



การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปย่านความถี่ S-band สำหรับระบบเรดาร์
ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม
Design of a Conformal Antenna Array for an S-band FOD Radar System

เสาวภา มีระเบียบ
SAOWAPA MEERABEAB

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปย่านความถี่ S-band สำหรับระบบเรดาร์
ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

Design of a Conformal Antenna Array for an S-band FOD Radar System

เสาวภา มีระเบียบ

SAOWAPA MEERABEAB

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Prince of Songkla University

2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปย่านความถี่ S-band สำหรับ
ระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

ผู้เขียน นางสาว เสาวภา มีระเบียบ

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....

(ดร. วสันต์ จันทโรชาติ)

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชลากร ครุพงศ์ศิริ)

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ วุ่นขุ่ม)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติศักดิ์ แพบัว)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกกิง วงศ์ศิริโชติ)

รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ดร. วสันต์ จันทโรทัย)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ วุ่นชุม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ

(นางสาว เสาวภา มีระเบียบ)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นางสาว เสาวภา มีระเปี้ยบ)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบสายอากาศแกลลุ่มลำดับแบบคงรูปย่านความถี่ S-band สำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม
ผู้เขียน	นางสาว เสาวภา มีระเปียบ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2565

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายมุ่งเน้น การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม โดยทำงานที่ความถี่ย่าน S-band (2.45 GHz) สายอากาศที่ออกแบบเป็น สายอากาศแกลลุ่มลำดับแบบคงรูป มีองค์ประกอบเป็นสายอากาศแพทช์แบบคงรูป ซึ่งให้คุณสมบัติลำคลื่นกว้าง ส่งผลให้สายอากาศแกลลุ่มลำดับแบบคงรูปนี้ มีคุณสมบัติ Constant gain คือมีค่าความแตกต่างของอัตราขยายสูงสุดมีค่าไม่เกิน 3 dB และมีแม่นยำการชี้ทิศทางสูงเมื่อปรับลำคลื่น

โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอ เป็นสายอากาศแพทช์ช่องเปิด ซึ่งประยุกต์ใช้เทคนิครูป Minkowski fractal เพื่อลดขนาดองค์ประกอบให้สามารถจัดเรียงเป็นแกลลุ่มลำดับโดยมีระยะขององค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$ เรียกแต่ละองค์ประกอบว่า Minkowski fractal Suspended conformal patch antenna หรือ MKF-SCPA จากการทดสอบสายอากาศหนึ่งองค์ประกอบให้อัตราขยาย 7.10 dBi มีขนาดของลำคลื่นในแนวระนาบ H-plane และ E-plane มีค่าเท่ากับ 90 องศา และ 62 องศาตามลำดับ เมื่อจัดเรียงเป็นแกลลุ่มลำดับแบบคงรูป มีลักษณะเป็นระนาบโค้งที่รัศมีของแกลลุ่มลำดับเท่ากับ $2.00\lambda_0$ เรียกว่า MKF-SCPA Conformal phased array มีขนาด 4X4 องค์ประกอบ จากการทดสอบต้นแบบสายอากาศให้ผลสอดคล้องกับผลการจำลอง ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 15.12 dBi สามารถปรับทิศทางของลำคลื่นในแนวระนาบมุมกวาดไปยังมุมต่างๆ โดยมีค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดเมื่อปรับลำคลื่นเท่ากับ 0.92 dB ให้คุณสมบัติ Constant gain และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางสูง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเพียง 2.22% ดังนั้นต้นแบบสายอากาศนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ตรวจจับสิ่งแปลกปลอมได้

คำสำคัญ : สายอากาศแกลลุ่มลำดับแบบคงรูป, สายอากาศแพทช์แบบคงรูป, สายอากาศแพทช์ช่องเปิด, Constant gain, เรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์, การตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

Thesis Title	Design of a Conformal Antenna Array for an S-band FOD Radar System
Author	Miss Saowapa Meerabeab
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2022

ABSTRACT

The antenna design for the Synthetic aperture radar system to detect foreign object debris in the S-band frequency (2.45 GHz) was the purpose of this research. The proposed antenna was based on a conformal antenna array consisting of conformal antenna elements, which provides wide beamwidth characteristics. Consequently, the array gives a constant gain property, with a maximum gain difference of less than 3 dB and it had high directional accuracy when switching the antenna beam.

The proposed antenna was designed as a suspended structure utilizing the Minkowski fractal loop to reduce the size of the elements. These elements could be arranged in an array with a spacing of $0.50\lambda_0$. Each element in the array is referred to as a Minkowski Fractal Suspended Conformal Patch Antenna, or MKF-SCPA. The measured results of a single element showed a gain of 7.10 dBi with a beamwidth in the H-plane and E-plane were 90 and 62 deg, respectively. The single element was arranged in a conformal phased array with a curved array radius of $2.00\lambda_0$ and a size of 4X4 elements, called the MKF-SCPA Conformal phased array. The measured results were in good agreement with the simulation. The antenna prototype provides a maximum gain of 15.12 dBi. The difference in the maximum gain when switching the beam to the desired direction was 0.92 dB, indicating a constant gain property. Furthermore, it provides high directional accuracy with a beam-pointing error of 2.22%. Therefore, the antenna prototype is appropriate for use in the synthetic aperture radar system to detect foreign object debris.

Keywords: Conformal antenna array, Conformal antenna, Suspended patch antenna, Constant gain, Synthetic aperture radar, Foreign object debris detection

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาชี้แนะ และ ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ดร. วสันต์ จันทโรชาติ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพโรจน์ วุ่นชุม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ คณดิถ เจษฎ์พัฒนานนท์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชลากร ครุพงศ์ศิริ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ แพบัว ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนเงินอุดหนุนวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนและกำลังใจงานวิจัยสำเร็จด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากการศึกษาวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชาพระคุณบิดามารดาและบูรพาจารย์ทุกท่าน ที่ได้อบรม สั่งสอนวิชาความรู้

เสาวภา มีระเบียบ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	(5)
ABSTRACT	(6)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(13)
รายการภาพประกอบ	(15)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ.....	(22)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	4
1.5 ขั้นตอนและระยะเวลาการดำเนินงาน	4
1.6 การศึกษา และแนวคิดการออกแบบ	5
1.6.1 ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม	5
1.6.2 ทำอากาศยานขนาดใหญ่	9
1.6.3 แนวคิดการออกแบบ	11
1.7 การทบทวนวรรณกรรม	17
1.7.1 The MIT IAP Radar Course: Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture (SAR) Imaging*	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

1.7.2 Design of an antenna array for a LFM-CW synthetic aperture radar prototype	19
1.7.3 76.5 GHz Millimeter-Wave Radar for Foreign Object Debris Detection on Airport Runway	22
1.7.4 Studies on conformal antenna arrays placed on cylindrical curved surfaces	30
1.7.5 Conformal Antenna Arrays Placed on Cylindrical Curved Surfaces for Radar Applications	31
1.7.6 SAR Experiments Using a Conformal Antenna Array Radar Demonstrator	33
1.7.7 สรุปการทบทวนวรรณกรรม	36
1.8 ประเด็นวิจัย.....	36
1.9 ระเบียบวิธีวิจัย	42
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	44
2.1 สายอากาศแพทช์ (Patch antenna).....	44
2.1.1 การออกแบบสายอากาศแพทช์ (Patch antenna).....	44
2.1.2 การป้อนสัญญาณ (Feeding methods).....	46
2.1.3 การโพลาไรซ์ของสายอากาศแพทช์.....	47
2.2 สายอากาศแถวลำดับ (Array antenna).....	47
2.3 สายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม (Circular antenna array).....	48
2.4 สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป (Conformal array antenna)	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 เรดาร์ (Radar).....	51
2.5.1 หลักการทำงานของเรดาร์.....	51
2.5.2 สมการเรดาร์ (Radar's range equation)	52
2.5.3 การคำนวณพื้นที่ตัดขวางเรดาร์ (Radar cross section).....	55
2.6 การคำนวณพื้นที่ครอบคลุม (Footprint coverage calculation).....	56
2.6.1 การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมในแนวระนาบมุมยก	56
2.6.2 การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมในแนวระนาบมุมกวาด	57
2.6.3 สรุป.....	58
บทที่ 3 การออกแบบ จำลอง และทดสอบสายอากาศ	59
3.1 การคำนวณ Power budget.....	59
3.1.1 การคำนวณอัตราขยายของสายอากาศ	59
3.1.1 การคำนวณกำลังงานที่ภาครับได้รับ	60
3.1.2 การคำนวณค่า Margin ของระบบ.....	61
3.2 สายอากาศ 1 องค์ประกอบ (Single element).....	62
3.2.1 การออกแบบสายอากาศ.....	62
3.2.2 การจำลองสายอากาศ	66
3.2.3 การสร้างสายอากาศแพทช์ 1 องค์ประกอบ.....	73
3.2.4 ทดสอบสายอากาศ.....	74
3.3 สายอากาศแถวลำดับ (Antenna Array)	81

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 การจำลองสายอากาศแถวลำดับ.....	81
3.3.2 การสร้างสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$).....	92
3.3.3 การทดสอบสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$).....	93
3.4 สรุป.....	98
บทที่ 4 การลดขนาดสายอากาศ.....	100
4.1 การลดขนาดสายอากาศด้วยวิธีการรูป Minkowski Fractal	100
4.2 การออกแบบสายอากาศ.....	104
4.3 การจำลองสายอากาศ.....	107
4.3.1 สายอากาศ 1 องค์ประกอบ (Single element).....	107
4.3.2 สายอากาศแถวลำดับขนาด 4X1 องค์ประกอบ	111
4.3.3 สายอากาศแถวลำดับขนาด 4X4 องค์ประกอบ	118
4.3.4 การสร้างสายอากาศ.....	129
4.4 การทดสอบสายอากาศ	133
4.4.1 สายอากาศ 1 องค์ประกอบ (Single element).....	133
4.4.2 สายอากาศแถวลำดับแบบขนาด 4x1 องค์ประกอบ	141
4.4.3 สายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA.....	153
4.4.4 สายอากาศ 4x4 MFK-SCPA Conformal phased array.....	158
4.5 สรุป.....	165
บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ	169

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 สายอากาศ 4X1 SCPA ($R = 30\text{mm}$)-Planar phased array	170
5.2 สายอากาศแถวลำดับ 4X4 MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$) Conformal phased array.....	171
5.3 ข้อเสนอแนะ	174
5.3.1 โครงสร้างของต้นแบบสายอากาศ.....	174
5.3.2 ความทนกำลังของอุปกรณ์ภายในระบบ (Power handling).....	174
5.3.3 กำลังงานสูงสุดที่ใช้ในระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมภายในอากาศยาน.....	175
5.3.4 ความละเอียดของระบบเรดาร์ ขึ้นอยู่กับขนาดลำคลื่นของสายอากาศ.....	175
บรรณานุกรม.....	177
ภาคผนวก	180
ภาคผนวก ก.....	180
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์.....	192
ข.1 บทความวิจัยเสนอในที่ประชุมวิชาการและมีการพิมพ์รวมเล่ม.....	192
ข.2 บทความวิจัยในวารสารวิชาการ.....	197
ประวัติผู้เขียน.....	210

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม	8
ตารางที่ 1.2 สรุปการทบทวนวรรณกรรม.....	39
ตารางที่ 2.1 การคำนวณพื้นที่ตัดขวางเรดาร์ ในรูปทรงต่างๆ	55
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุแผ่น Flexible PCB ชนิด FR-4.....	63
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุ Filament PLA.....	63
ตารางที่ 3.3 ขนาดโครงสร้างสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์กรประกอบ.....	66
ตารางที่ 3.4 ผลการจำลองของสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA.....	72
ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบและจำลอง ของสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA.....	81
ตารางที่ 3.6 ผลการจำลอง Directivity ของตำแหน่งมุม Peak direction	83
ตารางที่ 3.7 ผลการจำลอง Directivity ของตำแหน่งมุม Desired direction	84
ตารางที่ 3.8 ผลการจำลองของอากาศแถวลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$).....	89
ตารางที่ 3.9 ผลการจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับ SPPA และ SCPA.....	90
ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R=30\text{ mm}$)	93
ตารางที่ 3.11 ผลการทดสอบต้นแบบสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R=30\text{ mm}$)	97
ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ค่า indentation factor ต่างๆ.....	103
ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ MKF-SPPA และ MKF-SCPA.....	106
ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศขนาด 1 องค์กรประกอบ.....	111
ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับ	116
ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองของสายอากาศแถวลำดับย่อย	120
ตารางที่ 4.6 ขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA Conformal phased array	121
ตารางที่ 4.7 ผลการจำลองค่า S-parameter สายอากาศแถวลำดับย่อย	122
ตารางที่ 4.8 ผลการจำลองค่า S-parameter 4x4 MKF-SCPA Conformal phased array	124
ตารางที่ 4.9 ผลการจำลองของสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA Conformal phased array.....	128
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบของสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และ MKF-SCPA ($R=30\text{ mm}$).....	139

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบ S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับ 142	142
ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบของสายอากาศ 4x1 MKF-SPPA Planar phased array 150	150
ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบของ 4x1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array 150	150
ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบของ 4x1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array 151	151
ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบ S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับย่อย 154	154
ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบของต้นแบบสายอากาศแถวลำดับย่อย 156	156
ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบ S-parameter ของ 4x4 MFK-SCPA Conformal phased array 159	159
ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบของสายอากาศ 4x4 MKF-SCPA Conformal phased array 164	164

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม	2
ภาพประกอบที่ 1.2 ตัวอย่างการทำงานของสายอากาศในระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม	3
ภาพประกอบที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป.....	3
ภาพประกอบที่ 1.4 ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมจาก QinetiQ’s Tarsier	6
ภาพประกอบที่ 1.5 การทำงานของกล้อง.....	7
ภาพประกอบที่ 1.6 รูปแบบ Stationary system จากอากาศยาน Chicago O’Hare	7
ภาพประกอบที่ 1.7 ตัวอย่างการทำงานของ Stratech’s iFerret	7
ภาพประกอบที่ 1.8 ตัวอย่างระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมจาก Xsight’s FODetect	8
ภาพประกอบที่ 1.9 ตัวอย่างระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมของ FOD Finder	8
ภาพประกอบที่ 1.10 ขนาดของเขตพื้นที่การบิน ของอากาศยานขนาดใหญ่.....	11
ภาพประกอบที่ 1.11 สายอากาศแถวลำดับ	12
ภาพประกอบที่ 1.12 ตำแหน่งของการติดตั้งสายอากาศตามกฎ ICAO และ FAA	13
ภาพประกอบที่ 1.13 ตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศ และพื้นที่ครอบคลุมในแนวระนาบมุมยก	14
ภาพประกอบที่ 1.14 ขนาดความกว้างของการปรับลำคลื่นในแนวมุมกวาด	14
ภาพประกอบที่ 1.15 การปรับลำคลื่นของสายอากาศ	15
ภาพประกอบที่ 1.16 การปรับลำคลื่นของสายอากาศ 7 ทิศทาง	15
ภาพประกอบที่ 1.17 พื้นที่ครอบคลุมของสายอากาศ ที่ขนาดลำคลื่นของสายอากาศต่างๆ.....	16
ภาพประกอบที่ 1.18 อุปกรณ์ชุด Radar kit ประกอบด้วยวงจรร และสายอากาศ	19
ภาพประกอบที่ 1.19 ระบบเรดาร์ SAR โดยอุปกรณ์และสายอากาศเคลื่อนที่ด้วยรางเลื่อน.....	19
ภาพประกอบที่ 1.20 การทดสอบสายอากาศในระบบเรดาร์ SAR.....	19
ภาพประกอบที่ 1.21 โมเดลสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นขนาด 1x4 องค์กรประกอบ	20
ภาพประกอบที่ 1.22 ต้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นขนาด 1x4 องค์กรประกอบ	20
ภาพประกอบที่ 1.23 สายอากาศรับและส่ง ภายในระบบเรดาร์.....	21
ภาพประกอบที่ 1.24 ตำแหน่งของเป้าหมายจำนวน 4 ขึ้น	22

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 1.25 ภาพที่ถูกสร้างจาก Raw data โดยใช้อัลกอริทึม	22
ภาพประกอบที่ 1.26 สายอากาศแถวลำดับแผ่นสะท้อน	23
ภาพประกอบที่ 1.27 สายอากาศแบบสะท้อนรูปพาราโบลา.....	24
ภาพประกอบที่ 1.28 สายอากาศแถวลำดับแผ่นสะท้อน ถูกติดตั้งบนโรตเตอร์	24
ภาพประกอบที่ 1.29 พื้นที่สำหรับการทดสอบระบบเรดาร์	26
ภาพประกอบที่ 1.30 ภาพเรดาร์ โดยที่วัตถุเป้าหมายอยู่ในตำแหน่ง 20 m	26
ภาพประกอบที่ 1.31 ภาพเรดาร์ ภายหลังจากประมวลผล.....	26
ภาพประกอบที่ 1.32 พื้นที่สำหรับการทดสอบ	27
ภาพประกอบที่ 1.33 ตัวอย่างวัตถุเป้าหมาย	27
ภาพประกอบที่ 1.34 ตำแหน่งของวัตถุ.....	28
ภาพประกอบที่ 1.35 ภาพเรดาร์	28
ภาพประกอบที่ 1.36 ภาพเรดาร์.....	28
ภาพประกอบที่ 1.37 ตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่เป็นวัตถุแปลกปลอมจากอากาศยาน	29
ภาพประกอบที่ 1.38 ภาพเรดาร์ โดยวัตถุเป้าหมายเป็นวัตถุแปลกปลอมของอากาศยาน.....	29
ภาพประกอบที่ 1.39 การจำลองสายอากาศแถวลำดับขนาด 8 องค์ประกอบ	30
ภาพประกอบที่ 1.40 โมเดลสายอากาศแถวลำดับแบบคกรูปมีขนาด 8X96 องค์ประกอบ.....	32
ภาพประกอบที่ 1.41 โมเดลสายอากาศแถวลำดับขนาด 1 องค์ประกอบในโปรแกรมจำลอง.....	32
ภาพประกอบที่ 1.42 ผลการจำลองรูปแบบการแผ่พลังงาน	33
ภาพประกอบที่ 1.43 ต้นแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคกรูปขนาด 24 องค์ประกอบ	33
ภาพประกอบที่ 1.44 ผลการจำลองและทดสอบของรูปแบบการแผ่พลังงาน	33
ภาพประกอบที่ 1.45 แถวลำดับย่อยหนึ่งแถว	34
ภาพประกอบที่ 1.46 สายอากาศแถวลำดับแบบคกรูป	34
ภาพประกอบที่ 1.47 สายอากาศแถวลำดับแบบคกรูปถูกติดตั้งบนยานพาหนะ	35
ภาพประกอบที่ 1.48 วิธีและแนวทางการวิจัย	43

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 2.1 โครงสร้างสายอากาศแพทช์.....	44
ภาพประกอบที่ 2.2 ระยะความกว้างและความยาวของแผ่นตัวนำ หรือแพทช์ชนิดสี่เหลี่ยม.....	45
ภาพประกอบที่ 2.3 ด้านข้างของสายอากาศแพทช์.....	45
ภาพประกอบที่ 2.4 การป้อนสัญญาณของสายอากาศชนิดแพทช์.....	47
ภาพประกอบที่ 2.5 สายอากาศแถวลำดับแนววงกลม จำนวน N องค์ประกอบ.....	48
ภาพประกอบที่ 2.6 รูปแบบการแผ่กำลังในรูป 3 มิติของตัวประกอบประกอบแถวลำดับ.....	50
ภาพประกอบที่ 2.7 ระบบเรดาร์.....	51
ภาพประกอบที่ 2.8 การคำนวณระยะเอียงและพื้นที่ครอบคลุมของสายอากาศ.....	57
ภาพประกอบที่ 2.9 พื้นที่ครอบคลุมในแนวระนาบมุมกวาด.....	58
ภาพประกอบที่ 3.1 การคำนวณ Radar's range.....	59
ภาพประกอบที่ 3.2 การคำนวณ Power budget.....	61
ภาพประกอบที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศแพทช์.....	64
ภาพประกอบที่ 3.4 สายอากาศแพทช์ SPPA.....	65
ภาพประกอบที่ 3.5 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ SCPA.....	65
ภาพประกอบที่ 3.6 โมเดลสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์ประกอบในโปรแกรมจำลอง.....	66
ภาพประกอบที่ 3.7 โมเดลสายอากาศแพทช์และ Support ในโปรแกรมจำลอง.....	67
ภาพประกอบที่ 3.8 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SPPA.....	69
ภาพประกอบที่ 3.9 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SCPA ($R=60\text{mm}$).....	69
ภาพประกอบที่ 3.10 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SCPA ($R=45\text{mm}$).....	70
ภาพประกอบที่ 3.11 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SCPA ($R=30\text{mm}$).....	70
ภาพประกอบที่ 3.12 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA.....	71
ภาพประกอบที่ 3.13 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA.....	73
ภาพประกอบที่ 3.14 ต้นแบบสายอากาศแพทช์.....	74
ภาพประกอบที่ 3.15 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA.....	75

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบ Two antenna method	76
ภาพประกอบที่ 3.17 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SPPA.....	78
ภาพประกอบที่ 3.18 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SCPA ($R=60\text{mm}$).....	79
ภาพประกอบที่ 3.19 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SCPA ($R=45\text{mm}$).....	79
ภาพประกอบที่ 3.20 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SCPA ($R=30\text{mm}$).....	80
ภาพประกอบที่ 3.21 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA	80
ภาพประกอบที่ 3.22 โมเดลสายอากาศแถวลำดับ ในโปรแกรมจำลอง	82
ภาพประกอบที่ 3.23 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับ	88
ภาพประกอบที่ 3.24 ผลการจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับ	92
ภาพประกอบที่ 3.25 ต้นแบบสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R=30\text{ mm}$)	92
ภาพประกอบที่ 3.26 การทดสอบวัดค่า S-Parameter ของต้นแบบสายอากาศ.....	94
ภาพประกอบที่ 3.27 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R=30\text{mm}$) .	94
ภาพประกอบที่ 3.28 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยาย	95
ภาพประกอบที่ 3.29 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของแถวลำดับ SCPA ($R=30\text{mm}$).....	97
ภาพประกอบที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างรูป Minkowski Fractal	101
ภาพประกอบที่ 4.2 ร่องของ Minkowski Fractal	101
ภาพประกอบที่ 4.3 โครงสร้างสายอากาศ 1 st Iteration Minkowski Fractal.....	102
ภาพประกอบที่ 4.4 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ Minkowski Fractal	103
ภาพประกอบที่ 4.5 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน ที่ค่า Indentation factor ต่างๆ	103
ภาพประกอบที่ 4.6 โครงสร้างสายอากาศ MKF-SPPA	105
ภาพประกอบที่ 4.7 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ SCPA.....	106
ภาพประกอบที่ 4.8 โมเดลสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องศาประกอบในโปรแกรมจำลอง.....	107
ภาพประกอบที่ 4.9 โมเดลสายอากาศแพทช์และ Support ในโปรแกรมจำลอง	108
ภาพประกอบที่ 4.10 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ขนาด	109

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 4.11 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์.....	110
ภาพประกอบที่ 4.12 ผลการจำลองของสายอากาศแพทช์ 1 องค์ประกอบก่อนและหลังลดขนาด.....	110
ภาพประกอบที่ 4.13 โมเดลสายอากาศ Planar phased array	112
ภาพประกอบที่ 4.14 โมเดลสายอากาศ Conformal phased array	112
ภาพประกอบที่ 4.15 ผลจำลองแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับ.....	118
ภาพประกอบที่ 4.16 โมเดลสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$)	119
ภาพประกอบที่ 4.17 โมเดลสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$) Conformal phased array.	120
ภาพประกอบที่ 4.18 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA.....	121
ภาพประกอบที่ 4.19 ผลการจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับย่อย.....	123
ภาพประกอบที่ 4.20 โมเดลสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA Conformal phased array	124
ภาพประกอบที่ 4.21 ผลการจำลองค่า S-parameter	126
ภาพประกอบที่ 4.22 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับย่อย.....	127
ภาพประกอบที่ 4.23 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ.....	129
ภาพประกอบที่ 4.24 ต้นแบบสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์ประกอบ.....	130
ภาพประกอบที่ 4.25 ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SPPA Planar phased array.....	130
ภาพประกอบที่ 4.26 ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$) Planar array	131
ภาพประกอบที่ 4.27 ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$) Conformal array.....	131
ภาพประกอบที่ 4.28 ต้นแบบสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA	132
ภาพประกอบที่ 4.29 ต้นแบบสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R=30\text{ mm}$) Conformal array	133
ภาพประกอบที่ 4.30 การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA	134
ภาพประกอบที่ 4.31 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA.....	135
ภาพประกอบที่ 4.32 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA	135
ภาพประกอบที่ 4.33 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA	136
ภาพประกอบที่ 4.34 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพทช์.....	136

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 4.35 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ	137
ภาพประกอบที่ 4.36 การทดสอบวัดอัตราขยายของสายอากาศ.....	138
ภาพประกอบที่ 4.37 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA	140
ภาพประกอบที่ 4.38 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศ MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$).....	140
ภาพประกอบที่ 4.39 ผลการทดสอบสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และ MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$) ...	141
ภาพประกอบที่ 4.40 การทดสอบวัดค่า S-parameter ของ 4x1 MKF-SPPA planar array	143
ภาพประกอบที่ 4.41 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของ 4x1 MKF-SPPA planar array.....	143
ภาพประกอบที่ 4.42 การทดสอบวัดค่า S-parameter ของ 4x1 MKF-SCPA planar array.....	144
ภาพประกอบที่ 4.43 ผลการทดสอบค่า S-parameter สายอากาศ 4x1 MKF-SCPA planar array..	144
ภาพประกอบที่ 4.44 การทดสอบ S-parameter สายอากาศ 4X1 MKF-SCPA conformal array...	145
ภาพประกอบที่ 4.45 ผลการทดสอบ S-parameter 4X1 MKF-SCPA conformal array.....	145
ภาพประกอบที่ 4.46 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ Planar array.....	146
ภาพประกอบที่ 4.47 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ Conformal array	147
ภาพประกอบที่ 4.48 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน 4x1 MKF-SPPA planar array.....	151
ภาพประกอบที่ 4.49 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน 4X1 MKF-SCPA planar array.....	152
ภาพประกอบที่ 4.50 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน 4X1 MKF-SCPA Conformal array	152
ภาพประกอบที่ 4.51 การทดสอบวัดค่า S-Parameter ของสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA....	153
ภาพประกอบที่ 4.52 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA ...	154
ภาพประกอบที่ 4.53 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของแถวลำดับย่อยและ Power combiner ..	155
ภาพประกอบที่ 4.54 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับย่อย	157
ภาพประกอบที่ 4.55 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับย่อย	157
ภาพประกอบที่ 4.56 การทดสอบวัดค่า S-Parameter ของ 4x4 MFK-SCPA Conformal array	159
ภาพประกอบที่ 4.57 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของ 4x4 MFK-SCPA Conformal array....	160
ภาพประกอบที่ 4.58 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแนวระนาบ H-plane.....	161

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ภาพประกอบที่ 4.59 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแนวระนาบ E-plane	162
ภาพประกอบที่ 4.60 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน 4x4 MKF-SCPA conformal array	165

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ICAO	International Civil Aviation Organization
FAA	Federal Aviation Administration
FOD	Foreign Object Debris
RCS	Radar Cross Section
SAR	Synthetic Aperture Radar
SPPA	Suspended planar patch antenna
SCPA	Suspended conformal patch antenna
MKF-SPPA	Minkowski Fractal Suspended planar patch antenna
MKF-SCPA	Minkowski Fractal Suspended conformal patch antenna

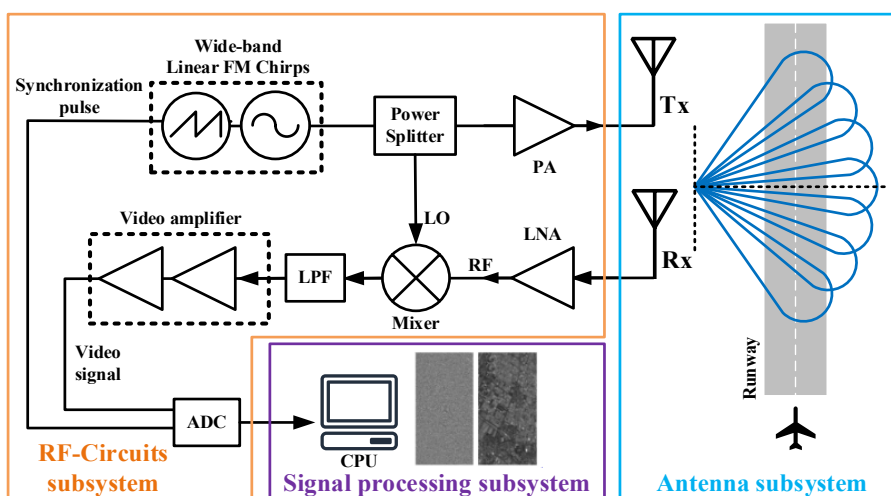
บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบขนส่งทางอากาศเป็นการขนส่งที่สะดวกและรวดเร็วกว่าการขนส่งรูปแบบอื่น ๆ มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น บริการขนส่งทั้งผู้โดยสารและสินค้าทั้งภายในและระหว่างประเทศ ซึ่งการขนส่งทางอากาศต้องใช้จ่ายค่าเชื้อเพลิงสูงและมีอุปสรรคทางด้านดินฟ้าอากาศ ดังนั้นระบบการขนส่งทางอากาศจะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายในเขตการบินที่มีความจำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบวัตถุแปลกปลอมหรือ FOD (Foreign Object Debris) เช่น กรวด, หิน, ทราบ, ชิ้นส่วนโลหะ, เครื่องมืออุปกรณ์ช่าง และ รวมไปถึงสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่ออากาศยานขณะปฏิบัติการภายในเขตการบินและก่อให้เกิดความเสียหายร้ายแรงได้ ดังนั้นจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับวัตถุแปลกปลอม เทคโนโลยีที่นำมาประยุกต์ในระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบเรดาร์ย่าน Millimeter wave (Millimeter wave radar), ระบบ Electro-optical และระบบ Hybrid (Radar sensor ทำงานร่วมกับ Electro-optical sensor) จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ประยุกต์ใช้งานระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ (Synthetic Aperture Radar, SAR) ภาคพื้นดินสำหรับตรวจจับวัตถุแปลกปลอมในพื้นที่เขตการบิน

เรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ หรือ Synthetic Aperture Radar มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเรดาร์ คืออาศัยการสะท้อนกลับของคลื่น เมื่อภาคส่งทำการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระทบกับวัตถุเป้าหมาย ส่วนภาครับทำการรับคลื่นที่สะท้อนกลับมาไปการประมวลผลภาพ ซึ่งในระบบ SAR อาศัยการเคลื่อนที่ของสายอากาศสามารถสังเคราะห์พื้นที่ Aperture ให้ขนาดใหญ่ได้ ส่งผลให้ภาพที่ได้จากการประมวลเป็นภาพสองมิติที่มีความละเอียดสูง โดยทั่วไปสายอากาศจะถูกติดตั้งแพลตฟอร์มที่มีการเคลื่อนที่ เช่น เครื่องบิน, เครื่องบินไร้คนขับ, โดรน และดาวเทียม เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้แพลตฟอร์มที่จะเคลื่อนที่เป็นลำคลื่นของสายอากาศแทนการให้อุปกรณ์ภายในระบบเรดาร์ SAR เคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ดีทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน รวมถึงการทำงานได้ในทุกสภาพอากาศ ระบบเรดาร์ SAR ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ สายอากาศรับและส่งคลื่น (Antenna subsystem), วงจรคลื่นวิทยุ (RF circuits subsystem) และ การประมวลผล (Signal processing subsystem) ดังแสดงภาพประกอบที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

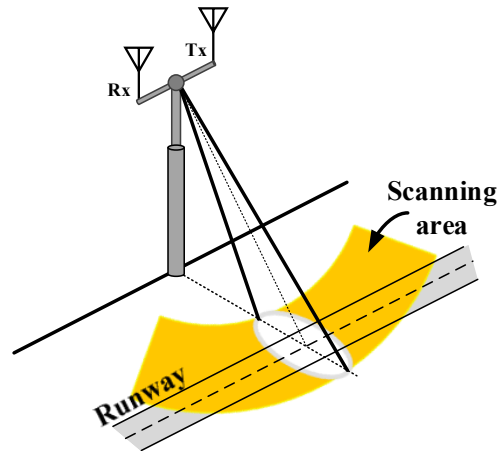
งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการพัฒนาภาครับและส่งสัญญาณของระบบตรวจจับวัตถุ แปลกปลอม โดยมุ่งเน้นการออกแบบและสร้างสายอากาศ เป็นสายอากาศแฉลล่ำดบแบบคงรูป (Conformal antenna array) ที่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่เป็นสายอากาศแบบคงรูป (Conformal antenna) ซึ่งให้คุณสมบัติขนาดความกว้างลำคลื่นกว้าง สามารถปรับลำคลื่นทางไฟฟ้าด้วยวงจรเลื่อนเฟส (Phase shifter circuits) และทำงานบนย่านความถี่ S-Band (2.45 GHz) กำหนดให้ขนาดของวัตถุที่สามารถตรวจจับได้มีขนาดมากกว่า 12.24 cm จากการคำนวณเทียบกับขนาดของความยาวคลื่น แสดงการทำงานของสายอากาศซึ่งเป็นสายอากาศรับและส่งถูกติดตั้งบนหอคอย หรือบนโครงสร้างที่ไม่มีการเคลื่อนดงภาพประกอบที่ 1.2 และบล็อกไดอะแกรมของสายอากาศแฉลล่ำดบแบบคงรูปถูกปรับลำคลื่นด้วยวงจรเลื่อนเฟสดงภาพประกอบที่ 1.3



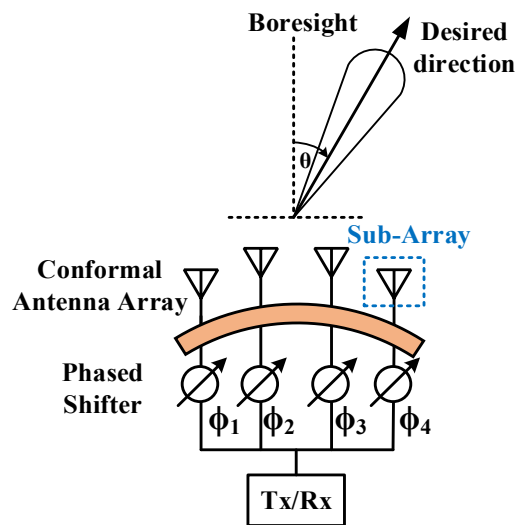
ภาพประกอบที่ 1.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อออกแบบสายอากาศ สำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมทำงานย่านความถี่ S-band (2.45 GHz)
- 2) เพื่อศึกษา ออกแบบ สร้าง และทดสอบสายอากาศแฉลล่ำดบแบบคงรูป ให้คุณสมบัติ Constant gain และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางสูง
- 3) เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบสายอากาศลำดบแฉลล่ำดบแบบคงรูปที่สามารถนำไปต่อยอดใช้งานกับท่าอากาศยาน และสามารถทำงานได้ภายใต้กฎระเบียบและข้อบังคับของท่าอากาศยาน



ภาพประกอบที่ 1.2 ตัวอย่างการทำงานของสายอากาศในระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม



ภาพประกอบที่ 1.3 บล็อกไดอะแกรมสายอากาศแนวลำดับแบบคงรูป ปรับลำคลื่นด้วยวงจรเลื่อนเฟส

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) องค์ความรู้ของการศึกษาระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์
- 2) สามารถวิเคราะห์สายอากาศแนวลำดับแบบคงรูป ที่ออกแบบ
- 3) สามารถนำต้นแบบสายอากาศแนวลำดับแบบคงรูป ใช้งานร่วมกับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

1.6 การศึกษา และแนวคิดการออกแบบ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุ แปลกปลอม สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับท่าอากาศยานขนาดใหญ่ ผู้วิจัยศึกษาและสืบค้นข้อมูล เกี่ยวกับ ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมภายในเขตพื้นที่การบินที่ใช้งานในปัจจุบัน และข้อมูลทั่วไปของ ท่าอากาศยานขนาดใหญ่ เพื่อให้ได้แนวคิดสำหรับการออกแบบสายอากาศ

1.6.1 ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

ปัจจุบันมีการใช้งานระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมด้วยกัน 4 ระบบ [1], [2] ได้แก่

- 1) ระบบ Human observation หรือ Human eyes คือระบบที่ใช้สายตาของมนุษย์ในการตรวจจับ และการใช้วิจารณญาณของมนุษย์ในการตัดสินใจ พิจารณาถึงสิ่งที่อาจเกิดอันตรายร้ายแรงต่อ เครื่องบิน อากาศยาน รวมไปถึงบุคลากรภายในอากาศยาน โดยการทำงานจำเป็นต้องจัดตารางเวลา สำหรับการตรวจหาวัตถุแปลกปลอม ไม่สามารถเฝ้าระวัง หรือตรวจจับวัตถุแปลกปลอมได้ตลอดเวลา และอัตโนมัติ
- 2) ระบบเรดาร์ คือระบบที่ใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการตรวจวัตถุแปลกปลอม ซึ่งมีข้อจำกัดในกรณีที่ คลื่นที่สะท้อนกลับจากวัตถุเป้าหมาย และคลื่นที่สะท้อนกลับจากพื้นผิว สะท้อนกลับพร้อมกัน ทำให้ ยากต่อการแยกแยะระหว่างวัตถุเป้าหมายและพื้นผิว แต่อย่างไรก็ตามระบบเรดาร์สามารถทำงานได้ ทุกช่วงเวลาทั้งกลางวันและกลางคืน ทุกสภาพอากาศเช่น ฝน, หมอก, หิมะ และพายุ ซึ่งระบบเรดาร์ มีแพลตฟอร์มการทำงาน 2 รูปแบบ ได้แก่ 1. Stationary system คือการติดตั้งเซนเซอร์บนหอคอย หรือบนโครงสร้างที่ไม่มีการเคลื่อนไหว และ 2. Mobile system คือการติดตั้งเซนเซอร์บนหลังคา ยานพาหนะ
- 3) ระบบ Electro-Optical คือระบบที่ใช้เซนเซอร์ Electro-optical คลื่นย่านความถี่ที่อยู่นอกเหนือ คลื่นวิทยุ ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีวิดีโอ และการประมวลผลภาพ ในการตรวจจับวัตถุแปลกปลอม แต่ อย่างไรก็ตามระบบนี้มีข้อจำกัด กรณีสีของวัตถุและการสะท้อนแสงของวัตถุไปสัมพันธ์กับพื้นหลัง ทำ ให้ยากต่อแยกแยะวัตถุแปลกปลอมและพื้นหลัง นอกจากนี้ระบบจะสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อมีแสง เป็นความยากและท้าทายที่จะทำให้ระบบนี้สามารถทำงานภายใต้สภาพที่ไม่มีแสง โดยระบบ Electro-Optical มีรูปแบบการทำงานแพลตฟอร์มเดียว คือ Stationary system

- 4) ระบบ Hybrid คือระบบที่ใช้งานเซนเซอร์เรดาร์ และเซนเซอร์ Electro-optical ร่วมกันในการตรวจจับวัตถุแปลกปลอม สำหรับระบบนี้มีความยาก คือความสามารถในการรวมเซนเซอร์ทั้งสองให้สามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีระบบนี้มีเพียงรูปแบบเดียวเป็น Stationary system

การเลือกใช้งานระบบการตรวจจับวัตถุแปลกปลอมแต่ละรูปแบบนั้น ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม ลักษณะทางกายภาพ รวมไปถึงต้นทุนของอากาศยาน ซึ่งระบบการตรวจจับด้วยเทคโนโลยีต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น ระบบเรดาร์, ระบบ Electro-optical และระบบ Hybrid มีค่าใช้จ่ายการลงทุนที่ค่อนข้างสูง

ปัจจุบันมีบริษัทที่ทำระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมในเชิงพาณิชย์มี 4 บริษัท [2], [3] ได้แก่

- 1) QinetiQ's Tarsier เป็นระบบเรดาร์ย่าน Millimeter Wave มีรูปแบบเป็น Stationary system ดังภาพประกอบที่ 1.4 ก) และ ภาพประกอบที่ 1.4 ข) อุปกรณ์เซนเซอร์ติดตั้งบนหอคอยของอากาศยาน London Heathrow (UK) และอากาศยาน Vancouver International (Canada) ตามลำดับ



ก) อากาศยาน London Heathrow



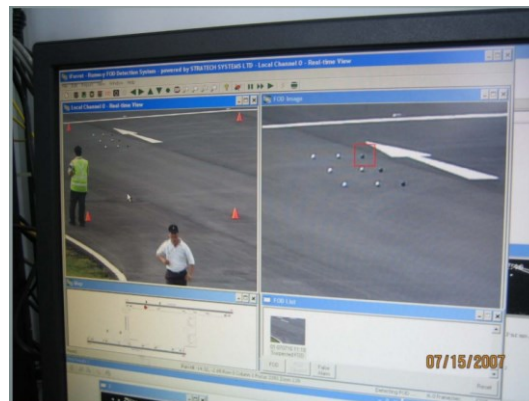
ข) อากาศยาน Vancouver International

ภาพประกอบที่ 1.4 ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมจาก QinetiQ's Tarsier [3]

- 2) Stratech's iFerret เป็นระบบ Electro-Optical มีกล้องความละเอียดสูงดังภาพประกอบที่ 1.5 สำหรับตรวจจับวัตถุแปลกปลอม ทำงานในรูปแบบ Stationary system ดังภาพประกอบที่ 1.6 และแสดงตัวอย่างการทำงานดังภาพประกอบที่ 1.7



ก) กล้องความละเอียดสูง

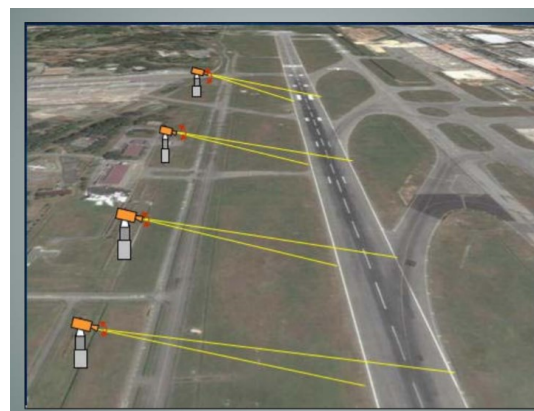


ข) ตัวอย่างจอแสดงผล

ภาพประกอบที่ 1.5 การทำงานของกล้อง [3]



ภาพประกอบที่ 1.6 รูปแบบ Stationary system
จากอากาศยาน Chicago O'Hare [3]



ภาพประกอบที่ 1.7 ตัวอย่างการทำงานของ
Stratech's iFerret [3]

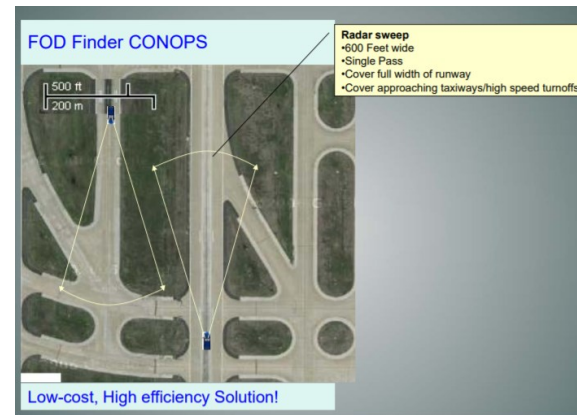
- 3) Xsight's FODetect เป็นระบบ Hybrid มีการใช้งานเรดาร์ย่าน Millimeter Wave และเซนเซอร์ Electro-Optical สำหรับตรวจจับวัตถุแปลกปลอม เป็นรูปแบบ Stationary system อุปกรณ์ถูกติดตั้งบนขอบของไฟทางวิ่ง หรือติดตั้งบริเวณใกล้กับขอบทางวิ่ง แสดงตัวอย่างตำแหน่งของเซนเซอร์ ดังภาพประกอบที่ 1.8ก) และภาพประกอบที่ 1.8ข) แสดงตัวอย่างเซนเซอร์ SDUs (Surface Detection Units) จากอากาศยาน Boston Logan (BOS)
- 4) FOD Finder เป็นระบบเรดาร์ย่าน Millimeter Wave ทำงานร่วมกับกล้องอินฟราเรด เป็นรูปแบบ Mobile system เซนเซอร์ถูกติดตั้งบนหลังคาของยานพาหนะ เพื่อตรวจจับวัตถุแปลกปลอมบนผิวของทางวิ่ง ดังภาพประกอบที่ 1.9



ก) ตำแหน่งเซนเซอร์ SDUs

ข) เซนเซอร์ SDUs ของ

ภาพประกอบที่ 1.8 ตัวอย่างระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมจาก Xsight's FODetect [3]



ก) เซนเซอร์ติดตั้งบนยานพาหนะ

ข) ตัวอย่างทำงานของ Mobile system

ภาพประกอบที่ 1.9 ตัวอย่างระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมของ FOD Finder [3]

สามารถสรุปเทคโนโลยีของระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมที่ใช้ในงานในปัจจุบันแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

ระบบ	วิธีการตรวจจับ	การทำงานของระบบ
Human observation	ใช้สายตาของมนุษย์ในการตรวจจับวัตถุแปลกปลอม และพิจารณาณฐานประเมินถึงสิ่งที่สามารถก่ออันตราย	ไม่สามารถทำงานหรือเฝ้าระวังได้ตลอดเวลา มีการจัดตารางเวลาการทำงาน
Radar	ใช้คลื่นในการตรวจจับวัตถุแปลกปลอม	มี 2 แพลตฟอร์ม คือ

ระบบ	วิธีการตรวจจับ	การทำงานของระบบ
		1. Stationary system สามารถทำงานและเฝ้าระวังได้ตลอดเวลา 2. Mobile system ใช้สายตามนุษย์ และเซนเซอร์ในการตรวจจับซึ่งมีการกำหนดตารางเวลา
Electro-optical	ใช้เทคโนโลยีวิดีโอ และการประมวลผลภาพ	Stationary system สามารถทำงานและเฝ้าระวังได้ตลอดเวลา
Hybrid	ใช้งานระบบเรดาร์ ร่วมกับElectro-optical	Stationary system สามารถทำงานและเฝ้าระวังได้ตลอดเวลา

จากการศึกษาเกี่ยวกับระบบและเทคโนโลยีการตรวจจับที่ใช้งานในปัจจุบันนั้น ระบบส่วนใหญ่ทำงานแพลตฟอร์ม Stationary system และทำงานร่วมกับกล้อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานมากขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกออกแบบระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมเป็นระบบเรดาร์ที่ใช้คลื่นวิทยุตรวจจับวัตถุแปลกปลอมเป็นแพลตฟอร์ม Stationary system ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมบน Tower หรือโครงสร้าง Support ที่ไม่มีการเคลื่อนที่

1.6.2 ท่าอากาศยานหาดใหญ่

การออกแบบสายอากาศ สำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมที่นำไปประยุกต์ใช้งานกับท่าอากาศยานหาดใหญ่ ก่อนออกแบบสายอากาศนั้นต้องทราบข้อมูลทั่วไปของอากาศยาน รวมไปถึงกฎระเบียบข้อบังคับต่างๆของอากาศยาน ในหัวข้อนี้กล่าวถึงข้อมูลทั่วไปของท่าอากาศยานหาดใหญ่ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมของท่าอากาศยานหาดใหญ่ และกฎระเบียบ ข้อบังคับตามมาตรฐานการบิน

1.6.2.1 ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมของท่าอากาศยานขนาดใหญ่

ท่าอากาศยานขนาดใหญ่ใช้การตรวจสอบหาวัตถุแปลกปลอม ด้วยวิธีการ Human observation ใช้สายตามองหาวัตถุแปลกปลอมจากหอบังคับการบิน นอกจากนี้ใช้งานรถตรวจขับภายในเขตการบิน และใช้สายตามองหาวัตถุแปลกปลอม โดยจัดตารางงานเป็นวงรอบ

ภายในท่าอากาศยานขนาดใหญ่ไม่มีเทคโนโลยีการตรวจจับวัตถุแปลกปลอมอัตโนมัติ เช่น ระบบเรดาร์, ระบบ Electro-optical เนื่องจากต้องใช้งบประมาณในการลงทุนที่สูง ค่าใช้จ่ายในการอบรมบุคลากรสำหรับวิธีการใช้งาน รวมถึงการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ต่างๆ ระหว่างการใช้งาน

ลักษณะทางกายภาพของท่าอากาศยานขนาดใหญ่ แสดงดังภาคผนวก Error! Reference source not found. มีทางวิ่ง หนึ่งเส้นทางวิ่ง สำหรับการบินลง (Landing) และบินขึ้น (Takeoff) มีขนาดความกว้างเท่ากับ 45 m และความยาวเท่ากับ 3,050 m

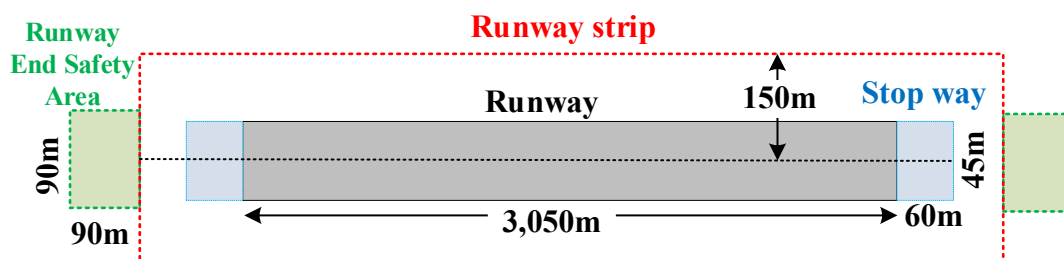
วัตถุแปลกปลอมที่ถูกพบเจอภายในเขตการบินของท่าอากาศยานขนาดใหญ่ได้แก่ ก้อนหิน, ถุงพลาสติก, โคมไฟจากงานเทศกาล, สติกเกอร์ Tracking กระเป่า, เศษดินจากล้อรถตรวจวัตถุแปลกปลอม และสิ่งมีชีวิตอาทิ นกประจำถิ่น และงู เป็นต้น วัตถุแปลกปลอมทั้งวัสดุอ่อนและแข็งทุกขนาด และทุกรูปร่าง รวมไปถึงสิ่งมีชีวิต สามารถสร้างความเสียหายแก่อากาศยานได้ เมื่อกระทบกับใบพัดและชิ้นส่วนอื่นๆของเครื่องยนต์ [4]

1.6.2.2 กฎระเบียบข้อบังคับตามมาตรฐานการบิน

การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมบนเขตพื้นที่การบินนั้น ต้องอยู่ภายใต้กฎข้อบังคับของอากาศยานถึงพื้นที่ที่สามารถติดตั้งระบบได้ โดยไม่ก่อความเสียหายและรบกวนการทำงานของอากาศยาน ดังนี้

กฎข้อบังคับมาตรฐานการบินตาม ICAO ภาคผนวกที่ 14 (Annex -14) ว่าด้วยเรื่องอากาศยาน จากหมวดที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของอากาศยาน ส่วนที่ 4, 5, 6 และ 7 กล่าวถึงพื้นที่ทางวิ่ง (Runway area), พื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่ง (Runway strip area), พื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่ง (Runway end safety area), พื้นที่ปลอดภัยกีดขวาง (Clearways) และทางหยุด (Stepways) ตามลำดับพื้นที่ดังกล่าวจะไม่มีสิ่งกีดขวาง หรือ อุปกรณ์ที่ไม่ได้ถูกจำกัดความว่าเป็นเครื่องนำร่อง, อุปกรณ์นำร่อง

อุปกรณ์เครื่องบินอากาศยาน, วัสดุแตกหักง่าย และไม่ใช่วัตถุติดตรึงใดๆ จะไม่สามารถอยู่ในบริเวณพื้นที่ดังกล่าวได้ แสดงขนาดพื้นที่ต่างๆ ของอากาศยานขนาดใหญ่ ดังภาพประกอบที่ 1.10



ภาพประกอบที่ 1.10 ขนาดของเขตพื้นที่การบิน ของอากาศยานขนาดใหญ่

กฎข้อบังคับตาม FAA title-14 part 77.9 (e) กล่าวถึง โครงสร้างสายอากาศต้องมีความสูงไม่เกิน 6m หรือหากมีความสูงเกิน 6m ต้องมีการแจ้งเตือนกับหน่วยงาน FAA แสดงดังภาคผนวก ก หัวข้อ 1.2 ดังนั้นจากข้อกำหนดข้างต้น ตำแหน่งของการติดตั้งสายอากาศต้องไม่อยู่ในเขตพื้นที่ดังกล่าว และไม่มี ความสูงของสายอากาศไม่เกิน 6m

ท่าอากาศยานขนาดใหญ่ใช้วิธีการ Human observation ในการตรวจจับวัตถุแปลกปลอม ซึ่งไม่มีเทคโนโลยีในการตรวจจับวัตถุแปลกปลอมอัตโนมัติ ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกออกแบบเป็นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมแพลตฟอร์มแบบ Stationary system โดยตำแหน่งการติดตั้ง รวมถึงความสูงของสายอากาศต้องเป็นไปตามกฎระเบียบของมาตรฐานการบิน ICAO ANNEX 14 และ FAA title 14 part 77.9 (e)

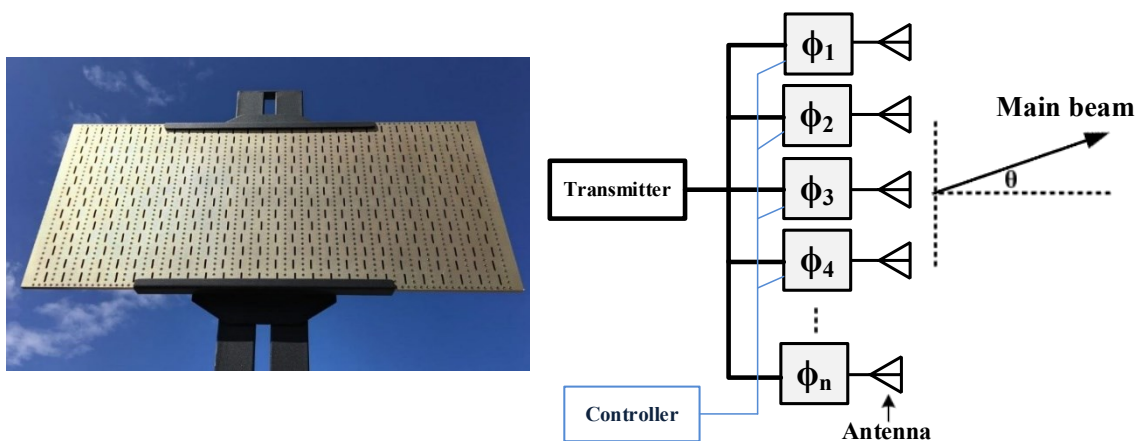
1.6.3 แนวคิดการออกแบบ

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงแนวคิดการออกแบบสายอากาศ สำหรับใช้ในระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมภายในเขตพื้นที่การบิน ประกอบด้วย 4 หัวข้อ ได้แก่ สายอากาศ, ตำแหน่งสายอากาศ, การปรับลำคลื่นของสายอากาศ และขนาดของพื้นที่ครอบคลุม

1.6.3.1 สายอากาศ

งานวิจัยนี้เลือกออกแบบเป็นแบบระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมแพลตฟอร์มระบบที่อยู่นิ่ง (Stationary system) ติดตั้งสายอากาศและอุปกรณ์บนหอคอยหรือโครงสร้าง Support ที่ไม่มีการเคลื่อนที่ โดยใช้วิธีการสแกนพื้นที่เป้าหมาย โดยการปรับลำคลื่นของสายอากาศ

สายอากาศแถวลำดับแบบปรับเฟส (Phase array antenna) สายอากาศชนิดนี้สามารถปรับรูปร่างและทิศทางของลำคลื่นได้ โดยที่สายอากาศไม่มีการเคลื่อนที่ ผ่านการควบคุมการป้อนกระแสและเฟสให้กับสายอากาศ ดังภาพประกอบที่ 1.11ก) ตัวอย่างสายอากาศแถวลำดับแบบปรับเฟส และภาพประกอบที่ 1.11ข) ตัวอย่างบล็อกไดอะแกรมของสายอากาศแถวลำดับแบบปรับเฟส มีพารามิเตอร์ดังนี้ θ คือทิศทางของลำคลื่นถูกควบคุมผ่านการป้อนกระแสและเฟส, ϕ คือเฟสที่ป้อนให้แก่แต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ



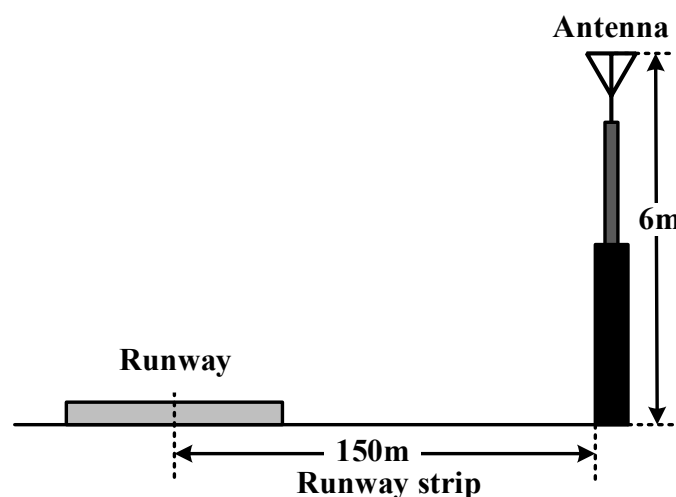
ก) สายอากาศแถวลำดับแบบปรับเฟส [5] ข) การทำงานของสายอากาศแถวลำดับแบบปรับเฟส
ภาพประกอบที่ 1.11 สายอากาศแถวลำดับ

งานวิจัยนี้เลือกออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบปรับเฟส ที่สามารถปรับลำคลื่นทางไฟฟ้าได้ ซึ่งตรงกับความต้องการของระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมในรูปแบบระบบที่อยู่นิ่งที่ตัวระบบและอุปกรณ์จะไม่มีการเคลื่อนที่

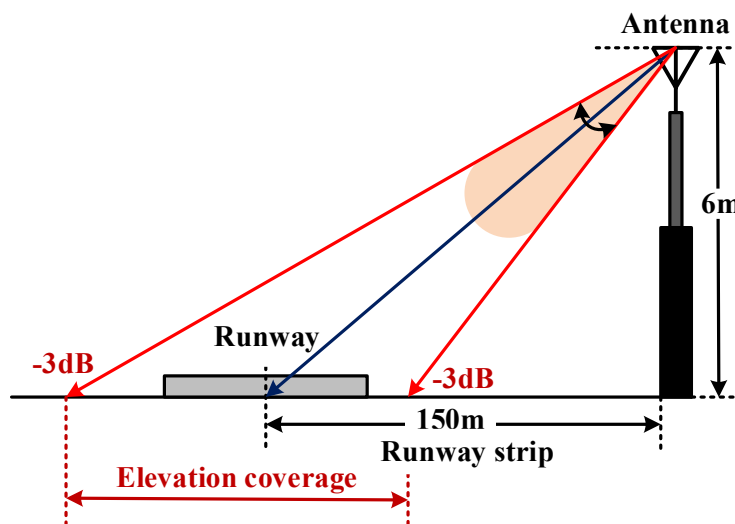
1.6.3.2 ตำแหน่งของการติดตั้งสายอากาศ

การกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสายอากาศ จากข้อกำหนด ICAO ANNEX 14 และ FAA title 14 part 77.9 (e) ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งสายอากาศได้ ต้องอยู่นอกเขตพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่ง (Runway strip area) มีระยะตั้งแต่ 150 m จากเส้นกึ่งกลางของทางวิ่งเป็นต้นไป สามารถติดตั้งระบบและอุปกรณ์ได้ และความสูงของสายอากาศไม่เกิน 6 m ดังภาพประกอบที่ 1.12

การเลือกตำแหน่งสำหรับการติดตั้งสายอากาศ เลือกจากพื้นที่ครอบคลุมของความลำคลืน (Half-power beamwidth, HPBW) ซึ่งมีกำลังงานลดลงไม่เกินครึ่งหนึ่งของกำลังงานสูงสุด หรือไม่ต่ำกว่า 3 dB ต้องสามารถครอบคลุมพื้นที่ด้านกว้างของทางวิ่ง ดังภาพประกอบที่ 1.13 ซึ่งขนาดด้านกว้างของทางวิ่งตามขนาดมาตรฐานของ ICAO ได้แก่ 30m, 45m และ 60m [7] ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนี้สามารถใช้งานได้ทั้งสามขนาด



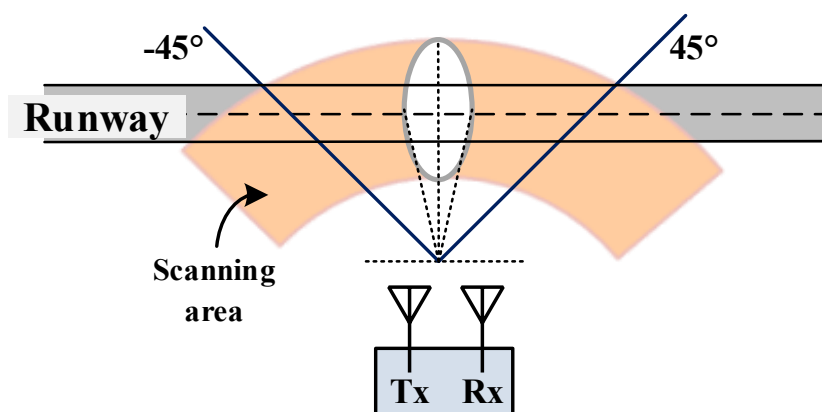
ภาพประกอบที่ 1.12 ตำแหน่งของการติดตั้งสายอากาศตามกฎ ICAO และ FAA



ภาพประกอบที่ 1.13 ตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศ และพื้นที่ครอบคลุมในแนวระนาบมุมยก

1.6.3.3 การปรับลำคลื่นของสายอากาศ

การปรับลำคลื่นของสายอากาศสำหรับสแกนพื้นที่เป้าหมาย งานวิจัยนี้มีขนาดความกว้างของพื้นที่ให้สายอากาศปรับลำคลื่นในแนวมุมกวาด (Azimuth plane) มีค่าเท่ากับ 90 องศา ตั้งแต่ -45 องศา ถึง 45 องศา ดังภาพประกอบที่ 1.14 ดังนั้นความละเอียดของวงจรถ่ายเฟส และความกว้างของลำคลื่นของสายอากาศจะต้องสัมพันธ์กัน และเหมาะกับการใช้งานภายใต้เงื่อนไขนี้

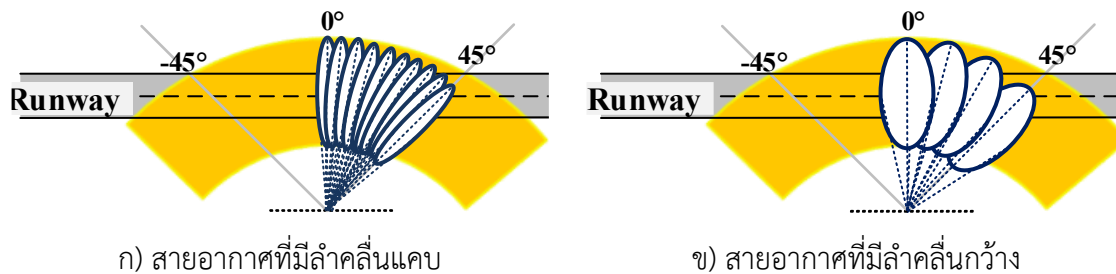


ภาพประกอบที่ 1.14 ขนาดความกว้างของการปรับลำคลื่นในแนวมุมกวาด

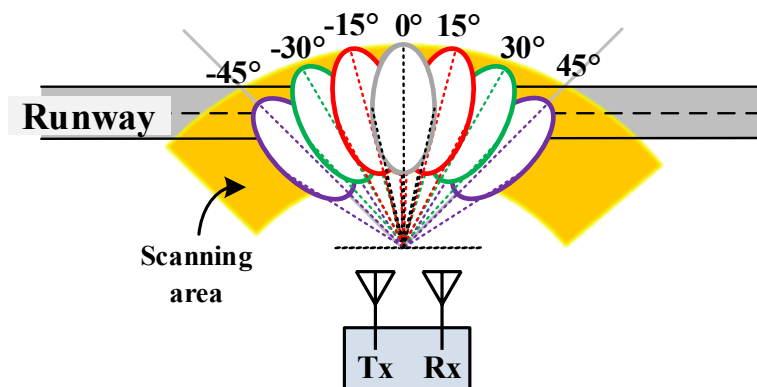
ขนาดความกว้างลำคลื่นของสายอากาศ มีผลต่อความละเอียดของวงจรถ่ายเฟส โดยขนาดของลำคลื่นที่แคบ ความละเอียดของวงจรถ่ายเฟสจะมากขึ้น เพื่อให้สามารถปรับลำคลื่นได้อย่าง

ครอบคลุม ดังภาพประกอบที่ 1.15ก) และภาพประกอบที่ 1.15ข) ตัวอย่างสายอากาศที่มีลำคลื่นแคบ และสายอากาศที่มีขนาดลำคลื่นกว้าง ตามลำดับ จะเห็นว่าสายอากาศที่มีลำคลื่นแคบต้องใช้ความละเอียดของวงจรถ่ายเฟสมากกว่าสายอากาศที่มีลำคลื่นกว้าง

เบื้องต้นสำหรับงานวิจัยนี้ ความละเอียดของวงจรถ่ายเฟสมีจำกัด คือมีความละเอียดเท่ากับ 45 องศา สามารถปรับได้ทั้งหมด 7 ระดับได้แก่ 0 องศา, ± 45 องศา, ± 90 องศา และ ± 135 องศา ซึ่งปรับลำคลื่นของสายอากาศได้ 7 ทิศทางได้แก่ 0 องศา, ± 15 องศา, ± 30 องศา และ ± 45 องศา ดังนั้นความละเอียดของการปรับลำคลื่นของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 15 องศา ดังภาพประกอบที่ 1.16



ภาพประกอบที่ 1.15 การปรับลำคลื่นของสายอากาศ



ภาพประกอบที่ 1.16 การปรับลำคลื่นของสายอากาศ 7 ทิศทาง

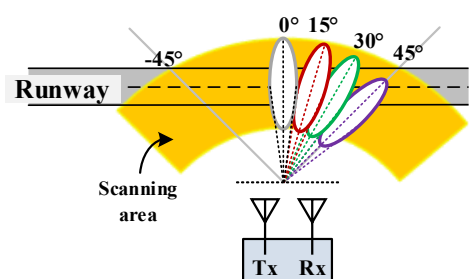
จากข้อจำกัดความละเอียดของวงจรถ่ายเฟสที่สามารถใช้งานได้ ขนาดลำคลื่นของสายอากาศที่เหมาะสมควรมีขนาดของลำคลื่นที่กว้าง และการที่ลำคลื่นกว้างนั้นทำให้พื้นที่ของการทับซ้อนกันของลำคลื่นขณะที่ปรับลำคลื่นมีพื้นที่มากขึ้น ทำให้ SNR ของสัญญาณในขณะสแกนเพื่อตรวจจับวัตถุแปลกปลอมมีมากขึ้น จะเป็นผลดีต่อการนำไปประมวลผลในภายหลัง

ส่วนถัดไปจะต้องหาขนาดลำคลื่นของสายอากาศที่น้อยที่สุด ที่สามารถใช้ในระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมบนพื้นผิวของทางวิ่ง และอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการปรับลำคลื่นของสายอากาศที่มีทั้งหมด 7 ทิศทาง (0 องศา, ± 15 องศา, ± 30 องศา และ ± 45 องศา)

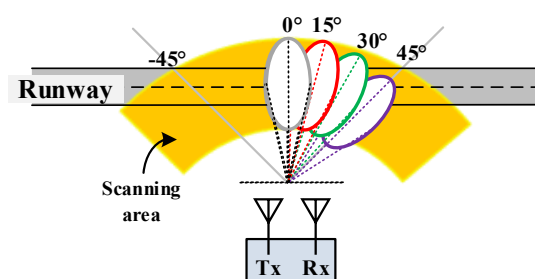
แสดงพื้นที่ที่ครอบคลุมของสายอากาศขนาดลำคลื่นเท่ากับ 10 องศา สามารถแผ่กำลังงานไปได้มีดังภาพประกอบที่ 1.17ก) จะเห็นว่ามีพื้นที่บางส่วนที่ลำคลื่นของสายอากาศแผ่กำลังงานได้ และลำคลื่นของสายอากาศไม่มีการซ้อนทับกัน

แสดงพื้นที่ที่ครอบคลุมของสายอากาศขนาดลำคลื่นเท่ากับ 15 องศา สามารถแผ่กำลังงานไปได้มีดังภาพประกอบที่ 1.17ข) ลำคลื่นของสายอากาศสามารถแผ่กำลังงานไปยังพื้นที่เป้าหมายได้ และลำคลื่นของสายอากาศซ้อนทับกัน

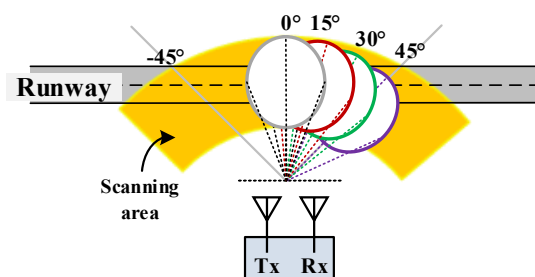
แสดงพื้นที่ที่ครอบคลุมของสายอากาศขนาดลำคลื่นมากกว่า 15 องศา สามารถแผ่กำลังงานไปได้มีจากภาพประกอบที่ 1.17ค) ลำคลื่นของสายอากาศสามารถแผ่กำลังงานไปยังพื้นที่เป้าหมายได้ และพื้นที่ลำคลื่นทับซ้อนกันค่อนข้างมาก



ก) ขนาดลำคลื่นเท่ากับ 10 องศา



ข) ขนาดลำคลื่นเท่ากับ 15 องศา



ค) ขนาดลำคลื่นเท่ากับ 30 องศา

ภาพประกอบที่ 1.17 พื้นที่ครอบคลุมของสายอากาศ ที่ขนาดลำคลื่นของสายอากาศต่างๆ

ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับใช้ในระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนี้ ออกแบบให้สายอากาศควรมีขนาดลำคลื่นกว้าง (> 15 องศา) เพื่อให้สามารถรับลำคลื่นครอบคลุมเป็นมุม 90 องศา ตั้งแต่ -45 องศาถึง 45 องศา ภายใต้การรับลำคลื่นทั้งหมด 7 ระดับของวงจรถ่ายเฟส

1.6.3.4 ขนาดของพื้นที่ครอบคลุม

ขนาดของพื้นที่ครอบคลุมที่มีขนาดกว้าง (wide footprint) ให้ความเข้มข้นของกำลังงานเมื่อกระทบกับวัตถุเป้าหมายน้อยกว่าขนาดของพื้นที่ครอบคลุมขนาดเล็ก (narrow footprint) และความแรงของกำลังงานเมื่อสะท้อนกลับจากวัตถุเป้าหมายอาจไม่เพียงพอที่จะสามารถตรวจจับวัตถุเป้าหมายได้ กล่าวคือพื้นที่ครอบคลุมขนาดเล็กจะให้ความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุเป้าหมายได้มากกว่าพื้นที่ครอบคลุมขนาดใหญ่ ซึ่งในการออกแบบสายอากาศที่ลำคลื่นกว้าง เพื่อให้พื้นที่ครอบคลุมที่กว้าง ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมสามารถเพิ่มกำลังงานจากภาคส่งมากขึ้น เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของกำลังงาน และวัตถุเป้าหมายสามารถสะท้อนกำลังงานกลับมายังภาครับได้ หรือเพิ่มความไวของภาครับให้มากขึ้น

1.7 การทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในงานด้านสายอากาศ เป็นสายอากาศนำมาใช้งานกับระบบเรดาร์ SAR และระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม มีดังนี้

1.7.1 The MIT IAP Radar Course: Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture (SAR) Imaging* [6]

บทความนำเสนอ การสร้างระบบเรดาร์โดยมีสายอากาศเป็น สายอากาศท่อนำคลื่นทรงกระบอกปลายเปิด (Open-ended circular waveguide) มีโครงสร้างหลักของสายอากาศทำมาจากกระป๋องกาแฟโลหะตัวนำ เรียกว่า สายอากาศกระป๋องกาแฟ (Coffee can antenna) ดังภาพประกอบที่ 1.18

การออกแบบสายอากาศ

สร้างสายอากาศท่อนำคลื่นทรงกระบอกปลายเปิด ทำจากกระป๋องกาแฟซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 cm สำหรับโหมด TE₁₁ มีความถี่ตัดผ่านเท่ากับ 1.80 GHz สามารถใช้งานกับ

ระบบเรดาร์ได้ทำงานบนความถี่ 2.45 GHz กระจ่องกาแพ็โหะตัวนำจะทำหน้าที่เป็นตัวแพร่กระจายคลื่น และจุดบ่อดัณญูณ Monopole probe บทความนี้สร้างต้นแบบสายอากาศจำนวนสองต้นสำหรับสายอากาศรับและส่งคนละต้น จััดวางสายอากาศทั้งสองต้นห่างกันเป็นระยะ 20 cm เพื่อไม่ผลผลจากการเกิด Mutual coupling ระหว่างสายอากาศ

การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์สายอากาศ

ต้นแบบสายอากาศสามารถทำงานบนย่านความถี่ ISM-band 2.40-2.50 GHz ให้อัตราขยายสูงสุด 7.2 dBi ขนาดความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 72 องศา และค่า Isolation ระหว่างสายอากาศทั้งสองเท่ากับ -39 dB

การทดสอบสายอากาศในระบบ SAR

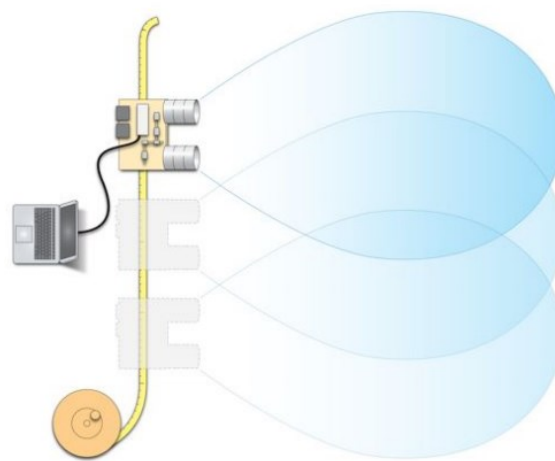
สายอากาศที่นำคลื่นทรงกระบอกปากเปิดจำนวนสองต้น นำมาใช้เป็นสายอากาศรับและสายอากาศส่งภายในระบบเรดาร์ SAR ในการทดสอบใช้งานสายอากาศทั้งสองจะถูกเคลื่อนที่บนรางเลื่อนสามารถสแกนพื้นที่เป้าหมายต้องการแสดงดั่งภาพประกอบที่ 1.19 และภาพประกอบที่ 1.20

สรุป

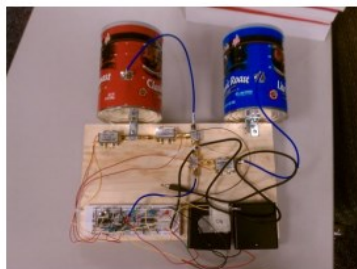
บทความนี้เสนอ สายอากาศสายอากาศที่นำคลื่นทรงกระบอกปลายเปิด (Open-ended circular waveguide) ทำงานที่ความถี่ 2.4-2.5 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 7.2 dBi มีขนาดความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 72 องศา สร้างสายอากาศภาครรับและภาคส่ง แยกกันเพื่อลดผลของ Mutual coupling ระหว่างสายอากาศ ค่า Isolation เท่ากับ -39 dB ต้นแบบสายอากาศนี้เป็น Fixed-beam antenna ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์ SAR ซึ่งสายอากาศถูกเคลื่อนที่ด้วยวิธีการทางกลโดยอาศัยรางเลื่อนในการสแกนพื้นที่เป้าหมาย



ภาพประกอบที่ 1.18 อุปกรณ์ชุด Radar kit ประกอบด้วยวงจร และสายอากาศ [6]



ภาพประกอบที่ 1.19 ระบบเรดาร์ SAR โดยอุปกรณ์และสายอากาศเคลื่อนที่ด้วยรางเลื่อน [6]



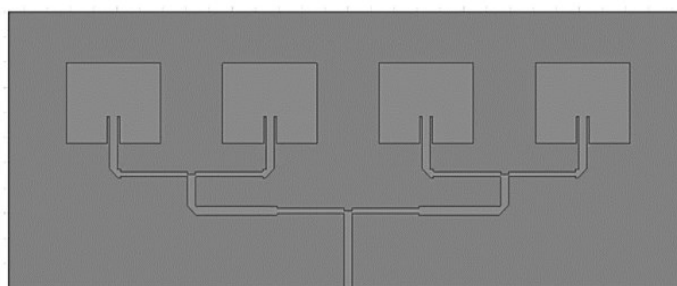
ภาพประกอบที่ 1.20 การทดสอบสายอากาศในระบบเรดาร์ SAR [6]

1.7.2 Design of an antenna array for a LFM-CW synthetic aperture radar prototype [8]

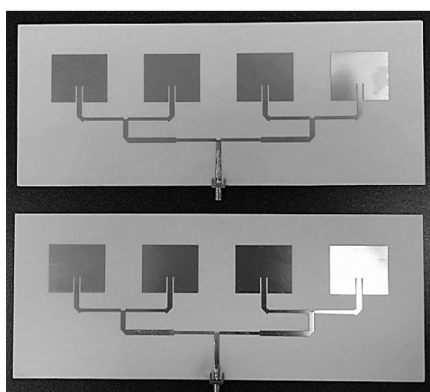
บทความนำเสนอ การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น ขนาด 1x4 องค์ประกอบ (Linear array antenna) สำหรับใช้ในระบบ LFM-CW synthetic aperture radar

การออกแบบสายอากาศ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นขนาด 1x4 องค์ประกอบ แต่ละองค์ประกอบเป็นสายอากาศแพทช์รูปสี่เหลี่ยม (Rectangular patch antenna) ทำงานที่ความถี่ 2.44 GHz วัสดุที่ใช้เป็น RO4003C มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 3.55 มีความหนาเท่ากับ 1.524 mm เชื่อมต่อแต่ละองค์ประกอบใช้ด้วย T-junction network และใช้ Quarter-wave impedance transformer แปลงอิมพีแดนซ์เพื่อให้สามารถต่อกับ SMA connector ขนาด 50 Ω ได้แสดงโมเดลสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นขนาด 1x4 องค์ประกอบดังภาพประกอบที่ 1.21 และต้นแบบสายอากาศจำนวนสองต้นดังภาพประกอบที่ 1.22



ภาพประกอบที่ 1.21 โมเดลสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นขนาด 1x4 องค์ประกอบ [8]



ภาพประกอบที่ 1.22 ต้นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นขนาด 1x4 องค์ประกอบ [8]

การทดสอบวัดพารามิเตอร์ของสายอากาศ

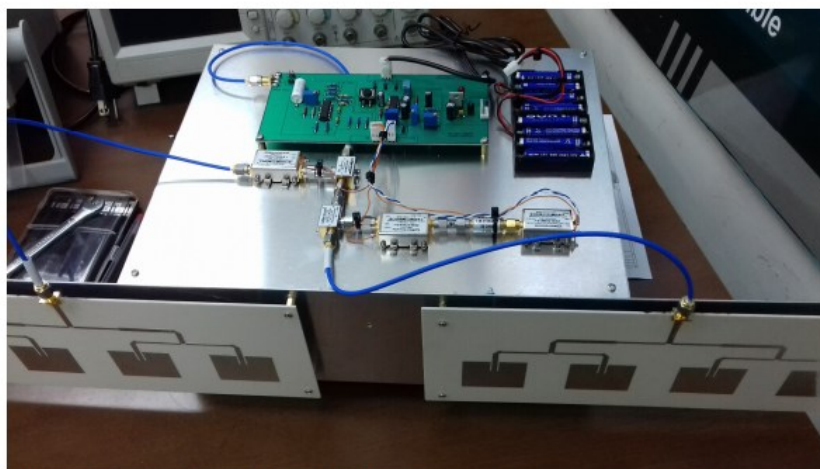
การทดสอบต้นแบบสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นขนาด 1x4 องค์ประกอบ ทดสอบวัดพารามิเตอร์ที่สำคัญภายใต้ห้อง Anechoic chamber ผลการทดสอบต้นแบบสายอากาศทำงานที่

