

การประเมินผลทดลองเกี่ยวกับการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของ RFID
ด้วยชั้นวางหนังสือไม้และโลหะ

EXPERIMENTAL EVALUATION OF RFID PROPAGATION LOSS
WITH WOODEN AND METAL BOOKSHELVES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMUTL-2023-EN-D-018-165
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EXPERIMENTAL EVALUATION OF RFID PROPAGATION LOSS
WITH WOODEN AND METAL BOOKSHELVES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2023
KMITL-2023-EN-D-018-165
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินผลทดลองเกี่ยวกับการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของ RFID ด้วยชั้นวางหนังสือไม้และโลหะ
นักศึกษา	นางสาวจตุพร ศุภมวงคลเศรษฐ์
รหัสนักศึกษา	63601233
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาคุณลักษณะช่องสัญญาณการสูญเสียการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ โดยจำลองช่องสัญญาณโดยใช้แบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้น และแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีด้วยพารามิเตอร์เลขยกกำลังการสูญเสียเชิงวิถีและการสูญเสียเชิงวิถีที่ระยะอ้างอิง และใช้แบบจำลองเชิงสถิติโดยฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) เพื่อการจำลองเปรียบเทียบสัญญาณหลายวิถี นอกจากนี้ยังหาแบบจำลองเชิงสถิติที่เหมาะสมของการสูญเสียจากสัญญาณหลายวิถี โดยหาจากค่าไคกำลังสอง (CHI Square Test) ที่มีค่าน้อยสุด ในการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งได้จากการวัดช่องสัญญาณโดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ที่ความถี่กลาง 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ และได้ใช้สายอากาศแผนแบบไมโครสตริปทั้งด้านรับและส่งสัญญาณ โดยได้จำลองการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุในสถานะแวดล้อมในห้องสมุด และนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาหาค่าการสูญเสียเชิงวิถี การจางหายหลายวิถี การกระจายเชิงสถิติที่เหมาะสม ผลที่ได้นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการพัฒนา และออกแบบระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุที่ใช้ในห้องสมุด

Thesis Title	Experimental Evaluation of RFID Propagation Loss with Wooden and Metal Bookshelves
Student	Miss Jatuporn Supramongkonset
Student ID.	63601233
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Sathaporn Promwong

ABSTRACT

This thesis presents a study of the propagation channel characteristics of radio frequency identification (RFID) by using Friis' transmission formula to analyze the data from measurements. Linear regression is used to model the path loss characteristic and path loss exponent. Statistical models which compose of cumulative distribution function (CDF) are used. Moreover, multipath fading is evaluated by Chi square test for minimum error obtained for appropriate statistical model. The channels were measured using a vector network analyzer (VNA) at the center frequency of 2.45 GHz. Microstrip patch antennas were used as both transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. This thesis also investigates and imitate the RFID in library to find out the path loss, multipath fading, and statistical model. The results can be useful to develop and design the RFID system in library.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สถาพร พรหมวงศ์ เป็นอย่างที่สุดที่ให้ความอนุเคราะห์ ช่วยเหลือ อบรมสั่งสอน และคอยชี้แนะแนวทางเกี่ยวกับโครงงานวิจัยอย่างดีเยี่ยมตลอดจนคอยสอบถามปัญหาและความคืบหน้าของงานวิจัยวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิจัยนี้ให้สำเร็จได้ จึงขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแต่ผู้ที่มีส่วนร่วมในการสนับสนุนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทุกท่าน

นางสาวจตุพร ศุภมงคลเศรษฐ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย	2
1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการนำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน	3
1.6 ขอบเขตการวิจัย	3
1.7 ขั้นตอนของการศึกษา	4
บทที่ 2 เทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 ความเป็นมาของเทคโนโลยี RFID	5
2.3 ลักษณะจำเพาะของระบบการสื่อสาร RFID	6
2.3.1 องค์ประกอบหลักที่สำคัญ	6
2.3.2 หลักการทำงานเบื้องต้น	7
2.3.3 การรับส่งข้อมูลระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ	8
2.3.3.1 วิธีการสื่อสารระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ	8
2.3.3.2 รูปแบบของการสื่อสารระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ	8
2.3.4 ระยะห่างระหว่างการรับส่งข้อมูลและกำลังงานการส่ง	9
2.3.5 อัตราการรับส่งข้อมูลและแบนด์วิดท์	10
2.4 ประเภทของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตน	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การประยุกต์การใช้เทคโนโลยีการสื่อสารแบบ RFID ในห้องสมุด	13
2.6 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบ REID	14
2.6.1 ย่นความถี่ที่ใช้งาน	14
2.6.2 มาตรฐานในการใช้งาน	16
2.6.3 การอนุญาตใช้งานในประเทศไทย	17
2.7 บทสรุป	18
บทที่ 3 หลักการวิเคราะห์และการประเมินผล	19
3.1 กล่าวนำ	19
3.2 การสูญเสียเชิงวิฤติ	19
3.3 การจางหายหลายวิฤติ	20
3.4 แบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้น	20
3.5 แบบจำลองเชิงสถิติ	21
3.5.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (PDF)	22
3.5.2 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (CDF)	22
3.5.3 การทดสอบไคกำลังสอง (CHI SQUARE TEST)	22
3.5.4 แบบจำลองเชิงสถิติที่นำมาทำการทดสอบไคกำลังสอง	23
3.6 หลักการโพลาริซเซชันของสายอากาศ	25
3.7 บทสรุป	25
บทที่ 4 ขั้นตอนการศึกษาทดลองวิจัย	26
4.1 กล่าวนำ	26
4.2 การวัดช่องสัญญาณ	26
4.2.1 อุปกรณ์การวัดการวัดช่องสัญญาณในการวัดช่องสัญญาณ	26
4.2.2 สายอากาศที่ใช้วัดช่องสัญญาณ	27
4.2.3 ขั้นตอนการวัดช่องสัญญาณ	28
4.3 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ	28
4.3.1 ชั้นวางหนังสือชนิดไม้	28
4.3.2 ชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 บทสรุป	31
บทที่ 5 ผลการทดลองวิจัย	32
5.1 กล่าวนำ	32
5.2 ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	32
5.2.1 กรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้	32
5.2.2 กรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ	32
5.3 แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี	34
5.3.1 กรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้	34
5.3.2 กรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ	34
5.4 บทสรุป	36
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	37
6.1 กล่าวนำ	37
6.2 สรุปผลความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	37
6.3 สรุปผลของแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี	37
6.4 สรุปผลของแบบจำลองการจางหายหลายวิถี	38
6.5 ข้อเสนอแนะ	38
บรรณานุกรม	40
ภาคผนวก บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์	42
ประวัติผู้เขียน	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ย่านความถี่ของระบบการสื่อสารแบบ RFID ที่ใช้งาน	15
2.2	เปรียบเทียบย่านความถี่ต่าง ๆ ของระบบการสื่อสารแบบ RFID	16
4.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ	26
6.1	แบบจำลองการจางหายหลายวิถี	38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	องค์ประกอบหลักของระบบการสื่อสารแบบ RFID	8
2.2	ระบบการส่งผ่านช่องสัญญาณระหว่างการรับ-ส่งสัญญาณ	9
2.3	ตัวอย่างของรหัสบาร์โค้ด	10
2.4	ระบบการส่งผ่านช่องสัญญาณระหว่างการรับ-ส่งสัญญาณทางชีวภาพ	11
2.5	ตัวอย่างของเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยบัตรอิเล็กทรอนิกส์	12
2.6	ตัวอย่างของตัวรับและตัวส่งสัญญาณของเทคโนโลยี RFID	12
2.7	ตัวอย่างของเทคโนโลยีการจดจำสัญลักษณ์ด้วยสายตา	13
2.8	ตัวอย่างของการสำรวจชั้นหนังสือ	14
2.9	แถบความถี่การใช้งานของย่านต่าง ๆ	15
3.1	แสดงตัวอย่างการทำแบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้น	21
4.1	เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์ E5063A	27
4.2	ขนาดโครงสร้าง และ $ S_{11} $ คุณสมบัติของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป	27
4.3	อุปกรณ์การปรับเทียบที่ตั้งสายอากาศ และสายอากาศที่ใช้ในการวัด	28
4.4	มุมมองด้านบนของแบบจำลองที่ใช้วัดชั้นวางหนังสือชนิดไม้	29
4.5	มุมมองด้านหน้าของตำแหน่งสายอากาศบนชั้นวางหนังสือชนิดไม้	29
4.6	มุมมองด้านบนของแบบจำลองที่ใช้วัดชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ	30
4.7	มุมมองด้านหน้าของตำแหน่งสายอากาศบนชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ	31
5.1	ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของชั้นวางหนังสือ (ก) กรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้ และ (ข) กรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ	34
5.2	การเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีและผลการทดลองวัด (ก) กรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้ และ (ข) กรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ	36
5.3	การเปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างกรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้และกรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ	36
6.1	การประยุกต์ใช้ RFID ในระบบไร้สายทางการแพทย์	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ (Radio frequency identification; RFID) ได้เข้ามามีบทบาทและมีการนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน ในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีการสื่อสารแบบ RFID มาใช้ในห้องสมุดเช่นกัน โดยนำมาใช้ในกระบวนการยืมคืนหนังสือและสื่ออัตโนมัติด้วยตนเอง (Self-service) ระบบการจัดการชั้นวางหนังสือ (Shelf management) ระบบการป้องกันการสูญหายและการขโมย (Anti-theft detection)

ร้านจำหน่ายหนังสือ และห้องสมุดแต่ละแห่งพัฒนาฐานข้อมูลเพื่อจัดเก็บรายละเอียดทางบรรณานุกรมและสถานภาพของทรัพยากรสารสนเทศ โดยแต่ละรายการจะได้รับตัวเลขที่เฉพาะรายการ นั่นคือ บาร์โค้ด (Bar code) ซึ่งไม่ได้มีความสัมพันธ์กันระหว่างชื่อผู้แต่ง และชื่อเรื่องของทรัพยากรสารสนเทศรายการนั้นๆ การยืมคืนทรัพยากรสารสนเทศที่ใช้เทคโนโลยีบาร์โค้ด ผู้ใช้ต้องติดต่อขอความช่วยเหลือจากบรรณารักษ์เจ้าหน้าที่ จากนั้นบรรณารักษ์/เจ้าหน้าที่จะนำแถบบาร์โค้ดที่ติดกับทรัพยากรสารสนเทศนั้นไปไว้ในบริเวณที่เครื่องอ่านบาร์โค้ดที่สามารถอ่านได้ทีละเล่มแต่ด้วยเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบ RFID นั้นมีลักษณะคล้ายกับบาร์โค้ดและยังสามารถรองรับความต้องการอีกหลายๆอย่างที่บาร์โค้ดไม่สามารถตอบสนองได้ นอกจากนี้ ระบบเทคโนโลยี RFID เป็นเทคโนโลยีที่สามารถส่งข้อมูลทุกอย่างผ่านคลื่นความถี่วิทยุ ดังนั้นการอ่านข้อมูลจากป้าย RFID จึงไม่ต้องนำป้ายข้อมูลไปอยู่ติดกับเครื่องอ่านได้ และผู้ใช้สามารถยืมคืนทรัพยากรสารสนเทศได้ด้วยตนเอง นอกจากนี้เมื่อมีการยืมคืนผ่านเทคโนโลยีการสื่อสารแบบ RFID ฐานข้อมูลทรัพยากรสารสนเทศจะถูกปรับปรุงข้อมูลเป็นปัจจุบันทันที ดังนั้น เทคโนโลยีการสื่อสารแบบ RFID จึงมีประโยชน์ต่อการปฏิบัติงานของบรรณารักษ์และเอื้อให้เกิดความสะดวกในการให้บริการ ดังนี้

1. ลดขั้นตอนและประหยัดเวลาในการให้บริการยืมคืน
2. ทำให้การยืมคืนทรัพยากรสารสนเทศด้วยตนเองง่ายขึ้น
3. มีความปลอดภัยสูง
4. เพิ่มความรวดเร็วในการสำรวจชั้นหนังสือ
5. สามารถรู้จำนวนหนังสือที่อยู่ในชั้นได้

ระบบการจัดการชั้นวางหนังสือในห้องสมุดนำเทคโนโลยีการสื่อสารแบบ RFID มาใช้โดยมีการเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์ส่งและอุปกรณ์รับ ส่งสัญญาณวิทยุผ่านช่องสัญญาณที่สภาวะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แวดล้อมต่างๆ การวัดช่องสัญญาณที่สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ จะเกิดการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) และการเกิดการจางหายหลายวิถี (Multipath fading) ที่ต่างกัน จึงจำเป็นต้องศึกษาและทดลองวัด และทำแบบจำลองช่องสัญญาณในห้องสมุด ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการวัดและทำแบบจำลองที่ สภาวะแวดล้อมในห้องสมุด บริเวณชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ เพื่อ ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นกับช่องสัญญาณและหาแบบจำลองทางสถิติโดยทำ การวัดช่องสัญญาณใน 4 กรณีคือ กรณีการ โพลาริซ์แบบแนวตั้ง-ตั้ง กรณีการโพลาริซ์แบบ แนวนอน-นอน กรณีการโพลาริซ์แบบแนวตั้ง-นอน และกรณีการโพลาริซ์แบบแนวนอน-ตั้ง โดยนำ ข้อมูลของช่องสัญญาณที่วัดได้จากกรณีทั้งสี่แบบมาสร้างเป็นแบบจำลองสองรูปแบบ คือ แบบจำลอง การสูญเสียเชิงวิถี และการจางหายหลายวิถี โดยแบบจำลองที่ได้นี้ช่วยให้ทราบถึง ผลกระทบต่อ ช่องสัญญาณในสภาวะแวดล้อมในห้องสมุด และสามารถนำไปพัฒนาระบบการจัดการชั้นวางหนังสือ ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบ RFID ภายในอาคารสำนักงาน
- 1.2.2 ศึกษาการออกแบบจำลองและการจำวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น RFID
- 1.2.3 ศึกษาการวัดช่องสัญญาณการสูญเสียเชิงวิถีที่สภาวะแวดล้อมภายในอาคารด้วยชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชนิดโลหะ
- 1.2.4 ศึกษาวิเคราะห์และประเมินผลเปรียบเทียบช่องสัญญาณการสูญเสียเชิงวิถีของ RFID ด้วยชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชนิดโลหะ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การทดลองวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นภายในอาคารด้วยชั้นวางหนังสือโดยนำ ระบบการสื่อสารไร้สายของ RFID ภายในห้องที่จำลองไว้ และศึกษาถึงแบบจำลองของช่องสัญญาณ ส่งผ่านและสามารถนำแบบจำลองการสูญเสียสัญญาณในส่งผ่าน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการ สื่อสารแบบ RFID ในสภาพแวดล้อมภายในอาคารได้ เช่น ห้องสมุด ร้านค้า ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดในการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาการวัดและการทำแบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบถึงผลกระทบของ ชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ โดยทำการวัดช่องสัญญาณใน 4 กรณี คือ กรณี การโพลาริซ์ของสายอากาศแบบแนวตั้ง-ตั้ง กรณีการโพลาริซ์ของสายอากาศแบบแนวนอน-นอน กรณีการโพลาริซ์ของสายอากาศแบบแนวตั้ง-นอน และกรณีการโพลาริซ์ของสายอากาศแบบนอน-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 6 บท ด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ ซึ่งประกอบไปด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย และขอบเขตการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงเทคโนโลยีระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ ประเภทของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตน ประวัติความเป็นมาของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ ลักษณะเฉพาะของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ ลักษณะเฉพาะของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ การประยุกต์ใช้งานและบทสรุป

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีและการวิเคราะห์การสูญเสียในการส่งผ่านของการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ ทฤษฎีการสูญเสียเชิงวิถี การจางหายหลายวิถี แบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้น แบบจำลองเปรียบเทียบในเชิงสถิติและบทสรุป

บทที่ 4 กล่าวถึงการวัดช่องสัญญาณและการจำลองของช่องสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วยบทนำ การวัดช่องสัญญาณ แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ การออกแบบจำลองช่องสัญญาณ

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยกล่าวนำ และผลการทดลองวิจัย

บทที่ 6 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

เทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ

2.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันนี้เราคงคุ้นเคยกันบ้างแล้วเมื่อได้เข้าไปเดินจับจ่ายซื้อของตามห้างสรรพสินค้าต่าง ๆ ในขณะที่นำสินค้าไปยังแคชเชียร์เพื่อชำระเงิน ก็คงคุ้นเคยกับภาพของพนักงานที่ใช้อุปกรณ์บางอย่างตรวจสอบแถบรหัสแบบแท่งหรือที่เรียกกันว่า แถบบาร์โค้ดบนตัวสินค้าเพื่ออ่านข้อมูลบางอย่างออกมา ถึงแม้ว่าฉลากแบบบาร์โค้ดจะเป็นที่นิยมและใช้กันมากในบ้านเรา แต่วิธีการจัดการจัดเก็บข้อมูลแบบดังกล่าวก็ยังคงมีจุดค้อยที่ควร ได้รับการแก้ไขอยู่หลายๆ จุดที่เห็นได้ชัดข้อหนึ่งคือ ปัญหาในการอ่านค่าข้อมูลจากแถบดังกล่าวที่ต้องยิงด้วยแสงตรวจสอบไปยังฉลากเพื่ออ่านค่า หรือใช้กล้องขนาดเล็กจับภาพฉลากขึ้นมาเพื่ออ่านภาพก็ตาม ถ้าแถบข้อมูลดังกล่าวมีรอยเปื้อนหรือไม่ชัดเจนการอ่านค่าอาจมีข้อผิดพลาด นอกจากนี้วิธีการอ่านค่าที่มีความจำเป็นต้องนำเครื่องอ่านมาวางอยู่เหนือฉลากที่ต้องการอ่านค่าก็ทำให้เกิดความไม่สะดวกสำหรับงานบางประเภท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณี ที่มีฉลากในการตรวจสอบเป็นจำนวนมาก ๆ จึงทำให้เป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบฉลากใหม่ที่มีชื่อเรียกว่า RFID (Radio Frequency Identification) หรือการระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ โดยในบทนี้จะกล่าวถึง ประเภทของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบ RFID ประวัติความเป็นมา ลักษณะเฉพาะ ข้อกำหนด และการประยุกต์ใช้งานของระบบการสื่อสารไร้สายแบบ RFID และโดยเฉพาะอย่างยิ่งนำมาใช้ในห้องสมุดเหมือนกันเพื่อความสะดวกรวดเร็วและถูกต้องแม่นยำในการค้นหาและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาวิจัยการสูญเสียเชิงวิถีของแพร์กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ย่านความถี่ RFID ที่ประกอบด้วยชั้นวางหนังสือภายในอาคาร

2.2 ความเป็นมาของเทคโนโลยี RFID

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบ RFID [4] นั้น ย้อนกลับไปถึงสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ซึ่งประเทศกลุ่มพันธมิตร และกลุ่มอักษะได้มีการใช้เรดาร์ที่ถูกสร้างโดยเซอร์โรเบิร์ต อเล็กซานเดอร์ ในการตรวจจับและเตือนเครื่องบินที่กำลังเข้ามา แต่ปัญหาคือไม่สามารถแยกแยะระหว่างเครื่องบินรบได้ว่าเป็นของฝ่ายไหน โดยทางฝั่งเยอรมันซึ่งเป็นจุดกำเนิดของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบ RFID แบบที่ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นวิทยุ (แบบถูกกระตุ้น) เมื่อเทคโนโลยีเรดาร์มีการพัฒนาขึ้น นักบินสามารถที่จะสื่อสารระหว่างเครื่องบินกับสถานีภาคพื้นดินหรือระหว่างนักบินด้วยกันที่เราเรียกว่าระบบแยกแยะระหว่างมิตรกับศัตรูสถานีภาคพื้นดินหรือระหว่างนักบินด้วยกันที่เราเรียกว่าระบบแยกแยะระหว่างมิตรกับศัตรู (Identification friend or foe: IFF) โดยเมื่อเครื่องบินได้รับสัญญาณเรดาร์จากภาคพื้นดินหรือระหว่างนักบิน ตัวเครื่องบินจะส่งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ตอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับไปทำให้ทราบว่าเป็นเครื่องบินของฝ่ายไหน ซึ่งถือได้ว่าเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแบบ RFID แบบวัตถุส่งสัญญาณจากตัวเอง (แบบกระตุ้นเอง)

ระบบการระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุหรือ RFID ถูกนำมาพัฒนาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้แก่ ระบบกันขโมยหรือเรียกว่า ระบบระวังภัยสิ่งของทางไฟฟ้า (Electric article surveillance: EAS) ในห้างสรรพสินค้า ซึ่งตัวสินค้าจะมีการติดระบบการสื่อสารแบบ RFID แบบ 1 บิต โดยจะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เมื่อสินค้ามีการชำระเงินตัวบิตจะถูกตั้งค่าเป็น 0 ทำให้สามารถนำออกร้านได้ แต่ในกรณีไม่มีการชำระเงินเมื่อสินค้าผ่านประตูเครื่องตรวจ บิตจะเป็น 1 ทำให้สัญญาณเตือนดังขึ้นมาทางด้านการพัฒนาได้มีการให้สิทธิบัตรของอเมริกาเกี่ยวกับการสื่อสารแบบ RFID อันแรกให้กับ มาริโอ วอ คาร์ ดูโล เป็นสิทธิบัตรเกี่ยวกับตัวส่งสัญญาณแบบกระตุ้นเอง เมื่อวันที่ 23 มกราคม ค.ศ. 1973 ในช่วงปี ค.ศ. 1970 รัฐบาลอเมริกาได้มีการพัฒนาใช้สำหรับการติดตามวัตถุนิวเคลียร์ให้กับกระทรวงพลังงาน ต่อมาทีมนักวิทยาศาสตร์นี้ได้ออกมาตั้งบริษัทและพัฒนาเป็นระบบเก็บค่าทางด่วนอัตโนมัติ ในขณะเดียวกันกระทรวงเกษตรของสหรัฐก็ได้พัฒนาใช้ในเชิงพาณิชย์ เพื่อแยกแยะวัวในช่วงต้นปี ค.ศ. 1990 บริษัทไอบีเอ็มได้พัฒนาและจดสิทธิบัตรการสื่อสารแบบ RFID ในย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra high frequency: UHF) คือย่านความถี่ตั้งแต่ 300 MHz ถึง 3 GHz แต่เมื่อบริษัทไอบีเอ็มมีปัญหา คำนการเงินได้ขายสิทธิบัตรให้กับบริษัทอินเตอร์แมค ซึ่งช่วงนั้นการใช้งานยังไม่แพร่หลายนัก เนื่องจากอุปกรณ์ยังมีราคาแพงมาก

