



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า	วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	สายอากาศแบบโหมดคู่ชั้นเดียวสำหรับป้ายยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดีแบบแพสซีฟที่มีชั้นโดยใช้สแต็บแบบเปิด
	Single Layer Dual Mode Antenna for Passive UHF RFID Tag using Open Stubs
نامผู้วิจัย	นายสิทธิกิต เพชรสุวรรณ
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	( ผู้ช่วยศาสตราจารย์เด่นชัย วรเสวต, Ph.D. )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนทร พรานนทีสถิตย์, Ph.D. )
หัวหน้าภาควิชา	( รองศาสตราจารย์วิชัย สุระพัฒน์, วศ.ม. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สายอากาศแบบ โหมดคู่ชั้นเดียวสำหรับป้ายยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดีแบบแพสซีฟที่มีชั้น โดยใช้สตั๊บ  
แบบเปิด

Single Layer Dual Mode Antenna for Passive UHF RFID Tag using Open Stubs

โดย

นายสิทธิกิต เพชรสุวรรณ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)  
พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สิทธิกิต เพชรสุวรรณ 2557: สายอากาศแบบโหมคคู่ชั้นเดียวสำหรับป้ายยูเอชเอฟอาร์-  
เอฟไอดีแบบแพสซีฟที่มีชั้นโดยใช้สตับบแบบเปิด ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
(วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เด่นชัย วรเสวต, Ph.D. 133 หน้า

งานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาวิธีการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีแบบ  
แพสซีฟสำหรับผิวโลหะและอโลหะ โดยการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นจะ  
ออกแบบสายอากาศสองชนิดในสายอากาศตัวเดียวคือ สายอากาศไมโครสตริปในกรณีที่สายอากาศ  
สำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีติดบนผิวโลหะ และสายอากาศไดโพลในกรณีที่สายอากาศติดบนผิวอโลหะ  
จึงเรียกว่าสายอากาศโหมคคู่ สำหรับโหมคไมโครสตริปนั้นจะออกแบบจากค่าอิมพีแดนซ์ของแพทช์  
สี่เหลี่ยมจตุรัสโดยใช้โปรแกรมจำลองผลการทำงาน โชนเน็ต โดยใช้สตับบแบบเปิดในการแมตช์ ส่วน  
การออกแบบสายอากาศไดโพลนั้นจะเพิ่มสตับบแบบเปิดเข้าไปตรงสายกราวด์เสมือนในโหมค  
ไมโครสตริป เพื่อให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปมีผลกระทบน้อยที่สุด นอกจากการ  
ออกแบบแล้วในงานวิจัยฉบับนี้ยังทดลองสร้างสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีตัวจริงขึ้นมา  
เพื่อที่จะวัดผลระยะอ่านเปรียบเทียบผลที่เกิดจากการจำลองผลการการทำงานจาก โปรแกรมการ  
ออกแบบสายอากาศ และปรับปรุงสายอากาศอีกครั้งเพื่อที่จะให้ระยะอ่านเป็นไปตามจุดประสงค์ที่  
ทำการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sittikit Pechsuwan 2014: Single Layer Dual Mode Antenna for Passive UHF RFID Tag using Open Stubs. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Denchai Worasawate, Ph.D. 133 pages.

The purpose of this research is to find the design method of passive UHF RFID tag antenna for metallic and non metallic surfaces. Two types of antennas, microstrip and dipole antennas, must be simultaneously designed. The antenna acts like a microstrip antenna when attached on metallic surface and acts like a dipole antenna when attached on non metallic surface. This is called a dual mode antenna. The microstrip mode is designed from an impedance of a square patch antenna obtained by a simulation software, Sonnet. A transmission line and open stubs are used to match the antenna. The dipole mode is designed by adding an open stubs at the virtual ground of microstrip mode which gives the least effect impedance of microstrip mode. The optimum length of the stub is obtained by using Sonnet. This research is shown the made antenna to measure the reading range of RFID tag antenna. The measured results are compared with the simulated results. Finally, the antenna must be improved the reading range which is the nearest of purpose results.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.เด่นชัย วรเสวต ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผศ.ดร.สุเนตร พรานนท์สถิตย์ กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ อีกทั้ง ผศ.ดร. ชีรสิทธิ์ เกษตรเกษม จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ ดร.ละออ โควาวิสารัช จากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่กรุณาให้คำแนะนำในงานวิจัยของ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ให้ความรู้ และอบรมสั่งสอน ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในการต่อไป และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดามารดาของผู้วิจัยซึ่ง ได้อบรมสั่งสอนและให้ความสนับสนุนผู้วิจัยมาโดยตลอด

สิทธิกิต เพชรสุวรรณ

ตุลาคม 2556

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(12)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์	25
วิธีการ	26
ผลและวิจารณ์	57
ผล	57
วิจารณ์	99
สรุปและข้อเสนอแนะ	123
สรุป	123
ข้อเสนอแนะ	125
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	126
ภาคผนวก	128
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	133

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงย่านความถี่ที่ใช้ในระบบอาร์เอฟไอดี	5
2 แสดงค่าพารามิเตอร์สายอากาศ	19
3 แสดงค่าพารามิเตอร์สายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้แพทช์แบบพาราซิติก	21
4 แสดงระยะอ่านของสายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้แพทช์แบบพาราซิติก	22
5 แสดงค่าพารามิเตอร์สายอากาศ	24
6 แสดงขนาดของชิพอาร์เอฟไอดีโดยใช้พารามิเตอร์จากภาพร่าง	28
7 แสดงขนาดของชิพอาร์เอฟไอดีโดยใช้พารามิเตอร์จากภาพร่าง (ต่อ)	28
8 แสดงข้อมูลที่เป็นของตัวชิพสำหรับการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี	29
9 แสดงค่าแอดมิตแตนซ์ของแพทช์และค่าจริงของแอดมิตแตนซ์สูงสุดต่ำสุดที่เป็นไปได้เมื่อใส่สายป้อนสัญญาณลงไป	40
10 แสดงค่าความยาว $Y_{patch}^R$ , $L_2^\lambda$ และ $L_2$ ที่สายอากาศมีขนาด $L_1$ เท่ากับ 109 และ 101 มิลลิเมตร	40
11 แสดงค่าความกว้างของสาย $W_1$ ตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	41
12 แสดงค่าความยาวสายที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์เสมือน $L_3$ ตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	41
13 แสดงค่า $Y_{patch}^{match}$ , $S_1^\lambda$ และ $S_2$ ที่สายอากาศมีขนาด $L_1$ เท่ากับ 109 และ 101 มิลลิเมตร	41
14 แสดงขนาดสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการจำลองผลการทำงานในโปรแกรม Somnet และค่าแอดมิตแตนซ์ที่ได้จากการจำลองผลการทำงานในโหมดไมโครสตริป	42
15 แสดงระยะ $S_2$ ที่ให้ค่าการส่งผ่านที่ดีที่สุดพร้อมทั้งค่าการส่งผ่าน	43
16 แสดงขนาดของสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ทั้งโหมดไดโพลและโหมดไมโครสตริป	44
17 แสดงค่าแอดมิตแตนซ์ของแพทช์และค่าจริงของแอดมิตแตนซ์สูงสุดต่ำสุดที่เป็นไปได้เมื่อใส่สายป้อนสัญญาณลงไป	45
18 แสดงค่าความยาว $Y_{patch}^R$ , $L_2^\lambda$ และ $L_2$ ที่สายอากาศมีขนาด $L_1$ มีค่าต่างๆ	46
19 แสดงค่าความกว้างของสาย $W_1$ ตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	46
20 แสดงค่าความยาวสายที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์เสมือน $L_3$ ตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	47
21 แสดงค่า $Y_{patch}^{match}$ , $S_1^\lambda$ และ $S_2$ ที่สายอากาศมีขนาด $L_1$ มีค่าต่างๆ	47

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
22 แสดงขนาดสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการจำลองผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet และค่าแอดมิตแตนซ์ที่ได้จากการจำลองผลการทำงานในโหมดไมโครสตริป	48
23 แสดงระยะ $S_2$ ที่ให้ค่าการส่งผ่านที่ดีที่สุดพร้อมทั้งค่าการส่งผ่าน	50
24 แสดงขนาดของสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ทั้งโหมดไดโพลและโหมดไมโครสตริป	51
25 แสดงค่า $Z_{simulated}^{dipole}$ ของสายอากาศ AntV, AntVI และ AntVII	53
26 แสดงค่า $Z_1, Z_2, Z_3$ และ $Z_{ant}$ ของสายอากาศ AntV, AntVI และ AntVII	53
27 แสดงระยะ $S_2$ ที่ให้ค่าการส่งผ่านที่ดีที่สุดพร้อมทั้งค่าการส่งผ่าน	55
28 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศที่ใช้เทฟลอนเป็นฉนวนทั้งหมดในโหมดไมโครสตริป	58
29 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศที่ใช้เทฟลอนเป็นฉนวนทั้งหมดในโหมดไดโพล	58
30 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศที่ใช้เอพาร์ไฟร์เป็นฉนวนทั้งหมดในโหมดไมโครสตริป	59
31 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศที่ใช้เอพาร์ไฟร์เป็นฉนวนทั้งหมดในโหมดไดโพล	60
32 แสดงค่าแอดมิตแตนซ์และค่าการส่งผ่านของสายอากาศฉนวนเอพาร์ไฟร์ทั้งหมดในโหมดไมโครสตริปจากการคำนวณ	61
33 แสดงค่าแอดมิตแตนซ์และค่าการส่งผ่านของสายอากาศฉนวนเอพาร์ไฟร์ทั้งหมดในโหมดไมโครสตริปจากการจำลองผลการทำงาน	62
34 แสดงระยะ $S_1^{new}$ ที่เหมาะกับขนาดของแพทช์สายอากาศจากการหักสับ $S_1$	68
35 แสดงระยะ $S_4$ , อิมพีแดนซ์ที่ทำให้ค่าการส่งผ่านสูงสุด และค่าการส่งผ่าน	68
36 แสดงระยะ $S_2^{new}$ ที่เหมาะกับขนาดของแพทช์สายอากาศจากการหักสับ $S_2$	69
37 แสดงระยะ $S_3$ , อิมพีแดนซ์ที่ทำให้ค่าการส่งผ่านสูงสุด และค่าการส่งผ่าน	69
38 แสดงการตั้งระยะ $D$ ของโหมดไดโพลและของโหมดไมโครสตริป	79

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
39 แสดงการตั้งระยะอ่าน $r_{measured}$ และระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกลของสายอากาศที่ใช้เอพาร์โพร์เป็นชั้นสเตรทในโหมคไดโพล	80
40 แสดงการตั้งระยะอ่าน $r_{measured}$ และระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกลของสายอากาศที่ใช้เอพาร์โพร์เป็นชั้นสเตรทในโหมคโครสตริป	81
41 แสดงค่า $P_{th}$ ของสายอากาศแต่ละตัวที่ทำให้ระยะอ่านของสายอากาศในโหมคไดโพลจากการจำลองผลการทำงานและการวัดสอดคล้องกัน	82
42 แสดงการเลื่อนความถี่ของสายอากาศในโหมคไมโครสตริปในกรณีที่ไม่ติดเทป	98
43 แสดงการเลื่อนความถี่ของสายอากาศในโหมคไมโครสตริปในกรณีที่ติดเทป	98
44 แสดงค่าความถี่ที่จะใช้ออกแบบสายอากาศใหม่โดยอิงข้อมูล $f_{shift}(\text{percentage})$ จาก Ant IV	99
45 แสดงขนาดสายอากาศของ AntXI และ AntXII ที่พร้อมจะนำไปสร้างอุปกรณ์จริง	100
46 แสดงการตั้งระยะอ่าน $r_{measured}$ ของสายอากาศAntXI และ AntXII ในโหมคโครสตริป	100
47 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และ AntXII ในโหมคไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	101
48 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และ AntXII ในโหมคไมโครสตริปแบบมีเทป	101
49 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และ AntXII ในโหมคไดโพล	101
50 แสดงการปรับ $P_{th}$ เพื่อให้ระยะอ่านสูงสุดของผลการจำลองผลการทำงานมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดจริง	113
51 แสดงค่าอัตราขยายที่ปรับเพิ่มของสายอากาศ AntXI และAntXII โหมคไมโครสตริปแบบมีเทปและแบบไม่มีเทปเพื่อระยะอ่านสูงสุดจากผลการจำลองผลการทำงานใกล้เคียงกับผลการวัด	116
52 แสดงระยะอ่านสูงสุดมือหรือ $\epsilon_r$ มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.2 และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างทางความถี่ที่ให้ระยะอ่านสูงสุด	121

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 แสดงหลักการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดี	6
2 แสดงตัวชิพอาร์เอฟไอดีที่ต้องการใช้งาน	8
3 แสดงการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ	9
4 แสดงลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป	16
5 แสดงการออกแบบสายอากาศ	19
6 แสดงระยะอ่านในย่านความถี่ต่างๆ	20
7 แสดงสายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้แพทช์แบบพาราซิติก	21
8 แสดงการปรับขนาดสายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้แพทช์แบบพาราซิติกกับพารามิเตอร์ที่มีผลกับค่าอิมพีแดนซ์	22
9 แสดงสายอากาศที่ออกแบบได้	23
10 แสดงสายอากาศตัวอย่างที่ออกแบบเสร็จสมบูรณ์แล้วพร้อมพารามิเตอร์ขนาด	26
11 แสดงภาพร่างของตัวชิพอาร์เอฟไอดี	27
12 แสดงวงจรของตัวชิพ	29
13 แสดงการติดตั้งซิปสเตรทสำหรับใช้บนโปรแกรมจำลองผลการทำงาน	31
14 แสดงภาพสายอากาศที่ไว้หาค่าอิมพีแดนซ์หรือแอดมิทแตนซ์ของตัวแพทช์	33
15 แสดงส่วนของการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่เสร็จสมบูรณ์	34
16 แสดงค่าการส่งผ่านของสายอากาศที่ใช้เทพลอนเป็นซิปสเตรทในระยะ $S_2$ ต่างๆ	43
17 แสดงค่าการส่งผ่านของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI ในระยะ $S_2$ ต่างๆ	49
18 แสดงค่าการส่งผ่านของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX ในระยะ $S_2$ ต่างๆ	49
19 แสดงวงจรของสายอากาศในโหมดไดโพลที่ยังไม่ได้ใส่สตัป	51
20 แสดงวงจรของสายอากาศในโหมดไดโพลที่ใส่สตัปแล้ว	51
21 แสดงค่าการส่งผ่านของสายอากาศ AntV, AntVI และ AntVII ในระยะ $S_2$ ต่างๆ	54
22 แสดงค่าจริงของอิมพีแดนซ์ของสตัปของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมดไดโพลที่ระยะเท่ากับ 1 ถึง 120 มิลลิเมตร	55

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	แสดงค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ของสตั๊บของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมคไดโพลที่ระยะเท่ากับ 1 ถึง 120 มิลลิเมตร	56
24	แสดงส่วนจริงของค่าแอดมิทแตนซ์เมื่อใส่สายส่งที่มีความยาว $L_2$ ในหน่วยความยาวคลื่นของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI	63
25	แสดงส่วนจริงของค่าแอดมิทแตนซ์เมื่อใส่สายส่งที่มีความยาว $L_2$ ในหน่วยความยาวคลื่นของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX	63
26	แสดงอัตราขยายเปรียบเทียบกับขนาดของแพทช์สายอากาศโหมคไมโครสตริปทั้งสี่กรณีคือกรณีที่หนึ่งใช้โลหะที่มีค่าความนำเป็นอนันต์ และใช้แผ่นซับสเตรทที่มี $\epsilon_r = 4.4$ และ $\tan\delta = 0$ (กรณี Lossless) กรณีที่สองใช้ทองแดงเป็นโลหะ และใช้แผ่นซับสเตรทที่มี $\epsilon_r = 4.4$ และ $\tan\delta = 0$ (กรณี Copper) กรณีที่สามใช้โลหะที่มีค่าความนำเป็นอนันต์ และใช้แผ่นซับสเตรทที่มี $\epsilon_r = 4.4$ และ $\tan\delta = 0.02$ กับใช้ทองแดงเป็นโลหะ (กรณี FR4) และกรณีที่สี่ใช้แผ่นซับสเตรทที่มี $\epsilon_r = 4.4$ และ $\tan\delta = 0.02$ (กรณี Copper + FR4)	66
27	แสดงสายอากาศก่อนนำไปทำอุปกรณ์จริงของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI	71
28	แสดงสายอากาศก่อนนำไปทำอุปกรณ์จริงของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX	72
29	แสดงสายอากาศจริงที่จะนำไปวัดระยะอ่านของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI	73
30	แสดงสายอากาศจริงที่จะนำไปวัดระยะอ่านของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX	74
31	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การวัดระยะอ่านของป้ายอาร์เอฟไอดี	76
32	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การวัดป้ายอาร์เอฟไอดีในส่วนของเครื่องอ่าน	76
33	แสดงการติดตั้งตัวป้ายอาร์เอฟไอดีกับวัสดุโพลีและทองแดง	77
34	แสดงการติดตั้งป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมคไมโครสตริปแบบติดเทป	77
35	แสดงการติดตั้งป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมคไมโครสตริปแบบไม่ติดเทป	78
36	แสดงกำลังงานของเครื่องอ่านป้ายอาร์เอฟไอดีที่ความถี่ต่างๆ	78

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
37 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน $x$ ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntIV ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	83
38 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน $x$ ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntIV ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป	84
39 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntIV ในโหมดไดโพล	84
40 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน $x$ ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntV ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	85
41 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน $x$ ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntV ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป	86
42 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntV ในโหมดไดโพล	86
43 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน $x$ ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVI ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	87

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
44	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVI ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป	88
45	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntVI ในโหมดไดโพล	88
46	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	89
47	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntVII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทปและส่วนของการวัดจะมีการรวมเอาไว้รอบผลวัด	90
48	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntVII ในโหมดไดโพล	90
49	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVIII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	91
50	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVIII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป	92
51	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntVIII ในโหมดไดโพล	92

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
52	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntIX ใน โหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	93
53	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntIX ใน โหมดไมโครสตริปแบบมีเทป	94
54	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntIX ใน โหมดไดโพล	94
55	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntX ใน โหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	95
56	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntX ใน โหมดไมโครสตริปแบบมีเทป	96
57	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntX ใน โหมดไดโพล	96
58	แสดงสายอากาศก่อนนำไปทำอุปกรณ์จริงของสายอากาศ AntXI และ AntXII	102
59	แสดงสายอากาศจริงที่จะนำไปวัดระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และ AntXII	103
60	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXI ใน โหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	104
61	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXI ใน โหมดไมโครสตริปแบบมีเทป	105
62	แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXI ใน โหมดไดโพล	105

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
63 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	106
64 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป	107
65 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXII ในโหมดไดโพล	107
66 แสดงระยะอ่านเทียบกับความถี่อิมมัลไลซ์ของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทปด้านล่างที่นำระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันของความถี่ที่ต่ำที่สุดระหว่างผลการจำลองผลการทำงานกับผลการวัดเปรียบเทียบการหาระยะอ่านสูงสุด	109
67 แสดงระยะอ่านเทียบกับความถี่อิมมัลไลซ์ของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทปด้านล่างที่นำระยะอ่านสูงสุดมาไว้ที่ความถี่อิมมัลไลซ์เดียวกัน	110
68 แสดงอัตราขยายจำลองผลการทำงานและอัตราขยายจำลองผลการทำงานที่ปรับปรุงแล้วของสายอากาศ AntXI ในโหมดไดโพลที่มีค่าไดเรกทิวิตีไว้เท่ากับ 2.156 dB	111
69 แสดงอัตราขยายจำลองผลการทำงานและอัตราขยายจำลองผลการทำงานที่ปรับปรุงแล้วของสายอากาศ AntXII ในโหมดไดโพลที่มีค่าไดเรกทิวิตีไว้เท่ากับ 2.156 dB	112
70 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXI ในโหมดไดโพลที่มีค่าไดเรกทิวิตีไว้เท่ากับ 2.156 dB	112
71 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXII ในโหมดไดโพลที่มีค่าไดเรกทิวิตีไว้เท่ากับ 2.156 dB	113
72 แสดงอัตราขยายของสายอากาศ AntXI ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่ติดเทปที่นำผลการจำลองผลการทำงาน และอัตราขยายที่ปรับปรุงใหม่จะผลการจำลองผลการทำงานเดิม	114
73 แสดงอัตราขยายของสายอากาศ AntXI ในโหมดไมโครสตริปแบบติดเทปที่นำผลการจำลองผลการทำงาน และอัตราขยายที่ปรับปรุงใหม่จะผลการจำลองผลการทำงานเดิม	115

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
74 แสดงอัตราขยายของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่ติดเทปที่นำผลการจำลองผลการทำงาน และอัตราขยายที่ปรับปรุงใหม่จะผลการจำลองผลการทำงานเดิม	115
75 แสดงอัตราขยายของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบติดเทปที่นำผลการจำลองผลการทำงาน และอัตราขยายที่ปรับปรุงใหม่จะผลการจำลองผลการทำงานเดิม	116
76 แสดงสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบติดเทปที่ปรับปรุงค่าอัตราขยายโดยทำการเลื่อนผลการวัดที่มีระยะที่เท่ากันมาอยู่ในความถี่เดียวกันกับผลการจำลองผลการทำงาน	117
77 แสดงสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบติดเทปที่ปรับปรุงค่าอัตราขยายโดยนำผลการวัดระยะอ่านสูงสุดจากผลการวัดเลื่อนมาอยู่ที่ความถี่เดียวกับระยะอ่านสูงสุดของผลการจำลองผลการทำงาน	118
78 แสดงระยะอ่านจะผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntXII โดยเปรียบเทียบชั้นความหนาของชั้นอากาศ	119
79 แสดงระยะอ่านจะผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntXII โดยเปรียบเทียบชั้นความหนาของชั้นเทป	119
80 แสดงระยะอ่านของผลการจำลองผลการทำงานโดยกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือ $\epsilon_r$ มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.2 ของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	120
81 แสดงระยะอ่านของผลการจำลองผลการทำงานโดยกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือ $\epsilon_r$ มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.2 ของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป	121

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

RFID	=	Radio Frequency Identification
dB	=	Decibels
dBm	=	Power ratio in decibels (dB) of the measured power referenced to one milliwatt (mW)
UHF	=	Ultrahigh Frequency
PSK	=	Phase Shift Keying
ASK	=	Amplitude Shift Keying
LF	=	Low Frequency
HF	=	High Frequency
MHz	=	Megahertz
m	=	Meter
mm	=	Millimeter
PCB	=	Print Circuit Board

# สายอากาศแบบโหมดคู่ชั้นเดียวสำหรับป้ายยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดีแบบแพสซีฟที่มีชั้นโดย ใช้สตัปแบบเปิด

## Single Layer Dual Mode Antenna for Passive UHF RFID Tag using Open Stubs

### คำนำ

ระบบอาร์เอฟไอดีในปัจจุบันเราสามารถเห็นได้ทั่วไป เช่น ห้างสรรพสินค้า แหล่งกระจายสินค้าต่างๆ เป็นต้น โดยระบบอาร์เอฟไอดีนั้นจะนำไปใช้ในการระบุชนิดของสินค้าในรูปแบบข้อมูลดิจิทัล (Digital Data) เพื่อจำแนกความหลากหลายของสินค้าดังกล่าว รวมไปถึงความสะดวกในการแลกเปลี่ยนสินค้าด้วย ซึ่งระบบอาร์เอฟไอดีนั้นจะใช้คลื่นวิทยุ ในการส่งข้อมูล จากนั้นก็จะแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลอีกครั้งเพื่อที่จะนำข้อมูลดังกล่าวไประบุชนิดของสินค้านั้นๆ

ในระบบอาร์เอฟไอดียังมีส่วนหนึ่งที่สำคัญคือระบบสายอากาศ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการส่งคลื่นวิทยุโดยผ่านตัวกลางคืออากาศ สายอากาศนั้นสามารถใช้งานได้หลายอย่าง แต่ในระบบอาร์เอฟไอดีนั้นจะต้องคำนึงถึงคือค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ของสายอากาศซึ่งต้องออกแบบให้เหมาะสมกับตัวชิพ (Chip) อาร์เอฟไอดี และออกแบบให้มีขนาดเล็กที่สุด

ปัญหาในงานวิจัยนี้คือ จะออกแบบสายอากาศอย่างไรเมื่อนำป้ายอาร์เอฟไอดีส่วนที่ทำการออกแบบไว้ไปติดกับวัสดุที่เป็นโลหะและวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ เพราะเมื่อนำส่วนของป้ายอาร์เอฟไอดีไปติดกับวัสดุดังกล่าวแล้วจะมีผลต่ออิมพีแดนซ์ของสายอากาศ และระยะอ่าน โดยตรง ทำอย่างไรที่จะออกแบบสายอากาศให้มีชั้นเดียวและให้มีระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานใกล้เคียงกับผลการวัดมากที่สุด

งานวิจัยฉบับนี้มีประโยชน์ต่องานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศป้ายอาร์เอฟไอดี ดังต่อไปนี้

1. พัฒนาสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีให้สามารถอ่านค่าได้ถึงแม้ว่าตัวป้ายจะติดกับวัสดุที่เป็นโลหะหรือโลหะ โดยตัวสายอากาศจะมีทองแดงแผ่นชั้นเดียว
2. สามารถออกแบบสายอากาศโดยทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศที่สามารถใช้งานจริงได้โดยเน้นทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปเป็นหลัก
3. ตรวจสอบและค้นหาปัจจัยจากการจำลองผลการทำงานจาก โปรแกรมออกแบบสายอากาศที่มีผลต่อระยะอ่านของตัวป้ายสายอากาศอาร์เอฟไอดี ทั้งสายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศไดโพล
4. ตรวจสอบและค้นหาปัจจัยจากการวัดระยะอ่านจริงที่มีผลต่อระยะอ่านของตัวป้ายสายอากาศสำหรับอาร์เอฟไอดี ทั้งสายอากาศไมโครสตริปและสายอากาศไดโพล

## วัตถุประสงค์

ออกแบบสายอากาศป้ายยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดีแบบแพสซีฟสำหรับผิวโลหะและโลหะที่มีลายทองแดงเพียงด้านเดียว โดยปรับปรุงจากผลงานที่นำเสนอโดย (ศศิวิมล, 2553) ซึ่งมีวิธีการออกแบบสำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่แน่นอนและออกแบบสายอากาศไดโพล โดยใช้ผลจากโปรแกรมจำลองการออกแบบสายอากาศช่วยในการออกแบบ นอกจากนี้สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ จะศึกษาปัจจัยต่างๆของการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ที่มีผลต่อความผิดพลาดของผลการจำลองการทำงานด้านความถี่ของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีและปัจจัยที่มีผลต่อสายอากาศไดโพลด้วย นอกจากนี้แล้วงานวิจัยฉบับนี้ได้สร้างสายอากาศจริงมาวัดเปรียบเทียบผลตรวจสอบความผิดพลาด และออกแบบสายอากาศใหม่ให้ใช้งาน โดยมีวิธีการออกแบบที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

## การตรวจเอกสาร

### ระบบอาร์เอฟไอดี

ระบบอาร์เอฟไอดี (RFID หรือ Radio Frequency Identification) คือ ระบบที่ใช้ระบุเอกลักษณ์ของวัตถุโดยส่งสัญญาณผ่านทางคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) โดยระบบอาร์เอฟไอดีนั้นจะแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นป้าย (Tags) หรือส่วนที่ติดกับวัตถุที่ต้องการระบุเอกลักษณ์นั้นๆ และส่วนที่เป็นเครื่องอ่าน (Reader) ซึ่งส่วนประกอบทั้งสองส่วนดังกล่าวนี้ จะต้องอาศัยคลื่นวิทยุที่ผ่านตัวกลางคืออากาศ โดยอุปกรณ์ที่จะทำหน้าที่ส่งและรับคลื่นวิทยุดังกล่าวนี้เรียกว่าสายอากาศ (Antenna) โดยปกติแล้วระบบอาร์เอฟไอดีนั้นจะมีสองประเภทตามลักษณะตัวป้ายอาร์เอฟไอดี ดังนี้

1. ระบบป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแอคทีฟ (Active RFID Tag) จาก (Finkenzeller, 2003) ได้บอกลักษณะไว้ว่า ป้ายอาร์เอฟไอดีที่ต้องใช้แหล่งจ่ายภายในตัวป้ายโดยสัญญาณที่เกิดจากเครื่องอ่านป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นจะใช้เพียงแค่ตรวจสอบข้อมูลสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีเท่านั้น มีข้อดีในเรื่องระยะเวลาการอ่านของตัวป้ายเมื่อเทียบกับป้ายอาร์เอฟไอดีแบบพาสซีฟซึ่งป้ายอาร์เอฟไอดีชนิดนี้จะมีระยะอ่านอย่างต่ำ 10 เมตร

2. ระบบป้ายอาร์เอฟไอดีแบบพาสซีฟ (Passive RFID Tags) จาก (Dobkin, 2008) ได้ให้ความหมายว่า ป้ายอาร์เอฟไอดีที่ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายจากตัวป้ายแต่จะใช้คลื่นที่ส่งมาจากเครื่องอ่านมากระตุ้นเป็นพลังงานของตัวเอง มีข้อดีในเรื่องราคา และไม่จำเป็นต้องตรวจพลังงานของชิปในตัวป้ายด้วยเนื่องจากว่าแหล่งจ่ายในตัวป้ายนั้นไม่มี

นอกจากจะแบ่งชนิดของอาร์เอฟไอดีตามลักษณะของตัวป้ายแล้ว ยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของย่านความถี่ ในระบบอาร์เอฟไอดีนั้นเราจะใช้ช่วงความถี่ดังตารางที่ 1 ได้ดังนี้

## ตารางที่ 1 แสดงย่านความถี่ที่ใช้ในระบบอาร์เอฟไอดี

ย่านความถี่	ความถี่
LF	30 - 300 kHz
HF	30 - 30 เมกกะเฮิร์ต
UHF	300 - 3000 เมกกะเฮิร์ต

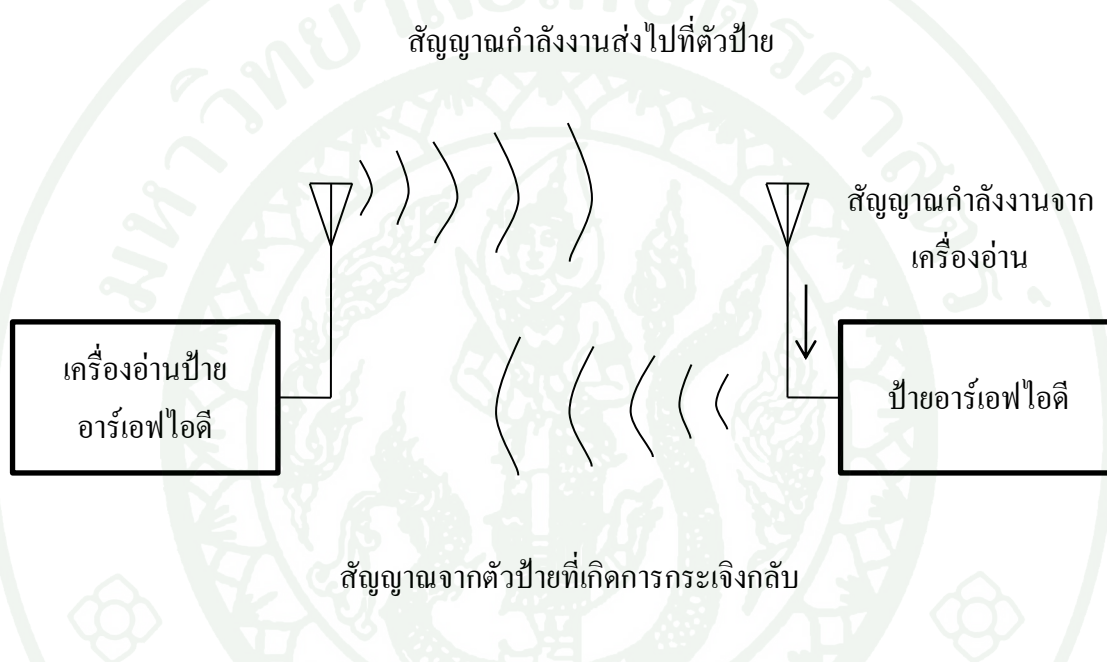
**ที่มา:** Radar System Panel of IEEE Aerospace and Electronic System Society (1984)

นอกจากนี้ (Dobkin, 2008) ยังได้กล่าวไว้ว่าในแต่ละความถี่ที่จะใช้ในการออกแบบอาร์เอฟไอดีนั้น ระบบอาร์เอฟไอดีที่ได้จะการใช้ในย่านความถี่ต่างๆที่ระบุดังตารางที่ 1 นั้นจะใช้ประโยชน์ได้ต่างกัน อย่างอาร์เอฟไอดีที่ออกแบบให้ใช้กับความถี่ย่านแอลเอฟ (LF) นั้นมักจะใช้ในระบบอุตสาหกรรมปศุสัตว์ที่มักจะนำตัวป้ายอาร์เอฟไอดีมาติดที่หูหรือไว้ในกระเพาะของสัตว์ ส่วนในย่านความถี่เอชเอฟ (HF) นั้นจะใช้ในเรื่องของระบบการเงินจำพวกบัตรเครดิต และย่านยูเอชเอฟจะใช้ในเรื่องของระบบติดตามยานพาหนะ ระบบพวกสายพาน เช่น การขนส่งกระเป๋ابนเครื่องบิน ระบบขนส่งสินค้า เป็นต้น นอกจากนี้แล้วในระบบย่านความถี่ต่างๆนั้นจะส่งผลกระทบต่อระยะการอ่านด้วย ซึ่งระยะการอ่านนั้นจะมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ดังนั้น ความถี่ยูเอชเอฟสำหรับการออกแบบระบบอาร์เอฟไอดีนั้นจึงมีความยืดหยุ่นสูง

งานวิจัยฉบับนี้สนใจในส่วนของป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแพสซีฟ ในย่านความถี่แบบยูเอชเอฟ (UHF Frequency) ซึ่งจะมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของระยะการอ่านค่า ความยืดหยุ่นในการใช้งาน และในเรื่องการออกแบบที่มีความซับซ้อนน้อย ส่วนในย่านความถี่ยูเอชเอฟนั้นจะไม่ได้กำหนดให้ใช้งานทั้งย่านความถี่เนื่องจากในตารางที่ 1 นั้นจะเห็นได้ว่าช่วงความถี่ยูเอชเอฟเป็นช่วงความถี่ที่กว้างมาก โดยแต่ละประเทศก็จะกำหนดในย่านที่ไม่เท่ากัน แต่สำหรับประเทศไทย (Dobkin, 2008) ได้ระบุไว้ที่คลื่นความถี่ยูเอชเอฟที่ 920 - 925 เมกกะเฮิร์ต

## หลักการการทำงานของป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแพสซีฟ

เนื่องจากงานวิจัยของเรานั้นจะสนใจในเรื่องชนิดของป้ายดังกล่าว ดังนั้นจึงต้องทราบหลักการการทำงานของป้ายอาร์เอฟไอดีแบบแพสซีฟจาก (National Instruments Corporation, 2009) มีหลักการดังนี้



ภาพที่ 1 แสดงหลักการการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดี

1. เริ่มจากเครื่องอ่านป้ายอาร์เอฟไอดีที่สามารถจะระบุรหัสจากตัวป้ายได้ โดยเครื่องอ่านนั้นจะส่งสัญญาณเพื่อให้ตัวป้ายส่งข้อมูลกลับมา ข้อมูลดังกล่าวจะถูกเข้ารหัส ซึ่งข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสแล้วนำรหัสดังกล่าวไปโมดูเลชันแบบดิจิทัล (Digital Modulation) ในแบบแอมพลิจูด (Amplitude Shift Keying หรือ ASK)

2. เมื่อสัญญาณถูกส่งมาจากเครื่องอ่านแล้วสัญญาณที่ส่งไปจะกระเจิงในหลายทิศทาง แต่จะมีบางสัญญาณถึงตัวป้าย

3. เมื่อสัญญาณมาถึงตัวปายหรือตัวปายรับสัญญาณในลักษณะของคลื่นวิทยุ จากนั้นสัญญาณที่เป็นคลื่นวิทยุนี้จะถูกแปลงเป็นไฟตรง (DC Power) โดยตัวชิพอาร์เอฟไอดี ซึ่งจะเข้าไปในส่วนของคุณมภายในชิพอาร์เอฟไอดี จากนั้นตัวชิพอาร์เอฟไอดีจะนำสัญญาณดังกล่าวทำการดีโมดูเลชัน (Demodulation) เพื่อที่จะได้ทราบว่าเครื่องอ่านนั้นส่งคำสั่งอะไรมา

4. เมื่อทราบคำสั่งดังกล่าวแล้ว ตัวชิพจะส่งคำสั่งป้อนกลับไปให้เครื่องอ่านปายอาร์เอฟไอดี โดยจะทำการเข้ารหัสใหม่อีกครั้งส่งสัญญาณกลับมา ลักษณะนี้เรียกว่าสัญญาณการกระเจิงกลับ (Backscattering) โดยจะนำคลื่นที่รับมาจากเครื่องในเวลาก่อนหน้าเข้ามาเข้ารหัสและทำการโมดูเลชันด้วยวิธีโมดูเลชันแบบเฟส (Phase Shift Keying หรือ PSK) หรือโมดูเลชันแบบแอมพลิจูด (Amplitude Shift Keying หรือ ASK)

5. เมื่อสัญญาณส่งไปถึงเครื่องอ่านปายอาร์เอฟไอดี เครื่องอ่านปายอาร์เอฟไอดีจะทำการดีโมดูเลชัน เครื่องอ่านจึงเข้าใจข้อมูลของปายอาร์เอฟไอดีนั้นๆ

จากหลักการของระบบอาร์เอฟไอดีข้างต้นนั้น ในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบส่วนของตัวปายอาร์เอฟไอดี ซึ่งส่วนของตัวชิพนั้นจะใช้ชิพสำเร็จรูป ส่วนที่จะต้องออกแบบคือส่วนของสายอากาศ โดยจะทำการอธิบายทั้งสองส่วนดังกล่าวนี้ต่อไป

## ชิพอาร์เอฟไอดี (RFID Chip)

ในส่วนของตัวเองของตัวชิพอาร์เอฟไอดีนั้นจะใช้ของยี่ห้อ NXP semiconductor รุ่น IC UCODE G2XL แพ็คเกจ TSSOP8 จะมีรูปร่างหน้าตาดังภาพที่ 2 ซึ่งตัวชิพยี่ห้ออื่นจะมีแพ็คเกจหลายรูปแบบ แต่ที่เลือกแบบ TSSOP8 นั้นเพราะเชื่อมต่อกับสายอากาศได้ง่ายที่สุด



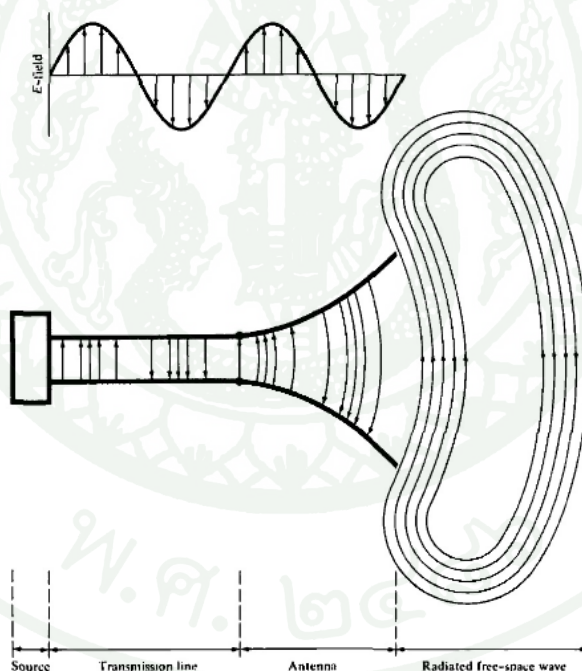
**ภาพที่ 2** แสดงตัวชิพอาร์เอฟไอดีที่ต้องการใช้งาน

**ที่มา:** Mouser Electronic (n.d.)

ลักษณะตัวชิพดังกล่าวนี้สิ่งที่ต้องดูก็คือค่าอิมพีแดนซ์ของตัวชิพว่ามีค่าเท่าไรจากข้อมูลของ (NXP Semiconductor, 2011) ที่ได้มาพบว่าที่ความถี่ 915 เมกกะเฮิร์ต นั้นมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 16-j148 โอห์ม นอกจากนั้นยังบอกลักษณะวงจรด้วยว่ามีตัวเก็บประจุต่อขนานกับค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวด้วยซึ่งจะต้องหาค่าอิมพีแดนซ์ของชิพจริงๆที่ความถี่ที่ต้องการด้วยเพราะว่าในแต่ละความถี่จะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป เมื่อได้ข้อมูลดังกล่าวนี้ทำให้ทราบว่าต้องหาวิธีหาค่าอิมพีแดนซ์ในความถี่ยูเอชเอฟที่เราต้องการ (ประมาณ 920 - 925 เมกกะเฮิร์ต) นั้นมีค่าอิมพีแดนซ์เป็นอย่างไรในการออกแบบสายอากาศให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยการหาค่าอิมพีแดนซ์นั้นจะนำเสนอในส่วนวิธีการออกแบบสายอากาศต่อไป

## สายอากาศ

ในส่วนนี้เป็นส่วนสำคัญที่จะต้องนำข้อมูลมาออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้ จึงจำเป็นต้องทราบถึงความรู้พื้นฐานในการออกแบบ ซึ่ง (Balanis, 2005) ได้อธิบายในส่วนของสายอากาศทั้งหมด โดยทั่วไปนั้นสายอากาศจะใช้งานในการสื่อสารมากมาย ความหมายของสายอากาศนั้นคืออุปกรณ์ที่ส่งหรือรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางตัวกลางคืออากาศ โดยทั่วไปแล้วการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศจะประกอบด้วย ส่วนของแหล่งจ่าย (Source) ส่วนของสายส่ง (Transmission Line) และส่วนของสายอากาศ (Antenna) เมื่อเราจะส่งสัญญาณนั้น สายอากาศจะต้องได้รับกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งจ่ายผ่านสายส่งก็จะเกิดการเหนี่ยวนำไปเรื่อยจนถึงสายอากาศ เมื่อสายอากาศรับสัญญาณดังกล่าวแล้วจะเกิดการเหนี่ยวนำจนมีพลังงานมากพอ จะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปกับอากาศดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ที่มา: Balanis (2005)

สายอากาศที่จะใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 แบบ คือ

### 1. สายอากาศไดโพล (Dipole Antenna)

ใน (Balanis, 2005) ได้บอกลักษณะไว้ว่าสายอากาศไดโพลนั้นเป็นสายอากาศที่มีตัวนำ 2 ตัวอยู่ขนานด้านซ้ายและด้านขวาของแหล่งจ่าย ซึ่งสายอากาศไดโพลนั้นถ้าสร้างบนแผ่นพีซีบี (Print Circuit Board หรือ PCB) จะไม่มีมีระนาบกราวด์อยู่ในชั้นข้างใต้

