

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการแจกแจงแบบพหุนามของเฟรมอะโลฮา
สำหรับระบบ RFID

PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTINOMIAL DISTRIBUTION
OF FRAMED ALOHA FOR RFID SYSTEM

ณัฐพล มุลศิริ
NATTHAPOL MOOLSIRI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-010-195

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการแจกแจงแบบพหุนามของเฟรมอะโลฮา
สำหรับระบบ RFID

PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTINOMIAL DISTRIBUTION
OF FRAMED ALOHA FOR RFID SYSTEM



ณัฐพล มุลศิริ
NATTHAPOL MOOLSIRI

เลขหมู่
เลขทะเบียน 138770
รับเดือนปี 16 ต.ค. 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2557
KMITL-2014-EN-M-010-195

PERFORMANCE ANALYSIS OF MULTINOMIAL DISTRIBUTION
OF FRAMED ALOHA FOR RFID SYSTEM

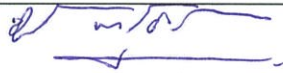




NATTHAPOL MOOLSIRI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014
KMITL-2014-EN-M-010-195

COPYRIGHT 2014
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการแจกแจงแบบพหุนามของเฟรมอะโลฮาสำหรับระบบ RFID
Thesis Title Performance Analysis of Multinomial Distribution of Framed ALOHA for RFID System
นักศึกษา นายณัฐพล มุลศิริ
รหัสประจำตัว 54611836
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวิพล ลิทธิชีวกาศ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-010-195

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชวรงค์	พงศ์เจริญพานิชย์	
ดร.สถาพร	พรหมวงศ์	
ศ.ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	
ผศ.ดร.สุทธิชัย	นพนาศิพงษ์	
รศ.ดร.สุวิพล	ลิทธิชีวกาศ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2557 เวลา 14.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 6 ตุลาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการแจกแจงแบบพหุนามของเฟรมอะไหล่สำหรับระบบ RFID
นักศึกษา	นายณัฐพล มูลศิริ
รหัสประจำตัว	54611836
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิมล สิทธิชีวภาค

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอรูปแบบสมการพหุนามมาใช้วิเคราะห์การส่ง RFID แบบหลากหลายทางด้วยโปรโตคอลเฟรมสล็อตอะไหล่แบบแบ่งกลุ่ม ซึ่งการแบ่งกลุ่มนี้เป็นการแบ่งแท็กออกเป็นสองกลุ่มเท่าๆ กัน โดยให้แท็กแต่ละกลุ่มแบ่งกลุ่มการสุ่มเข้าสล็อตในแต่ละเฟรมอย่างเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งจากรูปแบบการส่งนี้จะทำให้ความน่าจะเป็นหรือความสามารถในการสุ่มแท็กเข้าหาสล็อตของแต่ละกลุ่มมีค่าต่างกัน ดังนั้นเราจึงนำเสนอสมการความน่าจะเป็นแบบพหุนามมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบ โดยจะนำเสนอโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นรูปแบบการเลือกและเรียงลำดับเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ในการส่งแท็กเพื่อที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการส่งแท็กสำเร็จของแต่ละเหตุการณ์ และส่วนที่สอง เป็นการนำรูปแบบการวิเคราะห์ในส่วนแรกมาใช้วิเคราะห์การส่งแท็กในรูปแบบที่มีการแบ่งกลุ่มการส่ง โดยจะทำการวิเคราะห์โดยพิจารณาประสิทธิภาพในสภาพที่มีการแย่งชิงสล็อตสูงและการแย่งชิงสล็อตที่ต่ำว่าการแบ่งกลุ่มแต่ละขนาดจะมีประสิทธิภาพเป็นอย่างไร และยังทำการวิเคราะห์ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งแพสซีฟแท็กเพื่อให้ใช้เวลาการส่งแท็กต่ำที่สุดในแต่ละขนาดการแบ่งกลุ่ม

Thesis	Performance Analysis of Multinomial Distribution of Frame ALOHA for RFID System
Student	Mr.Natthapol Moolsiri
Student ID.	54611836
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Suvepon Sitthichivapak

ABSTRACT

This thesis was proposed the multinomial to analyze multi-access of RFID by using frame slotted ALOHA group assignment protocol, which is group assignment of tag to equal two groups. Each tag group randomly access to slot in each frame, independently. From this transmission form, it makes probability or random tag access ability to slot in each frame is different. Therefore, multinomial probability equation was chose to analyze the system. The research proposal was divided to two parts. First part is choosing and collecting each pattern and event sequence of all possible tag transmissions for calculating success tag transmission probability of each event. Second part is analysis form selection from the first part to analyze group assignment tag transmission. The efficiency of each group assignment size in high contention slots and low contention slots condition was considered. Moreover, optimum frame size of passive tag transmission with the shortest transmission time in each group assignment size was investigated.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ต้องขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุวิมล สิริชีวะภาค เป็นอย่างสูงที่ให้คำปรึกษาและความรู้ต่างๆ ตลอดจนช่วยตรวจสอบความถูกต้องของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.กฤษณ์ วงจรจิระ อาจารย์ผู้ให้คำชี้แนะและเอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติการในการทำงานจนสำเร็จลุล่วง

ขอบคุณครอบครัวมูลศิริ ทั้งบิดา มารดา และพี่ชาย ที่คอยสนับสนุนและกำลังใจมาตลอด

ขอบคุณนายวชิรา วัชรวิเศษกุล และนางสาวธัญวรัตน์ ภาวะโสภณที่เป็นคนให้คำปรึกษาในเรื่องการเรียนและการเขียนโปรแกรม

ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ห้อง 3 วิศวะฯลาดกระบังทุกคนที่ให้กำลังใจมาตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐพล มูลศิริ

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 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFID).....	4
2.2.1 ส่วนประกอบของระบบ RFID.....	5
2.2.2 พื้นฐานการทำงานของระบบ RFID.....	7
2.2.3 การจำแนกประเภทอุปกรณ์ RFID.....	9
2.2.4 ประเภทของแท็ก RFID.....	14
2.2.5 ตัวอย่างรูปแบบของแท็ก RFID	17
2.2.6 ระยะเวลาการทำงานและเหนี่ยวนำ.....	22
2.2.7 หลักการทำงานพื้นฐานในการรับส่งพลังงานระหว่างเครื่องอ่าน กับแท็กแบบ 1 บิต.....	24
2.2.8 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ RFID.....	31
2.3 กระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูล.....	34
2.3.1 การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งช่องว่าง.....	34
2.3.2 การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งความถี่.....	35
2.3.3 การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งเวลา.....	36
2.3.4 ตัวอย่างกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูล.....	37

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 ตัวแปรสุ่ม.....	41
2.4.1 ความน่าจะเป็นเชิงการจัด (Combinatorial Probability)	41
2.4.2 การแจกแจงทวินาม (Binomial Distribution)	46
2.4.3 การแจกแจงมัลติโนเมียล (Multinomial Distribution)	47
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	49
2.5.1 ตัวอย่างกระบวนการป้องกันการชนกันที่นิยมใช้ในระบบ RFID.....	49
2.5.2 รูปแบบการจัดเก็บแท็กแบบแพสซีฟและแบบแอ็คทีฟ.....	50
2.5.3 รูปแบบการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นแบบทวินาม สำหรับระบบ RFID แบบ FSA.....	52
บทที่ 3 รูปแบบและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของเฟรมสล็อตอะโลฮา โดยใช้สมการพหุนาม.....	53
3.1 กล่าวนำ.....	53
3.2 ระบบ RFID ที่มีการเข้าถึงแบบหลากหลาย.....	54
3.3 แบบจำลองของกระบวนการเฟรมสล็อตอะโลฮาในระบบ RFID.....	56
3.4 ขั้นตอนวิธีการจัดเก็บทุกเหตุการณ์ที่นำมาใช้ในรูปแบบการวิเคราะห์.....	57
3.5 โมเดลคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์.....	60
3.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์.....	62
3.6.1 กรณีที่ 1 วิเคราะห์โดยเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของแต่ละ จำนวนแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่ง.....	62
3.6.2 กรณีที่ 2 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนแท็ก (N) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ.....	63
3.6.3 กรณีที่ 3 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนสล็อต (M) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ.....	64
บทที่ 4 รูปแบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของการแบ่งกลุ่ม เฟรมสล็อตอะโลฮา.....	66
4.1 กล่าวนำ.....	66
4.2 แบบจำลองของกระบวนการเฟรมสล็อตอะโลฮาในระบบ RFID แบบแบ่งกลุ่ม.....	67
4.3 การจัดเก็บทุกเหตุการณ์แบบแบ่งกลุ่มที่นำมาใช้ในรูปแบบการวิเคราะห์.....	69
4.4 โมเดลคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์.....	70
4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์.....	73

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.1 กรณีที่ 1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่ม ในแต่ละขนาดการแบ่งที่แตกต่างกัน.....	74
4.4.2 กรณีที่ 2 วิเคราะห์ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับ การส่งแพสซีฟแท็กแบบแบ่งกลุ่ม.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	88
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	89
เอกสารอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก.....	92
ผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	99

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแท็ก RFID แบบต่างๆ.....	11
2.2 ย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ.....	14
2.3 ความถี่ใช้งานของอุปกรณ์ RFID ในแต่ละประเทศ.....	14
2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแท็กระดับต่างๆ.....	17
2.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ EAS แบบใช้ความถี่วิทยุที่ใช้งานทั่วไป.....	25
2.6 ระบบ EAS แบบที่ใช้ความถี่วิทยุที่ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ.....	26
2.7 ตัวอย่างค่ามาตรฐานของระบบ EAS แบบใช้วงจรความถี่.....	29
2.8 เวลาเฉลี่ยที่เครื่องอ่านใช้ในการอ่านแท็ก RFID ทุกแท็กภายในพื้นที่การอ่าน.....	38
2.9 แสดงการแจกแจงของจำนวนลูกบอล 7 ลูก ในกล่อง 7 ใบ.....	46
3.1 เหตุการณ์ที่เป็นไปได้ในการสุ่มเข้าสล็อตของแท็ก.....	57
3.2 ตัวอย่างการเลือกเก็บค่า output และ suboutput.....	59
3.3 ตัวอย่างการจัดเก็บค่าเฟรมที่สำเร็จ.....	60
4.1 ตัวอย่างการจัดเก็บแท็กของเฟรมสล็อตอะโหลฮาแบบแบ่งกลุ่มเป็น 2 กลุ่ม.....	70
4.2 จุดเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของการแบ่งกลุ่มจากกราฟรูปที่ 4.11 ทั้ง (a), (b) และ (c).....	81
4.3 ขนาดเฟรมที่เหมาะสมในการส่งแพสซีฟแท็ก (M_{min_p}) จากกราฟรูปที่ 4.12.....	84
4.4 จุดต่ำสุดของ overall tag read time จากกราฟรูปที่ 4.12.....	85
5.1 ความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จสูงสุดต่อเฟรมจากบทที่ 3 กราฟที่ 3.7 และ 3.8.....	88
5.2 ขนาดเฟรมที่เหมาะสมในการส่งแพสซีฟแท็ก (M_{min_p}) จากกราฟรูปที่ 4.12 ในบทที่ 4.....	89
5.3 จุดต่ำสุดของ overall tag read time จากกราฟรูปที่ 4.12 ในบทที่ 4.....	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างส่วนประกอบทั่วไปของระบบ RFID.....	5
2.2 แผนผังการทำงานของระบบ RFID	8
2.3 ตัวอย่างแท็ก RFID รูปแบบต่างๆ 1.....	18
2.4 โครงสร้างของแท็ก RFID แบบพลาสติก.....	19
2.5 ตัวอย่างแท็ก RFID รูปแบบต่างๆ 2.....	19
2.6 โครงสร้างของแท็กแบบที่ใช้ติดกับแผ่นโลหะ.....	20
2.7 โครงสร้างของแท็ก RFID แบบกระดาษแก้ว.....	21
2.8 ลักษณะการทำงานของแท็ก RFID แบบใช้คลื่นความถี่วิทยุ.....	25
2.9 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดกำเนิดที่ความถี่กำลังของแท็ก RFID.....	26
2.10 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรไฟฟ้าของแท็ก RFID ที่ใช้กับสัญญาณไมโครเวฟ.....	28
2.11 การทำงานของแท็ก RFID ที่อยู่ภายในพื้นที่ตรวจสอบของเครื่องอ่านที่ใช้ความถี่ไมโครเวฟ.....	28
2.12 แผนภาพการทำงานของระบบ EAS แบบใช้วงจรหารความถี่.....	29
2.13 คุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแท็ก RFID แบบใช้แม่เหล็กไฟฟ้า.....	30
2.14 พื้นที่การอ่านของเครื่องอ่านในระบบ RFID แบบต่างๆ.....	32
2.15 ลักษณะการทำงานของระบบ RFID ที่ใช้กระบวนการ SDMA.....	35
2.16 ลักษณะการทำงานของระบบ RFID ที่ใช้กระบวนการ FDMA.....	36
2.17 นิยามของโหลดที่ถูksenอ (offered load) และ Throughput ของระบบ ALOHA.....	37
2.18 เปรียบเทียบปริมาณงาน (throughput) ของกระบวนการ ALOHA และ Slotted ALOHA.....	39
2.19 ตัวอย่างการทำงานของกระบวนการ Slotted ALOHA.....	40
2.20 กระบวนการ ALOHA สำหรับ RFID.....	49
2.21 กระบวนการ Slotted ALOHA สำหรับ RFID.....	49
2.22 กระบวนการ Framed Slotted ALOHA สำหรับ RFID.....	50
2.23 ลำดับการจัดเก็บแท็กของ RFID แบบแอดคทีฟโดยใช้เฟรมสล็อตอะโลฮา.....	50
2.24 เปรียบเทียบการจัดเก็บแท็กระหว่าง RFID แบบแอดคทีฟ และแพสซีฟโดยใช้เฟรมสล็อตอะโลฮา.....	51
3.1 ขั้นตอนการทดลองวิจัยบทที่ 3.....	54
3.2 แบบจำลองการเข้าถึงหลากหลาย (multi-access).....	56
3.3 แบบจำลองกระบวนการป้องกันการชนกันแบบเฟรมสล็อตอะโลฮา.....	57
3.4 แผนภูมิรูปภาพขั้นตอนการเลือกจัดเก็บเฟรมทุกเหตุการณ์ไปใช้ในการวิเคราะห์.....	58
3.5 รูปแบบการเข้าถึงสล็อตของแท็กแบบสุ่ม.....	60

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 Success Probability ของเหตุการณ์ที่มีสล็อตเป็น 20 และแท็กตั้งแต่ 15 ถึง 60 โดยแสดง K 3 เหตุการณ์ คือ 8, 10 และ 12.....	63
3.7 Success Probability ของทุกเหตุการณ์ที่มีขนาดเฟรมเป็น 20 สล็อต และมีแท็ก 4 ค่า คือ 30, 40, 50 และ 60.....	64
3.8 Success Probability ของทุกเหตุการณ์ที่มีจำนวนแท็กเป็น 50 และมีขนาดเฟรม 4 ค่าคือ 15, 20, 25 และ 30 สล็อต.....	65
4.1 ขั้นตอนการทดลองวิจัยบทที่ 4.....	67
4.2 รูปแบบระบบ RFID แบบแบ่งกลุ่มความสามารถในการสุมเข้าสล็อต.....	68
4.3 ตัวอย่างการจัดเก็บแท็กของเฟรมสล็อตอะโลฮาแบบแบ่งกลุ่ม.....	69
4.4 รูปแบบการเข้าถึงสล็อตของแท็กแบบแบ่งกลุ่มความสามารถในการสุมเข้าสล็อต.....	70
4.5 จำนวนของแท็กหรือสล็อตที่ส่งสำเร็จต่อเฟรม M_f	72
4.6 ความน่าจะเป็นในการส่งประสบความสำเร็จ(Psuc) ที่จำนวนแท็กในระบบ มีจำนวน 60 และมีขนาดเฟรม 20 สล็อต.....	76
4.7 ความน่าจะเป็นที่ไม่มีสล็อตใดส่งสำเร็จเลย (Pcoll) ที่มีขนาดเฟรมเป็น 20 และมีจำนวนสล็อตตั้งแต่ 20 จนถึง 60.....	76
4.8 ความน่าจะเป็นในการส่งประสบความสำเร็จ (Psuc) ที่จำนวนแท็กในระบบ มีจำนวน 30 และมีขนาดเฟรม 60 สล็อต.....	78
4.9 ความน่าจะเป็นที่ไม่มีสล็อตใดส่งสำเร็จเลย(Pcoll) ที่มีจำนวนแท็กเป็น 30 และมีจำนวนขนาดเฟรมตั้งแต่ 20 จนถึง 60.....	79
4.10 ค่าประสิทธิภาพของระบบที่มีจำนวนแท็กเป็น 40 และมีขนาดเฟรม ตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 120 สล็อต.....	79
4.11 การอ่านแท็กที่ใช้การกำหนดขนาดเฟรม ($\alpha = 0.99$)	
(a) overall tag read time จำนวนแท็ก 30.....	82
(b) overall tag read time จำนวนแท็ก 40.....	82
(c) overall tag read time จำนวนแท็ก 50.....	83

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 การอ่านแท็กซีฟแท็กที่ใช้การกำหนดขนาดเฟรม ($\alpha = 0.99$)	
(a) overall tag read time ของการส่ง FSA ปกติ.....	85
(b) overall tag read time ของการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 50-50.....	86
(c) overall tag read time ของการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 2 เท่า.....	86
(d) overall tag read time ของการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 3 เท่า.....	87
(e) overall tag read time ของการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 4 เท่า.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคโนโลยีบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFID : radio frequency identification) หรือเรียกสั้นๆ ว่า “เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดี (RFID)” เป็นเทคโนโลยีบ่งชี้อัตโนมัติแบบไร้สัมผัส โดยมีลักษณะการส่งกำลังงานและข้อมูลระหว่างบัตรและเครื่องอ่านจะอาศัยคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีบ่งชี้อัตโนมัติ (Auto-ID: automatic identification) เป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตประจำวันของประชากรทุกคน เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น โลจิสติกส์ ระบบคลังสินค้า ร้านค้าปลีก และสายการผลิต เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงตัวตนของมนุษย์ สัตว์ สินค้า และวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ด้วยการใช้งานแบบไร้สัมผัสของเทคโนโลยี RFID นี้เอง จะทำให้การส่งข้อมูลมีความสะดวกมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาความไม่เที่ยงตรงและความคลาดเคลื่อนในการอ่านและเขียนข้อมูล เมื่อเทียบกับการใช้งานเทคโนโลยีบ่งชี้อัตโนมัติแบบสัมผัสซึ่งอาจจะเกิดการสึกหรอของหน้าสัมผัสได้ เนื่องจากความสามารถและความสะดวกสบายทำให้ RFID ถูกประยุกต์ใช้งานหลายด้าน จนถือว่าตลาดอุตสาหกรรม RFID เป็นตลาดเทคโนโลยีที่เติบโตสูงมาก [1]-[3]

ปัจจุบันเทคโนโลยี RFID ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความต้องการใช้งานรูปแบบต่างๆ ซึ่งปัญหาที่มักพบในระบบการทำงานของระบบนี้คือ การชนกันของข้อมูล(เกิดขึ้นในกรณีที่แท็ก RFID มากกว่าหนึ่งแท็ก ส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่านในเวลาเดียวกัน) ซึ่งมักจะเกิดในกรณีที่มีแท็กจำนวนมากเข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของตัวเครื่องอ่าน ดังนั้นจึงได้มีโปรโตคอลที่จะป้องกันการเกิดการชนกันขึ้น[1],[3],[4] จากการศึกษาของงานวิจัยพบว่าโปรโตคอลที่นำมาใช้แก้ปัญหาการชนกันของการปรากฏตัวของแท็กหลายๆ ตัวพร้อมกันในพื้นที่การอ่านของเครื่องอ่านนั้นคือโปรโตคอลเฟรมสล็อตอะโลฮา เป็นโปรโตคอลที่พัฒนามาจากโปรโตคอลอะโลฮา ที่ได้ทำการแบ่งช่วงเวลาการส่งแท็กออกเป็นเฟรมๆ ซึ่งในหนึ่งเฟรมก็จะมีช่องสื่อสารที่เรียกว่าสล็อตมารวมกันหลายๆ สล็อต แท็กทั้งหมดในระบบก็จะทำการสุ่มเข้าแต่ละสล็อตในแต่ละเฟรม โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในส่วนแรกจะเป็นการเสนอแนวคิดรูปแบบการวิเคราะห์ใหม่โดยใช้สมการความน่าจะเป็นแบบพหุนามหรือมัลติโนเมียล[5]-[7] มาวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นในการส่งแท็กประสบความสำเร็จ ในส่วนที่สองของวิทยานิพนธ์ได้นำรูปแบบการวิเคราะห์ในส่วนแรกนำมาใช้วิเคราะห์ระบบที่มีรูปแบบการส่งที่แท็กแบ่งออกเป็นสองกลุ่มเท่าๆ กัน โดยให้แท็กแต่ละกลุ่มมีความสามารถในการสุ่มเข้าแท็กในขนาดต่างๆ ซึ่งเป็นการแบ่งกลุ่มการส่งที่สมมุติให้ทั้งสองกลุ่มเป็นอิสระต่อกัน โดยทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบในแต่ละขนาดเฟรม และหาขนาดเฟรมที่เหมาะสมที่สุดในการส่งแท็กแบบแพสซีฟแท็ก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

1. จะพิจารณาความน่าจะเป็นในการส่งแท็กประสบความสำเร็จ ที่ได้มาจากรูปแบบการวิเคราะห์แบบพหุนามที่ได้ทำการนำเสนอ โดยจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากตัวแปรต่างๆ ในระบบคือ

- กรณีที่ 1 วิเคราะห์โดยเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของแต่ละจำนวนแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่ง(K)
- กรณีที่ 2 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนแท็ก(N) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ
- กรณีที่ 3 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนสล็อต(M) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ

2. จะพิจารณาผลของการวิเคราะห์ที่ได้ใช้รูปแบบการวิเคราะห์แบบพหุนามที่ได้ทำการนำเสนอ มาใช้วิเคราะห์ในการส่งแพสซีฟแท็กแบบเฟรมสล็อตอะโลฮาที่แบ่งกลุ่มของแท็กให้ความสามารถในการสุ่มเข้าสล็อตต่างกัน โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

- กรณีที่ 1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่มในแต่ละขนาดการแบ่งที่แตกต่างกัน
- กรณีที่ 2 วิเคราะห์การส่งแท็กแบบแพสซีฟจากจำนวนเฟรมและจำนวนการตอบสนองแท็กของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่ม

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การวิเคราะห์การส่งแท็กแบบเฟรมสล็อตอะโลฮาโดยทั่วไปได้มาจากสมการความน่าจะเป็นแบบทวินามหรือโปโนเมียล ซึ่งเป็นกรณีวิเคราะห์ที่ความสามารถหรือโอกาสในการสุ่มเข้าสล็อตของแท็กทุกตัวเท่าๆ กัน โดยรูปแบบการวิเคราะห์แบบพหุนามหรือมัลติโนเมียลนี้ จะทำการวิเคราะห์การส่งแท็กที่ความสามารถหรือโอกาสในการสุ่มเข้าสล็อตของแท็กต่างกัน ซึ่งการแบ่งกลุ่มในขนาดต่างๆ จะมีประสิทธิภาพที่ต่างกัน สถานะการแย่งชิงสล็อตที่สูงและต่ำ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

โปรโตคอลป้องกันการชนของการส่ง RFID แบบหลากหลายทาง ได้ใช้โปรโตคอลเฟรมสล็อตอะโลฮา ที่ทำการส่งแท็กสุ่มเข้าเฟรมของตัวอ่าน ซึ่งแต่ละเฟรมก็จะมีขนาดสล็อตแล้วแต่จะกำหนดนั้น โดยบทความที่ได้ทำการศึกษายทำการวิเคราะห์โดยใช้สมการความน่าจะเป็นแบบทวินาม มาทำการคำนวณหาความน่าจะเป็นที่จะส่งแท็กสำเร็จ แต่วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอรูปแบบการวิเคราะห์ใหม่ซึ่งจะทำการจัดเรียงเหตุการณ์ทุกความเป็นไปได้ที่แท็กจะสุ่มเข้าหาสล็อต แล้วทำการคำนวณหาความน่าจะเป็นของแต่ละจำนวนสล็อตที่ทำการส่งสำเร็จโดยใช้สมการความน่าจะเป็นแบบพหุนาม ซึ่งรูปแบบการวิเคราะห์นี้จะสามารถนำไปใช้กับเหตุการณ์ที่การส่งแท็กในระบบทำการแบ่งแท็กออกเป็นกลุ่ม ให้ความสามารถในการสุ่มเข้าสล็อตของแท็กที่มีค่าแตกต่างกันได้ นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ กับแบบปกติ และวิเคราะห์ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ ของการส่งแพสซีฟแท็กอีกด้วย

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการวิเคราะห์การส่ง RFID แบบหลากหลายทางที่มีโปรโตคอลป้องกันการชนกันแบบเฟรมสล็อตอะโลฮา และได้ใช้รูปแบบการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นแบบพหุนาม โดยจะแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วนคือ รูปแบบการจัดเรียงเหตุการณ์ทุกความเป็นไปได้ที่แท็กจะส่งเข้าหาสล็อตที่จะนำมาใช้คำนวณความน่าจะเป็นแบบพหุนามต่อ และการวิเคราะห์โดยนำเอารูปแบบการวิเคราะห์ส่วนแรกมาใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของระบบการส่งแท็กแบบเฟรมสล็อตอะโลฮาแบบแบ่งกลุ่มความสามารถในการส่งเข้าสล็อตของแท็ก และยังทำการวิเคราะห์หาขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งแพสซีฟแท็กอีกด้วย

1.6 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

รายในวิทยานิพนธ์ประกอบไปด้วย

บทที่ 1 บทนำ ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์ และขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้จะกล่าวถึง ข้อมูลพื้นฐานและการส่งข้อมูล RFID เบื้องต้น โปรโตคอลป้องกันการชนกันสำหรับการส่งแท็กแบบหลากหลายทาง ทฤษฎีความน่าจะเป็นที่ได้ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับงานวิจัย และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ระบบ RFID โดยใช้รูปแบบการส่งแบบเฟรมสล็อตอะโลฮา (Framed Slotted ALOHA)

บทที่ 3 รูปแบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของเฟรมสล็อตอะโลฮา โดยใช้สมการพหุนามหรือมัลติโนเมียล

บทที่ 4 รูปแบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของการแบ่งกลุ่มเฟรมสล็อตอะโลฮา

บทที่ 5 สรุป ในบทนี้ได้กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

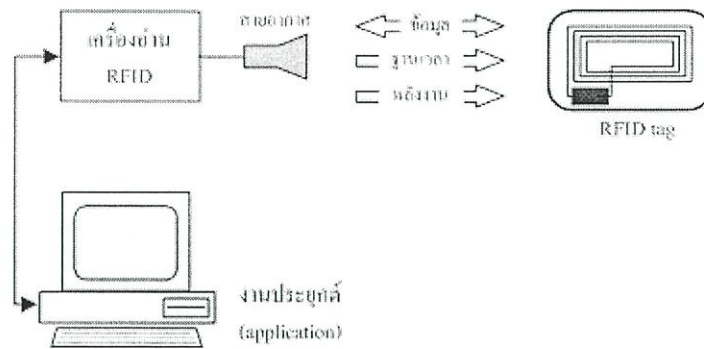
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลพื้นฐานและการส่งข้อมูล RFID เบื้องต้น โพรโตคอลป้องกันการชนกันสำหรับการส่งแท็กแบบหลากหลายทาง ทฤษฎีความน่าจะเป็นที่ได้ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการนำไปใช้คำนวณประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในบทต่อไป และยังมีเนื้อหาที่เอามาจากงานวิจัยที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบ RFID ที่มีการส่งแบบหลากหลายโดยใช้รูปแบบการส่งแบบเฟรมสลอตอะโลฮา (Framed Slotted ALOHA) ซึ่งได้เสนอโดยแบ่งเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

2.2 ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFID)

ระบบบ่งชี้ด้วยคลื่นความถี่วิทยุหรือ RFID ย่อมาจากคำว่า Radio Frequency Identification เป็นระบบขดลวดที่ได้ออกพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 โดยที่อุปกรณ์ RFID ที่มีการใช้งานเป็นครั้งแรกนั้นเป็นผลงานของ Leon Theremin ซึ่งสร้างให้กับรัฐบาลรัสเซียในปี ค.ศ. 1945 ซึ่งอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในเวลานั้นทำหน้าที่เป็นเครื่องมือดักจับสัญญาณ ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นตัวระบุเอกลักษณ์อย่างที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน

RFID ในปัจจุบันมีลักษณะเป็นป้ายอิเล็กทรอนิกส์ (RFID Tag) ที่สามารถอ่านค่าได้โดยผ่านคลื่นวิทยุจากระยะห่าง เพื่อตรวจ ติดตามและบันทึกข้อมูลที่ติดอยู่กับป้าย ซึ่งนำไปฝังไว้ในหรือติดอยู่กับวัตถุต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ กล่อง หรือสิ่งของใดๆ สามารถติดตามข้อมูลของวัตถุ 1 ชิ้นว่า คืออะไร ผลิตที่ไหน ใครเป็นผู้ผลิต ผลิตอย่างไร ผลิตวันไหน และเมื่อไหร่ ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนกี่ชิ้น และแต่ละชิ้นมาจากที่ไหน รวมทั้งตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุนั้นๆ ในปัจจุบันว่าอยู่ส่วนใดในโลก โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการสัมผัส (Contact-Less) หรือต้องเห็นวัตถุนั้นๆ ก่อน ทำงานโดยใช้เครื่องอ่านที่สื่อสารกับป้ายด้วยคลื่นวิทยุในการอ่านและเขียน ข้อมูล

เทคโนโลยี RFID สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบทั้งในภาคอุตสาหกรรมและภาคบริการ จากการวิจัยพบว่า [1]-[3] มูลค่ารวมตลาดทั่วโลกของ RFID มีอัตราที่สูงและเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2550 ตลาดอุตสาหกรรม RFID ในโลกมีมูลค่าสูงถึง 3,800 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และคาดว่าในปี พ.ศ. 2555 จะมีมูลค่าตลาดเพิ่มขึ้นเป็น 8,400 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ดังนั้นตลาดอุตสาหกรรม RFID จึงถือว่าเป็นตลาดเทคโนโลยีที่เติบโตสูงมากเช่นเดียวกับตลาดอุตสาหกรรมโทรศัพท์เคลื่อนที่และตลาดอุตสาหกรรมรถยนต์ สำหรับตลาด RFID ในประเทศไทยพบว่าการนำ RFID ไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน ได้แก่ การผลิตในอุตสาหกรรม, การประยุกต์ใช้กับห่วงโซ่อุปทานและโลจิสติกส์, การควบคุมการเข้า-ออก, การปศุสัตว์, และการเงิน เป็นต้น โดยจากสถิติในปี พ.ศ. 2548 มูลค่าตลาดของ RFID ในประเทศไทย (ทั้งส่วนที่ผลิตเองในประเทศและนำเข้า) มีมูลค่าประมาณ 856.2 ล้านบาท หรือคิดเป็นร้อยละ 1.07 ของตลาด RFID ทั่วโลก และมีมูลค่าเพิ่มเป็น 1,827.3 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2550



รูปที่ 2.1 โครงสร้างส่วนประกอบทั่วไปของระบบ RFID

2.2.1 ส่วนประกอบของระบบ RFID

ในการออกแบบระบบ RFID ให้มีการใช้งานได้อย่างสมบูรณ์จะมีการนำส่วนประกอบต่างๆ เข้ามารวมกัน สิ่งหนึ่งที่เป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดของการทำให้เกิดการตัดสินใจนั้นก็คือวิศวกร จะต้องทำการศึกษาถึงการเลือกของส่วนประกอบของระบบที่มีความแตกต่างกัน ในการที่จะทำการศึกษารื่องดังกล่าว ต้องมีความรู้ความเข้าใจอย่างถ่องแท้ในเรื่องของความเกี่ยว ข้องกับ กระบวนการนั้นๆ เพื่อที่จะเพิ่มเติมทางด้านของความน่าจะเป็นของผลิตภัณฑ์ที่เต็มไปด้วยฟังก์ชันต่างๆ และทำให้เกิดความน่าเชื่อถือของระบบ ซึ่งโดยหลักๆแล้ว ส่วนประกอบของระบบ RFID จะมีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วนคือ

1. แท็ก (Tag)
2. ตัวอ่านข้อมูล (Reader หรือ Interrogator)
3. สายอากาศ (Antenna)
4. โฮสต์ (Host)

2.2.1.1 แท็ก (Tag หรือ Transponder)

แท็กหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) จะมีหน้าที่ในการส่งสัญญาณ หรือข้อมูลที่บันทึกอยู่ในแท็กตอบสนองไปที่ตัวอ่านข้อมูล การสื่อสารระหว่างแท็กและตัวอ่านข้อมูลจะเป็นการสื่อสารกันโดยอาศัยช่องความถี่วิทยุผ่านอากาศ โครงสร้างภายในแท็กประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่

1. ไมโครชิป (Microchip) เป็นสารกึ่งตัวนำ ทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลของวัตถุในหน่วยความจำ ซึ่งในหน่วยความจำนี้ อาจเป็นแบบอ่านได้อย่างเดียว (ROM) หรือทั้งอ่านและเขียน (RAM) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการนำไปใช้งานโดยปกติหน่วยความจำแบบอ่านได้อย่างเดียวจะเก็บข้อมูลด้วยความปลอดภัย เช่น สิทธิในการเข้าออกประตู ส่วนหน่วยความจำแบบทั้งอ่านและเขียนใช้เก็บข้อมูลชั่วคราวระหว่างที่แท็กและตัวเครื่องอ่านทำการติดต่อสื่อสารกัน นอกจากนี้ยังมีหน่วยความจำแบบ อีอีพรอม (EEPROM) เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลการสื่อสารระหว่างแท็ก และตัวเครื่องอ่าน ทำให้ข้อมูลยังคงอยู่ถึงแม้จะไม่มีพลังงานไฟฟ้าป้อนให้แก่แท็ก

2. สายอากาศ(Antenna)เป็นขดลวดขนาดเล็กที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศสำหรับรับส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสร้างพลังงานป้อนให้กับไมโครชิป สายอากาศจะแผ่สัญญาณวิทยุจำนวนหนึ่งออกมา เพื่อกระตุ้นให้แท็กอ่านหรือเขียนข้อมูลลงไป สายอากาศสามารถมีได้หลากหลายขนาด

และรูปร่าง เพื่อให้เหมาะสมกับวัตถุที่จะนำแท็กไปติดตั้ง และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการรับ-ส่งสัญญาณความถี่วิทยุ ทั้งสองส่วนนี้จะเชื่อมต่ออยู่ด้วยกัน

ไอซีของแท็กที่มีการผลิตออกมานั้นจะมีทั้งขนาดและรูปร่างเป็นได้ตั้งแต่แท่ง หรือแผ่นขนาดเล็กจนแทบไม่สามารถมองเห็น หรือไปจนถึงขนาดใหญ่สะดุดตา ซึ่งต่างก็มีความเหมาะสมกับชนิดงานที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปโครงสร้างภายในส่วนที่เป็นไอซีของแท็กนั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่

1. ส่วนของการควบคุมภาครับภาคส่งสัญญาณวิทยุ สำหรับโครงสร้างของส่วนนี้ประกอบด้วยภาคตีมอดคูเลต และภาคมอดคูเลต (สำหรับรับส่งข้อมูลระหว่างแท็กกับตัวเครื่องอ่าน) และวงจรกำเนิดไฟฟ้า

2. ส่วนของการควบคุมภาคดิจิทัล ซึ่งรับหน้าที่จัดการเกี่ยวกับกระบวนการทางดิจิทัลทั้งหมดโครงสร้างหลักๆของส่วนการทำงานนี้ประกอบด้วย ส่วนบันทึกข้อมูล ประกอบด้วยหน่วยความจำ แรม รอม หรืออีอีพรอม ส่วนของการเข้ารหัส (Crypts Unit) ส่วนตอบรับ สัญญาณร้องขอ (Answer to Request) ส่วนควบคุมและประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (Control and Arithmetic Unit) อย่างไรก็ตามโครงสร้างภายในของแท็กที่ต่างผู้ผลิต หรือต่างรุ่นกันบางครั้งอาจมีรายละเอียดในการทำงานไม่ครบถ้วนทุกส่วนอย่างที่ได้อธิบายมา ซึ่งรายละเอียดโครงสร้างตลอดจนรายละเอียดในการทำงานของแท็กเบอร์ใดๆ ก็สามารถหาได้จากดาต้าชีทของบริษัทผู้ผลิตแท็กเบอร์นั้นๆ

แท็กมีลักษณะเป็นไมโครชิปที่ยอมให้ผู้ใช้ติดเข้าระหว่างชั้นของกระดาษหรือพลาสติกที่ใช้ทำป้ายสติก ชิพหรือแท็ก อาจมีรูปร่างได้หลากหลายขึ้นอยู่กับรูปแบบการนำไปใช้งาน โดยอาจมีรูปร่างเหมือนบัตรเครดิตในการใช้งานทั่วไป หรือเล็กขนาดใส่ดินสอยาวเพียง 10 มิลลิเมตร เพื่อฝังเข้าใต้ผิวหนังสัตว์ในกรณีนำไปใช้งานในปศุสัตว์ หรืออาจมีขนาดใหญ่มาก เช่น แท็กที่ใช้กับเครื่องจักรขณะทำการขนส่ง แท็กอาจนำไปติดไว้กับสินค้าในร้านค้าปลีกทั่วไปเพื่อป้องกันการขโมย โดยจะมีการติดตั้งสายอากาศของตัวอ่านข้อมูลขนาดใหญ่ไว้ตรงประตูทางออกเพื่อเป็นการตรวจจับขโมย โดยแท็กจะได้รับพลังงานจากสัญญาณความถี่วิทยุเพื่อติดต่อสื่อสารกันกับตัวเครื่องอ่าน หรือใช้พลังงานแบตเตอรี่ที่บรรจุอยู่ในแท็ก ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ ลิเทียมไอออน ที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนานจึงมักนำมาใช้กับแผ่นแท็กนี้

2.2.1.2 ตัวอ่านข้อมูล (Reader)

หน้าที่สำคัญของตัวอ่านข้อมูล (Reader หรือ Interrogator) ก็คือการรับข้อมูลที่ส่งมาจากแท็ก แล้วทำการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูล ถอดรหัสสัญญาณข้อมูลที่ได้รับซึ่งกระทำโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ อัลกอริทึมที่อยู่ในเฟิร์มแวร์ (Firmware) ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณ ถอดรหัสสัญญาณที่ได้ และทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อนำข้อมูลผ่านเข้าสู่กระบวนการต่อไป โครงสร้างภายในเครื่องอ่านจะประกอบด้วย

1. ภาครับและส่งสัญญาณวิทยุ (Transceiver)
2. ภาคสร้างสัญญาณพาหะ (Carrier)
3. ขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศ (Antenna)
4. วงจรจูนสัญญาณ (Tuner)
5. หน่วยประมวลผลข้อมูล (Processing Unit)

นอกจากนี้ตัวอ่านข้อมูลที่ดีต้องมีความสามารถในการป้องกันการอ่านข้อมูลซ้ำ เช่น ในกรณีที่แท็กถูกวางทิ้งอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตัวอ่านข้อมูลสร้างขึ้น หรืออยู่ในระยะการรับส่ง ก็อาจทำให้ตัวอ่านข้อมูลทำการรับหรืออ่านข้อมูลจากแท็กซ้ำอยู่เรื่อยๆไม่สิ้นสุด ดังนั้นตัวอ่านข้อมูลที่ดีต้องมีระบบป้องกันเหตุการณ์เช่นนี้ที่เรียกว่าระบบ "Hands Down Polling" โดยตัวอ่านข้อมูล จะสั่งให้แท็กหยุดการส่งข้อมูลในกรณีเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว หรืออาจมีบางกรณีที่มีแท็กหลายแท็กอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าพร้อมกัน หรือที่เรียกว่า "Batch Reading" ตัวอ่านข้อมูลควรมีความสามารถที่จะจัดลำดับการอ่านแท็กทีละตัวได้

2.2.1.3 สายอากาศ (Antenna)

สายอากาศในระบบ RFID จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวรับ ตัวส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระหว่างแท็กและตัวเครื่องอ่าน สิ่งที่เห็นได้ชัดเจนในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นก็คือสายอากาศที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องส่งสัญญาณในระบบ RFID จะทำการสร้างบริเวณส่งสัญญาณออกไปเป็น สามมิติ (Three-dimensional) เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารกับแท็ก ซึ่งจะประสบความสำเร็จในการติดต่อสื่อสารกันก็ต่อเมื่อมีแท็กเข้ามาอยู่ในบริเวณนั้น

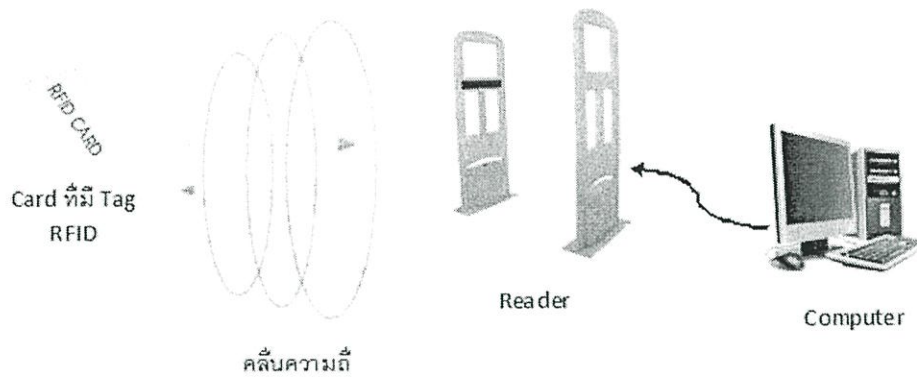
2.2.1.4 โฮสต์ (Host)

โฮสต์ในระบบ RFID ก็คือระบบคอมพิวเตอร์ที่แท็กใช้ในการติดต่อสื่อสารกับตัวเครื่องอ่าน ทำหน้าที่ในการรับข้อมูลจากตัวเครื่องอ่าน ซึ่งสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ตามจำนวนของซอฟต์แวร์ที่ส่งเสริมการประยุกต์ใช้งานในระบบ RFID ซึ่งหนึ่งในนั้นที่เป็นที่รู้จักกันดีก็คือซอฟต์แวร์ในชั้น มิดเดิลแวร์ (Middleware) ที่ทำหน้าที่ในการกำหนดและควบคุมการทำงานของตัวเครื่องอ่าน ส่วนอีกประเภทหนึ่งก็จะเป็นในส่วนของการจัดการของข้อมูล ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบด้วย การจัดการฐานข้อมูลและเก็บข้อมูลต่างๆ

2.2.2 พื้นฐานการทำงานของระบบ RFID

หัวใจของเทคโนโลยี RFID ได้แก่ อินเลย์ (Inlay) ที่บรรจุอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์กับโลหะที่ยึดหยุ่นได้สำหรับการติดตามหรือทำหน้าที่เป็นเสาอากาศนั่นเอง อินเลย์มีความหนาสูงสุดอยู่ที่ 0.375 มิลลิเมตร สามารถทำเป็นแผ่นบางอัดเป็นชั้น ระหว่างกระดาษแผ่นฟิล์มหรือพลาสติกก็ได้ ซึ่งเป็นการผลิตเครื่องหมายหรือฉลาก จากวัสดุที่มีราคาไม่แพงมากนัก ซึ่งจะเห็นได้ว่าอินเลย์มีลักษณะรูปร่างที่บางมาก จึงทำให้ง่ายต่อการติดเป็นป้ายชื่อหรือฉลากของชิ้นงานหรือวัตถุนั้นๆ ได้สะดวก

RFID เป็นระบบที่นำเอาคลื่นวิทยุมาเป็นคลื่นพาหะเพื่อใช้ในการสื่อสารข้อมูลสองชนิดที่เรียกว่าแท็ก และตัวอ่านข้อมูล ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless) โดยการนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาทำการมอดดูเลต (Modulation) กับคลื่นวิทยุแล้วส่งออกผ่านสายอากาศที่อยู่ในตัวรับข้อมูล ดังแผนผังการทำงานของระบบ RFID ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แผนผังการทำงานของระบบ RFID

