สายอากาศแท็กชนิดแถบสำหรับระบบระบุรหัสและทางความถี่ในย่านอัลตร้าไฮ

STRIP TAG ANTENNA FOR RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION IN ULTRA HIGH FREQUENCY BAND

ฟิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

FITCHANUN WONGSIRITORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-FN-M-011-048

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศแท็กชนิดแผ่นบางสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง

STRIP TAG ANTENNA FOR RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION IN ULTRA HIGH FREQUENCY BAND

พิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

PITCHANUN WONGSIRITORN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 105142
วัน,เดือน,ปี 1 6 มี.ค. 2552

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL 2009-EN-M-010-068

STRIP TAG ANTENNA FOR RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION IN ULTRA HIGH FREQUENCY BAND

PITCHANUN WONGSIRITORN

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

2009

KMITL 2009-EN-M-010-068

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สายอากาศแท็กชนิดแผ่นบางสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง

Thesis Title Strip Tag Antenna for Radio Frequency Identification in Ultra High Frequency Band

นักศึกษา นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

รหัสประจำตัว 50060911

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-010-068

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาคีพงษ์	
ศ.ดร.โมไนย	ไกรฤกษ์	
ผศ.ดร.ดนัย	ต.รุ่งเรือง	
รศ.ดร.สมผล	โกศัลวิตร์	
ผศ.ดร.ชูวงค์	พงศ์เจริญพาณิชย์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศแท็กชนิดแผ่นบางสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง
นักศึกษา	นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร
รหัสนักศึกษา	50060911
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร. ดนัย ต.รุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศแท็กสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง 920-925 MHz ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานทางความถี่ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุภายในประเทศไทย การออกแบบจะออกแบบในตัวกลางที่เป็นอากาศ โดยสิ่งสำคัญในการออกแบบสายอากาศแท็กคือสายอากาศที่ทำการออกแบบจะต้องแมตช์สังยุคกับชิปวงจรรวมเพื่อให้สายอากาศสามารถส่งผ่านพลังงานไปยังชิป วงจรรวมได้สูงสุด โดยสายอากาศที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์นี้จะถูกออกแบบให้แมตช์สังยุคกับ ชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่าความถี่กลาง 922.5 MHz เท่ากับ 21.3+j191.7 โอห์ม นำเสนอสายอากาศแท็กไดโพลกับเส้นปรสิต (parasitic lines) สำหรับการศึกษาการจำลองสายอากาศแท็กในเบื้องต้นและเป็นการทดสอบความถูกต้องของการออกแบบสายอากาศกับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL โดยสายอากาศดังกล่าวมีความง่ายและสะดวกในการออกแบบและการปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้มีความเหมาะสมกับชิปวงจรรวม สำหรับการปรับปรุงคุณลักษณะของสายอากาศและโครงสร้างของสายอากาศ สายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นวงจรพิมพ์อ่อนจะถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่อ่อนบางและการออกแบบจะถูกนำเสนอโดยการใช้ชิปรุ่น NXP G2XL ซึ่งเป็นชิปวงจรรวมเดียวกันกับสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต โดยการทดสอบสายอากาศจะใช้การทดสอบจากระยะการอ่านได้ไกลที่สุด

Thesis Title	Strip Tag Antenna for Radio Frequency Identification in Ultra High Frequency Band
Student	Miss Pitchanun Wongsiritorn
Student ID.	50060911
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich
Thesis Co-advisor	Asst.Prof.Dr. Danai Torrungrueng

ABSTRACT

This thesis presents the RFID tag antenna designs for the frequency band of 920-925 MHz corresponding to the standard of UHF RFID in Thailand. The design is carried out in free space environment. An importance for design the tag antenna is that the impedance of the tag antenna must be conjugately matched with the impedance of the IC chip for the maximum power transfer from the tag antenna to the IC chip. The tag antennas are designed for conjugate matching with NXP G2XL IC Chip which has the impedance of 21.3+j191.7 Ohms at the center frequency of 922.5 MHz. The tag antenna design using dipole with parasitic lines is presented to show the concept of tag antenna design and test with NXP G2XL IC Chip. This tag antenna can be easily designed and adjusted its input impedance. To improve the characteristics and structure of the tag antenna, the small meander-line tag antenna on flexible PCB is presented. The proposed antenna is relatively small which are designed to match with the impedance of the same IC chip. The maximum read range is measured.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และเป็นผู้ช่วยเหลือแนะนำทั้งแนวทางทางด้านการศึกษา งานวิจัย หลักการการดำเนินชีวิตและหลักการคิดให้ชีวิตดำรงอยู่ได้อย่างมีความสุข ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดนัย ต.รุ่งเรือง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และทั้งยังแนะนำกระบวนการคิดและหลักการทำงานวิจัย ให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา ขอขอบคุณในความเมตตาของ ดร. พรอนงค์ พงษ์ไพบูรณ์ ที่ได้แนะแนวและให้ข้อมูลงานทางด้านระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุพร้อม ทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปกรณ์อันเป็นประโยชน์มากมายแก่งานวิจัยของข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมผล โกศัลวิตร์ และศาสตราจารย์ ดร.โมไนย ไกรฤกษ์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าและคำแนะนำที่มีประโยชน์ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ทุกๆ ท่าน ตลอดช่วงชีวิตการศึกษาของข้าพเจ้าที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้ง และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงยิ่ง

ขอขอบคุณ สมาชิกห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่านสำหรับคำแนะนำ กำลังใจและข้อคิดดีๆ ตลอดช่วงเวลาที่ผ่าน มาโดยเฉพาะ คุณกิตติศักดิ์ แพบัว คุณรัฐพงษ์ สุวลักษณ์ ที่คอยช่วยเหลือในงานวิจัยของข้าพเจ้าเสมอมา และคุณคณะวัติ เนื่องวงษา ที่ค่อยช่วยเหลืองานทางด้านปฏิบัติของข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณมารินทร์ ปานจันทร์ ที่เป็นกำลังสำคัญในการส่งเสริมทางด้านการศึกษาของข้าพเจ้าตั้งแต่เยาว์วัย และความปรารถนาดีทุกอย่างที่มอบให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่มอบความปรารถนาดีอันเป็นกำลังใจที่สำคัญแก่ข้าพเจ้า และให้การสนับสนุนในทุกๆเรื่อง จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พิชชานันท์ วงศ์ศิริธร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VIII

สารบัญรูป IX

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาของวิทยานิพนธ์และความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย 3

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ 3

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ .....

2.1 บทนำ 5

2.2 ความเป็นมาของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 5

2.2.1 ข้อดีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 6

2.2.2 การประยุกต์ใช้งานระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นวิทยุ 7

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 8

2.3.1 ส่วนควบคุม 9

2.3.2 เครื่องอ่านข้อมูล 10

2.3.3 แท็กหรือเครื่องลูกข่าย (Tag) 11

2.3.3.1 ส่วนประกอบของแท็ก 11

2.3.3.1.1 สายอากาศแท็ก (Tag antenna) 12

2.3.3.1.2 ชิปวงจรรวม (IC chip) 12

2.3.3.1.3 แผ่นพิมพ์และวัสดุฐานรอง (Substrate) 13

2.3.3.2 การแบ่งประเภทของแท็กตามวิธีการของการส่งพลังงานไปยังแท็ก 14

2.3.3.2.1 แท็กชนิดพาสซีฟ (Passive tag) 14

2.3.3.2.2 แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active tag) 15

2.3.3.2.3 แท็กชนิดแอ็กทีฟ (Active tag) 17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.3.3 การแบ่งประเภทของแท็กตามวิธีการของความแตกต่างของโครงสร้างและการออกแบบ 18
2.3.3.3.1 แท็กแบบจานและเหรียญ (Disk and coin) 18
2.3.3.3.2 แท็กแบบกระเปาะแก้ว (Glass housing) 18
2.3.3.3.3 แท็กแบบหุ้มพลาสติก (Plastic housing) 19
2.3.3.3.4 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ 19
2.3.3.3.5 แท็กแบบพวงกุญแจ (Key and key fob) 19
2.3.3.3.6 แท็กแบบนาฬิกา 20
2.3.3.3.7 แท็กมาตรฐาน ID-1และสมาร์ตการ์ดแบบไร้การสัมผัส 21
2.3.3.3.8 แท็กแบบ Smart label 21
2.3.3.3.9 แท็กแบบขดลวดบนชิป (Coil-on-chip) 22
2.4 การจัดสรรคลื่นความถี่วิทยุย่านสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 23
2.5 มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 24
2.6 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID) 27
2.7 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุสนามระยะไกล (Far-field RFID) 28
2.7.1 หลักการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในสนามระยะไกล 29
2.7.1.1 การติดต่อสื่อสารของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในสนามระยะไกล 29
2.7.1.2 การติดต่อสื่อสารจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก 30
2.7.1.3 การติดต่อสื่อสารจากแท็กกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล 31
2.7.2 ค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผลไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) และค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผล (Effective Radiated Power: ERP) 32
2.7.3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน (Power transmission coefficient) 33
2.7.4 สัมประสิทธิ์การแมตช์ของโพลาไรซ์ (Polarization matching coefficient) 35
2.7.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity) 36
2.7.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna efficiency) 36
2.7.7 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain of antenna) 36
2.7.8 ความไวของชิปวงจรรวม (Sensitivity of IC chip) 37

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8 หลักการออกแบบสายอากาศแท็กของระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นวิทยุ 37
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่มีมาก่อน 39
2.10 บทสรุป.....44

บทที่ 3 การจำลองสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต .....
3.1 บทนำ.....45
3.2 สายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต (Dipole with parasitic lines) 45
3.2.1 โครงสร้างของสายอากาศชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต 46
3.2.2 การออกแบบสายอากาศ.....46
3.3 การคำนวณค่าความยาวของสายอากาศเบื้องต้น 47
3.4 การศึกษาค่าความยาวเริ่มต้น l_d ของสายอากาศ.....48
3.5 การศึกษาความกว้างเริ่มต้น w_d ของสายอากาศ.....50
3.6 การศึกษาถึงการปรับค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้เส้นปรสิต.....52
3.6.1 การเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 1 และศึกษาผลของพารามิเตอร์ S_1 52
3.6.2 การเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 2 และศึกษาผลของพารามิเตอร์ S_2 55
3.6.3 การเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 3 และศึกษาผลของพารามิเตอร์ S_3 57
3.7 การปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยพารามิเตอร์ l_d 59
3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต 63
3.9 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต.....64
3.10 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าประสิทธิภาพความเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของ
สายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต.....66
3.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต.....66
3.12 บทสรุป.....67

บทที่ 4 การจำลองสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน .....
4.1 บทนำ.....68
4.2 โครงสร้างของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน.....68
4.3 การศึกษาถึงโครงสร้างที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 69
4.3.1 การศึกษาผลโครงสร้างฐานรองของชิปวงจรรวมและความยาว l_d และความกว้าง
w_d ของสายอากาศ.....69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.2 การเพิ่มความยาวทางไฟฟ้าและการลัดวงจรของสายอากาศ 74
4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 84
4.5 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 85
4.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าประสิทธิภาพความเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 86
4.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 87
4.8 บทสรุป 88

บทที่ 5 การสร้าง ทดสอบสายอากาศแท็กและการประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมเบื้องต้น ..
5.1 บทนำ 89
5.2 การทดสอบระยะการอ่านได้ไกลที่สุด 89
5.2.1 ผลการทดสอบระยะการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต .92
5.2.2 ผลการทดสอบระยะการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศขนาดเล็ก 94
5.3 การประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมเบื้องต้น 95
5.3.1 การประเมินค่าอิมพีแดนซ์จากการคำนวณ 96
5.3.2 การประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมเบื้องต้นจากชุดสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต 97
5.4 บทสรุป 102

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....
6.1 บทนำ 103
6.2 สรุปผลการวิจัย 103
6.3 ข้อดี ข้อเสีย ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา 104
บรรณานุกรม 106
ภาคผนวก 109
ประวัติผู้เขียน 116

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุกับระบบบรหัสแท่ง 6

2.2 ความถี่วิทยุที่นำมาใช้ในงานด้านต่างๆสำหรับ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 24

2.3 มาตรฐานของ EPC Global 25

2.4 มาตรฐานของ ISO 26

2.5 มาตรฐานย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่อนุญาตให้ใช้ในแต่ละประเทศ 27

2.6 สายอากาศทั่วไปในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 44

3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศสตริปไดโพลเริ่มต้น 48

3.2 สรุปการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของสายอากาศและคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่มีความเหมาะสมที่ได้ทำการจำลอง 62

3.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมที่ได้ทำการจำลอง 63

4.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อน 71

4.2 พารามิเตอร์สายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนภายใต้โครงสร้างที่กำหนด

(ก) สายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนบนวัสดุฐานรองขยายความกว้าง w_d 75

(ข) สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนหนึ่งขด บนแผ่นพิมพ์อ่อน 75

(ค) สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนสองขด บนแผ่นพิมพ์อ่อน 76

4.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศสตริปไดโพลแบบขดวกวนบนแผ่นพิมพ์อ่อน 79

4.4 สรุปการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายอากาศวัสดุฐานรองชนิดอ่อนและคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่ได้จำลองที่ค่าความถี่ 922.5 MHz 83

5.1 คุณสมบัติของเครื่องอ่านข้อมูล 91

5.2 คุณสมบัติของสายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น 91

5.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ 93

5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 94

5.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิตที่นำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้น 98

5.4 สรุปสมรรถนะของชุดสายอากาศที่ทำการนำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้นที่ค่าความถี่กลาง 922.5 MHz 101

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ส่วนประกอบของระบบ RFID 2

2.1 โครงสร้างของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 9

2.2 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล 10

2.3 ลักษณะของเครื่องอ่านข้อมูลแบบต่างๆ 11

2.4 ส่วนประกอบพื้นฐานของแท็ก 11

2.5 องค์ประกอบพื้นฐานภายในชิปวงจรรวม 12

2.6 แท็กชนิดพาสซีฟในรูปแบบต่างๆ 14

2.7 หลักการทำงานของแท็กชนิดพาสซีฟ 15

2.8 แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ 16

2.9 หลักการทำงานของแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ 16

2.10 แท็กชนิดแอ็กทีฟ 17

2.11 หลักการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟ 17

2.12 แท็กแบบจานและเหรียญ 18

2.13 แท็กแบบกระเปาะแก้ว 19

2.14 แท็กแบบหุ้มพลาสติก 19

2.15 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ 19

2.16 แท็กแบบพวงกุญแจ 20

2.17 แท็กแบบนาฬิกา 20

2.18 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ตการ์ดแบบไร้การสัมผัส 21

2.19 แท็กแบบ Smart Label 22

2.20 แท็กแบบขดลวดบนชิป 22

2.21 ย่านความถี่ที่นำมาใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ 23

2.22 กำลังงานและกลไกการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุบริเวณสนามระยะไกล 29

2.23 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผลไอโซทรอปิก 32

2.24 กำลังงานที่ส่งมายังแท็กและวงจรสมมูล (ก) กำลังงานที่ส่งมายังโครงสร้างของแท็ก (ข) วงจรสมมูล 34

2.25 แผนผังหลักการออกแบบสายอากาศแท็ก 40

2.26 โครงสร้างของสายอากาศแท็กขดวกวนที่มีโหลด 40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.27 กราฟค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ 41

2.28 กราฟนอร์แมลไลซ์ระยะการอ่านไกลที่สุดต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน 42

2.29 สายอากาศแท็กชนิดโค้งงอและขดวกวน 42

2.30 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานของแท็ก 43

3.1 สายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านข้าง 46

3.2 โครงสร้างสายอากาศสตริปไดโพลเริ่มต้น 47

3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลเมื่อเปลี่ยนความยาว l_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz (ก) ค่าความต้านทาน (ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์ 49

3.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 50

3.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลเมื่อมีการเปลี่ยนความกว้าง w_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz (ก) ค่าความต้านทาน (ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์ 51

3.6 สายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1 52

3.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1 เมื่อความกว้างระยะ S_1 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz-(ก) ค่าความต้านทาน (ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์ 53

3.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1 เมื่อความกว้างระยะ S_1 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 54

3.9 สายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 2 55

3.10 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 2 เมื่อความกว้างระยะ S_2 มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่าความถี่กลาง 922.5 MHz (ก) ค่าความต้านทาน (ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์ 56

3.11 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 2 เมื่อความกว้างระยะ S_2 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 57

3.12 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 3 เมื่อความกว้างระยะ S_3 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz (ก) ค่าความต้านทาน (ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์ 58

3.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 3 เมื่อความกว้างระยะ S_3 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 59

3.14 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d (ครั้งที่ 2) ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 60

3.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d (ครั้งที่ 2) ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

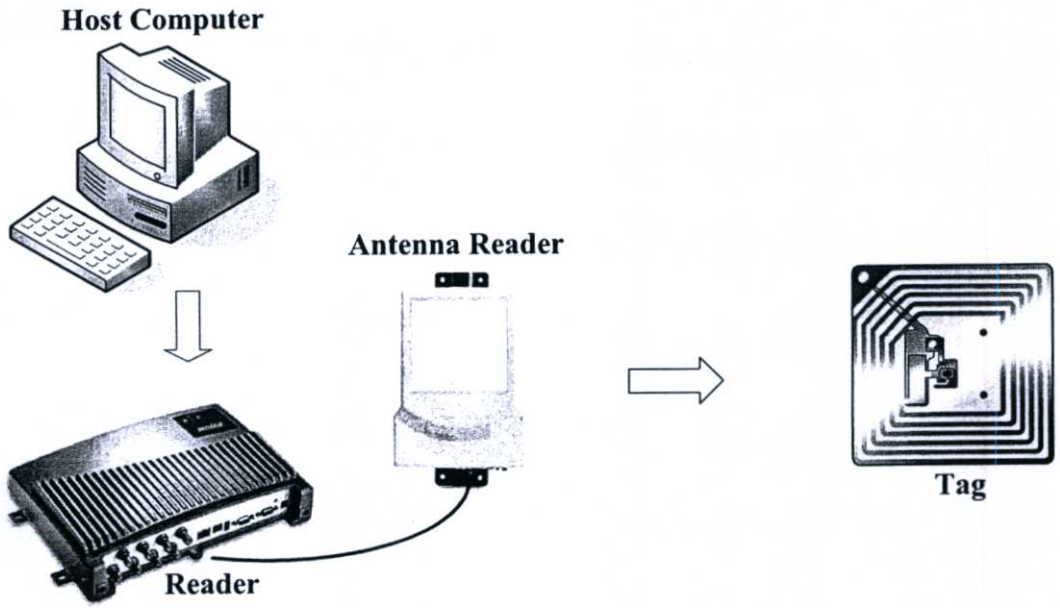
3.16 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) หรือระนาบ YZ (YZ-plane) (ข) ระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบ XZ (XZ-plane) 64
3.17 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต (ก) ค่าความต้านทาน (ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์ 65
3.18 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต 66
3.19 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต 66
4.1 โครงสร้างของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กแผ่นพิมพ์อ่อน (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านข้าง 69
4.2 ส่วนโครงสร้างฐานรองของชิปวงจรรวม 70
4.3 ค่าอิมพีแดนซ์โครงสร้างฐานรองของชิปวงจรรวม 70
4.4 สายอากาศสตริปไดโพลบนวัสดุฐานรองชนิดอ่อนเริ่มต้น 70
4.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้นเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 71
4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้นเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 72
4.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้นเมื่อมีการเปลี่ยนความกว้าง w_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 73
4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้นเมื่อมีการเปลี่ยนความกว้าง w_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz 73
4.9 สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้นภายใต้โครงสร้างที่กำหนด (ก) สายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนขยายความกว้าง (ข) สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนหนึ่งขด บนแผ่นพิมพ์อ่อนภายใต้ขนาดที่กำหนด (ค) สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนสองขด บนแผ่นพิมพ์อ่อนภายใต้ขนาดที่กำหนด 75
4.10 ค่าอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างสายอากาศแท็กที่ทำการศึกษาบนแผ่นพิมพ์อ่อนขนาด $0.10\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$ (ก) ค่าความต้านทานของสายอากาศ (ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์ 78
4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของโครงสร้างสายอากาศแท็กที่ทำการศึกษาบนแผ่นพิมพ์อ่อนขนาด $0.10\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$ 78
4.12 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กเมื่อมีการเพิ่มโครงสร้างการลัดวงจร (ก) ค่าความต้านทานของสายอากาศ (ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์ 81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.13 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศแท็กเมื่อมีการเพิ่มโครงสร้างการลัดวงจร 81
4.14 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) หรือระนาบ YZ (YZ-plane) (ข) ระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบ XZ (XZ-plane) 84
4.15 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน (ก) ค่าความต้านทานของสายอากาศ (ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์ 86
4.16 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 87
4.17 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 87
5.1 เครื่องอ่านข้อมูล RFID ของบริษัท IET รุ่น RU-110 90
5.2 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล (มุมมอง 3 มิติ) 91
5.3 ไดอะแกรมการทดสอบเพื่อหาค่าระยะการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศ 92
5.4 รูปถ่ายสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต 92
5.5 รูปการทดสอบระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต 93
5.6 รูปถ่ายสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 94
5.7 การทดสอบระยะการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 95
5.8 แผนผังรูปแบบการประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมในเบื้องต้น 96
5.9 สายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิตที่ทำการนำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้น (ก) มุมมองด้านหน้า (ข) มุมมองด้านข้าง 98
5.10 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของชุดสายอากาศที่นำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้น (ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) หรือระนาบ YZ (YZ-plane) (ข) ระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบ XZ (XZ-plane) 99
5.11 ชุดสายอากาศที่นำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้น (ก) สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตลำดับที่ 1 (ข) สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตลำดับที่ 2 (ค) สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตลำดับที่ 3 100
5.12 กราฟนอร์แมลไลซระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุด 101
6.1 โครงสร้างสายอากาศที่ทำการออกแบบ (ก) สายอากาศแท็กไดโพลกับเส้นปรสิต (ข) สายอากาศแท็กขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน 104

ระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุย่านความถี่สูงยิ่งโดยส่วนมากจะเน้นไปในทางวงการทางการค้า ทำให้ปัจจุบันได้ทวีความต้องการมากขึ้น [4] ในย่านความถี่สุดท้ายคือย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งมีระยะการใช้งานที่สูงมาก การนำไปประยุกต์ใช้งานโดยส่วนมากนั้นจะถูกนำไปใช้ในระบบโครงข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) อุตสาหกรรมรถยนต์และการเข้าออกสถานที่เป็นต้น



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะมีส่วนประกอบหลัก แบ่งออกเป็นสามส่วนดังแสดงในรูปที่ 1.1 ส่วนแรกคือแท็ก จะใช้ติดวัตถุที่ทำการระบุโดยภายในแท็ก ประกอบไปด้วยชิปวงจรรวมที่มีการบันทึกข้อมูลของวัตถุนั้นๆและสายอากาศขนาดเล็ก ส่วนที่สองคือเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งมีหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างแท็กและส่วนควบคุมพร้อมกับยังทำหน้าที่ในการอ่านและเขียนข้อมูลของแท็กด้วย ส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนควบคุม ในส่วนนี้จะรวมถึงเครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ โดยหลักการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งคือ เมื่อมีแท็กเข้ามาในระยะการทำงานของเครื่องอ่านข้อมูลแล้ว เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไปยังแท็ก หลังจากนั้นแท็กจะส่งสัญญาณกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้นเนื่องจากระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงยิ่งมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางมากขึ้นและมีการกระจายการนำไปใช้งานอย่างรวดเร็ว ซึ่งมาตรฐานทางความถี่ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งนี้จะมีความแตกต่างกันออกไป ตามมาตรฐานและข้อกำหนดของแต่ละประเทศ [4] สำหรับในกรณีของประเทศไทยมีการจัดสรรช่วงความถี่ที่ใช้งานในช่วง 920-925 MHz [5] ซึ่งการใช้งานระบบระบุลักษณะทาง

คลื่นวิทยุ สายอากาศขนาดเล็กที่สามารถใช้งานได้ในย่านความถี่สูงยิ่งตามมาตรฐานที่ประเทศไทยกำหนดนั้นมีความจำเป็นอย่างมาก ในการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุในประเทศ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอสายอากาศแท็กขนาดเล็กสามารถใช้งานได้ในย่านความถี่สูงยิ่ง ตามมาตรฐานของประเทศไทยซึ่งสายอากาศดังกล่าวจะสามารถนำไปพัฒนาให้ดีขึ้นและสามารถนำไปพัฒนาและใช้งานได้จริงภายในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษาและขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาและออกแบบสายอากาศแท็กที่ใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งชนิดพาสซีฟ ที่สามารถใช้งานได้ตามมาตรฐานการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุตามมาตรฐานภายในประเทศ 920-925 MHz โดยโครงสร้างของสายอากาศจะประกอบไปด้วยตัวนำซึ่งวางอยู่บนวัสดุฐานรอง (Substrate) ส่วนสำคัญสำหรับการออกแบบสายอากาศแท็กนั้นคือการที่สายอากาศแท็กสามารถส่งต่อพลังงานงานจากสายอากาศไปยังชิปวงจรรวม (IC Chip) ให้ได้มากที่สุดนั้นหมายความว่าสายอากาศแท็กที่ออกแบบนั้นต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความเหมาะสมกับชิป (Conjugate match) [6] แต่และชนิดที่นำมาออกแบบ โดยในวิทยานิพนธ์นี้สายอากาศแท็กจะถูกออกแบบไปกับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL [7] โดยสายอากาศที่ทำการศึกษาและออกแบบก็จะทำการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับชิปรุ่นดังกล่าว โครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอจะประกอบไปด้วยสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต (Parasitic lines) ที่มีโครงสร้างในการออกแบบที่ง่ายและสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้เหมาะสมกับชิปได้ง่าย ในส่วนต่อมาจะเป็นการออกแบบสายอากาศให้มีคุณลักษณะที่ดีขึ้นโดยจะเป็นการลดขนาดทางโครงสร้างให้สายอากาศมีขนาดที่เล็กลงบนวัสดุฐานรองชนิดอ่อนแต่ยังคงมีคุณลักษณะที่มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้กับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL โดยโครงสร้างที่นำเสนอคือสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กที่สร้างบนวัสดุฐานรองชนิดอ่อน เพื่อให้โครงสร้างของแท็กนั้นสามารถโค้งงอได้ โดยการพิจารณาประสิทธิภาพของสายอากาศแท็กจะพิจารณาจากการทดสอบระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุด (Maximum read range) ผลการวิเคราะห์จากวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ในการออกแบบ และสร้างสายอากาศแท็กเพื่อใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF RFID)

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกัน คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย วัตถุประสงค์การศึกษา ขอบเขตงานวิจัย และเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุและหลักการพื้นฐานของสายอากาศแท็กพร้อมทั้งหลักการออกแบบโดยทั่วไป รวมถึงงานวิจัยที่มีมาก่อนที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแท็กสายอากาศไดโพลที่ออกแบบโดยใช้เส้นปรสิตกับวงจรรวมรุ่น NXP G2XL พร้อมทั้งศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศและทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบ

บทที่ 4 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแท็กขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อนที่ออกแบบกับวงจรรวมรุ่น NXP G2XL และทำการออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิดอ่อน พร้อมทั้งศึกษาโครงสร้างที่มีอิทธิพลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศและมีผลต่อการลดขนาดสายอากาศพร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบ

บทที่ 5 ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบคุณลักษณะสายอากาศแท็กโดยประเมินจากการหาระยะการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศแท็กที่ออกแบบ ของทั้งสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิตและสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน และจะกล่าวถึงการนำแท็กไดโพลที่ออกแบบโดยใช้เส้นปรสิตมาใช้ในการประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมในเบื้องต้นโดยใช้การประเมินจากระยะการอ่านได้ไกลที่สุด

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ปัญหาที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งวิธีแก้ไขปัญหาในเบื้องต้น พร้อมทั้งสรุปผลกระทบในการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศ การสร้างและผลการทดสอบสายอากาศทั้งหมด สรุปข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแบบต่างๆพร้อมทั้งเสนอแนวทางการพัฒนาสายอากาศต่อ

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน ความเป็นมา หลักการทำงานโดยทั่วไปของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID system) ข้อดีของการนำเอาระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ มาใช้งาน ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนควบคุม เครื่องอ่านข้อมูล และแท็ก และจะกล่าวถึงหลักการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง พร้อมทั้งอธิบายหลักการติดต่อสื่อสาร โดยหลักการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering communication) และหลักการออกแบบโดยทั่วไปของสายอากาศเครื่องลูกข่ายหรือแท็ก เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาและการออกแบบในส่วนต่อๆไปพร้อมกับรายละเอียดมาตรฐานการใช้งานและการจัดสรรคลื่นความถี่ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ

2.2 ความเป็นมาของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนั้นได้ถูกสร้างขึ้นและเริ่มต้นใช้งานในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 เพื่อใช้ทำการระบุเครื่องบินที่บินผ่านน่านฟ้า และนับได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการนำเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมาใช้ หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาศักยภาพในการทำงานให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นโดยเฉพาะหลังปี ค.ศ 1960 ได้เริ่มมีการนำเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมาประยุกต์ใช้ในภาคเอกชน เช่น การนำมาใช้ด้านการควบคุมการเข้าออกสถานที่ของหน่วยงาน เพื่อการรักษาความปลอดภัย ต่อมาในปี ค.ศ 1970 ได้นำเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมาใช้กับการติดตามและตรวจสอบสัตว์และระบบคลังสินค้า ในปี ค.ศ 1980 เทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุได้รับการพัฒนาศักยภาพในการทำงานที่มีลักษณะแตกต่างและหลากหลายรูปแบบมากขึ้นจนนำไปสู่การพัฒนาและประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางเพิ่มมากขึ้น นับตั้งแต่ปี ค.ศ 1990 จนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่เพื่อสนับสนุนรูปแบบการทำงานที่หลากหลายมากขึ้น เนื่องจากระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมีคุณสมบัติที่พิเศษและมีความโดดเด่นกว่าเทคโนโลยีอื่น อาทิ รหัสแท่ง (Barcode)โดยระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนั้นมีจุดมุ่งหมายคือการนำมาใช้งานแทนรหัสแท่ง (Barcode) ซึ่งลักษณะการทำงานจะมีการติดต่อสื่อสารกันระหว่างแท็ก (Tag) กับเครื่องอ่านข้อมูล (Reader)โดยใช้การสื่อสารแบบไม่มีการสัมผัสกัน เป็นระบบบ่งชี้ข้อมูลอัตโนมัติแบบไร้สาย ซึ่งมีการส่งคลื่นความถี่วิทยุจากอุปกรณ์เครื่องอ่านข้อมูล ไปยังอุปกรณ์ไมโครชิปขนาดเล็กที่มีสายอากาศติดอยู่ เพื่อส่ง

ข้อมูลเฉพาะของสิ่งที่ต้องการบ่งชี้ แล้วนำข้อมูลมาประมวลผลยังเครื่องอ่านข้อมูล หรือระบบที่เกี่ยวข้องโดยใช้คลื่นวิทยุเป็นตัวกลางในการอ่านและบันทึกข้อมูลของระบบ

2.2.1 ข้อดีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ข้อดีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุสามารถสรุปได้ดังนี้ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ นั้นได้รับความนิยมนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลกเช่นเดียวกับระบบบรหัสแท่งแต่ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนั้น สามารถแก้ไขข้อจำกัดหลายประการของการใช้รหัสแท่ง ดังแสดงได้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุกับระบบบรหัสแท่ง

คุณสมบัติ	รหัสแท่ง	ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ
ความสามารถในการอ่านป้ายสินค้า	ต้องใช้แสงเลเซอร์สแกนป้ายรหัสแท่งตามแนวการมองเห็น	อ่านป้ายได้แม้ไม่ได้อยู่ในแนวการมองเห็น เพียงให้อยู่ภายในรัศมีของการอ่าน
ความสามารถในการอ่านป้ายสินค้าหลายชิ้นพร้อมกัน	ไม่มี	มี
ความสามารถในการนำป้ายกลับมาใช้ซ้ำหรือบันทึกข้อมูลใหม่	ไม่มี	อาจมีได้หากสามารถใช้หน่วยความจำชนิดโปรแกรมและลบได้
ความสามารถในการระบุสินค้ารายชิ้น	ระบุได้เพียงชนิดเดียว	มี
ความสามารถในการกันขโมย	ไม่	มี
ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม	ไม่ทนต่อความเปียกชื้นและความเปรอะเปื้อน	ทนต่อความเปียกชื้นและความเปรอะเปื้อน
ต้นทุนของป้ายสินค้า	ต่ำมาก	ค่อนข้างสูง (แต่มีแนวโน้มที่ลดลง)
ระยะการอ่าน	ใกล้	ไกลกว่า
เวลาที่ใช้ในการตรวจจับสินค้า 300ชิ้น	30 นาที	5 วินาที (ตามมาตรฐาน EPC Class1 Gen 2)

สิ่งที่เป็นข้อจำกัดที่สำคัญของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในปัจจุบันคือ การที่ราคาต่อหน่วยของแท็กยังคงมีราคาที่แพงอยู่ ประมาณ 10-20 บาท ต่อชิ้น เมื่อเปรียบเทียบกับรหัสแท่ง

ทำให้ผู้ประกอบการยังคงต้องพิจารณาถึงผลตอบแทนจากการลงทุน แต่ถึงแม้ว่าราคาของแท็กยังคงมีราคาแพงอยู่แต่การใช้งานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุอาจจะให้ผลตอบแทนที่คุ้มค่าแก่การลงทุน แต่ปัญหาเรื่องต้นทุนจะได้รับการแก้ไขในที่สุด ด้วยจำนวนการใช้งานที่มากขึ้นและการกำหนดมาตรฐานที่มีความชัดเจนและแน่นอนและเปิดกว้างมากขึ้น ซึ่งในอนาคตอันใกล้คาดว่า แท็ก เครื่องอ่านข้อมูล และอุปกรณ์อื่นๆ จะมีราคาที่ถูกลง ยังผลให้เกิดความยอมรับในเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมากขึ้น ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้ราคาของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมีราคาที่ถูกลงอีก ซึ่งจะทำให้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุสามารถนำมาใช้แทนระบบบรหัสแท่งได้มากขึ้นเรื่อยๆจนอาจกล่าวได้ว่าในที่สุดแล้วระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุก็จะถูกนำมาใช้แทนรหัสแท่ง แต่ในปัจจุบันด้วยราคาที่ยังคงค่อนข้างแพง ทำให้คาดการณ์ได้ว่ารหัสแท่งจะยังคงอยู่คู่กับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุไปอีกนานหลายปี เนื่องจากการใช้งานกับสินค้าราคาถูกยังขาดความคุ้มทุน แต่ในปัจจุบันสินค้าที่นิยมนำเอาเทคโนโลยีระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมาใช้งานก็ได้แก่สินค้าที่มีมูลค่าสูงหรือมีความเสี่ยงจากการถูกปลอมแปลง เช่น ซีดี ดีวีดี อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เสื้อผ้าที่มียี่ห้อ และยา ซึ่งข้อดีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สามารถอ่านข้อมูลโดยไร้การสัมผัสกับวัตถุโดยตรง
2. สามารถบ่งชี้วัตถุหรืออ่านข้อมูลได้ โดยวัตถุนั้นไม่ต้องอยู่ในแนวระดับที่มองเห็น
3. สามารถอ่านข้อมูลผ่านวัตถุหรือสิ่งกีดขวางได้ (ยกเว้น โลหะหรือของเหลวที่มีผลต่อการส่งและรับคลื่นวิทยุ แต่ก็สามารถออกแบบแท็กให้สามารถรองรับการใช้งานในลักษณะดังกล่าวได้)
4. สามารถอ่านข้อมูลของวัตถุทั้งหมดที่อยู่ในรัศมีการอ่านได้ในครั้งเดียว
5. เพิ่มความสะดวกรวดเร็ว และความถูกต้องของข้อมูลที่จัดเก็บ
6. สามารถอ่านข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูง
7. มีความคงทนต่อแรงสั่นสะเทือน การกระทบกระแทก และมีความคงทนต่อความเปียกชื้น (ขึ้นอยู่กับการออกแบบ)
8. สามารถอ่านข้อมูลได้ในระยะไกล

2.2.2 การประยุกต์ใช้งานระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นวิทยุ

ในปัจจุบันการนำระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานหลากหลายด้าน เช่น ระบบคลังสินค้า ด้านระบบการขนส่ง ด้านการทหาร ด้านการแพทย์และสาธารณสุข ด้านการเกษตรกรรมและการปศุสัตว์ ธุรกิจการบิน ธุรกิจการเงิน การท่องเที่ยวอุตสาหกรรมการผลิต ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานได้แก่

1. ระบบห่วงโซ่อุปทาน การค้าปลีก การผลิต การกระจายสินค้า ลอจิสติกส์ เช่นการใช้งานในโรงงานโดยการติดป้ายระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุไว้กับชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานผ่านสายพาน

การผลิตในโรงงาน แต่ละแผนกจะต้องรู้ว่าจะต้องทำอย่างไร ประกอบชิ้นงานอะไรบ้าง และต้องส่งไปยังสถานีถัดไป รวมถึงการจัดการสินค้าในคลังสินค้า เช่นการรับส่งสินค้าและการจัดเก็บ ตัวอย่างภาพที่ผู้บริโภคจะเห็นคือ การซื้อสินค้าในซูเปอร์มาร์เก็ต เมื่อมีการคิดคำนวณราคารวม เครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุสามารถคำนวณราคารวมภายในครั้งเดียวได้ทันที โดยที่ไม่ต้องมีการสแกนรหัสแท่งที่ติดกับสินค้าทีละชิ้นแบบเดิมๆและอาจจะเตือนผู้ซื้อได้หากสินค้าที่ซื้อหมดอายุ

2. ด้านการแพทย์และสาธารณสุข มีการใช้งานสำหรับเครื่องมือแพทย์ที่มีราคาแพง ทำให้สามารถตรวจสอบการเก็บรักษาเครื่องมือแพทย์ได้สะดวกรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีการใช้ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุเสริมในการผลิตสุขภัณฑ์ยาเพื่อตรวจสอบยาปลอมได้ เป็นการป้องกันการสูญเสียของผู้ผลิตจากสินค้าเลียนแบบและป้องกันไม่ให้ผู้ป่วยได้รับยาที่ไม่มีคุณภาพหรือปลอมได้

3. ด้านการเกษตรกรรมและปศุสัตว์ ระบบการระบุสัตว์ (Animal tracking) มาใช้เหมาะสมกับเกษตรกรไทย ในการพัฒนาด้านปศุสัตว์ให้เป็นระบบฟาร์มอัตโนมัติ ด้วยชิประบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุติดตัวสัตว์เลี้ยง ทำให้สามารถทราบเจ้าของ ตรวจสอบสายพันธุ์ การให้อาหาร และการควบคุมโรคติดต่อในสัตว์ได้ รวมถึงการใช้งานสำหรับการทำการตรวจสอบสำหรับแหล่งที่มาของผลิตภัณฑ์อาหารหรือสินค้าเกษตรกรรมได้

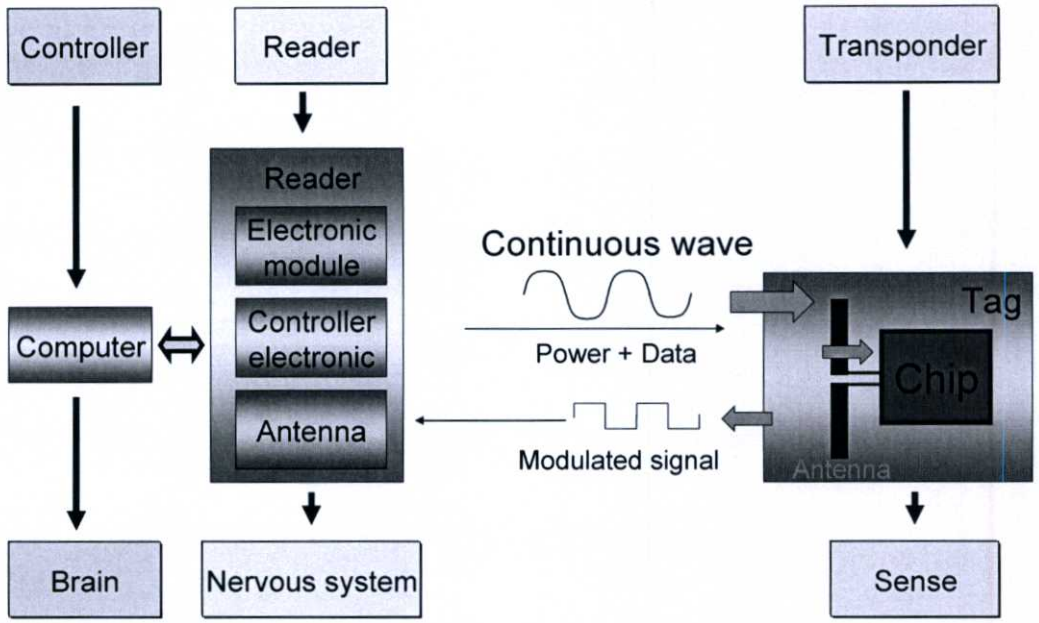
4. การเข้า-ออกอาคาร หรือแทนการใช้แถบแม่เหล็กเมื่อมีการใช้งานเป็นเวลานานจะมีการชำรุดที่สูง แต่บัตรของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะใช้เพียงการแตะหรือแสดงผ่านหน้าเครื่องอ่านข้อมูลเท่านั้น รวมทั้งยังสามารถใช้ในการตรวจสอบเวลาเข้า-ออกงานของพนักงานได้ด้วย

5. ระบบตั๋วอิเล็กทรอนิกส์ เช่นบัตรทางด่วน บัตรรถไฟฟ้าใต้ดิน เป็นต้น
6. ระบบหนังสือเดินทางอิเล็กทรอนิกส์ ใช้เพื่อป้องกันผู้ก่อการร้าย
7. ระบบกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ ในรถยนต์เพื่อป้องกันการใช้กุญแจปลอมในการขโมยรถยนต์
8. ระบบห้องสมุด ในการยืมหรือคืนหนังสืออัตโนมัติ ทำให้ผู้ใช้บริการได้รวดเร็วและมีความสะดวกสบาย

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ในระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นวิทยุจะมีองค์ประกอบหลักๆด้วยกันอยู่ สามส่วน ส่วนแรกคือแท็ก (Tag) ที่ใช้ติดกับวัตถุต่างๆที่เราต้องการ โดยแท็กนั้นจะประกอบไปด้วยสายอากาศและไมโครชิป (Microchip) ที่มีการบันทึกหมายเลข (ID) หรือข้อมูลที่เกี่ยวกับวัตถุนั้นๆ ส่วนที่สองคือเครื่องอ่านข้อมูล (Reader) และส่วนที่สามได้แก่ระบบควบคุม (Controller)

ทั้งนี้จะรวมถึงคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ประยุกต์ใช้งานโดยโครงสร้างของระบบจะแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [1]

การติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลจะมีการติดต่อสื่อสารกันโดยผ่านคลื่นวิทยุ เป็นการนำเอาคลื่นวิทยุมาเป็นคลื่นพาห์เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูล โดยเริ่มต้นจากการที่ตัวอ่านข้อมูลมีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาตลอดเวลา เพื่อคอยตรวจจับว่ามีการมอดูเลตสัญญาณเกิดขึ้นหรือไม่ เมื่อวัตถุที่มีการติดแท็กเข้ามาในบริเวณระยะการทำงานของเครื่องอ่านข้อมูล แท็กจะได้รับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อกระตุ้นให้แท็กเริ่มทำงาน และจะส่งข้อมูลในหน่วยความจำที่ผ่านการมอดูเลตกับคลื่นพาห์แล้วออกมาทางสายอากาศที่อยู่ภายในแท็ก จากนั้นแท็กก็จะทำการส่งข้อมูลที่มีอยู่ภายในแท็กไปยังเครื่องอ่านข้อมูลโดยคลื่นพาหะที่ถูกส่งออกมาจากแท็กจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ความถี่ หรือเฟสขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลต หลังจากที่เครื่องอ่านข้อมูลได้รับข้อมูลจากแท็กเรียบร้อยแล้วเครื่องอ่านข้อมูลก็จะทำการส่งข้อมูลไปยังส่วนควบคุมต่อไป

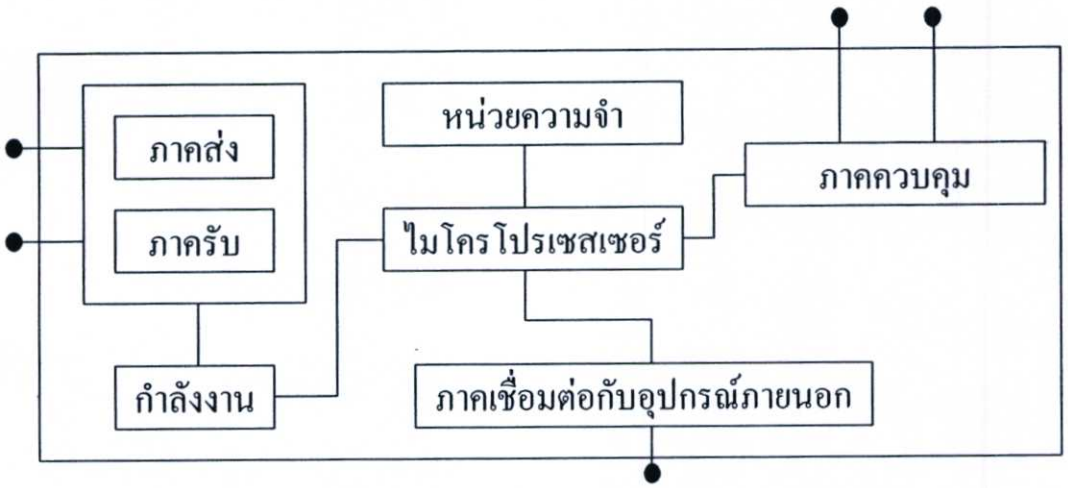
2.3.1 ส่วนควบคุม (Controller)

ส่วนควบคุมของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ (RFID controllers) ถือได้ว่าเป็นสมองของระบบ โดยระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุส่วนมากจะประกอบไปด้วยเครื่องอ่านข้อมูลหลายๆตัวและแท็กจำนวนมาก โดยการที่จะทำงานรวมกันเป็นโครงข่าย (Network) ได้นั้น จะต้องใช้ส่วนระบบควบคุม (Controller) เป็นจุดศูนย์กลางในการรวมกันเป็นโครงข่าย โดยส่วนมากจะใช้คอมพิวเตอร์เป็นสถานีดำเนินการ โดยส่วนควบคุมนี้จะรวมไปถึงโปรแกรมและระบบ

