

สายอากาศมีเนเดอร์นัทกของระบบซ่งเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ
ในย่านความถี่เอชเอฟ

MEANDER TAG ANTENNA FOR UHF RFID

นัธภาคย์ สังกษารักษ์

NITHIPARK SANGKHARAK

วิทยานัพนตณเป็นส่วนหน่งของถารกัถษาตามหลักสุตรปรินญญูวักษกรรณศาสตรณหาวัฒนัถถ

สาขาวิชาวักษกรรณโทรคณนาคณ

บัฒนัถถวักษาสักย

สธฉบับเทคโนโลยีพระจลณเกธ่าเจ้าคณทหารธาคกรรณบั้ง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-010-105

สายอากาศมีนเดอร์แท็กของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ
ในย่านความถี่เอชเอฟ

MEANDER TAG ANTENNA FOR UHF RFID

นธิภาคย์ สังฆรักษ์

NITHIPARK SANGKHARAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-010-105

MEANDER TAG ANTENNA FOR UHF RFID

NITHIPARK SANGKHARAK

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

KMITL-2007-EN-M-010-105

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สายอากาศมินิเคอร์แท็กของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ยูเอชเอฟ
นักศึกษา	นาย นิธิภักย์ สังฆรักษ์
รหัสนักศึกษา	45060516
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์คุณลักษณะสายอากาศแบบมินิเคอร์แท็กสำหรับระบบขนถ่ายลำเลียงสินค้าสำหรับทรานสปอนเดอร์ของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) ในช่วงความถี่ยูเอชเอฟ (Ultra High Frequency: UHF) โดยสายอากาศนี้จะถูกนำไปเชื่อมต่อกับไมโครชิปอิเล็กทรอนิกส์หรือโมดูลขนาดเล็ก ซึ่งสายอากาศจะต้องออกแบบให้มีการส่งผ่านกำลังสูงสุดระหว่างสายอากาศและตัวไมโครอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้มีระยะการสื่อสารที่ไกลขึ้น และต้องการให้มีการแพร่กระจายคลื่นออกแบบรอบตัว โดยที่โครงสร้างไม่ซับซ้อนและราคาถูก โดยจะวิเคราะห์สายอากาศ เพื่อให้ได้คุณลักษณะอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่เหมาะสม โดยการใช้วิธีการออกแบบการทดลองทาง (DOE) ซึ่งเป็นวิธีการทางสถิติเข้ามาช่วย จากการออกแบบการทดลองสามารถนำหลักการไปวิเคราะห์สำหรับสายอากาศที่มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าค่าอื่นๆ ได้ ซึ่งการวิเคราะห์จะเริ่มจากการ คำนวณและออกแบบสายอากาศให้มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าให้แมตซ์กับอิมพีแดนซ์ด้านออกของไมโครชิปอิเล็กทรอนิกส์หรือโมดูลขนาดเล็ก จากนั้นทำการหาแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นและทำการคำนวณคุณลักษณะต่างๆ ได้ ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า $33.2 + j6.395 \Omega$ ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง 2.075 dBi ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่ง $1.431:1$ ค่าความกว้างแถบความถี่ 6.28% ค่าอัตราขยาย 1.7 dBi เพื่อยืนยันผลจากการคำนวณ ได้ทำการสร้างสายอากาศขึ้นมาเพื่อทดสอบ และวัดระยะทางการสื่อสารสูงสุดได้ 122 เมตร และนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยการต่อโมดูลภาครับ ภาดส่ง และทดสอบการส่ง การรับข้อมูลของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ พบว่าสายอากาศสามารถทำงานได้ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งาน และมีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นรอบตัวตามต้องการ

Thesis Title	Meander Tag Antenna for UHF RFID
Student	Mr. Nithipark Sangkharak
Student ID.	45060516
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Chuwong Phongcharoenpanich

ABSTRACT

This thesis presents the characteristic analysis of meander tag antenna for supply chain for transponder of Radio Frequency Identification (RFID) at Ultra High Frequency (UHF) band. The meander tag antenna will be connected with the Integrating Circuit (IC) or transmission module. The antenna is designed for maximum power transfer between antenna and IC or transmission module for long read range. The omni-directional radiation pattern is required for this application. The antenna is designed to operate with the advantage of simple structure and inexpensive cost. In the analysis, it is started by considering impedance matching with IC or transmission module by using statistic method called Design of Experiment or DOE. The result from DOE can apply for antennas that require other input impedances. It is the input impedance of $33.2 + j6.395 \Omega$, directivity of 2.075 dBi, standing wave ratio of 1.431:1, bandwidth of 6.28% and gain of 1.7 dBi are obtained. In order to verify the theoretical calculations, the prototype antenna is fabricated and tested to compare with the theoretical calculations. The maximum read range is measured between transmitting and receiving module to test data transfer of RFID system and we achieved 122 meters. The result from design and testing found that bandwidth of antenna can cover UHF band (433 MHz) and radiation pattern is omni-directional one as required.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาเป็นอันมากจากของ ผศ.ดร.ชวงค์พงศ์เจริญพาณิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่เคารพของข้าพเจ้า โดยเป็นผู้ให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางในการศึกษาเสมอมา ตลอดจนอบรมสั่งสอน ตลอดเวลายาวนานของการศึกษา ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมผล โกศลวิตร ผู้ซึ่งให้คำแนะนำที่นำไปสู่การแก้ไขปัญหา ความเข้าใจที่ชัดเจน และขอขอบพระคุณ ศ.ดร. โมไนย ไกรฤกษ์ หัวหน้าห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายสำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยและกรุณาให้ข้าพเจ้าได้เสนอความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์ตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา ขอขอบพระคุณ รศ.เวช วิเวก ในการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมถึงคำชี้แนะที่มีคุณประโยชน์ ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จเร สุรวัฒน์ปัญญา ที่ได้อบรม คำแนะนำในการแก้ไข ขอขอบพระคุณท่านคณาจารย์ทุกท่านที่ให้โอกาสแก่ผมในวันนี้

ขอขอบคุณ คุณศุภชัย เกรียงชนสาร คุณศราวุธ ชัยมูล คุณกฤตยา ชวานนท์พิทักษ์ คุณดวงอาทิตย์ ศรีมูล คุณไพโรจน์ วุ่นชุม เพื่อนและพี่ๆ ที่ให้ความกรุณาตลอดมา คุณกิตติศักดิ์ แพบัว คุณรัฐพงษ์ สุวลักษณ์ น้องๆ ที่คอยให้การสนับสนุนเสมอมา และขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการสื่อสารไร้สายทุกท่านสำหรับคำแนะนำ การดูแลและข้อคิดดีๆ ระหว่างการอภิปรายตลอดช่วงเวลาที่ผ่านมา รวมทั้งความช่วยเหลือตลอดเวลา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณมารดา ที่ให้ชีวิต ความรักความห่วงใย ตลอดจนให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้าจนมาถึงวันนี้

นิธิภาคย์ สังฆรักษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ ภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์และขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	5
1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	7
2.1 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ.....	7
2.1.1 ทรานสปอนเดอร์ (Tag)	7
2.1.1.1 Active RFID Tag.....	8
2.1.1.2 Passive RFID Tag.....	8
2.1.2 ประเภทของ RFID Tag	8
2.1.2.1 Tag แบบจานและเหรียญ (Disk and coin).....	9
2.1.2.2 Tag แบบพลาสติก (Plastic housing)	9
2.1.2.3 Tag แบบกระเปาะแก้ว (Glass housing)	10
2.1.2.4 Tag แบบพวงกุญแจ (Key and Key fog)	10
2.1.2.5 Tag แบบนาฬิกา	11
2.1.2.6 Tag แบบ Smart label	11
2.1.2.7 Tag มาตรฐาน ID – 1 และสมาร์ทการ์ด แบบไร้สัมผัส	11
2.1.2.8 Tag แบบขดลวดบนชิป (Coil – on – chip).....	12

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2 เครื่องอ่าน (Reader)	12
2.3 หลักการทำงานของ RFID	13
2.3.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX)	15
2.3.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half Duplex (HDX)	16
2.4 ประเภทของระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ	16
2.4.1 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่จำแนกโดยขนาดของหน่วยความจำ	16
2.4.1.1 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุชนิด 1 บิต (1 Bit Type)	16
2.4.1.2 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุชนิด หน่วยความจำมากกว่า 1 บิต	17
(Data Carrier Type)	
2.4.2 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่จำแนกโดยลักษณะการคล้องของสัญญาณ	17
2.4.2.1 Close Coupling	17
2.4.2.2 Remote Coupling	17
2.4.2.3 Long Range	18
2.4.3 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่จำแนกตามความสามารถของระบบ	19
2.4.3.1 ระบบอ่านอย่างเดียว (Read Only System).....	19
2.4.3.2 ระบบอ่านเขียน (Read-Write System)	19
2.4.3.3 ระบบไมโคร โพรเซสเซอร์ (Microprocessor System)	19
2.5 ย่านความถี่ของระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ	20
2.6 ข้อควรพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ RFID	21
2.6.1 ความถี่ใช้งาน.....	21
2.6.2 ระยะทำการ.....	22
2.6.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย	22
2.6.3.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล	22
2.6.3.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์	22
2.6.4 ขนาดของหน่วยความจำ	22
2.7 หลักการของการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)	23

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.7.1	หลักการเบื้องต้นในการออกแบบการทดลอง.....	23
2.7.2	วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	23
2.7.3	การทดลองแบบ Factorial	23
2.7.4	คำนิยามต่างๆ ในการออกแบบการทดลอง	25
2.7.5	2^k Factorial Designs	26
2.7.5.1	Main Effect.....	26
2.7.5.2	Interaction.....	27
2.7.5.3	การออกแบบการทดลอง.....	27
2.7.5.4	ขอบเขตของการทดลอง DOE (Design of Experiment).....	28
บทที่ 3	การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์	29
3.1	บทนำ	29
3.2	เงื่อนไขการออกแบบสายอากาศที่ใช้สำหรับ Tag	29
3.2.1	ความถี่ใช้งาน	29
3.2.2	วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ.....	29
3.2.2.1	การเลือก Printed Circuit Board (PCB) ที่จะนำมาใช้ทำสายอากาศ.....	29
3.2.2.2	ค่า ϵ_r ของวัสดุฐานรองที่ใช้ทำสายอากาศ.....	30
3.2.3	ขนาดของสายอากาศ.....	30
3.2.3.1	วิวัฒนาการของสายอากาศ.....	30
3.2.3.1.1	สายอากาศแบบไดโพล	30
3.2.3.1.2	สายอากาศแบบ Strip Dipole.....	31
3.2.3.1.3	สายอากาศแบบมินิเคอร์แท็ก	31
3.2.3.2	การพิจารณาเลือกขนาดความกว้างของ Strip line บนวัสดุฐานรอง.....	31
3.2.4	การใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)	40
	สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบ 2^k Factorial Design	
3.2.5	สนามระยะไกล.....	48

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.6 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)	48
3.2.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)	49
3.2.8 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR)	51
3.2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)	52
3.2.10 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity).....	53
3.2.11 ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth)	53
3.2.12 ค่าอัตราขยาย(Gain).....	54
บทที่ 4 การสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบ	55
4.1 บทนำ	55
4.2 การสร้าง และการทดสอบสายอากาศมินิเคอร์แท็ก.....	55
4.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	55
4.2.2 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ	58
4.3 บทสรุป	60
บทที่ 5 การประเมินสมรรถนะของสายอากาศ	61
5.1 บทนำ	61
5.2 พื้นฐาน Tag ตามมาตรฐานของ EPC.....	61
5.3 ระยะบริการสูงสุด (Maximum Read Range)	62
5.4 การทดสอบสมรรถนะ	63
5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น	65
5.6 การทดสอบการรับ-ส่งสัญญาณ.....	67
5.6.1 ขั้นตอนการติดตั้งชุดทดสอบภาครับ-ส่ง	67
5.6.1.1 การกำหนดค่าชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบของภาคส่ง.....	67
5.6.1.2 การกำหนดค่าชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบของภาครับ.....	68
5.6.1.3 ผลการวัดสัญญาณของข้อมูลทั้งภาครับและภาคส่ง.....	68

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.6.2 การตั้งค่าพอร์ทและค่า Bit Rate ของคอมพิวเตอร์	70
5.7 สรุป	73
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	74
6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม	74
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา	75
เอกสารอ้างอิง.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	78

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 เปรียบเทียบข้อแตกต่างของเทคโนโลยีในแต่ละระบบ.....	2
3.1 ค่าช่วงกว้างความถี่ และ Return Loss เมื่อปรับค่าความกว้าง Strip Line โดยความยาว.....	32
3.2 จำนวนการทดลองสำหรับ DOE แบบ 2^k Factorial Design.....	41
3.3 ค่าระดับของตัวแปรแต่ละตัวสำหรับ DOE แบบ 2^k Factorial Design.....	42
3.4 แสดงขนาดของสายอากาศมินิเจอร์แท็กที่ได้จากออกแบบ.....	48
5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ.....	64

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวอย่างบาร์โค้ด.....	1
1.2 ตัวอย่างสมาร์ทการ์ด.....	2
1.3 Tag ของระบบชี้บ่งอัตโนมัติ.....	4
1.4 รูปแบบการทำงานของ RFID Tag และตัวอ่าน Reader	4
1.5 แบบ โครงสร้างจำลองการทำงานของ RFID.....	5
1.6 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ สำหรับการขนถ่ายลำเลียงสินค้า สำหรับระบบอุตสาหกรรม.....	6
การผลิต	
2.1 Active RFID Tags.....	8
2.2 Passive RFID Tag.....	8
2.3 Tag แบบงานและเหรียญ.....	9
2.4 Tag แบบพลาสติก.....	9
2.5 Tag แบบกระดาษแก้ว.....	10
2.6 Tag แบบพวงกุญแจ.....	10
2.7 Tag แบบ Smart label.....	11
2.8 ส่วนประกอบของเครื่องอ่าน RFID.....	12
2.9 เครื่องอ่าน RFID แบบอุโมงค์.....	13
2.10 เครื่องอ่าน RFID แบบประตู.....	13
2.11 รูปแบบการทำงานของ RFID Tag และเครื่องอ่าน Reader.....	14
2.12 แบบ โครงสร้างจำลองการทำงานของ RFID.....	15
2.13 การสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex.....	16
2.14 การติดต่อสื่อสารระหว่าง Tag และ Reader แบบ Inductive coupling (LF และ HF band).....	18
2.15 โครงสร้างการทำงานของระบบ RFID ย่าน UHF และ ไมโครเวฟ.....	19
2.16 ย่านความถี่ต่างๆ ของระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ.....	20
2.17 ตารางแสดง 2^k Factorial design สำหรับ factors ต่างๆ.....	27
3.1 สายอากาศแบบไดโพล.....	30
3.2 สายอากาศแบบ Strip line.....	31
3.3 สายอากาศแบบมีนเคอร์แท็ก.....	31
3.4 Strip line ที่ขนาด 30 เซนติเมตรที่ความกว้างต่างๆกัน.....	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 กราฟของ $ S_{11} $ ในช่วงความถี่ 400 – 500 MHz.....	32
3.6 แนวโน้มของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแปรผันตามความกว้างของเส้น Strip Line.....	33
3.7 แนวโน้มของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแปรผันตามความยาวของเส้น Strip Line.....	34
3.8 เปรียบเทียบผลของความกว้างและความยาวที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า.....	35
3.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ขนาดความกว้างของ Strip Line ต่างๆกัน.....	37
3.10 การนำ Strip Line มาخذและการลดจำนวนขดของ Strip Line.....	38
3.11 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่จำนวนขดของสายอากาศต่างๆกัน.....	38
3.12 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่จำนวนขดของสายอากาศต่างๆกัน.....	39
3.13 การปรับขนาดของสายอากาศที่ตัวแปร X และ Y.....	40
3.14 ลักษณะทางกายภาพของสายอากาศที่เราใช้ DOE ในการวิเคราะห์.....	41
3.15 ระดับความน่าเชื่อถือของค่าที่ได้จากการทดลอง DOE.....	42
3.16 Main effect ของ Output ของค่า Resistance.....	43
3.17 Main effect ของ Output ของค่า Reactance.....	43
3.18 Interaction ของ Output ของค่า Resistance และ Reactance.....	44
3.19 ตัวอย่าง Optimizer ของ DOE.....	45
3.20 เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทำ DOE กับค่าที่ได้จากการคำนวณสำหรับค่าของ.....	45
Resistance และ Reactance	
3.21 การทำ Optimizer ของ DOE สำหรับสายอากาศที่อิมพีแดนซ์ด้านเข้า $50 + j0 \Omega$	46
3.22 สายอากาศมินเดอร์แท็กสำหรับระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่ได้จากการออกแบบ.....	47
3.23 ผลการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ออกแบบ	49
ที่ความถี่ 400 - 500 MHz	
3.24 วงจรสมมูลของสายอากาศกับไมโครชิปหรือโมดูล.....	49
3.25 ผลการวิเคราะห์ค่า $ S_{11} $ ของสายอากาศที่ออกแบบ ที่ความถี่ 400 – 500 MHz	50
3.26 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ออกแบบ	51
ที่ความถี่ 400 – 500 MHz	
3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ E -Plane และ H- Plane	52
ที่ความถี่ 433.4 MHz	
3.28 ค่าสภาพเจาะงทศทาง ที่ความถี่ 400 - 500 MHz	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.29 ค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ความถี่ 400 – 500 MHz	54
4.1 รูปถ่ายสายอากาศมินิคอร์แท็กสำหรับระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่ได้สร้างขึ้นจริง	55
4.2 การติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ	56
E-plane และ H-plane	
4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane.....	57
4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane	57
4.5 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมินิคอร์แท็ก	58
4.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมินิคอร์แท็ก	59
4.7 ค่า $ S_{11} $ ที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมินิคอร์แท็ก	59
5.1 การ Modulate สัญญาณด้วยวิธี ASK ในระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ	62
5.2 การทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ	64
5.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane	65
5.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane	66
5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบในระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ	66
(E-plane)	
5.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบในระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ	66
(H-plane)	
5.7 ชุดภาคส่ง ซึ่งประกอบไปด้วยโมดูลภาคส่ง TLP434 และ ไมโครคอนโทรลเลอร์	67
5.8 แสดงชุดข้อมูลที่ใช้ทำการทดสอบภาคส่งและภาครับ	67
5.9 การต่อดัวย พอร์ต RS-232 และ USB	68
5.10 ชุดภาครับซึ่งประกอบด้วย RS-232 และ โมดูลภาครับ RLP434	68
5.11 ภาพสัญญาณเอาต์พุตจากไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนส่งไปที่โมดูล	69
5.12 ภาพสัญญาณเอาต์พุตจากภาครับหลังทำการ Demodulate แล้วที่เครื่องอ่าน	70
5.13 การตั้งค่าที่คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลสัญญาณที่ส่งมาด้วย Hyper Terminal	70
5.14 สัญญาณที่คอมพิวเตอร์ อ่านได้ผ่านพอร์ต COM3 จาก RS-232 หรือ USB	71
5.15 การตั้งค่า Bit Rate และค่าของชุดข้อมูล	72
5.16 ลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการอ่านผ่านโปรแกรม Hyper Terminal	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า ความต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารของมนุษย์ นั้นมีมาตั้งแต่อดีต เริ่มตั้งแต่การสื่อสารแบบใช้สายนำสัญญาณ จนถึงยุคของสื่อสารแบบไร้สายซึ่งเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

ระบบชี้เฉพาะอัตโนมัติ หรือ Auto-ID เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้อุปกรณ์ เครื่องมือหรือเครื่องจักรสามารถบ่งบอกวัตถุ สิ่งของ แม้แต่คนหรือสัตว์ หรือแม้กระทั่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งล้วนมีความสำคัญในการอำนวยความสะดวกในการทำธุรกิจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการบันทึกระบบฐานข้อมูลอย่างรวดเร็ว แทนที่จะต้องใช้การนับหรือจดบันทึกโดยมนุษย์ อันอาจมีโอกาที่จะเกิดความผิดพลาดได้เสมอ ในปัจจุบันนี้ระบบชี้เฉพาะอัตโนมัติ (Automatic Identification) ถูกนำมาใช้งานและพัฒนาไปอย่างมากทั้งในภาคอุตสาหกรรม ลอจิสติกส์ กระบวนการผลิต การขนถ่ายวัตถุดิบ ฯลฯ ระบบชี้เฉพาะอัตโนมัติจะนำมาใช้ในการจัดเก็บข้อมูลระบุสถานะของคน สัตว์ สิ่งของ เช่น สินค้าที่เราสนใจ

มาตรฐานเทคโนโลยี Auto-ID มีอยู่หลายประเภท บางประเภทต้องการสัมผัสกับเครื่องอ่าน (Contact Auto-ID) ในขณะที่อีกหลายประเภทเป็นแบบไม่ต้องใช้การสัมผัสกับเครื่องอ่าน (Contactless Auto-ID)

ระบบบาร์โค้ดมีข้อเสียอยู่ที่การอ่านแถบข้อมูลแบบแท่ง แม้จะไม่ได้สัมผัสกันโดยตรงแต่จำเป็นต้องอยู่ใกล้กันพอประมาณที่ตัวอ่านสามารถอ่านแถบข้อมูลได้ และเมื่อใช้ไปนานๆ แถบแบบแท่งอาจสึกกร่อนและชำรุดได้ง่ายอีกทั้งไม่ทนต่อการขีดข่วน ทำให้ไม่สามารถอ่านข้อมูลจากแถบข้อมูลดังกล่าวได้ รวมทั้งจำนวนข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้มีขนาดที่จำกัดยิ่งข้อมูลมากยิ่งต้องมีแถบที่ยาวขึ้นทำให้ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานที่มีการเก็บบันทึกข้อมูลจำนวนมากๆ และการอ่านข้อมูลก็ทำได้แค่ครั้งละชิ้นต่อตัวอ่านหนึ่งตัว ระยะทำการได้ไม่ไกล



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างบาร์โค้ด

ระบบสมาร์ตการ์ดเป็นระบบซีเฉพาะอัตโนมัติอีกแบบหนึ่ง ที่การอ่านหรือเขียนข้อมูลจำเป็นต้องอาศัยการสัมผัสโดยตรงจึงจะสามารถเกิดการถ่ายโอนข้อมูลได้ เนื่องจากการที่ต้องมีการสัมผัสกับตัวอ่านตลอดเวลาที่มีการโอนข้อมูล และเมื่อใช้ไปนานๆจะเกิดการสึกหรอของหน้าสัมผัสได้ จนทำให้ไม่สามารถอ่านข้อมูลได้อีก และการอ่านข้อมูลก็ทำได้แค่ครั้งละชิ้นต่อตัวอ่านหนึ่งตัวเท่านั้นซึ่งเหมือนกับระบบบาร์โค้ด อีกทั้งระยะทำการสั้นมากต้องสัมผัสกับตัวอ่านเท่านั้น



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างสมาร์ตการ์ด

ปัจจุบันได้เกิดมาตรฐาน Auto-ID ที่ได้รับความนิยมในการใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ อันเป็นผลมาจากความสะดวกในการใช้งาน รวมทั้งศักยภาพในการรองรับข้อมูลและความต้องการใช้งานได้ทุกรูปแบบอีกทั้งต้นทุนยังไม่สูงมาก ซึ่งเป็นมาตรฐานการสื่อสารแบบไร้สัมผัส ช่วยลดปัญหาความเที่ยงตรง และคลาดเคลื่อนในการอ่าน-เขียนข้อมูล ซึ่งก็คือระบบซึ่งสามารถจัดข้อเสียของทั้งระบบบาร์โค้ดและสมาร์ตการ์ดออก เราเรียกระบบนี้ว่าระบบซีเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ (RFID: Radio Frequency Identification)

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบข้อแตกต่างของเทคโนโลยีในแต่ละระบบ

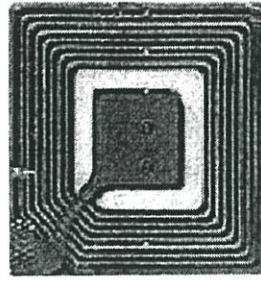
รายการ	บาร์โค้ด (Bar Code)	สมาร์ตการ์ด (Smart Card)	ระบบซีเฉพาะด้วย คลื่นวิทยุ (RFID)
ความจุข้อมูล (byte)	1 - 100	1 - 100	16 -64 kB
ปัญหาของความชื้น	มีผลกระทบสูง	มีผลต่อจุดสัมผัส	ไม่มีผล
เมื่อโดนปิดบัง (ขวางทางตัวอ่าน)	ไม่สามารถอ่านได้	ไม่สามารถอ่านได้	ไม่มีผล
ทิศทางการอ่านมีผลกระทบ	น้อย	อ่านได้แนวเดียว	ไม่มีผล
การสึกหรอ/ชำรุด (จากการอ่าน)	ควบคุมได้	ส่วนหัวสัมผัส	ไม่มีผล
ราคาอุปกรณ์และระบบ	ต่ำมาก	ต่ำถึงปานกลาง	ปานกลางถึงสูงมาก

ตารางที่ 1.1 (ต่อ)

การแก้ไขหรือการปลอมแปลง	ทำได้ง่าย	ทำได้ยากมาก	ทำได้ยากมาก
อัตราเร็วในการอ่านข้อมูล	ต่ำ (ใช้เวลา 4 วินาที)	ต่ำ (ใช้เวลา 4 วินาที)	เร็วมาก (ใช้เวลา 0.5 วินาที)
ระยะในการอ่านข้อมูล	0-50 เซนติเมตร	สัมผัสโดยตรง	0-5 เมตร หรือ มากกว่า

ระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) จะมีลักษณะและรูปแบบการทำงานใกล้เคียงกับสมาร์ทการ์ดมากที่สุด ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมภายใน คือข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในการ์ดหรือ Tag เหมือนกันแต่ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดคือ การอ่าน-เขียนข้อมูลสามารถทำได้โดยไม่ต้องสัมผัสเหมือนสมาร์ทการ์ด เนื่องจากมาตรฐานของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่ต้องการให้เกิดการติดต่อสื่อสารระหว่าง Tag และเครื่องอ่าน (Reader) ซึ่งเครื่องอ่านในที่นี้ไม่เพียงอ่านได้อย่างเดียวยังหมายถึงเขียน-อ่านข้อมูลได้ด้วย เป็นแบบไร้สัมผัส ทำให้ต้องหาทางส่งพลังงานไฟฟ้าไปให้กับ Tag โดยไปในรูปของคลื่นวิทยุ

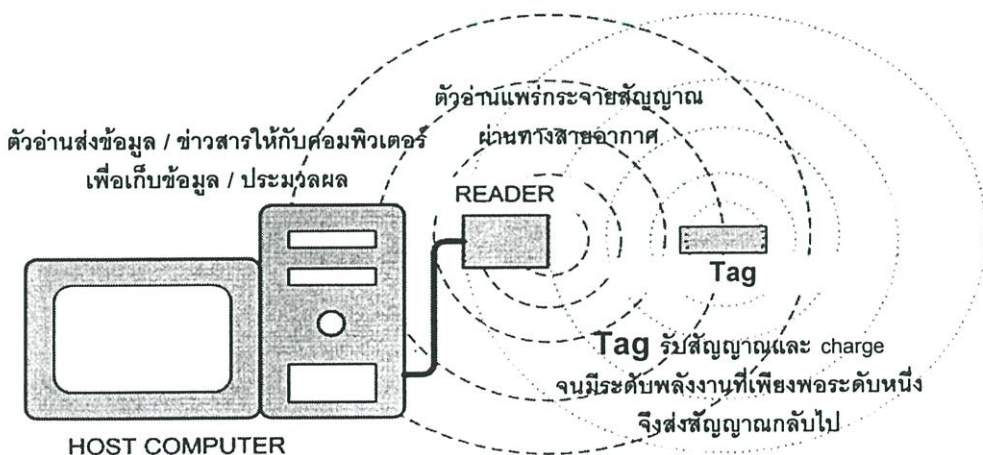
ระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุจะอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่วิทยุจะประกอบไปด้วย Tag และเครื่องอ่าน (Reader) โดย Tag จะประกอบไปด้วยไมโครชิปหรือโมดูลที่สามารถอ่าน-เขียนข้อมูลและสายอากาศ (Antenna) โดยสายอากาศจะทำหน้าที่ส่งคลื่นสัญญาณวิทยุไปให้เครื่องอ่าน (Reader) อีกส่วนที่สำคัญของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ คือ เครื่องอ่าน (Reader) โดยเครื่องอ่านจะสามารถรับสัญญาณคลื่นวิทยุจากตัว Tag และนำสัญญาณที่ได้มาแปลงกลับให้เป็นสัญญาณดิจิทัลส่งกลับไปให้คอมพิวเตอร์อ่าน ประมวลผล และสามารถนำข้อมูลไปใช้ในกระบวนการอื่นได้อีกด้วย ซึ่งความสามารถส่งข้อมูลระยะไกล ตัวอ่านตัวเดียวสามารถอ่านข้อมูลได้หลายตัวโดยใช้ตัวอ่านเพียงตัวเดียว และจำนวนข้อมูลที่สามารถถ่ายโอนยังมากด้วย จึงเป็นสาเหตุให้ระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ ได้เปรียบระบบที่เฉพาะอัตโนมัติทุกชนิดที่กล่าวมาแล้ว และมีแนวโน้มจะถูกใช้มากขึ้นเรื่อยๆ