ความถี่เท่ากับ 2.44 GHz ให้อัตราขยายเท่ากับ 9.87 dBi มีขนาดลำคลื่นในแนวนอนเท่ากับ 24 องศา ผลการทดสอบวัด Mutual coupling ระหว่างสายอากาศทั้งสองต้น โดยจัดวางสายอากาศวางห่างกันเป็นระยะเท่ากับ 2.05 m มีค่า Isolation เท่ากับ -26.63 dB

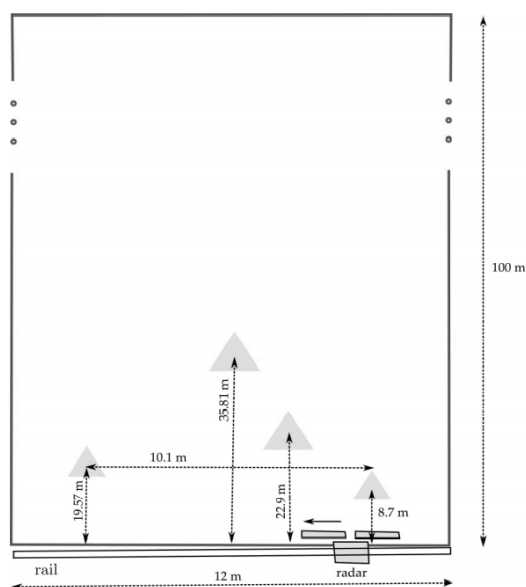
การทดสอบสายอากาศในระบบ SAR

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้นขนาด 1x4 องค์ประกอบทั้งสองต้น เป็นสายอากาศภาครับและส่งภายในระบบเรดาร์ SAR ดังภาพประกอบที่ 1.23 ทดสอบในพื้นที่ขนาดกว้างเท่ากับ 12 m และยาวเท่ากับ 100 m ดังภาพประกอบที่ 1.24 และติดตั้งสายอากาศให้สูงจากพื้น 1.2 m

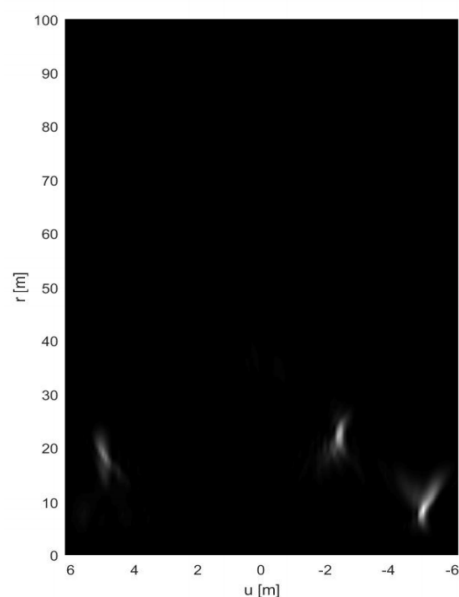
สำหรับการทดสอบ สายอากาศส่ง LFW-CW (Linear frequency modulation-continuous wave) ไปยังวัตถุเป้าหมายซึ่งเป็นตัวสะท้อนมุม (Corner reflector) และสายอากาศที่ภาครับ รับผิดชอบที่สะท้อนกลับมาทุกๆระยะ 10 cm และประมวลผลสัญญาณที่ได้มานั้นผ่านอัลกอริทึม $\omega - K$ และการสร้างออกมาเป็นภาพแสดงดังภาพประกอบที่ 1.25



ภาพประกอบที่ 1.23 สายอากาศรับและส่ง ภายในระบบเรดาร์ [8]



ภาพประกอบที่ 1.24 ตำแหน่งของเป้าหมาย
จำนวน 4 ชั้น [8]



ภาพประกอบที่ 1.25 ภาพที่ถูกสร้างจาก Raw
data โดยใช้อัลกอริทึม [8]

สรุป

บทความนำเสนอ การออกแบบ และสร้างอากาศแวลล่าดับแบบเชิงเส้นขนาด 1x4 องค์ประกอบ สำหรับเป็นสายอากาศรับและส่งในระบบ LFM-CW synthetic aperture radar ทำงานบนความถี่ 2.44 GHz มีอัตราขยาย 9.87 dBi มีขนาดลำคลื่นในแนวนอนเท่ากับ 24 องศา สร้างสายอากาศรับและส่งแยกต้นกันเพื่อไม่ให้เกิดการ Mutual coupling ระหว่างสายอากาศมีค่า Isolation เท่ากับ -26.63 dB ต้นแบบสายอากาศนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบเรดาร์ SAR โดยสายอากาศทั้งภาครรับและส่ง เคลื่อนที่ด้วยวิธีการทางกล อาศัยรางเลื่อนในการสแกนพื้นที่เป้าหมาย

1.7.3 76.5 GHz Millimeter-Wave Radar for Foreign Object Debris Detection on Airport Runways [9]

บทความนี้แนะนำเสนอ ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมบนพื้นที่ทางวิ่งของอากาศยาน ทำงานบนความถี่ Millimeter wave radar (76.5 GHz) สายอากาศที่ใช้งานในระบบประกอบด้วยสายอากาศสองชนิดได้แก่ 1. สายอากาศแวลล่าดับแผ่นสะท้อน (Printed reflect array) สำหรับใช้กับ

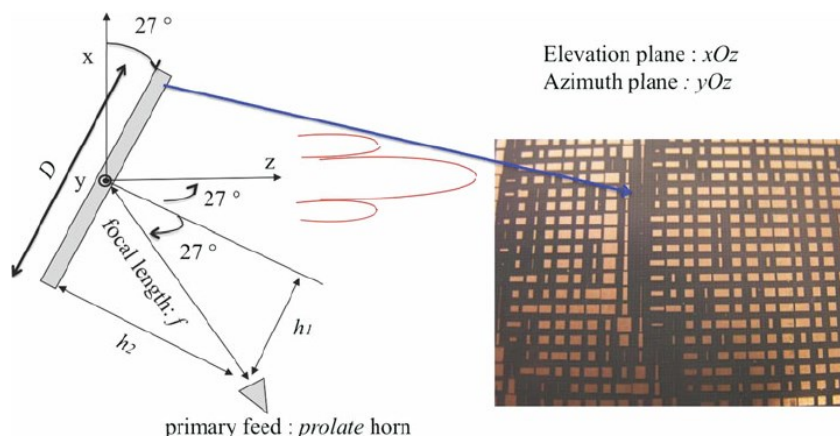
โมดูลเรดาร์ Narrowband และ 2. สายอากาศแบบสะท้อนรูปพาราโบลา (Parabolic reflector antenna) ใช้กับโมดูลเรดาร์ Wideband

สายอากาศ

1. สายอากาศแถวลำดับแผ่นสะท้อน (Printed reflect array)

สายอากาศแถวลำดับแผ่นสะท้อน เป็นสายอากาศที่มี สายอากาศแถวลำดับใช้เป็นแผ่นสะท้อน ทำงานบนความถี่ 76.25 - 76.75 GHz สายอากาศแถวลำดับแผ่นสะท้อนถูกป้อนสัญญาณด้วยสายอากาศฮอร์นที่มีรูปร่างเป็นทรงรีแนวตั้ง มีแบบรูปการแผ่กำลังงานที่มีขนาดของโลบข้างมีระดับต่ำมากๆ กำลังงานส่วนใหญ่ประมาณ 99% อยู่ที่โลบหลัก และเพื่อไม่ให้สายอากาศฮอร์นนั่นบังพื้นที่ประสิทธิภาพของสายอากาศแถวลำดับแผ่นสะท้อน จัดวางสายอากาศฮอร์นในตำแหน่งเอียงจากกึ่งกลางเป็นมุม 27 องศา และทำให้โลบหลักถูกเลื่อนตามการสะท้อนของคลื่น ดังภาพประกอบที่ 1.26

ผลการทดสอบสายอากาศ สามารถทำงานบนความถี่ 75 - 81 GHz ให้อัตราขยายสูงสุดที่ 42 dBi ในช่วงความถี่สูง และช่วงความถี่ 76.25 - 76.75 GHz ให้อัตราขยายเท่ากับ 39 dBi และขนาดของโลบข้างมีระดับต่ำกว่า 25 dB



ภาพประกอบที่ 1.26 สายอากาศแถวลำดับแผ่นสะท้อน [9]

2. สายอากาศแบบสะท้อนรูปพาราโบลา (Parabolic reflector antenna)

สายอากาศแบบสะท้อนรูปพาราโบลา โดยจานสะท้อนรูปพาราโบลาใช้เป็นวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์พลาสติก (carbon fiber-reinforced plastic, CFRP) ดังภาพประกอบที่ 1.27 ผลการทดสอบ

รูปแบบการแผ่พลังงานบนความถี่ 76.5 GHz สายอากาศให้อัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 39.5 dBi มีขนาดความกว้างคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 1.60 องศา ให้แนวการโพลาไรซ์แบบ Horizontal



ภาพประกอบที่ 1.27 สายอากาศแบบสะท้อนรูปพาราโบลา [9]



ภาพประกอบที่ 1.28 สายอากาศแกลวลำดับแผ่นสะท้อน ถูกติดตั้งบนโรตเตอร์ [9]

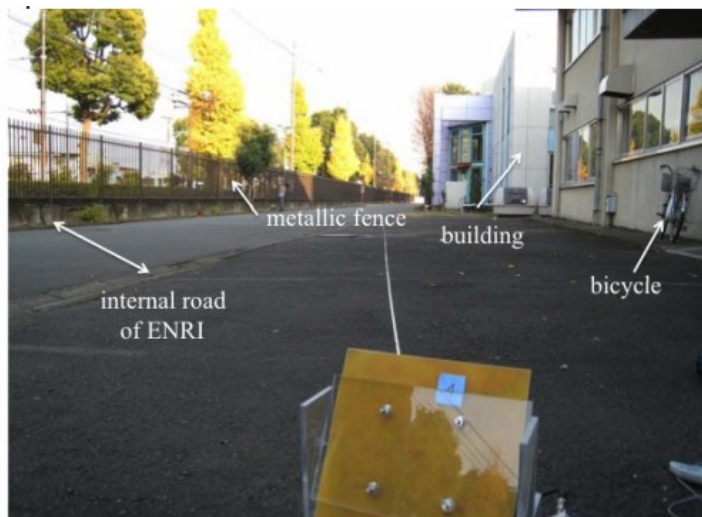
การทดสอบสายอากาศภายในระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม

1. การทดสอบของโมดูลเรดาร์ Narrowband

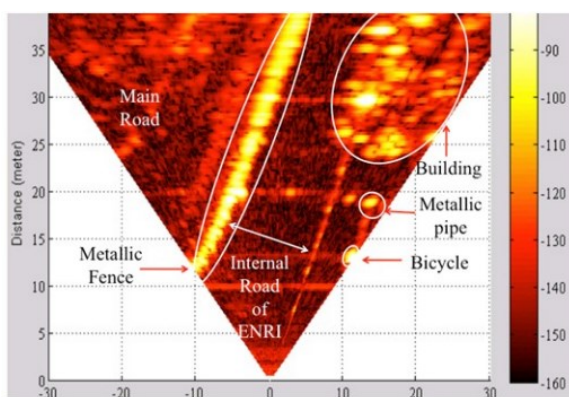
การทดสอบระบบเรดาร์โดยใช้โมดูลเรดาร์ Narrowband และสายอากาศแกลวลำดับแผ่นสะท้อนสำหรับการตรวจจับวัตถุแปลกปลอม ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นวัตถุประสงค์ทดสอบตาม FAA

circular มีความไวในตรวจจับวัตถุแปลกปลอมที่มีขนาดเล็ก มีขนาดพื้นที่ตัดขวางเรดาร์ (Radar cross section, RCS) เท่ากับ -20 dBsm

- 1) การทดสอบระบบเรดาร์ ใช้วัตถุเป้าหมายเป็นโลหะทรงกระบอก จำนวนสามชิ้น (0 dBsm, -10 dBsm และ -20 dBsm) ขนาดของวัตถุโลหะทรงกระบอกทั้งสามเป็น C1, C2 และ C3 มีขนาดความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 134.5, 62.4 และ 29mm ตามลำดับ โดยคำนวณค่า RCS ที่ความถี่ 78.5 GHz และวัตถุเป้าหมายแบบตัวสะท้อนมุมเท่ากับ 28 dBsm
- 2) พื้นที่สำหรับใช้ทดสอบระบบเรดาร์แสดงดังภาพประกอบที่ 1.29 และตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายทั้ง 4 ชิ้น เป็นระยะ 20 m จากระบบเรดาร์เป็นตัวสะท้อนมุม C3, C2 และ C1 เรียงจากซ้ายไปขวา ตามลำดับ
- 3) ต้นแบบสายอากาศรวมไปถึงอุปกรณ์ระบบเรดาร์ถูกติดตั้งบนโรเตเตอร์ (Mechanical rotator) ภาพประกอบที่ 1.28 เพื่อให้สามารถสแกนในแนวระนาบมุมกวาดดังภาพประกอบที่ 1.30 ระบบเรดาร์สแกนพื้นที่ตั้งแต่มุม -30 องศาถึง 30 องศา
- 4) มีสัญญาณรบกวนบริเวณระยะ 10, 13 และ 30m และมีคลื่นสะท้อนจากรั้วโลหะ, ดึง, ท่อโลหะ, และจักรยาน นอกจากนี้มีชิ้นโลหะวางอยู่เป็นระยะบริเวณถนนด้านในของพื้นที่ทดสอบซึ่งเป็นแผ่นโลหะกั้นระหว่างทางเท้าและถนนด้านในอยู่ติดกับถนนสายหลักด้านนอก มีคลื่นสะท้อนของรถที่ผ่านในบริเวณพื้นที่ทดสอบ
- 5) สำหรับการตรวจจับวัตถุเป้าหมายที่ตำแหน่ง 20 m สามารถตรวจจับวัตถุที่เป็นทรงกระบอกได้ทั้งหมด ยกเว้นวัตถุที่เป็นตัวสะท้อนมุม เนื่องจากคลื่นที่สะท้อนกลับจากตัวสะท้อนมุม ไปสัมพันธ์กับคลื่นสะท้อนกับรั้วโลหะ ทำให้ไม่สามารถแยกแยะได้
- 6) ภายหลังจากนำข้อมูลที่ได้ไปทำการประมวลผล โดยใช้การลบองค์ประกอบภายนอกที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป ได้แก่ รั้วโลหะ, จักรยาน และการกำหนด Threshold ทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนบริเวณระยะ 10m, 13m และ 30m แสดงดังภาพประกอบที่ 1.31 เมื่อองค์ประกอบที่ไม่เกี่ยวข้องถูกลบออกไป และสามารถตรวจจับวัตถุเป้าหมายทั้ง 4 ชิ้นได้ แต่ยังคงมีคลื่นสะท้อนจากรถที่วิ่งบริเวณถนนสายหลัก
- 7) ทดสอบวางวัตถุเป้าหมาย C3 ที่ตำแหน่งระยะ 35m, 40m และ 45m สามารถตรวจจับวัตถุเป้าหมาย C3 จนถึงระยะ 35m และที่ระยะ 40m กำลังงานที่ตรวจจับได้มีกำลังงานน้อย ซึ่งควรจะเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศให้มากขึ้นจึงจะสามารถตรวจจับที่ระยะ 40m ได้

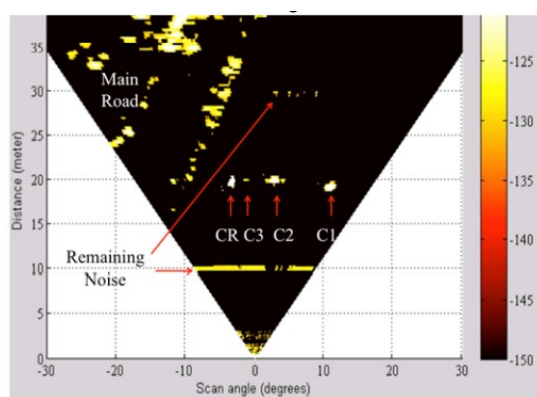


ภาพประกอบที่ 1.29 พื้นที่สำหรับการทดสอบระบบเรดาร์ [9]



ภาพประกอบที่ 1.30 ภาพเรดาร์

โดยที่วัตถุเป้าหมายอยู่ในตำแหน่ง 20 m [9]



ภาพประกอบที่ 1.31 ภาพเรดาร์

ภายหลังการประมวลผล [9]

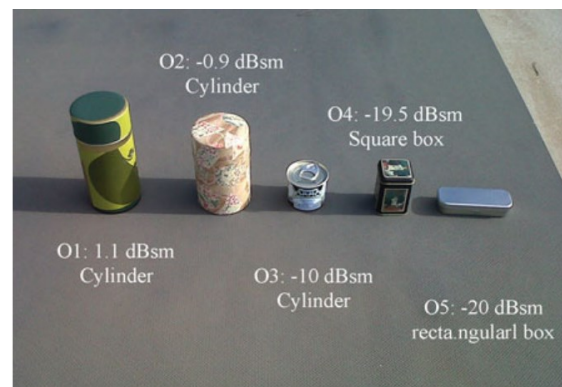
2. การทดสอบของโมดูลเรดาร์ Wideband

การทดสอบระบบเรดาร์โดยใช้โมดูลเรดาร์ Wideband ซึ่งสามารถเพิ่มความละเอียดของระบบได้ ใช้งานสายอากาศแบบสะท้อนรูปพลาโบลา สำหรับสถานที่ทดสอบดังภาพประกอบที่ 1.32 ประกอบไปด้วย รั้วที่ระยะห่างเท่ากันเป็นระยะ 5 m, ตู้อีโวลต์ด้านหลัง และขอบหลังคาที่มีความสูงประมาณ 5 cm

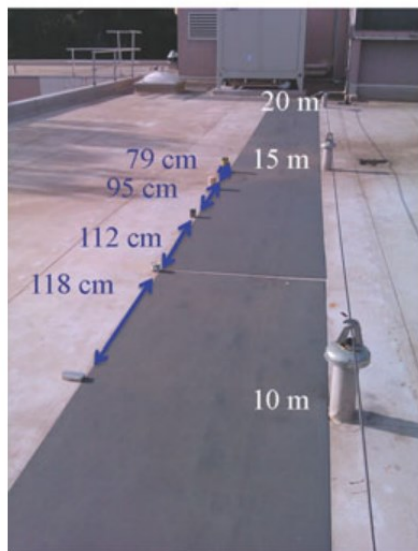
- 1) ในการทดสอบระบบเรดาร์ สายอากาศหรือระบบเรดาร์สามารถสามารถหมุน 360 องศาในแนวระนาบมุมกวาดด้วยโรเตอร์ และไม่มี การปรับในแนวระนาบมุมยก
- 2) วัตถุเป้าหมายที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ โลหะทรงกระบอก และโลหะทรงสี่เหลี่ยม ที่ให้ค่า RCS ต่างกัน ดังภาพประกอบที่ 1.33 วัตถุเป้าหมายวางในตำแหน่งระยะ 10m จากระบบเรดาร์ และวางห่างกันเป็นระยะ 1 m ดังภาพประกอบที่ 1.34
- 3) ระบบเรดาร์สามารถตรวจจับวัตถุเป้าหมายทั้ง 5 ชั้นได้ ดังภาพประกอบที่ 1.35 แสดงภาพเรดาร์ที่ได้จากระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม
- 4) ทดสอบระบบเรดาร์ โดยให้ระยะห่างระหว่างวัตถุเป้าหมาย เท่ากับ 30cm ดังภาพประกอบที่ 1.36ก) สามารถตรวจจับเป้าหมายได้ 4 ชั้น ไม่สามารถตรวจจับวัตถุเป้าหมาย O4 ที่เป็นโลหะทรงสี่เหลี่ยมได้
- 5) ทดสอบระบบเรดาร์ โดยให้ระยะห่างระหว่างวัตถุเป้าหมาย เท่ากับ 10cm ดังภาพประกอบที่ 1.36ข) สามารถตรวจจับเป้าหมายได้ 3 ชั้น โดยวัตถุเป้าหมาย O1 และ O2 เมื่อวางในระยะที่ 10cm ระยะห่างระหว่างขอบของเป้าหมาย ใกล้เคียงกับความละเอียดของพิกเซล ระบบไม่สามารถแยกแยะได้ ซึ่งต้องใช้การประมวลผลที่ซับซ้อนมากขึ้น เพื่อให้สามารถแยกแยะวัตถุเป้าหมายได้
- 6) ทดสอบระบบเรดาร์ โดยใช้วัตถุเป้าหมายเป็นวัตถุแปลกปลอมจากอากาศยาน Charles de Gaulle คือหมวกจากเครื่องบิน ดังภาพประกอบที่ 1.37 ระบบเรดาร์สามารถตรวจจับเป้าหมายได้ ดังภาพประกอบที่ 1.38



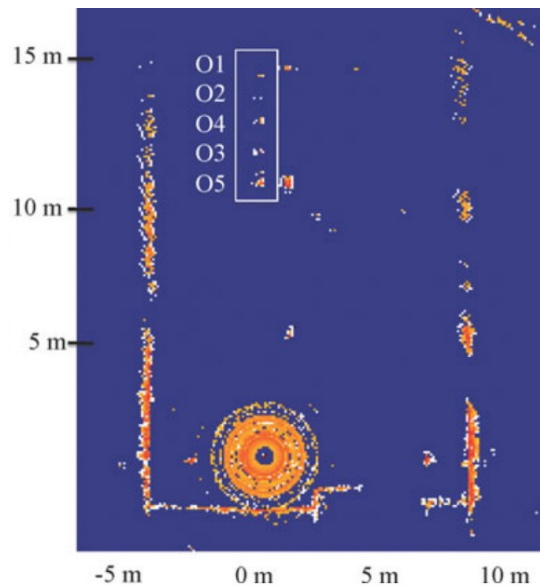
ภาพประกอบที่ 1.32 พื้นที่สำหรับการทดสอบ [9]



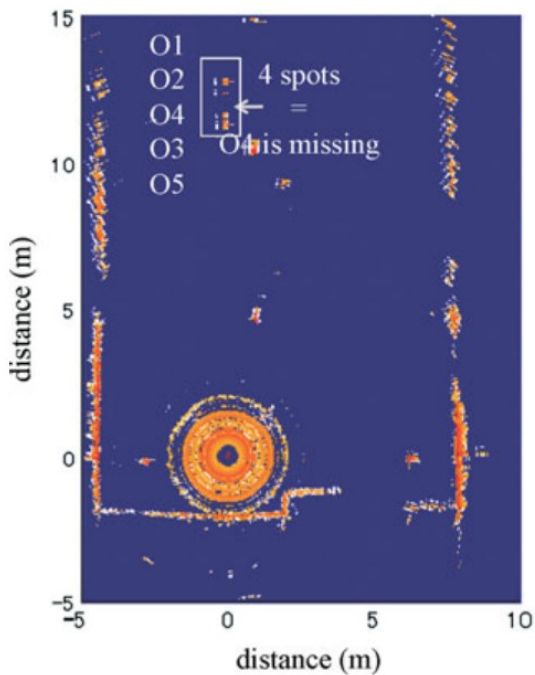
ภาพประกอบที่ 1.33 ตัวอย่างวัตถุเป้าหมาย [9]



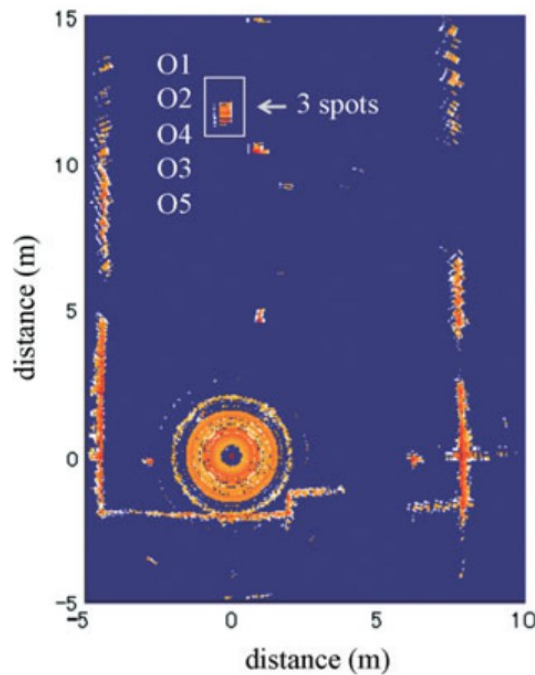
ภาพประกอบที่ 1.34 ตำแหน่งของวัตถุ [9]



ภาพประกอบที่ 1.35 ภาพเรดาร์ [9]

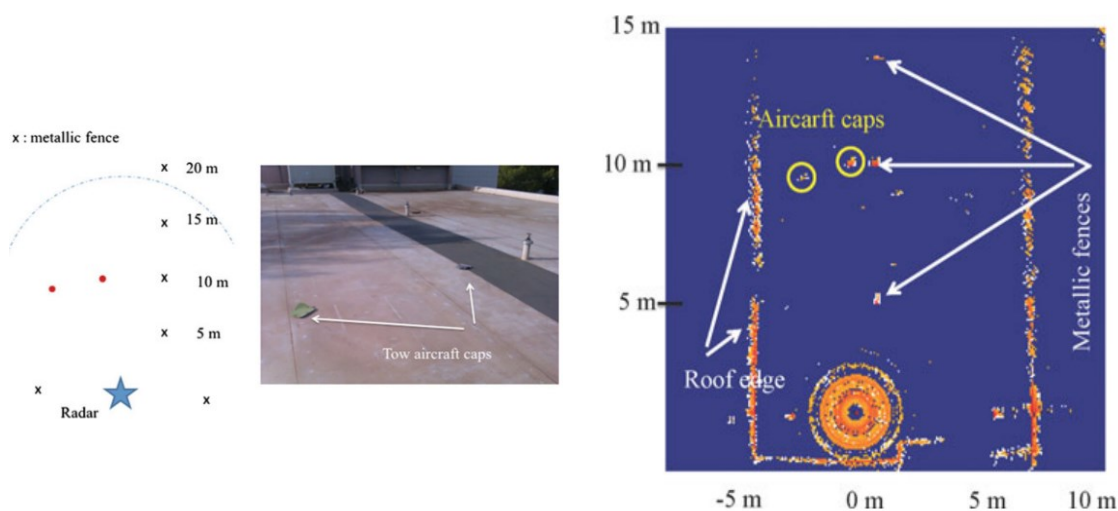


ก) ระยะระหว่างวัตถุเป้าหมายเท่ากับ 30cm



ข) ระยะระหว่างวัตถุเป้าหมายเท่ากับ 10cm

ภาพประกอบที่ 1.36 ภาพเรดาร์ [9]



ภาพประกอบที่ 1.37 ตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่เป็นวัตถุแปลกปลอมจากอากาศยาน [9]

ภาพประกอบที่ 1.38 ภาพเรดาร์ โดยวัตถุเป้าหมายเป็นวัตถุแปลกปลอมของอากาศยาน [9]

สรุป

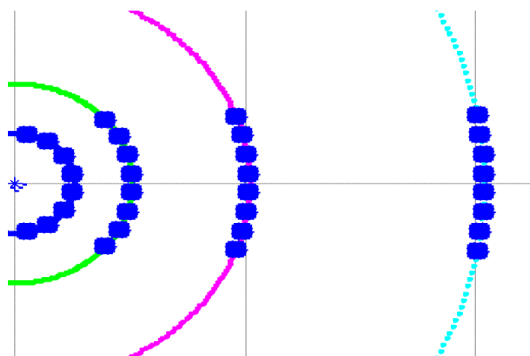
บทความนี้นำเสนอ ระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมบนพื้นที่ทางวิ่งของอากาศยานทำงานบนย่าน Millimeter wave radar (76.5 GHz) สายอากาศที่ใช้ในงานในระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมมีสองชนิด คือสายอากาศแถวลำดับแผ่นสะท้อน ป้อนสัญญาณด้วยสายอากาศฮอร์น (Feed horn) ให้อัตราขยายเท่ากับ 39 dBi สำหรับใช้กับโมดูลเรดาร์ Narrow band และ สายอากาศแบบสะท้อนรูปพาราโบลาให้อัตราขยายเท่ากับ 39.5 dBi มีขนาดความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 1.60 องศา ใช้กับโมดูลเรดาร์ Wide band เพื่อเพิ่มความละเอียดของระบบให้มากขึ้น

สำหรับการทำงานของสายอากาศภายในระบบนี้ ต้นแบบสายอากาศทั้งสองถูกติดตั้งบนโรเตอร์เพื่อทำการสแกนพื้นที่เป้าหมาย ซึ่งระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมที่บทความนำเสนอนี้สามารถตรวจจับเป้าหมายที่เป็นลักษณะโลหะรูปทรงระบอให้ค่า RCS เท่ากับ -20 dBsm ได้ที่ไกลสุดที่ระยะ 35 m นอกจากนี้ภายในระบบมีการใช้การประมวลผล เพื่อให้สามารถแยกแยะวัตถุเป้าหมายกับสภาพแวดล้อมได้

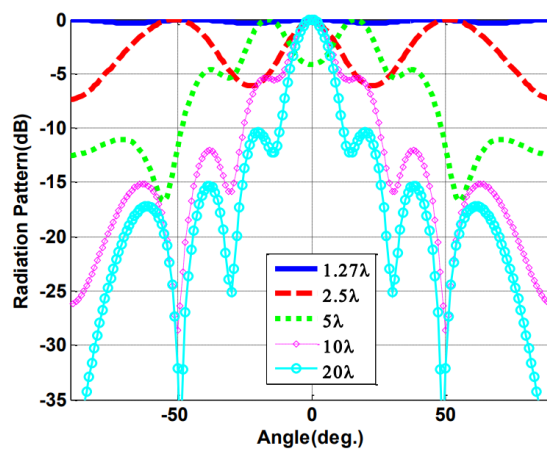
1.7.4 Studies on conformal antenna arrays placed on cylindrical curved surfaces [10]

บทความนำเสนอ การศึกษาผลจากความโค้งของสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป (Conformal antenna array) ที่ทำบนผิวโค้งของทรงกระบอก

- 1) เปรียบเทียบแบบรูปการแผ่พลังงาน ของสายอากาศแถวลำดับขนาด 8 องค์ประกอบ โดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ ได้แก่ 0.40λ , 0.60λ , 0.80λ และ 1.00λ ผลจากการเพิ่มระยะห่างระหว่างองค์ประกอบ ทำให้แบบรูปการแผ่พลังงานของลำคลื่นเป็นลักษณะ Star beam และมีโลบข้างเกิดขึ้น และหากระยะห่างขององค์ประกอบน้อยขนาดของลำคลื่นแถวลำดับจะกว้าง
- 2) เปรียบเทียบสายอากาศแถวลำดับขนาด 8 องค์ประกอบ ในรัศมีความโค้งที่ต่างกัน ได้แก่ 1.27λ , 2.5λ , 5λ , 10λ และ 20λ โดยที่ระยะห่างของระหว่างองค์ประกอบคงที่คือ 0.50λ ผลจากการเพิ่มส่วนโค้งของแถวลำดับ ส่งผลให้ลำคลื่นมีขนาดแคบลง (Narrow beamwidth) และการลดขนาดของส่วนโค้งจะทำให้ลำคลื่นจะกว้างขึ้น (Wide beamwidth) ดังภาพประกอบที่ 1.39ก) และภาพประกอบที่ 1.39ข) การจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับขนาด 8 องค์ประกอบ ในรัศมีความโค้งที่ต่างกัน และรูปแบบการแผ่พลังงาน ตามลำดับ



ก) การจัดเรียงของสายอากาศแถวลำดับ[10]



ข) รูปแบบการแผ่พลังงาน [10]

ภาพประกอบที่ 1.39 การจำลองสายอากาศแถวลำดับขนาด 8 องค์ประกอบ

สรุป

บทความเสนอ การศึกษาผลของความโค้งของสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป (Conformal antenna array) รูปแบบการแผ่กำลังของสายอากาศเป็นฟังก์ชันของความกว้างส่วนโค้ง

ของสายอากาศ และระยะห่างขององค์ประกอบ หากต้องการเพิ่มขนาดความกว้างของลำคลื่น จะต้องจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับให้มีลักษณะโค้ง

1.7.5 Conformal Antenna Arrays Placed on Cylindrical Curved Surfaces for Radar Applications [11]

บทความนำเสนอ การออกแบบและ พัฒนาสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป (Conformal array antenna) ขนาด 8X96 องค์ประกอบ ที่ถูกทาบบนผิวโค้งของทรงกระบอก

การออกแบบสายอากาศ

- 1) การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปขนาด 8X96 องค์ประกอบ โดยเป็นแถวในแนวตั้งทั้งหมด 96 แถว แต่ละแถวประกอบด้วย 8 องค์ประกอบ ระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากับ 0.60λ และขนาดรัศมีของรูปทรงกระบอกเท่ากับ 8λ ดังภาพประกอบที่ 1.40 ส่วนวัสดุที่ใช้เป็น RT Duroid 5880 มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.2 มีความหนาของชั้นวัสดุฐานรองเท่ากับ 20 mil (0.508 mm) มีค่า loss tangent เท่ากับ 0.0009
- 2) สำหรับการออกแบบสายอากาศแถวลำดับ 1 องค์ประกอบ เป็นสายอากาศแพทช์สองชั้นประกอบด้วยชั้นที่เป็นอากาศ และชั้นที่เป็นวัสดุฐานรอง การป้อนสัญญาณแบบ Coaxial probe ดังภาพประกอบที่ 1.41 และผลการจำลอง อัตราขยายต่อ 1 องค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 5 dBi

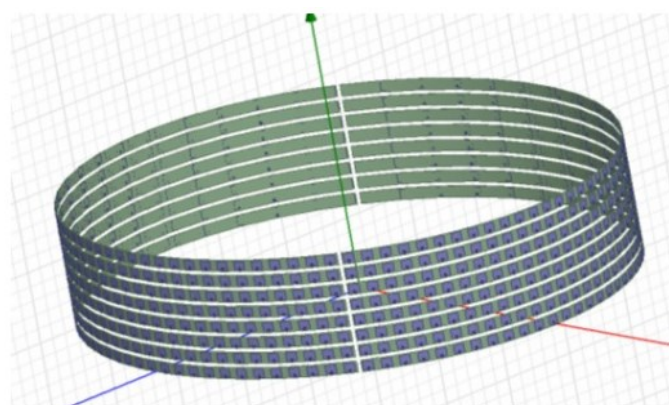
การจำลองและทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์

- 1) ผลการจำลองรูปแบบการแผ่พลังงานในแนวระนาบมุมกวาด ซึ่งในแต่ละองค์ประกอบที่อยู่ในแนวระนาบมุมกวาดมีการป้อนกระแสและเฟสดังภาพประกอบที่ 1.42ก) มีขนาดอัตราขยาย 19.6 dBi มีความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 4 องศา สายอากาศปรับลำคลื่นด้วยวิธีทางทางไฟฟ้าโดยใช้วงจรเลื่อนเฟสสามารถปรับลำคลื่นในแนวระนาบมุมกวาดภาพประกอบที่ 1.42ข) มีความละเอียดของการปรับลำคลื่นเท่ากับ 3.75 องศา สายอากาศที่บทความนำเสนอ ไม่มีการปรับลำคลื่นในแนวระนาบมุมยก มีขนาดความกว้างคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 50 องศา
- 2) สำหรับการสร้างสายอากาศจริง สร้างเพียง 1 Section ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 24 องค์ประกอบ และใช้ Power divider แบบ 1 ต่อ 24 เพื่อป้อนสัญญาณในแต่ละองค์ประกอบในแนวระนาบมุมกวาด ดังภาพประกอบที่ 1.43 ผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปขนาด 1X24

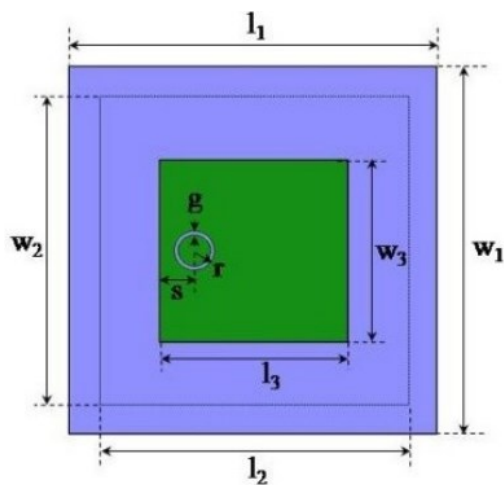
องค์ประกอบมีค่าเท่ากับ 19.2 dBi มีความกว้างคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 4.7 องศา ดังภาพประกอบที่ 1.44

สรุป

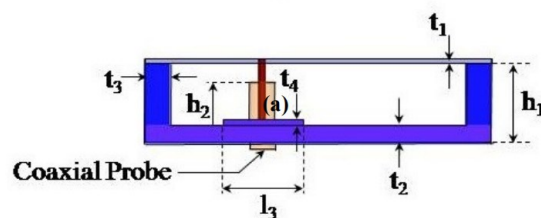
บทความนำเสนอ การออกแบบและสร้างสายอากาศแถวลำดับแบบคกรูปขนาด 1X24 องค์ประกอบ มีอัตราขยายเท่ากับ 19.2 dB มีขนาดกว้างคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 4.7 องศา และปรับลำคลื่นสายอากาศทางไฟฟ้าด้วยใช้วงจรเลื่อนเฟสที่มีความละเอียดค่อนข้างสูง มีลักษณะเป็น Steering beam antenna ความละเอียดของการปรับลำคลื่นเท่ากับ 3.75 องศา



ภาพประกอบที่ 1.40 โมเดลสายอากาศแถวลำดับแบบคกรูปมีขนาด 8X96 องค์ประกอบ [11]

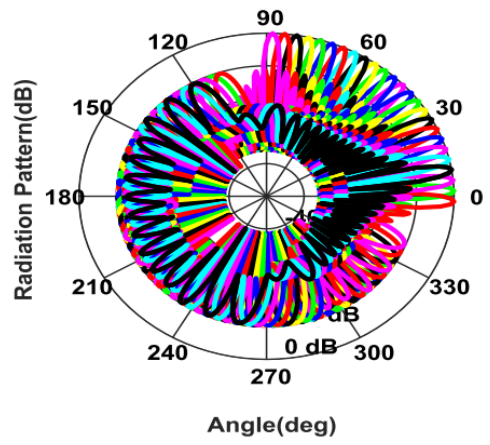
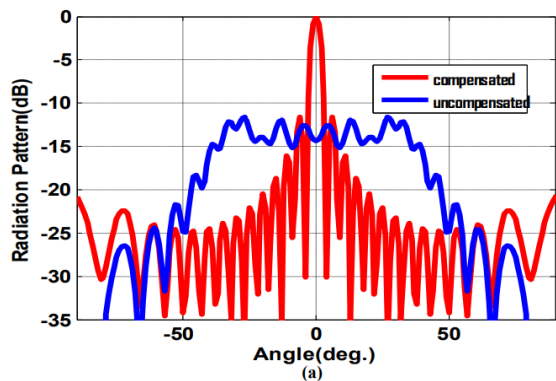


ก) ด้านบน

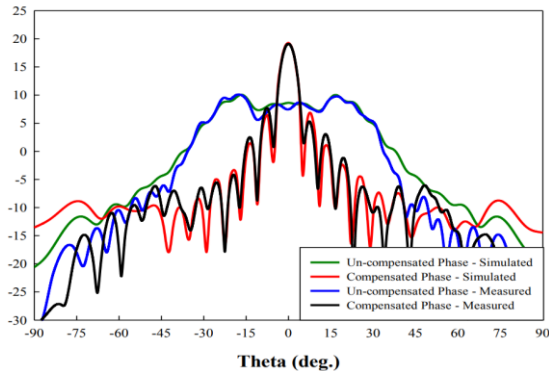
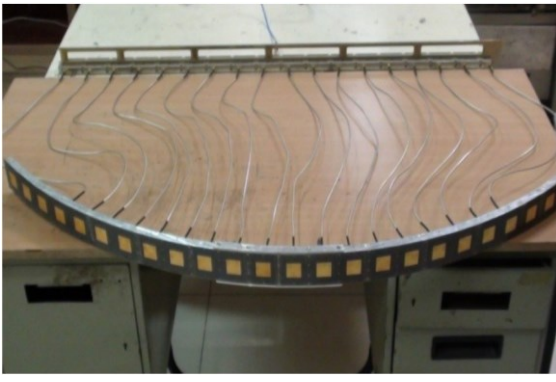


ข) ด้านข้าง

ภาพประกอบที่ 1.41 โมเดลสายอากาศแถวลำดับขนาด 1 องค์ประกอบในโปรแกรมจำลอง [11]



ก) รูปแบบการแผ่พลังงานในแนวระนาบมุมกวาด ข) การปรับลำคลื่นในแนวระนาบมุมกวาด
 ภาพประกอบที่ 1.42 ผลการจำลองรูปแบบการแผ่พลังงาน [11]



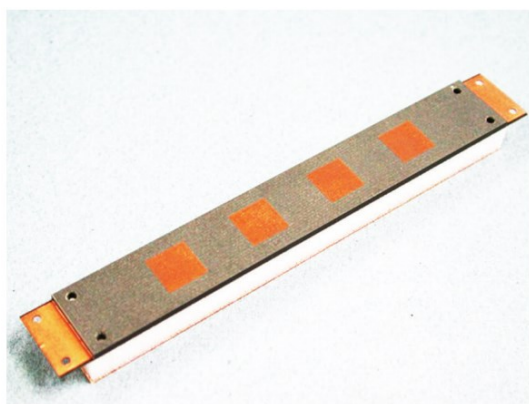
ภาพประกอบที่ 1.43 ต้นแบบสายอากาศแฉก ลำดับแบบคงรูปขนาด 24 องค์ประกอบ [11] ภาพประกอบที่ 1.44 ผลการจำลองและทดสอบของรูปแบบการแผ่พลังงาน [11]

1.7.6 SAR Experiments Using a Conformal Antenna Array Radar Demonstrator [12]

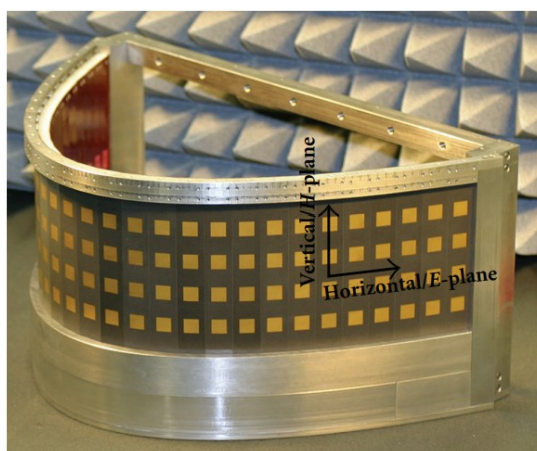
บทความนี้แนะนำ การออกแบบและพัฒนาสายอากาศแฉกลำดับแบบคงรูป (Conformal phased array antenna) สำหรับเป็นสายอากาศส่วนหน้า (Antenna front-end) สำหรับใช้ในระบบเรดาร์ SAR

การออกแบบสายอากาศ

- 1) ออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป มีลักษณะโค้งเป็นรูปวงรีตัดขวาง ในแนวระนาบ (xy-plane) มีสัดส่วนความโค้งของวงรีเท่ากับ $a/b=4$ (Axial ratio) สายอากาศค่อนข้างมีความโค้งงอมาก เนื่องจากต้องการสร้างให้โค้งงอเหมือนติดตั้งทาบบนปีกของอากาศยาน
- 2) สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปนี้ ประกอบด้วยแถวลำดับย่อยแบบเชิงเส้น (Linear sub-array) จำนวน 30 แถวลำดับย่อย ที่วางตัวในแนวแกน z ซึ่งแต่ละแถวลำดับย่อยประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ ทำงานบนความถี่ 9.4 GHz ดังภาพประกอบที่ 1.45 มีลักษณะที่ประกอบด้วยชั้น Copper foil วางบนชั้นของโฟมและภาพประกอบที่ 1.46 สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปที่มีจำนวน 30 แถวลำดับย่อย โดยถูกใส่อยู่ในซัพพอร์ตมีขนาดรัศมีมีความโค้งเท่ากับ 83 mm



ภาพประกอบที่ 1.45 แถวลำดับย่อยหนึ่งแถว [12]



ภาพประกอบที่ 1.46 สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป [12]

การจำลองและทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์

การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของสายอากาศ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ได้แก่ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และค่า Mutual coupling ระหว่างแถวลำดับย่อย (Sub-array) ผลการทดสอบอัตราขยายต่อหนึ่งแถวลำดับย่อยมีค่าเท่ากับ 12 dBi มีขนาดความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 17 องศา ผลการทดสอบ Mutual coupling ระหว่างแถวลำดับย่อยข้างเคียงให้ค่าที่ต่ำมีค่า Isolation ประมาณ -20 dB และค่า Isolation ระหว่าง Co-polarization (Horizontal) และ Cross-polarization (Vertical) มีค่าต่ำกว่า -20 dB

การทดสอบสายอากาศในระบบ SAR

สำหรับการทดสอบใช้งานสายอากาศภายในระบบเรดาร์ SAR สายอากาศถูกติดตั้งบนยานพาหนะ ดังภาพประกอบที่ 1.47 ในระบบใช้สายอากาศรับและส่งคลื่นเป็นสายอากาศตัวเดียวกัน และใช้กับปรับลำคลื่นทางไฟฟ้าด้วยวงจรเลื่อนเฟส



ภาพประกอบที่ 1.47 สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปถูกติดตั้งบนยานพาหนะ

สรุป

บทความนำเสนอ สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป ใช้เป็นสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ SAR สายอากาศที่ออกแบบมีลักษณะเป็นโค้งเป็นรูปทรงวงรี ประกอบด้วย 30 แถวลำดับย่อยแบบเชิงเส้น แต่ละแถวลำดับย่อยประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ ให้อัตราขยายเท่ากับ 12 dBi ต่อหนึ่งแถวลำดับย่อย มี

ขนาดความกว้างลำคลื่นเท่ากับ 17 องศา มีแนวการโพลาริซแบบเชิงเส้น ค่า Isolation ระหว่างองค์ประกอบมีค่าต่ำกว่า -20 dB และค่า Isolation ระหว่างแนวโพลาริซมีค่าต่ำกว่า -20 dB ตลอดทุกช่วงองศาในแนวระนาบมุมกวาดรูปแบบการแผ่พลังงานที่บริเวณโพลหลักเกิด Ripple ขึ้นเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของแถวลำดับย่อย ผลจาก Mutual coupling และผลจากการใช้ฝาครอบ สำหรับการดำเนินงานของสายอากาศในระบบเรดาร์ SAR สายอากาศปรับลำคลื่นทางไฟฟ้าด้วย วงจรเลื่อนเฟสได้ครอบคลุมถึง ± 70 องศา

1.7.7 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

บทความ [6] ออกแบบสายอากาศสำหรับระบบ SAR เป็นสายอากาศท่อนำคลื่นทรงกระบอกปลายเปิด ให้อัตราขยายเท่ากับ 7.20 dBi มีขนาดความกว้างคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 72 องศา สร้างสายอากาศรับและส่งแยกต้น เพื่อลดผล Mutual coupling ระหว่างสายอากาศ สายอากาศมีลักษณะลำคลื่นคงที่ (Fixed beam antenna) ในการทำงานภายในระบบเรดาร์ SAR ใช้การปรับลำคลื่นทางกล ให้สายอากาศเคลื่อนที่บนรางเลื่อน

บทความ [8] ออกแบบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ SAR เป็นสายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น ให้อัตราขยายเท่ากับ 9.87 dBi สร้างสายอากาศรับและส่งแยกต้นกันเพื่อลดผล Mutual coupling ระหว่างสายอากาศ การทำงานในระบบเรดาร์ SAR ใช้การปรับลำคลื่นทางกล ให้สายอากาศเคลื่อนที่บนรางเลื่อน

บทความ [9] ออกแบบระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมที่อยู่บนพื้นที่ทางวิ่งของอากาศยาน ทำงานบนความถี่ Millimeter wave radar (76.50 GHz) สายอากาศที่ใช้งานในระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมมีสองชนิด คือ สายอากาศแถวลำดับแผ่นสะท้อน บ่อนสัญญาณด้วยสายอากาศฮอร์น (Feed horn) ให้อัตราขยายเท่ากับ 39.00 dBi มีแนวการโพลาริซแบบเชิงเส้น สำหรับใช้กับโมดูลเรดาร์แบนด์วิธแคบ และ สายอากาศแบบสะท้อนรูปพาราโบลาให้อัตราขยายเท่ากับ 39.50 dBi มีขนาดความกว้างคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 1.6 องศา มีแนวการโพลาริซแบบเชิงเส้น ใช้กับโมดูลเรดาร์แบนด์วิธกว้าง สำหรับการดำเนินงานของสายอากาศภายในระบบนี้ สายอากาศถูกติดตั้งบนโรเตเตอร์ เพื่อทำการสแกนพื้นที่ที่ต้องการ

บทความ [10] ศึกษาผลจากการโค้งงอสายอากาศแฉลล่ำดับ การทำให้สายอากาศแฉลล่ำดับโค้งงอ มีผลทำให้ล่ำคลี่นของสายอากาศกว้างขึ้น เรียกว่า สายอากาศแฉลล่ำดับแบบคงรูป

บทความ [11] นำเสนอการออกสายอากาศแฉลล่ำดับแบบคงรูปที่ทาบบนรูปทรงกระบอก ส่ำหรับใช้กับระบบเรดาร์ ซึ่งต้องการพื้นที่ครอบคลุ่มทั้งหมด 360 องศา จึงได้ออกแบบเป็นลักษณะทาบบกับทรงกระบอก ออกแบบและจำลองสายอากาศขนาด 8X96 องศาประกอบ แต่สร้ำงจริงเพียงหนึ่งในเซคชันของสายอากาศทั้งหมดคือขนาด 1X24 องศาประกอบ ให้อัตราขยายเท่ากับ 19.2 dBi มีขนาดความกว้างล่ำคลี่นเท่ากับ 4.7 องศา สายอากาศที่นำเสนอทำงานระบบเรดาร์ โดยวิธีปรับล่ำคลี่นทางไฟฟ้าด้วยวงจรเลื่อนเฟสที่มีความละเอียดสูง สามารถปรับล่ำคลี่นละเอียดถึง 3.75 องศา ซึ่งลักษณะของ Steering beam antenna

บทความ [13] ออกแบบสายอากาศส่ำหรับระบบเรดาร์ SAR เป็นสายอากาศแฉลล่ำดับแบบคงรูปมีขนาด 30 แฉลล่ำดับย่อยเชิงเส้น ในแต่ละแฉลล่ำดับย่อยประกอบด้วย 4 องศาประกอบสายอากาศมีลักษณะโค้งงอเป็นรูปวงรีตัดขวาง ซึ่งการทำให้สายอากาศโค้งงอนั้นนอกจากจะช่วยเพิ่มขนาดความกว้างของล่ำคลี่นแล้ว ทำเพื่อจำลองเสมือนว่าสายอากาศทาบบนปีกหรือหางของเครื่องบิน ให้อัตราขยายเท่ากับ 12 dBi ต่อหนึ่งแฉลล่ำดับย่อย มีขนาดความกว้างล่ำคลี่นเท่ากับ 17 องศา การทำงานของสายอากาศในระบบใช้วิธีปรับล่ำคลี่นทางไฟฟ้าด้วยใช้วงจรเลื่อนเฟส และมีการปรับการป้อนกระแสแบบ Beamforming

การวิเคราะห์เชิงของระบบ

บทความ [6] และบทความ [8] และบทความออกแบบสายอากาศส่ำหรับใช้ในระบบเรดาร์ SAR สายอากาศเป็นลักษณะล่ำคลี่นคงที่ (Fixed-beam antenna) ดังนั้นใช้การปรับล่ำคลี่นทางกล เพื่อสแกนพื้นที่โดยติดตั้งสายอากาศบนรางเลื่อน

บทความ [9] นำเสนอระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมหรับสำหรับพื้นที่ทางวิ่งสายอากาศที่ใช้งานเป็นลักษณะล่ำคลี่นคงที่ (Fixed-beam antenna) เช่นกัน ดังนั้นใช้การปรับล่ำคลี่นทางกลแบบวงกลมเพื่อสแกนพื้นที่โดยติดตั้งสายอากาศบนโรเตเตอร์

งานวิจัยนี้จะการปรับลำดับทางไฟฟ้าแทนการปรับลำดับทางกล เนื่องจากต้องการ ออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมในรูปแบบ ระบบที่อยู่นิ่ง (Stationary system) ที่ สายอากาศและอุปกรณ์ต่างๆถูกติดตั้งบนหอคอยหรือซีพพอร์ดที่ไม่มีการเคลื่อนที่ ดังนั้นการใช้สายอากาศ ที่มีลักษณะลำดับคงที่ และต้องใช้การปรับลำดับทางกลจึงไม่เหมาะกับระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม ที่ออกแบบ

ตารางที่ 1.2 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

Ref	Application	Type of antenna	Antenna properties	Type of antenna beam	Beam scanning method
[6]	SAR	Open- ended Circular waveguide (2.45 GHz)	- Gain=7.2 dBi - HPBW = 72 deg - Linear polarization	Fixed-beam antenna	Mechanical scanning; Rail
[8]	SAR	Linear array antenna (2.45 GHz)	- Gain=9.87 dBi - HPBW = 24 deg - Linear polarization	Fixed-beam antenna	Mechanical scanning; Rail
[9]	Radar	Printed reflect array (76.5 GHz)	- Gain=39.00 dBi - Linear polarization	Fixed-beam antenna	Mechanical scanning; Rotator
		Parabolic reflector antenna (76.5 GHz)	- Gain=39.50 dBi - HPBW = 1.60 deg - Linear polarization	Fixed-beam antenna	Mechanical scanning; Rotator
[10]	Study	Conformal antenna array	- Linear polarization	-	-
[11]	Radar	Cylindrical conformal array antenna	- Gain=19.20 dBi - HPBW = 4.70 deg - Linear polarization	Steering beam antenna	Electrical scanning; Phased shifter circuits

Ref	Application	Type of antenna	Antenna properties	Type of antenna beam	Beam scanning method
[12]	SAR	Conformal array antenna (9.40 GHz)	<ul style="list-style-type: none"> - Gain=19.20 dBi - Scanning coverage = ± 70 deg - Linear polarization 	Beamforming antenna	Electrical scanning; Phased shifter circuits
Proposed antenna	SAR	Conformal antenna array (2.45GHz)	<ul style="list-style-type: none"> - Gain > 10 dBi - Linear polarization - Scanning coverage =90 deg - Constant gain property (Gain reduction < 3 dB) - High directional accuracy (Beam pointing error <20%) 	Switched-beam antenna	Electrical scanning; Phased shifter circuits

การวิเคราะห์เชิงของสายอากาศ

บทความ [11] และ [12] ออกแบบเป็นสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป และใช้วิธีการปรับลำคลื่นทางไฟฟ้าด้วยวงจรเลื่อนเฟส ซึ่งขนาดลำคลื่นของสายอากาศนั้นมีขนาดที่แคบ ดังนั้นต้องใช้วงจรเลื่อนเฟสที่ความละเอียด

งานวิจัยนี้จะออกแบบสายอากาศให้มีลักษณะลำคลื่นกว้างเพื่อชดเชยความละเอียดของวงจรเลื่อนเฟสที่มีจำกัด ใช้เทคนิคการโค้งง้อสายอากาศแถวลำดับมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้ลำคลื่นของสายอากาศกว้างขึ้น [10] การโค้งง้อของสายอากาศตามผิวรูปร่างต่างๆ เรียกว่า สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป

1.8 ประเด็นวิจัย

- 1) งานวิจัยมีเป้าหมายมุ่งเน้น ออกแบบ และ สร้างสายอากาศรับส่งสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุ แปรกล่อมภายในเขตการบิน นำไปประยุกต์ใช้กับท่าอากาศยานขนาดใหญ่ โดยการออกแบบนั้นต้องอยู่ภายใต้กฎข้อบังคับตามมาตรฐานการบิน
- 2) งานวิจัยนี้ใช้การปรับลำคลื่นของสายอากาศแทนการเคลื่อนที่ของสายอากาศและอุปกรณ์ของระบบเรดาร์ทั้งระบบ กล่าวคือใช้การปรับลำคลื่นของสายอากาศเป็นการปรับลำคลื่นทางไฟฟ้า แทนการปรับลำคลื่นทางกล
- 3) โดยปกติลำคลื่นของแถวลำดับที่ชี้ในทิศทางตั้งฉากกับระนาบแถวลำดับ มีอัตราขยายสูงสุด เมื่อปรับทิศทางของลำคลื่นไปในทิศทางขนานกับแนวระนาบของแถวลำดับ อัตราขยายของแถวลำดับจะมีค่าลดลง เนื่องจากรูปแบบการแผ่พลังงานขององค์ประกอบเดี่ยวมีขนาดลำคลื่นที่แคบ [13] งานวิจัยนี้ออกแบบสายอากาศ 1 องค์ประกอบ ให้มีความโค้งง้อเพื่อให้ขนาดของลำคลื่นกว้าง เมื่อรวมเป็นสายอากาศแถวลำดับแล้วสามารถปรับลำคลื่นใน 7 ทิศทางโดยที่อัตราขยายจะลดลงไม่เกินครึ่งหนึ่งของกำลังงานสูงสุด หรือ 3 dB
- 4) ออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป ซึ่งลักษณะโค้งง้อเพื่อให้ขนาดของลำคลื่นเมื่อรวมเป็นแถวลำดับแล้วมีขนาดลำคลื่นกว้าง

- 5) ออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป สามารถปรับลำคลื่น 7 ทิศทาง (0 องศา, ± 15 องศา, ± 30 องศา และ ± 45 องศา) และมีค่าความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทางของลำคลื่น ควรมีความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่เกิน 20% ของขนาดความกว้างลำคลื่น [14]

1.9 ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้มีแนวทางการดำเนินงานของ การออกแบบ และ สร้างสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป สำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม มีดังนี้

1) การทบทวนวรรณกรรม (Literature review)

การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวข้องกับทางด้านสายอากาศที่ถูกใช้งานในระบบเรดาร์ และศึกษาเทคโนโลยีระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมที่ใช้งานในปัจจุบันภายในอากาศยาน รวมไปถึงกฎระเบียบข้อบังคับของอากาศยาน เนื่องจากสายอากาศที่ออกแบบสำหรับระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนั้น จะนำไปประยุกต์ใช้กับอากาศยานต่อไป

2) วิเคราะห์ ออกแบบ และจำลองสายอากาศ

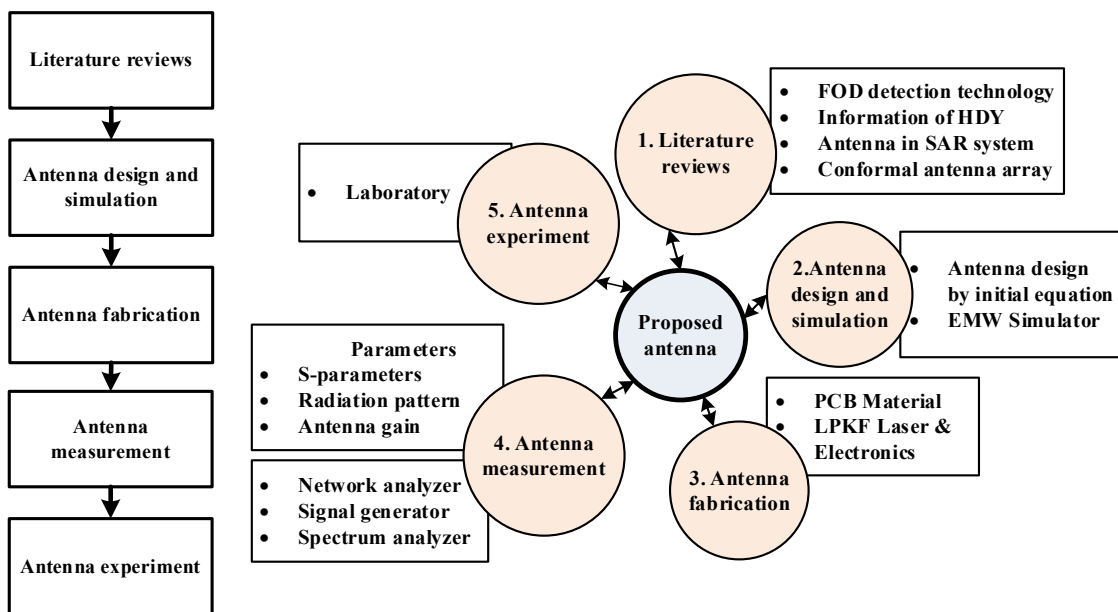
การวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศ โดยใช้สมการการคำนวณพื้นฐาน ร่วมกับโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

3) การสร้าง และปรับปรุง และทดสอบสายอากาศ

การสร้าง รวมถึงการปรับปรุงสายอากาศเพื่อให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการ สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้งาน ได้แก่ เครื่อง LPKF Laser & Electronics สำหรับการพิมพ์ลายของสายอากาศ

การทดสอบวัดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ภายใต้ห้องปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไร้คลื่นสะท้อน (Anechoic chamber) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient), ขนาดความกว้างแบนด์วิธ, รูปแบบการแผ่กระจายกำลัง (Radiation pattern), อัตราขยาย (Gain), ขนาดความกว้างของลำคลื่น (Half-power beamwidth, HPBW), แนวการโพลาไรซ์ (Polarization), ค่า Mutual coupling เป็นต้น โดยมีอุปกรณ์การทดสอบ เช่น เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer), เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum analyzer) และ เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal generator) เป็นต้น

สามารถสรุปกระบวนการวิจัยเป็นไดอะแกรมได้ดังในภาพประกอบที่ 1.48 ซึ่งแยกแสดงเป็นขั้นตอนด้วย flow diagram และผังความคิด



ก) Flow diagram

ข) ผังความคิด

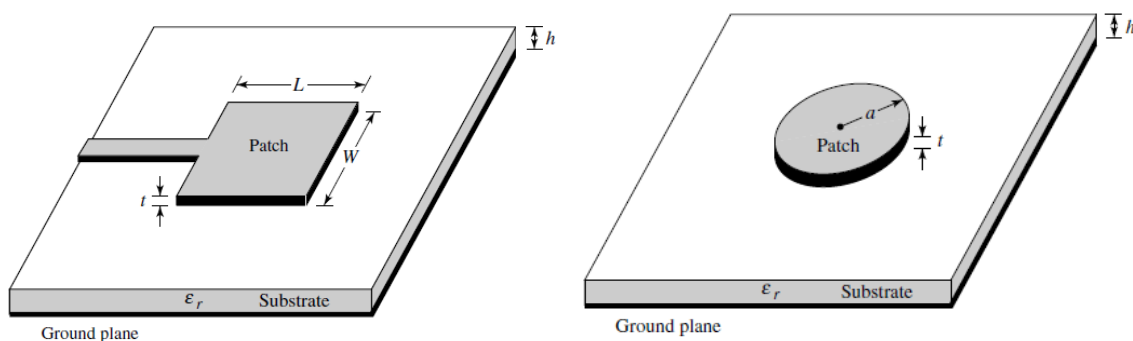
ภาพประกอบที่ 1.48 วิธีและแนวทางการวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ประกอบไปด้วย ทฤษฎีและการคำนวณของสายอากาศ, หลักการทำงานของระบบเรดาร์ และสมการการคำนวณต่างๆ

2.1 สายอากาศแพทช์ (Patch antenna)

สายอากาศแบบแพทช์หรือ Patch antenna มีลักษณะโครงสร้างของสายอากาศ ประกอบไปด้วยองค์ประกอบพื้นฐานคือ 1. ส่วนที่เป็นแผ่นตัวนำ หรือเรียกว่า Patch 2. แผ่นระนาบกราวด์ (Ground plane) ซึ่งแยกออกจากกันด้วย 3. วัสดุฐานรอง หรือเรียกว่า Substrate ที่มีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) มีโครงสร้างของสายอากาศแบบแพทช์แสดงดังภาพประกอบที่ 2.1



ก) ชนิดสี่เหลี่ยม (Rectangular)

ข) ชนิดวงกลม (Circular)

ภาพประกอบที่ 2.1 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ [15]

2.1.1 การออกแบบสายอากาศแพทช์ (Patch antenna)

สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบแพทช์ (Patch antenna) จะเริ่มจากการคำนวณความกว้างและความยาวของชั้นแพทช์ก่อนสามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ มีโครงสร้างแสดงดังภาพประกอบที่ 2.1

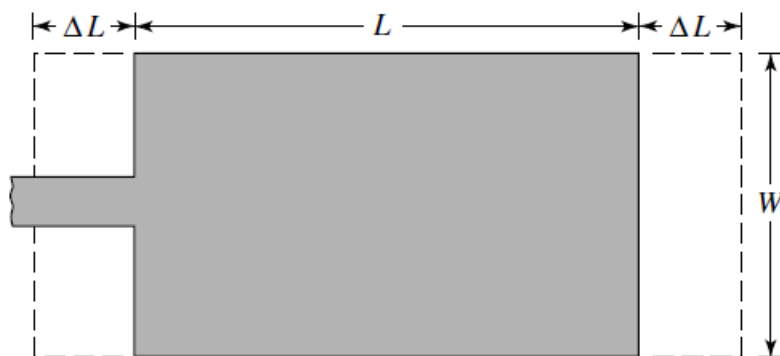
สมการคำนวณความกว้างของแพทช์ ดังสมการ (2.1)

$$W = \frac{1}{2f_c \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (2.1)$$

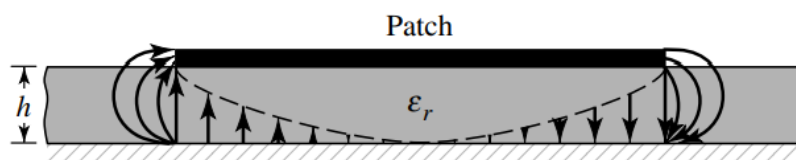
สมการคำนวณความยาวของแพทช์ ดังสมการ (2.2) เนื่องจากผลของ Fringing field ทำให้ขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศแพทช์มีขนาดใหญ่กว่าขนาดทางกายภาพเพิ่มขึ้นเป็นระยะ ΔL สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.3) แสดงดังภาพประกอบที่ 2.2

$$L = \frac{c}{2f_c \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (2.2)$$

$$\Delta L = 0.412h \left[\frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \right] \quad (2.3)$$



ภาพประกอบที่ 2.2 ระยะความกว้างและความยาวของแผ่นตัวนำ หรือแพทช์ชนิดสี่เหลี่ยม [15]



ภาพประกอบที่ 2.3 ด้านข้างของสายอากาศแพทช์ [15]

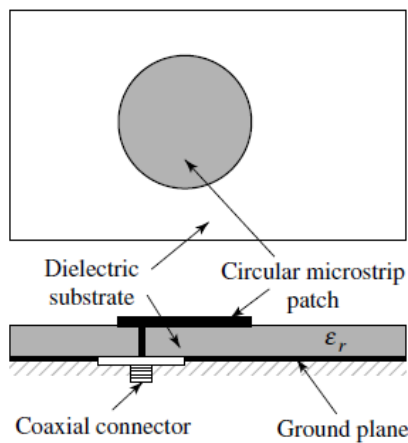
สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายอากาศแพทช์นั้น สนามไฟฟ้าที่แผ่กำลังงาน จะไม่มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากสนามไฟฟ้าแพร่อยู่ในสองตัวกลางที่ต่างกัน นั่นคือ อากาศและวัสดุฐานรอง (Substrate) ทำให้เกิดเป็น ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective dielectric constant, ϵ_{eff}) ซึ่งเกิดระหว่างอากาศและวัสดุฐานรอง สามารถคำนวณดังสมการ (2.4) โดยที่ W คือความกว้างของสายอากาศ (Width), L คือความยาวของสายอากาศ (Length), h คือความหนาของวัสดุฐานรอง

(Substrate), f_c คือความถี่ (Frequency), ϵ_{eff} คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective dielectric constant), ϵ_0 คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอากาศ (Dielectric constant in free space) และ ϵ_r คือค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของชั้นวัสดุฐานรอง (Relative dielectric constant)

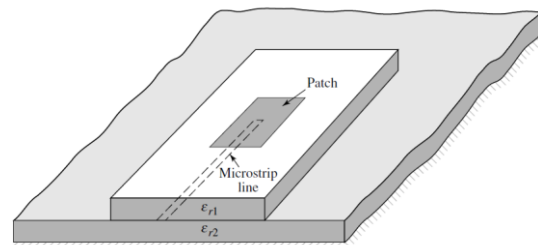
$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \right) \quad (2.4)$$

2.1.2 การป้อนสัญญาณ (Feeding methods)

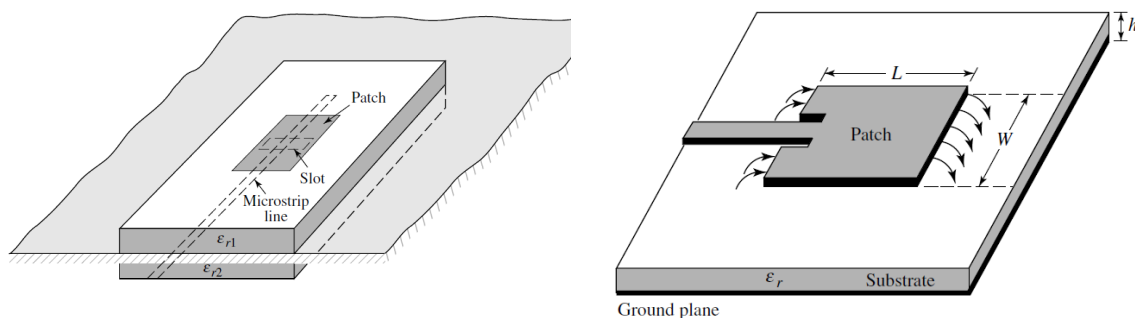
การป้อนสัญญาณ (Feeding Methods) ให้กับสายอากาศแบบแพทช์ โดยสายนำสัญญาณทำหน้าที่จ่ายกำลังงานให้แก่ สายอากาศแพทช์ โดยสายนำสัญญาณเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบคุณสมบัติของสายอากาศ รูปแบบการป้อนสัญญาณของสายอากาศแพทช์มี 4 ชนิดคือ สายโคแอกเซียลโพรบ (Coaxial probe), การป้อนแบบประกบ (Proximity coupling), การป้อนแบบช่องเปิด (Aperture coupling) และสายไมโครสตริป (Microstrip line) แสดงดังภาพประกอบที่ 2.4 ตามลำดับ



ก) สายโคแอกเซียลโพรบ (Coaxial probe)



ข) การป้อนแบบประกบ (Proximity coupling)



ค) การป้อนแบบช่องเปิด (Aperture coupling)

ง) สายไมโครสตริป (Microstrip line)

ภาพประกอบที่ 2.4 การป้อนสัญญาณของสายอากาศชนิดแพทช์ [15]

2.1.3 การโพลาไรซ์ของสายอากาศแพทช์

การโพลาไรซ์เป็นหนึ่งในคุณลักษณะของสายอากาศ ที่แสดงคุณสมบัติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่อธิบายในรูปแบบการเคลื่อนที่ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าทั้งขนาดและทิศทาง ซึ่งแปรผันตามเวลา ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ชนิดได้แก่ 1. แนวการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น (Linear Polarization), 2. แนวการโพลาไรซ์แนววงกลม (Circular Polarization) และ 3. แนวการโพลาไรซ์แบบวงรี (Elliptical Polarization)

2.2 สายอากาศแถวลำดับ (Array antenna)

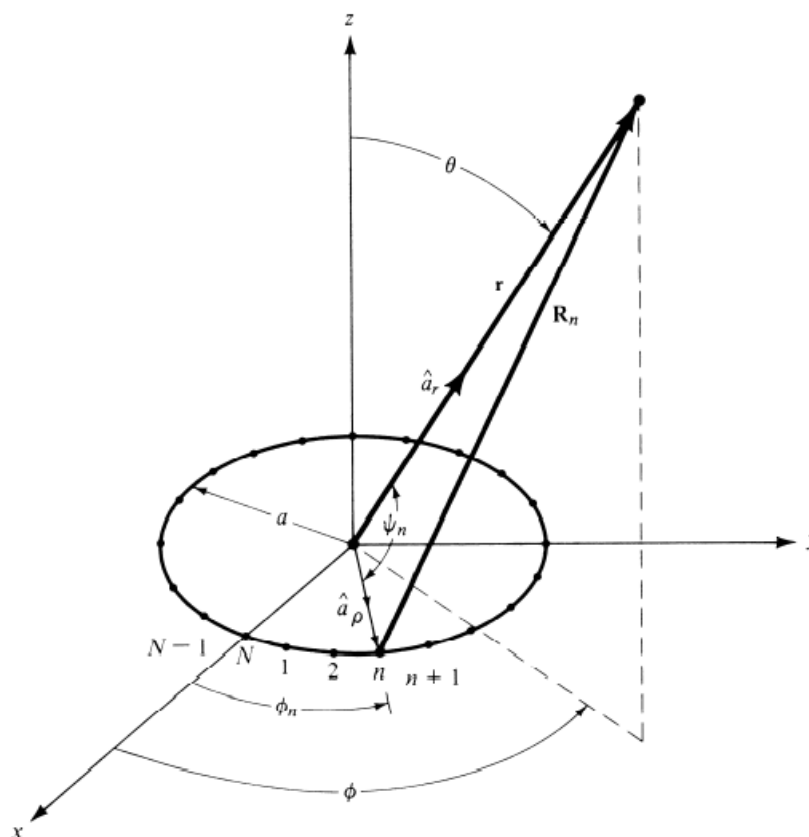
สายอากาศทั่วไปมีลักษณะเป็นองค์ประกอบเดี่ยว (Single element) ซึ่งมีคุณสมบัติของการแผ่พลังงาน บีบวิธกว้าง (Beamwidth) ซึ่งทำให้อัตราขยาย (Gain) และสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) มีค่าต่ำ ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานกับงานบางประเภทที่ต้องการสายอากาศที่มีอัตราขยายที่สูง เพื่อให้สามารถสื่อสารระยะทางที่ไกล และมีความแม่นยำสูง ซึ่งวิธีการเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศทำได้โดยการเพิ่มขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศ (Electrical antenna size) หรือ การเพิ่มพื้นที่ประสิทธิผล (Effective aperture area)

นอกจากการเพิ่มขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศ คือ การเพิ่มจำนวนขององค์ประกอบ ซึ่งเรียกว่า แถวลำดับ (Array) ทำให้สนามไฟฟ้ารวมสายอากาศแถวลำดับ เกิดจากการรวมทางเวกเตอร์ของสนามการแผ่พลังงานของแต่ละองค์ประกอบเดี่ยวนั้น ซึ่งมีปัจจัยอย่างน้อย 5 ประการด้วยกันที่จะ

ควบคุมรูปร่างของแบบรูปการแผ่พลังงานของแวลลำดับ ได้แก่ 1. การจัดเรียงองค์ประกอบของแวลลำดับ เช่น เส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม ทรงกลม เป็นต้น 2. ระยะห่างขององค์ประกอบ 3. ขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนแต่ละองค์ประกอบ 4. เฟสของกระแสที่ให้ป้อนแต่ละองค์ประกอบ และ 5. แบบรูปการแผ่กำลังของแต่ละองค์ประกอบ [15]

2.3 สายอากาศแวลลำดับแบบวงกลม (Circular antenna array)

สายอากาศแวลลำดับแบบวงกลม คือ องค์ประกอบของแวลลำดับมีการจัดเรียงตัวเป็นลักษณะวงแหวนวงกลม (Circular ring) ดังภาพประกอบที่ 2.5 ซึ่งสายอากาศชนิดนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การค้นหา ระบบการนำทาง เรดาร์ และโซร์นา เป็นต้น [15]



ภาพประกอบที่ 2.5 สายอากาศแวลลำดับแบบวงกลม จำนวน N องค์ประกอบ [15]

จากภาพประกอบที่ 2.5 แสดงลักษณะของสายอากาศแวลลำดับแบบวงกลม ที่วางตัวในระนาบ $x-y$ ประกอบด้วย N องค์ประกอบ จัดเรียงตัวกันในระยะห่างที่เท่ากันไปตามส่วนโค้งของวงกลม

ตามแนว ϕ ซึ่งองค์ประกอบลำดับที่ n มีตำแหน่งมุมในการจัดเรียงการจาดเรียงตัวเป็น ϕ_n และมีรัศมีเท่ากับ a โดยสามารถเขียนสมการนอมอไรซ์ของสนามไฟฟ้าได้ ดังสมการ (2.5) โดยที่ a คือรัศมีของวงกลม (Radius), R_n คือระยะจากองค์ประกอบลำดับที่ n ไปยังจุดที่สนใจ (Observation point), N คือจำนวนองค์ประกอบ (Number of element), ϕ_n คือตำแหน่งมุมขององค์ประกอบลำดับที่ n มีค่าเท่ากับ $\phi_n = 2\pi \left(\frac{n}{N}\right)$

$$E_n(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^N a_n \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \quad (2.5)$$

คำนวณค่า R_n ระยะของอิลิเมนต์ลำดับที่ n ไปยังจุดที่สนใจ (Observation point) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.6)

$$R_n = (r^2 + a^2 - 2ar \cos \psi)^{1/2} \quad (2.6)$$

กรณีที $r \gg a$ สามารถเขียนลดรูปได้ ดังสมการ (2.7)

$$R_n \simeq r - a(\hat{a}_p \cdot \hat{a}_r) = r - a \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \hat{a}_n \cdot \hat{a}_r &= (\hat{a}_x \cos \phi_n + \hat{a}_y \sin \phi_n) \\ &\cdot (\hat{a}_x \sin \theta \cos \phi + \hat{a}_y \sin \theta \sin \phi + \hat{a}_z \cos \theta) \end{aligned} \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.5) สามารถเขียนลดรูปสมการของสนามไฟฟ้าได้ดังสมการ (2.9) ซึ่งสมมติว่าขนาดของแอมพลิจูดมีการเปลี่ยนแปลงเป็น $R_n \simeq r$ โดยที่ a_n คือค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบลำดับที่ n (ประกอบด้วยแอมพลิจูดและเฟส) และ ϕ_n คือตำแหน่งมุมขององค์ประกอบลำดับที่ n มีค่าเท่ากับ $\phi_n = 2\pi \left(\frac{n}{N}\right)$

$$E_n(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} \sum_{n=1}^N a_n e^{+jkr \sin \theta \cos(\phi - \phi_n)} \quad (2.9)$$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ขององค์ประกอบในลำดับที่ n ดังสมการ (2.10) โดยที่ I_n คือแอมพลิจูดของกระแสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบลำดับที่ n และ α_n คือเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบลำดับที่ n

$$a_n = I_n e^{j\alpha_n} \tag{2.10}$$

จากสมการ (2.9) และ (2.10) สามารถเขียนสมการสนามไฟฟ้าในรูปแบบของตัวประกอบแถวลำดับ (Array factor) ดังสมการ (2.11)

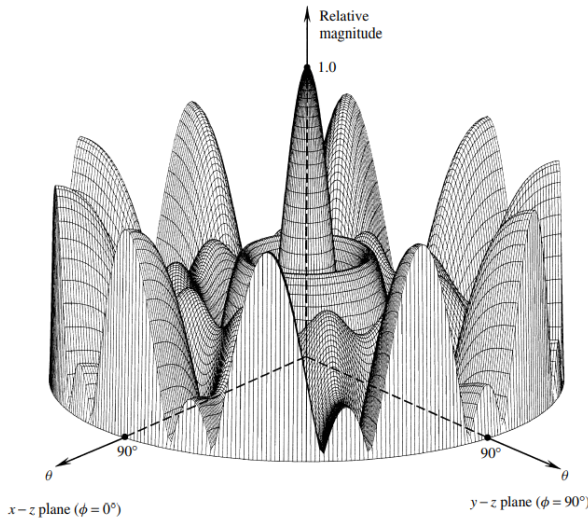
$$E_n(r, \theta, \phi) = \frac{e^{-jkr}}{r} [AF(\theta, \phi)] \tag{2.11}$$