ฐานข้อมูลด้วยทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับระบบของการใช้งานด้วย โดยส่วนควบคุมจะมีหน้าที่ในการประมวลผลและเก็บข้อมูลที่รวบรวมมาได้จากแท็ก

2.3.2 เครื่องอ่านข้อมูล

เครื่องอ่านข้อมูล (RFID Reader) เปรียบเสมือนสะพานเชื่อมต่อระหว่างแท็กกับส่วนควบคุม ซึ่งจะมีหน้าที่การทำงานพื้นฐานคือ การอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ การเขียนข้อมูลไปยังแท็กในกรณีของสมาร์ตแท็ก (Smart tag) ทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลไปยังส่วนควบคุมและการให้พลังงานแก่แท็ก โดยทั่วไปเครื่องอ่านข้อมูลจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆคือภาคส่ง (Transmitter) และภาครับ (Receiver) สัญญาณวิทยุ ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) หน่วยความจำ (Memory) เซ็นเซอร์ (Sensor) ภาคควบคุม (Controller) ภาคเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก (Input/output Interface) แหล่งจ่ายกำลังงาน (Power Supply) และสายอากาศ (Antenna) ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของเครื่องอ่านข้อมูล

โดยลักษณะของเครื่องอ่านข้อมูลนั้นจะแตกต่างกันออกไปตามประเภทของการใช้งาน เช่นแบบมือถือขนาดเล็กหรือแบบติดผนัง จนไปถึงขนาดใหญ่เท่าประตูดังแสดงในรูปที่ 2.3

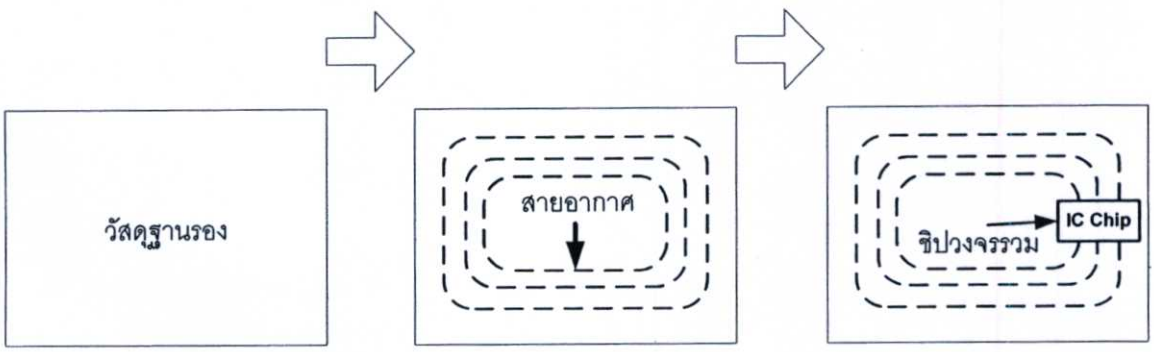
รูปที่ 2.3 ลักษณะของเครื่องอ่านข้อมูลแบบต่างๆ [8]-[9]

2.3.3 แท็กหรือเครื่องลูกข่าย

แท็กมีหน้าที่หลักก็คือ ใช้ในการเก็บข้อมูลของวัตถุ และการส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล โดยลักษณะของแท็กนั้นจะมีรูปแบบหลากหลายรูปแบบตัวอย่างเช่น แบบกระเปาะ แบบจานและเหรียญ และอีกหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน

2.3.3.1 ส่วนประกอบของแท็ก

โดยส่วนประกอบของแท็กจะแสดงดังรูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของแท็กจะประกอบไปด้วย 1. แผ่นพิมพ์และวัสดุฐานรอง 2. สายอากาศ 3. ชิปวงจรรวม

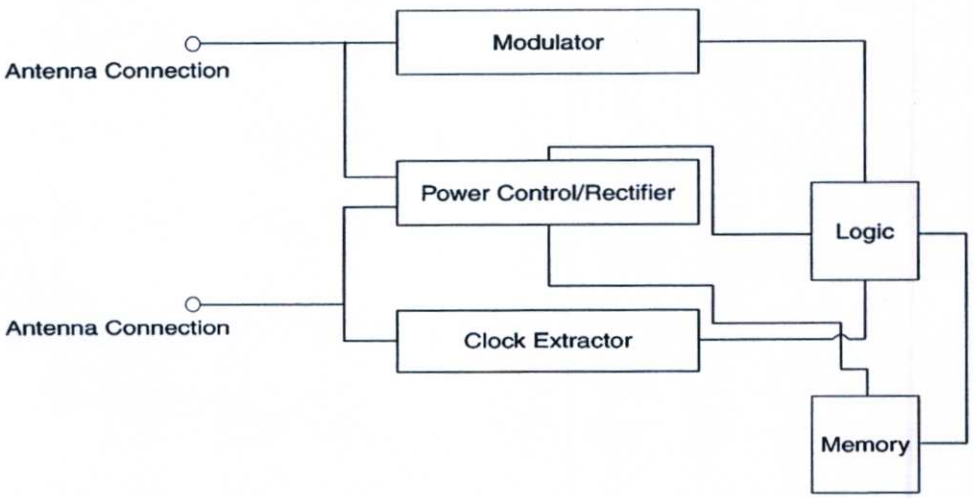


รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบพื้นฐานของแท็ก

2.3.3.1.1 สายอากาศแท็ก (Tag antenna)

สายอากาศแท็กจะถูกนำไปใช้งานเพื่อแพร่กระจายพลังงานที่รับจากเครื่องอ่านที่ทำการปล่อยสัญญาณเพื่อนำไปกระตุ้นการทำงานของชิปวงจรรวมสำหรับทั้งการส่งสัญญาณกลับไปยังเครื่องอ่านและทั้งการรับสัญญาณจากเครื่องอ่าน (พาสซีฟแท็ก) สายอากาศแท็กจะมีส่วนที่ถูกยึดติดไว้กับชิปวงจรรวม โดยโครงสร้างของสายอากาศจะเป็นส่วนสำคัญในการช่วยการทำงานของแท็กและมีรูปแบบที่มากมายไม่จำกัดที่สามารถเป็นไปได้ในการออกแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายอากาศแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง สายอากาศมีรูปแบบที่มากมายในการนำมาออกแบบให้สายอากาศมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับงานแต่ละชนิด ซึ่งอาจเป็นทั้งรูปแบบทางศิลปะและรูปแบบทางวิทยาศาสตร์หรืออาจจะเป็นการรวมทั้งสองรูปแบบไว้ด้วยกัน [10] ขนาดความยาวของสายอากาศนั้นจะเป็นสัดส่วนกับค่าความยาวคลื่นของความถี่ที่ถูกเลือกนำมาใช้งาน โดยขนาดของสายอากาศแท็กโดยทั่วไปจะมีขนาดที่ใหญ่กว่าชิปวงจรรวม ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าการพิจารณาขนาดของแท็กจึงพิจารณาจากขนาดของสายอากาศแท็ก สายอากาศแท็กสามารถถูกออกแบบได้ด้วยองค์ประกอบที่หลากหลายในการพิจารณา ดังเช่น ระยะการอ่านได้ไกลที่สุด ลักษณะการวางตัวของแท็กเมื่อนำไปใช้งาน ลักษณะของวัสดุที่นำไปใช้งาน การใช้งานที่มีลักษณะจำเพาะ โพลาไรซ์ของเครื่องอ่าน ส่วนที่มีความสำคัญที่สุดคือส่วนที่เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างสายอากาศและชิปวงจรรวมซึ่งจะเป็นส่วนที่มีความเปราะบางมากที่สุดในโครงสร้างของแท็ก ซึ่งถ้าหากจุดเชื่อมต่อดังกล่าวเกิดการเสียหายจะทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานต่ำลงหรืออาจจะไม่สามารถใช้การได้ โดยทั่วไปสายอากาศแท็กจะสร้างขึ้นมาจากเส้นโลหะเช่น ทองแดง เงิน หรือ อลูมิเนียม ซึ่งการใช้หมึกนำไฟฟ้าก็มีแนวโน้มที่จะถูกพัฒนาและนำมาใช้งานจริง [11]

2.3.3.1.2 ชิปวงจรรวม (IC chip)



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบพื้นฐานภายในชิปวงจรรวม

ชิปวงจรรวมเป็นส่วนที่มีความสำคัญของแท็กโดยเปรียบเสมือนสมองหลักในการทำงานของแท็ก โดยชิปวงจรรวมในปัจจุบันมีผู้ผลิตหลากหลายบริษัทเช่น Hitachi, NXP semiconductor , ST Microelectronic และบริษัทอื่นๆอีกมากมาย โดยค่าอิมพีแดนซ์ของตัววงจรรวมแต่ละตัวก็จะมีค่าที่แตกต่างกันออกไป และจะเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละความถี่ที่เราเลือกใช้งาน โดยองค์ประกอบพื้นฐานของชิปวงจรรวมจะแสดงดังรูปที่ 2.5 ส่วนควบคุมพลังงาน/วงจรเรียงกระแสจะทำการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับของสายอากาศเครื่องอ่านที่ส่งมาเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อนำไปเลี้ยงยังส่วนต่างๆของไมโครชิป Clock extractor จะทำการดึงสัญญาณนาฬิกามาจากสัญญาณที่มาจากเครื่องอ่าน วงจรมอดูเลเตอร์ จะทำการมอดูเลทสัญญาณที่รับมาได้จากเครื่องอ่าน การตอบสนองของแท็กจะถูกฝังไปกับสัญญาณที่มีการมอดูเลท ซึ่งจะมีการส่งกลับไปยังเครื่องอ่านในภายหลัง logic unit เป็นส่วนของอุปกรณ์ที่จะรับผิดชอบในส่วนของโปรโตคอลในการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูล หน่วยความจำของชิปวงจรรวม (Memory) มีหน้าที่สำหรับเก็บข้อมูล มีความสามารถในการระบุตัวตน (Addressability) หมายถึงความสามารถในการระบุตำแหน่งที่เป็นเอกลักษณ์ ทั้งการอ่านและเขียนในแต่ละหน่วยความจำของชิปวงจรรวมของแท็ก ในส่วนของหน่วยความจำของแท็กจะสามารถเก็บข้อมูลที่มีความแตกต่างได้หลายชนิดเช่น ส่วนของข้อมูลของการระบุและแสดงตัว การตรวจสอบชุดข้อมูล โดยปัจจุบันนี้ชิปวงจรรวมสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุได้มีขนาดที่เล็กลงเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามขนาดของแท็กก็ไม่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของชิปวงจรรวมเพียงอย่างเดียวโดยขนาดของแท็กจะถูกคิดจากขนาดของสายอากาศเป็นหลัก

2.3.3.1.3 แผ่นพิมพ์และวัสดุฐานรอง (Substrate)

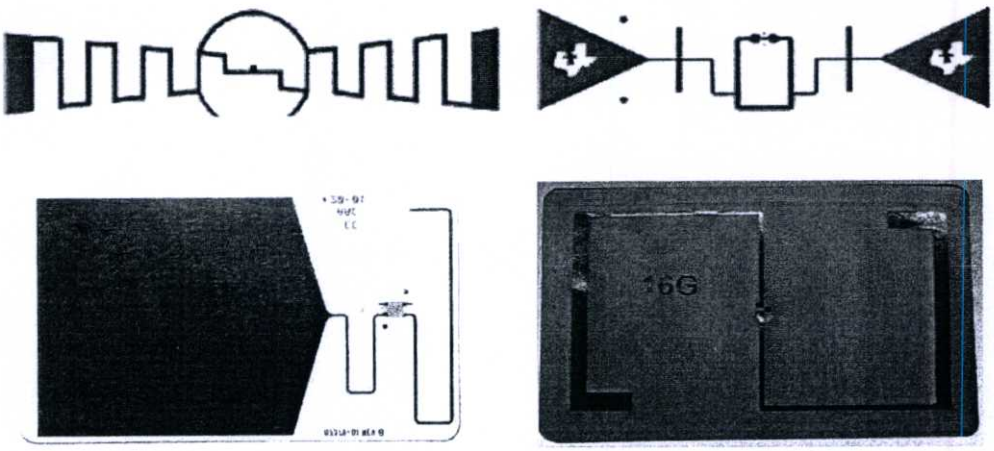
ชนิดและขนาดของวัสดุฐานรอง เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบสายอากาศ โดยจะเป็นองค์ประกอบที่มีความสำคัญที่ใช้ในการกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกายภาพของสายอากาศ ซึ่งการเลือกวัสดุฐานรองนอกจากจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม ความชื้น อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ความราบเรียบของพื้นผิวแล้ว สิ่งที่สำคัญนั่นคือคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยหลักๆที่มีการพิจารณาคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ε_r) และค่าการสูญเสียแทนเจนท์ ($\tan\delta$) โดยวัสดุที่ทำการเลือกใช้ ควรเป็นวัสดุที่เป็นสารเนื้อเดียวเพื่อให้ค่าดังกล่าวมีค่าที่คงที่ตลอดแผ่นฐานรอง ซึ่งขนาดความหนาของวัสดุฐานรองจะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะกำหนดคุณสมบัติของสายอากาศด้วยเช่นกัน โดยสมควรจะมีค่าต่ำเพื่อ ทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และการเพิ่มค่าคงที่ไดอิเล็กตริกก็นั้นก็จะสามารถลดขนาดของสายอากาศให้มีขนาดที่เล็กลงได้ด้วยเช่นกัน ส่วนการสูญเสียแทนเจนท์ ($\tan\delta$) สมควรจะให้มีค่าที่ต่ำ เพื่อลดพลังงานการสูญเสียอันเนื่องมาจากการสูญเสียของไดอิเล็กตริก ทำให้สายอากาศมีประสิทธิภาพที่สูงมากขึ้น วัสดุฐานรองโดยทั่วไปที่นำมาใช้ในการสร้างสายอากาศแท็กได้แก่

FR-4 PET PVC Plastic film กระดาษ และวัสดุชนิดอื่นอีกมากมาย โดยการเลือกใช้ชนิดของวัสดุฐานรองก็จะขึ้นอยู่กับ ชนิดและจุดประสงค์ของการนำแท็กไปใช้งาน

2.3.3.2 การแบ่งประเภทของแท็กตามวิธีการของการส่งพลังงานไปยังแท็ก

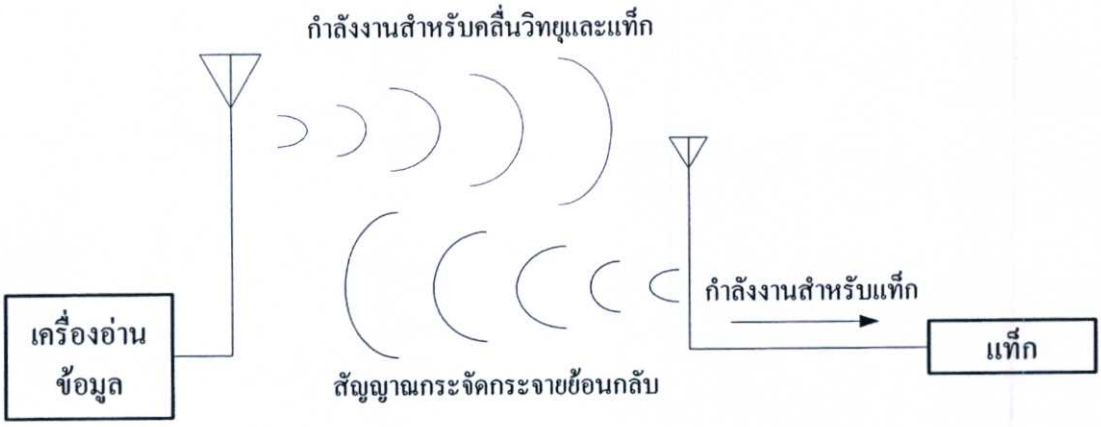
แท็กหรือเครื่องลูกข่าย (Tag or Transponder) เมื่อทำการแบ่งตามวิธีการของการส่งพลังงานไปยังแท็กนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ 1. แท็กแบบพาสซีฟ (Passive tag) แท็กชนิดนี้ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้แบตเตอรี่ในการทำงาน มีระยะการใช้งานที่ไม่สูง 2. แท็กแบบกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active tag) ซึ่งจะมีแบตเตอรี่ในตัวใช้ในการเลี้ยงวงจรไฟฟ้าและชิปวงจรรวม แต่ไม่ได้ใช้ในการส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่าน และมีระยะใช้งานที่มากกว่าแท็กแบบพาสซีฟ แต่น้อยกว่าแท็กแบบแอ็กทีฟ 3. แท็กชนิดแอ็กทีฟ (Active tag) จะมีแหล่งจ่ายไฟขนาดเล็กเพื่อป้อนพลังงานให้แท็กสามารถทำงานได้ในระยะการทำงานที่ไกลกว่าสองแบบแรก

2.3.3.2.1 แท็กชนิดพาสซีฟ (Passive tag)



รูปที่ 2.6 แท็กชนิดพาสซีฟในรูปแบบต่างๆ[4]

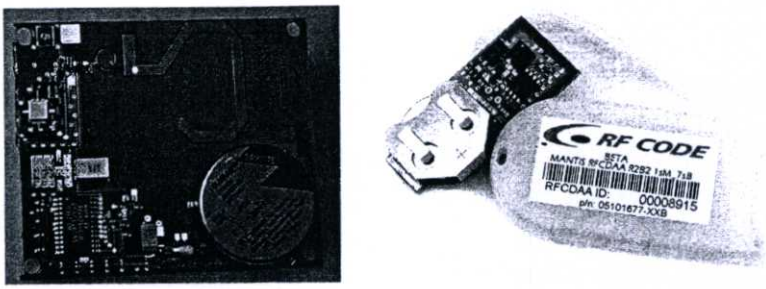
แท็กชนิดนี้ไม่ต้องการแหล่งจ่ายพลังงานจากแบตเตอรี่โดยจะใช้พลังงานจากเครื่องอ่านที่ส่งมาในการกระตุ้นการทำงานของแท็กและส่งข้อมูลที่เก็บไว้กลับไปยังเครื่องอ่าน ในรูปที่ 2.7 แสดงหลักการทำงานของแท็กชนิดพาสซีฟ การติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กไปยังเครื่องอ่านนั้นเครื่องอ่านจะเป็นตัวติดต่อก่อนเสมอแล้วตามด้วยการติดต่อกลับของแท็ก



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของแท็กชนิดพาสซีฟ

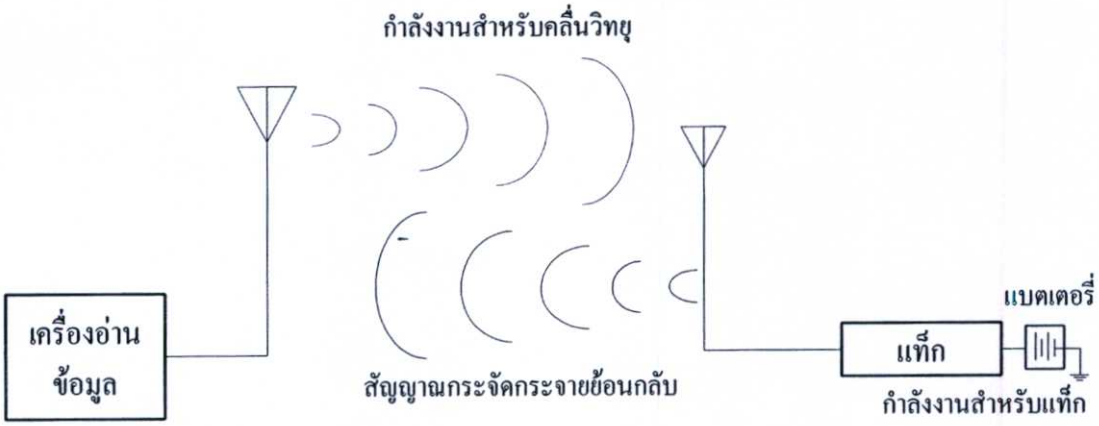
การอ่านข้อมูลนั้นทำได้ไม่ไกลมากนัก ระยะอ่านสูงสุดประมาณ 9 เมตร โดยจะขึ้นอยู่กับความแรงของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้และกำลังงานที่ต้องการน้อยที่สุดของชิปวงจรรวม โดยปกติแล้วแท็กชนิดนี้มักมีหน่วยความจำขนาดเล็ก โดยทั่วไปประมาณ 16 ถึง 1,024 ไบต์ เมื่อเปรียบเทียบถึงโครงสร้างโดยทั่วไปกับแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟและแท็กชนิดแอ็กทีฟ โครงสร้างของแท็กชนิดนี้จะมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และด้วยความที่แท็กชนิดนี้ไม่มีแบตเตอรี่ภายในจึงทำให้มีน้ำหนักเบากว่าแท็กชนิดแอ็กทีฟ ราคาต่ำกว่า และมีอายุการใช้งานไม่ถูกจำกัดด้วยอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แต่ข้อเสียก็คือ ตัวอ่านข้อมูลจะต้องมีความไวสูงและมีกำลังส่งงานสูง และมักจะมีปัญหาเมื่อนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสูง แท็กที่ถูกใช้ในย่านความถี่สูงยิ่ง(UHF) จะเกิดปัญหาได้เป็นอย่างมากเมื่อนำแท็กที่ไม่ได้ถูกออกแบบไว้เฉพาะแล้วนำไปใช้ติดกับวัสดุจำพวกโลหะหรือของเหลว [12]-[13] โดยจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก แต่ด้วยข้อได้เปรียบในเรื่องราคาและอายุการใช้งานทำให้แท็กชนิดพาสซีฟนี้เป็นที่นิยมมากกว่าแท็กชนิดแอ็กทีฟ

2.3.3.2.2 แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ (Semi-active tag)



รูปที่ 2.8 แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ [4]

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



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟ

หลักการทำงานของแท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟแสดงดังรูปที่ 2.9 เครื่องอ่านจะทำการติดต่อสื่อสารมาก่อนแล้วจะตามด้วยการทำงานของแท็ก ส่วนการส่งสัญญาณกลับยังคงจะต้องใช้สัญญาณที่เกิดจากการกระจัดกระจายย้อนกลับ และใช้เวลาเพียงเล็กน้อยในการอ่านข้อมูล โดยด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้แท็กชนิดนี้มีความเหมาะสมกับการใช้งานระบุตัวตนของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง แท็กชนิดกึ่งแอ็กทีฟนี้มีระยะการติดต่อสื่อสารที่ไกลกว่าแท็กชนิดพาสซีฟแต่ยังไม่สูงเท่าระยะการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟ และต่างจากแท็กชนิดแอ็กทีฟคือแท็กไม่ได้เป็นผู้เริ่มส่งสัญญาณก่อน ดังนั้นจึงมีความประหยัดพลังงานที่มากกว่าแท็กชนิดแอ็กทีฟ ซึ่งถ้าไม่มีการส่งสัญญาณมาจากตัวเครื่องอ่าน แท็กจะอยู่ในสภาวะ Sleep ซึ่งต่างจากแท็กชนิดแอ็กทีฟที่จะมีการส่งสัญญาณวิทยุอยู่ตลอดเวลา โดยระยะการทำงานโดยประมาณคือ 30 เมตร และมี

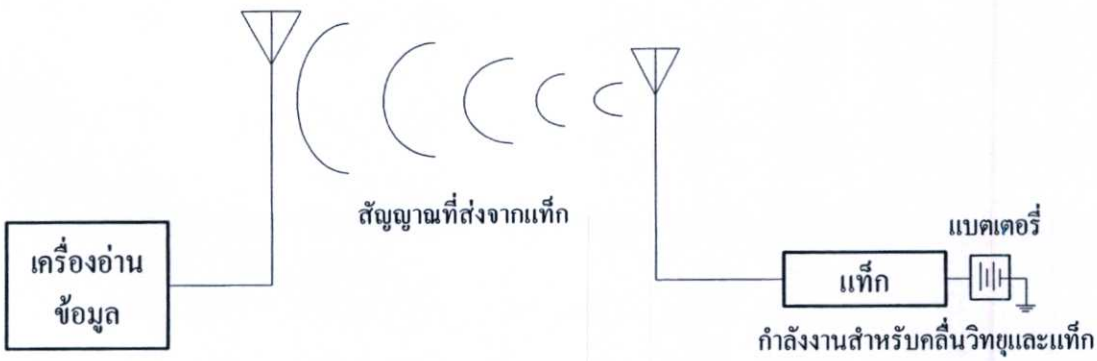
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ความเชื่อถือได้ที่สูงกว่าแท็กชนิดพาสซีฟทั้งยังมีสามารถระบุตัวตนของวัตถุที่มีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงได้ โดยโครงสร้างภายในตัวของแท็กจะมีส่วนประกอบของโครงสร้างที่มากกว่าชิปวงจรรวมและสายอากาศ โดยมีส่วนที่สำคัญนั่นก็คือแบตเตอรี่และวงจรไฟฟ้า โดยแท็กบางตัวอาจจะมีสายอากาศสองตัว ตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่งอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นสายอากาศรับสัญญาณ โดยปรกติแท็กชนิดกึ่งพาสซีฟจะถูกนำมาใช้งานใน Automobile tolling การระบุตัวตนของเครื่องบิน Airline part และสินค้าที่มีราคาสูง

2.3.3.2.3 แท็กชนิดแอ็กทีฟ (Active tag)

รูปที่ 2.10 แท็กชนิดแอ็กทีฟ [14]

แท็กชนิดแอ็กทีฟ (สามารถส่งสัญญาณออกมาเองได้) โดยอาศัยแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ภายใน โดยจะมีลักษณะเป็นแบตเตอรี่ขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟ ในการให้พลังงานแก่แท็กทำให้แท็กสามารถทำงานได้โดยปรกติ โดยหลักการทำงานของสายอากาศแท็กชนิดแอ็กทีฟแสดงดังรูปที่ 2.11 แท็กจะทำการติดต่อสื่อสารก่อนแล้วตามด้วยเครื่องอ่านข้อมูล โดยจะสามารถทำให้สามารถรับส่งสัญญาณข้อมูลกับ เครื่องอ่านข้อมูลระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ได้ในระยะที่ไกล โดยระยะทางอาจจะสามารถสูงได้ถึงหลายร้อยฟุต



รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟ

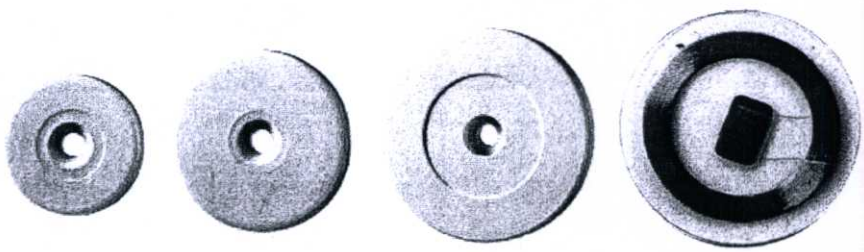
105142

แท็กชนิดแอ็กทีฟมีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในการติดตามวัตถุในพื้นที่มีขนาดใหญ่หรือต้องการระยะการอ่านได้ที่สูงเช่น ระบบสายพานการผลิตรถยนต์ภายในโรงงาน ระบบการชำระเงินบนทางด่วน ระบบการตรวจสอบการเข้าออกรถยนต์ การติดตามทรัพย์สินที่มีมูลค่าสูง ซึ่งระยะการทำงานของแท็กชนิดแอ็กทีฟจะมีระยะการทำงานที่สูงการแท็กชนิดพาสซีฟหลายเท่าตัว สามารถทำงานได้ในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนได้ดี มีระบบความจำขนาดใหญ่ โดยสามารถมีหน่วยความจำได้มากถึง 1 เมกะไบต์ สามารถส่ง/รับข้อมูลได้เป็นจำนวนมาก และมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูง แต่ถึงแม้ว่าแอ็กทีฟจะมีข้อดีอยู่มากมาย แต่ว่าการใช้งานแท็กชนิดแอ็กทีฟ ต้องมีแบตเตอรี่ติดอยู่ภายในตัวแท็ก ทำให้อายุการใช้งานถูกจำกัดด้วยอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยทั่วไปจะมีอายุการใช้งานประมาณ 3-7 ปี นอกจากนั้นยังมีส่วนประกอบของวงจรไฟฟ้าและสายอากาศ ซึ่งทำให้โครงสร้างของแท็กชนิดแอ็กทีฟมีขนาดที่ใหญ่ และมีราคาที่ค่อนข้างสูง โดยจะมีราคาประมาณ 40-80 ดอลลาร์ โดยภายในอนาคตเมื่อมีการใช้งานที่มากขึ้นราคาดังกล่าวอาจจะมีราคาที่ต่ำลง และสามารถนำไปใช้กับวัสดุที่มีราคาที่ถูกได้

2.3.3.3 การแบ่งประเภทของแท็กตามวิธีการของความแตกต่างของโครงสร้างและการออกแบบ

2.3.3.3.1 แท็กแบบจานและเหรียญ (Disk and coin)

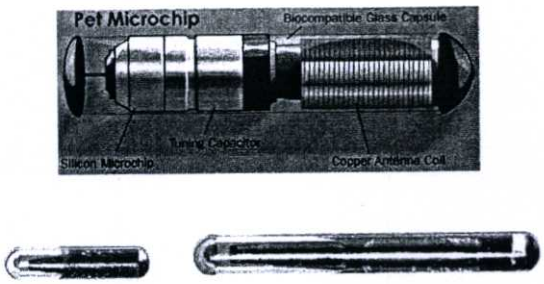
แท็กจะถูกบรรจุอยู่ในโครงสร้างวงกลมคล้ายจานหรือเหรียญและมีการเคลือบป้องกันไว้เป็นอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท็กชนิดนี้มีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรไปจนถึง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2.12 แท็กแบบจานและเหรียญ [15]

2.3.3.3.2 แท็กแบบกระเปาะแก้ว (Glass housing)

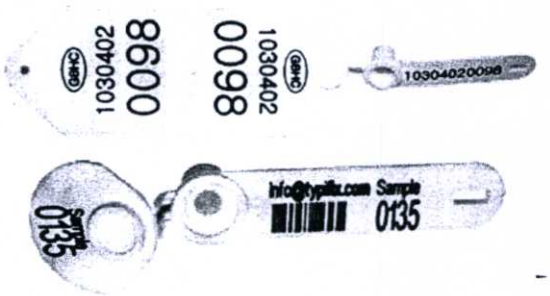
เป็นแท็กที่ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นสำหรับใช้ฝังไว้ใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแวดวงปศุสัตว์และการสาธารณสุข ตัวกระเปาะแก้วมีขนาดความยาวในช่วง 32-12 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.13 แท็กแบบกระเปาะแก้ว [16]

2.3.3.3.3 แท็กแบบหุ้มพลาสติก (Plastic housing)

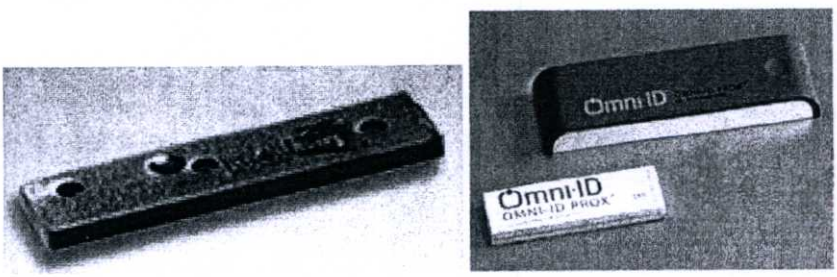
นิยมเรียกกันในชื่อย่อว่า PP (Plastic package) ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในกิจการอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีความต้องการเฉพาะรูปแบบ แท็กแบบนี้มีขนาดบางและสามารถนำไปติดตั้งประกอบกับผลิตภัณฑ์หลาย ๆ ประเภท



รูปที่ 2.14 แท็กแบบหุ้มพลาสติก [17]

2.3.3.3.4 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ

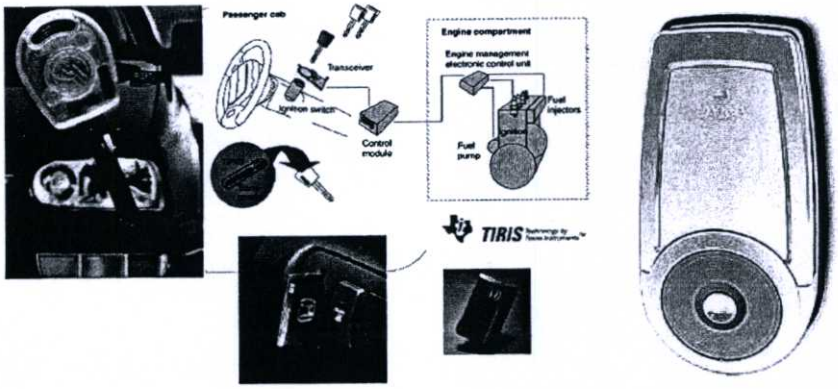
เป็นแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ อีกประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษ สำหรับใช้งานในกรณีเฉพาะกิจดังเช่นการนำไปประยุกต์ใช้กับคอนเทนเนอร์หรือวัสดุที่เป็นโลหะ โดยมีการคิดค้นและพัฒนาเพื่อบรรจุแท็กลงในโครงสร้างและหน้าสัมผัสที่เป็นโลหะ



รูปที่ 2.15 แท็กสำหรับใช้เฉพาะกิจ [18]

2.3.3.3.5 แท็กแบบพวงกุญแจ (Key and key fob)

แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สามารถได้รับการพัฒนาให้อยู่ในรูปของกุญแจพิเศษที่ใช้ในการเปิดปิดประตู หรือใช้กับระบบรักษาความปลอดภัยต่าง ๆ ซึ่งพวงกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ไม่มีลูกกุญแจ แต่กลับทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณข้อมูลต่าง ๆ ซึ่งอาจมีการนำเข้ารหัสเพื่อใช้ในการยืนยันตัวบุคคล



รูปที่ 2.16 แท็กแบบพวงกุญแจ [19]

2.3.3.3.6 แท็กแบบนาฬิกา

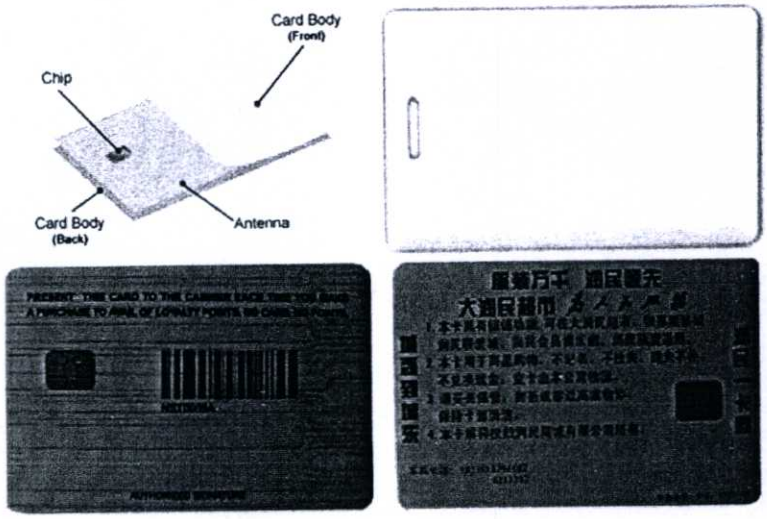
แท็กแบบนาฬิกาได้รับการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ ค.ศ .1990-1992 โดยบริษัทสัญชาติออสเตรียที่มีชื่อว่า Sky-Data โดยผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นนาฬิกาสวมใส่ข้อมือและใช้เป็นอุปกรณ์แสดงตัวตนในลักษณะช่องเซ็นเซอร์แบบไร้การสัมผัส (Contactless sensor) เพื่อผ่านเข้าสู่ลู่เล่นสกีสำหรับนักสกีทั้งหลาย

รูปที่ 2.17 แท็กแบบนาฬิกา [15]

2.3.3.3.7 แท็กมาตรฐาน ID-1และสมาร์ตการ์ดแบบไร้การสัมผัส

สมาร์ตการ์ดแบบไร้การสัมผัสเป็นรูปแบบของแท็กชนิดพาสซีฟอีกรูปแบบหนึ่ง โดยในปัจจุบันได้ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายพื้นที่ ข้อมูลที่อยู่ภายในการ์ดจะถูกอ่านเมื่ออยู่ใกล้กับเครื่องอ่าน โดยตัวการ์ดไม่จำเป็นที่จะต้องวางติดกับเครื่องอ่านเพื่อทำการอ่านข้อมูล

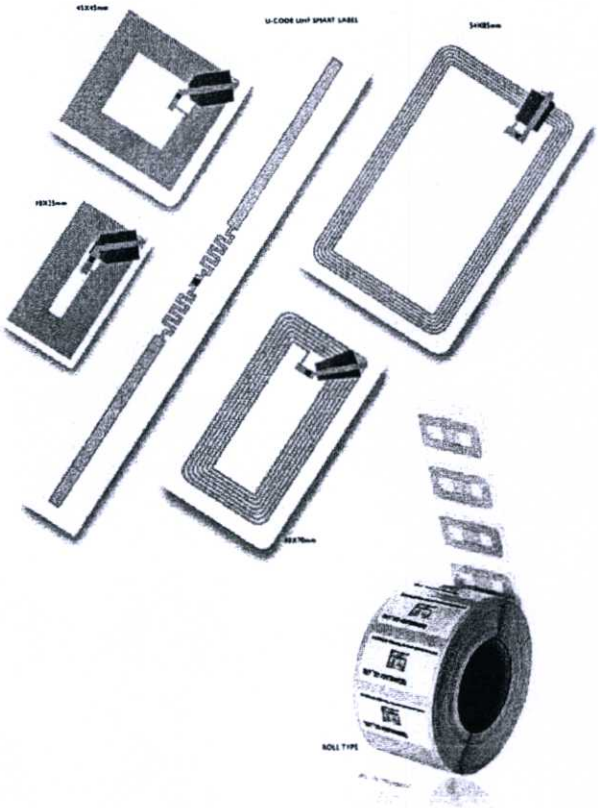
แท็กแบบ ID-1 มีรูปลักษณ์ภายนอกไม่ต่างจากบัตรเครดิตหรือบัตรโทรศัพท์ทั่วไป โดยมีขนาดประมาณมิลลิเมตร 85.72 × 54.03 มิลลิเมตร ความหนา 0.76 มิลลิเมตร เป็นแท็กที่ได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติพิเศษก็คือระยะทำการรับส่งสัญญาณที่เหนือกว่าแท็กแบบอื่นๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดที่กว้างมากของตัวบัตร ทำให้สามารถจัดวางระบบสายอากาศที่มีแกนขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มรัศมีทำการขึ้นได้อีกมาก



รูปที่ 2.18 แท็กมาตรฐาน ID-1 และ สมาร์ตการ์ดแบบไร้การสัมผัส [20]

2.3.3.3.8 แท็กแบบ Smart label

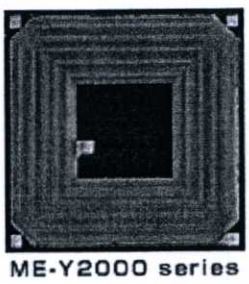
เป็นแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ บางที่สุดที่ได้รับการออกแบบเป็นกระดาษบาง ๆ สามารถงอหรือทบได้ โดยขดลวดสำหรับรับส่งสัญญาณจะถูกออกแบบเป็นแถบฟอยล์พลาสติกความหนาเพียง 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ขบวนการผลิตแบบพิมพ์สกรีน โดยทั่วไปแถบฟอยล์เหล่านี้จะถูกเคลือบชั้นหนึ่งโดยเยื่อกระดาษและทับอีกชั้นหนึ่งด้วยสารยึดเกาะ เพื่อป้องกันการฉีกขาด



รูปที่ 2.19 แท็กแบบ Smart label [15]

2.3.3.3.9 แท็กแบบขดลวดบนชิป (Coil-on-chip)

แท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ชนิดนี้มีความแตกต่างจากแท็กแบบอื่น ๆ ซึ่งมีการแยกส่วนระหว่างแท็กกับขดลวดหรือสายอากาศอย่างชัดเจน แต่สำหรับแท็กแบบขดลวดบนชิปนั้นจะรวมส่วนที่เป็นขดลวดสายอากาศและตัววงจรประมวลผลเข้าด้วยกัน

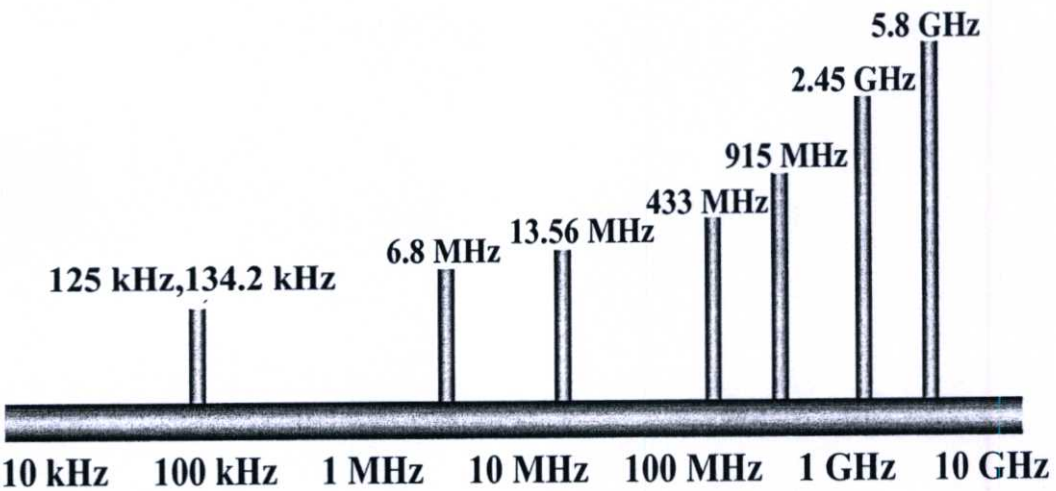


รูปที่ 2.20 แท็กแบบขดลวดบนชิป [21]

2.4 การจัดสรรคลื่นความถี่วิทยุย่านสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ปัจจุบันคลื่นพาหะในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ใช้งานในประเทศไทยจะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial-Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดในการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้ในการสื่อสารโดยทั่วไปซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ย่านความถี่ที่ใช้งาน คือ

1. ย่านความถี่ต่ำ (LF: Low Frequency) ต่ำกว่า 150 kHz
2. ย่านความถี่สูง (HF: High Frequency) 13.56/27.125 MHz
3. ย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF: Ultra High Frequency) 433/860-960 MHz
4. ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave Frequency) 2.45/5.8GHz



รูปที่ 2.21 ย่านความถี่ที่นำมาใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ในการใช้งานสอง ย่านความถี่แรกจะเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ ย่านความถี่ต่ำ (LF) มีระยะอ่านประมาณ 10-20 เซนติเมตร และย่านความถี่สูง (HF) มีระยะอ่านประมาณ 15-100 เซนติเมตร เช่น การตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่ การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ส่วนในย่านความถี่สูงยิ่งจะถูกใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล ย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) มีระยะอ่านประมาณ 1-10 เมตร เช่น การเก็บค่าบริการทางด่วน ระบบขนส่งสินค้า และในปัจจุบันระบบ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ กำลังถูกวิจัยและพัฒนาในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4/5.8 GHz เพื่อใช้ในระบบคลังสินค้าเนื่องจากขนาดของสายอากาศมีขนาดที่เล็กมาก สำหรับในด้านของราคาและความเร็วในการส่งข้อมูล เมื่อเทียบกันแล้วระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ซึ่งใช้คลื่นพาหะย่านความถี่สูงเป็นระบบที่มีความเร็วในการส่งข้อมูลสูงและมีราคาสูงด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2.2 ความถี่วิทยุที่นำมาใช้ในงานด้านต่างๆสำหรับ ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

ย่านความถี่	ระยะการอ่าน	ความเร็วในการรับ-ส่งข้อมูล	มาตรฐาน ISO (Passive Tag)	การประยุกต์ใช้งาน
ย่านความถี่ต่ำ 120-150 kHz	< 1 m	ต่ำ	ISO 18000-2	-ระบบระบุรหัสประจำตัวสัตว์ -บัตรผ่านเข้าออกประตู
ย่านความถี่สูง 13.56 MHz	< 1 m	ต่ำ ถึง ปานกลาง	ISO 18000-3	-สมาร์ตการ์ด ตั๋วโดยสาร -บัตรเติมเงิน -ห้องสมุด
ย่านความถี่สูงยิ่ง 433 MHz	> 1 m	ปานกลาง	18000, part 7	-ระบบคลังสินค้า -ระบบลอจิสติกส์
ย่านความถี่สูงยิ่ง 860-960 MHz	1-5 m	ปานกลาง ถึง สูง	18000, part 6	-ระบบ EPC -ระบบคลังสินค้า -ระบบลอจิสติกส์
ย่านความถี่ไมโครเวฟ 2.4 GHz	1-10 m	สูง	18000, part 4	-อุปกรณ์ไร้สาย

2.5 มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

มาตรฐานสำหรับการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะแบ่งออกเป็นสองหน่วยงานหลัก คือ International Standard Organization หรือ ISO และ EPC Global เป็นองค์กรที่เกิดจากความร่วมมือระหว่าง Uniform Code Council (UCC) และ EAN International โดยได้รับการสนับสนุนจากภาคอุตสาหกรรม ทำหน้าที่ในการกำหนดและพัฒนามาตรฐานรหัสของสินค้าอิเล็กทรอนิกส์และโครงข่ายโดย EPC หรือ Electronic Product Code มีวัตถุเพื่อนำมาใช้งานทางด้านการระบุตัวตนของวัตถุ เฉกเช่นเดียวกับการใช้งานของรหัสแท่ง ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยศูนย์ Auto – ID แห่งมหาวิทยาลัย MIT ซึ่งได้รับทุนจากบริษัทขนาดใหญ่หลายบริษัทเช่น Intel และ Wal-Mart มีวัตถุประสงค์หลักคือการนำไปใช้งานทางด้านการจัดการในระบบของห่วงโซ่อุปทาน (Supply chain) โดยจะถูกแบ่งออกเป็น 6 ประเภท (0-5) ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานของ EPC Global

คลาส	กำลังงาน	ระยะการอ่านได้ (เมตร)	หน่วยความจำ	คำอธิบาย	การติดต่อสื่อสาร	ชนิดของแท็ก	ราคา
0	ไม่มี	<3	1-96 bit	อ่านอย่างเดียว	การกระจัดกระจายย้อนกลับ	พาสซีฟ	ถูก
1	ไม่มี	<3	1-96 bit	อ่าน/เขียนข้อมูล 1 ครั้ง	การกระจัดกระจายย้อนกลับ	พาสซีฟ	ถูก
2	ไม่มี	<3	1-96 bit	อ่าน/เขียนข้อมูล	การกระจัดกระจายย้อนกลับ	พาสซีฟ	ปานกลาง
3	แบตเตอรี่	< 100	< 100 kilobytes	อ่าน/เขียนข้อมูล	การกระจัดกระจายย้อนกลับ	กึ่งพาสซีฟ	สูง
4	แบตเตอรี่	< 300	< 100 kilobytes	อ่าน/เขียนข้อมูล	การส่งข้อมูลแบบแอ็กทีฟ	แอ็กทีฟ	สูง
5	แบตเตอรี่ AC/DC Connection	ไม่จำกัด	ไม่จำกัด	อ่าน/เขียนข้อมูล	การส่งข้อมูลแบบแอ็กทีฟ		สูงมาก

