่า S-parameter การจำลองไมโครสตริปแถวลำดับ 8 องค์ประกอบ	38
3.8 ค่า S-parameter การจำลองไมโครสตริปแถวลำดับ 16 องค์ประกอบ	40
3.9 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแต่ละพอร์ตของสายอากาศ 4 8 และ 16 องค์ประกอบ	41
3.10 การเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในกรณีที่มีปรับมุมชี้ทิศทางได้สูงสุดของสายอากาศ 4 8 และ 16 องค์ประกอบ	44
3.11 การจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศ 8 องค์ประกอบ	45
4.1 ค่า S-parameter สายอากาศต้นแบบ	51
4.2 ภาพสายอากาศต้นแบบทั้ง 4 ลำดับพร้อมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการทดสอบ	54
4.3 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อสัญญาณผ่านวงจรการเปลี่ยนเฟส	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สายอากาศมีความสำคัญที่สามารถช่วยในการสื่อสารรับ-ส่งข้อมูล โดยในปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริป เป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ น้ำหนักเบา ใช้พื้นที่น้อย มีลักษณะแบนราบ ซึ่งเหมาะกับการติดตั้งที่แบนราบไปกับพื้นผิว สามารถใช้ร่วมกันกับวงจรรวม ไมโครเวฟ ทำงานได้ 2-3 ความถี่พร้อมกัน มีความแข็งแรง มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน

ทฤษฎีของสายอากาศแถวลำดับ คือการออกแบบและวิเคราะห์กลุ่มของสายอากาศที่ถูกจัดเรียง ในรูปแบบที่เป็นระเบียบเรียบร้อย เช่น แถวลำดับ หรือการจัดเรียงในรูปแบบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถ ในการส่งและรับสัญญาณได้ดียิ่งขึ้น รวมถึงการควบคุมลักษณะการกระจายพลังงานและทิศทาง การรับ สัญญาณ

ระบบสายอากาศที่สามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ในทิศทางต่าง ๆ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ การสื่อสารไร้สาย อีกทั้งช่วยลดการแทรกสอดของสัญญาณที่ไม่ต้องการ (Undesired Signal) ระบบ สายอากาศสวิตช์ลำคลื่นนี้ประกอบด้วยสายอากาศไมโครสตริปทำงานที่ความถี่ 1.8 GHz จำนวน 8 องค์ประกอบ ประกอบกันเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ และวงจรสวิตช์ลำคลื่นที่ไม่ซับซ้อน เหมาะกับการพัฒนาและประยุกต์ใช้งานต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาทฤษฎีการทำงานของสายอากาศสวิตช์ลำคลื่น
2. นำเสนอสายอากาศสวิตช์ลำคลื่นที่มีอัตราขยายของสายอากาศ 5 dBi
3. ศึกษาออกแบบและสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบไมโครสตริป ที่มีแบบรูปการแพร่กระจาย คลื่นทิศทางเดียวเพื่อปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและอัตราขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ออกแบบและจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลอง พร้อมทั้งปรับปรุงสายอากาศให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสม โดยสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ตามความต้องการ
2. สร้างสายอากาศต้นแบบ พร้อมทั้งประกอบสายอากาศเข้ากับวงจร Microcontroller วงจร Phase shifter และ Power divider
3. สายอากาศสามารถสวิตช์ลำคลื่นได้ มีรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว มีอัตราขยาย 5 dBi และ มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ  $|S_{11}|$  ต่ำกว่า -10 dB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความหมายของสายอากาศ

สายอากาศเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่ง que เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือในทางกลับกัน ปกติสายอากาศจะถูกใช้กับเครื่องส่งและเครื่องรับวิทยุ ในการส่ง เครื่องส่งวิทยุจะป้อนคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ความถี่วิทยุ หรือไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงไปยังขั้วไฟฟ้าทั้งสองของสายอากาศ จากนั้นสายอากาศจะแพร่กระจายพลังงานจากกระแสในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่ง สำหรับกรณีที่ เป็นสายอากาศภาครับ สายอากาศจะดักจับพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อที่จะสร้างแรงดันไฟฟ้าขนาดเล็กที่ขั้วของสายอากาศ โดยแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกส่งต่อไปให้อุปกรณ์เครื่องรับเพื่อทำการขยายสัญญาณต่อไป [7]

##### 2.1.1 ประเภทของสายอากาศ [9]

##### 1. ประเภทที่มีตัวแพร่กระจายคลื่นเพียงตัวเดียว แบ่งประเภทได้ดังนี้

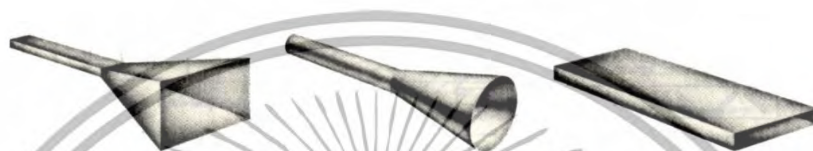
ก) สายอากาศชนิดเส้นลวด (Wire antennas) ดังแสดงรูปที่ 2.1 [22] มีรูปร่างที่แตกต่างกันและหลากหลาย โดยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มได้คือ กลุ่มที่เป็นเส้นลวดตรง เช่น สายอากาศโมโนโพล กลุ่มที่มีลักษณะเป็นบ่วงหรือลูป เช่น สายอากาศแบบวงกลม (Circular loop) แบบวงสี่เหลี่ยม (Square loop) และแบบรอมบิค (Rhombic) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 สายอากาศชนิดเส้นลวดอีลีเมนต์แบบเส้นตรง แบบบ่วง และแบบเกลิวย ตามลำดับ

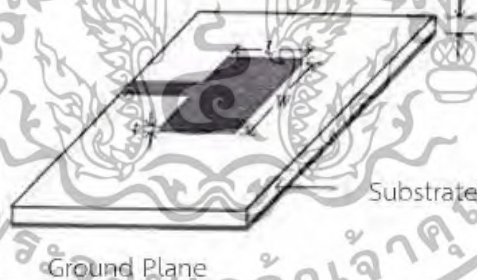
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข) สายอากาศแบบช่องเปิด (Aperture antennas) ดังแสดงรูปที่ 2.2 [22] สายอากาศชนิดช่องเปิดนี้นิยมใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 1-20 GHz ทั้งนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านเครื่องบิน หรือยานอวกาศ เนื่องจากความสะดวกในการติดตั้ง และยังสามารถหุ้มด้วยฉนวนหรือวัสดุที่ไม่เป็นสื่อไฟฟ้าได้อีก เพื่อป้องกันสภาพที่อันตรายต่อระบบสื่อสาร



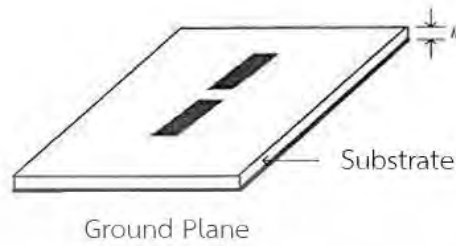
รูปที่ 2.2 สายอากาศชนิดช่องเปิดอีลิเมนต์เดี่ยวแบบปากแตรรูปทรงต่าง ๆ

ค) สายอากาศแผ่นพิมพ์ (Printed antennas) ดังแสดงรูปที่ 2.3 [22] โครงสร้างของสายอากาศแผ่นพิมพ์จะประกอบด้วยแผ่นแพทช์ตัวนำซึ่งทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นวางอยู่บนแผ่นไดอิเล็กตริกชั้นเสตรท โดยมีแผ่นกราวด์โลหะรองรับอยู่ด้านล่างอีกชั้นหนึ่ง ปัจจุบันส่วนที่เป็นแพทช์ซึ่งใช้ในการแพร่กระจายคลื่น ได้ถูกพัฒนาออกมาในลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เช่น แพทช์รูปสี่เหลี่ยม รูปวงกลม หรือรูปแบบทางเรขาคณิตอื่น ๆ

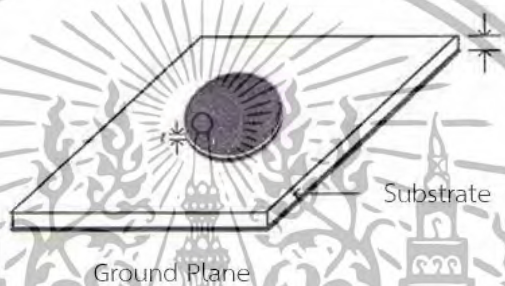


ก) สายอากาศแผ่นพิมพ์แบบแพทช์สี่เหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



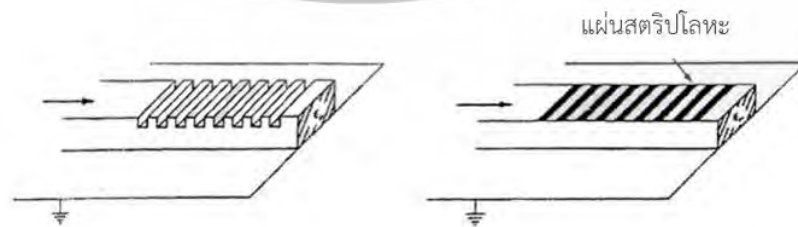
ข) สายอากาศไดโพลแบบแผ่นพิมพ์



ค) สายอากาศแผ่นพิมพ์แบบแพทช์วงกลม

รูปที่ 2.3 สายอากาศแผ่นพิมพ์ในรูปแบบทางเรขาคณิตต่าง ๆ

ง) สายอากาศแบบคลื่นรั่ว (Leaky-wave antennas) ดังแสดงรูปที่ 2.4 [22] สายอากาศชนิดนี้ถูกออกแบบจากท่อนำคลื่นที่ใช้งานกับความถี่ไมโครเวฟในย่านมิลลิเมตร (Millimeter wave) เช่น ท่อนำคลื่นแบบไดอิเล็กทริก (Dielectric guide) สายส่งแบบไมโครสตริบ (Microstrip line) สายส่งแบบแนวระนาบร่วม (Coplanar line) และสายส่งแบบร่อง (Slot line) สายอากาศแบบนี้จะถูกนำไปใช้งานที่ความถี่สูงกว่า 30 GHz ขึ้นไป รวมไปถึงความถี่อินฟราเรด โครงสร้างของสายอากาศจะถูกทำให้ขาดความต่อเนื่องด้วยระยะที่เท่า ๆ กัน

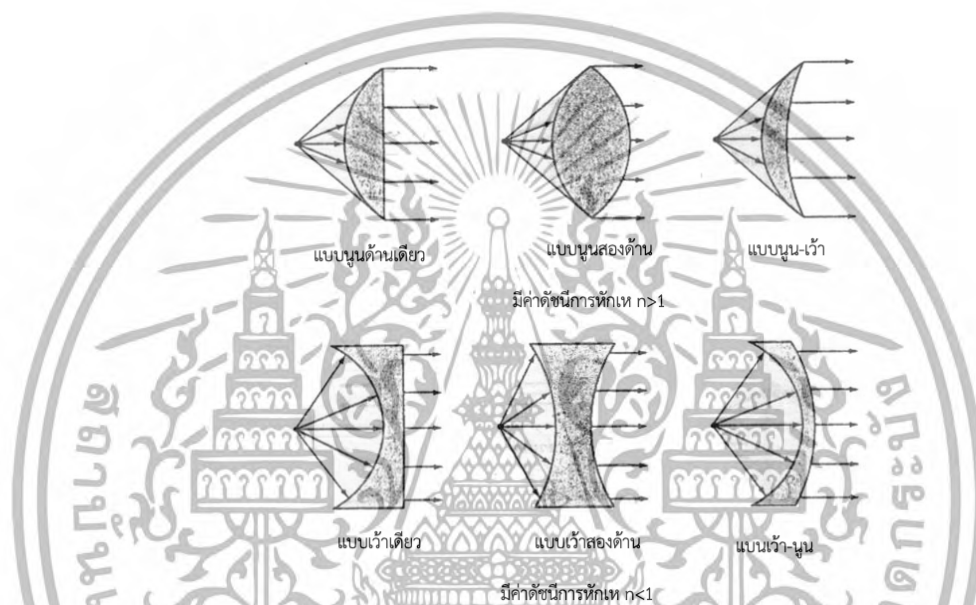


ก) ทำให้ขาดความต่อเนื่องโดยการเจาะร่องสตริบโลหะ ข) ทำให้ขาดความต่อเนื่องโดยการติดเส้น

รูปที่ 2.4 สายอากาศแบบคลื่นรั่วซึ่งเกิดจากการทำให้ปลายของท่อนำคลื่นไดอิเล็กทริกขาดความต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ) สายอากาศแบบเลนส์ (Lens antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 [22] ทำหน้าที่รวมเอาพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจัดกระจายในทิศทางที่ไม่คงที่ ให้อยู่ในรูปของคลื่นระนาบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic plane wave) โดยทั่วไปมักจะนำเลนส์มาใช้เป็นตัวสะท้อนในงานความถี่สูงมาก ๆ (สูงกว่า 100 GHz) และมีการแบ่งชนิดและตั้งชื่อของเลนส์ตามรูปร่างและชนิดของวัสดุที่ใช้



รูปที่ 2.5 สายอากาศแบบเลนส์ซึ่งแบ่งตามรูปร่างและวัสดุ

ฉ) สายอากาศแถวลำดับ (Array antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [22] เป็นการนำสายอากาศมาจัดเป็นแถวลำดับ คือ การนำสายอากาศหรือตัวแพร่กระจายคลื่นที่มีลักษณะเหมือนกันตั้งแต่สองตัวขึ้นไป มาจัดวางเรียงลำดับกันตามรูปทรงเรขาคณิต เพื่อให้ได้คุณสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นตามลักษณะเฉพาะที่ผู้ออกแบบต้องการ นอกจากการจัดวางตัวให้เป็นแถวลำดับของสายอากาศเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการแล้วยังสามารถควบคุมการเปลี่ยนทิศของรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นของแถวลำดับหรือควบคุมการวาดด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic scanning) โดยการควบคุมการเลื่อนเฟสและแอมพลิจูดของสัญญาณที่ป้อนให้กับแถวลำดับ การจัดแถวลำดับแบบนี้จะเรียกว่า การจัดแถวลำดับเชิงเฟส (Phase arrays) ทั้งนี้การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศแบบแถวลำดับนี้จะไม่มีความยุ่งยาก แต่จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ในปัจจุบันได้นำเอาเทคโนโลยีด้านการประมวลผลสัญญาณ (Signal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

processing) มาช่วยในการออกแบบทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ ๆ เช่น สายอากาศฉลาด (Smart antennas) และสายอากาศติดตาม (Tracking antennas) เป็นต้น



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างสายอากาศแบบแถวลำดับที่สร้างจากสายอากาศพื้นฐานชนิดต่าง ๆ

### 2.1.2 ตัวแปรที่มีผลกระทบกับสายอากาศ

สายอากาศจัดเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญมากในเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ดังนั้นในการออกแบบเพื่อสร้างสายอากาศนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้มีประสิทธิภาพในการรับ-ส่งสัญญาณ ให้ได้ดีที่สุดจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศ [7] ซึ่งมีดังนี้

1. ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (SWR: Standing Wave Ratio) หรือ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) ถูกใช้ในการตรวจสอบว่าสายอากาศที่ใช้อยู่มีประสิทธิภาพเพียงใด โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในอัตราส่วนคลื่นนิ่ง กล่าวคืออัตราส่วนระหว่างกำลังส่งที่ถูกส่งออกไปต่อกำลังส่งที่ถูกสะท้อนกลับมา ดังนี้

$$SWR = \frac{|\Gamma|_{max}}{|\Gamma|_{min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\Gamma$  คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน

$V_{max}$  คือ คลื่นนิ่ง หรือแรงดันเอาต์พุตสูงสุดจากสายอากาศ

$V_{min}$  คือ คลื่นนิ่งขั้นต่ำ หรือแรงดันไฟฟ้าสะท้อนกลับ

โดยค่ามาตรฐานของอัตราส่วนคลื่นนิ่งจะอยู่ที่ 1.1:1 – 1.5:1 กรณีต่ำที่สุดไม่ควรเกิน 2:1 แต่ในหลักความเป็นจริงสายอากาศไม่สามารถยึดหาคความยาวตามความถี่ใช้งานได้ จึงต้องใช้ค่ากึ่งกลาง และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาคำนวณเพื่อให้สามารถใช้งานได้ตลอดทั้งย่านความถี่ที่จะใช้งาน โดยที่ SWR มีค่าเป็น 1.1:1 สายอากาศจะมีประสิทธิภาพสูงสุด

2. ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return loss : RL) หรือ  $S_{11}$  คือ ค่าของสัญญาณในส่วนที่สะท้อนกลับเมื่อมีการส่งสัญญาณผ่านระบบต้องการให้สายอากาศไม่มีการสะท้อนกลับของสัญญาณ จึงต้องดูที่สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน  $|\Gamma|$  มีค่าเป็น 0 หรือ  $|\Gamma|$  มีค่าเท่ากับ  $-10$  dB

$$RL = -10 \log \frac{P_r}{P_t} \quad (2.2)$$

$$P_t = P_r + P_0$$

โดยที่ RL คือ ค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ

$P_r$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ

$P_t$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่รับได้

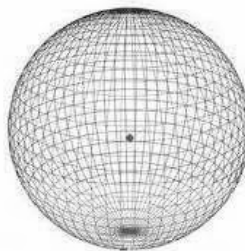
$P_0$  คือ กำลังงานของสัญญาณที่ส่งออก

3. แบนด์วิดท์ (Bandwidth) คือ ช่วงภายในของความถี่ ซึ่งประสิทธิภาพสายอากาศจะขึ้นกับคุณสมบัติในข้อนี้เพราะสามารถบอกได้ว่า สายอากาศที่สร้างขึ้นสามารถรองรับการใช้งานได้ในช่วงความถี่ใดความถี่แบนด์วิดท์ ถือได้ว่าเป็นระยะห่างของความถี่สูงและต่ำ ซึ่งอยู่บนความถี่ศูนย์กลางโดยทั่วไปแล้วในระบบสื่อสารไร้สาย ต้องออกแบบสายอากาศให้มีค่าความสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า  $-10$  dB ในช่วงของความถี่แบนด์วิดท์ที่ต้องการให้สายอากาศใช้งานได้