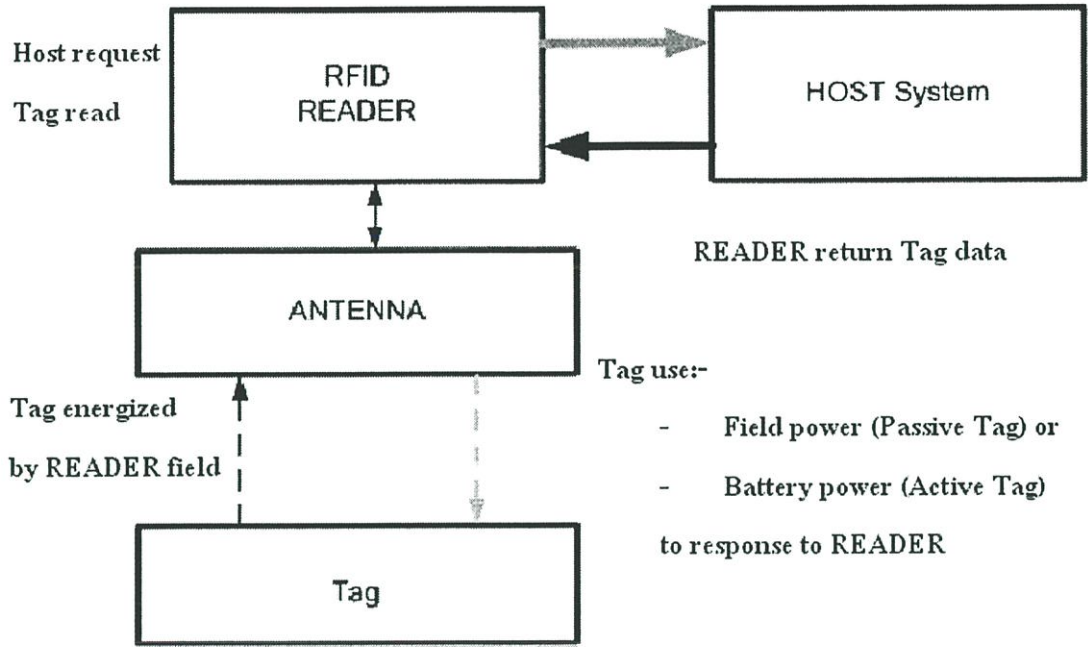
รูปที่ 1.3 Tag ของระบบชี้เป้าอัตโนมัติ

การทำงานของระบบชี้เป้าเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ นั้น ระบบ Tag กับเครื่องอ่านต้องมีการปรับคลื่นความถี่ให้เหมือนกันเพื่อให้สามารถสื่อสารกันได้ ระบบชี้เป้าเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ นั้นมีหลายย่านความถี่ซึ่งแตกต่างกันไปตามการใช้งานของแต่ละประเภท

เนื่องจากสายอากาศสำหรับระบบชี้เป้าเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ (433/868/915 MHz) โดยทั่วไปการออกแบบสายอากาศ [1]-[2] จะขึ้นกับค่าของอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของตัวโมดูลซึ่งต้องให้เกิดการแมตซ์ซึ่งกัน ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศแปรเปลี่ยนตามอิมพีแดนซ์ของโมดูล ซึ่งแตกต่างกันไปตามสภาพใช้งาน [3]-[8] เทคนิคในการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าซึ่งนำเอาวิธีทางสถิติเข้ามาช่วย [9] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอสายอากาศแบบมินิเจอร์แท็กสำหรับ Tag ของระบบชี้เป้าเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ ดังรูปที่ 1.4 และ 1.5 ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอสายอากาศที่ใช้ Tag ซึ่ง ดังนั้นการออกแบบสายอากาศสำหรับ Tag จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ Tag และเครื่องอ่านติดต่อกันได้ และโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน สามารถขึ้นรูปสายอากาศได้ง่ายไม่ต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตที่สูง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอสายอากาศแบบมินิเจอร์แท็ก Tag ของระบบชี้เป้าเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF)



รูปที่ 1.4 รูปแบบการทำงานของ RFID Tag และตัวอ่าน Reader

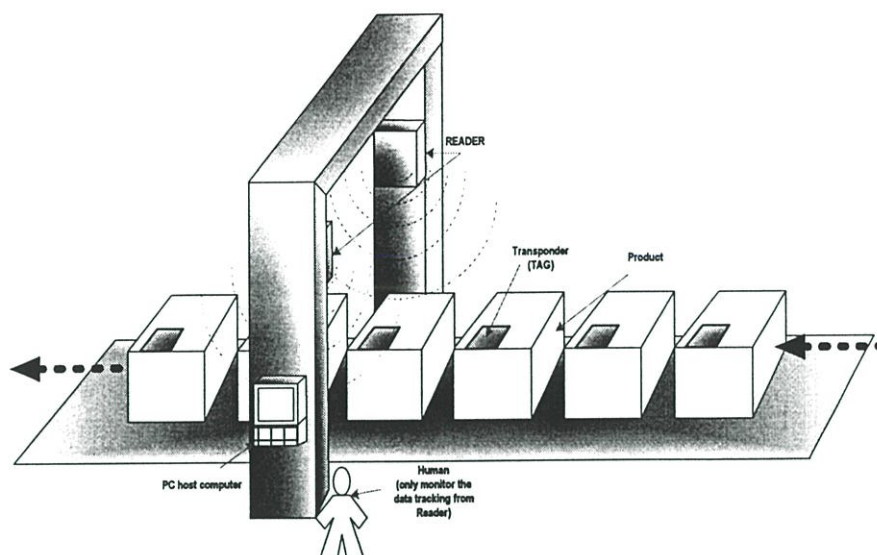


รูปที่ 1.5 แบบ โครงสร้างจำลองการทำงานของ RFID

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์และขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ สร้างทดสอบ และประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศสำหรับ Tag แบบมีนเคอร์แท็กของระบบขนถ่ายลำเลียงสินค้าสำหรับระบบอุตสาหกรรมการผลิต โดยโครงสร้างของสายอากาศประกอบไปด้วยตัวนำบางๆ ซึ่งวางอยู่บนชั้นของวัสดุฐานรอง (Substrate) โดยสายอากาศดังกล่าวมีขนาดกะทัดรัดสามารถติดหรือคล้องไว้กับวัตถุที่ต้องการได้ง่าย ซึ่งสายอากาศที่ออกแบบต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่แมตช์กับอิมพีแดนซ์ด้านออกของโมดูลที่ใช้รับส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศจะพิจารณาจากผลการทดสอบค่าระยะทำการว่าได้มากน้อยเพียงใด ในวิทยานิพนธ์นี้จะประเมินประสิทธิภาพของสายอากาศแบบมีนเคอร์แท็กสำหรับ Tag ของระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ ในย่านความถี่ยูเอชเอฟ (UHF) ที่ความถี่ 433.4 MHz ในส่วนของการวิเคราะห์จะใช้วิธีคำนวณด้วยโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณทางแม่เหล็กไฟฟ้า และวิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) [9]-[10] หาค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศที่เหมาะสม เพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ และต้องอยู่ภายใต้มาตรฐานของระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) เช่น ความเข้มสูงสุดของสนามแม่เหล็กที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ข้อกำหนดของแต่ละประเทศ [11]-[12]

ทำการหาระยะทางสูงสุดที่เครื่องรับสามารถอ่านข้อมูลจาก Tag ได้ ซึ่งถูกเรียกว่าระยะบริการสูงสุด โดยใช้สายอากาศที่ออกแบบทำหน้าที่เป็นสายอากาศ Tag และเครื่องอ่าน



รูปที่ 1.6 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ สำหรับการขนถ่ายลำเลียงสินค้า สำหรับระบบอุตสาหกรรม การผลิต

1.3 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ตลอดจนปัญหาที่น่าสนใจของวิทยานิพนธ์รวมทั้งแนวความคิดที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ และหลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบสายอากาศมินิเจอร์แท็ก

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดสอบ และผลการทดสอบสายอากาศมินิเจอร์แท็ก สำหรับ Tag

บทที่ 5 กล่าวถึงการประเมินสมรรถนะของสายอากาศโดยหาระยะบริการสูงสุดของระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ โดยใช้สายอากาศมินิเจอร์แท็ก

บทที่ 6 กล่าวถึง สรุปเนื้อหาทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ

ในปัจจุบันนี้ระบบชี้เฉพาะอัตโนมัติ (Automatic Identification) หรือ Auto ID ถูกนำมาใช้งานและพัฒนาไปอย่างมากทั้งในภาคอุตสาหกรรม ลอจิสติกส์ กระบวนการผลิต การขนถ่าย วัตถุดิบ ฯลฯ ระบบ Auto ID จะนำมาใช้ในการจัดเก็บข้อมูล ระบุสถานะของคน สัตว์ สิ่งของ เช่น สินค้าที่เราสนใจ

ระบบ Auto ID ที่เราจะนำเสนอในที่นี้คือ ระบบซึ่งสามารถจัดซื้อเสียของทั้งระบบบาร์โค้ดและส്മาร์ตการ์ดออก เราเรียกระบบนี้ว่า RFID ซึ่ง RFID นั้นย่อมาจากคำว่า Radio Frequency Identification (ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ)

ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) จะมีลักษณะใกล้เคียงกับส്മาร์ตการ์ดที่สุดคือข้อมูลจะถูกเก็บไว้ในการ์ดหรือ Tag เหมือนกันแต่ข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดคือ การอ่าน/เขียนข้อมูลสามารถทำได้โดยไม่ต้องสัมผัสเหมือนส്മาร์ตการ์ด ซึ่งจะอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่วิทยุ (Radio Frequency) ในการติดต่อสื่อสารจึงเป็นสาเหตุให้ RFID ได้เปรียบระบบ Auto ID ทุกชนิดที่กล่าวมาแล้ว และมีแนวโน้มจะถูกใช้มากขึ้นเรื่อยๆ

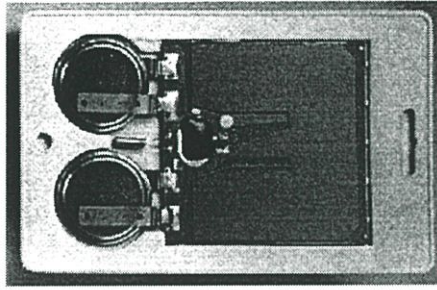
โดยทั่วไประบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนสำคัญคือ Tag และเครื่องอ่าน

2.1.1 ทรานสปอนเดอร์ (Tag)

จะเป็นส่วนของการเก็บข้อมูลและถูกติดตั้งอยู่กับวัตถุที่เราต้องการชี้เฉพาะ (Identify) จะประกอบไปด้วยสายอากาศทำหน้าที่คล่องสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องอ่านและส่วนของไมโครชิป ในกรณีที่ Tag ไม่มีแบตเตอรี่ในตัวและอยู่นอกพื้นที่ที่มีสัญญาณจะไม่มีการทำงานเกิดขึ้น Tag จะทำงานก็ต่อเมื่อ Tag เข้ามาในพื้นที่ที่มีสัญญาณซึ่ง Tag จะได้รับพลังงานจากการคล่องของสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสร้างแรงดันไฟฟ้าขึ้นจำนวนหนึ่ง ปริมาณเพียงพอที่จะใช้ในการทำงานของ Tag โดยแต่ละชนิดก็จะมีขนาดแตกต่างกันในเรื่องของการใช้งาน ราคา โครงสร้าง และ หลักการทำงาน ซึ่งจะขอกกล่าวถึงและอธิบายแยกเป็นหัวข้อดังนี้

2.1.1.1 Active RFID Tag

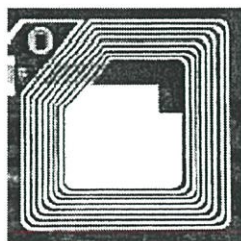
Tag ชนิดนี้จะต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากพลังงานแบตเตอรี่ เพื่อจ่ายพลังงานให้กับ วงจรเครื่องส่งภายใน ซึ่ง Tag ชนิดนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่งสัญญาณได้ไกลด้วยพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ มีอายุการใช้งานสั้นเพราะแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานจำกัด และมีราคาแพง มักจะนิยมใช้กับเครื่องอ่านย่านความถี่ UHF หรือ ไมโครเวฟ ซึ่งระยะการอ่านไม่ขึ้นกับสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.1 Active RFID Tags

2.1.1.2 Passive RFID Tag

Tag ชนิดนี้ไม่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟภายนอกใดๆ มีอายุการใช้งานนาน เพราะไม่ต้องอาศัยแบตเตอรี่ แสดงรูป 2.2 เพราะภายใน Tag จะมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขนาดเล็ก เป็นแหล่งจ่ายไฟในตัวอยู่ทำให้การอ่านข้อมูลทำได้ไม่ไกลมากนัก ขึ้นอยู่กับความแรงของเครื่องส่งและคลื่นความถี่วิทยุที่ใช้ ขนาดและรูปร่างเป็นได้ตั้งแต่แท่งหรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็นได้ไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน Tag มีราคาไม่แพง ระยะการอ่านขึ้นกับสิ่งแวดล้อม



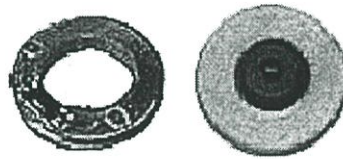
รูปที่ 2.2 Passive RFID Tag

2.1.2 ประเภทของ RFID Tag

อุปกรณ์ RFID Tag ประเภทต่างๆที่มีการผลิตใช้งานในกิจกรรมต่างๆ ในปัจจุบัน โดยแยกกล่าวตามความแตกต่างของโครงสร้าง และการออกแบบเป็นสำคัญตามด้วยตัวอย่างประเภทของการประยุกต์ใช้งาน

2.1.2.1 Tag แบบจานและเหรียญ (Disk and coin)

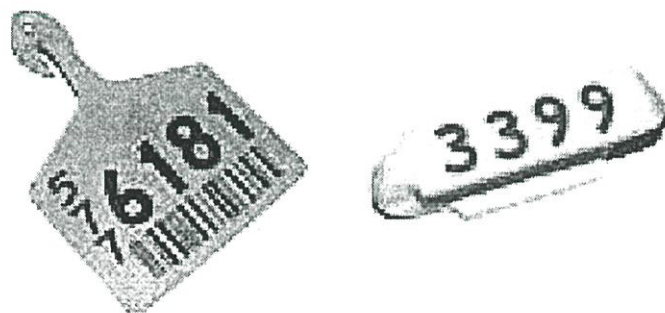
Tag จะถูกบรรจุอยู่ในโครงสร้างทรงกลมคล้ายจานหรือเหรียญ และมีการเคลือบป้องกันไว้เป็นอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Tag ชนิดนี้มีตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตรไปจนถึง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 2.3 Tag แบบจานและเหรียญ

2.1.2.2 Tag แบบพลาสติก (Plastic housing)

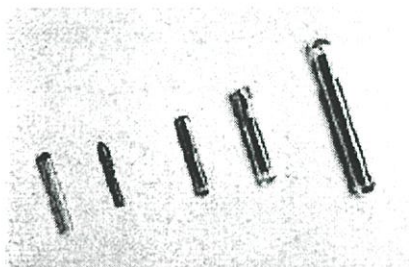
นิยมเรียกกันในชื่อย่อว่า PP (Plastic Package) ได้รับการคิดค้นและพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในกิจการอุตสาหกรรมบางประเภท ที่มีความต้องการเฉพาะรูปแบบ Tag แบบนี้มีขนาดบางและสามารถนำไปติดตั้งประกอบกับผลิตภัณฑ์หลายๆประเภท



รูปที่ 2.4 Tag แบบพลาสติก

2.1.2.3 Tag แบบกระเปาะแก้ว (Glass housing)

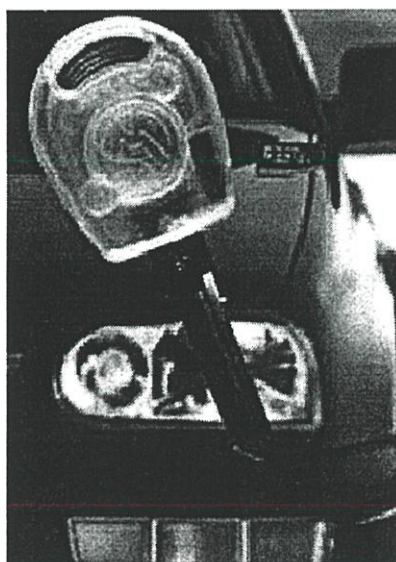
เป็น Tag ที่ได้รับการพัฒนาและผลิตขึ้นสำหรับใช้ฝังไว้ใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อใช้ในการติดตามข้อมูล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแวดวงปศุสัตว์ และการสาธารณสุข ตัวกระเปาะแก้วมีขนาดความยาวในช่วง 12-32 มิลลิเมตร



รูปที่ 2.5 Tag แบบกระเปาะแก้ว

2.1.2.4 Tag แบบพวงกุญแจ (Key and Key fog)

RFID Tag สามารถได้รับการพัฒนาให้อยู่ในรูปของกุญแจพิเศษที่ใช้ในการเปิด ปิดประตู หรือใช้กับระบบรักษาความปลอดภัยต่างๆ ซึ่งพวงกุญแจอิเล็กทรอนิกส์ชนิดนี้ไม่มีลูกกุญแจ แต่กลับทำหน้าที่ส่งสัญญาณข้อมูลต่างๆ ซึ่งอาจมีการนำเข้ารหัสเพื่อใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล



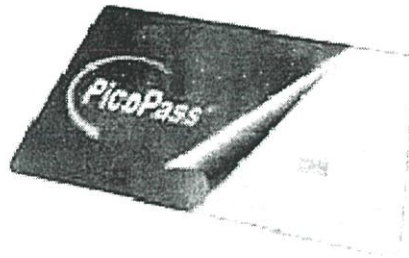
รูปที่ 2.6 Tag แบบพวงกุญแจ

2.1.2.5 Tag แบบนาฬิกา

Tag แบบนาฬิกาได้รับการคิดค้นและพัฒนาตั้งแต่ พ.ศ. 2533-2535 โดยบริษัทสัญชาติออสเตรเลียที่มีชื่อว่า Sky-Data โดยผลิตขึ้นเพื่อใช้เป็นนาฬิกาสวมใส่ข้อมือและใช้เป็นอุปกรณ์แสดงตัวตนในลักษณะช่องเซ็นเซอร์แบบไร้การสัมผัส (Contactless sensor) เพื่อผ่านเข้าสู่ลู่วิ่งสำหรับนักสกีทั้งหลาย

2.1.2.6 Tag แบบ Smart label

เป็น RFID Tag บางที่สุดที่ได้รับการออกแบบเป็นกระดาษบางๆสามารถงอหรือทบได้ โดยขดลวดสำหรับรับส่งสัญญาณจะถูกออกแบบเป็นแถบฟอยล์พลาสติกความหนาเพียง 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้ขบวนการผลิตแบบพิมพ์สกรีน โดยทั่วไปแถบฟอยล์เหล่านี้จะถูกเคลือบชั้นหนึ่งโดยเยื่อกระดาษและทำอีกชั้นหนึ่งด้วยสารยึดเกาะ เพื่อป้องกันการฉีกขาด



รูปที่ 2.7 Tag แบบ Smart label

2.1.2.7 Tag มาตรฐาน ID – 1 และสมาร์ทการ์ด แบบไร้สัมผัส

Tag แบบ ID – 1 มีรูปลักษณะภายนอกไม่ต่างจากบัตรเครดิตหรือบัตรโทรศัพท์ทั่วไปโดยมีขนาดประมาณยาว 85.72 มิลลิเมตรและกว้าง 54.03 มิลลิเมตร ความหนา 0.76 มิลลิเมตร เป็น Tag ที่ได้รับการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย ด้วยคุณสมบัติพิเศษก็คือระยะทำการรับส่งสัญญาณที่เหนือกว่า Tag แบบอื่นๆ ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดที่กว้างมากของตัวบัตร ทำให้สามารถจัดวางระบบสายอากาศที่มีแกนขนาดใหญ่ช่วยเพิ่มรัศมีทำการขึ้นได้อีกมาก

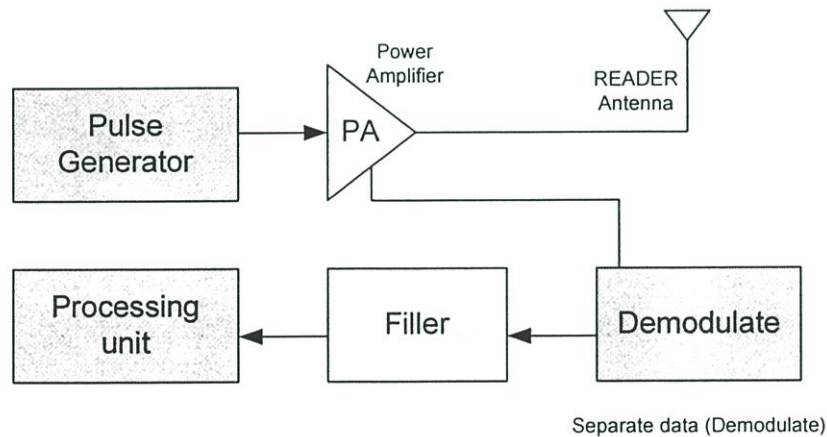
2.1.2.8 Tag แบบขดลวดบนชิป (Coil – on – chip)

Tag ชนิดนี้มีความแตกต่างจาก Tag แบบอื่นๆ ซึ่งมีการแยกส่วนระหว่าง Tag กับขดลวดหรือสายอากาศอย่างชัดเจน แต่สำหรับ Tag แบบขดลวดบนชิปนั้นจะรวมส่วนที่เป็นขดลวดสายอากาศและตัววงจรประมวลผลเข้าด้วยกัน

2.2 เครื่องอ่าน (Reader)

จะประกอบไปด้วยภาครับ/ส่งสัญญาณวิทยุ ส่วนควบคุมและสายอากาศ (Antenna) ทำหน้าที่คลั่งสัญญาณกับ Tag และส่วนของการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ควบคุมภายนอก ขึ้นอยู่กับลักษณะการสื่อสารที่เราต้องการ ซึ่งเครื่องอ่านในที่นี้ นอกจากจะสามารถอ่านข้อมูลได้แล้วยังสามารถเขียนข้อมูลได้ด้วย อีกทั้งวงจรควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูลจำพวกไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนของการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งเครื่องอ่านจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักดังนี้

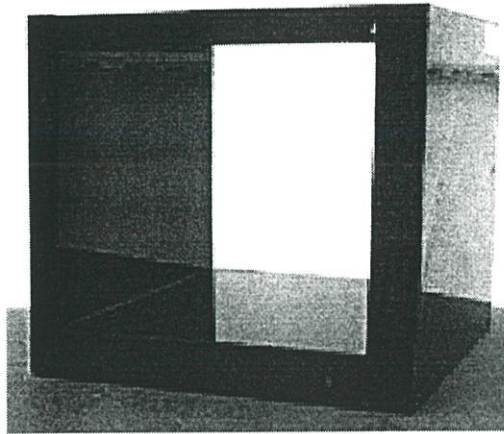
- ภาคสร้างสัญญาณพาหะ (Pulse generator)
- ภาคขยายสัญญาณ (Power Amplifier)
- สายอากาศ (READER Antenna)
- วงจรถอดรหัส (Demodulation)
- ฟิวเลอร์ (Filler)
- หน่วยประมวลผลข้อมูล และภาคติดต่อกับคอมพิวเตอร์ (Processing Unit)



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่องอ่าน RFID

โดยทั่วไปหน่วยประมวลผลข้อมูลที่อยู่ภายใต้เครื่องอ่านมักใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอัลกอริทึมที่อยู่ภายในโปรแกรม ทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล (Decoding) ที่ได้รับ และทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยลักษณะขนาดและรูปร่างของเครื่องอ่านจะแตกต่างกันไปตามประเภท

ของการใช้งาน เช่น แบบมือถือขนาดเล็กหรือติดผนัง จนไปถึงขนาดใหญ่เท่าประตู (Gate size) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 เครื่องอ่าน RFID แบบตู้ โมงค์



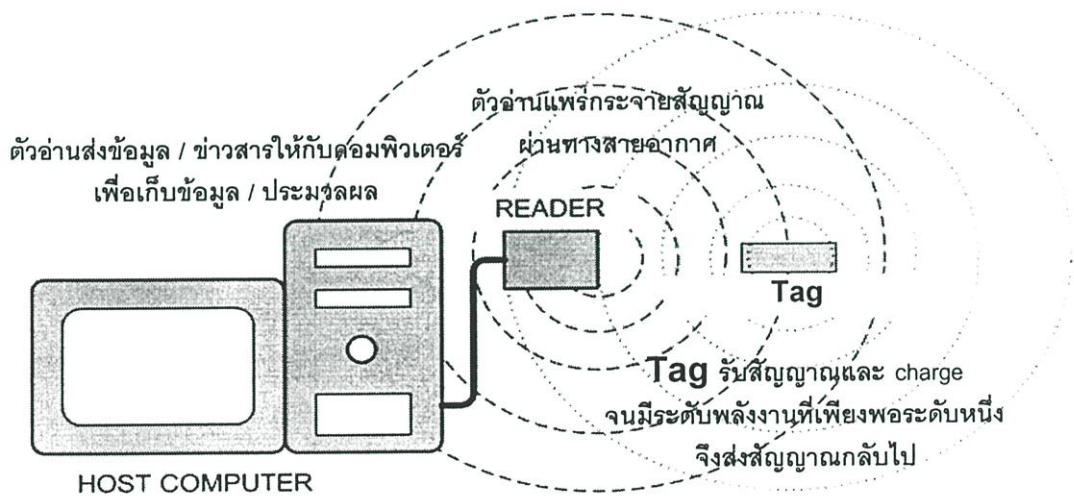
รูปที่ 2.10 เครื่องอ่าน RFID แบบประตู

2.3 หลักการทำงานของ RFID

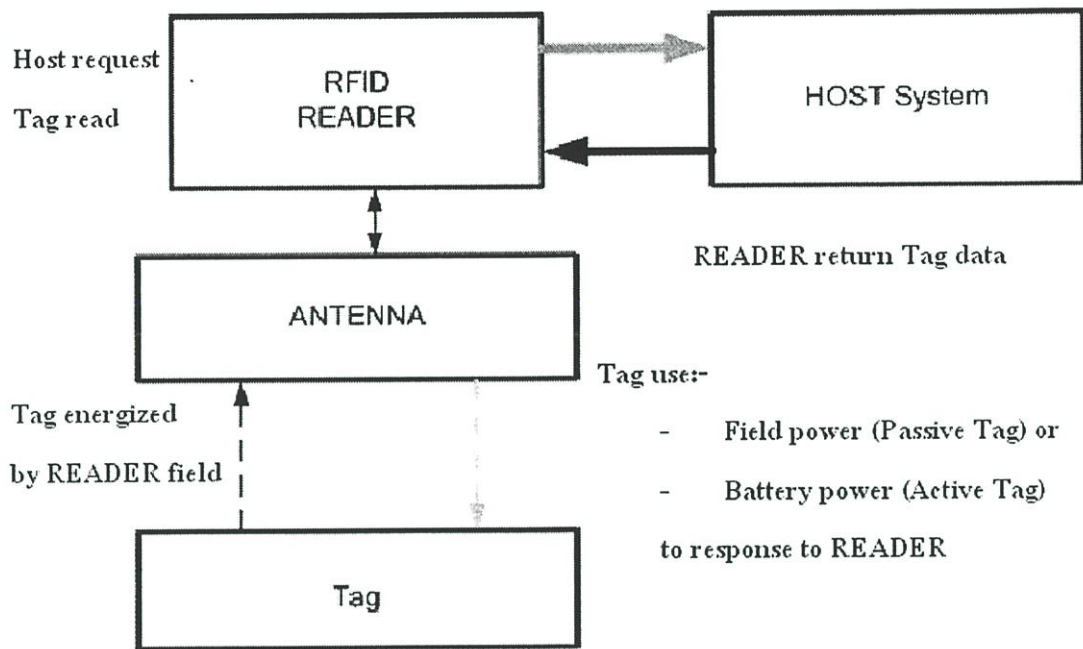
เครื่องอ่านซึ่งประกอบด้วยสายอากาศและวงจรควบคุม รวมถึงคอมพิวเตอร์ จะส่งคลื่นและสัญญาณออกมาตลอดเวลาผ่านสายอากาศ เพื่อตรวจดูว่ามี Tag หรือ Tag เข้ามาในระยะอ่านหรือไม่ จนเมื่อมีสินค้าที่มี Tag เข้ามาในระยะทำการ ตัว Tag จะสามารถรับพลังงานจากคลื่นสัญญาณที่ส่งในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และผ่านให้วงจรที่ประกอบด้วยคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลข้อมูล และส่งสัญญาณกลับไปยังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสายอากาศของตัว Tag กลับไปยังเครื่องอ่านเพื่อ

ตรวจสอบสินค้าที่มี Tag ติดเข้ามาในระยะทำการและนำข้อมูลที่อ่านได้ไปประยุกต์ใช้ตามงานต่อไป ดังรูปที่ 2.11

ส่วนควบคุมและติดต่อสื่อสาร จะได้รับคำสั่ง จากส่วนควบคุมที่สูงกว่า (Host) เช่น คอมพิวเตอร์หรือ PLC จากนั้นตัวควบคุมจะทำการประมวลผลสั่งว่า Host ต้องการให้ทำอะไร จากนั้นก็จะสั่งให้ส่วนของภาครับ/ส่งวิทยุที่มีส่วนของวงจรเข้ารหัสเป็นดิจิทัล จากนั้นส่วนของวงจร Modulation ทำการ Modulate สัญญาณเข้ากับคลื่นพาหะแล้วทำการส่งออกไปทางสายอากาศ ขนาดของพื้นที่ที่มีสัญญาณอยู่นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของสายอากาศและพลังงานของสายอากาศ เมื่อ Tag เข้ามาในพื้นที่ที่มีสัญญาณแล้วสายอากาศภายใน Tag จะได้รับการคล่องสัญญาณทำให้ Tag ทำงานได้ตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อน วงจร Demodulate จะทำการแยกสัญญาณข้อมูล ที่ถูก Modulate มาจากเครื่องอ่านออกจากคลื่นสัญญาณแล้วทำการแปลงรหัส จากนั้น CPU ของ Tag จะรับคำสั่งไปประมวลผลถ้าเป็นคำสั่งเขียน Tag จะบันทึกข้อมูลที่ส่งมาลงในหน่วยความจำของ Tag แต่ถ้าเป็นคำสั่งอ่าน จะดึงข้อมูลจากหน่วยความจำที่ระบุไว้จากคำสั่ง แล้วทำการ Modulate ข้อมูลที่วงจร Modulation ภายใน Tag กับคลื่นพาหะ แล้วส่งออกไปทางสายอากาศเหมือนกัน เมื่อเครื่องอ่านได้รับสัญญาณจาก Tag วงจร Demodulate ของเครื่องอ่านก็จะถอดเอาข้อมูลออกจากคลื่นพาหะและส่งไปที่ Host ซึ่งแบบการทำงานของ RFID Tag และตัวอ่าน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 รูปแบบการทำงานของ RFID Tag และเครื่องอ่าน Reader



รูปที่ 2.12 แบบ โครงสร้างจำลองการทำงานของ RFID

อุปกรณ์ของระบบซึ่งเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) ทั้ง Tag หรือเครื่องอ่าน (Reader) จะมีรูปแบบการทำงานอย่างไรอย่างหนึ่งระหว่างการรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX) / Half Duplex (HDX)