โดยการแบ่งประเภทจะถูกแบ่งอยู่บนพื้นฐานของ กำลังงาน ระยะการอ่าน การติดต่อสื่อสาร ชนิดการทำงานของแท็ก แท็กชนิดพาสซีฟจะถูกกำหนดอยู่ในคลาสที่ 0-2 คลาสที่ 3 เป็นแท็กชนิดกึ่งพาสซีฟ ส่วนในคลาสที่ 4 จะเป็นแท็กชนิดแอ็กทีฟ โดยคลาสที่ 5 จะถูกสำรองไว้สำหรับ แท็กเครื่องอ่านข้อมูล (Tag reader) และแท็กชนิดแอ็กทีฟที่สามารถอ่านข้อมูลจากแท็กตัวอื่นๆได้ ในปัจจุบัน EPC Global จะมีมาตรฐานออกมา 2 รุ่น รุ่นแรกคือ EPC Global Gen 1 ซึ่งจะประกอบไปด้วย Class 0 Class 1 และมี EPC Gen 2 เป็นมาตรฐานอันล่าสุดที่จะทำให้เครื่องอ่านข้อมูลทุกอันที่ เป็นไปตามมาตรฐาน EPC Gen 2 นี้จะต้องสามารถอ่านได้ในมาตรฐานทางความถี่ของทุกประเทศโดยใช้มาตรฐาน ISO 18000 - 6

ตารางที่ 2.4 มาตรฐานของ ISO

	LF	HF	UHF	Microwave
ย่านความถี่	< 135 kHz	13.56 MHz	433 MHz (แอ็กทีฟ) 860-960 MHz	2.4 GHz
การติดต่อสื่อสารทางด้านอากาศ	ISO/IEC 18000-2	ISO/IEC 18000-3	ISO/IEC 18000-7 ISO/IEC 18000-6	ISO/IEC 18000-4
มาตรฐานสำหรับรูปแบบการใช้งานที่เฉพาะเจาะจง	ISO/IEC 11784	ISO/IEC 14443	ISO/IEC 10374	ISO/IEC 10374
	ISO/IEC 11785	ISO/IEC 15693	ISO/IEC 18185	ISO/IEC 18185
	ISO/IEC 14223 (การระบุสัตว์)	(บัตรสมาร์ตการ์ดแบบไร้สัมผัส)	(คอนเทนเนอร์ขนส่งสินค้า)	(คอนเทนเนอร์ขนส่งสินค้า)

มาตรฐานการระบุตัวสัตว์ (Animal Identification) มาตรฐาน ISO 11784 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับการระบุตัวสัตว์ด้วยความถี่วิทยุซึ่งเป็นมาตรฐานเกี่ยวกับโครงสร้างรหัส ISO 11785 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับทางด้านเทคนิค และ ISO 14223/1 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับแท็ก

มาตรฐานบัตรสมาร์ตการ์ดแบบไร้สัมผัส (Contactless smart cards) มาตรฐาน ISO 10536 เป็นมาตรฐานของวงจรรวม ซึ่งจะกำหนดโครงสร้างและตัวแปรในการทำงานของ Contactless coupling smart cards ซึ่งระยะการทำงานจะถูกกำหนดให้มีระยะ 1 เซนติเมตร ISO 14443 เป็นมาตรฐานที่อธิบายถึงหลักการทำงานและตัวแปรในการทำงานของ Contactless proximity coupling smart cards ที่มีระยะการอ่านประมาณ 7-15 เซนติเมตร และ ISO 15693 เป็นมาตรฐานของ Contactless vicinity coupling smart cards ที่ระยะการอ่านที่สูงถึง 1 เมตร

มาตรฐานการจัดการวัตถุ (Item management) มาตรฐาน ISO 18000 เป็นมาตรฐานที่เกี่ยวกับการระบุวัตถุด้วยความถี่วิทยุโดยเฉพาะพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการติดต่อสื่อสารกันผ่านอากาศ Air Interface Standard แบ่งเป็น 5 ย่านความถี่ด้วยกันคือ 1. ย่านความถี่ ต่ำ <135 kHz – 18000 - 2 2.ย่านความถี่สูง 13.56 MHz – 18000 - 3 3.ย่านความถี่สูงยิ่ง 433 MHz – Active – 18000 -7 4. ย่านความถี่สูงยิ่ง 860 ~ 960 MHz – 18000 - 6 5.ย่านความถี่สูงยิ่งยวด 2.45 GHz – 18000 - 4

2.6 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency RFID Systems)

ระบบย่านความถี่สูงยิ่งนั้นจะมีการใช้งานในย่านความถี่ 860-960 MHz ซึ่งจะมีค่าความยาวคลื่นประมาณ 33 เซนติเมตร ระบบย่านความถี่สูงยิ่งถูกควบคุมโดยมาตรฐาน ISO/IEC 18000-6 และ Gen 2-จาก EPC global แท็กและเครื่องอ่านข้อมูลที่ทำการผลิตจะถูกควบคุมภายใต้ EPC global สำหรับ class 0 class 1 และ class 2 ยังคงมีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยในปัจจุบันราคาต่อหน่วยของแท็กยังคงมีราคาที่แพงอยู่แต่คาดว่าภายในอนาคตอันใกล้ราคาของแท็กต่อหน่วยจะมีราคาที่ลดลง การใช้งานของแท็กในย่านความถี่สูงยิ่ง โดยส่วนมากจะถูกใช้งานในระบบการขนส่งสินค้า ห่วงโซ่อุปทาน สำหรับในการระบุกล่องหรือตู้สินค้า ซึ่งการใช้งานของแท็กจะเป็นการใช้งานทั้งแบบพาสซีฟแท็กและแอ็กทีฟแท็ก ช่วงการอ่านได้โดยปกติของแท็กที่ใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่งนั้นจะอยู่ที่ 1-9 เมตร โดยการใช้งานช่วงค่าความถี่ที่ใช้งานก็จะแตกต่างกันออกไปตามแต่ข้อกำหนดของแต่ละประเทศ

ตารางที่ 2.5 มาตรฐานความถี่สูงยิ่ง (UHF) ของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่อนุญาตให้ใช้ในแต่ละประเทศ

ประเทศ	ช่วงความถี่ที่ใช้งาน (MHz)	แบนด์วิดธ์ (MHz)	กำลังงาน (Watt)
นิวซีแลนด์	864-868	4	4
อินเดีย	865-868	3	4
ยุโรป	865-868	3	4
อัฟริกาเหนือ	865.6-867.6	2	2
ตูนีเซีย	865.6-867.6	2	2
ฟินแลนด์	865.6-867.6	2	2
ฝรั่งเศส	865.6-867.6	2	2
เยอรมนี	865.6-867.6	2	2
อิตาลี	865.6-867.6	2	2
เนเธอร์แลนด์	865.6-867.6	2	2
สหพันธรัฐรัสเซีย	865.6-867.6	2	2
สเปน	865.6-867.6	2	2
สวีเดน	865.6-867.6	2	2
สวิตเซอร์แลนด์	865.6-867.6	2	2
สหราชอาณาจักร	865.6-867.6	2	2

ประเทศ	ช่วงความถี่ที่ใช้งาน (MHz)	แบนด์วิดท์ (MHz)	กำลังงาน (Watt)
สิงคโปร์	866-869	3	0.5
บราซิล	902-907.5	5.5	4
แคนาดา	902-928	26	4
สหรัฐอเมริกา	902-928	26	4
อาร์เจนตินา	902-928	26	4
ชิลี	902-928	26	4
เกาหลี	910-914	4	4
อัฟริกาใต้	917-921	4	4
จีน	917-922	5	2
ไทย	920-925	5	4
ออสเตรเลีย	920-926	6	4
ไต้หวัน	920-925	5	1
ญี่ปุ่น	952-954	2	4

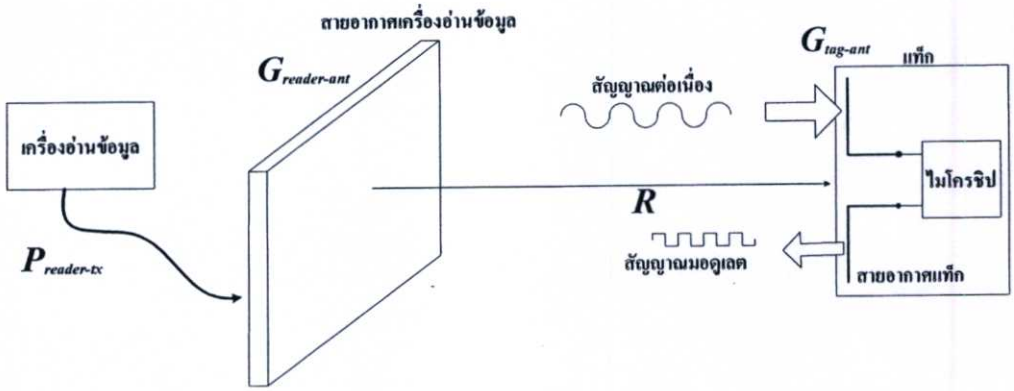
จากตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ใช้ในย่านความถี่สูงยิ่งยังคงมีปัญหาหนึ่งในการใช้งานคือความไม่แน่นอนของค่าความถี่ที่ใช้กันทั่วโลก ซึ่งค่าความถี่และแบนด์วิดธ์มีมาตรฐานที่ต่างกันไปตามแต่และข้อกำหนดของแต่ละประเทศ มาตรฐาน EPC global Gen-2 ซึ่งจะใช้สำหรับเครื่องอ่านข้อมูลที่สามารถอ่านแท็กได้ครอบคลุมตลอดช่วงความถี่สูงยิ่ง (UHF) อัตราการอ่านสำหรับการอ่านแท็กหลายๆตัวจะแตกต่างกันไปตามแต่ละประเทศ เนื่องจากความไม่แน่นอนระหว่างแบนด์วิดธ์และวิธีการการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กและเครื่องอ่านข้อมูลที่ถูกนำไปใช้งาน เมื่อแบนด์วิดธ์มีขนาดที่กว้างก็จะสามารถติดต่อสื่อสารกับกลุ่มของแท็กในบริเวณที่ใช้งานได้รวดเร็วมากกว่าการที่มีแบนด์วิดธ์แคบ ดังนั้นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีแบนด์วิดธ์ 26 MHz อัตราการอ่านแท็กจะมีค่าประมาณ 1600 แท็กต่อวินาที ในกลุ่มประเทศยุโรปที่มีแบนด์วิดธ์ 3 MHz จะมีอัตราการอ่านอยู่ที่ประมาณ 600 แท็กต่อวินาที แต่การใช้แบนด์วิดธ์ที่กว้างเกินไปก็อาจจะก่อให้เกิดปัญหาที่เกี่ยวกับสัญญาณรบกวนมากเช่นกัน

2.7 ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-field RFID)

ระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่บริเวณสนามระยะไกล (Far-field) จะใช้หลักการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โครงสร้างของแท็กประกอบด้วย 2 ส่วน คือ แผงวงจรหรือชิป (Chip) ที่เก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ และสายอากาศสำหรับการรับและการส่งสัญญาณ

2.7.1 หลักการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในสนามระยะไกล

สำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในสนามระยะไกลนั้น สายอากาศมีความสำคัญต่อสมรรถนะและความน่าเชื่อถือของระบบ เนื่องมาจากหลักการทำงานนี้จะอาศัยการแพร่กระจายคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านทางสายอากาศ ในรูปที่ 2.22 ที่แสดงหลักการทำงานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบพาสซีฟในบริเวณสนามระยะไกล เครื่องอ่านข้อมูลจะส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่มีความต่อเนื่องซึ่งบรรจุกำลังงานและสัญญาณนาฬิกาออกไปยังแท็ก หลังจากนั้นสายอากาศของแท็กจะเหนี่ยวนำแรงดัน RF แล้วแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้กับชิป โดยทั่วไปแรงดันที่ชิปใช้ในการอ่านข้อมูลมีค่าประมาณ 1.2 โวลต์ ส่วนการเขียนข้อมูลแรงดันที่ชิปใช้ประมาณ 2.2 โวลต์ เมื่อชิปได้รับกำลังงานที่เพียงพอจะทำการส่งข้อมูลโดยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้ากลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล โดยทั่วไปอิมพีแดนซ์จะมีอยู่สองสถานะ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นแมตช์สังยุคและค่าอิมพีแดนซ์ค่าอื่นบางค่า เพื่อไว้สำหรับมอดูเลตกับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับไปยังเครื่องอ่านข้อมูล



รูปที่ 2.22 กำลังงานและกลไกการติดต่อสื่อสารสำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุบริเวณสนามระยะไกล

2.7.1.1 การติดต่อสื่อสารของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ในสนามระยะไกล

ระยะทางการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุนั้นจะขึ้นอยู่กับข้อจำกัดสองอย่าง คือ ระยะทางไกลที่สุดที่แท็กสามารถรับกำลังงานเพียงพอสำหรับการทำงานของชิปและการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscattering) สัญญาณและระยะทางไกลที่สุดที่เครื่องอ่านข้อมูลสามารถรับสัญญาณที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูลได้ แต่โดยทั่วไปแล้วเครื่องอ่านข้อมูลจะมีความไวมากเพียงพอที่จะรับสัญญาณที่กระจัดกระจายย้อนกลับมาได้ ดังนั้นระยะทางในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูลจึงขึ้นอยู่กับแท็ก เช่น ลักษณะการวางตัวของแท็ก คุณสมบัติของวัตถุที่นำแท็กไปติด และสิ่งแวดล้อมในการแพร่กระจายคลื่น

2.7.1.2 การติดต่อสื่อสารจากเครื่องอ่านข้อมูลไปยังแท็ก

เนื่องจากการทำงานของแท็กนั้นเป็นแบบพาสซีฟ (Passive operation) คือไม่มีแหล่งจ่ายกำลังงานภายในเป็นของตัวเอง จึงจำเป็นจะต้องรับกำลังงาน (Power) มาจากเครื่องอ่านข้อมูลโดยตรง ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการออกแบบระบบสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล ซึ่งทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งทั้งข้อมูลและกำลังงานไปในตัวให้สามารถส่งกำลังงานที่มีค่าสูงพอให้สามารถแพร่กระจายไปในพื้นที่ใช้งาน และสามารถทำให้สายอากาศของแท็กได้รับกำลังงานที่เพียงพอในการสั่งให้ชิปภายในแท็กทำงาน เทคโนโลยีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกลนั้นเป็นหลักการที่ใช้งานที่ความถี่สูง เช่น ย่านความถี่สูงยิ่ง และย่านความถี่ไมโครเวฟ เป็นต้น

ในรูปที่ 2.22 แสดงระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ใช้หลักการการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกล ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าต่างๆได้ เช่น กำลังที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล เป็นต้น

จากสมการการส่งสัญญาณของฟรีส ในช่องว่างอิสระ (Friis free space transmission) สามารถหาค่ากำลังงานที่สายอากาศของแท็กรับได้ ดังนี้

$$P_{tag-ant} = (\frac{\lambda}{4\pi R})^2 P_{reader-ant} G_{reader-ant} G_{tag-ant} \chi \qquad (2.1)$$

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 ค่าสัมประสิทธิ์การแมตช์ของโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก

ถ้าสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลกับสายอากาศของแท็กมีการโพลาไรซ์ที่ตรงกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแมตช์ของการโพลาไรซ์เท่ากับ 1 หรือ 0 dB แต่ในการติดต่อสื่อสารของระบบระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุในสนามระยะไกล โดยทั่วไปสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลจะมีการโพลาไรซ์เป็นแบบวงกลมและสายอากาศของแท็กจะมีโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแมตช์ของการโพลาไรซ์มีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ -3 dB

กำลังงานบางส่วนที่สายอากาศของแท็กรับมาได้จะถูกส่งต่อไปยังชิป ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้ [1]

$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \tag{2.2}$$

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

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

$$R_{\max(reader)} = \frac{\lambda}{4\pi}\sqrt{\frac{P_{reader-tx}G_{reader-ant}G_{tag-ant}\chi\tau}{P_{tag-threshold}}} \tag{2.3}$$

หรือ

$$R_{\max(reader)} = 10^{\alpha} \text{ (m)} \tag{2.4}$$

โดยที่

$$\alpha = 27.6 - 20\log[f(\text{MHz})] + P_{reader-tx}(\text{dBm}) + G_{reader-ant}(\text{dBic})$$

$$+\frac{G_{tag-ant}(\text{dBi}) + \chi(\text{dB}) + \tau(\text{dB}) - P_{tag-threshold}(\text{dBm})}{20} \tag{2.5}$$

2.7.1.3 การติดต่อสื่อสารจากแท็กกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล

มาตรฐานของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบบการเชื่อมต่อระยะสนามระยะไกลกำหนดรูปแบบการส่งข้อมูลจากแท็กมายังเครื่องอ่านข้อมูล (Uplink communication) โดยอาศัยเทคโนโลยีที่เป็นการแพร่กระจายคลื่นวิทยุกลับมายังเครื่องอ่านข้อมูล คือ การกระจัดกระจายย้อนกลับ การติดต่อสื่อสารจากแท็กไปยังเครื่องอ่านข้อมูลด้วยวิธีการกระจัดกระจายย้อนกลับนี้จะขึ้นอยู่กับความแรงของสนามที่เกิดการกระจัดกระจายย้อนกลับของแท็ก บนพื้นฐานของสมการ Monostatic หรือ Backscatter radar สามารถหาค่ากำลังงานของสัญญาณมอดูเลตที่เครื่องอ่านข้อมูลรับได้ คือ [1]

$$P_{reader-rx} = \frac{\lambda}{(4\pi)^3 R^4} P_{reader-tx} G^2{}_{reader-ant}\chi\sigma \tag{2.6}$$

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

เมื่อกำลังงานที่รับได้ ($P_{tag-threshold}$) มีค่าเท่ากับความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล จะทำให้ได้ระยะทางที่ไกลที่สุดสำหรับการติดต่อสื่อสารด้วยการกระจัดกระจายย้อนกลับ (Backscatter) และสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$R_{\max(\text{Backscatter})} = \sqrt[4]{\frac{\lambda^2 P_{reader-tx} G^2_{reader-ant} \chi\sigma}{(4\pi)^3 P_{reader-threshold}}} \tag{2.7}$$

หรือ

$$R_{\max(\text{Backscatter})} = 10^{\beta} \text{ (m)} \tag{2.8}$$

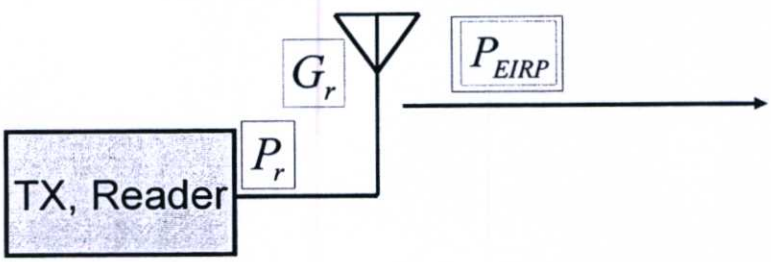
โดยที่

$$\beta = 16.6 - 20\log[f(\text{MHz})] + P_{reader-tx}(\text{dBm}) + 2G_{reader-ant}(\text{dBic})$$

$$+ \frac{\chi(\text{dB}) + \sigma(\text{dBsm}) - P_{reader-threshold}(\text{dBm})}{40} \tag{2.9}$$

จากสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่าระยะทางในการอ่านของเครื่องอ่านข้อมูลขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แต่มีพารามิเตอร์อยู่สองตัว ที่สามารถทราบค่าได้ก่อนจากการเลือกเครื่องอ่านข้อมูลและตัวชิป คือ ค่ากำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้ ($P_{tag-threshold}$) และค่าความไวในการตอบสนองของเครื่องอ่านข้อมูล ($P_{reader-threshold}$)

2.7.2 ค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผลไอโซทรอปิก (Effective Isotropic Radiated Power: EIRP) และค่ากำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผล (Effective Radiated Power: ERP)



รูปที่ 2.23 กำลังงานการแพร่กระจายคลื่นประสิทธิผลไอโซทรอปิก

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ระยะทางในการอ่านที่ไกลที่สุดเป็นสัดส่วนกับกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลและอัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล นั่นคือ ถ้ากำลังงานและอัตราขยายของเครื่องอ่านข้อมูลมีค่าสูงจะทำให้ระยะทางการอ่านไกลขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามในการส่งกำลังงานด้านออกของเครื่องอ่านข้อมูลต้องเป็นไปตามมาตรฐานข้อบังคับของแต่ละประเทศ

ค่า EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) คือ การทดสอบกำลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศตัวส่งที่เป็นไอโซทรอปิก (Isotropic) นั่นคือ มีอัตราขยายเท่ากับ 1 หรือ 0 dBi หรือกล่าวโดยง่ายว่า EIRP คือกำลังงานที่แพร่กระจายจากสายอากาศตัวส่งโดยเป็นการรวมค่ากำลังงานของตัวส่งและอัตราขยายของสายอากาศตัวส่ง โดยสามารถหาค่าได้ดังนี้

$$P_{EIRP} = P_{reader-tx} G_{reader-ant} \tag{2.10}$$

หรือ

$$P_{EIRP} = P_{reader-tx}\left(\text{dBm}\right) + G_{reader-ant}\left(\text{dBi}\right)$$

โดยทั่วไปมีการอ้างถึงค่า EIRP และค่า ERP (Effective Radiated Power) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสายอากาศไดโพล มากกว่าสายอากาศแบบไอโซทรอปิก และมีค่าอัตราขยายเท่ากับ 1.64 หรือ 2.15 dBi

$$P_{ERP} = P_{reader-tx}\left(\text{dBm}\right) + G_{reader-ant}\left(\text{dBd}\right) \tag{2.11}$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่า EIRP และค่า ERP คือ

$$P_{EIRP} = 1.64 P_{ERP} \tag{2.12}$$

2.7.3 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน (Power transmission coefficient)

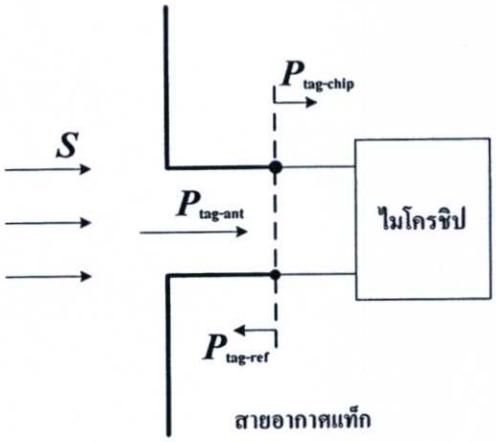
พิจารณาพื้นที่ประสิทธิผล ($A_{e-\max}$) ของสายอากาศของแท็กที่วางอยู่ในสนามของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลซึ่งมีความหนาแน่นกำลังงาน (S: W/m^2) แท็กจะได้รับกำลังงานและส่งต่อไปยังรอยต่อระหว่างสายอากาศและชิปที่มีอิมพีแดนซ์เป็น Z_T กำลังงานส่วนหนึ่งจะส่งผ่านไปยังชิป ในขณะที่บางส่วนจะถูกสะท้อนกลับและแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่งที่สายอากาศ กำลังงานที่แท็กรับได้และกำลังงานที่ส่งต่อไปยังชิป คือ

$$P_{tag-ant} = SA_{e-\max} \tag{2.13}$$

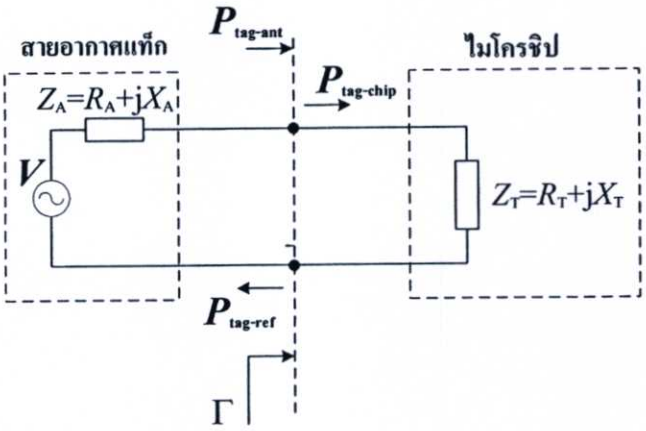
และ

$$P_{tag-chip} = \tau P_{tag-ant} \tag{2.14}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานจะถูกกำหนดโดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ Z_A ของแท็กและอิมพีแดนซ์ของชิป Z_T ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่และกำลังงานที่จ่ายให้ชิป



(ก) กำลังงานที่ส่งมายังโครงสร้างของแท็ก



(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 2.24 กำลังงานที่ส่งมายังแท็กและวงจรสมมูล

จากรูปที่ 2.24 แสดงวงจรสมมูล อิมพีแดนซ์ของชิป Z_T จะรวมผลของตัวกล่องที่ใส่ชิปด้วย [1] โดยที่อิมพีแดนซ์ของทั้งสายอากาศและชิปจะขึ้นอยู่กับความถี่

จากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Γ) คือ

$$\Gamma = \frac{Z_T - Z^*_A}{Z_T + Z_A}, \qquad 0 \le |\Gamma| \le 1 \tag{2.15}$$

โดยที่

$$Z_T = R_T + jX_T \tag{2.16}$$

$$Z_A = R_A + jX_A \tag{2.17}$$

กำลังงานที่ส่งไปยังชิป คือ

$$P_{tag-chip} = (1-|\Gamma|^2)P_{tag-ant} \tag{2.18}$$

สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\tau = \frac{P_{tag-chip}}{P_{tag-ant}} = 1-|\Gamma|^2 = \frac{4R_A R_T}{(R_A+R_T)^2+(X_A+X_T)^2}, \quad 0 \le \tau \le 1 \tag{2.19}$$

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

$$P_{tag-chip-\max} = P_{tag-ant} = SA_{e-\max} \tag{2.20}$$

ในขณะที่สายอากาศถูกทำให้ลัดวงจร นั่นคือ อิมพีแดนซ์ของชิปมีค่าเท่ากับศูนย์ ($Z_T = 0$) ส่งผลให้ $|\Gamma| = 1$ และ $\tau = 0$ ดังนั้นจะไม่มีกำลังงานส่งไปยังชิป

ในการจำลองหรือการทดสอบสายอากาศโดยส่วนใหญ่จะได้ผลออกมาในรูปของค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss: RL) มีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน ซึ่งใช้เพื่ออธิบายคุณลักษณะของการแมตช์ของอิมพีแดนซ์ กำหนดได้ดังนี้

$$RL(\text{dB}) = -20\log_{10}(|\Gamma|) \tag{2.21}$$

2.7.4 สัมประสิทธิ์การแมตช์ของโพลาไรซ์ (Polarization matching coefficient)

โพลาไรซ์ของสายอากาศแท็กจะต้องมีความเหมาะสมกับโพลาไรซ์ของเครื่องอ่านข้อมูล เนื่องจากจะสามารถนำมาซึ่งระยะการอ่านได้ที่ไกลที่สุด โดยพารามิเตอร์ที่ซึ่งแสดงถึงการแมตช์ของโพลาไรซ์คือ χ (สัมประสิทธิ์การแมตช์เชิงโพลาไรซ์) สำหรับระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ สนามระยะไกลนั้นสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลส่วนมากจะมีโพลาไรซ์เชิงวงกลม ซึ่งแท็กโดยส่วนมากก็จะโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งทิศทางการติดตั้งสายอากาศแท็กก็จะไม่สามารถกำหนดได้อย่างตายตัว ตัวอย่างเช่น การใช้แท็กที่มีโพลาไรซ์แบบเชิงเส้นกับสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลที่มีโพลาไรซ์เชิงวงกลมค่าสัมประสิทธิ์การแมตช์เชิงโพลาไรซ์ จะมีค่าเท่ากับ 0.5 หรือ -3 dB ซึ่งถ้าหากใช้แท็กที่มีโพลาไรซ์เชิงวงกลมก็จะสามารถเพิ่มระดับสัญญาณขึ้นมาได้อีก 3 dB

2.7.5 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)

ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง คือ อัตราส่วนของความเข้มการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุดต่อความเข้มของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) ถ้าไม่มีการระบุทิศทางให้หมายถึงทิศทางที่มีความเข้มการแพร่กระจายคลื่นที่มากที่สุด

สำหรับสายอากาศที่มีการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) จะมีค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับหนึ่ง เนื่องจากค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่น (U) และค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่นมากที่สุด (U_{max}) และค่าความเข้มการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) มีค่าเท่ากัน

โดยทั่วไปค่าสภาพเจาะจงทิศทางจะแสดงในหน่วยของเดซิเบล (dB) ซึ่งสามารถหาได้จากการแปลงค่าสภาพเจาะจงทิศทางที่ไม่มีหน่วย (Dimensionless)

2.7.6 ประสิทธิภาพของสายอากาศ (Antenna efficiency)

ประสิทธิภาพของสายอากาศจะใช้เพื่อคำนึงถึงค่าการสูญเสียในส่วนต่างๆ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การสูญเสียจากการไม่แมตช์ของส่วนเชื่อมต่อกับสายอากาศแท็กและการสูญเสียภายในตัวสายอากาศ เช่น การสูญเสียในตัวนำ การสูญเสียในสารไดอิเล็กตริก เป็นต้น โดยปรกติแล้วค่าประสิทธิภาพของแท็กโดยรวมจะแสดงดังสมการที่ 2.22

$$e_t = e_{cd} e_r = e_{cd}\left(1-|\Gamma|^2\right) \qquad (2.22)$$

เมื่อกำหนดให้

e_t = ประสิทธิภาพรวม

e_{cd} = ประสิทธิภาพความเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศ

e_r = ประสิทธิภาพการสะท้อน (ไม่แมตช์)

และ Γ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อน อ้างอิงจากสมการที่ (2.14)

โดยทั่วไปการกล่าวถึงค่าประสิทธิภาพของแท็กจะเป็นการพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็ก โดยพจน์ดังกล่าวนี้จะส่งผลต่อค่าอัตราขยายของแท็ก

2.7.7 อัตราขยายของสายอากาศ (Gain of antenna)

อัตราขยายของสายอากาศนั้นเป็นอีกพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญสำหรับระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุด ระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดจะอยู่ในทิศทางที่ค่าอัตราการขยายมีค่ามากที่สุด ซึ่งโดยปรกตินั้นจะถูกจำกัดโดยขนาด แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ ย่านความถี่ที่ทำงาน สำหรับสายอากาศไดโพลขนาดเล็ก จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวและจะมีค่าอัตราการขยายประมาณ 0-2 dBi สำหรับสายอากาศชนิดชี้ทิศทางบางชนิดเช่นสายอากาศชนิดแผ่นบาง (Patch antenna) สายอากาศจะสามารถมีอัตราการขยายที่สูงขึ้นไปถึง 6 dBi หรือมากกว่านั้น

จากข้อกำหนดจากมาตรฐานของ IEEE นั้น อัตราขยายโดยทั่วไปจะไม่รวมการสูญเสียที่เกิดเนื่องมาจากการไม่แมตช์กันของอิมพีแดนซ์ (ค่าการสูญเสียจากการสะท้อน) และค่าการสูญเสียที่เกิดจากการไม่แมตช์กันของโพลาไรซ์ โดยในวิทยานิพนธ์จะทำการอธิบายรูปแบบของอัตราขยายสองรูปแบบ โดยรูปแบบแรกคือ อัตราขยาย (Gain, G) ส่วนอีกรูปแบบนั้นคือ อัตราขยายสัมบูรณ์ (Absolute gain, G_{abs}) โดย อัตราขยาย (Gain, G) จะมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพเจาะจงทิศทางสูงสุดดังสมการ

$$G(\theta,\phi) = e_{cd} D(\theta,\phi) \tag{2.23}$$

เมื่อกำหนดให้

D = ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศ

e_{cd} = ประสิทธิภาพการเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศ

ในส่วนของอัตราขยายสัมบูรณ์ (Absolute gain, G_{abs}) จะเป็นพจน์ของค่าอัตราขยาย (Gain, G) ที่มีการรวมพจน์ของประสิทธิภาพการสะท้อนจากการไม่แมตช์ e_r เข้าไปด้วย เมื่อ $e_r = \left(1-|\Gamma|^2\right)$ โดยค่าอัตราขยายสัมบูรณ์จะเขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} G_{abs}(\theta,\phi) &= e_r G(\theta,\phi) \\ &= \left(1-|\Gamma|^2\right) G(\theta,\phi) \end{aligned} \tag{2.24}$$

2.7.8 ความไวของชิปวงจรรวม (Sensitivity of IC chip)

กำลังงานไฟฟ้าขีดเริ่ม P_{th} เป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากที่สุดในการจำกัดระยะการอ่านที่ไกลที่สุดของแท็ก ค่าดังกล่าวคือพลังงานคลื่นวิทยุที่ต่ำสุดที่จำเป็นในการกระตุ้นให้ชิปเริ่มทำงาน โดยเมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2.3) เมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์อื่นคงที่จะพบว่ายิ่งกำลังงานไฟฟ้าขีดเริ่มมีค่าที่น้อยลงจะทำให้ได้ระยะการอ่านไกลสุดเพิ่มมากขึ้น

2.8 หลักการออกแบบสายอากาศแท็กของระบบระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นวิทยุ

สิ่งที่มีความสำคัญที่สุดของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ คือค่าประสิทธิภาพของช่วงการอ่าน ซึ่งจะเป็นระยะทางที่ไกลที่สุดที่เครื่องอ่านข้อมูลของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุสามารถที่นำข้อมูลกลับคืนมาได้ ระยะของการอ่านนั้นจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของแท็ก โดยปกติแล้วสิ่งที่ควรคำนึงถึงสำหรับการออกแบบระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจะเป็นดังนี้

1. แท็กมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับชิป โดยค่าอิมพีแดนซ์ของแท็กที่ออกแบบจะต้องเป็นค่าสังยุคกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิป เพื่อที่จะทำให้สามารถรับค่าพลังงานจากเครื่องอ่านข้อมูลได้มากที่สุด
2. มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน
3. เมื่อนำแท็กไปติดวัสดุ แล้วยังคงมีคุณสมบัติที่ไม่เปลี่ยนแปลง
4. มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นไปตามความความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน (แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวหรือแบบชี้เจาะจงทิศทาง)
5. มีโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทาน
6. ทั้งวัสดุและการผลิตมีราคาถูก

การใช้งานแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่แตกต่างกันออกไปทำให้ต้องมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาการออกแบบสายอากาศแท็ก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหลักการออกแบบนั้นก็จะมีความสัมพันธ์กับการนำไปใช้งานของแท็ก โดยจะมีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาสำหรับการออกแบบดังนี้

ช่วงความถี่ที่ใช้งาน : ชนิดของสายอากาศจะขึ้นอยู่กับช่วงความถี่ที่ใช้งาน ในการใช้งานสำหรับย่านความถี่สูง (HF) และย่านความถี่ต่ำ (LF) จะนิยมใช้สายอากาศเส้นลวดขดเป็นวง (Spiral coil antenna) ส่วนในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) และย่านความถี่ไมโครเวฟ จะนิยมใช้สายอากาศไดโพล สายอากาศขดวกวนและ สายอากาศแผ่นบางเรียบ ส่วนการเลือกความถี่ที่ใช้งานจะต้องขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งานและข้อกำหนดของแต่ละประเทศที่แตกต่างกันออกไป

ขนาด และรูปแบบ : การออกแบบแท็กมีความต้องการในเบื้องต้นคือ ต้องการให้แท็กมีขนาดที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้เช่น การนำไปใช้เป็นแผ่นป้าย การนำไปใช้กับกล่องกระดาษหรือการนำไปติดกระเป๋าเดินทางสำหรับสายการบิน ซึ่งการออกแบบให้สายอากาศที่มีขนาดเล็กนั้นก็เป็นความท้าทายสำหรับผู้ออกแบบเป็นอย่างมาก เนื่องจากสายอากาศที่มีขนาดเล็กก็จะมีความสามารถในการเชื่อมต่อที่จำกัดโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสายอากาศบ่วงที่ใช้ในย่านความถี่ต่ำและความถี่สูง ส่วนในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) และย่านความถี่ไมโครเวฟ จะยังผลให้ประสิทธิภาพของสายอากาศลดลง ซึ่งผลทั้งหมดของการลดขนาดสายอากาศก็คือ การลดลงของระยะการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูล

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น : ในการใช้งานแต่ละประเภทนั้นก็มีความต้องการแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่มีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดรอบตัว แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดชี้เจาะจงทิศทาง หรือ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นชนิดครึ่งทรงกลม

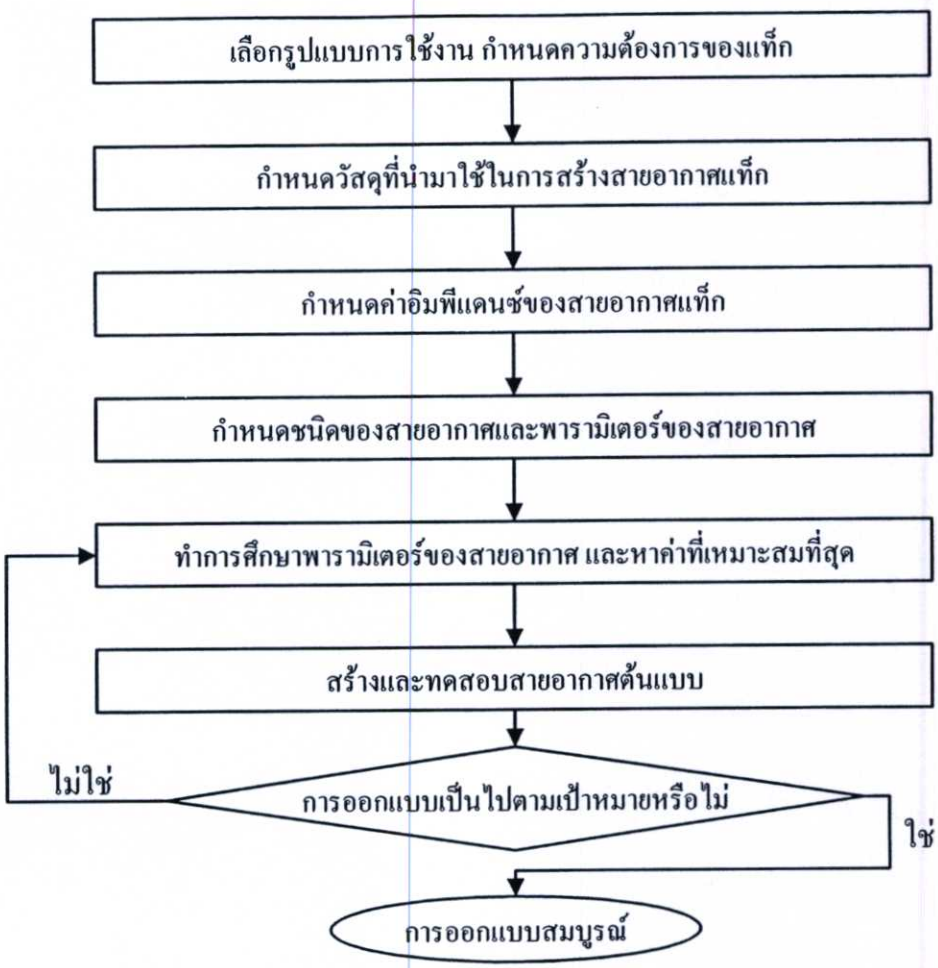
ความอ่อนไหวในการใช้งานร่วมกับวัตถุ : สมรรถนะในการทำงานของแท็กจะเปลี่ยนแปลงเมื่อนำไปใช้กับวัสดุที่แตกต่างกันออกไปเช่น กล่องกระดาษที่มีสิ่งของภายในที่แตกต่างกัน และจะมีประสิทธิภาพที่ลดลงเมื่อติดอยู่บนวัสดุที่มีการสูญเสีย ตัวอย่างเช่นขวดน้ำพลาสติกที่มีน้ำหรือน้ำมันบรรจุอยู่ หรือกระป๋องโลหะ โดยสายอากาศแท็กจะถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมกับวัสดุที่ต้องการจะนำไปติดเพื่อให้ได้สมรรถนะในการทำงานที่สูงที่สุด หรือทำการออกแบบให้แท็กมีความอ่อนไหวต่อการใช้งานร่วมกับวัสดุแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกันให้น้อยที่สุด

ราคา : แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะต้องมีราคาที่ไม่แพงเพราะจะต้องถูกนำไปใช้จำนวนมากในแต่ละการใช้งาน โดยข้อจำกัดนี้จะเป็นตัวกำหนดทั้งโครงสร้างและวัสดุที่จะนำมาใช้ในการสร้างแท็กที่ซึ่งจะประกอบไปด้วยไมโครชิป วัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างแท็กได้แก่แถบหรือสายตัวนำไฟฟ้าและไดเล็กตริก ในส่วนของไดเล็กตริกนั้นจะประกอบไปด้วยโพลีเอสเตอร์ที่ดัดได้ สำหรับการใช้งานในย่านความถี่สูง (HF) และความถี่ต่ำ (LF) ส่วนวัสดุฐานรองที่เป็นแผ่นพิมพ์อย่างเช่น FR-4 จะถูกนำไปใช้งานสำหรับย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) และย่านความถี่ไมโครเวฟ ส่วนตัวนำไฟฟ้าที่นิยมนำมาใช้จะเป็นพวกทองแดง อลูมิเนียม และหมึกเงิน

ความเชื่อถือได้ : แท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ จะต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีความเชื่อถือได้ที่สามารถทนได้กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความชื้น ความเค้นและความเครียด และ ความคงทนต่อกระบวนการผลิต เช่น การติดป้ายฉลาก การพิมพ์ และการวางซ้อนทับเป็นต้น

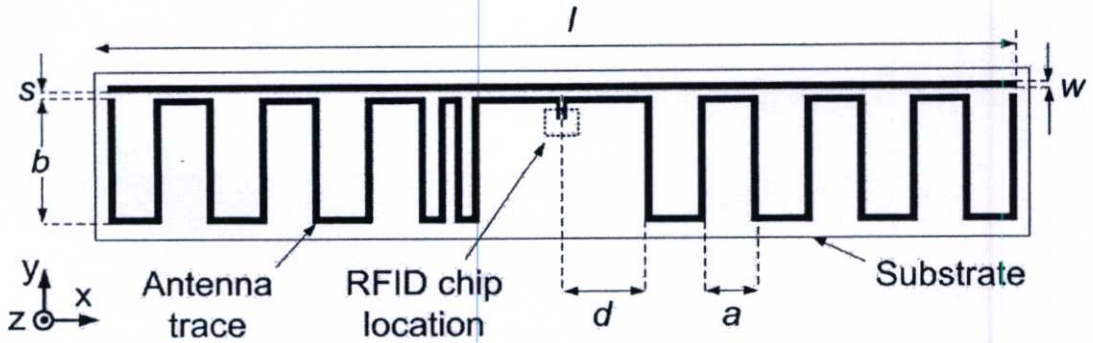
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ที่มีมาก่อน

มีงานวิจัยจำนวนมากที่กล่าวถึงการหลักการออกแบบสายอากาศแท็กย่านความถี่สูงยิ่ง [22]-[24] แต่ละปัญหาที่เกิดขึ้นในการออกแบบสายอากาศแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ [25] จากที่กล่าวมาแล้วในส่วนของทฤษฎีในหัวข้อระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง จะพบว่ามาตรฐานการใช้งานทางด้านความถี่ของแต่ละประเทศจะมีมาตรฐานที่แตกต่างกันออกไป และการที่สายอากาศแท็กจะต้องถูกนำไปติดกับชิปวงจรรวมที่มีอยู่หลากหลายผู้ผลิต ซึ่งชิปวงจรรวมดังกล่าวก็มีค่าอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกันออกไปตามผู้ผลิต ทั้งชิปวงจรรวมนั้นยังมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปตามความถี่ที่เราเลือกใช้งาน ดังนั้นจึงมีบทความที่ต่างๆกันในการนำเสนอการออกแบบสายอากาศแท็กกับย่านความถี่ตามมาตรฐานของประเทศต่างๆ [26]-[28] และการออกแบบรวมกับชิปวงจรรวมที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น บทความของ K.V. Seshagiri Rao และคณะ [22] ซึ่งกล่าวถึงหลักการการออกแบบสายอากาศแท็กโดยรวมให้มีประสิทธิภาพ โดยหลักการออกแบบดังกล่าวจะในแผนผังดังรูปที่ 2.25



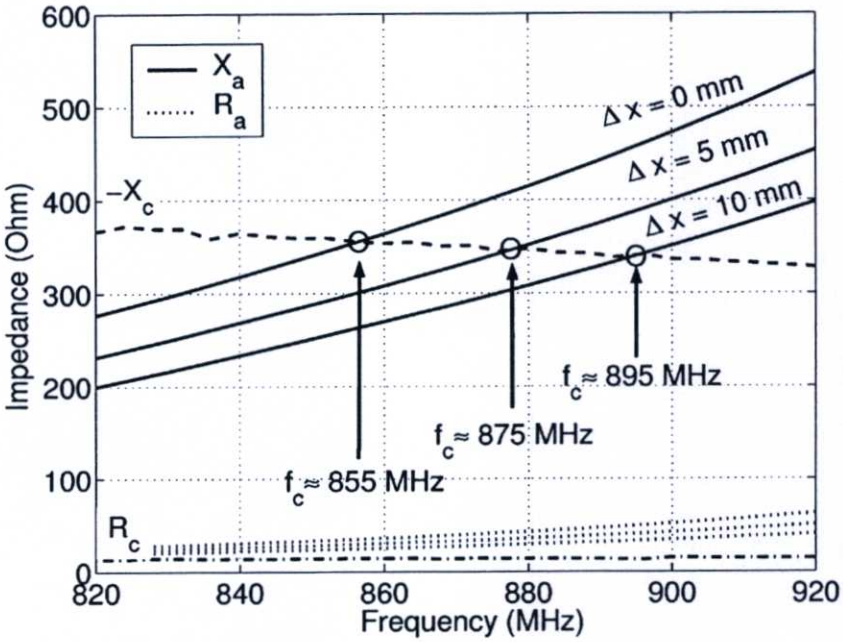
รูปที่ 2.25 แผนผังหลักการออกแบบสายอากาศแท็ก

