

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับ
ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง

READER ANTENNA FOR UNIVERSAL RFID APPLICATION

โดย

นางสาวสโรชา	สาเรศ
นางสาวสิริพร	ธรรมธีระ
นางสาวสุชวดา	ทัศนาศนา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับ
ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง
READER ANTENNA FOR UNIVERSAL RFID APPLICATION

โดย

นางสาวสโรชา	สาเรศ
นางสาวสิริพร	ธรรมธีระ
นางสาวสุชาดา	ทัศนาศ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

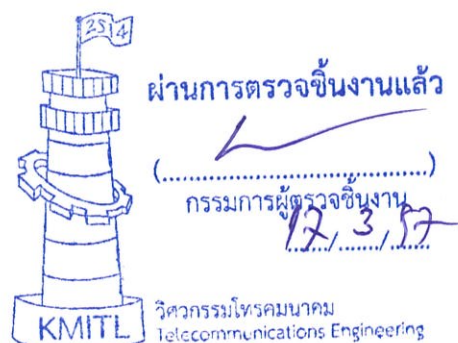
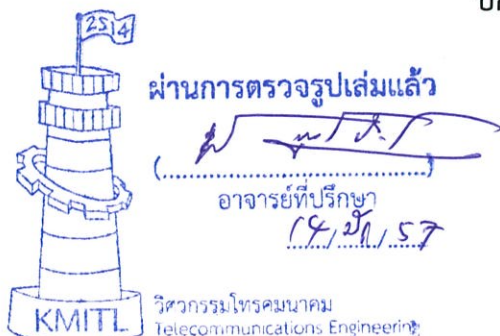
สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับ
ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง
READER ANTENNA FOR UNIVERSAL RFID APPLICATION

โดย

นางสาวสโรชา	สาเรศ	53011653
นางสาวสิริพร	ธรรมธีระ	53011706
นางสาวสุชาดา	ทัศน	53011730

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556



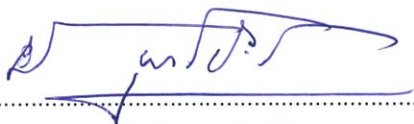
ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง
READER ANTENNA FOR UNIVERSAL RFID APPLICATION

ผู้จัดทำ

- | | |
|--------------------------|----------|
| 1. นางสาวสโรชา สาเรศ | 53011653 |
| 2. นางสาวสิริพร ธรรมธีระ | 53011706 |
| 3. นางสาวสุชาดา ทัดนา | 53011730 |



.....
(รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจากรองศาสตราจารย์ ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทและเป็นผู้ช่วยเหลือแนะนำ ทางด้านการศึกษา รวมทั้งยังอบรมสั่งสอนกลุ่มของข้าพเจ้าอย่างดีตลอดมา ขอขอบคุณสถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) ที่สนับสนุนปริญญาโทนี้ขึ้นมา กลุ่ม ของข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณพี่ๆ และสมาชิกในห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่านสำหรับคำแนะนำ กำลังใจ และข้อคิดดีๆ ตลอดช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณสิทธิชัย เตนต์รี ที่คอย แนะนำแนวทางตลอดจนแนวคิดในการทำรวมถึงการสนับสนุนปริญญาโทกลุ่มของข้าพเจ้าใน ทุกๆด้าน และ คุณบัญชา เหลือแดง ที่คอยช่วยเหลือโครงการกลุ่มของข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวกลุ่มของข้าพเจ้าทุกคน ที่ มอบความปรารถนาดีอันเป็นกำลังใจที่สำคัญแก่กลุ่มของข้าพเจ้า อีกทั้งยังส่งเสริมทางด้านการ ศึกษาของกลุ่มของข้าพเจ้าอย่างดียิ่งรวมถึงให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง จนทำให้กลุ่มของ ข้าพเจ้าสามารถทำปริญญาโทนี้สำเร็จลุล่วง คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาโทนี้ เล่มนี้กลุ่มของข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

น.ส.สโรชา สาเรศ

น.ส.สิริพร ธรรมิระ

น.ส.สุชาดา ทักนา

สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับ
ระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง
READER ANTENNA FOR UNIVERSAL RFID
APPLICATION

โดย	นางสาวสโรชา สาเรศ	53011653
	นางสาวสิริพร ธรรมธีระ	53011706
	นางสาวสุชาดา ทิศนา	53011730

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

ปฏิญานินพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง มีช่วงความถี่ใช้งานที่ความถี่ 860 MHz – 960 MHz สายอากาศที่นำเสนอเป็นแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมตัดมุมทั้งสี่ด้านที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวและมีโพลาไรซ์วงกลมที่ความถี่ 920 MHz - 925 MHz สายอากาศมีโครงสร้างเป็นแผ่นโลหะสองชั้น โดยแผ่นล่างเป็นระนาบกราวด์สี่เหลี่ยมจัตุรัสและแผ่นโลหะด้านบนเป็นตัวแพร่กระจายคลื่นแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมทั้งสี่ด้านและเพิ่มแผ่นกลางโดยเชื่อมกับแผ่นกำแพงแนวตั้งแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ทำการตัดมุม การวิเคราะห์สายอากาศทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดโครงสร้างรวมทั้งทำการสร้างและทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบซึ่งพบว่าการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว มีอัตราขยายเท่ากับ 6.64 dBi มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังเท่ากับ 70 องศา ทั้งสองระนาบ มีแบนด์วิดธ์ครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 860 MHz ถึง 961 MHz และมีโพลาไรซ์วงกลมที่ย่านความถี่ประเทศไทย (920 MHz - 925 MHz) ดังนั้นสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอจึงเหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง

ABSTRACT

This project presents reader antenna for universal RFID application at 860 MHz to 960 MHz. The proposed antenna is square plate with 4-truncated corners. The antenna has unidirectional beam and circular polarization at 920 MHz to 925 MHz the propose antenna structure consists of two metallic plate. The top plate is square plate with 4-truncated corners and adds middle plate, vertical wall plate with truncated corners in this top plate. That acts as radiating plate and the bottom plate cut as square geometry that acts as ground plane. The effects of antenna parameters are analyzed. The prototype was fabricated and measured. The pattern is unidirectional beam with the gain 6.64 dBic. The half-power beamwidths at 70 degree. The beamwith covers operating frequency from 860 MHz to 961 MHz and circular polarization at 920 MHz to 925 MHz, so it can be confirmed that the proposed antenna can be use for reader of RFID system

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์	2
1.4 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2	4
ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 บทนำ	4
2.2 ระบบอาร์เอฟไอดี	4
2.3 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบอาร์เอฟไอดี	7
2.4 ข้อพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบอาร์เอฟไอดี	12
2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ	13
2.6 พารามิเตอร์สำคัญในการใช้งานสายอากาศ	30
2.7 การทดสอบสายอากาศ	41
2.8 สรุป	45
บทที่ 3	46
การออกแบบและการจัดทำปริญญานิพนธ์	
3.1 บทนำ	46
3.2 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล	46
3.3 การออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล	50
3.4 สรุปพารามิเตอร์ของสายอากาศ	62
3.5 ผลการจำลองสายอากาศ	63
3.6 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศ	70
3.7 สรุป	71

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4	
การสร้างและทดสอบสายอากาศ	72
4.1 บทนำ	72
4.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศ	72
4.3 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล	72
4.4 การทดสอบและผลการทดสอบของสายอากาศ	74
4.5 สรุป	88
บทที่ 5	
การทดสอบประยุกต์ใช้งาน	90
5.1 บทนำ	90
5.2 การทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็กในย่านความถี่ต่างๆ	90
5.3 การทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็กโดยใช้เครื่องอ่านข้อมูล	94
5.4 การทดสอบความเร็วที่แท็กกับสายอากาศสามารถรับส่งข้อมูลกันได้	100
5.5 การวัดความถี่ที่ออกจากเครื่องอ่านข้อมูล	105
5.6 สรุป	106
บทที่ 6	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	107
6.1 สรุปเนื้อหาของโครงงาน	107
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา	109
บรรณานุกรม	111
ภาคผนวก ก.	113
ภาคผนวก ข.	115
ภาคผนวก ค.	122
ภาคผนวก ง.	131
ภาคผนวก จ.	141
ภาคผนวก ฉ.	142

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบพื้นฐานของแท็ก	5
2.2	แท็กระบบอาร์เอฟไอดีทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟ	5
2.3	ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล	6
2.4	ย่านความถี่ที่ใช้งานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุ	8
2.5	โครงสร้างไมโครสตริป	14
2.6	รูปร่างของแพตช์ไมโครสตริป	14
2.7	ชนิดของการป้อนสำหรับสายอากาศไมโครสตริป	16
2.8	วงจรมุมสำหรับการป้อนสายอากาศไมโครสตริป	17
2.9	สายนำสัญญาณไมโครสตริป เส้นสนามไฟฟ้าและโครงสร้างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล	18
2.10	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลเทียบกับความถี่	21
2.11	โครงสร้างทางกายภาพและความยาวประสิทธิผลของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	21
2.12	การกระจายของประจุและความเข้มของกระแสที่เกิดจากแพตช์ไมโครสตริป	23
2.13	รูปร่างสายอากาศแบบ Planar Invert-F (PIFA) ทำงานที่สองความถี่	25
2.14	ผลการทดสอบและผลการจำลองการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบ Planar Invert-F (PIFA)	25
2.15	รูปร่างสายอากาศแบบ Aperture-coupled ที่มีช่องสลีต H	26
2.16	การสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบ Aperture-coupled	27
2.17	รูปร่างสายอากาศที่มีสลีตตัว U และสลีตตัว L	28
2.18	VSWR ของสายอากาศแพตช์ที่มีสลีตตัว U และสลีตตัว L	29
2.19	การจัดรูปแบบแพตช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับโพลาริซวงกลม	29
2.20	โพลาริซวงกลมสำหรับแพตช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเจาะช่องสลีต	30
2.21	โพลาริซวงกลมโดยการตัดขอบทั้งสองด้านและการเพิ่มแท็บ	30
2.22	ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ	31
2.23	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว	32
2.24	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-Plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-Plane) ของสายอากาศปากแตร	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.25	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	34
2.26	การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ c	35
2.27	การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแนวระนาบที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ $z=0$	38
2.28	โพลาริซวงรีที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $z=0$	40
2.29	แสดงการเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน	40
3.1	โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่ 920 -925 MHz	47
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (W_p) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์	48
3.3	$ S_{11} $ ของการปรับพารามิเตอร์ W_p	49
3.4	โครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นของเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล	50
3.5	$ S_{11} $ ของการปรับพารามิเตอร์ d	50
3.6	$ S_{11} $ ของการปรับพารามิเตอร์ c	51
3.7	โครงสร้างสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นกลาง	52
3.8	$ S_{11} $ ของการปรับพารามิเตอร์ L_s	52
3.9	$ S_{11} $ ของการปรับพารามิเตอร์ W_s	53
3.10	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz ของการปรับพารามิเตอร์ W_s	54
3.11	โครงสร้างสายอากาศที่ตัดมุมทั้ง 2 มุม	55
3.12	$ S_{11} $ ที่ความถี่ 922.5 MHz ของการปรับพารามิเตอร์ m เมื่อตัดมุมทั้งสองมุม	55
3.13	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz ของการปรับพารามิเตอร์ m เมื่อตัดมุมทั้งสองมุม	56
3.14	โครงสร้างสายอากาศที่ตัดมุมทั้ง 4 มุม	57
3.15	$ S_{11} $ ของการปรับพารามิเตอร์ m เมื่อตัดมุมทั้งสี่มุม	57
3.16	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz ของการปรับพารามิเตอร์ m	58
3.17	โครงสร้างสายอากาศที่ตัดมุมแผ่นกำแพงแนวตั้ง	58
3.18	$ S_{11} $ ของการปรับพารามิเตอร์ n	59
3.19	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz ของการปรับพารามิเตอร์ n	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.20	$ S_{11} $ ของการปรับพารามิเตอร์ L_s	60
3.21	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz ของการปรับพารามิเตอร์ L_s	60
3.22	$ S_{11} $ ของการปรับพารามิเตอร์ P_y	61
3.23	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz ของการปรับพารามิเตอร์ P_y	61
3.24	$ S_{11} $ เปรียบเทียบความถี่	63
3.25	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 860 MHz	63
3.26	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 910 MHz	64
3.27	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 960 MHz	65
3.28	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 920 MHz	66
3.29	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz	66
3.30	อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 925 MHz	67
3.31	อัตราส่วนแกนช่วงความถี่ 860 – 960 MHz	67
3.32	รูปแบบการกระจายของกระแส	68
3.33	อัตราขยายของสายอากาศ	69
3.34	รีซิสแตนซ์ของสายอากาศ	69
3.35	รีแอกแตนซ์ของสายอากาศ	70
4.1	สายอากาศต้นแบบเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล	73
4.2	การทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศต้นแบบ	75
4.3	ผลการทดสอบและการจำลอง $ S_{11} $ ของสายอากาศ	76
4.4	การจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	78
4.5	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ความถี่ 860 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง	78
4.6	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ความถี่ 910 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง	79
4.7	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ความถี่ 960 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง	80
4.8	การจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดสอบอัตราส่วนแกน	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4..9	เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 920 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง	82
4.10	เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง	83
4.11	เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 925 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง	84
4.12	อัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆที่มุม 0 องศา	85
4.13	ผลการทดสอบและการจำลองอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆ	87
5.1	มุมมองด้านข้างของการติดตั้งการทดสอบสายอากาศใช้งานร่วมกับแท็ก	91
5.2	มุมมองด้านบนของมุมระหว่างสายอากาศกับแท็กที่ใช้ในการทดสอบ	91
5.3	ระยะในการติดต่อสื่อสารสูงสุดระหว่างสายอากาศกับแท็กที่ความถี่ 866 MHz	92
5.4	ระยะในการติดต่อสื่อสารสูงสุดระหว่างสายอากาศกับแท็กที่ความถี่ 920 MHz	93
5.5	ระยะในการติดต่อสื่อสารสูงสุดระหว่างสายอากาศกับแท็กที่ความถี่ 952 MHz	93
5.6	เครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง	95
5.7	แท็กชนิดไดโพลแบบขด Alien รุ่น ALN-9640	95
5.8	สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดี	96
5.9	การติดตั้งการทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก	97
5.10	การวางตัวของแท็กแนวแกน z	98
5.11	ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบและสายอากาศ Log-periodic	99
5.12	การทดสอบความเร็ว	101
5.13	คาบการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ	102
5.14	คาบการอ่านของแท็กอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.15	วิธีทดสอบคาบการอ่านของระบบอาร์เอฟไอดี	103
5.16	ผลการทดสอบค่า QUERY CYCLE ของเครื่องอ่านข้อมูล	104
5.17	ผลการทดสอบคาบการอ่านข้อมูลของเครื่องอ่านต่อหนึ่งแท็ก	104
5.18	การเปลี่ยนแปลงความถี่(กระโดด)ที่ออกจากเครื่องอ่านข้อมูล	105
5.19	การเปลี่ยนแปลงความถี่(กระโดด)ที่ออกจากเครื่องอ่านข้อมูลครบทั้งย่านความถี่ 902 – 928 MHz	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ความถี่และข้อจำกัดของกำลังในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งในประเทศต่างๆ	10
3.1	ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส	48
3.2	ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่ประเทศไทย	49
3.3	ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล	54
3.4	สรุปพารามิเตอร์ของสายอากาศ	62
3.5	คุณลักษณะของสายอากาศ	70
4.1	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ	74
4.2	สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ	88
5.1	ความถี่ของระบบยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดีของประเทศต่างๆ	92
5.2	ผลการทดสอบความเร็ว	101
6.1	สรุปขนาดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง	108

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบระบุของวัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุหรือระบบอาร์เอฟไอดี (Radio Frequency Identification System : RFID) เป็นเทคโนโลยีที่เข้ามามีบทบาทในระบบหลายระบบเพราะนอกจากมีประสิทธิภาพในหลายๆด้าน เช่น สามารถอ่านข้อมูลจากป้ายข้อมูลหรือแท็กได้หลายตัวพร้อมกัน สามารถอ่านข้อมูลจากระยะไกลและไม่ต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันกับเครื่องอ่านข้อมูล การอ่านข้อมูลมีความเร็วสูงและยังทนทานต่อสภาพแวดล้อมกว่าระบบรหัสแท่งหรือบาร์โค้ด (Barcode) ดังนั้นระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจึงนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายประเภท ตัวอย่างเช่น การรักษาความปลอดภัย ที่มีการใช้บัตรสำหรับการผ่านเข้าออกพื้นที่ การคมนาคม เช่น การเก็บค่าบริการทางด่วนหรือในการปศุสัตว์ที่มีการติดหรือฝังอุปกรณ์ระบุระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุกับตัวสัตว์ เพื่อบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับตัวสัตว์และสามารถระบุหรือติดตามตัวสัตว์นั้นได้

ปัจจุบันคลื่นความถี่พาหะสำหรับใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะอยู่ในช่วงความถี่ ISM (Industrial Scientific and Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดใช้ในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และการแพทย์ ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้โดยไม่รบกวนกับความถี่ที่ใช้ในระบบสื่อสาร สามารถแบ่งออกเป็นย่านความถี่หลักๆได้ 4 ย่าน คือ

ย่านความถี่ต่ำ (LF: Low Frequency) 125/ 134.5 / 135 KHz

ย่านความถี่สูง (HF: High Frequency) 13.56 MHz

ย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF: Ultra High Frequency) 860 - 960 MHz

ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/ 5.8 GHz

ซึ่งแต่ละย่านความถี่ก็จะมีลักษณะ คุณสมบัติและราคาของอุปกรณ์ที่ต่างกัน จึงทำให้แต่ละย่านความถี่ที่เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกันด้วย สำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ในย่านความถี่สูงยิ่งนั้น แต่ละประเทศอนุญาตให้ใช้ความถี่แตกต่างกัน กำหนดให้ใช้ในช่วง 860 - 960 MHz ส่วนในประเทศไทยนั้น กสทช. ได้กำหนดให้ใช้ในช่วง 920 - 925 MHz

ในระบบอาร์เอฟไอดี สิ่งหนึ่งที่สำคัญมากต่อประสิทธิภาพของระบบคือสายอากาศเพราะสายอากาศเป็นส่วนที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานสำหรับบางระบบ สายอากาศจึงมีความต้องการความเร็วในการอ่านข้อมูลที่สูง ระยะทางในการสื่อสารที่ไกล มีขนาดเล็ก รวมทั้งโครงสร้างของสายอากาศต้องไม่ซับซ้อนและราคาถูก ดังนั้นย่านความถี่สูงยิ่งจึงเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับระบบดังกล่าว

ในแต่ละประเทศระบบอาร์เอฟไอดีนั้นมีการใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น ตามมาตรฐานและข้อกำหนดการจัดสรรช่วงความถี่ใช้งานนั้น ดังนั้นปัญญาประดิษฐ์ฉบับนี้ได้นำเสนอสายอากาศที่จะนำมาใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้งานได้ตลอดย่านความถี่สากล ที่มีอัตราขยายสูงและมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยสายอากาศนั้นสามารถพัฒนาและประยุกต์ใช้งานได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง และทฤษฎีของโพลาริซวงกลม
2. คำนวณ ออกแบบและสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดี ในช่วงยูเอชเอฟ ย่านความถี่กว้าง และมีโพลาริซวงกลมในย่านความถี่ประเทศไทย
3. ทดสอบคุณลักษณะสมรรถนะการทำงานของสายอากาศที่ออกแบบ
4. วิเคราะห์ สรุปผลที่ได้จากการคำนวณและทดสอบ เพื่อเขียนเป็นปริญญานิพนธ์

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอการศึกษา การวิเคราะห์ ออกแบบ สร้างและทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้างสามารถครอบคลุมการใช้งานระบบยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดีได้ทั่วโลก ซึ่งจะแบ่งขอบเขตในการทำงานเป็น 2 ส่วนหลักๆดังนี้

ในส่วนของภาคการศึกษาที่ 1 จะเป็นการศึกษางานวิจัยที่มีมาก่อน จากนั้นจะทำการคำนวณออกแบบและจำลองสายอากาศสำหรับการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศนั้นจะใช้โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อหาช่วงความถี่กว้าง คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งในส่วนของภาคการศึกษาที่ 1 นี้จะมุ่งเน้นการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่มาตรฐานภายในประเทศที่มีย่านความถี่ 920 – 925 MHz จากนั้นได้พัฒนาคุณลักษณะของสายอากาศให้ครอบคลุมย่านความถี่การใช้งานได้ทั่วโลก

ในส่วนของภาคการศึกษาที่ 2 นำสายอากาศที่ได้จากภาคการศึกษาที่ 1 มาปรับปรุงเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีย่านความถี่กว้างสามารถครอบคลุมการใช้งานได้ทั่วโลก โดยที่คุณลักษณะทางด้านการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศกำหนดให้จะต้องมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว มีความสมมาตรของลำคลื่น และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังต่ำ และลักษณะการโพลาริซวงกลมในย่านความถี่ประเทศไทย (920 – 925 MHz) หลังจากทำการออกแบบและได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นจะทำการสร้างสายอากาศเพื่อนำผลการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อยืนยันผลลัพธ์ของคุณลักษณะของสายอากาศและประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดี

1.4 เนื้อหาของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆของระบบอาร์เอฟไอดี เทคนิคที่ช่วยทำให้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีมีย่านความถี่กว้าง มีโพลาริซวงกลม รวมถึงการวิเคราะห์พารามิเตอร์

ต่าง ๆ ของสายอากาศ เพื่อจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ และการปรับปรุงคุณลักษณะสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี เพื่อศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์และนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบสายอากาศให้สมรรถนะสูงสุด

บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างสายอากาศและการทดสอบ โดยนำพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้จากการศึกษาและออกแบบ มาสร้างเป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีและนำไปทดสอบเพื่อยืนยันผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศ คุณลักษณะของสายอากาศที่พิจารณาคือ ย่านความถี่กว้าง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย และการโพลาไรซ์

บทที่ 5 กล่าวถึงการนำสายอากาศที่ได้สร้างนั้นมาทำการทดสอบประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีและจะใช้งานร่วมกับแท็ก

บทที่ 6 กล่าวถึงการวิเคราะห์และสรุปผลเนื้อหาโดยรวมทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบและสรุปผลของการทดสอบของปริญญาโทฉบับนี้ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะ

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทั่วไปของระบบอาร์เอฟไอดีที่อ่านความถี่สูงซึ่งประกอบด้วย ประเภทของแท็กแบบต่าง ๆ หลักการรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีกับแท็ก การเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบอาร์เอฟไอดี และพื้นฐานการออกแบบสายอากาศโดยใช้ทฤษฎีของสายอากาศไมโครสตริบในการอ้างอิง

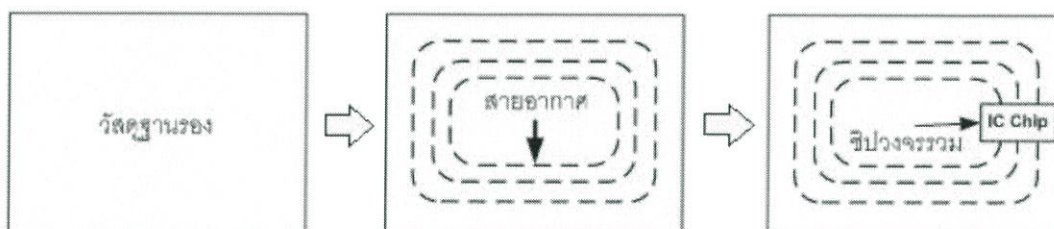
2.2 ระบบอาร์เอฟไอดี

RFID ย่อมาจาก Radio frequency identification เป็นระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ ปีค.ศ.1980 มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อนำไปใช้งานแทนระบบบาร์โค้ด (Barcode) โดยจุดเด่นของระบบอาร์เอฟไอดี อยู่ที่สามารถอ่านข้อมูลจากแท็ก (Tag) ได้หลายๆ แท็กแบบไร้สัมผัสและสามารถอ่านได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดีทนต่อความเปียกชื้น แร่งสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก และสามารถจะอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงโดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิพที่อยู่ในแท็ก

ในระบบอาร์เอฟไอดี จะมีองค์ประกอบหลักๆอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือแท็ก ส่วนที่สองคือเครื่องอ่านข้อมูล หรือเขียนข้อมูลภายในแท็ก ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อความเข้าใจจึงขอเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ดเพื่อให้เห็นภาพชัดเจน แท็กในระบบอาร์เอฟไอดี คือตัวบาร์โค้ดที่ติดกับฉลากของสินค้าและเครื่องอ่านข้อมูลในระบบอาร์เอฟไอดี คือ เครื่องอ่านข้อมูลบาร์โค้ดโดยข้อแตกต่างของทั้งสองระบบ คือ ระบบอาร์เอฟไอดี จะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านหรือเขียนข้อมูล ส่วนระบบบาร์โค้ดจะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่านข้อมูล โดยข้อเสียของระบบบาร์โค้ด คือหลักการอ่านข้อมูลเป็นการใช้แสงในการอ่านบาร์โค้ดซึ่งจะต้องอ่านข้อมูลบาร์โค้ดที่ไม่มีอะไรปิดหรือต้องอยู่ในเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกนและอ่านข้อมูลวัตถุได้ที่ละชั้นในระยะใกล้ ๆ แต่ระบบอาร์เอฟไอดี จะแตกต่างโดยสามารถอ่านข้อมูลแท็กได้โดยไม่ต้องเห็นแท็กหรือแท็กนั้นอยู่ภายในวัตถุและไม่จำเป็นต้องอยู่ในเส้นตรงกับคลื่นเพียงแต่อยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้และการอ่านข้อมูลแท็กในระบบอาร์เอฟไอดียังสามารถอ่านข้อมูลได้หลายแท็กในเวลาเดียวกัน

2.2.1 แท้ก

โครงสร้างภายในของแท้กจะประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ดังรูปที่ 2.1 ได้แก่ ขดลวดขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศสำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของ ไมโครชิพ (Microchip) ที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุเช่นรหัสสินค้าโดยทั่วไปแท้กอาจอยู่ในชนิดทั้งเป็นกระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติกมีขนาดและรูปร่างต่างๆกันไปทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะนำมาไปติด และมีหลายรูปแบบ เช่น ขนาดเท่าบัตรเครดิต เหยี่ยูกระดุม ฉลากสินค้า แคปซูล เป็นต้น

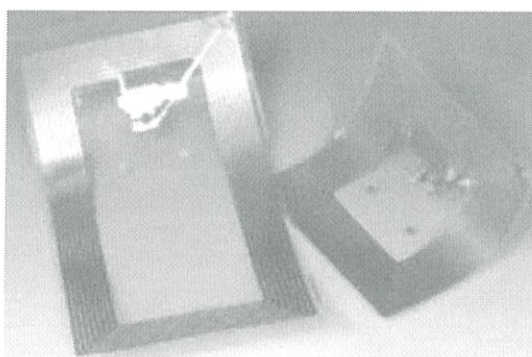


รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของแท้ก [1]

แต่โดยหลักการอาจแบ่งแท้ก ที่มีใช้งานกันอยู่นั้นจะมีอยู่ 3 ชนิดใหญ่ๆ โดยแต่ละชนิดก็จะมีมีความแตกต่างกันในเรื่องของการใช้งาน ราคา โครงสร้าง และหลักการทำงานซึ่งจะขอกกล่าวถึงและอธิบายแยกเป็นหัวข้อดังนี้

2.2.1.1 แท้กของระบบอาร์เอฟไอดี แบบพาสซีฟ

แท้กชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใดๆ แสดงตามรูปที่ 2.2 เพราะภายในแท้กจะมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็ก เป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่



รูปที่ 2.2 แท้กของระบบอาร์เอฟไอดีแบบพาสซีฟ [1]

2.2.1.2 แท็กของระบบอาร์เอฟไอดี แบบแอ็กทีฟ

แท็กชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรเครื่องส่งภายในแท็ก

2.2.1.3 แท็กของระบบอาร์เอฟไอดีแบบกึ่งแอ็กทีฟ

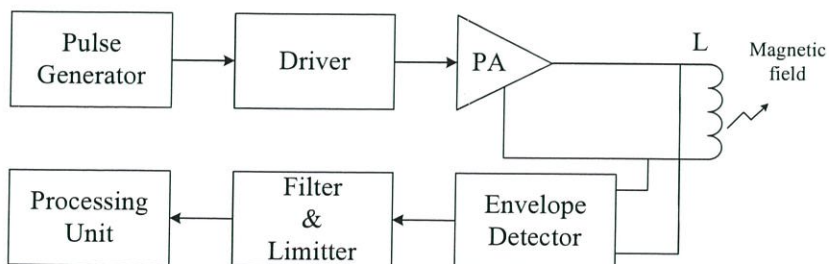
แท็กแบบกึ่งแอ็กทีฟ(Semi-active tag) หรืออีกชื่อหนึ่งคือแท็กแบบกึ่งพาสซีฟ (Semi-passive tag) แท็กชนิดนี้จะทำงานได้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรไฟฟ้าภายในแท็กแต่อย่างไรก็ตามแท็กชนิดนี้ยังต้องใช้กำลังงานที่ได้รับจากเครื่องอ่านข้อมูลในการส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล

2.2.2 เครื่องอ่านข้อมูล (Reader)

หน้าที่ของเครื่องอ่านข้อมูล คือ การเชื่อมต่อเพื่อเขียนหรืออ่านข้อมูลลงในแท็กด้วยสัญญาณความถี่วิทยุภายในเครื่องอ่านข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.3 จะประกอบด้วยสายอากาศที่ทำจากขดลวดทองแดงเพื่อใช้รับส่งสัญญาณภาครับ-ส่งสัญญาณวิทยุและวงจรควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูล จำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนของการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งเครื่องอ่านข้อมูลจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

1. ภาครับและส่งสัญญาณวิทยุ
2. ภาคสร้างสัญญาณพาหะ
3. ลายทองแดงที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ
4. วงจรจูนสัญญาณ
5. หน่วยประมวลผลข้อมูลและภาคเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านข้อมูลมักใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรมจะทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ที่ได้รับและทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์โดยลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านข้อมูลจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งานเช่นแบบมือถือขนาดเล็กหรือติดตั้งจนถึงขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate size) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของเครื่องอ่าน [1]

2.3 คุณลักษณะของอุปกรณ์ระบบอาร์เอฟไอดี

2.3.1 ลักษณะการทำงาน (Operation type)

อุปกรณ์ระบบอาร์เอฟไอดี ทั้งแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลจะมีรูปแบบข้อมูลบนการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่างการรับส่งข้อมูลแบบ Full duplex (FDX) หรือ Half duplex (HDX)

2.3.2 ขนาดข้อมูล (Data quantity)

โดยทั่วไปอุปกรณ์แท็กในระบบอาร์เอฟไอดี จะมีขนาดของหน่วยความจำ หรือที่นิยมเรียกกันว่าขนาดความจุข้อมูล (Data capacity) เล็กขนาดตั้งแต่ไม่กี่ไบต์ไปจนถึงหลายๆ กิโลไบต์ ตัวอย่างแท็กในระบบอาร์เอฟไอดี อีกกลุ่มหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาให้มีขนาดความจุเพียง 1 บิต (1-bit Transponder) ซึ่งแท็กแบบนี้มักมีราคาประหยัดและมีจุดประสงค์ในการนำไปใช้งานเพียงเพื่อการแจ้งสถานภาพเท่านั้น

2.3.3 ความสามารถในการโปรแกรม (Programmable)

การจำแนกประเภทของแท็กในระบบอาร์เอฟไอดี ตามขีดความสามารถในการโปรแกรมข้อมูล สามารถแบ่งออกได้เป็นแท็กที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ ซึ่งภายในจะมีการเขียนข้อมูลที่อาจเป็นรหัสเลขหมายใดๆ ตามที่ได้รับคำสั่งทำมาตั้งแต่สายการผลิตและไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ อีกประเภทหนึ่งเป็นแท็กในระบบอาร์เอฟไอดี ที่สามารถทำการโปรแกรมข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่านข้อมูลได้ การจัดการลำดับคำสั่ง (Sequence) ในกรณีของแท็กที่สามารถโปรแกรมได้นั้น ก็มีเทคนิคที่ใช้ในการจัดการประมวลผลข้อมูลให้เลือกพิจารณาเป็นเรื่องทางเทคนิค

2.3.4 แหล่งพลังงาน (Power supply)

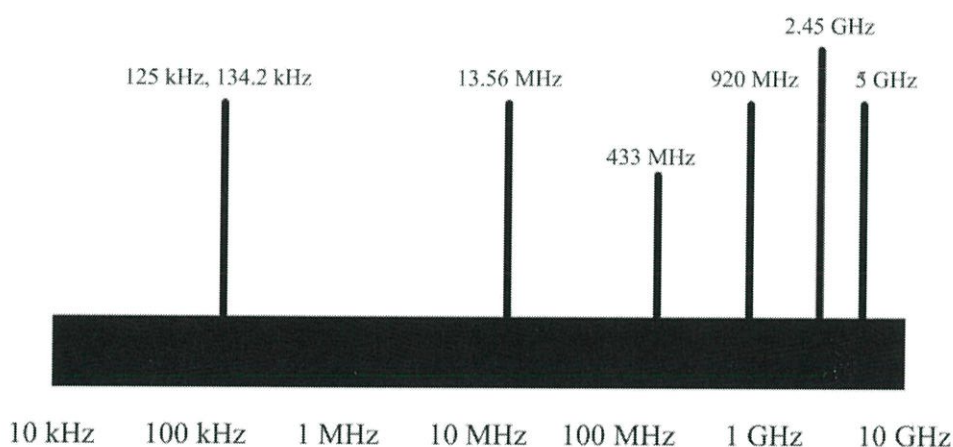
เป็นคุณสมบัติทางเทคนิคที่มีความสำคัญมากในการพิจารณาเลือกใช้แท็กในระบบอาร์เอฟไอดีทั้งนี้สามารถจำแนกประเภทของแท็กออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แบบพาสซีฟซึ่งเป็นแท็กที่ไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟบรรจุไว้ภายในตัว แต่จะอาศัยการแปลงสัญญาณพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องอ่านข้อมูลมาเป็นไฟเลี้ยงเพียงอย่างเดียว กับอีกประเภทหนึ่ง คือ แบบแอ็กทีฟซึ่งต้องการระบบจ่ายไฟภายในแท็กเพื่อใช้ป้อนจ่ายให้กับชิปประมวลผลที่ติดตั้งอยู่ภายใน

2.3.5 ย่านความถี่ใช้งาน (Frequency range)

ความหมายของความถี่ใช้งาน (Operating frequency) ในมาตรฐานของระบบระบุลักษณะ นั้นจะหมายถึงคลื่นความถี่วิทยุที่เครื่องอ่านข้อมูลทำการส่งออกไปเท่านั้น โดยจะไม่นับว่าแท็กจะส่งคลื่นความถี่ในย่านใดตอบกลับมา ยิ่งในบางกรณีแท็กอาจมีการส่งคลื่นความถี่กลับมาเป็นค่าความถี่เดียวกับที่เครื่องอ่านข้อมูลส่งออกไป โดยแยกแยะความแตกต่างกันด้วย

เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบ Load modulation ประเด็นของคลื่นความถี่จากแท็กจึงไม่ใช่สาระสำคัญในการนำมาพิจารณาในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบอาร์เอฟไอดี จะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial-Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสาร โดยทั่วไปมีความถี่ใช้งานสำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบอาร์เอฟไอดีแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านหลัก ดังรูปที่ 2.4 ได้แก่

- ย่านความถี่ต่ำ (Low frequency : LF) 125/ 134.5/ 135 kHz
- ย่านความถี่สูง (High frequency : HF) 13.56 MHz
- ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra high frequency : UHF) 433 MHz และ 860-960 MHz
- ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave) 2.4/5.8GHz



รูปที่ 2.4 ย่านความถี่ที่ใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดีทางคลื่นความถี่วิทยุ [2]

ในการใช้งาน 2 ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ (ย่านความถี่ต่ำระยะอ่านประมาณ 1 cm จนถึง 1 m และย่านความถี่สูงระยะอ่านข้อมูลประมาณ 1 m) เช่นการตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ส่วนย่านความถี่สูงยิ่งจะถูกใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล (ย่านความถี่สูงยิ่งระยะอ่านข้อมูลประมาณ 1 m จนถึง 10 m) เช่นระบบเก็บค่าบริการทางด่วนและในปัจจุบันระบบอาร์เอฟไอดีกำลังถูกวิจัยและพัฒนาในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz เพื่อใช้งานที่ต้องการระยะอ่านข้อมูลที่ไกลกว่า 10 m เป็นต้น

ในแง่ของราคาและความเร็วในการสื่อสารข้อมูลเมื่อเทียบกับแล้วระบบอาร์เอฟไอดีซึ่งใช้คลื่นพาหะย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงสุด และมีราคาแพงที่สุดด้วย

เช่นกันส่วนระบบอาร์เอฟไอดี ที่ใช้คลื่นพาหะในอีก 2 ย่านความถี่แรกจะมีระดับราคาและความเร็วลดหลั่นกันไป

2.3.6 มาตรฐานระบบอาร์เอฟไอดี

การนำมาตรฐานมาใช้กับระบบอาร์เอฟไอดีและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบนี้ถือว่าเป็นสิ่งซับซ้อน แต่ก็มีความพยายามนำมาใช้อย่างต่อเนื่อง มาตรฐานที่มีอยู่นั้นครอบคลุมใน 4 เรื่อง ของการประยุกต์ใช้งานระบบอาร์เอฟไอดี คือมาตรฐาน การติดต่อสื่อสารในอากาศ (Air interface standard) มาตรฐานปริมาณความจุของข้อมูลและการเข้ารหัส (Data content and Encoding) มาตรฐานความเข้ากันได้ของระบบอาร์เอฟไอดี (Conformance) มาตรฐานการทำงานร่วมกันระหว่างการใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดี

มาตรฐานหลักๆของระบบอาร์เอฟไอดี ในปัจจุบันมี 2 ค่าด้วยกันคือ ISO และ EPC Global ซึ่ง ISO ก็จะมีมาตรฐานการติดต่อสื่อสารในอากาศ ในย่านยูเอชเอฟ คือ 18000-6A กับ 18000-6B ส่วนทางด้าน EPC Global ก็จะมีมาตรฐานออกมาสองรุ่น รุ่นแรกคือ EPC Global gen 1 ซึ่งประกอบไปด้วย Class 0 กับ Class 1 แท้ก็อีกรุ่นหนึ่งคือ EPC Global gen 2 ซึ่งเตรียมไว้สำหรับ Class 1 ขึ้นไป แต่ตอนนี้ใช้กันหลักๆก็จะมีแต่เฉพาะ Class 1 เท่านั้น โดยถ้าจำแนกตาม Class ของแท็ก ก็จะมีตั้งแต่ Class 0 Class 1 Class 2 ไปจนถึง Class 3 โดยจะแบ่งตามความสามารถในการเขียนข้อมูลลงไปบนแท็กแบบพาสซีฟและแบบแอ็กทีฟ ถ้า Class 0 ก็จะเป็นแบบพาสซีฟและเขียนไม่ได้ Tag ID ถูกกำหนดมาตั้งแต่โรงงาน Class 1 ก็ยังคงเป็นพาสซีฟอยู่แต่จะอ่านหรือเขียนข้อมูลได้ ส่วน Class 2 ก็จะเป็นแบบกึ่งแอ็กทีฟ คือ ในขณะที่รับข้อมูลจากเครื่องอ่านข้อมูลแบบพาสซีฟ แต่พอจะส่งข้อมูลจะใช้กำลังงานจากแบตเตอรี่ช่วยในการส่ง สุดท้ายคือ Class 3 ก็จะเป็นแบบแอ็กทีฟ

มาตรฐานของระบบอาร์เอฟไอดีสร้างขึ้นมาใช้ในสาขาต่างๆ ตัวอย่างเช่น มาตรฐานการระบุตัวสัตว์ (Animal identification) มาตรฐานการจัดการวัตถุ (Item management) เป็นต้น

มาตรฐานการระบุตัวสัตว์ (Animal identification) เช่น มาตรฐาน ISO 11784 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับการระบุตัวสัตว์ด้วยความถี่วิทยุซึ่งมาตรฐานเกี่ยวกับโครงสร้างรหัส ISO 11785 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องทางด้านเทคนิค และ ISO 14223/1 จะเกี่ยวกับแท็ก

มาตรฐานการจัดการวัตถุ (Item management) เช่น ISO18000 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับการระบุวัตถุด้วยความถี่วิทยุโดยเฉพาะพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการติดต่อสื่อสารกันผ่านอากาศ

และประเทศต่างๆจะมีการใช้ย่านความถี่ที่แตกต่างกันตามมาตรฐานในแต่ละประเทศ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ความถี่และข้อจำกัดของกำลังในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งในประเทศต่างๆ

ประเทศ	สถานะ	ความถี่ (MHz)	กำลัง	เทคนิค	หมายเหตุ
แอฟริกา					
แอฟริกาเหนือ	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกกฎหมายบังคับใช้ใน ปี ค.ศ. 2006
แอฟริกาใต้		917-921	4 W ERP	FHSS	ภายในอาคาร
ตูนิเซีย	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	วางแผนที่จะนำมาใช้ งาน
เอเชียแปซิฟิก					
ออสเตรเลีย	OK	920-926	4 W EIRP		4W EIRP เหมาะจะใช้ กับ GS1
จีน	IP	917-922	2 W ERP		อนุญาตชั่วคราว
ฮ่องกงและจีน	OK	865-868 920-925	2 W ERP 4 W EIRP		
ไทย	OK	920-925	4 W EIRP		กำลังงานไม่เกิน 0.5 W EIRP ไม่ต้องขออนุญาต
อินเดีย	OK	865-868	4 W ERP		อนุญาตให้ใช้ในเดือน พฤษภาคม ปี ค.ศ.2005
อินโดนีเซีย	IP				พิจารณาช่วง 920-925 MHz
ญี่ปุ่น	OK	952-954	4 W EIRP	LBT	ในช่วง 952-954 MHz อนุญาตให้ใช้ 4 W EIRP และสำหรับ 20 mW EIRP ไม่ต้องมีใบอนุญาต
เกาหลี	OK	908.5-910	4 W EIRP	LBT	อนุญาตให้ใช้ในเดือน กรกฎาคม ปี ค.ศ.2004
		910-914	4 W EIRP	FHSS	อนุญาตให้ใช้ในเดือน กรกฎาคม ปี ค.ศ.2004
มาเลเซีย	OK	866-869			กำลังอยู่ในการพิจารณา และที่ความถี่ 868 MHz อนุญาตให้ใช้ 50 mW
		910-914	2 W ERP		กำลังงาน 2 W ERP ไม่ ต้องมีใบอนุญาต แต่ กำลังงานตั้งแต่ 2 ถึง 4 W ต้องมีใบอนุญาต
สิงคโปร์	OK	866-869	0.5 W ERP		

ตาราง 2.1 ความถี่และข้อจำกัดของกำลังในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่สูงยิ่งในประเทศต่างๆ(ต่อ)

ประเทศ	สถานะ	ความถี่	กำลัง	เทคนิค	หมายเหตุ
ไต้หวัน	OK	922-928	1 W ERP	FHSS	ภายในอาคาร
		922-928	0.5 W ERP	FHSS	ภายนอกอาคาร
นิวซีแลนด์	OK	864-868	4 W EIRP		
ยุโรป					
ฟินแลนด์	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกบังคับใช้ตั้งแต่ 22 กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2005
ฝรั่งเศส	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	
เยอรมนี	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกบังคับใช้ตั้งแต่ 22 ธันวาคม ปี ค.ศ. 2004
อิตาลี	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ตรงกับย่านความถี่ที่อนุญาตของทหาร
เนเธอร์แลนด์	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	
สหพันธ์รัฐรัสเซีย	IP	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ต้องใช้ใบอนุญาตเท่านั้น
สเปน	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกแบบบังคับใช้ตั้งแต่ 31 มกราคม ปี ค.ศ. 2007
สวีเดน	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกแบบบังคับใช้ตั้งแต่ 31 มกราคม ปี ค.ศ. 2006
สวิตเซอร์แลนด์	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	
สหราชอาณาจักร	OK	865.6-867.6	2 W ERP	LBT	ออกแบบบังคับใช้ตั้งแต่ 31 มกราคม ปี ค.ศ. 2006
อเมริกาเหนือ					
แคนาดา	OK	902-928	4 W EIRP	FHSS	
สหรัฐอเมริกา	OK	902-928	4 W EIRP	FHSS	
อเมริกาใต้					
อาร์เจนตินา	OK	902-928	4 W EIRP	FHSS	
บราซิล	OK	902-907.5	4 W EIRP	FHSS	
		915-928	4 W EIRP	FHSS	
ชิลี	OK	902-928	4 W EIRP	FHSS	

หมายเหตุ

OK	แสดงถึง ได้มีการออกกฎข้อบังคับใช้แล้วหรือกำลังจะนำมาใช้ในอนาคตอันใกล้
IP	แสดงถึง คาดการณ์ว่าจะออกกฎข้อบังคับภายใน 6-12 เดือนข้างหน้า
FHSS	แสดงถึง Frequency Hopping Spread Spectrum
LBT	แสดงถึง Listen Before Talk