2.3.1 การรับส่งข้อมูลแบบ Full Duplex (FDX)

เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลออกตลอดเวลา ซึ่งเท่ากับว่าเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านทางคลื่นวิทยุไปจ่ายให้กับ Tag ที่อยู่ในบริเวณการใช้งานด้วย และเนื่องจากความแรงของคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุที่ Tag ส่งออกมามีกำลังส่งต่ำ ทำให้มีแนวโน้มว่าสัญญาณอาจส่งไปไม่ถึงเครื่องอ่าน หรือส่งไปถึงแต่มีระดับสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ด้วย เมื่อเทียบกับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากเครื่องอ่าน ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าเป็นของตนเอง ทำให้ส่งสัญญาณออกมาได้สูงกว่า ดังนั้นจึงต้องมีมาตรการในการสร้างความแตกต่างของสัญญาณคลื่นวิทยุที่มีการส่งออกมาจาก Tag แต่ละเครื่อง ให้มีเอกลักษณ์ (Identity) ที่แตกต่างกัน เพื่อให้เครื่องอ่านสามารถแยกแยะแหล่งที่มาได้อย่างถูกต้อง ซึ่งการสื่อสารแบบ Full Duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งสัญญาณที่สามารถตรวจจับและแปลงเป็นกำลังงานไฟฟ้าให้กับ Tag ได้ตลอดเวลา การส่งสัญญาณจากเครื่องอ่าน ไปยัง Tag (Downlink) และการส่งข้อมูลจาก Tag กลับมายังเครื่องอ่าน (Uplink) สามารถทำขึ้นเมื่อใดก็ได้ไม่จำเป็นต้องรอจังหวะในการส่งไปกลับแต่อย่างใด

ในระบบ Active RFID จะใช้พลังงานของแบตเตอรี่เป็นพลังงานในการส่ง โดยจะมีวงจรที่ใช้สำหรับ Modulate และ Demodulate เพื่อทำการส่งสัญญาณออกไป

2.3.2 การรับส่งข้อมูลแบบ Half Duplex (HDX)

การสื่อสารแบบ Half Duplex เครื่องอ่านจะทำการส่งพลังงานไฟฟ้าไปให้กับ Tag ตลอดเวลา ซึ่งการส่งสัญญาณจากเครื่องอ่านไปยัง Tag (Downlink) และการส่งข้อมูลจาก Tag กลับมายังเครื่องอ่าน (Uplink) จะต้องมีการกำหนดจังหวะผลัดกันรับส่งข้อมูลระหว่างเครื่องอ่าน และ Tag



รูปที่ 2.13 การสื่อสารแบบ Full Duplex และ Half Duplex

2.4 ประเภทของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ

ระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ ถูกจำแนกออกเป็นประเภทได้หลายอย่างขึ้นอยู่กับว่าจะถูกจำแนกจากคุณสมบัติอะไร เช่น ความถี่ที่ใช้งาน ชนิดของ Tag หรือขนาดของหน่วยความจำของ Tag ที่ใช้ ซึ่งเราจะแบ่งออกได้หลาย ประเภท คือ

2.4.1. ระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่จำแนกโดยขนาดของหน่วยความจำ

2.4.1.1 ระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุชนิด 1 บิต (1 Bit Type)

RFID ชนิดนี้หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า EAS (Electronic Article Surveillance) เป็น RFID ที่ใช้ Tag ที่ไม่มีไมโครชิป RFID ระบบนี้จะตรวจสอบเฉพาะว่ามี Tag อยู่ในพื้นที่สัญญาณหรือไม่ ดังนั้นสถานะจึงแสดงเพียงแค่มี่หรือไม่มีซึ่งเป็นรหัสดิจิทัล 0 หรือ 1 นั่นเอง ซึ่ง Tag ของระบบ EAS จะมีเฉพาะสายอากาศอย่างเดียว

เนื่องจากการทำงานของ RFID ระบบนี้ง่ายไม่ซับซ้อนและ Tag มีราคาถูกมากระบบจึงถูกนำมาใช้กับการป้องกันสินค้าถูกขโมยในห้างร้านต่างๆ โดย Tag จะติดอยู่กับตัวสินค้าหรือซ่อนไว้ข้างหลังบาร์โค้ดอีกที เครื่องอ่านจะออกแบบเป็นโครงสายอากาศสูงประมาณ 1-1.2 เมตร อยู่ที่

ทางออกของร้านนั้นๆ เมื่อสินค้าที่มี Tag ติดอยู่ผ่านบริเวณสายอากาศนี้ก็จะถูกตรวจจับได้จากการ คล้องสัญญาณจากสายอากาศและ Tag จึงสามารถตรวจจับสินค้าที่ถูกนำออกไปได้ Tag จะถูกดึง ออกหรือใช้เครื่องทำลายความเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แคปเตอร์แคชเชอร์เมื่อสินค้าถูกนำมา ชำระเงิน ซึ่งเราจะพบเห็น Tag ระบบ EAS มากในซูเปอร์มาร์เก็ตหรือร้านค้าต่างๆ ช่วงเวลาที่ที่ ใช้งานจะเป็นช่วงเวลาที่ไม่มีโครเวฟเนื่องจากระยะในการสื่อสารค่อนข้างไกล

2.4.1.2 ระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุชนิดหน่วยความจำมากกว่า 1 บิต (Data Carrier Type)

RFID ชนิดนี้จะใช้ Tag ที่มีไมโครชิปและหน่วยความจำเป็นส่วนประกอบสำคัญมีราคาสูง กว่า Tag ชนิด EAS โดยบางชนิดสามารถเก็บข้อมูลได้สูงสุดถึง 64 กิโลไบต์ ใช้งาน ในอุตสาหกรรมหรืองานทั่วไปที่ต้องใช้ Tag ในการเก็บข้อมูล

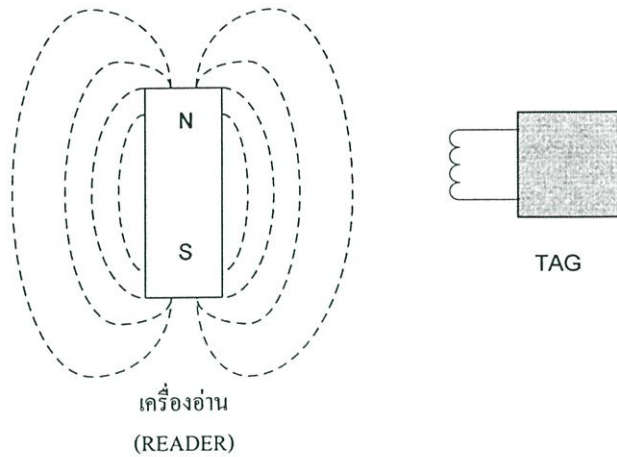
2.4.2 ระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่จำแนกโดยลักษณะการคล้องของสัญญาณ

2.4.2.1 Close Coupling

เป็น RFID ที่มีระยะในการอ่าน/เขียนข้อมูลสั้นมากประมาณ 0-1 เซนติเมตร ดังนั้น จะต้องอยู่ใกล้หรือวางอยู่บนเครื่องอ่าน Close Coupling นี้สามารถใช้คลื่นความถี่ได้ตั้งแต่ 1 Hz จนถึง 50 Hz เนื่องจากการทำงานของ Tag ไม่อาศัยการส่งพลังงานจากการแผ่คลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องอ่านแต่อาศัยการเหนี่ยวนำเหมือนหลักการของหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้เกิด พลังงานที่ทำให้อุปกรณ์ภายใน Tag ทำงานได้ ระบบชนิดนี้จะนิยมนำมาใช้งานที่ต้องการความ ปลดปล่อยค่อนข้างสูงแต่ไม่ต้องการติดต่อได้ไกล เช่น ประตูอัตโนมัติ หรือ สมาร์ทการ์ดไร้สัมผัส (Contactless Smart Cards)

2.4.2.2 Remote Coupling

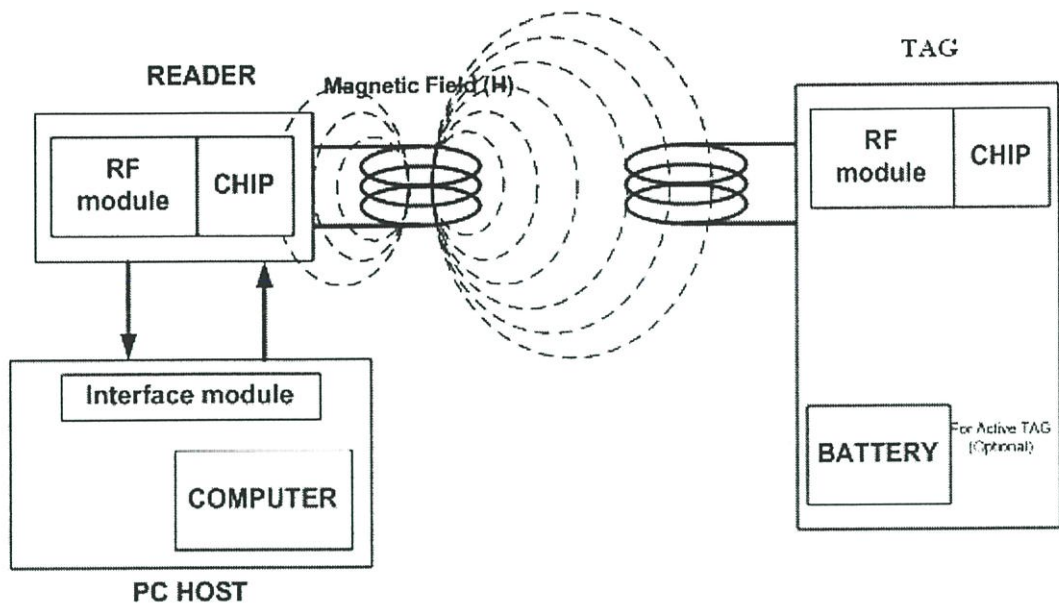
เป็นระบบที่มีระยะการอ่าน/เขียนสูงถึง 1 เมตร ระบบนี้จะใช้หลักการคล้องสัญญาณแบบ Inductive (Magnetic) Coupling ระหว่างเครื่องอ่านกับ Tag ประมาณ 90-95 % ของระบบ RFID ในปัจจุบันใช้หลักการนี้โดยความถี่ที่ใช้งานมีหลายความถี่ตั้งแต่ต่ำกว่า 125 kHz หรือ 13.5 MHz และ 27.125 MHz พลังงานไฟฟ้าจะถูกส่งโดยหลักการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปให้ Tag ทำให้ Tag ได้รับพลังงานสามารถทำงานได้ ระบบ Remote Coupling นี้จะพบมากในลักษณะงาน อุตสาหกรรม เช่น รถยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า หรือ อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.14 การติดต่อสื่อสารระหว่าง Tag และ Reader แบบ Inductive coupling (LF และ HF band)

2.4.2.3 Long Range

ระบบนี้จะมีระยะการอ่าน/เขียนอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 เมตร หรือบางระบบอาจสูงกว่านี้ ความถี่ที่ใช้ในระบบนี้จะเป็นย่านที่มีความถี่สูงมาก หรือ ไมโครเวฟ (Microwave range) ซึ่งปกติที่ความถี่ 2.45 GHz หรือบางครั้งจะพบที่ 915 MHz 5.8 GHz และ 24.125 GHz แต่การส่งพลังงานจากตัวเครื่องอ่านไปยัง Tag ทำได้ยาก ดังนั้นที่ใช้งานจะเป็นชนิดที่มีแบตเตอรี่ในตัว ซึ่งจะใช้สำหรับเป็นไฟเลี้ยงที่ทำให้ไมโครชิปทำงาน และเก็บรักษาข้อมูล ลักษณะงานที่พบเห็นจะเป็นลักษณะงานที่ต้องการการสื่อสารระยะไกล เช่น ในกระบวนการผลิตรถยนต์ ระบบชำระเงินอัตโนมัติของทางด่วน



รูปที่ 2.15 โครงสร้างการทำงานของระบบ RFID ย่าน UHF และไมโครเวฟ

2.4.3 ระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่จำแนกตามความสามารถของระบบ

2.4.3.1 ระบบอ่านอย่างเดียว (Read Only System)

ถือว่าเป็นระบบที่ระดับต่ำที่สุด Tag มีข้อมูลซึ่งจะอยู่ในรูปของ Serial Number และไม่สามารถเขียนข้อมูลใหม่ลงไปได้เหมาะกับการอ่านอย่างเดียว เพื่อแยกแยะความแตกต่างของสินค้าหรือบุคคล ระบุชนิดของสินค้า Pallets หรือตู้คอนเทนเนอร์มีราคาต่ำความถี่ที่ใช้งานจะอยู่ที่ต่ำกว่า 135 kHz

2.4.3.2 ระบบอ่านเขียน (Read-Write System)

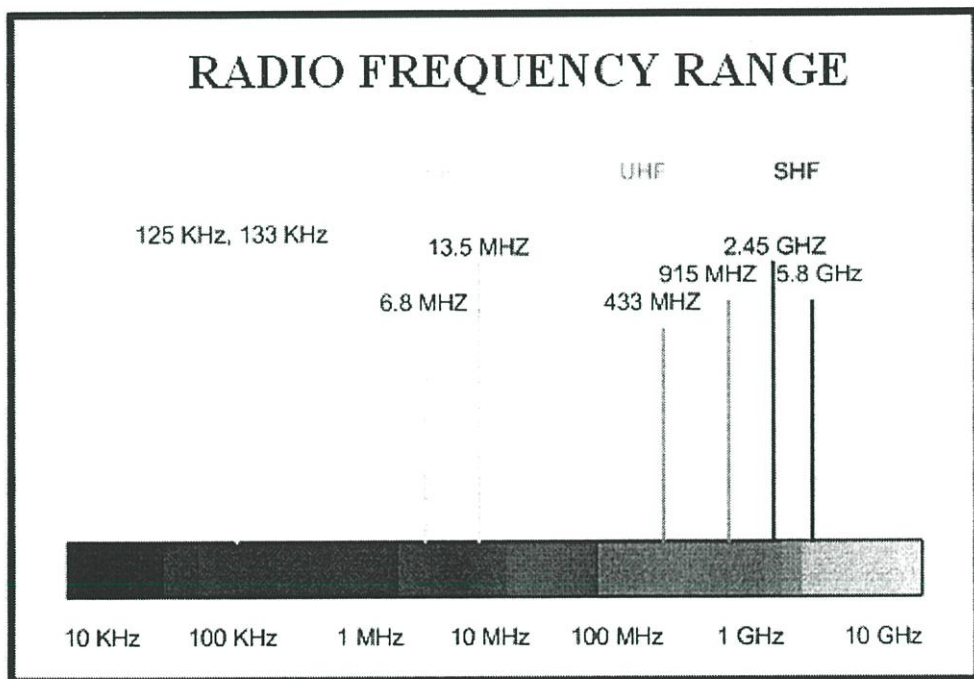
จะจัดอยู่ระดับกลางของระบบ RFID สามารถเขียนข้อมูลซ้ำได้โดยความจุจะอยู่ที่ 16 ไบต์ หน่วยความจำที่ใช้เป็นชนิด EEPROM ความถี่ที่ใช้งานจะเป็น 135 kHz, 13.56 MHz, 27.125 MHz และ 2.45 GHz

2.4.3.3 ระบบไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor System)

ระบบนี้จะจัดอยู่ประเภทระดับสูง เพราะมีไมโครโปรเซสเซอร์เป็นตัวประมวลผลใน Tag สามารถประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายและมีฟังก์ชันการสร้างรหัสลับ (Cryptological Functions) สามารถนำไปใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการรักษาความปลอดภัยส่วนมากระบบนี้จะใช้ย่านความถี่ 13.56 MHz หน่วยความจำที่ใช้งานจะมีขนาดตั้งแต่ร้อยละ จนถึง 16 กิโลไบต์ และหน่วยความจำจะเป็นชนิด EEPROM

2.5 ย่านความถี่ของระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ

ความหมายของความถี่ใช้งาน (Operating frequency) ในมาตรฐาน RFID นั้นจะหมายถึงคลื่นความถี่วิทยุที่เครื่องอ่านทำการส่งออกไปเท่านั้น โดยจะไม่สนใจว่า Tag จะส่งคลื่นความถี่ในย่านใดตอบกลับมา ยิ่งในบางกรณี Tag อาจมีการส่งคลื่นความถี่กลับมาเป็นค่าความถี่เดียวกับที่เครื่องอ่านส่งออกไป โดยแยกแยะความแตกต่างกันด้วยเทคนิคการ Modulate สัญญาณ ประเด็นของคลื่นความถี่จาก Tag จึงไม่ใช่สาระสำคัญในการนำมาพิจารณา ในปัจจุบันคลื่นพาหะที่ใช้งานกันในระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุจะอยู่ในย่านความถี่ ISM (Industrial-Scientific-Medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่กำหนดการใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สามารถใช้งานได้ โดยไม่ตรงกับย่านความถี่ที่ใช้งานในการสื่อสาร โดยทั่วไปมีความถี่ใช้งาน สำหรับคลื่นพาหะที่ใช้กันในระบบระบุลักษณะทางคลื่นวิทยุแบ่งออกได้เป็น 4 ย่าน หลักได้แก่



รูปที่ 2.16 ย่านความถี่ต่างๆ ของระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ

LF: Low Frequency (ย่านความถี่ต่ำ) 125-133 kHz

HF: High Frequency (ย่านความถี่สูง) 13.5 MHz

UHF: Ultra High Frequency (ย่านความถี่สูงยิ่ง) 433/868*/915** MHz

SHF: Super High Frequency (ย่านความถี่ไมโครเวฟ) 2.45 - 5.8 GHz (microwave)

หมายเหตุ * 868 MHz: Europe (ECR: European Radio Communication Committee)

** 915 MHz: US (FCC: Federal Communications commission)

มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่องโทรคมนาคมประเภท Radio Frequency Identification: RFID ของประเทศไทย อ้างอิงตามประกาศคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ เรื่องการใช้เครื่องวิทยุคมนาคมประเภท Radio Frequency Identification: RFID [12]

2.6 ข้อควรพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ RFID

2.6.1 ความถี่ใช้งาน

อุปกรณ์ RFID ที่ใช้ย่านความถี่ในช่วง 125 - 133 kHz (LF) ถึง 13.5 MHz (HF) จะใช้รูปแบบรับถ่ายสัญญาณข้อมูลระหว่าง Tag กับเครื่องรับเป็นแบบเหนี่ยวนำ (Inductive coupling) ในขณะที่อุปกรณ์ RFID ที่มีการสื่อสารโดยใช้ย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งอยู่ในช่วง 2.45-5.8 GHz จะใช้การส่งถ่ายสัญญาณข้อมูลในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเลือกใช้อุปกรณ์ RFID ทำงานที่ความถี่ในย่าน HF น่าจะให้เกิดผลดีในการแพร่กระจายคลื่นในระยะทางกว้าง

ในแง่การใช้งาน 2 ย่านความถี่ ช่วงความถี่แรกจะเหมาะสมสำหรับใช้กับงานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะใกล้ (LF ระยะอ่านประมาณ 1 เซนติเมตร จนถึง 1 เมตร และ HF ระยะอ่านประมาณ 1 เมตร) เช่นการตรวจสอบการผ่านเข้าออกพื้นที่ การตรวจหาและเก็บประวัติในสัตว์ ส่วนย่าน UHF จะถูกใช้งานที่มีระยะการสื่อสารข้อมูลในระยะไกล (UHF ระยะอ่านประมาณ 1-10 เมตร) เช่นระบบเก็บค่าทางด่วน และในปัจจุบันระบบ RFID กำลังถูกวิจัยและพัฒนาในย่านความถี่ไมโครเวฟที่ความถี่ 2.4 GHz และความถี่ 5.8 GHz เพื่อใช้งานที่ต้องการระยะอ่านที่ไกลกว่า 10 เมตร เป็นต้น

ส่วนการเลือกใช้อ่านความถี่ไมโครเวฟนั้น โดยทั่วไปจะทำให้ผลดีในเรื่องของระยะทางที่ไกลกว่าการเหนี่ยวนำโดยใช้คลื่นความถี่ต่ำ แต่อุปกรณ์ Tag ที่ทำงานในย่านไมโครเวฟนั้นจำเป็นต้องมีแบตเตอรี่สำรองไฟฟ้าทำให้ต้องมีขนาดใหญ่และมีข้อจำกัดในการพกพาหลายประการ สิ่งที่ต้องพิจารณาประการหนึ่งสำหรับการใช้อุปกรณ์ RFID ในย่านความถี่ต่ำก็คือ การที่ระบบอาจถูกรบกวนจากการเดินเครื่องมอเตอร์ที่อยู่ใกล้เคียงได้ เนื่องจากเป็นการรับส่งข้อมูลที่ใช้การเหนี่ยวนำทำให้มีความนิยมใช้งานการสื่อสาร โดยใช้คลื่นไมโครเวฟแทนในกรณีของการใช้งานภายในโรงงานอุตสาหกรรม

2.6.2 ระยะทำการ

ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องโดยตรงต่อระยะทำการในการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและ Tag สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประการ คือ

- ตำแหน่งการวาง Tag
- ระยะห่างชั้นตัวระหว่าง Tag
- ความเร็วในการอ่าน/เขียน ข้อมูลของ Tag

2.6.3 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย

2.6.3.1 การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล

การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วยการตรวจยืนยันตัวตน Tag และการเข้ารหัสข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านทางคลื่นวิทยุ กระบวนการหรือความต้องการใช้งานในกรณีนั้นๆ จำเป็นต้องใช้มาตรการรักษาความปลอดภัยหรือไม่ หรือหากต้องการใช้จะเป็นเพียงระดับใด เพื่อให้การลงทุนเป็นไปอย่างเหมาะสมที่สุด

2.6.3.2 การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์

การรักษาความปลอดภัยที่มีผลกระทบต่อมนุษย์ ที่ความถี่ 0.1-3.0 MHz จะต้องมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Strength: E) ไม่เกิน 614 V/m ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Strength: H) ไม่เกิน $16.3/f$ A/m ค่าความหนาแน่นกำลัง (Power Density: S) ไม่เกิน $10,000/f$ m W/cm โคนคิดที่เวลาเฉลี่ย (Averaging Time) 6 นาที ซึ่ง f มีหน่วยเป็น MHz และในส่วนของมาตรฐานการลดทอนของความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ระยะ 10 เมตร จะต้องมีค่าไม่เกิน 72 dB A/m ซึ่งเป็นมาตรฐานยุโรป EN300 [11] และข้อกำหนดมาตรฐานของคณะกรรมการโทรคมนาคมแห่งชาติ [12]

2.6.4 ขนาดของหน่วยความจำ

ต้นทุนของ Tag ย่อมมีความสัมพันธ์กับลักษณะและขนาดของหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ภายใน การใช้งานในระดับสาธารณะ เช่น ระบบขนส่งจึงนิยมใช้ Tag ที่มีหน่วยความจำน้อย หรือในบางกรณีอาจใช้ Tag แบบ โปรแกรมไม่ได้ เพื่อควบคุมต้นทุนของบัตร โดยอาจใช้บัตรหรือ Tag ทำหน้าที่ส่งข้อมูลแสดงรหัส แล้วให้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนขึ้นใช้งานภายในระบบ หรือเครือข่ายขนส่งทำหน้าที่ตรวจสอบแทน โดยไม่ต้องเก็บข้อมูลไว้ในบัตร

2.7 หลักการของการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

2.7.1 หลักการเบื้องต้นในการออกแบบการทดลอง

ซึ่งการทดลอง คือการทดสอบ หรือการทดสอบอย่างต่อเนื่อง เพื่อค้นหาตัวแปรอินพุทที่สำคัญที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแล้ว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองขึ้นที่เอาท์พุทตามที่เราวางวัตถุประสงค์ไว้

สิ่งที่เรามุ่งเน้นอยู่ตลอดเวลา นั้น ก็คือการค้นหาความสัมพันธ์ของกระบวนการ นั่นคือ $Y = f(x)$ เรามักต้องการ การปรับค่าอินพุทให้ออกไปนอกช่วงการทำงานปกติ เพื่อดูผลกระทบต่อความผันแปรของกระบวนการนั้นๆ บางครั้ง ข้อมูลที่มีอยู่เดิมก็สามารถนำพาเราให้วิเคราะห์หาสิ่งที่เราต้องการได้ในทิศทางที่ถูกต้อง แต่บ่อยครั้งที่ข้อมูลอินพุทที่มีอยู่เดิมไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากพอที่จะครอบคลุมช่วงที่เราต้องการศึกษาทั้งหมด กระบวนการส่วนใหญ่เราต้องปรับอินพุทให้ออกไปนอกช่วงการทำงานในปัจจุบันเพื่อให้เห็นผลการปรับปรุงที่เราต้องการ

2.7.2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

- ตัวแปรใดส่งผลมากที่สุดต่อเอาท์พุท
- จะต้องปรับตั้งอินพุทไว้ที่ระดับใด เพื่อให้เอาท์พุทอยู่ในระดับที่เราต้องการได้มากที่สุด
- จะต้องปรับตั้งอินพุทที่ควบคุมได้ไว้ที่ระดับใด เพื่อให้ผลของอินพุทที่ควบคุมไม่ได้ส่งผลน้อยที่สุด
- จะปรับตั้งอินพุทอย่างไรเพื่อจะให้ความผันแปรในเอาท์พุทลดลง ในที่สุดเราจะได้สมการความสัมพันธ์กระบวนการ $Y=f(x)$ เพื่อนำไปใช้หาจุดที่ดีที่สุดของกระบวนการ (Optimization Process)

2.7.3 การทดลองแบบ Factorial

แนวทางที่จะใช้เผชิญกับปัญหาในลักษณะที่มีหลายตัวแปร หรือหลายๆ Factors ก็คือการทดลองแบบ Factorial หรือที่รู้จักกันดีในนามของ DOE (Design of Experiment) หรือ การออกแบบการทดลอง ซึ่งการทดลองแบบ Factorial นี้ค่า Factors ต่างๆ จะเปลี่ยนไปพร้อมกัน และการทดลองจะทำทั้งหมดทุกๆ เงื่อนไขของการตั้งค่าของแต่ละ Factor และพิจารณาวิเคราะห์ตัวเลขเมื่อการทดลองทั้งหมดสิ้นสุดลง

การออกแบบการทดลองถือเป็นหัวข้อเรื่องในการศึกษา และจะถือว่าการทดลองที่เราทำนั้นเป็นการทดลองที่ถูกออกแบบมาด้วยสถิติ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีมากกว่า 3 factors

หลักการในการออกแบบการทดลอง ซึ่งสามารถเขียนออกมาเรื่อยๆ ได้ดังนี้

ขั้นที่ 1 คำจำกัดความของปัญหาเชิงปฏิบัติ

ขั้นที่ 2 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

วัตถุประสงค์จะต้องจำเพาะเจาะจงและชัดเจนมากกว่าในคำจำกัดความปัญหา ถ้าเป็นไปได้ให้ตั้งเป้าหมายสำหรับการปรับปรุงให้เป็นตัวเลขชี้ชัดไปเลย สำหรับวัตถุประสงค์ของการทดลองเพื่อให้การกำหนดผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงที่ต้องการเห็นนั้นง่ายเข้า และในการคำนวณหาจำนวนสิ่งตัวอย่างสำหรับการทดลองเราจะต้องมีเลขในใจแล้ว ว่าเราต้องการเห็นขนาดของการเปลี่ยนแปลงที่ตัวเอาต์พุต มากน้อยเพียงใด

มีน้อยครั้งมากที่สามารถ ทำการทดลองเพียง 1 ครั้งแล้วจะได้คำตอบตามที่ตั้งเป้าหมาย เราพบว่ามีมักจะต้องทำหลายๆ ครั้งต่อเนื่องกันเป็นชุด เพื่อค้นหาจุดที่ดีที่สุด จะต้องทำการทดลองในลักษณะนี้เพื่อคัดเลือกเอาเฉพาะ ตัวแปรอินพุตที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ และจะไปจบลงที่ การทดลองเพื่อหาจุดที่ดีที่สุด หรือที่เรียกว่าวิธี การ Response Surface

ขั้นที่ 3 เลือกคุณลักษณะของเอาต์พุต

คุณลักษณะของเอาต์พุตในทางการออกแบบเราจะเรียกมันว่า “Y” โดยต้องมองหา Y ในสมการของ $Y = f(x)$ และการเลือก Y ต้องทำเป็นอันดับแรก ซึ่ง Y ที่เลือกนี้ต้องสอดคล้องกับปัญหา และใช้เป็นตัวอธิบายผลของกระบวนการที่มีปัญหาอยู่ได้เป็นอย่างดี

เมื่อเรากำหนด Response (Y) หรือ เอาต์พุต ได้แล้ว ก่อนที่จะลงมือทำขั้นตอนต่อไป จะต้องทราบถึงความสามารถของเครื่องมือวัดหรือระบบวัดให้ดีเสียก่อน เพราะปัญหาของระบบวัด อาจจะบดบังและบิดเบือน รวมทั้งยังส่งผลให้เราต้องเพิ่มจำนวนสิ่งตัวอย่างในการทดลอง (Sample size) ขึ้นอีกด้วย

คุณลักษณะของเอาต์พุตอาจจะเป็นข้อมูลแบบต่อเนื่อง (Variable) เช่น ความยาว, ขนาด เป็นต้น หรืออาจจะเป็นข้อมูลที่เป็น Attribute เช่น อัตราส่วน เป็นต้น

ขั้นที่ 4 การเลือกอินพุต Factor

ปัจจัยอินพุต (Factor) เป็นอินพุตตัวหนึ่งของกระบวนการ ส่งผลต่อ Response ที่เรากำลังศึกษาอยู่ในการทดลอง ซึ่งอาจจะแบ่งตัวแปรอินพุตออกเป็น 2 ประเภท คือ

- ตัวแปรเชิงปริมาณ เช่น ระยะทาง, ขนาด เป็นต้น
- ตัวแปรเชิงคุณภาพ เช่น นักศึกษา, เครื่องมือแต่ละเครื่อง, โรงเรียน เป็นต้น

ในการทำการออกแบบการทดลอง (DOE) นั้นจะต้องแยกความแตกต่างระหว่าง

- Response (Y): คุณลักษณะของเอาต์พุต
- Factor (x): คุณลักษณะของตัวแปรอินพุต
- Level: ระดับต่างๆ ของตัวแปร x ที่ใช้ในการทดลอง