โดยสายอากาศที่นำเสนอในบทความนี้มีเป็นสายอากาศไดโพลชนิดขดวกวนเพื่อให้ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง และการขดวกวนสามารถช่วยในการลดขนาดทางโครงสร้างให้สายอากาศมีความยาวโดยรวมที่ลดลง [29]-[30] และมีการใช้เส้นแท่งโหลด 1 เส้น เพื่อเป็นการควบคุมค่าอิมพีแดนซ์ให้ได้เป็นไปตามต้องการ โดยโครงสร้างของสายอากาศมีขนาด $0.3\lambda \times 0.04\lambda$ แสดงดังรูปที่ 2.26



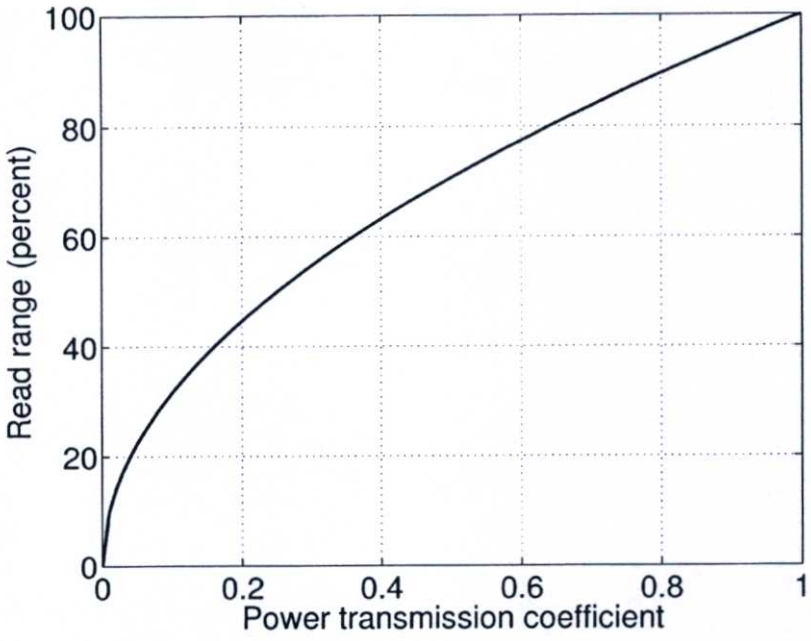
รูปที่ 2.26 โครงสร้างของสายอากาศแท็กขดวกวนที่มีโหลด

จากโครงสร้างของสายอากาศดังกล่าวสายอากาศจะถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานโดยการออกแบบรวมกับชิป Philips EPC 1.19 G2 RFID ASIC chip ซึ่งชิปดังกล่าวจะทำงานในช่วงความถี่ 860-960 MHz จากผลการจำลองสายอากาศแท็กขดวกวนที่มีโหลด จะเห็นได้ว่าจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจากผลการจำลองจะพบว่าสายอากาศที่ทำการออกแบบดังกล่าวมีเหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ค่อนข้างสูงดังแสดงในรูปที่ 2.27



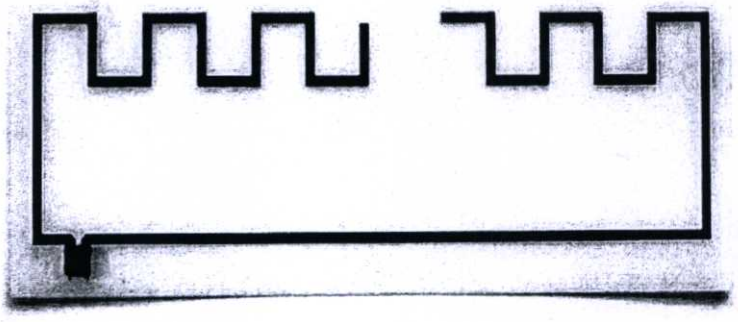
รูปที่ 2.27 กราฟค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

จากบทความของ K.V.S Rao และคณะ [23] ได้อธิบายถึงหลักการของการแมตช์อิมพีแดนซ์ในการออกแบบสายอากาศแท็ก โดยได้แสดงให้เห็นว่าที่ $\tau = 1$ หรือที่มีการแมตช์สังยุคของอิมพีแดนซ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมกับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กโดยสมบูรณ์ก็จะได้ระยะการอ่านที่สูงที่สุด โดยระยะการอ่านได้ไกลสุดจะมีการเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานมีค่าที่เพิ่มขึ้น เมื่อกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.28

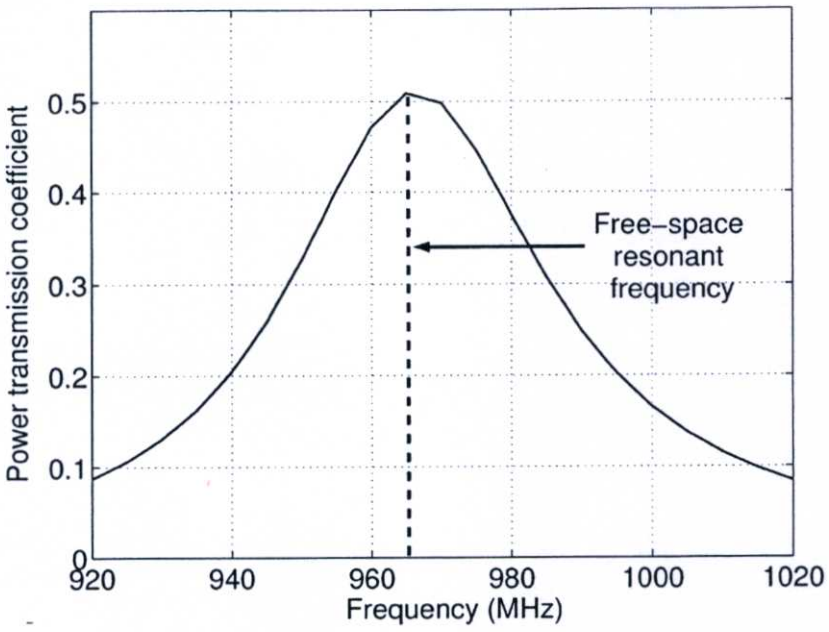


รูปที่ 2.28 กราฟนอร์แมลไลซ์ระยะการอ่านไกลที่สุดต่อค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน

สายอากาศที่ทำการออกแบบมีลักษณะเป็นแบบโค้งงอและขดวกวน (Folded meander) เพื่อใช้ใน Intellitag ID card สายอากาศมีความกว้าง 22 มิลลิเมตร ความยาว 70 มิลลิเมตรแสดงในรูปที่ 2.29 สร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 โดยออกแบบที่มาตรฐานของอเมริกาเหนือ 902-928 MHz ความถี่กลางเท่ากับ 915 MHz ออกแบบร่วมกับชิปวงจรรวมรุ่น Fairchild RFID ASIC chip มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 15-j420 โอห์ม โดยผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานของแท็กชนิดโค้งงอและขดวกวนแสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.29 สายอากาศแท็กชนิดโค้งงอและขดวกวน



รูปที่ 2.30 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานของแท็ก

โดยสายอากาศดังกล่าวจะถูกออกแบบที่ 965 MHz ในสภาวะช่องว่างอิสระ ซึ่งเมื่อนำไปใส่ภายใน Intellitag ID card จะทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ 915 MHz พอดี โดยเมื่อพิจารณาที่ความถี่ 965 MHz ที่ทำการออกแบบสายอากาศจะมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานประมาณ 0.5 หรือประมาณ 70 % ของระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุด โดยระยะการอ่านได้ไกลที่สุดจะมีค่าประมาณ 3.5 เมตร

ในบทความของ P.R Foster และคณะ [25] ได้กล่าวถึงปัญหาของสายอากาศในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ และรูปแบบของสายอากาศที่เป็นไปได้ในเบื้องต้นในการเริ่มออกแบบ โดยได้กล่าวว่าปัญหาของการออกแบบสายอากาศให้สามารถแมตช์กับวัสดุที่ถูกห่อหุ้มเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก โดยเป้าหมายของสายอากาศทุกตัวที่ออกแบบนั่นคือการทำให้สามารถส่งผ่านกำลังงานให้ได้มากที่สุด โดยสายอากาศจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับวัสดุที่จะนำไปใช้ ต้องสามารถส่งผ่านกำลังงานไปยังชิปวงจรรวมให้ได้มากที่สุด มีโพลาไรซ์เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน มีความแข็งแรง และมีราคาถูก และได้นำเสนอรูปแบบที่เป็นไปได้ในเบื้องต้นของสายอากาศในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สายอากาศทั่วไปในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ

สายอากาศ	แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	แบนด์วิดธ์ (MHz)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_0)	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
ไดโพล	แบบรอบตัว	10-15	0.5	50-80
ไดโพลแบบวกกลับ	แบบรอบตัว	15-20	0.5×0.05	100-300
ไดโพลแผ่นพิมพ์	ชี้ทิศทาง	10-15	$0.5 \times 0.5 \times 0.1$	50-100
แพตช์แผ่นพิมพ์	ชี้ทิศทาง	2-3	0.5×0.5	30-100
ล็อกรายคาบ	ชี้ทิศทาง	100	0.3×0.25	50-100

2.10 บทสรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ส่วนประกอบของระบบ ข้อดีของการใช้งานระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ตัวอย่างการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ หลักการที่จำเป็นของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ส่วนประกอบของแท็ก การแบ่งประเภทของแท็กและแท็กรูปแบบต่างๆที่มีการใช้งานในปัจจุบัน หลักการออกแบบสายอากาศแท็ก หลักการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านข้อมูล พารามิเตอร์ที่จำเป็นในการพิจารณาการออกแบบสายอากาศแท็ก งานวิจัยที่มีมาก่อนที่เป็นประโยชน์และเป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบสายอากาศแท็ก

บทที่ 3
การจำลองสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต

3.1 บทนำ

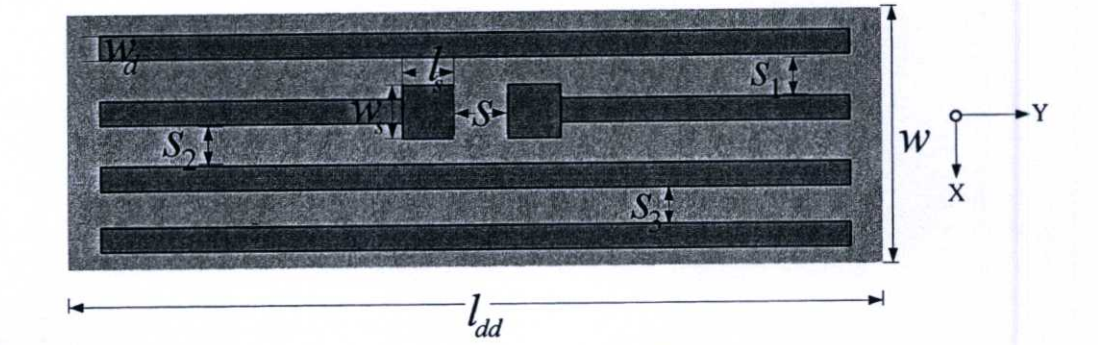
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิตที่ใช้ในย่านความถี่สูงยิ่งในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ และการศึกษาถึงพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณลักษณะของแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิตความเป็นมาและประโยชน์ของโครงสร้างดังกล่าว โดยโครงสร้างที่ทำการออกแบบจะทำการศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ในเบื้องต้นก่อนที่จะนำมาใช้ในการเริ่มต้นสำหรับการออกแบบสายอากาศแท็กในแต่ละขั้นตอนของโครงสร้างสายอากาศ โดยอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของสายอากาศสตริปไดโพลในเบื้องต้น ประกอบกับงานวิจัยที่มีมาก่อน โดยการศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆของสายอากาศจะผ่านการจำลองด้วยโปรแกรม CST@ Microwave Studio [31] เพื่อเป็นการศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวและทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของสายอากาศที่ทำการออกแบบในแต่ละโครงสร้าง พร้อมทั้งโครงสร้างของสายอากาศนี้จะถูกนำไปประเมินความถูกต้องของค่าอิมพีแดนซ์ของค่าชิปวงจรรวมในเบื้องต้น เพื่อจะเป็นประโยชน์กับการสร้างสายอากาศในโครงสร้างอื่นถัดไป

3.2 สายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต (Dipole with parasitic lines)

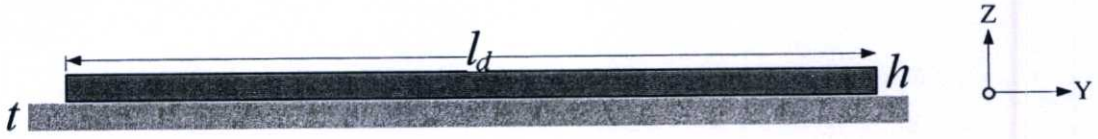
สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตถูกนำมาพิจารณาเป็นสายอากาศแท็กตัวแรกเนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวสามารถออกแบบได้ง่าย และมีพารามิเตอร์ที่ไม่มากนั้นสำหรับการนำไปศึกษาและการออกแบบในขั้นต้น จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เนื่องจากชิปวงจรรวมที่ถูกใช้งานในปัจจุบันมีค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความหลากหลายแตกต่างกันไปในแต่ละผู้ผลิต แต่ส่วนมากนั้นการออกแบบสายอากาศให้เหมาะสมกับชิปในรุ่นต่างๆนั้นจะต้องออกแบบให้สายอากาศมีค่าความต้านทานที่ค่อนข้างต่ำและมีค่ารีแอ็กแตนซ์ที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการออกแบบสายอากาศโครงสร้างดังกล่าวนี้คือ ต้องการให้สายอากาศสามารถปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศได้โดยใช้เทคนิคการเพิ่มเส้นปรสิตเพื่อเป็นการปรับค่าความต้านทานของสายอากาศให้มีค่าที่ลดต่ำลง แต่ยังคงให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ที่มีความเหมาะสมที่นำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศรวมกับชิปวงจรรวมให้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมกับการนำไปใช้กับชิปรุ่น NXP G2XL ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ 21.3-j191.7 โอห์ม ที่ความถี่ 922.5 MHz โดยการเลือกใช้ชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL เนื่องจากโครงสร้างของชิปวงจรรวมมีความเหมาะสมกับการนำมาสร้างสายอากาศแท็กบนแผ่นวงจรพิมพ์

3.2.1 โครงสร้างของสายอากาศชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต

โครงสร้างของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตจะประกอบไปด้วยสายอากาศสตริปไดโพลที่มีความยาว l_d และประกอบไปด้วยเส้นปรสิตจำนวน 3 เส้น ที่มีความยาวเท่ากับสายอากาศไดโพลเพื่อให้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง โดยเส้นปรสิตดังกล่าวจะทำหน้าที่ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีความเหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิป โดยสายอากาศแท็กจะถูกสร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีขนาดความกว้าง w_d และ ความยาว l_d ดังแสดงในรูปที่ 3.1



(ก) มุมมองด้านหน้า



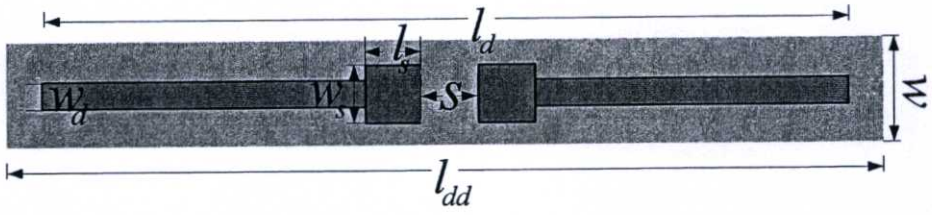
(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 3.1 สายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต

3.2.2 การออกแบบสายอากาศ

สำหรับขั้นตอนในการออกแบบสายอากาศแท็กในขั้นต้นนั้นจะเริ่มจากสายอากาศสตริปไดโพลเนื่องจากโครงสร้างดังกล่าวมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการออกแบบในขั้นต้น โดยโครงสร้างของสายอากาศจะเริ่มต้นพิจารณาจากโครงสร้างของสายอากาศไดโพลยาวครึ่งความยาวคลื่น $\lambda_0 / 2$ โดยสายอากาศถูกสร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ($\varepsilon_r = 4.3$, $\tan\delta = 0.025$, หนา = 0.764 มิลลิเมตร) โดยสาเหตุของการนำเอาวัสดุฐานรองชนิดดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบนั้นคือ วัสดุดังกล่าวมีราคาที่ไม่แพงและสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด ทำให้ราคาของแท็กมีราคาต่อหน่วยที่ไม่แพงมากนัก โดยโครงสร้างพื้นฐานที่ถูกกำหนดในเบื้องต้นนั้นก็คือ โครงสร้างบริเวณที่จะทำการติดชิปวงจรรวม โครงสร้างที่ถูกกำหนดในเบื้องต้นคือ ช่องว่างระหว่างแผ่นที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่น (s_d) โดยจะกำหนดให้มีระยะห่างเท่ากับ 2 มิลลิเมตร ความกว้างและยาวของบริเวณฐานรองชิป (l_s) เท่ากับ 3 มิลลิเมตร และค่าความกว้างของฐานรองชิป (w_s) เท่ากับ 4

มิลลิเมตร ตามลำดับโครงสร้างที่ถูกกำหนดดังกล่าวจะถูกกำหนดให้มีความเหมาะสมกับโครงสร้างของชิปวงจรรวม



รูปที่ 3.2 โครงสร้างสายอากาศสตริปไดโพลเริ่มต้น

3.3 การคำนวณค่าความยาวของสายอากาศเบื้องต้น

กำหนดค่าความถี่ที่ใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 920-925 MHz โดยมีค่าความถี่กลางที่เท่ากับ 922.5 MHz เมื่อทำการพิจารณาจากสายอากาศไดโพลครึ่งความยาวคลื่น $\lambda_0 / 2$

λ_0 คือ ค่าความยาวคลื่นในสุญญากาศ และ v คือ ความเร็วแสงในสุญญากาศ
เมื่อ $f = 922.5$ MHz, $v = 3\times10^8$ m/s
ดังนั้น

$$\lambda_0 = \frac{v}{f} = \left(\frac{3\times10^8}{922.5\times10^6}\right) = 0.325 \text{ m}$$

หรือ $\lambda_0 = 32.5$ cm

เมื่อนำสายอากาศไดโพลมาวางบนวัสดุฐานรองที่มีค่า $\varepsilon_r = 4.3$
กำหนดให้ λ_d คือ ค่าความยาวคลื่นบนไมโครสตริป

$$\lambda_d = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \left(\frac{0.325}{\sqrt{4.3}}\right) = 0.157 \text{ m}$$

หรือ $\lambda_d = 15.7$ cm

ดังนั้น สายอากาศสตริปไดโพล $\lambda_d / 2$ จะมีความยาวเท่ากับ

$$\frac{\lambda_d}{2} = \frac{0.157}{2} = 0.079 \text{ m}$$

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของสายอากาศสตริปไดโพลเริ่มต้น

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)
w	8
w_s	4
w_d	1
l_d	7.9
l_s	3
l_{dd}	11.9
s_d	2
h	0.017

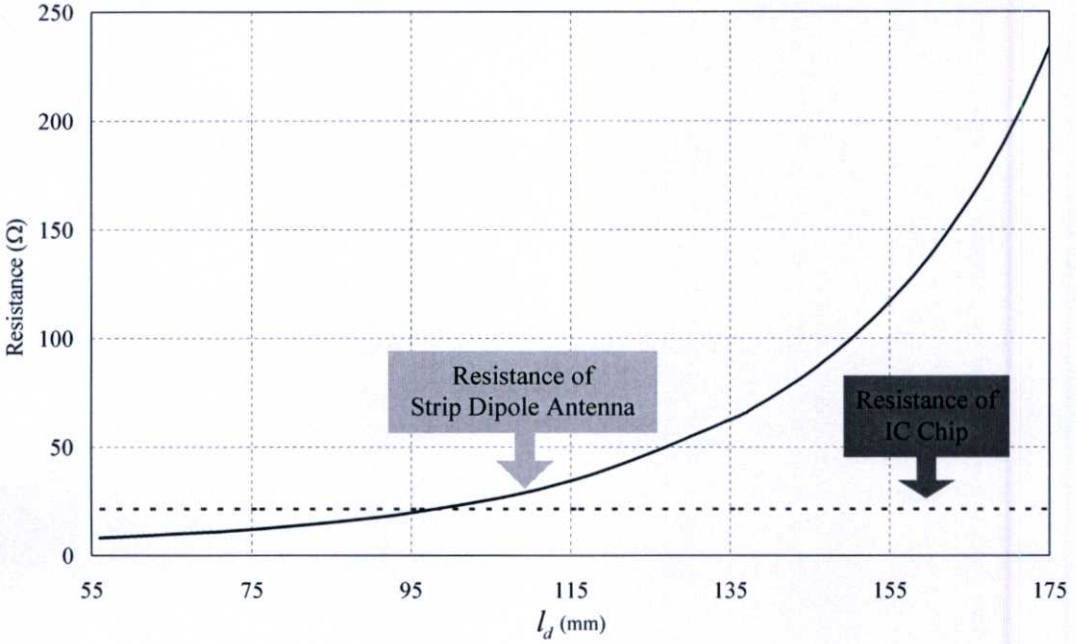
สายอากาศไดโพลถูกนำมาจำลองในเบื้องต้นเนื่องจากรูปแบบที่มีความเหมาะสมกับการนำมาเป็นสายอากาศในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุซึ่งสายอากาศจะอยู่บนหน้าเดียวกันบนวัสดุฐานรองทำให้เป็นโครงสร้างที่มีความเหมาะสมการติดชิปวงจรรวม โดยค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 922.5 MHz มีค่า 21.3-j191.7 โอห์ม ซึ่งโดยปรกติของสายอากาศไดโพลที่มีความยาวครึ่งความยาวคลื่นจะมีค่าประมาณ 73+j42.5 โอห์ม และเนื่องจากโครงสร้างที่ถูกจำกัดในเรื่องของการต้องกำหนดโครงสร้างของสายอากาศในเบื้องต้นให้เหมาะสมกับการติดชิปวงจรรวมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จึงทำให้ต้องมีการศึกษาถึงค่าความยาวเริ่มต้นที่มีความเหมาะสมโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความยาว l_d โดยผ่านการจำลองโดยโปรแกรม CST @ Microwave Studio แล้วทำการหาค่าความยาวเริ่มต้นที่มีความเหมาะสมที่สุด

3.4 การศึกษาค่าความยาวเริ่มต้น l_d ของสายอากาศ

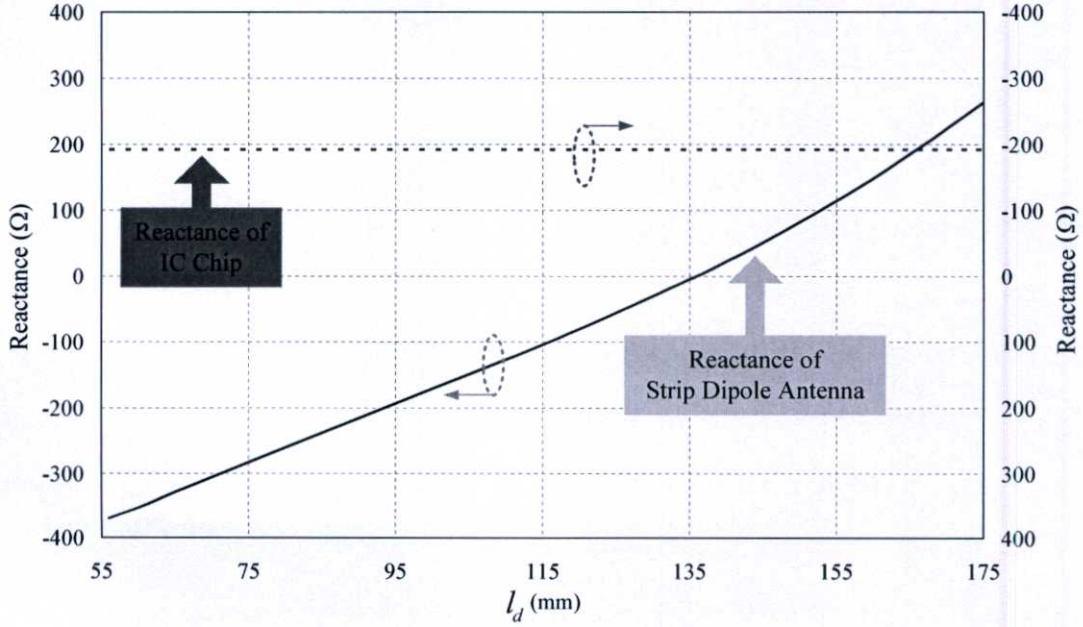
โครงสร้างของสายอากาศสตริปไดโพลเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นการนำค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในตารางที่ 3.1 มาทำการจำลองสายอากาศแท็กเบื้องต้นด้วยโปรแกรม CST @ Microwave Studio แล้วทำการเปลี่ยนความยาวของสายอากาศ l_d เพื่อทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดจากโครงสร้างดังกล่าวจะได้ผลดังรูปที่ 3.3

จากรูปที่ 3.3 (ก) กราฟแสดงการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานของสายอากาศสตริปไดโพล เมื่อทำการเพิ่มความยาว l_d ของสายอากาศ โดยพิจารณาที่ความถี่ 922.5 MHz ค่าความต้านทานจะแปรผันตรงกับค่าความยาว l_d ของสายอากาศที่เพิ่มขึ้น ในรูปที่ 3.3 (ข) เป็นกราฟแสดงค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนความยาวของสายอากาศ l_d จากการพิจารณา

จะพบว่าเมื่อความยาวของสายอากาศไดโพลยาวเพิ่มขึ้น แนวโน้มของค่ารีแอ็กแตนซ์ก็จะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยสรุปในเบื้องต้นได้ว่าเมื่อความยาว l_d ของสายอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเพิ่มขึ้น

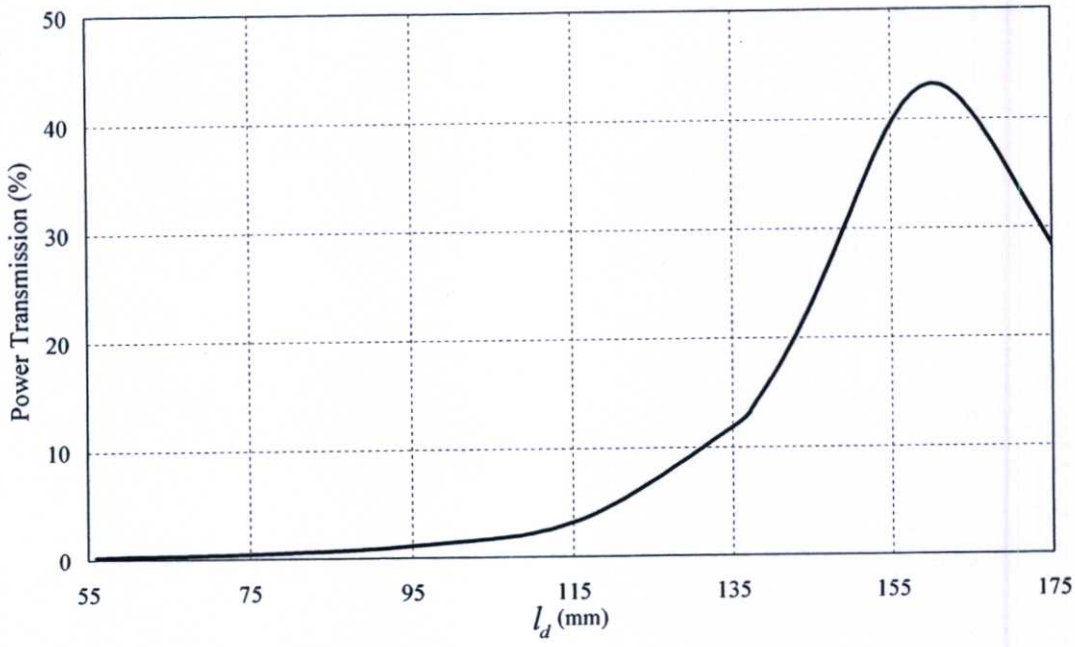


(ก) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลเมื่อเปลี่ยนความยาว l_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz



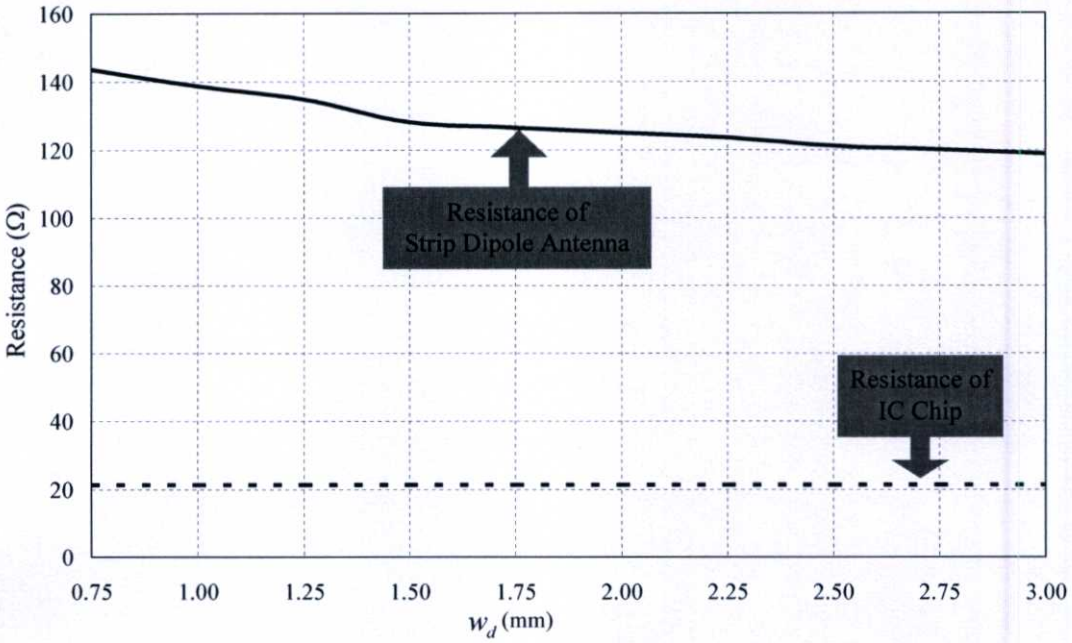
รูปที่ 3.4 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

จากกราฟในรูปที่ 3.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศต่อความยาว l_d ของสายอากาศจะเห็นเพียงค่าแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ต่อความยาวซึ่งยังไม่สามารถหาข้อสรุปในการเลือกพารามิเตอร์ความยาวได้อย่างถูกต้องเนื่องจากมีสองคุณลักษณะที่จะต้องทำการพิจารณานั่นคือ ค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ ในกราฟรูปที่ 3.4 จะเป็นกราฟที่ได้จากการคำนวณค่าเปอร์เซ็นการส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความยาว l_d ของสายอากาศ โดยการคำนวณจะอ้างอิงจากสมการที่ (2.18) ในบทที่ 2 ผลจากกราฟจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อความยาว l_d ของสายอากาศสตริปไดโพลเพิ่มขึ้น แนวโน้มในเบื้องต้นของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น และมีค่าการส่งผ่านกำลังงานสูงสุดเมื่อ l_d มีค่าเท่ากับ 160 มิลลิเมตร หลังจากนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานจะลดต่ำลง ดังนั้นค่าความยาวที่ถูกคัดเลือกในเบื้องต้นนั้นคือ l_d เท่ากับ 160 มิลลิเมตร โดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลจะมีค่าเท่ากับ 138.7+j149.86 โอห์ม และมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 43.2 %

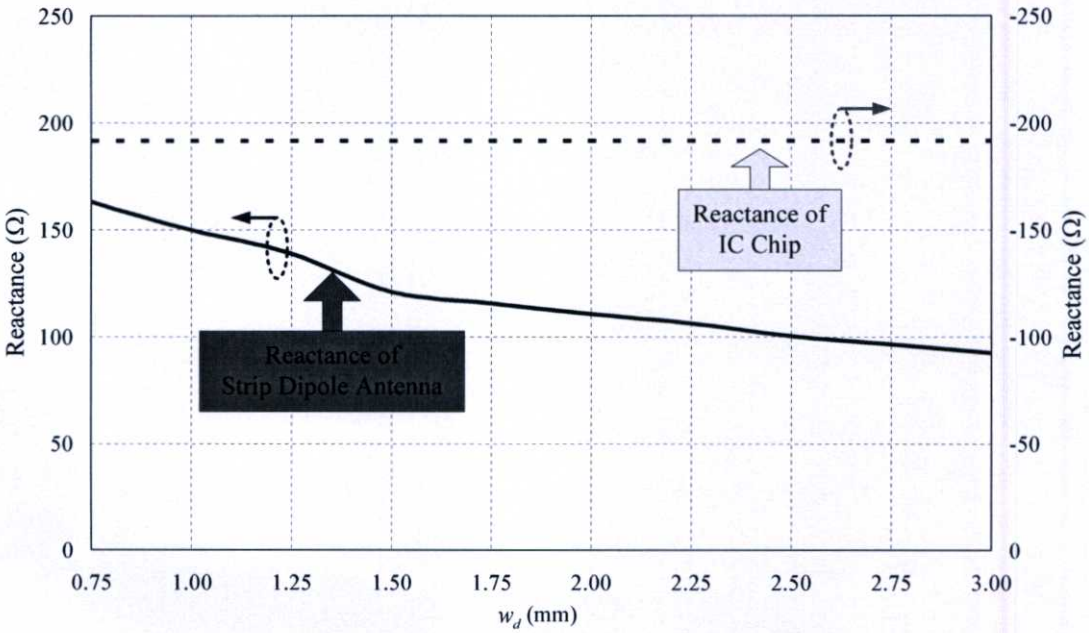
3.5 การศึกษาความกว้างเริ่มต้น w_d ของสายอากาศ

ในส่วนต่อไปจะทำการทดสอบค่าความกว้าง w_d ของสตริปที่มีความเหมาะสม โดยพารามิเตอร์ของสายอากาศ l_d มีค่าเท่ากับ 160 มิลลิเมตร ส่วนค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆยังคงไม่เปลี่ยนแปลง เพื่อหาค่าความกว้างของสายอากาศสตริปไดโพลที่มีความเหมาะสมกับค่าชิป

อิมพีแดนซ์ของวงจรรวม โดยในส่วนนี้จะทำการพิจารณาถึงความเป็นไปใช้ในการสร้างชิ้นงานจริงด้วย



(ก) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

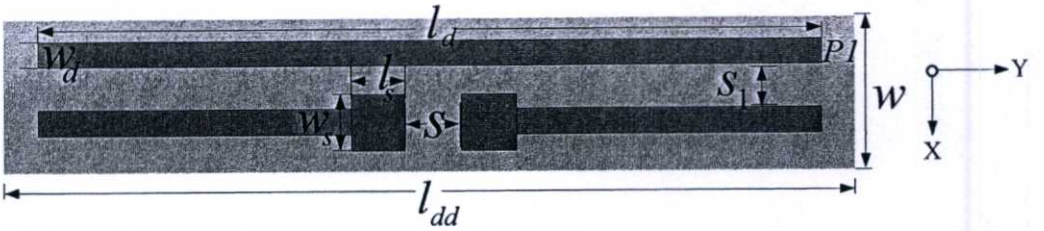
รูปที่ 3.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลเมื่อมีการเปลี่ยนความกว้าง w_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

จากผลการจำลองการเปลี่ยนแปลงความกว้างของของแถบลวดยาวพบว่า ความกว้างของสริปนั้นมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ จากรูปที่ 3.5 จะพบว่าขนาดของเส้นสตริปที่เล็กลงนั้นจะแปรผันโดยตรงกับทั้งค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศ โดยจะพบว่ายิ่งความกว้างแถบลวดยาว w_d มีขนาดที่เล็กลงมากเท่าไร ก็จะทำให้มีค่ารีแอ็กแตนซ์สูงมากขึ้น แต่เนื่องจากความเป็นไปได้ในการสร้างชิ้นงานและความสะดวกในการสร้างสายอากาศจึงทำการเลือกค่าความกว้าง w_d ที่เท่ากับ 1 มิลลิเมตร โดยค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลในขณะนี้ยังคงมีค่าเท่าเดิมคือ 138.7+j149.86 โอห์ม

3.6 การศึกษาถึงการปรับค่าอิมพีแดนซ์โดยใช้เส้นปรสิต

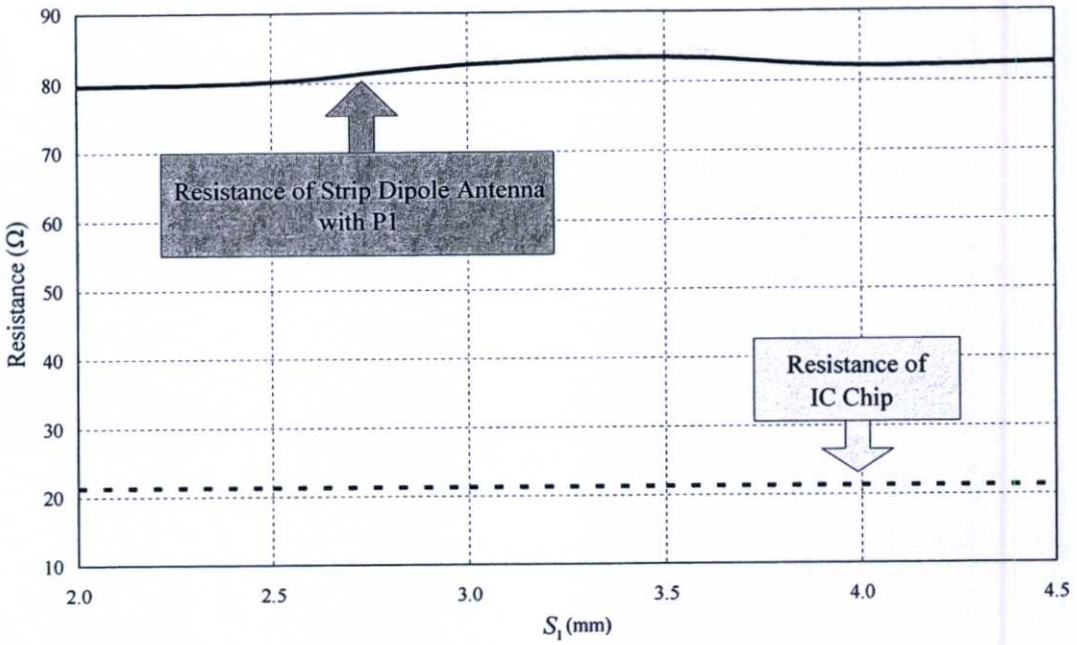
หากเราพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่สามารถส่งถ่ายกำลังงานให้แก่ชิปวงจรรวมได้ 100 % นั้นจะพบว่าค่าความต้านทานของสายอากาศดังกล่าวนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ โดยมีค่า 21.3 โอห์ม ส่วนค่ารีแอ็กแตนซ์นั้นจะมีค่า j191.7 โอห์ม ซึ่งจากโครงสร้างของสายอากาศสตริปไดโพลเบื้องต้นนั้น มีแนวโน้มของค่ารีแอ็กแตนซ์ที่ค่อนข้างสูงที่เหมาะสมกับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL แต่ทว่าค่าความต้านทานก็ยังคงมีค่าที่สูงเช่นกัน ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงนำเอาโครงสร้างของเส้นปรสิตมาช่วยในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ โดยโครงสร้างดังกล่าวอ้างอิงจากบทความ [12]

3.6.1 การเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 1 และศึกษาผลของพารามิเตอร์ S_1

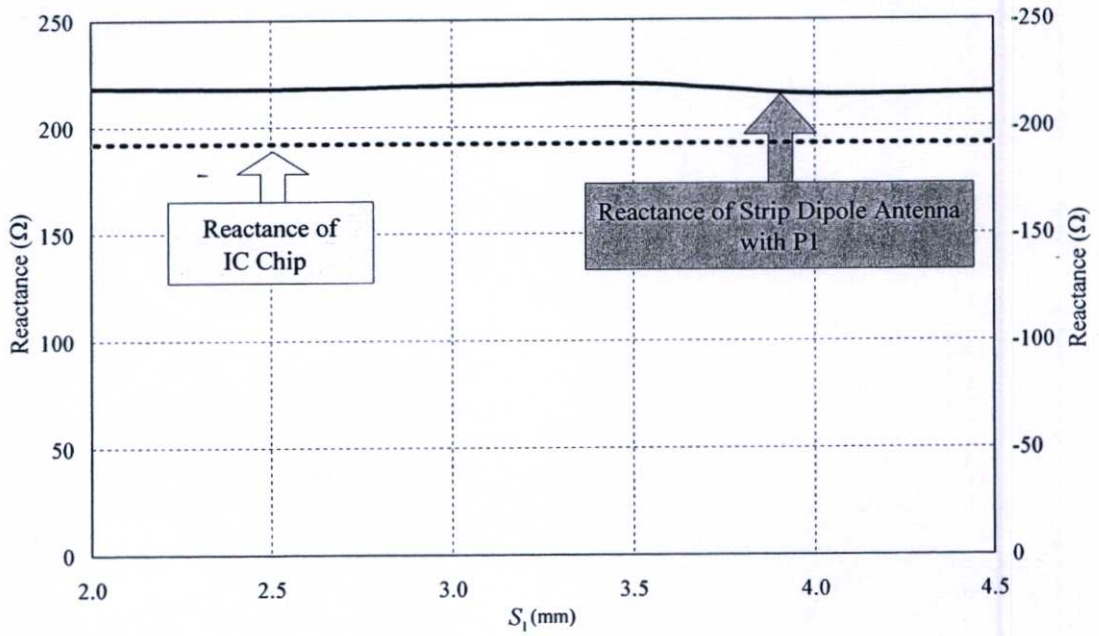


รูปที่ 3.6 สายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1

ในรูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1 โดยโครงสร้างเริ่มต้นของเส้นปรสิตที่ 1 (P1) จะกำหนดให้มีความยาวเท่ากับสายอากาศสตริปไดโพลตั้งต้นโดยกำหนดให้มีความยาว l_d เท่ากับ 160 มิลลิเมตร ส่วนระยะห่างระหว่างสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1 S_1 จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าเพื่อทำการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กให้มีความเหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวม โดยทำการพิจารณาถึง โครงสร้างที่จะสามารถนำไปสร้างจริงได้ด้วย



(ก) ค่าความต้านทาน

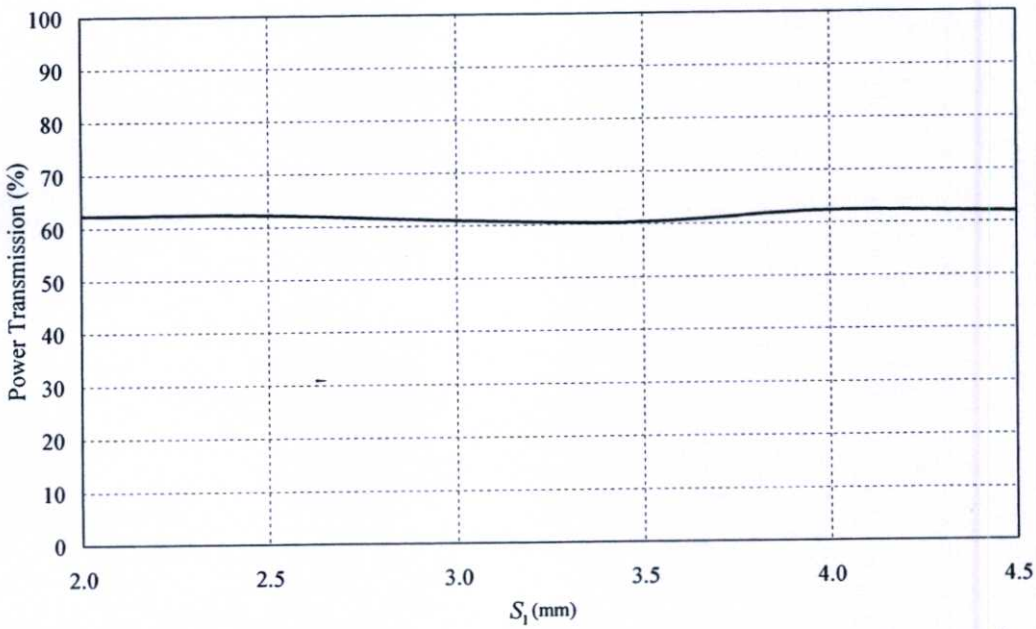


(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 3.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1 เมื่อความกว้างระยะ S_1 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

ในรูปที่ 3.7 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1 จากการเปลี่ยนแปลงระยะ S_1 รูปที่ 3.7 (ก) แสดงค่าความต้านทานของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1 จากกราฟแสดงค่าความต้านทานที่มีการเปลี่ยนจากการเปลี่ยนแปลงระยะ S_1 จะพบว่า

ค่าความต้านทานของสายอากาศนั้นลดลงอย่างมากจากตอนต้นประมาณ 57% จากค่าความต้านทานเดิมของสายอากาศสตริปไดโพลที่ปราศจากเส้นปรสิตที่ 1 จากการพิจารณาระยะ S_1 ในช่วงระยะ 2.0-4.5 มิลลิเมตร จะพบว่าค่าความต้านทานจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดเมื่อระยะ S_1 มีระยะที่ห่างขึ้นและจะมีค่าสูงสุดเมื่อระยะ S_1 มีค่าเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มระยะห่าง S_1 มากขึ้นค่ารีแอ็กแตนซ์ก็จะมีค่าลดต่ำลง ในส่วนของรูปที่ 3.7 (ข) เป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอ็กแตนซ์ จะพบว่าค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศนั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนระยะ S_1 และมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าสายอากาศสตริปไดโพลในตอนแรกที่ยังไม่มีการใส่เส้นปรสิตที่ 1 เพื่อทำการปรับค่าอิมพีแดนซ์ ค่ารีแอ็กแตนซ์ในตอนนี้จะมีค่าโดยเฉลี่ยจะมีค่าประมาณ j217 โอห์ม



รูปที่ 3.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1 เมื่อความกว้างระยะ S_1 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