### 2. สายอากาศแบบไมโครสตริป (Microstrip Antenna)

ใน (Balanis, 2005) ได้บอกลักษณะไว้ว่าสายอากาศไมโครสตริปเป็นสายอากาศที่ลักษณะเป็นแผ่นโลหะบนฉนวนซับสเตรท (Substrate) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำ ในส่วนที่เป็นสายอากาศนั้นเป็นส่วนของแผ่นโลหะ ซึ่งสามารถออกแบบในรูปแบบที่หลากหลายทั้งแบบสี่เหลี่ยม วงกลม หรือรูปแบบอื่นๆ ได้ โดยสายอากาศชนิดนี้มักจะออกแบบบนแผ่นพีซีบี (Printed Circuit Board หรือ PCB) ที่มีระนาบกราวด์อยู่ด้วย

### พารามิเตอร์ของสายอากาศ

พารามิเตอร์ของสายอากาศนั้น คือ ส่วนที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมของสายอากาศ และบ่งบอกความเหมาะสมของการใช้งาน ซึ่งพารามิเตอร์ของสายอากาศสำหรับป้าอาร์เอฟไอดีมีดังนี้

### บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่น (Field - Region)

บริเวณสนามการแผ่กระจายคลื่นนั้นจะแบ่งออกเป็นสามส่วน คือ บริเวณสนามระยะใกล้ที่เกิดปฏิกิริยา (Reactive Near - Field) บริเวณสนามระยะใกล้ที่เกิดการแผ่กระจายคลื่น (Radiating Near - Field) และบริเวณสนามระยะไกล (Far Field)

บริเวณสนามระยะใกล้ที่เกิดปฏิกิริยา (Reactive Near - Field) เป็นบริเวณที่สายอากาศกำลังก่อคลื่น ซึ่งอยู่ในช่วงรัศมี  $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$  เมื่อ R คือรัศมีของการแผ่กระจายคลื่นและ D คือขนาดของแบบสายอากาศที่กว้างหรือยาวที่สุด

บริเวณสนามระยะใกล้ที่เกิดการแผ่กระจายคลื่น (Radiating Near - Field) เป็นบริเวณที่สายอากาศเริ่มแผ่กระจายคลื่น มีช่วงรัศมี คือ  $R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$

บริเวณสนามระยะไกล (Far Field) เป็นบริเวณที่เกิดลำคลื่นใช้ส่งสัญญาณ มีรัศมี  $R$  มากกว่า  $2D^2/\lambda$  โดยมีเงื่อนไข คือ  $R \gg D$  และ  $R \gg \lambda$  (Stutzman, 1998)

งานวิจัยฉบับนี้จะใช้สนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกลในการตั้งระยะที่ใช้ในการวัดระยะอ่านสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนของ การวัดระยะอ่านของป้ายอาร์เอฟไอดีต่อไป

### ไดเรกทิวิตี (Directivity)

ไดเรกทิวิตีหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอัตราขยายโดยตรง (Directive Gain) คือ ค่าอัตราขยายของสายอากาศโดยปราศจากการสูญเสีย เป็นอัตราส่วนความเข้มข้นของการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในทิศทางนั้นต่อค่าเฉลี่ยการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศในทุกทิศทาง โดยจะเขียนในรูปสมการที่ (1)

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (1)$$

ถ้ายังไม่กำหนดทิศทางการแผ่กระจายคลื่น ทิศทางการแผ่กระจายคลื่นจะมีค่าสูงสุดดังสมการที่ (2)

$$D_{max} = D_0 = \frac{U|_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{U_0} = \frac{4\pi U_{max}}{P_{rad}} \quad (2)$$

โดยที่

$D$  คือ ไดเรกทิวิตี

$D_0$  คือ ไดเรกทิวิตีสูงสุด

$U$  คือ ความเข้มข้นของการแผ่กระจายคลื่น

$U_{max}$  คือ ความเข้มข้นของการแผ่กระจายคลื่นสูงสุด

$U_0$  คือ ความเข้มข้นของการแผ่กระจายคลื่นในแบบรูปไอโซโทรปิก

$P_{rad}$  คือ กำลังที่ใช้ในการแผ่กระจายคลื่นทั้งหมด

### ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna Efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศเป็นค่าที่บ่งบอกว่าสายอากาศเกิดการสูญเสียเนื่องจากความไม่แมตช์ของค่าอิมพีแดนซ์และค่าการสูญเสียของตัวนำและวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำว่ามากน้อยอย่างไร ซึ่งค่านี้สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังสมการ (3)

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad (3)$$

โดยที่

$e_0$  คือ ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศทั้งหมด

$e_r$  คือ ค่าประสิทธิภาพการสะท้อนซึ่งเกิดจากการไม่แมตช์ของสายอากาศ มีค่า

$(1 - |\Gamma|^2)$  โดยที่  $\Gamma$  คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)

$e_c$  คือ ค่าประสิทธิภาพตัวนำ

$e_d$  คือ ค่าประสิทธิภาพของวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำ

สำหรับค่า  $e_c$  และ  $e_d$  เป็นค่าที่นำมาใช้จริงได้ยากดังนั้นจึงจะเขียนในรูปของค่าประสิทธิภาพของสายอากาศในการแผ่กระจายคลื่นดังสมการที่ (4)

$$e_0 = e_r e_{cd} = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (4)$$

เมื่อ  $e_{cd} = e_c e_d$

โดย  $e_{cd}$  คือ ประสิทธิภาพของสายอากาศในการแผ่กระจายคลื่น

### อัตราขยาย (Gain)

อัตราขยายของสายอากาศนั้นเป็นค่าไดเรกทิวิตีที่มีการสูญเสียที่เกิดจากค่าประสิทธิภาพของสายอากาศในการแผ่กระจายคลื่น  $e_{cd}$  เป็นเครื่องชี้วัด ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (5)

$$G(\theta, \phi) = e_{cd}D(\theta, \phi) \quad (5)$$

และอัตราขยายมีค่าสูงสุดดังสมการ (6)

$$G_0 = G(\theta, \phi)_{max} = e_{cd}D(\theta, \phi)_{max} = e_{cd}D_0 \quad (6)$$

ซึ่งค่าอัตราขยายนั้นมักจะใช้ในการวัดพร้อมกับมุมต่างๆที่สายอากาศแผ่คลื่นออกไป มักจะใช้หน่วยเป็นวัตต์ (Watt) และเดซิเบล (dB)

ส่วนอัตราขยายที่เกิดจากความไม่แมตซ์เนื่องมาจากค่าความสูญเสียจากการสะท้อนมาเกี่ยวข้องเพิ่มด้วยหรือค่า  $e_r = (1 - |\Gamma|^2)$  จะเรียกว่าอัตราขยายสัมบูรณ์ (Absolute Gain หรือ  $G_{abs}$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (7)

$$G_{abs}(\theta, \phi) = e_r G(\theta, \phi) = e_r e_{cd} D(\theta, \phi) = e_0 D_0 \quad (7)$$

สำหรับค่าอัตราขยายของสายอากาศจากการจำลองผลการทำงานนั้นในช่วงความถี่ต่างๆจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากปัจจัยจากประสิทธิภาพของสายอากาศ แต่สำหรับค่าไดเรกทิวิตีนั้นผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะค่อนข้างคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอัตราขยาย

### แบนวิธ (Bandwidth)

แบนวิธสำหรับสายอากาศนั้นจะเป็นช่วงที่ความถี่ที่สามารถใช้งานได้ โดยปกติแล้วจะใช้ค่า  $S_{11}$  ค่า อิมพีแดนซ์ ค่า VSWR ในการพิจารณาในแต่ละช่วงความถี่ โดยทั่วไปนั้นจะนิยมใช้ค่า  $S_{11}$  มาประกอบการพิจารณาย่านความถี่ใช้งานเสมอ แต่ในระบบอาร์เอฟไอดีจะพิจารณาจากผลของระยะอ่าน (Reading Range) โดยจะใช้เปรียบเทียบในการวัดว่าเครื่องอ่านป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นสามารถข้อมูลจากตัวป้ายอาร์เอฟไอดีได้หรือไม่

### ค่าอิมพีแดนซ์/แอดมิทแตนซ์ขาเข้า (Input Impedance/Admittance)

ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ต่อกับแหล่งจ่าย ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์โดยทั่วไปจะเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับกระแส อิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าดัง สมการที่ (8)

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (8)$$

เมื่อ

$Z_A$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

$R_A$  คือ ค่าความต้านทานของสายอากาศ

$X_A$  คือ ค่ารีแอกแตนซ์ของสายอากาศ

ในส่วนของค่าความต้านทานของสายอากาศนั้นจะแบ่งเป็นสองส่วนดังสมการที่ (9)

$$R_A = R_r + R_L \quad (9)$$

เมื่อ

$R_r$  คือ ค่าความต้านทานการแผ่กระจายคลื่นของสายอากาศ

$R_L$  คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากการสูญเสีย

สำหรับงานวิจัยนี้ส่วนที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นส่วนพื้นฐานของระบบอาร์เอฟไอดีสำหรับการทำงานวิจัยนี้ นอกจากนั้นแล้วยังมีส่วนของงานวิจัยเก่าที่ทำมาแล้วซึ่งจะกล่าวในลำดับต่อไป

ส่วนค่าแอดมิตแตนซ์ ( $Y$ ) นั้น (Oliver, 1894) มีหน่วยเป็นซีเมนต์ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (10)

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (10)$$

สำหรับค่าแอดมิตแตนซ์ขาเข้าสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (11)

$$Y_A = G_A + jB_A \quad (11)$$

เมื่อ

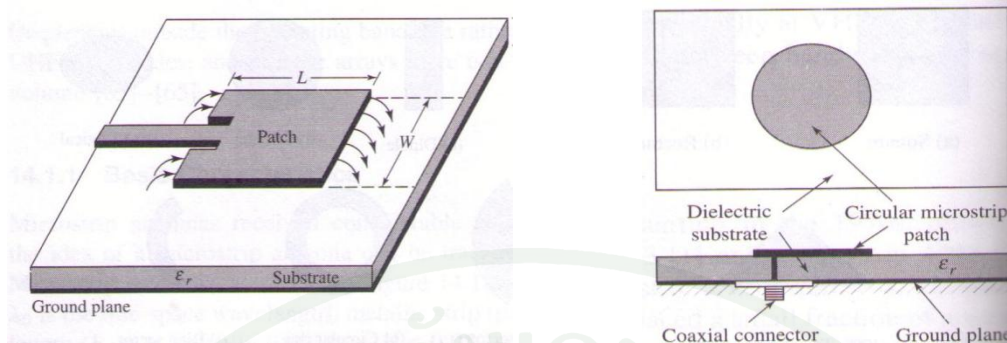
$Y_A$  คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ขาเข้า

$G_A$  คือ ค่าความนำหรือค่าคอนดักแตนซ์ (Conductance)

$B_A$  คือ ค่าซัสเซพแตนซ์ (Susceptance)

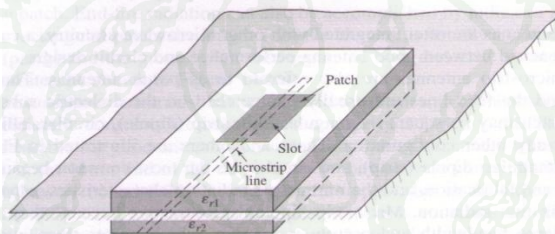
#### การป้อนสัญญาณของสายอากาศ (Feeding Methods)

สำหรับการป้อนสัญญาณของสายอากาศนั้น จะกล่าวถึงเฉพาะสายอากาศไมโครสตริปเท่านั้น ซึ่งใน (Balanis, 2005) ได้แบ่งการป้อนสัญญาณของสายอากาศไว้ คือ การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริป (Microstrip Feed Line), การป้อนสัญญาณโดยใช้สายโพรบ (Probe Feed) และการป้อนสัญญาณแบบอะเพอเจอร์คัปเปิ้ล (Aperture - Couple Feed) ซึ่งวิธีการป้อนสัญญาณทั้งหมดแสดงไว้ดังภาพที่ 4



(ก) การป้อนสัญญาณโดยใช้สายส่งไมโครสตริป

(ข) การป้อนสัญญาณโดยใช้สายโพรม



(ค) การป้อนสัญญาณแบบอะพोजอร์คัลบเป็ล

ภาพที่ 4 แสดงลักษณะการป้อนสัญญาณของสายอากาศไมโครสตริป

ที่มา: Balanis (2005)

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้นั้นจะใช้การป้อนสัญญาณแบบสายส่งไมโครสตริป ซึ่งเมื่อใส่สายส่งดังกล่าวไปที่ตัวสายอากาศไมโครสตริปแล้วค่าอิมพีแดนซ์จะเปลี่ยนไป ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์สามารถหาได้จากสมการที่ (12)

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta d)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta d)} \quad (12)$$

เมื่อ

$Z_{in}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าเมื่อต่อสายส่งสำหรับป้อนสัญญาณแล้ว

$Z_0$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

$d$  คือ ค่าความยาวของสายป้อนสัญญาณ

ส่วนค่า  $\beta$  นั้นจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (13)

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (13)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

#### การแมตช์สายอากาศ

การแมตช์สายอากาศนั้นจาก (Balanis, 2005) จะมีการแมตช์ดังนี้ คือ การแมตช์โดยใช้  
 สตับ (Stub Matching), การแมตช์โดยใช้สายส่งที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในการ  
 แปลงค่าอิมพีแดนซ์ (Quarter - Wavelength Transformer), การแมตช์แบบที (T - Match), การ  
 แมตช์แบบแกมมา (Gamma Match) และ การแมตช์แบบโอเมก้า (Omega Match)

ในส่วนของงานวิจัยนี้จะใช้การแมตช์โดยใช้สตับ ซึ่งการแมตช์สตับนั้นมีสองแบบคือสตับ  
 แบบเปิด (Open Stub) และ สตับแบบปิด (Close Stub) แต่สำหรับงานวิจัยฉบับนี้จะใช้การแมตช์  
 โดยใช้สตับแบบเปิดเท่านั้น โดยจะใช้กับสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีทั้งสองโหมดคือ โหมด  
 ไมโครสตริปและโหมดไดโพล สำหรับสตับแบบเปิดสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าได้จากสมการ  
 ที่ (14) (Bancroft, 2008)

$$Z_{in} = -jZ_0 \frac{1}{\beta d} \quad (14)$$

เมื่อ

$Z_{in}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของสตัป

$Z_0$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

$d$  คือ ค่าความยาวสตัป

### การวัดของสายอากาศ

สำหรับการวัดสายอากาศจาก (Balanis, 2005) โดยทั่วไปนั้นจะวัดในรูปแบบของอัตราขยาย โดยที่ติดตั้งสายอากาศสองตัวคือสายอากาศตัวส่งและตัวรับดังสมการที่ (15)

$$(G_{r(abs)})_{dB} + (G_{t(abs)})_{dB} = 20\log\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right) + 10\log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) \quad (15)$$

โดยที่

$G_{t(abs)}$  คือ อัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศตัวส่ง

$G_{r(abs)}$  คือ อัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศตัวรับ

$P_t$  คือ กำลังงานของสายอากาศตัวส่ง

$P_r$  คือ กำลังงานของสายอากาศตัวรับ

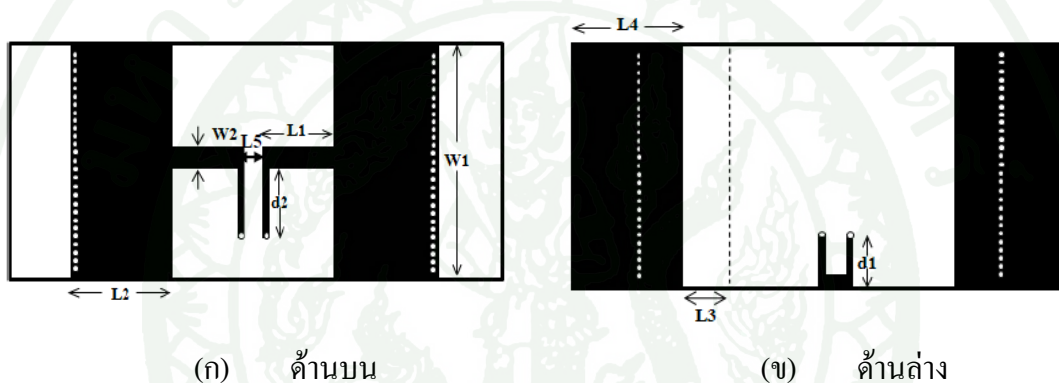
$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

$r$  คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศสองตัว

แต่การวัดสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นจะวัดระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและตัวรับหรือค่า  $r$  เป็นหลัก สำหรับการวัดสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นจะกล่าวถึงในส่วนของงานวิจัยที่เป็นส่วนของผลต่อไป

## ส่วนของงานวิจัยที่ผ่านมา

จากงานวิจัย (ศศิวิมล, 2553) ได้ทำการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายโลหะและอโลหะไว้ โดยให้ค่าอิมพีแดนซ์ของซีพีมี่ค่า 25-j150 โอห์ม และทำการแมตช์สายอากาศในลักษณะคอนจูเกต (Conjugate) ค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้Stub ช่วย ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีไว้สองโหมด คือ เมื่อสายอากาศติดกับวัสดุที่เป็นวัสดุที่ไม่ใช่โลหะนั้น สายอากาศจะทำหน้าที่เป็นสายอากาศไดโพล และเมื่อนำสายอากาศไปติดกับวัสดุที่เป็นโลหะนั้นสายอากาศจะทำหน้าที่เป็นสายอากาศไมโครสตริปแทน ได้สายอากาศออกมาดังภาพที่ 5 และขนาดดังตารางที่ 2



ภาพที่ 5 แสดงการออกแบบสายอากาศ

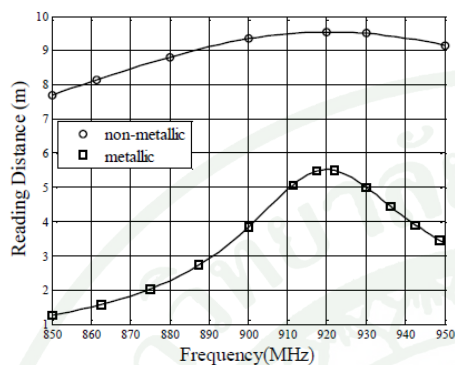
ที่มา: ศศิวิมล (2553)

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์สายอากาศ

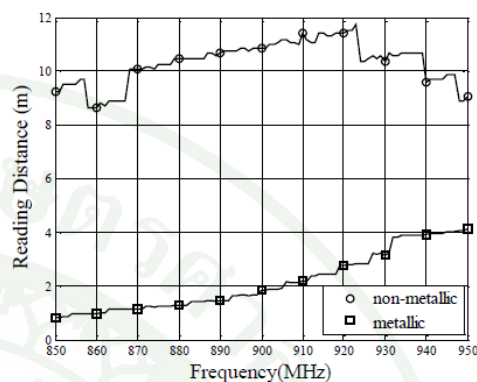
พารามิเตอร์	W1	W2	L1	L2	L3	L4	L5	d1	d2
มิลลิเมตร	63	3	36	38.4	16	35	4	9.1	12.9

ที่มา: ศศิวิมล (2553)

เมื่อได้สายอากาศและทำการสร้างอุปกรณ์จริงแล้วก็ได้ระยะอ่านออกมาได้ดีทั้งสองโหมด คือ โหมดไดโพลและโหมดไมโครสตริป ซึ่งระยะอ่านจะแสดงดังภาพที่ 6



(ก) ผลจากการจำลองผลการทำงาน



(ข) ผลจากการวัดจริง

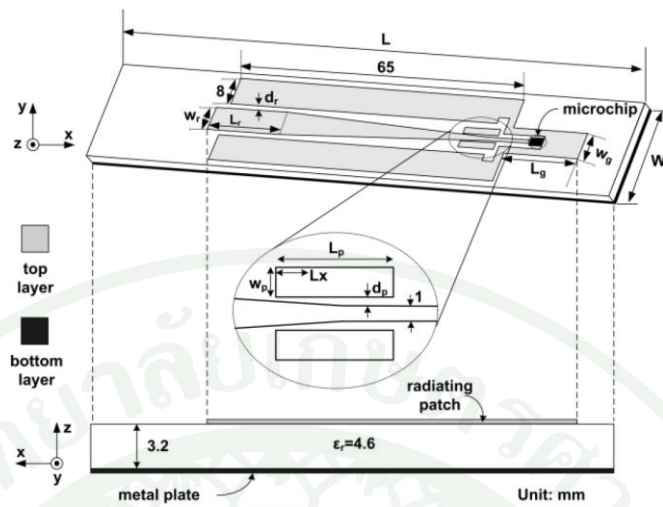
ภาพที่ 6 แสดงระยะอ่านในย่านความถี่ต่างๆ

ที่มา: ศศิวิมล (2553)

ปัญหาจากงานวิจัยนี้คือ ขนาดของตัวป้ายเมื่อทำสายอากาศออกมาสำเร็จแล้วตัวป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นมีความกว้าง 6.3 เซนติเมตร และยาว 17.8 เซนติเมตร สำหรับการใช้งานมีส่วนทองแดงทั้งด้านบนและด้านล่าง เมื่อสายอากาศติดกับวัสดุที่เป็นโลหะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงได้ง่าย ซึ่งมีผลต่อระยะอ่านของตัวป้ายอาร์เอฟไอดี

นอกจากงานวิจัยดังกล่าวที่น่าเสนอสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีสำหรับวัสดุที่เป็นโลหะและอโลหะแล้วยังมีงานวิจัยอื่นๆอีกดังนี้

ในงานวิจัยของ (Kim et al., 2008) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับสายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีเหมือนกันโดยเมื่อติดกับวัสดุโลหะ แล้วจะกลายเป็นสายอากาศไมโครสตริปแบบงานวิจัย (ศศิวิมล, 2553) เช่นกัน แต่งานวิจัยนี้จะใช้แพทช์แบบพาราซิติก (Parasitic Patch) ออกแบบมาตรงกับชิพอาร์เอฟไอดีที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 12-j133 โอห์ม ใช้ชั้นสเตรทอพอาร์โพร์ซึ่งออกแบบสายอากาศได้ดังภาพที่ 7 และตารางแสดงระยะอ่านดังตารางที่ 4



ภาพที่ 7 แสดงสายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้แพทช์แบบพาราซิติก

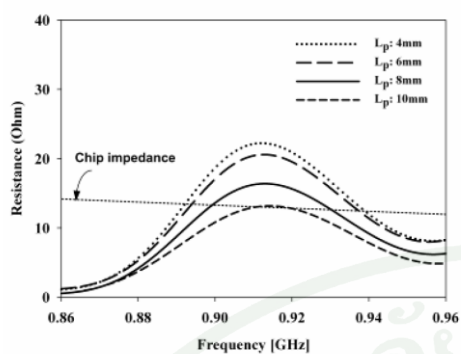
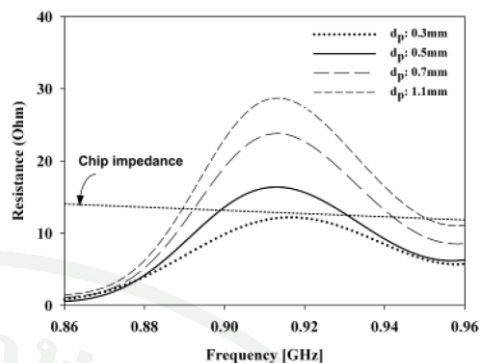
ที่มา: Kim et al. (2008)

ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์สายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้แพทช์แบบพาราซิติก

พารามิเตอร์	L	W	wg	Lg	dp	Lp	wp	wr	Lr	dr
มิลลิเมตร	120	30	8	17	0.5	8	2	7	16	1.5

ที่มา: Kim et al. (2008)

การนำเสนอของงานวิจัยนี้จะนำเสนอในรูปแบบของค่าอิมพีแดนซ์ซึ่งค่าเรโซแนนซ์ของอิมพีแดนซ์นั้นเป็นค่าที่ต่ำจากผลการปรับของ  $L_p$  และ  $d_p$  หรือค่าสูงสุดที่เป็นค่าจริงนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงของตัวชิพดังภาพที่ 8

(ก) แสดงค่าอิมพีแดนซ์เมื่อปรับ  $L_p$ (ข) แสดงค่าอิมพีแดนซ์เมื่อปรับ  $d_p$ 

ภาพที่ 8 แสดงการปรับขนาดสายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้แพทช์แบบพาราซิติกกับพารามิเตอร์ที่มีผลกับค่าอิมพีแดนซ์

ที่มา: Kim et al. (2008)

ตารางที่ 4 แสดงระยะอ่านของสายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้แพทช์แบบพาราซิติก

วัสดุที่ติด	ระยะการอ่าน (m)
ไม่มี	4.3
แผ่นโลหะขนาดกว้างและยาว 200 ตารางมิลลิเมตร	4.0
แผ่นโลหะขนาดกว้างและยาว 400 ตารางมิลลิเมตร	3.8

ที่มา: Kim et al. (2008)

แต่องานฉบับวิจัยดังกล่าวนี้ไม่ได้บอกว่าอ่านได้ที่ระยะความถี่เท่าไรหรือเพียงแต่บอกว่าเป็นค่าที่อ่านได้ระยะสูงสุด ในส่วนการออกแบบนั้นน่าจะออกแบบยากกว่างานวิจัยของ (ศศิวิมล, 2553)

นอกจากที่ใช้แผ่นโลหะให้เปรียบเสมือนคุณสมบัติกราวด์แล้วนั้น ยังมีการออกแบบสายอากาศในลักษณะที่ปรับค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) และค่าความจุ (Capacitance) โดย

งานวิจัยของ (Chen et al., 2009) ได้ออกแบบสายอากาศจากการนำค่าความเหนี่ยวนำและค่าความจุมาหาความถี่เรโซแนนซ์  $f_r$  ดังสมการที่ (16)

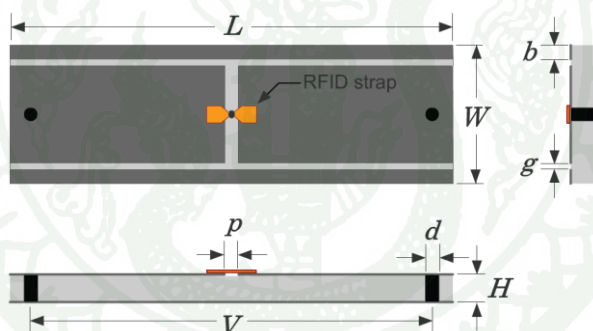
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_a C_a}} \quad (16)$$

โดยที่

$L_a$  คือ ค่าความนำของสายอากาศ

$C_a$  คือ ค่าความจุของสายอากาศ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบสายอากาศมาได้ขนาดของสายอากาศดังภาพที่ 9 และตารางที่ 5



ภาพที่ 9 แสดงสายอากาศที่ออกแบบได้

ที่มา: Chen et al. (2009)

ตารางที่ 5 แสดงค่าพารามิเตอร์สายอากาศ

พารามิเตอร์	L	W	H	V	p	d	g	b
(mm)	64	20	1.5	60	2	2	1	2

ที่มา: Chen et al. (2009)

โดยทำการออกแบบให้แมตซ์กับชิพที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 8.4-j132.7 โอห์ม ในการจำลองผลการทำงาน และ 10-j125 โอห์ม จากการวัด เมื่อทดลองวัดระยะอ่านแล้วได้ ระยะอ่านที่ดีที่สุดเมื่อติดกับวัสดุโลหะที่ 2.5 เมตร และบนอากาศที่ 2.3 เมตร

## อุปกรณ์และวิธีการ

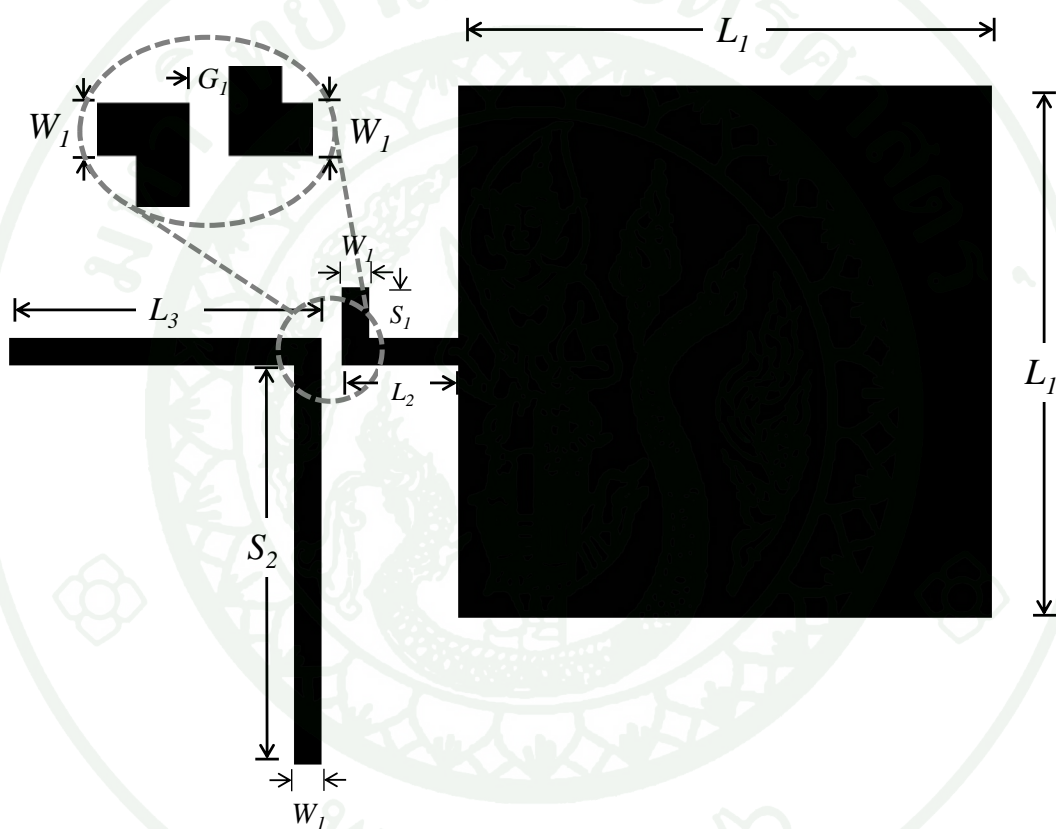
### อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์
2. โปรแกรมการออกแบบสายอากาศ Sonnet
3. โปรแกรมคำนวณค่าขนาดสายส่ง Txline
4. โปรแกรม Matlab
5. แผ่นพีซีบีเอฟอาร์ไฟร์ (FR4 PCB)
6. เครื่องวิเคราะห์ทางสเปกตรัม (Spectrum Analyzer)
7. ชิพอาร์เอฟไอดี UCODE G2XL (RFID Chip)
8. เครื่องอ่านอาร์เอฟไอดีย่านยูเอชเอฟ AS3990 (UHF RFID Reader)
9. ตัวลดทอนพลังงานแบบปรับได้ (Attenuator) ครั้งละ 1 dB
10. ตัวลดทอนพลังงานแบบปรับได้ (Attenuator) ครั้งละ 0.1 dB
11. ตัวลดทอนพลังงานแบบคงที่ (Fixed Attenuator) 5 dB
12. ขาตั้งสำหรับวางสายอากาศ
13. สายโคแอกเชียล (Coaxial Line)
14. แผ่นโฟม
15. แผ่นทองแดง
16. อุปกรณ์บัดกรี
17. เทปกาวสองหน้าเนื้อกระดาษทิชชู (Tissue Adhesive Tape)
18. ห้องดูดซับสัญญาณ (Anechoic Chamber)

## วิธีการ

### ภาพและขนาดต่างๆของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี

สำหรับการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้น ในงานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดลักษณะสายอากาศที่ออกแบบสำเร็จแล้ว พร้อมทั้งกำหนดพารามิเตอร์ของขนาดดังภาพที่ 10



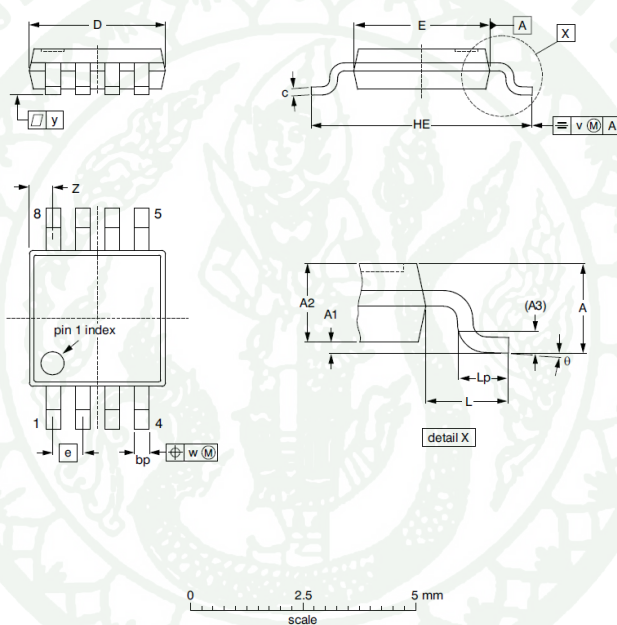
ภาพที่ 10 แสดงสายอากาศตัวอย่างที่ออกแบบเสร็จสมบูรณ์แล้วพร้อมพารามิเตอร์ขนาด

จากภาพที่ 10 แสดงให้เห็นขนาดต่างๆของสายอากาศ โดย  $L_1$  คือ ขนาดความกว้างและความยาวของตัวแพทช์ของสายอากาศ,  $L_2$  คือ ขนาดความยาวของสายส่งสัญญาณจากตัวชิปไปยังตัวแพทช์,  $L_3$  คือ ขนาดความยาวของสายส่งที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในโหมดไมโครสตริป,  $W_1$  คือ ขนาดความกว้างของสายป้อนสัญญาณ สายส่งที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นสำหรับสายอากาศในโหมดไมโครสตริปและความกว้างของสแต็บทั้งสองโหมด ซึ่งมาจากค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ,  $S_1$  คือ ความยาวสแต็บสำหรับโหมดไมโครสตริป,  $S_2$  คือ ความยาว

สัดสำหรับโหมดไดโพล และ  $G_1$  คือ ระยะที่เว้นไว้ใส่ตัวชิพอาร์เอฟไอดี สำหรับขนาดของสายอากาศต่าง ๆ นั้น สามารถหาได้โดยวิธีการในขั้นตอนต่อไป

### การหาค่าอิมพีแดนซ์ของชิพ

ก่อนที่จะทำการออกแบบการทดลองนั้น ในส่วนของตัวชิพมีข้อมูลมาให้ดังภาพที่ 11 และขนาดของตัวชิพดังตารางที่ 6 และ 7



ภาพที่ 11 แสดงภาพร่างของตัวชิพอาร์เอฟไอดี

ที่มา: NXP Semiconductor (2011)

ตารางที่ 6 แสดงขนาดของชิพอาร์เอฟไอดีโดยใช้พารามิเตอร์จากภาพร่าง

หน่วย (มิลลิเมตร)	A	A1	A2	A3	bp	c	D(1)	E(2)
สูงสุด	1.1	0.15	0.95	0.25	0.45	0.28	3.1	3.1
		0.05	0.80		0.25	0.15	2.9	2.9

ที่มา: NXP Semiconductor (2011)

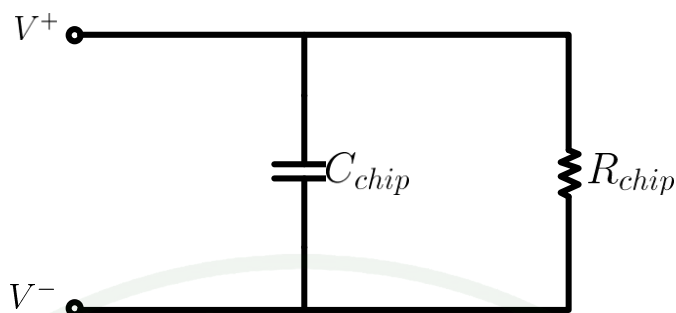
ตารางที่ 7 แสดงขนาดของชิพอาร์เอฟไอดีโดยใช้พารามิเตอร์จากภาพร่าง (ต่อ)

หน่วย (มิลลิเมตร)	e	HE	L	Lp	v	w	y	Z(1)
	0.65	5.1	0.94	0.7	0.1	0.1	0.1	0.70
		4.7		0.4				0.35

ที่มา: NXP Semiconductor (2011)

จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าค่าพารามิเตอร์ระหว่าง E กับ HE จะเป็นช่วงขนาดความกว้างของตัวชิพ ดังนั้นจึงกำหนดระยะห่างของสายอากาศที่กำหนดความกว้างของตัวชิพหรือ  $G_1$  ไว้ที่ 4 มิลลิเมตร

นอกจากข้อมูลทางด้านขนาดของตัวชิพนี้แล้วยังมีข้อมูลเกี่ยวกับตัววงจรของตัวชิพ ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุต่อขนานกับตัวต้านทานด้วยดังภาพที่ 12 และตารางที่ 8



ภาพที่ 12 แสดงวงจรของตัวชิพ

ที่มา: NXP Semiconductor (2011)

ตารางที่ 8 แสดงข้อมูลที่จำเป็นของตัวชิพสำหรับการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี

ค่าของตัวเก็บประจุ ( $C_{chip}$ ) (ต่อขนาน)	1.16 พิโคฟาร์ด
ค่าของอิมพีแดนซ์ ( $Z_{chip}$ ) ที่ความถี่ 915 เมกกะเฮิร์ต	16-j148 โอห์ม

ที่มา: NXP Semiconductor (2011)

สำหรับการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นจะออกแบบให้แมตซ์อยู่ในช่วงความถี่ 920 - 925 เมกกะเฮิร์ต ดังนั้นจึงต้องหาค่าอิมพีแดนซ์ใหม่ โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 922.5 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งเป็นค่าความถี่กลางระหว่างช่วงความถี่ 920 - 925 เมกกะเฮิร์ต

จากข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์จะสามารถหาค่าความต้านทานได้ดังสมการที่ (17)

$$Y_{chip} = \frac{1}{Z_{chip}} \quad (17)$$

โดย  $Z_{chip}$  จะมีค่าเท่ากับ 16-j148 โอห์ม เมื่อแทนค่า  $Z_{chip}$  ในสมการด้านบนจะได้ค่า  $Y_{chip}$  เท่ากับ  $0.7222+j6.6787$  มิลลิซีเมนต์ ซึ่งค่า  $Y_{chip}$  จะเขียนออกมาได้อยู่ในรูปของ  $Y_{chip} = G_{chip} + jB_{chip}$  โดยจะใช้  $G_{chip}$  หาค่าความต้านทานดังสมการที่ (18)

$$R_{chip} = \frac{1}{G_{chip}} \quad (18)$$

เมื่อแทนค่า  $G_{chip}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7222 มิลลิซีเมนต์ ลงไปในสมการจะได้ค่าความต้านทาน  $R_{chip}$  เท่ากับ 1385 โอห์ม จากนั้นจะทำการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 922.5 เมกกะเฮิร์ต ดังสมการที่ (19)

$$jX_{chip} = \frac{1}{j\omega C_{chip}} \quad (19)$$

โดยที่

$$\omega = 2\pi f \quad (20)$$

เมื่อแทนค่า  $\omega$  ที่ความถี่ 922.5 เมกกะเฮิร์ต และค่า  $C_{chip} = 1.16$  พิโกฟาร์ด จะได้  $jX_{chip} = -j148$  โอห์ม จากข้อมูลของตัวชิพที่ได้มานั้นจะพบว่าส่วนที่เป็นตัวต้านทานและส่วนที่เป็นตัวเก็บประจุต่อขนานกันอยู่ ดังนั้นจึงต้องรวมค่าความต้านทานแบบขนานดังสมการที่ (21)

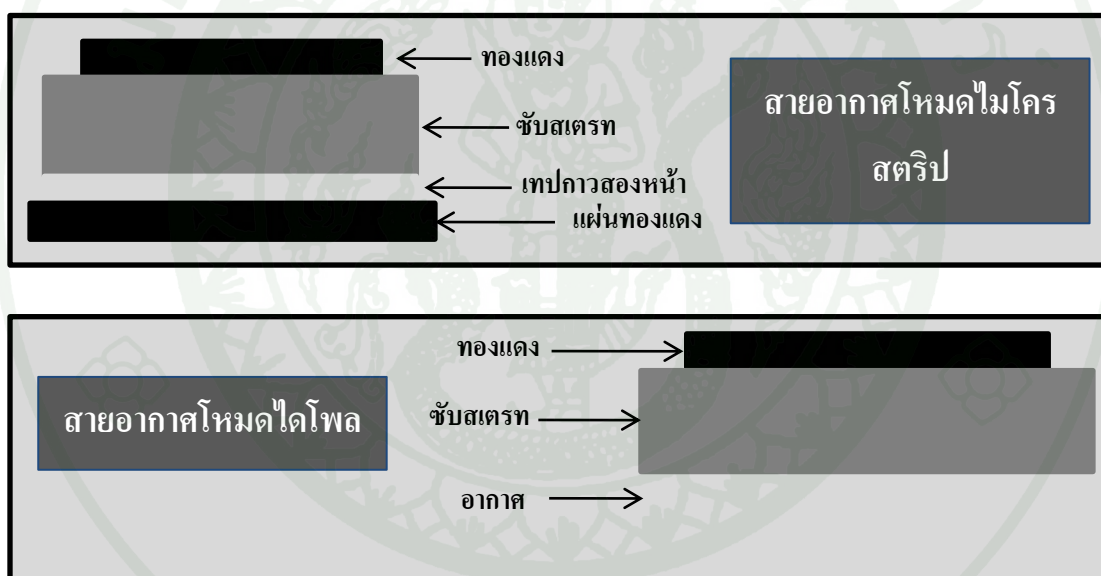
$$\frac{1}{Z_{chip}}(922.5MHz) = \frac{1}{R_{chip}} + \frac{1}{jX_{chip}} \quad (21)$$

แทนค่า  $R_{chip}$  และ  $jX_{chip}$  จากสมการ (21) จะได้ค่า  $Z_{chip}(922.5MHz) = 15.8 - j147.1 \approx 16 - j147$  โอห์ม ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 922.5 เมกกะเฮิร์ต มีค่า  $16 - j147$  โอห์ม ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้น จะต้องทำการออกแบบโดยที่สายอากาศจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงค่าคอนจูเกต (conjugate) ซึ่งจะมีค่า  $16 + j147$  โอห์ม หรือในรูปของค่าแอดมิตแตนซ์จะมีค่า  $0.731 - j6.723$  มิลลิซีเมนต์ ทั้งสองโหมด คือ โหมดไมโครสตริปและโหมดไดโพล

### การตั้งค่าชั้นสเตรทของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีในโปรแกรม Sonnet

สำหรับการตั้งค่าชั้นสเตรทของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีในโปรแกรม Sonnet ในงานวิจัยฉบับนี้ ตัวสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีจะต้องอ่านได้เมื่อตัวป้ายติดกับวัสดุโลหะและอโลหะ โดยเมื่อตัวป้ายติดกับวัสดุที่เป็นโลหะตัวสายอากาศจะเป็นสายอากาศไมโครสตริป และเมื่อตัวป้ายติดกับวัสดุที่เป็นอโลหะตัวสายอากาศจะเป็นสายอากาศไดโพล

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ จะออกแบบสายอากาศให้เหมาะกับแผ่นชั้นสเตรทเทฟลอน (Teflon) และแผ่นชั้นสเตรทเอพาร์โพร์ (FR4) โดยตั้งค่าแผ่นชั้นสเตรทตามลำดับชั้นดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แสดงการติดตั้งชั้นสเตรทสำหรับใช้บนโปรแกรมจำลองผลการทำงาน