ขั้นที่ 5 เลือกการตั้งระดับของ Factor

- ระดับการทดลอง (Level) ค่าที่เราปรับตั้ง ให้กับตัวอินพุต ซึ่งข้อพิจารณา ในการเลือกระดับของ Factor
- ต้องการเห็นผลของการเปลี่ยนแปลง มากน้อยขนาดไหน
- เราปรับเปลี่ยนได้มากที่สุดเท่าไร โดยที่ยังคงอยู่ในช่วงปลอดภัยอยู่ ซึ่งการทดลองที่ 2 ระดับให้ผลดีพอควร

ขั้นที่ 6 การเลือกและการออกแบบ

ซึ่งสุดท้ายก็เพื่อคัดเลือกอินพุตที่ไม่สำคัญออก (Screening) และเพื่อหาจุด Optimum เราจำเป็นจะต้องปรับตั้งค่าอินพุตหลายๆ ตัว (Factor) ที่หลายๆระดับ (level) ไปในการวิเคราะห์ครั้งเดียวกัน ซึ่งก็คือการออกแบบการทดลอง (DOE)

2.7.4 คำนิยามต่างๆ ในการออกแบบการทดลอง

Balanced Design (Orthogonally) การออกแบบการทดลองที่แต่ละระดับ level ของ factor หนึ่งๆ มีการทำซ้ำๆ ด้วยจำนวนครั้งที่เท่าๆ กัน ที่ทุกเงื่อนไขของการทดลองของทุกๆ factors การออกแบบสมดุลนี้ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Orthogonal

Experimental Design การวางแผนอย่างมีรูปแบบ ในการทำการทดลองโดยรวมถึง ทางเลือกของ factor, level, output response, จำนวนสิ่งตัวอย่าง, การทำซ้ำ

Factors (ปัจจัยอินพุต) ตัวแปรที่ควบคุมได้ หรือควบคุมไม่ได้ ที่มีอิทธิพลต่อ response (เอาต์พุต) ที่เรากำลังสนใจศึกษาอยู่ในการทดลอง

Interaction เมื่อความแตกต่างของ response ระหว่าง level ของ factor หนึ่งไม่เหมือน หรือไม่เท่ากัน ที่ทุกๆระดับ level ของ factor ตัวอื่นๆ

Fixed Factor คือ factor ที่เราเลือกและระบุค่าระดับของมันเอาไว้ การสรุปผลจะได้ข้อสรุปเฉพาะ level ต่างๆ เหล่านี้เท่านั้น โดยทั่วไป เป้าหมายของการทดลองก็คือ การหาผลของเอาต์พุต ที่เป็นอิทธิพลมาจากการตั้งระดับของอินพุต factor

Random Factor คือ Factor ที่เราเลือกค่าระดับ level ของมันมาอย่างสุ่มจากความเป็นไปได้มากมายของ level เป้าหมายของการทดลองจะเป็นเรื่อง การส่งผลของ factor ต่อ variance หรือความแปรปรวนทั้งหมดของระบบ

$k_1 \times k_2 \times k_3 \dots$ เป็นการอธิบายถึง การออกแบบพื้นฐาน ของการทดลองแบบ factorial ตัว k 's มีทั้งหมดกี่ตัว ก็จะหมายถึงว่า มีกี่ factor ในการทดลอง และค่าของ “ k ” แต่ละตัว ก็จะหมายถึงระดับ level ของ factor นั้นๆ ตัวอย่างเช่น การทดลอง $4 \times 3 \times 3$ จะหมายความว่า มี factors อินพุต factor แรกมี 4 levels และอินพุตอีก 2 ตัวที่เหลือ มีอย่างละ 3 levels ในการทดลองแบบ full

factorial ผลของการคูณก็คือ จำนวนเงื่อนไขของการทดลองทั้งหมด ในกรณีนี้ $4 \times 3 \times 3 = 36$ เงื่อนไขการทดลอง

Level คือ ค่าระดับของตัวแปรอินพุต factor ที่เรากำลังศึกษาในการทดลอง

Main Effect คือ การเปลี่ยนแปลงที่ค่าเฉลี่ยของ response (output) ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงจากระดับ level หนึ่งไปสู่อีก level หนึ่งของ factor โดยการเปลี่ยนเพียง factor เดียว

Test Run (Experiment Run) คือ หนึ่งเงื่อนไขการทดลองของระดับ level ของ factor ที่ให้ผลที่ response 1 ค่า หรือมากกว่า 1 ค่า

2.7.5 2^k Factorial Designs

การออกแบบ Factorial ที่ 2 ระดับนั้นค่อนข้างเป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะความสะดวก และมีประโยชน์อันมากมายของมันในการนำไปใช้ออกแบบการทดลองเพื่อคัดเลือกตัวแปรออก (Screening Experiment)

เหตุผลที่สำคัญที่ทำให้ 2^k เป็นที่นิยมใช้ คือ

1. ได้สมการ $Y = f(x)$
2. ง่ายต่อการทำความเข้าใจและวิเคราะห์
3. สามารถทดลองเพิ่มเติมในลักษณะต่อยอดขึ้นไปเพื่อทดลองแบบ Composite Design เมื่อต้องการรายละเอียดข้อมูลเพิ่มขึ้น
4. มักจะใช้จำนวนครั้งในการทดลอง (Run) ต่อ Factor น้อยกว่า

2^k Factorial Design เป็นการทดลองที่ทุกๆ factor มีเพียง 2 levels ซึ่งมีกฎพื้นฐานในการทดลอง คือ ที่ระดับ level หนึ่งของ factor จะกำหนดให้เป็นค่า “ต่ำ” และใส่รหัสเป็น -1 ที่อีกระดับหนึ่ง ก็จะกำหนดให้เป็นค่า “สูง” และเป็น +1

2.7.5.1 Main Effect

ในการออกแบบการทดลองแบบ 2^k ค่า Main Effect ของ factor ใดๆ อันหนึ่งคือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด เมื่อตั้ง Factor นั้นไว้ที่ “High” แล้วลบออกด้วยค่าเฉลี่ยของข้อมูล เมื่อตั้ง factor ไว้ที่ค่า “Low”

$$\text{Main Effect} = \overline{\text{Response}_{\text{High}}} - \overline{\text{Response}_{\text{Low}}}$$

Main Effect ก็คือ การเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยของเอาต์พุต ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับ level ของอินพุต ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับ level ของอินพุต ซึ่ง effect นี้สามารถคำนวณได้จากการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลเมื่อ factor นั้นเป็น +1 กับค่าเฉลี่ยเมื่อ factor นั้นเป็น -1 แล้วนำสองค่ามาหักลบกัน (high - low)

เป็นการพล็อตค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่แยกแยะตามระดับปัจจัยที่เราพิจารณา

(Factor levels)

2.7.5.2 Interaction

เป็นการพล็อตค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับปัจจัยๆหนึ่ง (means for each level of a factor) โดยที่ระดับของอีกปัจจัยหนึ่งถูกจับให้อยู่คงที่

ถ้ากราฟ Interaction มีเส้นที่วิ่งไปไม่ขนานกันอย่างมีนัยสำคัญ เราจะสรุปว่ากระบวนการนั้นมี Interaction จะมีความหมายว่า ผลของปัจจัยที่มีต่อ Output นั้นขึ้นอยู่กับรายละเอียด หรือระดับของอีกปัจจัยหนึ่งด้วย ซึ่งก็หมายความว่ามันไม่เป็นอิสระต่อกัน

2.7.5.3 การออกแบบการทดลอง

ซึ่งอาจสามารถใช้โปรแกรมทางสถิติมาช่วยในการคำนวณเพื่อให้ได้ผลเร็วขึ้นได้ โดยการออกแบบจะกำหนดเป็นแบบ 2-level factorial

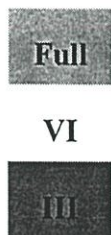
จุดประสงค์ของการทดลอง

- ตัวแปรใดส่งผลมากที่สุดต่อเอาท์พุท
- จะต้องปรับอินพุทไว้ที่ระดับเท่าใด เพื่อให้เอาท์พุทอยู่ในระดับที่เราต้องการ
- จะต้องปรับอินพุทเท่าไร เพื่อให้ความผันแปรของเอาท์พุทลดลง
- จะปรับตั้งอินพุทไว้ที่ระดับใด เพื่อให้ผลของอินพุทที่ควบคุมไม่ได้ส่งผลน้อยที่สุด

Define of $Y = f(x)$

- Main Effect
- Interaction
- Linear and Non-Linearity

Available Factorial Designs (with Resolution)														
	Factors													
Runs	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full													
8		Full	IV											
16			Full	V	IV	IV	IV							
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV



มาก

น้อย

ระดับความน่าเชื่อถือของค่าที่ได้จากการทดลอง DOE

รูปที่ 2.17 ตารางแสดง 2^k Factorial design สำหรับ factors ต่างๆ

บทที่ 3

การวิเคราะห์และผลการวิเคราะห์

3.1 บทนำ

เนื่องจากสายอากาศของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ (RFID) เป็นส่วนที่ต้องติดอยู่กับวัตถุที่เราสนใจได้ง่าย อีกทั้งสามารถนำมาทำเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมซึ่งจะนำมาติดแทนบาร์โค้ดหรือประยุกต์ใช้งานได้ทั้งสองแบบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีขนาดไม่ใหญ่เกินไป สายอากาศแบบมินิเดอรัทท์จึงถูกเลือกมาเพื่อใช้สำหรับ Tag อีกทั้งแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว จึงทำให้ใช้สำหรับระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุได้ดี

3.2 เงื่อนไขการออกแบบสายอากาศที่ใช้สำหรับ Tag

3.2.1 ความถี่ใช้งาน

จากลักษณะงานที่เราจะนำไปใช้การในระบบการขนถ่ายสินค้าเนื่องจากความถี่ที่เราใช้งานอยู่ในย่าน UHF (433.4 MHz) การทำงานของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุย่านความถี่ UHF นี้จะทำงานที่ระยะสนามระยะไกล (Far field) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสนามตามมุมต่างๆ จะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง จึงเหมาะสมสำหรับระบบขนถ่ายสินค้าที่อาจจำเป็นต้องมีระยะทำการมากกว่าหนึ่ง เนื่องจากบางกรณีเราไม่สามารถเข้าไปถึงหรือใกล้ตัวสินค้าได้มาก ดังนั้นสายอากาศที่ออกแบบต้องแมตช์ที่ความถี่นี้ อีกทั้งข้อกำหนดของคณะกรรมการกิจการ โทรคมนาคมแห่งชาติ [12] ยินยอมให้ความถี่สำหรับระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุในย่าน UHF ที่ 433.4 MHz

3.2.2 วัสดุที่ใช้ทำสายอากาศ

3.2.2.1 การเลือก Printed Circuit Board (PCB) ที่จะนำมาใช้ทำสายอากาศ

เนื่องจากสายอากาศที่เราจะนำมาใช้มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะวางบนวัสดุฐานรอง ต้องเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย ราคาไม่แพง และทนต่อการขีดข่วนได้ เพราะเรานำไปใช้ในอุตสาหกรรมขนถ่ายลำเลียงสินค้า การกระทบ ชน หรือการขีดข่วน อาจเกิดขึ้นได้เมื่อมีการขนย้ายสินค้า การวางซ้อนกัน หรือการนำสินค้า (Finish Goods) ขนตู้คอนเทนเนอร์เพื่อส่งออกไปขาย ไม่ว่าเหตุการณ์อย่างใดก็อย่างหนึ่งที่เกิดมาแล้วก็อาจเกิดขึ้นได้ทั้งสิ้น ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องเลือกวัสดุฐานรองที่ใช้ทำสายอากาศ ที่มีความแข็งแรงพอสมควร ที่มีความหนาไม่มาก หรือน้อยเกินไป

ซึ่งขนาดที่เราสามารถหาได้และมีความเหมาะสมคือ 0.6525 มิลลิเมตร และมีความหนาของชั้นทองแดงบนผิววัสดุฐานรองเท่ากับ 0.0795 มิลลิเมตร

3.2.2.2 ค่า ϵ_r ของวัสดุฐานรองที่ใช้ทำสายอากาศ

เนื่องจาก FR4 เป็นวัสดุที่ใช้ทำ PCB ที่มีขายอยู่ทั่วไปตามท้องตลาด และมีค่า ϵ_r เท่ากับ 4.34 เนื่องจากสายอากาศที่ออกแบบควรมีขนาดกะทัดรัด ราคาไม่แพงและสามารถนำไปติดกับวัสดุที่เราสนใจได้จริง

3.2.3 ขนาดของสายอากาศ

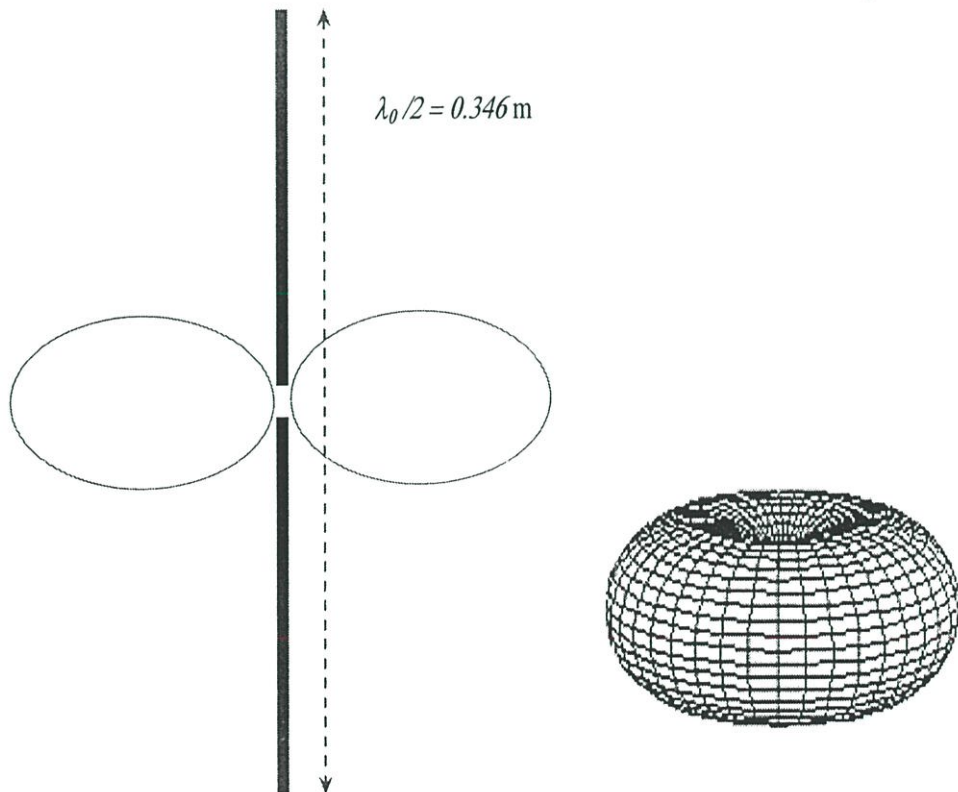
เนื่องจากไมโครชิปหรือโมดูล ที่เรานำมาเชื่อมต่อกับสายอากาศนั้นมีลักษณะเป็น Surface Mounted Device (SMD) ดังนั้น Strip line บนระนาบเดียวของวัสดุฐานรองจึงถูกเลือกมาเพื่อรองรับการเชื่อมต่อแบบนี้

3.2.3.1 วิวัฒนาการของสายอากาศ

เริ่มต้นมีการนำสายอากาศไดโพลมาวิเคราะห์พบว่า ที่ $\lambda_0/2$ จะมีความยาวเท่ากับ 0.346 เมตร และเมื่อทำการนำโมเดลไดโพลมาวางบน PCB ทำให้ $\lambda_d/2$ ลดลงเพราะค่า ϵ_r ที่มีอยู่ใน Dielectric แต่ก็ยังคงมีขนาดที่ยาวอยู่ จึงได้ทำการนำมาขดเพื่อให้ขนาดของสายอากาศสั้นลงไปอีก ซึ่งเราจะเรียกว่า สายอากาศมินิเจอร์

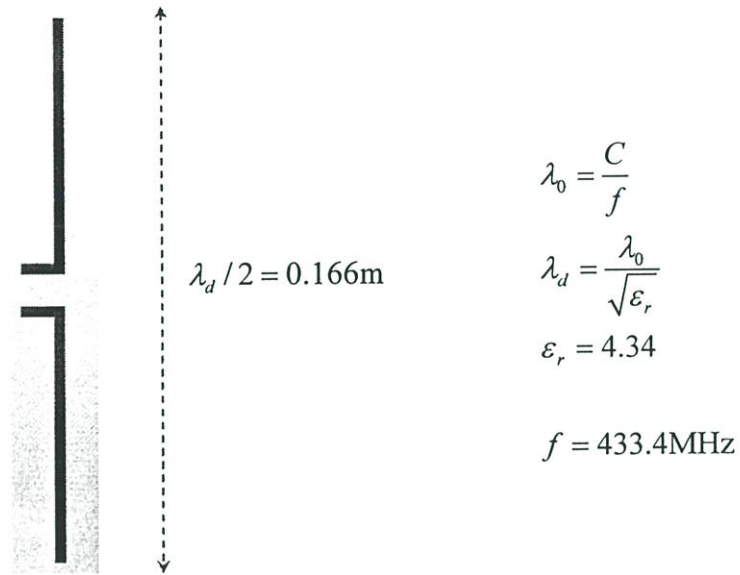
3.2.3.1.1 สายอากาศแบบไดโพล

ความยาวของสายอากาศที่ความถี่ 433.4 MHz จะอยู่ที่ $\frac{\lambda_0}{2} = 0.386 \text{ m}$



รูปที่ 3.1 สายอากาศแบบไดโพล

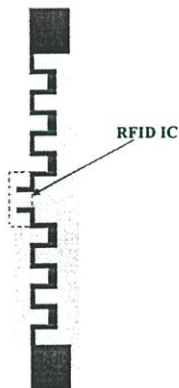
3.2.3.1.2 สายอากาศแบบ Strip Dipole



รูปที่ 3.2 สายอากาศแบบ Strip line

3.2.3.1.3 สายอากาศแบบมินเดอร์แท็ก

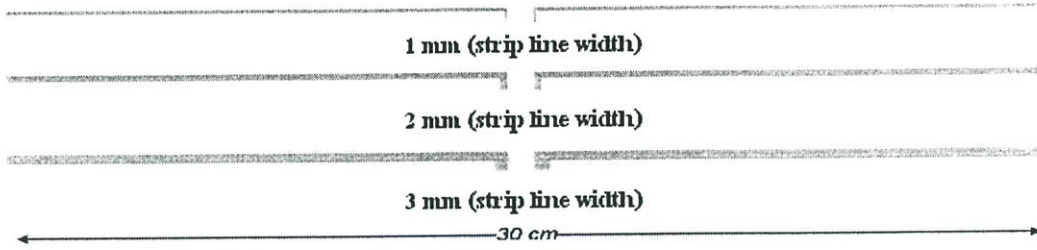
ได้นำเอา Strip line ที่อยู่บนวัสดุฐานรองมาทำการขุดไปมาเพื่อให้ขนาดด้านปลายของสายอากาศทั้งสองฝั่งสั้นเข้ามา



รูปที่ 3.3 สายอากาศแบบมินเดอร์แท็ก

3.2.3.2 การพิจารณาเลือกขนาดความกว้างของ Strip line บนวัสดุฐานรอง

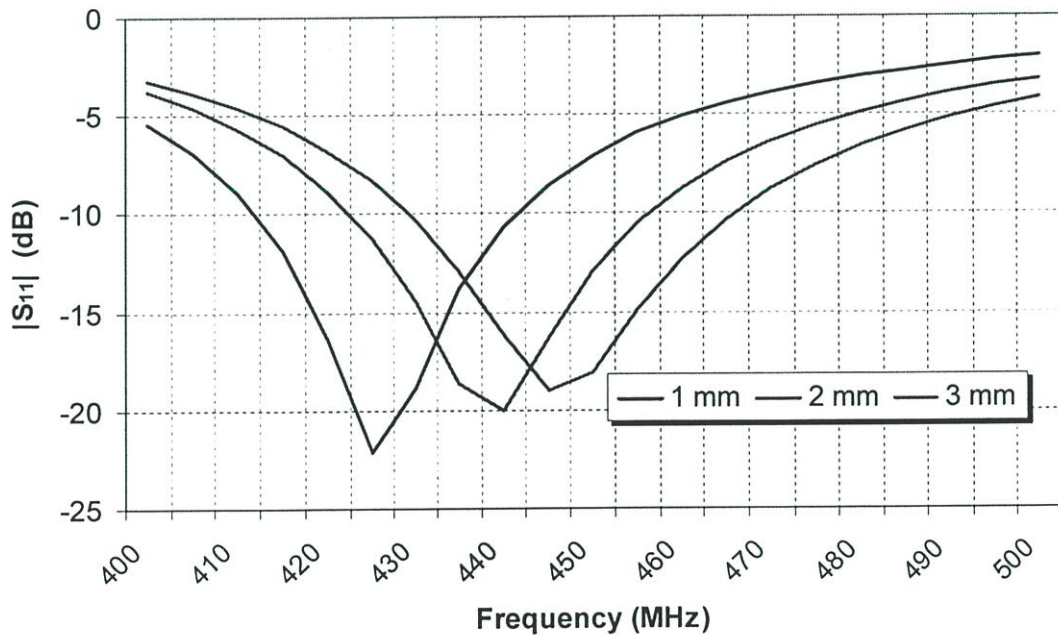
ต่อไปเรามาพิจารณาถึงขนาดและความยาวของ Strip line ซึ่งต้องมาคำนึงถึงขนาด ความกว้างและความยาวดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Strip line ที่ขนาด 30 เซนติเมตรที่ความกว้างต่างๆกัน

ตารางที่ 3.1 ค่าช่วงกว้างความถี่ และ Return Loss เมื่อปรับค่าความกว้าง Strip Line โดยความยาวของเส้น Strip Line เท่ากับ 30 cm โดยคิดที่ความถี่ใช้งานที่ 433.4 MHz

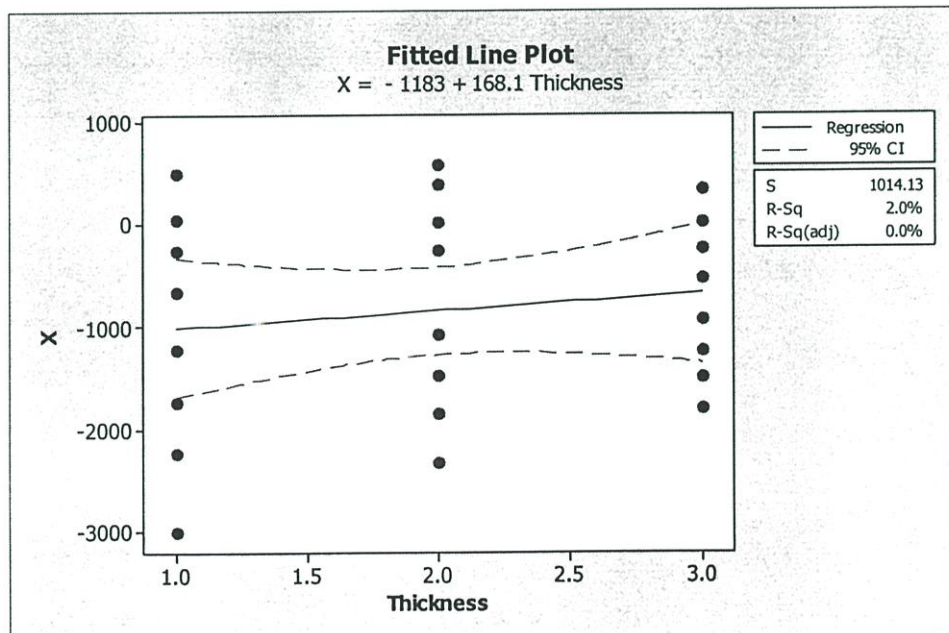
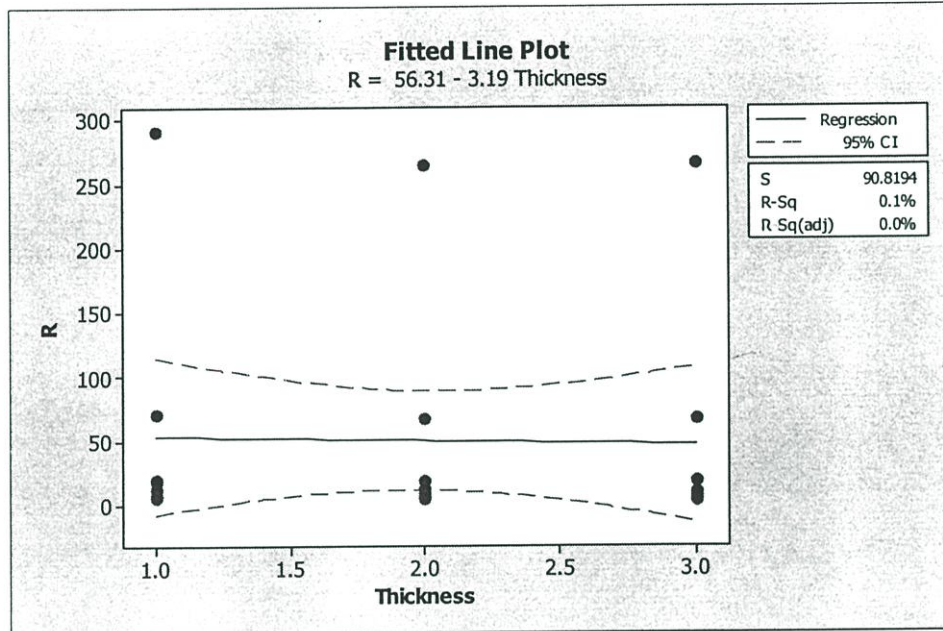
พารามิเตอร์	หน่วย	ขนาดความกว้างของ Strip Line ($l = 30$ cm)		
		1 mm	2 mm	3 mm
ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth)	%	6.92	8.08	9.23
$ S_{11} $	dB	-21.7	-19.8	-18



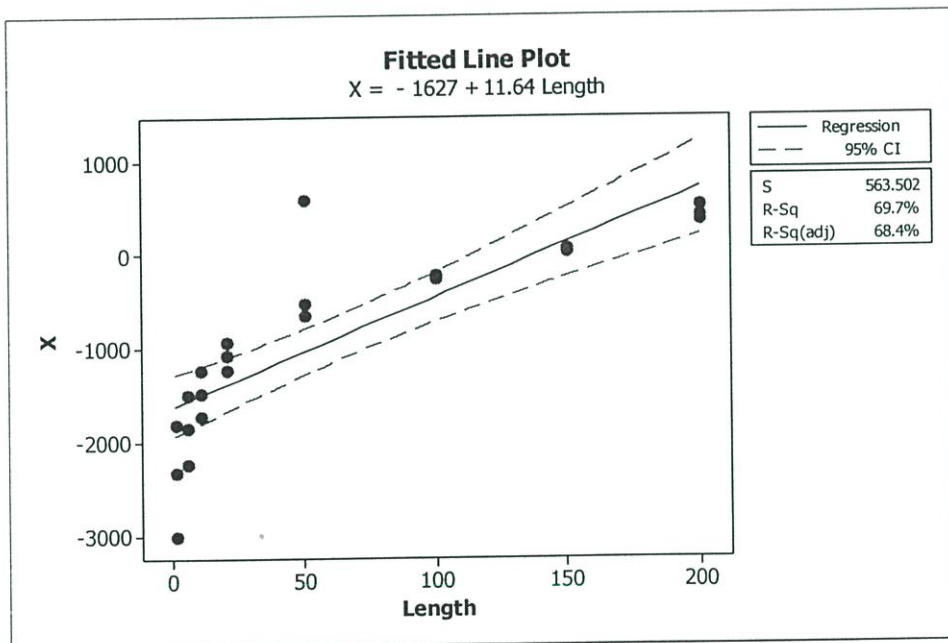
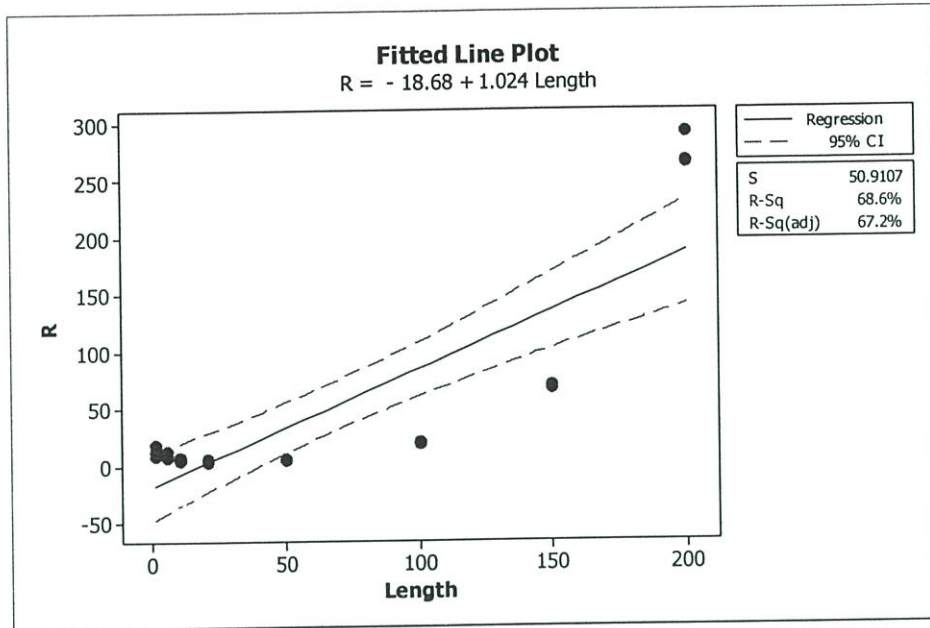
รูปที่ 3.5 กราฟของ $|S_{11}|$ ในช่วงความถี่ 400 – 500 MHz

จากผลที่ได้ในรูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.1 พบว่าที่ความถี่ใช้งาน 433.4 MHz ขนาดของ Strip Line ที่ 3 มิลลิเมตร มีค่าช่วงความกว้างแถบความถี่มีค่ามากที่สุดที่ 9.23 % แต่ก็ไม่แตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับขนาด 1 และ 2 มิลลิเมตร คือ 6.92 % และ 8.08 % ตามลำดับ