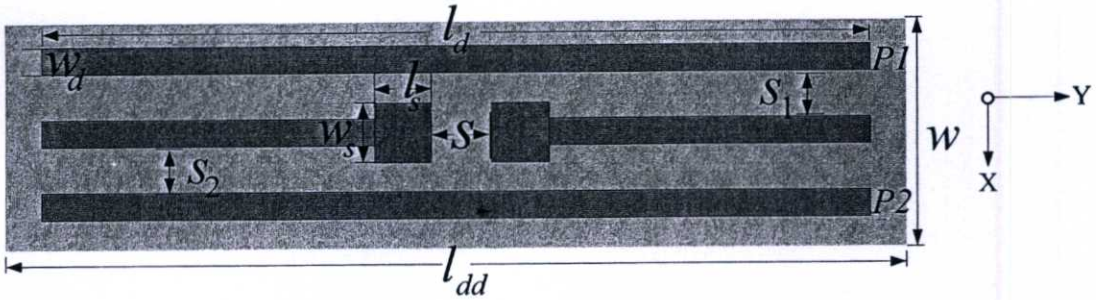
รูปที่ 3.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะ S_1 จากการเปลี่ยนระยะดังกล่าวจะพบว่าค่าการส่งผ่านกำลังงานค่อนข้างมีค่าคงที่ อันเนื่องมาจากมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่มากนัก โดยจะพบว่าที่ระยะ S_1 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 2.0-2.5 มิลลิเมตร จะมีค่าการส่งผ่านกำลังงานที่สูงใกล้เคียงกับ ระยะ S_1 ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 3.7-4.5 มิลลิเมตร ดังนั้นพารามิเตอร์ S_1 จึงถูกเลือกค่าที่ 2.5 มิลลิเมตร เพื่อทำให้โครงสร้างไม่มีขนาดที่ใหญ่จากการเลือกระยะห่าง S_1 ที่มากขึ้น ส่วนที่ระยะน้อยกว่า 2.5 มิลลิเมตร ไม่ถูกเลือกเนื่องจากเมื่อระยะ S_1 มีค่าที่ใกล้มากกับสายอากาศสตริปไดโพลอาจจะทำเกิดปัญหาจากการสร้างสายอากาศจริงได้ โดยสรุปค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในส่วนนี้จะได้ว่า

ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานจะมีค่าเท่ากับ 62.2 % โดยสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 80+j217.7 โอห์ม

จากการสรุปในขั้นต้นจากการเปลี่ยนพารามิเตอร์ l_d และการเพิ่มเส้นปรสิตที่ 1 แล้วทำการปรับระยะ S_1 จะพบว่า การเปลี่ยนความยาวของสายอากาศจะส่งผลต่อค่าความต้านทานของสายอากาศมากกว่าค่ารีแอ็กแตนซ์ส่วนการใช้ เส้นปรสิตมาใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ จะส่งผลต่อค่าความต้านทานมากว่าค่ารีแอ็กแตนซ์โดยเมื่อทำการเพิ่มเส้นปรสิตเข้าไปในโครงจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าความต้านทานมีค่าลดลงอย่างมาก

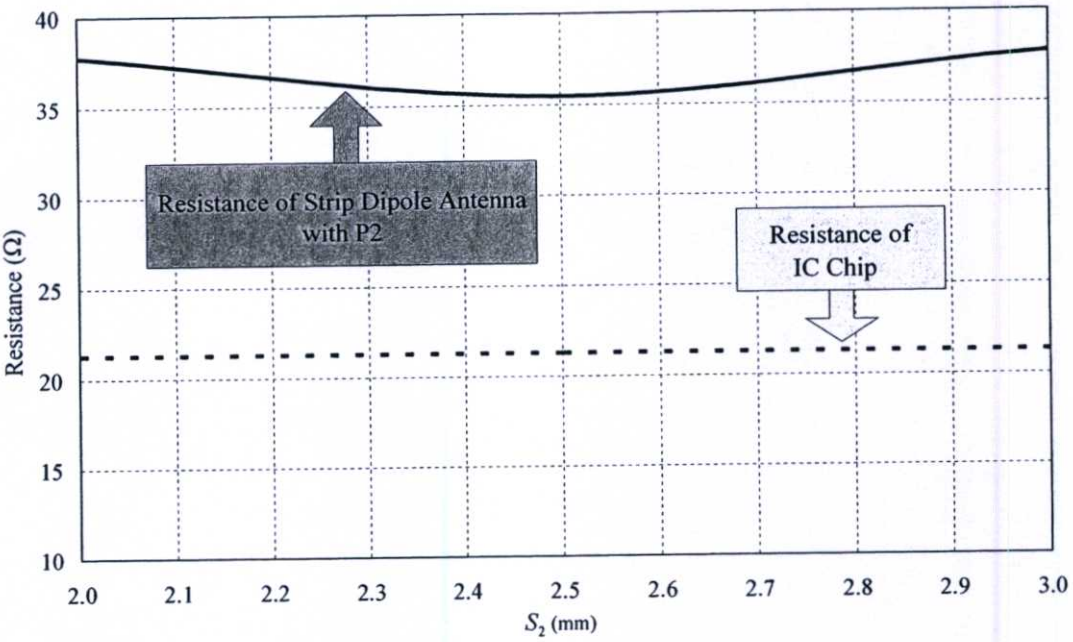
3.6.2 การเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 2 และศึกษาผลของพารามิเตอร์ S_2

ดังนั้นในส่วนต่อไปจึงทำการเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 2 (P2) เพื่อทำการปรับค่าความต้านทานให้มีค่าลดลง โดยโครงสร้างของสายอากาศจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.9 โดยระยะ S_2 จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

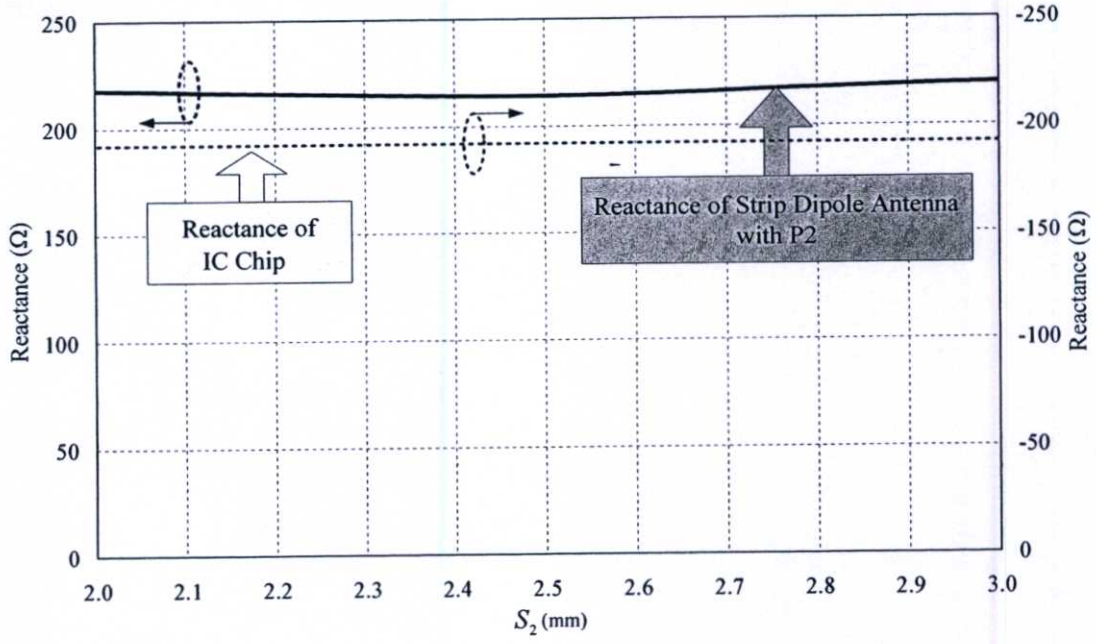


รูปที่ 3.9 สายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 2

การจำลองโดยการใส่ปรสิตเส้นที่ 2 เพิ่มเข้าไปแล้วทำการการเปลี่ยนแปลงระยะ S_2 จากรูปที่ 3.10 (ก) แสดงให้เห็นผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกับระยะ S_2 ที่เปลี่ยนจะพบว่าที่ระยะ S_2 ลดลงต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 35.5 โอห์ม และเมื่อพิจารณาค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ข) จะพบว่าที่ระยะ S_2 จะให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ที่ใกล้เคียงกับค่าสังยุคของชิปวงจรรวมมากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ j214.2 โอห์ม



(ก) ค่าความต้านทาน

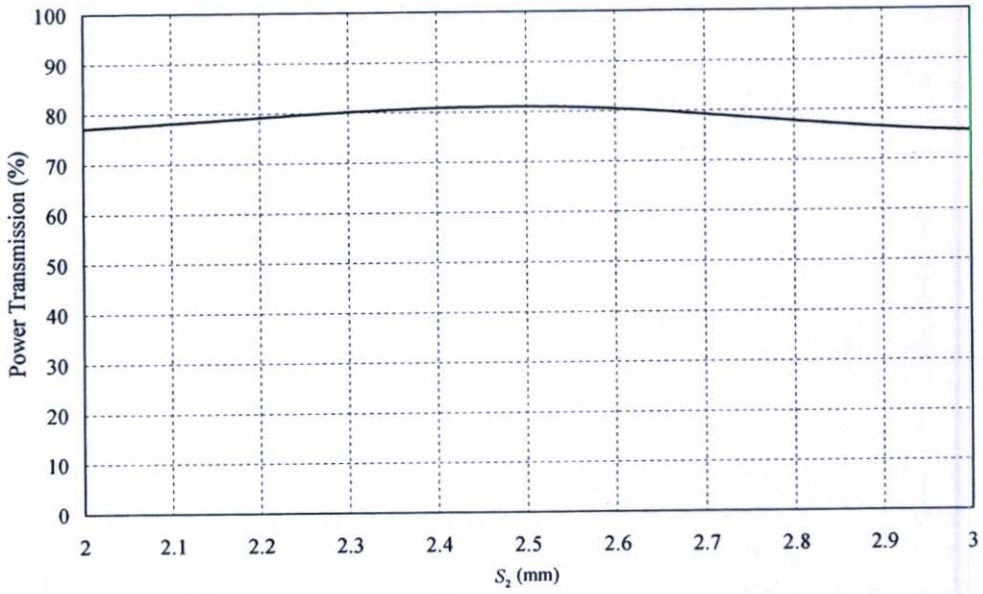


(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 3.10 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 2 เมื่อความกว้างระยะ S_2 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

จากกราฟที่ 3.10 นำมาคำนวณเพื่อให้เห็นความชัดเจนในการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการโดยผ่านทางกราฟค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศมีการเปลี่ยนแปลงระยะ S_2 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ระยะ S_2 มีค่าเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร

สายอากาศจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงานสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 81.1% ดังนั้น พารามิเตอร์ S_2 จึงถูกเลือกที่ 2.5 มิลลิเมตร



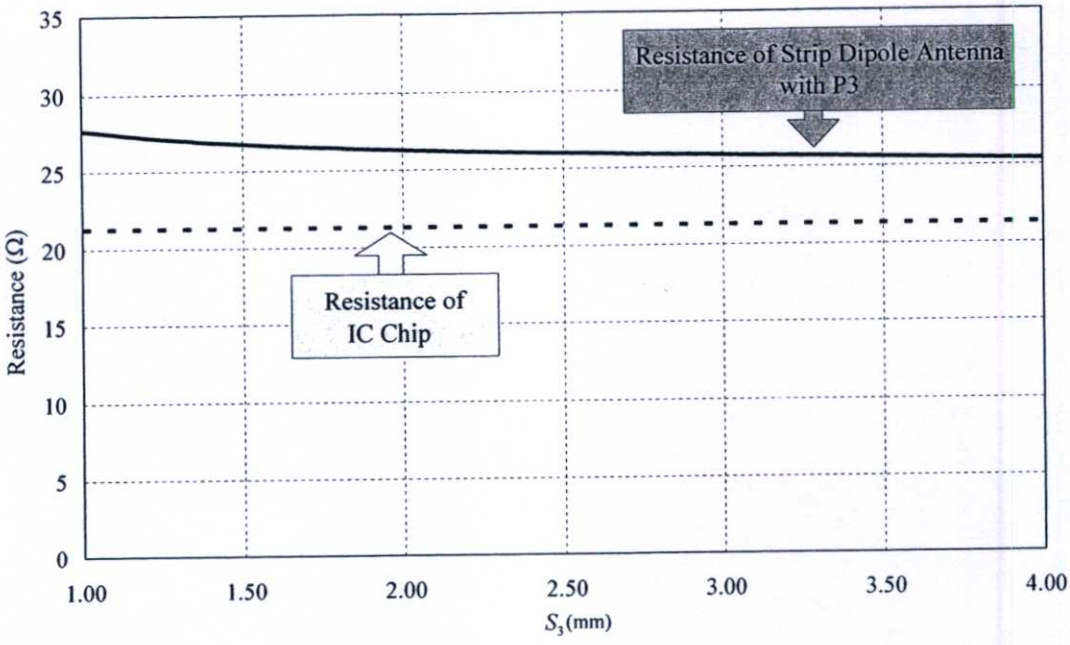
รูปที่ 3.11 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 2 เมื่อความกว้างระยะ S_2 มีการเปลี่ยนแปลงที่ค่าความถี่กลาง 922.5 MHz

จากการเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 2 เข้าไปนั้นจะพบว่าจะสามารถทำให้ควบคุมค่าความต้านทานให้มีค่าที่ลดลงได้ซึ่งในตอนนี้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 35.5+j214.2 โอห์ม และมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 81.1% ดังนั้นจะเห็นได้ว่าพารามิเตอร์ l_d จะใช้ในการปรับค่ารีแอ็กแตนซ์และพารามิเตอร์ S_2 จะใช้ในการปรับค่าความต้านทานของสายอากาศ

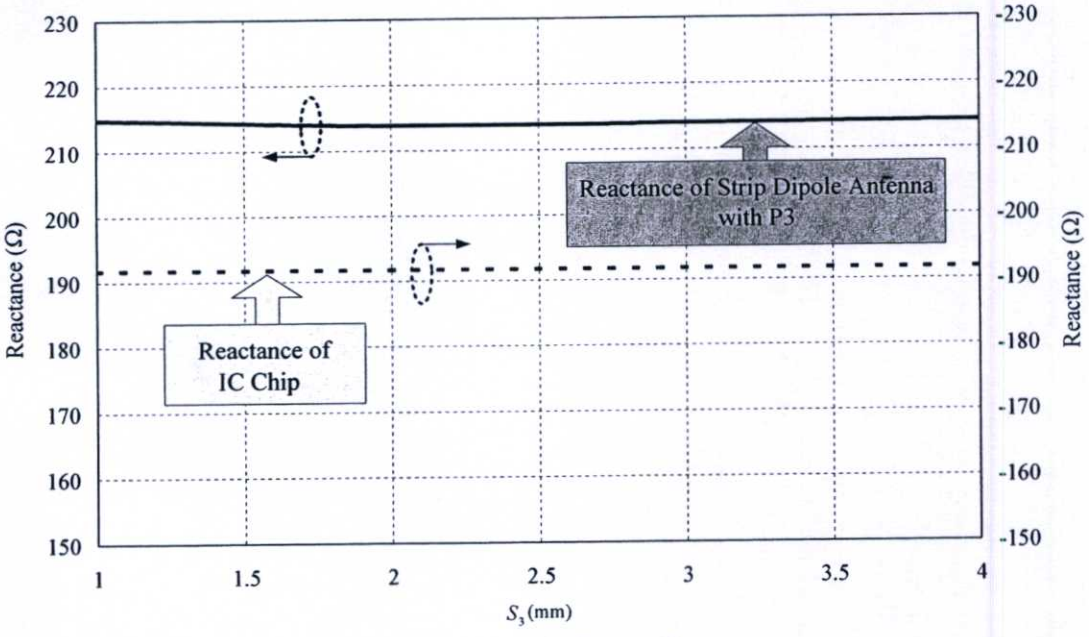
3.6.3 การเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 3 และศึกษาผลของพารามิเตอร์ S_3

เนื่องจากจะเห็นได้ว่าการเพิ่มเส้นปรสิตเข้าไปในโครงสร้างของสายอากาศจะทำให้สามารถควบคุมค่าความต้านทานของสายอากาศได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในส่วนต่อมาจะทำการเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 3 (P3) เข้าไปเพื่อปรับค่าความต้านทานของสายอากาศแท็กให้มีค่าที่เข้าใกล้กับค่าความต้านทานของชิปวงจรรวมให้มากที่สุด

จากรูปที่ 3.12 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศจะพบว่าการเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 3 ทำให้สามารถลดค่าความต้านทานของสายอากาศลงได้โดยเฉลี่ยประมาณ 9 โอห์ม และส่งผลกระทบที่ไม่มากนักกับค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศจากการเพิ่มเส้นปรสิตเส้นที่ 3 เข้าไปในโครงสร้าง โดยจากผลที่ได้จากการจำลองในส่วนนี้จะพบว่าการเพิ่มเส้นปรสิตนั้นจะทำให้สามารถควบคุมค่ารีความต้านทานได้ แต่ทว่าการเพิ่มของเส้นปรสิตนั้นจะส่งผลน้อยลงเมื่อมีการเพิ่มจำนวนเส้นเข้าไป

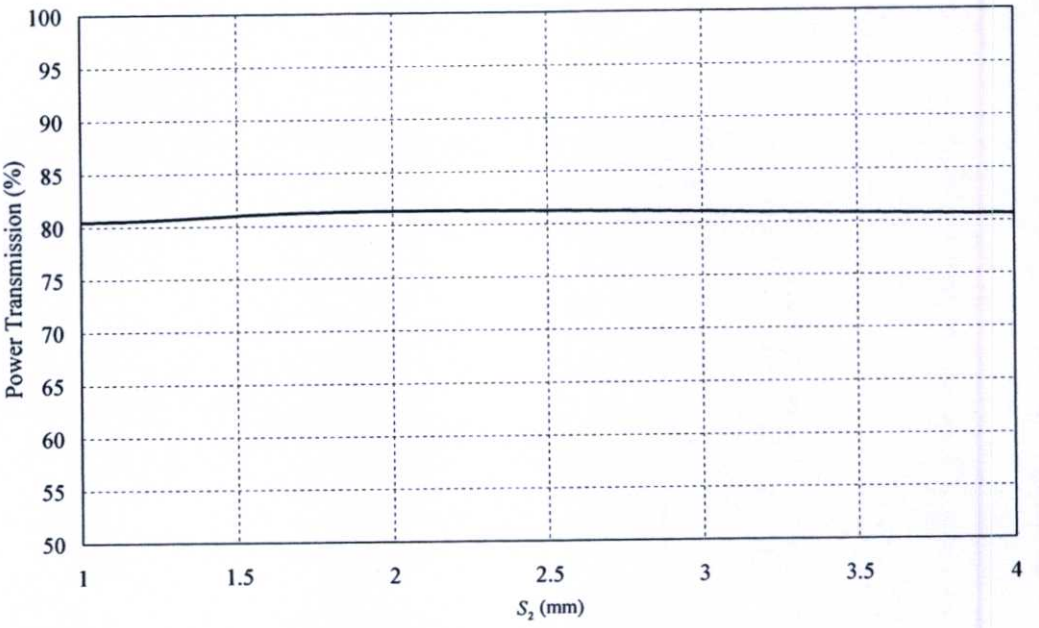


(ก) ค่าความต้านทาน



(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 3.12 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 3 เมื่อความกว้างระยะ S_3 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

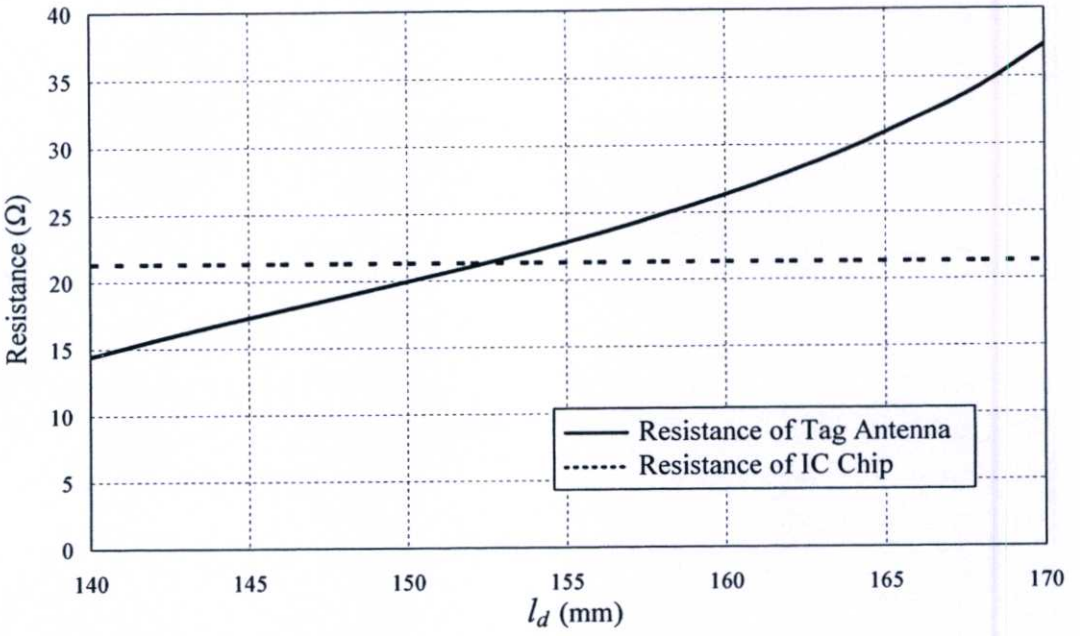


รูปที่ 3.13 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 3 เมื่อความกว้างระยะ S_3 มีการเปลี่ยนแปลงที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

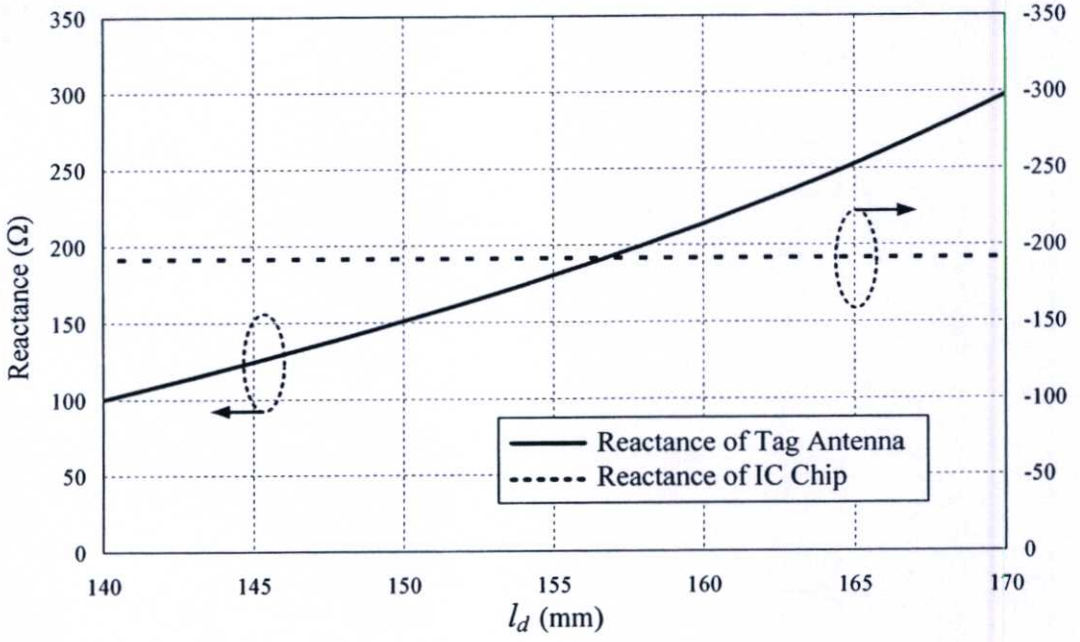
ในรูปที่ 3.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตเส้นที่ 3 และมีการเปลี่ยนระยะ S_3 จะพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่างจากผลในรูปที่ 3.11 มากนัก อันเนื่องมาจากการที่แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอ็กแตนซ์ที่มีมากนั้น ซึ่งโดยมากการเปลี่ยนแปลงจะเกิด ค่าความต้านทานซึ่งจะส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อค่าค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศ โดยเมื่อพิจารณาถึงระยะ S_3 ที่ให้ผลที่ดีที่สุดจะได้ระยะ $S_3 = 2$ มิลลิเมตร

3.7 การปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยพารามิเตอร์ l_d

เมื่อได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับการแมตช์สังยุคของอิมพีแดนซ์ของชิปแล้วจากการใส่เส้นปรสิตเพิ่ม ในขั้นตอนต่อไปจึงทำการปรับความยาวของสายอากาศ l_d อีกครั้งเพื่อปรับค่ารีแอ็กซ์แตนซ์ของสายอากาศในขั้นตอนสุดท้าย



(ก) ค่าความต้านทาน

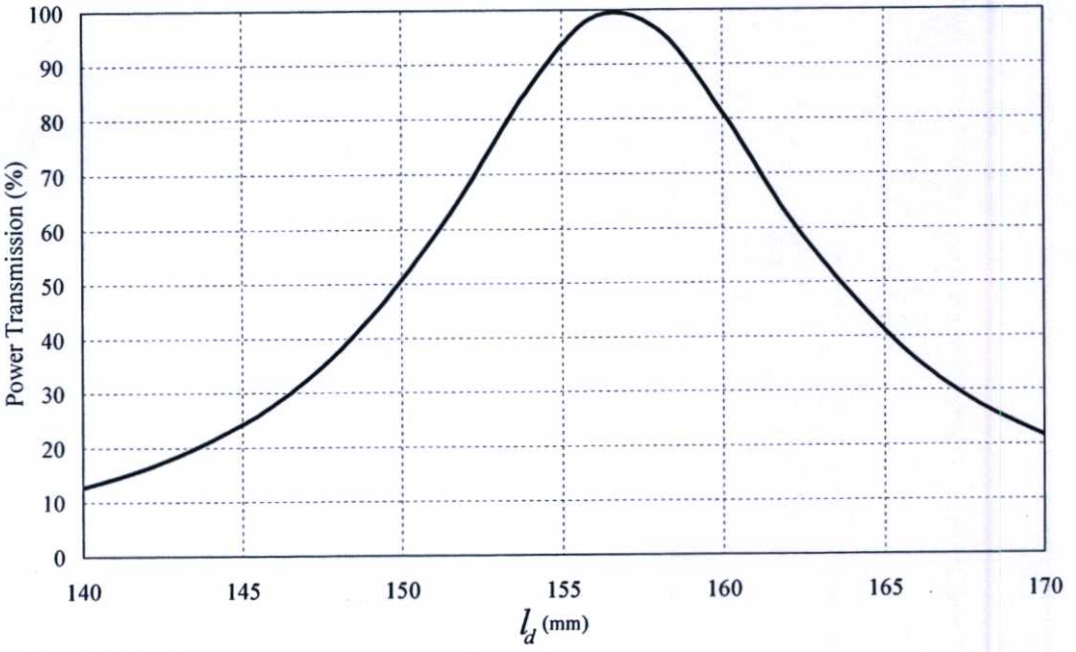


(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 3.14 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d (ครั้งที่ 2) ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

จากรูปที่ 3.14 (ก) แสดงผลการจำลองค่าความต้านทานของสายอากาศเมื่อความยาว l_d มีการเปลี่ยนแปลง จะพบว่าเมื่อความยาวของสายอากาศยาวเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานจะมีค่ามากขึ้น และจากรูปที่ 3.14 (ข) แสดงผลการจำลองค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศ เมื่อสายอากาศ

เปลี่ยนแปลงไปจะพบว่า เมื่อความยาวของสายอากาศมีความยาวที่เพิ่มขึ้นค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย โดยจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศดังในกราฟที่ 3.14 จะทำให้สามารถเลือกความยาวของสายอากาศที่มีความเหมาะสมคือ l_d = 156 มิลลิเมตร จะมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศที่เท่ากับ 23.43+j186.7 โอห์ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่สังยุคแมตช์กับชิปมากที่สุดซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศภายหลังจากการเปลี่ยนค่าความยาว l_d จะแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าที่ค่าความยาว l_d= 156 มิลลิเมตร สายอากาศจะสามารถส่งผ่านพลังงานไปยังชิปวงจรรวมได้มากที่สุด โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 98.56 % ที่ค่าความถี่กลาง 922.5 MHzโดยการผลของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตทั้งหมดจะถูกแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.15 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d (ครั้งที่ 2) ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

ตารางที่ 3.2 สรุปการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของสายอากาศและคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่มีความเหมาะสมที่ได้ทำการจำลอง

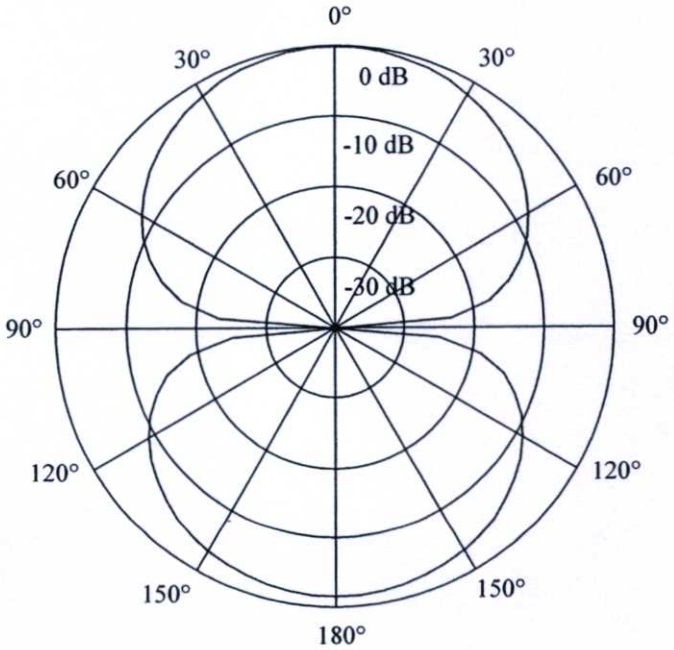
สายอากาศ	พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)		ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงาน
			ความต้านทาน	รีแอ็กแตนซ์	
สตริปไดโพล	l_d	160	138.7	j149.86	43.2
ไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 1	S_1	2.5	80.2	j217.7	62.2
ไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 2	S_2	2.5	35.5	j214.2	81.1
ไดโพลกับเส้นปรสิตที่ 3	S_3	2	26.29	j213.8	81.3
	l_d(ครั้งที่2)	156	23.43	j186.7	98.56

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเพิ่มจำนวนของเส้นปรสิตสามารถใช้ในการปรับค่าความต้านทานของสายอากาศได้ โดยการเพิ่มจำนวนเส้นปรสิตแก่สายอากาศจะเป็นการลดค่าความต้านทานของสายอากาศ แต่แนวโน้มของผลกระทบดังกล่าวจะส่งผลที่น้อยลงเมื่อเพิ่มจำนวนไปมากขึ้นเรื่อยๆ โดยจากตารางจะพบว่าการเพิ่มเส้นปรสิตเส้นสุดท้ายสามารถเพิ่มค่ากำลังงานการส่งผ่านได้เพียง 0.2 % แต่ยังสามารถลดค่าความต้านทานของสายอากาศได้ประมาณ 9.21 โอห์ม ส่วนจากการศึกษาถึงค่าความยาวของสายอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงจะพบว่าค่าความยาวของสายอากาศจะส่งผลกระทบอย่างมากกับค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศ ดังนั้นในส่วนสุดท้ายหลังจากที่ได้ค่าความต้านทานเป็นที่น่าพอใจแล้ว ระยะ l_d ของสายอากาศจะถูกปรับระยะอีกครั้งเพื่อให้สายอากาศสามารถส่งผ่านกำลังงานไปยังชิปได้สูงที่สุด ในตารางที่ 3.3 แสดงผลสรุปค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตที่เหมาะสมที่ได้ทำการจำลอง

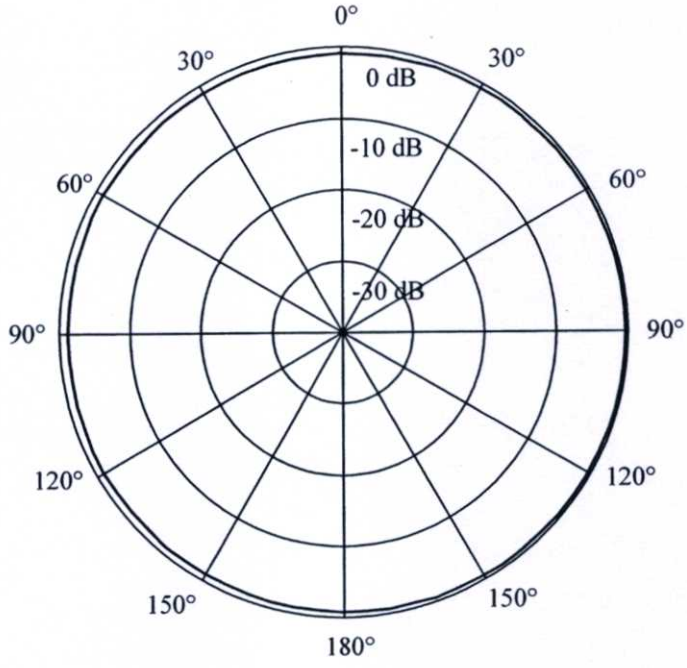
ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสมที่ได้ทำการจำลอง

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)
w	15
w_s	4
w_d	1
l_d	156
l_s	3
l_{dd}	160
S	2
S_1	25
S_2	2
h	0.017

3.8 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) หรือระนาบ YZ (YZ-plane)



(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบ XZ (XZ-plane)

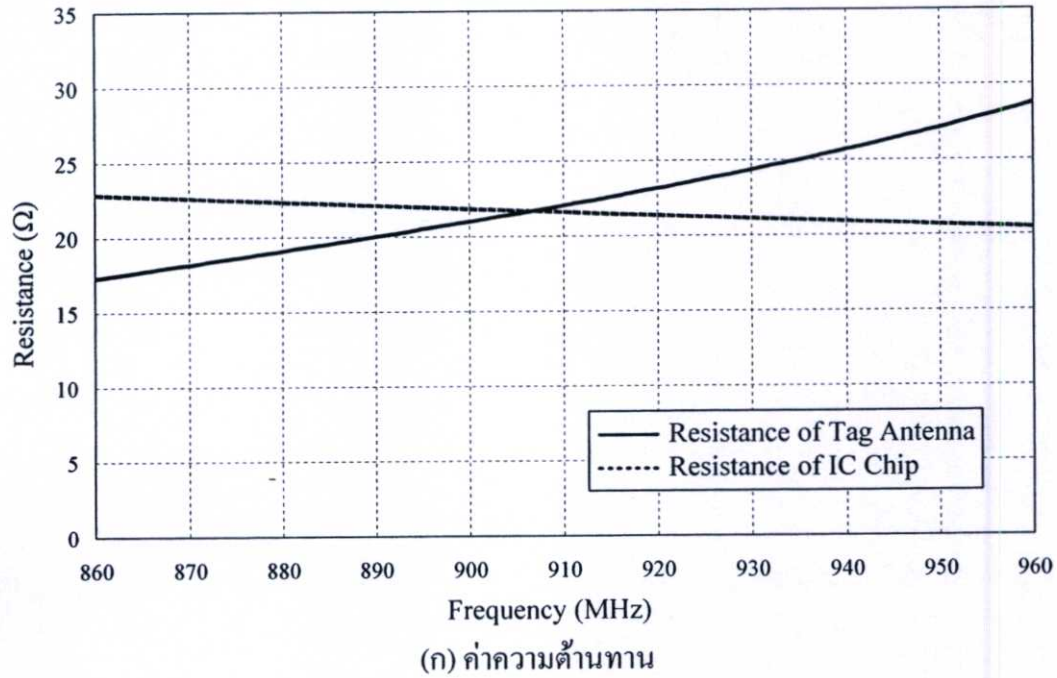
รูปที่ 3.16 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต

ในรูปที่ 3.16 แสดงผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จะเป็นแบบรูปการแพร่กระจ่ายคลื่นแบบรอบตัว โดยเมื่อพิจารณาในระนาบสนามไฟฟ้าหรือระนาบ YZ (YZ-plane) จะพบว่ากำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-power beamwidth) จะมีค่าเท่ากับ 76.7 องศา ส่วนค่าความกว้างลำคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็ก หรือระนาบ XZ (XZ-plane) จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจะสมมาตรในแนวแกน x

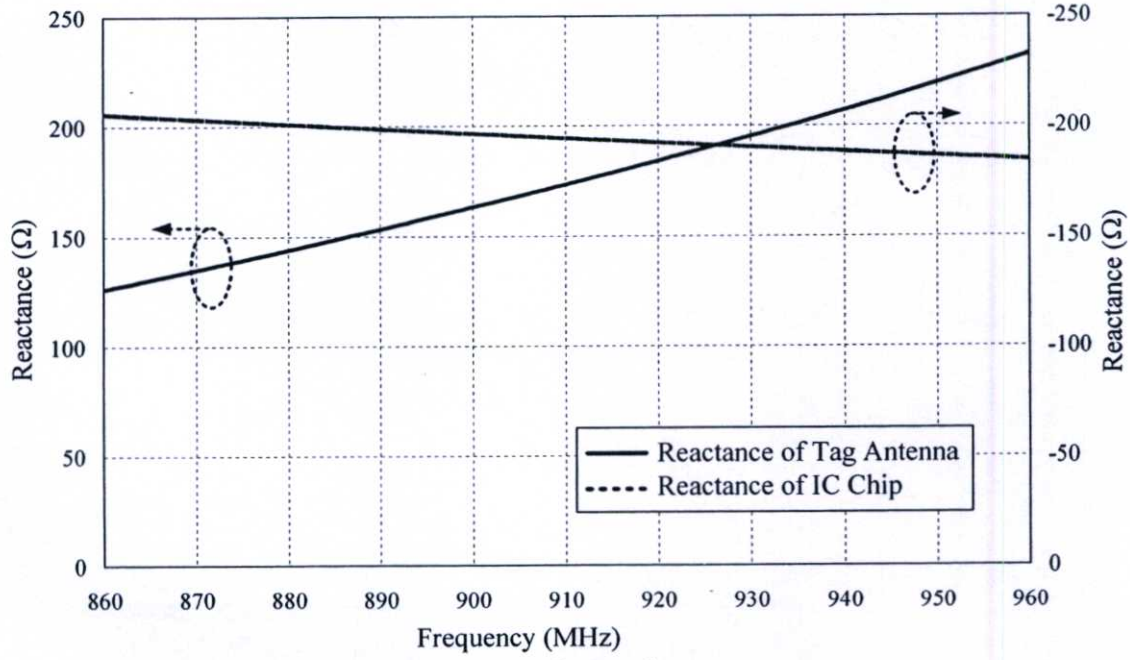
3.9 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเมื่อความถี่มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 3.17 (ก) จากรูปจะพบว่าสายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานอยู่ระหว่าง 17.3 โอห์ม ถึง 28.7 โอห์ม ในย่านความถี่ระหว่าง 860-960 MHz ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานดังกล่าวมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 22.9-20.5 โอห์ม ส่วนในรูปที่ 3.17 (ข) แสดงผลของค่ารีแอ็กแตนซ์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ โดยค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศมีแนวโน้มที่สูงขึ้นไปตามค่าความถี่ที่

เพิ่มขึ้นโดยมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 232.3-125.9 โอห์ม เมื่อพิจารณาที่กลางความถี่ที่ใช้งาน ที่ 922.5 MHz สายอากาศจะมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 23.43+j186.7 โอห์ม



(ก) ค่าความต้านทาน

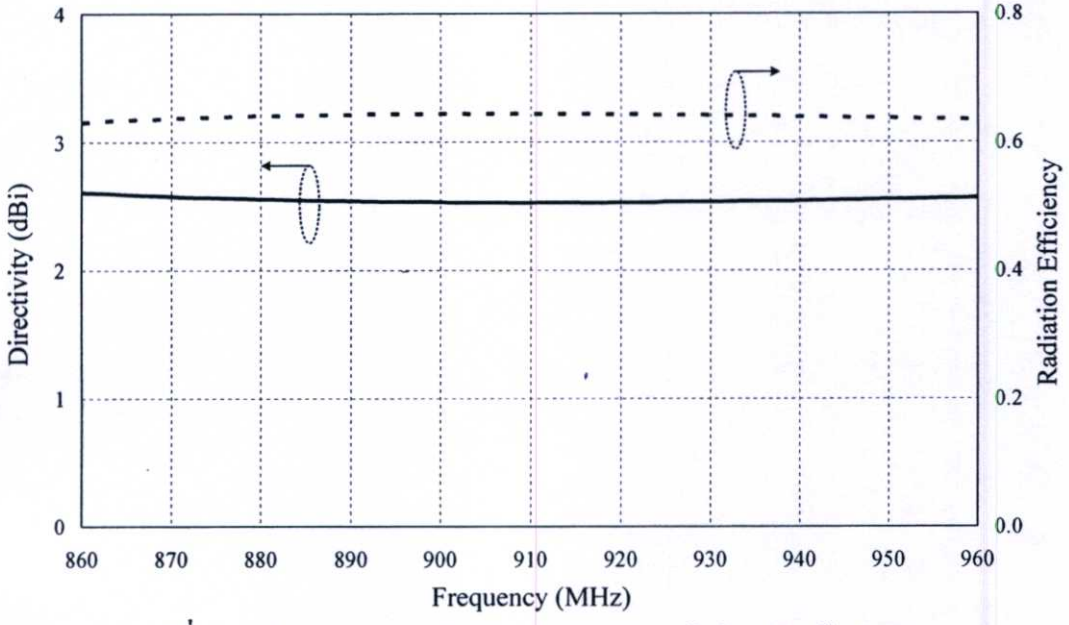


(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 3.17 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต

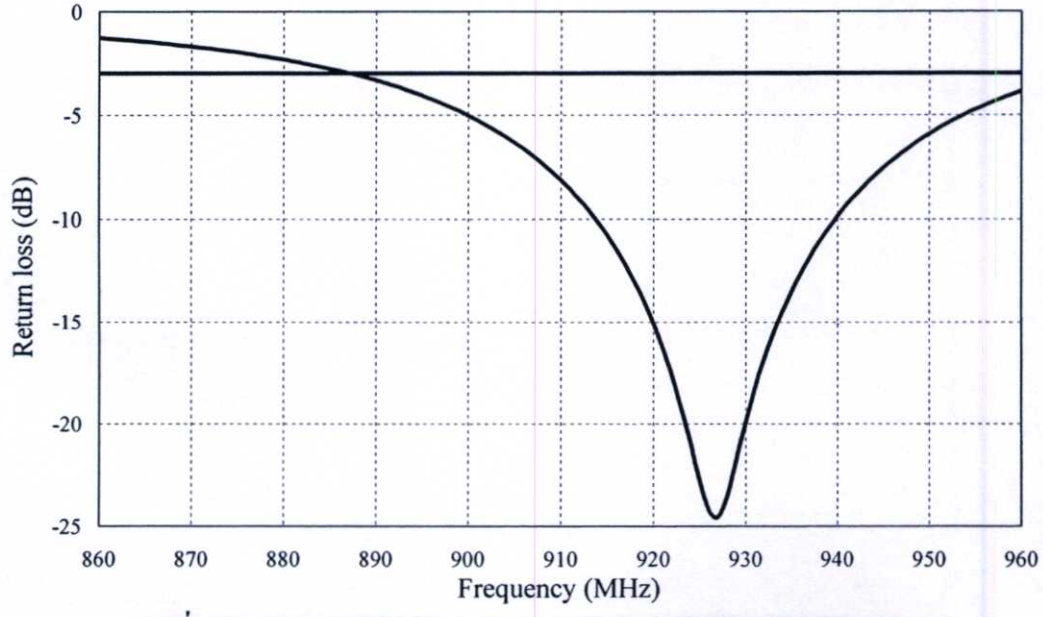
3.10 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าประสิทธิภาพความเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต

ในรูปที่ 3.18 แสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าประสิทธิภาพความเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศ ซึ่งจะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงความถี่ 920-925 MHz โดยที่ค่าความถี่กลาง 922.5 MHz ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับ 2.53 dBi และค่าประสิทธิภาพความเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศจะมีค่าเท่ากับ 0.64



รูปที่ 3.18 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต

3.11 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต



รูปที่ 3.19 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต

ในรูปที่ 3.19 แสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศสตริปไดโพลกับเส้นปรสิตโดยพิจารณาที่ค่า ช่วงกว้างความถี่ที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-power bandwidth: ค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -3 dB) ของสายอากาศ โดยจะพบว่าสามารถครอบคุมย่านความถี่ 887-960 MHz ซึ่งสามารถครอบคลุมย่านความถี่ที่เป็นไปตามมาตรฐานภายในประเทศไทยคือ 920-925 MHz

3.12 บทสรุป

ในบทนี้อธิบายถึงหลักการออกแบบสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิต โดยเริ่มต้นจากการศึกษาถึงสายอากาศแท็กชนิดสตริปไดโพลแบบพื้นฐานและเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านโครงสร้างในการติดชิปวงจรรวม และเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ที่ถูกกำหนดโดยชิปวงจรรวมทำให้ต้องทำการศึกษาถึงโครงสร้างความยาวเบื้องต้นของสายอากาศ โดยในเบื้องต้นพบว่าความยาวของสายอากาศจะสามารถปรับค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศได้ โดยค่าความยาวของสายอากาศจะแปรผันไปตามค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศ ในส่วนต่อมาเป็นการศึกษาถึงการปรับค่าความต้านทานของสายอากาศ โดยการใช้เส้นปรสิตในการควบคุมค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้เป็นไปตามที่ต้องการ และในส่วนสุดท้ายเป็นผลการจำลองคุณลักษณะของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต

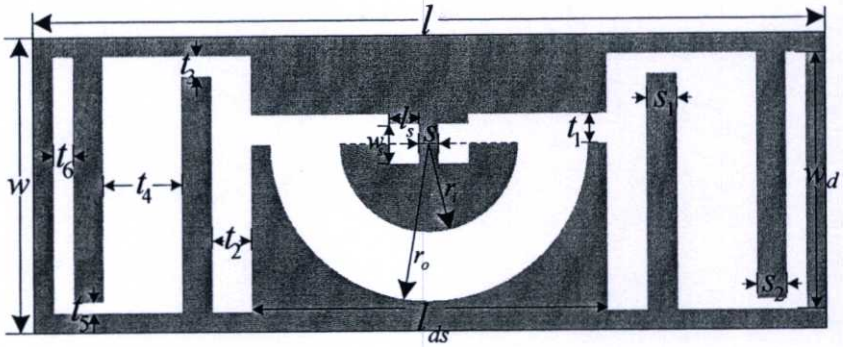
บทที่ 4
การจำลองสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