จากภาพที่ 13 นั้น ในชั้นชั้นสเตรทของสายอากาศของทั้งสอง โหมดจะทำการออกแบบทั้งสองแบบคือ จะใช้เทฟลอนและเอพาร์โพร์เป็นชั้นชั้นสเตรท สำหรับเทฟลอนจะมีค่าคุณสมบัติคือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.2 ค่าความสูญเสียในแผ่นชั้นสเตรทเท่ากับ 0.0009 และติดตั้งความหนาเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร และชั้นสเตรทเอพาร์โพร์จะมีค่าคุณสมบัติ คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 4.4 ค่าความสูญเสียในแผ่นชั้นสเตรทเท่ากับ 0.02 และติดตั้งความหนาเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร เช่นเดียวกับวัสดุเทฟลอน ส่วนชั้นทองแดงที่ทำการติดตั้งนั้นจะมีความหนา 35 ไมโครเมตร ชั้นของ

เทปกาวสองหน้าจะใช้แบบเนื้อที่ขรุขระ ซึ่งเป็นวัสดุเดียวกันกับกระดาษที่ขรุขระ ซึ่งเทปชนิดนี้จาก (Integrated Publishing, n.d.) เทียบได้จากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุกระดาษแบบเคลือบจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.5 ถึง 4 ซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหลายค่า ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงตัดสินใจใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้นจากงานวิจัย (ศศิวิมล, 2553) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4 และติดตั้งความหนาของชั้นเทปกาวเท่ากับ 0.0762 มิลลิเมตร

### ขั้นตอนการออกแบบสายอากาศ

#### การออกแบบสายอากาศในโหมดไมโครสตริป

เริ่มจากการออกแบบสายอากาศที่โหมดไมโครสตริปก่อน โดยเริ่มต้นด้วยส่วนแพทช์ของสายอากาศ (Patch Antenna) ซึ่งส่วนของแพทช์นั้นในงานวิจัยนี้จะใช้แพทช์แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากนั้นทำการจำลองผลการทำงานโดยใช้โปรแกรม Sonnet ดังภาพที่ 14 เพื่อหาค่าแอดมิทแตนซ์ (Admittance หรือ  $Y_{patch}$ ) หรือส่วนกลับของค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance หรือ  $Z_{patch}$ ) เมื่อได้ค่าแอดมิทแตนซ์แล้ว จากนั้นทำการออกแบบสายป้อนสัญญาณ (Feed Line) โดยก่อนที่จะออกแบบสายส่งนั้นจะต้องทราบค่าแอดมิทแตนซ์ ซึ่งค่าแอดมิทแตนซ์มีทั้งค่าจริง (Real หรือ  $G_{patch}$ ) และค่าจินตภาพ (Imaginary หรือ  $B_{patch}$ ) ดังสมการที่ (22)



ภาพที่ 14 แสดงภาพสายอากาศที่ไว้หาค่าอิมพีแดนซ์หรือแอดมิตแตนซ์ของตัวแพทช์

$$Y_{patch} = G_{patch} + jB_{patch} \quad (22)$$

โดยปกติแล้วขนาดสายอากาศสี่เหลี่ยมจัตุรัส ( $L_1$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ (23) (Bancoft, 2008)

$$L_1 = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (23)$$

ซึ่งจากสมการที่ (23) เมื่อหาขนาดได้แล้ว จากนั้นนำค่าดังกล่าวไปหาค่าจริงของแอดมิตแตนซ์สูงสุด ( $G_{micro}^{max}$ ) และต่ำสุด ( $G_{micro}^{min}$ ) ที่เป็นไปได้เพื่อที่ตรวจสอบว่าเมื่อทำการเพิ่มสายป้อนสัญญาณมาแล้วสายอากาศมีโอกาสที่จะแมตช์ได้หรือไม่ สำหรับการหาค่าจริงของแอดมิตแตนซ์สูงสุดและต่ำสุดจะต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$  หรือ  $S_{11}$ ) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (24)

$$S_{11} = \frac{Z_{patch} - Z_0}{Z_{patch} + Z_0} \quad (24)$$

โดยที่  $Z_0$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของตัวสายส่ง (Characteristic Impedance) และค่า  $S_{11}$  ที่ได้จะเป็นทั้งค่าจริงและค่าจินตภาพ จากนั้นปรับค่า  $S_{11}$  จะอยู่ในเทอมของแมกนิจูด (Magnitude) และเฟส (Phase) ดังสมการที่ (25)

$$S_{11} = |S_{11}| e^{j\phi} \quad (25)$$

จากนั้นทำการหาค่าจริงของแอดมิตแตนซ์สูงสุด และต่ำสุดโดยหาความสัมพันธ์จากสมการที่ (26) ถึง (30)

$$|S_{11}| = \left| \frac{Y_0 - G}{Y_0 + G} \right| \quad (26)$$

กรณีที่  $Y_0 < G$

$$|S_{11}| = \frac{G - Y_0}{Y_0 + G} \quad (27)$$

$$G_{micro}^{min} = Y_0 \frac{1 - |S_{11}|}{1 + |S_{11}|} \quad (28)$$

กรณีที่  $Y_0 > G$

$$|S_{11}| = \frac{Y_0 - G}{Y_0 + G} \quad (29)$$

$$G_{micro}^{max} = Y_0 \frac{|S_{11}| + 1}{1 - |S_{11}|} \quad (30)$$

โดยที่ค่า  $Y_0$  คือ ค่าแอดมิตแตนซ์คุณลักษณะของสายส่ง (Characteristic Admittance) หรือเป็นส่วนกลับของค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ  $Z_0$  ค่าจริงของแอดมิตแตนซ์สูงสุดหาได้จากสมการ (30) และ ค่าจริงของแอดมิตแตนซ์ต่ำสุดหาได้จากสมการ (28) เมื่อได้ค่าจริงของแอดมิตแตนซ์ทั้งสองค่าแล้ว ค่าจริงของแอดมิตแตนซ์ของชิพ  $G_{chip}$  จะอยู่ระหว่าง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  ซึ่งหมายความว่าระยะของสายป้อนสัญญาณ  $L_2$  ที่ระยะหนึ่งนั้นสามารถทำให้ค่าจริงของแอดมิตแตนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับค่าจริงของแอดมิตแตนซ์ของชิพได้

เมื่อได้ระยะ  $L_1$  ที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นทำการหาระยะของสายป้อนสัญญาณ  $L_2$  จากสมการที่ (31) (Bancroft, 2008)

$$Y_{patch}^R = Y_0 \frac{Y_{patch} + jY_0 \tan(2\pi L_2^\lambda)}{Y_0 + jY_{patch} \tan(2\pi L_2^\lambda)} \quad (31)$$

โดยที่  $L_2^\lambda$  คือ ระยะของสายป้อนสัญญาณในหน่วยความยาวคลื่น จากสมการที่ (31) นั้นจะใช้วิธีการกำหนด  $L_2^\lambda$  ในช่วง 0 ถึง 0.5 เพื่อหา  $Y_{patch}^R$  โดยที่  $G_{patch}^R$  เท่ากับ  $G_{chip}$  เพราะถ้า  $L_2^\lambda$  ยาวเกิน 0.5 หรือเกินครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นแล้วค่าแอดมิตแดนซ์ที่ได้เสมือนว่ากลับมาเริ่มที่  $L_2^\lambda$  เท่ากับ 0 ใหม่ และเมื่อได้ระยะ  $L_2^\lambda$  ในหน่วยความยาวคลื่น ที่ทำให้  $G_{patch}^R$  เท่ากับ  $G_{chip}$  หรือใกล้เคียงแล้ว จากนั้นทำการแปลงค่า  $L_2^\lambda$  เป็น  $L_2$  ในหน่วยมิลลิเมตร โดยใช้โปรแกรม Txline หาค่าความยาวของสายป้อนสัญญาณที่หนึ่งหน่วยความยาวคลื่นสำหรับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะใดๆ จากนั้นนำ  $L_2^\lambda$  คูณเข้าไปและผลลัพธ์ที่ได้คือค่าความยาวของสายป้อนสัญญาณ  $L_2$

สำหรับความกว้างของสายป้อนสัญญาณ ( $W_1$ ) นั้น จะใช้ค่าเดียวกับความกว้างของสายส่งที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (Quarter Wave Length Transmission Line) และตัวสลับที่ใช้ในการแมตช์ด้วย สำหรับความกว้างที่ต้องการใช้งานนั้นหาได้จากโปรแกรม Txline โดยค่าความกว้างที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่กำหนดไว้ตั้งแต่ตอนเริ่มต้นการออกแบบสายอากาศในโหมดไมโครสตริป

เมื่อได้ความกว้าง  $W_1$  แล้วขั้นตอนถัดไปที่ทำการออกแบบคือ การออกแบบสายส่งที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น องค์ประกอบของสายดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นระนาบกราวด์เสมือน (Visual Ground) ให้กับสายอากาศไมโครสตริปด้วย และที่ต่อความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในโหมดไมโครสตริปก็เพราะว่าต้องการให้ค่าอิมพีแดนซ์ หรือแอดมิตแดนซ์ของสายอากาศมีผลกระทบกับค่าแอดมิตแดนซ์ของสายอากาศโหมดไมโครสตริปน้อยที่สุด โดยมีระยะความยาวเป็น  $L_3$  สำหรับการหาความยาวหนึ่งในสี่นั้นสามารถหาได้จากโปรแกรม Txline โดยปรับค่าความยาวทางไฟฟ้าที่ (Electrical Length) 90 องศา โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะค่าเดียวกับสายป้อนสัญญาณ

เมื่อออกแบบส่วนประกอบดังกล่าวทั้งหมดแล้ว จะพบว่าค่าจริงของแอดมิตแดนซ์ของสายอากาศนั้นแมตช์แล้ว แต่ค่าจินตภาพของแอดมิตแดนซ์ของสายอากาศนั้นยังไม่แมตช์ ดังนั้นจึง

ต้องสร้างสตัปเพื่อที่จะให้ค่าจินตภาพแมตซ์ โดยวิธีการหาความยาวสตัปหาได้นั้นจะต้องทราบค่า  $G_{patch}^R$  ซึ่งเป็นค่าจริงของ  $Y_{patch}^R$  ที่แมตซ์แล้ว แต่ค่าจินตภาพ  $B_{patch}^R$  ยังไม่แมตซ์ ดังนั้นจึงต้องหาความยาวสตัป  $S_1$  สำหรับสตัปในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้สตัปแบบเปิด โดยรูปสมการทั่วไปเขียนในรูปค่าจินตภาพของแอดมิตแตนซ์ ( $B_{stub}^{micro}$ ) ได้ดังสมการที่ (32)

$$B_{stub}^{micro} = Y_0 \tan(2\pi S_1^\lambda) \quad (32)$$

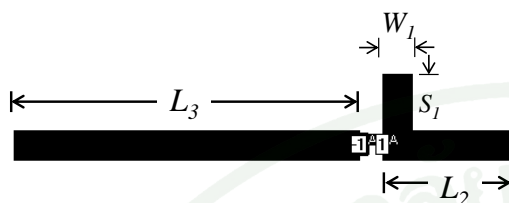
โดยที่  $S_1^\lambda$  คือ ความยาวของสตัป  $S_1$  ในหน่วยความยาวคลื่นและ  $B_{stub}^{micro}$  เป็นส่วนต่างระหว่างค่าจินตภาพของแอดมิตแตนซ์ของชิปและค่าจินตภาพของแอดมิตแตนซ์ของสายอากาศที่มีค่าแอดมิตแตนซ์เท่ากับ  $Y_{patch}^R$  ซึ่งแสดงไว้ดังสมการที่ (33)

$$B_{stub}^{micro} = -B_{chip} - B_{patch}^R \quad (33)$$

จากสมการหา  $B_{stub}^{micro}$  นั้นสามารถหาได้จากสมการที่ (33) ส่วนค่าที่จะต้องหานั้นคือ  $S_1^\lambda$  ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนรูปสมการที่ (32) ใหม่เพื่อที่จะหาค่า  $S_1^\lambda$  ดังสมการที่ (34)

$$S_1^\lambda = \frac{1}{2\pi} \arctan\left(\frac{B_{stub}^{micro}}{Y_0}\right) \quad (34)$$

เมื่อได้ค่า  $S_1^\lambda$  แล้ว จากนั้นทำการแปลงค่า  $S_1^\lambda$  เป็น  $S_1$  ในหน่วยมิลลิเมตร และเมื่อได้ความยาว  $S_1$  แล้ว สายอากาศในโหมดไมโครสตริปจะให้ค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_{patch}^{match}$  และการออกแบบสายอากาศในโหมดไมโครสตริปจึงเสร็จสมบูรณ์ และจากนั้นทำการจำลองผลการทำงานโดยใช้โปรแกรม Sonnet เพื่อตรวจสอบความคลาดเคลื่อนครั้งแรก สำหรับสายอากาศในโหมดไมโครสตริปที่ออกแบบสำเร็จแสดงไว้ในภาพที่ 15



ภาพที่ 15 แสดงส่วนของการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่เสร็จสมบูรณ์

การออกแบบสายอากาศในโหมดไดโพล

เมื่อการออกแบบสายอากาศสำหรับปายอาร์เอฟไอดีเสร็จสมบูรณ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการออกแบบสายอากาศสำหรับปายอาร์เอฟไอดีในโหมดไดโพล สำหรับโหมดไดโพลนั้นจะใช้ค่าอิมพีแดนซ์ในการแสดงผล เนื่องจากการง่ายในการวิเคราะห์การแมตซ์ของสายอากาศในโหมดดังกล่าวได้ง่ายขึ้น สำหรับการแมตซ์สายอากาศในโหมดไดโพลนั้น จะใช้สลับแบบเปิด เช่นเดียวกับการแมตซ์สายอากาศในโหมดไมโครสตริป แต่วิธีการพิจารณานั้นจะนำเสนอในลักษณะที่ต่างกันออกไป โดยใส่สลับบริเวณจุดกราวด์เสมือนของโหมดไมโครสตริป ซึ่งวิธีการนี้ไม่สามารถควบคุมค่าจริงของอิมพีแดนซ์ได้ และนอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังไม่มีวิธีการอธิบายค่าอิมพีแดนซ์จากสายอากาศโหมดไดโพลดังนั้นจึงต้องใช้การจำลองผลการทำงานจากโปรแกรม Sonnet เข้าช่วยเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของสลับในช่วงความยาวต่างๆ สำหรับงานวิจัยฉบับนี้การออกแบบสายอากาศในโหมดไดโพลนั้น จะเริ่มจากใส่สลับสำหรับโหมดไดโพล ซึ่งมีความกว้างเท่ากับ  $W_1$  และมีความยาวเท่ากับ  $S_2$  และงานวิจัยฉบับนี้จะทำการจำลองผลการทำงานของสายอากาศในโหมดไดโพลและตรวจสอบการส่งผ่าน (Transmission Coefficient) โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดจากการจำลองผลการทำงานดังสมการที่ (35)

$$\tau = \frac{4R_{chip}R_{ant}}{|Z_{chip} + Z_{ant}|^2} = (1 - |\Gamma^2|) \quad (35)$$

โดยที่  $\tau$  เป็นค่าการส่งผ่านซึ่งเป็นค่าเดียวกับค่า  $e_r$  หรือ ค่าประสิทธิภาพการสะท้อนซึ่งเกิดจากการไม่แมตช์ของสายอากาศ  $Z_{chip}$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวชิพ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของตัวชิพจะอยู่ในเทอมของ  $Z_{chip} = R_{chip} + jX_{chip}$  ส่วนค่า  $Z_{ant}$  เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศจะอยู่ในเทอมของ  $Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant}$

เมื่อได้ค่าการส่งผ่านที่ค่า  $S_2$  ต่างๆแล้ว จากนั้นเลือกขนาด  $S_2$  ที่ทำให้ค่าการส่งผ่านสูงสุด และการออกแบบสายอากาศสำหรับปายอาร์เอฟไอดีนั้นจึงเสร็จสมบูรณ์

สำหรับขั้นตอนการออกแบบสายอากาศทั้งหมดสามารถสรุปออกมาเป็นขั้นตอน ดังนี้

1. หาขนาด  $L_1$  เริ่มจากหาขนาดโดยใช้สมการที่ (23) หากค่าแอดมิตแตนซ์ และตรวจสอบค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  ให้อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$
2. หาขนาด  $L_2$  จากสมการที่ (31) ที่ทำให้ค่าจริงของแอดมิตแตนซ์ใกล้เคียงกับค่าจริงของแอดมิตแตนซ์ชิพมากที่สุดซึ่งตอนแรกจะได้ค่า  $L_2^{\lambda}$  หรือ  $L_2$  ในหน่วยความยาวคลื่น แล้วจึงแปลงเป็นค่า  $L_2$  ในหน่วยมิลลิเมตรโดยใช้โปรแกรม Txline และหาค่า  $W_1$  โดยใช้โปรแกรม Txline โดยกำหนดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะตามที่ต้องการใช้
3. หาขนาด  $L_3$  โดยใช้โปรแกรม Txline ตั้งค่าความยาวทางไฟฟ้าไว้ที่ 90 องศา และมีความกว้างเท่ากับ  $W_1$
4. หาขนาด  $S_1$  จากสมการที่ (34) เพื่อปรับค่าจินตภาพของแอดมิตแตนซ์สายอากาศให้เท่ากับค่าจินตภาพของแอดมิตแตนซ์ของชิพมากที่สุด โดยตอนแรกจะได้ค่า  $S_1^{\lambda}$  แล้วจึงแปลงเป็นค่า  $S_1$  ในหน่วยมิลลิเมตร และมีความกว้างเท่ากับ  $W_1$

5. เมื่อหาขนาด  $S_1$  สำเร็จแล้ว สร้างสายอากาศในโปรแกรม Sonnet โดยปิดค่าของขนาดทั้งหมดให้ขนาดสามารถหาร 0.5 มิลลิเมตรได้ลงตัว และทำการจำลองผลการทำงานของสายอากาศในโหมดไดโพลหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่ได้

6. สร้างสับทหาคความยาว  $S_2$  บนโปรแกรม Sonnet ทำการจำลองผลการทำงาน และนำค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้หาค่าการส่งผ่าน และตรวจสอบความยาว  $S_2$  ที่ให้ค่าการส่งผ่านสูงที่สุด

**การหาขนาดสายอากาศโดยใช้เทฟลอนเป็นฉนวน**

สำหรับการหาขนาดสายอากาศโดยใช้เทฟลอนเป็นฉนวนนั้น จะออกแบบโดยกำหนดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะสองค่า คือ 120 โอห์มและ 50 โอห์ม เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่มีค่าดังกล่าวนี้สามารถให้ความกว้าง  $W_1$  ของสายส่งต่าง ๆ นั้นไม่กว้างและไม่แคบจนเกินไป โดยลำดับขั้นตอนการหาขนาดของสายอากาศเป็นไปตามลักษณะดังนี้

1. หาขนาด  $L_1$  โดยใช้สมการที่ (23) ซึ่งเมื่อคำนวณออกมาสำเร็จแล้วขนาด  $L_1$  มีค่าเท่ากับ 109 มิลลิเมตร และเมื่อหาค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  นั้นผลลัพธ์ที่ได้จะออกมาดังตารางที่ 9 ที่แสดงค่า  $Y_{patch}$ ,  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  เมื่อวิเคราะห์ค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  แล้วพบว่าที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 120 โอห์ม ค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  และพบว่าที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม ค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  ไม่ได้อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  ดังนั้น จึงต้องลดขนาดแพทช์ลงเพื่อตรวจสอบว่าที่ขนาดแพทช์เท่าใดจึงสามารถแมตช์กับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์มได้ พบว่าเมื่อปรับลดขนาด  $L_1$  ลงมาจนเหลือขนาด 101 มิลลิเมตร พบว่าค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  ทั้งในกรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 120 โอห์ม และ 50 โอห์ม ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า  $L_1$  เท่ากับ 101 มิลลิเมตร สำหรับการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีด้วย ดังนั้นจึงออกแบบสายอากาศทั้งสามตัวที่สามารถออกแบบได้ทั้งสามกรณี

ตารางที่ 9 แสดงค่าแอดมิทแตนซ์ของแพทช์และค่าจริงของแอดมิทแตนซ์สูงสุดต่ำสุดที่เป็นไปได้  
เมื่อใส่สายป้อนสัญญาณลงไป

$L_1$ มิลลิเมตร	$Y_{patch}$ มิลลิซีเมนต์	$Z_0 = 120$ โอห์ม		$Z_0 = 50$ โอห์ม	
		$G_{max}$ มิลลิซีเมนต์	$G_{min}$ มิลลิซีเมนต์	$G_{max}$ มิลลิซีเมนต์	$G_{min}$ มิลลิซีเมนต์
109	3.9626+j18.085	0.6718	103.36	2.1588	185.29
101	2.4232-j36.308	0.1208	574.98	0.5626	710.95

2. หาค่า  $L_2$  จากสมการที่ (31) โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 9 แสดงออกมาในรูปของ  $Y_{patch}^R$ ,  $L_2^\lambda$  และ  $L_2$  ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงค่าความยาว  $Y_{patch}^R$ ,  $L_2^\lambda$  และ  $L_2$  ที่สายอากาศมีขนาด  $L_1$  เท่ากับ 109 และ 101 มิลลิเมตร

$L_1$ มิลลิเมตร	$Z_0 = 120$ โอห์ม			$Z_0 = 120$ โอห์ม		
	$Y_{patch}^R$ มิลลิซีเมนต์	$L_2^\lambda$	$L_2$ มิลลิเมตร	$Y_{patch}^R$ มิลลิซีเมนต์	$L_2^\lambda$	$L_2$ มิลลิเมตร
109	0.7317-j2.477	0.2701	66.67	-	-	-
101	0.7315-j18.73	0.0308	7.603	0.7319-j10.97	0.0902	21.32

เมื่อได้  $L_2$  แล้วจากนั้นหาค่า  $W_1$  จากโปรแกรม Txlinc ตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 120 โอห์ม และ 50 โอห์ม ซึ่งแสดงค่าดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงค่าความกว้างของสาย  $W_1$  ตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

$Z_0$ โอห์ม	$W_1$ มิลลิเมตร
120	4.6
50	0.8

3. หาค่า  $L_3$  ซึ่งเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ แสดงไว้ในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 แสดงค่าความยาวสายที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์เสมือน  $L_3$  ตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

$Z_0$ โอห์ม	$L_3$ มิลลิเมตร
120	59.10
50	61.71

4. เมื่อได้ค่าจริงของแอดมิตแตนซ์แมตซ์แล้ว จากนั้นหาค่า  $S_1$  จากสมการที่ (34) และแสดงออกมาในรูปของ  $Y_{patch}^{match}$ ,  $S_1^\lambda$  และ  $S_1$  ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงค่า  $Y_{patch}^{match}$ ,  $S_1^\lambda$  และ  $S_1$  ที่สายอากาศมีขนาด  $L_1$  เท่ากับ 109 และ 101 มิลลิเมตร

$L_1$ มิลลิเมตร	$Z_0 = 120$ โอห์ม			$Z_0 = 50$ โอห์ม		
	$Y_{patch}^{match}$ มิลลิซีเมนต์	$S_1^\lambda$	$S_1$ มิลลิเมตร	$Y_{patch}^{match}$ มิลลิซีเมนต์	$S_1^\lambda$	$S_1$ มิลลิเมตร
109	0.7317-j6.723	0.4250	104.91	-	-	-
101	0.7315-j6.713	0.1535	37.892	0.7319-j6.723	0.0333	7.8725

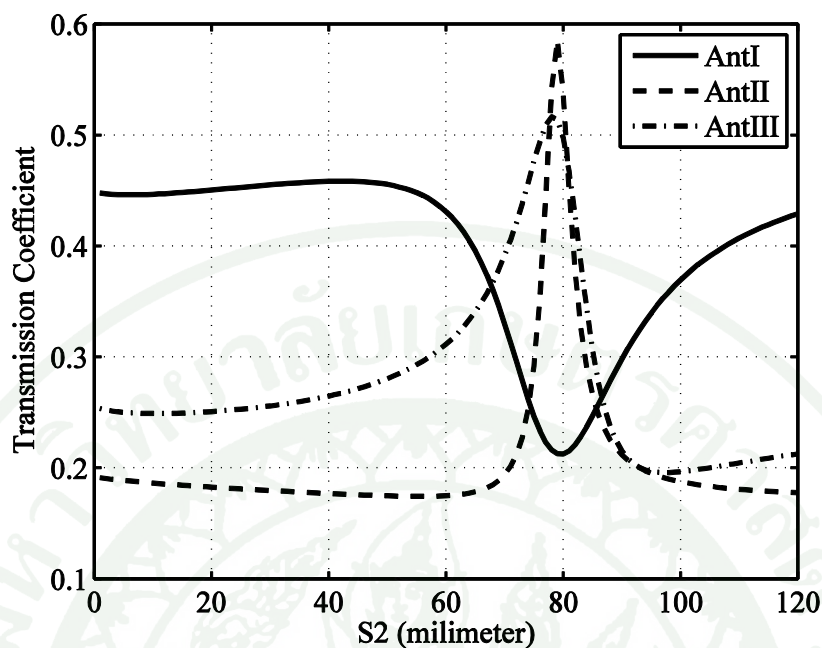
5. สำหรับขั้นตอนนี้ การออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมดไมโครสตริปนั้นเสร็จสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นจึงทำการจำลองสายอากาศ โดยกำหนดขนาดใหม่ให้ปิด

ตัวเลขให้หาร 0.5 มิลลิเมตรลงตัว จากนั้นกำหนดชื่อสายอากาศดังนี้ AntI เป็นสายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 109 มิลลิเมตรและค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 120 โอห์ม AntII เป็นสายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 101 มิลลิเมตรและค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 120 โอห์ม และ AntIII เป็นสายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 101 มิลลิเมตรและค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม และจำลองสายอากาศลงในโปรแกรม Sonnet ทำการแสดงค่าแอดมิตแตนซ์จากการผลการจำลองผลการทำงานดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 แสดงขนาดสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการจำลองผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet และค่าแอดมิตแตนซ์ที่ได้จากการจำลองผลการทำงานในโหมดไมโครสตริป

สายอากาศ	$L_1$ มิลลิเมตร	$L_2$ มิลลิเมตร	$L_3$ มิลลิเมตร	$W_1$ มิลลิเมตร	$S_1$ มิลลิเมตร	ค่าแอดมิตแตนซ์ จากการจำลอง ผลการทำงาน มิลลิซีเมนต์
AntI	109	66.5	62	1	105	0.8281-j6.0539
AntII	101	7.5	62	1	38	0.7782-j6.0930
AntIII	101	21.5	59	4.5	8	0.7300-j6.4672

6. ปรับการตั้งของโปรแกรม Sonnet ให้ค่าสายอากาศ AntI, AntII และ AntIII ทำงานในโหมดไดโพล จำลองผลการทำงานโดยปรับ  $S_2$  ในโปรแกรม Sonnet เพื่อนำค่าอิมพีแดนซ์จากการจำลองผลการทำงานและนำมาหาค่าการส่งผ่านดังสมการที่ (35) ซึ่งแสดงออกมาเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 16 และตารางที่ 15



ภาพที่ 16 แสดงค่าการส่งผ่านของสายอากาศที่ใช้เฟลลอนเป็นชั้นสเตรทในระยะ  $S_2$  ต่างๆ

ตารางที่ 15 แสดงระยะ  $S_2$  ที่ให้ค่าการส่งผ่านที่ดีที่สุดพร้อมทั้งค่าการส่งผ่าน

สายอากาศ	$S_2$ มิลลิเมตร	ค่าการส่งผ่าน
AntI	42	0.46
AntII	79	0.58
AntIII	78	0.52

เมื่อออกแบบสายอากาศสำเร็จแล้ว ขนาดสายอากาศที่ได้บนชั้นสเตรทเฟลลอนแสดงไว้ในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 แสดงขนาดของสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ทั้งโหมดไดโพลและโหมดไมโครสตริป

สายอากาศ	$L_1$ มิลลิเมตร	$L_2$ มิลลิเมตร	$L_3$ มิลลิเมตร	$W_1$ มิลลิเมตร	$S_1$ มิลลิเมตร	$S_2$ มิลลิเมตร
AntI	109	66.5	62	1	105	42
AntII	101	7.5	62	1	38	79
AntIII	101	21.5	59	4.5	8	78

#### การออกแบบสายอากาศโดยใช้เอพาร์โพร์เป็นขั้วสเตรท

ในกรณีที่ขั้วสเตรทเป็นเอพาร์โพร์นั้น ในงานวิจัยฉบับนี้จะเพิ่มในส่วนของแพทช์ที่มีขนาดสองในสามและหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของการแมตช์ นอกจากขนาดแพทช์ที่เล็กกว่าขนาดครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นนั้นสามารถที่จะใช้งานได้ดีเท่าขนาดแพทช์ครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นหรือไม่หรือมีปัญหาประการใด สำหรับการออกแบบสายอากาศบนขั้วสเตรทเอพาร์โพร์นั้น จะกำหนดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะต่างจากขั้วสเตรทเทฟลอนเล็กน้อย โดยจะกำหนดค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะไว้ที่ 100 โอห์ม และ 50 โอห์ม ที่ไม่ใช่ 120 โอห์ม เพราะเมื่อออกแบบความกว้าง  $W_1$  จะมีขนาดเล็กเกินไป ส่วนวิธีการออกแบบสายอากาศสำหรับปายอาร์เอฟไอดีมีวิธีการเป็นขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มจากหาค่า  $L_1$  จากสมการที่ (23) ซึ่งเมื่อทำการคำนวณแล้วจะได้  $L_1$  มีค่าเท่ากับ 76 มิลลิเมตร เมื่อวิเคราะห์ค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  นั้นผลลัพธ์ที่ได้จะออกมาดังตารางที่ 17 แสดงค่า  $Y_{patch}$ ,  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  เมื่อวิเคราะห์ค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  แล้วพบว่าค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  และ พบว่าที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะทั้ง 100 โอห์ม และ 50 โอห์ม ค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  ไม่ได้อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  ดังนั้นจึงต้องปรับค่า  $L_1$  ลงมาที่ 73 มิลลิเมตร พบว่าที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะทั้ง 100 โอห์ม อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  แต่ที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์มนั้นค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  ไม่ได้อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  ดังนั้น จึงปรับขนาดแพทช์อีกครั้ง พบว่าที่  $L_1$  เท่ากับ 70 มิลลิเมตรนั้น ทั้งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 100 โอห์ม และ 50 โอห์มนั้นค่า  $G_{max}$

และ  $G_{min}$  อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  ดังนั้นจึงสามารถสร้างสายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 73 และ 70 มิลลิเมตรได้

นอกจากนั้นแล้ว งานวิจัยฉบับนี้ยังทดลองสร้างสายอากาศที่มีขนาดแพทช์สองในสามและหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น โดยที่ขนาดแพทช์ความยาวสองในสามของความยาวคลื่นหาได้จากสมการที่ (36) และขนาดแพทช์ความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นหาได้จากสมการที่ (37)

$$L_1^{\frac{2\lambda}{3}} = \frac{2c}{3f_r\sqrt{\epsilon_r}} \quad (36)$$

$$L_1^{\frac{\lambda}{4}} = \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_r}} \quad (37)$$

จากการหา  $L_1$  ในสมการที่ (36) และ (37) พบว่าค่า  $L_1$  มีค่าเท่ากับ 54 มิลลิเมตร และ 38 มิลลิเมตร ตามลำดับ และทั้งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 100 โอห์ม และ 50 โอห์มนั้นค่า  $G_{max}$  และ  $G_{min}$  อยู่ในช่วง  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  ซึ่งข้อมูลทั้งหมดแสดงไว้ในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 แสดงค่าแอดมิตแตนซ์ของแพทช์และค่าจริงของแอดมิตแตนซ์สูงสุดต่ำสุดที่เป็นไปได้เมื่อใส่สายป้อนสัญญาณลงไป

$L_1$ มิลลิเมตร	$Y_{patch}$ มิลลิซีเมนต์	$Z_0 = 100$ โอห์ม		$Z_0 = 50$ โอห์ม	
		$G_{max}$ มิลลิซีเมนต์	$G_{min}$ มิลลิซีเมนต์	$G_{max}$ มิลลิซีเมนต์	$G_{min}$ มิลลิซีเมนต์
76	8.6414-j11.214	3.1643	31.603	6.3442	63.15
73	5.9898-j33.539	0.4761	210.02	1.5442	259.03
70	4.5530-j50.173	0.1725	579.57	0.6201	645.06
54	2.8498-j115.15	0.0213	4690.8	0.0834	4796.0
38	11.204-j280.44	0.0142	7039.6	0.0566	7066.4

2. หาค่า  $L_2$  จากสมการที่ (31) โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 17 แสดงออกมาในรูปของ  $Y_{patch}^R$ ,  $L_2^\lambda$  และ  $L_2$  ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 แสดงค่าความยาว  $Y_{patch}^R$ ,  $L_2^\lambda$  และ  $L_2$  ที่สายอากาศมีขนาด  $L_1$  มีค่าต่างๆ

$L_1$ มิลลิเมตร	$Z_0 = 100$ โอห์ม			$Z_0 = 120$ โอห์ม		
	$Y_{patch}^R$ มิลลิซีเมนต์	$L_2^\lambda$	$L_2$ มิลลิเมตร	$Y_{patch}^R$ มิลลิซีเมนต์	$L_2^\lambda$	$L_2$ มิลลิเมตร
76	-	-	-	-	-	-
73	0.7318-j7.310	0.1044	19.6	-	-	-
70	0.7315-j17.99	0.0496	9.3	0.7318-j8.49	0.1261	21.5
54	0.7327-j57.76	0.0135	2.5	0.7305-j55.7	0.0275	4.9
38	0.7306-j71.101	0.0166	3.1	0.7331-j69.14	0.0335	5.9

จากนั้นหาค่า  $W_1$  ซึ่งเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ โดยใช้โปรแกรม Txline แสดงไว้ในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 แสดงค่าความกว้างของสาย  $W_1$  ตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

$Z_0$ โอห์ม	$W_1$ มิลลิเมตร
120	0.36
100	0.66
50	3

สำหรับกรณีหาขนาด  $W_1$  นั้นพบว่ากรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่มีค่า 120 โอห์ม และ 100 โอห์ม นั้นมีค่าไม่ใกล้เคียง 0.5 มิลลิเมตร ดังนั้นจึงหาค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะซึ่งมีค่าเท่ากับ 109.5 โอห์ม ดังนั้นจึงใช้ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 100 โอห์ม แทน 120 โอห์ม

3. หาค่า  $L_3$  ซึ่งเปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ แสดงไว้ในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 แสดงค่าความยาวสายที่ทำหน้าที่เป็นกราวด์เสมือน  $L_3$  ตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ

$Z_0$ โอห์ม	$L_3$ มิลลิเมตร
100	44.6
50	47

4. เมื่อได้ค่าจริงของแอดมิตแตนซ์แมตซ์แล้ว จากนั้นหาค่า  $S_1$  จากสมการที่ (34) และแสดงออกมาในรูปของ  $Y_{patch}^{match}$ ,  $S_1^\lambda$  และ  $S_1$  ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 แสดงค่า  $Y_{patch}^{match}$ ,  $S_1^\lambda$  และ  $S_1$  ที่สายอากาศมีขนาด  $L_1$  มีค่าต่างๆ

$L_1$ มิลลิเมตร	$Z_0 = 120$ โอห์ม			$Z_0 = 120$ โอห์ม		
	$Y_{patch}^{match}$ มิลลิซีเมนต์	$S_1^\lambda$	$S_1$ มิลลิเมตร	$Y_{patch}^{match}$ มิลลิซีเมนต์	$S_1^\lambda$	$S_1$ มิลลิเมตร
73	0.7318-j6.916	0.0093	1.75	-	-	-
70	0.7315-j6.733	0.1344	20.53	0.7318-j6.739	0.0139	2.49
54	0.7327-j7.071	0.2190	41.2	0.7305-j6.633	0.1884	33.5
38	0.7306-j6.912	0.2254	42.4	0.7331-j6.788	0.2006	35.7

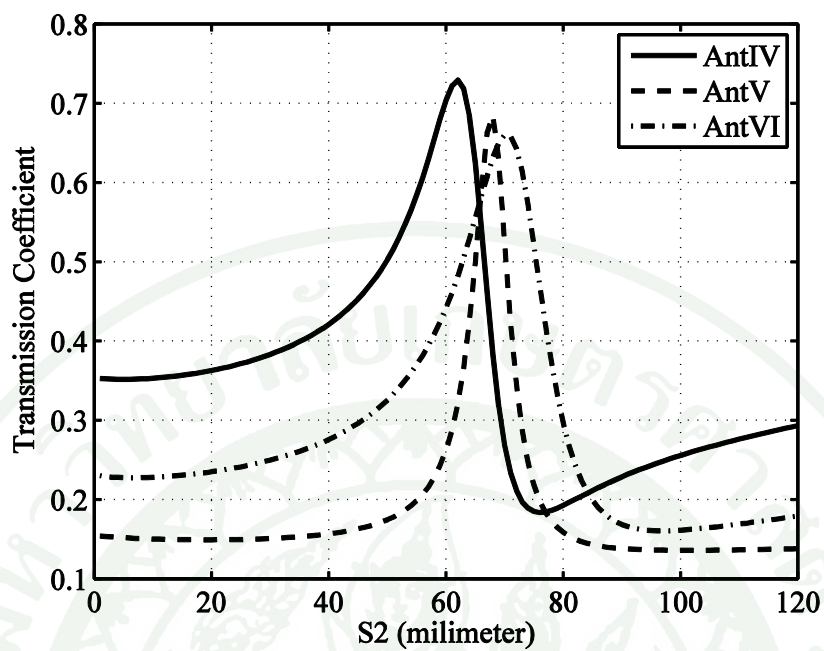
5. สำหรับขั้นตอนนี้ การออกแบบสายอากาศสำหรับป้าอาร์เอฟไอดีในโหมดไมโครสตริปนั้นเสร็จสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นจึงทำการจำลองสายอากาศ โดยกำหนดขนาดใหม่ให้ปิดตัวเลขให้หาร 0.5 มิลลิเมตรลงตัว จากนั้นกำหนดชื่อสายอากาศดังนี้ AntIV คือ สายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 73 มิลลิเมตรและค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 100 โอห์ม AntV คือ สายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 70 มิลลิเมตรและค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 100 โอห์ม AntVI คือ สายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 70 มิลลิเมตรและค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม AntVII คือ สายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 54 มิลลิเมตร และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 100 โอห์ม AntVIII คือ สายอากาศที่มี

ขนาดแพทช์ 54 มิลลิเมตร และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 500 โอห์ม AntIX คือ สายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 38 มิลลิเมตร และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 100 โอห์ม และ AntX คือ สายอากาศที่มีขนาดแพทช์ 38 มิลลิเมตร และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม โอห์ม และจำลองสายอากาศลงในโปรแกรม Sonnet ทำการแสดงค่าแอดมิตแตนซ์จากการผลการจำลองผลการทำงานดังตารางที่ 22

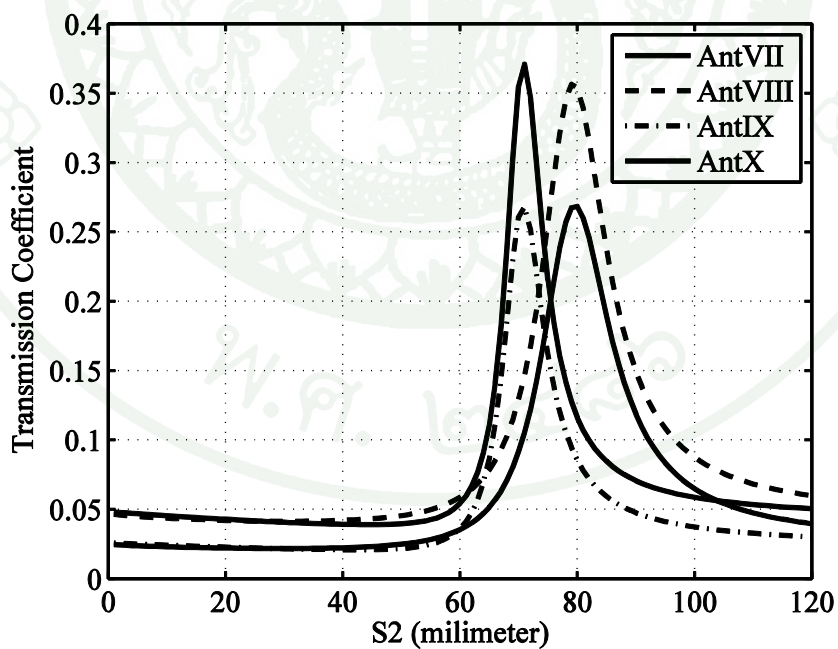
**ตารางที่ 22** แสดงขนาดสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับการจำลองผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet และค่าแอดมิตแตนซ์ที่ได้จากการจำลองผลการทำงานในโหมดไมโครสตริป

สายอากาศ	$L_1$ มิลลิเมตร	$L_2$ มิลลิเมตร	$L_3$ มิลลิเมตร	$W_1$ มิลลิเมตร	$S_1$ มิลลิเมตร	ค่าแอดมิตแตนซ์ จากการจำลอง ผลการทำงาน มิลลิซีเมนต์
AntIV	73	19.5	47	0.5	2	0.7519-j6.0196
AntV	70	9.5	47	0.5	20.5	0.9334-j8.9216
AntVI	70	21.5	44.5	3	2.5	0.9565-j7.8017
AntVII	54	2.5	47	0.5	41	3.6401-j22.492
AntVIII	54	5	44.5	3	33.5	2.7432-j16.492
AntIX	38	3	47	0.5	42.5	5.5597-j16.429
AntX	38	6	44.5	3	36	4.0102-j25.025

6. ปรับการตั้งค่าของโปรแกรม Sonnet ให้สายอากาศ AntIV, AntV, AntVI, AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX เป็น สายอากาศโหมดไดโพล จำลองผลการทำงานโดยปรับ  $S_2$  ในโปรแกรม Sonnet เพื่อนำค่าอิมพีแดนซ์จากผลการจำลองและนำมาหาค่าการส่งผ่านดังสมการที่ (35) ซึ่งแสดงออกมาเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 17 และ 18



ภาพที่ 17 แสดงค่าการส่งผ่านของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI ในระยะ  $S_2$  ต่างๆ



ภาพที่ 18 แสดงค่าการส่งผ่านของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX ในระยะ  $S_2$  ต่างๆ

จากภาพที่ 17 และภาพที่ 18 จะได้ขนาด  $S_2$  ที่ทำให้ให้ค่าการส่งผ่านสูงสุดดังตารางที่ 23

ตารางที่ 23 แสดงระยะ  $S_2$  ที่ให้ค่าการส่งผ่านที่ดีที่สุดพร้อมทั้งค่าการส่งผ่าน

สายอากาศ	$S_2$ มิลลิเมตร	ค่าการส่งผ่าน
AntIV	62	0.6600
AntV	68	0.6843
AntVI	70	0.7291
AntVII	71	0.3370
AntVIII	79	0.3564
AntIX	71	0.2683
AntX	71	0.3708

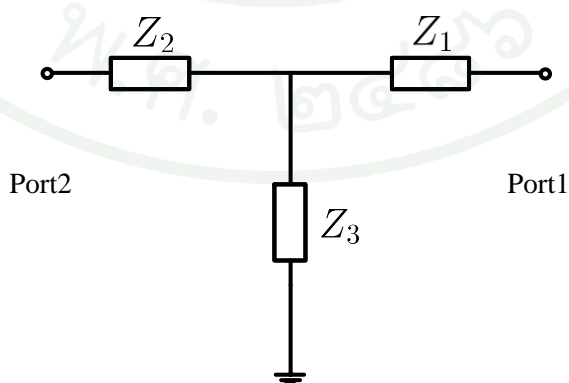
เมื่อออกแบบสายอากาศสำเร็จแล้วขนาดสายอากาศที่ได้บนชั้นสเตรทเทฟลอน แสดงไว้ใน  
ตารางที่ 24