การสื่อสารแบบ RFID ในย่านความถี่สูงยิ่งได้รับความสนใจอีกครั้งในปี ค.ศ. 1999 เมื่อองค์การนานาชาติกำหนดหมายเลขแห่งยุโรปและคณะกรรมการกำหนดรหัสให้เป็นแบบเดียวกัน (European article number international-uniform code council: EAN-UCC) และบริษัทจิลเลทได้ร่วมกันก่อตั้งศูนย์การสื่อสารแบบระบุตัวตนแบบอัตโนมัติ (Auto ID) ขึ้นในช่วงปี ค.ศ.1999-2003 การสื่อสารแบบระบุตัวตนแบบอัตโนมัติได้รับการสนับสนุนจากบริษัทเอกชนจำนวนมากและได้มีการขยายตลาดไปยังประเทศออสเตรเลีย อังกฤษ สวิตเซอร์แลนด์ ญี่ปุ่น และจีน จึงมีการพัฒนามาตรฐานใหม่ที่เรียกว่ารหัสสินค้าอิเล็กทรอนิกส์

ในปัจจุบันระบบการสื่อสารแบบ RFID มีลักษณะเป็นแท็กที่สามารถอ่านค่าได้โดยผ่านคลื่นวิทยุจากระยะห่างเพื่อตรวจติดตามและบันทึกข้อมูลที่ติดอยู่กับแท็กซึ่งถูกฝังหรือติดไว้กับวัตถุต่างๆ เช่น หีบห่อ กล่อง หรือบรรจุภัณฑ์ของสินค้า ทำให้สามารถติดตามได้ว่าสินค้านั้น คืออะไร ผลิตที่ไหน ใครเป็นผู้ผลิต และผลิตเมื่อใด โดยไม่จำเป็นต้องสัมผัส หรือเห็นวัตถุนั้น ๆ ก่อนแต่สามารถทำงานได้โดยใช้เครื่องอ่านที่สื่อสารกับแท็กผ่านทางคลื่นวิทยุแทน

2.3 ลักษณะจำเพาะของระบบการสื่อสาร RFID [5]

2.3.1 องค์ประกอบหลักที่สำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการสื่อสารแบบ RFID เป็นเทคโนโลยีการส่งข้อมูลแบบอัตโนมัติ และระบบสื่อสารแบบ RFID จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ ดังรูปที่ 2.1 [5] มีองค์ประกอบดังนี้

ส่วนที่หนึ่งเป็นตัวส่งสัญญาณได้ทำหน้าที่ส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไปยังสายอากาศทางด้านรับ และอ่านข้อมูลของวัตถุที่ส่งกลับมาพร้อมด้วยคลื่นความถี่วิทยุ ผลที่ได้ของสัญญาณจะเก็บไว้ในเครื่องอ่านเพื่อที่จะถ่ายโอนข้อมูลไปในระบบฐานข้อมูลในภายหลัง หรือส่งไปในเวลานั้น

ส่วนที่สองเป็นตัวรับสัญญาณประกอบไปด้วยไมโครชิปจะทำหน้าที่เก็บข้อมูลของวัตถุในรูปสัญญาณดิจิทัล และเสายอากาศ ทำหน้าที่เป็นตัวรับและตัวส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุกลับไปยังเครื่องอ่านพร้อมทั้งข้อมูลของวัตถุภายในไมโครชิป โดยไมโครชิปขนาดเล็กจะบรรจุโปรแกรมที่มีข้อมูลหรือตัวเลขของผลิตภัณฑ์ คน สัตว์ สิ่งของ ไว้ในฐานข้อมูล ซึ่งสามารถวางไว้ภายในหรือบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์หรือในภาชนะบรรจุทำหน้าที่บันทึกข้อมูลของวัตถุที่ต้องการระบุตัวคนเราสามารถแบ่งชนิดของตัวรับสัญญาณออกเป็น 2 แบบคือ

- ตัวรับสัญญาณแบบกระตุ้นเอง (Active receiver) ตัวรับสัญญาณชนิดนี้จะมีแบตเตอรี่อยู่ภายใน เพื่อป้อนพลังงานไฟฟ้าให้ทำงาน โดยปกติเราจะสามารถทั้งอ่านและเขียนข้อมูลลงได้ และการที่ต้องใช้แบตเตอรี่จึงทำให้ตัวรับสัญญาณแบบกระตุ้นเองมีอายุการใช้งานจำกัดตามอายุของแบตเตอรี่ เมื่อแบตเตอรี่หมดก็ต้องนำไปทิ้งไม่สามารถนำกลับ มาใช้ใหม่ได้อย่างไรก็ตามถ้าเราสามารถออกแบบวงจรให้กินกระแสไฟน้อยๆ ก็อาจจะมียุการใช้งานนานนับสิบปี ตัวรับสัญญาณชนิดแรกที่พินี้จะมีหน่วยความจำภายในขนาดใหญ่ มีกำลังส่งสูงและระยะการรับส่งข้อมูลได้ไกลกว่าที่กชนิดพาสซีฟ นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้ดีในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวน แต่ก็มีข้อเสียอยู่ที่ราคาต่อหน่วยแพง มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และมีจำกัดเวลาของการทำงาน

- ตัวรับสัญญาณแบบถูกกระตุ้น (Passive receiver) จะไม่มีแบตเตอรี่อยู่ภายในแต่จะทำงานโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวส่งสัญญาณจึงทำให้ตัวรับสัญญาณแบบถูกกระตุ้นมีน้ำหนักเบาว่าตัวรับสัญญาณแบบกระตุ้นเอง ราคาถูกกว่าและมีอายุการใช้งานไม่จำกัด แต่มีข้อเสียคือระยะการรับส่งข้อมูลใกล้ และตัวอ่านข้อมูลจะต้องมีความไวสูง มักจะมีปัญหาเมื่อนำไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนอีกด้วย

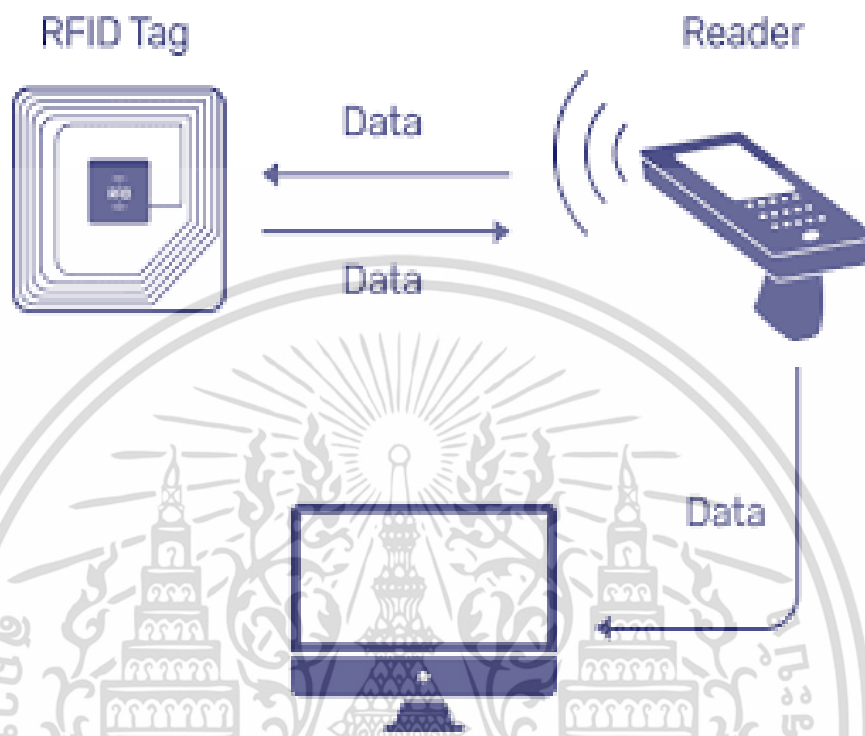
ส่วนที่สามคือการเชื่อมต่อกับระบบฐานข้อมูล ประกอบด้วยซอฟต์แวร์โปรแกรม ดำเนินงานเกี่ยวกับข้อมูลระบบคอมพิวเตอร์ต่างๆ เพื่อทำการบ่งชี้ข้อมูล ประมวลผลและแสดงข้อมูลตามต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.3.2 หลักการทำงานเบื้องต้น RFID

เริ่มแรกตัวส่งสัญญาณจะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาตลอดเวลา และคอยตรวจจับว่ามีตัวรับสัญญาณเข้ามาอยู่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไม่ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือคอยตรวจจับว่ามีมอดูเลตสัญญาณเกิดขึ้นหรือไม่ทางสายอากาศที่อยู่ภายในตัวรับสัญญาณ โดยคลื่นพาหะที่ถูกส่งออกมาจากตัวรับสัญญาณเกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ความถี่ หรือเฟส ขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีตัวรับสัญญาณเข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวรับสัญญาณจะได้รับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวส่งสัญญาณ จากนั้นตัวรับสัญญาณก็จะเริ่มทำงาน และส่งข้อมูลในหน่วยความจำของไมโครชิปที่ผ่านการมอดูเลตกับคลื่นพาหะแล้วออกมา



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบหลักของระบบการสื่อสารแบบ RFID [4-5]

สุดท้ายตัวส่งสัญญาณจะตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของคลื่นพาหะแปลงออกมาเป็นข้อมูลแล้วทำการถอดรหัสเพื่อนำข้อมูลไปใช้งานต่อไป

2.3.3 การรับส่งข้อมูลระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ

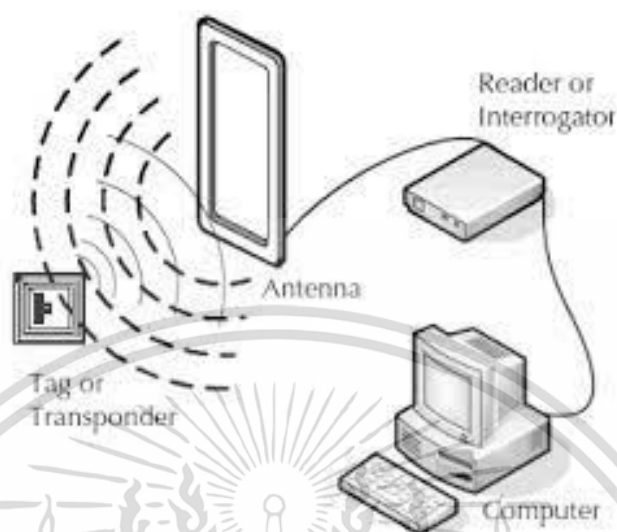
2.3.3.1 วิธีการสื่อสารระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ

ในการสื่อสารข้อมูลของระบบการสื่อสารแบบ RFID นั้นจะสื่อสารกันแบบไร้สายผ่านอากาศ โดยจะนำข้อมูลมาทำการมอดูเลต (Modulation) กับคลื่นพาหะที่เป็นคลื่นความถี่วิทยุ โดยมีสายอากาศ (Antenna) ที่อยู่ในตัวส่งสัญญาณเป็นตัวรับและส่งคลื่นซึ่งแบ่งออกเป็น 2 วิธีด้วยกันคือ วิธีเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Inductive coupling) กับวิธีการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic propagation coupling) ดังรูปที่ 2.2

2.3.3.2 ช่องสัญญาณการส่งผ่านระหว่างตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ

เราแบ่งรูปแบบของการสื่อสารตามทิศทางของการสื่อสารหรือจำนวนของช่องสื่อสารได้ 3 แบบ คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบทิศทางเดียว (Simplex : SPX) คือ ฝ่ายหนึ่งจะส่งเพียงอย่างเดียวและอีกฝ่ายหนึ่งจะเป็นฝ่ายรับเพียงอย่างเดียว การสื่อสารแบบทิศทางเดียวนี้อาจต้องการช่องสื่อสารเพียง 1 ช่อง



รูปที่ 2.2 ระบบการส่งผ่านช่องสัญญาณระหว่างการรับ-ส่งสัญญาณ

ตัวอย่างเช่น การส่งวิทยุกระจายเสียง (Broadcasting)

แบบกึ่งสองทาง (Half duplex : HDX) เป็นการสื่อสารแบบ 2 ทางแต่สลับเวลากันในขณะที่ฝ่ายหนึ่งเป็นฝ่ายส่ง อีกฝ่ายหนึ่งจะเป็นฝ่ายรับ การสื่อสารแบบกึ่งสองทางนี้ต้องการช่องสื่อสารเพียงช่องเดียว ตัวอย่างเช่น วิทยุคมนาคม

แบบสองทาง (Full duplex : FDX) เป็นการสื่อสารแบบ 2 ทิศทาง โดยที่ทั้ง 2 ฝ่ายสามารถรับและส่งได้พร้อมกันในเวลาเดียวกัน การสื่อสารแบบ 2 ทิศทางนี้ต้องการช่องสื่อสาร 2 ช่อง ตัวอย่างเช่น โทรศัพท์ และโทรศัพท์เคลื่อนที่

2.3.4 ระยะห่างระหว่างการรับส่งข้อมูลและกำลังงานการส่ง

ระยะการรับส่งข้อมูลในระบบการสื่อสารแบบ RFID นั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่าง ๆ คือ กำลังส่งของสัญญาณ กำลังส่งของตัวรับสัญญาณ และสภาพแวดล้อม

สำหรับการออกแบบสายอากาศของตัวส่งสัญญาณจะเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปร่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่สายอากาศของตัวส่งสัญญาณจะเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปร่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกมาจากสายอากาศ ดังนั้นระยะการรับส่งข้อมูล บางทีอาจขึ้นอยู่กับมุมของการรับส่งระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับส่งระหว่างตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสำคัญ

ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยทั่วไปจะลดลงตามระยะทางโดยแปรผกผันกับระยะยกกำลังสอง แต่ในบางสภาพแวดล้อมซึ่งอาจมีการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสิ่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบตัว เช่น โลหะ ก็อาจทำให้ความเข้มของคลื่นแม่ไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว หรือแม้กระทั่งความชื้น ในอากาศก็อาจมีผลในกรณีที่ความถี่สูง ๆ

ดังนั้นการนำระบบการสื่อสารแบบ RFID ไปใช้งานก็ควรมีการคำนึงถึงสภาพแวดล้อม เพราะจะมีผลกระทบกับระยะเวลาการรับส่งข้อมูลและพยายามติดตั้งระบบให้ห่างไกลจากโลหะ ซึ่งอาจทำให้เกิด การสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้

กำลังส่งของตัวรับสัญญาณที่จะส่งกลับมายังตัวส่งข้อมูลนั้น โดยทั่วไปจะมีกำลังที่ต่ำมากเมื่อ เทียบกับกำลังส่งของตัวส่งข้อมูล ดังนั้นความไวในการตรวจจับสัญญาณของตัวส่งข้อมูลก็เป็นอีกจุด หนึ่งที่ต้องพิจารณา ถึงแม้ในทางเทคนิคเราจะสามารถทำให้ตัวอ่านข้อมูลมีกำลังส่งมากแค่ไหนก็ได้ แต่โดยทั่วไปก็จะถูกจำกัดโดยกฎหมายของแต่ละประเทศเช่นเดียวกับความถี่

2.3.5 อัตราการรับส่งข้อมูลและแบนด์วิดท์

อัตราการถ่ายโอนข้อมูล (Data transfer rate) จะขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นพาหะ โดยปกติ ถ้าความถี่ของคลื่นพาหะยิ่งสูงอัตราการรับส่งข้อมูลก็จะยิ่งสูงตามไปด้วย

ในส่วนการเลือกแบนด์วิดท์ หรือย่านความถี่นั้นก็จะมีผลต่ออัตราการรับส่งข้อมูลก็เช่นกัน โดยมีหลักว่าแบนด์วิดท์ควรมีค่ามากกว่าอัตราการรับส่งข้อมูลที่ต้องการอย่างน้อยสองเท่า ยกตัวอย่างเช่น ถ้าใช้แบนด์วิดท์ในช่วง 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz ก็จะสามารถรองรับอัตราการรับส่ง ข้อมูลได้ถึงประมาณ 2 เมกกะบิตต่อวินาที เป็นต้น

การใช้แบนด์วิดท์ที่กว้างเกินไปก็อาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณรบกวนมาก หรือทำให้ อัตราส่วนของสัญญาณที่รับได้ต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio : SNR) ต่ำลงนั่นเอง ดังนั้น การเลือกใช้แบนด์วิดท์ให้ถูกต้องก็เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณา

2.4 ประเภทของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตน

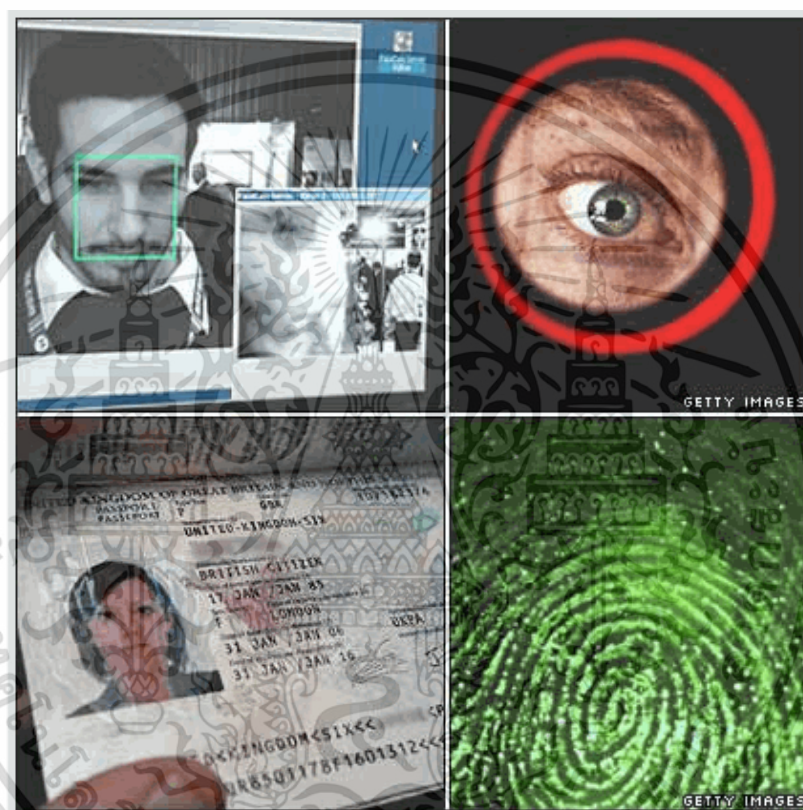
เทคโนโลยีรหัสบาร์โค้ด (Barcode technology) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนที่ เก่าแก่มากที่สุด โดยใช้รหัสแถบสีดำเข้มเรียงตัวกันและมีช่องว่างที่แตกต่างกันเช่นเดียวกับแถบสี ดัง รูปที่ 2.3 ซึ่งการอ่านรหัสบาร์โค้ดทำได้โดยใช้เครื่องอ่านรหัส



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างของรหัสบาร์โค้ด [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเพื่อใช้ประกอบการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีการระบุตัวตนทางชีวภาพ (Biometric technology) เป็นเทคโนโลยีการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของสิ่งมีชีวิต โดยที่นำมาใช้งานคือการตรวจสอบลายนิ้วมือ ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของสิ่งมีชีวิต โดยที่นำมาใช้งานคือการตรวจสอบลายนิ้วมือ (Fingerprint) และการตรวจสอบเสียงพูด (Voice recognition) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเทคโนโลยีนี้จำกัดการใช้งานบางกลุ่มไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในแวดวงอื่นได้ จึงไม่เข้าข่ายเทคโนโลยีทางเลือกสำหรับการจัดการอุตสาหกรรมยุคใหม่.