สมการตัวประกอบแถวลำดับ (array factor) แสดงดังสมการ (2.12) โดยที่ I_n คือแอมพลิจูดของกระแสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบลำดับที่ n , α_n คือเฟสของกระแสที่ป้อนให้กับองค์ประกอบลำดับที่ n และ k คือ เลขคลื่น (Wave number) เท่ากับ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

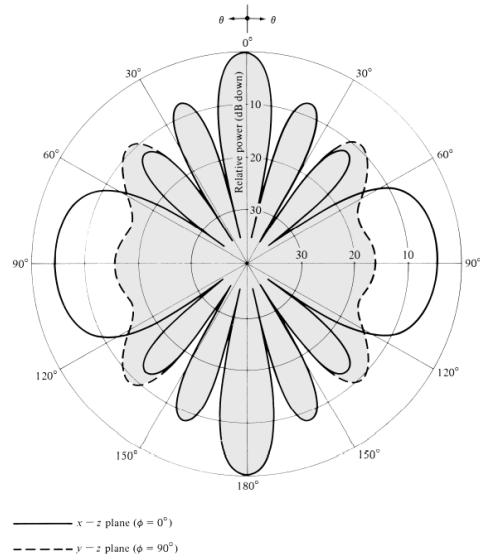
$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j[ka \sin \theta \cos(\phi - \phi_n) + \alpha_n]} \tag{2.12}$$

$$\alpha_n = -ka \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n) \tag{2.13}$$

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{jka[\sin \theta \cos(\phi - \phi_n) - \sin \theta_0 \cos(\phi_0 - \phi_n)]} \tag{2.14}$$



ก) สามมิติ



ข) สองมิติ

ภาพประกอบที่ 2.6 รูปแบบการแผ่กำลังในรูป 3 มิติของตัวประกอบประกอบแถวลำดับ [15]

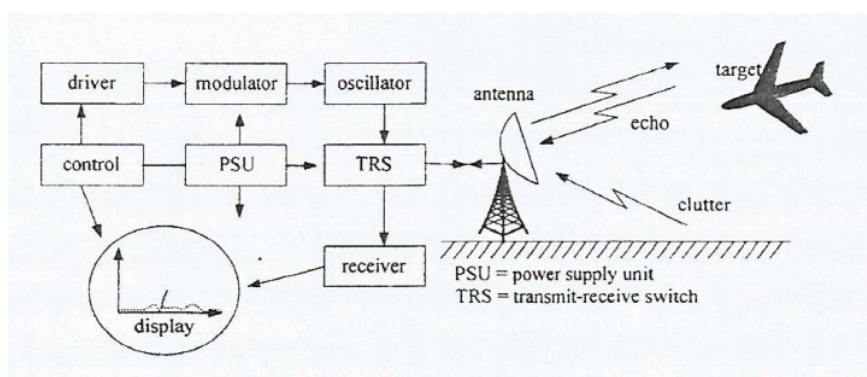
สมการ (2.14) เป็นสมการตัวประกอบแถวลำดับของสายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม (Circular array antenna) ขนาด N องค์ประกอบที่มีระยะห่างระหว่างแต่ละองค์ประกอบเท่ากัน ซึ่งโลปหลัก (Main beam) จะชี้ไปในทิศทาง (θ_0, ϕ_0) ซึ่งเฟสที่ป้อนให้กับแต่ละองค์ประกอบดังสมการ (2.13) แสดงตัวอย่างรูปแบบการแผ่กำลังงานในรูปสามมิติและสองมิติของแถวลำดับขนาด 10 องค์ประกอบ เป็นลักษณะ Uniform circular array กำหนด $ka = 10$ ดังภาพประกอบที่ 2.6

2.4 สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป (Conformal array antenna)

สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป หรือ Conformal array antenna มีรูปแบบพื้นฐานมาจากสายอากาศแถวลำดับแบบวงกลม (Circular array antenna) เพียงแต่สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปนั้นมีลักษณะการจัดวางบนพื้นผิวที่เป็น Non-planar กล่าวคือเป็นสายอากาศที่มีการจัดวางตามพื้นผิวของรูปร่างต่างๆ โดยสายอากาศชนิดนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องบิน ยานพาหนะ, เรือ รวมไปถึงเครื่องบินรบ เป็นต้น

2.5 เรดาร์ (Radar)

2.5.1 หลักการทำงานของเรดาร์

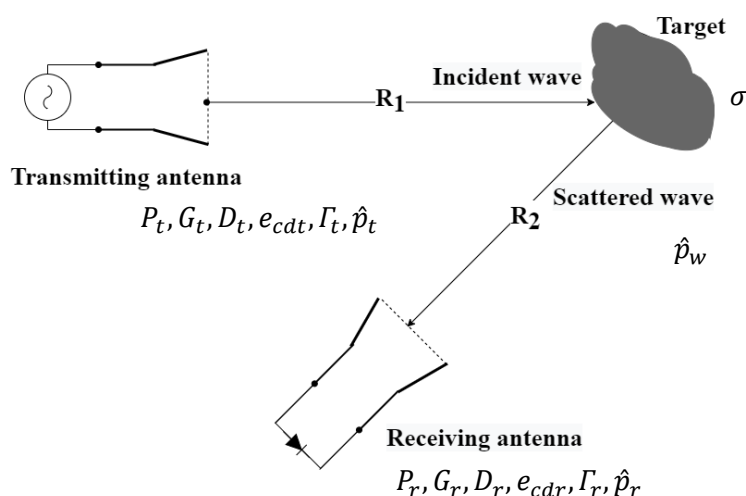


ภาพประกอบที่ 2.7 ระบบเรดาร์ [16]

เรดาร์ หรือ Radar ย่อมาจาก Radio Detection and Ranging เป็นเทคโนโลยีที่สามารถระบุตำแหน่งและระยะทางของวัตถุได้ โดยใช้หลักการของการสะท้อนกลับของคลื่น โดยเครื่องส่งได้ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ไปในบรรยากาศ และเครื่องรับสามารถรับสัญญาณที่เกิดจากการสะท้อนจาก

วัตถุ (Target) เป็นสัญญาณ Echo กลับมา ซึ่งระบบเรดาร์ที่นำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย อาทิ เช่น ทางด้านการทหาร (Military), ทำอากาศยาน (Air traffic control), ทางทะเล (Marine) และด้านอุตุนิยมวิทยา (Metrology) จากภาพประกอบที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการทำงานของระบบเรดาร์ [16]

2.5.2 สมการเรดาร์ (Radar's range equation)



รูปที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของภาคส่ง ภาครับ และวัตถุเป้าหมาย ในสมการเรดาร์ [15]

ภาคส่งของเรดาร์มีกำลังส่งเท่ากับ P_t ที่ส่งกำลังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาด้วยระยะทาง R_1 จากเครื่องส่งเรดาร์ และมีความหนาแน่นของกำลังไอโซทรอปิก (Isotropic power density, W_o) โดยสมมติสายอากาศว่ามีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทรงกลม (isotropic pattern) จะได้ดังสมการ (2.15)

$$W_o = \frac{P_t}{4\pi R_1^2} \quad (2.15)$$

ความหนาแน่นกำลังงานในสมการ (2.15) เป็นกรณีที่เป็นสายอากาศแบบทรงกลม (Isotropic antenna) ด้วยระยะทาง R_1 ซึ่งทั่วไปแล้วสายอากาศที่ใช้ในงานในเทคโนโลยีเรดาร์จะเป็นสายอากาศแบบมีทิศทาง (Directional antenna) ส่งผลให้ความหนาแน่นกำลังงานเพิ่มขึ้นด้วยอัตราขยายของสายอากาศ G_t สามารถเขียนได้ดังสมการ (2.16)

$$W_t = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R_1^2} \quad (2.16)$$

อัตราขยายของสายอากาศนั้นมีค่าเป็นอัตราส่วนของโลบหลัก (Main lobe) เทียบกับสายอากาศแบบทรงกลมหรือ isotropic ที่มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่รวมผลของค่าความสูญเสียภายใน สามารถคำนวณได้จากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity, D) และค่าประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (Radiation efficient, e_t) ดังสมการ (2.17)

$$G = e_t \cdot D \quad (2.17)$$

กำลังงานของคลื่นเรดาร์ที่กระเจิงจากวัตถุเป้าหมาย ขึ้นอยู่กับพื้นที่ตัดขวางเรดาร์ หรือ Radar cross section (RCS, σ) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการสะท้อนคลื่นของวัตถุเป้าหมาย มีหน่วยเป็นพื้นที่ m^2 ซึ่งค่า RCS ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 6 ประการได้แก่ 1. ชนิดของวัตถุเป้าหมาย วัตถุที่เป็นโลหะย่อมสะท้อนคลื่นได้ดีกว่าไม้ หรือ 2. รูปร่างของวัตถุ รูปร่างที่แบนราบสะท้อนคลื่นได้ดีกว่าที่เป็นวัตถุทรงกลม 3. วัตถุที่ผิวเรียบ จะสะท้อนคลื่นไม่กระจัดกระจาย 4. ขนาดของวัตถุ ซึ่งขนาดวัตถุที่ใหญ่กว่าจะสะท้อนคลื่นได้ดีกว่า 5. ทิศทางของคลื่น หากตั้งฉากจะสะท้อนคลื่นกลับไปหาเรดาร์ได้ หากไม่ตั้งฉากจะไม่สะท้อนกลับไปหาเรดาร์ 6. ความถี่ของเครื่องส่ง ความถี่ที่สูงกว่ามีผลต่อขนาดของการสะท้อนคลื่นได้ดีกว่า ดังนั้นค่ากำลังงานที่วัตถุตรวจจับได้และกระเจิงจากวัตถุเป้าหมายดังสมการ (2.18)

$$P_c = \sigma \cdot W_t = \sigma \cdot \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R_1^2} = e_t \cdot \sigma \cdot \frac{P_t \cdot D_t}{4\pi R_1^2} \quad (2.18)$$

ความหนาแน่นกำลังงานที่ได้จากภาครับได้รับ ณ ตำแหน่งสายอากาศภาครับ W_s สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.19)

$$W_s = \frac{P_c}{4\pi R_2^2} = \sigma \cdot \frac{P_t \cdot G_t}{(4\pi R_1 R_2)^2} = e_{cdt} \cdot \sigma \cdot \frac{P_t \cdot D_t}{(4\pi R_1 R_2)^2} \quad (2.19)$$

สายอากาศภาครับมีพื้นที่ประสิทธิผลคือ A_r และดูดซับกำลังงานที่ได้จากความหนาแน่นกำลังงานที่ภาครับ W_s ดังสมการ (2.20)

$$P_r = A_r \cdot W_s = \sigma \cdot \frac{P_t \cdot G_t \cdot A_r}{(4\pi R_1 R_2)^2} = e_{cdt} \sigma \cdot \frac{P_t \cdot D_t \cdot A_r}{(4\pi R_1 R_2)^2} \quad (2.20)$$

สมการของพื้นที่ประสิทธิผลของสายอากาศ A_r สามารถเขียนให้อยู่ในเทอมของอัตราขยาย G ได้ดังสมการ (2.21)

$$G = \frac{4\pi A_r}{\lambda^2} \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.20) และสมการ (2.21) ทำให้สมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งจากภาคส่งและกำลังที่ได้รับ จากภาครับในเทอมของอัตราขยายของสายอากาศภาคส่งและภาครับ และในเทอมของพื้นที่ประสิทธิผล ดังสมการ (2.22)

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2} = e_{cat} e_{cdr} \sigma \cdot \frac{D_t \cdot D_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2} = \sigma \cdot \frac{A_t \cdot A_r}{4\pi \lambda^2 R_1^2 R_2^2} \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.22) นำพิจารณาสมมติฐานของค่า signal-to-noise ratio (S/N) โดยให้ค่ากำลังงานที่รับได้ที่ต่ำที่สุด P_{Rmin} และระยะทางจะแทนด้วยระยะทางที่ไกลที่สุดของพื้นที่ครอบคลุม R_{max} ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (2.23) ซึ่งในสมการนี้ สายอากาศรับและสายอากาศส่งอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน นั่นคือ $R_1 = R_2 = R$

$$R_{max} = \sqrt[4]{P_t \cdot \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot P_{Rmin}} \cdot \sigma} = \sqrt[4]{P_t \cdot \frac{A_t \cdot A_r}{4\pi \lambda^2 \cdot P_{Rmin}} \cdot \sigma} \quad (2.23)$$

ค่าระยะทางสูงสุด R_{max} จะขึ้นอยู่กับกำลังงานส่งของภาคส่ง P_t และค่าภาคตัดขวางของการสะท้อนของวัตถุเป้าหมายเรดาร์ (RCS, σ) โดยมีสัดส่วนของรากที่สี่ สำหรับสมการขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่น จะค่อนข้างมีความซับซ้อนเนื่องจาก ค่าความยาวคลื่นเองก็แฝงอยู่ในค่าภาคตัดขวางของการกระเจิง (Scattering cross section) ได้เช่นกัน เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่บางครั้งขึ้นอยู่กับค่าความถี่ด้วยซึ่งขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุเป้าหมาย ด้วยเหตุนี้สำหรับการประมาณของระยะของพื้นที่ครอบคลุมที่ขึ้นอยู่กับค่าความถี่มักจะเกี่ยวข้องกับคุณลักษณะที่สำคัญที่ต้องพิจารณาดังนี้ 1. อัตราขยายของสายอากาศ 2. ค่าการลดทอนของการแพร่กระจายคลื่น และ 3. ค่าภาคตัดขวางของการสะท้อนของวัตถุเป้าหมาย (RCS)

สมการ (2.22) แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังส่งจากภาคส่งและกำลังที่ได้รับจากภาครับ นำมาเขียนในเทอมของค่าสภาพเจาะจง (Directivity, D) ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศ

(Radiation efficiency) และรวมผลของแนวโพลาไรซ์ (Polarization loss factor, *PLF*) ผลจากการสะท้อน (Reflection loss) แสดงดังสมการ (2.24) เมื่อสายอากาศมีโพลาไรซ์แมตซ์กัน สามารถเขียนลดรูปของจากสมการ (2.24) ได้ดังสมการ (2.25)




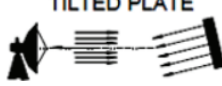

$$\frac{P_r}{P_t} = e_{cdt}e_{cdr}(1 - |\Gamma_t|^2)(1 - |\Gamma_r|^2)\sigma \cdot \frac{D_t \cdot D_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2} \cdot |\hat{p}_w \cdot \hat{p}_r|^2 \quad (2.24)$$




$$\frac{P_r}{P_t} = \sigma \cdot \frac{G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 R_1^2 R_2^2} \quad (2.25)$$

2.5.3 การคำนวณพื้นที่ตัดขวางเรดาร์ (Radar cross section)

พื้นที่ตัดขวางเรดาร์ หรือ Radar cross section (RCS, σ) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการสะท้อนคลื่นของวัตถุเป้าหมาย มีหน่วยเป็นพื้นที่กำลังสอง แสดงตัวอย่างรูปทรงและสมการการคำนวณค่า RCS ของรูปทรงต่างๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การคำนวณพื้นที่ตัดขวางเรดาร์ ในรูปทรงต่างๆ

รูปทรง	สูตรการคำนวณ
 <p>SPHERE ทรงกลม</p>	$\sigma_{max} = \pi r^2$
 <p>CYLINDER ทรงกระบอก</p>	$\sigma_{max} = \frac{2\pi r h^2}{\lambda}$
 <p>FLAT PLATE ระนาบ</p>	$\sigma_{max} = \frac{4\pi r W^2 h^2}{\lambda^2}$
 <p>TILTED PLATE ระนาบเอียง</p>	$\sigma_{max} = \frac{4\pi r W^2 h^2}{\lambda^2}$
 <p>CORNER ตัวมุมสะท้อน Dihedral Corner Reflector</p>	$\sigma_{max} = \frac{8\pi r W^2 h^2}{\lambda^2}$

รูปทรง	สูตรการคำนวณ
 ตัวมุมสะท้อน สามเหลี่ยม	$\sigma_{max} = \frac{\pi L^4}{3\lambda^2}$
 ตัวมุมสะท้อน สี่เหลี่ยม	$\sigma_{max} = \frac{12\pi L^4}{\lambda^2}$
 ตัวมุมสะท้อน แบบโค้ง	$\sigma_{max} = \frac{15.6\pi L^4}{3\lambda^2}$

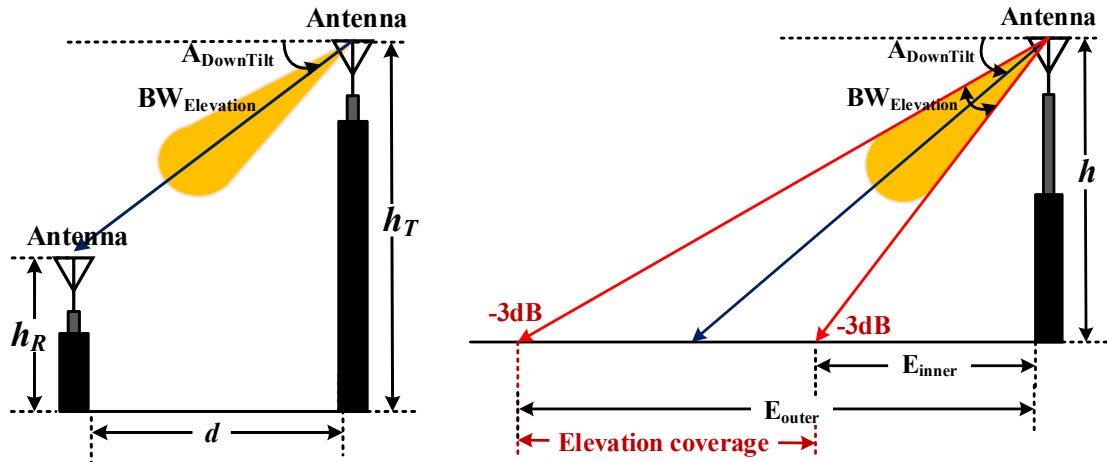
2.6 การคำนวณพื้นที่ครอบคลุม (Footprint coverage calculation)

การคำนวณระยะที่สายอากาศแพร่กระจายคลื่น จะพิจารณาจากความกว้างคลื่นครึ่งกำลังของสายอากาศ มีขนาดความกว้างเพียงพอสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการได้

2.6.1 การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมในแนวระนาบมุมยก

การคำนวณเพื่อหาระยะที่สายอากาศจะแพร่กระจายสัญญาณเอียงลงมา (Down tilt) และพื้นที่ครอบคลุมของสายอากาศ ซึ่งขึ้นอยู่กับความกว้างลำคลื่นของสายอากาศ ดังภาพประกอบที่ 2.8 สำหรับการคำนวณมุมก้มสำหรับสายอากาศส่ง เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ ดังสมการ (2.27) และรัศมีของพื้นที่ที่ครอบคลุมทั้งภายในและภายนอกดังสมการ (2.28) และ (2.29) ตามลำดับ

สามารถคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้ โดยที่ $A_{DownTilt}$ คือมุมเอียงของสายอากาศ, h_T คือความสูงของสายอากาศส่ง, h_R คือความสูงของสายอากาศรับ, d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศรับและส่ง, E_{outer} คือรัศมีวงนอกของพื้นที่ครอบคลุม, E_{inner} คือรัศมีวงในของพื้นที่ครอบคลุม, $BW_{Elevation}$ คือความกว้างกำลังงานคลื่นครึ่งกำลังในแนวระนาบมุมยก (Elevation beamwidth)



ภาพประกอบที่ 2.8 การคำนวณระยะเอียงและพื้นที่ครอบคลุมของสายอากาศ

$$h = h_T - h_R \quad (2.26)$$

$$A_{DownTilt} = \tan^{-1}\left(\frac{h}{d}\right) \quad (2.27)$$

$$E_{inner} = \frac{h}{\tan\left(90 - A_{DownTilt} - \frac{BW_{Elevation}}{2}\right)} \quad (2.28)$$

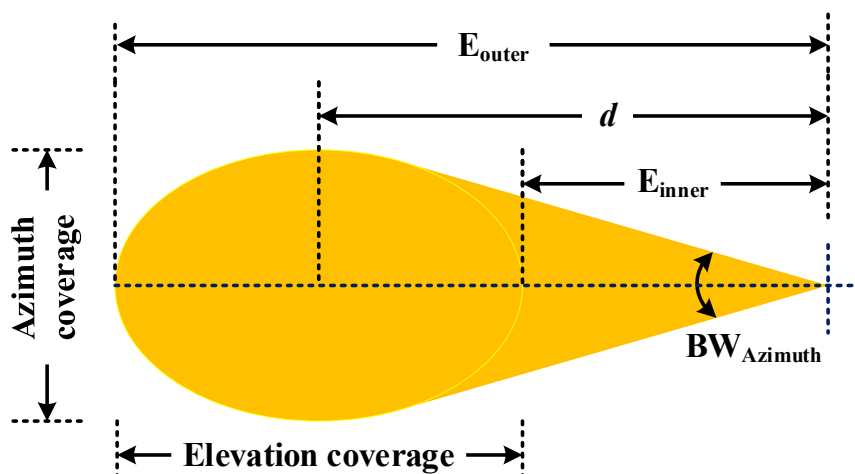
$$E_{outer} = \frac{h}{\tan\left(90 - A_{DownTilt} + \frac{BW_{Elevation}}{2}\right)} \quad (2.29)$$

$$Elevation\ coverage = E_{outer} - E_{inner} \quad (2.30)$$

2.6.2 การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมในแนวระนาบมุมกวาด

การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมที่ลำคลื่นของสายอากาศแพร่กระจายคลื่นในแนวระนาบมุมกวาด (Azimuth coverage) ซึ่งพื้นที่ครอบคลุมนั้นขึ้นอยู่กับความกว้างของกำลังงานครึ่งคลื่นในแนวระนาบมุมกวาด (Azimuth beamwidth) แสดงดังภาพประกอบที่ 2.9 สามารถคำนวณหาความกว้างของพื้นที่ที่ลำคลื่นครอบคลุมในแนวระนาบมุมกวาด ดังสมการ (2.31) โดยที่ *Azimuth coverage* คือ พื้นที่ครอบคลุมในแนวระนาบมุมกวาด (Azimuthal beamwidth) และ $BW_{Azimuth}$ คือความกว้างคลื่นครึ่งกำลังในแนวระนาบมุมกวาด (Azimuth beamwidth)

$$Azimuth\ coverage = \frac{2 \times \tan\left(\frac{BW_{Azimuth}}{2}\right) \times h}{\tan(A_{DownTilt})} \quad (2.31)$$



ภาพประกอบที่ 2.9 พื้นที่ครอบคลุมในแนวระนาบมุมกวาด

2.6.3 สรุป

บทนี้นำเสนอ ทฤษฎีและหลักการ รวมไปถึงการสมการคำนวณต่างๆ ที่ต้องใช้ภายในวิจัยนี้ ดังนี้

1. ทฤษฎี และสมการการออกแบบสายอากาศแพทช์

สายอากาศที่นำเสนอภายในวิจัยนี้คือ สายอากาศแกลวลำดับ ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่เป็นสายอากาศแพทช์

2. หลักการทำงานเรดาร์

สายอากาศที่นำเสนอทำงานภายใต้ระบบเรดาร์ช่องเปิด ดังนั้นผู้วิจัยต้องเข้าใจหลักการทำงาน และใช้สมการเรดาร์สำหรับคำนวณ Power budget ภายในของระบบ

3. สมการ การคำนวณพื้นที่ครอบคลุมของสายอากาศที่ถูกแผ่กระจาย เพื่อให้ทราบถึงขนาดของพื้นที่ครอบคลุม ที่ลำคลื่นของสายอากาศที่ออกแบบจะแพร่กระจายไปยังพื้นที่เป้าหมายได้ เพื่อตรวจจับวัตถุแปลกปลอมบนเขตพื้นที่การบิน

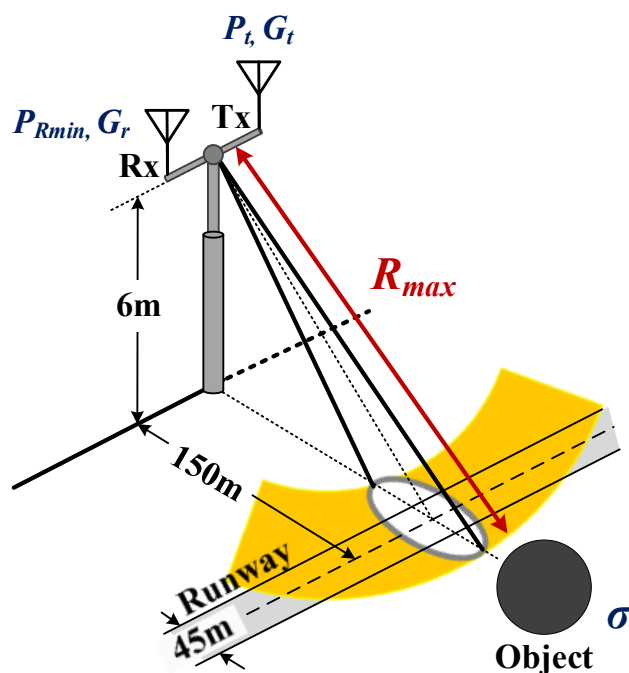
บทที่ 3 การออกแบบ จำลอง และทดสอบสายอากาศ

บทนี้นำเสนอ สายอากาศสำหรับระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม คือ สายอากาศแถว ลำดับแบบคงรูป ซึ่งประกอบด้วย 1. การคำนวณ Power budget 2. การออกแบบสายอากาศ 3. การจำลองสายอากาศ 4. การสร้างสายอากาศ และ 5. การทดสอบสายอากาศ

3.1 การคำนวณ Power budget

3.1.1 การคำนวณอัตราขยายของสายอากาศ

ก่อนการออกแบบสายอากาศ จำนวนอัตราขยายของสายอากาศที่น้อยที่สุดที่สามารถทำงานในระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศที่ต่ำที่สุดจากสมการเรดาร์ (2.23) โดยปกติสมการเรดาร์ ใช้คำนวณหาระยะทางไกลที่สุดของเรดาร์ เมื่อคลื่นเดินทางไปยังพื้นที่เป้าหมาย และสามารถสะท้อนกลับมายังภาครับได้ โดยจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กำลังงานส่ง (P_T) พื้นที่ตัดขวางเรดาร์ (σ) ค่ากำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถรับได้ (P_{Rmin}) หรือค่าความไวของภาครับและอัตราขยายของสายอากาศ (G) แสดงดังภาพประกอบที่ 3.1



ภาพประกอบที่ 3.1 การคำนวณ Radar's range

$$R_{max} = \sqrt[4]{P_T \cdot \frac{G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot P_{Rmin}} \cdot \sigma} \quad (2.23)$$

ระยะทางระหว่างสายอากาศ และพื้นที่เป้าหมาย R_{max} มีค่าเท่ากับ 173 m ภาคส่งมีกำลังส่ง P_T เท่ากับ 30 dB ภาครับสามารถรับกำลังงานได้ต่ำที่สุด P_{Rmin} มีค่าเท่ากับ -110 dB โดยใช้วัตถุเป้าหมายเป็นทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12.24 cm เป็นขนาดของความยาวคลื่นของความถี่ 2.45 GHz สามารถคำนวณเป็นพื้นที่ตัดขวางเรดาร์ตามตารางที่ 2.1

มีค่า σ เท่ากับ 0.0117 m² สามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศตามสมการ (2.23) ซึ่งในที่นี้สายอากาศของภาครับและภาคส่งเป็นสายอากาศชนิดเดียวกันและให้อัตราขยายเท่ากัน จากการคำนวณอัตราของสายอากาศ G ควรมีค่าน้อยมีค่าเท่ากับ 13 dBi

3.1.1 การคำนวณกำลังงานที่ภาครับได้รับ

การคำนวณกำลังงานที่ภาครับได้รับ เมื่อสายอากาศมีอัตราขยายของภาคส่ง และภาครับ ($G_T = G_R$) มีค่าน้อยเท่ากับ 13 dBi ภาคส่งมีกำลังงานส่ง (P_T) เท่ากับ 30 dBm โดยที่ระยะทางระหว่างสายอากาศและพื้นที่เป้าหมาย (d) เท่ากับ $173 \times 2 = 346$ m ซึ่งคำนวณเป็นระยะทางที่คลื่นเดินทางไปและกลับแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถคำนวณกำลังงานสูญเสียในอากาศว่าง (L_{FSPL}) จากสมการ (3.2) มีค่าเท่ากับ 91 dB กำลังงานสูญเสียภายในระบบ (L_{system}) มีค่าเท่ากับ 3 dB

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_{FSPL} - L_{system} \quad (3.1)$$

$$L_{FSPL} = 32.5 + 20 \log(f \text{ in MHz}) + 20 \log(d \text{ in m}) \quad (3.2)$$

โดยที่ P_R คือค่ากำลังงานที่ภาครับ ได้รับ (Receive power) หน่วยเป็น dBm

L_{FSPL} คือค่ากำลังงานสูญเสียในอากาศว่าง (Free space loss) หน่วยเป็น dB

G_T คืออัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง (Gain transmit antenna) หน่วยเป็น dBi

G_R คืออัตราขยายของสายอากาศภาครับ (Gain receive antenna) หน่วยเป็น dBi

L_{system} คือค่ากำลังงานสูญเสียภายในระบบ (System loss) หน่วยเป็น dB

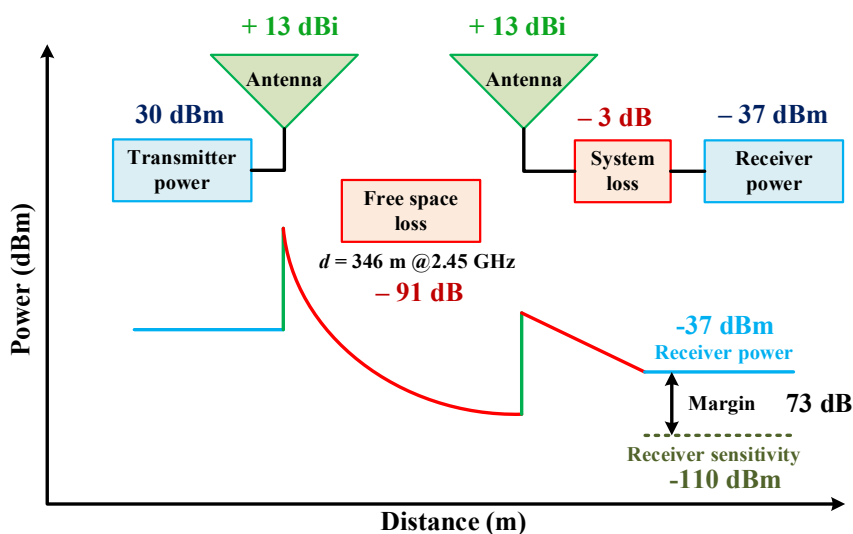
การกำลังงานที่ภาครับได้รับจากสมการการส่งผ่านของฟรีส (Friis transmission equation) ดังสมการ (3.1) จากการคำนวณกำลังที่ภาครับได้รับมีค่าเท่ากับ -37 dB เมื่อสายอากาศส่งและรับมีอัตราขยายเท่ากับ 13 dBi

3.1.2 การคำนวณค่า Margin ของระบบ

การทำงานของระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนั้น จะต้องสามารถทำงานได้ตลอดทั้งช่วงกลางวัน และกลางคืน รวมไปถึงทุกช่วงสภาพอากาศ จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณค่า Margin เพื่อเอาไว้ เพื่อให้แน่ใจว่า คลื่นจากภาคส่งเดินทางถึงภาครับ โดยทั่วไปค่า Margin ของระบบควรมีค่าน้อยกว่า 30 dB

$$\text{Margin} = [\text{Receive power}] - [\text{Rx sensitivity}] \quad (3.3)$$

โดยค่าความไวของภาครับ (*Rx sensitivity*) เท่ากับ -110 dBm และจากการคำนวณกำลังที่ภาครับได้รับ (*Rx power*) เท่ากับ -37 dBm สามารถคำนวณ Margin ของระบบตามสมการ (3.3) จากการคำนวณมีค่า Margin เท่ากับ 73 dB ดังนั้น สายอากาศที่อัตราขยายเท่ากับ 13 dBi สามารถทำงานภายในระบบเรดาร์ตรวจจับแปลกปลอมได้ แสดงการคำนวณ Power budget ดังภาพประกอบที่ 3.2



ภาพประกอบที่ 3.2 การคำนวณ Power budget

ภายหลังจากได้อัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับที่น้อยที่สุดที่สามารถทำงานในระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนี้ได้แล้ว ในลำดับถัดไปเป็นการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป โดยประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ 1. การออกแบบสายอากาศขนาด 1 องค์ประกอบ และ 2. สายอากาศแถวลำดับแบบ โดยนำสายอากาศขนาด 1 องค์ประกอบนั้นมาจัดเรียงเป็นสายอากาศแถวลำดับ

3.2 สายอากาศ 1 องค์ประกอบ (Single element)

สายอากาศสำหรับระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนั้น เป็น สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป มีลักษณะเป็นสายอากาศแถวลำดับ โดยแต่ละองค์ประกอบมีโครงสร้างลักษณะที่โค้งงอ เพื่อให้แบบรูปการแผ่พลังงานต่อ 1 องค์ประกอบ มีขนาดความกว้างลำคลื่นมีขนาดกว้างขึ้น สายอากาศแถวลำดับสามารถปรับลำคลื่นได้กว้างจะตำแหน่งบอร์ดไซด์ (Broadside) โดยที่อัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับไม่ต่ำกว่า 3 dB และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางสูง

3.2.1 การออกแบบสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศสำหรับระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอม มีเงื่อนไขสำหรับดังนี้ ทำงานที่ความถี่กลางเท่ากับ 2.45 GHz สามารถใช้งานในช่วงแบนด์วิธมากกว่า 40 kHz และอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับต้องมีค่ามากกว่า 13 dBi เพื่อสามารถทำงานได้ภายใต้ Margin ของระบบ มาจากคำนวณ Power budget จากหัวข้อก่อนหน้า

การออกแบบสายอากาศแพทช์แบบโค้งขนาด 1 องค์ประกอบ เนื่องด้วยลักษณะสายอากาศต้องมีการโค้งงอของโครงสร้างสายอากาศ ทางผู้วิจัยเลือกออกแบบสายอากาศแบบแพทช์โค้ง โดยใช้งานวัสดุแผ่น PCB แบบ Flexible ที่มีความยืดหยุ่นสามารถพับหรืองอได้ เป็นชนิด FR-4 ที่มีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1 อย่างไรก็ตาม สายอากาศแพทช์โดยทั่วไปที่ออกแบบโดยใช้วัสดุชนิด FR4 สามารถให้อัตราขยายประมาณ 3-5 dBi และนอกจากนี้ความหนาของวัสดุแผ่น Flexible PCB มีความหนาเพียง 0.20 mm ส่งผลให้มีประสิทธิภาพของสายอากาศน้อย ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ ทางผู้วิจัยประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบช่องเปิด โดยการแทรกชั้นอากาศระหว่างชั้นวัสดุฐานรองและชั้นกราวด์ ซึ่งเรียกว่า “Suspended patch antenna” ซึ่งการแทรกชั้นอากาศสามารถเพิ่มอัตราขยายของสายอากาศและสามารถเพิ่มความแบนด์วิธด้วยเช่นกัน ทางผู้วิจัยจะเรียกโครงสร้างของ

สายอากาศแพทช์ธรรมดาที่ไม่มีการโค้งงอของโครงสร้างว่า “Suspended planar patch antenna” หรือ SPPA และสำหรับสายอากาศแพทช์แบบโค้งงอว่า “Suspended conformal patch antenna” หรือ SCPA เนื่องด้วยโครงสร้างของสายอากาศแพทช์เป็นลักษณะช่องเปิด (Suspended structure) มีชั้นอากาศอยู่ระหว่างชั้นวัสดุฐานรองและชั้นกราวด์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้าง Support สำหรับแยกชั้นวัสดุฐานรองและชั้นกราวด์ โดยที่ซัพพอร์ตเป็นโมเดลสามมิติสร้างจากเครื่อง 3D Printer ใช้วัสดุชนิด PLA แสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุแผ่น Flexible PCB ชนิด FR-4

พารามิเตอร์	ตัวแปร	หน่วย	ค่า
ค่าไดอิเล็กตริกของชั้นวัสดุฐานรอง (Dielectric constant)	ϵ_r	-	4.3
ความหนาของชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate thickness)	h	mm	0.2
ความหนาของชั้นทองแดง (Copper thickness)	t	mm	0.035
ค่า Loss tangent	$\tan\delta$	-	0.025

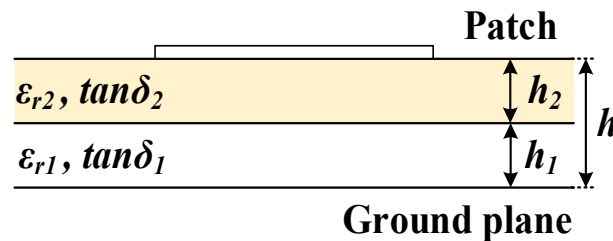
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุ Filament PLA [17]

พารามิเตอร์	ตัวแปร	หน่วย	ค่า
ค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุ PLA (Dielectric constant)	ϵ_r	-	2.451
ค่า Loss tangent	$\tan\delta$	-	0.0071

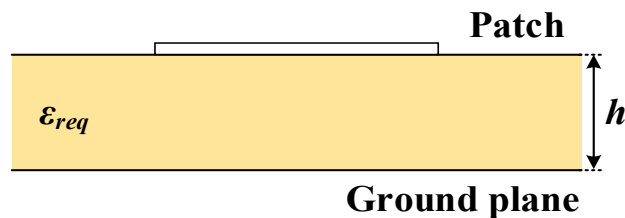
โครงสร้างสายอากาศที่ออกแบบเป็นสายอากาศแพทช์แบบโค้งงอขนาด 1 องค์กรประกอบ ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นวัสดุของชนิดคือ ชั้นวัสดุฐานรองและชั้นอากาศ โดยที่โครงสร้างสายอากาศแพทช์ SPPA คือมีรัศมี R เท่ากับอนันต์ (Planar) ดังภาพประกอบที่ 3.4 และโครงสร้างสายอากาศแพทช์ SPPA คือมีรัศมีเท่ากับ R โดยผู้วิจัยกำหนดรัศมีโค้งงอของสายอากาศแพทช์เท่ากับ 60 mm, 45 mm และ 30 mm เพื่อเปรียบเทียบและศึกษาคุณลักษณะของสายอากาศแสดงดังภาพประกอบที่ 3.5 โดยแสดงพารามิเตอร์ดังนี้ W คือขนาดความกว้างของสายอากาศแพทช์, L คือขนาดความยาวของสายอากาศแพทช์ สายอากาศถูกป้อนสัญญาณด้วยวิธี Microstrip line โดยมี W_t คือขนาดความกว้างของ Microstrip line, W_g คือขนาดความกว้างของกราวด์, L_g คือขนาดความยาวของกราวด์, y_0 คือระยะ

ของจุดบ่อนสัญญาณ, h_1 คือความหนาของชั้นอากาศ, h_2 คือความหนาของชั้นวัสดุฐานรอง, ϵ_{r1} คือค่าไดอิเล็กตริกของชั้นอากาศ และ ϵ_{r2} คือค่าไดอิเล็กตริกของชั้นวัสดุฐานรอง

การคำนวณขนาดของโครงสร้างสายอากาศแพทช์ซึ่งทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ความกว้างและความยาวจากสมการ (2.1) และ (2.2) ชั้นของวัสดุฐานรองประกอบด้วยวัสดุสองชนิดคืออากาศและวัสดุฐานรองชนิด FR4 สามารถคำนวณค่าไดอิเล็กตริกสมมูล (Equivalent dielectric constant) ของวัสดุสองชนิดดังภาพประกอบที่ 3.3ก) จากสมการ (3.4) และนำค่าไดอิเล็กตริกสมมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective dielectric constant, ϵ_{eff}) จากสมการ (2.4) แสดงค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องศาประกอบ จากการคำนวณดังตารางที่ 3.3



ก) โครงสร้างสายอากาศแพทช์ช่องเปิด

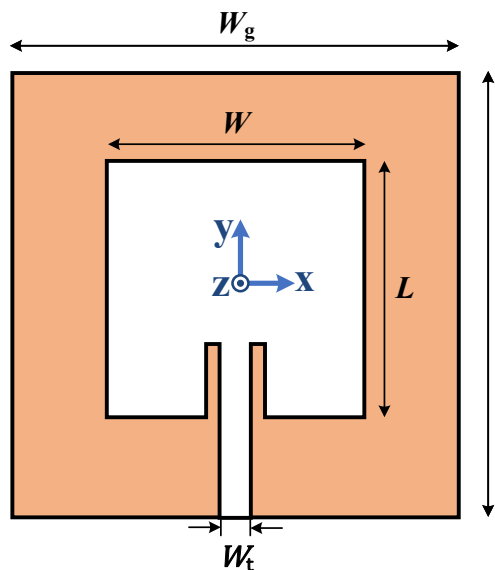


ข) โครงสร้างสายอากาศที่มีไดอิเล็กตริกสมมูล

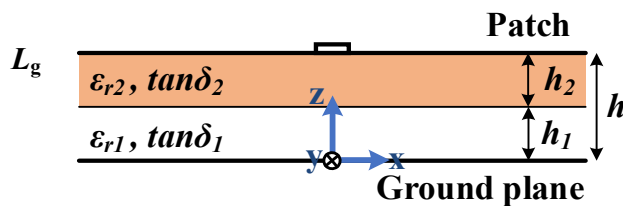
ภาพประกอบที่ 3.3 โครงสร้างสายอากาศแพทช์

การคำนวณค่าไดอิเล็กตริกสมมูล (Equivalent dielectric constant, ϵ_{req}) ของวัสดุไดอิเล็กตริกสองชนิดดังสมการ (3.4) โดยที่ ϵ_{r1} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองชั้นที่หนึ่ง ϵ_{r2} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองชั้นที่สอง h_1 คือ ความหนาของวัสดุฐานรองชั้นที่หนึ่ง และ h_2 คือ ความหนาของวัสดุชั้นฐานรองที่สอง

$$\epsilon_{req} = \frac{\epsilon_{r1}\epsilon_{r2}(h_1 + h_2)}{\epsilon_{r1}h_2 + \epsilon_{r2}h_1} \quad (3.4)$$

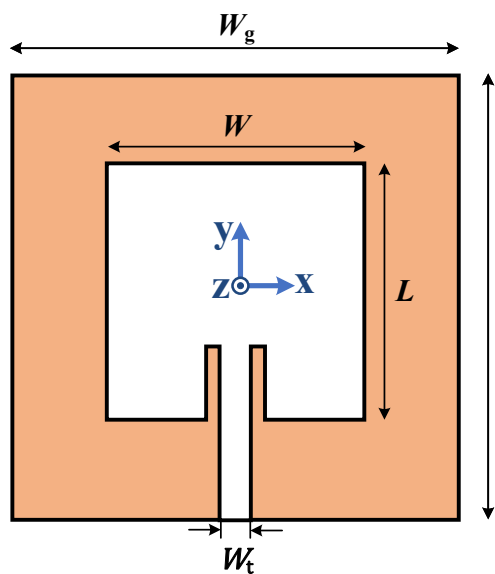


ก) ด้านบน

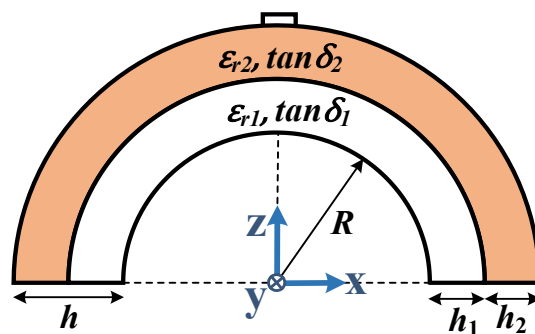


ข) ด้านหน้า

ภาพประกอบที่ 3.4 สายอากาศแพทช์ SPPA



ก) ด้านบน



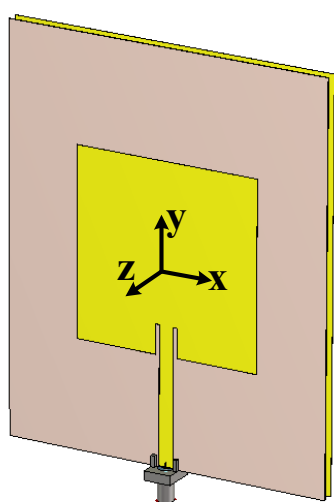
ข) ด้านหน้า

ภาพประกอบที่ 3.5 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ SCPA

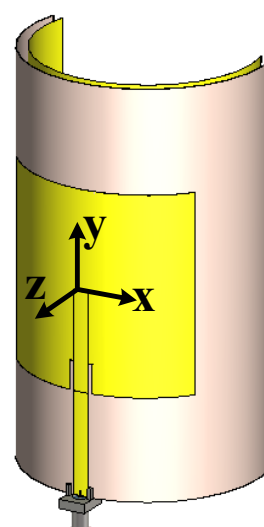
ตารางที่ 3.3 ขนาดโครงสร้างสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์กรประกอบ

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง (Dielectric constant)	ϵ_{r1}	4.30	-
ค่าไดอิเล็กตริกของอากาศ (Dielectric constant in free space)	ϵ_{r2}	1.00	-
ความหนาของชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate thickness)	h_1	0.20	mm
ความหนาของชั้นอากาศ (Air gap thickness)	h_2	3.00	mm
ค่าไดอิเล็กตริกสมมูล (Equivalent dielectric constant)	ϵ_{req}	1.05	-
ความกว้างของแพทช์ (Patch width)	W	60.43	mm
ความยาวของแพทช์ (Patch length)	L	55.43	mm
จุดป้อนสัญญาณ (Feeding point)	y_0	13.09	mm
ความกว้างของกราวด์ (Ground width)	W_g	90.00	mm
ความยาวของกราวด์ (Ground length)	L_g	110.00	mm
รัศมีความโค้ง (Radius)	R	30, 45, 60	mm

3.2.2 การจำลองสายอากาศ

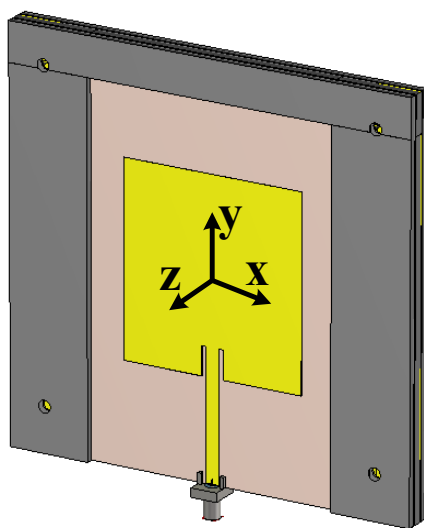


ก) สายอากาศแพทช์ SPPA

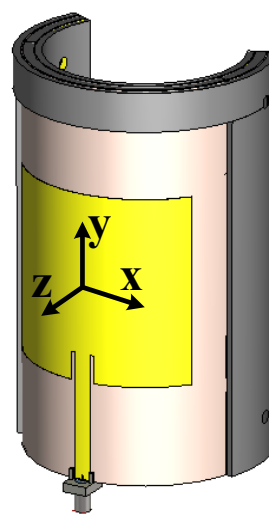


ข) สายอากาศแพทช์ SCPA

ภาพประกอบที่ 3.6 โมเดลสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์กรประกอบในโปรแกรมจำลอง



ก) สายอากาศแพทช์ SPPA



ข) สายอากาศแพทช์ SCPA

ภาพประกอบที่ 3.7 โมเดลสายอากาศแพทช์และ Support ในโปรแกรมจำลอง

จากขนาดและโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ออกแบบ นำมาจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า CST เพื่อพิจารณาคุณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน, อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงาน ดังแสดงโครงสร้างสายอากาศภายในโปรแกรมจำลองดังภาพประกอบที่ 3.6 และโครงสร้างสายอากาศพร้อมด้วย Support ดังภาพประกอบที่ 3.7

ผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังนี้

1) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)

สายอากาศควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างน้อยต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ที่ใช้ ออกแบบคือ 2.45 GHz ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนยิ่งต่ำมากๆ สายอากาศก็จะยิ่งแมตซ์ได้ดี และขนาดแบนด์วิธพิจารณาที่ค่าประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -10 dB ในการผลการจำลองสายอากาศแพทช์ SPPA และ สายอากาศแพทช์ SCPA โดยที่โครงสร้างและขนาดของโมเดลสายอากาศมีขนาดเท่ากัน แตกต่างกันที่รัศมีความโค้งคือ อนันต์, 60 mm, 45 mm และ 30 mm

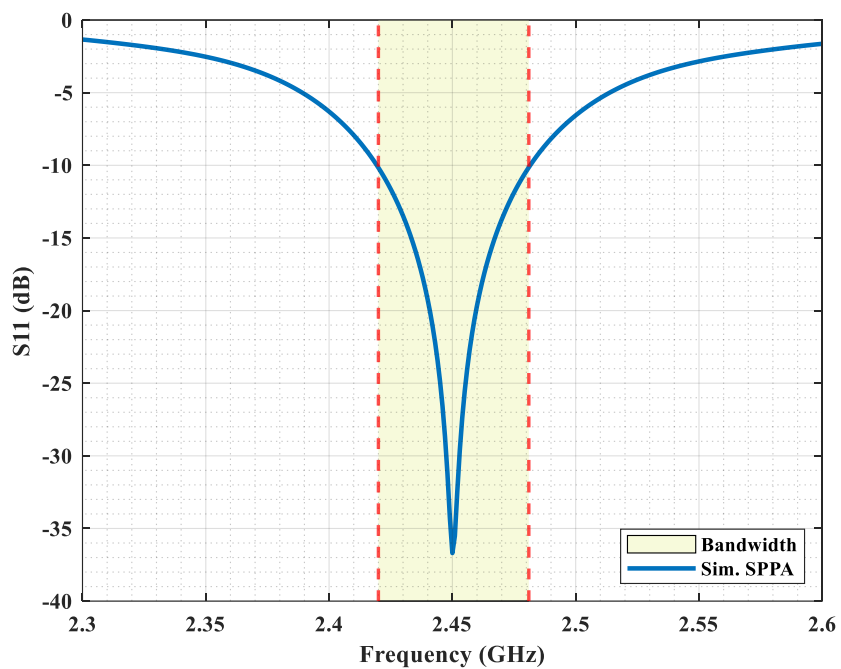
ผลการจำลองสายอากาศแพทช์ SPPA ที่มีรัศมีเท่ากับอนันต์ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -36.69 dB และมีแบนด์วิธมีค่าเท่ากับ 61 MHz ตั้งแต่ 2.42 – 2.48 GHz แสดงดังภาพประกอบที่ 3.8

ผลการจำลองสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60\text{mm}$) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -30.42 dB และมีแบนด์วิธเท่ากับ 68 MHz ตั้งแต่ 2.41 – 2.48 GHz แสดงดังภาพประกอบที่ 3.9

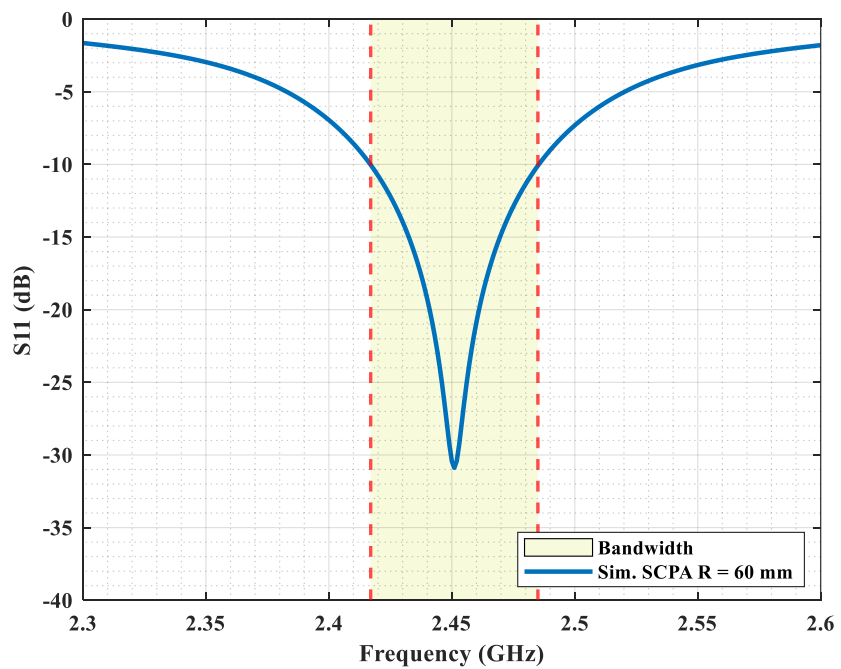
ผลการจำลองสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 45\text{mm}$) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -16.19 dB และมีแบนด์วิธเท่ากับ 66 MHz ตั้งแต่ 2.40 – 2.46 GHz แสดงดังภาพประกอบที่ 3.10

ผลการจำลองสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30\text{mm}$) มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -16.02 dB และมีแบนด์วิธเท่ากับ 62 MHz ตั้งแต่ 2.41 – 2.47 GHz แสดงดังภาพประกอบที่ 3.11

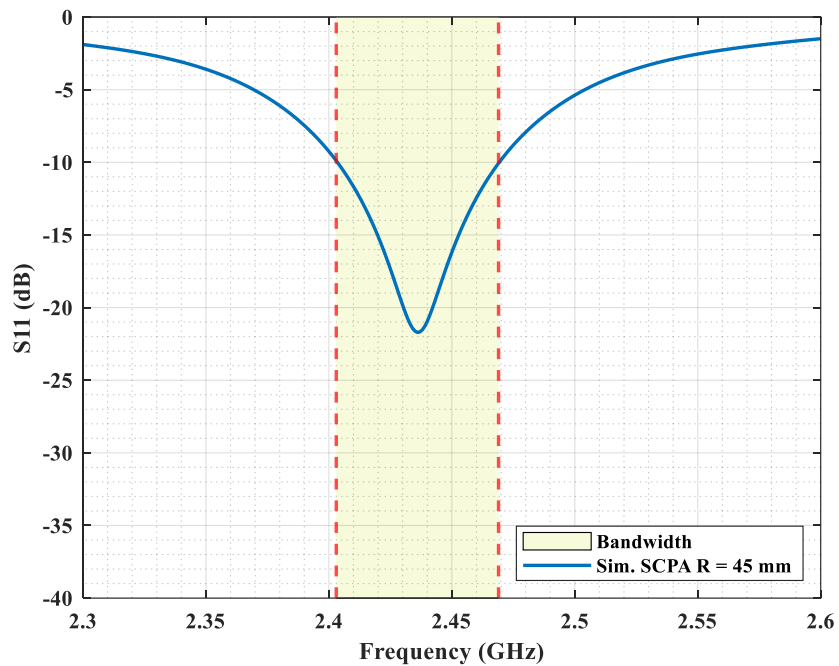
จากผลการจำลองเปรียบเทียบสายอากาศแพทช์ทั้งสี่ขนาด สายอากาศแพทช์ SPPA ให้ผลการ Matching ที่ดีกว่าสายอากาศแพทช์ SCPA เมื่อลดรัศมีมีความโค้งของการ Matching ของสายสายอากาศแพทช์ SCPA จะแยกลง และความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนไปความถี่ต่ำ แสดงดังภาพประกอบที่ 3.12



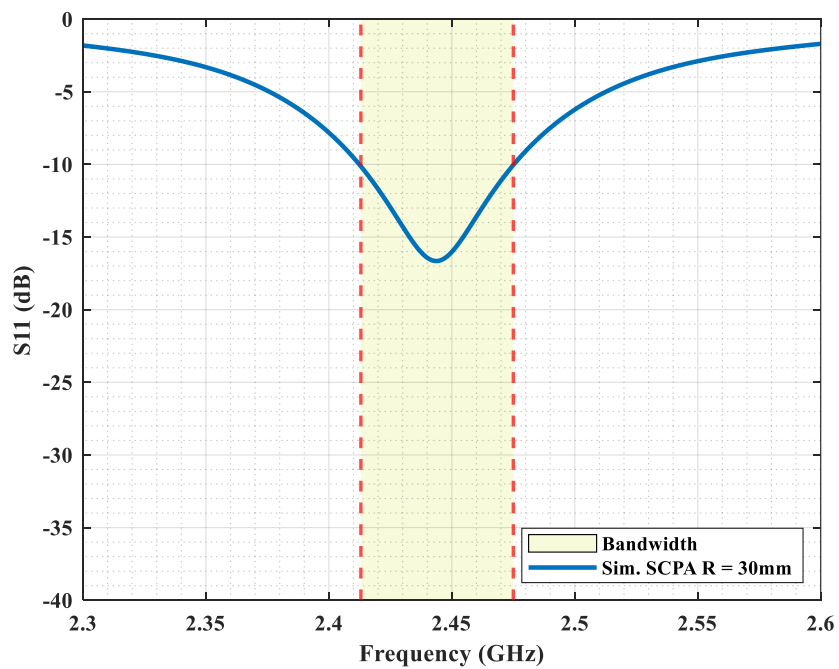
ภาพประกอบที่ 3.8 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SPPA



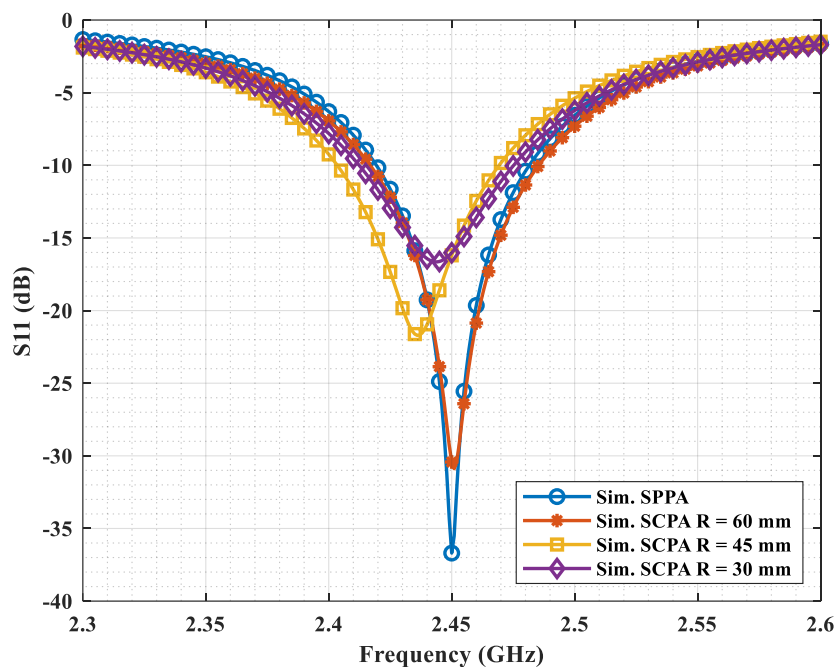
ภาพประกอบที่ 3.9 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60\text{mm}$)



ภาพประกอบที่ 3.10 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 45$ mm)



ภาพประกอบที่ 3.11 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30$ mm)



ภาพประกอบที่ 3.12 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA

2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

การจำลองสายอากาศเพื่อดูแบบรูปการแผ่พลังงาน อัตราขยายและทิศทางการแพร่กระจายคลื่น จากผลการจำลองเป็นการแพร่กระจายคลื่นแบบมีทิศทาง (Directional radiation pattern) ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์ SPPA และสายอากาศแพทช์ SCPA ในระนาบ H-plane และ E-plane แสดงดังภาพประกอบที่ 3.13 ก) และ ภาพประกอบที่ 3.13 ข) ตามลำดับ

ผลการจำลองสายอากาศแพทช์ SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์ ให้อัตราขยาย 8.88 dBi ในระนาบ H-plane มีความกว้างลำคลื่น 64 องศา มีระดับของโลบหลังเท่ากับ 19.50 dB และในระนาบ E-plane มีความกว้างลำคลื่น 62 องศา มีระดับของโลบหลังเท่ากับ 19.90 dB

ผลการจำลองสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60$ mm) ให้อัตราขยาย 8.41 dBi ในระนาบ H-plane มีขนาดความกว้างลำคลื่น 74.60 องศา มีระดับของโลบหลังเท่ากับ 16.90 dB และในระนาบ E-plane มีขนาดความกว้างลำคลื่น 67 องศา มีระดับของโลบหลังเท่ากับ 15.90 dB

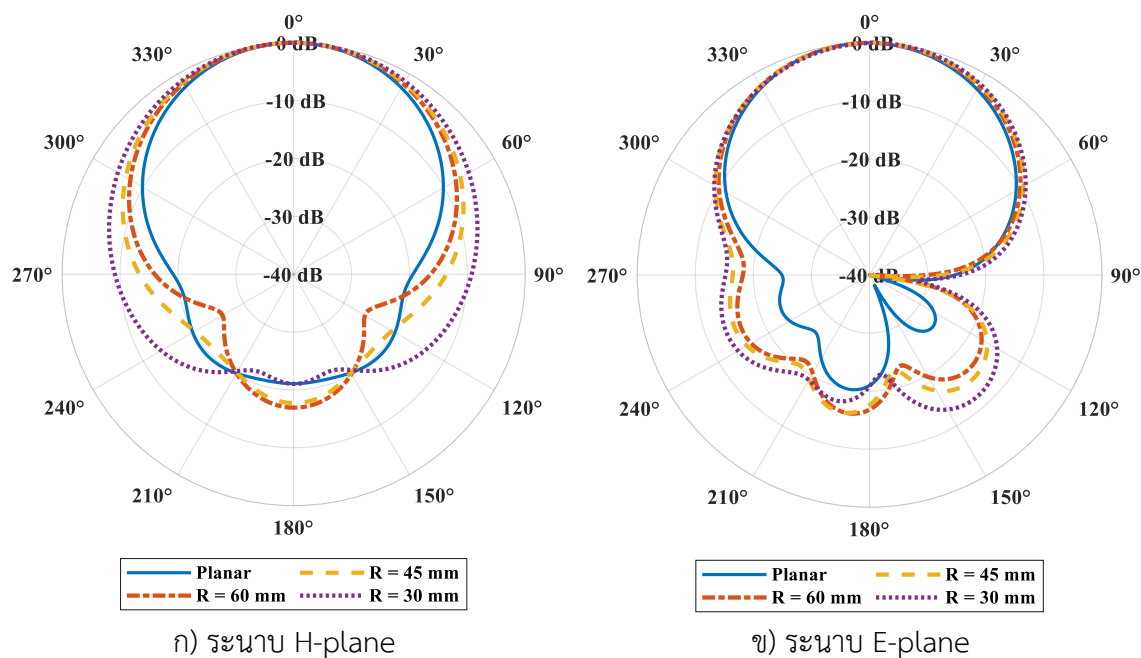
ผลการจำลองสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 45$ mm) ให้อัตราขยาย 8.00 dBi ในระนาบ H-plane มีขนาดความกว้างลำคลื่น 79.20 องศา มีระดับของโลบหลังเท่ากับ 17.70 dB และในระนาบ E-plane มีขนาดความกว้างลำคลื่น 69.90 องศา มีระดับของโลบหลังเท่ากับ 14.80 dB

ผลการจำลองสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30$ mm) ให้อัตราขยาย 7.37 dBi ในระนาบ H-plane มีขนาดความกว้างลำคลื่น 89.70 องศา มีระดับของโลบหลังเท่ากับ 21.00 dB และในระนาบ E-plane มีขนาดความกว้างลำคลื่น 69.90 องศา มีระดับของโลบหลังเท่ากับ 12.00 dB

พิจารณาจากผลการจำลองจะเห็นว่าสายอากาศโค้งงอในระนาบ H-plane เมื่อการลดขนาดของรัศมีส่วนโค้งของสายอากาศแพทช์ ทำให้ความกว้างลำคลื่นในระนาบ H-plane มีขนาดกว้างขึ้น และในระนาบ E-plane ขนาดของลำคลื่นมีขนาดใกล้เคียงกันที่ค่ารัศมีต่างๆ แต่ในทางกลับกันอัตราขยายจะลดลง แสดงตารางเปรียบเทียบดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลการจำลองของสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA

Radius (R)	HPBW (deg)		Gain (dBi)	F/B Ratio (dB)	
	H-plane	E-plane		H-plane	E-plane
Planar	8.88	62.00	8.88	19.50	19.90
60 mm	74.60	67.00	8.41	16.90	15.90
45 mm	79.20	69.20	8.00	17.70	14.80
30 mm	89.70	69.90	7.40	21.00	12.00

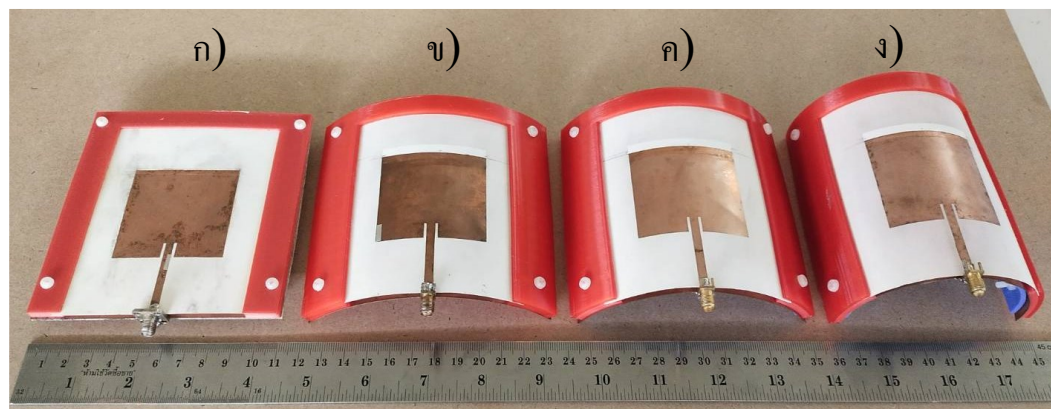


ภาพประกอบที่ 3.13 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA

3.2.3 การสร้างสายอากาศแพทช์ 1 องค์ประกอบ

สร้างสายอากาศแพทช์ SPPA และสายอากาศแพทช์ SCPA รัศมีเท่ากับ 60 mm, 45 mm และ 30 mm ใช้งานย่านความถี่ 2.45 GHz โดยใช้วัสดุแผ่น Flexible PCB ชนิด FR-4 ที่มีความหนาเท่ากับ 0.2 mm และ Support สำหรับโครงสร้างช่องเปิด เพื่อแยกชั้นวัสดุฐานรองและชั้นกราวด์ทำจากวัสดุ PLA filament สร้างเป็นโมเดลสามมิติจากเครื่อง 3D Printer แสดงต้นสายอากาศแพทช์ ภายหลังจากสร้างดัง ภาพประกอบที่ 3.14 ดังนี้ ก) สายอากาศแพทช์ SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์ ข) สายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60$ mm) ค) สายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 45$ mm) และ ง) สายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30$ mm)

สำหรับต้นแบบสายอากาศทั้งสี่ขนาดนี้ ผู้วิจัยสร้างต้นแบบสายอากาศแต่ละขนาดจำนวน 2 ต้น ที่มีลักษณะโครงสร้างและขนาดเหมือนกัน สำหรับการทดสอบอัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงาน จะกล่าวในหัวข้อถัดไป



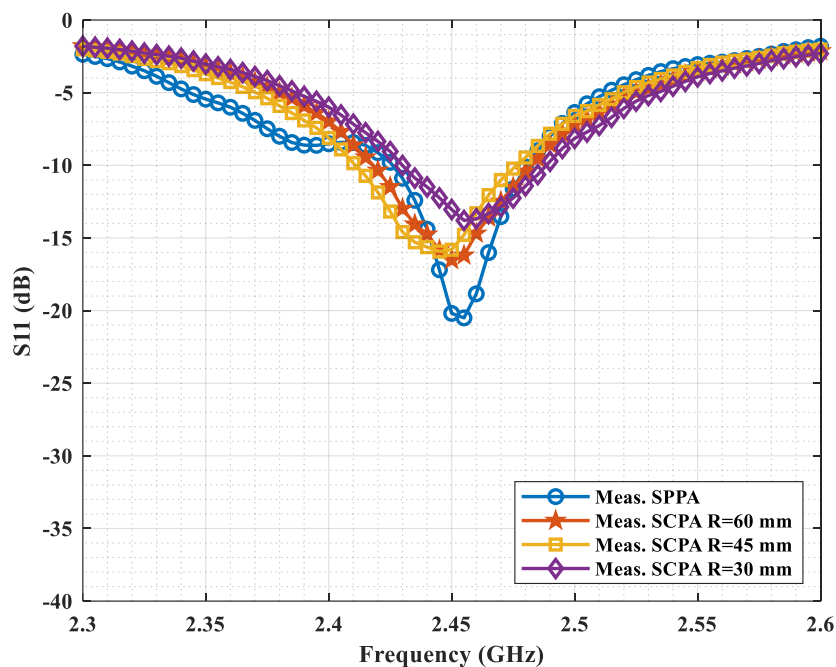
ภาพประกอบที่ 3.14 ต้นแบบสายอากาศแพทช์

3.2.4 ทดสอบสายอากาศ

ภายหลังจากการสร้างต้นแบบสายอากาศ นำต้นแบบสายอากาศทดสอบวัดคุณลักษณะของสายอากาศ ประกอบด้วย 1. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และ 2. อัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงาน

1) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient, S11)

สายอากาศควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างน้อยต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ที่ใช้ ออกแบบคือ 2.45 GHz ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนยิ่งต่ำมากๆ สายอากาศก็จะยิ่งแมตซ์ได้ดี และขนาดแบนด์วิธพิจารณาที่ค่าประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -10 dB การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) ผลการทดสอบของต้นแบบสายอากาศแพทช์ SPPA รัศมีเท่ากับบอห์นันต์ และสายอากาศแพทช์ SCPA รัศมีเท่ากับ 60 mm, 45 mm และ 30 mm ดังภาพประกอบที่ 3.15



ภาพประกอบที่ 3.15 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA

ผลการทดสอบของสายอากาศแพทช์ SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์ มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -20.19 dB และให้แบนด์วิธเท่ากับ 54 MHz (2.42 – 2.48 GHz)

ผลการทดสอบสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60$ mm) มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -16.50 dB และให้แบนด์วิธเท่ากับ 62 MHz (2.41 – 2.48 GHz)

ผลการทดสอบสายอากาศแพทช์ SPCA ($R = 45$ mm) มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -13.21 dB และให้แบนด์วิธเท่ากับ 50 MHz (2.42 – 2.47 GHz)

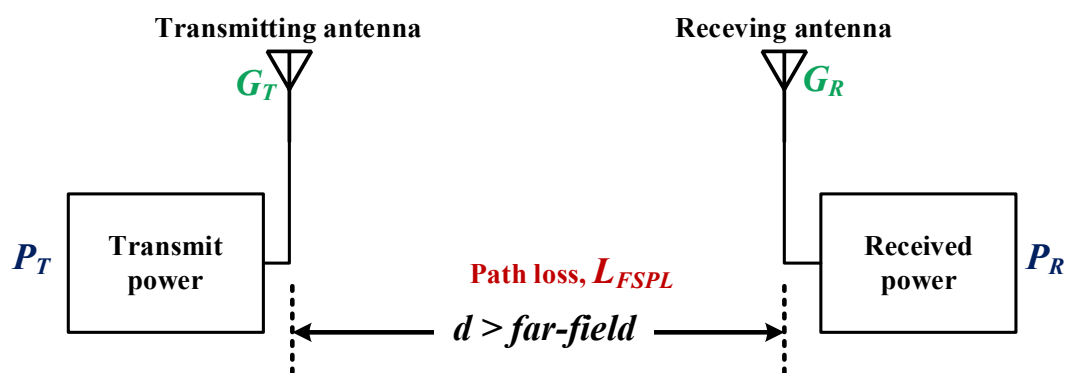
ผลการทดสอบสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30$ mm) มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ความถี่ 2.45 GHz มีค่าเท่ากับ -13.04 dB และมีแบนด์วิธเท่ากับ 56 MHz (2.43 – 2.48 GHz)

การเปรียบเทียบผลการทดสอบของต้นแบบสายอากาศแพทช์ SPPA และสายอากาศแพทช์ SCPA ขนาด 1 องค์ประกอบ ผลการทดสอบของให้ผลที่สอดคล้องกับผลการจำลอง ต้นแบบสายอากาศแพทช์ทั้ง 4 ขนาดสามารถทำงานบทความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศแพทช์ SPPA ให้ผล

การ Matching ดีกว่าสายอากาศแพทช์ SCPA และการลดรัศมีมีความโค้งของสายอากาศลง ส่งผลให้สายอากาศ Matching แ่ลง

2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

การทดสอบวัดอัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงาน ของต้นแบบสายอากาศแพทช์ SPPA และสายอากาศแพทช์ SCPA ขนาด 1 องศาประกอบ ในการทดสอบสายอากาศทั้งในภาคส่งและภาครับใช้สายอากาศที่เหมือนกันคือ ต้นแบบสายที่ต้องการทดสอบ เรียกว่าวิธีการทดสอบสายอากาศนี้ว่า “Two antenna method” [14] แสดงบล็อกไดอะแกรมการทดสอบดังภาพประกอบที่ 3.16



ภาพประกอบที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบ Two antenna method [14]

โดยแสดงพารามิเตอร์ดังนี้ P_T คือกำลังงานจากภาคส่ง, P_R คือกำลังที่ได้รับจากภาครับ, G_T คือ อัตราขยายของสายอากาศส่ง, G_R คืออัตราขยายของสายอากาศรับ, L_{FSPL} คือการสูญเสียในอากาศว่าง และระยะ d คือระยะห่างของสายอากาศภาคส่งและภาครับ ซึ่งเป็นระยะที่มีความสอดคล้องกับระยะของสนามระยะไกล (Far field) สามารถคำนวณหาระยะสนามไกลของสายอากาศจากสมการ (3.8) โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะช่วยในการคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศด้วยสมการการส่งผ่านของฟรีส ดังสมการ (3.5) ในการทดสอบสายอากาศภาครับและภาคส่งเป็นสายอากาศชนิดเดียวกัน $G_T = G_R = G$ สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังสมการ (3.6) และสามารถคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศจากสมการ (3.7)

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_{FSPL} \quad (3.5)$$

$$G_T + G_R = P_R - P_T + L_{FSPL} \quad (3.6)$$

$$G = (P_R - P_T + L_{FSPL})/2 \quad (3.7)$$

การคำนวณระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ ซึ่งระยะห่างดังกล่าวต้องสอดคล้องกับระยะสนามไกลของสายอากาศ โดยระยะห่างต้องยาวกว่าระยะสนามไกล เนื่องจากแบบรูปการแผ่พลังงานที่วัดได้จากระยะสนามไกลของสายอากาศมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าระยะสนามใกล้ สามารถคำนวณหาระยะสนามไกลของสายอากาศจากสมการ (3.8) โดยที่ f คือ ความถี่ (frequency) หน่วยเป็น Hz, $Far\ field$ คือ ระยะสนามไกลหน่วยเป็น m, D คือ ขนาดของสายอากาศ หน่วยเป็น m และ λ คือ ความยาวคลื่น (Wavelength) หน่วยเป็น m

$$Far\ field \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.8)$$

ความยาวของสายอากาศ (D) เท่ากับ 0.11 m สามารถคำนวณระยะสนามไกลได้เท่ากับ 0.20 m ดังนั้นจึงได้กำหนดระยะห่างของภาครับและภาคส่งเท่ากับ 1.00 m

การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแพทช์ 1 องค์ประกอบ ทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยที่ ภาคส่งให้กำลังงาน (P_T) เท่ากับ 0 dBm ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ (d) มีค่าเท่ากับ 1.00 m การสูญเสียในอากาศว่าง (L_{FSPL}) คำนวณจากสมการ (3.2) มีค่าเท่ากับ 40.22 dB เมื่อภาครับได้รับกำลังงาน (P_R) สามารถคำนวณอัตราขยายจากสมการ (3.7)

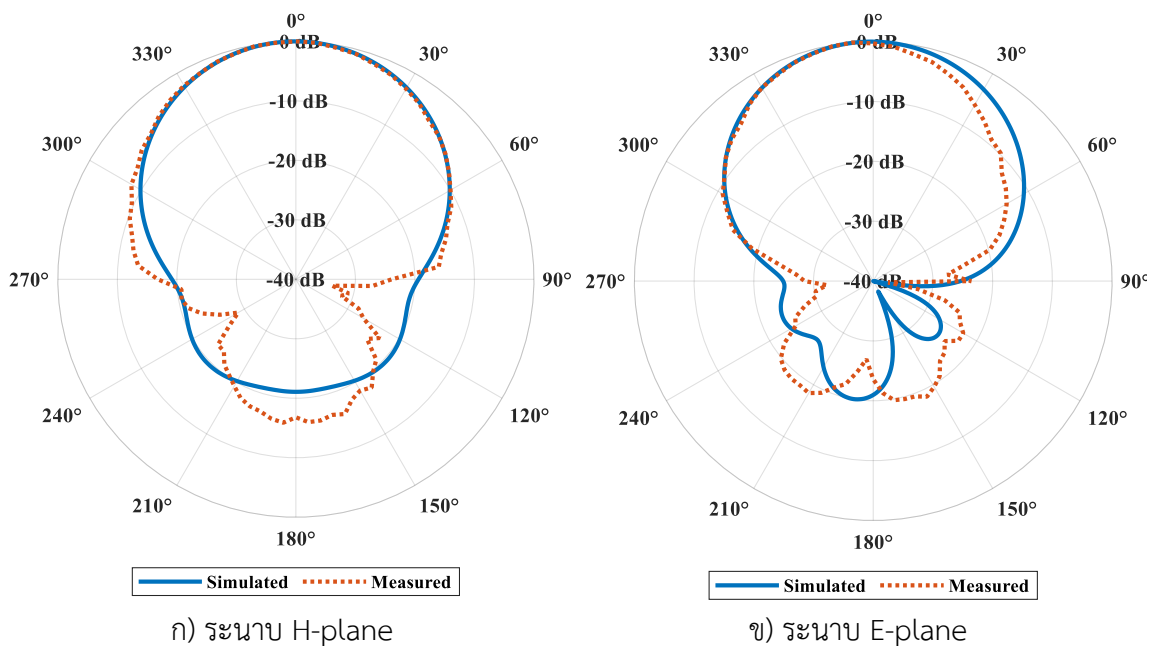
ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงาน ของต้นแบบสายอากาศแพทช์ SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์ ในระนาบ H-plane และระนาบ E-plane ดังภาพประกอบที่ 3.17 ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยาย 8.51 dBi มีขนาดลำคลื่นในระนาบ H-plane และในระนาบ E-plane เท่ากับ 60 และ 62 องศา ตามลำดับ การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกัน

ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงาน ของต้นแบบสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60$ mm) ในระนาบ H-plane และระนาบ E-plane ดังภาพประกอบที่ 3.18 ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยาย 7.86 dBi มีขนาดลำคลื่นในระนาบ H-plane และในระนาบ E-plane เท่ากับ 75 และ 65 องศา ตามลำดับ การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกัน

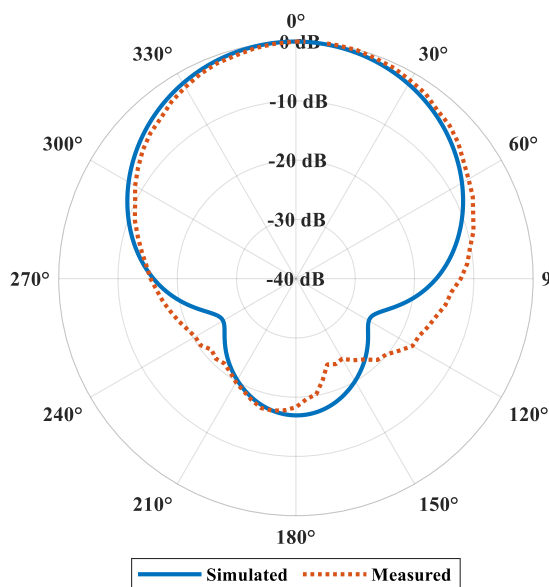
ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงาน ของต้นแบบสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 45$ mm) mm ในระนาบ H-plane และระนาบ E-plane ดังภาพประกอบที่ 3.19 ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยาย 7.56 dBi มีขนาดลำคลื่นในระนาบ H-plane และในระนาบ E-plane เท่ากับ 80 และ 65 องศา ตามลำดับ การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกัน

ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงานของต้นแบบสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30$ mm) ในระนาบ H-plane และระนาบ E-plane ดังภาพประกอบที่ 3.20 ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยาย 7.41 dBi มีขนาดลำคลื่นในระนาบ H-plane และ E-plane เท่ากับ 85 และ 65 องศาตามลำดับ การเปรียบเทียบผลการทดสอบและผลการจำลองให้ผลที่สอดคล้องกัน

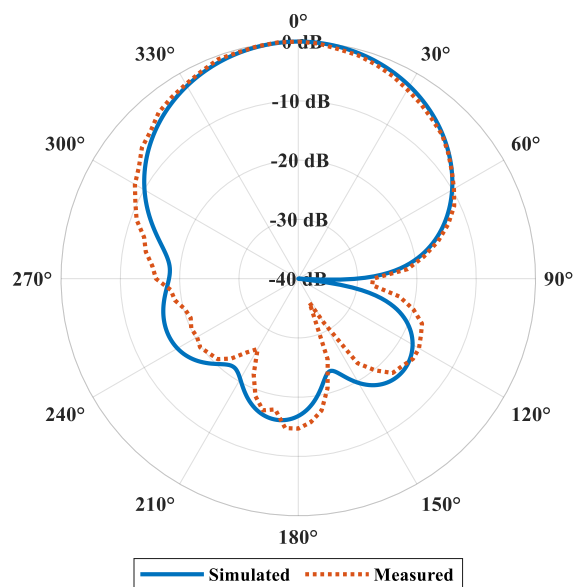
การวิเคราะห์ผลการทดสอบ ผลการทดสอบให้ผลที่สอดคล้องกับการผลการจำลอง ขนาดความกว้างลำคลื่นของสายอากาศแพทช์ SCPA มีขนาดกว้างกว่าสายอากาศแพทช์ SPPA และขนาดลำคลื่นกว้างขึ้น เมื่อลดรัศมีความโค้งของสายอากาศ SCPA และในทางกลับกันการที่ขนาดของลำคลื่นกว้างขึ้น อัตราขยายจะลดลง แสดงตารางเปรียบเทียบดัง ตารางที่ 3.5



ภาพประกอบที่ 3.17 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SPPA

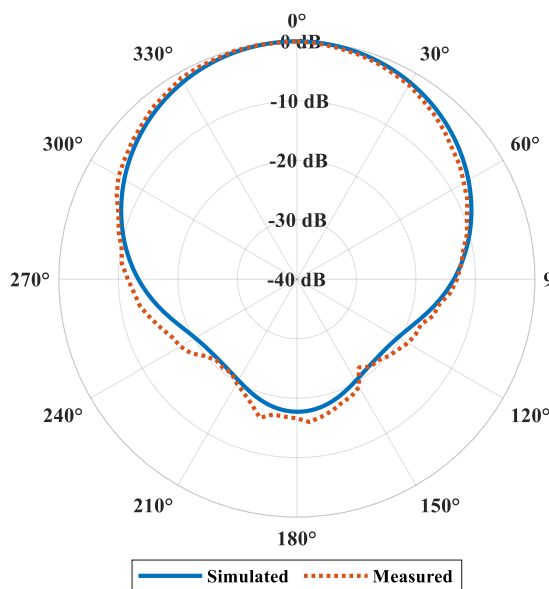


ก) ระนาบ H-plane

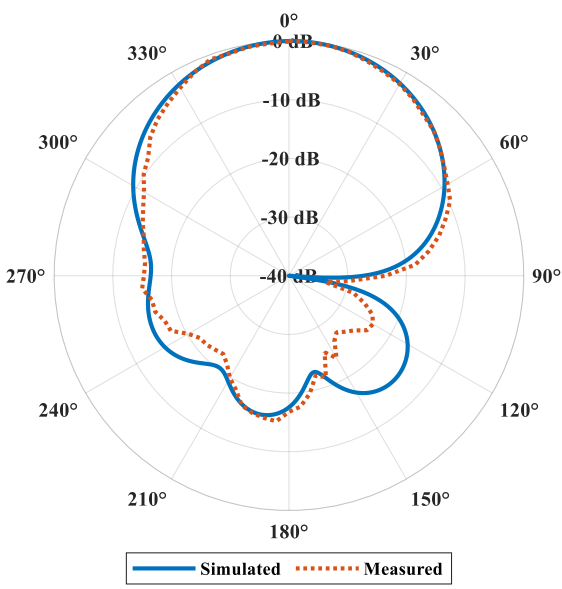


ข) ระนาบ E-plane

ภาพประกอบที่ 3.18 ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60\text{mm}$)

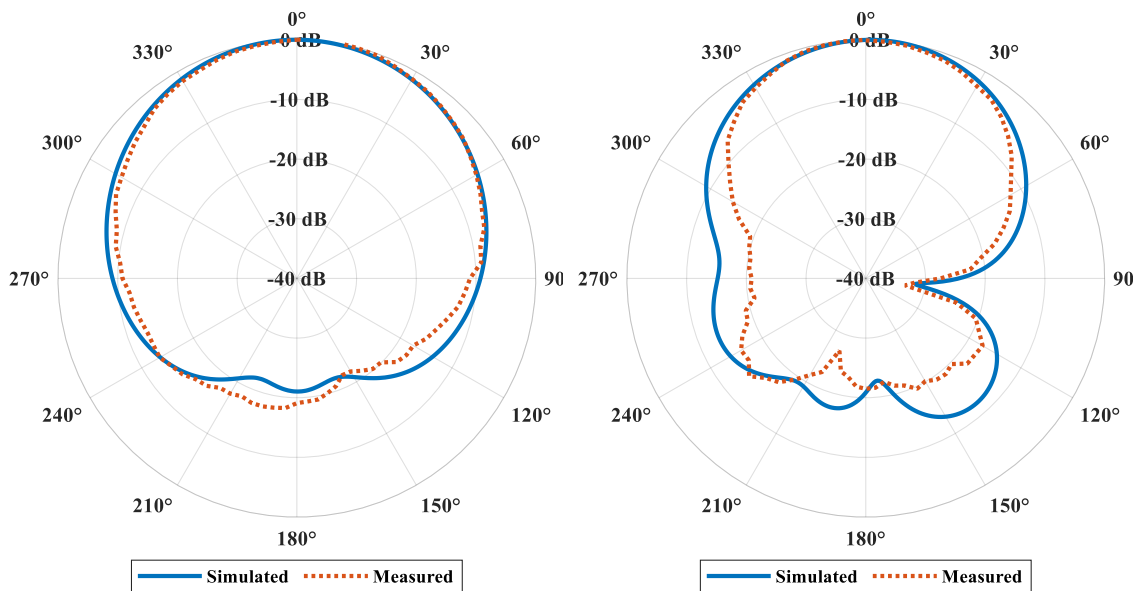


ก) ระนาบ H-plane



ข) ระนาบ E-plane

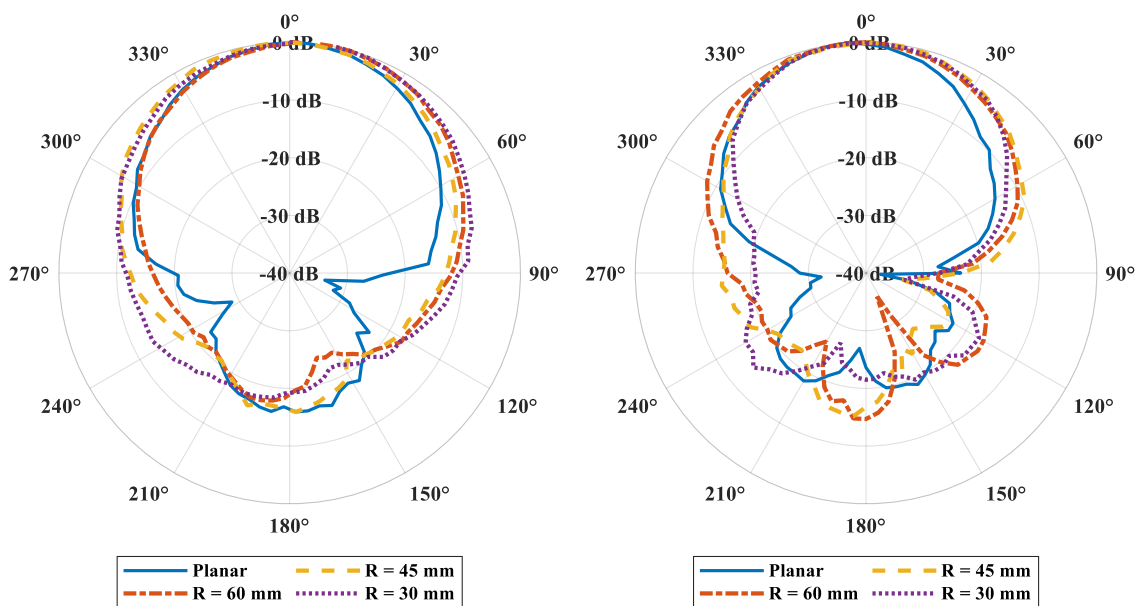
ภาพประกอบที่ 3.19 ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 45\text{mm}$)



ก) ระนาบ H-plane

ข) ระนาบ E-plane

ภาพประกอบที่ 3.20 ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30\text{mm}$)



ก) ระนาบ H-plane

ข) ระนาบ E-plane

ภาพประกอบที่ 3.21 ผลการทดสอบรูปแบบการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบและจำลอง ของสายอากาศแพทช์ SPPA และ SCPA

Radius (R)	HPBW (deg)				Gain (dBi)		F/B Ratio (dB)			
	H-plane		E-plane				H-plane		E-plane	
	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.
Planar	64.00	60.00	62.00	62.00	8.88	8.51	19.50	15.80	19.90	18.70
60 mm	74.60	75.00	67.00	65.00	8.41	7.86	16.90	17.40	15.90	14.70
45 mm	79.20	80.00	69.20	65.00	7.99	7.56	17.70	15.90	14.80	15.10
30 mm	89.70	85.00	69.90	65.00	7.37	7.41	21.00	18.00	12.00	14.50

ในหัวข้อนี้นำเสนอ สายอากาศแพทช์ขนาด 1 องศาประกอบ สำหรับสายอากาศแถวลำดับ โดยการออกแบบ การจำลอง การสร้าง และทดสอบสายอากาศแพทช์ทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ สายอากาศแพทช์ SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์, สายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60\text{mm}$), สายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 45\text{mm}$) และสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30\text{mm}$) สำหรับสายอากาศแถวลำดับจะถูกกล่าวในหัวข้อถัดไป

3.3 สายอากาศแถวลำดับ (Antenna Array)

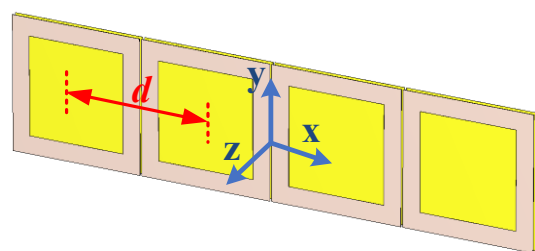
3.3.1 การจำลองสายอากาศแถวลำดับ

ในหัวข้อนี้นำเสนอเกี่ยวกับ สายอากาศแถวลำดับ (Planar array) โดยนำองค์ประกอบสายอากาศแพทช์ (Suspended planar patch antenna, SPPA) และสายอากาศแพทช์แบบโค้ง (Suspended conformal patch antenna, SCPA) ที่รัศมีความโค้งต่างๆ ได้แก่ 60mm, 45mm และ 30mm มาจัดเรียงเป็นแถวลำดับ

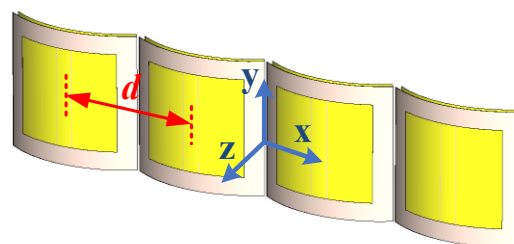
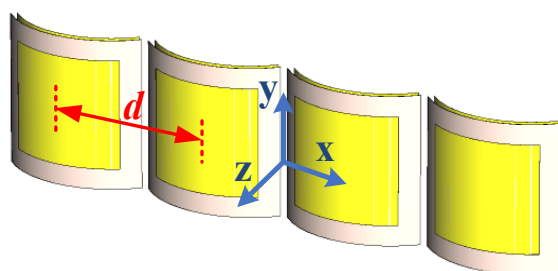
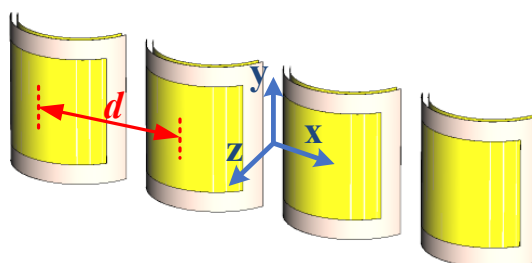
โมเดลสายอากาศแถวลำดับในโปรแกรมจำลองดังภาพประกอบที่ 3.220 คือ SPPA-planar phased array และภาพประกอบที่ 3.22 ก) คือสายอากาศ SCPA ($R = 60\text{mm}$) - planar phased array, ภาพประกอบที่ 3.22 ข) คือสายอากาศ SCPA ($R = 45\text{mm}$) planar phased array และ ภาพประกอบที่ 3.22 ง) คือสายอากาศ SCPA ($R = 30\text{mm}$) - planar phased array

ขนาดของสายอากาศแถวลำดับจำนวน 4X1 องค์ประกอบ และระยะห่างของ องค์ประกอบเป็นระยะเท่ากับ d เนื่องจากแต่ละองค์ประกอบเป็น โครงสร้างสายอากาศแพทช์แบบช่อง เปิด มีการแทรกช่องอากาศระหว่างชั้นวัสดุฐานรองและชั้นกราวด์ ส่งผลให้ขนาดของสายอากาศนั้นมี ขนาดใหญ่ และไม่สามารถจัดเรียงที่ระยะเท่ากับ $0.50\lambda_0$ ได้ โดยมีระยะขององค์ประกอบตั้งแต่ $0.60\lambda_0$ เป็นต้นไป เมื่อนำองค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแล้วไม่เกิดการซ้อนทับกัน

การจำลองค่า Directivity และการชี้ทิศทางของลำคลื่น (Beam direction) เมื่อ สายอากาศแถวลำดับปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ ได้แก่ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา) ซึ่งจะพิจารณาค่า Directivity ของตำแหน่ง Desired direction เป็นตำแหน่งที่สนใจได้แก่มุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา และพิจารณาค่า Directivity ในตำแหน่ง Peak direction คือ ตำแหน่งมุมที่สายอากาศสามารถปรับไปได้



ก) SPPA

ข) SCPA ($R = 60\text{mm}$)ค) SCPA ($R = 45\text{mm}$)ง) SCPA ($R = 30\text{mm}$)

ภาพประกอบที่ 3.22 โมเดลสายอากาศแถวลำดับ ในโปรแกรมจำลอง

ผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังนี้

1) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

ในการจำลองสายอากาศ โครงสร้างของสายอากาศแกลวลำดับ SPPA และ SCPA มีขนาดเท่ากัน โดยจะเปรียบเทียบที่รัศมีต่างๆ และที่ระยะห่างขององค์ประกอบ (d) ตั้งแต่ $0.60\lambda_0$, $0.65\lambda_0$, $0.70\lambda_0$, และ $0.75\lambda_0$

ดังนั้นในส่วนของการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานนี้จึงเป็นค่า Directivity เนื่องจากสายอากาศยังไม่มี การปรับจูน Matching แสดงผลการจำลองค่า Directivity ของตำแหน่งมุม Peak direction และทิศทางของลำคลื่นดังตารางที่ 3.6 และแสดงค่า Directivity ของตำแหน่งมุม Desired direction ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.6 ผลการจำลอง Directivity ของตำแหน่งมุม Peak direction

Element spacing (d)	Radius (R)	Peak directivity at 2.45 GHz				$max \Delta D_{peak}$ (dB)
		0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)	
$0.60\lambda_0$	Planar	(0 deg) 14.04	(11 deg) 13.87	(22 deg) 13.33	(34 deg) 12.11	1.93
	60 mm	(0 deg) 13.98	(11 deg) 13.81	(23 deg) 13.31	(34 deg) 12.25	1.73
	45 mm	(0 deg) 13.93	(11 deg) 13.76	(23 deg) 13.27	(34 deg) 12.26	1.67
	30 mm	(0 deg) 13.79	(11 deg) 13.6	(23 deg) 13.13	(35 deg) 12.18	1.61
$0.65\lambda_0$	Planar	(0 deg) 14.32	(10 deg) 14.15	(21 deg) 13.74	(32 deg) 12.66	1.66
	60 mm	(0 deg) 14.26	(10 deg) 14.09	(21deg) 13.70	(32deg) 12.65	1.61
	45 mm	(0 deg) 14.21	(11deg) 14.04	(21deg) 13.65	(32 deg) 12.62	1.59

	30 mm	(0 deg) 14.07	(11 deg) 13.90	(21 deg) 13.49	(32 deg) 12.50	1.57
0.70 λ_0	Planar	(0 deg) 14.58	(10 deg) 14.44	(20 deg) 14.06	(29 deg) 12.91	1.67
	60 mm	(0 deg) 14.52	(10 deg) 14.38	(20 deg) 14.00	(29 deg) 12.87	1.65
	45 mm	(0 deg) 14.47	(10 deg) 14.33	(20 deg) 13.95	(30 deg) 12.84	1.63
	30 mm	(0 deg) 14.32	(10 deg) 14.17	(20 deg) 13.78	(30 deg) 12.71	1.61
0.75 λ_0	Planar	(0 deg) 14.82	(9 deg) 14.72	(18 deg) 14.28	(28 deg) 13.05	1.77
	60 mm	(0 deg) 14.76	(9 deg) 14.65	(18 deg) 14.22	(28 deg) 13.02	1.74
	45 mm	(0 deg) 14.71	(9 deg) 14.59	(18 deg) 14.17	(28 deg) 12.98	1.73
	30 mm	(0 deg) 14.55	(9 deg) 14.42	(18 deg) 13.99	(28 deg) 12.87	1.68

ตารางที่ 3.7 ผลการจำลอง Directivity ของตำแหน่งมุม Desired direction

Element spacing (d)	Radius (R)	Directivity at 2.45 GHz				$max \Delta D_{desired}$ (dB)
		0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)	
0.60 λ_0		14.04	13.51	12.05	9.84	4.20
		13.98	13.46	12.11	10.06	3.92
		13.93	13.42	12.12	10.16	3.77
	30 mm	13.78	13.29	12.06	10.22	3.56
0.65 λ_0	Planar	14.32	13.55	11.67	8.91	5.41

Element spacing (d)	Radius (R)	Directivity at 2.45 GHz				$max \Delta D_{desired}$ (dB)
		0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)	
	60 mm	14.26	13.52	11.67	8.89	5.37
	45 mm	14.21	13.49	11.67	8.93	5.28
	30 mm	14.07	13.36	11.59	8.97	5.10
$0.70\lambda_0$	Planar	14.58	13.56	10.83	6.91	7.67
	60 mm	14.52	13.52	10.80	6.84	7.68
	45 mm	14.47	13.48	10.79	6.87	7.60
	30 mm	14.32	13.35	10.72	6.92	7.40
$0.75\lambda_0$	Planar	14.82	13.46	9.46	3.83	10.99
	60 mm	14.76	13.42	9.43	3.75	11.01
	45 mm	14.71	13.38	9.43	3.79	10.92
	30 mm	14.55	13.24	9.38	3.88	10.67

จากผลการจำลองตารางที่ 3.6 และตารางที่ 3.7 พบว่าการเพิ่มระยะห่างขององค์ประกอบส่งผลให้ค่า Directivity ของสายอากาศแถวลำดับเพิ่มขึ้น โดยสายอากาศแถวลำดับ SPPA ให้ค่า Directivity ที่สูงกว่าสายอากาศแถวลำดับ SCPA เป็นผลจากแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศ SPPA มีขนาดลำคลื่นที่แคบ เมื่อรวมผลบวกทางเวกเตอร์ของแบบรูปการแผ่พลังงานแล้ว ทำให้ผลรวมของแบบรูปการแผ่พลังงานมีค่าสูงกว่า สายอากาศแถวลำดับ SCPA

สำหรับการชี้ทิศทางของลำคลื่น การเพิ่มระยะห่างขององค์ประกอบ ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทาง เนื่องจากผลจาก Grating lobe ดังนั้นระยะห่างขององค์ประกอบที่เหมาะสมเท่ากับ $0.60\lambda_0$

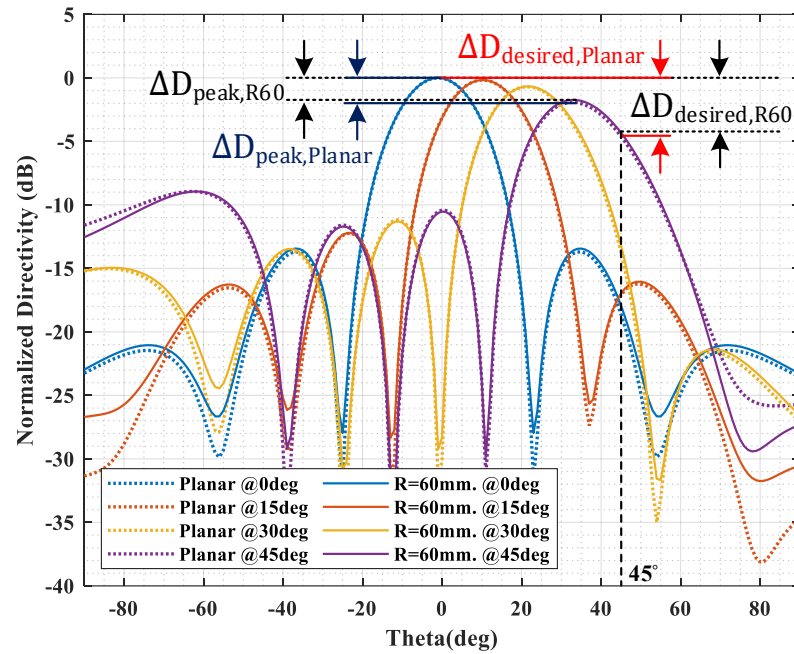
ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ โดยใช้ระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากับ $0.60\lambda_0$ เมื่อปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา เป็นค่า Normalized Directivity ซึ่งถูก Normalized ด้วยมุม 0 องศาของสายอากาศแถวลำดับ SPPA และ SCPA รัศมี 60mm, 45mm และ 30mm แสดงดังภาพประกอบที่ 3.23ก) ภาพประกอบที่ 3.23ข) และภาพประกอบที่ 3.23ค) ตามลำดับ ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ ค่า $\Delta D_{desired}$ คือค่าความ

แตกต่างของค่า Directivity สูงสุดของตำแหน่งที่มุมที่สนใจ (Desired direction) และค่า ΔD_{peak} คือค่าความแตกต่างของค่า Directivity สูงสุดของตำแหน่งที่ลำคลื่นสามารถปรับไปได้ (Peak direction)

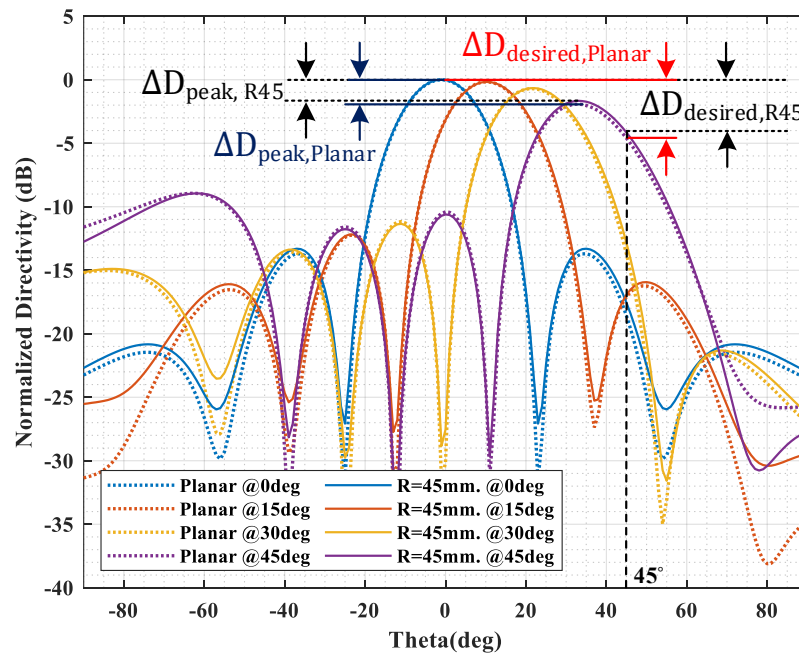
จากตารางที่ 3.6 และตารางที่ 3.7 พบว่า สายอากาศแถวลำดับ SCPA มีค่าความแตกต่างของ Directivity สูงสุด ($max \Delta D$) ทั้งในตำแหน่ง Peak direction และ Desired direction น้อยกว่า สายอากาศแถวลำดับ SPPA กล่าวคือ สายอากาศแถวลำดับ SCPA ให้คุณสมบัติในการคงค่าการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด (Constant gain) ขณะปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ ได้ดีกว่า สายอากาศแถวลำดับ SPPA

สำหรับการชี้ทิศทางของลำคลื่น สายอากาศแถวลำดับ SCPA มีความแม่นยำของการชี้ทิศทางดีกว่าสายอากาศแถวลำดับ SPPA เนื่องจากขนาดลำคลื่นหนึ่งองค์ประกอบ ของสายอากาศแถวลำดับ SCPA มีขนาดลำคลื่นกว้างกว่าขนาดลำคลื่นหนึ่งองค์ประกอบสายอากาศแถวลำดับ SPPA เมื่อนำแบบรูปการแผ่พลังงานของสนามไฟฟ้าของหนึ่งองค์ประกอบ คูณกับตัวประกอบอาเรย์ (Array factor) แล้ว แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ SCPA สามารถคงค่าขนาดของแอมพลิจูดของลำคลื่น และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางสูงขึ้น เมื่อมีการปรับลำคลื่นไปยังทิศทางต่างๆ จากมุม Broadside (0 องศา) นอกจากนี้สายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$) ที่มีขนาดความกว้างลำคลื่นขององค์ประกอบกว้างกว่าองค์ประกอบของแถวลำดับ SCPA ($R = 60\text{mm}$) และแถวลำดับ SCPA ($R = 45\text{mm}$) ให้ค่า ΔD น้อยที่สุด และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางดีกว่าเล็กน้อย

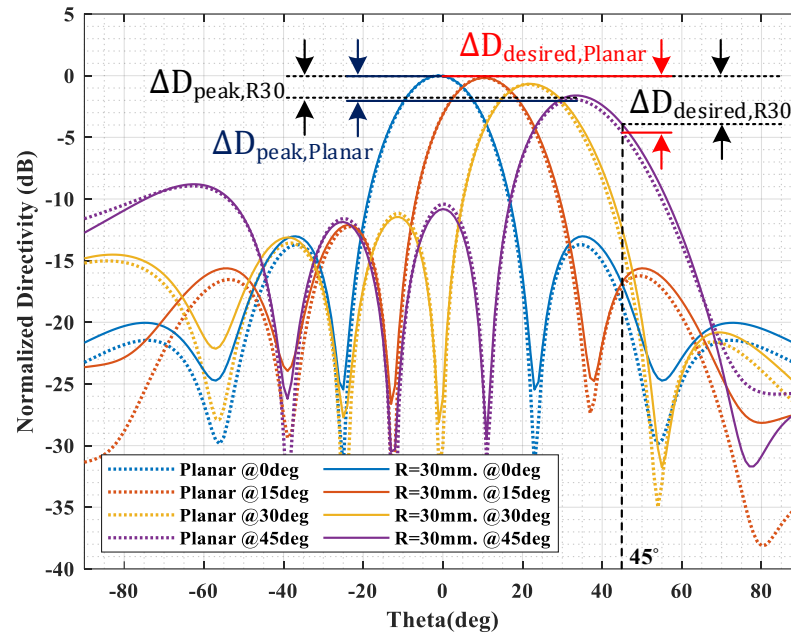
ถึงแม้ว่า ค่าความแตกต่างของ Directivity และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางเมื่อปรับลำคลื่นไปยังทิศทางต่างๆ ของสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$) ให้ผลที่ดีกว่าสายอากาศแถวลำดับขนาดอื่นๆ เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามผู้วิจัยมองเห็นแนวโน้มของสายอากาศแถวลำดับที่ให้ทั้งคุณสมบัติ Constant gain และความแม่นยำของการชี้ทิศทางของลำคลื่นสูง ตลอดการปรับลำคลื่น



ก) สายอากาศแฉกลำดับ SPPA และ SCPA ($R = 60\text{mm}$)



ข) สายอากาศแฉกลำดับ SPPA และ SCPA ($R = 45\text{mm}$)



ค) สายอากาศแฉะลำดับ SPPA และ SCPA ($R = 30\text{mm}$)

ภาพประกอบที่ 3.23 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแฉะลำดับ

ด้วยคุณสมบัติการคงค่าความการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราขยายขณะปรับลำคลื่นไปยังมุมต่างๆ (Constant gain) และมีความแม่นยำการชี้ทิศทาง ของสายอากาศแฉะลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$) โดยมีความห่างขององค์ประกอบเท่ากับ $0.60\lambda_0$ ผู้วิจัยเลือกที่จะสร้างต้นแบบสายอากาศ ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

สำหรับผลการจำลองของสายอากาศแฉะลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$) ภายหลังจากปรับจูน Matching แล้วดังตารางที่ 3.8 ค่าอัตราขยายที่ตำแหน่ง Desired direction คือมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา มีค่าเท่ากับ 12.86 dBi, 12.59 dBi, 11.84 dBi และ 9.64 dBi ตามลำดับ มีความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุด ที่ตำแหน่ง Desired direction ($\Delta G_{desired}$) เท่ากับ 3.22 dB และอัตราขยายที่ตำแหน่ง Peak direction ที่สายอากาศสามารถปรับลำคลื่นไปได้คือมุม 0 องศา, 13 องศา, 23 องศา และ 35 องศา มีค่าเท่ากับ 12.86 dBi, 12.80 dBi, 12.70 dBi และ 11.50 dBi มีความต่างของอัตราขยายสูงสุดของตำแหน่ง Peak direction (ΔG_{peak}) เท่ากับ 1.36 dB และมีความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 22.22%

ตารางที่ 3.8 ผลการจำลองของอากาศแถวลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$)

Parameter	Beam1	Beam2	Beam3	Beam4	$max \Delta G$ (dB)
Sim. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 12.86	(15 deg) 12.59	(30 deg) 11.84	(45 deg) 9.64	3.22
Sim. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 12.86	(13 deg) 12.80	(23 deg) 12.70	(35 deg) 11.50	1.36

2) ค่า S-Parameter

การจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับ SPPA และสายอากาศแถวลำดับ SPCA รัศมี 60mm, 45mm และ 30mm ประกอบไปด้วย 1. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) โดยสายอากาศควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างน้อยต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ที่ใช้ออกแบบคือ 2.45 GHz ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนยิ่งต่ำมากๆ สายอากาศก็จะยิ่งแมตซ์ได้ดี และ 2. ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับจำลองดูผลจาก Mutual coupling ระหว่างองค์ประกอบ

ผลการจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับ SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์ และสายอากาศแถวลำดับ SPCA ที่รัศมีเท่ากับ 60mm, 45mm และ 30mm แสดงดังภาพประกอบที่ 3.24ก) ภาพประกอบที่ 3.24ข) ภาพประกอบที่ 3.24ค) และภาพประกอบที่ 3.24ง) ตามลำดับ และแสดงผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 3.9

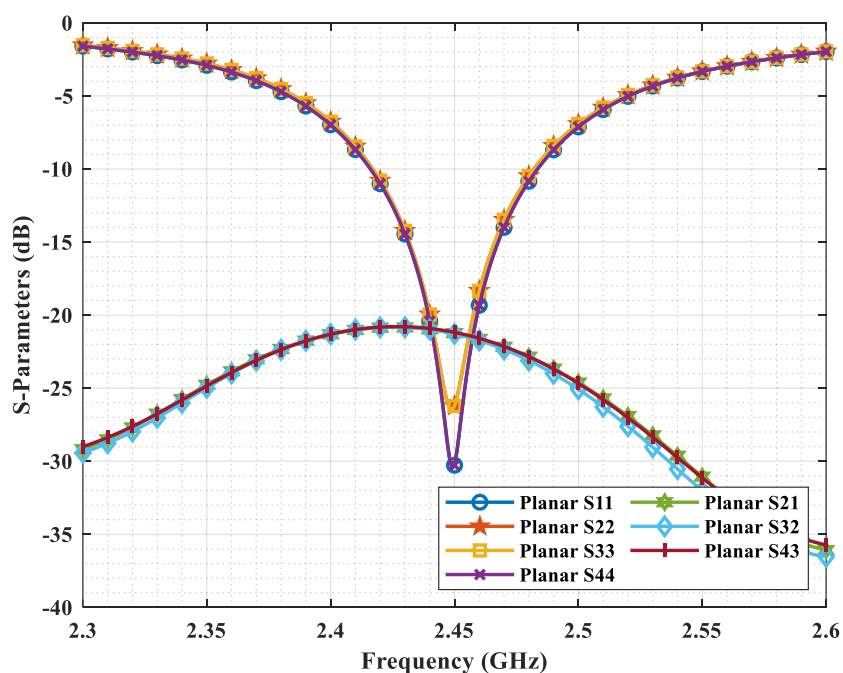
จากผลการจำลอง ค่า Return loss ขององค์ประกอบที่ 1 ($S_{1,1}$) และ 4 ($S_{4,4}$) และองค์ประกอบที่ 2 ($S_{2,2}$) และ 3 ($S_{3,3}$) มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากสายอากาศแถวลำดับนี้สมมาตร

สายอากาศแถวลำดับ SPPA มีผลของการ Matching ดีกว่าสายอากาศแถวลำดับ SPCA และการลดขนาดของรัศมีความโค้งองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ SPCA ทำให้ค่าการ Matching แย่ลง

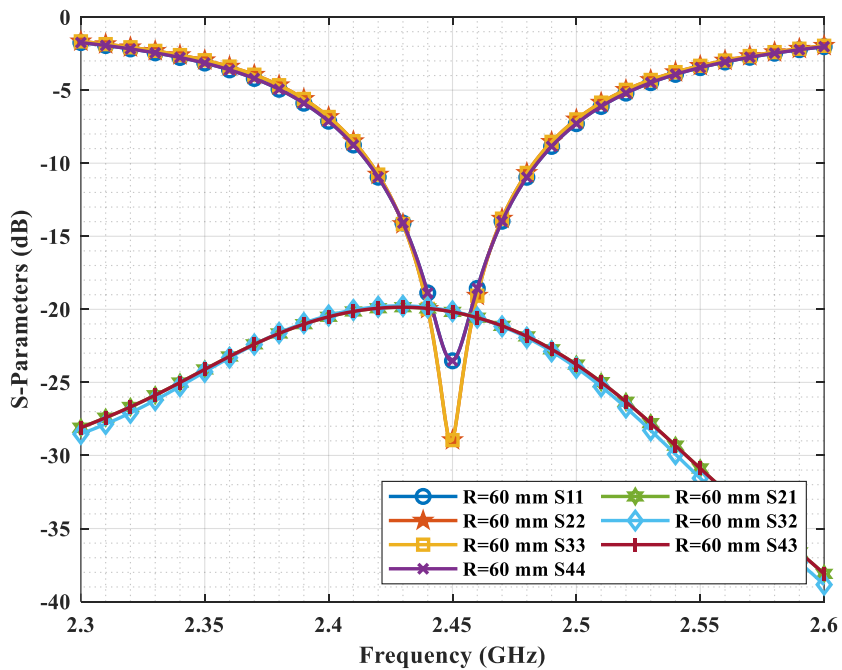
สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน สายอากาศแถวลำดับ SPPA ให้ผลค่า Isolation ต่ำกว่าสายอากาศแถวลำดับ SCPA และการลดขนาดของรัศมีความโค้งงอประกอบของสายอากาศแถวลำดับ SCPA ส่งผลให้ค่า Isolation สูงขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ SCPA มีขนาดของลำคลื่นที่กว้าง ทำให้ Mutual coupling ระหว่างองค์ประกอบข้างเคียงเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าสายอากาศแถวลำดับ SPPA และนอกจากนี้สายอากาศ SCPA รัศมี 30mm ที่องค์ประกอบมีขนาดลำคลื่นกว้างกว่า จึงมีค่า Isolation สูงที่สุด

ตารางที่ 3.9 ผลการจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับ SPPA และ SCPA

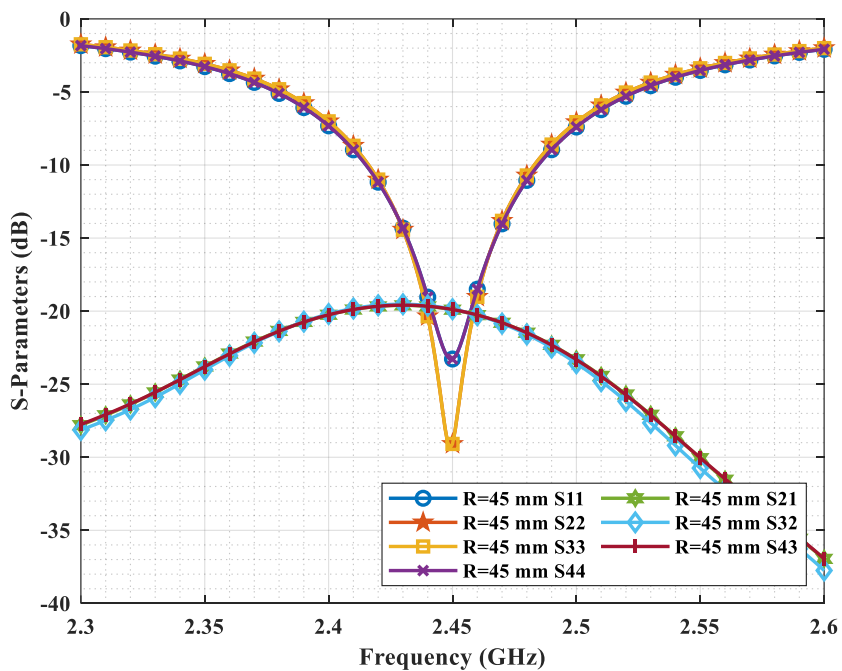
Radius (R)	S-parameter (dB) at 2.45 GHz						
	S1,1	S2,2	S3,3	S4,4	S2,1	S3,2	S4,3
Planar	-30.27	-26.22	-26.22	-30.27	-21.23	-21.29	-21.18
R = 60 mm	-23.52	-28.95	-28.95	-23.52	-20.18	-20.13	-20.18
R = 45 mm	-23.28	-29.10	-29.10	-23.28	-19.90	-19.87	-19.89
R = 30 mm	-21.29	-26.77	-26.77	-21.29	-19.21	-19.23	-19.20



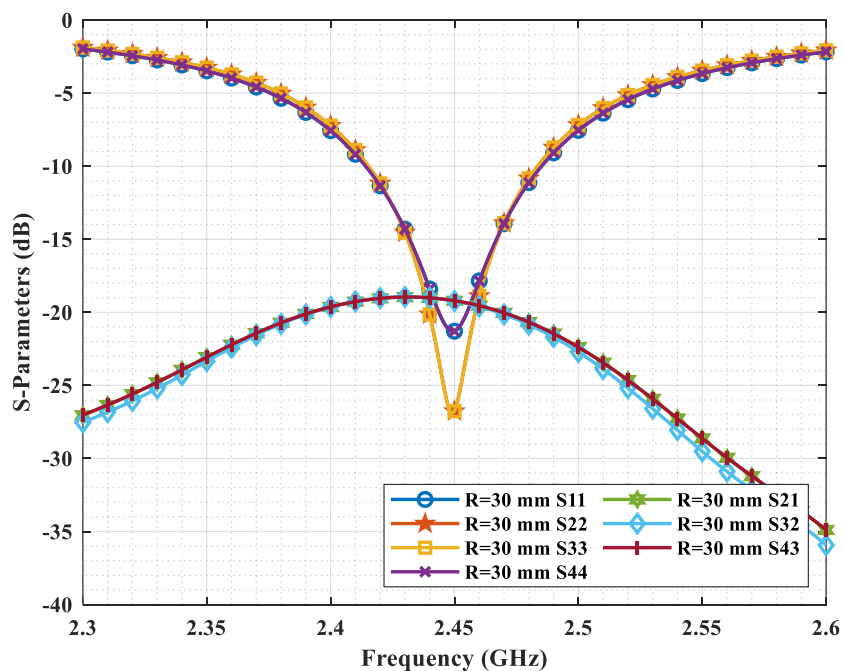
ก) สายอากาศแถวลำดับ SPPA



ข) สายอากาศแฉกลำดับ SCPA ($R = 60$ mm)



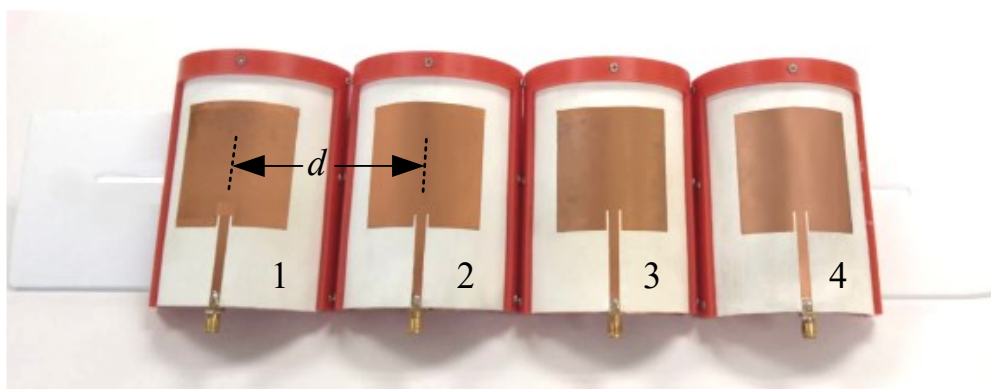
ค) สายอากาศแฉกลำดับ SCPA ($R = 45$ mm)



ง) สายอากาศแฉวลำดับ SCPA ($R = 30$ mm)

ภาพประกอบที่ 3.24 ผลการจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศแฉวลำดับ

3.3.2 การสร้างสายอากาศแฉวลำดับ SCPA ($R = 30$ mm)



ภาพประกอบที่ 3.25 ต้นแบบสายอากาศแฉวลำดับ SCPA ($R = 30$ mm)

ต้นแบบสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30$ mm) นำมาจัดเรียงเป็นแฉวลำดับ SCPA ($R = 30$ mm) - Planar phased array มีระยะขององค์ประกอบ (d) เท่ากับ $0.60\lambda_0$ แสดงดังภาพประกอบที่ 3.25 เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศเป็นแพทช์ช่องเปิด จึงจำเป็นต้องมีโครงสร้าง Support เพื่อ

แยกชั้นวัสดุฐานรองและกราวด์ โครงสร้าง Support เป็นโมเดลสามมิติ วัสดุชนิด PLA สร้างจากเครื่อง 3D Printer แสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2

3.3.3 การทดสอบสายอากาศแกลวลำดับ SCPA ($R = 30$ mm)

ภายหลังจากการสร้างสายอากาศ นำต้นแบบสายอากาศทดสอบวัดคุณลักษณะของสายอากาศ ประกอบด้วย ค่า S-Parameter, อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงาน

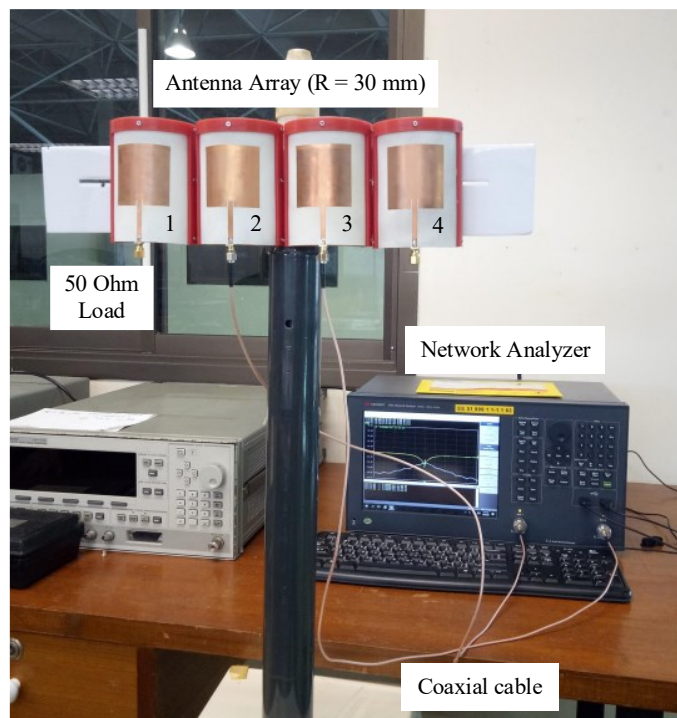
1) ค่า S-Parameter

การทดสอบค่า S-parameter ประกอบไปด้วย 1. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) โดยสายอากาศควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างน้อยต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ที่ใช้ออกแบบคือ 2.45 GHz ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนยิ่งต่ำมาก ๆ สายอากาศก็จะยิ่งแมตช์ได้ดี การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยวัดค่า Return loss ขององค์ประกอบที่ต้องการทดสอบ และองค์ประกอบที่เหลือจะถูก Terminate ด้วยโหลดขนาด 50Ω และ 2. ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission coefficient) ระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแกลวลำดับ การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน โดยวัดค่า Isolation ของสององค์ประกอบที่ต้องการทดสอบ และองค์ประกอบที่เหลือจะถูก Terminate ด้วยโหลดขนาด 50Ω

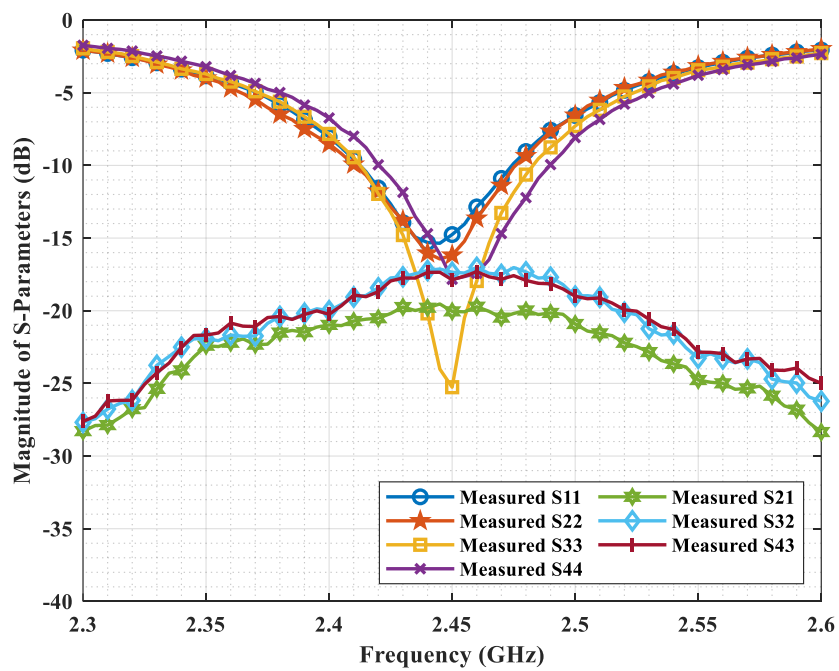
ทดสอบค่า S-parameter ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแสดงดังภาพประกอบที่ 3.26 ผลการทดสอบค่า S-parameter แสดงดังภาพประกอบที่ 3.27 และตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบให้ผลสอดคล้องกับผลการจำลอง โดยค่า Return loss ของแต่ละองค์ประกอบสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยแต่ละองค์ประกอบมีค่า Return loss แตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากผลจากความไม่แม่นยำจากการสร้างต้นแบบ ทำให้การค่า Impedance matching ของแต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน

ตารางที่ 3.10 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของสายอากาศแกลวลำดับ SCPA ($R=30$ mm)

S-Parameter (dB) at 2.45 GHz						
S1,1	S2,2	S3,3	S4,4	S2,1	S3,2	S4,3
-14.76	-16.18	-25.26	-17.84	-20.04	-17.35	-17.87



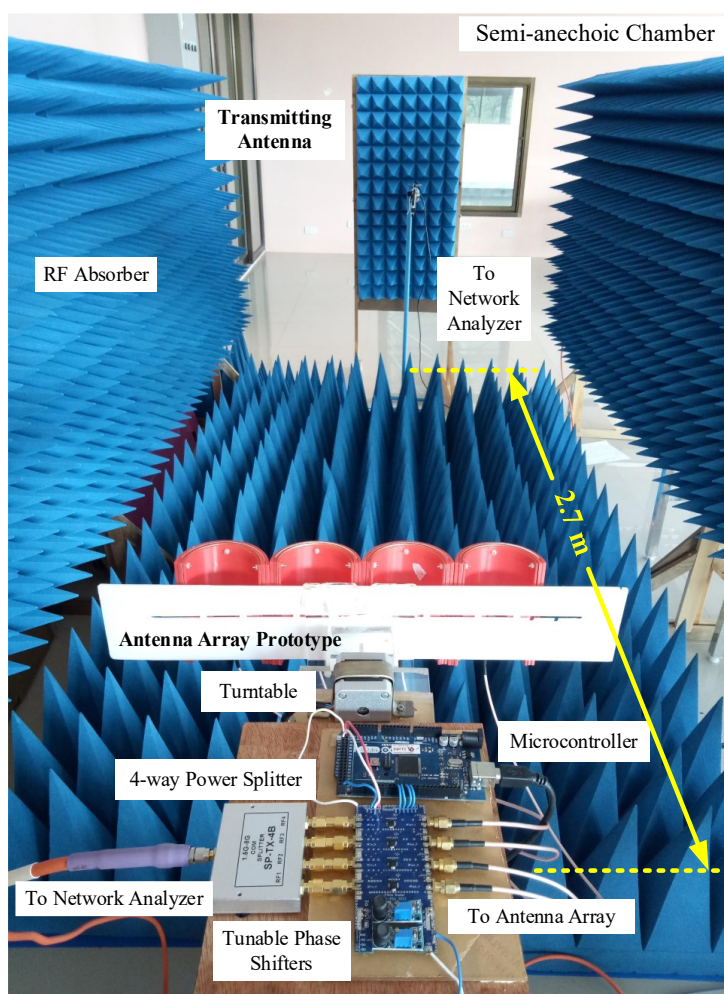
ภาพประกอบที่ 3.26 การทดสอบวัดค่า S-Parameter ของต้นแบบสายอากาศ



ภาพประกอบที่ 3.27 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R=30$ mm)

2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

การทดสอบวัดอัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงานของต้นแบบสายอากาศแกลวลำดับ SCPA ($R=30$ mm) แสดงดังภาพประกอบที่ 3.28 ทดสอบภายใน Semi-anechoic chamber ที่ล้อมรอบไปด้วยแผ่น Absorber ภายในการทดสอบประกอบไปด้วย 1. สายอากาศภาคส่ง (Transmitting antenna) 2. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) และ 3. ต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบ (Antenna Under Test, AUT) ที่ต่อกับวงจรเลื่อนเฟส สำหรับป้อนกระแสและเฟสไปยังแต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแกลวลำดับ



ภาพประกอบที่ 3.28 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยาย

การทดสอบวัดอัตราขยาย มีพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบ ดังนี้ P_T คือ กำลังงานจากส่ง, P_R คือ กำลังที่ภาครับ, G_T คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง, G_R คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับซึ่งในที่นี้คือ ต้นแบบสายอากาศ, L_T คือกำลังงานสูญเสียจากสายนำสัญญาณ, L_{PS} คือกำลังงานสูญเสียของวงจรเลื่อนเฟส, $L_{splitter}$ คือกำลังงานสูญเสียของ 4-way Power splitter, L_{FSPL} คือการสูญเสียในอากาศว่าง และระยะ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและรับ ซึ่งเป็นระยะที่มีความสอดคล้องกับระยะสนามไกล โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะช่วยในการคำนวณค่าอัตราขยาย สามารถคำนวณจากสมการการส่งผ่านของฟรีดริชสมการ (3.9) เมื่อสายอากาศภาครับเป็นต้นแบบสายอากาศสามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังสมการ (3.10)

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_{FSPL} - L_T - L_{PS} - L_{splitter} \quad (3.9)$$

$$G_R = P_R - P_T - G_T + L_{FSPL} + L_T + L_{PS} + L_{splitter} \quad (3.10)$$

การทดสอบอัตราขยายของ สายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R=30$ mm) มีการทดสอบทั้งหมด 4 ทิศทาง คือ 0 องศา, 15 องศา, 30 และ 45 องศา โดยการป้อนเฟสให้แต่ละองค์ประกอบที่แตกต่างกันคือ 0 องศา, 45 องศา, 90 องศา และ 135 องศา อย่างไรก็ตามจากบทที่ 1 ผู้วิจัยต้องการพิจารณาทิศทางของลำคลื่นทั้งหมด 7 ทิศทางคือ 0 องศา, ± 15 องศา, ± 30 องศา และ ± 45 องศา แต่เนื่องสายอากาศแถวลำดับนี้เป็น สายอากาศสมมาตร ดังนั้นจึงทดสอบเพียงด้านเดียวคือ 0 องศา, 15 องศา, 30 และ 45 องศา

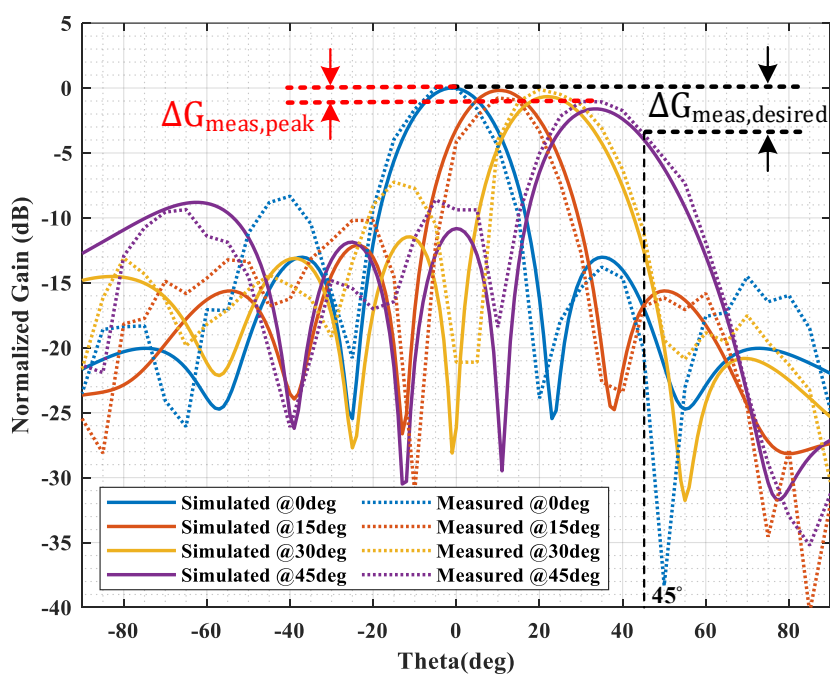
ทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz เริ่มต้นจากภาคส่งให้กำลังงาน (P_T) 20 dBm ไปยังสายอากาศภาคส่งเป็นสายอากาศ Log periodic ให้อัตราขยาย (G_T) เท่ากับ 8.5 dBi ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ (d) เท่ากับ 2.70 m สามารถคำนวณการสูญเสียในอากาศว่าง (L_{FSPL}) เท่ากับ 48.85 dB จากสมการ (3.2) การสูญเสียในสายนำสัญญาณ (L_T) เท่ากับ 2.86 dB การสูญเสียของวงจรเลื่อนเฟส (L_{PS}) มีค่าเท่ากับ 6.20 dB การสูญเสียจาก Power splitter ($L_{splitter}$) เท่ากับ 6.70 dB

เมื่อภาครับได้รับกำลังงาน (P_R) สามารถคำนวณอัตราขยาย (G_R) ตามสมการ (3.10) และ การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานบันทึกค่า $S_{2,1}$ ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นค่า Normalized Gain ด้วยมุม 0 องศา เมื่อปรับลำคลื่นไปมุมต่างๆ 0

องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ของระนาบ H-plane แสดงดังภาพประกอบที่ 3.29 และเปรียบเทียบผลการทดสอบดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ผลการทดสอบต้นแบบสายอากาศแฉวลำดับ SCPA ($R=30$ mm)

Parameters	Beam1	Beam2	Beam3	Beam4	$\max \Delta G$ (dB)
Sim. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 12.86	(15 deg) 12.59	(30 deg) 11.84	(45 deg) 9.64	3.22
Meas. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 11.83	(15 deg) 11.25	(30 deg) 10.94	(45 deg) 9.11	2.72
Sim. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 12.86	(13 deg) 12.80	(23 deg) 12.70	(35 deg) 11.50	1.36
Meas. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 11.83	(13 deg) 11.48	(25 deg) 11.41	(35 deg) 10.06	1.77



ภาพประกอบที่ 3.29 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของแฉวลำดับ SCPA ($R= 30$ mm)

ผลการทดสอบมีแนวโน้มของลำคลื่นสอดคล้องกับผลการจำลอง ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยายสูงสุด 11.83 dBi ที่ตำแหน่งมุม 0 องศา เมื่อปรับลำคลื่นไปยังทิศทางต่างๆ มีค่าความแตกต่างของอัตราขยายสูงสุดที่ตำแหน่ง Desired direction ($\Delta G_{meas,desired}$) เท่ากับ 2.72 dB และที่ตำแหน่ง Peak direction ($\Delta G_{meas,peak}$) เท่ากับ 1.77 dB ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 3 dB จึงกล่าวได้ว่าต้นแบบสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R=30$ mm) ให้คุณสมบัติความเป็น Constant gain

ผลการทดสอบการชี้ทิศทางของลำคลื่นเมื่อปรับลำคลื่นไปยังทิศทางต่างๆ ได้แก่มุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ต้นแบบสายอากาศสามารถปรับลำคลื่นไปได้ดังนี้ 0 องศา, 13 องศา, 25 องศา และ 35 องศา ตามลำดับ มีความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทางที่ค่อนข้างมากเท่ากับ 22.22%

3.4 สรุป

บทนี้นำเสนอการคำนวณค่า Power budget และการออกแบบ จำลอง ทดสอบสายอากาศ ดังนี้

1. การคำนวณ Power budget ของระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม จากการคำนวณอัตราขยายของสายอากาศที่น้อยที่สุดที่ทำให้ระบบยังทำงานได้ และอยู่ภายใต้เงื่อนไข Margin ของระบบนี้ควรมีอย่างน้อย 30 dB ควรมีค่าน้อยเท่ากับ 13 dBi
2. การออกแบบ, จำลอง, สร้าง และทดสอบสายอากาศ

สายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัย เป็นสายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป โดยที่แต่ละองค์ประกอบเป็นสายอากาศแพทช์แบบคงรูป ที่ให้คุณสมบัติลำคลื่นกว้าง ส่งผลให้สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป มีคุณสมบัติ Constant gain และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางสูง ขณะปรับลำคลื่น

ผู้วิจัยเริ่มต้นจาก การออกแบบสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์ประกอบ ซึ่งเปรียบเทียบด้วยกันทั้งหมด 4 ขนาดได้แก่ สายอากาศแพทช์ SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์, สายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60$ mm), สายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 45$ mm) และสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30$ mm) จากผลการจำลองและทดสอบ การลดขนาดรัศมีของสายอากาศแพทช์ ส่งผลให้ขนาดลำคลื่นกว้างขึ้น โดยสายอากาศแพทช์ SPPA, สายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 60$ mm), สายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 45$ mm) และสายอากาศแพทช์ SCPA ($R = 30$ mm) มีขนาดลำคลื่นดังนี้ 64 องศา, 74.60 องศา, 79.20 องศา และ

89.70 องศา ตามลำดับ ผู้วิจัยต้องการขนาดลำคลื่นขนาดเท่ากับ 90 องศา แต่อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของโครงสร้างสายอากาศที่ผู้วิจัยสามารถสร้างได้ มีขนาดโครงสร้างรัศมีเล็กที่สุดได้เพียง 30 mm

ในลำดับถัดมา นำองค์ประกอบแพทช์ทั้ง 4 ขนาดข้างต้น จัดเรียงเป็นสายอากาศแถวลำดับ (Planar phased array) ขนาด 4X1 องค์ประกอบ โดยมีระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากับ $0.60\lambda_0$ ที่ความถี่ 2.45 GHz เพื่อจำลองคุณลักษณะของสายอากาศ ดังนี้ 1. การจำลองค่า Directivity เมื่อปรับตำแหน่งมุมต่างๆ ได้แก่มุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา คำนวณหาค่าความแตกต่างของ Directivity สูงสุดเมื่อปรับลำคลื่น เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติความเป็น Constant gain และ 2. การจำลองการชี้ทิศทางของลำคลื่น พิจารณาถึงความแม่นยำในการชี้ทิศทางของลำคลื่น เมื่อปรับลำคลื่น

จากการจำลองและทดสอบ สายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$) ขนาด 4X1 องค์ประกอบ มีระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากับ $0.60\lambda_0$ ให้คุณสมบัติ Constant gain มีค่าความแตกต่างของอัตราขยายสูงสุดไม่เกิน 3 dB มีเท่ากับ 2.72 dB เมื่อมีการปรับลำคลื่นไปยังมุมต่างๆ แต่อย่างไรก็ตาม สายอากาศแถวลำดับข้างต้นนี้ มีความคลาดเคลื่อนของการชี้ทิศทางที่ค่อนข้างมาก มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 22.22% เป็นผลจากขนาดองค์ประกอบของแถวลำดับมีโครงสร้างเป็นสายอากาศแพทช์แบบช่องเปิด ทำให้องค์ประกอบมีขนาดใหญ่คือมีขนาดพื้นที่เท่ากับ $90 \times 110 \text{ mm}^2$ เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับแล้วระยะห่างขององค์ประกอบที่น้อยที่สุดที่จะไม่ซ้อนทับกันเท่ากับ $0.60\lambda_0$ จึงได้รับผลจาก Gating lode คือระดับของโลปข้างที่สูง ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$) มีระดับของโลปข้างเท่ากับ -13.00 dB ดังนั้นเพื่อลดผลจาก Gating lode ที่ส่งผลต่อความแม่นยำการชี้ทิศทางของแถวลำดับ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบควรมีระยะเท่ากับ $0.50\lambda_0$ ผู้วิจัยจะทำการลดขนาดขององค์ประกอบลง เพื่อให้สามารถจัดเรียงแถวลำดับใหม่ที่มีระยะเท่ากับ $0.50\lambda_0$ โดยจะนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 4 การลดขนาดสายอากาศ

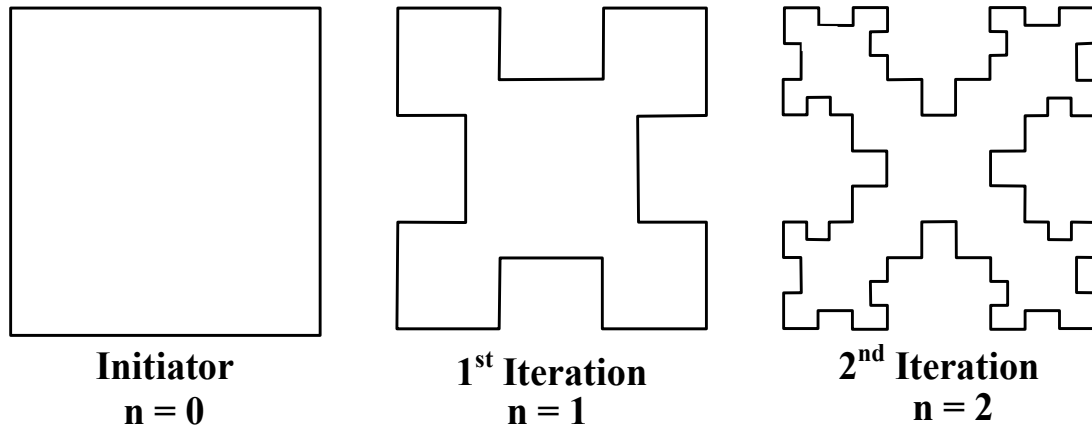
เนื่องจากบทก่อนหน้า ต้นแบบสายอากาศแกลลัมดับ SCPA รัศมีเท่ากับ 30 mm ทั้งผลการจำลองและการทดสอบของสายอากาศแกลลัมดับ มีผลความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางของลำคลื่นค่อนข้างมาก มีความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 22.22% เนื่องจากโครงสร้างของแต่ละองค์ประกอบเป็น สายอากาศแพทช์แบบช่องเปิด มีการแทรกช่องอากาศระหว่างชั้นกราวด์และชั้นวัสดุฐานรอง ทำให้มีโครงสร้างที่ใหญ่กว่าสายอากาศแพทช์ธรรมดา ซึ่งมีขนาดพื้นที่เท่ากับ $90 \times 110 \text{ mm}^2$ เมื่อจัดเรียงเป็นแกลลัมดับแล้ว ระยะห่างขององค์ประกอบที่น้อยที่สุดที่องค์ประกอบไม่ทับซ้อนกันเท่ากับ $0.60\lambda_0$ เมื่อปรับลำคลื่นไปยังทิศทางต่างๆ เกิดความคลาดเคลื่อนในการชี้ทิศทาง ผลจากปัญหา Gating lode ดังนั้นในบทนี้ผู้วิจัยจึงประยุกต์เทคนิคการลดขนาดของสายอากาศให้มีขนาดขององค์ประกอบเล็กลง สามารถจัดเรียงเป็นแกลลัมดับที่ระยะขององค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$ ได้

การลดขนาดของสายอากาศแพทช์ สามารถทำได้ด้วยกันหลายวิธี เช่น การเปลี่ยนวัสดุชั้นวัสดุฐานรองของสายอากาศที่ให้ค่า Dielectric สูง, เทคนิค Defected Ground Structure (DGS), การเจาะช่อง (Slot), เทคนิค Defected Patch Structure (DPS) และเทคนิคการทำรูป Fractal เป็นต้น สำหรับวิธีการ DGS คือการเจาะร่องในระนาบกราวด์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้งานอย่างแพร่หลาย แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากต้นแบบสายอากาศที่ออกแบบ ใช้วิธีการป้อนสัญญาณแบบ Coaxial probe จึงไม่เหมาะที่จะใช้วิธี DGS ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการลดขนาดของสายอากาศด้วยรูป Fractal ซึ่งง่ายต่อการสร้างสายอากาศ

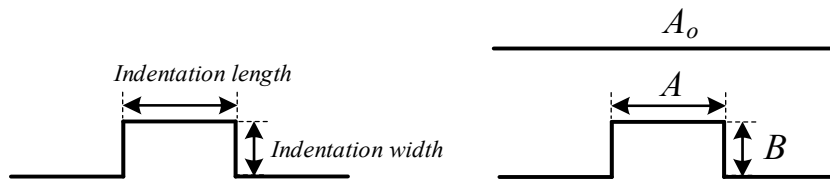
4.1 การลดขนาดสายอากาศด้วยวิธีการรูป Minkowski Fractal [18]

การลดขนาดสายอากาศแพทช์ด้วยวิธีการรูป Fractal เป็นการเพิ่มขนาดทางไฟฟ้า (Electrical size) หรือเป็นการเพิ่มเส้นทางการไหลของกระแส (Current flow) ทำให้ความถี่ที่สายอากาศที่ทำงานความถี่ต่ำลง จึงสามารถลดขนาดของสายอากาศได้ และในวิจัยนี้ใช้การลดขนาดสายอากาศด้วยรูป Minkowski Fractal [18]

การลดขนาดของสายอากาศด้วยรูป Minkowski Fractal จะเพิ่มเส้นทางการไหลของกระแสด้วยการเพิ่มร่อง แสดงดังภาพประกอบที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง Minkowski Fractal Curve ตั้งแต่ n=0, 1 และ 2 แสดงลักษณะการเพิ่มร่องของ Minkowski Fractal ดังภาพประกอบที่ 4.2



ภาพประกอบที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างรูป Minkowski Fractal [18]

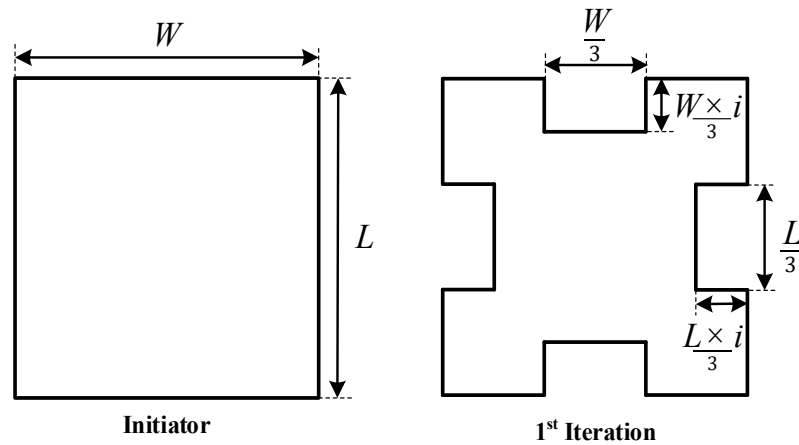


ภาพประกอบที่ 4.2 ร่องของ Minkowski Fractal [18]

การคำนวณขนาดของ Indentation ของ 1st Minkowski Fractal ดังสมการ (4.1) และ (4.2) โดยที่ i คือ Indentation factor ค่าอัตราส่วนระหว่างค่า Indentation width และ Indentation length, A_0 คือความยาวเริ่มต้น, A คือความยาวของ Indentation (Indentation length), B คือ ความกว้างของ Indentation (Indentation width)

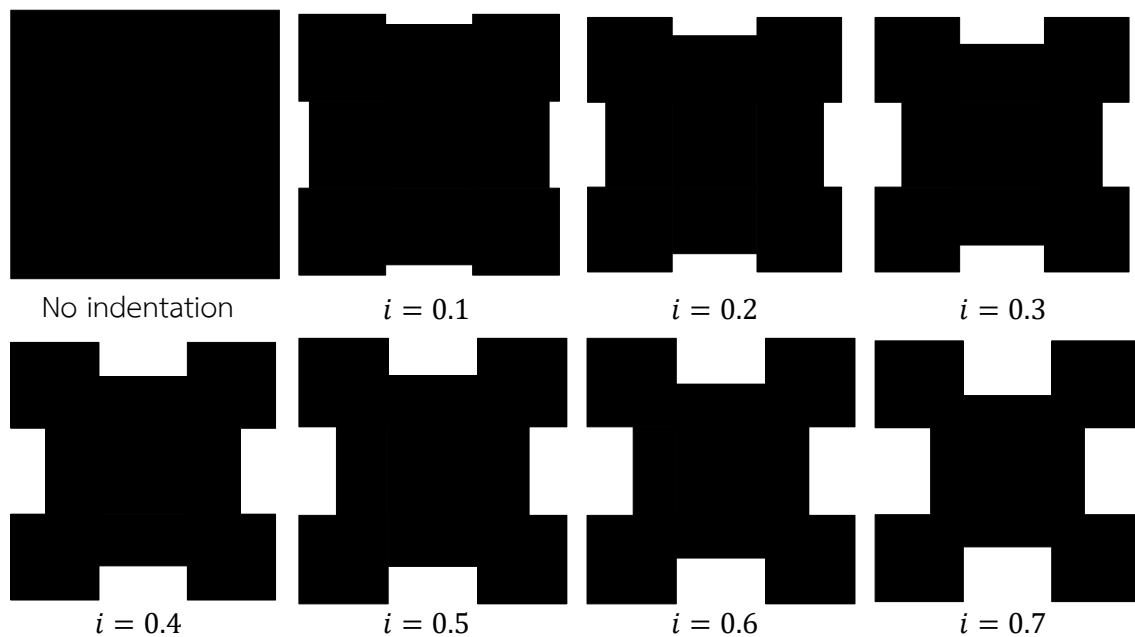
$$\text{indentation length}, A = \frac{A_0}{3} \tag{4.1}$$

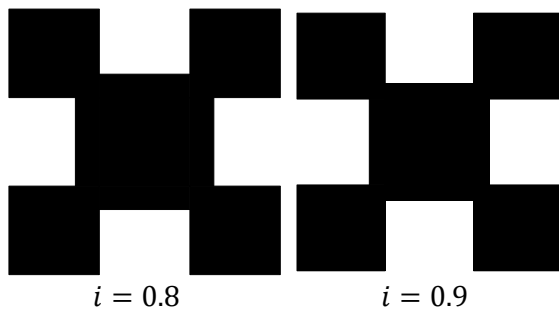
$$\text{indentation width}, B = \frac{A_0 * i}{3} \tag{4.2}$$



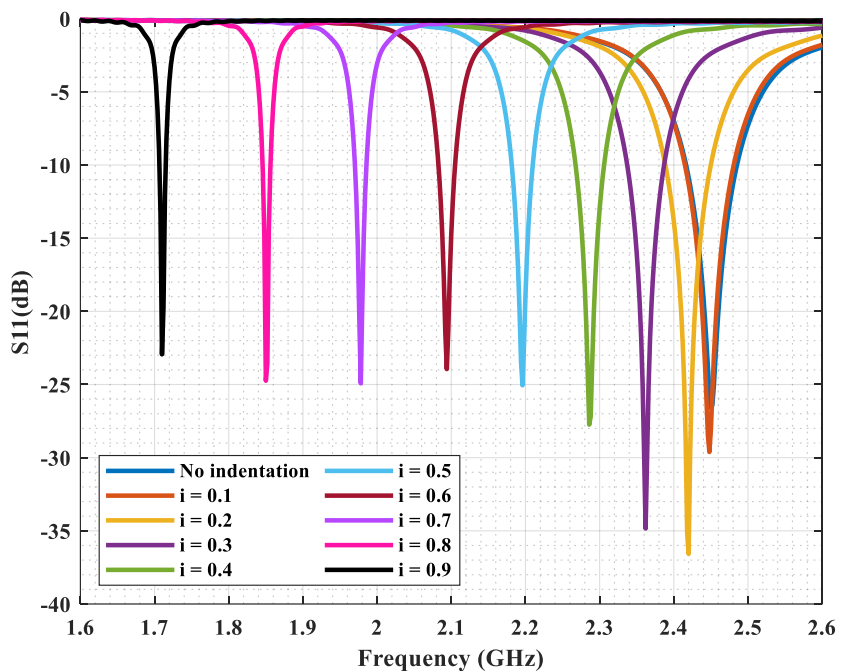
ภาพประกอบที่ 4.3 โครงสร้างสายอากาศ 1st Iteration Minkowski Fractal

การศึกษาค่าผลของการเปลี่ยนแปลงค่า Indentation factor (i) ต่อความถี่เรโซแนนซ์ โดยเปรียบเทียบค่า Indentation factor ตั้งแต่ 0 – 0.90 ของสายอากาศแพทช์แบบ 1st Iteration Minkowski Fractal แสดงโครงสร้างของสายอากาศดังภาพประกอบที่ 4.3 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ที่ค่า Indentation factor ต่างๆดังภาพประกอบที่ 4.4





ภาพประกอบที่ 4.4 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ Minkowski Fractal



ภาพประกอบที่ 4.5 ผลการจำลองสัมประสิทธิ์การสะท้อน ที่ค่า Indentation factor ต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ผลการจำลองค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่ค่า indentation factor ต่างๆ

Indentation factor (<i>i</i>)	Resonance frequency (GHz)
No indentation	2.45
0.1	2.44
0.2	2.42
0.3	2.36
0.4	2.28

Indentation factor (i)	Resonance frequency (GHz)
0.5	2.19
0.6	2.09
0.7	1.97
0.8	1.85
0.9	1.71

ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศที่ค่า Indentation factor ต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.5 จากผลการจำลอง การเปลี่ยนแปลงของค่า indentation factor ส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ การเพิ่มค่า indentation factor ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์เลื่อนต่ำลง ดังนั้นจึงสามารถลดขนาดของสายอากาศได้ เพื่อให้สายอากาศมีขนาดและความถี่ที่ต้องการ

4.2 การออกแบบสายอากาศ

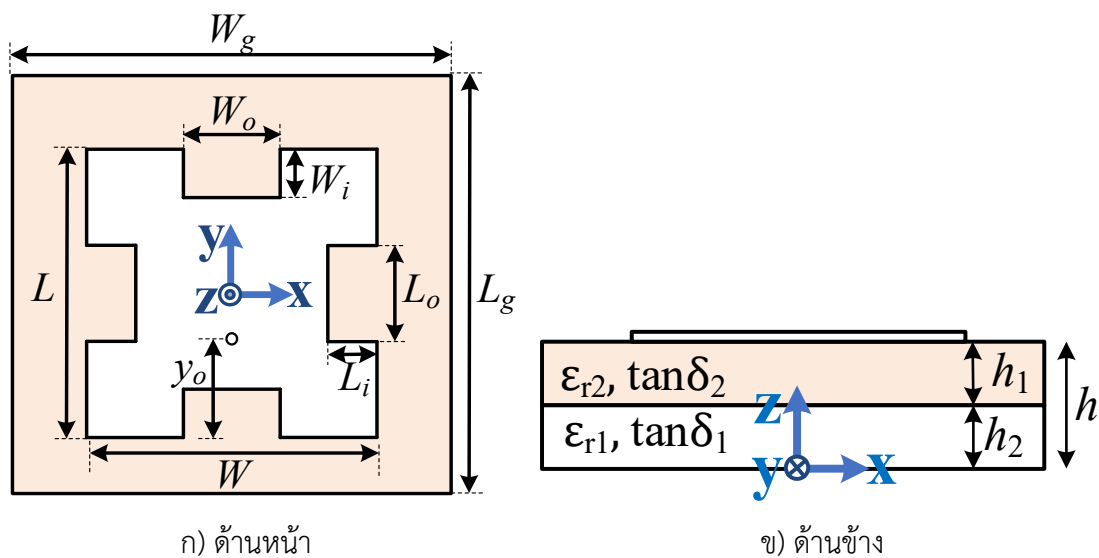
การออกแบบโครงสร้างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ โดยแต่ละองค์ประกอบมีโครงสร้างเป็นสายอากาศแพทช์แบบช่องเปิด และประยุกต์ใช้เทคนิคการลดขนาดของสายอากาศด้วยวิธีรูป Minkowski Fractal

สายอากาศทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz จัดเรียงเป็นแถวลำดับที่ ระยะระหว่างองค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$ มีค่าเท่ากับ 61.22 mm ดังนั้นขนาดของแต่ละองค์ประกอบต้องมีขนาดไม่เกิน 61.22 mm จึงจะสามารถจัดเรียงเป็นแถวลำดับได้

