

สายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**DESIGN OF CONFORMAL PATCH ARRAY ANTENNA
FOR SHORT RANGE MISSILE**

Jessada Monthasuwan



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2013

สายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ชุตินา พรหมมาก)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภณ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

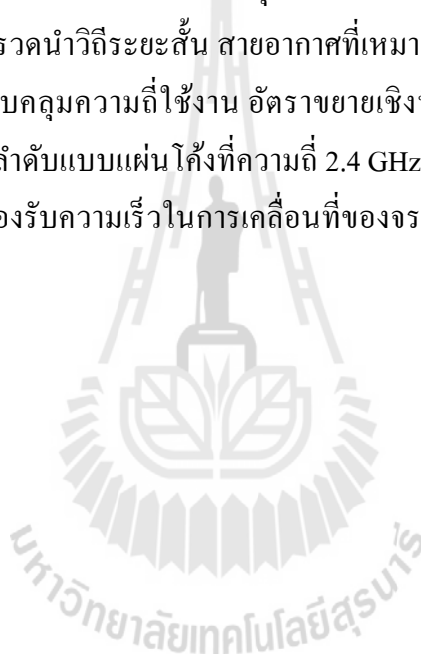
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

เจษฎา มณฑาสวรรณ : สายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น
(DESIGN OF CONFORMAL PATCH ARRAY ANTENNA FOR SHORT RANGE
MISSILE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 79 หน้า.

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น และมีการนำมาใช้งานกันในวงกว้าง ที่ผ่านมามีเทคโนโลยีการสื่อสาร ไร้สายนั้นได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว ด้วยรูปแบบการใช้งานและความสามารถที่แตกต่างกัน โดยที่สายอากาศแพทช์ไมโครสตริปนั้น เป็นสายอากาศที่ได้รับความนิยมนำมาใช้งานมากในการสื่อสารแบบไร้สาย เนื่องจากมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ต้นทุนต่ำ และมีโครงสร้างที่ง่าย ซึ่งมีการนำสายอากาศมาเข้ามาประยุกต์ใช้กับจรวดนำวิถีระยะสั้น สายอากาศที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งบนจรวดนำวิถีระยะสั้นต้องมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมความถี่ใช้งาน อัตราขยายเชิงทิศทางสูง วิทยานิพนธ์นี้จึงทำการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งที่ความถี่ 2.4 GHz โดยใช้ทองแดงหนา 0.1 มิลลิเมตร มีแบนด์วิดท์ที่กว้างเพื่อรองรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีระยะสั้น และมีอัตราขยายเชิงทิศทางสูง



JESSADA MONTHASUWAN : DESIGN OF CONFORMAL PATCH

ARRAY ANTENNA FOR SHORT RANGE MISSILE. THESIS ADVISOR :

ASST. PROF. CHANCHAI THONGSOPA, Ph.D., 79 PP.

RECTANGULAR PATH ARRAYS/SMALL MISSILE ANTENNA.

Nowadays, wireless communication systems have important role to the human livelihood and are used widely. The wireless communication technology has been developed and expanded rapidly with different styles and ability. Because of small, lightweight, low cost and simple structure, the micro-strip patch antenna is the popular antenna used in wireless communication. So an antenna is applied to shot range missile. The suitable antenna for installation on shot range missile must have bandwidth covering operating frequency and high directional gain. The objective of this thesis is to design the 2.4 GHz curve patch array antenna using 0.1 mm thin copper. This antenna has wide bandwidth to support the movement speed of shot range missile and high directional gain.

School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมที่คอยแนะนำช่วยเหลือให้คำปรึกษาอย่างดีมาโดยตลอด รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา รองศาสตราจารย์ ดร.พิระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจงนอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย อาจารย์ อาจารย์ ดร. บุญส่ง สุตะพันธ์ และ อาจารย์ ดร.ชนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ด้านวิชาการและให้โอกาสในการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษา โดยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

เจษฎา มณฑาทิวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	2
1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	2
1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	3
1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 ปรัชญาหรือค่านิยม.....	3
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	6
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.2 สายอากาศไมโครสตริป.....	7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.1	คุณลักษณะของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	9
2.2.2	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป.....	11
2.2.3	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ที่ทำการแมทช์อิมพีแดนซ์โดยใช้ Quarter-wavelength transformer.....	12
2.3	สายอากาศแถวลำดับ.....	21
2.3.1	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพทช์แถวลำดับ 4 อีลิเมนต์และ 8 อีลิเมนต์.....	21
2.4	อัตราขยาย.....	27
2.5	การเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถี.....	28
2.6	สรุป.....	28
3	การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น.....	30
3.1	กล่าวนำ.....	30
3.2	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ ลักษณะโค้ง.....	30
3.3	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ ลักษณะโค้ง.....	38
3.4	สรุป.....	45
4	ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น.....	46
4.1	กล่าวนำ.....	46
4.2	วิธีการสร้างและวัดทดสอบสายอากาศแพทช์ไมโครสตริปต้นแบบ.....	46
4.3	ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น.....	53
4.4	สรุป.....	64
5	สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1	สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	65
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	66
5.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	66
	รายการอ้างอิง.....	67
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	68
	ประวัติผู้เขียน.....	79

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้.....	11
2.2	ค่าพารามิเตอร์ สายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์.....	25
2.3	ค่าพารามิเตอร์ สายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์.....	26
3.1	ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์	34
3.2	ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์	41



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปรูปสี่เหลี่ยม	8
2.2	ลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริปวงกลม	8
2.3	สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก	9
2.4	กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวนำ	10
2.5	การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์	12
2.6	การแมตช์สายส่งเข้าด้วยกัน	13
2.7	แสดงขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมที่มีการแมตช์อิมพีแดนซ์โดยใช้ Quarter-wavelength transformer	14
2.8	แบบจำลองสายอากาศไมโครสตริป	18
2.9	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศไมโครสตริปแพทช์	18
2.10	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่ทำการปรับพารามิเตอร์	19
2.11	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้ปรับพารามิเตอร์แล้ว	20
2.12	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป	20
2.13	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปค่า Imaginary	20
2.14	การออกแบบตัวป้อนสัญญาณสายอากาศไมโครสตริปแพทช์แถวลำดับและออกแบบสายให้มีความยาว $\lambda / 4$	22
2.15	แสดงแบบจำลองลักษณะของตัวป้อนสัญญาณ	24
2.16	แสดงขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ 4 อิลิเมนต์	24
2.17	สายอากาศไมโครสตริป 4 อิลิเมนต์ ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม CST	25
2.18	สายอากาศไมโครสตริป 8 อิลิเมนต์ ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม CST	26
3.1	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 4 อิลิเมนต์	31
3.2	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 4 อิลิเมนต์	31
3.3	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป 4 อิลิเมนต์	32
3.4	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อิลิเมนต์ค่า Imaginary	32
3.5	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 4 อิลิเมนต์ลักษณะโค้ง	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.6	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ ลักษณะ โค้ง.....	33
3.7	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้งที่ปรับค่าพารามิเตอร์.....	35
3.8	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้ง ค่า Real	35
3.9	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้งค่า Imaginary	36
3.10	รูปอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้ง.....	36
3.11	ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้งในระนาบ XZ.....	37
3.12	ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้งในระนาบ YZ.....	37
3.13	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์.....	38
3.14	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์	39
3.15	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์.....	39
3.16	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ค่า Imaginary	40
3.17	โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้ง จำลองใน CST	40
3.18	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้ง	41
3.19	แสดงผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศ ไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้งที่ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์	42
3.20	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้ง ค่า Real.....	42
3.21	อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้ง ค่า Imaginary.....	43
3.22	รูปอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้ง.....	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.23 ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งในระนาบ XZ.....	44
3.24 ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งในระนาบ YZ.....	44
4.1 โปรแกรม AutoCAD 2011 จัดแต่งรูปร่างของสายอากาศ.....	47
4.2 โปรแกรม CoreIDRAW 9 กำหนดการตัดแผ่นสติกเกอร์.....	47
4.3 สายอากาศแพทช์ไมโครสตริปต้นแบบ.....	48
4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ต้นแบบ.....	48
4.5 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST ของ สายอากาศแพทช์ไมโครสตริปต้นแบบ.....	49
4.6 โปรแกรม AutoCAD 2011 จัดแต่งรูปร่างของสายอากาศ.....	50
4.7 โปรแกรม CoreIDRAW 9 กำหนดการตัดสติกเกอร์.....	50
4.8 สายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้ง 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบต่อ เข้ากับขั้วต่อชนิด SMA 50 โอห์ม.....	51
4.9 โปรแกรม AutoCAD 2011 จัดแต่งรูปร่างของสายอากาศ.....	51
4.10 โปรแกรม CoreIDRAW 9 กำหนดการตัดแผ่นสติกเกอร์.....	52
4.11 สายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้ง 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบต่อเข้ากับขั้วต่อ ชนิด SMA 50 โอห์ม.....	52
4.12 สายอากาศต้นแบบ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบ.....	54
4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ ลักษณะโค้งต้นแบบ.....	54
4.14 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศ แถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบ.....	55
4.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบ ในระนาบ XZ.....	55
4.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบ ในระนาบ YZ.....	56

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17	เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศ แถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบในระนาบ XZ.....56
4.18	เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศ แถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบในระนาบ YZ.....57
4.19	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ ลักษณะ โคงังต้นแบบ57
4.20	สายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบ58
4.21	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ ลักษณะ โคงังต้นแบบ59
4.22	เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศ แถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบ59
4.23	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงัง ต้นแบบในระนาบ XZ.....60
4.24	แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบ ในระนาบ YZ.....60
4.25	เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศ แถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบในระนาบ XZ.....61
4.26	เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศ แถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบในระนาบ YZ.....61
4.27	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงัง ต้นแบบ62
4.28	วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบ.....63
4.29	วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบ.....63

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

E	=	electric field
H	=	magnetic field
β	=	propagation constant
h	=	thickness of substrate
l	=	length of microstrip or patch antenna
S_{11}	=	input reflection coefficient
ϵ_{eff}	=	effective dielectric constant
ϵ_r	=	relative permittivity
ϵ_0	=	permittivity of free space
μ_0	=	permeability of free space
f	=	frequency
f_h	=	upper frequency
f_l	=	lower frequency
f_c	=	centre frequency
f_r	=	resonance frequency
ω	=	angular frequency
λ	=	wavelength
λ_0	=	wavelength of electromagnetic wave in free space
λ_d	=	wavelength of electromagnetic wave in dielectric
c	=	velocity of light
W	=	width of the microstrip patch antenna
Z_{in}	=	input impedance
Z_{out}	=	output impedance
IEEE	=	the Institute of Electrical and Electronics Engineers

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น และมีการนำมาใช้งานกันในวงกว้าง ซึ่งที่ผ่านมาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว ด้วยรูปแบบการใช้งานและความสามารถที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการสื่อสารแบบไร้สายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญช่วยอำนวยความสะดวกด้านการสื่อสารได้อย่างมาก รวมถึงด้านอุตสาหกรรม ด้านการสื่อสารและเทคโนโลยีด้านสุขภาพ ด้านการเมือง และด้านการทหาร โดยมีการนำสายอากาศมาเข้ามาประยุกต์ใช้กับจรวดนำวิถีด้วยเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งเป้าหมาย

จรวดนำวิถีมีพิสัยการยิงสามระยะคือ จรวดนำวิถีระยะสั้น จรวดนำวิถีระยะกลาง และจรวดนำวิถีระยะไกล ซึ่งในแต่ละระยะมีความเร็วที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ น้ำหนัก วัสดุที่ใช้ทำจรวดนำวิถี รวมถึงเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน สายอากาศที่เหมาะสมสำหรับใช้ติดตั้งบนจรวดนำวิถีระยะสั้นมีแบนด์วิดท์ที่กว้างเพื่อรองรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถี มีอัตราขยายสูงเพื่อให้สามารถรับส่งได้ในระยะทางที่ต้องการ สายอากาศที่นำมาติดตั้งบนจรวดนำวิถีที่มีอยู่เดิมนั้นมีโครงสร้างที่ซับซ้อน และวัสดุที่นำมาใช้มีต้นทุนสูง

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำสายอากาศแพทช์ทำการแกลวลำดับและนำกราวอยู่ด้านเดียวกับสายอากาศแพทช์ ปรับตั้งค่าที่ความถี่ศูนย์กลาง 2.4 GHz เพื่อให้มีอัตราขยายเชิงทิศทางที่สูงเพื่อรองรับกับรุ่นของจรวดนำวิถีที่ได้ออกแบบไว้แล้วทำการตัดโค้งเพื่อให้สะดวกในการใช้ติดตั้งกับจรวดนำวิถีระยะสั้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของระบบการสื่อสารไร้สาย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาคูณลักษณะสมบัติจรวดนำวิถีระยะสั้น
- 1.2.3 เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบสายอากาศใช้งานบนจรวดนำวิถีระยะสั้น

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง์งที่ความถี่ 2.4 GHz
- 1.3.2 ออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง์งให้มีแบนด์วิดท์กว้าง และอัตราขยายเชิงทิศทางสูง
- 1.3.3 สร้างต้นแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง์งที่ความถี่ 2.4 GHz
- 1.3.4 วัดและทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง์งที่สร้างขึ้น โดยนำไปติดตั้งบนท่อพีวีซีที่มีรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง์งความถี่ 2.4 GHz ออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง์งให้มีแบนด์วิดท์กว้าง และอัตราขยายเชิงทิศทางสูง
- 1.4.2 ทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศจริง โดยใช้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายที่ความถี่ 2.4 GHz
- 1.4.3 สร้างสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง์ง ติดตั้งบนท่อพีวีซีที่มีรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร
- 1.4.4 วิเคราะห์ผลกระทบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง์งบนท่อพีวีซีที่มีรูปทรงกระบอก

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน
 - 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
 - 2) สร้างสายอากาศต้นแบบ ที่ความถี่ 2.4 GHz
 - 3) ทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
- 1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

 - 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
 - 2) สร้างสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz สำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น
 - 3) วิเคราะห์คุณสมบัติและปรับแต่งจนได้ระบบที่มีประสิทธิภาพ

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 (F4) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personnel Computer)
- 2) โปรแกรมสำเร็จรูป CST
- 3) เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายเวกเตอร์ (Network Analyzer)

1.5.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการจำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
- 3) นำผลจากการจำลองดังกล่าว ไปวิเคราะห์ และออกแบบสายอากาศ ที่ความถี่

2.4 GHz

4) เก็บรวบรวมผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และผลที่ได้จากการนำไปวัดทดสอบจริง

1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

โดยการนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไว้ในทางทฤษฎี การจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และผลที่ได้จากการนำไปทดสอบจริงมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลเพื่อหาประสิทธิภาพของสายอากาศที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้สายอากาศที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับจรวดนำวิถีระยะสั้น โดยมีโครงสร้างง่าย น้ำหนักเบา มีแบนด์วิดท์กว้างและอัตราขยายเชิงทิศทางสูง

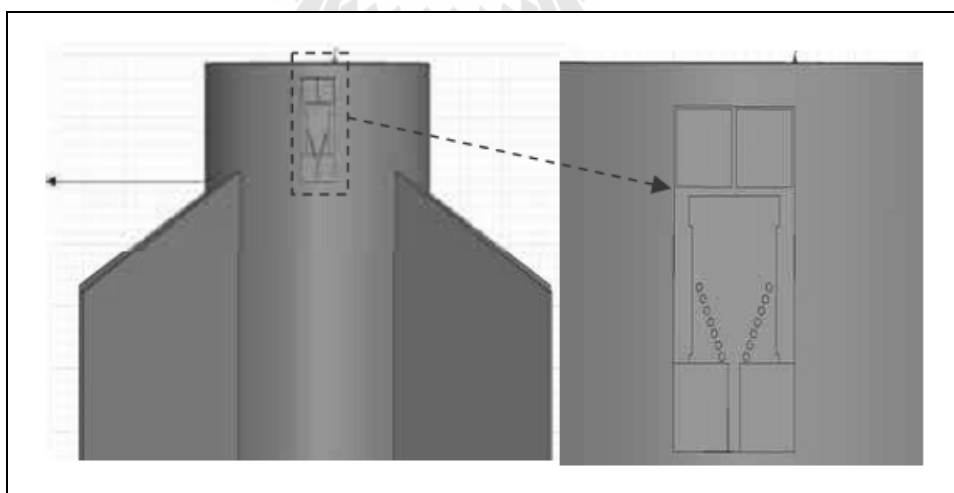
1.7 ปรัชศน์วรรณกรรม

ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยได้มีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาและอาศัยฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE และฐานข้อมูล IEICE นอกจากนี้ยังได้มีการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ โดยจากผลการสืบค้นที่ได้นั้นจะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึง ปรัชญ์นัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศประยุกต์การใช้งานบนจรวดนำวิถีระยะสั้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบสายอากาศสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย โดยงานวิจัยในส่วนของสายอากาศนี้ถือเป็นการวิจัยพื้นฐานที่สำคัญมากสำหรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย ซึ่งสายอากาศเป็นส่วนประกอบที่จำเป็นสำหรับระบบการสื่อสารไร้สายเนื่องจากเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นของระบบสื่อสารไร้สาย และการรับส่งสัญญาณของระบบจะมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสายอากาศด้วยเช่นกัน โดยเฉพาะการนำสายอากาศไปประยุกต์ใช้งาน สายอากาศสำหรับใช้ติดตั้งบนจรวดนำวิถีระยะสั้นซึ่งจะพิจารณาได้จาก ขนาดของจรวดนำวิถี ความถี่ที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณ พิสัยในการยิง รวมถึงความเร็วของจรวด ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการเลือกใช้สายอากาศซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สายอากาศแพทช์ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ขนาดเบา วัสดุหาซื้อได้ง่าย และสามารถออกแบบตัดโค้งเพื่อสะดวกในการติดตั้งกับจรวดนำวิถีระยะสั้น

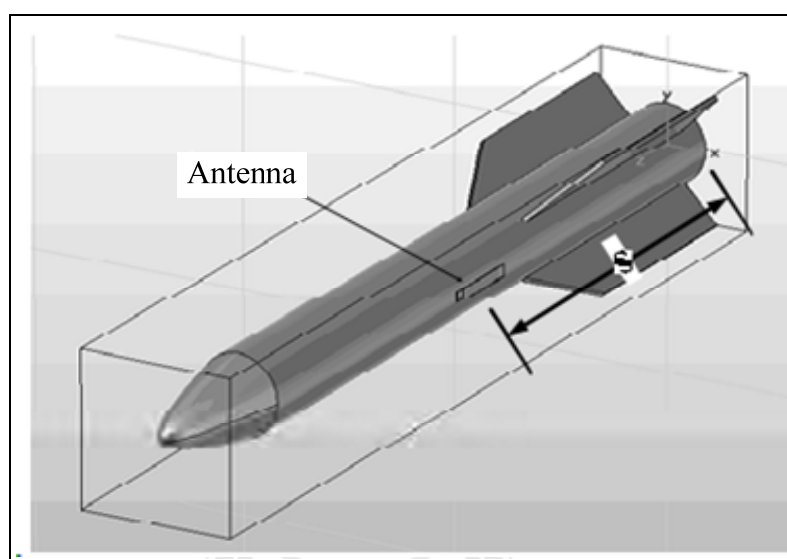
ปี ค.ศ. 2013 งานวิจัยหัวข้อ “Design of Missile-Mounted SIW Antenna with High Directivity for Data Transmission” เป็นการศึกษาสายอากาศที่ใช้ติดตั้งบนจรวดนำวิถีโดยใช้แผ่น FR4 จากรูปที่ 1.1 ในการออกแบบความถี่ 4.83 GHz มีอัตราขยายเฉลี่ย 5 dBi มีการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางเดียว



รูปที่ 1.1 การศึกษาสายอากาศที่ใช้ติดตั้งกับจรวดนำวิถีโดยใช้แผ่น FR4 ในการออกแบบ
(Wen-Chung Liu, et.al, 2013)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยของ Wen-Chung Liu ได้ศึกษาสายอากาศที่ใช้ติดตั้งบนจรวดนำวิถี ซึ่งสายอากาศมีโครงสร้างที่ซับซ้อน และมีการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางเดียว

ปี ค.ศ. 2010 งานวิจัยหัวข้อ “Research of The Missile and Aircraft Base Mounted Antennas for Data Transmission” เป็นการศึกษาสายอากาศที่ใช้ติดตั้งบนจรวดนำวิถีโดยใช้ความถี่ 400 MHz มีอัตราขยายเฉลี่ย 6 dB มีการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางเดียว



รูปที่ 1.2 การศึกษาสายอากาศที่ใช้ติดตั้งกับจรวดนำวิถี (Cong Chen, Li, et.al, 2010)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยของ Cong Chen, Li ได้ศึกษาสายอากาศที่ใช้ติดตั้งบนจรวดนำวิถี ซึ่งสายอากาศมีโครงสร้างที่ซับซ้อน วัสดุที่ใช้ออกแบบมีราคาสูง และมีการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางเดียว

ดังนั้นจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรม ผู้วิจัยมีความสนใจในการออกแบบสายอากาศที่ใช้ติดตั้งบนจรวดนำวิถีระยะสั้น โดยใช้แผ่นทองแดงบางซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่าย ในการออกแบบมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สายอากาศมีลักษณะโค้งสามารถติดตั้งได้ง่าย และมีการแผ่กระจายกำลังงานรอบทิศทาง

1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

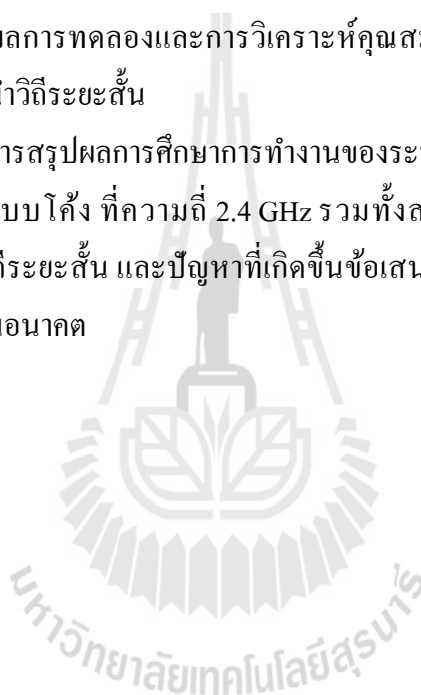
บทที่ 1 เป็นบทนำ โดยกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของเทคโนโลยีการสื่อสารสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น ทฤษฎีของสายอากาศเบื้องต้น ทฤษฎีสายอากาศไมโครสตริปแพทช์

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแพทช์แบบ โค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของสายอากาศ สำหรับประยุกต์ใช้งานบนจรวดนำวิถีระยะสั้น

บทที่ 5 กล่าวถึงการสรุปผลการศึกษางานของระบบการสื่อสารไร้สาย และออกแบบสายอากาศแบบแพทช์แบบ โค้ง ที่ความถี่ 2.4 GHz รวมทั้งสรุปผลที่ได้จากการสร้างต้นแบบสายอากาศบนจรวดนำวิถีระยะสั้น และปัญหาที่เกิดขึ้นข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหา และแนวทางการพัฒนาในอนาคต



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

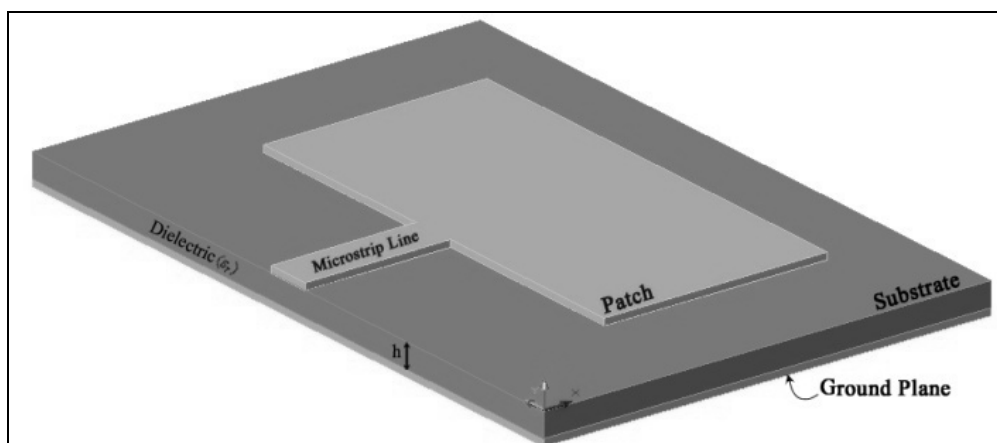
2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับสายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna) ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีความเหมาะสมในการใช้งานและมีหลายแบบหลายชนิด โดยมีโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป โดยได้มีการพัฒนาและปรับปรุงมาโดยตลอด สายอากาศซึ่งเลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ ซึ่งจะทำการออกแบบและการคำนวณสายอากาศด้วยโปรแกรม CST (Microwave Studio 2009) ต่อมาจะกล่าวถึงทฤษฎีสายอากาศแถวลำดับ (array) (Sabban, et.al., 2007); (Yu, et.al., 2008); (DeJean, et.al., 2007) การออกแบบตัวป้อนสัญญาณ (feed network) (DeJean, et.al., 2007) และค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ 4 อีลิเมนต์ รวมทั้งค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ 8 อีลิเมนต์ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้ได้ความถี่ที่ใช้กับจรวดนำวิถีระยะสั้นที่มีความถี่ 2.4 GHz จากนั้นกล่าวถึงอัตราขยายของสายอากาศ (El-Sheikh, 2004) และการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีระยะสั้น และในส่วนท้ายจะเป็นการสรุปเนื้อหาทั้งหมดในบทนี้

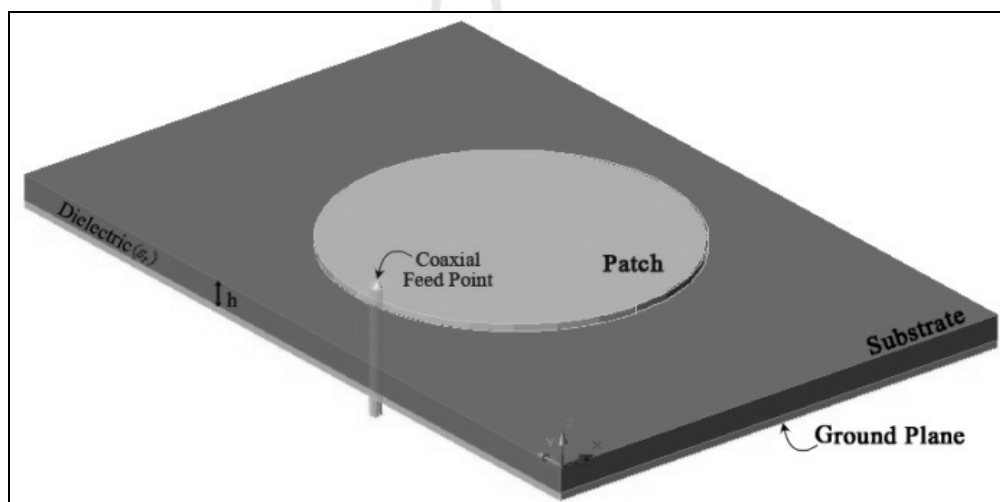
2.2 สายอากาศไมโครสตริป

สายอากาศไมโครสตริปประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นสายอากาศที่เป็น แผ่นตัวนำ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากหรือวงกลม ซึ่งถูกแยกออกจากแผ่นระนาบกราวด์ และมีลักษณะเป็นชั้นหรือที่เรียกว่าเป็นวัสดุฐานรอง (substrate) ของสารไดอิเล็กตริก ซึ่งสายอากาศแบบไมโครสตริปนี้ได้รับความนิยมอย่างมากสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากมีลักษณะแบนราบ ไม่ต้านลม และสามารถติดกับผิวของยานพาหนะได้ นอกจากนี้ยังมีข้อดีคือราคาถูก น้ำหนักเบา และมีความสะดวกในการสร้างและการติดตั้ง

โดยจากรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 เป็นการแสดงลักษณะ โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปแผ่นตัวนำรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากและรูปร่างวงกลม ซึ่งสายอากาศดังกล่าวนี้มีความสะดวกในการสร้างลงในแผ่นวงจรพิมพ์ โดยแผ่นตัวนำจะถูกวางไว้ด้านหนึ่งของแผ่นวงจรพิมพ์ และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแผ่นระนาบกราวด์ (ground plane)

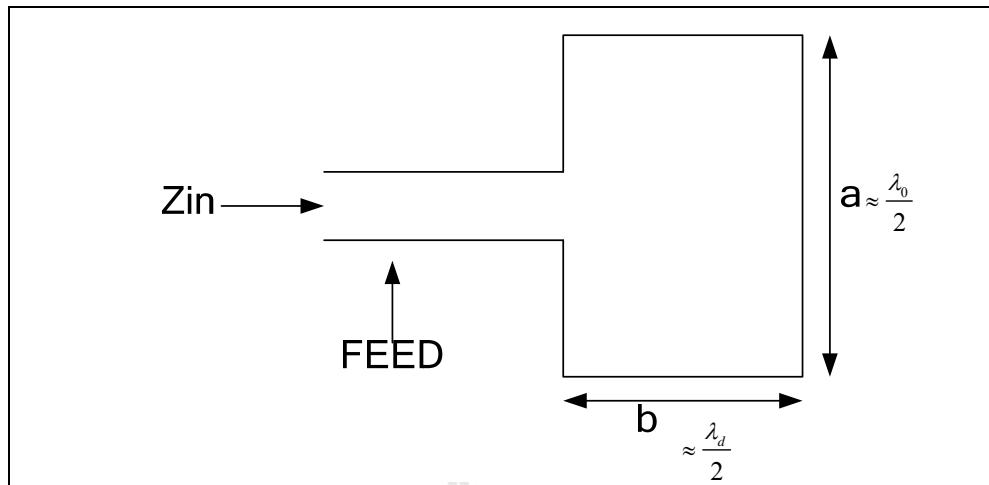


รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบไมโครสตริปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศแบบไมโครสตริปวงกลม

สำหรับสายอากาศไมโครสตริปนั้น ความแม่นยำของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองถือว่ามีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อการเดินทางของคลื่น ความถี่เรโซแนนซ์ และคุณลักษณะการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยการแสดงคุณลักษณะของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (characteristics of a rectangular patch)



รูปที่ 2.3 สายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานรูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

2.2.1 คุณลักษณะของแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก

รูปที่ 2.3 แสดงมิติพื้นฐานของสายอากาศไมโครสตริปซึ่งเป็นแพทช์รูปสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Balanis, C.A, 1989) โดยค่าความนำของสายอากาศจะเป็นฟังก์ชันของความกว้าง a โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์จะเป็นฟังก์ชันของความยาว b ซึ่งจะถูกกำหนดโดย

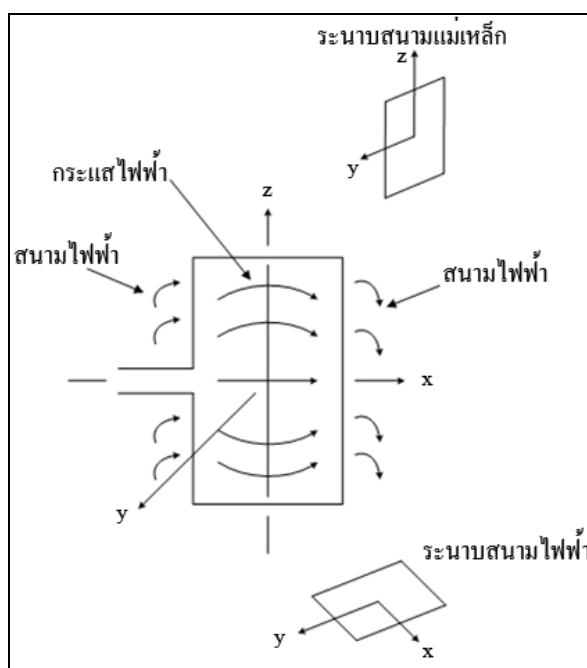
$$a \approx \lambda_d \approx \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

$$b = 0.49\lambda_d = 0.49 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

โดยที่ λ_d คือ ความยาวคลื่นในสารไดอิเล็กตริก

λ_0 คือ ความยาวคลื่นในอากาศว่าง

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของวัสดุฐานรอง



รูปที่ 2.4 กระแสไฟฟ้าและลักษณะเส้นแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวนำ

รูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นการแสดงกระแสไฟฟ้า และเส้นแรงของสนามไฟฟ้าทั้งภายในและบริเวณรอบ ๆ แผ่นตัวนำ โดยปกติสนามไฟฟ้าที่บริเวณขอบของแผ่นตัวนำที่ถูกต่อด้วยสายนำสัญญาณและด้านตรงข้ามขอบนั้น จะมีผลต่อคุณสมบัติการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ คลื่นที่แผ่กระจายจากสายอากาศดังรูปที่ 2.4 จะมีการโพลาไรซ์ในแนวนอน ซึ่งระนาบของสนามไฟฟ้า (E-plane) จะมีทิศทางในแนวนอน และระนาบของสนามแม่เหล็ก (H-plane) จะมีทิศทางในแนวตั้ง

ระยะห่าง b ซึ่งเป็นระยะของขอบทั้งสองด้านของแพทช์ จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นที่เดินทางภายในสารไดอิเล็กตริก ($0.49\lambda_d$) ซึ่งที่ระยะห่างขนาดนี้จะมีผลทำให้ร่องที่อยู่ตรงข้ามมีการป้อนด้วยเฟสที่ตรงกันขาม อย่างไรก็ตามสนามไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากองค์ประกอบทั้งสองจะมีการเสริมกันเนื่องจากเฟสตรงกัน ทำให้ทิศทางการแผ่กระจายคลื่นออกมาในทิศตั้งฉากกับองค์ประกอบ (ในทิศทาง y)

2.2.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ (microstrip patch antenna) ที่เป็นสี่เหลี่ยมทำบนแผ่น FR4 แบบสองหน้า ซึ่งพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับใช้ในการออกแบบได้แก่

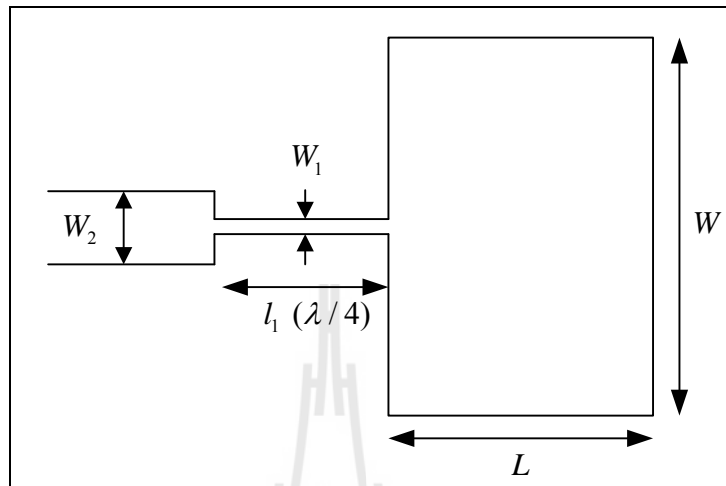
- 1) ความถี่ปฏิบัติการของสายอากาศ (f_0) หรือ resonant frequency (f_r) ซึ่งสายอากาศไมโครสตริปที่ได้ออกแบบมีความถี่ปฏิบัติการคือ 2.4 GHz
- 2) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของฉนวน (dielectric constant : ϵ_r) ซึ่งไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้ในการออกแบบเป็น FR4 แบบสองหน้าซึ่งมีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.4
- 3) ความสูงของไดอิเล็กตริกฉนวน (h) สำหรับในการออกแบบนี้มีความสูง h เท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปก่อนนำไปออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบโค้งแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

Frequency	2.4 GHz
Substrate	FR4
Substrate Height	1.6 mm
Dielectric Constant, ϵ_r	4.4
Conductor Thickness	35.0 um

2.2.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ที่ทำการแมทช์อิมพีแดนซ์ โดยการใช้ Quarter-wavelength transformer



รูปที่ 2.5 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์

จากรูปที่ 2.5 ทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์ทำงานที่ย่านความถี่ 2.4 GHz ซึ่งมีค่าคงที่ (ϵ_r) เท่ากับ 4.4 และวัสดุฐานรองมีความหนาเท่ากับ 0.16 เซนติเมตร ทำการ feed input impedance 50 โอห์ม และทำการแมทช์อิมพีแดนซ์โดย พิจารณาที่ l_1 ดังรูปที่ 2.6 การคำนวณโดยใช้วิธี Quarter-wavelength transformer (Balanis, C.A,1989) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

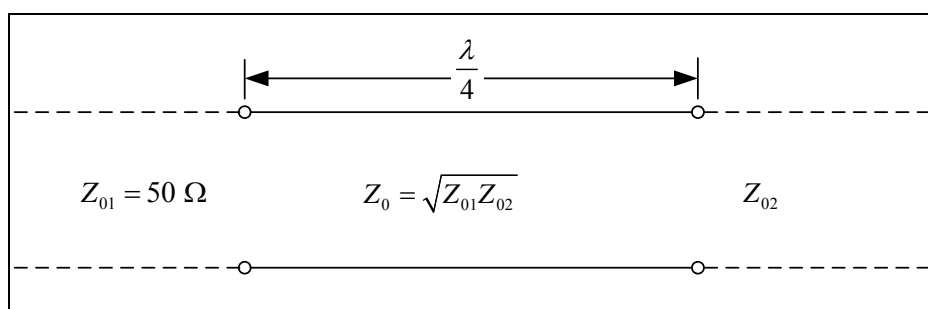
$$Z_0 = \sqrt{Z_{01} Z_{02}} \quad (2.3)$$

กำหนดค่า

Z_{01} = อิมพีแดนซ์ด้านเข้า (input impedance)

Z_{02} = อิมพีแดนซ์ด้านออก (output impedance)

Z_0 = อิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (characteristic impedance)



รูปที่ 2.6 การแมตช์สายส่งเข้าด้วยกัน

จากข้อมูลสายอากาศ

$$f_r = 2.4 \text{ GHz}, \quad h = 0.16 \text{ cm}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_r} = 12.5 \text{ cm}$$

คำนวณหาความกว้าง (W) ซึ่งความกว้างของสายอากาศไมโครสตริปแบบแพทช์กำหนดโดยสมการ

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (2.4)$$

โดยการแทน $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$, $\epsilon_r = 4.4$ และ $f_r = 2.4 \text{ GHz}$ ซึ่งจะได้

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2(2.4 \times 10^9)} \left(\frac{4.4 + 1}{2} \right)^{-1/2}$$

$$W = 3.8 \text{ cm}$$

คำนวณหา Effective dielectric constant (ϵ_{eff}) กำหนดโดยสมการ

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

โดยการแทน $\epsilon_r = 4.4$, $W = 3.8$ cm และ $h = 0.16$ cm จะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{4.4 + 1}{2} + \frac{4.4 - 1}{2} \left[1 + \frac{12(0.0016)}{0.038} \right]^{-1/2}$$

$$\epsilon_{eff} = 4.08$$

คำนวณหา Effective length (L_{eff}) ซึ่งกำหนดโดยสมการ

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.6)$$

โดยการแทน $\epsilon_{eff} = 4.08$, $c = 3 \times 10^8$ m/s และ $f_r = 2.4$ GHz จะได้

$$L_{eff} = \frac{3 \times 10^8}{2(2.4 \times 10^9) \sqrt{4.08}}$$

$$L_{eff} = 3 \text{ cm}$$

คำนวณหา length extension (ΔL) กำหนดโดยสมการ

$$\Delta L = 0.412h \left(\frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \right) \left(\frac{\frac{W}{h} + 0.264}{\frac{W}{h} + 0.8} \right) \quad (2.7)$$

โดยการแทน $\epsilon_{eff} = 4.08$, $W = 3.8$ cm และ $h = 0.16$ cm จะได้

$$\Delta L = 0.412(0.0016) \left(\frac{4.08 + 0.3}{4.08 - 0.258} \right) \left(\frac{\frac{0.038}{0.0016} + 0.264}{\frac{0.038}{0.0016} + 0.8} \right)$$

$$\Delta L = 0.07 \text{ cm}$$

คำนวณหาความยาวจริงของแพทช์ (L) หาได้โดย

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.8)$$

โดยการแทน $L_{eff} = 3$ cm และ $\Delta L = 0.07$ cm จะได้

$$L = 0.03 - 2(0.0007) = 2.8 \text{ cm}$$

หา อิมพีแดนซ์ด้านออก และ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของ transformer

$$R_m = \frac{1}{(2G_e)} \quad (2.9)$$

$$G_e = 0.00836 \frac{W}{(\lambda_0)}$$

เมื่อ $G_e =$ แสดงสื่อกระแสไฟฟ้าบริเวณขอบของแพทช์

$$R_m = 196.73 \text{ โอห์ม}$$

เนื่องจาก

$$R_m = 196.73 \text{ โอห์ม} = Z_{02} = \text{อิมพีแดนซ์ด้านออก}$$

ดังนั้น อิมพีแดนซ์ลักษณะของ transformer

$$Z_0 = \sqrt{196.73 \times 50} \approx 100 \text{ โอห์ม}$$

หาความกว้าง W_1 และ W_2 ได้จาก

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$$H' = \frac{Z_0 \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{\epsilon_r} \ln \frac{4}{\pi} \right) \quad (2.11)$$

การคำนวณหา W_1 โดยแทน $Z_0 = 156.02$ โอห์ม, $h = 0.16$ cm และ $\epsilon_r = 4.4$

$$\frac{W_1}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1}$$

$$H' = \frac{156.02 \sqrt{2(4.4 + 1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.4 - 1}{4.4 + 1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.4} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

$$\frac{W_1}{h} = 0.095 \text{ ดังนั้น } W_1 = 0.015 \text{ cm}$$

การคำนวณหา W_2 โดยแทน $Z_0 = 50$ โอห์ม และ $h = 0.16$ cm

$$\frac{W_2}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1}$$

$$H' = \frac{50\sqrt{2(4.4+1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.4-1}{4.4+1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.4} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

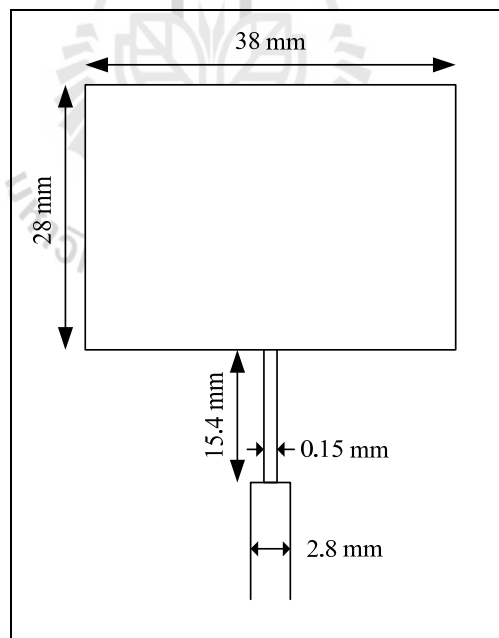
$$\frac{W_2}{h} = 1.79 \text{ ดังนั้น } W_2 = 0.28 \text{ cm}$$

คำนวณหาความยาวของ Transformer (l_1)

$$l_1 = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (2.12)$$

โดยการแทน $\lambda_0 = 12.5 \text{ cm}$ และ $\epsilon_{eff} = 4.08$

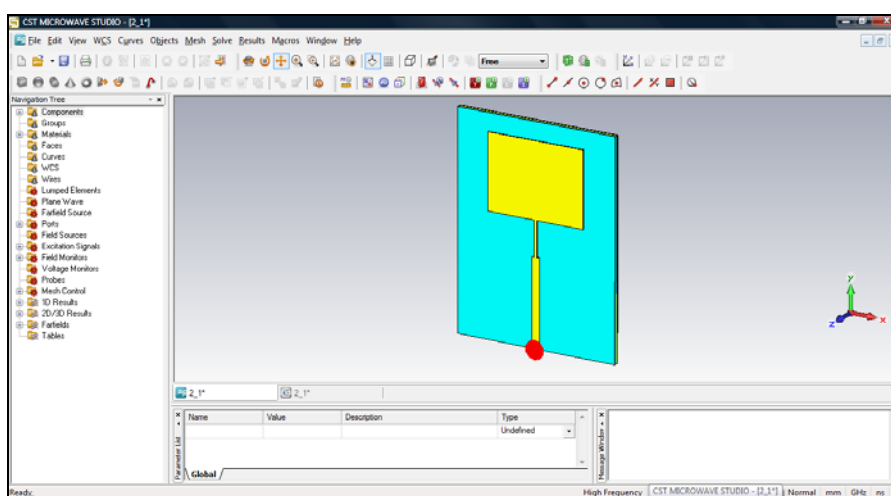
$$l_1 = 1.54 \text{ cm}$$



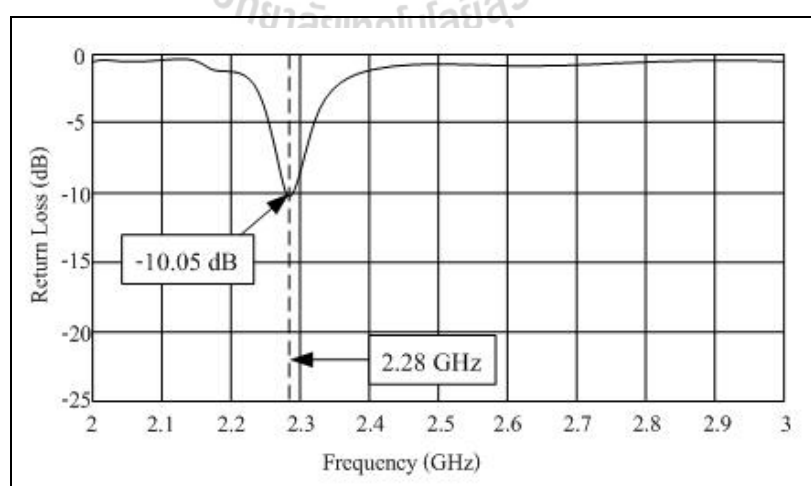
รูปที่ 2.7 แสดงขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมที่มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้

Quarter-wavelength transformer

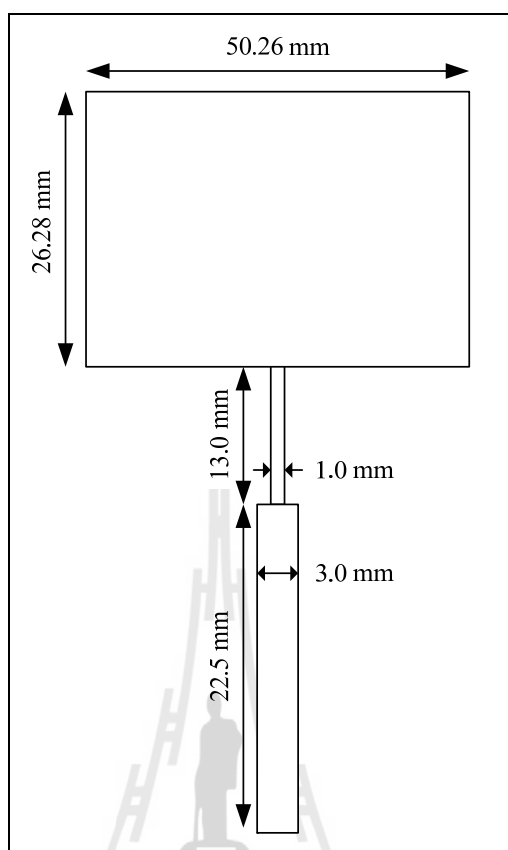
จากรูปที่ 2.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์สี่เหลี่ยมที่มีการแมทซ์อิมพีแดนซ์โดยใช้ Quarter-wavelength transformer จะเป็นค่าเริ่มต้นในการออกแบบสายอากาศจำลองแบบในโปรแกรม CST ดังรูปที่ 2.8 จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศดังรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศในช่วงที่ต่ำกว่า -10 dB ไม่ใช่ความถี่ปฏิบัติงานที่ต้องการ ดังนั้นจึงได้ปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้สายอากาศสามารถทำงานที่ความถี่ที่ต้องการได้



รูปที่ 2.8 แบบจำลองสายอากาศไมโครสตริป

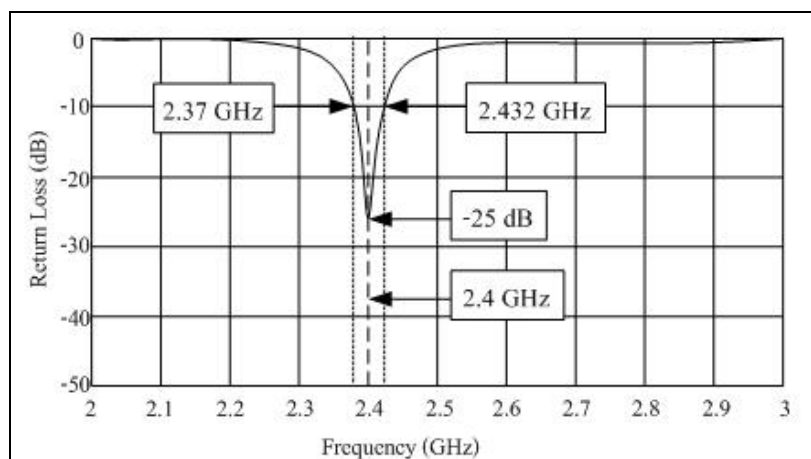


รูปที่ 2.9 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับสายอากาศไมโครสตริปแพทช์

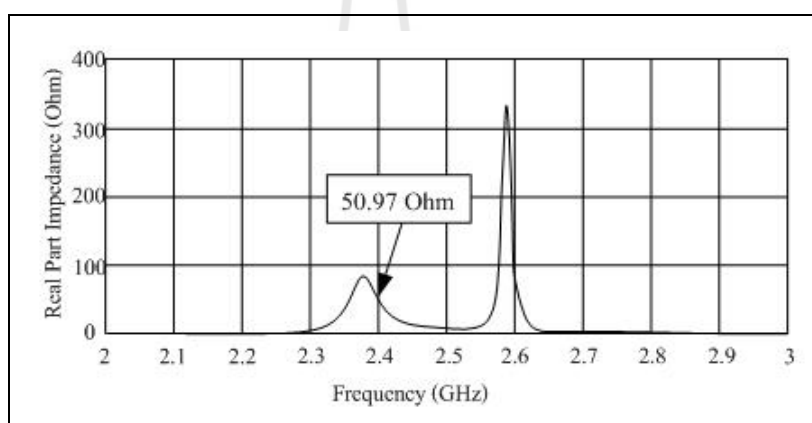


รูปที่ 2.10 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปที่ทำการปรับพารามิเตอร์

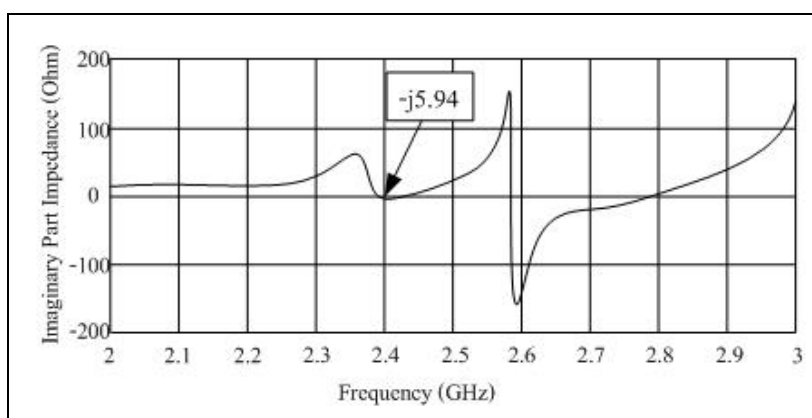
จากรูปที่ 2.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ ซึ่งได้จากการจำลองและออกแบบด้วยโปรแกรม CST จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $W_1 = 1$ มิลลิเมตร, $W_2 = 3$ มิลลิเมตร $W = 50.26$ มิลลิเมตร, $L = 26.28$ มิลลิเมตร และ $l_1 = 13$ มิลลิเมตร ต่อมาจะพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและอิมพีแดนซ์ของสายอากาศตามลำดับ จากรูปที่ 2.11 ที่ความถี่ 2.4 GHz ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมีค่าเท่ากับ -25 dB ที่ต่ำกว่า -10 dB มีช่วงแบนวิดท์ตั้งแต่ 2.37 GHz – 2.432 GHz และอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ $50.97 - j5.94$ โอห์มดังรูปที่ 2.12 และรูปที่ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S_{11}) ที่ได้ปรับพารามิเตอร์แล้ว



รูปที่ 2.12 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป



รูปที่ 2.13 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปค่า Imaginary

2.3 สายอากาศแถวลำดับ

สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) หมายถึง การนำเอาสายอากาศหลาย ๆ อีลิเมนต์มาจัดวางเรียงกัน โดยสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์ที่นำมาจัดเรียงให้เป็นแถวลำดับนั้น มีข้อดีคือจะทำให้สามารถเพิ่มค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าอัตราขยายของสายอากาศได้ นอกจากนี้สายอากาศแบบแถวลำดับยังสามารถปรับขนาดของแอมพลิจูด (amplitude) และเฟส (phase) ของสัญญาณที่ป้อนให้แต่ละอีลิเมนต์ได้อีกด้วย ซึ่งทำให้สามารถปรับแบบรูปการแผ่กระจายกำลังงานให้เป็นไปตามที่เราต้องการในการใช้งานแต่ละประเภทได้

ค่าสภาพเจาะจงทิศทางรวมทั้งค่าอัตราขยายเชิงกำลังงานของสายอากาศแถวลำดับ มักจะมีค่ามากกว่าของสายอากาศอีลิเมนต์เดี่ยว ซึ่งคุณสมบัตินี้มีประโยชน์อย่างมากทั้งในการส่งและรับสัญญาณ ในการส่งสัญญาณนั้น สายอากาศที่มีสภาพเจาะจงทิศทางที่ดี จะสามารถรวบรวมกำลังงานให้อยู่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางอื่น ๆ ได้ ซึ่งให้ผลเสมือนว่าเกิดการเพิ่มกำลังงานให้กับทิศทางนั้น ๆ ของเครื่องส่ง ส่วนทางด้านรับสายอากาศจะทำหน้าที่เสมือนว่าเลือกรับคลื่นที่เข้ามาในทิศทางที่เจาะจง โดยจะไม่เลือกรับสัญญาณที่เราไม่ต้องการรวมทั้งการแทรกสอดจากทิศทางอื่น ๆ

สายอากาศแถวลำดับแบบเชิงเส้น (linear antenna array) เป็นสายอากาศแถวลำดับแบบพื้นฐานและมีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด คือประกอบด้วยสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์วางเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงซึ่งอาจจะมีระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์เท่ากันหรือไม่เท่ากันก็ได้ เป็นสายอากาศแบบเชิงเส้นจำนวน N อีลิเมนต์ หรือ $N \times 1$ อีลิเมนต์ ในการวางตัวสายอากาศของสายอากาศแถวลำดับจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงระยะห่าง (d) ของแต่ละอีลิเมนต์ เนื่องจากระยะห่างของสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์นั้นจะมีผลต่อการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศโดยปกติแล้วสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์จะวางตัวห่างกันเท่ากับครึ่งความยาวคลื่น ซึ่งการคำนวณหาระยะห่างระหว่างสายอากาศแต่ละอีลิเมนต์นั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (2.14)