### 2.1.3 การแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ [7]

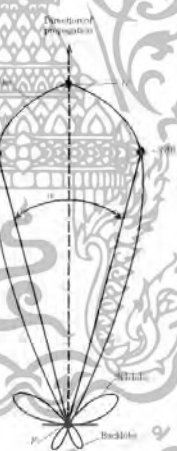
1. การแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก (Isotropic) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 สายอากาศที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง ยกตัวอย่างเช่น แหล่งจ่ายแบบจุด (Point source) เป็นสายอากาศแบบหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างได้จริง แต่มักจะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศจริงเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติ แสดงทิศทางของ สายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การแพร่กระจายคลื่นแบบไอโซโทรปิก

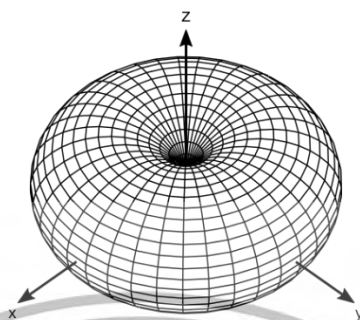
2. การแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง (Directional) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เป็นสายอากาศซึ่งมีคุณสมบัติของการส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในทิศทางที่ กำหนดสามารถเพิ่มระยะทางการใช้งาน ได้ไกลกว่าเสาอากาศแบบรอบตัว มีข้อเสียคือ ถ้าไม่อยู่ในทิศทางการแพร่กระจายของคลื่นจะไม่สามารถ รับสัญญาณได้เลย สายอากาศที่นิยมใช้ ได้แก่ เสาอากาศแบบเซ็กเตอร์ (Sector antenna) เสาอากาศ แบบยาคิ (Yagi antenna) สายอากาศแบบกริด (Grid antenna)



รูปที่ 2.8 การแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง

3. การแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง (Omni Directional) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 เป็นกรณี พิเศษของสายอากาศแบบชี้ทิศทาง ซึ่งสายอากาศประเภทนี้มีทิศทางการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง 360 องศา เหมาะสำหรับใช้ติดต่อกับเครื่องลูกข่ายที่เคลื่อนไหวอยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่ไม่แน่นอน

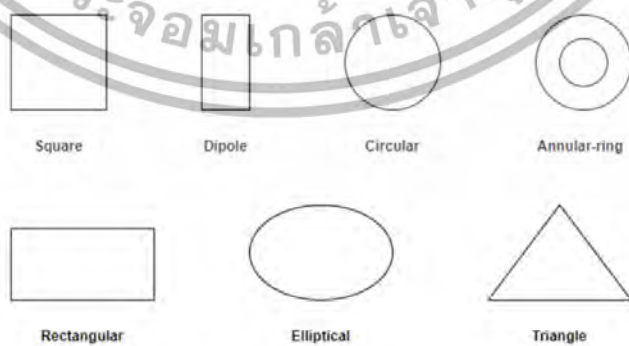
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง

## 2.2 สายอากาศไมโครสตริป

ปัจจุบันสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในย่านความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือ น้ำหนักเบา ใช้พื้นที่น้อย [19] มีลักษณะแบนราบซึ่งเหมาะกับการติดตั้งที่แบนราบไปกับพื้นผิว สามารถใช้ร่วมกับวงจรไมโครเวฟ ทำงานได้ 2 ถึง 3 ความถี่พร้อมกัน มีความแข็งแรง เมื่อนำมายึดติดกับพื้นผิว ทำให้ง่ายต่อการออกแบบและสร้าง สำหรับสายอากาศไมโครสตริป นั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ในแต่ละชนิดจะมีรูปแบบและคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป ดังนั้นในการออกแบบหรือเลือกใช้สายอากาศชนิดใดจะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน สายอากาศไมโครสตริปประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแผ่นหรือที่เรียกว่าแพทช์ซึ่งเป็นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีได้หลายรูปทรง เช่น สี่เหลี่ยมมุมฉาก สามเหลี่ยม วงกลม วงแหวน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2. 10 ซึ่งถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นระบายความร้อนที่มีความบางและมีลักษณะเป็นชั้นหรือเรียกว่าซับสเตรทของสารไดอิเล็กตริก [26]



รูปที่ 2.10 แพทช์ลักษณะต่าง ๆ

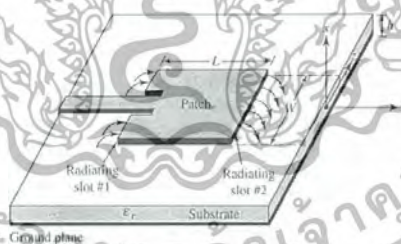
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศแบบไมโครสตริปมีหลายประเภท หากแบ่งตามการใช้งานสามารถแบ่งได้สามประเภท ได้แก่

1. สายอากาศแบบแพร่กระจายคลื่นตามแนวกว้าง เพื่อการสื่อสารตามแนวกว้างของแผ่นทองแดง สายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตั้งฉากกับแผ่นทองแดง
2. สายอากาศที่แพร่กระจายคลื่นตามแนวยาว เพื่อการสื่อสารในทิศทางตัดขวางของแผ่นทองแดง สายอากาศแบบนี้จะมีทิศทางการส่งสัญญาณตามแนวเดียวกับแผ่นทองแดง
3. สายอากาศอื่น ๆ เป็นสายอากาศที่ออกแบบมาเฉพาะการใช้งานชนิดหนึ่ง ๆ อาจมีมากกว่าสองทิศทางหรืออาจปรับเปลี่ยนทิศทางได้ตามความถี่ที่ใช้งาน

### 2.2.1 โครงสร้างของไมโครสตริป

ส่วนโครงสร้างของไมโครสตริปจะประกอบไปด้วยตัวนำอยู่สองด้าน ด้านหนึ่งเรียกว่าแผ่นระนาบกราวด์ และด้านที่สองใช้สำหรับการสร้างตัวป้อนสัญญาณลายวงจรรหรือสายอากาศไมโครสตริปแบบแผ่นวงจรรพิมพ์ โดยมีวัสดุฐานรองอิเล็กทรอนิกส์อยู่ตรงกลาง ตัวนำส่วนใหญ่จะเป็นทองแดง ส่วนคุณสมบัติทางไฟฟ้าวัสดุฐานรองแสดงด้วยสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์และค่าของ Loss tangent คือระดับการทะลุทะลวงของสนามไฟฟ้า และระดับการกระจายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน [7]



รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสายอากาศไมโครสตริป

โดยที่  $W$  คือ ความกว้างของแผ่นระนาบ

$L$  คือ ความยาวของแผ่นระนาบ

$h$  คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง

$\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์

สามารถทำการคำนวณขนาดของความยาวและความกว้างของแพตช์ จากการระบุค่าสภาพยอมไฟฟ้าสัมพัทธ์ ความถี่ และความสูงของวัสดุฐานรอง หาค่าความกว้างของแพตช์ จากสูตร [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = \frac{c}{2f \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.3)$$

โดยที่  $c = 3 \times 10^8$  m/s (อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ)

หรือ

$$W = \frac{1}{2f \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.4)$$

โดยที่  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  N · A<sup>-2</sup> (ค่าคงตัวแม่เหล็ก)

$\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2 = 8.854 \times 10^{-12}$  F · m<sup>-1</sup> (ค่าคงตัวไฟฟ้า)

หาความยาวของแพตช์จากสูตร

$$L = \frac{c}{2f \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 0.0824h \left[ \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad (2.5)$$

โดยที่

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left( \frac{h}{w} \right)}} \right] \quad (2.6)$$

$\epsilon_{eff}$  = effective dielectric constant

### 2.2.2 ข้อดีและข้อเสียของสายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปมีข้อได้เปรียบหลายประการเมื่อเทียบกับสายอากาศที่ใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟแบบอื่น ๆ โดยสายอากาศไมโครสตริปสามารถใช้งานในย่านความถี่ตั้งแต่ 100 MHz ถึง 50 GHz มีข้อดี คือ มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เหมาะสำหรับอุปกรณ์พกพา ต้นทุนต่ำ สามารถผลิตได้ง่ายโดยใช้เทคนิคการพิมพ์วงจรพิมพ์ (PCB) ง่ายต่อการผลิตและติดตั้ง สามารถรวมเข้ากับวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ง่าย ปรับแต่งได้หลากหลาย สามารถออกแบบให้มีรูปแบบการแผ่กระจายคลื่นและความถี่ที่ต้องการได้ สามารถออกแบบให้มีรูปทรงที่หลากหลาย เช่น สี่เหลี่ยม วงกลม หรือรูปทรงอื่น ๆ ตามความต้องการ แต่ข้อเสียคือ แบนด์วิดท์แคบ อาจไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการแบนด์วิดท์กว้าง ประสิทธิภาพต่ำ เมื่อเทียบกับสายอากาศประเภทอื่น ๆ โดยเฉพาะในด้านอัตราขยาย การสูญเสียพลังงาน อาจมีการสูญเสียพลังงานในชั้นไดอิเล็กทริก ผลกระทบจากวัสดุ ประสิทธิภาพของสายอากาศอาจได้รับผลกระทบจากคุณสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริก และข้อจำกัดด้านกำลังส่ง อาจไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการกำลังส่งสูง [26]

## 2.3 การสวิตช์ลำคลื่นของสายอากาศ (Waveguide switch theory)

เกี่ยวข้องกับการควบคุมการไหลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในลำคลื่น (Waveguide) โดยการเปลี่ยนทิศทางหรือเส้นทางของคลื่นในระบบการสื่อสารหรือระบบเรดาร์ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดการสัญญาณและลดการสูญเสียพลังงาน ทฤษฎีนี้สามารถแยกออกเป็นหลักการหลักหลายประการ [25] ดังนี้

### 1. หลักการของลำคลื่น (Waveguide principles)

- ท่อลำคลื่น (Waveguide) โครงสร้างที่ใช้ในการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาจเป็นท่อโลหะหรือวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ

- โหมดการแพร่กระจายคลื่น (Propagation modes) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เดินทางในลำคลื่นสามารถมีหลายโหมด เช่น โหมด TE (Transverse electric) และ TM (Transverse magnetic) ซึ่งมีลักษณะการกระจายพลังงานที่แตกต่างกัน ลำคลื่นจะต้องออกแบบให้สามารถรองรับโหมดที่ต้องการ และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำคลื่น

### 2. หลักการของการสวิตช์ลำคลื่น (Waveguide switching principles)

- การสวิตช์ลำคลื่น (Waveguide switching) การเปลี่ยนทิศทางหรือเส้นทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในลำคลื่น โดยใช้การควบคุมทางกลหรือไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนเส้นทางของคลื่น

- กลไกการสวิตช์ (Switching mechanisms) สามารถทำได้โดยการเคลื่อนที่ของส่วนประกอบทางกล เช่น การเคลื่อนที่ของปีกผีเสื้อ หรือการใช้การควบคุมทางไฟฟ้า เช่น การใช้การสวิตช์ที่ควบคุมด้วยสัญญาณไฟฟ้า การออกแบบสวิตช์ลำคลื่นต้องคำนึงถึงความสามารถในการเปลี่ยนเส้นทางของคลื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดการสูญเสียพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 อุปกรณ์และโปรแกรมที่ใช้งาน

### 1. Arduino Mega 2560



รูปที่ 2.12 บอร์ด Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 แสดงดังรูปที่ 2.12 [25] เป็นบอร์ดที่ใช้ชิป ATmega2560 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก เป็นบอร์ดที่ต่อยอดมาจาก Arduino Uno R3 มี digital input/output 54 ขา สามารถใช้เป็น output แบบ PWM ได้ 15 ขา มี analog inputs 16 ขา มี UARTs (hardware serial ports) 4 ขา ทำงานที่ความถี่ 16 MHz สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสายเคเบิล USB หรือใช้ adaptor AC-to-DC เพื่อเริ่มต้นใช้งาน และมีปุ่ม reset สามารถต่อเข้ากับ shields ที่ออกแบบเพื่อใช้งานกับ Arduino Duemilanove หรือ Diecimila. มีองค์ประกอบข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino Mega 2560 ดังแสดงตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและข้อมูลจำเพาะของบอร์ด Arduino Mega 2560

องค์ประกอบ	ข้อมูลจำเพาะ
แรงดันการทำงาน	5 โวลต์ แนะนำที่ 7-12 โวลต์ จำกัดที่ 6-20 โวลต์
ดิจิทัลอินพุต/เอาต์พุต	54 ขา (ใช้เป็น PWM ได้ 15 ขา)
แอนะล็อกอินพุต/เอาต์พุต	16 ขา
กระแสไฟฟ้าในพินอินพุต/เอาต์พุต	20 มิลลิแอมป์
กระแสไฟฟ้าในพิน 3.3 โวลต์	50 มิลลิแอมป์
หน่วยความจำ	256 กิโลไบต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องค์ประกอบ	ข้อมูลจำเพาะ
SRAM	8 กิโลไบต์
EEPROM	4 กิโลไบต์
ความเร็วสัญญาณนาฬิกา	16 เมกะเฮิรตซ์
ไฟ LED แบบ Built-in	ขา 13
ขนาด	ยาว 101.52 มิลลิเมตร กว้าง 53.3 มิลลิเมตร
น้ำหนัก	37 กรัม



รูปที่ 2.13 ขาต่อการใช้งานของบอร์ด Arduino Mega 2560

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลขาการใช้งาน

ขาการใช้งาน	ข้อมูล
VIN	เป็นขาจ่ายแรงดันขาเข้าของบอร์ด โดยใช้แหล่งจ่ายจากภายนอก
5V	เป็นขาที่จ่ายแรงดัน 5V โดยควบคุมจากบอร์ด
3V3	เป็นแรงดันที่สร้างขึ้นจาก regulator บนบอร์ด และให้กระแสได้สูงสุด 50 mA
GND	เป็นขากราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขบวนการใช้งาน	ข้อมูล
IOREF	เป็นขาที่ให้ voltage reference กับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเลือกค่าแรงดันให้กับ shield ที่มาเชื่อมต่อกับบอร์ด
External Interrupts	2, 3, 18, 19 , 20 , 21 ขาเหล่านี้สามารถกำหนดค่าที่เรียก interrupt ในค่าต่ำ ๆ ขอบขาขึ้นและลง หรือเปลี่ยนแปลงค่าได้
PWM	2 ถึง 13 และ 44 ถึง 46 ให้ PWM output 8-bits
SPI	50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS) ใช้สำหรับรองรับการสื่อสารแบบ SPI โดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับ ICSP header
LED 13	เป็น build-in LED ที่เชื่อมต่อกับ digital pin 13 เมื่อ pin มีค่าเป็น HIGH LEDจะติด , แต่เมื่อ pin เป็น LOW LED จะดับ
TWI	20 (SDA) and 21 (SCL). รองรับการเชื่อมต่อแบบ TWI(I2C)
AREF	แรงดันอ้างอิง สำหรับ analog input
Reset	ใช้ในการ reset ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยทั่วไปจะใช้โดยการเพิ่มปุ่ม reset ไว้บน shield เพื่อป้องกันปุ่มที่อยู่บนบอร์ด

## 2. คีย์แพด 4x4

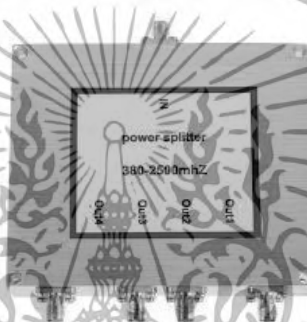


รูปที่ 2.14 คีย์แพด 4x4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอุปกรณ์อินพุตที่ใช้ในการบ่อนข้อมูลโดยการกดปุ่ม ซึ่งมีการจัดเรียงปุ่มเป็นตาราง 4 แถว x 4 คอลัมน์ รวมทั้งหมด 16 ปุ่ม คีย์แพดประเภทนี้มักใช้ในโครงการอิเล็กทรอนิกส์และระบบที่ต้องการอินพุตจากผู้ใช้ โดยปกติ ถ้าต่อปุ่มกดแยกจำนวน 16 ตัว จะต้องใช้ขาสัญญาณทั้งหมด 16 ขา แต่ถ้าใช้การจัดเรียงแบบ 4x4 จะใช้ขาสัญญาณเพียง 8 ขา แสดงดังรูปที่ 2.14 [23]

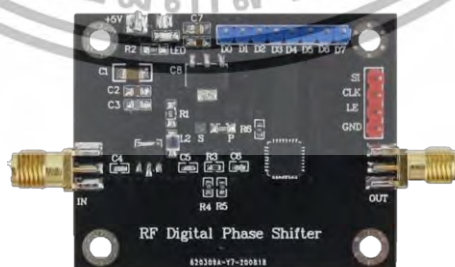
### 3. Power divider (Input 1 Output 4)