โดยเบื้องต้นตัวเครื่องอ่านข้อมูลจะปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาตลอดเวลา และคอยตรวจจับว่ามีแท็กเข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือไม่ หรืออีกนัยหนึ่งคือการคอยตรวจว่ามี การมอดูเลตสัญญาณเกิดขึ้นหรือไม่ เมื่อมีแท็กเข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แท็กจะได้รับพลังงานไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้แท็กเริ่มทำงาน และจะส่งข้อมูล ในหน่วยความจำที่ผ่านการมอดูเลตกับคลื่นพาหะออกมาทางสายอากาศที่อยู่ภายในแท็ก คลื่นพาหะ ที่ถูกส่งออกมาจากแท็ก เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด ความถี่ หรือเฟส ขึ้นอยู่กับวิธีการมอดูเลต โดยมากมักจะใช้วิธีการมอดูเลตทางแอมพลิจูดหรือใช้การมอดูเลตทางแอมพลิจูดบวกกับการเข้ารหัส แมนเชสเตอร์ (Manchester encoded AM) แต่ทว่าในปัจจุบันก็มีแท็กส์ที่ใช้การมอดูเลตแบบอื่นๆ ด้วย เช่น การมอดูเลชันแบบเฟสชิฟคีย์อิง (Phase Shift Keying : PSK) ฟรีควเินซีชิฟคีย์อิง (Frequency Shift Keying : FSK) หรือการใช้การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation : FM) ตัวอ่านข้อมูลตรวจจับความเปลี่ยนแปลงของคลื่นพาหะออกมาเป็นข้อมูล แล้วทำการถอดรหัส เพื่อนำข้อมูลไปใช้งานต่อไป

ในการรับส่งข้อมูลหรือสัญญาณวิทยุระหว่างแท็กกับเครื่องอ่าน จะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อเมื่อสายอากาศมีความยาวที่เหมาะสมกับความถี่พาหะที่ใช้งาน เช่น เมื่อความถี่ใช้งานเป็น 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ ความยาวของเสาอากาศ (เป็นเส้นตรง) ที่เหมาะสมก็คือ 22.12 แนนอนว่าในทางปฏิบัติ คงไม่สามารถนำเสาอากาศที่ใหญ่ขนาดนั้นมาใช้งานกับแท็กขนาดเล็กได้ สายอากาศที่ดูจะเหมาะสม ใช้ร่วมกับแท็กส์มากที่สุดก็คือ สายอากาศที่เป็นขดลวดขนาดเล็กหรือที่มีชื่ออย่างเป็นทางการว่า สายอากาศแบบแมกเนติกไดโพล (Magnetic dipole Antenna) รูปแบบของสายอากาศแบบนี้ก็จะมี อยู่หลากหลายทั้งแบบที่เป็นขดลวดพันแกนอากาศหรือแกนเฟอร์ไรต์ แบบที่เป็นวงรูปที่ทำขึ้นจาก ลายทองแดงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ทั้งที่เป็นลูปแบบวงกลมและสี่เหลี่ยม ทั้งนี้ความเหมาะสมในการใช้ งานก็แตกต่างกันไปตามความถี่พาหะและประเภทของงานด้วยเช่นกัน

นอกจากการรับส่งข้อมูลแล้วสายอากาศก็ยังทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับแท็กด้วย โดยอาศัยหลักการทำงานตามแนวคิดของไมเคิล ฟาราเดย์ เรื่องแรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดที่เกิดขึ้นจาก เส้นแรงแม่เหล็ก (จากเครื่องอ่าน) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (Time-varying magnetic field) พุ่งผ่านสายอากาศของแท็ก เมื่อแท็กและเครื่องอ่านตั้งอยู่ห่างกันในระยะ 0.16 เท่าของความยาวของ คลื่นพาหะที่ใช้ เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า Transformer-type Coupling ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ แบบเดียวกับการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิ (Primary) และขดลวดทุติยภูมิ

(Secondary) ในทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Transformer) จะเป็นวงจรพื้นฐานสำหรับอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นในการส่งข้อมูลของแท็ก

กลไกในการส่งข้อมูลของแท็กจะเกิดขึ้นโดยมีมอสเฟต T1 (ที่แท็ก) ซึ่งทำงานเป็นสวิตช์เป็น ผู้ควบคุมอีกที เพราะการเปิด ปิดที่มอสเฟต T1 ทำให้ค่าความต้านทานของโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ค่าแรงดันตกคร่อมสายอากาศเปลี่ยนตามไปด้วย ซึ่งถ้าหากว่าการเปิดปิดที่มอสเฟต T1 ถูกควบคุมด้วยข้อมูลที่ต้องการส่งก็จะทำให้เกิดการส่งข้อมูลด้วยการมอดูเลตทางแอมพลิฟิเคชัน กรรมวิธีในการส่งข้อมูลแบบนี้เรียกว่า โหลดมอดูเลชัน (Load Modulation) เนื่องจากว่าเป็นการส่งด้วยการมอดูเลตทางแอมพลิฟิเคชัน เมื่อรับข้อมูลจึงต้องใช้วงจรพีคดีเท็กเตอร์ (Peak Detector) เพื่อดึงเอาส่วนของสัญญาณที่ได้รับกลับออกมา

2.2.3 การจำแนกประเภทอุปกรณ์ RFID

เทคโนโลยี RFID สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ จึงทำให้อุปกรณ์ RFID ที่ผลิตออกมามีความแตกต่างกันตามความเหมาะสมของการใช้งาน ดังนั้นการเลือกอุปกรณ์ RFID ให้เหมาะสมกับความต้องการใช้งาน ผู้ใช้จำเป็นต้องศึกษาความแตกต่างทั้งทางด้านเทคนิคและคุณลักษณะของอุปกรณ์ RFID แต่ละรูปแบบ เพื่อให้สามารถตัดสินใจเลือกอุปกรณ์ RFID มาใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ ในส่วนนี้จะอธิบายถึงคุณลักษณะที่สำคัญซึ่งนิยมใช้เป็นข้อกำหนดทางเทคนิคของระบบ RFID ดังต่อไปนี้

2.2.3.1 แหล่งกำเนิดพลังงาน

หากพิจารณาถึงปัจจัยว่าแท็ก RFID มีแหล่งกำเนิดพลังงานภายในตัวเองหรือไม่ และแท็ก RFID สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารข้อมูลได้หรือไม่ ก็จะทำให้สามารถจำแนกแท็ก RFID ออกเป็น 3 กลุ่มคือ แบบพาสซีฟ, แบบกึ่งพาสซีฟ, และแบบแอ็กทีฟ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. แท็กชนิดพาสซีฟ (passive tag) จะไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานบรรจุไว้ภายในแท็ก แต่จะอาศัยการแปลงสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งออกมาจากเครื่องอ่านให้เป็นพลังงานไฟฟ้าหล่อเลี้ยงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในแท็ก RFID ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- 1) สายอากาศของแท็กได้รับสัญญาณจากเครื่องอ่าน
- 2) สายอากาศส่งสัญญาณไปให้กับวงจรรวม (IC : integrated circuit) เพื่อแปลงให้ เป็นกำลังไฟฟ้า
- 3) หนึ่งของกำลังไฟฟ้าจะนำไปใช้หล่อเลี้ยงวงจรรวม
- 4) เมื่อวงจรรวมทำงาน ก็จะเริ่มทำการประมวลผลสัญญาณและส่งผลลัพธ์กลับไปยังเครื่องอ่าน

โดยทั่วไปแท็กแบบพาสซีฟมีคุณสมบัติดังนี้

- การทำงาน (operation) แท็กแบบพาสซีฟจะต้องถูกใช้งานภายในพื้นที่การอ่าน (interrogation zone) ของเครื่องอ่านเท่านั้น เพราะที่ต้องอาศัยพลังงานที่ส่งมาจากเครื่องอ่าน
- ขนาดและระยะเวลาการทำงาน (size and range) แท็กแบบพาสซีฟจะมีขนาดเล็กและมีระยะเวลาการทำงานที่น้อยกว่าแท็กแบบแอ็กทีฟ เนื่องจากไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง
- ช่วงชีวิต (lifespan) แท็กแบบพาสซีฟจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เพราะทำงานโดยใช้พลังงานที่ส่งมาจากเครื่องอ่าน
- หน่วยความจำ (memory) แท็กแบบพาสซีฟมีหน่วยความจำตั้งแต่ 1 บิต จนถึงหลายกิโลไบต์

ในทางปฏิบัติแท็กแบบแพสซีฟสามารถนำมาใช้ในย่านความถี่ LF, HF, และ UHF ได้ โดยมีระยะการทำงานตั้งแต่ 2 มิลลิเมตร จนถึง 5 เมตร นอกจากนี้แท็กแบบแพสซีฟจะมีราคาถูก และหาซื้อได้ง่าย จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำมาใช้งานประยุกต์ที่ต้องการอ่านข้อมูลในระยะใกล้

นอกจากนี้ในบางครั้งแท็กที่ไม่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารได้จะถูกเรียกว่าแท็กแบบแพสซีฟ ดังนั้นแท็กที่ไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานภายในแท็ก แต่ไม่ทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารจะเรียกว่าแท็กแบบกึ่งแพสซีฟ (semi-passive tag)

2. แท็กชนิดกึ่งแพสซีฟ มีแหล่งกำเนิดพลังงานภายในแท็ก (เช่น แบตเตอรี่) แต่จะไม่ทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารกับเครื่องอ่าน กล่าวคือสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องอ่านจะทำให้แท็กเริ่มทำงาน โดยแท็กนี้จะใช้กำลังไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการหล่อเลี้ยงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และใช้พลังงานที่ได้รับจากเครื่องอ่านสำหรับส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่าน โดยทั่วไปแท็กแบบกึ่งแพสซีฟมีคุณสมบัติดังนี้

- การทำงาน เนื่องจากแท็กแบบกึ่งแพสซีฟต้องอาศัยพลังงานที่ส่งมาจากเครื่องอ่านในการเริ่มทำงาน ดังนั้นการทำงานของแท็กนี้จึงเหมือนกับแท็กแบบแพสซีฟ
- ขนาดและระยะการทำงาน เนื่องจากแท็กแบบกึ่งแพสซีฟมีแบตเตอรี่สำหรับหล่อเลี้ยงวงจรภายใน จึงทำให้มีขนาดใหญ่กว่าและมีระยะการทำงานไกลกว่าแท็กแบบแพสซีฟ
- ช่วงชีวิต เนื่องจากแท็กแบบกึ่งแพสซีฟมีแหล่งกำเนิดพลังงาน ดังนั้นอายุการใช้งานของแท็กนี้จะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของแหล่งกำเนิดพลังงาน
- หน่วยความจำ แท็กแบบกึ่งแพสซีฟจะมีหน่วยความจำมากกว่าแท็กแบบแพสซีฟ

3. แท็กชนิดแอ็กทีฟ (active tag) มีแหล่งกำเนิดพลังงานหรือแบตเตอรี่ภายในแท็ก และสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารกับเครื่องอ่านได้ โดยมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- การทำงาน เนื่องจากแท็กแบบแอ็กทีฟสามารถเริ่มทำงานได้ตลอดเวลา จึงทำให้ใช้งานได้หลากหลาย
- ขนาดและระยะการทำงาน แท็กแบบแอ็กทีฟมีขนาดใหญ่ (ประมาณ $1.5 \times 3 \times 0.5$ ลูกบาศก์นิ้ว) แต่ด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบันจึงทำให้แท็กแบบแอ็กทีฟมีขนาดเล็กลงจนมีขนาดเทียบเท่ากับเหรียญได้ สำหรับระยะการทำงานของแท็กนี้สามารถส่งข้อมูลได้ไกลหลายสิบลเมตรจนถึงหนึ่งกิโลเมตร ดังนั้นแท็กแบบแอ็กทีฟนิยมนำมาใช้ร่วมกับระบบ GPS (global positioning system) เพื่อระบุตำแหน่งที่แน่นอนของวัตถุที่ติดแท็กนี้ได้
- ช่วงชีวิต แท็กนี้จะมีอายุการใช้งานประมาณ 10 ปี ตามชนิดของแหล่งกำเนิดพลังงาน
- หน่วยความจำ แท็กแบบแอ็กทีฟจะมีหน่วยความจำมากกว่าแท็กแบบอื่น

ในทางปฏิบัติแท็กแบบแอ็กทีฟนิยมนำมาใช้งานในย่านความถี่ UHF และไมโครเวฟ เช่น 455 MHz, 2.45 GHz, และ 5.8 GHz ซึ่งมีระยะการทำงานตั้งแต่ 20 เมตรจนถึง 100 เมตร โดยนิยมนำมาใช้ในการระบุตัวตนของวัตถุที่มีมูลค่าสูง เช่น รถยนต์ หรือตู้สินค้า เป็นต้น เนื่องจากสามารถอ่านค่าระยะไกลและเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารได้ โดยจะแบ่งย่อยออกเป็น 2 แบบคือ

- 1) แท็กแบบแอ็กทีฟ จะเริ่มต้นทำงานเมื่อได้รับสัญญาณจากเครื่องอ่าน ดังนั้นวิธีนี้จึงช่วยยืดอายุการใช้งานของแท็กให้ยาวนานขึ้น โดยแท็กแบบแอ็กทีฟจะนิยมใช้งาน

- ในระบบเก็บเงินทางด่วน (toll collection system) และระบบควบคุมจุดตรวจ (checkpoint control system)
- 2) แท็กแบบ Beacon คือแท็กที่จะส่งสัญญาณเฉพาะในช่วงเวลาที่กำหนด มักนิยมใช้งานในระบบหาตำแหน่งแบบเวลาจริง (RTLS: real-time locating system)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแท็ก RFID แบบต่างๆ[3]

คุณสมบัติของแท็ก	ประเภทของแท็ก		
	แบบแพลสซิฟ	แบบกึ่งแพลสซิฟ	แบบแอ็กทีฟ
แหล่งพลังงาน	ไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง แต่จะอาศัยพลังงานที่ส่งมาจากเครื่องอ่าน	มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง (แบตเตอรี่)	มีแหล่งกำเนิดพลังงานในตัวเอง (แบตเตอรี่)
การติดต่อสื่อสาร	เครื่องอ่านจะกำหนดการเริ่มต้นการสื่อสาร	เครื่องอ่านจะกำหนดการเริ่มต้นการสื่อสาร	เครื่องอ่านหรือแท็กจะกำหนดการเริ่มต้นการสื่อสาร
ขนาด	เล็ก 0.15 mm × 0.15 mm × 7.5 μm	กลาง	ใหญ่ 1.5 × 1.5 × 1.5 นิ้ว ³
ระยะการอ่าน	สั้น (2 mm ถึงหลายเมตร)	ปานกลาง (ไกลถึง 100 เมตร)	ไกล (ไกลถึง 1 กิโลเมตร)
การออกแบบหน่วยความจำ	แบบอ่านอย่างเดียว (RO: read only, แบบเขียนหนึ่งครั้งและอ่านได้หลายครั้ง (WORM: write once/read many), หรือแบบอ่านและเขียน (RW: read/write)		
ขนาดหน่วยความจำ	1 – 128 บิต (บางแท็กอาจสูงถึง 64 KB)	--	สูงถึง 8 เมกะไบต์ (MB)
ราคา	ไม่แพง	ปานกลาง	แพง

2.2.3.2 ลักษณะการติดต่อสื่อสาร

อุปกรณ์ RFID ทั้งหมดที่มีจำหน่ายในท้องตลาดจะมีลักษณะการติดต่อสื่อสารอยู่ 2 แบบคือ แบบการสื่อสารสองทางเต็มอัตรา (FDX: full duplex) หรือแบบการสื่อสารสองทางครึ่งอัตรา (HDX: half duplex) และแบบการสื่อสารเป็นลำดับ (SEQ: sequential) ซึ่งทั้งสองแบบมีหลักการทำงานแตกต่างกันดังต่อไปนี้

1. การรับส่งข้อมูลแบบ FDX/HDX เครื่องอ่านจะส่งพลังงานไฟฟ้าผ่านทางคลื่นความถี่วิทยุไปจ่ายให้กับแท็กต่างๆ ที่อยู่ในบริเวณการใช้งาน จากนั้นแท็กก็จะทำการตอบสนองโดยการส่งสัญญาณกลับไปให้เครื่องอ่าน โดยทั่วไปกำลังส่งสัญญาณของแท็กมีค่าต่ำ (เมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องอ่าน) จึงอาจทำให้สัญญาณส่งไปไม่ถึงเครื่องอ่าน หรือส่งไปถึงแต่ก็จะมีสัญญาณรบกวนอยู่มาก ดังนั้นจึงต้องมีกระบวนการส่งสัญญาณที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างสัญญาณของแท็กกับสัญญาณของเครื่องอ่าน ในทางปฏิบัติการมอดูเลชันแบบโพลด์ (load modulation) จะถูกนำไปใช้ในการส่งข้อมูลจากแท็กไปยังเครื่องอ่าน

2. การรับส่งข้อมูลแบบ SEQ เครื่องอ่านจะทำการหยุดส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุไปยังแท็กเป็นระยะๆ อย่างสม่ำเสมอโดยในช่วงเวลาที่เครื่องอ่านไม่ได้ส่งสัญญาณออกไป แท็กก็จะทำการส่งสัญญาณกลับมายังเครื่องอ่านซึ่งถือว่าเป็นการสร้างฐานเวลา (timing) สำหรับใช้อ้างอิงภายในระบบสื่อสารอย่างไรก็ตามการรับส่งข้อมูลแบบนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่การจ่ายพลังงานให้กับแท็กเนื่องจากในช่วงเวลาที่เครื่องอ่านหยุดส่งสัญญาณนั้น แท็กทั้งหมดจะไม่ได้รับพลังงานไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องอ่าน ดังนั้นโดยทั่วไปแท็กที่ใช้งานการรับส่งข้อมูลแบบ SEQ จะมีการติดตั้งอุปกรณ์เก็บประจุหรือแบตเตอรี่ขนาดเล็กไว้ภายในแท็กเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่าน

2.2.3.3 ความจุข้อมูล

โดยทั่วไปแท็กจะมีขนาดของหน่วยความจำ หรือที่เรียกกันว่า “ความจุข้อมูล (data capacity)” ตั้งแต่ไม่กี่ไบต์ (byte) จนถึงหลายกิโลไบต์ (KB) นอกจากนี้ยังมีแท็กอีกแบบหนึ่งที่ถูกออกแบบให้มีความจุข้อมูลเพียง 1 บิต (1-bit transponder) ซึ่งมีราคาถูกและสามารถเก็บข้อมูลได้เพียงสองสถานะเท่านั้น (เช่น มีหรือไม่มี) ดังนั้นแท็กแบบหนึ่งบิตจึงนิยมใช้ในระบบ EAS (electronic article surveillance) เพื่อป้องกันสินค้าภายในร้าน ตัวอย่างเช่น แท็กแบบหนึ่งบิตจะติดอยู่กับสินค้าในร้านค้า โดยสถานะของข้อมูลในแท็กแต่ละชิ้นที่ยังไม่ได้มีการขายอาจจะถูกกำหนดให้เป็นค่า “1” และจะถูกเปลี่ยนให้เป็นค่า “0” เมื่อสินค้าชิ้นนั้นได้มีการชำระเงินแล้ว ดังนั้นในกรณีที่ผู้หยิบสินค้าที่ติดแท็กนี้ออกจากร้านโดยไม่ได้มีการจ่ายเงิน เครื่องอ่านที่ได้รับการติดตั้ง ณ ทางเข้าออกของร้านค้ายิ่งจะตรวจพบว่ามีแท็กอยู่ในรัศมีทำการและจะส่งสัญญาณไปยังระบบเตือนภัยทันที

2.2.3.4 ความสามารถในการโปรแกรม

การจำแนกประเภทของแท็กตามความสามารถในการโปรแกรมข้อมูลสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบคือ

- 1) แท็กที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ โดยข้อมูลต่างๆที่อยู่ภายในแท็กนี้ (เช่น หมายเลขรหัส) จะถูกบันทึกมาตั้งแต่การผลิต ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขข้อมูลเหล่านี้ได้ระหว่างการใช้งาน
- 2) แท็กที่สามารถทำการโปรแกรมข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่านได้ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบตามเทคโนโลยีหน่วยความจำดังต่อไปนี้

2.1) หน่วยความจำแบบ EEPROM (electrically erasable programmable read-only memory) เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด แต่มีข้อเสียคือใช้พลังงานไฟฟ้าสูงในการบันทึกข้อมูลและสามารถบันทึกข้อมูลได้เพียง 100,000 – 1,000,000 ครั้งเท่านั้น

2.2) หน่วยความจำแบบ FRAM (ferromagnetic random access memory) ใช้พลังงานไฟฟ้าในการบันทึกข้อมูลต่ำกว่าแบบ EEPROM ประมาณ 100 เท่า แต่มีอายุการใช้งานในการบันทึกข้อมูลใหม่ต่ำกว่า 1,000 เท่า นอกจากนี้การผลิตแท็กแบบนี้มีความยุ่งยาก จึงมีผลให้แท็กนี้ไม่ได้รับความนิยมในการใช้งานเหมือนแบบอื่นๆ

2.3) หน่วยความจำแบบ SRAM (static random access memory) นิยมใช้ในการเก็บข้อมูล เนื่องจากมีความรวดเร็วในการบันทึกข้อมูล อย่างไรก็ตามหน่วยความจำแบบนี้ต้องการกระแสไฟฟ้าเลี้ยงอยู่ตลอดเวลาเพื่อ

รักษาข้อมูลให้คงอยู่ในหน่วยความจำ ดังนั้นแท็กที่ใช้หน่วยความจำแบบนี้จะต้องมีแบตเตอรี่สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงให้กับหน่วยความจำ จึงมีผลทำให้แท็กนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เพราะฉะนั้นแท็กแบบนี้มันจะนำไปใช้ในงานเฉพาะด้านเท่านั้น

2.2.3.5 การจัดการลำดับคำสั่ง

ในกรณีของแท็กที่สามารถโปรแกรมได้นั้นยังสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 แบบตามเทคนิคที่ใช้ในการจัดการลำดับคำสั่งสำหรับการประมวลผลข้อมูลดังนี้

- 1) การประมวลผลแบบกำหนดเงื่อนไขตายตัว (state machine) เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ถูกบันทึกลงในชิปประมวลผลของแท็ก ตั้งแต่อยู่ในโรงงานผลิตจึงทำให้ใช้งานได้เฉพาะด้านเท่านั้นเนื่องจากไม่สามารถทำการแก้ไขโปรแกรมภายในชิปของแท็กได้
- 2) การประมวลผลแบบไมโครโพรเซสเซอร์ (microprocessor) ผู้ใช้งานสามารถเขียนและแก้ไขโปรแกรมให้ทำงานตามที่ต้องการได้ โดยภายในชิปไมโครโพรเซสเซอร์จะมีการติดตั้งระบบปฏิบัติการและโปรแกรมพื้นฐานสำหรับใช้ในงานประยุกต์ต่างๆ ตั้งแต่อยู่ในโรงงานผลิต

2.2.3.6 ความถี่ใช้งาน

ความถี่ใช้งาน (operating frequency) ถือเป็นคุณสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่งในการเลือกใช้อุปกรณ์ RFID ทั้งระบบ ซึ่งหมายถึงคลื่นความถี่วิทยุที่เครื่องอ่านทำการส่งออกไปเท่านั้น โดยไม่สนใจว่าแท็กจะส่งคลื่นความถี่ในย่านใดตอบกลับมา ในบางกรณีแท็กอาจส่งคลื่นความถี่เดิมกลับไปหาเครื่องอ่านก็ได้โดยอาศัยเทคนิคการมอดูเลชันแบบโพลดในการแยกแยะความแตกต่างของสัญญาณที่รับและส่ง โดยทั่วไปความถี่ใช้งานของอุปกรณ์ RFID สามารถแบ่งออกเป็น 4 ย่านความถี่ตามตารางที่ 2.2 สำหรับแท็กแบบแอ็กทิฟสามารถทำงานได้ระยะไกลถึง 100 เมตร ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้งานในขนาดใหญ่ เช่น ตู้บรรจุสินค้า และรถยนต์ โดยใช้ความถี่ 455 MHz, 2.45 GHz, หรือ 5.8 GHz และมีระยะการทำงานตั้งแต่ 20 เมตรถึง 100 เมตร เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าระยะการทำงานของแท็กจะเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงระยะการทำงานของแท็กยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆอีก ได้แก่ พลังงานที่ส่งมาจากเครื่องอ่าน, ขนาดของสายอากาศ, ตำแหน่งของเครื่องอ่านและแท็ก, เทคนิคในการรับส่งข้อมูล, และประเภทของแท็ก เป็นต้น

ในทางปฏิบัติระบบ RFID ที่ทำงานในย่านความถี่ต่ำ (LF) และความถี่สูง (HF) จะใช้ความถี่เดียวกันทั้งคู่โดย เช่น ย่านความถี่ต่ำจะใช้ความถี่ 135 kHz และย่านความถี่สูงจะใช้ความถี่ 13.56 MHz เป็นต้น อย่างไรก็ตามไม่มีการกำหนดความถี่ที่จะใช้ในระบบ RFID ที่ทำงานในย่านความถี่สูงยิ่ง (UHF) ดังนั้นความถี่ใช้งานในย่านความถี่สูงยิ่งในแต่ละประเทศจะแตกต่างกันตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ย่านความถี่ที่ใช้งานในระบบ RFID

ย่านความถี่	ช่วงความถี่	ความยาวคลื่น	ระยะการทำงานของแท็กแบบพาสซีฟ
ความถี่ต่ำ (LF: low frequency)	30 kHz – 300 kHz	10 km – 1 km	< 50 cm
ความถี่สูง (HF: high frequency)	3 MHz – 30 MHz	100 m – 10 m	< 3 cm
ความถี่สูงยิ่ง (UHF: ultra high frequency)	300 MHz – 3 GHz	1 m – 10 cm	< 9 m
ความถี่ไมโครเวฟ (microwave)	3 GHz – 300 GHz	30 cm – 1 mm	> 10 m

ตารางที่ 2.3 ความถี่ใช้งานของอุปกรณ์ RFID ในแต่ละประเทศ

ประเทศ	ความถี่ต่ำ (LF)	ความถี่สูง (HF)	ความถี่สูงยิ่ง (UHF)	ความถี่ไมโครเวฟ
สหรัฐอเมริกา	125, 134 MHz	13.56 MHz	902 – 928 MHz	2.40 – 2.48 GHz 5.72 – 5.85 GHz
ยุโรป	125, 134 MHz	13.56 MHz	868 – 870 MHz	2.45 GHz
จีน	125, 134 MHz	13.56 MHz	N/A	N/A
อินเดีย	125, 134 MHz	N/A	865 – 867 MHz	2.40 GHz
ญี่ปุ่น	125, 134 MHz	13.56 MHz	950 – 956 MHz	2.45 GHz
สิงคโปร์	125, 134 MHz	13.56 MHz	923 – 925 MHz	2.45 GHz

2.2.4 ประเภทของแท็ก RFID

แท็กจะติดอยู่กับสินค้าที่ต้องการระบุตัวตน โดยภายในแท็กจะเก็บข้อมูลเกี่ยวกับสินค้านั้น เช่น ชื่อของสินค้า และหมายเลขรหัสของสินค้า (ID number) เป็นต้น ในทางปฏิบัติหมายเลขรหัสของสินค้าเรียกว่า รหัสสินค้าอิเล็กทรอนิกส์ (EPC: electronic product code) ซึ่งแท็กที่เก็บข้อมูล EPC นี้เรียกว่าแท็ก EPC (EPC tag)

โดยทั่วไปความซับซ้อนของแท็กจะขึ้นอยู่กับฟังก์ชันการทำงานที่มีอยู่ในแท็ก ซึ่งถ้าแท็กมีฟังก์ชันการทำงานมากเท่าใด ก็จะมีราคาแพงมากขึ้นเท่านั้นเพราะว่าต้องใช้ตัวประมวลผลที่

ซับซ้อน ดังนั้นทางศูนย์ Auto-ID ของสถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์จึงได้เสนอจัดระดับความซับซ้อนของแท็ก EPC ออกเป็น 6 ระดับชั้น ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.4.1 แท็กระดับชั้น 0 (class 0 tag) คือแท็กแบบแพสซีฟที่ไม่มีความซับซ้อนและสามารถอ่านข้อมูลได้เพียงอย่างเดียว โดยที่หมายเลขรหัส EPC จะถูกบันทึกเข้าไปในแท็กในระหว่างขั้นตอนการผลิต ดังนั้นผู้ใช้งานไม่สามารถเปลี่ยนแปลงหมายเลขรหัส EPC นี้ได้ แท็กระดับชั้น 0 มีราคาถูกและการใช้งานก็จะจำกัดเพียงแค่การระบุตัวตนของสิ่งของเท่านั้น โดยทั่วไปป้ายระดับชั้น 0 ประกอบด้วย

- 1) ตัวระบุแท็ก (TID: tag identifier) เป็นหมายเลขที่เป็นหนึ่งเดียวที่กำหนดโดยผู้ผลิต ซึ่งใช้สำหรับระบุสินค้า (product)
- 2) หมายเลขรหัส EPC เป็นหมายเลขที่เป็นหนึ่งเดียวที่กำหนดโดยผู้ผลิต โดยใช้สำหรับระบุวัตถุที่จะนำแท็กไปติด บางครั้งหมายเลขรหัส EPC จะถูกเรียกว่าหมายเลขรหัสวัตถุ (OIC: object ID)
- 3) ฟังก์ชันคิลล์ (kill function) เป็นฟังก์ชันการทำงานที่มีอยู่ในแท็ก โดยจะใช้สำหรับยกเลิกการทำงานของแท็กนั้นอย่างถาวร

นอกจากนี้ยังมีแท็กระดับชั้น 0+ (class 0+ tag) ซึ่งมีคุณสมบัติต่างๆ เหมือนกับแท็กระดับชั้น 0 แต่มีความสามารถที่จะเขียนข้อมูลเข้าไปเก็บในแท็กได้เพียงหนึ่งครั้งเท่านั้น

2.2.4.2 แท็กระดับชั้น 1 (class 1 tag) คือแท็กแบบแพสซีฟที่ไม่มีความซับซ้อนสามารถอ่านข้อมูลได้หลายครั้งแต่เขียนข้อมูลได้เพียงหนึ่งครั้ง (มีหน่วยความจำแบบ WORM) และมีลักษณะการทำงานแบบการกระจายย้อนกลับ (backscattering) โดยหลังจากขั้นตอนการผลิตแท็กนี้ จะไม่มีข้อมูลใดๆ บรรจุในหน่วยความจำ อย่างไรก็ตามผู้ผลิตสามารถเขียนข้อมูลเข้าไปในแท็กนี้ได้ก่อนการขนส่ง หรือจะให้ผู้ใช้งานเขียนข้อมูลเข้าไปในแท็กด้วยตัวเองก็ได้ แท็กระดับ 1 มีคุณสมบัติดังนี้

- เป็นแท็กแบบแพสซีฟที่ไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานและไม่สามารถเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารได้
- มีหน่วยความจำ 128 บิต โดยที่ 96 บิตใช้สำหรับเก็บหมายเลข ID และ 32 บิตใช้สำหรับเก็บฟังก์ชันคิลล์และการแก้ไขข้อผิดพลาด
- มีหน่วยความจำแบบ WORM ทำให้สามารถเขียนข้อมูลเข้าไปในแท็กได้เพียงครั้งเดียว

2.2.4.3 แท็กระดับชั้น 2 (class 2 tag) เป็นแท็กแบบแพสซีฟที่ทำงานแบบการกระจายย้อนกลับเช่นเดียวกับแท็กระดับชั้น 1 เพียงแต่มีหน่วยความจำมากกว่า คุณสมบัติของแท็กระดับชั้น 2 มีดังนี้

- เป็นแท็กแบบแพสซีฟ ทำให้ไม่สามารถเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารได้ และไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงานภายใน
- มีหน่วยความจำแบบที่สามารถอ่านและเขียนได้ โดยมีขนาดหน่วยความจำสูงถึง 65 กิโลไบต์ (KB)
- มีฟังก์ชันการควบคุมการยืนยันตัวตน (authenticated access control)

แท็กระดับชั้น 2 มีหน่วยความจำที่มากพอที่จะนำมาบันทึกข้อมูล (log data) นอกเหนือไปจากการเก็บหมายเลขรหัส ID ในทางปฏิบัติแท็กระดับชั้น 1 และ 2 เป็นที่นิยมใช้งานในหลายๆงานประยุกต์

2.2.4.4 แท้กระดับชั้น 3 (class 3 tag) เป็นแท็กแบบกึ่งแพสซีฟ (semi-passive) ที่ทำงานแบบการกระจายย้อนกลับ โดยจะมีวงจรถูกเข้ารหัสอยู่ในแท็กด้วย โดยทั่วไปแท้กระดับชั้น 3 มีคุณสมบัติดังนี้

- เป็นแท็กแบบกึ่งแพสซีฟ มีแหล่งกำเนิดพลังงานภายในแท็กแต่ไม่สามารถเริ่มต้นติดต่อสื่อสารได้
- มีหน่วยความจำแบบที่สามารถอ่านและเขียนได้ โดยมีขนาดหน่วยความจำสูงถึง 65 กิโลไบต์
- มีวงจรถูกเข้ารหัสอยู่ในแท็ก (integrated sensor circuitry)

เนื่องจากแท้กระดับชั้น 3 มีแหล่งกำเนิดพลังงานเป็นของตัวเอง จึงทำให้มีระยะเวลาทำงานที่ไกลมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีวงจรถูกเข้ารหัสอยู่ในแท็กเพื่อทำหน้าที่เก็บข้อมูลต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความดัน การเคลื่อนที่ เป็นต้น โดยอาศัยแหล่งกำเนิดพลังงานของตนเอง ดังนั้นแท้กระดับชั้น 3 จึงนิยมนำมาใช้งานประยุกต์ห่วงโซ่อุปทาน (supply chain) เช่น นำแท็กไปติดกับตู้สินค้า (container) หรือพาเลต (pallet) เพื่อเก็บข้อมูลประวัติการใช้งาน เป็นต้น

2.2.4.5 แท้กระดับชั้น 4 (class 4 tag) เป็นแท็กแบบแอ็กทีฟและมีวงจรถูกเข้ารหัสอยู่ในแท็กเพื่อทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปให้เครื่องอ่าน โดยทั่วไปแท้กระดับชั้น 4 มีคุณสมบัติดังนี้

- เป็นแท็กแบบแอ็กทีฟ มีแหล่งกำเนิดพลังงานภายในแท็ก และสามารถเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารได้
- มีหน่วยความจำแบบที่สามารถอ่านและเขียนซ้ำได้
- สามารถติดต่อสื่อสารกับแท็กอื่นๆได้ จึงมีความสามารถในการทำเครือข่ายแบบ Ac hoc ได้

2.2.4.6 แท้กระดับชั้น 5 (class 5 tag) เป็นแท็กแบบแอ็กทีฟที่มีความสามารถในการติดต่อสื่อสารกับแท็กอื่นๆหรืออุปกรณ์ต่างๆ โดยทั่วไปแท้กระดับชั้น 5 มีความสามารถเหมือนกับแท้กระดับชั้น 4 ยกเว้นแท้กระดับชั้น 5 มีความสามารถในการเริ่มต้นการติดต่อสื่อสารกับแท็กทุกระดับชั้น ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกแท้กระดับชั้น 5 นี้ว่าแท็กเครื่องอ่าน (reader tag) เนื่องจากสามารถทำหน้าที่ของเครื่องอ่านได้

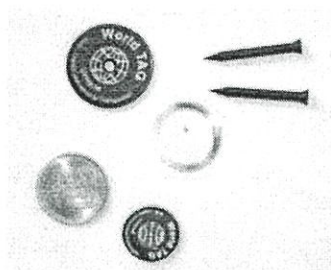
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแท้กระดับชั้นต่างๆ ซึ่งพบว่าการจำแนกระดับชั้นของแท็กจะอาศัยความสามารถและความซับซ้อนของแท็ก RFID เป็นตัวแบ่งแยก ดังนั้นแท้กระดับชั้นสูงก็จะมีฟังก์ชันการทำงานที่มากกว่า (และมีราคาแพงกว่า) แท้กระดับชั้นที่ต่ำกว่า

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบคุณสมบัติของแท็กระดับต่างๆ

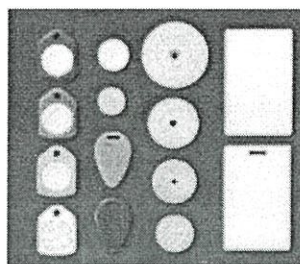
คุณสมบัติของแท็ก				
ระดับชั้น	ประเภท	หน่วยความจำ	การติดต่อสื่อสาร	หมายเหตุ
ระดับ 0	แพสซีฟ	อ่านได้อย่างเดียว	ไม่สามารถเริ่มต้นการสื่อสาร	หมายเลขรหัส EPC ถูกกำหนดตั้งแต่การผลิต
ระดับ 0+	แพสซีฟ	อ่านได้อย่างเดียว (สามารถเขียนได้ 1 ครั้ง)	ไม่สามารถเริ่มต้นการสื่อสาร	-
ระดับ 1	แพสซีฟ	อ่านได้หลายครั้ง และเขียนได้ 1 ครั้ง	ไม่สามารถเริ่มต้นการสื่อสาร	หมายเลขรหัส EPC สามารถกำหนดหลังการผลิตได้
ระดับ 2	แพสซีฟ	อ่านได้หลายครั้ง และเขียนได้ 1 ครั้ง	ไม่สามารถเริ่มต้นการสื่อสาร	มีการเข้ารหัสลับ (encryption)
ระดับ 3	กึ่งแพสซีฟ	อ่านและเขียน (ได้หลายครั้ง)	ไม่สามารถเริ่มต้นการสื่อสาร	ความสามารถเหมือนชั้น 2, มีวงจรเซ็นเซอร์ภายใน
ระดับ 4	แอ็กทีฟ	อ่านและเขียน (ได้หลายครั้ง)	สามารถเริ่มต้นการสื่อสารและติดต่อสื่อสารกับแท็กอื่นได้	ความสามารถเหมือนชั้น 3, เพิ่มความสามารถอื่นได้
ระดับ 5	แอ็กทีฟ	อ่านและเขียน (ได้หลายครั้ง)	สามารถเริ่มต้นการสื่อสารและติดต่อสื่อสารกับแท็กอื่นได้	ความสามารถเหมือนชั้น 4, เพิ่มความสามารถอื่นได้

2.2.5 ตัวอย่างรูปแบบของแท็ก RFID

แท็กที่ใช้งานในปัจจุบันมีหลายรูปแบบตามภาพที่ 2.3 และ 2.5 ซึ่งสามารถจำแนกได้ตามความแตกต่างของโครงสร้าง การออกแบบ และลักษณะการประยุกต์ใช้งาน ดังต่อไปนี้



(ก)



(ข)



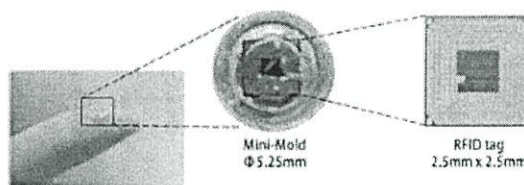
(ค)



(ง)



(จ)

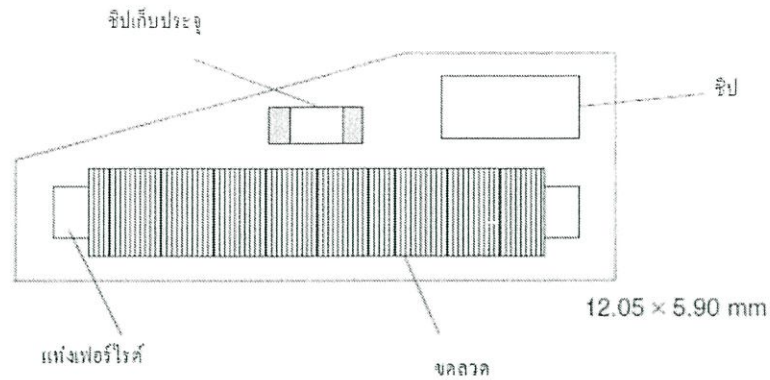


(ฉ)

รูปที่ 2.3 ตัวอย่างแท็ก RFID รูปแบบต่างๆ 1 [9] – [14]

2.2.5.1 แบบงานและเหรียญ

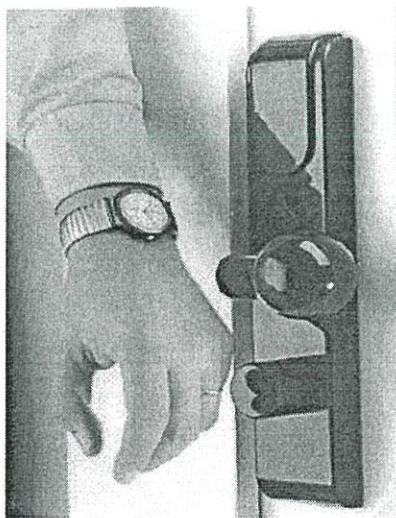
แท็กจะถูกบรรจุอยู่ในวัสดุกลมคล้ายงานหรือเหรียญและเคลือบสารป้องกันไว้เป็นอย่างดี โดยทั่วไปแท็กแบบนี้จะพบเห็นกันมากที่สุดโดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ไม่กี่มิลลิเมตร ไปจนถึง 10 เซนติเมตร และมีการเจาะรูตรงกึ่งกลางของงานเพื่อใช้สำหรับการขันน็อตหรือสกรูในกรณีที่ต้องการยึดติดกับอุปกรณ์อื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.3 (ก) สำหรับวัสดุที่ใช้ในการเคลือบผิวมันจะใช้สารจำพวก Polystyrol หรือ Epoxy resin เพื่อให้แท็กสามารถทำงานได้ในย่านอุณหภูมิที่กว้าง



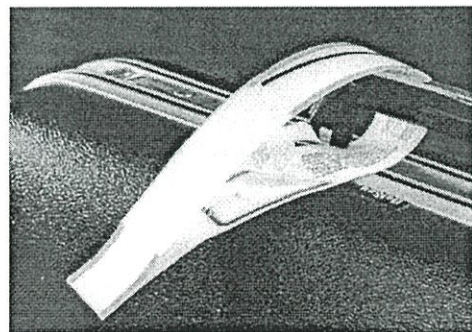
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแท็ก RFID แบบพลาสติก

2.2.5.2 แบบพลาสติก

แท็กแบบพลาสติกได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม เพราะแท็กแบบนี้มีขนาดบางและสามารถนำไปติดตั้งกับผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ง่าย ตัวอย่างเช่น การนำแท็กแบบนี้ไปฝังอยู่กับวงกบกุญแจรถยนต์ในรูปของกุญแจอัจฉริยะสำหรับระบบ electronic immobilization ดังแสดงในภาพที่ 2.3 (ข) โดยทั่วไปโครงสร้างภายในของแท็กแบบนี้จะไม่แตกต่างจากแท็กแบบกระดาษตามภาพที่ 2.4 โดยจะแตกต่างกันเพียงส่วนของขลวดที่ใช้พันแท่งเฟอร์ไรต์ จะมีความยาวมากกว่าแท็กแบบกระดาษ เพื่อให้รัศมีการทำงานที่กว้างไกลกว่า นอกจากนี้แท็กแบบพลาสติกยังสามารถรองรับไมโครชิปขนาดใหญ่ได้ (ซึ่งหมายถึงขีดความสามารถในการประมวลผลที่สูงกว่า), มีความทนทานต่อการสัมผัสและการกระแทก, และทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระดับสูง ดังนั้นจึงทำให้แท็กแบบพลาสติกมีความเหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ เป็นต้น



(ก)

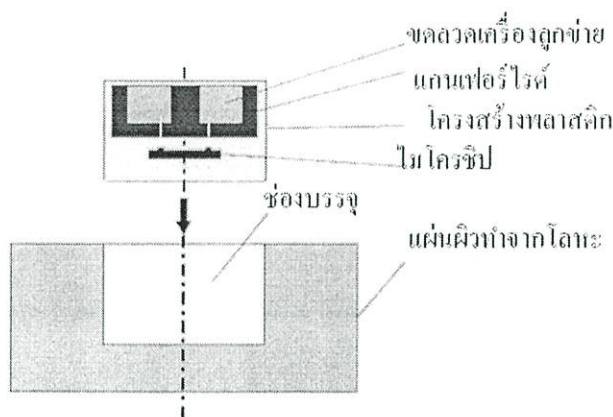


(ข)

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างแท็ก RFID รูปแบบต่างๆ 2 [1]