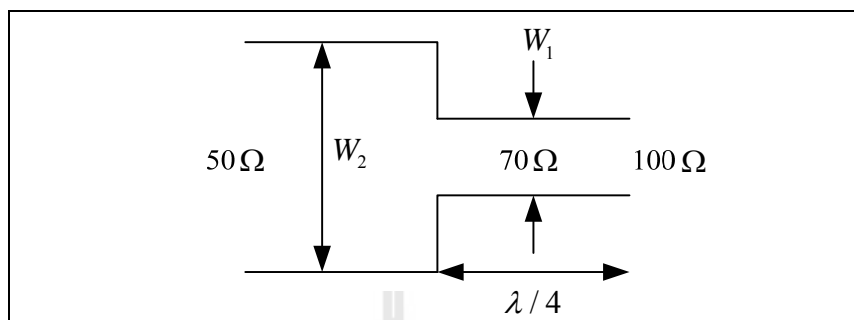
$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.13)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น

2.3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพทช์แถวลำดับ 4 อีลิเมนต์และ 8 อีลิเมนต์

การออกแบบหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณและขนาดของลายทองแดง โดยทำการออกแบบตัวป้อนสัญญาณสายอากาศไมโครสตริปแพทช์แถวลำดับกับสายอากาศที่มี

ค่าอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม การออกแบบค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณซึ่งจะใช้ทฤษฎีการแปลงอิมพีแดนซ์โดยจะออกแบบสายให้มีความยาว $\lambda/4$ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การออกแบบตัวป้อนสัญญาณสายอากาศไมโครสตริปแพทช์แถวลำดับและออกแบบสายให้มีความยาว $\lambda/4$

วิธีการคำนวณหาค่าความกว้างของลายทองแดงโดยใช้สมการที่ 2.11 และ 2.12

เมื่อ $Z_0 = 50$ โอห์ม, $h = 0.16$ cm และ $\epsilon_r = 4.4$

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1}$$

$$H' = \frac{50\sqrt{2(4.4+1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.4-1}{4.4+1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.4} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

$$\frac{W}{h} = 1.79 \text{ ดังนั้น } W = 0.28 \text{ cm}$$

เมื่อ $Z_0 = 70$ โอห์ม, $h = 0.16$ cm และ $\epsilon_r = 4.4$

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1}$$

$$H' = \frac{70\sqrt{2(4.4+1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.4-1}{4.4+1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.4} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

$$\frac{W}{h} = 1.04 \text{ ดังนั้น } W = 0.16 \text{ cm}$$

เมื่อ $Z_0 = 100$ โอห์ม, $h = 0.16$ cm และ $\epsilon_r = 4.4$

$$\frac{W}{h} = \left(\frac{(\exp H')}{8} - \frac{1}{4 \exp H'} \right)^{-1}$$

$$H' = \frac{100\sqrt{2(4.4+1)}}{119.9} + \frac{1}{2} \left(\frac{4.4-1}{4.4+1} \right) \left(\ln \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4.4} \ln \frac{4}{\pi} \right)$$

$$\frac{W}{h} = 0.44 \text{ ดังนั้น } W = 0.07 \text{ cm}$$

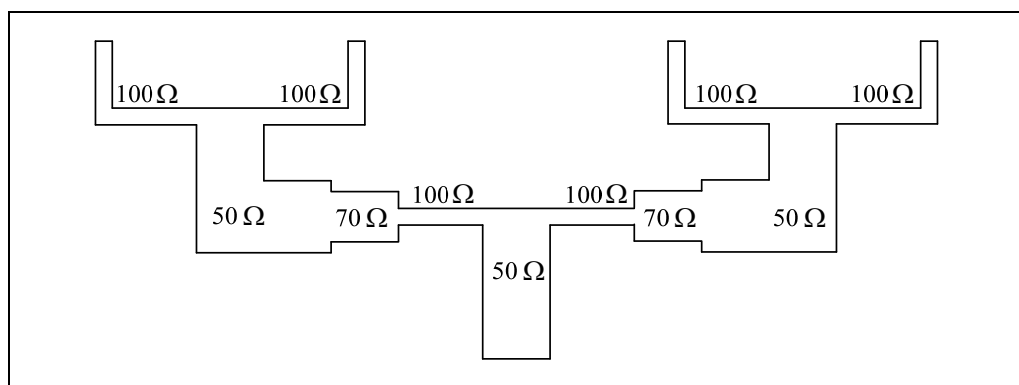
สรุปขนาดของลายทองแดงที่ใช้ในการออกแบบตัวป้อนสัญญาณ

ที่ $Z_0 = 50$ โอห์ม ขนาดของลายทองแดงจะมีค่าประมาณ 2.8 มิลลิเมตร

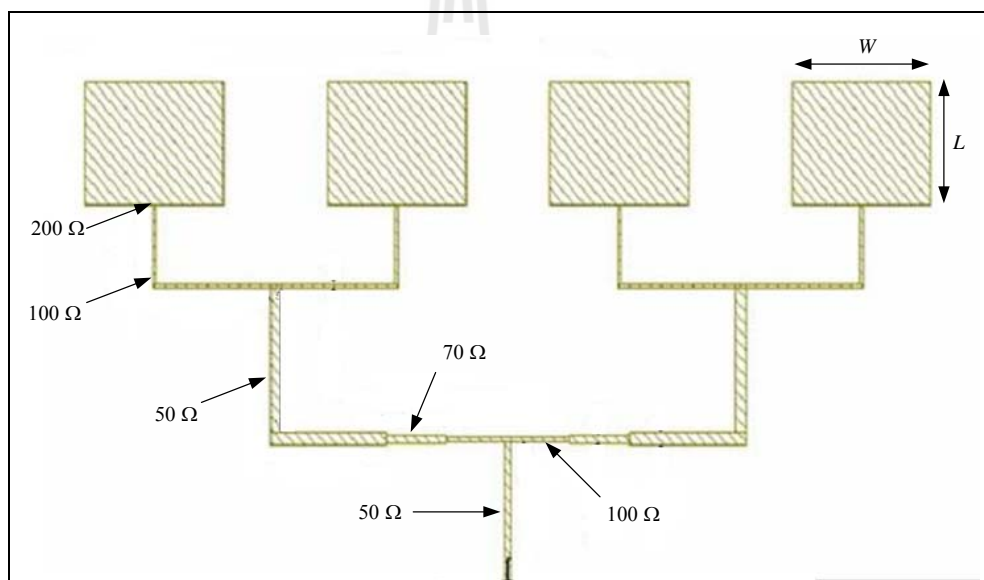
ที่ $Z_0 = 70$ โอห์ม ขนาดของลายทองแดงจะมีค่าประมาณ 1.6 มิลลิเมตร

ที่ $Z_0 = 100$ โอห์ม ขนาดของลายทองแดงจะมีค่าประมาณ 0.7 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 2.15 แสดงแบบจำลองลักษณะของตัวป้อนสัญญาณ โดยจะนำค่าพารามิเตอร์ขนาดของลายทองแดงที่ได้จากการคำนวณ นำมาออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ 4 อีลิเมนต์ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $W = 50.26$ มิลลิเมตร, $L = 26.28$ มิลลิเมตร, $W_1 = 1.6$ มิลลิเมตร, $W_3 = 0.7$ มิลลิเมตร, $W_2 = 2.8$ มิลลิเมตร

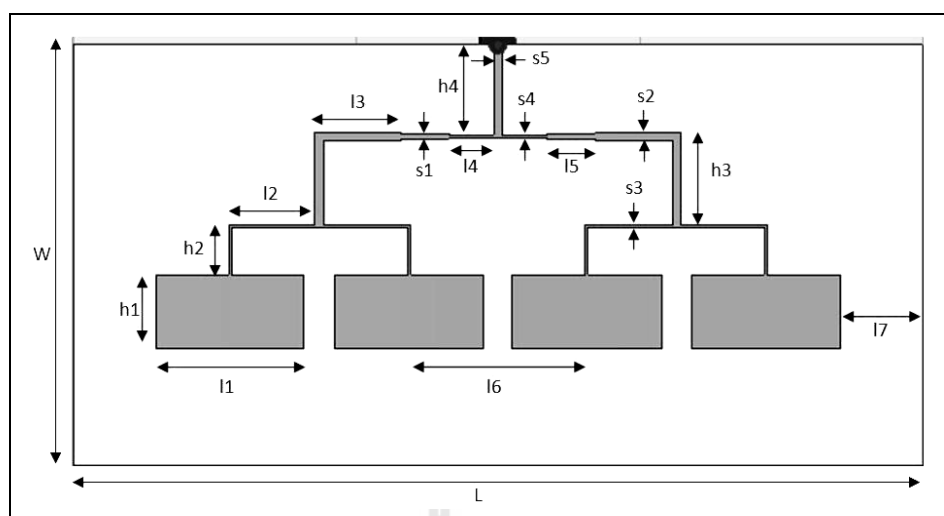


รูปที่ 2.15 แสดงแบบจำลองลักษณะของตัวป้อนสัญญาณ



รูปที่ 2.16 แสดงขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ 4 อีลิเมนต์

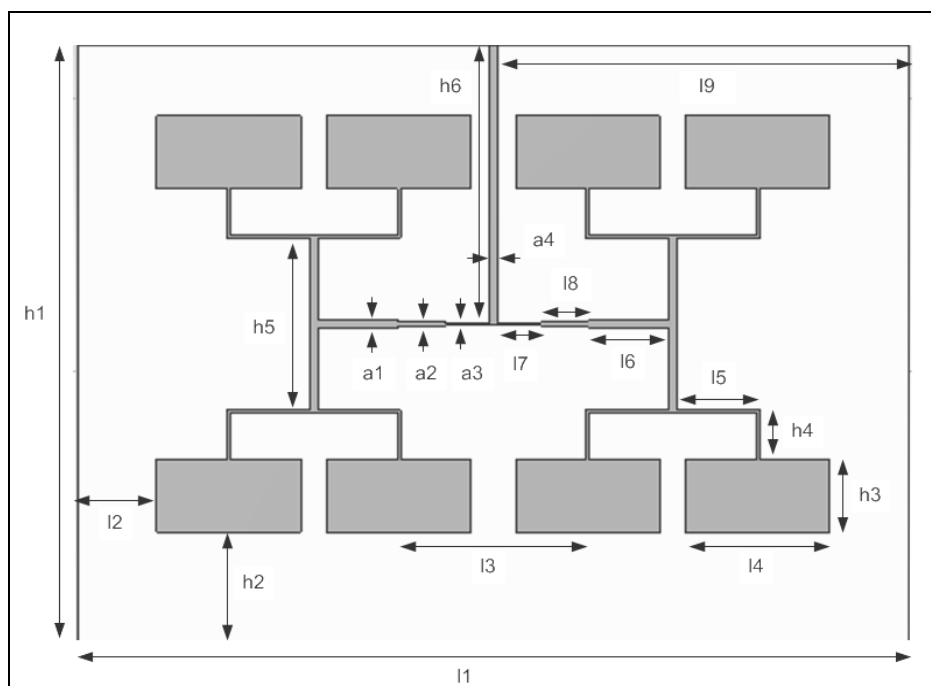
จากรูป 2.16 แสดงขนาดของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ 4 อีลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม CST เพื่อจำลองและปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ ให้มีความถี่ปฏิบัติงานคือ 2.4 GHz สายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 2.17 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ แสดงดังตารางที่ 2.2 สายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ ซึ่งมีการออกแบบโดยใช้ทฤษฎีเดียวกันกับสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 2.18 และได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม CST ให้มีความถี่ปฏิบัติการเท่ากับ 2.4 GHz แสดงดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.17 สายอากาศไมโครสตริป 4 อิลิเมนต์ ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม CST

ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ สายอากาศไมโครสตริป 4 อิลิเมนต์

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	150	h1	26.6
L	300	h2	18
l1	52.6	h3	33
l2	30.75	h4	32
l3	30.25	s1	2
l4	15.75	s2	3
l5	17	s3	1
l6	63.5	s4	1
l7	29.25	s5	3



รูปที่ 2.18 สายอากาศไมโครสตริป 8 อิลิเมนต์ ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม CST

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ สายอากาศไมโครสตริป 8 อิลิเมนต์

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
11	300	h1	220
12	28.5	h2	41
13	68	h3	27
14	52	h4	18
15	29.75	h5	63
16	29	h6	102
17	15.75	a1	3
18	17	a2	2
19	148.5	a3	1
a4	3		

2.4 อัตรายาย

การวัดอัตรายายของสายอากาศ (C. A. Balanis, 1997) เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับการวัดสภาพเจาะจงทิศทางตลอดจนประสิทธิภาพการแผ่กระจายกำลังงานของสายอากาศ โดยอัตรายายจริงของสายอากาศเป็นอัตราส่วนของความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานที่ได้รับเข้ามา

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.14)$$

ถ้ากำลังงานที่รับเข้ามาโดยสายอากาศนั้น มีการแผ่กระจายกำลังงานในลักษณะของไอโซทรอปิกแล้ว ความเข้มของการแผ่กระจายกำลังงานในลักษณะนี้จะมีค่าเท่ากับกำลังงานที่สายอากาศรับเข้ามาที่ขั้วอินพุทหารด้วย 4π ส่วนอัตรายายสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนของอัตรายายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตรายายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น ซึ่งกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุทของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบนั้นจะเป็นสายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้นจะได้

$$G = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in} \text{ (isotropic Source)}} \quad (2.15)$$

การวัดอัตรายายโดยวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (two-antenna method) สายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับและอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง โดยมีลักษณะทุกอย่างที่เหมือนกันสามารถนำสมการพื้นฐาน (Friis transmission equation) มาคำนวณคือ

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (2.16)$$

เมื่อ P_t คือกำลังงานอินพุทที่ป้อนให้สายอากาศส่ง G_t คืออัตรายายของสายอากาศส่ง P_r คือกำลังงานเอาต์พุทของสายอากาศรับ G_r คืออัตรายายของสายอากาศรับ และ r คือระยะห่างระหว่าง

สายอากาศส่งและสายอากาศส่งรับเมื่อสายอากาศรับและสายอากาศส่งเป็นสายอากาศรูปแบบเดียวกัน ดังนั้น $G_r = G_t = G$ เมื่อนำไปคำนวณหาอัตราขยายในหน่วย dB ได้ดังนี้

$$G_{dB} = \frac{1}{2} \left[20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \right] \quad (2.17)$$

2.5 การเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถี

การเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีซึ่งมีความเร็วประมาณ 1.1 มัค (mach) จะเป็นปรากฏการณ์ดอปเปลอร์ (doppler shift) (Bassem, R, 2009) (Melvin, M, 2006) ที่หน้าคลื่นเคลื่อนที่มาเสริมกันในลักษณะที่เป็นหน้าคลื่นวงกลมซ้อนเรียงกันไป โดยที่มีแนวหน้าคลื่นที่มาเสริมกันมีลักษณะเป็นรูปตัว V อันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่มากกว่าความเร็วของคลื่นในตัวกลาง หน่วยของความเร็วซึ่งเรียกว่า มัค หน่วยมัค คือ ตัวเลขที่บอกให้เราทราบว่า อัตราเร็วของแหล่งกำเนิดคลื่น มีค่าเป็นกี่เท่าของอัตราเร็วของคลื่นในตัวกลาง หน่วยมัคถูกเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ " Ma "

การออกแบบสายอากาศที่ใช้งานกับจรวดนำวิถีขนาดเล็กจะต้องมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมในการรับส่งสัญญาณในขณะที่จรวดไม่มีการเคลื่อนที่และมีการเคลื่อนที่ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีนำวิถีระยะสั้น ทำการคำนวณ โดยใช้ความเร็วประมาณ 2 มัค ที่ความถี่ 2.4 GHz ± 11.072 kHz สามารถคำนวณได้จากสมการที่

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \text{ Hz} \quad (2.18)$$

เมื่อ f_0 คือ ความถี่ของตัวส่งสัญญาณ Hz

v คือ ความเร็วของจรวดนำวิถี m / s

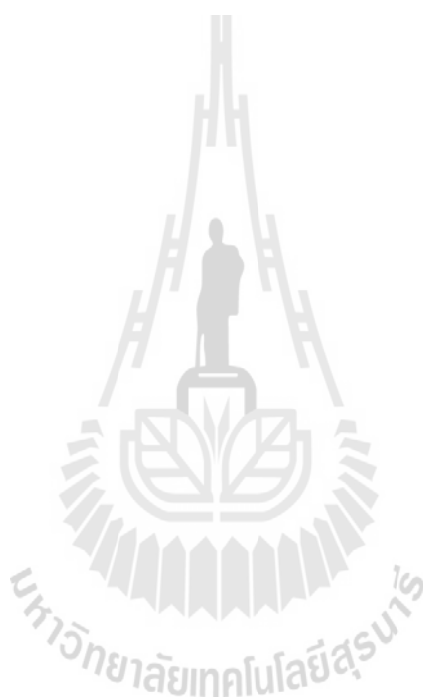
c คือ ความเร็วแสง m / s

f_d คือ ความถี่ของสัญญาณที่ Hz เปลี่ยนแปลงจาก f_0 เมื่อ $(f_0 \pm f_d)$

2.6 สรุป

การศึกษาหลักการและเทคนิควิธีต่าง ๆ สำหรับการออกแบบสายอากาศให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับจรวดนำวิถีระยะสั้นเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมได้มีการศึกษา

หลักการพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศคือค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ ช่วงของแบนวิดท์ อัตราขยายของสายอากาศและแบบรูปการแผ่กระจายพลังงาน ซึ่งหลักการและทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ในบทนี้ เพื่อการออกแบบและประยุกต์ใช้งานสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้นต่อไป



บทที่ 3

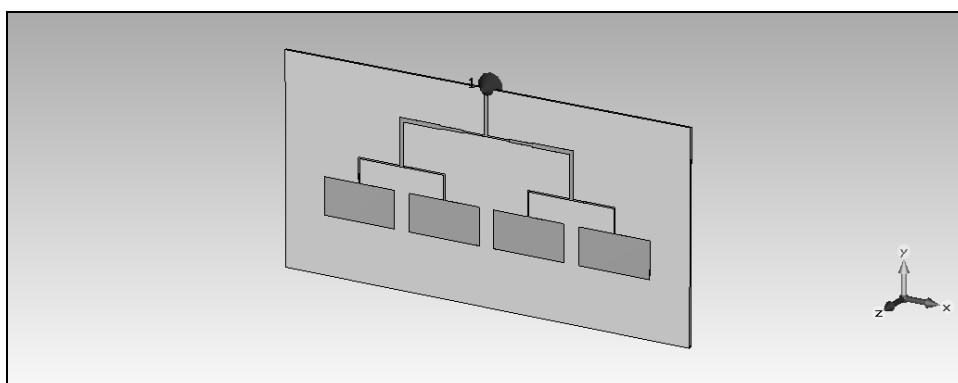
การออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น

3.1 กล่าวนำ

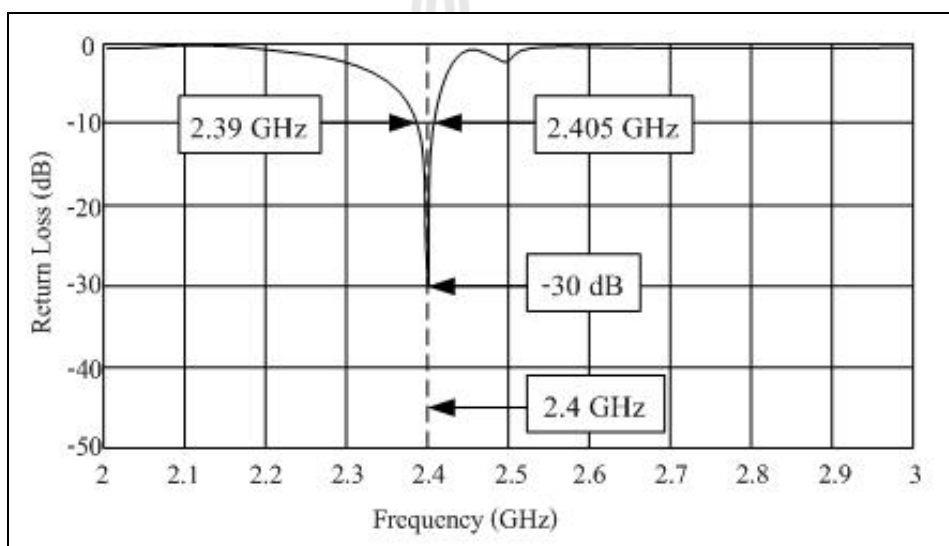
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้ง จากทฤษฎีบทที่ 2 ได้นำค่าพารามิเตอร์การออกแบบสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ และ 8 อีลิเมนต์ ประยุกต์ใช้กับจรวดนำวิถีระยะสั้น ทำการคัดโค้งเพื่อให้สะดวกในการใช้ติดตั้งช่วยให้มีรูปการแผ่กระจายพลังงานโดยรอบในกรณีที่จรวดนำวิถีมีการหมุน และมีช่วงแบนวิดท์รองรับการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีระยะสั้น ซึ่งในบทนี้สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการออกแบบในส่วนของสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งและส่วนที่สองเป็นการจำลองแบบ โดยในการออกแบบส่วนประกอบของสายอากาศดังกล่าวซึ่งจะใช้โปรแกรม CST ในการจำลองผลเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างสายอากาศต้นแบบต่อไป

3.2 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง

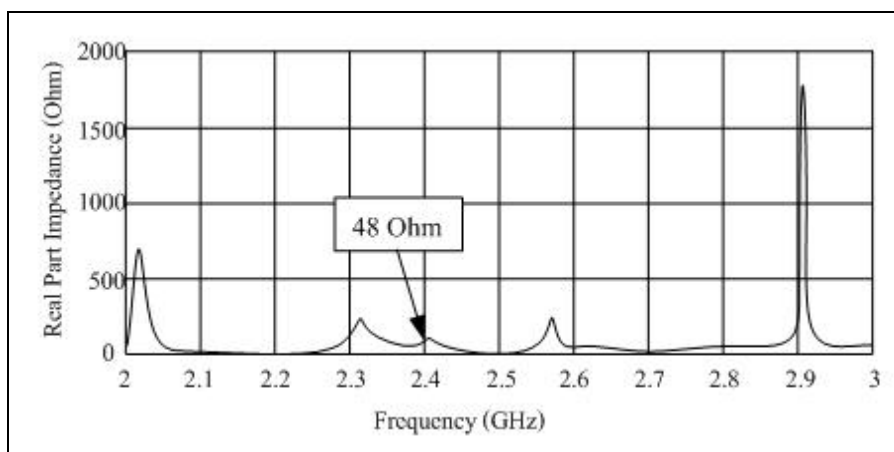
จากการออกแบบสายอากาศได้ทำการจำลองแบบโดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR4 จำลองสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ โดยใช้พารามิเตอร์จากตารางที่ 2.2 ในบทที่ 2 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำสายอากาศไปตัดโค้ง การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป จะใช้โปรแกรม CST จำลองและออกแบบสายอากาศ โดยโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.2 ที่ต่ำกว่า -10 dB มีช่วงแบนวิดท์ตั้งแต่ 2.39 GHz – 2.405 GHz ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -30 dB จากนั้นจึงพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์มีค่าเท่ากับ $48 - j2 \Omega$ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจากการจำลองมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการใช้งาน



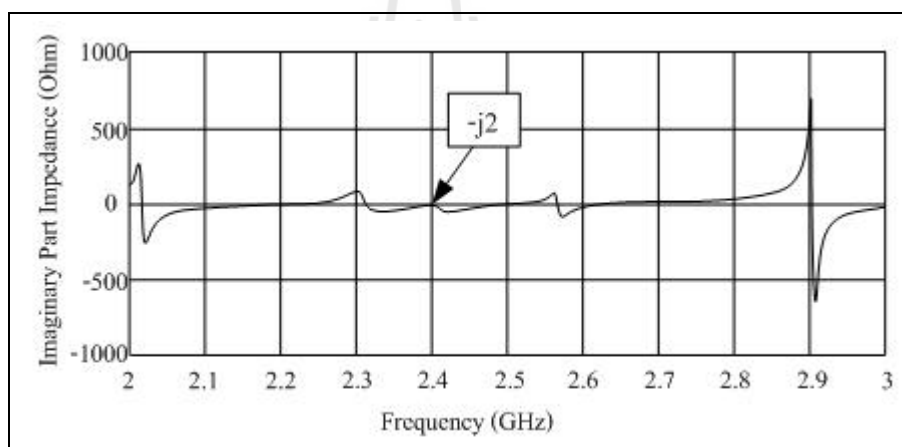
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์



รูปที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์

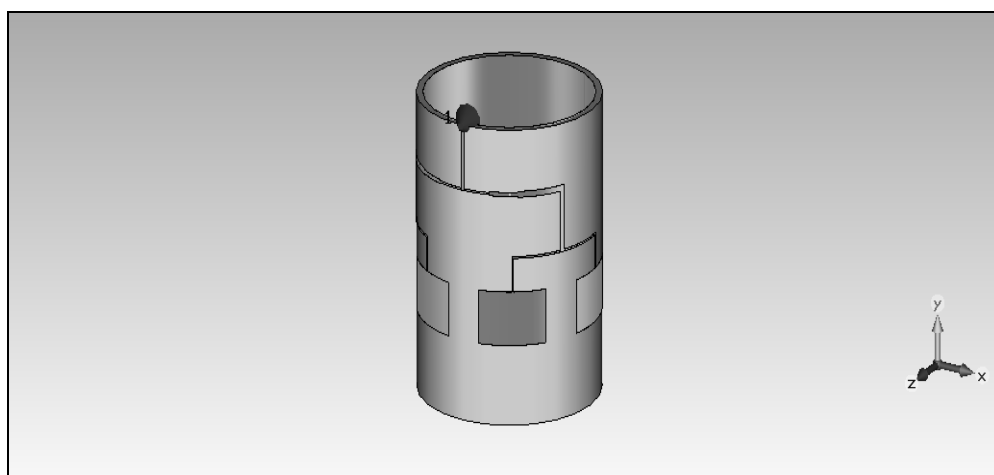


รูปที่ 3.3 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์

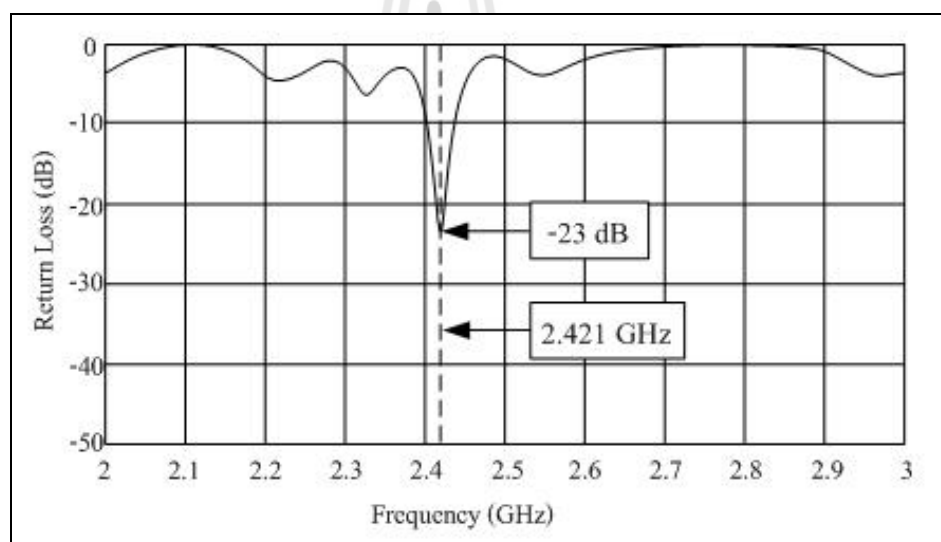


รูปที่ 3.4 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ค่า Imaginary

เนื่องจากวงจรพิมพ์แบบ FR4 ที่ได้ออกแบบไว้ไม่สามารถตัดโค้งได้ จึงเลือกใช้แผ่นทองแดงหนา 0.1 มิลลิเมตร ตัดตามโครงสร้างที่มีการจำลองบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR4 วางลงบนพลาสติกพีวีซีซึ่งมีความหนา 1.8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร โดยมีชั้นกราวด์ทำจากแผ่นทองแดงหนา 0.1 มิลลิเมตร อยู่ด้านในโครงสร้างของสายอากาศแสดงในรูปที่ 3.5 จากนั้นทำการจำลองด้วยโปรแกรม CST