4.1 บทนำ

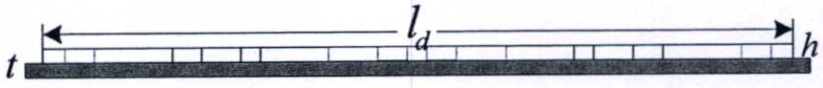
เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กที่สร้างบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 ที่มีลักษณะอ่อนบางและสามารถโค้งงอได้ โดยมีความหนาเท่ากับ 0.15 มิลลิเมตร เพื่อให้สายกาศแท็กสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับวัสดุที่มีโครงสร้างที่โค้งงอได้ ซึ่งจะมีการศึกษาถึงโครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศที่จะนำมาออกแบบ และโครงสร้างของสายอากาศที่มีความเหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้กับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL โดยในบทนี้จะมุ่งเน้นไปทางด้านการลดขนาดของสายอากาศระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุโดยกำหนดขอบเขตขนาดของสายอากาศเบื้องต้นให้มีขนาดไม่เกิน $0.10\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$ ซึ่งเป็นค่าความกว้างและความยาวโดยเฉลี่ยทั่วไปของสายอากาศแท็กขนาดเล็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง โดยให้สายอากาศที่ออกแบบมีขนาดที่ถูกจำกัดอยู่ภายใต้ขนาดเริ่มต้นที่ถูกกำหนดไว้อีกทั้งยังคงให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานกับชิปรุ่น NXP G2XL ซึ่งจะพิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศแท็กไปยังชิปวงจรรวม โดยวัตถุประสงค์ในเนื้อหาของบทนี้คือการให้ได้มาซึ่งสายอากาศที่มีขนาดจำกัดภายใต้ข้อกำหนดเบื้องต้นแต่ยังสามารถมีสมรรถนะในการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยเนื้อหาในบทที่ 4 จะประกอบไปด้วย การศึกษาผลกระทบของโครงสร้างของสายอากาศ และคุณลักษณะที่ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST @ Microwave Studio

4.2 โครงสร้างของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

โครงสร้างของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อนจะถูกกำหนดขนาดในเบื้องต้นให้มีขนาดไม่เกิน $0.10\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$ โดยจะประกอบไปด้วยแผ่นที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นเป็นทองแดงสองด้านที่เหมือนกัน โดยมีลักษณะขดวกวนเพื่อเป็นการเพิ่มค่าความยาวทางไฟฟ้า ส่วนของฐานรองชิปวงจรรวม และส่วนโครงสร้างที่ทำหน้าที่ในการลัดวงจรเพื่อปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยสายอากาศจะถูกจำลองและสร้างบนวัสดุชนิด FR-4 ชนิดบางซึ่งมีความหนา 0.15 มิลลิเมตร ($\varepsilon_r = 4.3$, $\tan\delta = 0.025$) เพื่อประโยชน์ในการนำสายอากาศแท็กดังกล่าวนี้ไปพัฒนาในการใช้งานจริงต่อไป โดยโครงสร้างที่สมบูรณ์แบบของสายอากาศนั้นจะแสดงในรูปที่ 4.1



(ก) มุมมองด้านหน้า



(ข) มุมมองด้านข้าง

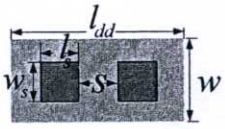
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กแผ่นพิมพ์อ่อน

4.3 การศึกษาถึงโครงสร้างที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

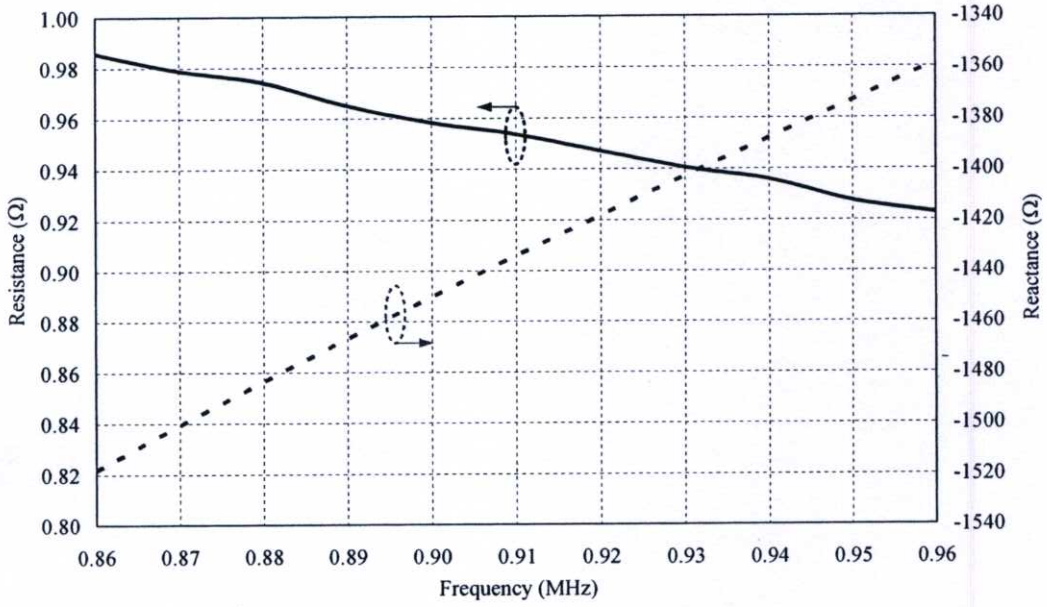
เนื่องจากในบทที่ 3 ในส่วนของการออกแบบสายอากาศเริ่มต้นจะเห็นได้ว่าการที่มีโครงสร้างที่ถูกจำกัดโดยสร้างโครงสร้างของสายอากาศขึ้นมาเพื่อเป็นฐานรองชิปวงจรรวม ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการสร้างสายอากาศในเบื้องต้น และทั้งยังต้องออกแบบให้อิมพีแดนซ์ ของสายอากาศแท็กมีความเหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมโดยสายอากาศแท็กจะต้องมีค่าความต้านทานต่ำและมีค่ารีแอ็กแตนซ์สูงเป็นไปตามความต้องการให้เกิดการแมตช์สังยุคกับชิปวงจรรวมนั้น ทำให้โครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศ จะต้องศึกษาโดยผ่านทางการจำลองโดยโปรแกรมก่อนในเบื้องต้น และทำการศึกษาถึงผลกระทบของโครงสร้างดังกล่าว

4.3.1 การศึกษาผลของโครงสร้างฐานรองของชิปวงจรรวมและความยาว l_d และความกว้าง w_d ของสายอากาศ

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาถึงโครงสร้างที่ถูกจำกัดโดยใช้เป็นฐานรองชิปวงจรรวมเพื่อดูแนวโน้มการจำลองสายอากาศให้มีความเหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวม โดยกำหนดเบื้องต้นคือให้ฐานรองแต่ละด้านกว้าง (w_s) เท่ากับ 4 มิลลิเมตร และยาว (l_s) เท่ากับ 3 มิลลิเมตร ให้มีความเหมาะสมกับโครงสร้างของชิปวงจรรวม เช่นเดียวกับโครงสร้างฐานรองชิปวงจรรวมของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตในบทที่ 3 โดยกำหนดให้ฐานรองชิปดังกล่าววางอยู่บนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 หนา 0.15 มิลลิเมตร ที่มีความกว้าง w เท่ากับ 6 มิลลิเมตร และยาว l_{dd} เท่ากับ 8 มิลลิเมตร และมีระยะห่างระหว่างฐานรองชิปวงจรรวม (s) เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2

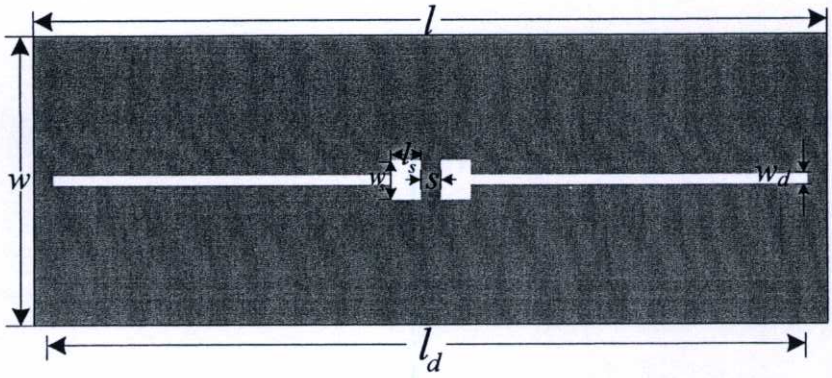


รูปที่ 4.2 ส่วนโครงสร้างฐานรองของชิปวงจรรวม



รูปที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์โครงสร้างฐานรองของชิปวงจรรวม

จากผลของการจำลองโครงสร้างฐานรองชิปวงจรรวมที่เป็นโครงสร้างที่ถูกกำหนดเบื้องต้นให้มีความเหมาะสมกับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL นั้นจากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าโครงสร้างที่ถูกกำหนดเริ่มต้นของสายอากาศนั้นจะให้ค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ และถ้าหากเพิ่มความยาวของโครงสร้างของสายอากาศสตริปไดโพลเข้าไปก็จะให้ผลที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งความยาวเริ่มต้นในส่วนนี้จะอ้างอิงมาจากขนาดความยาวจากฐานรองชิปวงจรรวม แล้วทำการเพิ่มความยาว l_d ไปจนถึงค่าที่มากที่สุดที่มีความเหมาะสมภายใต้ขอบเขตของโครงสร้างที่เราต้องการ $0.25\,\lambda_0$ โดยกำหนดให้สายอากาศนั้นมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.1

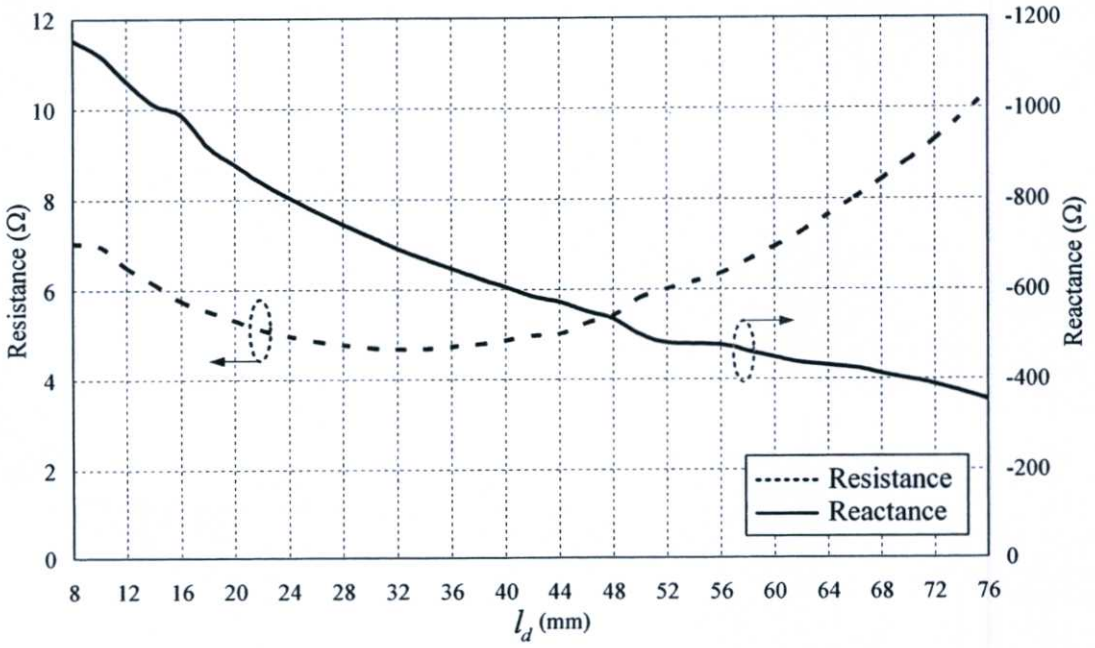


รูปที่ 4.4 สายอากาศสตริปไดโพลบนวัสดุฐานรองชนิดอ่อนเริ่มต้น

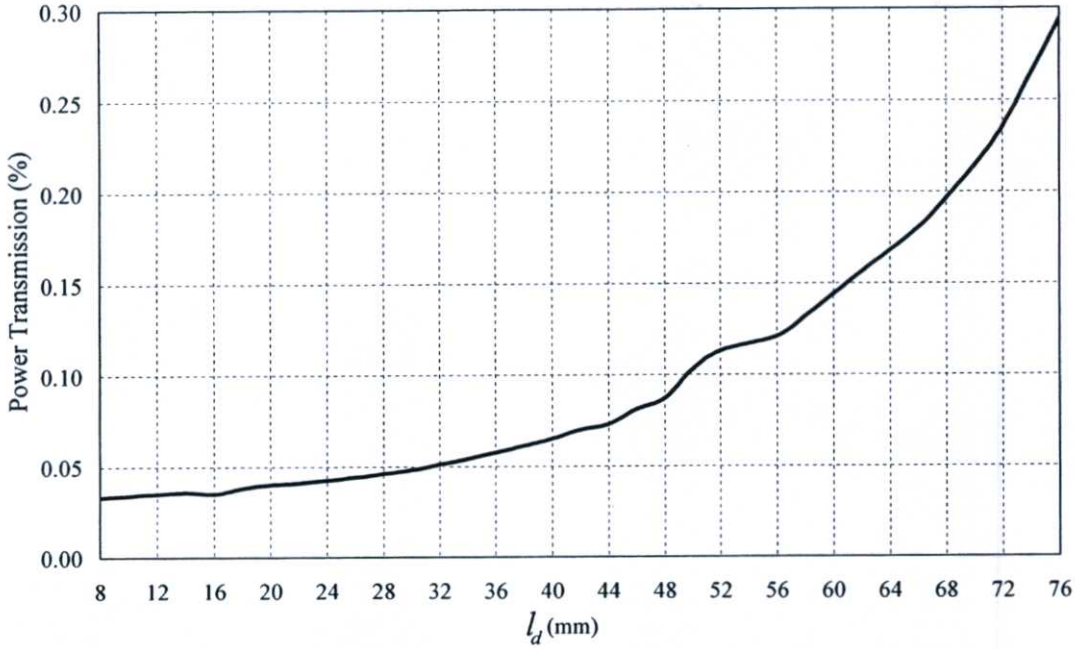
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์เริ่มต้นสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อน

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_0)
w	3	0.092
w_s	4	0.012
w_d	1	0.003
l	80	0.246
l_s	3	0.009
l_d	8	0.025
h	0.017	0.00005
t	0.15	0.00046
s	2	0.006

จากค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในตารางที่ 4.1 เมื่อ λ_0 คือ ค่าความยาวคลื่นในช่องว่างอิสระ ทำการจำลองโดยการเปลี่ยนแปลงระยะความยาว l_d เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่สุดจากการเปลี่ยนความยาวดังกล่าวโดยค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้นั้นแสดงในรูปที่ 4.5



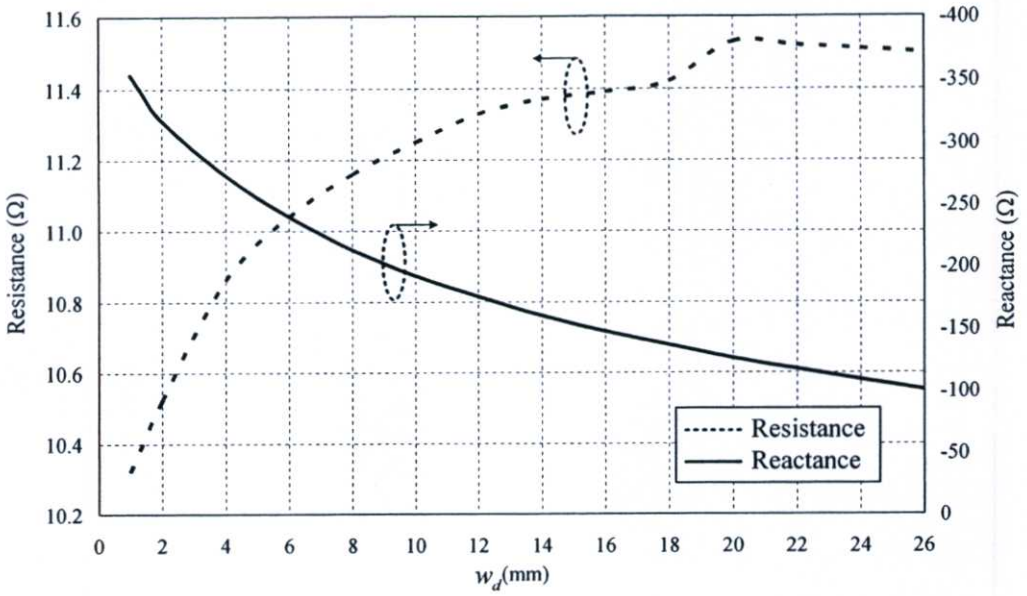
รูปที่ 4.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้นเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz



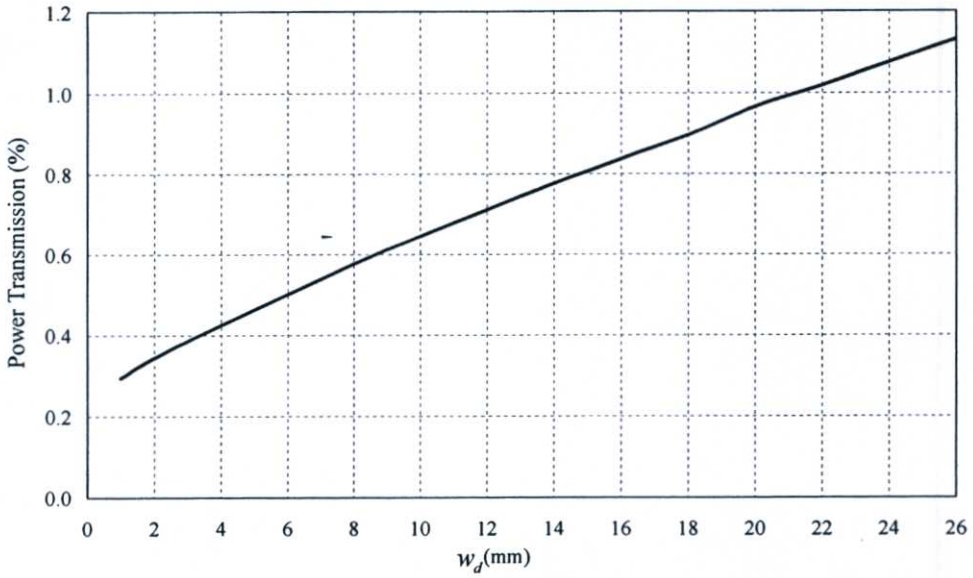
รูปที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้น เมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

จากรูปที่ 4.5 (ก) จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานของสายอากาศจะแปรผันไปตามค่าความยาว l_d ของสายอากาศ โดยที่ความยาวมากที่สุดภายใต้โครงสร้างที่กำหนดที่ l_d เท่ากับ 26 มิลลิเมตร จะให้ค่าความต้านทานที่มากที่สุด เช่นเดียวกันในรูปที่ 4.5 (ข) แสดงให้เห็นค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเมื่อมีการเปลี่ยนความยาว l_d ที่เพิ่มขึ้นโดยจะพบว่าที่ค่าความยาวมากที่สุด l_d เท่ากับ 26 มิลลิเมตร ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศจะให้ค่ามากที่สุด แต่ก็ยังไม่มีความเหมาะสมกับการนำโครงสร้างดังกล่าวนี้มาใช้กับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL โดยความไม่เหมาะสมที่เกิดขึ้นจะแสดงโดยกราฟในรูปที่ 4.6 ซึ่งแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อความยาวของสายอากาศเพิ่มขึ้น สายอากาศจะให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานที่มากขึ้น แต่ภายใต้ขอบเขตของโครงสร้างที่ทำการศึกษานั้นความยาว l_d ที่มากที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 26 มิลลิเมตร ดังนั้นความยาวดังกล่าวนี้จึงถูกเลือก ในขณะนี้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ดีที่สุดของโครงสร้างสายอากาศในรูปที่ 4.4 จะมีค่าเท่ากับ 10.53-j353.3 โอห์ม และมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 0.29%

จากนั้นทำการศึกษาถึงการขยายความกว้างของเส้นสตริปไดโพล โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ w_d และทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ ภายใต้โครงสร้างที่กำหนด โดยค่าความกว้าง w_d จะถูกเปลี่ยนตั้งแต่ค่า w_d เท่ากับ 1 มิลลิเมตร จนถึง w_d เท่ากับ 26 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดของความกว้างภายใต้ขอบเขต $0.10\,\lambda_0$ ที่กำหนดในเบื้องต้น



รูปที่ 4.7 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้นเมื่อมีการเปลี่ยนความกว้าง w_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz



รูปที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้นเมื่อมีการเปลี่ยนความกว้าง w_d ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz

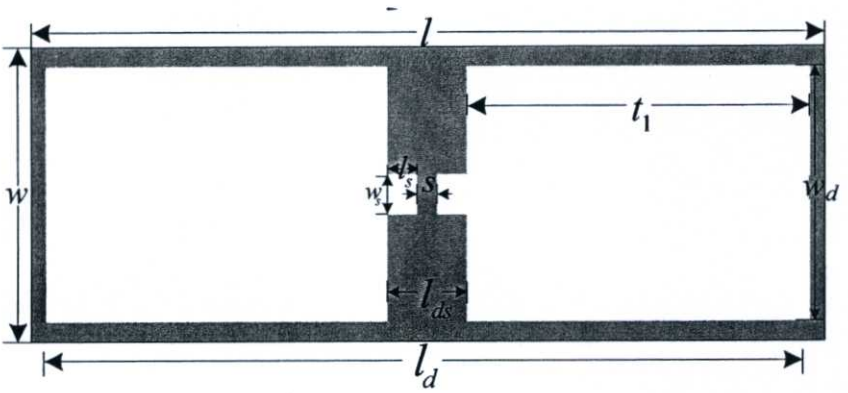
จากกราฟที่ 4.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าถึงแม้ว่าขนาดของสายอากาศจะขยายถึงความกว้างให้มากที่สุด w_d เท่ากับ 26 มิลลิเมตร ภายใต้โครงสร้างที่กำหนดแล้วนั้น สายอากาศดังกล่าวก็ยังมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่เหมาะสมกับชิปวงจรรวมที่นำมาออกแบบ โดยจะสังเกตความเหมาะสมของสายอากาศกับชิปวงจรวมได้จากกราฟค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานในรูปที่ 4.8 นี้ โดยจะพบว่าการเพิ่มความกว้าง w_d นั้นจะสามารถทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานที่มากขึ้น ดังนั้นค่าความกว้างที่มากที่สุดที่ w_d เท่ากับ 26 มิลลิเมตร จะมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 1.13% จึงถูกเลือกเพื่อนำมาเป็นโครงสร้างเพื่อ

ทำการศึกษาหาโครงสร้างที่เหมาะสมในขั้นต่อไป โดยในส่วนนี้จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์กำลังงานการส่งผ่านยังคงมีค่าที่ต่ำอยู่ เนื่องมาจากค่าความต้านทาน และค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศยังคงมีค่าที่ต่ำ และยังไม่ใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความเหมาะสมกับชิปวงจรรวม

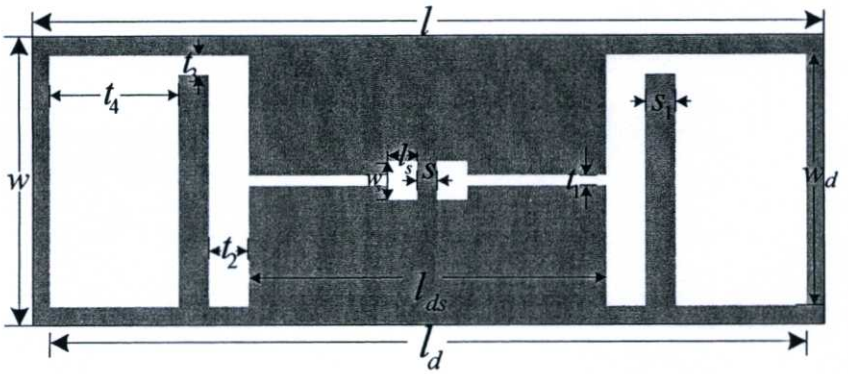
4.3.2 การเพิ่มความยาวทางไฟฟ้าและการลัดวงจรของสายอากาศ

จากการศึกษาถึงสายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนในตอนต้น จะพบว่าสายอากาศสตริปไดโพลที่ความยาวของเส้นสตริปเท่ากับ 76 มิลลิเมตร และกว้างเท่ากับ 26 มิลลิเมตร นั้นสามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานที่ค่าความถี่กลาง 922.5 MHz เท่ากับ 1.13% ซึ่งจะพบว่าโครงสร้างดังกล่าวยังไม่เหมาะสมกับชิปวงจรรวมเนื่องจากค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศยังมีค่าต่ำ ดังนั้นเพื่อให้ได้สายอากาศที่มีขนาดเป็นไปตามที่ต้องการคือ $0.10\,\lambda_0 \times 0.25\,\lambda_0$ และมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานที่สูงขึ้น ในส่วนนี้จึงทำการศึกษาโครงสร้างในลักษณะของการขดสายอากาศสตริปไดโพลให้วางอยู่ภายในขนาดวัสดุฐานรองที่เราต้องการ โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจะถูกหาผ่านการจำลอง

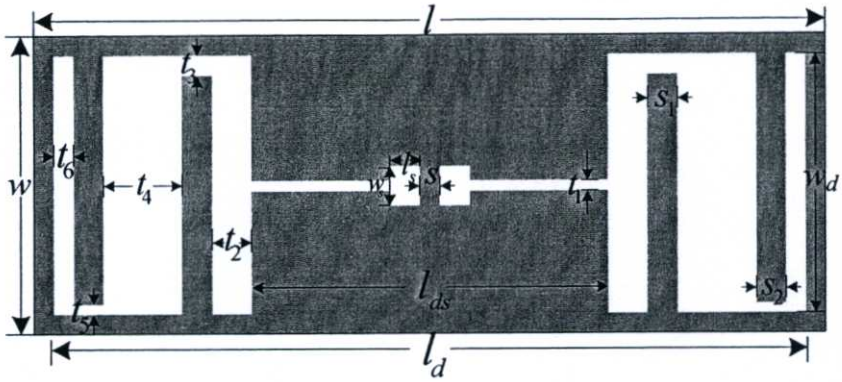
เริ่มต้นจากการศึกษาสตริปไดโพลบนความยาวที่กำหนดไว้ โดยโครงสร้างของสายอากาศและพัฒนาการศึกษาโครงสร้างสายอากาศที่นำมาขดแสดงดังรูปที่ 4.9 และมีค่าพารามิเตอร์แสดงในตารางที่ 4.2



(ก) สายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนขยายความกว้าง



(ข) สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนหนึ่งขด บนแผ่นพิมพ์อ่อนภายใต้ขนาดที่กำหนด



(ค) สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนสองขด บนแผ่นพิมพ์อ่อนภายใต้ขนาดที่กำหนด

รูปที่ 4.9 สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนบนแผ่นพิมพ์อ่อนเริ่มต้นภายใต้โครงสร้างที่กำหนด

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์สายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนภายใต้โครงสร้างที่กำหนด

(ก) สายอากาศสตริปไดโพลบนแผ่นพิมพ์อ่อนบนวัสดุฐานรองขยายความกว้าง w_d

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_0)
w	30	0.092
w_s	4	0.012
w_d	26	0.080
l	80	0.246
l_s	3	0.009
l_d	76	0.234
l_{ds}	8	0.025
h	0.017	0.00005
t	0.15	0.00046
t_1	20	0.062
s	2	0.006

(ข) สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนหนึ่งขด บนแผ่นพิมพ์อ่อน

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_0)
w	30	0.092
w_s	4	0.012
w_d	26	0.080

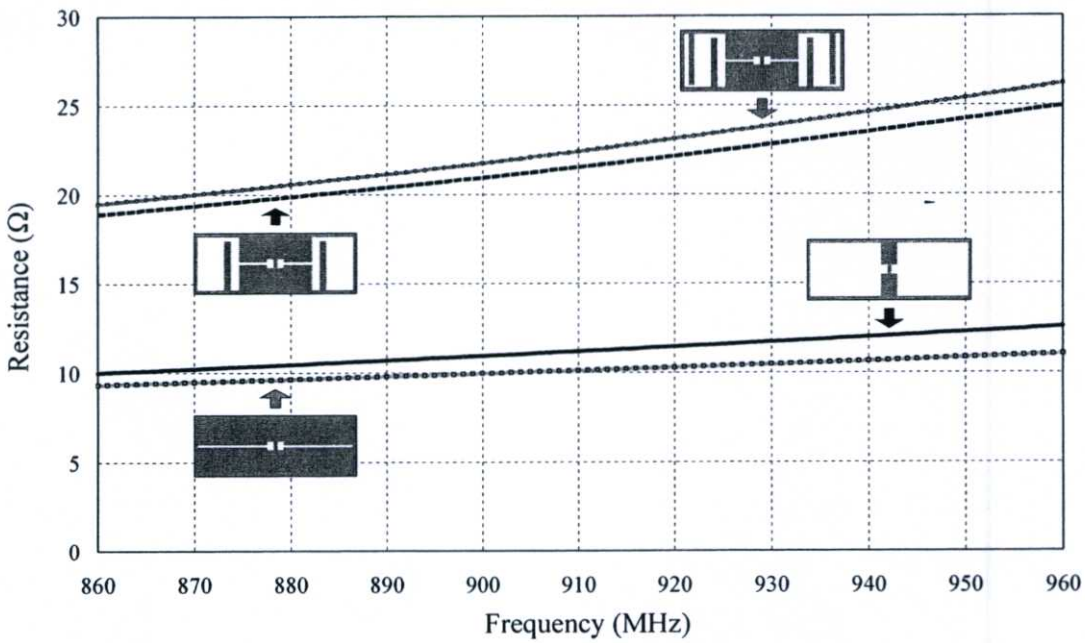
พารามิเตอร์ (ต่อ)	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_0)
l	80	0.246
l_s	3	0.009
l_d	76	0.234
l_{ds}	36	0.11
h	0.017	0.00005
t	0.15	0.00046
t_1	1	0.003
t_2	4	0.012
t_3	2	0.006
t_4	13	0.04
s	2	0.006
s_1	3	0.092

(ค) สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนสองขด บนแผ่นพิมพ์อ่อน

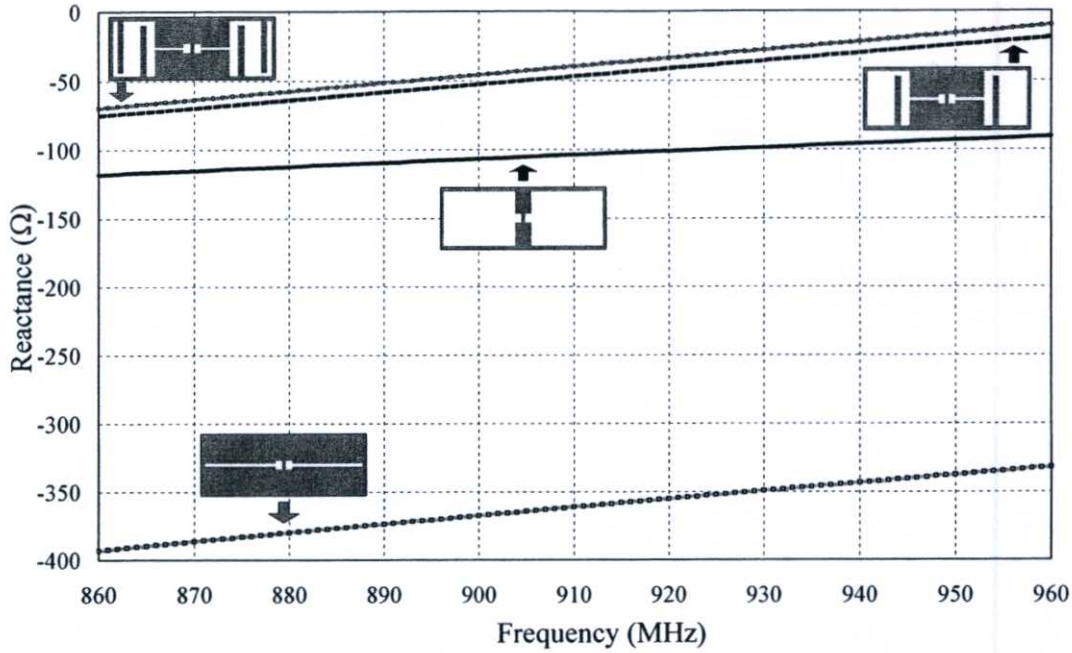
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_0)
w	30	0.092
w_s	4	0.012
w_d	26	0.080
l	80	0.246
l_s	3	0.009
l_d	76	0.234
l_{ds}	36	0.11
h	0.017	0.00005
t	0.15	0.00046
t_1	1	0.003
t_2	4	0.012
t_3	2	0.006
t_4	8	0.025

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_0)
t_5	1	0.003
t_6	2	0.006
s	2	0.006
s_1	3	0.009
s_2	3	0.009

จากโครงสร้างของสายอากาศในรูปที่ 4.4 และ 4.7 (ก)และ 4.7 (ข) และ 4.7 (ค) ที่มีค่าพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 รูปที่ 4.10 เป็นการแสดงผลของค่าอิมพีแดนซ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงต่อรูปแบบของโครงสร้างของสายอากาศในรูปแบบต่างๆเพื่อเปรียบเทียบให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในรูปแบบต่างๆ

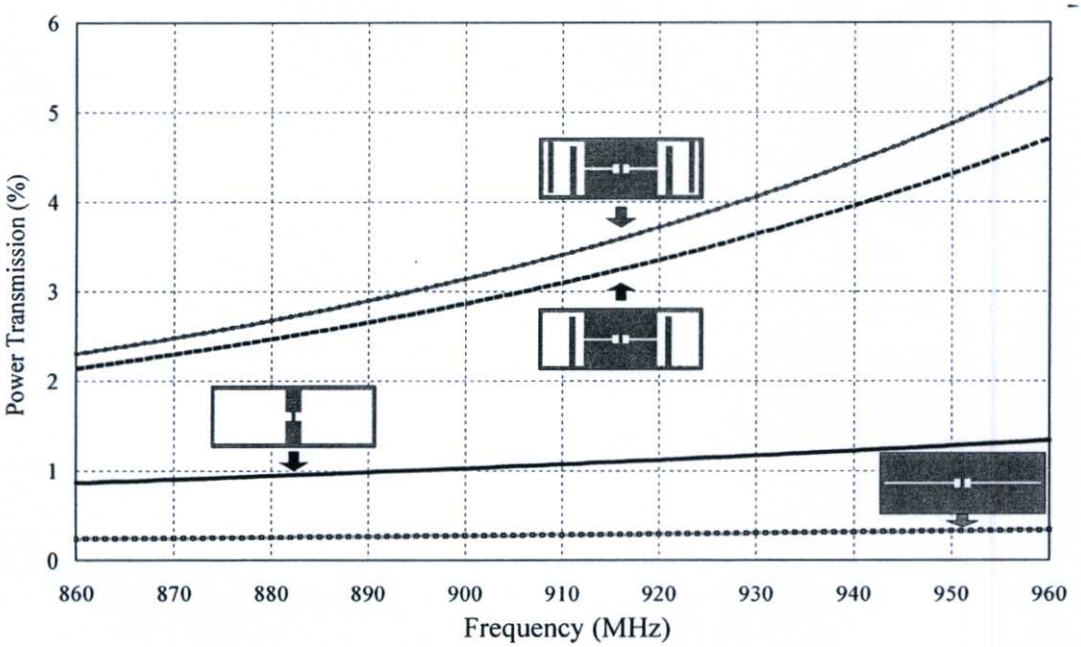


(ก) ค่าความต้านทานของสายอากาศ



(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 4.10 ค่าอิมพีแดนซ์ของโครงสร้างสายอากาศแท็กที่ทำการศึกษาบนแผ่นพิมพ์อ่อนขนาด $0.10\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$



รูปที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของโครงสร้างสายอากาศแท็กที่ทำการศึกษาบนแผ่นพิมพ์อ่อนขนาด $0.10\lambda_0 \times 0.25\lambda_0$

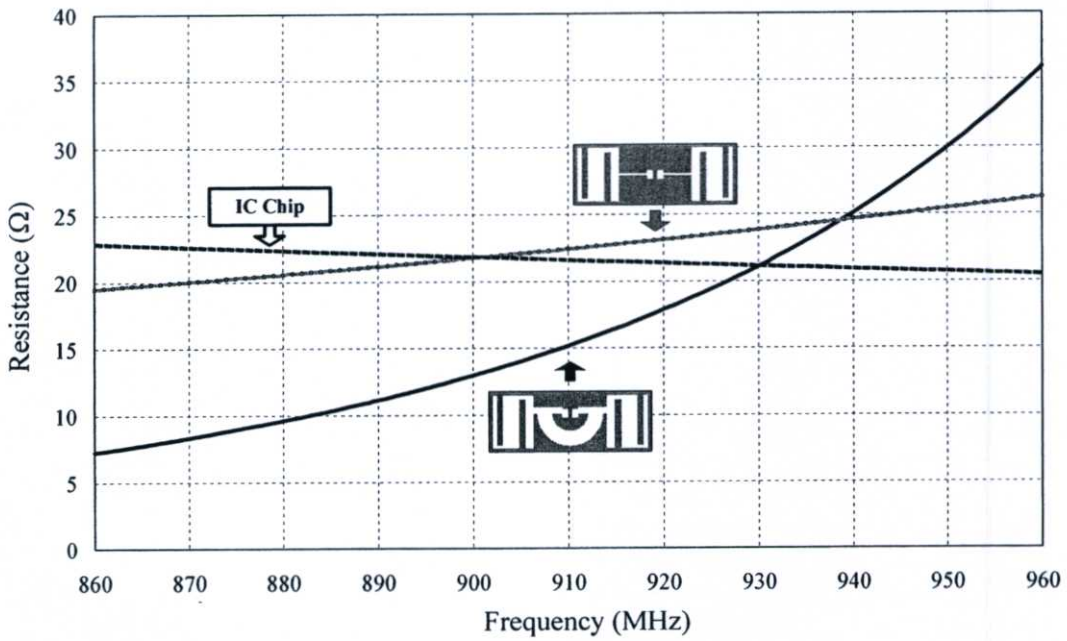
จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในลักษณะของสายอากาศโครงสร้างต่างๆ โดยจะเห็นได้ว่าการทำให้สายอากาศที่มีการขยายส่วนทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นและทำให้โครงสร้างมีลักษณะขดวกวนนั้นจะสามารถเพิ่มค่าความต้านทานและเพิ่มค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศได้ แต่จากการศึกษาโครงสร้างการขดวกวนสายอากาศในเบื้องต้นจากกราฟดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่ารีแอ็กแตนซ์ของโครงสร้างสายอากาศที่ทำการขดวกวนที่ทำการศึกษายังไม่มีความเหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวม ดังจะเห็นได้จากค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานที่มีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงนำโครงสร้างการลัดวงจรมาใช้เพื่อใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยส่วนที่ทำหน้าที่ในการแพร่กระจายคลื่นที่มีการขดวกวนในส่วนแรกนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นโครงสร้างที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพื่อความสะดวกในการศึกษา เพราะเนื่องจากมีตัวแปรจำนวนมากในโครงสร้างของสายอากาศดังกล่าว โดยการใส่โครงสร้างของการลัดวงจรเพื่อทำการปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้ได้ตามต้องการ และทำการหาค่าที่เหมาะสมโดยผ่านทางการจำลองโดยโปรแกรม CST @ Microwave Studio โดยโครงสร้างของสายอากาศภายหลังจากการใส่ส่วนของโครงสร้างที่ทำหน้าที่ในการลัดวงจรไปแล้วแสดงดังรูปที่ 4.1 และมีค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ของสายอากาศสตริปไดโพลแบบขดวกวนบนแผ่นพิมพ์อ่อน

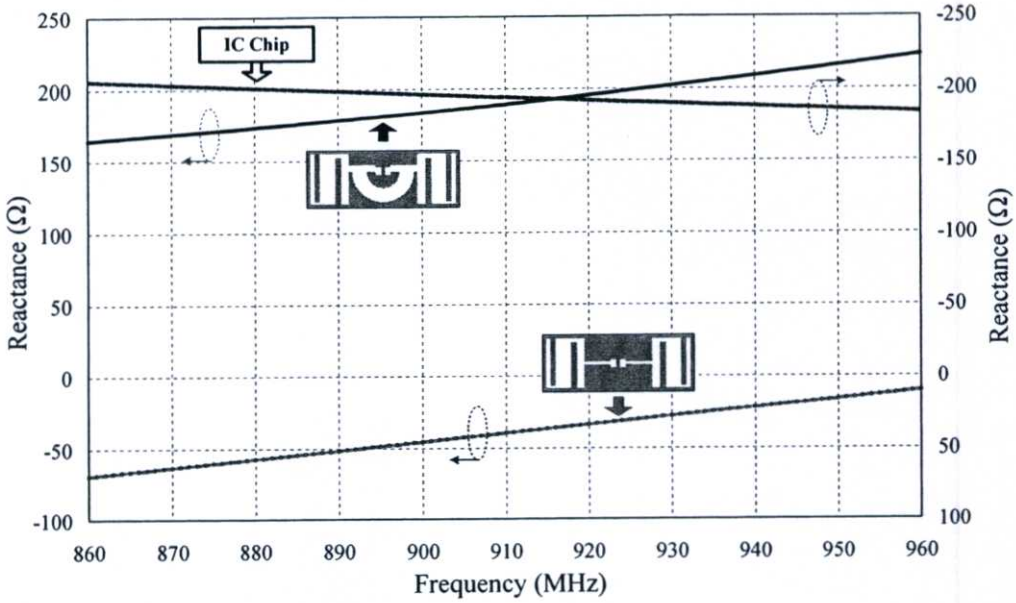
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_0)
w	30	0.092
w_s	4	0.012
w_d	26	0.080
l	80	0.246
l_s	3	0.009
l_d	76	0.234
l_{ds}	36	0.11
h	0.017	0.00005
t	0.15	0.00046
t_1	3	0.009
t_2	4	0.012
t_3	2	0.006

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	ขนาดทางไฟฟ้า (λ_0)
t_4	8	0.025
t_5	1	0.003
t_6	2	0.006
s	2	0.006
s_1	3	0.009
s_2	3	0.009
r_i	9	0.028
r_o	16	0.049

จากการใส่โครงสร้างการลัดวงจร ของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.1 แล้วทำการจำลองหาค่าที่เหมาะสมผ่านทางการจำลองโดยโปรแกรมในรูปกราฟที่ 4.12 แสดงค่าอิมพีแดนซ์และในรูปที่ 4.13 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานภายหลังจากการเพิ่มโครงสร้างของการลัดวงจรให้แก่สายอากาศ

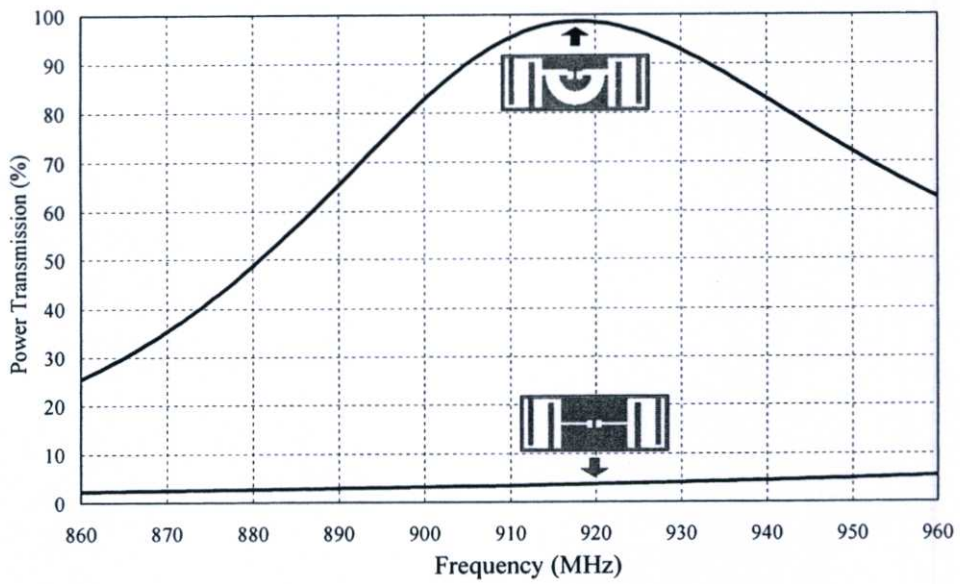


(ก) ค่าความต้านทานของสายอากาศ



(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กเมื่อมีการเพิ่มโครงสร้างการลัดวงจร



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศแท็กเมื่อมีการเพิ่มโครงสร้างการลัดวงจร

จากกราฟจะเห็นว่าภายหลังจากการใส่โครงสร้างการลัดวงจรแล้วทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ให้มีความเหมาะสมแล้ว สายอากาศจะสามารถให้ค่าเปอร์เซ็นซ์การส่งผ่านกำลังงานที่สูงขึ้นเป็นอย่างมาก โดยเมื่อพิจารณาที่ความถี่กลางที่ 922.5 MHz สายอากาศจะให้ค่า

เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานสูงถึง 97.74 % โดยตารางที่ 4.4 แสดงข้อสรุปของการเปลี่ยนโครงสร้างของสายอากาศและคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่ได้ทำการจำลอง

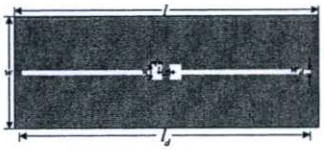
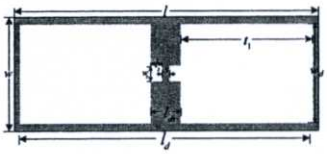
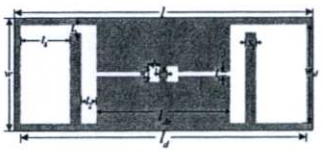
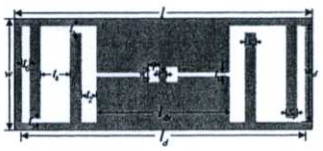
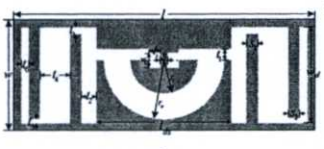
จากการศึกษาโครงสร้างของสายอากาศในรูปแบบต่างๆ ในเนื้อหาจากบทที่ 4 ทั้งหมด ข้อสรุปในตารางที่ 4.2 แสดงข้อสรุปผลกระทบของโครงสร้างที่เหมาะสมกับการนำมาใช้กับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL แสดงโดยค่าอิมพีแดนซ์และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานของสายอากาศไปยังชิปวงจรรวม เริ่มต้นจากสายอากาศสตริปไดโพลเริ่มต้นในรูปที่ 4.4 เส้นสตริปขนาดบางซึ่งมีความยาวของสายอากาศอยู่ในขอบเขตโครงสร้างที่ถูกกำหนดเบื้องต้น 0.25 λ_0 จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานและค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศนั้นมีค่าต่ำ โดยเมื่อพิจารณาในพจน์ของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานนั้นจะมีค่าเพียง 0.29%