รูปที่ 2.15 Power divider (Input 1 Output 4)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแบ่งพลังงานของสัญญาณ RF (Radio frequency) จากช่องทางเดียวให้กับหลายช่องทาง โดยทั่วไป Power divider แบบ In1 Out4 หมายถึงอุปกรณ์ที่มีช่องสัญญาณเข้า 1 ช่อง (Input) และแบ่งสัญญาณออกเป็น 4 ช่อง (Outputs) ซึ่งมักใช้ในระบบการสื่อสาร เรดาร์ และแอปพลิเคชัน RF อื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 2.15 [15]

### 4. Phase Shifter 8-bit



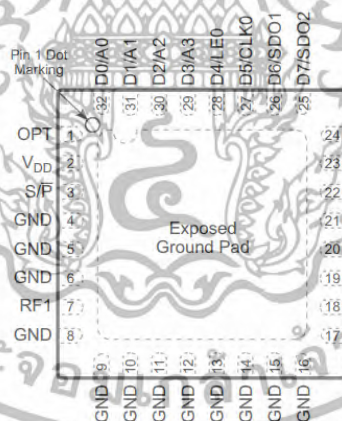
รูปที่ 2.16 RF Digital Phase Shifter Module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PE44820 [13] คือตัวเลื่อนเฟสดิจิทัล 8 บิตที่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทคโนโลยี HaRP™ ออกแบบมาเพื่อใช้ในแถวลำดับปรับเฟสและแอปพลิเคชันสายอากาศแอ็คทีฟ DPS นี้ครอบคลุมช่วงเฟส 358.6° ที่ย่านความถี่ 1.7–2.2 GHz PE44820 ยังสามารถทำงานที่ความถี่ขยายจาก 1.1–3.0 GHz สำหรับการใชงานย่านความถี่แคบได้ PE44820 มีตัวเลือกแหล่งจ่ายไฟภายนอกสำหรับความถี่สวิตช์ที่เร็วขึ้น และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเก็บประจุลือกภายนอกหากมี 0 VDC บนพอร์ต RF แสดงดังรูปที่ 2.16 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ PE44820 แสดงดังตารางที่ 2.2 และข้อมูลขาอุปกรณ์ PE44820 แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ PE44820 [13]

องค์ประกอบ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	หน่วย
แรงดันไฟจ่าย, $V_{DD}$	-0.3	5.5	V
กระแสไฟฟ้า, $I_{DD}$		200	$\mu A$
กำลังไฟฟ้ายิงสูงสุด		28	dBm
ช่วงอุณหภูมิการจ้ดเก็บ	-65	+150	$^{\circ}C$



รูปที่ 2.17 RF Digital Phase Shifter (PE44820)

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลขาอุปกรณ์ PE44820 [13]

หมายเลขขา	ชื่อขา	คำอธิบาย
1	OPT	บิตปรับแต่งความแม่นยำของเฟส แบบอนุกรม
2	$V_{DD}$	แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขขา	ชื่อขา	คำอธิบาย
3	S/P	เลือกโหมดอนุกรม/ขนาน
4-6, 8-17, 19-21	GND	Ground
7	RF1	พอร์ต RF1
18	RF2	พอร์ต RF2
20	V <sub>SS_EXT</sub>	แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าลบ V <sub>SS</sub> ภายนอก
22	LE	เปิดใช้งานการล็อกอินเทอร์เฟซอนุกรมอินพุต
23	CLK	Clock
24	SI	อินพุตข้อมูลอินเทอร์เฟซอนุกรม
25	D7/SD02	แบบขนาน-บิต D7 180° อนุกรม-ข้อมูลออก 2
26	D6/SD01	แบบขนาน-บิต D6 90° อนุกรม ข้อมูลออก 1
27	D5/CLK	แบบขนาน-บิต D5 45° อนุกรม-ออกแบบ buffered CLK
28	D4/LEO	แบบขนาน-บิต D4 22.4° อนุกรม- buffered LEO
29	D3/A3	แบบขนาน-บิต D3 11.2° อนุกรม- บิตอยู่ที่ A3
30	D2/A2	แบบขนาน-บิต D2 5.6° อนุกรม- บิตอยู่ที่ A2
31	D1/A1	แบบขนาน-บิต D1 2.8° อนุกรม- บิตอยู่ที่ A1
32	D0/A0	แบบขนาน-บิต D0 1.4° อนุกรม- บิตอยู่ที่ A0
Pad	GND	สายดินเพื่อการทำงานของอุปกรณ์ที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. โปรแกรม CST Studio Suite

CST Studio Suite เป็นชุดซอฟต์แวร์ด้านการวิเคราะห์คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field) ยอดนิยมที่มีผู้ใช้งานมาทั่วโลก เป็นทั้ง Pre, Solver และ Post-processor ช่วยแก้ปัญหาครอบคลุมทั้งในคลื่นความถี่สูงและความถี่ต่ำ ชุดซอฟต์แวร์ประกอบด้วย CST Microwave Studio, CST EM Studio, CST Particle Studio, CST Multi Physics Studio, CST Cable Studio, CST PCB Studio, CST Board check และ CST Design Studio สามารถใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์เสริม เช่น Antenna Magus เพื่อใช้ออกแบบเสาอากาศ, FEST 3D สำหรับการวิเคราะห์ตัวกรอง, Spark 3D สำหรับการวิเคราะห์แยกย่อยการปล่อยก๊าซของเสีย และ Opera สำหรับการจำลองด้านความถี่ต่ำ ช่วยให้วิศวกรนำไปใช้การสร้างต้นแบบเสมือนจริงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบ สามารถนำปรับแก้ให้เหมาะสมกับปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้น ช่วยลดกระบวนการออกแบบจำลองทางกายภาพ ลดความเสี่ยงจากการลองผิดลองถูกและการเรียกคืนสินค้าที่ไม่ได้มาตรฐาน

CST Studio Suite เป็นซอฟต์แวร์ที่ช่วยตอบโจทย์ความต้องการในหลากหลายอุตสาหกรรม ทั้งยานยนต์ อากาศยาน การป้องกันทางทะเล วิทยาศาสตร์ชีวภาพ พลังงานและวัสดุทางการแพทย์ ไปจนถึงอุปกรณ์ไฮเทคที่ใช้ในชีวิตประจำวัน พร้อมความสามารถในการวิเคราะห์อันหลากหลาย อาทิเช่น การออกแบบและจำลองในอุปกรณ์ความถี่สูงอย่างเสาอากาศ, GPS, GSM, เรดาร์, เซ็นเซอร์, ระบบชาร์จไร้สาย, ชุดสายไฟสายเคเบิล, ระบบสื่อสาร วิเคราะห์ผลกระทบเชิงกลในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิเคราะห์การไหลในสนามแม่เหล็ก บนแผงวงจรบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในมือถือ, อุปกรณ์ 4G, 5G, Wi-Fi, บลูทูธ เพื่อลดอันตรายจากการกระจายรังสี รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น เครื่อง MRI, เครื่องเอกซเรย์, เครื่องกระตุ้นหัวใจ, เครื่องช่วยฟัง ไปจนถึงเครื่องมือพิเศษต่าง ๆ พร้อมคลังข้อมูลวัสดุชีวภาพเพื่อสร้างแบบจำลองร่างกายมนุษย์ เป็นต้น [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

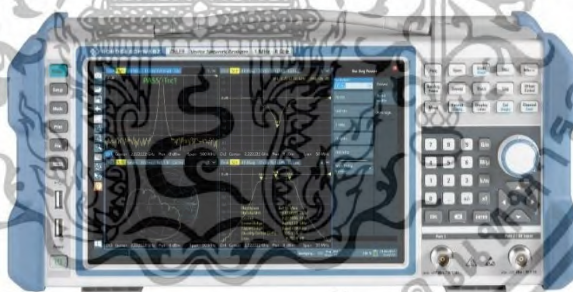
## 6. ออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (Voltage-controlled oscillator หรือ VCO)



รูปที่ 2.18 ออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (VCO)

ออสซิลเลเตอร์ควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (VCO) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 [18] เป็นออสซิลเลเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความถี่การสั่นสะเทือนควบคุมโดยแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป แรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ใช้จะกำหนดความถี่การสั่นสะเทือนในทันที ดังนั้น VCO สามารถใช้สำหรับการ (Frequency modulator) หรือการมอดูเลตเฟส (Phase modulator : PM) โดยการใช้สัญญาณมอดูเลตกับอินพุตควบคุม VCO ยังเป็นส่วนสำคัญของวงจรถูกเฟส (Phase-locked loop : PLL) VCO ถูกนำมาใช้ในเครื่องส่งเคราะห์เสียงเพื่อสร้างคลื่นเสียงที่มีระดับเสียงสามารถปรับได้โดยแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดโดยคีย์บอร์ดหรืออินพุตอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 2.18 [18]

## 7. Vector network analyzer



รูปที่ 2.19 Vector network analyzer

Vector network analyzer (VNA) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 [เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดสำคัญที่วิเคราะห์ลักษณะที่ขึ้นกับความถี่ของชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และวงจร โดยการวัดคุณสมบัติการส่งผ่านและการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การวัดที่แม่นยำของ VNA ช่วยกำหนดลักษณะแอมพลิจูดและเฟสของส่วนประกอบและวงจร ให้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการปรับประสิทธิภาพของระบบให้เหมาะสม VNA ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลากหลายอุตสาหกรรม รวมถึงโทรคมนาคม กลาโหม การสื่อสารผ่านดาวเทียม วิทยุกระจายเสียง อุปกรณ์ทางการแพทย์ และ R&D อุปกรณ์เหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศ การกำหนดลักษณะของตัวกรองและเครื่องขยายเสียง การทดสอบ ส่วนประกอบไมโครเวฟ และการประเมินคุณสมบัติที่ขึ้นกับความถี่อื่น ๆ

## 8. Spectrum analyzer



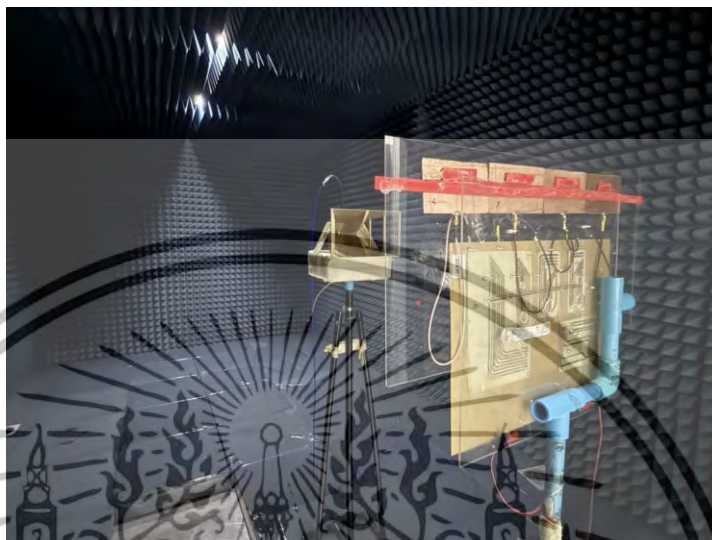
รูปที่ 2.20 Spectrum analyzer

Spectrum analyzer ดังรูปที่ 2.20 [17] เป็นเครื่องมือวัดขนาดของสัญญาณอินพุตเทียบกับ ความถี่ภายในช่วงความถี่เต็มของเครื่องมือ การใช้งานหลักคือการวัดกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณที่ รู้จักและไม่รู้จัก สัญญาณอินพุตที่สเปกตรัมอนาล็อกส่วนใหญ่วัดคือสัญญาณไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบสเปกตรัมของสัญญาณอื่นๆ เช่น คลื่นความดันเสียงและคลื่นแสง สามารถพิจารณาได้โดยใช้ ตัวแปลงสัญญาณที่เหมาะสม สเปกตรัมอนาล็อกสำหรับสัญญาณประเภทอื่น ๆ ก็มีอยู่เช่นกัน เช่น สเปกตรัมอนาล็อกแบบออปติคัล ซึ่งใช้เทคนิคออปติคัลโดยตรง เช่น โมโนโครมาเตอร์ เพื่อทำการวัด

โดยการวิเคราะห์สเปกตรัมของสัญญาณไฟฟ้า สามารถสังเกตความถี่หลัก กำลัง ความเพี้ยน ฮาร์โมนิก แบนด์วิดท์ และองค์ประกอบสเปกตรัมอื่น ๆ ของสัญญาณ ซึ่งตรวจจับได้ยากในรูปคลื่นโดเมน เวลา พารามิเตอร์เหล่านี้มีประโยชน์ในการกำหนดลักษณะของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น เครื่องส่ง สัญญาณไร้สาย จอแสดงผลของสเปกตรัมอนาล็อกจะแสดงความถี่บนแกนแนวนอน และแอมพลิจูดบน แกนแนวตั้ง สำหรับผู้สังเกตการณ์ทั่วไป สเปกตรัมอนาล็อกดูเหมือนออสซิลโลสโคป ซึ่งพล็อต แอมพลิจูดบนแกนแนวตั้ง แต่พล็อตเวลาบนแกนแนวนอน ในความเป็นจริง เครื่องมือในห้องปฏิบัติการ บางชนิดสามารถทำงานได้ทั้งในฐานะออสซิลโลสโคปหรือสเปกตรัมอนาล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 9. ห้องไร้การสะท้อน



รูปที่ 2.21 ห้องไร้การสะท้อน

ห้องไร้เสียงสะท้อน หรือ Anechoic Chamber ดังรูปที่ 2.21 [10] เป็นห้องพิเศษที่ถูกออกแบบมาให้ไร้การสะท้อนอย่างสมบูรณ์ ภายในห้องถูกบุด้วยวัสดุดูดซับเสียงโดยรอบ ทั้งผนัง เพดาน และใต้พื้น เพื่อดูดซับคลื่นเสียงทั้งหมดไม่ให้สะท้อนกลับมา พื้นห้องทำเป็นตาข่ายโลหะยกสูงเพื่อให้มีช่องว่างสำหรับดูดซับเสียงด้านล่าง นอกจากนี้ ผนังห้องยังถูกออกแบบให้มีหลายชั้นเพื่อป้องกันเสียงจากภายนอกไม่ให้เล็ดลอดเข้ามาได้ ทำให้ภายในห้องมีระดับเสียงต่ำกว่า 0 เดซิเบล ซึ่งเงียบกว่าระดับที่มนุษย์จะได้ยินปกติ ห้องชนิดนี้มีประโยชน์อย่างมากในงานวิจัย และอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำในการวัดเสียง เช่น การทดสอบอุปกรณ์เสียง ลำโพง ไมโครโฟน หรือ เครื่องช่วยฟัง รวมถึงการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการได้ยินของมนุษย์ การพัฒนาเทคโนโลยีด้านเสียง และการตรวจสอบระดับเสียงของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

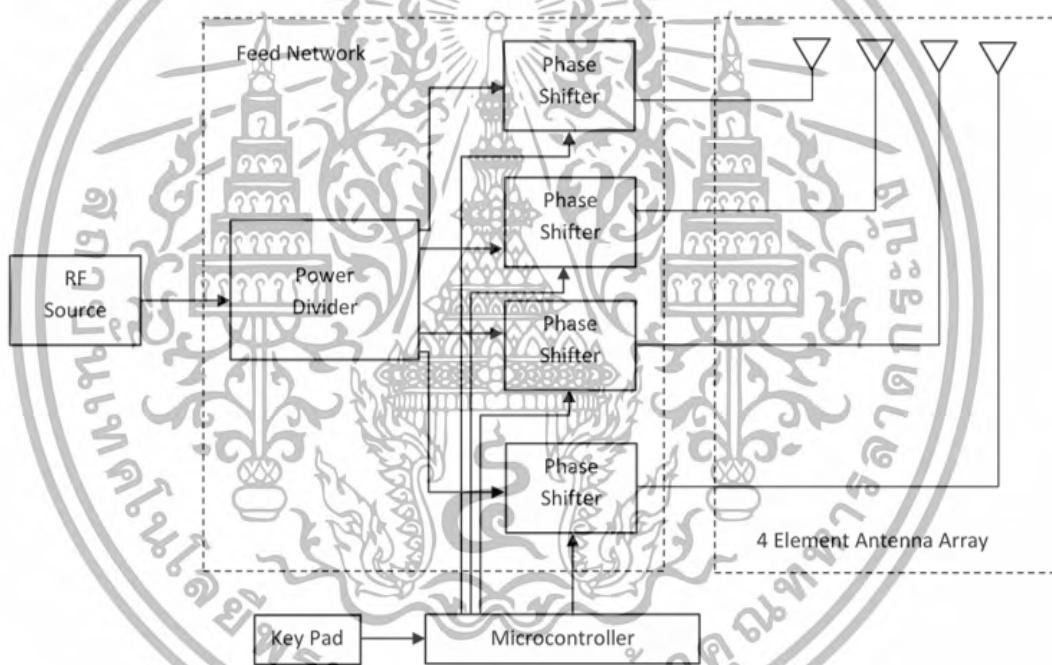
## บทที่ 3

### การออกแบบและจัดทำปริญญาบัตร

ในบทนี้จะกล่าวถึงภาพรวมของการดำเนินงาน ได้แก่ การออกแบบวงจรการเปลี่ยนเฟสของสายอากาศ การออกแบบ จำลอง และสร้างสายอากาศใช้งานที่ความถี่ 1.8 GHz และการออกแบบการเขียนโปรแกรมควบคุมการเปลี่ยนเฟส โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 การออกแบบวงจรระบบสายอากาศ