รูปที่ 3.5 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคง



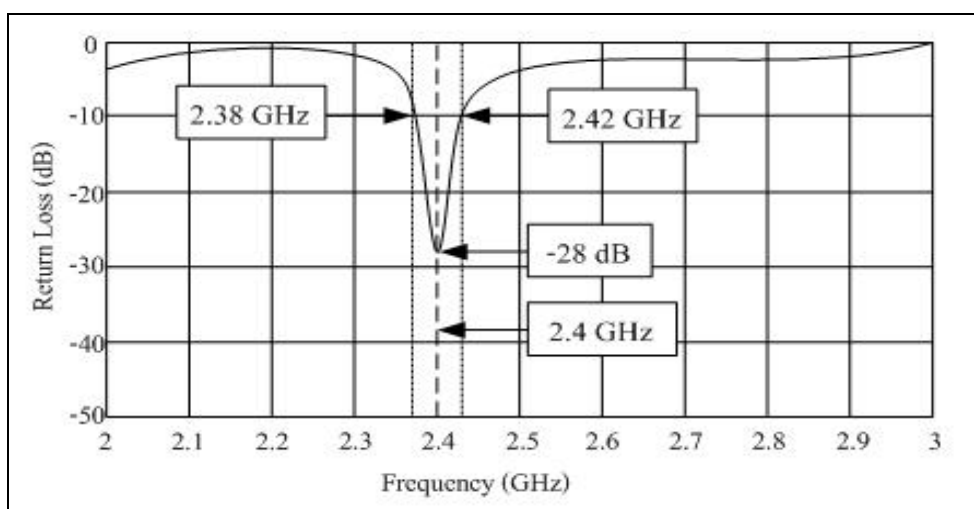
รูปที่ 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคง

รูปที่ 3.6 แสดงผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ ลักษณะ โคง ซึ่งพบว่ากราฟที่ได้นั้นมีการเลื่อนจากความถี่ 2.4 GHz ไปที่ความถี่สูงกว่าดังนั้นจึงทำการจำลองด้วยโปรแกรม CST เพื่อเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3.1

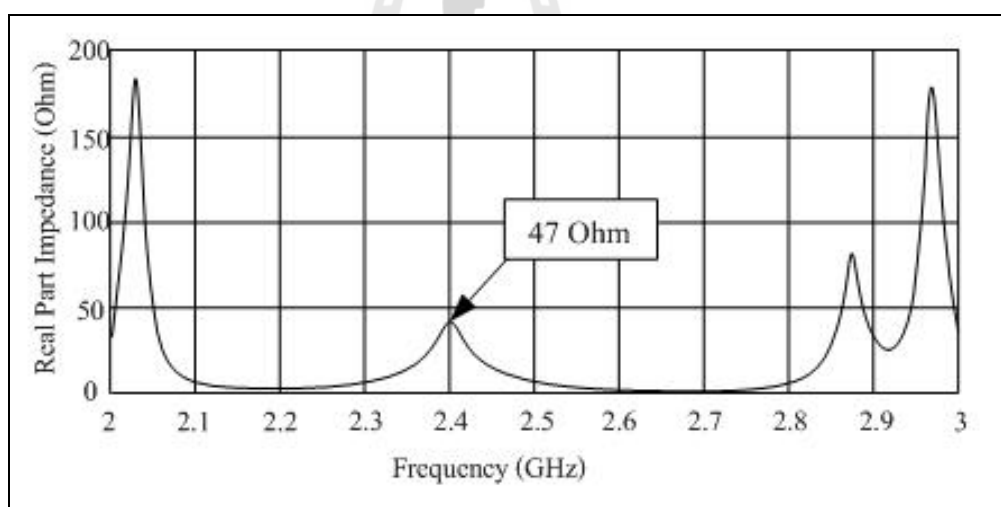
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงสายอากาศไมโครสตริป 4 อลิเมนต์ ลักษณะโค้ง

พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด (มม.)
W	150	h1	28.5
L	300	h2	18
11	42	h3	33
12	30.75	h4	32
13	30.25	s1	2
14	15.75	s2	3
15	17	s3	1
16	63.5	s4	1
17	29.25	s5	3

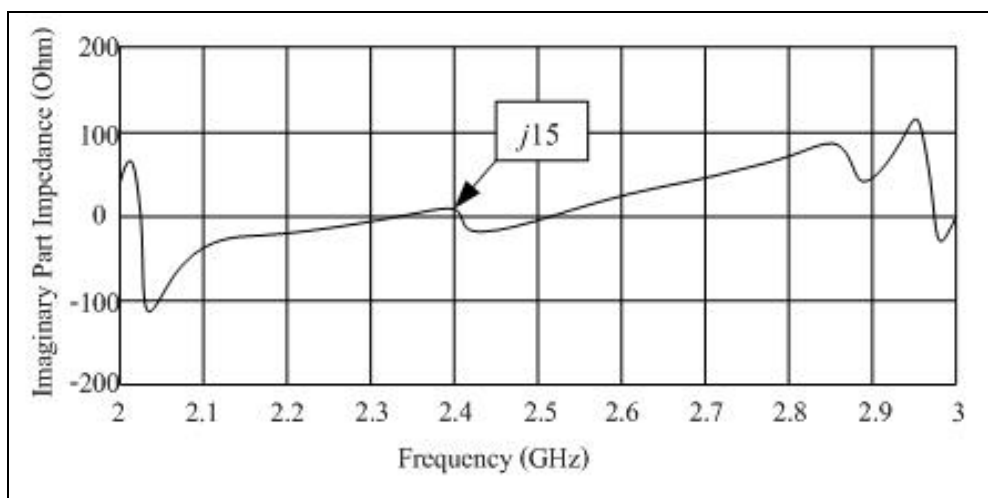
รูปที่ 3.7 แสดงผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 4 อลิเมนต์ลักษณะโค้งที่ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยใช้โปรแกรม CST ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเท่ากับ -28 dB จากนั้นพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ มีค่าเท่ากับ $47 + j15 \Omega$ แสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ โดยค่าที่ได้มีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียง 50 โอห์ม ช่วงต่ำกว่า -10 dB ของแบนวิดท์มีค่าตั้งแต่ 2.38 GHz – 2.42 GHz ซึ่งอยู่ในช่วงรองรับการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีระยะสั้นซึ่งคำนวณในบทที่ 2



รูปที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งที่ปรับค่าพารามิเตอร์

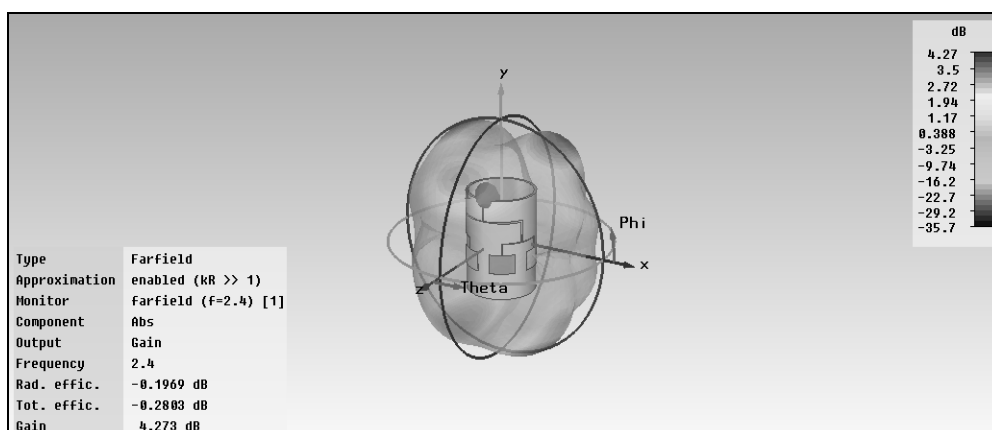


รูปที่ 3.8 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง ค่า Real

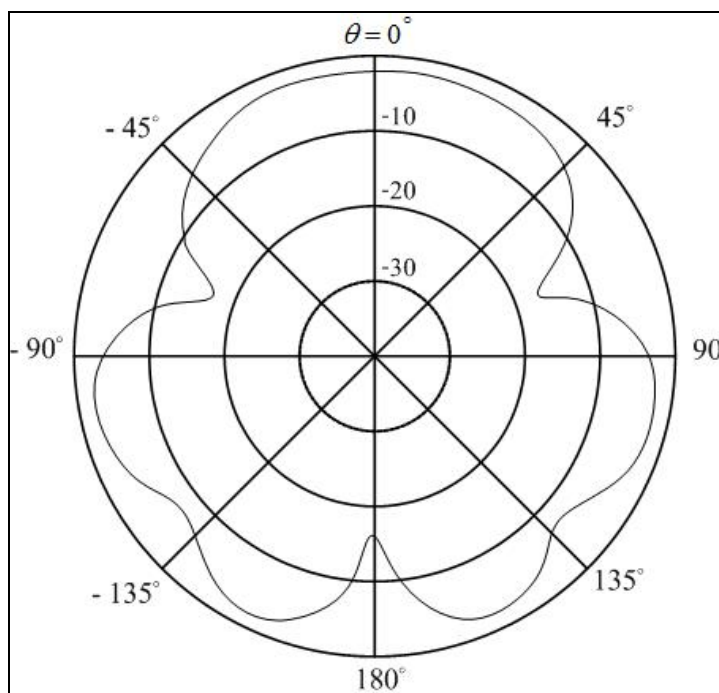


รูปที่ 3.9 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้งค่า Imaginary

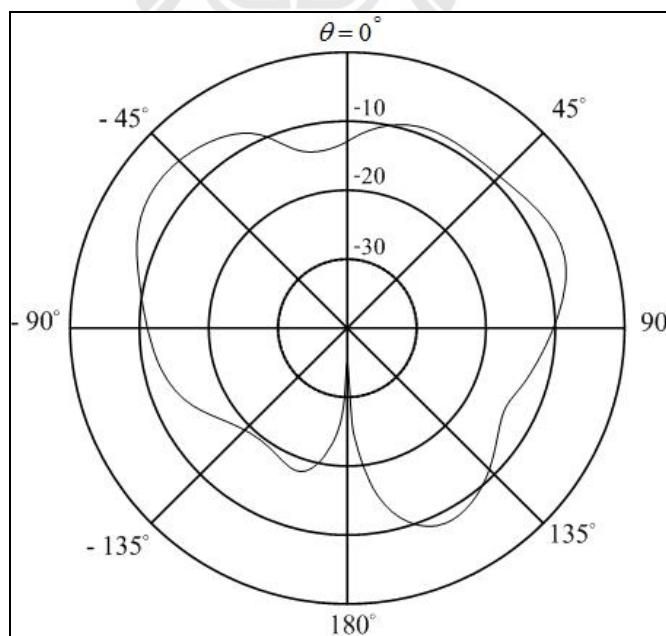
สายอากาศวางตามแนวแกน Y อยู่บนระนาบแกน X มีทิศทางด้านหน้าอยู่ตามแนวแกน Z จากนั้นพิจารณารูปแบบการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 4.273 dB แสดงดังรูปที่ 3.10 ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้งในระนาบ XZ แสดงดังรูปที่ 3.11 และ ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ ในระนาบ YZ แสดงดังรูปที่ 3.12 สำหรับผลการจำลองแบบสายอากาศพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงาน สังเกตว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานโดยรอบ



รูปที่ 3.10 รูปอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โค้ง



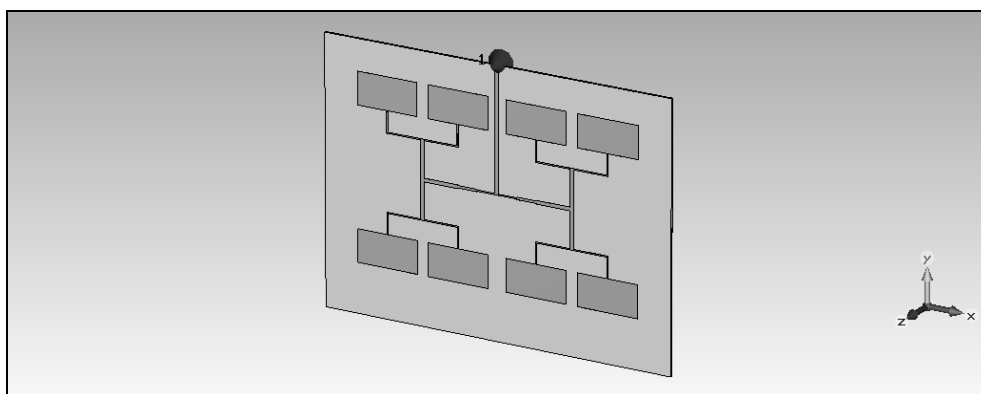
รูปที่ 3.11 ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์
ลักษณะโค้งในระนาบ XZ



รูปที่ 3.12 ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์
ลักษณะโค้งในระนาบ YZ

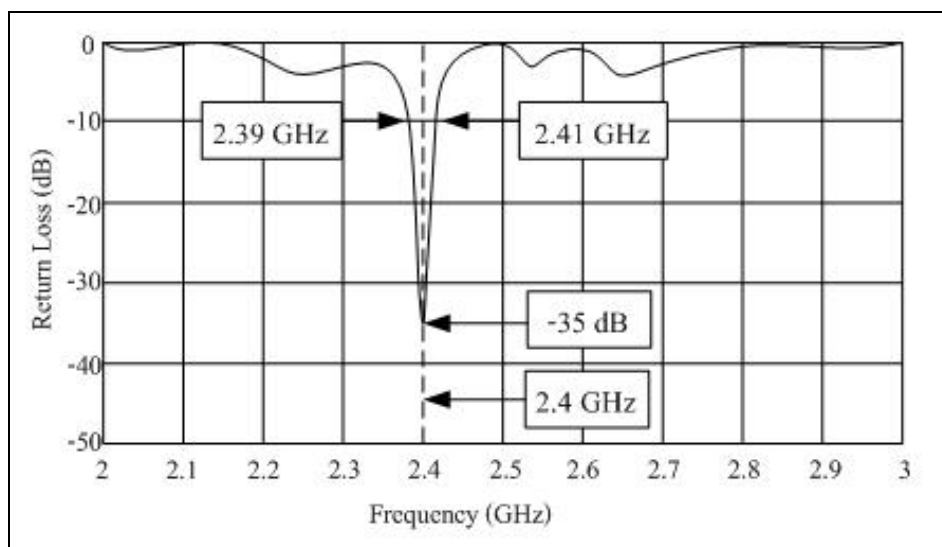
3.3 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับ 8 อีลิเมนต์ ลักษณะโค้ง

จากการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง สายอากาศมีอัตราขยายค่อนข้างต่ำ จึงได้ทำการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปแฉวลำดับ 8 อีลิเมนต์ จากการออกแบบใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 2.3 ในบทที่ 2 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.13

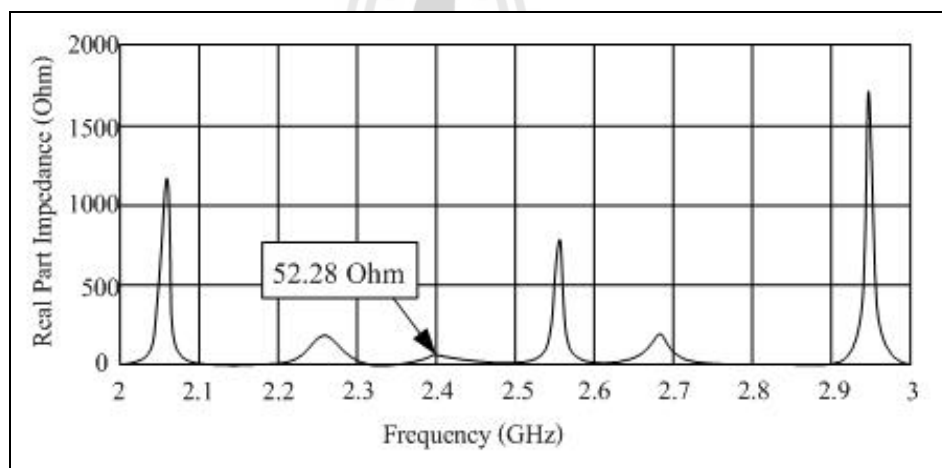


รูปที่ 3.13 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์

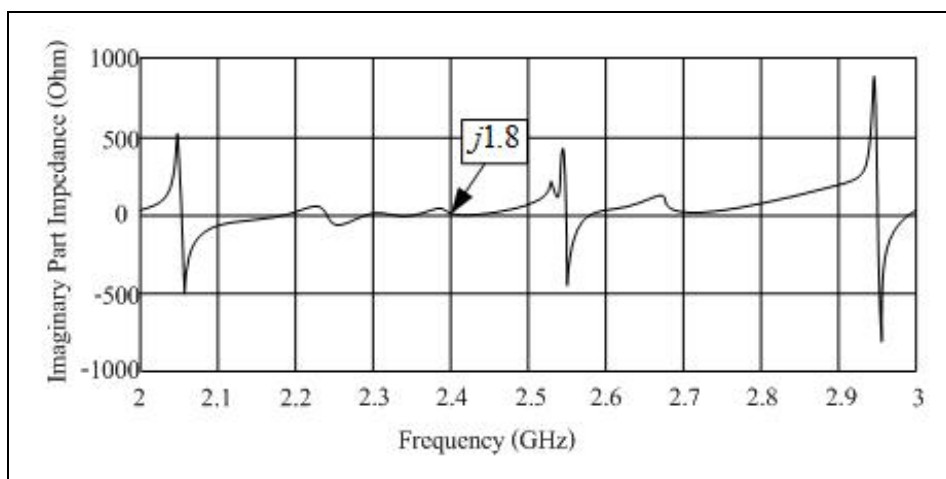
จากรูปที่ 3.14 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ที่ต่ำกว่า -10 dB มีช่วงแบนวิดท์ตั้งแต่ 2.39 GHz – 2.41 GHz ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -35 dB จากนั้นจึงพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ $52.28 + j1.8 \Omega$ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และรูปที่ 3.16 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จากการจำลองพบว่าสายอากาศมีอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการใช้งาน



รูปที่ 3.14 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์

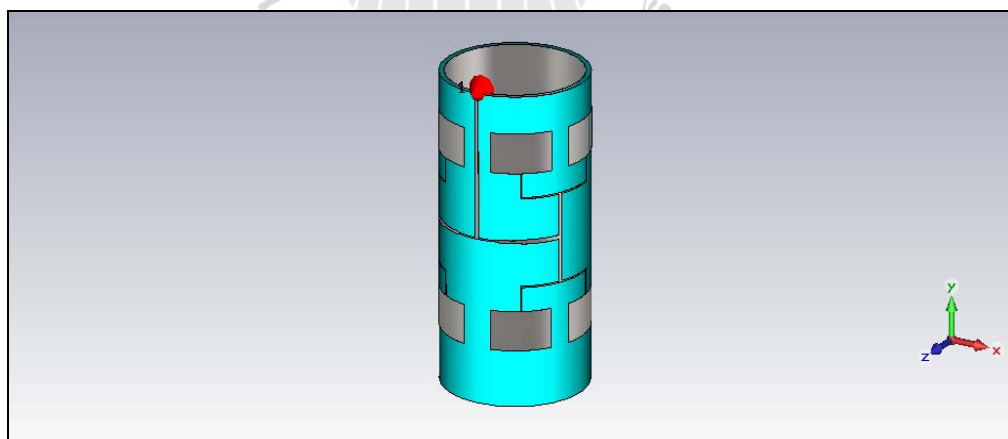


รูปที่ 3.15 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์

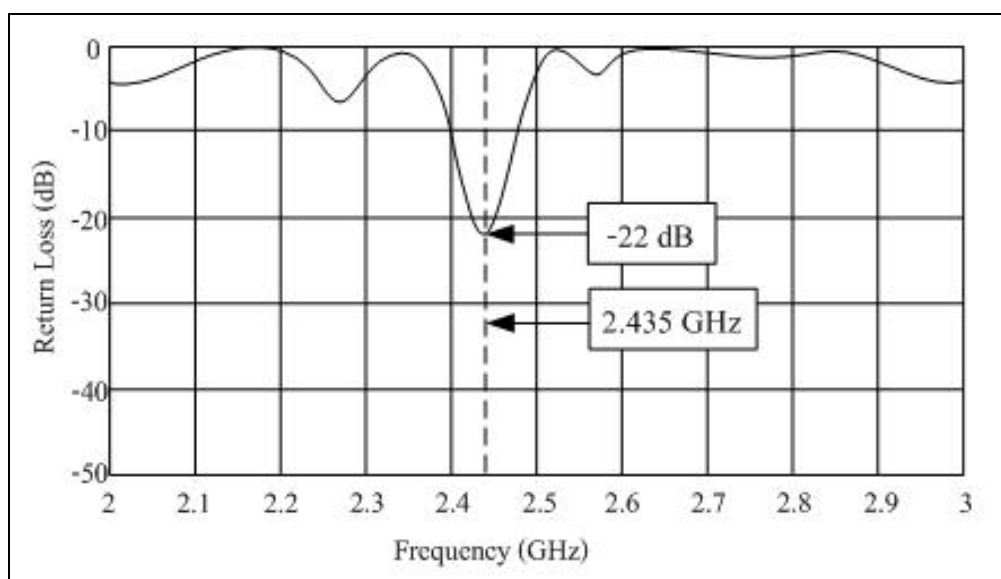


รูปที่ 3.16 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแวลวาคับ 8 อีลิเมนต์ค่า Imaginary

เนื่องจากวงจรพิมพ์แบบ FR4 ที่ออกแบบไว้ไม่สามารถตัดโค้งได้ จึงเลือกใช้แผ่นทองแดงหนา 0.1 มิลลิเมตร ตัดตามโครงสร้างที่มีการจำลองบนแผ่นวงจรพิมพ์แบบ FR4 วางลงบนพลาสติกพีวีซีซึ่งมีความหนา 1.8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร โดยมีชั้นกราวด์ทำจากแผ่นทองแดงหนา 0.1 มิลลิเมตร อยู่ด้านในโครงสร้างของสายอากาศแสดงในรูปที่ 3.17 จากนั้นทำการจำลองด้วยโปรแกรม CST



รูปที่ 3.17 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง จำลองใน CST



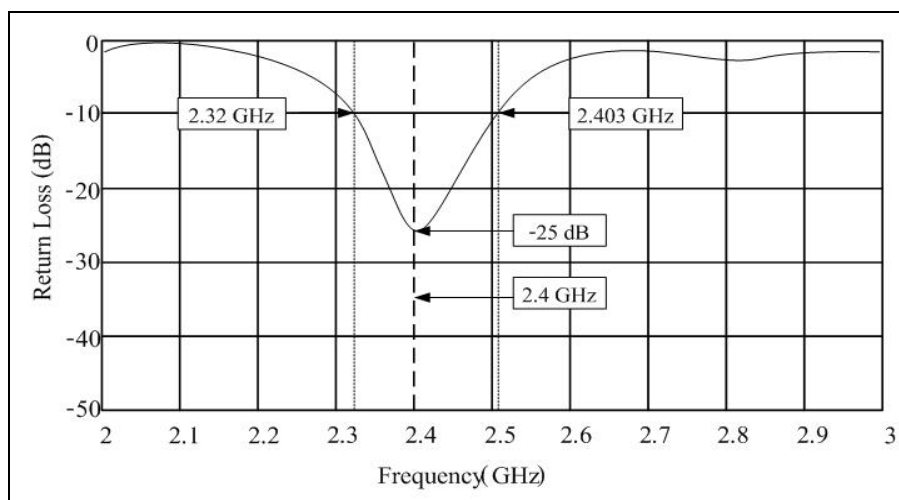
รูปที่ 3.18 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง

รูปที่ 3.18 แสดงผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ ซึ่งพบว่ากราฟที่ได้นั้นมีการเลื่อนจากความถี่ 2.4 GHz ไปที่ความถี่สูงกว่าจึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์โดยใช้โปรแกรม CST แสดงดังตารางที่ 3.2

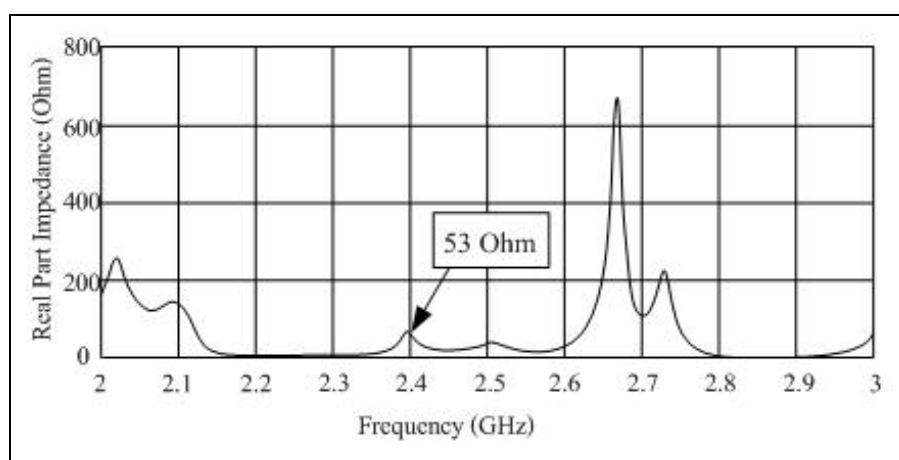
ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงของสายอากาศไมโคร สตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง

พารามิเตอร์	ขนาด(มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด(มม.)
11	300	h1	220
12	28.5	h2	41
13	68	h3	27
14	54	h4	18
15	29.75	h5	63
16	29	h6	102
17	15.75	a1	3
18	17	a2	2
19	148.5	a3	1
a4	3		

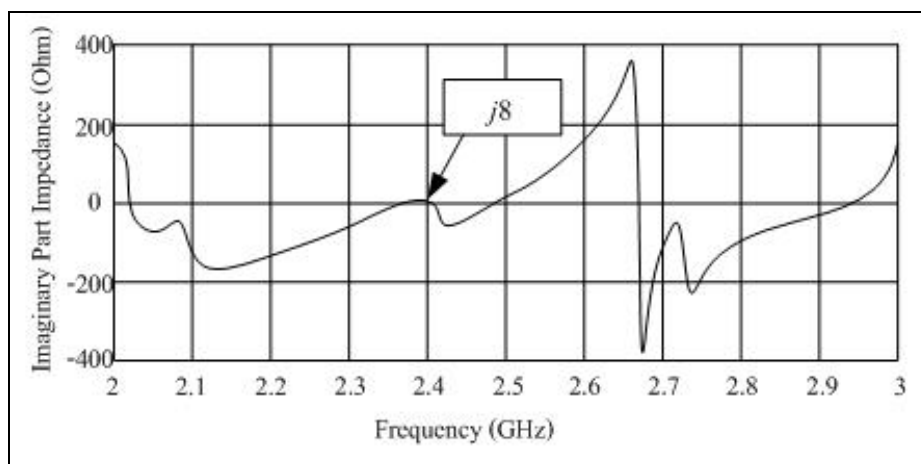
รูปที่ 3.19 แสดงผลการจำลองซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งที่ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์แล้ว ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศเท่ากับ -25 dB ช่วงของแบนวิดท์ที่ต่ำกว่า -10 dB มีค่าตั้งแต่ 2.32 GHz – 2.403 GHz ซึ่งอยู่ในช่วงรองรับการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีระยะสั้น จากนั้นพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ $53 + j8 \Omega$ แสดงดังรูปที่ 3.20 และรูปที่ 3.21 ตามลำดับโดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองใกล้เคียง 50 โอห์ม เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการใช้งาน