ต่อมาในรูปที่ 4.9 (ก) การขยายความกว้างของสายอากาศภายใต้ขอบเขตโครงสร้างที่กำหนด 0.10 λ_0 โดยจะพบว่าที่ความกว้างของสายอากาศที่มากที่สุดภายใต้ขอบเขตที่กำหนดสายอากาศให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานมากที่สุดโดยโครงสร้าง ค่าอิมพีแดนซ์ ของสายอากาศในโครงสร้างที่ 4.9 (ก) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานของสายอากาศจะมีค่าไม่มากนัก แต่ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศมีการเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยโครงสร้างที่ 4.9 (ก) นี้สายอากาศมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 1.13%

ส่วนในรูปที่ 4.9 (ข) และ 4.9 (ค) สายอากาศจะถูกทำการเซาะร่องให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นขดเพื่อเพิ่มความยาวทางไฟฟ้าให้แก่สายอากาศโดยการขดจะสามารถทำให้ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเพิ่มขึ้น ภายใต้โครงสร้างที่ 4.9 (ข) สายอากาศมีค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 3.43% และภายใต้โครงสร้างที่ 4.9 (ค) สายอากาศให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานที่เท่ากับ 3.81%

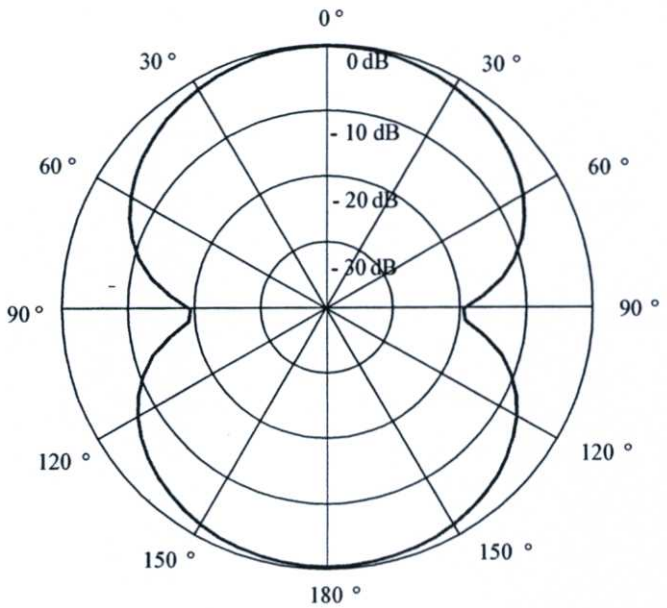
จากการศึกษาโครงสร้างของสายอากาศที่เหมาะสมกับชิปวงจรรวมนั้นจะพบว่าการเพิ่มความยาวทางไฟฟ้าภายใต้โครงสร้างที่กำหนดสามารถช่วยในการปรับค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศให้เพิ่มมากขึ้นเป็นอย่างมาก แต่ค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวก็ยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับชิปวงจรรวม ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 21.3-j191.6 โอห์ม ซึ่งการสร้างสายอากาศที่สามารถส่งผ่านกำลังงานไปยังชิปวงจรรวมได้สูงสุดนั้นคือสายอากาศต้องมีลักษณะแมตช์สังยุคกับชิปวงจรรวม โดยค่าอิมพีแดนซ์ที่แมตช์สังยุคอย่างสมบูรณ์กับชิปวงจจรวมคือ 21.3+j191.3 โอห์ม ดังนั้นเพื่อเป็นการค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโครงสร้างการลัดวงจรจึงถูกนำมาใช้ในการปรับค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยจากรูปที่ 4.1 ที่แสดงโครงสร้างของสายอากาศที่ทำการใส่โครงสร้างการลัดวงจร แล้วทำการปรับโครงสร้างให้มีความเหมาะสมกับชิปวงจรรวมเรียบร้อยแล้ว โดยจะเห็นได้ว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถให้ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานได้สูงถึง 97.74%

ตารางที่ 4.4 สรุปการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสายอากาศวัสดุฐานรองชนิดอ่อนและคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมที่ได้จำลองที่ค่าความถี่ 922.5 MHz

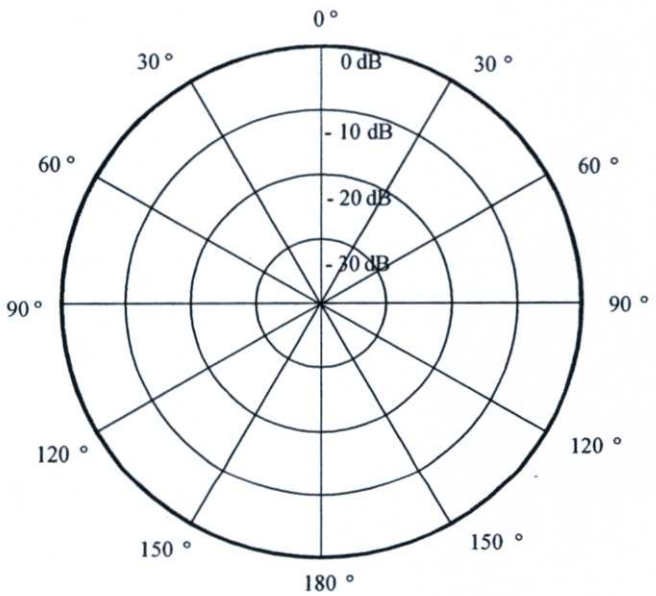
สายอากาศ	โครงสร้าง	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)		ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงาน
		ความต้านทาน	รีแอ็กแตนซ์	
สายอากาศสตริปไดโพลเริ่มต้น	 รูปที่ 4.4	10.32	- j353.8	0.29
สายอากาศสตริปไดโพลขยายความกว้าง (w_s)	 รูปที่ 4.9 (ก)	11.52	-j100.7	1.13
สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนหนึ่งขด	 รูปที่ 4.9 (ข)	22.33	- j39.7	3.43
สายอากาศสตริปไดโพลขดวกวนสองขด	 รูปที่ 4.9 (ค)	23.30	-j32.12	3.81
สายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็ก	 รูปที่ 4.1	18.59	j197.1	97.74

4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

จากค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กแบบแผ่นพิมพ์อ่อนมาจำลองเพื่อพิจารณาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่ความถี่กลางของย่านความถี่ที่ใช้งาน 922.5 MHz โดยจะทำการพิจารณาทั้งในระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) และระนาบสนามแม่เหล็ก (H-plane) ดังแสดงในรูปที่ 4.14



(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) หรือระนาบ YZ (YZ-plane)



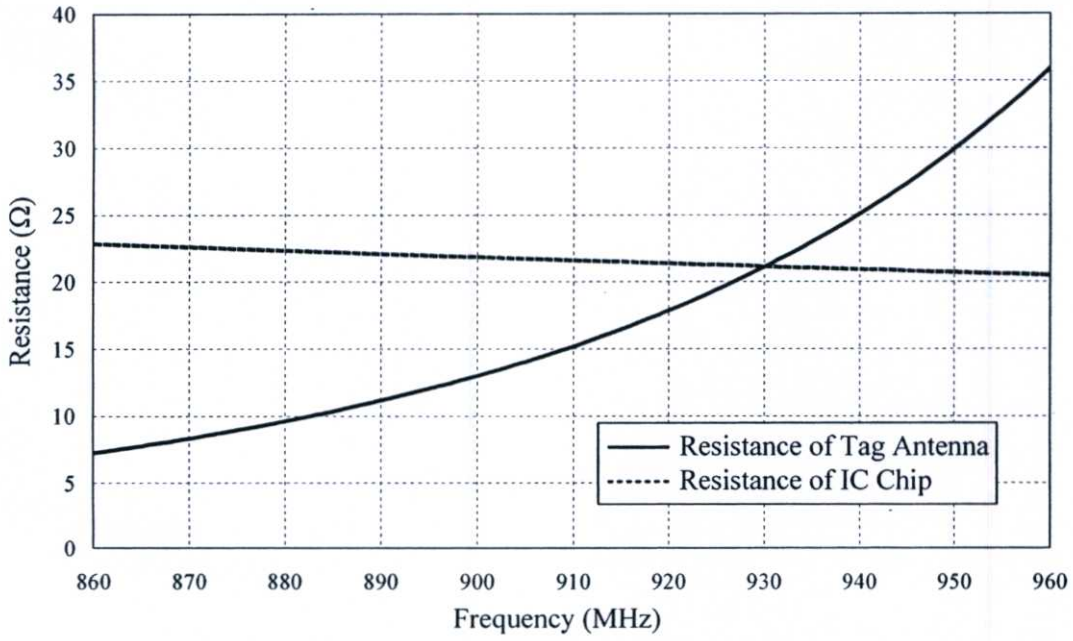
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบ XZ (XZ-plane)

รูปที่ 4.14 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศแท็กขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

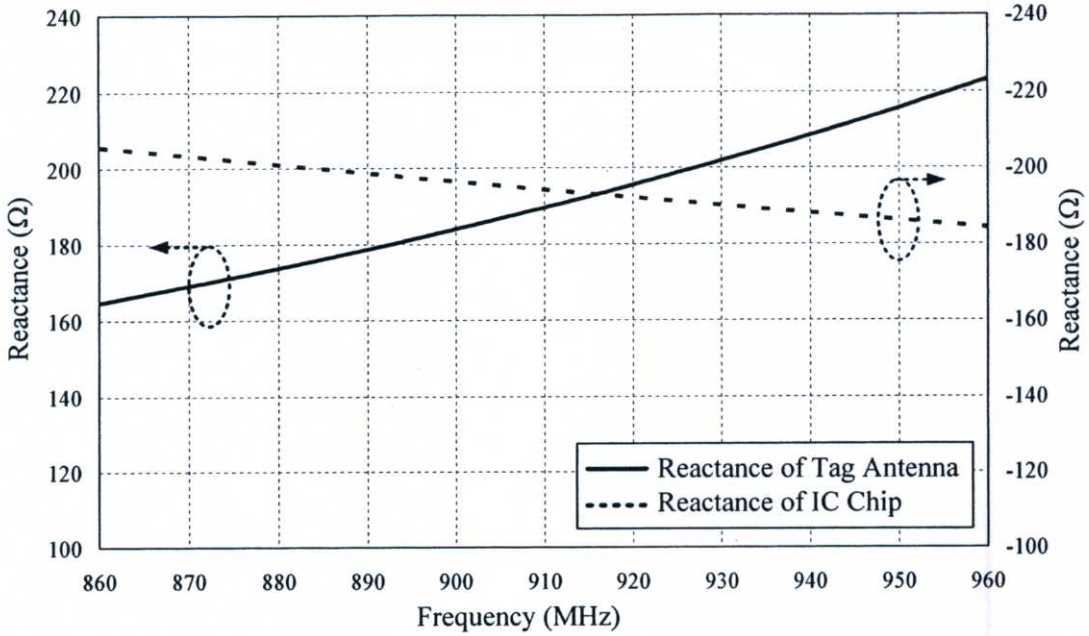
จากรูปที่ 4.14 (ก) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้า หรือระนาบ YZ (YZ-plane) จะพบว่าความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-power beamwidth) จะมีค่าเท่ากับ 89.5 องศา และในรูปที่ 4.14 (ข) แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบ XZ (XZ-plane) จากรูปจะเห็นได้ว่าสายอากาศมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นสมมาตรในแนวแกน x โดยแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จะเป็นแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว

4.5 คุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

จากรูปที่ 4.15 แสดงคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเมื่อความถี่มีการเปลี่ยนแปลง ในรูปที่ 4.15 (ก) แสดงค่าความต้านทานของสายอากาศในช่วงความถี่ 860-960 MHz โดยเส้นทึบแสดงค่าความต้านทานของสายอากาศที่มีแนวโน้มที่แปรผันตรงกับค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้น ส่วนเส้นประแสดงค่าความต้านทานของชิปวงจรรวมที่แปรผกผันไปตามความถี่ที่เปลี่ยนไป โดยค่าความต้านทานของสายอากาศมีค่าอยู่ระหว่าง 7.22-35.93 โอห์ม และที่ความถี่กลาง 922.5 MHz สายอากาศจะมีค่าความต้านทานเท่ากับ 18.59 โอห์ม ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวม 21.3 โอห์ม ที่ความถี่เดียวกัน



(ก) ค่าความต้านทานของสายอากาศ



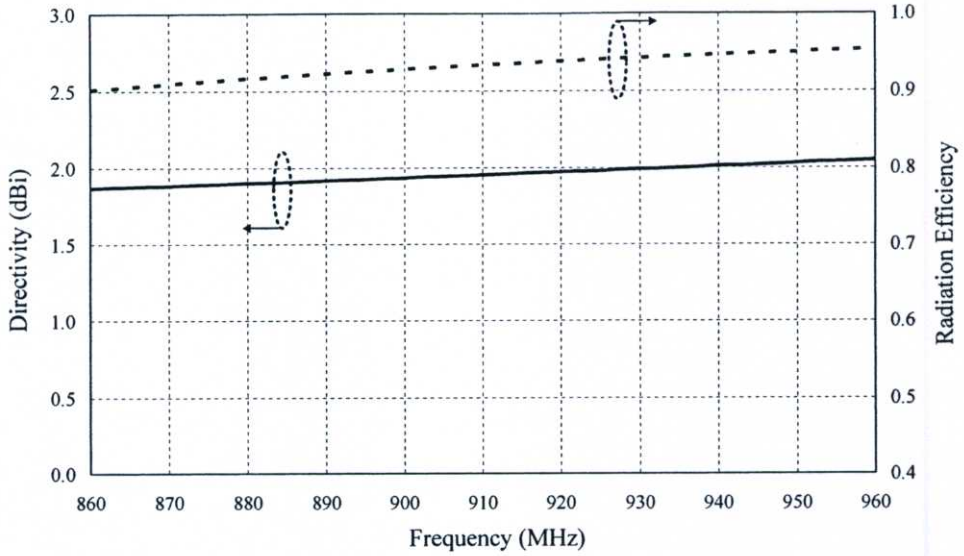
(ข) ค่ารีแอ็กแตนซ์

รูปที่ 4.15 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

ในรูปที่ 4.15 (ข) แสดงผลของค่ารีแอ็กแตนซ์เมื่อมีการเปลี่ยนความถี่ ในย่านความถี่ 860-960 MHz เส้นประแสดงค่ารีแอ็กแตนซ์ของชิปวงจรรวมที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าอยู่ระหว่าง -j184.2 โอห์ม ถึง -j205.63 โอห์ม เส้นทึบแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศ เมื่อพิจารณาจากรูปกราฟจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 164.6-223.2 โอห์ม โดยมีลักษณะแปรผันไปตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น โดยที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศมีค่าเท่ากับ j197.1 โอห์ม

4.6 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าประสิทธิภาพความเป็นตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

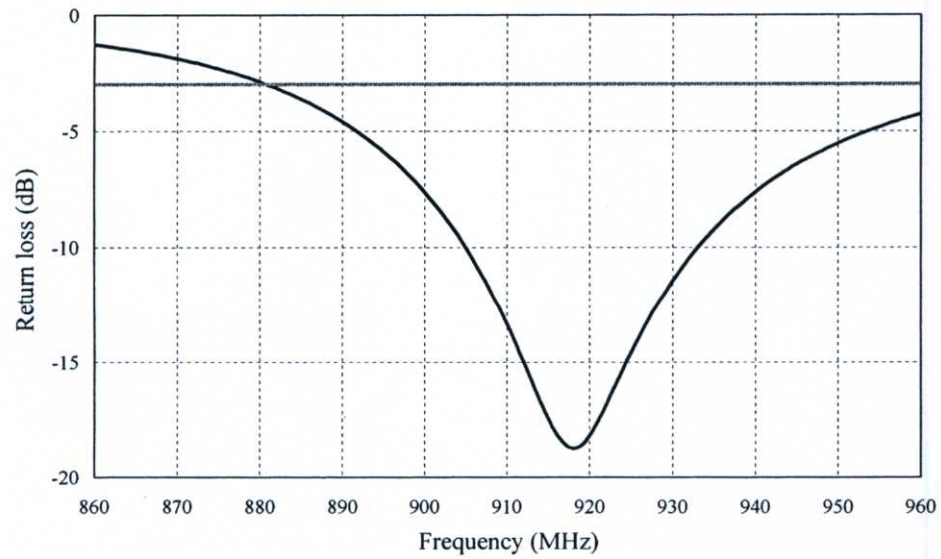
จากกราฟในรูปที่ 4.16 แสดงค่าสภาพเจาะจงทิศทางและค่าประสิทธิภาพตัวนำและฉนวนของสายอากาศ โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปตามช่วงความถี่ที่สูงขึ้นแต่ค่อนข้างไม่แตกต่างกันมากนักตลอดช่วงความถี่ 920-925 MHz โดยที่ความถี่กลาง 922.5 MHz ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 1.98 dBi ส่วนค่าประสิทธิภาพตัวนำและไดอิเล็กตริกของสายอากาศมีค่าเท่ากับ 0.94



รูปที่ 4.16 ค่าสภาพเจาะจงทิศทางของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

4.7 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อนแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อพิจารณาที่ค่า ช่วงกว้างความถี่ที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-power bandwidth และค่าการสูญเสียย้อนกลับต่ำกว่า -3 dB ของสายอากาศแท็กจะพบว่าสายอากาศนั้นครอบคลุมย่านความถี่ 881-960 MHz สามารถครอบคลุมย่านความถี่ตามมาตรฐานภายในประเทศไทยคือ 920-925 MHz หรือถ้าหากพิจารณาที่ค่าอัตราการสูญเสียย้อนกลับที่ต่ำกว่า -10 dB สายอากาศก็สามารถครอบคลุมช่วงความถี่ 905-933 MHz ซึ่งสามารถครอบคลุมย่านความถี่มาตรฐานภายในประเทศ



รูปที่ 4.17 ค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

4.8 บทสรุป

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายหลักการออกแบบสายอากาศแท็กชนิดขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน โดยเริ่มต้นจากการศึกษาสายอากาศแท็กชนิดสตริปไดโพลแบบพื้นฐานและโครงสร้างในการติดชิปวงจรรวม โดยสายอากาศดังกล่าวจะถูกจำลองบนวัสดุฐานรองชนิด FR-4 แบบอ่อนบาง ซึ่งมีความหนา 0.015 มิลลิเมตร โดยสายอากาศจะมีขนาดที่เล็กจากการใช้หลักการขดวกวนเพื่อเป็นการเพิ่มความยาวทางไฟฟ้าให้แก่โครงสร้างที่ถูกจำกัดให้มีขนาดเล็ก และทำการปรับปรุงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยหลักการลัดวงจร โดยโครงสร้างที่นำเสนอดังกล่าวที่นำเสนอนี้อาจยังไม่ใช่โครงสร้างที่ดีที่สุดในขนาดที่ถูกจำกัดไว้ แต่เป็นโครงสร้างรูปแบบหนึ่งที่สามารถให้คุณลักษณะของสายอากาศเหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมที่นำมาออกแบบ

บทที่ 5
การสร้าง ทดสอบสายอากาศแท็กและการประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมเบื้องต้น

5.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบสายอากาศและการประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมในเบื่องต้น โดยเริ่มจากการนำเอาโครงสร้างของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตที่โครงสร้างสามารถที่จะปรับจูนค่าอิมพีแดนซ์ได้ง่ายมาทำการทดสอบเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมที่นำมาออกแบบ ในส่วนต่อมาจะเป็นผลของระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดที่สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตที่ถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมกับชิปวงจรรวม และในส่วนสุดท้ายจะเป็นผลการทดสอบของสายอากาศขนาดเล็กเนื่องจากสายอากาศแท็กในระบบระบุลักษณะทางคลื่นความถี่วิทยุนั้นไม่ได้ถูกนำไปใช้งานเหมือนสายอากาศโดยทั่วไป โดยสิ่งที่มีการเปลี่ยนแปลงคือการเปลี่ยนจากการใช้คอนเนคเตอร์มาใช้ชิปวงจรรวมในการป้อนสัญญาณ และการทดสอบเพื่อจะให้แท็กเริ่มทำงานก็จำเป็นจะต้องมีชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการกระตุ้นให้แท็กทำงานในเบื้องต้นทั้งยังต้องใช้เครื่องอ่านข้อมูลที่สามารถปรับความถี่และพลังงานในการส่งสัญญาณได้ [32] ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะนำสายอากาศดังกล่าวมาทำการทดสอบคุณลักษณะเช่นสายอากาศโดยทั่วไป ดังนั้นในการทดสอบคุณสมบัติของแท็กในบทที่ 5 นี้จึงเป็นผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบจากระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุด

5.2 การทดสอบระยะการอ่านได้ไกลที่สุด

การทดสอบระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดซึ่งประกอบไปด้วย สายอากาศแท็กไดโพลกับเส้นปรสิต และสายอากาศแท็กขนาดเล็กบนวัสดุฐานรองชนิดอ่อน โดยการคำนวณระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดจะคำนวณจากสมการการส่งสัญญาณของฟรีส ในช่องว่างอิสระ (Friis free space transmission) ในสมการที่ 2.3 สามารถหาระยะทางที่ไกลที่สุดในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลกับแท็กได้ดังนี้

$$R_{\max(reader)} = \frac{\lambda}{4\pi}\sqrt{\frac{P_{reader-tx}G_{reader-ant}G_{tag-ant}\chi\tau}{P_{tag-threshold}}} \qquad (5.1)$$

โดยที่

$P_{reader-tx}$ คือ กำลังงานส่งออกมาจากเครื่องอ่านข้อมูล

$G_{reader-ant}$ คือ อัตราขยายของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล

$P_{tag-threshold}$ คือ กำลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้ชิปทำงานได้

$G_{tag-ant}$ คือ อัตราขยายของสายอากาศแท็ก

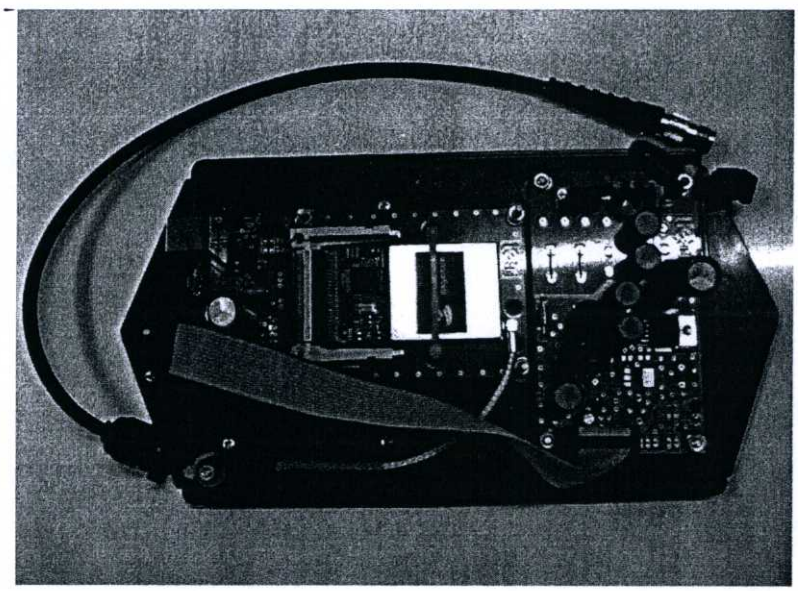
λ คือ ความยาวคลื่นที่ความถี่ใช้งาน

χ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแมตช์ของการโพลาไรซ์ระหว่างสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของแท็ก

τ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านกำลังงาน (Transmission power coefficient)

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบสายอากาศแท็กของระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุมีดังต่อไปนี้

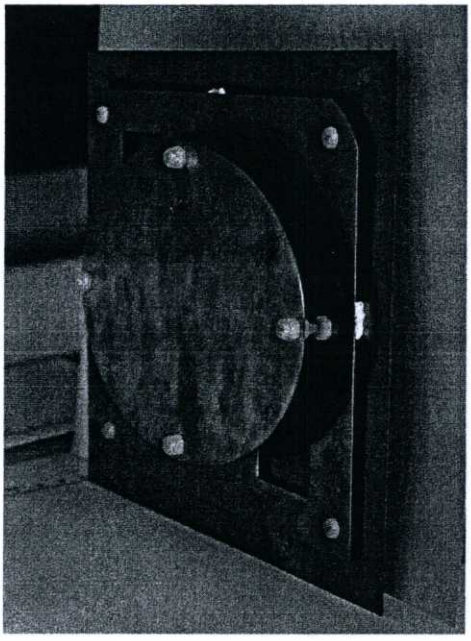
1. เครื่องคอมพิวเตอร์
2. สายนำสัญญาณ
3. เครื่องอ่านข้อมูลของระบบลักษณะทางคลื่นวิทยุ
4. สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูล



รูปที่ 5.1 เครื่องอ่านข้อมูล RFID ของบริษัท IET รุ่น RU-110 [33]

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของเครื่องอ่านข้อมูล

คุณสมบัติ	**คำอธิบาย**
ย่านความถี่	860-960 MHz
กำลังงานเอาต์พุต	27 dBm
รุ่น	RU-110 U

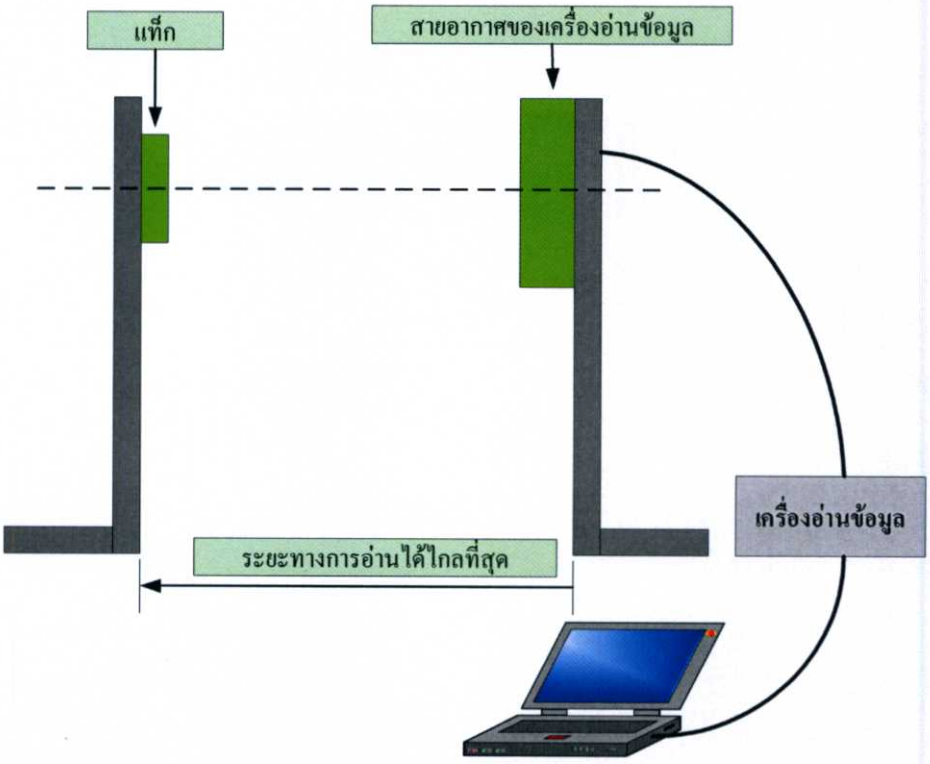


รูปที่ 5.2 ลักษณะโครงสร้างของสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล (มุมมอง 3 มิติ) [34]

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติของสายอากาศอ้างอิงที่มีการโพลาไรซ์เป็นแบบเชิงเส้น

คุณสมบัติ	**คำอธิบาย**
ย่านความถี่	860-960 MHz
การโพลาไรซ์	เชิงวงกลม
อัตราขยายสูงสุด	7.7 dBic
ค่าการสูญเสียย้อนกลับ	-30.56 dB
ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ xz	100 องศา
ความกว้างของลำคลื่นในระนาบ yz	70 องศา

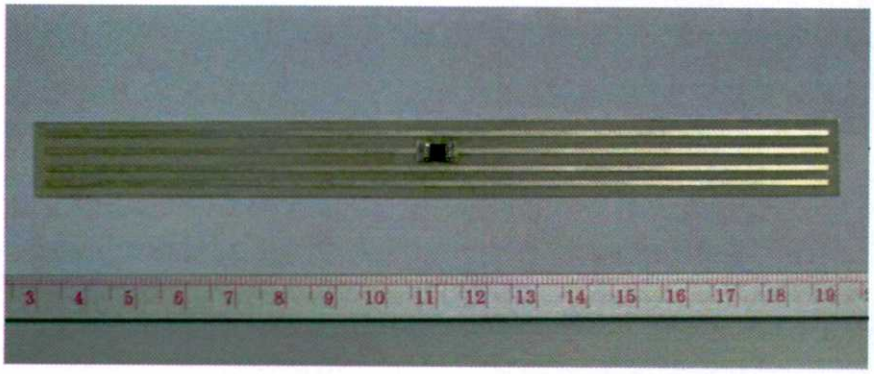
หมายเหตุ : ข้อมูลเพิ่มเติมแสดงใน [34]



รูปที่ 5.3 ไดอะแกรมการทดสอบเพื่อหาค่าระยะการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศ

5.2.1 ผลการทดสอบระยะการอ่านได้ไกลสุดของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต

จากผลการจำลองและศึกษาถึงค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในบทที่ 3 ของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต ในส่วนนี้จะทำการสร้างและนำสายอากาศดังกล่าวมาทำการสร้างและทดสอบระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศ โดยรูปสายอากาศต้นแบบที่ขึ้นจะแสดงดังรูปที่ 5.4 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.3

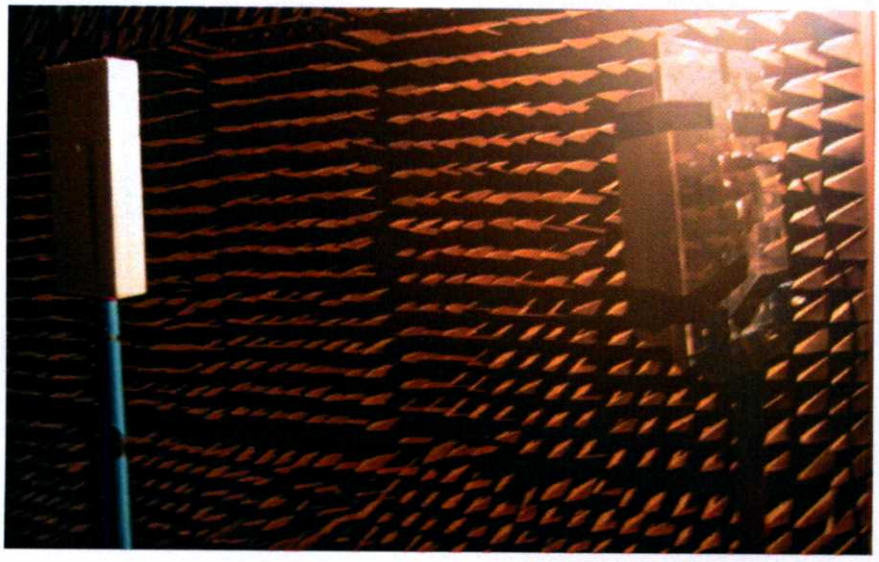


รูปที่ 5.4 รูปถ่ายสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบ

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)
w	15
w_s	4
w_d	1
l_d	156
l_s	3
l_{dd}	160
s	2
s_1	25
s_2	2
h	0.017

การสร้างสายอากาศจะทำการสร้างโดยใช้พารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ 5.3 รูปโครงสร้างของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 5.4 โดยระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดจะโดยเครื่องอ่านข้อมูล IE Technology รุ่น (RU-110U) สายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลมีโพลาไรซ์แบบวงกลม และมีอัตราขยายเท่ากับ 7.7 dBic จากผลการทดลองระยะการอ่านได้ไกลที่สุดจะมีระยะที่เท่ากับ 2.6 เมตร โดยในรูปที่ 5.5 แสดงการทดสอบเพื่อหาค่าระยะการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต



รูปที่ 5.5 รูปถ่ายการทดสอบระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต

5.2.2 ผลการทดสอบระยะการอ่านได้ไกลสุดของสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

รูปที่ 5.6 รูปถ่ายสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

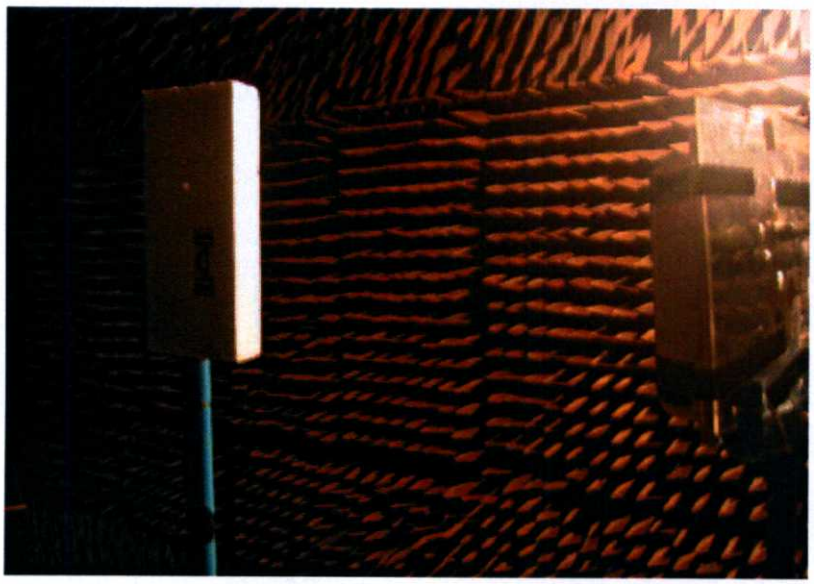
ในบทที่ 4 จากผลการจำลองและศึกษาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน ในส่วนนี้จะนำสายอากาศดังกล่าวมาสร้างและทดสอบ ระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศ โดยรูปสายอากาศที่สร้างสำเร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 5.6 โดยสร้างจากค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศต้นแบบขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)
w	30
w_s	4
w_d	26
l	80
l_s	3
l_d	76
l_{ds}	36
h	0.017
t	0.15
t_1	3

พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)
t_2	4
t_3	2
t_4	8
t_5	1
t_6	2
s	2
s_1	3
s_2	3
r_i	9
r_o	16

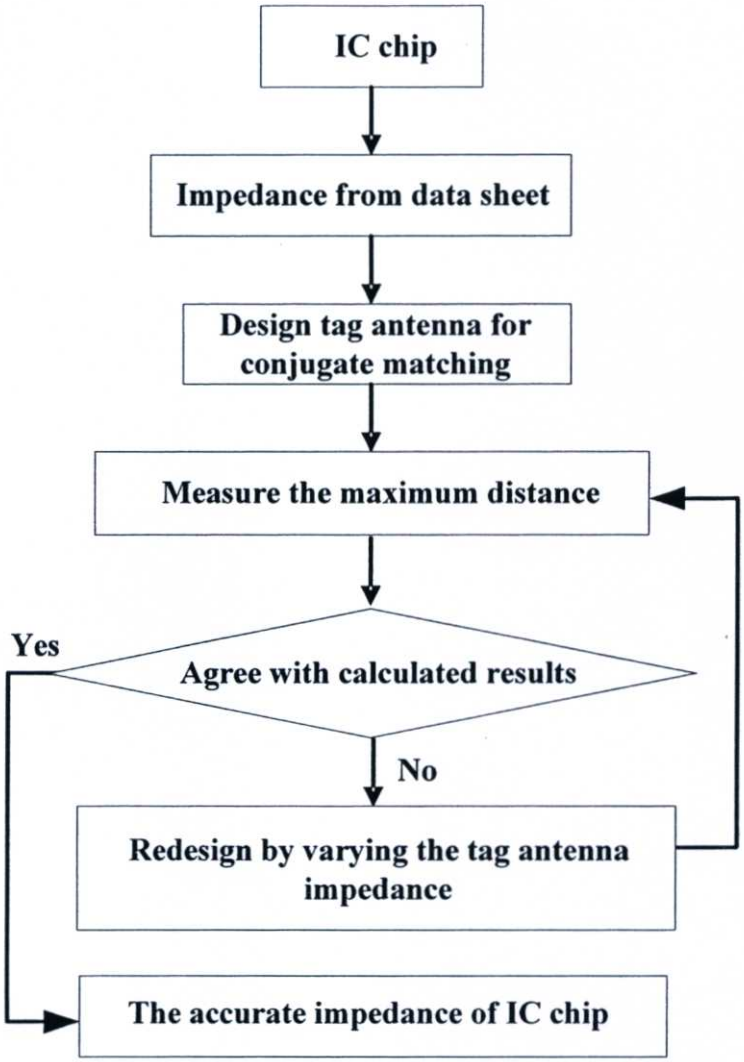
โครงสร้างของสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อนที่นำมาสร้างนั้นแสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งพารามิเตอร์ของสายอากาศที่ทำการสร้างจะเป็นไปตามตารางที่ 5.4 โดยการทดสอบระยะการอ่านได้ไกลที่สุดนั้นจะใช้อุปกรณ์ และเครื่องอ่านข้อมูลรุ่นเดียวกันกับสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต หรือใช้เครื่องอ่านข้อมูล IE Technology รุ่น (RU-110U) โดยสายอากาศเครื่องอ่านข้อมูลเป็นโพลาไรซ์เชิงวงกลม มีอัตราขยาย 7.7 dBic ในรูปที่ 5.7 แสดงการทดสอบระยะการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน โดยผลจากการทดสอบระยะการอ่านได้ที่ไกลที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 2.3 เมตร



รูปที่ 5.7 การทดสอบระยะการอ่านได้ไกลที่สุดของสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

5.3 การประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมเบื้องต้น

ซึ่งสายอากาศแท็กจะต้องถูกออกแบบให้สามารถส่งผ่านพลังงานได้สูงสุดกับชิปแต่ละตัวที่ถูกเลือกใช้งาน ซึ่งชิปวงจรรวมของระบบระบุลักษณะคลื่นวิทยุค่าอิมพีแดนซ์จะแปรผันไปความถี่ที่เราเลือกใช้งานและชิปวงจรรวมที่เราเลือกใช้งานที่ต่างกัน ดังนั้น การศึกษาถึงแนวโน้มความเป็นไปได้ในการนำค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความถูกต้องเบื้องนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง การประเมินในเบื้องต้นนี้จะเริ่มต้นจากการนำเอาพารามิเตอร์ข้อมูลที่ได้จากทางบริษัทมาทำการคำนวณให้มีความเหมาะสมกับย่านความถี่ที่เราต้องการที่จะไปใช้ก่อน หลังจากนั้นจึงทำการสร้างสายอากาศ โดยอาศัยโครงสร้างของสายอากาศที่นำเสนอไปในบทที่ 3 ในการทดสอบความถูกต้องโดยผ่านทางระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุด รูปแบบของการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความเหมาะสมกับชิปในเบื้องต้นนั้นจะแสดงดังกราฟในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แผนผังรูปแบบการประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมในเบื้องต้น

5.3.1 การประเมินค่าอิมพีแดนซ์จากการคำนวณ

กำหนด ตัวประกอบเชิงคุณภาพ (Q) = 9 และ ค่าความจุไฟฟ้า = 0.9 พิโคฟารัด [7] คำนวณค่าความต้านทาน ของชิปวงจรรวม

$$Q = \frac{1}{\omega_0 RC} \tag{5.2}$$

$$R = \frac{1}{\omega_0 QC} \tag{5.3}$$

$$R = \frac{1}{2\pi fQC} \tag{5.4}$$

$$R = \frac{1}{2\pi\left(922.5\times10^{9}\right)\times9\times\left(0.9\times10^{-12}\right)} \tag{5.5}$$

$$R = 21.3 \text{ โอห์ม} \tag{5.6}$$

คำนวณค่ารีแอ็กแตนซ์ของชิปวงจรรวม

$$X_C = \frac{1}{j2\pi fC} \tag{5.7}$$

$$X_C = \frac{1}{j2\pi\left(922.5\times10^{9}\right)\times\left(0.9\times10^{-12}\right)}] \tag{5.8}$$

$$X_C = -j191.7 \text{ โอห์ม} \tag{5.9}$$

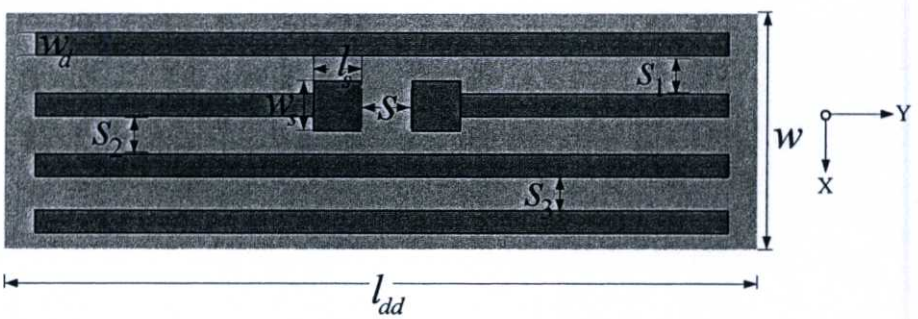
ดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของชิปมีค่าเท่ากับ 21.3-j191.7 โอห์ม

5.3.2 การประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปวงจรรวมเบื้องต้นจากชุดสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต

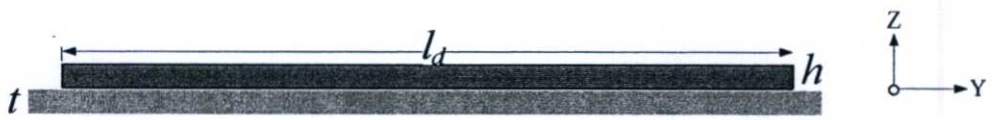
ชุดของสายอากาศที่นำมาประเมินคุณลักษณะของชิปวงจรรวมในเบื้องต้นนั้นจะใช้โครงสร้างของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิต แสดงในรูปที่ 5.9 มาทำการปรับเปลี่ยนอิมพีแดนซ์ของสายอากาศให้มีค่าที่ต่างกันออกไปโดยสายอากาศจะถูกสร้างให้มีค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความแตกต่างกันโดยพิจารณาจากค่ารีแอ็กแตนซ์และค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงานเป็นหลัก โดยสายอากาศจะถูกออกแบบให้มี 1. แนวโน้มของค่ารีแอ็กแตนซ์ที่สูงกว่าชิปวงจรรวม 2. อิมพีแดนซ์ที่ใกล้เคียงกับค่าแมตช์สังยุคของชิปวงจรรวมมากที่สุด 3.แนวโน้มของค่ารีแอ็กแตนซ์ที่ต่ำกว่าชิปวงจรรวม โดยลักษณะโครงสร้างของสายอากาศเพื่อทำการทดสอบค่าโดยพิจารณาดังแสดงในรูปที่ 5.9 และมีโครงสร้างดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างสายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิตที่นำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้น

สายอากาศลำดับที่ 1		สายอากาศลำดับที่ 2		สายอากาศลำดับที่ 3	
พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)	พารามิเตอร์	ขนาดทางกายภาพ (มิลลิเมตร)
w	13	w	13	w	13
w_s	4	w_s	4	w_s	4
w_d	1	w_d	1	w_d	1
l_d	158	l_d	156	l_d	154
l_s	3	l_s	3	l_s	3
l_{dd}	160	l_{dd}	158	l_{dd}	156
s	2	s	2	s	2
s_1	25	s_1	25	s_1	25
s_2	2	s_2	2	s_2	2
h	0.017	h	0.017	h	0.017
t	0.8	t	0.8	t	0.8

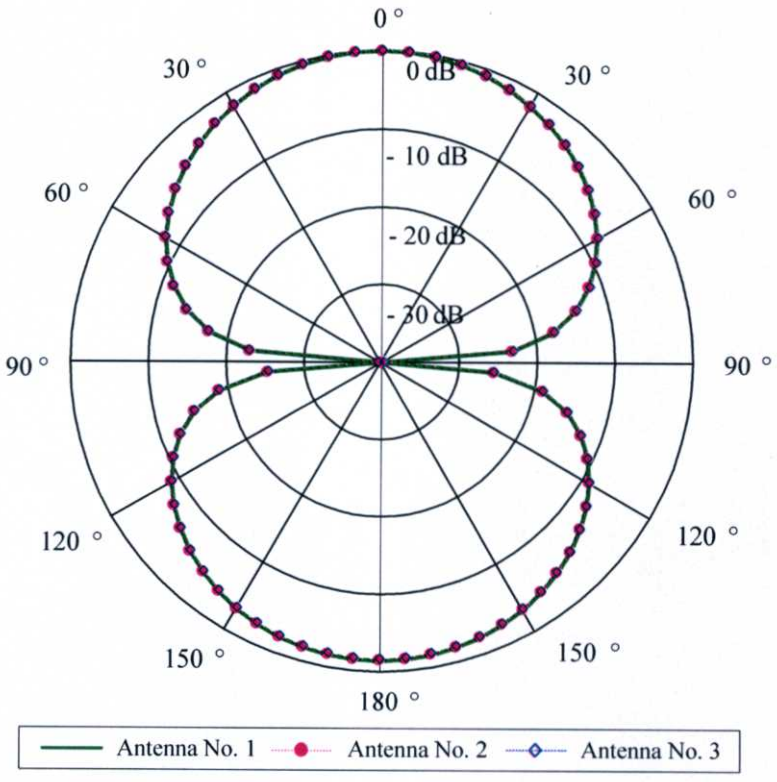


(ก) มุมมองด้านหน้า

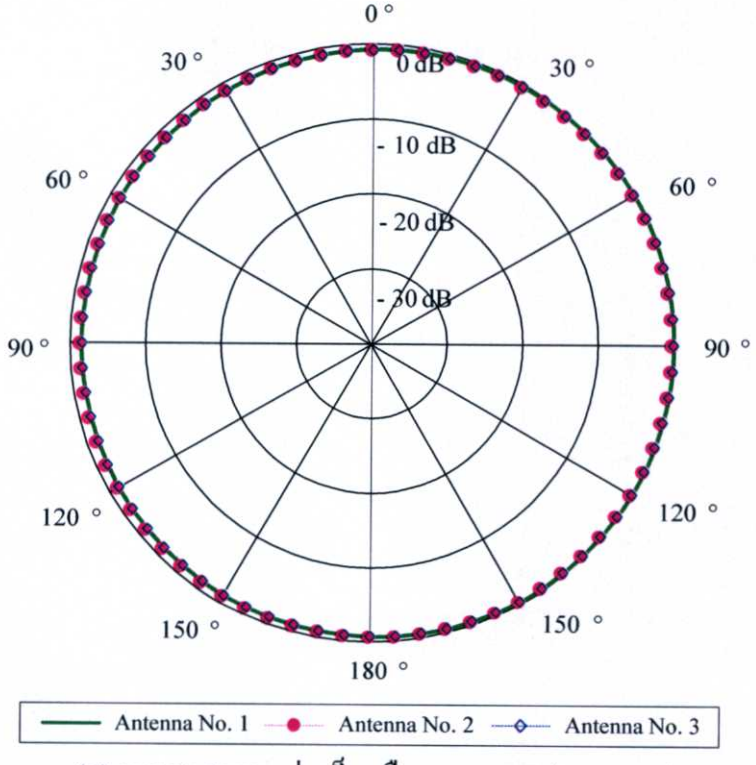


(ข) มุมมองด้านข้าง

รูปที่ 5.9 สายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิตที่ทำการนำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้น