2.2.5.3 แบบนาฬิกา

แท็กแบบนาฬิกาได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1990 โดยบริษัท Ski-Data ประเทศออสเตรีย ซึ่งมีลักษณะเป็นนาฬิกาใช้สวมใส่ข้อมือเพื่อใช้แสดงตัวตนแบบไร้สัมผัส (contactless) เพื่อผ่านประตูสำหรับเล่นสกี จากนั้นได้มีการนำมาใช้ในงานทางด้านการรักษาความปลอดภัยมากขึ้น โดยเฉพาะการแสดงตัวตนเพื่อผ่านเข้าออกประตู โครงสร้างภายในของแท็กแบบนี้จะประกอบไปด้วยเฟรมสายอากาศเชื่อมต่ออยู่กับแผงวงจรพิมพ์ขนาดเล็กที่จัดรูปทรงให้สามารถบรรจุลงไปในนาฬิกาข้อมือได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 (ก)



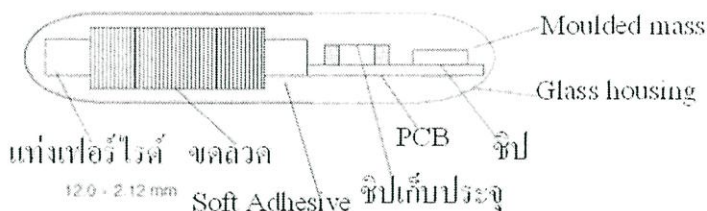
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของแท็กแบบที่ใช้ติดกับแผ่นโลหะ

2.2.5.4 แบบที่ใช้ติดกับแผ่นโลหะ

แท็กนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ติดกับโลหะ โดยจะมีขดลวดพันกับแกนเฟอร์ไรต์และไมโครชิปที่ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณจะถูกติดตั้งอยู่บนแกนด้านนอกของแกนเฟอร์ไรต์และเชื่อมต่อกับขดลวด ดังรูปที่ 2.6 และเพื่อให้แท็กมีเสถียรภาพในการใช้งานในสภาพการทำงานต่างๆ เช่น ทนต่อแรงสั่นสะเทือน และความร้อน เป็นต้น จึงได้บรรจุไมโครชิปและแกนเฟอร์ไรต์ลงในโครงสร้างโลหะ แล้วเคลือบด้วย epoxy resin ทั้งนี้ขนาดของแท็กแบบนี้จะเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐาน ISO 69873 เพื่อให้สามารถใช้กับอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ เครื่องจักรกล เครื่องมือ และขวดแก้ว เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.3 (ค)

2.2.5.5 แบบลูกกุญแจ

แท็กจะถูกบรรจุอยู่ในลูกกุญแจหรือเรียกว่า “กุญแจอัจฉริยะ (smart key)” เพื่อใช้สำหรับการเปิดปิดประตูและระบบรักษาความปลอดภัยต่างๆ โดยทั่วไปแท็กแบบนี้ถือเป็นแท็กแบบพลาสติกที่ถูกออกแบบให้มีลักษณะและรูปทรงเป็นแบบลูกกุญแจ แท็กแบบนี้เป็นที่นิยมใช้งานสำหรับผ่านเข้าออกอาคาร สำนักงาน และสถานที่ต่างๆ โดยมีรูปแบบตามที่แสดงในภาพที่ 2.3 (ง)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของแท็ก RFID แบบกระดาษแก้ว

2.2.5.6 แบบกระดาษแก้ว

แท็กแบบนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับใช้ฝังไว้ใต้ผิวหนังของสัตว์เพื่อใช้ในการติดตามตัวสัตว์ดังแสดงในภาพที่ 2.3 (จ) ตัวกระดาษแก้วจะมีขนาดความยาวในช่วง 12 – 32 มิลลิเมตร โดยภายในจะบรรจุไมโครชิปที่ติดตั้งอยู่บนแผงวงจร (PCB : printed circuit board) และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับจ่ายไฟเลี้ยงให้กับไมโครชิปในขณะที่ไม่มีสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุส่งมาจากเครื่องอ่าน นอกจากนี้บนแผงวงจรมีขดลวดที่มีความหนาเพียง 0.03 มิลลิเมตรพันอยู่บนแท่งเฟอร์ไรท์ (ferrite core) โครงสร้างเหล่านี้จะได้รับการห่อหุ้มด้วยของเหลวรักษาสภาพ (soft adhesive) เพื่อป้องกันการขยับเขยื้อนของชิ้นส่วนต่างๆ ในกระดาษแก้ว (ตามภาพที่ 2.7) อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของสัตว์ที่ติดตั้งแท็ก

2.2.5.7 แบบมาตรฐาน ID-1

แท็กแบบ ID-1 มีใช้งานทั่วไปในรูปของบัตรเครดิตและบัตรโทรศัพท์ (ขนาดประมาณ 85.72 มิลลิเมตร x 54.03 มิลลิเมตร x 0.76 มิลลิเมตร) ซึ่งสร้างจากการนำแท็กมาวางซ้อนอยู่ระหว่างแผ่นพอยล์ PVC จำนวน 4 ชั้น โดยแผ่นพอยล์แต่ละชั้นจะถูกอบด้วยความดันสูง ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่า 100 องศาเซลเซียส เพื่อทำให้มีการยึดตัวและป้องกันวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในแท็กได้อย่างคงทนถาวร ในทางปฏิบัติแท็ก ID-1 นิยมนำมาใช้งานในรูปของบัตรสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส (contactless smart card) เนื่องจากแท็กแบบนี้มีพื้นที่หน้าตัดที่กว้างจึงทำให้สามารถจัดวางระบบสายอากาศที่มีแกนขนาดใหญ่ได้ ซึ่งช่วยทำให้สามารถส่งสัญญาณได้ไกลกว่าแท็กแบบอื่นๆ

นอกจากนี้สมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสมักจะถูกออกแบบตามมาตรฐาน ID-1 เพื่อให้สามารถพกพาได้สะดวกและสามารถพิมพ์ข้อความหรือลวดลายต่างๆ ลงบนบัตรได้ (เช่นเดียวกับบัตรโทรศัพท์) อย่างไรก็ตามสำหรับบัตรสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสที่ต้องการนำไปใช้งานในย่านความถี่ไมโครเวฟตามมาตรฐาน ISO 7810 จะต้องมีขนาดมากกว่าปกติ (ประมาณ 0.8 มิลลิเมตร) ดังนั้นในการผลิตบัตรสมาร์ทการ์ดแบบนี้จะแตกต่างไปจากบัตรสมาร์ทการ์ดแบบ ID-1

2.2.5.8 แบบเลเบลอัจฉริยะ

แท็กแบบนี้ได้ถูกออกแบบมาให้มีขนาดบางเท่ากับแผ่นกระดาษซึ่งสามารถงอหรือหุบได้ โดยขดลวดที่ใช้สำหรับรับส่งสัญญาณจะถูกออกแบบเป็นแผ่นพอยล์พลาสติกที่มีความหนาเพียง 0.1 มิลลิเมตร โดยใช้กระบวนการผลิตแบบพิมพ์สกรีน (screen printing หรือ etching) โดยทั่วไปแถบพอยล์เหล่านี้จะถูกเคลือบชั้นหนึ่งด้วยเยื่อกระดาษและเคลือบทับอีกชั้นหนึ่งด้วยสารยึดเกาะ เพื่อป้องกันการฉีกขาดหรือลอกระหว่างการใช้งาน ตัวอย่างเช่น แท็กแบบเลเบลที่พื้นที่หูหิ้วของกระเป๋าเดินทางหรือสัมภาระต่างๆ ตามภาพที่ 2.5 (ข)

2.2.5.9 แบบขดลวดบนชิป

แท็กแบบขดลวดบนชิป (coil-on-chip) จะแตกต่างจากแท็กแบบอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้นซึ่งมีการแยกส่วนระหว่างขดลวดที่ทำหน้าที่เป็นสายอากาศและชิปประมวลผลอย่างชัดเจน แต่สำหรับแท็กแบบขดลวดบนชิปนั้นจะรวมส่วนที่เป็นขดลวดและวงจรประมวลผลเข้าด้วยกันตามภาพที่ 2.3 (ฉ) โดยใช้กระบวนการผลิตแบบไมโครกัลวานิก (microgalvanic process) ในระหว่างขั้นตอนการผลิตเวเฟอร์ CMOS โดยจะมีการติดตั้งขดลวดลงบนฉนวนที่คั่นระหว่างชั้นของสารซิลิกอนที่เป็นวงจรรายในของไมโครชิปสำหรับใช้ในแท็กจากนั้นจึงนำมาผ่านกระบวนการเคลือบด้วยสารโพลีไมด์ (polyamide) เพื่อผนึกส่วนประกอบต่างๆ ให้ติดกัน โดยทั่วไปขนาดของแท็กแบบนี้จะมีขนาดเล็กมาก (เพียง 3 มิลลิเมตร x 3 มิลลิเมตร) และมักจะนำมาใช้บรรจุลงในอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่มีพื้นที่ติดตั้งแท็กขนาดเล็กได้อย่างสะดวก

2.2.6 ระยะการทำงานและการเหนี่ยวนำ

ระยะการทำงานของแท็กหรือระยะการอ่าน (read range) เป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพิจารณาว่างานประยุกต์นี้จะใช้แท็กแบบใด ตัวอย่างเช่น โรงเก็บสินค้าต้องการระยะการอ่านไม่กี่เมตร (ประมาณ 3 เมตร) ในขณะที่การใช้แท็กเพื่อผ่านประตูเข้าออกสำหรับรถไฟฟ้าอาจต้องการระยะการอ่านที่สั้นมาก (เพียง 1-2 เซนติเมตร) โดยทั่วไประยะการอ่านจะใกล้หรือไกลขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

- ความถี่ที่ใช้งาน
- พลังงานสูงสุดที่สายอากาศสามารถส่งสัญญาณได้
- ชนิดของแท็ก (แบบแพสซีฟหรือแบบแอ็กทีฟ)
- เทคนิคในการสื่อสาร (การคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ หรือการกระจายย้อนกลับ)

ในทางปฏิบัติพลังงานสูงสุดที่สายอากาศสามารถส่งสัญญาณได้จะถูกจำกัดโดยมาตรฐานการใช้งานคลื่นความถี่วิทยุ นอกจากนี้ถึงแม้ว่าพลังงานที่ใช้ในการส่งจะมีค่าสูง แต่ถ้าวิธีการใช้การส่งพลังงานไม่เหมาะสม ก็ไม่ได้ทำให้ระยะการอ่านไกลขึ้น โดยทั่วไปการส่งผ่านพลังงานที่ใช้ในระบบ RFID มีอยู่ 2 แบบคือ การคู่ควบแบบเหนี่ยวนำและการกระจายย้อนกลับ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.6.1 การคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ

การสื่อสารแบบการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ (inductive coupling) เป็นกระบวนการในการถ่ายโอนพลังงานจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังวงจรไฟฟ้าอีกอันหนึ่งที่มีสนามแม่เหล็กร่วมกัน (มีความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างวงจรไฟฟ้าทั้งสองวงจร) การสื่อสารแบบการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำมีข้อควรคำนึงดังนี้

- การคู่ควบแบบเหนี่ยวนำนิยมใช้ในระบบ RFID ที่ทำงานในย่านความถี่ต่ำ (LF) และย่านความถี่สูง (HF) โดยเครื่องอ่านและแท็กสามารถใช้ขดลวดแบบลูป (loop antenna) ได้ เพราะว่าเมื่อใช้งานในย่านความถี่ต่ำ ความยาวคลื่นจะยาว จึงทำให้ต้องใช้สายอากาศที่มีความยาว
- การคู่ควบแบบเหนี่ยวนำจะต้องทำงานอยู่ในสนามระยะใกล้ (near field) ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขดลวดสร้างขึ้นเท่านั้น ดังนั้นโดยทั่วไประยะการอ่านสำหรับ LF จะไม่เกิน 30 เซนติเมตร และสำหรับ HF จะไม่เกิน 1 เมตร
- การคู่ควบแบบเหนี่ยวนำสามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 แบบคือ

- การคู่ควบแบบใกล้ (close coupling) มีระยะทำงานประมาณ 1 เซนติเมตร โดยในการใช้งานจะต้องนำแท็กมาสัมผัสหรือวางไว้ในบริเวณที่กำหนดเพื่อให้เครื่องอ่านสามารถอ่านข้อมูลจากแท็กได้ โดยวิธีการเหนี่ยวนำจะใช้สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า และทำงานที่ความถี่ 0 – 30 MHz ระบบ RFID ที่ใช้การคู่ควบแบบใกล้นิยมนำมาใช้ในงานประยุกต์ที่ต้องการความปลอดภัยสูงและมีระยะการอ่านที่ใกล้ เช่น ใช้ปิด-เปิดประตูหรือใช้ชำระเงินเป็นต้น โดยทั่วไปแท็กที่ใช้ในระบบนี้จะมีลักษณะเป็นแบบบัตรสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัสตามมาตรฐาน ID-1 (ISO 10536) ซึ่งในปัจจุบันเริ่มเป็นที่นิยมใช้งานน้อยลง เนื่องจากมีระยะการอ่านที่ใกล้เกินไป
- การคู่ควบแบบไกล (remote coupling) มีระยะทำงานประมาณ 1 – 100 เซนติเมตร โดยอาศัยวิธีการเหนี่ยวนำเชิงแม่เหล็กระหว่างเครื่องอ่านและแท็ก และทำงานที่ความถี่ 135 kHz – 13.56 MHz ระบบ RFID ที่ใช้การคู่ควบแบบไกลนิยมนำมาใช้งานทางด้านการบ่งชี้สัตว์ (animal identification) หรือระบบอัตโนมัติในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ตามมาตรฐาน ISO 10443 (บัตรสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส) หรือ ISO 15693 (เลเบลอัจฉริยะและบัตรสมาร์ทการ์ดแบบไร้สัมผัส)

นอกจากนี้การถ่ายโอนพลังงานระหว่างขดลวดทั้งสองยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ อีก ได้แก่ ความถี่ที่ใช้งาน, จำนวนรอบของขดลวด, พื้นที่ที่ครอบคลุมโดยขดลวด, มุมที่ทำต่อกันของขดลวดทั้งสอง (เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนพลังงานสูงสุด ขดลวดทั้งสองจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน), และระยะห่างระหว่างสองขดลวด เป็นต้น

2.2.6.2 การกระจายย้อนกลับ

โดยทั่วไปสนามแม่เหล็กจะใช้ในการถ่ายโอนพลังงานได้ในระยะใกล้เท่านั้น สำหรับการถ่ายโอนพลังงานในระยะไกลจะต้องใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (EM: electromagnetic wave) ซึ่งในระบบ RFID จะเรียกเทคนิคนี้ว่าการกระจายย้อนกลับ (backscattering)

การกระจายย้อนกลับเป็นกระบวนการในการสะสมพลังงานจากสัญญาณที่ได้รับ แล้วเปลี่ยนลักษณะของสัญญาณ (เปลี่ยนแปลงข้อมูล) ก่อนที่จะทำการสะท้อนสัญญาณกลับไปยังต้นทาง ในทางปฏิบัติ เทคนิคการกระจายย้อนกลับจะใช้ในระบบ RFID แบบการสื่อสารระยะไกล (long-range RFID system) ที่มีระยะการอ่านมากกว่า 1 เมตร และทำงานในย่านความถี่ UHF (868 MHz สำหรับยุโรป และ 915 MHz สำหรับสหรัฐอเมริกา) หรือความถี่ไมโครเวฟ (2.5 GHz และ 5.8 GHz) โดยเครื่องอ่านจะส่งข้อมูลในรูปของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปยังแท็ก เมื่อแท็กได้รับสัญญาณคลื่นนี้ก็จะทำการเข้ารหัส (เปลี่ยนแปลง) ข้อมูลในคลื่น แล้วจึงสะท้อนสัญญาณคลื่นกลับไปยังเครื่องอ่าน

ในทางปฏิบัติระบบ RFID แบบการกระจายย้อนกลับสามารถใช้งานได้ในระยะ 3 เมตร สำหรับแท็กแบบแพสซีฟ และสามารถใช้งานได้ในระยะ 15 เมตร สำหรับแท็กแบบกึ่งแพสซีฟ (แบตเตอรี่ในแท็กใช้สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในแท็กเท่านั้น จะไม่นำมาใช้ในการส่งข้อมูลจากแท็กไปยังเครื่องอ่าน กล่าวคือพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากแท็กไปยังเครื่องอ่าน จะมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งมาจากเครื่องอ่านเท่านั้น)

2.2.7 หลักการทำงานพื้นฐานในการรับส่งพลังงานระหว่างเครื่องอ่านกับแท็กแบบ 1 บิต

แท็กแบบ 1 บิตเป็นแท็กที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เพราะว่ามีโครงสร้างภายในแบบง่าย และมีราคาถูก โดยแท็กนี้จะสามารถบรรจุข้อมูลดิจิทัลได้เพียงบิตเดียว นั่นคือ บิต 0 หรือบิต 1 เท่านั้น ซึ่งก็พอเพียงสำหรับการนำไปใช้งานในการตรวจสอบว่ามีแท็กนี้ปรากฏอยู่ในพื้นที่ใช้งานหรือไม่ ตัวอย่างการใช้งานที่เห็นได้ชัดคือ การใช้แท็กแบบหนึ่งบิตเป็นอุปกรณ์ป้องกันการขโมยสินค้าภายในร้านค้า ระบบ EAS (electronic article surveillance) โดยการนำแท็กนี้ไปติดกับสินค้าเพื่อใช้ในการตรวจจับการลักลอบขโมยสินค้าออกจากร้านค้า หรือใช้ติดตั้งระบบสายการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อใช้ตรวจสอบตำแหน่งของสินค้า โดยทั่วไปโครงสร้างของระบบ EAS จะประกอบไปด้วยองค์ประกอบต่างๆดังนี้

- 1) สายอากาศของเครื่องอ่าน (interrogator) จะมีโครงสร้างและการทำงานที่แตกต่างกันโดยจะขึ้นอยู่กับเทคนิคการทำงานของระบบแต่ละประเภท
- 2) อุปกรณ์รักษาความปลอดภัย (security element) หรือแท็กที่มีขนาดเล็ก ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อใช้ประกบติดสินค้า
- 3) อุปกรณ์ลบสถานะของแท็ก (deactivation device) ซึ่งใช้ลบค่าสถานะที่บรรจุอยู่ในแท็กหลังจากได้มีการชำระสินค้าชิ้นนั้นแล้ว อย่างไรก็ตามระบบ EAS บางระบบอาจจะไม่ใช้อุปกรณ์ลบสถานะของแท็กนี้ แต่จะใช้วิธีให้พนักงานแคชเชียร์ทำการปลดแท็กออกจากสินค้าเมื่อลูกค้าชำระเงินแล้ว พร้อมทั้งนำแท็กกลับมาใช้ติดสินค้าชิ้นอื่นก็ได้

2.2.7.1 EAS แบบใช้ความถี่คลื่นความถี่วิทยุ

แท็กแบบใช้ความถี่คลื่นความถี่วิทยุจะอยู่บนพื้นฐานของวงจรกำธรร (resonant circuit) แบบ LC (ตัวเหนี่ยวนำ L และตัวเก็บประจุ C) ที่มีความถี่ f_R โดยมีการติดตั้งขดลวดและตัวเก็บประจุเพื่อให้เกิดการกำธรรและการขยายสัญญาณซึ่งคำนวณได้จากค่า L และ C ในปัจจุบันแท็กแบบนี้มีให้พบเห็นทั่วไปในรูปของบัตรพลาสติกและแผ่นสติ๊กเกอร์ที่ติดกับตัวสินค้า

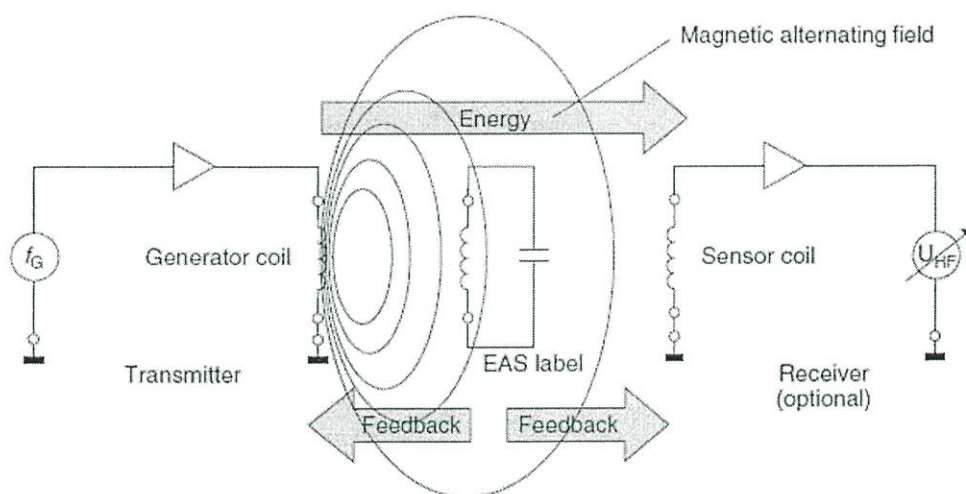
ภาพที่ 2.8 แสดงลักษณะการทำงานแท็กแบบใช้คลื่นความถี่วิทยุ โดยที่เครื่องอ่านจะสร้างสนามแม่เหล็กกระแสสลับในย่านความถี่วิทยุสำหรับปกคลุมพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบอยู่ตลอดเวลา ถ้าแท็กเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ของสนามแม่เหล็กกระแสสลับ พลังงานจากสนามแม่เหล็กกระแสสลับก็จะถูกเหนี่ยวนำเข้าไปในวงจรกำธรรผ่านทางขดลวดตามกฎของฟาราเดย์ ถ้าความถี่ของสนามกระแสสลับ f_G สอดคล้องกับความถี่กำธรรของแท็ก f_R ก็จะส่งผลทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดกำเนิดของวงจรภาคส่งลดลง และนำไปสู่ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่สามารถวัดได้อ่อนลง โดยถ้ามีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับก็สามารถพบการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ซึ่งจะหมายความว่าแท็กปรากฏอยู่ในพื้นที่ทำงานของเครื่องอ่าน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ระยะห่างระหว่างขดลวดกำเนิดของวงจรภาคส่งและแท็ก ค่าพารามิเตอร์ Q ของวงจรกำธรรภายในแท็ก เป็นต้น ตารางที่ 2.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ EAS แบบใช้ความถี่วิทยุที่มีใช้งานทั่วไปในท้องตลาด

ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีการนำแท็กเข้าไปในพื้นที่ตรวจสอบค่าน้อยมาก ก็ส่งผลทำให้เครื่องอ่านไม่สามารถตรวจจับแท็กได้ ดังนั้นเพื่อ

เป็นการแก้ไขปัญหาที่จึงได้มีการกำหนดให้วงจรภาคส่งสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ไม่คงที่ (อยู่ในลักษณะกวาดความถี่ไปรอบๆ ย่านความถี่ที่ใช้งาน) เช่น วงจรภาคส่งย่านความถี่ 8.2 MHz จะไม่ส่งสัญญาณเฉพาะที่ความถี่ 8.2 MHz แต่จะลดและเพิ่มความถี่ในลักษณะของการกวาด (sweep) อยู่ตลอดเวลา โดยที่ช่วงของการกวาดความถี่จะขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของมาตรฐานแต่ละย่านความถี่ ตัวอย่างเช่น ถ้ากำหนดเป็น $8.2 \text{ MHz} \pm 10 \%$ ก็หมายถึงวงจรภาคส่งจะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ตั้งแต่ 7.38 MHz จนถึง 9.02 MHz ตารางที่ 2.6 แสดงระบบ EAS แบบที่ใช้ความถี่วิทยุที่ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ ที่มีใช้งานทั่วไป

เมื่อความถี่กวาดที่ส่งมาจากวงจรภาคส่งสอดคล้องกับความถี่กำธรของแท็ก ก็จะส่งผลทำให้เกิดการกำธร ซึ่งจะทำให้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดกำเนิดของแท็กลดลงอย่างผิดปกติหรือที่เรียกว่า “เกิด dip” ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งถึงแม้ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่ก็สามารถตรวจจับได้เมื่อเปรียบเทียบระดับความแรงที่เปลี่ยนแปลงระดับความแรงของแรงดันไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ (impedance) ของวงจรกิจกรรมภายในแท็ก ณ ความถี่ใช้งานต่างๆ

ในทางปฏิบัติแท็กแบบใช้ความถี่คลื่นความถี่วิทยุจะถูกออกแบบให้ประกบติดกับสินค้าแบบตายตัวซึ่งไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นเมื่อนำสินค้ามาชำระเงินที่แคชเชียร์ พนักงานขายก็จะนำสินค้านั้นไปวางไว้ที่เครื่องลบสถานะ (deactivate stage) ซึ่งทำให้แท็กไม่สามารถใช้งานได้อีกต่อไปและจะไม่มีผลตอบสนองใดๆ ต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปรากฏในพื้นที่ตรวจสอบ



รูปที่ 2.8 ลักษณะการทำงานของแท็ก RFID แบบใช้คลื่นความถี่วิทยุ

ตารางที่ 2.5 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ EAS แบบใช้ความถี่วิทยุที่ใช้งานทั่วไป [1]

ตัวแปร	ค่ามาตรฐาน
Quality factor Q of the security element	มากกว่า 60 – 80
Minimum deactivation filed strength H_D	1.5 A/m
Maximum filed strength in the deactivation range	0.9 A/m

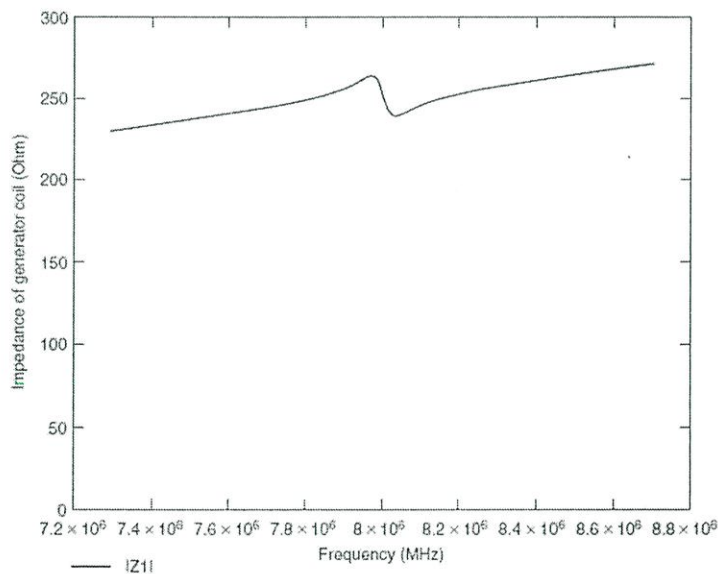
ตารางที่ 2.6 ระบบ EAS แบบที่ใช้ความถี่วิทยุที่ใช้งานในย่านความถี่ต่างๆ [1]

	ระบบที่ 1	ระบบที่ 2	ระบบที่ 3	ระบบที่ 4
ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)	1.86 – 2.18	7.44 – 8.73	7.30 – 8.70	7.40 – 8.60
ความถี่กวาด (เฮิรตซ์)	141	141	85	85

ระบบสายอากาศเพื่อใช้ส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการตรวจสอบแท็กแบบนี้ มักจะได้รับการออกแบบให้มีรูปแบบคล้ายขั้วประตูดั้งเดิมซึ่งจะเรียกว่า "Frame Antenna" ซึ่งอาจจะมีขนาดกว้างถึง 2 เมตร นอกจากนี้การนำแท็กไปติดตั้งกับสินค้าบางประเภทก็อาจส่งผลโดยตรงกับประสิทธิภาพในการตรวจจับของระบบ EAS ได้ ตัวอย่างเช่น

- สินค้าที่มีส่วนประกอบของโลหะ (เช่น กระจ่าง ท่อเหล็ก) ก็มีโอกาที่จะตรวจจับสินค้าไม่พบในกรณีที่มีการลักลอบนำเอาสินค้าออกจากร้านค้า วิธีแก้ไขก็คือการใช้แท็กที่มีขนาดใหญ่ขึ้น
- สินค้าที่มีความถี่กำธรของตนเอง เช่น สายไฟฟ้า หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางชนิด ตัวสินค้าเองอาจทำตัวเป็นแท็กหลอกให้ระบบ EAS เข้าใจว่ามีการลักลอบนำเอาสินค้าออกจากร้านค้าทั้งที่มีการจ่ายเงินและเปลี่ยนสถานะของแท็กอย่างถูกต้องแล้ว

ดังนั้นผู้ประกอบการควรพิจารณาเลือกใช้ระบบ EAS ที่มีย่านความถี่ตรวจสอบที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหาความผิดพลาดในการตรวจสอบให้มากที่สุด



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดกำเนิดที่ความถี่กำธรของแท็ก RFID

2.2.7.2 EAS แบบใช้ความถี่ไมโครเวฟ

ระบบ EAS แบบใช้ความถี่ไมโครเวฟจะอาศัยหลักการสร้างฮาร์โมนิก (harmonic) ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีคุณลักษณะแบบไม่เชิงเส้น เช่น ไดโอด (diode) โดยเมื่อมีการป้อนสัญญาณคลื่นไซน์ชวยล์ความถี่ f_A เฮิรตซ์ เข้าไปในไดโอดก็จะทำให้เกิดการสร้างสัญญาณฮาร์โมนิกที่มีค่าความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่มูลฐานของสัญญาณคลื่นไซน์ชวยล์ นั่นคือ nf_c เฮิรตซ์ เมื่อ n

คือเลขจำนวนเต็มแต่ระดับความแรงของสัญญาณฮาร์โมนิกเหล่านี้จะลดทอนลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณต้นฉบับเพราะว่าพลังงานทั้งหมดที่บรรจุในสัญญาณต้นฉบับจะถูกแบ่งไปให้สัญญาณฮาร์โมนิกต่างๆ โดยที่ฮาร์โมนิกยิ่งสูง ระดับความแรงของสัญญาณก็จะยิ่งลดลง ในการใช้งานเครื่องอ่านจะทำการตรวจสอบการปรากฏของสัญญาณฮาร์โมนิกซึ่งมีค่าความถี่ต่างจากค่าความถี่ของสัญญาณที่ส่งออกไป ซึ่งจะมีความเที่ยงตรงและมีประสิทธิภาพในการตรวจจับแท็กมากกว่าระบบ EAS แบบใช้คลื่นความถี่วิทยุ อย่างไรก็ตามแท็กของระบบ EAS แบบที่ใช้ความถี่ไมโครเวฟจะมีราคาสูง ดังนั้นจึงควรต้องมีการนำแท็กเหล่านี้กลับมาใช้งานซ้ำใหม่ เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าในการใช้งานให้มากที่สุด

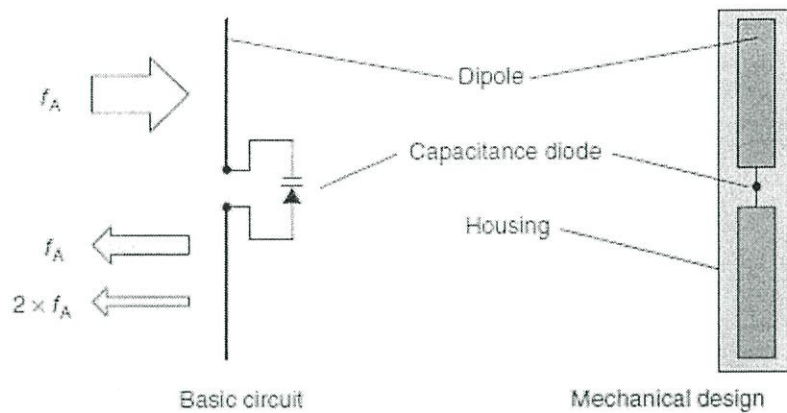
โดยทั่วไปไดโอดแบบ capacitance มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการสร้างสัญญาณฮาร์โมนิกโดยที่ความสามารถในการสร้างสัญญาณฮาร์โมนิกได้ถึงระดับใดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำไดโอด ซึ่งในทางเทคนิคจะเรียกว่า dopant profile หรือความเข้มข้นในการผสมสารกึ่งตัวนำในการสร้างไดโอด ในทางปฏิบัติระบบ EAS แบบใช้ความถี่ไมโครเวฟจะใช้ไดโอดที่สร้างจากสารประกอบจำพวกอัลลอยด์ เพราะสามารถสร้างสัญญาณฮาร์โมนิกที่สองที่มีลักษณะเหมือนสัญญาณต้นฉบับทุกประการ แต่มีความถี่สูงกว่า 2 เท่า ซึ่งก็นับว่าเพียงพอแล้วสำหรับการนำไปใช้งาน

แท็กแบบหนึ่งบิตที่ใช้กับความถี่ไมโครเวฟสามารถผลิตขึ้นได้ง่าย โดยการนำไดโอดแบบ capacitance มาเชื่อมเข้ากับสายอากาศแบบไดโพลดังแสดงในรูป 2.10 นอกจากนี้ในการออกแบบแท็ก ต้องคำนึงลักษณะการใช้งานด้วย เช่น ถ้านำไปใช้งานในย่านความถี่ 2.45 GHz ความยาวของสายอากาศแบบไดโพลจะต้องมีค่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของค่าความยาวคลื่นของสัญญาณไมโครเวฟที่ใช้ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐานทางสายอากาศ นั่นคือ $\lambda = \frac{C}{f_A} = \frac{3 \times 10^8}{2.45 \times 10^9} = 0.1224$ เมตร เมื่อ λ คือความยาวคลื่นของสัญญาณไมโครเวฟ, C คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที และ f_A คือความถี่ของสัญญาณไมโครเวฟ ดังนั้นในกรณีนี้จะต้องใช้สายอากาศแบบไดโพลที่มีความยาว 6.12 เซนติเมตร

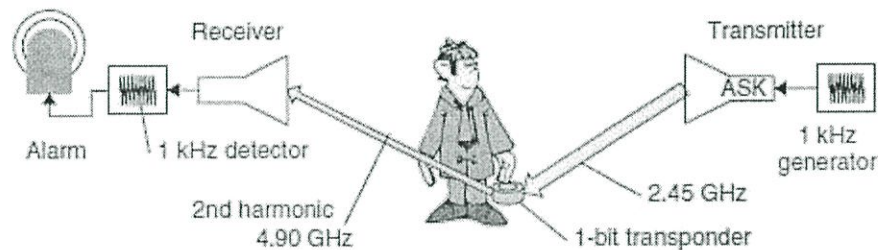
ความถี่ไมโครเวฟที่ใช้ในระบบ EAS มีหลายความถี่ เช่น 915 MHz, 2.45 GHz และ 5.6 GHz ตามข้อกำหนดในแต่ละภูมิภาค ในการใช้งานเมื่อนำแท็กเข้ามาภายในพื้นที่ตรวจจับซึ่งมีการส่งสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุที่ตรงกับย่านความถี่การทำงานของแท็กก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเวียนภายในแท็กโดยผ่านไดโอดที่อยู่ภายใน และเริ่มมีการสร้างสัญญาณฮาร์โมนิกเลียนแบบสัญญาณต้นฉบับออกมซึ่งโดยทั่วไปจะสนใจเฉพาะสัญญาณฮาร์โมนิกที่สองและสามเท่านั้น ฮาร์โมนิกที่สูงกว่านี้มักไม่ได้รับความสนใจเพราะว่ามีระดับความแรงของสัญญาณต่ำกว่าฮาร์โมนิกต้นๆ อยู่มาก

ภาพที่ 2.11 แสดงการทำงานของแท็กที่อยู่ภายในพื้นที่ตรวจสอบของเครื่องอ่านที่ใช้สัญญาณไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz โดยไดโอดภายในแท็กจะทำการสร้างสัญญาณฮาร์โมนิกที่สองซึ่งมีความถี่เท่ากับ $2 \times 2.45 = 4.90$ GHz แล้วส่งสัญญาณฮาร์โมนิกที่สองนี้กลับไปยังเครื่องอ่านเพื่อตรวจจับการปรากฏตัวของแท็ก แล้วส่งต่อไปยังวงจรสร้างสัญญาณเตือนภัยนอกจากนี้เพื่อป้องกันความสับสนในกรณีที่มีสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดภายนอกเข้ามาในพื้นที่ตรวจจับ จึงได้มีการนำสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุและสัญญาณไมโครเวฟมาทำการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูด (ASK: amplitude shift keying) หรือการมอดูเลตเชิงความถี่ (FSK: frequency shift keying) เพื่อให้สัญญาณที่ต้องการนำไปใช้ในการตรวจจับแท็กมีความแตกต่างจากสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบตัวอย่างเช่น ถ้าสัญญาณไมโครเวฟได้ถูกทำการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดกับสัญญาณความถี่ 1 GHz สัญญาณฮาร์โมนิกที่สองที่สร้างจากตัวไดโอดภายในแท็กก็จะถูกทำการมอดูเลตเชิงแอมพลิจูดกับ

สัญญาณความถี่ 1 GHz เช่นกัน โดยเมื่อเครื่องอ่านได้รับสัญญาณจากแท็กก็จะทำการตีמודูเลตสัญญาณฮาร์โมนิกที่สองนี้ เพื่อตรวจสอบว่ามีสัญญาณความถี่ 1 GHz รวมอยู่ด้วยหรือไม่ (ถ้ามีก็แสดงว่าเป็นสัญญาณที่ต้องการ และถ้าไม่มีก็แสดงว่าเป็นสัญญาณรบกวนที่เข้ามาในระบบ)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างพื้นฐานของวงจรไฟฟ้าของแท็ก RFID ที่ใช้กับสัญญาณไมโครเวฟ



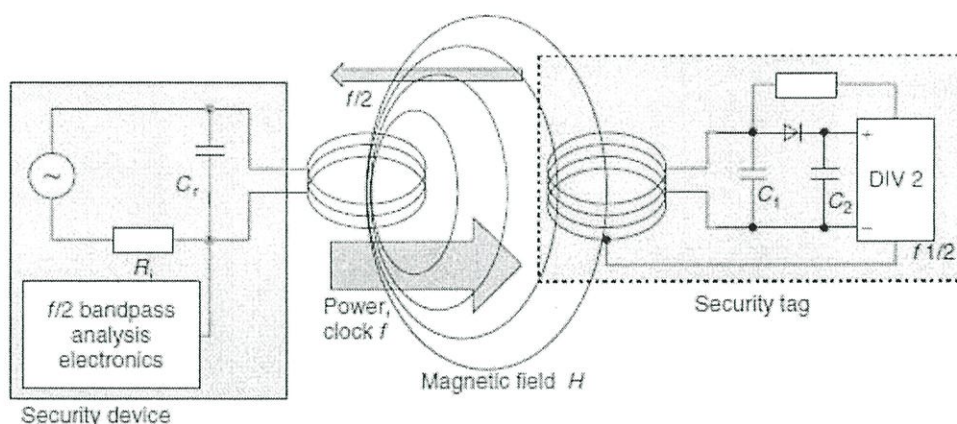
รูปที่ 2.11 การทำงานของแท็ก RFID ที่อยู่ภายในพื้นที่ตรวจสอบของเครื่องอ่านที่ใช้ความถี่ไมโครเวฟ

2.2.7.3 EAS แบบใช้วงจรทหารความถี่

ระบบ EAS แบบใช้วงจรทหารความถี่นิยมนำมาใช้งานในย่านความถี่ 100 – 135.5 kHz โดยภายในแท็กประกอบด้วยแผงวงจรประมวลผลแบบไมโครชิปและวงจรกำธร (resonant circuit) เพื่อใช้กำหนดค่าความถี่กำธรที่ตรงกับความถี่ทำงานของระบบ EAS โดยทั่วไปแท็กแบบนี้จะอยู่ในรูปของบัตรพลาสติก ซึ่งพนักงานขายจะดึงออกจากสินค้าเมื่อมีการชำระเงินซื้อสินค้าเพื่อนำแท็กกลับมาใช้ใหม่

การทำงานของระบบ EAS แบบนี้เริ่มจากไมโครชิปภายในแท็กได้รับพลังงานไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็กที่ส่งมาจากเครื่องอ่าน โดยสัญญาณความถี่ที่ไมโครชิปได้รับจะถูกหารค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งเสมอ ก่อนที่จะส่งกลับไปยังเครื่องอ่านดังแสดงในภาพที่ 2.12 กล่าวคือเมื่อแท็กปรากฏขึ้น

ในพื้นที่ตรวจจับ เครื่องอ่านก็จะได้รับสัญญาณความถี่ที่ส่งมาจากแท็ก ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความถี่ของเครื่องอ่าน 2 เท่า ในทำนองเดียวกันสัญญาณที่ส่งออกไปจากเครื่องอ่านจะถูกทำการมอดูเลตแบบ ASK หรือ PSK กับสัญญาณคลื่นความถี่วิทยุเพื่อให้สัญญาณที่ใช้ในการตรวจจับมีรูปแบบแตกต่างจากสัญญาณรบกวนจากภายนอก ซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับระบบ EAS แบบใช้ความถี่ไมโครเวฟ ตารางที่ 2.7 แสดงตัวอย่างค่ามาตรฐานของระบบ EAS แบบวงจรหารความถี่



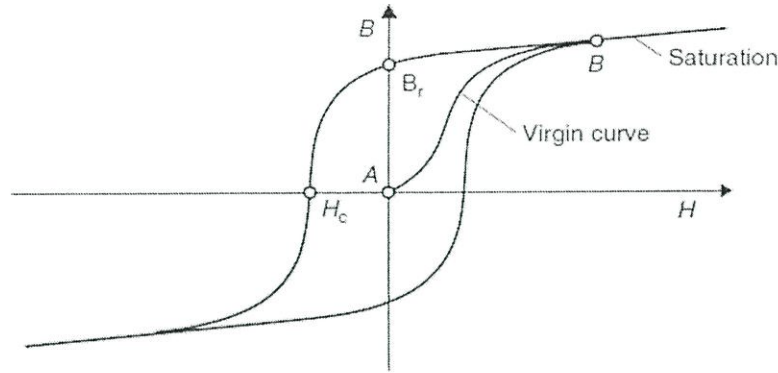
รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของระบบ EAS แบบใช้วงจรหารความถี่

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างค่ามาตรฐานของระบบ EAS แบบใช้วงจรหารความถี่ [1]

ตัวแปร	ค่ามาตรฐาน
ความถี่	130 kHz
ประเภทของการมอดูเลชัน	100% ASK
ความถี่การมอดูเลต	12.5 Hz หรือ 25 Hz
สัญญาณที่ใช้ในการมอดูเลต	สัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยม

2.2.7.4 EAS แบบใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ระบบ EAS แบบใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะทำงานโดยอาศัยความเข้มของสนามแม่เหล็กในย่านความถี่ต่ำในช่วง 10 Hz ถึง 20 kHz แท็กที่ใช้ในระบบ EAS นี้จะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ที่สร้างจากโลหะอสัณฐาน (amorphous metal) ซึ่งมีคุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กตามภาพที่ 2.13 กล่าวคือเมื่อมีการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กจากเครื่องส่ง ก็จะมีผลทำให้ความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่แท็กเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าเพิ่มหรือลดความเข้มของสนามแม่เหล็กจนเกินค่าที่เรียกว่า “จุดความเข้มแม่เหล็กอิ่มตัว (saturation point)” ก็จะมีผลว่าขนาดความเข้มของฟลักซ์แม่เหล็กจะคงที่ และเมื่อทำการลดความเข้มของสนามแม่เหล็กลง ฟลักซ์แม่เหล็กที่แท็กก็จะเริ่มลดลง แต่อัตราการลดลงช้ากว่าอัตราการเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการฟลักซ์แม่เหล็กที่ตกค้างอยู่บนแท็กจนกระทั่งเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าไปเป็นทิศทางตรงข้าม ฟลักซ์แม่เหล็กบนแท็กก็จะค่อยๆ ลดลงจนค่าศูนย์ จากนั้นจึงจะค่อยๆ เพิ่มค่าในทิศทางตรงข้ามจนเข้าถึงจุดความเข้มแม่เหล็กอิ่มตัวอีกครั้งตามภาพที่ 2.13



รูปที่ 2.13 คุณสมบัติการตอบสนองสนามแม่เหล็กของแท็ก RFID แบบใช้แม่เหล็กไฟฟ้า

ถ้ามีการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มากขึ้นกว่าจุดความเข้มแม่เหล็กอิ่มตัวไปเรื่อยๆก็จะส่งผลให้อำนาจแม่เหล็กของโลหะสัณฐานภายในแท็กเสื่อมสภาพ โดยมีค่าฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างอยู่ที่ระดับอิ่มตัวไม่แปรเปลี่ยนตามความเข้มของสนามแม่เหล็กอีกต่อไปซึ่งจะมีผลทำให้ไม่สามารถใช้แท็กนั้นได้ต่อไป หลักการนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการลบสถานะของแท็กที่ติดกับสินค้าหลังจากที่ได้มีการชำระเงินซื้อสินค้าแล้ว