รูปที่ 2.4 ระบบการส่งผ่านช่องสัญญาณระหว่างการรับ-ส่งสัญญาณทางชีวภาพ [6]

เทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยบัตรอิเล็กทรอนิกส์ (Smartcard technology) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยการป้อนข้อมูลไว้ในบัตรอิเล็กทรอนิกส์ลักษณะคล้ายกับเทคโนโลยีการสื่อสารแบบ RFID ต่างกันตรงที่เทคโนโลยีนี้การรับส่งข้อมูลมีความจำเป็นที่ตัวรับและตัวส่งสัญญาณต้องสัมผัสกัน โดยมีผลทำให้อายุการใช้งานน้อยลง ดังรูปที่ 2.5

เทคโนโลยี RFID เป็นระบบการสื่อสารแบบไร้สายที่นำเอาคลื่นวิทยุมาเป็นคลื่นพาหะเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์สองชนิดที่ตัวส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณ ดังรูปที่ 2.6 โดยการนำเอาข้อมูลที่ต้องการส่ง มาทำการมอดูเลต (Modulation) กับคลื่นวิทยุแล้วส่งออกผ่านทาง

สายอากาศที่ส่งจนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคโนโลยีการจดจำสัญลักษณ์ด้วยสายตา (Optical character recognition: OCR) เป็น การออกแบบตัวอักษรตัวเลขหรือสัญลักษณ์ ให้มีรูปแบบเฉพาะตัวที่อ่านได้ด้วยสายตามนุษย์และ เครื่องอ่าน โดยทั่วไปจะใช้งานในเชิงพาณิชย์และกานธนาการ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างของเทคโนโลยีระบุตัวตนด้วยบัตรอิเล็กทรอนิกส์ [6]



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณเทคโนโลยีของ RFID [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างของเทคโนโลยีการจดจำสัญลักษณ์ด้วยสายตา [6]

2.5 การประยุกต์การใช้เทคโนโลยีการสื่อสารแบบ RFID ในห้องสมุด [7-10]

ห้องสมุดแต่ละแห่งพัฒนาฐานข้อมูลเพื่อจัดเก็บรายละเอียดทางบรรณานุกรมและสถานภาพของทรัพยากรสารสนเทศ เพื่อใช้ในการตรวจสอบข้อมูลเกี่ยวกับยืมคืนทรัพยากรสารสนเทศแต่ละรายการของห้องสมุด โดยทรัพยากรสารสนเทศแต่ละรายการจะได้รับตัวเลขที่เฉพาะรายการ (บาร์โค้ด ซึ่งไม่ได้มีความสัมพันธ์กันระหว่างชื่อผู้แต่ง และชื่อเรื่องของทรัพยากรสารสนเทศรายการนั้นๆ การยืมคืนทรัพยากรสารสนเทศที่ใช้เทคโนโลยีบาร์โค้ด ผู้ใช้ต้องติดต่อขอความช่วยเหลือจากเจ้าหน้าที่บรรณารักษ์ จากนั้นเจ้าหน้าที่บรรณารักษ์จะนำแถบบาร์โค้ดที่ติดกับทรัพยากรสารสนเทศนั้นไปไว้ในบริเวณที่เครื่องอ่านรหัสบาร์โค้ดโดยสามารถอ่านได้ที่ละเล่ม เทคโนโลยีการสื่อสารแบบ RFID นั้นมีลักษณะคล้ายกับบาร์โค้ดและยังสามารถรองรับความต้องการอีกหลายอย่างที่บาร์โค้ดไม่สามารถตอบสนองได้ กล่าวคือเทคโนโลยีบาร์โค้ดเป็นระบบที่อ่านได้อย่างเดียว ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่อยู่บนบาร์โค้ดได้ แต่แท็ก RFID สามารถอ่านและบันทึกข้อมูลเพิ่มเติมนอกเหนือจากตัวเลขและเพิ่มเติมข้อมูลภายหลังได้ นอกจากนี้ระบบเทคโนโลยีการสื่อสารแบบ RFID เป็นเทคโนโลยีที่สามารถส่งข้อมูลทุกอย่างผ่านคลื่นความถี่วิทยุ [7] ดังนั้นวิทยานิพนธ์ได้เล็งเห็นการพัฒนากระบวนการสแกนด้วยคลื่นวิทยุควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการสูญเสียเชิงวิธีการแพร่กระจายคลื่นของ RFID โดยการเปรียบเทียบชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชนิดโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การสำรวจหนังสือในชั้นวางหนังสือห้องสมุด [7]

2.6 ข้อกำหนดของระบบการสื่อสารแบบ RFID

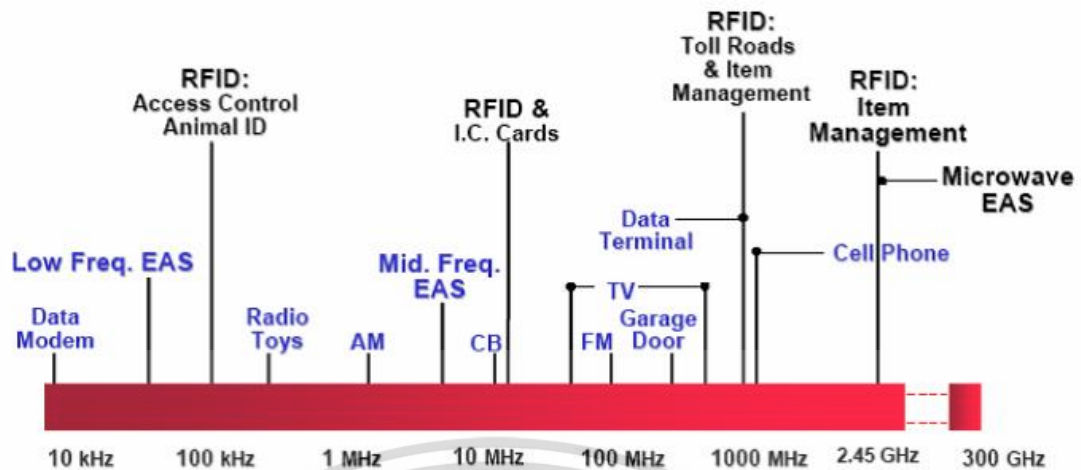
2.6.1 ย่านความถี่ที่ใช้งาน

ในปัจจุบันได้มีการรวมกลุ่มระหว่างแต่ละประเทศ เพื่อกำหนดมาตรฐานความถี่คลื่นพาหะของระบบการสื่อสารแบบ RFID โดยมีสามกลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มประเทศในยุโรปและแอฟริกา กลุ่มประเทศอเมริกาเหนือและอเมริกาใต้ และสุดท้ายกลุ่มประเทศตะวันออกไกลและออสเตรเลีย ซึ่งแต่ละกลุ่มประเทศจะกำหนดแนวทางในการเลือกใช้ความถี่ต่างๆ ให้แก่บรรดาประเทศสมาชิก

อย่างไรก็ตามความถี่ของคลื่นพาหะส่วนมากนิยมใช้งานกันในย่านความถี่ ISM Band (Industrial scientific medical) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่หลายประเทศกำหนดไว้สอดคล้องกันในการอนุญาตให้ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ สำหรับย่านความถี่ใน ISM Band ที่กำหนดให้ใช้สำหรับ

- ย่านความถี่ต่ำ (Low frequency : LF) ต่ำกว่า 150 KHz
- ย่านความถี่สูง (High frequency : HF) 13.56/27.125 Mhz
- ย่านความถี่สูงมาก (Very high frequency : VHF) 433/868/915 MHz
- ย่านความถี่ไมโครเวฟ (Microwave frequency) 2.45/5.8 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แถบความถี่การใช้งานของย่านต่าง ๆ [1]

ตารางที่ 2.1 ย่านความถี่ของระบบการสื่อสารแบบ RFID ที่ใช้งาน

ย่านความถี่	คุณลักษณะ	การใช้งาน
ย่านความถี่ต่ำ 100-500 kHz ความถี่มาตรฐานที่ใช้ งานทั่วไปคือ 125 kHz	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะการรับส่งข้อมูลใกล้ - ต้นทุนไม่สูง - ความเร็วในการอ่านข้อมูลต่ำ - ความถี่ในย่านนี้เป็นที่แพร่หลายทั่วโลก 	<ul style="list-style-type: none"> - Access control - ปศุสัตว์ - ระบบคงคลัง
ย่านความถี่กลาง 10-15 MHz ความถี่มาตรฐานที่ใช้ งานทั่วไปคือ 13.56 kHz	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะการรับส่งข้อมูลปานกลาง - ราคาไม่แพง - ความเร็วในการอ่านข้อมูลปานกลาง - ความถี่ในย่านนี้เป็นที่แพร่หลายทั่วโลก 	<ul style="list-style-type: none"> - Access Control - สมาร์ทการ์ด - ห้องสมุด
ย่านความถี่สูง 433/868/915 MHz	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะการรับส่งข้อมูลไกล (10 เมตร) - ความเร็วในการอ่านข้อมูลสูง - ราคาแพง 	<ul style="list-style-type: none"> - รถไฟฟ้า - ระบบเก็บค่าผ่านทาง
ย่านความถี่ไมโครเวฟ 2.45/5.8 MHz	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะการรับส่งข้อมูลไกล (10 เมตร) - ความเร็วในการอ่านข้อมูลสูง - ราคาแพง 	<ul style="list-style-type: none"> - รถยนต์ รถไฟฟ้า - ระบบเก็บค่าผ่านทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบย่านความถี่ต่าง ๆ ของระบบการสื่อสารแบบ RFID

ย่านความถี่	<135 kHz	13.56 MHz	868/915 MHz, 2.45/5.8 GHz
ชนิดของแท็ก	Passive Tag (ไม่มีแบตเตอรี่)		Active Tag (มีแบตเตอรี่)
การเหนี่ยวนำ	การเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า		การแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
กำลังส่ง	72 dB μ A/m	42 dB μ A/m	10 ถึง 100 mW, 500 mW, 4W
ชนิดหน่วยความจำ	EEPROM		SRAM มีแบตเตอรี่
ระยะห่าง	0.5 - 1 เมตร		4 - 15 เมตร
อัตรารับส่งข้อมูล	ต่ำ \longrightarrow สูง		
ขนาดสายอากาศ	ใหญ่ \longleftarrow เล็ก		
กำลังทะลุทะลวงวัตถุ	ดี \longleftarrow ไม่ดี		
สามารถผ่านความชื้น	ต่ำ \longrightarrow สูง		

2.6.2 มาตรฐานในการใช้งาน

มาตรฐานของการใช้งานของระบบการสื่อสารแบบ RFID มีหลายมาตรฐานได้แก่ สถาบันมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (American national standards Institute : ANSI), Automotive industry action group (AIAG), European article numbering association international, European telecommunications standards institute (ETSI), European radio communications office (ERO), American society for testing and materials (ASTM) และ Electronic product code global (EPC global) เป็นต้น โดยมาตรฐานหลักที่นิยมใช้กันคือ องค์การมาตรฐานสากล (International Organization of Standards : ISO) ได้กำหนดมาตรฐานไว้ 4 ด้าน ดังนี้

- มาตรฐานค่านเทคโนโลยี (Technology standard)

ISO/IEC 18001 เทคโนโลยีด้านข่าวสารสำหรับการจัดการในระบบสื่อสารแบบ RFID แบ่งออกเป็น 6 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศสำหรับความถี่ที่ยอมรับกันโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 2 พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่ที่ต่ำกว่า 135 kHz

ส่วนที่ 3 พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่ 13.56 MHz

ส่วนที่ 4 พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่ 2.45 GHz

ส่วนที่ 5 พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่ 5.80 GHz

ส่วนที่ 6 พารามิเตอร์สำหรับการสื่อสารในอากาศย่านความถี่สูงยิ่ง

- มาตรฐานด้านรูปแบบข้อมูล (Data format standard)

ISO/IEC 15418 การเจาะจงชุดของข้อมูลและแอปพลิเคชันสำหรับจุดประสงค์การเข้ารหัสข้อมูล รวมถึงการระบุองค์การรับผิดชอบสำหรับผู้ดูแลรักษา

ISO/NEC 15434 เทคโนโลยีด้านข่าวสารแบบเฉพาะเจาะจงในการส่งผ่านสำหรับการสื่อสารที่มีความจุสูง

ISOIEC 15459 ว่าด้วยมาตรฐานเกี่ยวกับเทคนิค ทฤษฎี และมาตรฐานเกี่ยวกับขั้นตอนกระบวนการส่งข้อมูล

- มาตรฐานด้านการทดสอบ (Conformance standard)

ISO/IEC 18047 โครงสร้างของอุปกรณ์การสื่อสารแบบ RFID สำหรับการทดสอบ

- มาตรฐานด้านการใช้งาน (Application standard) ปัจจุบันมีด้วยกัน มาตรฐาน ได้แก่

ISO 10374 มาตรฐานการขนส่งสินค้าแบบระบุตัวตนอัตโนมัติ

ISO 1 1785 มาตรฐานการสื่อสารแบบ RFID ที่ใช้กับสัตว์

ISO 18185 มาตรฐานการสื่อสารแบบ RFID สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2.6.3 การอนุญาตใช้งานในประเทศไทย

ประกาศคณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (กทช.) ลงในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 10 ง ลงวันที่ 24 มกราคม 2549 ว่าหากผู้ผลิต ผลิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณที่ใช้กำลังส่งต่ำกว่า 1 วัตต์ ถือว่าไม่ต้องขออนุญาต แต่ถ้าอยู่ระหว่าง 1-4 วัตต์ ต้องขออนุญาต และถ้ากำลังส่งสูงกว่า 4 วัตต์ คณะกรรมการกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติต้องพิจารณาอีกครั้งว่า จะเกิดการรบกวนคลื่นอื่นๆ หรือไม่ การใช้อุปกรณ์ในการสื่อสารแบบ RFID ไม่ได้รับสิทธิคุ้มครองการรบกวน หากก่อให้เกิดการรบกวนระดับรุนแรงต่อการใช้ความถี่วิทยุของข่ายสื่อสารวิทยุคมนาคมอื่นในบริเวณใด บริเวณหนึ่ง ผู้ใช้ต้องระงับการใช้อุปกรณ์ในการสื่อสารแบบ RFID ที่ก่อให้เกิดการรบกวนในบริเวณนั้นทันที ส่วนใบอนุญาตจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือใบอนุญาตนำเข้าเพื่อใช้งานในประเทศไทยและใบอนุญาตเพื่อผลิตและส่งออก ซึ่งได้ให้ศูนย์คอมพิวเตอร์และอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (National electronic and computer technology center : NECTEC) ไปศึกษาถึงการสนับสนุนเอกชนเพื่อผลิตตัวส่งและตัวรับสัญญาณ ส่วนสำนักงานส่งเสริมอุตสาหกรรมซอฟต์แวร์แห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Software industry promotion agency : SIPA) จะศึกษาแนวทางสนับสนุนการพัฒนาซอฟต์แวร์ เพื่อใช้ในการสื่อสารแบบ REID นี้

2.7 บทสรุป

เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วอย่างในปัจจุบัน ทำให้หลายองค์กรพยายามที่จะนำเอาระบบการสื่อสารที่สะดวก รวดเร็ว และทันสมัยมาประยุกต์ใช้กับองค์กรของตนเอง ตลอดจนการพยายามที่จะลดต้นทุนการซื้อเทคโนโลยีใหม่ที่กำลัง มีบทบาทและความสำคัญเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยการประยุกต์เทคโนโลยีนี้มาใช้งานมีรูปแบบหลากหลายด้วยจุดประสงค์ที่แตกต่างกันแต่อยู่บนหลักการพื้นฐานเดียวกัน นั่นคือการใช้คลื่นความถี่วิทยุเพื่อการระบุเอกลักษณ์ระบุตัวตนของคน สัตว์ และสิ่งของแทนการระบุด้วยวิธีการอื่น ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยอำนวยความสะดวกและเพิ่มประสิทธิภาพได้ดีกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตน RFID มีหลักการทำงานรวมถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานไว้พอสังเขป เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการวิเคราะห์และการประเมินผล

3.1 กล่าวนำ

เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สาย RFID นั้นเป็นอีกปัจจัยที่มีจำเป็นต้องนำมาพิจารณาก่อนนำไปใช้ได้อย่างเหมาะสม และเป็นสิ่งที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณการแพร่กระจายคลื่น เมื่อมีการส่งสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับโดยผลที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะต้องทำการตรวจสอบเบื้องต้นด้วยวิธีการทดลองวัด จากนั้นจึงนำผลที่ได้จากการทดลองวัดมาทำการวิเคราะห์และประเมินผลตามขั้นตอนที่ได้นำเสนอของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และคำนวณค่าการสูญเสียในการส่งของช่องสัญญาณ RFID ตามทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ทราบถึงผลกระทบและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยขั้นตอนการตรวจสอบนี้มีสำคัญพอ ๆ กับขั้นตอนการศึกษาทดลองวิจัยเพื่อรู้ถึงคุณลักษณะช่องสัญญาณการส่งผ่านย่านความถี่ RFID จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งยวดที่ต้องศึกษาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยการประเมินผลเปรียบเทียบให้ถูกต้องและการพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยมีรายละเอียดของการศึกษาวิจัยและได้นำผลการทดลองวิจัยมาวิเคราะห์ตามพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

3.2 การสูญเสียเชิงวิถี

โดยทั่วไปแล้วระบบการสื่อสารไร้สายต้องศึกษาและวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำลองการสูญเสียเชิงวิถีของช่องสัญญาณการส่งผ่านทั้งในทางทฤษฎีและการวัดเพื่อให้คุณภาพสัญญาณที่ดีที่สุดได้แสดงให้เห็นว่ากำลังเฉลี่ยของสัญญาณจะลดลงแบบแปรผันตรงตามระยะทาง [5] ซึ่งการสูญเสียเฉลี่ยที่ระยะทาง d สามารถกำหนดให้เป็นฟังก์ชันของระยะทางได้ดังนี้

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (3.1)$$

หรือเขียนได้ตามสมการที่ (3.2)

$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.2)$$

ในเมื่อ n เป็นเลขยกกำลัง การสูญเสียเชิงวิถีซึ่งแสดงให้เห็นถึงอัตราที่การสูญเสียเชิงวิถีเพิ่มขึ้น ตามระยะทาง d_0 เป็นระยะทางอ้างอิง จากแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีนี้ เมื่อแสดงกราฟในสเกลแบบล็อก-ล็อก แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีจะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเป็น $10n$ โดยที่ค่า n ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม เช่น ถ้าเป็นช่องสัญญาณอวกาศว่าง n จะเท่ากับ 2 แต่ถ้าเป็นช่องสัญญาณที่ถูกบดบัง n จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในโครงการนี้ได้ทำการหาพารามิเตอร์ของแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีโดยใช้แบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้นกับข้อมูลการสูญเสียเชิงวิถีที่ได้จากการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจางหายหลายวิถี

ในระบบการสื่อสารไร้สาย สัญญาณที่รับได้จะมีมากกว่าหนึ่งวิถีขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม สัญญาณแต่ละวิถีจะมีทิศทางมาถึงที่แตกต่างกัน ซึ่งจะผ่านสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันทำให้มีแอมพลิจูด เฟส และทิศทางที่ต่างกันด้วย ดังนั้น สัญญาณที่รับได้จะเป็นผลรวมของสัญญาณแต่ละดีซึ่งมีแอมพลิจูด เฟส และทิศทางที่มาถึงแบบสุ่ม ส่วนประกอบหลายวิถีที่มาถึงทั้งหมดรวมกันแบบเวกเตอร์ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการจางหายหลายวิถี คือระดับสัญญาณที่รับได้จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นๆ ลงๆ เมื่อระยะทางเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อยซึ่งจะไม่รวมถึงการลดทอนของระดับสัญญาณตามระยะทางการสูญเสียเชิงวิถี PL ในหน่วย dB สามารถเขียนอยู่ในเทอมของการสูญเสียเฉลี่ยบวกกับพารามิเตอร์การจางหายหลายวิถี ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$PL(d)[dB] = \overline{PL}(d)[dB] + X_{\sigma} \quad (3.3)$$

เมื่อ X_{σ} เป็นพารามิเตอร์การจางหายหลายวิถี ซึ่งเป็นตัวแปรสุ่มที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น σ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงคุณสมบัติการกระจายของการจางหายหลายวิถีโดยใช้แบบจำลองทางสถิติ

3.4 การจำลองของรีเกรสชันเชิงเส้น

กำหนดให้มีข้อมูลอยู่ทั้งหมด M พิกัด ดังนี้

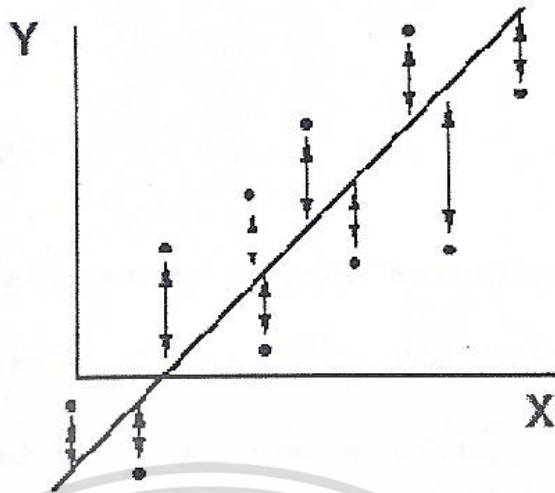
$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_M, y_M) \quad (3.4)$$

การทำแบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้นเป็นการหาฟังก์ชันเส้นตรงที่ผ่านพิกัดข้อมูลแล้วมีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด ตัวอย่างการทำแบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

แบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้นจะมีนิพจน์ทั่วไปทางคณิตศาสตร์เป็น

$$y = ax + b \quad (3.5)$$

เมื่อ a และ b เป็นค่าคงที่ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ต้องการเพื่อให้มีค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด โดยที่ค่าผิดพลาดกำลังสองทั้งหมด e สามารถหาได้จาก



รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างการทำแบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้น [2]

$$e = \sum_{j=1}^M (y_j - a - bx_j)^2 \quad (3.6)$$

ในการทำให้อยู่ในเงื่อนไขของค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด จะทำการหาอนุพันธ์ย่อยของค่าผิดพลาดกำลังสองทั้งหมดเทียบกับพารามิเตอร์ a และ b ตามลำดับ แล้วกำหนดให้เท่ากับ 0 ซึ่งจะได้

$$\frac{\partial e}{\partial a} = -2 \sum_{j=1}^M (y_j - a - bx_j) = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial e}{\partial a} = -2 \sum_{j=1}^M x_j (y_j - a - bx_j) = 0 \quad (3.8)$$

จัดรูปใหม่เป็นระบบสมการเชิงเส้นสองตัวแปรได้

$$an + b \sum_{j=1}^M x_j = \sum_{j=1}^M y_j \quad (3.9)$$

$$a \sum_{j=1}^M x_j + b \sum_{j=1}^M x_j^2 = \sum_{j=1}^M x_j y_j \quad (3.10)$$

ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ a และ b ของแบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้นสามารถหาได้จากการแก้สมการระบบเชิงเส้นสองตัวแปรนี้

3.5 การจำลองในเชิงสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function: PDF)

PDF นิยามเป็นอนุพันธ์ของความน่าจะเป็นที่ตัวแปรสุ่ม X มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด x ซึ่งสามารถเขียนเป็นนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ได้ [6].

$$f_X(x) = \frac{d}{dx} P\{X \leq x\} \quad (3.11)$$

PDF จะเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ และมีพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดเท่ากับหนึ่ง PDF จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรสุ่มผ่านทางค่าเฉลี่ย μ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็น

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_j \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f_X(x) dx} \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - \mu)^2 \end{aligned} \quad (3.13)$$

3.5.2 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative distribution function: CDF)

CDF นิยามเป็นความน่าจะเป็นที่ตัวแปรสุ่ม X มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าที่กำหนด x ซึ่งมีค่าเท่ากับการอินทิเกรต PDF ซึ่งสามารถเขียนเป็นนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ได้ [6]

$$f_X(x) = \frac{d}{dx} P\{X \leq x\} \quad (3.14)$$

CDF จะเป็นฟังก์ชันต่อเนื่องที่มีคุณสมบัติเป็นฟังก์ชันเพิ่ม ซึ่งจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ x มีค่าเข้าสู่ $-\infty$ และจะมีค่าเป็นหนึ่งเมื่อ x มีค่าเข้าสู่ ∞

3.5.3 การทดสอบไคกำลังสอง (Chi Square Test) [13]

การทดสอบไคกำลังสองใช้เพื่อหาแบบจำลองเชิงสถิติที่เหมาะสมของข้อมูลที่กำลังพิจารณา ซึ่งจะนิยามให้ค่าผิดพลาด q ของการทดสอบไคกำลังสองเป็นผลรวมทั้งหมด N ช่วงของผลต่างกำลังสองระหว่างความถี่ของข้อมูลที่เกิดขึ้น k กับความถี่ที่เกิดขึ้นซึ่งได้จากแบบจำลองเชิงสถิติที่ใช้ทดสอบ ถ่วงน้ำหนักด้วยความถี่ที่เกิดขึ้นซึ่งได้จากแบบจำลองเชิงสถิติที่ใช้ทดสอบ ในช่วงที่ i ซึ่งสามารถเขียนเป็นนิพจน์ทางคณิตศาสตร์ได้

$$q = \sum_{i=1}^N \frac{(k_i - m_i)^2}{m_i} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่แบบจำลองในเชิงสถิติที่ทำให้เกิดค่า q น้อยที่สุด จะถูกเลือกมาเป็นแบบจำลองเชิงสถิติที่ใช้แสดงข้อมูลที่กำลังพิจารณาอยู่ ซึ่งแบบจำลองเชิงสถิติทั้งหมดที่นำมาทำการทดสอบไคกำลังสองจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3.5.4 แบบจำลองเชิงสถิติที่นำมาทำการทดสอบไคกำลังสอง [14]