ตารางที่ 24 แสดงขนาดของสายอากาศที่สามารถใช้งานได้ทั้งโหมดไดโพลและโหมดไมโครสตริป

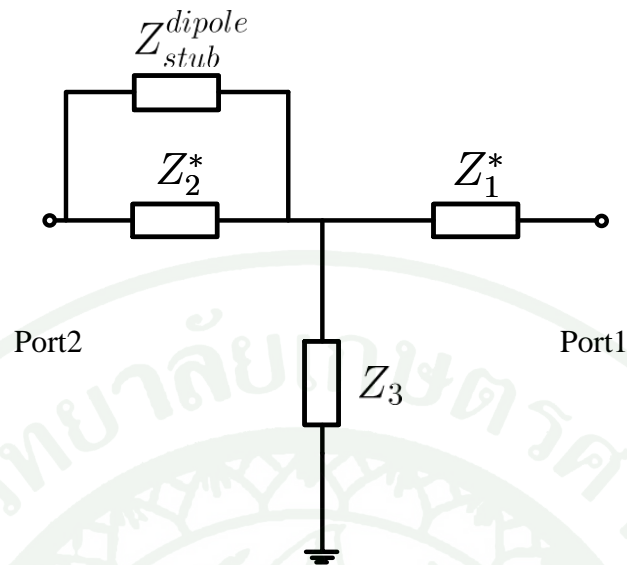
สายอากาศ	$L_1$ มิลลิเมตร	$L_2$ มิลลิเมตร	$L_3$ มิลลิเมตร	$W_1$ มิลลิเมตร	$S_1$ มิลลิเมตร	$S_2$ มิลลิเมตร
AntIV	73	19.5	47	0.5	2	62
AntIV	70	9.5	47	0.5	20.5	68
AntVI	70	21.5	44.5	3	2.5	70
AntVII	54	2.5	47	0.5	41	71
AntVIII	54	5	44.5	3	33.5	79
AntIX	38	3	47	0.5	42.5	71
AntX	38	6	44.5	3	36	71

การแมตช์สายอากาศโหมดไดโพลโดยใช้สตัปที่เกิดจากการนำสายอากาศโมนโพลมาต่อขนาน

โดยการออกแบบสายอากาศในโหมดไมโครสตริปนั้นเหมือนเดิมทุกประการ แต่เมื่อถึงตอนออกแบบสายอากาศในโหมดไดโพลนั้นจะเป็นการสร้างสตัปแล้วจะนำตัวสตัปนั้นมาต่อขนานแทน โดยวงจรสมมูลของสายอากาศในโหมดไดโพลที่ยังไม่ได้ใส่สตัปแสดงไว้ดังภาพที่ 19 และวงจรที่ใส่สตัปแล้วแสดงไว้ในภาพที่ 20



ภาพที่ 19 แสดงวงจรของสายอากาศในโหมดไดโพลที่ยังไม่ได้ใส่สตัป



ภาพที่ 20 แสดงวงจรของสายอากาศในโหมดไดโพลที่ใส่สตั๊บแล้ว

โดยวิธีการจำลองผลการทำงานจากโปรแกรม Sonnet นั้นจะตั้งพอร์ตด้านที่เป็นตัวแพทช์สายอากาศไว้ที่ 1 และตั้งพอร์ตอีกด้านที่เป็นตัวสายส่งที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในโหมดไมโครสตริปไว้ที่ 2 ซึ่งปกติแล้วในโหมดไมโครสตริปนั้นตอนที่ทำการจำลองผลการทำงานจะตั้งพอร์ตที่ 1 ในส่วนของแพทช์สายอากาศ และตั้งพอร์ตไว้ที่ -1 ไว้ตรงตำแหน่งที่เป็นตัวสายส่งที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่นในโหมดไมโครสตริป โดยผลลัพธ์ที่เป็นค่าอิมพีแดนซ์จะแสดงไว้ดังสมการที่ (38)

$$Z_{simulated}^{dipole} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (38)$$

จากนั้นจากวงจรของสายอากาศดังภาพที่ 19 จะมีตัวแปรอยู่ 4 ตัว คือ  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  และ  $Z_{ant}$  โดยที่  $Z_{ant}$  นั้นเป็นค่าอิมพีแดนซ์ของตัวสายอากาศสำหรับปายอาร์เอฟดีในโหมดไดโพล ซึ่งสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ของ  $Z_{simulated}^{dipole}$  ดังสมการที่ (39) ถึง (42)

$$Z_1 = Z_{11} - Z_{12} \quad (39)$$

$$Z_2 = Z_{22} - Z_{12} \quad (40)$$

$$Z_3 = Z_{12} = Z_{21} \quad (41)$$

$$Z_{ant} = Z_1 + Z_2 \quad (42)$$

จากนั้นนำผลการจำลองผลการทำงานที่เป็นค่าแอดมิตแตนซ์มาพิจารณา ซึ่งการหาสัดับในกรณีนี้จะแสดงเฉพาะ AntV, AntVI และ AntVII เท่านั้น เพื่อแสดงความแตกต่างทางด้านของค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ และทางด้านของขนาดแพทช์สายอากาศโดยค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งวิธีการนั้นเริ่มจากการหาค่าอิมพีแดนซ์ แสดงผลออกมาดังสมการที่ (38) ซึ่งได้ค่าอิมพีแดนซ์ออกมาดังตารางที่ 25 และแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของแต่ละพอร์ตไว้ในตารางที่ 26

ตารางที่ 25 แสดงค่า  $Z_{simulated}^{dipole}$  ของสายอากาศ AntV, AntVI และ AntVII

สายอากาศ	$Z_{11}$	$Z_{12}$	$Z_{21}$	$Z_{22}$
AntV	25.71+j398.36	8.825+j345.25	8.825+j345.25	60.88+j293.46
AntVI	54.89+j423.694	17.08+j329.54	17.08+j329.54	64.29+j267.30
AntVII	24.71+j419.93	20.30+j401.51	20.30+j401.51	53.55+j314.05

ตารางที่ 26 แสดงค่า  $Z_1, Z_2, Z_3$  และ  $Z_{ant}$  ของสายอากาศ AntV, AntVI และ AntVII

สายอากาศ	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_{ant}$
AntV	16.88+j53.11	52.055-j51.79	8.825+j345.25	68.940 +j1.320
AntVI	37.81+j94.15	47.210-j62.24	17.08+j329.54	85.020+j31.910
AntVII	4.410 +j18.42	33.250 -j87.46	20.30+j401.51	37.660-j69.040

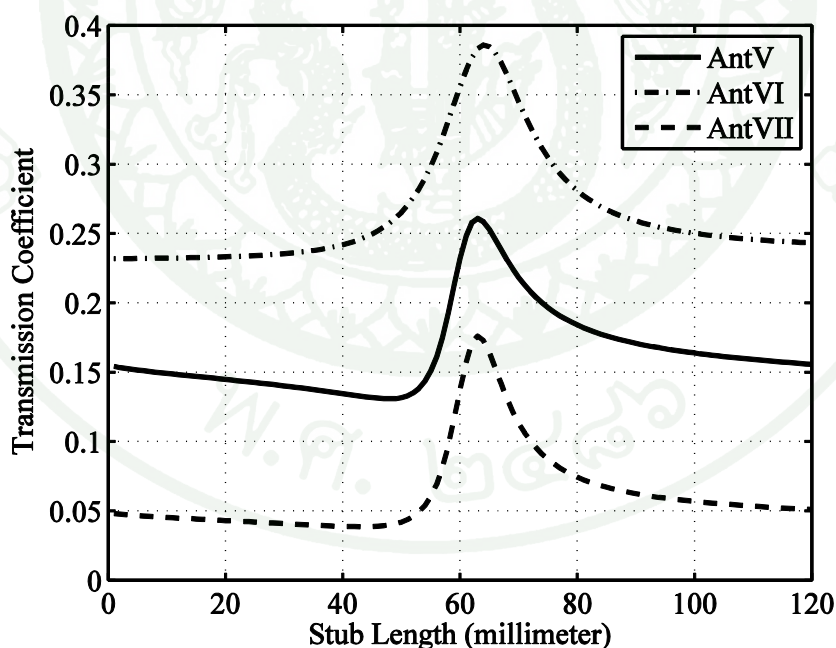
จากนั้นทำการสร้างสายอากาศไดโพลแบบธรรมดาที่มีความยาว  $S_2$  และ ความกว้าง  $W_1$  ซึ่งได้ค่าอิมพีแดนซ์ และนำค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลมาหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพลหรืออิมพีแดนซ์ของสัดับ ซึ่งผลลัพธ์จะแสดงออกมาเป็นกราฟโดยจะแบ่งตามค่า  $W_1$  ออกเป็นสองค่าตามค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ 100 โอห์ม และ 50 โอห์ม จากนั้นทำการจำลองผล

การทำงานหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลแบบธรรมดา และค่าอิมพีแดนซ์ของสตัปมีค่าดังสมการที่ (43)

$$Z_{stub}^{dipole} = \frac{Z_{antenna}^{dipole}}{2} \quad (43)$$

เมื่อ  $Z_{stub}^{dipole}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพลหรือสตัปที่นำไปต่อกับสายอากาศสำหรับปายอาร์เอฟไอดีและ  $Z_{antenna}^{dipole}$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์สตัปที่สร้างเป็นสายอากาศไดโพล

จากนั้นนำตัวสตัปมาต่อขนานในส่วนของพอร์ต 2 ดังภาพที่ 20 หาค่าอิมพีแดนซ์ที่ใส่สตัปแล้ว ซึ่งหมายความว่า จะต้องได้ค่า  $Z_2$  ใหม่ หรือ  $Z_2^*$  และนำ  $Z_2^*$  หาค่า  $Z_{ant}$  ใหม่ หรือ  $Z_{ant}^*$  จากนั้นนำค่า  $Z_{ant}^*$  หาค่าการส่งผ่านซึ่งผลของการส่งผ่านจะแสดงออกมาในรูปแบบกราฟดังภาพที่ 21 และแสดงออกมาในรูปของค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำให้ค่าการส่งผ่านสูงสุดพร้อมกับค่าการส่งผ่านดังตารางที่ 27

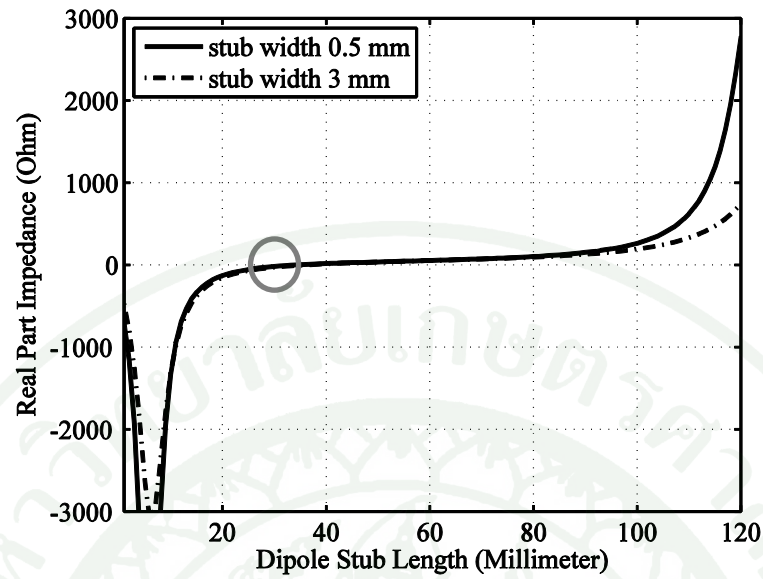


ภาพที่ 21 แสดงค่าการส่งผ่านของสายอากาศ AntV, AntVI และ AntVII ในระยะ  $S_2$  ต่างๆ

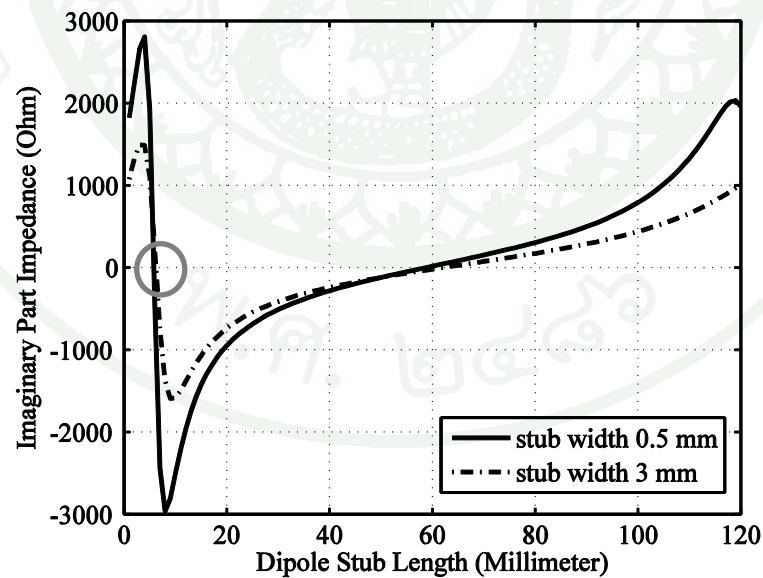
ตารางที่ 27 แสดงระยะ  $S_2$  ที่ให้ค่าการส่งผ่านที่ดีที่สุดพร้อมทั้งค่าการส่งผ่าน

สายอากาศ	$S_2$ มิลลิเมตร	ค่าการส่งผ่าน
AntV	63	0.2608
AntVI	64	0.3859
AntVII	63	0.1761

เมื่อเปรียบเทียบวิธีการหาระยะ  $S_2$  โดยเมื่อนำวิธีแรกมาเปรียบเทียบกับวิธีที่สองพบว่ามีความแตกต่าง 7 - 12 เปอร์เซ็นต์ และค่าการส่งผ่านวิธีแรกเปรียบเทียบกับวิธีที่สองพบว่ามีความแตกต่าง 47.07 - 61.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้งสองค่าแล้วพบว่าระยะ  $S_2$  ไม่ต่างกันเท่าไรนัก แต่ค่าการส่งผ่านนั้นต่างกันค่อนข้างมากเนื่องจากผลของค่า  $Z_2$  และ  $Z_3$  ที่ได้จากวิธีนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ผลของค่า  $Z_2$  และ  $Z_3$  ที่ได้จากผลการจำลองผลการทำงานเปลี่ยนแปลงตามค่า  $S_2$  แบบเดียวกับ  $Z_1$  ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีที่สองหรือวิธีที่ใช้สายอากาศโมนโพลมาต่อสายอากาศสำหรับปายอาร์เอฟไอได้นั้น ให้ค่าการส่งผ่านที่ต่ำกว่าวิธีที่หนึ่งหรือวิธีการใส่สตั๊ปและจำลองผลการทำงานโดยตรง ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงใช้วิธีที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ซึ่งออกแบบง่ายและให้ค่าการส่งผ่านที่สูงกว่า ซึ่งอาจจะเป็นเพราะตำแหน่งที่วางสตั๊ปอาจทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงได้ และนอกจากนั้นค่าอิมพีแดนซ์จากการจำลองผลการทำงานของของสายอากาศไดโพลนั้นที่จะใช้เป็นตัวสตั๊ปนั้น ค่าอิมพีแดนซ์ยังมีความผิดพลาดไปจากทฤษฎีอยู่ดังภาพที่ 22 และภาพที่ 23



ภาพที่ 22 แสดงค่าจริงของอิมพีแดนซ์ของสตับของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมดไดโพลที่ระยะเท่ากับ 1 ถึง 120 มิลลิเมตร



ภาพที่ 23 แสดงค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ของสตับของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมดไดโพลที่ระยะเท่ากับ 1 ถึง 120 มิลลิเมตร

เมื่อสายอากาศไดโพลในระยะที่สั้นมากมีค่าจริงของอิมพีแดนซ์ติดลบซึ่งความจริงนั้นค่าจริงของอิมพีแดนซ์ควรจะเป็นค่าบวกดังบริเวณที่วงกลมไว้ดังภาพที่ 22 และค่าจินตภาพเริ่มที่ค่าบวก ซึ่งความเป็นจริงสายอากาศไดโพลในระยะที่สั้นมากๆควรมีค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เป็นลบดังบริเวณที่วงกลมไว้ดังภาพที่ 23



## ผลและวิจารณ์

### ผล

#### ผลจากการจำลองผลการทำงาน

ผลจากการจำลองผลการทำงานของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีที่ออกแบบโดยใช้เทฟลอนเป็นฉนวน

สำหรับผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีที่ออกแบบโดยใช้เทฟลอนเป็นฉนวนนั้น จะแสดงสายอากาศ AntI, AntII และ AntIII ซึ่งจะแสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่าน และระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีเกิดจากการย้ายค่าพารามิเตอร์ของสมการการวัดของสายอากาศในสมการที่ (16) โดยจะแสดงระยะอ่านดังสมการที่ (44)

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_{t(abs)} G_{r(abs)}}{P_r}} \quad (44)$$

ซึ่งสมการที่ (44) นั้น  $P_r$  คือ ค่ากำลังงานของสายอากาศตัวรับโดยจะเขียนใหม่ในรูปของ  $P_{th}$  ส่วน  $G_{t(abs)}$  คืออัตราขยายสัมบูรณ์ของเครื่องอ่านป้ายอาร์เอฟไอดีซึ่งในกรณีนี้จะไม่คิดถึงความสูญเสียที่เกิดจากความไม่แม่นยำของค่าอิมพีแดนซ์ ดังนั้น  $G_{t(abs)} = G_t$  และ  $G_{r(abs)}$  คือ อัตราขยายของสัมบูรณ์สายอากาศ ซึ่งแสดงออกมาในรูปอัตราขยายดังสมการที่ (45)

$$G_{r(abs)} = \tau G_r \quad (45)$$

จากนั้นระยะอ่าน  $r$  ถูกเขียนขึ้นมาใหม่ดังสมการที่ (46)

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{EIRP G_r \tau}{P_{th}}} \quad (46)$$

โดยที่  $r$  คือ ระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นในหน่วยเมตร  $EIRP$  ( $EIRP$  หรือ Effective Isotropic Radiated Power) คือ ค่ากำลังที่ส่งออกจากสายอากาศตัวส่งโดยที่  $EIRP = P_t G_t$  หรือ ผลคูณระหว่างค่ากำลังงานทางไฟฟ้าของเครื่องวัดและอัตราขยายของเครื่องวัดมีค่าเท่ากับ 4 วัตต์  $G_r$  คือ อัตราขยายของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี  $T$  คือ ค่าการส่งผ่านหาได้จากสมการ (35)  $P_{th}$  คือ กำลังไฟฟ้าต่ำสุดที่กระตุ้นให้ชิพอาร์เอฟไอดีที่งานมีค่าเท่ากับ -15 dBm (NXP Semiconductor, 2011) ส่วนค่าพารามิเตอร์จากการจำลองผลการทำงานของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปแสดงไว้ในตารางที่ 28 และโหมดไดโพลแสดงไว้ในตารางที่ 29

ตารางที่ 28 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่าน และระยะอ่านของสายอากาศที่ใช้เทฟลอนเป็นชั้นสเตรททั้งหมดในโหมดไมโครสตริป

สายอากาศ	ค่าอิมพีแดนซ์ โอห์ม	ค่าอัตราขยาย dB	ค่าการส่งผ่าน	ระยะอ่าน เมตร
AntI	22.20+j161.9	5.2154	0.87	15.7
AntII	20.42+j160.8	5.7544	0.88	16.8
AntIII	17.31+j151.5	6.1277	0.89	18.5

ตารางที่ 29 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่าน และระยะอ่านของสายอากาศที่ใช้เทฟลอนเป็นชั้นสเตรททั้งหมดในโหมดไดโพล

สายอากาศ	ค่าอิมพีแดนซ์ โอห์ม	ค่าอัตราขยาย dB	ค่าการส่งผ่าน	ระยะอ่าน เมตร
AntI	105.1+j144.0	1.3736	0.46	7.3
AntII	64.9+j123.6	0.7412	0.59	7.6
AntIII	86.2+j131.6	1.7706	0.52	8.1

ผลจากการจำลองผลการทำงานของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีที่ออกแบบโดยใช้  
เอพอาร์โพร์เป็นชั้นสเตรท

สำหรับผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีที่ออกแบบโดย  
ใช้เอพอาร์โพร์เป็นชั้นสเตรทนั้น จะนำเสนอสายอากาศ AntVI, AntV, AntVI, AntVII, AntVIII,  
AntIX และ AntX ซึ่งจะแสดง ค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของ  
สายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี สำหรับค่าพารามิเตอร์จากการจำลองผลการทำงานของ  
สายอากาศในโหมดไมโครสตริปแสดงไว้ในตารางที่ 30 และโหมดโคโพลแสดงไว้ในตารางที่ 31

**ตารางที่ 30** แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่าน และระยะอ่านของสายอากาศที่ใช้  
เอพอาร์โพร์เป็นชั้นสเตรททั้งหมดในโหมดไมโครสตริป

สายอากาศ	ค่าอิมพีแดนซ์ โอห์ม	ค่าอัตราขยาย dB	ค่าการส่งผ่าน	ระยะอ่าน เมตร
AntIV	20.43+j163.6	-1.1031	0.82	7.4
AntV	11.60+j110.9	-2.0740	0.36	4.2
AntVI	15.48+j126.3	-1.1102	0.70	6.7
AntVII	9.951+j51.33	-8.2318	0.06	0.8
AntVIII	5.343+j43.80	-5.3811	0.04	0.9
AntIX	18.48+j54.61	-12.549	0.12	0.7
AntX	6.243+j38.96	-8.7654	0.03	0.5

ตารางที่ 31 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่าน และระยะอ่านของสายอากาศที่ใช้  
เอพอาร์โพร์เป็นชั้นสเตรททั้งหมดในโหมดไดโพล

สายอากาศ	ค่าอิมพีแดนซ์ โอห์ม	ค่าอัตราขยาย dB	ค่าการส่งผ่าน	ระยะอ่าน เมตร
AntIV	50.71+j147.9	1.6972	0.7291	9.5
AntV	50.22+j137.4	0.9939	0.6843	8.7
AntVI	58.98+j137.1	1.6194	0.66	9.4
AntVII	91.72+j81.993	1.0446	0.3708	6.3
AntVIII	88.26+j76.431	1.5079	0.3564	6.5
AntIX	108.4+j45.085	1.0767	0.2683	5.4
AntX	35.0+j10.677	1.4845	0.3708	6.6

จากตารางที่ 30 และ 31 จะเห็นความแตกต่างหลายค่า ซึ่งจะวิเคราะห์กันในแต่ละหัวข้อ โดยจะวิเคราะห์พารามิเตอร์ ค่าอิมพีแดนซ์พร้อมกับค่าการส่งผ่าน และ ค่าอัตราขยายในลำดับถัดไป

## วิเคราะห์ผลจากการจำลองผลการทำงานของค่าอิมพีแดนซ์พร้อมกับค่าการส่งผ่าน

วิเคราะห์ผลจากการจำลองผลการทำงานของค่าอิมพีแดนซ์พร้อมกับค่าการส่งผ่านใน  
โหมดไมโครสตริป

สำหรับการวิเคราะห์สายอากาศในโหมดไมโครสตริปนั้นจะเริ่มจากค่าแอดมิตแตนซ์ที่  
คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการจำลองผลการทำงานโดยค่าแอดมิตแตนซ์  $Y_{patch}^{match}$   
ดังตารางที่ 32 และ 33

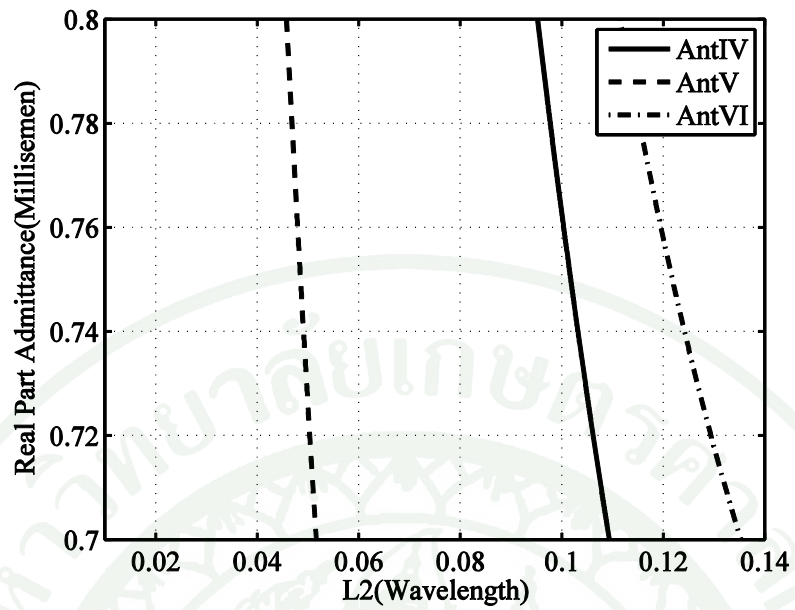
ตารางที่ 32 แสดงค่าแอดมิตแตนซ์และค่าการส่งผ่านของสายอากาศชั้นสเตรทเทฟอาร์โพร์  
ทั้งหมดในโหมดไมโครสตริปจากการคำนวณ

สายอากาศ	ค่าแอดมิตแตนซ์จากการจำลองผลการทำงาน มิลลิซีเมนต์	ค่าการส่งผ่าน
AntI	0.7317-j6.723	0.99
AntII	0.7315-j6.713	0.99
AntIII	0.7319-j6.723	0.99
AntIV	0.7318-j6.916	0.98
AntV	0.7315-j6.733	0.99
AntVI	0.7318-j6.739	0.99
AntVII	0.7327-j7.071	0.94
AntVIII	0.7305-j6.633	0.99
AntIX	0.7306-j6.912	0.98
AntX	0.7331-j6.788	0.99

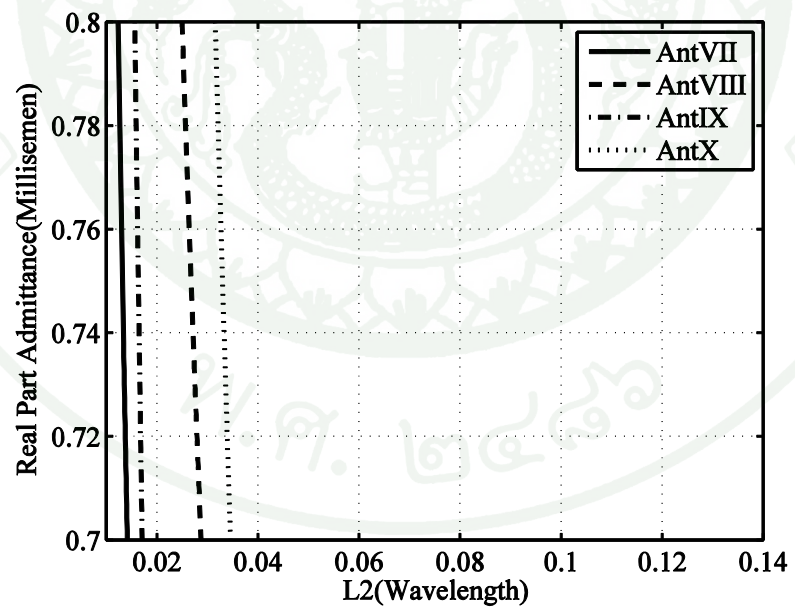
ตารางที่ 33 แสดงค่าแอดมิตแดนซ์และค่าการส่งผ่านของสายอากาศชนิดสเตรทเอพาร์โพร์ทั้งหมดในโหมดไมโครสตริปจากการจำลองผลการทำงาน

สายอากาศ	ค่าแอดมิตแดนซ์จากการจำลองผลการทำงาน มิลลิซีเมนต์	ค่าการส่งผ่าน
AntI	0.8313-j6.062	0.87
AntII	0.7772-j6.120	0.88
AntIII	0.7445-j6.515	0.89
AntIV	0.7516-j6.018	0.82
AntV	0.9330-j8.919	0.36
AntVI	0.9561-j7.800	0.70
AntVII	3.6400-j18.77	0.06
AntVIII	2.7442-j22.49	0.04
AntIX	5.5600-j16.43	0.12
AntX	4.0100-j25.02	0.03

จากข้อมูลตารางที่ 32 และ 33 พบว่าค่าแอดมิตแดนซ์จากการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntI, AntII, AntIII, AntIV และ AntVI มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่คำนวณไว้ ส่วนที่เหลือมีค่าอิมพีแดนซ์ค่อนข้างแตกต่างเนื่องจากค่าการส่งผ่านนั้นต่ำกว่า 0.5 จากข้อมูลตารางที่ 33 ค่าจริงของแอดมิตแดนซ์ยังคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้น่าจะมาจาก  $L_2$  เพราะว่าจากขั้นตอนการออกแบบสายอากาศพบว่าการปรับขนาด  $L_2$  นั้นมีผลให้ค่าจริงของแอดมิตแดนซ์เปลี่ยนแปลงได้ และเมื่อค่าจริงของแอดมิตแดนซ์เปลี่ยนแปลงค่าจินตภาพของแอดมิตแดนซ์ก็จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่วนจะเปลี่ยนแปลงมากน้อยหรือไม่จำเป็นต้องพิจารณาที่ความชันของกราฟที่แสดงระหว่างค่าจริงของแอดมิตแดนซ์ในช่วง 0.7 - 0.8 มิลลิซีเมนต์ กับ  $L_2$  ในหน่วยความยาวคลื่นหรือ  $L_2$  ดังภาพที่ 24 และ 25



ภาพที่ 24 แสดงส่วนจริงของค่าแอดมิทแตนซ์เมื่อใส่สายส่งที่มีความยาว  $L_2$  ในหน่วยความยาวคลื่นของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI



ภาพที่ 25 แสดงส่วนจริงของค่าแอดมิทแตนซ์เมื่อใส่สายส่งที่มีความยาว  $L_2$  ในหน่วยความยาวคลื่นของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX

จากภาพที่ 24 พบว่าสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI จะจัดอยู่ในกลุ่มของสายอากาศที่มีขนาดแพทช์เป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งจากค่าการส่งผ่านของสายอากาศกลุ่มนี้พบว่าสายอากาศ AntV มีค่าการส่งผ่านน้อยที่สุดเมื่อสังเกตจากเส้นกราฟจะพบว่า AntV นั้นจะมีเส้นของค่าแอดมิทแตนซ์ เทียบกับความยาวในหน่วยความยาวคลื่นเกือบขนานกับแกน y มากกว่า AntIV และ AntVI หมายความว่าเมื่อปรับค่า  $L_2$  ในระยะที่เท่ากันค่าแอดมิทแตนซ์ที่ขนานกับแกน y ยิ่งมากค่าแอดมิทแตนซ์ก็จะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ซึ่งหมายถึงค่าแอดมิทแตนซ์จากการคำนวณมีโอกาสคลาดเคลื่อนไปจากผลการจำลองผลการทำงานมากขึ้นด้วย

จากภาพที่ 25 พบว่าส่วนที่เป็นสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX นั้นเป็นกลุ่มของสายอากาศที่มีขนาดแพทช์น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น จะมีเส้นของค่าแอดมิทแตนซ์ เทียบกับความยาวในหน่วยความยาวคลื่นเกือบขนานกับแกน y มากกว่ากลุ่มของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI ดังนั้นค่าการส่งผ่านของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX จึงมีค่าน้อยกว่ากลุ่มสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของค่า  $L_2$  ที่ในระยะที่เท่ากันมากกว่านั่นเอง

วิเคราะห์ผลจากการจำลองผลการทำงานของค่าอิมพีแดนซ์พร้อมกับค่าการส่งผ่านใน โหมดไดโพล

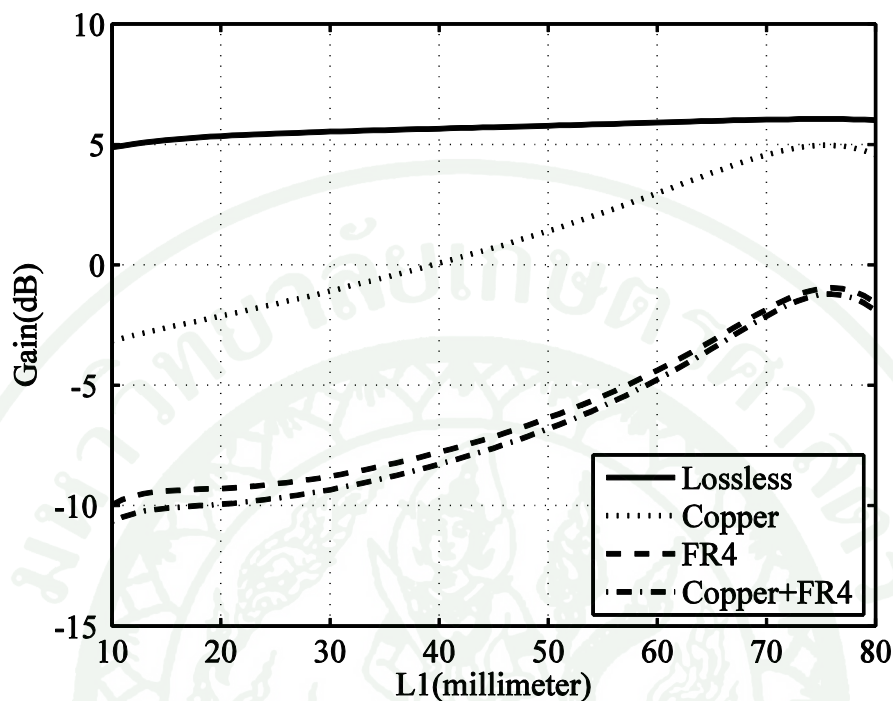
สำหรับการออกแบบสายอากาศในโหมดไดโพลนั้นพบว่าการแมตซ์ค่าอิมพีแดนซ์สำหรับวิธีการที่งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอนี้พบว่าค่าอิมพีแดนซ์ไม่สามารถแมตซ์ได้อย่างสมบูรณ์ เพราะส่วนประกอบส่วนใหญ่จะ ใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์หรือค่าแอดมิทแตนซ์ใน โหมดไมโครสตริปมากกว่าและสลับ  $S_2$  นั้นสามารถทำให้สายอากาศแมตซ์ขึ้นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น อีกส่วนหนึ่งที่สามารถแสดงให้เห็นวิเคราะห์ความแตกต่างได้คือ ค่าจินตภาพของแอดมิทแตนซ์ซึ่งสามารถปรับได้ตามความยาวของสายอากาศไดโพลในหน่วยความยาวคลื่น (Balanis, 2005) ดังนั้นความยาวผลรวมของความยาว  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  และ  $G_1$  จึงมีผลต่อค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดไดโพลด้วย เมื่อตรวจสอบสายอากาศที่ใช้เฟดอาร์โพรเป็นชั้นสเตรทนั้นพบว่า AntIV, AntV และ AntVI นั้นจะมีค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์อยู่ในช่วง j137 ถึง j147 โอห์ม ซึ่งใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับค่าคอนจูเกตอิมพีแดนซ์ของชิพมาก ส่วน AntVII และ AntVIII นั้นจะมีค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์อยู่ในช่วง j75 ถึง j82 โอห์ม ซึ่งใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับค่าคอนจูเกตอิมพีแดนซ์ของชิพรองลงมา และส่วน AntIX และ AntX นั้นจะมีค่าจินตภาพของ

อิมพีแดนซ์อยู่ในช่วง  $j10$  ถึง  $j45$  โอห์ม ซึ่งค่อนข้างต่างกันแต่ก็จัดว่าอยู่ในบริเวณค่าอิมพีแดนซ์บริเวณเดียวกัน สาเหตุอาจเกิดจากช่วงระยะความยาวผลรวมของความยาว  $L_1, L_2, L_3$  และ  $G_1$  อาจเป็นช่วงที่ทำให้ค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงเร็ว ซึ่งสายอากาศกลุ่มนี้จะแมตช์ได้น้อยที่สุด

สำหรับสาเหตุที่สายอากาศในโหมดไดโพลยังสามารถใช้งานได้นั้น เนื่องมาจากค่าอัตราขยาย จะพบว่าค่าอัตราขยายของสายอากาศในโหมดไดโพลทั้งวัสดุเฟลอน และวัสดุเอพาร์โพร์มีค่าระหว่าง  $0.99 - 1.7$  dB ซึ่งค่าอัตราขยายจะใกล้เคียงกันจากทั้งสองวัสดุ สันนิษฐานได้ว่าค่าการสูญเสียในชั้นสเตรทไม่มีผลกับสายอากาศในโหมดไดโพล ดังนั้นระยะอ่านจึงขึ้นอยู่กับการแมตช์ของค่าอิมพีแดนซ์เท่านั้น

วิเคราะห์ผลจากการจำลองผลการทำงานของค่าอัตราขยายของสายอากาศในโหมดไมโครสตริป

จากข้อมูลผลการจำลองผลการทำงานเรื่องอัตราขยายโหมดไมโครสตริปที่ใช้ชั้นสเตรทเอพาร์โพร์ของสายอากาศจากรายที่ 30 พบว่าอัตราขยายของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปอยู่ระหว่าง  $-1$  ถึง  $-9$  dB ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเยอะมากจนสายอากาศบางตัวนั้นมีอัตราขยายที่ต่ำเกินไปจึงอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ระยะการอ่านของสายอากาศสั้นได้ ส่วนสายอากาศในโหมดไดโพลนั้นค่าอัตราขยายไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงพิจารณาในส่วนของอัตราขยายเฉพาะสายอากาศที่เป็นโหมดไมโครสตริปเท่านั้น ซึ่งสำหรับการพิจารณาสายอากาศโหมดไมโครสตริปนั้นจะพิจารณาสองเงื่อนไขและแบ่งออกเป็นสี่กรณี คือพิจารณาในเรื่องของตัวชั้นสเตรทและพิจารณาในเรื่องของขนาดแพทช์หรือขนาด  $L_1$  โดยก่อนที่จะพิจารณาเงื่อนไขที่กล่าวไปข้างต้นนั้น ทำการสร้างสายอากาศไมโครสตริปที่มีชั้นสเตรทและแผ่นโลหะตามที่กำหนดลงในโปรแกรม Sonnet และปรับขนาด  $L_1$  ในช่วง  $10 - 80$  มิลลิเมตร โดยมีเงื่อนไขต่างกันสี่กรณี คือ ใช้โลหะที่มีค่าความนำเป็นอนันต์ และใช้แผ่นชั้นสเตรทที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0$  ใช้ทองแดงเป็นโลหะ และใช้แผ่นชั้นสเตรทที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0$  โลหะที่มีค่าความนำเป็นอนันต์ และใช้แผ่นชั้นสเตรทที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0.02$  กับใช้ทองแดงเป็นโลหะ และใช้แผ่นชั้นสเตรทที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0.02$  ซึ่งได้ข้อมูลทั้งหมดดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แสดงอัตราขยายเปรียบเทียบกับขนาดของแพทช์สายอากาศโหมดไมโครสตริปทั้งสี่กรณี คือกรณีที่หนึ่งใช้โลหะที่มีค่าความนำเป็นอนันต์ และใช้แผ่นซับสเตรตที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0$  (กรณี Lossless) กรณีที่สองใช้ทองแดงเป็นโลหะ และใช้แผ่นซับสเตรตที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0$  (กรณี Copper) กรณีที่สามใช้โลหะที่มีค่าความนำเป็นอนันต์ และใช้แผ่นซับสเตรตที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0.02$  กับใช้ทองแดงเป็นโลหะ (กรณี FR4) และกรณีที่สี่ใช้แผ่นซับสเตรตที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0.02$  (กรณี Copper + FR4)

จากภาพที่ 26 นั้นสรุปได้ว่าชนิดโลหะ และชนิดซับสเตรตมีผลกับอัตราขยายโดยตรง สำหรับขนาด  $L_1$  นั้นพบว่าในกรณีที่ใช้โลหะที่มีค่าความนำของโลหะเป็นอนันต์ และใช้แผ่นซับสเตรตที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0$  (กรณี Lossless) นั้นอัตราขยายไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปตามค่า  $L_1$  มากนัก ส่วนกรณีที่เหลือนั้นอัตราขยายนั้นจะค่อยๆเพิ่มจนได้ประมาณความยาวตามสมการที่ (23) ค่าอัตราขยายจะมีค่าสูงสุด เมื่อค่า  $L_1$  เกินจากการคำนวณสมการที่ (23) ซึ่งอยู่ที่ 76 มิลลิเมตร อัตราขยายจะค่อยๆลดลง ดังนั้น AntIV, AntV และ AntVI จึงมีอัตราขยายสูงกว่า AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในกรณีที่ ใช้ทองแดงเป็นโลหะและใช้แผ่นซับสเตรตที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0$  (กรณี Copper) และกรณีที่ใช้แผ่นซับสเตรตที่มี  $\epsilon_r = 4.4$  และ  $\tan\delta = 0.02$

กับใช้ทองแดงเป็นโลหะ (กรณี Copper + FR4) นั้นพบว่า ค่า  $\tan\delta$  หรือค่าความสูญเสียบนแผ่น ชั้นสเตรทที่มีผลต่ออัตราขยายมาก ดังนั้นชั้นสเตรทเทฟลอนซึ่งมีค่า  $\tan\delta = 0.0009$  จึงอาจจะมีค่า อัตราขยายสูงกว่าเอพาร์โฟร์ซึ่งมีค่า  $\tan\delta = 0.02$  ดังกรณี AntI, AntII และ AntIII ที่มีค่า อัตราขยายสูงกว่า AntIV, AntV และ AntVI นั่นเอง

### การสร้างอุปกรณ์จริง

สำหรับการสร้างสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นจะสร้างสายอากาศในส่วนที่เป็น ชั้นสเตรทเอพาร์โฟร์ หรือ AntIV, AntV, AntVI, AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX ส่วนที่เหลือ หรือที่ใช้ชั้นสเตรทเทฟลอนนั้นไม่สร้างเนื่องจากว่าวัสดุจริงหายากและราคาสูง ส่วนเอพาร์โฟร์ นั้นสามารถหาได้ตามท้องตลาดทั่วไป ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงนำสายอากาศที่ทำจากชั้นสเตรท เอพาร์โฟร์เท่านั้นมาสร้างเป็นสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีของจริง

สำหรับสายอากาศที่ทำการออกแบบไว้ ก่อนที่จะนำสายอากาศไปสร้างอุปกรณ์จริงพบว่า ช่วงสลับ  $S_2$  จะเกินช่วงของแพทช์ซึ่งจะทำให้ความกว้างของสายอากาศมากจนเกินไปของ สายอากาศ AntIV, AntV, AntVI, AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX ส่วน  $S_1$  จะเกินช่วงของ ขนาดแพทช์ซึ่งจะทำให้ความกว้างของสายอากาศโดยรวมมากจนเกินไปของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX ดังนั้นจึงต้องทำการหักสลับ  $S_2$  ของสายอากาศ AntIV, AntV, AntVI, AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX และสลับ  $S_1$  ของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX เพื่อเป็นการประหยัดเนื้อที่ไม่ให้ใหญ่มากจนเกินไปซึ่งวิธีการนั้นจะนำเสนอลำดับถัดไป

### การหักสลับ

การหักสลับนั้นมีจุดประสงค์เพื่อประหยัดเนื้อที่ของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี โดยเริ่มหักสลับ  $S_1$  ของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX ก่อนเพื่อหาค่า แอดมิตแตนซ์ในโหมดไมโครสตริป โดยเมื่อหักสลับสำเร็จแล้วก็จะได้สลับ  $S_1^{new}$  และ  $S_4$  ซึ่งในตอนแรกจะได้  $S_1^{new}$  ใหม่ที่ทำให้สายอากาศมีความกว้างน้อยที่สุดดังตารางที่ 34