รูปที่ 3.19 แสดงผลการจำลองแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งที่ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์

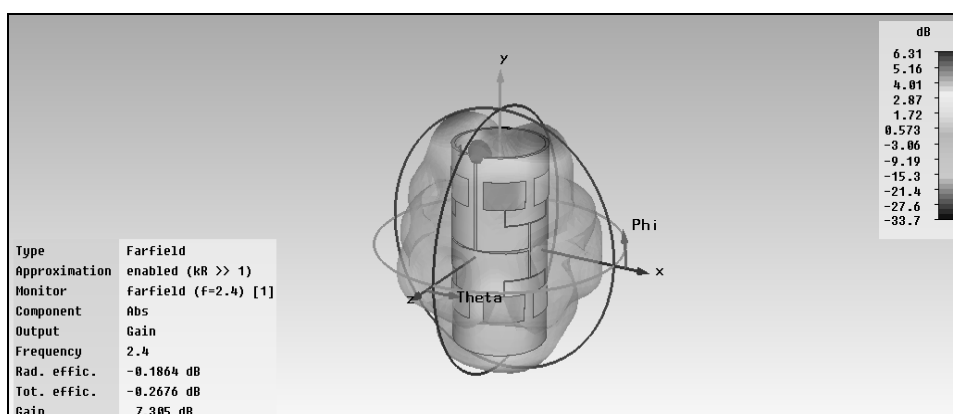


รูปที่ 3.20 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง ค่า Real

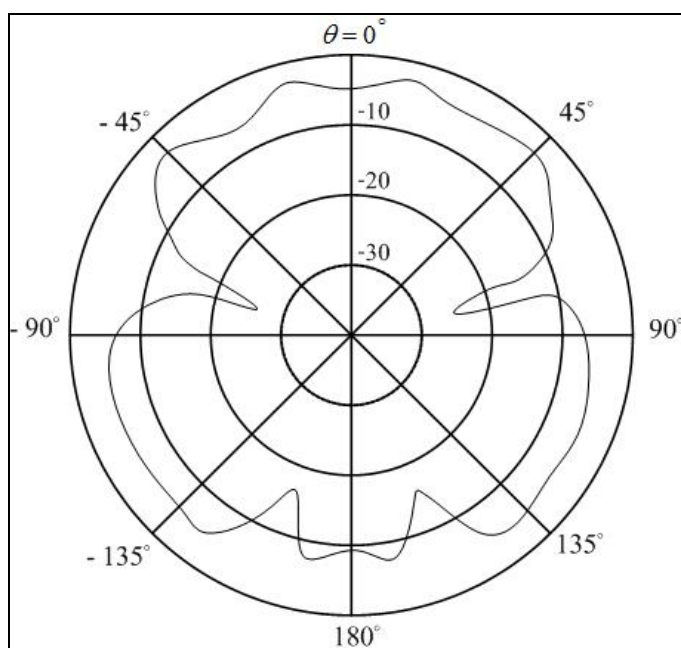


รูปที่ 3.21 อิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง ค่า Imaginary

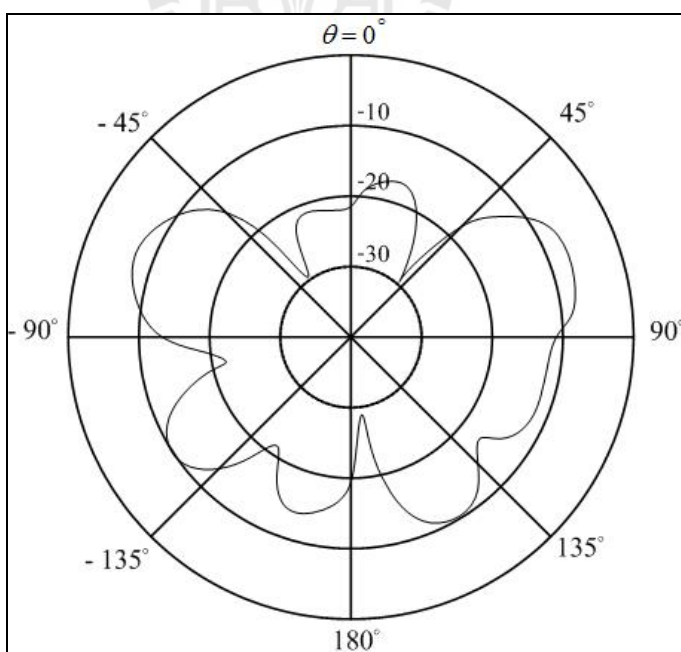
สายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งวางตามแนวแกน Y อยู่บนระนาบแกน X มีทิศทางด้านหน้าอยู่ตามแนวแกน Z จากนั้นจำลองผลเพื่อวิเคราะห์การแผ่พลังงานของสายอากาศซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 7.305 dB แสดงดังรูปที่ 3.22 ผลจำลองรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งในระนาบ XZ แสดงดังรูปที่ 3.23 และผลจำลองรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งในระนาบ YZ แสดงดังรูปที่ 3.24 สังเกตว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่กระจายพลังงานโดยรอบ สังเกตว่าอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งดีขึ้นกว่าสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง



รูปที่ 3.22 รูปอัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริปแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง



รูปที่ 3.23 ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์
ลักษณะโค้งในระนาบ XZ



รูปที่ 3.24 ผลจำลองแบบรูปการแผ่พลังงานของโครงสร้างสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์
ลักษณะโค้งในระนาบ YZ

3.4 สรุป

ในบทนี้แสดงการออกแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้ง เพื่อนำไปใช้งานสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น โดยหาค่าขนาดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศสำหรับใช้งานและการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST สายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ ลักษณะโค้ง ที่ต่ำกว่า -10 dB มีช่วงแบนวิดท์ตั้งแต่ 2.38 GHz – 2.42 GHz มีอัตราขยายเท่ากับ 4.273 dB และมีรูปแบบการแผ่พลังงานโดยรอบในระนาบ XZ และสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ ลักษณะโค้ง ที่ต่ำกว่า -10 dB มีช่วงแบนวิดท์ตั้งแต่ 2.32 GHz – 2.403 GHz มีอัตราขยาย เท่ากับ 7.305 dB และมีรูปแบบการแผ่พลังงานโดยรอบในระนาบ XZ จากการจำลองผลสายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ ลักษณะโค้งและสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งมีช่วงแบนวิดท์รองรับการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีระยะสั้น แต่อัตราขยายของสายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง มีอัตราขยายที่มากกว่า 4 สายอากาศไมโครสตริป 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง จึงเลือกใช้สายอากาศไมโครสตริป 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง



บทที่ 4

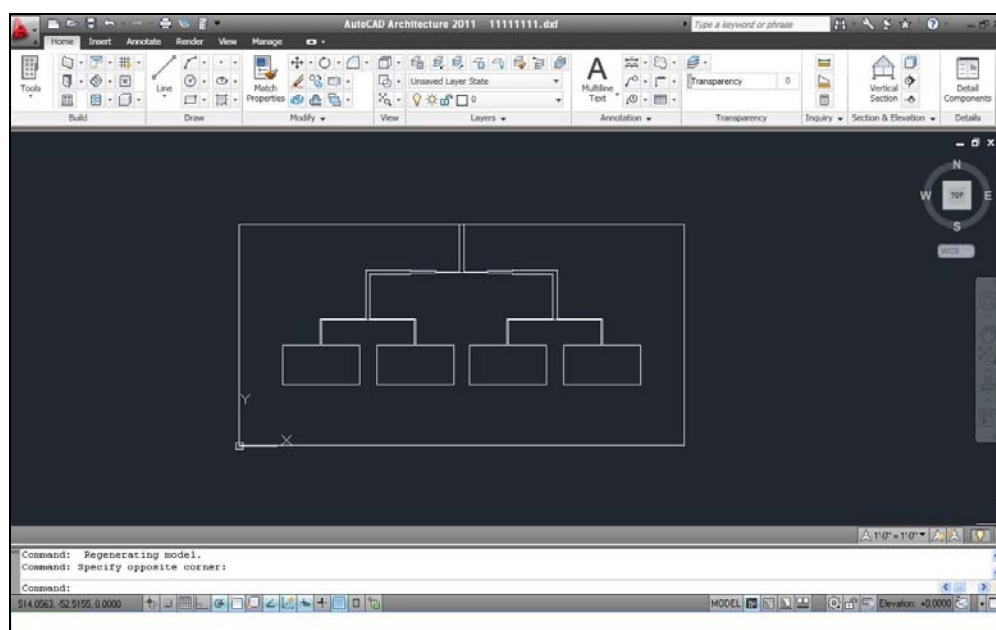
ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น

4.1 กล่าวนำ

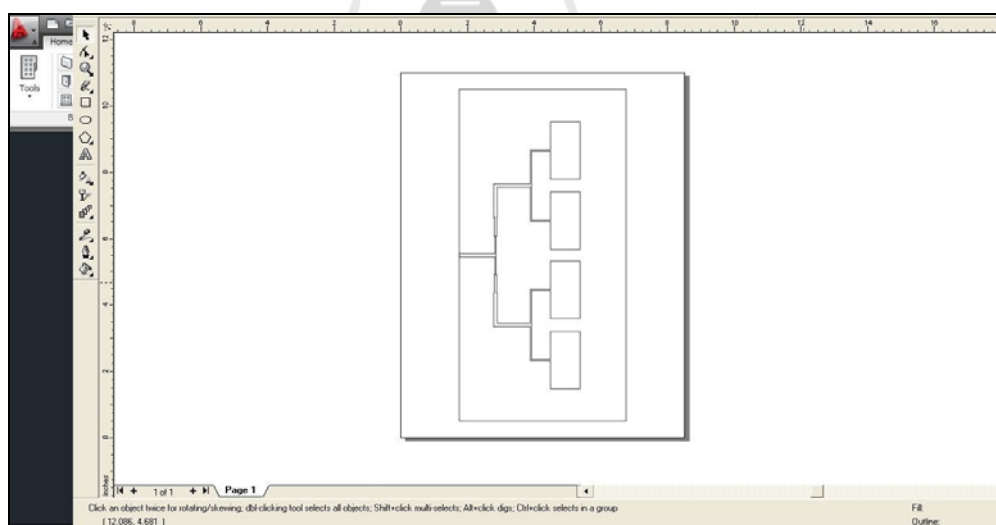
ในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีและหลักการทั้งหมดที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ผ่านมา มาช่วยสร้างสายอากาศต้นแบบ จากนั้นจะวัดทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ที่สำคัญของสายอากาศต้นแบบ ได้แก่ แบบรูปการแผ่พลังงาน ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ วัดอัตราขยายและวัดโพลาไรเซชัน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (network analyzer) รุ่น HP8722D เพื่อวัดทดสอบคุณลักษณะข้างต้น และในส่วนสุดท้ายจะเป็นบทสรุปของบทนี้

4.2 วิธีการสร้างและวัดทดสอบสายอากาศแพทช์ไมโครสตริปต้นแบบ

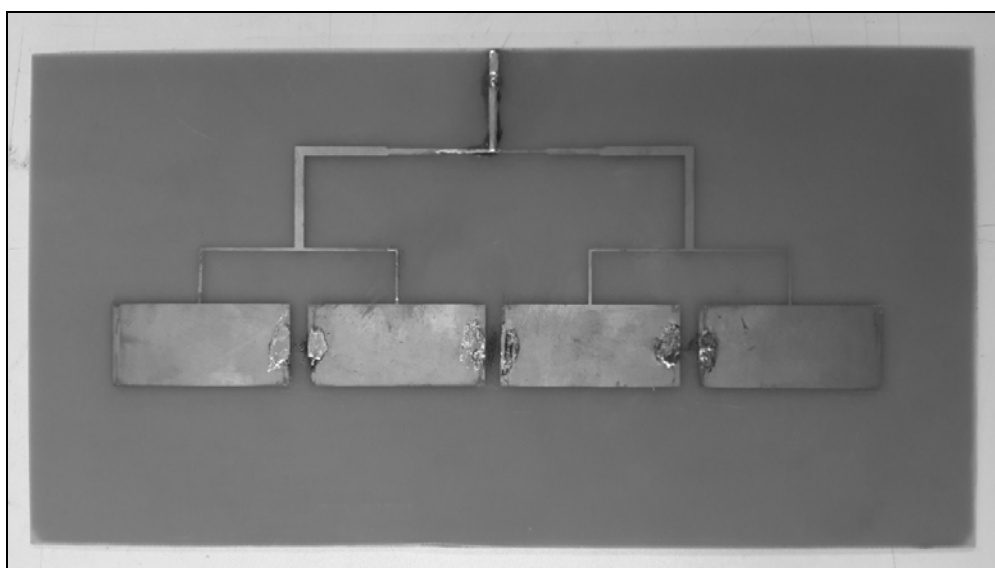
สายอากาศแพทช์ไมโครสตริปแบบแผ่นโค้งเริ่มต้นสร้างจากการนำโครงสร้างสายอากาศแพทช์ไมโครสตริปจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม CST จนได้ขนาดของสายอากาศตามที่ต้องการ โดยผลจากการจำลองจะมีนามสกุลแฟ้มข้อมูลคือ MOD ซึ่งจะต้องนำไปส่งออก (export file) จากโปรแกรมสำเร็จรูป CST และบันทึกข้อมูลนามสกุลแฟ้มข้อมูลที่ได้คือชื่อแฟ้มข้อมูลนามสกุล DXF เมื่อได้แฟ้มข้อมูลแล้ว นำไปจัดแต่งรูปร่างของสายอากาศด้วยโปรแกรม (Auto CAD 2011) แสดงดังรูปที่ 4.1 ก่อนนำไปตัดสติ๊กเกอร์โดยใช้โปรแกรม (CorelDRAW 9) แสดงดังรูปที่ 4.2 เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศแพทช์ไมโครสตริปโดยสร้างจากแผ่นไมโครสตริปชนิด FR4 จากนั้นนำสายอากาศแพทช์ไมโครสตริปต้นแบบต่อเข้ากับหัวต่อชนิด SMA 50 โอห์ม แสดงดังรูปที่ 4.3



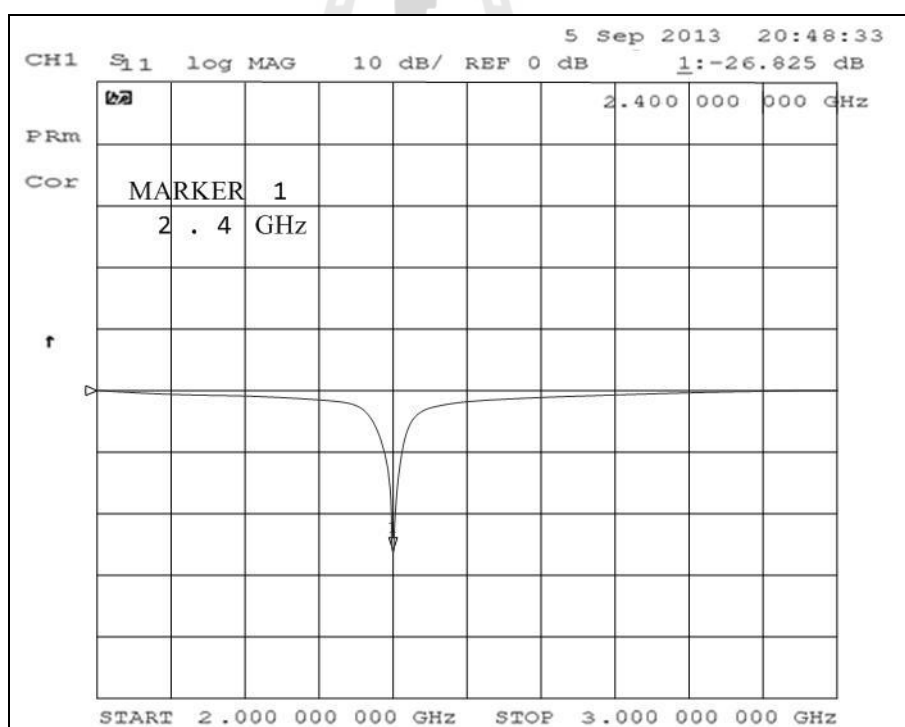
รูปที่ 4.1 โปรแกรม AutoCAD 2011 จัดแต่งรูปร่างของสายอากาศ



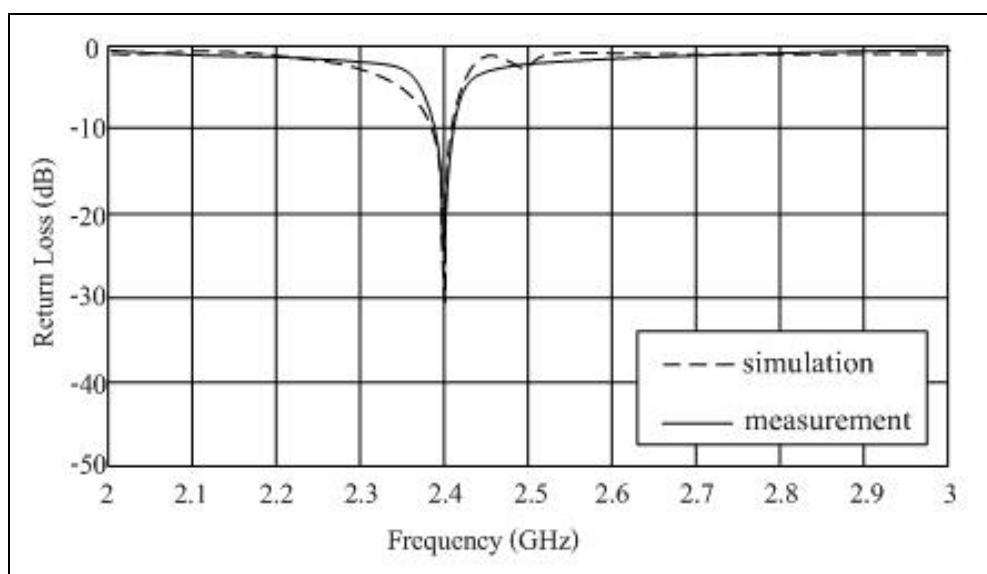
รูปที่ 4.2 โปรแกรม CoreIDRAW 9 กำหนดการตัดแผ่นสติกเกอร์



รูปที่ 4.3 สายอากาศแพทช์ไมโครสตริปต้นแบบ



รูปที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ต้นแบบ



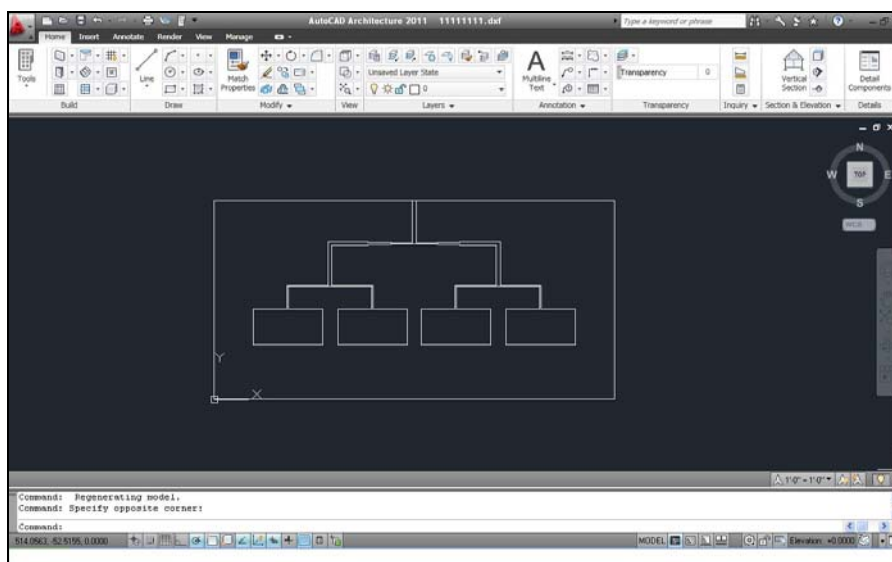
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแพทช์ไมโครสตริปต้นแบบ

จากรูปที่ 4.3 การสร้างสายอากาศต้นแบบตามที่กล่าวมาข้าง แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ดังรูปที่ 4.4 จากนั้นแสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการจำลองแบบด้วยโปรแกรม CST (เส้นประ) และผลที่ได้จากการวัดในห้องปฏิบัติการ (เส้นทึบ) ดังรูปที่ 4.5

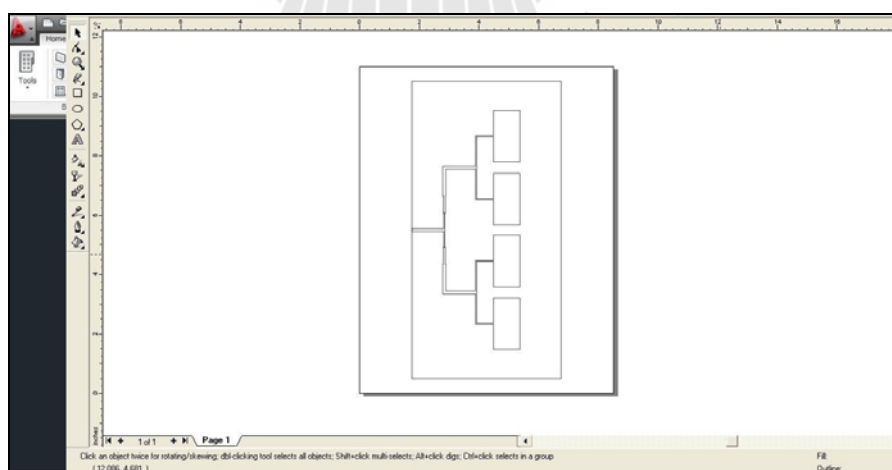
สายอากาศแฉวลำดับ 4 อิลิเมนต์ลักษณะ โคง มีวิธีสร้างคล้ายกับ โครงสร้างสายอากาศไมโครสตริปแพทช์ แต่ในการจำลองนี้จะใช้แผ่นทองแดงหนา 0.1 มิลลิเมตร ใช้พลาสติกพีวีซีเป็นวัสดุฐานรองและมีกราวด์ด้านในพลาสติกพีวีซีโดยใช้แผ่นทองแดงหนา 0.1 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถตัดโค้งได้ใช้โปรแกรม CST จำลองและออกแบบจนได้ขนาดของสายอากาศตามที่ต้องการ ซึ่งผลจากการจำลองจะมีนามสกุลเพิ่มข้อมูลคือ MOD ซึ่งจะต้องนำไฟล์ออกจากโปรแกรมสำเร็จรูป CST และบันทึกข้อมูลนามสกุลเพิ่มข้อมูลที่ได้ คือ ชื่อเพิ่มข้อมูลนามสกุล DXF เมื่อได้เพิ่มข้อมูลแล้ว นำไปจัดแต่งรูปร่างของสายอากาศด้วยโปรแกรม (Auto CAD 2011) แสดงดังรูปที่ 4.6 ก่อนนำไปตัดสติ๊กเกอร์โดยใช้โปรแกรม (CoreIDRAW 9) แสดงดังรูปที่ 4.7 เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศแพทช์ไมโครสตริปที่มีความโค้ง นำสายอากาศแฉวลำดับแบบแผ่นโค้ง 4 อิลิเมนต์ต้นแบบต่อเข้ากับหัวต่อชนิด SMA 50 โอห์มแสดงดังรูปที่ 4.8

สายอากาศแฉวลำดับ 8 อิลิเมนต์ลักษณะ โคง มีวิธีสร้างที่เหมือนกับสายอากาศแฉวลำดับ 4 อิลิเมนต์ลักษณะ โคง โดยการจำลองด้วยโปรแกรม CST จนได้ขนาดของสายอากาศตามที่ต้องการ จากนั้นใช้โปรแกรมจัดแต่งรูปร่าง Auto CAD 2011 แสดงดังรูปที่ 4.9 ก่อนนำไปตัดสติ๊กเกอร์

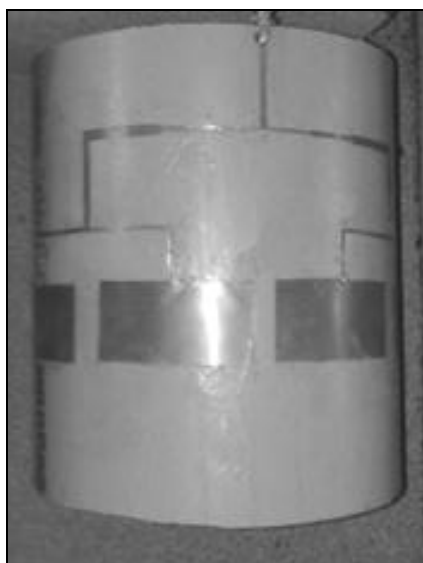
โดยใช้โปรแกรม CoreDRAW 9 ดังรูปที่ 4.10 เพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศแพทช์ไมโครสตริปที่มีความโค้ง นำสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้ง 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบต่อเข้ากับหัวต่อชนิด SMA 50 โอห์มแสดงดังรูปที่ 4.11



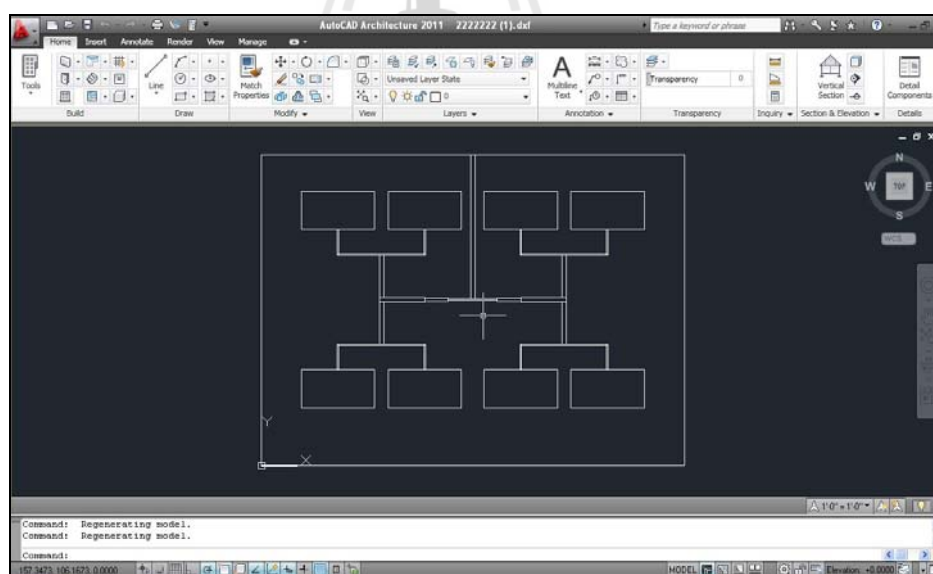
รูปที่ 4.6 โปรแกรม AutoCAD 2011 จัดแต่งรูปร่างของสายอากาศ