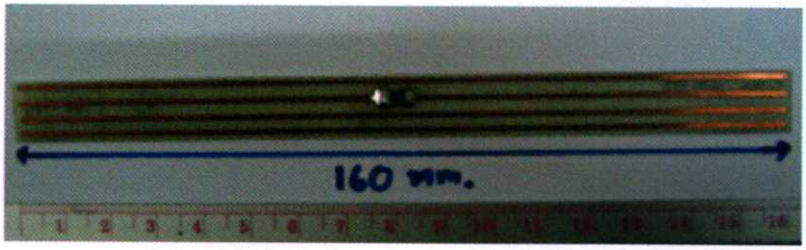
(ก) ระนาบสนามไฟฟ้า (E-plane) หรือระนาบ YZ (YZ-plane)



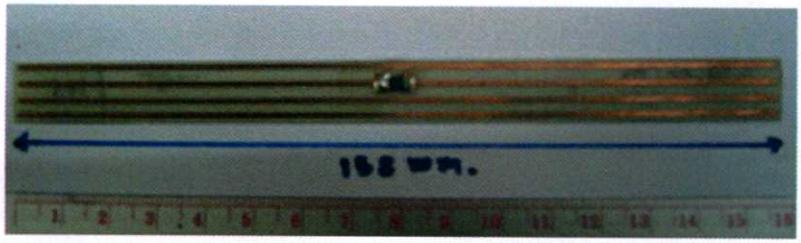
(ข) ระนาบสนามแม่เหล็กหรือระนาบ XZ (XZ-plane)

รูปที่ 5.10 ผลการจำลองแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของชุดสายอากาศที่นำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้น

การที่จะต้องใช้สายอากาศที่มีลักษณะทางโครงสร้างที่คล้ายคลึงกันมาทดสอบความถูกต้องในเบื้องต้นซึ่งจะต้องใช้การประเมินจากระยะการอ่านได้ไกลที่สุดนั้น สิ่งที่จำเป็นก็คือแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่นำมาทดสอบนั้นไม่ควรที่จะมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่แตกต่างกัน [35] ในรูปที่ 5.10 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศต้นแบบที่นำมาทดสอบทั้งสามตัว จะเห็นได้ว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นนั้นมีลักษณะแบบรอบทิศทางเช่นเดียวกัน โดยสายอากาศลำดับ 1 ลำดับที่ 2 และลำดับที่ 3 จะมีความกว้างลำคลื่นที่กำลังงานลดลงครึ่งหนึ่ง (Half-power beamwidth) จะมีค่าเท่ากับ 75.3 75.6 และ 75.8 องศา ตามลำดับ



(ก) สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตลำดับที่ 1



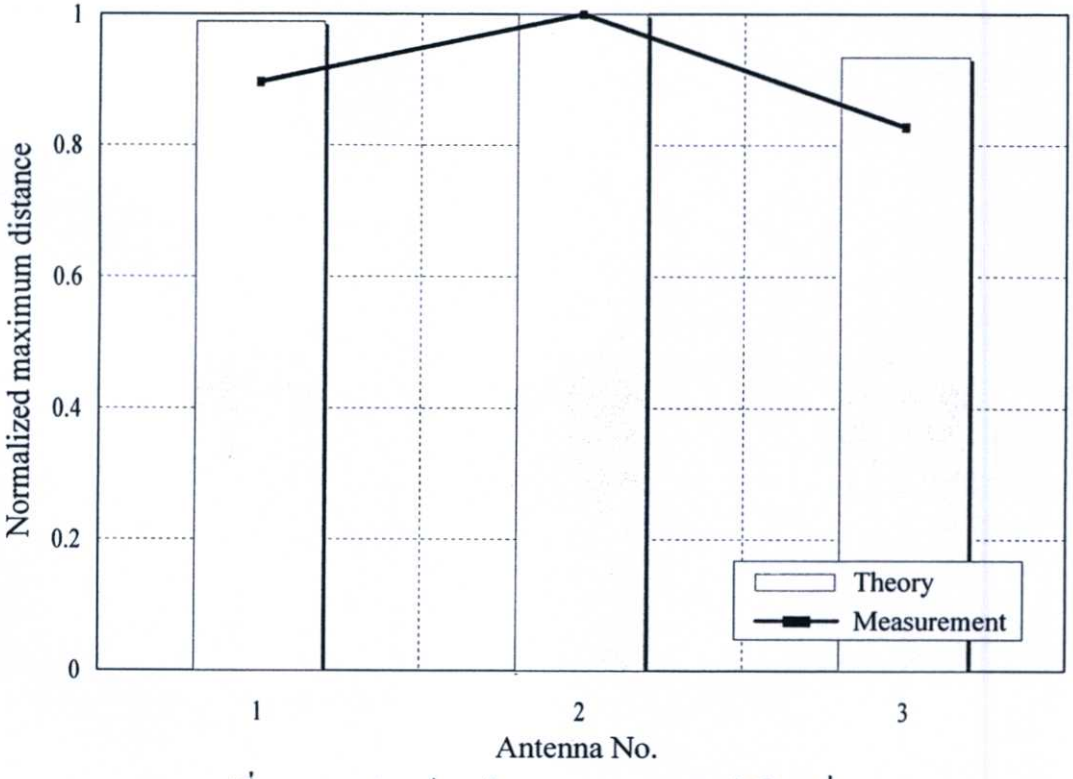
(ข) สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตลำดับที่ 2

(ค) สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตลำดับที่ 3

รูปที่ 5.11 ชุดสายอากาศที่นำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้น

ตารางที่ 5.4 สรุปสมรรถนะของชุดสายอากาศที่ทำการนำมาประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้น ความถี่กลาง 922.5 MHz

ลำดับสายอากาศ	อิมพีแดนซ์ (โอห์ม)		เปอร์เซ็นต์การส่งผ่านกำลังงาน	ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง	ค่าประสิทธิภาพความนำและไดอิเล็กตริก
	ความต้านทาน	รีแอ็กแตนซ์			
1	24.4	j199.4	96.8	2.57	0.625
2	23	j185.6	98	2.59	0.627
3	21.7	j174	85.5	2.62	0.627



รูปที่ 5.12 กราฟนอร์แมลไลซระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุด

จากผลการทดสอบการประเมินความถูกต้องของชิปวงจรรวมเบื้องต้นจะเห็นว่าสายอากาศแท็กที่ออกแบบให้มีความเหมาะสมกับชิปวงจรรวมที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 21.3+j191.7

โอห์ม นั้นสายอากาศที่ออกแบบให้เกิดการแมตช์มากที่สุดนั้นให้ระยะการอ่านที่ไกลที่สุดดังนั้นจะสามารถสรุปได้เบื้องต้นว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่นำมาออกแบบนั้นมีความถูกต้อง

5.4 บทสรุป

จากการสร้างและผลการทดสอบสายอากาศแท็กไดโพลกับเส้นปรสิตและสายอากาศแท็กขนาดเล็กพบว่าสายอากาศสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุที่ได้โดยระยะการอ่านได้อาจจะยังไม่ไกลนักเนื่องมาจากค่ากำลังงานของเครื่องอ่านข้อมูลและเกิดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณระหว่างเครื่องอ่านข้อมูลและสายอากาศของเครื่องอ่านข้อมูล โดยระยะทางการอ่านได้ไกลที่สุดนั้นจะถูกพิจารณาจากสมการการส่งสัญญาณของฟรีส ในช่องว่างอิสระ ในส่วนของการประเมินค่าอิมพีแดนซ์จะพบว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มาจากข้อมูลทางบริษัทน่าจะมีความถูกต้องในเบื้องต้นซึ่งวิธีการประเมินความถูกต้องเบื้องต้นของชิปวงจรรวมดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับชิปวงจรรวมชนิดอื่นหรือในรูปแบบอื่นได้เช่นกัน

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

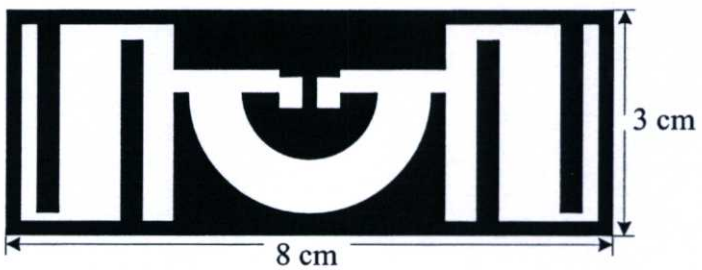
กล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม หลักการออกแบบสายอากาศปัญหาที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งวิธีแก้ไขปัญหาในเบื้องต้น สรุปข้อดีและข้อเสียของสายอากาศแบบต่างๆพร้อมทั้งเสนอแนวทางการพัฒนาสายอากาศต่อ

6.2 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอหลักการออกแบบสายอากาศสำหรับใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุย่านความถี่สูงยิ่ง ที่เป็นไปตามมาตรฐานทางความถี่การใช้งานระบบระบุลักษณะทางย่านความถี่สูงยิ่งของประเทศไทยที่ย่านความถี่ 920-925 MHz โดยสายอากาศจะถูกออกให้มีความเหมาะสมกับชิปวงจรรวมรุ่น NXP G2XL ที่มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ 21.3-j191.7 โอห์มโครงสร้างเริ่มต้นของสายอากาศแต่ละตัวนั้นจะเริ่มต้นพิจารณาจากสายอากาศสตริปไดโพลก่อนหลังจากนั้นจึงปรับปรุงค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศด้วยการศึกษาโครงสร้างของสายอากาศจากงานวิจัยที่มีมาก่อน สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตได้ถูกนำเสนอเป็นสายอากาศตัวแรกเนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อนในการศึกษา โดยสายอากาศดังกล่าวจะสามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสมกับชิปวงจรรวมได้โดยง่าย สามารถส่งถ่ายพลังงานไปยังชิปได้ 98.56% โดยมีค่าอิมพีแดนซ์พิจารณาที่ความถี่กลางที่ 922.5 MHz เท่ากับ 23.43+j186.7 โอห์ม มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นเป็นแบบรอบทิศทาง มีระยะการอ่านได้ไกลที่สุด 2.6 เมตร เนื่องจากโครงสร้างของสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตสามารถที่จะปรับค่าอิมพีแดนซ์ได้ง่าย ดังนั้นสายอากาศดังกล่าวจึงถูกนำมาประเมินความถูกต้องของค่าอิมพีแดนซ์ของชิปในเบื้องต้น โดยทำการสร้างสายอากาศที่มีอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงชิปวงจรรวมสามตัว โดยมีค่าความต้านทานที่ใกล้เคียงกัน แต่ทำการเปลี่ยนค่ารีแอ็กแตนซ์ของสายอากาศเป็นสามค่า คือ 1. มีค่าใกล้เคียงชิปวงจรรวม (การส่งผ่านกำลังงานสูงสุด คำนวณฐานข้อมูลจากทางบริษัท) 2. มีค่ามากกว่าชิปวงจรรวม 3. มีค่าน้อยกว่าชิปวงจรรวม โดยจากการทดสอบจะพบว่า ข้อมูลการทดสอบและข้อมูลการทดลองมีความสอดคล้องกันคือสายอากาศที่ออกแบบให้เหมาะสมกับ ชิปวงจรรวมมากที่สุดจะได้ระยะการอ่านที่ไกลที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่นำมาออกแบบนั้นมีความถูกต้องในเบื้องต้น ในส่วนต่อมาเป็นการนำเสนอสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน สายอากาศดังกล่าวถูกนำเสนอโดยการออกแบบจะใช้ชิปรุ่น NXP G2XL เช่นเดียวกับสายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตในตัวแรก โดยสายอากาศจะมีขนาดความยาวทางกายภาพที่เล็กลงด้วย

โครงสร้างของการขดวกวนและใช้หลักการลัดวงจรช่วยในการปรับปรุงค่าอิมพีแดนซ์ และสร้างบนวัสดุฐานรอง FR-4 ชนิดอ่อน โดยสายอากาศจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่กลาง 922.5 MHz เท่ากับ 18.59+j197.1 โอห์ม และมีค่าการส่งผ่านกำลังงานเท่ากับ 97.7% มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบทิศทาง และมีระยะการอ่านได้ไกลที่สุดเท่ากับ 2.3 เมตร โดยโครงสร้างของสายอากาศที่ได้ทำการออกแบบทั้งสองโครงสร้างจะแสดงในรูปที่ 6.1

(ก) สายอากาศแท็กไดโพลกับเส้นปรสิต



(ข) สายอากาศแท็กขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อน

รูปที่ 6.1 โครงสร้างสายอากาศที่ทำการออกแบบ

6.3 ข้อดี ข้อเสีย ข้อเสนอแนะ และแนวทางพัฒนา

จากการสร้างและการทดสอบสายอากาศจะเห็นได้ว่าสายอากาศสามารถนำมาใช้ในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุ ได้แต่สายอากาศแท็กชนิดไดโพลกับเส้นปรสิตอาจจะยังมีขนาดใหญ่ แต่ข้อดีของสายอากาศดังกล่าวคือความสะดวกในการปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์และมีโครงสร้างที่ง่ายสำหรับการนำไปศึกษาการออกแบบสายอากาศแท็กในเบื้องต้น โดยโครงสร้างของแท็กดังกล่าวจะมีประโยชน์ต่อการหาค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความถูกต้องเบื้องต้น แต่การที่สายอากาศไดโพลกับเส้นปรสิตยังมีขนาดยาวและสร้างบนวัสดุฐานรองที่มีความหนา 0.8 มิลลิเมตร การนำไปใช้งานจริงก็จะต้องเลือกการนำไปใช้งานให้เหมาะสมดังเช่นใช้กับวัสดุที่มีขนาดใหญ่และมีพื้นผิวระนาบเรียบ ไม่โค้งงอ ส่วนสายอากาศขนาดเล็กที่สร้างบนวัสดุฐานรองชนิดอ่อน หรืออาจจะปรับปรุงคุณลักษณะให้ดีขึ้นด้วยการใช้โปรแกรมในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากมีพารามิเตอร์เป็นจำนวนมาก แต่ว่าสายอากาศที่นำเสนอนี้เป็นรูปแบบโครงสร้างอีกรูปแบบหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้งานกับชิปรุ่น NXP G2XL และเนื่องจากวิธีการที่นำเสนอโครงสร้างของสายอากาศขดวกวนขนาดเล็กบนแผ่นพิมพ์อ่อนนั้นเป็นเพียงแค่โครงสร้างของ

สายอากาศแท็กรูปแบบหนึ่งที่ออกแบบโดยใช้เทคนิคของการเพิ่มความยาวทางไฟฟ้าและการลัดวงจร ซึ่งอาจจะยังมีโครงสร้างและเทคนิคในรูปแบบอื่นที่สามารถให้คุณลักษณะที่เหมาะสมกับชิปวงจรรวมได้เช่นกัน

ระยะการทำงานนั้นอาจจะเห็นได้ว่ายังมีระยะการทำงานที่ไม่ไกลก็เนื่องมาจากกำลังงานส่งของเครื่องอ่านข้อมูลนั้นไม่สูงมาก ซึ่งถ้าหากต้องการระยะการอ่านที่ไกลเพิ่มขึ้นทางหนึ่งสามารถทำได้โดยใช้เครื่องอ่านข้อมูลที่มีกำลังงานส่งเพิ่มขึ้น

วิธีการประเมินค่าอิมพีแดนซ์ของชิปเบื้องต้น โดยหลักการดังกล่าวยังคงเป็นเพียงการประเมินผลที่ปลายทางเท่านั้น แต่ก็สามารถยืนยันความถูกต้องได้ในเบื้องต้น ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบสายอากาศแท็กโดยมากก็จะเป็นการอ้างอิงค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้มาจากข้อมูลจากทางบริษัท ซึ่งยังไม่มีการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ยืนยันและทดสอบได้ว่าที่มีความแน่นอนและถูกต้อง 100 % โดยเฉพาะชิปบางรุ่นนั้นมีโครงสร้างบางส่วนที่ถูกใส่เพิ่มเติมขึ้นมาเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้ในการยึดติดกับสายอากาศแท็ก เช่นชิปรุ่น XRAG 2 ดังนั้นวิธีที่ได้ทำการนำเสนอไปอาจจะเป็นประโยชน์กับผู้ที่จะทำการออกแบบสายอากาศแท็กต่อไป

แนวทางการพัฒนางานวิจัยต่อคือ การศึกษาและค้นคว้าวิธีการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความถูกต้องมากขึ้นสำหรับนำไปทดสอบทั้งสายอากาศและชิปวงจรรวม และในส่วนโครงสร้างของสายอากาศอาจจะเป็นการศึกษาโดยการนำไปออกแบบบนวัสดุฐานรองชนิดอื่นให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุจริงมากขึ้น และสิ่งที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่งอีกส่วนหนึ่งคือการศึกษาถึงผลกระทบของสิ่งแวดล้อมและผลกระทบจากการนำแท็กไปใช้งานกับวัสดุที่สนใจ [36] และการพัฒนาสายอากาศแท็กให้นำไปใช้ได้ในงานที่มีความจำเพาะเจาะจงเช่นการนำไปใช้งานกับวัสดุที่เป็นโลหะ เป็นต้น

บรรณานุกรม

[1] Z. N. Chen, **RFID tag antenna, antennas for portable devices**, England, John Wiley & Sons, 2007.

[2] J. Bank, D. Hanny, M.A. Pachano, L.G. Thompson, **RFID applied**, New Jersey, John Wiley & Sons, 2007.

[3] K. Finkenzeller, **RFID Handbook: Radio-Frequency Identification fundamentals and applications**. New York: John Wiley & Sons, 1999.

[4] D. M. Dobkin, **The RF in RFID passive UHF in practice**, United States of America, Newnes, 2008

[5] สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมและอุปกรณ์ เครื่องวิทยุคมนาคมประเภท RFID Frequency Identification: RFID 17 มกราคม 2551

[6] K. V. S. Rao, P. V. Nikitin, S. F. Lam, "**Impedance matching concepts in RFID transponder design**," Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies (AutoID'05), pp.39-42, 2005.

[7] NXP Semiconductors, Ultra High Frequency smart label ICs [online] Available www.nxp.com/acrobat_download/ literature/9397/75016225.pdf

[8] Available http://detail.en.china.cn/provide/detail,1077002120.html

[9] Available http://www.adcnordic.com/news/intermec-ip30-rfid-reader.php

[10] G. Marrocco, "**The art of UHF RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques**," IEEE Antennas Propagation Magazine., vol. 50, no. 1, pp. 66-79, 2008.

[11] A. Rida, L. Yang, R. Vyas, S. Bhattacharya, and M. M. Tentzeris, "**Design and integration of inkjet-printed paper-based UHF components for RFID and ubiquitous sensing applications**," Proc. 2007 IEEE European Microwave Conference, Munich, Germany, Oct. 2007.

[12] P. Raumonen et al., "**Folded dipole antenna near metal plate**," in Proc. IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp., vol. 1, pp. 848–851, June 2003.

[13] J. D. Griffin, G. D. Durgin, A. Haldi and B. Kippelen, "**RF tag antenna performance on various materials using radio link budgets**," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 5, pp. 247 – 250, Dec. 2006.

[14] Available http://www.cisco.com/en/US/docs/solutions/Enterprise/Mobility/wifich6.html

[15] Available http://www.cardpress.ru/acsess.htm

[16] Available http://animals.howstuffworks.com/pets/pet-travel/pet-microchip1.htm

[17] Available http://www.rfleader.com

[18] Available http://www.omni-id.com

[19] Available http://www.ti.com/rfid/

[20] Available http://www.mdt.cn/index11/production_show.asp?id=77

[21] Available http://www.maxei.co.jp/products/coc/eng-smal_chip.html

[22] K.V.S. Rao, P.V. Nikitin and S.F. Lam, "**Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application**," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 53, no. 12, pp. 3870-2876, Dec. 2005.

[23] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, S. F. Lam, V. Pillai, R. Martinez, and H. Heinrich, "**Power reflection coefficient analysis for complex impedances in RFID tag design**," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 53, no. 9, pp. 2715 – 2721, Sep. 2005.

[24] J. D. Griffin, "**A radio assay for the study of radio frequency tag antenna performance**," Master's Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2005.

[25] P. R. Foster and R. A. Burberry, "**Antenna problems in RFID systems**," IEE Colloquim on RFID, October. 1999, pp. 3/1-3/5.

[26] Y.Tikhov, Y.Kim, and Y.H. Min, "**Compact low cost antenna for passive RFID transponder**," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2006, pp.1015-1018, July 2006.

[27] P. Wongsiritorn and C. Phongcharoenpanich, "**A tapered-meander-line antenna for UHF RFID tag**," Proc. APSAEM08, pp. 322-325, July 2008.

[28] Y.Tikhov, Y.Kim, and Y.H. Min, "**A novel small antenna for passive RFID transponder**," Microwave Conference European,Vol 1, Oct. 2005.

[29] Y. Yamada, W.H. Jung and N. Michishita, "**Extremely small antennas for RFID tags,**" , Proc. 10th IEEE Singapore International Conference, pp. 1-5, Oct. 2006.

[30] H.K.Ryu and J.M. Woo, "**Small-sized square loop antenna using meander line for RFID tag applications**," Proc. IEEE Antennas and Propagation International Symposium , pp. 2463-2466, June 2007

[31] P.V. Nikitin, K. V. S.Rao, R.Martinez, and S.F. Lam, "**Sensitivity and impedance measurements of UHF RFID chips**," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques [Accepted for future publication on 2009]

[32] CST-Microwave Studio, User's manual, 2006

[33] Available http://www.iet.co.th

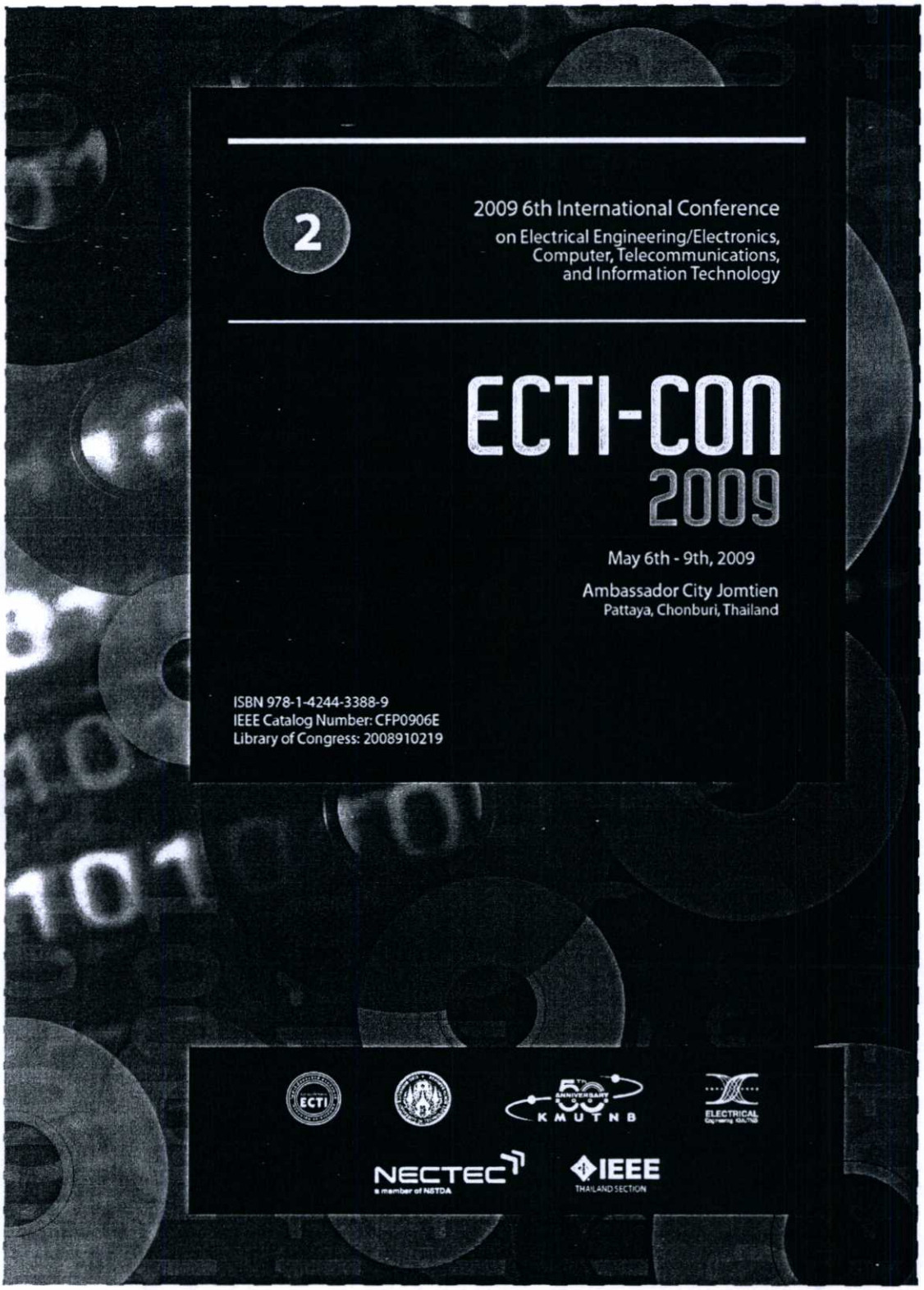
[34] R.Suwalak, "**Elliptical patch antenna on double-layer plate fed by probe for reader of RFID system at UHF band**," Master's Thesis, Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang , Thailand, 2008.

[35] G. Marrocco, "**Multiport sensor RFIDs for wireless passive sensing of objects-basic theory and early results**" IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 56, no. 8, pp. 2691 – 2702, Aug 2008.

[36] D. M. Dobkin and S. M. Weigand, "**Environmental effects on RFID tag antennas**," in Proc. IEEE Int. Microw. Symp., pp. 135 – 138, June. 2005.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่


2
2009 6th International Conference
on Electrical Engineering/Electronics,
Computer, Telecommunications,
and Information Technology
ECTI-CON
2009
May 6th - 9th, 2009
Ambassador City Jomtien
Pattaya, Chonburi, Thailand
ISBN 978-1-4244-3388-9
IEEE Catalog Number: CFP0906E
Library of Congress: 2008910219
ECTI
KMUTNB
ELECTRICAL
NECTEC
a member of NSTDA
IEEE
THAILAND SECTION

A Study on the Triple Band(DCS, PCS, UPCS) Internal Chip Antenna 778
Sungil Park, Younghuk Ko, Hyeonjin Lee, and Yeongseog Lim

Session TPM1-2 : Antenna & Propagation II

A Wideband Bidirectional Antenna Using Truncated Circular Sector Fed by Rectangular Monopole 782
T. Tipsawate, C. Phongcharoenpanich, and S. Kosulvit

Finding Capability Enhancement for 360-degree DOA Finder 786
N. Sangmanee, P. Uthansakul, R. Wongsan, and M. Uthansakul

Dual V shape Slot microstirp Antenna for a bi- and uni-directional radiation pattern 790
Tanawat Pantui, Chatchai Suppitaksakul, and Paitoon Rakluea

UHF-RFID Tag Antenna Design Using Dipole with Parasitic Lines 794
P. Wongsiritorn, C. Phongcharoenpanich, D. Torrungrueng, and M. Krairiksh

Session TPM2-2 : Communication & Information Theory

Tighter Upper Bounds for Terminated Convolutional Codes in Rayleigh Fading Channels 800
Pushpika Wijesinghe, Upul Gunawardana, and Ranjith Liyanapathirana

Fast Simulation of Turbo Codes over Rayleigh Fading Channels 804
Upul Gunawardana, Kim Chi Nguyen, and Ranjith Liyana-Pathirana

A Novel formulation of Hamming Code 808
A. Ahmadpour, A. Ahadpour Shal, and M. Ziabari

Accelerating Asymmetric-Key Cryptography using Parallel-key Cryptographic Algorithm (PCA) 812
Thongpon Teerakanok and Sinchai Kamolphiwong

Path Loss Modeling in Durian Orchard for Wireless Network at 5.8 GHz 816
K. Nuangwongsa, K. Phaebua, T. Lertwiriyaprapa, C. Phongcharoenpanich, and M. Krairiksh

Session TPM3-2 : Microwave Theory and Technique I

Applications of the Modified Extended ZY T-Chart for Problems Associated with CCITLs with Active Characteristic Impedances 822
Kanokwan Vudhivorn, Danai Torrungrueng, and Tuptim Angkaew

Graphical Tool in Analysis of Active Loaded Transmission Lines 826
Chatrpol Lertsirimit and Danai Torrungrueng

Microwave Planar Circuit Design Tool in the Teaching of Microwave Engineering 830
Sommart Khamkleang and Somsak Akatimagool

Ultra-Compact Wideband Ka-Band CMOS Hybrid Ring 834
M. Chirala and C. Nguyen

Design of an Ultra-Wideband Power-Efficient Distributed Low-Noise Amplifier 836
X. Guan and C. Nguyen

UHF-RFID Tag Antenna Design Using Dipole with Parasitic Lines

P. Wongsiritorn[1], C. Phongcharoenpanich[1], D. Torrungrueng[2] and M. Krairiksh[1]

[1]Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand.
E-mail: kpchuwon@kmitl.ac.th, kkmonai@kmitl.ac.th
[2]Faculty of Engineering and Technology, Asian University, Chon Buri 20150, Thailand.
E-mail: dtg@asianust.ac.th

Abstract- **This paper presents the RFID tag antenna design for the frequency band of 920-925 MHz corresponding to the standard of UHF RFID in Thailand. An importance for design the tag antenna is that the impedance of the tag antenna must be conjugately matched with the impedance of the IC chip for the maximum power transfer from the tag antenna to the IC chip. The tag antenna can be easily designed and easy to adjust for its input impedance.**

I. Introduction

Nowadays, the RFID systems are used in many applications such as logistics, supply chain, access control, product management in warehouse and many others [1]. Therefore, many countries including Thailand have used these systems in many applications, and the demand increases all the times. The RFID systems are generally distinguished into four frequency ranges; i.e., low frequency (125-134.2 kHz), high frequency (13.56 MHz), ultra high frequency (433, 860-960 MHz) and microwave frequency (2.45, 5 GHz). The standards of the UHF RFID are different for each country [2]. For example, the UHF RFID in Thailand employs the frequency range between 920 and 925 MHz, where the center frequency is 922.5 MHz [3]. The RFID systems use wireless radio communication technologies to uniquely identify tagged objects. There are three basic parts, namely tag, reader and controller. The tag is composed of electronics chip and antenna. The reader consists of an antenna, RF electronics module and electronics module controller. The controller is either PC or workstation, and it is used with controlled software [4].

The investigations of tag antennas for UHF-RFID systems are very active research topic. Generally, the antenna design for RFID systems uses some specific antenna types, such as dipole antennas, patch antennas and many others [5]. It is known that IC chip have complex input impedances, and their impedances are varied with frequency. One important point for tag antenna design is that the tag antenna must be conjugately matched with the desired IC chip for the maximum power transfer [1-5]. For this reason, this paper presents the antenna structure that is easy to adjust its input impedance, and convenient to design and fabricate.

This paper is organized as follows. Section II presents tag antenna design. Antenna characteristics and fabrication and measurement are illustrated in Sections III and IV, respectively. Finally, Section V provides conclusions.

II. Tag Antenna Design

The objective of tag antenna design is to obtain high communication performance with increasing the maximum read range. For the maximum power transfer from the tag antenna ($P_{tag-ant}$) to the IC chip ($P_{tag-chip}$), the real part of tag antenna impedance (R_A) must be equal to the real part of the IC chip impedance (R_T), and the imaginary part of the tag antenna impedance (X_A) must be added with the imaginary part of the IC chip impedance (X_T) to obtain null value (conjugate matching). This can be readily seen in the following equation [1].

$$P_{tag-chip} = \left[1 - \left|\frac{Z_T - Z_A^*}{Z_T + Z_A}\right|^2\right] P_{tag-ant} \quad , \tag{1}$$

where $Z_T = R_T + jX_T$ is the IC chip impedance, and the tag antenna impedance is $Z_A = R_A + jX_A$. The impedance of the NXP G2XL IC chip from the data sheet in [7] is approximately 21.3-j191.7 Ω at the frequency of 922.5 MHz. Therefore, it aims to design the tag antenna such that its impedance is close to 21.3+j191.7Ω.

For the first design, the dipole antenna in Fig. 1 is used because the structure is easy to design. It is designed on FR-4 substrate (ε_r = 4.3, $\tan\delta$ = 0.025, thickness = 0.764 mm). The gap (s_d) between the radiating patch is fixed at 2 mm. Subsequently, the length (l_{dd}) of the conventional dipole antenna is varied to seek for the appropriated impedance where the length (l_w) is 3 mm, and the width (w_w) is fixed at 4 mm to match with the chip configuration.

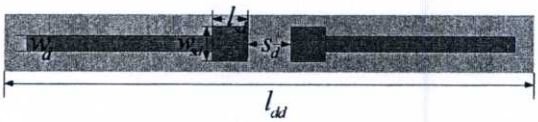
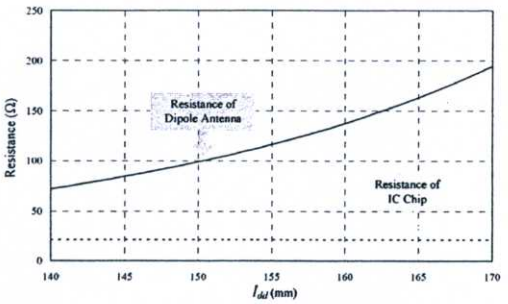
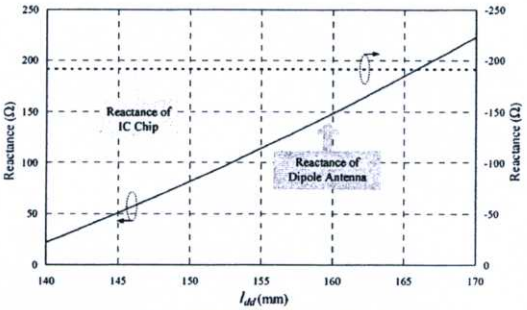


Figure 1. The conventional dipole antenna.

978-1-4244-3388-9/09/$25.00 ©2009 IEEE



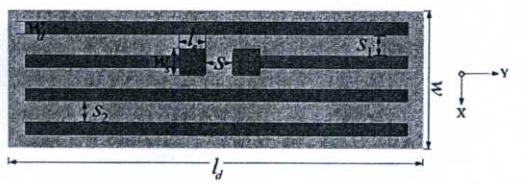
(a) Resistance for various lengths.



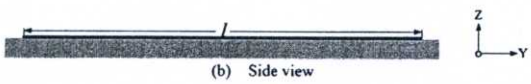
(b) Reactance for various lengths.

Figure 2. The impedance of the conventional dipole antenna for various lengths at 922.5 MHz.

In Fig. 2, the impedance of the conventional dipole antenna simulated by using CST [8] varies with the dipole length. From this structure, the resistance of the conventional dipole antenna is too high to obtain the opposite reactance of the IC chip. Therefore, parasitic lines are applied to adjust the resistance of the antenna as shown in Fig. 3.



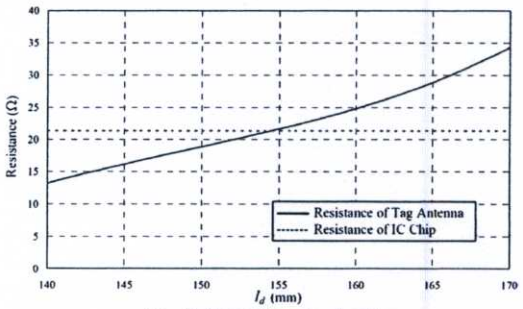
(a) Front view



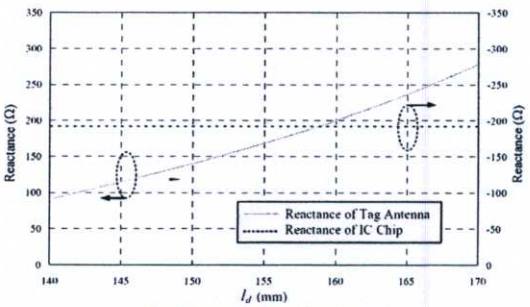
(b) Side view

Figure 3. Proposed antenna structure.

The structure and dimension of the proposed antenna are illustrated in Fig. 4. The antenna contains three symmetrical parasitic lines with identical length. The number of parasitic lines can be appropriately adjusted such that its input resistance is close to 21.3Ω. In addition, the length of the parasitic line can be used to adjust the resistance of the tag antenna. Each parasitic line possesses the width (w_s) of 1 mm, respectively. All antenna parameters are tabulated in Table I. The length (l) of the antenna is varied to determine the appropriate impedance. Figure 4 illustrates variations of the impedance of the proposed tag antenna to its length. Figure 4(a) shows the simulated resistance when the length of the proposed tag antenna is varied. It is observed from Fig. 4(b) that the increasing of the reactance of the proposed tag antenna is occurred when the length is increased. From Fig. 4, the proper length of the proposed antenna is chosen as l=156 mm resulting in the impedance of 23.43+j186.7 Ω, which is close to the conjugate of the IC chip impedance.



(a) Resistance for various lengths.



(b) Reactance for various lengths.

Figure 4. The impedance of the proposed tag antenna for various lengths.

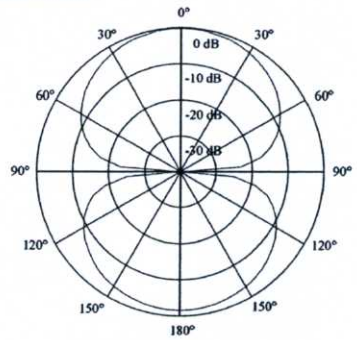
TABLE I
ANTENNA PARAMETERS

Parameters	Physical Size (mm)
w	15
w_s	4
w_d	1
l	156
l_s	3
l_d	160
s	2
s_1	25
s_2	2

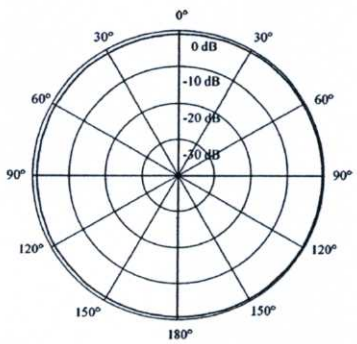
III. ANTENNA CHARACTERISTICS

The simulation of the antenna characteristics (radiation pattern, impedance, directivity and return loss) at 922.5 MHz will be reported in this section. From the design of the proposed antenna, the tag antenna was simulated by using parameters in Table I.

A. Radiation Pattern



(a) E-plane (YZ-plane)



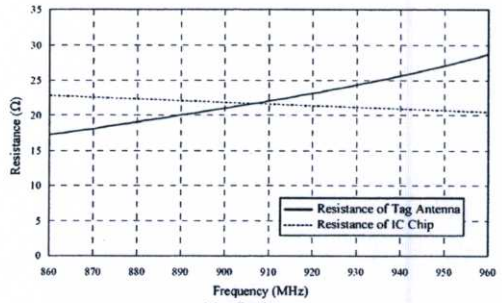
(b) H-plane (XZ-plane)

Figure 5. Simulated radiation pattern.

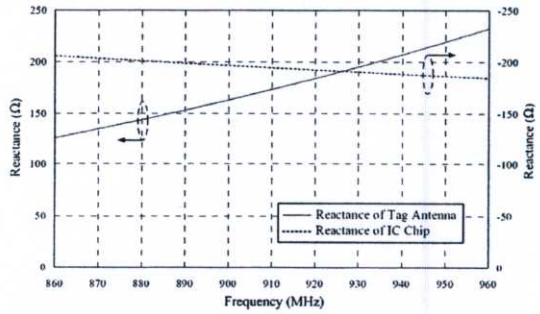
The radiation pattern is plotted for both E-plane and H-plane. Figure 5 (a) shows the simulated result of the radiation pattern in the E-plane (YZ-plane). From Fig. 5(a), it is obvious that the radiation pattern of the proposed tag antenna is omni-directional beam with the vertical half-power beamwidth of 76.7°. In addition, Figure 5(b) illustrates the radiation pattern in the H-plane (XZ-plane). It is found that the beam is rotational symmetry along the X-axis.

B. Impedance Characteristics

In this section, the impedance characteristics as a function of the frequency are shown in Fig. 6. Note that the resistance of the tag antenna varies between 17.3 Ω and 28.7 Ω for the frequency range between 860 MHz and 960 MHz, which is in neighborhood of the resistance of the IC chip which varies between 20.5 Ω and 22.9 Ω. Note that the reactance of the tag antenna increases with the frequency between 125.9 Ω and 232.3 Ω. The impedance at the frequency of 922.5 MHz is equal to 23.43+j186.7 Ω.



(a) Resistance



(b) Reactance

Figure 6. Impedance of the proposed tag antenna.

C. Directivity

In Fig. 7, the directivity of the proposed tag antenna is decreased with the frequency. Note that the directivity of the antenna is equal to 2.53 dB at the frequency of 922.5 MHz.

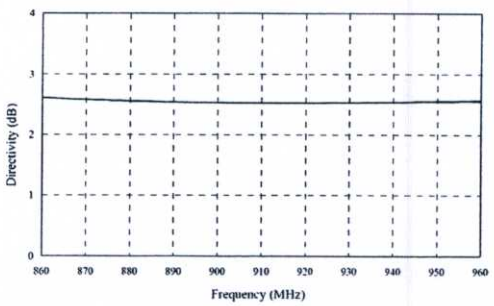


Figure 7. Directivity of the proposed tag antenna.

D. *Return Loss*

Figure 8 shows the return loss of the proposed tag antenna. Note that the half-power bandwidth (return loss less than -3 dB) of the proposed antenna covers the frequency range of 887-960 MHz, which cover the operating frequency of UHF RFID in Thailand (920-925 MHz).

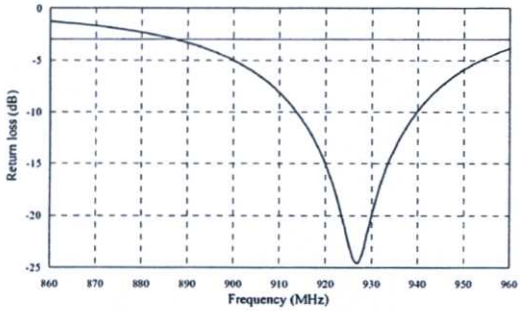


Figure 8. Return loss of the proposed tag antenna.

IV. Fabrication And Measurement

The prototype antenna was fabricated by using parameters in Table I. The photograph of the proposed antenna is depicted in Fig. 9. The maximum read range was measured by using IE Technology Reader (RU-110U). The reader antenna radiates circular polarization, and the gain of the reader antenna is 7.7 dBic. The obtained maximum read range is 2.6 m.

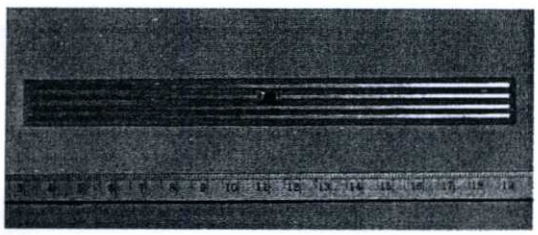


Figure 9. Photograph of the prototype antenna.

V. Conclusions

The tag antenna for the UHF-RFID system is presented in this paper. The length and the number of the parasitic lines are appropriately adjusted for impedance matching. The appropriate impedance of the tag antenna for conjugate matching with the IC chip impedance is found to be 21.3+j191.655 Ω. The impedance of the presented tag antenna is 23.43+j186.7 Ω at the center frequency of 922.5 MHz, and possesses the power transmission about 98.56%. The radiation pattern is omni-directional beam. From the measurement, the maximum read range of the proposed antenna is 2.6 m. This tag antenna can be used in the national standard of UHF RFID in the frequency range of 920-925 MHz.

Acknowledgment

The authors would like to thank Dr. Pornanong Pongpaibool to provide IC chips and useful discussions. This work was supported by the Thailand Research Fund (TRF) under the contract number RTA-5180002.

References

[1] Z. N. Chen, "RFID tag antenna, *Antennas for Portable Devices*, England, John Wiley & Sons, 2007.

[2] J. Bank, D. Hanny, M.A. Pachano, L.G. Thompson, *RFID Applied*, New Jersey, John Wiley & Sons, 2007.

[3] P. Wongsiritorn and C. Phongcharoenpanich, "A tapered-meander-line antenna for UHF RFID tag," *Proceeding of APSAEM08*, July 2008, pp. 322-325.

[4] K.V.S. Rao, P.V. Nikitin and S.F. Lam,"Antenna design for UHF RFID tags: a review and a practical application," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 53, no. 12, December 2005, pp. 3870-2876.

[5] G. Marrocco," The art of UHF RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques," *IEEE Antennas Propagation Magazine.*, vol. 50, no. 1, February 2008, pp. 66-79.

[6] P. R. Foster and R. A. Burberry, "Antenna problems in RFID systems,"*IEE Colloquim on RFID*, October. 1999, pp. 3/1-3/5.

[7] NXP Semiconductors, Ultra High Frequency Smart Label ICs [online] Available www.nxp.com/acrobat_download/ literature/9397/75016225 .pdf

[8] CST-Microwave Studio, User's manual, 2006

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวพิชชานันท์ วงศ์ศิริธร
วัน เดือน ปีเกิด	23 เมษายน 2528 ที่จังหวัดปทุมธานี
ที่อยู่	16/1 หมู่ 2 ต. บ้านกลาง อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2550 สำเร็จการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความที่ได้ตีพิมพ์

1. P. Wongsiritorn, C. Phongcharoenpanich and S. Kosulvit, "Parasitic Array of Circular Plate for UWB Applications," *Proceedings of the 2007 Joint International Conference on Information and Communication Technology (JICT 2007)*, Vientiane, pp.304-307, 4 pages, Dec. 2007.
2. P. Wongsiritorn and C.Phongcharoenpanich, "A Tapered-Meander-Line Antenna for UHF RFID Tag," *Proceedings of the 2008 Asia Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics*, Bangkok, pp.322-325, July 2008.
3. P. Wongsiritorn, C.Phongcharoenpanich, D.Torrungrueng and M.Krairiksh "UHF-RFID Tag Antenna Design Using Dipole with Parasitic Lines," *Proceedings of the 2009 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology International Conference*, Pattaya, vol.2, pp.I-794 to I-797, May 2009.
4. P. Wongsiritorn and C.Phongcharoenpanich, "Design of a UHF RFID Tag Antenna Using Tapered-Meander-Line Antenna Structure," *Accepted for publication in Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics,* Sep. 2009.