ตารางที่ 34 แสดงระยะ  $S_1^{new}$  ที่เหมาะกับขนาดของแพทช์สายอากาศจากการหักสลับ  $S_1$

สายอากาศ	$S_1^{new}$ มิลลิเมตร
AntVII	26.75
AntVIII	25.50
AntIX	18.75
AntX	17.50

จากนั้นทดลองสร้าง  $S_4$  และทำการจำลองผลการทำงานในช่วง  $S_1 - S_1^{new} - 4$  และ  $S_1 - S_1^{new} + 4$  เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำให้ค่าการส่งผ่านดีที่สุด ซึ่งจะได้ค่า  $S_4$  ดังตารางที่ 35

ตารางที่ 35 แสดงระยะ  $S_4$ , อิมพีแดนซ์ที่ทำให้ค่าการส่งผ่านสูงสุด และค่าการส่งผ่าน

สายอากาศ	$S_4$ มิลลิเมตร	$S_1$ มิลลิเมตร	$S_1^{new} + S_4$ มิลลิเมตร	อิมพีแดนซ์ โอห์ม	ค่าการ ส่งผ่าน
AntVII	16	41	42.75	34.861+j79.14	0.3102
AntVIII	12	33.5	37.5	93.130+j115.91	0.4629
AntIX	25	42.5	43.75	53.180+j70.464	0.3198
AntX	22	36	39.5	91.909+j81.376	0.3688

จากนั้นเริ่มหักสลับ  $S_2$  ของสายอากาศ AntIV, AntV, AntVI, AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX และหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในโหมดไดโพล โดยเมื่อหักสลับสำเร็จแล้วจะได้สลับ  $S_2^{new}$  และ  $S_4$  ซึ่งในตอนแรกจะได้  $S_2^{new}$  ใหม่ที่ทำให้สายอากาศมีความกว้างน้อยที่สุดดังตารางที่ 36

ตารางที่ 36 แสดงระยะ  $S_2^{new}$  ที่เหมาะกับขนาดของแพทช์สายอากาศจากการหักสลับ  $S_2$

สายอากาศ	$S_2^{new}$
AntIV	36.25
AntV	34.75
AntVI	33.50
AntVII	26.75
AntVIII	25.50
AntIX	18.75
AntX	17.5

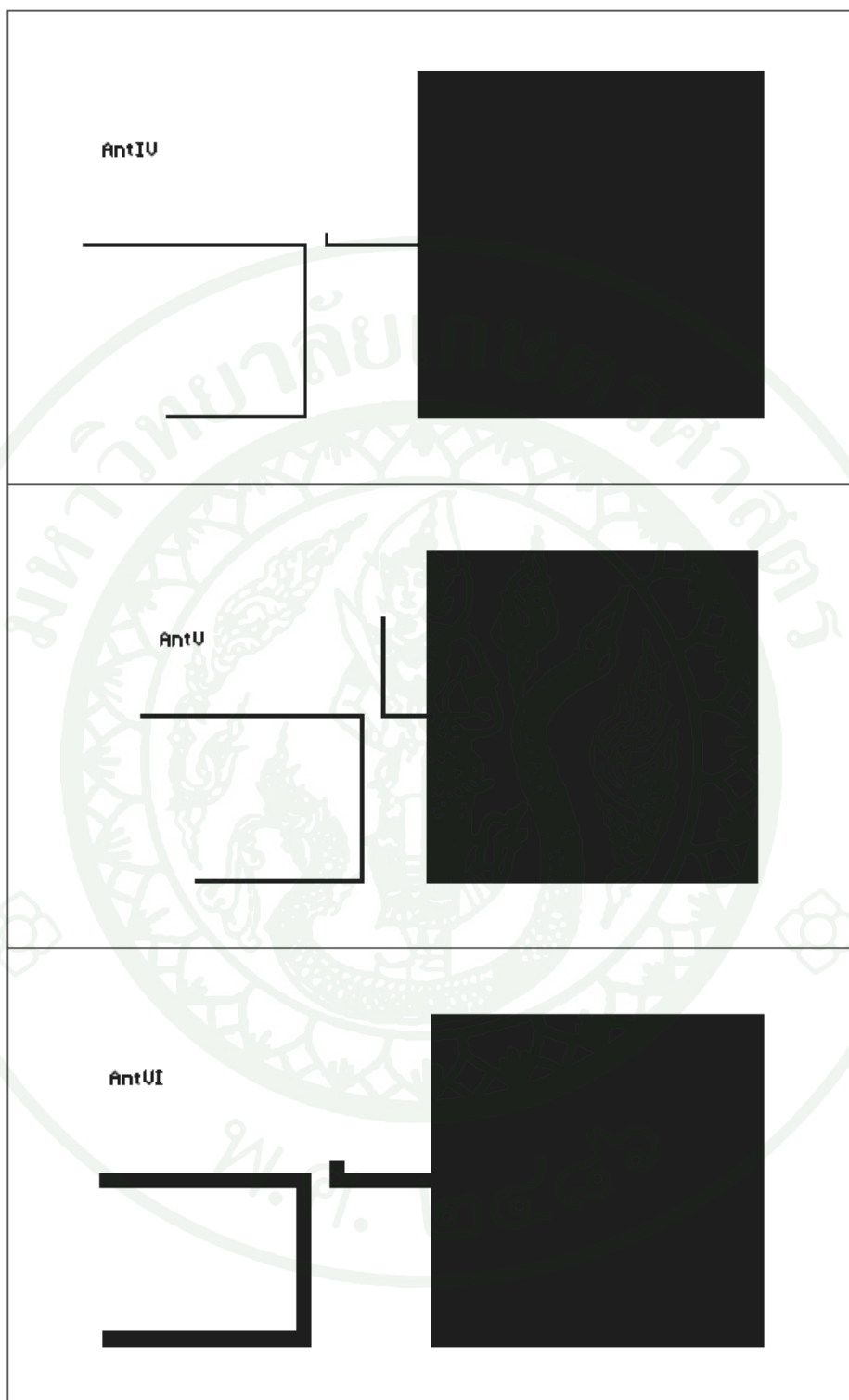
จากนั้นทดลองสร้าง  $S_3$  และทำการจำลองผลการทำงานในช่วง  $S_2 - S_2^{new} - 4$  และ  $S_2 - S_2^{new} + 4$  เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ทำให้ค่าการส่งผ่านดีที่สุด ซึ่งจะได้อิมพีแดนซ์ดังตารางที่ 37

ตารางที่ 37 แสดงระยะ  $S_3$ , อิมพีแดนซ์ที่ทำให้ค่าการส่งผ่านสูงสุด และค่าการส่งผ่าน

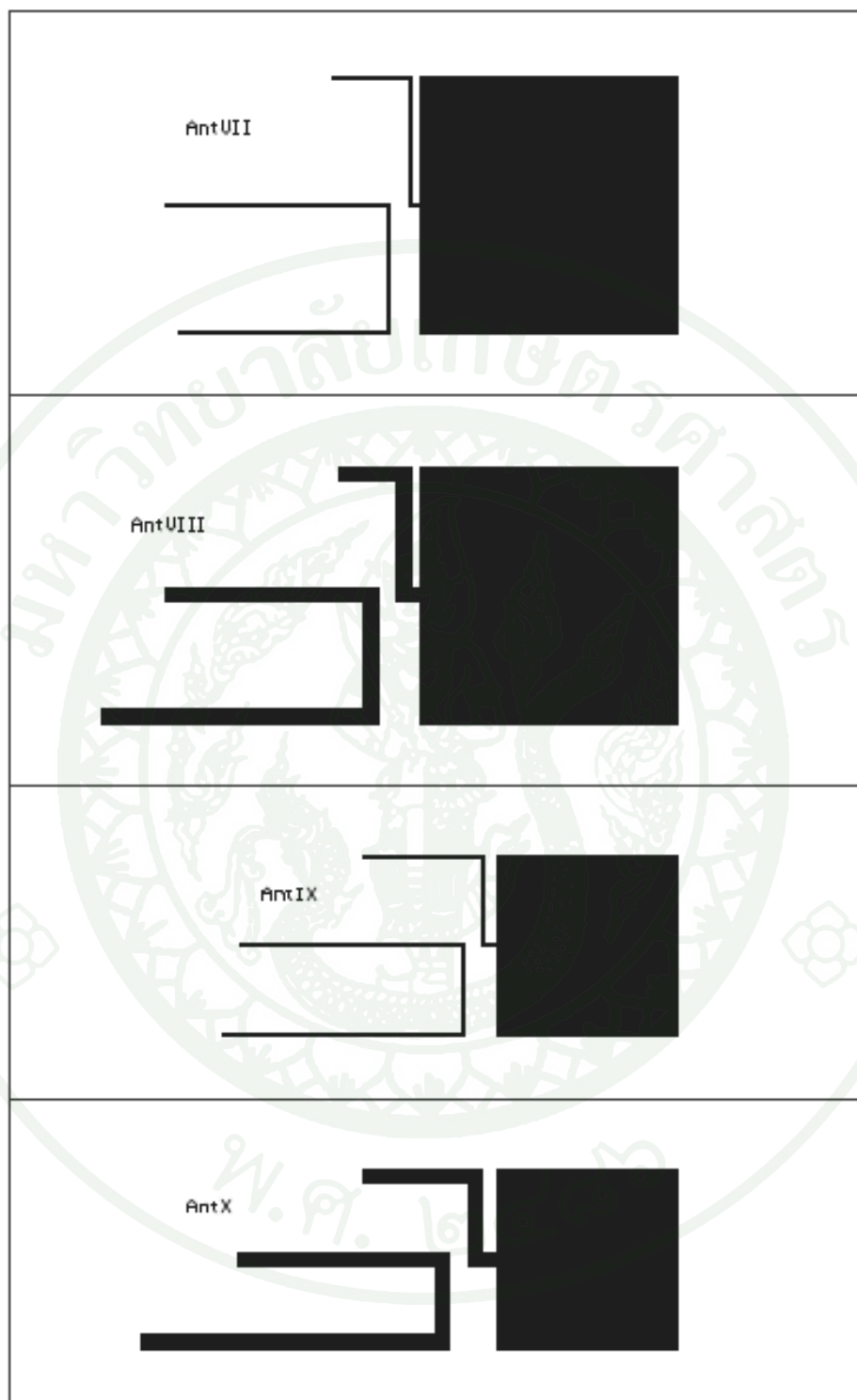
สายอากาศ	$S_3$ มิลลิเมตร	$S_2$ มิลลิเมตร	$S_2^{new} + S_3$ มิลลิเมตร	อิมพีแดนซ์ โอห์ม	ค่าการส่งผ่าน
AntIV	29	62	65.25	59.150+j145.76	0.6701
AntV	35	68	69.75	60.124+j123.74	0.6073
AntVI	41	70	74.5	77.637+j131.72	0.5520
AntVII	44	71	70.75	88.812+j157.39	0.5124
AntVIII	55	79	80.5	103.60+j107.87	0.4187
AntIX	50	71	68.75	91.605+j91.345	0.3995
AntX	53.5	71	71	99.278+j98.394	0.4060

ซึ่งเมื่อทำการหักตัวสตั๊บเพื่อลดขนาดของสายอากาศสำหรับปียอาร์เอฟไอดีนั้นค่าก่อนหักกับหลังหัก  $S_1^{new} + S_4$  เปรียบเทียบกับ  $S_1$  และค่า  $S_2^{new} + S_3$  เปรียบเทียบกับ  $S_2$  นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และจากนั้นนำสายอากาศที่ได้มาสร้างเป็นอุปกรณ์จริง โดยแสดงภาพสายอากาศก่อนนำไปทำอุปกรณ์จริงดังภาพที่ 27 และภาพที่ 28 และสายอากาศจริงที่จะนำไปวัดระยะอ่านดังภาพที่ 29 และภาพที่ 30

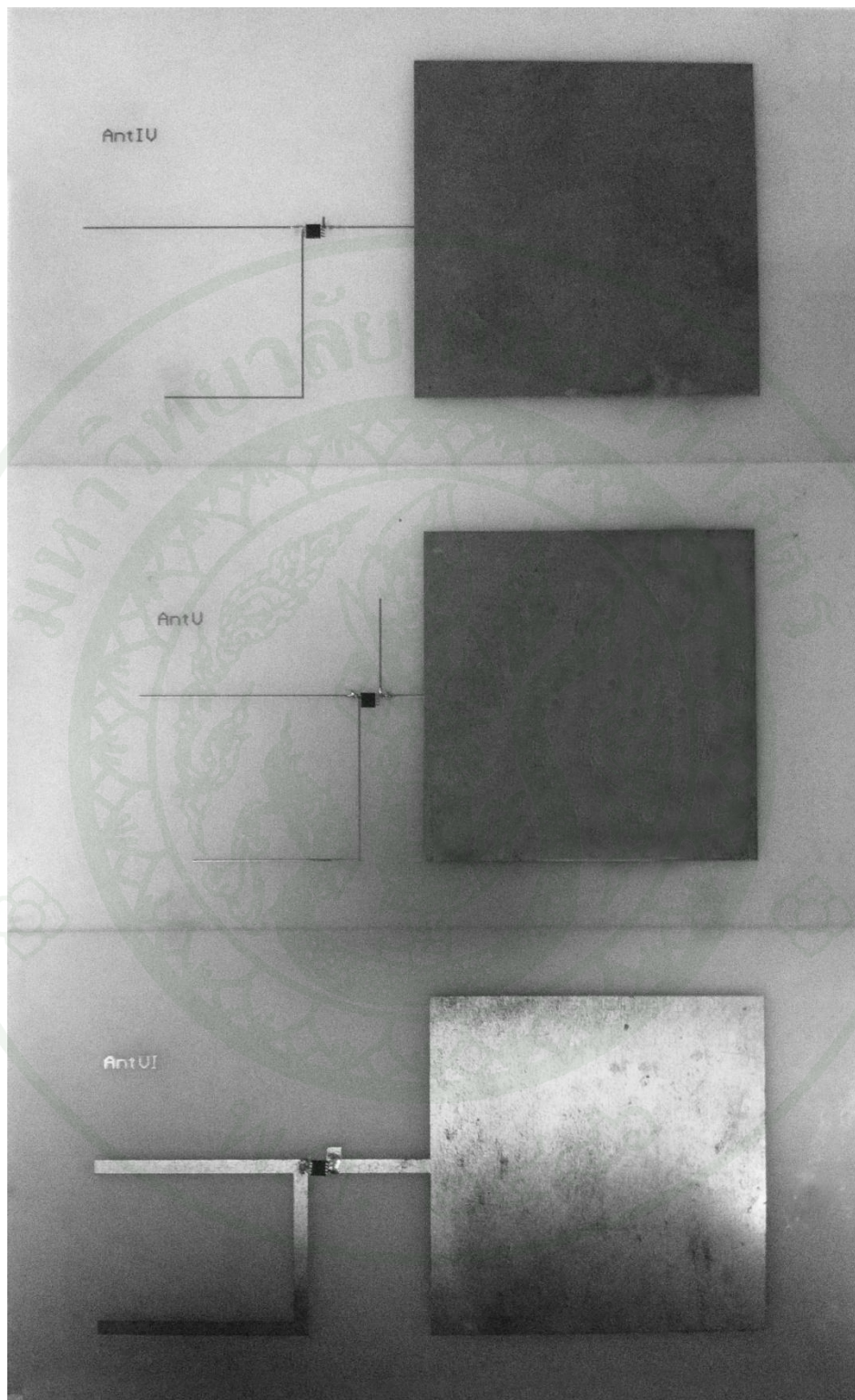




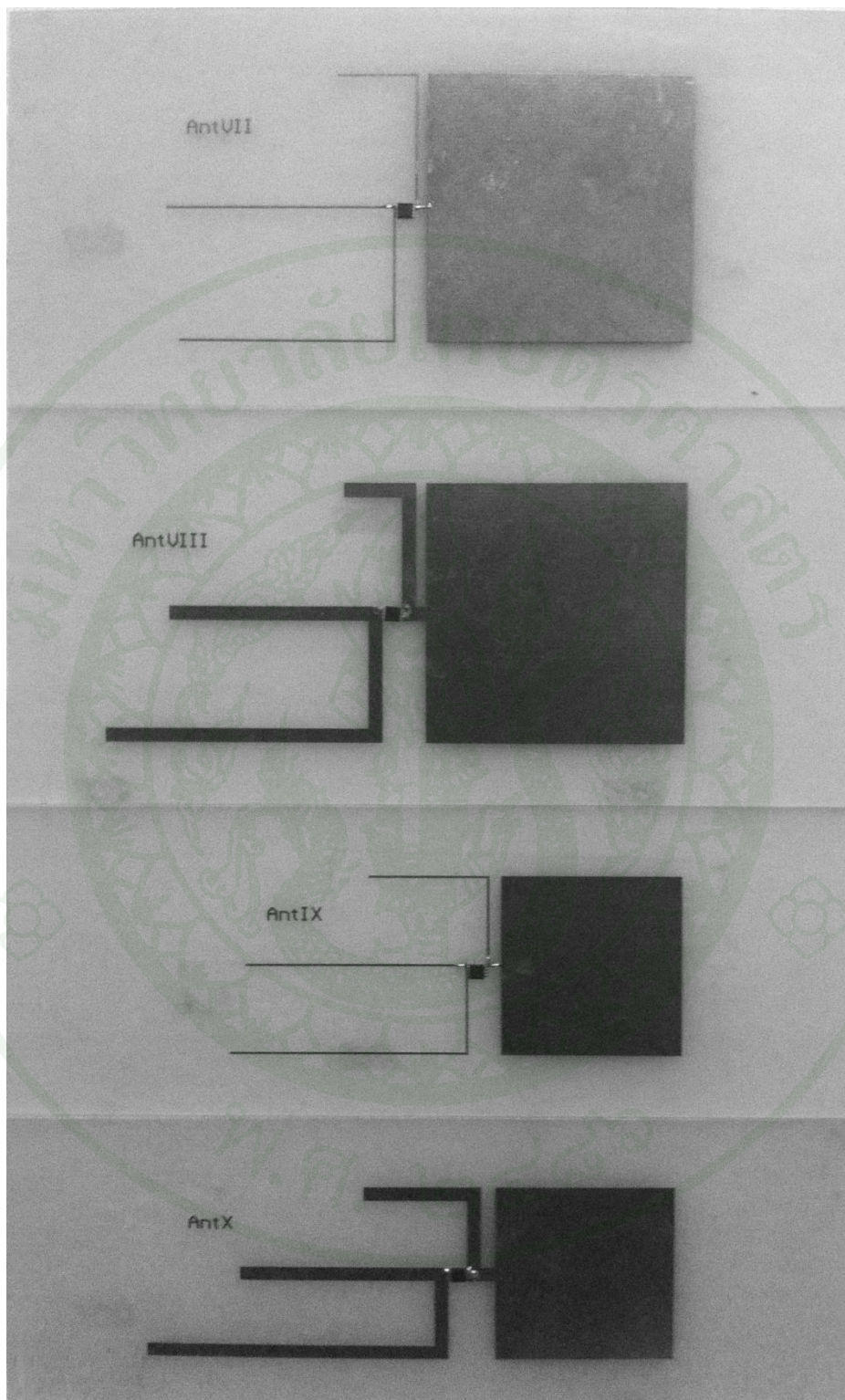
ภาพที่ 27 แสดงสายอากาศก่อนนำไปทำอุปกรณ์จริงของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI



ภาพที่ 28 แสดงสายอากาศก่อนนำไปทำอุปกรณ์จริงของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX



ภาพที่ 29 แสดงสายอากาศจริงที่จะนำไปวัดระยะอ่านของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI



ภาพที่ 30 แสดงสายอากาศจริงที่จะนำไปวัดระยะอ่านของสายอากาศ AntVII, AntVIII, AntIX และ AntX

### การวัดระยะอ่านและการเปรียบเทียบ

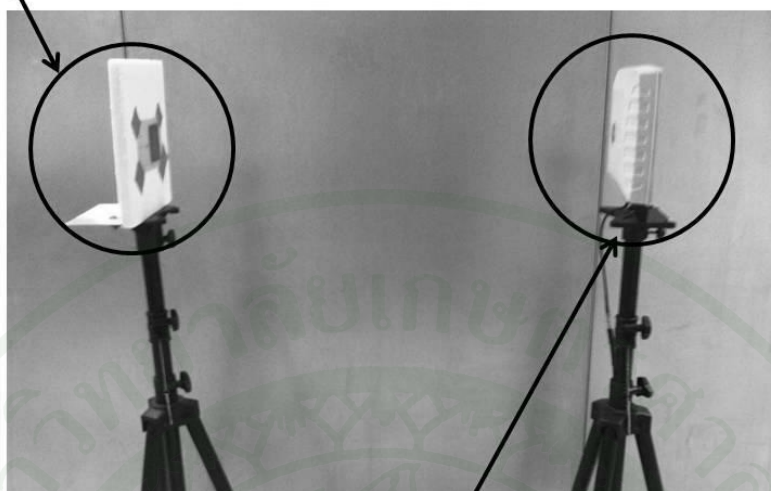
เมื่อตรวจสอบผลของระยะอ่านสำเร็จแล้ว จากนั้นทำการสร้างสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี และวัดระยะอ่านโดยใช้เครื่องวัดระยะอ่านอาร์เอฟไอดี ซึ่งเครื่องวัดระยะอ่านนี้จะใช้เครื่องอ่านของบริษัท Austriamicrosystem รุ่น AS3990 โดยจะมีค่ากำลัง (Power) และอัตราขยาย (Gain) ต่างจากที่กำหนดไว้ตอนต้นดังนั้นหลังจากการวัดระยะวัดของตัวสายอากาศ สำหรับวิธีการวัดระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นจะเป็นการลดทอนกำลัง โดยตั้งระยะอ่านคงที่และปรับระยะอ่านใหม่ดังสมการที่ (47)

$$r_{measured}^{real} = r_{measured} \sqrt{\frac{EIRP}{P_{min}G_t}} \quad (47)$$

โดยที่  $r_{measured}^{real}$  คือ ระยะอ่านที่ผ่านการปรับค่ากำลังงาน  $EIRP$  ให้มีค่าเท่ากับ 4 วัตต์ และ  $r_{measured}$  คือ ระยะระหว่างป้ายอาร์เอฟไอดีกับสายอากาศของเครื่องอ่าน และกำลัง  $P_{min}$  ซึ่งเป็นกำลังงานที่น้อยที่สุดของเครื่องอ่านป้ายอาร์เอฟไอดีที่ทำให้ป้ายอาร์เอฟไอดีรับสัญญาณจากเครื่องอ่านได้ และ  $G_t$  คือ อัตราขยายของเครื่องอ่านซึ่ง (ศศิวิมล, 2553) ได้ทำการทดลองพบว่า  $G_t$  มีค่าเท่ากับ 3 dB

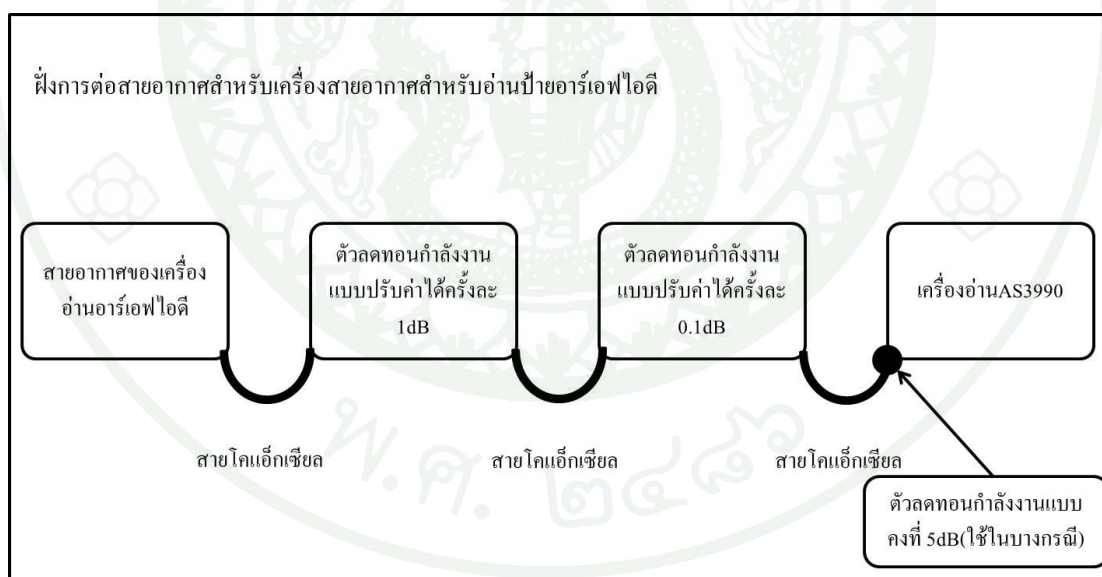
ในการติดตั้งอุปกรณ์การวัดสายอากาศนั้นจะติดตั้งตัวสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีดังภาพที่ 31 ซึ่งจะมี 2 ฟัง คือ ฟังของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีที่ติดตั้งสำหรับการวัดซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายของภาพ และฟังของสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีซึ่งอยู่ทางด้านขวา โดยฟังของสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้นจะติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดคือ สายโคแอกเซียล สายอากาศสำหรับเครื่องอ่านป้ายอาร์เอฟไอดี ตัวลดทอนกำลังงานแบบปรับค่าได้ครั้งละ 1 dB ตัวลดทอนกำลังงานแบบปรับค่าได้ครั้งละ 0.1 dB ในบางกรณีจะใช้ตัวลดทอนกำลังงานแบบคงที่ 5 dB ด้วย ซึ่งทั้งระบบจะลดทอนกำลังงานได้มากที่สุด 15 dB และตัวประมวลผลหรือเครื่องอ่าน AS3990 ซึ่งการต่ออุปกรณ์ทั้งหมดจะแสดงไว้ดังภาพที่

ฝั่งของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีที่ติดตั้งสำหรับการวัด



ฝั่งของสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี

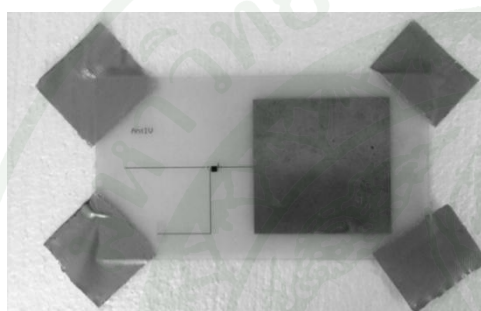
ภาพที่ 31 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การวัดระยะอ่านของป้ายอาร์เอฟไอดี



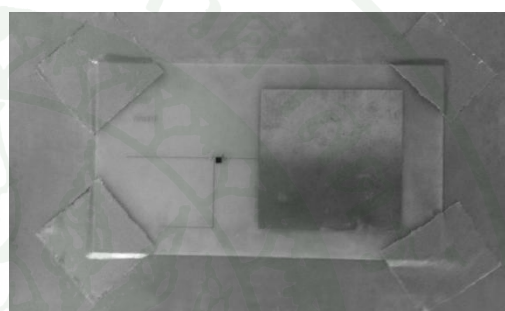
ภาพที่ 32 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์การวัดป้ายอาร์เอฟไอดีในส่วนของเครื่องอ่าน

ในส่วนฝั่งซ้ายของภาพที่ 31 จะเป็นส่วนของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีที่ติดตั้งสำหรับการวัดนั้น จะทำการติดสายอากาศบนแผ่นโฟมและแผ่นทองแดง โดยกรณีที่สายอากาศติดกับแผ่นโฟมนั้นสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีจะเป็นสายอากาศไดโพล ส่วนกรณีที่สายอากาศ

ติดกับแผ่นทองแดงนั้นสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีจะเป็นสายอากาศไมโครสตริปดังภาพที่ 33 นอกจากนั้นสำหรับกรณีที่สายอากาศติดกับทองแดงในการทดลองวัดจริงครั้งนี้ นอกจากจะต้องติดเทปกาวด้านล่างระหว่างชั้นทองแดงและตัวสายอากาศแล้ว ยังมีอีกกรณีหนึ่งคือติดสายอากาศเฉพาะตรงมุมของตัวสายอากาศเท่านั้น ซึ่งเปรียบเสมือนว่าระหว่างชั้นของตัวซับสเตรทกับแผ่นทองแดงนั้นเป็นอากาศโดยจะแสดงภาพสายอากาศกรณีนี้ที่ติดเทปตรงชั้นด้านล่างดังภาพที่ 34 และไม่ติดเทปตรงชั้นด้านล่างของสายอากาศดังภาพที่ 35

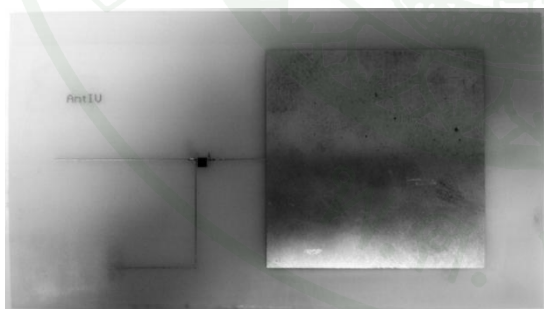


(ก) สายอากาศติดกับวัสดุโฟม



(ข) สายอากาศติดกับวัสดุทองแดง

ภาพที่ 33 แสดงการติดตั้งตัวป้ายอาร์เอฟไอดีกับวัสดุโฟมและทองแดง

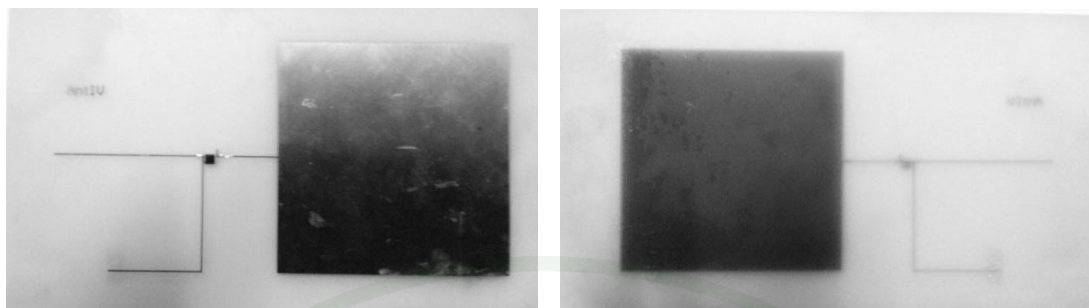


(ก) ด้านบน



(ข) ด้านล่าง

ภาพที่ 34 แสดงการติดตั้งป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมดไมโครสตริปแบบติดเทป

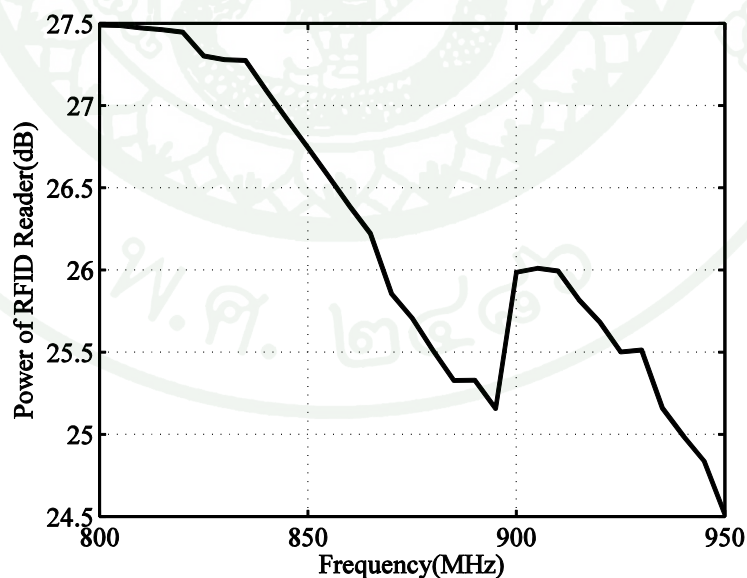


(ก) ด้านบน

(ข) ด้านล่าง

ภาพที่ 35 แสดงการติดตั้งป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมดไมโครสตริปแบบไม่คิดเทป

สำหรับการแปลงการวัดกำลังงานของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีนั้น จะทำการวัดในช่วงความถี่ 800 - 950 เมกกะเฮิร์ต ซึ่งเป็นผลจากการวัดกำลังงานผ่านเครื่องวิเคราะห์ทางสเปกตรัม (Spectrum Analyzer) พบว่าเครื่องอ่านสามารถอ่านได้ในช่วงความถี่ 800 - 950 เมกกะเฮิร์ต โดยกำลังงานที่วัดได้จะแสดงไว้ในภาพที่ 36 ซึ่งเปรียบเทียบกับผลการทำงานช่วงความถี่ 800 - 950 เมกกะเฮิร์ต



ภาพที่ 36 แสดงกำลังงานของเครื่องอ่านป้ายอาร์เอฟไอดีที่ความถี่ต่างๆ

จากภาพที่ 36 นั้นคือค่ากำลังส่งของตัวเครื่องอ่านอาร์เอฟไอดี ซึ่งจะนำค่ากำลังงานที่ได้จากภาพที่ 36 มาใช้หา  $P_{min}$  โดยนำค่ากำลังงานจากภาพที่มาลบกับผลการลดทอนกำลังงานจากเครื่องลดทอนกำลังทั้งหมดในหน่วย dB จากนั้นจึงแปลงเป็นวัตต์แล้วนำไปคำนวณในสมการที่ (47) ต่อไป

สำหรับช่วงความถี่ในการวัดหาระยะอ่านนั้น จะแคบกว่าความถี่จากการจำลองผลการทำงาน เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านกำลังของเครื่องอ่านเมื่อทำการวัดผลอาจจะคลาดเคลื่อนได้ และต้องเปรียบเทียบกับผลของการจำลองผลการทำงานที่มีช่วงความถี่ที่กว้างกว่า เพราะต้องใช้ในการเปรียบเทียบว่าระยะอ่านสูงสุดมีการเลื่อนไปทางความถี่ใดหรือไม่ สำหรับผลการวัดระยะอ่านนั้น จะแสดงผลเปรียบเทียบกับผลการจำลองผลการทำงานเพื่อทำการวิเคราะห์ได้ง่ายขึ้น และแสดงระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นเพื่อที่จะตรวจว่าการตั้งระยะ  $r_{measured}$  ต่ำกว่าระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกลซึ่งมีค่าเท่ากับ  $2D^2/\lambda$  หรือไม่ ซึ่งระยะ  $D$  จะแสดงไว้ดังตารางที่ 38 ส่วนการตั้งระยะอ่าน  $r_{measured}$  สำหรับการวัดระยะอ่าน และระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกลของสายอากาศในโหมดไดโพลจะแสดงไว้ดังตารางที่ 39 ส่วนสายอากาศในโหมดไมโครสตริปทั้งกรณีที่มีเทปและไม่มีเทปจะตั้งระยะอ่านไม่เท่ากันดังตารางที่ 40

ตารางที่ 38 แสดงการตั้งระยะ  $D$  ของโหมดไดโพลและของโหมดไมโครสตริป

สายอากาศ	ระยะ $D$ ของโหมดไดโพล (เมตร)	ระยะ $D$ ของโหมดไมโครสตริป (เมตร)
AntIV	0.148	0.103
AntV	0.135	0.098
AntVI	0.144	0.098
AntVII	0.110	0.076
AntVIII	0.111	0.076
AntIX	0.093	0.053
AntX	0.094	0.053

ตารางที่ 39 แสดงการตั้งระยะอ่าน  $r_{measured}$  และระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกลของสายอากาศที่ใช้เอพาร์โพร์เป็นขั้วสเตรทในโหมดไดโพล

สายอากาศ	ระยะ $r_{measured}$ ในโหมด ไมโครสตริป แบบไม่มีเทป (เมตร)	ระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกล (เมตร)
AntIV	1	0.13
AntV	1	0.11
AntVI	1	0.12
AntVII	2	0.07
AntVIII	2	0.07
AntIX	2	0.05
AntX	2	0.05

สำหรับสายอากาศ AntIV, AntIV และ AntVI นั้นที่ตั้งระยะ  $r_{measured}$  ไว้ที่ 1 เมตร เพราะว่าถ้าตั้งระยะอ่านไว้ที่ 2 เมตรแบบสายอากาศที่เหลือผลของระยะอ่านนั้นมีแนวโน้มที่ผิดเพี้ยนจากผลการจำลองผลการทำงานมาก แต่เมื่อตั้งระยะ  $r_{measured}$  ไว้ไกลขึ้นผลของระยะอ่านมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงผลการจำลองผลการทำงานมากขึ้น ดังนั้นจึงตั้งระยะ  $r_{measured}$  สายอากาศ AntIV, AntIV และ AntVI ให้ไกลขึ้น

ตารางที่ 40 แสดงการตั้งระยะอ่าน  $r_{measured}$  และระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกลของสายอากาศที่ใช้เอพาร์โพร์เป็นขั้วสตรัทในโหมดโครสตริป

สายอากาศ	ระยะ $r_{measured}$ ในโหมดโครสตริปแบบไม่มีเทป (เมตร)	ระยะ $r_{measured}$ ในโหมดโครสตริปแบบมีเทป (เมตร)	ระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกล (เมตร)
AntIV	0.4	0.4	0.065
AntV	0.3	0.3	0.060
AntVI	0.3	0.3	0.060
AntVII	0.4	0.3	0.035
AntVIII	0.14	0.14	0.035
AntIX	0.14	0.14	0.017
AntX	0.14	0.14	0.017

เมื่อวิเคราะห์ผลการตั้งระยะอ่าน  $r_{measured}$  และระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกลแล้วพบว่าในโหมดไดโพลและโหมดโครสตริปเป็นไปตามเงื่อนไข  $R \gg D$  และ  $R \gg \lambda$  ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการตั้งระยะอ่าน  $r_{measured}$  ไม่ได้ตั้งต่ำกว่าระยะของสนามการแผ่กระจายคลื่นระยะไกล

สำหรับผลการวัดของสายอากาศในโหมดไดโพลนั้น ผลของระยะอ่านทั้งหมดที่ได้จะต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบผลของระยะอ่านโดยเทียบกับความถี่เมื่อ  $P_{th}$  เท่ากับ -15 dBm พบว่าผลการวัดของระยะอ่านจะเลื่อนลงในแนวแกน  $y$  ดังนั้นจึงต้องปรับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานโดยปรับ  $P_{th}$  ลดลง สาเหตุที่ปรับให้  $P_{th}$  ลดลงนั้นเนื่องมาจากปัญหาคัดกรีมีผลต่อค่า  $P_{th}$  ซึ่งค่า  $P_{th}$  ของสายอากาศในแต่ละตัวจะไม่เหมือนกัน โดยการปรับค่า  $P_{th}$  จะปรับให้ส่วนที่มีระยะอ่านสูงสุดในแนวแกน  $y$  มีค่าเท่ากัน และ  $P_{th}$  จะปรับลดลงเรื่อยๆ ครั้งละ 0.5 dB ซึ่งจะแสดงค่า  $P_{th}$  ไว้ดังตารางที่ 41

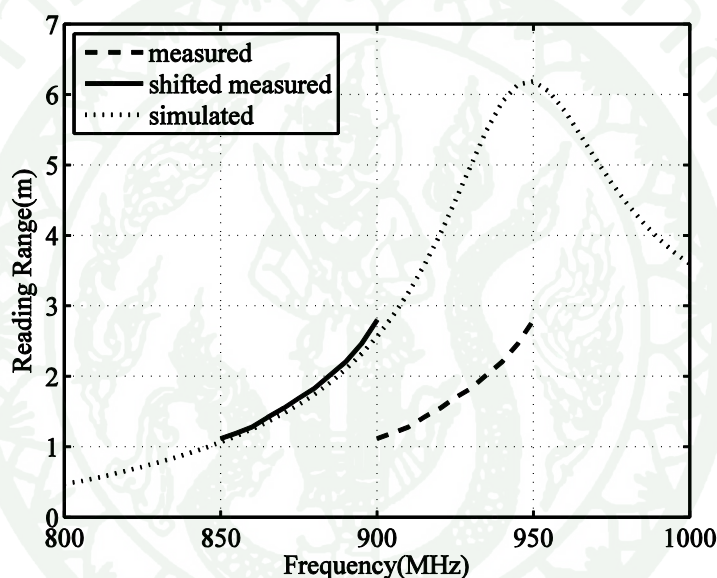
ตารางที่ 41 แสดงค่า  $P_{th}$  ของสายอากาศแต่ละตัวที่ทำให้ระยะอ่านของสายอากาศในโหมด ไดโพลจากการจำลองผลการทำงานและการวัดสอดคล้องกัน

สายอากาศ	$P_{th}(dBm)$
AntIV	-13
AntV	-14.5
AntVI	-13
AntVII	-15
AntVIII	-14
AntIX	-15
AntX	-14

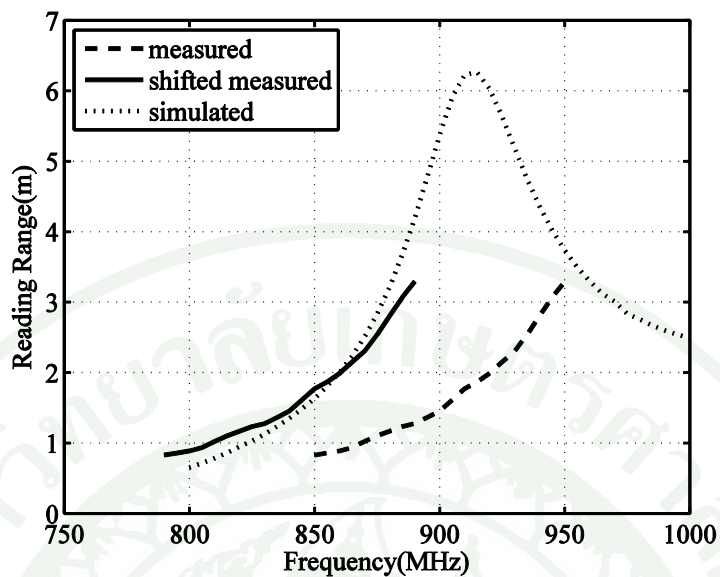
นอกจากนั้นแล้วสำหรับการอ่านของสายอากาศในโหมดไมโครสตริป ผลของระยะอ่านที่เปรียบเทียบกับความถี่ทั้งหมดจะเลื่อนไปทางแนวแกน x ทางด้านขวา ซึ่งหมายความว่าระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานนั้นจะมีระยะที่เท่ากับผลของการวัดในความถี่ที่สูงกว่า จึงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการหาระยะอ่านสูงสุดว่าตกอยู่ที่ความถี่ใด เนื่องจากตัวเครื่องอ่านนั้นสามารถข้อมูลจากตัวปายอาร์เอฟไอดีได้ในช่วงความถี่ 800 - 950 เมกกะเฮิร์ต ดังนั้นจึงเพิ่มผลของการวัดเลื่อนมาตามแนวแกน x ทางด้านซ้ายให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันทั้งผลจากการจำลองผลการทำงานและผลจากการวัดอยู่ในความถี่เดียวกัน เพื่อที่จะหาเปอร์เซ็นต์การเลื่อนของระยะอ่านจากผลวัดเทียบกับผลการจำลองผลการทำงาน และใช้เปอร์เซ็นต์การเลื่อนในการหาความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบสายอากาศสำหรับโหมดไมโครสตริปอีกครั้ง

### การเปรียบเทียบผลจากระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี AntIV

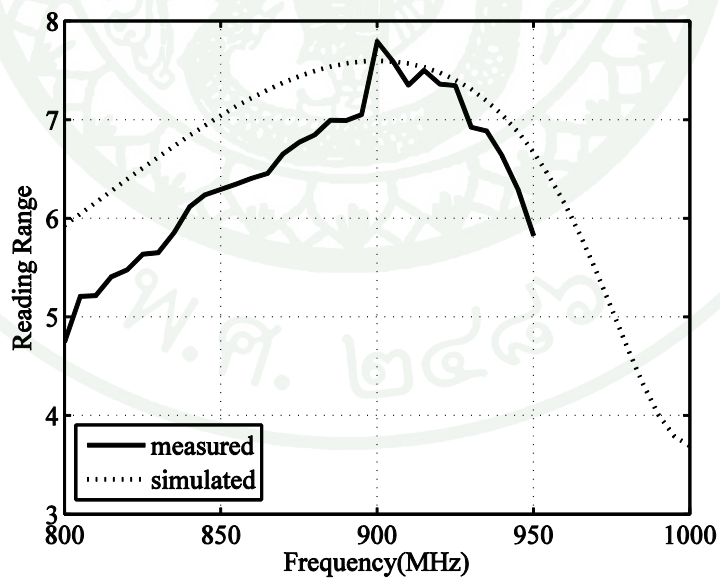
เริ่มจากการวัดระยะอ่านจริง จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับระยะอ่านจากผลการจำลอง ผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดังภาพที่ 37 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปดังภาพที่ 38 และโหมดไดโพลดังภาพที่ 39 สำหรับโหมดไมโครสตริป ทั้งกรณีที่ติดเทปและไม่ติดเทปนั้นจะมีผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานด้วย



ภาพที่ 37 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntIV ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



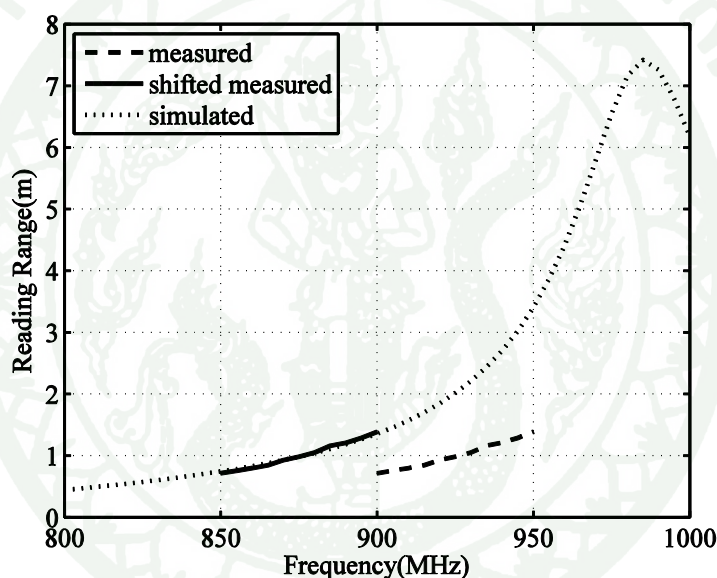
ภาพที่ 38 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntIV ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป



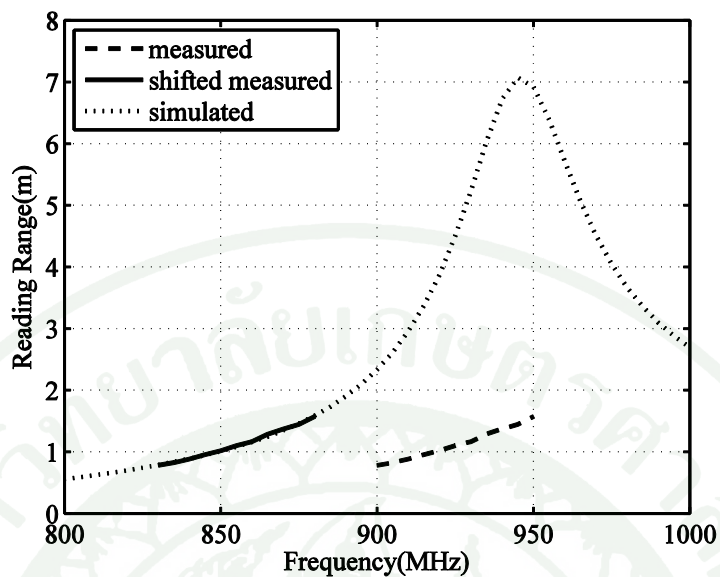
ภาพที่ 39 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntIV ในโหมดไดโพล

### การเปรียบเทียบผลจากระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี AntV

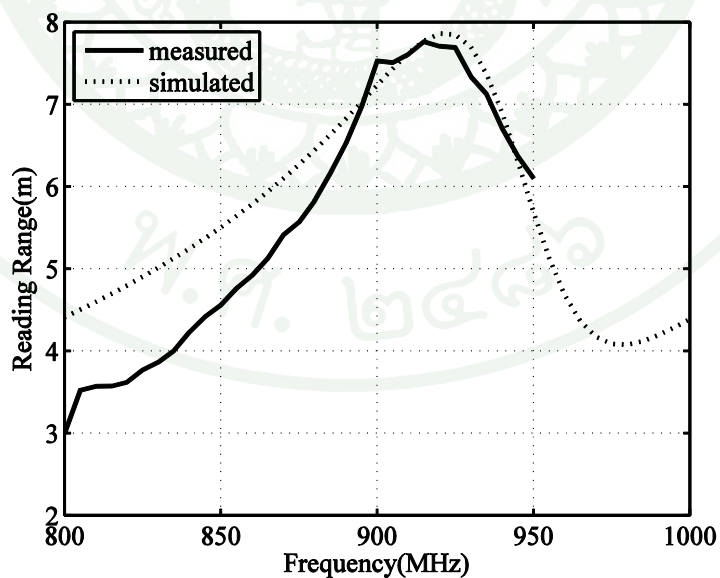
เริ่มจากการวัดระยะอ่านจริง จากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบกับระยะอ่านจากผลการจำลอง ผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดังภาพที่ 40 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปดังภาพที่ 41 และโหมดไดโพลดังภาพที่ 42 สำหรับโหมดไมโครสตริป ทั้งกรณีที่มีเทปและไม่มีเทปนั้นจะมีผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานด้วย



ภาพที่ 40 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntV ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



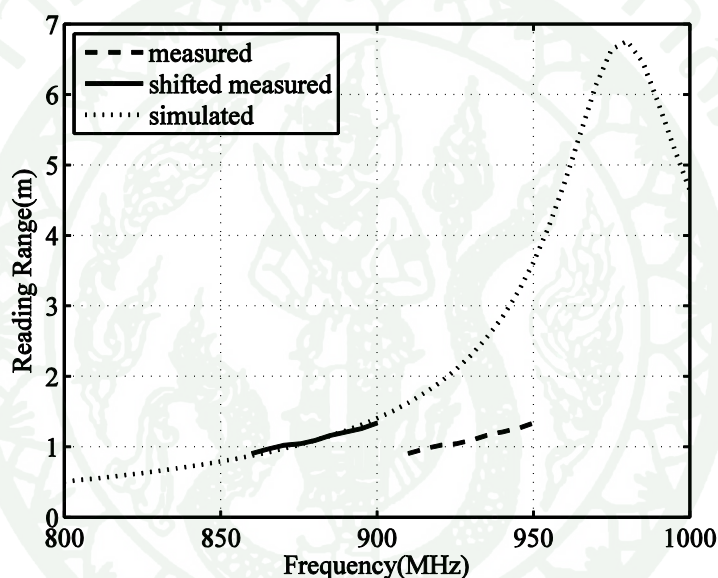
ภาพที่ 41 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntV ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป



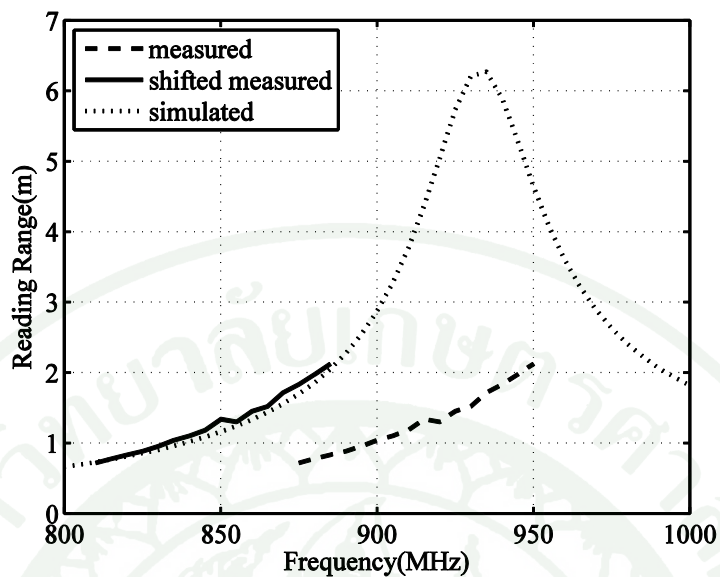
ภาพที่ 42 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntV ในโหมดไดโพล

### การเปรียบเทียบผลจากระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี AntVI

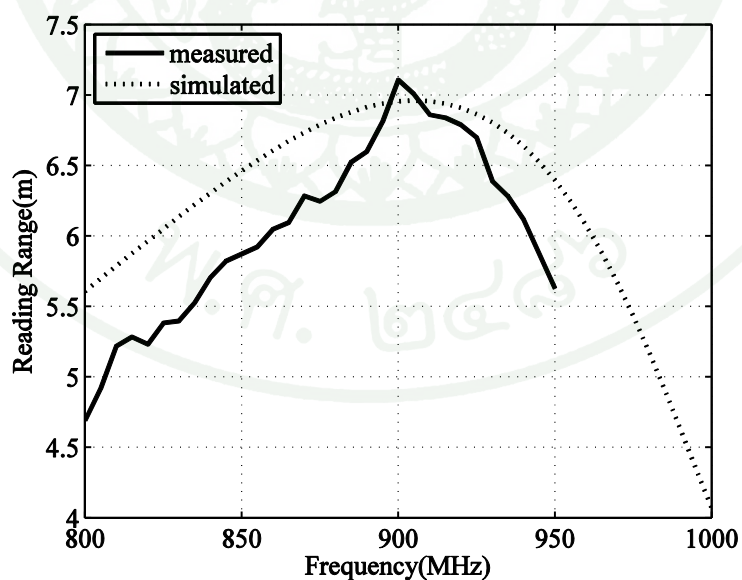
เริ่มจากการวัดระยะอ่านจริง จากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบกับระยะอ่านจากผลการจำลอง ผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดังภาพที่ 43 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปดังภาพที่ 44 และโหมดไดโพลดังภาพที่ 45 สำหรับโหมดไมโครสตริปทั้งกรณีที่มีเทปและไม่มีเทปนั้นจะมีผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานด้วย



ภาพที่ 43 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVI ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



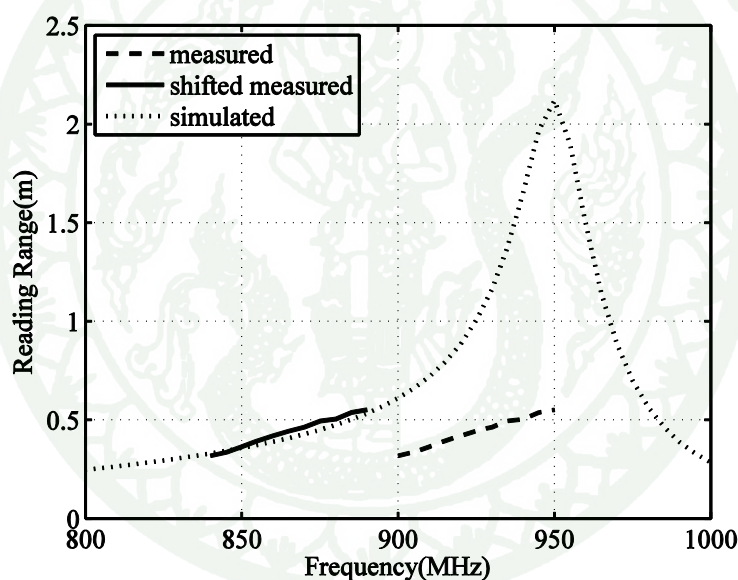
ภาพที่ 44 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVI ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป



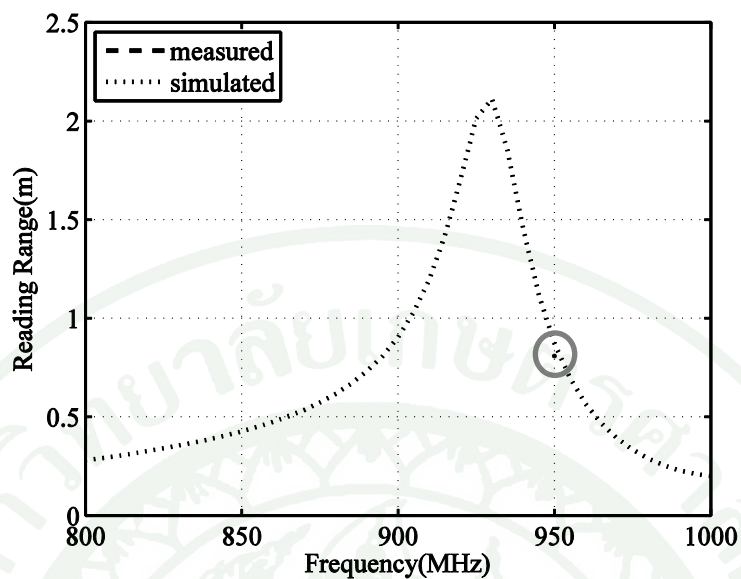
ภาพที่ 45 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntVI ในโหมดไดโพล

## การเปรียบเทียบผลจากระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี AntVII

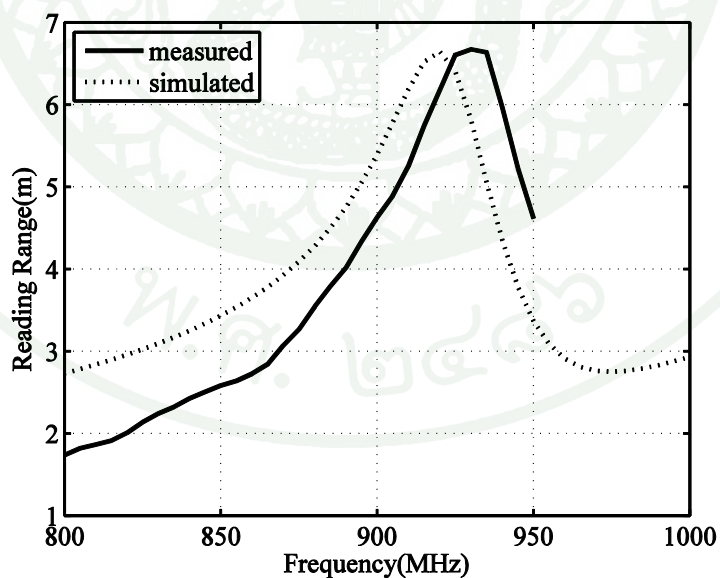
เริ่มจากการวัดระยะอ่านจริง จากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบกับระยะอ่านจากผลการจำลอง ผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดังภาพที่ 46 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปดังภาพที่ 47 และโหมดไดโพลดังภาพที่ 48 สำหรับโหมดไมโครสตริปกรณีที่ไม่คิดเทปนั้นจะมีผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงาน ส่วนกรณีดังภาพที่ 47 นั้นจะไม่มีผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานไม่ได้เพราะผลการวัดนั้นวัดได้ค่าเดียว



ภาพที่ 46 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



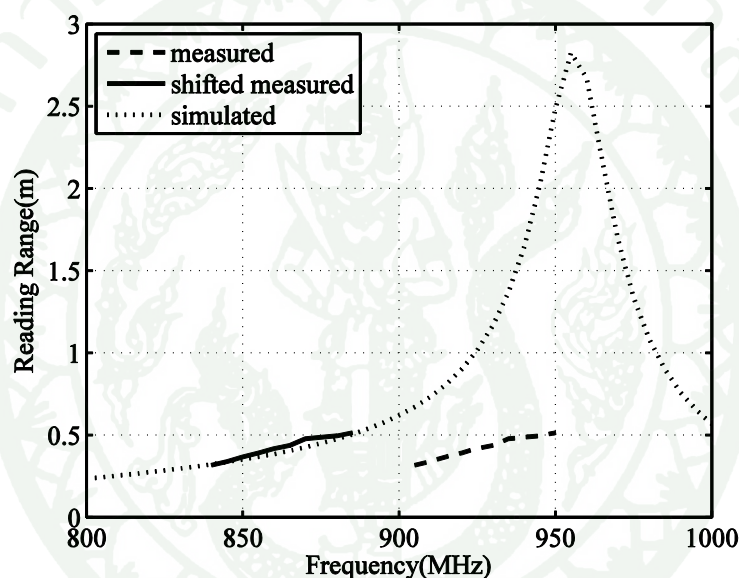
ภาพที่ 47 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ Ant VII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทปและส่วนของการวัดจะมีการวงกลมเอาไว้รอบผลวัด



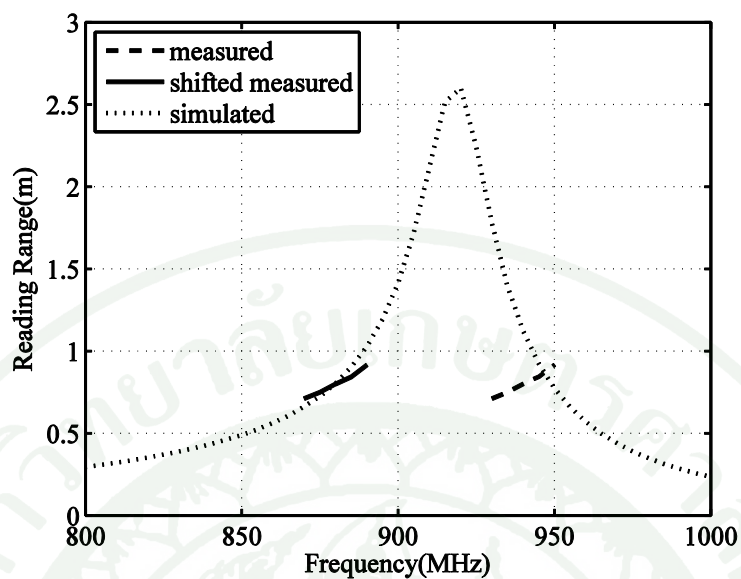
ภาพที่ 48 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ Ant VII ในโหมดไดโพล

### การเปรียบเทียบผลจากระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี AntVIII

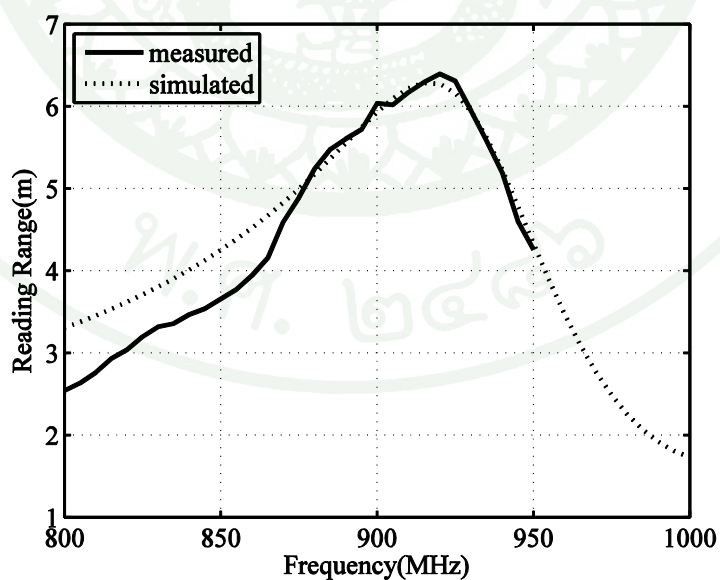
เริ่มทำการวัดระยะอ่านจริง จากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดังภาพที่ 49 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปดังภาพที่ 50 และโหมดไดโพลดังภาพที่ 51 สำหรับโหมดไมโครสตริป ทั้งกรณีที่มีเทปและไม่มีเทปนั้นจะมีผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานด้วย



ภาพที่ 49 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVIII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



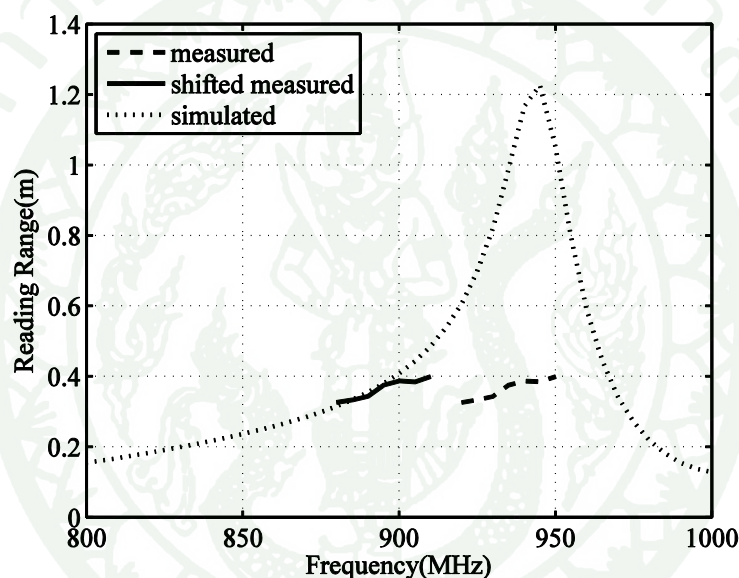
ภาพที่ 50 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntVIII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป



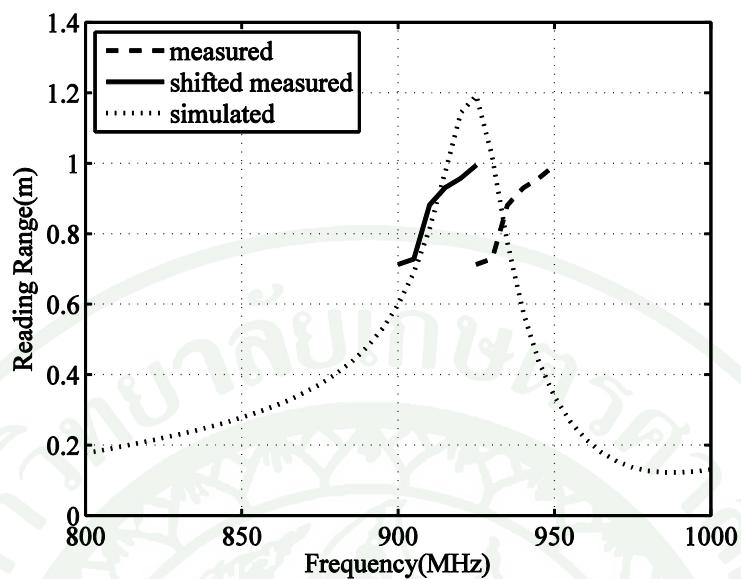
ภาพที่ 51 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntVIII ในโหมดไดโพล

### การเปรียบเทียบผลจากระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี AntIX

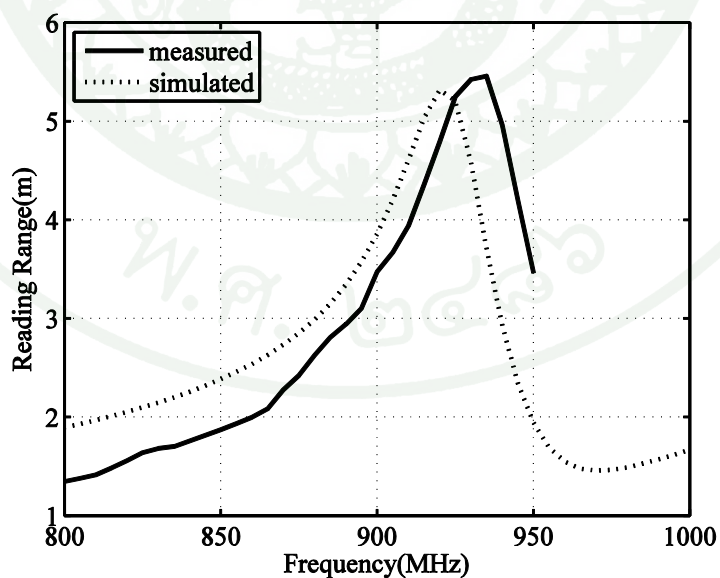
เริ่มจากการวัดระยะอ่านจริง จากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบกับระยะอ่านจากผลการจำลอง ผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดั่งภาพที่ 52 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปดั่งภาพที่ 53 และโหมดไดโพลดั่งภาพที่ 54 สำหรับโหมดไมโครสตริป ทั้งกรณีที่มีเทปและไม่มีเทปนั้นจะมีผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานด้วย



ภาพที่ 52 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัด ไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntIX ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



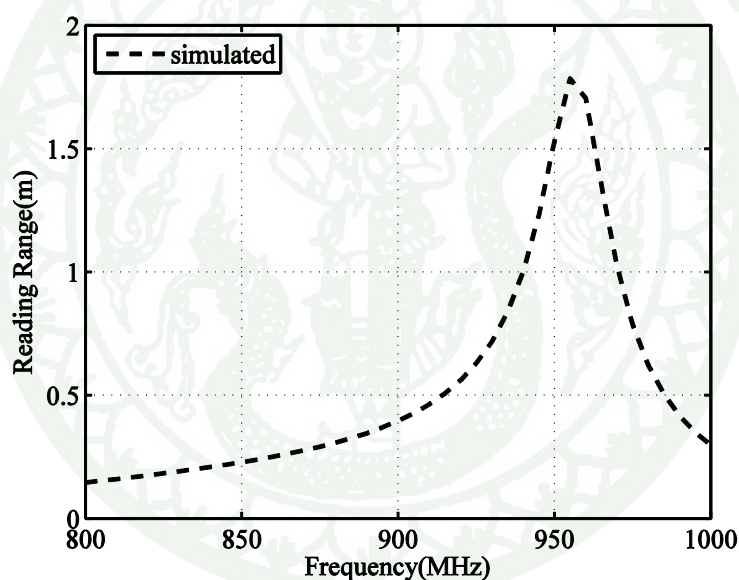
ภาพที่ 53 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากผลการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntIX ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป



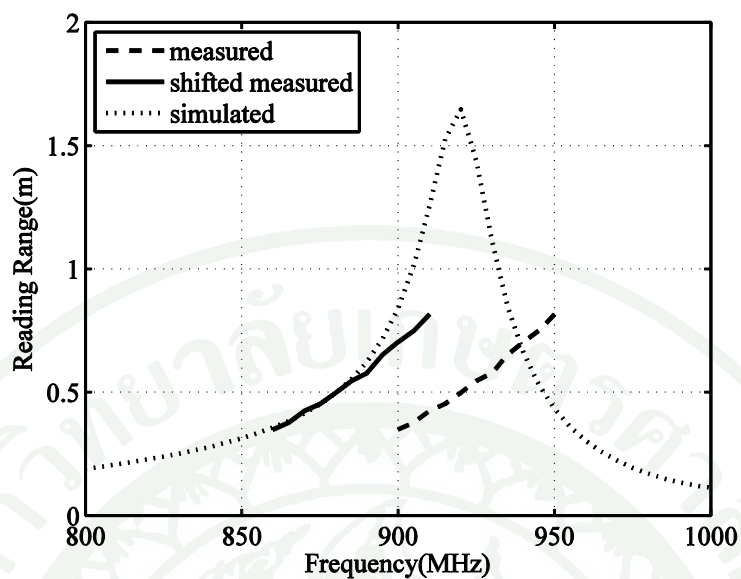
ภาพที่ 54 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntIX ในโหมดไดโพล

### การเปรียบเทียบผลจากระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี AntX

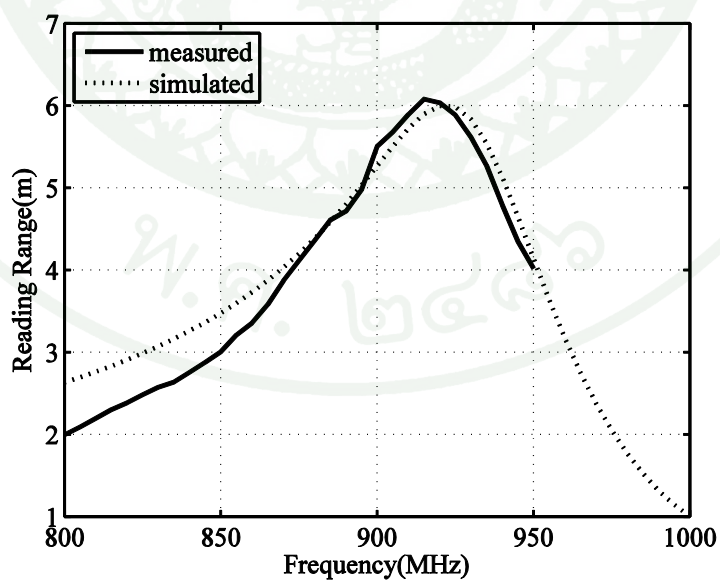
เริ่มจากการวัดระยะอ่านจริง จากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดังภาพที่ 55 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปดังภาพที่ 56 และโหมดไดโพลดังภาพที่ 57 สำหรับโหมดไมโครสตริปเฉพาะกรณีที่เกิดเทปนั้นจะมีผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานด้วย สำหรับการวัดสายอากาศ AntX นั้นไม่สามารถวัดระยะอ่านในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดังภาพที่ 52 ด้วย นั้นจึงแสดงเฉพาะส่วนที่เป็นผลการจำลองผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet อย่างเดียวเท่านั้น



ภาพที่ 55 แสดงระยะอ่านของจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntX ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



ภาพที่ 56 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดที่ทำการเลื่อนความถี่จากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากับจากการวัดทับกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntX ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป



ภาพที่ 57 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงาน, ผลการวัดจริงและผลการวัดทับกับผลจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntX ในโหมดไดโพล

### ผลของระยะอ่านเปรียบเทียบระหว่างผลของการจำลองผลการทำงานกับผลของการวัด

จากผลการวัดทั้งหมดพบว่าระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานนั้นในโหมดไดโพล กลุ่มของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI จะมีระยะอ่านสูงสุดอยู่ในช่วง 5.9 - 8 เมตร กลุ่มของสายอากาศ AntVII และ AntVIII จะมีระยะอ่านสูงสุดอยู่ในช่วง 6 - 6.5 เมตร และกลุ่มของสายอากาศ AntIX และ AntX จะมีระยะอ่านสูงสุดอยู่ในช่วง 5.3 - 6 เมตร ผลของระยะอ่านที่ได้จากการวัดนั้นสามารถวัดได้ทุกช่วงความถี่คือ 800 - 950 เมกกะเฮิร์ต และผลของการวัดเมื่อเทียบกับผลของการจำลองผลการทำงาน ไม่มีการเลื่อนระยะอ่านไปทางแนวแกน x แต่อย่างใด

ส่วนผลระยะอ่านของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปนั้นจากผลการจำลองผลการทำงานพบว่ากลุ่มของสายอากาศ AntIV, AntV และ AntVI จะมีระยะอ่านสูงสุดอยู่ในช่วง 6 - 8 เมตร กลุ่มของสายอากาศ AntVII และ AntVIII จะมีระยะอ่านสูงสุดอยู่ในช่วง 2 - 3 เมตร และกลุ่มของสายอากาศ AntIX และ AntX จะมีระยะอ่านสูงสุดอยู่ในช่วง 1 - 1.7 เมตร ส่วนผลของการวัดนั้นไม่สามารถที่จะวัดได้ทุกความถี่คือวัดได้บางความถี่จากช่วงความถี่ 800 - 950 เมกกะเฮิร์ตเท่านั้น และนอกจากนั้นผลวัดของสายอากาศทุกตัวมีระยะอ่านที่เท่ากันอยู่ในความถี่ที่สูงกว่า ดังนั้นจึงนำผลของระยะอ่านของการวัดเลื่อนไปตามแนวแกน x ไปที่ความถี่ระยะอ่านของผลการจำลองผลการทำงานเท่ากับระยะอ่านที่ได้จากการวัด จากนั้นนำไปคิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนดังสมการที่ (48)

$$f_{shift}(percentage) = \frac{(f_{measured} - f_{simulated})}{f_{measured}} \times 100 \quad (48)$$

โดยที่  $f_{shift}(percentage)$  เป็นเปอร์เซ็นต์การเลื่อนความถี่ของระยะอ่านในแนวแกน x ส่วน  $f_{measured}$  คือ ความถี่ที่เป็นผลมาจากระยะอ่านที่มาจากการวัดมีค่าเท่ากับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงาน  $f_{simulated}$  คือ ความถี่ที่เป็นผลมาจากระยะอ่านที่มาจากผลการจำลองผลการทำงานมีค่าเท่ากับระยะอ่านจากผลการวัด

จากนั้นนำผลที่แสดงผลของระยะอ่านของการวัดเลื่อนไปตามแนวแกน x ไปที่ความถี่ระยะอ่านของผลการจำลองผลการทำงานเท่ากับระยะอ่านที่ได้จากการวัดดังตารางที่ 42 ในกรณีที่ไม่มีเทปและตารางที่ 43 ในกรณีที่มีเทป

ตารางที่ 42 แสดงการเลื่อนความถี่ของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปในกรณีที่ไม่ติดเทป

สายอากาศ	$f_{measured}$	$f_{simulated}$	$f_{shift}(percentage)$
AntIV	900	850	5.5556
AntV	900	850	5.5556
AntVI	910	860	5.4945
AntVII	900	840	6.6667
AntVIII	905	840	7.1823
AntIX	920	880	4.3478
AntX	-	-	-

ตารางที่ 43 แสดงการเลื่อนความถี่ของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปในกรณีที่ติดเทป

สายอากาศ	$f_{measured}$	$f_{simulated}$	$f_{shift}(percentage)$
AntIV	920	860	6.5217
AntV	900	830	7.7778
AntVI	875	810	7.4286
AntVII	-	-	-
AntVIII	930	870	6.4516
AntIX	925	900	2.7027
AntX	900	860	4.4444

## วิจารณ์

เนื่องจากเกิดปัญหาในการออกแบบสายอากาศในโหมดไมโครสตริป โดยที่ผลของกราฟระยะอ่านในโหมดไมโครสตริปทั้งหมดเลื่อนไปทางด้านขวา หรือเลื่อนไปที่ความถี่สูงกว่าในแนวแกน x ดังนั้นจึงต้องออกแบบสายอากาศสำหรับปายอาร์เอฟไอดีใหม่ในความถี่ที่ต่ำกว่าเดิม ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้จะออกแบบสายอากาศใหม่ โดยทำการทดลองโดยอิงจาก  $f_{shift}(percentage)$  ของสายอากาศ AntIV ซึ่งจะออกแบบสายอากาศ AntXI ให้เหมาะกับโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปด้านล่าง และสายอากาศ AntXII ให้เหมาะกับโหมดไมโครสตริปแบบมีเทปด้านล่าง ซึ่งข้อมูลความถี่ที่จะต้องออกแบบให้เหมาะกับสายอากาศในโหมดไมโครสตริปนั้น จะแสดงดังตารางที่ 44 ส่วนของโหมดไดโพลนั้นจะออกแบบที่มีความถี่ 922.5 เมกกะเฮิร์ตซ์อย่างเดิม ขนาดของสายอากาศแสดงไว้ดังตารางที่ 45 ระยะ  $r_{measured}$  สำหรับการวัดตารางที่ 46 ผลการจำลองผลการทำงานในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดังตารางที่ 47 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปด้านล่างดังตารางที่ 48 และโหมดไดโพลดังตารางที่ 49

**ตารางที่ 44** แสดงค่าความถี่ที่จะใช้ออกแบบสายอากาศใหม่โดยอิงข้อมูล  $f_{shift}(percentage)$  จาก Ant IV

โหมดของสายอากาศ AntIV	ความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบ (เมกกะเฮิร์ต)	$f_{shift}(percentage)$ จาก AntIV
ไมโครสตริปแบบไม่มีเทป (AntXI)	871.24 $\approx$ 870	5.5556
ไมโครสตริปแบบมีเทป (AntXII)	862.35 $\approx$ 860	6.5217
ไดโพล (AntXI และ AntXII)	922.5	-

ตารางที่ 45 แสดงขนาดสายอากาศของ AntXI และ AntXII ที่พร้อมจะนำไปสร้างอุปกรณ์จริง

สายอากาศ	$L_1$ มิลลิเมตร	$L_2$ มิลลิเมตร	$L_3$ มิลลิเมตร	$W_1$ มิลลิเมตร	$S_1$ มิลลิเมตร	$S_2^{new}$ มิลลิเมตร	$S_4$ มิลลิเมตร
AntXI	79	8	50.5	0.5	31.5	39.25	31
AntXII	79	20	51	0.5	2	39.25	26

ตารางที่ 46 แสดงการตั้งระยะอ่าน  $r_{measured}$  ของสายอากาศ AntXI และ AntXII ในโหมดไมโครสตริป

สายอากาศ	ระยะอ่านที่ตั้งสำหรับการวัด ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป (เมตร)	ระยะอ่านที่ตั้งสำหรับการวัด ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป (เมตร)
AntXI	0.5	0.5
AntXII	0.5	0.7

สำหรับการตั้งระยะที่ไกลขึ้นกว่า AntIV ของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปนั้นเพราะว่าในช่วงความถี่จำเป็นต้องปรับเครื่องลดทอนกำลังงานเกิน 15 dB ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการวัดจึงปรับระยะเพิ่มขึ้นแทน

ตารางที่ 47 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป

สายอากาศ	ค่าอิมพีแดนซ์ โอห์ม	ค่าอัตราขยาย dB	ค่าการส่งผ่าน	ระยะอ่าน เมตร
AntXI	24.52+j140.1	-1.9460	0.9289	7.5
AntXII	22.57+j158.1	-1.2911	0.8967	8.1

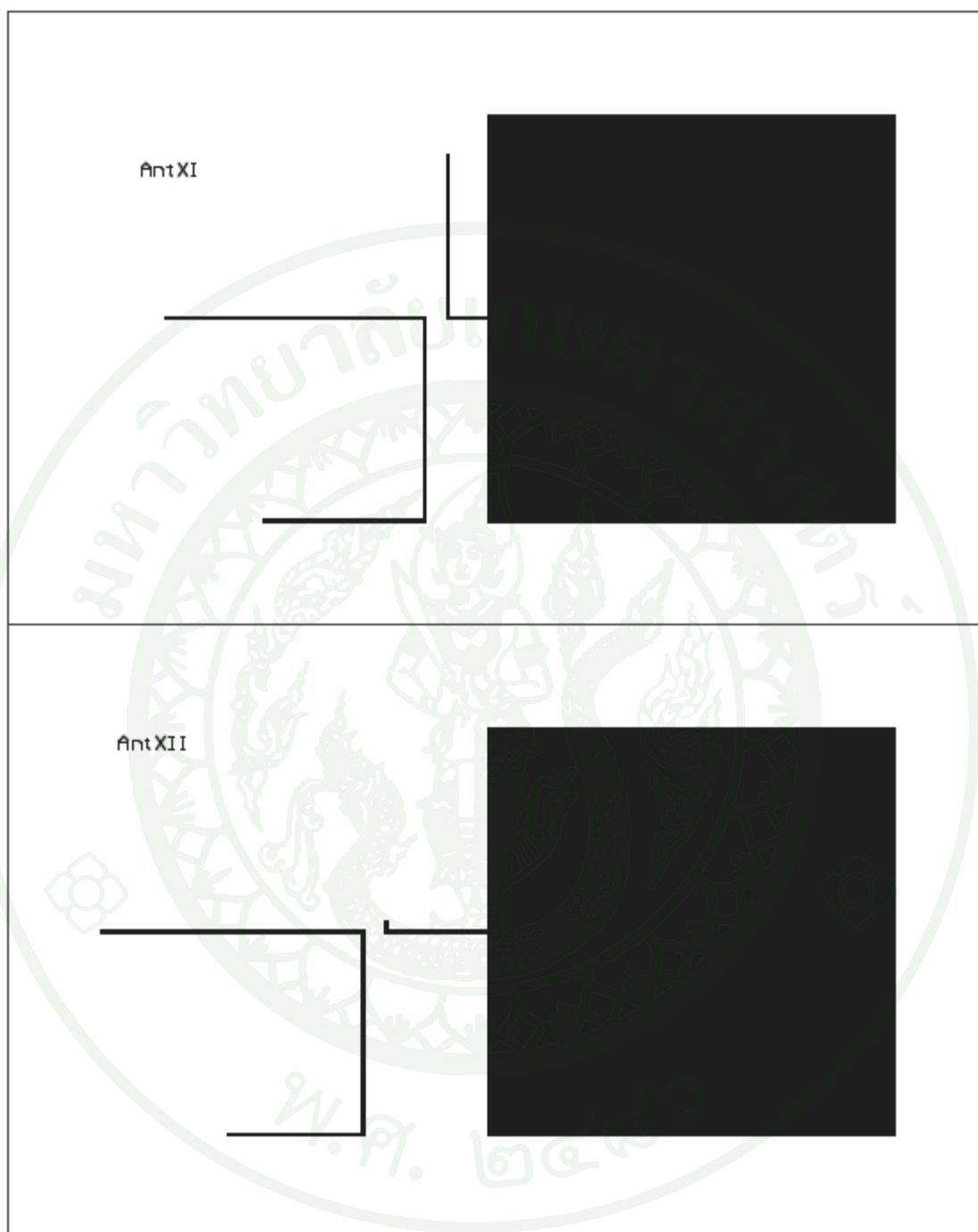
ตารางที่ 48 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป

สายอากาศ	ค่าอิมพีแดนซ์ โอห์ม	ค่าอัตราขยาย dB	ค่าการส่งผ่าน	ระยะอ่าน เมตร
AntXI	330.3+j22.09	- 1.7370	0.1560	3.2
AntXII	6.29+j123.07	- 2.0949	0.3764	4.8

