

สายอากาศโพลาริซวงกลมทิศทางเดียวโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม
เหนือแผ่นสะท้อนสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ยูเอชเอฟ
CIRCULARLY POLARIZED UNIDIRECTIONAL ANTENNA USING PROBE-EXCITED
CIRCULAR RING ABOVE REFLECTOR FOR UHF-RFID SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-010-184

สายอากาศโพลาไรซ์วงกลมทิศทางเดียวโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม
เหนือแผ่นสะท้อนสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ยูเอชเอฟ

CIRCULARLY POLARIZED UNIDIRECTIONAL ANTENNA USING PROBE-EXCITED
CIRCULAR RING ABOVE REFLECTOR FOR UHF-RFID SYSTEM



รังสิณี สุขมาตย์

RUNGSINEE SUKKAMAT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-010-184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CIRCULARLY POLARIZED UNIDIRECTIONAL ANTENNA USING PROBE-EXCITED
CIRCULAR RING ABOVE REFLECTOR FOR UHF-RFID SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-EN-M-010-184

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศโพลาริซวงกลมทิศทางเดียวโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม
เหนือแผ่นสะท้อนสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ
Thesis Title Circularly Polarized Unidirectional Antenna Using Probe-Excited
Circular Ring above Reflector for UHF-RFID System
นักศึกษา นางสาวรังสีณี สุขมาตย์
รหัสประจำตัว 55611918
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-010-184

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.สถาพร พรหมวงศ์		
ผศ.ดร.สุทธิชัย นพนาดีพงษ์		
ศ.ดร.ประยุทธ์ อัครเอกพาลี		
ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล		
รศ.ดร.ชวรงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์		

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558 เวลา 11.00-13.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
คณะบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สายอากาศโพลาริซวงกลมทิศทางเดียวโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมเหนือแผ่นสะท้อนสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ยูเอชเอฟ

นักศึกษา

นางสาวรังสีณี สุขมาตย์

รหัสนักศึกษา

55611918

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโทรคมนาคม

พ.ศ.

2558

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศโพลาริซวงกลมที่มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมเหนือแผ่นสะท้อนสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่ยูเอชเอฟ ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอเพื่อประยุกต์ใช้งานในระบบอาร์เอฟไอดีที่ย่านความถี่ 920 - 925 MHz โครงสร้างของสายอากาศจะทำการป้อนโพรบกระตุ้นไฟฟ้าเชิงเส้นให้กับวงแหวนวงกลมที่มีแผ่นระนาบตั้งฉากภายใน เพื่อให้เกิดการโพลาริซวงกลม และแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัสวางในระนาบ xy เพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว สายอากาศที่นำเสนอมีคุณลักษณะ $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ตั้งแต่ความถี่ 884-1000 MHz คิดเป็น 12.31% มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดที่น้อยกว่า 3 dB ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 900-1000 MHz คิดเป็น 10.53% อัตราขยายของสายอากาศมีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.05 dBic มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz และบนระนาบ yz เท่ากับ 66.5° และ 67.0° ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Circularly Polarized Unidirectional Antenna Using Probe-Excited Circular Ring above Reflector for UHF-RFID System
Student	Miss Rungsinee Sukkamat
Student ID.	55611918
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis proposes a circularly polarized unidirectional antenna using a probe excited circular ring with inserted perpendicular slabs above the square reflector for UHF-RFID system. The proposed antenna is designed for UHF-RFID reader following national standard. The frequency range of 920 - 925 MHz with 922.5 MHz of center frequency. The measured $|S_{11}| \leq -10$ dB covers 884 - 1000 MHz or 12.31% bandwidth, and 3 dB AR bandwidth of 900 - 1000 MHz or 10.53% bandwidth. The maximum gain is 8.05 dBic. The half-power beamwidths in xz - and yz - planes are 66.5 and 67.0 degrees, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์และการสนับสนุนของ รศ. ดร. ชวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้มอบโอกาส ความเมตตา การใส่ใจดูแลและให้คำปรึกษาต่าง ๆ รวมทั้งให้คำแนะนำความรู้ด้านวิชาการ ทักษะการใช้อุปกรณ์ ทดสอบสายอากาศ แนวคิดและกระบวนการทางงานวิจัย จนกระทั่งชี้แนะแนวทางและข้อคิดต่าง ๆ สำหรับการดำเนินชีวิตอย่างดียิ่งเสมอให้กับลูกศิษย์คนนี้ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ และขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านตลอดช่วงการศึกษาที่ผ่านมาอันซึ่งได้ประสิทธิ์ประสาทองค์วิชาความรู้ต่าง ๆ ให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายที่คอยให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ มีคำแนะนำ ดี ๆ มอบให้ตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา และคอยให้กำลังใจอย่างดีเสมอมา โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณพีณัฐเศรษฐ์ หมวดทองอ่อน คุณพีสิทธิ์ชัย เด่นตรี ผู้ให้คำชี้แนะแนวคิดต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย เป็นผู้ให้คำปรึกษาทางด้านเทคนิค และคอยแนะนำเรื่องความเป็นระเบียบ ความถูกต้องในการเขียน เล่มวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณที่อานนท์ สกลคณาพงษ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านต่อ ข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณมารดาที่ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย ดูแลความเป็นอยู่ทุกอย่าง คอยสนับสนุนส่งเสริมให้โอกาสทางการศึกษา และเป็นให้กำลังใจที่สำคัญ ที่สุดในชีวิตของข้าพเจ้า จนทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คุณค่า และองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่บิดา มารดาซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง รวมทั้งครูอาจารย์และผู้มีพระคุณที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

รังสิณี สุขมาตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูปภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย.....	4
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ความเป็นมาของระบบอาร์เอฟไอดี.....	6
2.3 วิวัฒนาการของระบบอาร์เอฟไอดี.....	7
2.4 ส่วนประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี.....	7
2.4.1 แท็ก (Tag/Transponders).....	8
2.4.1.1 การแบ่งประเภทของแท็กตามวิธีการส่งพลังงานไปยังแท็ก.....	9
2.4.1.2 การแบ่งประเภทของแท็กตามความสามารถของระบบอาร์เอฟไอดี.....	12
2.4.1.3 การแบ่งประเภทของแท็กตามย่านความถี่ใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดี.....	13
2.4.2 เครื่องอ่านข้อมูล (Reader).....	14
2.5 หลักการรับและส่งข้อมูลระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูลในระบบอาร์เอฟไอดี.....	15
2.6 คุณสมบัติของระบบอาร์เอฟไอดี.....	17
2.6.1 สามารถอ่านและเขียนโดยไม่ต้องสัมผัส.....	17
2.6.2 สามารถอ่านและเขียนข้อมูลได้สะดวก.....	17
2.6.3 สามารถสื่อสารได้ทุกทิศทาง.....	17
2.6.4 แท็กสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้.....	17
2.6.5 ระบบอาร์เอฟไอดีมีแท็กหลากหลายแบบเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัด IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.6 มีความสามารถในการทะลุทะลวงของสัญญาณ.....	18
2.6.7 สามารถสื่อสารได้ระยะไกล.....	18
2.6.8 มีความปลอดภัยสูง.....	18
2.6.9 การอ่านและการเขียนข้อมูลสามารถทำพร้อมกันหลาย ๆ แท้ก ในเวลาเดียวกันได้.....	18
2.6.10 สามารถอ่านและเขียนข้อมูลขณะวัตถุกำลังเคลื่อนที่ได้.....	18
2.7 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ.....	18
2.7.1 ท่อนำคลื่นวงกลม (Circular waveguide).....	19
2.7.1.1 หลักการทำงานของท่อนำคลื่นวงกลม.....	19
2.7.1.2 รูปแบบของคลื่นที่ส่งในท่อนำคลื่นวงกลม.....	20
2.7.1.3 การใช้งานท่อนำคลื่นวงกลม.....	22
2.7.2 ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์ (Ridge waveguide).....	22
2.7.3 โพรบไฟฟ้า.....	24
2.7.4 บริเวณต่างๆ ของสนามจากสายอากาศ.....	25
2.7.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern).....	25
2.7.5.1 แบบรูปการแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก แบบชี้ทิศทาง และแบบทิศทางรอบทิศทาง	26
2.7.5.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern).....	27
2.7.5.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe).....	27
2.7.6 แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ (Antenna Bandwidth).....	29
2.7.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss).....	30
2.7.8 อัตราขยาย (Gain).....	30
2.7.9 การโพลาไรซ์ (Polarization).....	32
2.7.9.1 โพลาไรซ์เชิงเส้น.....	33
2.7.9.2 โพลาไรซ์วงกลม.....	33
2.7.9.3 โพลาไรซ์วงรี.....	35
2.7.10 เทคโนโลยีของระบบอาร์เอฟไอทีที่ใช้หลักการสื่อสาร แบบการเชื่อมต่อที่ระยะสนามระยะไกล.....	37
2.7.10.1 หลักการทำงาน.....	37
2.7.10.2 การติดต่อสื่อสารของระบบอาร์เอฟไอทีในสนามระยะไกล.....	38
2.7.10.2.1 การติดต่อสื่อสารจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก.....	38
2.7.10.2.2 การติดต่อสื่อสารจากแท็กกลับมายัง เครื่องอ่านข้อมูล.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.10.3 ค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผลไอโซทรอปิก และค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผล.....	41
2.7.10.4 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน.....	41
2.8 งานวิจัยที่มีมาก่อน.....	43
2.9 บทสรุป.....	46
บทที่ 3 การออกแบบและการจำลองสายอากาศ.....	47
3.1 บทนำ.....	47
3.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ.....	47
3.2.1 การกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น.....	49
3.2.2 การปรับปรุงโพลาริซชันของสายอากาศ.....	54
3.2.3 การปรับปรุงเมตซิงของสายอากาศ.....	62
3.2.4 การปรับปรุงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว.....	64
3.3 ผลการจำลองสายอากาศต้นแบบ.....	67
3.3.1 ผลการจำลอง $ S_{11} $	67
3.3.2 ผลการจำลองอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศต้นแบบ.....	68
3.3.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ.....	68
3.3.4 ผลการจำลองอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง.....	70
3.3.5 ผลการจำลองลำคลื่นย่อยด้านข้าง.....	70
3.3.6 ผลการจำลองความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกน.....	71
3.3.7 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	72
3.3.8 ผลการจำลองทิศทางสนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบ.....	72
3.4 บทสรุป.....	75
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	76
4.1 บทนำ.....	76
4.2 สายอากาศต้นแบบ.....	76
4.3 การสร้างและการทดสอบสายอากาศ.....	77
4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ.....	79
4.4.1 ผลการจำลอง $ S_{11} $	80
4.4.2 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับ ความถี่ของสายอากาศ.....	80
4.4.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.4 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ.....	83
4.5 บทสรุป.....	84
บทที่ 5 การทดสอบประยุกต์ใช้งานและการประเมินสมรรถนะ.....	85
5.1 บทนำ.....	85
5.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบเบื้องต้นและทดลองในสภาพใช้งานจริง	85
5.3 การทดสอบประยุกต์ใช้งาน.....	87
5.3.1 ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศอ้างอิงแบบไดโพล มาตรฐานร่วมกับแท็ก.....	89
5.3.2 ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศวงแหวนวงแบบร่วมกับ แท็ก.....	89
5.3.2.1 การทดสอบการประยุกต์ใช้งานเมื่อเปลี่ยนระยะมุมยก (α_2) และระยะมุมกวาด (α_1) ของแท็กในกรณีที่แท็กวางตัวในแนวตั้งฉากกับ แนวแกน x.....	91
5.4 บทสรุป.....	92
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	93
6.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	93
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	95
เอกสารอ้างอิง.....	96
ประวัติผู้เขียน.....	97
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแท่ง.....	12
2.2	เปรียบเทียบคลื่นความถี่ใช้งานในแต่ละย่านความถี่กับระยะเวลาอ่านข้อมูล.....	14
2.3	สรุปคุณสมบัติของสายอากาศในงานวิจัยที่มีมาก่อน.....	45
3.1	พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์และการออกแบบ.....	48
3.2	พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ.....	50
3.3	พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ.....	53
3.4	พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ.....	54
3.5	พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ.....	55
3.6	พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ.....	57
3.7	พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ.....	59
3.8	พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ.....	62
3.9	พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ.....	64
3.10	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	67
3.11	สรุปคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ.....	74
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	77
4.2	สรุปคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ.....	83
5.1	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งการทดสอบการประยุกต์ใช้งาน สายอากาศร่วมกับแท่ง.....	88
6.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างทั่วไปของระบบอาร์เอฟไอดี (RFID).....	1
1.2	การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งาน ด้านการแพทย์และสาธารณสุข.....	2
1.3	การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งาน ด้านการเกษตร.....	2
1.4	การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งาน ทางด้านโลจิสติกส์.....	3
1.5	การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งาน ทางด้านระบบคมนาคม.....	3
1.6	การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งาน ทางด้านระบบตรวจสอบการผ่านเข้า – ออก.....	4
2.1	โครงสร้างทั่วไปของระบบอาร์เอฟไอดี.....	8
2.2	ส่วนประกอบพื้นฐานของแท็ก.....	8
2.3	แท็กระบบอาร์เอฟไอดีในรูปแบบต่าง ๆ.....	9
2.4	แท็กชนิดพาสซีฟ.....	9
2.5	หลักการทำงานของแท็กชนิดพาสซีฟ.....	10
2.6	หลักการทำงานของแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ.....	11
2.7	แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ.....	11
2.8	หลักการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟ.....	11
2.9	แท็กชนิดแอ็กทีฟ.....	12
2.10	ยานความถี่ใช้งานระบบอาร์เอฟไอดี.....	13
2.11	เครื่องอ่านข้อมูลแบบมือถือ.....	15
2.12	เครื่องอ่านข้อมูลแบบติดตั้ง.....	15
2.13	เครื่องอ่านข้อมูลแบบประตู.....	15
2.14	ชนิดของ Line Code ที่ใช้ในระบบ RFID.....	16
2.15	ท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมสำหรับประกอบตัวอย่างที่ 1.....	20
2.16	ความหมายของ m และ n.....	21
2.17	โหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่นวงกลม.....	21
2.18	ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์ในรูปแบบต่าง ๆ.....	22
2.19	ท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมสำหรับประกอบตัวอย่างที่ 2.....	23
2.20	การแบ่งบริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ.....	25
2.21	ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.22	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว.....	26
2.23	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศปากแตร.....	27
2.24	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น.....	28
2.25	การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแนวระนาบที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ $z=0$	32
2.26	การโพลาไรซ์วงกลมหมุนขวา (Right-handed CP).....	34
2.27	การโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้าย (Left-handed CP).....	34
2.28	โพลาไรซ์วงรีที่เป็นฟังก์ชันของเวลาในระนาบ $Z=0$	36
2.29	กำลังงานและกลไกของการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบอาร์เอฟเออดี ในสนามระยะไกล.....	37
2.30	กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก.....	40
2.31	กำลังงานที่ส่งมายังแท็กและวงจรมุม.....	42
2.32	โครงสร้างสายอากาศแบบสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม.....	44
2.33	โครงสร้างสายอากาศวงแหวนวงกลมใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม	44
2.34	โครงสร้างสายอากาศทิศทางเดียวที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม วงแหวนแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	45
3.1	โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ.....	48
3.2	โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศ.....	50
3.3	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศเริ่มต้น.....	50
3.4	การไหลของกระแสบนพื้นผิวของสายอากาศเริ่มต้น.....	51
3.5	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ D_1	52
3.6	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ D_2	52
3.7	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ R_1	53
3.8	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_p	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด X อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.9	โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นระนาบในระนาบ yz	55
3.10	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศ เมื่อเพิ่มแผ่นระนาบ yz	56
3.11	โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นระนาบ ในระนาบ xz	56
3.12	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศ เมื่อเพิ่มแผ่นระนาบ xz	57
3.13	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ G_1	58
3.14	โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นระนาบในระนาบ xz และ yz	58
3.15	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศ เมื่อเพิ่มแผ่นระนาบทั้งสองระนาบพร้อมกัน.....	59
3.16	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ G_2	60
3.17	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อปรับปรุงพารามิเตอร์ W_s	60
3.18	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_s	61
3.19	โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นแมตซ์ชิงวงกลม.....	62
3.20	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_r	63
3.21	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ R_2	63
3.22	โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นตัวสะท้อน.....	64
3.23	$ S_{11} $ และอัตราส่วนแอมพลิจูดที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ W_f	65
3.24	อัตราขยาย และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ W_f	65
3.25	ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และลำคลื่นย่อยด้านข้างบนระนาบ xz ที่ความถี่ กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ W_f	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด X บ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.26	ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และลำคลื่นย่อยด้านข้างบนระนาบ yz ที่ความถี่ กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศ เมื่อปรับปรุงพารามิเตอร์ W	66
3.27	$ S_{11} $ ที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบ.....	67
3.28	อัตราส่วนแกนเทียบกับฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบ.....	68
3.29	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 3 มิติของสายอากาศที่ความถี่ 922.5 MHz.....	69
3.30	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 922.5 MHz ของสายอากาศบนระนาบ xz	69
3.31	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 922.5 MHz ของสายอากาศ บนระนาบ yz	69
3.32	อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ ของสายอากาศต้นแบบ.....	70
3.33	ลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบ.....	71
3.34	อัตราส่วนแกนเทียบกับมุมของสายอากาศที่ความถี่ 922.5 MHz.....	71
3.35	อัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ.....	72
3.36	สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศเริ่มต้นที่เวลา (t) ต่างๆ	72
4.1	โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ.....	76
4.2	การทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศ.....	77
4.3	การติดตั้งและการทดสอบสายอากาศต้นแบบ.....	79
4.4	ภาพถ่ายสายอากาศต้นแบบ.....	79
4.5	ผลการจำลองและผลการทดสอบ $ S_{11} $ ของสายอากาศ.....	80
4.6	ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศ	81
4.7	ผลการจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ บนระนาบ xz	81
4.8	ผลการจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ บนระนาบ yz	82
4.9	ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่.....	83
5.1	เครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	85
5.2	แท็กชนิดไดโพลแบบขด Alien.....	86
5.3	สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น.....	86
5.4	สายอากาศต้นแบบของเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่ยูเอชเอฟ.....	86
5.5	เครื่องมือวัดระยะทาง.....	87
5.6	การติดตั้งและการทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก	87

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.7	การวางตัวของแท่งในแนวแกน x แนวแกน y และ แนวแกน z	88
5.8	ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่มุมต่าง ๆ โดยใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานที่มีโพลาริซ์แบบเชิงเส้น.....	89
5.9	ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท่งที่มุมต่างๆ โดยใช้สายอากาศวงแหวนวงกลมทดสอบร่วมกับแท่ง.....	90
5.10	การทดสอบผลการเปลี่ยนแปลงระยะมุมกวาด (a_1) และระยะมุมยก (a_2)	91
5.11	ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศวงแหวนวงกลมกับแท่งในมุมกวาด (a_1).....	91
5.12	ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศวงแหวนวงกลมกับแท่งในมุมยก (a_2)	92



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี XIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

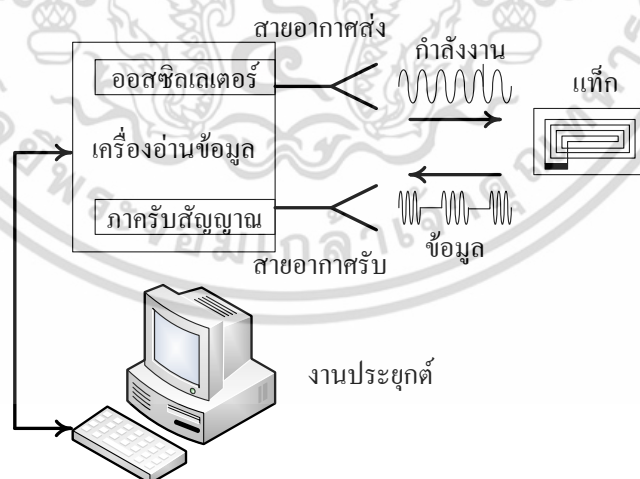
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวัน ซึ่งเห็นได้จากการนำมาประยุกต์ใช้งานในหลาย ๆ ด้าน เช่น โลจิสติกส์ ระบบคลังสินค้า ร้านค้าปลีก และสายการผลิตในโรงงาน เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้แสดงตัวตนของมนุษย์ สัตว์ สินค้า และวัตถุดิบในกระบวนการผลิต โดยทั่วไปเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีแบบต่าง ๆ ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการทำธุรกิจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติอย่างรวดเร็ว แทนที่จะต้องใช้การนับ หรือจดบันทึกด้วยมนุษย์ ซึ่งอาจเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย

ในทางปฏิบัติระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) ประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

1) แท็กระบบอาร์เอฟไอดี (tag หรือ transponder) จะถูกออกแบบให้มีรูปแบบ และขนาดต่าง ๆ ตามความเหมาะสมของการนำไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อให้สามารถยึดติดกับวัตถุ หรือสินค้าที่ต้องการระบุตัวตน โดยทั่วไปแท็กที่ใช้ร่วมกับระบบอาร์เอฟไอดี จะมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ สายอากาศ และไมโครชิพ

2) เครื่องอ่านข้อมูล (reader หรือ interrogator) ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับแท็กระบบอาร์เอฟไอดี โดยสามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลลงไปบนแท็กได้ โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งโครงสร้างทั่วไปของระบบอาร์เอฟไอดีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) [1]

ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) มาใช้งานกันอย่างแพร่หลายเพิ่มมากขึ้น โดยนำมาทำการประยุกต์ใช้งานร่วมกับการทำงานในชีวิตประจำวันในด้านต่าง ๆ หลากหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ด้านการแพทย์และสาธารณสุข

มีการนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) มาใช้งานร่วมกับระบบติดตาม (Asset tracking) เครื่องมือแพทย์ ซึ่งสามารถทำให้เกิดการตรวจสอบ และการเก็บรักษาเครื่องมือแพทย์ได้อย่างสะดวกรวดเร็ว นอกจากนี้ได้มีการนำมาใช้กับการตรวจสอบยาปลอม และการติดตามข้อมูลทางการรักษาย้อนหลังของผู้ป่วย ในกรณีที่ต้องเปลี่ยนแพทย์ในการรักษา ทำให้แพทย์สามารถทราบถึงข้อมูลของผู้ป่วย และทำการรักษาได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังสามารถใช้ในการติดตามตัวผู้ป่วยในกรณีของผู้ป่วยที่เป็นอัลไซเมอร์ (Alzheimer) ได้ด้วย



รูปที่ 1.2 การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งานด้านการแพทย์และสาธารณสุข [2]

- ด้านการเกษตร

เทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบการจัดการทางด้านการเกษตร เช่น ระบบติดตาม เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลของสัตว์เลี้ยง โดยสามารถใช้ในการตรวจสอบสายพันธุ์ การระบุข้อมูลจำเพาะของสัตว์ ยกตัวอย่างเช่น วัน เดือน ปี เกิด น้ำหนัก และประวัติการได้รับวัคซีนหรือยา เป็นต้น



รูปที่ 1.3 การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งานทางด้านการเกษตร [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ด้านโลจิสติกส์

มีการนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) มาช่วยในเรื่องของการขนส่งและการกระจายสินค้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการกระจายสินค้าใช้ในการตรวจสอบสินค้าที่เข้าและออกจากคลังสินค้า ตลอดจนสินค้าคงเหลือภายในคลังได้สะดวกรวดเร็วกว่าการใช้บาร์โค้ด



รูปที่ 1.4 การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งานทางด้านโลจิสติกส์ [4]

- ระบบการคมนาคม

การใช้บริการทางด้านการคมนาคม เช่น การเดินทางด้วยรถไฟฟ้า BTS หรือการเดินทางด้วยรถไฟฟ้ามหานคร และบัตรผ่านขึ้นทางด่วน เป็นต้น โดยตัวที่ใช้เป็นการนำเอาระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) มาประยุกต์ใช้งาน เพื่อเพิ่มความสะดวกรวดสบายในการเข้าออกประตูผ่านทางสำหรับผู้ใช้บริการ

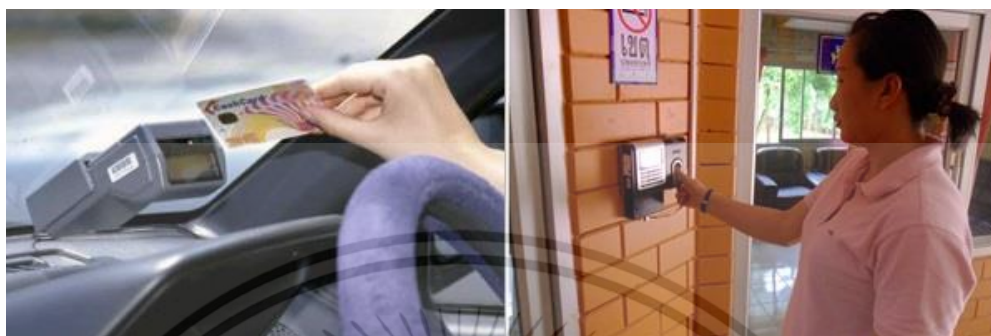


รูปที่ 1.5 การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งานทางด้านระบบคมนาคม [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระบบตรวจสอบการผ่านเข้า-ออก

เทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดทำบัตร เพื่อควบคุมการเข้าออกอาคารหรือสถานที่ต่าง ๆ และยังสามารถตรวจสอบสิทธิ์ของผู้ที่ผ่านเข้า-ออกได้มากยิ่งขึ้น ทำให้การผ่านทางมีความปลอดภัยมากขึ้น



รูปที่ 1.6 การนำเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับ ระบบตรวจสอบการผ่านเข้า-ออก [6]

สายอากาศจึงถือเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ระบบอาร์เอฟไอดีทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากระบบอาร์เอฟไอดีมีความต้องการอัตราการส่งข้อมูลที่สูง ระยะทางในการส่งไกล โครงสร้างของสายอากาศที่ไม่ซับซ้อน และมีราคาถูก ซึ่งระบบดังกล่าวนิยมใช้งานในย่านความถี่เอชเอฟ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการออกแบบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ โดยอาศัยทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศ โดยทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ เพื่อพัฒนาให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะที่มีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบอาร์เอฟไอดี โดยสายอากาศที่นำเสนอมีคุณลักษณะที่สำคัญคือ สามารถทำงานในย่านความถี่ 920 - 925 MHz ซึ่งเป็นความถี่มาตรฐานระบบอาร์เอฟไอดีของประเทศไทย มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โพลาริซวงกลม และมีอัตราขยายที่สูง เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบสายอากาศที่สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ ซึ่งสายอากาศที่ต้องการมีคุณลักษณะดังนี้คือ สายอากาศมีอัตราขยายที่สูง มีโพลาริซวงกลม มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และขนาดของสายอากาศมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน การศึกษาและวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ขนาดรัศมีของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม ความยาวของโพรบกระตุ้นไฟฟ้า ตำแหน่งการจัดวางแผ่นระบายสีเหลี่ยมจัตุรัสภายในท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม ตำแหน่งการเชื่อมต่อแผ่นแมตชิงวงกลม ที่วางเหนือโพรบกระตุ้นไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวจะทำให้สายอากาศมีคุณลักษณะตามที่ต้องการ โดยอาศัยโปรแกรมสำหรับการออกแบบ และการจำลองสายอากาศ เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองไปทำการสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาสายอากาศเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ ให้มีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กได้ และมีโพลาริซิงกลม

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษาขอบเขตงานวิจัยและเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบอาร์เอฟไอดี หลักการและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการออกแบบสายอากาศ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่มีมาก่อน

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบและการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศ เริ่มจากการกำหนดรูปแบบของสายอากาศ โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานและสมการในการคำนวณจากบทที่ 2 จากนั้นจึงทำการจำลองแบบสายอากาศ และศึกษาหาค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมที่สุดของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ โดยนำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ได้จากการจำลองมาทำการสร้าง และทำการทดสอบสายอากาศ เพื่อดูผลกระทบของคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ ยกตัวอย่างเช่น $|S_{11}|$ ค่าอัตราส่วนแกน ค่าอัตราขยายแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น เป็นต้น

บทที่ 5 กล่าวถึงการประเมินสมรรถนะของสายอากาศต้นแบบ โดยจะนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็ก เพื่อทดสอบความสามารถในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสามารถของสายอากาศ ในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ในกรณีที่แท็กวางตัวในทิศทางแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ตามลำดับ

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของสายอากาศ โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงความ เป็นมาและหลักการของเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดี [7] การจำแนกประเภทของแท็ก รายละเอียดการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดี ทฤษฎีพื้นฐานในการออกแบบสายอากาศสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี [1] และ [8] และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อนหน้า

2.2 ความเป็นมาของระบบอาร์เอฟไอดี

ระบบอาร์เอฟไอดี (RFID ย่อมาจาก Radio Frequency Identification) เป็นเทคโนโลยีการระบุข้อมูลที่แสดงเอกลักษณ์ของวัตถุ หรือบุคคลด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่ได้ถูกพัฒนามาในปี ค.ศ. 1970 วัตถุประสงค์เพื่อนำไปใช้ในการบ่งชี้วัตถุในระยะไกล โดยมีจุดเด่นคือสามารถอ่านข้อมูลจากแท็ก (Tag) ได้หลาย ๆ แท็กแบบไร้สัมผัส และสามารถอ่านค่าได้แม้ในสภาพที่ทัศนวิสัยไม่ดี ทนต่อความเปียกชื้น แสงสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก และสามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง โดยข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในไมโครชิปที่อยู่ภายในแท็ก ในปัจจุบันได้มีการนำระบบอาร์เอฟไอดีไปประยุกต์ใช้งาน ในด้านอื่น ๆ นอกเหนือจากนำมาใช้ทดแทนระบบรหัสแท่งแบบเดิม ได้แก่ การใช้งานในบัตรชนิดต่าง ๆ เช่น บัตรประจำตัวพนักงาน (ID card) บัตรโดยสาร บัตรสำหรับผ่านเข้าออกห้องพัก บัตรที่จอดรถตามศูนย์การค้าต่าง ๆ แท็กสำหรับติดกระเป๋าเดินทาง แท็กสำหรับติดสินค้า แท็กสำหรับติดหนังสือ และแท็กสำหรับติดฉลากยา เป็นต้น บางครั้งอาจพบเห็นอยู่ในรูปของแท็กสินค้า ซึ่งมีขนาดเล็กจนสามารถแทรกลงระหว่างชั้นของเนื้อกระดาษได้ หรือเป็นแท็กแคปซูลขนาดเล็กฝังเอาไว้ในตัวสัตว์ เพื่อบันทึกประวัติต่าง ๆ เป็นต้น

ประวัติการเริ่มต้นของเทคโนโลยีระบบอาร์เอฟไอดีนั้น ย้อนกลับไปถึงสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งประเทศในกลุ่มพันธมิตร และกลุ่มอักษะได้มีการใช้เรดาร์ ซึ่งถูกค้นพบโดย เซอร์โรเบิร์ต อเล็กซานเดอร์ วัตสัน-วัตต์ ในปี ค.ศ. 1935 ใช้ในการตรวจจับและเตือนเครื่องบินที่กำลังเข้ามา แต่ปัญหาของการใช้เรดาร์ในยุคนั้น คือไม่สามารถแยกแยะระหว่างเครื่องบินรบลำใดเป็นของฝ่ายไหน ทางประเทศเยอรมันได้ค้นพบว่า เมื่อนักบินบินหมุนตัวแล้วจะทำให้มีการสะท้อนสัญญาณเรดาร์ที่เปลี่ยนไป ทำให้ทราบว่าเครื่องบินที่บินเข้ามาเป็นของประเทศเยอรมัน ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของระบบอาร์เอฟไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 วิวัฒนาการของระบบอาร์เอฟไอดี

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้เกี่ยวกับ จุดเริ่มต้นของระบบอาร์เอฟไอดีซึ่งเกิดขึ้นมาตั้งแต่ในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอวิวัฒนาการของระบบอาร์เอฟไอดี ทางด้านการพัฒนาได้มีการให้สิทธิบัตรของอเมริกาใบแรกเกี่ยวกับระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งมอบให้กับ Mario W. Cardullo เป็นสิทธิบัตรเกี่ยวกับแท็กชนิดแอ็กทีฟ ในปี ค.ศ. 1973 และในปีเดียวกันได้มีการมอบสิทธิบัตรเกี่ยวกับแท็กแบบพาสซีฟ ให้กับ Charles Walton โดยการประยุกต์ใช้งานสำหรับการเปิดล็อกประตู

ในช่วงปี ค.ศ. 1970 รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้มีการพัฒนาเกี่ยวกับระบบอาร์เอฟไอดี เหมือนกันที่ศูนย์วิจัยแห่งชาติลอสอลามอส (Los Alamos National Laboratory) มลรัฐนิวเม็กซิโก ใช้สำหรับการติดตามวัตถุนิวเคลียร์ให้กับกระทรวงพลังงาน โดยใช้ระบบอาร์เอฟไอดีติดกับรถบรรทุก และเครื่องอ่านที่ประตูทางเข้า-ออก

ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1990 บริษัทไอบีเอ็มได้พัฒนาและจดสิทธิบัตร ระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่เอชเอฟ (UHF) (ที่ย่านความถี่ตั้งแต่ 300 MHz - 3 GHz) แต่เมื่อไอบีเอ็มมีปัญหาการเงินได้ขายสิทธิบัตรเกี่ยวกับระบบอาร์เอฟไอดีให้กับบริษัท Intermec ในช่วงกลาง ค.ศ. 1990 ในช่วงนั้นการใช้งานยังไม่แพร่หลายนัก เนื่องจากอุปกรณ์ยังคงมีราคาสูงมาก

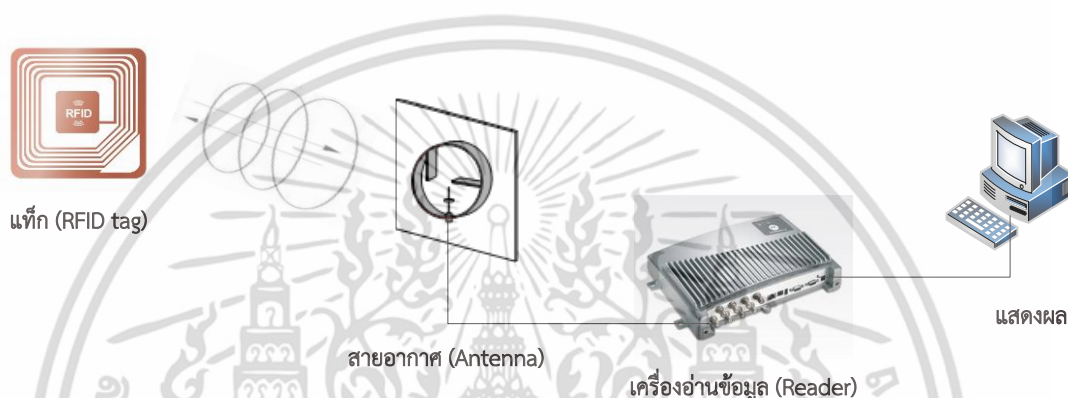
ระบบอาร์เอฟไอดีในย่านความถี่เอชเอฟ (UHF) เป็นที่รู้จักอีกครั้งในปี ค.ศ. 1999 เมื่อ UCC (Uniform Code Council) EAN International บริษัท Procter & Gamble และบริษัท Gillette ได้ร่วมกันก่อตั้งศูนย์ระบบอาร์เอฟไอดีขึ้น ที่สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (MIT) ประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อพัฒนาแนวทางการใช้ระบบอาร์เอฟไอดีในห่วงโซ่อุปทาน (supply chain) ในช่วงปี ค.ศ. 1999 - 2003 ระบบอาร์เอฟไอดีได้รับการสนับสนุนจากบริษัทเอกชนจำนวนมาก และได้มีการขยายศูนย์ระบบอาร์เอฟไอดี ไปยังประเทศออสเตรเลีย อังกฤษ สวิตเซอร์แลนด์ ญี่ปุ่น และจีน ได้มีการพัฒนามาตรฐานใหม่ที่เรียกว่า รหัสสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ EPC (Electronic Product Code) และในปี ค.ศ. 2003 เทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำมาขายให้กับ UCC ซึ่งได้ร่วมกับ EAN ตั้งบริษัท EPC global เพื่อพัฒนา EPC ในเชิงพาณิชย์ ส่วนศูนย์ Auto-ID ได้ปิดตัวลงอย่างเป็นทางการ ยังคงเหลือเฉพาะส่วนปฏิบัติการวิจัยและพัฒนา (Auto-ID Lab)