หัวใจสำคัญของระบบ EAS จะอยู่ที่เครื่องอ่านซึ่งจะทำการสร้างสนามแม่เหล็ก H ที่เปลี่ยนแปลงทิศทางตลอดเวลาที่มีความเข้มสูงถึงระดับที่ทำให้แท็กอิ่มตัว แล้วทำการเปลี่ยนทิศทางโดยฉับพลัน เนื่องจากคุณสมบัติการสะสมอำนาจแม่เหล็กภายในโลหะสัณฐานเป็นแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) นั่นคือเส้นทางการตอบของฟลักซ์แม่เหล็กที่มีต่อการเพิ่มและการลดสนามแม่เหล็กจะมีลักษณะต่างกัน ดังนั้นจึงทำให้แท็กสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกจากสัญญาณต้นฉบับหรือสัญญาณหลัก (main signal) รวมทั้งสัญญาณเพิ่มเติม (additional signal) ที่เกิดจากการตอบสนองของฟลักซ์แม่เหล็กภายในแท็กต่อระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ส่งมาจากเครื่องอ่าน

สมมุติว่าเครื่องอ่านส่งสัญญาณหลักที่ความถี่ $f_s = 20$ kHz แท็กจะทำการสร้างสัญญาณฮาร์มอนิกต่างๆ และสัญญาณเพิ่มเติมที่ความถี่ $f_1 = 3.5$ kHz และ $f_2 = 5.3$ kHz เนื่องจากคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของวัสดุที่ทำแท็ก จึงทำให้สัญญาณความถี่ต่างๆ เกิดการแทรกสอดและลดทอนกันเกิดเป็นความถี่อนุพันธ์ (derivation frequency) ต่างๆ ดังนี้

$$f_1 + f_2 = 8.80 \text{ kHz}$$

$$f_1 + f_2 = 1.80 \text{ kHz}$$

$$f_1 + f_2 = 3.52 \text{ kHz} \text{ และความถี่อื่นๆ}$$

โดยทั่วไปเครื่องอ่านจะไม่ตอบสนองต่อสัญญาณฮาร์มอนิกที่ส่งมาจากแท็ก แต่จะตอบสนองเฉพาะสัญญาณที่มีความถี่ผลรวมและความถี่ผลต่างของสัญญาณเพิ่มเติมเท่านั้น

โครงสร้างแท็กแบบใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นแถบสติกเกอร์บางๆ ที่มีความยาวตั้งแต่ไม่กี่เซนติเมตรจนถึง 20 เซนติเมตร ใช้ประกบติดกับสินค้าหรือสิ่งของที่ต้องการตรวจสอบและสามารถแกะออกได้ง่าย เนื่องจากแท็กแบบนี้ใช้งานในย่านความถี่ต่ำมากๆ จึงไม่ก่อให้เกิดผลกระทบเมื่อนำไปใช้งานกับสินค้าที่เป็นโลหะ (ถ้านำไปใช้งานในระบบ EAS ที่ย่านความถี่สูง ก็จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนจนทำให้ระบบทำงานผิดพลาดได้) อย่างไรก็ตามข้อควรระวังในการ

ใช้แท็กแบบนี้คือเรื่องทิศทางของการติดตั้งแท็ก ซึ่งในทางปฏิบัติจะติดตั้งแท็กในแนวตั้งเพื่อให้แท็กตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กจากเครื่องอ่านได้ดีที่สุด

การลบสถานะของแท็กที่ติดบลิ้นค้ำหลังจากมีการชำระเงินแล้วสามารถทำได้ง่ายโดยการนำแท็กไปวางจ่อกับแม่เหล็กถาวรที่มีระดับความเข้มสูงๆ เพื่อให้สภาพความเป็นแม่เหล็กของวัสดุที่ใช้ทำแท็กเกิดการอิ่มตัว และไม่สามารถถูกกระตุ้นได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กที่ส่งมาจากเครื่องตรวจจับ ณ บริเวณพื้นที่ตรวจจับที่ประตูทางออกอีกต่อไป นอกจากนี้แท็กสามารถที่จะทำการกระตุ้น (reactivation) ให้สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้โดยผ่านกระบวนการสลายสภาพแม่เหล็ก (demagnetization) โดยทั่วไปกระบวนการลบและกระตุ้นสถานะของแท็กสามารถทำได้ก็ครั้งก็ได้ จึงทำให้เป็นที่นิยมใช้งานในห้องสมุด โดยจะนำแท็กมาติดกับหนังสือแทนที่การใช้รหัสแท่ง และเมื่อมีการยืมหนังสือออกจากห้องสมุดได้โดยไม่ถูกเครื่องตรวจจับแจ้งเตือน และเมื่อได้รับหนังสือคืนก็จะทำการกระตุ้นให้แท็กกลับมาใช้งานได้ใหม่อีกครั้งหนึ่ง นอกจากนี้เนื่องจากแท็กแบบนี้มีขนาดบางมากจนสามารถพิมพ์รูปภาพและข้อความต่างๆ ลงบนแท็กเพื่อใช้แทนฉลากสินค้าได้ จึงทำให้ระบบ EAS เป็นที่นิยมใช้งานในร้านค้ามากขึ้น

2.2.8 ข้อพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์ RFID

หลักพื้นฐานที่ผู้ใช้งานเทคโนโลยี RFID พึงทราบเพื่อจะได้ใช้เป็นบรรทัดฐานในการตัดสินใจเลือกใช้อุปกรณ์ให้ได้ตรงตามความต้องการใช้งานให้มาก และสอดคล้องที่สุดโดยจะพิจารณาจากปัจจัยทั้ง 6 ด้าน ดังนี้

2.2.8.1 ความถี่ที่ใช้งาน

โดยทั่วไประบบ RFID ที่ใช้งานย่านความถี่ในช่วง 100 kHz ถึง 30 MHz จะใช้รูปแบบการรับส่งข้อมูลระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านเป็นแบบการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ ในขณะที่ระบบ RFID ที่ใช้งานย่านความถี่ในช่วง 2.45 GHz ถึง 5.8 GHz จะรับส่งข้อมูลโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งผู้ใช้จะต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการแพร่กระจายของสัญญาณที่ใช้ในระบบ RFID ให้ดี เพื่อให้สามารถนำมาใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ตัวอย่างเช่น การดูดซับคลื่นสัญญาณของตัวนำที่เป็นน้ำหรือวัสดุที่ไม่เป็นตัวนำ (non-conductive substance) ที่ความถี่ใช้งาน 100 kHz จะมีอัตราดูดซับที่ต่ำกว่า 100,000 เท่า ของการใช้งานที่ความถี่ 1 GHz เช่น การใช้งานระบบ RFID ที่ย่านความถี่ 100 kHz เป็นต้น นอกจากนี้ระบบ RFID ที่ใช้งานย่านความถี่ต่ำจะมีความสามารถในการทะลวงทะลวงได้สูงกว่า (แต่ส่งไปได้ไกลน้อยกว่า) ระบบ RFID ที่ใช้งานย่านความถี่สูง

ระบบ RFID ที่ทำงานโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะสามารถครอบคลุมพื้นที่ใช้งานได้มากกว่า (2 – 15 เมตร) ระบบ RFID ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ อย่างไรก็ตามแท็ก RFID ที่ทำงานในย่านไมโครเวฟต้องการแบตเตอรี่เป็นของตัวเอง เนื่องจากพลังงานที่ส่งมาจากเครื่องอ่านผ่านทางคลื่นความถี่วิทยุไม่เพียงพอต่อการใช้งาน จึงทำให้แท็กมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้สัญญาณรบกวนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (ที่เกิดจากการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า หรือเครื่องจักรกลต่างๆ) จะมีผลกระทบต่อระบบ RFID ที่ใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟน้อยกว่าระบบ RFID ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำคู่ควบ ดังนั้นโดยทั่วไประบบ RFID ที่ใช้งานย่านความถี่ไมโครเวฟจะถูกนำมาใช้งานในสายการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานประกอบรถยนต์ เป็นต้น

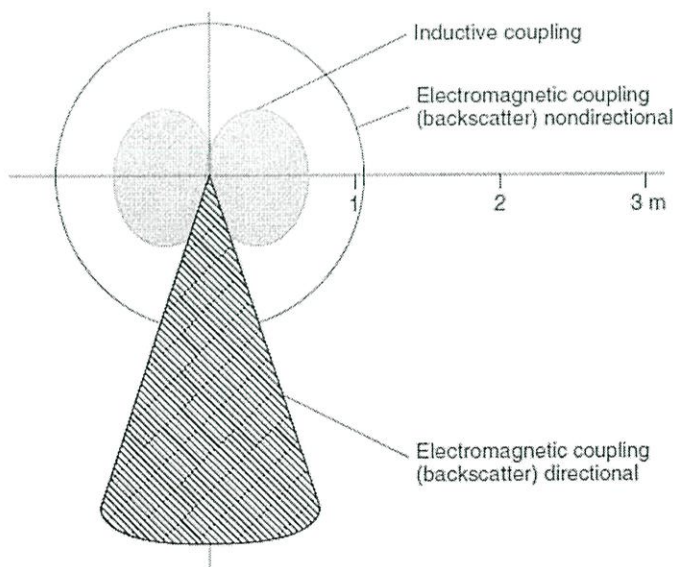
2.2.8.2 ระยะการอ่าน

ระยะการอ่านระหว่างแท็กและเครื่องอ่านจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 อย่าง ได้แก่ ความเที่ยงตรงของตำแหน่งการใช้งานของแท็ก, ระยะห่างระหว่างแท็ก, และความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท็ก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ความเที่ยงตรงของตำแหน่งการใช้งานของแท็ก RFID ในการใช้งานแท็กแบบไร้สัมผัสเพื่อผ่านการเข้าออกช่องทางเข้าสู่รถไฟฟ้าใต้ดิน ระบบนี้ไม่ต้องการความเที่ยงตรงของตำแหน่งแท็กมากนัก เนื่องจากในทางปฏิบัติผู้โดยสารทุกคนจะต้องนำบัตรมาวางในระยะที่เกือบจะสัมผัสกับเครื่องอ่านอยู่แล้ว ดังนั้นสิ่งที่ควรให้ความสำคัญคือระยะห่างขั้นต่ำที่ยอมให้แท็กอยู่ใกล้กัน ซึ่งในที่นี้ก็คือระยะห่างระหว่างผู้โดยสารปัจจุบันกับผู้โดยสารคนถัดไปที่กำลังเดินตามมา (โดยทั่วไปไม่เกิน 5 - 10 เซนติเมตร) เพื่อให้มั่นใจว่าสัญญาณที่ส่งออกจากเครื่องอ่านจะไปถึงแท็กที่อยู่ใกล้เครื่องอ่านมากที่สุดเพียงแท็กเดียว (จะไม่ถูกส่งไปไกลจนถึงแท็กของผู้โดยสารคนถัดไป) มิฉะนั้นจะทำให้แท็กทั้งสองแท็กส่งสัญญาณออกมาพร้อมกันอันเป็นผลทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลได้

2. ระยะห่างระหว่างแท็ก การติดตั้งแท็กลงในตัวถังรถยนต์ที่อยู่ในกระบวนการผลิตเพื่อใช้บอกลำดับและแสดงตัวตนเมื่อเข้าสู่กระบวนการต่างๆ โดยทั่วไปจะใช้แท็กที่ทำงานในย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งระยะการอ่านเขียนข้อมูลระหว่างแท็กและเครื่องอ่านจะถูกออกแบบให้มีระยะทำการที่ไกล นอกจากนี้ระยะห่างระหว่างแท็กจะต้องกว้างเพียงพอที่จะทำให้มีแท็กเพียงแท็กเดียวที่อยู่ในพื้นที่การอ่านของเครื่องอ่าน

ในทางปฏิบัติระบบ RFID แบบการกระจายย้อนกลับที่ใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบมีทิศทาง (directional beam) จะมีข้อดีมากกว่าระบบ RFID แบบคู่ควบแบบเหนี่ยวนำที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบกว้างและไม่มีทิศทาง (nondirectional) ดังแสดงในภาพที่ 2.14 ดังนั้นผู้ใช้ควรศึกษาพฤติกรรมและการแพร่กระจายของอุปกรณ์ RFID ที่ใช้ให้ชัดเจน เพื่อกำหนดระยะห่างระหว่างแท็ก, ทิศทาง, และตำแหน่งการยิงสัญญาณของเครื่องอ่านให้เหมาะสม



รูปที่ 2.14 พื้นที่การอ่านของเครื่องอ่านในระบบ RFID แบบต่างๆ

3. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท็ก RFID ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท็กเมื่อเทียบกับเครื่องอ่านระยะการอ่านข้อมูลจะเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่สามารถใช้งานได้ในพื้นที่การอ่านของเครื่องอ่าน ตัวอย่างเช่น การนำแท็กมาติดตั้งในรถยนต์ที่เคลื่อนที่ไปบนสายพานในโรงงานผลิต วิศวกรระบบจะต้องคำนึงความเร็วของสายพานที่นำตัวรถเข้าสู่ระบบและเวลาที่แท็กจะอยู่ในพื้นที่การอ่าน เพื่อใช้ในการคำนวณระยะเวลาที่สามารถใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างแท็กกับเครื่องอ่านให้ตรงตามความต้องการ

2.2.8.3 ชนิดของวัสดุที่นำแท็ก RFID ไปติดตั้ง

คลื่นความถี่วิทยุมีคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญที่ควรคำนึง ได้แก่ การสะท้อนกลับ (reflection), การหักเห (refraction), การเลี้ยวเบน (diffraction), และการแทรกสอด (interference) โดยที่วัสดุแต่ละชนิดจะมีผลต่อคุณสมบัติเหล่านี้ไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น การหักเหของการเดินทางของคลื่นวิทยุเกิดจากความเร็วของคลื่นในตัวกลางที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างกันจะมีความเร็วไม่เท่ากัน (คลื่นความถี่วิทยุจะเดินทางในน้ำได้ช้ากว่าเดินทางในอากาศถึง 9 เท่า) ดังนั้นชนิดของวัสดุที่นำแท็กไปติดตั้งจึงมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ เพราะฉะนั้นในการใช้งานจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดเหล่านี้ เพราะว่ามีสินค้าหลายแบบที่มีน้ำบรรจุอยู่ในปริมาณที่สูงหรือทำมาจากโลหะ

2.2.8.4 ข้อกำหนดด้านการรักษาความปลอดภัย

การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ประกอบไปด้วยการตรวจยืนยันจากแท็ก และการเข้ารหัสข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านทางคลื่นวิทยุ เป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาและผู้ออกแบบต้องตัดสินใจวางข้อกำหนดให้ชัดเจนก่อนเลือกใช้อุปกรณ์ RFID อย่างไรก็ตามผู้ออกแบบควรศึกษาขอบเขตของการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยี RFID นั้นๆ โดยเปรียบเทียบกับความต้องการใช้งานด้วยว่า กระบวนการหรือความต้องการใช้งานในกรณีนั้น จำเป็นต้องใช้มาตรการรักษาความปลอดภัยหรือไม่ หรือหากการใช้จะเป็นเพียงระดับใด เพื่อให้การลงทุนเป็นไปอย่างเหมาะสม

2.2.8.5 ขนาดของหน่วยความจำ

โดยทั่วไปราคาของแท็กจะสัมพันธ์กับลักษณะและขนาดหน่วยความจำที่บรรจุอยู่ในแท็ก การใช้งานระดับสาธารณะ เช่น ระบบขนส่ง จะนิยมใช้แท็กที่มีหน่วยความจำน้อยหรือแท็กแบบที่ไม่สามารถโปรแกรมได้ เพื่อควบคุมต้นทุนของบัตร อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีความจำเป็นจะต้องมีการบันทึกข้อมูลจำนวนมากหรือเขียนทับข้อมูลลงในหน่วยความจำบ่อยๆ ผู้ออกแบบควรพิจารณาเลือกใช้หน่วยความจำแบบ EEPROM หรือ SRAM

หน่วยความจำแบบ EEPROM นิยมใช้ในระบบ RFID ที่มีการรับส่งข้อมูลแบบคู่ควบแบบเหนี่ยวนำ โดยมีขนาดของหน่วยความจำตั้งแต่ 16 ไบต์ จนถึง 8 กิโลไบต์ ในขณะที่หน่วยความจำแบบ SRAM ที่มักจะมาพร้อมกับแบตเตอรี่สำรอง จะนิยมใช้ในการรับส่งข้อมูลในย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยมีขนาดหน่วยความจำตั้งแต่ 256 ไบต์ จนถึง 64 กิโลไบต์

2.3 กระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูล

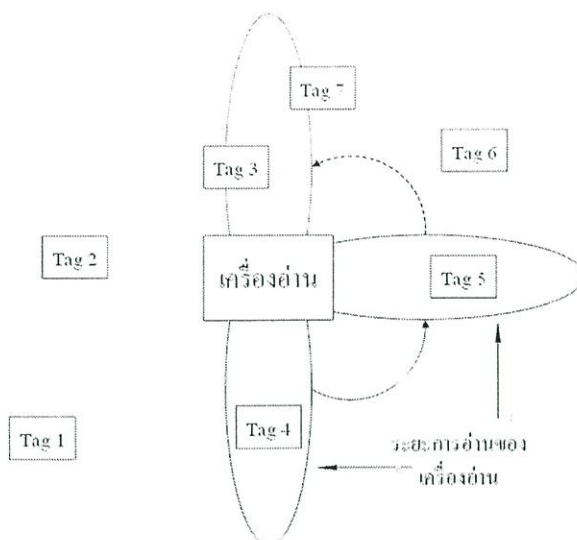
ในทางปฏิบัติประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลในระบบการสื่อสารจะถูกกำหนดด้วย “ความจุของช่องสัญญาณ (channel capacity)” ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดของช่องสัญญาณที่ยอมรับได้ ดังนั้นช่องสัญญาณควรจะต้องถูกจัดสรรให้กับแท็กแต่ละแท็กเพื่อให้สามารถส่งข้อมูลมายังเครื่องอ่านได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องการแทรกสอดหรือการชนกัน (collision) ของข้อมูล โดยทั่วไปแท็กไม่สามารถถอดรหัสหรืออ่านกลุ่มข้อมูล (data packet) ที่ส่งโดยแท็กอื่นไปยังเครื่องอ่านได้ จึงทำให้แท็กไม่สามารถตรวจสอบได้ว่ามีแท็กอื่นอยู่ในพื้นที่การอ่านหรือไม่ และเมื่อแท็กมากกว่าหนึ่งแท็กส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่านในเวลาเดียวกัน ก็จะก่อให้เกิดการชนกันของข้อมูล (ทำให้ต้องเริ่มส่งข้อมูลใหม่อีกครั้งซึ่งจะเสียเวลามาก) ฉะนั้นจึงเป็นหน้าที่ของเครื่องอ่านที่จะต้องมีการป้องกันการชนกันของข้อมูล (anti-collision) เพื่อใช้ในการจัดสรรช่องสัญญาณให้กับแท็กที่ต้องการส่งข้อมูลมายังเครื่องอ่าน

ระบบสื่อสารดิจิทัลได้แบ่งเทคนิคการเข้าถึงหลากหลายเพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูลออกเป็น 4 แบบ คือ การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งช่องว่าง (SDMA: space division multiple access), การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งความถี่ (FDMA: frequency division multiple access), การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งเวลา (TDMA: time division multiple access), และการเข้าถึงแบบหลากหลายแบบแบ่งรหัส (CDMA: code division multiple access) ซึ่งกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูลที่นิยมใช้ในระบบ RFID ได้แก่ SDMA, FDMA, และ TDMA ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งช่องว่าง

เทคนิค SDMA เป็นการแบ่งพื้นที่การให้บริการซึ่งสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การใช้เครื่องอ่านและสายอากาศหลายๆ ชุดจัดเรียงกันในลักษณะของอะเรย์ (array) ซึ่งเหมาะสำหรับงานประยุกต์ที่ต้องการพื้นที่การให้บริการที่กว้าง หรืออีกแบบหนึ่งคือการใช้เครื่องอ่านที่มีสายอากาศแบบปรับทิศทางได้ ซึ่งจะทำให้พื้นที่การอ่านเปลี่ยนแปลงไปในตำแหน่งต่างๆ ตามที่กำหนดไว้ โดยทั่วไประบบ RFID ที่ใช้วิธีการนี้จะใช้สายอากาศแบบเฟสอะเรย์ (phased array antenna) ที่ใช้งานที่ความถี่มากกว่า 850 MHz (เช่น 2.45 GHz) เพื่อจะได้ใช้สายอากาศขนาดเล็กได้ โดยเครื่องอ่านจะทำการควบคุมพื้นที่การอ่านให้หมุนไปรอบตัวมันเองครั้งละ 90 องศา ตามที่แสดงในรูปที่ 2.15

ข้อเสียของวิธีการนี้คือค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบนี้จะสูง เพราะสายอากาศที่ไม่มีมุมซับซ้อนค่อนข้างมาก ดังนั้นระบบ RFID ที่ใช้กระบวนการ SDMA เพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูลจะมีใช้บางงานประยุกต์เท่านั้น



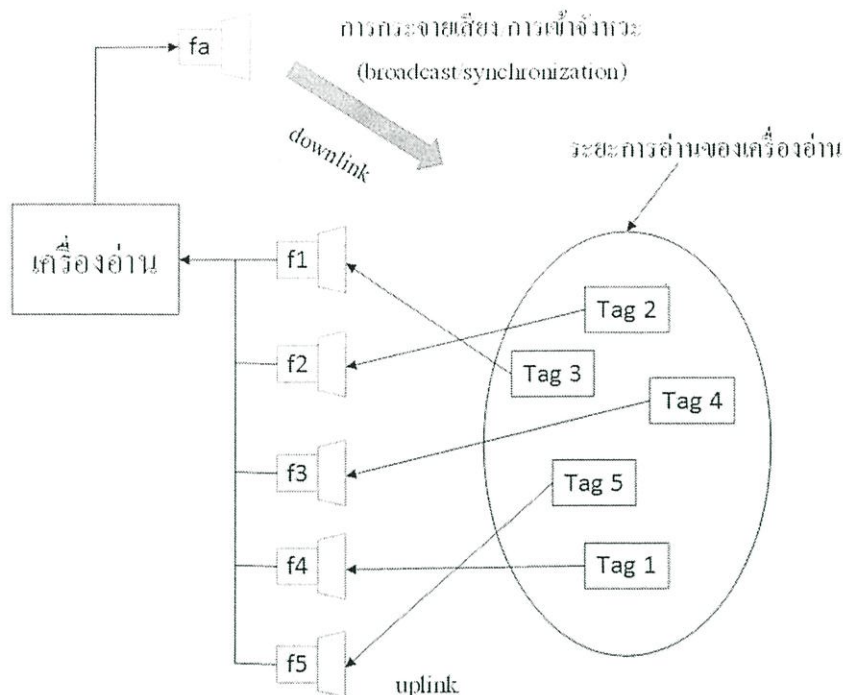
รูปที่ 2.15 ลักษณะการทำงานของระบบ RFID ที่ใช้กระบวนการ SDMA

2.3.2 การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งความถี่

เทคนิค FDMA เป็นการแบ่งความถี่ในการใช้งาน กล่าวคือช่องสัญญาณแต่ละช่องสัญญาณซึ่งทำหน้าที่ในการติดต่อสื่อสารจะใช้คลื่นพาที่มีความถี่ต่างๆ กัน

ในระบบ RFID ที่ใช้เทคนิค FDMA แท็กแต่ละตัวจะมีความสามารถในการปรับแต่งความถี่ได้อย่างอิสระ โดยที่การทำงานของระบบนี้เริ่มจากเครื่องอ่านส่งสัญญาณความถี่ f_a ไปยังแท็กทั้งหมด จากนั้นแท็กแต่ละแท็กก็จะใช้ความถี่อื่นที่แตกต่างกันในช่วงความถี่ f_1 ถึง f_N ในการส่งข้อมูลกลับมา ยังเครื่องอ่านดังแสดงในรูปที่ 2.16 ตัวอย่างเช่น เครื่องอ่านส่งสัญญาณให้กับแท็ก (downlink) โดยใช้ความถี่ที่ 135 kHz และเมื่อแท็กต้องการส่งข้อมูลให้กับเครื่องอ่าน (uplink) แท็กสามารถส่งข้อมูลได้หลายช่องสัญญาณภายในช่วงความถี่ 433 – 434 MHz ซึ่งสำหรับระบบ RFID แบบที่ใช้การมอดูเลชันแบบโพลทหรือการกระจายแบบย้อนกลับ แท็ก RFID จะใช้คลื่นพาแบบรอง(subcarrier) ที่ความถี่ต่างๆ ในการส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่าน

ข้อเสียของเทคนิค FDMA คือค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องอ่านให้สามารถรองรับการทำงานได้หลายความถี่จะมีราคาสูง ดังนั้นระบบ RFID ที่ใช้กระบวนการ FDMA เพื่อป้องกันการชนกันของข้อมูลจะมีใช้เฉพาะในบางงานประยุกต์เท่านั้น



รูปที่ 2.16 ลักษณะการทำงานของระบบ RFID ที่ใช้กระบวนการ FDMA

2.3.3 การเข้าถึงหลากหลายแบบแบ่งเวลา

เทคนิค TDMA เป็นการแบ่งเวลาในการใช้งานช่องสัญญาณ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้งานในระบบวิทยุเคลื่อนที่แบบดิจิทัล สำหรับในระบบ RFID เทคนิค TDMA แบ่งลักษณะการทำงานออกได้เป็น 2 แบบคือแบบที่ขับเคลื่อนโดยแท็ก (transponder-driven) และแบบที่ขับเคลื่อนโดยเครื่องอ่าน (reader-driven)

กระบวนการแบบที่ขับเคลื่อนโดยแท็กจะทำงานแบบไม่เข้าจังหวะ (asynchronous) เนื่องจากเครื่องอ่านไม่สามารถควบคุมการถ่ายโอนข้อมูลได้ โดยอาศัยใช้อัลกอริทึมที่เรียกว่ากระบวนการ ALOHA ซึ่งสามารถแบ่งแยกการทำงานย่อยออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบปิดสวิตช์ (switched-off) และแบบไม่มีสวิตช์ (non-switched) โดยจะขึ้นอยู่กับว่าแท็กหยุดทำงานเมื่อได้รับสัญญาณจากเครื่องอ่านหลังจากถ่ายโอนข้อมูลเสร็จแล้วหรือไม่ โดยทั่วไปกระบวนการแบบที่ขับเคลื่อนโดยแท็กจะทำงานช้าและไม่ยืดหยุ่นต่อการใช้งาน ในทางปฏิบัติจะนิยมใช้กระบวนการแบบที่ขับเคลื่อนโดยเครื่องอ่านซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบเข้าจังหวะ (synchronous) เพราะว่าแท็กทั้งหมดจะถูกควบคุมและตรวจสอบโดยเครื่องอ่าน นั่นคือเครื่องอ่านจะทำการเลือกแท็กที่ต้องการติดต่อสื่อสาร จากนั้นจึงทำการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างเครื่องอ่านและแท็กนั้น และเมื่อถ่ายโอนข้อมูลเสร็จก็จะทำการเลือกแท็กตัวใหม่เพื่อทำการติดต่อสื่อสาร กระบวนการแบบที่ขับเคลื่อนโดยเครื่องอ่านจะทำงานได้อย่างรวดเร็ว เพราะว่าการสื่อสารสามารถเกิดขึ้นเมื่อใดก็ได้ตามที่เครื่องอ่านต้องการ

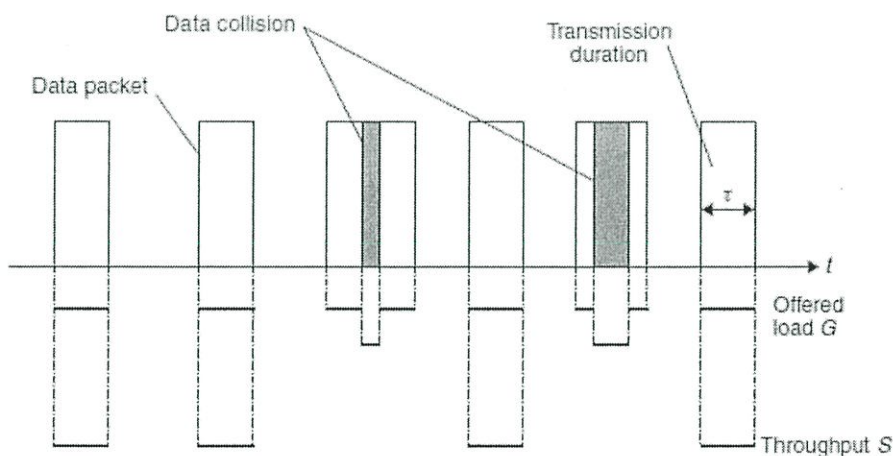
กระบวนการแบบที่ขับเคลื่อนโดยเครื่องอ่านยังสามารถแบ่งแยกการทำงานย่อยออกเป็น 2 แบบคือ polling และ binary search โดยแท็กที่ใช้กับการทำงานแบบนี้จะต้องมีหมายเลขประจำที่เป็นหนึ่งเดียว กระบวนการแบบ polling จะทำการจัดเรียงหมายเลขประจำของแท็กทั้งหมดที่มีใช้ใน

งานประยุกต์นั้น จากนั้นเครื่องอ่านก็จะทำการตรวจสอบหมายเลขประจำของแท็กแต่ละแท็กเรียงตามลำดับแท็กที่มีหมายเลขประจำตรงกับที่เครื่องอ่านต้องการก็จะส่งสัญญาณตอบรับกลับมา แล้วจึงจะเริ่มการถ่ายโอนข้อมูลได้ กระบวนการแบบ polling นี้จะทำงานช้า (แท็กยิ่งมากการทำงานก็จะยิ่งช้า) ฉะนั้นจึงเหมาะสมกับงานประยุกต์ที่มีจำนวนแท็กน้อย ในขณะที่กระบวนการแบบ binary search เป็นที่นิยมใช้งานมากกว่าเนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง

2.3.4 ตัวอย่างกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูล

ในกรณีที่มีแท็กหลายแท็กอยู่ในพื้นที่การอ่านเดียวกัน เมื่อเครื่องอ่านส่งสัญญาณออกมาแท็กทั้งหมดนั้นจะได้รับสัญญาณจากเครื่องอ่าน พร้อมทั้งส่งสัญญาณตอบสนองกลับไปยังเครื่องอ่าน และเมื่อเครื่องอ่านได้รับสัญญาณจากแท็กหลายๆแท็กในเวลาเดียวกัน ก็ทำให้เกิดการชนกันของข้อมูล ดังนั้นกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูลจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานประยุกต์ที่ต้องเผชิญกับการปรากฏตัวของแท็กหลายๆแท็กพร้อมกันในพื้นที่การอ่านของเครื่องอ่าน ดังมีตัวอย่างกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูลที่นิยมใช้ในระบบ RFID ดังต่อไปนี้

2.3.4.1 กระบวนการอะโลฮา (ALOHA) จัดเป็นกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูลที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดโดยได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้งานในโครงข่ายวิทยุที่เรียกว่า ALOHANET ในปี ค.ศ. 1970 กระบวนการ ALOHA ถือว่าเป็นกระบวนการ TDMA แบบที่ซับซ้อนโดยแท็ก RFID ซึ่งโดยทั่วไปแท็ก RFID ที่ใช้ในกระบวนการ ALOHA เป็นแท็ก RFID แบบที่อ่านข้อมูลได้อย่างเดียวและนิยมใช้ในการส่งข้อมูลขนาดเล็ก โดยจะส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่านในลักษณะเป็นลำดับวนรอบซึ่งเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลของแต่ละแท็ก RFID จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลาของการวนซ้ำ ดังนั้นจึงทำให้สามารถคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นที่แท็ก RFID สองแท็กส่งข้อมูลในเวลาที่แตกต่างกันและกลุ่มข้อมูลจะไม่เกิดการชนกันได้



รูปที่ 2.17 นิยามของโหลดที่ถูกเสนอ (offered load) และ Throughput ของระบบ ALOHA [1]

ลำดับของเวลาในการส่งข้อมูลในระบบ ALOHA ได้แสดงในรูปที่ 2.17 ถ้ากำหนดให้โหลดที่ถูกเสนอ (offered load) G สอดคล้องกับจำนวนแท็ก RFID ที่ส่งข้อมูลพร้อมกันในเวลาเดียวกัน ดังนั้นค่าเฉลี่ยของโหลดที่ถูกเสนอสามารถคำนวณได้จาก

$$G = \sum_{n=1}^n \frac{\tau_n}{T} \cdot r_n \quad (2.1)$$

เมื่อ n คือจำนวนแท็ก RFID ในระบบ, τ_n คือช่วงเวลาในการส่งข้อมูลหนึ่งกลุ่ม (one data packet), T คือคาบเวลาที่ทำกรเก็บข้อมูล (observation period), และ r_n คือจำนวนกลุ่มข้อมูลที่ถูส่งโดยแท็ก RFID ตัวที่ n ภายในคาบเวลา T

ปริมาณงานต่อหน่วยเวลาหรือที่เรียกว่า “Throughput” $s = 1$ หมายถึงช่วงเวลาในการส่งข้อมูลไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นหรือไม่มีการชนกันของข้อมูลที่ส่งไป และ $s = 0$ หมายถึงไม่มีการส่งข้อมูลหรือข้อมูลที่ส่งไปเกิดการชนกัน ดังนั้นค่าเฉลี่ยปริมาณงาน S คำนวณได้จาก

$$S = G \cdot e^{-2G} \quad (2.2)$$

จากการหาความสัมพันธ์ของ S และ G ทำให้สามารถหาค่าสูงสุดของ S ได้เท่ากับ 18.4 % เมื่อ $G = 0.5$ (ดูรูปที่ 2.18) ดังนั้นเมื่อ G มีค่าน้อยจะหมายถึงช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลไม่ได้ถูกใช้ตลอดเวลา และเมื่อ G มีค่าเพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลทำให้โอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

นอกจากนี้เรายังสามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นที่แท็ก RFID แต่ละแท็กส่งข้อมูลโดยไม่เกิดการชนกันของข้อมูล q ได้จาก S และ G ดังนี้

$$q = \frac{S}{G} = e^{-2G} \quad (2.3)$$

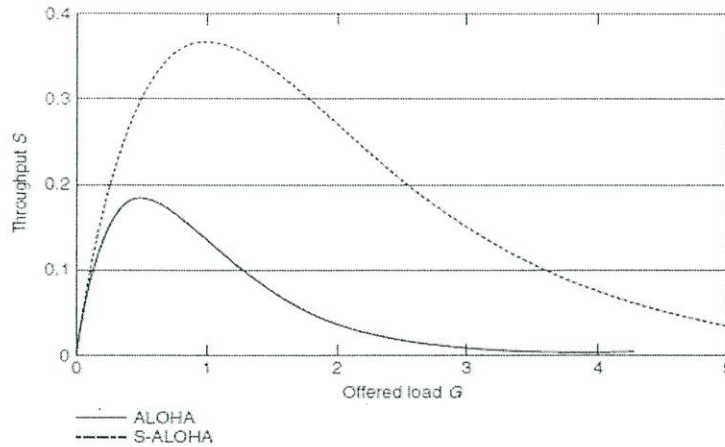
และความน่าจะเป็น $p(k)$ ของการส่งข้อมูลจำนวน k แท็กเกิดที่ไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นภายในคาบเวลา T สามารถคำนวณได้จาก

$$p(k) = \frac{(GT/\tau)^k}{k!} e^{-GT/\tau} \quad (2.4)$$

จะเห็นได้ว่า $p(k)$ มีการแจกแจงแบบปัวส์ซอง (Poisson distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ G/τ ตารางที่ 2.8 แสดงเวลาเฉลี่ยที่เครื่องอ่านใช้ในการอ่านแท็กทุกแท็กภายในพื้นที่การอ่าน

ตารางที่ 2.8 เวลาเฉลี่ยที่เครื่องอ่านใช้ในการอ่านแท็ก RFID ทุกแท็กภายในพื้นที่การอ่าน [1]

จำนวนแท็ก RFID ในพื้นที่การอ่าน	ค่าเฉลี่ย (ms)	90% ความน่าเชื่อถือ (ms)	99.9% ความน่าเชื่อถือ (ms)
2	150	350	500
3	250	550	800
4	300	750	1000
5	400	900	1250
6	500	1200	1600
7	650	1500	2000
8	800	1800	2700



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบปริมาณงาน (throughput) ของกระบวนการ ALOHA และ Slotted ALOHA [1]

2.3.4.2 กระบวนการสล็อตอะโลฮา (Slotted ALOHA) ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการ ALOHA ซึ่งมีค่าปริมาณงานต่ำ (low throughput) โดยกระบวนการ Slotted ALOHA แท้ก็จะเริ่มทำการส่งข้อมูลเมื่อถึงเวลาที่เข้าจังหวะตามที่กำหนดไว้ หรือเรียกว่า “ช่องการสื่อสาร(slot)” เท่านั้น ซึ่งการเข้าจังหวะของแท็กทั้งหมดจะถูกควบคุมด้วยเครื่องอ่าน

โดยทั่วไปคาบเวลาที่ก่อให้เกิดการชนกันของข้อมูลสำหรับกระบวนการ Slotted ALOHA จะมีค่าเพียงครึ่งหนึ่งของกระบวนการ ALOHA กล่าวคือถ้ากำหนดให้กลุ่มข้อมูลมีขนาดเท่านั้น (นั่นคือมีช่วงเวลาในการส่งข้อมูลเท่ากับ τ) กระบวนการ ALOHA จะเกิดการชนกันของข้อมูลก็ต่อเมื่อแท็กสองแท็กส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่านภายในคาบเวลา $T < 2\tau$ แต่สำหรับกระบวนการ Slotted ALOHA แท้ก็ส่งข้อมูลภายในช่วงเวลาที่กำหนด (หรือ slot) ซึ่งแต่ละ slot มีช่วงเวลาเท่ากับ τ ฉะนั้นการชนกันของข้อมูลจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแท็กมากกว่าหนึ่งแท็กต้องการส่งข้อมูล ณ ช่วงเวลาที่เข้าจังหวะเดียวกัน ซึ่งก็คือ $T = \tau$ จึงทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่าง S และ G คือ

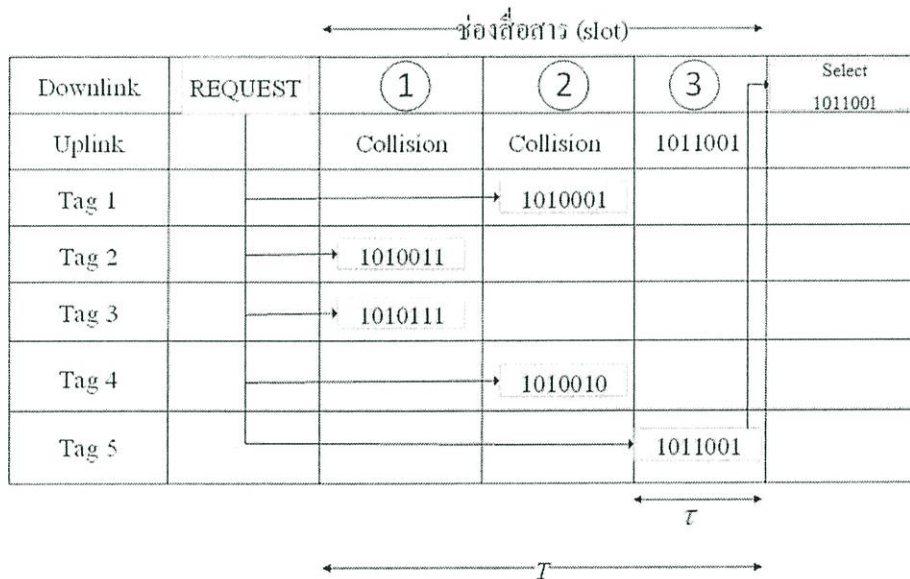
$$S = G \cdot e^{-G} \quad (2.5)$$

สมการ (2.5) ทำให้ทราบว่าค่าสูงสุดของ S คือ 36.8% เมื่อ $G = 0.9$ ดังแสดงในภาพที่ 2.18

อย่างไรก็ตามไม่เป็นจริงเสมอไปที่ว่าแท็กหลายแท็กที่ส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่านในเวลาเดียวกันจะก่อให้เกิดการชนกันของข้อมูล กล่าวคือในกรณีที่แท็ก A อยู่ใกล้เครื่องอ่านมากกว่าแท็ก B แล้วแท็ก A จะได้รับสัญญาณที่แรงกว่า (ได้รับพลังงานมากกว่า) จึงส่งผลทำให้สัญญาณที่ใช้ส่งข้อมูลของแท็ก A มีความแรงของสัญญาณมากกว่าของแท็ก B ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลของแท็ก A ถูกเขียนทับลงไปข้อมูลของแท็ก B ทำให้เครื่องอ่านอ่านข้อมูลของแท็ก A ได้เพียงอย่างเดียว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “capture effect” ซึ่งเป็นผลดีกับพฤติกรรมของ Throughput ถ้ากำหนดให้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold) b คือปริมาณที่กลุ่มข้อมูลหนึ่งจะต้องมีความแรงมากกว่ากลุ่มข้อมูลอื่นๆ เพื่อให้เครื่องอ่านสามารถตรวจหาได้โดยปราศจากข้อผิดพลาด ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$S = G e^{\left(\frac{bG}{1+b}\right)} \quad (2.6)$$

สมมุติว่าในระบบมีแท็กอยู่ 5 แท็ก โดยที่แต่ละแท็กจะมีหมายเลขประจำที่เป็นหนึ่งเดียว(หรือหมายเลข ID) ซึ่งมีทั้งหมด 8 บิต (นั่นแสดงว่ามีแท็กได้สูงสุด $2^8 = 256$ แท็ก) จากรูปที่ 2.19 การทำงานของกระบวนการ Slotted ALOHA สามารถอธิบายได้ดังนี้ ในตอนเริ่มต้นเครื่องอ่านจะอยู่ในโหมดรอ (wait mode) จากนั้นจึงทำการส่งคำสั่ง REQUEST ไปยังทั้ง 5 แท็กเพื่อทำการเข้าจังหวะกับแท็กทุกแท็กในพื้นที่การอ่าน และเตรียมพร้อมรับข้อมูลหมายเลข ID (หรือ serial number) ที่แท็กจะส่งกลับมาให้เครื่องอ่านในหนึ่งช่องสื่อสารที่ตามมา เมื่อแท็กแต่ละตัวได้รับคำสั่ง REQUEST ก็จะทำการสุ่มเลือกช่องสื่อสาร (slot) เพียงช่องเดียวสำหรับส่งหมายเลข ID ไปยังเครื่องอ่าน จากภาพที่ พบว่าเกิดการชนกันของข้อมูลเพราะว่ามีแท็กหมายเลข 5 (Tag 5) เพียงแท็กเดียวที่ส่งข้อมูลกลับไปยังเครื่องอ่าน โดยที่เมื่อเครื่องอ่านได้รับหมายเลข ID ของแท็กที่ไม่มีข้อผิดพลาดเครื่องอ่านก็จะเลือกแท็กนั้นเพื่อทำการติดต่อสื่อสารโดยการส่งคำสั่ง SELECT ไปยังแท็กนั้น จากนั้นจึงเริ่มทำการอ่านหรือเขียนข้อมูลได้โดยไม่มีแท็กอื่นมารบกวน แต่ถ้าเครื่องอ่านไม่สามารถตรวจสอบหมายเลข ID ของแท็ก RFID ใดๆ ได้ เครื่องอ่านก็จะทำการส่งคำสั่ง REQUEST ออกไปใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยจะทำขั้นตอนแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเครื่องอ่านสามารถตรวจสอบแท็ก RFID ได้ครบทั้งหมดตามที่ต้องการ



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างการทำงานของกระบวนการ Slotted ALOHA

2.3.4.3 กระบวนการไดนามิกสล็อตอะโลฮา (Dynamic Slotted ALOHA) ในกรณีที่มีแท็กจำนวนมากเข้ามาอยู่ในพื้นที่การอ่านของเครื่องอ่าน ก็จะส่งผลทำให้ค่าปริมาณงานลดลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว นั่นคือโอกาสที่จะเกิดการชนกันของข้อมูลจะสูงมาก เพราะจำนวนช่องสื่อสาร (slot) มีน้อยกว่าจำนวนแท็กมาก ฉะนั้นถ้าต้องการให้เครื่องอ่านสามารถตรวจสอบหมายเลข ID ของแท็กได้ ก็จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนช่องสื่อสารให้มากขึ้น เนื่องจากแท็กหนึ่งแท็กสามารถส่งข้อมูลได้ภายในหนึ่งช่องสัญญาณเท่านั้น