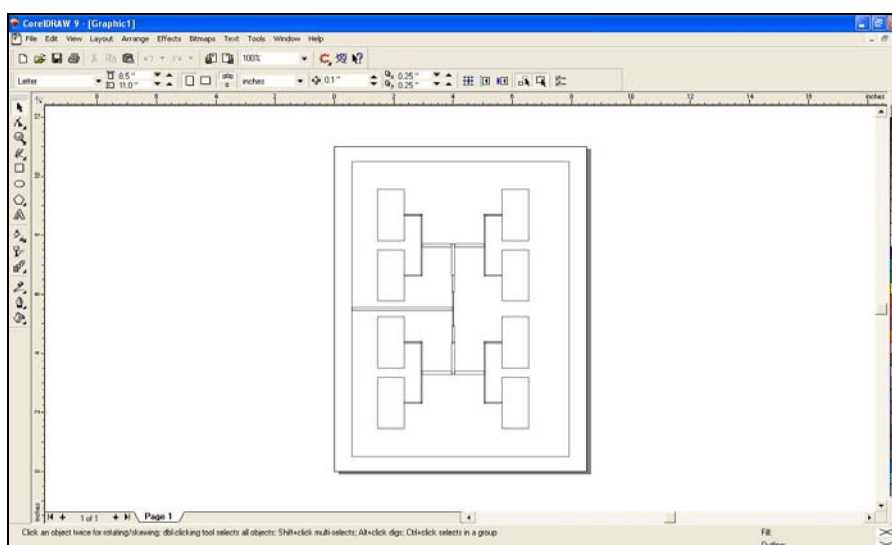
รูปที่ 4.7 โปรแกรม CoreDRAW 9 กำหนดการตัดสติ๊กเกอร์



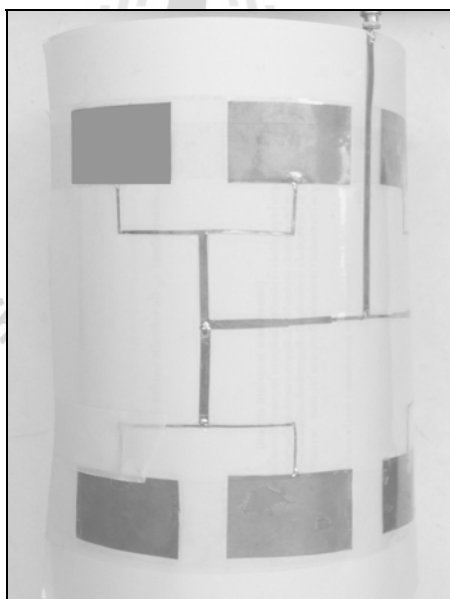
รูปที่ 4.8 สายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคงัง 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบต่อเข้ากับขั้วต่อชนิด SMA 50 โอห์ม



รูปที่ 4.9 โปรแกรม AutoCAD 2011 จัดแต่งรูปร่างของสายอากาศ



รูปที่ 4.10 โปรแกรม CorelDRAW 9 กำหนดการตัดแผ่นสติกเกอร์



รูปที่ 4.11 สายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้ง 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบ
ต่อเข้ากับขั้วต่อชนิด SMA 50 โอห์ม

4.3 ผลการทดสอบสายอากาศแถวลำดับลักษณะโค้งสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น

โครงสร้างชิ้นงานจริงของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 4.12 ที่ต่ำกว่า -10 dB มีช่วงแบนวิดท์ตั้งแต่ 2.381 GHz – 2.422 GHz แสดงดังรูปที่ 4.13 พิจารณาช่วงแบนวิดท์ของสายอากาศ เมื่อจรวดนำวิถีเคลื่อนที่จะมีความเร็วสูงสุดประมาณ 1.1 มัค แต่ในการคำนวณผู้วิจัยจะใช้ความเร็วในการคำนวณที่ 2 มัค เพื่อให้สายอากาศมีประสิทธิภาพมากขึ้นพิจารณาจากสมการที่ 2.19 ในบทที่ 2

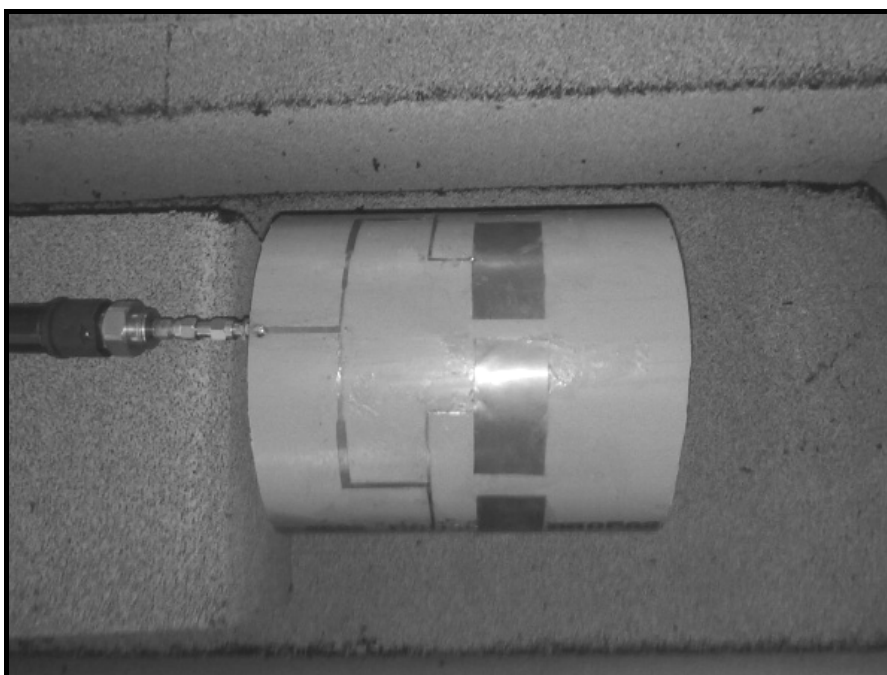
$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \text{ Hz}$$

$$f_d = \frac{2(2 \times 346)(2.4 \times 10^9)}{3 \times 10^8}$$

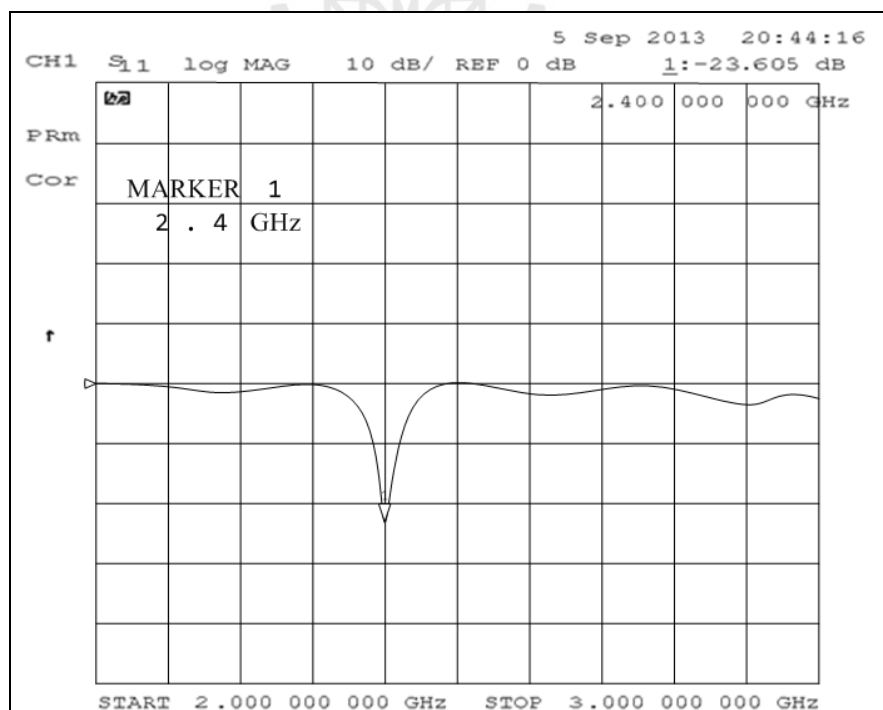
$$f_d = 11.072 \text{ kHz}$$

จากสมการค่าการเปลี่ยนแปลงที่ได้เท่ากับ $f_d = 11.072 \text{ kHz}$ ซึ่งแบนวิดท์ที่ได้จากการคำนวณอยู่ในช่วงความถี่ที่สามารถวัดได้จริง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบ ที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ -23.605 dB เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่นโค้ง 4 อีลิเมนต์ต้นแบบแสดงดังรูปที่ 2.14

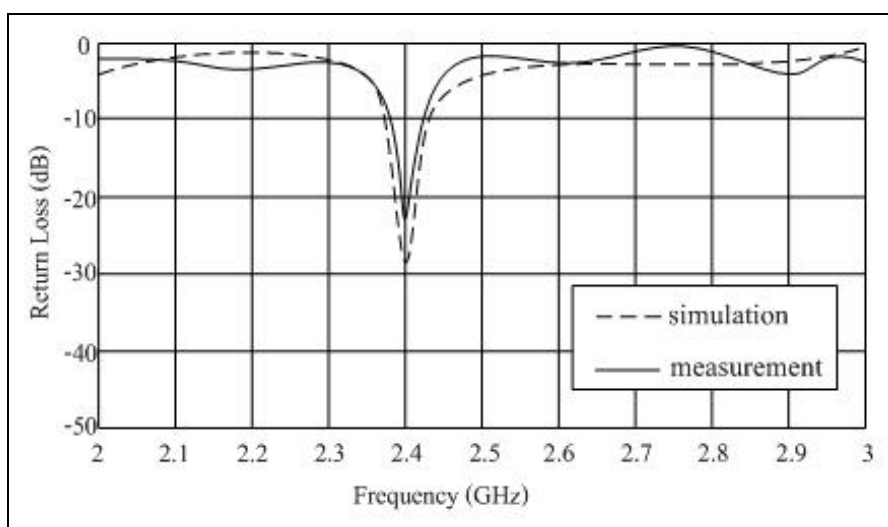
รูปการแผ่พลังงานในระนาบ XZ แสดงดังรูปที่ 4.15 และรูปการแผ่พลังงานในระนาบ YZ แสดงดังรูปที่ 4.16 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งในระนาบ XZ แสดงดังรูปที่ 4.17 และเปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งในระนาบ YZ แสดงดังรูปที่ 4.18 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ $46.61 + j5.121$ โอห์ม แสดงดังรูปที่ 4.19 โดยจากผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศพบว่าสายอากาศมีอิมพีแดนซ์ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม สังเกตได้ว่าค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับที่วัดได้จริงนั้นจะมีความถี่ที่ต่ำกว่าค่าสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลอง แต่มีแนวโน้มของค่าที่คล้ายคลึงกับค่าที่ได้จากการจำลอง ซึ่งอาจเกิดมาจากความผิดพลาดเนื่องจากชิ้นงานและในการสร้างจริง แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศที่นำเสนอก็ยังสามารถใช้งานได้กับจรวดนำวิถีระยะสั้นที่ความถี่ 2.4 GHz



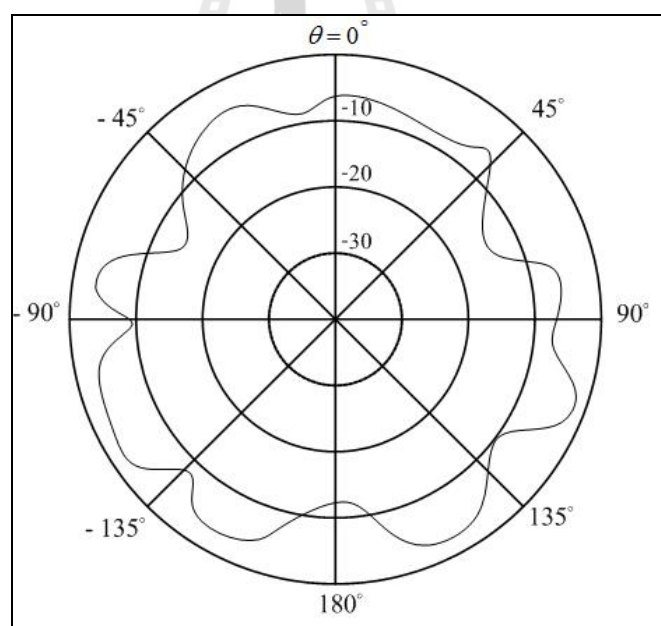
รูปที่ 4.12 สายอากาศต้นแบบ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงตั้งต้นแบบ



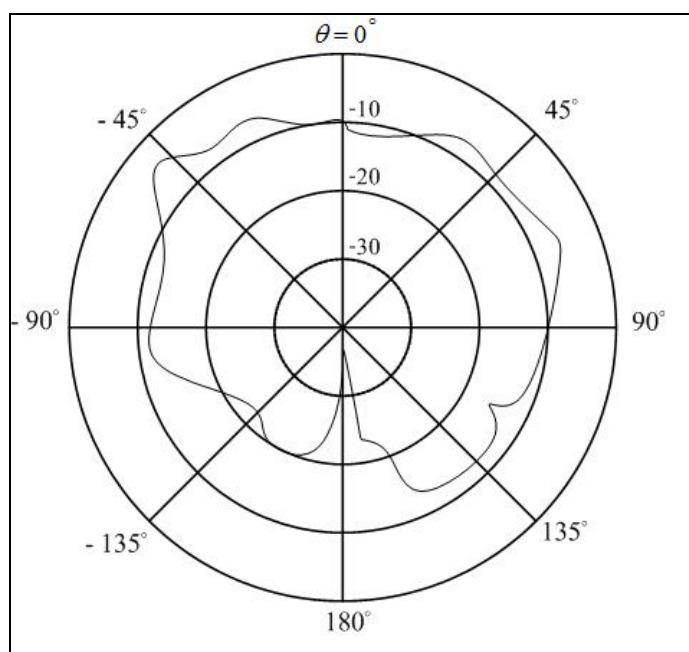
รูปที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงตั้งต้นแบบ



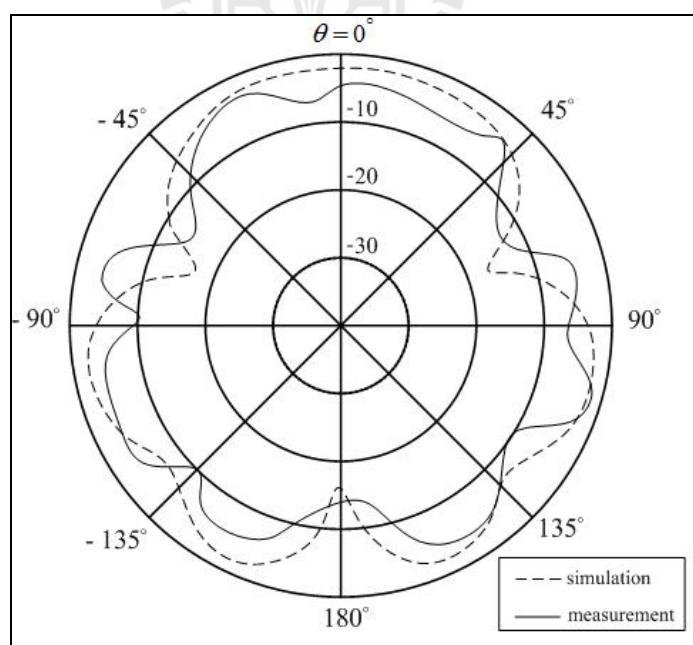
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงังตันแบบ



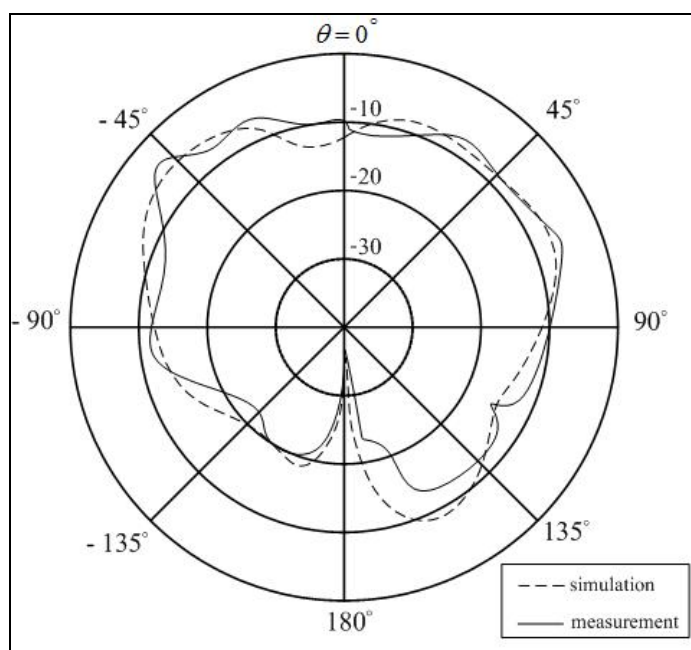
รูปที่ 4.15 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ ลักษณะ โคงังตันแบบ
ในระนาบ XZ



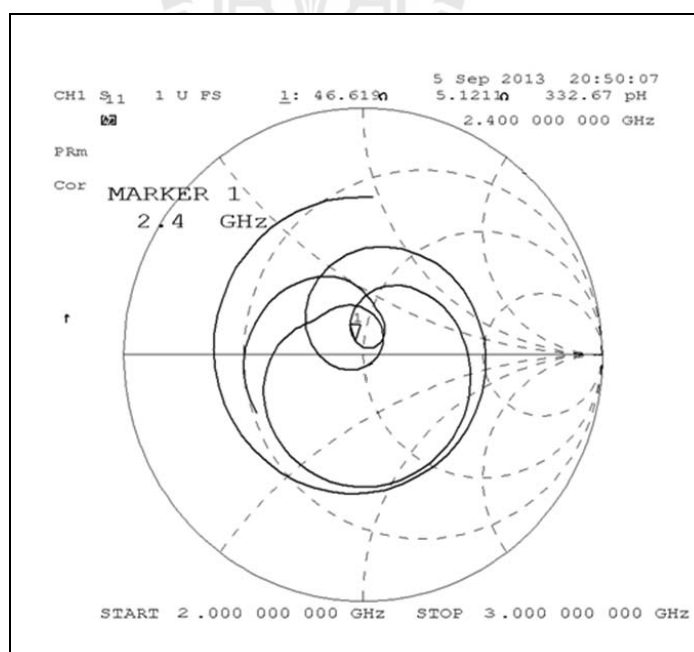
รูปที่ 4.16 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ ลักษณะ โคงตั้งแบบ
ในระนาบ YZ



รูปที่ 4.17 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ
4 อีลิเมนต์ลักษณะ โคงตั้งแบบในระนาบ XZ



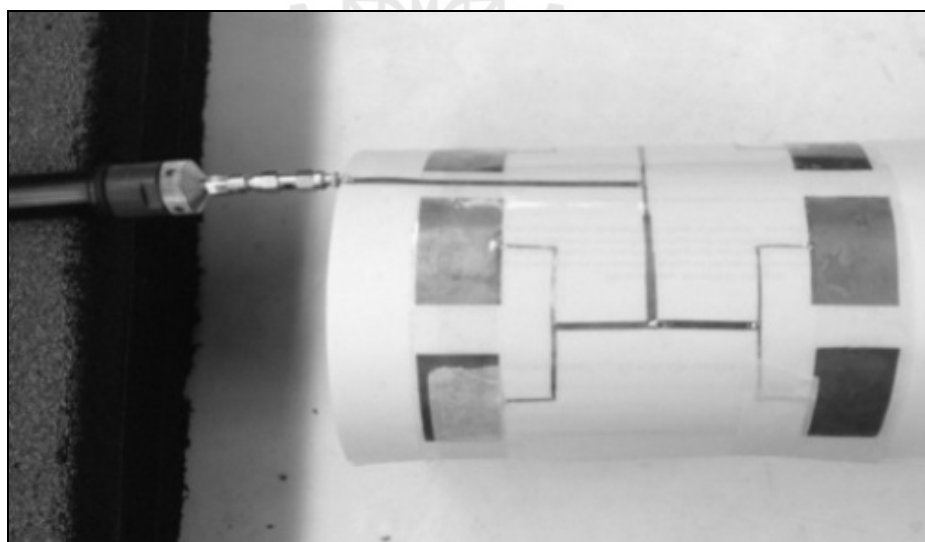
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งตันแบบในระนาบ YZ



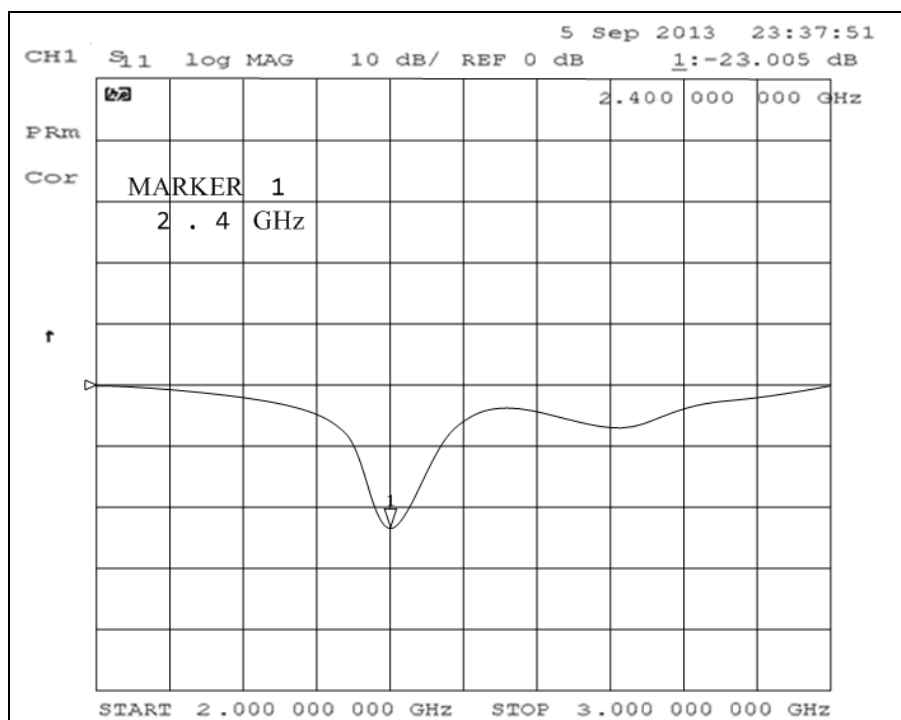
รูปที่ 4.19 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งตันแบบ

โครงสร้างชิ้นงานจริงของสายอากาศแถวลำดับ 8 อิลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.20 ค่าที่ต่ำกว่า -10 dB มีช่วงแบนลิตต์ตั้งแต่ 2.35 GHz – 2.48 GHz แสดงดังรูปที่ 4.21 พิจารณาการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีระยะสั้น ค่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ได้เท่ากับ $f_d = 11.072 \text{ kHz}$ ซึ่งแบนวิดท์ที่วัดได้สามารถใช้งานครอบคลุมความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลง สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ 8 อิลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ -23.005 dB เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคงัง 8 อิลิเมนต์ต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.22

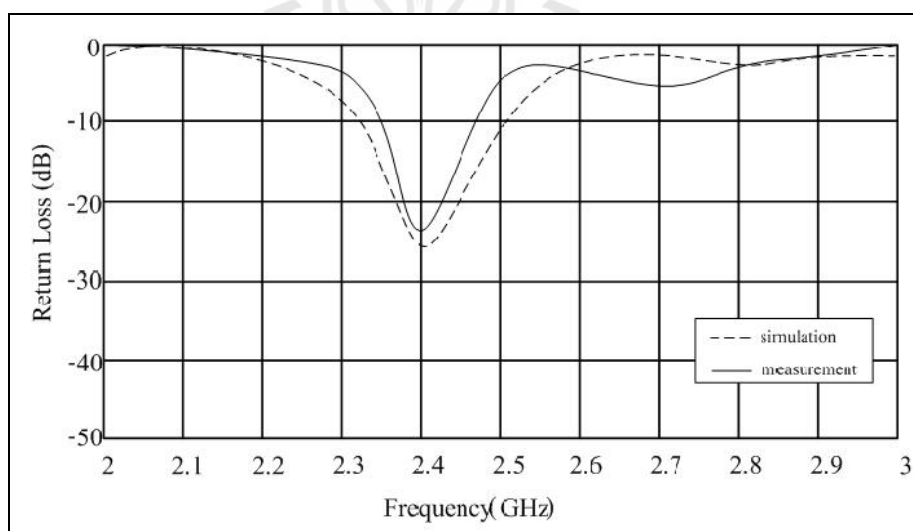
รูปการแผ่พลังงานในระนาบ XZ แสดงดังรูปที่ 4.23 และรูปการแผ่พลังงานในระนาบ YZ แสดงดังรูปที่ 4.24 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ 8 อิลิเมนต์ลักษณะ โคงังในระนาบ XZ แสดงดังรูปที่ 4.25 และเปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ 8 อิลิเมนต์ลักษณะ โคงังในระนาบ YZ แสดงดังรูปที่ 4.26 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่าเท่ากับ $52.66 + j10.69$ โอห์ม แสดงได้ดังรูปที่ 4.27 โดยจากผลการทดลองวัดค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศพบว่าสายอากาศมีอิมพีแดนซ์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม



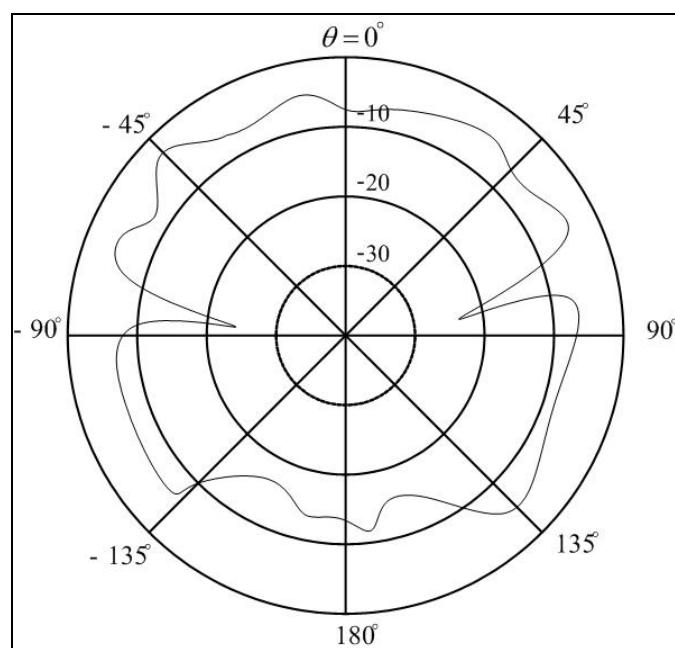
รูปที่ 4.20 สายอากาศแถวลำดับ 8 อิลิเมนต์ลักษณะ โคงังต้นแบบ



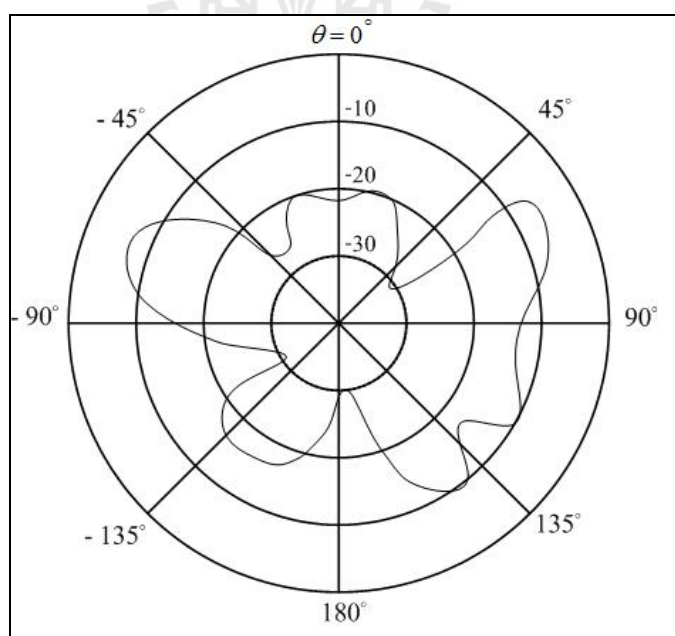
รูปที่ 4.21 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งคั่นแบบ