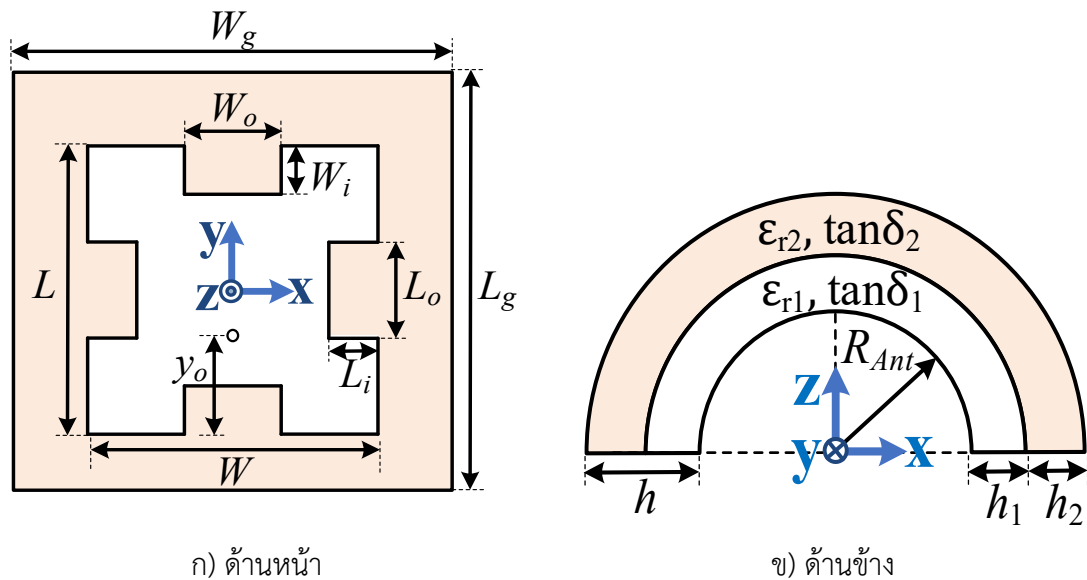
การออกแบบสายอากาศแพทช์โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการลดขนาดด้วยวิธีรูป Minkowski Fractal โครงสร้างของสายอากาศจะการเพิ่มร่องที่ด้านยาว (L) และด้านกว้าง (W) ของสายอากาศแพทช์ สามารถคำนวณได้จากสมการ (4.1) และ (4.2) สำหรับด้านยาวของสายอากาศมีขนาดของร่องยาว (L_o) มีขนาดเป็นหนึ่งส่วนสามเท่าของด้านยาว ($\frac{1}{3}L$) และด้านกว้างของร่อง (L_i) เท่ากับ $\frac{L \cdot i}{3}$ โดยที่ i และสำหรับด้านกว้างของสายอากาศมีขนาดของร่องยาว (W_o) เป็นหนึ่งส่วนสามเท่าของด้านยาว ($\frac{1}{3}w$) และด้านกว้างของร่อง (W_i) เท่ากับ $\frac{W \cdot i}{3}$

การประยุกต์ใช้เทคนิคลดขนาดสายอากาศด้วยวิธีรูป Minkowski Fractal กับโครงสร้างสายอากาศแพทช์ SPPA เรียกว่า “Minkowski Fractal Suspended Planar Patch Antenna” หรือ MKF-SPPA ดังภาพประกอบที่ 4.7 และประยุกต์ใช้กับสายอากาศแพทช์ SCPA เรียกว่า “Minkowski Fractal Suspended Conformal Patch Antenna” หรือ MKF-SCPA แสดงการโครงสร้างดังภาพประกอบที่ 4.8 มีพารามิเตอร์ดังนี้ W คือขนาดความกว้างของสายอากาศแพทช์, L คือขนาดความยาวของสายอากาศแพทช์, W_g คือขนาดความกว้างของกราวด์, L_g คือขนาดความยาวของกราวด์, y_0 คือระยะของจุดป้อนสัญญาณ, h_1 คือความหนาของชั้นอากาศ, h_2 คือความหนาของชั้นวัสดุฐานรอง, ϵ_{r1} คือค่าไดอิเล็กตริกของชั้นอากาศ, ϵ_{r2} คือค่าไดอิเล็กตริกของชั้นวัสดุฐานรอง, L_o คือความยาวของร่องของด้านยาวแพทช์, L_i คือความกว้างของร่องของด้านยาว, W_o คือความยาวของร่องของด้านกว้างแพทช์, W_i คือความกว้างของร่องของด้านกว้างแพทช์ และ R_{Ant} คือรัศมีของสายอากาศ โดยกำหนดรัศมีโค้งของสายอากาศแพทช์เท่ากับ 60 mm, 45 mm และ 30 mm ซึ่งเหมือนกับบทก่อนหน้า แสดงค่าพารามิเตอร์ของโครงสร้างสายอากาศแพทช์ MKF ขนาด 1 องค์กรประกอบ จากการคำนวณดังตารางที่ 4.2

ขนาดของสายอากาศภายหลังการลดขนาดแล้วมีขนาดพื้นที่เท่ากับ 59.11X60.12 mm² เมื่อเปรียบเทียบกับสายอากาศก่อนลดขนาดซึ่งมีขนาดพื้นที่เท่ากับ 90X110 mm² ที่ขนาดพื้นที่เล็กลง 37% หรือมีขนาดพื้นที่เท่ากับ 63% ของสายอากาศก่อนลดขนาด



ภาพประกอบที่ 4.6 โครงสร้างสายอากาศ MKF-SPPA



ภาพประกอบที่ 4.7 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ SCPA

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ MKF-SPPA และ MKF-SCPA

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ค่าไดอิเล็กตริกของชั้นวัสดุฐานรอง (Dielectric constant)	ϵ_{r1}	4.30	-
ค่าไดอิเล็กตริกของชั้นอากาศ (Dielectric constant in free space)	ϵ_{r2}	1.00	-
ค่าไดอิเล็กตริกสมมูล (Equivalent dielectric constant)	ϵ_{req}	1.05	-
ความหนาของชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate thickness)	h_1	0.20	mm
ความหนาของชั้นอากาศ (Air gap thickness)	h_2	3.00	mm
ความกว้างของแพทช์ (Patch width)	W	40.37	mm
ความยาวของแพทช์ (Patch length)	L	40.92	mm
Indentation factor	i	0.71	-
ความกว้างของร่อง ของด้านกว้างแพทช์	W_i	9.53	mm
ความยาวของร่อง ของด้านกว้างแพทช์	W_o	13.46	mm
ความกว้างของร่อง ของด้านยาวแพทช์	L_i	9.66	mm
ความยาวของร่อง ของด้านยาวแพทช์	L_o	13.64	mm

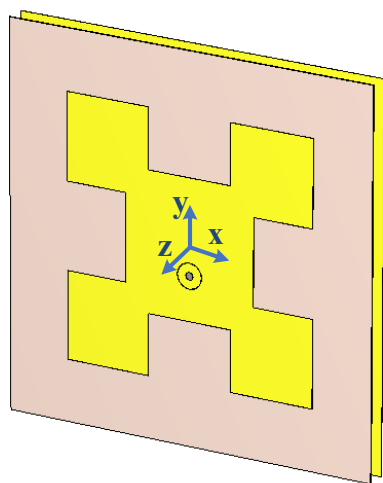
พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
จุดป้อนสัญญาณ (feed point)	y_0	36.92	mm
ความกว้างของกราวด์ (Ground width)	W_g	59.57	mm
ความยาวของกราวด์ (Ground length)	L_g	60.12	mm
รัศมีความโค้ง (Radius)	R_{Ant}	$\infty, 30, 45, 60$	mm

4.3 การจำลองสายอากาศ

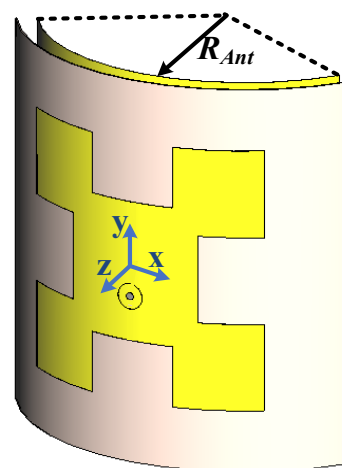
การลดขนาดสายอากาศด้วยวิธีรูป Minkowski Fractal ไปประยุกต์กับสายอากาศแพทช์ SPPA และสายอากาศแพทช์ SCPA เพื่อให้ขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็กลงเพียงพอสำหรับจัดเรียงเป็นแถวลำดับให้มีระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$

4.3.1 สายอากาศ 1 องค์ประกอบ (Single element)

จากขนาดและโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ออกแบบ จำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า CST เพื่อพิจารณาคูณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน, อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงาน ดังแสดงโครงสร้างสายอากาศภายในโปรแกรมจำลองดังภาพประกอบที่ 4.8 และโครงสร้างสายอากาศพร้อมด้วย Support ดังภาพประกอบที่ 4.9

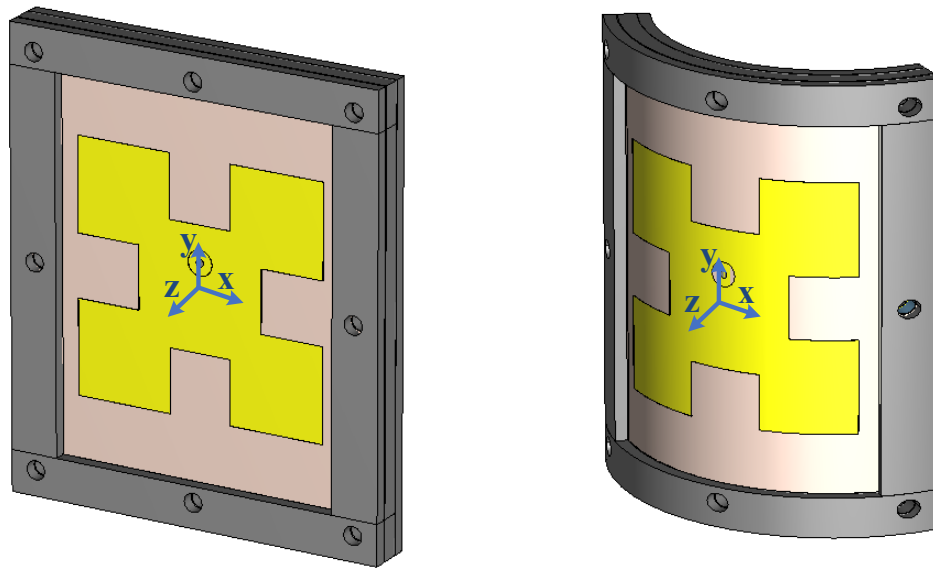


ก) สายอากาศแพทช์ MKF-SPPA



ข) สายอากาศแพทช์ MKF-SCPA

ภาพประกอบที่ 4.8 โมเดลสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์ประกอบในโปรแกรมจำลอง



ก) สายอากาศแพทช์ MKF-SPPA

ข) สายอากาศแพทช์ MKF-SCPA

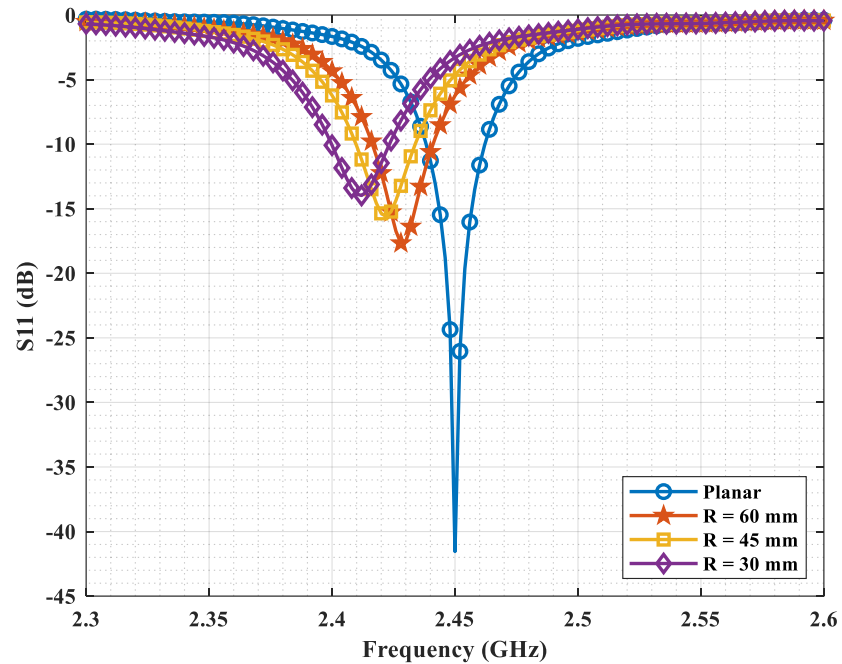
ภาพประกอบที่ 4.9 โมเดลสายอากาศแพทช์และ Support ในโปรแกรมจำลอง

การจำลองสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และ สายอากาศแพทช์ MKF-SCPA โครงสร้างและขนาดของโมเดลสายอากาศมีขนาดเท่ากัน แตกต่างกันที่รัศมีความโค้งคือ อนันต์ (Planar), 60 mm, 45 mm และ 30 mm

ผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังนี้

1) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)

ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และ MKF-SCPA ที่รัศมีต่างๆ แสดงดังภาพประกอบที่ 4.10 จากผลการจำลอง การลดรัศมีความโค้งของสายอากาศแพทช์ ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ถูกเลื่อนไปยังความถี่ต่ำ และส่งผลต่อการ Matching ของสายอากาศ โดยสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์ ให้ผลการ Matching ดีกว่าสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ที่มีรัศมี 60 mm, 45 mm และ 30 mm ตามลำดับ และนอกจากนี้ผลการจำลองของสายอากาศแพทช์ MKF มีแนวโน้มของผลการจำลองสอดคล้องกับสายอากาศแพทช์ก่อนลดขนาดดังภาพประกอบที่ 3.12

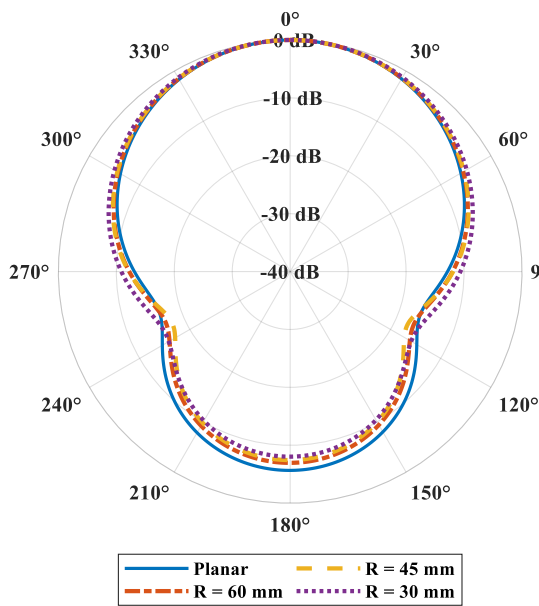


ภาพประกอบที่ 4.10 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์กรประกอบ

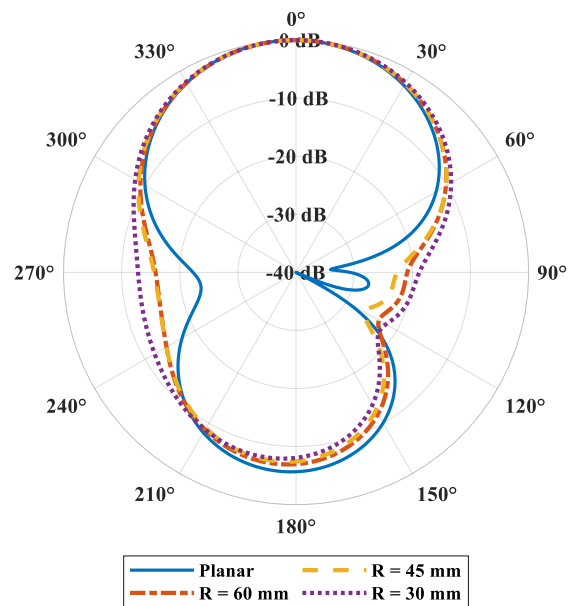
2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และ MKF-SCPA ที่ความถี่ 2.45 GHz บนระนาบ H-plane และ E-plane แสดงดังภาพประกอบที่ 4.11 เนื่องจากสายอากาศแพทช์โค้งในระนาบ H-plane ขนาดของลำคลื่นในระนาบ H-plane เพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดของรัศมีความโค้ง และในระนาบ E-plane ที่ไม่มีการโค้งงอของโครงสร้าง ขนาดของลำคลื่นมีขนาดใกล้เคียงกันที่ค่ารัศมีต่างๆ และในทางกลับกันการที่ขนาดของลำคลื่นกว้างขึ้น ส่งผลให้ค่า Directivity ของสายอากาศลดลง แสดงตารางเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.3

การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานสายอากาศแพทช์ MKF ภายหลังการลดขนาด และสายอากาศแพทช์ก่อนลดขนาด แสดงดังภาพประกอบที่ 4.12 ขนาดลำคลื่นของสายอากาศแพทช์ MKF ให้ขนาดลำคลื่นกว้างกว่าสายอากาศแพทช์ก่อนลดขนาด และอัตราขยายของสายอากาศแพทช์ MKF มีอัตราขยายน้อยกว่า เนื่องจากอัตราขยายขึ้นอยู่กับขนาดทางกายภาพของสายอากาศ การที่ขนาดทางกายภาพลดลงจึงทำให้อัตราขยายลดลง นอกจากนี้ขนาดของโลบหลังของสายอากาศแพทช์ MKF มีระดับที่สูงขึ้น

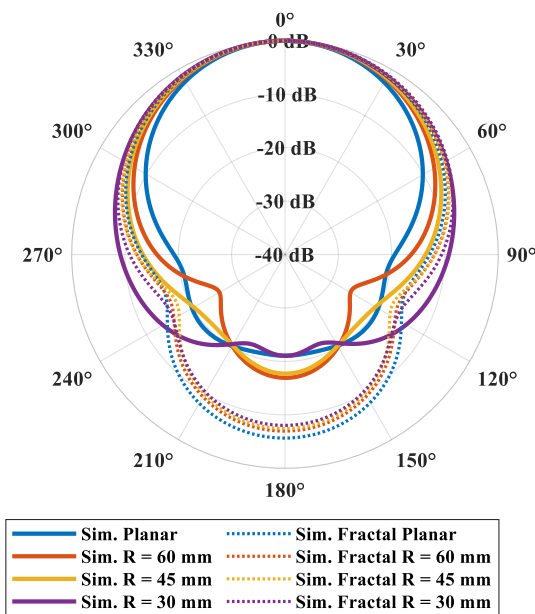


ก) ระนาบ H-plane

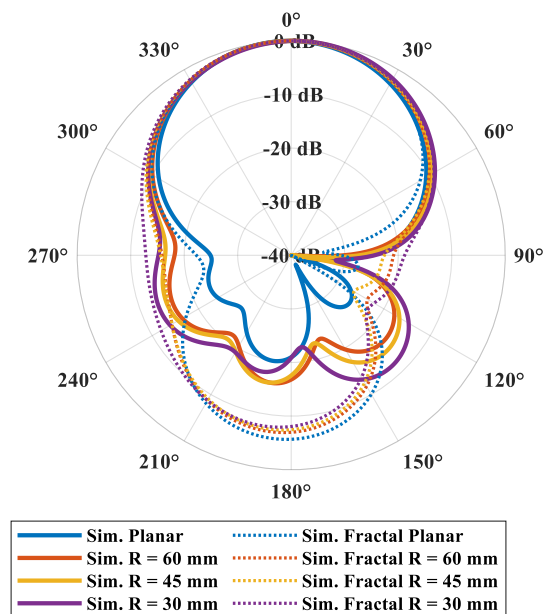


ข) ระนาบ E-plane

ภาพประกอบที่ 4.11 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์ประกอบ



ก) ระนาบ H-plane



ข) ระนาบ E-plane

ภาพประกอบที่ 4.12 ผลการจำลองของสายอากาศแพทช์ 1 องค์ประกอบก่อนและหลังลดขนาด

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศขนาด 1 องค์ประกอบ

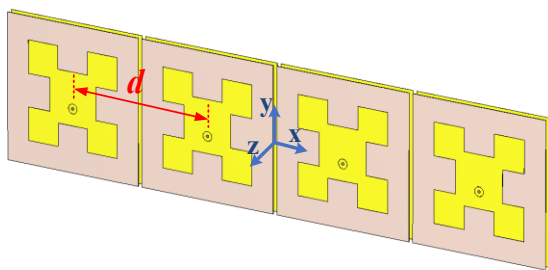
Radius (R)	HPBW (deg)		F/B ratio (dB)	Directivity (dBi)
	H-plane	E-plane		
Planar	83.40	65.30	5.70	7.65
60 mm	86.50	67.60	6.80	7.50
45 mm	88.30	68.60	7.20	7.39
30 mm	92.70	70.40	7.90	7.13

4.3.2 สายอากาศแถวลำดับขนาด 4X1 องค์ประกอบ

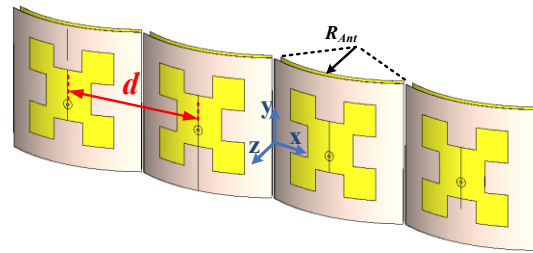
ในหัวข้อนี้นำเสนอ สายอากาศแถวลำดับแบบ Planar (Planar phased array) และสายอากาศแถวลำดับแบบ Conformal (Conformal phased array) ที่องค์ประกอบถูกลดขนาดลงแล้วด้วยวิธีรูป Minkowski Fractal คือ สายอากาศ MKF-SPPA ที่มีรัศมีเท่ากับอนันต์ และสายอากาศ MKF-SCPA ที่มีรัศมีความโค้งเท่ากับ 60 mm, 45 mm และ 30 mm

การจัดเรียงของสายอากาศแถวลำดับแบบ Planar ขนาดเท่ากับ 4X1 องค์ประกอบ มีระยะห่างขององค์ประกอบในแนวระนาบ (d) มีค่าเท่ากับ $0.50\lambda_0$ แสดงโมเดลสายอากาศในโปรแกรมจำลองดังภาพประกอบที่ 4.13 ก) คือ สายอากาศ 4X1 MKF-SPPA planar phased array, ภาพประกอบที่ 4.13 ข) คือสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R = 60\text{mm}$) planar phased array, ภาพประกอบที่ 4.13 ค) คือสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R = 45\text{mm}$) planar phased array และภาพประกอบที่ 4.13 ง) คือสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) planar phased array

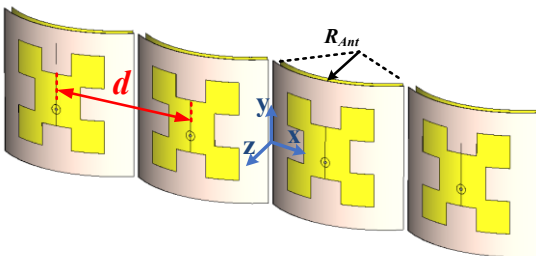
การจัดเรียงสายอากาศแถวลำดับแบบ Conformal ที่ขนาดเท่ากับ 4X1 องค์ประกอบ มีระยะห่างขององค์ประกอบในแนว Circumferential (d_c) มีค่าเท่ากับ $0.50\lambda_0$ แสดงโมเดลในโปรแกรมจำลองดังภาพประกอบที่ 4.14 ก) คือสายอากาศ 4X1 MKF-SPPA conformal phased array, ภาพประกอบที่ 4.14 ข) คือสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R = 60\text{mm}$) conformal phased array, ภาพประกอบที่ 4.14 ค) คือสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R = 45\text{mm}$) conformal phased array และภาพประกอบที่ 4.14 ง) คือสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) conformal phased array



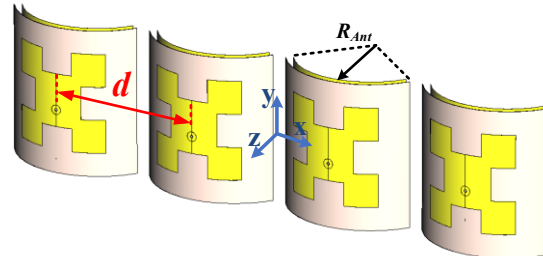
ก) สายอากาศ MKF-SPPA



ข) สายอากาศ MKF-SCPA ($R_{Ant} = 60$ mm)

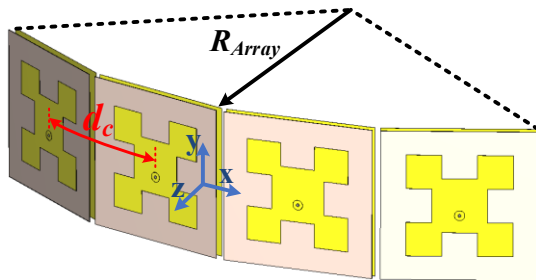


ค) สายอากาศ MKF-SCPA ($R_{Ant} = 45$ mm)

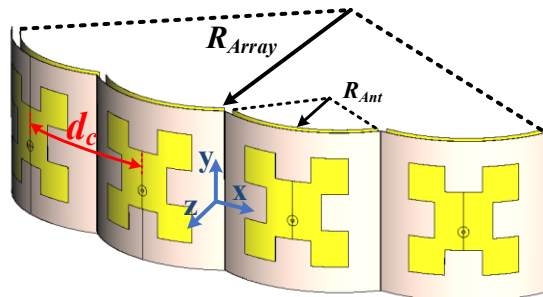


ง) สายอากาศ MKF-SCPA ($R_{Ant} = 30$ mm)

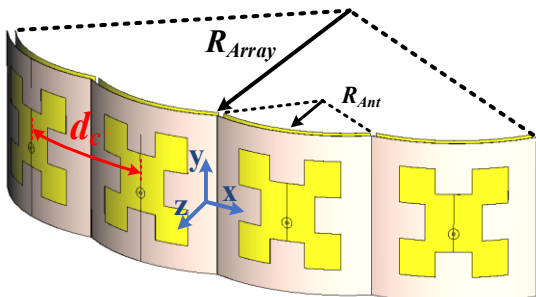
ภาพประกอบที่ 4.13 โมเดลสายอากาศ Planar phased array



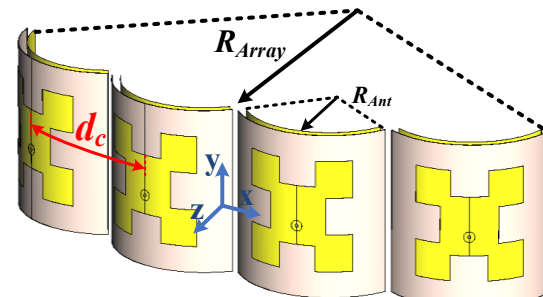
ก) สายอากาศ MKF-SPPA



ข) สายอากาศ MKF-SCPA ($R_{Ant} = 60$ mm)



ค) สายอากาศ MKF-SCPA ($R_{Ant} = 45$ mm)



ง) สายอากาศ MKF-SCPA ($R_{Ant} = 30$ mm)

ภาพประกอบที่ 4.14 โมเดลสายอากาศ Conformal phased array

การจำลองสายอากาศมีพารามิเตอร์ที่พิจารณาดังนี้คือ ค่า Directivity โดยจะพิจารณา ค่าในตำแหน่งของ Desired direction และ Peak direction และพิจารณาการชี้ทิศทางของลำคลื่นเมื่อ ปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุมต่างได้แก่ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา

ผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังนี้

1) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

สำหรับโครงสร้างขององค์ประกอบ MKF-SPPA และ MKF-SCPA มีขนาดเท่ากัน โดยจะ เปรียบเทียบที่รัศมีต่างๆของสายอากาศ (R_{Ant}) และรัศมีความโค้งของแถวลำดับ (R_{Array}) ดังนั้นใน ส่วนของหัวข้อนี้จึงพิจารณาเป็นค่า Directivity เนื่องจากสายอากาศยังไม่มี การปรับจูน Matching

แสดงผลการจำลองเปรียบเทียบค่า Directivity ในตำแหน่งมุม Desired direction, ตำแหน่งมุม Peak direction, ทิศทางของลำคลื่น และขนาดของโลปข้างของสายอากาศแถวลำดับ เมื่อ ปรับลำคลื่นไปยังที่ตำแหน่งมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ดังตารางที่ 4.4

- การเปรียบเทียบสายอากาศ Planar phased array ก่อนและลดขนาดขององค์ประกอบ

การเปรียบเทียบผลการจำลองจากตารางที่ 4.4 สายอากาศ MKF-SPPA, MKF-SCPA Planar phased array ดังภาพประกอบที่ 4.13 (องค์ประกอบถูกลดขนาดแล้ว จัดเรียงจัดเรียงระยะของ องค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$) โดยเปรียบเทียบกับ ผลการจำลองของสายอากาศ SPPA, SCPA Planar phased array ดังภาพประกอบที่ 3.22 (องค์ประกอบจัดเรียงมีระยะเท่ากับ $0.60\lambda_0$) จากตารางที่ 3.6 และตารางที่ 3.7

จะได้ว่า สายอากาศแถวลำดับหลังลดขนาดแล้ว สามารถเพิ่มคุณสมบัติความเป็น Constant gain และความแม่นยำการชี้ทิศทางให้สูงขึ้น และรัศมีขององค์ประกอบต่างๆ รัศมีความโค้งที่ น้อยที่สุดที่ให้ขนาดลำคลื่นกว้าง ให้ผลความเป็น Constant gain และความแม่นยำการชี้ทิศทางดีที่สุด คือ สายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) เมื่อปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ มีค่าความแตกต่าง ของ Directivity สูงสุดเท่ากับ 1.83 dB ค่าความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 8.88% สามารถเพิ่ม

ประสิทธิภาพของแฉลล่ำดับจากเดิมก่อนลดขนาด มีค่าความแตกต่างของ Directivity สูงสุดเท่ากับ 3.56 dB และมีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับ 22.22%

นอกจากนี้สามารถดระดับของโลบข้างลงได้จากเดิมของสายอากาศแฉลล่ำดับ SCPA ($R = 30$ mm) มีโลบข้างเท่ากับ -13.00 dB สายอากาศแฉลล่ำดับ MKF-SCPA ($R = 30$ mm) สามารถดระดับของโลบข้างลงเหลือเท่ากับ -14.58 dB

- การเปรียบเทียบ สายอากาศ Planar phased array และ Conformal phased array

ผลจากตารางที่ 4.4 สายอากาศ Conformal phased array สามารถเพิ่มคุณสมบัติ Constant gain และความแม่นยำการชี้ทิศทางที่สูงขึ้น เมื่อเทียบกับสายอากาศ Planar phased array

การลดขนาดของแฉลล่ำดับของสายอากาศ Conformal phased array ส่งผลให้ทั้งมีความแม่นยำการชี้ทิศทางแม่นยำยิ่งขึ้น และมีการลดลงของ Directivity ขณะปรับลำคลื่นน้อย แต่อย่างไรก็ตาม ส่งผลให้มีค่า Directivity รวมของแฉลล่ำดับลดลงอย่างมาก

- การเปรียบเทียบระหว่าง องค์กรประกอบ MKF-SPPA และ MKF-SCPA

ผลจากตารางที่ 4.4 สายอากาศแฉลล่ำดับ MKF-SCPA ($R_{Ant} = 60$ mm, 45 mm, 30 mm) มีความแม่นยำการชี้ทิศทาง และคุณสมบัติความเป็น Constant gain ที่ดีกว่า สายอากาศแฉลล่ำดับ MKF-SPPA

การลดขนาดของรัศมีขององค์กรประกอบของ MKF-SCPA ลง ส่งผลให้ทั้งมีความแม่นยำการชี้ทิศทาง และคุณสมบัติความเป็น Constant gain มากขึ้น นอกจากนี้สามารถดระดับของโลบข้างให้ต่ำลงขณะปรับลำคลื่นด้วยเช่นกัน

ดังนั้น จากผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงาน ทางผู้วิจัยจึงเลือกที่ใช้โครงสร้างสายอากาศ Conformal phased array รัศมีของสายอากาศแฉลล่ำดับเท่ากับ $2.00\lambda_0$ ให้คุณสมบัติความแม่นยำการชี้ทิศทาง และ Constant gain นอกจากนี้อัตราขยายของแฉลล่ำดับไม่ต่ำจนเกินไปยังคงเป็นสายอากาศประเภท High gain (Gain > 10 dBi) และขนาดรัศมีขององค์กรประกอบ เลือกขนาดรัศมีให้

ขนาดของลำคลื่นที่กว้าง นั่นคือ รัศมีเท่ากับ 30 mm ซึ่งเรียกชื่อว่า MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array

แสดงแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array ขนาด 4X1 องค์ประกอบดังภาพประกอบที่ 4.15 เป็นค่า Normalized Directivity ขณะปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา

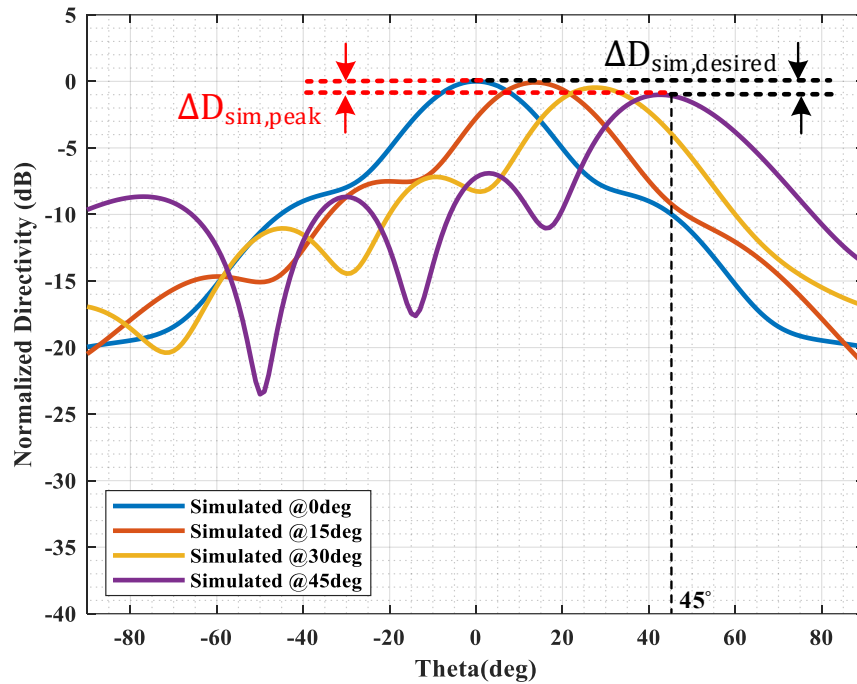
เมื่อปรับลำคลื่นไปยังมุมต่างๆ มีความแตกต่างของ Directivity ที่ตำแหน่ง Desired direction เท่ากับ 1.16 dB และที่ตำแหน่ง Peak direction ที่ลำคลื่นสามารถปรับไปได้เท่ากับ 1.10 dB ซึ่งค่าทั้งสองมีค่าน้อยกว่า 3 dB

สำหรับการชี้ทิศทางของลำคลื่น เมื่อปรับลำคลื่นไปที่ตำแหน่งมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา สายอากาศแถวลำดับสามารถปรับลำคลื่นไปได้ดังนี้ 0 องศา, 14 องศา, 28 องศา และ 43 องศา มีความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 4.44%

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับ

R_{Array}	R_{Ant}	Directivity (dBi) at Desired direction				$\Delta D_{desired}$ (dB)	Directivity (dBi) at Peak direction				ΔD_{peak} (dB)	SLL (dB)
		0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)		0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)		45 (deg)
Planar	Planar	12.80	12.53	11.77	10.76	2.04	(0 deg) 12.80	(13 deg) 12.60	(26 deg) 11.90	(40 deg) 10.80	2.00	-8.00
Planar	60 mm	12.70	12.37	11.6	10.75	1.95	(0 deg) 12.70	(13 deg) 12.40	(26 deg) 11.80	(40 deg) 11.10	1.60	-7.50
Planar	45 mm	12.60	12.29	11.53	10.71	1.89	(0 deg) 12.60	(13 deg) 12.40	(26 deg) 11.70	(40 deg) 10.90	1.70	-7.32
Planar	30 mm	12.50	12.16	11.45	10.67	1.83	(0 deg) 12.50	(13 deg) 12.20	(27 deg) 11.60	(41 deg) 10.80	1.70	-7.47
$2.50\lambda_0$	Planar	11.00	10.78	10.17	9.14	1.86	(0 deg) 11.00	(13 deg) 10.80	(26 deg) 10.30	(41 deg) 9.80	1.20	-3.65
$2.50\lambda_0$	60 mm	11.70	11.5	10.98	10.31	1.39	(0 deg) 11.70	(13 deg) 11.60	(26 deg) 11.10	(41 deg) 10.50	1.20	-5.80
$2.50\lambda_0$	45 mm	11.60	11.39	10.87	10.20	1.40	(0 deg) 11.60	(13 deg) 11.40	(26 deg) 11.00	(41 deg) 10.50	1.10	-5.90
$2.50\lambda_0$	30 mm	11.70	11.57	11.01	10.30	1.40	(0 deg) 11.70	(13 deg) 11.60	(27 deg) 11.20	(42 deg) 10.70	1.00	-6.80

R_{Array}	R_{Ant}	Directivity (dBi) at Desired direction				$\Delta D_{desired}$ (dB)	Directivity (dBi) at Peak direction				ΔD_{peak} (dB)	SLL (dB)
		0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)		0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)		45 (deg)
$2.00\lambda_0$	Planar	11.20	11.07	10.52	9.68	1.52	(0 deg) 11.20	(13 deg) 11.10	(27 deg) 10.70	(41 deg) 10.20	1.00	-4.56
$2.00\lambda_0$	60 mm	11.00	10.88	10.38	9.78	1.22	(0 deg) 11.00	(13 deg) 10.90	(27 deg) 10.50	(42 deg) 10.00	1.00	-5.00
$2.00\lambda_0$	45 mm	11.30	11.15	10.66	10.12	1.18	(0 deg) 11.30	(13 deg) 11.20	(27 deg) 10.80	(42 deg) 10.30	1.00	-5.90
$2.00\lambda_0$	30 mm	11.19	11.06	10.6	10.03	1.16	(0 deg) 11.19	(14 deg) 11.09	(28 deg) 10.69	(43 deg) 10.09	1.10	-6.00
$1.50\lambda_0$	Planar	9.38	9.38	9.01	8.57	0.81	(0 deg) 9.38	(14 deg) 9.39	(28 deg) 9.05	(44 deg) 8.62	0.76	-1.41
$1.50\lambda_0$	60 mm	9.38	9.36	9.06	8.58	0.80	(0 deg) 9.38	(14 deg) 9.37	(28 deg) 9.08	(44 deg) 8.62	0.76	-2.00
$1.50\lambda_0$	45 mm	9.67	9.63	9.26	8.9	0.77	(0 deg) 9.67	(14 deg) 9.64	(28 deg) 9.29	(44 deg) 8.91	0.76	-3.00
$1.50\lambda_0$	30 mm	10.2	10.2	9.89	9.46	0.74	(0 deg) 10.20	(14 deg) 10.20	(29 deg) 9.93	(45 deg) 9.48	0.72	-4.80



ภาพประกอบที่ 4.15 ผลจำลองแบบรูปการแผ่กำลังของสายอากาศแถวลำดับ
4X1 MKF-SCPA ($R= 30\text{mm}$) Conformal phased array

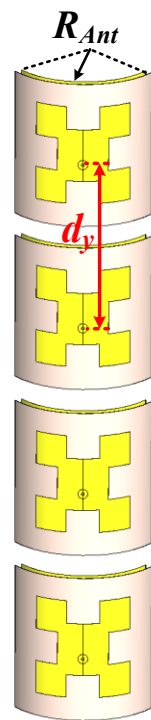
4.3.3 สายอากาศแถวลำดับขนาด 4X4 องค์ประกอบ

จากหัวข้อก่อนหน้าทางผู้วิจัยเลือก สายอากาศ Conformal phased array ที่รัศมีของแถวลำดับเท่ากับ $2.00\lambda_0$ โดยที่แต่ละองค์ประกอบเป็นสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ขนาดรัศมีเท่ากับ 30 mm มีขนาดของแถวลำดับเป็น 4X1 องค์ประกอบ ให้คุณสมบัติ Constant gain และมีความแม่นยำ การชี้ทิศทางขณะปรับลำคลื่นไปในตำแหน่งมุมต่างๆ ถึงแม้ว่าสายอากาศแถวลำดับขนาด 4X1 องค์ประกอบนี้เป็นสายอากาศแบบ High gain (Gain >10 dBi) แต่อย่างไรก็ตามอัตราขยายไม่ถึง 13 dBi ซึ่งจากการคำนวณ Power budget สำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม อัตราขยายของสายอากาศควรมีอย่างน้อย 13 dBi

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเลือกเพิ่มขนาดของแถวลำดับให้มีขนาดเท่ากับ 4x4 องค์ประกอบ มีจำนวนองค์ประกอบทั้งหมด 16 องค์ประกอบ สายอากาศแถวลำดับสำหรับระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนี้มีการปรับลำคลื่นแคในแนวระนาบมุมกวาด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกเพิ่มองค์ประกอบในระนาบ

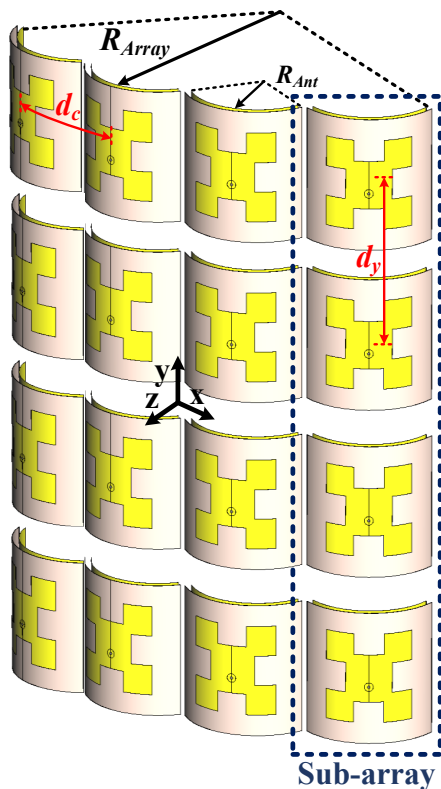
แกน Y นอกจากจะสามารถเพิ่มอัตราขยายให้กับสายอากาศแถวลำดับแล้ว ยังสามารถช่วยบีบลำคลื่นในแนวระนาบมุมยกให้มีขนาดเล็กลง มีขนาดพอดีกับความกว้างของรันเวย์ ฉะนั้นสายอากาศแถวลำดับขนาด 4×4 องค์ประกอบนี้ ประกอบไปด้วยแถวลำดับย่อย (Sub-array) ขนาด 1×4 องค์ประกอบดังภาพประกอบที่ 4.16 และเมื่อประกอบแถวลำดับย่อยจำนวน 4 แถวลำดับย่อย ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบในแนว Circumferential (d_c) มีขนาดเท่ากับ $0.50\lambda_0$ ดังภาพประกอบที่ 4.17

ผู้วิจัยต้องการเพิ่มอัตราขยายแก่แถวลำดับย่อย ดังนั้นสำหรับระยะห่างขององค์ประกอบของแถวลำดับย่อยเท่ากับ $0.75\lambda_0$ ที่ให้ผลอัตราขยายของแถวลำดับสูงสุด จากการจำลองเปรียบเทียบระยะ d_y อัตราขยายสามารถเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระยะห่างของแถวลำดับย่อย การจัดเรียงองค์ประกอบลักษณะนี้เป็น Colinear array เมื่อเพิ่มระยะมากกว่า $0.75\lambda_0$ อัตราขยายจะลดลง นอกจากนี้ระดับโลปข้างจะสูงขึ้นเล็กน้อยแสดงดังตารางที่ 4.5 แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศแถวลำดับสำหรับระบบตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนี้ไม่ได้มีการปรับลำคลื่นในแนวมุมยก ดังนั้นจึงไม่ส่งผลต่อสายอากาศที่มีการปรับลำคลื่นแค้ในแนวมุมกวาด



Sub-array

ภาพประกอบที่ 4.16 โมเดลสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$)

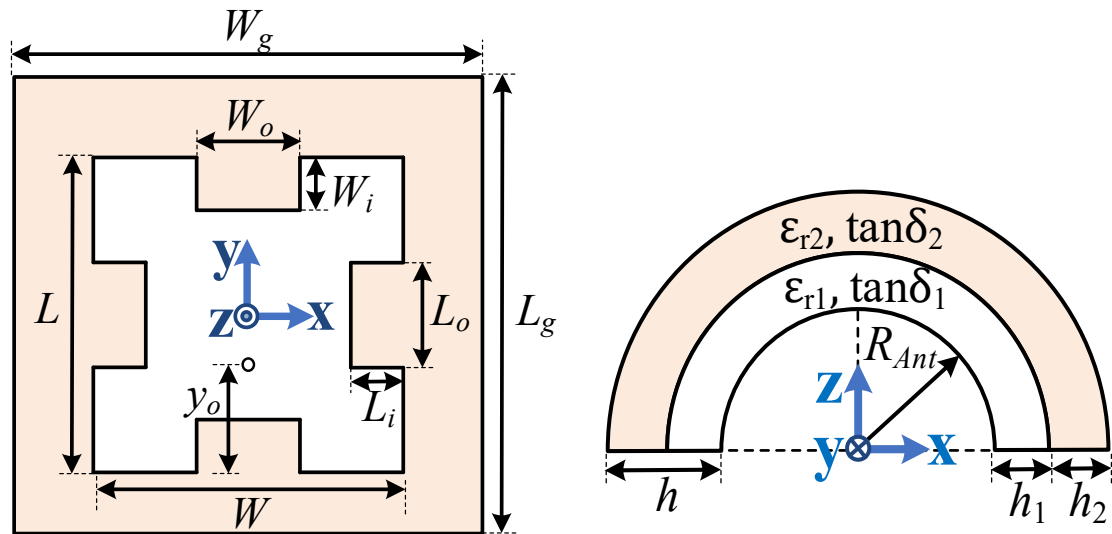


ภาพประกอบที่ 4.17 โมเดลสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองของสายอากาศแถวลำดับย่อย

d_y	Gain (dBi)	HPBW (deg)		SLL (dB)
		H-plane	E-plane	
$0.50\lambda_0$	11.00	96.00	24.30	-14.83
$0.55\lambda_0$	11.50	92.20	22.20	-14.27
$0.60\lambda_0$	11.80	91.20	20.60	-13.94
$0.65\lambda_0$	12.10	90.60	19.20	-13.79
$0.70\lambda_0$	12.30	90.50	18.00	-13.74
$0.75\lambda_0$	12.60	90.40	16.90	-13.62
$0.80\lambda_0$	12.60	90.40	16.90	-13.45
$0.85\lambda_0$	12.55	90.20	17.00	-13.40
$1.00\lambda_0$	12.00	90.00	17.20	-13.39

โครงสร้างสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) ขนาด 1 องค์ประกอบดัง
ภาพประกอบที่ 4.18 และขนาดโครงสร้างของสายอากาศแถวลำดับดังตารางที่ 4.6



ก) ด้านบน

ข) ด้านข้าง

ภาพประกอบที่ 4.18 โครงสร้างสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA

ตารางที่ 4.6 ขนาดพารามิเตอร์ของสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA Conformal phased array

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ความกว้างของแพทช์ (Patch width)	W	40.37	mm
ความยาวของแพทช์ (Patch length)	L	40.92	mm
ความกว้างของกราวด์ (Ground width)	W_g	59.57	mm
ความยาวของกราวด์ (Ground length)	L_g	60.12	mm
จุดป้อนสัญญาณ (feed point)	y_0	35.12	mm
Indentation factor	i	0.69	-
ความกว้างของร่อง ของด้านกว้างแพทช์	W_i	9.28	mm
ความยาวของร่อง ของด้านกว้างแพทช์	W_0	13.46	mm
ความกว้างของร่อง ของด้านยาวแพทช์	L_i	9.41	mm
ความยาวของร่อง ของด้านยาวแพทช์	L_0	13.64	mm

พารามิเตอร์	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ค่าไดอิเล็กตริกของชั้นวัสดุฐานรอง (Dielectric constant)	ϵ_{r1}	4.30	-
ค่าไดอิเล็กตริกของชั้นอากาศ (Dielectric constant in free space)	ϵ_{r2}	1.00	-
ความหนาของชั้นวัสดุฐานรอง (Substrate thickness)	h_1	0.20	mm
ความหนาของชั้นอากาศ (Air gap thickness)	h_2	3.00	mm
ค่าไดอิเล็กตริกสมมูล (Equivalent dielectric constant)	ϵ_{eq}	1.05	-
รัศมีความโค้งขององค์ประกอบ (Radius)	R_{Ant}	30.00	mm
รัศมีความโค้งของสายอากาศแถวลำดับ (Array radius)	R_{Array}	$2.00\lambda_0$	-
ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบในระนาบ Circumferential	d_c	$0.50\lambda_0$	-
ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบในระนาบ y	d_y	$0.75\lambda_0$	-

ผลการจำลองสายอากาศด้วยโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังนี้

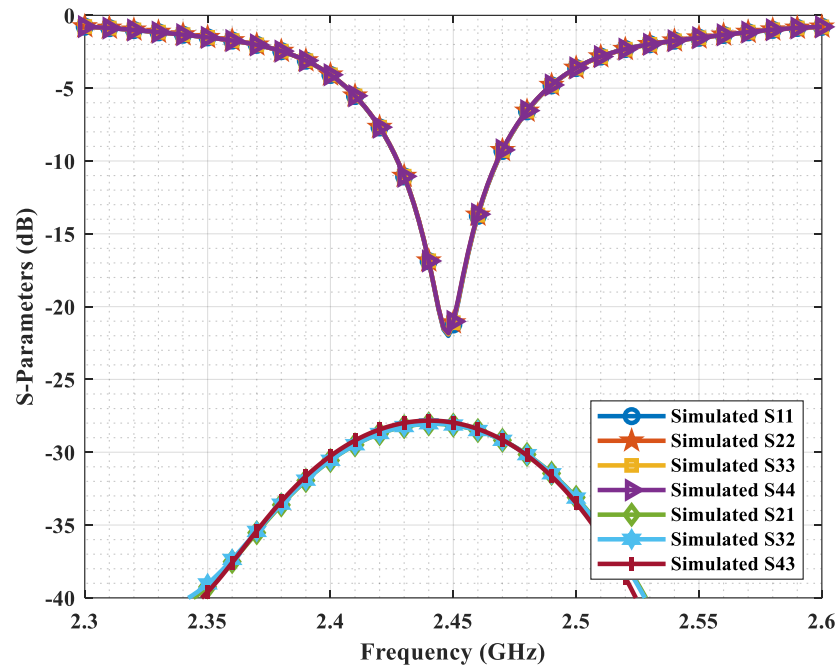
1) ค่า S-parameter

สายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$)

ผลการจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA แสดงดังภาพประกอบที่ 4.19 และตารางที่ 4.7 จากผลการจำลองแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับย่อยสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz มีระดับ Isolation ระหว่างองค์ประกอบที่สูง (ต่ำกว่า -20 dB) เป็นผลมาจากการจัดเรียงขององค์ประกอบในระนาบแกน Y มีระยะห่างเท่ากับ $0.75\lambda_0$ ส่งผลให้ได้รับผลจาก Mutual coupling น้อยจากองค์ประกอบข้างเคียง

ตารางที่ 4.7 ผลการจำลองค่า S-parameter สายอากาศแถวลำดับย่อย

S-parameter (dB) at 2.45 GHz						
S1,1	S2,2	S3,3	S4,4	S2,1	S3,2	S4,3
-21.22	-21.10	-21.10	-21.01	-28.14	-28.13	-27.97

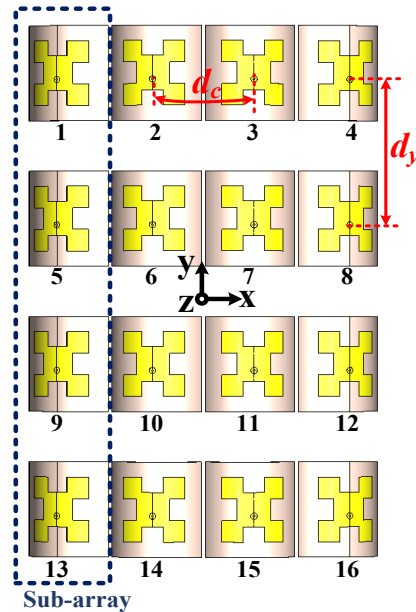


ภาพประกอบที่ 4.19 ผลการจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศแถวลำดับย่อย

สายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) conformal phased array

การจำลองสายอากาศ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array ขนาด 4X4 องค์ประกอบ ในโปรแกรมจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงโมเดลสายอากาศดังภาพประกอบที่ 4.20 ผลจำลองสายอากาศค่า S-parameter ขององค์ประกอบในแนว Circumferential ดังภาพประกอบที่ 4.21ก) ผลจำลองสายอากาศค่า S-parameter ขององค์ประกอบในแนวแถวลำดับย่อย ดังภาพประกอบที่ 4.21 ข) และตารางที่ 4.8

จากผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน แต่ละองค์ประกอบสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz และเนื่องจากสายอากาศแถวลำดับเป็นลักษณะสมมาตร ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนขององค์ประกอบที่ 1 ($S_{1,1}$) และ 4 ($S_{4,4}$) และองค์ประกอบที่ 2 ($S_{2,2}$) และ 3 ($S_{3,3}$) มีค่าใกล้เคียงกัน และเช่นเดียวกัน องค์ประกอบที่ 5 ($S_{5,5}$) และ 8 ($S_{8,8}$) และองค์ประกอบที่ 6 ($S_{6,6}$) และ 7 ($S_{7,7}$) มีค่าใกล้เคียงกัน องค์ประกอบที่ 9 ($S_{9,9}$) และ 12 ($S_{12,12}$) และองค์ประกอบที่ 10 ($S_{10,10}$) และ 11 ($S_{11,11}$) มีค่าใกล้เคียงกัน องค์ประกอบที่ 13 ($S_{13,13}$) และ 16 ($S_{14,14}$) และองค์ประกอบที่ 14 ($S_{14,14}$) และ 15 ($S_{15,15}$) มีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบที่ 4.20 โมเดลสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array

สำหรับค่า Isolation ระหว่างองค์ประกอบในแนว Circumferential มีค่า Isolation อยู่ในช่วง -17 dB เนื่องจากการจัดเรียงมีระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$ และขนาดลำคลื่นขององค์ประกอบมีขนาดลำคลื่นที่กว้างส่งผลให้ได้รับผลจาก Mutual coupling จากองค์ประกอบข้างเคียงได้ง่าย

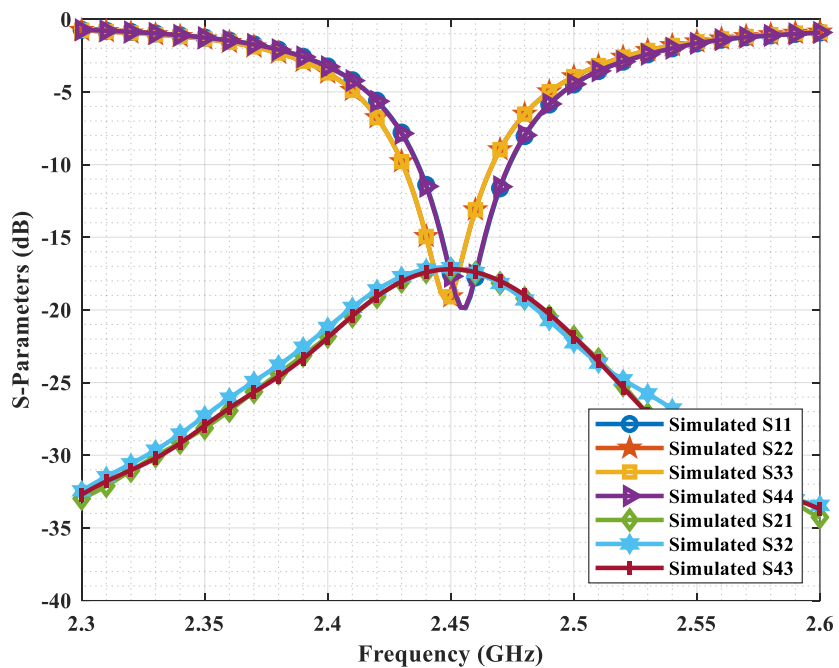
สำหรับค่า Isolation ระหว่างองค์ประกอบในแนวระนาบแกน Y หรือภายในแถวลำดับย่อย ผลจากการจัดเรียงมีระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากับ $0.75\lambda_0$ จึงได้รับผลจาก Mutual coupling จากองค์ประกอบข้างเคียงน้อยส่ง ส่งผลให้มีระดับค่า Isolation สูง อยู่ในช่วง -27 dB

ตารางที่ 4.8 ผลการจำลองค่า S-parameter สายอากาศ 4x4 MKF-SCPA Conformal phased array

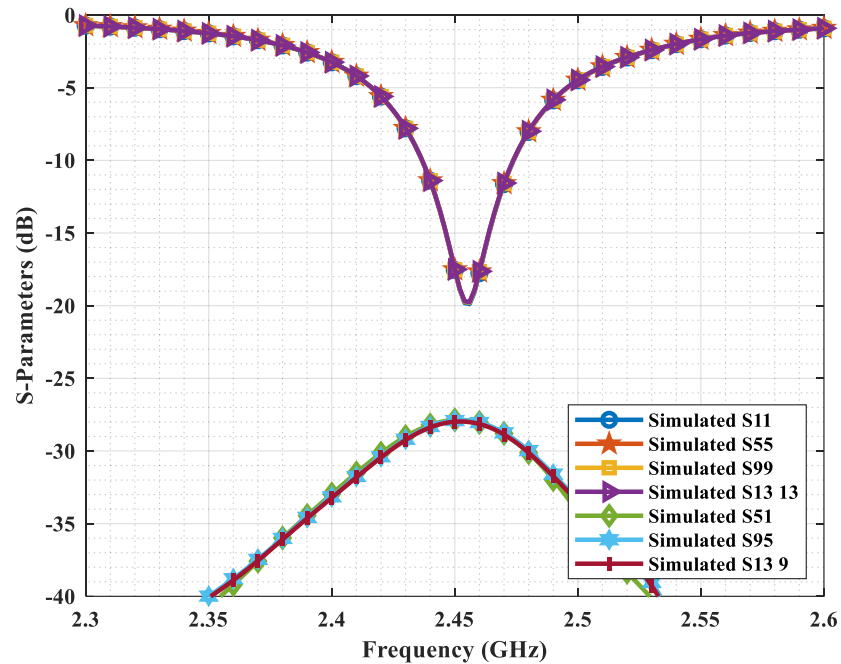
Reflection coefficient (dB) at 2.45 GHz			
S1,1	S2,2	S3,3	S4,4
-17.54	-19.09	-19.09	-17.68
S5,5	S6,6	S7,7	S8,8
-17.52	-18.92	-18.93	-17.65

Reflection coefficient (dB) at 2.45 GHz			
S9,9	S10,10	S11,11	S12,12
-17.52	-18.92	-18.93	-17.66
S13,13	S14,14	S15,15	S16,16
-17.49	-19.00	-19.00	-17.63

Transmission coefficient (dB) at 2.45 GHz					
S2,1	S3,2	S3,4	S5,1	S9,5	S13,9
-17.18	-17.09	-17.18	-27.98	-27.90	-27.98



ก) 4X1 องค์ประกอบ ในแนว Circumferetial



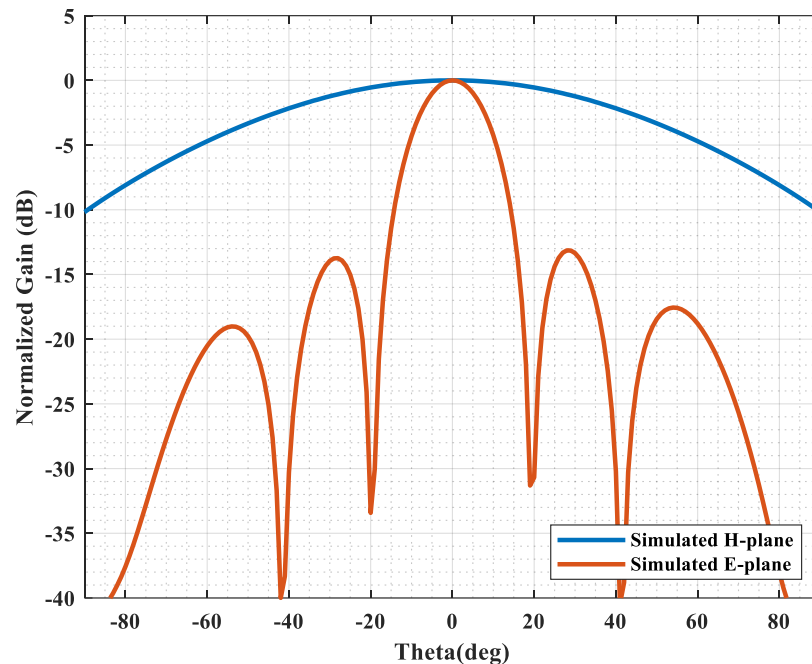
ข) 1X4 องค์ประกอบ ในแนวแกนลำตัวย่อย

ภาพประกอบที่ 4.21 ผลการจำลองค่า S-parameter ของสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) conformal phased array

2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

สายอากาศแนวลำตัวย่อย

ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแนวลำตัวย่อยในระนาบ H-plane และ E-plane ดังภาพประกอบที่ 4.22 ผลการจำลองความถี่ 2.45 GHz สายอากาศแนวลำตัวย่อยให้อัตราขยายเท่ากับ 12.60 dBi มีขนาดความกว้างลำคลื่นในแนว H-plane เท่ากับ 94.80 องศา และในแนว E-plane ความกว้างลำคลื่นถูกบีบให้แคบลงเท่ากับ 17.00 องศา



ภาพประกอบที่ 4.22 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับย่อย

สายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array ขนาด องค์ประกอบ

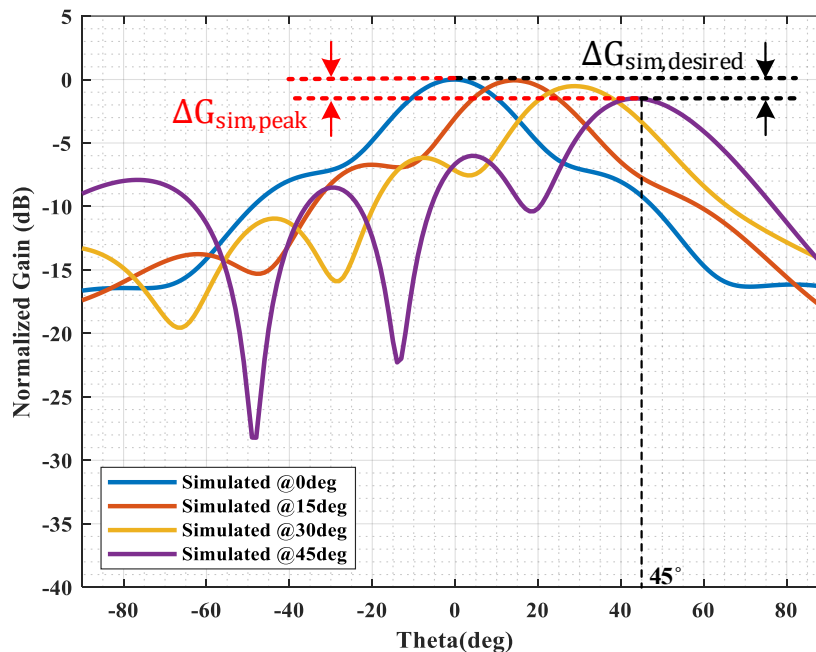
ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 4x4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array ที่ความถี่ 2.45 GHz ในระนาบ H-plane และ E-plane แสดงดังภาพประกอบที่ 4.23ก) และภาพประกอบที่ 4.23ข) ตามลำดับ สายอากาศให้อัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 16.24 dBi มีขนาดความกว้างลำคลื่นในแนว H-plane เท่ากับ 30 องศา และในแนว E-plane เท่ากับ 17 องศา

ผลการจำลองค่าอัตราขยายที่ตำแหน่ง Desired direction และที่ตำแหน่ง Peak direction มีค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดขณะปรับลำคลื่นที่ตำแหน่ง Desired direction ($\Delta G_{desired}$) เท่ากับ 1.52 dB และที่ตำแหน่ง Peak direction (ΔG_{peak}) เท่ากับ 1.50 dB ซึ่งน้อยกว่า -3 dB จึงถือได้ว่าให้คุณสมบัติความเป็น Constant gain

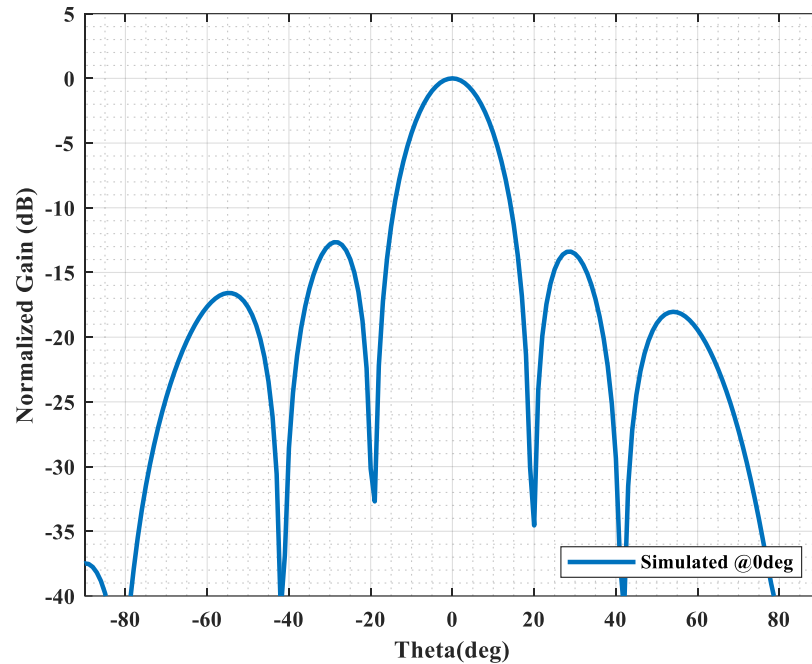
สำหรับความแม่นยำในการชี้ทิศทางขณะปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา สายอากาศสามารถปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุมดังนี้ 0 องศา, 14 องศา, 29 องศา และ 44 องศา มีค่าความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 2.22% แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการจำลองของสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array

Parameter	Beam 1	Beam 2	Beam 3	Beam 4	$max \Delta G$ (dB)
Sim. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 16.24	(15 deg) 16.17	(30 deg) 15.70	(45 deg) 14.72	1.52
Sim. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 16.24	(14deg) 16.20	(29 deg) 15.72	(44 deg) 14.74	1.50
Side lode level, SLL (dB)	-	-6.60	-5.70	-4.50	
HPBW H-plane (deg)	29.90	30.10	30.80	31.80	
HPBW E-plane (deg)	17.00	17.00	16.80	17.00	



ก) ระนาบ H-plane



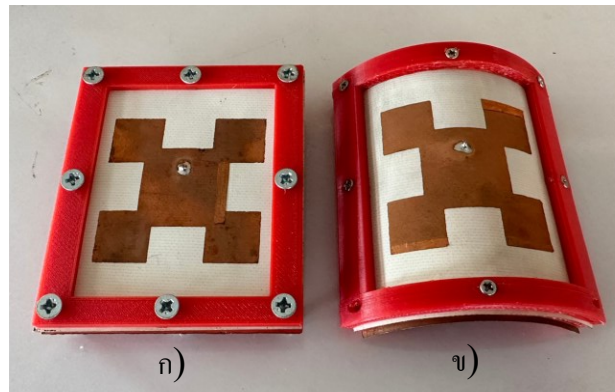
ข) ระนาบ E-plane

ภาพประกอบที่ 4.23 ผลการจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ
4X4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array

สำหรับการสร้างต้นแบบสายอากาศ MKF-SCPA ($R=30\text{ mm}$) Conformal phased array ขนาด 4X4 องค์ประกอบ ที่รัศมีของแฉกลำดับเท่ากับ $2.00\lambda_0$ ซึ่งจะถูกลำในหัวข้อถัดไป

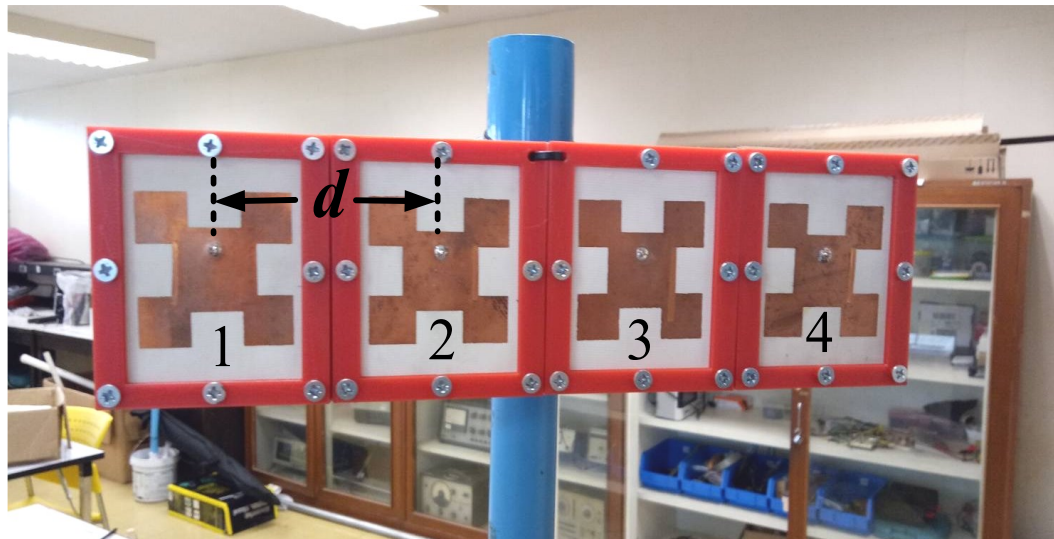
4.3.4 การสร้างสายอากาศ

สำหรับการสร้างต้นแบบสายอากาศ ผู้วิจัยเริ่มต้นจาก การสร้างต้นแบบสายอากาศ แพทช์ขนาด 1 องค์ประกอบ ได้แก่ สายอากาศแพทช์ MKF-SPPA ขนาดรัศมีเท่ากับบอแนนต์ และสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30\text{ mm}$) แสดงดังภาพประกอบที่ 4.24 ก) และภาพประกอบที่ 4.24 ข) ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศเป็นลักษณะช่องเปิด จึงจำเป็นต้องมีโครงสร้าง Support เพื่อแยกชั้นวัสดุฐานรองและชั้นกราวด์ โดยโครงสร้าง Support เป็นโมเดลสามมิติ สร้างจากวัสดุชนิด PLA แสดงคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2



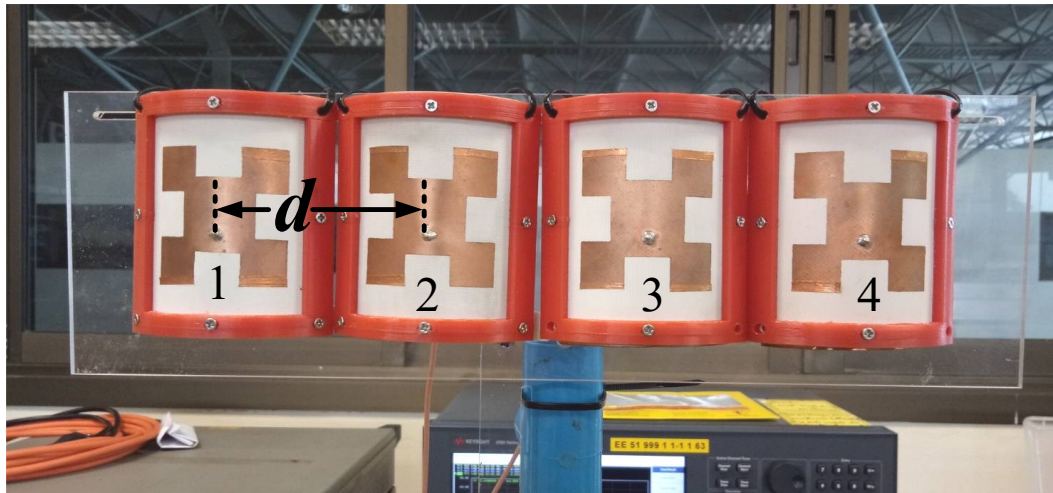
ภาพประกอบที่ 4.24 ต้นแบบสายอากาศแพทช์ขนาด 1 องค์ประกอบ

การนำสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA ที่รัศมีเท่ากับอนันต์ จำนวน 4 องค์ประกอบ มาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ Planar โดยจัดเรียงที่ระยะห่างขององค์ประกอบ (d) เท่ากับ $0.50\lambda_0$ คือสายอากาศ 4x1 MKF-SPPA Planar phased array แสดงดังภาพประกอบที่ 4.25



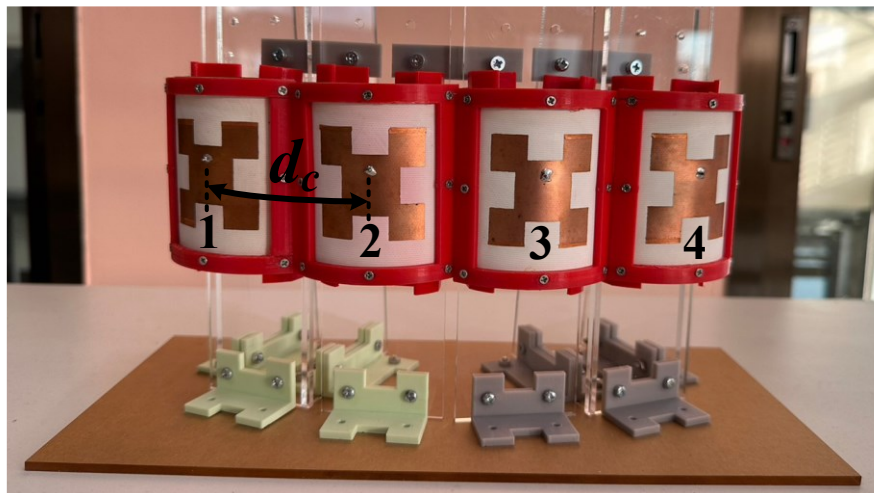
ภาพประกอบที่ 4.25 ต้นแบบสายอากาศ 4x1 MKF-SPPA Planar phased array

การนำสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm) จำนวน 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ Planar โดยจัดเรียงที่ระยะห่างขององค์ประกอบ (d) เท่ากับ $0.50\lambda_0$ เช่นกัน คือสายอากาศ 4x1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) planar phased array แสดงดังภาพประกอบที่ 4.26



ภาพประกอบที่ 4.26 ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array

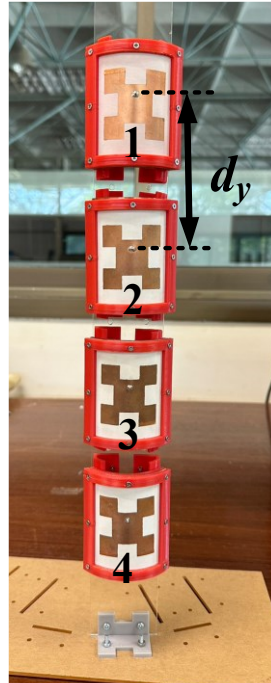
การนำสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm) จำนวน 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ Conformal โดยจัดเรียงที่ระยะห่างขององค์ประกอบในแนว Circumferential (d_c) เท่ากับ $0.50\lambda_0$ คือ สายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array แสดงดังภาพประกอบที่ 4.27



ภาพประกอบที่ 4.27 ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array

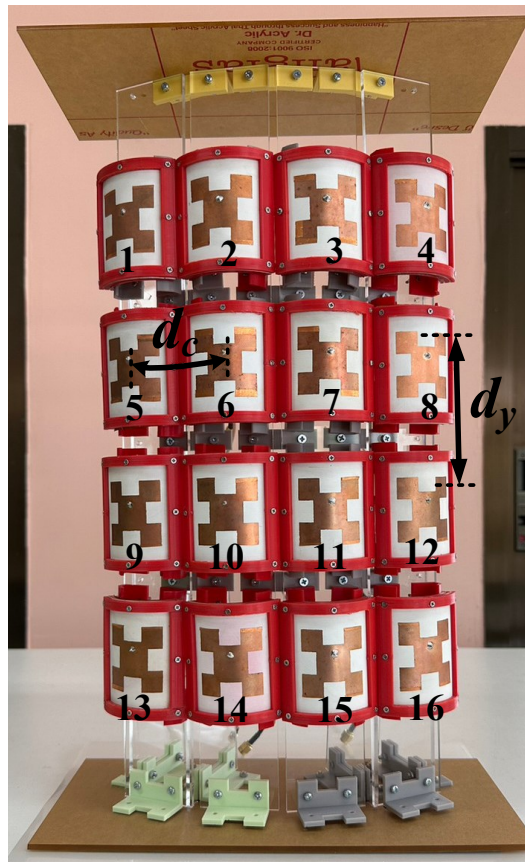
การนำสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm) จำนวน 4 องค์ประกอบมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ Planar ในแนวแกน Y ที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเป็นระยะ d_y เท่ากับ $0.75\lambda_0$

คือ สายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA ($R=30$ mm) ขนาด 1X4 องค์ประกอบ แสดงดังภาพประกอบ
ที่ 4.28



ภาพประกอบที่ 4.28 ต้นแบบสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA

การนำสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA ($R=30$ mm) ขนาดเท่ากับ 1X4 องค์ประกอบจำนวน 4 แถวลำดับย่อยมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ Conformal โดยจัดเรียงที่ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบในแนว Circumferential (d_c) เท่ากับ $0.50\lambda_0$ คือ สายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array แสดงดังภาพประกอบที่ 4.29



ภาพประกอบที่ 4.29 ต้นแบบสายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array

4.4 การทดสอบสายอากาศ

ภายหลังจากการสร้างสายอากาศ นำต้นแบบสายอากาศมาทดสอบวัดคุณลักษณะของสายอากาศ ประกอบด้วย ค่า S-parameter อัตราขยาย และแบบรูปการแผ่พลังงาน

4.4.1 สายอากาศ 1 องค์ประกอบ (Single element)

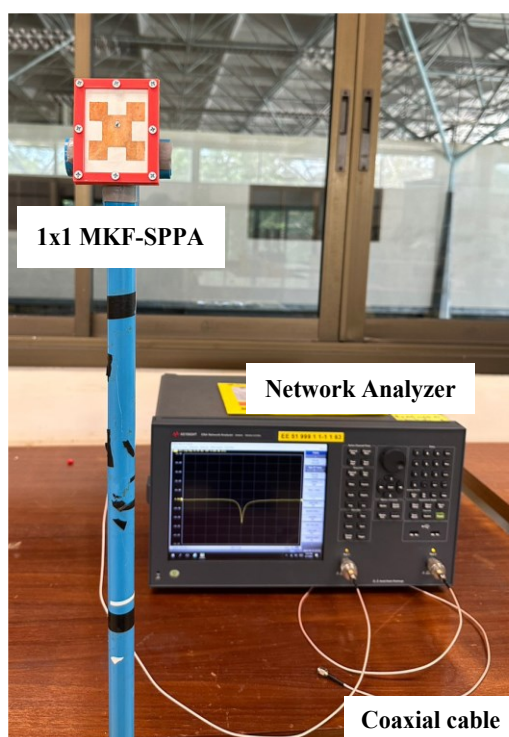
1) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)

สายอากาศควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างน้อยต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ที่ใช้ ออกแบบคือ 2.45 GHz ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนยิ่งต่ำมาก ๆ สายอากาศก็จะยิ่งแมตซ์ได้ดี และขนาดแบนด์วิธพิจารณาที่ค่าประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -10 dB การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์ด้วยเครื่อง

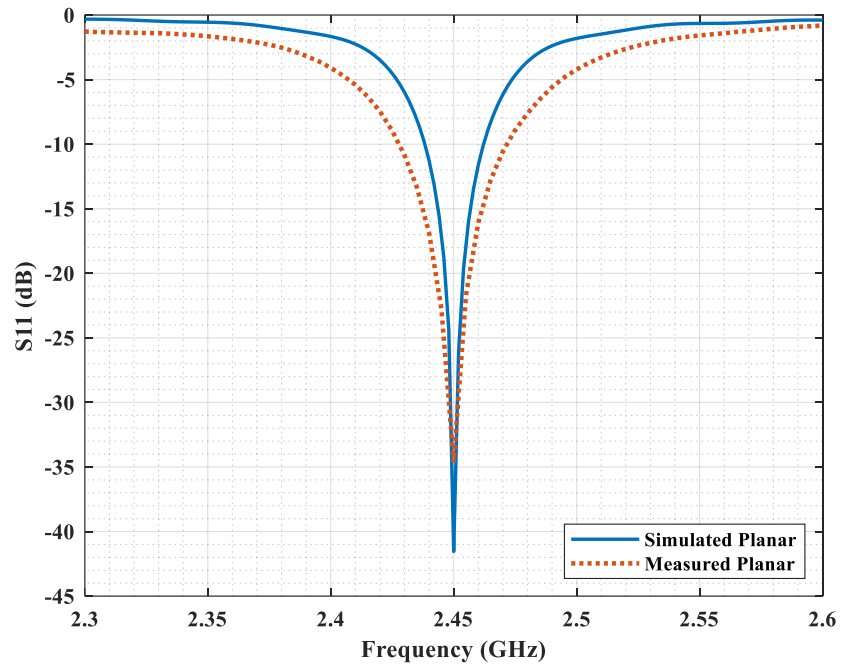
วิเคราะห์โครงข่าย ของสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm) ดังภาพประกอบที่ 4.30 และภาพประกอบที่ 4.32 ตามลำดับ