ดังนั้นกระบวนการ Dynamic Slotted ALOHA (DSA) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาจากกระบวนการ Slotted ALOHA เพื่อแก้ไขปัญหานี้ โดยที่จำนวนช่องสื่อสารที่ใช้ในกระบวนการ DSA

สามารถปรับเปลี่ยนได้ระหว่างการส่งคำสั่ง REQUEST แต่ละครั้ง (ถ้าเกิดการชนกันของข้อมูลจำนวนมาก ก็จะทำให้การเพิ่มจำนวนช่องสื่อสารขึ้นไปเรื่อยๆ เช่น 1, 2, 4, 8, 16 หรือ 32 เป็นต้น) จนกระทั่งแท็ก RFID จะถูกค้นพบทั้งหมด และเมื่อเครื่องอ่านสามารถระบุตัวตนของแท็ก RFID ที่ต้องการได้แล้ว ก็จะส่งคำสั่ง BREAK ไปยังแท็กนั้น เพื่อให้หยุดการติดต่อสื่อสารกับเครื่องอ่าน จนกว่าเครื่องอ่านจะใช้คำสั่งที่มีการระบุหมายเลข ID ของแท็กนั้นใหม่อีกครั้งหนึ่ง

2.3.4.4 กระบวนการเฟรมสล็อตอะโลฮา (Frame Slotted ALOHA) เป็นโปรโตคอลที่ได้รับการพัฒนาหรือแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบเพียวอะโลฮา สล็อตอะโลฮา โดยหลักการคือ จะแบ่งช่วงเวลาสำหรับการส่งข้อมูลออกเป็นช่วงเวลาเล็กๆ (time slot) การส่งข้อมูลจะทำการส่งเมื่อมีการเริ่มต้นของสล็อตและต้องเสร็จสิ้นเมื่อสิ้นสุดในสล็อตนั้นๆ สำหรับโปรโตคอล FSA จะมีการรวมสล็อตเป็นกลุ่มเข้าไปเป็น 1 เฟรม ซึ่งแท็กแต่ละตัวจะทำการส่งข้อมูลได้ 1 ครั้ง ต่อ 1 เฟรม เมื่อมีการเกิดการชนกัน แท็กจะทำการหน่วงเวลาแบบสุ่มรอในเฟรมถัดไป โดยที่ขนาดของเฟรมจะเป็นแบบตายตัวหรือเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งาน

หลักการของ FSA จะใช้เป็นการติดต่อสื่อสารที่ตัวเครื่องอ่านจะมีการกำหนดความยาวของเฟรม และแท็กจะทำการเลือกสล็อตในเฟรมดังกล่าว เพื่อทำการส่งข้อมูล ตัวเครื่องอ่านจะมีกระบวนการทำงานซ้ำๆ จนกระทั่งแท็กทุกตัวที่ได้มีการส่งข้อมูล มีอย่างน้อยหนึ่งตัวที่ประสบความสำเร็จในสล็อตโดยปราศจากการชนกัน ซึ่งในระบบแท็กที่เป็นชนิดเคมี-แอ็กทีฟและแอ็กทีฟนั้น ตัวเครื่องอ่านจะรับทราบได้ว่ามีแท็กใดที่ประสบความสำเร็จบ้างในแต่ละครั้งที่มีการทำงานจบหนึ่งเฟรม เนื่องจากสาเหตุนี้แท็กดังกล่าวจะไปอยู่ที่โหมดเงียบของเฟรมตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นการลดค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการชนกัน ดังนั้นระยะเวลาที่ระบุเอกลักษณ์ทั้งหมดจึงลดลง แต่สำหรับแท็กชนิดพาสซีฟ แท็กทั้งหมดจะทำการส่งต่อไปเรื่อยๆ ในทุกๆ เฟรม ซึ่งความยาวของระยะเวลาทั้งหมดจำเป็นต้องเพียงพอต่อการระบุเอกลักษณ์ของแท็กทุกตัว

2.4 ตัวแปรสุ่ม (Random Variables)

เราได้นำเอาการแจกแจงของตัวแปรสุ่มมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาในการวิเคราะห์โปรโตคอลการป้องกันการชนกันของ RFID ดังนั้น เพื่อความเข้าใจในรูปแบบการวิเคราะห์จึงต้องทราบถึงทฤษฎีความน่าจะเป็นพื้นฐานและการแจกแจงของฟังก์ชันของตัวแปรสุ่มบางรูปแบบที่จะทำการกล่าวถึงในหัวข้อนี้

2.4.1 ความน่าจะเป็นเชิงการจัด (Combinatorial Probability)

ปัญหามากมายที่เกี่ยวกับความน่าจะเป็นสามารถแก้ได้โดยอาศัยการนับจำนวน (Item Counting) ที่เรียกว่า เชิงการจัด (Combinatorics) ซึ่งปัญหาเกี่ยวกับความน่าจะเป็นเชิงการจัดมีลักษณะดังนี้

1. ปริภูมิตัวอย่าง S ประกอบด้วยผลของการทดลองที่มีจำนวนจำกัด n
2. เหตุการณ์ที่ประกอบด้วยผลของการทดลองหนึ่งชนิดหรือหนึ่งจุด (A Single Outcome) มีความน่าจะเป็นเท่ากันหมดและเท่ากับ $\frac{1}{n}$

โดยทั่วไปเรานิยมกล่าวว่า การทดลองชนิดนี้มีผลที่อาจจะเกิดขึ้นได้ทั้งหมด n ชนิด และแต่ละชนิดมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นเท่าๆ กัน (Equally Likely Outcome) หรือการทดลองให้ผลของการทดลองแบบสุ่ม (At Random) ระหว่างผลการทดลองที่เป็นไปได้ n ชนิด

ในกรณีที่ไม่มีควมซับซ้อนเช่นนี้ เราเลือกซิกมาฟิลต์ที่โตที่สุดคือ เซตที่บรรจุเซ็ดย่อยทั้งหมดของปริภูมิตัวอย่าง S และสำหรับเซต A ใดๆ ที่อยู่ในซิกมาฟิลต์แล้วเราจะได้ $P(A) = \frac{k}{n}$ เมื่อ k คือสมาชิกที่อยู่ใน A

การคำนวณค่าของ n สำหรับแต่ละการทดลองและ k สำหรับแต่ละเหตุการณ์นั้นโดยทั่วไปยังเป็นปัญหาที่ยุ่งยาก โดยเฉพาะถ้าการทดลองซับซ้อน การจะเขียนสมาชิกทุกตัวในปริภูมิตัวอย่างย่อมเป็นไปได้ แต่กระนั้นก็ตามมีสูตรการนับบางสูตรที่จะศึกษาในที่นี้ ช่วยให้แก้ปัญหาดังกล่าวได้มากมาย

2.4.1.1 หลักเบื้องต้นของการนับ

ถ้าการทดลองหนึ่งประกอบด้วย การทดลอง 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกมีทางที่จะทำได้ r ขั้นตอน และขั้นตอนที่ 2 มีทางที่จะทำได้ k ขั้นตอน ผลของการทดลองทั้งหมดจะเกิดขึ้นได้ rk วิธี เพื่อที่จะเข้าใจหลักการเบื้องต้นนี้ พิจารณาผลของการทดลองหนึ่งซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ A อาจจะได้ผลของการทดลองเป็น $a_1, a_2, a_3, \dots, a_r$ วิธี วิธีที่ 2 คือ B อาจจะได้ผลของการทดลองเป็น b_1, \dots, b_k วิธี ดังนั้นผลของการทดลองจะออกมาในรูปของคู่ลำดับ (a_i, b_j) ดังนี้

	b_1	b_2	...	b_j	...	b_k
a_1	(a_1, b_1)	(a_1, b_2)	...	(a_1, b_j)	...	(a_1, b_k)
a_2	(a_2, b_1)	(a_2, b_2)	...	(a_2, b_j)	...	(a_2, b_k)
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	...	\vdots
a_j	(a_j, b_1)	(a_j, b_2)	...	(a_j, b_j)	...	(a_j, b_k)
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots	...	\vdots
a_r	(a_r, b_1)	(a_r, b_2)	...	(a_r, b_j)	...	(a_r, b_k)

นั่นคือผลของการทดลองจะออกมาในรูปของผลคูณคาร์ทีเซียนของ $A \times B$ โดยที่ $A = \{a_1, a_2, \dots, a_r\}, B = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}$ จะได้คู่ลำดับทั้งหมด rk คู่ลำดับด้วยกัน ดังนั้น จำนวนวิธีทั้งหมดของผลของการทดลอง $= n(A \times B) = n(A) \times n(B)$

โดยการขยายหลักเกณฑ์นี้ออกไปให้ใช้ได้กับการทดลองที่ประกอบด้วยขั้นตอนมากกว่า 2 ขั้นตอน ก็จะได้หลักเกณฑ์ทั่วไป ที่ใช้หาจำนวนวิธีทั้งหมดสำหรับการทดลองหนึ่งๆ ที่ประกอบด้วยขั้นตอน n ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 (A_1) อาจจะทำเลือกทำได้ a_1 วิธี

ขั้นตอนที่ 2 (A_2) อาจจะทำเลือกทำได้ a_2 วิธี

\vdots

ขั้นตอนที่ n (A_n) อาจจะทำเลือกทำได้ a_n วิธี

ดังนั้นผลของการทดลองทั้งหมดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ จะออกมาในรูปของผลคูณคาร์ทีเซียนของ $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ นั่นคือ

$$S = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) | x_i \in A_i\}$$

จำนวนสมาชิกในแซมเปิลสเปซ

$$\begin{aligned} S &= n(A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n) \\ &= n(A_1) \times n(A_2) \times \dots \times n(A_n) \\ &= a_1 \times a_2 \times \dots \times a_n \end{aligned}$$

ตัวอย่างเช่น ทอดลูก 1 ลูก 3 ครั้ง จำนวนวิธีทั้งหมดที่อาจจะเกิดขึ้นได้ $= 6 \times 6 \times 6 = 216$ วิธี

2.4.1.2 การสุ่มตัวอย่างแบบคืนที่และแบบไม่คืนที่

ปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ของทฤษฎีความน่าจะเป็นอีกอันหนึ่งก็คือการสุ่มสิ่งของออกมาจำนวนหนึ่ง r สิ่ง จากสิ่งของต่างกัน n สิ่ง วิธีการสุ่มสิ่งของนี้เรียกว่าการสุ่มตัวอย่างเรียกสั้นๆว่า การสุ่มตัวอย่างขนาด r ซึ่งอาจจะสุ่มได้มาโดยวิธีหยิบทีละสิ่งแล้วใส่กลับคืนที่เดิม (With Replacement) ก่อนหยิบครั้งต่อไป หรืออาจจะสุ่มหยิบทีละสิ่งแล้วไม่ใส่กลับคืนที่เดิม (Without Replacement) ก่อนหยิบครั้งต่อไป

ในแต่ละวิธี บางครั้งลำดับของการสุ่มที่ได้มาอาจจะมีความสำคัญ หรือไม่มีความสำคัญก็ได้ ถ้าตัวอย่างขนาด r ถูกสุ่มมาจากสิ่งของทั้งหมด n สิ่งโดยคำนึงถึงลำดับในการสุ่มแล้วเรียกตัวอย่างขนาด r ที่สุ่มมาได้ว่าเป็นลำดับของตัวอย่างขนาด r (Ordered Sample of Size r) เราเรียกวิธีนี้ว่าเป็นการเรียงสับเปลี่ยน (Permutation) ถ้าไม่คำนึงถึงลำดับของตัวอย่างขนาด r แล้ว เราเรียกว่าเป็นการเลือก หรือ การจัดหมู่ (Combination)

ลำดับของตัวอย่างขนาด r นิยมเขียนในรูปแบบของ r ลำดับ คือ (x_1, x_2, \dots, x_r) เมื่อ x_i แทนผลที่สุ่มได้ในครั้งที่ i

นิยาม การสุ่มตัวอย่างแบบคืนที่ที่เกิดขึ้นได้ เมื่อสุ่มตัวอย่างทีละสิ่ง แล้วใส่กลับคืนที่เดิมก่อนหยิบครั้งต่อไป ดังนั้น จำนวนวิธีทั้งหมดที่อาจจะสุ่มตัวอย่างอย่างมีลำดับขนาด r จากสิ่งของที่ต่างกัน n สิ่ง จะเท่ากับ r สิ่ง

นิยาม การสุ่มตัวอย่างแบบไม่คืนที่ที่เกิดขึ้นได้ เมื่อสุ่มตัวอย่างทีละสิ่งแล้วไม่ใส่กลับคืนที่เดิมก่อนหยิบครั้งต่อไป ดังนั้น จำนวนวิธีทั้งหมดที่อาจจะสุ่มตัวอย่างอย่างมีลำดับขนาด r จากสิ่งของที่ต่างกัน n สิ่ง จะเท่ากับ

$$n(n-1) \dots (n-r+1) = \frac{n!}{(n-r)!} \text{ วิธี}$$

ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ ${}^n P_r$ หรือ $(n)_r$ แทน

นั่นคือ

$$({}^n P_r)_r = \frac{n!}{(n-r)!} \text{ วิธี}$$

บางครั้งลำดับของการเลือกไม่มีความสำคัญ และเราไม่สนใจว่าจะได้สิ่งใดก่อนหรือหลัง เพียงแต่ต้องการให้ได้ของตัวอย่างขนาด r เท่านั้น เพื่อที่จะหาวิธีการสุ่มตัวอย่างขนาด r โดยไม่คำนึงถึงลำดับ สมมติให้ c แทนจำนวนวิธีการสุ่มตัวอย่างขนาด r (ไม่คำนึงถึงลำดับ) จากสิ่งของที่ต่างกัน n สิ่ง จะเห็นได้ว่าในแต่ละวิธีที่สุ่มมาได้นี้ ถ้าจะนำมาจัดเรียงสับเปลี่ยน จะทำได้ $r!$ วิธี ดังนั้น จำนวนวิธีการจัดเรียงสับเปลี่ยนของตัวอย่างขนาด r จะเท่ากับจำนวนวิธีการสุ่มตัวอย่างขนาด r คูณด้วยจำนวนวิธีการจัดเรียงสับเปลี่ยนในแต่ละวิธี ซึ่งจะได้

$$({}^n P_r)_r = \frac{n!}{(n-r)!} = c \times r! \tag{2.7}$$

ดังนั้น

$$c = \frac{n!}{r!(n-r)!}, (r \leq n)$$

จะใช้สัญลักษณ์ ${}^n C_r$ หรือ $c_{(n,r)}$ หรือ $\binom{n}{r}$ แทน c นั่นคือ

$$\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} \tag{2.8}$$

หมายเหตุ: จะเห็นได้ว่า จำนวนวิธีที่ได้นี้ จะเหมือนกับการจัดเรียงสับเปลี่ยนสิ่งของที่มีลักษณะเหมือนกัน ชนิดแรกเหมือนกัน มี r สิ่ง อีกชนิดหนึ่งเหมือนกันมี $(n - r)$ สิ่ง ซึ่งจะจัดเรียงสับเปลี่ยนได้ $= \frac{n!}{r!(n-r)!}$ (เลือกตำแหน่งให้ของชนิดแรกอยู่ เลือกได้ $\binom{n}{r}$ วิธี ตำแหน่งที่เหลือวางของชนิดที่สอง) นิยาม จำนวนวิธีของการเลือกสิ่งของ r สิ่งจากสิ่งของที่แตกต่างกัน n สิ่ง (ตัวอย่างขนาด r ไม่คำนึงถึงลำดับ) คือ

$$\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!} \text{ วิธี}$$

จำนวน $\binom{n}{r}$ มีชื่อเรียกว่า สัมประสิทธิ์ทวินาม เพราะว่า สัมประสิทธิ์ของ $a^r b^{n-r}$ ได้มาจากการกระจาย $(a + b)^n$ ก็คือ $\binom{n}{r}$ นั่นเอง นั่นคือ

$$(a + b)^n = \sum_{r=0}^{\infty} \binom{n}{r} a^r b^{n-r} \quad (2.9)$$

2.4.1.3 สัมประสิทธิ์พหุนามและการแบ่งส่วน

ปัญหาเกี่ยวกับการจัดเรียงสับเปลี่ยนและการเลือก เป็นส่วนหนึ่งของปัญหาเกี่ยวกับการนับสัมประสิทธิ์ทวินามเป็นเพียงกรณีหนึ่งของสัมประสิทธิ์พหุนาม เราจะพิจารณาถึงการเลือกหรือการแบ่งกลุ่มสิ่งของออกเป็นหลายๆ กลุ่ม ซึ่งเป็นการขยายกฎของการเลือกของ หรือการแบ่งกลุ่มของ ออกเป็น 2 กลุ่มตามลำดับ กฎเกณฑ์นี้มีชื่อเรียกว่า การแบ่งส่วน (Partitions) ก่อนจะพูดถึงกฎเกณฑ์การแบ่งส่วน ขอทบทวนความหมายของการเลือก ${}^n C_r$ หรือ $\binom{n}{r}$ ที่รู้จักกันตอนต้นก่อน สมมติว่าเราพิจารณาการเลือกของ r สิ่งจากของที่แตกต่างกันทั้งหมด n สิ่ง จะเห็นได้ว่าสิ่งของทั้งหมด n สิ่ง เป็นสมาชิกในปริภูมิตัวอย่าง S ออกเป็น 2 ส่วน คือ S_1 และ S_2 โดยที่ S_1 จะประกอบด้วยสมาชิก r สิ่ง ที่ถูกเลือกมา และ S_2 จะประกอบด้วยสมาชิก $(n - r)$ สิ่งที่เหลือ จะได้ $S = S_1 \cup S_2$ และ $n(S_1) + n(S_2) = n(S) = n$ ซึ่งก็คือการแบ่งส่วนอย่างมีลำดับที่เรียกว่า Ordered Partition of Type $(r, n-r)$

ดังนั้นจำนวนวิธีของการเลือกสิ่งของ r สิ่งจากสิ่งของที่แตกต่างกัน n สิ่ง ก็คือจำนวนวิธีของการแบ่งส่วนอย่างมีลำดับ โดยส่วนแรกมีของ r สิ่ง ส่วนที่สองมีของ $n-r$ สิ่ง ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ $(r, n-r)$ จะเท่ากับ $\binom{n}{r}$ วิธี $= \frac{n!}{r!(n-r)!}$ วิธี เราอาจจะขยายความคิดนี้ออกไปได้ดังนี้

ให้ S เป็นเซตที่ประกอบด้วยสมาชิก n จำนวน

การแบ่งส่วนอย่างมีลำดับของ S ในรูปแบบ (n_1, n_2, \dots, n_m) ก็คือการแบ่งเซต S ออกเป็นเซตย่อย S_1, S_2, \dots, S_m โดยที่ $S_i \cap S_j = \emptyset, i \neq j$ และ $n(S_1) = n_1, n(S_2) = n_2, \dots, n(S_m) = n_m$

โดยที่ $n_1 + n_2 + \dots + n_m = n$

จะได้จำนวนวิธีของการแบ่ง $\frac{n!}{n_1!n_2!\dots n_m!}$ วิธี

นิยาม ถ้า S เป็นเซตที่มีจำนวนสมาชิก n จำนวนแล้ว จำนวนวิธีของการแบ่งส่วนอย่างมีลำดับในรูปแบบของ (n_1, n_2, \dots, n_m) จะเท่ากับ $\frac{n!}{n_1!n_2!\dots n_m!}$ วิธี

วิธีคิด: ประการแรกเลือกของที่จะถูกแบ่งออกเป็นส่วนแรกก่อนจะเลือกได้ $\binom{n}{n_1}$ วิธี ขั้นต่อไปเลือกของที่เหลือออกเป็นส่วนที่สองจะเลือกได้ $\binom{n-n_1}{n_2}$ วิธี ดังนี้เรื่อยๆ ไป จนถึงส่วนสุดท้ายจะเหลือของอยู่ n_m สิ่งพอดี

จะได้จำนวนวิธีของการแบ่ง = $\binom{n}{n_1} \binom{n-n_1}{n_2} \dots \binom{n-n_1-\dots-n_{m-1}}{n_m} \binom{n_m}{n_m} = \frac{n!}{n_1!n_2!\dots n_m!}$ วิธี
 จำนวนวิธีที่ได้นี้มีชื่อเรียกว่า สัมประสิทธิ์พหุนาม (Multinomial Coefficient) ทั้งนี้เพราะว่า
 สัมประสิทธิ์ของ $a_1^{n_1} a_2^{n_2} \dots a_m^{n_m}$ ได้มาจากการกระจาย $(a_1 + a_2 + \dots + a_m)^n$ ก็คือ $\frac{n!}{n_1!n_2!\dots n_m!}$
 นั่นเอง

ถ้า $S = \{a, b, c, d\}$ จำนวนวิธีทั้งหมดของการแบ่งสมาชิกใน S ออกเป็น 3 ส่วน โดยให้
 แต่ละส่วนมีสมาชิก (1,1,2) ตามลำดับจะแบ่งได้เท่ากับ $\binom{4}{1,1,2} = \frac{4!}{1!1!2!} = 12$ วิธี

2.4.1.4 การแบ่งส่วนอย่างไม่มีลำดับ

ในกรณีที่มีการแบ่งสิ่งของออกเป็นส่วนๆ ส่วนละเท่าๆ กัน ดังตัวอย่าง
 ให้ $S = \{a, b, c, d\}$ แบ่งจำนวนสมาชิกใน S ออกเป็น 2 ส่วนๆ ละ 2 สิ่ง จะแบ่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_1 &= \{\{a, b\}, \{c, d\}\}, S_2 = \{\{c, d\}, \{a, b\}\} \\ S_3 &= \{\{a, c\}, \{b, d\}\}, S_4 = \{\{b, d\}, \{a, c\}\} \\ S_5 &= \{\{a, b\}, \{b, c\}\}, S_6 = \{\{b, c\}, \{a, d\}\} \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่า ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ถ้าคิดลำดับของการแบ่งแล้วจะถือว่าแตกต่างกัน
 คือ S_1 ครั้งแรกแบ่งได้ $\{a, b\}$ ก่อน สำหรับ S_2 ครั้งแรกแบ่งได้ $\{c, d\}$ ก่อน แต่ถ้าไม่คำนึงถึงลำดับใน
 การแบ่งแล้ว จะเห็นได้ว่า S_1 และ S_2 เป็นวิธีเดียวกัน S_3 และ S_4 เป็นวิธีเดียวกัน S_5 และ S_6 เป็นวิธี
 เดียวกัน

ฉะนั้น จึงมีวิธีต่างกันเพียง 3 วิธีเท่านั้นคือเอา 2 ไปหารจำนวนวิธีเดิมที่จะแบ่งสิ่งของ
 ออกเป็น 2 ส่วน โดยแต่ละส่วนมีจำนวนเท่ากับ 2 สิ่ง ซึ่งจะได้ออกมาเท่ากับ $\binom{4}{2} = \frac{4!}{2!2!}$
 แต่มีสองจำนวนที่มีจำนวนสิ่งของเท่ากัน การสลับที่ของ 2 ส่วนนี้ไม่ทำให้เกิดเป็นวิธีใหม่ขึ้นมา เพราะ
 ไม่คิดลำดับเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้น จะมีวิธีที่ซ้ำกันอยู่ $2!$ วิธี จำนวนวิธีการแบ่งส่วนอย่างไม่มีลำดับใน
 รูปแบบ $\underbrace{(r, r, \dots, r)}_m$ สรุปได้ดังนี้ คือ

จำนวนวิธีของการแบ่งส่วนอย่างไม่มีลำดับ โดยที่แต่ละส่วนมีจำนวนสิ่งของเท่าๆ กัน r สิ่ง
 ให้ S เป็นเซตที่มีจำนวนสมาชิก n จำนวน โดยที่ $n = m \times r$ ดังนั้นจำนวนวิธีการแบ่งส่วนอย่าง
 ไม่มีลำดับของ S ในรูปแบบ $\underbrace{(r, r, \dots, r)}_m$ จะเท่ากับ

$$\binom{n}{r, r, \dots, r} / m! = \frac{1}{m!} \frac{n!}{(r!)^m} \quad (2.10)$$

2.4.1.5 ตัวอย่างเกี่ยวกับปัญหาเชิงการจัด

ปัญหาส่วนมากที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน เช่น ปัญหาในทางธุรกิจ ทางจิตวิทยา ทาง
 สังคมวิทยา ทางสัตวศาสตร์ และทางการแพทย์ มักจะอยู่ในรูปของลูกบอลและกล่อง ปัญหาเกี่ยวกับ
 การจับคู่ต่อไปนี้จะได้ยกตัวอย่างให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างโมเดลนี้กับปัญหาต่างๆ ใน
 ชีวิตประจำวัน

ตัวอย่าง สุ่มใส่ลูกบอล 7 ลูก ลงในกล่อง 7 ใบ ตารางต่อไปนี้แสดงการแจกแจงความน่าจะเป็นของ
 จำนวนลูกบอลที่จะบรรจุอยู่ในกล่องทั้ง 7 ใบ (แสดงให้เห็นเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น)

ตารางที่ 2.9 แสดงการแจกแจงของจำนวนลูกบอล 7 ลูก ในกล่อง 7 ใบ

จำนวนลูกบอลในแต่ละกล่อง (1)	จำนวนวิธีของการจัด เรียงลำดับไม่คิดลำดับเท่ากับ $7! \times 7!$ หารตัวเลขต่อไปนี้(2)	ความน่าจะเป็น $(2)/7^7$
1,1,1,1,1,1,1	$7! \times 1!$	0.006120
2,1,1,1,1,1,0	$5! \times 2!$	0.128518
2,2,1,1,1,0,0	$2!3!2! \times 2!2!$	0.321295
2,2,2,1,0,0,0	$3!3! \times 2!2!2!$	0.107098
3,1,1,1,1,0,0	$4!2! \times 3!$	0.107098
3,2,1,1,0,0,0	$2!3! \times 3!2!$	0.214197
4,1,1,1,0,0,0,0	$3!3! \times 4!$	0.035699
5,1,1,0,0,0,0,0	$2!4! \times 5!$	0.005355
7,0,0,0,0,0,0,0	$6! \times 7!$	0.000008

ในที่นี้ จำนวนลูกบอล (r) เท่ากับ 7 จำนวนกล่อง (n) เท่ากับ 7 (กล่องอาจจะแทนจำนวนวันในรอบ 1 สัปดาห์ จำนวนลูกบอลอาจจะแทนจำนวนครั้งที่ผู้โทรศัพท์เข้ามาหรือแทนจำนวนจดหมายที่เข้ามาหรือแทนจำนวนอุบัติเหตุ ฯลฯ) พิจารณาเหตุการณ์หนึ่งคือ 2,2,1,1,1,0,0 ในแถว (1) เหตุการณ์ที่ 3 ซึ่งมีลูกบอลอยู่ในกล่องจำนวน (2,2,1,1,1,0,0) วิธีคิดก็คือ แบ่งลูกบอล 7 ลูก ออกเป็นหมู่ๆ ละ 2,2,1,1,1 ได้เท่ากับ ${}^7C_2 \times {}^5C_2 \times {}^3C_1 \times {}^2C_1 \times {}^1C_1 = \frac{7!}{2!2!1!1!1!}$ วิธีการแบ่งนี้มีลำดับในตัวเองอยู่แล้ว คือจำนวนลูกบอล 2,2,1,1,1 ลูกเหล่านี้ บรรจุอยู่ในกล่องใบที่ 1,2,3,4,5 ตามลำดับ กล่องใบที่ 6 และใบที่ 7 เป็นกล่องว่าง แต่เมื่อไม่สนใจกล่อง จำนวนลูกบอลที่ถูกแบ่งนี้อาจจะอยู่ในกล่องใบไหนก็ได้ ดังนั้นจะเกิดการสลับที่การใส่ลูกบอลจำนวนต่างๆ ในกล่องทั้ง 7 ใบได้อีก $7!$ วิธี แต่มีจำนวนลูกบอลเท่ากัน 2 ลูกอยู่ 2 กล่อง 1 ลูกอยู่ 3 กล่อง และมีกล่องว่าง 2 กล่อง จะต้องหารออกด้วย $2!3!2!$ ดังนั้น จำนวนวิธีการสลับที่จำนวนลูกบอลในกล่องทั้ง 7 ใบจะเท่ากับ $\frac{7!}{2!3!2!}$ จำนวนวิธีของการสุ่มใส่ลูกบอล 7 ลูกในกล่อง 7 ใบ โดยมีจำนวนลูกบอลอยู่ (2,2,1,1,1,0,0) จะเท่ากับ $\frac{7!}{2!2!} \times \frac{7!}{2!3!2!}$ ดังตัวเลขในตารางข้างบน ส่วนเหตุการณ์อื่นๆ ก็คิดในทำนองเดียวกัน ดังได้อธิบายมาแล้วข้างต้น

2.4.2 การแจกแจงทวินาม (Binomial Distribution)

ในลำดับของการทดลองแบบเบอูลลี เราสนใจแต่จำนวนครั้งของการเกิดความสำเร็จในการทดลองทั้งหมด n ครั้ง โดยไม่สนใจลำดับของการเกิดแต่ละครั้ง ถ้ากำหนดให้ตัวแปรสุ่ม X เป็นจำนวนครั้งของการเกิดความสำเร็จในการทดลองแบบเบอูลลี n ครั้ง x อาจจะมีค่าเป็น 0,1,2,3,..., n นั่นคือเราจะได้นิยามของการทดลองแบบทวินามดังนี้

นิยาม การทดลองแบบทวินาม (Binomial Experiment) จะต้องมีคุณสมบัติดังนี้

- 1) เป็นการทดลองที่กระทำซ้ำๆ กัน n ครั้ง ($n > 1$)
- 2) การทดลองทั้ง n ครั้ง เป็นอิสระซึ่งกันและกัน
- 3) ผลของการทดลองแต่ละครั้งจะเกิดได้เพียง 2 ชนิดเท่านั้นคือ ความสำเร็จ (Success)

กับความไม่สำเร็จ(Failure)

4) ความน่าจะเป็นของการเกิดความสำเร็จในการทดลองแต่ละครั้งมีค่าคงที่ นั่นคือ $P(\text{เกิดความสำเร็จในแต่ละครั้ง}) = p$ และ $P(\text{ไม่เกิดความสำเร็จในแต่ละครั้ง}) = 1 - p = q$

5) ตัวแปรสุ่ม X คือ จำนวนครั้งของความสำเร็จจากการทดลองทั้ง n ครั้ง

ถ้า X เป็นจำนวนครั้งของการเกิดความสำเร็จ x อาจจะมีค่าเป็น $0, 1, 2, \dots, n$ แล้ว $n-x$ จะเป็นจำนวนครั้งของการเกิดความสำเร็จ x ครั้ง ในการทดลอง n ครั้งจะเท่ากับ $\binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$ นั่นคือฟังก์ชันความน่าจะเป็นของ X คือ

$$P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad x = 0, 1, \dots, n \quad (2.11)$$

เราเรียกความน่าจะเป็นนี้ว่า ความน่าจะเป็นทวินาม (Binomial Probability) และเรียกการแจกแจงของตัวแปรสุ่ม X ว่าเป็น การแจกแจงทวินาม (Binomial Distribution)

นิยาม ตัวแปรสุ่ม X มีการแจกแจงทวินาม ถ้า (สำหรับจำนวนเต็มบวก n ใดๆ และ $0 \leq p \leq 1$)

$$P(X = x) = p_x(x) = \begin{cases} \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, & x = 0, 1, \dots, n \\ 0, & \text{ถ้าเป็นอย่างอื่น} \end{cases} \quad (2.12)$$

จะตรวจสอบว่าสมการดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็นหรือไม่

พิจารณา $P(X = x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$, $x > 0$ ทุกค่าของ x

เพราะว่า $\binom{n}{x}$ มีค่าเป็นบวก p และ $1-p$ มีค่าเป็นบวกเสมอ

พิจารณา

$$\sum_{x=0}^n P(X = x) = \sum_{x=0}^n \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$$

$$= (p + (1-p))^n \text{ โดยทฤษฎีบททวินาม}$$

$$= 1$$

ดังนั้นสมการดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นฟังก์ชันความน่าจะเป็น

ตัวอย่าง ทอดลูกเต๋า 1 ลูก 5 ครั้ง ความน่าจะเป็นที่ลูกเต๋าคจะขึ้นแต้มหก 2 ครั้งจะเท่ากับ

$$\binom{5}{2} \left(\frac{1}{6}\right)^2 \left(\frac{5}{6}\right)^3$$

$$\left(p = \frac{1}{6}, 1-p = \frac{5}{6}\right)$$

หรือ ถ้ากำหนดให้ตัวแปรสุ่ม X เป็นจำนวนครั้งที่ลูกเต๋าคจะขึ้นแต้มหก

ดังนั้น X จะมีค่าเป็น $0, 1, 2, 3, 4, 5$

$$P(X = 2) = \binom{5}{2} \left(\frac{1}{6}\right)^2 \left(\frac{5}{6}\right)^3$$

2.4.3 การแจกแจงมัลติโนเมียล (Multinomial Distribution)

ในการทดลองที่กระทำซ้ำๆ กัน n ครั้ง โดยที่การทดลองแต่ละครั้งต่างเป็นอิสระซึ่งกันและกันและกันและผลของการทดลองแต่ละครั้งอาจเกิดผลลัพธ์ได้หลายชนิด เช่น ในการสอบถามถึงความคิดเห็นของบุคคลแต่ละคน แต่ละบุคคลอาจจะมีความคิดเห็นได้หลายอย่างอาจเห็นด้วยอย่างมาก เห็นด้วย ไม่มีความเห็น ไม่เห็นด้วย ไม่เห็นด้วยอย่างมาก ด้วยความน่าจะเป็นต่างๆ กัน

สมมติว่าผลของการทดลองในแต่ละครั้งในลักษณะที่กล่าวมานี้ อาจเกิดผลลัพธ์ได้ถึง k อย่าง ด้วยความน่าจะเป็น

$$p_1, p_2, \dots, p_k \left(\sum_{i=1}^k p_i = 1 \right) \quad (2.13)$$

โดยที่ p_1, p_2, \dots, p_k แทนความน่าจะเป็นที่จะเกิดผลลัพธ์ชนิดที่ 1, 2, ... และ k ตามลำดับ ถ้ากำหนดให้ X_i แทนความสำเร็จที่จะเกิดขึ้นจากผลลัพธ์ชนิดที่ $i, i = 1, 2, \dots, k$ นั่นคือ

$$P(X_i = x_i) = p_i, i = 1, 2, \dots, k$$

ถ้าเราสนใจความน่าจะเป็นที่ X_1 จะเกิดผลลัพธ์ชนิดที่ 1

X_2 จะเกิดผลลัพธ์ชนิดที่ 2

⋮

X_k จะเกิดผลลัพธ์ชนิดที่ k

จะได้

$$P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_k = x_k) = \binom{n}{x_1, x_2, \dots, x_k} p^{x_1} p^{x_2} \dots p^{x_k}$$

หรือ

$$P(x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{n!}{x_1! x_2! \dots x_k!} p^{x_1} p^{x_2} \dots p^{x_k}$$

โดยที่

$$\sum_{i=1}^k x_i = n$$

และ

$$\begin{aligned} \binom{n}{x_1, x_2, \dots, x_k} &= \text{จำนวนวิธีของการเลือกให้เกิด } x_1 \text{ จากผลลัพธ์ที่ 1,} \\ &\quad x_2 \text{ จากผลลัพธ์ที่ 2, } \dots, x_k \text{ จากผลลัพธ์ที่ } k \\ &= \frac{n!}{x_1! x_2! \dots x_k!} \end{aligned}$$

ทฤษฎี ถ้าตัวแปรสุ่ม X_1, X_2, \dots, X_k มีการแจกแจงมัลติโนเมียลแล้ว ฟังก์ชันความน่าจะเป็นร่วมของตัวแปรสุ่ม กำหนดโดย

$$P(x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{n!}{x_1! x_2! \dots x_k!} p^{x_1} p^{x_2} \dots p^{x_k} \quad (2.14)$$

เมื่อ $x_i = 0, 1, \dots, n$ ทุกค่าของ $i, \sum x_i = n, \sum p_i = 1$

โดยที่ $\binom{n}{x_1, x_2, \dots, x_k}$ คือสัมประสิทธิ์ของ $a_1^{x_1} a_2^{x_2}, \dots, a_k^{x_k}$

ซึ่งได้มาจากการกระจาย $(a_1 + a_2 + \dots + a_n)^n$ และเรียกว่า Multinomial Coefficient

ตัวอย่าง ในการทดลองถึงการเรียนรู้ของหนู โดยจับไปขังไว้ในกรงที่มีทางออก 3 ทาง ทางออกที่ 1 เมื่อหนูออกไปแล้วพบอาหาร ทางออกที่ 2 และทางออกที่ 3 ไม่มีอาหาร ถ้าหนูไม่มีการเรียนรู้และได้สุ่มเลือกทางออกอย่างสุ่ม สมมติให้ Y_i แทนจำนวนครั้งที่หนูสุ่มออกทางออกที่ $i, i = 1, 2, 3$ จงหาว่าในการทดลองจับหนูใส่กรง 6 ครั้ง จงหาความน่าจะเป็นที่ $Y_1 = 3, Y_2 = 1, Y_3 = 2$
วิธีทำ เพราะว่า $p(y_i) = \frac{1}{3}, i = 1, 2, 3$

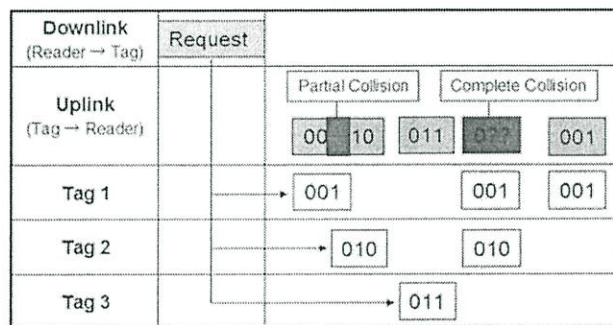
$$p(3,1,2) = \frac{6!}{3!1!2!} \left(\frac{1}{3}\right)^3 \left(\frac{1}{3}\right) \left(\frac{1}{3}\right)^2$$

$$= 0.0823$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

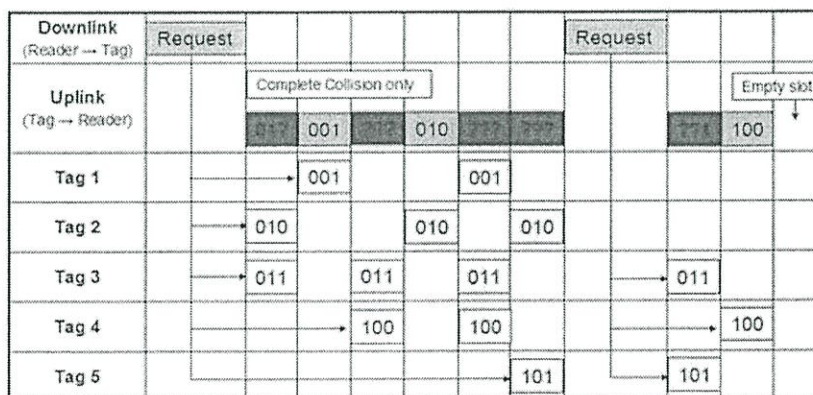
2.5.1 ตัวอย่างกระบวนการป้องกันการชนกันที่นิยมใช้ในระบบ RFID

2.5.1.1 กระบวนการ ALOHA เป็นกระบวนการป้องกันการชนกันที่ซับซ้อนน้อยที่สุด แท็กจะส่งเวลาที่ส่งข้อมูลเอง โดยเวลาที่ส่งจะไม่มีการเข้าจังหวะกับทั้งเครื่องอ่านและแท็กอื่นๆ เมื่อได้รับพลังงานคลื่นจากเครื่องอ่านในพื้นที่การอ่าน แท็กจะส่งเวลาและส่งข้อมูลหลังจากได้รับคำสั่ง REQUEST จากเครื่องอ่าน แท็กสามารถเกิดการชนกันได้แบบสมบูรณ์หรืออาจชนบางส่วน ซึ่งเมื่อแท็กชนกันก็จะส่งเวลาหน่วงในการส่งใหม่อีกรอบ ดังรูป 2.20



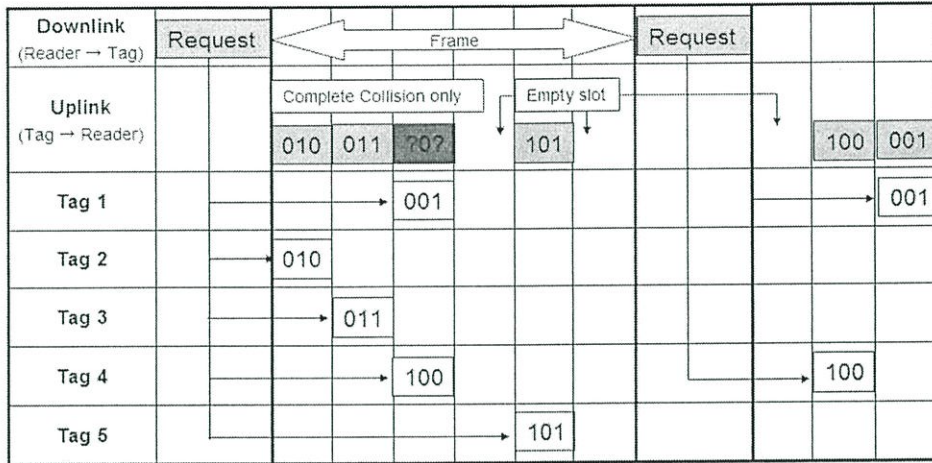
รูปที่ 2.20 กระบวนการ ALOHA สำหรับ RFID

2.5.1.2 Slotted ALOHA ได้ถูกพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการ ALOHA ที่มีปริมาณงานต่ำ โดยกระบวนการ Slotted ALOHA แท็กจะเริ่มทำการส่งข้อมูลเมื่อเวลาที่เข้าจังหวะตามที่กำหนดไว้หรือเรียกว่าสล็อตเท่านั้น ซึ่งการเข้าจังหวะจะถูกควบคุมด้วยเครื่องอ่านแท็กจะเลือกส่งเข้าสล็อตเดียว และจะเริ่มการส่งแบบสล็อตถัดไปอีกโดยคั่นด้วย 1 สล็อต ดังรูปที่ 2.21 เมื่อการชนกันเกิดขึ้น จะเป็นการชนกันที่สมบูรณ์ ไม่มีการชนกันแค่บางส่วนแบบกระบวนการ ALOHA ดังนั้น Slotted ALOHA จึงมีปริมาณงานสูงกว่า ALOHA



รูปที่ 2.21 กระบวนการ Slotted ALOHA สำหรับ RFID

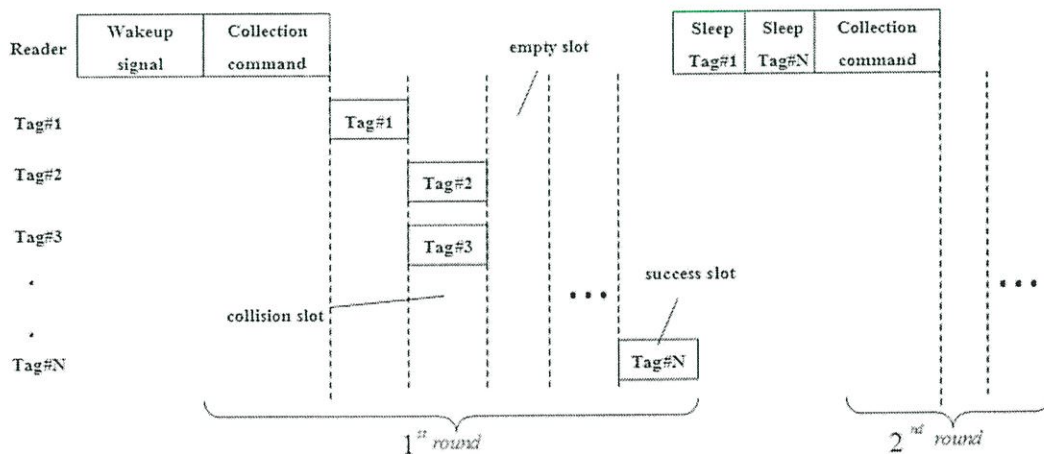
2.5.1.3 Framed Slotted ALOHA (FSA) เป็นโปรโตคอลที่ได้รับการพัฒนาจากสล็อตอะโลฮา โดยมีหลักการคือ จะแบ่งช่วงเวลาสำหรับการส่งข้อมูลออกเป็นช่วงเวลาเล็กๆ หรือ สล็อต ซึ่งจะถูกนำมารวมกันเรียกว่าเฟรม ซึ่งแท็กแต่ละตัวจะทำการส่งข้อมูลได้ 1 สล็อต ต่อ 1 เฟรม จะเกิดการชนกันของข้อมูลเมื่อมีแท็กมากกว่า 1 ตัวในสล็อตเดียวกัน และสล็อตว่าง คือสล็อตที่ไม่มีแท็กเข้ามาเลย และจำนวนเฟรมจะเท่าเดิมจนกว่าจะจบการติดต่อสื่อสารระหว่างแท็กและเครื่องอ่าน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กระบวนการ Framed Slotted ALOHA สำหรับ RFID