ส่วนค่า $|S_{11}|$ พบว่าที่ Strip line ที่ 1 มิลลิเมตร มีค่าต่ำที่สุดอยู่ที่ -21.7 dB แต่ก็ไม่ต่างกันมากนักเมื่อเทียบกับขนาด 2 และ 3 มิลลิเมตร คือ -19.8 dB และ -18 dB ตามลำดับ



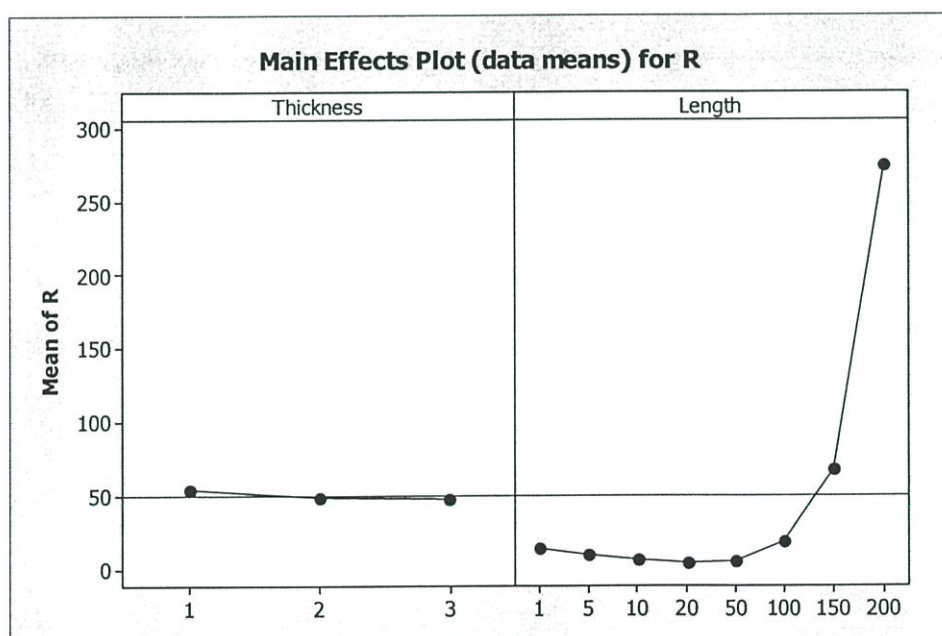
รูปที่ 3.6 แนวโน้มของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแปรผันตามความกว้างของเส้น Strip Line

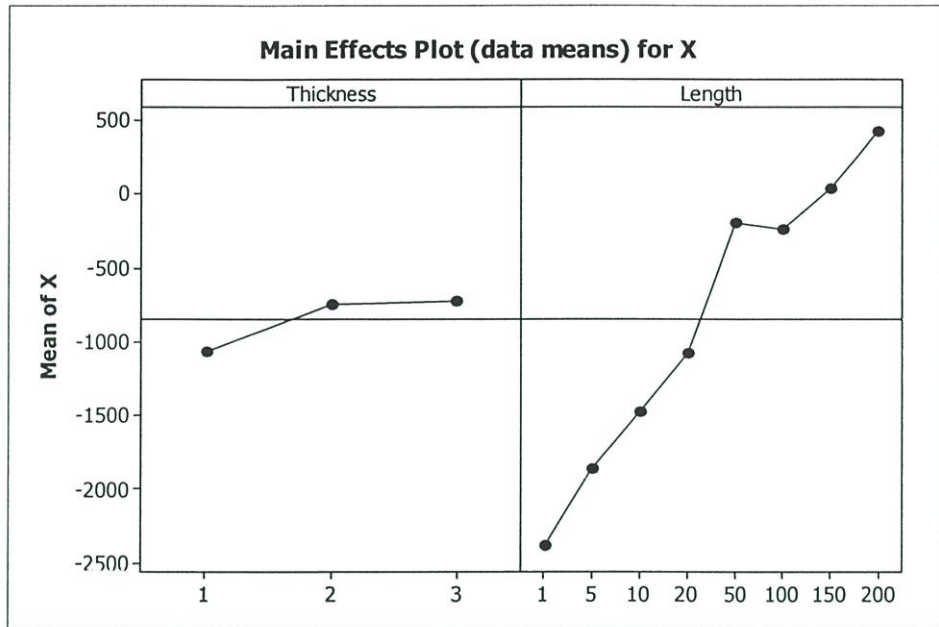


รูปที่ 3.7 แนวโน้มของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแปรผันตามความยาวของเส้น Strip Line

เราได้นำวิธีการทางสถิติเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อวิเคราะห์ผลของ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ซึ่งเป็น Output ที่เราสนใจ (โดยค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ดีที่สุดอยู่ที่ $50 + j0 \Omega$ แต่ในทางปฏิบัตินั้นทำได้ยาก) จากการเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างและความยาวของ Strip Line แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ทางสถิติ จำเป็นต้องพิจารณาจากทุกเงื่อนไขแม้ Output ของเรายอยู่นอกช่วงที่เราสนใจแต่การพล็อตกราฟเพื่อดูแนวโน้มการกระจายตัวของข้อมูล ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะทำให้เราสามารถพยากรณ์ทิศทางของข้อมูลได้ถูกต้องมากขึ้น จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 จะเห็นได้ว่าค่า Resistance และค่า Reactance จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อความยาวของ Strip Line เพิ่มขึ้น โดยสังเกตความชันของกราฟจะเห็นว่าความชันของกราฟต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ยิ่งกราฟมีความชันมากเท่าไรนั้นแสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลมาก

มีค่าเข้าใกล้แนวโน้มของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแปรผันตามความยาวของเส้น Strip Line อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเทียบกับขนาดความกว้างของ Strip Line แล้วมีผลน้อยกว่ามาก





รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบผลของความกว้างและความยาวที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า

Two-way ANOVA: R-X versus Thickness, Length

Source	DF	SS	MS	F	P
Thickness	2	1806699	903349	4.51	0.031
Length	7	274614460	39230637	195.98	0.000
Error	14	2802501	200179		
Total	23	279223659			

S = 447.4 R-Sq = 99.00% R-Sq(adj) = 98.35%

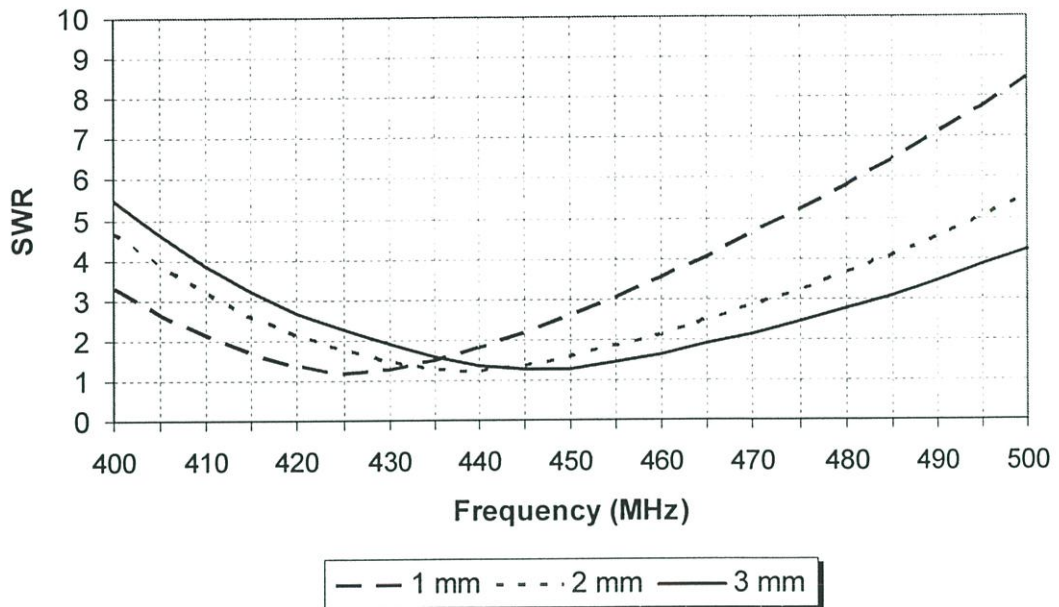
ค่า P-Value

ความยาว P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าค่าทั้งสองมีนัยสำคัญต่อค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า

ค่า R-Sq

เท่ากับ 99% สำหรับค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า มีความน่าเชื่อถือดีมาก (ปกติทางสถิติยอมรับได้ที่มากกว่า 80%) เปรียบเทียบโดยใช้วิธี 2-WAY-ANOVA

Strip Line width vs SWR

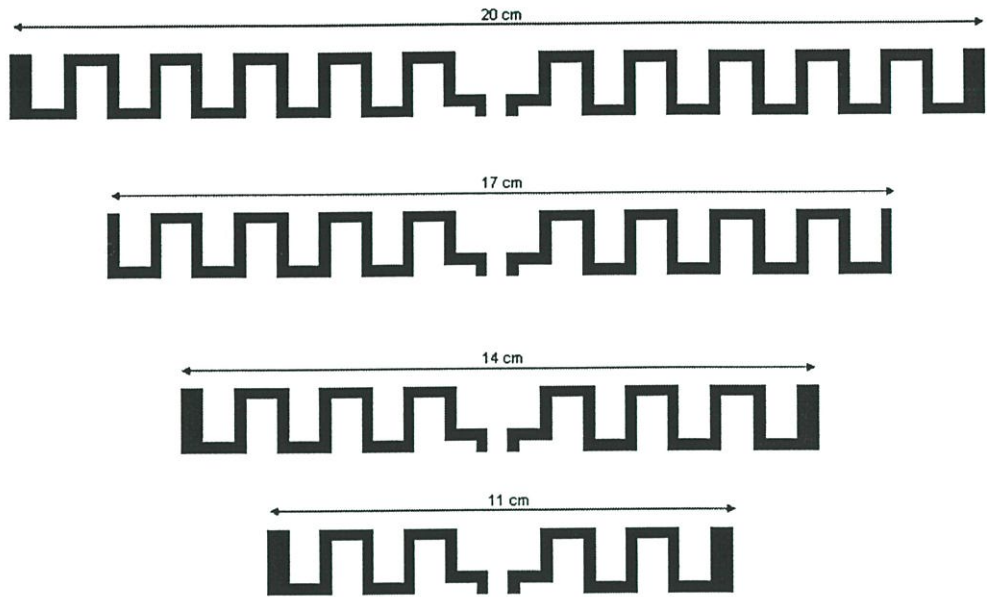


รูปที่ 3.9 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ขนาดความกว้างของ Strip Line ต่างๆกัน

จากผลที่แสดงของ SWR และ $|S_{11}|$ พบว่าที่ขนาดของความยาวของ Strip Line ที่ 30 เซนติเมตร คิดที่ SWR 2:1 พบว่าทั้งสามขนาดความกว้างสตริปสามารถครอบคลุมย่านความถี่ที่เราใช้งาน แต่ที่ขนาด 2 มิลลิเมตรมีค่า Bandwidth อยู่ที่ 8.03 % และค่าที่ SWR ต่ำสุดอยู่ที่ 1.2:1

และเมื่อเรามาพิจารณาในแง่ของขนาด เราพบว่าที่ 1 มิลลิเมตร มีขนาดของเส้นที่เล็กเกินไป เมื่อเวลานำ Strip Line ไปบัดกรีเพื่อเชื่อมต่อกับส่วนที่เป็นไมโครชิปหรือโมดูล ส่วน Strip Line ที่ขนาด 3 มิลลิเมตรก็มีขนาด Strip Line ที่ใหญ่เกินไป จึงเป็นเหตุผลที่ Strip Line ขนาด 2 มิลลิเมตรจึงน่าสนใจ

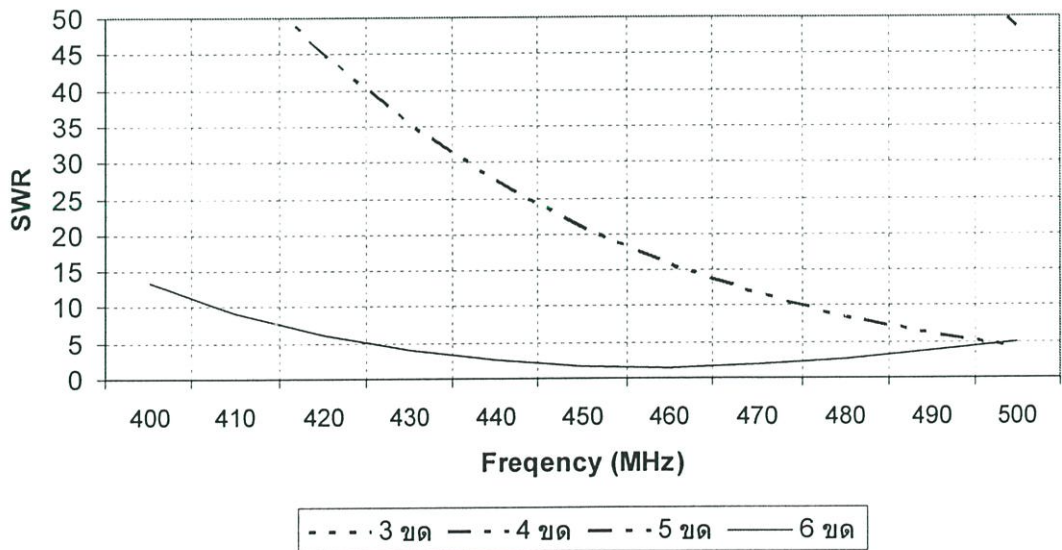
แต่เนื่องจากที่ความยาวของสายอากาศโดยรวมแล้วยังมีขนาดที่ยาวเกินไป ดังนั้นเราจำเป็นต้องนำสายอากาศที่ได้มาย่อขนาด โดยเงื่อนไขคือยังคงต้องรักษาการแมตซึ่งเป็นสำคัญ โดยการขุดสายอากาศไปมาจึงเป็นวิธีหนึ่งที่ถูกเลือก



รูปที่ 3.10 การนำ Strip Line มาขดและการลดจำนวนขดของ Strip Line

จากรูปเมื่อเราลดจำนวนขดของ Strip Line ลง จะทำให้ความยาวของสายอากาศมีขนาดลดลงด้วยแต่เราต้องมาพิจารณาต่อในเรื่องของค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งและอิมพีแดนซ์ด้านเข้า

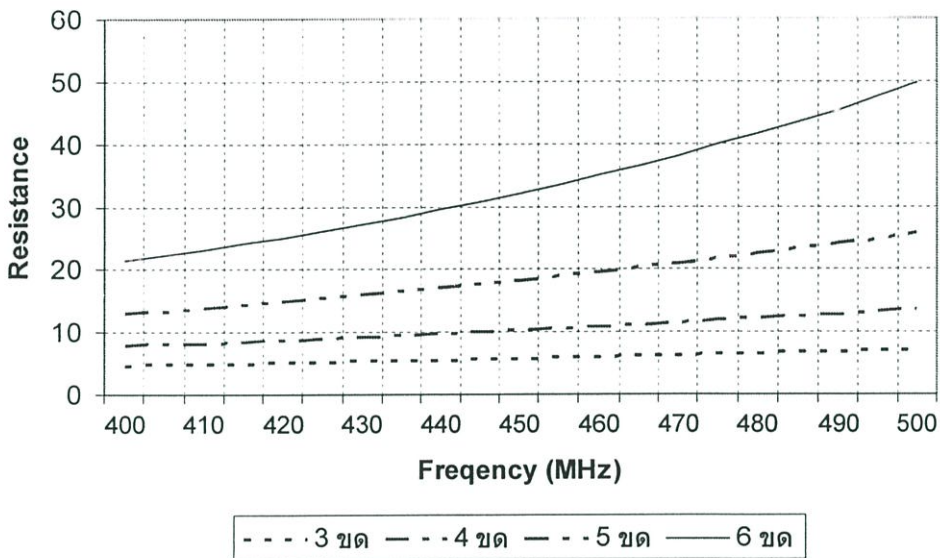
จำนวนขด vs SWR



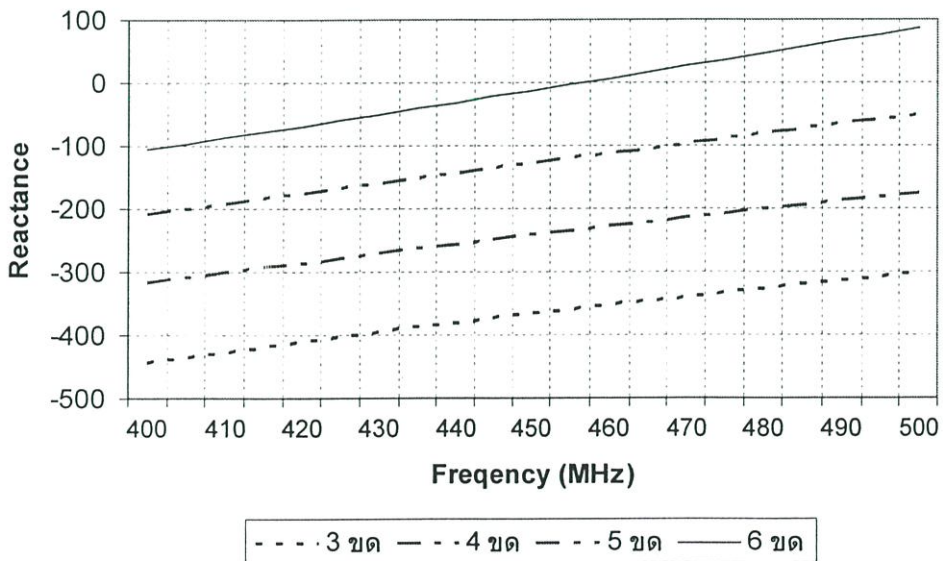
รูปที่ 3.11 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่จำนวนขดของสายอากาศต่างกัน

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าค่า SWR ของสายอากาศเมื่อเทียบตามจำนวนขด พบว่า ยิ่งจำนวนขดน้อยลงค่า SWR ยิ่งมากขึ้นนั่นคือยิ่งมีการแมตซ์ซึ่งได้น้อยลงนั่นเอง จะเห็นได้ว่าค่า SWR ของการขดที่ 3 และ 4 ขดมากเกินไปกว่าช่วงที่เราสนใจ ซึ่งไม่ดีเพราะแสดงว่าสายอากาศไม่แมตซ์กับค่าอิมพีแดนซ์ที่เราตั้งไว้ แต่เนื่องจากขนาดยังเป็นปัจจัยสำคัญ ดังนั้นเราจึงมาศึกษาตัวแปรอื่นที่มีผล เพื่อให้ขนาดความยาวของสายอากาศสั้นลงและยังต้องคำนึงถึงความแมตซ์กับค่าอิมพีแดนซ์ของโมดูล ดังแสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าดังรูปที่ 3.12

Input impedance



Input impedance

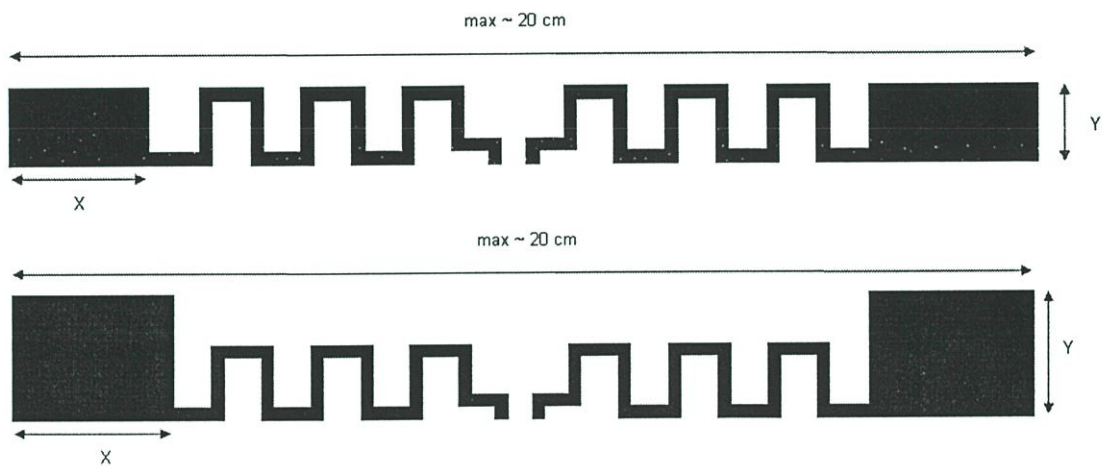


รูปที่ 3.12 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่จำนวนขดของสายอากาศต่างๆกัน

ซึ่งในส่วนของคุณค่า Resistance และ ค่า Reactance จะมีค่าลดลงตามจำนวนขดที่ลดลงด้วย แต่เนื่องจากความยาวของสายอากาศยังเป็นปัจจัยที่จำเป็นที่ต้องพิจารณาแม้ว่า ที่ขนาด Strip Line ที่ 3 ขดจะไม่แมตซึ่งกัน

แต่การลดขนาดของขดเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้เกิดการแมตซึ่งกันได้เพราะค่า Reactance ของขนาดจำนวน 3 ขดที่เราใช้ยังมีค่าที่สูงอยู่ ซึ่งเราต้องการให้ค่าในเทอมนี้มีค่าใกล้เคียงศูนย์จึงจำเป็นที่จะต้องทำให้อิมพีแดนซ์ด้านเข้าเข้าใกล้ 50Ω ที่สุด จึงจำเป็นต้องอาศัยการปรับขนาดด้านปลายทั้งสองข้างของสายอากาศเข้ามาช่วย

โดยเราจะพิจารณาที่ปลายของ Strip Line ซึ่งจะมีตัวแปร 2 ค่าที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า คือ ตัวแปร X และ Y



รูปที่ 3.13 การปรับขนาดของสายอากาศที่ตัวแปร X และ Y

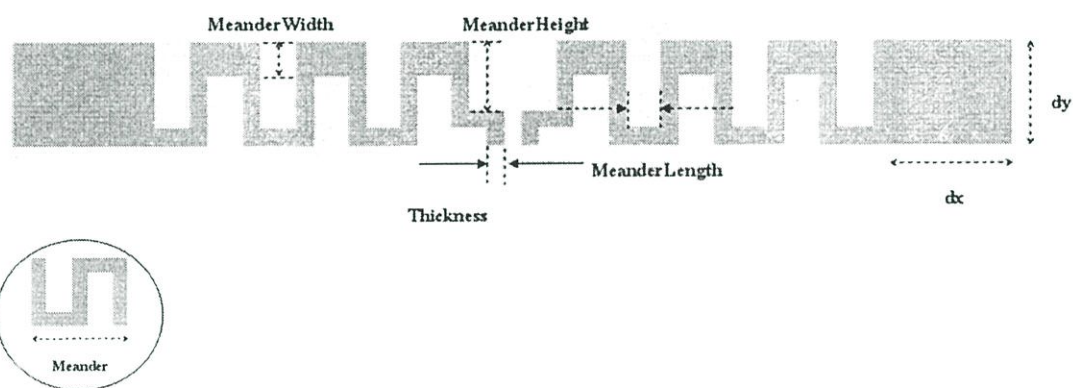
จากการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า พบว่าค่า Resistance เพิ่มขึ้นและค่า Reactance ลดลง เมื่อความถี่ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.13 ดังนั้นเราจึงสามารถอาศัยขนาดของปลาย Strip Line ที่เป็นสี่เหลี่ยมนี้ในการปรับหาค่าอิมพีแดนซ์แมตซึ่งได้

3.2.4 การใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) สำหรับการออกแบบสายอากาศแบบ 2^k Factorial Design

ในการออกแบบการทดลองเราต้องกำหนด Y ซึ่งเป็น Output หรือ response ของเราก่อนในที่นี้เรากำหนด Y คือ อิมพีแดนซ์ด้านเข้า ซึ่งมีทั้งพจน์ที่เป็นค่าจริง (Resistance: R) กับ ค่าจินตภาพ (Reactance: X) ซึ่งเท่ากับว่าเรามี Output 2 ตัว

กำหนด Factor (k) ที่เราสนใจ

1. ความสูงของขด (Meander Height)
2. ความกว้างของขดด้านบน (Meander Width)
3. ความยาวของขด (Meander Length)
4. ปลายของสายอากาศแกน dx
5. ปลายของสายอากาศแกน dy
6. จำนวนขดหรือรอบ N



รูปที่ 3.14 ลักษณะทางกายภาพของสายอากาศที่เราใช้ DOE ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองสำหรับ DOE แบบ 2^k Factorial Design

Available Factorial Designs (with Resolution)														
Runs	Factors													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full	III												
8		Full	IV	III	III	III								
16			Full	IV	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV



รูปที่ 3.15 ระดับความน่าเชื่อถือของค่าที่ได้จากการทดลอง DOE

กำหนด Factors และ levels สำหรับการทดลอง โดยในแต่ละ Level ของแต่ละ factor ต้องมีทั้งค่า Low Level และ High Level

ตารางที่ 3.3 ค่าระดับของตัวแปรแต่ละตัวสำหรับ DOE แบบ 2^k Factorial Design

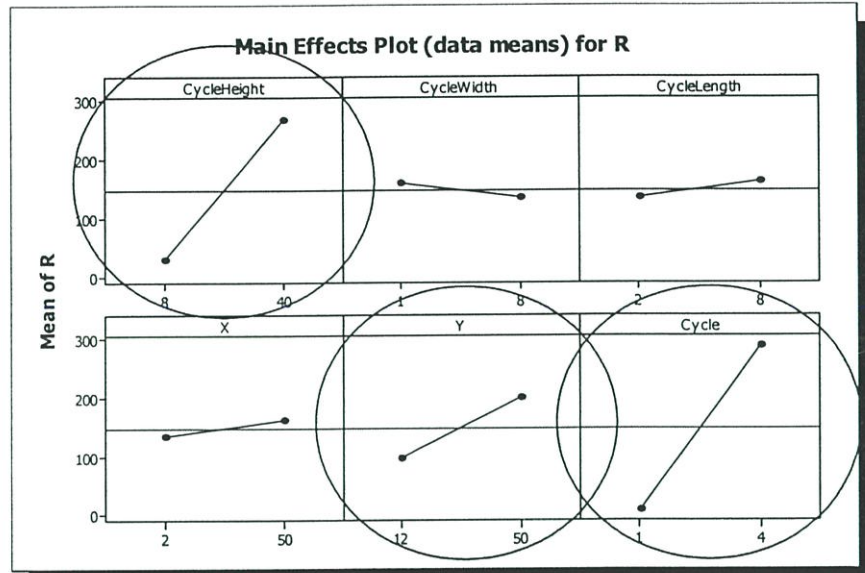
Factor	Low level	High level
Meander Height	8	40
Meander Width	1	8
Meander Length	2	8
dx	2	50
dy	12	50
Meander	1	4

จะมี Factor ทั้งหมด 6 factors โดยที่แต่ละ factor มีอย่างละ 2 ระดับ (Level: high-low) และจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 32 การทดลอง ($2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 2^6 = 32$)

ขั้นตอนต่อมาคำนวณหา

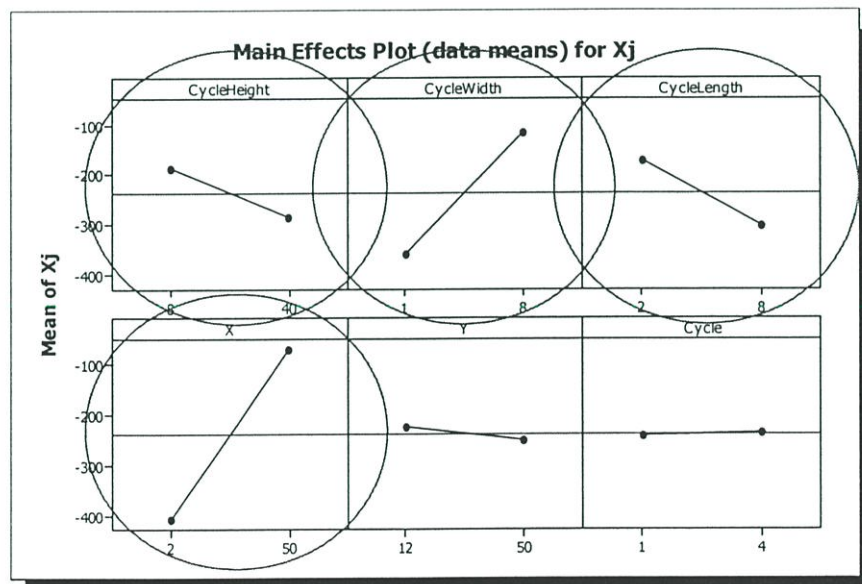
- Main Effect
- Interaction
- Linear and Non-Linearity

จากการใช้โปรแกรมทางสถิติในการคำนวณหา Main effect



รูปที่ 3.16 Main effect ของ Output ของค่า Resistance

จากรูป 3.16 จะเห็นได้ว่า factor ของ Meander Height, d_y และ Meander มีผลมากเมื่อเทียบกับ factor อื่นๆ สำหรับค่าของ Output: R

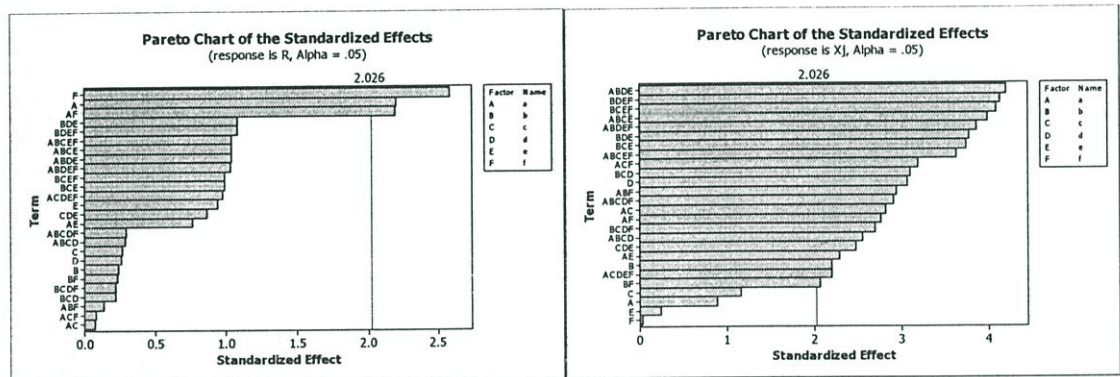


รูปที่ 3.17 Main effect ของ Output ของค่า Reactance

จากรูป 3.16 จะเห็นได้ว่า factor ของ Meander Height, Meander Width, Meander Length และ d_x มีผลมากเมื่อเทียบกับ factor อื่นๆ สำหรับค่าของ Output: X