3.5.4.1 การกระจายแบบปกติ (Normal)

แบบจำลองเชิงสถิติที่มีการกระจายแบบปกติจะมีฟังก์ชัน PDF นิยามเป็น

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (3.16)$$

เมื่อ μ และ σ เป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตามลำดับ

3.5.4.2 การกระจายแบบล็อกปกติ (Lognormal)

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, & x \geq a \\ 0, & x < a \end{cases} \quad (3.17)$$

เมื่อ a และ b เป็นค่าคงที่ใดๆ และ $\delta > 0$ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น $\mu = a + e^{b+\delta^2/2}$ และ $\sigma = \sqrt{e^{b+\delta^2/2} (e^{\delta^2} - 1)}$

3.5.4.3 การกระจายแบบนาคากามิ (Nakagami)

แบบจำลองเชิงสถิติที่มีการกระจายแบบนาคากามิจะมีฟังก์ชัน PDF นิยามเป็น

$$f_x(x) = 2 \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \frac{1}{\Gamma(m)} x^{2m-1} e^{-mx^2/\Omega} \quad (3.18)$$

เมื่อฟังก์ชันแกมมา Γ พารามิเตอร์ Ω และ m นิยามเป็น

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{m-1} dt \quad (3.19)$$

$$m = \frac{\Omega^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^2 - \Omega)^2} \quad (3.20)$$

3.5.4.4 การกระจายแบบเรย์ลี (Rayleigh)

แบบจำลองเชิงสถิติที่มีการกระจายแบบเรย์ลีจะมีฟังก์ชัน PDF นิยามเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/2\sigma^2}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

เมื่อ $a > 0$ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น $\mu = \sqrt{\pi/(2a^2)}$ และ $\sigma = \sqrt{2 - \pi/2}/a$

3.5.4.5 การกระจายแบบริเซียน (Rician)

แบบจำลองเชิงสถิติที่มีการกระจายแบบริเซียนจะมีฟังก์ชัน PDF นิยามเป็น

$$f_X(x) = \begin{cases} I_0\left(\frac{xu}{\delta^2}\right) \frac{x}{\delta^2} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

เมื่อ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และฟังก์ชันเบสเซล (Bessel) ที่ถูกแก้ไขอันดับที่ ν ของชนิดที่หนึ่ง I_ν ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น

$$\mu = \delta \sqrt{\frac{\pi}{2} e^{-u^2/4\delta^2} \left[\left(1 + \frac{u^2}{2\delta^2}\right) I_0\left(\frac{u^2}{2\delta^2}\right) + \frac{u^2}{2\delta^2} I_1\left(\frac{u^2}{2\delta^2}\right) \right]}$$

$$\sigma = \sqrt{2\delta^2 + u^2 - \frac{\pi\delta^2}{2} e^{-u^2/2\delta^2} \left[\left(1 + \frac{u^2}{2\delta^2}\right) I_0\left(\frac{u^2}{2\delta^2}\right) + \frac{u^2}{2\delta^2} I_1\left(\frac{u^2}{2\delta^2}\right) \right]^2}$$

$$I_\nu(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^\nu \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z^2}{4}\right)^k}{k! \Gamma(\nu + k + 1)}$$

3.5.4.6 การกระจายแบบไวบูลล์ (Weibull)

แบบจำลองเชิงสถิติที่มีการกระจายแบบไวบูลล์จะมีฟังก์ชัน PDF นิยามเป็น

$$f_X(x) = \begin{cases} ba^{-b} x^{b-1} e^{-(x/a)^b}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น $\mu = a\Gamma(1 + 1/b)$ และ

$$\sigma = a\sqrt{\Gamma(1 + 2/b) - \Gamma^2(1 + 1/b)}$$

3.5.4.7 การกระจายแบบแกมมา (Gamma)

แบบจำลองเชิงสถิติที่มีการกระจายแบบแกมมาจะมีฟังก์ชัน PDF นิยามเป็น

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-x/b}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $a > -1$ และ $b > 0$ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น $\mu = (a + 1)b$ และ $\sigma = b\sqrt{a + 1}$

3.6 หลักการโพลาไรซ์เซชันของสายอากาศ

โพลาไรเซชัน (Polarization) ของสายอากาศเป็นแบบรูปที่แสดงคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกไป [15] ซึ่งใช้ในการอธิบายทิศทางและขนาดของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลา โพลาไรเซชันจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ ณ ตำแหน่งที่ทำการสังเกตซึ่งคงที่ โดยการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังการเคลื่อนที่ของคลื่น โพลาไรเซชันทำการสังเกตซึ่งคงที่ โดยการสังเกตนี้จะทำโดยมองตามหลังการเคลื่อนที่ของคลื่น โพลาไรเซชันสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น (Linear polarization) โพลาไรเซชันแบบวงกลม (Circular polarization) และโพลาไรเซชันแบบวงรี (Elliptic polarization) ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า กล่าวคือถ้าสนามไฟฟ้า ณ จุดใดๆ ในที่ว่างจะชี้เป็นเส้นตรงเสมอ (แนวนอนหรือแนวตั้ง) จะเรียกว่าโพลาไรเซชันแบบเชิงเส้น แต่ถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีการหมุนแบบรูปวงกลมจะเรียกว่า โพลาไรเซชันแบบวงกลม และถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้ามีการหมุนแบบรูปวงรี ก็เรียกว่าโพลาไรเซชันแบบวงรี

นอกจากนี้สำหรับโพลาไรเซชันแบบวงกลมและแบบวงรี ถ้าเวกเตอร์สนามในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (เมื่อมองตามหลังคลื่นแล้ว มีลักษณะการหมุนตามเข็มนาฬิกา) จะเรียกว่า โพลาไรเซชันด้านมือขวา (Right-hand polarization) ในขณะที่ถ้าเวกเตอร์สนามไฟฟ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จะเรียกว่าโพลาไรเซชันด้านมือซ้าย (Left-hand polarization)

ในการโพลาไรเซชันของสายอากาศในทิศทางหนึ่งทิศทางใดในอากาศ จะเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่แพร่กระจายออกจากสายอากาศนั้น เมื่อทำหน้าที่เป็นสายอากาศส่ง หรือเป็นโพลาไรเซชันของคลื่นที่มาตกกระทบสายอากาศนั้นจากทิศทางที่กำหนดให้ ซึ่งเมื่อสายอากาศได้รับคลื่นที่มีโพลาไรเซชันตรงกับโพลาไรเซชันของสายอากาศ ก็จะทำให้เกิดกำลังงานมากที่สุด

ในกรณีที่โพลาไรเซชันของสายอากาศไม่เหมือนกับโพลาไรเซชันของคลื่นที่เดินทางมาตกกระทบจะเรียกว่าเกิดการไม่เข้าคู่ของโพลาไรเซชัน (Polarization mismatch) ซึ่งทำให้สายอากาศไม่สามารถดึงเอากำลังงานออกมาจากคลื่น ได้สูงสุด เนื่องจากเกิดการสูญเสียจากโพลาไรเซชัน (Polarization loss) [7].

3.7 บทสรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์ขั้นพื้นฐานระบบการสื่อสารไร้สาย RFID และแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถึของช่องสัญญาณการส่งผ่าน โดยได้ใช้แบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้นทำแบบจำลองของการสูญเสียเชิงวิถึ สำหรับพารามิเตอร์เลขยกกำลังการสูญเสียเชิงวิถึและการสูญเสียเชิงวิถึที่ระยะทางอ้างอิง และใช้แบบจำลองเชิงสถิติซึ่งประกอบไปด้วย CDF ได้นำเสนอแบบจำลองของการจางหายหลายวิถึเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติการกระจายของการจางหายหลายวิถึที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณการสูญเสียเชิงวิถึในแพร่กระจายคลื่นของ RFID.

บทที่ 4

ขั้นตอนการศึกษาทดลองวิจัย

4.1 กล่าวนำ

บทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการวัดช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นของระบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุหรือ RFID การวัดช่องสัญญาณได้ใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (Vector network analyzer; VNA) และใช้สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับ หลังจากนั้นจะกล่าวถึงขั้นตอนในการวัดช่องสัญญาณ ตามด้วยแบบจำลองการวัด โดยทำการวัดบริเวณชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ และได้นำผลที่ได้จากการวัดไปวิเคราะห์เปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีในการแพร่กระจายคลื่นของ RFID ด้วยชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ

4.2 การวัดช่องสัญญาณ

4.2.1 อุปกรณ์การวัดการวัดช่องสัญญาณในการวัดช่องสัญญาณ

โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ เป็นอุปกรณ์หลักในการวัดและบันทึกผล ซึ่งถูกควบคุมการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการวัดนี้ได้กำหนดให้พอร์ตหนึ่งใช้สำหรับส่งสัญญาณผ่าน และส่วนของพอร์ตสองใช้สำหรับรับสัญญาณผ่าน ที่ปลายทั้งสองพอร์ตจะถูกต่อเข้ากับสายอากาศแบบไมโครสตริป อุปกรณ์การวัดช่องสัญญาณได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ในการวัดจะกำหนดพารามิเตอร์ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยทำการวัดในช่วงความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.5 GHz ซึ่งครอบคลุมความถี่ของระบบการสื่อสาร RFID ที่ใช้ในห้องสมุด โดยแบ่งการวัดออกเป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีสายอากาศส่ง-รับ มีการโพลาไรซ์แบบระนาบแนวตั้ง-ตั้ง
2. กรณีสายอากาศส่ง-รับ มีการโพลาไรซ์แบบระนาบแนวนอน-นอน

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองวัดแบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ

ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง	ค่า
ช่วงความถี่	2.4 - 2.5 GHz
จำนวนจุดความถี่	801
ชนิดสายอากาศ	สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริป
การวางสายอากาศของสายอากาศส่ง-รับ	ระนาบตั้ง-ตั้ง และระนาบนอน-นอน
ขนาดของห้อง (กว้าง x ยาว x สูง)	3.40x5.45x3.0 ลูกบาศก์เมตร
เครื่องมือวัด	เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เอกสารนี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการค้า

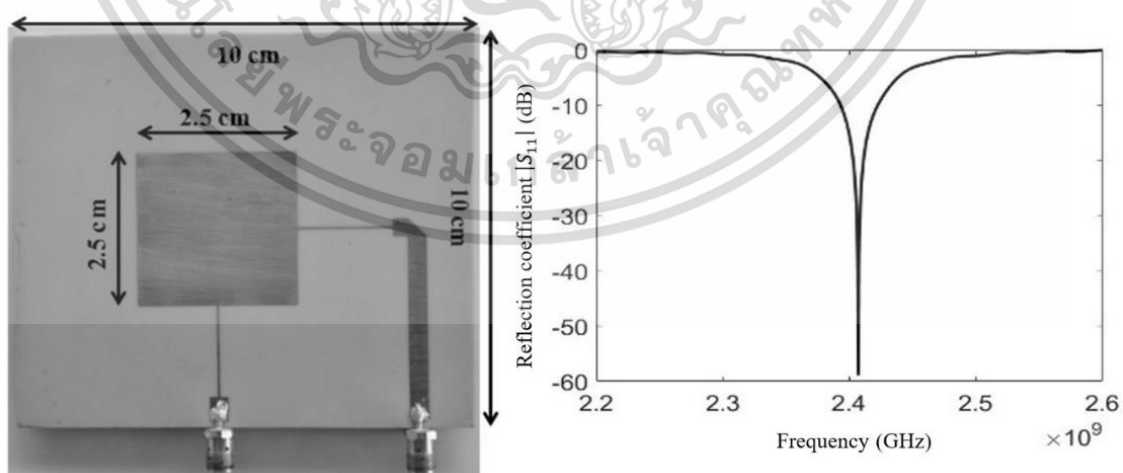
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 เครื่องวิเคราะห์ที่โครงข่ายแบบเวกเตอร์ E5063A [23]

4.2.2 สายอากาศที่ใช้วัดช่องสัญญาณ

ในการทดลองวัดได้ใช้สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริบทำงานย่านความถี่ 2.45 GHz มีขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร วัสดุฐานรองหนา 0.1 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3 สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริบในย่านความถี่ 2.45 GHz ที่ใช้วัดนี้ได้ถูกสร้างขึ้นโดยภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทดลองใช้เป็นทั้งเป็น สายอากาศส่งและสายอากาศรับ



รูปที่ 4.2 ขนาดโครงสร้าง และ $|S_{11}|$ คุณสมบัติของสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ขั้นตอนการวัดช่องสัญญาณ

- ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้
- การกำหนดให้ช่วงความถี่ใช้งานของเครื่องวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์ (VNA) ที่ 2.3 ถึง 2.6 GHz เพื่อให้ครอบคลุมความถี่ที่ต้องการวัด
- กำหนดค่าความละเอียดความถี่ของเครื่อง VNA ไว้ที่ 801 จุด ซึ่งเป็นความละเอียดสูงสุดของเครื่องวัด
- ทำการเชื่อมต่อปลายสายเซมิลิจิด (Semiligit cable) ของพอร์ตหนึ่งต่อเชื่อมต่อแบบเปิดวงจร (Open connector) ตัวเชื่อมต่อแบบลัดวงจร (Short connect) เชื่อมต่อแบบความต้านทาน (Load connector) จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับตัวเชื่อมต่อทีละตัวตามลำดับ สำหรับพอร์ตสองต่อเข้ากับตัวเชื่อมต่อทั้ง 3 ตัวข้างต้นและทำการเปรียบเทียบทีละตัวเช่นเดียวกันกับพอร์ตหนึ่งจากนั้นนำปลายสายเซมิลิจิดทั้งสองเส้นมาเชื่อมต่อกันด้วยตัวเชื่อมต่อแบบ SNR เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนออกไป
- ต่อสายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริปเข้ากับปลายสายเซมิลิจิดทั้งสอง แล้วทำการทดลองวัดตามแบบจำลอง อุปกรณ์การเปรียบเทียบ ที่ตั้งสายอากาศ และสายอากาศที่ใช้ในการวัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 วัดตามแบบจำลอง อุปกรณ์การเปรียบเทียบ ที่ตั้งสายอากาศ และสายอากาศที่ใช้ในการวัดได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4



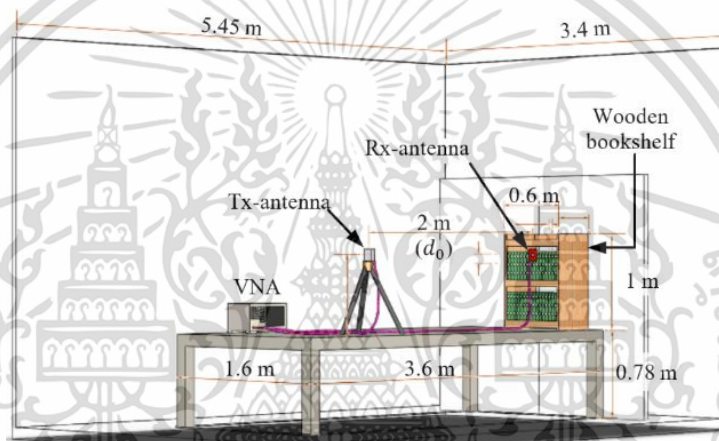
รูปที่ 4.3 อุปกรณ์การเปรียบเทียบที่ตั้งสายอากาศ และสายอากาศที่ใช้ในการวัด

4.3 แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณ

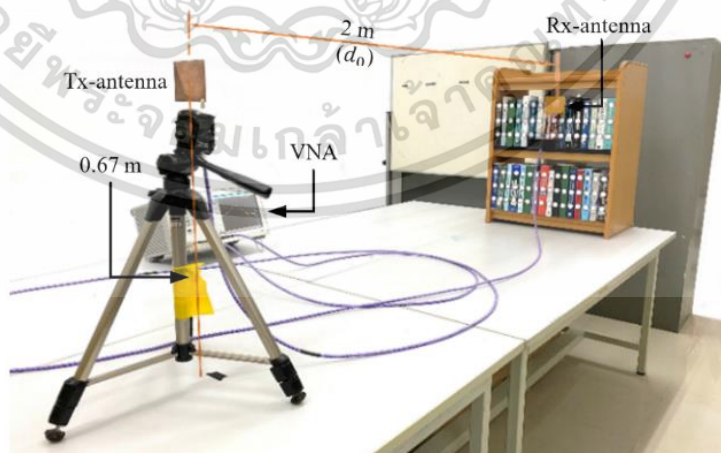
4.3.1 ชั้นวางหนังสือชนิดไม้

แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 และ 4.5 โดยรูปที่ 4.4 แสดงมุมมองด้านบนของห้องที่ทำแบบจำลองในการวัดชั้นวางหนังสือชนิดไม้ และรูปที่ 4.5 แสดงมุมมองด้านหน้าของตำแหน่งสายอากาศส่งบนชั้นวางหนังสือชนิดไม้ โดยได้ทำการวัดในห้องที่มีขนาดกว้าง 3.4 เมตร ยาว 5.45 เมตร และ สูง 3.0 เมตร ทำการวัดช่องสัญญาณบริเวณชั้นวางหนังสือชนิดไม้มีขนาดกว้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.6 เมตร สูง 1.00 เมตร และหนา 0.025 เมตร จำนวน 1 คู่ สายอากาศรับมีตำแหน่งอยู่กึ่งกลางของชั้นวางหนังสือและสูงจากพื้นเป็นระยะ 0.76 เมตร สายอากาศส่งมีความสูง 0.67 เมตร ของแต่ละชั้นของชั้นวางหนังสือดังรูปที่ 4.5 ตำแหน่งการวัดตำแหน่งแรกจะอยู่ด้านขวาบนสุดของชั้นวางหนังสือ โดยห่างจากขอบเป็นระยะ 14 เซนติเมตรแล้วทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศส่ง โดยแต่ละตำแหน่งห่างกันเป็นระยะ 2 เซนติเมตร ไปจนถึงตำแหน่งสุดท้ายในการวัดได้ใช้สายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับ และทำการวัด 2 กรณี เพื่อเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะนำมาได้มาพิจารณาทำแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถึการจางหายหลายวิถึ และหาแบบจำลองสถิติที่เหมาะสมต่อช่องสัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.4 มุมมองด้านบนของแบบจำลองที่ใช้วัดชั้นวางหนังสือชนิดไม้

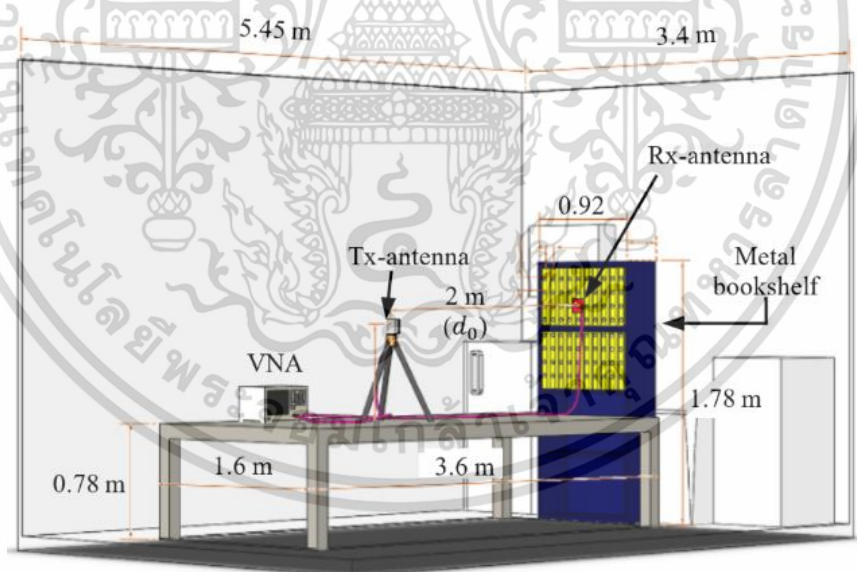


รูปที่ 4.5 มุมมองด้านหน้าของตำแหน่งสายอากาศบนชั้นวางหนังสือชนิดไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

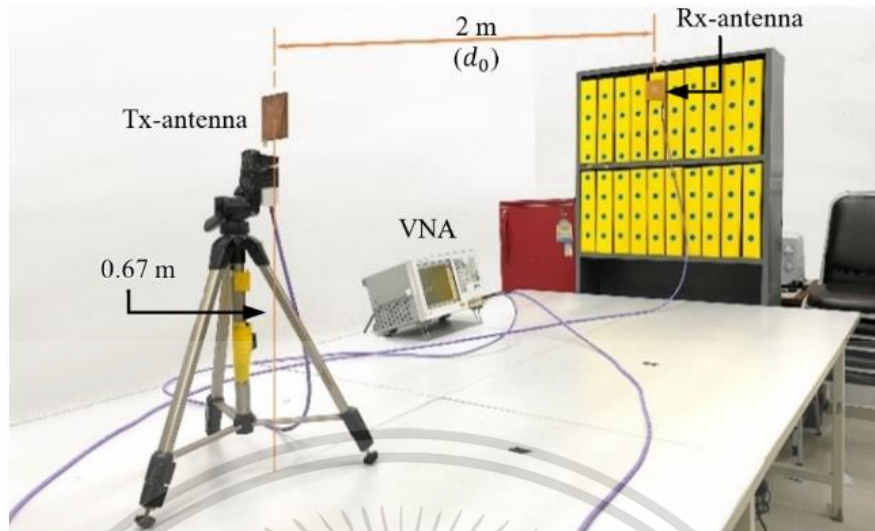
4.3.2 ชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ

แบบจำลองการวัดช่องสัญญาณได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.6 และ 4.7 โดยรูปที่ 4.6 แสดงมุมมองด้านบนของห้องที่ทำแบบจำลองในการวัดชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ และรูปที่ 4.7 แสดงมุมมองด้านหน้าของตำแหน่งสายอากาศบนชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ โดยได้ทำการวัดในห้องที่มีขนาดกว้าง 3.40 เมตร ยาว 5.45 เมตร และ สูง 3.0 เมตร ทำการวัดช่องสัญญาณบริเวณชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ มีขนาดกว้าง 0.92 เมตร สูง 1.78 เมตร และหนา 0.028 เมตร จำนวน 1 คู่ สายอากาศรับมีตำแหน่งอยู่กึ่งกลางของชั้นวางหนังสือและสูงจากพื้นเป็นระยะ 0.76 เมตรสายอากาศส่งมีความสูง 0.67 เมตรของแต่ละชั้นของชั้นวางหนังสือดังรูปที่ 4.7 ตำแหน่งการวัดตำแหน่งแรกจะอยู่ด้านขวาบนสุดของชั้นวางหนังสือโดยห่างจากขอบเป็นระยะ 16 เซนติเมตร แล้วทำการเปลี่ยนตำแหน่งของสายอากาศส่งโดยแต่ละตำแหน่งห่างกันเป็นระยะ 2 เซนติเมตรไปจนถึงตำแหน่งสุดท้าย ในการวัดได้ใช้สายอากาศแบบไมโครสตริปเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับ และทำการวัด 2 กรณี เพื่อเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณ ข้อมูลกรณี เพื่อเปรียบเทียบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อช่องสัญญาณ ข้อมูลที่ได้จากการวัดจะนำมาได้มาพิจารณาทำแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี การจางหายหลายวิถี และหาแบบจำลองสถิติที่เหมาะสมต่อช่องสัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.6 มุมมองด้านบนของแบบจำลองที่ใช้วัดชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 มุมมองด้านหน้าของตำแหน่งสายอากาศบนชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ

4.4 บทสรุป

ขั้นตอนการศึกษาทดลองการวัดช่องสัญญาณการสูญเสียเชิงวิธีการแพร่กระจายคลื่นของระบบตัวต้นด้วยความถี่วิทยุหรือ RFID นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพิจารณากำหนดให้แบบแผนการทดลองวัดโดยต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ สถานที่แวดล้อมที่ทำการทดลองวัด และการติดตั้งสายอากาศ สภาพแวดล้อมรอบข้างต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชนิดโลหะมีผลกระทบต่อพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองรวมถึงความถูกต้องและความแม่นยำในการใช้เครื่องมือวัดด้วยเหตุผลดังที่ได้กล่าวมานี้ จึงได้แสดงขั้นตอนการทดลองอย่างละเอียดไว้ในบทนี้ เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด นำผลที่ได้จากการทดลอง และการประเมินผลเปรียบเทียบแสดงไว้ในบทที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการทดลองวิจัย

5.1 กล่าวนำ

ในการวัดและบันทึกช่องสัญญาณการสูญเสียเชิงวิถีการแพร่กระจายคลื่นของ RFID ด้วยชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชนิดโลหะเป็นข้อมูลที่ได้จากการวัดช่องสัญญาณการส่งผ่านและได้มาประเมินผลความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยจำลองการสูญเสียเชิงวิถีโดยใช้แบบจำลองรีเกรสชันและการจำลองการจางหายหลายวิถีโดยใช้การจำลองในเชิงสถิติ โดยฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) และนำมาทดสอบไคกำลังสอง (Chi Square Test) ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3

5.2 ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

5.2.1 กรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้

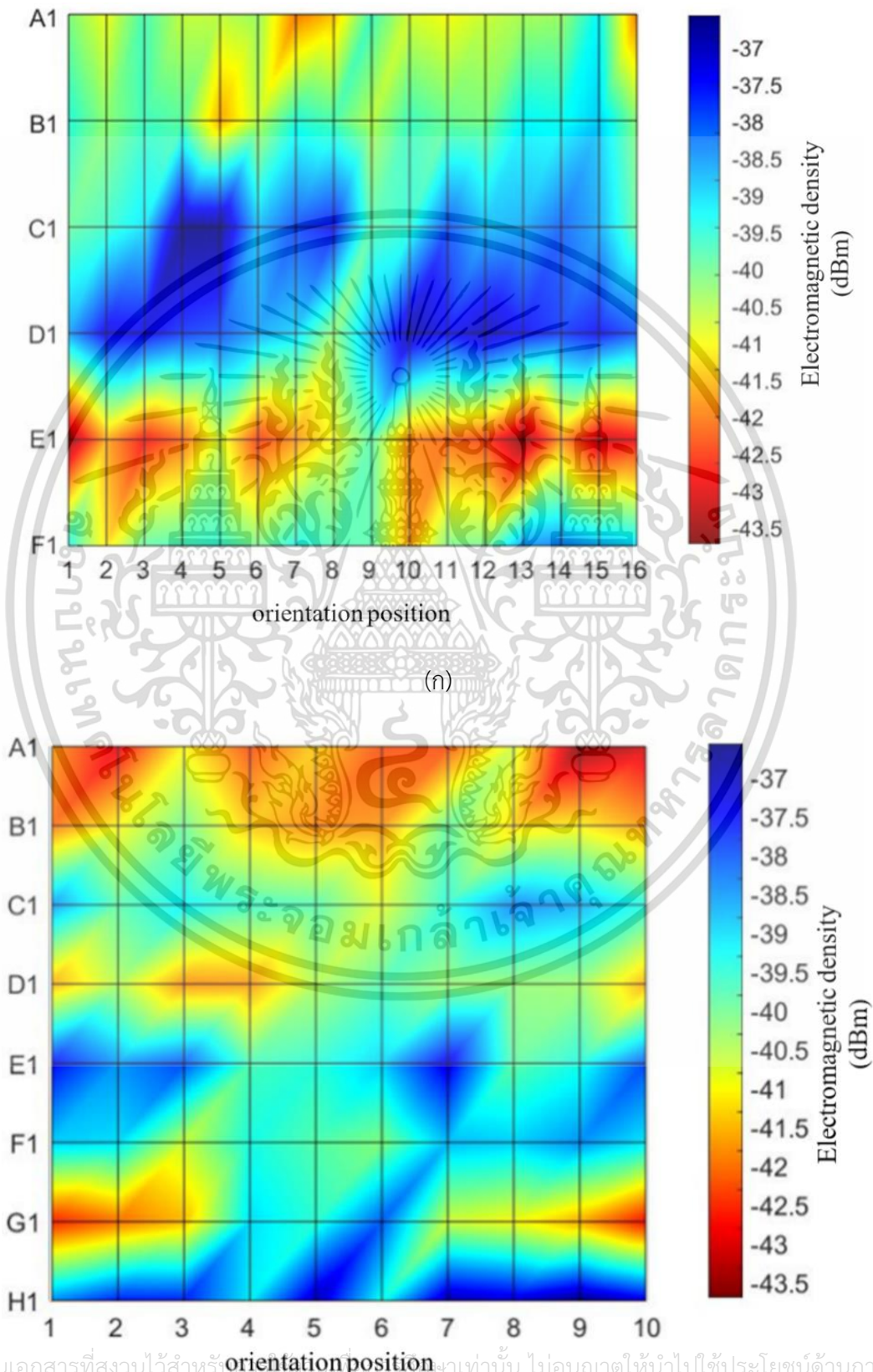
ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสัญญาณที่ได้รับจากช่องสัญญาณบนชั้นวางหนังสือชนิดไม้ได้แสดงในรูปที่ 5.1 (ก) ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงลักษณะการแพร่กระจายของสัญญาณบนชั้นวางหนังสือชนิดไม้ จะเห็นได้ว่าในแถว A และ B จะมีความหนาแน่นของสัญญาณอยู่ในระดับปานกลางคือระหว่าง -39.5 dBm ถึง -41 dBm เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีระดับความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับต่างกันทำให้ระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับมากกว่าบริเวณตรงกลางของชั้นวางหนังสือ ในขณะที่เดียวกันบริเวณแถว C และ D จะมีความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดคือระหว่าง -37 dBm ถึง -39 dBm เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีระดับความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับอยู่ในระดับเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาบริเวณแถว E และ F พบว่าเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำที่สุดคือ ระหว่าง -41.5 dBm ถึง -43.5 dBm เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีระดับความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับต่างกันและมีการสะท้อนของสัญญาณจากโต๊ะไม้ดังที่แสดงในแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองวัดในรูปที่ 4.4

5.2.2 กรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ

ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสัญญาณที่ได้รับจากช่องสัญญาณบนชั้นวางหนังสือชนิดไม้ได้แสดงในรูปที่ 5.1 (ข) ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงลักษณะการแพร่กระจายของสัญญาณบนชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ จะเห็นได้ว่าในแถว A และ B จะมีความหนาแน่นของสัญญาณอยู่ในระดับต่ำคือระหว่าง -41.5 dBm ถึง -43.5 dBm เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีระดับความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับต่างกันและมีการสะท้อนของสัญญาณกับชั้นวางหนังสือ ในขณะที่เดียวกันบริเวณแถว C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ H จะสังเกตได้ว่าการรบกวนจากการสะท้อนของสัญญาณสูง ส่งผลให้ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดมีลักษณะกระจายตัวระหว่าง -37 dBm ถึง -41 dBm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข)

รูปที่ 5.1 ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของชั้นวางหนังสือ (ก) กรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้ และ (ข) กรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ

5.3 แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี

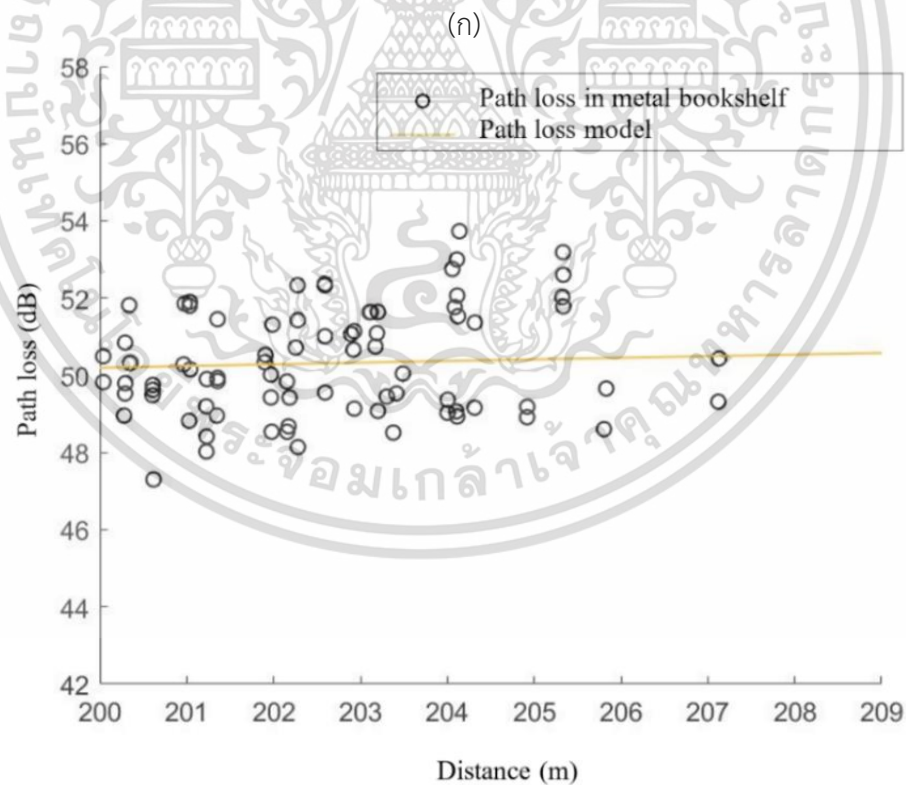
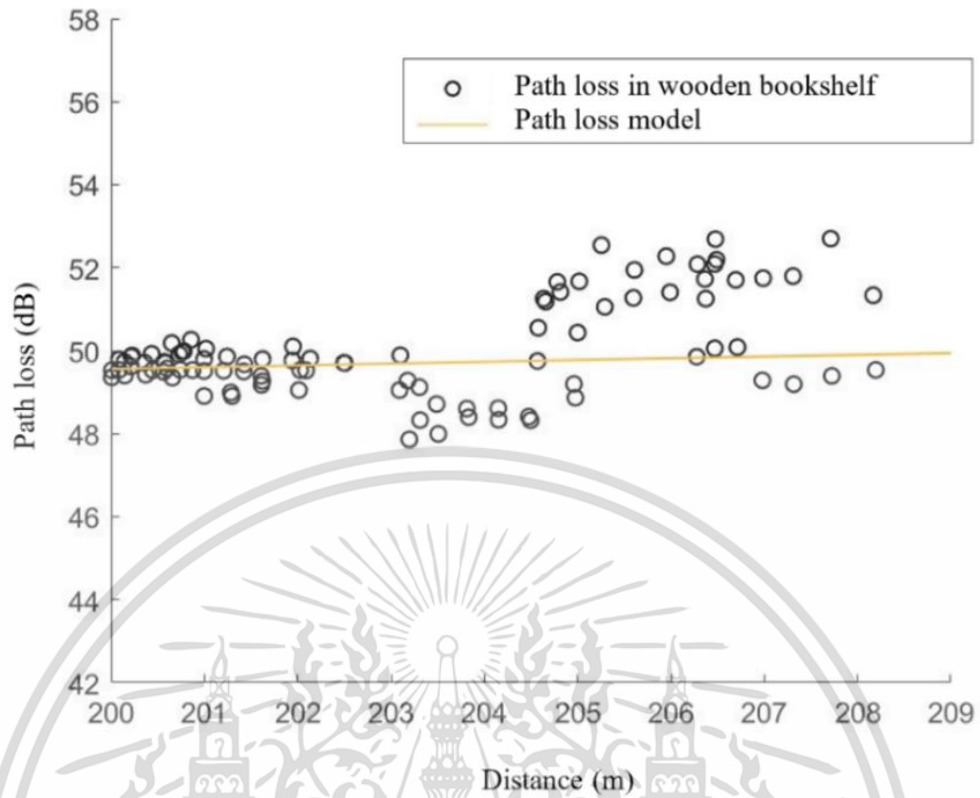
5.3.1 กรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้

การสูญเสียเชิงวิถีเปรียบเทียบกับแบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้นกรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 (ก) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามระยะทาง จากผลการทดลองวัด การสูญเสียเชิงวิถีกรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้มีค่าระหว่าง 47.50 dB ถึง 52.4dB ซึ่งสังเกตได้ว่าการสูญเสียเชิงกรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้มีการกระจายตัวน้อยกว่ากรณีชั้นวางหนังสือประเภทโลหะ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการสะท้อนของชั้นวางหนังสือน้อยกว่า และสามารถหาค่าเฉลี่ยของการสูญเสียเชิงวิถีได้จากฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ซึ่งมีค่าเท่ากับอยู่ที่ 49.8 dB ดังที่แสดงในรูปที่ 5.3

5.3.2 กรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ

การสูญเสียเชิงวิถีเปรียบเทียบกับแบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้นกรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 (ข) คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามระยะทาง จากผลการทดลองวัด การสูญเสียเชิงวิถีกรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะมีค่าระหว่าง 47.25 dB ถึง 53.9dB ซึ่งสังเกตได้ว่าการสูญเสียเชิงกรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะมีการกระจายตัวมากกว่ากรณีชั้นวางหนังสือประเภทไม้ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการสะท้อนของชั้นวางหนังสือมากกว่า และสามารถหาค่าเฉลี่ยของการสูญเสียเชิงวิถีได้จากฟังก์ชันการแจกแจงสะสม ซึ่งมีค่าเท่ากับอยู่ที่ 50.7 dB ดังที่แสดงในรูปที่ 5.3

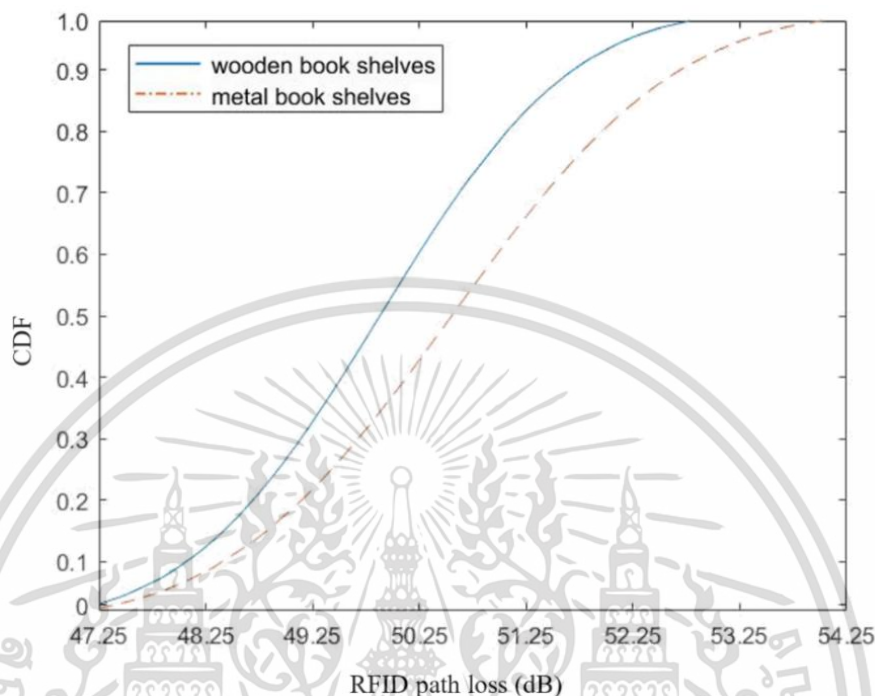
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีและผลการทดลอง วัด (ก) กรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้ และ (ข) กรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของการสูญเสียเชิงวิถีระหว่างกรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้และกรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ

5.4 บทสรุป

จากผลการวิจัยในการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองในเชิงสถิติ โดยได้นำแบบจำลองต่าง ๆ มาทดสอบ เพื่อหาชนิดของแบบจำลองที่เหมาะสม โดยแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีการแพร่กระจายคลื่นของ RFID ด้วยชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชนิดโลหะ ได้ใช้การจำลองแบบรีเกรสชันเชิงเส้นและแบบจำลองการจางหายหลายวิธีใช้แบบจำลองเชิงสถิติมาเปรียบเทียบ ซึ่งประกอบไปด้วยฟังก์ชันความหนาแน่นของฟังก์ชันการแจกแจงสะสม นอกจากนี้ยังนำ การจางหายหลายวิธีมาวิเคราะห์ โดยใช้วิธีการทดสอบด้วยเลขชี้กำลังสอง เพื่อหาแบบจำลองเชิงสถิติที่เหมาะสมที่สุด เพื่อที่จะนำมาใช้ในการออกแบบระบบการสื่อสาร RFID ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันมีการนำเอาเทคโนโลยีการสื่อสารแบบระบุตัวตนด้วยความถี่วิทยุ มาใช้งานอย่างแพร่หลายและในอนาคตเทคโนโลยีนี้จะเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของผู้คนอย่างมากด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาวิเคราะห์การสูญเสียในการแพร่กระจายของสัญญาณการสื่อสารไร้สายแบบ RFID ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการศึกษาการวัดเกี่ยวกับการสูญเสียเชิงวิธีการแพร่กระจายคลื่นของ RFID ในห้องสมุดด้วยชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชนิดโลหะ โดยได้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์เป็นเครื่องมือหลักในการวัดช่องสัญญาณถ่ายโอนและบันทึกผลและได้ใช้สายอากาศแผ่นแบบไมโครสตริบเป็นสายอากาศส่งและสายอากาศรับ สำหรับการทดลองวัดภายในอาคารเป็นบริเวณชั้นวางหนังสือชนิดไม้และชั้นวางหนังสือชนิดโลหะจากการทดลองวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

6.2 สรุปผลความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากผลการทดลองวิจัยเห็นได้ว่า ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสัญญาณที่ได้รับได้จากช่องสัญญาณส่งผ่านบนชั้นวางหนังสือชนิดไม้และโลหะได้รับผลกระทบอย่างมีนัยยะสำคัญจากชนิดของชั้นวางหนังสือ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือชั้นวางหนังสือชนิดไม้มีการสะท้อนน้อยกว่าของสัญญาณจากชั้นวางหนังสือแบบชนิดโลหะ ส่งผลให้รูปแบบการแพร่กระจายของความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีรูปแบบที่ชัดเจน คือในบริเวณที่ระดับความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับเท่ากันจะมีความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงที่สุดกว่าบริเวณที่ระดับความสูงของสายอากาศส่งและสายอากาศรับแตกต่างกัน และจะสังเกตได้ว่าบริเวณที่อยู่ใกล้พื้นจะได้รับผลกระทบจากการสะท้อนของสัญญาณมาหักล้าง ทำให้ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าบริเวณอื่น ๆ

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาในกรณีของชั้นวางหนังสือชนิดโลหะมีรูปแบบการแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจัดกระจายอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเกิดการสะท้อนของสัญญาณจากชั้นวางหนังสือ ทำให้ความหนาแน่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกหักล้างและมีรูปแบบที่กระจัดกระจาย

สรุปได้ว่า ในระบบการสื่อสารแบบ RFID ที่ใช้ในห้องสมุด ควรจะใช้ชั้นวางหนังสือชนิดไม้ เนื่องจากมีการสูญเสียของสัญญาณต่ำกว่าดังผลการทดลองวิจัยที่ได้นำเสนอ

6.3 สรุปผลของแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสูญเสียเชิงวิถีในการส่งผ่านการสื่อสารไร้สายแบบ RFID ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้นกรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้และโลหะได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 (ก) และ 5.2 (ข) เพิ่มวิเคราะห์คุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามระยะทาง จากผลการทดลองวัด การสูญเสียเชิงวิถีกรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้มีค่าระหว่าง 47.50 dB ถึง 52.4dB และการสูญเสียเชิงวิถีกรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะมีค่าระหว่าง 47.25 dB ถึง 53.9dB ซึ่งสังเกตได้ว่าการสูญเสียเชิงกรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้มีค่าการสูญเสียเชิงวิถีต่ำกว่ากรณีชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ และเมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัวของการสูญเสียเชิงวิถีจากการวิเคราะห์ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม พบว่ากรณีชั้นวางหนังสือชนิดไม้มีการกระจายตัวต่ำกว่ากรณีชนิดโลหะ เนื่องจากได้รับผลกระทบจากการสะท้อนของชั้นวางหนังสือน้อยกว่า และสามารถหาค่าเฉลี่ยของการสูญเสียเชิงวิถีได้จากฟังก์ชันการแจกแจงสะสม โดยมีค่าเฉลี่ยของการสูญเสียเชิงวิถีเท่ากับ 49.8 dB และ 50.7 dB ตามลำดับ

6.4 สรุปผลของแบบจำลองการจางหายหลายวิถี

จากการคำนวณหาค่าไคกำลังสอง (Chi Square Test) ที่มีค่าน้อยสุด การกระจายแบบล็อกปกติ เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการกระจายแบบล็อกปกติ สามารถหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ย จากการวิจัยพบว่ามีค่าเฉลี่ยเป็น 0 ซึ่งสอดคล้องกับการทำแบบจำลองรีเกรสชันเชิงเส้น นอกจากนี้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการกระจายแบบล็อกปกติ (Lognormal Distribution) มีค่าสอดคล้องกับการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการจางหายสัญญาณหลายวิถี

ตารางที่ 6.1 แบบจำลองการจางหายหลายวิถี

การโพลาริซ์	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
	ชั้นวางหนังสือชนิดไม้	ชั้นวางหนังสือชนิดโลหะ
แนวตั้ง-ตั้ง	1.47	2.21
แนวนอน-นอน	2.23	2.20

6.5 ข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถีและการจางหายหลายวิถีโดยได้พิจารณาการสูญเสียของช่องสัญญาณการแพร่กระจายคลื่นไร้สายแบบ REID ที่มีชั้นวางหนังสือภายใต้สภาวะแวดล้อมภายในห้องสมุด เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สอดคล้องกับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองดังกล่าวยังไม่ได้ครอบคลุมการใช้งานจริงทั้งหมด ดังนั้นควรพิจารณาถึงปัจจัยในหลาย ๆ ด้านที่ส่งผลต่อข้อสังเกต เช่น สายอากาศที่นำมาใช้จริง ผลกระทบของหนังสือ รวมทั้งสิ่งแวดล้อมรอบข้างก็ส่งผลกระทบต่อข้อสังเกตได้ เช่น วัสดุอุปกรณ์ที่อยู่ในบริเวณการใช้งานตลอดจนการรบกวนจากการสื่อสารไร้สายแบบอื่นๆ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ทำให้เกิดการสูญเสียในการส่งผ่านไร้สายแบบ RFID ทั้งสิ้น จึงมีความจำเป็นที่ศึกษาและทำการพิจารณาข้อจำกัดต่อไป



รูปที่ 6.1 การประยุกต์ใช้ RFID ในระบบไร้สายทางการแพทย์ [7]

ท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าข้อมูล กระบวนการและเทคนิคที่ได้นำเสนอไปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็ประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้า เพื่อพัฒนาระบบการสื่อสารแบบ RFID ต่อไปในอนาคตข้างหน้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Wyne, T. Santos, F. Tufvesson, and A. F. Molisch, "Channel measurements of an indoor office scenario for wireless sensor applications," IEEE Global Telecommunications Conference 2007 (GLOBALCOM 2007), pp. 3831 - 3836, 26 - 30 Nov., 2007.
- [2] R. Szumy, K. Kurek, S. Kozlowski, and J. Modelski, "Measurements and analysis of the propagation channel for various indoor environments," The International Conference on "Computer as a Tool" 2007 (EUROCON 2007), pp. 990 - 996, 9- 12 Sept. 2007.
- [3] D. Smith, L. Hanlen, D. Miniutti, J. Ahang, D. Rodda, and B. Gilbert, "Statistical characterization of the dynamic narrowband body area channel," Applied Science on Biomedical and Communication Technologies 2008 (ISABEL '08), pp. 1- 5, 25 - 28 Oct. 2008.
- [4] P. J. Sweeney, RFID For Dummies. Wiley, 2005.
- [5] S. Ahson and M. Llyas, RFID Handbook: Applications Technology Security and Privacy. CRC Press, 2008.
- [6] ศูนย์พัฒนาธุรกิจออกแบบวงจรรวม, รู้จักกับเทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2548.
- [7] K. Coyle, "Management of RFIS in libraries," The Journal of Academic Librarianship, vol. 31, pp. 486 - 489, Sept. 2005.
- [8] Howard and M. Anderson, "RFID technology in the library environment," Georgia Library Quarterly Spring, pp. 17 - 22, 2007.
- [9] M. K. Galhotra and A. M. Galhotra, "Application of Radio Frequency Identification Technology in Libraries," Journal of Library & Information Technology, vol. 29, pp. 59 - 64, May. 2009.
- [10] M. S. Selamat and B. Y. Majilis, "Challenges in Implementing RFID Tag in a Conventional Library," 2006 International Conference on Semiconductor Electronic (ICSE'06), pp. 258 - 262, Dec. 2006.
- [11] T. S. Rappaport, Wireless Communications: Principles and Practice. Prentice Hall PTR, 2nd Edition, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Papoulis and S. U. Pillai, Probability Random variances and stochastic processes. McGrawHill, 2002.
- [13] R. D. Yates and D. J. Goodman, Probability and Stochastic Processes. John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [14] E. Kreyszig, Advance Engineering Mathematics. John Wiley & Sons Inc. 7th Edition, 1993.
- [15] ผศ.ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ และคณะ, ระเบียบข้อบังคับด้วยคลื่นวิทยุ. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2552.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวิทยานิพนธ์

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

- [1] J. Supramongkonset and S. Promwong, "Quantitative Experimental Evaluation of RFID Propagation Loss with Wooden and Metal Bookshelves", JMM, vol. 19, no. 06, pp. 1481–1494, Oct. 2023.

บทความที่ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการนานาชาติ

- [1] J. Supramongkonset, K. Rattasuwan and S. Promwong, "Evaluation of RFID Propagation Channels with Wooden and Metal Bookshelves Based on Measurement Data," 2023 9th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), Vientiane, Laos, 2023, pp. 67-70, doi: 10.1109/ICEAST58324.2023.10157612.
- [2] J. Supramongkonset and S. Promwong, "Path Loss Analysis of RFID Channels Measurement in Library with Metal Bookshelves," 2023 9th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST), Vientiane, Laos, 2023, pp. 47-50, doi: 10.1109/ICEAST58324.2023.10157422.

Editor-in-Chief: Pavlos Lazaridis

ISSN 1550-4646

Journal of Mobile Multimedia

JMM



River Publishers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantitative Experimental Evaluation of RFID Propagation Loss with Wooden and Metal Bookshelves

Jatuporn Supramongkonset and Sathaporn Promwong*

*School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand*

E-mail: 63601233@kmitl.ac.th; sathaporn.pr@kmitl.ac.th

** Corresponding Author*

Received 16 June 2023; Accepted 12 August 2023;

Publication 13 October 2023

Abstract

Radio frequency identification (RFID) is wireless multimedia applications for bookshelves experimental system to replace the barcodes media technology. The RFID propagation channel characteristics and environment effect should be known. In this study to evaluate the RFID propagation loss with wooden and metal bookshelves based on data of measurement. Experimental study evaluation of RFID multimedia system with bookshelves is using vector network analyzer (VNA) and the microstrip patch antennas of transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas at a frequency range from 2.4 GHz to 2.5 GHz. The results of experiment are considering the path loss, received signal strength (RSS), and comparison the path loss differences with cumulative distribution function (CDF) to evaluated, respectively. In this research work are necessary for RFID antenna design and evaluate the RFID multimedia systems.

Keywords: RFID, RFID multimedia system, RFID measurement, path loss model, microstrip antennas.

Journal of Mobile Multimedia, Vol. 19_6, 1481–1494.

doi: 10.13052/jmm1550-4646.1966

© 2023 River Publishers

1 Introduction

RFID (Radio Frequency Identification) is a wireless multimedia technology that has gained significant prominence recently as a versatile wireless solution that has permeated various aspects of our daily lives. Originally evolving from traditional barcode systems, RFID has surpassed its predecessors in performance and functionality. While RFID has demonstrated superior capabilities, it has not entirely replaced barcode systems due to cost considerations. Nevertheless, RFID finds extensive use in diverse applications, such as shopping malls, inventory management, logistics, supply chain operations, smart cards, and libraries [1–7].

The advantages of RFID multimedia system very good ability to automatically identify and track people or objects using radio waves. This groundbreaking capability has revolutionized several industries by enabling efficient and seamless operations. RFID systems allow for quick and accurate identification, leading to enhanced reliability and productivity. For example, in libraries, RFID technology has streamlined the book recovery process, enabling quick and efficient management of books within the library premises. The durability of RFID tags ensures their longevity, contributing to long-term operational efficiency [8–13].

RFID multimedia technology operate across different frequency bands to cater to diverse requirements. These frequency bands include UHF (868–915 MHz), HF (13.56 MHz), LF (125–134.2 kHz), and radio frequency (2.45 GHz). The wide frequency range enables RFID systems to handle large volumes of data swiftly and effectively. This capability is crucial for high-speed data transfer applications, such as real-time inventory management and supply chain optimization. Furthermore, RFID multimedia systems offer the advantage of non-line-of-sight communications. RFID tags can be read and identified if they fall within the radio frequency range, allowing for seamless tracking and monitoring in various scenarios [14–19].

Understanding the propagation characteristics of RFID multimedia channels is essential for optimizing system performance. These channels exhibit intriguing phenomena, including reflections, diffraction, and scattering. Various channel models and measurement techniques have been developed to analyze and model these characteristics. These models and measurements help comprehend the impact of path loss on the overall system performance [20].

This research paper focuses on investigating and comparing path loss in two distinct types of bookshelves: wooden and metal. The study involves

conducting meticulous indoor channel measurements, which provide valuable insights into the propagation loss of RFID propagation within indoor environments. The research aims to enhance our understanding of signal propagation dynamics in RFID multimedia systems by examining the effects of different bookshelves materials on path loss. Additionally, the study evaluates the resultant effects on system performance, shedding light on the complexities associated with path loss in RFID multimedia applications [21].

To achieve this, path loss measurements were conducted using a Vector Network Analyzer (VNA) operating within the frequency range of 2.3 GHz to 2.6 GHz, with a center frequency of 2.45 GHz. The collected data were analyzed using contour methods and cumulative distribution function (CDF) methods, which provide a comprehensive understanding of the relationship between channel function and path loss.

This research paper contributes significantly to the field of RFID multimedia technology by investigating path loss variations in different bookshelves materials and exploring the complexities of indoor signal propagation in RFID multimedia systems. The findings of this study serve as valuable inputs for developing efficient and optimized RFID multimedia applications, ultimately enhancing the performance and reliability of wireless identification and tracking systems in various domains. The paper is structured coherently, with Section 2 outlining the channel modeling approach, Section 3 presenting the measurement methodology and results, Section 4 delving into the indoor signal propagation analysis, and Section 5 offers conclusive insights derived from the study.

2 RFID Path Loss Model

The RFID propagation channel effects many factors on communication systems. The separate between transmitter and receiver antennas is main variable [20]. Therefore, it is necessary to understand the characteristics of propagation channels and RFID path loss. This path loss can characterize by using statistical model.

2.1 Path Loss

The path loss analysis of RFID propagation channel due to multipath which affects many factors on environment fading. The main variables are separate between the transmitter and receiver. The equation of path loss model can be

1484 *J. Supramongkonset and S. Promwong*

written as [21]

$$PL[dB] = 10 \log \left(\frac{P_t(f)}{P_r(f)} \right) = -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 \times d^2} \right] \quad (1)$$

where $P_t(f)$ is the power transmitter, $P_r(f)$ is the power receiver, d the separate between the transmitter and the receiver, λ is wavelength ($\lambda = \frac{c}{f}$), c is called the phase speed (3×10^8 m/s), f is wave frequency.

2.2 RFID Path Loss Model

RFID channel measurement show that average received signal power decreases logarithmically with distance. RFID path loss model mentions to any method to modeling the association among one or more variables; therefore, the model depends linearly on the unknown parameters of data estimated. Most commonly, path loss model of RFID can be written as [22]

$$\overline{PL} = (d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2)$$

where d_0 is the reference distance set in measurement, d is the distance between transmitter antenna and receiver antenna, n is the exponent path loss which indicates the path loss rate increases with d . The n parameters and $\overline{PL}(d_0)$ are evaluated by using least square method of linear regression model between parameter \overline{PL} and $\log(d)$ with $d_0 = 2$ m.

2.3 RFID Statistical Model

For RFID path loss characterized parameters X_σ in the terms of the CDF. The CDF of X_σ is respectively expressed as [23]

$$F_{X_\sigma}(x) = P\{X_\sigma \leq x\} \quad (3)$$

where X_σ is the path loss in dB, σ is standard deviation of path loss variable.

3 Experimental System Model

In this study, to conducted a comprehensive investigation of measure and estimate the path loss in RFID systems designed for operation within wooden and metal bookshelves. The objective was to gain for understanding the characteristics propagation loss and optimize the performance of RFID multimedia technology in real-world scenarios.

Quantitative Experimental Evaluation of RFID Propagation Loss 1485

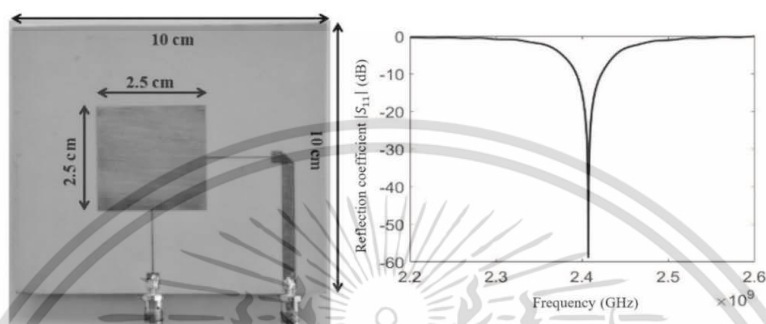


Figure 1 The structure and characteristic of microstrip patch antenna.

Table 1 Parameters of experiments

Parameters	Values
Range of Frequency	2.4 GHz to 2.5 GHz
Frequency point numbers	801
Height of Tx-antenna	0.67 m
Height of Rx-antenna	(Rx-antenna orientation with experiment positions)
Measurement positions	96 positions for wooden bookshelves and 80 positions for metal bookshelves
Type of antennas	Microstrip patch antennas
Transmitter power	1 W

To assess the path loss accurately, using a VNA to be measured and recorder the channel response within a frequency range of 2.4 GHz to 2.5 GHz, with the frequency center is 2.45 GHz. The transmission (Tx) and reception (Rx) antennas utilized microstrip patch antenna technology, which has proven efficient and reliable in RFID applications. The specific geometry and dimensions of the antennas can be found in Figure 1, providing a visual representation of their construction.

Establish a comprehensive to understanding of the data measured, to classify the RFID system designs into five distinct tiers. Each tier presented unique advantages and disadvantages, primarily relating to power consumption and availability. Notably, we observed that redundant or duplicated designs were often implemented to address system availability and safety concerns. However, such redundancy inevitably leads to increased power consumption, which must be carefully considered in practical RFID deployments. Figure 2 illustrates the different system conditions observed based on the measured data, further emphasizing the significance of our findings.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1486 *J. Supramongkonset and S. Promwong*

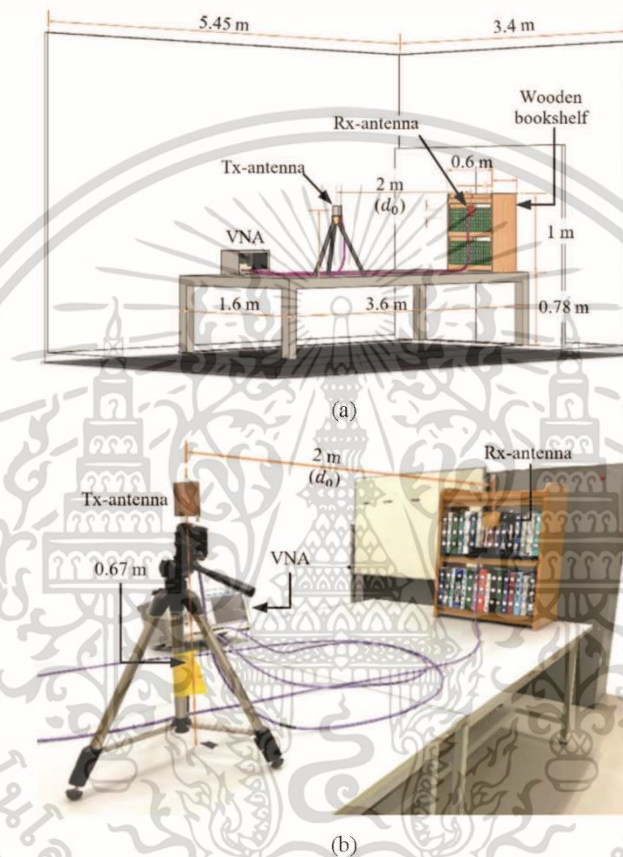


Figure 2 RFID propagation loss measurement with wooden bookshelves: (a) experimental model. (b) experimental setup.

The experimental study was conducted within the well-equipped laboratory facilities at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), School of Engineering in Bangkok, Thailand. To meticulously designed and implemented wooden and metal bookshelves models, as depicted in Figures 2(a) and 3(a), respectively. In these models, the Tx antenna, representing the reader, was positioned 2 meters away from the bookshelves and 0.67 meters above the table surface. The Rx antenna, symbolizing the RFID tag, was strategically placed in front of the bookshelves,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantitative Experimental Evaluation of RFID Propagation Loss 1487

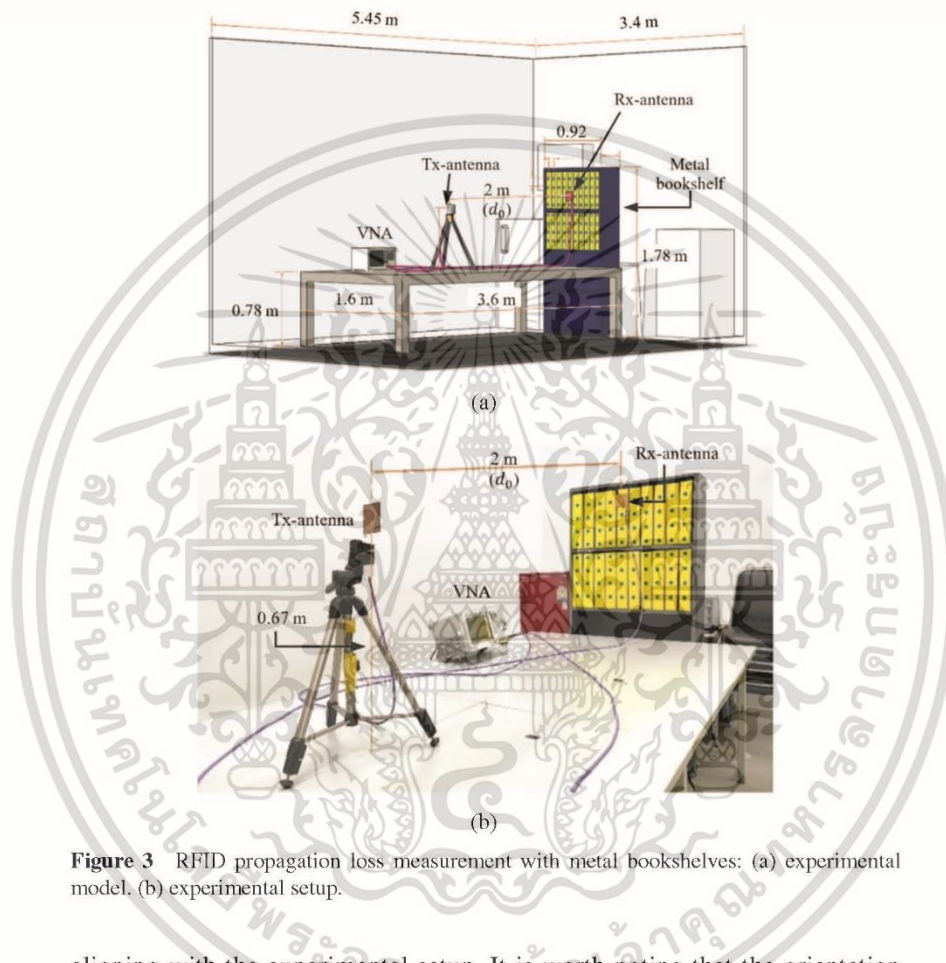


Figure 3 RFID propagation loss measurement with metal bookshelves: (a) experimental model, (b) experimental setup.

aligning with the experimental setup. It is worth noting that the orientation of the Rx antenna was crucial in ensuring accurate measurements of the electromagnetic field's intensity.

To ensure robust and comprehensive data collection, we meticulously measured the electromagnetic density at multiple positions within the bookshelves. In the case of the wooden bookshelve, a total of 96 positions were sampled, whereas 80 positions were recorded for the metal bookshelves. This extensive measurement setup allowed us to capture the intricate variations in signal propagation within different bookshelves materials.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1488 *J. Supramongkonset and S. Promwong*

Figures 2(b) and 3(b) provide visual illustrations of the RFID propagation loss measurements conducted within the wooden and metal bookshelves for a clearer representation of the experimental setup. These setups showcase the precise positioning of the antennas, the bookshelf models, and the overall experimental environment.

4 Experiment Results

This session, the characterized of RFID propagation loss from experimental data. First, electromagnetic density contour between wooden bookshelf and metal bookshelf can show as follow in Figures 4 and 5, respectively. Show in the wooden bookshelf has better received signal than metal bookshelves. Next, the path loss of RFID propagation between wooden bookshelf and metal bookshelves are show in Figures 6 and 7. The wooden bookshelf has less than metal bookshelves. The RFID average path loss in wooden bookshelf is 49.97 dB and the RFID average path loss in metal bookshelf is 50.05 dB. Next, CDF comparison of RFID propagation loss between wooden bookshelf and metal bookshelf can show as follow in Figure 8 form this experimental results with CDF of wooden bookshelf less than metal bookshelf is 27.26%.

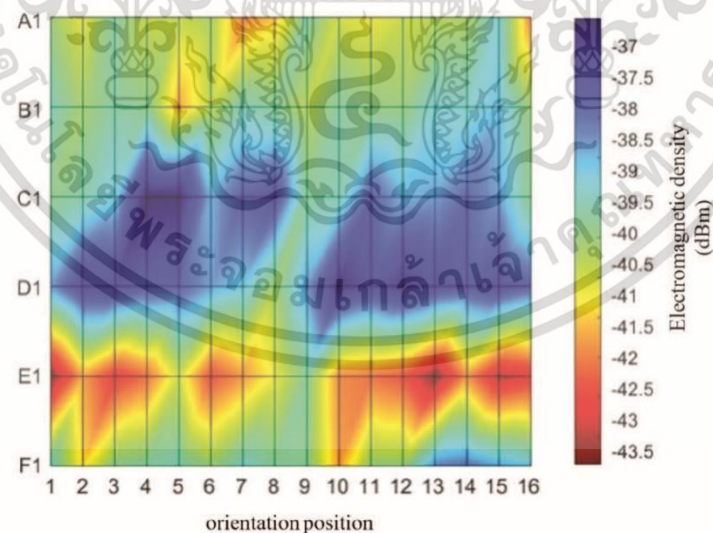


Figure 4 RFID electromagnetic density contour of wooden bookshelves case.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Quantitative Experimental Evaluation of RFID Propagation Loss 1489

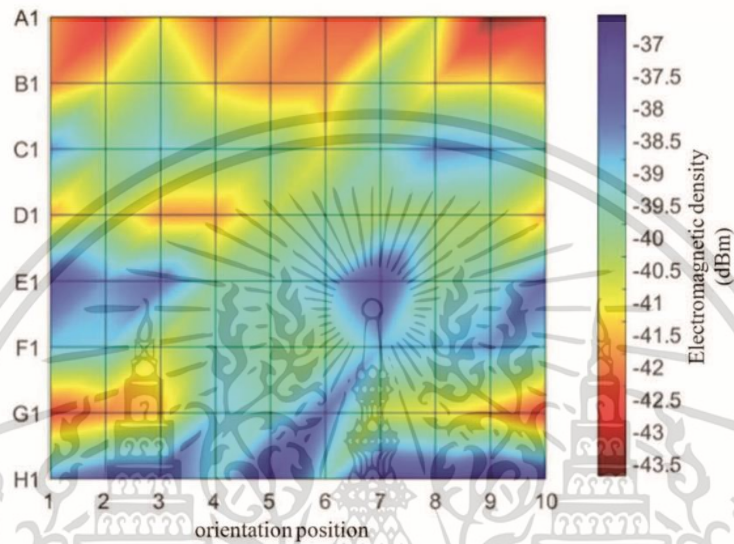


Figure 5 RFID electromagnetic density contour of metal bookshelves case.