ผลการทดสอบต้นแบบสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm) สายอากาศทั้งสองทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz โดยสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA ให้ผลแมตซ์ซึ่งดีกว่าสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm) ดังภาพประกอบที่ 4.34

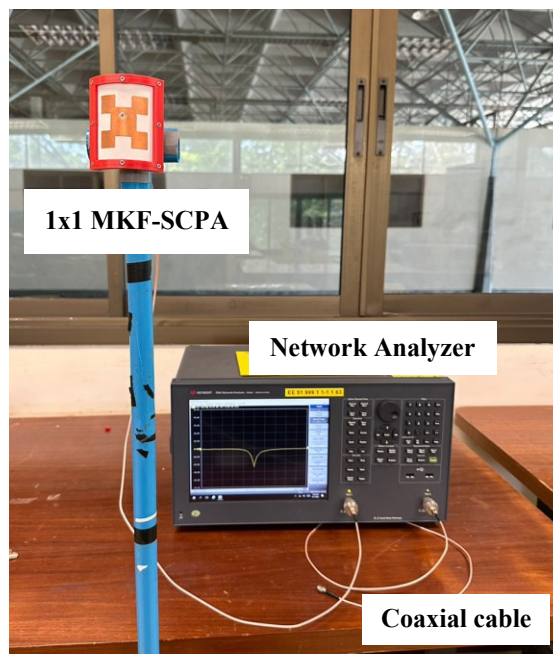
สายอากาศ MKF-SPPA มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่มีค่าเท่ากับ -34.62 dB และมีแบนด์วิธเท่ากับ 40 MHz (2.43 – 2.47 GHz) และสายอากาศ MKF-SCPA ($R=30$ mm) มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนเท่ากับ -22.44 dB และมีแบนด์วิธเท่ากับ 45 MHz (2.43 – 2.47 GHz) แสดงดังภาพประกอบที่ 4.31 และภาพประกอบที่ 4.33 ตามลำดับ ซึ่งผลจากผลการทดสอบของต้นแบบสายอากาศ ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการจำลอง



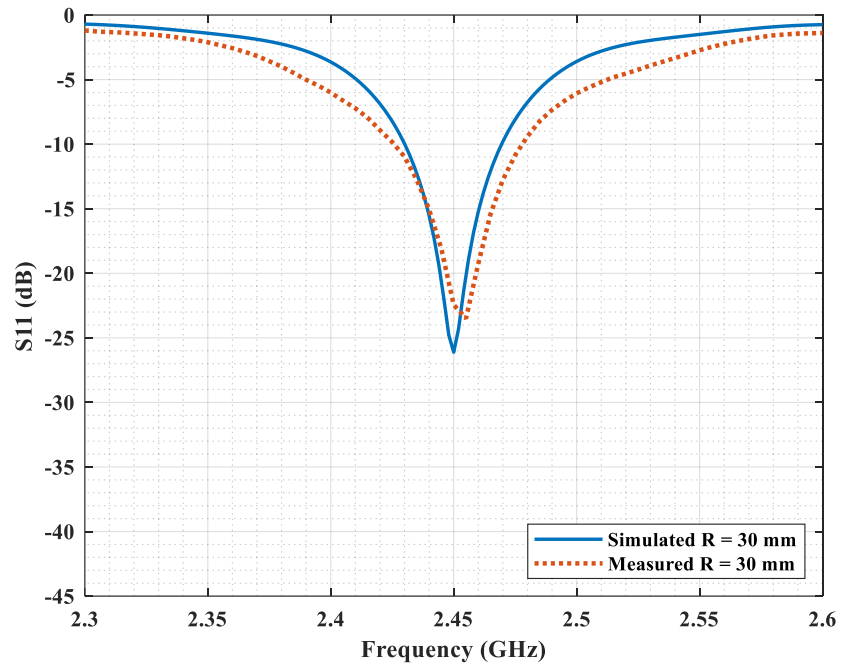
ภาพประกอบที่ 4.30 การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA



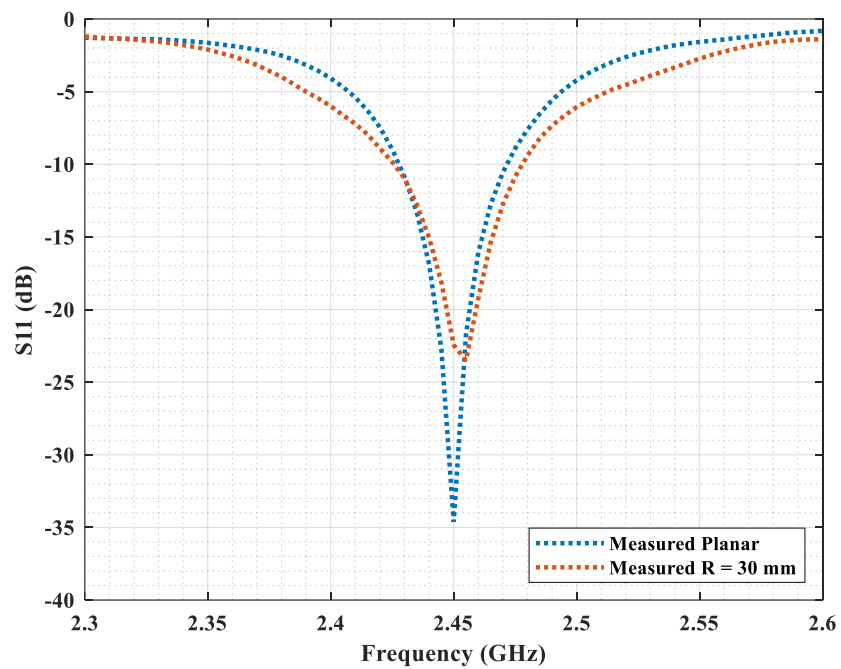
ภาพประกอบที่ 4.31 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA



ภาพประกอบที่ 4.32 การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm)



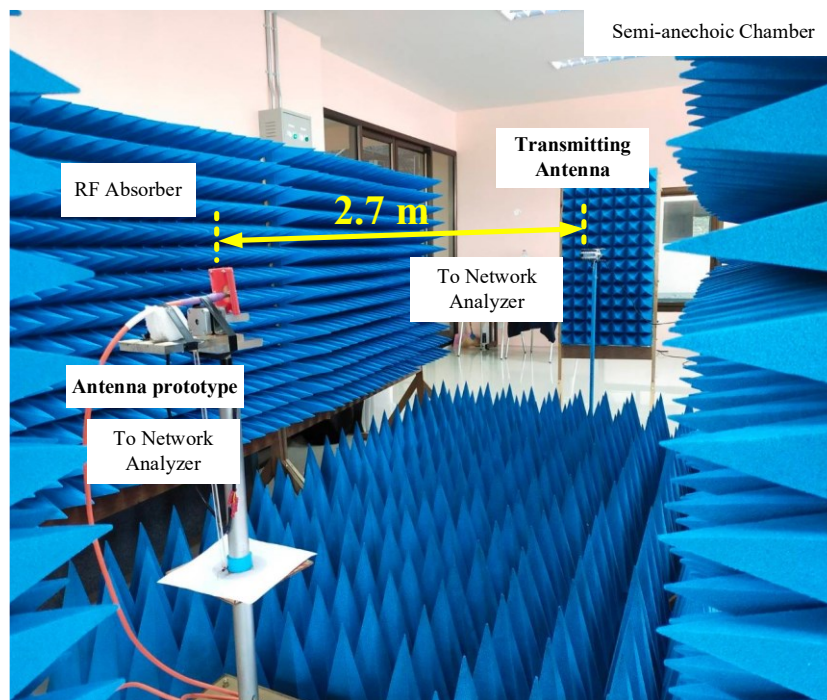
ภาพประกอบที่ 4.33 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm)



ภาพประกอบที่ 4.34 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm)

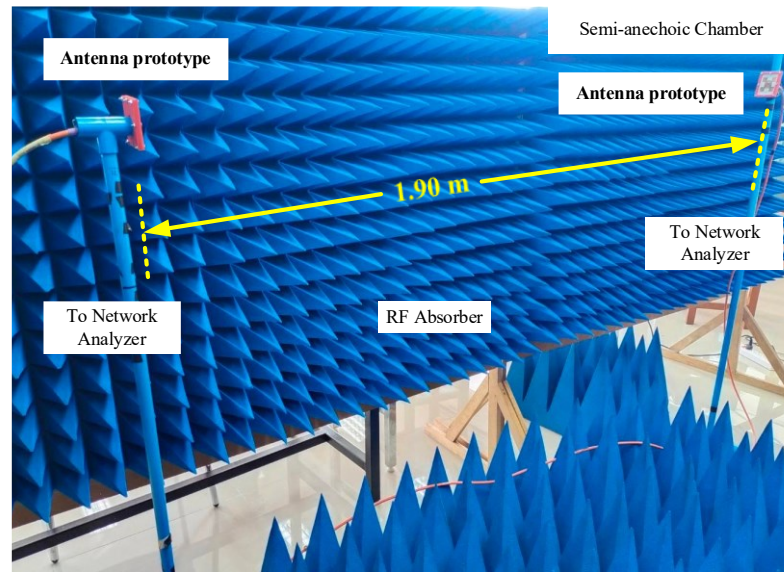
2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของต้นแบบสายอากาศ MKF-SPPA และ MKF-SCPA ($R=30$ mm) โดยทดสอบภายใน Semi-anechoic chamber ที่ล้อมรอบไปด้วยแผ่น Absorber ภายในระบบทดสอบประกอบไปด้วย 1. สายอากาศภาคส่ง (Transmitting antenna) 2. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) และ 3. ต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบ (Antenna Under Test, AUT) โดยระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ เป็นระยะที่ความสอดคล้องกับระยะของสนามระยะไกล การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานบันทึกค่า $S_{2,1}$ ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแสดงดังภาพประกอบที่ 4.35



ภาพประกอบที่ 4.35 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ

การทดสอบวัดอัตราขยายของต้นแบบสายอากาศ ด้วยวิธี “Two antenna method” [15] ภายในการทดสอบประกอบไปด้วย 1. ต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบที่มีโครงสร้างเหมือนกันจำนวนสองต้น เป็นสายอากาศของภาคส่งและภาครับ และ 2. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย แสดงการทดสอบวัดอัตราขยายดังภาพประกอบที่ 4.36



ภาพประกอบที่ 4.36 การทดสอบวัดอัตราขยายของสายอากาศ

มีพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบดังนี้ P_T คือกำลังงานจากภาคส่ง, P_R คือกำลังที่ได้รับจากภาครับ โดยภาครับละภาคส่งในที่นี้จะใช้เป็นเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย, G_T คือ อัตราขยายของสายอากาศของภาคส่ง, G_R คืออัตราขยายของสายอากาศภาครับ ซึ่งทั้งสายอากาศภาครับและส่งในที่นี้คือต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบ, L_{FSPL} คือการสูญเสียในอากาศว่าง และระยะ d คือระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับ

สามารถคำนวณค่าอัตราขยายจากสมการการส่งผ่านของฟรีสตั้งสมการ (4.3) สายอากาศภาคส่งและภาครับเป็นสายอากาศต้นแบบที่โครงสร้างเหมือนกัน ดังนั้น ให้อัตราขยายเท่ากัน $G_T = G_R = G$ สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ตั้งสมการ (4.4)

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_{FSPL} \quad (4.3)$$

$$G = P_R - P_T + L_{FS}/2 \quad (4.4)$$

การทดสอบอัตราขยายของต้นแบบสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz โดยที่ภาคส่งและภาครับเป็นเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ค่า $P_R - P_T$ คือค่า $S_{2,1}$ จากเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ (d) มีค่าเท่ากับ 1.90 m จากการคำนวณการสูญเสียในอากาศว่าง (L_{FSPL}) จากสมการ (3.2) เท่ากับ 45.80 dB สามารถคำนวณอัตราขยายต้นแบบสายอากาศ (G) ตามสมการ(4.4)

ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.45 GHz ของต้นแบบสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์ ขนาด 1 องศาประกอบ ให้อัตราขยายเท่ากับ 7.28 dBi ขนาดความกว้างลำคลื่นในระนาบ H-plane และระนาบ E-plane เท่ากับ 85.00 องศา และ 65.00 องศา แสดงดังภาพประกอบที่ 4.37ก) และภาพประกอบที่ 4.37ข) ตามลำดับ

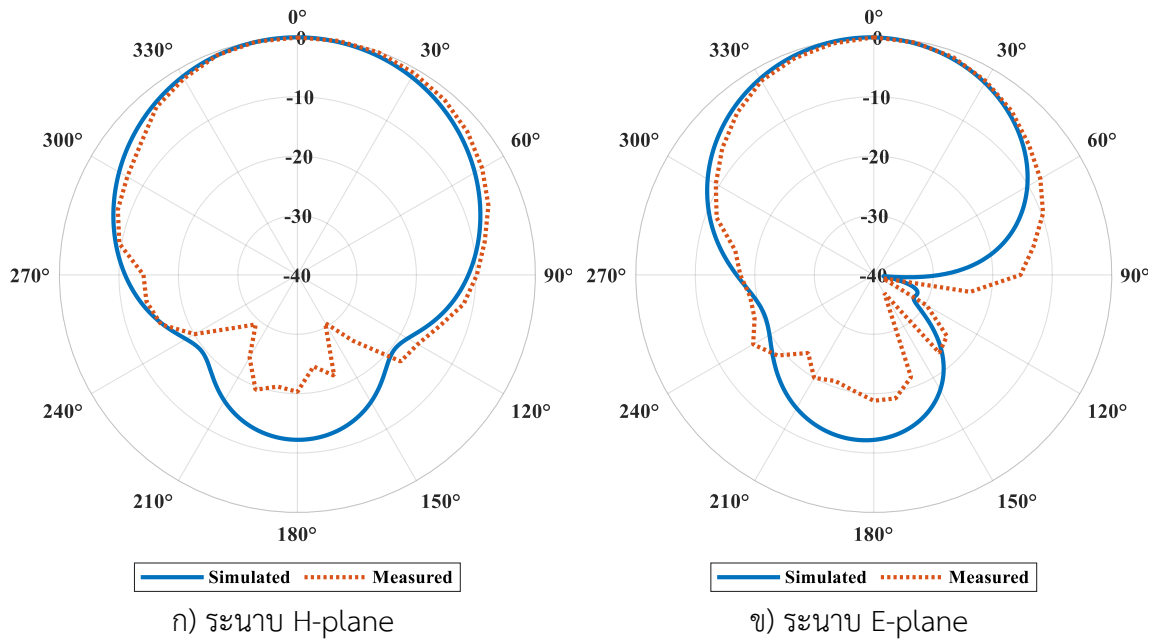
ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 2.45 GHz ของต้นแบบสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm) ขนาด 1 องศาประกอบ ให้อัตราขยายเท่ากับ 7.10 dBi ขนาดความกว้างลำคลื่นในระนาบ H-plane เท่ากับ 90.00 องศา และในระนาบ E-plane เท่ากับ 62.00 องศา แสดงดังภาพประกอบที่ 4.38ก) และภาพประกอบที่ 4.38ข) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบของสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และ MKF-SCPA ($R=30$ mm)

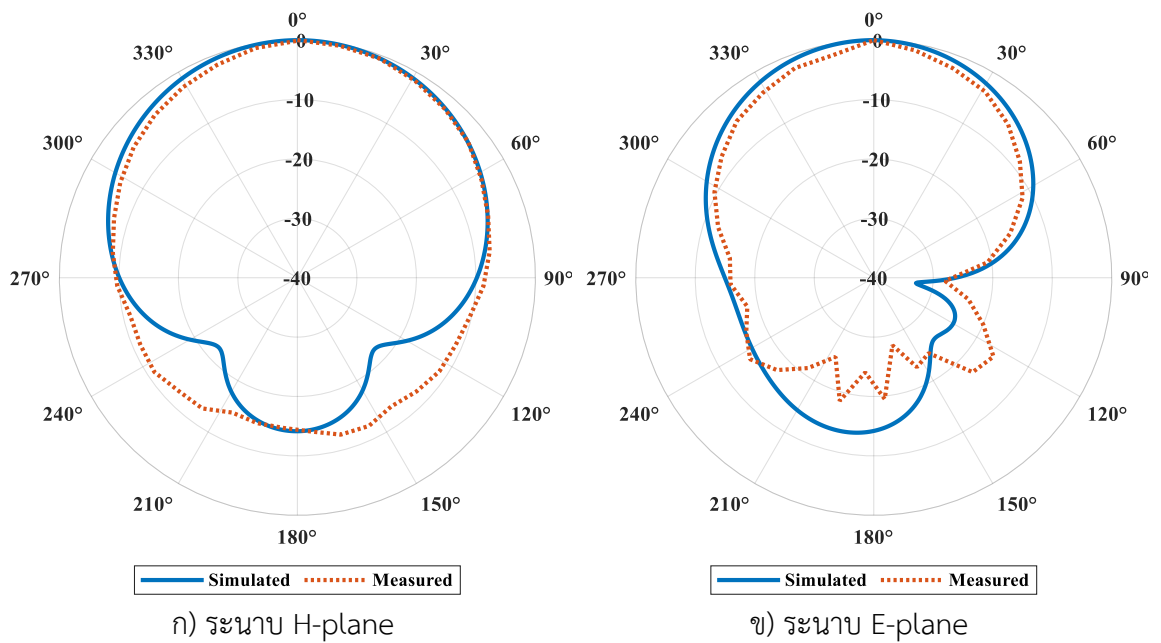
R_{Ant}	HPBW (deg)				Gain (dBi)		F/B ratio (dB)			
	H-plane		E-plane				H-plane		E-plane	
	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.
Planar	83.40	85.00	65.30	65.00	6.87	7.28	5.70	19.42	5.70	18.81
30 mm	92.70	90.00	70.40	62.00	6.58	7.10	7.90	12.60	7.74	19.50

การวิเคราะห์ผลการทดสอบ ขนาดความกว้างลำคลื่นของต้นแบบสายอากาศแพทช์จะมีขนาดกว้างขึ้น เมื่อลดรัศมีความโค้งของสายอากาศลง และในทางกลับกันอัตราขยายของสายอากาศจะลดลง แสดงตารางเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.10 และภาพประกอบที่ 4.39

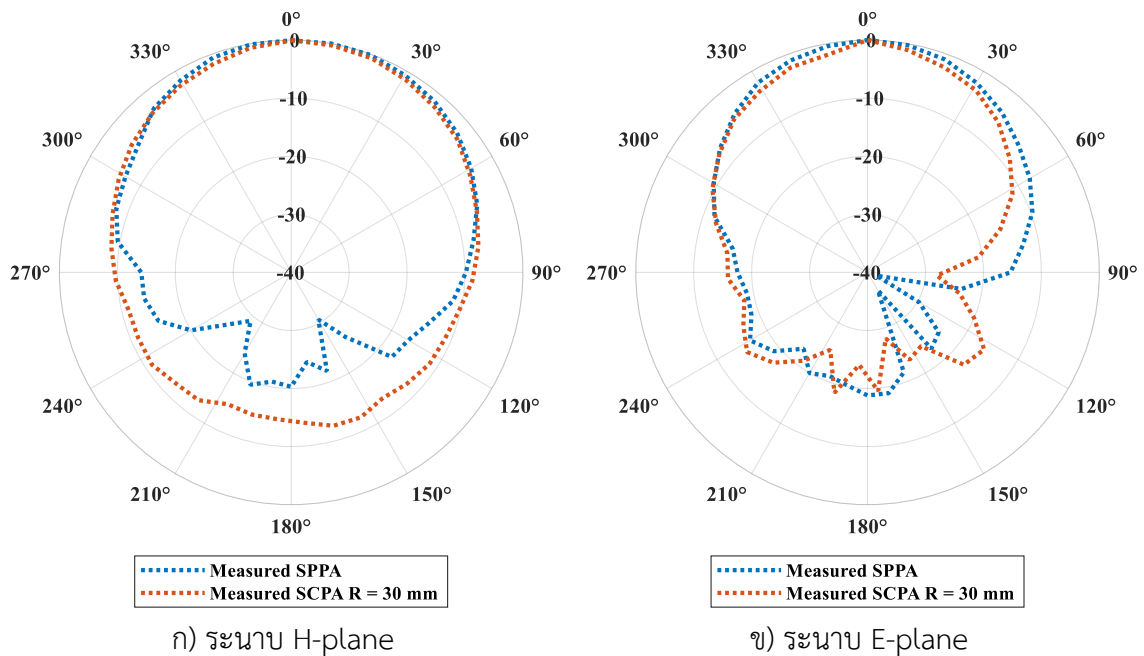
ผลทดสอบมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลอง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับต้นแบบสายอากาศที่ไม่ได้มีการลดขนาดของสายอากาศ จากตารางที่ 3.11 ขนาดความกว้างลำคลื่นของต้นแบบสายอากาศ MKF-SPPA และ MKF-SCPA ($R=30$ mm) ให้ขนาดลำคลื่นที่กว้างกว่า และมีอัตราขยายน้อยกว่าต้นแบบสายอากาศก่อนลดขนาด



ภาพประกอบที่ 4.37 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA



ภาพประกอบที่ 4.38 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ MKF-SCPA ($R=30$ mm)



ภาพประกอบที่ 4.39 ผลการทดสอบของสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และ MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$)

4.4.2 สายอากาศแถวลำดับแบบขนาด 4x1 องค์ประกอบ

1) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)

การทดสอบค่า S-parameter ประกอบไปด้วย 1. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยสายอากาศควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างน้อยต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ที่ใช้ออกแบบคือ 2.45 GHz ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนยิ่งต่ำมากๆ สายอากาศก็จะยิ่งแมตช์ได้ดี การทดสอบโดยวัดค่า Return loss ขององค์ประกอบที่ต้องการทดสอบ องค์ประกอบที่เหลือจะถูก Terminate ด้วยโหลดขนาด 50Ω และ 2. ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ โดยวัดของค่า Isolation ของสององค์ประกอบที่ต้องการทดสอบ และองค์ประกอบที่เหลือจะถูก Terminate ด้วยโหลดขนาด 50Ω

การทดสอบวัดค่า S-parameter ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายของต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SPPA planar phased array, ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30\text{ mm}$) planar phased array และสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30\text{ mm}$) conformal phased array แสดงดัง

ภาพประกอบที่ 4.40 ภาพประกอบที่ 4.42 และภาพประกอบที่ 4.44 ตามลำดับ แสดงผลการทดสอบค่า S-parameter ดังภาพประกอบที่ 4.41 ภาพประกอบที่ 4.43 และ ภาพประกอบที่ 4.45 ตามลำดับ และแสดงตารางเปรียบเทียบดังตารางที่ 4.11

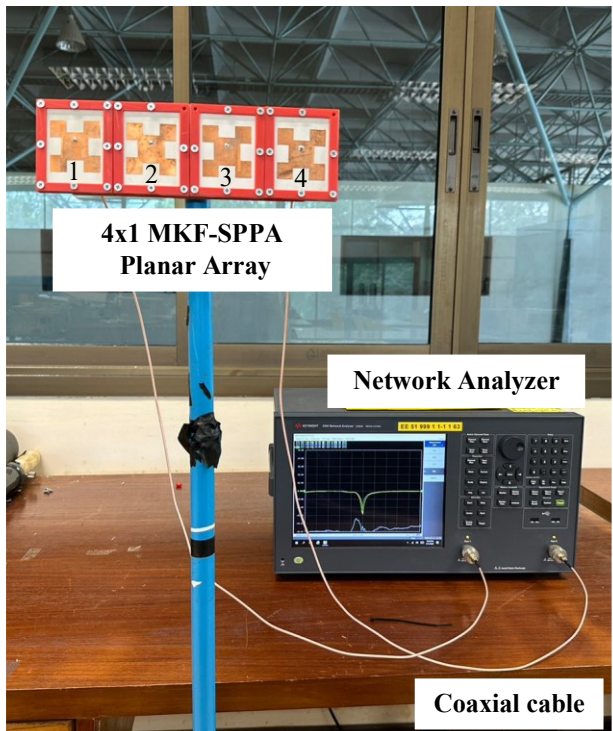
จากผลการทดสอบค่า S-parameter ของต้นแบบสายอากาศทั้งสามแบบ มีผลสอดคล้องกับผลการจำลอง โดยผลการทดสอบค่า Return loss ของแต่ละองค์ประกอบทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ค่า Return loss ของแต่ละองค์ประกอบ มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากผลจากความไม่แม่นยำจากการสร้างต้นแบบ ดังนั้นการ Matching ของแต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน

สำหรับค่า Isolation ระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศ MKF-SPPA Planar phased array และ MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array ให้ผลค่า Isolation ที่ใกล้เคียงกัน แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยที่สายอากาศ MKF-SPPA Planar phased array ให้ค่า Isolation มากกว่าสายอากาศ MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array เพียงเล็กน้อย เป็นผลมาจากการที่แต่ละองค์ประกอบ MKF-SPPA มีขนาดลำคลื่นแคบกว่าองค์ประกอบของสายอากาศ MKF-SCPA ($R=30$ mm)

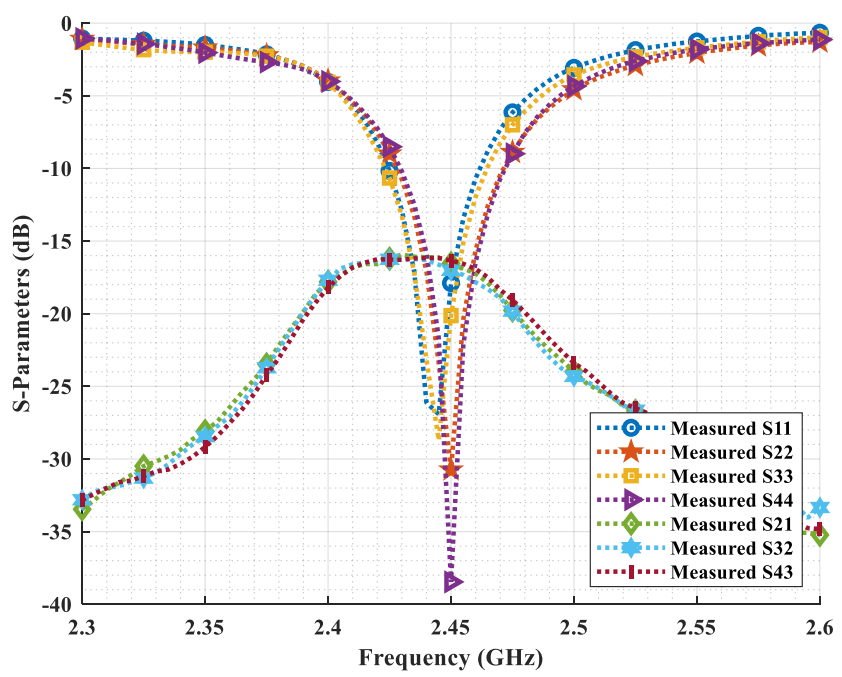
สำหรับสายอากาศ MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array ให้ค่า Isolation มากกว่าสายอากาศ MKF-SPPA Planar phased array และ MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array เป็นผลมาจากการจัดเรียงที่เป็นลักษณะ Conformal

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบ S-parameter ของสายอากาศแฉวลำดับ

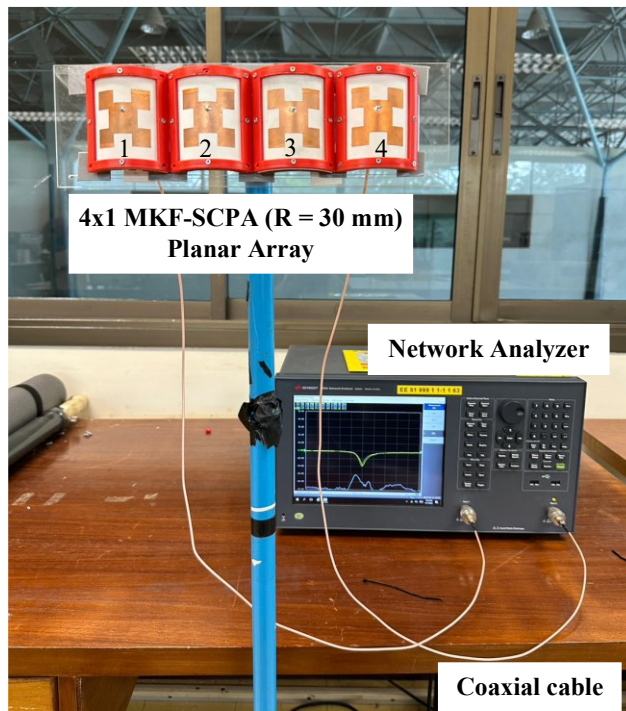
		S-parameter (dB) at 2.45 GHz						
R_{Array}	R_{Ant}	S1,1	S2,2	S3,3	S4,4	S2,1	S3,2	S4,3
Planar	Planar	-17.99	-30.93	-19.87	-39.80	-16.45	-17.06	-16.32
Planar	30 mm	-19.22	-20.22	-17.75	-27.42	-17.33	-16.32	-16.08
$2.00\lambda_0$	30 mm	-24.16	-39.95	-20.94	-21.64	-20.09	-18.13	-18.03



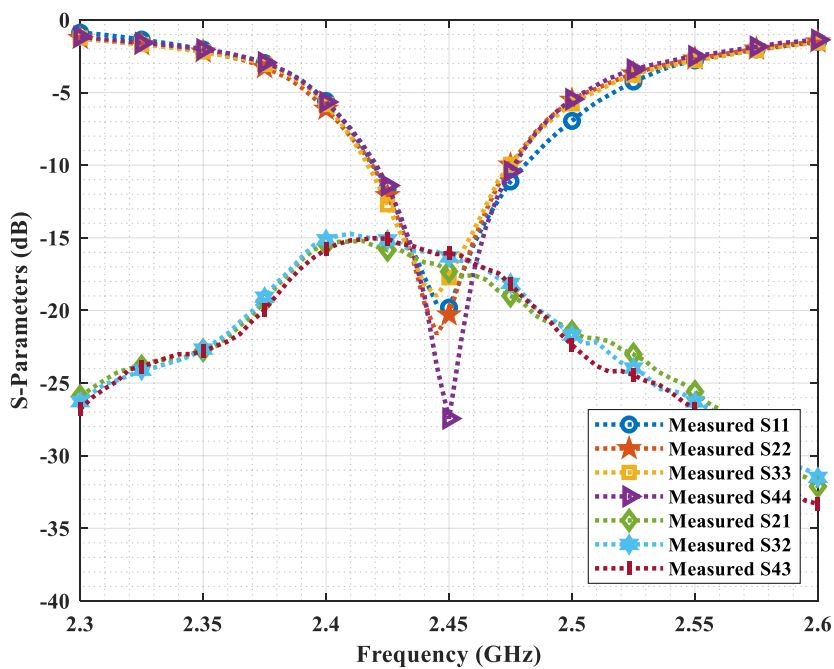
ภาพประกอบที่ 4.40 การทดสอบวัดค่า S-parameter ของ 4x1 MKF-SPPA planar phased array



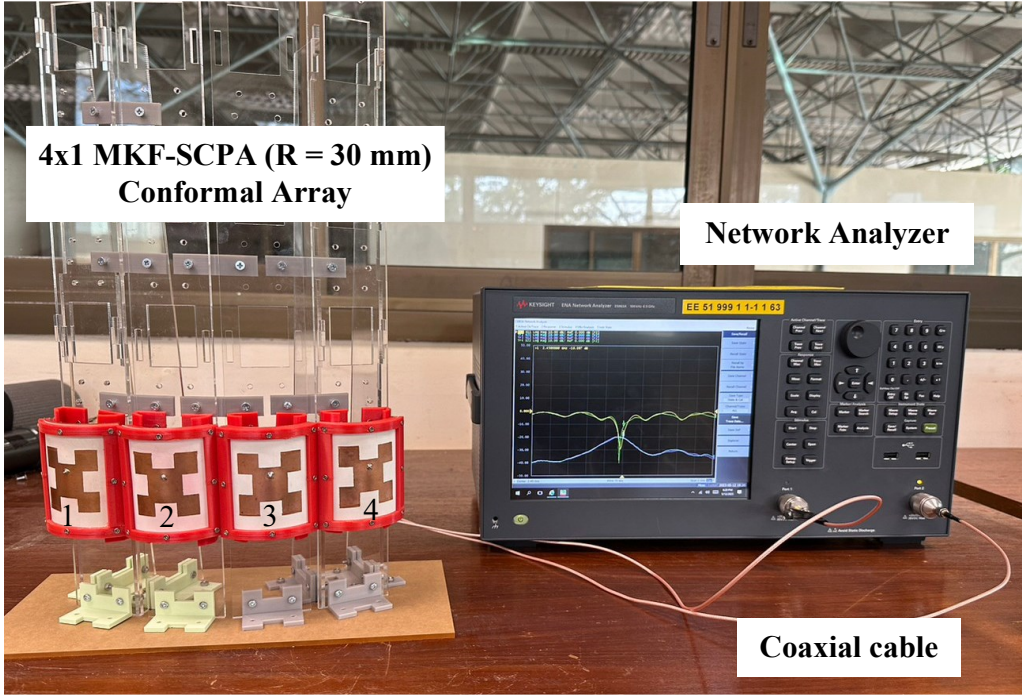
ภาพประกอบที่ 4.41 ผลการทดสอบวัดค่า S-parameter ของ 4x1 MKF-SPPA planar phased array



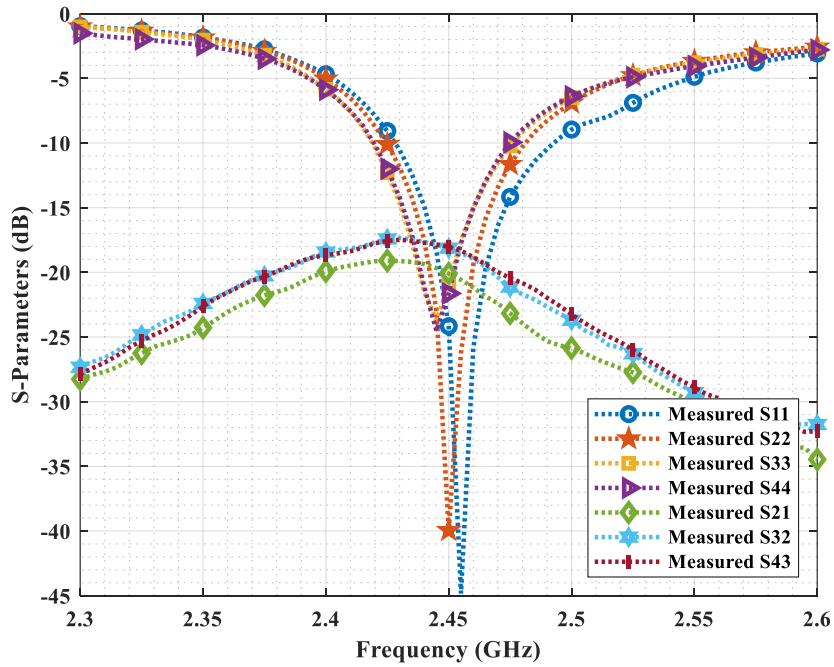
ภาพประกอบที่ 4.42 การทดสอบวัดค่า S-parameter ของ 4x1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) planar phased array



ภาพประกอบที่ 4.43 ผลการทดสอบวัดค่า S-parameter ของสายอากาศ 4x1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) planar phased array



ภาพประกอบที่ 4.44 การทดสอบ S-parameter ของสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) conformal phased array

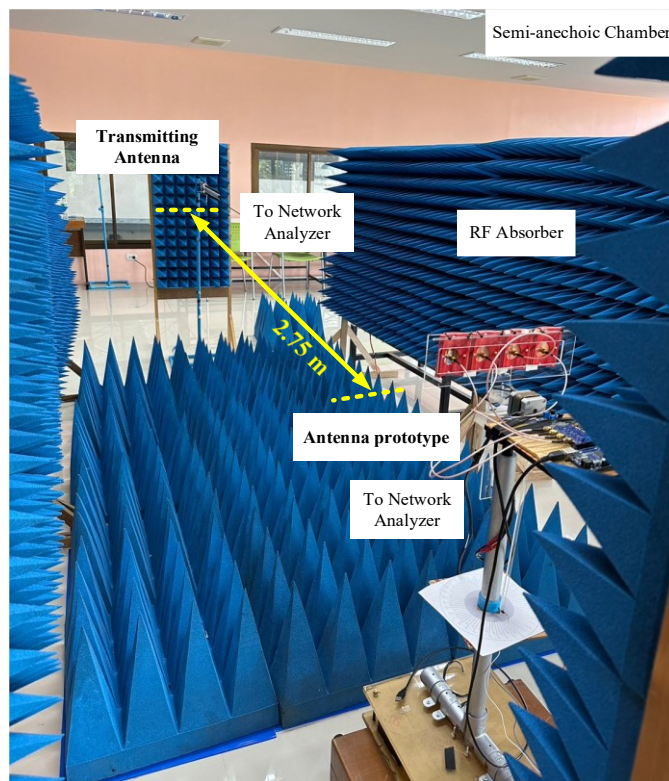


ภาพประกอบที่ 4.45 ผลการทดสอบ S-parameter ของสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) conformal phased array

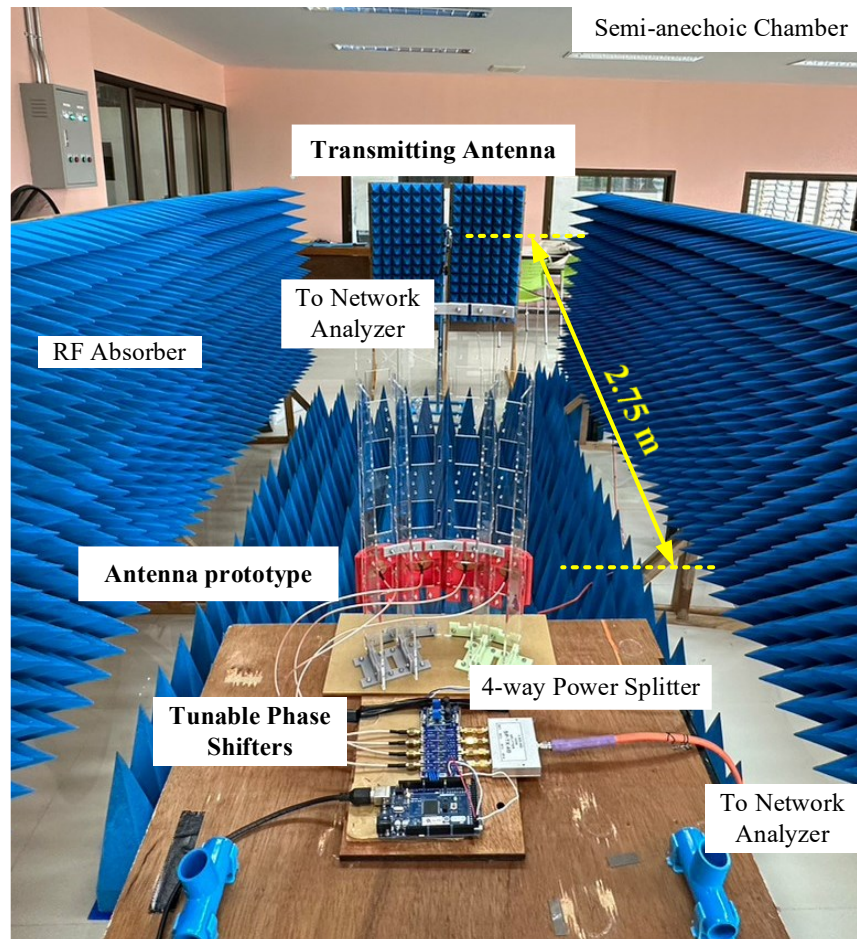
2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยายของต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SPPA planar phased array, ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) planar phased array ดังภาพประกอบที่ 4.46 และต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array ดังภาพประกอบที่ 4.47

โดยทดสอบภายในห้อง Semi-anechoic chamber ที่ล้อมรอบไปด้วยแผ่น Absorber ภายในระบบทดสอบประกอบไปด้วย 1. สายอากาศภาคส่ง (Transmitting antenna) 2. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network analyzer) และ 3. ต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบ (Antenna Under Test, AUT)



ภาพประกอบที่ 4.46 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ Planar phased array



ภาพประกอบที่ 4.47 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ Conformal phased array

ในการทดสอบวัดอัตราขยาย มีพารามิเตอร์ดังนี้ P_T คือ กำลังงานจากภาคส่ง, P_R คือ กำลังที่ได้รับจากภาครับ, G_T คือ อัตราขยายของสายอากาศของภาคส่ง, G_R คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับซึ่งในที่นี้คือ ต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบ, L_T คือกำลังงานสูญเสียจากสายนำสัญญาณ L_{PS} คือกำลังงานสูญเสียของวงจรเลื่อนเฟส, $L_{splitter}$ คือกำลังงานสูญเสียจาก Power splitter, L_{FSPL} คือการสูญเสียในอากาศว่าง และระยะ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับซึ่งเป็นระยะที่สอดคล้องกับระยะของสนามไกล

โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะช่วยในการคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศจากสมการการส่งผ่านของฟรีสดังสมการ (4.5) ในการทดสอบสายอากาศภาครับ เป็นสายอากาศต้นแบบที่ต้องการทดสอบ สามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังสมการ (4.6)

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L_{FSPL} - L_T - L_{PS} - L_{splitter} \quad (4.5)$$

$$G_R = P_R - P_T - G_T + L_{FSPL} + L_T + L_{splitter} \quad (4.6)$$

การทดสอบอัตราขยายของต้นแบบสายอากาศทั้งสามแบบ มีการทดสอบทั้งหมด 4 ทิศทาง คือ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา โดยการป้อนแอมพลิจูดและเฟสให้แก่แต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับที่แตกต่างกันคือ 0 องศา, 45 องศา, 90 องศา และ 135 องศา อย่างไรก็ตามจากบทที่ 1 ผู้วิจัยต้องการพิจารณาทิศทางของลำคลื่นทั้งหมด 7 ทิศทางคือ 0 องศา ± 15 องศา ± 30 องศา และ ± 45 องศา เนื่องสายอากาศแถวลำดับนี้เป็น สายอากาศสมมาตร ดังนั้นจึงทดสอบเพียงด้านเดียวคือ 0 องศา, 15 องศา, 30 และ 45 องศา

การทดสอบที่ความถี่ 2.45 GHz โดยที่ภาคส่งและภาครับเป็นเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ค่า $P_R - P_T$ คือค่า S2,1 สายอากาศส่งเป็นสายอากาศ Yagi ให้อัตราขยาย (G_T) เท่ากับ 14.51 dBi, ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ (d) เท่ากับ 2.75 m จากการคำนวณการสูญเสียในอากาศว่าง (L_{FSPL}) จากสมการ (3.2) เท่ากับ 49.01 dB, การสูญเสียในสายนำสัญญาณ (L_T) เท่ากับ 0.50 dB, การสูญเสียของวงจรเลื่อนเฟส (L_{PS}) มีค่าเท่ากับ 6.20 dB, กำลังงานสูญเสียจาก 4-way Power splitter ($L_{splitter}$) เท่ากับ 6.70 dB สามารถคำนวณอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ (G_R) ตามสมการ (4.6) และในการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานบันทึกค่า S2,1 ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นค่า Normalized Gain ด้วยมุม 0 องศา เมื่อปรับลำคลื่นไปมุมต่างๆ (0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา) ของต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SPPA planar phased array, ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array, ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array ดังภาพประกอบที่ 4.48 ภาพประกอบที่ 4.49 และภาพประกอบที่ 4.50 ตามลำดับ และเปรียบเทียบผลการทดสอบดังตารางที่ 4.12 ตารางที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.14 ตามลำดับ โดยผลการทดสอบของต้นแบบสายอากาศทั้งสามแบบสอดคล้องกับผลการจำลอง

การเปรียบเทียบผลการทดสอบ เมื่อปรับลำคลื่นไปยังทิศทางต่างๆ ค่าความแตกต่างของอัตราขยายสูงสุดที่ตำแหน่ง Desired direction และที่ตำแหน่ง Peak direction ต้นแบบสายอากาศทั้ง

สามแบบให้ค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดที่ตำแหน่ง Desired direction ($\Delta G_{meas,desired}$) และตำแหน่ง Peak direction ($\Delta G_{meas,peak}$) น้อยกว่า 3 dB มีคุณสมบัติ Constant gain

สำหรับค่า $\Delta G_{meas,desired}$ ของต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array มีการลดลงของอัตราขยายน้อยที่สุด ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array และต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SPPA Planar phased array ตามลำดับดังนี้ 0.92 dB, 2.02 dB และ 2.43 dB

สำหรับค่า $\Delta G_{meas,peak}$ ให้ผลที่สอดคล้องเช่นกัน โดยต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array มีการลดลงของอัตราขยายน้อยที่สุดเช่นกัน ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array และต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SPPA Planar phased array ตามลำดับดังนี้ 0.86 dB, 1.43 dB และ 1.67 dB

การเปรียบเทียบ ผลการชี้ทิศทางของลำคลื่นเมื่อปรับไปยังทิศทางต่างๆ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array มีความแม่นยำในการชี้ทิศทางมากที่สุด ต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array และต้นแบบสายอากาศ 4X1 MKF-SPPA Planar phased array ตามลำดับ มีค่าความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางดังนี้ 2.22%, 4.44% dB และ 8.88% dB

สรุปการเปรียบเทียบ ต้นแบบสายอากาศ 4x1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array ให้ทั้งคุณสมบัติ Constant gain และความแม่นยำในการชี้ทิศทางชี้ทิศทางที่สูง เมื่อปรับลำคลื่น เป็นผลมาจากโครงสร้างที่จัดเรียงแถวลำดับแบบ Conformal และองค์ประกอบของแถวลำดับมีลำคลื่นกว้าง

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบของสายอากาศ 4x1 MKF-SPPA Planar phased array

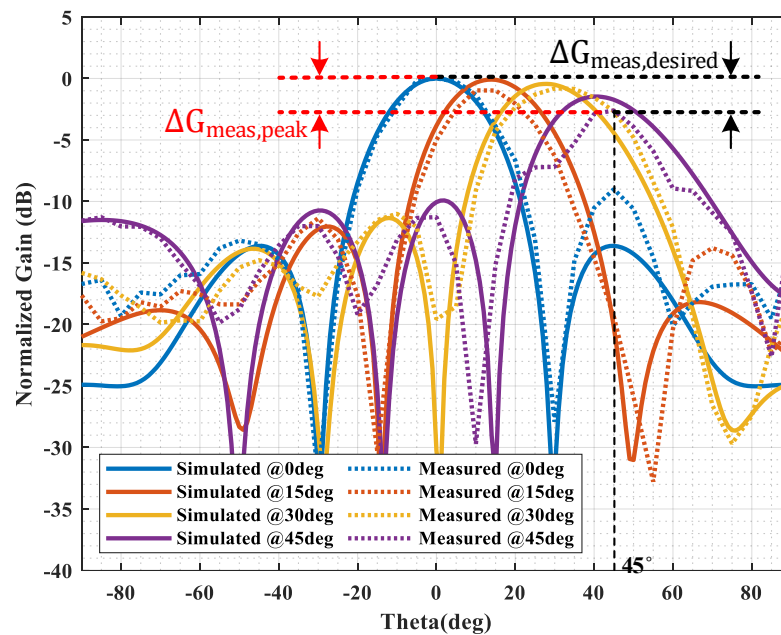
Parameters	Beam1	Beam2	Beam3	Beam4	<i>max ΔG</i> (dB)
Sim. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 12.20	(15 deg) 12.09	(30 deg) 11.71	(45deg) 8.90	2.31
Meas. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 11.83	(15 deg) 10.85	(30 deg) 11.02	(45 deg) 9.40	2.43
Sim. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 12.20	(14 deg) 12.10	(28 deg) 11.80	(41 deg) 10.20	2.00
Meas. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 11.83	(13 deg) 11.40	(29 deg) 11.46	(41 deg) 10.16	1.67

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบของสายอากาศ 4x1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Planar phased array

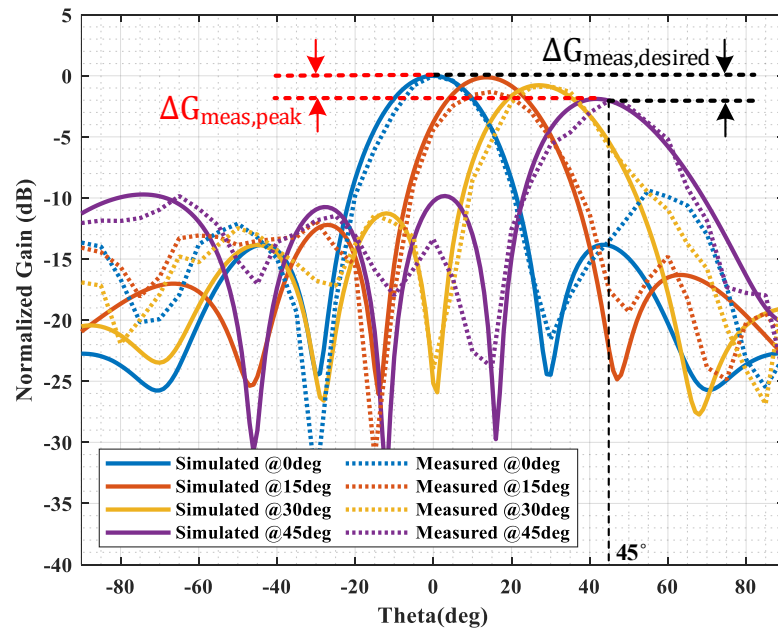
Parameters	Beam1	Beam2	Beam3	Beam4	<i>max ΔG</i> (dB)
Sim. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 12.10	(15 deg) 11.90	(30 deg) 11.16	(45 deg) 10.06	2.04
Meas. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 12.20	(15 deg) 10.89	(30deg) 11.33	(45 deg) 10.18	2.02
Sim. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 12.10	(14 deg) 11.93	(27deg) 11.30	(42 deg) 10.21	1.89
Meas. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 12.20	(14 deg) 12.13	(30 deg) 11.33	(43 deg) 10.68	1.43

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบของสายอากาศ 4x1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array

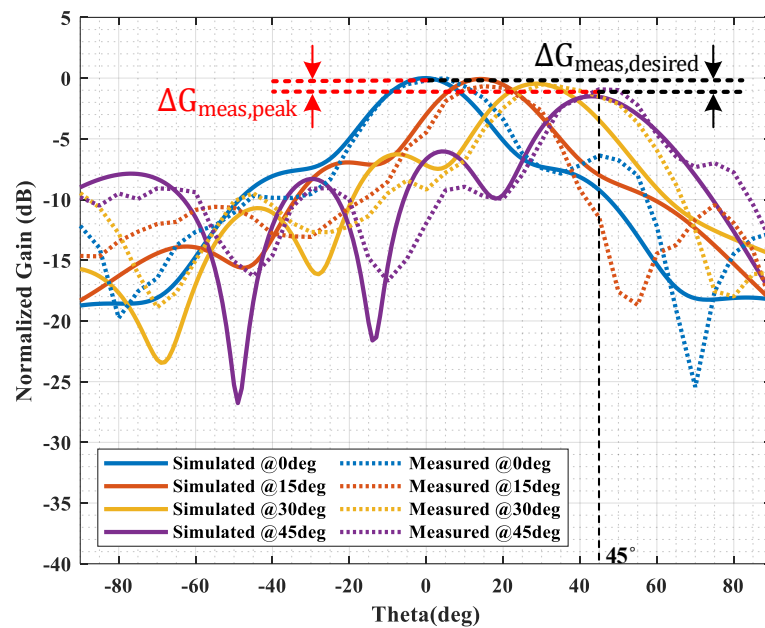
Parameters	Beam1	Beam2	Beam3	Beam4	$max \Delta G$ (dB)
Sim. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 10.40	(15 deg) 10.27	(30 deg) 9.88	(45 deg) 8.81	1.59
Meas. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 10.58	(15 deg) 9.58	(30 deg) 9.87	(45 deg) 9.66	0.92
Sim. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 10.40	(15 deg) 10.30	(29 deg) 9.90	(43 deg) 8.86	1.54
Meas. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 10.58	(13 deg) 9.75	(29 deg) 9.99	(44 deg) 9.72	0.86



ภาพประกอบที่ 4.48 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ 4x1 MKF-SPPA planar phased array



ภาพประกอบที่ 4.49 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ
4X1 SCPA ($R=30$ mm) planar phased array



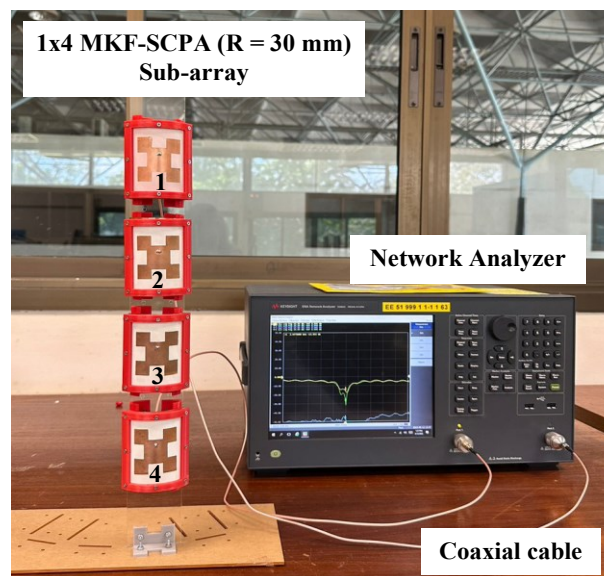
ภาพประกอบที่ 4.50 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ
4X1 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array

4.4.3 สายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA

1) ค่า S-parameter

การทดสอบค่า S-parameter ประกอบไปด้วย 1. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยสายอากาศควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างน้อยต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ที่ใช้ออกแบบคือ 2.45 GHz ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนยิ่งต่ำมากๆ สายอากาศก็จะยิ่งแมตซ์ได้ดี การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยวัดค่า Return loss ขององค์ประกอบที่ต้องการทดสอบ องค์ประกอบที่เหลือจะถูก Terminate ด้วยโหลดขนาด 50Ω และ 2. ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ การทดสอบโดยวัดของค่า Isolation ของสององค์ประกอบที่ต้องการทดสอบ และองค์ประกอบที่เหลือจะถูก Terminate ด้วยโหลดขนาด 50Ω

การทดสอบวัดค่า S-parameter ของต้นแบบสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA ($R=30$ mm) ด้วยเครื่องวิเคราะห์โคจรข่ายดังภาพประกอบที่ 4.51 แสดงผลการทดสอบค่า S-parameter ดังภาพประกอบที่ 4.52 และผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA ($R = 30$ mm) รวมกับ 4-way Power combiner แสดงดังภาพประกอบที่ 4.53 และตารางที่ 4.15



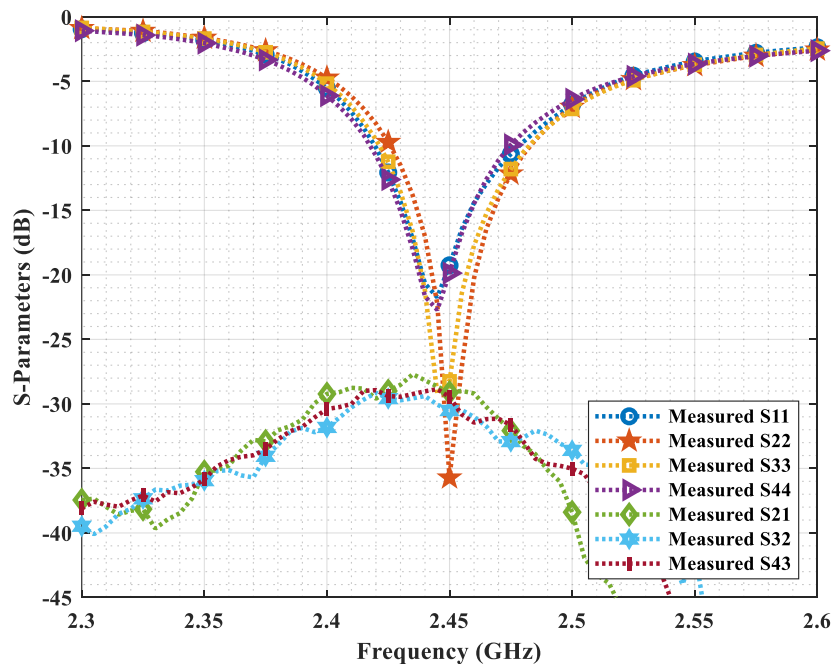
ภาพประกอบที่ 4.51 การทดสอบวัดค่า S-Parameter ของสายอากาศแถวลำดับย่อย MKF-SCPA

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบ S-parameter ของสายอากาศแฉวลำดับย่อย

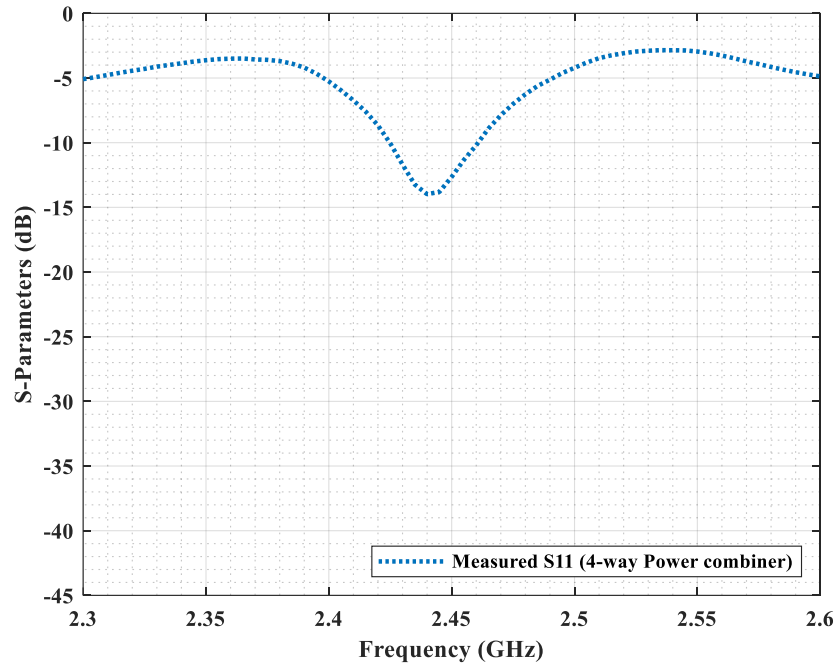
S-parameter (dB) at 2.45 GHz							
S1,1	S2,2	S3,3	S4,4	S2,1	S3,2	S4,3	4-way Power combiner
-19.26	-35.73	-28.25	-19.86	-29.12	-30.52	-29.46	-12.65

การวิเคราะห์ผลการทดสอบวัดค่า S-parameter ของต้นแบบสายอากาศแฉวลำดับย่อย มีผลสอดคล้องกับผลการจำลอง โดยค่า Return loss ของแต่ละองค์ประกอบสามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz แต่มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากผลจากความไม่แม่นยำจากการสร้างต้นแบบทำให้การ Matching ของแต่ละองค์ประกอบไม่เท่ากัน

สำหรับระดับค่า Isolation ระหว่างองค์ประกอบมีค่าอยู่ในช่วงต่ำกว่า -20 dB เนื่องจากสายอากาศจัดเรียงองค์ประกอบเป็นระยะเท่ากับ $0.75\lambda_0$ จึงได้รับจากผล Mutual coupling ระหว่างองค์ประกอบข้างเคียงน้อย และเมื่อเชื่อมต่อต้นแบบสายอากาศแฉวลำดับย่อยกับ 4-way Power combiner ส่งผลให้ Impedance matching ของแฉวลำดับย่อยแยลง อย่างไรก็ตามต้นแบบสายอากาศสามารถยังคงใช้งานที่ความถี่ที่ต้องการได้ 2.45 GHz มีค่า Return loss ต่ำกว่า -10 dB



ภาพประกอบที่ 4.52 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของสายอากาศแฉวลำดับย่อย MKF-SCPA



ภาพประกอบที่ 4.53 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของแฉวลำดับย่อยและ Power combiner

2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

การทดสอบวัดอัตราขยาย แบบรูปการแผ่พลังงานของต้นแบบสายอากาศแฉวลำดับย่อย MKF-SCPA ($R = 30$ mm) แสดงดังภาพประกอบที่ 4.56 โดยทดสอบภายใน Semi-anechoic chamber ที่ล้อมรอบไปด้วยแผ่น Absorber ภายในระบบทดสอบประกอบไปด้วย 1. สายอากาศภาคส่ง 2. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย และ 3. ต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบ

ในการทดสอบวัดอัตราขยาย มีพารามิเตอร์ดังนี้ P_T คือ กำลังงานจากภาคส่ง, P_R คือ กำลังที่ได้รับจากภาครับ, G_T คือ อัตราขยายของสายอากาศของภาคส่ง, G_R คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับซึ่งในที่นี้คือ ต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบ, L_T คือกำลังงานสูญเสียจากสายนำสัญญาณ, L_{PS} คือกำลังงานสูญเสียของวงจรเลื่อนเฟส, $L_{splitter}$ คือกำลังงานสูญเสียจาก 4-way Power splitter, L_{FSPL} คือกำลังงานสูญเสียในอากาศว่าง และระยะ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและภาครับซึ่งเป็นระยะที่สอดคล้องกับระยะของสนามระยะไกล

โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะช่วยในการคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศ จากสมการการส่งผ่านของพริสตั้งสมการ (4.5) ในการทดสอบสายอากาศภาครับ เป็นสายอากาศต้นแบบที่ต้องการทดสอบสามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังสมการ (4.6)

การทดสอบอัตราขยายของ ต้นแบบสายอากาศแฉวลำดับย่อย MKF-SCPA ($R = 30$ mm) ที่ความถี่ 2.45 GHz มีรายละเอียด ดังนี้ การทดสอบเพียงทิศทางเดียว คือตำแหน่ง 0 องศา โดยการป้อนเฟสให้แก่แต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแฉวลำดับย่อยเท่ากับ 0 องศา

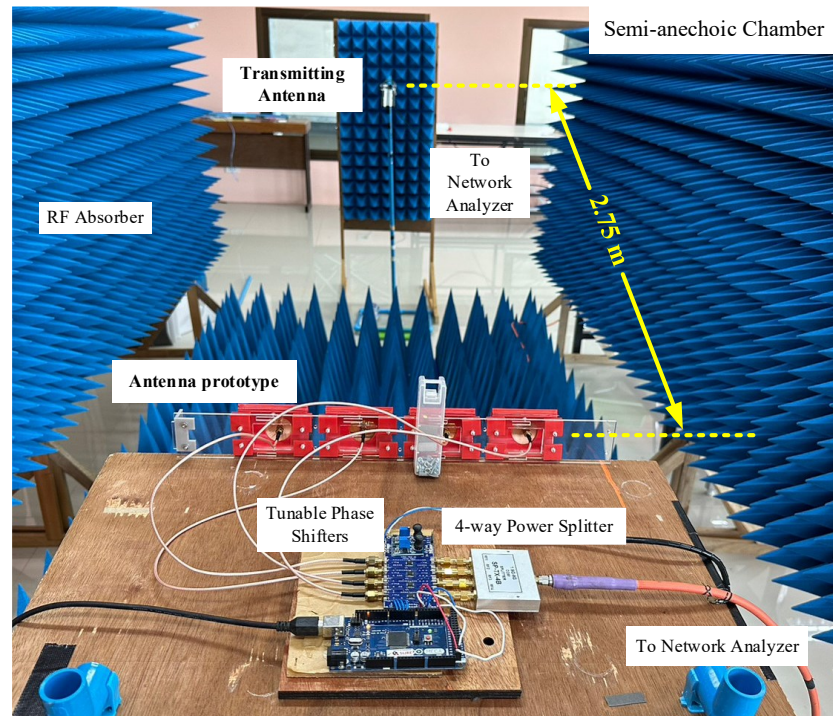
การทดสอบภาคส่งและภาครับเป็นเครื่องวิเคราะห์ที่ตรงข่ายทำให้ค่า $P_R - P_T$ คือ S2,1 สายอากาศภาคส่งซึ่งเป็นสายอากาศ Yagi ให้อัตราขยาย (G_T) เท่ากับ 14.51 dBi ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ (d) มีค่าเท่ากับ 2.75 m การสูญเสียในอากาศว่าง (L_{FSPL}) คำนวณจากสมการ (3.2) มีค่าเท่ากับ 49.01 dB กำลังสูญเสียในสายนำสัญญาณ (L_T) มีค่าเท่ากับ 0.50 dB กำลังสูญเสียของวงจรถ่ายเฟส (L_{PS}) มีค่าเท่ากับ 6.20 dB กำลังงานสูญเสียจาก 4-way Power splitter ($L_{splitter}$) เท่ากับ 6.7 dB สามารถคำนวณอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ (G_R) ตามสมการ (4.6) และในการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน บันทึกค่า S2,1 จากเครื่องวิเคราะห์ที่ตรงข่าย

แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นค่า Normalized Gain ด้วยมุม 0 องศา ของต้นแบบสายอากาศในระนาบ H-plane และ E-plane แสดงดังภาพประกอบที่ 4.55 ก) และภาพประกอบที่ 4.55 ข) ตามลำดับ และการเปรียบเทียบผลการทดสอบดังตารางที่ 4.16

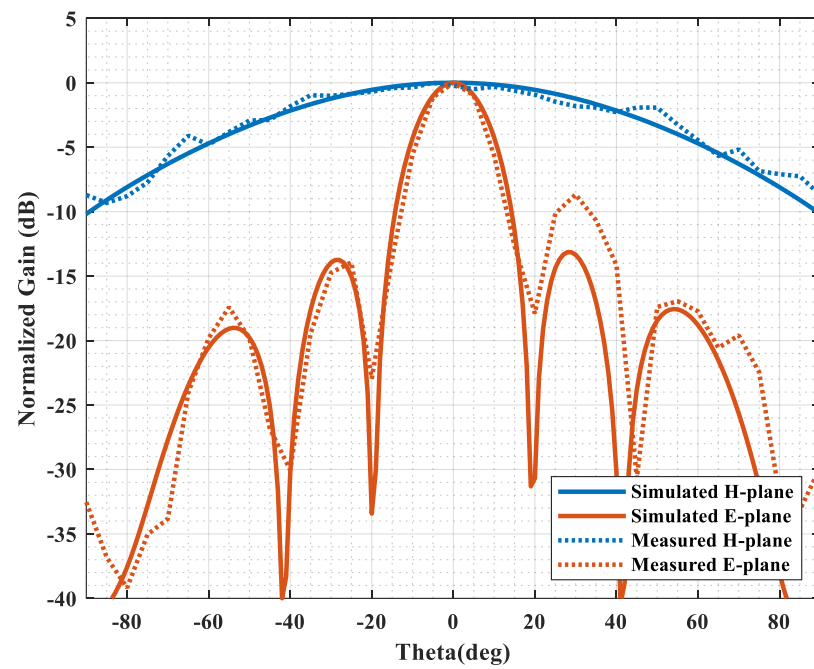
ผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการจำลอง ต้นแบบสายอากาศแฉวลำดับย่อย ให้อัตราขยายเท่ากับ 10.63 dBi มีขนาดลำคลื่นในระนาบ H-plane และในระนาบ E-plane เท่ากับ 95.00 องศา และ 16.20 องศา ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบของต้นแบบสายอากาศแฉวลำดับย่อย

	HPBW (deg)		Gain (dBi)
	H-plane	E-plane	
Sim.	94.80	17.00	12.60
Meas.	95.00	16.20	10.63



ภาพประกอบที่ 4.54 การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแฉวลำดับย่อย MKF-SCPA



ภาพประกอบที่ 4.55 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน ของสายอากาศแฉวลำดับย่อย

4.4.4 สายอากาศ 4x4 MFK-SCPA Conformal phased array

1) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient)

สำหรับการทดสอบค่า S-parameter ประกอบไปด้วย 1. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยสายอากาศควรมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนอย่างน้อยต่ำกว่า -10 dB ที่ความถี่ที่ใช้ออกแบบคือ 2.45 GHz ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนยิ่งต่ำมากๆ สายอากาศก็จะยิ่งแมตซ์ได้ดี การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน โดยวัดค่า Return loss ขององค์ประกอบที่ต้องการทดสอบ องค์ประกอบที่เหลือจะถูก Terminate ด้วยโหลดขนาด 50Ω และ 2. ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระหว่างองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับ การทดสอบวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านระหว่างองค์ประกอบ โดยวัดของค่า Isolation ของสององค์ประกอบที่ต้องการทดสอบ และองค์ประกอบที่เหลือจะถูก Terminate ด้วยโหลดขนาด 50Ω

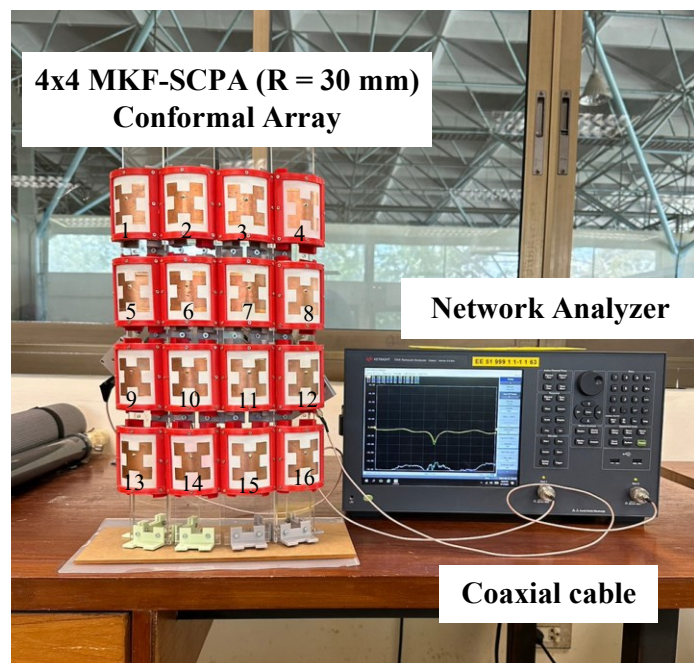
การทดสอบวัดค่า S-parameter ของต้นแบบสายอากาศ 4x4 MFK-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายดังภาพประกอบที่ 4.56 ผลการทดสอบค่า S-parameter แสดงดังภาพประกอบที่ 4.57 และตารางที่ 4.17

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากขนาดของต้นแบบสายอากาศเป็น 4x4 องค์ประกอบ คือมีองค์ประกอบทั้งหมด 16 องค์ประกอบ ทางผู้วิจัยมีโหลดขนาด 50Ω สำหรับการ Terminate ไม่เพียงพอสำหรับจำนวนองค์ประกอบทั้งหมด ดังนั้นผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จึงเป็นผลของสายอากาศแถวลำดับย่อยรวมกับ 4-way Power combiner คือค่า S_{1,1} S_{2,2} S_{3,3} และ S_{4,4}

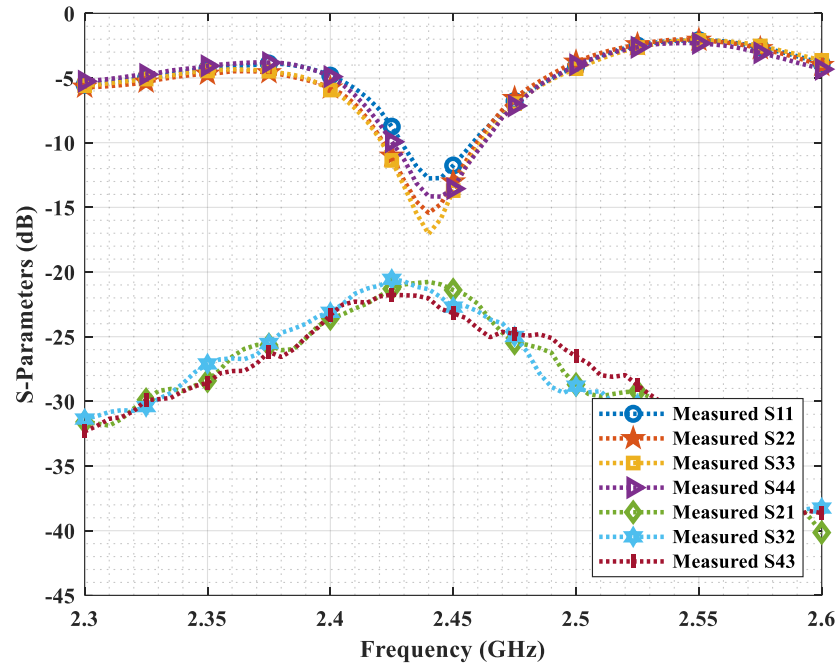
ผลการทดสอบ สายอากาศแถวลำดับย่อยที่รวมกับ Power combiner สามารถทำงานที่ความถี่ 2.45 GHz ได้ ให้ค่า Return loss ต่ำกว่า -10 dB สำหรับค่า Isolation ของแถวลำดับย่อยในแนว Circumferential มีค่าระดับอยู่ในช่วงต่ำกว่า -20 dB ผลมาการจัดเรียงแบบแถวลำดับแบบ Conformal

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบ S-parameter 4x4 MFK-SCPA ($R=30\text{mm}$) Conformal phased array

S-Parameter (dB) at 2.45 GHz						
S1,1	S2,2	S3,3	S4,4	S2,1	S3,2	S4,3
-11.78	-13.02	-13.55	-13.71	-21.39	-22.71	-23.18



ภาพประกอบที่ 4.56 การทดสอบวัดค่า S-Parameter ของสายอากาศ 4x4 MFK-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array



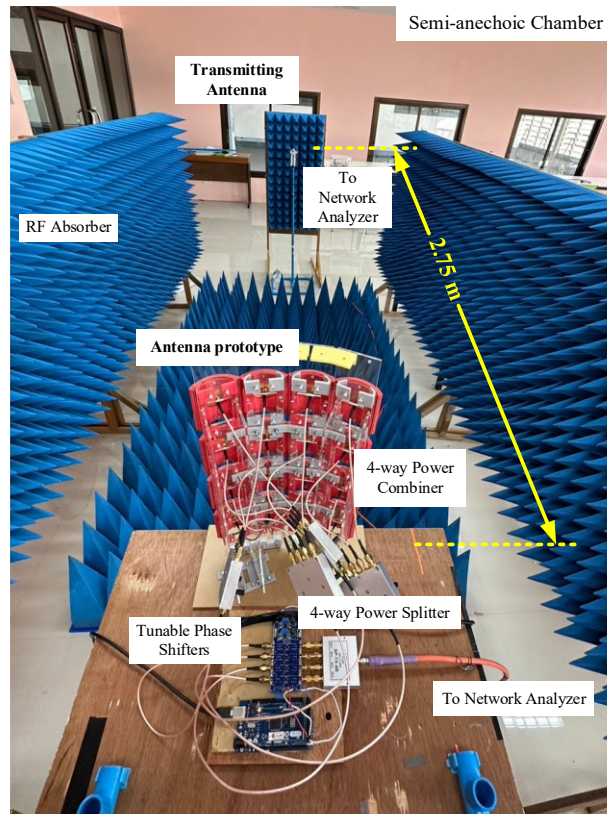
ภาพประกอบที่ 4.57 ผลการทดสอบค่า S-parameter ของสายอากาศ
4x4 MFK-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array

2) แบบรูปการแผ่พลังงาน (Radiation pattern)

การทดสอบวัดอัตราขยายและแบบรูปการแผ่พลังงาน ของต้นแบบสายอากาศ 4x4 MKF-SCPA ($R=30\text{ mm}$) Conformal phased array ดังภาพประกอบที่ 4.58 โดยทดสอบภายใน Semi-aecnaoic chamber ที่ล้อมรอบไปด้วยแผ่น Absorber ภายในระบบทดสอบประกอบไปด้วย 1. สายอากาศภาคส่ง 2. เครื่องวิเคราะห์โคจรข่าย และ 3. ต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบ

ในการทดสอบวัดอัตราขยาย มีพารามิเตอร์ดังนี้ P_T คือกำลังงานจากภาคส่ง, P_R คือกำลังที่ได้รับจากภาครับ, G_T คือ อัตราขยายของสายอากาศของภาคส่ง, G_R คืออัตราขยายของสายอากาศภาครับ ซึ่งในที่นี้คือ ต้นแบบสายอากาศที่ต้องการทดสอบ, L_T คือกำลังงานสูญเสียจากสายนำสัญญาณ, L_{PS} คือกำลังงานสูญเสียของวงจรเลื่อนเฟส, $L_{splitter}$ คือกำลังงานสูญเสียจาก 4-way Power splitter, L_{FSPL} คือการสูญเสียในอากาศว่าง และระยะ d คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ ซึ่งเป็นระยะที่สอดคล้องกับสนามระยะไกล โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะช่วยให้ในการคำนวณค่าอัตราขยายของสายอากาศ

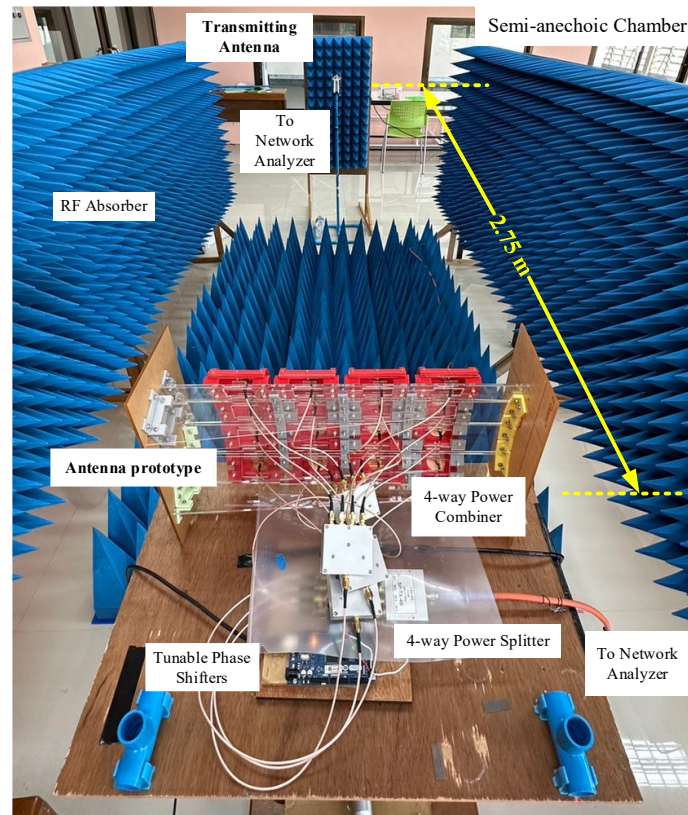
และคำนวณด้วยสมการการส่งผ่านของฟรีดริชสมการ (4.5) ในการทดสอบสายอากาศภาครับเป็นสายอากาศต้นแบบที่ต้องการทดสอบสามารถจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังสมการ (4.6)



ภาพประกอบที่ 4.58 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแนวระนาบ H-plane ของสายอากาศ 4x4 MKF-SCPA conformal phased array

การทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงานและอัตราขยายของ ต้นแบบสายอากาศ 4x4 MKF-SCPA ($R=30$ mm) Conformal phased array ที่ความถี่ 2.45 GHz มีรายละเอียด ดังนี้ 1. การทดสอบทั้งหมด 4 ทิศทางในแนวระนาบ H-plane ดังภาพประกอบที่ 4.58 คือ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา โดยการป้อนเฟสให้แก่แต่ละองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับที่แตกต่างกันคือ 0 องศา, 45 องศา, 90 องศา และ 135 องศา ตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากบทที่ 1 ผู้วิจัยต้องการพิจารณา ทิศทางของลำคลื่นทั้งหมด 7 ทิศทางคือ 0 องศา ± 15 องศา ± 30 องศา และ ± 45 องศา เนื่องจากสายอากาศแถวลำดับนี้เป็น สายอากาศสมมาตร ดังนั้นจึงทดสอบเพียงด้านเดียวคือ 0 องศา, 15 องศา, 30 และ 45