ทั้ง 6 factors ต่างมีผลต่อ Output R , X จึงทำให้เราทราบว่า การปรับเปลี่ยน factor บางตัว ทำให้มีผลต่อ Output ภาพรวมทั้งสิ้น การ Trial and Run เป็นทางเลือกหนึ่งแต่อาจจะต้องใช้การทดลองมากกว่าเพื่อให้ได้ผลที่ต้องการ แต่การทำ DOE ทำให้สามารถไปถึงจุดที่ต้องการด้วยการทดลองที่น้อยกว่า รวมทั้งข้อมูลที่ได้จากการทำ DOE ยังสามารถนำไปใช้กับสายอากาศรูปแบบอื่นๆ ได้อีกด้วย

จากการใช้โปรแกรมทางสถิติในการคำนวณหา Interaction



รูปที่ 3.18 Interaction ของ Output ของค่า Resistance และ Reactance

จากการศึกษาค่า Main Effect และ Interaction พบว่าทุก factor ที่เราสนใจล้วนมีผลต่อ Output (R,X) ทั้งสิ้น การใช้ Trail and Run จึงเป็นวิธีที่เป็นไปได้ยาก แต่สำหรับ DOE สามารถจัดการกระบวนการที่ยู่ยากเหล่านั้นให้มีระเบียบและง่ายขึ้น จนสามารถวิเคราะห์หา Output ที่เราต้องการได้

จากการใช้โปรแกรมทางสถิติในการคำนวณหาสมการสำเร็จด้วย Optimizer

Meander Height		Meander Width		Meander Length		dx	dy	Meander (N)
New	Hi	CycleHel	CycleWid	CycleLen	X	Y	Cycle	
D	Cur	40.0	8.0	8.0	50.0	50.0	4.0	
0.00000	Lo	[39.9922]	[1.0]	[8.0]	[50.0]	[13.7697]	[4.0]	
		8.0	1.0	2.0	2.0	12.0	1.0	
R								
Targ: 345.80								
y = 59.9410								
d = 0.00000								
Xj								
Targ: 913.10								
y = -628.2763								
d = 0.00000								

รูปที่ 3.19 ตัวอย่าง Optimizer ของ DOE

ตัวอย่าง การใช้ DOE ทำการ optimize พารามิเตอร์ของ R, X

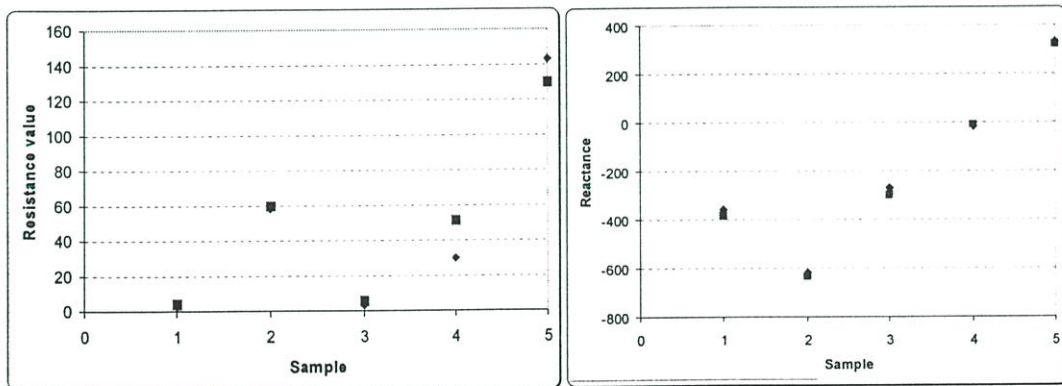
ค่าจากการ Optimize ด้วย DOE: R= 59.9410, Y=-628.2763

ค่าจากการวิเคราะห์ด้วย IE3D: R=58.08, Y=-619.4

หมายเหตุ

สำหรับการทำ Optimizer ของ DOE สามารถคำนวณหรือพยากรณ์ได้ทั้ง 2 กรณี

- ค่า R หรือ X คือค่าที่เราสามารถ Input ไปส่วน Dimension ของสายอากาศจะเป็น Output
- ค่า Dimension ของสายอากาศ คือค่าที่เราสามารถ Input ไปส่วน R หรือ X จะเป็น Output



รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทำ DOE กับค่าที่ได้จากการคำนวณสำหรับค่าของ Resistance และ Reactance

จากการสุ่มตัวอย่าง 5 ตัวอย่างก็พบว่าค่าที่ได้จากการพยากรณ์ทางสถิติด้วยวิธี DOE มีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณสังเกตจากรูปที่ 3.20 จะเห็นว่าบางจุดของ DOE กับการคำนวณ

ทั้งสองนั้นทับกันสนิทเกือบจะทั้งหมด เราจึงสามารถนำ DOE ไปใช้ในการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่เราจะออกแบบต่อไป

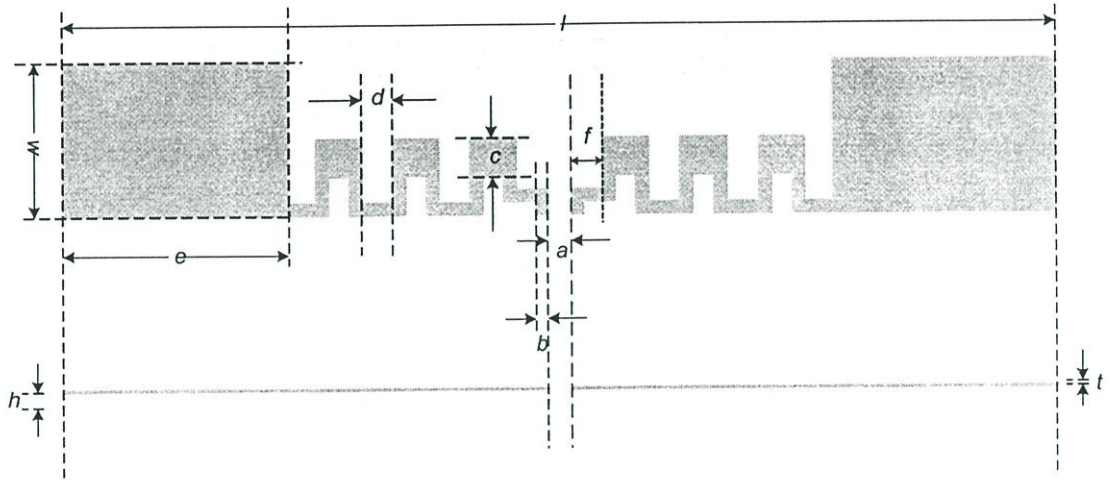
สำหรับสายอากาศของเราที่ต้องการค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ $50 + j0 \Omega$ เราก็สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับตัวอย่างข้างบน แต่ว่าบางจุดของสายอากาศเราไม่สามารถทำให้มันเป็นทศนิยมได้เช่น Meander numberจากการที่ DOE คำนวณเราพบว่า Meander number (จำนวนขด) เราเป็นทศนิยม แต่ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถทำสายอากาศที่มีจำนวนขดเป็นทศนิยมได้ เราจึงทำการปัดเศษเพื่อให้จำนวนขด (Meander number) เป็นจำนวนเต็มในที่นี้ก็คือให้เท่ากับ 3

จะเห็นว่าค่าตั้งต้นของอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเปลี่ยนไปจาก $50 + j0 \Omega$ เป็น $51.3092 - j9.6260 \Omega$ ซึ่งเป็นผลมาจากการขยับ Meander number จากจำนวนเต็มไปเป็นทศนิยม แต่ค่าที่ได้ก็ยังไม่ได้แตกต่างจากค่าตั้งต้นมากนักจึงยังพอยอมรับได้

		Meander Height	Meander Width	Meander Length	dx	dy	Meander
New D	Hi	A	B	C	D	E	F
0.00000	Cur	40.0	8.0	8.0	50.0	50.0	4.0
	Lo	[8.0]	[6.0]	[6.0]	[38.0]	[32.0]	[3.0]
		8.0	1.0	2.0	2.0	12.0	1.0
R							
Targ: 14.070							
y = 51.3092							
d = 0.00000							
Xj							
Targ: -102.30							
y = -9.6260							
d = 0.00000							

รูปที่ 3.21 การทำ Optimizer ของ DOE สำหรับสายอากาศที่อิมพีแดนซ์ด้านเข้า $50 + j0 \Omega$

จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าที่จุดนั้นอีกครั้งก่อนที่จะสามารถนำไปใช้งานจริง และในกรณีที่ค่าที่ได้จากการทำ DOE นั้นยังไม่ใกล้ค่าที่เราตั้งไว้เราสามารถเลือกปรับ factor ต่างๆ โดยดูแนวโน้มของกราฟได้ เช่น ต้องการเพิ่มค่าของ Resistance ก็ปรับ Factor แล้วสังเกตค่าของ R โดยดูความชันเป็นหลัก โดยการปรับนั้นต้องคำนึงถึงค่า Reactance ด้วยซึ่งมีผลซึ่งกันและกัน



รูปที่ 3.22 สายอากาศมินิเดอรั้กสำหรับระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่ได้จากการออกแบบ

a = ระยะห่างระหว่างพอร์้ท

b = ความกว้างของ Strip Line

c = ความกว้างของขดด้้านบน

d = ระยะห่างระหว่างขดในแนวแกน X

e = ความยาวของแผ่น Strip Line ด้านปลาย

f = ระยะระหว่างจุด feed ถึงขดแรก

w = ความกว้างของแผ่น Strip Line ด้านปลายหรือความกว้างโดยรวมของสายอากาศ

l = ความยาวโดยรวมของสายอากาศ

h = ความสูงของชั้นวัสดุฐานรอง

t = ความหนาของชั้นทองแดงบนวัสดุฐานรอง

จากการออกแบบเราได้ค่าสายอากาศที่เหมาะสมสำหรับระบบชี้เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุดังตารางที่ 3.4

โดยเราจะแบ่งพารามิเตอร์ที่ได้จาก 2 แหล่ง คือ

- จากการออกแบบและพิจารณาขนาดการนำไปใช้งานจริง ซึ่งได้ถูกกำหนดไว้ก่อนเริ่มต้นทำ DOE (a, h, t, f)
- พารามิเตอร์ที่เราสนใจที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่เราจะปรับเพื่อหาอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (b, c, d, e, w, n)

ตารางที่ 3.4 แสดงขนาดของสายอากาศมีนเคอร์แท็กที่ได้จากออกแบบ

ด้าน	ความหมาย	ขนาด
a	a = ระยะห่างระหว่างพอร์ท	4 mm
h	h = ความสูงของชั้นวัสดุฐานรอง	0.6525 mm
t	t = ความหนาของชั้นทองแดงบนวัสดุฐานรอง	0.0795 mm
f	f = ระยะระหว่างจุด feed ถึงขดแรก	4 mm
b	b = ความกว้างของ Strip Line	2 mm
c	c = ความกว้างของขดด้านบน	6 mm
d	d = ระยะห่างระหว่างขดในแนวแกน X	6 mm
e	e = ความยาวของแผ่น Strip Line ด้านปลาย	47 mm
w	w = ความกว้างของแผ่น Strip Line ด้านปลายหรือความยาวโดยรวมของสายอากาศ	32 mm
n	n = จำนวนขดของสายอากาศต่อข้าง	3 ขด

3.2.5 สนามระยะไกล

บริเวณระยะสนามระยะไกล เป็นบริเวณสนามของสายอากาศซึ่งการแพร่ของสนามของสายอากาศที่มุมต่างๆ ไม่ขึ้นกับระยะทางของสายอากาศ โดย D คือ มิติใหญ่ที่สุดของสายอากาศ บริเวณสนามระยะไกลจะเกิดขึ้นที่ระยะทาง R_2 มากกว่า $2D^2/\lambda$ ดังนั้นค่าระยะสนามระยะไกลเท่ากับ $R_2 > 2D^2/\lambda$ ซึ่งทำการทดสอบที่สนามระยะไกล หรือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิด (สายอากาศส่ง) และสายอากาศรับต้องห่างกันมากกว่า $2D^2/\lambda$ ซึ่งสนามระยะไกลนี้ การเปลี่ยนแปลงของสนามของสายอากาศตามมุมต่างๆ จะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง

3.2.6 ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance)

เป็นค่าของอิมพีแดนซ์ที่ขั้วของสายอากาศนั้นๆ

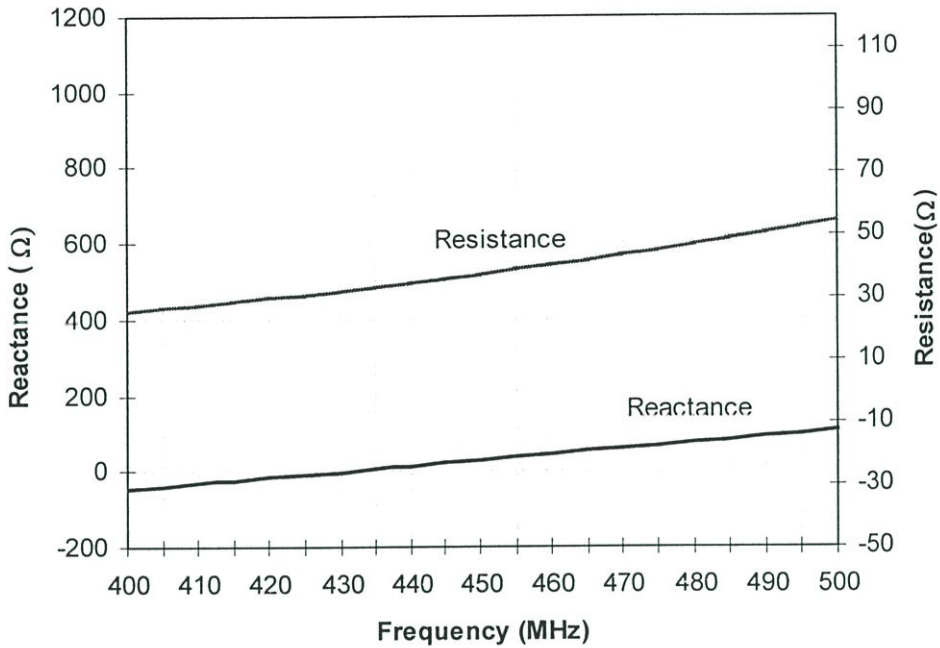
$$Z=R+jX \quad (3.1)$$

โดยที่ Z = อิมพีแดนซ์ด้านเข้า

R = ค่าความต้านทาน (Resistance)

X = ค่ารีแอคแตนซ์ (Reactance)

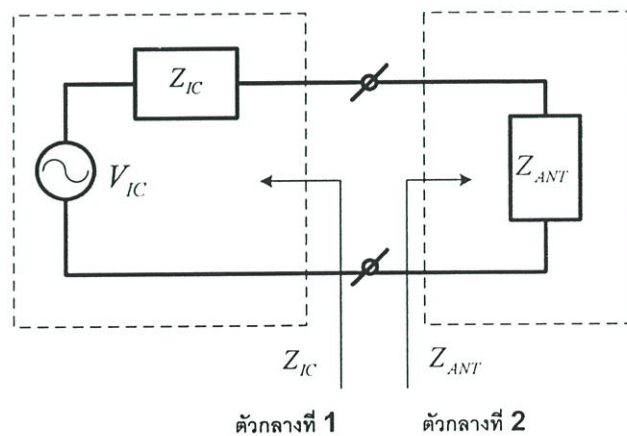
ที่ความถี่ 433.4 MHz มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าอยู่ที่ $33.2 + j(6.395) \Omega$ และค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าที่ความถี่ต่างๆ ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ผลการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ออกแบบที่ความถี่ 400 - 500 MHz

3.2.7 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection Coefficient)

การนำสายอากาศมาต่อกับ โมดูลหรือ ไมโครชิปจะมีค่าความสูญเสียที่เกิดจากการไม่เท่ากันของค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า ทำให้เกิดการสะท้อนกลับ เราเรียกค่าพารามิเตอร์นี้เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่แสดงการแมตซิ่ง



รูปที่ 3.24 วงจรสมมูลของสายอากาศกับไมโครชิปหรือโมดูล

Z_{IC} = อิมพีแดนซ์ของไมโครชิป หรือ โมดูล

Z_{ANT} = อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

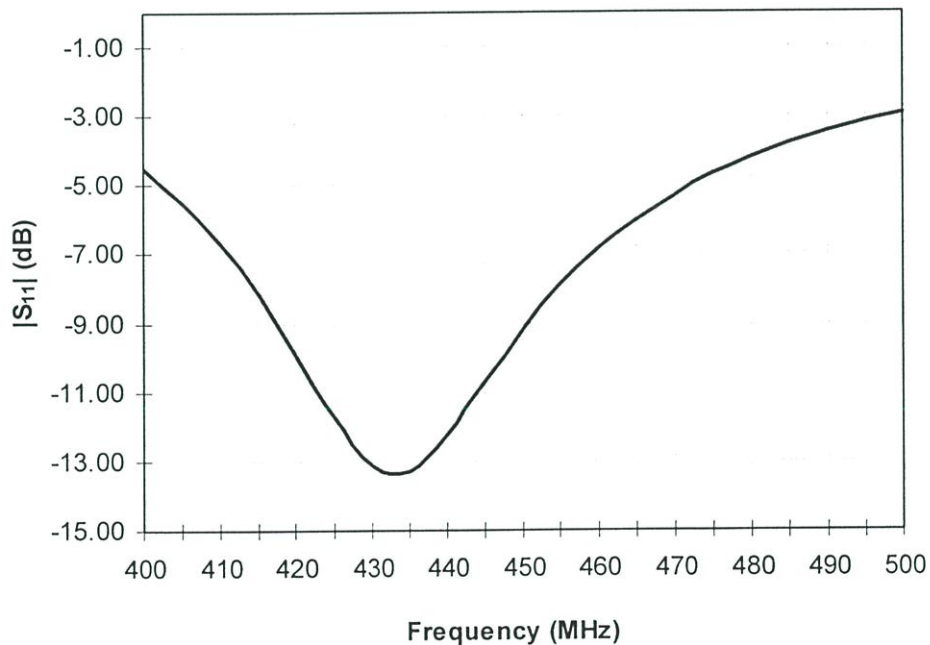
Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (Reflection Coefficient);

$$\Gamma = \frac{Z_{IC} - Z_{ANT}^*}{Z_{IC} + Z_{ANT}} \quad (3.10)$$

ตามปกติสายนำสัญญาณหรือ โมดูลจะมีการวัดค่ามาแล้วด้วยค่ามาตรฐาน และค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเท่ากับ 50 Ω

สำหรับสายอากาศค่า Return loss ที่เราขอมรับได้สำหรับการออกแบบสายอากาศ ควรจะไม่น้อยกว่า 10 dB หาได้จาก

$$RL(dB) = -20 \cdot \log(|\Gamma|) \quad (3.11)$$



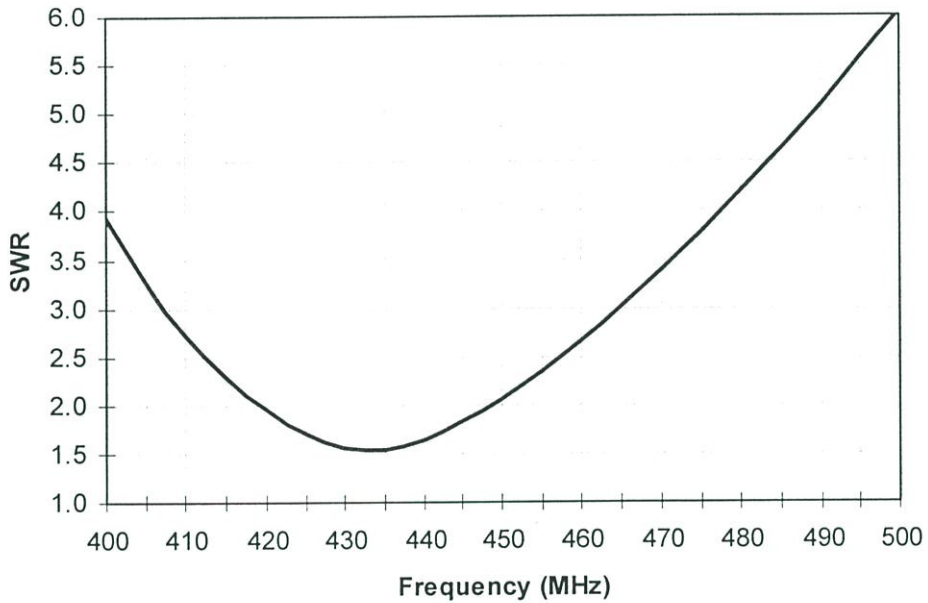
รูปที่ 3.25 ผลการวิเคราะห์ค่า $|S_{11}|$ ของสายอากาศที่ออกแบบ ที่ความถี่ 400 – 500 MHz

จากรูปกราฟ 3.25 พบว่า $|S_{11}|$ ต่ำที่สุดที่ค่าประมาณ 433.4 MHz ซึ่งโดยปกติการออกแบบสายอากาศขอมรับค่า $|S_{11}|$ ว่าควรจะต้องไม่มากกว่า -10 dB และควรจะครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งาน ซึ่งจากการคำนวณพบว่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมช่วงความถี่ประมาณ 420 – 450 MHz

3.2.8 อัตราส่วนคลื่นนิ่ง (Standing Wave Ratio: SWR)

$$SWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{I_{\max} \cdot Z}{I_{\min} \cdot Z} \quad (3.12)$$

$$SWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.13)$$

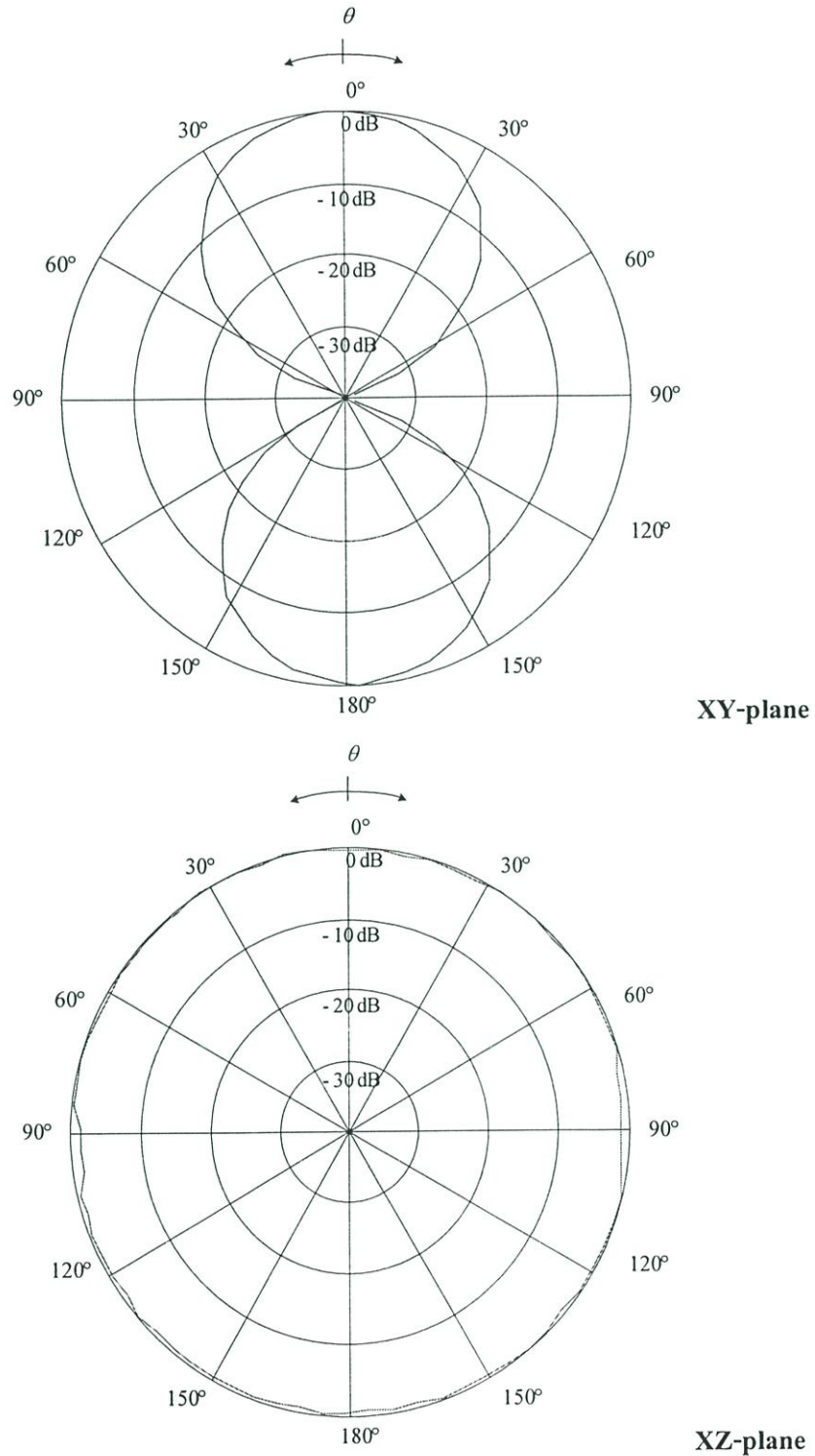


รูปที่ 3.26 ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศที่ออกแบบ ที่ความถี่ 400 – 500 MHz

จากรูปกราฟ 3.26 พบว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งต่ำที่สุดที่ค่าประมาณ 433.4 MHz ซึ่งโดยปกติ การออกแบบสายอากาศยอมรับค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งว่าควรจะต้องไม่มากกว่า 2:1 และควรจะ ครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งาน ซึ่งจากการคำนวณพบว่าค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งครอบคลุมช่วงความถี่ ประมาณ 420 – 450 MHz

3.2.9 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น (Radiation Pattern)

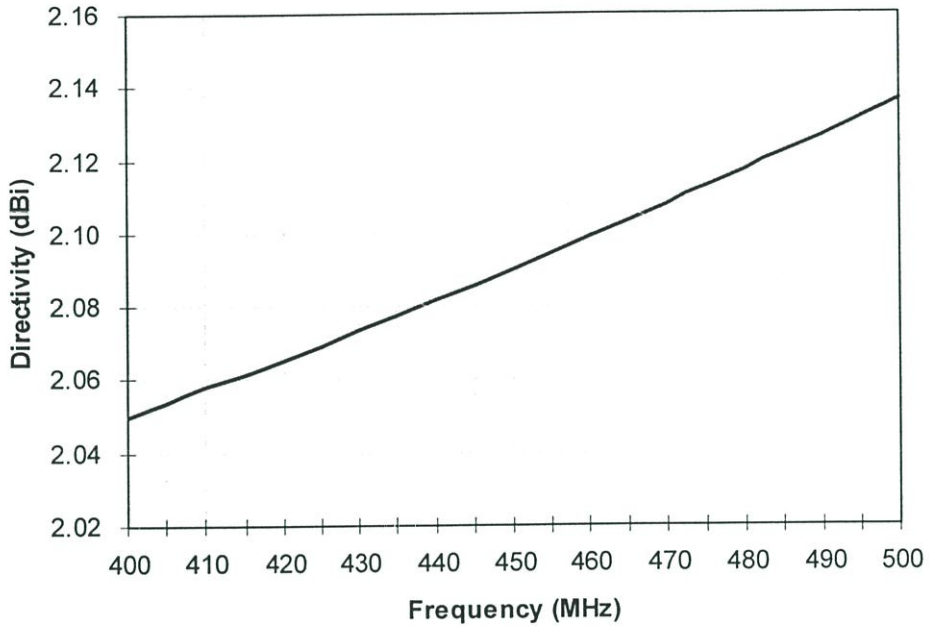
แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง



รูปที่ 3.27 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบ E-Plane และ H-Plane ที่ความถี่ 433.4 MHz

จากรูปที่ 3.27 ได้แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นจากสายอากาศที่ออกแบบมีลักษณะการแพร่กระจายคลื่นรอบตัว

3.2.10 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง (Directivity)



รูปที่ 3.28 ค่าสภาพเจาะจงทิศทาง ที่ความถี่ 400 - 500 MHz

จากรูป 3.28 เนื่องจากสายอากาศที่ออกแบบมีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว จึงทำให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางไม่มากนักแต่ก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น

3.2.11 ความกว้างแถบความถี่ (Bandwidth)

การพิจารณาช่วงความกว้างแถบความถี่ของสายอากาศ (พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 2:1)

โดยที่ f_H คือค่าความถี่สูงสุดที่สามารถทำงานได้ = 448 MHz

f_L คือค่าความถี่ต่ำสุดที่สามารถทำงานได้ = 418 MHz

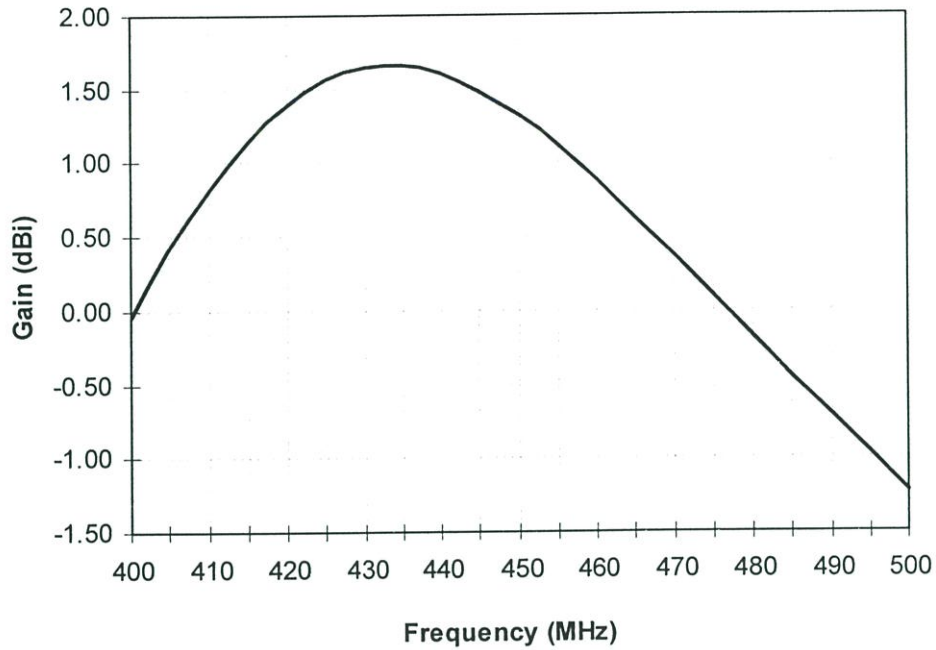
เมื่อ ค่าความถี่ที่ออกแบบ = 433.4 MHz

สายอากาศมีความกว้างแถบความถี่เท่ากับ 30 MHz

3.2.12 ค่าอัตราขยาย (Gain)