2.4 ส่วนประกอบของระบบอาร์เอฟไอดี

ในระบบระบบอาร์เอฟไอดีประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ 2 ส่วนด้วยกัน ส่วนแรกคือ ทรานสปอนเดอร์หรือแท็ก (Transponder/Tag) ใช้สำหรับติดกับวัตถุต่าง ๆ ที่ต้องการ โดยในส่วน ของแท็กนั้นจะประกอบด้วยสายอากาศ และไมโครชิปที่ไว้สำหรับบันทึก หมายเลข (ID) หรือข้อมูล เกี่ยวกับวัตถุชิ้นนั้น ๆ ส่วนที่สองคือเครื่องอ่านข้อมูลใช้สำหรับอ่านข้อมูลที่บันทึกไว้ภายในแท็ก (Interrogator/Reader) ซึ่งเครื่องอ่านข้อมูลจะทำงานด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งส่วนประกอบของ ระบบอาร์เอฟไอดีแสดงในรูปที่ 2.1 ถ้าจะเปรียบเทียบกับระบบบาร์โค้ดแท็ก ในระบบอาร์เอฟไอดีเปรียบได้กับตัวรหัสแท็กที่ติดกับฉลากสินค้า และเครื่องอ่านข้อมูลใน ระบบอาร์เอฟไอดีเปรียบได้กับเครื่องอ่านรหัสแท็ก (Scanner) โดยทั้ง 2 ระบบ มีข้อแตกต่างกันคือ

ระบบอาร์เอฟไอดีจะใช้คลื่นความถี่วิทยุในการอ่านและการเขียนข้อมูล ส่วนระบบรหัสแท็ก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

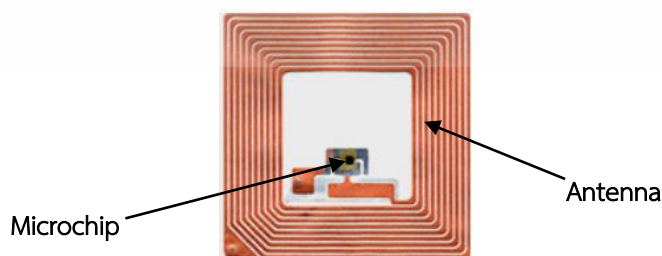
จะใช้แสงเลเซอร์ในการอ่าน ซึ่งระบบรหัสแท่งมีข้อเสีย คือในการอ่านหรือการสแกนต้องใช้แสงในการอ่านรหัสแท่ง ซึ่งจะต้องไม่มีสิ่งกีดขวางหรือต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกับลำแสงที่ยิงจากเครื่องสแกนเท่านั้น และสามารถอ่านได้ที่ละรหัสในระยะใกล้ ๆ แต่ระบบอาร์เอฟไอดีสามารถอ่านรหัสจากแท็กได้โดยไม่ต้องเห็นแท็ก หรือแท็กนั้นซ่อนอยู่ภายในวัตถุ และไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันกับคลื่นของเครื่องอ่านข้อมูล เนื่องจากระบบอาร์เอฟไอดีในใช้คลื่นวิทยุในการทำงาน ฉะนั้นเพียงอยู่ในบริเวณที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ก็สามารถอ่านข้อมูลได้ และการอ่านแท็กในระบบอาร์เอฟไอดีสามารถอ่านข้อมูลได้ครั้งละหลาย ๆ แท็กในเวลาเดียวกัน ซึ่งระยะเวลาในการอ่านข้อมูลได้ไกลกว่าระบบรหัสแท่งอีกด้วย โดยส่วนประกอบของระบบอาร์เอฟไอดีจะอธิบายรายละเอียดต่อไป



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของระบบอาร์เอฟไอดี

2.4.1 แท็ก (Tag/Transponders)

แท็กประกอบด้วยโครงสร้างภายใน 2 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ ส่วนของไมโครชิป (Microchip) ทำหน้าที่เก็บข้อมูลต่าง ๆ ของวัตถุ เช่น รหัสสินค้า ข้อมูลสินค้า และส่วนของสายอากาศ (Antenna) สำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุ และสร้างพลังงานป้อนให้ส่วนของไมโครชิป โดยทั่วไปแท็กมีลักษณะที่หลากหลายรูปแบบ ยกตัวอย่างเช่น เป็นกระดาษ แผ่นฟิล์ม พลาสติก มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งานด้วยว่านำไปติดกับวัสดุรูปแบบใด ซึ่งวัสดุที่มีการใช้งานร่วมกับแท็กมีรูปแบบที่หลากหลาย เช่น บัตรเครดิต เหรียญ กระดุม ฉลาก แคปซูล เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างและรูปแบบของแท็กแสดงในรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของแท็ก [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แท็กแบบเหรียญ



(ข) แท็กแบบกระเปาะแก้ว



(ค) แท็กแบบแท็ก



(ง) แท็กแบบบัตร

รูปที่ 2.3 แท็กระบบอาร์เอฟไอดีในรูปแบบต่าง ๆ [1]

2.4.1.1 การแบ่งประเภทของแท็กตามวิธีการส่งพลังงานไปยังแท็ก

การแบ่งประเภทของแท็กตามวิธีการส่งพลังงานไปยังแท็ก สามารถแบ่งแท็กออกเป็น 3 ชนิด ใหญ่ ๆ คือ แท็กแบบพาสซีฟ (Passive tag) แท็กแบบกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active tag) และแท็กแบบแอ็กทีฟ (Active tag) โดยแท็กแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติต่างกันไปตามการใช้งาน ราคา โครงสร้าง และหลักการทำงาน โดยรายละเอียดดังนี้

2.4.1.1.1 แท็กชนิดพาสซีฟ

แท็กชนิดนี้ทำงานได้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก เนื่องจากภายในของแท็กมีวงจรถูกกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็กเป็นแหล่งจ่ายไฟให้อยู่ ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ระยะอ่านสูงสุดประมาณ 1 m ขึ้นอยู่กับกำลังงานของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้งาน โดยปกติแท็กชนิดนี้มักมีหน่วยความจำขนาดเล็กประมาณ 16 - 1,024 Byte และน้ำหนักเบา ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยทั่วไปโครงสร้างภายในส่วนที่เป็นไอซีของแท็กนั้นก็ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนของควบคุมการทำงานของภาครับส่งสัญญาณวิทยุ (Analog Front-End) ส่วนควบคุมภาคลอจิก (Digital Control Unit) ส่วนของหน่วยความจำ (Memory) ซึ่งอาจจะเป็นแบบ ROM หรือ EEPROM



รูปที่ 2.4 แท็กชนิดพาสซีฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของแท็กชนิดพาสซีฟ แท็กชนิดนี้ทำงานได้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใด ๆ โดยทั่วไปการ ทำงานของแท็กชนิดพาสซีฟในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง (LF และ HF) จะใช้หลักการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) ซึ่งเกิดจากการอยู่ใกล้กันของขดลวดจากเครื่องอ่านข้อมูลที่กำลังทำงานและสายอากาศของแท็ก ทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานจากเครื่องอ่านไปยังไมโครชิปในแท็กผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เมื่อไมโครชิปได้รับพลังงานก็จะทำงานตามลักษณะเฉพาะของข้อมูลรหัสประจำตัวปฏิบัติการของไมโครชิปดังกล่าว เครื่องอ่านจะรับรู้ได้ผ่านสนามแม่เหล็กและจะทำการตีความเป็นข้อมูลดิจิทัล แสดงถึงรหัสประจำตัวที่ส่งมาจากแท็กได้ ลักษณะเงื่อนไขในการเหนี่ยวนำแบบชั๊กพาทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก โดยทั่วไประยะอ่านสูงสุดจะประมาณ 1 m ขึ้นอยู่กับกำลังงานของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้งาน

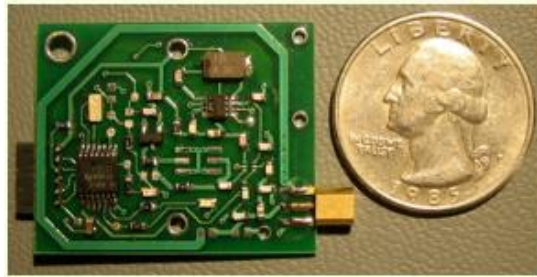


รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของแท็กชนิดพาสซีฟ [8]

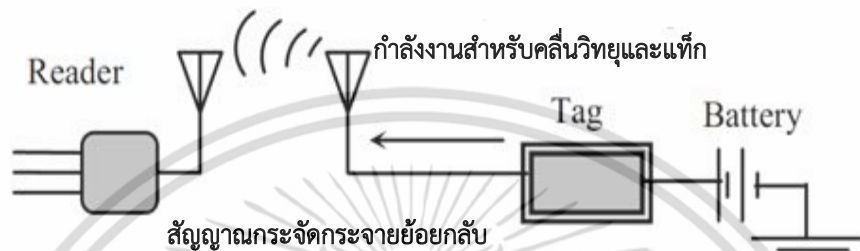
ส่วนในระบบย่านความถี่เอชเอฟ (UHF) แทนที่จะใช้การสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะใช้การคู่ควบแบบแผ่กระจาย (Propagation coupling) โดยที่สายอากาศของเครื่องอ่านจะทำการส่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปคลื่นวิทยุออกมา ซึ่งเมื่อแท็กได้รับสัญญาณผ่านสายอากาศ แท็กจะทำงานโดยการสะท้อนกลับคลื่นที่ได้รับ ซึ่งถูกปรับค่าตามรหัสประจำตัวของแท็กไปยังเครื่องอ่านข้อมูล (backscattering) ทั้งนี้การทำงานในย่านความถี่ที่แตกต่างกัน จะทำให้คุณสมบัติการทะลวงแตกต่างกัน รวมทั้งประสิทธิภาพโดยรวมจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขอื่น ๆ ด้วย เช่น ขนาดของสายอากาศ หรือสภาพแวดล้อมบริเวณนั้นว่ามีสัญญาณรบกวนมากน้อยเพียงใด

2.4.1.1.2 แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active tag)

แท็กแบบกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active tag) หรืออีกชื่อหนึ่งคือแท็กแบบกึ่งพาสซีฟ (Semi-passive tag) แท็กชนิดนี้จะทำงานได้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรไฟฟ้าภายในแท็ก แต่อย่างไรก็ตามแท็กชนิดนี้ยังต้องใช้กำลังงานที่ได้รับจากเครื่องอ่านข้อมูลในการส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ

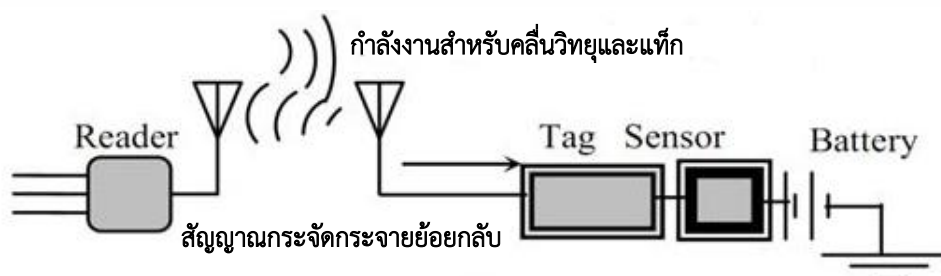


รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ [8]

หลักการทำงานของแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟแสดงดังรูปที่ 2.7 เครื่องอ่านจะทำการติดต่อสื่อสารมาก่อนแล้วจะตามด้วยการทำงานของแท็ก ส่วนการส่งสัญญาณกลับยังคงต้องใช้สัญญาณที่เกิดจากการกระจัดกระจายย้อนกลับ และใช้เวลาเพียงเล็กน้อยในการอ่านข้อมูล ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้แท็กชนิดนี้มีความเหมาะสมกับการใช้งานระบุตัวตนของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟนี้มีระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลกว่าแท็กชนิดพาสซีฟแต่ยังไม่สูงเท่าระยะการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟ

2.4.1.1.3 แท็กชนิดแอ็กทีฟ

แท็กชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากแบตเตอรี่ภายนอก เพื่อจ่ายพลังงานให้กับวงจรภายในทำงาน โดยแท็กแบบนี้สามารถมีหน่วยความจำภายในขนาดใหญ่ได้ถึง 1 MB และสามารถอ่านได้ในระยะไกลสูงสุดประมาณ 100 m ข้อเสียของแท็กชนิดนี้คือ มีราคาต่อหน่วยสูง มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีอายุการใช้งานที่จำกัดตามอายุของแบตเตอรี่ซึ่งจะมีอายุการใช้งานประมาณ 3 - 7 ปี หลักการทำงาน และตัวอย่างของแท็กชนิดแอ็กทีฟแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ โดยตารางที่ 2.1 จะแสดงผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแท็กในแต่ละประเภท



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แท็กชนิดแอ็กทีฟ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสายอากาศแท็ก

คุณสมบัติของแท็ก	ประเภทของแท็ก		
	ชนิดพาสซีฟ	ชนิดกึ่งพาสซีฟ	ชนิดแอ็กทีฟ
แหล่งพลังงาน	ไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง แต่อาศัยพลังงานที่ส่งมาจากเครื่องอ่านข้อมูล	มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง (แบตเตอรี่)	มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง (แบตเตอรี่)
การติดต่อสื่อสาร	เครื่องอ่านข้อมูลจะกำหนดการเริ่มต้นการสื่อสาร	เครื่องอ่านข้อมูลจะกำหนดการเริ่มต้นการสื่อสาร	เครื่องอ่านข้อมูลหรือแท็กจะกำหนดการเริ่มต้นการสื่อสาร
ขนาด	เล็ก	กลาง	ใหญ่
ระยะการอ่าน	ใกล้ (มากกว่า 2 m)	ปานกลาง (100 m)	ไกล (1 km)
ขนาดหน่วยความจำ	1 - 128 bit	-	สูงสุด 8 MB
ราคา	ไม่แพง	ปานกลาง	แพง

2.4.1.2 การแบ่งประเภทของแท็กตามความสามารถของระบบอาร์เอฟไอดี

นอกจากการแบ่งประเภทของแท็กจากวิธีการส่งพลังงานแล้ว ยังสามารถแบ่งประเภทของแท็กตามรูปแบบการอ่านหรือการบันทึกข้อมูลได้อีกด้วย ซึ่งในการแบ่งประเภทแท็กตามรูปแบบการอ่านข้อมูลสามารถแบ่งแท็กออกได้เป็น 3 ประเภท คือ แท็กสำหรับระบบอย่างเดียว (Read Only System) แท็กสำหรับระบบอ่านและเขียน (Read-Write System) และแท็กสำหรับระบบไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor System) โดยรายละเอียดจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

2.4.1.2.1 ระบบอ่านอย่างเดียว (Read Only System)

แท็กชนิดอ่านได้เพียงอย่างเดียว (Read Only System) เป็นแท็กที่มีข้อมูลซึ่งจะอยู่ในรูปแบบ Serial Number และไม่สามารถเขียนข้อมูลใหม่ลงไปได้ เหมาะกับงานที่ต้องการอ่านอย่างเดียว เพื่อแยกแยะความแตกต่างของสินค้าหรือบุคคล ระบุชนิดของสินค้า Pallets หรือตู้คอนเทนเนอร์มีราคาต่ำ โดยความถี่ที่ใช้งานจะต่ำกว่า 135 KHz หรือ 2.45 GHz

2.4.1.2.2 ระบบอ่านเขียน (Read-Write System)

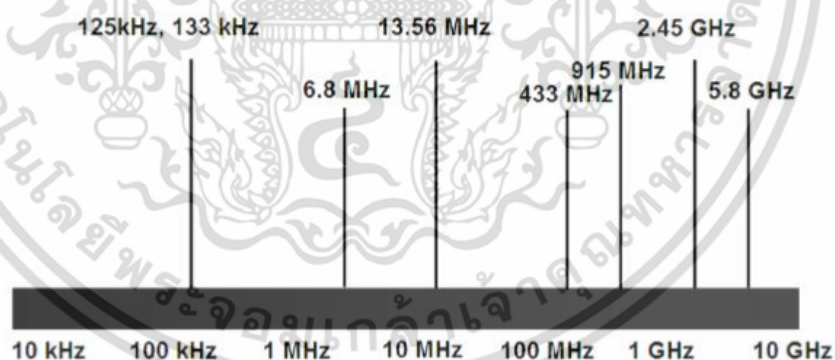
แท็กชนิดนี้สามารถเขียนข้อมูลซ้ำได้ โดยความจุจะอยู่ที่ 16 Byte จนถึงมากกว่า 16 KB หน่วยความจำที่ใช้จะเป็นชนิด EEPROM หรือ SRAM ความถี่ที่ใช้งานจะเป็น 135 KHz 13.56 MHz 27.125 MHz และ 2.45 GHz

2.4.1.2.3 ระบบไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor System)

ระบบนี้จะจัดอยู่ประเภทที่ดีที่สุด เพราะมีไมโครโปรเซสเซอร์เป็นตัวประมวลผลในแท็ก สามารถประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายและมีฟังก์ชันการสร้างรหัสลับ (Crypto logical Functions) สามารถนำไปใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการรักษาความปลอดภัย ส่วนมากระบบนี้จะใช้ย่านความถี่ที่ 13.56 MHz หน่วยความจำที่ใช้งานจะมีขนาดตั้งแต่หน่วย ๆ จนถึง 16 KB และหน่วยความจำเป็นชนิด EEPROM

2.4.1.3 การแบ่งประเภทของแท็กตามย่านความถี่ใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดี

นอกจากนี้ย่านความถี่ในการใช้งานถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเลือกใช้แท็กสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของแท็กตามย่านความถี่การใช้งานออกเป็น 4 ย่านความถี่หลัก คือ แท็กย่านความถี่ต่ำ (Low Frequency: LF) แท็กย่านความถี่สูง (High Frequency: HF) แท็กย่านความถี่ยูเอชเอฟ (Ultra High Frequency: UHF) และแท็กย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave frequency) โดยย่านความถี่ใช้งานของระบบอาร์เอฟไอดีแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ย่านความถี่ใช้งานระบบอาร์เอฟไอดี

โดยการเปรียบเทียบชนิดของแท็กแต่ละความถี่ใช้งาน ในย่านความถี่ต่าง ๆ สามารถวัดระยะการอ่านข้อมูลซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบคลื่นความถี่ใช้งานในแต่ละย่านความถี่กับระยะการอ่านข้อมูล

ชนิดของแท็ก	ความถี่	ระยะที่อ่านได้
แท็กย่านความถี่ต่ำ	125 – 134 kHz	น้อยกว่า 1 m (10 cm)
แท็กย่านความถี่สูง	13.56 MHz	น้อยกว่า 1.5 m (~1 m)
แท็กย่านความถี่ยูเอชเอฟ	860 – 960 MHz	2 – 5 m 1 – 100 m (แท็กชนิดแอ็กทีฟ)
แท็กย่านความถี่ไมโครเวฟ	2.45 GHz	น้อยกว่า 1 m (แท็กชนิดพาสซีฟ) 1 – 15 m (แท็กชนิดแอ็กทีฟ)

ในการใช้งานย่านความถี่ต่ำ และย่านความถี่สูงจะเหมาะสำหรับการใช้งานที่มีระยะในการสื่อสารข้อมูลระยะใกล้ โดยย่านความถี่ต่ำที่ความถี่ 125 kHz - 134 kHz ซึ่งนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับควบคุมการเข้าออกอาคาร และสถานที่ต่าง ๆ โดยส่วนย่านความถี่สูงที่ความถี่ 13.56 MHz นิยมนำมาใช้งานในการทำบัตรเอนกประสงค์แบบไร้สัมผัส เช่น หนึ่งสื่อเดินทาง อิเล็กทรอนิกส์ ย่านความถี่ยูเอชเอฟจะถูกนำมาใช้ในงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลระยะไกล เช่น ระบบเก็บค่าบริการทางด่วน ระบบขนส่งสินค้า เป็นต้น

2.4.2 เครื่องอ่านข้อมูล (Reader)

เครื่องอ่านข้อมูลทำหน้าที่เชื่อมต่อเพื่ออ่านหรือเขียนข้อมูลลงในแท็กด้วยสัญญาณความถี่วิทยุ ภายในเครื่องอ่านจะประกอบด้วย สายอากาศที่ทำจากขดลวดทองแดง เพื่อใช้รับส่งสัญญาณภาครับและภาคส่งสัญญาณวิทยุ และวงจรควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูล ซึ่งมักจะเป็นวงจรพวงไมโครคอนโทรลเลอร์ และอุปกรณ์ต่อร่วมกับคอมพิวเตอร์

เครื่องอ่านข้อมูล ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

- ภาครับและส่งสัญญาณวิทยุ (Transceiver)
- ภาคสร้างสัญญาณพาหะ (Carrier)
- ขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (Antenna)
- วงจรจูนสัญญาณ (Tuner)
- หน่วยประมวลผลข้อมูล และภาคติดต่อกับคอมพิวเตอร์ (Processing Unit)

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายในเครื่องอ่านมักใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรม ทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (decoding) ที่ได้รับ และทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านจะแตกต่างกันไปตามประเภทของการใช้งาน เช่น เครื่องอ่านข้อมูลแบบมือถือ ซึ่งสามารถพกพาได้สะดวก เครื่องอ่านข้อมูลแบบติดตั้ง และเครื่องอ่านข้อมูลแบบประตู (Gate size) ซึ่งตัวอย่างเครื่องอ่านข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.11 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 เครื่องอ่านข้อมูลแบบมือถือ



รูปที่ 2.12 เครื่องอ่านข้อมูลแบบติดผนัง



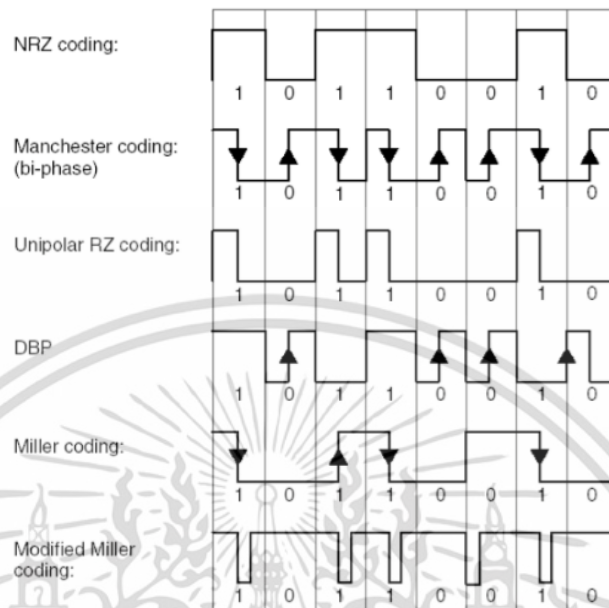
รูปที่ 2.13 เครื่องอ่านข้อมูลแบบประตู [1]

2.5 หลักการรับและส่งข้อมูลระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูลในระบบอาร์เอฟไอดี

กระบวนการส่งสัญญาณระหว่างระบบอาร์เอฟไอดีและเครื่องอ่านข้อมูลโดยทั่วไป เป็นไปตามกระบวนการทางด้านการสื่อสารระบบดิจิทัล นั่นคือการเตรียมข้อมูลดิจิทัลจะส่งผ่านโดยการเข้ารหัสให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการส่งผ่านช่องสัญญาณ (channel) สัญญาณมีโอกาสจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน (noise) โดยมีค่าผิดพลาดน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งวิธีการเข้ารหัสนั้นมีได้หลายแบบโดยการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณที่จะส่งผ่าน ตัวอย่าง

เทคนิคการเข้ารหัส เช่น การเข้ารหัสสัญญาณแบบ NRZ การเข้ารหัสแบบ Manchester การเข้ารหัส
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ Miller การเข้ารหัสแบบ Differential เป็นต้น ซึ่งชนิดของ Line Code ที่ใช้ใน ระบบอาร์เอฟไอดีแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ชนิดของ Line Code ที่ใช้ในระบบ RFID [7]

จากรูปพบว่ามาตรฐานของ Line Code มีอยู่หลายชนิดความแตกต่างของมันก็คือลักษณะ การแสดงค่า 0 กับ 1 ที่ให้ลักษณะสัญญาณแตกต่างกัน Line Code ที่พบบ่อยและที่นิยมใช้ก็คือ NRZ และManchester Coding

- NRZ Coding: สัญลักษณ์แทนค่า “1” คือช่วงสัญญาณเป็น “High” สัญลักษณ์แทนค่า “0” คือช่วงสัญญาณเป็น ”Low”
- Manchester Coding: สัญลักษณ์ “1” จะแทนด้วยช่วงขอบขาลงของสัญญาณ สัญลักษณ์ “0” จะแทนด้วยขอบขาขึ้นของสัญญาณ

ซึ่งหลังจากการเข้ารหัสสัญญาณแล้ว สัญญาณจะถูกทำการกล้ำสัญญาณ (modulation) กับ คลื่นพาหะย่านที่สูงกว่าเพื่อทำการส่งรับข้อมูลในย่านนั้น ๆ การกล้ำสัญญาณ หมายถึง การปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ของคลื่นพาหะซึ่งเป็นคลื่นสนามแม่เหล็ก เช่น แอมพลิจูด เฟส และ ความถี่ ตามค่าของข้อมูลที่ส่ง ตัวอย่างเช่น ในการกล้ำสัญญาณแบบ ASK (amplitude shift keying) ค่าแอมพลิจูดของคลื่นพาหะจะถูกเปลี่ยนอยู่ระหว่างค่าสองค่าซึ่งขึ้นกับค่าไบนารีของสัญญาณที่ถูกเข้ารหัส

2.6 คุณสมบัติของระบบอาร์เอฟไอดี

ในหัวข้อก่อนหน้านี้ได้ทราบถึงโครงสร้างการทำงานและเทคโนโลยีของระบบอาร์เอฟไอดี ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติของระบบอาร์เอฟไอดี ซึ่งอาศัยพื้นฐานของการสื่อสารแบบคลื่นวิทยุ เป็นเกณฑ์สำคัญดังต่อไปนี้

2.6.1 สามารถอ่านและเขียนโดยไม่ต้องสัมผัส

จุดเด่นข้อแรกของระบบอาร์เอฟไอดี คือเครื่องอ่านกับแท็กสามารถสื่อสารกันได้โดยไม่ต้องสัมผัสกัน ทำให้ไม่เกิดการสึกหรอของแถบแม่เหล็ก ลดต้นทุนในการดูแลรักษา แท็กมีอายุการใช้งานยาวนาน

2.6.2 สามารถอ่านและเขียนข้อมูลได้สะดวก

ระบบอาร์เอฟไอดีเป็นเทคโนโลยีที่สามารถอ่านและเขียนข้อมูลได้สะดวก ซึ่งบางระบบต้องใช้เครื่องอ่านและเครื่องเขียนแยกกัน เช่น บาร์โค้ด ต้องมีเครื่องพิมพ์และเครื่องอ่านแยกกัน สมาร์ทการ์ดต้องนำแท็กมาสัมผัสกับวงจรอ่านและเขียนโดยตรง แต่ระบบอาร์เอฟไอดีตัวอ่านกับตัวเขียนข้อมูลจะอยู่ในตัวเดียวกันเพียงเปลี่ยนโหมดโดยใช้ซอฟต์แวร์เท่านั้น จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงข้อมูลอยู่ตลอดเวลา เช่น สายการผลิตอัตโนมัติ

2.6.3 สามารถสื่อสารได้ทุกทิศทาง

เนื่องจากคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การอ่านและการเขียนในระบบอาร์เอฟไอดีจึงไม่ต้องคำนึงถึงทิศทาง โดยแท็กไม่จำเป็นต้องวางในตำแหน่งที่ตรงกับเครื่องอ่านข้อมูล แท็กสามารถอยู่ด้านหลัง ด้านข้าง หรือแม้กระทั่งถูกห่อหุ้มแท็กก็สามารถติดต่อสื่อสารกับเครื่องอ่านข้อมูลได้ เพียงแท็กวางในบริเวณที่มีคลื่นวิทยุเท่านั้น ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน

2.6.4 แท็กสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ด้วยลักษณะโครงสร้างและความสามารถในการเขียนข้อมูลซ้ำหลาย ๆ ครั้งได้ ทำให้แท็กสามารถนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตได้มากกว่า 100,000 ครั้งต่อแท็ก 1 อัน คุณสมบัติข้อนี้เป็นจุดเด่นอีกจุดหนึ่งที่ระบบอาร์เอฟไอดีที่สามารถทำได้

2.6.5 ระบบอาร์เอฟไอดีมีแท็กหลากหลายแบบเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ

แท็กของระบบอาร์เอฟไอดีนั้นจะถูกออกแบบให้มีรูปร่าง ขนาด โครงสร้าง ความจุของหน่วยความจำ และลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป เช่น มีลักษณะเป็นสมาร์ทการ์ด กระดุม เหรียญ ทรงสี่เหลี่ยม หรือแม้กระทั่งเป็นแผ่นบาง ๆ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้งานตามความต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.6 มีความสามารถในการทะลุทะลวงของสัญญาณ

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถทะลุผ่านวัตถุที่ไม่ใช่โลหะ หรือมีโลหะเป็นส่วนผสมอยู่ เช่น พลาสติก ฝิวหนัง ไม้ ปูนซิเมนต์ เป็นต้น ดังนั้นแท็กจึงสามารถติดตั้งทั้งแบบฝัง แบบซ่อนลงไปในเรื่องวัตถุที่ต้องการใช้งาน โดยไม่มีผลกระทบกับการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูล ตัวอย่างการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น การติดแท็กที่มีลักษณะเป็นแท่งแก้วเล็ก ๆ เข้าไปในตัวสัตว์ และการฝังแท็กลงบนพื้นในระบบ AGV (Automatic Guide Vehicle)

2.6.7 สามารถสื่อสารได้ระยะไกล

ระยะในการอ่านและการเขียนข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีสามารถทำได้ในระยะไกล ๆ ทั้งนี้ระยะในการอ่านและการเขียนข้อมูลจะขึ้นอยู่กับกำลังส่งของสายอากาศ และช่วงความถี่ที่ใช้งาน สำหรับกำลังส่งของสายอากาศนั้นจะถูกกำหนดโดยกฎหมายของแต่ละประเทศ ทำให้ระบบอาร์เอฟไอดีที่ผลิตในบางประเทศมีระยะในการอ่านและการเขียนต่างกันออกไปทั้งที่ความถี่ใช้งานเดียวกัน

2.6.8 มีความปลอดภัยสูง

ระบบอาร์เอฟไอดีเป็นระบบที่มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากข้อมูลที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารเป็นข้อมูลดิจิทัลในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้สามารถเพิ่มความปลอดภัยของข้อมูลด้วยการเข้ารหัสลับ เพื่อไม่ให้ผู้อื่นไม่สามารถทราบข้อมูลที่ไม่ต้องการเปิดเผยได้

2.6.9 การอ่านและการเขียนข้อมูลสามารถทำพร้อมกันหลาย ๆ แท็กในเวลาเดียวกันได้

กล่าวคือเมื่อแท็กอยู่ในบริเวณที่มีสัญญาณคลื่นวิทยุ เครื่องอ่านข้อมูลจะสามารถอ่านและเขียนข้อมูลจากแท็กได้พร้อมกัน โดยสามารถทำได้หลาย ๆ แท็กพร้อมกัน หรือจะเลือกอ่านเฉพาะแท็กที่ต้องการระบุก็ได้

2.6.10 สามารถอ่านและเขียนข้อมูลขณะวัตถุกำลังเคลื่อนที่

เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ แม้ขณะฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งกำลังเคลื่อนที่ โดยความเร็วของการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับชนิดของการสื่อสาร หน่วยความจำ และปริมาณข้อมูลที่ใช้ อ่านและเขียน

2.7 ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ

สายอากาศถือเป็นองค์ประกอบสำคัญอีกประการหนึ่งสำหรับการสื่อสารไร้สาย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและการวิเคราะห์สายอากาศ ซึ่งต้องอาศัยหลักการและทฤษฎีพื้นฐานสำหรับสายอากาศ โดยจะทำการคำนึงถึงพารามิเตอร์สำหรับการใช้งาน ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญในการใช้งานสายอากาศ ได้แก่ บริเวณต่าง ๆ ของสนามสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern) ความกว้างลำคลื่น (Beamwidth) ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) อัตราขยาย (Gain) โพลารไรซ์ (Polarization) รวมถึงอัตราส่วนแกนของสายอากาศ เป็นต้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับสายอากาศที่นำเสนอ โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 ท่อนำคลื่นวงกลม (Circular waveguide)

ท่อนำคลื่นวงกลมเป็นท่อนำคลื่นอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยม ซึ่งท่อนำคลื่นนั้นจะใช้รูปทรงลักษณะใดก็ได้ แต่ที่ได้รับความนิยมเลือกใช้จะเป็นท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และท่อนำคลื่นวงกลม เพราะการคำนวณวิเคราะห์เกี่ยวกับโหมดการส่งคลื่น และรูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทำได้ง่ายกว่า ท่อนำคลื่นรูปทรงอื่นจึงไม่ค่อยได้รับความนิยมกัน และเมื่อมีการคิดคำนวณเกี่ยวกับรูปวงกลม การนำระบบโคออร์ดิเนตแบบโพลาร์มาใช้ในการคำนวณจะสะดวกกว่า โดยพารามิเตอร์ของระบบโพลาร์โคออร์ดิเนตที่ใช้จะเป็นรัศมี r มุมจากแนวนอน และมิติที่สามหรือแกนที่ 3 คือ แกน z

2.7.1.1 หลักการทำงานของท่อนำคลื่นวงกลม

หลักการทำงานของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม มีเงื่อนไขที่สำคัญที่สุดคือ ความถี่ที่ต้องการใช้งานต้องมีค่าสูงกว่าความถี่คัทออฟ ดังสมการที่ 2.1

$$f_o > f_{cutoff} \quad (2.1)$$

f_o = ความถี่ที่ต้องการใช้งาน (MHz)

f_{cutoff} = ความถี่คัทออฟ (MHz)