องศา และ 2. การทดสอบในแนว E-plane ดังภาพประกอบที่ 4.59 ทดสอบเพียงทิศทางเดียวคือ 0 องศา โดยการป้อนเฟสให้แก่ละองค์ประกอบของสายอากาศแถวลำดับเท่ากับ 0 องศา



ภาพประกอบที่ 4.59 การทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานแนวระนาบ E-plane ของสายอากาศ 4x4 MKF-SCPA conformal phased array

การทดสอบที่ภาคส่งและภาครับเป็นเครื่องวิเคราะห์ที่ตรงข้าม ค่า $P_R - P_T$ คือ S2,1 สายอากาศภาคส่งซึ่งเป็นสายอากาศ Yagi ให้อัตราขยาย (G_T) เท่ากับ 14.51 dBi ระยะทางระหว่างภาคส่งและภาครับ (d) มีค่าเท่ากับ 2.75 m การสูญเสียในอากาศว่าง (L_{FSPL}) คำนวณจากสมการ (3.2) มีค่าเท่ากับ 49.01 dB กำลังงานสูญเสียในสายนำสัญญาณ (L_T) เท่ากับ 0.68 dB กำลังงานสูญเสียของวงจรเลื่อนเฟส (L_{PS}) มีค่าเท่ากับ 6.20 dB กำลังงานสูญเสียจาก Power splitter ($L_{splitter}$) เท่ากับ 6.70 dB กำลังงานสูญเสียจาก Power combiner ($L_{Combiner}$) เท่ากับ 6.70 dB

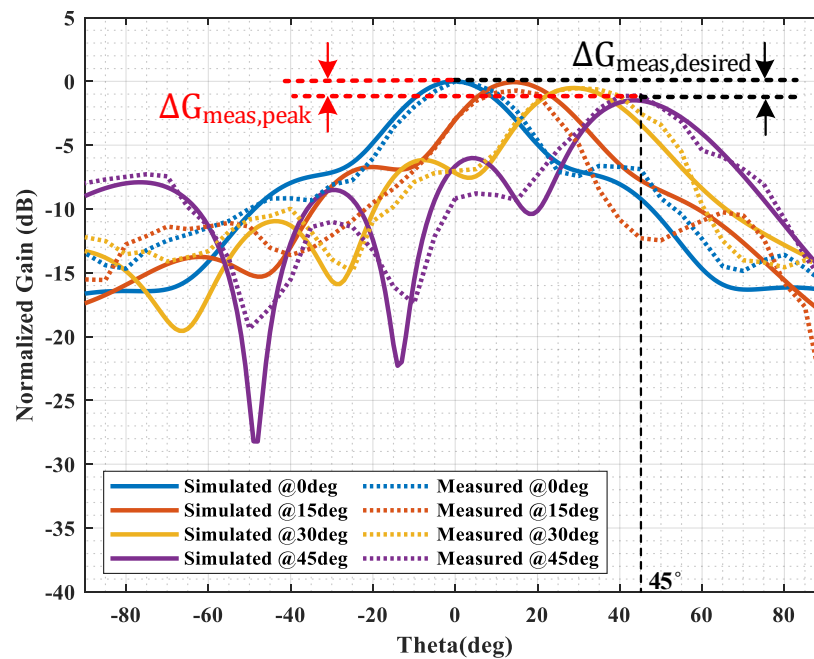
สามารถคำนวณอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ (G_R) ตามสมการ (4.6) และในการทดสอบวัดแบบรูปการแผ่พลังงาน บันทึกค่า $S_{2,1}$ ของเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

แสดงผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานเป็นค่า Normalized Gain ด้วยมุม 0 องศา ของต้นแบบสายอากาศ ในระนาบ H-plane และ E-plane แสดงดังภาพประกอบที่ 4.60 ก) และภาพประกอบที่ 4.60 ข) ตามลำดับ ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 15.12 dBi มีขนาดลำคลื่นในระนาบ H-plane เท่ากับ 30.00 องศา และในแนว E-plane มีขนาดเท่ากับ 15.00 องศา จากลำคลื่นในแนว E-plane เมื่อคำนวณขนาดของพื้นที่ครอบคลุม ลำคลื่นของสายอากาศสามารถแพร่กระจายให้พื้นที่ครอบคลุมกับด้านกว้างของรันเวย์นี้ได้ที่มีขนาดกว้างเท่ากับ 45 m และระยะที่ไกลที่สุดเท่ากับ 244 m เมื่อต้องปรับลำคลื่นไปยังมุม ± 45 องศา ซึ่งสายอากาศต้นแบบนี้มีระยะไกลสุดที่แผ่กำลังงานไปได้เท่ากับ 271 m คำนวณจากสมการ (2.29)

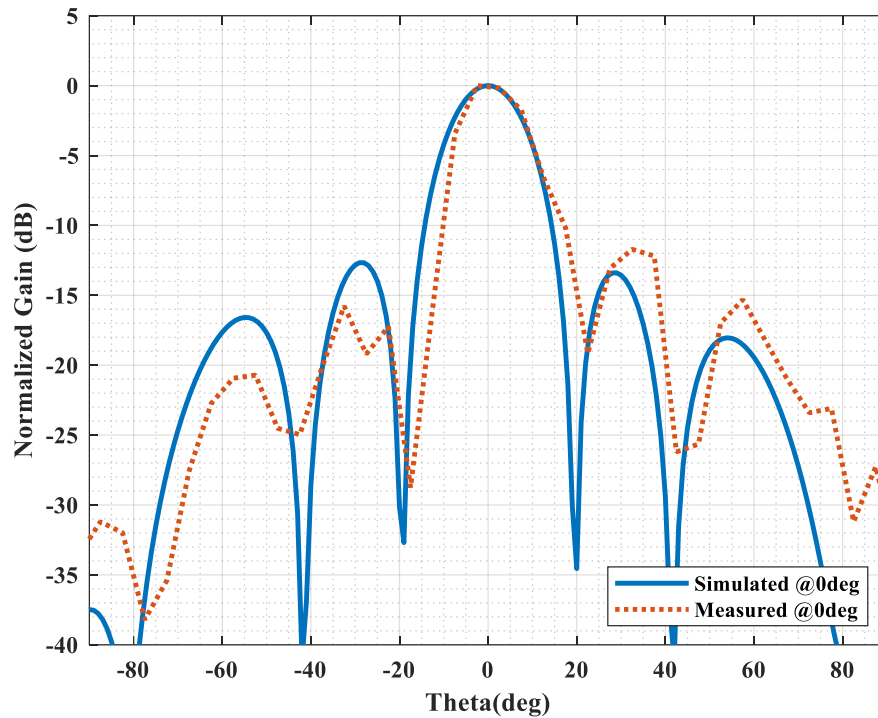
การเปรียบเทียบผลการจำลองและทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบให้ผลสอดคล้องกับผลการจำลอง ค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดที่ตำแหน่ง Desired direction ($\Delta G_{meas,desired}$) เท่ากับ 1.01 dB และค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดที่ตำแหน่ง Peak direction ($\Delta G_{meas,peak}$) เท่ากับ 0.90 dB ซึ่งน้อยกว่า -3 dB จึงถือได้ว่าให้คุณสมบัติ Constant gain สำหรับความแม่นยำการชี้ทิศทางเมื่อปรับลำคลื่นไปยังมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ต้นแบบสายอากาศนี้สามารถปรับลำคลื่นไปได้ดังนี้ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 44 องศา มีความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 2.22%

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบ สายอากาศ 4x4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) conformal phased array

Parameters	Beam1	Beam2	Beam3	Beam4	$\max \Delta G$ (dB)
Sim. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 16.24	(15 deg) 16.17	(30 deg) 15.7	(45 deg) 14.72	1.52
Meas. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 15.12	(15 deg) 14.49	(30 deg) 14.76	(45 deg) 14.11	1.01
Sim. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 16.24	(14 deg) 16.20	(29 deg) 15.72	(44 deg) 14.74	1.50
Meas. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 15.12	(15 deg) 14.49	(30 deg) 14.76	(44 deg) 14.22	0.90



ก) ระนาบ H-plane



ข) ระนาบ E-plane

ภาพประกอบที่ 4.60 ผลการทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ
4x4 MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) conformal phased array

ต้นแบบสายอากาศ MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$) Conformal phased array ขนาด 4X4 องค์ประกอบ ให้คุณสมบัติ Constant gain ปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ การลดลงของอัตราขยายขณะปรับลำคลื่นต่ำกว่า 3 dB และคุณสมบัติความแม่นยำการชี้ทิศทางที่สูง โดยมีค่าความคาดเคลื่อนในการชี้ทิศทางเพียงแค่ 2.22 %

4.5 สรุป

บทความนี้นำเสนอการลดขนาดของสายอากาศ ซึ่งพัฒนามาจากสายอากาศแถวลำดับ SCPA ($R = 30\text{mm}$) หรือ SCPA ($R = 30\text{mm}$) - Planar phased array จากบทก่อนหน้า องค์ประกอบของต้นแบบแถวลำดับดังกล่าวมีขนาดใหญ่ เมื่อนำมาจัดเรียงเป็นแถวลำดับสามารถจัดเรียงโดยไม่เกิดการทับซ้อนขององค์ประกอบมีระยะห่างเท่ากับ $0.60\lambda_0$ เมื่อปรับลำคลื่นไปยังมุมต่างๆ สายอากาศให้คุณสมบัติ Constant gain แต่อย่างไรก็ตาม มีความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 22.22% เป็นผลจาก

ระดับของ Grating lobe ที่สูงเกิดจากระยะห่างขององค์ประกอบมากกว่า $0.50\lambda_0$ ดังนั้นในบทนี้เสนอ การลดขนาดสายอากาศเพื่อให้สามารถจัดเป็นแถวลำดับใหม่แล้วมีระยะระหว่างองค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$ ได้ดังนี้

สายอากาศ 1 องค์ประกอบ

ผู้วิจัยเริ่มต้นจาก การประยุกต์เทคนิคการลดขนาดด้วยรูป Minkowski fractal กับ สายอากาศขนาด 1 องค์ประกอบ ซึ่งผู้วิจัยยังคงใช้โครงสร้างสายอากาศเดิมเหมือนกับบทก่อนหน้า เป็น สายอากาศแพทช์ช่องเปิด คือสายอากาศแพทช์ SPPA และสายอากาศแพทช์ SCPA เมื่อลดขนาดลงแล้ว จะได้เป็น สายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และ สายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ตามลำดับ โดยขนาดพื้นที่ ของสายอากาศลดลง มีขนาดพื้นที่เท่ากับ $59.57 \times 60.12 \text{ mm}^2$ ซึ่งสามารถลดขนาดพื้นที่ลง 37% จาก เดิมมีขนาดพื้นที่ $90 \times 110 \text{ mm}^2$ โดยสายอากาศหลังลดขนาดแล้วมีขนาดพื้นที่เป็น 63% ของสายอากาศ ก่อนลดขนาดจากบทก่อนหน้า

การจำลองสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และ MKF-SCPA ให้ผลดังนี้ สายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ให้ขนาดลำคลื่นกว้างกว่า สายอากาศแพทช์ MKF-SPPA และการลดขนาดรัศมีของ สายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ส่งผลให้ขนาดลำคลื่นกว้างขึ้น ซึ่งผู้วิจัยต้องการสายอากาศแพทช์หนึ่ง องค์ประกอบที่ให้ขนาดลำคลื่นกว้างที่สุดคือ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) อย่างไรก็ตามผู้วิจัยทำการสร้าง ต้นแบบสองขนาด คือสายอากาศแพทช์ MKF-SPPA รัศมีเท่ากับอนันต์ และสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบ

สายอากาศแถวลำดับ 4X1 องค์ประกอบ

ในลำดับถัดมา นำองค์ประกอบที่มีรัศมีต่างๆ ได้แก่ Planar, 60mm, 45mm และ 30mm จัดเรียงเป็นสายอากาศ Planar phased array และสายอากาศ Conformal phased array ขนาดเท่ากับ 4X1 องค์ประกอบ เพื่อจำลองคุณลักษณะของสายอากาศ โดยพิจารณาค่า Directivity ใน ตำแหน่งมุมต่างๆ (มุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา) คำนวณค่าความแตกต่างของ Directivity สูงสุด เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติ Constant gain หรือ Gain reduction ของแถวลำดับต้อง ไม่เกิน 3 dB และความแม่นยำในการชี้ทิศทางของลำคลื่น โดยผู้วิจัยเปรียบเทียบผลการจำลอง

ระหว่างสายอากาศ Planar phased array ระหว่างก่อนและหลังลดขนาดองค์ประกอบ และการเปรียบเทียบผลของแถวลำดับที่ถูกลดขนาดลงแล้ว ที่มีการจัดเรียงต่างกัน คือ สายอากาศ Planar phased array และสายอากาศ Conformal phased array ดังนี้

ผลการจำลองเปรียบเทียบของ สายอากาศ Planar phased array ระหว่างองค์ประกอบ ก่อนลดขนาดและภายหลังการลดขนาด ด้วยวิธีรูป Minkowski fractal จากเดิมที่จัดเรียงแถวลำดับได้ ระยะขององค์ประกอบเท่ากับ $0.60\lambda_0$ สามารถจัดเรียงเป็นระยะขององค์ประกอบใหม่ได้เท่ากับ $0.50\lambda_0$ ที่ความถี่ 2.45 GHz

จากผลการจำลอง สายอากาศ Planar phased array ที่องค์ประกอบถูกลดขนาดแล้ว ให้คุณสมบัติ Constant gain และความแม่นยำการชี้ทิศทางดีกว่า สายอากาศแถวลำดับที่องค์ประกอบก่อนลดขนาด นอกจากนี้สามารถลดระดับของโลบข้างลงได้จากเดิมมีโลบข้างเท่ากับ -13.00 dB สามารถลดระดับของโลบข้างลงเหลือเท่ากับ -14.58 dB

ผลการจำลองเปรียบเทียบของ สายอากาศ Planar phased array และสายอากาศ Conformal phased array โดยที่องค์ประกอบถูกลดขนาดด้วยวิธีรูป Minkowski fractal

สายอากาศแถวลำดับ Conformal ให้คุณสมบัติ Constant gain และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางดีกว่า สายอากาศแถวลำดับ Planar และการลดขนาดรัศมีของสายอากาศแถวลำดับ Conformal สามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติ Constant gain และมีความแม่นยำการชี้ทิศทาง นอกจากนี้ขนาดลำคลื่นขององค์ประกอบ ก็ส่งผลต่อสมบัติ Constant gain และความแม่นยำการชี้ทิศทางด้วยเช่นกัน โดยองค์ประกอบที่มีขนาดลำคลื่นกว้างช่วยเพิ่มให้คุณสมบัติทั้งสองข้างต้นมากขึ้นด้วยเช่นกัน

ดังนั้นผู้วิจัยเลือก องค์ประกอบที่มีขนาดลำคลื่นกว้างคือสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R=30$ mm) และจัดเรียงแถวลำดับแบบ Conformal phased array รัศมีแถวลำดับโค้งเท่ากับ $2.00\lambda_0$ จะได้เป็นสายอากาศ MKF-SCPA ($R = 30$ mm) Conformal phased array มีคุณสมบัติ Constant gain มีค่าความแตกต่างของอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 0.92 dB และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางสูง มีความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 2.22% นอกจากนี้เป็นสายอากาศแถวลำดับประเภท High gain (Gain > 10 dB)

การสร้างต้นแบบสายอากาศ ผู้วิจัยสร้างต้นแบบ 3 โครงสร้าง ได้แก่ สายอากาศ 4X1 MKF-SPPA Planar phased array, สายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R= 30\text{mm}$) Planar phased array และสายอากาศ 4X1 MKF-SCPA ($R= 30\text{mm}$) Conformal phased array เพื่อใช้สำหรับการเปรียบเทียบ โดยให้ผลการทดสอบสอดคล้องกับผลการจำลอง

สายอากาศแถวลำดับ 4X4 องค์ประกอบ

แต่อย่างไรก็ตามต้นแบบสายอากาศ MKF-SCPA ($R= 30\text{mm}$) Conformal phased array ที่มีขนาดเพียง 4X1 องค์ประกอบข้างต้นนี้ สามารถให้อัตราประมาณ 10 dBi ตลอดทุกช่วงการปรับลำคลื่น ซึ่งจากการคำนวณ Power budget สายอากาศแถวลำดับควรมีอัตราขยายอย่างน้อย 13 dBi

ดังนั้นผู้วิจัย เพิ่มองค์ประกอบของแถวลำดับให้มีขนาดเท่ากับ 4X4 องค์ประกอบ โดยมีระยะห่างขององค์ประกอบในแนว Circumferential เท่ากับ $0.50\lambda_0$ และระยะห่างขององค์ประกอบในแนวแกน Y เท่ากับ $0.75\lambda_0$ ซึ่งการเพิ่มองค์ประกอบในแนวแกน Y นอกจากจะช่วยเพิ่มอัตราขยายแล้วยังช่วยปรับลำคลื่นแนวมุมยกให้แคบลง ทำให้ขนาดลำคลื่นพอดีกับขนาดความกว้างของรันเวย์

จากผลการทดสอบให้ผลสอดคล้องกับผลการจำลอง สายอากาศ 4X4 MKF-SCPA ($R= 30\text{mm}$) Conformal phased array ให้อัตราขยายเท่ากับ 15.12 dBi มีขนาดลำคลื่นในระนาบ H-plane เท่ากับ 30.00 องศา และในแนว E-plane มีขนาดเท่ากับ 15.00 องศา ซึ่งลำคลื่นของสายอากาศสามารถแผ่กำลังงานครอบคลุมพื้นที่ด้านกว้างของรันเวย์ได้ที่มีขนาดกว้างเท่ากับ 45 m มีระยะที่ไกลที่สุดเท่ากับ 244 m เมื่อต้องปรับลำคลื่นไปยังมุม ± 45 องศา ซึ่งสายอากาศสามารถแผ่กำลังงานไปได้ระยะไกลที่สุดเท่ากับ 271 m ต้นแบบสายอากาศให้มีความคงที่ Constant gain มีความแตกต่างของอัตราขยายสูงสุดน้อยกว่า 3 dB มีค่าเท่ากับ 1.01 dB และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางสูง มีความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเพียง 2.22 %

บทที่ 5 สรุป และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม ในเขตพื้นที่การบิน ประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ มีหลักการทำงานเช่นเดียวกับเรดาร์ โดยอาศัยการสะท้อนกลับของคลื่นจากวัตถุเป้าหมาย นำสัญญาณมาประมวลผลภาพสามารถสร้างเป็นภาพสองมิติที่มีความละเอียดสูง ซึ่งสายอากาศที่ออกแบบเป็น สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปทำงานบนย่านความถี่ S-Band (2.45 GHz) แต่ละขององค์ประกอบของแถวลำดับเป็นสายอากาศแพทช์แบบคงรูป ที่มีโครงสร้างโค้งงอ ให้คุณสมบัติลำคลื่นกว้าง ส่งผลให้เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับแล้ว ถูกปรับลำคลื่นทางไฟฟ้าด้วยวงจรเลื่อนเฟส สายอากาศแถวลำดับนี้ให้คุณสมบัติ Constant gain มีค่าความแตกต่างของอัตราขยายไม่เกิน 3 dB และมีความแม่นยำในการชี้ทิศทางที่สูง ขณะปรับลำคลื่นไปยังทิศทางต่างๆ

ภายในงานวิจัยนี้นำเสนอ การออกแบบ, จำลอง, สร้าง และทดสอบสายอากาศ จำนวน 2 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ 1. สายอากาศแถวลำดับ Suspended conformal patch antenna - planar phased array คือสายอากาศแถวลำดับที่จัดเรียงแถวลำดับในลักษณะ Planar โดยที่แต่ละองค์ประกอบเป็นสายอากาศ Suspended conformal patch antenna หรือ SCPA และ 2. สายอากาศแถวลำดับ Minkowski Fractal Suspended Conformal patch antenna - Conformal phased array คือสายอากาศลำดับที่จัดเรียงแถวลำดับในลักษณะ Conformal โดยที่แต่ละองค์ประกอบเป็นสายอากาศ Minkowski Fractal Suspended Conformal patch antenna หรือ MKF-SCPA โดยสายอากาศแถวลำดับนี้ เป็นสายอากาศที่พัฒนามากจาก SCPA - Planar phased array เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ

อย่างไรก็ตาม ก่อนการออกแบบสายอากาศ ผู้วิจัยคำนวณ Power budget ภายในระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม เพื่อทราบถึงอัตราขยายที่น้อยที่สุดที่ระบบสามารถยังคงทำงานได้ และ อยู่ภายใต้กฎและข้อบังคับมาตรฐานการบิน จากการคำนวณสายอากาศควรมีอัตราขยายอย่างน้อย 13 dBi ดังนั้นต้นแบบสายอากาศแถวลำดับควรมีมากกว่า 13 dBi

5.1 สายอากาศ 4X1 SCPA ($R = 30\text{mm}$)-Planar phased array

สายอากาศแถวลำดับ SCPA-planar phased array คือแต่ละองค์ประกอบเป็นสายอากาศแพทช์ช่องเปิดแบบโค้ง (Suspended conformal patch antenna, SCPA) ที่รัศมีขององค์ประกอบเท่ากับ 30 mm โดยขนาดของแถวลำดับเท่ากับ 4X1 องค์ประกอบ ซึ่งระยะห่างระหว่างองค์ประกอบเท่ากับ $0.60\lambda_0$

จากผลจำลองและทดสอบสายอากาศให้ผลที่สอดคล้องกัน ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยายสูงสุดที่ตำแหน่งมุม 0 องศาเท่ากับ 11.83 dBi เมื่อปรับลำคลื่นไปยังทิศทางต่างๆ คือ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ต้นแบบสายอากาศนี้ให้คุณสมบัติ Constant gain มีค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดน้อยกว่า 3 dB โดยที่ตำแหน่งมุมที่สนใจ (Desired direction) ได้แก่ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา เท่ากับ 2.72 dB และที่ตำแหน่ง Peak direction คือตำแหน่งมุมที่ลำคลื่นของสายอากาศสามารถปรับไปได้มีค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน เท่ากับ 1.77 dB

แต่อย่างไรก็ตาม ต้นแบบสายอากาศข้างต้นนี้ ยังคงมีความคาดเคลื่อนในการชี้ทิศทางค่อนข้างสูง เมื่อปรับลำคลื่นไปยังทิศทาง 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ต้นแบบสายอากาศนี้สามารถปรับไปได้เพียง 0 องศา, 13 องศา, 25 องศา และ 35 องศา มีความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 22.22% เป็นผลจากการจัดเรียงแถวลำดับที่ระยะห่างขององค์ประกอบมากกว่า $0.50\lambda_0$ ส่งผลให้เกิดปัญหา Grating lobe มีระดับโลบข้างสูงเท่ากับ -13.00 dB ขนาดองค์ประกอบมีขนาดเท่ากับ $90 \times 110 \text{ mm}^2$ เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับแล้ว มีระยะห่างขององค์ประกอบที่น้อยที่สุดที่ไม่ซ้อนทับกันเพียงเท่ากับ $0.60\lambda_0$

ดังนั้น เพื่อลดความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทางของสายอากาศแถวลำดับนี้ ผู้วิจัยจำเป็นต้องลดขนาดขององค์ประกอบลง เพื่อให้สามารถจัดเรียงเป็นแถวลำดับใหม่แล้ว มีระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$ ที่ความถี่ 2.45 GHz นั่นคือขนาดขององค์ประกอบจะต้องไม่เกิน 61.22 mm

5.2 สายอากาศแถวลำดับ 4X4 MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$) Conformal phased array

ในลำดับถัดไปเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของต้นแบบสายอากาศ SCPA ($R = 30\text{mm}$) - Planar phased array ให้มีความแม่นยำการชี้ทิศทางเมื่อปรับลำคลื่นมากขึ้น ดังนั้นต้องผลจาก Gating lode ซึ่งต้องลดขนาดขององค์ประกอบให้เล็กลง เมื่อจัดเรียงเป็นแถวลำดับแล้วมีระยะห่างขององค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$ ผู้วิจัยประยุกต์ใช้เทคนิคการลดขนาดสายอากาศด้วยวิธีรูป Minkowski Fractal

การลดขนาดสายอากาศด้วยวิธีรูป Minkowski Fractal คือการเพิ่มร่องที่ขอบของด้านกว้างและด้านยาวของสายอากาศแพทช์ สามารถเพิ่มขนาดทางไฟฟ้าโดยเพิ่มการไหลของกระแส ส่งผลให้ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศถูกเลื่อนไปยังความถี่ต่ำ ดังนั้นจึงสามารถลดขนาดทางกายภาพของสายอากาศได้ เรียก องค์ประกอบ SCPA ที่ถูกลดขนาดด้วยวิธีรูป Minkowski Fractal ว่า สายอากาศแพทช์ Minkowski Fractal Suspended conformal patch antenna หรือ MKF-SCPA

สายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ที่ถูกลดขนาดแล้วมีขนาดพื้นที่เท่ากับ $59.57 \times 60.12 \text{ mm}^2$ มีขนาดเล็กลงจากต้นแบบสายอากาศแพทช์ SCPA ที่มีขนาดพื้นที่เท่ากับ $90 \times 110 \text{ mm}^2$ ขนาดพื้นที่เล็กลงเท่ากับ 37% หรือมีขนาดพื้นที่เป็น 63% ของสายอากาศแพทช์ SCPA และสามารถนำมาจัดเรียงเป็นสายอากาศแถวลำดับที่มีระยะขององค์ประกอบเท่ากับ $0.50\lambda_0$ ได้ และนอกจากนี้สามารถลดระดับของโลบข้างลงเหลือ -14.52 dB ซึ่งลดระดับโลบข้างจากเดิมของสายอากาศแถวลำดับ SCPA เท่ากับ -13.00 dB

นำสายอากาศแพทช์ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) จัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ Planar เรียกว่า สายอากาศ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Planar phased array โดยมีขนาด 4X1 องค์ประกอบ จากผลการจำลองและทดสอบสายอากาศให้ผลที่สอดคล้องกัน ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยายสูงสุดที่ตำแหน่งมุม 0 องศาเท่ากับ 11.70 dBi เมื่อปรับลำคลื่นไปยังมุมต่างๆ ได้แก่ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ต้นสายอากาศนี้ให้คุณสมบัติ Constant gain ที่ตำแหน่ง Desired direction ได้แก่ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา มีค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดมีค่าน้อยกว่า 3 dB เท่ากับ 2.02 dB และค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดของตำแหน่ง Peak direction เป็นตำแหน่งมุมที่ลำคลื่นของสายอากาศสามารถชี้ไปได้มีค่าน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน เท่ากับ 1.43 dB และมี

ความแม่นยำการชี้ทิศทางที่แม่นยำขึ้น เมื่อปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ต้นแบบสายอากาศนี้สามารถปรับลำคลื่นไปได้ดังนี้ 0 องศา, 14 องศา, 30 องศา และ 43 องศา มีความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 4.44% ซึ่งเปรียบเทียบกับสายอากาศแถวลำดับ SCPA-Planar phased array ก่อนการลดขนาดแล้ว ต้นแบบสายอากาศนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคุณสมบัติ Constant gain และมีความแม่นยำการชี้ทิศทางมากขึ้น

ในลำดับถัดไป นำสายอากาศ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) มาจัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ Conformal คือจัดเรียงองค์ประกอบเป็นระนาบโค้ง เรียกว่า สายอากาศ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array มีขนาด 4X1 องค์ประกอบ ระยะห่างระหว่างองค์ประกอบในแนว Circumferential เท่ากับ $0.50\lambda_0$ และรัศมีโค้งของแถวลำดับเท่ากับ $2.00\lambda_0$ จากผลการจำลองและผลการทดสอบ สายอากาศแถวลำดับที่จัดเรียงเป็นแถวลำดับแบบ Conformal ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของคุณสมบัติ Constant gain และความแม่นยำการชี้ทิศทางมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ สายอากาศ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Planar phased array

จากผลการทดสอบให้ผลที่สอดคล้องกับผลการจำลอง ต้นแบบสายอากาศนี้ให้อัตราขยายสูงสุดที่ตำแหน่งมุม 0 องศาเท่ากับ 10.58 dBi เมื่อปรับทิศทางของลำคลื่นไปยังมุมต่างๆ ได้แก่ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ที่ตำแหน่ง Desired direction มีค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดมีค่าน้อยกว่า 3 dB เท่ากับ 0.92 dB และที่ตำแหน่ง Peak direction เป็นตำแหน่งมุมที่ลำคลื่นของสายอากาศสามารถปรับไปได้มีค่าน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน เท่ากับ 0.86 dB สำหรับความแม่นยำการชี้ทิศทางเมื่อปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ซึ่งต้นแบบสายอากาศสามารถปรับลำคลื่นไปได้เพียง 0 องศา, 13 องศา, 29 องศา และ 44 องศา มีความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเท่ากับ 2.22%

สายอากาศแถวลำดับ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array ข้างต้นนี้มีขนาดของแถวลำดับเพียง 4X1 องค์ประกอบ ซึ่งให้อัตราขยายตลอดการปรับลำคลื่นทุกทิศทางอยู่ในช่วง 10 dBi แต่อย่างไรก็ตาม จากการคำนวณ Power budget อัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับควรมีอย่างน้อย 13 dBi เพื่อให้ระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนี้สามารถทำงานได้ภายใต้ Margin ของระบบอย่างน้อย 30 dB ดังนั้น จึงเพิ่มขนาดของแถวลำดับเป็นขนาด 4X4 องค์ประกอบ โดยเพิ่ม

องค์ประกอบในแนวระนาบ Y จำนวน 4 องค์ประกอบ เรียกองค์ประกอบในแนวระนาบแกน Y ว่า แถวลำดับย่อย

ภายในสายอากาศแถวลำดับย่อย แต่ละองค์ประกอบถูกจัดเรียงมีระยะเท่ากับ $0.75\lambda_0$ เนื่องจากต้องการเพิ่มอัตราขยายแก่สายอากาศแถวลำดับ ซึ่งการเพิ่มระยะห่างขององค์ประกอบ สามารถเพิ่มอัตราขยายมากขึ้น ที่ระยะเท่ากับ $0.75\lambda_0$ ให้อัตราขยายสูงสุด และมีระดับของโลปข้างก็เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามต้นแบบสายอากาศแถวลำดับนี้ ต้องการปรับลำคลื่นเพียงในแนวมุมกวาดเท่านั้น ดังนั้นการที่แถวลำดับย่อยมีระดับโลปข้างในแนวมุมยกที่สูง จึงไม่มีผลต่อการปรับลำคลื่นในแนวมุมกวาด นอกจากนี้ ขนาดของลำคลื่นของแถวลำดับย่อยในแนวมุมยกถูกบีบให้แคบลง ให้มีขนาดลำคลื่นพอดีกับขนาดความกว้างของรันเวย์ที่มีขนาดเท่ากับ 45 m

จากการทดสอบต้นแบบสายอากาศ MKF-SCPA ($R = 30\text{mm}$) Conformal phased array ขนาด 4X4 องค์ประกอบ ให้ผลที่สอดคล้องกับผลการจำลอง ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยายสูงสุดที่ตำแหน่งมุม 0 องศาเท่ากับ 15.12 dBi มีขนาดลำคลื่นในระนาบ H-plane เท่ากับ 30.00 และ E-plane มีขนาดลำคลื่นเท่ากับ 15.00 องศา เมื่อคำนวณหาพื้นที่ครอบคลุมในแนวมุมยกแล้ว ลำคลื่นของสายอากาศสามารถแผ่กำลังงานครอบคลุมพื้นที่ด้านกว้างของรันเวย์ที่มีเท่ากับ 45 m ได้ โดยมีระยะที่ไกลที่สุดเมื่อต้องปรับลำคลื่นไปยังมุม ± 45 องศา เท่ากับ 244 m สายอากาศสามารถแผ่กำลังงานไปได้ระยะไกลที่สุดเท่ากับ 271 m

เมื่อปรับลำคลื่นต้นแบบสายอากาศไปยังมุมต่างๆ ได้แก่ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ที่ตำแหน่ง Desired direction มีค่าความแตกต่างของค่าอัตราขยายสูงสุดมีค่าน้อยกว่า 3 dB เท่ากับ 1.01 dB และที่ตำแหน่ง Peak direction เป็นตำแหน่งที่ลำคลื่นของสายอากาศสามารถปรับไปได้มีค่าน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน เท่ากับ 0.92 dB สำหรับความแม่นยำการชี้ทิศทางเมื่อปรับลำคลื่นไปยังตำแหน่งมุม 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 45 องศา ซึ่งต้นแบบสายอากาศนี้สามารถปรับไปได้ดังนี้ 0 องศา, 15 องศา, 30 องศา และ 44 องศา มีความคาดเคลื่อนการชี้ทิศทางเพียง 2.22%

สายอากาศที่นำเสนอในวิจัยเล่มนี้คือ สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูป มีชื่อว่า MKF-SCPA ($R=30\text{mm}$) Conformal phased array ขนาด 4X4 องค์ประกอบ โดยผู้วิจัยเริ่มต้นจากการออกแบบสายอากาศขนาดหนึ่งองค์ประกอบก่อน แล้วนำมาจัดเรียงเป็นสายอากาศแถวลำดับ โดยต้นแบบ

สายอากาศแถวลำดับนี้ให้คุณสมบัติ Constant gain มีอัตราขยายลดขณะปรับลำคลื่นไม่เกิด 3 dB และให้ความความแม่นยำการชี้ทิศทางเมื่อปรับลำคลื่น มีความคลาดเคลื่อนการชี้ทิศทางไม่เกิน 20% ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขประเด็นวิจัยที่ผู้วิจัยตั้งไว้ นอกจากนี้ต้นแบบสายอากาศให้อัตราขยายมากกว่า 13 dBi มีเงื่อนไขไปตาม Power budget ของระบบ สามารถนำไปประยุกต์กับระบบเรดาร์ช่องเปิดสังเคราะห์ ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมภายในเขตพื้นที่การบินที่ทำงานย่าน 2.45 GHz ได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 โครงสร้างของต้นแบบสายอากาศ

สายอากาศแถวลำดับแบบคงรูปที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่เป็นโครงสร้างสายอากาศแพทช์โค้งแบบช่องเปิด มีโครงสร้างสายอากาศแพทช์ที่มีการแทรกชั้นอากาศระหว่างชั้นกราวด์กับชั้นวัสดุฐานรอง และโครงสร้างมีลักษณะโค้งงอ โดยแต่ละองค์ประกอบของแถวลำดับนี้ให้คุณสมบัติลำคลื่นกว้าง ซึ่งการลดรัศมีความโค้งของสายอากาศแพทช์โค้งแบบช่องเปิดลง ส่งผลให้ขนาดของลำคลื่นยิ่งกว้างขึ้น ดังนั้นผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุสำหรับชั้นวัสดุฐานรองที่มีความยืดหยุ่น สามารถโค้งงอตามรัศมีที่ต้องการ เลือกใช้เป็นแผ่น Flexible PCB ชนิด FR4 มีความหนาเท่ากับ 0.2 mm และจำเป็นต้องมีโครงสร้าง Support สำหรับโครงสร้างช่องเปิดสำหรับแยกระหว่างชั้นกราวด์กับชั้นวัสดุฐานรองและทำให้โครงสร้างสามารถโค้งได้ ผู้วิจัยเลือกใช้เป็นโมเดลสามมิติที่ถูกสร้างจากเครื่อง 3D Printer

แต่อย่างไรก็ตามด้วยข้อจำกัดของแผ่น Flexible PCB และโครงสร้าง Support ที่สร้างจาก 3D Printer นี้ สามารถทำให้สายอากาศแพทช์นี้โค้งงอที่รัศมีน้อยที่สุดเพียง 30 mm ดังนั้นหากต้องการโครงสร้างสายอากาศที่มีขนาดรัศมีเล็กกว่า 30 mm ควรเปลี่ยนโครงสร้าง Support โดยใช้วิธีการสร้าง Support วิธีอื่นแทน

5.3.2 ความทนกำลังของอุปกรณ์ภายในระบบ (Power handling)

ภายในระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ 1. สายอากาศ 2. วงจรคลื่นวิทยุ และ 3. การประมวลผลภาพ ซึ่งระดับของกำลังงานที่ถูกนำมาใช้ภายใน

ระบบนี้เป็นส่วนที่จำเป็นที่ต้องตรวจสอบ เนื่องจากระดับความทนกำลังงานของแต่ละอุปกรณ์นั้น มีความทนทานของกำลังไม่เท่ากัน เช่น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ วงจรเลื่อนเฟส เป็นต้น

นอกจากนี้ จากการออกแบบระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมเบื้องต้น ผู้วิจัยคำนวณโดยให้มีกำลังงานจากภาคส่งเท่ากับ 30 dBm แต่อย่างไรก็ตามในภายหลังพบว่า วงจรเลื่อนเฟสที่ใช้งานคือ MAPS-010144 Digital Phased Shifter [19] สามารถทนกำลังงานได้น้อยกว่าที่คำนวณไว้ คือ ทนกำลังงานได้ไม่เกิน 25 dBm ดังนั้นเมื่อลดกำลังงานของระบบให้มีกำลังงานส่งเท่ากับ 25 dBm เพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับวงจรเลื่อนเฟสนี้ได้ ระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมนี้ก็ยังคงสามารถทำงานได้ภายใต้ค่า Margin ของระบบซึ่งยังคงมีค่ามากกว่า 30 dB

5.3.3 กำลังงานสูงสุดที่ใช้ในระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมภายในอากาศยาน

กำลังงานสูงสุดสำหรับระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอมภายในอากาศยาน มีขีดจำกัดการแผ่รังสีภายในย่านความถี่ 76–81 GHz ในรูปของกำลังส่งออกอากาศแบบไอโซทรอปิก (Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP) ดังนั้น กำลังงานที่สามารถใช้งานภายในย่านความถี่ 76–81 GHz โดยเฉลี่ยที่ใช้งานทั่วไป 50 dBm และมีกำลังงานไม่เกิน 55 dBm [20]

5.3.4 ความละเอียดของระบบเรดาร์ ขึ้นอยู่กับขนาดลำคลื่นของสายอากาศ

ความละเอียดของระบบเรดาร์ ต่อขนาดลำคลื่นของสายอากาศ มีดังนี้

ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศ คือความกว้างครอบคลุมเชิงมุมของรูปแบบการแผ่กำลังของสายอากาศ ซึ่งสามารถกำหนดขอบเขตเชิงมุมที่สายอากาศสามารถส่งหรือรับสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ความละเอียดของเรดาร์ คือความสามารถของระบบในการแยกแยะระหว่างเป้าหมายหรือตัวสะท้อนที่มีระยะห่างใกล้กัน ระยะห่างที่ใกล้ที่สุดระหว่างสองเป้าหมายที่เรดาร์สามารถแยกออกเป็นวัตถุได้จะเป็นตัวกำหนดความละเอียดของเรดาร์

ความกว้างลำคลื่นของสายอากาศและความละเอียดของเรดาร์โดยทั่วไปแล้วจะแปรผกผันกัน โดยสายอากาศที่มีความกว้างของลำคลื่นที่แคบ (Narrow beamwidth) แสดงถึงคุณสมบัติแบบรูปสายอากาศที่มีทิศทาง (Directional pattern) มีความแม่นยำที่ในการตรวจจับวัตถุแปลกปลอมสูง ในขณะที่สายอากาศที่มีความกว้างของลำคลื่นที่กว้าง (Width beamwidth) จะให้การครอบคลุมที่กว้าง แต่ความไวของการตรวจจับวัตถุแปลกปลอมจะถูกลดลง ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ยังได้คำนวณความละเอียดของระบบเรดาร์ต่อขนาดความกว้างของลำคลื่นในแนวมุมกวาด (Azimuth plane) ถึงระยะห่างที่ใกล้ที่สุดที่ของสองวัตถุเป้าหมายที่เรดาร์สามารถแยกแยะได้

อย่างไรก็ตาม ความละเอียดของเรดาร์ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆ นอกเหนือจากความกว้างลำคลื่นของสายอากาศด้วยเช่นกัน ได้แก่ การออกแบบระบบโดยรวม รวมถึงลักษณะของรูปคลื่น เทคนิคการประมวลผล และอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) โดยปัจจัยเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการกำหนดความละเอียดของเรดาร์

บรรณานุกรม

- [1] FAA, "Airport Foreign Object Debris (FOD) Detection Equipment," U.S. Department of Transportation, AC No:150/5220-24, Sep. 30, 2009. Accessed: Jan. 14, 2021. [Online]. Available: https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5220-24
- [2] L. Werfelman. "New technologies are supplementing traditional methods of keeping foreign object debris off runways." flightsafety.org. <https://flightsafety.org/asw-article/clean-sweep/> [Accessed Jan. 14, 2021]
- [3] FAA. (2014). FOD Detection System [Online]. Available: <https://www.icao.int/MID/Documents/2014/Wildlife%20and%20FOD%20Workshop/Assessing%20Risk%20FAA.pdf> [Accessed Jan. 14, 2021]
- [4] R. Hussin, N. Ismail and S. Mustapa, "A study of foreign object damage (FOD) and prevention method at the airport and aircraft maintenance area," in *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, doi: 152. 012038. 10.1088/1757-899X/152/1/012038.
- [5] RF Microtech, "Antennas and Phased Arrays," RFMicrotech, Available: <https://rfmicrotech.com/products-smart-solutions/antennas-and-phased-arrays/>. [Accessed: Mar. 8, 2021].
- [6] G. L. Charvat, A. J. Fenn and B. T. Perry, "The MIT IAP radar course: Build a small radar system capable of sensing range, Doppler, and synthetic aperture (SAR) imaging," in *2012 IEEE Radar Conf.*, Atlanta, GA, USA, 2012, pp. 0138-0144, doi: 10.1109/RADAR.2012.6212126.
- [7] ICAO, "International Standards and Recommended Practices Aerodromes, Annex 14," July 1951. [Online]. Available: https://www.icao.int/APAC/Meetings/2015%20WAWG1/an14_1ed_1951.pdf.
- [8] A. Zozaya and P. Del Pino, "Design of an antenna array for a LFM-CW synthetic aperture radar prototype," in *Dyna.*, (Medellin, Colombia), Feb. 2020, pp 96-110, doi: 10.15446/dyna.v87n212.79862

- [9] K. Mazouni et al., "76.5 GHz millimeter-wave radar for Foreign Object Debris detection on airport runways," in *2011 8th European Radar Conf.*, Manchester, UK, 2011, pp. 222-225.
- [10] K. S. Beenamole, C. A. Sreejith and G. Shankar, "Studies on conformal antenna arrays placed on cylindrical curved surfaces," in *2016 International Symposium on Antennas and Propagation (APSYM)*, Cochin, 2016, pp. 1-3, doi: 10.1109/APSYM.2016.7929157.
- [11] K. S. Beenamole, R. Samminga, P. Dongaonkar, F. A.M. and A. Meena, "Conformal Antenna Arrays Placed on Cylindrical Curved Surfaces for Radar Applications," in *2019 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation (InCAP)*, Ahmedabad, India, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/InCAP47789.2019.9134621.
- [12] P. Knott, T. Bertuch, H. Wilden, O. Peters, A. R. Brenner, I. Walterscheid, "SAR Experiments Using a Conformal Antenna Array Radar Demonstrator", in *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2012, Article ID 142542, 7 pages, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/142542>
- [13] P. Delos, B. Broughton, and J. Kraft, "Phased Array Antenna Patterns-Part 1: Linear Array Beam Characteristics and Array Factor," Feb. 26,2021. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/phased-array-antenna-patterns-part1.html>
- [14] M. Skolnik, "Radar Handbook," 2nd ed. New York, USA: McGraw-Hill Education, 2008.
- [15] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and design*. John Wiley and Sons, 2005.
- [16] B. Tumsuk. (2018) RADAR PRINCIPLE [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/basicradarnavy/paper>. [Accessed: Mar. 8, 2021].
- [17] R. Colella, F. P. Chietera, and L. Catarinucci, "Analysis of FDM and DLP 3D-Printing Technologies to Prototype Electromagnetic Devices for RFID Applications," *Sensors*, vol. 21, no. 3, p. 897, Jan. 2021.

- [18] S. Dhar, R. Ghatak, B. Gupta and D. R. Poddar, "A Wideband Minkowski Fractal Dielectric Resonator Antenna," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 6, pp. 2895-2903, June 2013, doi: 10.1109/TAP.2013.2251596.
- [19] MACOM. MAPS-010144 - 4-Channel EML Driver and CDR. [Online]. Available: <https://www.macom.com/products/product-detail/MAPS-010144>. Accessed: June 6, 2023.
- [20] Title 47 - Telecommunication, Chapter I - Federal Communications Commission, Subchapter D - Part 95 - Personal Radio Services," Electronic Code of Federal Regulations (ECFR) - Title 47. Available online: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-95/subpart-M/subject-group-ECFR938fd48a3f538f7/section-95.3367>. Accessed: June 5, 2023.
- [21] CAAT, "VTSS-Songkhla / Hat Yai International Airport," [Online]. Available: <https://aip.caat.or.th/2019-11-07-AIRAC/html/eAIP/VT-AD-2.VTSS-en-GB.html>. Accessed: Feb. 26, 2021.
- [22] ICAO, "Aerodromes, Annex 14," July 2016. [Online]. Available: <https://www.pilot18.com/wp-content/uploads/2017/10/Pilot18.com-ICAO-Annex-14-Volume-1-7th-Edition-2016.pdf>. Accessed: Feb. 26, 2021.
- [23] ข้อกำหนดของสำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย, ฉบับที่ 14, Feb. 26. [Online]. Available: <https://www.caat.or.th/th/archives/43504>
- [24] *FAA Code of Federal Regulations*, Title 14, Part 77.9, FAA, Feb 2021. [Online]. Available: https://www.customsmobile.com/regulations/title14_chapterI_part77_subpartB_section77.9
- [25] D. Chew and J. Gwee, "iFerret™ intelligent Airfield/Runway Surveillance & Foreign Object & Debris (FOD) Detection System," Feb. 26, 2021. [Online]. Available: <http://fod-detection.com/wp-content/uploads/2009/12/iFerret-at-Changi.pdf>.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

1. ทำอากาศยานชาติขนาดใหญ่

1.1 ลักษณะทางกายภาพของทำอากาศยานขนาดใหญ่

ทำอากาศยานขนาดใหญ่ ประกอบด้วยทางวิ่งหนึ่งทางวิ่งสำหรับให้เครื่องบินขึ้นและลง ซึ่งลักษณะทางกายภาพของทางวิ่งลักษณะโค้งเป็นหลังเต่ามาแนวยาว สำหรับขนาดของลักษณะทางกายภาพของทำอากาศยานขนาดใหญ่ ดังตารางที่ ก1 แสดงขนาดพื้นที่ของแผนผังของทำอากาศยานขนาดใหญ่ และผังภาพประกอบที่ ก1

ตารางที่ ก1 แสดงขนาดของลักษณะทางกายภาพของทำอากาศยานขนาดใหญ่

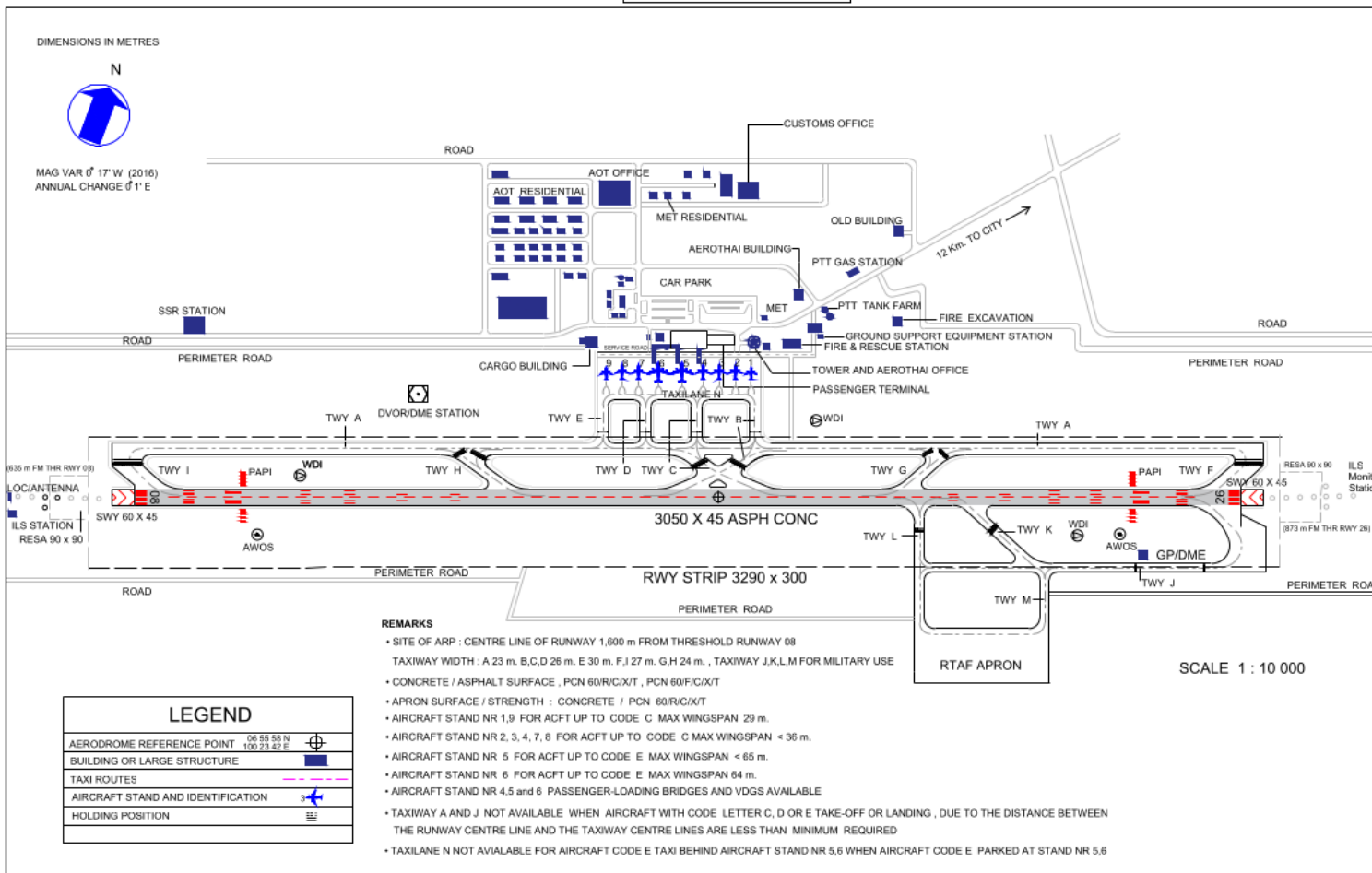
พารามิเตอร์	ขนาด (m ²)
ทางวิ่ง (Runway, RWY)	3050 X 45
พื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่ง (Runway Strip, RWY STRIP)	3290 X 300
พื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่ง (Runway End Safety area, RESA)	90 X 90
ทางหยุด (Stopway, SWY)	60 X 45

AERODROME GROUND MOVEMENT CHART-ICAO

APRON ELEV
90 FT

TWR : 118.1, 275.8
APP : 126.7, 301.5
GND : 121.9, 257.8
EMERGENCY : 121.5, 243.0
ATIS : 128.8

SONGKHLA / Hat Yai Intl



ภาพประกอบที่ ก1 แผนผังพื้นที่เขตการบิน ของท่าอากาศยานหาดใหญ่ [21]

1.2 ระเบียบการจัดการรูปแบบของอากาศยาน

1.2.1 มาตรฐานการบิน ICAO [22], [23]

ในการขนส่งทางอากาศนั้น มีหน่วยงานที่มีหน้าที่กำกับดูแลด้านการบินเพื่อให้ไปในแนวทางเดียวกันมาตรฐานเดียวกัน โดยที่ทั่วโลกเรายึดถือและปฏิบัติตามกฎระเบียบและแนวทางที่ ICAO กำหนดไว้ ICAO คือ องค์การการบินพลเรือนระหว่างประเทศ (International Civil Aviation organization) ซึ่งเป็นหน่วยงานระหว่างประเทศ ที่กำกับดูแลมาตรฐานการบินในระดับนานาชาติ หน้าที่ของ ICAO คือ มุ่งเน้นการวางแผน พัฒนา การขนส่งทางอากาศระหว่างประเทศเพื่อให้เกิดความมั่นใจในความปลอดภัยท่ามกลางการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องในการขนส่งทางอากาศ โดย ICAO ได้จัดทำมาตรฐานและคำแนะนำในการปฏิบัติสำหรับการทำการบินระหว่างประเทศ ในรูปแบบของภาคผนวก โดยมีจำนวน 19 ภาคผนวก หรือที่เรียกว่า Annex เพื่อให้ทุกประเทศที่เป็นสมาชิกของ ICAO นั้น ถือปฏิบัติให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน ประกอบไปด้วยภาคผนวกทั้ง 19 ภาคผนวก โดยใน Annex 14: Aerodromes – อากาศยาน เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ของอากาศยาน สำหรับใช้ในการระบุตำแหน่งพื้นที่ในการติดตั้งระบบเรดาร์ตรวจจับวัตถุแปลกปลอม ซึ่งจากกฎระเบียบข้อบังคับของ ICAO Annex 14 กล่าวว่า “พื้นผิวของทางวิ่ง แหกซี่เวย์ ลานจอดอากาศยาน และพื้นที่ข้างเคียง จะต้องไม่มีหิน หรือวัตถุอื่นๆ ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างเครื่องบินหรือเครื่องยนต์หรือทำให้ระบบการทำงานของเครื่องบินเสียหาย”

คำศัพท์ที่ใช้นิยามตามมาตรฐานการบิน มีดังนี้

ทางวิ่ง (Runway) หมายความว่า พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่กำหนดไว้ในอากาศยาน ซึ่งจัดไว้ สำหรับการบินขึ้นและบินลงของอากาศยาน

พื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่ง (Runway End Safety Area, RESA) หมายความว่า พื้นที่ซึ่งสมมาตรกันรอบแนวเส้นกึ่งกลางทางวิ่งที่ต่อขยายออกไปและอยู่ติดกับจุดสิ้นสุดพื้นที่ปลอดภัย รอบทางวิ่ง ซึ่งมีไว้เพื่อวัตถุประสงค์หลักในการลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายแก่อากาศยาน ที่ลงก่อนถึงทางวิ่ง (undershooting) หรือวิ่งออกนอกทางวิ่ง (overrunning)

พื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่ง (Runway strip) หมายความว่า พื้นที่ที่กำหนดไว้ซึ่งรวมถึงทางวิ่งและทางหยุด (ถ้ามี) ที่กำหนดไว้เพื่อ 1. ลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายแก่อากาศยานที่วิ่งออกนอกทางวิ่ง และ 2. ป้องกันอากาศยานที่บินอยู่เหนือพื้นที่ดังกล่าวระหว่างการปฏิบัติการบินขึ้นหรือการบินลง

ทางหยุด (Stop way) หมายความว่า พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่กำหนดไว้บนพื้นดิน ที่อยู่บริเวณจุดสิ้นสุดระยะทางของทางวิ่งซึ่งได้ประกาศไว้ถึงระยะเหมาะสมสำหรับอากาศยานวิ่งบนพื้น เพื่อบินขึ้น หรือความยาวโทรรา ซึ่งเตรียมไว้เพื่อเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมในการให้อากาศยานหยุด ในกรณีที่ยกเลิกการบินขึ้น

พื้นที่ปลอดสิ่งกีดขวาง (Clearway) หมายความว่า พื้นที่รูปสี่เหลี่ยมมุมฉากที่กำหนดไว้ บนพื้นดินหรือพื้นน้ำภายใต้การควบคุมของเจ้าของหรือผู้ดำเนินการอากาศยาน ซึ่งเลือกหรือเตรียมไว้ เพื่อเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับอากาศยานที่อาจทำการไต่ระดับเบื้องต้นไปยังความสูงเฉพาะเหนือพื้นที่ดังกล่าว

วัตถุแตกหักง่าย (Frangible object) หมายความว่า วัตถุที่มีมวลเบาซึ่งถูกออกแบบมาให้ง่าย ต่อการแตกหัก บิดงอ หรือยืดหยุ่น เมื่อถูกกระแทกหรือชนโดยอากาศยานแล้วก่อให้เกิดอันตราย ต่ออากาศยานน้อยที่สุด

หมวด 1 บททั่วไป

ส่วนที่ 4 รหัสอ้างอิงอากาศยาน (Aerodrome Reference Code)

ข้อ 21 อากาศยานต้องมีรหัสอ้างอิงอากาศยาน ซึ่งประกอบด้วย รหัสตัวเลข (code number) และรหัสตัวอักษร (code letter) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการวางแผนอากาศยาน (aerodrome planning) ทั้งนี้ ต้องเลือกและกำหนดให้สอดคล้องกับลักษณะของอากาศยานที่สั่งอำนวยความสะดวกของอากาศยานนั้น จะรองรับได้

ข้อ 22 รหัสตัวเลขตามข้อ 21 ให้กำหนดโดยอ้างอิงจาก ตารางที่ ก2 ทั้งนี้รหัสตัวเลขนั้น ต้องสอดคล้องกับค่าที่มากที่สุดของความยาวทางวิ่งอ้างอิงของอากาศยาน (aeroplane reference field length) ที่ทางวิ่งนั้นต้องรองรับ ความยาวทางวิ่งอ้างอิงของอากาศยานตามวรรคหนึ่ง ใช้เพื่อการพิจารณากำหนดรหัสตัวเลขเท่านั้น ไม่ได้ใช้เพื่อแสดงความยาวทางวิ่งจริง (actual runway length)

ตารางที่ ก2 รหัสอ้างอิงอากาศยานที่เป็นรหัสตัวเลข

รหัสตัวเลข	ความยาวทางวิ่งอ้างอิงของอากาศยาน
1	น้อยกว่า 800 m
2	800 mขึ้นไป แต่ไม่ถึง 1,200 m
3	1,200 mขึ้นไป แต่ไม่ถึง 1,800 m
4	1,800 mขึ้นไป

หมวด 3 ลักษณะทางกายภาพของอากาศยาน

ส่วนที่ 4 พื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่ง (Runway Strips)

ข้อ 133 ทางวิ่งและทางหยุดใดๆ ที่เชื่อมต่อกับทางวิ่งต้องล้อมรอบด้วยพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่ง

ข้อ 134 พื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งต้องขยายต่อออกไปจากหัวทางวิ่งและยาวเลยปลายทางวิ่งหรือทางหยุดไม่น้อยกว่าระยะทาง ดังต่อไปนี้

- 1) 60 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 2, 3 หรือ 4
- 2) 60 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 1 และเป็นทางวิ่งแบบบินลงด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน
- 3) 30 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 1 และเป็นทางวิ่งแบบบินลงโดยไม่ใช้เครื่องวัดประกอบการบิน

ข้อ 135 พื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งของทางวิ่งแบบพรีซิชั่นและทางวิ่งแบบนอนพรีซิชั่นต้องขยายไปทางด้านข้างแต่ละด้านของเส้นกึ่งกลางทางวิ่งและแนวเส้นกึ่งกลางทางวิ่งที่ต่อขยายออกไปตลอดความยาวของพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งนั้นเป็นระยะทางอย่างน้อย ดังต่อไปนี้

- 1) 140 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 3 หรือ 4
- 2) 70 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 1 หรือ 2

ข้อ 136 พื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งของทางวิ่งแบบบินลงโดยไม่ใช้เครื่องวัดประกอบการบิน ต้องขยายไปทางด้านข้างแต่ละด้านของเส้นกึ่งกลางทางวิ่งและแนวเส้นกึ่งกลางทางวิ่งที่ต่อขยายออกไป ตลอดความยาวของพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งนั้นเป็นระยะทางอย่างน้อย ดังต่อไปนี้

- 1) 75 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 3 หรือ 4
- 2) 40 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 2
- 3) 30 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 1

ข้อ 137 วัตถุใดๆ ที่อยู่ในพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่ง ให้ถือว่าเป็นสิ่งกีดขวาง และอากาศยานต้องเคลื่อนย้ายออกจากพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งนั้น

ข้อ 140 นอกเหนือไปจากเครื่องอำนวยความสะดวกในการเดินอากาศ ประเภททัศนวิสัยหรือวัตถุที่จำเป็นต้องตั้งอยู่บนพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งเพื่อวัตถุประสงค์การใช้งานด้านความปลอดภัยในการปฏิบัติการของอากาศยานซึ่งต้องได้รับการเห็นชอบจากผู้อำนวยการและเป็นไปตามข้อกำหนดเกี่ยวกับวัสดุแตกหักง่าย การทำเครื่องหมายและการติดตั้งไฟตามที่ระบุไว้ในหมวด 5 สิ่งอำนวยความสะดวก สิ่งติดตั้งและอุปกรณ์ พื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งต้องไม่มีวัตถุติดตรึงใดๆ ตั้งอยู่ในพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งภายในระยะ ดังต่อไปนี้

- (1) ภายในระยะ 77.5 m จากเส้นกึ่งกลางทางวิ่งของทางวิ่งแบบพรีซีชัน ประเภทที่หนึ่ง ทางวิ่งแบบพรีซีชัน ประเภทที่สอง หรือทางวิ่งแบบพรีซีชัน ประเภทที่สาม ที่มีรหัสตัวเลขเป็น 4 และมีรหัสตัวอักษรเป็น F หรือ
- (2) ภายในระยะ 60 m จากเส้นกึ่งกลางทางวิ่งของทางวิ่งแบบพรีซีชัน ประเภทที่หนึ่ง ทางวิ่งแบบพรีซีชัน ประเภทที่สอง หรือทางวิ่งแบบพรีซีชัน ประเภทที่สาม ที่มีรหัสตัวเลขเป็น 3 หรือ 4
- (3) ภายในระยะ 45 m จากเส้นกึ่งกลางทางวิ่งของทางวิ่งแบบพรีซีชัน ประเภทที่หนึ่ง ที่มีรหัสตัวเลขเป็น 1 หรือ 2 ภายในระยะตามวรรคหนึ่ง ต้องไม่มีวัตถุเคลื่อนที่ใดๆ อยู่ใน

พื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่ง ในระหว่างที่มีการใช้งานทางวิ่งในการบินขึ้นลงของอากาศยาน

ส่วนที่ 5 พื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่ง (Runway End Safety Areas)

ข้อ 154 อากาศยานต้องจัดให้มีพื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่งในบริเวณจุดสิ้นสุดของพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่ง แต่ละด้าน

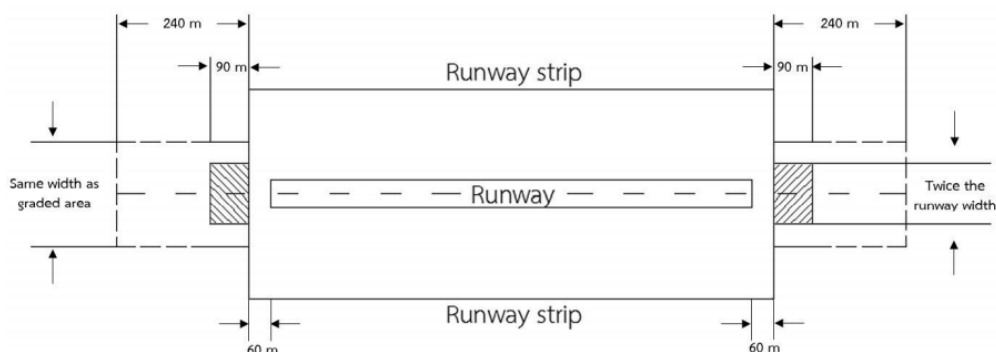
ข้อ 155 พื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่งต้องต่อขยายจากบริเวณจุดสิ้นสุดพื้นที่ปลอดภัยรอบทางวิ่งออกไปเป็นระยะอย่างน้อย ดังต่อไปนี้

- (1) 240 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 3 หรือ 4 ตาม ภาพประกอบที่ ก2
- (2) 120 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 1 หรือ 2 และเป็นทางวิ่งแบบบินลงด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน
- (3) 30 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 1 หรือ 2 และเป็นทางวิ่งแบบบินลงโดยไม่ใช้เครื่องวัดประกอบการบิน

หากไม่สามารถจัดให้มีพื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่งตามวรรคหนึ่ง (1) หรือ (2) ได้ อากาศยาน ต้องติดตั้งระบบช่วยชะลอความเร็วและหยุดอากาศยานที่วิ่งเลยออกนอกทางวิ่ง ซึ่งต้องได้รับความเห็นชอบจากผู้อำนวยการก่อนการติดตั้ง ในการติดตั้งระบบดังกล่าว อากาศยานต้องคำนึงถึงข้อกำหนดเกี่ยวกับ การใช้งานพื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่งโดยอากาศยานที่ลงก่อนถึงทางวิ่ง (undershooting) หรือวิ่งออกนอกทางวิ่ง (overrunning) ด้วย ทั้งนี้ ไม่ว่าจะกรณีใด พื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่งต้องมีความยาวไม่น้อยกว่าระยะ ดังต่อไปนี้

- (1) 90 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 3 หรือ 4
- (2) 90 m สำหรับทางวิ่งที่มีรหัสตัวเลขเป็น 1 หรือ 2 และเป็นทางวิ่งแบบบินลง ด้วยเครื่องวัดประกอบการบิน

ข้อ 157 วัตถุที่อยู่ในพื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่งให้ถือว่าเป็นสิ่งกีดขวาง และอากาศยานต้องเคลื่อนย้ายออกจากพื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่งนั้น



ภาพประกอบที่ ก2 พื้นที่ปลอดภัยปลายทางวิ่งสำหรับทางวิ่ง [23]

ส่วนที่ 6 พื้นที่ปลอดภัยกลาง (Clearways)

ข้อ 163 หากอากาศยานจัดให้มีพื้นที่ปลอดภัยกลางพื้นที่ปลอดภัยกลางนั้นต้องเริ่มต้น ที่จุดสิ้นสุดของความยาวโทรา

ข้อ 164 ความยาวของพื้นที่ปลอดภัยกลางต้องไม่เกินครึ่งหนึ่งของความยาวโทรา

ข้อ 165 พื้นที่ปลอดภัยกลางต้องขยายไปทางด้านข้างแต่ละด้านของแนวเส้นกึ่งกลางทางวิ่งที่ต่อขยายออกไปเป็นระยะทางอย่างน้อย 75 m

ข้อ 168 วัตถุที่อยู่ในพื้นที่ปลอดภัยกลางที่อาจเป็นอันตรายต่ออากาศยานในอากาศให้ถือว่าเป็นสิ่งกีดขวาง และต้องเคลื่อนย้ายออกจากพื้นที่ปลอดภัยกลางนั้น

ส่วนที่ 7 ทางหยุด (Stopways)

ข้อ 169 ในกรณีที่อากาศยานจัดให้มีทางหยุด ทางหยุดนั้นต้องมีความกว้างเท่ากับความกว้าง ของทางวิ่งที่เชื่อมต่อกัน

1.2.2 กฎระเบียบตาม FAA [24]

กฎระเบียบข้อบังคับ เกี่ยวกับความสูงของสิ่งกีดขวาง หรือการก่อสร้างที่อยู่รอบอากาศยาน จะต้องเป็นไปตาม FAA จาก Title 14 : Aeronautics and Space Chapter I > Part 77 > Subpart B - Notice Requirements > § 77.9 - Construction or alteration requiring notice.

ข้อกำหนดของ 77.9 - Construction or alteration requiring notice.

การยื่นเรื่องแจ้งขออนุญาต กรณีที่มีสิ่งก่อสร้าง หรือการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกิดขึ้น กรณีที่จะทำการก่อสร้าง หรือการเปลี่ยนแปลงประเภทใดๆ ก็ตาม จะต้องทำการยื่นเรื่องแจ้งต่อหน่วยงาน FAA

If requested by the FAA, or if you propose any of the following types of construction or alteration, you must file notice with the FAA of:

- a) Any construction or alteration that is more than 200 ft. AGL at its site.
- b) Any construction or alteration that exceeds an imaginary surface extending outward and upward at any of the following slopes:
 - 1) 100 to 1 for a horizontal distance of 20,000 ft. from the nearest point of the nearest runway of each airport described in paragraph (d) of this section with its longest runway more than 3,200 ft. in actual length, excluding heliports.
 - (2) 50 to 1 for a horizontal distance of 10,000 ft. from the nearest point of the nearest runway of each airport described in paragraph (d) of this section with its longest runway no more than 3,200 ft. in actual length, excluding heliports.
 - (3) 25 to 1 for a horizontal distance of 5,000 ft. from the nearest point of the nearest landing and takeoff area of each heliport described in paragraph (d) of this section.

c) Any highway, railroad, or other traverse way for mobile objects, of a height which, if adjusted upward 17 feet for an Interstate Highway that is part of the National System of Military and Interstate Highways where overcrossings are designed for a minimum of 17 feet vertical distance, 15 feet for any other public roadway, 10 feet or the height of the highest mobile object that would normally traverse the road, whichever is greater, for a private road, 23 feet for a railroad, and for a waterway or any other traverse way not previously mentioned, an amount equal to the height of the highest mobile object that would normally traverse it, would exceed a standard of paragraph (a) or (b) of this section.

d) Any construction or alteration on any of the following airports and heliports:

1) A public use airport listed in the Airport/Facility Directory, Alaska Supplement, or Pacific Chart Supplement of the U.S. Government Flight Information Publications.

2) A military airport under construction, or an airport under construction that will be available for public use;

3) An airport operated by a Federal agency or the DOD.

3) An airport or heliport with at least one FAA-approved instrument approach procedure.

e) You do not need to file notice for construction or alteration of:

1) Any object that will be shielded by existing structures of a permanent and substantial nature or by natural terrain or topographic features of equal or greater height and will be located in the congested area of a city, town, or settlement where the shielded structure will not adversely affect safety in air navigation.

2) Any air navigation facility, airport visual approach or landing aid, aircraft arresting device, or meteorological device meeting FAA-approved siting criteria or an

appropriate military service siting criterion on military airports, the location and height of which are fixed by its functional purpose.

3) Any construction or alteration for which notice is required by any other FAA regulation.

4) Any antenna structure of 20 feet or less in height, except one that would increase the height of another antenna structure.

1.2.3 คลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ภายในอากาศยาน [21]

ความถี่ที่ถูกใช้งานภายในอากาศยาน สำหรับใช้งานในการสื่อสารภายในอากาศยาน และสำหรับการนำทาง (Navigation) และการบินลงของอากาศยาน (landing) แสดงดังตารางที่ ก3 และ ตารางที่ ก4 ตามลำดับ

ตารางที่ ก3 คลื่นความถี่ที่ใช้สำหรับการสื่อสารของท่าอากาศยานขนาดใหญ่

Service designation	Call sign	Frequency	Hours of operation
APP	Hat Yai Approach	126.7 MHZ 301.5 MHZ	H24
TWR	Hat Yai Tower	118.1 MHZ 121.5* MHZ 275.8 MHZ 243.0* MHZ	H24
GND	Hat Yai Ground	121.9 MHZ 257.8 MHZ	H24
ATIS	Hat Yai Intl. Airport	128.8 MHZ	H24

หมายเหตุ * คือ Emergency Frequency

ตารางที่ ก4 คลื่นความถี่ที่ใช้สำหรับระบบนำทางและการบินลง ภายในท่าอากาศยานหาดใหญ่

Type of aid, MAG VAR CAT of ILS/MLS	ID	Frequency	Hours of operation
DVOR/DME	HTY	115.3 MHZ CH100X	H24
ILS CAT I LOC/DME RWY 26	IHTY	109.9 MHZ CH36X	H24
GP	IHTY	333.8 MHZ	H24
TACAN	HTY	115.70 MHZ CH104X	23.00-11.00 Daily

ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

ข.1 บทความวิจัยเสนอในที่ประชุมวิชาการและมีการพิมพ์รวมเล่ม

S. Meerabeab, V. Jantarachote and P. Wouchoum, "Design and Parametric Study of a Suspended Conformal Patch Antenna," *2022 19th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Prachuap Khiri Khan, Thailand, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECTI-CON54298.2022.9795443.

Design and Parametric Study of a Suspended Conformal Patch Antenna

Saowapa Meerabeab, Vasan Jantarachote and Phairote Wouchoum
 Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
 Prince of Songkla University (PSU), Thailand
 6310120023@psu.ac.th, vasan.j@psu.ac.th, phairote.w@psu.ac.th

Abstract— In this paper, a suspended conformal patch antenna (SCPA) is presented for improving the radiation pattern and gain of the phased antenna array. The antenna structure is designed by using a rectangular patch operating at 2.45 GHz. The combination of FR4 substrate and air-gap is used to enhance the antenna gain with the compact size. The simulation of the antenna was done based on CST Microwave Studio 2021. The parametric study of the proposed antenna such as reflection coefficient, radiation pattern, and gain with various radii of curvatures are also demonstrated. The simulated and measured results of the proposed antenna are also compared with a suspended planar patch antenna (SPPA). The results show that the antenna beamwidth increases with decreasing the radius of curvature. The single patch of SCPA purposes to obtain the unidirectional pattern and wide-beamwidth antenna, which is appropriate for a constant-gain phased antenna array.

Keywords— patch antenna, suspended antenna, conformal antenna, antenna beamwidth, array antenna

I. INTRODUCTION

An antenna array is one type of antenna that is widely used in wireless communication systems. This antenna is a combination of multielement or array. The array can enhance gain without increasing the electrical antenna size. The radiation pattern of the array is determined by the vector addition of the fields radiated by the individual element [1], or the multiples of element factor and array factor. The element factor is the radiation of a single element in the arrays. The array factor is calculated based on the array geometries such as phase, amplitude, and spacing between the elements. In addition, the antenna array controls the direction without moving the antenna by feeding the phased to each element. In general, the linear planar antenna array that feeds the same amplitude and phase of each element. For a narrow-beamwidth antenna element, the radiation pattern has a beam pointing error and the gain will decrease when switching the direction near the horizon direction [2]. Therefore, a wide-beamwidth antenna element can decrease beam pointing error and yield the constant gain of the array when pointing in the prescribed direction. The conformal patch antenna that conforms on the curved surface which has a wider beamwidth than the conventional patch antenna [3]. The suspended structure is capable to improve the gain and impedance bandwidth of the patch antenna by inserting the air gap between the substrate and ground plane [4],[5].

This paper proposes to design a single element of antenna array which is a suspended conformal patch antenna (SCPA). This antenna is capable to design a high gain and wide beamwidth which depends on the radius of curvature of the patch antenna. The antenna array, which each element has a wide beamwidth, can reduce the beam pointing error and has a constant-gain when steering the direction from broadsight. Antenna design and structure of a single patch is present in Section II. Section III presents the results of simulation and

measurement of a single patch antenna. The simulated result of antenna array is shown in Section IV.

II. ANTENNA DESIGN AND STRUCTURE

This section presents the antenna design and structure of a single patch antenna, which is an SCPA and an SPPA. A rectangular conducting patch of length L and width W is fed by microstrip line as shown in Fig. 1. The width of microstrip feeding line is W_f . The inset feed point where the impedance matching is y_0 . The ground length and ground width are L_g and W_g , respectively. The radius of curvature of the conformal patch antenna is R . A substrate material is made from an FR-4 which has a dielectric constant of 4.3 and a loss tangent of 0.025 with a thickness of 0.2 mm. An air-gap between the FR4 substrate and the ground plane is used to achieve a high gain antenna and wider impedance bandwidth.

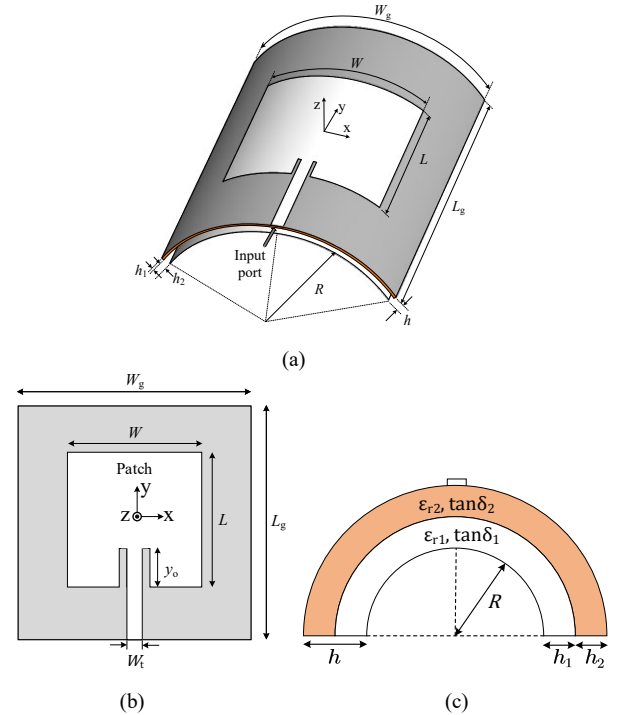


Fig. 1 The structure of the proposed antenna: (a) Perspective view (b) Top view and (c) Front view

The structural parameters of the proposed antenna can be calculated as follows [1]. The equivalent dielectric constant, ϵ_{req} , of the two-layer substrate is calculated by (1)

$$\epsilon_{req} = \frac{\epsilon_{r1}\epsilon_{r2}(h_1+h_2)}{\epsilon_{r1}h_2+\epsilon_{r2}h_1}, \quad (1)$$

where ϵ_{r1} and ϵ_{r2} are the dielectric constant of material 1 and material 2, respectively. h_1 and h_2 are the height of material 1 and material 2, respectively.

The width of the patch can be calculated as the equation:

$$W = \frac{c}{2f_c} \left(\frac{2}{\epsilon_{req+1}} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

where c is the velocity of light, f_c is the operating frequency of antenna.

The effective dielectric constant is given by

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_{req+1}}{2} + \frac{\epsilon_{req-1}}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

The length of the patch can be calculated as the equation:

$$L = \frac{c}{2f_c \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L, \quad (4)$$

where

$$\Delta L = 0.412h \left[\frac{(\epsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{w}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{w}{h}+0.08\right)} \right], \quad (5)$$

and ΔL is the extended incremental length of the patch and h is the height of the substrate. The inset feed point and the width of microstrip feeding line are calculated from [1].

Table I shows the parameters of the antenna from theoretical and optimized values. For all antenna structures (SCPA and SPPA), we use the same dimensions. The simulation of the antenna was done using CST Microwave Studio. The patch layer is a copper sheet with a thickness of 0.035 mm. The ground plane is a copper sheet metal with a thickness of 0.3 mm. The air-gap separates the FR4-substrate and ground plane with a 3D printing with PLA material that has a dielectric constant of 2.54 and a dielectric loss tangent of 0.007 [6]. The 3D printing structure for supporting the air-gap is placed around the antenna which is designed to minimize the effect on antenna efficiency. Some antenna parameters after optimization, which are the width and length of the patch and the inset feed point, are changed according to impedance matching.

TABLE I. THE PARAMETERS OF THE PROPOSED ANTENNA FROM THEORETICAL AND OPTIMIZED VALUES

Parameters	Theoretical value (mm)	Optimized value (mm)
L	55.48	54
W	60.43	51
y_o	13.13	8
h_2	0.2	0.2
h_1	3	3
W_t	4	4
W_g	90	90
L_g	110	110

III. SINGLE PATCH ANTENNA

This section presents the simulated and measured results of the SCPA, which compares the SPPA.

A. Antenna Prototype

From the dimension of the single patch antennas after optimization in Table I, the prototypes of all structures are fabricated and measured to verify the simulation at the

frequency of 2.45GHz. The antenna prototypes, which are the SPPA and SCPA with various radii of curvatures of 30, 45, and 60 mm, are shown in Fig. 2. The measured results, such as the reflection coefficient, radiation pattern, and gain, were done with a Network analyzer.

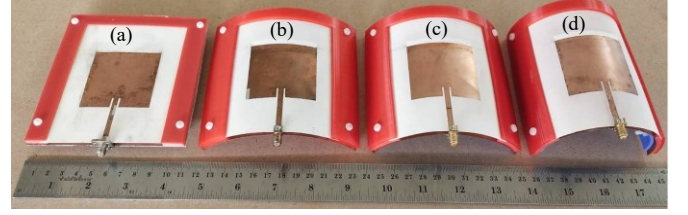


Fig. 2 The antenna prototype: (a) SPPA (b) SCPA, $R = 60$ mm (c) SCPA, $R = 45$ mm and (d) SCPA, $R = 30$ mm.