ค่าอัตราขยายเป็นความสัมพันธ์ที่ได้มาจากค่าสภาพเจาะจงทิศทาง
ประสิทธิภาพรวมของสายอากาศเข้ามาด้วย

โดยพิจารณา



รูปที่ 3.29 ค่าอัตราขยาย (Gain) ที่ความถี่ 400 – 500 MHz

จากรูปที่ 3.29 แสดงผลการคำนวณค่าอัตราขยาย เนื่องจากสายอากาศที่ออกแบบมีการ
แพร่กระจายคลื่นออกรอบตัว จึงทำให้ค่าอัตราขยายไม่สูงแต่ก็มากที่สุดที่ความถี่ที่ใช้งานที่ได้
ออกแบบไว้

บทที่ 4

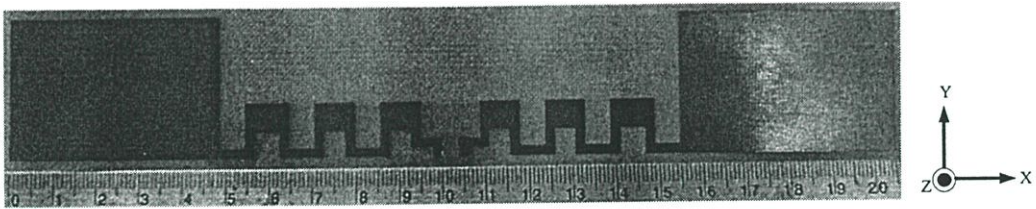
การสร้าง ทดสอบ และผลการทดสอบ

4.1 บทนำ

จากที่เราได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศมินิเจอร์แท็ก สำหรับ Tag ที่ได้จากการคำนวณในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์คุณลักษณะของสายอากาศมินิเจอร์แท็ก ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบคุณลักษณะของสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลที่ได้จากการคำนวณว่ามีความแม่นยำและถูกต้องมากน้อยเพียงใด ซึ่งการทดสอบสายอากาศได้ออกแบบสร้างที่ความถี่ 433.4 MHz ซึ่งเป็นความถี่ใช้งานของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ UHF

4.2 การสร้าง และการทดสอบสายอากาศมินิเจอร์แท็ก

จากขนาดความสูงของวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.6525 มิลลิเมตร (0.00094λ) และความหนาของทองแดงบนวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.0795 มิลลิเมตร (0.0000115λ) จากผลการคำนวณได้ทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด คือ ขนาดความกว้างโดยรวม 32 มิลลิเมตร (0.046λ) ความยาวที่ 208 มิลลิเมตร (0.300λ) และความหนาเท่ากับ 0.732 มิลลิเมตร (0.001λ) รูปถ่ายของสายอากาศที่ได้สร้างขึ้นจริงแสดงดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปถ่ายสายอากาศมินิเจอร์แท็กสำหรับระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่ได้สร้างขึ้นจริง

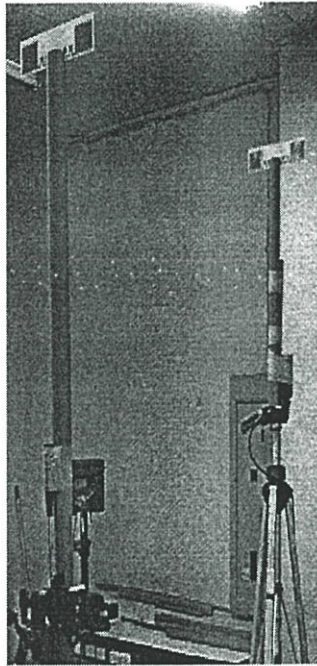
4.2.1 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ คือ รูปภาพที่ใช้เพื่อเป็นตัวบ่งบอกลักษณะการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศที่เป็นฟังก์ชันของทิศทาง ซึ่งทำการทดสอบที่สนามระยะไกลหรือระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิด (สายอากาศส่ง) และสายอากาศรับมากกว่า $2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือมิติที่ยาวที่สุดของสายอากาศ

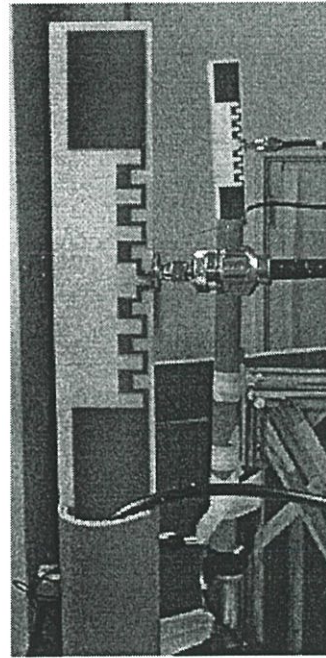
โดยสายอากาศที่ออกแบบไว้มีมิติที่ใหญ่ที่สุดเท่ากับ 20.8 เซนติเมตร ที่ความถี่ 433.4 MHz จะมีสนามระยะไกลเกิดขึ้นที่ระยะ $R > 125$ เซนติเมตร

เนื่องจากสายอากาศมินิเคอร์แท็กที่ออกแบบไว้ไม่มีระนาบกราวนด์จึงมีลักษณะเดียวกับสายอากาศไดโพล จึงทำให้มีแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัวด้วย

รูปที่ 4.2 แสดงการต่อสายอากาศเพื่อทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็ก รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศในระนาบสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณี พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่คำนวณด้วยโปรแกรมมีแนวโน้มที่สอดคล้องกันกับในกรณีที่ได้จากการทดสอบ



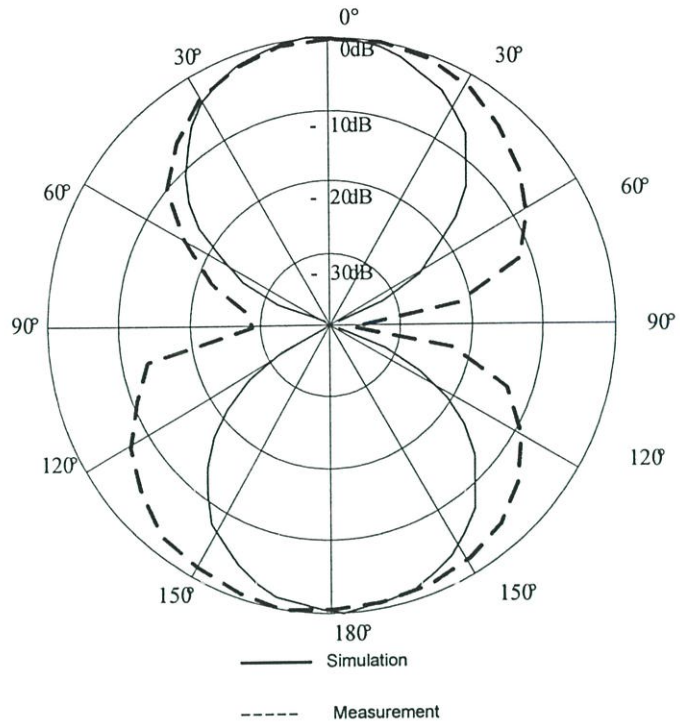
E-plane



H-plane

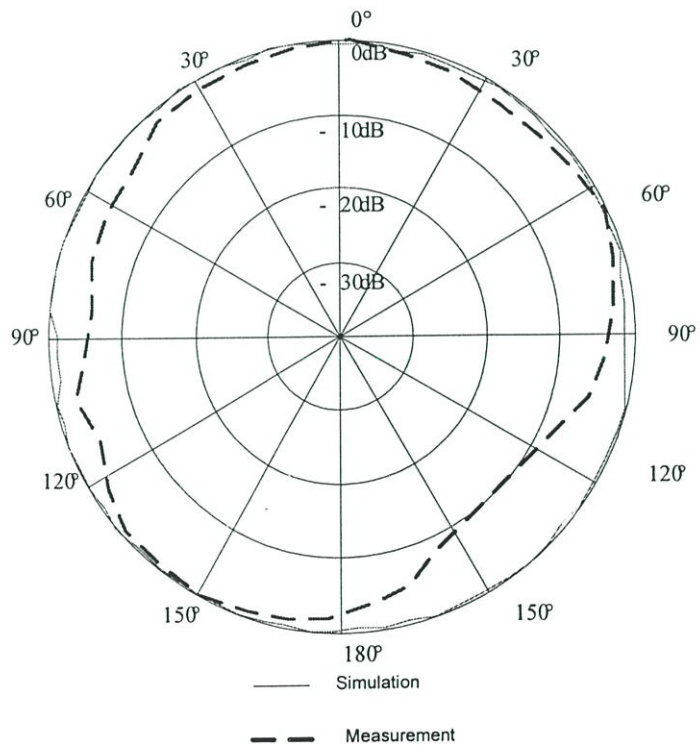
รูปที่ 4.2 การติดตั้งสายอากาศเพื่อทำการทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ

E-plane และ H-plane



XY-plane

รูปที่ 4.3 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane

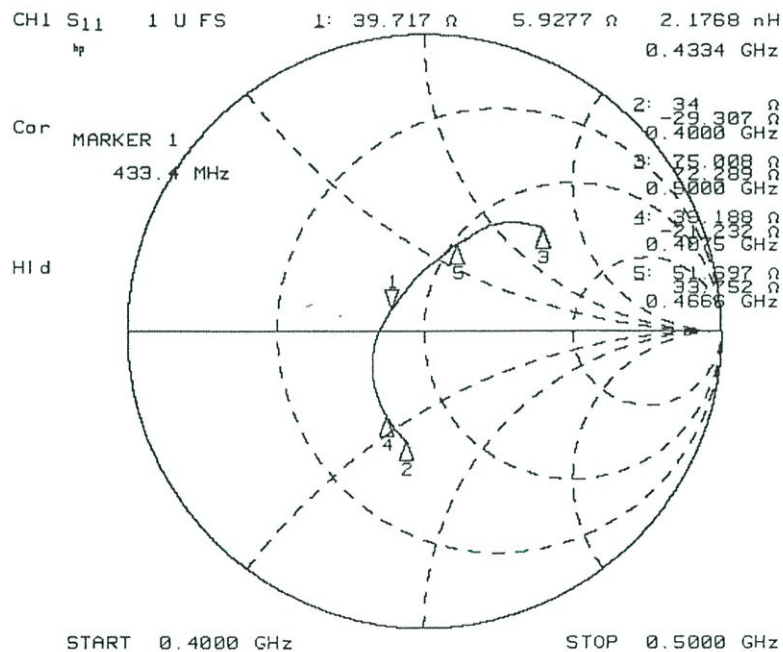


XZ-plane

รูปที่ 4.4 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane

4.2.2 อิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ

ได้ทำการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศ โดยทั่วไปค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศในระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุจะไม่เท่ากันแล้วแต่โมดูลที่ใช้ บางโมดูลก็มีค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความจุไฟฟ้าเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่สำหรับสายอากาศที่ออกแบบนี้สำหรับโมดูลที่ใช้มีค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า 50Ω ซึ่งเริ่มมีโมดูลแบบนี้ ออกมาอย่างแพร่หลายแล้ว แต่ว่า ในทางปฏิบัติไม่สามารถทำได้ดังนั้นจึงต้องออกแบบให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด และเมื่อพิจารณาค่าที่ใกล้เคียงนั้น ในรูปอัตราส่วนคลื่นนิ่งของสายอากาศ (SWR) ไม่ควรเกิน 2:1 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ รูปที่ 4.5 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศที่ได้จากการทดสอบสายอากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ $39 + j5.927 \Omega$ และในรูปที่ 4.6 แสดงอัตราส่วนคลื่นนิ่ง พบว่าความถี่ที่ออกแบบจะมีค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.304:1 และสายอากาศมีความกว้างแถบความถี่เท่ากับ 61.3 MHz (พิจารณาที่ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 2:1



รูปที่ 4.5 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมินิเจอร์แท็ก

สำหรับการแสดงตัวชี้ต่างๆ (Marker) โดย

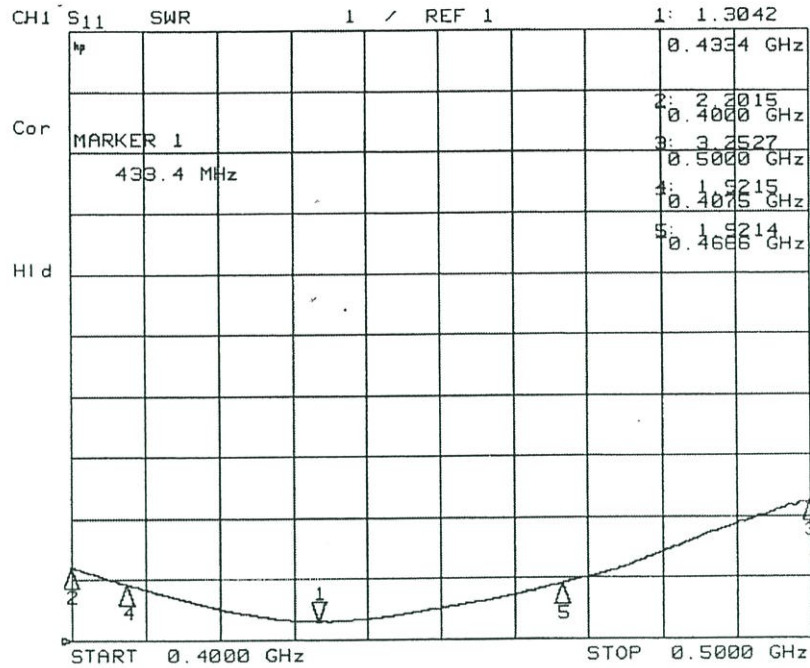
ตัวชี้ที่ 1 คือ ความถี่ที่ออกแบบ (433.4 MHz)

ตัวชี้ที่ 2 คือ ความถี่ทางต่ำที่สุดของสายอากาศที่ทำการทดสอบ (400 MHz)

ตัวชี้ที่ 3 คือ ความถี่ทางสูงที่สุดของสายอากาศที่ทำการทดสอบ (500 MHz)

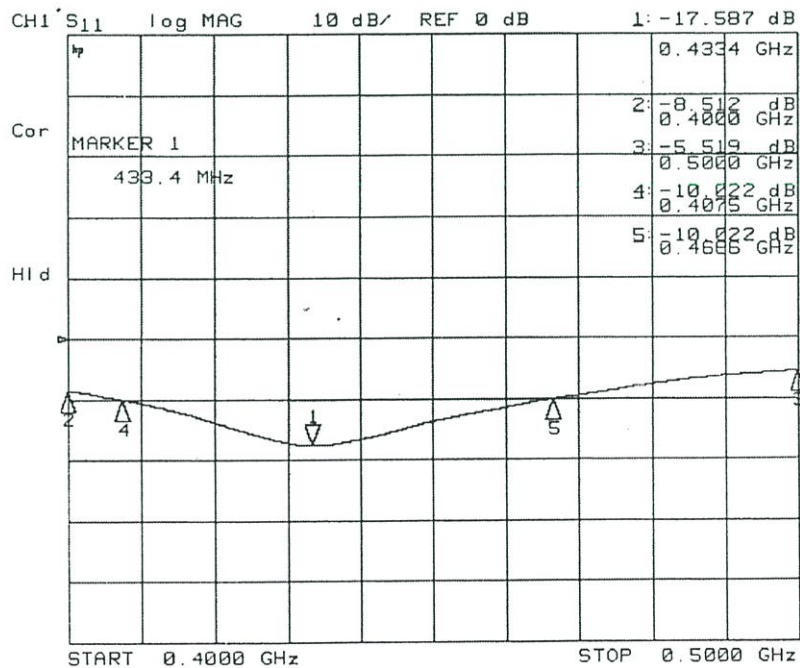
ตัวชี้ที่ 4 คือ ความถี่ทางต่ำที่สุดของสายอากาศที่ยังคงให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 2:1

ตัวชี้ที่ 5 คือ ความถี่ทางสูงที่สุดของสายอากาศที่ยังคงให้อัตราส่วนคลื่นนิ่งไม่เกิน 2:1



รูปที่ 4.6 ค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมินิเจอร์แท็ก

จากรูปกราฟที่ 4.7 พบว่า $|S_{11}|$ ต่ำที่สุดที่ความถี่ประมาณ 434 MHz ซึ่งโดยปกติการสายอากาศที่จะนำไปใช้งานจะยอมรับค่า $|S_{11}|$ ที่ไม่มากกว่า -10 dB และครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งานย่าน 433.4 MHz ซึ่งจากการทดสอบพบว่า $|S_{11}|$ ครอบคลุมช่วงความถี่ประมาณ 407.5 – 468.8 MHz



รูปที่ 4.7 ค่า $|S_{11}|$ ที่ได้จากการทดสอบของสายอากาศมินิเจอร์แท็ก

4.3 บทสรุป

ในบทนี้เป็นการแสดงการออกแบบสร้างและทดสอบสายอากาศ ทั้งนี้เพื่อใช้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและการทดสอบว่ามีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งคุณลักษณะของสายอากาศที่พิจารณาได้แก่ แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ และคุณลักษณะเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในส่วนของการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศมีนอร์มัลเท็ก พบว่าผลที่ได้จากการทดสอบและการคำนวณนั้นมีความสอดคล้องกัน ส่วนคุณลักษณะทางอิมพีแดนซ์ด้านเข้าของสายอากาศมีค่าเท่ากับ $39 + 5.927j \Omega$ และมีความกว้างแถบความถี่เท่ากับ 61.3 MHz ซึ่งครอบคลุมช่วงความถี่ใช้งาน

ส่วนค่าอัตราส่วนคลื่นนิ่งเท่ากับ 1.304:1 เนื่องจากมีการแพร่กระจายแบบรอบตัว ทำให้อัตราขยายจึงไม่สูงมาก ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น และค่าการสูญเสียย้อนกลับ นั้นมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ เช่นเดียวกับช่วงความกว้างแถบความถี่ที่ครอบคลุมย่านความถี่ใช้งานเหมือนกัน

บทที่ 5

การประเมินสมรรถนะของสายอากาศ

5.1 บทนำ

เนื้อหาบทนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะตามมาตรฐานของ EPC ของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งมีความจำเป็นต่อการออกแบบและการทำงานของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ เริ่มจากการศึกษาพื้นฐาน โครงข่ายระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุซึ่งประกอบด้วย สายอากาศของเครื่องอ่าน (Reader) และตัว Tag อีกทั้งยังมีการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวสร้างข้อมูลดิจิทัลขึ้นมาโดยนำส่งผ่านโมดูลและส่งผ่านสายอากาศสำหรับ Tag ออกไป จนถึงภาครับหรือเครื่องอ่าน (Reader) เพื่อประมวลผลที่ได้รับสัญญาณจาก Tag กลับมา และยังกล่าวถึงวิธีการประเมินสมรรถนะและผลการประเมินสมรรถนะโดยใช้สายอากาศมินิเดอรัทเทก การประเมินสมรรถนะของสายอากาศสำหรับ Tag จะทำการประเมินจากค่าระยะบริการสูงสุด คือระยะที่ไกลสุดระหว่างจุดส่งสัญญาณหรือ Tag กับจุดรับสัญญาณ หรือเครื่องอ่าน (Reader) ซึ่งค่าระยะบริการสูงสุดเป็นตัวแปรที่สำคัญที่บอกถึงความสามารถของสายอากาศ

5.2 พื้นฐาน Tag ตามมาตรฐานของ EPC

Tag class (อ้างอิงจาก EPC Global)

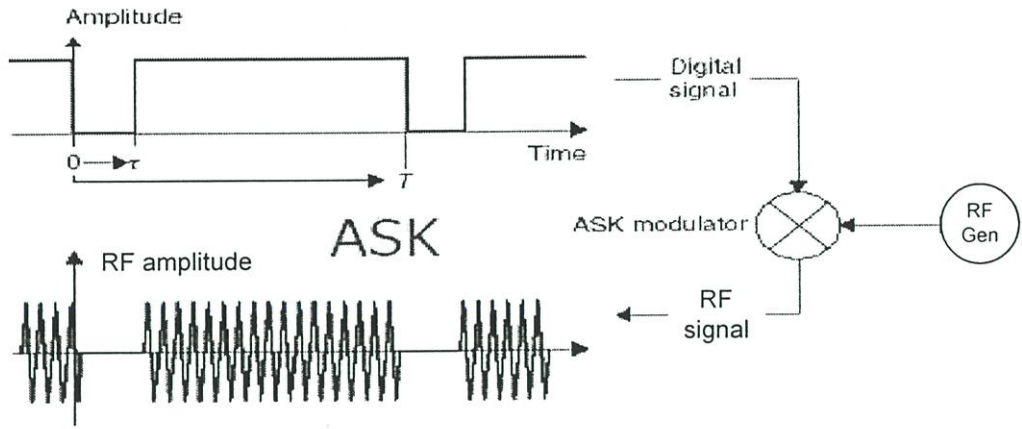
CLASS 0 – อ่านอย่างเดียว (โปรแกรมมาจากโรงงานผลิต)

CLASS 1 – เขียนได้ครั้งเดียว

CLASS 2 – อ่าน / เขียน

CLASS 3 - อ่าน / เขียน (ด้วยเซ็นเซอร์บนบอร์ด)

CLASS 4 - อ่าน / เขียน (Active Tags)



รูปที่ 5.1 การ Modulate สัญญาณด้วยวิธี ASK ในระบบซึ่งเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ

5.3 ระยะบริการสูงสุด (Maximum Read Range)

ระยะการทำงานไกลสุดของระบบเกิดขึ้นเมื่อระดับกำลังงานรับเท่ากับระดับที่ให้คุณภาพการสื่อสารตามที่กำหนดไว้ซึ่งระดับนี้เรียกว่าความไวเครื่องอ่าน (Reader Sensitivity) อัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นที่ให้ค่ากำลังงานรับเท่ากับความไวเครื่องรับเรียกว่า ค่าอัตราสูญเสียการแพร่กระจายที่ยอมรับได้ (Maximum Acceptable Path Loss) แสดงเป็นหน่วยเดซิเบลได้ดังนี้

$$L_{\max} = P_t - L_t + G_t - L_r + G_r - S \quad (5.2)$$

- เมื่อ P_t คือกำลังงานส่ง G_t และ G_r คืออัตราการขยายของสายอากาศส่งและรับ ตามลำดับ
 L_r คืออัตราการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านรับ
 L_t คืออัตราการสูญเสียจากสายนำสัญญาณด้านส่ง
 S คือค่าความไวเครื่องรับ

ซึ่งตัวแปรทั้งหมดมีหน่วยเป็น dB ซึ่งจากทฤษฎีสภาวะย้อนกลับ (Reciprocity Theorem) ให้นิยามว่า การสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการสลับหน้าที่รับส่งระหว่างสายอากาศส่งและรับ แต่อย่างไรก็ตามอัตราการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นสูงสุดที่ยอมรับได้ระหว่างสองทิศทางอาจมีความแตกต่างกันเนื่องจากความไว (Sensitivity) ของเครื่องรับ ด้านรับและด้านส่งต่างกัน

จากสมการ (5.3) ของ Friis Free-Space Transmission Formula เป็นความสัมพันธ์กันระหว่าง กำลังด้านรับและด้านส่งระหว่างสายอากาศ 2 ตัวที่แยกจากกันโดยระยะทาง $R > 2D^2/\lambda$ โดยที่ D คือ

มิติของด้านที่กว้างที่สุดของสายอากาศแต่ละอัน (ในกรณีนี้ใช้สายอากาศสำหรับตัวอ่านและ Tag เป็นตัวเดียวกัน)

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 G_t G_r \quad (5.3)$$

โดยที่เทอมของ $(\lambda / 4\pi R)^2$ คือ Free Space Loss Factor

ระยะทำการของระบบเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบของตัว Tag ซึ่งคือ ระยะที่ไกลที่สุดที่ตัวอ่านสามารถตรวจจับตัว Tag ที่เข้ามาในระยะทำการหรือในระบบได้

$$r_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{EIRP \times D_r \times (1 - |\Gamma|^2)}{P_{th}}} \quad (5.4)$$

r_{\max} = ระยะทางที่ Tag กับเครื่องอ่านสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ (m)

$EIRP$ = กำลังส่งออกอากาศสมมูลแบบไอโซทรอปิก ซึ่งรวมอัตราขยายของสายอากาศ(W)

D_r = ค่าสภาพเงาเชิงทิศทาง

P_{th} = ค่ากำลังงานน้อยที่สุดที่สามารถทำให้ไมโครชิปหรือโมดูลสามารถทำงานได้ (W)

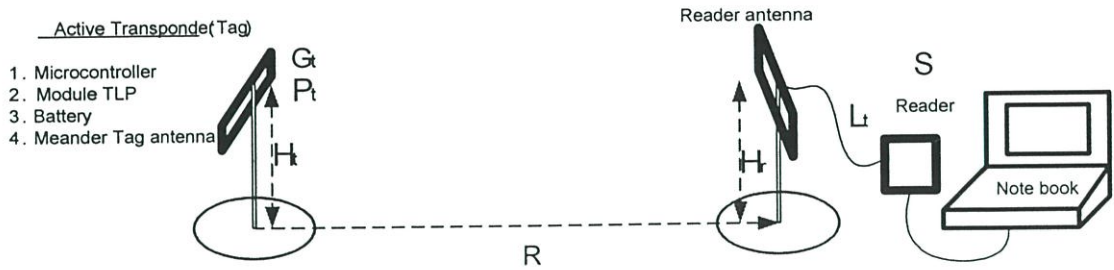
λ = ค่าความยาวคลื่น (m)

Γ = สัมประสิทธิ์การสะท้อน

5.4 การทดสอบสมรรถนะ

การสื่อสารไร้สายของระบบซึ่งเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ โดยทั่วไปต้องมีสายอากาศรับ-ส่ง สายอากาศในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้สายอากาศสำหรับ Tag เป็นตัวเดียวกับของเครื่องอ่านด้วย เพื่อสะดวกในการคำนวณและทดสอบระยะทางสูงสุดที่สามารถรับส่งกันได้

สถานที่ทดสอบที่ใช้มีลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่มีสิ่งกีดขวาง ในการทดสอบคือสนามฟุตบอลหน้าอาคารอำนวยการ 2 ชั้น ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (วาสูกรี) ซึ่งเป็นสนามหญ้าโล่ง ด้านฝั่งรับประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องอ่าน (Reader) ด้วยพอร์ต RS-232 หรือ USB โดยวางสูงจากพื้น 30 เซนติเมตรเท่ากันทั้งฝั่งส่งและฝั่งรับดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 การทดสอบสมรรถนะของสายอากาศ

ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบแสดงไว้ดังตารางที่ 5.1 ในการทดสอบจะใช้สายอากาศมีนเตอร์แท็กที่ออกแบบเป็นตัวรับและตัวส่ง เพื่อเปรียบเทียบว่าสายอากาศที่ออกแบบมีสมรรถนะเพียงใดในระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ

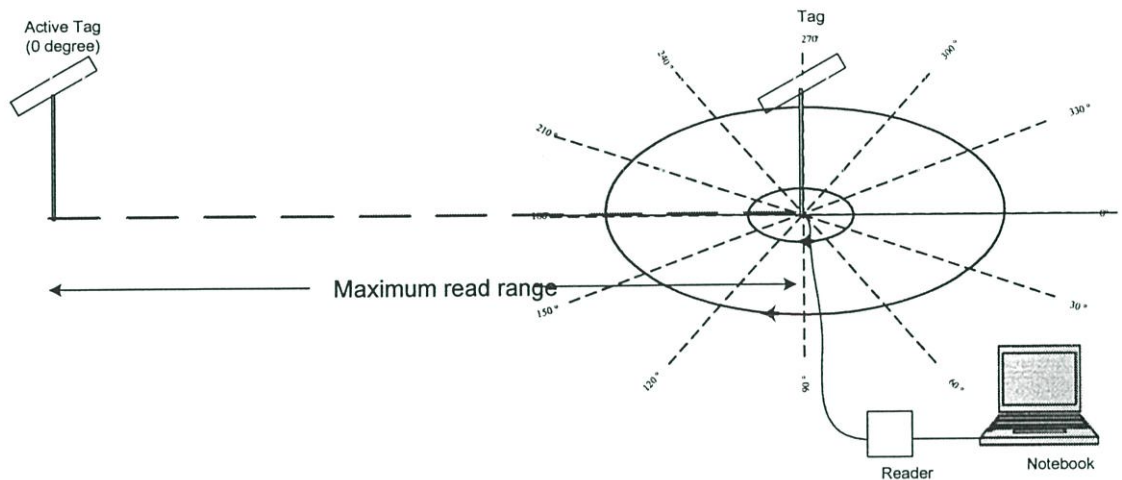
ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ

พารามิเตอร์	ด้านส่ง (Transponder)	ด้านรับ (Reader)
กำลังงานส่ง	12 dBm	-110 dBm
การสูญเสียเนื่องจากสายนำสัญญาณ	0 dB	0 dB
อัตราการขยายของสายอากาศ	1.78	1.78
ความสูงของสายอากาศ	30 เซนติเมตร	30 เซนติเมตร
Module ภาครับ	TLP-434A	RLP-434A
ภาคประมวลผลข้อมูล	ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ATTINY2313-20PU)	คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Acer Aspire 3050)

ผลการประเมินสมรรถนะสายอากาศจากระยะบริการสูงสุด ซึ่งในที่นี้ได้จำลองกำหนดรหัสให้ด้านส่ง ส่งด้วยรหัสเลข “1” และให้คอมพิวเตอร์ของด้านรับยังสามารถอ่านรหัสของภาคส่ง “1” ที่เข้ามาอ่านให้ได้ไม่ผิดเพี้ยน พบว่าสายอากาศมีนเตอร์แท็กมีระยะบริการสูงสุดเท่ากับ 122 เมตร (โดยกำลังงานทั้งด้านส่งและรับมาจาก datasheet ของโมดูลที่ใช้ในการทดสอบ)