2.4 ข้อพิจารณาการเลือกใช้อุปกรณ์ในระบบอาร์เอฟไอดี

2.4.1 ความถี่ใช้งาน

หลักการของระบบอาร์เอฟไอดี ที่ใช้ย่านความถี่ในช่วง 100 kHz- 30 MHz จะใช้รูปแบบส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลระหว่างแท็กกับเครื่องรับเป็นการเชื่อมต่อโดยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Inductive coupling) ในขณะที่อุปกรณ์ของระบบอาร์เอฟไอดี ที่มีการสื่อสารโดยใช้ความถี่ย่านไมโครเวฟซึ่งอยู่ในช่วง 2.4 - 5.8 GHz จะใช้การส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การดูดซับคลื่นสัญญาณของตัวนำที่เป็นน้ำ ที่ความถี่ใช้งาน 100 kHz จะมีค่าต่ำกว่าการใช้งานที่ความถี่ 1 GHz - 100,000 เท่า การเลือกใช้งานอุปกรณ์ของระบบอาร์เอฟไอดี ที่ความถี่สูงระดับ 1 GHz ในกรณีที่มีฝนตกย่อมจะเกิดปัญหาการลดทอนสัญญาณระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งอยู่กลางแจ้งมากกว่าการใช้งานแบบเดียวกันที่ความถี่ 100 kHz การเลือกใช้อุปกรณ์ของระบบอาร์เอฟไอดี ทำงานที่ความถี่ในย่านความถี่สูงน่าจะให้ผลดีในการแพร่กระจายคลื่นในระยะทางกว้าง

ส่วนการเลือกใช้อ่านความถี่ไมโครเวฟนั้น โดยทั่วไปจะให้ผลดีในเรื่องของระยะทางที่ไกลกว่าการเหนี่ยวนำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำ แต่อุปกรณ์แท็กที่ทำงานในย่านไมโครเวฟนั้นจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายไฟสำรองไฟฟ้าทำให้ต้องมีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดในการพกพาหลายๆ ประการ สิ่งที่ต้องพิจารณาประการหนึ่งสำหรับการใช้งานอุปกรณ์ของระบบอาร์เอฟไอดี ในย่านความถี่สูงก็คือการที่ระบบอาจถูกรบกวนจากการเดินเครื่องมอเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงได้ เนื่องจากการรับส่งข้อมูลที่ใช้การเหนี่ยวนำ ทำให้มีความนิยมใช้งานการสื่อสารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟแทนในกรณีของการทำงานภายในโรงงานอุตสาหกรรม

2.4.2 ระยะทำการ

ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องโดยตรงต่อระยะทำการในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดีและแท็กของระบบอาร์เอฟไอดี สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประการ คือ ตำแหน่งของแท็กหรือระยะห่างชั้นต่ำระหว่างแท็กแต่ละตัวกับเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไปตามประเภทของการใช้งาน ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท็กและความเร็วในการอ่านหรือเขียนข้อมูลของแท็ก

2.4.3 ขนาดของหน่วยความจำ

ต้นทุนของแท็กในระบบอาร์เอฟไอดี ย่อมมีความสัมพันธ์กับลักษณะและขนาดของหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ภายใน การใช้งานในระดับสาธารณะ เช่น ระบบขนส่งจึงนิยมใช้แท็กที่มีหน่วยความจำน้อย หรือในบางกรณีอาจใช้แท็กแบบโปรแกรมไม่ได้ เพื่อควบคุมต้นทุนของบัตร โดยอาจใช้บัตรหรือแท็กทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสดงหมายเลข แล้วให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นใช้งานภายในระบบหรือเครือข่ายขนส่งทำหน้าที่ตรวจสอบแทน โดยไม่ต้องเก็บข้อมูลไว้ในบัตร

2.5 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ

2.5.1 พื้นฐานสายอากาศไมโครสตริป

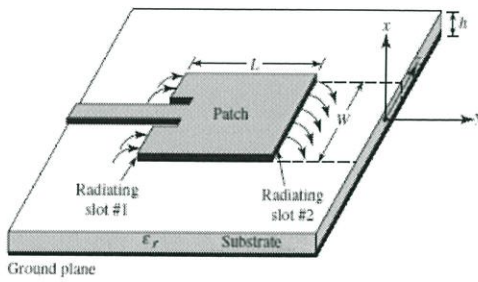
2.5.1.1 คุณสมบัติเบื้องต้น

สายอากาศไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.5 ประกอบด้วยสตริป (แพทช์) โลหะบางมาก ($t \ll \lambda_0$ เมื่อ λ_0 คือ ความยาวคลื่นในอากาศ) วางบนวัสดุฐานรอง ($h \ll \lambda_0$ ปกติ $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$) เหนือระนาบกราวด์ แพทช์ไมโครสตริปถูกออกแบบเพื่อที่จะให้เกิดค่าสูงสุดของแบบรูปที่ตั้งฉากกับแพทช์ (ตัวแพร่กระจายคลื่นงานแบบรอดไซด์ (Broadside) โดยการเลือกโหมดที่เหมาะสมในการกระตุ้น (Excite) นอกจากนั้นเมื่อเลือกโหมดที่เหมาะสมสายอากาศไมโครสตริปยังสามารถแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบเอนด์ไฟร์ (End-fire radiation) ได้สำหรับแพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular patch) ความยาวของแพทช์ L ปกติอยู่ในช่วง $\lambda_0/3 \leq L \leq \lambda_0/2$ ระหว่างแพทช์และนาบกราวด์ถูกแยกออกจากกันโดยแผ่นไดอิเล็กตริก (Dielectric sheet) แสดงดังรูป 2.5 (ก) ซึ่งอาจจะเรียก วัสดุฐานรองไดอิเล็กตริก (Dielectric substrate)

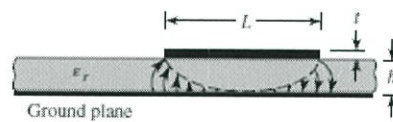
วัสดุวัสดุฐานรองมีหลายแบบที่ใช้สำหรับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองปกติจะใช้ค่าในช่วง $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ และหนึ่งในพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของสายอากาศคือความหนาของวัสดุฐานรอง โดยถ้าความสูงของวัสดุฐานรองที่บางกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงจะเหมาะสำหรับการออกแบบวงจรไมโครเวฟ เพราะต้องการสนามที่เข้มข้นที่จะให้การแพร่กระจายคลื่นและการคัปปลิงน้อยซึ่งทำให้ขนาดเล็กลง อย่างไรก็ตามเนื่องจากการสูญเสียที่สูงจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลงและแบนด์วิดท์แคบลง เนื่องจากสายอากาศที่ดีและการออกแบบวงจรที่ดี (เลือกกระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูง ประสิทธิภาพจะลดลงแต่ขนาดจะลดลงด้วย)

บ่อยครั้งสายอากาศไมโครสตริปถูกเรียกว่า สายอากาศแพทช์โดยตัวแพร่กระจายคลื่นและสายป้อนจะถูกวางบนวัสดุฐานรอง แพทช์แพร่กระจายคลื่นอาจจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า สตริปบาง (ไดโพล) วงกลมวงรี สามเหลี่ยมหรือรูปอื่น ๆ ตัวอย่างดัง

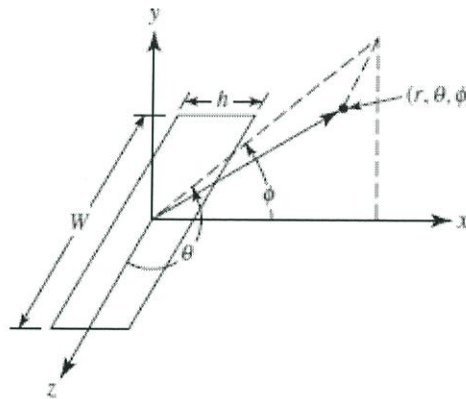
รูปที่ 2.6 โดยทั่วไปแล้วรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้าไดโพล และวงกลมจะถูกเลือกใช้ในการออกแบบเพราะง่ายต่อการวิเคราะห์และสร้าง รวมทั้งคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นเป็นที่น่าสนใจ โดยเฉพาะค่าโพลาไรซ์ไขว้ต่ำ (Low cross polarization) โดยไดโพลไมโครสตริปถูกนำมาออกแบบเพราะมีแบนด์วิดท์ที่กว้างและใช้พื้นที่น้อยมีการโพลาไรซ์และขณะที่แพทช์ทั่ว ๆ ไปสามารถทำได้โดยทั้งใช้แพทช์เดี่ยวนำมาต่อแบบแถวลำดับ ซึ่งทำให้แบบรูปมีทิศทางมากขึ้น



(ก) สายอากาศไมโครสตริป



(ข) มุมมองด้านข้าง



(ค) ระบบโคออดิเนตสำหรับแต่ละช่อง

รูปที่ 2.5 สายอากาศไมโครสตริปและระบบโคออดิเนต [3]



(ก) สี่เหลี่ยมจัตุรัส



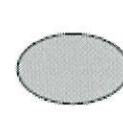
(ข) สี่เหลี่ยมผืนผ้า



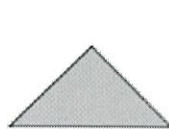
(ค) ไดโพล



(ง) วงกลม



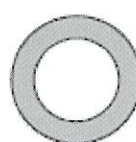
(จ) วงรี



(ฉ) สามเหลี่ยม



(ช) ส่วนของวงกลม



(ฐ) วงแหวนวงกลม



(ฎ) วงแหวนส่วนของวงกลม

รูปที่ 2.6 รูปร่างของแพทช์ไมโครสตริป [3]

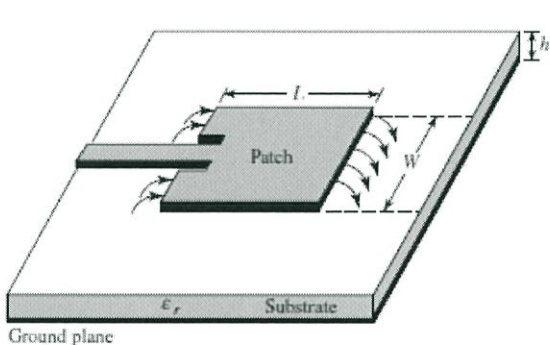
2.5.1.2 วิธีการป้อน

วิธีการป้อน (Feeding techniques) สายอากาศไมโครสตริปมีโครงสร้างการป้อน 4 แบบที่ได้รับความนิยมใช้งานคือ สายไมโครสตริป (Microstrip line) โคแอกเซียล (Coaxial line) คัปปลิงโดยใช้ช่อง (Aperture coupling) และการคัปปลิงเมื่อวางไว้ใกล้ ๆ (Proximity Coupling) แสดงดังรูปที่ 2.7 และวงจรมุมแสดงดังรูปที่ 2.8 สายป้อนแบบไมโครสตริปคือการนำสตริปซึ่งปกติจะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับแพทช์ต่อไปยังตัวแพทช์โดยการป้อนแบบสายไมโครสตริปนั้นง่ายต่อการสร้าง การแมตช์ได้สะดวกโดยการควบคุมตำแหน่งการป้อน และมีวงจรมุมที่ง่าย อย่างไรก็ตาม เมื่อความหนาของวัสดุฐานรองเพิ่มขึ้น คลื่นที่ผิวและการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมจะเพิ่มขึ้นตามซึ่งในการออกแบบทางปฏิบัติ จะมีแบนด์วิดท์ที่ค่อนข้างแคบและจำกัด (ปกติ 2%-5%)

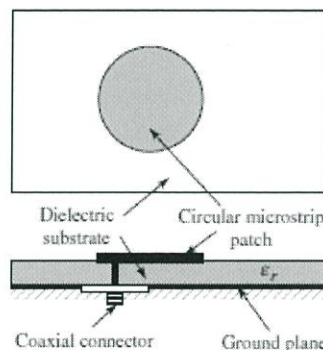
การป้อนแบบโคแอกเซียล โดยตัวนำด้านในของสายโคแอกเซียลต่อเข้ากับแพทช์ที่ใช้แพร่กระจายคลื่น ขณะที่ตัวนำด้านนอกต่อเข้ากับระนาบกราวด์อาจจะเรียกว่า การป้อนแบบโพรบ (Probe feed) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายในการสร้างและการแมตช์รวมทั้งมีค่าการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมน้อย อย่างไรก็ตาม มันจะมีแบนด์วิดท์ที่แคบและมีวงจรมุมที่ค่อนข้างยุ่งยากโดยเฉพาะเมื่อความหนาของวัสดุฐานรองสูง ($h > 0.02\lambda_0$)

ทั้งการป้อนแบบใช้สายไมโครสตริปและโคแอกเซียลจะมีโครงสร้างที่ไม่สมมาตรซึ่งจะทำให้เกิดโหมดในอันดับที่สูง (Higher order modes) ซึ่งจะเพิ่มค่าโพลาริซเมชันเพื่อที่จะขจัดปัญหาเหล่านี้ไปจะใช้การป้อนแบบคัปปลิงผ่านช่องที่ไม่มีการสัมผัสแสดงดังรูปที่ 2.7 (ค) และ (ง) การป้อนแบบคัปปลิงผ่านช่องในรูปที่ 2.7 (ค) เป็นวิธีที่ยากที่สุดใน 4 วิธีที่กล่าวมาในการสร้างและค่อนข้างที่จะมีแบนด์วิดท์ที่แคบ อย่างไรก็ตาม แบบจำลองค่อนข้างง่ายและมีการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมด้วย การคัปปลิงผ่านช่องประกอบด้วยวัสดุฐานรองสองชั้นถูกแยกออกจากกันด้วยระนาบกราวด์ ด้านล่างสุดของวัสดุฐานรองแผ่นล่างมีสายนำสัญญาณไมโครสตริปป้อนซึ่งพลังงานและถูกคัปปลิงผ่านช่องบนระนาบกราวด์ที่แยกกันระหว่างวัสดุฐานรอง การจัดวางสามารถที่จะทำการหาค่าที่เหมาะสม (Optimize) ทั้งของสายป้อนและตัวแพร่กระจายคลื่นโดยทั่วไปวัสดุฐานรองที่มีค่าไดอิเล็กตริกค่าสูงจะถูกใช้เป็นวัสดุฐานรองแผ่นล่าง ส่วนวัสดุฐานรองที่หนาและค่าไดอิเล็กตริกต่ำจะใช้สำหรับวัสดุฐานรองด้านบน ระนาบกราวด์ระหว่างวัสดุฐานรองใช้สำหรับแยกแหว่งสายป้อนกับตัวแพร่กระจายคลื่นและเพื่อให้การรบกวนของการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมน้อยที่สุดที่จะไม่รบกวนแบบรูปและไม่รบกวนต่อโพลาริซเมชัน สำหรับการออกแบบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวัสดุฐานรอง ความกว้างของสายป้อน และขนาดของช่อง รวมทั้งตำแหน่งจะต้องทำการหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบการแมตช์สามารถทำได้โดยการควบคุมความกว้างของสายป้อนและความยาวของช่อง การคัปปลิงผ่านช่องสามารถใช้แบบจำลองโดยใช้ทฤษฎีของ Bethe ซึ่งใช้พิจารณากรณีการคัปปลิงผ่านช่องเล็ก ๆ ในระนาบตัวนำในทฤษฎีของช่องถูกแสดงด้วยไดโพลไฟฟ้าสมมูลในการพิจารณาในองค์ประกอบตั้งฉากของสนามไฟฟ้า ส่วนไดโพลแม่เหล็กใช้พิจารณา

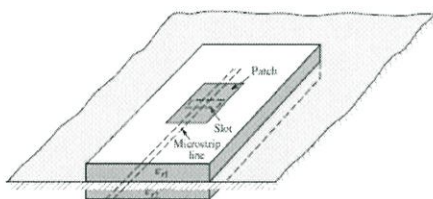
ในองค์ประกอบแนวสัมผัส (Tangential) ของสนามแม่เหล็ก ถ้าช่องอยู่ตรงกลางใต้แพทช์ การคัปปลิงของสนามแม่เหล็กจะสำคัญกว่า (Dominant) เมื่อโหมดโดมิแนนท์สำหรับทางอุดมคติ สนามไฟฟ้าจะมีค่าเป็นศูนย์ขณะที่สนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุด ซึ่งการทำอย่างนี้ทำให้ไม่มีโพลาไรซ์ ผสมและไม่มีโพลาไรซ์ไขว้ในระนาบหลัก การคัปปลิงแบบพรอกซิมิตี้จะให้เกิดแบนด์วิดท์ที่กว้างที่สุด (มากกว่า 13%) ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและมีการแพร่กระจายคลื่นแปลกปลอมน้อย อย่างไรก็ตาม การสร้างค่อนข้างยุ่งยาก ความยาวของสายป้อนและอัตราส่วนความกว้างต่อสายของแพทช์สามารถใช้ควบคุมการการแมตซ์



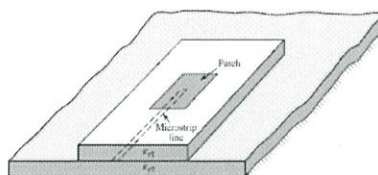
(ก) การป้อนสายไมโครสตริป



(ข) การป้อนแบบโคแอกเซียล

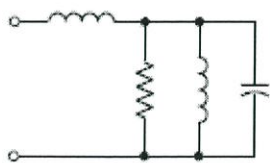


(ค) การป้อนแบบคัปเปิ้ลช่อง

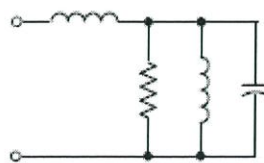


(ง) การป้อนแบบคัปเปิ้ลพรอกซิมิตี้

รูปที่ 2.7 ชนิดของการป้อนสำหรับสายอากาศไมโครสตริป [3]

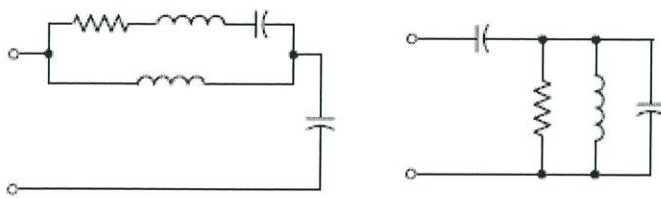


(ก) สายไมโครสตริป



(ข) โพรบ (โคแอกเซียล)

รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลสำหรับสายอากาศไมโครสตริป [3]



(ค) คัปเปิลช่อง

(ง) คัปเปิลอีพรอกซี

รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลสำหรับสายอากาศไมโครสตริป.(ต่อ) [3]

2.5.1.3 แบบจำลองสายนำสัญญาณ

แบบจำลองสายนำสัญญาณเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ แต่ผลการวิเคราะห์แม่นยำน้อยที่สุดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ไม่หลากหลาย อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ช่วยให้เข้าใจวิธีอื่น ๆ มากขึ้น โดยแบบจำลองสายนำสัญญาณที่ใช้แสดงสำหรับสายอากาศไมโครสตริปที่มีสองช่องถูกแบ่งออกเป็นสองตัวแปรคือ อิมพีแดนซ์ต่ำ Z_c และความยาวของสายนำสัญญาณ L

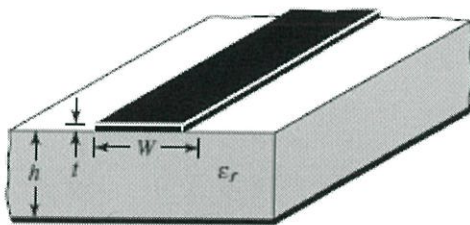
ก. ผลกระทบของขอบ (Fringing effects)

เพราะขนาดของแพทช์มีขนาดจำกัดทั้งตามแนวยาวและกว้างสนามที่ขอบของแพทช์จะเกิดสนามภายใต้ขอบ โดยรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) แสดงขนาดตามความยาวสำหรับช่องแพร่กระจายคลื่นสองช่องของสายอากาศไมโครสตริป ซึ่งผลรวมของสนามที่ขอบจะเป็นฟังก์ชันของแพทช์และความสูงของวัสดุฐานรองสนามที่ขอบของระนาบสนามไฟฟ้าหลัก (ระนาบ $x-y$) เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนของความยาวของแพทช์ L ต่อความสูงวัสดุฐานรอง $h(L/h)$ และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) เนื่องจากสายอากาศไมโครสตริปมี $L/h \gg 1$ ดังนั้นสนามที่ขอบจะลดลงอย่างไรก็ตาม ยังคงมีผลกระทบต่อความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศ

สายนำสัญญาณไมโครสตริปแสดงดังรูปที่ 2.9 (ก) และเส้นสนามไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 2.9 (ข) จะพบว่าเส้นสนามมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (Non-homogeneous) เนื่องจากไดอิเล็กตริกสองชนิดที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปไดอิเล็กตริกทั้งสองเป็นของวัสดุฐานรองและอากาศ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะอยู่ในวัสดุฐานรองเพราะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากกว่าและบางส่วนจะอยู่ในอากาศ ขณะที่ $W/h \gg 1$ และ $\epsilon_r \gg 1$ เส้นสนามไฟฟ้าจะกระจุกรวมกันอยู่ในวัสดุฐานรอง สนามที่ขอบของสายนำสัญญาณไมโครสตริปทำให้ขนาดทางไฟฟ้าใหญ่กว่าขนาดทางกายภาพ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของคลื่นบางส่วนในวัสดุฐานรองและบางส่วนในอากาศ โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ϵ_{ref} (Effective dielectric constant) จึงถูกใช้ในการอธิบายสนามที่ขอบและการแพร่กระจายคลื่น

การหาค่าของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล จะสมมติให้ตัวนำของสายสัญญาณไมโครสตริปซึ่งมีขนาดและความสูงเหนือระนาบกราวด์เท่าของเดิมถูกฝังเข้าไปใน

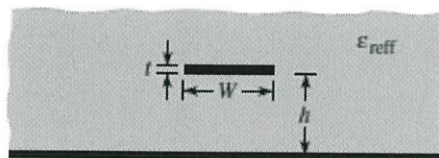
ไดอิเล็กตริกค่าหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.9 (ค) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ถูกนิยามโดย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกสม่ำเสมอซึ่งเส้นสนามดังแสดงในรูป 2.9 (ค) มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าแบบเดียวกันกับค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นในทางปฏิบัติ เหมือนเส้นสนามจริงในรูปที่ 2.9 (ข) สำหรับเส้นสนามในอากาศเหนือวัสดุฐานรองค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลจะมีค่าอยู่ในช่วง $1 < \epsilon_{reff} < \epsilon_r$ สำหรับการใช้งานโดยส่วนใหญ่ถ้าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองจะมีค่ามากกว่าหนึ่งมาก ๆ ($\epsilon_r \gg 1$) ค่าของ ϵ_{reff} จะมีค่าเข้าใกล้ค่าไดอิเล็กตริกค่าจริงของวัสดุฐานรอง ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลยังเป็นฟังก์ชันของความถี่ด้วย โดยถ้าความถี่ใช้งานเพิ่มขึ้น เส้นสนามไฟฟ้าส่วนใหญ่จะกระจุกในวัสดุฐานรอง ดังนั้น สายไมโครสตริปจึงประพฤติตัวเหมือนสายนำสัญญาณสม่ำเสมอที่มีค่าไดอิเล็กตริกค่าหนึ่ง (มีเพียงวัสดุฐานรอง) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลมีค่าใกล้ค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงเทียบฟังก์ชันของความถี่ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลสำหรับสายไมโครสตริปที่มีวัสดุฐานรองที่แตกต่างกันสามค่า แสดงดังรูปที่ 2.10



(ก) เส้นไมโครสตริป



(ข) เส้นสนามไฟฟ้า



(ค) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

รูปที่ 2.9 สายนำสัญญาณไมโครสตริป เส้นสนามไฟฟ้าและ
โครงสร้างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล [3]

สำหรับความถี่ต่ำ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลโดยพื้นฐานจะมีค่าคงที่ ขณะที่ที่ความถี่กลางๆจะมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นและในที่สุดจะเข้าสู่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรองค่าเริ่มต้น (ที่ความถี่ต่ำๆ) ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล ถูกอ้างอิงด้วย ค่าหยุดนิ่ง (Static value) และมีค่า $W/h > 1$

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.1)$$

ข. ความยาวประสิทธิผล ความถี่เรโซแนนซ์ และความกว้างประสิทธิผล
 เพราะผลกระทบของสนามที่ขอบ ขนาดของแพทช์ทางไฟฟ้าของสายอากาศไมโครสตริปดูเหมือนว่าจะใหญ่กว่าขนาดทางกายภาพ สำหรับสนามที่ของระนาบสนามไฟฟ้าหลัก (ระนาบ $x-y$) แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.11 เมื่อขนาดของแพทช์ตามแนวยาวถูกขยายออกไปในแต่ละด้านด้วยระยะ ΔL ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล $\varepsilon_{\text{reff}}$ และอัตราส่วนของความกว้างต่อความสูง W/h ค่าโดยประมาณสามารถหาได้โดย

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (2.2)$$

เนื่องจากความยาวของแพทช์ในแต่ละด้านถูกขยายด้วย ความยาวประสิทธิผลของแพทช์ในตอนนี้คือ ($L = \lambda/2$ สำหรับโหมดหลัก TM_{010} และไม่มีการการแพร่กระจายคลื่นที่ขอบ)

$$L_{\text{eff}} = L + 2\Delta L \quad (2.3)$$

สำหรับโหมดหลัก TM_{010} ความถี่เรโซแนนซ์ของสายอากาศไมโครสตริปจะเป็นฟังก์ชันของความยาว โดยปกติสามารถเขียนได้ดังนี้

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (2.4)$$

เมื่อ v_0 คือความเร็วแสงในอวกาศว่าง เนื่องจากสมการที่ (2.4) ไม่ได้รวมผลของสนามค่าขอบเข้าไปด้วย ดังนั้นจะรวมกระทบของสนามค่าขอบดังกล่าวเข้าด้วย จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 (f_r)_{010} &= \frac{1}{2L_{eff}\sqrt{\epsilon_{eff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = \frac{1}{2(L+2\Delta L)\sqrt{\epsilon_{reff}}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \\
 &= q \frac{1}{2L\sqrt{\epsilon_r}\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = q \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}}
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

เมื่อ

$$q = \frac{(f_{rc})_{010}}{(f_r)_{010}} \tag{2.5 ก}$$

ค่าองค์ประกอบ q อ้างอิงถึง องค์ประกอบค่าขอบ (Fringe factor) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้ความยาวลดลง ขณะที่ความสูงเพิ่มขึ้น สนามค่าขอบจะเพิ่มขึ้นตามด้วยและนำไปสู่การแยกกันมากขึ้นระหว่างขอบการการแพร่กระจายคลื่น และความถี่เรโซแนนซ์ที่ต่ำลง

ค. การออกแบบ

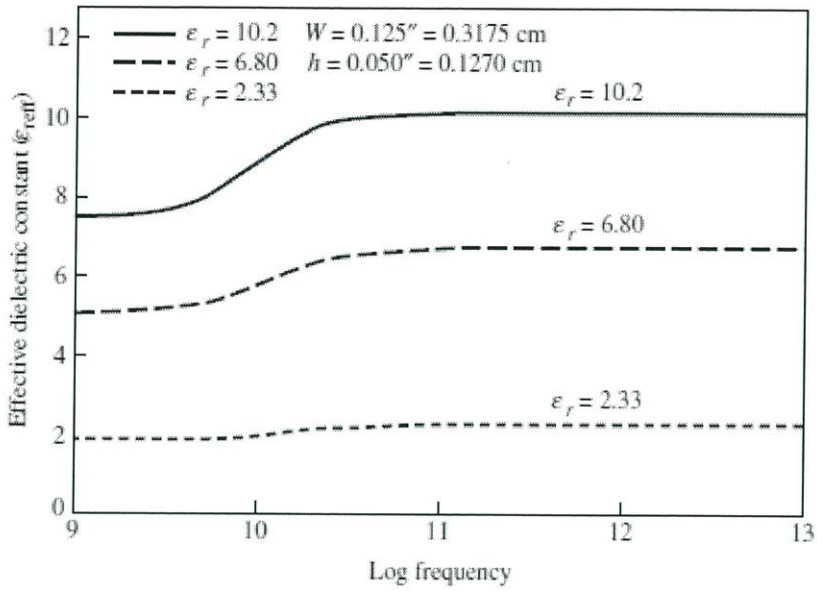
ขั้นตอนการออกแบบ โดยเริ่มจากการกำหนดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกคงที่ของวัสดุฐานรอง (ϵ_r) ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และความสูงของวัสดุฐานรอง h ขั้นตอนการออกแบบมีดังนี้

กำหนดค่า

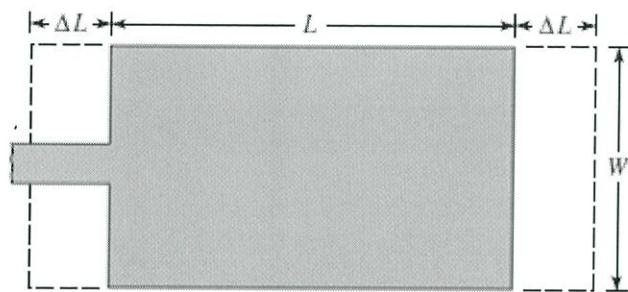
ϵ_r , f_r (ในหน่วย Hz) และ h

คำนวณ

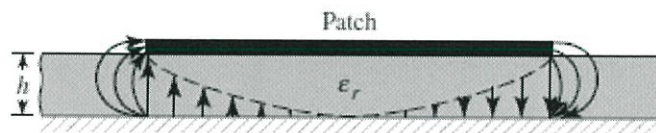
W, L



รูปที่ 2.10 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผลเทียบกับความถี่ [3]



(ก) มุมมองด้านบน



(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 2.11 โครงสร้างทางกายภาพและความยาวประสิทธิผลของสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมผืนผ้า [3]

ขั้นตอนการออกแบบ

1. ตัวแพร่กระจายคลื่นที่มีประสิทธิภาพ ความกว้างในทางปฏิบัติซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นที่ดี

$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \text{ cm} \quad (2.6)$$

เมื่อ v_0 คือ ความเร็วแสงในอวกาศว่าง

2. คำนวณค่าคงที่ได้ไอเล็กตริกประสิทธิผลของสายอากาศไมโครสตริปโดยใช้สมการที่ (2.1)
3. เมื่อได้ W จากสมการที่ (2.6) และคำนวณความยาวที่ขยายออกมา ΔL โดยใช้สมการที่ (2.2)
4. คำนวณความยาวจริงของแพทช์โดยใช้สมการที่ (2.5) หรือ

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \text{ cm} \quad (2.7)$$

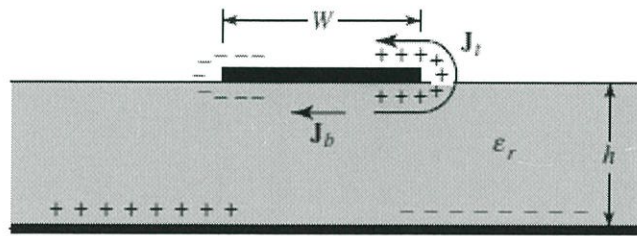
หมายเหตุ f หน่วย GHz ความยาวและความกว้าง หน่วย cm

2.5.1.4 แบบจำลองควาวิตี้

สายอากาศไมโครสตริปมีลักษณะคล้ายกับควาวิตี้โหลดไดอิเล็กตริก (Dielectric loaded cavity) และมีลักษณะเรโซแนนซ์ในอันดับที่สูง สนามนอร์มัลไรซ์ภายในวัสดุฐานรองไดอิเล็กตรอน (ระหว่างแพทช์ระนาบกราวนด์) สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำถ้าใช้กระบวนการของควาวิตี้โดยกำหนดขอบเขตของตัวนำ (อยู่บนและล่าง) และกำแพงแม่เหล็กตามแนวเส้นรอบวงของแพทช์

เพื่อที่จะทำความเข้าใจแบบจำลองแบบควาวิตี้ตัวอย่างลึกซึ้ง ในที่นี้จะพยายามอธิบายสนามให้เห็นเป็นรูปร่างภายในตัวควาวิตี้และการการแพร่กระจายคลื่นผ่านด้านข้างของมัน เมื่อแพทช์ไมโครสตริปคือตัวจ่ายพลังงานการกระจายของประจุจะเกิดที่ผิวด้านบนและด้านล่างของแพทช์ (ระนาบกราวนด์) แสดงดังรูปที่ 2.12 การกระจายของประจุถูกควบคุมด้วยกลไกสองอย่าง คือ การดึงดูด (Attractive) และการขับไล่ (Repulsive) กลไกการดึงดูด คือเกิดจากประจุที่มีขั้วต่างกันระหว่างบนด้านล่างของแพทช์และระนาบกราวนด์ ซึ่งทำให้ความหนาแน่นของประจุอยู่บนข้างล่างของแพทช์ ส่วนกลไกการขับไล่จะเกิดจากประจุเหมือนกันระหว่างผิวด้านล่างของแพทช์ซึ่งจะทำให้เกิดการผลักกันของประจุจากด้านล่างของแพทช์รอบ ๆ ขอบของมันไปยังผิวด้านบน การเคลื่อนที่ของประจุเหล่านี้ทำให้เกิดความหนาแน่นของกระแส J_b และ J_t ที่ผิวด้านล่างและด้านบนของแพทช์ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.12 เนื่องจากไมโครสตริปในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างจะมีค่าค่อนข้างเล็กกลไกการดึงดูดจะมีค่าโดมิแนนท์และกระแสยังคงอยู่ใต้แพทช์และผลรวมส่วนน้อยของกระแสที่ไหลจะรอบ ๆ ขอบของแพทช์ถึงด้านบนของแพทช์อย่างไรก็ตาม การไหลของกระแสจะลดลงเมื่ออัตราส่วนความสูงต่อความกว้างลดลง ใน

ขอบเขตที่จำกัด การไหลของกระแสที่ด้านบนจะมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งในทางอุดมคติจะไม่มีองค์ประกอบสนามแม่เหล็กแทนเจนต์ที่ขอบของแพทช์ ซึ่งจะพบว่าถ้าแพทช์ทั้ง 4 ด้านจะมีรูปแบบเป็นผิวดำนำแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์ ซึ่งในทางอุดมคติจะไม่มีสนามแม่เหล็กบริเวณและการกระจายของสนามไฟฟ้าจะกระจายอยู่ใต้แพทช์ เนื่องจากในทางปฏิบัติขนาดอัตราส่วนของความสูงต่อความกว้างมีค่าจำกัด ถึงแม้จะมีขนาดเล็กแต่สนามแม่เหล็กแทนเจนต์จะไม่เท่ากับศูนย์ที่ขอบของแพทช์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมันมีขนาดเล็ก เราสามารถประมาณค่าของแบบจำลองควิตี้ให้ต่าง ๆ เป็นตัวนำแม่เหล็กอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 2.12 การกระจายของประจุและความเข้มของกระแสที่เกิดจากแพทช์ไมโครสตริป [3]

ถ้าสายอากาศไมโครสตริปถูกพิจารณาโดยใช้เพียงวิธีแบบควิตี้ อาจจะไม่เพียงพอสำหรับการหาค่าขนาดสมบูรณ์ของสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก ในความเป็นจริงในการพิจารณากำแพงของควิตี้ซึ่งใช้วัสดุที่ไม่มีการสูญเสีย ควิตี้จะไม่มีการแพร่กระจายคลื่นและอิมพีแดนซ์ด้านเข้าจะเป็นเฉพาะค่ารีเอกแตนซ์ นอกจากนี้ฟังก์ชันที่แสดงอิมพีแดนซ์จะมีเฉพาะโพลค่าจริง (Real poles) แบบวงจรมูลของสายอากาศโดยทั่วไป จะประกอบด้วยความต้านทานสองตัวคือ ความต้านทานการแพร่กระจายคลื่น R_r และความต้านทานการสูญเสีย R_L ซึ่งค่าความต้านทานทั้งสองทำให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้าเป็นค่าเชิงซ้อนและฟังก์ชันของมันจะมีโพลเชิงซ้อนด้วย โดยค่าโพลทางจินตภาพเนื่องจาก R_r และ R_L การพิจารณาสายอากาศไมโครสตริปที่มีการสูญเสียจากแบบจำลองควิตี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าแทนเจนต์การสูญเสียประสิทธิผล $\tan \delta_{eff}$ (Effective loss tangent) ค่าแทนเจนต์การสูญเสียประสิทธิผลจะใช้แสดงค่าการสูญเสียของควิตี้ ซึ่งจะใช้แสดงในสายอากาศและเป็นสัดส่วนซึ่งกันและกันของตัวประกอบคุณภาพของสายอากาศ Q ($\tan \delta_{eff} = 1/Q$)

เพราะความหนาของไมโครสตริปปกติแล้วค่อนข้างบาง คลื่นที่เกิดขึ้นภายในวัสดุฐานรอง (ระหว่างแพทช์กับระนาบกราวด์) เกิดการสะท้อนไปมากกว่าจะมาถึงขอบของแพทช์ ดังนั้นจึงมีเพียงสัดส่วนน้อยของพลังงานที่เข้าเกิดการการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศจึงทำงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพ รูปแบบของสนามข้างล่างแพทช์จะแสดงด้วยฟังก์ชันโคไซน์ เนื่องจากความสูงของวัสดุฐานรองค่อนข้างเล็ก ($h \ll \lambda$) การเปลี่ยนแปลงของสนามตามแนวความสูงจะถูกพิจารณาให้มีค่าคงที่ นอกจากนี้ เพราะความสูงของวัสดุฐานรองค่อนข้างเล็ก ดังนั้นสนามรั่วไหลที่

ของของแพทช์ก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วยขณะที่สนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับผิว ดังนั้นจะมีเพียงสนามโหมด TM^x ถูกพิจารณาภายในควาวิตี้ ขณะที่ด้านบนและล่างของควาวิตี้จะเป็นตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ กำแพงทั้งสี่ด้านจะถูกจำลองด้วยกำแพงแม่เหล็กสมบูรณ์

การคำนวณโหมดโดมิแนนท์ซึ่งจะมีความถี่เรโซแนนซ์ต่ำสุด เราจำเป็นพิจารณาความถี่เรโซแนนซ์โหมดที่ให้ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำสุดซึ่งจะเรียกว่า โหมดโดมิแนนท์ (Dominant mode) อันดับความถี่เรโซแนนซ์ในลำดับที่สูงขึ้นไปเป็นตัวกำหนดโหมดถัดไป สำหรับสายอากาศไมโครสตริป $h \ll \lambda$ และ $h \ll W$ ถ้า $L > W > h$ โหมดที่เกิดขึ้นที่ความถี่เรโซแนนซ์ต่ำสุด (โหมดโดมิแนนท์) คือ TM_{010}^x ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ของมันสามารถหาได้จาก

$$(f_r)_{010} = \frac{1}{2L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.8)$$

เมื่อ v_0 คือความเร็วของแสงในอวกาศว่าง ถ้ากรณี $L > W > L/2 > h$ โหมดถัดไป (อันดับที่ 2) คือโหมด TM_{001}^x ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ของมันสามารถหาได้จาก

$$(f_r)_{001} = \frac{1}{2W\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{2W\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.9)$$

อย่างไรก็ตาม ถ้า $L > W > L/2 > h$ โหมดอันดับที่สองคือ คือโหมด TM_{020}^x แทนโหมด TM_{001}^x ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ของมันสามารถหาได้จาก

$$(f_r)_{020} = \frac{1}{L\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{v_0}{L\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.10)$$

ถ้า $W > L > h$ โหมดโดมิแนนท์คือโหมด TM_{001}^x ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ของมันสามารถหาได้จากสมการที่ (2.9)

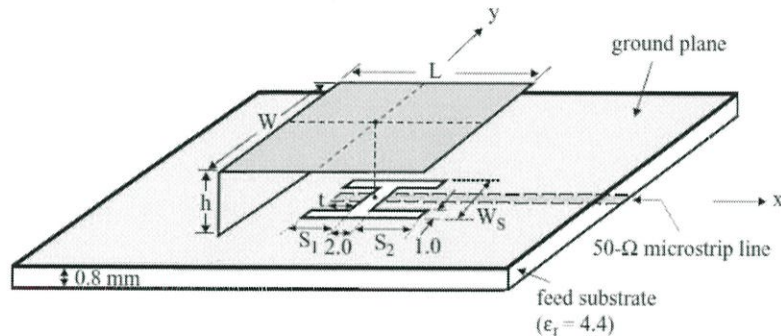
ขั้นตอนดังที่กล่าวมาในข้างต้น เราสมมติว่าไม่มีสนามรั่วไหลที่ตามแนวขอบของควาวิตี้ ซึ่งไม่ใช่การสมมติที่ถูกต้องสมบูรณ์แต่มันเป็นการประมาณที่ดี อย่างไรก็ตามผลกระทบของสนามที่รั่วไหลและอิทธิพลของมันเราได้กล่าวแล้วก่อนหน้านี้ และส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์

2.5.2 สายอากาศแบนด์วิดท์กว้าง (Broadband microstrip antenna)

สำหรับการออกแบบสายอากาศ โดยใช้สายอากาศไมโครสตริปที่มีช่องว่างอากาศ จะมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ (ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB) ได้ถึง 10% หรือมากกว่า รูปแบบสายอากาศไมโครสตริปจะมีความสะดวกในการป้อนสัญญาณโดยการใช้โพรบป้อน และโดยปกติจะอ้างอิงสายอากาศแบบ Planar Invert-F (PIFA) ปัจจุบันมีวิธีการป้อนสัญญาณหลายแบบ เช่น Aperture-coupled หรือ Microstrip-line หรือ Capacitively coupled หรือ L-probe

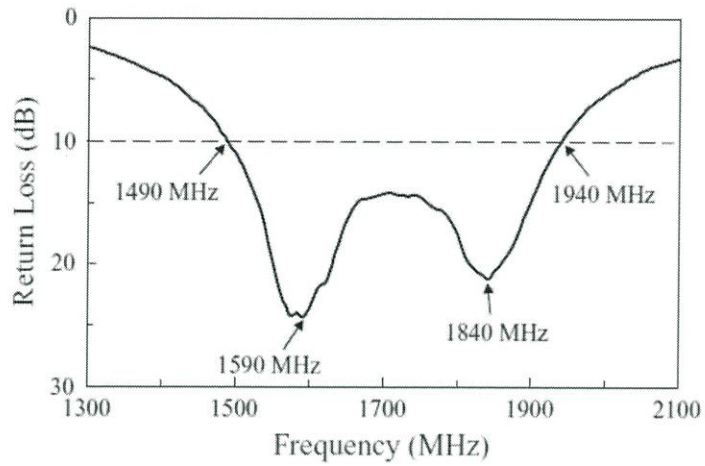
จะพบว่าผลการทดสอบกับผลการจำลองมีแนวโน้มเดียวกัน สำหรับความถี่ด้านต่ำ มีความกว้างแบนด์วิดธ์อยู่ 302 MHz (1588-1890 MHz) หรือประมาณ 17.4% อ้างอิงจากความถี่กลาง (1739 MHz) สำหรับความถี่ด้านสูง มีความกว้างแบนด์วิดธ์คือ 74 MHz (2426-2500 MHz) หรือประมาณ 3.0% อ้างอิงจากความถี่กลาง (2463 MHz)

2.5.2.2 สายอากาศแบบ Aperture-coupled



รูปที่ 2.15 รูปร่างสายอากาศแบบ Aperture-coupled ที่มีช่องสลีต H [4]

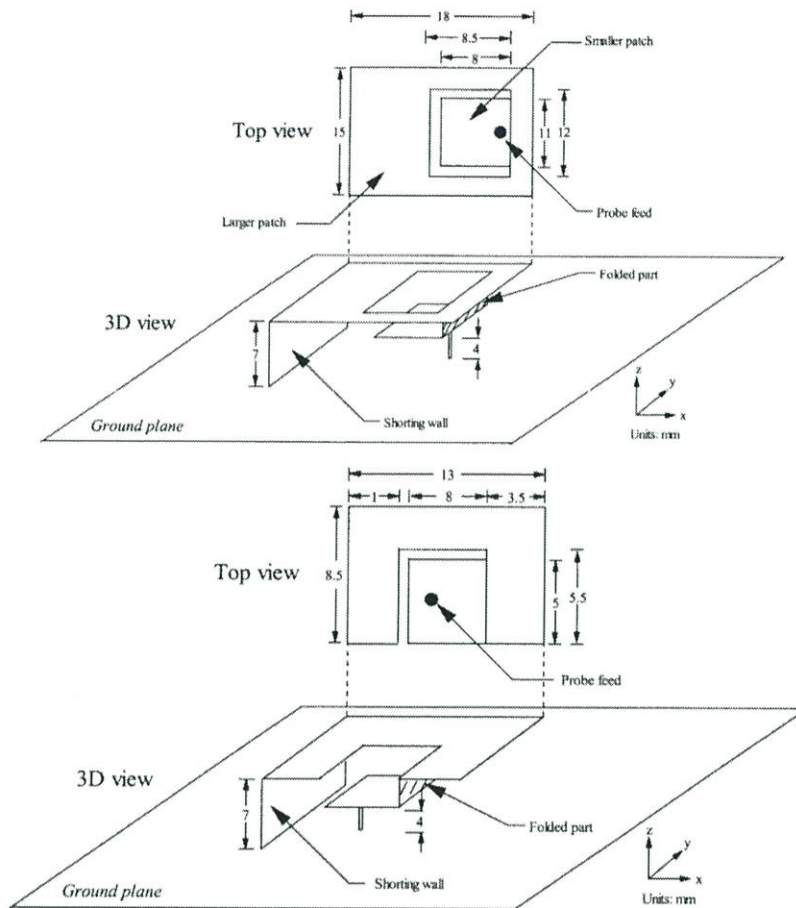
สายอากาศจะถูกป้อนสัญญาณโดยใช้ Aperture-coupled เพื่อให้มีแบนด์วิดธ์ที่กว้าง รูปที่ 2.15 แสดงรูปร่างของสายอากาศแบบ Aperture-coupled ที่มีช่องสลีตเป็นตัว H แพทช์สี่เหลี่ยมผืนผ้ามีความยาว L และความกว้าง W ทำการเชื่อมต่อเซอร์กิตไปยังระนาบกราวนด์โดยใช้แผ่นกำแพงตัวนำ (Conducting wall) ขนาด $W \times h$ ในกรณีนี้แพทช์จะพิจารณาได้ว่ามีความหนาของช่องว่างอากาศเป็น h ช่องสลีต H จะเจาะที่ระนาบกราวนด์และอยู่ใต้จุดกึ่งกลางของแพทช์ จุดกึ่งกลางแกนของช่องสลีต H มีความกว้าง 2 mm และมีความยาว W_s ส่วนบน (อยู่ใกล้กับแผ่นกำแพงตัวนำ) และส่วนล่างของแกนของช่องสลีต H มีความยาวเป็น S_1 และ S_2 ตามลำดับ และมีความกว้างเท่ากันคือ 1 mm