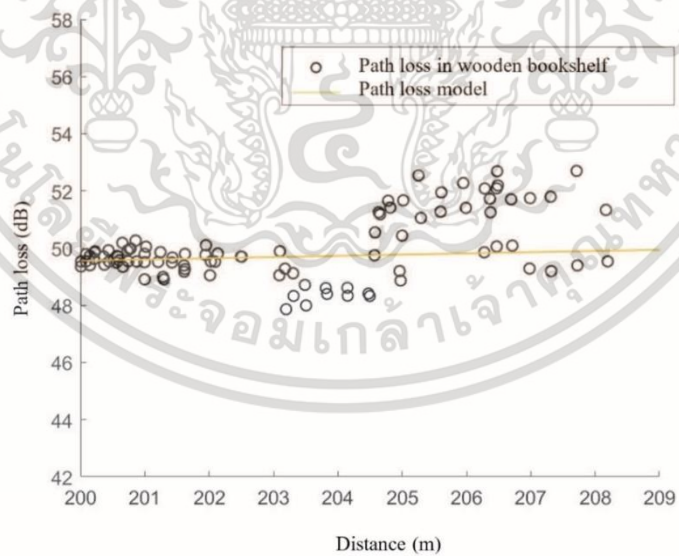


Figure 6 Path loss of RFID propagation of wooden bookshelves case.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1490 J. Supramongkonset and S. Promwong

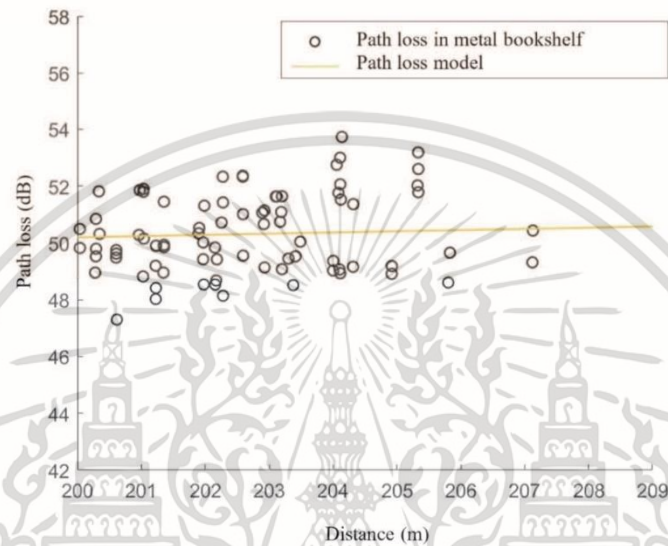


Figure 7 Path loss of RFID propagation of metal bookshelves case.

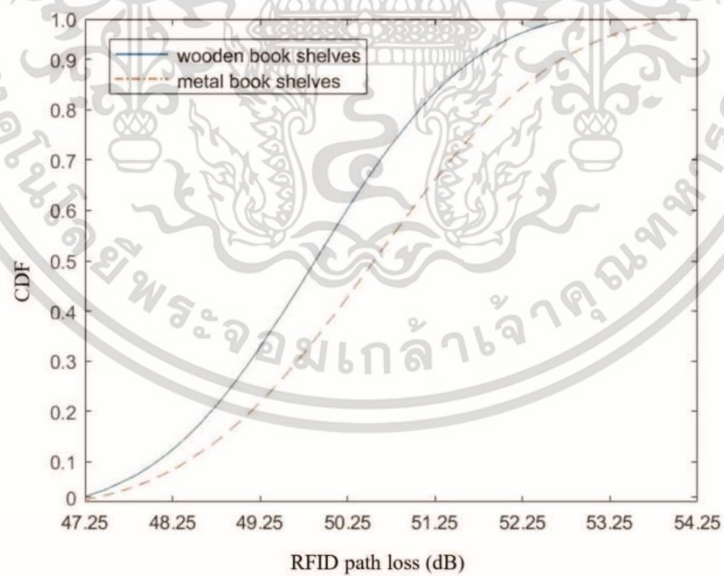


Figure 8 CDF comparison of RFID propagation loss between wooden and metal bookshelves.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 Conclusions

In this research to evaluate the propagation loss of RFID multimedia system in an indoor environment with wooden and metal bookshelves multimedia. The path loss density, path loss distribution and channel characteristics can be seen from path loss model by using contour method and regression analysis. According to the results of the experiment, RFID path loss in wooden bookshelves is less than metal bookshelves as 0.79 dB. Consider the contour model in bookshelves showed that there was high path loss near the edge of the bookshelves. Because of the effects of the environment. In the path loss around row E1 (wooden bookshelves) and row G1 (metal bookshelves) are higher than row F1 (wooden bookshelves) and row H1 (metal bookshelves). Path loss does not increase with distance. Because of the effect of the environment to the surface of the table that cause destructive interference occurs around row E1 and G1 and constructive superposition occurred around row F1 and H1. Therefore, factors of distance, environment and materials used are effect on path loss.

Therefore, can be conclude that co-polarization can work better in wood bookshelves by observation of the less path loss as compared to the metal bookshelves. Because of the effect of the material, pattern of antennas and environment. In this research very useful for RFID antennas design, RFID system design and evaluation of RFID multimedia systems with a new technology.

References

- [1] Y. Liu, S. Sakamoto, K. Matsuo, M. Ikeda, and L. Barolli, "Improving Reliability of Jxta-Overlay Platform: Evaluation for E-Learning and Trustworthiness", *Journal of Mobile Multimedia*, Vol. 11, No. 1-2, pp. 034-049, Apr. 2015.
- [2] N. Kulkarni, D. Mantri, N. R. Prasad, and R. Prasad, "Eehrp: Energy Efficient Hybrid Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", *Journal of Mobile Multimedia*, Vol. 17, No. 1-3, pp. 245-272, Feb. 2021.
- [3] J. Symonds, B.-C. Seet, and J. Xiong, "Activity Inference for Rfid-Based Assisted Living Applications", *Journal of Mobile Multimedia*, Vol. 6, No. 1, pp. 015-025, Sep. 2009.
- [4] K. Fujisaki, "Evaluation and Measurements of Main Features of A Table Type Rfid Reader", *Journal of Mobile Multimedia*, Vol. 11, No. 1-2, pp. 021-033, Mar. 2015.

1492 J. Supramongkonset and S. Promwong

- [5] K. Finkenzeller, "Rfid Handbook," John Wiley Sons, New York, Ny, Usa, 2nd Edition, 2003.
- [6] H. Lehpamer, Rfid Design Principles, Second Edition, Artech, 2012.
- [7] K. Finkenzeller and D. Muller, "Physical Principles of Rfid Systems," In Rfid Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Wiley, pp. 61–154, 2010.
- [8] IEEE-USA Communications & Information Policy Committee (CCIP), RFID: The State of Radio Frequency Identification (RFID) Implementation and Policy Implications, IEEE, 2005.
- [9] N. C. Karmakar, "Design of Portable Smart Antenna System for RFID Reader: A New Approach," in Handbook of Smart Antennas for RFID Systems, IEEE, pp. 301–316, 2010.
- [10] S. Evdokimov, B. Fabian, O. Günther, L. Ivantysynova, and H. Ziekow, RFID and the Internet of Things: Technology, Applications, and Security Challenges, now, 2011.
- [11] R. Xiao, A. Vianto, A. Shaikh, O. Buruk, J. Hamari and J. Virkki, "Exploring the Application of RFID for Designing Augmented Virtual Reality Experience," in IEEE Access, vol. 10, pp. 96840–96851, 2022.
- [12] J. Liu, B. Xiao, X. Liu, K. Bu, L. Chen and C. Nie, "Efficient Polling-Based Information Collection in RFID Systems," in IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 27, no. 3, pp. 948–961, June 2019.
- [13] A. Haibi, K. Oufaska, K. E. Yassini, M. Boulmalf and M. Bouya, "Systematic Mapping Study on RFID Technology," in IEEE Access, vol. 10, pp. 6363–6380, 2022.
- [14] M. Bolic, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenovic, "UHF RFID Antennas," in *RFID Systems: Research Trends and Challenges*, Wiley, pp. 57–98, 2010.
- [15] D. Guha and Y. M.M. Antar, "UHF Passive RFID Tag Antennas," in *Microstrip and Printed Antennas: New Trends, Techniques and Applications*, Wiley, 2011, pp. 263–303, doi: 10.1002/9780470973370.ch9.
- [16] H. Lehpamer, *RFID Design Principles*, Second Edition, Artech, 2012.
- [17] V. D. Hunt, A. Puglia, and M. Puglia, "RFID Regulations and Standards," in *RFID: A Guide to Radio Frequency Identification*, Wiley, pp. 83–95, 2007.
- [18] R. E-Azim, P. Kalansuriya, N. C. Karmakar, and R. Koswatta, *Chipless RFID Reader Architecture*, Artech, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] J. Frith, "RFID and the Internet of Things," in *A Billion Little Pieces: RFID and Infrastructures of Identification*, MIT Press, pp. 93–142, 2019.
- [20] S. Promwong and S. Duangsuwan, "Indoor Measurement and Modeling of Diffraction at a Shadowing for RFID Systems," *ISAP 2009*, pp. 5631–5634, 2009.
- [21] S. Duangsuwan and S. Promwong, "Measurement and Modeling of RFID Propagation channel with in an Indoor Environment," *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering*, pp. 393–397, 2008.

Biographies



Jatuporn Supramongkonset received her B.A. degree from Sukhothai Thammathirat University, Thailand, in 2004, and her M.S. degree in Information Technology from Assumption University, Thailand, in 2016. She is currently pursuing a D.Eng. degree in Electrical Engineering at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. Her research interests are in IoTs, UAVs, and sensors.



Sathaporn Promwong received a Ph.D. in communications and integrated systems from the Tokyo Institute of Technology (TIT), Japan. He is a

1494 *J. Supramongkonset and S. Promwong*

faculty member at KMITL's Department of Telecommunication Engineering. His expertise spans partial discharge, antenna and wave propagation, multimedia system and digital broadcasting technology, WiMedia systems. He holds leadership positions in IEEE, IEICE, and serves as the Chair of IEEE Broadcast Technology Society (BTS) Thailand chapter.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2023 9th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (CEAST) | 979-8-3503-2204-0/23/\$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/CEAST58324.2023.10157188

9th iceast 2023

Vientiane, Lao PDR

1- 4 JUNE 2023
<https://iceast.kmitl.ac.th/2023/>

Conference Proceeding

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Evaluation of RFID Propagation Channels with Wooden and Metal Bookshelves Based on Measurement Data

Jatuporn Supramongkonset
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
jatupornfreewave@gmail.com

kotchakorn Rattasuwan
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
61601091@kmitl.ac.th

Sathaporn Promwong
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
sathaporn.pr@kmitl.ac.th

Abstract—This paper studies the propagation that occurs in Radio Frequency Identification (RFID). The purpose of this study is to establish a model to study the energy and efficiency of the system. Experimenting with two model of bookshelf models. Wood and metal bookshelves are used as models to measure data. Microstrip antenna are used as a transmitter (Tx antenna) and a receiver (Rx antenna) at frequency of 2.45 GHz channels in co-polarization. From the data of this measurement result, we can observe the tendency of path loss arising from the change in distance and the effect of the signal in both wood and metal bookshelf by the contouring of the path loss signal. The results showed that the co-polarization had higher path loss at increased distances. By path loss modeling using contour method it was found that at measuring point near the edge of the bookshelf There is path loss in the edge of metal bookshelf higher than the edges of wooden bookshelf.

Keywords—RFID, RFID propagation loss, RFID measurement, channel measurement, path loss

I. INTRODUCTION

At the present, wireless communication technology has evolved and become more and more active in human daily life. Radio frequency identification system (RFID) is technology of the wireless technologies developed from the barcode system. This system has the advantage of being able to store a large amount of data, read data even when not in the field of sight or with obscured objects, resistance to humidity, impact resistant, high speed read data, data is stored on the microchip in the tag. RFID has been applied in various fields as retail business, inventory system, logistics and so forth and can also be applied to use in library services as well by read data from a data sheet attached to the spine of the book for link to the program for easy handling and also can check the borrowing period, book loss and delayed return. [1]-[4]

The purpose of this study is to compare path loss in wooden and metal book shelves, indoor channel measurement [5], measuring the propagation of indoor signals [6]. RFID path loss measured using the vector network analyzer (VNA) at frequency ranged from 2.3 GHz to 2.6 GHz with center frequency 2.45 GHz. The RFID path loss model to analyzed relation of function and path loss characterized by using contour method and regression analysis this paper is organized as follow. In section 2, channel modeling is defined. Measurement and results are obtainable in section 3 and 4, respectively. Finally, conclude of this paper in section 5.

RFID PATH LOSS MODEL

The propagation of waves affects many factors on communication systems. Distance between the transmission

and the receiver is the Main variables [7] Therefore, it is necessary to understand these characteristics for channel modeling in the part of path loss. This path loss can characterize by using statistical model.

A. Path Loss Analysis

Extrapolation the path loss of a channel (PL) due to wave propagation which affects many factors on communication systems. The main variables are distance between the transmitter and receiver. The path loss equation can be written as [9]

$$PL(dB) = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) \quad (1)$$

where P_t is transmitted power, P_r is received power.

$$PL(dB) = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right), d \geq d_0 \quad (2)$$

Where d_0 is the reference distance, d is the distance between Tx and Rx antennas. n is a constant that differs depending on the environment in which the signal is transmitted with $d_0 = 200 \text{ cm}$ and $n = 2$.

B. Linear Regression Model

The RFID propagation models measurement show that average received signal power decreases logarithmically with distance. Linear regression model mentions to any method to modeling the association among one or more variables, therefore the model depends linearly on the unknown parameters to be estimated from the data. Most commonly, linear regression refers model in the term of conditional mean. For large scale propagation, the average path loss \overline{PL} in dB is expressed as [10].

$$\overline{PL} = (d)[dB] = \overline{PL}(d_0)[dB] + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3)$$

where d_0 is the reference distance, d is the distance between Tx and Rx antennas, n is the path loss exponent which indicates the rate at which the path loss increases with d . The parameters n and $\overline{PL}(d_0)$ are evaluated by using least square method of linear regression model between parameter \overline{PL} and $\log(d)$ with $d_0 = 200 \text{ cm}$.

II. MEASUREMENT DESCRIPTION

Path loss in wooden and metal bookshelves are measured and estimated. The channel is measured with vector network analyzer (VNA) at frequency ranged from 2.3 GHz to 2.5 GHz with center frequency of 2.45 GHz. The microstrip antenna is used for both transmission (Tx) and receiving (Rx) antennas [5],[8]. The co-polarizations V-V are considered. The measurement parameters are shown in Table 1. [7]-[8]

TABLE I.
MEASUREMENT PARAMETERS

Parameter	Value
Frequency range	2.3 GHz to 2.5 GHz
Number of frequency points	801
Polarization	Vertical-vertical
Dimension of room	5.45m×3.39m×3.0m
Antenna type	Microstrip

The experiment was conducted in the lab of Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang Bangkok. The model of measurement wooden bookshelves and metal bookshelves is shown in Fig. 1 and Fig. 2. The Tx antenna represented reader is located 2 meters distance from the bookshelves and 0.67 meters above the table. The Rx antenna represents a tag placed in front of the bookshelves and moves to each position where the symbol is mark. Positions to measure each polarization of the wooden and metal bookshelves are 96 positions and 80 positions, respectively. Using VNA to measured and record data of RFID propagation loss with wooden bookshelve and metal bookshelves are shown in Fig. 1 and Fig. 2.

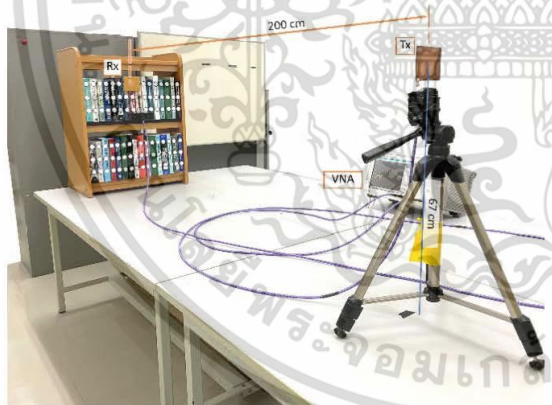


Fig. 1 RFID propagation measurement setup with wooden bookshelves.

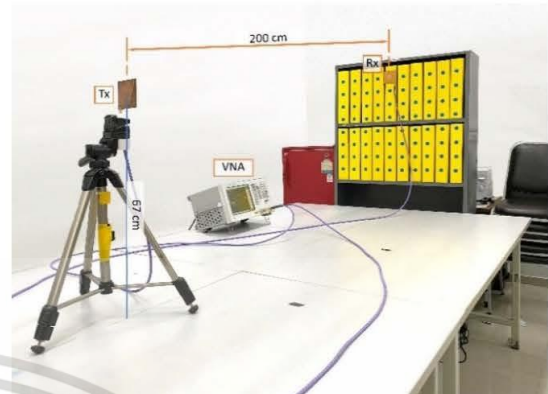


Fig. 2 The RFID propagation measurement setup with metal bookshelves.

III. RESULTS

The data obtained from the measurement in a channel were used to path loss modeling by using contour method and regression analysis which includes Probability Density Function (PDF) and Cumulative Distribution Function (CFD) [12] to see the results.

Fig. 4 shows path loss density of the signal of co-polarization in a wooden bookshelves. It was found that path loss increases with the increased distance between a transmitter and a receiver microstrip antenna. Although the distance between a transmitter and a receiver is closer, there is higher path loss in row E1 than row F1 due to radio wave propagation to the surface of the table that cause destructive interference occurs in channel around row E1 [12] and Constructive Superposition occurred in channel around row F1.

The same applies to metal bookshelves Fig. 5 shows Path loss density of the signal of co-polarization in a metal bookshelves increases with the increased distance between a transmitter and a receiver microstrip antenna. There is destructive interference occurs in channel around row G1 and Constructive Superposition occurred in channel around row H1 resulted in higher path loss in row G1 than row H1. In addition, at measuring point near the edge of the bookshelves. There is path loss in the edge of metal bookshelves higher than the edges of wooden bookshelves due to properties of metals that contribute reflection of the signal this causes constructive superposition. [11]

The comparison of RFID path loss between wooden bookshelves in Fig. 6 and metal bookshelves in Fig. 7 at a distance of 200 cm between transmitting and receiving antennas, it was found that the path loss in wooden bookshelf was less than metal bookshelf. The path loss in the wooden bookshelf and in the metal bookshelves is 49.70 dB and 50.49 dB respectively. Path loss of co-polarization are characterized by using CDF as shown in Fig. 8 and Fig. 9

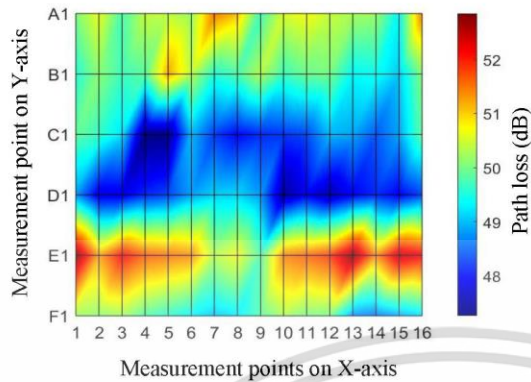


Fig. 4 The contour of RFID propagation density with wooden bookshelves.

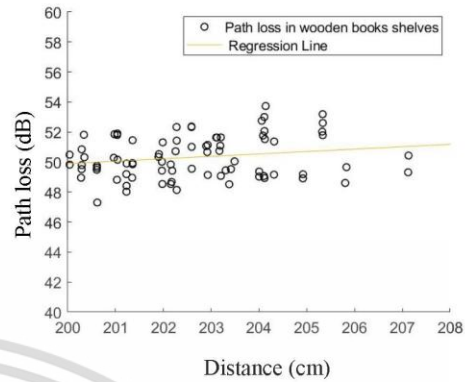


Fig. 7 Path loss of RFID propagation loss with metal bookshelves.

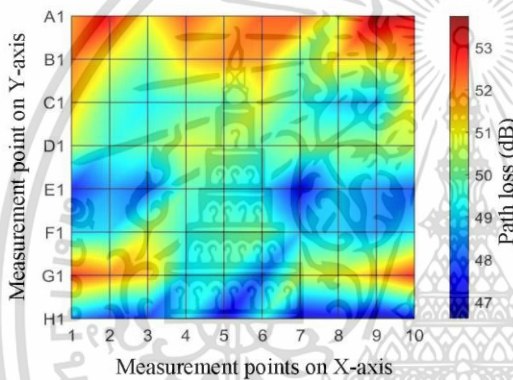


Fig. 5 The contour of RFID propagation density with metal bookshelves.

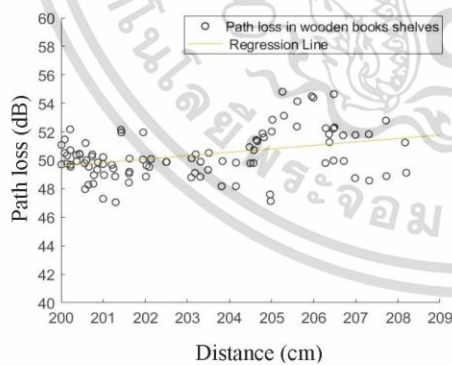


Fig. 6 Path loss of RFID propagation loss with wooden bookshelves.