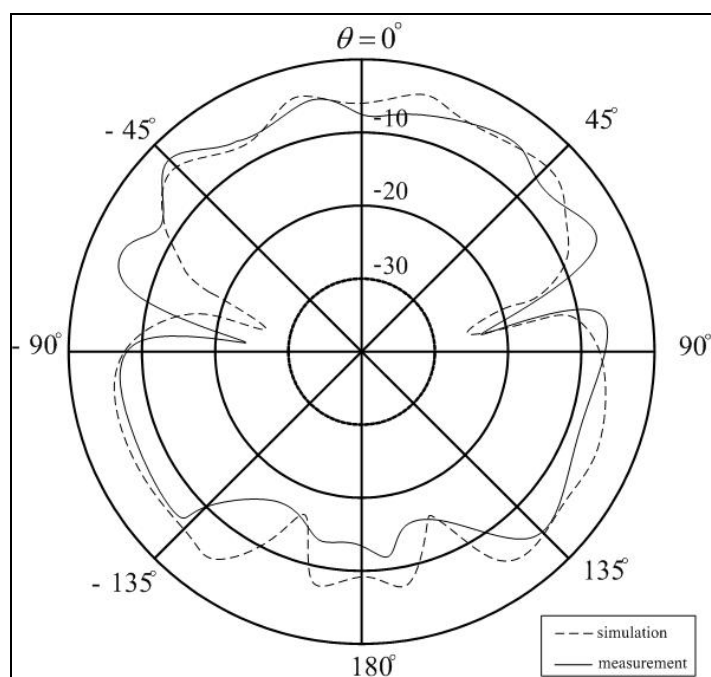
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งคั่นแบบ



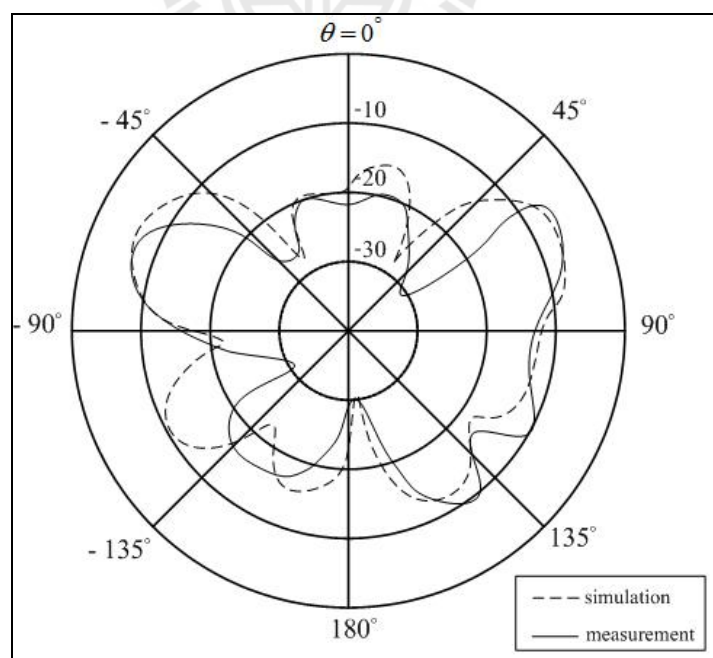
รูปที่ 4.23 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ ลักษณะ โคงตั้งแนวนอน
ในระนาบ XZ



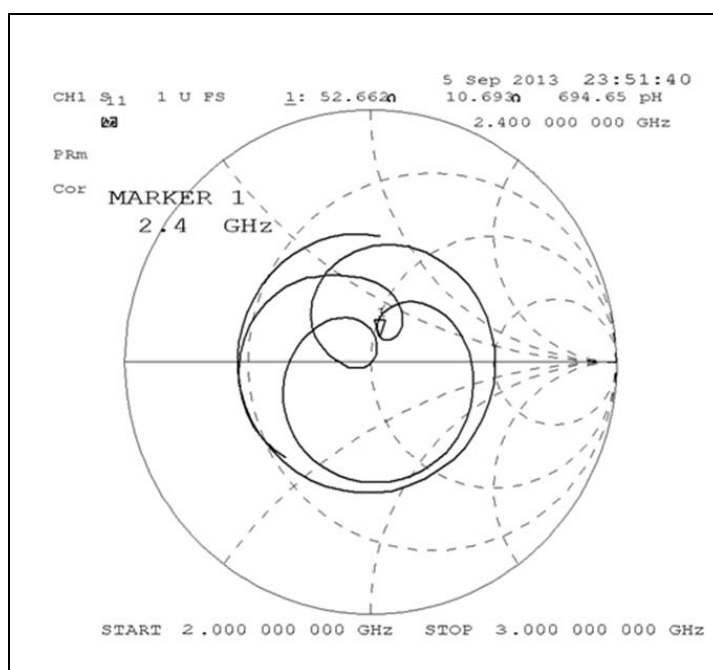
รูปที่ 4.24 แบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ ลักษณะ โคงตั้งแนวนอน
ในระนาบ YZ



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบในระนาบ XZ

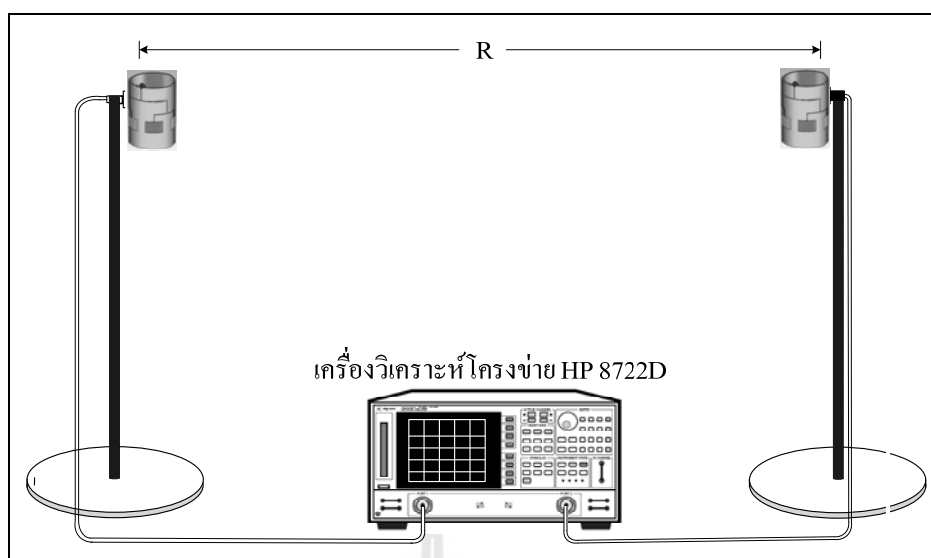


รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบผลการวัดทดสอบและจำลองด้วยโปรแกรม CST กับสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งต้นแบบในระนาบ YZ

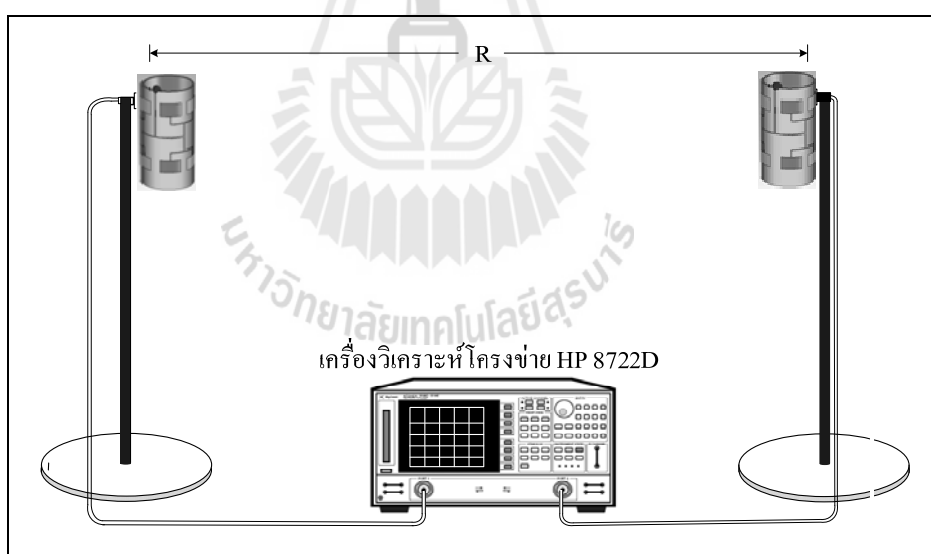


รูปที่ 4.27 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการวัดทดสอบสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์
ลักษณะโค้งตันแบบ

ผลการวัดทดสอบอัตรายาย สำหรับการวัดอัตรายายของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์ ลักษณะโค้งตันแบบแสดงดังรูปที่ 4.28 และสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้งตันแบบแสดงดังรูปที่ 4.29 ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้สายอากาศสองตัว (two-antenna method) โดยใช้สายอากาศที่มีลักษณะเหมือนกันสำหรับการวัดทดสอบ โดยตัวหนึ่งใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศภาคส่งและอีกตัวหนึ่งที่เหลือจะเป็นสายอากาศภาครับ



รูปที่ 4.28 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ 4 อีลิเมนต์
ลักษณะ โคงตั้งแนบ



รูปที่ 4.29 วิธีการวัดทดสอบอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับ 8 อีลิเมนต์
ลักษณะ โคงตั้งแนบ

จากนั้นใช้สมการการพื้นฐานในการคำนวณหาค่าอัตราขยายของสายอากาศสมการที่ 4.1 ในการคำนวณหาอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง 4 อีลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 4.2 dB และอัตราขยายของสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคง 8 อีลิเมนต์มีค่าเท่ากับ 6.5 dB

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_t G_r \quad (4.1)$$

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r,dB} - P_{t,dB} + Loss}{2} \right)$$

$$G_{dB} = \left(\frac{P_{r,dB} - P_{t,dB} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)}{2} \right)$$

$$G_{r,dB} = P_{r,dB} - P_{t,dB} - G_{t,dB} + 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)$$

โดยที่	P_t	คือ กำลังที่ป้อนให้กับสายอากาศภาคส่ง
	P_r	คือ กำลังที่รับได้จากสายอากาศภาครับ
	G_{dB}	คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับเมื่อสายอากาศทั้งสองตัวมีลักษณะเหมือนกัน
	G_t	คือ อัตราขยายของสายอากาศภาคส่ง
	G_r	คือ อัตราขยายของสายอากาศภาครับ
	R	คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศภาคส่งและสายอากาศภาครับ

4.4 สรุป

จากการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบสายอากาศแถวลำดับแบบแผ่น โคงสำหรับจรวดนำวิถีระยะสั้น พบว่าระบบต้นแบบที่ได้ออกแบบนี้มีแบบรูปการแผ่พลังงานไปในทิศทางที่ได้ออกแบบ และพบว่าเมื่อใช้สายอากาศต้นแบบ 8 อีลิเมนต์ จะให้อัตราขยายที่สูงกว่าสายอากาศต้นแบบ 4 อีลิเมนต์ มีช่วงแบนวิดท์รองรับการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถีระยะสั้น และมีการแผ่กระจายคลื่นโดยรอบ เหมาะสำหรับการติดตั้งบนจรวดนำวิถีระยะสั้น

บทที่ 5

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น และมีการนำมาใช้งานกันในวงกว้าง ซึ่งที่ผ่านมาเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาและขยายตัวอย่างรวดเร็ว ด้วยรูปแบบการใช้งานและความสามารถที่แตกต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการสื่อสารแบบไร้สายเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีความสำคัญช่วยอำนวยความสะดวกด้านการสื่อสารได้อย่างมาก รวมถึงด้านอุตสาหกรรม ด้านการสื่อสารและเทคโนโลยีด้านสุขภาพ ด้านการเมือง และด้านการทหาร โดยมีการนำสายอากาศมาเข้ามาประยุกต์ใช้กับจรวดนำวิถี ด้วยเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งเป้าหมาย จรวดนำวิถีมีพิสัยการยิงสามระยะคือ จรวดนำวิถีระยะสั้น จรวดนำวิถีระยะกลาง และจรวดนำวิถีระยะไกล ซึ่งในแต่ละระยะมีความเร็วที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ น้ำหนัก วัสดุที่ใช้ทำจรวดนำวิถี รวมถึงเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน สายอากาศที่เหมาะสมสำหรับใช้ติดตั้งบนจรวดนำวิถีระยะสั้น มีแบนด์วิดท์ที่กว้างเพื่อรองรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของจรวดนำวิถี มีอัตราขยายสูงเพื่อให้สามารถรับส่งสัญญาณได้ในระยะทางที่ต้องการ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำสายอากาศแพทช์ทำการแกลวลำดับ เพื่อให้มีอัตราขยายเชิงทิศทางที่สูงจากนั้นใช้พลาสติกพีวีซีเป็นวัสดุฐานรองและนำกราวอยู่ด้านล่าง ปรับตั้งค่าที่ความถี่ศูนย์กลาง 2.4 GHz แล้วทำการตัดโค้งเพื่อให้สะดวกในการใช้ติดตั้งกับจรวดนำวิถีระยะสั้น

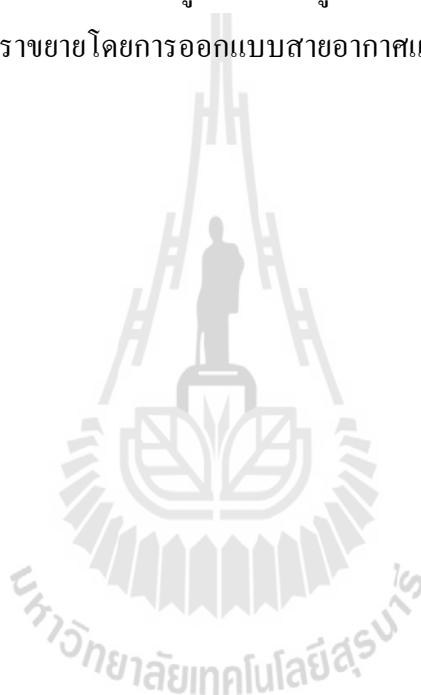
ในการออกแบบของผู้วิจัยได้มีการออกแบบสายอากาศแกลวลำดับที่โค้งตามแกนทอสามารถนำไปใช้งานกับ จรวดนำวิถีขนาดเล็ก โดยได้นำเสนอผลการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ ซึ่งจากผลการทดสอบสายอากาศโค้งตามแกนทอพบว่าครอบคลุมแบนด์วิดท์ที่อยู่ในช่วงการรับส่งของสายอากาศมีความถี่กลางที่ 2.4 GHz และมีอัตราขยายเฉลี่ย 4.2 dB สำหรับการออกแบบสายอากาศที่มีองค์ประกอบ 4 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง แบบรูปการแผ่กำลังงานโดยรอบแต่อัตราขยายอาจยังไม่ดีพอ จึงได้มีการออกแบบเป็น สายอากาศที่มีองค์ประกอบ 8 อีลิเมนต์ลักษณะโค้ง ซึ่งผลพบว่าอัตราขยายที่สูงขึ้นเพิ่มเป็น 6.5 dB โดยผู้วิจัยได้วัดและทดสอบประสิทธิภาพของสายอากาศแกลวลำดับแบบแผ่นโค้งที่สร้างขึ้นโดย นำไปติดตั้งบนพลาสติกพีวีซีที่มีรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร ที่เหมาะสำหรับนำไปใช้ในจรวดนำวิถีระยะสั้น

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการออกแบบสายอากาศที่ใช้ในการติดตั้งกับจรวดนำวิถีระยะสั้น สายอากาศที่ใช้มีขนาดบางมากทำให้การสร้างสายอากาศในการวัดทดสอบมีความยากและสายอากาศมีการดัดโค้งในการจำลองและสร้างจริงจึงมีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อให้ลงที่ความถี่ 2.4 GHz

5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

สายอากาศยังมีอัตราขยายที่ไม่สม่ำเสมอสำหรับแบบรอบตัว อัตราขยายที่ยังต่ำอยู่ อาจมีการทดสอบสายอากาศจากรูปสี่เหลี่ยมเป็นรูปอื่น เพื่อดูค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับและช่วงแบนวิดท์ และการเพิ่มอัตราขยายโดยการออกแบบสายอากาศแบบแถวลำดับให้มากขึ้น แต่ต้องไม่ใช้พื้นที่มากจนเกินไป



รายการอ้างอิง

- Balanis, C.A. (1989). *Advanced Engineering Electromagnetics*, **John Wiley & Sons**, New York.
- Bassem, R. (2009). **Radar signal analysis and processing using matlab**, Inc, 2009.
- Balanis C. A. (1997). *Antenna Theory: Analysis and Design* 2nd edition . **John Wiley& Sons**, **CST-Microwave Studio**, ed, (2009).
- Cong Chen, Li Jiebo, Lin Zhang and Haitao Chen, (2010). Research of the missile and aircraft base mounted antennas for data transmission, **International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology**, pp. 392 – 394.
- DeJean, G. R., Thai, T.T., Nikolaou S., and Tentzeris, M.M. (2007). Design and Analysis of Microstrip Bi-Yagi and Quad-Yagi Antenna Arrays for WLAN Applications, **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, vol. 6, pp. 244 – 248.
- DeJean, G. R., and Tentzeris, M. M., (2007). A new high-gain microstrip Yagi array antenna with a high front-to-back (F/B) ratio for WLAN and millimeter-wave applications,” **IEEE Trans. Antennas Propag.**, vol. 55, pp.298–304.
- 38, pp 79.
- El-Sheikh, G. A. (2004). Performance investigation of a homing guided missile with positioning the seeker antenna, **Proceedings of the Twenty-First National Radio Science Conference**, pp. C20 - 1-10.
- Melvin, M. (2006). **Adaptive antennas and receivers**,
- Sabban, A. (2007). Applications of MM Wave Microstrip Antenna Arrays, **International Symposium on Systems and Electronics**, pp. 119 – 122.
- Wen-Chung Liu and Chih-Sheng Chen, (2013). Design of Missile-Mounted SIW Antenna with High Directivity for Data Transmission, **Progress in Electromagnetics Research C**, Vol.
- Yu, B., Wu, D., and Seo, K. (2008). Array of waveguide-fed microstrip antennas, **International Conference on Communication Systems**, pp.797 - 800.

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, it features a stylized tower or spire. Below this, a central figure of a person stands on a platform. The figure is flanked by two large, stylized letters 'H'. The entire emblem is set against a background of radiating lines, suggesting a sun or a fan. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the emblem.

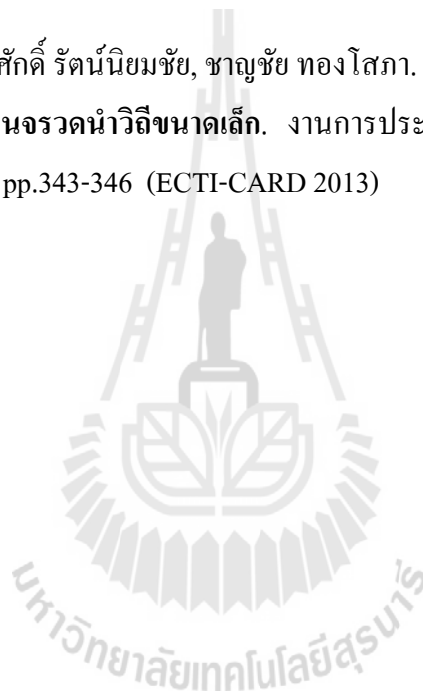
ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Jessada Monthasuwan, Charinsak Saetiaw, Chanchai Thongsopa. **Curved Rectangular Patch Array Antenna Using Flexible Copper Sheet for Small Missile Application.** World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Communication Science and Engineering Vol:7 No:11, 2013.

เจษฎา มณฑาสุวรรณ, คงศักดิ์ รัตน์นิยมชัย, ชาญชัย ทองโสภณ. **สายอากาศแบบแผ่นโค้งสำหรับการประยุกต์ใช้งานบนจรวดนำวิถีขนาดเล็ก.** งานการประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 5 pp.343-346 (ECTI-CARD 2013)



Curved Rectangular Patch Array Antenna Using Flexible Copper Sheet for Small Missile Application

Jessada Monthasuwan, Charinsak Saetiauw, Chanchai Thongsopa

Abstract—This paper presents the development and design of the curved rectangular patch arrays antenna for small missile application. This design uses a 0.1mm flexible copper sheet on the front layer and back layer, and a 1.8mm PVC substrate on a middle layer. The study used a small missile model with 122mm diameter size with speed 1.1 Mach and frequency range on ISM 2.4 GHz. The design of curved antenna can be installation on a cylindrical object like a missile. So, our proposed antenna design will have a small size, lightweight, low cost and simple structure. The antenna was design and analysis by a simulation result from CST microwave studio and confirmed with a measurement result from a prototype antenna. The proposed antenna has a bandwidth covering the frequency range 2.35-2.48 GHz, the return loss below -10 dB and antenna gain 6.5 dB. The proposed antenna can be applied with a small guided missile effectively.

Keywords—Rectangular path arrays, small missile antenna.

I. INTRODUCTION

THE demands of wireless communication systems are rapidly growing. Future wireless systems will provide various services such as broadband multimedia and high speed access. Especially, the application of military radio technology has become an important topic for microwave communication. In recent years, the increasing interest in antennas and propagations research is an application in military communication devices [1]. The communication link for a missile and military weapons communication devices used to be a wireless network system. Military wireless network system was used for monitoring and tracking of rocket or missile. The communication on missile or rocket was differs from the convectional radiofrequency and wireless communication technologies. The antenna designed for missile needs a bandwidth covered both receive and transmit signals of the missile including some bandwidth because of effect of missile's speed from Doppler Effect. The speed of small missile was about Mach 2 [2]. So, the antenna resonance frequency will be changed when it's used on the missile or military weapons. The essential equipment for their wireless communication systems is the antenna which is used for transmitting and receiving a signal. There are many types of antenna applied for the appropriate function and system. But one of the major requirements of a missile and weapons tracking application is a compact and extremely wideband antenna covering the spectrum frequency.

The microstrip patch antenna is better option for military weapons tracking application. Due to their exhibit small size, light weight, low manufacturing cost and easy fabrication. However, frequency shifts where there moving very high

speed [3]-[5] because the center frequency will be changed when it's moved with very high speed around 2 Mach. Recent antenna for missile application development tends to focus on small planar antennas such as bow-tie, elliptical, slot and array antennas [6], [7].

This paper presents a design and analysis of curved rectangular patch array antenna for small missile application. A thin and flexible copper sheet antenna was attached a part of cylindrical PVC substrate. This antenna was designed on small missile model by cylindrical metal object and antenna analysis was conducted by using the CST microwave studio program [8]. The frequency of a designed antenna was used in ISM frequency band at 2.4 GHz. The proposed antenna is realized and experimentally examined, since it has small size, light weight, easy fabrication and low manufacturing cost. In this paper, the antenna will have return loss lower than -10 dB which covered frequency standard of 2.4GHz ISM Band. The average gain achieved in the antenna is more than 6.5 dB over the operating frequency. The advantage of the proposed antenna is that it can be used to small missile for military application.

II. ANTENNA DESIGN AND SIMULATION RESULT

The advantages of the microstrip antennas are small size, and lightweight, conformable to planar and non planar surfaces. They are simple and cheap to manufacture using technology. Ideal for installation on guided missile designed to be small.

However, substrate is also important; we have to consider the temperature and other environmental ranges of operation. Thickness of the substrate has a large effect on the resonant frequency and bandwidth of the antenna. Bandwidth of microstrip antenna will increase with increasing of substrate thickness but with limits, otherwise the antenna will stop resonating.

The purposed antenna is designed from calculations and consists of two parts: the patch microstrip antenna and the matching microstrip line at center frequency 2.4 GHz.

Consider, Fig. 1 shows a rectangular microstrip patch antenna of length L , width W resting on a substrate of height h . the length of the patch must be slightly less than $\lambda/2$ where λ is the wavelength in the dielectric medium and equal to $\lambda_0/\sqrt{\epsilon_{reff}}$ where λ_0 is the free space wavelength.

From Fig. 1, patch antenna can be design with a given resonance frequency f_0 , the effective length is given by [9] as:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (1)$$

where the expression for ϵ_{reff} is given by Balanis [10] as:

Jessada Monthasuwan, Charinsak Saetiauw, and Chanchai Thongsopa are with the Suranaree University of Technology, 111, University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, Thailand (e-mail: Jessada_joc@hotmail.com, charinsak_s@yahoo.co.th, chan@sut.ac.th).

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

For efficient radiation, the width W is given by Bahl and Bhartia [11] as:

$$W = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (3)$$

Next, we introduce a simplest and most commonly used feed technique which is the microstrip transmission line. Microstrip transmission line is connected directly to the patch to induce excitation. The main advantage is that the feed line and the patch can be printed on the same substrate layer.

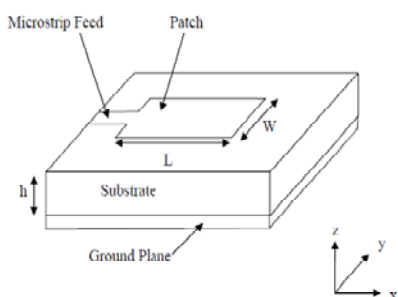
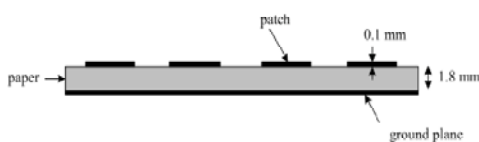
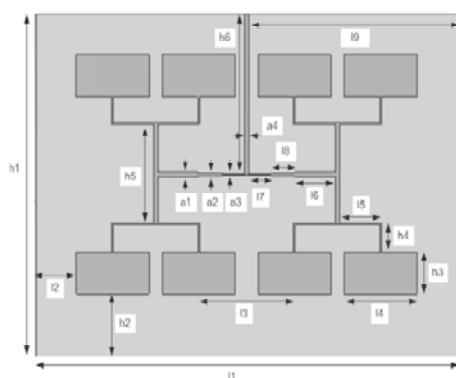


Fig. 1 Microstrip Patch Antenna



(a) Top view



(b) Front view

Fig. 2 Schematic of purposc antenna (Straight)

Three types of feed network were used: tapered lines to match 100Ω patch elements to a 50Ω input; combination of 100Ω, 50Ω and 70Ω lines; and a corporate-feed network modeled with multiple-section quarter-wavelength

impedance transformers. The technique was chosen for this design because it presented better simulation results in impedance matching and antenna response. The input port of antenna was fed into the center of strip line of the antenna. The size of the microstrip line was calculated on the center frequency at 2.4 GHz with 50Ω 70Ω and 100Ω impedances as shown in Fig. 2.

The patch array antenna was designed appropriately for an application on small cylinder missile. Center-to-center spacing between the patches is more than 0.5λ in order to obtain a proper balance between antenna gain and radiation main lobe shape. The purposed antenna model used the thin copper 0.1 mm. for the patch array [7] on front layer and ground layer at the back of the PVC substrates with a thickness of 1.8 mm. Fig. 2, with the parameters in Table I.

TABLE I
DIMENSIONS PARAMETER OF PURPOSED ANTENNA

Parameter	Size(mm)	Parameter	Size (mm)
h1	300	h1	220
h2	28.5	h2	41
h3	68	h3	27
h4	52	h4	18
h5	29.75	h5	63
h6	29	h6	102
a1	15.75	a1	3
a2	17	a2	2
a3	148.5	a3	1
a4	3	a4	3

Designing an antenna for small missile, bandwidth needs to cover both receiving and transmitting signals including bandwidth from Doppler Effect. The speed of small missile is around 2 Mach at the frequency of 2.4 GHz and a result from Doppler Effect is ±11.072GHz which can be calculated by (4).