รูปที่ 2.16 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแบบ Aperture-coupled [4]

รูปที่ 2.16 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของโครงสร้างสายอากาศ มีความหนาช่องว่างอากาศ h เป็น 12 mm แพทช์มีขนาด 30 mm x 40 mm ผลการวัดแสดงให้เห็นถึงความถี่เรโซแนนซ์ 2 ความถี่ที่มีอิมพีแดนซ์แมชชิงที่ดี คุณสมบัตินี้พบเห็นได้ในสายอากาศแบนด์วิดท์กว้างที่มีช่องว่างอากาศ ในกรณีนี้สายอากาศมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ ที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -10 dB คือ 450 MHz หรือประมาณ 26.2% อ้างอิงจากความถี่กลางที่ 1715 MHz

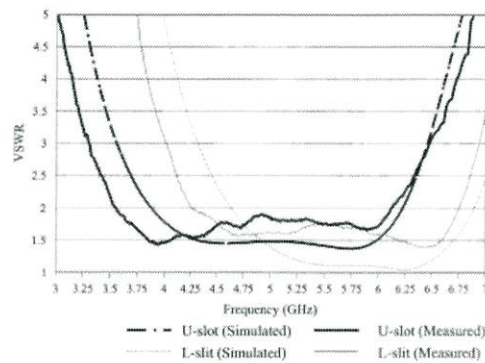
2.5.2.3 สายอากาศแพทช์สลีตตัว U และสลีตตัว L



รูปที่ 2.17 รูปร่างสายอากาศที่มีสลีตตัว U และสลีตตัว L [5]

สลีตตัว U และสลีตตัว L มักเป็นสองวิธีที่ใช้ในการออกแบบเพื่อให้สายอากาศทำงานได้ในสองความถี่ [6] ส่วนแผ่น shorting จะทำให้ขนาดแพทช์ของสายอากาศมีขนาดลดลง สองวิธีนี้จะทำให้สายอากาศมีอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ไม่ถึง 10% [7] สำหรับเทคนิคในการเพิ่มแบนด์วิดธ์นั้นมีหลายวิธี เช่น การเพิ่มแผ่นแพทช์พาราซิติกเข้าไป การใช้แพทช์ที่มีสลีตตัว U การบ่อนโพรบรูปตัว L [8] สายอากาศแบบ Aperture coupling และการเพิ่มความหนาของช่องว่างอากาศ

เป็นที่รู้กันว่าการเพิ่มความสูงของแผ่นแพทช์จะช่วยเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดธ์ แต่ถึงอย่างนั้นการเพิ่มความสูงจะทำให้ความยาวโพรบในการบ่อนสัญญาณนั้นสูงตามไปด้วย ความยาวโพรบที่สูงยิ่งทำให้แบนด์วิดธ์แคบ [9] ดังนั้นการลดความสูงของโพรบจะช่วยเพิ่มแบนด์วิดธ์ให้สายอากาศได้

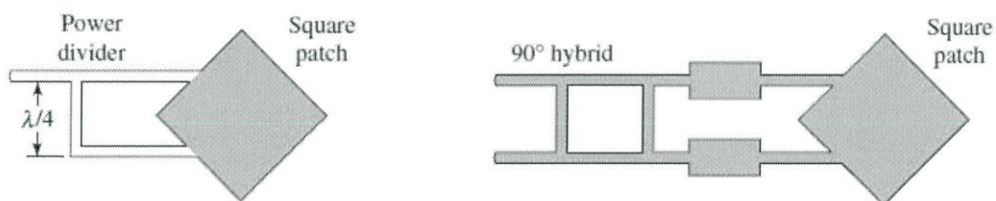


รูปที่ 2.18 VSWR ของสายอากาศแพทช์ที่มีสลิตตัว U และสลิตตัว L [5]

จากสายอากาศรูปที่ 2.17 ผลการจำลองและผลทดสอบของสายอากาศแพทช์ที่มีสลิตตัว U และสายอากาศสลิตตัว L ที่ถูกขับลงมาจากแพทช์ด้านบน แสดงได้ดังรูปที่ 2.18 แบนด์วิดท์ที่ได้จากการทดสอบ (VSWR<2) เท่ากับ 53.54% มีช่วงความถี่อยู่ที่ 3.57 GHz - 6.18 GHz และ 45.12% มีช่วงความถี่อยู่ที่ 4.265 GHz - 6.75 GHz ผลจากการจำลองและทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน

2.5.3 สายอากาศไมโครสตริปแบบโพลาริซวงกลม

โพลาริซวงกลมสามารถเกิดขึ้นได้ ถ้าโหมดคลื่นสองโหมดที่ตั้งฉากกันมีเฟสต่างกันอยู่ 90° การเกิดความต่างเฟสสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนรูปร่างหรือขนาดของแพทช์และจุดป้อนสัญญาณหนึ่งจุด หรือสองจุด หรือมากกว่านั้น สำหรับแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัส วิธีที่ง่ายที่สุดในการทำให้เกิดโพลาริซวงกลม คือ การป้อนสัญญาณที่ขอบทั้งสองข้างที่อยู่ติดกัน ดังรูปที่ 2.19

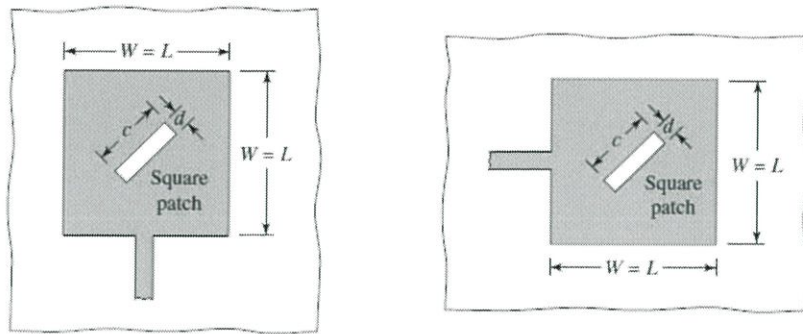


รูปที่ 2.19 การจัดรูปแบบแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับโพลาริซวงกลม [10]

นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นๆ ในการทำให้เกิดโพลาริซวงกลม สำหรับแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสสามารถทำให้เกิดโพลาริซวงกลมได้ด้วยการเจาะช่องสลิต ดังรูปที่ 2.20 โดยมีขนาดดังนี้

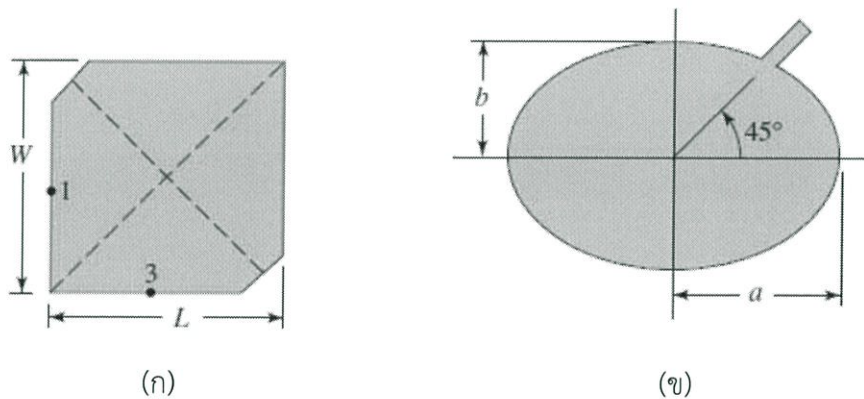
$$c = \frac{L}{2.72} = \frac{W}{2.72} \quad (2.11)$$

$$d = \frac{c}{10} = \frac{L}{27.2} = \frac{W}{27.2}$$



รูปที่ 2.20 โพลาริซวงกลมสำหรับแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีการเจาะช่องสลิต [10]

ทางเลือกอีกอย่างหนึ่งคือการตัดขอบของมุมที่อยู่ตรงกันข้ามของแพทช์สี่เหลี่ยมจัตุรัสแล้วทำการป้อนสัญญาณที่จุด 1 หรือจุด 3 ดังรูปที่ 2.21(ก) นอกจากนี้การเกิดโพลาริซวงกลมสามารถทำได้โดยการเพิ่มแท็บบนตัวแพทช์ขึ้นมา ดังรูปที่ 2.21(ข)



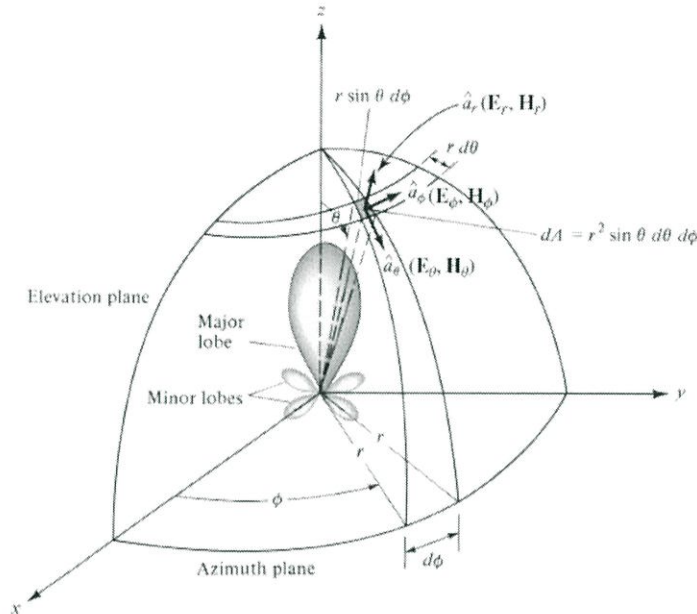
รูปที่ 2.21 โพลาริซวงกลมโดยการตัดขอบทั้งสองด้านและการเพิ่มแท็บ [10]

2.6 พารามิเตอร์สำคัญในการใช้งานสายอากาศ

2.6.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสายอากาศหรือแบบรูปสายอากาศมีความหมายคือ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ หรือ แสดงโดยเส้นที่สามารถแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการแพร่กระจายของสายอากาศตามฟังก์ชันของสเปซโคออร์ดิเนต (Space coordinates) ส่วนมากในกรณีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนี้จะกำหนดการคิดในบริเวณที่เป็นสนามระยะไกล (Far-field) และแสดงให้เห็นเช่นเดียวกับฟังก์ชันตามทิศทางของโคออร์ดิเนต คุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นประกอบด้วยกำลังความหนาแน่น ฟลักซ์แม่เหล็ก (Flux) ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

(Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field strength) เฟส (Phase) หรือโพลาไรซ์ (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ใช้เพื่อแสดงการแจกแจงรูปของพลังงานเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งสามมิติที่สังเกตที่มีรัศมีคงที่

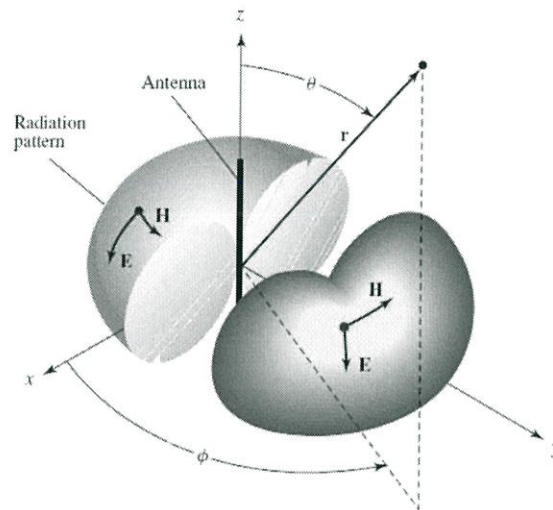


รูปที่ 2.22 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [10]

จากรูป 2.22 จะเป็นการแสดงระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่มีชื่อเรียกว่า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Power pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่างๆ ที่มีรัศมีคงที่เรียกว่า สนามการแพร่กระจายคลื่น (Field pattern) ของสายอากาศนั้น

2.6.1.1 แบบรูปการแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก แบบชี้ทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว (Isotropic, Directional and Omnidirectional pattern)

ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก (Isotropic radiation) คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นให้มีการแพร่กระจายคลื่นเท่าๆกันในทุกทิศทาง แม้ว่ามันจะเป็นแค่แนวความคิด แต่ก็มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ



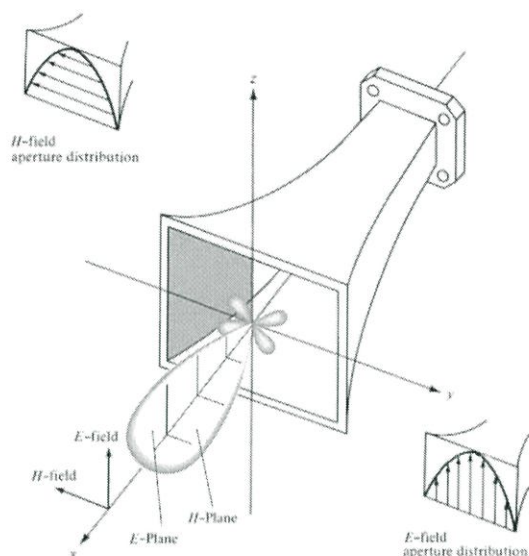
รูปที่ 2.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว [10]

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นหรือรองรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omnidirectional antenna) คุณสมบัตินี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.23

จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบนี้ ไม่มีทิศทางในระนาบแอสิมัทหรือระนาบมุมกวาด (Azimuth Plane) $[f(\phi), \theta = \pi/2]$ แต่เป็นแบบชี้ทิศทางในระนาบเอเลเวชันหรือมุมยก (Elevation Plane) $[g(\theta), \phi = \text{ค่าคงที่}]$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวนี้เป็นกรณีพิเศษของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบชี้ทิศทาง

2.6.1.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern)

เรามักจะอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในเทอมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สำหรับสายอากาศโพลาไรซ์เชิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด



รูปที่ 2.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศปากแตร [10]

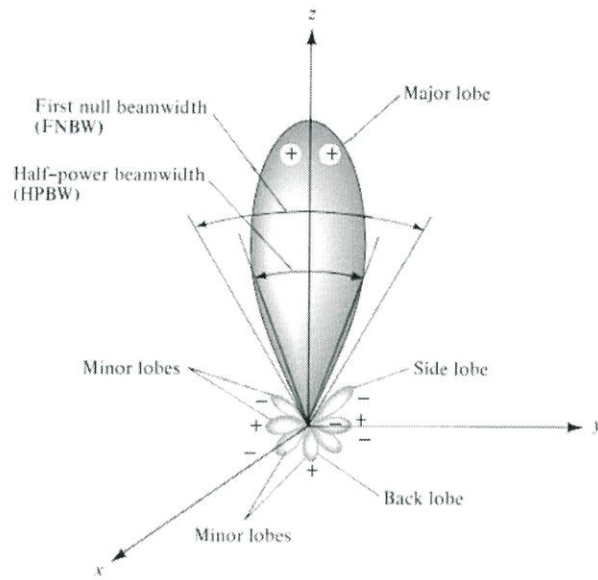
จากรูป 2.24 เป็นการแสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นหลัก โดยมีระนาบ xz (ระนาบเอเลเวชัน; $\phi = 0$) เป็นระนาบสนามไฟฟ้า หลักและมีระนาบ xy (ระนาบแอสิมัท; $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบสนามแม่เหล็กหลัก

2.6.1.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation lobe)

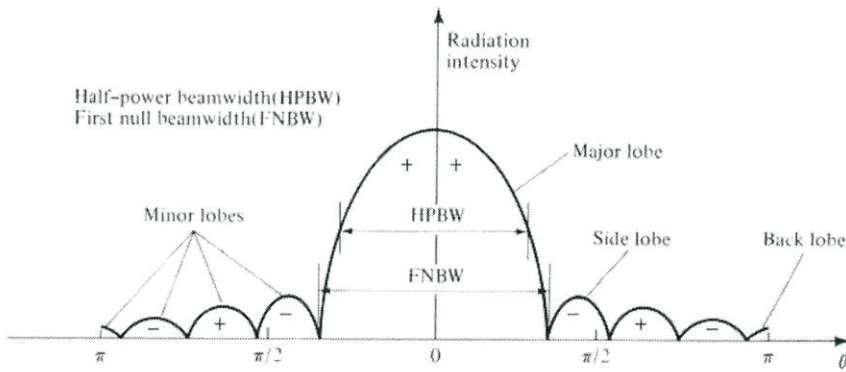
ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นเป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณโดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำรูปที่ 2.25(ก) แสดงรูปแบบการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ ซึ่งสามารถแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่างๆ ดังนี้

ลำคลื่นหลัก (Major lobe หรือ Main lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นที่อยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามรูปที่ 2.25(ข) มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น ลำคลื่นย่อย คือลำคลื่นอื่นที่นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก ลำคลื่นข้าง (Side lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่ติดอยู่กับลำคลื่นหลักและอยู่ในทิศทางของครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก ลำคลื่นด้านหลัง (Back lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก

ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจึงต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของคลื่นย่อยมักจะแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่าระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe level:SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมักจะต้องการให้ระดับของลำคลื่นน้อยกว่า -20 dB



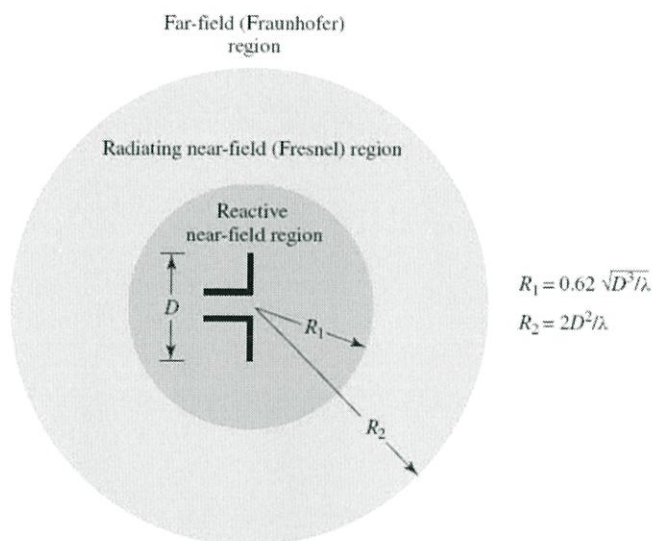
(ก) ลำคลื่นต่างๆ และความกว้างลำคลื่นสัญญาณของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



(ข) แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในแบบเชิงเส้นรูปที่ 2.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น [10]

2.6.1.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปมักจะเป็นบริเวณที่ล้อมรอบสายอากาศออกเป็น 3 ส่วน คือสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ (Reactive-Near field) สนามกระจายระยะใกล้ (Radiating – Near field) และสนามกระจายระยะไกล ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ [10]

บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุดและมีสนามเป็นชนิดแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R < 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$

จากผิวของสายอากาศเมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นและ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ บริเวณสนามกระจายระยะใกล้เป็นบริเวณของสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่แพร่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่

การกระจายของสนามตามมุมต่างๆนั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศเมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $0.62 \sqrt{D^3 / \lambda} \leq R \leq 2D^2 / \lambda$

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $2D^2/\lambda$ จากสายอากาศ ในบริเวณนี้สามารถมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแพร่กระจายของสนามตามมุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในบริเวณดังกล่าวมีค่า R เท่ากับ $2D^2/\lambda$ และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์

2.6.2 อัตราขยาย (Gain)

ค่าอัตราขยายของสายอากาศ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณีคือ

1. อัตราขยายจริง (Absolute Gain) ของสายอากาศ (ในทิศทางที่กำหนดให้) หมายถึง อัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่กำหนดให้ ต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นที่ได้รับเข้ามา

2. อัตราขยายสัมพัทธ์ (Relative Gain) หมายถึง อัตราส่วนของอัตราขยายกำลังงานในทิศทางที่กำหนดให้ ต่ออัตราขยายกำลังงานของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น โดยกำลังงานที่ป้อนให้กับอินพุตของสายอากาศจะต้องเหมือนกันทั้งสองตัว โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบ ก็คือ สายอากาศที่เป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย (Lossless Isotropic Source) และสายอากาศแบบไดโพล

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วย ในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

อัตราการขยายกำลัง (Power gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้นมีค่าเท่ากับ 4π คูณอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อทิศทางกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วจะคิดค่ากำลังขยายในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

$$\text{Gain} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.12)$$

เมื่อ $U(\theta, \phi)$ = ความเข้มของการแพร่กระจายคลื่น

P_{in} = กำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วมักจะพูดถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราการขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราการขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศนั้นต้องเท่ากับสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศ

ไดโพล สายอากาศปากแตร แต่โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นไอโซทรอปิกพอยท์ซอร์สที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.13)$$

กำลังงานที่แพร่กระจายทั้งหมด P_{rad} สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ P_{in} ดังนี้

$$P_{rad} = e_i P_{in} \quad (2.14)$$

เมื่อ e_i เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ(ไม่มีหน่วย)ทำให้ จะได้

$$G(\theta, \phi) = e_i \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.15)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = e_i D_g(\theta, \phi) \quad (2.16)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดโดย

$$G_0 = D_g(\theta, \phi)_{max} = e_i D_g(\theta, \phi)_{max} \quad (2.17)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะได้

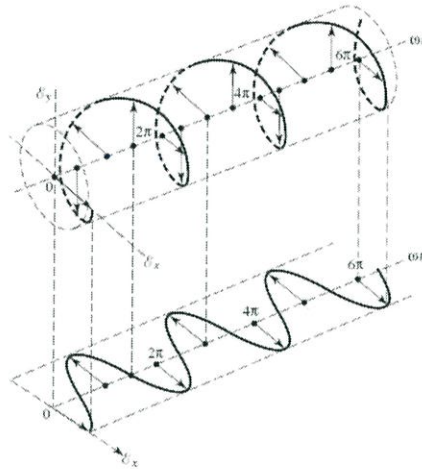
$$G_0 = \frac{30000}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.18)$$

เมื่อ Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใดๆ(องศา)

Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก(องศา)

2.6.4 การโพลาไรซ์ (Polarization)

โพลาไรซ์ของลำคลื่นที่แพร่กระจายนั้น เป็นรูปแสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป ที่อธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าซึ่งแปรผันตามเวลา โพลาไรซ์จะแสดงการกวาดของยอดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่างๆที่ ตำแหน่งทำการสังเกตซึ่งคงที่และการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังคลื่นที่เดินทางไป แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแนวระนาบที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ $z=0$ [10]

สำหรับโพลาไรซ์ของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาไรซ์ของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังที่ชี้ของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาจะให้หมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีค่าการขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาไรซ์ของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาไรซ์อาจแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1. โพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization)
2. โพลาไรซ์วงกลม (Circular polarization)
3. โพลาไรซ์วงรี (Elliptical polarization)

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่า โพลาไรซ์หมุนขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาไรซ์หมุนซ้าย ซึ่งจะเขียนสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบ ที่เดินทางในทิศ $-z$ ได้ว่า

$$\mathcal{E}(z;t) = \hat{a}_x \mathcal{E}_x(z;t) + \hat{a}_y \mathcal{E}_y(z;t) \quad (2.19)$$

เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามนั้นดังนี้

$$\mathcal{E}_x(z;t) = E_{x0} \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.20)$$

$$\mathcal{E}_y(z;t) = E_{y0} \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.21)$$

เมื่อ E_{x0} และ E_{y0} เป็นขนาดของสนามค่าสูงสุด ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

2.6.6.1 โพลาริซ์เชิงเส้น

คลื่นซึ่งเป็นโพลาริซ์เชิงเส้น ความแตกต่างเฟสระหว่างส่วนประกอบทั้งสองของสนาม จะมีค่าดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.22)$$

2.6.6.2 โพลาริซ์วงกลม

การที่จะสามารถเกิดการโพลาริซ์วงกลมได้ ก็ต่อเมื่อขนาดของส่วนประกอบของสนามทั้งสองมีค่าเท่ากัน และความต่างเฟส ระหว่างส่วนประกอบทั้งสอง เป็นจำนวนคี่เท่าของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$E_{x0} = E_{y0} \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4n)\pi}{2}; n = 0, 1, 2, \dots \text{CW} \quad (2.24)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\frac{(1+4n)\pi}{2}; n = 0, 1, 2, \dots \text{CCW} \quad (2.25)$$

เมื่อ

CW (Clockwise) คือ สนามหมุนตามเข็มนาฬิกา

CCW (Counter clockwise) คือ สนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ถ้าคลื่นเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม (คือทิศทาง +Z) เฟสในสมการ (2.23) ที่ทำให้เกิด CW และ CCW จะต้องสลับกัน

2.6.6.3 โพลาริซ์วงรี

โพลาริซ์วงรี จะเกิดขึ้นเมื่อความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่เท่าของ $\frac{\pi}{2}$ แต่ขนาดของสนามไฟฟ้าจะไม่เท่ากัน หรือความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ ดังรูปที่ 2.28 นั่นคือ

$$E_{x0} \neq E_{y0} \quad (2.26)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4n)\pi}{2}; n = 0, 1, 2, \dots \text{CW} \quad (2.27)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\frac{(1+4n)\pi}{2}; n = 0, 1, 2, \dots \text{CCW} \quad (2.28)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n\pi}{2} > 0 \dots \text{CW} \quad (2.29)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x \neq \pm \frac{n\pi}{2} < 0 \dots \text{CCW} \quad (2.30)$$

โดยที่ $n = 0, 1, 2, \dots$

ในกรณีของโพลาริซแบบวงรีนั้น การกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งใดๆ จะเป็นวงรีเอียง อัตราส่วนของแกนหลักต่อแกนย่อย จะเรียกว่าอัตราส่วนแกน(Axial Ratio:AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{OA}{OB}, \quad 1 \leq AR \leq \infty \quad (2.31)$$

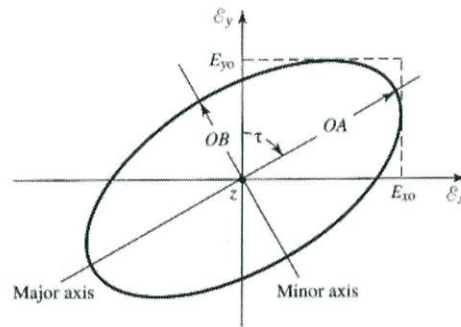
เมื่อ OA = แกนหลัก และ OB = แกนย่อย ดังรูป (2.28)

การเอียงของวงรีเทียบแกน y สามารถแสดงด้วยมุมเอียงดังนี้คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_x E_y \cos(\Delta\phi)}{E_x^2 + E_y^2} \right] \quad (2.32)$$

เมื่อวงรีตามแนวแกนหลัก $\tau = \frac{n\pi}{2}, n = 0, 1, 2, \dots$ แกนหลัก(ย่อย) เท่ากับ $E_x (E_y)$ หรือ $E_y (E_x)$

หรืออัตราส่วนของแกนมีค่าเท่ากับ $\frac{E_x}{E_y}$ หรือ $\frac{E_y}{E_x}$



รูปที่ 2.28 โพลาริซวงรีที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $Z=0$ [10]

2.6.7 ค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss)

การสูญเสียหรือ Loss นั้นจะเกิดขึ้นทุกครั้งเมื่อระบบการสื่อสารของเราเริ่มทำงาน ซึ่งผลของมันอาจจะไม่เป็นที่ต้องการของเรา เพราะมันจะทำให้ระบบของเรามีประสิทธิภาพต่ำลงนั่นเอง โดยการสูญเสียในทางโทรคมนาคมที่เราจะกล่าวถึงในหัวข้อนี้คือค่าการสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss) ซึ่งการสูญเสียประเภทนี้มักจะเกิดขึ้นเมื่อมีการส่งสัญญาณข้อมูลเข้าไปในระบบดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงการเกิดการย้อนกลับของกำลังงาน [10]

จากรูป P_i คือ กำลังงานของสัญญาณอินพุต
 P_r คือ กำลังงานของสัญญาณที่สะท้อนกลับ
 P_o คือ กำลังงานของสัญญาณเอาต์พุต
 ซึ่งค่าของ และ Return loss สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{Return Loss} = P_r / P_i \quad (2.33)$$

จากสมการจะเห็นว่าค่า Return loss คืออัตราส่วนของ P_r กับ P_i ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพการส่งผ่าน ซึ่งแสดงได้ว่าถ้าค่า Return loss มาก ๆ จะยิ่งดีเนื่องจากจะมีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดีนั่นเอง

2.7 การทดสอบสายอากาศ

เพื่อความสะดวกในการวัดทดสอบสายอากาศ ส่วนใหญ่จะให้สายอากาศทดสอบ (Antenna under test: AUT) จะอยู่ในโหมดของการรับถ้าสายอากาศทดสอบมีลักษณะภาวะย้อนกลับ(Reciprocal) คุณลักษณะที่ได้จากโหมดการรับ (แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยายและอื่นๆ) จะเหมือนกับสายอากาศในโหมดส่ง ซึ่งจากเงื่อนไขทางอุดมคติแต่สามารถประมาณค่าได้ถ้าระยะห่างมีค่าเพียงพอซึ่งถ้าระยะห่างไกลมาก ๆ ความโค้งของคลื่นด้านหน้า (Wavefront) จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของสายอากาศทดสอบโดยถ้าระยะดังกล่าวห่างเท่ากับขอบด้านในของสนามระยะไกล $2D^2 / \lambda$ ค่าผิดพลาดทางเฟสมากที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 22.5° นอกจากนี้ความโค้งของคลื่นด้านหน้าอาจจะเกิดจากระยะทางที่ไม่เพียงพอ การสะท้อนจากระนาบกราวด์และวัตถุที่อยู่ใกล้ ๆ ซึ่งจะทำให้คลื่นไม่เป็นไปตามอุดมคติ

อย่างไรก็ตามในการทำการวัดทดสอบสายอากาศก็ไม่ใช่ว่าเรื่องง่าย มีอุปสรรคหรือข้อจำกัดหลาย ๆ อย่างอาจจะพอสรุปได้ดังนี้

1. ในการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ระยะทางสำหรับบริเวณสนามระยะไกล ($r > 2D^2 / \lambda$) จะไกลมากสำหรับการวัดในบริเวณภายนอก รวมทั้งยากที่ควบคุมการสะท้อนจากระนาบพื้นดินและการสะท้อนจะวัตถุรอบ ๆ ข้างให้อยู่ในระดับต่ำที่ยอมรับได้
2. ในหลาย ๆ กรณีเป็นการยากหรือทำไม่ได้เลยที่จะเคลื่อนย้ายสายอากาศไปยังสถานที่ที่จะทำการวัด เช่น การวัดสายอากาศบนเรือรบ
3. สำหรับสายอากาศบางชนิด เช่น สายอากาศแถวลำดับแบบเปลี่ยนเฟส (Phase array) เวลาที่ต้องใช้ในการวัดอาจจะยาวนานเกินไป
4. ระบบที่ทำการวัดภายนอกจะไม่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมด้านนอกได้จึงไม่สามารถทำได้ในทุก ๆ สภาพอากาศ

5. การวัดในระบบปิด โดยทั่วไปจะไม่สามารถวัดสายอากาศในระบบที่มีขนาดใหญ่ได้ เช่น เรือ เครื่องบิน หรือยานอวกาศ

6. เทคนิคหรือระบบวัดทดสอบทั่วไปค่อนข้างแพง

จากข้อจำกัดข้างต้นอาจจะแก้ไขโดยใช้เทคนิคพิเศษต่าง ๆ เข้ามาช่วยในการวัด ไม่ว่าจะเป็น การวัดภายในห้องแทนการวัดภายนอก การทำนายและแปลงสนามระยะใกล้ด้วยการวัดที่สนามระยะไกล ทำการวัดโดยใช้เทคนิคการสเกลค่า และการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือที่ทำงานอัตโนมัติที่สามารถควบคุมได้ด้วยระบบคอมพิวเตอร์เพื่อลดเวลาและเพิ่มความถูกต้องของการวัดทดสอบ

พารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบสายอากาศที่ดีที่สุดอาจจะบอกในรูปแบบของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งขนาดและเฟส อัตราขยาย สภาพเงาเงจทิศทาง ประสิทธิภาพอิมพีแดนซ์ การกระจายของกระแสและโพลาริซ

2.7.1 วิธีการทดสอบอัตราขยาย

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการอธิบายถึงข้อดีและประสิทธิภาพของสายอากาศที่ดี หนึ่งพารามิเตอร์นั้นคือ อัตราขยาย โดยมีเทคนิคในการวัดอัตราขยายมากมาย โดยแต่ละวิธีจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆอย่าง โดยเฉพาะช่วงความถี่ที่ต้องการวัดโดยในการวัดความถี่ที่สูงกว่า 1 GHz ปกติจะใช้ระยะอวกาศว่างในการวัด นอกจากนี้ เทคนิคจากไมโครเวฟและท่อนำคลื่นจะถูกนำมาช่วยในการวัด ในขณะที่ความถี่ต่ำๆ เป็นเรื่องยากมากที่จะวัดในระยะอวกาศว่างเพราะความยาวคลื่นค่อนข้างยาว ดังนั้นช่วงความถี่ 0.1-1.0 GHz ส่วนใหญ่จะใช้ระยะการสะท้อนในการวัดทดสอบ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากองค์ประกอบค่าความนำและการสูญเสียอาจทำการสเกลได้ไม่แม่นยำ ในการหาประสิทธิภาพอาจจะต้องใช้วิธีอื่นร่วมในการคำนวณเพื่อคูณกับสภาพเงาเงจทิศทางในการคำนวณหาอัตราขยาย ในขณะที่ความถี่ที่ต่ำกว่า 0.1 GHz เนื่องจากสายอากาศมีขนาดใหญ่มากและผลกระทบต่อระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่ ดังนั้นการวัดอัตราขยายจะวัดที่จุดกำเนิด ส่วนความถี่ที่ต่ำกว่า 1 MHz จะไม่นิยมวัดอัตราขยาย จะวัดความเข้มของสนามของคลื่นกราวด์แทน

การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศโดยทั่ว ๆ ไปจะวัดได้ 2 แบบหลัก ๆ คือ อัตราขยายสัมบูรณ์ (Absolute-gain measurement) และอัตราขยายส่งผ่าน (Gain-transfer measurement) หรืออัตราขยายแบบเปรียบเทียบ การวัดอัตราขยายแบบสัมบูรณ์จะต้องใช้สายอากาศที่มีการปรับเทียบซึ่งจะ การวัดแบบนี้ส่วนใหญ่จะใช้เป็นวิธีการวัดอัตราขยายแบบมาตรฐานในขณะที่การวัดแบบและ อัตราขยายส่งผ่านจะต้องใช้สายอากาศมาตรฐานในการคำนวณหาอัตราขยายสัมบูรณ์ของสายอากาศทดสอบ

สายอากาศสองชนิดที่นิยมและยอมรับในการใช้เป็นสายอากาศมาตรฐานในการวัดอัตราขยายคือ สายอากาศไดโพลยาว $\lambda/2$ (โดยมีอัตราขยายประมาณ 2.1 dB) และสายอากาศฮอร์นรูปทรงพีระมิด (โดยมีอัตราขยายประมาณ 12-25 dB) โดยสายอากาศจะมีโพลาริซแบบเชิง

เส้น สายอากาศที่วางไว้ในอวกาศว่างจะมีค่าโพลาไรซ์เซชันที่บริสุทธิ์สูงมาก (มีความเป็นเชิงเส้นสูง หรือ AR เข้าใกล้อนันต์) อย่างไรก็ตามถ้าใช้ในช่องความถี่กว้าง ค่าโพลาไรซ์ก็จะมีค่าลดลงและจากการสะท้อนจากสิ่งแวดล้อม ขณะที่ฮอร์นที่วางไว้ในอวกาศว่างจะมีโพลาไรซ์เซชันเป็นวงรี (ปกติ AR ประมาณ 40 dB) แต่เนื่องจากสายอากาศมีอัตราขยายที่สูง ดังนั้น สิ่งแวดล้อมจะมีผลต่อโพลาไรซ์ไม่มาก

การทดสอบอัตราขยายสัมบูรณ์

ในการวัดอัตราขยายสายอากาศมีเทคนิคการวัดอยู่หลายรูปแบบ โดยวิธีการวัดทั้งหมดจะใช้สมการของการส่งผ่านของฟรีส (Friis) ช่วยในการคำนวณ โดยสมมติในการวัดแต่ละครั้งจะมีสายอากาศ 2 ตัววางห่างกันในระยะ R ซึ่งเป็นระยะที่สอดคล้องกับระยะของสนามระยะไกลของความถี่และขนาดของสายอากาศที่ทำการวัด รวมทั้งกรณีที่สายอากาศทั้งสองมีการแผ่รังสีของโพลาไรซ์ ดังนั้นในทิศทางสูงสุดของการแผ่กระจายคลื่น

ก. การวัดโดยใช้สายอากาศสองตัว

$$(G_{0t})_{dB} + (G_{0r})_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (2.34)$$

เมื่อ $(G_{0t})_{dB}$ = อัตราขยายของสายอากาศตัวส่ง (dB)

$(G_{0r})_{dB}$ = อัตราขยายของสายอากาศตัวรับ (dB)

P_r = กำลังที่รับได้ (W)

P_t = กำลังที่ส่งออก (W)

R = ระยะห่างระหว่างสายอากาศ (m)

λ = ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้วัด (m)

กรณีที่สายอากาศสองตัวทั้งตัวส่งและตัวรับเป็นสายอากาศเหมือนกันทุกประการ ($(G_{0t})_{dB} = (G_{0r})_{dB}$) สมการจะลดเหลือเพียง

$$(G_{0t})_{dB} = (G_{0r})_{dB} = \frac{1}{2} \left[20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \right] \quad (2.35)$$

ข. การวัดโดยใช้สายอากาศสามตัว

ถ้าสายอากาศสองตัวที่ต้องการวัดไม่เหมือนกัน ดังนั้นจำเป็นต้องใช้สายอากาศ 3 ตัวคือ สายอากาศ ก ข และ ค และต้องมีการวัด 3 ครั้งเพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณอัตราขยายของสายอากาศแต่ละตัว โดยจะใช้สมการ 3 สมการในการคำนวณดังนี้

กรณีสายอากาศ ก ส่งและ ข รับ

$$(G_a)_{dB} = (G_b)_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{P_{ra}}{P_{ta}} \right) \quad (2.36 \text{ ก})$$

กรณีสายอากาศ ค ส่งและ ก รับ

$$(G_a)_{dB} = (G_c)_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rc}}{P_{tc}} \right) \quad (2.36 \text{ ข})$$

กรณีสายอากาศ ข ส่งและ ค รับ

$$(G_b)_{dB} = (G_c)_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rc}}{P_{tb}} \right) \quad (2.36 \text{ ค})$$

จากสมการทั้งสาม อัตราขยาย $(G_a)_{dB}$ $(G_b)_{dB}$ และ $(G_c)_{dB}$ สามารถคำนวณได้เมื่อทราบค่า R λ และกำลังที่ส่งและรับได้ของแต่ละคู่ที่ได้จากการวัด

จากวิธีการวัดทั้งแบบใช้สายอากาศ 2 ตัวและ 3 ตัวจะมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นดังนั้น เพื่อลดค่าผิดพลาดให้น้อยที่สุด สิ่งที่จะต้องสนใจเป็นอย่างมากคือ

1. ความถี่ของระบบวัดต้องแม่นยำ ถูกต้อง คงตัว
2. ระยะสายอากาศต้องอยู่ในเกณฑ์ของสนามระยะไกล
3. สายอากาศวางในแนวเดียวกัน
4. ส่วนประกอบที่จะนำมาใช้ในระบบต้องแมตซ์ทั้งอิมพีแดนซ์และโพลาไรซ์
5. การรบกวนจากการสะท้อนและผลกระทบจากสิ่งรอบข้างให้น้อยที่สุด

2.7.2 การทดสอบการโพลาไรซ์ได้

โพลาไรซ์ของสายอากาศโดยทั่วไป จะบอกด้วยคุณลักษณะอัตราส่วนแกน (Axial ratio: AR) การรับรู้ของการหมุน (Sense of rotation-ตามเข็มนาฬิกา CW หรือทวนเข็มนาฬิกา CCW หมุนซ้าย LH หรือขวา RH) และมุมเอียง τ วัดตามเข็มนาฬิกาเทียบกับแกนของ \hat{a}_ϕ สำหรับคลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทางพุ่งออกตามแนวรัศมี ในการหาคุณลักษณะของโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

ต้องระมัดระวังเป็นอย่างมากถ้ามุมเอียงของคลื่นตกกระทบมีโพลาไรซ์ (τ_m) ที่แมตซ์กับ โพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับซึ่งสัมพันธ์กับมุมเอียงของคลื่นที่ส่งมา (τ_r) จากสายอากาศตัวเดียวกัน ดังนี้

$$\tau_r = 180^\circ - \tau_m \quad (2.37)$$

การแสดงโพลาไรซ์ที่ดีที่สุดสำหรับคลื่นและสายอากาศควรแสดงบนทรงกลม Poincare โดยที่แต่ละจุดของผิวทรงกลมของ Poincare จะหมายถึงโพลาไรซ์แต่ละค่าที่ไม่ซ้ำกัน โดยถ้าจุดสองบนผิวทรงกลมแทนโพลาไรซ์ของคลื่นตกกระทบและสายอากาศตัวรับมุมระหว่างจุดสองจุดสามารถนำไปใช้ในการคำนวณการสูญเสียทางโพลาไรซ์ได้

การเลือกวิธีการวัดโพลาไรซ์วิธีใดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะทำการวัดและชนิดของสายอากาศ รวมทั้ง ความแม่นยำ เวลาที่ใช้ในการวัดและงบประมาณ โดยการแสดงคุณลักษณะของโพลาไรซ์อย่างสมบูรณ์ ไม่เพียงแสดงแค่ขนาดของ AR และมุมเอียง แต่หมายรวมทั้งการรับรู้ของการหมุนว่าเป็นหมุนซ้ายหรือหมุนขวา ดังนั้นวิธีการวัดโดยสนใจเพียง AR และมุมเอียงจะมีความซับซ้อนน้อยกว่าโดยจะเรียกวิธีการวัดแบบนี้ว่า วิธีการวัดแบบรูปของโพลาไรซ์ (Polarization-pattern method) โดยที่สายอากาศตัวส่งจะใช้สายอากาศเชิงเส้น เช่น ไดโพล หรือ ฮอร์นหมุนตามแกนของการหาโพลาไรซ์และนำหาที่ได้ไปแสดงผล โดยถ้าสายอากาศทดสอบมีโพลาไรซ์เชิงเส้นรูปร่างของแบบรูปที่ออกมาจะเป็นลักษณะเส้น 8 เมื่อมุม φ คือ มุมในการหมุน ในขณะที่ถ้าเป็นโพลาไรซ์แบบวงรีจะออกมาเป็นรูปท่อนเหล็กยกน้ำหนัก (Dumbbell) โดยเส้นประแสดงโพลาไรซ์แบบวงรี และถ้าเป็นโพลาไรซ์แบบวงกลมจะรู้ปวงกลม ในขณะที่ถ้าต้องการวัดการรับรู้ของสายอากาศจำเป็นต้องใช้สายอากาศตัวส่งที่มีโพลาไรซ์วงกลมที่รู้การรับรู้ของสายอากาศใช้ในการวัดทดสอบ

2.8 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของระบบอาร์เอฟไอเดีย่นยูเอชเอฟ ตัวอย่างเช่น ลักษณะและประเภทของลูกข่าย การทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ การสื่อสารแบบกระจายจุดกระจายย้อนกลับ นอกจากนี้ได้กล่าวทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่นิยมใช้กันทั่วไป รวมทั้งหลักการงานและหลักการสื่อสารของระบบอาร์เอฟไอดีด้วย ซึ่งในบทที่ 3 จะเป็นการนำทฤษฎีพื้นฐานและสมการคำนวณจากบทที่ 2 มาใช้ในการออกแบบและจำลองสายอากาศโดย CST Microwave Studio เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปริญญาานิพนธ์