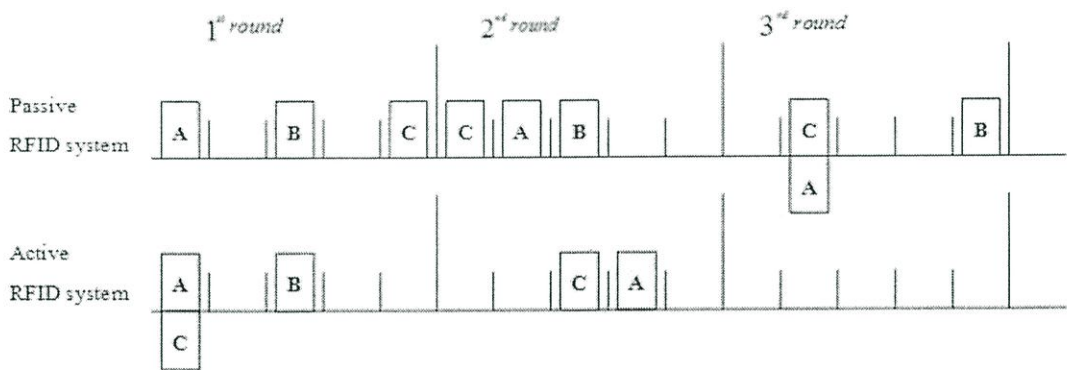
2.5.2 รูปแบบการจัดเก็บแท็กแบบแพสซีฟและแบบแอ็กทีฟ

ได้มีบทความวิจัยนำเสนอถึงรูปแบบการวิเคราะห์ของระบบ RFID ที่มีการส่งหลากหลายมากมายหลายโปรโตคอล ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ระบบ RFID ที่มีการส่งแบบหลากหลาย โดยใช้รูปแบบการส่งแบบเฟรมสล็อตอะโลฮา (FSA: Framed Slotted ALOHA) [15]-[20] โดยจะมีรูปแบบการส่งข้อมูลแท็ก 2 ประเภทคือ แท็กแบบแพสซีฟ (passive tag) และแบบแอ็กทีฟแท็ก (active tag) โดยทั้ง 2 จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันดังนี้



รูปที่ 2.23 ลำดับการจัดเก็บแท็กของ RFID แบบแอ็กทีฟโดยใช้เฟรมสล็อตอะโลฮา

แอ็กทิฟแท็กจะมีแบตเตอรี่ภายในแท็กทำให้ระยะเวลาการส่ง ส่งได้ไกลกว่าแบบพาสซีฟ นอกจากนี้ยังมีหน่วยความจำและฟังก์ชันที่มากกว่าอีกด้วย โดยส่วนมากแล้วการการเริ่มการสื่อสารระหว่างแท็กและตัวอ่าน ตัวอ่านจะเป็นคนเริ่มทำการติดต่อกับแท็ก ในขณะที่แอ็กทิฟแท็กไม่ได้ทำงานหรือไม่ต้องตอบสนองคำสั่งใดๆ แท็กจะอยู่ในสถานะหลับ (Sleep state) จากรูปที่ 2.23 แสดงตัวอย่างลำดับการจัดเก็บ ID แท็ก[15] โดยเริ่มต้นจากสัญญาณปลุก (Wakeup signal) เมื่อทุกแท็กได้รับสัญญาณปลุกจะเข้าสู่สถานะพร้อม (Ready state) ที่จะรับคำสั่งจากเครื่องอ่าน โดยเครื่องอ่านจะส่ง Collection command ที่ระบุขนาดเฟรมต่อรอบและระยะของสล็อตมา แอ็กทิฟแท็กก็จะทำการสุ่มเข้าสู่สล็อตต่างๆ โดยจะทำการสุ่มแท็กหนึ่งๆ ได้ 1 สล็อตใน 1 รอบเท่านั้น ดังนั้นในเฟรมดังกล่าวจะมีทั้งสล็อตที่ว่างเปล่า, สล็อตที่มีแท็กมากกว่า 1 ตัว และสล็อตที่มีแท็ก 1 ตัว เมื่อจบรอบของการจัดเก็บเครื่องอ่านจะส่งคำสั่งกลับให้กับแท็กที่ถูกจัดเก็บนั้นคือแท็กที่มีจำนวน 1 ตัว ต่อ 1 สล็อต แท็กดังกล่าวก็จะเข้าสู่สถานะหลับและจะไม่ทำการส่งในเฟรมต่อไปอีก แล้วเครื่องอ่านก็ทำการส่ง Collection command ให้กับแท็กที่เหลืออยู่ โดยจะเข้าไปเรื่อยๆ เหมือนกันทุกรอบจนหยุดกระบวนการส่งเมื่อไม่มีแท็กตอบสนองแล้ว



รูปที่ 2.24 เปรียบเทียบการจัดเก็บแท็กระหว่าง RFID แบบแอ็กทิฟและพาสซีฟโดยใช้เฟรมสล็อตอะโลฮา

ในการเริ่มส่งข้อมูลแบบพาสซีฟแท็ก ตัวอ่านจะกระจายคลื่นความถี่วิทยุออกมาและเริ่มทำการติดต่อเมื่อพบแท็กอยู่ในระยะเวลาการส่ง แต่พาสซีฟแท็กนั้นไม่สามารถจดจำสถานะใดๆ ได้ ทำได้เพียงตอบสนองต่อเครื่องอ่าน อาจพบการชนกันของแท็กได้ทุกรอบการส่งซึ่งต่างจากการจัดเก็บแท็กแบบแอ็กทิฟจะให้แท็กที่ส่งสำเร็จอยู่ในสถานะหลับ ทำให้รอบการส่งต่อไปมีจำนวนแท็กแย่งชิงน้อยลงหรือเท่าเดิม ดังนั้นเราไม่สามารถมั่นใจว่าจะจัดเก็บแท็กแบบพาสซีฟได้ครบทุกตัวหรือยัง กระบวนการจัดเก็บแท็กแบบนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อมาถึงรอบการจัดเก็บในระดับที่เรามั่นใจ ซึ่งระดับนั้นแทนค่าให้เป็นความน่าจะเป็น α ซึ่งในที่นี้เราให้ $\alpha = 0.99$ แทนความน่าจะเป็นที่มีแท็กหายไปไม่เกิน 1% จากรูปที่ 2.24 เปรียบการตอบสนองของทั้งสองแท็กใน 3 รอบการจัดเก็บ ให้เฟรมมีค่า 5 สล็อต และมีแท็ก 3 ตัวคือ A, B และ C แท็กแบบพาสซีฟทั้ง 3 จะทำการส่งทุกรอบ แต่แบบแอ็กทิฟในรอบที่ 2 จะให้แท็ก B อยู่ในสถานะหลับ และทำการส่งแท็ก A และ C เนื่องจากการชนกันในรอบที่ 1 และในรอบที่ 3 จะไม่มีการตอบสนองใดๆ ของแท็กเนื่องจากทุกแท็กทำการส่งสำเร็จแล้วนั่นเอง

2.5.3 รูปแบบการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นแบบทวินามสำหรับระบบ RFID แบบ FSA

ในการทำการวิเคราะห์การจัดเก็บ ID แท็กเราสนใจเพียงขั้นตอนที่แท็กจะสุ่มเข้าสู่สล็อตและไม่พิจารณาสัญญาณรบกวนต่างๆ โดยให้ขนาดเฟรมเท่ากับจำนวน $N(i)$ สล็อต และมีแท็กจำนวน $n(i)$ สื่อสารในรอบการสื่อสารที่ i รอบ ความน่าจะเป็นที่จะมี q แท็กในสล็อตในสมการทวินามหรือไบโนเมียลคือ

$$p_q(i) = \binom{n(i)}{q} \left(\frac{1}{N(i)}\right)^q \left(\frac{N(i)-1}{N(i)}\right)^{n(i)-q} \quad (2.15)$$

ให้ $q = 1$ แล้วจะได้ $p_1(i)$ คือความน่าจะเป็นของการประสบความสำเร็จของการส่ง จะได้จำนวนของแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่งแต่ละเฟรมเป็น $N(i)p_1(i)$ ถ้ากำหนดแท็กสูญหายเองในการส่งแท็กในระบบแพสซีฟแท็กจะได้ความน่าจะเป็นของแท็กที่สูญหายหลังการกำหนดให้เฟรมเท่ากับ R_{p-f} คือ

$$\prod_{i=1}^{R_f} \left(1 - \frac{N(i)p_1(i)}{n(i)}\right) = 1 - \alpha \quad (2.16)$$

และจำนวนเฟรมในการส่งแท็กแบบแพสซีฟควรมีค่าน้อยที่สุดคือ

$$R_{p-f} \geq \log(1 - \alpha) / \log\left(1 - \frac{Np_1}{n}\right) \quad (2.17)$$

เพื่อให้ได้จำนวนเฟรมตามระดับความมั่นใจ α เห็นได้ว่าจะสามารถลดจำนวนเฟรมได้โดยการเพิ่มขนาดของเฟรม N หมายความว่า การเพิ่มขนาดเฟรมจะลดจำนวนการตอบสนองของแท็ก ซึ่งจำนวนครั้งการอ่านที่ต่ำสุดของแพสซีฟแท็กทั้งหมดคือ

$$R_{p-t_min} = \min(N * R_{p-f}) \quad (2.18)$$

บทที่ 3

รูปแบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของ เฟรมสล็อตอะโลฮาโดยใช้สมการพหุนาม

3.1 กล่าวนำ

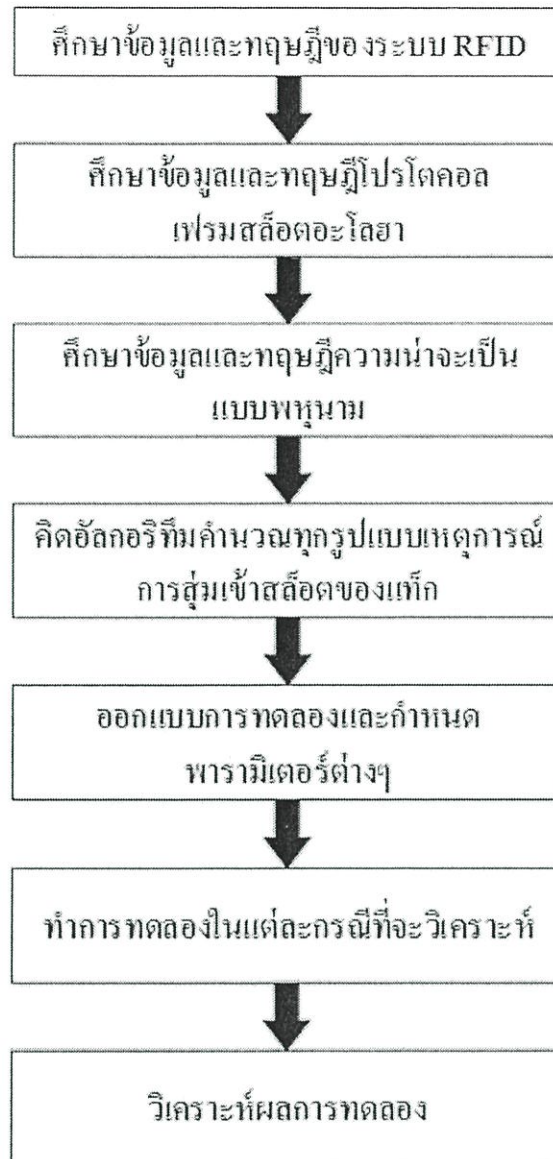
ในปัจจุบันลักษณะงานประยุกต์ระบบ RFID ได้มีการพัฒนารูปแบบการใช้งานที่หลากหลายตามเทคโนโลยีและความต้องการทางการตลาดที่สูงขึ้น ในส่วนของลักษณะงาน RFID ที่มีการเข้าถึงแบบหลากหลาย ซึ่งมีรูปแบบที่มีจำนวนแท็กหลายตัวอยู่ในบริเวณให้การอ่านแท็กของเครื่องอ่านและทำการส่งข้อมูลเข้าถึงเครื่องอ่านพร้อมกัน ทำให้เกิดปัญหาการชนกันของข้อมูลเกิดขึ้น จึงเป็นหน้าที่ของเครื่องอ่านที่จะต้องจัดสรรช่องสัญญาณให้แท็กเข้าถึงได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด ซึ่งโปรโตคอลที่นิยมใช้ก็คือ ALOHA, Slotted ALOHA และ Framed Slotted ALOHA สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเอารูปแบบ เฟรมสล็อตอะโลฮามาใช้ในการวิเคราะห์ซึ่งจะอธิบายรูปแบบโปรโตคอลและรูปแบบการวิเคราะห์ในบทนี้

ในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงรูปแบบการวิเคราะห์แบบใหม่ของการส่ง RFID ที่มีการรับส่งหลากหลายทางด้วยวิธี FSA (Framed Slotted ALOHA) โดยทั่วไปแล้วการคำนวณค่าประสิทธิภาพของ FSA ทำโดยใช้สมการความน่าจะเป็นแบบทวินามหรือโปโนเมียลดังหัวข้อ 2.5 แต่เราเสนอการใช้สมการพหุนามหรือมัลติโนเมียลในการคำนวณ ซึ่งเป็นรูปแบบการวิเคราะห์ที่ดีกว่าแบบทวินามที่สามารถวิเคราะห์โดยกำหนดให้การสุ่มเข้าของสล็อตแต่ละแท็กแตกต่างกันได้ จึงต้องทำการจัดเก็บค่าความน่าจะเป็นของรูปแบบการสุ่มเข้าถึงสล็อตทุกรูปแบบ เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้คำนวณหาความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จของแต่ละเหตุการณ์ โดยจะมีรายละเอียดหรือขั้นตอนการทำการวิเคราะห์ดังนี้

- อัลกอริทึมการคำนวณค่าทุกเหตุการณ์การเข้าถึงสล็อตหรือการสุ่มเข้าสล็อตของแท็กเนื่องจากรูปแบบการวิเคราะห์แบบพหุนามที่เราได้ทำการเสนอนั้น ต้องทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นทุกเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ที่แท็กจะสุ่มเข้าสล็อต ดังนั้นจะต้องมีอัลกอริทึมมาคำนวณให้ได้ทุกเหตุการณ์เพื่อไม่ให้มีเหตุการณ์ซ้ำกัน หรือตกหล่น และนำค่าเหตุการณ์นั้นมาทำการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นต่อไป

- ออกแบบการทดลองและกำหนดพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับการทดลองซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กรณี เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากตัวแปรต่างๆ ในระบบ คือ

- กรณีที่ 1 วิเคราะห์โดยเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของแต่ละจำนวนแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่ง(K)
- กรณีที่ 2 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนแท็ก(N) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ
- กรณีที่ 3 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนสล็อต(M) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทดลองวิจัยบทที่ 3

3.2 ระบบ RFID ที่มีการเข้าถึงแบบหลากหลาย

งานประยุกต์ของระบบ RFID สามารถทำได้หลากหลายรูปแบบ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบโดยผู้ใช้โดยการออกแบบการอ่านข้อมูลโดยเครื่องอ่าน ไม่ว่าจะเป็นการติดตั้งเครื่องอ่านแบบติดกับทางเข้า-ออก (Gate Reader) หรือจะเป็นการติดตั้งเครื่องอ่านแบบตั้งโต๊ะ (Station Reader) ซึ่งแบบตั้งโต๊ะนั้นสามารถประยุกต์ไปได้ตามลักษณะงาน ตัวอย่างเช่น

ด้านการจัดการคลังสินค้า ติดตั้งเครื่องอ่านกับชั้นวางสินค้าและติดแท็กกับสินค้า เมื่อใดที่สินค้าถูกหยิบออกจากชั้นวางไป RFID ก็ส่งสัญญาณเตือนไปยังพนักงานให้นำสินค้ามาเติมใหม่ ทำให้ไม่จำเป็นต้องเก็บสต็อกสินค้า แต่สามารถสั่งให้ Suppliers มาส่งของได้ทันทีรวมทั้งจะช่วยการันตี

ว่าสินค้ามีวางจำหน่ายตลอดเวลา การนำ RFID มาใช้ช่วยทำให้เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันได้ และมีประโยชน์สำคัญดังนี้

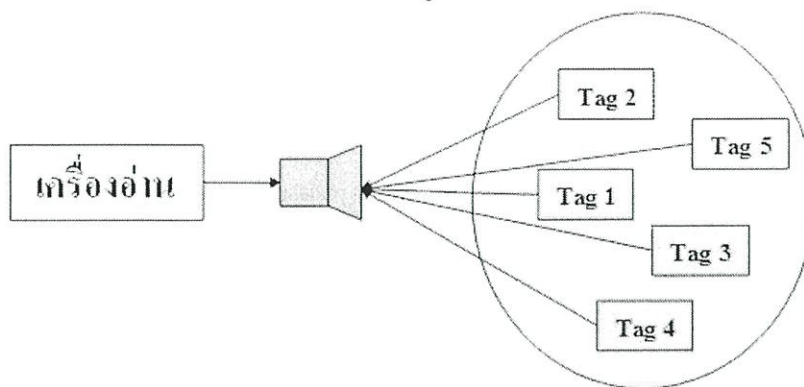
1. สามารถปรับปรุงให้สินค้าคงคลังมีความแม่นยำ
2. ลดระยะเวลาในกระบวนการสั่งซื้อ
3. ลดความบกพร่องในกระบวนการจัดการภายในคลังสินค้า
4. ลดต้นทุนในการจัดเก็บสินค้าคงคลัง
5. ปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการลูกค้าได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ด้านโลจิสติกส์ การตรวจสอบสินค้าในระหว่างการขนส่ง เช่น ติดตั้งเครื่องอ่านไว้ในตู้ขนส่งสินค้าและติดตั้งแท็กไว้กับสินค้าทุกตัว ในระหว่างการขนส่งสินค้า เจ้าของกิจการก็สามารถตรวจสอบว่ามีสินค้าอยู่ในตู้ขนส่งนั้นครบถ้วนหรือไม่ ทำให้ไม่ต้องใช้แรงงานคนเข้าไปนับ ข้อดีของการนำระบบ RFID มาใช้ด้านโลจิสติกส์

1. ลดต้นทุนด้านบุคลากรในการดำเนินงาน
2. เพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่งสินค้า
3. ลดการสูญหายหรือการสับเปลี่ยนสินค้าที่อยู่ในขั้นตอนของการขนส่ง
4. ลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการประกันภัยสินค้า

โดยการใช้งาน RFID รูปแบบดังกล่าวคือแท็กที่สินค้าระดับพาเลตที่ใช้จัดเก็บในคลังสินค้า ระบบตรวจสอบคลังสินค้า นิยมใช้ RFID มาตรฐาน ISO/IEC 18000-6 ที่มีการทำงานที่ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency : UHF) ความถี่ในช่วง 860-960MHz โดยมีจุดเด่นในเรื่องของแท็ก ซึ่งจะแบ่งเป็นชนิดแพสซีฟที่อ่านข้อมูลได้ไกล ประมาณ 3-7 เมตร และแบบแอ็กทีฟที่อ่านข้อมูล ได้ไกล ประมาณ 30-50 เมตร และมีกระบวนการป้องกันการชนกันของแท็กที่เครื่องอ่าน

จากตัวอย่างการติดตั้งเครื่องอ่านแบบตั้งโต๊ะนั้น รูปแบบการอ่านข้อมูลแท็กจะเป็นแบบการเข้าถึงแบบหลากหลาย คือการส่งข้อมูลจากแท็กหลายๆตัว ไปยังเครื่องอ่านเพียงเครื่องเดียวในเวลาเดียวกัน ดังรูปที่ 3.2 ซึ่ง ปัญหาที่พบในระบบ RFID คือ เมื่อมีแท็กจำนวนมากในพื้นที่การอ่าน แท็กไม่สามารถตรวจสอบได้ว่ามีแท็กอื่นอยู่ในพื้นที่การอ่านหรือไม่ และเมื่อแท็กมากกว่าหนึ่งแท็กส่งข้อมูลไปยังเครื่องอ่านในเวลาเดียวกัน ก็จะก่อให้เกิดการชนกันของข้อมูล ฉะนั้นจึงเป็นหน้าที่ของเครื่องอ่านที่จะต้องมีการป้องกันการชนกันของข้อมูล (anti-collision) เพื่อใช้ในการจัดสรรช่องสัญญาณให้กับแท็กที่ต้องการส่งข้อมูลมายังเครื่องอ่าน โดยกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูลที่นิยมใช้ในระบบ RFID ได้แก่ ALOHA, Slotted ALOHA, และ Framed Slotted ALOHA ซึ่งได้อธิบายลักษณะการทำงานไปแล้วในบทที่ 2.5 และในส่วนงานวิจัยเราได้นำ Framed Slotted ALOHA มาใช้ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อย่อถัดไป



รูปที่ 3.2 แบบจำลองการเข้าถึงหลากหลาย (multi-access)

3.3 แบบจำลองของกระบวนการเฟรมสล็อตอะโลฮาในระบบ RFID

รูปแบบการติดต่อสื่อสารกันระหว่างตัวอ่านและแท็กจะเป็นแบบ Master-Slave นั่นคือตัวเครื่องอ่านจะเป็นตัวที่ทำการติดต่อสื่อสารก่อนและคอยฟังการตอบสนองจากตัวแท็ก ซึ่งในการตอบสนองจากตัวแท็กที่มีอยู่เป็นจำนวนมาก จะถูกควบคุมโดยโปรโตคอลป้องกันการชนกัน

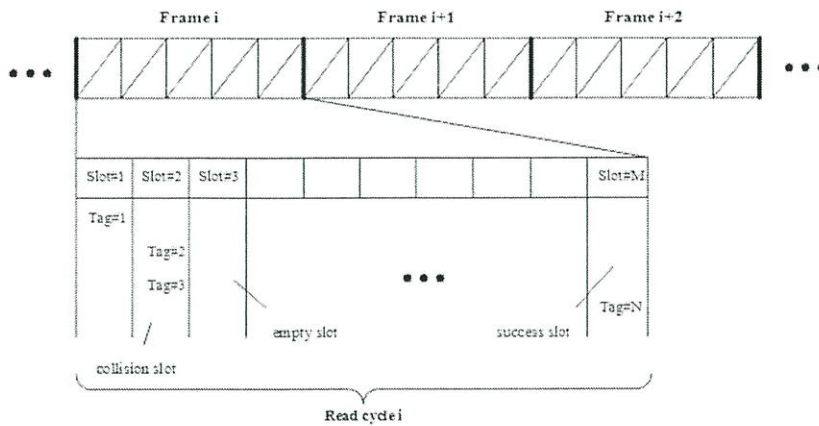
จุดประสงค์ที่เราให้ความสนใจในเรื่องของการป้องกันการชนกันของข้อมูล เพราะว่าจะเป็นการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพ และกลุ่มคำสั่ง ของแท็กที่อยู่ภายในของเขตการติดต่อสื่อสารกับตัวเครื่องอ่านข้อมูล ไปถึงความสามารถในการรับ และการบรรจุข้อมูล ตามลำดับ ขณะที่มีการย้อนกลับของข้อมูลจะเป็นกรทำงาน โดยการกำหนดของตัวอ่านข้อมูล ในการทำงานเครื่องอ่านจะทำหน้าที่เป็นตัวหลักในการติดต่อสื่อสารกับแท็กหนึ่งตัว หรือมากกว่านั้น

แท็กจะทำการส่งเข้าไปในสล็อตภายในแต่ละรอบ (Collection round หรือ Frame size) ภายในเฟรมจะประกอบไปด้วยจำนวนสล็อต แต่ละสล็อตจะต้องมีความยาวเพียงพอสำหรับให้ตัวเครื่องอ่านข้อมูลรับการตอบสนองจากแท็กได้ ซึ่งช่วงเวลาในการทำงานที่แท้จริงของสล็อตจะได้จากประเภท Collection command และระยะเวลาในการส่งของตัวแท็กจากตัวเครื่องอ่าน

เมื่อแท็กเข้ามาอยู่ในบริเวณการติดต่อสื่อสารด้วยคลื่นความถี่วิทยุของเครื่องอ่านแล้ว จะได้รับสัญญาณ wake up จากเครื่องอ่านที่ทำการส่งมาแบบกระจาย (broadcast) จากนั้นแท็กจะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้นเตรียมพร้อม ready state กระบวนการที่เครื่องอ่านเริ่มทำการทำงานกับแท็กคือ จะมีการส่ง Collection command เมื่อแท็กได้รับคำสั่งดังกล่าวจะทำการสุมเพื่อทำการตอบสนอง

กระบวนการเฟรมสล็อตอะโลฮาเป็นกระบวนการป้องกันการชนกันของข้อมูลที่มีการเข้าถึงแบบหลากหลายทาง ซึ่งได้มีการนำมาใช้วิเคราะห์กับการส่งข้อมูลแท็กกับเครื่องอ่านที่มีจำนวนแท็กหลายจำนวนในการส่งเวลาเดียวกัน โดย FSA แต่ละเฟรมจะแบ่งเป็นหลายๆสล็อตที่มีขนาดเท่าๆ กัน แต่ละแท็กจะทำการเข้าถึงสล็อตโดยการสุ่มเลือกสล็อต 1 สล็อตในเฟรม และเครื่องอ่านจะจัดเก็บหรือระบุตัวตนของแท็กที่ทำการส่งสำเร็จเมื่อได้รับข้อมูลจากแท็กที่มีการส่งเพียงแท็กเดียวใน 1 สล็อตเท่านั้น หากในสล็อตมีแท็กมากกว่า 1 จะถือว่าเกิดการชนกันของข้อมูล และสล็อตที่ไม่มีแท็กถือว่าเป็นสล็อตว่างเปล่าซึ่งก็คือไม่ประสบความสำเร็จในการส่ง โดย FSA จะกำหนดขนาดเฟรมเท่าๆกันทุกเฟรม จะไม่มีการเปลี่ยนขนาดเฟรมในขณะกระบวนการส่งยังไม่เสร็จ ซึ่งจะทำให้การส่งแบบนี้ทุกๆ รอบไปจนเครื่องอ่านสามารถจัดเก็บหรือระบุตัวตนแท็กได้ครบทุกตัวในระบบ โดยในบพนี้จะเป็นการวิเคราะห์การส่งแท็กในระบบ FSA โดยใช้สมการพหุนามในการวิเคราะห์ ซึ่งจะต้องนำค่าทุกรูปแบบที่

แท็กสุ่มเข้าสู่สล็อตมาทำการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็น ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณค่าทุกรูปแบบที่จะนำมาใช้หาความน่าจะเป็นดังหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.3 แบบจำลองกระบวนการป้องกันการชนกันแบบเฟรมสล็อตอะโลฮ่า

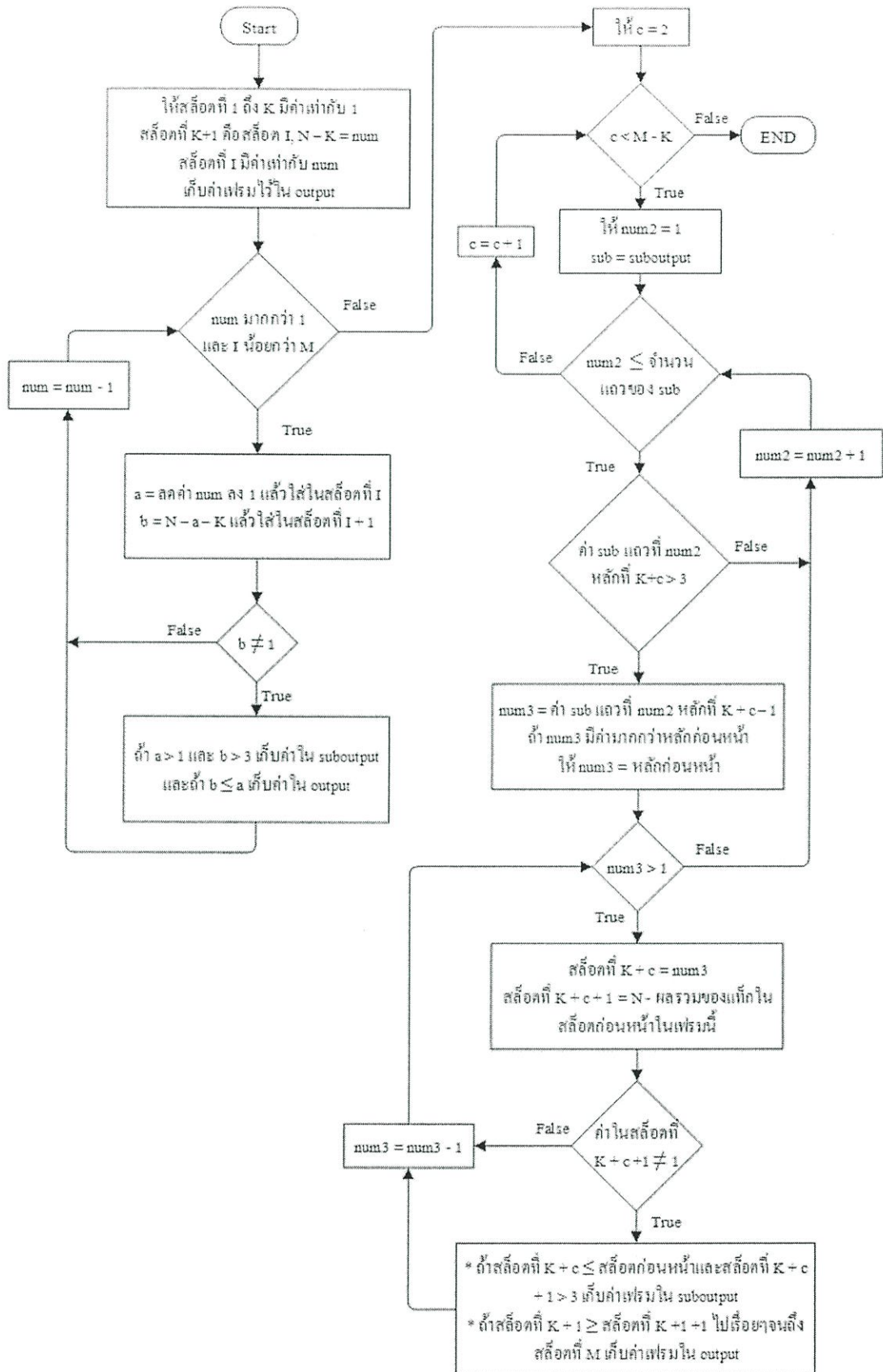
3.4 ขั้นตอนวิธีการจัดเก็บทุกเหตุการณ์ที่นำมาใช้ในรูปแบบการวิเคราะห์

เนื่องจากแบบการวิเคราะห์ใหม่ที่เราแนะนำ ได้นำสมการความน่าจะเป็นแบบพหุนามหรือมัลติโนเมียลมาใช้ในการทำการวิเคราะห์ จึงต้องนำค่าทุกเหตุการณ์การเข้าถึงสล็อตหรือการสุ่มเข้าสู่สล็อตของแท็กมาใช้ในการคำนวณ และได้มีขั้นตอนการเลือกเก็บแต่ละเหตุการณ์เพื่อไม่ให้มีเหตุการณ์ที่ซ้ำกันมาทำการคำนวณดังนี้

กำหนดให้จำนวนแท็กในระบบทั้งหมดเท่ากับ N , ขนาดของเฟรมมีจำนวนสล็อตเท่ากับ M และให้ K คือจำนวนแท็กที่ทำการส่งสำเร็จในสล็อตที่มีการช่วงชิงหรือจำนวนของสล็อตที่มีแท็กในสล็อตเท่ากับ 1 นั่นเอง โดยมีข้อจำกัดว่าจำนวนแท็กในสล็อตที่ 1 ถึงสล็อตที่ K จะมีแท็กเท่ากับ 1 ทุกสล็อต จำนวนของแท็กในสล็อตหลังจาก K หรือ $K+1$ เป็นต้นไปจนถึงสล็อตที่ M จะต้องมีค่าไม่เท่ากับ 1 และจำนวนแท็กในสล็อตที่ $K+1$ จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสล็อตที่ $K+1+1$ ไปเรื่อยๆ จนถึงสล็อตที่ M

ตารางที่ 3.1 เหตุการณ์ที่เป็นไปได้ในการสุ่มเข้าสู่สล็อตของแท็ก

Slot NO. Possible pattern	1	2	...	K	K+1	K+2	...	M
1	1	1	1	1	$a_{1,K+1}$	$a_{1,K+2}$	...	$a_{1,M}$
2	1	1	1	1	$a_{2,K+1}$	$a_{2,K+2}$	...	$a_{2,M}$
3	1	1	1	1	$a_{3,K+1}$	$a_{3,K+2}$	...	$a_{3,M}$
...
i	1	1	1	1	$a_{i,K+1}$	$a_{i,K+2}$	...	$a_{i,M}$



รูปที่ 3.4 แผนภูมิรูปภาพขั้นตอนการเลือกจัดเก็บเฟรมทุกเหตุการณ์ไปใช้ในการวิเคราะห์

จากแผนภูมิรูปภาพในรูปที่ 3.4 มีขั้นตอนการเลือกจัดเก็บเฟรมทุกเหตุการณ์ไปใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

1. ให้สล็อตที่ 1 ถึง K มีจำนวนแท็กเท่ากับ 1, จำนวนแท็กในสล็อตที่ K + 1 ในแถวแรกหรือเฟรมแรกเท่ากับ N - K และสล็อตถัดไปเรื่อยๆ จนถึงสล็อตที่ M เท่ากับ 0
2. ทำการลดค่าแท็กในสล็อตที่ K + 1 ทีละ 1 และใส่ค่าที่เหลือไว้ในสล็อตลำดับถัดมา วนลูปไปเรื่อยๆจนกระทั่งไม่สามารถลดค่าในสล็อตลำดับที่ K + 1 ได้อีก ทำการเลือกเก็บค่าของเฟรมที่สล็อตลำดับที่ K + 1 เป็นต้นไปไม่มีค่าเป็น 1 โดยที่เก็บค่าที่สล็อตลำดับที่ K + 1 มากกว่าหรือเท่ากับสล็อตลำดับถัดไปเรื่อยๆ ลงใน output ซึ่งเป็นค่าที่พร้อมนำมาทำการวิเคราะห์ต่อไป และเลือกเก็บเฟรมที่มีค่าในสล็อตลำดับที่ K + 2 มากกว่า 3 ลงใน suboutput
3. นำค่าใน suboutput มาลดค่าทีละ 1 ในหลักที่ K + 2 แล้วใส่ค่าที่เหลือในสล็อตลำดับถัดไปเรื่อยๆ โดยมีขั้นตอนการคำนวณและเลือกเก็บค่าเหมือนข้อ 2

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการเลือกเก็บค่า output และ suboutput

Slot No. Frame Pattern	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เก็บค่าที่
1	1	1	1	1	1	10	0	0	0	0	output
2	1	1	1	1	1	9	1	0	0	0	ไม่เก็บค่า
3	1	1	1	1	1	8	2	0	0	0	output
4	1	1	1	1	1	7	3	0	0	0	output
5	1	1	1	1	1	6	4	0	0	0	output&suboutput
6	1	1	1	1	1	5	5	0	0	0	output&suboutput
7	1	1	1	1	1	4	6	0	0	0	suboutput
8	1	1	1	1	1	3	7	0	0	0	suboutput
9	1	1	1	1	1	2	8	0	0	0	suboutput

จากตัวอย่างการเลือกเก็บค่า output และ suboutput ในตารางที่ 3.2 สมมติให้ N = 15, M = 10, K = 5 จะเห็นว่า

- ค่าในสล็อตที่ 1 ถึงสล็อตที่ K คือสล็อตที่ 5 จะมีค่าเป็น 1 ทุกแถว
- ในเฟรมแรกสล็อตที่ K + 1 หรือสล็อตที่ 6 จะมีค่าเท่ากับ N - K หรือ 15 - 5 = 10, สล็อตถัดไปเท่ากับ 0 และทำการเก็บค่าใน output
- เฟรมลำดับถัดไปก็จะทำการลดค่าในสล็อตลำดับที่ 6 ลงทีละ 1 และใส่ค่าที่เหลือในสล็อตลำดับที่ 7 และไม่เก็บค่าสล็อตหลังจากสล็อตที่ K ที่มีค่าเป็น 1 ดังเฟรมที่ 2
- เลือกเก็บค่าเฟรมที่มีสล็อตที่ 6 มากกว่าหรือเท่ากับสล็อตที่ 7 ใน output แต่หากเฟรมไหนสล็อตที่ 7 มีค่ามากกว่า 3 ให้เก็บใน suboutput ด้วย เพื่อนำไปทำการลดค่าใส่ในสล็อตหลักถัดไปด้วยวิธีการเดียวกัน

จากนั้นเราก็จะได้ค่าแต่ละเฟรมที่เสร็จสมบูรณ์ สำหรับทุกเหตุการณ์ที่ทำการส่งแท็กสำเร็จเท่ากับ 5 ดังตารางที่ 3.3 ในการวิเคราะห์เราต้องทำการหาค่าเฟรมแบบนี้ทุกเหตุการณ์ที่ส่งแท็ก

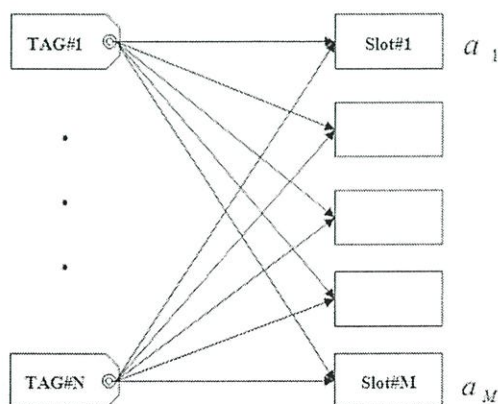
สำเร็จตั้งแต่ค่า K เท่ากับ 1 ไปจนกระทั่ง ค่า K เท่ากับ $M - 1$ เพื่อนำค่าทุกเหตุการณ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นตามโมเดลสมการทางคณิตศาสตร์แบบมัลติโนเมียล ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างการจัดเก็บค่าเฟรมที่สำเร็จ

Slot No. Frame Pattern	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	10	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	8	2	0	0	0
3	1	1	1	1	1	7	3	0	0	0
4	1	1	1	1	1	6	4	0	0	0
5	1	1	1	1	1	5	5	0	0	0
6	1	1	1	1	1	6	2	2	0	0
7	1	1	1	1	1	5	3	2	0	0
8	1	1	1	1	1	4	4	2	0	0
9	1	1	1	1	1	4	3	3	0	0
10	1	1	1	1	1	4	2	2	2	0
11	1	1	1	1	1	3	3	2	2	0
12	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2

3.5 โมเดลคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์

เราได้พิจารณาโดยนำฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นตามสมการ 2.14 มาใช้คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งแท็กสำเร็จของเรา โดยใช้การการส่งที่ใช้โปรโตคอลป้องกันการชนกันของแท็กแบบ FSA ตามหัวข้อ 3.3 ซึ่งจะพิจารณาความน่าจะเป็นที่แท็กแต่ละตัวมีโอกาสเข้าถึงสล็อตแบบสุ่ม โดยมีวิธีการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ดังนี้



รูปที่ 3.5 รูปแบบการเข้าถึงสล็อตของแท็กแบบสุ่ม

จากรูปที่ 3.5 กำหนดให้มีแท็กในระบบ N แท็กเข้าถึงยังสล็อตช่วงชิง M สล็อตในแต่ละเฟรม ในการทดลองสุ่มแท็ก N จำนวนใน 1 เฟรมต่อ M สล็อต จะเกิดผลลัพธ์ได้ถึง M อย่าง ด้วยความน่าจะเป็น

$$p_1 p_2 \dots p_M \left(\sum_{i=1}^M p_i = 1 \right) \quad (3.1)$$

โดยที่ $p_1 p_2 \dots p_M$ แทนความน่าจะเป็นที่จะเกิดผลลัพธ์ชนิดที่ 1, 2, ... และ M ตามลำดับ ถ้าเราสนใจความน่าจะเป็นที่ a_1, a_2, \dots, a_M จะเกิดผลลัพธ์เป็นจำนวนแท็กในสล็อตตั้งแต่สล็อตที่ 1 ถึง M จะได้จำนวนวิธีที่ N แท็ก สุ่มเลือกแต่ละสล็อตคือ

$$\binom{N}{a_1, a_2, \dots, a_M} = \frac{N!}{a_1! a_2! \dots a_M!} \quad (3.2)$$

เมื่อ a_1, a_2, \dots, a_M คือจำนวนของแท็กในแต่ละสล็อตตั้งแต่สล็อตที่ 1 ถึง M จำนวนวิธีการสลับที่จำนวนแท็กที่มีเท่ากันในสล็อตของเฟรมนั้นๆ คือ

$$\binom{M}{b_1, b_2, \dots, b_M} = \frac{M!}{b_1! b_2! \dots b_M!} \quad (3.3)$$

เมื่อ b_1, b_2, \dots, b_M คือจำนวนของสล็อตที่มีแท็กเท่ากันเช่น a_1, a_2, a_3 มีจำนวนของแท็กเท่ากับ 1 ดังนั้น b_1 เท่ากับ 3

จากสมการ(3.1),(3.2),(3.3) เมื่อ N คือจำนวนแท็กในระบบและ M คือจำนวนสล็อตใน 1 เฟรม จะหาความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ของแต่ละเฟรมตามรูปแบบฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบมัลติโนเมียล(2.14)ได้ดังนี้

$$P\{a_1, a_2, \dots, a_M\} = \frac{N!}{a_1! a_2! \dots a_M!} \frac{M!}{b_1! b_2! \dots b_M!} p^{a_1} p^{a_2} \dots p^{a_M} \quad (3.4)$$

โดยที่ $\sum_{i=1}^M a_i = N$ และค่า $p(a_i)$ แต่ละตัวคือ $\frac{1}{M}$ ดังนั้นจะได้ $p^{a_1} p^{a_2} \dots p^{a_M} = \left(\frac{1}{M}\right)^N$ ถ้าเราพิจารณาเฉพาะรูปแบบที่ประสบความสำเร็จนั้นคือถ้า K คือจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จกรณีที่จำนวนแท็กเข้าถึงสล็อตที่ 1 ถึง K เท่ากับ 1 นั่นคือ $a_1 = a_2 = \dots = a_K = 1$ และในสล็อตอื่นๆไม่เท่ากับ 1 นั่นคือ $a_{K+1} \neq a_{K+2} \neq \dots \neq a_M \neq 1$ จะได้ความน่าจะเป็นที่ประสบความสำเร็จคือ (Success probability P_{SUC}) คือผลรวมของความน่าจะเป็นแต่ละรูปแบบที่เป็นไปได้ที่จะประสบความสำเร็จทั้งหมด $P\{a_1, a_2, \dots, a_M\}$

$$P_{SUC} = \sum_{(a_1=a_2=\dots=a_K=1), (a_{K+1}, \dots, a_M \neq 1)} P\{a_1, a_2, \dots, a_M\} \quad (3.5)$$

3.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์

จากรูปแบบการส่งในระบบ RFID ที่ใช้โปรโตคอลป้องกันการชนกันแบบ FSA นิยมใช้ RFID มาตรฐาน ISO/IEC 18000 ที่มีการทำงานที่ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency : UHF) ความถี่ในช่วง 860-960MHz ตามหัวข้อ 3.3 เราได้ใช้โปรแกรม matlab ทำการจัดเก็บทุกรูปแบบเหตุการณ์การส่งตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.4 แล้วนำมาหาค่าความน่าจะเป็นของการประสบความสำเร็จในการส่งตามโมเดลทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 3.5 ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลของการวิเคราะห์ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณี เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากตัวแปรต่างๆ ในระบบ คือ

- กรณีที่ 1 วิเคราะห์โดยเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของแต่ละจำนวนแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่ง(K)
- กรณีที่ 2 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนแท็ก(N) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ
- กรณีที่ 3 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนสล็อต(M) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ

โดยสามารถพิจารณาในหัวข้อที่ 3.6.1, 3.6.2 และ 3.6.3 ต่อไป ซึ่งแต่ละกรณีที่ได้แบ่งทำการวิเคราะห์ก็จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