##### 3.1.1 ภาพรวมวงจร



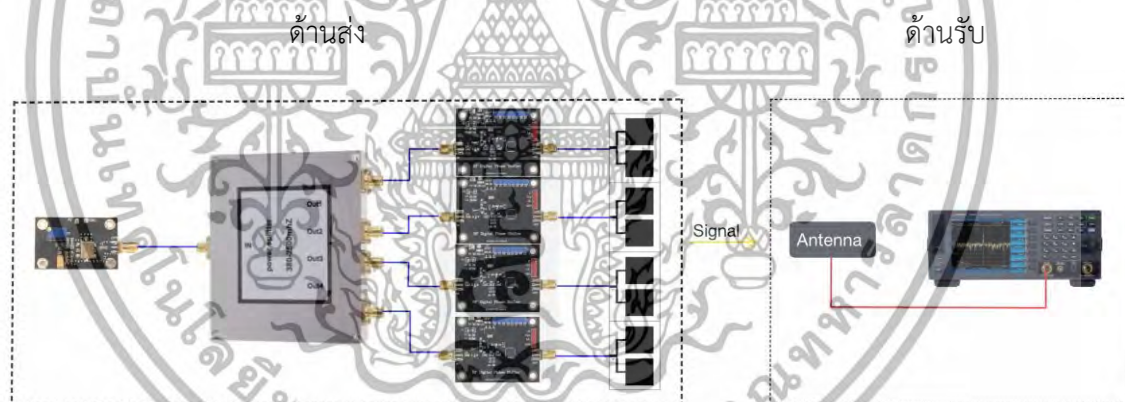
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 แสดงถึงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบเสาอากาศแบบอาร์เรย์ ที่ควบคุมทิศทาง โดยใช้การควบคุมเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้กับเสาอากาศแต่ละตัว ระบบนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่

1. แหล่งกำเนิดสัญญาณ RF สร้างสัญญาณความถี่วิทยุ ที่จะถูกส่งออกไป
2. เครือข่ายป้อนสัญญาณประกอบด้วยตัวแบ่งกำลัง และตัวเลื่อนเฟสทำหน้าที่แบ่งสัญญาณ RF จากแหล่งกำเนิด และปรับเฟสของสัญญาณแต่ละส่วน
3. เสาอากาศแบบอาร์เรย์ 4 องค์ประกอบ ประกอบด้วยเสาอากาศ 4 ตัว ที่จัดเรียงเป็นแถว ทำหน้าที่แผ่กระจายสัญญาณ RF ที่ได้รับ
4. ระบบควบคุม ประกอบด้วยแป้นพิมพ์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่รับคำสั่งจากผู้ใช้ และควบคุมการทำงานของตัวเลื่อนเฟส

### 3.1.2 ออกแบบวงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่เชื่อมต่อกับเฟสชิฟเตอร์

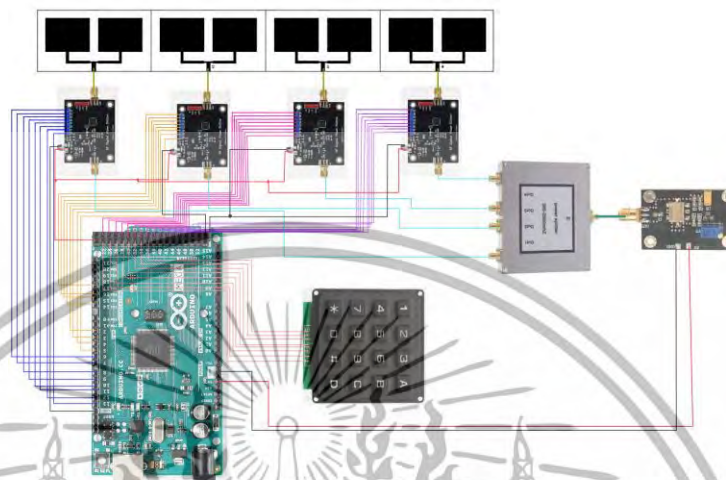


รูปที่ 3.2 วงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณความถี่เชื่อมต่อกับเฟสชิฟเตอร์

จากรูปที่ 3.2 การทำงานของวงจรด้านส่งสัญญาณ VCO จะสร้างสัญญาณคลื่นความถี่ผ่านไปยังตัวแบ่งสัญญาณ สัญญาณจาก VCO ถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนที่มีกำลังเท่ากัน แต่แต่ละส่วนของสัญญาณจะถูกส่งไปยังเฟสชิฟเตอร์ที่ปรับเฟสต่างกัน เช่น 90 หรือ 180 องศา สัญญาณที่ปรับเฟสแล้วถูกส่งไปยังสายอากาศ เพื่อกระจายคลื่นวิทยุที่มีเฟสต่างกัน สายอากาศด้านรับจะรับสัญญาณที่ส่งออกมาจากสายอากาศด้านส่ง สัญญาณที่รับได้ถูกส่งต่อไปยัง Spectrum analyzer เพื่อตรวจสอบสเปกตรัมและวิเคราะห์ความถี่และกำลังของสัญญาณ จากนั้นทำการบันทึกค่าที่หน้าจอแสดงผลออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 ออกแบบวงจรรวมของระบบสายอากาศ



รูปที่ 3.3 การจำลองภาพรวมของวงจร



วงจรควบคุมการเปลี่ยนเฟส

รูปที่ 3.4 ภาพจำลองการเปลี่ยนมุมชี้ทิศทางของสายอากาศ

หลักการทำงานวงจรในรูปที่ 3.3 สัญญาณ RF จากแหล่งกำเนิดจะถูกส่งไปยังตัวแบ่งกำลัง ตัวแบ่งกำลังจะแบ่งสัญญาณ RF ออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กันสัญญาณแต่ละส่วนจะถูกส่งไปยังตัวเลื่อนเฟส แต่ละตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับคำสั่งจากผู้ใช้ผ่านแป้นพิมพ์ เพื่อควบคุมการเลื่อนเฟสของสัญญาณแต่ละส่วน สัญญาณ RF ที่ผ่านการเลื่อนเฟสแล้วจะถูกส่งไปยังเสาอากาศแต่ละตัวในอาร์เรย์เสาอากาศแต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะแผ่กระจายสัญญาณ RF ออกไป โดยทิศทางของการแผ่กระจายจะขึ้นอยู่กับเฟสของสัญญาณที่ป้อนให้กับเสาอากาศแต่ละตัว โดยแสดงภาพจำลองดังรูปที่ 3.4 ในข้างต้น

### 3.1.4 การกำหนดบิตเฟสชิฟเตอร์

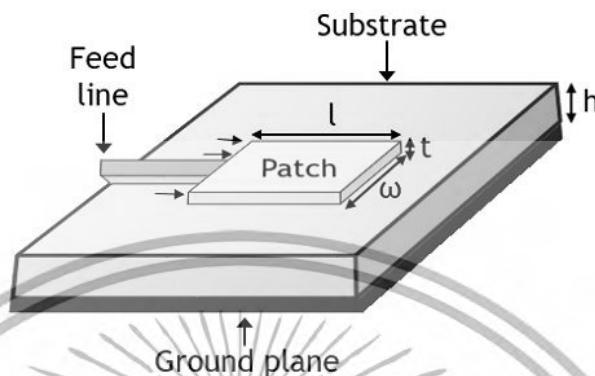
การทำงานของเฟสชิฟเตอร์เป็นแบบดิจิทัล 8 บิต ในการควบคุมการทำงานตัวเลื่อนเฟสทั้ง 4 ตัว คือ การกำหนดสถานะของบิตที่แตกต่างกันเพื่อให้ได้การเปลี่ยนเฟสของสายอากาศตามที่ต้องการ ดังนั้นเมื่อตัวเลื่อนเฟสทำงานร่วมกัน 4 ตัว สามารถกำหนดบิตของตัวเลื่อนเฟสจากการทดสอบบิตทั้งหมดที่มีความเป็นไปได้ในโปรแกรมจำลอง ผู้จัดทำได้ยกตัวอย่างมุมชี้ทิศทางที่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของมุมได้ชัดเจนทั้งหมด 9 รูปแบบ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รูปแบบการกำหนดบิตเฟสชิฟเตอร์

บิตของเฟสชิฟเตอร์ตัวที่ 1	บิตของเฟสชิฟเตอร์ตัวที่ 2	บิตของเฟสชิฟเตอร์ตัวที่ 3	บิตของเฟสชิฟเตอร์ตัวที่ 4
00000000	00000000	00000000	00000000
00000000	00001000	00000100	00000010
00000010	00000100	00001000	00000000
00000000	00000100	00000010	00000001
00000001	00000010	00000100	00000000
00000000	00000100	00000001	11111111
11111111	00000001	00000100	00000000
00000000	00000010	00000001	11111111
11111111	00000001	00000010	00000000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ออกแบบสายอากาศ



รูปที่ 3.5 โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริบ

จากรูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างสายอากาศที่น่าเสนอ สายอากาศถูกสร้างจากแผ่นพิมพ์ FR-4 มีการป้อนสัญญาณผ่าน Microstrip Feed และใช้ SMA Connector เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศกับสายนำสัญญาณ โดยพารามิเตอร์ของสายอากาศแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์
w	ความกว้างแพตช์
l	ความยาวแพตช์
h	ความสูงของวัสดุพิมพ์
t	ความหนาของทองแดง

การกำหนดค่าเบื้องต้นของสายอากาศ โดยอ้างอิงจากความยาวคลื่นที่ความถี่ 1.8 GHz

โดยที่

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

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = 166.7 \text{ mm}$$

สามารถคำนวณค่าสายอากาศเริ่มต้นได้จากสมการที่ 2.4 2.5 และ 2.6 จากบทที่ 2 จะได้ค่าตาม

ตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์เริ่มของสายอากาศ

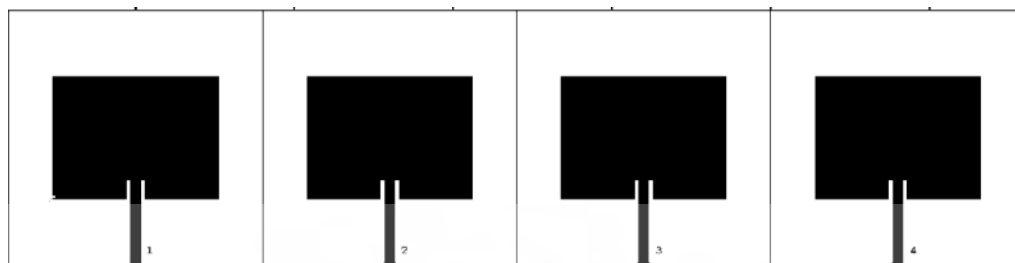
พารามิเตอร์	ขนาด (มิลลิเมตร)
ความกว้างของแพตช์	51
ความยาวของแพตช์	42
ความหนาของซับสเตรท	1.5
ความหนาของทองแดง	0.035

### 3.3 การจำลอง และการปรับปรุงสายอากาศ

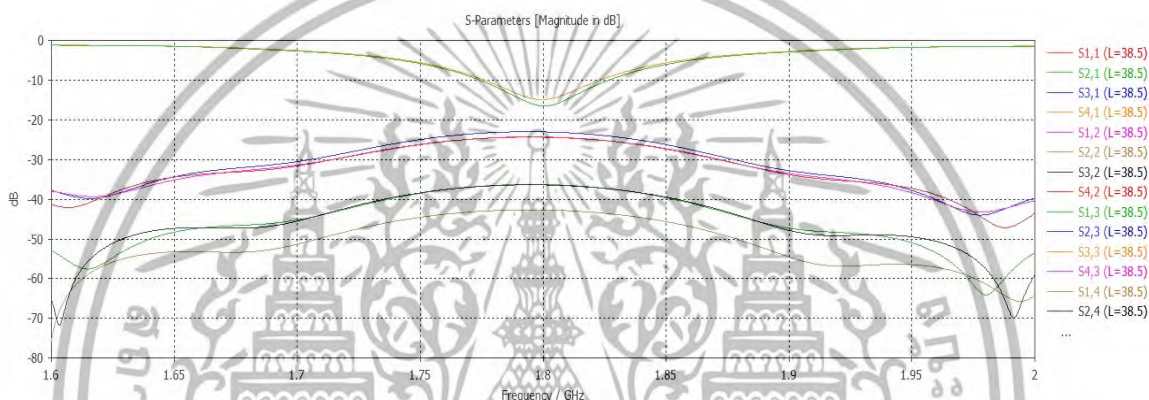
ในการดำเนินการจำลอง และปรับปรุงสายอากาศ แบ่งออกเป็น 2 ช่วงด้วยกัน คือ การพิจารณา รูปแบบการวางตำแหน่งขององค์ประกอบสายอากาศ และการพิจารณาจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ โดยการพิจารณาท่าแหน่งของการจัดวางองค์ประกอบมี 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบเชิงเส้น 1 แถว 4 ลำดับ และรูปแบบแนวระนาบ 2 แถว 2 ลำดับ และการจำลองสายอากาศแถวลำดับจำนวน 4 8 และ 16 องค์ประกอบ เพื่อใช้ในการพิจารณาคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบในระบบ

คุณลักษณะที่เหมาะสมที่ต้องการ คือ กำหนดให้สายอากาศต้องมีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB มีแบนด์วิดท์ครอบคลุมช่วงความถี่ประมาณ 40-50 MHz และเมื่อสายอากาศทำงานร่วมกันจะต้องมีอัตราขยายมากกว่า 5 dB มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทางเดียว มีมุมชี้ทิศทางของสายอากาศประมาณ 40-50 Deg ดังนั้นกระบวนการจำลอง และสังเกตผลมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

**3.3.1 พิจารณารูปแบบการวางตำแหน่งขององค์ประกอบสายอากาศ** แบ่งเป็น รูปแบบเชิงเส้น 1 แถว 4 ลำดับ และรูปแบบแนวระนาบ 2 แถว 2 ลำดับ จากพารามิเตอร์สำคัญ ได้แก่ ค่า S-parameter ค่าอัตราขยาย และมุมชี้ทิศทางแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



รูปที่ 3.6 จำลองสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น



รูปที่ 3.7 ผล S-parameters ของสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น

จากรูปที่ 3.7 เส้นกราฟแต่ละเส้นแทนค่า S-parameter ที่วัดได้จากพอร์ตต่าง ๆ ของสายอากาศ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.4

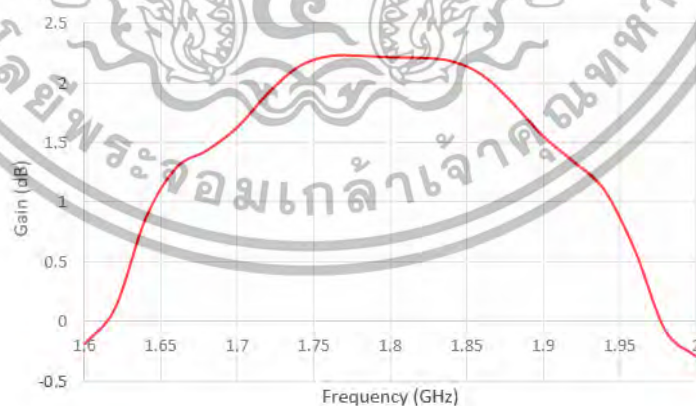
ตารางที่ 3.4 ค่า S-parameter ของสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น

พารามิเตอร์	ขนาด (dB)
S11 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 1	-11.42
S12 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 1	-16.09
S13 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1	-28.71
S14 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 1	-38.10
S21 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2	-16.08
S22 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 2	-10.77
S23 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2	-16.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

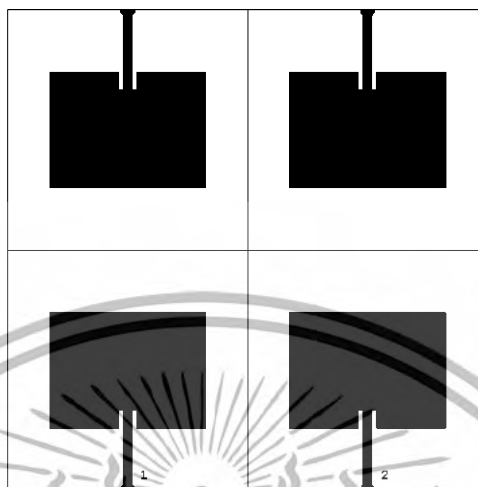
พารามิเตอร์	ขนาด (dB)
S24 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 2	-28.67
S31 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3	-28.67
S32 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3	-16.25
S33 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 3	-10.77
S34 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 3	-16.08
S41 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 4	-38.10
S42 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 4	-28.71
S43 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 4	-16.09
S44 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 4	-11.42

จากตารางที่ 3.4 ค่า S11, S22, S33, S44 ที่ต่ำกว่า -10 แสดงว่าสายอากาศมีการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อย ซึ่งหมายถึงการจับคู่ความต้านทานที่ดี และสายอากาศสามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่า S21, S31, S41 และค่าอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกัน แสดงถึงประสิทธิภาพในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ของตัวสายอากาศ โดยจะมีค่าต่ำเพื่อลดการรบกวนระหว่างพอร์ตต่าง ๆ