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \quad (4)$$

where

- f_0 is the transmit frequency (Hz)
- v is the speed of missile (m/s)
- c is the speed of light (m/s)
- f_d is the signal frequency Doppler Effect (Hz)

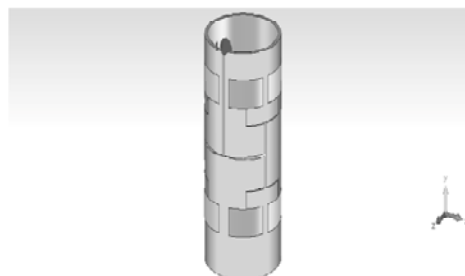


Fig. 3 Model of purposed antenna curved on cylindrical PVC tube

However, when we curved a patch array on PVC tube at 130 mm. diameter as shown in Fig. 3, the simulation result shows that the antenna is not working at the same center

International Science Index 83, 2013 waset.org/publications/17411

frequency 2.4 GHz. So, we have a modification of the parameters of the antenna to adjust the frequency resonance back to 2.4 GHz as shown in Fig. 4. The result of simulation shows that we can adjust l_4 equal to 52mm to make a resonant frequency 2.4 GHz.

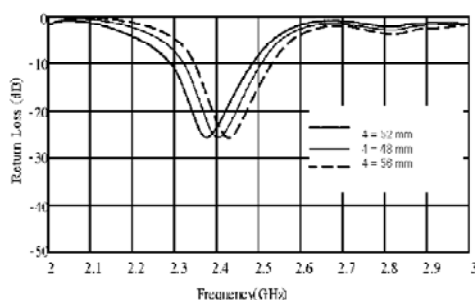


Fig. 4 Reflective coefficient (S11) of patch array antenna curved on PVC tube with difference l_4

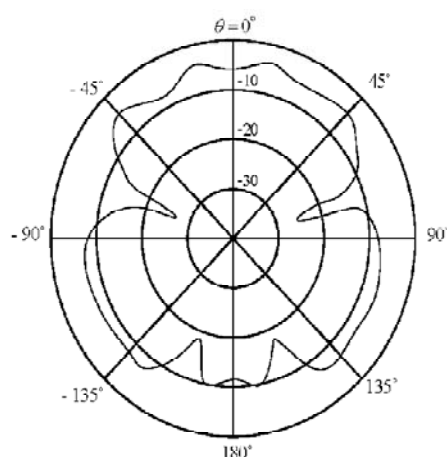


Fig. 5 Simulation result of E-field radiation pattern

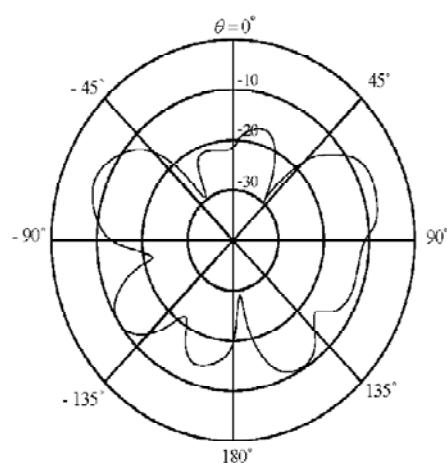


Fig. 6 Simulation result of H-field radiation pattern

The E-field and H-field radiation patterns of curved patch array antenna were shown on Figs. 5 and 6, respectively. The plane of the electric field direction shown in Fig. 5 has about 7 dB directional gain.

III. MEASUREMENT RESULTS

The prototype antennas were fabricated from flexible copper sheet with the same dimension parameters and electrical properties as simulation model and shown in Table I except l_4 as we had explained previously. The prototype antenna made from flexible copper sheet and curved on PVC tube as shown in Fig. 7. The prototype antennas are characterized in terms of return loss and radiation pattern using an Agilent HP8722D Microwave Vector Network Analyzer, is performed in the anechoic chamber. The result of simulation compared with a measurement of prototype with resonant frequency at 2.4 GHz as shown in Fig. 8.

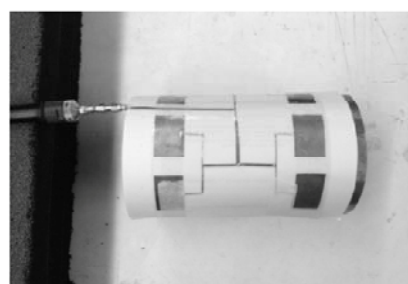


Fig. 7 Prototype of patch antenna arrays curved on PVC Tube

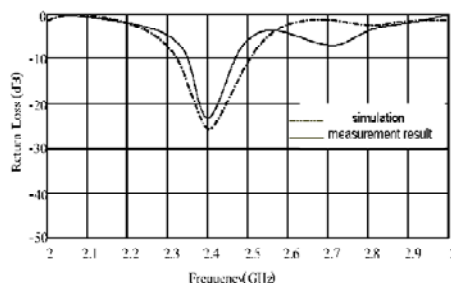


Fig. 8 Reflective coefficient (S11) of purposed antenna compare between simulation and measurement result

The antenna is laid on XY-plane and curved in XZ-plane. The E-fields and H-fields radiation patterns of curved patch array antenna were measured and shown on Figs. 9 and 10, respectively.

The plane of the E-field radiation pattern shown in Fig. 9 has around 6.5 dB directional gain. This measurement result agrees with simulation result that curved patch array antenna has a radiation pattern as Omni-directional, a frequency bandwidth is 2.35-2.48 GHz and average gain in all direction is 6.5 dB. This was enough to use for a small missile application.

Fig. 11 shows a range of bandwidth from the 2.38-2.435 GHz at -20 dB. This bandwidth covers the range of the missile which has 2 Mach of movement speed, calculated from the equation of the Doppler Effect.

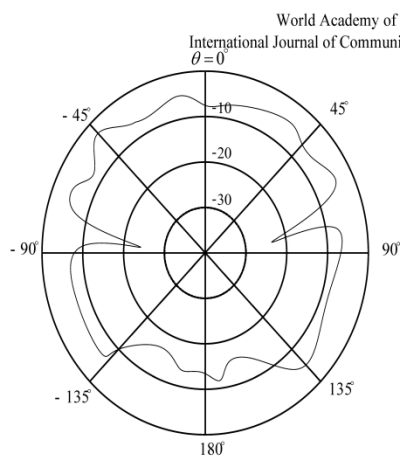


Fig. 9 E-filed radiation pattern from measurement

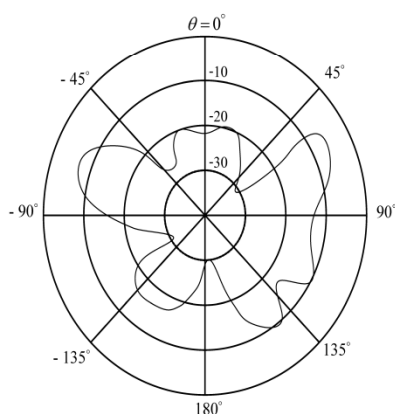
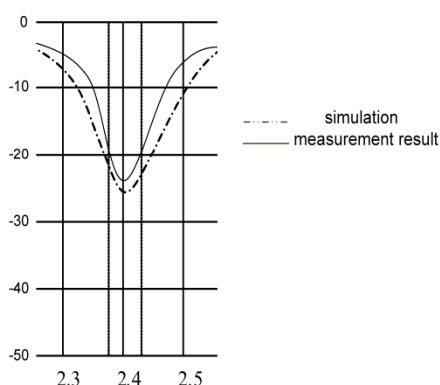


Fig. 10 H-filed radiation pattern from measurement

Fig. 11 Reflective coefficient (S_{11}) than -20 dB of purposed antenna compare between simulation and measurement result

IV. CONCLUSION

This paper presented the patch array antenna for a small missile application, which can be curved or bent along the cylindrical surface when it is installed on a small missile. The proposed antenna was designed with a cylinder PVC tube and antenna analysis was conducted by using the CST microwave

studio program. The ISM frequency of a designed antenna has center frequency at 2.4 GHz. In measurement, it is found that the proposed antenna has about 400 MHz (2:1 VSWR) frequency bandwidth which covered frequency range 2.35 - 2.48 GHz. The average gain achieved in the propose antenna is about 6.5 dB over the operating frequency. This antenna has Omni-directional radiation patterns at the center frequency of 2.4GHz and bandwidth covers all frequency effect on Doppler Effect (± 11.072 kHz). The advantage of the proposed antenna is that it can be used with small missile for military application.

REFERENCES

- [1] G. A. El-Sheikh, "Performance investigation of a homing guided missile with positioning the seeker antenna," Proceedings of the Twenty-First National Radio Science Conference, pp. C20 - 1-10, 2004.
- [2] Cong Chen, Li Jiebo, Lin Zhang and Haitao Chen, "Research of the missile and aircraft base mounted antennas for data transmission," International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, pp. 392 - 394, 2010.
- [3] G. R. DeJean, T.T. Thai, S. Nikolaou and M.M. Tentzeris, "Design and Analysis of Microstrip Bi-Yagi and Quad-Yagi Antenna Arrays for WLAN Applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 6, pp. 244 - 248, 2007.
- [4] Lin Jinyong, Li Gang, Sun Shenghe, Zhu Wenbiao, Gao Xiaoying, "Modeling Investigation in Large Scale System of Autonomous Formation Flying," Journal of System Simulation, Vol.19, No.16, pp. 3631-3633, August 2007.
- [5] G. R. DeJean and M. M. Tentzeris, "A new high-gain microstrip Yagi array antenna with a high front-to-back (F/B) ratio for WLAN and millimeter-wave applications," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 55, pp.298-304, Feb. 2007.
- [6] B. Yu, D. Wu and K. Seo, "Array of waveguide-fed microstrip antennas," International Conference on Communication Systems, pp. 797 - 800, 2008.
- [7] A. Sabban, "Applications of MM Wave Microstrip Antenna Arrays," International Symposium on Systems and Electronics, pp. 119 - 122, 2007.
- [8] "CST-Microwave Studio," ed, (2009).
- [9] Kumar, G. and Ray, K.P., Broadband Microstrip Antennas, Artech House, Inc, 2003.
- [10] Balanis, C.A., Advanced Engineering Electromagnetics, John Wiley & Sons, New York, 1989
- [11] Garg, R., Bhartia, P., Bahl, I., Ittipiboon, A., Microstrip Antenna Design Handbook, Artech House, Inc, 2001.

Jessada Monthasuwan received the B.Eng. degrees in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology in 2011. He is currently working toward the Master degree in Telecommunication Engineering of Suranaree University of Technology. His research focuses on antennas design and modeling with antennas systems for several applications.

Charinsak Saetiaw received the B.Eng. degrees in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology and M.Eng. degrees in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology in 1997 and 2007, respectively. He is currently working toward the Ph.D. degree in Telecommunication Engineering of Suranaree University of Technology. His research focuses on antennas design, wireless channel measurement and modeling with antennas systems for several applications.

Chanchai Thongsopa received B.Eng (1'Hons) Electronics Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand, M.Eng. (Electrical and Communications Engineering), Kasetsart University, Thailand and D.Eng. (Electrical Engineering), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand in 1992, 1996 and 2002, respectively. Experiences & expert are RF circuit design, active antenna, microwave heating application in 1992-1997 Researcher at Aeronautical Radio of Thailand Company Design Systems Air Traffic control: Design transmitters VHF-UHF (AM) 25W (on 24 Hour) and Design Transmitters HF (AM) 1KW (on 24 Hour). Furthermore, Researcher at National

World Academy of Science, Engineering and Technology
International Journal of Communication Science and Engineering Vol:7 No:11, 2013
Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) and consultant of
SDH project at Telephone Organization of Thailand (TOT) design RF circuit
in 1997-2000. He is currently an Associate Professor at the
Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology.

สายอากาศแบบแผ่นโค้งสำหรับการประยุกต์ใช้งาน

บนจรวดนำวิถีขนาดเล็ก

เจษฎา มณฑาสวรรณ¹ คงศักดิ์ รัตน์นิยมชัย¹ และ ชาญชัย ทองโสภา¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 0-4422-3000 E-Mail : Jassada_joe@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสายอากาศแบบแผ่นโค้งสำหรับการประยุกต์ใช้งานบนจรวดนำวิถีขนาดเล็ก โดยใช้แผ่นทองแดงบางชิ้นรูปเป็นส่วนของสายอากาศประกอบบนท่อพลาสติก เพื่อนำไปติดตั้งบนวัตถุที่เป็นโลหะลักษณะทรงกระบอก เพื่อนำไปสู่การประยุกต์ใช้งานด้านการสื่อสารของอุปกรณ์ด้านการทหารเป็นต้น โดยทำการออกแบบในย่านความถี่ 2.4 GHz โดยโครงสร้างที่นำเสนอมีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนรวมทั้งน้ำหนักเบาและวัสดุที่ใช้ออกแบบมีราคาถูก โดยได้ทำการออกแบบสายอากาศเป็นแบบอาร์เรย์และทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST พบว่า มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 ตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน

คำสำคัญ : สายอากาศแพทช์อาร์เรย์แบบแผ่นโค้ง, จรวดนำวิถีขนาดเล็ก.

Abstract

This paper presents and application of curved patch antenna on small missile. A thin copper sheet antenna was attached a part of plastic pipe. The pipe was then fixed on cylinder metal object for such an application in martial communication devices. Frequency of a designed antenna was adjusted at 2.4 GHz. with simple model, light, and used low price features. Additionally, antenna wire was designed as array type and the result of demonstration was displayed by CST program. The result of the demonstration found that return loss value was lower than -10 throughout the frequency rate generated for an application.

Keywords: patch antenna with a bow, Small missile.

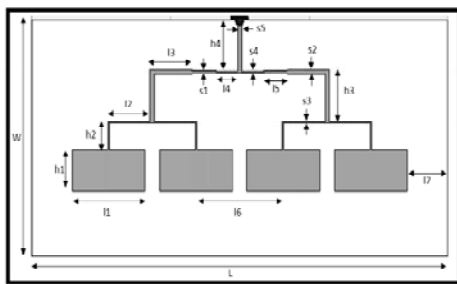
1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบไร้สายเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น และมีการใช้งานกันในวงกว้าง ด้วยรูปแบบการตั้งงานและความสามารถที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ได้ว่าเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญมาก ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการสื่อสาร อีกทั้งยังเชื่อมต่อและประยุกต์ให้ใช้งานได้หลากหลายด้าน เช่น ด้านอุตสาหกรรม ด้านการสื่อสารและเทคโนโลยี ด้านสุขภาพ ด้านการเมือง รวมถึงด้านการทหาร ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการนำสายอากาศเข้ามาใช้และส่งผลให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในระบบการสื่อสารแบบไร้สาย ดังนั้นสายอากาศจึงเป็นอุปกรณ์สำคัญที่นักวิจัยได้ให้ความสนใจในการออกแบบและมีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง

บทความนี้จึงได้นำเสนอสายอากาศแบบแผ่นโค้งสำหรับการประยุกต์ใช้งานบนจรวดนำวิถีขนาดเล็ก โดยนำความรู้เกี่ยวกับโครงสร้างพื้นฐานของสายอากาศที่มีอยู่เดิมนั้น มาพัฒนาผสมผสานให้สามารถใช้งานได้กับวัตถุโลหะที่มีรูปทรงกระบอกที่ความถี่ศูนย์กลาง 2.4 GHz โดยที่ความถี่ดังกล่าวมีการใช้งานที่หลากหลายรวมทั้งเป็นความถี่ย่านอุตสาหกรรม(ISM)ที่มีการนำไปใช้งานการสื่อสารไร้สายเชิงพาณิชย์รวมทั้งการใช้งานสำหรับการสื่อสารด้านการทหารด้วย โดยรายงานฉบับนี้จะประกอบไปด้วยส่วนของการออกแบบและการจำลองแบบและหัวข้อสุดท้ายเป็นการสรุปผลการออกแบบ

2. การออกแบบและการจำลองสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศแบบแผ่นโค้ง สำหรับการประยุกต์ใช้งานบนนำวิถุจรขนาดเล็กลักษณะรูปทรงกระบอก การออกแบบสายอากาศที่ใช้งานกับจรขนาดเล็กจะต้องมีแบนวิทที่ครอบคลุมในการรับส่งสัญญาณ ในขณะที่จรไม่มีการเคลื่อนที่และมีการเคลื่อนที่ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของจรนำวิถุขนาดเล็กจะมีความเร็วโดยประมาณ 2 มัค ที่ความถี่ 2.4GHz ± 11.072kHz สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานและพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาด(มม.)	พารามิเตอร์	ขนาด(มม.)
W	150	h1	26.6
L	300	h2	18
l1	52.6	h3	33
l2	30.75	h4	32
l3	30.25	s1	2
l4	15.75	s2	3
l5	17	s3	1
l6	63.5	s4	1
l7	29.25	s5	3

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \quad \text{Hz} \quad (1)$$

- เมื่อ f_0 คือความถี่ของตัวส่งสัญญาณ Hz
- v คือความเร็วของจรนำวิถุ m/s
- c คือความเร็วแสง m/s
- f_d คือความถี่ของสัญญาณที่ Hz

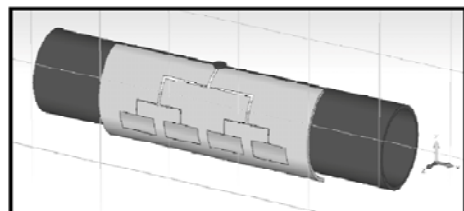
เปลี่ยนแปลงจาก f_0 เมื่อ $(f_0 \pm f_d)$

สายอากาศที่เหมาะสมกับจรนำวิถุขนาดเล็กนั้นต้องมีอัตราขยายที่สูง [4] จึงได้เลือกสายอากาศแพทช์สี่เหลี่ยมมาอาเรย์ ทำให้มีอัตราขยายสูง [1] เพื่อหาคุณสมบัติที่เหมาะสมของสายอากาศเบื้องต้นดังรูปที่ 1 จากการออกแบบเบื้องต้นได้สายอากาศแพทช์อาเรย์ โดยมีโครงสร้างสายอากาศที่ความถี่ 2.4GHz โดยมีขนาดของส่วนประกอบต่างๆของสายอากาศ ดังตารางที่ 1

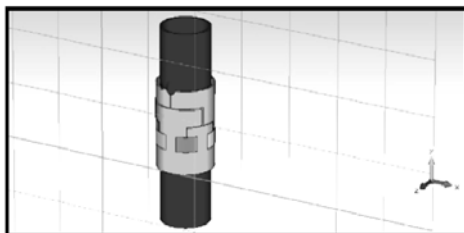
2.1 การออกแบบสายอากาศแบบโค้งตามความยาวท่อและสายอากาศแบบโค้งตามแกนท่อ

ในการออกแบบสายอากาศแบบแผ่นโค้งทั้งสองแบบนี้ สำหรับประยุกต์ใช้งานบนจรนำวิถุขนาดเล็กได้ทำการแทนส่วนจรนำวิถุด้วยวัตถุโลหะทรงกระบอก โดยการติดตั้งสายอากาศบนนำวิถุโลหะที่เป็นทรงกระบอกมีความโค้งสายอากาศแพทช์ทั่วไปซึ่งมีความแข็งไม่สามารถติดตั้งบนนำวิถุซึ่งมีความโค้งได้จึงมีการออกแบบสายอากาศแพทช์ให้มีความโค้งเพื่อให้เข้ากับจรนำวิถุขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 มิลลิเมตร และได้ทำการออกแบบสายอากาศได้ทำการเลือกใช้แผ่นทองแดงบางหนา 0.1 มิลลิเมตร เพื่อใช้ขึ้นรูปเป็นส่วนของสายอากาศชั้นบนสุด และใช้เป็นส่วนของกราวชั้นล่างสุดนอกจากนั้นได้ใช้วัสดุท่อพีวีซีเป็นวัสดุฐานรองระหว่างชั้นกราวกับชั้นแผ่กระจายคลื่นซึ่งมีค่าซึมซับ(ϵ_r) = 3.5

สายอากาศแบบโค้งตามความยาวท่อส่งผลให้การแผ่กระจายคลื่นมีทิศทางไปในทางเดียวทำให้อัตราขยายสูง (รูปที่ 2) และสายอากาศแบบโค้งตามแกนท่อส่งผลให้มีการแผ่กระจายคลื่นแผ่ออกรอบทิศทาง (รูปที่ 3)

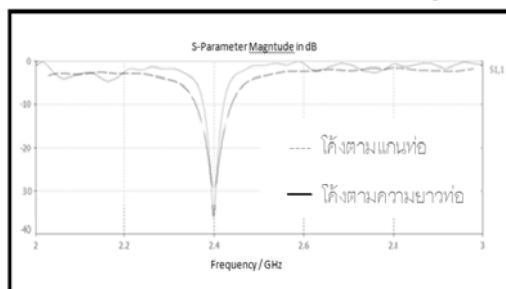


รูปที่ 2 สายอากาศแพทช์แบบโค้งตามความยาวท่อ

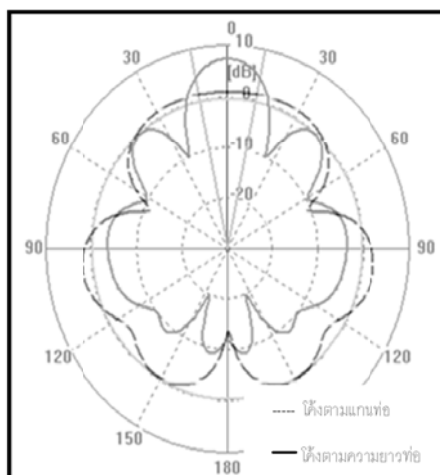


รูปที่ 3 ลายอากาศแพทช์แบบโค้งตามแกนท่อ

โดยผลที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม CST ได้ผลสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) ของลายอากาศทั้งสองแบบที่ความถี่ 2.4GHz ได้ผลดังนี้ การออกแบบลายอากาศแบบโค้งตามความยาวท่อ มีค่า -35 dB และมีอัตราขยาย 10 dB ที่มุม 0 องศา (รูปที่ 4) และความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังมีค่า 24 องศา (รูปที่ 5) และการออกแบบลายอากาศตามแกนท่อ มีค่า -28 dB และมีอัตราขยาย 4.2 dB ที่มุม 0 องศา (รูปที่ 4) และ ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง มีค่า 92.1 องศา (รูปที่ 5)



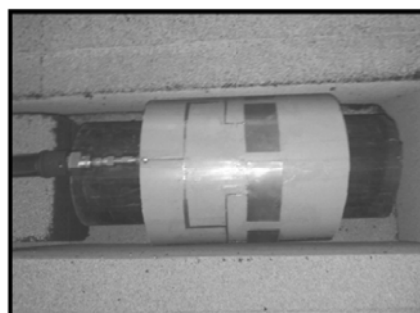
รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ(S11) แบนวิดท์ที่ทำงานต่ำกว่า -10 dB โค้งตามแกนท่อ 2.38 GHz – 2.42 GHz โค้งตามความยาวท่อ 2.385 GHz – 2.415 GHz



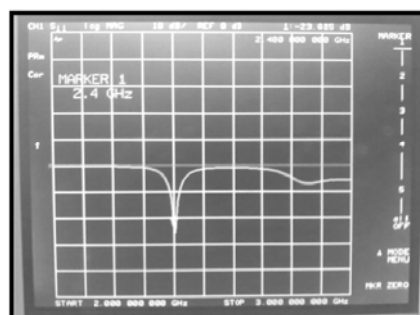
รูปที่ 5 รูปแบบการกระจายคลื่นสนามไฟฟ้าบนระนาบ XZ

3. การสร้างและผลการทดสอบ

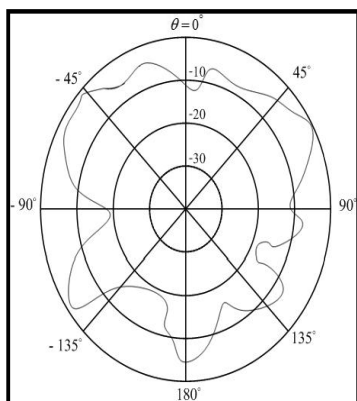
โครงสร้างชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบโค้งตามแกนท่อแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อนำมาวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 7 และการแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 8 จะสังเกตได้ว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับที่วัดได้จริงนั้นจะมีความถี่ที่ต่ำกว่าค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้จากการจำลองการทำงาน แต่มีแนวโน้มของค่าที่คล้ายคลึงกับค่าที่ได้จากการจำลองการทำงาน ซึ่งอาจเกิดมาจากความผิดพลาดเนื่องจกชิ้นงานและในการสร้างจริง แต่อย่างไรก็ตามสายอากาศที่นำเสนอก็ยังสามารถใช้งานได้กับจรวดนำวิถีขนาดเล็กที่มีความถี่ 2.4 GHz ได้ ซึ่งผลตอบสนองย่านความถี่จากผลการวัดค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ต่ำกว่า -10 dB และอยู่ในช่วงแบนวิดท์ที่จรวดนำวิถีขนาดเล็กสามารถรับส่งสัญญาณได้



รูปที่ 6 ภาพถ่ายชิ้นงานจริงของสายอากาศแบบโค้งตามแกนท่อ



รูปที่ 7 ผลการจำลองสายอากาศแบบโค้งตามแกนท่อ กราฟลองที่ความถี่ 2.4 GHz มีค่า -23.605 dB แบนวิดท์ที่ทำงานต่ำกว่า -10 dB 2.381 GHz - 2.422 GHz



รูปที่ 8 การแผ่กระจายคลื่นสนามไฟฟ้า

4. สรุป

บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอสายอากาศแบบโค้งสองรูปแบบ มีสายอากาศโค้งตามความยาวท่อและสายอากาศโค้งตามแกนท่อ สามารถนำไปใช้งานกับ จรวดนำวิถีขนาดเล็ก โดยได้นำเสนอผลการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศ ซึ่งจากผลการทดสอบสายอากาศโค้งตามแกนท่อพบว่า ครอบคลุมแบนด์วิดท์ที่อยู่ในช่วงการรับส่งของสายอากาศมีความถี่กลางที่ 2.4 GHz และมีอัตราขยายเฉลี่ย 4.2 dB รูปแบบการแผ่กำลังงานแบบรอบตัว ส่วนสายอากาศโค้งตามความยาวท่อจะพบว่าครอบคลุมแบนด์วิดท์ที่อยู่ในช่วงการรับส่งของสายอากาศมีความถี่กลางที่ 2.4 GHz และมีอัตราขยายเฉลี่ย 10 dB รูปแบบการแผ่กำลังงานไปในทิศทางเดียว

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายจรินทร์ศักดิ์ แซ่เตียว ที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการเขียนบทความฉบับนี้ และขอขอบคุณสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Yu, D. Wu and K. Seo, "Array of waveguide-fed microstrip antennas," International Conference on Communication Systems, pp. 797 - 800, 2008.
- [2] A. Sabban, "Applications of MM Wave Microstrip Antenna Arrays," International Symposium on Systems and Electronics, pp. 119 – 122, 2007.
- [3] G. R. DeJean, T.T. Thai, S. Nikolaou and M.M. Tentzeris, "Design and Analysis of Microstrip Bi-Yagi and Quad-Yagi Antenna Arrays for WLAN Applications," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 6, pp. 244 – 248, 2007.
- [4] Cong Cher, Li Jiebo, Lin Zhang and Haitao Chen, "Research of the missile and aircraft base mounted antennas for data transmission," International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, pp. 392 – 394, 2010.
- [5] G. A. El-Sheikh, "Performance investigation of a homing guided missile with positioning the seeker antenna," Proceedings of the Twenty-First National Radio Science Conference, pp. C20 - 1-10, 2004.

ประวัติผู้เขียน

นายเจษฎา มณฑาสวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 28 ธันวาคม พ.ศ. 2530 ที่อำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนชุมพวงศึกษา จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2553 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ โดยในปี 2556 มีผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ในระดับชาติ 1 ฉบับ ในงานการประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 5 (ECTI-CARD 2013) ในหัวข้อ สายอากาศแบบแผ่นโค้งสำหรับประยุกต์ใช้งานบนจรวดนำวิถีขนาดเล็ก และในระดับนานาชาติ 1 ฉบับ ในงาน International Conference on Mathematics and Statistical Engineering (ICMSE 2013) ในหัวข้อ Curved Rectangular Patch Array Antenna Using Flexible Copper Sheet for Small Missile Application.