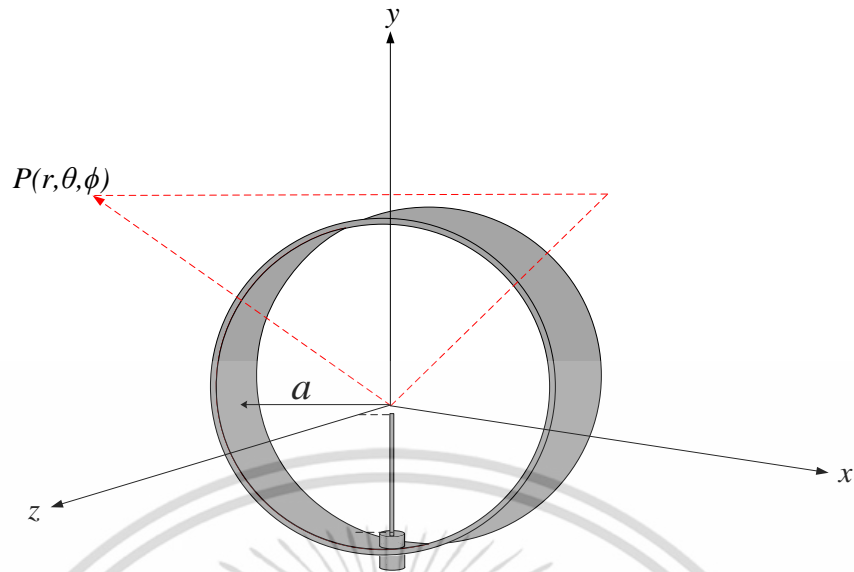
และสามารถคำนวณหาความยาวคลื่นคัทออฟของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมได้จากสมการที่ 2.2

$$\lambda_{cutoff} = 3.412a \quad (2.2)$$

λ_{cutoff} = ความยาวคลื่นคัทออฟ (cm)

a = รัศมีด้านในของท่อนำคลื่นวงกลม

ตัวอย่างที่ 1 การคำนวณความถี่คัทออฟ เมื่อท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมมีรัศมีด้านในยาว 7.35 cm โดยความถี่ใช้งานของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมที่ 920-925 MHz



รูปที่ 2.15 ท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมสำหรับประกอบตัวอย่างที่ 1

$$f = 920 - 925 \text{ MHz}$$

$$\lambda_{\text{cutoff}} = 32.61 - 32.43 \text{ cm}$$

จากสมการ 2.2

$$\lambda_{\text{cutoff}} = 3.412a$$

$$\lambda_{\text{cutoff}} = 25.078 \text{ cm}$$

$$f_{\text{cutoff}} = \frac{c}{\lambda_{\text{cutoff}}}$$

$$f_{\text{cutoff}} = 1196.25 \text{ MHz}$$

เพราะฉะนั้นท่อนำคลื่นคลื่นขนาดรัศมี $a = 7.35 \text{ cm}$ ไม่เหมาะสมในการใช้งานที่ความถี่ $920 \text{ MHz} - 925 \text{ MHz}$ จึงนำหลักการทำงานของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์มาใช้ เพื่อทำให้ท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมมีขนาดเล็กลงแต่สามารถทำงานในย่านความถี่ที่ต้องการได้ ซึ่งหลักการทำงานของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์จะนำเสนอในลำดับต่อไป

2.7.1.2 รูปแบบของคลื่นที่ส่งในท่อนำคลื่นวงกลม

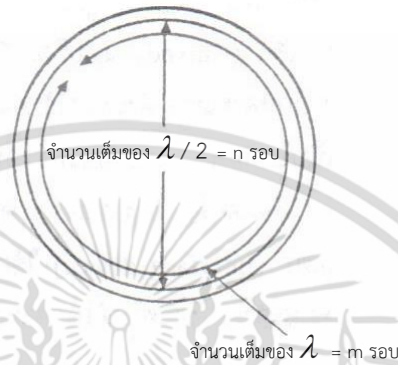
เนื่องจากท่อนำคลื่นเป็นรูปแบบวงกลม จึงทำให้มีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นในการวิเคราะห์คำนวณแก้ปัญหาต่าง ๆ จึงต้องใช้เบสเซลฟังก์ชัน (Bessel function) มาช่วยคำนวณแทนฟังก์ชันตรีโกณมิติในรูปแบบธรรมดาที่ใช้กัน การคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการหาสูตรหารูปแบบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่นต่าง ๆ เหล่านี้เป็นเรื่องที่ยังยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมดการส่งคลื่นในท่อนำคลื่นวงกลมจะเหมือนกับโหมดของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า เงื่อนไขขอบเขตที่รอยต่อก็เหมือนกันสามารถนำมาใช้ได้ โหมดการส่งคลื่นที่ใช้มี 2 โหมดหลัก คือ การส่งคลื่นในโหมด $TE_{m,n}$ และการส่งคลื่นในโหมด $TM_{m,n}$ ตามลำดับ โดยที่

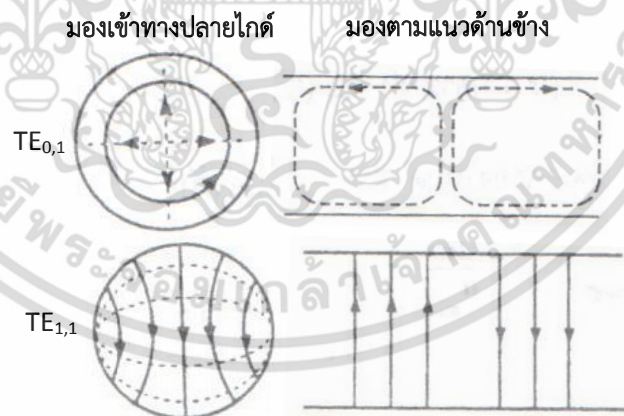
m = จำนวนเต็มของความยาวคลื่นรอบด้านในของท่อนำคลื่นวงกลม

n = จำนวนเต็มของครึ่งความยาวคลื่นบนเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนำคลื่นวงกลม



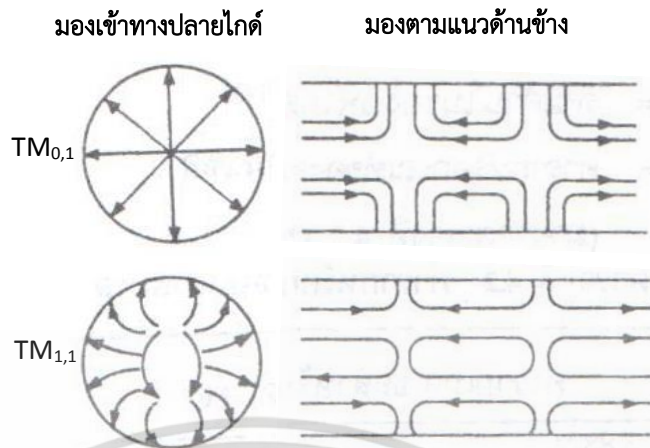
รูปที่ 2.16 ความหมายของ m และ n [9]

ความสัมพันธ์ของ m และ n แสดงไว้ในภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 2.16 รูปแบบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (Electric and Magnetic pattern) ที่ใช้งานกันในโหมด $TE_{m,n}$ และโหมด $TM_{m,n}$ ของท่อนำคลื่นวงกลมแสดงในเห็นรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 โหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่นวงกลม [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



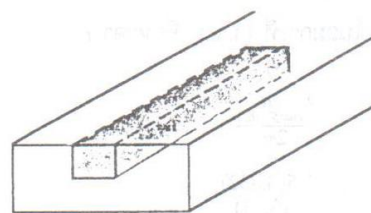
รูปที่ 2.17 โหมด TE และ TM ของท่อนำคลื่นวงกลม (ต่อ)

2.7.1.3 การใช้งานท่อนำคลื่นวงกลม

การประยุกต์ใช้งานมีความสำคัญและเหมาะสมมากที่สุดอีกงานหนึ่งก็คือ การใช้เป็นโรตารีจอยท์ (Rotary joint) โดยโรตารีจอยท์ซึ่งอาจจะเรียกง่าย ๆ ว่าข้อต่อหมุนเป็นคอนเนคเตอร์หรือข้อต่อที่ต่ออยู่ระหว่างท่อนำคลื่น ทำให้สามารถหมุนท่อนำคลื่นด้านหนึ่งไปรอบตัวได้ โดยท่อนำคลื่นอีกด้านหนึ่งจะหยุดนิ่งอยู่กับที่ ตัวอย่างการใช้งานที่พบเห็นกันได้บ่อย คือ การใช้สายอากาศเรดาร์แบบหมุนรอบตัว (Rotating radar antenna) ซึ่งไม่สามารถใช้ท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า แทนที่โดยไม่เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณ โดยท่อนำคลื่นวงกลมนี้มีความสมมาตรรอบตัวอยู่แล้ว การหมุนรอบตัวของท่อนำคลื่นวงกลม จึงไม่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบของสนาม ไม่ว่าจะเป็สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าก็ตาม ดังนั้นการนำไปประยุกต์ใช้ก็งานที่ต้องการหลีกเลี่ยงการเกิดสัญญาณสะท้อนกลับ จึงนิยมใช้ลักษณะความสมมาตรของท่อนำคลื่นวงกลมให้เป็นประโยชน์ เช่น ใช้เป็นข้อต่อหมุน เป็นต้น

2.7.2 ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์ (Ridge waveguide)

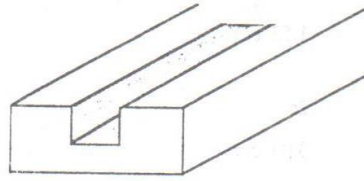
ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์เกิดจากการนำแท่งตัวนำสี่เหลี่ยมมาทำเป็นแนวหรือเป็นสันที่ด้านบนหรือด้านล่างของท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 (ก) อาจใช้วิธีเซาะร่องเป็นแนวแบบเดี่ยวหรือแบบคู่ก็ได้ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.17 (ข) (ค) ตามลำดับ



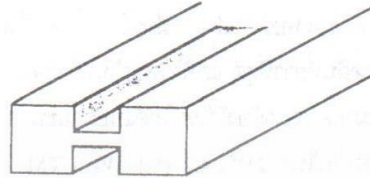
(ก) ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์แบบใช้แท่งตัวนำ

รูปที่ 2.18 ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์ในรูปแบบต่าง ๆ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์แบบเซาะร่องเดี่ยว



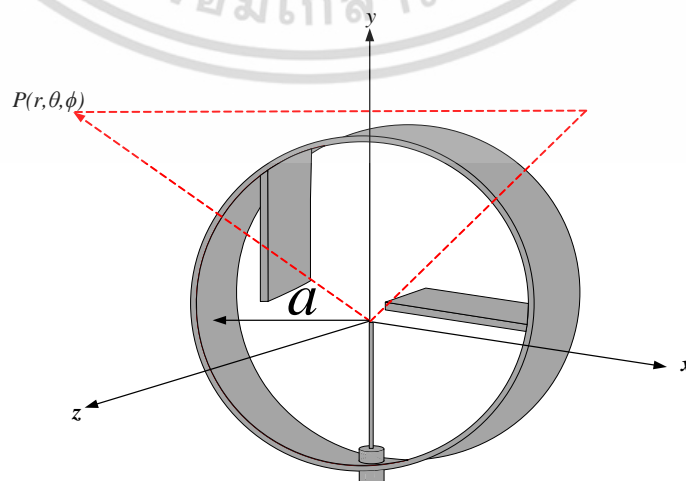
(ค) ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์แบบเซาะร่องคู่

รูปที่ 2.18 ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์ในรูปแบบต่าง ๆ (ต่อ)

ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์มีข้อดีที่น่าสนใจอยู่ 2 ประการ คือทำให้คุณลักษณะของอิมพีแดนซ์มีค่าน้อยลง และเป็น การเพิ่มแบนด์วิดท์ของท่อนำคลื่น โดยความเร็วเฟสจะต่ำลงด้วย ซึ่งส่งผลให้ความถี่คutoff ในโหมดส่งคลื่นหลักต่ำลง ดังนั้นที่ความถี่ใช้งานเดียวกัน ถ้าใช้ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์แทนท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะทำให้ขนาดของท่อนำคลื่นเล็กลง

นอกจากนี้สามารถปรับค่าคุณลักษณะของอิมพีแดนซ์ท่อนำคลื่นได้ จึงใช้แมตท่อนำคลื่นที่มีคุณลักษณะของอิมพีแดนซ์ต่างกัน โดยปรับท่อนำคลื่นแบบบริดจ์ที่ต่อคั่นกลางให้เรียวเล็กลง (Tapered) เพื่อให้เกิดอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสม ข้อเสียของท่อนำคลื่นแบบบริดจ์คือ การเพิ่มค่าการลดทอน (Attenuation) ซึ่งเป็นตัวจำกัดให้ใช้งานได้ในช่วงระยะใกล้ท่อนำคลื่นแบบบริดจ์ขนาดตามมาตรฐาน สามารถต่อใช้งานกับท่อนำคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดต่าง ๆ ได้

ตัวอย่างที่ 2 การคำนวณความถี่คutoff เมื่อท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมมีรัศมีด้านในยาว 7.35 cm โดยภายในท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมมีการเชื่อมต่อแผ่นระนาบจำนวนสองแผ่น ความยาวของแผ่นระนาบเท่ากับ 6.5 cm ความกว้างของแผ่นระนาบเท่ากับ 2.5 cm ความหนาของแผ่นระนาบเท่ากับ 0.015 mm และใช้งานที่ความถี่เดิมคือ 920-925 MHz



รูปที่ 2.19 ท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมสำหรับประกอบตัวอย่างที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลลิขสิทธิ์ของเอกสารฉบับนี้ไว้เป็นอันดี หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอสงวนสิทธิ์ในการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาความยาวรอบรูปของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม จาก

$$2\pi r = 2\pi(7.35) + [4 \times 6.5] + [2 \times 0.015]$$

$$2\pi r = 72.48 \text{ cm}$$

$$r = 11.54 \text{ cm}$$

สามารถหาความยาวคลื่นคัทออฟจากสมการที่ 2.2

$$\lambda_{\text{cutoff}} = 3.412a$$

$$\lambda_{\text{cutoff}} = 39.37 \text{ cm}$$

$$f_{\text{cutoff}} = \frac{c}{\lambda_{\text{cutoff}}}$$

$$f_{\text{cutoff}} = 764 \text{ MHz}$$

เพราะฉะนั้นท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมที่มีขนาดรัศมีด้านใน $a = 7.35 \text{ cm}$ สามารถใช้งานที่ความถี่ 920 MHz – 925 MHz ได้ เนื่องจาก

$$f_o > f_{\text{cutoff}}$$

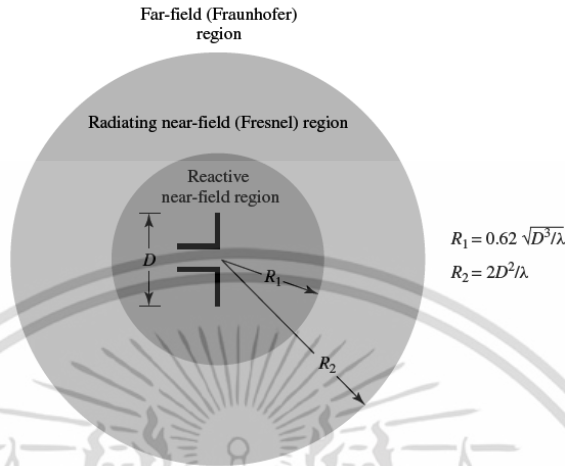
2.7.3 โพรบไฟฟ้า

โพรบไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบสำคัญในการบ่อนสัญญาณให้กับสายอากาศที่ทำการวิจัย ซึ่งหลักการของโพรบไฟฟ้านี้ ใกล้เคียงกับหลักการของสายอากาศโมโนโพล สายอากาศโมโนโพลเป็นสายอากาศที่มีการใช้แผ่นระนาบกราวด์มาแทนโครงสร้างอีกครั้งหนึ่งของสายอากาศไดโพล โดยระนาบกราวด์จะอยู่ในตำแหน่งตั้งฉากกับโครงสร้างอีกครั้งหนึ่งของสายอากาศไดโพล ถ้าระนาบกราวด์มีขนาดใหญ่เพียงพอจะทำให้เกิดการสะท้อนคลื่นโดยไม่เกิดการเลี้ยวเบน สายอากาศโมโนโพลจะให้คลื่นที่แพร่กระจายเช่นเดียวกับสายอากาศไดโพล ดังนั้นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โมโนโพลจึงเป็นแบบรอบทิศทาง โพรบไฟฟ้าที่ใช้ในสายอากาศวงแหวนวงกลมถึงแม้จะมีความยาวเท่ากับ ความยาวของสายอากาศโมโนโพล คือ หนึ่งส่วนของความยาวคลื่น ($\lambda / 4$) แต่เนื่องจากไม่ได้มีลักษณะโครงสร้างกราวด์ที่แบนราบ และไม่ได้ให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะโครงสร้างเฉพาะของกราวด์ที่เป็นแบบวงแหวนวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.4 บริเวณต่าง ๆ ของสนามจากสายอากาศ

โดยทั่วไปช่องว่างบริเวณรอบ ๆ สายอากาศถูกแบ่งออกเป็น 3 ขอบเขต คือ สนามระยะใกล้รีแอกทีฟ (Reactive near-field) สนามระยะใกล้ที่แผ่กระจายคลื่น (Radiating near-field (Fresnel)) และสนามระยะไกล (Far-field (Fraunhofer)) ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การแบ่งบริเวณสนามจากสายอากาศ [10]

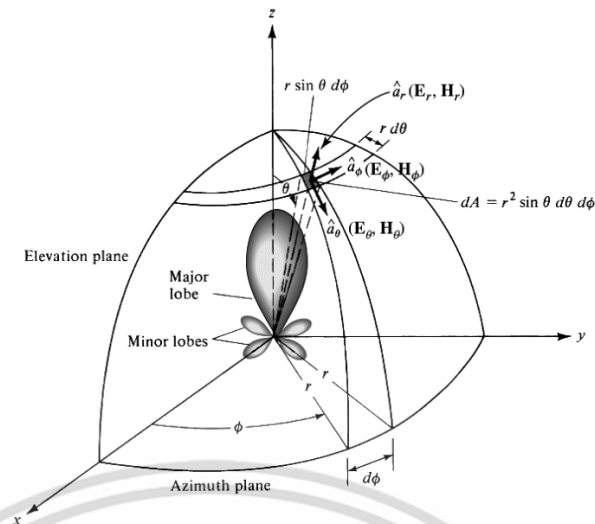
บริเวณสนามรีแอกทีฟระยะใกล้ เป็นบริเวณที่ล้อมรอบใกล้สายอากาศมากที่สุดและมีสนามชนิดแอกทีฟเป็นส่วนใหญ่บริเวณนี้จะมีระยะทาง $R \geq 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$ จากผิวของสายอากาศเมื่อ λ เป็นความยาวคลื่นและ D เป็นมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ บริเวณสนามกระจายระยะใกล้เป็นบริเวณของสนามของสายอากาศที่อยู่ระหว่างบริเวณของสนามรีแอกทีฟระยะใกล้กับบริเวณสนามระยะไกล โดยมีสนามที่แผ่กระจายอยู่เป็นส่วนใหญ่ การกระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ นั้นแปรผันตามระยะทางจากสายอากาศ เมื่อสายอากาศมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น สนามในบริเวณนี้อาจไม่เกิดขึ้น ในบริเวณนี้จะมีระยะทาง $R \geq 0.62 \sqrt{D^3 / \lambda} \leq R \leq 2D^2 / \lambda$

บริเวณสนามระยะไกลเป็นบริเวณสนามของสายอากาศ ซึ่งการแผ่ของสนามของสายอากาศตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางจากสายอากาศ ถ้าสายอากาศมีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ D บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R มากกว่า $2D^2 / \lambda$ จากสายอากาศ ในบริเวณนี้สามารถมีลักษณะเป็นสนามตัดขวาง (Transverse Field) และการแผ่กระจายของสนามตามมุมต่าง ๆ ไม่ขึ้นกับระยะทาง ขอบในบริเวณดังกล่าวมีค่า R เท่ากับ $2D^2 / \lambda$ และขอบนอกมีค่าเป็นอนันต์

2.7.5 แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

แบบรูปการแผ่กระจายคลื่น คือรูปภาพที่ใช้เพื่อแสดงคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่น ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสเปซโคออร์ดิเนต (Space Coordinates) ส่วนใหญ่แบบรูปการแผ่กระจายคลื่นจะพิจารณาในบริเวณสนามระยะไกล (Far Field) การอธิบายคุณสมบัติของการแผ่กระจายคลื่นจะอาศัยคุณสมบัติต่าง ๆ คือ ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น (Radiation Intensity) ความเข้มของสนาม (Field Strength) เฟส (Phase) หรือการโพลาไรซ์ (Polarization) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้มีการกระจายตัวใน 3 มิติ สามารถแสดงได้โดยการใช้ระบบพิกัดแบบ 3 มิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

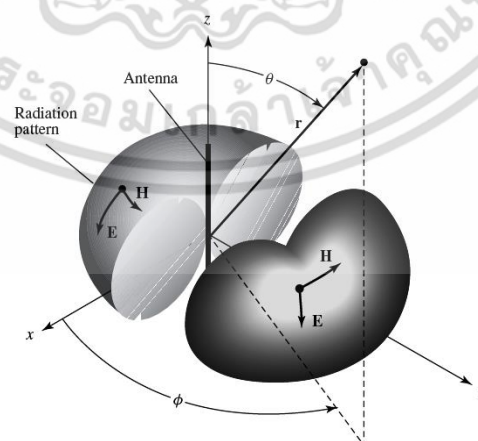


รูปที่ 2.21 ระบบโคออร์ดิเนตสำหรับการวิเคราะห์สายอากาศ [10]

จากรูป 2.21 เป็นการแสดงระบบโคออร์ดิเนตที่ใช้ในการแสดงคุณสมบัติการแพร่กระจายคลื่นสำหรับการใช้เส้นเพื่อแสดงกำลังงานที่สายอากาศรับได้ตามแนวรัศมีที่มีค่าคงที่ มีชื่อเรียกว่าแบบรูปกำลังงาน (Power Pattern) ของสายอากาศและกราฟที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในทิศทางต่าง ๆ ที่มีรัศมีคงที่เรียกว่า สนามการแพร่กระจายคลื่น (Field Pattern) ของสายอากาศนั้น

2.7.5.1 แบบรูปการแพร่กระจายแบบไอโซทรอปิก แบบชี้ทิศทางและแบบทิศทางรอบตัว (Isotropic, Directional and Omni-directional Pattern)

ตัวแพร่กระจายคลื่นไอโซทรอปิก (Isotropic Radiation) คือสายอากาศที่ถูกสมมติขึ้นให้มีการแพร่กระจายคลื่นเท่ากันในทุกทิศทาง แม้ว่ามันจะเป็นแค่แนวความคิด แต่ก็มักจะใช้เพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบกับสายอากาศเกี่ยวกับการแสดงคุณสมบัติและทิศทางของสายอากาศ



รูปที่ 2.22 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบทิศทางรอบตัว [10]

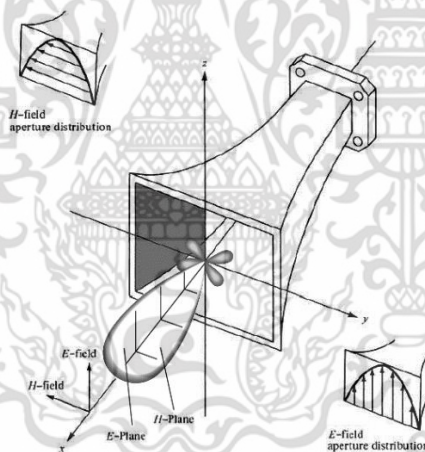
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศชี้ทิศทาง (Directional Antenna) คือสายอากาศที่มีคุณสมบัติของการแพร่กระจายคลื่นหรือรองรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีในเฉพาะทิศทางที่กำหนดเท่านั้น ตัวอย่างของสายอากาศที่มีคุณสมบัติดังกล่าวคือ สายอากาศแบบทิศทางรอบตัว (Omni-directional Antenna) คุณสมบัติของสายอากาศแบบนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.22

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

2.7.5.2 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก (Principal Pattern)

การอธิบายคุณสมบัติของสายอากาศ ในทอมของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลักของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สำหรับสายอากาศโพลาไรซ์เชิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าจะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามไฟฟ้า และทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด ส่วนแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก จะเป็นระนาบที่บรรจุเวกเตอร์สนามแม่เหล็กและทิศทางของการแพร่กระจายคลื่นที่แรงที่สุด



รูปที่ 2.23 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และ ระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ของสายอากาศปากแตร [10]

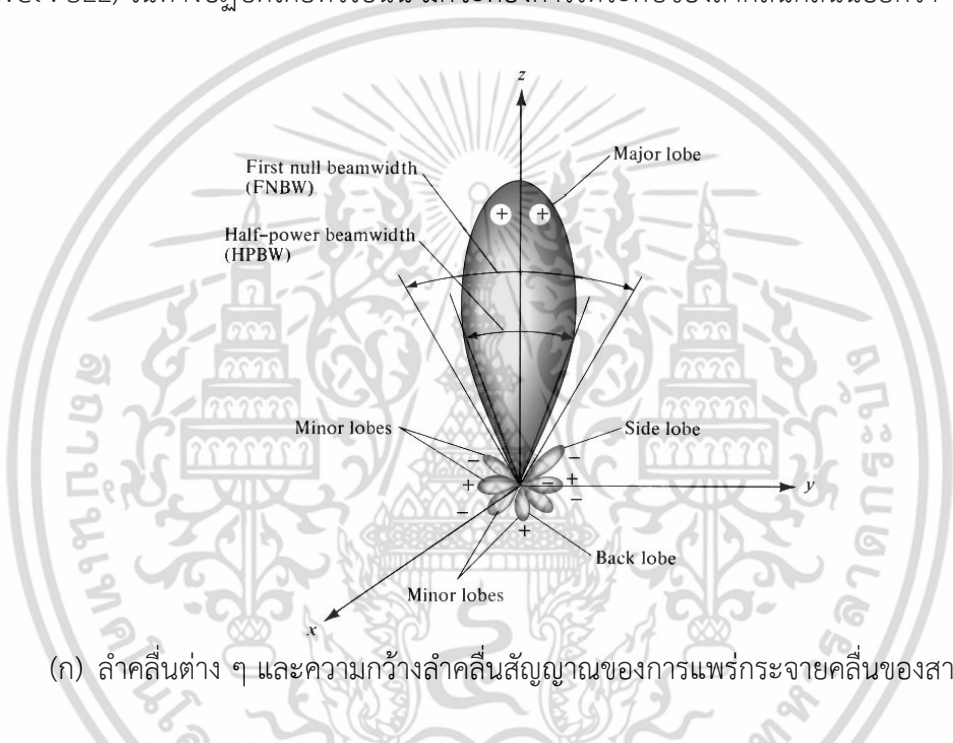
จากรูป 2.21 เป็นการแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นหลัก โดยมีระนาบ xz (ระนาบเอเลเวชัน; $\phi = 0$) เป็นระนาบสนามไฟฟ้า หลักและมีระนาบ xy (ระนาบแอสิมัท; $\theta = \pi/2$) เป็นระนาบสนามแม่เหล็กหลัก

2.7.5.3 ลำคลื่นของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Lobe)

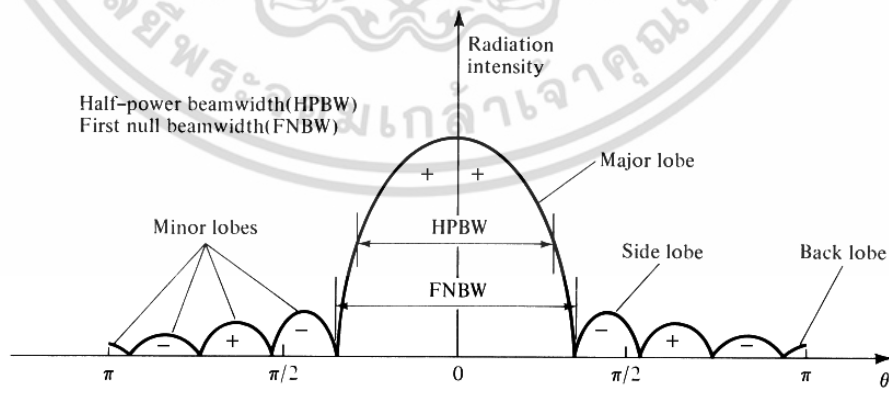
ลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นเป็นส่วนหนึ่งของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่เกิดเป็นบริเวณโดยการปิดล้อมของส่วนที่มีความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นต่ำจากรูปที่ 2.19 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสามมิติ ซึ่งสามารถแบ่งลำคลื่นเป็นแบบต่าง ๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำคลื่นหลัก (Major Lobe หรือ Main Lobe) เป็นลำคลื่นของการแพร่กระจายคลื่นที่อยู่ในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุดตามรูปที่ 2.22 มีลำคลื่นหลักอยู่ในทิศทาง $\theta = 0$ สำหรับสายอากาศบางชนิดอาจมีลำคลื่นหลักมากกว่าหนึ่งลำคลื่น เช่น สายอากาศแยกลำคลื่น ลำคลื่นย่อย คือลำคลื่นอื่นที่นอกเหนือจากลำคลื่นหลัก ลำคลื่นด้านข้าง (Side Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่ติดอยู่กับลำคลื่นหลักและอยู่ในทิศทางของครึ่งวงกลมซีกเดียวกับลำคลื่นหลัก ลำคลื่นด้านหลัง (Back Lobe) เป็นลำคลื่นย่อยที่อยู่ในครึ่งวงกลมตรงข้ามกับลำคลื่นหลัก ปกติแล้วลำคลื่นย่อยจะเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางที่ไม่ต้องการ ดังนั้นสายอากาศที่ดีจึงต้องกำจัดลำคลื่นเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุด ระดับของคลื่นย่อยมักจะแสดงเป็นอัตราส่วนของความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นที่กำลังคิดต่อความหนาแน่นพลังงานในลำคลื่นหลัก ซึ่งเรียกว่าระดับลำคลื่นย่อยด้านข้าง (Side Lobe Level : SLL) ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้น มักจะต้องการให้ระดับของลำคลื่นคลื่อนน้อยกว่า -20 dB



(ก) ลำคลื่นต่าง ๆ และความกว้างลำคลื่นสัญญาณของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ



(ข) รูปแบบการแพร่กระจายคลื่นเชิงเส้น [10]

รูปที่ 2.24 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ โดยทั่วไปนั้นมีหลากหลายแบบด้วยกัน ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และการออกแบบสายอากาศ ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบจะให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่แตกต่างกันตามองค์ประกอบของสายอากาศ โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีด้วยกัน 3 แบบ คือ

- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง (Omni-Directional)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Omni-Directional หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางมีการแพร่กระจายคลื่นออกรอบตัวสายอากาศ โดยข้อดีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง คือสามารถตอบสนองการใช้งานได้รอบทิศทางที่ความแรงของสัญญาณสม่ำเสมอ และข้อเสียของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทางคือมีอัตราขยายต่ำ

- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง (Bi-Directional)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Bi-Directional หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางจะมีการแพร่กระจายคลื่นออกทางด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศ โดยข้อดีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทางคือ มีอัตราขยายสูงกว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง และข้อเสียของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง คือสามารถตอบสนองการใช้งานได้ดีเฉพาะด้านหน้าและด้านหลังของสายอากาศ

- แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว (Uni-Directional)

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบ Uni-Directional หรือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียวจะมีการแพร่กระจายคลื่นออกทางด้านหน้าหรือด้านหลังของสายอากาศ โดยข้อดีของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว คือมีอัตราขยายสูงกว่าแบบรูปการแพร่กระจายแบบรอบทิศทางและแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบสองทิศทาง และข้อเสียของแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบทิศทางเดียว คือสามารถตอบสนองการใช้งานได้ดีเฉพาะด้านหน้าหรือด้านหลังของสายอากาศเท่านั้น

2.7.6 แบนด์วิดธ์ของสายอากาศ (Antenna Bandwidth)

แบนด์วิดธ์ของสายอากาศได้ถูกนิยามเอาไว้ว่า แบนด์วิดธ์ คือช่วงของความถี่ของสายอากาศที่มีคุณลักษณะบางอย่างที่สอดคล้องกับมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งคุณลักษณะที่บ่งบอกว่าสายอากาศที่ออกแบบสามารถทำงานในช่วงความถี่ใดบ้าง การคำนวณหาแบนด์วิดธ์ของสายอากาศนั้น จะพิจารณาที่ขอบความถี่สูง (f_H) และขอบความถี่ต่ำ (f_L) ของสายอากาศเมื่อพิจารณาคุณลักษณะของ $|S_{11}|$ ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ -10 dB ซึ่งการคำนวณแบนด์วิดธ์ของสายอากาศนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

$$BW = f_H - f_L \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss)

การพิจารณาว่าสายอากาศจะมีคุณลักษณะที่เพียงพอต่อการใช้งานได้หรือไม่นั้น นอกจากจะพิจารณาเฉพาะ $|S_{11}|$ แล้วยังสามารถที่จะพิจารณาค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Voltage Standing Wave Ratio : VSWR) ได้เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการใช้หลักการสะท้อนและการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสองตัวกลาง ซึ่งหากว่าทั้งสองตัวกลางมีอิมพีแดนซ์เท่ากันจะส่งให้คลื่นมีการส่งผ่านได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่เกิดการสูญเสีย ในทางกลับกันหากสองตัวกลางมีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันจะส่งผลให้การส่งผ่านของคลื่นเกิดการสูญเสียหรือเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งหมายความว่ากำลังงานส่วนใหญ่ที่ส่งให้กับสายอากาศไม่สามารถที่จะแพร่กระจายออกไปในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งกรณีส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้น เมื่ออิมพีแดนซ์ระหว่างสองตัวกลางมีค่าที่ไม่เท่ากัน ซึ่งในกรณีดังกล่าวนี้จะส่งผลให้ไม่มีการส่งผ่านอย่างสมบูรณ์หรือเกิดการสะท้อนกลับทั้งหมด เป็นผลให้เกิดการสะสมพลังงานไว้บางส่วน ซึ่งสามารถพิจารณาการสะท้อนได้จากสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) ได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (2.4)$$

เมื่อ Z_{in} คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

Z_o คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งสัญญาณ

$$RL(\text{dB}) = -20 \log |\Gamma| \quad (2.5)$$

2.7.8 อัตราขยาย (Gain)

ค่าอัตราขยายของสายอากาศ สามารถพิจารณาได้ 2 กรณี คือ

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

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

อัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทางโดยรวมประสิทธิภาพของสายอากาศเข้ามาด้วยในขณะที่ค่าสภาพเจาะจงทิศทางอธิบายคุณสมบัติในการชี้ทิศทางของสายอากาศเท่านั้น

อัตราการขยายกำลัง (Power Gain) ของสายอากาศในทิศทางที่กำหนดให้ นั้น มีค่าเท่ากับ 4π คูณกับอัตราส่วนของความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นในทิศทางนั้นต่อทิศทางกำลังงานสุทธิที่สายอากาศรับจากขั้วต่อของเครื่องส่ง เมื่อไม่ได้กำหนดทิศทางไว้โดยเฉพาะ โดยทั่วไปแล้วจะคิดค่ากำลังขยายในทิศทางที่มีการแพร่กระจายคลื่นแรงที่สุด ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Gain = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.6)$$