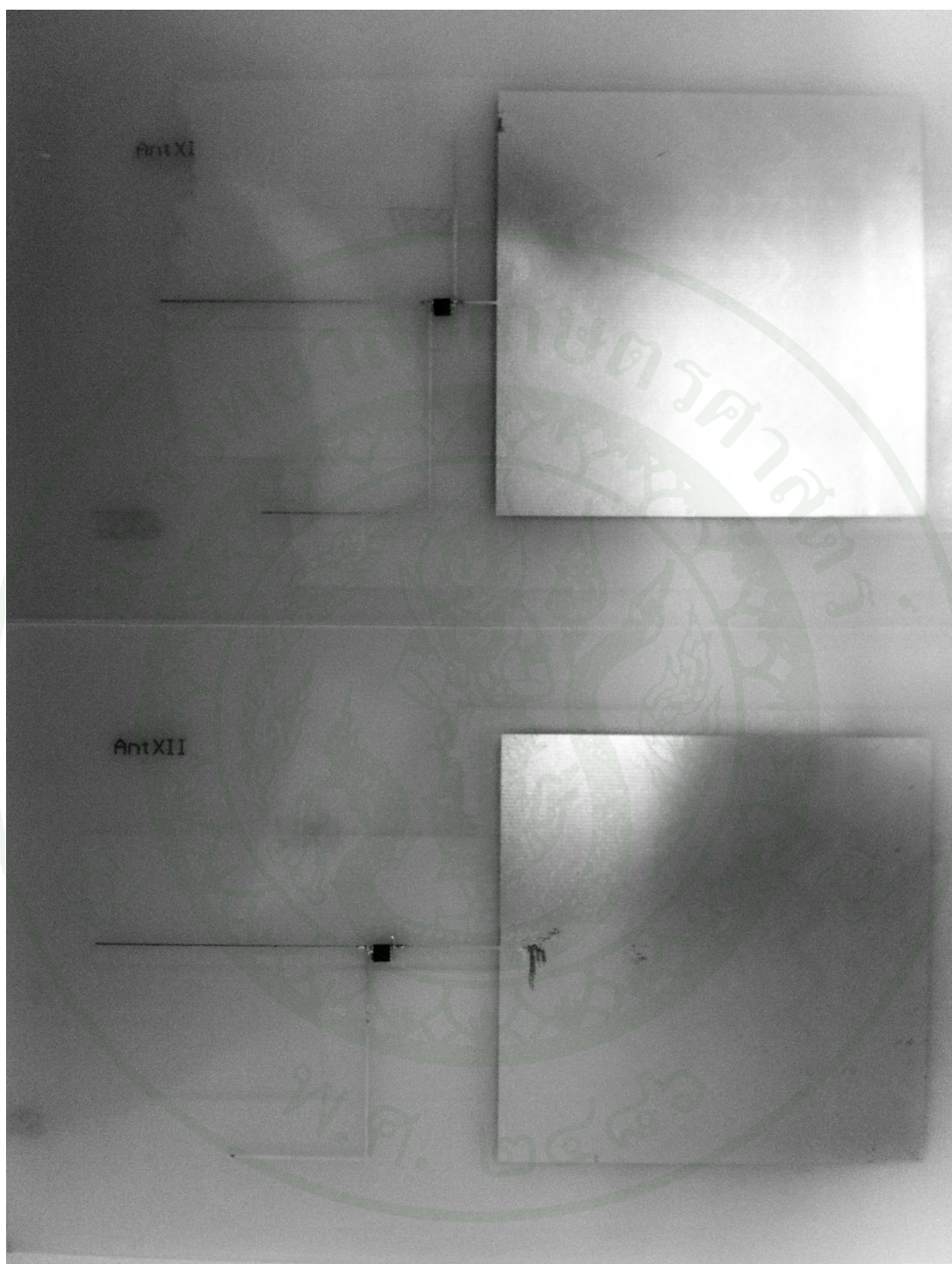
ตารางที่ 49 แสดงค่าอิมพีแดนซ์, อัตราขยาย, ค่าการส่งผ่านและระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และ AntXII ในโหมดไดโพล

สายอากาศ	ค่าอิมพีแดนซ์ โอห์ม	ค่าอัตราขยาย dB	ค่าการส่งผ่าน	ระยะอ่าน เมตร
AntXI	73.31+j137.2	0.7841	0.5812	7.7
AntXII	64.13+j148.78	1.9603	0.6389	9.2

นอกจากนี้ภาพสายอากาศก่อนนำไปทำอุปกรณ์จริงถูกแสดงดังภาพที่ 58 และสายอากาศจริงที่จะนำไปวัดระยะอ่านดังถูกแสดงภาพที่ 59



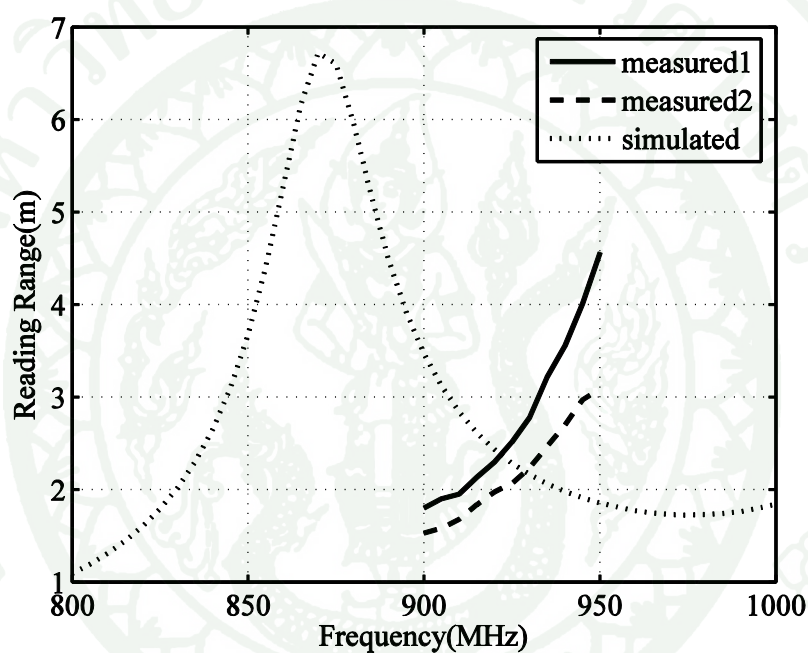
ภาพที่ 58 แสดงสายอากาศก่อนนำไปทำอุปกรณ์จริงของสายอากาศ Ant XI และ Ant XII



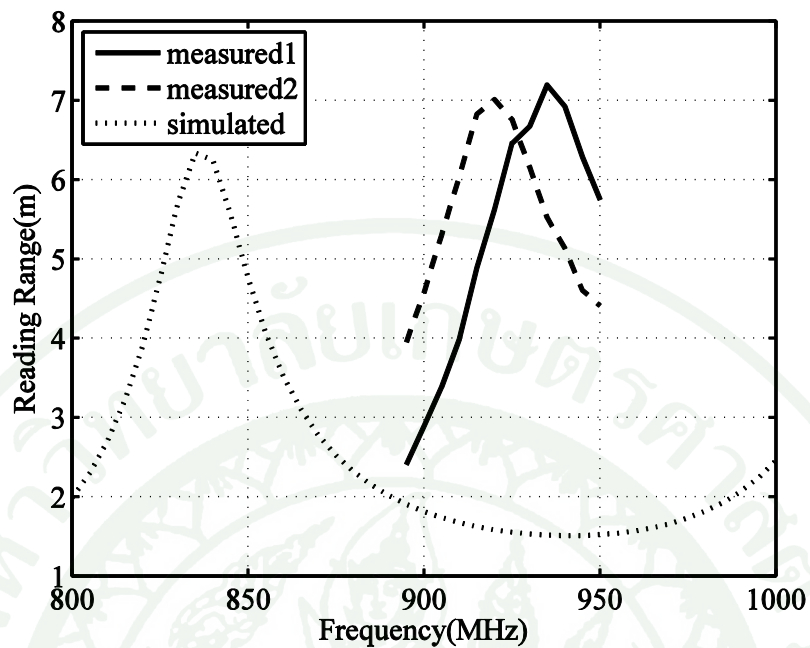
ภาพที่ 59 แสดงสายอากาศจริงที่จะนำไปวัดระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และ AntXII

### การเปรียบเทียบผลจากระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี AntXI

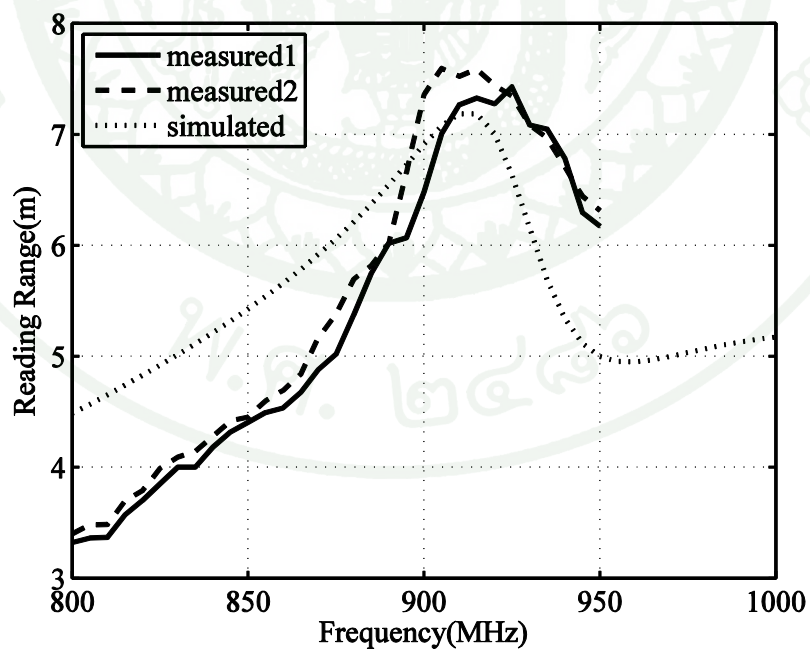
เริ่มทำการวัดระยะอ่านจริงโดยสร้างสายอากาศเหมือนกัน 2 ตัว จากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดั่งภาพที่ 60 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปดั่งภาพที่ 61 และโหมดไดโพลดั่งภาพที่ 62



ภาพที่ 60 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXI ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



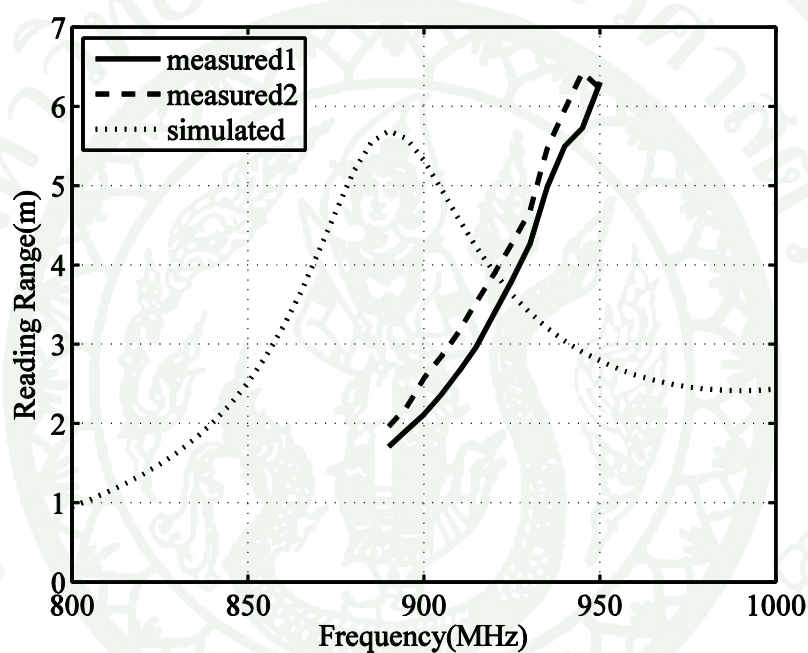
ภาพที่ 61 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXI ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป



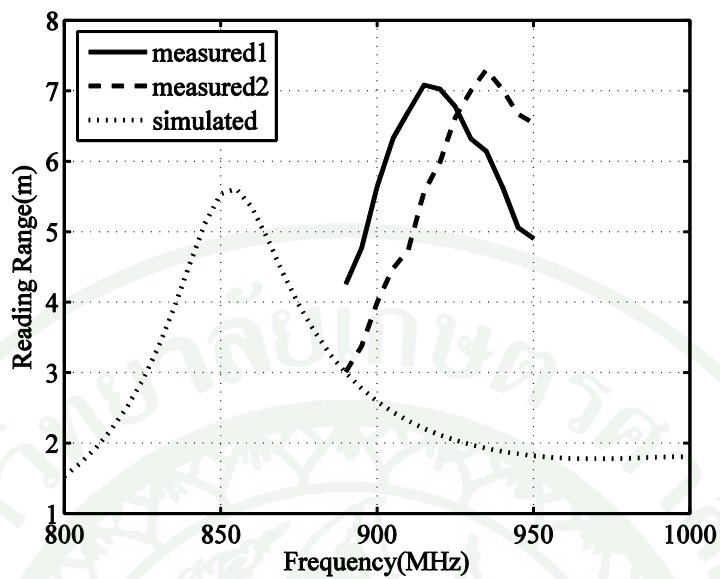
ภาพที่ 62 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXI ในโหมดไดโพล

### การเปรียบเทียบผลจากระยะอ่านของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี AntXII

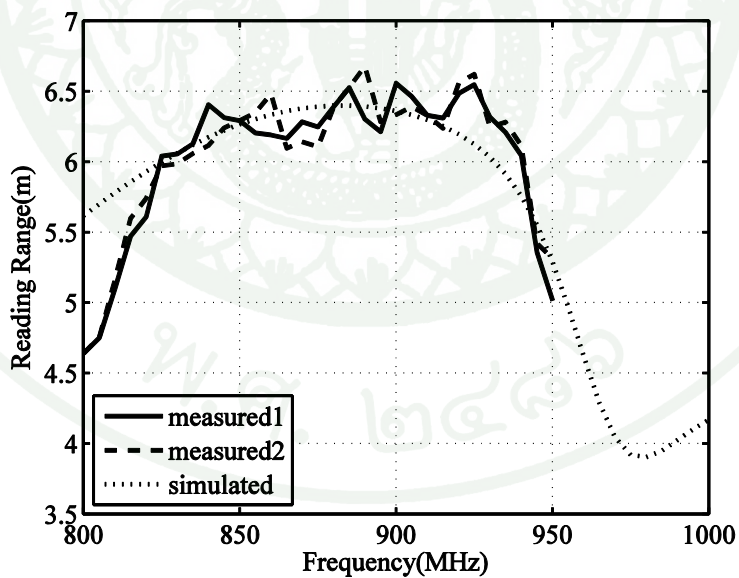
เริ่มทำการวัดระยะอ่านจริงโดยสร้างสายอากาศเหมือนกัน 2 ตัว จากนั้นก็ทำการเปรียบเทียบกับระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานในโปรแกรม Sonnet ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทปดั่งภาพที่ 63 โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปดั่งภาพที่ 64 และโหมดไดโพลดั่งภาพที่ 65



ภาพที่ 63 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



ภาพที่ 64 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทป



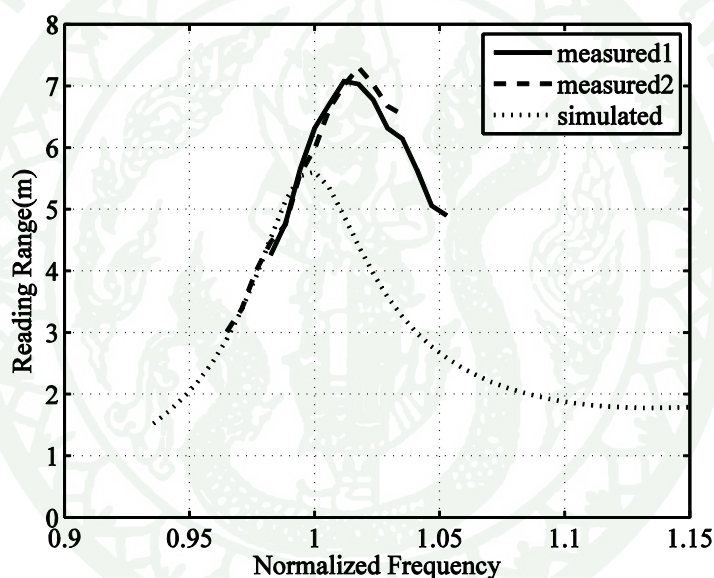
ภาพที่ 65 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXII ในโหมดไดโพล

จากผลวัดระยะการอ่านพบว่ากรณีที่สายอากาศ AntXI และสายอากาศ AntXII พบว่าผลการจำลองผลการทำงานในโหมดไดโพลมีระยะอ่านสูงสุดที่ 6 - 8 เมตร ส่วนในโหมดไมโครสตริปทั้งในกรณีที่ดินเตปด้านล่างและไม่ที่ดินเตปด้านล่างมีระยะอ่านสูงสุดอยู่ในช่วง 5.5 - 7 เมตร ส่วนผลระยะอ่านที่เกิดจากการวัดของโหมดไดโพลจะให้ผลที่ใกล้เคียงกัน สำหรับผลการวัดระยะอ่านของโหมดไมโครสตริปนั้น ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่ที่ดินเตปด้านล่างยังหาระยะอ่านสูงสุดไม่ได้ ส่วนในกรณีของโหมดไมโครสตริปแบบที่ดินเตปสามารถหาระยะอ่านสูงสุดได้ ซึ่งวัดได้ประมาณ 7 เมตร แต่ระยะอ่านสูงสุดจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงความถี่ 922.5 เมกกะเฮิร์ต จากผลของระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และสายอากาศ AntXII พบว่ากราฟระยะอ่านจากการวัดของโหมดไมโครสตริปทั้งแบบที่ดินเตปด้านล่างและไม่ที่ดินเตปด้านล่างยังมีการเลื่อนไปตามแนวแกน x ทางด้านขวามือของกราฟจากความถี่ 922.5 เมกกะเฮิร์ตอยู่แต่ถ้าดูจากผลการวัดในช่วงความถี่ 900 - 950 เมกกะเฮิร์ต ของสายอากาศ AntXI และสายอากาศ AntXII พบว่าในผลการวัดระยะอ่านสามารถอ่านได้ระยะไกลมากขึ้น ส่วนความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอีกประการหนึ่งคือระยะอ่านสูงสุดของสายอากาศไมโครสตริปที่เกิดจากการวัดสามารถวัดได้ไกลกว่าผลของระยะอ่านจากการจำลองผลการทำงาน ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลของความผิดพลาดของระยะอ่านได้ดังนี้

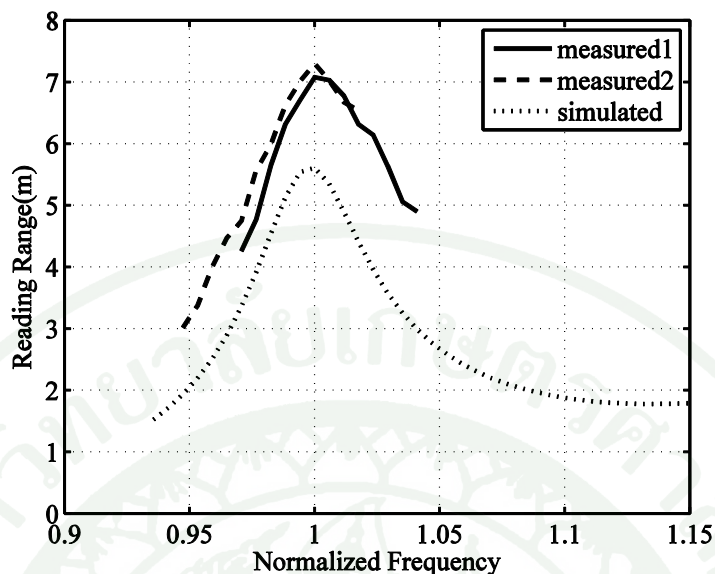
#### ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการเลื่อนความถี่ในแนวแกน x จากผลระยะอ่านในโหมดไมโครสตริป

เนื่องจากความผิดพลาดของสายอากาศในโหมดไมโครสตริป ทั้งในกรณีที่ดินเตปด้านล่างและไม่ที่ดินเตปด้านล่างนั้น ในกรณีผลการวัดระยะอ่านของสายอากาศ AntXI และสายอากาศ AntXII มีระยะอ่านที่สูงกว่าระยะอ่านของผลการจำลองผลการทำงาน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในของค่า  $f_{shift}(percentage)$  ได้ โดยคาดว่าโดยปกติแล้วการคิดเปอร์เซ็นต์ที่เกิดจากความผิดพลาดใดๆของสายอากาศจากผลการจำลองผลการทำงาน เมื่อเทียบกับการวัดจริง โดยที่แกน x เป็นความถี่ และแกน y เป็นค่าที่ต้องการวัด จะต้องนำผลการทดลองที่ดีที่สุดมาเทียบกัน เช่นเดียวกับผลของการวัดระยะอ่านจะต้องนำระยะอ่านที่ดีที่สุดจากผลการวัดและผลการจำลองผลการทำงานมาเทียบกัน โดยจะเทียบจากผลของระยะอ่านจากการจำลองผลการทำงานกับผลการวัดจริง ซึ่งในกรณีการวัดสายอากาศ AntIV ยังไม่สามารถหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดโดยเทียบระยะอ่านที่ดีที่สุดได้เนื่องจากข้อจำกัดเครื่องอ่านป้ายอาร์เอฟไอดี ซึ่งหาระยะอ่านได้จากความถี่ที่จำกัดคือ 800 - 950 เมกกะเฮิร์ต ดังนั้นจึงต้องนำความถี่ที่มีระยะอ่านเท่ากัน จากผลการจำลองผลการทำงานกับผลการวัดจริงหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเพื่อที่จะมาสร้างสายอากาศ AntXI และสายอากาศ AntXII สำหรับสายอากาศ AntXI และสายอากาศ AntXII สามารถหาระยะอ่านที่ดีที่สุด

ในการวัดสำหรับโหมดไมโครสตริปแบบติดเทปได้แล้ว ซึ่งสามารถเปรียบเทียบโดยใช้เปรียบเทียบโดยใช้สายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบติดเทปด้านหลังเพราะว่าผลการทดลองของสายอากาศในโหมดดังกล่าวสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจน โดยการเปรียบเทียบนั้นเพื่อให้เข้าใจง่ายขึ้นจะเปรียบเทียบกราฟที่เป็นระยะอ่านในแนวแกน  $y$  และ ความถี่นอร์มอลไลซ์ (Normalized Frequency) โดยกำหนดความถี่นอร์มอลไลซ์นั้นจะมีค่าเท่ากับ 1 ในส่วนที่เป็นผลของระยะอ่านจากผลการจำลองผลการทำงานให้ระยะอ่านสูงสุดเสมอ โดยผลของระยะอ่านจากการวัดที่เท่ากันในความถี่ต่ำสุดเลื่อนตามแนวแกน  $x$  ให้มาทับกันดังภาพที่ 66 และระยะอ่านที่ดีที่สุดของผลการวัดเทียบกับผลการจำลองผลการทำงานดังภาพที่ 67



ภาพที่ 66 แสดงระยะอ่านเทียบกับความถี่นอร์มอลไลซ์ของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบมีเทปด้านหลังที่นำระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันของความถี่ที่ต่ำที่สุดระหว่างผลการจำลองผลการทำงานกับผลการวัดเปรียบเทียบการหาระยะอ่านสูงสุด



ภาพที่ 67 แสดงระยะอ่านเทียบกับความถี่นอร์มอลไลซ์ของสายอากาศ AntXII ในโหมด ไมโครสตริปแบบมีเทปด้านล่างที่นำระยะอ่านสูงสุดมาไว้ที่ความถี่นอร์มอลไลซ์เดียวกัน

จากผลการเปรียบเทียบระยะอ่านพบว่าจากภาพที่ 66 พบว่าผลของการวัดที่ให้ระยะอ่านสูงสุดอยู่ที่ความถี่นอร์มอลไลซ์เท่ากับ 1.012 และ 1.016 ซึ่งข้อมูลจากกราฟในภาพที่ 66 นั้นผลของการวัดระยะอ่านสูงสุดไม่ได้อยู่ที่ความถี่นอร์มอลไลซ์เท่ากับ 1 ซึ่งถ้าจัดผลของระยะอ่านสูงสุด อยู่ที่ความถี่นอร์มอลไลซ์เท่ากับ 1 ดังภาพที่ 67 แล้วทำให้ผลของระยะอ่านจากการวัดที่เท่ากันในความถี่ต่ำสุดเลื่อนตามแนวแกน x ให้มาทับนั้นไม่เท่ากัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าวิธีการเลื่อนความถี่ที่ต่ำที่สุดจากผลวัดไปตามแนวแกน x ให้ระยะอ่านที่มีค่าเท่ากันจากการวัดทับกับระยะอ่านจากการจำลองผลการทำงาน ทำให้เปอร์เซ็นต์การเลื่อนความถี่ผิดพลาดจากความเป็นจริง โดยเฉพาะเมื่อตรวจสอบการเลื่อนผลของระยะอ่านตามแนวแกน x จากภาพที่ 64 พบว่าระยะอ่านสูงสุดจากการจำลองผลการทำงานที่เท่ากัน ระยะอ่านจากการวัดสูงสุดไม่จำเป็นที่จะต้องอยู่ในความถี่เดียวกันเสมอไป ซึ่งปัญหาดังกล่าวนี้ข้อสันนิษฐานหนึ่งอาจจะเกิดจากค่าอัตราขยายของสายอากาศของผลที่เกิดจากการจำลองผลการทำงาน ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงอัตราขยายดังนี้

วิธีการเริ่มจากค่าอัตราขยายสายอากาศในโหมดไดโพลในส่วนของอัตราขยาย พบว่าจาก (Balanis, 2005) ได้ให้ข้อมูลค่าไดเรกทิวิตีไว้เท่ากับ 2.156 dB ซึ่งในส่วนของการจำลองผลการ

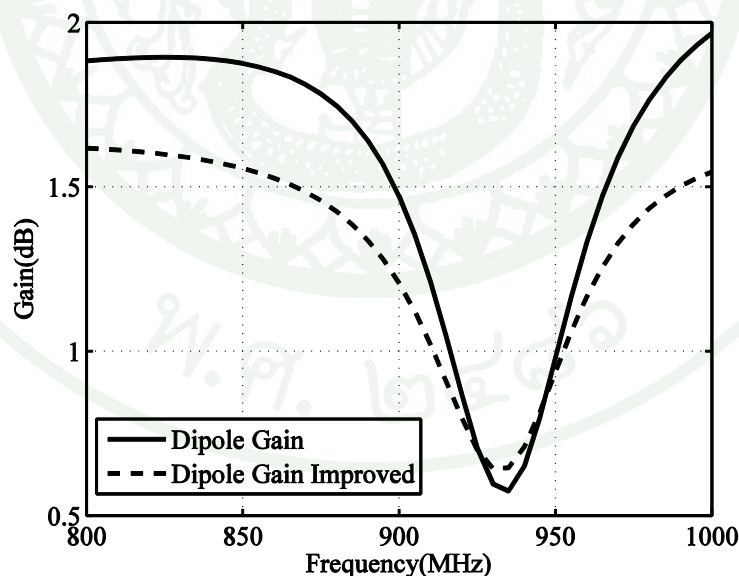
ทำงานพบว่าค่าไดเรกทิวิตี้นั้นมีค่ามากกว่าข้อมูลที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงต้องปรับปรับค่าอัตราขยาย ดังสมการที่ (49) และ (50)

$$(G_{new}^{dipole})_{dB} = (e_{cd}^{sonnet})_{dB} + 2.156 \quad (49)$$

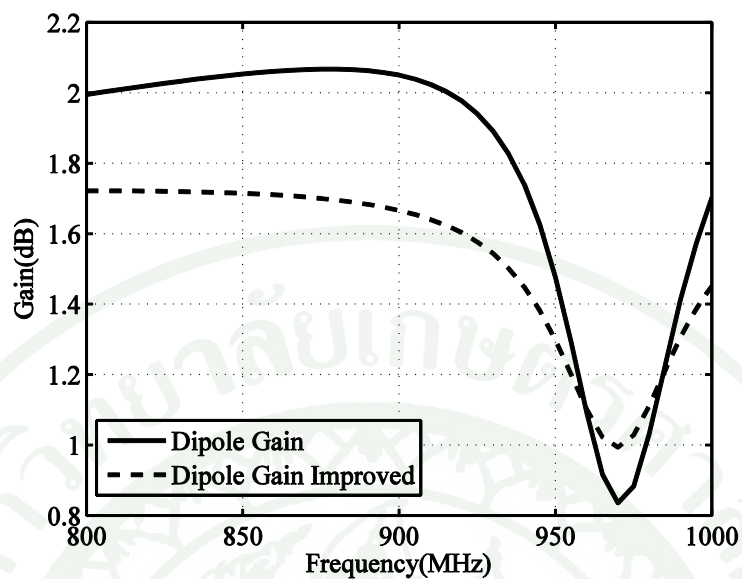
เมื่อ  $(e_{cd}^{sonnet})_{dB}$  คือ ค่าประสิทธิภาพของสายอากาศในการแผ่กระจายคลื่นจาก โปรแกรม Sonnet สามารถหาได้ดังสมการที่ (50)

$$(e_{cd}^{sonnet})_{dB} = (D_{sonnet})_{dB} - (G_{sonnet})_{dB} \quad (50)$$

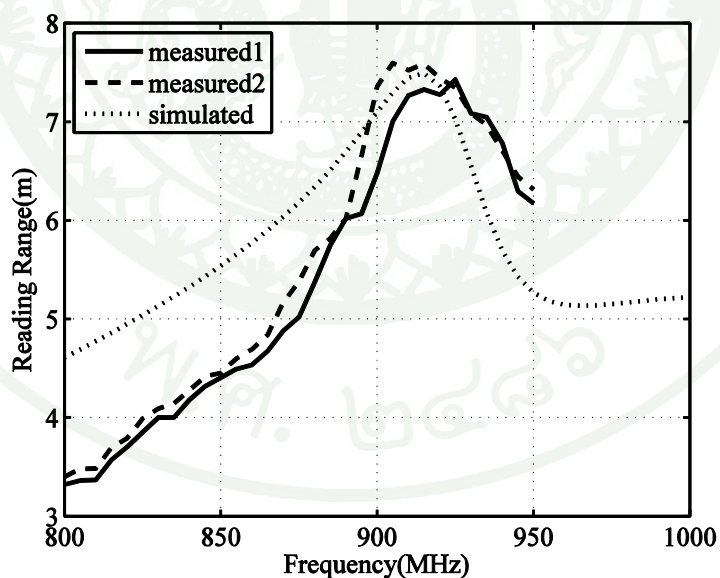
จากสมการที่ (49)  $G_{new}^{dipole}$  คือ ค่าอัตราขยายของโหมคไดโพลที่ผ่านการปรับปรุงค่า ไดเรกทิวิตี  $D_{sonnet}$  คือ ค่าไดเรกทิวิตีที่ได้จากโปรแกรมการจำลองผลการทำงาน  $G_{sonnet}$  คือ อัตราขยายที่ได้จากโปรแกรมการจำลองผลการทำงานโดยค่า  $G_{new}^{dipole}$  ของโหมคไดโพล AntXI จะ แสดงไว้ดังภาพที่ 68 และอัตราขยายของโหมคไดโพล AntXII จะแสดงไว้ดังภาพที่ 69 ระยะเวลาอ่าน ของ AntXI ดังภาพที่ 70 และ AntXII ดังภาพที่ 71



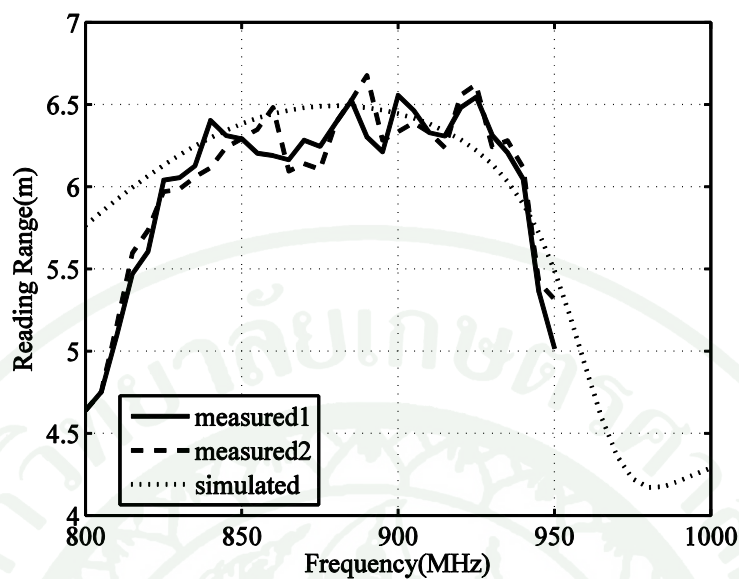
ภาพที่ 68 แสดงอัตราขยายจำลองผลการทำงานและอัตราขยายจำลองผลการทำงานที่ปรับปรุงแล้ว ของสายอากาศ AntXI ในโหมคไดโพลที่มีค่าไดเรกทิวิตีไว้เท่ากับ 2.156 dB



ภาพที่ 69 แสดงอัตราขยายจำลองผลการทำงานและอัตราขยายจำลองผลการทำงานที่ปรับปรุงแล้วของสายอากาศ AntXII ในโหมดไดโพลที่มีค่าไดเรกทิวิตี้ไว้เท่ากับ 2.156 dB



ภาพที่ 70 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXI ในโหมดไดโพลที่มีค่าไดเรกทิวิตี้ไว้เท่ากับ 2.156 dB



ภาพที่ 71 แสดงระยะอ่านระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงของสายอากาศ AntXII ในโหมดไดโพลที่มีค่าไดเรกทิวิตี้ไว้เท่ากับ 2.156 dB

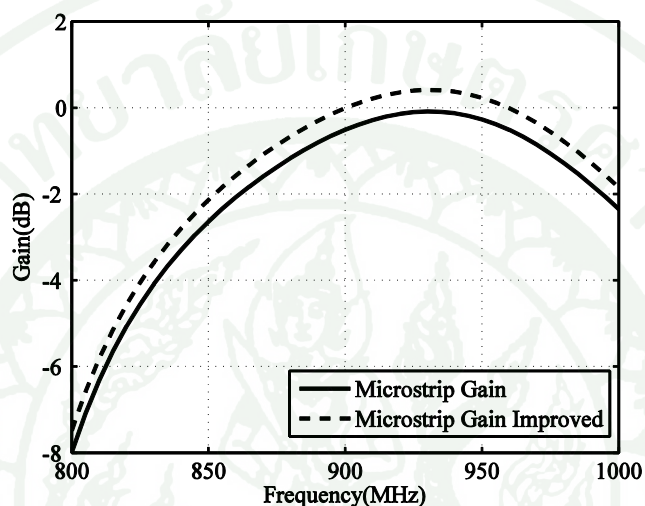
เพื่อตรวจสอบว่าอัตราขยายมีผลต่อระยะอ่านในแนวแกน  $y$  หรือไม่ขึ้นตอนถัดมาก็คือการเลื่อนความถี่ของอัตราขยายสูงสุดที่ได้จากผลการจำลองผลการทำงาน ให้ตรงกับความถี่ที่ให้ค่าระยะอ่านสูงสุดในแนวแกน  $y$  และปรับ  $P_{th}$  ให้ระยะอ่านสูงสุดเท่ากันดังตารางที่ 50

ตารางที่ 50 แสดงการปรับ  $P_{th}$  เพื่อให้ระยะอ่านสูงสุดของผลการจำลองผลการทำงานมีค่าใกล้เคียงกับผลการวัดจริง

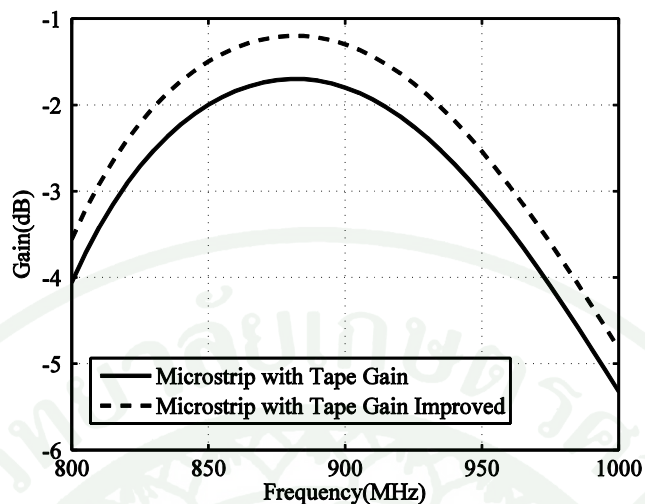
สายอากาศ	$P_{th}$ ก่อนปรับ (dBm)	$P_{th}$ หลังปรับ (dBm)
Ant XI	-14	-14.5
Ant XII	-11.5	-12

เมื่อทำการปรับ  $P_{th}$  และการเลื่อนความถี่ของอัตราขยายสูงสุดให้ตรงกับความถี่ของระยะอ่านสูงสุดแล้ว จากนั้นก็นำข้อมูลของระยะอ่านมาแสดงผลของสายอากาศ โดยที่ปรับอัตราขยาย

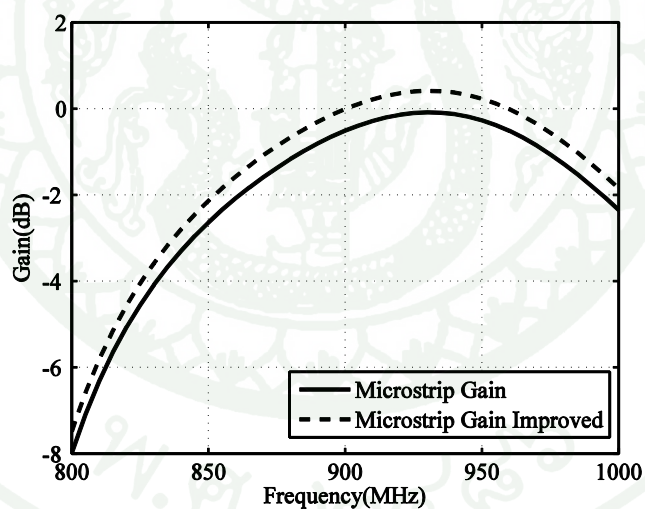
ของผลการจำลองผลการทำงานเพิ่ม โดยให้ระยะอ่านสูงสุดใกล้เคียงกับผลของการวัด โดยแสดงการปรับอัตราขยายเพิ่มของสายอากาศ AntXI ดังภาพที่ 72 และ 73 ปรับอัตราขยายเพิ่มของสายอากาศ AntXII ซึ่งค่าอัตราขยายจะเพิ่มขึ้นในแนวแกน y ดังภาพที่ 74 และ 75 และสรุปการปรับอัตราขยายเพิ่มดังตารางที่ 51



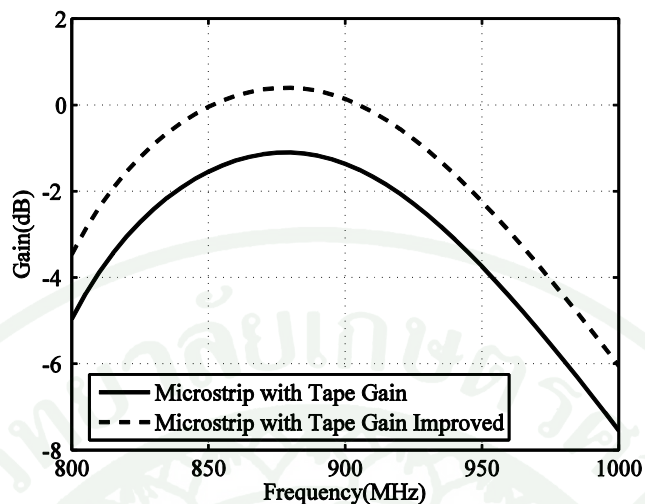
ภาพที่ 72 แสดงอัตราขยายของสายอากาศ AntXI ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่ติดเทปที่นำผลการจำลองผลการทำงาน และอัตราขยายที่ปรับปรุงใหม่จะผลการจำลองผลการทำงานเดิม



ภาพที่ 73 แสดงอัตราขยายของสายอากาศ AntXI ในโหมดไมโครสตริปแบบติดเทปที่นำผลการจำลองผลการทำงาน และอัตราขยายที่ปรับปรุงใหม่จะผลการจำลองผลการทำงานเดิม



ภาพที่ 74 แสดงอัตราขยายของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่ติดเทปที่นำผลการจำลองผลการทำงาน และอัตราขยายที่ปรับปรุงใหม่จะผลการจำลองผลการทำงานเดิม



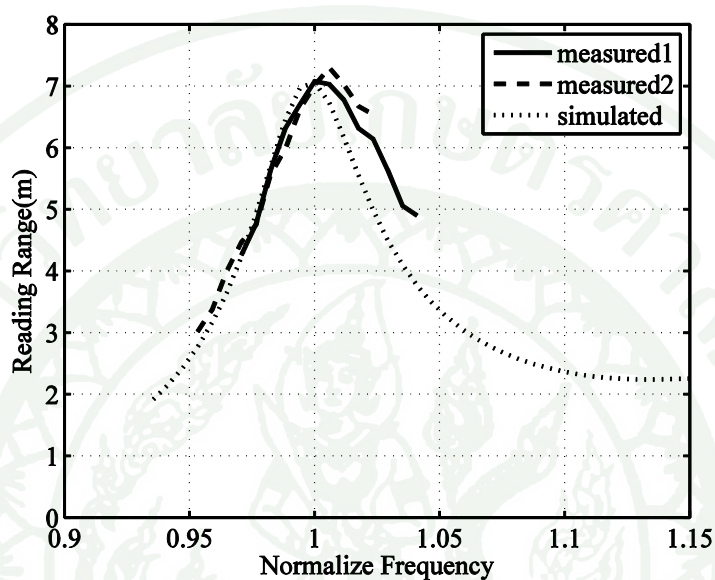
ภาพที่ 75 แสดงอัตราขยายของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบติดเทปที่นำผลการจำลองผลการทำงาน และอัตราขยายที่ปรับปรุงใหม่จะผลการจำลองผลการทำงานเดิม

ตารางที่ 51 แสดงค่าอัตราขยายที่ปรับเพิ่มของสายอากาศ AntXI และ AntXII โหมดไมโครสตริปแบบมีเทปและแบบไม่มีเทปเพื่อระยะอ่านสูงสุดจากผลการจำลองผลการทำงานใกล้เคียงกับผลการวัด

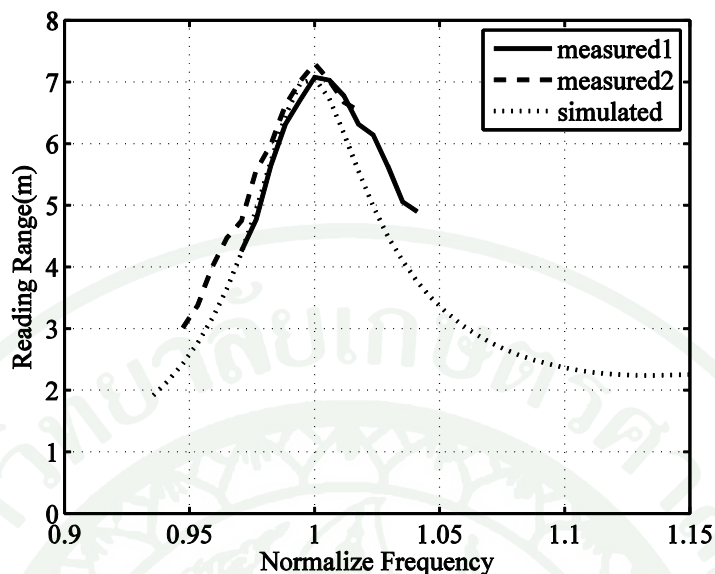
สายอากาศ	โหมด	อัตราขยายที่ปรับเพิ่ม dB
AntXI	ไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	1.5
AntXI	ไมโครสตริปแบบมีเทป	0.5
AntXII	ไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	0.5
AntXII	ไมโครสตริปแบบมีเทป	1.5

เมื่อทำการปรับปรุงค่าอัตราขยายของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปแล้ว จึงนำค่าอัตราขยายมาคำนวณระยะอ่านเทียบกัน ระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริง เฉพาะสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบที่ติดเทปด้านล่างเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของระยะอ่านของสายอากาศที่เกิดจากผลการจำลองผลการทำงาน โดยที่จะทำการเลื่อนผลการวัดที่

มีระยะที่เท่ากันมาอยู่ในความถี่เดียวกันกับผลการจำลองผลการทำงานดังภาพที่ 76 และนำผลการวัดระยะอ่านสูงสุดจากผลการวัดเลื่อนมาอยู่ที่ความถี่เดียวกับระยะอ่านสูงสุดของผลการจำลองผลการทำงานดังภาพที่ 77



ภาพที่ 76 แสดงสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบตีเทปที่ปรับปรุงค่าอัตราขยายโดยทำการเลื่อนผลการวัดที่มีระยะที่เท่ากันมาอยู่ในความถี่เดียวกันกับผลการจำลองผลการทำงาน