IV. CONCLUSIONS

In this paper we evaluated the RFID propagation loss. Experimenting with two types of bookshelf models. Path loss density and characteristics are determined from path loss modeling by using contour method and regression analysis. According to the results of the experiment, it was found that path loss of the co-polarization in wooden bookshelves is less than metal bookshelves as 0.79 dB. Consider the contour model in bookshelves showed that there was high path loss near the edge of the bookshelf due to properties of metals that contribute reflection of the signal this causes constructive superposition. In addition, see that in the path loss around row E1 (wooden bookshelf) and row G1 (metal bookshelf) are higher than row F1 (wooden bookshelf) and row H1 (metal bookshelf). RFID propagation loss does not increase with distance due to radio wave propagation to the surface of the table that cause destructive interference occurs around row E1 and G1 and constructive superposition occurred around row F1 and H1. Therefore, factors of distance, environment and materials used are effect on path loss. The microstrip patch antenna in V-V co-polarization of RFID propagation loss in this research are kwon the better in wood bookshelves by observation of the less path loss as compared to the metal bookshelves due to reflection of the signal at the edge.

REFERENCES

- [1] K. Prof. Piya, *Radio Frequency Identification (RFID) System*. 2018.
- [2] L. Howard and M. Anderson, "Rfid technology in the library environment," *J. Access Serv.*, vol. 3, no. 2, pp. 29–39, 2006
- [3] P. Teekaput and P. Khiwanichgij, *Technology RFID*. Dokya Grups, 2006.
- [4] K. Coyle, "Management of RFID in libraries," *J. Acad. Librariansh.*, vol. 31, no. 5, pp. 486–489, 2005
- [5] S. Promwong, S. Duangsuwan, "Indoor Measurement and Modeling of Diffraction at a Shadowing for RFID Systems", pp.5631-5634, The 2009 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2009), 20-23 October 2009
- [6] R. Szumny, K. Kurek, S. Kozłowski, J. Modelski "Measurements and analysis of the propagation channel for various indoor environments,"

- The International Conference on "Computer as Tool" 2007 (EUROCON 2007), pp. 990-996, 9-12 Sept. 2007
- [7] N. Tuccitto, G. Li-Destri, G. M. L. Messina, and G. Marletta, "Reactive messengers for digital molecular communication with variable transmitter-receiver distance," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 20, no. 48, pp. 30312–30320, 2018
- [8] T.Leukachorn, S.Duangsuwan, S. Chinsawapan S. Promwong, " Experimental Study for Polarimetric Measurement of RFID Transfer function with in an Indoor Environment ", pp. 123-127, The 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC 2009), 15-17 December 2009
- [9] L. Roithner, "Innovating A Complete Embedded System FPGA (Field Programmable Gate Array) Educational Paradigm for Teaching Undergraduates Next Generation Programming Languages," *IBM technical disclosure bulletin*, vol. 28, no. 7. p. 310, 2011, [Online].
- [10] S. L. Miller and D. G. Childers, "Probability and Random Processes with Applications to Signal Processing and Communications," *Elsevier*, 2004.
- [11] A. Leon-Garcia, *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, Second Edi. Addison-Wesley Publishing, 1994.
- [12] H. Georgi, "THE PHYSICS OF WAVES Version date - February 15, 2015," 2015.



IEEE THAILAND SECTION

BTS

IEEE BT Society
Thailand Chapter

9th

ICEAST
2023

Vientiane, Lao PDR

1- 4 JUNE 2023
<https://iceast.kmitl.ac.th/2023/>

Conference Proceeding

2023 9th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST) | 979-8-3503-2204-0/23/\$31.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.1109/ICEAST58324.2023.10157188

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Path Loss Analysis of RFID Channels Measurement in Library with Metal Bookshelves

Jatuporn Supramongkonset
 School of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
 Bangkok 10520, Thailand
 E-mail: jatupornfreewave@gmail.com

sathaporn.pr@kmitl.ac.th
 School of Engineering,
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
 Bangkok 10520, Thailand
 E-mail: sathaporn.pr@kmitl.ac.th

Abstract— The radio frequency identification (RFID) library management system has gained popularity in libraries due to its convenience and improved efficiency. Accurate channel modeling is crucial for predicting system performance and received power. This paper focuses on modeling the channel characteristics of metal bookshelves in RFID library management systems operating at a frequency of 2.45 GHz. We employ microstrip patch antennas as both transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas, considering both vertical-vertical (V-V) and horizontal-horizontal (H-H) polarizations. Linear regression analysis models the path loss characteristic, allowing us to establish a mathematical relationship that accurately represents the path loss between the antennas. Furthermore, statistical models based on cumulative distribution function (CDF) are employed to characterize multipath fading, providing insights into the distribution of signal variations caused by multipath propagation. The experimental results indicate that metal bookshelves with V-V and H-H polarizations are suitable for the performance of RFID library management systems. The path loss models generated through linear regression analysis enable accurate prediction of received power, while the statistical models based on CDF contribute to a comprehensive understanding of multipath fading and its impact on system performance. This study provides valuable insights for librarians and system designers seeking to implement efficient and reliable RFID technology in library management systems. By examining and modeling the channel characteristics of metal bookshelves, our findings support the optimal use of V-V and H-H polarizations, ensuring the effective operation of RFID systems in library environments.

Keywords—RFID, RFID management, library management system, metal bookshelves, path loss analysis

I. INTRODUCTION

Radio frequency identification (RFID) technology has gained significant attention recently as a promising solution for various applications. However, the relatively high cost of individual RFID tags has diverted its adoption as a replacement for barcodes. Nonetheless, with the increasing demand for comprehensive inventory tracking and the influence of large retail chains, the cost of RFID tags is expected to become more affordable. RFID utilizes magnetic coupling or electromagnetic fields within the radio frequency (RF) spectrum to identify objects, places, animals, or individuals uniquely. Its versatility has led to its widespread implementation in various industries, including libraries and manufacturing [1].

RFID technology offers numerous advantages over traditional barcode systems, particularly in libraries. Unlike barcodes, RFID does not require a direct line of sight between the reader and the tagged object, as it operates on electromagnetic fields. This feature enables libraries to

enhance book identification, streamline self-service processes, improve shelf management, facilitate sorting and conveying library materials, and enable anti-theft detection. By leveraging RFID, libraries can increase efficiency, reduce data entry errors, and free up staff to focus on more value-added tasks [2-4].

Shelf management is a critical aspect of RFID technology in libraries, involving the interconnection between readers and tags. Library tags are typically affordable, with limited functionality and short read ranges. The propagation characteristics of RFID signals can be attributed to reflection, diffraction, and scattering phenomena. Channel models derived from measurement results are essential for characterizing these mechanisms and predicting received power (path loss) and system performance (multipath fading) [5-6].

This paper aims to model the RFID transmission channels in the presence of metal bookshelves for RFID library management systems. The channels were measured using a vector network analyzer (VNA) at a center frequency of 2.45 GHz. Microstrip antennas were employed as transmitter (Tx) and receiver (Rx) antennas. The study considers the metal bookshelves' vertical-vertical (V-V) and horizontal-horizontal (H-H) polarizations. Path loss characteristics were modeled using linear regression, while multipath fading was characterized using the cumulative distribution function (CDF).

The results indicate that the path loss and multipath fading characteristics are more favorable for the V-V polarization than the H-H polarization. Thus, the V-V polarization suits RFID library management systems employing metal bookshelves. The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 provides an overview of channel modeling. In contrast, Section 3 presents the measurement methodology. The results are discussed in Section 4, highlighting the implications and insights gained from the study. Finally, Section 5 concludes the paper, summarizing the essential findings and discussing avenues for future research.

II. RFID TRANSMISSION MODEL

Path loss and multipath fading significantly impact the performance of RFID library management systems. Modeling the transmission channel is necessary to understand these characteristics. This section describes two methods: linear regression and statistical models, used for characterizing path loss and multipath fading in indoor environments. Linear regression analyzes the relationship between received signal power and distance to model path loss. Statistical models, such as cumulative distribution function (CDF), capture the statistical distribution of multipath fading. Understanding path

loss and multipath fading aids in optimizing system design and performance.

A. Linear Regression Model

The measurement-based RFID transmission channel models demonstrate that the average received signal power logarithmically decreases with distance in both indoor and outdoor environments. Linear regression modeling is a method used to describe the relationship between variables, where the model depends linearly on the unknown parameters estimated from the data. In the context of large-scale propagation, the average path loss \overline{PL} in dB can be expressed as [7]:

$$\overline{PL}(d)[\text{dB}] = \overline{PL}(d_0)[\text{dB}] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (1)$$

where, (d_0) represents the reference distance, and (d) is the distance between the transmitting (Tx) and receiving (Rx) antennas. The path loss exponent 'n' indicates the rate at which path loss increases with distance. The parameters 'n' and $\overline{PL}(d_0)$ are estimated using the least square method of the linear regression model, where the parameter \overline{PL} is regressed against the logarithm of (d) with (d_0) set to 1 m.

The path loss PL [dB] comprises both average path loss and multipath fading, and it can be expressed as [7]:

$$PL(d)[\text{dB}] = \overline{PL}(d)[\text{dB}] + X_\sigma, \quad (2)$$

where, X_σ represents the multipath fading factor in dB, which is a random variable with a standard deviation of σ . The parameter X_σ characterizes the small-scale propagation and is analyzed using a statistical model.

By utilizing linear regression for average RFID path loss estimation model and RFID statistical models for channels fading characterization, the performance and behavior of the RFID transmission channel can be understood and optimized. These models provide valuable insights for system design and performance evaluation.

B. RFID Statistical Model

RFID channel fading arises with the interference between multiple versions of the transmitted signal, arriving at the receiver with slight time differences. This phenomenon persists even in the presence of a line of sight, as reflections from the ground and surrounding structures contribute to its occurrence. In order to characterize the parameter X_σ associated with multipath fading, we employ the cumulative distribution function (CDF) [8]. The CDF of X_σ is defined as:

$$F_{X_\sigma}(x) = P\{X_\sigma \leq x\}, \quad (3)$$

The CDF provides a probabilistic representation of the random variable X_σ , expressing the probability that X_σ is less than or equal to a given value x . By analyzing the CDF, we can gain insights into the statistical behavior of multipath fading and its impact on the system performance. The characterization of X_σ through the CDF enables a comprehensive understanding of the multipath fading phenomenon, facilitating the design and optimization of

communication systems in the presence of such fading effects.

III. MEASUREMENT DESCRIPTION

Our objective is to understand the impact of metal bookshelves on wireless communication performance within a library environment. This section presents a comprehensive analysis of the path loss in channels with metal bookshelves through rigorous measurements and evaluations. To accurately assess the channel characteristics, we employ a Vector Network Analyzer (VNA) for the measurements. The frequency range chosen for our experiments spans 2.4 GHz to 2.5 GHz, with a central frequency of 2.45 GHz. Both transmitting (Tx) and receiving (Rx) functions are carried out using microstrip antennas, which exhibit favorable characteristics for this study.

The precise geometry and dimensions of the antennas can be found in [6]. Our measurements account for two polarizations: vertical-vertical (V-V) and horizontal-horizontal (H-H). These polarizations allow us to investigate the variations in signal propagation caused by different orientations of the antennas. A thorough description of the measurement parameters can be found in Table 1. To conduct our experiments, we utilize the library facilities of the Information Engineering department at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

As illustrated in Fig. 1, the measurement setup includes antennas and metal bookshelves to capture the diverse conditions encountered in natural library environments. Figures 3 and 4 provide a more detailed depiction of the layout of the metal bookshelves. During the measurements, the receiver antenna, represented as the reader, is positioned in front of the shelves at 0.76 m above the floor. Meanwhile, the transmitter antenna, represented as the tag, is placed within the shelves and systematically moved to various positions along the shelf. This approach enables us to collect a comprehensive dataset encompassing different spatial configurations.

For the receive antenna at the bookshelves, we conducted 240 position measurements for each polarization, capturing a wide range of scenarios and enabling a detailed analysis scheme of the path loss characteristics. Similarly, we perform 320 measurements for each polarization in the case of metal bookshelves, ensuring a comprehensive investigation of the short range wireless communication system performance. By conducting these extensive measurements, we aim to gain insights into the impact of metal bookshelves on the wireless channel and provide valuable information for designing and optimizing RFID library management systems in real-world library environments.

TABLE I. MEASUREMENT OF PARAMETERS

Parameter	Values
Frequency range	2.4 GHz to 2.5 GHz
Number of frequency points	801
Polarization	V-V, H-H
Dimension of room	2.48×3.43×3.0
Antenna type	Microstrip patch antenna

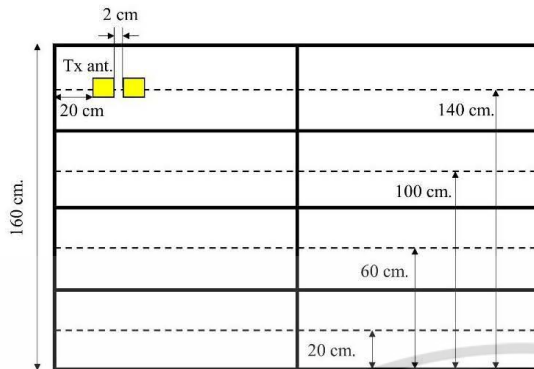


Fig. 1. The layout of metal bookshelves model

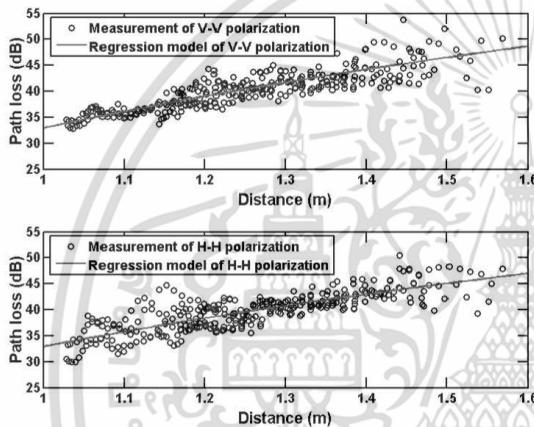


Fig. 2. The comparison of path loss metal bookshelves with the linear regression model between V-V and H-H polarizations

IV. RESULT AND DISCUSSION

The measurement and evaluation of path loss in the context of RFID library management systems are crucial for understanding the performance and efficiency of the system. In this section, we focused on measuring the path loss of metal bookshelves with V-V and H-H polarizations using the measurement scheme described in Section 3. The objective was to gain insights into path loss and multipath fading characteristics in different scenarios.

Fig.3 presents scatter plots depicting the measurement path loss with linear regression models for wooden bookshelves, considering both V-V and H-H polarizations. The results showcased the relationship between distance and path loss, visually representing the measured data compared to the linear regression models. Similarly, Fig. 3 displayed the scatter plots of the measurement path loss concerning the linear regression models for metal bookshelves, considering V-V and H-H polarizations. By analyzing these figures, we could observe the path loss trends and the effectiveness of the linear regression models in capturing the measurements.

The evaluated results that the path loss for metal bookshelves' V-V polarization was higher than H-H polarization. This finding suggests that the orientation and polarization of the antennas play a significant role in determining the path loss characteristics. By understanding

these variations, we can optimize the design and configuration of the RFID system for improved performance.

The multipath channel fading is an inherent phenomenon affecting wireless communication systems' quality. In the case of RFID systems, multipath channel fading arises due to interference caused by the arrival of multiple versions of the transmitted signal at the receiver with slight time differences. Even in scenarios with a line of sight, multipath fading can occur due to reflections from the ground and surrounding structures.

To evaluate the multipath fading factors, we employed Eq. (2), which combines the average path loss with the multipath fading factor, represented by X_{σ} . Fig. 4 provides an insight into the multipath fading characteristics by displaying the fluctuation of the multipath fading factor for both V-V and H-H polarizations of metal bookshelves. This information is vital for understanding the impact of multipath fading on the performance of the RFID system. It can aid in the development of suitable mitigation techniques.

Furthermore, we employed the cumulative distribution function (CDF) to express the multipath fading characteristics quantitatively. Fig. 5 illustrate the CDF of the multipath fading factors for V-V and H-H polarizations, respectively. By examining these figures, we can determine the statistical properties of the multipath fading factors, particularly the standard deviations. These standard deviations provide insights into the variations and fluctuations of the multipath fading factors, contributing to a comprehensive understanding of the system's behavior.

In this measurement and evaluation of path loss and multipath fading characteristics in metal bookshelves with V-V and H-H polarizations have been conducted. The findings shed light on the variations of path loss and the impact of multipath fading on RFID library management systems. These insights are crucial for system optimization, antenna design, and RFID channel performance enhancement..

V. CONCLUSION

This paper focuses on measurement and modeling of RFID multipath channel fading with metal bookshelves in the context of RFID library management systems. Path loss and multipath fading characteristics are analyzed for V-V and H-H polarizations, employing linear regression and statistical models. The findings reveal that the average path loss for V-V polarization is lower than that for H-H polarization by approximately 1.17 dB. Moreover, the quantity of multipath fading for V-V polarization is lower than that for H-H polarization by approximately 0.76 dB. However, when considering the results of metal bookshelves, the path loss for V-V polarization is slightly higher than that for H-H polarization by about 0.02 dB. The multipath fading for V-V polarization is also slightly higher than for H-H polarization by about 0.02 dB.

Based on these outcomes, it can be concluded that V-V polarization is suitable for RFID library management systems with metal bookshelves. In contrast, H-H polarization is appropriate for such systems as well. These findings contribute to optimizing the performance and efficiency of RFID library management systems by selecting the most suitable polarization based on the characteristics of the metal bookshelves.

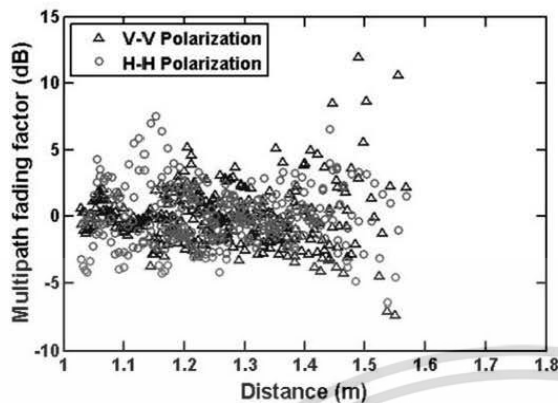


Fig. 3. Multipath fading factors for metal book shelves with V-V and H-H polarizations

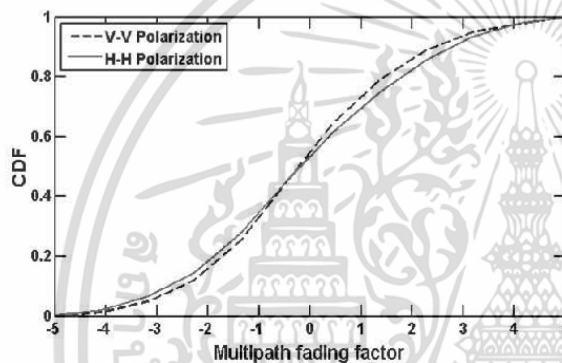


Fig. 4. CDF of the multipath fading factors with metal book shelves for V-V and H-H polarizations

REFERENCES

- [1] I. Pratt and S. Zhong, "A heuristically designed high-frequency RFID antenna head for use within libraries," 2019 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Pisa, Italy, pp. 363-373, 2019.
- [2] S. Evdokimov, B. Fabian, O. Günther, L. Ivantysynova, H. Ziekow, RFID and the Internet of Things: Technology, Applications, and Security Challenges, now, 2011.
- [3] D. Y. Li, S. D. Xie, R. J. Chen and H. Z. Tan, "Design of Internet of Things System for Library Materials Management using UHF RFID," 2016 IEEE International Conference on RFID Technology and Applications (RFID-TA), Shende, Foshan, China, pp. 44-48, 2016.
- [4] M. Bolic, D. Simplot-Ryl, I. Stojmenovic, "Principles and Techniques of RFID Positioning," in RFID Systems: Research Trends and Challenges, Wiley, pp.389-415, 2010.
- [5] D. Kissinger et al., "Wireless integrated sensor nodes for indoor monitoring and localization," 2015 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet), San Diego, CA, USA, pp. 7-10, 2015.
- [6] R.U. R-yohsae, S. Promwong and N. Sukutamantani, "Effects of IEEE 802.15.1 interference on RFID communication system at 2.45 GHz," 2008 5th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology, Krabi, Thailand, pp. 417-420, 2008.
- [7] T.S Rappaport, Wireless Communications- Principles and Practice, Prentice Hall, Second Edition, 2002.
- [8] R. D. Yates, and D. J. Goodman, "Probability and Stochastic Processes: A Friendly Introduction for Electrical and Computer Engineers," Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2014.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวจตุพร ศุภมงคลเศรษฐ์
 วัน เดือน ปีเกิด 15 กันยายน 2517
 ที่อยู่ บ้านเลขที่ 16 ซอยจันทร์ 34 ถนนจันทร์ พุ่งวัดดอน สาทร กทม 10120

ประวัติการศึกษา

2547 คณะศิลปศาสตร์ สาขาสารสนเทศ
 มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
 2559 คณะวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี สาขาเทคโนโลยีสารสนเทศ บริหารข้อมูล
 มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

ประวัติการทำงาน

2566 - ปัจจุบัน กรรมการผู้จัดการ บริษัท ฟรีเวฟ เทคโนโลยี จำกัด ประเทศไทย
 2563 - 2566 ผู้จัดการพัฒนาธุรกิจ และผู้จัดการด้านภาครัฐ ประจำประเทศไทย
 บริษัท ซุปเปอร์เน็ท ประเทศไทย
 2561 - 2563 ผู้จัดการภาคพื้นอินโดจีน, ฮองกง และไต้หวัน
 บริษัท ฟรีเวฟ เทคโนโลยี สหรัฐอเมริกา
 2560 - 2561 ผู้จัดการฝ่ายขายดิจิทัลเพลม ลิงค์โพร ด้านนโยบายสาธารณะ, การแพทย์,
 โทรคมนาคม, ขนส่ง และการท่องเที่ยว บริษัท ออราเคิล ลิงค์โพร
 2556-2558 ผู้จัดการฝ่ายขายอินโดจีน
 บริษัท แลนด์ซิส จำกัด สหรัฐอเมริกา ประจำประเทศไทย
 2553 - 2554 ผู้จัดการฝ่ายขายภาคธุรกิจ 3G, Wimax และโครงข่ายระยะไกล
 บริษัท เอลวาเลียน อีสราเอล ประจำประเทศไทย
 2551 - 2553 ผู้จัดการอาวุโสด้านพัฒนาธุรกิจ และผู้จัดการฝ่ายเทคนิค
 บริษัท โมโตโลล่า (ประเทศไทย)
 2549 - 2551 ผู้จัดการด้านบริการฝ่ายลูกค้าคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
 บริษัท เดลล์ คอมพิวเตอร์ ประเทศไทย
 2546 - 2548 ผู้ช่วยผู้จัดการโปรแกรมธุรกิจพันธมิตร
 บริษัท ฮิวเลต แพคการ์ด ประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้