เมื่อ $U(\theta, \phi)$ = ความเข้มของการแผ่กระจายคลื่น
 P_{in} = กำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วมักจะพูดถึงอัตราขยายสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราการขยายกำลังในทิศทางที่กำหนดให้ต่ออัตราการขยายกำลังของสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบในทิศทางนั้น เมื่อกำลังงานที่ป้อนเข้าสายอากาศนั้นต้องเท่ากับสายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบอาจจะเป็นสายอากาศไดโพล สายอากาศปากแตร แต่โดยส่วนใหญ่สายอากาศที่ใช้เปรียบเทียบจะเป็นแหล่งกำเนิดไอโซทรอปิกแบบจุดที่ไม่มีการสูญเสีย ดังนั้น

$$G_g = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.7)$$

กำลังงานที่แผ่กระจายทั้งหมด P_{rad} สัมพันธ์กับกำลังงานที่ป้อนให้สายอากาศ P_{in} ดังนี้

$$P_{rad} = e_r P_{in} \quad (2.8)$$

เมื่อ e_r เป็นประสิทธิภาพรวมของสายอากาศ (ไม่มีหน่วย) จะได้

$$G(\theta, \phi) = e_r \left[4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{rad}} \right] \quad (2.9)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางดังนี้

$$G_g(\theta, \phi) = e_r D_g(\theta, \phi) \quad (2.10)$$

ในทำนองเดียวกัน ค่าสูงสุดของอัตราขยายจะสัมพันธ์กับค่าการชี้ทิศทางสูงสุดโดย

$$G_0 = D_g(\theta, \phi)_{\max} = e_r D_g(\theta, \phi)_{\max} \quad (2.11)$$

ดังนั้นค่าประมาณของอัตราขยายจะได้

$$G_0 = \frac{30000}{\Theta_{1r} \Theta_{2r}} \quad (2.12)$$

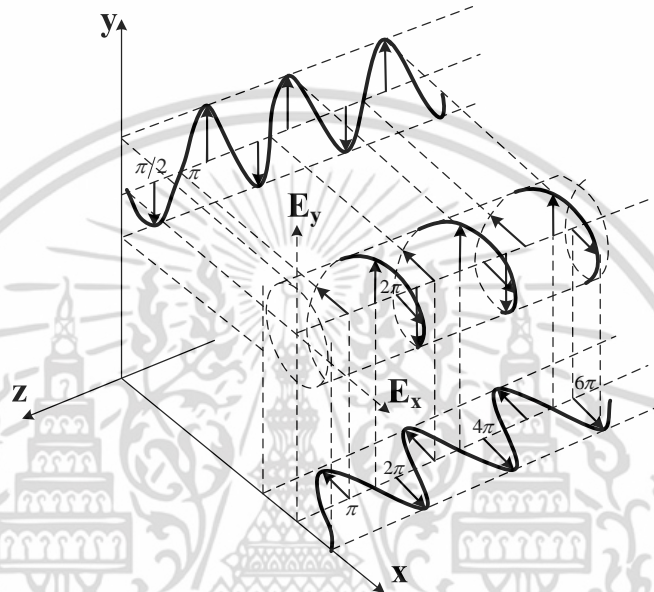
เมื่อ Θ_{1r} = HPBW ในระนาบใด ๆ (Degree)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Θ_{2r} = HPBW ในระนาบซึ่งตั้งฉากกับระนาบแรก (Degree)

2.7.9 การโพลาไรซ์

การโพลาไรซ์ คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อคลื่นเดินทาง โดยการมองตามหลังคลื่น การโพลาไรซ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ การโพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear polarization: LP) การโพลาไรซ์วงกลม (Circular polarization: CP) การโพลาไรซ์วงรี (Elliptical polarization: EP)



รูปที่ 2.25 การหมุนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแนวระนาบที่เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ $z=0$ [4]

สำหรับโพลาไรซ์ของสายอากาศในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง จะเป็นโพลาไรซ์ของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศรับคลื่นแล้วจะมีกำลังที่ชี้ของสายอากาศมากที่สุด ถ้าไม่ได้กำหนดทิศทางมาให้จะหมายถึง ทิศทางที่สายอากาศมีค่าอัตราขยายมากที่สุด ดังนั้นโพลาไรซ์ของสายอากาศในทิศทางที่ต่างกัน จะต่างกัน การแบ่งชนิดของโพลาไรซ์อาจแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

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

ถ้าสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่า โพลาไรซ์หมุนขวา ในขณะที่หากสนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะเป็นโพลาไรซ์หมุนซ้าย ซึ่งสนามชั่วขณะเวลานั้นของคลื่นระนาบที่เดินทางในทิศทางแนวแกน $-z$ ได้ว่า

$$\mathbf{E}(z;t) = \hat{a}_x E_x(z;t) + \hat{a}_y E_y(z;t) \quad (2.13)$$

เมื่อส่วนประกอบของสนามชั่วขณะเวลานั้น สัมพันธ์กับค่าเชิงซ้อนของสนามดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_x(z;t) = E_{x0} \cos(\omega t + kz + \phi_x) \quad (2.14)$$

$$E_y(z;t) = E_{y0} \cos(\omega t + kz + \phi_y) \quad (2.15)$$

เมื่อ E_{x0} และ E_{y0} เป็นค่าขนาดสูงสุดของสนาม ในทิศทางแนวแกน x และแนวแกน y ตามลำดับ

2.7.9.1 โพลาริซเซชัน

การโพลาริซเซชัน คือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) คงที่ตลอดการเดินทางของคลื่น สำหรับคลื่นที่มีการโพลาริซเซชัน จะมีความแตกต่างของเฟสระหว่างองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ในแนวตั้งและแนวนอน เป็นดังนี้

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = n\pi, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.16)$$

สามารถแบ่งชนิดของการโพลาริซเซชันได้เป็น 3 ชนิดคือ การโพลาริซเซชันแนวตั้ง (Vertical Polarization: VP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) คงที่ในแนวตั้งตลอดการเดินทางของคลื่น

การโพลาริซเซชันแนวนอน (Horizontal Polarization: HP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) คงที่ในแนวนอนตลอดการเดินทางของคลื่น

การโพลาริซเซชันแนวเฉียง (Slant Polarization: SP) คือ ทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) คงที่ในแนวเฉียงตลอดการเดินทางของคลื่น

2.7.9.2 โพลาริซเซชันวงกลม

การโพลาริซเซชันวงกลมคือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งจะมีลักษณะเป็นวงกลมที่เป็นฟังก์ชันของเวลา โดยมีเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดโพลาริซเซชันวงกลมดังนี้

- ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ
- องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากัน
- องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ทั้งสองต้องมีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเท่าของ $\frac{\pi}{2}$

ถ้าคลื่นแพร่กระจายไปในทิศทางแนวแกน $-z$ จะสามารถหาค่าความต่างของเฟสของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ในแนวตั้งและแนวนอน ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$E_{x0} = E_{y0} \quad (2.17)$$

เมื่อ

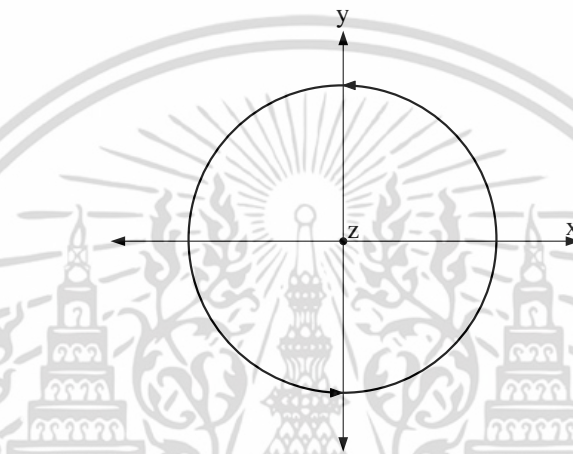
$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = +\frac{(1+4n)\pi}{2}; \quad n = 0, 1, 2, \dots \text{cw} \quad (2.18)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = -\frac{(1+4n)\pi}{2}; \quad n = 0, 1, 2, \dots \text{ccw} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

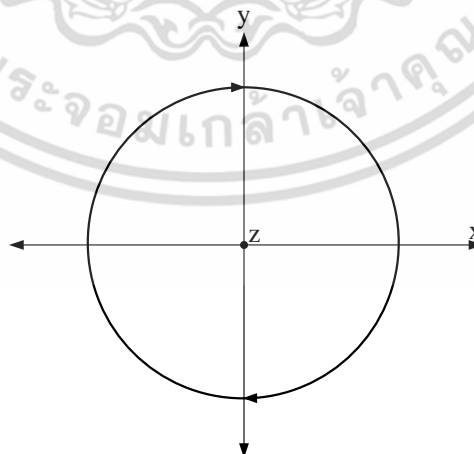
เมื่อ CW (Clockwise) คือ สนามหมุนตามเข็มนาฬิกา
 CWW (Counter Clockwise) คือ สนามหมุนทวนเข็มนาฬิกา
 จากสมการ (2.8) และ (2.9) พบว่าสามารถแบ่งการโพลาริซวงกลมออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

- การโพลาริซวงกลมหมุนขวา (Right-handed CP) คือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) จะหมุนตามเข็มนาฬิกา (Clockwise: CW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทางแนวแกน z) ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การโพลาริซวงกลมหมุนขวา (Right-handed CP)

- การโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย (Left-handed CP) คือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา (Counter Clockwise: CCW) เมื่อมองไปในทิศทางที่แพร่กระจายคลื่น (ทิศทางแนวแกน z) ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย (Left-handed CP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.9.3 โพลาริซวงรี

การโพลาริซวงรีคือทิศทางของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดโพลาริซวงรีสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1

- ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ
- ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ทั้งสองต้องมีขนาดที่เท่ากันแล้ว องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ทั้งสองต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับจำนวน $\frac{\pi}{2}$

$$E_{x0} = E_{y0} \quad (2.20)$$

เมื่อ

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pm \frac{n}{2} \pi > 0 \quad ; n = 0, 1, 2, \dots \text{cw} \quad (2.21)$$

$$\Delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pm \frac{n}{2} \pi < 0 \quad ; n = 0, 1, 2, \dots \text{ccw} \quad (2.22)$$

กรณีที่ 2

- ต้องมีองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) แบบเชิงเส้น 2 องค์ประกอบ
- ถ้าองค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ทั้งสองต้องมีขนาดที่ไม่เท่ากันแล้ว องค์ประกอบของสนามไฟฟ้า (\vec{E}) ทั้งสองต้องมีเฟสต่างกันไม่เท่ากับจำนวน π

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

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

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

ในกรณีของโพลาริซแบบวงรีนั้น จะมีการกวาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยทั่วไปจะแสดงในรูปของวงรีที่มีมุมเอียง (Tilted Ellipse) โดยอัตราส่วนของแกนหลัก (Major Axis) ต่อแกนย่อย (Minor Axis) จะเรียกว่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio : AR) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$AR = \frac{\text{Major axis}}{\text{Minor axis}} = \frac{OA}{OB} = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} \quad (2.26)$$

$$OA = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 + \left[E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi) \right]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$OB = \left[\frac{1}{2} \left\{ E_{x0}^2 + E_{y0}^2 - \left[E_{x0}^4 + E_{y0}^4 + 2E_{x0}^2 E_{y0}^2 \cos(2\Delta\phi) \right]^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad (2.28)$$

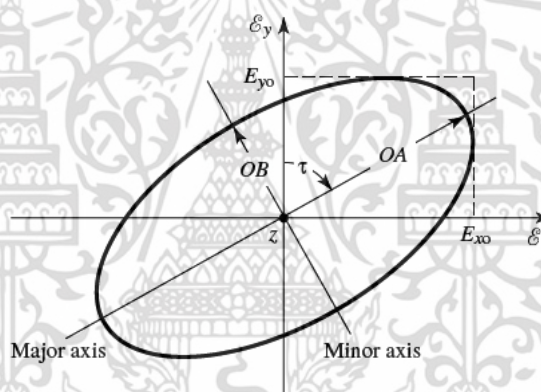
เมื่อ OA = แกนหลัก และ OB = แกนย่อย

มุมเอียงของวงรีเมื่อเทียบกับแกน y จะแทนด้วยมุม τ ซึ่งแสดงดังสมการต่อไปนี้คือ

$$\tau = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2E_x E_y}{E_x^2 + E_y^2} \cos(\Delta\phi) \right] \quad (2.29)$$

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]

การจำแนกชนิดของการโพลาริซจะพิจารณาได้จากค่าอัตราส่วนแกน (Axial Ratio : AR) ที่แสดงดังสมการที่ 2.30

ผลที่ได้จากสมการที่ 2.24 สามารถแบ่งชนิดของการโพลาริซออกได้เป็น 3 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 โพลาริซเชิงเส้น (LP) ซึ่งจะมีเฉพาะค่า $|E|_{\max}$ ($|E|_{\min} = 0$) นั่นคือ

$$AR = \frac{|E|_{\max}}{0} = \infty \quad (2.30)$$

กรณีที่ 2 โพลาริซวงกลม (CP) ซึ่งจะมีค่า $|E|_{\max} = |E|_{\min}$ นั่นคือ

$$AR = \frac{|E|_{\max}}{|E|_{\min}} = 1 \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี 3 โพลาริซวงรี (EP) ซึ่งจะมีค่า $|E|_{\max} > |E|_{\min}$ นั่นคือ

$$1 < AR < \infty \quad (2.32)$$

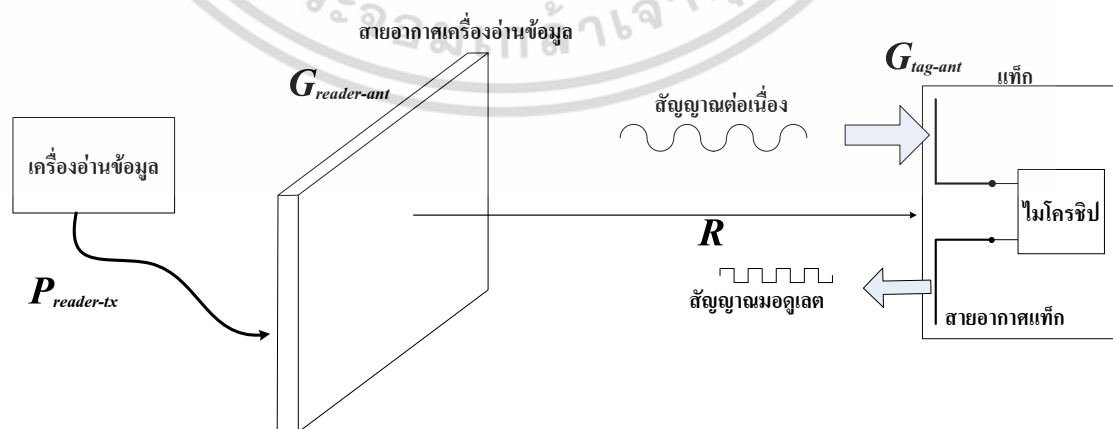
ข้อดีของสายอากาศที่มีการโพลาริซวงกลม คือการสูญเสียที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโพลาริซมีค่าต่ำ และสามารถรับส่งข้อมูลได้แม้สายอากาศไม่มีการจัดวางในทิศทางที่แน่นอน ทำให้ระหว่างการรับส่งข้อมูลมีช่วงจังหวะที่ทำให้เกิดการตรงกันของโพลาริซ (Polarized Matching) อย่างแน่นอน

2.7.10 เทคโนโลยีของระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้หลักการสื่อสารแบบการเชื่อมต่อที่ระยะสนามระยะไกล

ระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกล จะใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างของแท็กประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แผงวงจรหรือชิป ที่เก็บบันทึกข้อมูลต่าง ๆ และสายอากาศสำหรับรับและส่งสัญญาณ

2.7.10.1 หลักการทำงาน

สำหรับระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกลนั้น สายอากาศมีความสำคัญต่อสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของระบบ เนื่องจากหลักการทำงานนี้จะอาศัยการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางสายอากาศ ในรูปที่ 2.27 แสดงหลักการทำงานของระบบอาร์เอฟไอดีแบบพาสซีฟในสนามระยะไกล เครื่องอ่านข้อมูลจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่มีความต่อเนื่อง ซึ่งบรรจุกำลังงานและสัญญาณนาฬิกาออกไปยังแท็ก หลังจากนั้นสายอากาศของแท็กจะเหนี่ยวนำแรงดัน RF แล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับชิป โดยทั่วไปแรงดันที่ชิปใช้ในการอ่านข้อมูลมีค่าประมาณ 1.2 v ส่วนการเขียนข้อมูลแรงดันที่ชิปใช้ประมาณ 2.2 v เมื่อชิปได้รับกำลังงานที่เพียงพอจะทำการส่งข้อมูลโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล โดยทั่วไปอิมพีแดนซ์จะมีอยู่ 2 สถานะ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นคอนจูเกตแมตซ์และค่าอิมพีแดนซ์ค่าอื่นบางค่า เพื่อไว้สำหรับมอดูเลตกับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล



รูปที่ 2.29 กำลังงานและกลไกของการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.10.2 การติดต่อสื่อสารของระบบอาร์เอฟไอดีในสนามระยะไกล

ระยะทางการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในระบบอาร์เอฟไอดีนั้น จะขึ้นอยู่กับข้อจำกัด 2 อย่าง คือ ระยะทางที่มากที่สุดที่แท็กสามารถรับกำลังงานเพียงพอสำหรับการทำงานของชิปและการกระจายกระเจาย้อนกลับ (Backscattering) สัญญาณและระยะทางที่มากที่สุดที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถรับสัญญาณที่เกิดการกระจายกระเจาย้อนกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูลได้ แต่โดยทั่วไปแล้วเครื่องอ่านข้อมูลจะมีความไวมากเพียงพอที่จะรับสัญญาณที่กระจายกระเจาย้อนกลับมาได้ ดังนั้นระยะทางในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูลจึงขึ้นอยู่กับแท็ก เช่น ลักษณะการวางตัวของแท็ก คุณสมบัติของวัตถุที่นำแท็กไปติด และสิ่งแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่น

2.7.10.2.1 การติดต่อสื่อสารจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก

เนื่องจากการทำงานของแท็กนั้นเป็นแบบพาสซีฟ คือไม่มีแหล่งกำลังงานภายในเป็นของตัวเอง จึงจำเป็นต้องรับกำลังงานมาจากเครื่องอ่านข้อมูลโดยตรง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล (ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและกำลังงานไปในตัว) ให้สามารถส่งกำลังงานที่มีค่าสูงพอให้สามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่ใช้งาน และสามารถทำให้สายอากาศของแท็กได้รับกำลังงานที่เพียงพอในการส่งให้ชิปภายในแท็กทำงาน

เทคโนโลยีของระบบอาร์เอฟไอดีแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกลนั้น เป็นหลักการที่ใช้งานที่ความถี่สูง เช่น ย่านความถี่ยูเอชเอฟและย่านความถี่ไมโครเวฟเป็นต้น

ในรูปที่ 2.24 แสดงระบบอาร์เอฟไอดีที่ใช้หลักการการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่าง ๆ ได้ เช่น กำลังที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล เป็นต้น

จากสมการการส่งสัญญาณในช่องว่างอิสระของฟรีส (Friis free-space transmission) [5] สามารถหาค่ากำลังงานที่สายอากาศของแท็กได้รับได้ ดังนี้

$$P_{tag-ant} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 P_{reader-ant} G_{reader-ant} G_{tag-ant} \chi \quad (2.33)$$

โดยที่

$P_{tag-ant}$	คือ กำลังงานที่ชิปวงจรรวมรับได้
$P_{reader-ant}$	คือ กำลังงานส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล
$G_{reader-ant}$	คือ อัตราขยายสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล
R	คือ ระยะทางระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก
$G_{tag-ant}$	คือ อัตราขยายสายอากาศแท็ก
λ	คือ ความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระที่ความถี่ใช้งาน
χ	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของโพลาริซระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศแท็ก

ถ้าสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็กมีการโพลาริซที่ตรงกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของโพลาริซเท่ากับ 1 หรือ 0 dB แต่ในการติดต่อสื่อสารของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบอาร์เอฟไอทีในสนามระยะไกล โดยทั่วไปสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะมีโพลาไรซ์วงกลม และสายอากาศแท่งจะมีโพลาไรซ์เชิงเส้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแมตซ์ของโพลาไรซ์มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ -3 dB

กำลังงานบางส่วนที่สายอากาศของแท่งรับมาได้จะถูกส่งต่อไปยังชิป ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \quad (2.34)$$

โดยที่ τ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน $(1-|\Gamma|^2)$ (Transmission power coefficient)

ดังนั้นระยะทางที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถอ่านได้ไกลที่สุด คือ เมื่อ $P_{tag-chip}$ มีค่าเท่ากับกำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้ ($P_{tag-threshold}$) และสามารถหาระยะทางที่มากที่สุดแสดงดังสมการนี้ คือ

$$R_{max(reader)} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{reader-tx} G_{reader-ant} G_{tag-ant} \chi \tau}{P_{tag-threshold}}} \quad (2.35)$$

หรือ

$$R_{max(reader)} = 10^\alpha \quad (\text{m}) \quad (2.36)$$

โดยที่

$$\alpha = \frac{27.6 - 20 \log[f \text{ (MHz)}] + P_{reader-tx} \text{ (dBm)} + G_{reader-ant} \text{ (dBic)} + G_{tag-ant} \text{ (dBi)} + \chi \text{ (dB)} + \tau \text{ (dB)} - P_{tag-threshold} \text{ (dBm)}}{20} \quad (2.37)$$

2.7.10.2.2 การติดต่อสื่อสารจากแท่งกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล

มาตรฐานของระบบอาร์เอฟไอทีแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล กำหนดรูปแบบการส่งข้อมูลจากแท่งมายังเครื่องอ่านข้อมูล โดยอาศัยเทคโนโลยีที่เป็นการแพร่กระจายคลื่นความถี่วิทยุกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล คือ การกระจัดกระจายย้อนกลับ การติดต่อสื่อสารจากแท่งไปยังเครื่องอ่านข้อมูลด้วยวิธีการกระจัดกระจายย้อนกลับนี้ จะขึ้นอยู่กับความแรงของสนามที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับของแท่ง บนพื้นฐานของสมการ Monostatic หรือ Backscatter radar สามารถหาค่ากำลังงานของสัญญาณมอดูเลตที่เครื่องอ่านข้อมูลรับได้ คือ

$$P_{reader-rx} = \frac{\lambda}{(4\pi)^3 R^4} P_{reader-tx} G_{reader-ant}^2 \chi \sigma \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ σ คือ หน้าตัดขวางเรดาร์ (Radar cross-section: RCS) ของแท็ก

เมื่อกำลังงานที่รับได้มีค่าเท่ากับความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล ($P_{tag-threshold}$) จะทำให้ได้ระยะทางที่มากที่สุดสำหรับการติดต่อสื่อสารด้วยการกระจายย้อนกลับและสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R_{\max(\text{Backscatter})} = \sqrt[4]{\frac{\lambda P_{\text{reader-tx}} G_{\text{reader-ant}}^2 \chi \sigma}{(4\pi)^3 P_{\text{reader-threshold}}}} \quad (2.39)$$

หรือ

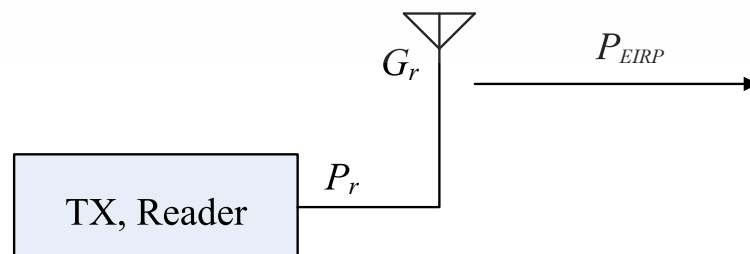
$$R_{\max(\text{Backscatter})} = 10^\beta \quad (\text{m}) \quad (2.40)$$

โดยที่

$$\beta = 16.6 - 20 \log[f(\text{MHz})] + P_{\text{reader-tx}} (\text{dBm}) + 2G_{\text{reader-ant}} (\text{dBic}) + \frac{\chi(\text{dB}) + \sigma(\text{dBsm}) - P_{\text{reader-threshold}} (\text{dBm})}{40} \quad (2.41)$$

จากสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่าระยะทางในการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แต่มีพารามิเตอร์อยู่สองตัว ที่สามารถทราบค่าได้ก่อนจากการเลือกเครื่องอ่านข้อมูลและตัวชิปวงจรรวม คือ กำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปวงจรรวมทำงานได้ ($P_{tag-threshold}$) และความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล ($P_{reader-threshold}$)

2.7.10.3 ค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) และค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพ (Effective Radiated Power: ERP)



รูปที่ 2.30 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิภาพไอโซทรอปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ระยะทางในการอ่านที่มากที่สุดเป็นส่วนหนึ่งกับกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลและอัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล นั่นคือ ถ้ากำลังงานและอัตราขยายของเครื่องอ่านข้อมูลมีค่าสูงจะทำให้ระยะทางการอ่านสูงขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามในการส่งกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูล ต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อบังคับของแต่ละประเทศ เช่น

ค่า EIRP คือ การทดสอบกำลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศตัวส่งที่เป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) นั่นคือ มีอัตราขยายเท่ากับ 1 หรือ 0 dBi หาได้ดังนี้

$$P_{EIRP} = P_{reader-tx} G_{reader-ant} \quad (2.42)$$

โดยทั่วไปมีการอ้างถึงค่า EIRP และค่า ERP ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสายอากาศไดโพลมากกว่าสายอากาศแบบไอโซทรอปิก และมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 1.64 หรือ 2.15 dBi ความสัมพันธ์ระหว่างค่า EIRP และค่า ERP คือ

$$P_{EIRP} = 1.64 P_{ERP} \quad (2.43)$$

2.7.10.4 ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่าน

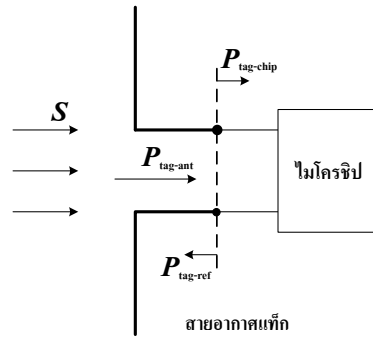
พิจารณาพื้นที่ประสิทธิผล (A_{e-max}) ของสายอากาศของแท็กที่วางอยู่ในสนามของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งมีความหนาแน่นกำลังงาน (S : W/m²) แท็กจะได้รับกำลังงานและส่งต่อไปยังรอยต่อระหว่างสายอากาศและชิปที่มีอิมพีแดนซ์เป็น Z_T กำลังงานส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปยังชิป ในขณะที่บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับและแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่งที่สายอากาศ กำลังงานที่แท็กได้รับและกำลังงานที่ส่งต่อไปยังชิป คือ

$$P_{tag-ant} = S A_{e-max} \quad (2.44)$$

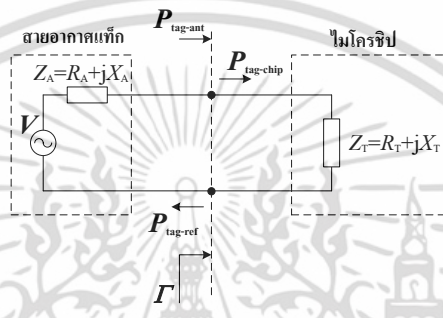
และ

$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \quad (2.45)$$

ค่าสัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่านจะถูกกำหนดโดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ Z_A ของแท็กและอิมพีแดนซ์ของชิป Z_T ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และกำลังงานที่จ่ายให้ชิป



(ก) กำลังงานที่ส่งมายังโครงสร้างของแท็ก



(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.31 กำลังงานที่ส่งมายังแท็กและวงจรสมมูล

จากรูปที่ 2.31 แสดงวงจรสมมูล อิมพีแดนซ์ของชิป Z_T จะรวมผลของตัวล่องที่ใส่ชิปด้วย โดยที่อิมพีแดนซ์ของทั้งสายอากาศและชิปจะขึ้นอยู่กับความถี่

จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) คือ

$$\Gamma = \frac{Z_T - Z_A^*}{Z_T + Z_A}, \quad 0 \leq |\Gamma| \leq 1 \quad (2.46)$$

โดยที่

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (2.47)$$

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.48)$$

กำลังงานที่ส่งไปยังชิปวงจรรวม คือ

$$P_{tag-chip} = (1 - |\Gamma|^2) P_{tag-ant} \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์กำลังงานการส่งผ่านสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = \frac{P_{tag-chip}}{P_{tag-ant}} = 1 - |\Gamma|^2 = \frac{4R_A R_T}{(R_A + R_T)^2 + (X_A + X_T)^2}, 0 \leq \tau \leq 1 \quad (2.50)$$

เมื่อสายอากาศเป็นแมตชิ่งกับชิป นั่นคือ $R_T = R_A$ และ $X_T = -X_A$ จะทำให้ $|\Gamma| = 0$, $\tau = 1$ จะได้กำลังงานที่ส่งผ่านจากสายอากาศแท้ไปยังชิปมากที่สุด และแสดงในรูปสมการได้ดังนี้

$$P_{tag-chip-max} = P_{tag-ant} = SA_{e-max} \quad (2.51)$$

ในขณะที่สายอากาศถูกทำให้ลัดวงจร นั่นคือ อิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมมีค่าเท่ากับ ศูนย์ ($Z_T = 0$) ส่งผลให้ $|\Gamma| = 1$ และ $\tau = 0$ ดังนั้นจะไม่มีกำลังงานส่งไปยังชิปวงจรรวม

ในการจำลองหรือการทดสอบสายอากาศโดยส่วนใหญ่จะได้ผลออกมาในรูปของค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: RL) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ซึ่งใช้เพื่ออธิบายคุณลักษณะของการแมตชิ่งของอิมพีแดนซ์ กำหนดได้ดังนี้

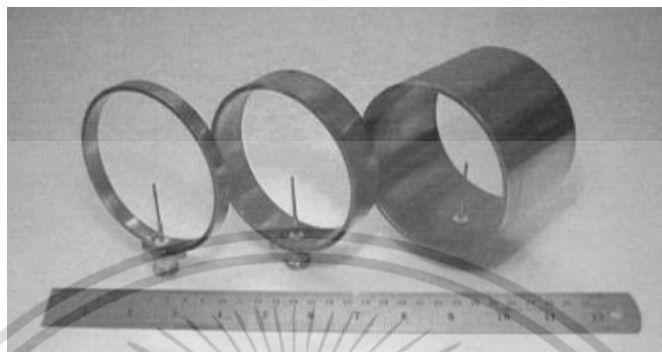
$$RL(\text{dB}) = -20 \log_{10}(|\Gamma|) \quad (2.52)$$

2.8 งานวิจัยที่มีมาก่อน

สายอากาศที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานกับระบบอาร์เอฟไอดีนั้น ได้รับความนิยมนในการศึกษา และวิจัยเป็นอย่างมาก และมีเทคนิคการสร้างที่แตกต่างกันออกไป แต่สิ่งที่แต่ละงานวิจัยต่างมุ่งให้ความสนใจเป็นหลัก นั่นก็คือสายอากาศต้องมีการออกแบบที่ง่าย ต้นทุนต่ำ สามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ ซึ่งแต่ละงานวิจัยนั้นจะกล่าวในลำดับต่อไป

2.8.1 สายอากาศแบบสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม [11]

สายอากาศสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 2001 โดย S. Kosulvit M. Krairiksh C. Phongcharoenpanich และ T. Wakabayashi ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.32

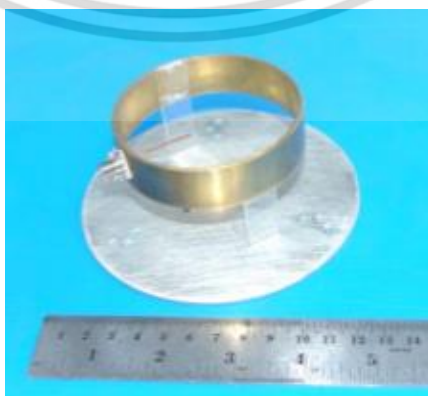


รูปที่ 2.32 โครงสร้างสายอากาศแบบสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม

โครงสร้างของสายอากาศแบบสองทิศทางที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม ที่นำเสนอในรูปที่ 2.32 โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอ เป็นโครงสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อนกล่าวคือ ประกอบด้วยท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมที่มีโพรบกระตุ้นไฟฟ้าภายใน พบว่าผลการทดสอบสายอากาศมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ต่ำกว่า 1.5 เป็น 17.8% โดยสายอากาศที่นำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสองทิศทาง โพลาริซเซชันเชิงเส้น

2.8.2 สายอากาศวงแหวนวงกลมที่ใช้โพรบกระตุ้นวางเหนือตัวสะท้อนสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบ WLAN [12]

สายอากาศวงแหวนวงกลมใช้โพรบกระตุ้นวางเหนือตัวสะท้อนสำหรับการประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบ WLAN ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 2005 โดย Chuwong Phongcharoenpanich Yuktith Chawanonphithak Phairote Wounchoum และ Monai Krairiksh ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 โครงสร้างสายอากาศวงแหวนวงกลมใช้โพรบกระตุ้นวางเหนือตัวสะท้อนวงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของสายอากาศวงแหวนวงกลมใช้โพรบกระตุ้นวางเหนือตัวสะท้อนที่นำเสนอในรูปแบบที่ 2.33 ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือวงแหวนวงกลมที่ประกอบด้วยโพรบกระตุ้นไฟฟ้าภายในและแผ่นตัวสะท้อนวงกลม โดยสายอากาศที่นำเสนอประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบ WLAN

2.8.3 สายอากาศทิศทางเดียวที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมวางเหนือแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส [13]

สายอากาศทิศทางเดียวใช้โพรบสองอันกระตุ้นวงแหวนวงกลมวางเหนือแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ถูกนำเสนอในปี ค.ศ. 2013 โดย S. Vongsack C. Phongcharoenpanich S. Kosulvit K. Hamamoto และ T. Wakabayashi ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 โครงสร้างสายอากาศทิศทางเดียวที่ใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมวางเหนือแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส

โครงสร้างของสายอากาศทิศทางเดียวใช้โพรบสองอันกระตุ้นวงแหวนวงกลม ที่มีแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่นำเสนอในรูปแบบที่ 2.34 ประกอบด้วยสามส่วนหลัก คือวงแหวนวงกลม โพรบกระตุ้นไฟฟ้าเชิงเส้นจำนวน 2 อันที่มีขนาดเท่ากันทุกประการ โดยวางในแนวแกน y และแนวแกน z ตามลำดับ และแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลการจำลองพบว่า มี $|S_{11}|$ ที่ต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมย่านความถี่ $5.11 - 6.48$ GHz คิดเป็น 23.64% ซึ่งที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่นำเสนอ มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 7.42 dBi และมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz และ yz เท่ากับ 65° และ 75° ตามลำดับ โดยสายอากาศที่ถูกนำเสนอมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว สำหรับการใช้งานร่วมกับระบบ WLAN มาตรฐาน IEEE802.11a

จากงานวิจัยที่มีมาก่อนพบว่ามีหลากหลายเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสายอากาศเพื่อให้ได้คุณลักษณะต่าง ๆ ที่น่าสนใจ โดยคุณลักษณะที่สนใจในการศึกษาของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ คือสายอากาศที่มีโพลาไรซ์วงกลม และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยคุณสมบัติของสายอากาศในงานวิจัยที่มีมาก่อนสรุปได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สรุปคุณสมบัติของสายอากาศในงานวิจัยที่มีมาก่อน

ลำดับงานวิจัย	ความถี่	การโพลาไรซ์	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	อัตราขยาย
1	1.9 GHz	โพลาไรซ์เชิงเส้น	สองทิศทาง	5.4 dBi
2	2.4 GHz	โพลาไรซ์เชิงเส้น	ทิศทางเดียว	6.7 dBi
3	5.15 - 5.83 GHz	โพลาไรซ์เชิงเส้น	ทิศทางเดียว	7.42 dBi