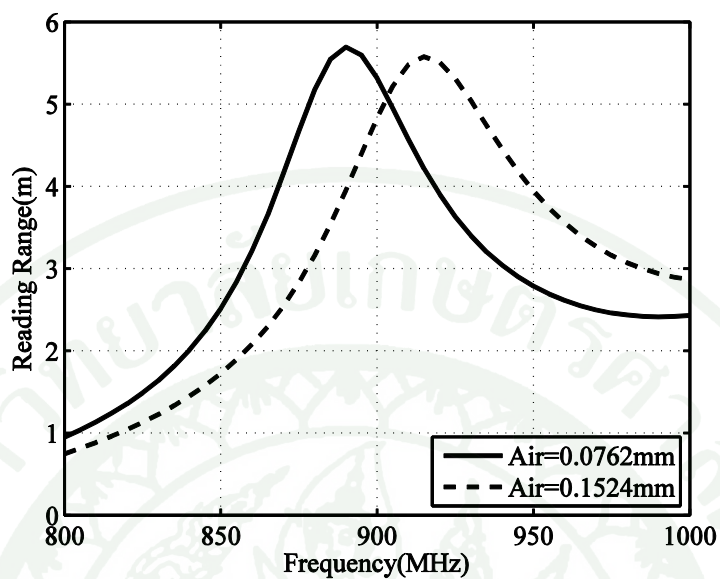


ภาพที่ 77 แสดงสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบตีดเทปที่ปรับปรุงค่าอัตราขยายโดยนำผลการวัดระยะอ่านสูงสุดจากผลการวัดเลื่อนมาอยู่ที่ความถี่เดียวกับระยะอ่านสูงสุดของผลการจำลองผลการทำงาน

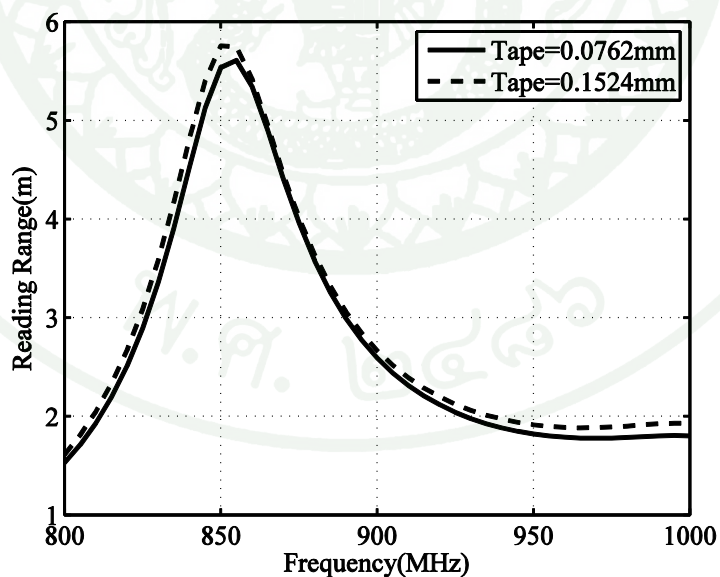
เมื่อทำการปรับปรุงค่าอัตราขยายให้เหมาะสมใหม่ พบว่าระยะอ่านจากการจำลองผลการทำงานของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปทั้งหมดเลื่อนขึ้นในแนวแกน  $y$  หรือระยะอ่านสูงขึ้น ทำให้การเทียบระยะอ่านที่เท่าระหว่างจากผลการจำลองผลการทำงานกับผลการวัดมีความผิดพลาดของค่า  $f_{shift}(\text{percentage})$  ลดลงดังภาพที่ 75 และแทบไม่เห็นความแตกต่างกับการเทียบระยะอ่านสูงสุดระหว่างผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัด

**กรณีของผลของระยะอ่านเกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากปัจจัยเกี่ยวกับชั้นของอากาศและชั้นเทปของสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีในโหมดไมโครสตริป**

สำหรับสายอากาศที่ผลระยะอ่านสูงสุดอยู่ที่ความถี่ไม่เท่ากันนั้นอาจเป็นเพราะความหนาของชั้นอากาศและเทปที่ไม่เท่ากันดังนั้นจึงทดลองปรับชั้นอากาศและชั้นเทปเปรียบเทียบเป็นสองเท่าจากเดิม โดยทำการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntXII ซึ่งปรับชั้นความหนาของอากาศและเทปเทียบกัน โดยผลความหนาของของเทปและอากาศที่จะเปรียบเทียบกันเท่ากับ 0.0762 มิลลิเมตร และ 0.1524 มิลลิเมตร ซึ่งผลระยะอ่านในชั้นอากาศจะแสดงดังภาพที่ 78 และเทปดังภาพที่ 79



ภาพที่ 78 แสดงระยะอ่านจะผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntXII โดยเปรียบเทียบ  
ชั้นความหนาของชั้นอากาศ

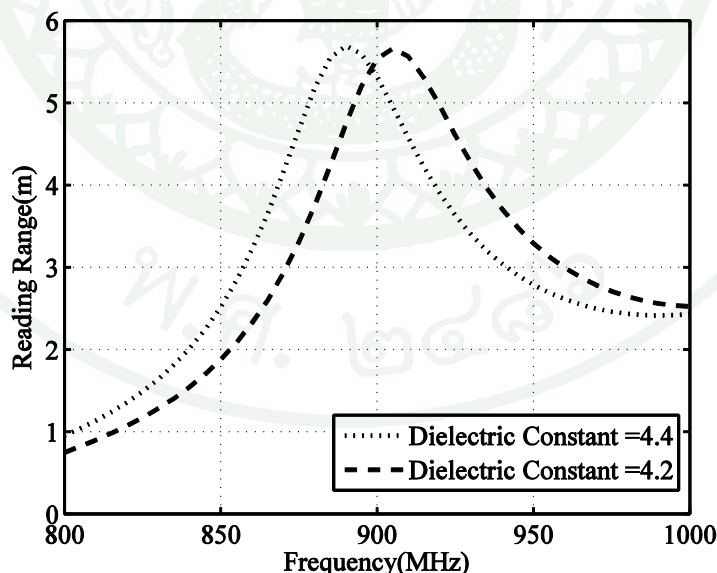


ภาพที่ 79 แสดงระยะอ่านจะผลการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntXII โดยเปรียบเทียบ  
ชั้นความหนาของชั้นเทป

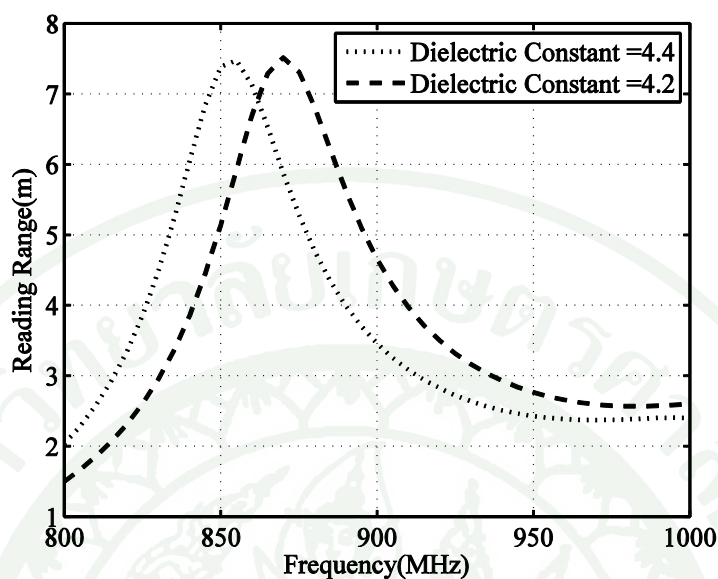
จากผลช่องอากาศดังภาพที่ 78 และช่องเทปดังภาพที่ 79 พบว่าชั้นอากาศมีผลต่อการเลื่อนความถี่ไปแนวแกน x มากเมื่อเทียบเทียบกับกันเทป โดยผลของการเพิ่มของชั้นอากาศนั้นพบว่าเมื่อชั้นอากาศยังมีค่ามากระยะอ่านสูงสุดก็จะเลื่อนไปในความถี่ที่สูงด้วย สำหรับผลการวัดจริงในกรณี โหมดไมโครสตริปที่ติดเทปนั้นสาเหตุที่มีผลต่อการการเลื่อนความถี่อาจเป็นเพราะเวลาติดเทปนั้นเทปอาจไม่แนบสนิททุกจุด ซึ่งอาจจะมีชั้นอากาศแทรกอยู่ได้และความหนาที่นำเสนอของชั้นอากาศและเทปนั้นยากที่จะสังเกตด้วยตาเปล่า ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะมีชั้นอากาศแทรกอยู่ระหว่างเทปกับแผ่นซับสเตรทเอพาร์โพร์และแทรกระหว่างชั้นเทปกับทองแดงได้

### ปัญหาที่เกิดจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสำหรับเอพาร์โพร์

เนื่องจากการวิจัยฉบับนี้ออกแบบสายอากาศที่ใช้เอพาร์โพร์เป็นซับสเตรท โดยกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือ  $\epsilon_r$  มีค่าเท่ากับ 4.4 แต่ในงานวิจัยของ (ศศิวิมล, 2553) ได้ทำการทดลองหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือ  $\epsilon_r$  มีค่าเท่ากับ 4.2 ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยการจำลองผลการทำงานของสายอากาศ AntXII โดยกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือ  $\epsilon_r$  มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.2 ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่ติดเทปดังภาพที่ 80 และแบบติดเทปดังภาพที่ 81



ภาพที่ 80 แสดงระยะอ่านของผลการจำลองผลการทำงาน โดยกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือ  $\epsilon_r$  มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.2 ของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบไม่มีเทป



ภาพที่ 81 แสดงระยะอ่านของผลการจำลองผลการทำงาน โดยกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือ  $\epsilon_r$  มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.2 ของสายอากาศ AntXII ในโหมดไมโครสตริปแบบมี เทป

จากผลการจำลองผลการทำงานพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือ  $\epsilon_r$  มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.2 ได้ระยะอ่านสูงสุดในความถี่ที่ต่างกันดังตารางที่ 52

ตารางที่ 52 แสดงระยะอ่านสูงสุดเมื่อหรือ  $\epsilon_r$  มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.2 และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างทางความถี่ที่ให้ระยะ อ่านสูงสุด

โหมดของสายอากาศ AntXII	ความถี่ที่ให้ระยะอ่านสูงสุดเมื่อ $\epsilon_r$ เท่ากับ 4.4 (เมกกะเฮิร์ต)	ความถี่ที่ให้ระยะอ่านสูงสุดเมื่อ $\epsilon_r$ เท่ากับ 4.2 (เมกกะเฮิร์ต)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างทางความถี่ที่ให้ระยะอ่านสูงสุดระหว่าง $\epsilon_r$ มีค่าเท่ากับ 4.4 และ 4.2
ไมโครสตริปแบบไม่มีเทป	855	870	1.75
ไมโครสตริปแบบมีเทป	890	905	1.68

จากการทดลองโดยการจำลองผลการทำงานพบว่าค่า  $\varepsilon_r$  ที่ต่างกันมีผลต่อการเลื่อนระยะอ่านสูงสุดไปตามแนวแกน x โดยเมื่อค่า  $\varepsilon_r$  น้อยลงผลของระยะอ่านสูงสุดจะเลื่อนไปทางขวาตามแนวแกน x หรือระยะอ่านสูงสุดจะอยู่ในความถี่สูงกว่าประมาณ 1.6 - 1.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสรุปได้ว่าปัจจัยหนึ่งระยะอ่านสูงสุดที่เกิดจากการวัดคลาดเคลื่อนนั้นส่วนหนึ่งอาจเกิดจากค่า  $\varepsilon_r$  ของผลการจำลองผลการทำงานและการวัดจริงไม่ตรงกัน



## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยฉบับนี้ได้ปรับปรุงการออกแบบสายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดี จากงานวิจัยของ (ศศิวิมล, 2553) ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอรูปแบบสายอากาศเพียงชั้นเดียว โดยขั้นตอนการออกแบบนั้นชัดเจนกว่างานวิจัยของ (ศศิวิมล, 2553) โดยเริ่มจากหาขนาดแพทช์  $L_1$  จากนั้นหาความยาวของสายป้อนสัญญาณ  $L_2$  จากนั้นหาค่า  $L_3$  ที่มีค่าแอดมิทแตนซ์ของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปส่งผลกระทบน้อยที่สุด จากนั้นหาค่า  $W_1$  ตามค่า  $Z_0$  ต่อมาหาค่า  $S_1$  เพื่อให้สายอากาศโหมดไมโครสตริปแมตช์ได้อย่างสมบูรณ์ และสุดท้ายหาค่า  $S_2$  จากโปรแกรมจำลองผลการทำงาน เพื่อที่จะให้แมตช์กับสายอากาศโหมดไดโพลมากที่สุด โดยวิธีการที่งานวิจัยนี้นำเสนอมานั้นในโหมดไมโครสตริปจะสามารถแมตช์ค่าอิมพีแดนซ์ได้สมบูรณ์กว่าโหมดไดโพล

ส่วนผลการจำลองผลการทำงานพบว่า สายอากาศในโหมดไดโพลที่ออกแบบโดยใช้ชั้นสเตรททอพอาร์โพร์เปรียบเทียบกับสายอากาศในแต่ละตัวพบว่าระยะอ่านที่ดีที่สุดมีค่า 9.5 เมตร (AntIV) ส่วนระยะอ่านที่แย่ที่สุดจากผลการจำลองผลการทำงานนั้นมีค่า 5.4 เมตร (AntIX) ส่วนสายอากาศในโหมดไมโครสตริปนั้นจากผลการจำลองผลการทำงานพบว่าระยะอ่านที่ดีที่สุดมีค่า 7.4 เมตร (AntIV) และระยะอ่านที่แย่ที่สุดมีค่า 0.5 เมตร (AntX) จากนั้นเมื่อตรวจสอบวิธีการหาระยะอ่านพบว่าปัจจัยสำคัญอีกประการที่มีผลต่อระยะอ่านคือค่าอัตราขยาย ซึ่งสายอากาศโหมดไดโพลนั้นจะมีอัตราขยายมีการเปลี่ยนแปลงน้อยคือมีค่าระหว่าง 0.99 - 1.7 dB เมื่อเทียบกับค่าอัตราขยายของโหมดไมโครสตริปพบว่า ค่าอัตราขยายค่อนข้างกว้างและมีค่าอัตราขยายน้อยกว่าสายอากาศในโหมด ไดโพลทุกกรณีสำหรับสายอากาศที่ใช้เอพอาร์โพร์ โดยในการเปรียบเทียบของสายอากาศในแต่ละตัว ค่าอัตราขยายสูงสุดของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปจะมีค่า -1.10 dB (AntIV) และค่าอัตราขยายต่ำสุดจะมีค่า -8.76 dB (AntX) เมื่อศึกษาปัจจัยที่ทำให้อัตราขยายเปลี่ยนแปลงพบว่าขนาดของแพทช์  $L_1$  มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของอัตราขยายโดยตรง ทำให้ต้องออกแบบค่า  $L_1$  ให้อยู่ในช่วงใกล้เคียงค่า  $L_1$  ที่ได้จากสมการที่ (23) มากที่สุดเพื่อให้อัตราขยายของสายอากาศในโหมดไมโครสตริปสูงสุด

ส่วนการสร้างสายอากาศที่ใช้งานจริงนั้นพบว่าสายอากาศในโหมดไดโพลนั้นสามารถวัดได้ในช่วงความถี่ที่กว้างกว่าสายอากาศในโหมดไมโครสตริป นอกจากนี้ยังพบว่าสายอากาศใน

โหมคไมโครสตริปนั้นสำหรับระยะอ่านจากการวัดที่เท่ากับระยะอ่านที่มาจากผลการจำลองผลการทำงานพบว่าจากการวัดจะอยู่ในความถี่ที่สูงกว่า ดังนั้นจึงออกแบบสายอากาศตามข้อมูลของค่า  $f_{shift}(\text{percentage})$  สำหรับสายอากาศ AntIV ออกแบบเป็นสายอากาศ AntXI และสายอากาศ AntXII โดยออกแบบที่ความถี่สำหรับโหมคไมโครสตริปที่ 870 เมกกะเฮิร์ต และ 860 เมกกะเฮิร์ตตามลำดับ ส่วนโหมคไดโพลจะออกแบบที่ความถี่ 922.5 เมกกะเฮิร์ตเหมือนเดิม จากนั้นหาระยะอ่านโดยเปรียบเทียบระยะอ่านจากการจำลองผลการทำงานและระยะอ่านจากการวัด พบว่าระยะอ่านจากการวัดในโหมคไมโครสตริปนั้นระยะอ่านสูงสุดอยู่ในความถี่ที่ต่ำกว่าสายอากาศ AntIV อย่างไรก็ตามระยะอ่านสูงสุดนั้นยังไม่อยู่ที่ 922.5 เมกกะเฮิร์ต ดังนั้นจึงทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยพบว่าสาเหตุแรกเกิดจากข้อมูลของ  $f_{shift}(\text{percentage})$  ผิดพลาดจึงทำให้การเลือกความถี่ของสายอากาศในโหมคไมโครสตริปผิดพลาดด้วย ซึ่งสาเหตุความผิดพลาดนั้นไม่สามารถตรวจสอบได้เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องวัดเนื่องเครื่องวัดจะวัดได้ในช่วงความถี่ 800 - 950 เมกกะเฮิร์ต สาเหตุถัดมาคือความผิดพลาดอีกประการ คือการตีพิมพ์ไม่แนบสนิทกับตัววัสดุซึ่งสรุปได้ว่าความหนาของชั้นอากาศมีผลต่อระยะอ่านสูงสุดโดยพบว่าส่วนของชั้นอากาศยิ่งมากระยะอ่านสูงสุดจะตกอยู่ในความถี่ที่สูงขึ้นด้วย และสาเหตุความผิดพลาดสุดท้ายนั้นเกิดจากค่า  $\epsilon_r$  ของผลการจำลองผลการทำงานและผลการวัดจริงไม่ตรงกัน โดยที่ค่า  $\epsilon_r$  จากผลการจำลองผลการทำงานเท่ากับ 4.4 และ  $\epsilon_r$  ของจริงที่ได้จาก (ศศิวิมล, 2553) เท่ากับ 4.2

### ข้อเสนอแนะ

สายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีที่ออกแบบในงานวิจัยฉบับนี้นั้นสำหรับสายอากาศที่สมบูรณ์ที่สุดในงานวิจัยฉบับนี้คือสายอากาศ AntXI และสายอากาศ AntXII สามารถใช้งานได้ที่ความถี่เอชเอฟของไทยคือความถี่ 920 - 925 เมกกะเฮิร์ต ได้ทั้งสองโหมด แต่จุดด้อยในตัวสายอากาศนี้คือขนาดของสายอากาศ

โดยขนาดของสายอากาศนั้น ถ้าเลือกสายอากาศที่ให้คุณภาพสูงสุดคือ สายอากาศ AntXI และสายอากาศ AntXII นั้นจะพบว่าขนาดของความกว้างต่ำสุดคือ 7.9 เซนติเมตร และความยาวต่ำสุดประมาณ 14 - 15 เซนติเมตร ซึ่งไม่เหมาะกับการนำตัวป้ายติดสินค้าที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของตัวสายอากาศ วิธีการที่แก้ปัญหาที่ง่ายที่สุดคือการหักสายส่งที่มีความยาว  $L_2$  และ  $L_3$  ซึ่งวิธีการนี้จะลดได้เฉพาะส่วนความยาวของสายอากาศเท่านั้น และเมื่อหักสายส่งดังกล่าวค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศก็จะเปลี่ยนไป และส่วนอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดขนาดของสายอากาศลงได้คือ เมื่อตรวจสอบส่วนที่เป็นปัญหาด้านความกว้างของสายอากาศ พบว่าค่า  $L_1$  มีผลต่อขนาดความกว้างของสายอากาศ แต่เมื่อปรับค่า  $L_1$  ลดลงอัตราขยายของสายอากาศก็จะลดลง และระยะอ่านที่ได้ก็จะสั้นลงด้วย ซึ่งปัญหาที่ปรับค่า  $L_1$  ไม่ได้คือค่าอัตราขยาย เมื่อตรวจสอบปัจจัยที่จะเพิ่มค่าอัตราขยายพบว่าค่าความสูญเสียในเนื้อของฉาบสเตรทจะให้ผลดังภาพที่ 26 มีผลต่ออัตราขยายโดยตรงดังนั้นวิธีที่จะสร้างสายอากาศที่มีค่า  $L_1$  น้อยๆนั้นควรจะเปลี่ยนวัสดุที่มีค่าความสูญเสียในเนื้อฉาบสเตรทน้อยๆ

สำหรับข้อเสียอีกจุดหนึ่งคือการแมตซ์ของสายอากาศในโหมดไดโพลยังไม่สามารถแมตซ์ได้ใกล้เคียงค่าคอนจูเกตค่าอิมพีแดนซ์ของชิพ จึงเป็นแนวทางในการศึกษาหาวิธีการแมตซ์ของสายอากาศในโหมดโพลต่อไปในอนาคต

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ศศิวิมล อ่อนสุทธิ. สายอากาศสำหรับป้ายอาร์เอฟไอดีที่ติดกับผิวโลหะและอโลหะ. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2553.

Balanis, C. 2005. **Antenna Theory Analysis and Design**. 3 ed. John Wiley & Son, USA.

Bancroft, R. 2008. **Microstrip and Printed Antenna Design**. 2 ed. SciTech Publishing Inc., USA.

Chen, S.L. Lin K.H. and R. Mittra. 2009. A Low Profile RFID Tags Designed for Metallic Objects. **IEEE Microwave Conference**. 9:226 - 228

Dobkin, D. 2008. **The RF in RFID Passive RFID in Practice**. 1 ed. Elsevier, USA.

Finkenzeller, K. 2003. **RFID Handbook**. 2 ed. John Wiley & Son, USA.

Heaviside, O. 1894. **Electrical Papers vol 2**. Macmillan and Co and London, USA.

Integrated Publishing. n.d. **Table 4 - 1.- Dielectric Constants of Materials**.

Availible Source: [http://electriciantraining.tpub.com/14193/css/14193\\_138.htm](http://electriciantraining.tpub.com/14193/css/14193_138.htm),  
December 20, 2013.

Kim, K.H. J.G. Song, D.H. Kim, H.S. Hu and J.H. Park. 2009. RFID tag antenna mountable on metallic surfaces and matching method by parasitic patches. **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**. 8 :1 - 4.

Mouser Electronic. n.d. **RFID Transponder SMART LABEL IC UCODE G2XL.**

Available Source : <http://th.mouser.com/ProductDetail/NXP/SL3S1202FTT118/?qs=pw%2f%252b4fOKvQtADcrKvLGO7A%3d%3d>,  
February 20, 2012.

National Instruments Corporation. 2009. **Advanced RFID Measurements Basic Theory to Protocol Conformance Test.**

Available Source: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6645>,  
February 20, 2012.

NXP Semiconductor. 2011. **UCODE G2XM and G2XL Products Data Sheet.**

Available Source: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/SL3ICS1002\\_1202\\_139036.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SL3ICS1002_1202_139036.pdf),  
March 2, 2012.

Radar Systems Panel of the IEEE Aerospace and Electronic Systems Society. 2003. **IEEE Standard Letter Designations for Radar - Frequency Bands.**

Available Source: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01160089>,  
April 30, 2012.

Stutzman, W. and G. Thele. 1998. **Antenna and Theory and Design.** 2 ed. John Wiley & Son, USA.



# Simulated Results for Single Layer Dual Mode Antennas for UHF RFID Tag using Open Stubs

Denchai Worasawate<sup>1</sup> and Sittikit Pechsuwan<sup>2</sup>

Department of Electrical Engineering,  
Faculty of Engineering, Kasetsart University  
Bangkok 10900, Thailand  
fengdcw@ku.ac.th<sup>1</sup>, sittikit@gmail.com<sup>2</sup>

**Abstract**— This paper proposes a single layer structure of a tag antenna for UHF RFID. The antenna can be used in both metallic and non-metallic surfaces. The antenna operates as a microstrip antenna when it is attached to a metallic surface and operates as a dipole antenna when it is attached to a non-metallic surface. The antenna is designed on Teflon substrate with the thickness of 1.52 mm to match NXP UCODE G2XL. The RFID-chip impedance is a resistor of 1385 ohm in parallel with a capacitor of 1.16 pF. This gives the impedance of  $16-j147$  ohm at 922.5 MHz. The simulated antenna impedance and reading range of the antenna are reported.

**Keywords**— UHF RFID, dipole antenna, microstrip antenna, passive RFID, dual mode antenna

## I. INTRODUCTION

The affects of the environment on the performance of UHF RFID tags [1]–[2] have been studied. Most of commercially available UHF RFID tags are designed for either non-metallic or metallic environment. Mounting the tags on an undesired environment degrades its performance significantly.

Dual mode antenna for UHF RFID tag has been proposed by [3] in 2009. The structure proposed in [3] requires two layers of copper trace and the performance is highly depends on the thickness and dielectric constant of the adhesive tape. This paper presents a single layer mode tag antenna. The antenna is either a dipole-like antenna or a microstrip antenna when mounted on either a non-metallic surface or a metallic surface, respectively. The proposed structure gives a tuning flexibility on the antenna impedance for each operation mode separately. Sonnet *em* Suite [4] is used as a simulation tool in this work. The simulated results show a good reading distance on both operating modes.

## II. PROPOSED ANTENNA STRUCTURE

The proposed antenna is designed for two operating modes. The cross-section of the antenna attached to a metallic sheet is shown in Fig. 1. The top copper layer with the thickness of 35 micron is used for fabricating the antenna. The 1.52-mm-thick Teflon is used as a substrate with its dielectric constant of 2.2 and loss tangent of 0.0009. 76-micron -thick adhesive tape with its dielectric constant of 4 is used to attach the antenna to a metallic sheet. The antenna operates in microstrip mode when

it is attached to a metallic sheet and in dipole mode when it is attached to a non-metallic object.

The layout of the antenna is shown in Fig. 2. The RFID chip is to be attached between a gap  $G_1$  which is set as 4 mm. The antenna is designed for RFID chip NXP UCODE G2XL [5] and the operating frequency of 922.5MHz which is the allowed frequency in Thailand [6]. The RFID-chip impedance is a resistor of 1385 ohm in parallel with a capacitor of 1.16 pF. This gives the impedance  $Z_{chip} = R_{chip} + jX_{chip}$  of  $16-j147$  ohm or the admittance  $Y_{chip} = G_{chip} + jB_{chip}$  of  $0.7318+j6.7231$  mS at 922.5 MHz.

In this paper, the antenna is designed for the best match in microstrip mode and tuned for maximum possible match for dipole mode. The design process is discussed in Sec. III and IV.

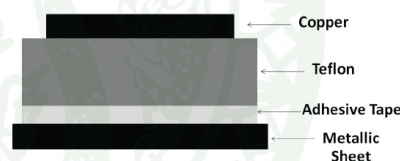


Fig. 1. Metal layers and substrates of proposed antenna in microstrip mode.

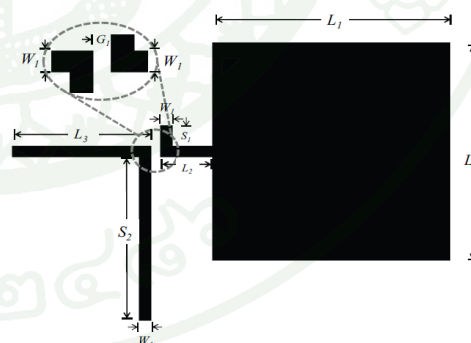


Fig. 2. Layout of proposed antenna.

### III. MICROSTRIP MODE

The layout of a square microstrip patch antenna is shown in Fig. 3. The length  $L_1$  should be less than a wavelength so that the antenna operates in  $TM_{10}$  mode and could be arbitrary chosen since the impedance can be adjusted by matching process. The optimum length  $L_1$  for the maximum gain is about a half wavelength which could be approximated by

$$L_1 = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

where  $c$  is the speed of light in freespace ( $3 \times 10^8$  m/s),  $f_r$  is the operating frequency at 922.5 MHz, and  $\epsilon_r$  is the dielectric constant of the substrate which is 2.2.  $L_1$  obtained from (1) is about 109 mm.

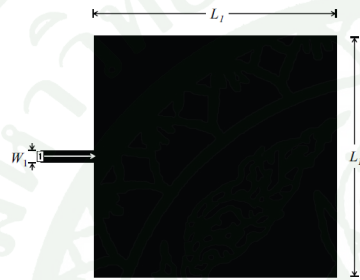


Fig. 3. Square microstrip patch antenna.

The antenna admittance  $Y_{patch} = G_{patch} + jB_{patch}$  at the feeding point is simulated for  $L_1 = 109$  mm and  $L_1 = 101$  mm and reported in Table I. A matching network as shown in Fig. 4 is used. The quarter wavelength line  $L_3$  is used for making a virtual ground at one side of the chip. Its dimensions are shown in Table II. The transmission line  $L_2$  connecting at the feeding point is used for matching the real part and the stub  $S_1$  is used for matching the imaginary part. For simplification of the design, the widths of these three lines are identically chosen as  $W_1$ .

TABLE I. SIMULATED ADMITTANCE OF PATCH ANTENNA AT FEEDING POINT

$L_1$ mm	$Y_{patch}$ mS	$Z_0 = 120$ ohm		$Z_0 = 50$ ohm	
		$G_{micro}^{min}$ mS	$G_{micro}^{max}$ mS	$G_{micro}^{min}$ mS	$G_{micro}^{max}$ mS
109	3.9626+j18.085	0.6718	103.36	2.1588	185.29
101	2.4232-j36.308	0.1208	574.98	0.5626	710.95

TABLE II. DIMENSIONS FOR QUARTER WAVELENGTH LINE

$Z_0$ ohm	$W_1$ mm	$L_3$ ( $\frac{\lambda}{4}$ ) mm
50	4.6	59.10
120	0.8	61.71

The characteristic impedance  $Z_0 = \frac{1}{Y_0}$  of the line  $L_2$  is chosen such  $G_{micro}^{min} < G_{chip} < G_{micro}^{max}$  where  $G_{micro}^{min}$  and  $G_{micro}^{max}$  are obtain from (2) and (3).

$$G_{micro}^{min} = Y_0 \frac{1 - |S_{11}|}{1 + |S_{11}|} \quad (2)$$

$$G_{micro}^{max} = Y_0 \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (3)$$

where  $|S_{11}| = \left| \frac{Y_0 - Y_{patch}}{Y_0 + Y_{patch}} \right|$ .  $G_{micro}^{min}$  and  $G_{micro}^{max}$  for an 120-ohm line ( $W_1 = 0.8$  mm) and a 50-ohm line ( $W_1 = 4.6$  mm) are reported in Table I. The real parts of the antennas with  $L_1 = 101$  mm and 109 mm can be matched with a 120-ohm line but only  $L_1 = 101$  mm can be matched with a 50-ohm line. The length  $L_2$  can be calculated by numerically solving (4).

$$G_{chip} = Re \left[ \frac{Y_{patch} + jY_0 \tan(2\pi L_2^\lambda)}{Y_0 + jY_{patch} \tan(2\pi L_2^\lambda)} \right] \quad (4)$$

where  $Re[Y]$  is a real part of  $Y$  and  $L_2^\lambda$  is the length in wavelengths. The admittance after matching the real part  $Y_{patch}^R = G_{patch}^R + jB_{patch}^R$  and the length  $L_2$  are reported in Table III.

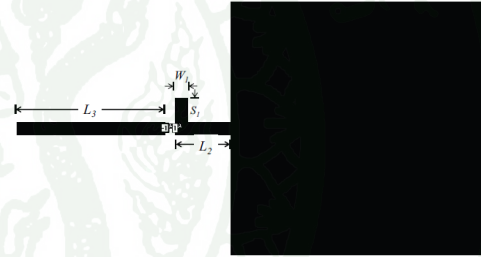


Fig. 4. Layout of proposed antenna for microstrip mode.

TABLE III. CALCULATED ADMITTANCE AFTER MATCHING REAL PART  $Y_{patch}^R$  AND  $L_2$

$L_1$ mm	$Z_0 = 120$ ohm			$Z_0 = 50$ ohm		
	$Y_{patch}^R$ mS	$L_2^\lambda$	$L_2$ mm	$Y_{patch}^R$ mS	$L_2^\lambda$	$L_2$ mm
109	0.7317-j2.477	0.2701	66.67	N/A	N/A	N/A
101	0.7315-j18.73	0.0308	7.603	0.7319-j10.97	0.0902	21.32

The stub  $S_1$  is chosen for matching the imaginary part. The required admittance  $B_{stub}^{micro}$  of the stub is obtained by (5) and the length  $S_1$  is obtained by numerically solving (6).

$$B_{stub}^{micro} = -B_{chip} - B_{patch}^R \quad (5)$$

$$B_{stub}^{micro} = Y_0 \tan(2\pi S_1^\lambda) \quad (6)$$

where  $S_1^\lambda$  is the length in wavelengths. The admittance after matching both the real and imaginary parts  $Y_{patch}^{match} = G_{patch}^{match} + jB_{patch}^{match}$  and the length  $S_1$  are reported in Table IV.

TABLE IV. CALCULATED ADMITTANCE AFTER MATCHING  $Y_{patch}^{match}$  AND  $S_1$

$L_1$ mm	$Z_0 = 120$ ohm			$Z_0 = 50$ ohm		
	$Y_{patch}^{match}$ mS	$S_1^\lambda$ $\lambda$	$S_1$ mm	$Y_{patch}^{match}$ mS	$S_1^\lambda$ $\lambda$	$S_1$ mm
109	0.7317-j6.723	0.4250	104.91	N/A	N/A	N/A
101	0.7315-j6.713	0.1535	37.892	0.7319-j6.723	0.0333	7.8725

Considering the fabrication accuracy and simplifying the simulation set up, the designed dimensions are rounded to 0.5 mm accuracy as shown in Table V. Each designed antenna is simulated for its admittance and reported in Table V.

TABLE V. DESIGNED DIMENSIONS AND SIMULATED ADMITTANCE FOR MICROSTRIP MODE

	$L_1$ mm	$L_2$ mm	$L_3$ mm	$W_1$ mm	$S_1$ mm	Simulated admittance mS
Ant I	109	66.5	62	1	105	0.8281-j6.0539
Ant II	101	7.5	62	1	38	0.7782-j6.0930
Ant III	101	21.5	59	4.5	8	0.7300-j6.4672

#### IV. DIPOLE MODE

To design the antennas in dipole mode, dimensions obtained for microstrip mode are simulated as a 2-port network with the ground plane removed. Port 1 is assigned at the line  $L_2$ . Port 2 is assigned at the line  $L_3$ . The antennas are modeled as a T-network as shown in Fig. 5a. The simulated results are shown in Table VI.  $Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} = Z_1 + Z_2$  is antenna impedance when it has a differential input.

TABLE VI. IMPEDANCE WITHOUT MATCHING FOR DIPOLE MODE

	$Z_1$ ohm	$Z_2$ ohm	$Z_3$ ohm	$Z_{ant}$ ohm
Ant I	50.767+j117.41	56.517+j20.154	13.622+j313.50	107.28+j137.57
Ant II	29.935+j40.536	79.163-j36.963	17.280+j356.55	109.1+j3.5731
Ant III	56.934+j75.481	73.967-j34.192	17.934+j295.27	130.90+j41.289

To improve the matching condition of the antenna, the stub  $S_2$  is added to line  $L_3$  as shown in Fig. 2. Adding the stub  $S_2$  does not have much effect on the impedance of the antenna in microstrip mode because the connecting point is a virtual ground in microstrip mode but would have much more effect on the impedance of the antenna in dipole mode since it acts like shunt impedance  $Z_{stub}^{dipole}$  to  $Z_2$  in Fig. 5a as shown in Fig. 5b. The impedances  $Z_1^*$ ,  $Z_2^*$ , and  $Z_3^*$  in Fig. 5b are the impedances in Fig. 5a having some effect from the stub  $S_2$ . To find the maximum possible match condition, the antenna with

$S_2$  varying from 0 to about quarter wavelength in freespace or 0 to 80 mm is simulated. The transmission coefficient  $\tau$  is calculated by (7) using the simulated impedance. The simulated impedance is shown in Fig. 6. The transmission coefficients  $\tau$  are shown in Fig. 7.  $S_2$  is chosen from Fig. 7 such that the maximum  $\tau$  is obtained. The optimum values of  $S_2$  are 42 mm, 78 mm, and 79 mm for Ant I, Ant II, and Ant III, respectively.

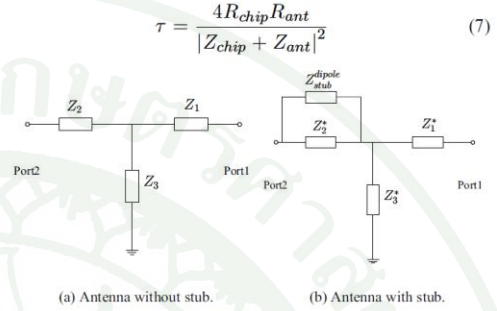


Fig. 5. Model of the antenna in dipole mode.

#### V. SIMULATED RESULTS AND DISCUSSIONS

Designed dimensions of the antennas for the best match in microstrip mode and tuned for maximum possible match for dipole mode are reported in Table VII. These dimensions are used in Sonnet to obtain impedance and gain of each antenna which are reported in Table VIII and IX. Reading range,  $r$ , in Table VIII and IX are calculated by (8) [6] when 4 Watt EIRP (effective isotropically radiated power) is used.

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{EIRP G_r \tau}{P_{th}}} \quad (8)$$

where  $\lambda$  is a wavelength in freespace at 922.5MHz.  $G_r$  is a gain of the antenna.  $\tau$  is a transmission coefficient.  $P_{th}$  of -15dBm is used for the minimum threshold power required for RFID chip to operate. Note that the admittances reported in Table V and Table VIII are slightly different due to effects of adding the stub  $S_2$ .

With the dimensions rounded up to the next ten-mm, Ant I has the largest size of about 250 × 150 mm. Sizes of Ant II and III are about 180 × 120 mm and 190 × 110 mm, respectively. The sizes of these antennas could be reduced by folding the stubs and the feeding lines. Ant I with the largest  $L_1$  should have the largest gain in microstrip mode but the results in Table VIII show opposite. This could be caused by a high loss contributed from the long stub  $S_1$ .

TABLE VII. DIMENSIONS OF FINAL DESIGN ANTENNAS

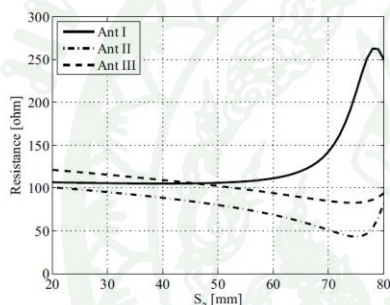
	$L_1$ mm	$L_2$ mm	$L_3$ mm	$W_1$ mm	$S_1$ mm	$S_2$ mm
Ant I	109	66.5	62	1	105	42
Ant II	101	7.5	62	1	38	79
Ant III	101	21.5	59	4.5	8	78

VI. CONCLUSIONS

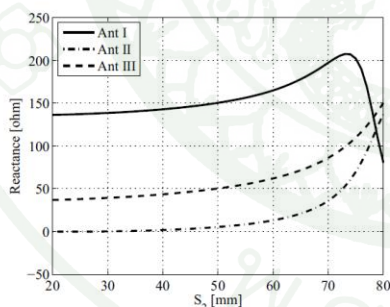
This paper presents a single layer structure for a passive UHF RFID tag antenna mountable on both metallic and non-metallic surfaces. This structure gives a flexibility to tune the antenna impedance of each operation separately. The simulated results show that the reading ranges are good in both modes. The microstrip mode gives a large reading distance on the front side of the metallic sheet but a very small reading distance on the back side. Gain of the antenna in microstrip mode rapidly varies with the reading direction therefore the reading range varies with the reading direction as well. The dipole mode gives a lower reading distance but the tag can be read on both front and back sides of the tag. The gain of the antenna in the dipole mode is almost constant in all direction in a plane perpendicular to the antenna plane so that the reading range is almost constant on the plane.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their gratitude to NTC Telecommunications Research Laboratory, Kasetsart University, Bangkok. Also, they are grateful to Sonnet Software Inc.



(a) Antenna resistance.



(b) Antenna reactance.

Fig. 6. Simulated antenna impedance versus stub  $S_2$ .

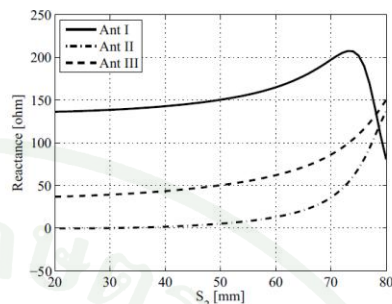


Fig. 7. Transmission coefficients in dipole mode versus stub  $S_2$ .

TABLE VIII. SIMULATED IMPEDANCE, GAIN, TRANSMISSION COEFFICIENT, AND READING RANGE FOR MICROSTRIP MODE

	Admittance mS	Impedance ohm	Gain, $G_r$ dBi	$\mathcal{T}$	Reading Range, $r$ m
Ant I	0.8313-j6.0626	22.20+j161.9	5.2154	0.87	15.7
Ant II	0.7772-j6.1202	20.42+j160.8	5.7544	0.88	16.8
Ant III	0.7444-j6.5156	17.31+j151.5	6.1277	0.99	18.5

TABLE IX. SIMULATED IMPEDANCE, GAIN, TRANSMISSION COEFFICIENT, AND READING RANGE FOR DIPOLE MODE

	Impedance ohm	Gain, $G_r$ dBi	$\mathcal{T}$	Reading Range, $r$ m
Ant I	105.1+j144	1.3736	0.46	7.3
Ant II	64.9+j123.6	0.7412	0.59	7.6
Ant III	86.2+j131.6	1.7706	0.52	8.1

REFERENCES

- [1] L. Sydanheimo, L. Ukkonen, and M. Kivikoski, "Effects of size and shape of metallic objects on performance of passive radio frequency identification", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 30, pp. 897-905, 2006.
- [2] J. D. Griffin, G. D. Durgin, A. Haldi, and B. Kippelen, "RF tag antenna performance on various materials using radio link budgets," *Antennas and Wireless Propagat. Lett.*, vol. 5, no. 1, pp. 247-250, 2006.
- [3] D. Worasawate, S. Onsuthi, P. Pongpaibool, and L. Kovavisaruch, "Passive UHF RFID tag antenna mountable on both metallic and non-metallic surfaces," in *Proceedings of The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation, Imperial Queen's Park Hotel, Bangkok, Thailand, Oct. 20-23, 2009*, pp. 875-878.
- [4] Sonnet Software Inc., <http://www.sonnetsoftware.com/>, (online access 3 May 2013).
- [5] NXP Semiconductors, UCODE G2XM and G2XL, [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/SL31CS1002\\_1202\\_139036.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SL31CS1002_1202_139036.pdf), (online access 12 July 2012).
- [6] D. Daniel, *The RF in RFID Passive RFID in Practice*.: Elsevier, 2008.

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นายสิทธิกิต เพชรสุวรรณ  
เกิดวันที่ 20 พฤศจิกายน 2529  
สถานที่เกิด จังหวัดกรุงเทพมหานคร  
ประวัติการศึกษา วศ.บ.(วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร  
เหนือ  
ตำแหน่งปัจจุบัน ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน  
สถานที่ทำงานปัจจุบัน อาคารวิศวกรรมศาสตร์ 60 ปี ชั้น 5 ห้อง 505/3  
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ ได้รับการตีพิมพ์ผลงานเรื่อง “Simulated results for single  
layer dual mode antennas for UHF RFID tag using open stubs”ใน The  
13<sup>th</sup> International Symposium on Communications and Information  
Technologies (ISCIT2013), pp 81 - 84, 4 - 6 September 2013.Samui  
Island, Thailand.  
ทุนการศึกษาที่ได้รับ -