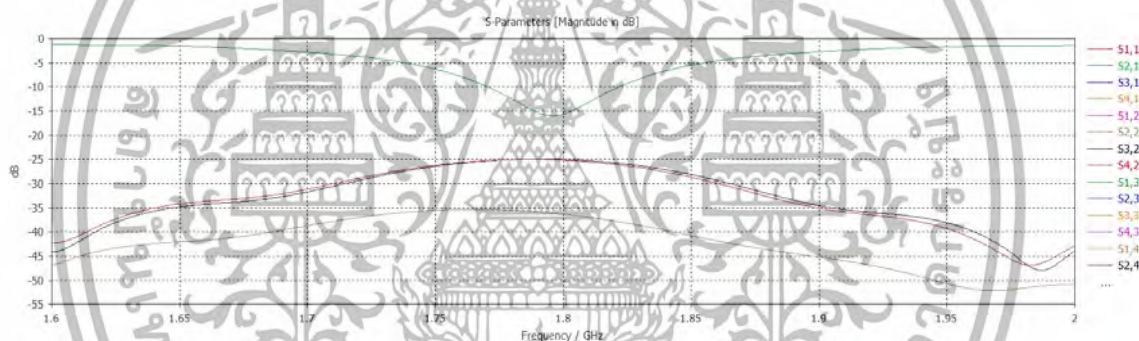


รูปที่ 3.8 ผลค่าอัตราขยายของสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น ที่ความถี่ 1.8 GHz มีค่าเท่ากับ 2.21 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 จำลองสายอากาศรูปแบบเชิงระนาบ



รูปที่ 3.10 ผล S-parameters ของสายอากาศรูปแบบแนวระนาบ

จากรูปที่ 3.10 เส้นกราฟแต่ละเส้นแทนค่า S-parameter ที่วัดได้จากพอร์ตต่างๆ ของสายอากาศ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่า S-parameter ของสายอากาศรูปแบบแนวระนาบ

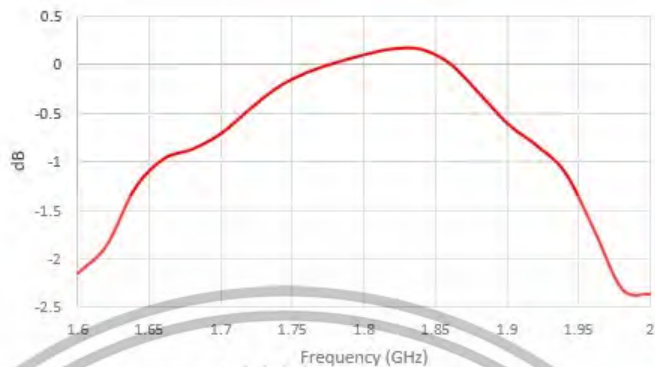
พารามิเตอร์	ขนาด (dB)
S11 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 1	-16.54
S12 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 1	-24.32
S13 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1	-36.28
S14 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 1	-42.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	ขนาด (dB)
S21 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2	-24.39
S22 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 2	-14.90
S23 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2	-23.02
S24 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 2	-36.40
S31 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3	-36.40
S32 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3	-23.02
S33 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 3	-14.90
S34 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 3	-24.39
S41 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 4	-42.69
S42 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 4	-36.28
S43 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 4	-24.32
S44 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 4	-16.54

จากตารางที่ 3.5 ค่า S11, S22, S33, S44 ที่ต่ำกว่า -10 ทราบได้ว่าสายอากาศมีการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อย ซึ่งหมายถึงการจับคู่ความต้านทานที่ดี และสายอากาศสามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่า S21, S31, S41 และค่าอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกัน แสดงถึงประสิทธิภาพในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ของตัวสายอากาศ โดยจะมีค่าต่ำเพื่อลดการรบกวนระหว่างพอร์ตต่าง ๆ

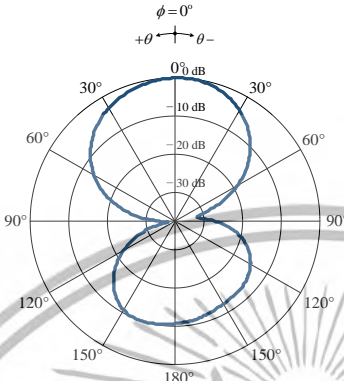
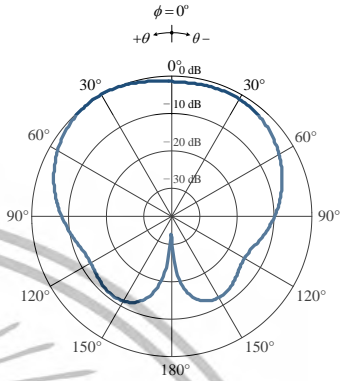
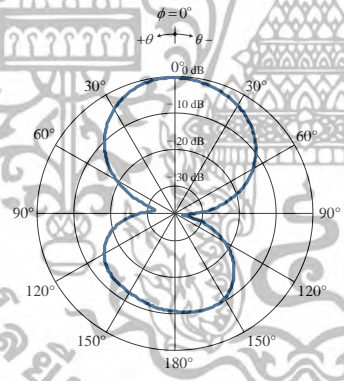
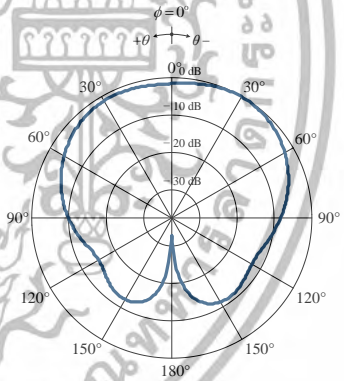
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



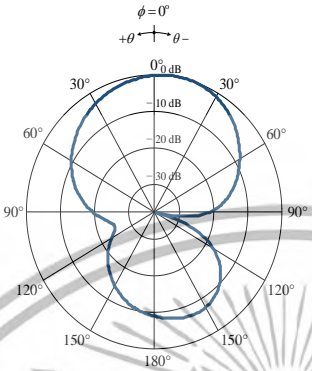
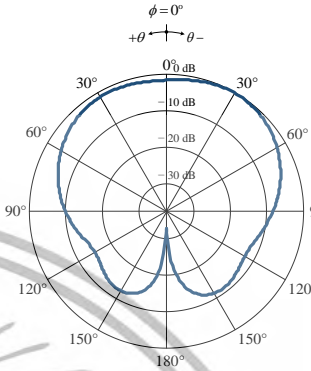
รูปที่ 3.11 ผลค่าอัตราขยายของสายอากาศรูปแบบแฉวระนาบที่ความถี่ 1.8 GHz มีค่าเท่ากับ 0.10 dB  
 ตารางที่ 3.6 เปรียบเทียบผลการจำลองระหว่างสายอากาศเชิงเส้นและแฉวระนาบ

พอร์ต	สายอากาศเชิงเส้น ดังรูปที่ 3.7	สายอากาศแฉวระนาบ ดังรูปที่ 3.9
1	<p>รูปที่ 3.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศเชิงเส้น มีอัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB</p>	<p>รูปที่ 3.13 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศแฉวระนาบ มีอัตราขยายเท่ากับ 0.10 dB</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอร์ต	สายอากาศเชิงเส้น ดังรูปที่ 3.7	สายอากาศแนวระนาบ ดังรูปที่ 3.9
2	 <p>รูปที่ 3.14 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของสายอากาศเชิงเส้น มีอัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.15 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของสายอากาศแนวระนาบ มีอัตราขยายเท่ากับ 0.10 dB</p>
3	 <p>รูปที่ 3.16 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของสายอากาศเชิงเส้น มีอัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.17 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของสายอากาศแนวระนาบ มีอัตราขยายเท่ากับ 0.10 dB</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอร์ต	สายอากาศเชิงเส้น ดังรูปที่ 3.7	สายอากาศแนวระนาบ ดังรูปที่ 3.9
4	 <p>รูปที่ 3.18 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของสายอากาศเชิงเส้น มีอัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.19 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของสายอากาศแนวระนาบ มีอัตราขยายเท่ากับ 0.10 dB</p>

จากค่า S พารามิเตอร์ของสายอากาศทั้ง 2 รูปแบบดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ทำให้ทราบว่าการออกแบบสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น และรูปแนวระนาบมีค่าการสูญเสียย้อนกลับใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.11 ที่ความถี่ 1.8 GHz สายอากาศรูปแบบเชิงเส้นมีค่าที่มากกว่าที่ 2.21 ในขณะที่รูปแบบระนาบมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 0.1 เมื่อเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ดังตารางที่ 3.6 สายอากาศเชิงเส้นมีมุมชี้ทิศทางของสายอากาศแคบส่งผลให้สามารถเห็นทิศทางของการเปลี่ยนมุมได้อย่างชัดเจน และสายอากาศแนวระนาบมีมุมชี้ทิศทางของสายอากาศกว้างดังนั้นจึงส่งผลให้เห็นการเปลี่ยนมุมได้น้อยกว่าสายอากาศรูปแบบเชิงเส้น

จากการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศ ได้แก่ ค่า S พารามิเตอร์ ค่าอัตราขยาย และผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น สรุปได้ว่าสายอากาศรูปแบบเชิงเส้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงเพื่อสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบมากกว่าสายอากาศแนวระนาบ

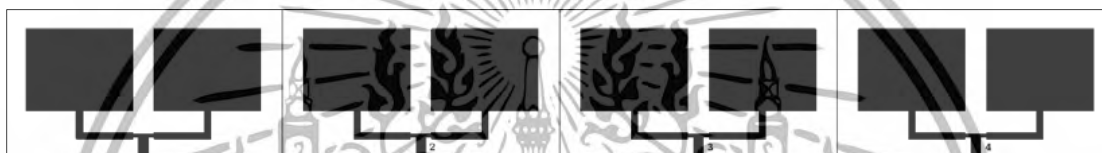
### 3.3.2 พิจารณาจำนวนองค์ประกอบของสายอากาศ แบ่งเป็น 4 8 และ 16 องค์ประกอบ

1. จำลองสายอากาศ 4 องค์ประกอบ เป็นการสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่มี 4 พอร์ตแต่ละพอร์ตประกอบไปด้วยไมโครสตริป 1 องค์ประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 สามารถการบันทึกผล S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ ได้ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และมีอัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB ทำให้ทราบว่าสายอากาศ 4 องค์ประกอบ เป็นองค์ประกอบขนาดเล็ก เหมาะสำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องการอัตราขยายสูงมาก มีค่า S พารามิเตอร์ ที่ต่ำกว่า -10 dB สามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบและการจำลองมีความซับซ้อนน้อย

2. จำลองสายอากาศ 8 องค์ประกอบ แสดงดังรูปที่ 3.20 เป็นการสร้างสายอากาศ ไมโครสตริปที่มี 4 ชุดแต่ละชุดประกอบด้วยไมโครสตริป 2 องค์ประกอบเชื่อมต่อกัน ทำการบันทึกผลเพื่อนำไปเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.20 การจำลองไมโครสตริปแกลวลำดับ 8 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.21 ผล S-parameters ของสายอากาศ 8 องค์ประกอบ

จากรูปที่ 3.21 เส้นกราฟแต่ละเส้นแทนค่า S-parameter ที่วัดได้จากพอร์ตต่างๆ ของสายอากาศที่ความถี่ 1.8 GHz โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.7

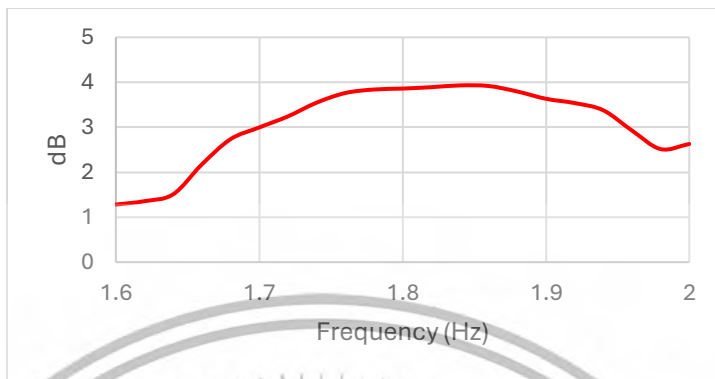
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ค่า S-parameter การจำลองไมโครสตริปแฉวลำดับ 8 องค์ประกอบ

พารามิเตอร์	ขนาด (dB)
S11 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 1	-16.01
S12 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 1	-29.84
S13 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1	-55.19
S14 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 1	-54.59
S21 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2	-29.87
S22 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 2	-16.41
S23 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2	-29.30
S24 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 2	-55.31
S31 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3	-55.31
S32 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3	-29.30
S33 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 3	-16.41
S34 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 3	-29.87
S41 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 4	-54.59
S42 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 4	-55.19
S43 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 4	-29.84
S44 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 4	-16.01

จากตารางที่ 3.7 ค่า S11, S22, S33, S44 ที่ต่ำกว่า -10 แสดงว่าสายอากาศมีการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อย ซึ่งหมายถึงการจับคู่ความต้านทานที่ดี และสายอากาศสามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่า S21, S31, S41 และค่าอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกัน แสดงถึงประสิทธิภาพในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ของตัวสายอากาศ โดยจะมีค่าต่ำเพื่อลดการรบกวนระหว่างพอร์ตต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



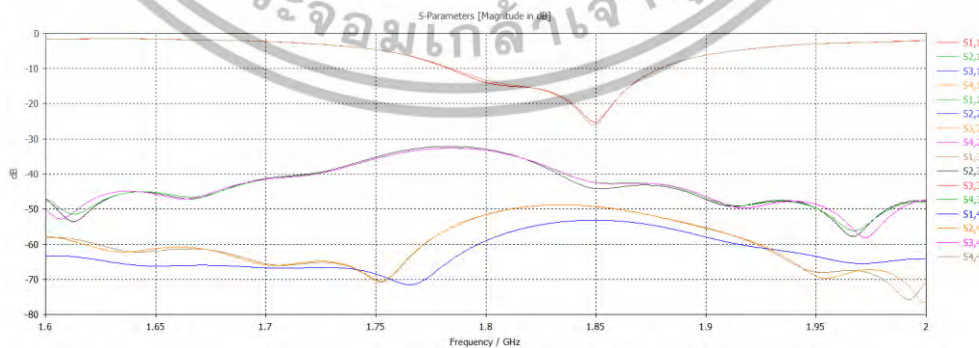
รูปที่ 3.22 ค่าอัตราขยายของการจำลองสายอากาศ 8 องค์ประกอบ ที่ความถี่ 1.8 GHz มีค่า 3.86 dB

การจำลองสายอากาศ 8 องค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.23 มีอัตราขยายสูงขึ้น มีค่า S พารามิเตอร์ ที่ต่ำกว่า -10 dB สามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการออกแบบและการจำลองมีความซับซ้อนมากขึ้น

3. จำลองสายอากาศ 16 องค์ประกอบ แสดงดังรูปที่ 3.23 เป็นการสร้างสายอากาศ ไมโครสตริปที่มี 4 พอร์ต แต่ละพอร์ตประกอบด้วยไมโครสตริป 4 องค์ประกอบเชื่อมต่อกัน ทำการบันทึกผลเพื่อนำไปเปรียบเทียบ



รูปที่ 3.23 การจำลองไมโครสตริปแถวลำดับ 16 องค์ประกอบ



รูปที่ 3.24 ผล S-parameters ของสายอากาศ 16 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกรุปที่ 3.24 เส้นกราฟแต่ละเส้นแทนค่า S-parameter ที่วัดได้จากพอร์ตต่างๆ ของสายอากาศที่ความถี่ 1.8 GHz โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 3.8

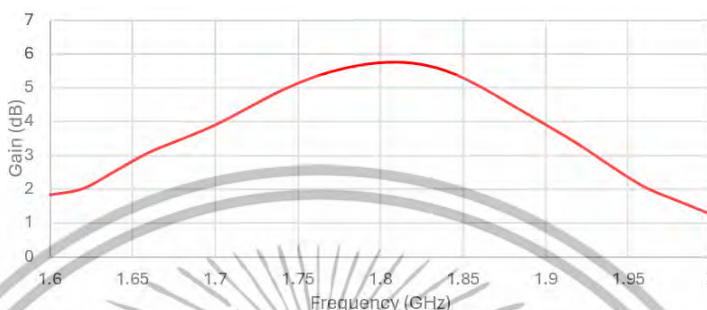
ตารางที่ 3.8 ค่า S-parameter การจำลองไมโครสตริปแกลวลำดับ 16 องค์ประกอบ

พารามิเตอร์	ขนาด (dB)
S11 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 1	-21.91
S12 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 1	-43.52
S13 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1	-64.06
S14 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 1	-68.64
S21 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2	-43.52
S22 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 2	-20.84
S23 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2	-45.28
S24 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 2	-72.42
S31 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3	-63.85
S32 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3	-45.17
S33 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 3	-20.84
S34 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 3	-45.17
S41 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 4	-68.22
S42 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 4	-72.46
S43 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 4	-45.87
S44 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 4	-21.12

จากตารางที่ 3.8 ค่า S11, S22, S33, S44 ที่ต่ำกว่า -10 แสดงว่าสายอากาศมีการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อย ซึ่งหมายถึงการจับคู่ความต้านทานที่ดี และสายอากาศสามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่า S21, S31, S41 และค่าอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกัน แสดงถึงประสิทธิภาพในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผ่านสัญญาณระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ของตัวสายอากาศ โดยจะมีค่าต่ำเพื่อลดการรบกวนระหว่างพอร์ตต่าง ๆ



รูปที่ 3.25 ค่าอัตราขยายของการจำลองสายอากาศ 16 องค์ประกอบ ที่ความถี่ 1.8 GHz มีค่า 5.79 dB  
สายอากาศ 16 องค์ประกอบ มีอัตราขยายสูงมาก มีค่า S-parameter ที่ต่ำกว่า -10 dB สามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ การออกแบบและการจำลองมีความซับซ้อนสูง