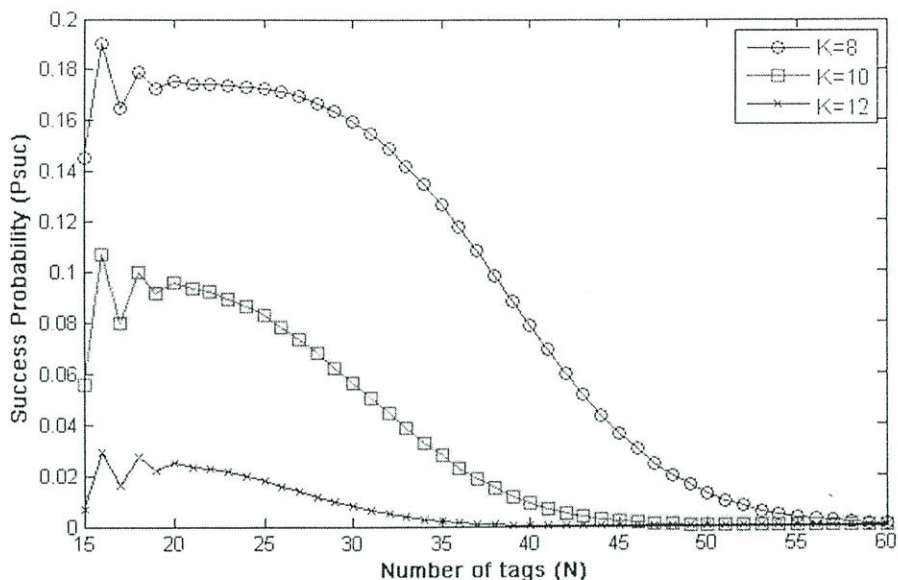
1. กำหนดพารามิเตอร์ซึ่งแต่ละกรณีก็จะกำหนดค่า N และ M แตกต่างกันไปตามลักษณะที่จะทำการวิเคราะห์
2. ทำการคำนวณการจัดเก็บทุกรูปแบบเหตุการณ์การที่แท็กจะสุ่มเข้าสู่สล็อตตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.4
3. นำค่าทุกรูปแบบเหตุการณ์ที่ได้จัดเก็บมาคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์และนำมาหาค่าความน่าจะเป็นที่ส่งสำเร็จหรือ Success Probability (P_{suc}) ตามหัวข้อที่ 3.5
4. พล็อตกราฟและทำการวิเคราะห์ผล

3.6.1 กรณีที่ 1 วิเคราะห์โดยเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของแต่ละจำนวนแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่ง(K)

กรณีที่ 1 วิเคราะห์โดยเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของแต่ละจำนวนแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่ง(K) ที่มีขนาดเฟรมและจำนวนแท็กในระบบเท่ากันเพื่อดูแนวโน้มความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จในการส่งที่มีการเพิ่มขึ้นของค่า K และจำนวนแท็ก โดยมีการเลือกกำหนดพารามิเตอร์ดังนี้

- ขนาดเฟรม (M) มีจำนวน 20 สล็อต เท่ากันทุกเหตุการณ์
- จำนวนแท็กในระบบ (N) มีตั้งแต่ 15 ถึง 60 ตัว เพิ่มขึ้นทีละ 1 ตัว
- เหตุการณ์แต่ละจำนวนแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่ง (K) ที่ได้เลือกมาทำการวิเคราะห์คือค่า K ที่ 8, 10 และ 12 ตัว

จากรูปที่ 3.6 จะพบว่าเมื่อจำนวนแท็กมีค่ามากขึ้น ความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จในการส่งมีค่าค่อยๆ ลดลงเมื่อมีแท็กในระบบมากขึ้น เนื่องจากมีการแย่งชิงสล็อตที่สูงขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของแท็กในระบบที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังจะพบว่าในแต่ละจำนวนแท็กที่เท่ากันกราฟเส้นที่ K เท่ากับ 8 มีค่าความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จในการส่งสำเร็จสูงสุด ตามมาด้วย K เท่ากับ 10 และ K เท่ากับ 12 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่งมีจำนวนมากขึ้น ค่าความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จก็จะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 3.6 Success Probability ของเหตุการณ์ที่มีสล็อตเป็น 20 และแท็กตั้งแต่ 15 ถึง 60 โดยแสดง K 3 เหตุการณ์ คือ 8, 10 และ 12

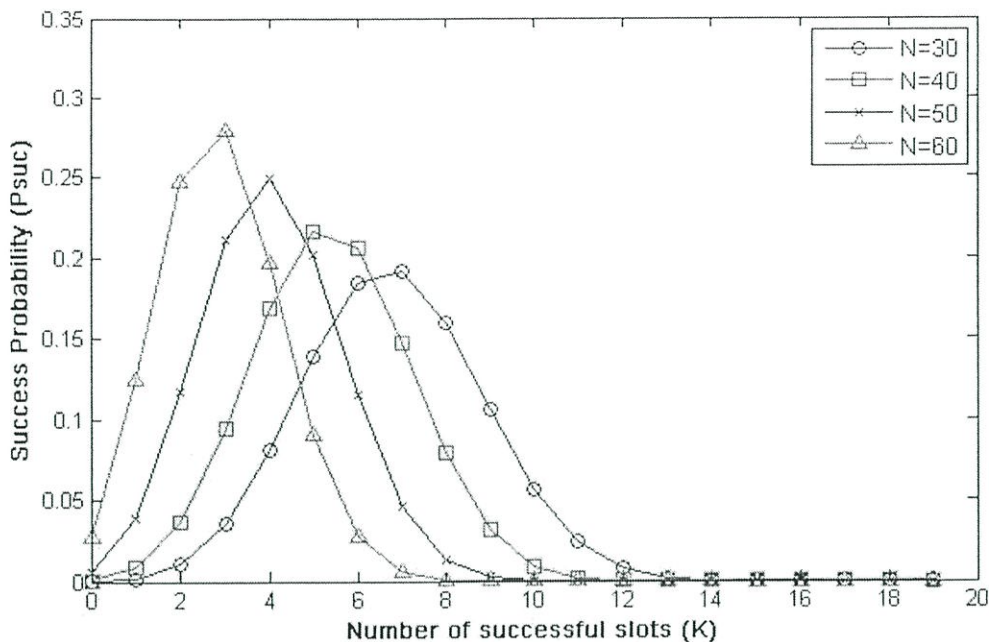
3.6.2 กรณีที่ 2 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนแท็ก(N) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ

กรณีที่ 2 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนแท็ก(N) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ ในระบบที่มีขนาดเฟรม(M) เท่ากัน เพื่อดูแนวโน้มค่าความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จในการส่ง(P_{suc}) ของแต่ละจำนวนแท็กที่ส่งสำเร็จ(K) ที่ทำการเปลี่ยนจำนวนแท็ก(N) ในระบบ โดยมีการเลือกกำหนดพารามิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบระบบที่มีขนาดเฟรมเท่ากันแต่จำนวนแท็กต่างกันจากน้อยไปมากดังนี้

- ขนาดเฟรม (M) มี 20 สล็อต เท่ากันทุกเหตุการณ์
- จำนวนแท็กในระบบ (N) มี 4 เหตุการณ์คือ 30, 40, 50 และ 60 ตัว
- แสดงค่าความน่าจะเป็นทุก K ของการส่งแท็กในระบบที่มีขนาดเฟรมเป็น 20 สล็อต และมีแท็ก 4 ค่า คือ 30, 40, 50 และ 60

จากรูปที่ 3.7 จะพบว่าค่าที่มีค่าความน่าจะเป็นในการส่งสำเร็จ (P_{suc}) ของจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จ (K) สูงที่สุดในแต่ละจำนวนแท็กมีค่าแตกต่างกันโดย แท็กที่มี P_{suc} สูงสุดที่จำนวน K เยอะที่สุดคือ การส่งที่มีแท็กเป็น 30 ตามมาด้วยแท็กจำนวน 40, 50 และ 60 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ขนาดเฟรมเท่าๆ กันยิ่งจำนวนแท็กในระบบมีค่ามากเท่าไร โอกาสในการส่งแท็กให้ประสบความสำเร็จต่อเฟรมยิ่งมีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากการแย่งชิงสล็อตที่มีจำนวนแท็กมากขึ้นทำให้เกิดการชนกันของแท็กสูงนั่นเอง

โดยจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จที่ P_{suc} สูงสุดของการส่งที่มีแท็กเป็น 30 เท่ากับ 7 สล็อต, จำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จที่ P_{suc} สูงสุดของการส่งที่มีแท็กเป็น 40 เท่ากับ 5 สล็อต, จำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จที่ P_{suc} สูงสุดของการส่งที่มีแท็กเป็น 50 เท่ากับ 4 สล็อต, จำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จที่ P_{suc} สูงสุดของการส่งที่มีแท็กเป็น 30 เท่ากับ 3 สล็อต



รูปที่ 3.7 Success Probability ของทุกเหตุการณ์ที่มีขนาดเฟรมเป็น 20 สล็อตและมีแท็ก 4 ค่า คือ 30, 40, 50 และ 60

3.6.3 กรณีที่ 3 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนสล็อต(M) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ

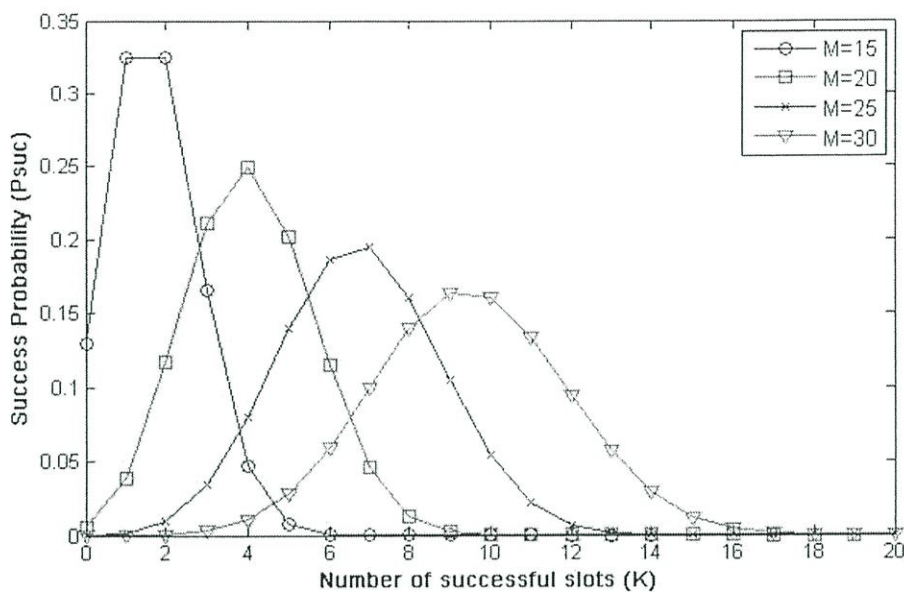
กรณีที่ 3 วิเคราะห์ผลกระทบต่อจำนวนสล็อต(M) ว่ามีผลอย่างไรในระบบ ในแต่ละการส่งที่มีจำนวนแท็กเท่าๆ กัน เพื่อดูแนวโน้มของค่าความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จในการส่ง (Psuc) ของแต่ละจำนวนแท็กที่ส่งสำเร็จ(K) ที่ทำการเปลี่ยนขนาดเฟรมหรือจำนวนสล็อต(M) ในแต่ละการส่ง โดยมีการเลือกกำหนดพารามิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบระบบที่มีจำนวนแท็กเท่าๆ กันแต่ขนาดเฟรมต่างกันจากน้อยไปมากดังนี้

- จำนวนแท็กในระบบ (N) มี 50 เท่ากันทุกเหตุการณ์
- ขนาดเฟรม (M) มี 4 เหตุการณ์คือ 15, 20, 25 และ 30 สล็อต
- แสดงค่าความน่าจะเป็นทุก K ของการส่งแท็กในระบบที่มีจำนวนแท็กเท่าๆ กันคือ 50 และมีจำนวนสล็อตต่อเฟรม 4 ค่า คือ 15, 20, 25 และ 30 สล็อต

จากรูปที่ 3.8 จะพบว่าค่าที่มีค่าความน่าจะเป็นในการส่งสำเร็จ (Psuc) ของจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จ (K) สูงที่สุดในแต่ละจำนวนสล็อตมีค่าแตกต่างกันโดย จำนวนสล็อตที่มี Psuc สูงสุดที่จำนวน K เยอะที่สุดคือ M เท่ากับ 30 ตามมาด้วย M เท่ากับ 25, 20 และ 15 สล็อต ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่จำนวนแท็กเท่าๆ กันยิ่งขนาดเฟรมในระบบมีค่ามาก โอกาสในการส่งแท็กให้ประสบความสำเร็จต่อเฟรมยังมีค่ามากตาม แต่ถ้าขนาดเฟรมมีค่าน้อยเท่าไร โอกาสในการส่งแท็กให้ประสบความสำเร็จต่อเฟรมก็จะยิ่งน้อยตาม ซึ่งเป็นผลมาจากการแย่งชิงสล็อตที่มีจำนวนสล็อตน้อยลงทำให้เกิดการชนกันของแท็กสูงขึ้นนั่นเอง

โดยจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จที่ Psuc สูงสุดของการส่งที่มีขนาดเฟรมเป็น 15 สล็อตอยู่ที่ประมาณ 1 และ 2 สล็อต, จำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จที่ Psuc สูงสุดของการส่งที่มีขนาดเฟรมเป็น 20

สล็อดอยู่ที่ 4 สล็อด, จำนวนสล็อดที่ส่งสำเร็จที่ P_{suc} สูงสุดของการส่งที่มีขนาดเฟรมเป็น 25 สล็อด อยู่ที่ 7 สล็อด, จำนวนสล็อดที่ส่งสำเร็จที่ P_{suc} สูงสุดของการส่งที่มีขนาดเฟรมเป็น 30 สล็อดอยู่ที่ 9 สล็อด



รูปที่ 3.8 Success Probability ของทุกเหตุการณ์ที่มีจำนวนแท็กเป็น 50 และมีขนาดเฟรม 4 ค่าคือ 15, 20, 25 และ 30 สล็อด

บทที่ 4

รูปแบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของการแบ่งกลุ่มเฟรมสล็อตอะโลฮา

4.1 กล่าวนำ

จากรูปแบบงานประยุกต์แบบต่างๆ ที่แท็กมีการเข้าถึงสล็อตแบบหลากหลายทางตามที่ได้เสนอไปในบทที่ 3 ซึ่งเป็นการจัดสรรช่องทางการเข้าถึงสล็อตของแท็กแบบสุ่มของเฟรมสล็อตอะโลฮา โดยที่แท็กทุกตัวมีโอกาสในการสุ่มเข้าสล็อตเท่าๆ กันแล้ว จึงได้เกิดแนวคิดต่อไปว่าถ้าหากในการส่งแต่ละเฟรมนั้น แบ่งให้แท็กมีโอกาสที่จะสุ่มเข้าสล็อตต่างกันหรือให้ความสามารถในการเข้าถึงสล็อตของแท็กแตกต่างกันโดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม จะทำให้การส่งแท็กแบบเฟรมสล็อตอะโลฮามีประสิทธิภาพสูงขึ้นหรือไม่

โดยแนวคิดที่จะเสนอในบทนี้ได้ต่อยอดมาจากบทที่ 3 ที่ได้เสนอรูปแบบการวิเคราะห์แบบใหม่ที่ทำกรหาค่าทุกเหตุการณ์การส่งแท็กแบบ FSA (Framed Slotted ALOHA) และได้นำมาวิเคราะห์โดยใช้สมการความน่าจะเป็นแบบมัลติโนเมียลในการคำนวณ ซึ่งจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวเป็นการแจกแจงแบบคำนวณทุกเหตุการณ์ ทำให้เราสามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการส่งสำเร็จโดยการกำหนดความสามารถในการเข้าถึงสล็อตของแท็กแบบสุ่มไม่เท่ากันได้

ในบทนี้นอกจากจะแสดงรูปแบบและวิเคราะห์ผลการแบ่งกลุ่ม FSA ที่มีสมรรถภาพการเข้าถึงสล็อตของแท็กแบบสุ่มที่ไม่เท่ากันได้แล้ว ยังทำการวิเคราะห์โดยการคำนวณขนาดเฟรมที่ต้องส่งในระบบในรูปแบบการส่งแท็กแบบแพสซีฟอีกด้วย โดยจะมีรายละเอียดหรือขั้นตอนการทำงานวิเคราะห์ดังนี้

- อัลกอริทึมการคำนวณค่าทุกเหตุการณ์การเข้าถึงสล็อตหรือการสุ่มเข้าสล็อตของแท็กมีขั้นตอนคล้ายกับหัวข้อที่ 3.4 แต่จะแตกต่างกันที่บทนี้จะแบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นทุกเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ที่แท็กจะสุ่มเข้าสล็อตทั้ง 2 กลุ่มใช้คิดค่า K รวมกัน คำนวณให้ได้ทุกเหตุการณ์เพื่อไม่ให้มีเหตุการณ์ซ้ำกัน หรือตกหล่น และนำค่าเหตุการณ์นั้นมาทำการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นต่อไป

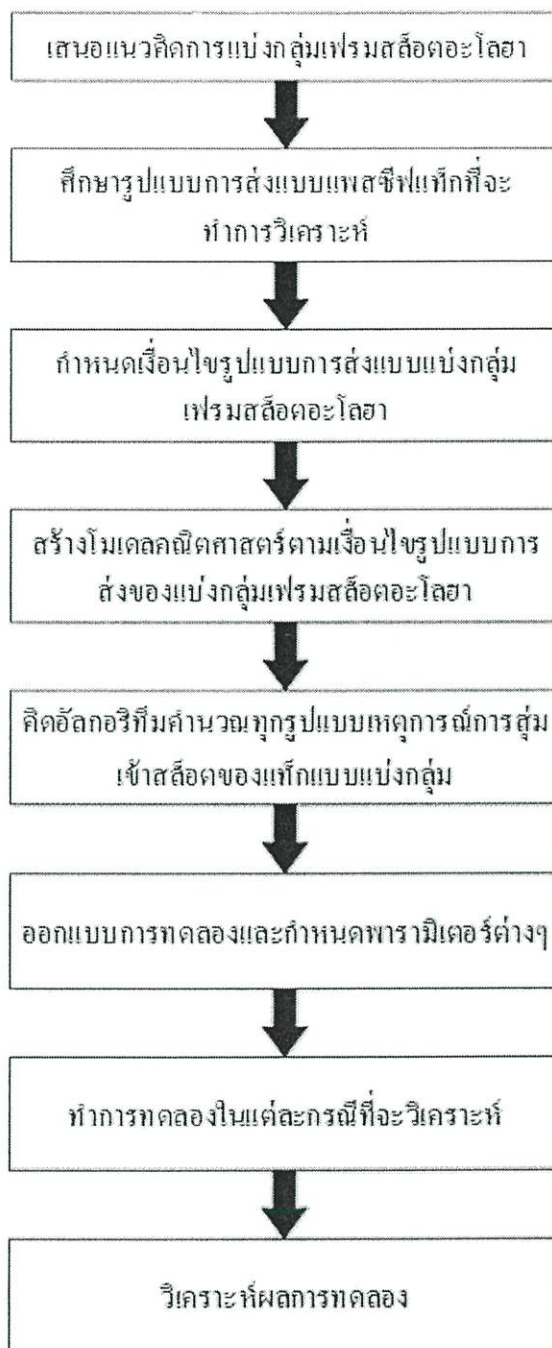
- ออกแบบการทดลองและกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับการทดลองซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณี เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากตัวแปรต่างๆ ในระบบ คือ

กรณีที่ 1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่มในแต่ละขนาดการแบ่งที่แตกต่างกัน โดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกดังนี้

- วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งในกรณีที่ขนาดเฟรมน้อยกว่าจำนวนแท็ก
- ประสิทธิภาพของการส่งในกรณีที่ขนาดเฟรมมากกว่าจำนวนแท็ก

กรณีที่ 2 วิเคราะห์การส่งแท็กแบบแพสซีฟจากจำนวนเฟรมและจำนวนการตอบสนองแท็กของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่ม

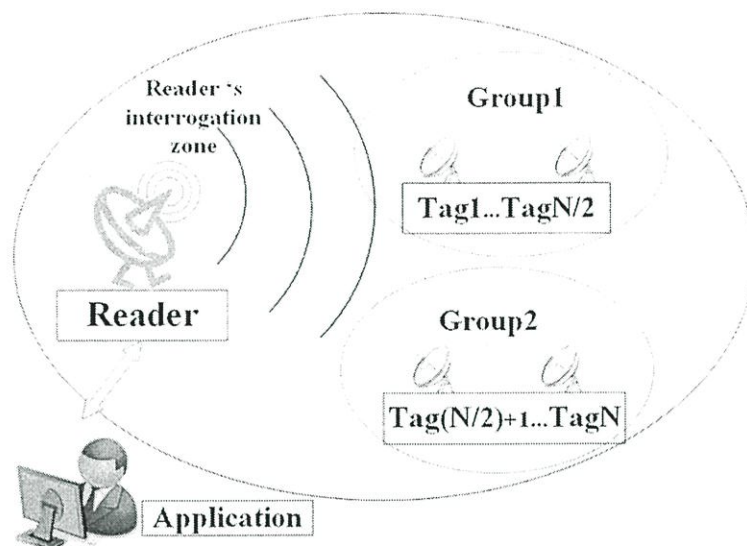
- ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งแพสซีฟแท็กในการส่งแบบแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ
- ขนาดเฟรมที่เหมาะสมเพื่อให้ใช้เวลาในการส่งแพสซีฟแท็กแบบแบ่งกลุ่มน้อยที่สุด



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทดลองวิจัยบทที่ 4

4.2 แบบจำลองของกระบวนการเฟรมสล็อตอะโหลฮาในระบบ RFID แบบแบ่งกลุ่ม

ในบทนี้เป็นการเสนอแนวคิดกระบวนการแบ่งกลุ่มการส่งของแท็กเพื่อกำหนดความสามารถในการสุ่มเข้าสล็อตที่แตกต่างกัน เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความน่าจะเป็นในการส่งสำเร็จ โดยมีรูปแบบการแบ่งกลุ่มดังรูปที่ 4.2

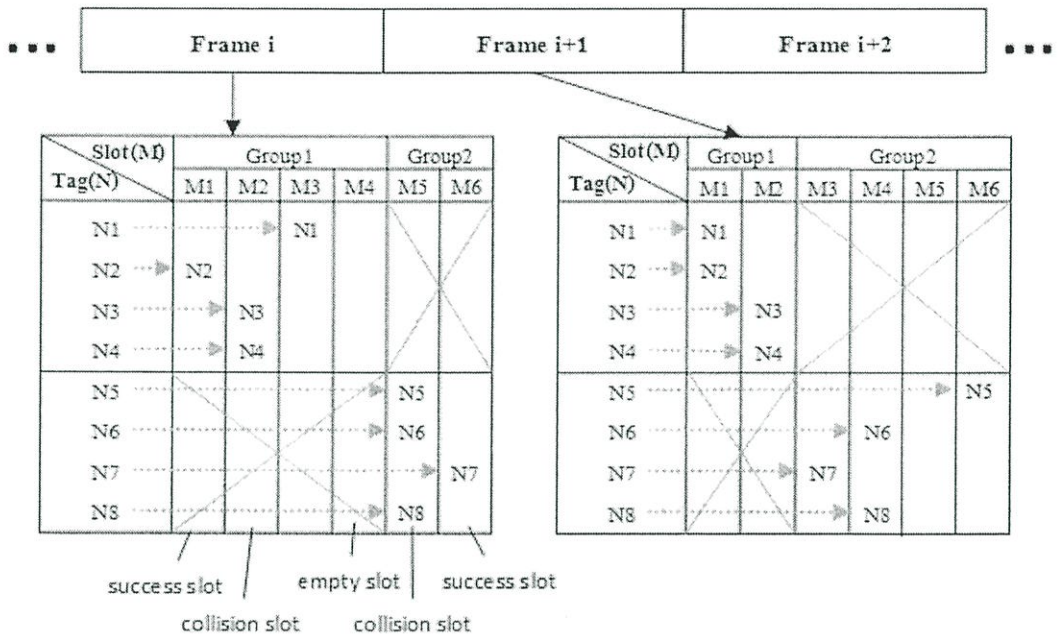


รูปที่ 4.2 รูปแบบระบบ RFID แบบแบ่งกลุ่มความสามารถในการสุมเข้าสล็อต

จากรูปที่ 4.2 เป็นโมเดลการส่งแท็กที่มีการเข้าถึงแบบหลากหลายทาง โดยแท็กจะมี 2 กลุ่ม กลุ่มละเท่าๆกัน ความแตกต่างระหว่างแท็กทั้ง 2 กลุ่มก็คือ ความสามารถที่แท็กจะเข้าถึงสล็อตของตัวอ่าน ซึ่งการจัดสรรช่องสัญญาณหรือการสร้างโปรโตคอลนั้น สามารถทำได้โดยกำหนดจากตัวอ่าน ซึ่งที่ตัวอ่าน RFID แต่ละมาตรฐาน จะมีคำสั่งการทำงานไว้สำหรับให้ผู้วางระบบได้เลือกนำมาใช้งานให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้ ซึ่ง RFID ที่มีคำสั่งสำหรับสร้างโปรโตคอลป้องกันการชนกันนั้น จะอยู่ใน ISO/IEC 18000-6 ที่มีการทำงานที่ย่านความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency : UHF) ความถี่ในช่วง 860-960MHz โดยมีจุดเด่นในเรื่องของแท็ก ซึ่งในบทรนี้จะทำการวิเคราะห์รูปแบบการส่งแบบแพสซีฟที่ตามมาตรฐานนี้จะอ่านข้อมูลได้ไกล ประมาณ 3-7 เมตร ในส่วนของการแบ่งกลุ่มที่เราได้เสนอไปนั้น อาจสามารถทำได้โดยใช้ตัวเลขสุมโดยอาศัยบิตที่มีความสำคัญสูงสุด (MSB) ของรหัสประจำตัว ซึ่งเป็นบิต 0 หรือบิต 1 เท่านั้น ก็สามารถแบ่งแท็กออกเป็น 2 กลุ่ม โดยให้บิต 0 สุมเข้ากลุ่มสล็อตกลุ่มแรก และบิต 1 สุมเข้าสล็อตกลุ่มที่ 2 เป็นต้น

จากการแบ่งกลุ่มของแท็กที่กำหนดให้ความสามารถเข้าถึงสล็อตที่แตกต่างกัน โดยการส่งแบบหลากหลายทางที่ใช้โปรโตคอลป้องกันการชนกันของแท็กแบบ FSA จะทำให้ลักษณะการส่งแท็ก FSA แบบแบ่งกลุ่ม เป็นไปตามตัวอย่างดังรูปที่ 4.3 เป็นการส่งข้อมูลในระบบที่มีแท็ก (N) จำนวน 8 ตัว และขนาดเฟรม (M) เฟรมละ 6 สล็อต โดยสมมติให้แท็กทั้งสองกลุ่มมีความสามารถในการเข้าถึงสล็อตแบบสุมมากกว่ากัน 2 เท่า ทำให้เฟรม i แท็กกลุ่มแรกคือแท็กที่ 1 ถึง 4 สุมเข้าได้ในสล็อตที่ 1 ถึง 4 แต่แท็กกลุ่มที่ 2 คือแท็กที่ 5 ถึง 8 จะสามารถสุมเข้าสล็อตได้เพียงช่วงท้ายของสล็อตคือ สล็อตที่ 5 และ 6 เท่านั้น จากนั้นในเฟรมถัดไปจะทำการสลับให้แท็กที่ 1 ถึง 4 เข้าถึงได้เพียง 2 สล็อต และแท็กที่ 5 ถึง 8 เข้าถึงได้ 4 สล็อต โดยทำการสลับไปมาเรื่อยๆ เพื่อให้มีโอกาสส่งสำเร็จเท่ากันทั้งสองกลุ่ม จนส่งแท็กได้ครบทุกตัวตามรูปแบบการส่งแท็กแบบแพสซีฟ ซึ่งการส่งแท็กแบบแพสซีฟนั้น จะทำการส่งแท็กซ้ำๆทุกเฟรม โดยไม่สนว่าแท็กใดส่งสำเร็จไปแล้ว ผู้ส่งต้องกำหนดว่าจะส่งกี่เฟรมจึงจะถึงระดับความพอใจ

ในการเริ่มส่งข้อมูลแบบแฟสซีฟแท้ก ตัวอ่านจะกระจายคลื่นความถี่วิทยุออกมาและเริ่มทำการติดต่อเมื่อพบแท็กอยู่ในระยะการส่ง แต่แฟสซีฟแท้กนั้นไม่สามารถจดจำสถานะใดๆ ได้ ทำได้เพียงตอบสนองต่อเครื่องอ่าน อาจพบการชนกันของแท็กได้ทุกรอบการส่งซึ่งต่างจากการจัดเก็บแท็กแบบแอ็คทีฟจะให้แท็กที่ส่งสำเร็จอยู่ในสถานะหลับ ทำให้รอบการส่งต่อไปมีจำนวนแท็กแย่งชิงน้อยลงหรือเท่าเดิม ดังนั้นเราไม่สามารถมั่นใจว่าจะจัดเก็บแท็กแบบแฟสซีฟได้ครบทุกตัวหรือยัง กระบวนการจัดเก็บแท็กแบบนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อมาถึงรอบการส่งในระดับที่เรามั่นใจ ซึ่งระดับนั้นแทนค่าให้เป็นความน่าจะเป็น α ซึ่งในที่นี้เราให้ $\alpha = 0.99$ แทนความน่าจะเป็นที่มีแท็กหายไปไม่เกิน 1% โดยจะมีวิธีคำนวณจำนวนเฟรมเพื่อให้ถึงระดับความพอใจ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการจัดเก็บแท็กของเฟรมสล็อตอะโลฮาแบบแบ่งกลุ่ม

4.3 การจัดเก็บทุกเหตุการณ์แบบแบ่งกลุ่มที่นำมาใช้ในรูปแบบการวิเคราะห์

เนื่องจากความน่าจะเป็นในการสุ่มเข้าสล็อตของแท็กแต่ละกลุ่มมีค่าไม่เท่ากัน เราจึงใช้สมการมัลติโนเมียลมาคำนวณหาความน่าจะเป็นของการประสบความสำเร็จในการส่งแท็กแต่ละจำนวนสล็อต โดยจะใช้วิธีตามหัวข้อที่ 3.4 ทำการเลือกจัดเก็บสล็อตของจำนวนที่ประสบความสำเร็จในการส่งมาคำนวณทุกเหตุการณ์ที่เป็นไปได้โดยไม่ซ้ำกันมาคำนวณหาความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์การเลือกจัดเก็บค่าเฟรมทุกเหตุการณ์แบบแบ่งกลุ่มไปใช้ในการวิเคราะห์ก็จะมีลักษณะเช่นเดียวกับการจัดเก็บค่าเหตุการณ์ได้ได้กล่าวไปแล้ว แต่จะแบ่งเป็น 2 กลุ่มโดยนับค่า K รวมกัน

จากตารางที่ 4.1 ตัวอย่างการจัดเก็บแท็กของเฟรมสล็อตอะโลฮาแบบแบ่งกลุ่มเป็น 2 กลุ่ม โดยที่แท็กอีกกลุ่มมีความสามารถในการสุ่มเข้าสล็อตต่างกัน 2 เท่า ที่ ขนาดเฟรม (M) มี 9 สล็อต, จำนวนแท็กในระบบ (N) มี 10 ตัว และจำนวนแท็กที่ส่งสำเร็จ (K) เท่ากับ 1 จะเห็นได้ว่า มีแท็ก 2 กลุ่ม แต่ละกลุ่มเท่ากับ 5 ตัว ทำการคำนวณแจกแจงค่าตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.4 ลงในกลุ่มสล็อต 2 ขนาดคือ 6 และ 3 สล็อต โดยทำการคิดค่า K รวมกัน ซึ่งในตัวอย่างคือ K เท่ากับ 1 จึงต้องเก็บค่า

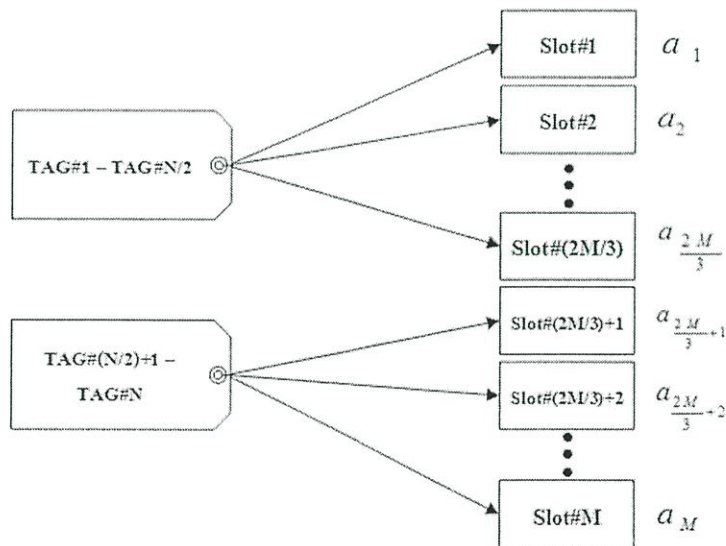
กลุ่มแรกเป็น K เท่ากับ 1 และกลุ่มที่สอง เป็น K เท่ากับ 0 จากนั้นทำการเก็บค่า K กลุ่มแรกเท่ากับ 0 กลุ่มที่สอง K เท่ากับ 1 เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างการจัดเก็บแท็กของเฟรมสล็อตอะโลฮาแบบแบ่งกลุ่มเป็น 2 กลุ่ม

Group1 Pattern	1	2	3	4	5	6	Group2 Pattern	7	8	9
K=1	1	4	0	0	0	0	K=0	5	0	0
	1	4	0	0	0	0		3	2	0
	1	2	2	0	0	0		5	0	0
	1	2	2	0	0	0		3	2	0
K=0	5	0	0	0	0	0	K=1	1	4	0
	5	0	0	0	0	0		1	2	2
	3	2	0	0	0	0		1	4	0
	3	2	0	0	0	0		1	2	2

4.4 โมเดลคณิตศาสตร์ที่ใช้วิเคราะห์

จากการแบ่งกลุ่มการส่งแท็กให้สองกลุ่มมีจำนวนแท็กเท่าๆ กัน และให้อีกกลุ่มมีความสามารถในการส่งเข้าแท็กได้ต่างกัน ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นในการเข้าถึงสล็อตที่ใช้ในการคำนวณจะแตกต่างกัน ทำให้ไม่สามารถใช้การคำนวณค่าประสิทธิภาพด้วยสมการไปโนเมียลแบบหัวข้อ 2.5 ได้ ดังนั้นจึงเป็นประโยชน์ของรูปแบบการวิเคราะห์แบบมัลติโนเมียลที่เราได้เสนอไปในบทที่ 3 ซึ่งจะมีวิธีการคำนวณแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากความแตกต่างของความน่าจะเป็นของแต่ละสล็อตดังที่ได้กล่าวไป



รูปที่ 4.4 รูปแบบการเข้าถึงสล็อตของแท็กแบบแบ่งกลุ่มความสามารถในการส่งเข้าสล็อต

จากตัวอย่างรูปที่ 4.4 เป็นการจำลองแท็กส่งเข้าสล็อตโดยให้แท็กทั้งสองกลุ่มมีโอกาสส่งเข้าสล็อตมากกว่าอีกกลุ่ม 2 เท่า $p_1 p_2 \dots p_M$ แทนความน่าจะเป็นที่จะเกิดผลลัพธ์ของสล็อตที่มี

จำนวนแท็กชนิดที่ 1,2,... และ M ตามลำดับ และจากหัวข้อที่ 3.5 เป็นการแสดงความน่าจะเป็นแบบมัลติโนเมียลโดยมีค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์แต่ละสล็อตคือ $p_1 p_2 \dots p_M$ เท่ากันทุกตัวคือ $\frac{1}{M}$ แต่ในหัวข้อนี้ค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์แต่ละสล็อตจะไม่เท่ากัน

ดังตัวอย่างตามดังรูปที่ 4.4 การคิดความน่าจะเป็นแบบแบ่งกลุ่ม หากสมมุติว่าแบ่ง N แท็กเท่าๆกัน 2 กลุ่ม ให้กลุ่มแรกมีความสามารถสุมเข้าสล็อตมากกว่ากลุ่มที่ 2 อยู่ 2 เท่า โดยทั้งสองกลุ่มเป็นอิสระต่อกัน จากปกติตามหัวข้อ 3.4 ที่แท็ก N สุมเข้าสล็อต M ก็จะกลายเป็นแท็กจำนวน $\frac{N}{2}$ และ $\frac{N}{2}$ สุมเข้าสล็อตจำนวน $\frac{2M}{3}$ และ $\frac{M}{3}$ ทำให้ค่า $p(a_i)$ จากการส่งปกติตัวละ $\frac{1}{M}$ ความน่าจะเป็นกลุ่มแรกจะกลายเป็น $\frac{3}{2M}$ และกลุ่มที่สองเป็น $\frac{3}{M}$

โดยกลุ่มแรกเข้าถึงสล็อตได้มากกว่า 2 เท่า หรือสามารถสุมเข้าสล็อตได้ตั้งแต่สล็อตที่ 1 ถึงสล็อตที่ $\frac{2M}{3}$ จะได้ความน่าจะเป็นคือ

$$P\left\{a_1, a_2, \dots, a_{\frac{2M}{3}}\right\} = \frac{(N/2)!}{a_1! a_2! \dots a_{\frac{2M}{3}}!} \cdot \frac{(2M/3)!}{b_1! b_2! \dots b_{\frac{2M}{3}}!} p^{a_1} p^{a_2} \dots p^{\frac{a_{2M}}{3}} \quad (4.1)$$

ซึ่ง $p(a_i)$ ของกลุ่มนี้จะมีค่าตัวละ $\frac{3}{2M}$ ดังนั้น $p^{a_1} p^{a_2} \dots p^{\frac{a_{2M}}{3}}$ จะมีค่าเป็น $(\frac{3}{2M})^{N/2}$ และกลุ่มที่สองสามารถสุมเข้าสล็อตได้ตั้งแต่สล็อตที่ $\frac{2M}{3} + 1$ ถึงสล็อตที่ M จะได้ความน่าจะเป็นคือ

$$P\left\{a_{\frac{2M}{3}+1}, a_{\frac{2M}{3}+2}, \dots, a_M\right\} = \frac{(N/2)!}{a_{\frac{2M}{3}+1}! a_{\frac{2M}{3}+2}! \dots a_M!} \cdot \frac{(M-\frac{2M}{3})!}{b_{\frac{2M}{3}+1}! b_{\frac{2M}{3}+2}! \dots b_M!} p^{\frac{a_{2M}}{3}+1} p^{\frac{a_{2M}}{3}+2} \dots p^{a_M} \quad (4.2)$$

ซึ่ง $p(a_i)$ ของกลุ่มนี้จะมีค่าตัวละ $\frac{3}{M}$ ดังนั้น $p^{\frac{a_{2M}}{3}+1} p^{\frac{a_{2M}}{3}+2} \dots p^{a_M}$ จะมีค่าเป็น $(\frac{3}{M})^{N/2}$

จากสมการ (4.1) และ (4.2) ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่จะสุมได้จำนวนแท็กในแต่ละสล็อตตั้งแต่สล็อตที่ 1 ถึง M ใน 1 เฟรม ส่งโดยแบ่งแท็กเป็นสองกลุ่มที่ความสามารถในการเข้าถึงสล็อตต่างกัน 2 เท่า เป็นความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่ a_1, a_2, \dots, a_M คือ

$$P\{a_1, a_2, \dots, a_M\} = P\left\{a_1, a_2, \dots, a_{\frac{2M}{3}}\right\} P\left\{a_{\frac{2M}{3}+1}, a_{\frac{2M}{3}+2}, \dots, a_M\right\} \quad (4.3)$$

โดยเราพิจารณาเฉพาะรูปแบบที่ประสบความสำเร็จนั้นคือถ้า K คือจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จกรณีที่จำนวนแท็กเข้าถึงสล็อตที่ 1 ถึง K เท่ากับ 1 นั่นคือ $a_1 = a_2 = \dots = a_K = 1$ และในสล็อตอื่นๆไม่เท่ากับ 1 นั่นคือ $a_{K+1} \neq a_{K+2} \neq \dots \neq a_M \neq 1$ จะได้ความน่าจะเป็นที่ประสบความสำเร็จคือ (Success probability P_{SUC}) คือผลรวมของความน่าจะเป็นแต่ละรูปแบบที่เป็นไปได้ที่จะประสบความสำเร็จทั้งหมด $P\{a_1, a_2, \dots, a_M\}$

$$P_{SUC} = \sum_{(a_1=a_2=\dots=a_K=1), (a_{K+1}, \dots, a_M \neq 1)} P\{a_1, a_2, \dots, a_M\} \quad (4.4)$$

และความน่าจะเป็นในการส่งที่ไม่มีสล็อตใดเลยสำเร็จ หมายถึงทุกเหตุการณ์ที่อาจเป็นการชนกันของแท็กหรืออาจเป็นสล็อตว่าง (Collision Probability) คือ

$$P_{coll} = \sum_{k=0} P\{a_1, a_2, \dots, a_M\} \quad (4.5)$$

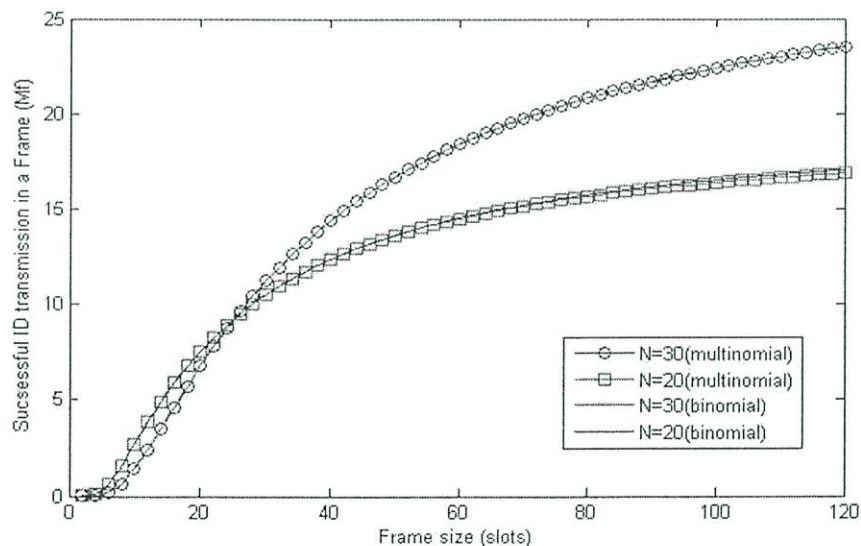
เมื่อหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งประสบความสำเร็จ (P_{SUC}) ครบทุกเหตุการณ์ของแต่ละจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จ (K) หรือทุกค่า P_{SUC} ของแต่ละเหตุการณ์ K แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย $Mean_p$ ได้

$$Mean_p = \sum_{k=0}^{k_{max}} (P_{SUC_k} \times K + 1) \quad (4.6)$$

เนื่องจากจำนวนที่นำมาทำการหาค่าเฉลี่ยเริ่มที่ $K = 0$ เมื่อได้ $Mean_p - 1$ เราจะได้จำนวนของแท็กหรือสล็อตที่ส่งสำเร็จต่อเฟรม M_f

$$M_f = Mean_p - 1 \quad (4.7)$$

จากรูปที่ 4.5 เมื่อทำการพล็อตกราฟจำนวนของแท็กหรือสล็อตที่ส่งสำเร็จต่อเฟรม M_f ของโมเดลคณิตศาสตร์แบบพหุนามที่เราได้นำเสนอ กับแบบทวินามตามแบบงานวิจัยทั่วไปที่ได้ศึกษาก็พบว่ามีความเท่ากันพอดี ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่าโมเดลคณิตศาสตร์ของเราสามารถใช้คำนวณได้ (ในตัวอย่างเป็นการจำลองที่ขนาดแท็กมีขนาด 20 และ 30 ทั้งแบบพหุนามและทวินาม และมีขนาดเฟรมตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 120)



รูปที่ 4.5 จำนวนของแท็กหรือสล็อตที่ส่งสำเร็จต่อเฟรม M_f

และได้ค่าประสิทธิภาพของระบบคือ

$$\text{system efficiency} = \frac{\text{จำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จต่อเฟรม}}{\text{ขนาดของเฟรม}} = \frac{M_f}{M} \quad (4.8)$$

เนื่องจากการส่งแท็กแบบแพสซีฟแท็กนั้น แท็กไม่สามารถจดจำสถานะใดๆ ได้ ทำได้เพียงตอบสนองต่อเครื่องอ่าน อาจพบการชนกันของแท็กได้ทุกรอบการส่ง ดังนั้นเราไม่สามารถมั่นใจว่าจะจัดเก็บแท็กแบบแพสซีฟได้ครบทุกตัวหรือยัง กระบวนการจัดเก็บแท็กแบบนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อมาถึงรอบการส่งในครั้งที่เรามั่นใจ ซึ่งระดับนั้นแทนค่าให้เป็นความน่าจะเป็น α ซึ่งในที่นี้เราให้ $\alpha = 0.99$ แทนความน่าจะเป็นที่มีแท็กหายไปไม่เกิน 1%