2.9 บทสรุป

ในบทนี้นำเสนอทฤษฎีและหลักการของระบบอาร์เอฟไอดีความถี่เอชเอฟ จากนั้นกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบสายอากาศ รวมถึงงานวิจัยที่มีมาก่อนในการออกแบบสายอากาศให้มีคุณลักษณะต่าง ๆ เพื่อสามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี

โดยสายอากาศสำหรับการประยุกต์ใช้งานระบบอาร์เอฟไอดีความถี่เอชเอฟ ที่ย่านความถี่ 920 – 925 MHz ซึ่งเป็นมาตรฐานของระบบอาร์เอฟไอดีของประเทศไทย ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งช่วงความถี่ดังกล่าวจะนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศ โดยเบื้องต้นจะทำการออกแบบและการคำนวณขนาดของสายอากาศ โดยการจำลองสายอากาศซึ่งต้องคำนึงถึง ค่า $|S_{11}|$ ที่สามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 920 – 925 MHz มีค่าอัตราส่วนแอมพลิจูดต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งาน มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวที่มีโพลาไรซ์วงกลม และมีอัตราขยายของสายอากาศที่เหมาะสม ซึ่งการออกแบบสายอากาศให้มีคุณลักษณะดังกล่าวจะนำเสนอการออกแบบและการจำลองสายอากาศอย่างละเอียดในบทที่ 3 ต่อไป

บทที่ 3

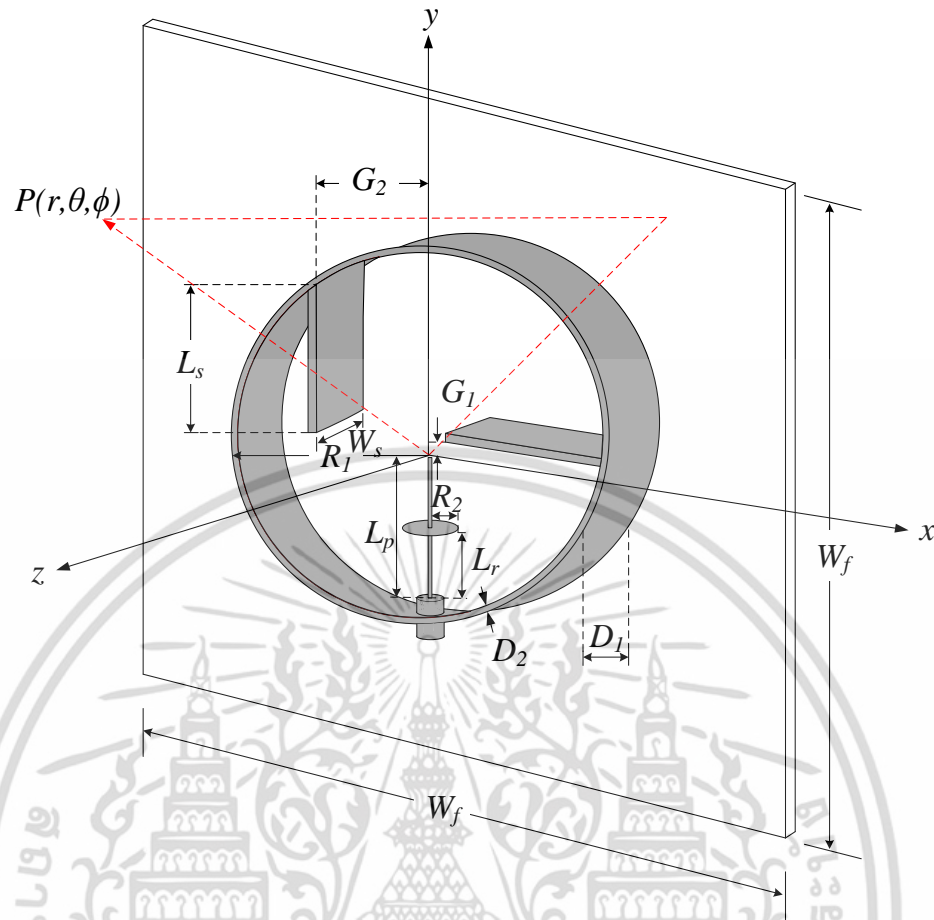
การออกแบบและการจำลองสายอากาศ

3.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศทิศทางเดียวโพลาไรซ์วงกลม โดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมที่มีแผ่นระนาบตั้งฉากภายในวงแหวนแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) ซึ่งสายอากาศที่นำเสนอจะมีโพลาไรซ์วงกลมเพื่อให้สามารถใช้งานร่วมกับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟที่ความถี่กลาง 922.5 MHz และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ซึ่งในบทนี้ได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์สายอากาศเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับสายอากาศ รวมทั้งศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ต่อการทำงานของสายอากาศ จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศไปใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยพิจารณา $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในย่านความถี่ที่ต้องการใช้งาน ซึ่งจะเริ่มด้วยการกำหนดรูปแบบของสายอากาศเริ่มต้น โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานและสมการคำนวณในบทที่ 2 จากนั้นจึงจำลองสายอากาศและทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® เพื่อศึกษาผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ที่มีต่อสายอากาศ รวมทั้งหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับสายอากาศใช้งานที่ความถี่กลาง 922.5 MHz รายละเอียดต่าง ๆ จะนำเสนอด้หัวข้อต่อไป

3.2 โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศ

การออกแบบสายอากาศจะใช้โครงสร้างของวงแหวนวงกลม [11] เป็นโครงสร้างเริ่มต้น จากนั้นทำการดัดแปลงโครงสร้างโดยใช้เทคนิคการเพิ่มแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมภายในท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม เพื่อให้สายอากาศมีโพลาไรซ์วงกลม และเพิ่มแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ โดยใช้ทฤษฎีของท่อนำคลื่นวงกลม เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณหาขนาดรัศมีของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม และใช้ทฤษฎีสายอากาศโมโนโพลที่มีความยาวเท่ากับหนึ่งส่วนของความยาวคลื่นเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น ในการคำนวณหาความยาวของโพรบ สายอากาศที่นำเสนอใช้แผ่นทองแดงในการสร้าง โดยสายอากาศมีโครงสร้างหลัก 3 ส่วนด้วยกัน คือ โพรบกระตุ้นไฟฟ้า ท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมปากเปิดเชื่อมต่อด้วยแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมตั้งฉากภายใน และแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 3.1 โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไว้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างสายอากาศต้นแบบ

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์และการออกแบบ

สัญลักษณ์	พารามิเตอร์
R_1	รัศมีด้านนอกของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม
D_1	ความกว้างของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม
R_2	รัศมีของแผ่นแมตซ์ชิงวงกลม
L_p	ความยาวโพรบ
L_r	ระยะห่างระหว่างคอนเนคเตอร์กับแมตซ์ชิง
W_s	ความกว้างแผ่นระนาบภายใน
L_s	ความยาวแผ่นระนาบภายใน
G_1	ตำแหน่งวางแผ่นระนาบ ในระนาบ xz
G_2	ตำแหน่งวางแผ่นระนาบ ในระนาบ yz
W_f	ความยาวแผ่นตัวสะท้อน
D_2	ความหนาแผ่นทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น

ในหัวข้อนี้นำเสนอการกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่เหมาะสมของสายอากาศ โดยใช้หลักการของท่อนำคลื่นวงกลมเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น จากสมการที่ 3.1

$$f_o > f_{cutoff} \quad (3.1)$$

f_o = ความถี่ใช้งาน (MHz) (920-925 MHz)

f_{cutoff} = ความถี่คัทออฟ (MHz)

โดยความถี่ใช้งานในที่นี้คือ 920 MHz เนื่องจากเป็นความต่ำสุดของย่านความถี่ใช้งาน จึงเป็นความถี่ต่ำที่สุดที่สามารถทำงานในท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมนี้ได้ จากนั้นสามารถหาค่าเริ่มต้นของรัศมีด้านในของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม จากสมการที่ 3.3

$$\lambda_{cutoff} = \frac{c}{f_{cutoff}} = \left(\frac{3 \times 10^{10}}{920 \times 10^6} \right) = 32.61 \quad (3.2)$$

$$\lambda_{cutoff} = 3.412a \quad (3.3)$$

$$a = \frac{32.61}{3.412} = 9.55 \text{ cm}$$

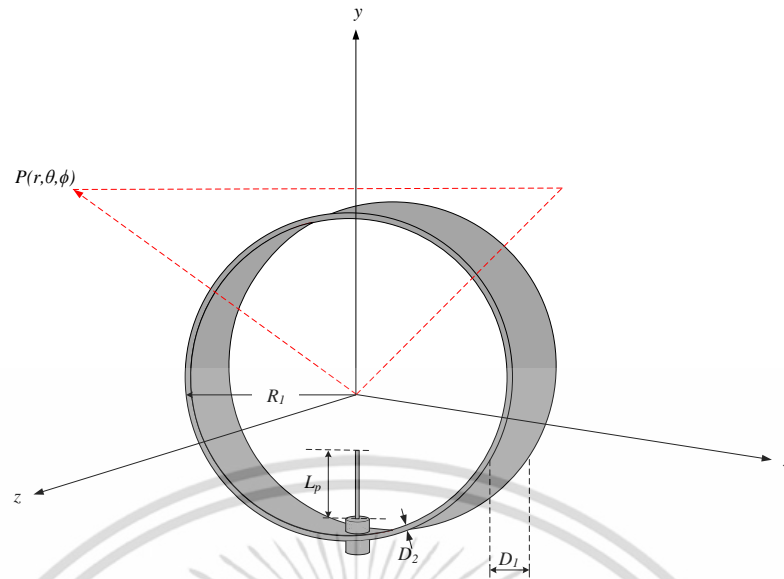
c = ความเร็วแสงในช่องว่างอิสระ (3×10^8 m/s)

λ_{cutoff} = ความยาวคลื่นคัทออฟ (cm)

a = รัศมีด้านในของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม (cm)

และใช้ทฤษฎีการออกแบบสายอากาศโมนโพลเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการกำหนดค่าความยาวโพรบกระตุ้นไฟฟ้า กล่าวคือในการออกแบบสายอากาศโมนโพลจะใช้ความยาวที่มีค่าเท่ากับหนึ่งส่วนสี่ของความยาวคลื่น ($\lambda / 4$) ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz จะได้ 81.0 mm

จากการคำนวณจึงได้พารามิเตอร์สายอากาศวงแหวนวงกลมเริ่มต้น ซึ่งโครงสร้างเริ่มต้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ในการออกแบบสายอากาศเริ่มต้นจะทำการกำหนดขนาดรัศมีด้านนอกของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม ได้จากการคำนวณรัศมีด้านในของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลมข้างต้นรวมกับความหนาของแผ่นทองแดง และความยาวของโพรบกระตุ้นไฟฟ้า ซึ่งแทนด้วยพารามิเตอร์ R_1 และ L_p ตามลำดับ โดยพารามิเตอร์เริ่มต้นต่าง ๆ ของสายอากาศสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

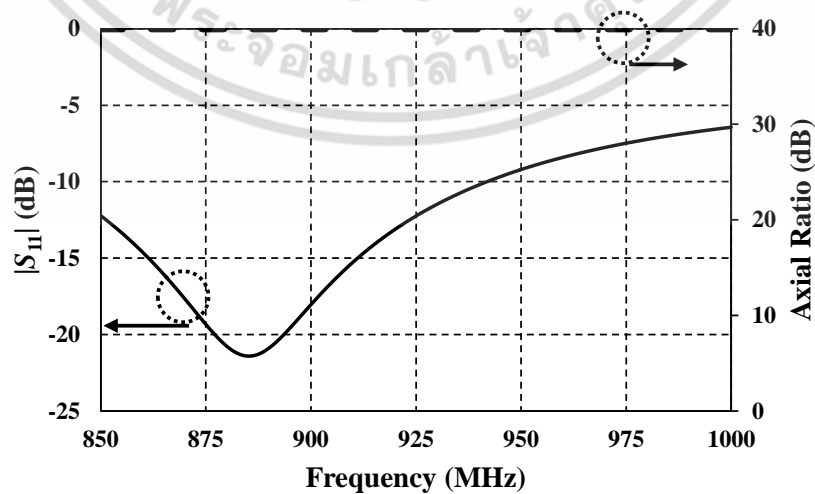


รูปที่ 3.2 สายอากาศที่ทำการออกแบบเริ่มต้น

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)
R_1	97.0
L_p	81.0
D_1	25.5
D_2	1.5

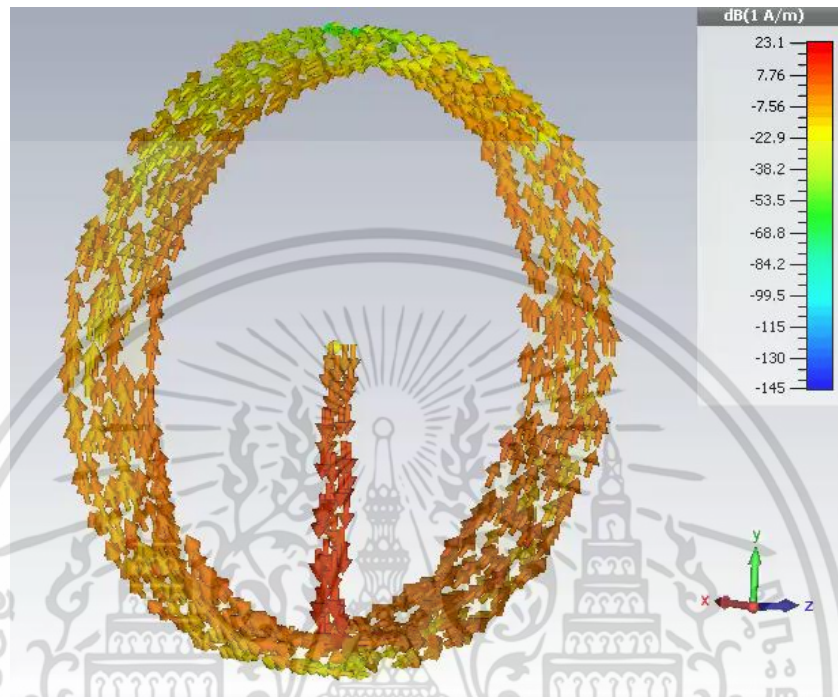
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของสายอากาศดังตารางที่ 3.3 มาทำการจำลองสายอากาศตามรูปที่ 3.2 เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศเริ่มต้น ผลการจำลอง $|S_{11}|$ ค่าอัตราส่วนแกน และสนามไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากสายอากาศเริ่มต้นที่เวลา (t) ต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศเริ่มต้น

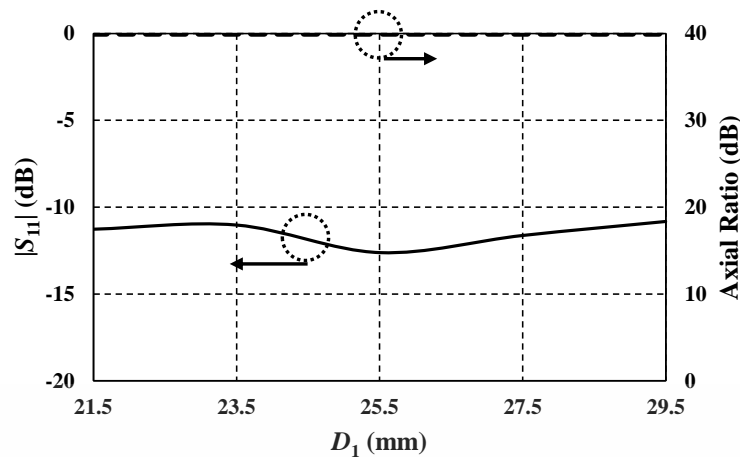
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 พบว่าสายอากาศมีการตอบสนองที่ความถี่ 850 – 942 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 10.40% ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่าเท่ากับ -12.65 dB และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศเริ่มต้นที่ช่วงความถี่ใช้งาน 920 - 925 MHz พบว่าอัตราส่วนแกนมีค่าสูงกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ส่งผลให้สายอากาศไม่เกิดโพลาไรซ์วงกลม



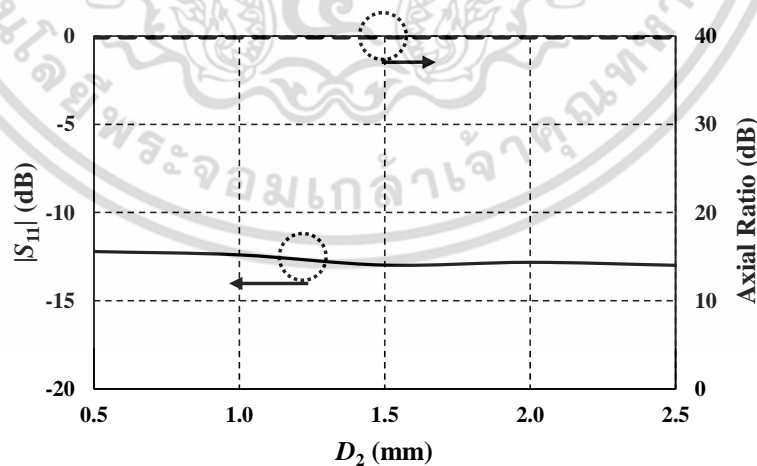
รูปที่ 3.4 การไหลของกระแสบนพื้นผิวของสายอากาศเริ่มต้น

จากรูปที่ 3.4 แสดงการไหลของกระแสบนพื้นผิวของสายอากาศ โดยมีโพรบกระตุ้นไฟฟ้าทำหน้าที่จ่ายสัญญาณในที่นี้ก็คือจ่ายกระแส โดยกระแสกระจายตัวบนพื้นผิวด้านในของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม และมีทิศทางการไหลจากด้านล่างที่มีค่ากระแสน้อยไปสู่ด้านบนที่มีกระแสมาก และเกิดการกลับเฟสไหลย้อนกลับลงมาด้านล่างของท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม การไหลของกระแสดังกล่าวทำให้สายอากาศเริ่มต้นเกิดโพลาไรซ์เชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าอัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB ซึ่งจะนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อค่าหาพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมของสายอากาศในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 3.5 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ D_1

จากรูปที่ 3.5 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ D_1 มีค่าเท่ากับ 25.5 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่าเท่ากับ -12.65 dB และครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานกว้างที่สุด กล่าวคือมีการตอบสนองที่ความถี่ 850 – 942 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 10.40% จากการจำลองพบว่าขนาดความกว้างที่นำคลื่นวงแหวนวงกลมมีผลต่อสภาพเจาะจงทิศทาง กล่าวคือเมื่อที่นำคลื่นวงแหวนวงกลมมีขนาดเล็กส่งผลให้มีความกว้างลำคลื่นแคบ อัตราขยายต่ำ และเมื่อที่นำคลื่นวงแหวนวงกลมมีขนาดใหญ่ส่งผลให้มีความกว้างลำคลื่นกว้าง อัตราขยายสูง แต่ทั้งนี้การที่จะเลือกใช้ที่นำคลื่นวงแหวนวงกลมที่มีขนาดใหญ่มา ๆ จะส่งผลต่อแมตซ์ชิงอีกด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ D_1 มีค่าเท่ากับ 25.5 mm ซึ่งเป็นค่าที่มีความเหมาะสมที่สุด เป็นค่าคงที่ตลอดการจำลอง และพบว่าค่าอัตราส่วนแกนมีค่าสูงกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ส่งผลให้สายอากาศไม่เกิดโพลาริซิงกลม



รูปที่ 3.6 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ D_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

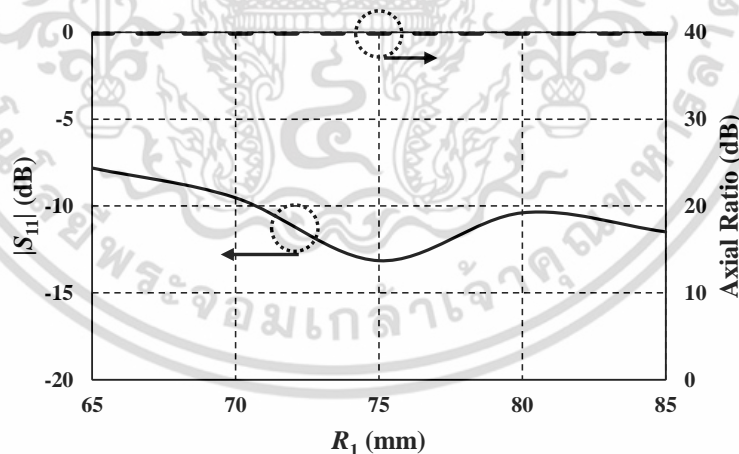
จากรูปที่ 3.6 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ D_2 มีค่าเท่ากับ 1.5 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีเท่ากับ -12.65 dB และครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานกว้างที่สุด กล่าวคือมีการตอบสนองที่ความถี่ 850 – 942 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 10.40% จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ D_2 มีค่าเท่ากับ 1.5 mm เป็นค่าคงที่ตลอดการจำลอง และพบว่าค่าอัตราส่วนแฉกมีค่าสูงกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ส่งผลให้สายอากาศไม่เกิดโพลาริซิงกลม

จากข้างต้นได้มีการนำเสนอการจำลองสายอากาศที่ใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการออกแบบ ผลการจำลองสายอากาศไม่เกิดคุณลักษณะที่ต้องการ จึงทำการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการใช้งานจึงต้องปรับลดขนาดสายอากาศวงแหวนวงกลมให้มีขนาดเล็กลง โดยใช้ทฤษฎีที่โอนาค่ลิ้นแบบบริดจ์มาเป็นเงื่อนไขในการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_1 ของสายอากาศ ซึ่งโครงสร้างสายอากาศดังรูป 3.2 เช่นเดิม โดยการปรับปรุงพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)
R_1	ปรับปรุงค่า
L_p	81.0
D_1	25.5
D_2	1.5

เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.2 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงดังตารางที่ 3.4 จะได้ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแฉกแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแฉกที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ R_1

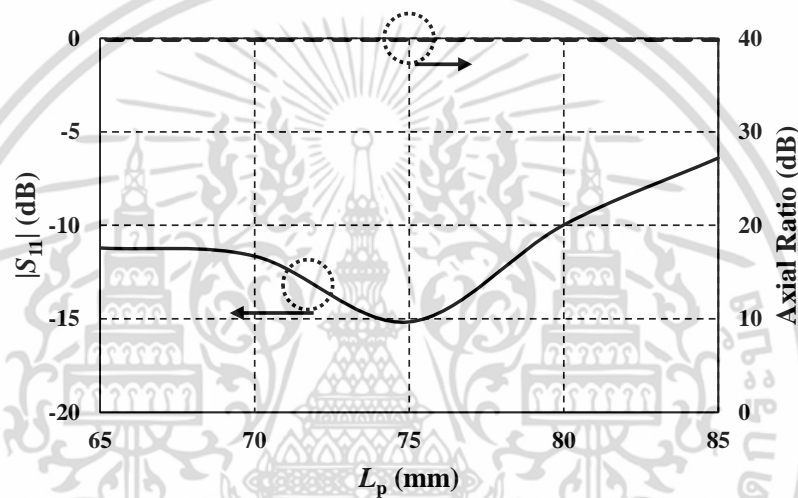
จากรูปที่ 3.7 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ R_1 มีค่าเท่ากับ 75 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่าเท่ากับ -13.15 dB และครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานกว้างที่สุด กล่าวคือมีการตอบสนองที่ความถี่ 850 – 966 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 12.78% จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ R_1 มีค่าเท่ากับ 75 mm ในการจำลองสายอากาศลำดับต่อไป และพบว่าค่าอัตราส่วนแฉกมีค่าสูงกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ส่งผลให้สายอากาศไม่เกิดโพลาริซิงกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองสายอากาศที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.4 โดยการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ R_1 จึงได้ค่าพารามิเตอร์ R_1 มีค่าเท่ากับ 75 mm จากนั้นทำการปรับค่าพารามิเตอร์ L_p ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 โดยพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)
R_1	75.0
L_p	ปรับปรุงค่า
D_1	25.5
D_2	1.5



รูปที่ 3.8 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_p

จากรูปที่ 3.8 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ L_p มีค่าเท่ากับ 75 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ -15.17 dB และครอบคลุมในช่วงความถี่ใช้งานกว้างที่สุด ครอบคลุมตั้งแต่ความถี่ 875 - 976 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 10.91% จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ L_p มีค่าเท่ากับ 75 mm ในการจำลองสายอากาศลำดับต่อไป และพบว่าค่าอัตราส่วนแกนมีค่าสูงกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ส่งผลให้สายอากาศไม่เกิดโพลาไรซ์วงกลม ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะนำเสนอการปรับปรุงโพลาไรซ์ของสายอากาศเพื่อให้สายอากาศเกิดโพลาไรซ์วงกลม

3.2.2 การปรับปรุงโพลาไรซ์ของสายอากาศ

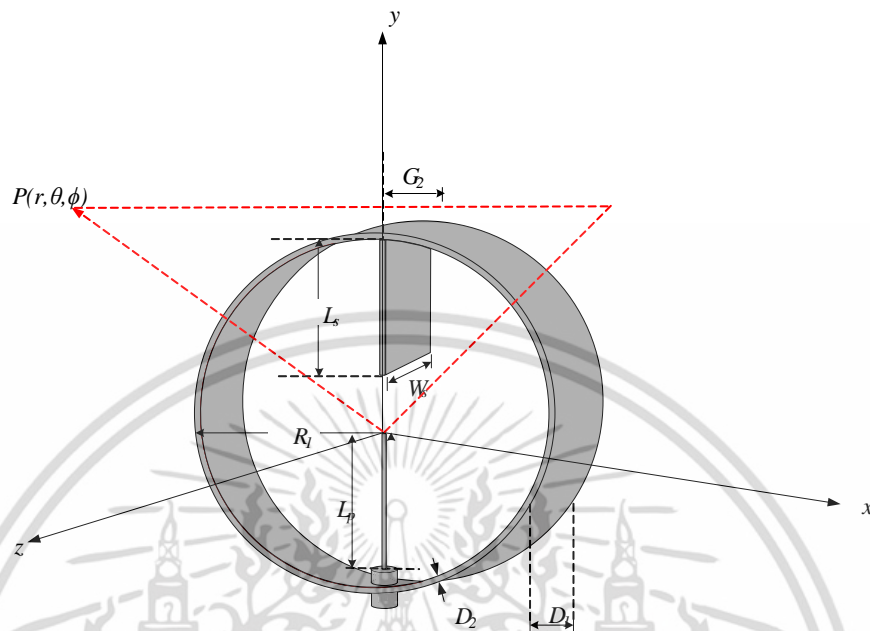
ในหัวข้อนี้นำเสนอการปรับปรุงโพลาไรซ์ของสายอากาศ ซึ่งจากการออกแบบสายอากาศ เริ่มต้นและการปรับปรุงพารามิเตอร์ R_1 และ L_p พบว่าสายอากาศยังคงมีโพลาไรซ์เชิงเส้นอยู่ ดังนั้นจึงนำเสนอการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศ เพื่อให้สายอากาศมีโพลาไรซ์วงกลม โดยใช้เทคนิคการเพิ่มแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมจำนวน 2 แผ่น เชื่อมต่อภายในท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม ซึ่งแผ่นระนาบดังกล่าวจะจัดวางตัวในระนาบ yz และระนาบ xz ซึ่งแสดงดัง

รูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.11 ตามลำดับ เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดโพลาไรซ์วงกลมของสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยขนาดต่าง ๆ ของพารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 3.6 การเกิดโพลาไรซ์วงกลมจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ส่วนหลัก ๆ คือ สนามไฟฟ้าจะต้องมีขนาดเท่ากัน และมีเฟสต่างกัน 90 องศา ดังนั้นจึงออกแบบให้แผ่นระนาบทั้งสองแผ่นมีขนาดเท่ากัน และวางตัวในระนาบที่ต่างกัน 90 องศา



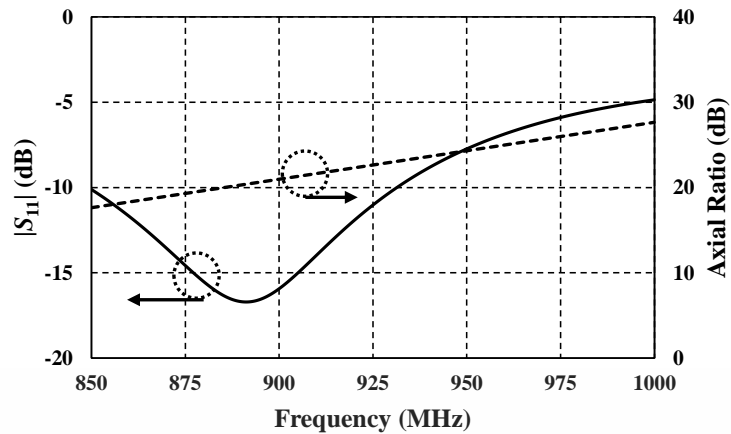
รูปที่ 3.9 โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นระนาบในระนาบ yz

เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.9 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงดังตารางที่ 3.5 จะได้ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนแสดงดังรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ

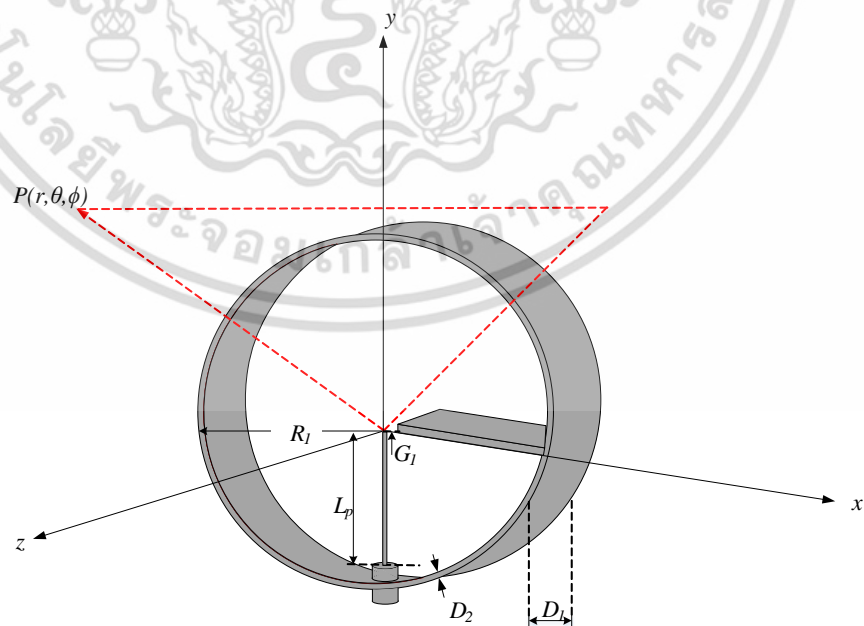
พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)
R_1	75.0
L_p	75.0
W_s	25.0
L_s	65.0
G_2	0
D_1	25.5
D_2	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศ เมื่อเพิ่มแผ่นระนาบ yz

จากรูปที่ 3.10 พบว่าสายอากาศมีการตอบสนองที่ความถี่ 850 – 931 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 9.09% มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ความถี่ 891 MHz เท่ากับ -16.71 dB และที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่า -11.47 dB ซึ่งครอบคลุมในย่านความถี่ใช้งาน และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นระนาบ ในระนาบ yz พบว่าที่ย่านความถี่ใช้งาน 920 - 925 MHz ค่าอัตราส่วนแกนมีค่าสูงกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน กล่าวคือที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 22.47 dB ซึ่งอย่างไรก็ตามสายอากาศไม่เกิดโพลาไรซ์วงกลม การศึกษาพารามิเตอร์ในลำดับต่อไปเพื่อจะทำให้สายอากาศเกิดการโพลาไรซ์วงกลม โดยใช้เทคนิคการเพิ่มแผ่นระนาบสี่เหลี่ยมภายในท่อนำคลื่นวงแหวนกลม ในระนาบ xz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.11 เพื่อศึกษาแนวโน้มการเกิดโพลาไรซ์วงกลมของสายอากาศ โดยขนาดต่าง ๆ ของพารามิเตอร์สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.7



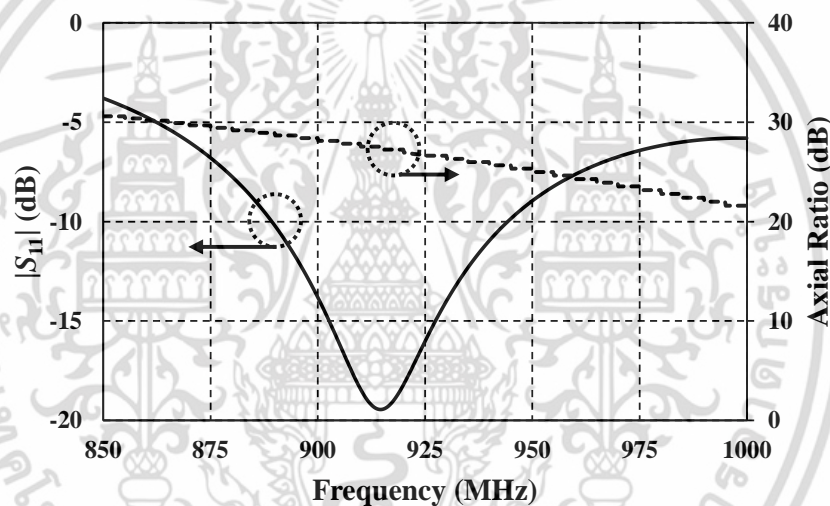
รูปที่ 3.11 โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นระนาบ ในระนาบ xz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.11 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงดังตารางที่ 3.6 จะได้ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนแสดงดังรูปที่ 3.12

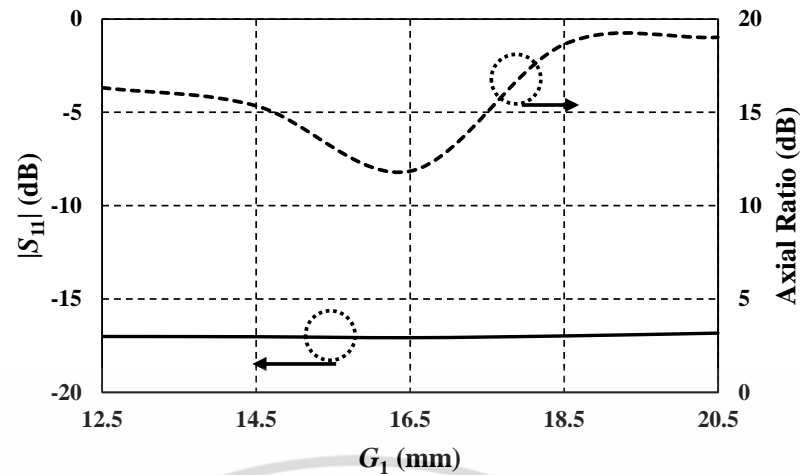
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)
R_1	75.0
L_p	75.0
W_s	25.0
L_s	65.0
G_1	0
D_1	25.5
D_2	1.5