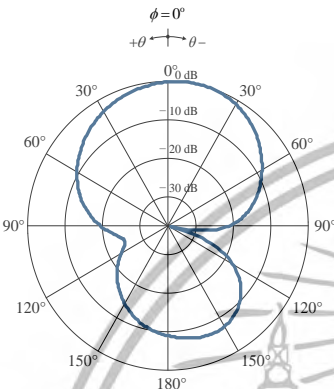
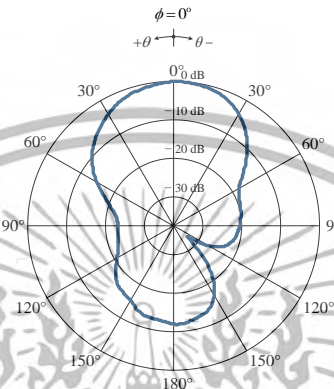
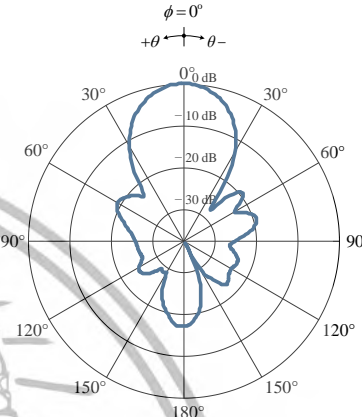
4. การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแต่ละพอร์ตของสายอากาศ ตารางที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแต่ละพอร์ตของสายอากาศ 4 8 และ 16 องค์ประกอบ

สายอากาศ 4 องค์ประกอบ ตั้งรูปที่ 3.6	สายอากาศ 8 องค์ประกอบ ตั้งรูปที่ 3.20	สายอากาศ 16 องค์ประกอบ ตั้งรูปที่ 3.23
<p>รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศ 4 องค์ประกอบ มีอัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB</p>	<p>รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศ 8 องค์ประกอบ มีอัตราขยายเท่ากับ 3.86 dB</p>	<p>รูปที่ 3.28 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นพอร์ต 1 ของสายอากาศ 16 องค์ประกอบ มีอัตราขยายเท่ากับ 5.79 dB</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ 4 องค์ประกอบ ตั้งรูปที่ 3.6	สายอากาศ 8 องค์ประกอบ ตั้งรูปที่ 3.20	สายอากาศ 16 องค์ประกอบ ตั้งรูปที่ 3.23
 <p>รูปที่ 3.29 แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของ สายอากาศ 4 องค์ประกอบ มี อัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.30 แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของ สายอากาศ 8 องค์ประกอบ มี อัตราขยายเท่ากับ 3.34 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.31 แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นพอร์ต 2 ของ สายอากาศ 16 องค์ประกอบ มี อัตราขยายเท่ากับ 5.93 dB</p>
 <p>รูปที่ 3.32 แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของ สายอากาศ 4 องค์ประกอบ มี อัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.33 แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของ สายอากาศ 8 องค์ประกอบ มี อัตราขยายเท่ากับ 3.34 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.34 แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นพอร์ต 3 ของ สายอากาศ 16 องค์ประกอบ มี อัตราขยายเท่ากับ 5.93 dB</p>

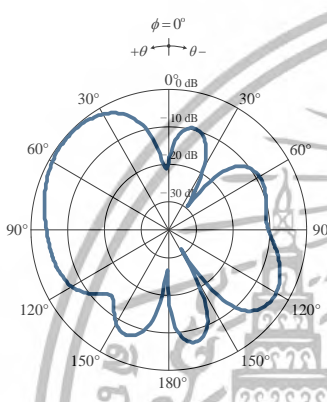
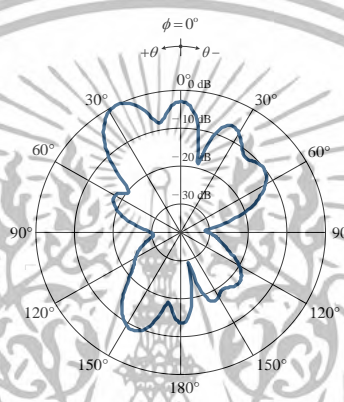
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ 4 องค์ประกอบ ตั้งรูปที่ 3.6	สายอากาศ 8 องค์ประกอบ ตั้งรูปที่ 3.20	สายอากาศ 16 องค์ประกอบ ตั้งรูปที่ 3.23
 <p>รูปที่ 3.35 แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของ สายอากาศ 4 องค์ประกอบ มี อัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.36 แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของ สายอากาศ 8 องค์ประกอบ มี อัตราขยายเท่ากับ 3.86 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.37 แบบรูปการ แพร่กระจายคลื่นพอร์ต 4 ของ สายอากาศ 16 องค์ประกอบ มี อัตราขยายเท่ากับ 5.79 dB</p>

จากการสังเกตผลการจำลองสายอากาศ 4 องค์ประกอบมีอัตราขยายเท่ากับ 2.21 dB สายอากาศ 8 องค์ประกอบมีอัตราขยายเท่ากับ 3.86 และ 16 องค์ประกอบ และสายอากาศทั้ง 3 มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทางเดียว ดังนั้นผู้จัดทำจึงใช้ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ผ่านการเปลี่ยนเฟส โดยกำหนดบิตจากเงื่อนไขขบิตในตารางที่ 3.1 ที่สามารถปรับเฟสได้สูงสุด คือ 11111111 00000001 00000010 00000000 ดังแสดงในตารางที่ 3.10 เพื่อพิจารณา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.10 แสดงการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในกรณีที่ปรับมุมชี้ทิศทางได้สูงสุดของสายอากาศ 4 8 และ 16 องค์ประกอบ

สายอากาศ 4 องค์ประกอบ ดังรูปที่ 3.20	สายอากาศ 8 องค์ประกอบ ดังรูปที่ 3.23	สายอากาศ 16 องค์ประกอบ ดังรูปที่ 3.26
 <p>รูปที่ 3.38 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 4 องค์ประกอบ ที่มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทางมาด้านซ้ายจากมุม 0 องศา สรุปได้ว่าสายอากาศสามารถปรับเฟสได้มากที่สุด <math>\pm 32</math> deg มีอัตราขยายเท่ากับ 2.50 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.39 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 8 องค์ประกอบ ที่มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทางมาด้านซ้ายจากมุม 0 องศา สรุปได้ว่าสายอากาศสามารถปรับเฟสได้มากที่สุด <math>\pm 25</math> องศา มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>	 <p>รูปที่ 3.40 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ 16 องค์ประกอบ ที่มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทางมาด้านซ้ายจากมุม 0 องศา สรุปได้ว่าสายอากาศสามารถปรับเฟสได้มากที่สุด <math>\pm 11</math> องศา มีอัตราขยายเท่ากับ 9.80 dB</p>

สรุปผลของการจำสายอากาศ 4, 8, และ 16 องค์ประกอบ จัดวางแบบรูปองค์ประกอบแบบเชิงเส้น (เมทริกซ์  $1 \times 4$ ) ดังรูปที่ 3.6 3.20 และ 3.23 ทราบได้ว่าสายอากาศ 4 8 และ 16 องค์ประกอบมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 2.50 5.64 และ 9.80 dB ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มองค์ประกอบของสายอากาศส่งผลให้มีอัตราขยายที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศที่มีจำนวนองค์ประกอบน้อยจะมีความกว้างของมุมชี้ทิศทางที่มากกว่า เมื่อมีองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

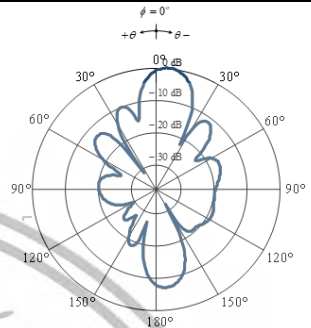
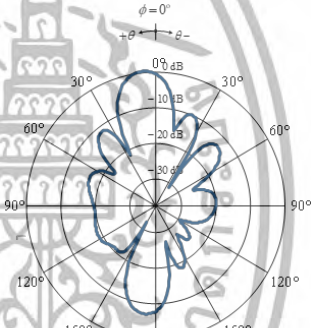
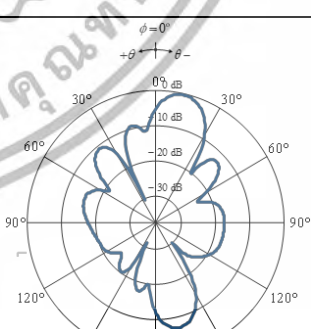
เพิ่มขึ้นมุมชี้ทิศทางของสายอากาศจะลดลง ดังนั้นจากผลของการปรับมุมชี้ทิศทางของสายอากาศ 4 องค์ประกอบมีค่ามากที่สุด ตามด้วย 8 และ 16 องค์ประกอบตามลำดับ ผลของการปรับเฟสสรุปได้ดังนี้ สายอากาศ 4 องค์ประกอบมีมุมสูงสุด  $\pm 32$  องศา (มีมุมกวาดกว้าง 64 องศา) สายอากาศ 8 องค์ประกอบมีค่าสูงสุด  $\pm 25$  องศา (มีมุมกวาดกว้าง 64 องศา) และสายอากาศ 16 องค์ประกอบมีค่าสูงสุด  $\pm 11$  องศา (มีมุมกวาดกว้าง 22 องศา) ดังนั้นเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทุกด้านแล้ว จำนวนองค์ประกอบของสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการเลือกใช้คือ สายอากาศแบบ 8 องค์ประกอบ เนื่องจากมีความซับซ้อนที่ระดับปานกลาง ทำให้ยังคงมีความเป็นไปได้ในการผลิตและใช้งานจริง มีอัตราขยายที่เหมาะสมคือ 5.64 dB และมุมชี้ทิศทางของผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีความกว้างที่เหมาะสม สามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของมุมได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศ 4 องค์ประกอบ สายอากาศ 8 องค์ประกอบมีลำคลื่นที่แคบลง ทำให้สามารถควบคุมทิศทางของสัญญาณได้แม่นยำยิ่งขึ้น

จากการพิจารณาเลือกจำนวนองค์ประกอบสายอากาศ สามารถสรุปได้ว่าสายอากาศจำนวน 8 องค์ประกอบเหมาะสมสำหรับการนำมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบมากที่สุด ดังนั้นขั้นตอนต่อไปคือการจำลองการปรับเฟสของสายอากาศตามค่าบิตที่ได้กำหนดไว้จากตารางที่ 3.11 สามารถจำลองผลได้ดังแสดงในตาราง 3.11

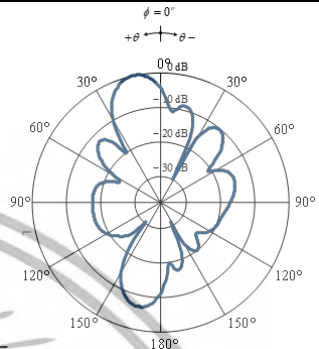
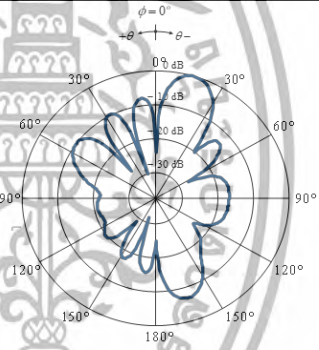
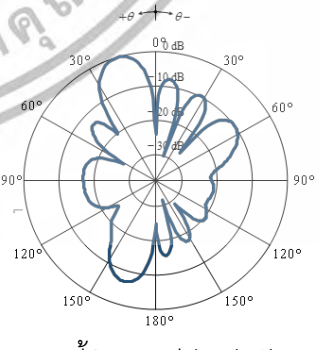
ตารางที่ 3.11 ผลการจำลองการเปลี่ยนเฟสสายอากาศ 8 องค์ประกอบ ตามบิตที่เปลี่ยนไป

สายอากาศ ตัวที่ 1	สายอากาศ ตัวที่ 2	สายอากาศ ตัวที่ 3	สายอากาศ ตัวที่ 4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อสัญญาณ ผ่านวงจรถ่ายเฟส
00000000	00000000	00000000	00000000	 <p>รูปที่ 3.41 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 0 deg มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>

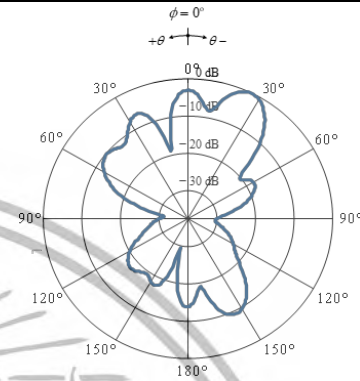
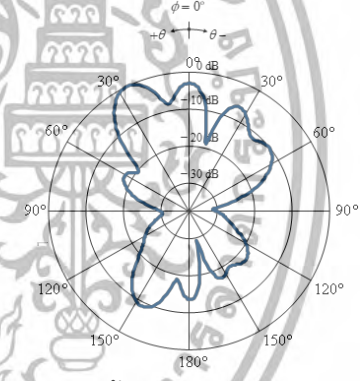
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ ตัวที่ 1	สายอากาศ ตัวที่ 2	สายอากาศ ตัวที่ 3	สายอากาศ ตัวที่ 4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อสัญญาณ ผ่านวงจรถ่าย
00000000	00001000	00000100	00000010	 <p>รูปที่ 3.42 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ +6 deg มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>
00000010	00000100	00001000	00000000	 <p>รูปที่ 3.43 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ -6 deg มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>
00000000	00000100	00000010	00000001	 <p>รูปที่ 3.44 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ +12 deg มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ ตัวที่ 1	สายอากาศ ตัวที่ 2	สายอากาศ ตัวที่ 3	สายอากาศ ตัวที่ 4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อสัญญาณ ผ่านวงจรถ่าย
00000001	00000010	00000100	00000000	 <p>รูปที่ 3.45 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ -12 deg มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>
00000000	00000100	00000001	11111111	 <p>รูปที่ 3.46 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ +17 deg มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>
11111111	00000001	00000100	00000000	 <p>รูปที่ 3.47 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ -17 deg มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ ตัวที่ 1	สายอากาศ ตัวที่ 2	สายอากาศ ตัวที่ 3	สายอากาศ ตัวที่ 4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เมื่อสัญญาณ ผ่านวงจรเฟส
00000000	00000010	00000001	11111111	 <p>รูปที่ 3.48 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ +25 deg มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>
11111111	00000001	00000010	00000000	 <p>รูปที่ 3.49 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ -25 deg มีอัตราขยายเท่ากับ 5.64 dB</p>

### 3.4 การสร้างสายอากาศ

เมื่อปรับปรุงสายอากาศให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการสร้างสายอากาศต้นแบบที่มีรูปแบบและขนาดเท่ากับการจำลอง เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 3.27



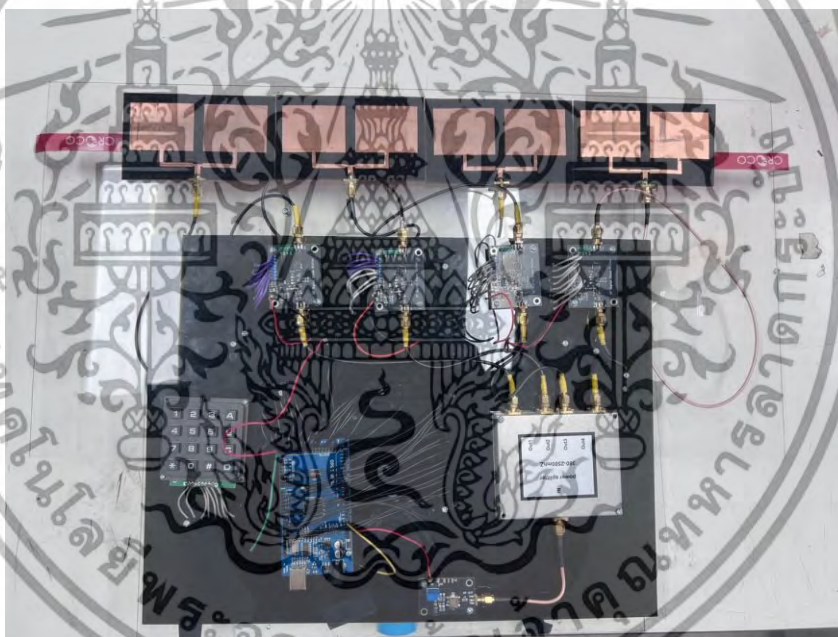
รูปที่ 3.50 สายอากาศต้นแบบ 8 องค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 สร้างวงจรรวมชิ้นงาน

อุปกรณ์ที่ใช้มีดังต่อไปนี้

โมดูลแรงดันไฟฟ้าความคมความถี่ 1.8 GHz	1 ตัว
ตัวแบ่งกำลังสัญญาณ RF	1 ตัว
Arduino mega 2560	1 ตัว
คีย์แพด	1 ตัว
เฟสชิฟเตอร์	4 ตัว
สายอากาศแกนลำดับ	4 ตัว