3.1 บทนำ

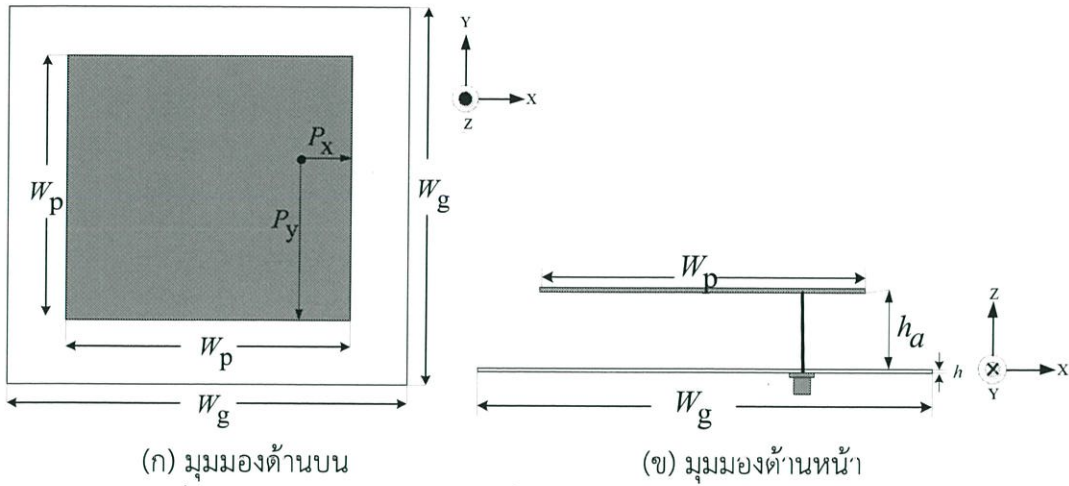
ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่กว้างแบบแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสและเพิ่มขึ้นสายอากาศ ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์กว้างครอบคลุมความถี่สากล (860 – 960 MHz) เพื่อนำไปใช้งานในระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง และมีการโพลาริซวงกลมที่ความถี่ 920 - 925 MHz โดยในบทนี้ได้ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยพิจารณา $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งจะเริ่มต้นด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศโดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานและสมการคำนวณในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองผลสายอากาศและปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อศึกษาโครงสร้างของสายอากาศ รวมทั้งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งระบบนี้มีความต้องการสายอากาศที่มีอัตราขยายสูง และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เหมาะสม รายละเอียดต่างๆ จะนำเสนอต่อหัวข้อต่อไป

3.2 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล

ในหัวข้อนี้จะเป็นการออกแบบและจำลองสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดี โดยจะเริ่มทำการออกแบบโครงสร้างและจำลองคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่ประเทศไทยในช่วงความถี่ 920 – 925 MHz โดยหัวข้อที่ 3.2.1 จะเป็นการออกแบบโครงสร้างสายอากาศ ซึ่งใช้สายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นต้นแบบในการออกแบบ และหัวข้อที่ 3.2.2 เป็นการออกแบบและหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ และจะนำสายอากาศที่ได้นี้เป็นสายอากาศเริ่มต้นในการพัฒนาต่อไป

3.2.1 โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่ประเทศไทย

จากทฤษฎีในบทที่ 2 จะทำการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีความถี่ครอบคลุมตั้งแต่ 920 – 925 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลในประเทศไทย โครงสร้างของสายอากาศ จะประกอบด้วยแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 แผ่น โดยแผ่นระนาบกราวด์อยู่ชั้นล่างสุด ชั้นที่สองคือไดอิเล็กตริก ซึ่งจะใช้ช่องว่างอากาศแทน เพราะจะลดการสูญเสียเนื่องจากไดอิเล็กตริกได้ ส่วนชั้นบนสุดคือแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น ดังรูปที่ 3.1 วัสดุที่นำมาใช้ทำแผ่นระนาบกราวด์และแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นคือ อลูมิเนียม เพราะมีความแข็งแรงทนทาน และน้ำหนักเบา



(ก) มุมมองด้านบน

(ข) มุมมองด้านหน้า

รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่ 920 -925 MHz

3.2.2 การออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่ประเทศไทย

คำนวณหาขนาดของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้างเป็น W_p มีวัสดุฐานรองเป็นอากาศ และต้องการให้เกิดโหมด TM_{010} ได้จากสมการที่ 2.6 อยู่ในบทที่ 2 ซึ่งเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 3.1 โดยที่ v_0 คือความเร็วแสง ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง

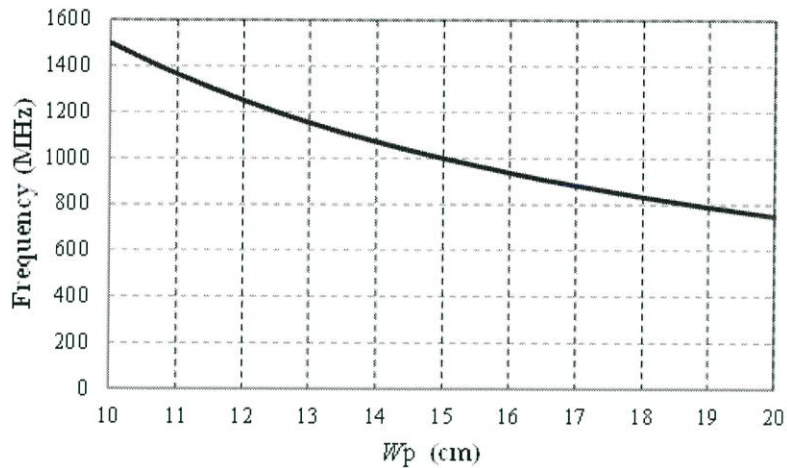
$$W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \tag{3.1}$$

$$W = \frac{3 \times 10^8}{2(922.5 \times 10^6) \sqrt{1}}$$

$$W \approx 16.2 \text{ cm}$$

จากสมการที่ 3.1 เมื่อนำค่าความถี่เรโซแนนซ์มาคำนวณหา W_p จะได้ความสัมพันธ์ดัง

รูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาด (W_p) ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์

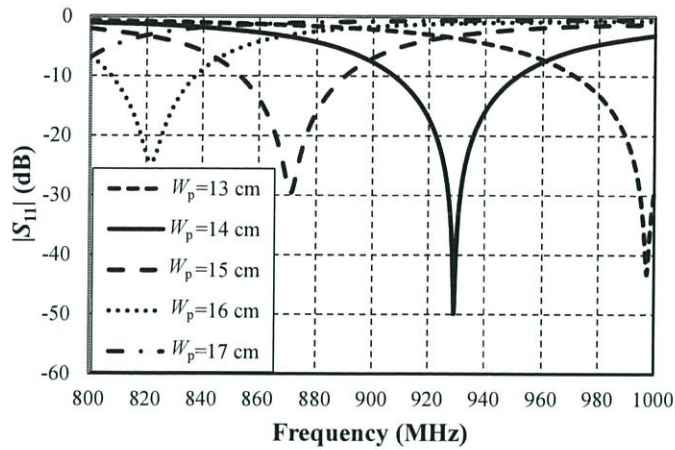
จากรูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาด W_p ของสายอากาศกับความถี่เรโซแนนซ์ พบว่าขนาด W_p ของสายอากาศส่งผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์เป็นอย่างมาก จากการคำนวณที่ความถี่เรโซแนนซ์เป็น 922.5 MHz ขนาดของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับ 16.2 cm

ดังนั้นขนาดเริ่มต้นของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส W_p มีค่าเท่ากับ 16.2 cm และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz (cm)	ขนาดทางไฟฟ้า
W_g	20	0.61λ
W_p	16	0.48λ
h_a	1.5	0.045λ
P_x	3.5	0.12λ
P_y	0	0λ
h	0.1	0.003λ

นำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังตารางที่ 3.1 ไปจำลองเป็นสายอากาศเริ่มต้น แล้วทำการปรับค่าพารามิเตอร์ความกว้างแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น (W_p) ที่ความกว้างตั้งแต่ 13 – 17 cm ได้ผลแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ W_p

จากรูปที่ 3.3 จะพบว่าที่ W_p ขนาด 14 cm มีค่า $|S_{11}|$ น้อยที่สุด และครอบคลุมย่านความถี่ประเทศไทย โดยมีย่านความถี่อยู่ระหว่าง 907.6 – 951.4 MHz ที่ความถี่ 922.5 MHz มี $|S_{11}|$ เท่ากับ -19.82 dB จากหัวข้อนี้สายอากาศมีแบนด์วิดท์ครอบคลุมความถี่ 920 – 925 MHz จากนั้นจึงเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศให้ครอบคลุมความถี่ 860 – 960 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่สากล และสามารถสรุปพารามิเตอร์ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่สามารถใช้งานได้ในประเทศไทย ได้ดังตารางที่ 3.2 จากนั้นในหัวข้อต่อไปจะพัฒนาสายอากาศให้มีแบนด์วิดท์ที่ครอบคลุมย่านความถี่สากล คือ ช่วงความถี่ 860 – 960 MHz

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่ประเทศไทย

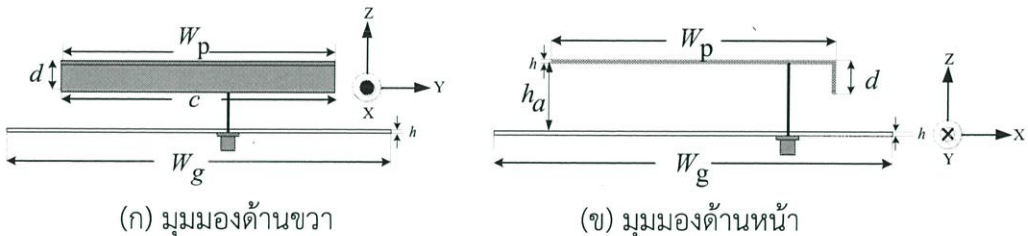
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพที่ความถี่ 922.5 MHz (cm)	ขนาดทางไฟฟ้า
W_g	20	0.61λ
W_p	14	0.48λ
h_a	1.5	0.045λ
P_x	3.5	0.12λ
P_y	0	0λ
h	0.1	0.003λ

3.3 การออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล

จากสายอากาศที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2 ซึ่งเป็นสายอากาศที่ทำงานในย่านความถี่ประเทศไทย จากนั้นจึงพัฒนาสายอากาศให้มีแบนด์วิดท์ที่กว้างขึ้นครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 860 – 960 MHz โดยการออกแบบอ้างอิงทฤษฎีจากบทที่ 2

3.3.1 การเพิ่มแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate)

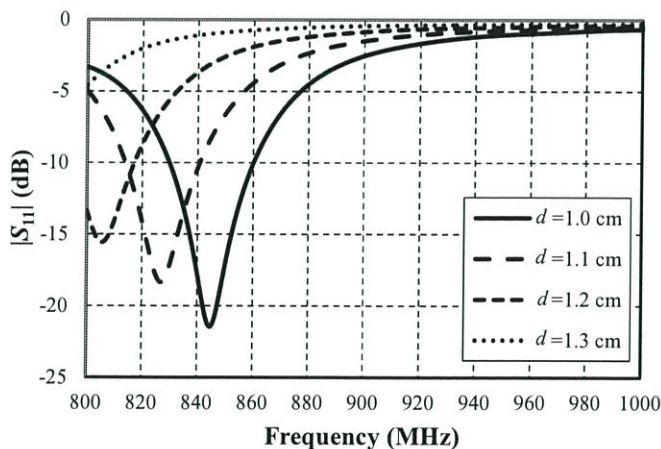
ย่านความถี่สากลมีความถี่ครอบคลุมตั้งแต่ 860-960 MHz ซึ่งมีแบนด์วิดท์ที่กว้าง จึงทำการพัฒนาสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่ประเทศไทยในหัวข้อที่ 3.2 ให้ครอบคลุมย่านความถี่สากลด้วย โดยเพิ่มแผ่นอลูมิเนียมลงมาจกด้านหนึ่งของแผ่นแพร่กระจายคลื่น เรียกว่า แผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate) ดังรูปที่ 3.4 โดยให้ d คือความกว้างของ Vertical wall plate และ c คือความยาวของ Vertical wall plate



รูปที่ 3.4 โครงสร้างสายอากาศเริ่มต้นของเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล

3.3.1.1 พารามิเตอร์ d

จากรูปที่ 3.4 ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ d เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยมีขนาดตั้งแต่ 1.0 cm - 1.3 cm เพื่อดู $|S_{11}|$ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.5

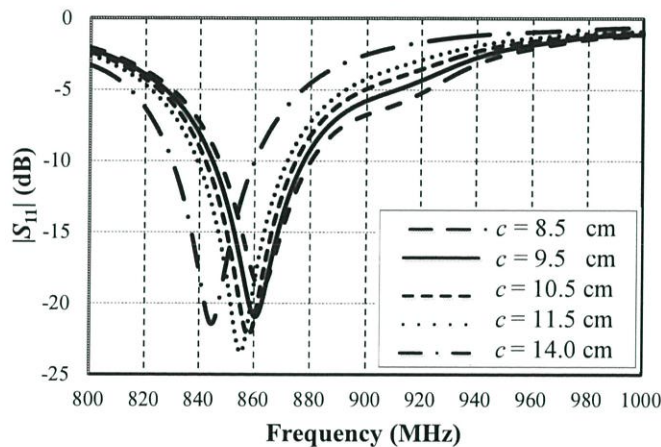


รูปที่ 3.5 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ d

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อ d ขนาด 1.0 cm มี $|S_{11}|$ น้อยที่สุดเท่ากับ -21.10 dB ที่ความถี่ 844.6 MHz และครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 829.8-860 MHz ผลที่ได้ยังมีแบนด์วิดท์ที่แคบอยู่ ดังนั้นจึงมีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ c ตามหัวข้อ 3.3.1.2

3.3.1.2 พารามิเตอร์ c

จากรูปที่ 3.4 ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ c เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยมีขนาดตั้งแต่ 8.5 cm - 11.5 cm ผล $|S_{11}|$ ที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.6



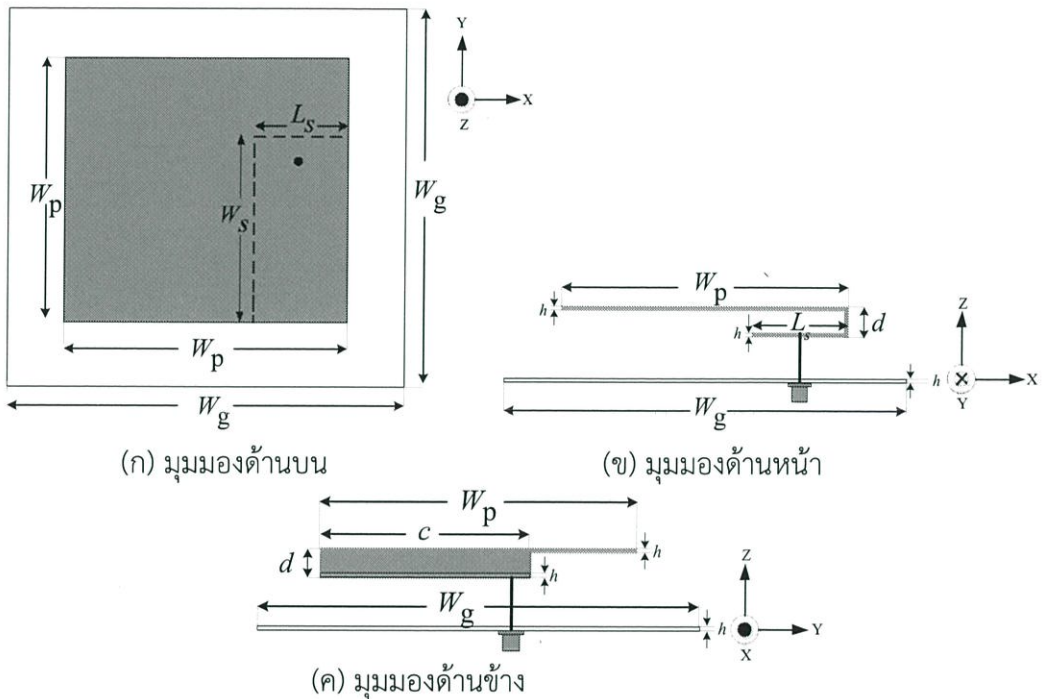
รูปที่ 3.6 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ c

จากรูปที่ 3.6 ที่ c ขนาด 8.5 cm ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 847.4 – 880.2 MHz มีความกว้างแบนด์วิดท์เท่ากับ 32.8 MHz ที่ c ขนาด 9.5 cm ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 844.8 – 877.6 MHz มีความกว้างแบนด์วิดท์เท่ากับ 32.8 MHz ที่ c ขนาด 10.5 cm ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 842.2 – 874.8 MHz มีความกว้างแบนด์วิดท์เท่ากับ 32.6 MHz ที่ c ขนาด 11.5 cm ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 839.4 – 871.6 MHz มีความกว้างแบนด์วิดท์เท่ากับ 32.2 MHz และ c ขนาด 14.0 cm เป็นขนาดอ้างอิงจากรูปที่ 3.5 ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 829.8-860 MHz ซึ่งที่ c ขนาด 8.5 และ 9.5 cm มีแบนด์วิดท์มากที่สุด แต่ c ขนาด 9.5 cm จะมีค่า $|S_{11}|$ น้อยกว่า โดย $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ความถี่ 860.5 MHz เท่ากับ -20.97 dB ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาด c เท่ากับ 9.5 cm แต่สายอากาศที่แล้วยังมีแบนด์วิดท์ไม่ครอบคลุมความถี่ 860 – 960 MHz ดังนั้นจึงเพิ่มขึ้นของสายอากาศขึ้นมา ดังจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

3.3.2 การเพิ่มแผ่นกลาง (Middle plate)

จากหัวข้อ 3.3.1.2 สายอากาศที่แล้วยังมีแบนด์วิดท์ที่แคบ เพื่อทำการเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศ จึงได้ทำการปรับปรุงสายอากาศโดยเพิ่มแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมอีกหนึ่งชั้น โดยกำหนดให้

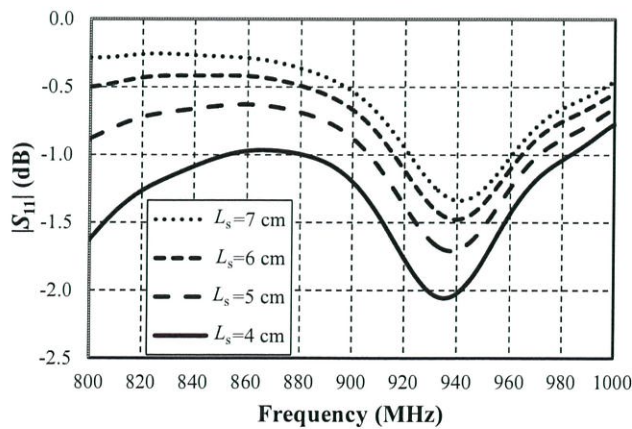
เป็นแผ่นกลาง หรือ (Middle plate) อยู่ระหว่างแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่นและแผ่นระนาบกราวนด์ ดังรูปที่ 3.7 กำหนด L_s คือความกว้างของ (Middle Plate) และ W_s คือความยาวของแผ่นกลาง (Middle Plate)



รูปที่ 3.7 โครงสร้างสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นกลาง

3.3.2.1 พารามิเตอร์ L_s

ปรับปรุงค่าความยาวของแผ่นกลาง (Middle plate : L_s) โดยมีขนาดตั้งแต่ 4 cm ถึง 7 cm เพื่อดูค่า $|S_{11}|$ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.8

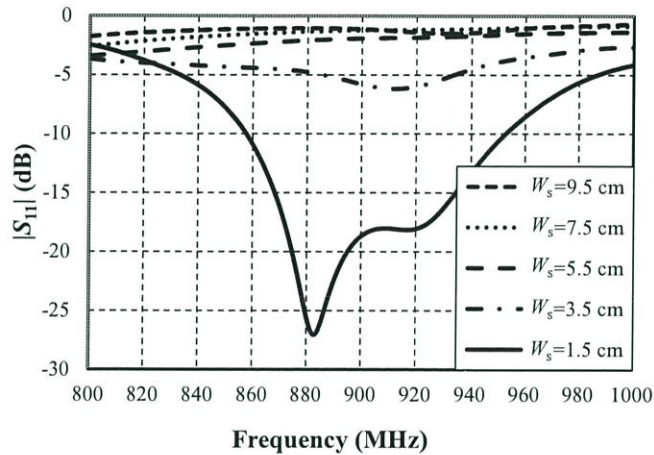


รูปที่ 3.8 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ L_s

จากรูปที่ 3.8 จะเห็นว่าความยาวของแผ่นระนาบ L_s ที่ขนาด 4 cm มีค่า $|S_{11}|$ น้อยที่สุด และมีแบนด์วิดท์กว้าง จากนั้นจึงทำการปรับพารามิเตอร์ W_s ต่อไป

3.3.2.2 พารามิเตอร์ W_s

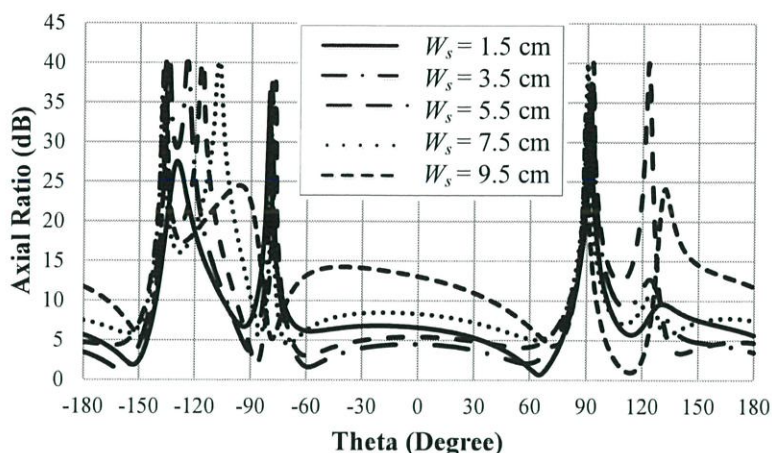
จากรูปที่ 3.7 ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ W_s เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยมีขนาดตั้งแต่ 1.5 cm ถึง 9.5 cm เพื่อดูผล $|S_{11}|$ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ W_s

จากรูปที่ 3.9 แสดงการปรับพารามิเตอร์ W_s ขนาดเล็กที่สุดถึง 1.5 cm เท่านั้นเพราะที่ขนาด 0.5 cm เป็นขนาดที่เล็กมากจะเป็นโครงสร้างที่ยากต่อการสร้าง ดังนั้นพบว่าที่ W_s ขนาด 1.5 cm มีค่า $|S_{11}|$ น้อยที่สุด และครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 857.6 – 952.8 MHz และ $|S_{11}|$ มีค่าน้อยสุดที่ความถี่ 882.8 MHz เท่ากับ -27.05 dB เนื่องจากสายอากาศมีแบนด์วิดท์ใกล้เคียงกับย่านความถี่สากลแล้ว จึงพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศ

การพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศนั้น จะทำการพิจารณาที่ช่วงความถี่ 920 – 925 MHz ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่ใช้ในระบบอาร์เอฟไอดีของประเทศไทย โดยสายอากาศจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม นั้น ค่าอัตราส่วนแกนจะต้องต่ำกว่า 3 dB จากรูปที่ 3.10 พบว่า W_s ขนาด 1.5 cm - 9.5 cm มีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz มากกว่า 3 dB ซึ่งยังไม่เป็นโพลาไรซ์วงกลม



รูปที่ 3.10 อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz

ของการปรับพารามิเตอร์ W_s

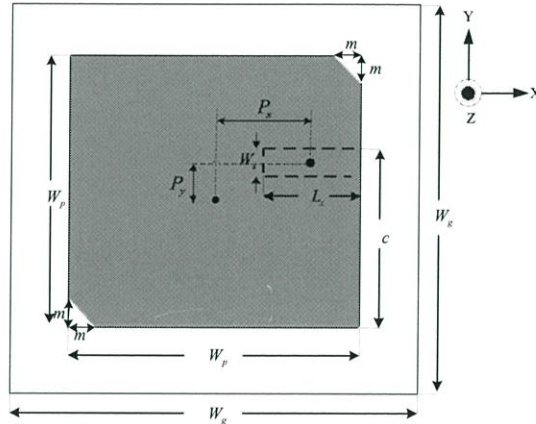
สายอากาศที่ได้ในหัวข้อนี้จะมีแบนด์วิดธ์อยู่ที่ 857.6 – 952.8 MHz ซึ่งใกล้เคียงกับย่านความถี่สากลของระบบอาร์เอฟไอดี และสามารถสรุปเป็นค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 3.3 แต่สายอากาศนี้ยังไม่เป็นโพลาไรซ์วงกลม จึงทำการพัฒนาสายอากาศให้เป็นโพลาไรซ์วงกลม ดังจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาด (cm)	ขนาดทางไฟฟ้า
ความกว้างแผ่นแพร่กระจายคลื่น (W_p)	14.0	0.42λ
ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม (h)	0.1	0.003λ
ช่องว่างอากาศ (h_a)	1.5	0.045λ
ความกว้างระนาบกราวด์ (W_g)	20.0	0.61λ
ตำแหน่งพอร์ต (P_x)	3.5	0.045λ
ตำแหน่งพอร์ต (P_y)	2.0	0.06λ
ความสูงของแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate : d)	1.0	0.03λ
ความยาวของแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate : c)	9.5	0.29λ
ความยาวของแผ่นกลาง (Middle Plate : L_s)	4	0.12λ
ความกว้างของแผ่นกลาง (Middle Plate : W_s)	1.5	0.045λ

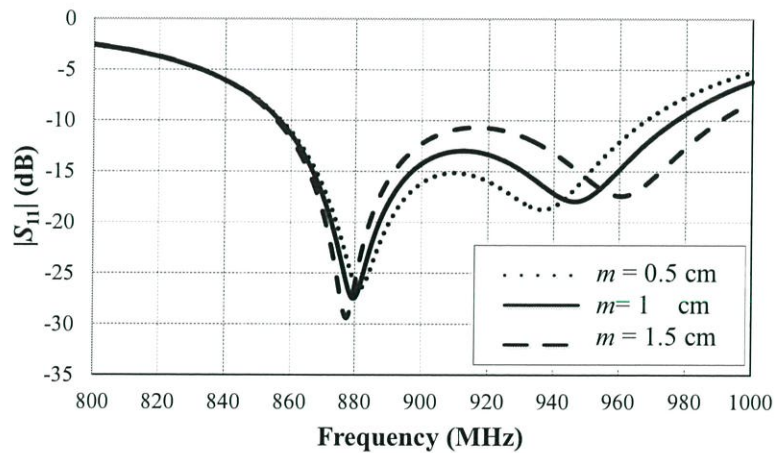
3.3.3 สายอากาศที่ตัดมุมทั้ง 2 มุม

เพื่อให้สายอากาศมีกรโพลาริซแบบวงกลม จึงทำการตัดมุมทั้ง 2 มุมของสายอากาศ ดังทฤษฎีในบทที่สอง ดังรูปที่ 3.11 จากนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนค่าของ m เพื่อดูผล $|S_{11}|$ และ อัตราส่วนแกนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.11 โครงสร้างสายอากาศที่ตัดมุมทั้ง 2 มุม

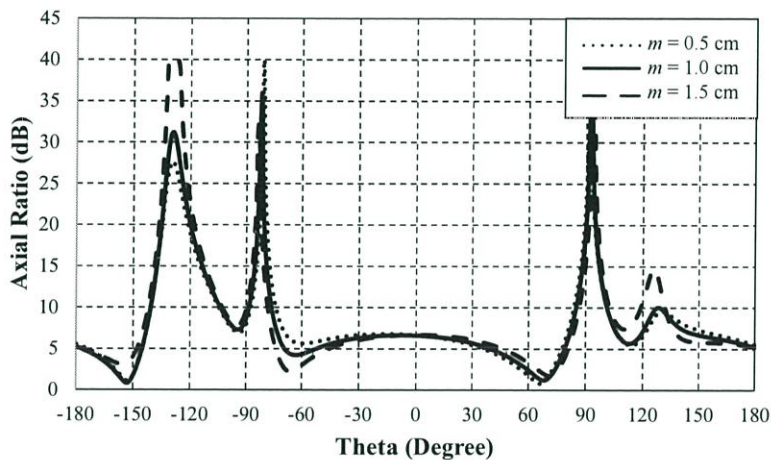
ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ m โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.5 cm 1.0 cm และ 1.5 cm เพื่อดูค่า $|S_{11}|$ แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ m เมื่อตัดมุมทั้งสองมุม

จากรูปที่ 3.12 จะพบว่าที่ m ขนาด 0.5 cm มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 857.19 – 967.8 MHz มี $|S_{11}|$ ต่ำสุดคือ -18.74 dB ที่ m ขนาด 1.0 cm มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 856.39 – 976.8 MHz มี $|S_{11}|$ ต่ำสุดคือ -27.49 dB และที่ m ขนาด 1.5 cm มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 855.6 – 990 MHz มี $|S_{11}|$ ต่ำสุดคือ -17.43 dB เห็นได้ว่าที่ m ขนาด 0.5 1.0 และ 1.5 cm มีช่วงแบนด์วิดธ์ครอบคลุมย่านความถี่สากล (860 – 960 MHz) แต่ที่ m ขนาด 0.5 cm มี $|S_{11}|$ ที่ความถี่สูง

ใกล้เคียงกับ -10 dB และที่ m ขนาด 1.5 cm มี $|S_{11}|$ ที่ความถี่ 916 MHz ใกล้เคียงกับ -10 dB ดังนั้นจึงเลือกใช้ m ขนาด 1.0 cm เพราะมี $|S_{11}|$ อยู่กึ่งกลางและมี $|S_{11}|$ ต่ำสุดจากนั้นจึงพิจารณาอัตราส่วนแอมพลิจูดเพื่อดูว่าสายอากาศมีโพลาไรซ์แบบวงกลมหรือไม่ โดยจะพิจารณาอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ต่ำกว่า 3 dB ผลอัตราส่วนแอมพลิจูดแสดงได้ดังรูปที่ 3.13

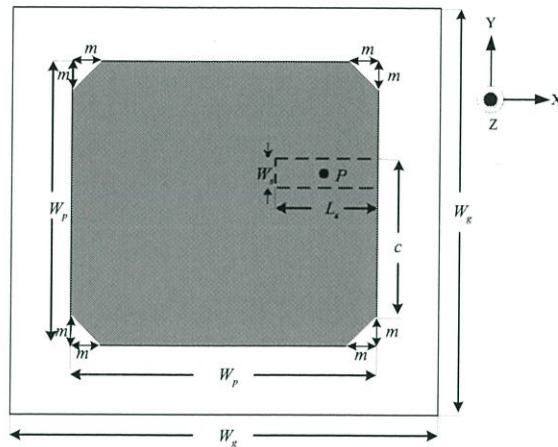


รูปที่ 3.13 อัตราส่วนแอมพลิจูดของการปรับพารามิเตอร์ m เมื่อตัดมุมทั้งสองมุม

จากรูปที่ 3.13 จะพบว่าที่ m ขนาด 0.5 1.0 และ 1.5 cm มีอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่ 922.5 MHz มุม 0° เท่ากับ 6.64 dB 6.60 dB และ 6.68 dB ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนแอมพลิจูดของสายอากาศมีค่ามากกว่า 3 dB ซึ่งยังไม่เป็นโพลาไรซ์วงกลม จึงพิจารณาที่จะทำการตัดมุมเพิ่มอีกสองมุมที่เหลือ เพื่อดูผลของอัตราส่วนแอมพลิจูดที่เกิดขึ้น

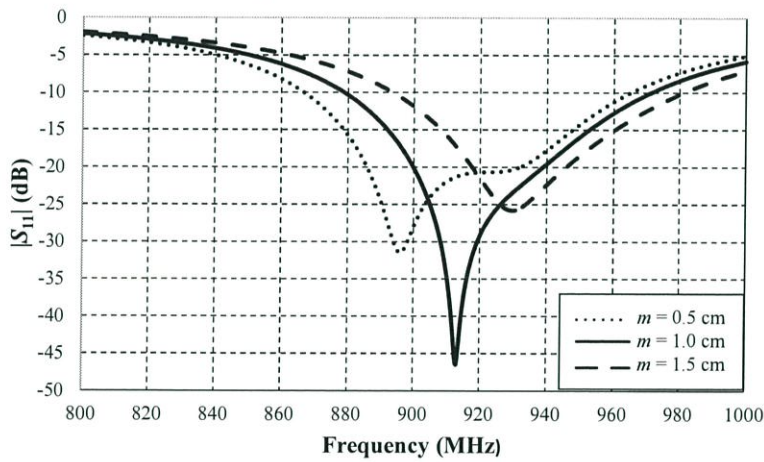
3.3.4 สายอากาศที่ตัดมุมทั้ง 4 มุม

เพื่อให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม จึงทำการตัดมุมทั้ง 4 มุมของสายอากาศ ดังรูปที่ 3.14 จากนั้นจึงทำการปรับค่าของ m เพื่อดูผลของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่เกิดขึ้น



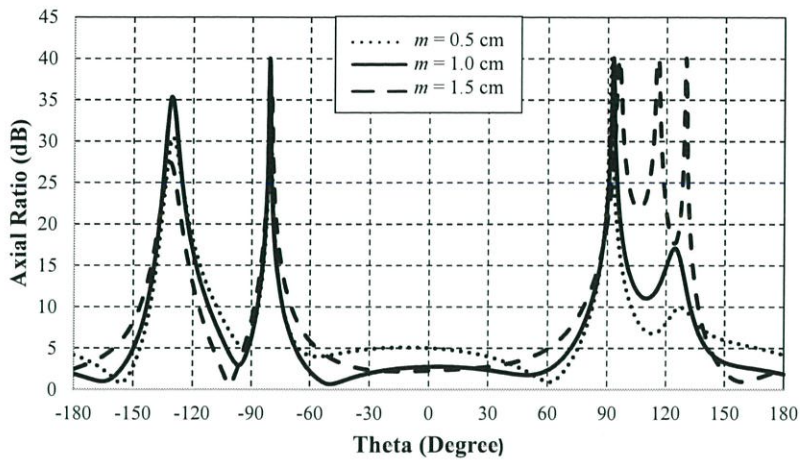
รูปที่ 3.14 โครงสร้างสายอากาศที่ตัดมุมทั้ง 4 มุม

ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ m โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.5 cm 1.0 cm และ 1.5 cm เพื่อดูค่า $|S_{11}|$ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ m เมื่อตัดมุมทั้งสี่มุม

จากรูปที่ 3.15 จะพบว่าที่ m ขนาด 0.5 cm มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 866 – 964 MHz มี $|S_{11}|$ ต่ำสุดคือ -30.92 dB ที่ m ขนาด 1.0 cm มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 878 – 970 MHz มี $|S_{11}|$ ต่ำสุดคือ -46.47 dB และที่ m ขนาด 1.5 cm มีแบนด์วิดธ์ตั้งแต่ 893 – 980 MHz มี $|S_{11}|$ ต่ำสุดคือ -25.81 dB เห็นได้ว่า ที่ m ขนาด 0.5 และ 1.0 cm มีช่วงแบนด์วิดธ์ที่กว้าง จากนั้นจึงพิจารณาอัตราส่วนแกน เพื่อดูว่าสายอากาศมีโพลาไรซ์วงกลมหรือไม่ โดยจะพิจารณาอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ผลอัตราส่วนแกนแสดงได้ดังรูปที่ 3.16

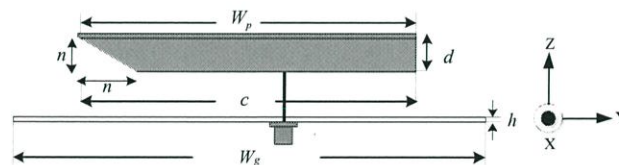


รูปที่ 3.16 อัตราส่วนแกนของการปรับพารามิเตอร์ m เมื่อตัดมุมทั้งสี่มุม

จากรูปที่ 3.16 จะพบว่าที่ m ขนาด 0.5 cm มีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz มุม 0° เท่ากับ 5.02 dB ส่วนที่ m ขนาด 1.0 cm มีอัตราส่วนแกนที่มุม 0° เท่ากับ 2.76 dB ดังนั้นจึงเลือกใช้ m ที่ขนาด 1.0 cm เพราะมีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB

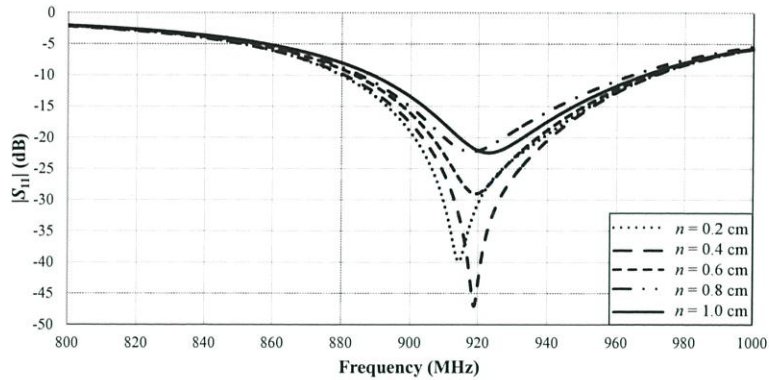
3.3.5 สายอากาศที่ตัดมุมแผ่นกำแพงแนวตั้ง

จากหัวข้อที่ 3.3.3 สายอากาศที่ไดยังมีแบนด์วิดธ์ที่ไม่ครอบคลุมช่วงความถี่ 860-960 MHz จึงทำการตัดมุมแผ่นกำแพงแนวตั้งของสายอากาศ ดังรูปที่ 3.17 จากนั้นจึงทำการปรับค่าของ n เพื่อดูผลของ $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่เกิดขึ้น



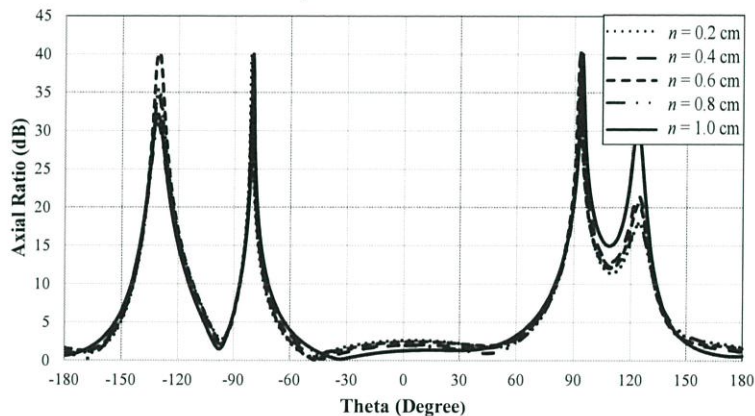
รูปที่ 3.17 โครงสร้างสายอากาศที่ตัดมุมแผ่นกำแพงแนวตั้ง

ปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ n โดยมีขนาดตั้งแต่ 0.2 cm ถึง 1.0 cm เพื่อดูค่า $|S_{11}|$ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ n

จากรูปที่ 3.18 เมื่อพิจารณา $|S_{11}|$ ของค่า n แต่ละค่า จะพบว่า มีแบนด์วิดท์ที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่ n เท่ากับ 0.4 มี $|S_{11}|$ ต่ำมากที่สุด เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการสร้างสายอากาศ จึงต้องพิจารณาอัตราส่วนแกนร่วมด้วยดังรูปที่ 3.19

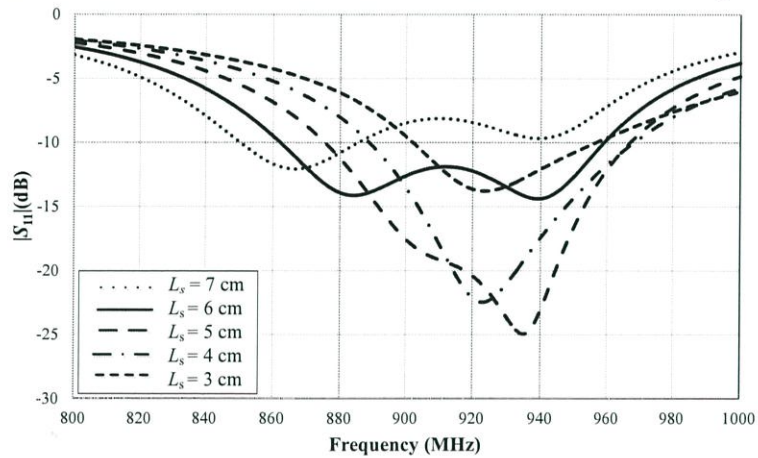


รูปที่ 3.19 อัตราส่วนแกนที่ของการปรับพารามิเตอร์ n

จากรูปที่ 3.19 พบว่าที่ n ขนาด 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 cm มีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz มุม 0° เท่ากับ 2.61 dB 2.42 dB 2.00 dB 1.95 dB และ 1.27 dB จะเห็นว่า n ขนาด 1.0 cm มีอัตราส่วนแกนต่ำที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ n ที่ขนาด 1.0 cm แต่จากรูปที่ 3.18 สายอากาศยังมีแบนด์วิดท์ไม่ครอบคลุมย่านความถี่ 860-960 MHz จึงต้องทำการปรับปรุงสายอากาศต่อไป

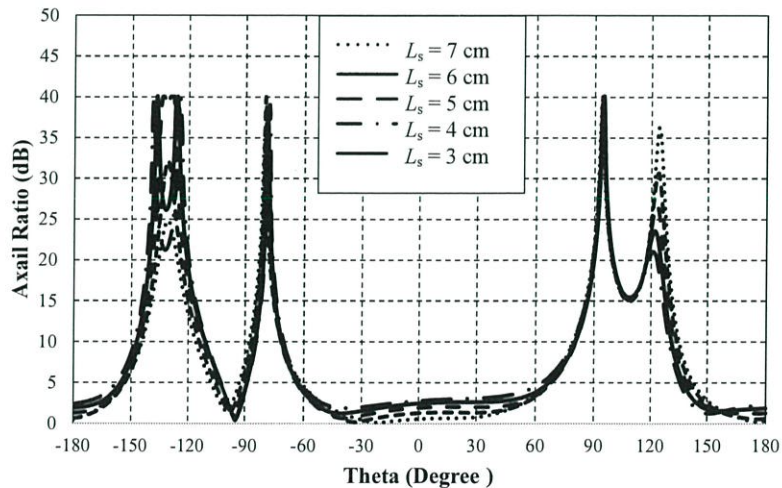
3.3.6 การปรับปรุงพารามิเตอร์ L_s

เพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ของสายอากาศให้มากขึ้น จึงทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ L_s และ P_x โดยให้ P_x ห่างจากระยะ L_s 5 mm ในการหาค่า L_s ที่เหมาะสม ทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_s ให้มีขนาดตั้งแต่ 3 cm ถึง 7 cm ผล $|S_{11}|$ ที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ L_s

จากรูปที่ 3.20 พบว่าที่ L_s ขนาด 6 cm และ P_x เท่ากับ 1.5 cm เป็นเพียงขนาดเดียวที่มีแบนด์วิดท์ใกล้เคียงกับย่านความถี่ที่ต้องการ โดยมีแบนด์วิดท์อยู่ที่ 858-958 MHz จากนั้นจะพิจารณาอัตราส่วนแกนเพื่อดูว่าสายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมหรือไม่ดังรูปที่ 3.21

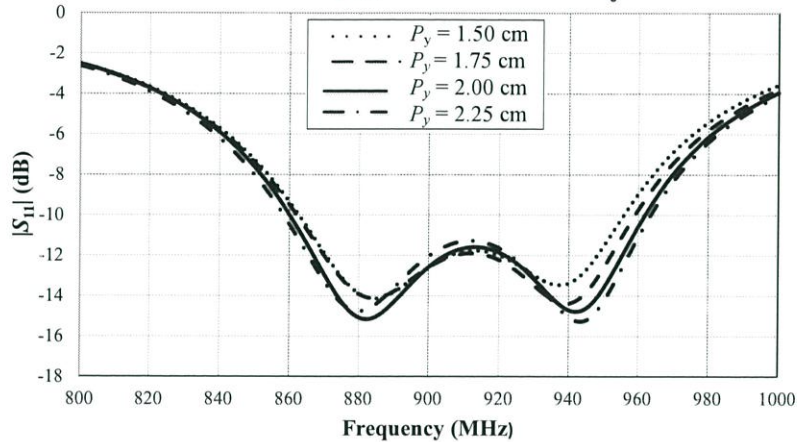


รูปที่ 3.21 อัตราส่วนแกนของการปรับพารามิเตอร์ L_s

จากรูปที่ 3.21 เมื่อพิจารณา L_s ที่ 6 cm และ P_x เท่ากับ 1.5 cm จะพบว่า มีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz มุม 0° เท่ากับ 2.44 dB ซึ่งต่ำกว่า 3 dB