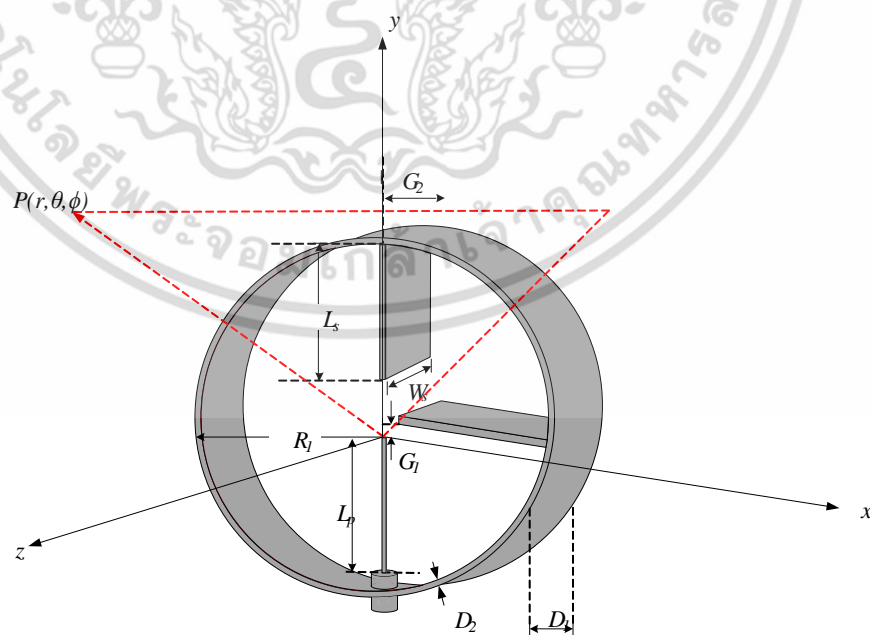
รูปที่ 3.12 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศ เมื่อเพิ่มแผ่นระนาบ xz

จากรูปที่ 3.12 พบว่าสายอากาศมีการตอบสนองที่ความถี่ 889 – 944 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 6.0% มีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ความถี่ 914 MHz เท่ากับ -19.45 dB และที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่า -17.08 dB ซึ่งครอบคลุมในย่านความถี่ใช้งาน และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นระนาบ ในระนาบ xz พบว่าที่ย่านความถี่ใช้งาน 920 - 925 MHz อัตราส่วนแกนมีค่าสูงกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน แต่มีแนวโน้มที่ค่าอัตราส่วนแกนปรับลดลงจากการจำลองสายอากาศเริ่มต้น ที่มีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 40 dB ซึ่งอย่างไรก็ตามสายอากาศไม่เกิดโพลาไรซ์วงกลม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าอัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ G_1 เพื่อศึกษาการเกิดโพลาไรซ์วงกลม โดยผลการจำลองการปรับปรุงค่าอัตราส่วนแกนดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ G_1

จากรูปที่ 3.13 จากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ G_1 พบว่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแผ่นระนาบไม่มีผลกระทบต่อ $|S_{11}|$ แต่จะมีผลต่อค่าอัตราส่วนแกน กล่าวคือเมื่อพารามิเตอร์ G_1 มีค่าเท่ากับ 16.5 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 11.58 dB ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนแกนที่ใกล้เคียง 3 dB มากที่สุด จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ G_1 ที่มีค่าเท่ากับ 16.5 mm ซึ่งอย่างไรก็ตามสายอากาศไม่เกิดโพลาไรซ์วงกลม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงค่าอัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB ซึ่งจะใช้เทคนิคการจำลองสายอากาศโดยการใส่แผ่นระนาบตั้งฉากพร้อมกันในระนาบ xz และระนาบ yz ดังแสดงในรูปที่ 3.14 จากนั้นทำการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ G_2 เพื่อศึกษาการเกิดโพลาไรซ์วงกลม โดยผลการจำลองการปรับปรุงค่าอัตราส่วนแกนดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.15



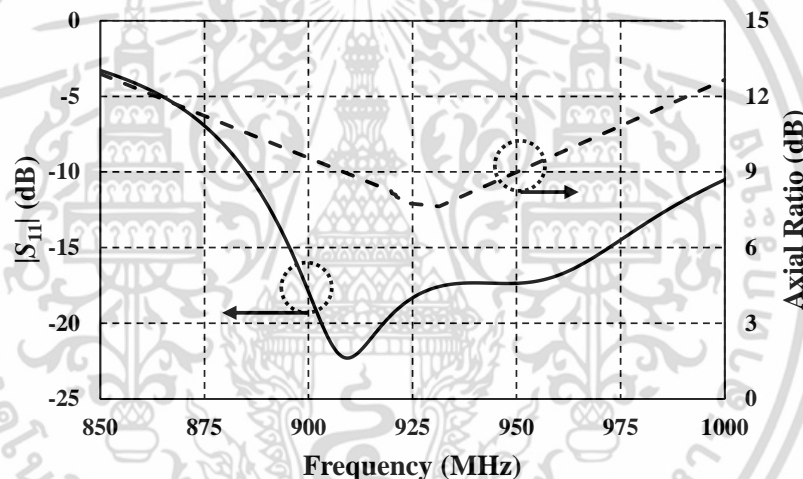
รูปที่ 3.14 โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นระนาบในระนาบ xz และ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.14 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงดังตารางที่ 3.7 จะได้ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนแสดงดังรูปที่ 3.15

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ

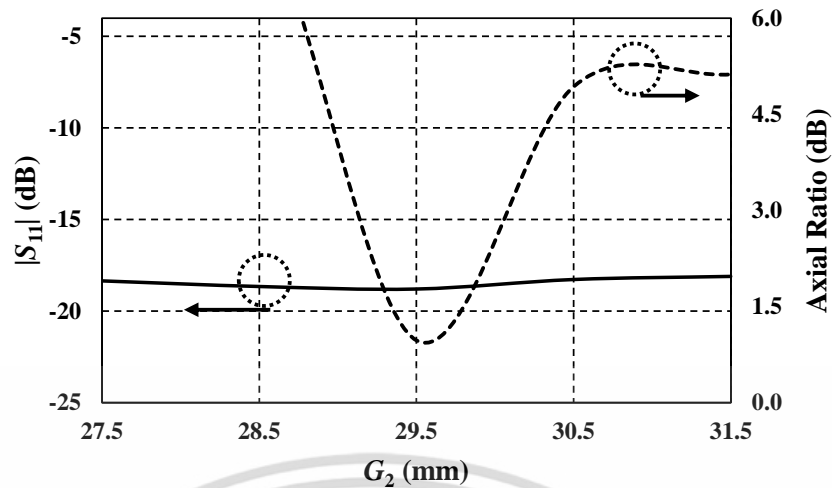
พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)
R_1	75.0
L_p	75.0
W_s	25.0
L_s	65.0
G_1	16.5
G_2	0
D_1	25.5
D_2	1.5



รูปที่ 3.15 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศ เมื่อเพิ่มแผ่นระนาบทั้งสองระนาบพร้อมกัน

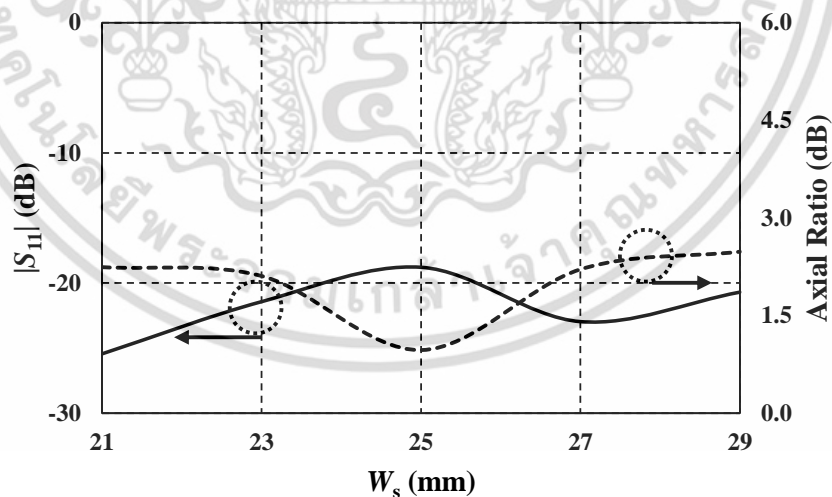
จากรูปที่ 3.15 เมื่อเชื่อมต่อแผ่นระนาบตั้งฉากภายในท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม พร้อมกันทั้งสองระนาบ พบว่าสายอากาศมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ต่ำมากขึ้น และตอบสนองในช่วงความถี่กว้างขึ้น คือ $895 - 1000$ MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 11.08% และมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำสุดที่ความถี่ 951 MHz เท่ากับ -25.74 dB และที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่า $|S_{11}|$ เป็น -20.42 dB และเมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วนแกนพบว่าที่ย่านความถี่ใช้งาน $920 - 925$ MHz มีค่าอัตราส่วนแกนสูงกว่า 3 dB ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน กล่าวคือที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 7.78 dB แต่อย่างไรก็ตามมีแนวโน้มที่ค่าอัตราส่วนแกนปรับลดลงจาก 12 dB ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนแกนที่ได้จากการจำลองในการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ G_1 แต่สายอากาศยังคงไม่เกิดโพลาไรซ์วงกลม จึงต้องมีการปรับปรุงค่าอัตราส่วนแกนให้มีค่าต่ำกว่า 3 dB โดยการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ G_2 เพื่อให้สายอากาศการเกิดโพลาไรซ์วงกลม โดยผลการจำลองการปรับปรุงค่าอัตราส่วนแกนดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ G_2

จากรูปที่ 3.16 จากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ G_2 พบว่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแผ่นระนาบไม่มีผลกระทบต่อ $|S_{11}|$ แต่จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนแกน กล่าวคือเมื่อพารามิเตอร์ G_2 มีค่าเท่ากับ 29.5 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 0.97 dB ซึ่งต่ำกว่า 3 dB ทำให้สายอากาศมีโพลาริซวงกลม จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ G_2 ที่มีค่าเท่ากับ 29.5 mm ในการศึกษาพารามิเตอร์ในลำดับต่อไป เพื่อปรับปรุงค่า $|S_{11}|$ สายอากาศ โดยการใช้นิเทศการเพิ่มแผ่นแมตซึ่งวงกลมวางเหนือโพรบกระตุ้นไฟฟ้า ซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

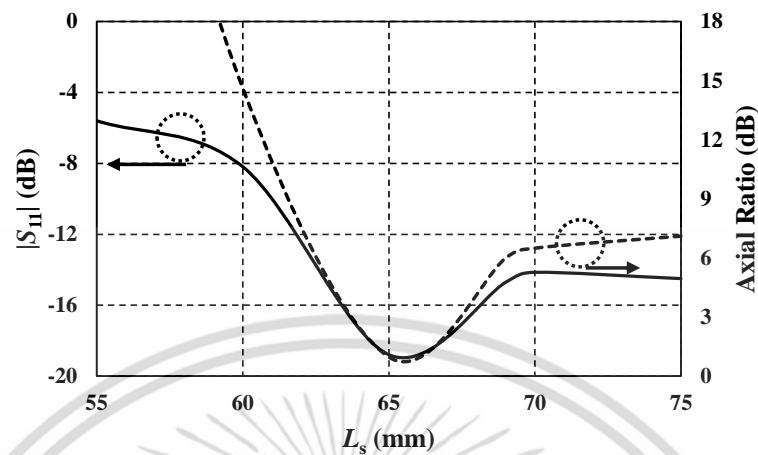


รูปที่ 3.17 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ W_s

จากรูปที่ 3.17 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ W_s มีค่าเท่ากับ 25 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz อัตราส่วนแกนมีค่าเท่ากับ 0.97 dB ซึ่งถือเป็นค่าอัตราส่วนแกนที่มีค่าต่ำกว่า 3 dB ที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ W_s ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ W_s มีค่าเท่ากับ 25 mm เป็นค่าคงที่ในการจำลองต่อไป



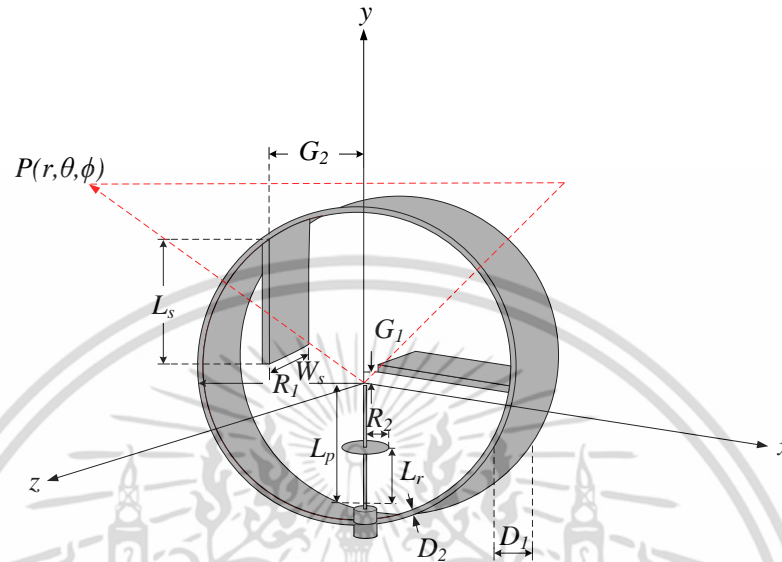
รูปที่ 3.18 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_s

จากรูปที่ 3.18 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ L_s มีค่าเท่ากับ 65 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่าต่ำกว่า -10 dB มากที่สุดถ้าเทียบกับพารามิเตอร์ L_s ค่าอื่นๆ กล่าวคือ มีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -18.79 dB และมีอัตราส่วนแกนต่ำกว่า 3 dB มากที่สุดเช่นเดียวกัน ซึ่งมีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 0.97 dB จึงเลือกใช้พารามิเตอร์ L_s มีค่าเท่ากับ 65 mm เป็นค่าคงที่ในการจำลองต่อไป

จากการจำลองปรับปรุงโพลาริซชันของสายอากาศ พบว่าโครงสร้างของสายอากาศเริ่มต้นที่ประกอบด้วยโพรบกระตุ้นไฟฟ้าเชื่อมต่อภายในวงแหวนวงกลม สายอากาศมีโพลาริซชันเชิงเส้น แต่เมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศโดยเพิ่มแผ่นระนาบตั้งฉากภายในวงแหวนวงกลมจำนวน 2 แผ่น ซึ่งแผ่นระนาบตั้งฉากวางตัวในระนาบ xz และระนาบ yz ตามลำดับ ทำให้สายอากาศมีโพลาริซชันวงกลม กล่าวคือการเพิ่มแผ่นระนาบที่มีขนาดเท่ากัน และสนามไฟฟ้ามีทิศทางการเคลื่อนที่มีเฟสต่างกัน 90° ทำให้สายอากาศเกิดโพลาริซชันวงกลม จากนั้นทำการปรับปรุงแมตซ์ซิงของสายอากาศ ซึ่งจะนำเสนอรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.2.3 การปรับปรุงแมตซิงของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้นำเสนอการปรับแมตซิงสายอากาศ โดยใช้เทคนิคการเพิ่มแผ่นแมตซิงวงกลมวางเหนือโพรบกระตุ้นไฟฟ้า โครงสร้างที่ใช้ในการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.16 และพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงแสดงดังตารางที่ 3.8



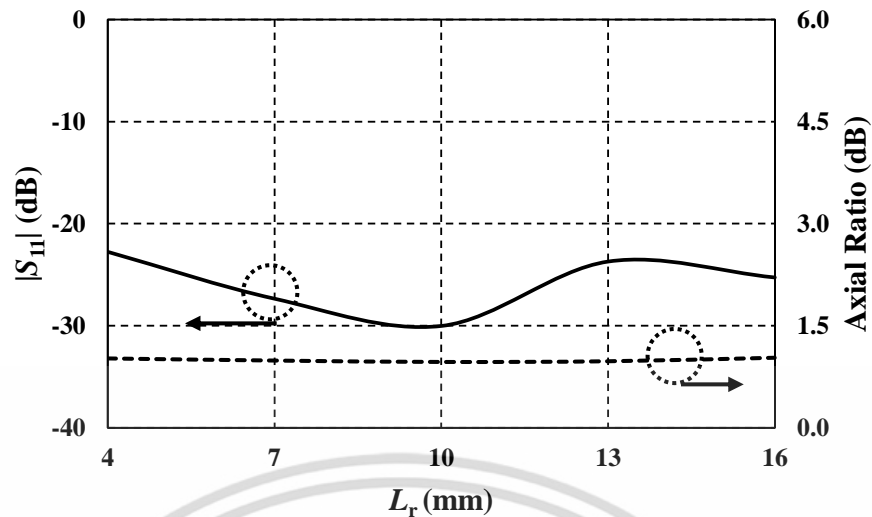
รูปที่ 3.19 โครงสร้างของสายอากาศที่มีการเพิ่มแผ่นแมตซิงวงกลม

เมื่อจำลองสายอากาศดังรูปที่ 3.19 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการปรับปรุงดังตารางที่ 3.8 จะได้ผลการจำลอง $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนแสดงดังรูปที่ 3.20

ตารางที่ 3.8 พารามิเตอร์ที่ปรับปรุงของสายอากาศ

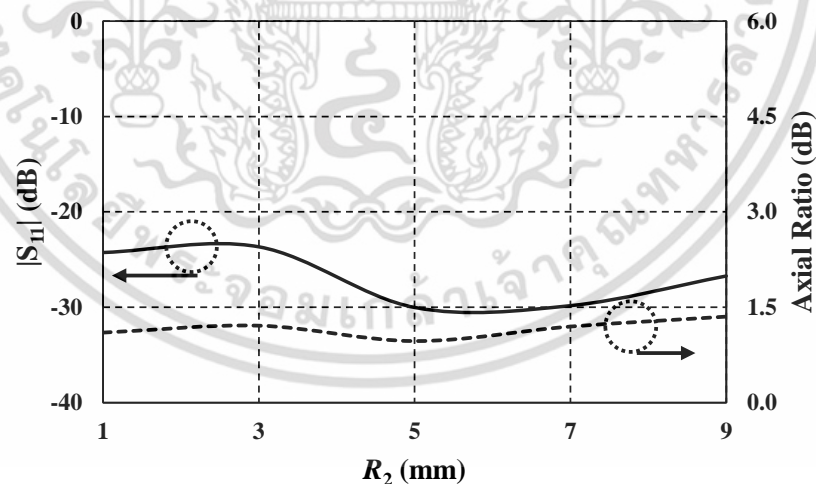
พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)
R_1	75.0
R_2	5.0
L_p	75.0
W_s	25.0
L_s	65.0
G_1	16.5
G_2	29.5
L_r	ทำการปรับปรุงค่า
D_1	25.5
D_2	1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



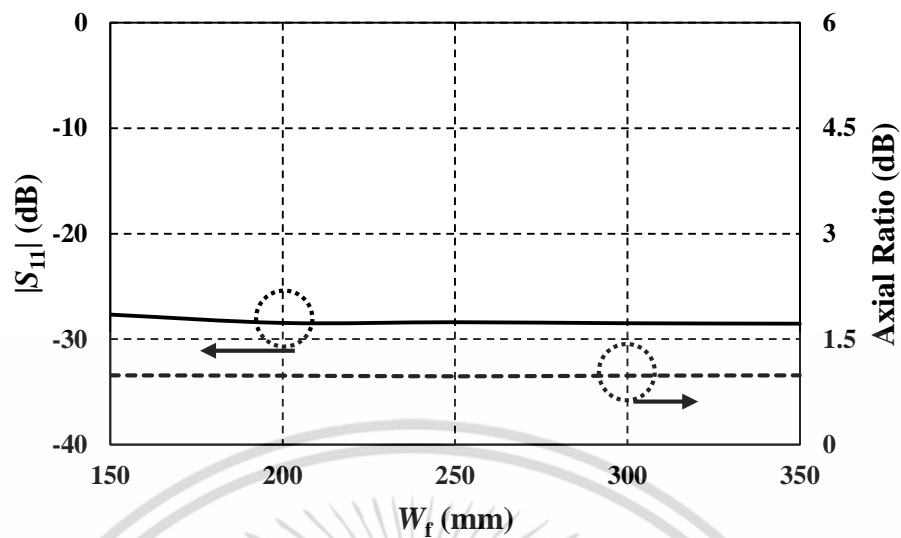
รูปที่ 3.20 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ L_r

จากรูปที่ 3.20 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ L_r มีค่าเท่ากับ 10 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่าต่ำกว่า -10 dB มากที่สุด คือ $|S_{11}|$ มีค่าเท่ากับ -30.02 dB โดย $|S_{11}|$ ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 891 - 1000 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 11.53% และพบว่ามีค่าอัตราส่วนแกนใกล้เคียงกัน กล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ L_r ทั้ง 5 ค่าดังแสดงในรูปที่ 3.20 จะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ L_r ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนแกน โดยมีค่าอัตราส่วนแกนอยู่ในช่วง 0.97 dB – 1.03 dB



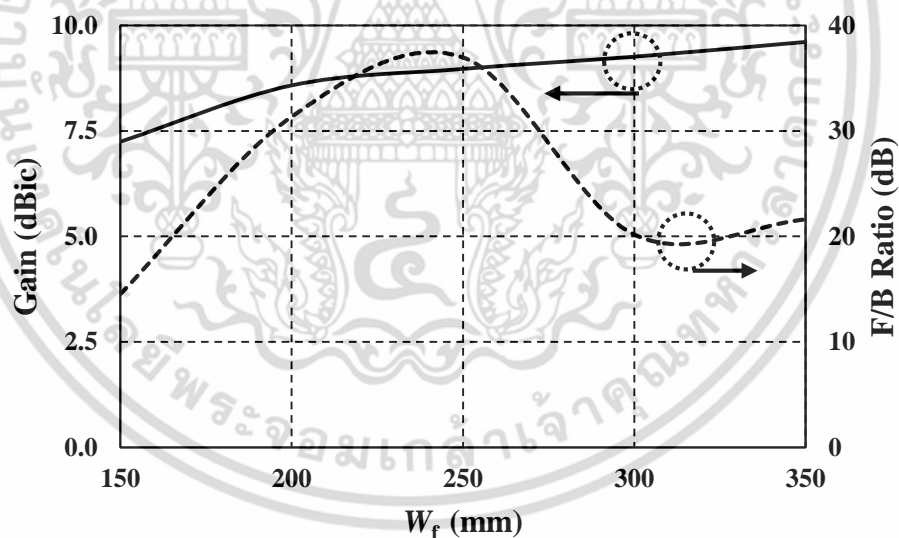
รูปที่ 3.21 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ R_2

จากรูปที่ 3.21 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ R_2 มีค่าเท่ากับ 5 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่าต่ำกว่า -10 dB มากที่สุด คือ $|S_{11}|$ มีค่าเท่ากับ -30.02 dB โดย $|S_{11}|$ ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 891 - 1000 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 11.53% และพบว่ามีค่าอัตราส่วนแกนใกล้เคียงกันแม้ว่าพารามิเตอร์ R_2 มีการเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 3.23 $|S_{11}|$ และอัตราส่วนแกนที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ W_f

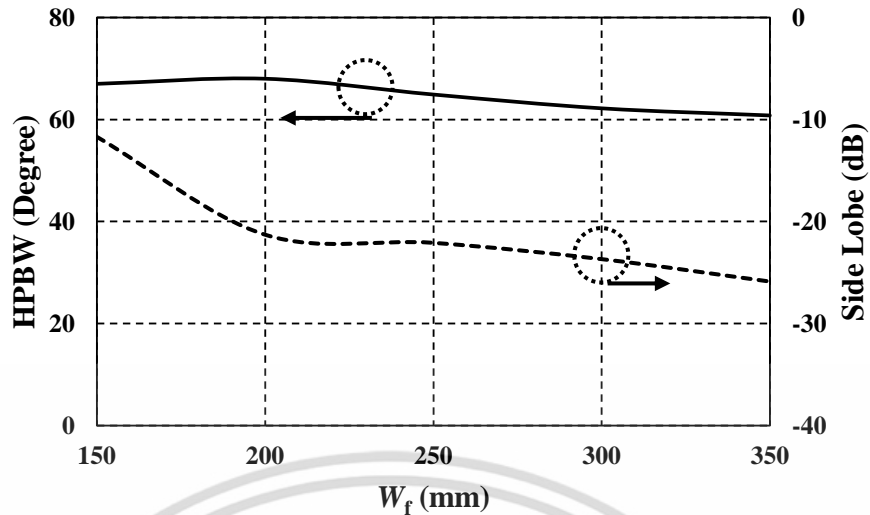
จากรูปที่ 3.23 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ W_f มีค่าเท่ากับ 250 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่าเท่ากับ -27.78 dB และมีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 0.97 dB



รูปที่ 3.24 อัตราขยาย และอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ W_f

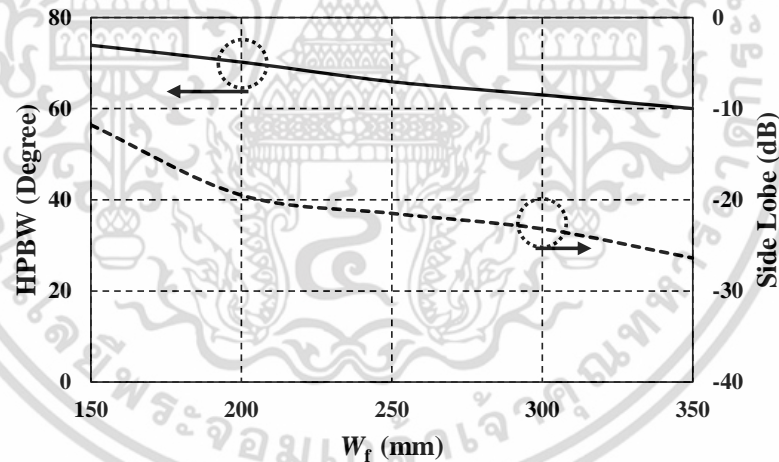
จากรูปที่ 3.24 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ W_f มีค่าเท่ากับ 250 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ W_f ค่าอื่น ๆ กล่าวคือมีค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังเท่ากับ 36.96 dB และมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 9.00 dBic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และลำคลื่นย่อยด้านข้างบนระนาบ xz ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ W_f

จากรูปที่ 3.25 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ W_f มีค่าเท่ากับ 250 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังต่ำกว่า 3 dB ที่มุม 66.5° และมีค่าลำคลื่นย่อยด้านข้างบนระนาบ xz มีค่าเท่ากับ -22.1 dB



รูปที่ 3.26 ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลัง และลำคลื่นย่อยด้านข้างบนระนาบ yz ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ของสายอากาศเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ W_f

จากรูปที่ 3.26 พบว่าเมื่อพารามิเตอร์ W_f มีค่าเท่ากับ 250 mm ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังต่ำกว่า 3 dB ที่มุม 66.9° และมีค่าลำคลื่นย่อยด้านข้างบนระนาบ yz มีค่าเท่ากับ -21.5 dB

3.3 ผลการจำลองสายอากาศต้นแบบ

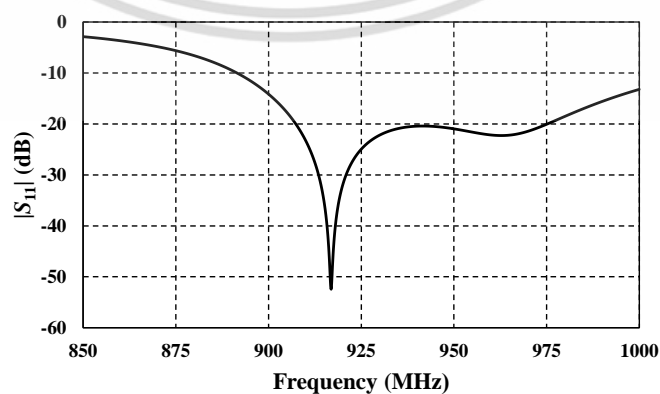
ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองของสายอากาศแบบทิศทางเดียวที่มีโพลาริเซชันวงกลม โดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมที่มีแผ่นระนาบตั้งฉากภายในเหนือแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับระบบอาร์เอฟไอดี (RFID) โดยนำค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.10 มาทำการจำลองเป็นโครงสร้างของสายอากาศเพื่อศึกษาถึงคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกนของสายอากาศ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น อัตราขยายของสายอากาศ และทิศทางการแพร่กระจายของสนามไฟฟ้า

ตารางที่ 3.10 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)	ขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศ
R_1	75.0	0.231λ
R_2	5.0	0.015λ
L_p	75.0	0.231λ
W_s	25.5	0.078λ
L_s	65.0	0.200λ
G_1	16.5	0.050λ
G_2	29.5	0.090λ
L_r	10.0	0.030λ
W_f	250	0.762λ
D_1	25.5	0.078λ
D_2	1.5	-

3.3.1 ผลการจำลอง $|S_{11}|$

สำหรับการพิจารณา $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันความถี่ของสายอากาศต้นแบบ จะพิจารณาที่ $|S_{11}| \leq -10$ dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งผลการจำลอง $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.27



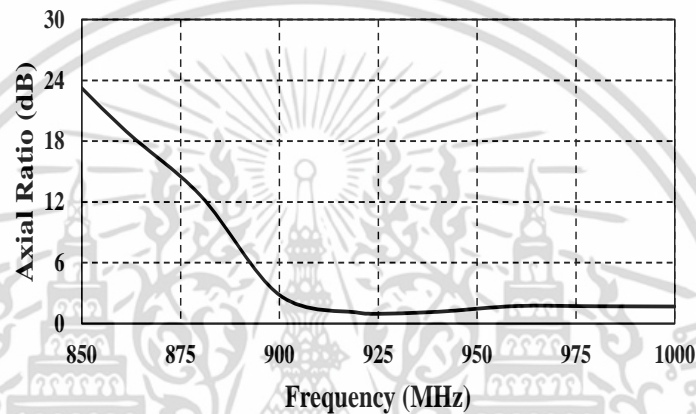
รูปที่ 3.27 $|S_{11}|$ ที่เป็นฟังก์ชันความถี่ของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.27 พบว่า $|S_{11}|$ มีการตอบสนองย่านความถี่ตั้งแต่ 891 - 1000 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 11.53% ซึ่งมีค่า $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ที่สุด ที่ความถี่ 916 MHz เท่ากับ -52.01 dB และที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งเป็นความถี่กลางของช่วงความถี่ใช้งาน มีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -27.39 dB ซึ่งครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานคือ 920-925 MHz

3.3.2 ผลการจำลองอัตราส่วนแชนเทียบกับความถี่ของสายอากาศต้นแบบ

สำหรับการพิจารณาอัตราส่วนแชนที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบ จะพิจารณาที่อัตราส่วนแชนน้อยกว่า 3 dB ซึ่งผลการจำลองอัตราส่วนแชนเป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.28

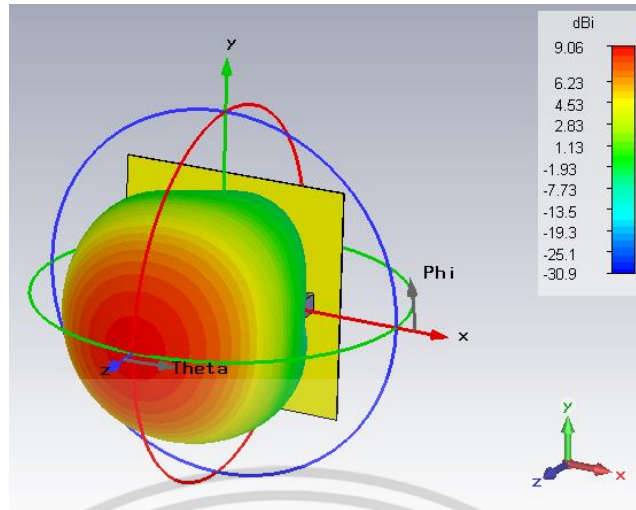


รูปที่ 3.28 อัตราส่วนแชนเทียบกับฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบ

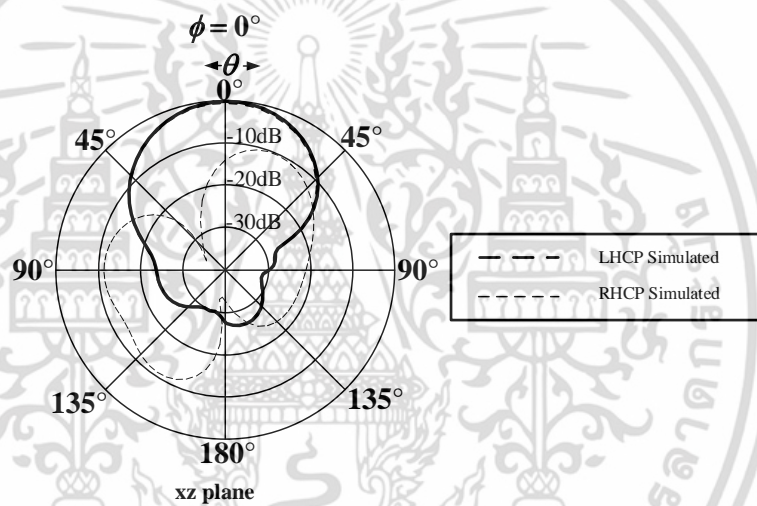
จากรูป 3.28 พบว่าอัตราส่วนแชนที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมความถี่ 900 – 1000 MHz ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราส่วนแชนเท่ากับ 0.97 dB

3.3.3 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ

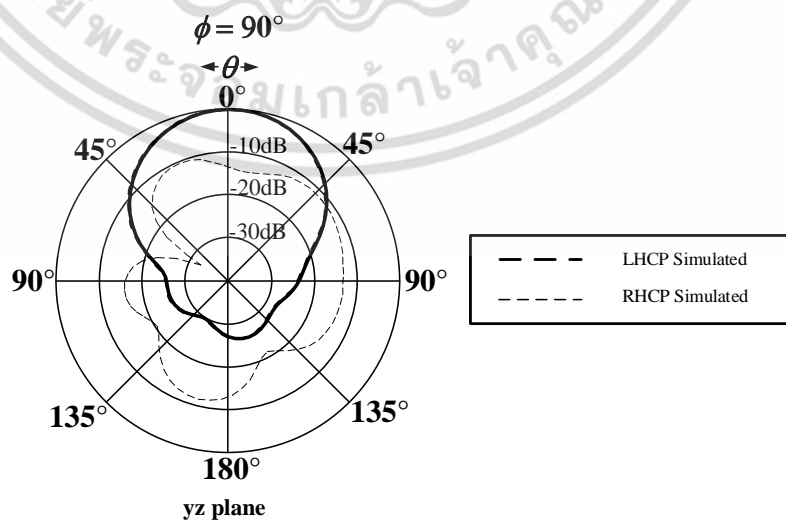
การจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำเสนอ จะพิจารณาที่ความถี่กลาง 922.5 MHz โดยผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 3 มิติของสายอากาศต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 3.29 และผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ ระนาบ xz และ ระนาบ yz ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.30 และรูปที่ 3.31 ตามลำดับ



รูปที่ 3.29 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น 3 มิติของสายอากาศที่ความถี่ 922.5 MHz



รูปที่ 3.30 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 922.5 MHz ของสายอากาศบนระนาบ xz



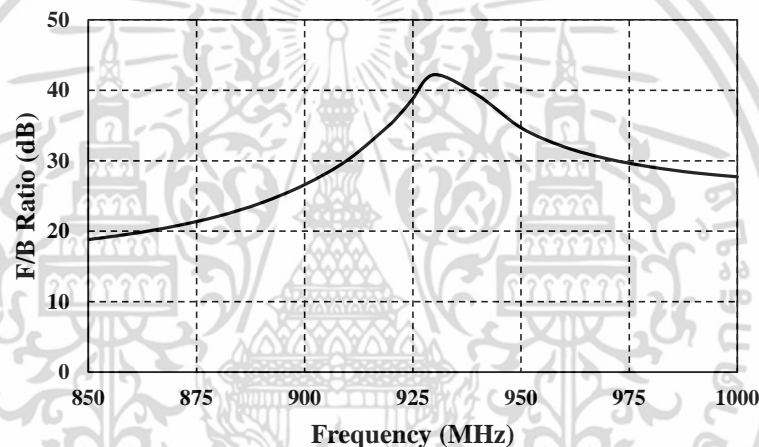
รูปที่ 3.31 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ความถี่ 922.5 MHz ของสายอากาศบนระนาบ yz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.30 แสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ xz ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และมีโพลาไรซ์วงกลม หนุนซ้าย โดยสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ xz เท่ากับ 66.5° และจากรูปที่ 3.31 แสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ yz ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวเช่นเดียวกัน และสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังในระนาบ yz เท่ากับ 66.9°