รูปที่ 3.51 ภาพวงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

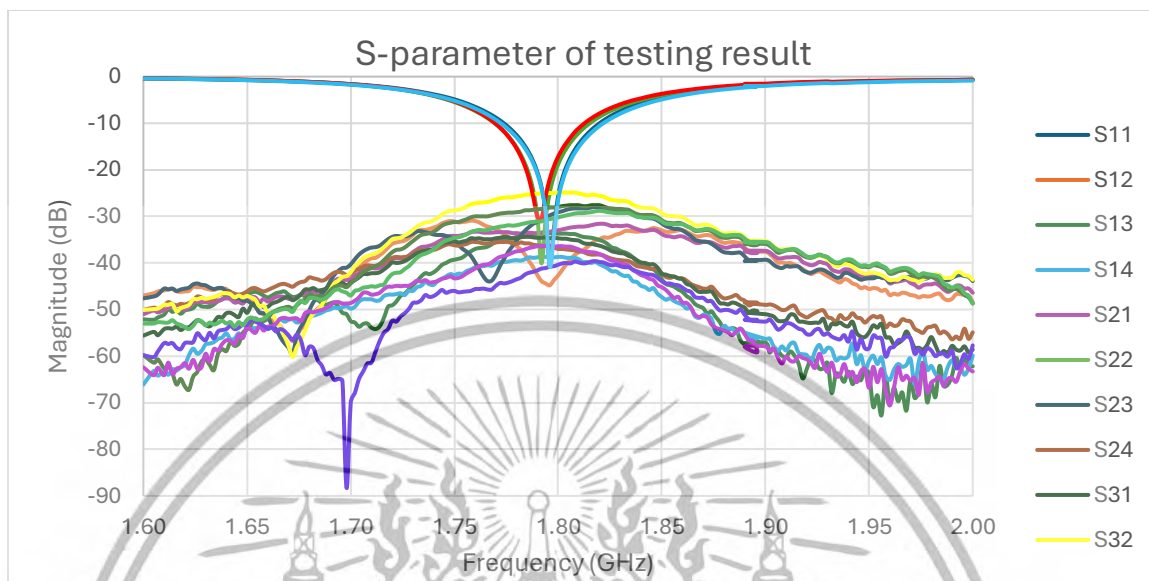
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

จากการออกแบบ จำลองและปรับปรุงสายอากาศบนโปรแกรมจำลองทำให้ได้ขนาด และคุณลักษณะที่เหมาะสม สามารถนำมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 3.44 การสร้างสายอากาศต้นแบบใช้วัสดุ FR-4 หรือแผ่น PCB ที่มีทองแดง 2 ด้าน โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยไมโครสตริป 8 องค์ประกอบ องค์ประกอบแต่ละส่วนมีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถูกจัดเรียงเป็น 4 ชุด ชุดละ 2 องค์ประกอบในแนวเชิงเส้น โดยมีช่องว่างเล็กน้อยระหว่างชุด บนพื้นผิวขององค์ประกอบร่องรอยหรือคราบเล็กน้อยซึ่งเกิดจากระบวนการสร้างหรือการจัดการ ที่ด้านล่างของสายอากาศแต่ละตัวมีขั้วต่อ SMA ซึ่งใช้สำหรับการเชื่อมต่อสายอากาศกับอุปกรณ์วัดหรือระบบส่งสัญญาณ และสามารถบันทึกค่าต่าง ๆ จากการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. ค่า S-parameter เป็นตัววัดประสิทธิภาพของต้นแบบที่สร้างขึ้น S11 แสดงถึงการสะท้อนกลับของสัญญาณ (Return loss) S12, S13, S14, S21, S22, S23, S24, S31, S32, S33, S34, S41, S42, S43 แสดงถึงการส่งผ่านสัญญาณ ระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ของสายอากาศ สามารถบันทึกผลได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่า S-parameter จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของค่า S-parameter (S11, S12, S13, S14, S21, S22, S23, S24, S31, S32, S33, S34, S41, S42, S43) เทียบกับความถี่ กำหนดให้แกน X แสดงความถี่ ในหน่วย Hz โดยมีช่วงตั้งแต่ 1.6 GHz ถึง 2 GHz แกน Y แสดงค่า S-parameter ในหน่วย dB โดยมีช่วงตั้งแต่ 0 dB ถึง -90 dB ค่า S-parameter ของสายอากาศที่ความถี่ 1.8 GHz แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่า S-parameter จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

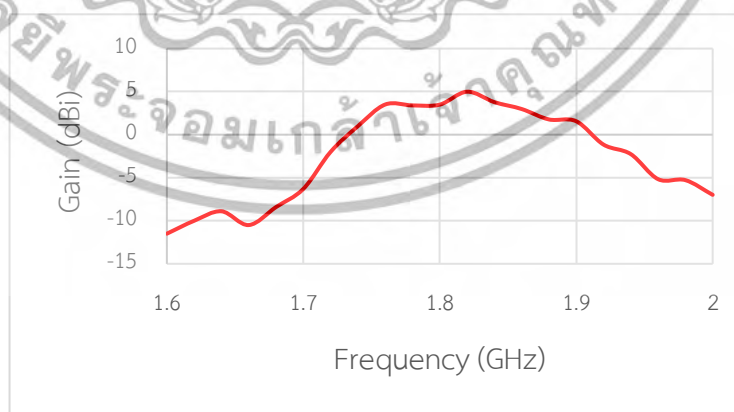
พารามิเตอร์	ขนาด (dB)
S11 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 1	-25.70
S12 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 1	-42.70
S13 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1	-33.70
S14 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 1	-38.70
S21 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2	-33.00
S22 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 2	-18.87
S23 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2	-29.10
S24 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 2	-37.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์	ขนาด (dB)
S31 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3	-34.70
S32 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3	-24.90
S33 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 3	-17.21
S34 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 3	-36.40
S41 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 4	-40.40
S42 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 4	-30.00
S43 การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 4	-30.20
S44 การสะท้อนกลับของสัญญาณที่พอร์ต 4	-26.58

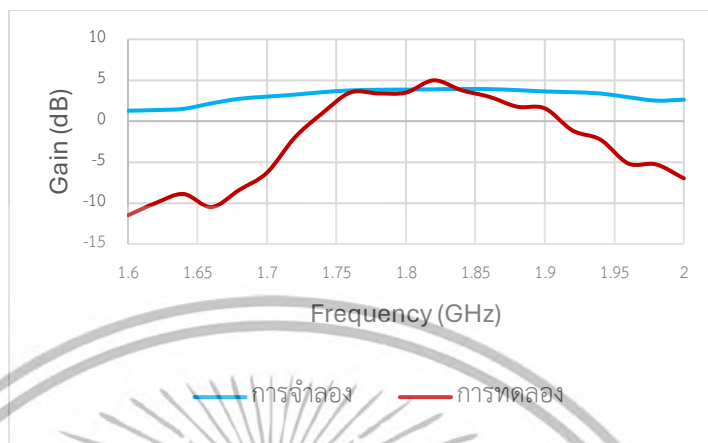
จากตารางที่ 4.1 ค่า S11, S22, S33, S44 ที่ต่ำกว่า -10 แสดงว่าสายอากาศมีการสะท้อนกลับของสัญญาณน้อย ซึ่งหมายถึงการจับคู่ความต้านทานที่ดี และสายอากาศสามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่า S21, S31, S41 และค่าอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกัน แสดงถึงประสิทธิภาพในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างพอร์ตต่าง ๆ ของตัวสายอากาศ โดยจะมีค่าต่ำเพื่อลดการรบกวนระหว่างพอร์ตต่าง ๆ

2. ค่าอัตราขยายของสายอากาศ สายอากาศต้นแบบที่ความถี่ 1.8 GHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 3.49 ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟอัตราขยายจากการทดลองของสายอากาศต้นแบบ ที่ความถี่ 1.8 มีค่าเท่ากับ 3.49 dB

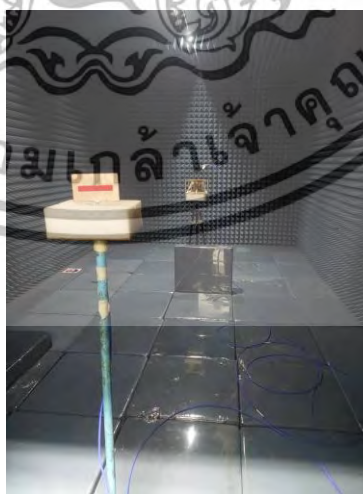
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศระหว่างการจำลองและการทดลอง

จากรูปที่ 4.3 ทราบได้ว่าอัตราขยายที่ความถี่ 1.8 GHz ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกันมาก อัตราขยายจากการจำลองเท่ากับ 3.86 และค่าอัตราขยายจากการทดลองเท่ากับ 3.49 โดยค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย

3. การวัดผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แสดงดังรูปที่ 4.4 โดยทำการวัดสายอากาศต้นแบบที่สร้างภายในห้องไร้เสียงสะท้อน เพื่อลดการรบกวนสัญญาณภายนอกที่มีผลกระทบต่อสายอากาศ โดยใช้เครื่อง Network analyzer เป็นเครื่องรับสัญญาณ สามารถบันทึกผลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2

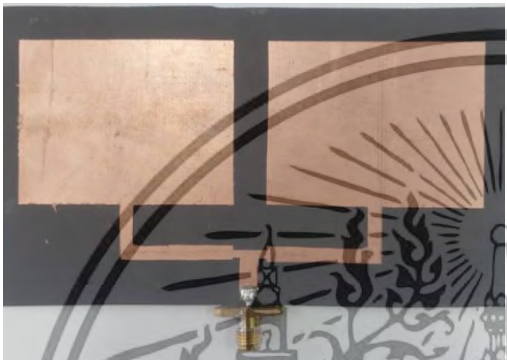
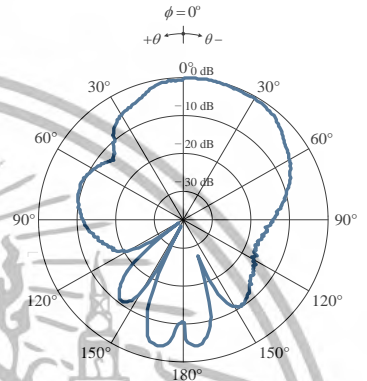

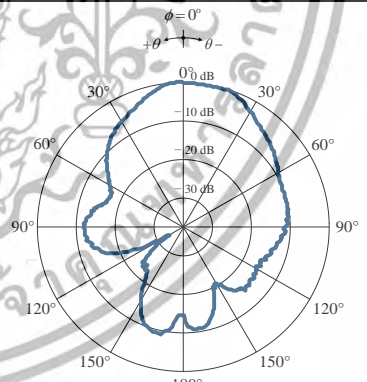


รูปที่ 4.4 การติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการวัดค่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบเดี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ภาพสายอากาศต้นแบบทั้ง 4 ลำดับพร้อมแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากการ

ทดสอบ

สายอากาศต้นแบบ	ผลการทดลอง
 <p>รูปที่ 4.5 สายอากาศต้นแบบพอร์ต 1 มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -25.70 dB มีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 48 MHz</p>	 <p>รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 1 มีอัตราขยายเท่ากับ 3.49 dB</p>
 <p>รูปที่ 4.7 สายอากาศต้นแบบพอร์ต 2 มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ -18.87 dB มีแบนด์วิดธ์เท่ากับ 50 MHz</p>	 <p>รูปที่ 4.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศต้นแบบพอร์ตที่ 2 มีอัตราขยายเท่ากับ 3.49 dB</p>

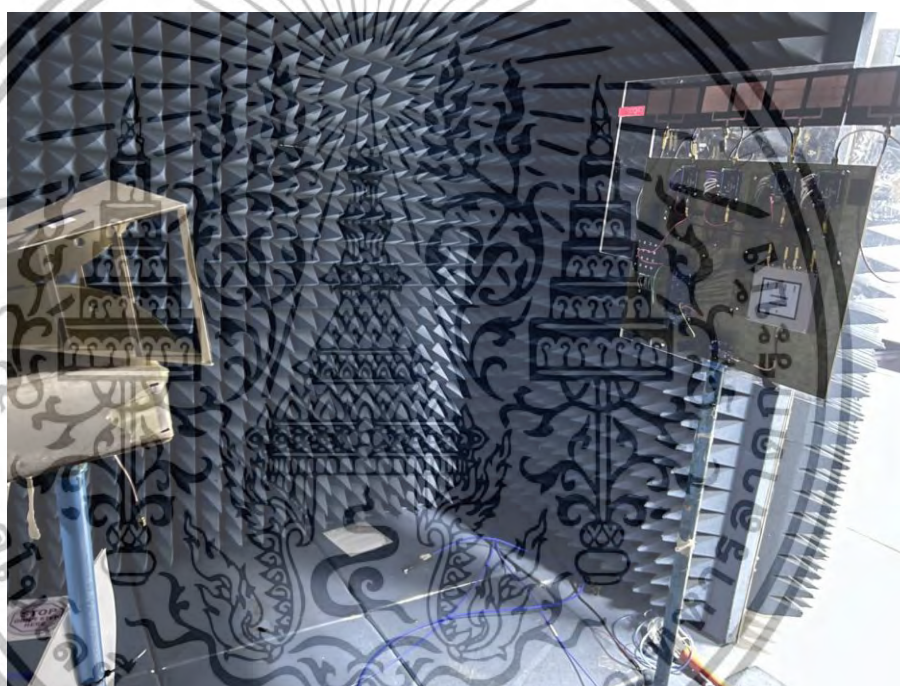
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศต้นแบบ	ผลการทดลอง
 <p>รูปที่ 4.9 สายอากาศต้นแบบพอร์ต 3 มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ <math>-17.21</math> dB มีแบนด์วิดธ์เท่ากับ <math>47</math> MHz</p>	 <p>รูปที่ 4.10 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศต้นแบบพอร์ต 3 อัตราขยายเท่ากับ <math>3.49</math> dB</p>
 <p>รูปที่ 4.11 สายอากาศต้นแบบพอร์ต 4 มีค่าการสูญเสียย้อนกลับเท่ากับ <math>-26.58</math> dB มีแบนด์วิดธ์เท่ากับ <math>50</math> MHz</p>	 <p>รูปที่ 4.12 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศต้นแบบพอร์ต 4 มีอัตราขยายเท่ากับ <math>3.49</math> dB</p>

จากตารางที่ 4.2 สายอากาศต้นแบบทุกพอร์ตมีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำ ซึ่งหมายถึงมีการสะท้อนกลับของสัญญาณต่ำ ทำให้สายอากาศสามารถรับส่งสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ สายอากาศมีแบนด์วิดธ์อยู่ในช่วง  $47$ - $50$  MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทางเดียว และมีอัตราขยายเท่ากับ  $3.49$  dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. การวัดผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ที่ผ่านการเปลี่ยนเฟสจากวงจรเปลี่ยนเฟส ติดตั้งสายอากาศด้านส่งและด้านรับให้มีระยะห่างกันเท่ากับ 1 เมตร ดังรูปที่ 4.17 ใช้ Power supply เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับวงจร และทำการวัดผลในห้องไร้เสียงสะท้อน เพื่อลดการรบกวนสัญญาณภายนอกที่มีผลกระทบต่อสายอากาศ ใช้ Spectrum analyzer เป็นเครื่องรับสัญญาณและจดบันทึกค่าสายอากาศ การติดตั้งสายอากาศแสดงในรูปที่ 4.18 และสามารถบันทึกผลพร้อมเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองได้ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.13 ภาพการติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการวัดผลแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเมื่อสัญญาณผ่านวงจรเปลี่ยนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศต้นแบบเมื่อสัญญาณผ่าน วงจรการเปลี่ยนเฟส (การเปลี่ยนบิต)

สายอากาศ ตัวที่ 1	สายอากาศ ตัวที่ 2	สายอากาศ ตัวที่ 3	สายอากาศ ตัวที่ 4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อสัญญาณ ผ่านวงจร
00000000	00000000	00000000	00000000	 <p>รูปที่ 4.14 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 25 deg (กำหนดให้เป็นมุมอ้างอิงของการเปรียบเทียบการเปลี่ยนองศาของสายอากาศมุมอื่น ๆ ) มีอัตราขยายเท่ากับ 5.51 dB</p>
00000000	00001000	00000100	00000010	 <p>รูปที่ 4.15 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 30 deg (มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทาง +5 deg เมื่อเปรียบเทียบกับมุมอ้างอิง) มีอัตราขยายเท่ากับ 5.51 dB</p>

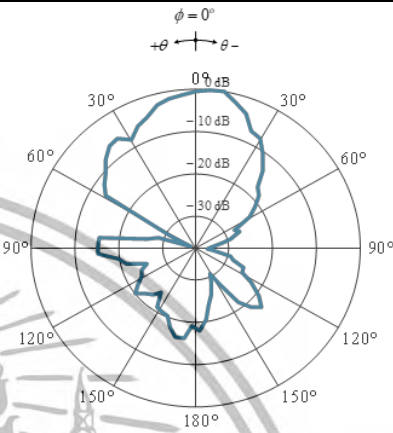
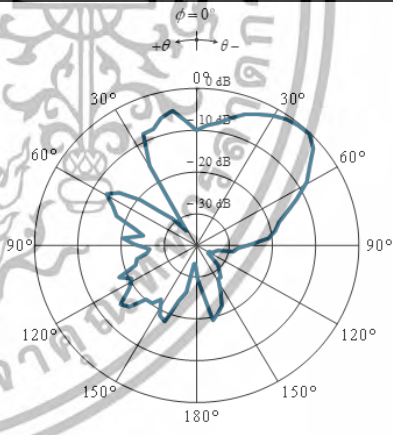
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ ตัวที่ 1	สายอากาศ ตัวที่ 2	สายอากาศ ตัวที่ 3	สายอากาศ ตัวที่ 4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อสัญญาณ ผ่านวงจร
00000010	00000100	00001000	00000000	 <p>รูปที่ 4.16 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 20 deg (มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทาง -5 deg เมื่อ เปรียบเทียบกับมุมอ้างอิง) มีอัตราขยาย เท่ากับ 5.51 dB</p>
00000000	00000100	00000010	00000001	 <p>รูปที่ 4.17 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 35 deg (มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทาง +10 deg เมื่อ เปรียบเทียบกับมุมอ้างอิง) มีอัตราขยาย เท่ากับ 5.51 dB</p>