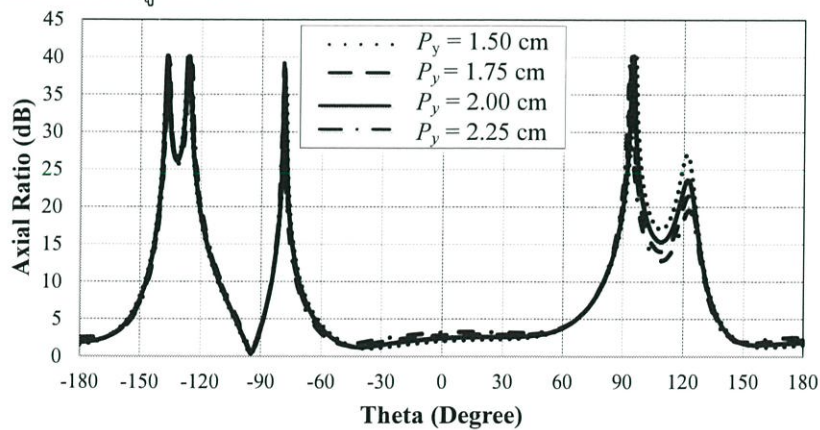
3.3.7 การปรับปรุงพารามิเตอร์ P_y

จากหัวข้อที่ 3.3.4 สายอากาศยังมีแบนด์วิดท์ไม่ครอบคลุมความถี่ 860-960 MHz ดังนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของ P_y โดยปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ P_y ให้มีขนาด 1.50 cm 1.75 cm 2.00 cm และ 2.25 cm ผล $|S_{11}|$ ที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 $|S_{11}|$ ของการปรับพารามิเตอร์ P_y

จากรูปที่ 3.22 พบว่าที่ตำแหน่งพอร์ต P_y เท่ากับ 1.75 cm และ 2.00 cm มีแบนด์วิดท์ครอบคลุมช่วงความถี่ 860-960 MHz แต่ที่ P_y ขนาด 2 cm มี $|S_{11}|$ ต่ำที่สุด ดังนั้นจึงเลือกตำแหน่งพอร์ต P_y เท่ากับ 2.00 cm จากนั้นจะพิจารณาอัตราส่วนแกนเพื่อดูว่าสายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมหรือไม่ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 อัตราส่วนแกนของการปรับพารามิเตอร์ P_y

จากรูปที่ 3.23 เมื่อพิจารณา P_y ที่ 2.0 cm จะพบว่ามีอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz มุม 0° เท่ากับ 2.83 dB ซึ่งต่ำกว่า 3 dB ดังนั้นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีการโพลาไรซ์แบบวงกลมในย่านความถี่ 920 - 925 MHz

3.4 สรุปพารามิเตอร์ของสายอากาศ

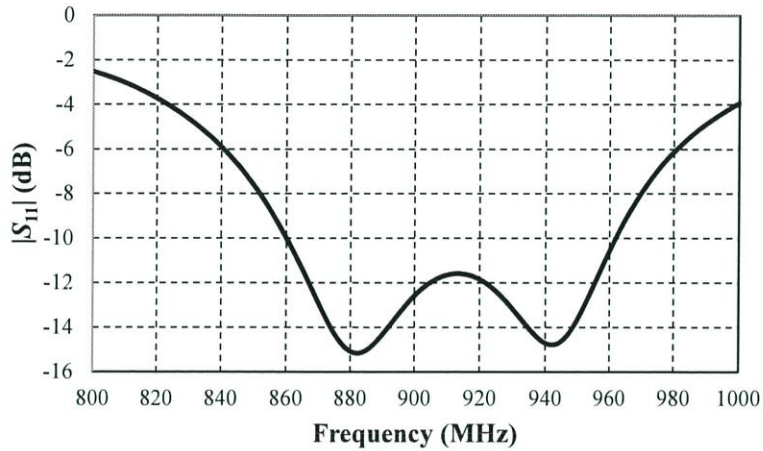
จากผลการจำลองสายสามารถสรุปพารามิเตอร์ของสายอากาศได้ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สรุปพารามิเตอร์ของสายอากาศ

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาด (cm)	ขนาดทางไฟฟ้า
ความกว้างแผ่นแพร่กระจายคลื่น (W_p)	14.0	0.42λ
ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม (h)	0.1	0.003λ
ช่องว่างอากาศ (h_a)	1.5	0.045λ
ความกว้างระนาบกราวด์ (W_g)	20.0	0.61λ
ตำแหน่งพอร์ต (P_x)	1.5	0.045λ
ตำแหน่งพอร์ต (P_y)	2.0	0.06λ
ความสูงของแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate : d)	1.0	0.03λ
ความยาวของแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate : c)	9.5	0.29λ
ความยาวของแผ่นกลาง (Middle Plate : L_s)	6	0.18λ
ความกว้างของแผ่นกลาง (Middle Plate : W_s)	1.5	0.045λ
พารามิเตอร์ m ที่ใช้ในการตัดมุม	1.0	0.03λ
พารามิเตอร์ n ที่ใช้ในการตัดมุมแผ่นกำแพงแนวตั้ง	1.0	0.03λ

3.5 ผลการจำลองสายอากาศ

3.5.1 $|S_{11}|$

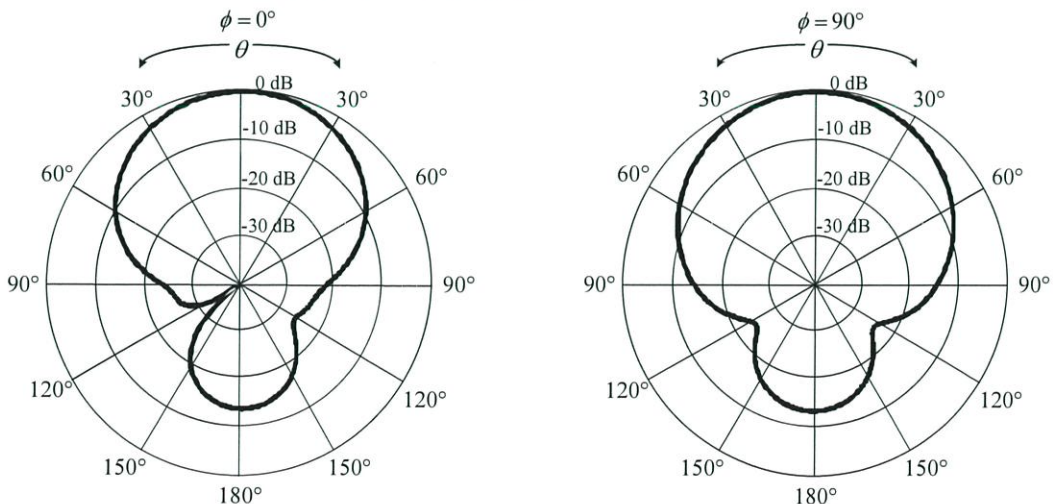


รูปที่ 3.24 $|S_{11}|$ เปรียบเทียบความถี่

จากรูปที่ 3.24 สายอากาศมีย่านความถี่ที่ $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB (เปรียบเทียบกับ การส่งพลังงานให้สายอากาศ 100% มีการสะท้อนกลับออกมา 10%) ตั้งแต่ 860 – 961 MHz โดย $|S_{11}|$ ต่ำสุดเท่ากับ -15.16 dB อยู่ที่ความถี่ 882 MHz มีความกว้างแบนด์วิดธ์เท่ากับ 101 MHz และมีเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์คิดเป็น 11.10% ซึ่งครอบคลุมความถี่ที่ต้องการใช้งาน

3.5.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

3.5.2.1 ความถี่ 860 MHz

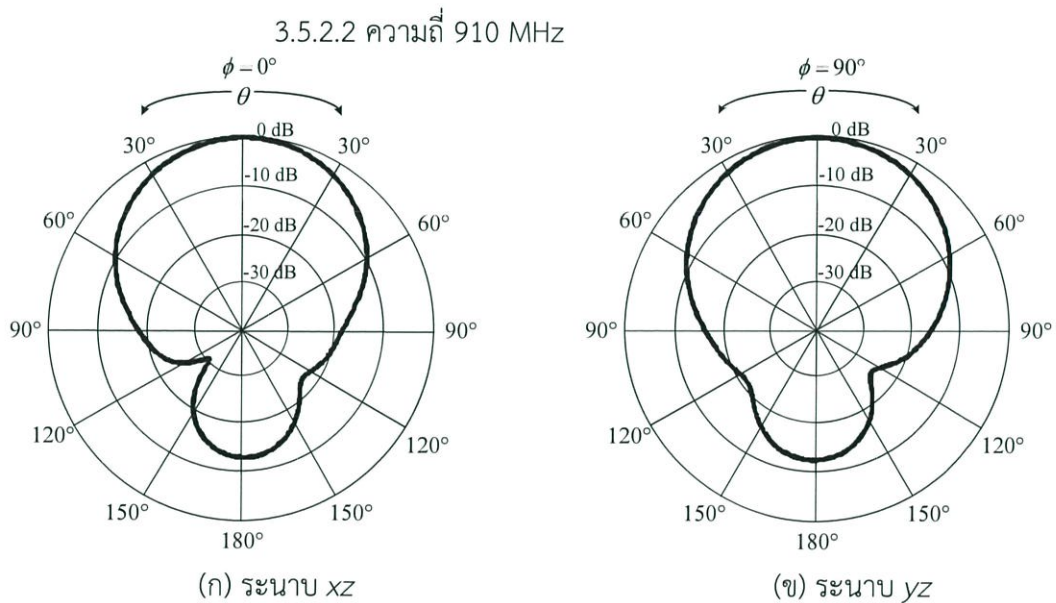


(ก) ระนาบ xz

(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 3.25 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 860 MHz

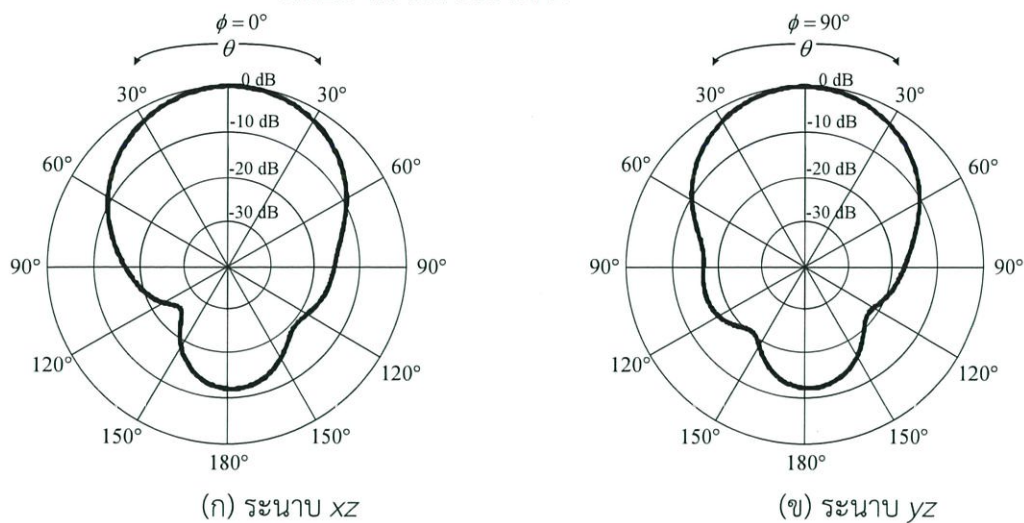
จากรูปที่ 3.25 สายอากาศที่นำเสนอบ้างเป็น 2 ระนาบ คือ ระนาบ xz และระนาบ yz โดยระนาบ xz จะมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth) เท่ากับ 66.7 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B ratio) เท่ากับ 13.9 dB ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe level) เท่ากับ -13.9 dB และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ส่วนระนาบ yz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth) เท่ากับ 75.4 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B ratio) เท่ากับ 13.8 dB ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe level) เท่ากับ -13.9 dB และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว



รูปที่ 3.26 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 910 MHz

จากรูปที่ 3.26 สายอากาศที่นำเสนอบ้างเป็น 2 ระนาบ คือ ระนาบ xz และระนาบ yz โดยระนาบ xz จะมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth) เท่ากับ 63.7 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B ratio) เท่ากับ 14.1 dB ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe level) เท่ากับ -13.5 dB และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ส่วนระนาบ yz ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth) เท่ากับ 63 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B ratio) เท่ากับ 13.2 dB ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe level) เท่ากับ -13.5 dB และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

3.5.2.3 ความถี่ 960 MHz



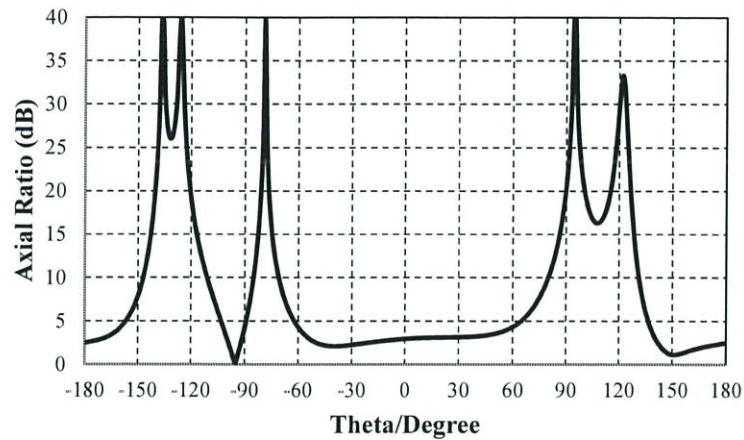
รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 960 MHz

จากรูปที่ 3.27 สายอากาศที่นำเสนอแบ่งเป็น 2 ระนาบ คือ ระนาบ xz และระนาบ yz โดยระนาบ xz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth) เท่ากับ 60.2 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B ratio) เท่ากับ 12.5 dB ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe level) เท่ากับ -12.8 dB และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ส่วนระนาบ yz ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง (Half power beamwidth) เท่ากับ 70.2 องศา อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง (F/B ratio) เท่ากับ 12.3 dB ระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side lobe level) เท่ากับ -12.6 dB และมีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

3.5.3 อัตราส่วนแกน

จากสายอากาศที่ทำการจำลอง มีการโพลาไรซ์เป็นวงกลม ในย่านความถี่ 920 – 925 MHz ของระบบอาร์เอฟเอทีในประเทศไทย ซึ่งการจะดูว่าสายอากาศเป็นโพลาไรซ์วงกลมหรือไม่นั้น สามารถดูได้จากอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ผลการจำลองแสดงได้ดังหัวข้อต่อไป

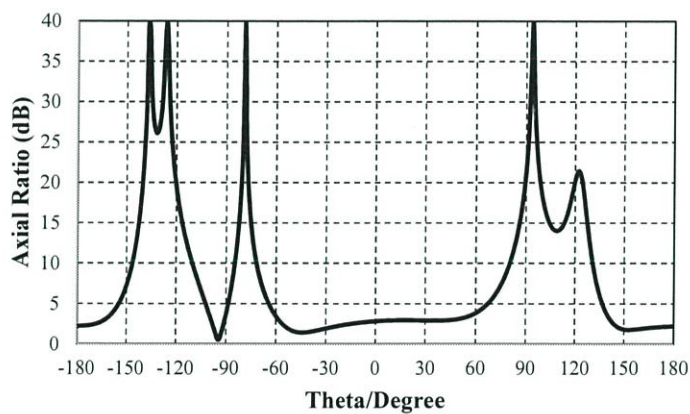
3.5.3.1 อัตราส่วนแคนที่ความถี่ 920 MHz



รูปที่ 3.28 อัตราส่วนแคนที่ความถี่ 920 MHz

จากรูปที่ 3.28 ที่มุม 0 องศา มีอัตราส่วนแคนที่อยู่ที่ 2.94 dB และช่วงกว้างลำคลื่นที่มีอัตราส่วนแคนที่ต่ำกว่า 3 dB อยู่ในช่วง -54 ถึง 5 องศา และมีความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแคนที่เท่ากับ 59 องศา

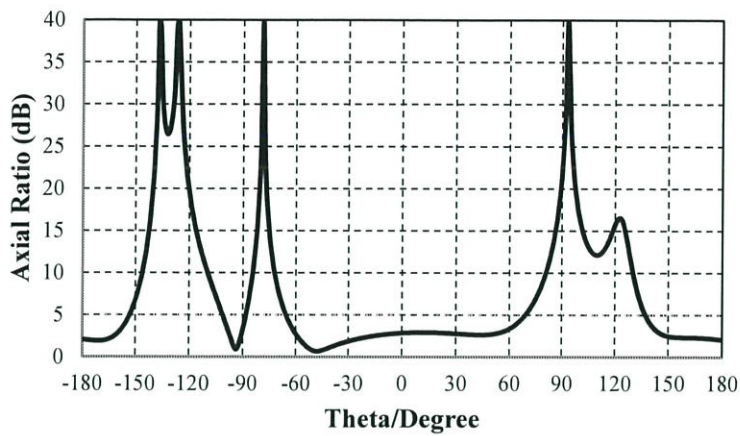
3.5.3.2 อัตราส่วนแคนที่ความถี่ 922.5 MHz



รูปที่ 3.29 อัตราส่วนแคนที่ความถี่ 922.5 MHz

จากรูปที่ 3.29 ที่มุม 0 องศา มีอัตราส่วนแคนที่อยู่ที่ 2.83 dB และช่วงกว้างลำคลื่นที่มีอัตราส่วนแคนที่ต่ำกว่า 3 dB อยู่ในช่วง -58 ถึง 46 องศา และมีความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแคนที่เท่ากับ 104 องศา

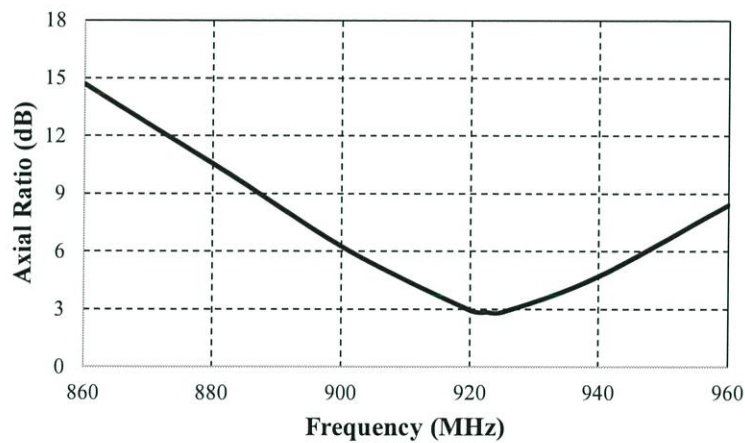
3.5.3.3 อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 925 MHz



รูปที่ 3.30 อัตราส่วนแกนที่ความถี่ 925 MHz

จากรูปที่ 3.30 ที่มุม 0 องศา มีอัตราส่วนแกนอยู่ที่ 2.84 dB และช่วงกว้างลำคลื่นที่มีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB อยู่ในช่วง -60 ถึง 56 องศาและมีความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกนเท่ากับ 116 องศา

3.5.3.4 อัตราส่วนแกนช่วงความถี่ 860 – 960 MHz

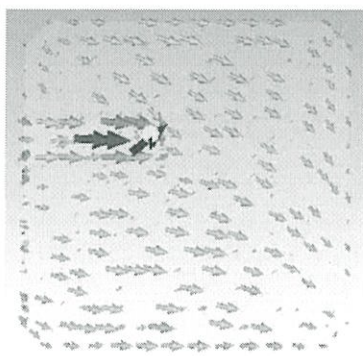


รูปที่ 3.31 อัตราส่วนแกนช่วงความถี่ 860 – 960 MHz

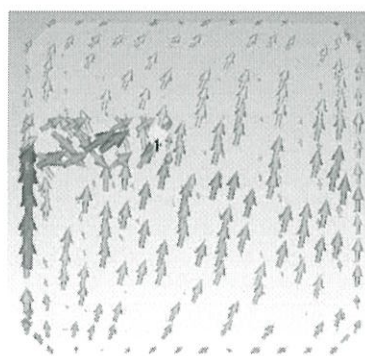
จากรูปที่ 3.31 มีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB ในช่วงความถี่ 920 – 925 MHz และที่ความถี่ 922.5 MHz มีอัตราส่วนแกนอยู่ที่ 2.83 dB

3.5.4 รูปแบบการกระจายกระแส

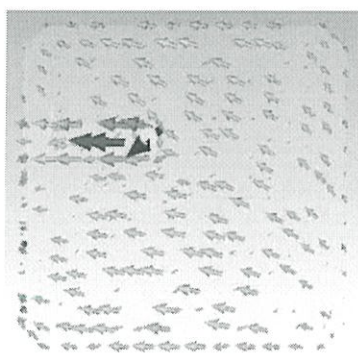
สำหรับทิศทางการหมุนของโพลาริซ์วงกลมสามารถดูได้จากการพิจารณารูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศจากมุมมองด้านหลังของสายอากาศ ในรูปที่ 3.32 แสดงรูปแบบการกระจายกระแสของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง ที่ความถี่ 922.5 MHz พบว่าทิศทางการหมุนของโพลาริซ์วงกลมนั้นหมุนทวนเข็มนาฬิกาหรือหมุนซ้าย



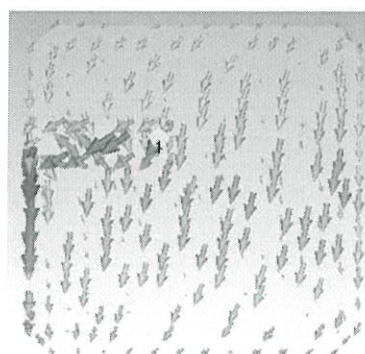
(ก) เฟสเท่ากับ 0 องศา



(ข) เฟสเท่ากับ 90 องศา



(ค) เฟสเท่ากับ 180 องศา

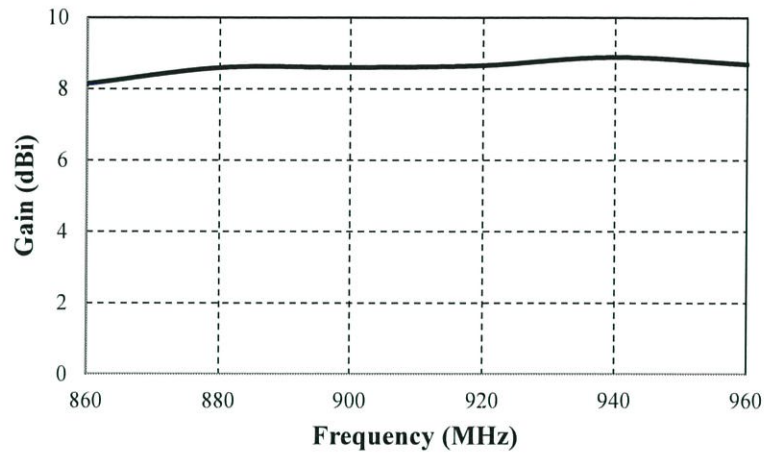


(ง) เฟสเท่ากับ 270 องศา

รูปที่ 3.32 รูปแบบการกระจายของกระแส

3.5.5 อัตราขยาย (Gain)

สามารถแสดงอัตราขยายช่วงความถี่ตั้งแต่ 860-960 MHz ได้ดังรูปที่ 3.33



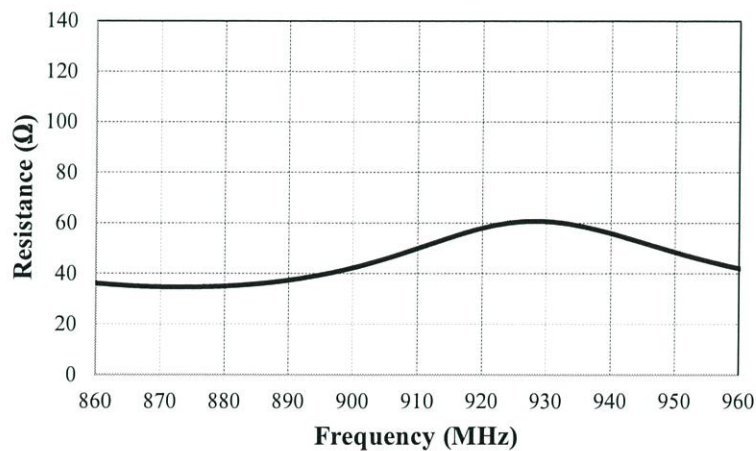
รูปที่ 3.33 อัตราขยายของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.33 แสดงผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ โดยสายอากาศมีอัตราขยายมากที่สุดที่ความถี่ 940 MHz เท่ากับ 8.89 dBi และสายอากาศมีอัตราขยายต่ำสุดที่ความถี่ 860 MHz มีอัตราขยายเท่ากับ 8.14 dBi

3.5.6 อิมพีแดนซ์

สามารถแสดงอิมพีแดนซ์ช่วงความถี่ตั้งแต่ 860-960 MHz ได้ดังรูปที่ 3.34 และ 3.35

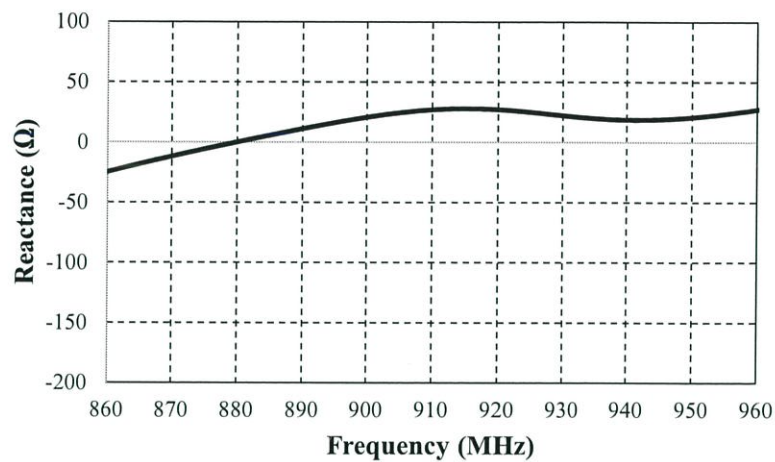
3.5.6.1 รีซิสแตนซ์ช่วงความถี่ตั้งแต่ 860-960 MHz



รูปที่ 3.34 รีซิสแตนซ์ของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.34 แสดงผลการจำลองรีซิสแตนซ์ของสายอากาศ โดยสายอากาศมีรีซิสแตนซ์เท่ากับ 50 โอห์มที่ความถี่ 910.2 MHz และ 947.8 MHz

3.5.6.2 รีแอกแตนซ์ช่วงความถี่ตั้งแต่ 860-960 MHz



รูปที่ 3.35 รีแอกแตนซ์ของสายอากาศ

จากรูปที่ 3.35 แสดงผลการจำลองรีแอกแตนซ์ของสายอากาศ โดยสายอากาศมีรีแอกแตนซ์เท่ากับ 0 โอห์มที่ความถี่ 880 MHz

3.6 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศ

จากผลการจำลองสายอากาศสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 คุณลักษณะของสายอากาศ

คุณลักษณะของสายอากาศ	ผลการจำลอง		
	860 MHz	910 MHz	960 MHz
$ S_{11} $	-10.04 dB	-12.56 dB	-10.51 dB
แบนด์วิดธ์	860 – 961 MHz		
เปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์	11.10 %		
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว	ทิศทางเดียว	ทิศทางเดียว
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xy	66.7°	63.7°	60.2°
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ yz	75.4°	63°	70.2°
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อด้านหลัง	13.9 dB	14 dB	12.5 dB
อัตราขยาย	8.14 dBi	8.60 dBi	8.68 dBi
รีซิสแตนซ์	36.10 Ω	49.94 Ω	42.09 Ω
รีแอกแตนซ์	-24.74 Ω	27.08 Ω	27.30 Ω

3.7 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอขั้นตอนในการออกแบบและการจำลองผลของสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง โดยเริ่มต้นทำการคำนวณและกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศก่อน จากนั้นจึงทำการออกแบบและจำลองสายอากาศ และปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศเพื่อให้มีแบนด์วิดธ์ครอบคลุมย่านความถี่สากลที่ 860-960 MHz โดยสายอากาศเริ่มต้นนั้นจะประกอบด้วยแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัส 2 แผ่น โดยแผ่นระนาบกราวนอยู่ชั้นล่างสุด ชั้นที่สองคือช่องว่างอากาศ และชั้นบนสุดคือแผ่นแพร์กระจายคลื่น เนื่องจากสายอากาศเริ่มต้นมีแบนด์วิดธ์ที่แคบ จึงต้องทำการขยายแบนด์วิดธ์เพื่อให้ครอบคลุมกับย่านความถี่สากล โดยทำการพับสายอากาศลงมา แต่สายอากาศยังมีแบนด์วิดธ์ไม่ครอบคลุมตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการเพิ่มชั้นของสายอากาศ เพื่อให้มีแบนด์วิดธ์ที่เพิ่มขึ้น ทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสม เมื่อเพิ่มชั้นของสายอากาศแล้ว ผลที่ได้คือสายอากาศมีแบนด์วิดธ์ที่ใกล้เคียงกับแบนด์วิดธ์ที่ต้องการ ต่อมาพิจารณาอัตราส่วนแกน เพื่อให้สายอากาศมีการโพลาไรซ์วงกลม จึงทำการตัดมุมบนแผ่นตัวแพร์กระจายคลื่น เริ่มแรกจะตัดมุมที่ละสองมุมตรงข้ามกัน จากนั้นทำการตัดมุมบนแผ่นตัวแพร์กระจายคลื่นทุกมุม สายอากาศที่ได้มีโพลาไรซ์วงกลมแล้ว แต่ยังไม่ได้แบนด์วิดธ์ตามที่ต้องการ สุดท้ายนี้จึงทำการตัดมุมของแผ่นกำแพงแนวตั้ง ผลการจำลองของสายอากาศพบว่ามีแบนด์วิดธ์ตามที่ต้องการ โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 860 – 961 MHz ซึ่งในบทที่ 4 จะเป็นการนำเสนอสายอากาศที่ได้จากการจำลองไปสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ พร้อมทั้งทำการวัดคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง และการนำไปประยุกต์ใช้งาน

บทที่ 4

การสร้างและทดสอบสายอากาศ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างและผลการทดสอบคุณสมบัติและทิศทางตอบสนองย่านความถี่ 860-960 MHz ของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้างและมีโพลาไรซ์วงกลมที่ความถี่ 920-925 MHz เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการจำลองมาสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อทำการทดสอบและนำผลที่ได้จากการทดสอบสายอากาศต้นแบบมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่งได้นำเสนอไว้แล้วในบทที่ 3 ซึ่งจะพิจารณาผลของ $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจาย อัตราส่วนแกน และอัตราขยายของสายอากาศ เพื่อยืนยันความถูกต้องของคุณลักษณะของสายอากาศ ในส่วนของรายละเอียดต่างๆจะได้กล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

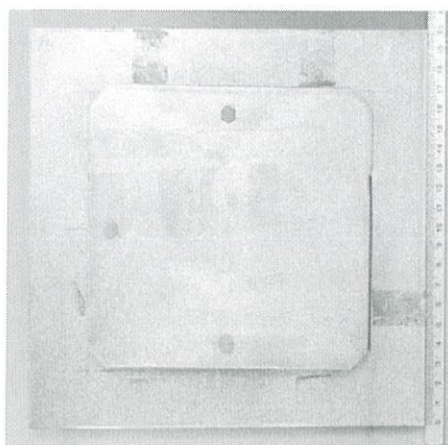
4.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศ

- แผ่นอลูมิเนียมหนา 0.1 cm ขนาด 20×20 cm และ 14×14 cm
- N-type SMA
- นี้อทองเหลือง
- หัวแร้ง
- ตะกั่ว
- เลื่อย
- สว่าน และ ดอกสว่าน

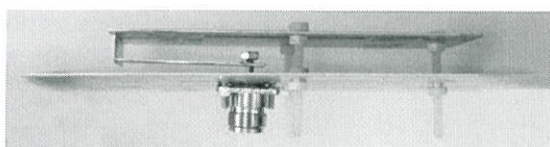
4.3 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล

4.3.1 สายอากาศต้นแบบ

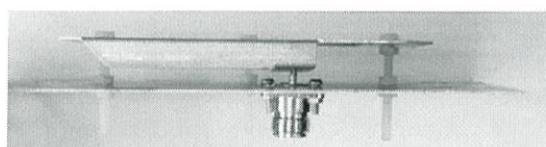
ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอสายอากาศต้นแบบเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้างและมีโพลาไรซ์วงกลมที่ความถี่ 920-925 MHz สำหรับใช้ในการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้ใช้งานที่ความถี่ 860 - 960 MHz ซึ่งเป็นความถี่ย่านสากลของระบบอาร์เอฟไอดี วัสดุที่นำมาใช้สร้างสายอากาศต้นแบบเป็นวัสดุที่เป็นอลูมิเนียมซึ่งไม่เป็นสนิม มีความแข็งแรงทนทาน น้ำหนักเบา และมีราคาถูก ลักษณะของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.1 ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้สร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งได้มาจากการจำลองผลในบทที่ 3



(ก) ด้านบน



(ข) ด้านหน้า



(ค) ด้านข้าง

รูปที่ 4.1 สายอากาศต้นแบบเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่สากล

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาด (cm)	โครงสร้างสายอากาศ
ความกว้างแผ่นแพร่กระจายคลื่น (W_p)	0.42λ	14	
ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม (h)	0.003λ	0.1	
ระยะตัดมุมแผ่นแพร่กระจายคลื่น ทั้งสี่มุม (Truncate corner of patch : m)	0.3λ	10	
ช่องว่างอากาศ (h_a)	0.045λ	1.5	
ความกว้างระนาบกราวด์ (W_g)	0.61λ	20	
ตำแหน่งพอร์ต (P_x)	0.11λ	3.5	
ตำแหน่งพอร์ต (P_y)	0.045λ	1.5	
ความกว้างของแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate : d)	0.03λ	1	
ความยาวของแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate : c)	0.29λ	9.5	
ความสูง a ของแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate : a)	0.03λ	1	
ระยะตัดมุมแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Truncate corner of Vertical wall plate : n)	0.03λ	1	
ความกว้างของแผ่นกลาง (Middle Plate : W_s)	0.045λ	1.5	
ความยาวของแผ่นกลาง (Middle Plate : L_s)	0.19λ	6	

4.4 การทดสอบและผลการทดสอบของสายอากาศ

เมื่อได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการออกแบบ จึงได้ทำการทดสอบโดยนำสายอากาศที่สร้างขึ้นไปวัดค่าคุณสมบัติต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม CST Microwave Studio ที่กล่าวมาในบทที่ 3 และผลที่ได้

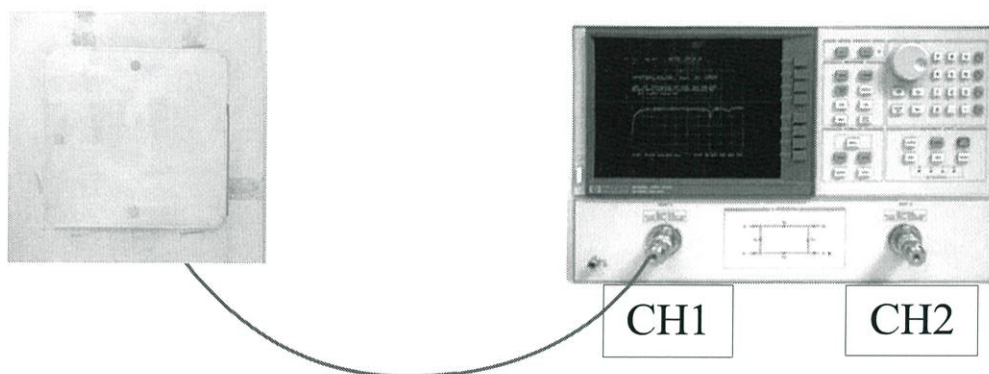
จากการทดสอบ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลของ $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ใช้งาน อัตราขยายและอัตราส่วนแกน ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่นำมาทดสอบคุณลักษณะต่างๆของสายอากาศ แสดงในตารางที่ 4.1

สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง มีดังต่อไปนี้

1. ห้องไร้การสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ (Microwave anechoic chamber)
2. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP รุ่น 8530A
3. สายนำสัญญาณอิมพีแดนซ์ 50 Ω

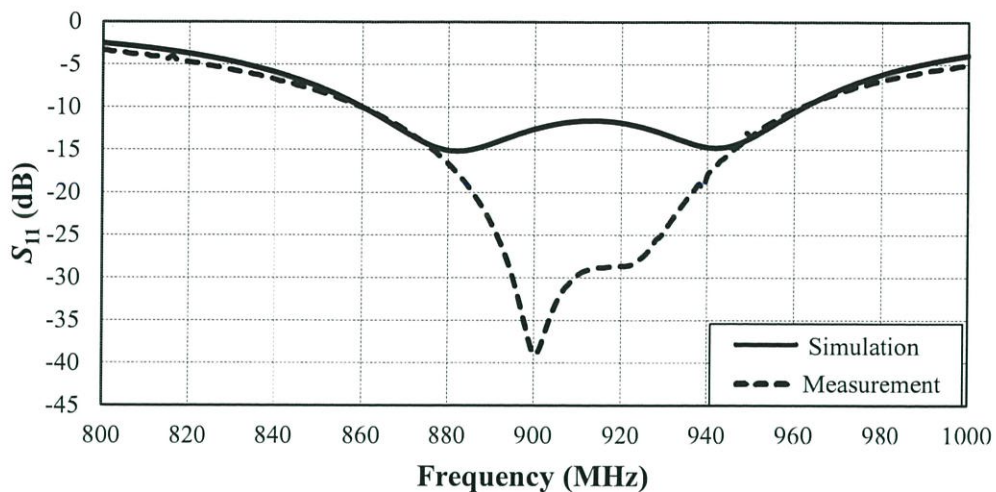
4.4.1 การทดสอบและผลการทดสอบ $|S_{11}|$

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดสอบสายอากาศเพื่อหา $|S_{11}|$ โดยนำสายอากาศที่จะทำการทดสอบผลมาทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP รุ่น 8530A ซึ่งแสดงวิธีการทดสอบดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ

จากรูป 4.2 พอร์ตของสายอากาศต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย HP รุ่น 8530A ซึ่งจะสามารถทดสอบ $|S_{11}|$ ได้ ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองตลอดย่านความถี่ 860 – 960 MHz ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบและการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.3 ผล $|S_{11}|$ จากการทดสอบของสายอากาศที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ 860 MHz - 961 MHz โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 11.10% โดย $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ความถี่ 900 MHz เท่ากับ -38.97 dB ซึ่งผล $|S_{11}|$ จากการทดสอบของสายอากาศมีความสอดคล้องกับผลจำลอง

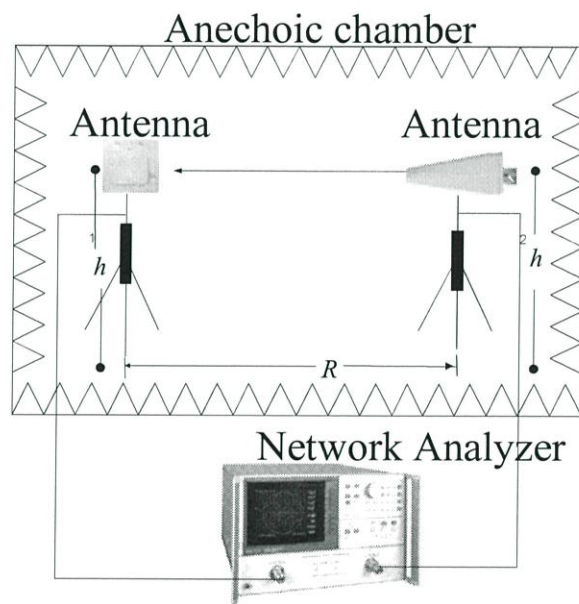
4.4.2 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง ซึ่งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง สำหรับการทดสอบจะใช้สายอากาศ log-periodic มาใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศด้านส่ง และใช้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้างทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับซึ่งในการทดสอบจะพิจารณาการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และในระนาบ yz ซึ่งทำการพิจารณาที่สนามระยะไกล (Far field) เพราะฉะนั้นระยะห่าง (d) ระหว่างสายอากาศตัวส่งและสายอากาศตัวรับต้องเป็นไปตามเงื่อนไข $R \geq 2D^2/\lambda_0$ โดยที่ D คือ ขนาดของสายอากาศที่มีความยาวที่สุดและ λ_0 คือ ความยาวคลื่นในสายอากาศโดยพิจารณาที่ความถี่ใช้งาน ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศตัวส่งและตัวรับเท่ากับ

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

โดยที่ R คือ ระยะห่างระหว่างสายอากาศ
 D คือ มิติด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศ

ซึ่งที่สนามระยะไกลนี้การเปลี่ยนแปลงของสนามจะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง ดังนั้นในการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะต้องมีระยะห่าง $R \geq 3$ m ซึ่งในการทดสอบได้วางสายอากาศตัวส่งและตัวรับ มีระยะห่างเท่ากับ 3 m โดยสายอากาศที่ทำกรทดสอบนั้น จะทำการตั้งระดับความสูงของสายอากาศด้านรับและด้านส่งจำเป็นต้องมีความสูงที่เท่ากัน ส่วนสายอากาศทางด้านส่งต้องเป็นสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่เดียวกันกับสายอากาศทางด้านรับ มีวิธีการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแสดงดังรูป 4.4



(ก)

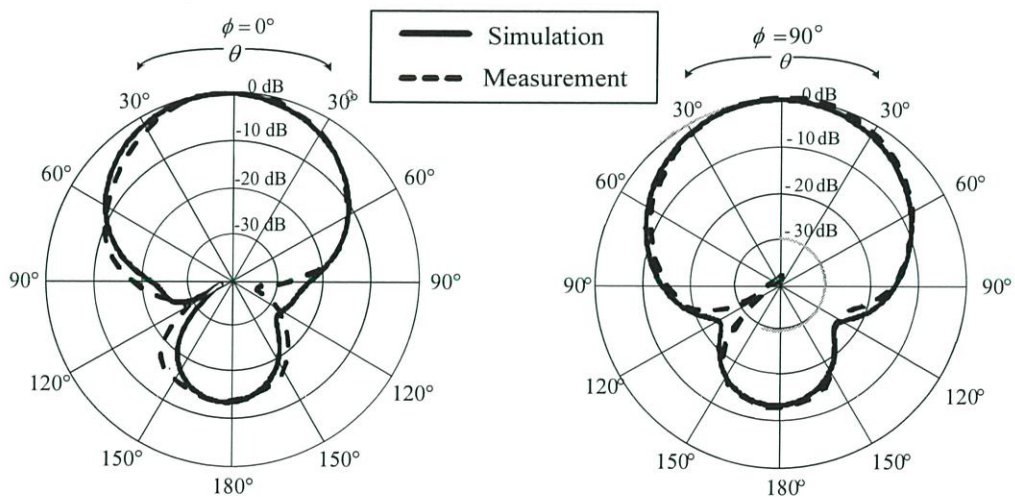


(ข)

รูปที่ 4.4 การจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

4.4.2.1 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ 860 MHz

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 860 MHz ของสายอากาศ โดยนำแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ได้จากการจำลองและจากการทดสอบ มาเปรียบเทียบกัน

(ก) ระนาบ xz (ข) ระนาบ yz

รูปที่ 4.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ความถี่ 860 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

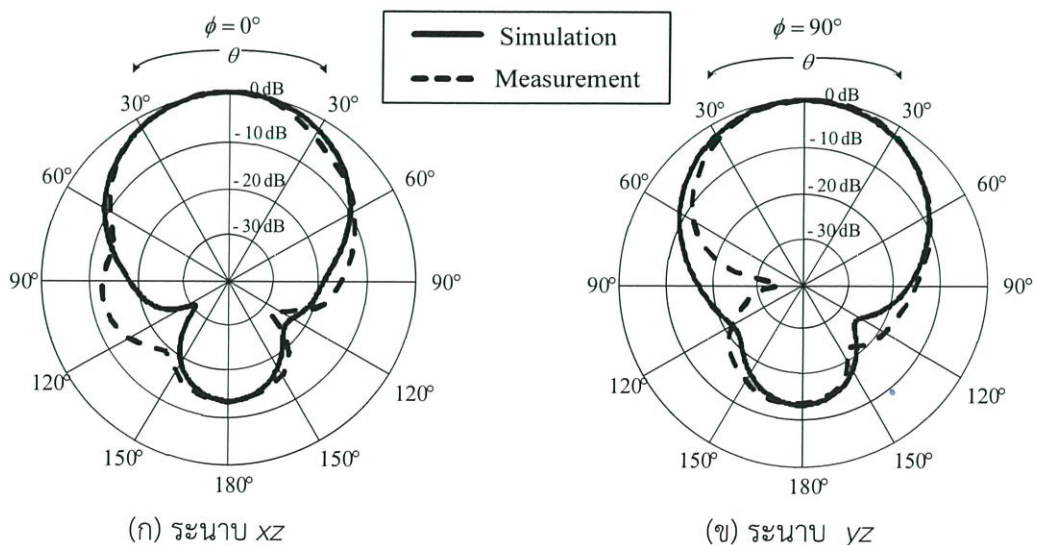
จากรูปที่ 4.5 แสดงผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ได้จากการทดสอบและจากการจำลอง ที่ความถี่ 860 MHz จากการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 66.7 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0 องศา มี และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 13.9 dB จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 65 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0 องศา มี และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 8.08 dB

จากการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 75.4 องศาและมีลำคลื่นหลัก 0 องศา และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 13.9 dB จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 70 องศา และมีลำคลื่นหลัก 90 องศา และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 12.33 dB

ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการทดสอบกับการจำลองมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกันในบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ เป็นการยืนยันว่าสายอากาศที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้นมีความถูกต้องและสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง

4.4.2.2 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ 910MHz

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 910 MHz ของสายอากาศ โดยนำแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ได้จากการจำลองและจากการทดสอบ มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ความถี่ 910 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

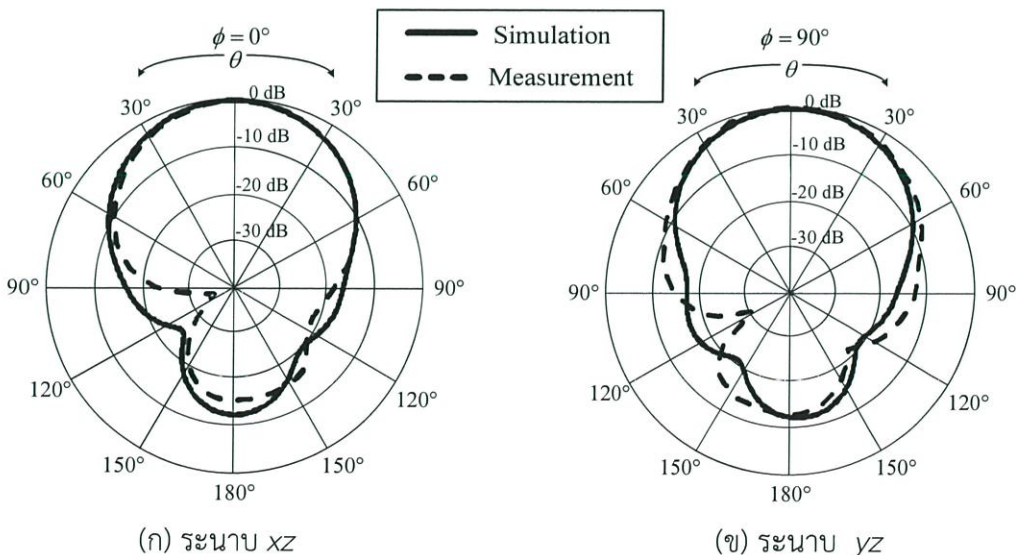
จากรูปที่ 4.6 แสดงผลของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ได้จากการทดสอบและจากการจำลอง ที่ความถี่ 910 MHz จากการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 63.7 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0 องศา และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 14 dB จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 70 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0 องศา และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 15.81 dB

จากการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 63 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0 องศา และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 14 dB จากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 70 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0 องศา และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 23.1 dB

ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการทดสอบกับการจำลองมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกันในบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ เป็นการยืนยันว่าสายอากาศที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้นมีความถูกต้องและสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง

4.4.2.3 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ 960 MHz

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 960 MHz ของสายอากาศ โดยนำแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ได้จากการจำลองและจากการทดสอบ มาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.7 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ความถี่ 960 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของแบบรูปการแพร่กระจาย ในระนาบ xz และระนาบ yz ที่ได้จากการทดสอบและจากการจำลอง ที่ความถี่ 960 MHz จากการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 60.2 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0° และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 12.5 dB และจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ xz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 60 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0 องศา และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 18.5 dB

จากการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 70.2 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0 องศา และอัตราส่วนด้านหน้าและด้านหลัง 12.5 dB และจากการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ yz มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง 55 องศา และมีลำคลื่นหลัก 0 องศา และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง 7.72 dB

ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลการทดสอบกับการจำลองมีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกันในบริเวณด้านหน้าของสายอากาศ เป็นการยืนยันว่าสายอากาศที่ออกแบบและสร้างขึ้นมานั้นมีความถูกต้องและสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่กว้าง

4.4.4 การทดสอบอัตราส่วนแกน

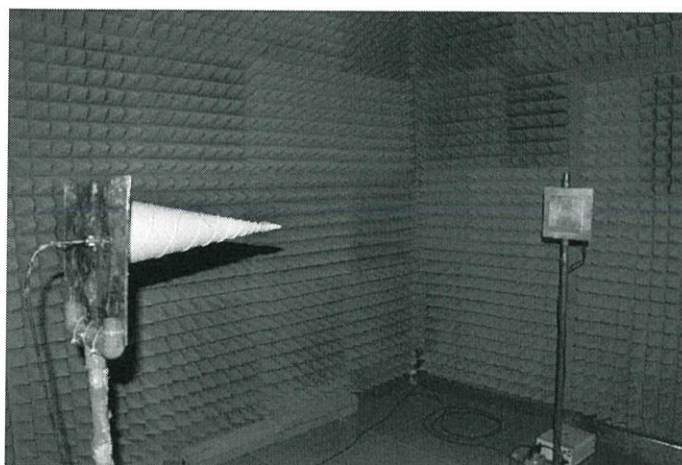
ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนแกนของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่กว้างโดยพิจารณาที่ความถี่ 920 - 925 MHz ซึ่งในการทดสอบจะใช้สายอากาศแบบเกลียวที่มีจำนวนรอบเท่ากับ 7 รอบ และมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 9 cm มาใช้ทำหน้าที่เป็นสายอากาศด้านส่ง และใช้สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่กว้างทำหน้าที่เป็นสายอากาศทางด้านรับ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและตัวรับมีค่าเท่ากับ 3 m ซึ่งผลจากการทดสอบที่ได้สามารถคำนวณอัตราส่วนแกนได้จากสมการ โดยมีวิธีการทดสอบดังรูป 4.8

$$\text{Axial Ratio} = 20 \log \left[\frac{|E_{co}| + |E_{cross}|}{|E_{co}| - |E_{cross}|} \right] \quad (4.2)$$

โดยที่

$|E_{co}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรซ์แบบเดียวกับโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ

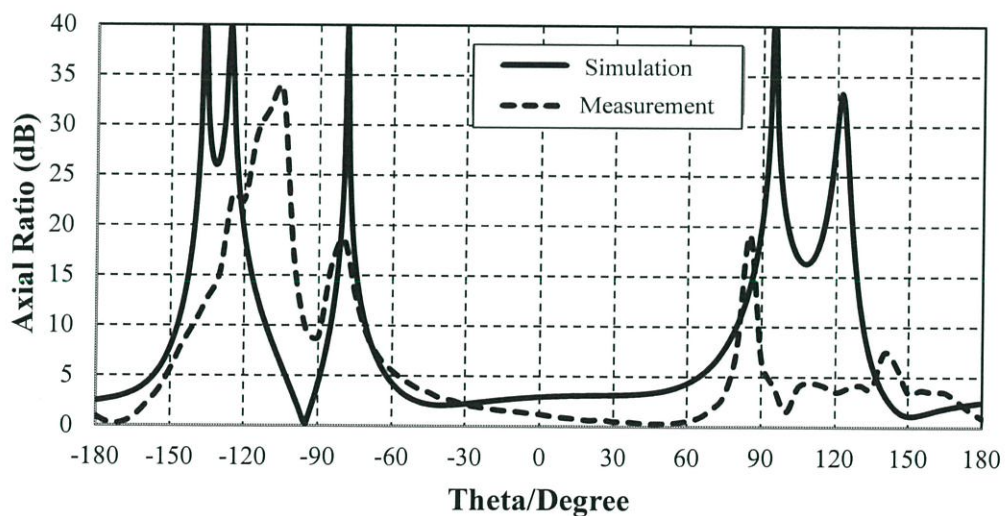
$|E_{cross}|$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรซ์ตรงข้ามกับโพลาไรซ์ของสายอากาศตัวรับ



รูปที่ 4.8 การจัดเตรียมเครื่องมือสำหรับการทดสอบอัตราส่วนแกน

4.4.4.1 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 920 MHz

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้างที่ได้จากผลทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยพิจารณาที่ความถี่ 920 MHz: ซึ่งเป็นผลของการเปรียบเทียบอัตราส่วนแกนของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

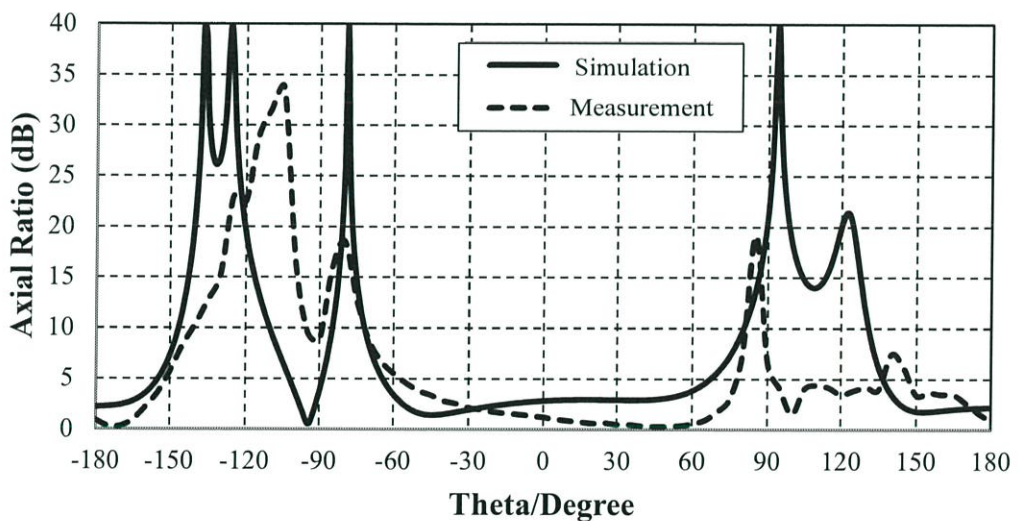


รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 920 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 4.9 เมื่อทำการเปรียบเทียบของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มุม 0 องศา หรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศซึ่งเป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารมีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB และจากการจำลองความกว้างของมุมที่อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ในระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 59 องศา ส่วนที่ได้จากการทดสอบความกว้างของมุมที่อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ในระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 115 องศา และที่มุม 0 องศา นั้นมีอัตราส่วนแกนจากการทดสอบเท่ากับ 1.21 dB และผลที่ได้จากการจำลองที่มุม 0 องศา มีอัตราส่วนแกนเท่ากับ 2.94 องศา

4.4.4.2 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 920 MHz

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟโอดีย่านความถี่กว้างที่ได้จากผลทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยพิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งเป็นผลของการเปรียบเทียบอัตราส่วนแกนของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



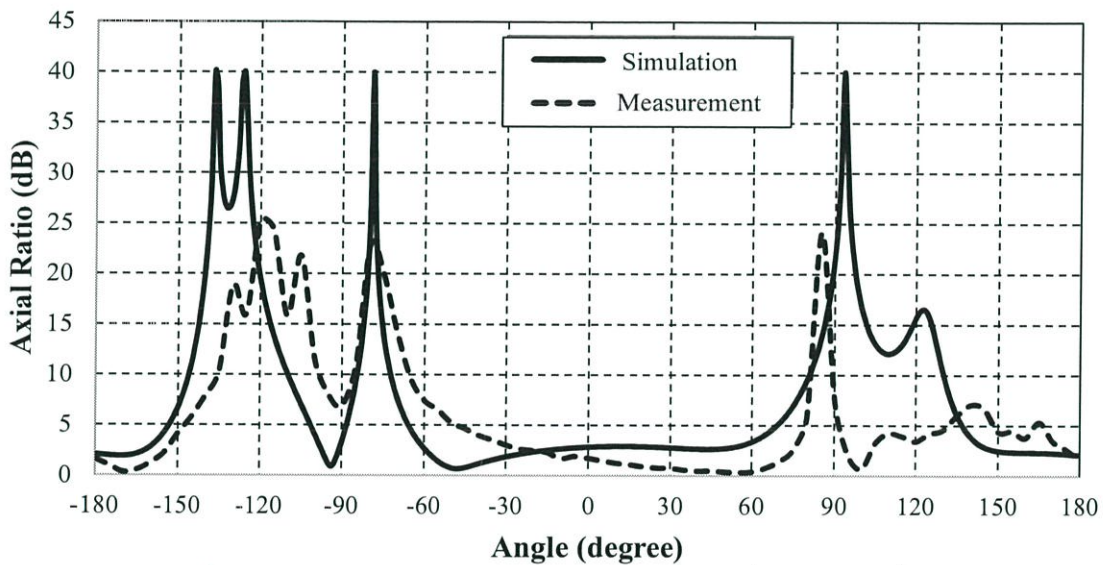
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 922.5 MHz ที่ได้จากการทดสอบ

จากรูปที่ 4.10 เมื่อทำการเปรียบเทียบของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มุม 0 องศา หรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศซึ่งเป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารมีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB และจากการทดสอบความกว้างของมุมที่อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ในระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 115 องศา ส่วนที่ได้จากการจำลองความกว้างของมุมที่อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ในระนาบ yz มีค่า

เท่ากับ 104 องศา และที่มุม 0 องศา นั้นมีอัตราส่วนแกนจากการทดสอบเท่ากับ 1.21 dB และผลที่ได้จากการจำลองที่มุม 0 องศา มีอัตราส่วนแกนเท่ากับ 2.83 dB

4.4.4.3 ผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่ 925 MHz

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้างที่ได้จากผลทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองโดยพิจารณาที่ความถี่ 925 MHz ซึ่งเป็นผลของการเปรียบเทียบอัตราส่วนแกนของสายอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

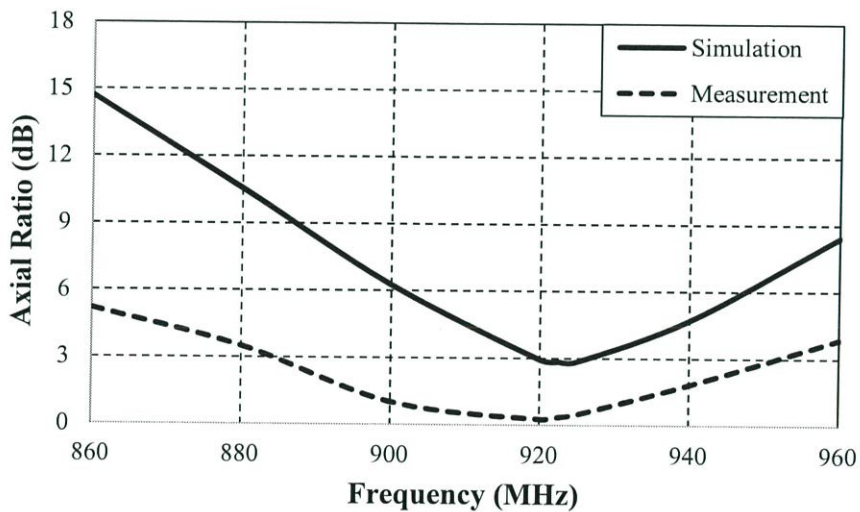


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบผลของอัตราส่วนแกนที่ความถี่ 925 MHz ที่ได้จากการทดสอบและการจำลอง

จากรูปที่ 4.11 เมื่อทำการเปรียบเทียบของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองพบว่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มุม 0 องศา หรือบริเวณด้านหน้าของสายอากาศซึ่งเป็นทิศทางที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารมีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB และจากการทดสอบความกว้างของมุมที่อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ในระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 100 องศา ส่วนที่ได้จากการจำลองความกว้างของมุมที่อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ในระนาบ yz มีค่าเท่ากับ 116 องศา และที่มุม 0 องศา นั้นมีอัตราส่วนแกนจากการทดสอบเท่ากับ 1.73 dB และผลที่ได้จากการจำลองที่มุม 0 องศา มีอัตราส่วนแกนเท่ากับ 2.84 dB

จากรูปที่ 4.9 4.10 และ 4.11 เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของของอัตราส่วนแกนที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองนั้นผลทั้งสองมีแนวโน้มที่สอดคล้อง จะเห็นว่าอัตราส่วนแกนที่มุมต่างๆของผลที่ได้จากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลอง แต่ยังมี ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากหลายๆสาเหตุ เช่น ตำแหน่งการติดตั้งสายอากาศทดสอบที่ไม่แม่นยำ การสูญเสียจากวัสดุที่นำมาสร้างสายอากาศต้นแบบที่ใช้อะลูมิเนียมเป็นตัวนำ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศต้นแบบที่มีผลคลาดเคลื่อนจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองผล เป็นต้น อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการทดสอบจากรูปที่ 4.9 4.10 และ 4.11 ดังข้างต้นสรุปได้ว่าสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้างมีการโพลาริซวงกลมใน ย่านความถี่ 920 MHz - 925 MHz

และอัตราส่วนแกนที่มุม 0 องศาของความถี่ต่างๆ ตั้งแต่ความถี่ 860 MHz – 960 MHz สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 อัตราส่วนแกนของสายอากาศที่ความถี่ต่างๆที่มุม 0 องศา

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าช่วงความถี่ 900 MHz – 940 MHz มีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB แสดงว่าช่วงความถี่นี้มีการโพลาริซวงกลม โดยที่ความถี่ 900 MHz มีอัตราส่วนแกนเท่ากับ 1.01 dB และที่ความถี่ 940 MHz มีอัตราส่วนแกนเท่ากับ 1.81 dB ซึ่งผลการทดสอบสายอากาศมีโพลาริซวงกลมในช่วงความถี่ประเทศไทย (920 MHz -925 MHz)

4.4.3 การทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

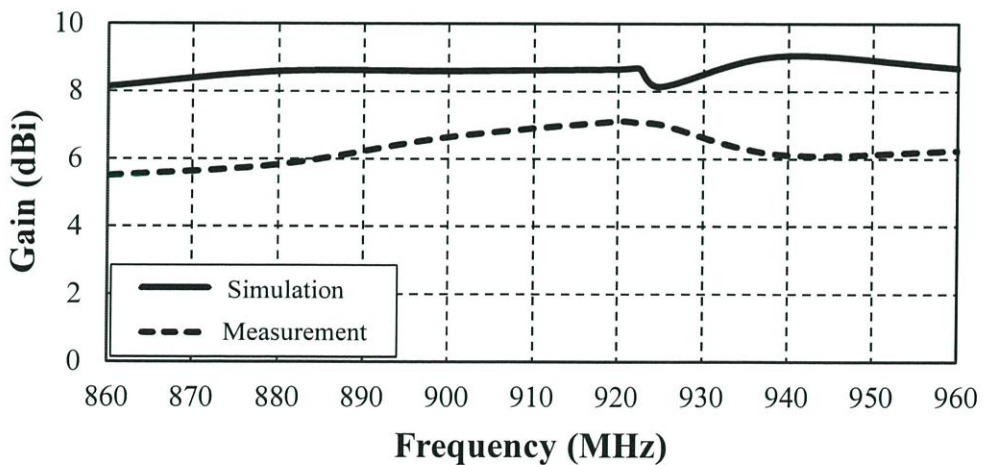
ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลของอัตราขยายของสายอากาศตลอดย่านความถี่ตอบสนองที่ต้องการของผลที่ได้จากการทดสอบกับจากการจำลอง โดยในการทดสอบสายอากาศนั้นได้ทำการทดสอบเช่นเดียวกับการวัดแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น โดยใช้สายอากาศคู่เหมือนในด้านรับและด้านส่ง โดยจะใช้ระยะห่างในการส่งและรับเท่ากับ 2 m โดยสามารถคำนวณหาอัตราขยายที่ได้จากสมการที่ 4.2

$$(G_{ot})_{dB} + (G_{or})_{dB} = 20 \log_{10} \left[\frac{4\pi R}{\lambda} \right] + 10 \log \left[\frac{P_r}{P_t} \right] \quad (4.2)$$

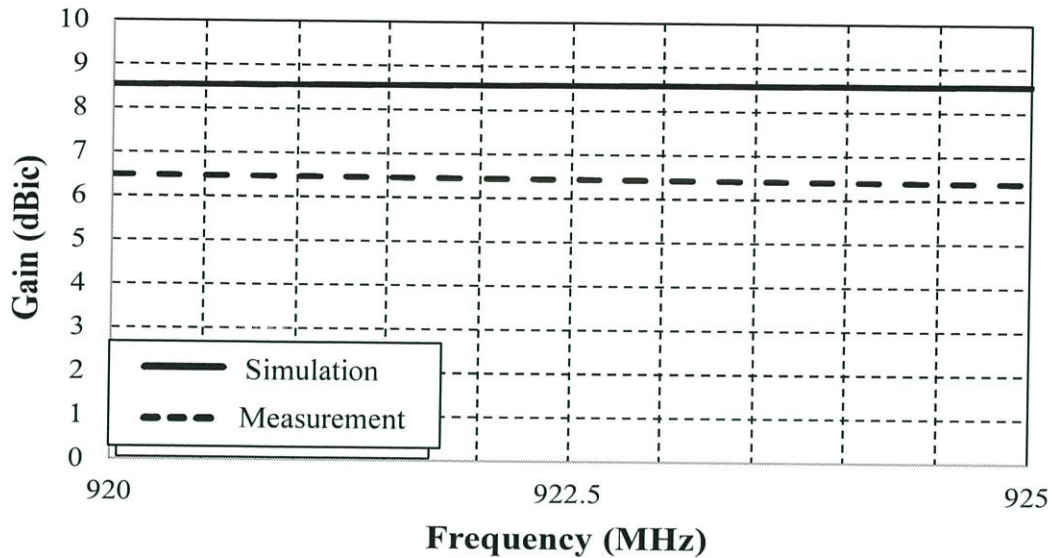
โดยที่

- G_{ot} คือ อัตราขยายของสายอากาศตัวส่ง (dBi)
- G_{or} คือ อัตราขยายของสายอากาศตัวรับ (dBi)
- R คือ ระยะห่างของสายอากาศทั้งสอง (m)
- λ คือ ความยาวคลื่นของความถี่ที่ใช้งาน (m)

ต่อไปเป็นการแสดงผลการเปรียบเทียบอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง ในช่วงความถี่ 860 MHz - 960 MHz ซึ่งแสดงผลการเปรียบเทียบในรูป 4.13



(ก) ผลการทดสอบและการจำลองอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ 860 MHz - 960 MHz



(ข) ผลการทดสอบและการจำลองอัตราขยายของสายอากาศที่ความถี่ 920-925 MHz ที่มีโพลาริเซชันวงกลม

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบและการจำลองอัตราขยายของสายอากาศ

เนื่องจากสายอากาศมีการโพลาไรซ์ทั้งเชิงเส้นและวงกลม โดยเป็นโพลาริเซชันวงกลม ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 900 MHz – 940 MHz ดังนั้นในช่วงความถี่ที่เป็นโพลาไรซ์เชิงเส้นและช่วงความถี่ที่เป็นโพลาไรซ์วงกลม จะมีหน่วยของอัตราขยายที่ต่างกัน โดยหน่วยของอัตราขยายช่วงความถี่ที่เป็นโพลาไรซ์เชิงเส้น มีหน่วยเป็น dBi ซึ่งเทียบกับอัตราขยายของสายอากาศไอโซทรอปิก และหน่วยของอัตราขยายช่วงความถี่ที่เป็นโพลาไรซ์วงกลม มีหน่วยเป็น dBic ซึ่งเทียบกับอัตราขยายของสายอากาศไอโซทรอปิกแบบโพลาไรซ์วงกลม ดังนั้นอัตราขยายในช่วงความถี่ 900 MHz – 940 MHz จึงมีหน่วยเป็น dBic ในที่นี้เราจะพิจารณาในย่านความถี่ประเทศไทย (920 MHz – 925 MHz)

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าอัตราขยายมีค่าต่ำสุดคือ 5.5 dBi ที่ความถี่ 860 MHz และอัตราขยายมีค่ามากที่สุดคือ 7.11 dBic ที่ความถี่ 920 MHz ซึ่งจากผลที่ได้จากการจำลองและการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามผลของอัตราขยายที่ได้ในแต่ละความถี่ก็ยังมีคลาดเคลื่อนกันอยู่ กล่าวคืออัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีค่าไม่เท่ากับผลที่ได้จากการจำลอง สาเหตุน่าจะเกิดมาจากการเลือกใช้วัสดุในการสร้างสายอากาศ ความเที่ยงตรงในค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่กว้าง ส่งผลให้อัตราขยายลดลงไปในขณะที่การจำลองผลค่าอัตราขยายไม่รวมผลกระทบต่างๆที่ส่งผลต่อ

สายอากาศ และค่าการสูญเสียจากสายนำสัญญาณ อาจทำให้ผลของอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบ มีความคลาดเคลื่อนไปจากอัตราขยายที่ได้จากการจำลอง

จากการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น สามารถสรุปการทดสอบคุณสมบัติของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง ได้ดังตาราง 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ

คุณสมบัติของสายอากาศ	ผลทดสอบ		
ความถี่ (MHz)	860	910	960
$ S_{11} $	-10.04dB	-29.69 dB	-10.33 dB
แบนด์วิดท์	100 MHz		
เปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์	11.10%		
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว		
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz	65 องศา	70 องศา	60 องศา
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ yz	70 องศา	70 องศา	55 องศา
ลำคลื่นหลักในระนาบ xy	0 องศา	0 องศา	0 องศา
ลำคลื่นหลักในระนาบ yz	0 องศา	0 องศา	0 องศา
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังในระนาบ xz	8.08 dB	15.81 dB	18.85 dB
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังในระนาบ yz	12.33 dB	23.1 dB	7.72 dB
อัตราส่วนแกนที่มุม 0 องศาในระนาบ yz	1.21 dB	1.21 dB	1.73 dB
อัตราขยาย	5.5 dBi	6.64 dBi	6.9 dBi

4.5 สรุป

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสร้างและผลการทดสอบของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง โดยทำการเปรียบเทียบ $|S_{11}|$ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และอัตราขยาย เมื่อทำการพิจารณาที่ผล $|S_{11}|$ จากผลการทดสอบพบว่ามีความถี่อยู่ในช่วง 860 MHz - 961 MHz ซึ่งมีแบนด์วิดท์เท่ากับผลการจำลอง ทำการพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ที่ความถี่ 860 MHz ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 65 องศา และระนาบ yz เท่ากับ 70 องศา ที่ความถี่ 910 MHz ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xy เท่ากับ 70 องศา และระนาบ yz เท่ากับ 70 องศา และที่ความถี่ 960 MHz ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz

เท่ากับ 60 องศา และระนาบ yz เท่ากับ 55 องศา ซึ่งสายอากาศมีแบบรูปการกระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว โดยมีทิศทางของลำคลื่นหลักไปในทิศทาง 0 องศา มีอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มุม 0 องศาที่ความถี่ 920 MHz เท่ากับ 1.21 dB ความถี่ 922.5 MHz เท่ากับ 1.21 dB และความถี่ 925 MHz เท่ากับ 1.73 dB ดังนั้นสายอากาศมีการโพลาไรซ์แบบแบบวงกลมที่ความถี่ 920 - 925 MHz และเมื่อพิจารณาอัตราขยายที่อยู่ในช่วงความถี่ 860-960 MHz มีอัตราขยายมากที่สุดเท่ากับ 7.11 dBi และน้อยที่สุดเท่ากับ 5.5 dBi อัตราขยายที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าผลการจำลองเนื่องจากการทดสอบอาจมีการสูญเสียในสายนำสัญญาณ จากผลที่ได้จากการทดสอบทางกายภาพของสายอากาศที่นำเสนอขึ้นมานั้นมีคุณสมบัติเพียงพอที่จะประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่กว้างได้ :ซึ่งการประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่กว้างจะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 5

การทดสอบประยุกต์ใช้งาน

5.1 บทนำ

จากบทที่ 4 ซึ่งได้ทำการสร้างสายอากาศต้นแบบจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองของสายอากาศ และได้ทำการทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่กว้าง ในบทนี้เป็นการนำสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบมาประยุกต์ใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดี โดยบทนี้แบ่งเป็นสี่หัวข้อใหญ่ด้วยกัน หัวข้อแรกเป็นการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็กในย่านความถี่ที่ 866 MHz 920 MHz และ 952 MHz หัวข้อที่สองเป็นการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็กโดยใช้เครื่องอ่านข้อมูล โดยจะทำการทดสอบหาระยะที่สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลที่สุดระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มีการวางตัวในทิศทางต่างๆกัน หัวข้อที่สามเป็นการทดสอบความเร็วที่แท็กกับสายอากาศสามารถรับส่งข้อมูลกันได้ และหัวข้อที่สี่เป็นการวัดความถี่ที่ออกจากเครื่องอ่านข้อมูล ในการทดสอบประยุกต์ใช้งานสายอากาศต้นแบบในแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.2 การทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็กในย่านความถี่ต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็กที่ความถี่ที่ 866 MHz 920 MHz และ 952 MHz ตามลำดับ แต่เนื่องจากเครื่องอ่านข้อมูลที่มีอยู่มีย่านความถี่ครอบคลุมอยู่ที่ 902 MHz – 928 MHz ซึ่งไม่ครอบคลุมย่านความถี่สากลของระบบอาร์เอฟไอดี (860 MHz – 960 MHz) ดังนั้นจึงออกแบบการทดสอบที่ใช้เครื่อง generator แพร่กระจายคลื่นแทนเครื่องอ่านข้อมูล และที่ด้านรับนำแท็กต่อเข้ากับเครื่องสเปกตรัมเพื่อดูค่ากำลังงานที่รับได้ โดยค่ากำลังงานที่สามารถรับได้ต่ำสุดจะอ้างอิงจากค่า sensitivity ของเครื่องอ่านข้อมูล

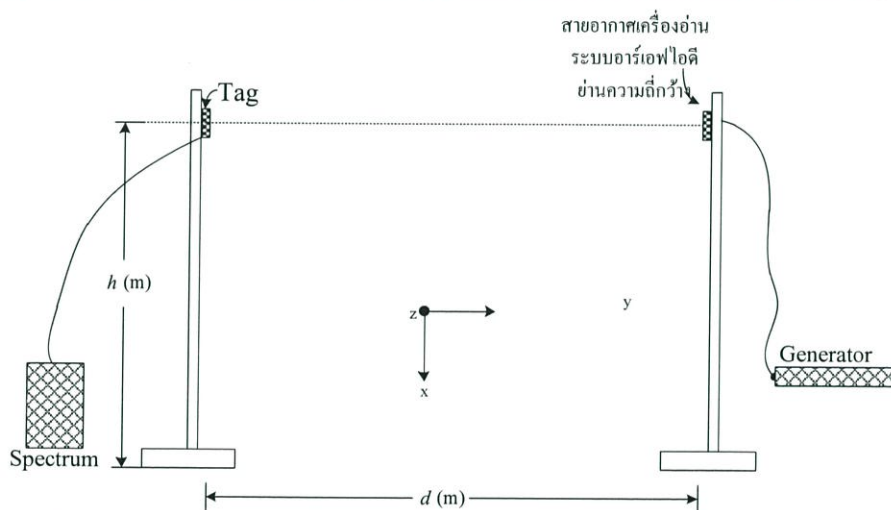
5.2.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็กในย่านความถี่ต่างๆ

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

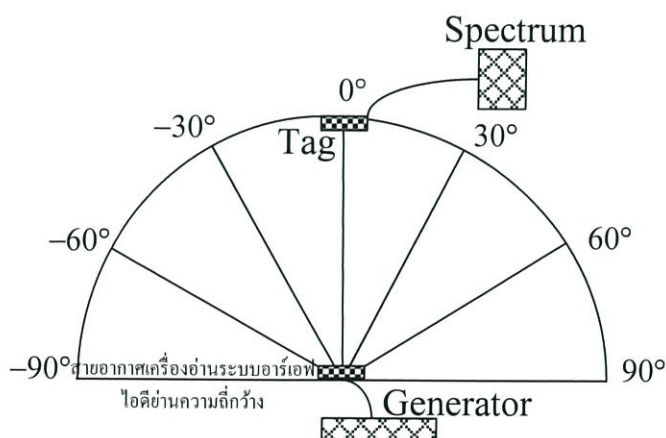
1. เครื่องสเปกตรัม
2. เครื่อง generator
3. สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง แบบแผ่นระนาบตัดมุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมสี่มุม
4. แท็กแบบไดโพล
5. สายนำสัญญาณ

5.2.2 การทดสอบประยุกต์ใช้งาน

การทดสอบการประยุกต์ใช้งาน มีการติดตั้งดังรูปที่ 5.1 โดยที่ด้านส่งสายอากาศจะต่อเข้ากับเครื่อง generator เพื่อทำการแพร่กระจายคลื่นที่มีความถี่ต่างๆ โดยความถี่ที่ใช้ในการทดสอบนั้น ได้แก่ 866 MHz 920 MHz และ 952 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใช้ในระบบอาร์เอฟอาร์ดีในประเทศต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.1 ส่วนที่ด้านรับจะใช้แท็กแบบไดโพลต่อเข้ากับเครื่องสเปกตรัม (Spectrum Analyzer) ให้แท็กวางตัวในแนวเริ่มต้นอยู่ที่ 0 องศา (แนวนอน) โดยวิธีการการทดสอบจะหาระยะมากที่สุดที่แท็กสามารถรับได้ที่ระยะแต่ละมุมตั้งแต่ -90° – 90° องศา ดังรูปที่ 5.2 ระยะที่รับได้มากที่สุดอ้างอิงจากค่า Sensitivity ของเครื่องอ่านข้อมูล โดยเครื่องอ่านข้อมูลที่ใช้อ้างอิง[18] มีค่า Sensitivity เท่ากับ -80 dBm โดยขั้นแรกทำการหาระยะสูงสุดในการติดต่อสื่อสารกับแท็กด้วยวิธีการเคลื่อนตำแหน่งของแท็กออกจากสายอากาศจนกระทั่งเครื่องสเปกตรัมวัดค่ากำลังงานได้ -80 dBm จากนั้นจึงเปลี่ยนแนวการวางแท็กเป็น 90 องศา ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 มุมมองด้านข้างของการติดตั้งการทดสอบสายอากาศใช้งานร่วมกับแท็ก



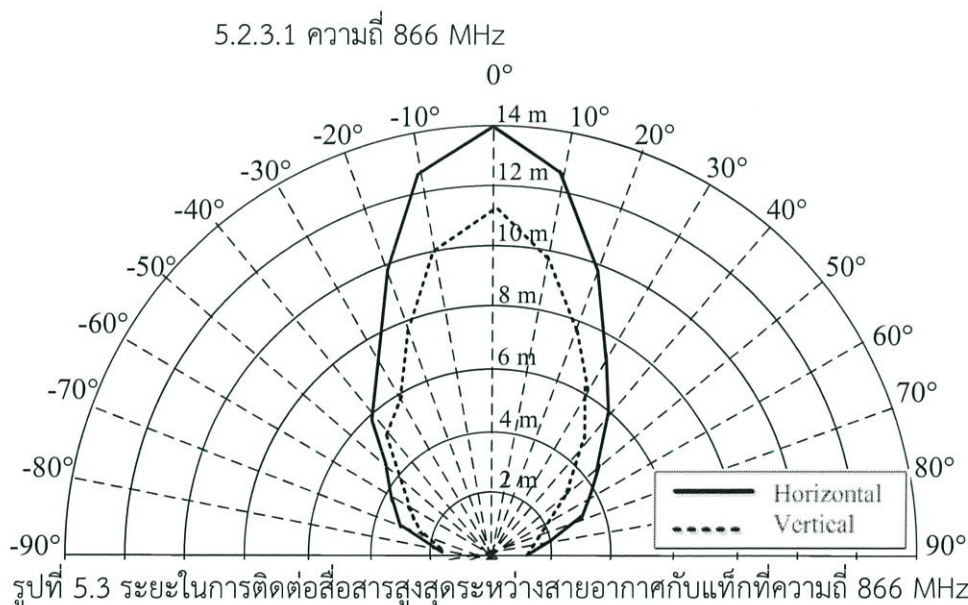
รูปที่ 5.2 มุมมองด้านบนของมุมระหว่างสายอากาศกับแท็กที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 5.1 ความถี่ของระบบยูเอชเอฟอาร์เอฟไอดีของประเทศต่างๆ

ความถี่ที่ทดสอบ	ประเทศ
866 MHz	ยุโรป แอฟริกาเหนือ ตุนิเซีย ฮังการี อินเดีย มาเลเซีย สิงคโปร์ นิวซีแลนด์
920 MHz	แอฟริกาใต้ ออสเตรเลีย จีน ไทย แคนาดา สหรัฐอเมริกา อาร์เจนตินา ชิลี
952 MHz	ญี่ปุ่น

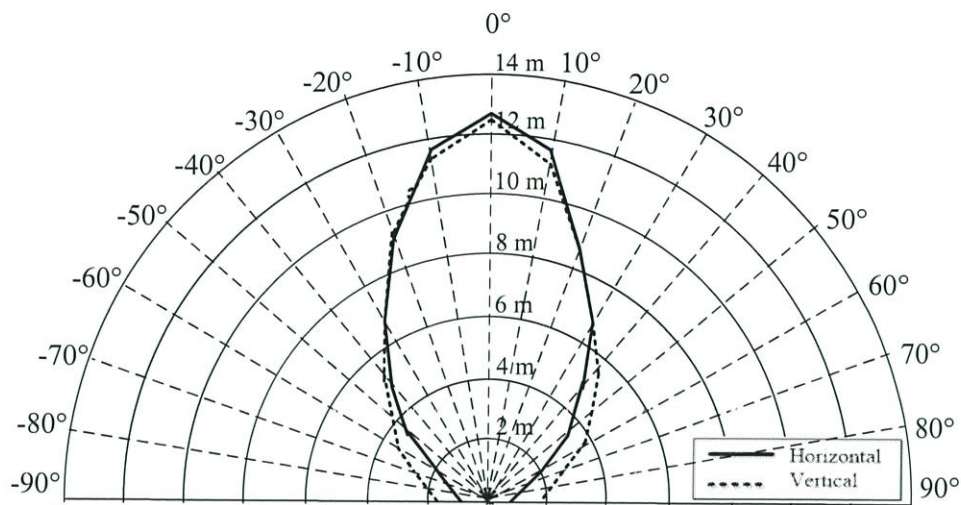
5.2.3 ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้เป็นผลการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศต้นแบบในการติดต่อสื่อสารกับแท็ก ที่ความถี่ที่ 866 MHz 920 MHz และ 952 MHz ตามลำดับ ในการทดสอบ จะทำการเปรียบเทียบระยะสูงสุดในการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็ก เมื่อเปลี่ยนมุมการทดสอบตั้งแต่ -90° – 90° องศา



จากรูปที่ 5.3 จากผลการทดสอบจะพบว่าเมื่อให้แท็กและสายอากาศทำมุมกัน 0° องศา จะมีระยะทางในการรับส่งข้อมูลมากที่สุด โดยเมื่อวางแท็กในแนว 0° องศา และ 90° องศา จะได้ระยะทางเท่ากับ 14 และ 9.5 ตามลำดับ แต่เมื่อเปลี่ยนมุมระหว่างแท็กกับสายอากาศที่มุม 30° องศา 60° องศา 90° องศา -30° องศา -60° องศา และ -90° องศา จะมีระยะทางในการรับส่งข้อมูลน้อยลงตามลำดับ โดยที่มุมระหว่างแท็กกับสายอากาศเท่ากับ 90° องศา และ -90° องศา จะมีระยะทางน้อยที่สุด

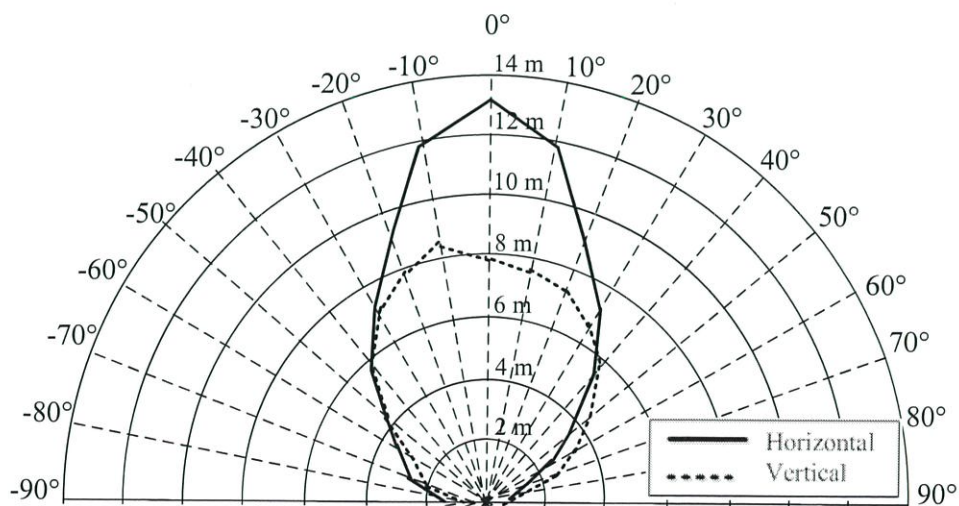
5.2.3.2 ความถี่ 920 MHz



รูปที่ 5.4 ระยะในการติดต่อสื่อสารสูงสุดระหว่างสายอากาศกับแท่งที่ความถี่ 920 MHz

จากรูปที่ 5.4 จากผลการทดสอบจะพบว่าเมื่อให้แท่งและสายอากาศทำมุมกัน 0 องศา จะมีระยะทางในการรับส่งข้อมูลมากที่สุด โดยเมื่อวางแท่งในแนว 0 องศา และ 90 องศา จะได้ระยะทางเท่ากับ 13 และ 11.3 ตามลำดับ แต่เมื่อเปลี่ยนมุมระหว่างแท่งกับสายอากาศที่มุม 30 องศา 60 องศา 90 องศา -30 องศา -60 องศา และ -90 องศา จะมีระยะทางในการรับส่งข้อมูลน้อยลงตามลำดับ โดยที่มุมระหว่างแท่งกับสายอากาศเท่ากับ 90 องศาและ -90 องศา จะมีระยะทางน้อยที่สุด

5.2.3.3 ความถี่ 952 MHz



รูปที่ 5.5 ระยะในการติดต่อสื่อสารสูงสุดระหว่างสายอากาศกับแท่งที่ความถี่ 952 MHz

จากรูปที่ 5.5 จากผลการทดสอบจะพบว่าเมื่อให้แท็กและสายอากาศทำมุมกัน 0 องศา จะมีระยะทางในการรับส่งข้อมูลมากที่สุด โดยเมื่อวางแท็กในแนว 0 องศา และ 90 องศา จะได้ระยะทางเท่ากับ 13.3 และ 7.85 ตามลำดับ แต่เมื่อเปลี่ยนมุมระหว่างแท็กกับสายอากาศที่มุม 30 องศา 60 องศา 90 องศา -30 องศา -60 องศา และ -90 องศา จะมีระยะทางในการรับส่งข้อมูลน้อยลงตามลำดับ โดยที่มุมระหว่างแท็กกับสายอากาศเท่ากับ 90 องศาและ -90 องศา จะมีระยะทางน้อยที่สุด

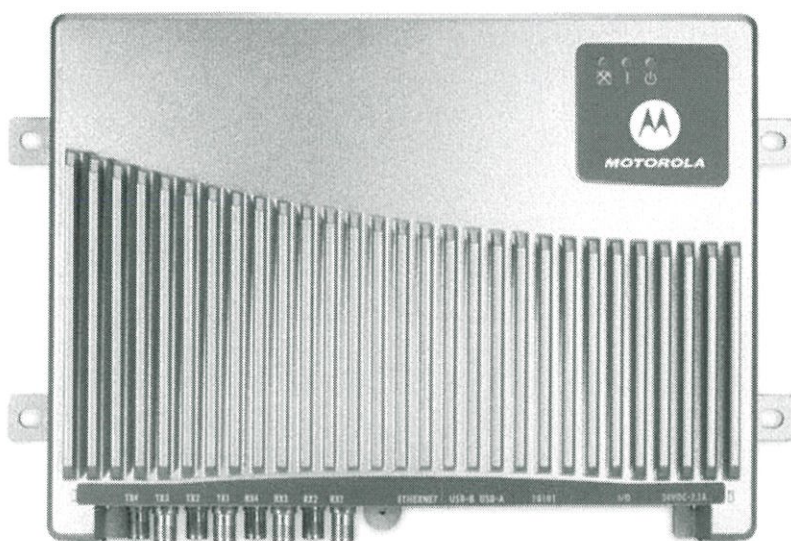
5.3 การทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็กโดยใช้เครื่องอ่านข้อมูล

5.3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบการรับส่งข้อมูลระหว่างสายอากาศกับแท็กโดยใช้เครื่องอ่านข้อมูล

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังนี้

1. เครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง ของบริษัท Motorola รุ่น RD11320 จำนวน 1 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5.6
2. แท็กชนิดไดโพลแบบขดลวด ของบริษัท Alien รุ่น ALN-9640 จำนวน 1 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.7
3. สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง แบบแผ่นระนาบตัดมุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมสี่มุม
4. สายอากาศ log-periodic
5. สายนำสัญญาณ

รูปที่ 5.6 แสดงเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง ของบริษัท Motorola รุ่น RD11320 มี 4 แชนเนล มีกำลังส่งสูงสุด 30 dBm ซึ่งจะนำมาต่อเข้ากับสายอากาศต้นแบบที่ได้จากบทที่ 4 เพื่อทำการทดสอบต่อไป