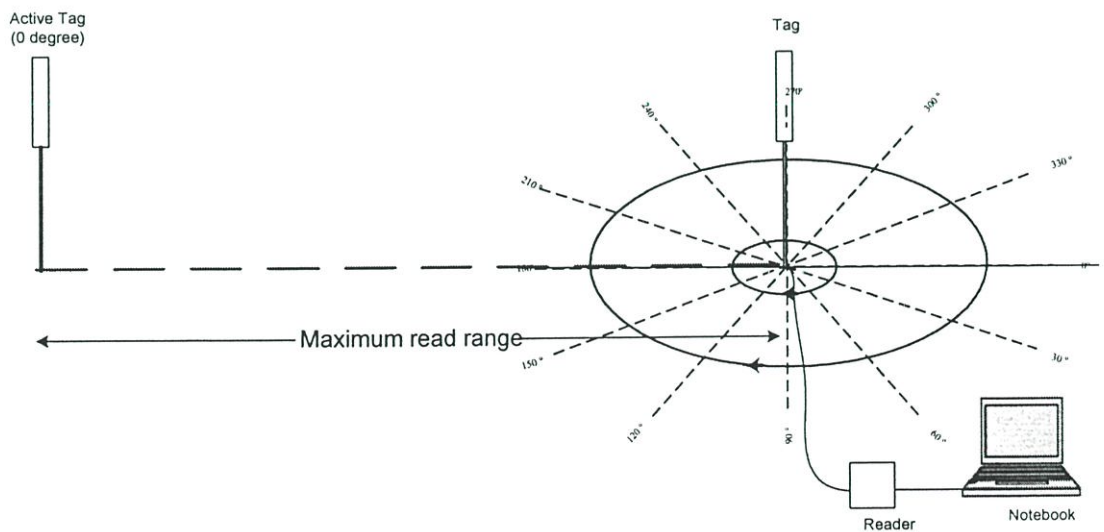
5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่น

ทำการทดสอบแต่ละมุมในหน่วยองศา จำนวน 36 จุด (จุดละ 10 องศา) เพื่อทำการนอร์มัลไลซ์โดยจัดให้มุมที่ทำให้เกิดระยะห่างมากที่สุดที่ระบบยังสามารถทำงานได้ ให้เท่ากับ 1 และทำการลงจุดทดสอบและเขียนกราฟแสดงการแพร่กระจายคลื่นออกมา เพื่อแสดงแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นทั้งระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ



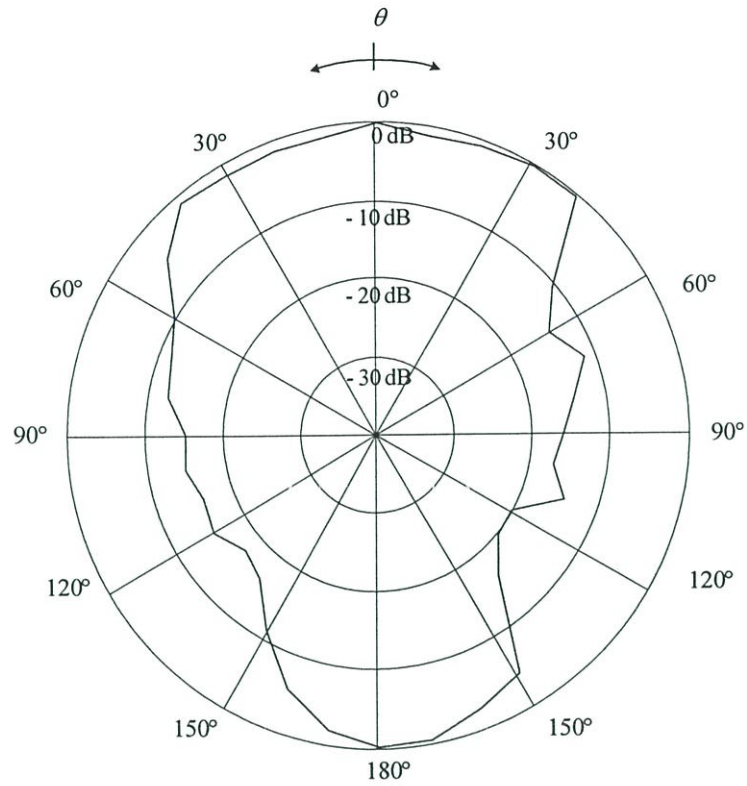
Read Range on E-Plane

รูปที่ 5.3 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ E-plane

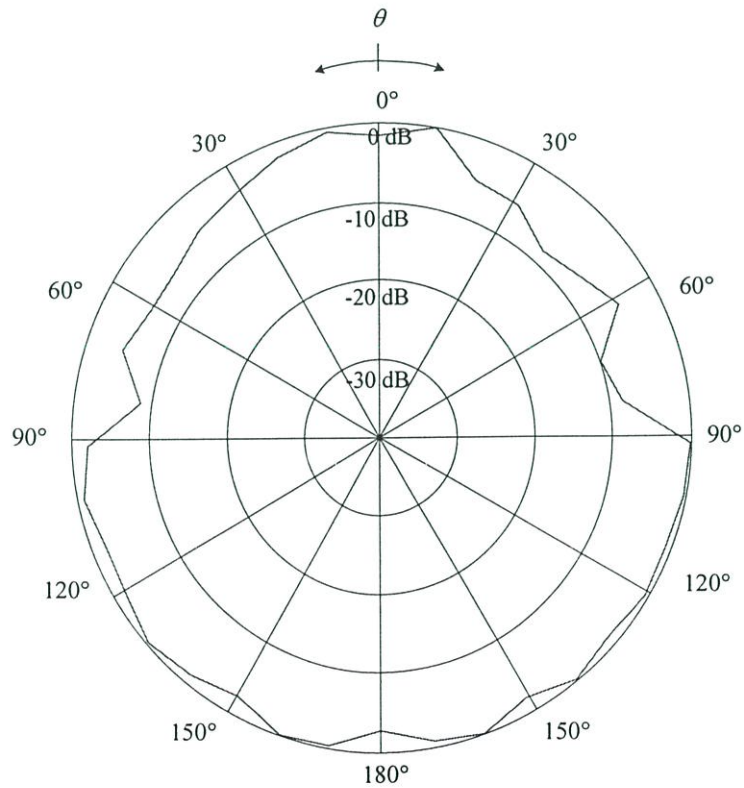


Read Range on H-Plane

รูปที่ 5.4 การทดสอบแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นในระนาบ H-plane



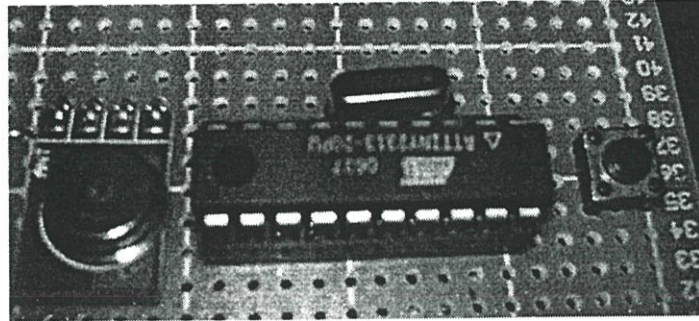
รูปที่ 5.5 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบในระบบซีเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ(E-plane)



รูปที่ 5.6 แบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้จากการทดสอบในระบบซีเฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ(H-plane)

5.6 การทดสอบการรับ-ส่งสัญญาณ

นำโมดูล TLP434 มาต่อกับสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้ โดยต่อแบตเตอรี่ให้เสมือนเป็น Tag แบบ Active โดยมี ไมโครคอนโทรลเลอร์ 1 ตัว ทำหน้าที่ในการประมวลผลและกำหนดข้อมูลในการส่งเพื่อใช้ทดสอบสัญญาณของทางภาครับและภาคส่ง โดยทำการบันทึกรหัสของมันไว้สำหรับทดสอบ คือ เลข “1”

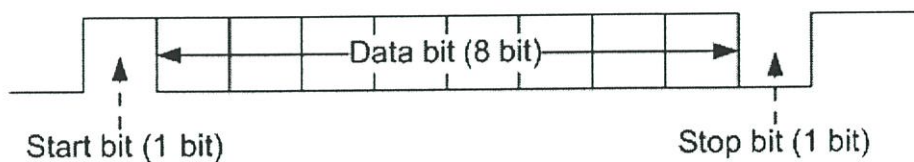


รูปที่ 5.7 ชุดภาคส่ง ซึ่งประกอบไปด้วยโมดูลภาคส่ง TLP434 และ ไมโครคอนโทรลเลอร์

5.6.1 ขั้นตอนการติดตั้งชุดทดสอบภาครับ-ส่ง

5.6.1.1 การกำหนดค่าชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบของภาคส่ง

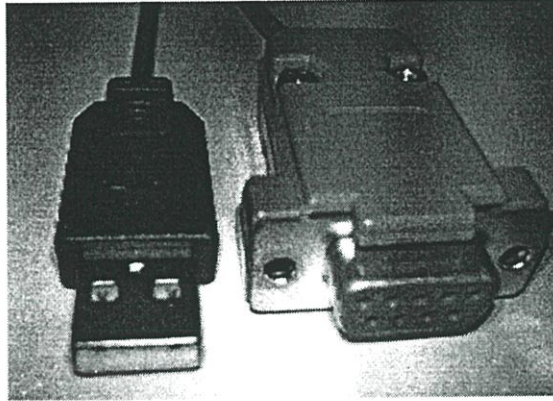
ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวส่งชุดข้อมูล ที่มีทั้งหมด 8 บิต โดยเริ่มส่ง “Start bit” จำนวน 1 บิต ซึ่งเป็น logic high (1) และตามด้วยชุดข้อมูล “Data bit” 8 บิต และปิดท้ายข้อมูลด้วย “Stop bit” อีก 1 บิต โดยที่มีทั้งหมด 10 บิต ต่อชุดข้อมูลการส่ง 1 ครั้ง (Start bit = 1 bit, Data bit = 8 bit และ Stop bit = 1 bit)



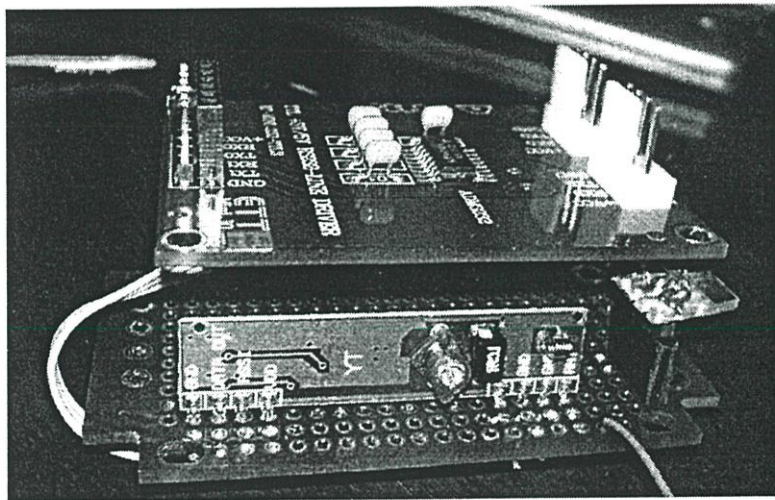
รูปที่ 5.8 แสดงชุดข้อมูลที่ใช้ทำการทดสอบภาคส่งและภาครับ

5.6.1.2 การกำหนดค่าชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบของภาครับ

ภาครับใช้โมดูล RLP434 และชุดส่งสัญญาณ RS-232 มาทำการเชื่อมต่อกับพอร์ตของคอมพิวเตอร์ โดยส่งผ่านได้ทั้งทางพอร์ต RS-232 หรือ USB โดยข้อมูลที่ได้จากการรับจะถูก Demodulate จากสัญญาณวิทยุกลับมาเป็นสัญญาณดิจิทัลอีกครั้งหนึ่ง โดยให้คอมพิวเตอร์ เป็นตัวอ่านข้อมูลที่ได้และแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบสัญญาณที่ได้รับ



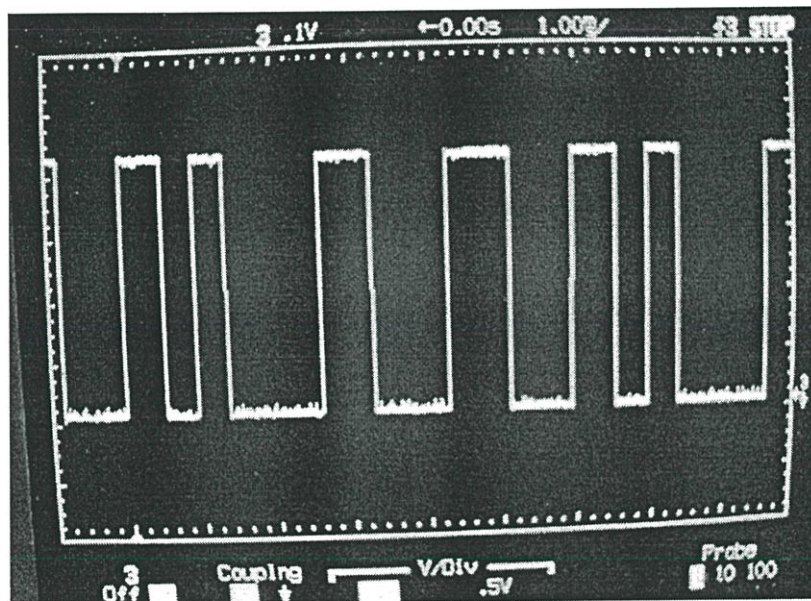
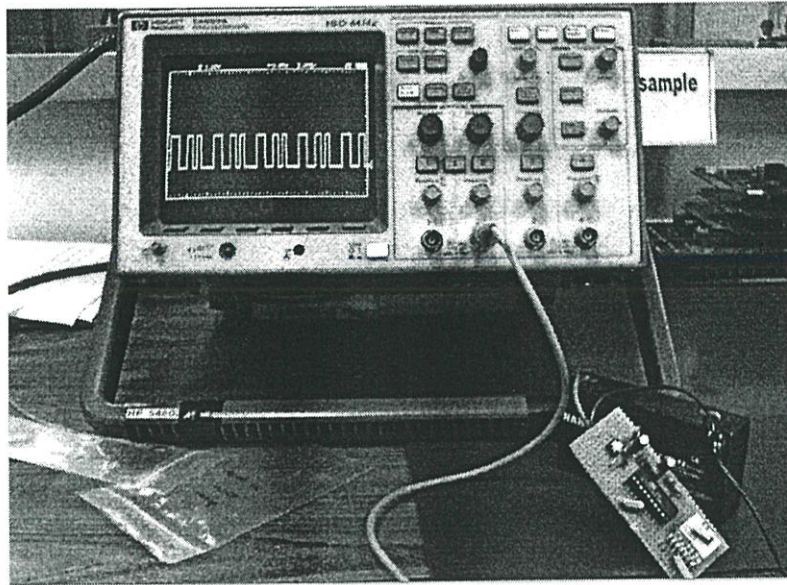
รูปที่ 5.9 การต่อดำย พอร์ต RS-232 และ USB



รูปที่ 5.10 ชุดภาครับซึ่งประกอบด้วย RS-232 และ โมดูลภาครับ RLP434

5.6.1.3 ผลการวัดสัญญาณของข้อมูลทั้งภาครับและภาคส่ง

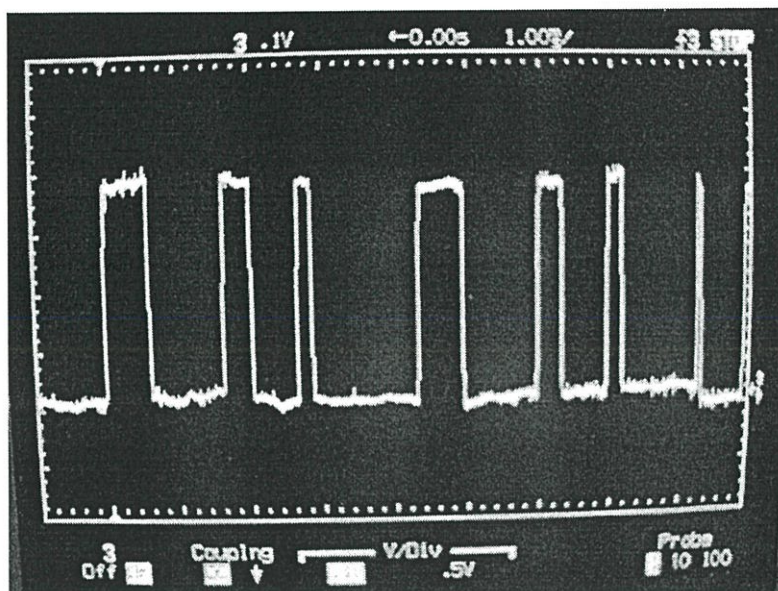
สัญญาณดิจิทัล 8 บิต ที่ออกมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ไปเข้าที่ภาคส่งของ Data IN ของ TX ที่ส่งผ่าน TLP434 ซึ่งจะทำให้การมอดูเลตสัญญาณแบบ ASK ซึ่งแอมพลิจูดของสัญญาณ output ก่อนที่จะทำการ modulate อยู่ที่ประมาณ 4.2 Volt



รูปที่ 5.11 ภาพสัญญาณเอาต์พุตจากไมโครคอนโทรลเลอร์ก่อนส่งไปที่โมดูล

หมายเหตุ: ใช้ Oscilloscope (Model: HP546028) ในการวัด และ Range ที่ใช้คือ 0.1 V/DIV, 1.00 mS/DIV และ Probe scale 10:1

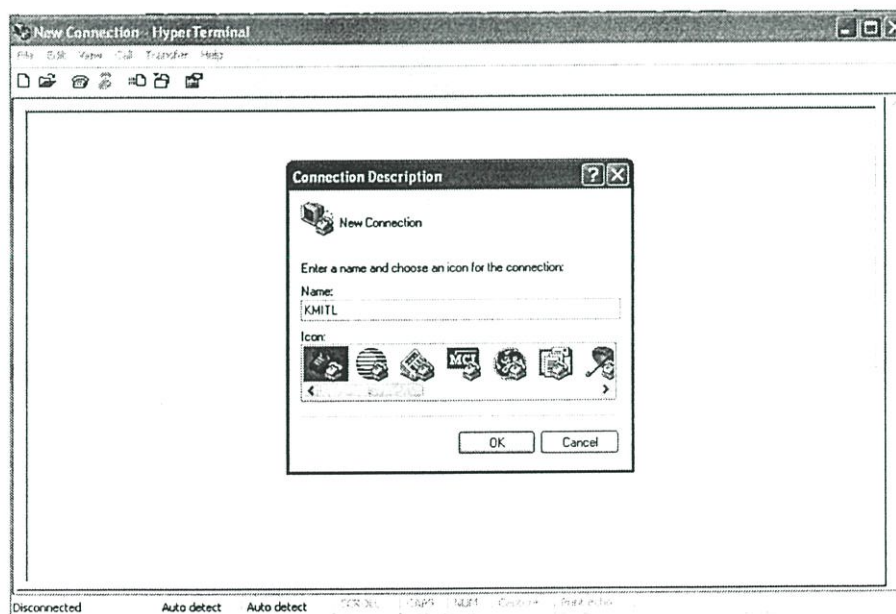
สัญญาณที่ภาครับ RLP434 และ Demodulate แล้วจะได้ดังรูป 5.12 ซึ่งจะอยู่ที่ประมาณ 4.2 Volts เท่ากับภาคส่ง TLP434 ซึ่งอาจจะมีสัญญาณรบกวนบ้างเล็กน้อย แต่ก็ยังมีลักษณะของสัญญาณเป็นดิจิตอล 8 บิต เหมือนกัน



รูปที่ 5.12 ภาพสัญญาณเอาต์พุตจากภาครับหลังทำการ Demodulate แล้วที่เครื่องอ่าน

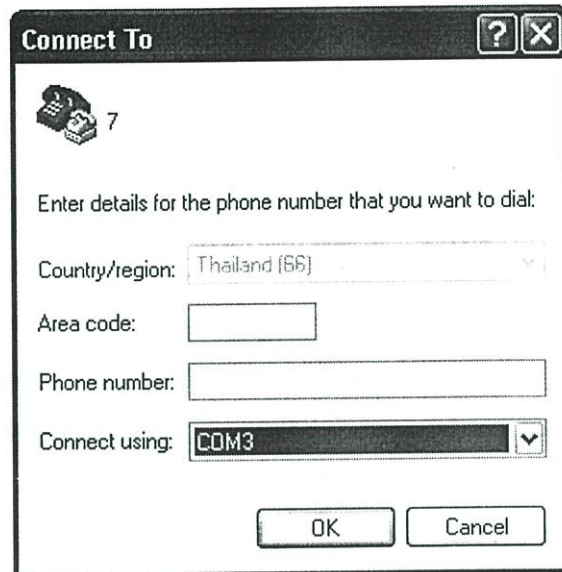
5.6.2 การตั้งค่าพอร์ทและค่า Bit Rate ของคอมพิวเตอร์

เมื่อเปิดโปรแกรม Hyper Terminal ขึ้นมาอันดับแรกคือทำการตั้งชื่อใน Connection ก่อน โดยเลือกที่ New Connection สำหรับการตั้งค่าครั้งแรก ดังแสดงในรูป 5.13



รูปที่ 5.13 การตั้งค่าที่คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลสัญญาณที่ส่งมาด้วย Hyper Terminal

หลังจากนั้นจึงทำการเลือกพอร์ทที่เราทำการเชื่อมต่อกับเครื่องอ่าน (Reader) ผ่านทาง RS-232 หรือ USB เพื่อทำการเปิดการใช้งานรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ทนั้น โดยในที่นี้พอร์ทที่เราใช้คือพอร์ท COM3 ดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 สัญญาณที่คอมพิวเตอร์ อ่านได้ผ่านพอร์ท COM3 จาก RS-232 หรือ USB

การกำหนด Bit Rate ของชุดข้อมูลที่จะทำการรับส่งทั้งนี้ค่าที่กำหนดจะต้องตรงกันกับค่าที่ภาคส่งทำการส่งออกมา โดยในการประเมินสมรรถนะนี้เราทำการตั้งค่าดังรูปที่ 5.15

Bit rate = 2400 bits per second

Data bits = 8 bits

Parity bit = None

Stop bit = 1 bit

Flow control = Hardware

5.7 สรุป

เนื้อหาบทนี้กล่าวถึง การประเมินสมรรถนะของสายอากาศมินิเดอรั้แท็กที่ออกแบบไว้ ในระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ UHF ที่ 433.4 MHz โดยพิจารณาจากระยะบริการสูงสุด ซึ่งเริ่มจากกรณีศึกษาระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุ ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลอ่านข้อมูลที่ได้จากภาคส่งว่ายังคงรับสัญญาณได้ไกลสุดเท่าไร และพบว่าสายอากาศที่ออกแบบมีระยะบริการสูงสุดไกลเท่ากับ 122 เมตร

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะกล่าวถึงการสรุปเนื้อหาโดยรวม ข้อเสนอแนะต่างๆ และแนวทางในการพัฒนาต่อสำหรับวิทยานิพนธ์

6.1 สรุปเนื้อหาโดยรวม

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึงสายอากาศแบบมินิเคอร์แท็ก ที่มีการแพร่กระจายคลื่นแบบรอบตัว เพื่อเป็นสายอากาศสำหรับ Tag ของระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุในย่านความถี่ UHF สำหรับสายงานการผลิตหรือสายงานการลำเลียงผ่านกระบวนการผลิตต่างๆ เพื่อชี้เฉพาะข้อมูลต่างๆ ของชิ้นงานนั้นที่ถูกเก็บบันทึกไว้ โดยมีขนาดเล็กกะทัดรัด ทนทานการขีดข่วน และมีระยะบริการ (Read Range) มากเพียงพอสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตที่มีลักษณะการลำเลียง ในอุตสาหกรรมการผลิตการคิดผลถากอิเล็กทรอนิกส์หรือ Tag จะมีตำแหน่งที่ตายตัวแน่นอนดังนั้นการแพร่กระจายคลื่นจึงสามารถอ้างอิงได้จากตำแหน่งของเครื่องอ่าน (Reader) กับตัว Tag ได้

เนื่องจากสายอากาศที่นำเสนอเกิดขึ้นจากสายอากาศมินิเคอร์แท็ก ในบทที่ 2 จึงได้อธิบายหลักการทฤษฎีที่สำคัญของการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์สายอากาศมินิเคอร์แท็ก และในบทที่ 3 ได้ทำการคำนวณและเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยความหนาของวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.6525 มิลลิเมตร (0.00094 λ) ความหนาของชั้นโลหะ (ทองแดง) บนวัสดุฐานรองเท่ากับ 0.0795 มิลลิเมตร (0.000115 λ) ขนาดโดยรวมของสายอากาศเท่ากับ ความกว้าง 32 มิลลิเมตร (0.046 λ) ความยาวเท่ากับ 208 มิลลิเมตร (0.300 λ) และความหนาเท่ากับ 0.732 มิลลิเมตร (0.001 λ) ซึ่งพบว่าสายอากาศนี้จะให้ค่าสภาพเจาะจงทิศทางเท่ากับ 1.75 dBi เพื่อยืนยันผลการคำนวณจึงได้ทดสอบสายอากาศเพื่อเปรียบเทียบดังแสดงในบทที่ 4 พบว่าแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ทดสอบและการคำนวณมีรูปร่างที่สอดคล้องกัน และเป็นการแพร่กระจายคลื่นออกรอบตัว

และยังได้นำสายอากาศที่ออกแบบและกล่าวมาแล้วนั้น ไปทดสอบกับระบบที่เฉพาะด้วยคลื่นวิทยุที่สร้างขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบการแพร่กระจายคลื่น และระยะทำการของสายอากาศดังแสดงในบทที่ 5 จะเห็นว่าระยะบริการสูงสุด และแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นที่ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ออกแบบด้วยโปรแกรมจากผลการทดสอบพบว่า สายอากาศมินิเคอร์แท็กให้ระยะบริการสูงสุดเท่ากับ 122 เมตร

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

1. เนื่องจากความซับซ้อนในการคำนวณแบบรูปการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศ จึงคำนวณที่เลขฮอร์เพียงเลขฮอร์เดียว การออกแบบสายอากาศแบบแผ่นวงจรบางหลายเลขฮอร์จึงน่าสนใจในการพัฒนาต่อไป
2. ในการสร้างสายอากาศเนื่องจากใช้แผ่นวงจรพิมพ์ จึงต้องระมัดระวังความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ซึ่งอาจจะทำให้คุณลักษณะของสายอากาศไม่เป็นไปตามทฤษฎี
3. ในส่วนของการทดสอบ อาจหาชุดโมดูลขนาดเล็กที่สามารถนำมาใช้ร่วมกับสายอากาศที่ออกแบบไว้ โดยคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ด้านเข้าเป็นสำคัญ เพราะอิมพีแดนซ์ด้านเข้าแต่ละโมดูลอาจแตกต่างกันออกไป เพื่อให้ระบบที่ใช้งานจริงมีประสิทธิภาพมากขึ้น
4. สามารถนำวิธีการออกแบบการทดลอง (DOE) ไปใช้ในการออกแบบสายอากาศที่มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์อื่นได้ โดยไม่ต้องทำการคำนวณใหม่
5. สามารถนำวิธีการออกแบบการทดลอง (DOE) ไปใช้กับการออกแบบสายอากาศในรูปแบบอื่นๆ ได้โดยกำหนดค่าขอบเขตและพารามิเตอร์ที่สนใจ
6. ในส่วนของสายอากาศมินิเจอร์แท็ก เนื่องจากวัสดุฐานรองยังสามารถลดขนาดให้บางลงได้อีก ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานกับงานอื่นๆ ได้ โดยอาจลดขนาดของวัสดุฐานรองลงตามคุณลักษณะงาน ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้สำหรับระบบอุตสาหกรรมซึ่งอาจจำเป็นที่สายอากาศจะมีความแข็งแรงและเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน

เอกสารอ้างอิง

- [1] C.A. Balanis. Antenna Handbook: Theory Application and Design. New York; (Y.T.Lo and S.W. Lee, eds.), Van Nostrand Reinhold Co. 1988.
- [2] J.R. James and P.S. Hall. Handbook of Microstrip Antennas. Peter Peregrinus. 1989
- [3] U. Karthaus and M. Fischer, "Fully Integrated Passive UHF RFID Transponder IC With 16.7-uW Minimum, RF Input Power," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.38, No.10, October 2003, pp.1602-1608.
- [4] P. V. Nikitin, K.V.S.Rao, S.F.Lam, "Power Reflection Coefficient Analysis for Complex Impedances in RFID Tags Design," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol.53, No.9, September 2005, pp.2721-2725.
- [5] K.V.S. Rao, P.V.Nikitin and S.F.Lam, "Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.53, No.12, December 2005, pp.3870-3876.
- [6] R. Glidden, "Design of Ultra-Low-Cost UHF RFID Tags for supply Chain Applications," *IEEE Communication Magazine*, August 2004, pp.141-150.
- [7] W. Choi, H.W. Son, J.H. Bae, G.Y. Choi, .S. Pyo, and J.S. Chae, "An RFID Tag Using a Planar Inverted-F Antenna Capable of Being Stuck to Metallic Objects," *ETRI Journal*. vol. 28, no. 2, Apr. 2006, pp. 216-218.
- [8] S.Basat, "Design and Development of a Miniaturized Embedded UHF RFID Tag for Automotive Tire Applications," School of ECE, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0250, USA.
- [9] C.J.Henao, R.A.R. Solts, D.R. Roman and D.G.Barreto, "Analysis of Concentric Slot Ring Antenna Array Using DOE and FDA," *Antennas and Propagation Society International Symposium* ., vol. 1, June. 2004, pp. 1074 - 1077.
- [10] Montgomery and Douglas C., Design and Analysis of Experiment, 4th ed., Wiley & Sons, 1977 Box, Hunter, & Hunter, Statistics for Experiments, Wiley & Sons, 1978.
- [11] IEEE Std C95.1,1999 Edition, IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Field, 3 kHz to 300 GHz, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, 1999.

- [12] สำนักงานคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ มาตรฐานทางเทคนิคของเครื่อง
โทรคมนาคมและอุปกรณ์ เครื่องวิทยุคมนาคมประเภท Radio Frequency Identification:
RFID กันยายน 2550

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

นายนิธินาถ์ สัจจรักษ์

วัน เดือน ปีเกิด

4 เมษายน 2522

ประวัติการศึกษา

2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

ที่อยู่

3/217 เมืองทองนิเวศน์ 1 แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่
กรุงเทพมหานคร