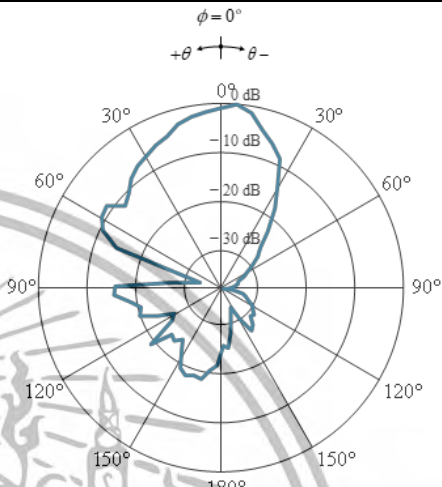
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ ตัวที่ 1	สายอากาศ ตัวที่ 2	สายอากาศ ตัวที่ 3	สายอากาศ ตัวที่ 4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อสัญญาณ ผ่านวงจร
00000001	00000010	00000100	00000000	 <p>รูปที่ 4.18 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 15 deg (มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทาง -10 deg เมื่อ เปรียบเทียบกับมุมอ้างอิง) มีอัตราขยาย เท่ากับ 5.51 dB</p>
00000000	00000100	00000001	11111111	 <p>รูปที่ 4.19 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 40 deg (มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทาง +15 deg เมื่อ เปรียบเทียบกับมุมอ้างอิง) มีอัตราขยาย เท่ากับ 5.51 dB</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ ตัวที่ 1	สายอากาศ ตัวที่ 2	สายอากาศ ตัวที่ 3	สายอากาศ ตัวที่ 4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อสัญญาณ ผ่านวงจร
11111111	00000001	00000100	00000000	 <p>รูปที่ 4.20 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 10 deg (มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทาง -15 เมื่อเปรียบเทียบกับมุมอ้างอิง) มีอัตราขยายเท่ากับ 5.51 dB</p>
00000000	00000010	00000001	11111111	 <p>รูปที่ 4.21 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 45 deg (มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทาง +20 เมื่อเปรียบเทียบกับมุมอ้างอิง) มีอัตราขยายเท่ากับ 5.51 dB</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศ ตัวที่ 1	สายอากาศ ตัวที่ 2	สายอากาศ ตัวที่ 3	สายอากาศ ตัวที่ 4	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อสัญญาณ ผ่านวงจร
11111111	00000001	00000010	00000000	 <p>รูปที่ 4.22 มุมชี้ทิศทางมีค่าเท่ากับ 5 deg (มีการเบี่ยงมุมชี้ทิศทาง -20 เมื่อเปรียบเทียบกับมุมอ้างอิง) มีอัตราขยายเท่ากับ 5.51 dB</p>

จากการตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเมื่อสัญญาณผ่านวงจรถ่ายเปลี่ยนเฟสเปรียบเทียบ มีมุมอ้างอิงเท่ากับ 25 deg และมีการเปลี่ยนเฟสของสายอากาศเมื่อเทียบกับมุมอ้างอิงได้ดังนี้ +5, -5, +10, -10, +15, -15, +20, -20 ดังนั้นสายอากาศที่สร้างสามารถปรับมุมชี้ทิศทางได้มากที่สุด  $\pm 20$  องศา (มีมุมกวาด 40 องศา) แสดงดังรูปที่ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศแกลลุ่มลำดับแบบสวิตช์ลาค์ลิ้นใช้งานที่ความถี่ 1.8 GHz การสร้างสายอากาศต้นแบบใช้วัสดุ FR-4 หรือแผ่น PCB ที่มีทองแดง 2 ด้าน โครงสร้างสายอากาศประกอบด้วยไมโครสตริป 8 องค์ประกอบ องค์ประกอบแต่ละส่วนมีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า ถูกจัดเรียงเป็น 4 ตัว ตัวละ 2 องค์ประกอบในแนวเชิงเส้น ที่ด้านล่างของสายอากาศแต่ละตัวมีขั้วต่อ SMA connector ซึ่งใช้สำหรับการเชื่อมต่อสายอากาศกับอุปกรณ์วัดหรือระบบส่งสัญญาณ โดยจุดประสงค์หลักในการสร้างสายอากาศสวิตช์ลาค์ลิ้น เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณของระบบ ระบบสายอากาศสามารถสวิตช์ลาค์ลิ้นโดยการควบคุมผ่านวงจรเปลี่ยนเฟส ด้วยการป้อนคำสั่งผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์และคีย์แพดที่เชื่อมต่อกับพีซีพีเตอร์ ซึ่งเป็นตัวทำหน้าที่ในการเปลี่ยนค่ามุมชี้ทิศทางของสายอากาศในสายอากาศ ทั้ง 4 ตัว ทำให้ลาค์ลิ้นหลักให้ชี้ไปในทิศทางที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จในการศึกษา และสร้างสายอากาศแกลลุ่มลำดับแบบสวิตช์ลาค์ลิ้นที่ความถี่ 1.8 GHz ผู้จัดทำได้ออกแบบ จำลอง และสร้าง พร้อมทำการทดสอบสายอากาศ โดยผลของการทดสอบทราบได้ว่าสายอากาศสามารถส่งสัญญาณได้จริง และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองมีความถูกต้องใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก โดยสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังนี้ สายอากาศทุกตัวมีค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB มีแบนวิธด์ประมาณ 47-50 MHz ในสภาวะปกติมีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 3.49 เมื่อระบบสายอากาศได้รับการป้อนสัญญาณผ่านวงจรเปลี่ยนเฟสทำให้มีอัตราขยายของสัญญาณเพิ่มขึ้นเท่ากับ 5.51 สามารถปรับมุมการชี้ทิศทางของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นได้ โดยในปริญญานิพนธ์นี้ได้ยกตัวอย่างการทำงานของระบบสายอากาศที่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงมุมได้ชัดเจนมากที่สุด 9 ระดับ โดยกำหนดมุมอ้างอิงอยู่ที่ 25 deg (เป็นจุด 0 ของการเปลี่ยนมุม) สามารถบันทึกมุมชี้ทิศทางสายอากาศได้ดังนี้ +5, -5, +10, -10, +15, -15, +20 และ -20 deg ดังนั้นการทำงานของระบบสายอากาศสามารถเปลี่ยนมุมการชี้ทิศทางได้สูงสุด  $\pm 20$  deg หรือมีมุมกวาดกว้าง 40 deg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการสร้างระบบสายอากาศแถวลำดับแบบสวิตช์ลำคลื่นที่ความถี่ 1.8 GHz สามารถปรับปรุงระบบและพัฒนาให้สายอากาศมีอัตราขยายที่สูงขึ้น และมีมุมชี้ทิศทางที่กว้างโดยในระบบสายอากาศสร้างได้นั้นยังมีข้อบกพร่องด้านความแรงของกำลังส่ง เนื่องจากโมดูลแรงดันไฟฟ้าควบคุมความถี่ที่เป็นแหล่งกำเนิดความถี่ของระบบสายอากาศมีกำลังส่งสัญญาณน้อย จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มกำลังส่งสัญญาณเพิ่มเข้าไปในระบบ ในส่วนผลที่ได้จากการทดสอบจะมีผลคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากการจำลองเล็กน้อย คาดว่าอาจเกิดการสูญเสียจากขั้นตอนการสร้างสายอากาศ หรือขั้นตอนการติดตั้งสายอากาศ ซึ่งหากสามารถลดการสูญเสียจากขั้นตอนการสร้างและการบันทึกค่าได้อาจได้ผลที่ดีมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] 3ds. “โปรแกรม CST Studio Suite” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 กันยายน 2567, จาก :  
<https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>
- [2] Allnewstep. (2559). “Keypad 4x4 Matrix สำหรับ Arduino” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก :  
<https://www.allnewstep.com/product/129/keypad-4x4-matrix-keypad-for-arduino>
- [3] AllNewStep. (2559). “สอน Arduino วิธีใช้จอ LCD 1602 แบบ I2C อย่างง่าย” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://www.allnewstep.com/article/220/20-สอน-arduino-วิธีใช้จอ-lcd-1602-แบบ-i2c-อย่างง่าย>
- [4] Allnewstep. Keypad 4x4 matrix keypad for Arduino [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก :  
<https://www.allnewstep.com/product/129/keypad-4x4-matrix-keypad-for-arduino>
- [5] Antenna Theory. S-Parameters [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก :  
<https://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>
- [6] Arduitrronics. (2559). “การใช้งาน I2C LCD” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก :  
<https://www.arduitronics.com/article/57/การใช้งาน-i2c-lcd>
- [7] Constantine A. Balanis. Antenna theory analysis and design. [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก :  
<https://pdfroom.com/books/antenna-theory-analysis-and-design/bWx5aMRo5BJ>
- [8] Electronicsdesk. “Microstrip or Patch Antenna [ออนไลน์]. สืบค้น 3 สิงหาคม 2567, จาก :  
<https://electronicsdesk.com/patch-antenna.htm>
- [9] Geocities. “ประเภทของสายอากาศ” [ออนไลน์]. สืบค้น 3 สิงหาคม 2567, จาก :  
<https://www.geocities.ws/areeyaapcy/page4.html>
- [10] Klipsch Thailand (2567). “ห้องไร้เสียงสะท้อน” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 ธันวาคม 2567, จาก  
[facebook.com/klipschTh/posts/ห้องไร้เสียงสะท้อน-/607006331853833/](https://facebook.com/klipschTh/posts/ห้องไร้เสียงสะท้อน-/607006331853833/)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] Lnwshop. (2565). “PCF8574/T - I2C I/O Expander” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก <http://fitrox.lnwshop.com/article/65/tutorial-pcf8574-t-i2c-i-o-expander>
- [12] Natakorn Hongham. (2564). The Arduino Series ตอนที่ 1 [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://www.borntodev.com/2021/09/17/the-arduino-series->
- [13] pSemi Corporation. “RF Phase shifter” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe44820ds.pdf>
- [14] Telecommunications Systems. How can you test and calibrate antennas for optimal signal reception? [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://www.linkedin.com/advice/3/how-can-you-test-calibrate-antennas-1obaf>
- [15] Topwave. “ตัวแบ่งกำลังคืออะไร” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://th.topwaverf.com/news/what-is-a-power-divider-51715032.html>
- [16] Wicida Sarne. “What is a DC millivoltmeter?” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://www.quora.com/What-is-a-DCmillivoltmeter#:~:text=The%20answers%20>
- [17] Wikipedia. “Spectrum analyzer” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : [https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum\\_analyzer](https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrum_analyzer)
- [18] Wikipedia. Voltage-controlled oscillator [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : [https://en.wikipedia.org/wiki/Voltage-controlled\\_oscillator](https://en.wikipedia.org/wiki/Voltage-controlled_oscillator)
- [19] Wireless. Antenna Basics [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <http://wireless.ictp.it/handbook/C4.pdf>
- [20] โครงการส่งเสริมการเรียนรู้ทางด้านวิศวกรรมโทรคมนาคมในโรงเรียนทั่วประเทศ. “สายอากาศ (Antenna)”. [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <http://wifinder.in.th/images.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] กาญจนาและคณะ. “สายอากาศไมโครสตริปที่ทำงานในย่าน 900 1800 และ 2100 MHz” [ออนไลน์]. สืบค้น 3 สิงหาคม 2567, จาก : <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/bitstream/123456789/7317/2/Fulltext.pdf>
- [22] ชมรมวิทยุสมัครเล่น. (2561). “แกนของสายอากาศคืออะไร” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://e20ae.blogspot.com/2018/09/blog-post.html>
- [23] ทีโด เทคโนโลยี. “Matrix Keypad 4x4 for Arduino” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://www.tido.tech/index.php/product/matrix-keypad-4x4-for-arduino/>
- [24] มาโนชญ์ แสงศิริ. (2562). “Arduino ผู้นำด้านฮาร์ดแวร์และระบบนิเวศซอฟต์แวร์แบบเปิดระดับโลก” [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://www.scimath.org/articletechnology/item/9815-arduino>
- [25] รัชวรรณ และรัฐนันท์. (2556). “สายอากาศสวิตซ์ลำคลื่นสำหรับการสื่อสารไร้สาย”. [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <https://opacimages.lib.kmitl.ac.th/medias/pdf/09023049.pdf>
- [26] สุรเชษฐ์ และเอกนรินทร์.(2550). “การสวิตซ์ลำคลื่นโดยใช้สายอากาศไมโครสตริปเพียงตัวเดียว”. [ออนไลน์]. สืบค้น 1 สิงหาคม 2567, จาก : <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/bitstream/123456789/2599/1/255-12-1.1.pdf>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include <Keypad.h>
// Define keypad settings
const byte ROWS = 4; // 4 rows
const byte COLS = 4; // 4 columns
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1', '2', '3', 'A'},
  {'4', '5', '6', 'B'},
  {'7', '8', '9', 'C'},
  {'*', '0', '#', 'D'}
};
byte rowPins[ROWS] = {36, 34, 32, 30}; // Connect the rows of the keypad to these pins
byte colPins[COLS] = {28, 26, 24, 22}; // Connect the columns of the keypad to these pins
Keypad keypad = Keypad(makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS);

// LED pin configuration
const int ledPins[32] = {
  13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, // Set 1
  5, 4, 3, 2, 14, 15, 16, 17, // Set 2
  23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37, // Set 3
  39, 41, 43, 45, 47, 49, 51, 53, // Set 4
};

// Function to reverse an array
void reverseArray(int arr[], int size) {
  for (int i = 0; i < size / 2; i++) {
    int temp = arr[i];
    arr[i] = arr[size - i - 1];
    arr[size - i - 1] = temp;
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    // Initialize LED pins as output
    for (int i = 0; i < 32; i++) {
        pinMode(ledPins[i], OUTPUT);
        digitalWrite(ledPins[i], LOW);
    }

    // Initialize Con as a 2D array
    const int rows = 10, cols = 8;
    int Con[rows][cols] = {0};

    // Populate Con
    int Con_2[cols] = {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1};
    for (int i = 0; i < rows; i++) {
        if (i == 0) {
            for (int j = 0; j < cols; j++) Con[i][j] = 0;
        } else if (i <= 8) {
            for (int j = 0; j < cols; j++) Con[i][j] = 0;
            Con[i][i - 1] = 1;
        } else {
            for (int j = 0; j < cols; j++) Con[i][j] = Con_2[j];
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

// Initialize Pre and reverse its elements
const int preSize = 4;
int Pre[preSize * 2][4] = {
    {0, 6, 7, 8},
    {0, 7, 8, 9},
    {0, 5, 7, 9},
    {0, 5, 6, 7},
};

for (int i = 0; i < preSize; i++) {
    for (int j = 0; j < 4; j++) Pre[i + preSize][j] = Pre[i][j];
    reverseArray(Pre[i + preSize], 4);
}

Serial.println("Waiting for keypad input..");
}

void loop() {
    char key = keypad.getKey();

    if (key != NO_KEY) {
        int C = -1;
        if (key >= '0' && key <= '9') {
            C = key - '0';
        } else if (key >= 'A' && key <= 'F') {
            C = key - 'A' + 10;
        } else if (key == '*') {
            // Special case for '*' key
            Serial.println("Key pressed: *");
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for (int i = 0; i < 32; i++) {
    digitalWrite(ledPins[i], LOW); // Turn off all LEDs
}
return; // Skip the rest of the loop for '*' key
}

```

```

if (C >= 0 && C < 8) { // Validate C value
    Serial.print("Key pressed: ");
    Serial.println(C);
    const int rows = 10, cols = 8;
    int Con[rows][cols] = {0};
    int Con_2[cols] = {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1};
    for (int i = 0; i < rows; i++) {
        if (i == 0) {
            for (int j = 0; j < cols; j++) Con[i][j] = 0;
        } else if (i <= 8) {
            for (int j = 0; j < cols; j++) Con[i][j] = 0;
            Con[i][i - 1] = 1;
        } else {
            for (int j = 0; j < cols; j++) Con[i][j] = Con_2[j];
        }
    }
}

const int preSize = 4;
int Pre[preSize * 2][4] = {
    {0, 6, 7, 8},
    {0, 7, 8, 9},
    {0, 5, 7, 9},
    {0, 5, 6, 7},
};

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for (int i = 0; i < preSize; i++) {
    for (int j = 0; j < 4; j++) Pre[i + preSize][j] = Pre[i][j];
    reverseArray(Pre[i + preSize], 4);
}
Serial.print("Pre[C: ");
for (int i = 0; i < 4; i++) {
    Serial.print(Pre[C][i]);
    Serial.print(" ");
}
Serial.println();
Serial.println("Use:");
for (int i = 0; i < 4; i++) {
    for (int j = 0; j < cols; j++) {
        int ledIndex = i * cols + j;
        if (ledIndex < 32) {
            digitalWrite(ledPins[ledIndex], Con[Pre[C][i][j]]);
        }
        Serial.print(Con[Pre[C][i][j]]);
        Serial.print(" ");
    }
    Serial.println();
} else {
    Serial.println("Invalid key pressed.");
}
}
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้