3.3.4 ผลการจำลองอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง

สำหรับการพิจารณาอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังของสายอากาศ จะพิจารณาที่มุม 180° คือลำคลื่นด้านหลัง และพิจารณาที่มุม 0° คือลำคลื่นด้านหน้า โดยผลการจำลองอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศ ต้นแบบแสดงดังรูปที่ 3.32

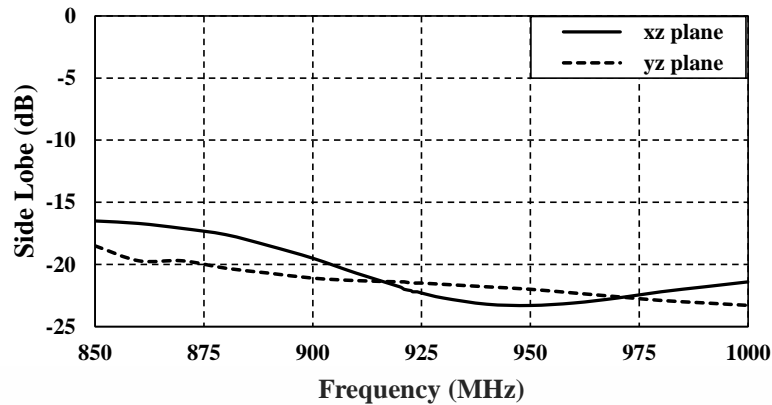


รูปที่ 3.32 อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 3.32 พบว่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าเท่ากับ 36.96 dB และที่ความถี่ 930 MHz มีค่าอัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลังมากที่สุด มีค่าเท่ากับ 42.22 dB

3.3.5 ผลการจำลองลำคลื่นย่อยด้านข้าง

สำหรับการพิจารณาลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศ จะพิจารณาความแรงของลำคลื่นย่อยอันแรก โดยผลการจำลองลำคลื่นย่อยด้านข้างของสายอากาศต้นแบบบนระนาบ xz และบนระนาบ yz แสดงดังรูปที่ 3.33

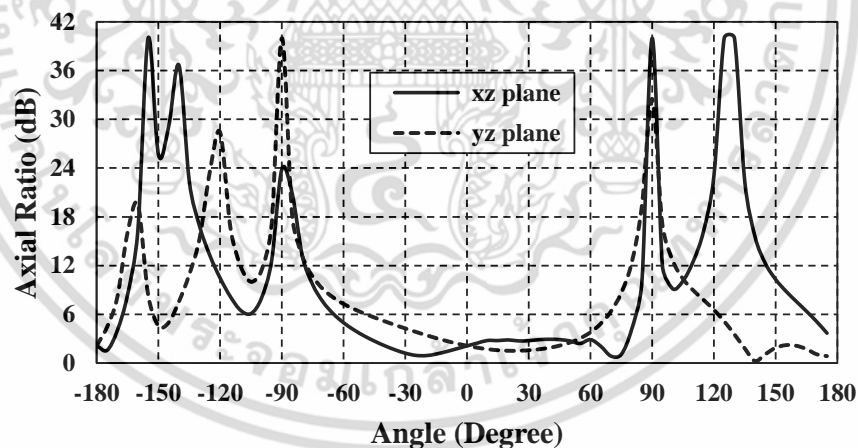


รูปที่ 3.33 ลำคลื่นย่อยด้านข้างที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ของสายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 3.33 พบว่าผลการจำลองลำคลื่นย่อยด้านข้างที่ความถี่กลาง 992.5 MHz บนระนาบ xz มีค่าเท่ากับ -22.1 dB และมีค่าลำคลื่นย่อยด้านข้างบนระนาบ yz เท่ากับ -21.5 dB ตามลำดับ

3.3.6 ผลการจำลองความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกน

สำหรับการพิจารณาอัตราส่วนแกนของสายอากาศ จะพิจารณาที่อัตราส่วนแกนน้อยกว่า 3 dB เช่นกัน โดยผลการจำลองความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนแกนเทียบกับมุมของสายอากาศต้นแบบ แสดงดังรูปที่ 3.34

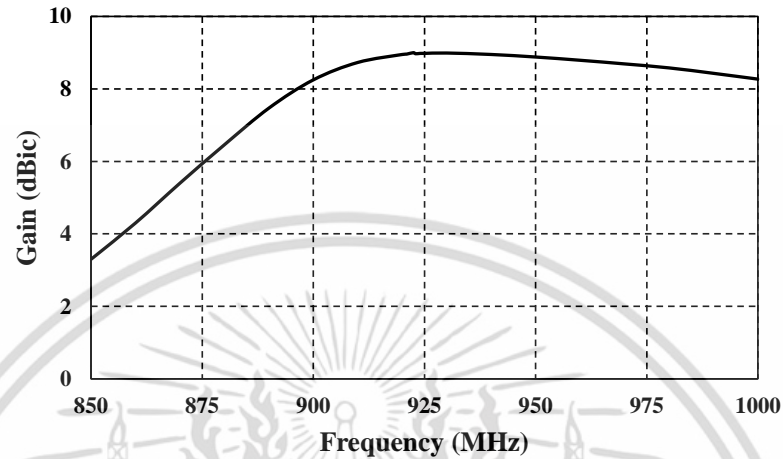


รูปที่ 3.34 อัตราส่วนแกนเทียบกับมุมของสายอากาศที่ความถี่ 922.5 MHz

จากรูปที่ 3.34 พบว่าค่าอัตราส่วนแกนที่มุม -20° มีค่าต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.91 dB บนระนาบ xz และค่าอัตราส่วนแกนที่มุม 25° มีค่าต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.5 dB บนระนาบ yz ตามลำดับ จากการจำลองบนระนาบ xz อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB มีค่าเท่ากับ 70° ตั้งแต่มุม -45° ถึงมุม 0° และ -55° ถึงมุม 80° และบนระนาบ yz อัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB มีค่าเท่ากับ 100° ตั้งแต่มุม 0° ถึงมุม 55° และ 135° ถึงมุม 180°

3.3.7 ผลการจำลองอัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลองสายอากาศต้นแบบ โดยทำการพิจารณาค่าอัตราขยายที่ด้านหน้าของสายอากาศที่มุม 0° ซึ่งเป็นมุมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร โดยค่าอัตราขยายของสายอากาศในย่านความถี่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ 3.35

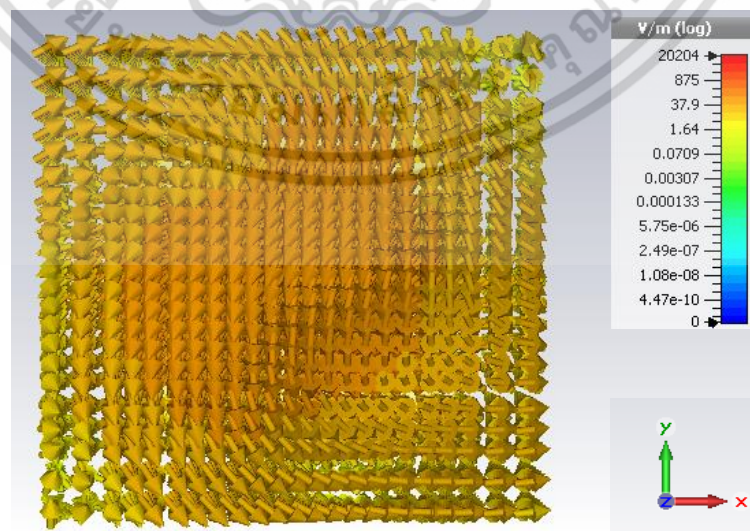


รูปที่ 3.35 อัตราขยายของสายอากาศต้นแบบ

จากรูปที่ 3.35 แสดงค่าอัตราขยายของสายอากาศ พบว่าสายอากาศมีอัตราขยายในช่วงความถี่ที่ใช้งานงาน (920 MHz ถึง 925 MHz) มีค่าอัตราขยายอยู่ในช่วงตั้งแต่ 8.95 - 9.00 dBic และที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราขยายเท่ากับ 9.00 dBic ซึ่งถือว่าเป็นค่าอัตราขยายที่สูง

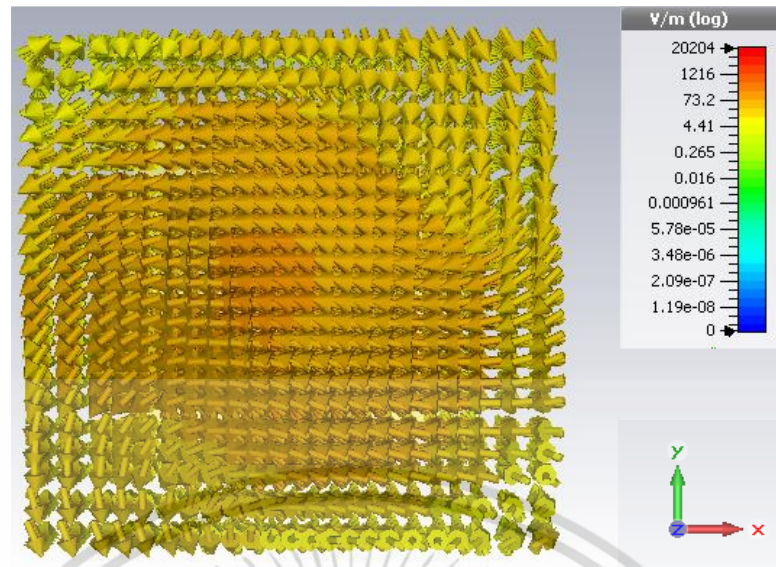
3.3.8 ผลการจำลองทิศทางสนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองทิศทางสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศต้นแบบ ที่เวลา (t) ต่าง ๆ ซึ่งผลการจำลองสนามไฟฟ้าของสายอากาศต้นแบบจะพิจารณาที่สนามระยะไกล ซึ่งผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 3.36

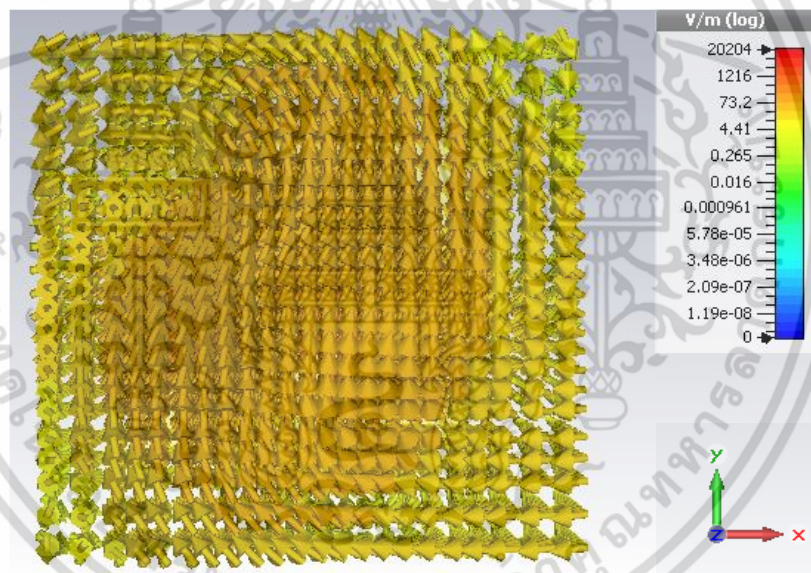


(ก) $t = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สง **รูปที่ 3.36** สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศต้นแบบที่เวลา (t) ต่าง ๆ การคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



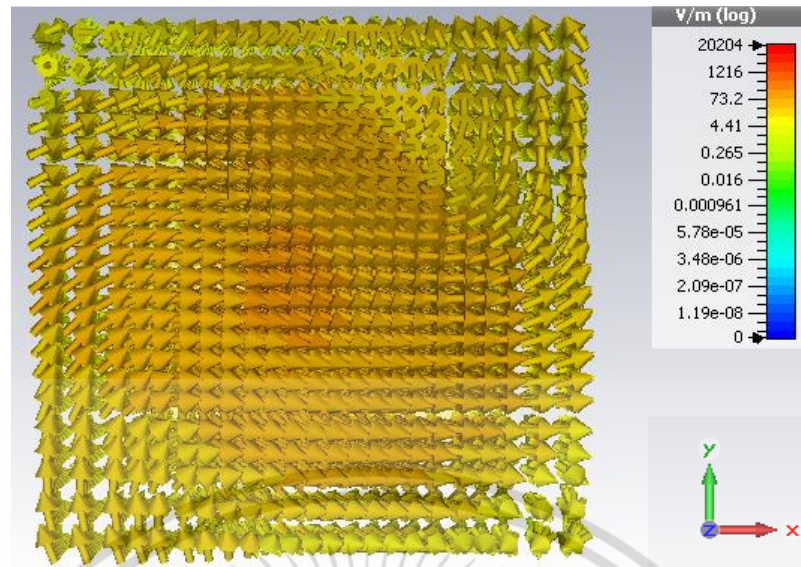
$$(ข) \quad t = \frac{T}{4}$$



$$(ค) \quad t = \frac{T}{2}$$

รูปที่ 3.36 สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศต้นแบบที่เวลา (t) ต่าง ๆ (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$(ง) \quad t = \frac{3T}{4}$$

รูปที่ 3.36 สนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายจากสายอากาศต้นแบบที่เวลา (t) ต่าง ๆ (ต่อ)

จากรูปที่ 3.36 สนามไฟฟ้าที่ปล่อยออกจากสายอากาศต้นแบบที่เวลา (t) เท่ากับ $0 T/4$ $T/2$ และ $3T/4$ พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องโดยมีการหมุนเป็นวงกลมด้วยขนาดที่เท่ากัน ซึ่งเงื่อนไขนี้สามารถทำให้เกิดโพลาไรซ์วงกลมได้

ตารางที่ 3.11 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ

คุณลักษณะของสายอากาศ	ค่าที่ได้จากการจำลอง
$ S_{11} $ แบนด์วิดท์	891 – 1000 MHz
ความกว้างอัตราส่วนแกน	900 – 1000 MHz
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	แบบทิศทางเดียว
โพลาไรซ์	วงกลมหมุนซ้าย
อัตราขยาย	9.00 dBic
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz	66.5°
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ yz	66.9°
ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนคลื่นแกนบนระนาบ xz	70°
ความกว้างลำคลื่นอัตราส่วนคลื่นแกนบนระนาบ yz	100°
อัตราส่วนลำคลื่นด้านหน้าต่อลำคลื่นด้านหลัง	36.96 dB
ลำคลื่นย่อยด้านข้างบนระนาบ xz	-22.1 dB
ลำคลื่นย่อยด้านข้างบนระนาบ yz	-21.5 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการจำลองผลของสายอากาศ โดยเริ่มต้นจากการคำนวณตามทฤษฎี เพื่อหาค่าขนาดของสายอากาศเริ่มต้น แล้วทำการออกแบบสายอากาศที่นำคลื่นวงแหวนวงกลม และทำการศึกษาการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศเพื่อให้มีคุณลักษณะที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดี ยานความถี่ยูเอชเอฟของประเทศไทย โดยค่าคุณลักษณะ $|S_{11}|$ มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมความถี่ $891 - 1000$ MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 11.53% มีค่าอัตราส่วนแกนที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมความถี่ $900 - 1000$ MHz คิดเป็น 10.53% โดยสายอากาศมีโพลารไรซ์วงกลมหมุนซ้าย สายอากาศมีอัตราขยายที่ความถี่กลาง 922.5 MHz เท่ากับ 9.00 dBic มีความกว้างอัตราส่วนแกนบนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 70° และ 100° ตามลำดับ มีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 66.5° และ 66.9° ตามลำดับ และสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว ฉะนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลจากการจำลอง จึงจะนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองสายอากาศไปทำการสร้างสายอากาศต้นแบบ และทำการทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ เพื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองซึ่งจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 4

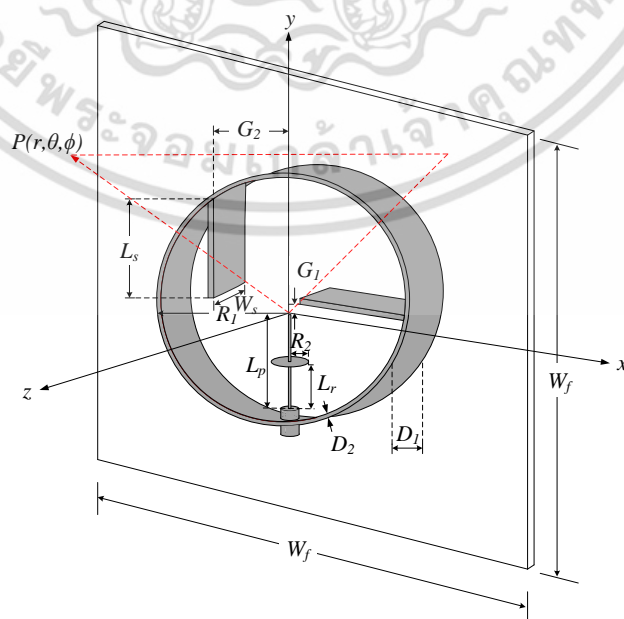
ผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศทิศทางเดียวที่มีโพลาไรซ์วงกลม โดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมที่มีแผ่นระนาบตั้งฉากภายในเหนือแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟ โดยการทดสอบจะพิจารณาคคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศดังนี้ $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นบนระนาบ xz และระนาบ yz ของสายอากาศ ในย่านความถี่ใช้งานคือที่ความถี่ 920 - 925 MHz ซึ่งจะนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากการศึกษาและวิจัยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอไว้ในบทที่ 3 เพื่อยืนยันความถูกต้อง โดยรายละเอียดต่างๆ ของการทดสอบสายอากาศจะกล่าวไว้ในหัวข้อถัดไป

4.2 สายอากาศต้นแบบ

ในหัวข้อนี้นำเสนอสายอากาศต้นแบบสำหรับใช้ในการทดสอบ โดยสายอากาศที่นำเสนอนี้ใช้งานในย่านความถี่ 920 - 925 MHz ซึ่งเป็นมาตรฐานระบบอาร์เอฟไอเดียันความถี่ยูเอชเอฟ ของประเทศไทย วัสดุที่นำมาสร้างสายอากาศต้นแบบเป็นแผ่นทองแดง เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย มีน้ำหนักเบา และมีราคาถูก ซึ่งแผ่นทองแดงมีความหนา 1.5 mm ใช้คอนเน็คเตอร์ชนิด SMA ต่อร่วมกับสายนำสัญญาณ โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอแสดงดังรูปที่ 4.1 และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยค่าพารามิเตอร์ในตารางเป็นค่าที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3



รูปที่ 4.1 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)	ขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศ
R_1	75.0	0.231 λ
R_2	5.0	0.015 λ
L_p	75.0	0.231 λ
W_s	25	0.077 λ
L_s	65.0	0.200 λ
G_1	16.5	0.050 λ
G_2	29.5	0.090 λ
L_r	10.0	0.030 λ
W_f	250	0.762 λ
D_1	25.5	0.078 λ
D_2	1.5	-

4.3 การสร้างและการทดสอบสายอากาศ

ในการสร้างสายอากาศที่จะนำมาทดสอบนั้นเกิดจากการวิเคราะห์และหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศจากการจำลองด้วยโปรแกรม CST MICROWAVE STUDIO® จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์มาสร้างสายอากาศต้นแบบขึ้น เพื่อนำมาทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ทางสายอากาศ เช่น $|S_{11}|$ อัตราส่วนแกน อัตราขยาย และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ แล้วนำผลจากการทดสอบไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองที่ได้จากบทที่ 3

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer HP 8720C)
2. สายนำสัญญาณ
3. สายอากาศแบบเกลียว
4. สายอากาศต้นแบบ

การทดสอบสายอากาศทิศทางเดียวที่มีโพลาริซวงกลม โดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลม ที่มีแผ่นระนาบตั้งฉากภายในเหนือแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี เพื่อทดสอบหาค่า $|S_{11}|$ ทำได้โดยนำสายอากาศที่ต้องการทำการทดสอบมาต่อเข้ากับเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย ดังรูปที่ 4.2 เพื่อวิเคราะห์ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบเพื่อหาอัตราขยายของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ ซึ่งในการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราขยายจะใช้สายอากาศคู่เหมือนในการทดสอบเพื่อหาอัตราขยายที่แท้จริง โดยสายอากาศจะวางหันหน้าเข้าหากันที่มุม 0° จากนั้นทำการคำนวณหาค่าอัตราขยายสมบูรณ์ได้จากสมการของฟรีส ในหน่วย dB ดังสมการที่ 4.1

$$(G_{0t})_{dB} + (G_{0r})_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right) \quad (4.1)$$

โดยที่การทดสอบสายอากาศจะต้องทำในสนามระยะไกล (R) ระยะระหว่างสายอากาศด้านส่งและสายอากาศด้านรับต้องเป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ 4.2

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (4.2)$$

โดย D คือ ขนาดที่ยาวที่สุดของสายอากาศ
 λ คือ ความยาวคลื่นโดยพิจารณาที่ความถี่ใช้งาน

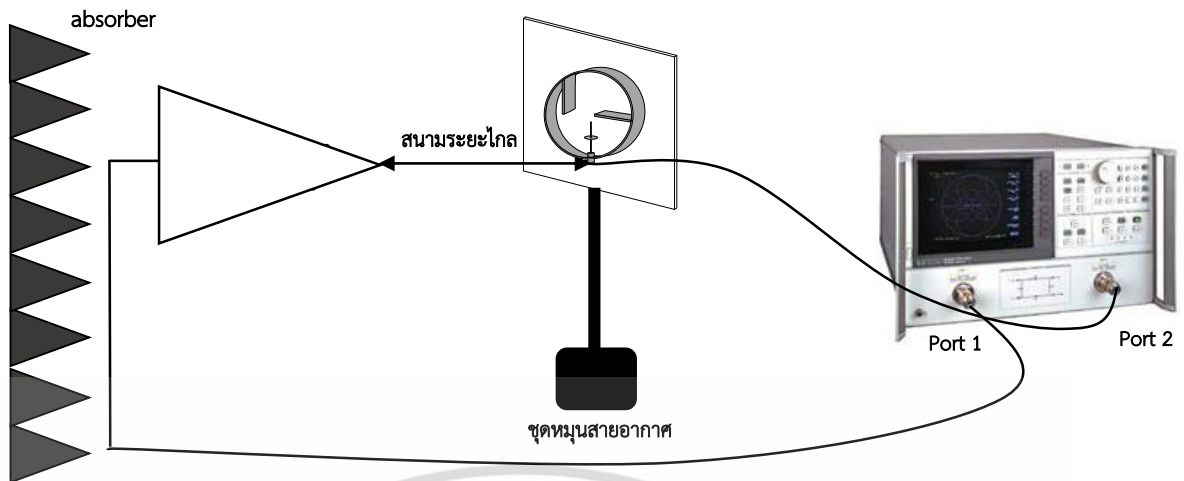
ดังนั้นจึงกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศของตัวส่งและสายอากาศของตัวรับมีค่าเท่ากับ 1.5 m ภายใต้เงื่อนไขเมตซ์โพลาไรซ์และมีระยะห่างระหว่างสายอากาศที่มีระยะมากกว่าหรือเท่ากับขอบเขตของสนามระยะไกล

การทดสอบอัตราขยายส่วนแกนและการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ในการทดสอบนั้นจะใช้สายอากาศแบบเกลียวจำนวนสองตัวเป็นสายอากาศด้านส่ง ซึ่งจะทำทดสอบทีละตัวและใช้สายอากาศต้นแบบเป็นสายอากาศด้านรับ กำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่ง และสายอากาศรับมีค่าเท่ากับ 1.5 m ซึ่งผลจากการทดสอบที่ได้สามารถคำนวณค่าอัตราส่วนแกนได้จากสมการที่ (4.3)

$$Axial Ratio (dB) = 20 \log \left[\frac{|E_{co}| + |E_{xp}|}{|E_{co}| - |E_{xp}|} \right] \quad (4.3)$$

โดย $|E_{co}|$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรซ์เดียวกับโพลาไรซ์ของสายอากาศ
 $|E_{xp}|$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าที่มีโพลาไรซ์ตั้งฉากกับโพลาไรซ์ของสายอากาศ

การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และอัตราขยายของสายอากาศแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การติดตั้งการทดสอบสายอากาศต้นแบบ

4.4 ผลการทดสอบสายอากาศ

โครงสร้างของสายอากาศต้นแบบจะถูกสร้างขึ้นตามขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศสรุปไว้ในตารางที่ 4.1 โดยสายอากาศต้นแบบที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.4



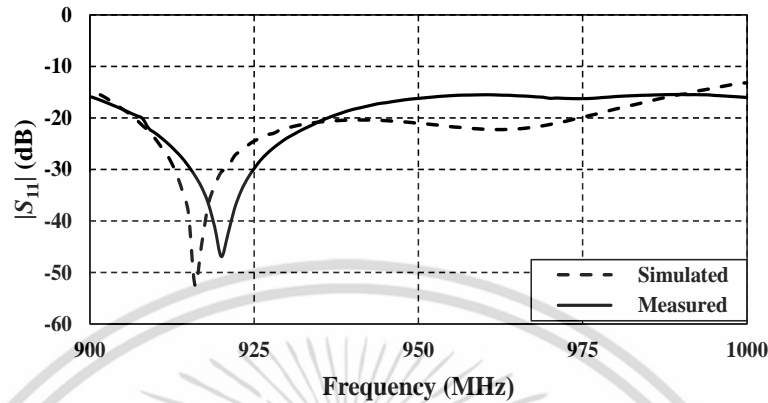
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายสายอากาศต้นแบบ

ในการทดสอบสายอากาศจะนำสายอากาศต้นแบบมาทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศแล้วนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3 โดยมีการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการจำลองคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น $|S_{11}|$ ค่าอัตราขยาย ค่าอัตราส่วนแแกน และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ เป็นต้น ซึ่งจะแสดงรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ผลการจำลอง $|S_{11}|$

สำหรับการพิจารณา $|S_{11}|$ ของสายอากาศ จะพิจารณาที่ $|S_{11}| \leq -10$ dB ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งผลการจำลองเทียบกับผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.5

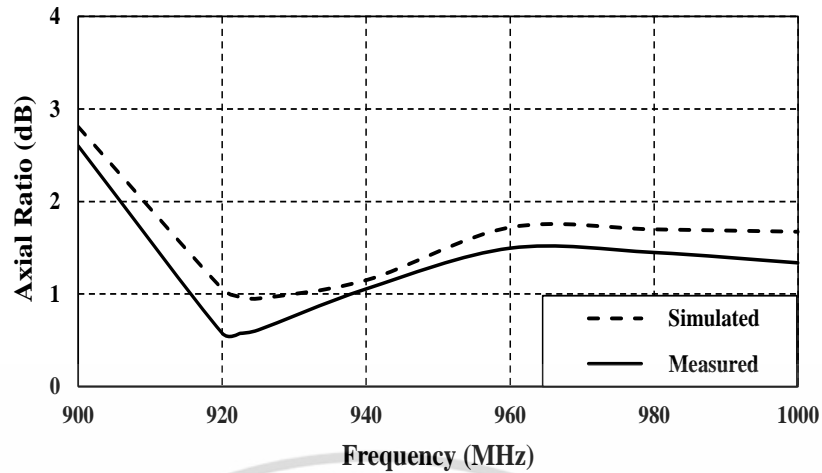


รูปที่ 4.5 ผลการจำลองและผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ

จากรูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศ พบว่า $|S_{11}|$ จากผลการทดสอบและผลจากการจำลองมีความสอดคล้องกันแต่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น โดยที่ $|S_{11}|$ จากผลการทดสอบจะมีช่วงกว้างความถี่ 116 MHz ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 884 – 1000 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 12.31% ซึ่ง $|S_{11}|$ มีค่าต่ำสุดที่ความถี่ 920 MHz มีค่าเท่ากับ -46.90 dB และที่ความถี่ 922.5 MHz ซึ่งเป็นความถี่กลางของย่านความถี่ใช้งาน มีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -37.67 dB ในขณะที่ผลจากการจำลอง $|S_{11}|$ มีช่วงกว้างความถี่ 109 MHz ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 891-1000 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 11.53% ซึ่ง $|S_{11}|$ มีค่าต่ำสุดที่ความถี่ 916 MHz มีค่าเท่ากับ -49.60 dB และที่ความถี่กลาง 922.5 MHz $|S_{11}|$ มีค่าเท่ากับ -27.39 dB และจากรูปที่ 4.5 สามารถสังเกตได้ว่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ได้จากผลการทดสอบเกิดคลาดเคลื่อนจากผลการจำลอง กล่าวคือ ค่า $|S_{11}|$ เคลื่อนไปทางความถี่สูงกว่าผลการจำลอง แต่ผลการทดสอบยังคงครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานคือ 920-925 MHz ดังนั้นสายอากาศต้นแบบที่นำเสนอจึงสามารถทำงานได้ในช่วงความถี่ที่ต้องการ

4.4.2 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของสายอากาศ

สำหรับการพิจารณาอัตราส่วนแอมพลิจูดของสายอากาศ จะพิจารณาที่อัตราส่วนแอมพลิจูดต่ำกว่า 3 dB ซึ่งผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแอมพลิจูดเทียบกับความถี่ของสายอากาศต้นแบบ สามารถแสดงดังรูปที่ 4.6

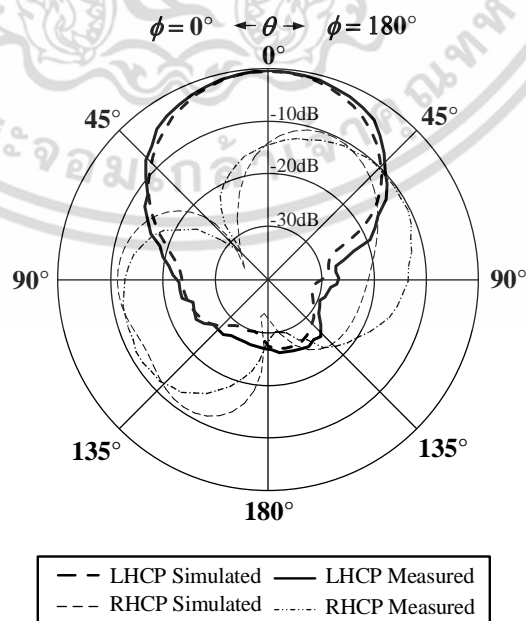


รูปที่ 4.6 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศ

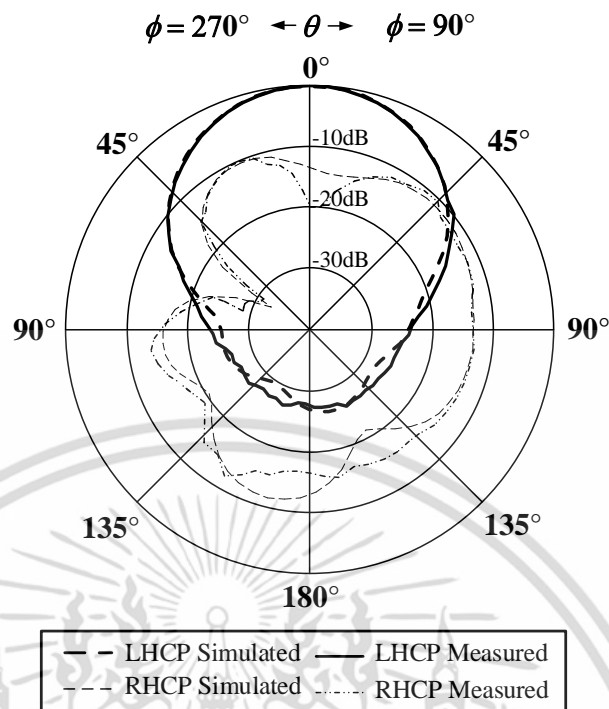
จากรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราส่วนแกนเทียบกับความถี่ของสายอากาศ ซึ่งสังเกตได้ว่ามีความสอดคล้องกัน โดยผลจากการทดสอบและผลการจำลองพบว่าอัตราส่วนแกนมีค่าต่ำกว่า 3 dB ในช่วงกว้างความถี่ที่เท่ากันคือ 100 MHz โดยครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 900-1000 MHz ซึ่งอัตราส่วนแกนของผลการทดสอบและผลการจำลอง ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราส่วนแกนเท่ากับ 0.57 dB และ 0.97 dB ตามลำดับ

4.4.3 ผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ จะพิจารณาที่ความถี่กลาง 922.5 MHz โดยผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบบนระนาบ xz และระนาบ yz แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8



รูปที่ 4.7 ผลการจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ xz
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



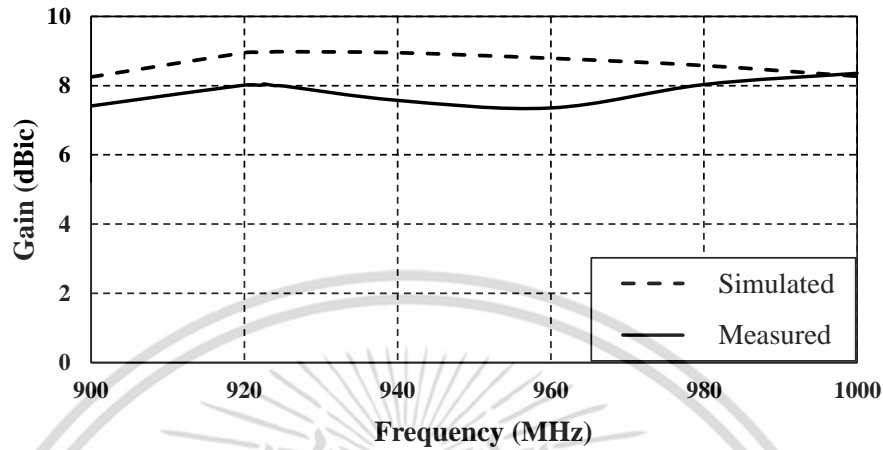
รูปที่ 4.8 ผลการจำลองและผลทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ yz

จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่กลาง 922.5 MHz บนระนาบ xz จากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz เท่ากับ 66.5° ในขณะที่ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ xz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวเช่นกัน และสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz เท่ากับ 66.5°

จากรูปที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่กลาง 922.5 MHz บนระนาบ yz จากผลการทดสอบพบว่าสายอากาศต้นแบบมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ yz เท่ากับ 67.0° ในขณะที่ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศบนระนาบ yz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียวเช่นกัน และสายอากาศมีความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ yz เท่ากับ 66.9°

4.4.4 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายของสายอากาศเทียบกับความถี่

จากรูปที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดสอบอัตราขยายเทียบกับความถี่ของสายอากาศ ซึ่งสังเกตได้ว่ามีความสอดคล้องกัน โดยที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราขยายที่ได้จากการทดสอบ มีค่าเท่ากับ 8.05 dBic และมีค่าอัตราขยายที่ได้จากการจำลอง มีค่าเท่ากับ 9.00 dBic