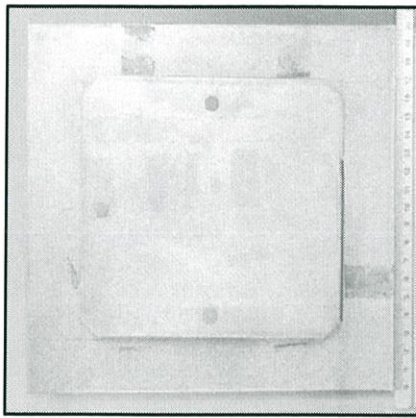
รูปที่ 5.6 เครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง [13]

รูปที่ 5.7 แสดงแท็กชนิดไดโพลแบบขด ของบริษัท Alien รุ่น ALN-9640 โดยการนำแท็กชนิดไดโพลแบบขดมาใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูล มีโพลาริซเซชันเชิงเส้น และเรโซแนนซ์ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 860 MHz- 960 MHz ขนาดความกว้างและความยาวของแท็กมีค่าเท่ากับ 94.8 mm และ 8.1 mm ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานของสายอากาศต้นแบบนี้จะใช้แท็กตัวเดียวกันในการทดสอบทุกรูปแบบ ดังนั้นจึงไม่ต้องพิจารณาถึงผลความแตกต่างของแท็ก



รูปที่ 5.7 แท็กชนิดไดโพลแบบขด Alien รุ่น ALN-9640 [14]

รูปที่ 5.8 แสดงสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีแบบแผ่นระนาบ สี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมทั้งสี่มุม มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 860 MHz – 961 MHz มีการโพลาริซเซชันวงกลมช่วงความถี่ 920 MHz – 925 MHz แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว มีอัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 8.89 dBic



รูปที่ 5.8 สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดี

5.3.2 ระยะทางสูงสุดที่เครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กสามารถรับส่งข้อมูลได้

ระยะทางสูงสุดที่เครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กสามารถรับส่งข้อมูลได้ สามารถหาได้โดยใช้

สมการที่ 5.1

$$d_{\max}(\theta, \phi) = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t \tau G_{tag}(\theta, \phi)}{L_t L_r P_{chip}}} \quad (5.1)$$

โดย

- $d_{\max}(\theta, \phi)$ = ระยะทางสูงสุด (m)
- λ = ความยาวคลื่น (m)
- P_t = กำลังส่งของเครื่องอ่านข้อมูล (W)
- G_t = อัตราขยายสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล (W)
- τ = สัมประสิทธิ์ค่ากำลังงานส่งผ่าน
- $G_{tag}(\theta, \phi)$ = อัตราขยายของแท็ก (W)
- L_t = ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณทางด้านส่ง (W)
- L_r = ค่าการสูญเสียของสายนำสัญญาณทางด้านรับ (W)
- P_{chip} = ค่ากำลังส่งของชิปที่อยู่ในแท็ก (W)

จากสมการ (5.1) สามารถคำนวณหาระยะทางสูงสุดได้ดังนี้

$$d_{\max}(\theta, \phi) = \frac{0.33}{4\pi} \sqrt{\frac{1 \times 5.13 \times 1 \times 1.41}{1.23 \times 1 \times 1.6 \times 10^{-5}}}$$

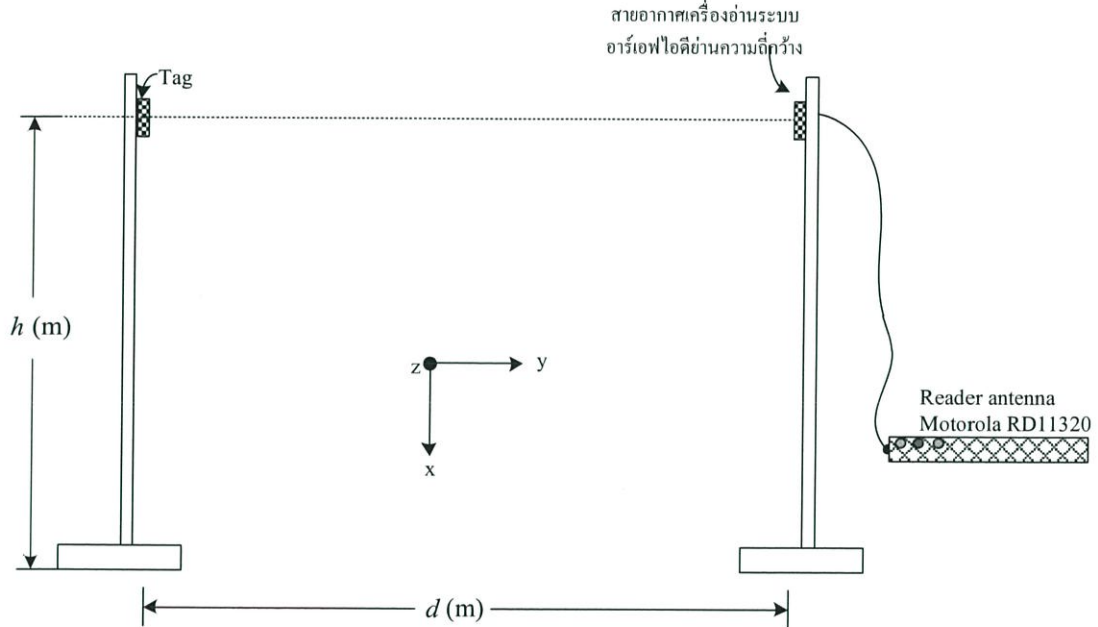
$$d_{\max}(\theta, \phi) = 15.92 \text{ m}$$

ดังนั้นระยะทางสูงสุดระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้

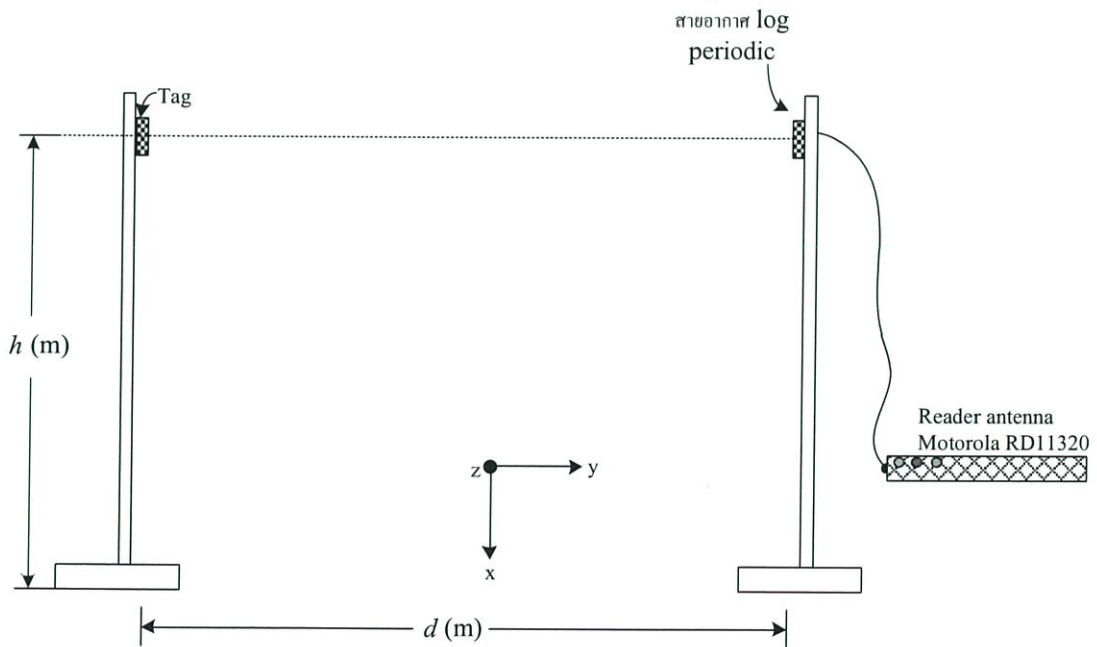
จากการคำนวณ คือ 15.92 m

5.3.3 การทดสอบประยุกต์ใช้งาน

สำหรับในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานนี้จะทำการทดสอบสายอากาศ log-periodic ที่มีโพลาริซเซชันร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลโดยใช้งานร่วมกับแท็ก และทดสอบสายอากาศต้นแบบที่สร้างจากบทที่ 4 ที่มีโพลาริซเซชันวงกลมร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลโดยใช้งานร่วมกับแท็ก



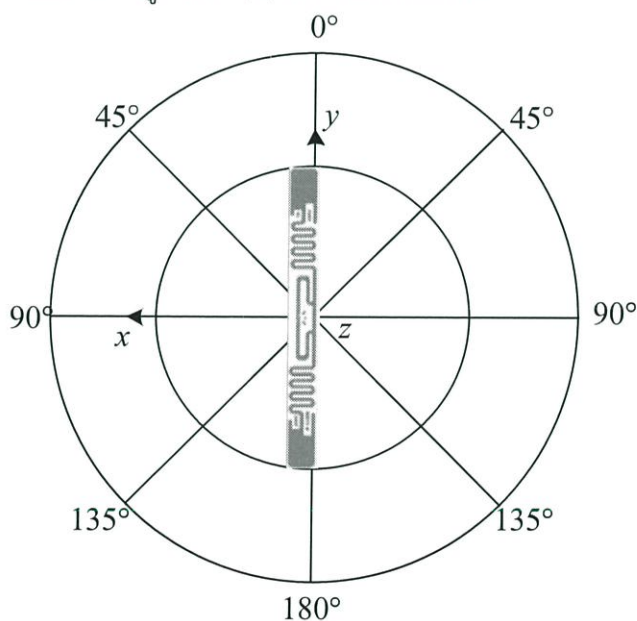
(ก) สายอากาศต้นแบบต่อเข้ากับเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่กว้าง



(ข) สายอากาศ log-periodic ต่อเข้ากับเครื่องอ่านข้อมูลย่านความถี่กว้าง

รูปที่ 5.9 การติดตั้งการทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก

จากรูปที่ 5.9 แสดงการติดตั้งการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่กว้างใช้งานร่วมกับแท็ก โดยสายอากาศทดสอบและแท็กมีระยะห่าง (d) และความสูง (h) ของสายอากาศทดสอบกับแท็กให้เท่ากันที่ความสูงเท่ากับ 1.3 m โดยการทดสอบการประยุกต์ใช้งานนั้นจะทำการเปรียบเทียบระหว่างสายอากาศต้นแบบและสายอากาศ log-periodic เพื่อดูความแตกต่างของระยะที่รับส่งข้อมูลเมื่อแท็กวางแนวต่างกัน ระหว่างสายอากาศที่มีโพลาริซวงกลมกับสายอากาศที่มีโพลาริซเชิงเส้น โดยขั้นแรกจะทำการทดสอบสายอากาศต้นแบบสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่กว้าง กับแท็กที่มีโพลาริซเชิงเส้น ดังรูปที่ 5.9(ก) โดยทำการหาระยะสูงสุดในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กด้วยวิธีการเคลื่อนตำแหน่งของแท็กออกจากสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล จนกระทั่งเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กไม่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ โดยการวางตัวของแท็กจะอ้างอิงโดยใช้แกนที่ตั้งฉากกับระนาบของแท็กแสดงดังรูปที่ 5.10 จากนั้นจึงทำการทดสอบกับสายอากาศ log-periodic สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอเดีย่นความถี่กว้างกับแท็ก ทดสอบเหมือนกับสายอากาศต้นแบบ ดังรูปที่ 5.9(ข) เปรียบเทียบผลที่ได้

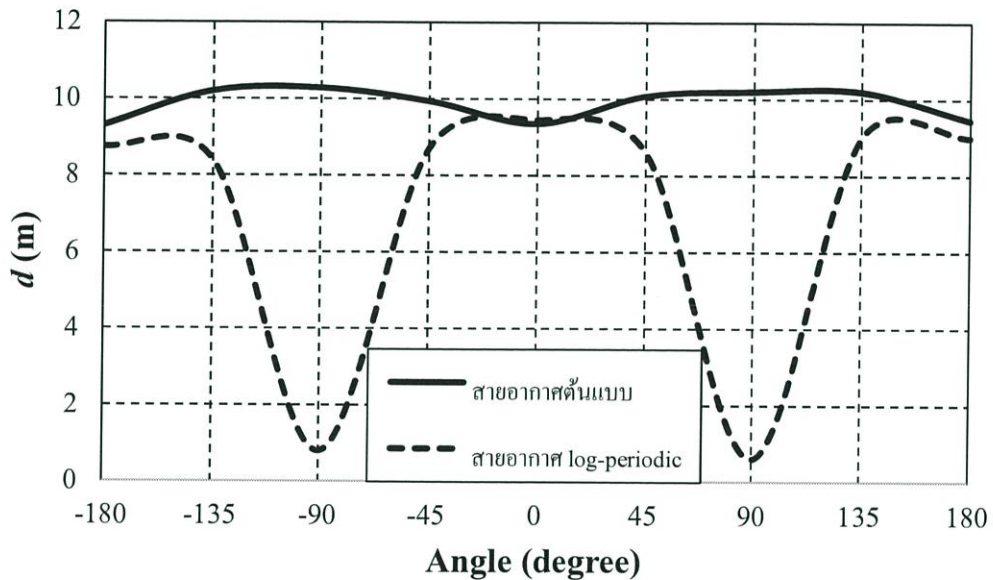


รูปที่ 5.10 การวางตัวของแท็กแนวแกน z

5.3.4 ผลการทดสอบ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศต้นแบบในการติดต่อสื่อสารกับแท็ก ที่ความถี่ 920 – 925 MHz ในการทดสอบจะแบ่งการทดสอบความสามารถในการติดต่อสื่อสารออกเป็น 2 การทดสอบ คือ การทดสอบความสามารถของสายอากาศต้นแบบที่มีโพลาริซวงกลมกับสายอากาศแท็กที่มีโพลาริซเชิงเส้น และการทดสอบสายอากาศมาตรฐาน Log-

periodic ซึ่งมีโพลาริซเซชันเชิงเส้น กับแท่งที่มีโพลาริซเซชันเชิงเส้น ในการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบระยะในการอ่านแท่งของวิธีการทั้งสอง โดยการทดสอบในหัวข้อนี้จะทำการหมุนแท่งที่ละ 45 องศาในแนวตั้งฉากกับการวางตัวของแท่ง เพื่อที่จะหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งในแต่ละมุม เมื่อแท่งวางตัวตั้งฉากกับแกน z ผลที่ได้จากการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่มุมต่างๆ ของสายอากาศต้นแบบและสายอากาศ log-periodic

จากรูปที่ 5.11 ผลทดสอบสายอากาศต้นแบบร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลโดยใช้งานร่วมกับแท่ง พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน z จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อวางในมุมที่แตกต่างกัน โดยที่มุม 90 องศา จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งมากที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 10.28 m และที่มุม -180 องศา มีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 9.3 m โดยแต่ละมุมจะมีระยะที่ใกล้เคียงกัน สาเหตุเนื่องมาจากสายอากาศต้นแบบนั้นเป็นโพลาริซเซชันวงกลม แม้จะเปลี่ยนแปลงลักษณะการวางตัวของแท่งในมุมต่างๆ ก็ยังทำให้รับสัญญาณได้เหมือนเดิม ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมากนัก

และผลทดสอบสายอากาศ log-periodic ที่มีโพลาริซเซชันเส้นตรงร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลโดยใช้งานร่วมกับแท่ง พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่วางตัวตั้งฉากกับแนวแกน z จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อวางในมุมที่แตกต่างกัน โดยที่มุม 0 องศา จะมีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งมากที่สุด คือมีค่าเท่ากับ 9.45 m และที่มุม -90 องศา

และ 90 องศา มีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.8 m และ 0.6 m ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่มุม -90 องศา และ 90 องศา มีระยะทางที่รับส่งข้อมูล น้อยมาก สาเหตุเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการวางตัวของแท็กในมุมต่างๆ จะส่งผลให้การโพลาไรซ์ของแท็กที่เป็นเชิงเส้นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการไม่แมตชิงกันของ โพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศ log-periodic กับสายอากาศแท็ก จึงส่งผลต่อระยะการอ่านข้อมูลของ แท็ก

ดังนั้นเมื่อใช้สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลม จะทำให้ได้ ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่างๆ มีความแตกต่างกันน้อยกว่าใน กรณีของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลที่มีการโพลาไรซ์แบบเชิงเส้น

5.4 การทดสอบความเร็วที่แท็กกับสายอากาศสามารถรับส่งข้อมูลกันได้

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบความเร็วที่แท็กกับสายอากาศสามารถรับส่งข้อมูลกันได้ เพื่อทดสอบว่าเมื่อแท็กมีความเร็วที่ค่าหนึ่ง สายอากาศและเครื่องอ่านข้อมูลก็ยังสื่อสารกันได้

5.4.1 วิธีการทดสอบความเร็ว

วิธีการทดสอบในหัวข้อนี้ จะทำการติดตั้งสายอากาศเข้ากับเครื่องอ่านข้อมูล จากนั้น จะนำแท็กติดกับรถจักรยานยนต์ ระยะห่างระหว่างแท็กกับสายอากาศในการทดสอบคือ 2.5 5 7.5 10 12.5 15 และ 17.5 m ตามลำดับ เพื่อทดสอบความเร็วที่แท็กกับสายอากาศสามารถ ติดต่อสื่อสารได้จะขับรถจักรยานยนต์ด้วยความที่ 10 20 30 40 และ 50 km/h ตามลำดับ หาก สามารถรับส่งข้อมูลกันได้เครื่องอ่านข้อมูลจะแสดงไฟสีส้มออกมา วิธีการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 การทดสอบความเร็ว

5.4.2 ผลทดสอบความเร็ว

ผลการทดสอบความเร็วที่แท็กกับสายอากาศสามารถรับส่งข้อมูลกันได้ แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบความเร็ว

ความเร็ว (km/h)	ระยะห่าง (m)														
	2.5		5		7.5		10		12.5		15		17.5		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
40	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×
50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×

จากตารางแสดงการทดสอบความเร็วที่ระยะทางต่างๆ พบว่าที่ระยะทาง 2.5 5 7.5 10 12.5 และ 15 m เมื่อวัดความเร็วตั้งแต่ 10 – 50 km/h สายอากาศยังสามารถรับส่งข้อมูลกับแท็กได้ แต่เมื่อเพิ่มระยะทางในการทดสอบเป็น 17.5 m พบว่าสายอากาศกับแท็กไม่สามารถรับส่งข้อมูล

ได้ แต่เนื่องจากที่ระยะ 15 m เป็นระยะสูงสุดที่เครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ดังนั้นระยะที่เกิน 15 m การทดสอบความเร็วจึงวัดไม่ได้ ในหัวข้อต่อไปจะทำการวิเคราะห์ความเร็วของแท็ก เพื่อหาเวลาโดยประมาณที่เครื่องอ่านรับส่งข้อมูลกับแท็ก

5.4.3 การวิเคราะห์ความเร็วของแท็ก

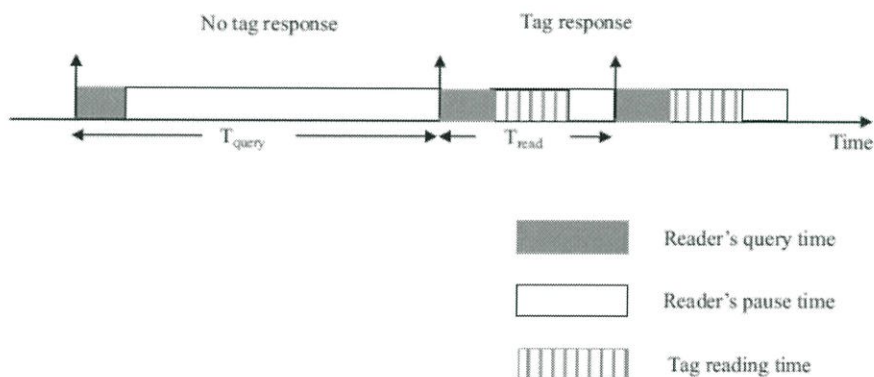
การอ่านข้อมูลของแท็กกับสายอากาศมีค่า effective read range ของแท็กเป็น Δd ความเร็วของแท็กเป็น v และระยะเวลาการอ่าน คือ Δt เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 5.1

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{v} \quad (5.1)$$

ระยะเวลาในการอ่านแท็กของเครื่องอ่านข้อมูลขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องอ่านข้อมูล 2 อย่างด้วยกันคือ

1. ค่า Query cycle ของเครื่องอ่าน

เครื่องอ่านจะส่งคำสั่ง query ไปยังแท็กแบบเป็นคาบ ถ้าไม่มีสัญญาณตอบกลับ เครื่องอ่านจะหยุดชั่วคราว ถ้ามีสัญญาณตอบกลับ เครื่องอ่านจะอ่านแท็กให้สอดคล้องกับรูปแบบโปรโตคอล รูปที่ 5.13 แสดงคาบการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ สำหรับแท็กหนึ่งแท็ก โดยให้ค่า query cycle ของเครื่องอ่านคือ T_{query}



รูปที่ 5.13 คาบการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ [15]

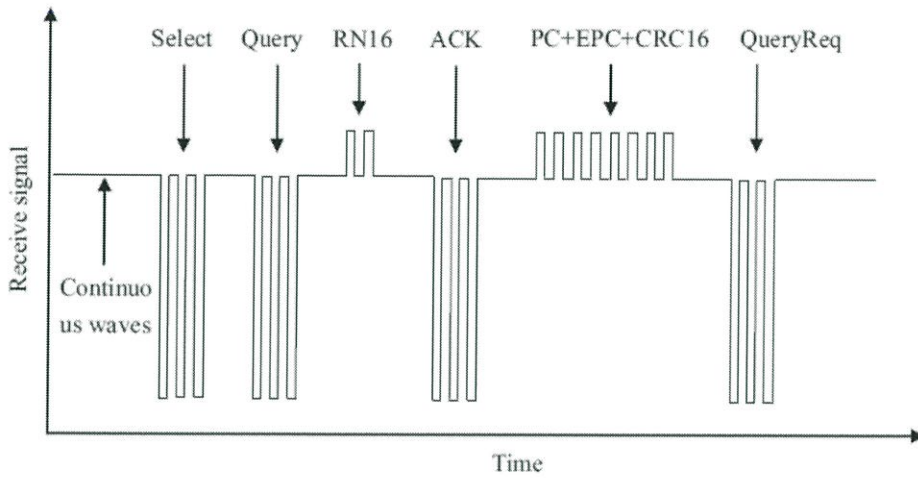
2. อัตราการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูล

เมื่อเครื่องอ่านส่งสัญญาณไปยังแท็ก แท็กจะส่งสัญญาณกลับพร้อมกับข้อมูลแท็ก ตามโปรโตคอลที่ใช้ในการสื่อสาร กระบวนการทั้งหมดจะใช้เวลาคือ T_{read} โดยกระบวนการอ่านของแท็กจะใช้โปรโตคอล EPC Gen2 ดังรูปที่ 5.14 ดังนั้นระยะเวลาในการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูลแสดงได้ดังสมการที่ 5.2

$$\Delta t > T_{query} + T_{read} \quad (5.2)$$

และความเร็วของแท็กที่เคลื่อนที่แสดงได้ดังสมการที่ 5.3

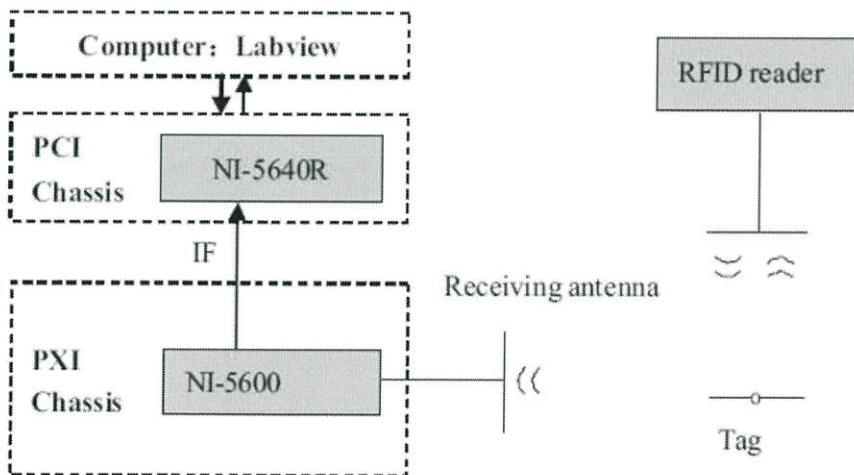
$$v < \frac{\Delta d}{T_{query} + T_{read}} \tag{5.3}$$



รูปที่ 5.14 คาบการอ่านของแท็กอาร์เอฟไอดียูเอชเอฟ [15]

5.4.4 การทดสอบคาบการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลและแท็ก

ในการหาคาบการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลและแท็กจะค่อนข้างยุ่งยากและซับซ้อน ในหัวข้อนี้จึงอ้างอิงงานวิจัย[15] โดยการทดสอบทำการทดสอบโดยบริษัท NI ใช้ระบบการทดสอบอาร์เอฟไอดี NI-100 โครงสร้างของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 5.15

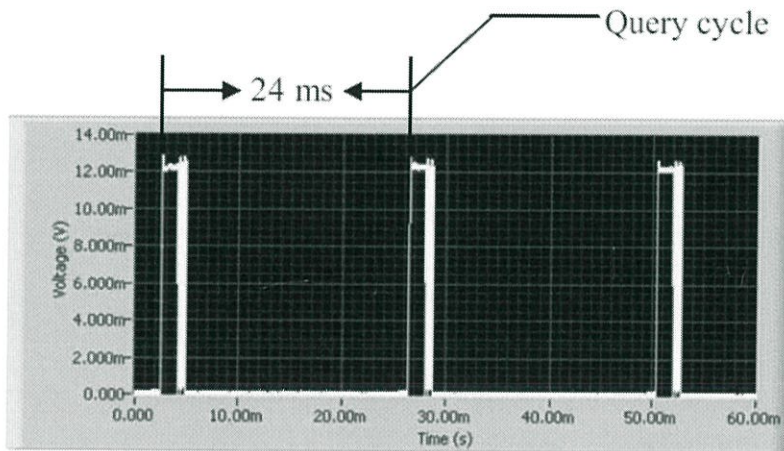


รูปที่ 5.15 วิธีทดสอบคาบการอ่านของระบบอาร์เอฟไอดี [15]

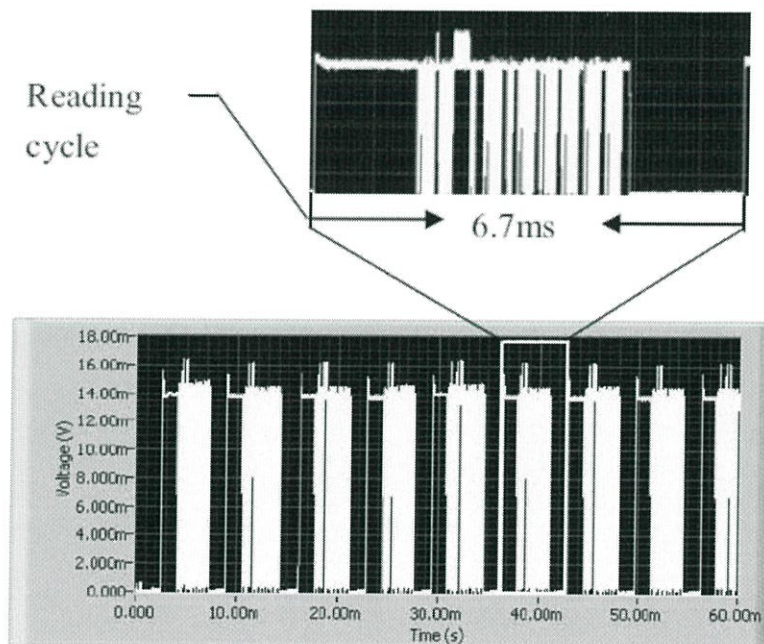
ดังนี้

ระหว่างการอ่าน อัตราการอ่านสูงสุดคือ 640 kbps ต่อหนึ่งแท็ก ผลการทดสอบมีค่า

- ค่า query cycle ของเครื่องอ่านเมื่อไม่มีแท็กคือ 24 ms แสดงดังรูปที่ 5.16
- คาบการอ่านแท็กคือ 6.7 ms แสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.16 ผลการทดสอบค่า query cycle ของเครื่องอ่านข้อมูล [15]

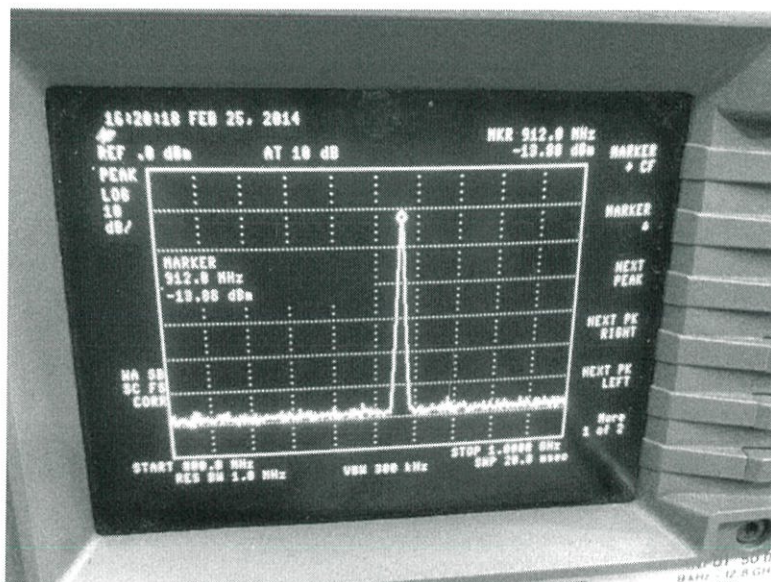


รูปที่ 5.17 ผลการทดสอบคาบการอ่านข้อมูลของเครื่องอ่านต่อหนึ่งแท็ก [15]

จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูล ใช้เวลาทั้งหมด $24\text{ms} + 6.7\text{ms} = 30.7\text{ms}$ ถ้าให้ค่า effective read range มีค่าเท่ากับ 15 m ดังนั้นความเร็วของแท็กที่มากที่สุดมีค่าประมาณ 488 km/h หรือประมาณ 135 m/s

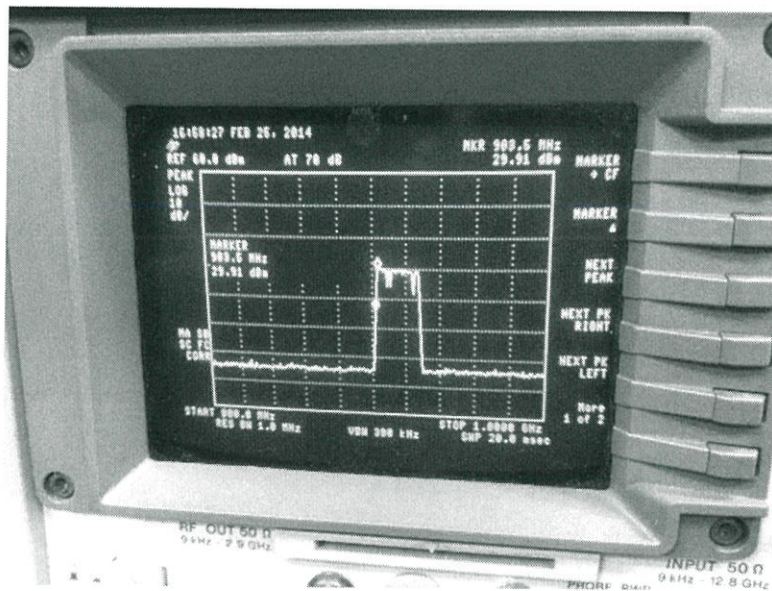
5.5 การวัดความถี่ที่ออกจากเครื่องอ่านข้อมูล

ในหัวข้อนี้เป็นการวัดความถี่ของเครื่องอ่านข้อมูลในย่านความถี่ 902 – 928 MHz เพื่อดูความถี่ที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูลโดยใช้เครื่องสเปกตรัม (Spectrum analyzer) ในการตรวจจับความถี่ที่ออกมา ซึ่งพบว่าการส่งคลื่นความถี่ของเครื่องอ่านข้อมูลใช้เทคนิค Spread Spectrum ในการส่งความถี่ออกมาเป็นแบบ Frequency – Hopping คือ ความถี่จะเปลี่ยนแปลง (กระโดด)ไปมาอย่างต่อเนื่องภายในย่านความถี่ 902 – 928 MHz ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 การเปลี่ยนแปลงความถี่(กระโดด)ที่ออกจากเครื่องอ่านข้อมูล

จากรูปที่ 5.18 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความถี่จากเครื่องอ่านข้อมูลโดยวัดจากเครื่องสเปกตรัม (Spectrum analyzer) จากรูปเป็นการกระโดดของความถี่ที่ 912 MHz สามารถวัดกำลังได้ -13 dB จากนั้นเมื่อเครื่องอ่านข้อมูลเปลี่ยนแปลงความถี่(กระโดด)ไปเรื่อยๆจนครบทั้งย่านความถี่ 902 – 928 MHz ผลที่ได้จะแสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 การเปลี่ยนแปลงความถี่(กระโดด)
ที่ออกจากเครื่องอ่านข้อมูลครบทั้งย่านความถี่ 902 – 928 MHz

จากรูปที่ 5.19 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงความถี่(กระโดด)ที่ออกจากเครื่องอ่านข้อมูล โดยวัดจากเครื่องสเปกตรัม (Spectrum analyzer) จากรูปเป็นการเปลี่ยนแปลงของความถี่ไปเรื่อยๆจนครบทั้งย่านความถี่ 902 – 928 MHz

5.6 สรุป

จากผลการทดสอบสายอากาศเพื่อหาระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก พบว่าสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นมีการโพลาไรซ์วงกลมที่ดี คือมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท็กที่มีการโพลาไรซ์แบบต่างๆได้ใกล้เคียงกัน และสายอากาศที่พัฒนาขึ้นมา นั้นสามารถปรับปรุงความสามารถในการติดต่อสื่อสารเมื่อแท็กมีโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในปฏิญญานี้นี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีและแท็กได้

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง (860 – 960 MHz) และมีโพลาไรซ์แบบวงกลมที่ความถี่ 920 MHz – 925 MHz โดยลักษณะโครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดี เป็นสายอากาศแบบแบนระนาบสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัดมุมและเพิ่มชั้นสายอากาศเพื่อเพิ่มแบนด์วิดท์ มีจุดบ่อนโดยเจาะทะลุผ่านระนาบกราวด์และส่วนที่พับของแพทช์เชื่อมต่อเข้ากับข้อเชื่อมต่อ N – Type โดยจุดประสงค์หลักในการสร้างสายอากาศ เพื่อให้เป็นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งทำให้มีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมในย่านความถี่ประเทศไทย (920 – 925 MHz) มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบทิศทางเดียว และสามารถครอบคลุมย่านความถี่สากล (860 -960 MHz)

ในบทนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ในหัวข้อที่ 6.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ซึ่งประกอบด้วยผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง ผลที่ได้จากการจำลองแบบสายอากาศ ผลที่ได้จากการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ และผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานสายอากาศกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีกับแท็ก ส่วนในหัวข้อ 6.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อไป

6.1 สรุปเนื้อหาของโครงการ

โครงการฉบับนี้จะเริ่มด้วยการอธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัยวัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศ ทฤษฎีและหลักการของระบบอาร์เอฟไอดี จากนั้นอธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป และทำการศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยเริ่มจากศึกษาโครงสร้างแผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสของสายอากาศสำหรับแพร่กระจายคลื่นที่ทุกด้านจะมีขนาดเท่ากันตามสูตรในการคำนวณทางทฤษฎีในบทที่ 3 และศึกษาโครงสร้างของสายอากาศเมื่อทำการตัดมุม และทำการพับสายอากาศ เพื่อให้ได้คุณลักษณะของสายอากาศที่ครอบคลุมย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดยกระบวนการหาพารามิเตอร์นี้จะใช้โปรแกรม CST Microwave Studio เพื่อจำลองแบบของสายอากาศ แล้ววิเคราะห์คุณลักษณะในด้านต่างๆ พบว่าสายอากาศมี

คุณลักษณะครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานและมีโพลาริซเป็นแบบวงกลมในย่านความถี่ประเทศไทย จากนั้นสร้างสายอากาศต้นแบบเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลอง ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบได้แก่ $|S_{11}|$ อัตราขยาย อัตราส่วนแกนและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ พบว่าผลการเปรียบเทียบของ $|S_{11}|$ อัตราขยาย อัตราส่วนแกนและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน แต่ก็มี ความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการสร้างสายอากาศต้นแบบ มีขนาดที่คลาดเคลื่อนกับพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองไว้และสภาพแวดล้อมที่อาจจะส่งต่อการทดสอบจริง ซึ่งในการจำลองไม่มีสภาพแวดล้อมดังกล่าวมาเกี่ยวข้องและจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดสรุปได้ว่าโครงสร้างของสายอากาศเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการบ่งบอกคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งจากการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในกรณีต่างๆสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล RFID ย่านความถี่สูงยิ่งตามตาราง 6.1

ตารางที่ 6.1 สรุปขนาดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดี

ย่านความถี่กว้าง

พารามิเตอร์ของสายอากาศ	ขนาดทางไฟฟ้า	ขนาดทางกายภาพ (mm)
ความกว้างแผ่นแพร่กระจายคลื่น (W_p)	0.424λ	140
ความหนาของแผ่นอลูมิเนียม (h)	0.030λ	10
ช่องว่างอากาศ (h_a)	0.045λ	15
ความกว้างระนาบกราวด์ (W_g)	0.606λ	200
ตำแหน่งพอร์ต (P_x)	0.045λ	15
ตำแหน่งพอร์ต (P_y)	0.061λ	20
ความสูงของแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate : d)	0.030λ	10

ความยาวของแผ่นกำแพงแนวตั้ง (Vertical wall plate : c)	0.288λ	95
ความยาวของแผ่นกลาง (Middle Plate : L_S)	0.182λ	60
ความกว้างของแผ่นกลาง (Middle Plate : W_S)	0.045λ	15
พารามิเตอร์ m ที่ใช้ในการตัดมุม	0.030λ	10
พารามิเตอร์ n ที่ใช้ในการตัดมุมแผ่นกำแพงแนวตั้ง	0.030λ	10

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้สร้างสายอากาศต้นแบบและทำการทดสอบสมรรถนะของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลการจำลอง พบว่าสายอากาศมีคุณลักษณะครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน (860 – 960 MHz) มีอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ในย่านความถี่ประเทศไทย (920 – 925 MHz) มี $|S_{11}|$ ในย่านความถี่ตั้งแต่ 834 – 970 MHz มีย่านกว้างความถี่เท่ากับ 136 MHz ที่มีค่าต่ำกว่า -10 dB ซึ่ง $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกัน

สุดท้ายคือ นำสายอากาศที่ได้ทำการทดสอบสมรรถนะเบื้องต้นแล้วไปประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีโดยทำงานร่วมกับแท็ก ซึ่งผลที่ได้จากการนำสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็ก พบว่าเครื่องอ่านสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในปริณิญาฉบับนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กได้จริง

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากการสร้างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่กว้าง พบว่าผลที่ได้จากการสร้างจะมีผลคลาดเคลื่อนไปจากผลที่ได้จากการจำลองเนื่องมาจากความละเอียดของค่าพารามิเตอร์ในการสร้างสายอากาศ

6.2.1 วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น

สำหรับอุปสรรคและปัญหาที่เกิดขึ้นในการใช้โครงสร้างปรับปรุงสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้าง คือการจำลองสำหรับหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งจำเป็นจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จำนวนค่อนข้างมาก และในการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์บางตัวจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะของสายอากาศ ได้แก่ $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยาย ดังนั้นในการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์จะต้องตรวจสอบค่า $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ให้ครอบคลุมในย่านความถี่ที่ต้องการ

6.2.2 แนวทางพัฒนา

สำหรับปัญหานี้นักวิจัยได้ทำการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่กว้างเพื่อลดข้อจำกัดของความถี่ที่ใช้ต่างกันในแต่ละประเทศ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีทั่วโลก

บรรณานุกรม

- [1] ดนัย ต.รุ่งเรือง ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ และ ศุภกิต แก้วดวงตา. “การออกแบบสายอากาศ”
เครื่องอ่าน ข้อมูลสำหรับระบบ RFID ในย่านความถี่ต่ำ เพื่อการจัดการฟาร์มและการลงทะเบียน
สัตว์.” <http://www.ecti-thailand.org/emagazine/views/106>
- [2] วัชรกร หนูทอง, อนุกุล น้อยไม้. “RFID หนึ่งในเทคโนโลยีที่น่าจับตามอง.”
http://motfgds.mot.go.th/joomla1512/doc/RFID_technology_final2.pdf
- [3] ศราวุธ ชัยมูล “วิศวกรรมสายอากาศ.” พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ศูนย์ผลิตตำราเรียนมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2556.
- [4] Kin-lu Wong. *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. New York, John Wiley &
Sons, Inc. 2002.
- [5] C Y Chiu, K M Shum, C H Chan, and K M Luk, "Bandwidth enhancement technique for
quarter-wave patch antennas." *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.*,
Vol. 2, Issue 1, pp.130-132, 2003.
- [6] P. Salonen, M. Keskilammi, and M. Kivikoski, "New slot configurations for dual-band
planar inverted-F antenna," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 28, pp 293-298,
Mar.2001.
- [7] S. Pinhas and S. Shtrikman, "Comparison between computed and measured
bandwidth of quarter-wave microstrip radiators," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*,
vol.36, pp. 1615-1616, Nov. 1988.
- [8] T.Huynh and K.F. Lee, "Single-layer single-patch wideband microstrip antenna." *Electronics letters* Vol.31, No.16, pp 1310-1312, 3rd Aug 1995.
- [9] Y.X. Guo, K.M. Luk, and K. F. Lee, "U-slot circular patch antennas with L-probe
feeding," *Electron. Lett*, vol 35, pp.1694-1695, Sept. 1999.
- [10] Constantine A. Balanis. *Antenna theory analysis and design*. 3rd. Hoboken Cliffs, NJ.
: John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- [11] Y.-L. Lu, H.-R.Cui, X.-W. Sun, M. Xu, and Y.-Z. Yin. “A simple UHF RFID circularly
polarized reader antenna design.” *Electrical Design of Advanced Packaging and
Systems Symposium (EDAPS)*, pp. 1-2 Dec 2011.

- [12] Z.-N. Chen, X. Qing and, H.-L. Chung. "A Universal UHF RFID Reader Antenna." *IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES*, vol. 57, no. 5, pp. 1275–1282.
- [13] RFID Reader รุ่น Motorola RD11320, [Online]. Available:
<http://www.motorola.com>
- [14] Alien Tag รุ่น ALN-9640,[Online]. Available:
<http://www.alientechnology.com/docs/products/Alien-Technology-Higgs-3-ALN-9640-Squiggle.pdf>
- [15] M L Fei, Q C Fang, and T X Fen," Velocity analysis for UHF RFID vehicle license plate." *International Conference on Optoelectronics and Image Processing*, pp.722-725, 2010.