B. Reflection Coefficient

The simulated results of reflection coefficient of the SPPA and SCPA with various radii of curvatures of 30, 45, and 60 mm are shown in Fig. 3. From the results, it is obviously that the SPPA provides a good impedance matching than the SCPA. The resonant frequency decreases when the decrease of radius of curvatures. However, the simulated results of all the structures are lower than -10 dB, which are operating in frequency band of 2.405-2.485 GHz.

Fig. 4 shows the measured results of the reflection coefficient of the SCPA and SPPA. It is observed that the measured results are in good agreement with the simulated results. However, the simulated results of the reflection coefficient are better than the measurement results.

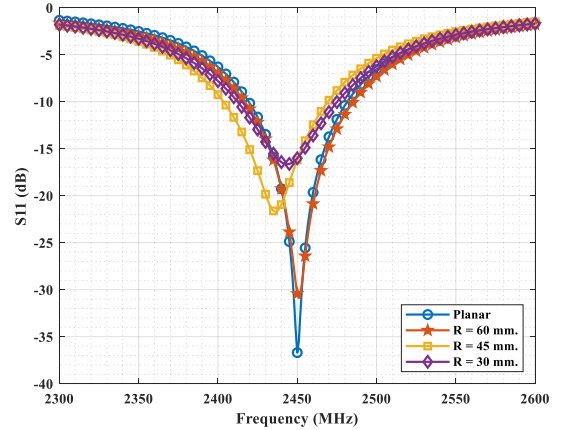


Fig. 3 The simulated result of the reflection coefficient pattern of the single patch antenna

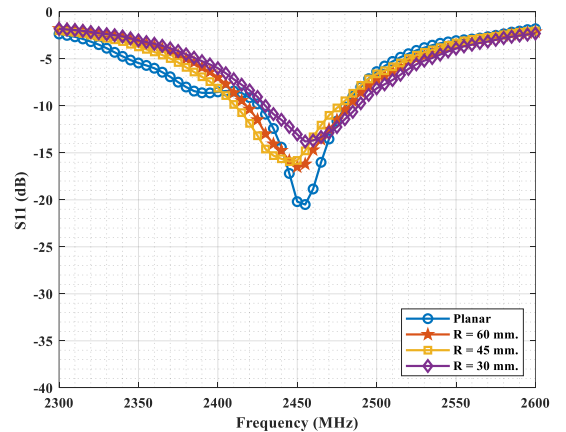


Fig. 4 The measured result of the reflection coefficient pattern of the single patch antenna

C. Radiation Pattern

The simulated results of radiation pattern of the single patch antenna in the H- and E-plane are shown in Fig. 5. The results indicate that the antenna beamwidth of the SPPA was narrow than the SCPA. Especially in the H-plane, the beamwidth increases when decreasing the radius of curvature. Whereas in the E-plane, the beamwidth tends to remain constant as the radius of curvature decreases. From the results, it is obviously that the measured results have good agreement with the simulated results in both the H- and E-planes as shown in Fig. 6. The comparison of the measured and simulated results is shown in Table II. The antenna gain tends to decrease with the radius of curvature decreases. However, the wider beamwidth is suitable for the antenna array.

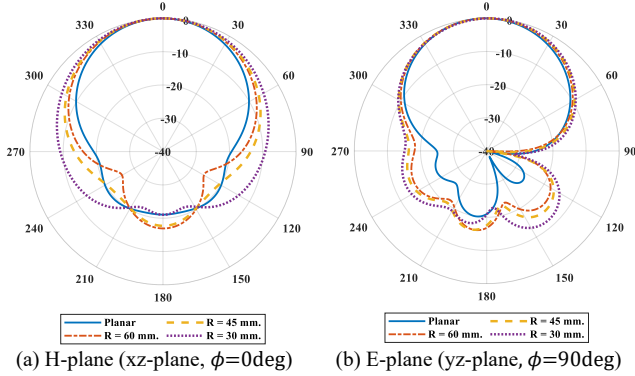


Fig. 5 The simulated result of the radiation pattern of the single patch antenna at 2.45 GHz

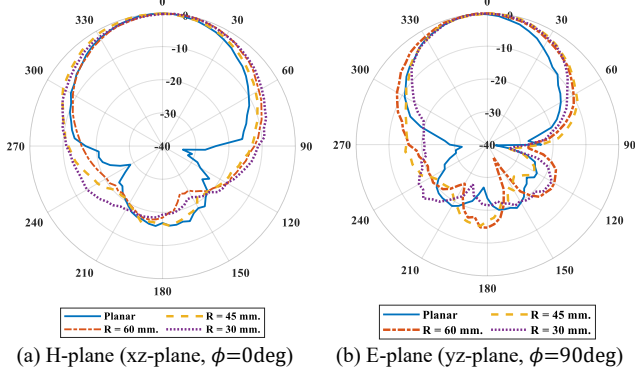


Fig. 6 The measured result of the radiation pattern of the single patch antenna at 2.45 GHz

TABLE II. THE SIMULATED AND MEASURED RESULTS OF MAXIMUM GAIN AND BEAMWIDTH OF SINGLE PATCH ANTENNA AT 2.45 GHz

Antenna	H-plane (deg)		E-plane (deg)		Gain (dBi)	
	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.
Planar	64	60	62	62	8.88	8.51
R = 60 mm	74.6	75	67	65	8.41	7.86
R = 45 mm	79.2	80	69.2	65	7.99	7.56
R = 30 mm	89.7	85	69.9	60	7.37	7.41

IV. ANTENNA ARRAY

This section presents the simulation results of the planar phased antenna array. The antenna arrays with 4 element rectangular patches are shown in Fig. 7. The element of antenna arrays, such as the SPPA and SCPA with various radii of curvatures of 30, 45, and 60 mm, are simulated and compared on the beam direction and the antenna gain in

different direction of phased antenna array. The separation between the element is d .

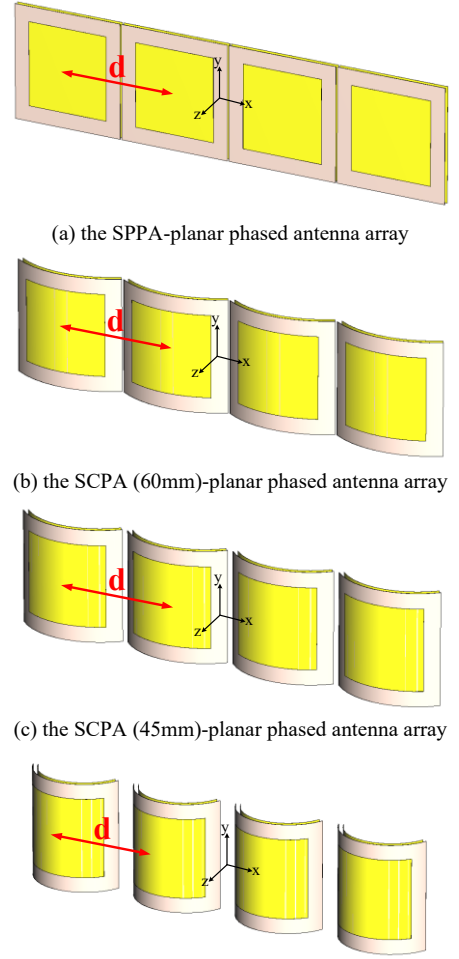
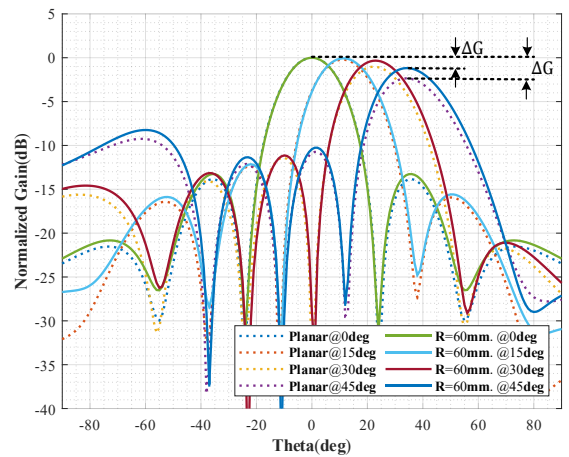
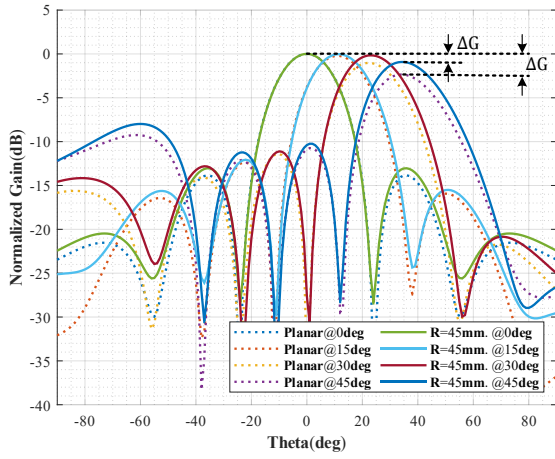


Fig. 7 The antenna models in the simulator program

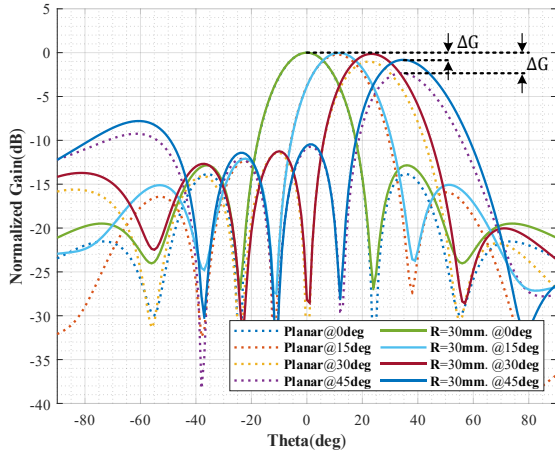
The simulated results of antenna array are shown in Fig. 8. In this paper, we use the separation between the element of 0.6 wavelength in free space. The results show the radiation pattern of phased antenna array in the beam direction of 0, 15, 30 and 45 degrees. Fig. 8 compares the normalized gain at 0 degree of the SPPA- and SCPA-planar phased antenna array with various radii of curvatures of 30, 45 and 60 mm. From the simulated results can be summarized as shown in Table III and Table IV.



(a) SPPA planar-array and SCPA planar-array ($R = 60$ mm)



(b) SPPA planar-array and SCPA planar-array ($R = 45$ mm)



(c) SPPA planar-array and SCPA planar-array ($R=30$ mm)

Fig. 8 The simulated results of the normalized gain at 0 degree of the SPPA- and SCPA-planar array in the different direction (xz-plane, $\phi = 0$ deg)

The comparison of the beam direction when switching in the direction of 0, 15, 30, and 45 degrees is shown in Table III. The results show that the main beam direction of the planar phased antenna array has a lot of beam pointing errors from the theoretical value, especially at the rising angle directions from boresight (0 degree). Because the radiation of a single patch has a narrow beamwidth. The beam pointing errors of the SCPA-planar phased antenna array is slightly better than the SPPA-planar phased antenna array.

TABLE III. THE SIMULATION OF BEAM DIRECTION

Antenna	Beam direction			
	0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)
Planar	0	11	22	34
$R = 60$ mm	0	11	23	34
$R = 45$ mm	0	11	23	34
$R = 30$ mm	0	12	23	35

Table IV compares the antenna gain beam when switching in the direction of 0, 15, 30, and 45 degrees. The results show that the antenna gain decreases when the beam direction increases. The maximum gain different (ΔG) is the different of antenna gain between the beam direction of 0 and

45 degrees. It is found that the maximum of the gain different of the SCPA-planar phased antenna array is clearly better than the SPPA-planar phased antenna array. The maximum gain different of the SCPA(30 mm)- and SPPA- planar phased antenna array are 0.8 and 2.3 dB, respectively. Thus, the SCPA is appropriated for a constant-gain phased array antenna application.

TABLE IV. THE SIMULATION OF GAIN IN DIFFERENT DIRECTION

Antenna	Gain at 2.45 GHz (dBi)				max. ΔG (dB)
	0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)	
Planar	12.6	12.4	11.6	10.3	2.3
$R = 60$ mm	12.9	12.8	12.5	11.7	1.2
$R = 45$ mm	12.5	12.4	12.3	11.6	0.9
$R = 30$ mm	12.4	12.4	12.3	11.6	0.8

V. CONCLUSION

The suspended conformal patch antenna (SCPA) for improving a constant-gain phased array antenna was proposed in this paper. The proposed antenna has been developed using a rectangular patch with FR-4 substrate and air-gap operating at 2.45 GHz. The simulated and measured results were also demonstrated and compared with the suspended planar patch antenna (SPPA). The results show that the antenna beamwidth increases with decreasing the radius of curvature. The measured results are in good agreement with the simulated results. The proposed antenna is very useful to achieve the unidirectional pattern and wide-beamwidth antenna for a constant-gain phased array antenna application.

ACKNOWLEDGEMENT

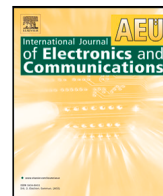
This paper and CST Microwave Studio 2021 program were supported by the Broadcasting and Telecommunications Research and Development Fund for Public Interest (BTRF), The National Broadcasting and Telecommunication Commission (NBTC) under the grant number B2-074/1-63.

REFERENCES

- [1] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and design," New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [2] P. Delos, B. Broughton, and J. Kraft, "Phased Array Antenna Patterns- Part 1: Linear Array Beam Characteristics and Array Factor," Feb. 26, 2021. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/phased-array-antenna-patterns-part1.html>.
- [3] F. Xu, B. Wei, W. Li, J. Liu, W. Liu, and Y. Qiu, "Cylindrical conformal single-patch microstrip antennas based on three dimensional woven glass fiber/epoxy resin composites," *Composites Part B: Engineering*, vol.78, 2015, pp. 331-337, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.091>.
- [4] S. B. Belamgi, S. Ray and P. Das, "Suspended planar patch antenna for wireless energy transfer at 2.45GHz," International Conference on Electronics, Communication and Instrumentation (ICECI), 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICECI.2014.6767381.
- [5] Kai-Fong Lee, K. Ho and J. Dahele, "Circular-disk microstrip antenna with an air gap," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 32, no. 8, pp. 880-884, August 1984, doi: 10.1109/TAP.1984.1143428.
- [6] R. Colella, F. P. Chietera, and L. Catarinucci, "Analysis of FDM and DLP 3D-Printing Technologies to Prototype Electromagnetic Devices for RFID Applications," *Sensors*, vol. 21, no. 3, p. 897, Jan. 2021.

ข.2 บทความวิจัยในวารสารวิชาการ

Meerabeab, S., Wouchoum, P., & Jantarachote, V. (2023). A suspended conformal patch antenna for a constant-gain beam-switching phased antenna array. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 161, 154538. <https://doi.org/10.1016/J.AEUE.2023.154538>



Regular paper

A suspended conformal patch antenna for a constant-gain beam-switching phased antenna array

Saowapa Meerabeab, Phairote Wouchoum, Vasan Jantarachote*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University (PSU), Thailand

ARTICLE INFO

Keywords:

Patch antenna
Suspended antenna
Conformal antenna
Beam-switching
Array antenna
Constant-gain

ABSTRACT

In this paper, a suspended conformal patch antenna (SCPA) for improving a constant-gain planar phased antenna array when switching the main beam direction to the desired direction is presented. The beam-switching antenna array is proposed in 4 main beam directions of 0, 15, 30, and 45 degrees. The proposed antenna array is composed of 4 SCPA elements operating at 2.45 GHz. The SCPA consists of an FR-4 substrate and an air gap between the radiator patch and the ground plane. The suspended patch antenna with the conformal patch antenna is used for improving the gain and beamwidth of antenna. The simulation was done using CST Microwave Studio 2021. The comparison results between the SCPA and a suspended planar patch antenna (SPPA) are illustrated with the antenna characteristics such as S-parameters and radiation patterns. The proposed antenna array prototype has been fabricated with SCPA of $R = 30$ mm. The measured results of the antenna characteristics are demonstrated and compared with the simulated results. The measured gain difference between the desired beam directions of 0 and 45 degrees is 2.72 dB. Consequently, the SCPA is very useful for the application in a constant-gain beam-switching phased antenna array.

1. Introduction

Nowadays, phased array antennas are widely used to increase performance and efficiency for data transmission rates [1,2]. Phased array antennas can be pointed in specific directions by using the switched-beam or steerable-beam antennas [3]. Beam-switching antennas have been applied in modern wireless communication such as an unmanned aerial vehicles (UAV) [4], radar [5], satellite communications [6,7], mobile communications [2], base station antenna applications [8], etc.

Beam-switching antennas have the benefit of high transmission gain, which significantly improves coverage and lowers multipath interference [2,8–10]. The advantage of these antennas is a less complicated feeding network, such as RF phase shifter [11], Butler matrices [12], and Blass matrices [13].

Theoretically, the total field of the antenna array is equal to the product of the field of a single element and the array factor [14]. The array factor is calculated based on the array geometries such as phase, amplitude, and spacing between the elements. In addition, the antenna array controls the direction without moving the antenna by feeding the phase to each element.

Traditionally, the linear antenna array feeds the same amplitude and dynamically adjusts the phase of each element. For the phased antenna arrays with narrow-beamwidth antenna elements, the radiation pattern has a beam-pointing error and the gain will decrease when switching the main beam direction near the horizon direction [15].

Many researches on beam-switching planar antenna arrays have been reported in the literature [11,12,16–23]. The switched-beam antenna array with butler matrix network was presented in [16,17]. These works used the patch antenna elements and switched four beam directions. A microstrip phased array antenna with a switched line base shifter was proposed in [11]. A beam-switching butler matrix using the planar monopole with reflector antennas was introduced in [12], where the radiation pattern is demonstrated in a switching 8-way Butler matrix with 8 beam directions. In [18], an 8-element planar antenna array with electronically controlled switches was proposed. This antenna provided beam steering in azimuth and elevation planes. An electronically reconfigurable microstrip antenna with steerable beams was presented in [20], in which the structure consists of a feeding network loaded with pin diodes and an array of two patches. It can produce five beam directions with five phase differences. A planar 4-bit reconfigurable antenna array based on a digital coding radiation element and the design philosophy of information metasurfaces was proposed in [21], where the result of the radiation pattern was demonstrated with the scanning beams of 5 directions. A switched-beam antenna based on a five-by-five slot antenna array was introduced in [22]. This antenna array provided a total of 25 fixed beams which can be selected to scan in both theta and phi directions. In [23], A

* Corresponding author.

E-mail address: vasan.j@psu.ac.th (V. Jantarachote).

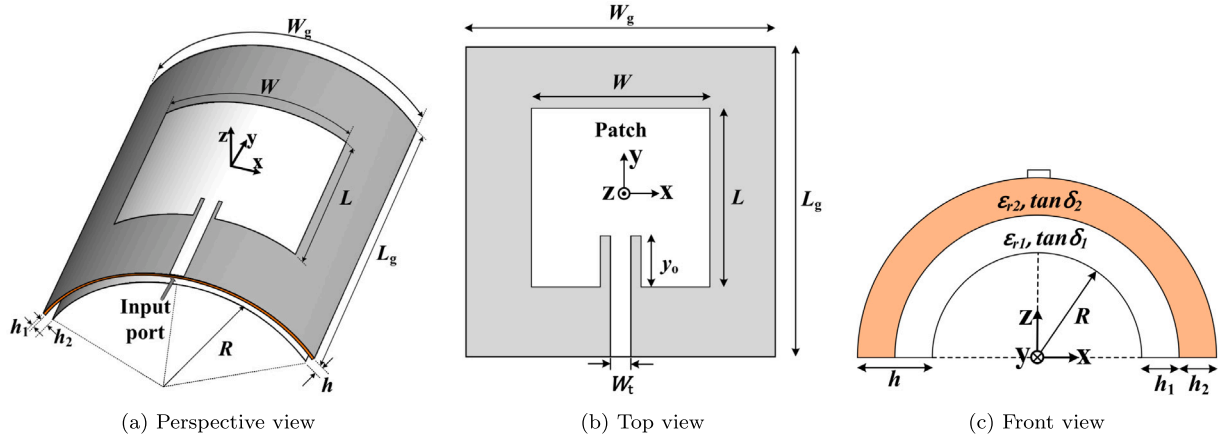


Fig. 1. The structure of the proposed antenna.

beam-switching tapered slot antenna array was proposed. This antenna has 5 main beam directions with peak gains varying from 3.5 dBi to 7 dBi. However, these designs are not able to achieve a constant gain when switching the main beam in different directions, especially the beam direction near the horizon direction. Since the antenna element was a narrow beamwidth when compared with the isotropic antenna element. The antenna element should be provided with a unidirectional and hemispherical radiation pattern. Therefore, for these reasons, a wide-beamwidth antenna element can decrease beam pointing error and yield the constant gain of the array when switching the beam directions.

Conformal antenna is one of the antennas that conform the antenna structure to the surface of a prescribed shape [24] such as cylindrical [25–29], elliptical [30], spherical [31], and conical shapes [32]. The conformal microstrip antennas were proposed in [33]. The effects of curvature radius on radiation patterns was investigated, which the beamwidth increases when decreasing the radius of curvature. Although this antenna provides a wide beamwidth, on the other hand, it is suitable for designing the antenna array.

Typically, conventional patch antennas using FR-4 substrate has a low efficiency. The suspended structures were proposed to provide the high performance [34–36]. These structures are capable to improve the gain and impedance bandwidth of the patch antenna by inserting the air gap between the substrate and ground plane.

In this paper, the design of a planar phased antenna array using 4-elements of the rectangular patch with a suspended conformal patch antenna (SCPA) is proposed. By combining the advantages of the conformal and suspended structures, an SCPA is capable to design a high gain and wide beamwidth which depends on the radius of curvature of the patch antenna. Therefore, if each element has a wide beamwidth, the antenna array can reduce the beam pointing error and has a constant gain when switching the direction from boresight. The antenna characteristics of the SCPA are also compared with a conventional patch antenna, which is a suspended planar patch antenna (SPPA). The antenna design and structure of a single patch antenna are presented in Section 2. Section 3 presents the simulated and measured results of a single patch antenna. Finally, the simulated and measured results of the antenna array are shown and discussed in Section 4.

2. Antenna design and structure

This section presents the antenna design and structure of a single patch antenna, which is an SCPA and an SPPA. A rectangular conducting patch of length L and width W is fed by microstrip line as shown in Fig. 1. The width of microstrip feeding line is W_t . The inset feed point where the impedance matching is y_0 . The ground length and ground width are L_g and W_g , respectively. The radius of curvature of

Table 1

The parameters of the proposed antenna from theoretical and optimized values.

Parameters	Theoretical value (mm)	Optimized value (mm)
L	55.48	54
W	60.43	51
y_0	13.13	8
h_2	0.2	0.2
h_1	3	3
W_t	4	4
W_g	90	90
L_g	110	110

the conformal patch antenna is R . A substrate material is made from an FR-4 which has a dielectric constant of 4.3 and a loss tangent of 0.025 with a thickness of 0.2 mm. An air-gap between the FR-4 substrate and the ground plane is used to achieve a high gain antenna and wider impedance bandwidth.

The structural parameters of the proposed antenna can be calculated as follows [14,35]. The equivalent dielectric constant, ϵ_{req} of the two-layered substrate is calculated by (1)

$$\epsilon_{req} = \frac{\epsilon_{r1}\epsilon_{r2}(h_1 + h_2)}{\epsilon_{r1}h_2 + \epsilon_{r2}h_1} \quad (1)$$

where ϵ_{r1} and ϵ_{r2} are the dielectric constant of material 1 and material 2, respectively. h_1 and h_2 are the height of material 1 and material 2, respectively. The width of the patch can be calculated as the equation:

$$W = \frac{c}{2f_c} \left(\frac{2}{\epsilon_{req} + 1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

where c is the velocity in free space, f_c is the operating frequency of antenna. The effective dielectric constant is given by

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_{req} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{req} - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2} \quad (3)$$

The length of the patch can be calculated as the equation:

$$L = \frac{c}{2f_c \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

Where

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (5)$$

and ΔL is the extended incremental length of the patch and h is the total thickness of the two-layered substrate. The inset feed point and the width of microstrip feeding line are calculated from [14].

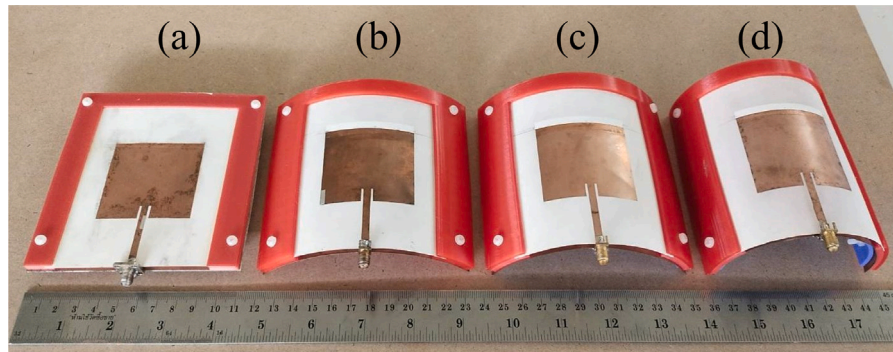


Fig. 2. The antenna prototypes: (a) SPPA (b) SCPA, $R = 60$ mm (c) SCPA, $R = 45$ mm and (d) SCPA, $R = 30$ mm.

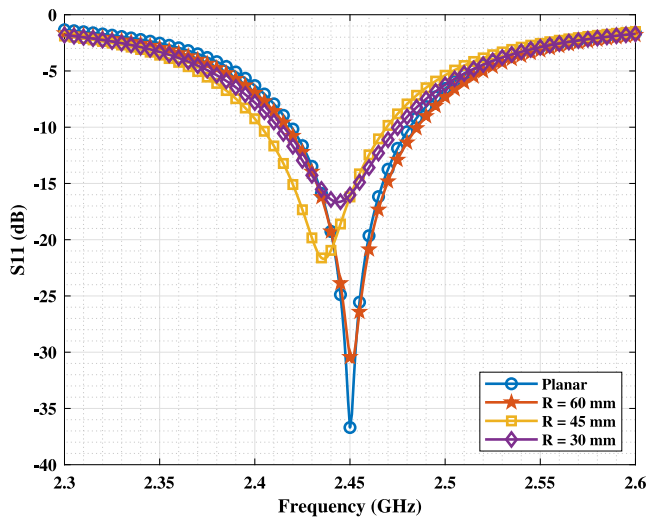


Fig. 3. The simulated reflection coefficient results of the single patch antenna.

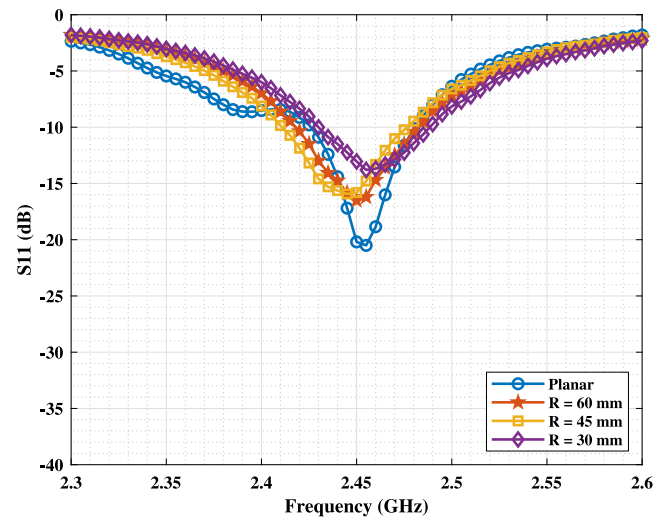


Fig. 4. The measured reflection coefficient results of the single patch antenna.

Table 1 shows the parameters of the antenna from theoretical and optimized values. For all antenna structures (SCPA and SPPA), we use the same dimensions operating at 2.45 GHz. The radii of antenna curvature R varies from 60, 45 and 30 mm. The simulation of the antenna was done using CST Microwave Studio. The patch layer is a copper sheet with a thickness of 0.035 mm. The ground plane is a copper sheet metal with a thickness of 0.3 mm. The air-gap separates the FR4-substrate and the ground plane with a 3D printing with PLA material that has a dielectric constant of 2.54 and a dielectric loss tangent of 0.007 [39]. The 3D printing structure for supporting the air-gap is placed around the antenna which is designed to minimize the effect on antenna performance. Some antenna parameters after optimization, which are the width and length of the patch and the inset feed point, are changed according to impedance matching.

3. Single patch antenna

This section presents the simulated and measured results of the SCPA, which compares the SPPA.

3.1. Antenna prototype

From the dimensions of the single patch antennas after optimization in Table 1, the prototypes of all structures were fabricated and measured to verify the simulation at the frequency of 2.45 GHz. The antenna prototypes, which are the SPPA and SCPA with various radii of curvatures of 30, 45, and 60 mm, are shown in Fig. 2. The measured results, such as the reflection coefficient, radiation pattern, and gain, were done with the Network analyzer.

3.2. Reflection coefficient

The simulated results of reflection coefficient of the SPPA and SCPA with various radii of curvatures of 30, 45, and 60 mm are shown in Fig. 3. From the results, it is obvious that the SPPA provides a good impedance matching than the SCPA. The resonant frequency decreases with the decrease of radius of curvatures. However, the simulated results of all the structures are lower than -10 dB in the operating frequency band of 2.405–2.485 GHz.

Fig. 4 shows the measured reflection coefficient results of the SCPA and SPPA. It is observed that the measured results are in good agreement with the simulated results. However, the simulated results of the reflection coefficient are better than the measurement results.

3.3. Radiation pattern

The simulated results of the radiation pattern of the single patch antenna in both the H- and E-plane are shown in Fig. 5. The results indicate that the antenna beamwidth of the SPPA was narrower than the SCPA. Especially in the H-plane, the beamwidth increases when decreasing the radius of curvature. Moreover, the radii less than 30 mm have a wider beamwidth. However, it is difficult to fabricate due to the special structural requirement for the suspended structure. Whereas in the E-plane, the beamwidth tends to remain constant as the radius of curvature decreases. From the results, it is obvious that the measured results have good agreement with the simulated results in both the H- and E-planes as shown in Fig. 6. The comparison of the measured and simulated results is shown in Table 2. The antenna gain tends to

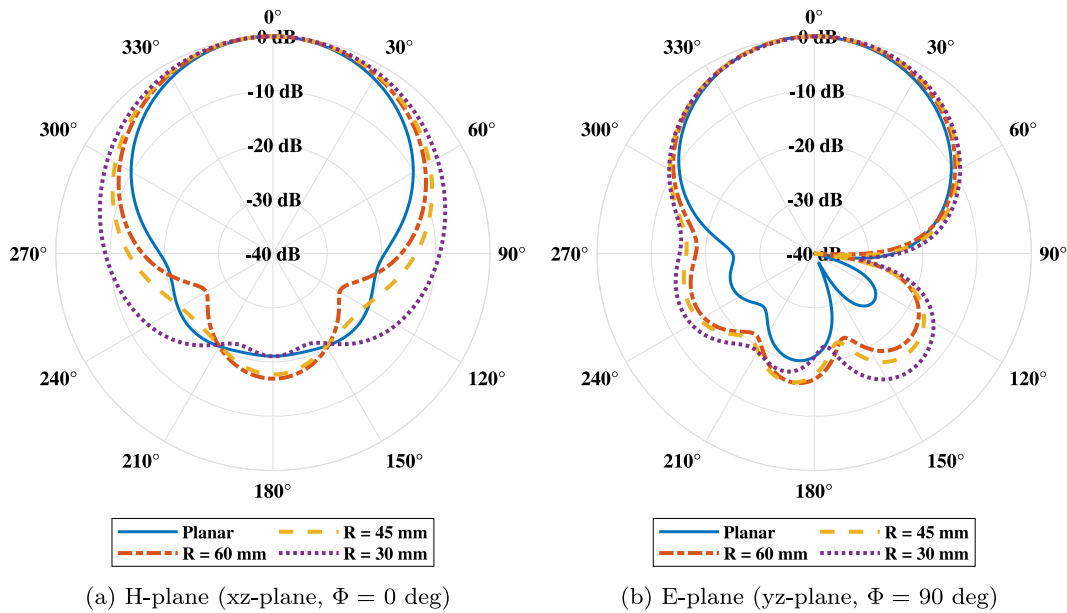


Fig. 5. The simulated radiation pattern results of the single patch antenna at 2.45 GHz.

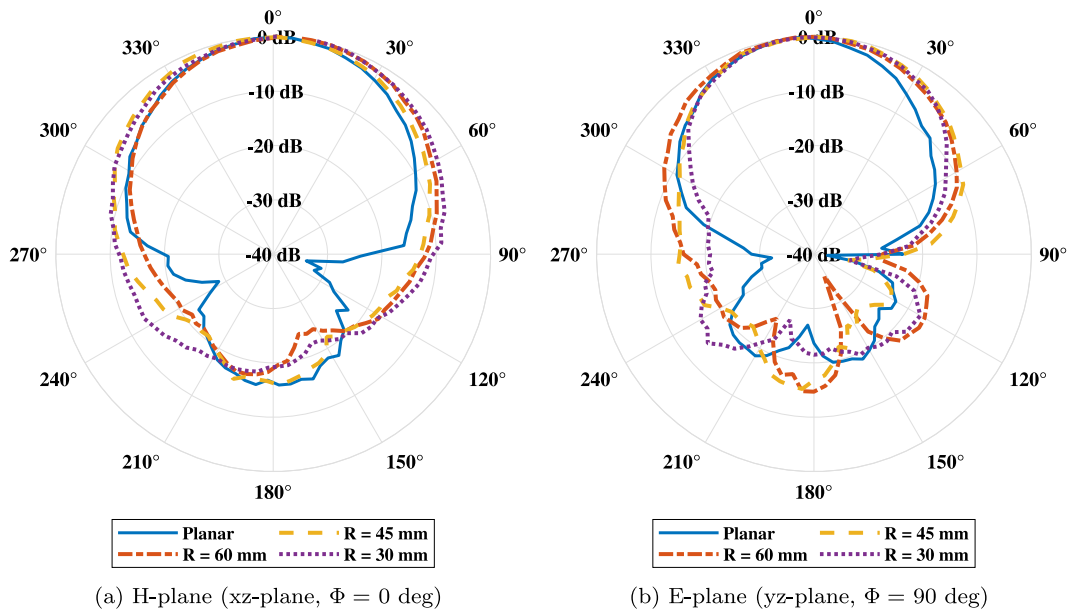


Fig. 6. The measured radiation pattern results of the single patch antenna at 2.45 GHz.

decrease with the decrease of radius of curvature. However, the wider beamwidth is suitable for the constant-gain beam-switching planar phased antenna array.

4. Antenna array

4.1. Simulation

This section presents the simulated results of the planar phased antenna array. The antenna arrays with 4-element rectangular patches are shown in Fig. 7. The element of antenna arrays, such as the SPPA

and SCPA with various radii of curvatures of 30, 45, and 60 mm, are simulated and compared on the beam peak and the desired beam directions. The separation between the adjacent element is d .

Since the size of each element is large, it cannot be placed on an array with a spacing of $0.50\lambda_0$, where λ_0 is the wavelength in free space. Therefore, the spacing of each element without overlapping should be greater than $0.60\lambda_0$.

4.1.1. Radiation pattern

This part shows the simulated results of the directivity of the planar phased antenna array with SPPA and SCPA ($R = 30, 45,$ and

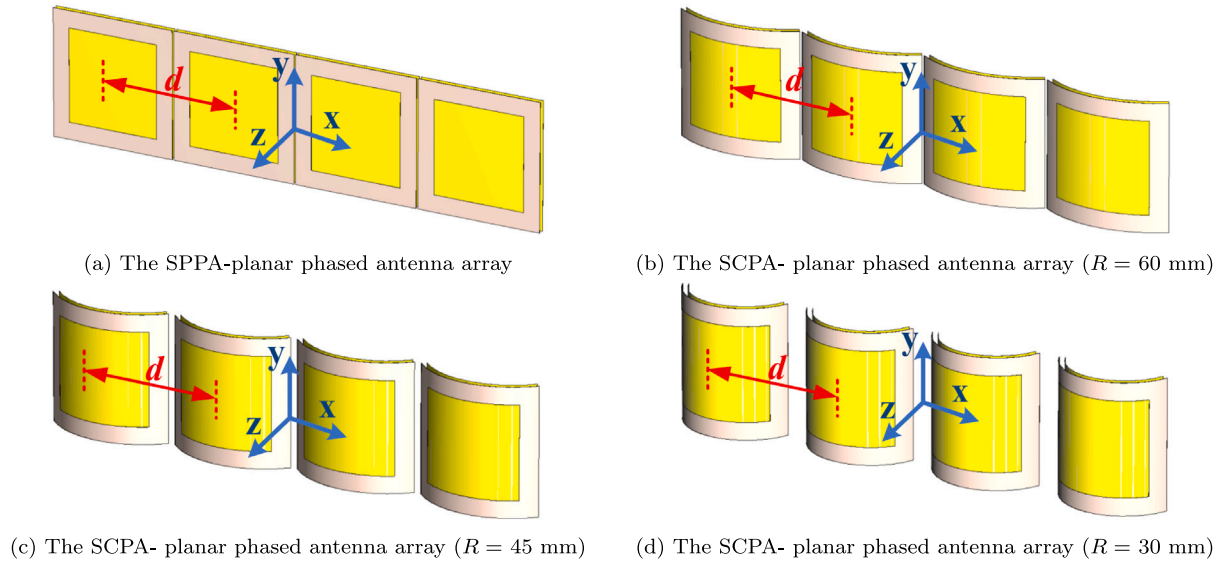


Fig. 7. The antenna array models in the simulation program.

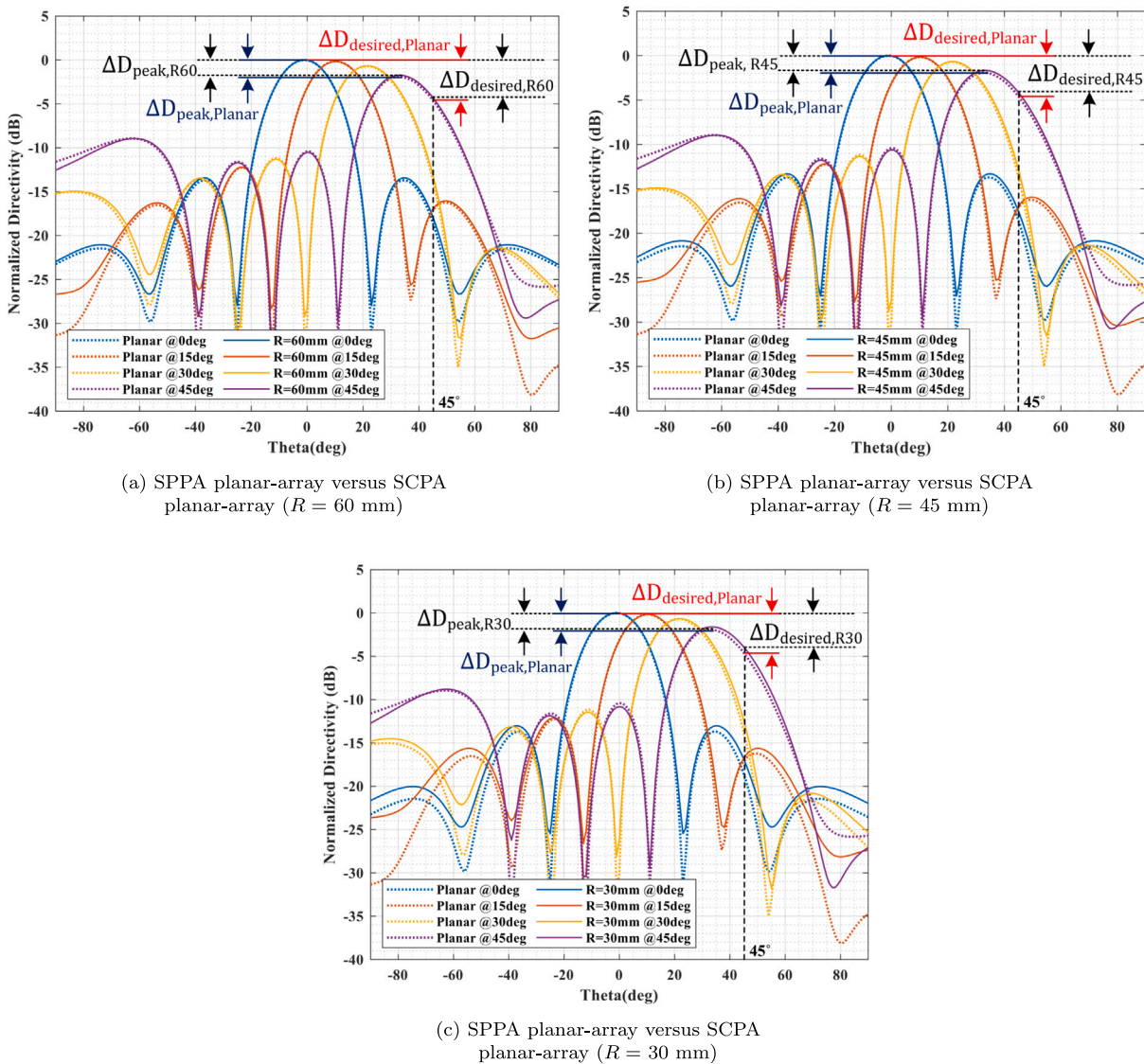


Fig. 8. The simulated radiation patterns with the normalized directivity at 0 degrees in xz-plane.

Table 2

The simulated and measured results of maximum gain, beamwidth, and F/B ratio of single patch antennas at 2.45 GHz.

Antenna	H-plane (deg)		E-plane (deg)		Gain (dBi)		F/B Ratio (dB)			
	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.	Sim.	Meas.	H-plane Sim.	H-plane Meas.	E-plane Sim.	E-plane Meas.
Planar	64.00	60.00	62.00	62.00	8.88	8.51	-21.00	-15.80	-25.90	-18.70
R = 60 mm	74.60	75.00	67.00	65.00	8.41	7.86	-16.90	-17.40	-15.90	-14.70
R = 45 mm	79.20	80.00	69.20	65.00	7.99	7.56	-17.70	-15.90	-14.80	-15.10
R = 30 mm	89.70	85.00	69.90	65.00	7.37	7.41	-21.00	-18.00	-12.00	-14.50

Table 3

The simulated directivity of the beam peak directions.

Spacing (d)	Antenna	Peak directivity at 2.45 GHz (dBi)				ΔD_{peak} (dB)
		0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)	
0.60 λ_0	Planar	(0 deg) 14.04	(11 deg) 13.87	(22 deg) 13.33	(34 deg) 12.11	1.93
	R = 60 mm	(0 deg) 13.98	(11 deg) 13.81	(23 deg) 13.31	(34 deg) 12.25	1.73
	R = 45 mm	(0 deg) 13.93	(11 deg) 13.76	(23 deg) 13.27	(34 deg) 12.26	1.67
	R = 30 mm	(0 deg) 13.79	(11 deg) 13.6	(23 deg) 13.13	(35 deg) 12.18	1.61
0.65 λ_0	Planar	(0 deg) 14.32	(10 deg) 14.15	(21 deg) 13.74	(32 deg) 12.66	1.66
	R = 60 mm	(0 deg) 14.26	(10 deg) 14.09	(21 deg) 13.7	(32 deg) 12.65	1.61
	R = 45 mm	(0 deg) 14.21	(11 deg) 14.04	(21 deg) 13.65	(32 deg) 12.62	1.59
	R = 30 mm	(0 deg) 14.07	(11 deg) 13.9	(21 deg) 13.49	(32 deg) 12.5	1.57
0.70 λ_0	Planar	(0 deg) 14.58	(10 deg) 14.44	(20 deg) 14.06	(29 deg) 12.91	1.67
	R = 60 mm	(0 deg) 14.52	(10 deg) 14.38	(20 deg) 14.00	(29 deg) 12.87	1.65
	R = 45 mm	(0 deg) 14.47	(10 deg) 14.33	(20 deg) 13.95	(30 deg) 12.84	1.63
	R = 30 mm	(0 deg) 14.32	(10 deg) 14.17	(20 deg) 13.78	(30 deg) 12.71	1.61
0.75 λ_0	Planar	(0 deg) 14.82	(9 deg) 14.72	(18 deg) 14.28	(28 deg) 13.05	1.77
	R = 60 mm	(0 deg) 14.76	(9 deg) 14.65	(18 deg) 14.22	(28 deg) 13.02	1.74
	R = 45 mm	(0 deg) 14.71	(9 deg) 14.59	(18 deg) 14.17	(28 deg) 12.98	1.73
	R = 30 mm	(0 deg) 14.55	(9 deg) 14.42	(18 deg) 13.99	(28 deg) 12.87	1.68

Table 4

The simulated directivity of the desired beam directions.

Spacing (d)	Antenna	Directivity at 2.45 GHz (dBi)				$\Delta D_{desired}$ (dB)
		0 (deg)	15 (deg)	30 (deg)	45 (deg)	
0.60 λ_0	Planar	14.04	13.51	12.05	9.84	4.20
	R = 60 mm	13.98	13.46	12.11	10.06	3.92
	R = 45 mm	13.93	13.42	12.12	10.16	3.77
	R = 30 mm	13.78	13.29	12.06	10.22	3.56
0.65 λ_0	Planar	14.32	13.55	11.67	8.91	5.41
	R = 60 mm	14.26	13.52	11.67	8.89	5.37
	R = 45 mm	14.21	13.49	11.67	8.93	5.28
	R = 30 mm	14.07	13.36	11.59	8.97	5.10
0.70 λ_0	Planar	14.58	13.56	10.83	6.91	7.67
	R = 60 mm	14.52	13.52	10.8	6.84	7.68
	R = 45 mm	14.47	13.48	10.79	6.87	7.60
	R = 30 mm	14.32	13.35	10.72	6.92	7.40
0.75 λ_0	Planar	14.82	13.46	9.46	3.83	10.99
	R = 60 mm	14.76	13.42	9.43	3.75	11.01
	R = 45 mm	14.71	13.38	9.43	3.79	10.92
	R = 30 mm	14.55	13.24	9.38	3.88	10.67

60 mm) when switching in the desired directions of 0, 15, 30, and 45 degrees and varying the spacing of each element from $0.60\lambda_0$, $0.65\lambda_0$, $0.70\lambda_0$, and $0.75\lambda_0$. For the structure of the SPPA and SCPA array, we used the same dimensions and vary only the radius of curvatures. We consider the antenna directivity because of the antenna has not been matched. Based on the antenna array design, we focus on the maximum directivity difference at the desired beam ($\Delta D_{desired}$) and beam peak (ΔD_{peak}) directions. The maximum of $\Delta D_{desired}$ is the antenna directivity difference between the beam direction of 0 degrees and the desired beam direction of 45 degrees. The maximum of ΔD_{peak} is the antenna directivity difference between the beam direction of 0 degrees and the furthest beam peak direction.

The simulated results of the directivity at the beam peak direction and the desired beam direction are shown in Table 3 and Table 4, respectively.

It is observed that the antenna directivity of the planar array is increased when increasing the spacing between the elements. However,

the results show that the radiation pattern has a higher beam pointing error from the desired direction when increasing the spacing between the elements. Moreover, the radiation pattern has a grating lobe (very strong sidelobes). In addition, the maximum directivity difference in both the beam peak and desired beam directions are increasing when increasing the spacing of each element.

Therefore, the spacing of $0.60\lambda_0$ is the best spacing for fabricating an antenna array prototype. Because of this spacing does not overlap between the elements and has a low grating lobe and low beam pointing error.

Fig. 8 shows the radiation pattern in xz-plane and the comparison of the normalized directivity at 0 degrees of the planar phased antenna array with the SPPA and the SCPA ($R = 30, 45,$ and 60 mm). The results show that the main beam direction of the planar phased antenna array with the SPPA and the SCPA has a lot of beam pointing errors from the desired value because the antenna beamwidth of each element is

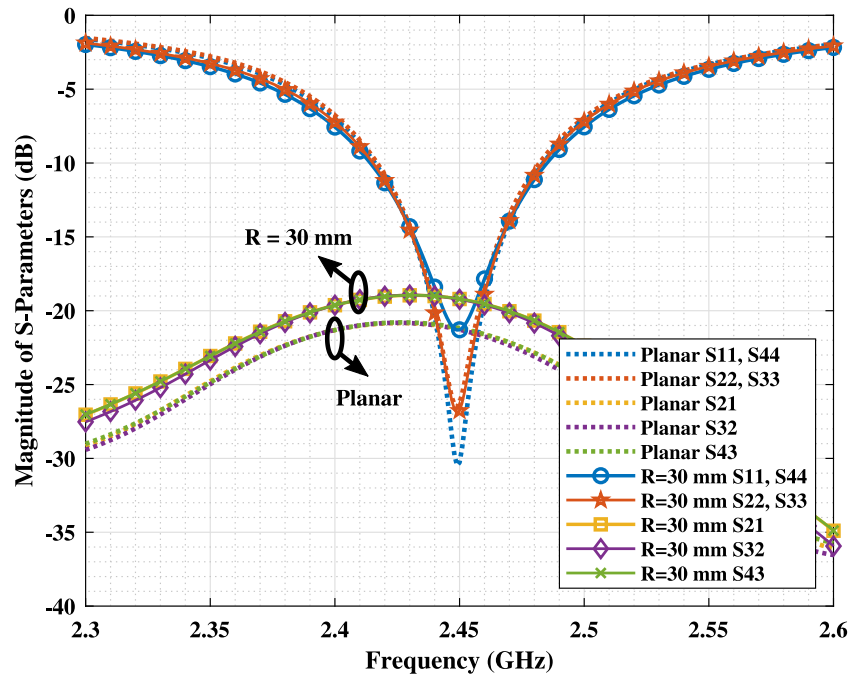


Fig. 9. The comparison results of the simulated S-Parameter of the planar antenna array between SPPA and SCPA ($R = 30$ mm).

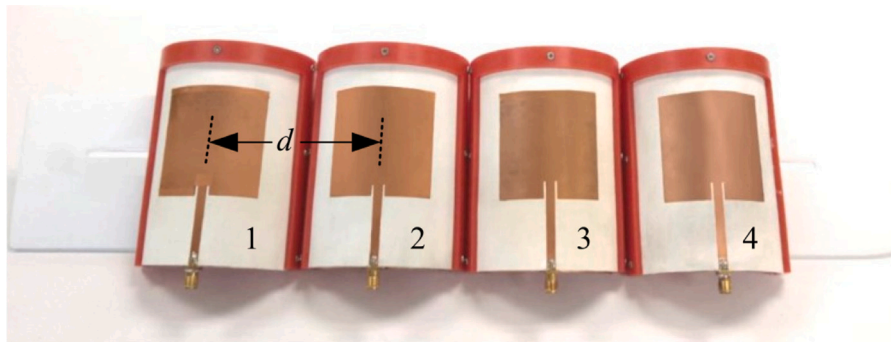


Fig. 10. The planar antenna array with SCPA ($R = 30$ mm) prototype.

narrower than that of the isotropic antenna. The beam pointing errors of the SCPA-planar array is slightly better than the SPPA-planar array. The $\Delta D_{desired}$ and ΔD_{peak} of the SCPA-planar array is clearly better than the SPPA-planar array. The $\Delta D_{desired}$ values of the SCPA ($R = 30$ mm)- and SPPA-planar array are 3.56 and 4.20 dB, respectively. The ΔD_{peak} values of the SCPA ($R = 30$ mm)- and SPPA-planar array are 1.61 and 1.93 dB, respectively. Thus, the planar antenna array with SCPA ($R = 30$ mm) is appropriated choice for a constant-gain phased array antenna application. The SCPA-planar array has been fabricated and measured, the details as shown in the following sections.

4.1.2. S-parameter

This section shows the simulated results of the S-parameters of the planar phased antenna array with the SPPA and the SCPA ($R = 30, 45,$ and 60 mm). The spacing of each element is $0.6\lambda_0$. The summarized results of the simulated S-parameters are shown in Table 5. Fig. 9 shows the comparison results of the simulated S-parameters of the planar antenna array between the SPPA and the SCPA ($R = 30$ mm). Since the antenna array has a symmetric structure, the values of S11 and S44 were similar, and the values of S22 and S33 were also similar. The return loss of the SPPA-planar array has a better impedance matching than the SCPA-planar array. The isolation of the SPPA-planar array has higher isolation than the SCPA-planar array caused by the beamwidth

of an element of the SCPA-planar array being wider than the SPPA-planar array. For all structures, the simulated results of the isolation and the return loss at the operating frequency of 2.45 GHz are better than 19 dB and 21 dB, respectively.

4.2. Antenna array prototype

The planar antenna array with SCPA ($R = 30$ mm) prototype is fabricated as shown in Fig. 10. It is composed of 4 elements with a spacing of $0.60\lambda_0$. The 3D-printing model is used for supporting the suspended structure.

4.3. Measurement

This section shows the test setup and the results of the planar phased antenna array with SCPA. The test setup is divided into three parts: 1. return loss and isolation test of the antenna array prototype, 2. phase angle difference test of the phase angle control system, and 3. radiation pattern test of the antenna array prototype.

4.3.1. The return loss and isolation testing

The test setup for return loss and isolation of the planar phased antenna array with SCPA is shown in Fig. 11, which consists of 1.

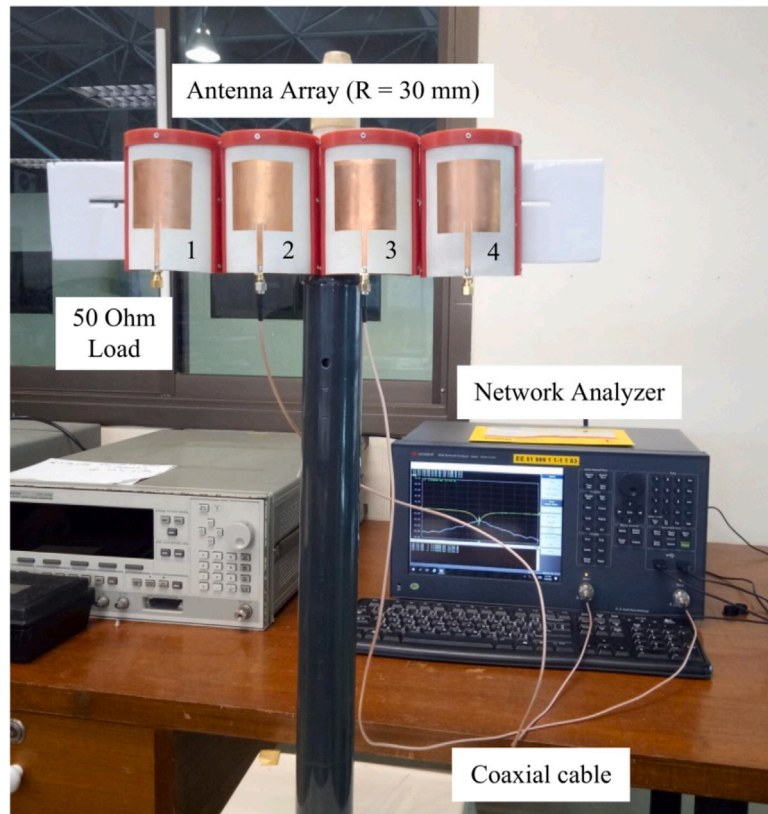


Fig. 11. The S-Parameter of the proposed antenna array measurement setup.

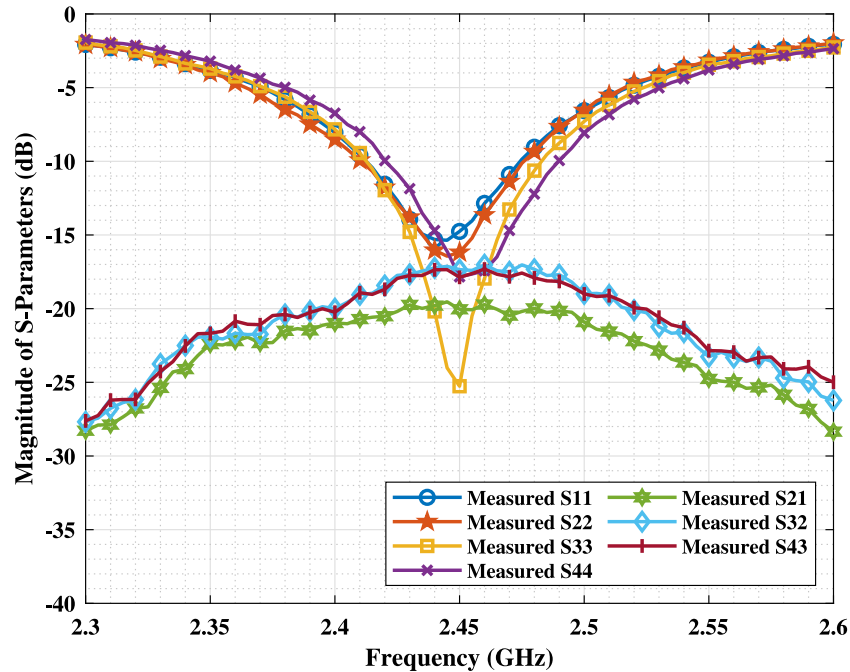


Fig. 12. The measurement results of the S-Parameter of the planar antenna array with SCPA ($R = 30$ mm).

antenna prototype, 2. antenna mounting plate with adjustable distance d between each antenna element, 3. antenna mounting pole, 4. coaxial cable, 5. 50 Ohm terminator, and 6. Network analyzer. A terminated load of 50 Ohm is required for all antenna elements. The testing results of the S-Parameter of the array patch antenna are shown in Fig. 12. The return loss is better than 15 dB at the designed 2.45 GHz frequency,

and the isolation between the antennas for each adjacent element is less than -18 dB at the 2.45 GHz frequency as desired.

It is found that the measured S-parameter results are in good agreement with the simulated results. However, the return loss of each element is slightly different due to the manufacturing process for fabricating the antenna prototype and the matching impedance.

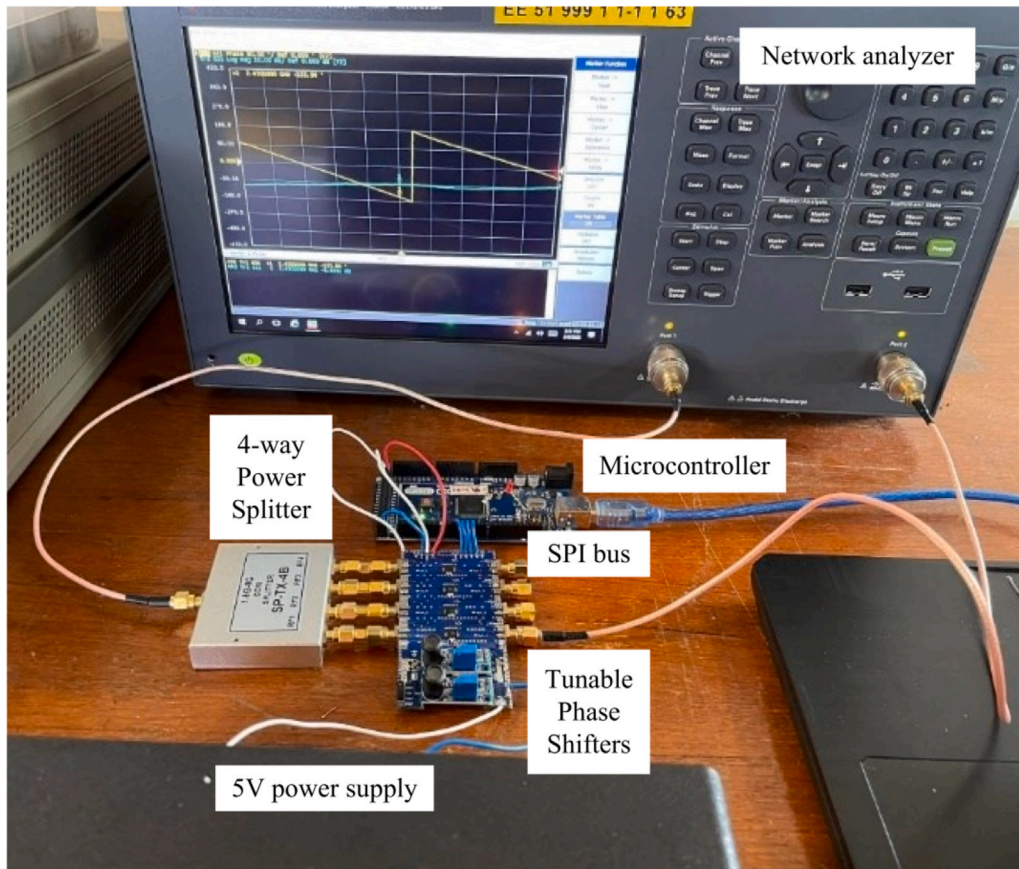


Fig. 13. Phase angle difference test setup of the phase angle control system.

Table 5
The simulated S-parameter of the planar antenna array with SPPA versus SCPA.

Antenna	S-Parameter at 2.45 GHz (dB)						
	S11	S22	S33	S44	S21	S32	S43
Planar	-30.27	-26.22	-26.22	-30.27	-21.23	-21.29	-21.18
R = 60 mm	-23.52	-28.95	-28.95	-23.52	-20.18	-20.13	-20.18
R = 45 mm	-23.28	-29.10	-29.10	-23.28	-19.90	-19.87	-19.89
R = 30 mm	-21.29	-26.77	-26.77	-21.29	-19.21	-19.23	-19.20

Table 6
The measured S-parameter results of the SCPA-planar phased antenna array (R = 30 mm).

S-Parameter at 2.45 GHz (dB)						
S11	S22	S33	S44	S21	S32	S43
-14.76	-16.18	-25.26	-17.84	-20.04	-17.35	-17.87

Consequently, the impedance of each element is slightly different. The measured S-parameters are shown in Table 6.

4.3.2. Phase angle difference test of the phase angle control system

To determine the radiation pattern and the beam direction of the planar phased antenna array with SCPA, it is necessary to have a phase angle control system that is capable of assigning phase shifts to each antenna element to control the desired beam direction of the antenna array to 0, 15, 30 and 45 degrees.

For this reason, a phase angle control system has been fabricated that can configure phase shifts for each antenna element, consisting of a 4-way power splitter and a digital tunable phase shifter. The phase angle of the circuit can be controlled by the SPI control signal from the microcontroller which can control the desired phase angle through the serial monitor of the IDE Arduino program on the computer screen.

Fig. 13 shows the system setup used to test the phase angle difference and insertion loss occurring in the four-channel phase angle control system, which is connected to the antenna arrays for each element. The phase angle control system consists of 1. Phase angle control system, 2. Coaxial cable, 3. 50 Ohm terminator, and 4. Network Analyzer. The test results of phase angle shifts at 2.45 GHz on each channel are shown in Table 7.

When the phase angle difference between the adjacent channels is calculated for the beam direction angle of the antenna array, the maximum deviation of the angle relative to the desired beam direction angle is 0.87 degrees. When the unused port was terminated with 50 Ohms and each channel's insertion loss was measured, it was approximately 12.9 dB ± 0.3 dB, showing that each channel had a similar power output. The sum of the insertion loss was obtained by the 4-way power splitter and the digitally tunable phase shifter was 6.7 dB, and 6.2 dB respectively. Therefore, this phase angle control system can be used

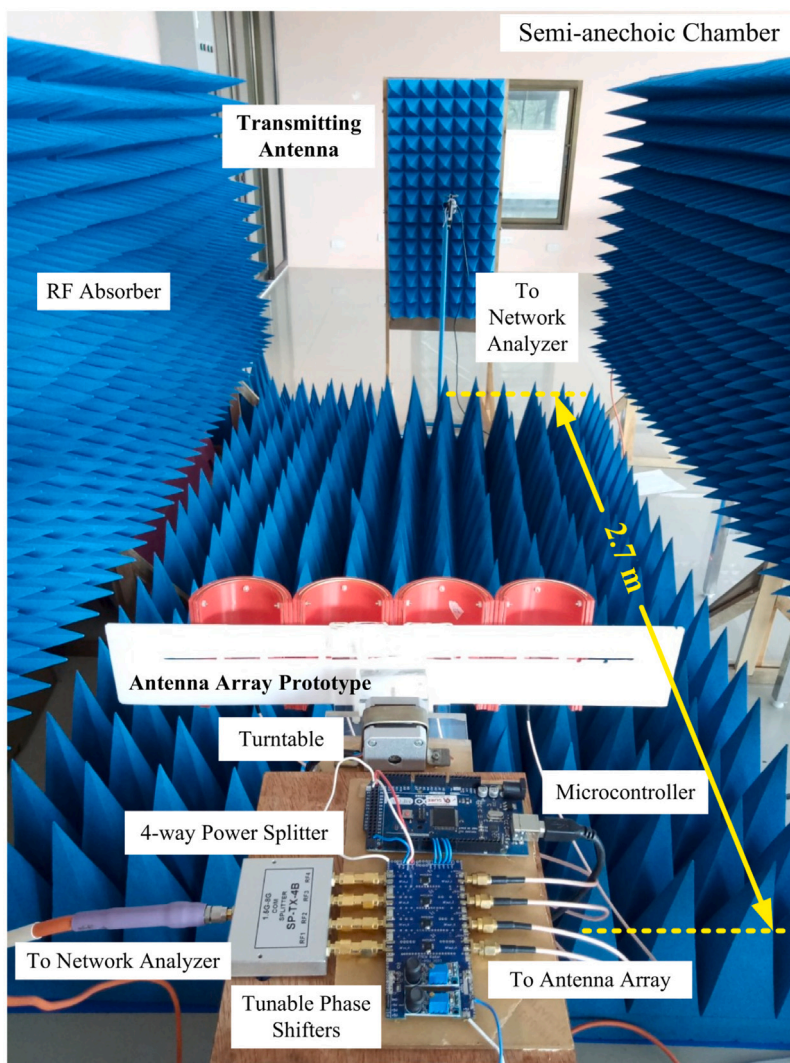


Fig. 14. Radiation pattern measurement setup in an anechoic chamber.

Table 7
Phased angle difference and calculated beam direction angle of antenna array.

Desired beam direction angle of antenna array (deg)	4-way power splitter and Phase shifters							Calculated direction angle of antenna array (deg)
	Phase shift (deg)				Calculated Phase difference (deg)			
	PS1	PS2	PS3	PS4	PS2-PS1	PS3-PS2	PS4-PS3	
0	85	88.3	91.5	91.1	3.3	3.2	-0.4	0.68
-15	80.9	39.3	1.8	-55	-41.6	-37.5	-56.8	-15.10
-30	83.3	-1.6	-89.4	-178.9	-84.9	-87.8	-89.5	-29.13
-45	80.9	-50.2	174.1	30.5	-131.1	-135.7	-143.6	-45.60
15	-42.1	1.8	43.9	88.5	43.9	42.1	44.6	14.51
30	170.1	-96	5.2	86.7	93.9	101.2	81.5	30.73
45	42.9	176.2	-42.8	84.9	133.3	141	127.7	44.67

for further testing to measure the beam direction of the antenna array prototype.

4.3.3. Radiation pattern of the antenna array prototype

After testing the phase angle control system, the radiation pattern of the antenna prototype was measured. The measurement setup system is shown in Fig. 14, which consists of 1. antenna array prototype, 2. phase angle control system, 3. semi-anechoic chamber, 4. transmitting antenna, 5. turntable, and 6. network analyzer. The testing distance between the two antennas was 2.70 m under the far-field condition ($D_{far-field} \geq 2.62$ m) and without any device and access point that

utilized 2.4 GHz Wi-Fi. The resolution step of this measurement system is 5 deg. The measurement of the radiation pattern was performed by rotating the antenna array prototype and measuring the radiation pattern of each beam direction through the control of the phase angle for each antenna element.

The antenna array prototype is already tuned to obtain the impedance matching at 2.45 GHz. Thus, we consider the antenna gain in this section. Fig. 15 shows the measured results of normalized gain with 0 degrees when switching the beam direction at 0, 15, 30, and 45 degrees by feeding the difference phased to each element. The measured results are in good agreement with the simulated results at

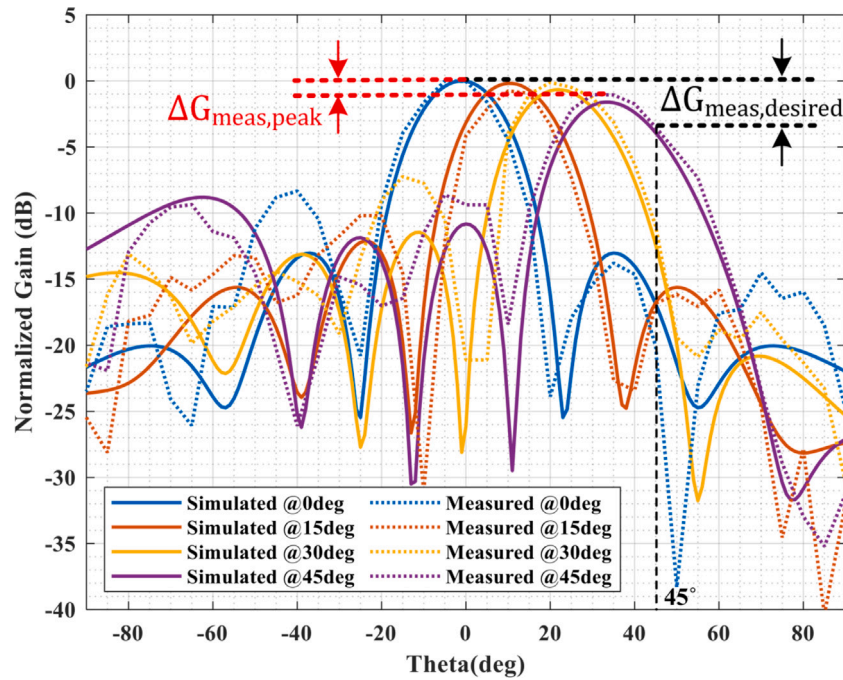


Fig. 15. The measured radiation pattern results of the planar antenna array with SCPA at 2.45 GHz.

Table 8

The simulated and measured results of gain and beam direction.

Parameters	Beam1	Beam2	Beam3	Beam4	ΔG (dB)
Sim. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 12.86	(15 deg) 12.59	(30 deg) 11.84	(45deg) 9.64	3.22
Meas. Gain at desired directions (dBi)	(0 deg) 11.83	(15 deg) 11.25	(30 deg) 10.94	(45 deg) 9.11	2.72
Sim. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 12.86	(13 deg) 12.80	(23 deg) 12.70	(35 deg) 11.50	1.36
Meas. Gain at beam peak directions (dBi)	(0 deg) 11.83	(13 deg) 11.48	(25 deg) 11.41	(35 deg) 10.06	1.77

the operating frequency of 2.45 GHz. The radiation patterns of each beam direction are in the same trend as the simulation. The measured gain did not include the insertion loss from phased shifter circuits of 6.2 dB. The simulated and measured gain of the desired beam and beam peak directions are shown in Table 8. From the measured results, it is obvious that the gain difference between the desired beam direction of 0 and 45 degrees is 2.72 dB. The gain difference between the beam direction of 0 degree and the furthest beam peak direction of 35 degrees is 1.77 dB. The measured result is slightly better than the simulated results. The results of the gain difference show that the planar antenna array with the SCPA are better than the planar antenna array with the SPPA. However, the beam peak directions of the planar antenna array in both the SPPA and SCPA can switch the direction of the angle less than the desired beam directions.

5. Conclusions

The design of SCPA for improving the constant-gain planar phased array antenna when switching the main beam direction to the desired direction was proposed in this paper. The beam-switching antenna array was designed in 4 main beam directions of 0, 15, 30, and 45 degrees. The proposed antenna array consists of 4-elements of the SCPA operating at 2.45 GHz. The SCPA has been developed using a rectangular patch with a suspended structure to improve antenna performance. It is composed of the FR-4 substrate and an air-gap layer. The simulated and measured results of the single element of SCPA were compared with the SPPA. The results show that the SCPA

antenna has a wider antenna beamwidth than the SPPA and beamwidth increases with decreasing the radius of curvature. The SCPA is used to investigate the planar phased antenna array with a separation of $0.60\lambda_0$. It is also compared with the antenna array using the SPPA. The simulated results show that the maximum directivity difference at the desired beam directions of the antenna array with the SCPA of $R = 30$ mm and the SPPA were 3.56 and 4.20 dB, respectively. The proposed antenna array prototype was fabricated with SCPA of $R = 30$ mm. The measured results of the radiation pattern were demonstrated and compared with the simulated results. The measured gain of the proposed antenna array at the desired beam directions of 0, 15, 30, and 45 degrees (not including the insertion loss of phased shifter circuits) were 11.83, 11.25, 10.94, and 9.11 dBi, respectively. The measured gain difference between the beam directions of 0 and 45 degrees was 2.72 dB. The SCPA is very useful for the application in a constant-gain beam-switching phased antenna array (i.e., SAR, Satellite communications, UAV).

Declaration of competing interest

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests: Vasan Jantarachote reports financial support was provided by the Broadcasting and Telecommunications Research and Development Fund for Public Interest (BTFP), The National Broadcasting and Telecommunication Commission (NBTC).

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgments

This paper and CST Microwave Studio 2021 program were supported by the Broadcasting and Telecommunications Research and Development Fund for Public Interest (BTFPI), The National Broadcasting and Telecommunication Commission (NBTC) Thailand under the grant number B2-074/1-63. A preliminary version of this work has been published in ECTI-CON 2022

References

- [1] Row JS, Tsai CW. Pattern reconfigurable antenna array with circular polarization. *IEEE Trans Antennas Propag* 2016;64(4):1525–30.
- [2] Bertin G, Bilotti F, Piovano B, Vallauri R, Vegni L. Switched beam antenna employing metamaterial-inspired radiators. *IEEE Trans Antennas Propag* 2012;60(8):3583–93.
- [3] Lin KCJ, Kuo TW, Yan PJ, Cheng WJ, Jeng SK. Beam configuration and client association for access points with switched beam antennas. *IEEE Trans Mob Comput* 2016;15(9):2179–92.
- [4] Lee H, Kim YB, Lee HL. Reconfigurable antenna for UAV-assisted wide coverage air-to-ground communications. *IEEE Access* 2022;10:88034–42.
- [5] Nakanishi T, Yoshida T, Ishida A, Uno H, Saito Y. Multiple-loop array antenna with switched beam for short-range radars. In: *IEEE vehicular technology conference*. 2006, p. 1–5.
- [6] Muriel-Barrado AT, Calatayud-Maeso J, Rodríguez-Gallego A, Sánchez-Olivares P, Fernández-González JM, Sierra-Pérez M. Evaluation of a planar reconfigurable phased array antenna driven by a multi-channel beamforming module at Ka band. *IEEE Access* 2021;9:63752–66.
- [7] Luo Q, Gao S, Carvalho N, et al. GaN-integrated beam-switching high-power active array for satellite communications. In: *12th European conference on antennas and propagation*. 2018, p. 1–5.
- [8] Tsai YC, Chen YB, Hwang RB. Combining the switched-beam and beam-steering capabilities in a 2-D phased array antenna system. *Radio Sci* 2016;51(1):47–58.
- [9] Moknache A, Dusopt L, Säily J, et al. A switched-beam linearly-polarized transmitarray antenna for V-band backhaul applications. In: *2016 10th European conference on antennas and propagation*. 2016, p. 1–5.
- [10] Burtowy M, Rzymowski M, Kulas L. Low-profile ESPAR antenna for RSS-based DoA estimation in IoT applications. *IEEE Access* 2019;7:17403–11.
- [11] Timsina RL, Messner RA, Kubwimana JL. A compact design of switched line phase shifter for a microstrip phased array antenna. In: *2017 Progress in electromagnetics research symposium - fall*. 2017, p. 1839–44.
- [12] Chang CC, Lee RH, Shih TY. Design of a beam switching/steering butler matrix for phased array system. *IEEE Trans Antennas Propag* 2010;58(2):367–74.
- [13] Meredov A, Klionovski K, Shamim A. Screen-printed, flexible, parasitic beam-switching millimeter-wave antenna array for wearable applications. *IEEE Open J Antennas Propag* 2020;1:2–10.
- [14] Balanis CA. *Antenna theory: analysis and design*. Wiley-Interscience; 2005.
- [15] Delos P, Broughton B, Kraft J. Phased array antenna patterns-Part 1: linear array beam characteristics and array factor. 2021, <https://www.analog.com/en/analogdialogue/articles/phased-array-antenna-patterns-part1.html>. (Accessed 26 February 2021).
- [16] Nazneen Z, Sunder MS, Bharath K, Ramakrishna D. 4-Stage switched beam phased array antenna using butler matrix. In: *2019 IEEE Indian conference on antennas and propagation*. 2019, p. 1–4.
- [17] Reddy MH, Siddle D, Sheela D. Design and implementation of a beam-steering antenna array using butler matrix feed network for X-band applications. *AEU - Int J Electron Commun* 2022;147:154147.
- [18] Sharawi MS, Deif S, Shamim A. An electronically controlled 8-element switched beam planar array. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett* 2015;14:1350–3.
- [19] Lee S, Lee Y, Shin H. A 28-GHz switched-beam antenna with integrated butler matrix and switch for 5G applications. *Sensors* 2021;21(15).
- [20] Singh A, Dubey R, Jatav R, Meshram MK. Electronically reconfigurable microstrip antenna with steerable beams. *AEU - Int J Electron Commun* 2022;149:154179.
- [21] Wang ZX, Yang H, Shao R, et al. A planar 4-bit reconfigurable antenna array based on the design philosophy of information metasurfaces. *Engineering* 2022.
- [22] Imbert M, Romeu J, Jofre L, Papió A, De Flaviis F. Switched-beam antenna array for 60 GHz WPAN applications. In: *2014 IEEE antennas and propagation society international symposium*. 2014, p. 1672–3.
- [23] Chen YS, Chou TH, Lin YD. A beam-switching tapered slot antenna array with an 8x8 butler matrix. In: *2015 IEEE international symposium on antennas and propagation USNC/URSI national radio science meeting*. 2015, p. 2481–2.
- [24] IEEE standard for definitions of terms for antennas. *IEEE Std 145-2013 Revision of IEEE Std 145-2014*, 1993, p. 1–50.
- [25] Hazarika B, Basu B, Kumar J. A multi-layered dual-band on-body conformal integrated antenna for WBAN communication. *AEU - Int J Electron Commun* 2018;95:226–35.
- [26] Sahoo R, Vakula D. Gain enhancement of conformal wideband antenna with parasitic elements and low index metamaterial for WiMAX application. *AEU - Int J Electron Commun* 2019;105:24–35.
- [27] Yinusa KA. A dual-band conformal antenna for GNSS applications in small cylindrical structures. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett* 2018;17(6):1056–9.
- [28] Beenamol KS, Samminga R, Dongaonkar P, F AM, Meena A. Conformal antenna arrays placed on cylindrical curved surfaces for radar applications. In: *2019 IEEE Indian conference on antennas and propagation*. 2019, p. 1–4.
- [29] Balderas LI, Reyna A, Panduro MA, Del Rio C, Gutiérrez AR. Low-profile conformal UWB antenna for UAV applications. *IEEE Access* 2019;7:127486–127494.
- [30] Knott P, Bertuch T, Wilden H, Peters O, Brenner AR, Walterscheid I. SAR experiments using a conformal antenna array radar demonstrator. *Int J Antennas Propag* 2012;2012:142542.
- [31] Knott P. Design and experimental results of a spherical antenna array for a conformal array demonstrator. In: *2007 2nd International ITG conference on antennas*. 2007, p. 120–3.
- [32] Xu H, Cui J, Duan J, Zhang B, Tian Y. Versatile conical conformal array antenna based on implementation of independent and endfire radiation for UAV applications. *IEEE Access* 2019;7:31207–17.
- [33] Xu F, Wei B, Li W, Liu J, Liu W, Qiu Y. Cylindrical conformal single-patch microstrip antennas based on three dimensional woven glass fiber/epoxy resin composites. *Compos B Eng* 2015;78:331–7.
- [34] Belamgi SB, Ray S, Das P. Suspended planar patch antenna for wireless energy transfer at 2.45 GHz. In: *International conference on electronics, communication and instrumentation*. 2014, p. 1–4.
- [35] Lee KF, Ho K, Dahele J. Circular-disk microstrip antenna with an air gap. *IEEE Trans Antennas Propag* 1984;32(8):880–4.
- [36] Colella R, Chietera FP, Catarinucci L. Analysis of FDM and DLP 3D-printing technologies to prototype electromagnetic devices for RFID applications. *MDPI Sensors* 2021;21(3).