ตารางที่ 4.2 สรุปคุณลักษณะของสายอากาศต้นแบบ

คุณลักษณะของสายอากาศ	ค่าที่ได้จากการจำลองที่ความถี่ 922.5 MHz	ค่าที่ได้จากการทดสอบที่ความถี่ 922.5 MHz
$ S_{11} $	-27.39 dB	-37.67 dB
อัตราส่วนคลื่นนิ่ง	1.09	1.03
อัตราส่วนแกน	0.97 dB	0.57 dB
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	ทิศทางเดียว	ทิศทางเดียว
โพลาไรซ์	โพลาไรซ์วงกลม	โพลาไรซ์วงกลม
อัตราขยาย	9.00 dBic	8.05 dBic
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz	66.5°	66.5°
ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ yz	66.9°	67.0°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 บทสรุป

ผลที่ได้จากการทดสอบคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศสายอากาศทิศทางเดียวที่มีโพลาริซวงกลมโดยใช้โพรบกระตุ้นวงแหวนวงกลมที่มีแผ่นระนาบตั้งฉากภายในวงแหวนแผ่นสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดยการนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3 มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบ เช่น เปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ช่วงความถี่ที่สามารถใช้งานได้ ความกว้างสูงสุดของลำคลื่นที่มีการแพร่กระจายคลื่น โดยสามารถสรุปผลต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ผลการทดสอบ $|S_{11}|$ ของสายอากาศต้นแบบมีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 884-1000 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 12.31%

- ผลการทดสอบอัตราส่วนแอมเพียกับความถี่ พบว่าอัตราส่วนแอมที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 900-1000 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์เท่ากับ 10.53%

- ผลการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบ มีการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว

- ผลการทดสอบอัตราขยายที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าเท่ากับ 8.05 dBic

- สายอากาศต้นแบบมีโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย

ผลที่ได้จากการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลอง จะเห็นได้ว่าคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศมีความสอดคล้องกันแต่อาจมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นบ้าง สาเหตุอาจเนื่องมาจากขนาดของสายอากาศที่สร้างมีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลองเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าสายอากาศที่นำเสนอของคุณลักษณะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟได้ ซึ่งในบทที่ 5 จะนำเสนอผลการนำสายอากาศต้นแบบไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กอย่างละเอียด

บทที่ 5

การทดสอบประยุกต์ใช้งานและการประเมินสมรรถนะ

5.1 บทนำ

ในบทก่อนหน้านี้นี้กล่าวถึงการสร้างสายอากาศต้นแบบจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง และการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศ ซึ่งแสดงไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ตามลำดับ โดยในบทนี้ ได้นำสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ มาทำการทดสอบ การประยุกต์ใช้งาน โดยใช้งานร่วมกับแท็ก เพื่อหาระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศของ เครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก โดยได้ทำการทดสอบหาระยะที่สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกลที่สุดระหว่าง สายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก โดยการทดสอบประยุกต์ใช้งานสายอากาศต้นแบบ มีรายละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

5.2 เครื่องมือ อุปกรณ์ ที่ใช้ในการทดสอบเบื้องต้นและทดลองในสภาพการใช้งานจริง

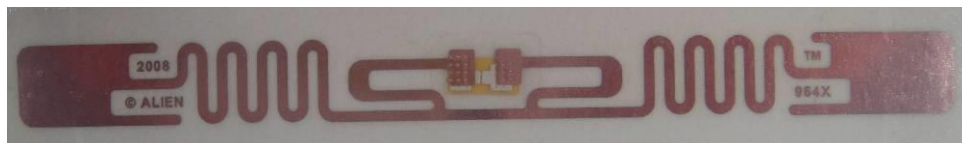
ในหัวข้อที่นำเสนอเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระยะการติดต่อสื่อสารระหว่าง สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลร่วมกับแท็ก โดยมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องอ่านข้อมูล ของบริษัท Motorola รุ่น XR480 จำนวน 1 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 5.1
2. แท็กชนิดไดโพลแบบขดลวด ของบริษัท Alien ดังแสดงในรูปที่ 5.2
3. สายอากาศอ้างอิงเป็นสายอากาศไดโพลมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 5.3
4. สายอากาศต้นแบบใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี ย่านความถี่ยูเอชเอฟ แสดงดังรูปที่ 5.4
5. เครื่องมือวัดระยะทาง แสดงดังรูปที่ 5.5
6. คอมพิวเตอร์
7. สายนำสัญญาณ

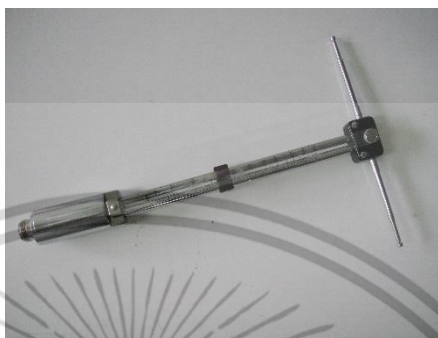


รูปที่ 5.1 เครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 แท่งชนิดไดโพลแบบขด Alien



รูปที่ 5.3 สายอากาศอ้างอิงสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาไรซ์เชิงเส้น

จากรูปที่ 5.3 แสดงสายอากาศอ้างอิงเป็นสายอากาศแบบไดโพลมาตรฐาน มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ใช้งานคือ 920 - 925 MHz มีโพลาไรซ์เชิงเส้น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบทิศทาง และอัตราการขยายที่ความถี่ใช้งานมีค่าเท่ากับ 2.1 dBi



รูปที่ 5.4 สายอากาศวงแหวนวงกลมของเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีที่ความถี่ยูเอชเอฟ

จากรูปที่ 5.4 สายอากาศวงแหวนวงกลมสำหรับใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีที่ความถี่ยูเอชเอฟ มีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 884 - 1000 MHz มีโพลาไรซ์วงกลมหมุนซ้ายด้านหน้า มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และอัตราการขยายที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าเท่ากับ 8.05 dBi

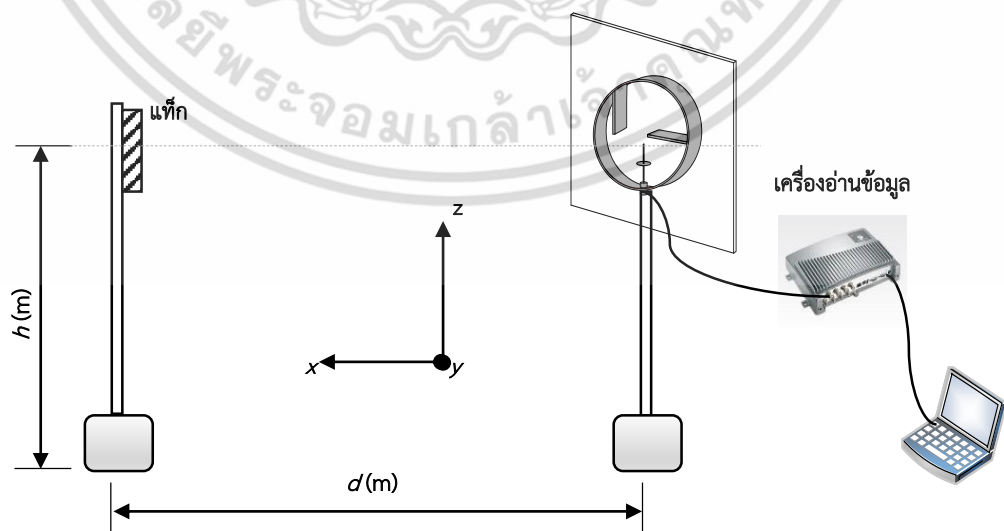
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 เครื่องมือวัดระยะทาง

5.3 การทดสอบประยุกต์ใช้งาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง การประยุกต์ใช้งานสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ โดยการทดสอบสายอากาศร่วมกับแท็ก ในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการนำสายอากาศอ้างอิงไดโพลมาตรฐานที่มีโพลาริเซชันเชิงเส้นใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูล เพื่อวัดระยะการติดต่อสื่อสารกับแท็ก และการนำสายอากาศวงแหวนวงกลมที่มีโพลาริเซชันวงกลมใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูล เพื่อวัดระยะการติดต่อสื่อสารกับแท็กเช่นเดียวกัน โดยรูปแบบการติดตั้งการทดสอบสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็กแสดงในรูปที่ 5.6 ในส่วนรายละเอียดการทดสอบจะแสดงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 5.6 การติดตั้งการทดสอบสายอากาศวงแหวนวงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็ก

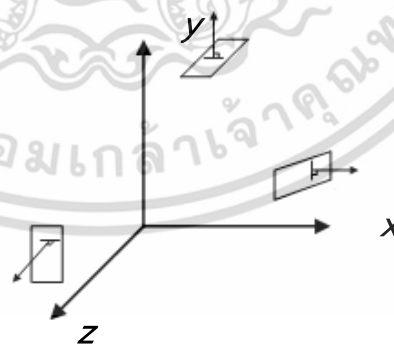
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.6 แสดงการติดตั้งการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟใช้งานร่วมกับแท็ก ซึ่งกำหนดให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศต้นแบบกับแท็กแทนด้วยพารามิเตอร์ d มีค่าระหว่าง 1-6 m และกำหนดให้ความสูงในการติดตั้งสายอากาศ และการติดตั้งแท็กมีความสูงเท่ากัน โดยแทนด้วยพารามิเตอร์ h มีค่าเท่ากับ 1.3 m ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งการทดสอบสายอากาศวงแหวนวงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลใช้งานร่วมกับแท็กแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศร่วมกับแท็ก

พารามิเตอร์	ขนาด
h	1.3 m
d	1-6 m
Power	1000 mW
f (ความถี่ใช้งาน)	920-925 MHz

โดยการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ จะทำการทดสอบสายอากาศอ้างอิงแบบไดโพลมาตรฐานที่มีโพลาริเซชันเส้นร่วมกับแท็กที่มีโพลาริเซชันเส้น และทำการทดสอบสายอากาศวงแหวนวงกลมที่มีโพลาริเซชันวงกลมร่วมกับแท็กที่มีโพลาริเซชันเส้น เพื่อหาระยะทางสูงสุดในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก ซึ่งวิธีการทดสอบจะทำการเลื่อนแท็กออกไปเรื่อย ๆ จนถึงระยะสุดท้ายที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถอ่านข้อมูลจากแท็กได้ และจะทำการวัดระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กด้วยเครื่องมือวัดระยะทาง โดยการวางตัวของสายอากาศและแท็กจะอ้างอิงตามแนวแกนต่าง ๆ 3 แนวแกน คือแนวแกน x แนวแกน y และ แนวแกน z ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.7

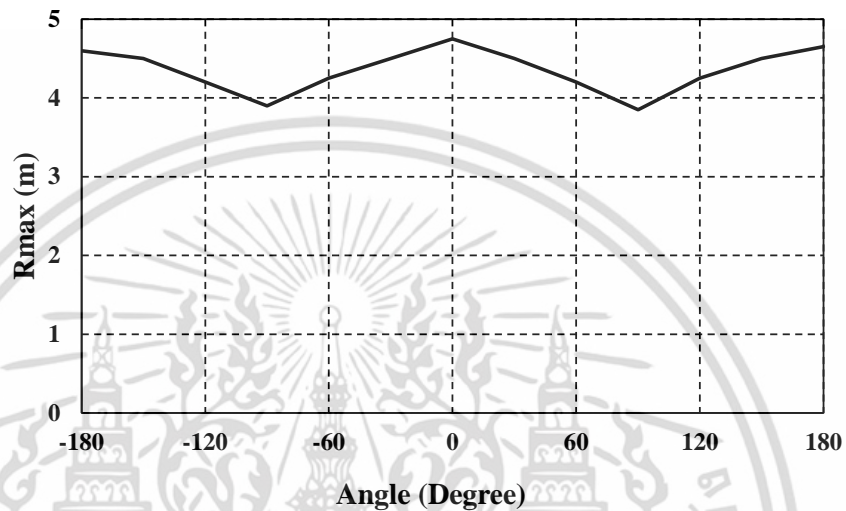


รูปที่ 5.7 การวางตัวของแท็กแต่ละแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z

จากรูปที่ 5.7 แสดงการวางตัวของแท็กโดยใช้แนวแกนต่าง ๆ 3 แนวแกน คือแนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบสายอากาศจะวางตัวในแนวแกน x กล่าวคือหันส่วนด้านหน้าของสายอากาศเข้าหาแท็กนั่นเอง และสายอากาศจะวางตัวเช่นนี้ตลอดการทดสอบ โดยผลการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลร่วมกับแท็กรายละเอียดดังนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่สัญญาใด ๆ ในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.1 ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศอ้างอิงไดโพลมาตรฐานร่วมกับแท็ก

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศอ้างอิงไดโพลมาตรฐานที่มีโพลาริเซชันเชิงเส้นร่วมกับแท็กที่มีโพลาริเซชันเชิงเส้นเช่นเดียวกัน โดยในการทดสอบจะติดตั้งสายอากาศไดโพลมาตรฐานในแนวแกน x โดยการทดสอบจะวางแท็กในแนวแกน x เช่นเดียวกัน และทำการหมุนแท็กเป็นมุมครั้งละ 30° เพื่อหาระยะทางในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในแต่ละมุม เมื่อแท็กวางตัวในแนวแกน x โดยผลการทดสอบการประยุกต์ใช้งานแสดงดังรูปที่ 5.8



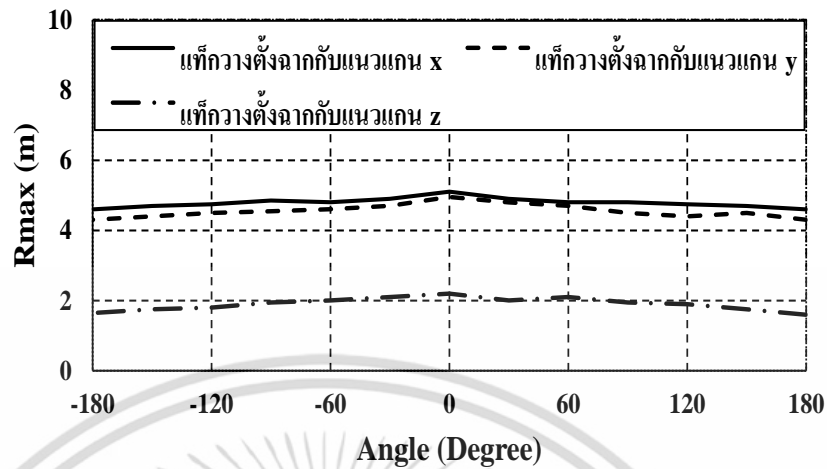
รูปที่ 5.8 ระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่าง ๆ โดยใช้สายอากาศไดโพลมาตรฐานที่มีโพลาริเซชันเชิงเส้น

จากรูปที่ 5.8 พบว่าระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟเอไอดีกับแท็กมีการเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือเมื่อแท็กมีการวางตัวในมุมที่ต่างกัน โดยที่มุม 0° ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก สามารถติดต่อกันได้ระยะทางที่ไกลที่สุด คือ 4.75 m ซึ่งเป็นมุมที่แท็กและสายอากาศมีการโพลาริเซชันเชิงเส้นในแนวแกนที่เหมือนกัน ทำให้เกิดการแมตชิ่งกันของการโพลาริเซชันระหว่างสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศแท็ก ทำให้มีระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กมีระยะไกลที่สุด โดยเมื่อแท็กวางตัวทำมุม 180° 150° 120° 90° 60° 30° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้มีระยะเท่ากับ 4.65 m 4.5 m 4.25 m 3.85 m 4.2 m 4.5 m ตามลำดับ และเมื่อแท็กวางตัวทำมุม -180° -150° -120° -90° -60° -30° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้มีระยะเท่ากับ 4.6 m 4.5 m 4.2 m 3.9 m 4.25 m 4.5 m ตามลำดับ

5.3.2 ผลการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศวงแหวนวงกลมร่วมกับแท็ก

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟเอไอดีย่านความถี่เอชเอฟ ในการทดสอบจะนำสายอากาศวงแหวนวงกลมที่มีโพลาริเซชันวงกลมวางในแนวแกน x ตลอดการทดสอบ โดยทำการทดสอบร่วมกับแท็กที่มีโพลาริเซชันเชิงเส้น ในการทดสอบจะทำการวางแท็กในแนวแกนต่าง ๆ ทั้งหมด 3 แกน คือ แนวแกน x แนวแกน y และแนวแกน z ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 5.7 จากนั้นจะทำการหมุนแท็กเป็นมุมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครึ่งละ 30° เพื่อหาระยะทางที่ไกลที่สุดในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในแต่ละมุม โดยผลจากการทดสอบการประยุกต์ใช้งานแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมต่าง ๆ โดยใช้สายอากาศวงแหวนวงกลมทดสอบร่วมกับแท็ก

จากรูปที่ 5.9 พบว่าเมื่อแท็กวางตัวในแนวแกน x ที่มุม 0° เครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ระยะทางที่ไกลที่สุด คือที่ระยะ 5.1 m โดยเมื่อแท็กวางตัวทำมุม 180° 150° 120° 90° 60° 30° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้มีระยะเท่ากับ 4.65 m 4.7 m 4.75 m 4.8 m 4.8 m 4.9 m ตามลำดับ และเมื่อแท็กวางตัวทำมุม -180° -150° -120° -90° -60° -30° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้มีระยะเท่ากับ 4.6 m 4.7 m 4.75 m 4.85 m 4.8 m 4.9 m ตามลำดับ

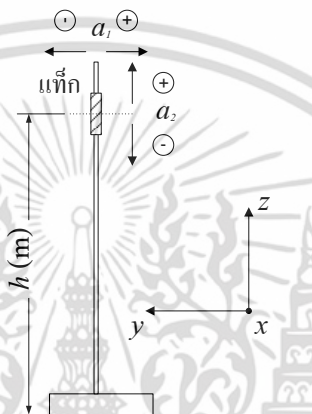
เมื่อวางแท็กในแนวแกน y ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.9 พบว่าการติดต่อสื่อสารข้อมูลเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (Alien tag) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อแท็กวางตัวในมุมต่าง ๆ โดยจะเห็นว่าที่มุม 0° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ระยะทางที่ไกลที่สุด คือที่ระยะ 4.95 m โดยเมื่อแท็กวางตัวทำมุม 180° 150° 120° 90° 60° 30° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้มีระยะเท่ากับ 4.3 m 4.5 m 4.4 m 4.5 m 4.7 m 4.8 m ตามลำดับ และเมื่อแท็กวางตัวทำมุม -180° -150° -120° -90° -60° -30° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้มีระยะเท่ากับ 4.3 m 4.4 m 4.5 m 4.55 m 4.6 m 4.7 m ตามลำดับ

เมื่อวางแท็กในแนวแกน z ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.9 พบว่าการติดต่อสื่อสารข้อมูลเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก (Alien tag) มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อแท็กวางตัวในมุมต่าง ๆ โดยจะเห็นว่าที่มุม 0° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ระยะทางที่ไกลที่สุด คือที่ระยะ 2.2 m โดยเมื่อแท็กวางตัวทำมุม 180° 150° 120° 90° 60° 30° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้มีระยะเท่ากับ 1.6 m 1.75 m 1.9 m 1.95 m 2.1 m 2.0 m ตามลำดับ และเมื่อแท็กวางตัวทำมุม -180° -150° -120° -90° -60° -30° เครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้มีระยะเท่ากับ 2.1 m 2.0 m 1.95 m 1.8 m 1.75 m 1.65 m

ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

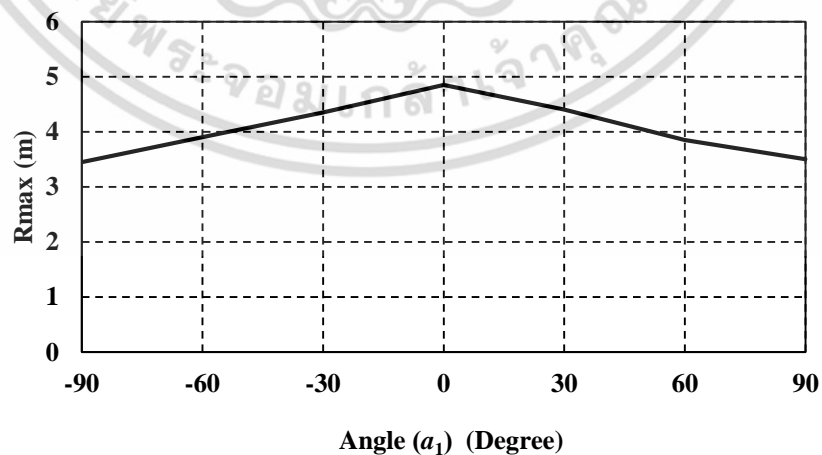
5.3.2.1 การทดสอบการประยุกต์ใช้งานเมื่อเปลี่ยนระยะมุมยก (a_2) และระยะมุมกวาด (a_1) ของแท่งในกรณีที่แท่งวางตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแกน x

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ ซึ่งทำการทดสอบสายอากาศวงแหวนวงกลมที่มีโพลาริซวงกลมร่วมกับแท่งที่มีโพลาริซเชิงเส้น ซึ่งรูปการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.10 ในการทดสอบ จะทำการเปลี่ยนแปลงระยะมุมยก (a_2) และระยะมุมกวาด (a_1) ของสายอากาศแท่ง โดยกำหนดให้ ความสูง (h) ของสายอากาศวงแหวนวงกลมสำหรับเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีมีความสูงคงที่ คือมีค่าความสูงเท่ากับ 1.3 m ซึ่งผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 ตามลำดับ



รูปที่ 5.10 การทดสอบผลการเปลี่ยนแปลงระยะมุมกวาด (a_1) และระยะมุมยก (a_2)

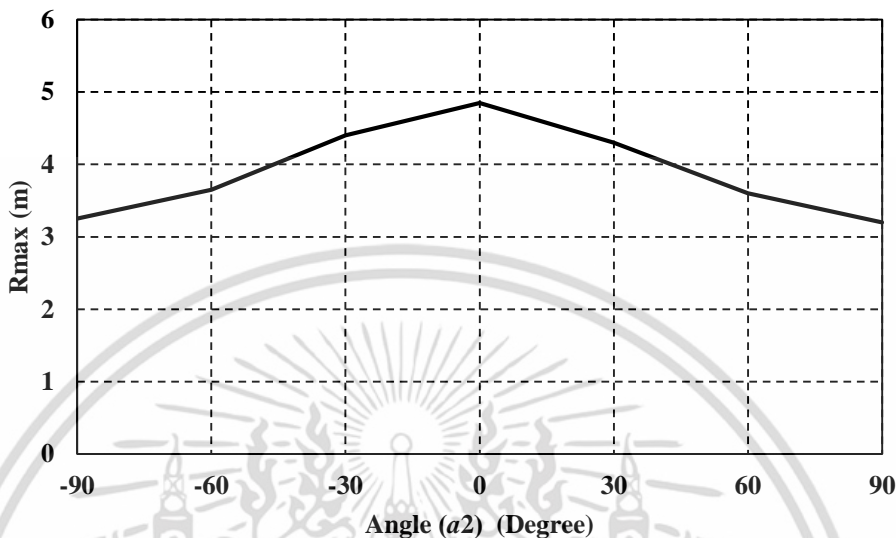
จากรูปที่ 5.10 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศวงแหวนวงกลมกับเครื่องอ่านข้อมูลระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ ในการทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงระยะมุมกวาด (a_1) และระยะมุมยก (a_2) ของสายอากาศแท่ง โดยมุมจะเปลี่ยนแปลงครั้งละ 30° ในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ



รูปที่ 5.11 ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศวงแหวนวงกลมกับแท่งในมุมกวาด (a_1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.11 ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมกวาดต่าง ๆ พบว่าที่แท็กวางตัวทำมุมกวาดที่ 0° มีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศวงแหวนวงกลมกับแท็กไกลที่สุด คือมีระยะเท่ากับ 4.85 m



รูปที่ 5.12 ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศวงแหวนวงกลมกับแท็กในมุมยก (a_2)

จากรูปที่ 5.12 ระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กที่มุมยกต่าง ๆ พบว่าที่แท็กวางตัวทำมุมกวาดที่ 0° มีระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างสายอากาศวงแหวนวงกลมกับแท็กไกลที่สุด มีระยะเท่ากับ 4.85 m

5.4 บทสรุป

จากผลการทดสอบการประยุกต์ใช้งานสายอากาศวงแหวนวงกลมกับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ เพื่อหาระยะในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็ก พบว่าสายอากาศวงแหวนวงกลมมีความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ โดยบริเวณด้านหน้าของสายอากาศจะสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ในระยะไกลที่สุด ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองและผลที่ได้จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สายอากาศที่พัฒนาขึ้นมาสามารถปรับปรุงความสามารถในการติดต่อสื่อสารเมื่อแท็กมีโพลาไรซ์เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กได้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอสายอากาศวงแหวนวงกลมที่มีแผ่นระนาบตั้งฉากภายในวงเหนือแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ ที่ความถี่ 920 – 925 MHz โดยจุดประสงค์เพื่อสร้างสายอากาศที่มีค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งทำให้มีการโพลารไรซ์วงกลม มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นทิศทางเดียว และมีอัตราการขยายสูง พร้อมทั้งสามารถนำสายอากาศมาประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีร่วมกับแท็กได้ทุกลักษณะการจัดวางตัวของแท็ก

โดยในหัวข้อ 6.1 จะกล่าวถึงผลสรุปโดยรวมของวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วยผลการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศวงแหวนวงกลมที่มีแผ่นระนาบตั้งฉากภายในเหนือแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัส สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์และการจำลองสายอากาศ ผลจากการทดสอบคุณลักษณะทางสายอากาศ ผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้งานสายอากาศกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีกับแท็ก และในหัวข้อ 6.2 จะกล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อไป

6.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้อธิบายถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์ในการออกแบบสายอากาศ ทฤษฎีและหลักการของระบบอาร์เอฟไอดี ทฤษฎีพื้นฐานการออกแบบสายอากาศ โดยศึกษาการออกแบบและการจำลองสายอากาศ เพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและนำมาใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ รวมทั้งผลการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศที่นำเสนอ

จากผลการศึกษาการออกแบบและการจำลองสายอากาศต้นแบบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ เพื่อให้ได้คุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศที่ต้องการ ซึ่งประกอบไปด้วย $|S_{11}|$ ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงความถี่ใช้งานที่ 920 – 925 MHz มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นทิศทางเดียว มีอัตราการขยายสูง และมีโพลารไรซ์วงกลม โดยกระบวนการออกแบบและหาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศจะใช้โปรแกรม CST® (Microwave studio) ในการจำลองสายอากาศ และวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อนำมาสร้างสายอากาศต้นแบบ โดยผลการจำลองสายอากาศสามารถสรุปคุณลักษณะของสายอากาศได้ดังต่อไปนี้

พบว่าสายอากาศมีผลการจำลอง $|S_{11}|$ สามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการ โดยครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 891 - 1000 MHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 109 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดธ์ 12.31% ซึ่ง $|S_{11}|$ มีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่ 916 MHz เท่ากับ -52.44 dB และที่ความถี่กลางของย่านใช้งานที่ 922.5 MHz มีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -27.39 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วนแวกที่ต่ำกว่า 3 dB ตลอดย่านใช้งาน ครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 900 – 1000 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์ 10.53% โดยที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราส่วนแวกเท่ากับ 0.97 dB

อัตราขยายในช่วงความถี่ใช้งาน มีค่าตั้งแต่ 8.81 – 9.12 dBic และที่ความถี่กลาง 922.5 MHz อัตราขยายมีค่าเท่ากับ 9.00 dBic

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 66.5° และ 66.9° ตามลำดับ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และสายอากาศมีโพลาริซวงกลมหมุนซ้ายที่ด้านหน้าสายอากาศ

จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากการออกแบบและการศึกษาผลกระทบที่เกิดจากพารามิเตอร์ของสายอากาศ ซึ่งได้จากผลการจำลองมาสร้างเป็นสายอากาศต้นแบบที่สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟ โดยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างสายอากาศต้นแบบ แสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดของสายอากาศ (mm)	ขนาดทางไฟฟ้าของสายอากาศ
R_1	75.0	0.231 λ
R_2	5.0	0.015 λ
L_p	75.0	0.231 λ
W_s	25.0	0.077 λ
L_s	65.0	0.200 λ
G_1	16.5	0.050 λ
G_2	29.5	0.090 λ
L_r	10.0	0.030 λ
W_f	250	0.762 λ
D_1	25.5	0.078 λ
D_2	1.5	-

จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงในตารางที่ 6.1 มาสร้างสายอากาศ แล้วจึงนำไปทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของสายอากาศ เพื่อนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

สายอากาศที่สร้างสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูล สำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่ยูเอชเอฟได้ โดย $|S_{11}|$ จากการทดสอบครอบคลุมความถี่ตั้งแต่ 884 – 1000 MHz มีช่วงกว้างความถี่เท่ากับ 116 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์เท่ากับ 12.31% ซึ่ง $|S_{11}|$ มีค่าต่ำที่สุดที่ความถี่ 920 MHz เท่ากับ -46.90 dB และที่ความถี่กลาง 922.5 MHz สายอากาศต้นแบบมีค่า $|S_{11}|$ เท่ากับ -37.67 dB

อัตราส่วนแวกเทียบกับความถี่ พบว่าอัตราส่วนแวกที่ต่ำกว่า 3 dB ครอบคลุมย่านความถี่ตั้งแต่ 900 - 1000 MHz คิดเป็นเปอร์เซ็นต์แบนด์วิดท์เท่ากับ 10.53%

อัตราขยายในช่วงความถี่ที่ต้องการใช้งาน มีค่าอัตราขยายตั้งแต่ 7.36 – 8.36 dBic และที่ความถี่กลาง 922.5 MHz มีค่าอัตราการขยายเท่ากับ 8.05 dBic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างลำคลื่นครึ่งกำลังบนระนาบ xz และระนาบ yz เท่ากับ 66.5° และ 67.0° ตามลำดับ มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว และสายอากาศมีโพลาริซวงกลมหมุนซ้าย

จากการทดสอบสายอากาศพบว่า ผลการทดสอบกับผลการจำลองมีความสอดคล้องกัน แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อน สาเหตุอาจเนื่องมาจากขนาดที่นำมาสร้างสายอากาศ มีความคลาดเคลื่อนไปจากการจำลอง หรืออาจเนื่องมาจากการสูญเสียระหว่างสายนำสัญญาณ แต่ผลการทดสอบยังยืนยันได้ว่าสายอากาศสามารถทำงานครอบคลุมย่านความถี่ที่ต้องการได้ และสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟได้

หลังจากการนำสายอากาศที่ได้จากการทดสอบคุณลักษณะต่างๆ แล้ว จากนั้นจึงนำสายอากาศไปประยุกต์ใช้ร่วมกับเครื่องอ่านข้อมูลของระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟ โดยทำงานร่วมกับแท็ก ซึ่งผลที่ได้จากการนำสายอากาศมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็ก พบว่าสายอากาศสามารถใช้งานร่วมกับแท็กได้ คือเครื่องอ่านข้อมูลสามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กได้ ดังนั้นสายอากาศที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับแท็กได้จริง

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิเคราะห์และทดสอบสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีย่านความถี่เอชเอฟในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะเห็นว่า การเพิ่มแผ่นระนาบภายในท่อนำคลื่นวงแหวนวงกลม ทำให้สายอากาศมีโพลาริซวงกลม กล่าวคือการเพิ่มแผ่นระนาบสองแผ่นที่มีขนาดเท่ากัน และมีการจัดวางแผ่นระนาบในตำแหน่งเฟสต่างกัน 90° ทำให้สายอากาศเกิดโพลาริซวงกลม และการเพิ่มแผ่นตัวสะท้อนสี่เหลี่ยมจัตุรัสวางด้านหลังของสายอากาศ เพื่อให้สายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทิศทางเดียว โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบสายอากาศ และทำการทดสอบสายอากาศเพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจ สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงโครงสร้างของสายอากาศให้มีรูปแบบที่ง่ายขึ้น และหลากหลายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีและการประยุกต์ใช้งาน Available: วารสารอิเล็กทรอนิกส์ ECTI [Online]. <http://www.ecti-thailand.org/emagazine/views/60>
- [2] Identifying Infants with RFID at MUSE 2014 [Online]. Available: <http://www.rmsomega.com/healthcare/identifying-infants-with-rfid-at-muse-2014-booth-607/>
- [3] Application of RFID Technology [Online]. Available: <http://www.ramielec.com/en/News/Public/50.html>
- [4] มาทำความรู้จักกับ Scanner ไร้สาย Intermec รุ่น SR61B กันดีกว่า Available: <http://riverplusblog.com/category/handheld>
- [5] Japan to support development, launch of 5G mobile networks. [Online]. Available: <http://en.twwt.com/Bignews/68740.html>
- [6] การสแกนลายนิ้วมือทำให้เกิด QCDM ต่อบริษัท [Online]. Available: <http://www.prosoftbioscan.com/ArticleInfo.aspx?ArticleTypeID=2228&ArticleID=6747>
- [7] ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, “รู้จักกับเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี” พ.ศ. 2548
- [8] Current Trends and Challenges in RFID “*RFID Technology*” [Online]. Available: <http://www.intechopen.com/books/current-trends-and-challengesin-rfid/rfid-technology-perspectives-and-technical-considerations-of-microstrip-antennas-for-multi-band-rfid>
- [9] พิชัย ภัคดีพานิชเจริญ “ทฤษฎีและการใช้งานความถี่ย่านไมโครเวฟ” สำนักพิมพ์ฟิสิกส์ เซ็นเตอร์ พ.ศ. 2536
- [10] Constantine A. Balanis, “*Antenna Theory: Analysis and Design*”, John Wiley & Son, Inc., 2005.
- [11] S. Kosulvit, M. Krairiksh, C. Phongcharoenpanich, and T. Wakabayashi, “A simple and cost-effective bidirectional antenna using a probe excited circular ring,” *IEICE Transaction on Electronics*, vol. E84-C, No. 4, April 2001.
- [12] C. Phongcharoenpanich, Y. Chawanonphithak, P. Wouchoum and M. Krairiksh “Analysis of Probe Excited Circular Ring above Reflector in Outdoor WLAN Systems” *IEEE Asia-Pacific Microwave Conference*, 2005.
- [13] S. Vongsack, C. Phongcharoenpanich, S. Kosulvit, K. Hamamoto, and T. Wakabayashi, “Unidirectional antenna using two-probe excited circular ring above square reflector for polarization diversity with high isolation,” *Progress in Electromagnetics Research*, vol.133, pp. 159-176, 2013.
- [14] XR 480 RFID Fixed Reader Specification Sheet Available: motorola.com
- [15] CST-Microwave Studio, User’s Manual, 2006.

เอกสารนี้ [15] ออกมาให้ใช้ฟรีโดยไม่คิดค่าลิขสิทธิ์ แต่ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และขอสงวนสิทธิ์ในการนำเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นางสาวรังสีณี สุขมาตย์
 วัน เดือน ปีเกิด 7 กันยายน 2532
 ที่อยู่ 55/408 หมู่บ้านโกลเด้นอเวนิว หมู่ 3 ซ.สุขประชาสรรค์ 3
 ต.บางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120
 ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] R. Sukkamat, P. Pongpaibon and C. Phongcharoenpanich, “Bandwidth Extension of Collinear Antenna for UHF Band,” 2013 *Thailand-Japan Microwave (TJMW2013)*, Bangkok, Thailand, December 2-4, 2013.
- [2] R. Sukkamat, N. Mhudtongon and C. Phongcharoenpanich, “Perturbation of a Probe Excited Circular Ring Antenna above the Square Reflector with Inserted Slabs for Circularly Polarized Radiation,” 2015 *Thailand-Japan Microwave (TJMW2015)*, Bangkok, Thailand, August 6-8, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้