ภาคผนวก ก

ความสามารถของสายอากาศ สรุปรุ้ได้ดังตาราง

ตารางแสดงความสามารถของสายอากาศ

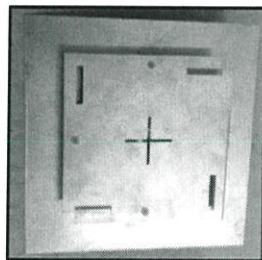
คุณสมบัติของสายอากาศ ที่ต้องการ	สายอากาศตัวที่ 1*		สายอากาศตัวที่ 2**	
	ผลการจำลอง	ผลการ ทดสอบ	ผลการจำลอง	ผลการ ทดสอบ
1. แบนด์วิดธ์ครอบคลุมความถี่ ตั้งแต่ 860 – 960 MHz	✓	✓	✓	✓
2. โพลาริซั้วงกลมตั้งแต่ความถี่ 920 – 925 MHz	x	x	✓	✓
3. อัตราขยาย 5 dBi	✓	✓	✓	✓
4. แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น ทิศทางเดียว	✓	✓	✓	✓

✓ สามารถทำได้

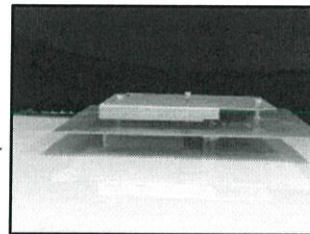
x ไม่สามารถทำได้

หมายเหตุ

* สายอากาศที่ทำการเจาะร่องบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



ก. ด้านหน้า

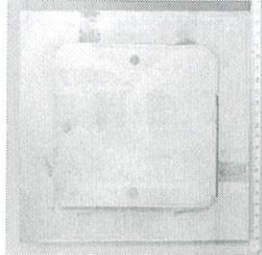


ข. ด้านข้าง

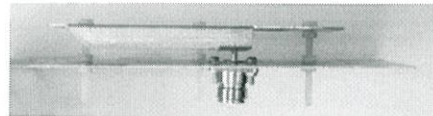
รูปที่ 1 สายอากาศเจาะร่องบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น

** สายอากาศที่ทำการตัดมุมบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น และตัดมุมที่แผ่นกำแพงแนวตั้ง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2

4



ก. ด้านหน้า



ข. ด้านข้าง

รูปที่ 2 สายอากาศตัดมุมบนแผ่นตัวแพร่กระจายคลื่น
และตัดมุมที่แผ่นกำแพงแนวตั้ง

ภาคผนวก ข

$|S_{11}|$ ของผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave studio และผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Network analyzer แสดงได้ดังตารางที่ 1 ข ตารางที่ 1 ข แสดง $|S_{11}|$ ของผลการจำลอง และผลการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ

ความถี่ (MHz)	$ S_{11} $ ของผลจำลอง (dB)	$ S_{11} $ ของผลทดสอบ (dB)
800	-2.52624	-3.379
801	-2.57069	-3.369
802	-2.61656	-3.498
803	2.66388	-3.462
804	-2.71272	-3.612
805	-2.76312	-3.626
806	-2.81513	-3.747
807	-2.86878	-3.817
808	-2.92412	-3.81
809	-2.98119	-3.912
810	-3.04001	-3.874
811	-3.10063	-4.063
812	-3.16308	-4.065
813	-3.2274	-4.123
814	-3.29363	-4.264
815	-3.3618	-4.346
816	-3.43197	-4.04
817	-3.50417	-4.472
818	-3.57846	-4.557
819	-3.65488	-4.637
820	-3.73351	-4.733
821	-3.81439	-4.81
822	-3.89759	-4.856
823	-3.9832	-4.977
824	-4.07128	-5.085
825	-4.16193	-5.156
826	-4.25523	-5.254

ตารางที่ 1ข แสดง $|S_{11}|$ ของผลการจำลอง และผลการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ (ต่อ)

ความถี่ (MHz)	$ S_{11} $ ของผลจำลอง (dB)	$ S_{11} $ ของผลทดสอบ (dB)
827	-4.35128	-5.329
828	-4.45018	-5.44
829	-4.55204	-5.559
830	-4.65698	-5.645
831	-4.76511	-5.751
832	-4.87657	-5.864
833	-4.99149	-5.932
834	-5.11001	-6
835	-5.23226	-6.162
836	-5.3584	-6.218
837	-5.48859	-6.372
838	-5.62298	-6.511
839	-5.76173	-6.604
840	-5.90502	-6.755
841	-6.05302	-6.923
842	-6.20589	-7.002
843	-6.36382	-7.13
844	-6.52699	-7.221
845	-6.69558	-7.434
846	-6.86977	-7.553
847	-7.04973	-7.719
848	-7.23566	-7.876
849	-7.42773	-7.985
850	-7.62611	-8.162
851	-7.83096	-8.32
852	-8.04244	-8.48
853	-8.2607	-8.674
854	-8.48586	-8.824
855	-8.71801	-9.031
856	-8.95725	-9.207
857	-9.2036	-9.406

ตารางที่ 1ข แสดง $|S_{11}|$ ของผลการจำลอง และผลการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ (ต่อ)

ความถี่ (MHz)	$ S_{11} $ ของผลจำลอง (dB)	$ S_{11} $ ของผลทดสอบ (dB)
858	-9.45707	-9.611
859	-9.7176	-9.833
860	-9.98507	-10.041
861	-10.2593	-10.267
862	-10.5399	-10.522
863	-10.8265	-10.747
864	-11.1185	-10.99
865	-11.4152	-11.251
866	-11.7156	-11.509
867	-12.0185	-11.799
868	-12.3224	-12.067
869	-12.6256	-12.387
870	-12.9258	-12.701
871	-13.2207	-13.013
872	-13.5072	-13.366
873	-13.7823	-13.712
874	-14.0422	-14.034
875	-14.2834	-14.423
876	-14.5019	-14.849
877	-14.694	-15.228
878	-14.8563	-15.697
879	-14.9859	-16.108
880	-15.0807	-16.612
881	-15.1395	-17.112
882	-15.1624	-17.681
883	-15.1503	-18.219
884	-15.105	-18.818
885	-15.0296	-19.503
886	-14.9273	-20.194
887	-14.802	-20.951
888	-14.6576	-21.713

ตารางที่ 1x แสดง $|S_{11}|$ ของผลการจำลอง และผลการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ (ต่อ)

ความถี่ (MHz)	$ S_{11} $ ของผลจำลอง (dB)	$ S_{11} $ ของผลทดสอบ (dB)
889	-14.4981	-22.577
890	-14.3272	-23.515
891	-14.1485	-24.558
892	-13.9649	-25.66
893	-13.7794	-26.864
894	-13.5942	-28.253
895	-13.4114	-29.797
896	-13.2327	-31.544
897	-13.0597	-33.492
898	-12.8933	-35.545
899	-12.7347	-37.615
900	-12.5847	-38.976
901	-12.4438	-38.67
902	-12.3126	-37.28
903	-12.1915	-35.699
904	-12.0809	-34.258
905	-11.981	-33.04
906	-11.8921	-32.041
907	-11.8143	-31.26
908	-11.7478	-30.711
909	-11.6926	-30.121
910	-11.649	-29.69
911	-11.6169	-29.354
912	-11.5964	-29.152
913	-11.5876	-28.988
914	-11.5906	-28.854
915	-11.6053	-28.816
916	-11.6318	-28.803
917	-11.6702	-28.754
918	-11.7203	-28.765
919	-11.7822	-28.716

ตารางที่ 1x แสดง $|S_{11}|$ ของผลการจำลอง และผลการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ (ต่อ)

ความถี่ (MHz)	$ S_{11} $ ของผลจำลอง (dB)	$ S_{11} $ ของผลทดสอบ (dB)
920	-11.8559	-28.632
921	-11.9595	-28.647
922	-12.0378	-28.547
923	-12.1458	-28.365
924	-12.2648	-27.957
925	-12.3945	-27.566
926	-12.5342	-27.05
927	-12.6835	-26.46
928	-12.8415	-25.557
929	-13.0072	-25.205
930	-13.1792	-24.478
931	-13.3561	-23.739
932	-13.5358	-23.025
933	-13.7162	-22.26
934	-13.8943	-21.6
935	-14.0671	-20.919
936	-14.2309	-20.236
937	-14.3816	-19.671
938	-14.5149	-19.004
939	-14.6262	-19.49
940	-14.7109	-17.921
941	-14.7649	-17.392
942	-14.7846	-16.902
943	-14.7672	-16.3
944	-14.7111	-15.93
945	-14.6161	-15.432
946	-14.4829	-15.004
947	-14.3139	-14.631
948	-14.1122	-14.17
949	-13.8817	-13.051
950	-13.6266	-13.436

ตารางที่ 1x แสดง $|S_{11}|$ ของผลการจำลอง และผลการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ (ต่อ)

ความถี่ (MHz)	$ S_{11} $ ของผลจำลอง (dB)	$ S_{11} $ ของผลทดสอบ (dB)
951	-13.3516	-13.044
952	-13.0609	-12.674
953	-12.7587	-12.325
954	-12.4486	-11.997
955	-12.1339	-11.702
956	-11.8176	-11.366
957	-11.5018	-11.111
958	-11.1265	-10.849
959	-10.8797	-10.594
960	-10.5762	-10.327
961	-10.2792	-10.065
962	-9.98927	-9.842
963	-9.7071	-9.625
964	-9.43304	-9.414
965	-9.16733	-9.218
966	-8.9101	-9.016
967	-8.66141	-8.822
968	-8.42122	-8.638
969	-8.18945	-8.478
970	-7.96597	-8.285
971	-7.75059	-8.145
972	-7.50256	-7.961
973	-7.34335	-7.814
974	-7.15102	-7.611
975	-6.96588	-7.476
976	-6.78766	-7.415
977	-6.6161	-7.241
978	-6.45091	-7.099
979	-6.29183	-6.975
980	-6.13857	-6.825
981	-5.99087	-6.726

ตารางที่ 1 ข แสดง $|S_{11}|$ ของผลการจำลอง และผลการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ (ต่อ)

ความถี่ (MHz)	$ S_{11} $ ของผลจำลอง (dB)	$ S_{11} $ ของผลทดสอบ (dB)
982	-5.84844	-6.636
983	-5.71103	-6.522
984	-5.57838	-6.4
985	-5.45023	-6.248
986	-5.32635	-6.195
987	-5.20652	-6.116
988	-5.0905	-6.02
989	-4.9781	-5.9
990	-4.86913	-5.796
991	-4.7634	-5.697
992	-4.66076	-5.637
993	-4.56107	-5.592
994	-4.46418	-5.482
995	-4.37	-5.482
996	-4.27842	-5.406
997	-4.18936	-5.282
998	-4.10276	-5.179
999	-4.01855	-5.13
1000	-3.93671	-4.997

ภาคผนวก ค

อัตราส่วนแกนของผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio และผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Network analyzer แสดงได้ดังตารางที่ 1ค

ตารางที่ 1ค อัตราส่วนแกนของสายอากาศ

อัตราส่วนแกนที่ช่วงความถี่ 920 MHz				
มุม (องศา)	$ S_{11} $ ผลการจำลอง (dB)	$ S_{11} $ ผลทดสอบ (E_{co}) (dB)	$ S_{11} $ ของผลทดสอบ (E_{cross}) (dB)	$20 \log \left[\frac{ E_{co} + E_{cross} }{ E_{co} - E_{cross} } \right]$ (dB)
-180	2.49	-57.61	-44.74	0.90
-175	2.68	-62.38	-44.85	0.31
-170	2.95	-62.56	-45.09	0.31
-165	3.41	-58.15	-45.23	0.89
-160	4.20	-54.22	-45.1	2.14
-155	5.57	-52.14	-45.2	3.56
-150	7.90	-50.04	-45.04	5.69
-145	12.09	-48.38	-44.83	8.24
-140	21.13	-47.71	-44.97	10.30
-135	31.47	-47.03	-44.98	12.70
-130	26.88	-46.43	-44.91	15.23
-125	36.19	-46.55	-45.93	22.94
-120	19.12	-46.86	-46.21	22.53
-115	13.17	-47.32	-47.01	28.95
-110	9.29	-48.15	-47.92	31.54
-105	6.12	-49.42	-49.24	33.67
-100	3.09	-51.24	-49.95	16.63
-95	0.21	-53.21	-50.21	9.57
-90	4.25	-52.87	-49.6	8.88
-85	10.22	-49.98	-48.57	15.87
-80	25.96	-46.71	-47.74	18.56
-75	15.52	-43.86	-45.88	12.82
-70	9.15	-41.36	-44.66	8.81

อัตราส่วนแอมป์ที่ช่วงความถี่ 920 MHz (ต่อ)				
มุม (องศา)	$ S_{11} $ ผลการ จำลอง (dB)	$ S_{11} $ ผลทดสอบ (E_{co}) (dB)	$ S_{11} $ ของ ผลทดสอบ (E_{cross}) (dB)	$20\log \left[\frac{ E_{co} + E_{cross} }{ E_{co} - E_{cross} } \right]$ (dB)
-65	6.09	-39.37	-43.71	6.71
-60	4.28	-37.6	-42.73	5.51
-55	3.17	-36.23	-42.11	4.59
-50	2.51	-34.71	-41.34	3.84
-45	2.19	-33.6	-40.77	3.37
-40	2.09	-32.33	-40.28	2.81
-35	2.13	-31.35	-39.73	2.54
-30	2.24	-30.44	-39.57	2.13
-25	2.38	-29.92	-39.47	1.93
-20	2.51	-29.32	-39.36	1.73
-15	2.64	-28.85	-39.26	1.59
-10	2.76	-28.56	-39.25	1.49
-5	2.86	-28.42	-39.55	1.34
0	2.94	-28.24	-39.81	1.21
5	3.00	-28.11	-40.46	1.01
10	3.05	-28.09	-41.09	0.87
15	3.09	-28.23	-41.83	0.76
20	3.11	-28.43	-42.88	0.62
25	3.13	-28.81	-42.98	0.67
30	3.15	-30.03	-45.36	0.51
35	3.18	-30.61	-46.11	0.49
40	3.24	-31.48	-48.21	0.37
45	3.35	-32.61	-50.15	0.31
50	3.54	-33.81	-51.2	0.32
55	3.84	-35.27	-51.87	0.38
60	4.32	-36.92	-51.72	0.58
65	5.05	-39.28	-52.03	0.92
70	6.13	-41.21	-51.12	1.78

อัตราส่วนแอมป์ที่ช่วงความถี่ 920 MHz (ต่อ)				
มุม (องศา)	$ S_{11} $ ผลการ จำลอง (dB)	$ S_{11} $ ผลทดสอบ (E_{co}) (dB)	$ S_{11} $ ของ ผลทดสอบ (E_{cross}) (dB)	$20\log\left[\frac{ E_{co} + E_{cross} }{ E_{co} - E_{cross} }\right]$ (dB)
75	7.71	-43.37	-50.94	3.07
80	10.06	-46.52	-50.41	7.53
85	13.71	-50.41	-49.45	19.17
90	20.46	-53.37	-48.94	6.56
95	40.00	-54.39	-48.01	4.07
100	20.47	-57.92	-47.35	1.53
105	16.77	-52.53	-46.08	4.00
110	16.58	-51.47	-45.4	4.38
115	19.81	-50.95	-44.64	4.14
120	29.45	-50.88	-43.86	3.50
125	25.31	-49.89	-43.29	3.86
130	12.02	-49.11	-42.84	4.18
135	6.19	-49.01	-42.5	3.95
140	3.29	-46.34	-42.4	7.44
145	1.74	-47.25	-42.54	6.11
150	1.14	-49.71	-42.61	3.43
155	1.27	-49.82	-43.02	3.68
160	1.59	-50.47	-43.44	3.49
165	1.89	-50.86	-43.8	3.46
170	2.12	-52.61	-44.35	2.61
175	2.31	-54.81	-44.59	1.66
180	2.45	-28.24	-39.81	0.90

อัตราส่วนแอมป์ในช่วงความถี่ 922.5 MHz				
มุม (องศา)	$ S_{11} $ ผลการ จำลอง (dB)	$ S_{11} $ ผลทดสอบ (E_{co}) (dB)	$ S_{11} $ ของ ผลทดสอบ (E_{cross}) (dB)	$20\log\left[\frac{ E_{co} + E_{cross} }{ E_{co} - E_{cross} }\right]$ (dB)
-180	2.21	-55.23	-43.71	0.90
-175	2.26	-58.6	-43.97	0.31
-170	2.40	-63.24	-44.22	0.31
-165	2.76	-58.59	-44.33	0.89
-160	3.50	-55.18	-44.5	2.14
-155	4.88	-52.79	-44.63	3.56
-150	7.29	-50.45	-44.62	5.69
-145	11.61	-48.85	-44.52	8.24
-140	20.88	-47.78	-44.7	10.30
-135	31.21	-47.15	-44.73	12.70
-130	27.10	-46.77	-45.05	15.23
-125	36.07	-46.69	-45.51	22.94
-120	19.47	-46.77	-45.29	22.53
-115	13.60	-47.37	-46.72	28.95
-110	9.77	-47.92	-46.67	31.54
-105	6.63	-49.39	-48.32	33.67
-100	3.64	-51.37	-49.47	16.63
-95	0.57	-53.28	-49.78	9.57
-90	3.74	-52.98	-49.05	8.88
-85	9.73	-49.97	-48.03	15.87
-80	26.03	-46.82	-46.84	18.56
-75	14.66	-43.89	-45.35	12.82
-70	8.35	-41.45	-44.13	8.81
-65	5.28	-39.42	-43.07	6.71
-60	3.43	-37.67	-42.24	5.51
-55	2.28	-36.19	-41.43	4.59
-50	1.63	-34.74	-44.76	3.84
-45	1.42	-33.65	-40.1	3.37

อัตราส่วนแอมป์ที่ช่วงความถี่ 922.5 MHz (ต่อ)				
มุม (องศา)	$ S_{11} $ ผลการ จำลอง (dB)	$ S_{11} $ ผลทดสอบ (E_{co}) (dB)	$ S_{11} $ ของ ผลทดสอบ (E_{cross}) (dB)	$20\log \left[\frac{ E_{co} + E_{cross} }{ E_{co} - E_{cross} } \right]$ (dB)
-40	1.50	-32.39	-39.74	2.81
-35	1.70	-31.4	-39.12	2.54
-30	1.93	-30.51	-38.87	2.13
-25	2.15	-29.79	-38.61	1.93
-20	2.34	-29.31	-38.43	1.73
-15	2.50	-28.82	-38.44	1.59
-10	2.64	-28.54	-38.48	1.49
-5	2.75	-28.45	-38.75	1.34
0	2.83	-28.19	-38.91	1.21
5	2.89	-28.06	-39.75	1.01
10	2.93	-28.07	-41.31	0.87
15	2.95	-28.21	-41.05	0.76
20	2.95	-28.36	-41.32	0.62
25	2.94	-28.72	-43.16	0.67
30	2.92	-29.97	-44.43	0.51
35	2.91	-30.59	-45.97	0.49
40	2.92	-31.42	-47.67	0.37
45	2.98	-32.45	-48.83	0.31
50	3.11	-33.7	-50.79	0.32
55	3.38	-35.11	-51.91	0.38
60	3.83	-36.83	-52.41	0.58
65	4.56	-39.07	-52.14	0.92
70	5.67	-41.14	-51.7	1.78
75	7.31	-43.19	-51.36	3.07
80	9.75	-46.24	-50.62	7.53
85	13.61	-49.79	-49.88	19.17
90	21.13	-53.49	-49.02	6.56
95	31.41	-56.12	-48.43	4.07

อัตราส่วนแคนที่ช่วงความถี่ 922.5 MHz (ต่อ)				
มุม (องศา)	$ S_{11} $ ผลการ จำลอง (dB)	$ S_{11} $ ผลทดสอบ (E_{co}) (dB)	$ S_{11} $ ของ ผลทดสอบ (E_{cross}) (dB)	$20\log\left[\frac{ E_{co} + E_{cross} }{ E_{co} - E_{cross} }\right]$ (dB)
100	18.24	-59.6	-47.31	1.53
105	14.71	-53.17	-46.33	4.00
110	14.08	-51.64	-45.43	4.38
115	15.87	-50.85	-44.51	4.14
120	20.18	-50.7	-43.79	3.50
125	19.19	-49.63	-43.2	3.86
130	10.98	-48.75	-42.69	4.18
135	6.05	-48.56	-42.33	3.95
140	3.53	-46.62	-41.95	7.44
145	2.28	-46.53	-41.92	6.11
150	1.82	-48.5	-42	3.43
155	1.79	-48.56	-42.34	3.68
160	1.91	-49.35	-42.57	3.49
165	2.03	-49.46	-42.81	3.46
170	2.11	-51.03	-43.33	2.61
175	2.17	-52.33	-43.53	1.66
180	2.20	-28.19	-38.91	0.90

อัตราส่วนแอมป์ในช่วงความถี่ 925 MHz				
มุม (องศา)	$ S_{11} $ ผลการ จำลอง (dB)	$ S_{11} $ ผลทดสอบ (E_{co}) (dB)	$ S_{11} $ ของ ผลทดสอบ (E_{cross}) (dB)	$20\log\left[\frac{ E_{co} + E_{cross} }{ E_{co} - E_{cross} }\right]$ (dB)
-180	2.08	-53.15	-42.82	1.61
-175	1.96	-55.51	-43.15	1.01
-170	1.91	-60.61	-43.41	0.33
-165	2.11	-58.73	-43.67	0.54
-160	2.79	-55.43	-43.88	1.22
-155	4.21	-53.14	-44.15	2.20
-150	6.71	-50.53	-44.21	4.13
-145	11.16	-49.26	-44.34	5.80
-140	20.65	-48.19	-44.46	7.85
-135	31.29	-47.25	-44.5	10.27
-130	27.67	-46.87	-45.87	18.81
-125	35.08	-46.82	-45.43	15.99
-120	19.67	-46.65	-46.17	25.16
-115	13.96	-47.3	-46.77	24.30
-110	10.20	-48.07	-46.65	15.81
-105	7.12	-49.25	-48.54	21.77
-100	4.17	-51.23	-48.89	11.60
-95	1.21	-52.79	-49.15	8.04
-90	3.32	-52.71	-48.47	6.88
-85	9.23	-50.15	-47.61	10.92
-80	25.57	-46.85	-46.22	22.80
-75	14.06	-44.05	-44.92	20.01
-70	7.73	-41.63	-43.34	14.23
-65	4.62	-39.53	-42.51	9.62
-60	2.70	-37.71	-41.65	7.44
-55	1.45	-36.33	-40.79	6.51
-50	0.74	-34.84	-40.18	5.23
-45	0.77	-33.72	-39.54	4.66

อัตราส่วนแอมป์ที่ช่วงความถี่ 925 MHz (ต่อ)				
มุม (องศา)	$ S_{11} $ ผลการ จำลอง (dB)	$ S_{11} $ ผลทดสอบ (E_{co}) (dB)	$ S_{11} $ ของ ผลทดสอบ (E_{cross}) (dB)	$20\log\left[\frac{ E_{co} + E_{cross} }{ E_{co} - E_{cross} }\right]$ (dB)
-40	1.16	-32.51	-38.98	3.98
-35	1.54	-31.49	-38.47	3.53
-30	1.86	-30.6	-38.21	3.04
-25	2.13	-29.84	-38.05	2.64
-20	2.34	-29.41	-37.87	2.49
-15	2.52	-28.93	-37.74	2.30
-10	2.66	-28.66	-38.73	1.71
-5	2.77	-28.39	-37.98	1.92
0	2.84	-28.21	-38.25	1.73
5	2.89	-28.1	-38.83	1.47
15	2.91	-28.22	-40.23	1.10
20	2.89	-28.38	-41.22	0.90
25	2.84	-28.74	-42.22	0.78
30	2.78	-29.92	-43.54	0.76
35	2.71	-30.51	-45.29	0.58
40	2.66	-31.36	-46.94	0.48
45	2.65	-32.41	-47.91	0.49
50	2.72	-33.66	-50.12	0.39
55	2.93	-34.98	-51.98	0.35
60	3.36	-36.51	-52.89	0.40
65	4.10	-38.96	-52.5	0.77
70	5.24	-40.95	-51.77	1.44
75	6.94	-43.05	-51.4	2.56
80	9.48	-45.66	-50.55	5.85
85	13.55	-49.61	-50.15	24.14
90	21.90	-53.23	-49.37	7.59
95	27.19	-57.94	-48.65	2.06
100	16.50	-61.67	-47.58	0.68

อัตราส่วนแอมป์ในช่วงความถี่ 925 MHz (ต่อ)				
มุม (องศา)	$ S_{11} $ ผลการ จำลอง (dB)	$ S_{11} $ ผลทดสอบ (E_{co}) (dB)	$ S_{11} $ ของ ผลทดสอบ (E_{cross}) (dB)	$20\log\left[\frac{ E_{co} + E_{cross} }{ E_{co} - E_{cross} }\right]$ (dB)
105	13.06	-53.96	-46.59	3.22
110	12.12	-51.87	-45.63	4.21
115	13.12	-51.12	-44.58	3.92
120	15.71	-50.96	-43.86	3.43
125	15.57	-49.24	-42.96	4.17
130	10.12	-48.43	-42.52	4.56
135	6.05	-47.78	-42.98	5.98
140	3.92	-45.86	-41.71	7.04
145	2.90	-45.92	-41.57	6.69
150	2.49	-47.8	-41.74	4.40
155	2.37	-47.55	-41.54	4.45
160	2.35	-48.41	-41.72	3.78
165	2.32	-48.11	-42.85	5.34
170	2.28	-49.45	-42.37	3.45
175	2.19	-50.85	-42.62	2.63
180	2.10	-28.21	-38.25	1.61

ภาคผนวก ง

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของผลจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microsoft Studio และผลการทดสอบจากการวัดโดยเครื่อง Network analyzer ที่ความถี่ 860 MHz, 910 MHz และ 960 MHz แสดงได้ดังตาราง

วิธีการหาแบบรูปแพร่กระจายคลื่น

1. ช่องที่ 1 คือค่ามุมที่จะหมุนทีละ 5 องศา
2. ช่องที่ 2 คือ ผลจำลองกำลังแบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่มุม 0 องศา (normalize)
3. ช่องที่ 3 คือ ผลทดสอบกำลังที่ได้จากเครื่อง Network analyzer โดยเราจะนำผลทดสอบที่ได้มา normalize โดยนำค่าที่มากที่สุดจากการทดสอบที่ได้จากช่องที่ 3 มาลบออกจากผลทดสอบในช่องที่ 3 จะได้ผลทดสอบ normalize ในช่องที่ 4
4. นำผลช่องที่ 2 และ ช่องที่ 4 มาพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบแบบรูปแพร่กระจายคลื่นระหว่างผลการจำลองและผลทดสอบ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio และผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Network analyzer แสดงได้ดังตารางที่ 1ง

ตารางที่ 1ง แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 860 MHz ในระนาบ xz				
มุม (องศา)	ผลจำลอง (dB)	ผลทดสอบ (dB)	ผลทดสอบสูงสุด (dB)	ผล normalize (dB) (ผลทดสอบ-ผลทดสอบสูงสุด)
0	-0.0012	-23.88	-23.68	-0.2
5	-0.07522	-23.68	-23.68	0
10	-0.2619	-23.71	-23.68	-0.03
15	-0.559	-23.94	-23.68	-0.26
20	-0.9629	-24.28	-23.68	-0.6
25	-1.47	-24.74	-23.68	-1.06
30	-2.074	-25.28	-23.68	-1.6
35	-2.772	-25.91	-23.68	-2.23
40	-3.558	-26.61	-23.68	-2.93
45	-4.427	-27.41	-23.68	-3.73
50	-5.372	-28.3	-23.68	-4.62
55	-6.386	-29.19	-23.68	-5.51
60	-7.462	-30.21	-23.68	-6.53
65	-8.59	-31.27	-23.68	-7.59
70	-9.761	-32.54	-23.68	-8.86
75	-10.97	-34.12	-23.68	-10.44
80	-12.21	-35.2	-23.68	-11.52
85	-13.48	-36.41	-23.68	-12.73
90	-14.78	-37.95	-23.68	-14.27
95	-16.14	-39.55	-23.68	-15.87
100	-17.58	-41.23	-23.68	-17.55
105	-19.13	-43.1	-23.68	-19.42
110	-20.81	-45.84	-23.68	-22.16
115	-22.57	-47.18	-23.68	-23.5
120	-24.16	-47.68	-23.68	-24
125	-24.95	-47.68	-23.68	-24
130	-24.4	-47.18	-23.68	-23.5
135	-22.88	-45.95	-23.68	-22.27
140	-21.1	-43.58	-23.68	-19.9

แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 860 MHz ในระนาบ xz (ต่อ)				
มุม (องศา)	ผลจำลอง (dB)	ผลทดสอบ (dB)	ผลทดสอบสูงสุด (dB)	ผล normalize (dB) (ผลทดสอบ-ผลทดสอบสูงสุด)
145	-19.44	-41.68	-23.68	-18
150	-17.99	-39.68	-23.68	-16
155	-16.76	-38.18	-23.68	-14.5
160	-15.76	-37.18	-23.68	-13.5
165	-14.98	-36.68	-23.68	-13
170	-14.41	-36.27	-23.68	-12.59
175	-14.05	-36.18	-23.68	-12.5
180	-13.91	-36.18	-23.68	-12.5
185	-13.97	-36.18	-23.68	-12.5
190	-14.24	-36.68	-23.68	-13
195	-14.72	-37.34	-23.68	-13.66
200	-15.41	-38.16	-23.68	-14.48
205	-16.3	-39.18	-23.68	-15.5
210	-17.4	-41.26	-23.68	-17.58
215	-18.74	-43.68	-23.68	-20
220	-20.31	-46.54	-23.68	-22.86
225	-22.07	-55.17	-23.68	-31.49
230	-23.83	-66.34	-23.68	-42.66
235	-24.93	-55.76	-23.68	-32.08
240	-24.62	-52.26	-23.68	-28.58
245	-23.11	-47.85	-23.68	-24.17
250	-21.21	-44.68	-23.68	-21
255	-19.34	-42.68	-23.68	-19
260	-17.63	-41.71	-23.68	-18.03
265	-16.06	-40.41	-23.68	-16.73
270	-14.59	-38.92	-23.68	-15.24
275	-13.21	-37.95	-23.68	-14.27
280	-11.89	-36.77	-23.68	-13.09
285	-10.63	-35.68	-23.68	-12
290	-9.406	-34.29	-23.68	-10.61

แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 860 MHz ในระนาบ xz (ต่อ)				
มุม (องศา)	ผลจำลอง (dB)	ผลทดสอบ (dB)	ผลทดสอบสูงสุด (dB)	ผล normalize (dB) (ผลทดสอบ-ผลทดสอบสูงสุด)
295	-8.234	-33.07	-23.68	-9.39
300	-7.115	-31.77	-23.68	-8.09
305	-6.055	-30.97	-23.68	-7.29
310	-5.061	-29.96	-23.68	-6.28
315	-4.14	-29.31	-23.68	-5.63
320	-3.298	-28.16	-23.68	-4.48
325	-2.541	-27.3	-23.68	-3.62
330	-1.873	-26.48	-23.68	-2.8
335	-1.3	-25.78	-23.68	-2.1
340	-0.8264	-25.28	-23.68	-1.6
345	-0.456	-24.64	-23.68	-0.96
350	-0.193	-24.51	-23.68	-0.83
355	-0.04067	-24.12	-23.68	-0.44
360	-0.0012	-23.94	-23.68	-0.26

แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 910 MHz ในระนาบ xz				
มุม (องศา)	ผลจำลอง (dB)	ผลทดสอบ (dB)	ผลทดสอบสูงสุด (dB)	ผล normalize (dB) (ผลทดสอบ-ผลทดสอบสูงสุด)
0	-0.00176	-22.94	-22.94	0
5	-0.09436	-23.12	-22.94	-0.18
10	-0.3265	-23.25	-22.94	-0.31
15	-0.6965	-23.75	-22.94	-0.81
20	-1.202	-24.37	-22.94	-1.43
25	-1.841	-25.04	-22.94	-2.1
30	-2.609	-25.77	-22.94	-2.83
35	-3.506	-26.74	-22.94	-3.8
40	-4.528	-27.83	-22.94	-4.89
45	-5.676	-28.94	-22.94	-6
50	-6.946	-30.32	-22.94	-7.38
55	-8.337	-31.83	-22.94	-8.89
60	-9.841	-33.1	-22.94	-10.16
65	-11.44	-34.57	-22.94	-11.63
70	-13.11	-36.34	-22.94	-13.4
75	-14.79	-37.36	-22.94	-14.42
80	-16.38	-38.94	-22.94	-16
85	-17.78	-40.33	-22.94	-17.39
90	-18.9	-41.79	-22.94	-18.85
95	-19.74	-42.64	-22.94	-19.7
100	-20.38	-43.89	-22.94	-20.95
105	-20.96	-44.41	-22.94	-21.47
110	-21.6	-44.94	-22.94	-22
115	-22.34	-44.94	-22.94	-22
120	-23.14	-44.44	-22.94	-21.5
125	-23.76	-43.94	-22.94	-21
130	-23.74	-42.94	-22.94	-20
135	-22.82	-40.94	-22.94	-18
140	-21.27	-39.94	-22.94	-17
145	-19.55	-39.44	-22.94	-16.5

แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 910 MHz ในระนาบ xz (ต่อ)				
มุม (องศา)	ผลจำลอง (dB)	ผลทดสอบ (dB)	ผลทดสอบสูงสุด (dB)	ผล normalize (dB) (ผลทดสอบ-ผลทดสอบสูงสุด)
150	-17.94	-38.94	-22.94	-16
155	-16.54	-38.94	-22.94	-16
160	-15.41	-38.94	-22.94	-16
165	-14.54	-38.94	-22.94	-16
175	-13.59	-38.81	-22.94	-15.87
180	-13.53	-38.81	-22.94	-15.87
185	-13.74	-38.87	-22.94	-15.93
190	-14.23	-39.24	-22.94	-16.3
195	-15.02	-39.76	-22.94	-16.82
200	-16.12	-40.87	-22.94	-17.93
205	-17.58	-42.01	-22.94	-19.07
210	-19.45	-43.75	-22.94	-20.81
220	-24.89	-48	-22.94	-25.06
225	-28.48	-50.44	-22.94	-27.5
230	-30.67	-52.41	-22.94	-29.47
235	-28.94	-55.27	-22.94	-32.33
240	-26.27	-56.44	-22.94	-33.5
245	-24.17	-57.34	-22.94	-34.4
250	-22.6	-58.49	-22.94	-35.55
255	-21.37	-57.32	-22.94	-34.38
260	-20.31	-55.71	-22.94	-32.77
265	-19.24	-50.97	-22.94	-28.03
270	-18.06	-45.81	-22.94	-22.87
275	-16.73	-43.24	-22.94	-20.3
280	-15.25	-40.12	-22.94	-17.18
285	-13.69	-37.87	-22.94	-14.93
290	-12.1	-35.85	-22.94	-12.91
295	-10.55	-34.73	-22.94	-11.79
300	-9.064	-32.84	-22.94	-9.9
305	-7.667	-31.52	-22.94	-8.58

แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 910 MHz ในระนาบ xz (ต่อ)				
มุม (องศา)	ผลจำลอง (dB)	ผลทดสอบ (dB)	ผลทดสอบสูงสุด (dB)	ผล normalize (dB) (ผลทดสอบ-ผลทดสอบสูงสุด)
310	-6.371	-30.44	-22.94	-7.5
315	-5.184	-28.98	-22.94	-6.04
320	-4.11	-27.92	-22.94	-4.98
325	-3.153	-26.77	-22.94	-3.83
330	-2.316	-25.85	-22.94	-2.91
335	-1.602	-25.02	-22.94	-2.08
340	-1.015	-24.33	-22.94	-1.39
345	-0.5581	-23.9	-22.94	-0.96
355	-0.04893	-22.99	-22.94	-0.05
360	-0.00176	-22.94	-22.94	0

แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 960 MHz ในระนาบ xz				
มุม (องศา)	ผลจำลอง (dB)	ผลทดสอบ (dB)	ผลทดสอบสูงสุด (dB)	ผล normalize (dB) (ผลทดสอบ-ผลทดสอบสูงสุด)
5	-0.1549	-27.86	-27.86	0
10	-0.4409	-28.36	-27.86	-0.5
15	-0.871	-28.86	-27.86	-1
20	-1.442	-29.86	-27.86	-2
25	-2.149	-30.86	-27.86	-3
30	-2.987	-31.86	-27.86	-4
35	-3.954	-32.86	-27.86	-5
40	-5.044	-33.86	-27.86	-6
45	-6.251	-34.56	-27.86	-6.7
50	-7.566	-34.86	-27.86	-7
55	-8.973	-35.86	-27.86	-8
60	-10.44	-36.86	-27.86	-9
65	-11.93	-37.86	-27.86	-10
70	-13.35	-38.86	-27.86	-11
75	-14.63	-39.86	-27.86	-12
80	-15.67	-40.86	-27.86	-13
85	-16.44	-41.86	-27.86	-14
90	-16.97	-42.86	-27.86	-15
95	-17.36	-43.86	-27.86	-16
100	-17.69	-44.86	-27.86	-17
105	-18.06	-45.86	-27.86	-18
110	-18.52	-47.86	-27.86	-20
115	-19.08	-50.86	-27.86	-23
120	-19.72	-52.86	-27.86	-25
125	-20.31	-54.86	-27.86	-27
130	-20.64	-55.86	-27.86	-28
135	-20.45	-49.86	-27.86	-22
140	-19.67	-46.86	-27.86	-19
145	-18.47	-44.86	-27.86	-17
150	-17.13	-43.36	-27.86	-15.5

แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 960 MHz ในระนาบ xz (ต่อ)				
มุม (องศา)	ผลจำลอง (dB)	ผลทดสอบ (dB)	ผลทดสอบสูงสุด (dB)	ผล normalize (dB) (ผลทดสอบ-ผลทดสอบสูงสุด)
155	-15.85	-42.86	-27.86	-15
160	-14.74	-42.36	-27.86	-14.5
165	-13.85	-41.86	-27.86	-14
170	-13.22	-41.36	-27.86	-13.5
175	-12.85	-40.86	-27.86	-13
180	-12.85	-40.86	-27.86	-13
185	-12.96	-40.86	-27.86	-13
190	-13.44	-41.36	-27.86	-13.5
195	-14.22	-41.86	-27.86	-14
200	-15.3	-42.36	-27.86	-14.5
205	-16.68	-43.36	-27.86	-15.5
210	-18.37	-44.86	-27.86	-17
215	-20.35	-45.86	-27.86	-18
220	-22.51	-46.86	-27.86	-19
230	-25.35	-44.86	-27.86	-17
235	-24.8	-43.36	-27.86	-15.5
240	-23.47	-41.84	-27.86	-13.98
245	-22.05	-41.27	-27.86	-13.41
250	-20.77	-40.84	-27.86	-12.98
255	-19.63	-40.54	-27.86	-12.68
260	-18.58	-40.33	-27.86	-12.47
265	-17.55	-40.43	-27.86	-12.57
270	-16.46	-40.93	-27.86	-13.07
275	-15.29	-41.36	-27.86	-13.5
280	-14.02	-41.85	-27.86	-13.99
285	-12.68	-42.01	-27.86	-14.15
290	-11.3	-41.07	-27.86	-13.21
295	-9.917	-39.72	-27.86	-11.86
300	-8.565	-38.08	-27.86	-10.22
305	-7.268	-36.32	-27.86	-8.46

แบบรูปแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 960 MHz ในระนาบ xz (ต่อ)				
มุม (องศา)	ผลจำลอง (dB)	ผลทดสอบ (dB)	ผลทดสอบสูงสุด (dB)	ผล normalize (dB) (ผลทดสอบ-ผลทดสอบสูงสุด)
310	-6.048	-34.75	-27.86	-6.89
315	-4.916	-33.24	-27.86	-5.38
320	-3.884	-32.12	-27.86	-4.26
325	-2.96	-30.94	-27.86	-3.08
330	-2.15	-30.06	-27.86	-2.2
335	-1.46	-29.12	-27.86	-1.26
340	-0.8975	-28.65	-27.86	-0.79
345	-0.4666	-28.38	-27.86	-0.52
350	-0.1731	-27.89	-27.86	-0.03
355	-0.02149	-27.86	-27.86	0
360	-0.01494	-27.86	-27.86	0

ภาคผนวก จ

อัตราขยายของผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม CST Microwave Studio และผลการทดสอบที่ได้จากเครื่อง Network analyzer แสดงได้ดังตารางที่ 1จ

ตารางที่ 1จ แสดงอัตราขยายของผลการจำลอง และผลการทดสอบที่ความถี่ต่างๆ

อัตราขยาย			
ความถี่ (MHz)	$ S_{11} $ ของผลจำลอง (dB)	$ S_{11} $ ของผลทดสอบ (dB)	$G = \frac{1}{2} \left(20 \log \frac{4\pi R}{\lambda} + 10 \log \frac{P_2}{P_1} \right)$ (dBi)
860	8.138	-26.663	5.026474742
880	8.592	-25.994	6.246474742
900	8.602	-24.367	7.536474742
920	8.656	-23.43	8.436474742
940	8.89	-25.598	9.406474742
960	8.689	-29.445	9.116474742

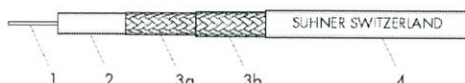
ภาคผนวก ฉ.



SUHNER® COAXIAL CABLE TYPE: RG 223 /U

Item: 22510072

Cable design



1	Inner conductor	Silver-plated copper wire	∅ 0.88 mm
2	Dielectric	Solid polyethylene (PE)	∅ 2.95 mm
3	Outer conductor	a) Silver-plated copper braid	96% coverage ∅ 3.60 mm
		b) Silver-plated copper braid	94% coverage ∅ 4.20 mm
4	Jacket	Non-migratory PVC	bk (RAL 9005) ∅ 5.40 mm
	Print on jacket	SUHNER SWITZERLAND RG 223 /U	50 Ohm

Electrical data

Typ. operating frequency	(GHz)	≤ 5
Impedance	(Ω)	50 ± 2
Capacitance	(pF/m)	100.7
Relative signal propagation	(%)	66.3
Signal delay	(ns/m)	5.03
Phase stability	vs temperature	f /GHz/m -
	vs bending	f /GHz -
Insulation resistance	(MΩm)	> 10 ⁸
Test voltage	50 Hz / 1 min.	(kV _{rms}) 5
Max. operating voltage	at sea level	(kV _{rms}) 2.5
Typ. DC resistance	inner conductor	(Ω/km) 27.7
	outer conductor	(Ω/km) 6.7
Typ. screening effectiveness	1 ... 300 MHz	(dB) > 85

General data

Cable specification	cable design and materials in accordance with	MIL-C-17/84
Temperature range	operating	(°C) -40...+70
	installation	(°C) -20...+60
Flame propagation	IEC 332-1	n/a
Halogen content	IEC 754	n/a
Typ. Weight		(kg/100m) 5.5
Min. bending radius	for bending once	(mm) 30
	for repeated bendings	(mm) 55
	for flexible applications	(mm) -

Suitable connectors

Cable group U9/U10
For details refer to the "SUHNER[®] coaxial connector catalogue" or contact your nearest HUBER+SUHNER representative

Document No.: 01.03.0500
Issue No.: 3
Supersedes: 0500/2

Uncontrolled copy
Issued/Checked/Released:
Last amended:

27.09.1997/486-thm
Modification of attenuation graph

1/2

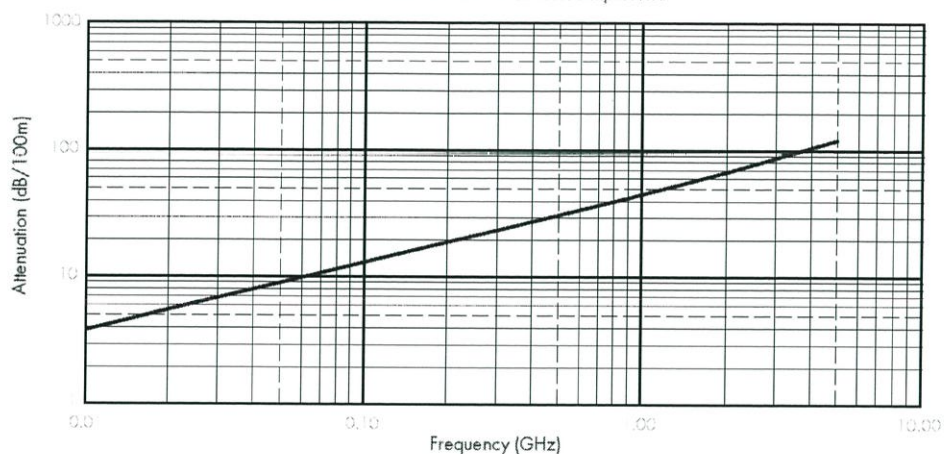
SUHNER® COAXIAL CABLE

TYPE: RG 223 /U

Item: 22510072

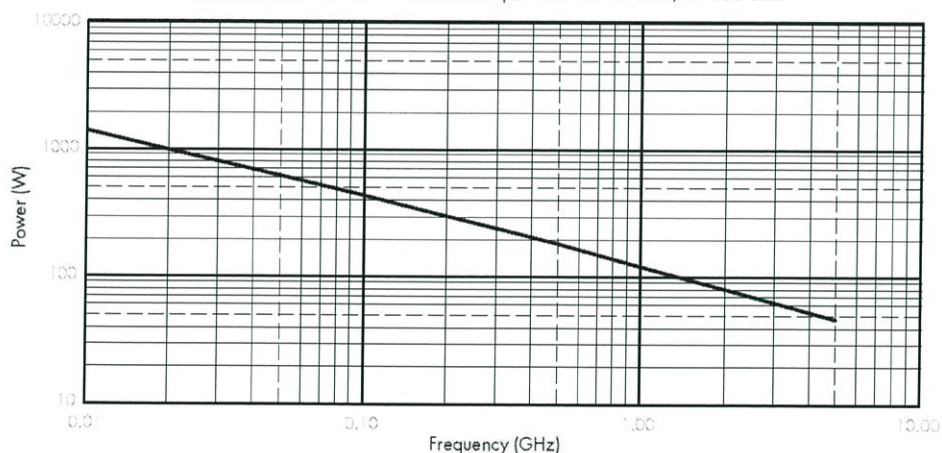
Cable attenuation

Nominal values @ +25 °C ambient temperature



C.W. power handling capability

Maximum values @ +40 °C ambient temperature and sea level, no solar load

**WAIVER!**

While the information contained in this folder has been carefully compiled to the best of our present knowledge, it is not intended as representation or warranty of any kind on our part regarding the fitness of the products concerned for any particular use of purpose and neither shall any statement contained herein be construed as a recommendation to infringe any industrial property rights or as a license to use any such rights. The fitness of each product for any particular purpose must be checked beforehand with our specialists.

**HUBER+SUHNER**

HUBER+SUHNER AG
Coaxial Cable Division
CH-9100 Herisau, Switzerland
Tel.: +41 (0)71 353 41 11
Fax: +41 (0)71 353 45 90
e-mail: sales.hfk@hubersuhner.com
www.hubersuhner.com

Document No.: 01.03.0500
Issue No.: 3
Supersedes: 0500/2

Uncontrolled copy
Issued/Checked/Released:
Last amended:

27.09.1997/486-rlm
Modification of attenuation graph

2/2