เมื่อ i คือจำนวนรอบในการส่งเฟรม เราสามารถกำหนดจำนวนแท็กที่สูญหายในการส่งแท็กระบบแพสซีฟแท็กได้เอง โดยการคำนวณจากความน่าจะเป็นที่กำหนดจำนวนแท็กสูญหายให้ส่งเฟรมจำนวน R_{p_f} เฟรม คือ

$$\prod_{i=1}^{R_{p_f}} \left(1 - \frac{M_f(i)}{N(i)}\right) = 1 - \alpha \quad (4.9)$$

ดังนั้น จากการส่งแท็กแบบแพสซีฟที่ได้กล่าวไป ทำให้ทุกรอบการส่งเฟรม i ใดๆ นั้น จะมีจำนวนแท็กเท่ากับ N และจำนวนของแท็กหรือสล็อตที่ส่งสำเร็จต่อเฟรมเท่ากับ M_f เท่าๆ กันทุกรอบการส่ง จึงทำให้ได้ จำนวนเฟรมที่ควรส่งต่ำสุดคือ

$$R_{p_f} \geq \log(1 - \alpha) / \log\left(1 - \frac{M_f}{N}\right) \quad (4.10)$$

เพื่อให้ได้จำนวนเฟรมตามระดับความมั่นใจ α จะพบว่าขนาดเฟรม (M) มีผลกับจำนวนเฟรมที่ต้องส่ง (R_{p_f}) โดยจำนวนการตอบสนองของแท็ก หรือจำนวนครั้งการอ่านของแท็กทั้งหมดทุกสล็อตที่ทำการส่งแบบแพสซีฟแท็ก (overall tag read time) คือ

$$R_{p_t} = M * R_{p_f} \quad (4.11)$$

4.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์

จากรูปแบบการส่งในระบบ RFID ที่ใช้โปรโตคอลป้องกันการชนกัน FSA แบบแบ่งกลุ่มตามหัวข้อ 4.2 เราได้ใช้โปรแกรม matlab ทำการจัดเก็บทุกรอบแบบเหตุการณ์การส่งแบบแบ่งกลุ่ม แล้วนำมาหาค่าความน่าจะเป็นของการประสบความสำเร็จในการส่งตามโมเดลทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 4.4 ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลของการวิเคราะห์ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากตัวแปรต่างๆ ในระบบ สำหรับการวิเคราะห์ได้กำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์เป็น FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่มในขนาดต่างๆ ดังนี้

แบ่งกลุ่มแบบ 2 เท่า จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ $\frac{2M}{3}$ และ $\frac{M}{3}$ สล็อต

แบ่งกลุ่มแบบ 3 เท่า จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ $\frac{3M}{4}$ และ $\frac{M}{4}$ สล็อต

แบ่งกลุ่มแบบ 4 เท่า จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ $\frac{4M}{5}$ และ $\frac{M}{5}$ สล็อต

แบ่งกลุ่มแบบ 50-50 จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ $\frac{M}{2}$ และ $\frac{M}{2}$ สล็อต

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลของการวิเคราะห์ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

- กรณีที่ 1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่มในแต่ละขนาดการแบ่งที่แตกต่างกัน

ในส่วนของกรณีที่ 1 ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อดูประสิทธิภาพของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่มในขนาดต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้ว เพื่อผลต่อสภาพการแย่งชิงสล็อตของแท็กในลักษณะต่างๆ จึงทำการวิเคราะห์โดยแบ่งเป็น 2 หัวข้อย่อยคือ

1. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งในกรณีที่ขนาดเฟรมน้อยกว่าจำนวนแท็ก เป็นการวิเคราะห์เพื่อดูแนวโน้มประสิทธิภาพของระบบในรูปแบบการส่งต่างๆ ว่ามีผลเป็นอย่างไรต่อสภาพที่มีการแย่งชิงสล็อตที่สูง

2. ประสิทธิภาพของการส่งในกรณีที่ขนาดเฟรมมากกว่าจำนวนแท็ก เป็นการวิเคราะห์เพื่อดูแนวโน้มประสิทธิภาพของระบบในรูปแบบการส่งต่างๆ ว่ามีผลเป็นอย่างไรต่อสภาพที่มีการแย่งชิงสล็อตที่ต่ำ

- กรณีที่ 2 วิเคราะห์การส่งแท็กแบบแพสซีฟจากจำนวนเฟรมและจำนวนการตอบสนองแท็กของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่ม

ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์จากรูปแบบการส่งแท็กแบบแพสซีฟในโปรโตคอล FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่มในขนาดต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้ว โดยแบ่งการวิเคราะห์เป็น 2 หัวข้อคือ

1. ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งแพสซีฟแท็กในการส่งแบบแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ เป็นการหาจุดเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ หรือหาว่าช่วงขนาดเฟรมเท่าใดที่เหมาะสมสำหรับการใช้โปรโตคอล FSA แบบแบ่งกลุ่ม

2. ขนาดเฟรมที่เหมาะสมเพื่อให้ใช้เวลาในการส่งแพสซีฟแท็กแบบแบ่งกลุ่มน้อยที่สุด เป็นการหาจำนวนการตอบสนองของแท็ก หรือจำนวนครั้งการอ่านของแท็กทั้งหมดทุกสล็อตที่ทำการส่งแบบแพสซีฟแท็ก (overall tag read time) ว่าที่มีจุดต่ำสุดของการตอบสนอง (ใช้เวลาส่งข้อมูลน้อยที่สุด) นั้น เป็นจุดที่มีขนาดเฟรมเป็นเท่าใด ซึ่งขนาดเฟรมนั้นจะคือขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งข้อมูลเพื่อให้ส่งได้เวลาน้อยที่สุด

4.5.1 กรณีที่ 1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่มในแต่ละขนาดการแบ่งที่แตกต่างกัน

กรณีที่ 1 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของ FSA แบบปกติและแบบแบ่งกลุ่มในแต่ละขนาดการแบ่งที่แตกต่างกัน โดยจะแบ่งการทดลองเป็น 2 หัวข้อย่อยคือ วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งแท็กในกรณีที่ระบบมีขนาดเฟรม(M) น้อยกว่าจำนวนแท็ก(N) และวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งแท็กในกรณีที่ระบบมีขนาดเฟรม(M) มากกว่าจำนวนแท็ก(N) เพื่อดูแนวโน้มว่าในลักษณะการแบ่งกลุ่มที่ขนาดเฟรมต่างๆ ระบบจะมีประสิทธิภาพเป็นอย่างไร โดยจะมีระบบที่ส่งโดย FSA ปกติ และแบบแบ่งกลุ่มในขนาดต่างๆ คือแบ่งให้ขนาดแท็กเป็น 2 กลุ่มเท่าๆกัน และแบ่งให้อีกกลุ่มส่งได้ในขนาดเฟรมมากกว่าอีกกลุ่มเป็น 2 เท่า , 3 เท่า , 4 เท่า และแบ่งให้ 2 กลุ่มส่งได้ในขนาดเฟรมเท่าๆกันหรือแบ่งแบบ 50-50 นั้นเอง

4.5.1.1. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งในกรณีที่ขนาดเฟรมน้อยกว่าจำนวนแท็ก

เราจะทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งแท็กในกรณีที่ขนาดเฟรมน้อยกว่าจำนวนแท็ก ว่าระบบการส่งแท็กแบบใดจะมีประสิทธิภาพดีในสภาพที่ยังมีการแย่งชิงสล็อตของแท็กสูง โดยจะมีรูปแบบการส่งแท็กแบบ FSA ธรรมดาและแบบแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ ตามที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้ โดยการวิเคราะห์จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. กำหนดพารามิเตอร์สำหรับกรณีที่ขนาดเฟรมน้อยกว่าจำนวนแท็ก
 - กราฟรูปที่ 4.6 ต้องการดูแนวโน้มของค่าความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จในการส่ง (Psuc) ของแต่ละจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จ (K) ที่มีจำนวนแท็กและขนาดเฟรมหรือจำนวนสล็อตเท่ากัน โดยกำหนดให้จำนวนแท็กในระบบ (N) มีจำนวน 60 ตัว และมีขนาดเฟรม (M) 20 สล็อต
 - กราฟรูปที่ 4.7 ต้องการดูค่าความน่าจะเป็นในการส่งที่ไม่มีสล็อตใดเลยสำเร็จเลย (Pcoll) หรือค่าความน่าจะเป็นที่ $K = 0$ โดยกำหนดให้มีขนาดเฟรม (M) เป็น 20 สล็อต และมีจำนวนแท็ก (N) ตั้งแต่ 20 จนถึง 60 ตัว

- ขนาดเฟรม (M) เป็น 20 สล็อต จึงทำให้
 - แบ่งกลุ่มแบบ 2 เท่า จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ 13 และ 7 สล็อต
 - แบ่งกลุ่มแบบ 3 เท่า จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ 15 และ 5 สล็อต
 - แบ่งกลุ่มแบบ 4 เท่า จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ 16 และ 4 สล็อต
 - แบ่งกลุ่มแบบ 50-50 จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ 10 และ 10 สล็อต

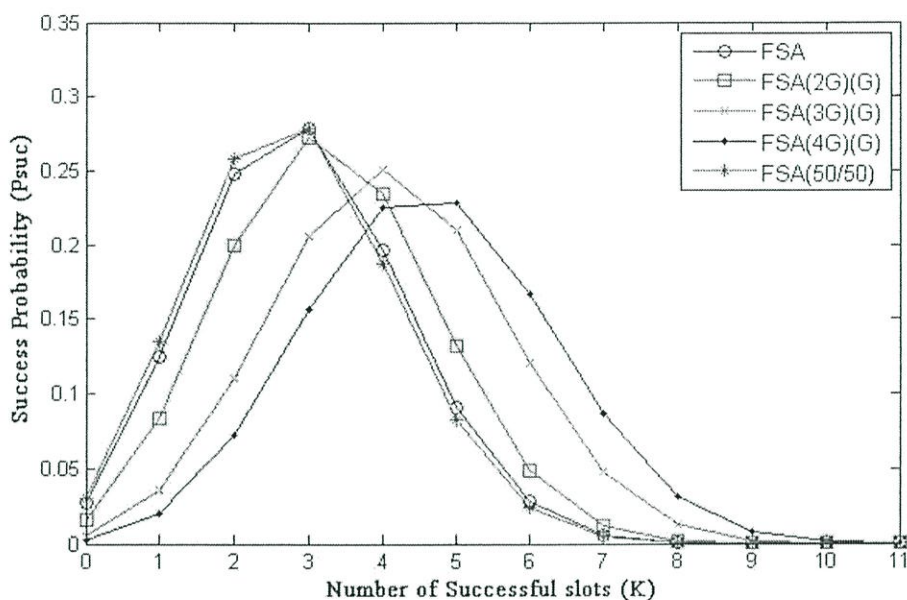
2. ทำการคำนวณการจัดเก็บทุกรูปแบบเหตุการณ์การที่แท็กจะสุมเข้าสล็อต
3. นำค่าทุกรูปแบบเหตุการณ์ที่ได้จัดเก็บมาคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์และนำมาหาค่าความน่าจะเป็นที่ส่งสำเร็จหรือ Success Probability (Psuc) (สมการที่ 4.4) ในกราฟรูปที่ 4.6 หรือค่าความน่าจะเป็นที่ไม่มีสล็อตใดส่งสำเร็จเลย (Pcoll) (สมการที่ 4.5) ในกราฟรูปที่ 4.7
4. พล็อตกราฟและทำการวิเคราะห์ผล

จากรูปที่ 4.6 วิเคราะห์โดยดูแนวโน้มของค่าความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จในการส่ง (Psuc) ของแต่ละจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จ (K) ทำการส่งแท็กที่มีจำนวนแท็กและขนาดเฟรมหรือจำนวนสล็อตเท่ากัน โดยที่จำนวนแท็กในระบบมีจำนวน 60 และมีขนาดเฟรม 20 สล็อต จะพบว่าค่าที่มีค่าความน่าจะเป็นในการส่งสำเร็จ (Psuc) ของจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จ (K) สูงที่สุดในแต่ละจำนวนสล็อตมีค่าแตกต่างกันโดย จำนวนสล็อตที่มี Psuc สูงสุดที่จำนวน K เยอะที่สุดคือ การแบ่งกลุ่มแบบ 4 เท่า ตามมาด้วย 3 เท่า, 2 เท่า และการส่งแบบ FSA ปกติกับการส่งแบบแบ่งกลุ่ม 50-50 โดยมีค่าใกล้เคียงกัน

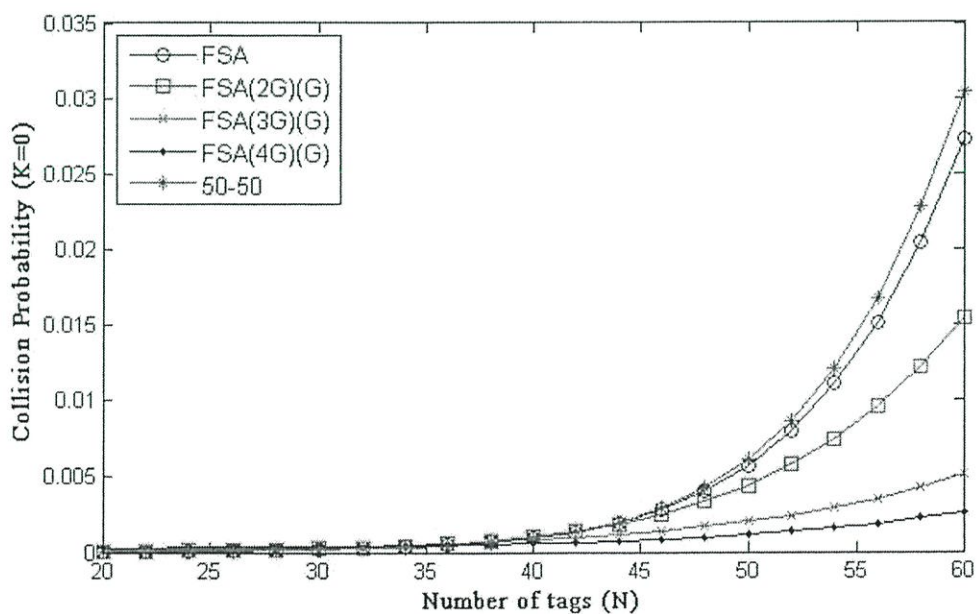
จากรูปที่ 4.7 วิเคราะห์โดยดูค่าความน่าจะเป็นในการส่งที่ไม่มีสล็อตใดเลยสำเร็จเลย (Pcoll) หรือค่าความน่าจะเป็นที่ $K = 0$ โดยทำการส่งแท็กที่มีขนาดเฟรมเป็น 20 และมีจำนวนสล็อตตั้งแต่ 20 จนถึง 60 จะพบว่าค่าความน่าจะเป็นที่ไม่มีสล็อตใดส่งสำเร็จเลย (Pcoll) จะมีค่าสูงขึ้นตามจำนวนแท็กที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแย่งชิงและชนกันของแท็ก ซึ่งค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าน้อยที่สุดในแต่ละจำนวนแท็กได้แก่ การแบ่งกลุ่มแบบ 4 เท่า ตามมาด้วย 3 เท่า, 2 เท่า, การส่งแบบ FSA ปกติ และการส่งแบบแบ่งกลุ่ม 50-50 ตามลำดับ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในสภาพการส่งแท็กในระบบที่ขนาดเฟรมน้อยกว่าจำนวนแท็ก ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่มีการแย่งชิงสล็อตที่สูง ระบบที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือระบบที่ส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม

ให้อีกกลุ่มมีค่ามากกว่าอีกกลุ่มมากๆไปเลย ดังเช่นการแบ่งกลุ่มแบบให้อีกกลุ่มมากกว่าอีกกลุ่มเป็น 4 เท่า ก็จะทำให้แท็กกลุ่มแรกสามารถสุ่มเข้าสล็อตได้ 16 สล็อต และอีกกลุ่มสามารถสุ่มเข้าสล็อตได้ 4 สล็อต ซึ่งจะเป็นการให้โอกาสการส่งแท็กสำเร็จในกลุ่มใหญ่ที่สูง และปล่อยให้กลุ่มเล็กชนกันไปเลย ส่วนการส่งแบบแบ่งกลุ่มที่พอๆ กัน ทำให้โอกาสการชนกันของทั้ง 2 กลุ่มยังสูงอยู่ เนื่องจากขนาดเฟรมที่ยังมีค่าน้อย



รูปที่ 4.6 ความน่าจะเป็นในการส่งประสบความสำเร็จ(P_{suc}) ที่จำนวนแท็กในระบบมีจำนวน 60 และมีขนาดเฟรม 20 สล็อต



รูปที่ 4.7 ความน่าจะเป็นที่ไม่มีสล็อตใดส่งสำเร็จเลย(P_{coll}) ที่มีขนาดเฟรมเป็น 20 และมีจำนวนแท็กตั้งแต่ 20 จนถึง 60

4.4.1.2. ประสิทธิภาพของการส่งในกรณีที่ขนาดเฟรมมากกว่าจำนวนแท็ก

เราจะทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการส่งแท็กในกรณีที่ขนาดเฟรมมากกว่าจำนวนแท็ก ว่าระบบการส่งแท็กแบบใดจะมีประสิทธิภาพดีในสภาพที่ยังมีการแย่งชิงสล็อตของแท็กต่ำ โดยจะมีรูปแบบการส่งแท็กแบบ FSA ธรรมดาและแบบแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ โดยการวิเคราะห์จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. กำหนดพารามิเตอร์สำหรับกรณีที่ขนาดเฟรมมากกว่าจำนวนแท็ก

- กราฟรูปที่ 4.8 ต้องการดูแนวโน้มของค่าความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จในการส่ง (Psuc) ของแต่ละจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จ (K) ที่มีจำนวนแท็กและขนาดเฟรมหรือจำนวนสล็อตเท่ากัน โดยกำหนดให้จำนวนแท็กในระบบ (N) มีจำนวน 30 ตัว และมีขนาดเฟรม (M) 60 สล็อต

- ขนาดเฟรม (M) เป็น 60 สล็อต จึงทำให้

- แบ่งกลุ่มแบบ 2 เท่า จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ 40 และ 20 สล็อต

- แบ่งกลุ่มแบบ 3 เท่า จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ 45 และ 15 สล็อต

- แบ่งกลุ่มแบบ 4 เท่า จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ 48 และ 12 สล็อต

- แบ่งกลุ่มแบบ 50-50 จะได้ขนาดสล็อตเป็น 2 กลุ่มคือ 30 และ 30 สล็อต

- กราฟรูปที่ 4.9 ต้องการดูค่าความน่าจะเป็นในการส่งที่ไม่มีสล็อตใดเลยสำเร็จเลย (Pcoll) หรือค่าความน่าจะเป็นที่ $K = 0$ โดยกำหนดให้มีขนาดเฟรม (M) เริ่มตั้งแต่ 60 จนถึง 120 สล็อต และมีจำนวนแท็ก (N) เป็น 30 ตัว

- กราฟรูปที่ 4.10 ต้องการดูแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพของระบบตั้งแต่การแย่งชิงสล็อตของแท็กสูงไปจนต่ำ จึงกำหนดให้ระบบมีจำนวนแท็ก (N) เป็น 40 และมีขนาดเฟรม (M) ตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 120 สล็อต

2. ทำการคำนวณการจัดเก็บทุกรูปแบบเหตุการณ์การที่แท็กจะสู้เข้าสล็อต

3. นำค่าทุกรูปแบบเหตุการณ์ที่ได้จัดเก็บมาคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์และนำมาหาค่าความน่าจะเป็นที่ส่งสำเร็จหรือ Success Probability (Psuc) (สมการที่ 4.4) ในกราฟรูปที่ 4.8 หรือค่าความน่าจะเป็นที่ไม่มีสล็อตใดส่งสำเร็จเลย (Pcoll) (สมการที่ 4.5) ในกราฟรูปที่ 4.9 และค่าประสิทธิภาพของระบบ (สมการที่ 4.8) ในกราฟรูปที่ 4.10

4. พล็อตกราฟและทำการวิเคราะห์ผล

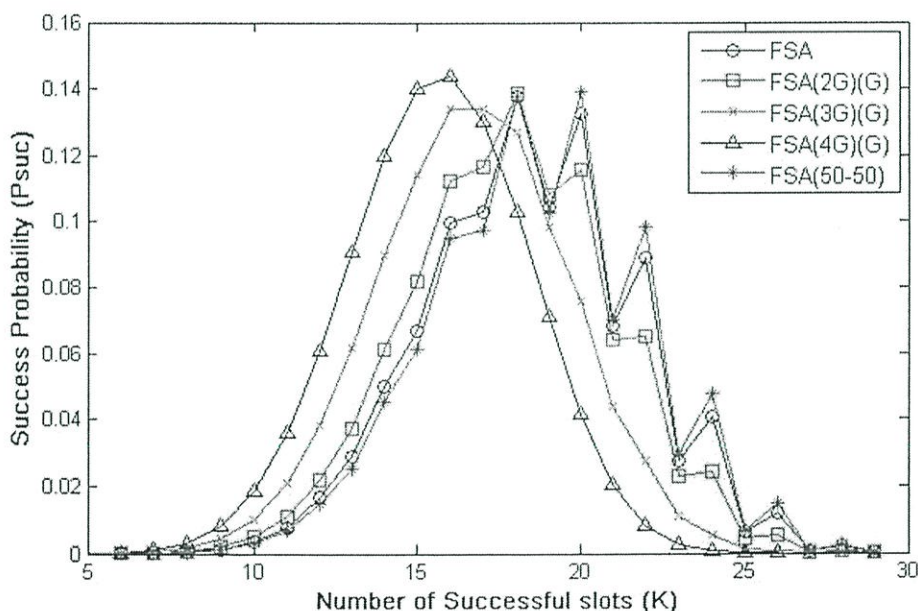
จากรูปที่ 4.8 วิเคราะห์โดยดูแนวโน้มของค่าความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จในการส่ง (Psuc) ของแต่ละจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จ (K) ทำการส่งแท็กที่มีจำนวนแท็กและขนาดเฟรมหรือจำนวนสล็อตเท่ากัน โดยที่จำนวนแท็กในระบบมีจำนวน 30 และมีขนาดเฟรม 60 สล็อต จะพบว่าค่าที่มีค่าความน่าจะเป็นในการส่งสำเร็จ (Psuc) ของจำนวนสล็อตที่ส่งสำเร็จ (K) สูงที่สุดในแต่ละจำนวนสล็อตมีค่าแตกต่างกันโดย จำนวนสล็อตที่มี Psuc สูงสุดที่จำนวน K เยอะที่สุดคือ ระบบที่ส่ง FSA แบบแบ่ง 50-50 และการส่ง FSA แบบปกติโดยมีค่าใกล้เคียงกัน ตามมาด้วยความใกล้เคียงคือการแบ่งให้อีกกลุ่มมากกว่าอีกกลุ่มเป็น 2 เท่า และตามด้วย 3 เท่า ส่วนการแบ่ง 4 เท่ามีค่าน้อยสุด ซึ่งกลับกันกับกราฟรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.9 วิเคราะห์โดยดูค่าความน่าจะเป็นในการส่งที่ไม่มีสล็อตใดเลยสำเร็จเลย (Pcoll) หรือค่าความน่าจะเป็นที่ $K = 0$ ในระบบการส่งแท็กที่มีการแย่งชิงสล็อตต่ำ ทำการส่งแท็กให้มีจำนวนน้อยกว่าขนาดเฟรม โดยมีจำนวนแท็กเป็น 30 แท็ก และมีขนาดเฟรมตั้งแต่ 60 จนถึง 120 จะพบว่าค่าความน่าจะเป็นที่ไม่มีสล็อตใดส่งสำเร็จเลย (Pcoll) ลดลงตามขนาดเฟรมที่มากและใน

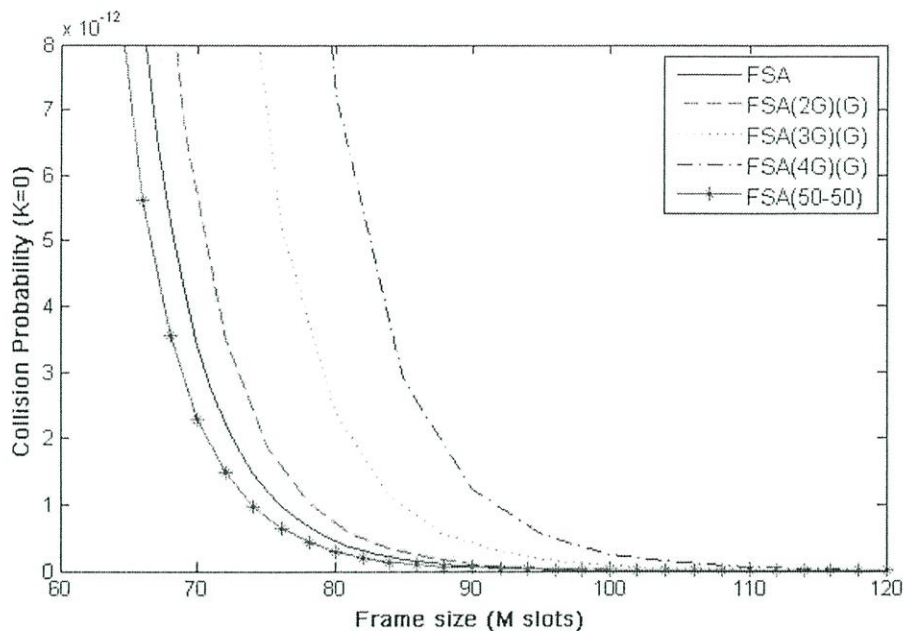
เหตุการณ์ที่มีขนาดเฟรมเท่ากัน ค่าความน่าจะเป็นที่น้อยที่สุดคือ ระบบที่ส่ง FSA แบบแบ่ง 50-50 ตามมาด้วยการส่ง FSA แบบปกติ และตามมาด้วยการส่งแบบแบ่งกลุ่มเป็น 2 เท่า, 3 เท่า และ 4 เท่า ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะสรุปได้ว่าในสภาพการส่งแท็กที่ระบบมีขนาดเฟรมมากกว่าจำนวนแท็กหลายๆ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่มีการแย่งชิงสล็อตที่ต่ำ โดยประสิทธิภาพของระบบการส่งแต่ละรูปแบบจะกลับกันกับการวิเคราะห์หัวข้อที่ 1 เพราะเมื่อทำการแบ่งกลุ่มโดยให้อีกกลุ่มมีค่ามากกว่าอีกกลุ่มมากๆ ดังเช่นรูปที่ 4.8 ที่ระบบมีจำนวนแท็กเป็น 30 และมีขนาดเฟรมเป็น 60 ทำให้การแบ่งแบบ 4 เท่าได้สล็อตกลุ่มแรกเป็น 12 และอีกกลุ่มเป็น 48 ซึ่งการชนกันที่เกิดจากการแย่งชิงสล็อตที่มีค่าสล็อตต่ำในกลุ่มแรกยังมีสูงอยู่ กลับกันหากแบ่งสล็อตเท่าๆกันหรือแบบ 50-50 จะได้สล็อตทั้งสองกลุ่มมีขนาด 30 สล็อต ซึ่งมีโอกาสส่งแท็กได้สำเร็จสูงทั้ง 2 กลุ่ม

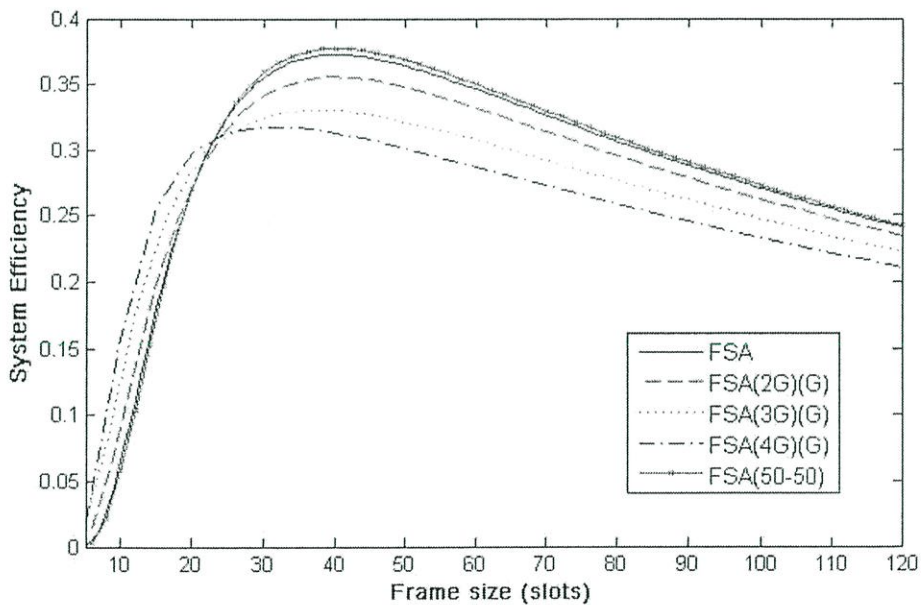
จะเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 4.10 เป็นการเทียบค่าประสิทธิภาพ จากสมการที่ (4.8) ในระบบที่มีจำนวนแท็กเป็น 40 และมีขนาดเฟรมตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 120 สล็อต จะเห็นว่าประสิทธิภาพของการแบ่งกลุ่มยิ่งต่างกันมากก็จะมีค่ามากในขนาดเฟรมที่มีค่าต่ำในช่วงประมาณไม่เกิน 24 สล็อต แต่หลังจากนั้นประสิทธิภาพของระบบก็จะกลับกัน เป็นไปตามที่ได้วิเคราะห์ไปดังกล่าว ซึ่งในหัวข้อการวิเคราะห์ถัดไป จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดเฟรมที่เหมาะสมต่อระบบ



รูปที่ 4.8 ความน่าจะเป็นในการส่งประสบความสำเร็จ (Psuc) ที่จำนวนแท็กในระบบมีจำนวน 30 และมีขนาดเฟรม 60 สล็อต



รูปที่ 4.9 ความน่าจะเป็นที่ไม่มีสล็อตใดส่งสำเร็จเลย(P_{coll}) ที่มีจำนวนแท็กเป็น 30 และมีจำนวนขนาดเฟรมตั้งแต่ 20 จนถึง 60



รูปที่ 4.10 ค่าประสิทธิภาพของระบบที่มีจำนวนแท็กเป็น 40 และมีขนาดเฟรมตั้งแต่ 2 ไปจนถึง 120 สล็อต

4.4.2 กรณีที่ 2 วิเคราะห์ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งแพสซิฟแท็กแบบแบ่งกลุ่ม

จากการวิเคราะห์ในกรณีที่ 1 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบการส่งแท็กแบบแบ่งกลุ่มในการแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ จะเห็นได้ว่าในสภาพการแย่งชิงสล็อตที่มากและน้อยการแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ ดังนั้นในกรณีที่ 2 นี้ เราจึงทำการวิเคราะห์ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ และวิเคราะห์หาขนาดเฟรมที่เหมาะสมเพื่อใช้จำนวนครั้งการส่งน้อยที่สุด(ใช้เวลาการส่งน้อยที่สุด) ที่ใช้การส่งแบบแพสซิฟแท็กในระดับความพึงพอใจที่กำหนดเองตามสมการที่ 4.9 ถึง 4.11 ให้ $\alpha = 0.99$ แทนความน่าจะเป็นที่มีแท็กหายไปไม่เกิน 1% โดยทำการแบ่งหัวข้อการวิเคราะห์เป็น 2 หัวข้อย่อย คือ หัวข้อแรกทำการวิเคราะห์ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งแพสซิฟแท็กในการส่งแบบแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ และหัวข้อย่อยที่สอง เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งแพสซิฟแท็กเพื่อให้ใช้เวลาในการส่งน้อยที่สุด เพราะหากเพิ่มขนาดเฟรมให้ยิ่งมากเท่าไรก็จะทำให้โอกาสการชนกันน้อยลงก็จริง แต่ก็ทำให้จำนวนครั้งของการอ่านแท็กมากขึ้นและสิ้นเปลืองเกินไป

4.4.2.1. ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งแพสซิฟแท็กในการส่งแบบแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ

จากการทดลองในกรณีที่ 1 พบว่าเมื่อขนาดเฟรมมีน้อยกว่าขนาดแท็ก (การแย่งชิงสล็อตสูง) การแบ่งกลุ่มที่มีขนาดแตกต่างกันมากก็จะมีประสิทธิภาพมาก แต่เมื่อขนาดเฟรมมีมากกว่าขนาดแท็ก (การแย่งชิงสล็อตต่ำ) การแบ่งกลุ่มที่ขนาดแตกต่างกันมากก็จะมีประสิทธิภาพต่ำ ทำให้ต้องทำการวิเคราะห์หาขนาดเฟรมที่เหมาะสมต่อลักษณะการแบ่งกลุ่มในขนาดต่างๆ โดยพิจารณาจากจำนวนครั้งการอ่านของสล็อตทั้งหมดแบบแพสซิฟแท็ก (overall tag read time) ตามสมการที่ (4.11) โดยการวิเคราะห์จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

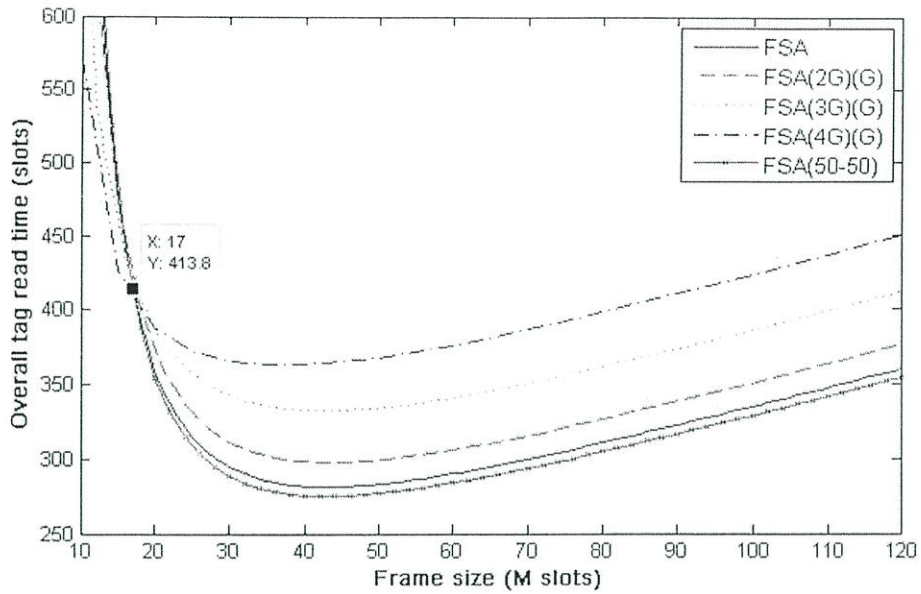
1. กำหนดพารามิเตอร์สำหรับหาจุดเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพ ของกราฟรูปที่ 4.11 (a), (b), และ (c)
 - ขนาดเฟรม (M) ตั้งแต่ 10 ไปจนถึง 120 สล็อต
 - ให้ $\alpha = 0.99$ แทนความน่าจะเป็นที่มีแท็กหายไปไม่เกิน 1% ของการส่งแบบแพสซิฟแท็ก
 - กราฟ (a), (b), และ (c) เป็นการแสดงค่าจำนวนครั้งการอ่านของสล็อตทั้งหมดแบบแพสซิฟแท็ก (overall tag read time) ตามสมการที่ (4.11) ของการส่ง FSA รูปแบบต่างๆ คือ
 1. การส่ง FSA แบบปกติ
 2. การส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 2 เท่า
 3. การส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 3 เท่า
 4. การส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 4 เท่า
 5. การส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 50-50
 - จำนวนแท็กในระบบ (N) แบ่งออกเป็น 3 กราฟ
 1. กราฟ (a) มีจำนวนแท็ก 30 ตัว
 2. กราฟ (b) มีจำนวนแท็ก 40 ตัว
 3. กราฟ (c) มีจำนวนแท็ก 50 ตัว
2. ทำการคำนวณการจัดเก็บทุกรูปแบบเหตุการณ์การที่แท็กจะสุ่มเข้าสู่สล็อต

3. นำค่าทุกรูปแบบเหตุการณ์ที่ได้จัดเก็บมาคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์และ
- นำมาหาค่าความน่าจะเป็นที่สำเร็จหรือ Success Probability (P_{suc}) (สมการที่ 4.4)
 - แล้วนำค่า P_{suc} มาหาจำนวนของแท็กหรือสล็อตที่สำเร็จต่อเฟรม M_f (สมการที่ 4.7)
 - จากนั้นกำหนดให้ $\alpha = 0.99$ แทนความน่าจะเป็นที่มีแท็กหายไปไม่เกิน 1% ของการส่งแบบแพสซีฟแท็ก จะหาจำนวนเฟรมที่ควรส่งต่ำสุดได้ (สมการที่ 4.10)
 - และนำมาคูณกับขนาดเฟรมที่กำหนดจะได้จำนวนครั้งการอ่านของแท็กทั้งหมดทุกสล็อตที่ทำการส่งแบบแพสซีฟแท็ก (overall tag read time) (สมการที่ 4.11)
4. พล็อตกราฟและทำการวิเคราะห์ผล

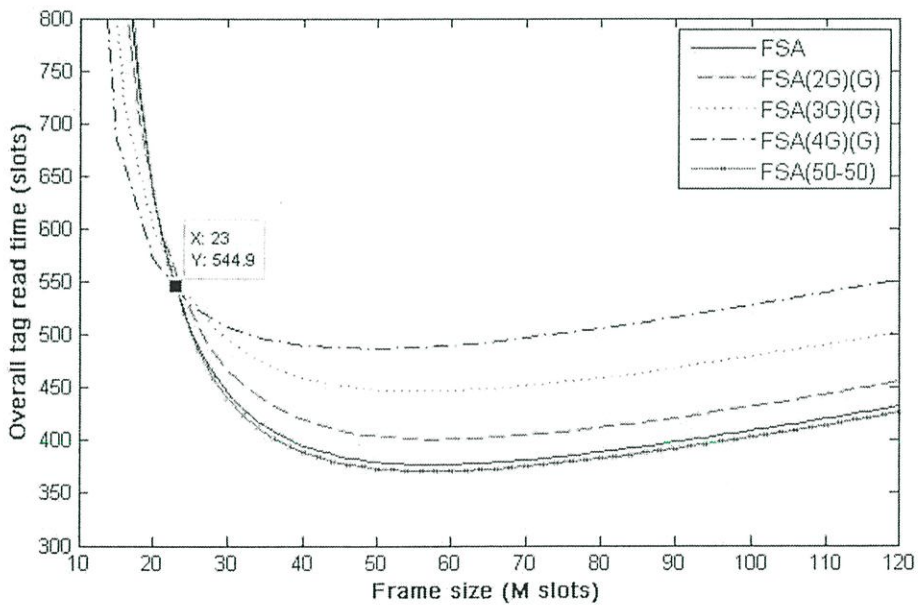
จากรูปที่ 4.11 ทั้ง (a), (b) และ (c) เป็นการอ่านแพสซีฟแท็กที่ใช้การกำหนดขนาดเฟรมให้มีตั้งแต่ 10 สล็อต ไปจนถึง 120 สล็อต โดย (a) มีจำนวนแท็กเป็น 30, (b) มีจำนวนแท็กเป็น 40 และ (c) มีจำนวนแท็กเป็น 50 เมื่อพิจารณาจำนวนครั้งการอ่านของสล็อตทั้งหมดแบบแพสซีฟแท็ก (overall tag read time) จะพบว่าในตอนแรกที่ขนาดเฟรมมีค่าน้อยๆ overall tag read time ที่น้อยที่สุดคือระบบการส่งที่แบ่งแบบ 4 เท่า ตามมาด้วย 3 เท่า, 2 เท่า และ FSA แบบปกติกับแบ่งแบบ 50-50 และเมื่อขนาดเฟรมมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ overall tag read time ที่น้อยที่สุดก็จะกลับกัน ซึ่งจุดที่เริ่มเปลี่ยนค่า overall tag read time ของรูป (a) คือ 17 สล็อต, รูป (b) คือ 23 สล็อต, รูป (c) คือ 28 สล็อต แสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากจำนวนแท็กของแต่ละการทดลองก็จะได้จุดเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของการแบ่งกลุ่มคือ $0.56*N$ โดยการแบ่งกลุ่มยิ่งต่างกันมากเหมาะสำหรับขนาดเฟรมที่ต่ำกว่า $0.56*N$ และในทางกลับกันการแบ่งกลุ่มยิ่งต่างกันน้อยเหมาะสำหรับขนาดเฟรมที่มากกว่า $0.56*N$

ตารางที่ 4.2 จุดเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของการแบ่งกลุ่มจากรูปที่ 4.11 ทั้ง (a), (b) และ (c)

จำนวนแท็ก (N)	จุดเปลี่ยนแปลงค่า overall tag read time (Frame size)	M/N
N = 30	17	0.566
N = 40	23	0.575
N = 50	28	0.56
ขนาดเฟรมที่เริ่มเปลี่ยนโดยเฉลี่ย		0.56N

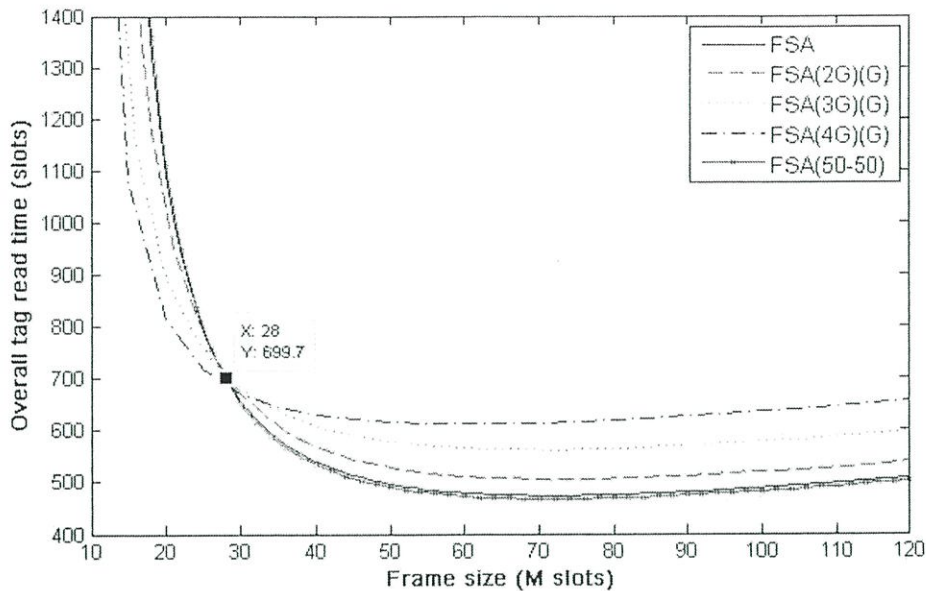


(a)



(b)

รูปที่ 4.11 การอ่านแท็กที่ใช้การกำหนดขนาดเฟรม ($\alpha = 0.99$) : (a) overall tag read time จำนวนแท็ก 30, (b) overall tag read time จำนวนแท็ก 40



(c)

รูปที่ 4.11 การอ่านแท็กที่ใช้การกำหนดขนาดเฟรม ($\alpha = 0.99$) : (c) overall tag read time จำนวนแท็ก 50

4.4.2.2. ขนาดเฟรมที่เหมาะสมเพื่อให้ใช้เวลาในการส่งแท็กแบบแบ่งกลุ่มน้อยที่สุด

เนื่องจากการเพิ่มขนาดเฟรมให้มีจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ จะมีผลต่อความน่าจะเป็นในการส่งแท็กได้สำเร็จสูงขึ้น แต่ก็ทำให้ใช้เวลาในการอ่านแท็กมากขึ้น การทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์หาขนาดเฟรมที่เหมาะสมเพื่อให้การส่งแท็กใช้เวลาในการส่งแท็ก หรือจำนวนครั้งการอ่านของแท็กทั้งหมดแบบแท็ก (overall tag read time) ให้น้อยที่สุด) โดยการวิเคราะห์จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. กำหนดพารามิเตอร์สำหรับหาขนาดเฟรมที่เหมาะสมกับการส่งแบบแท็กของกราฟรูปที่ 4.12 (a), (b), (c) และ (e)

- ขนาดเฟรม (M) ตั้งแต่ 10 ไปจนถึง 120 สล็อต
- ให้ $\alpha = 0.99$ แทนความน่าจะเป็นที่แท็กหายไปไม่เกิน 1% ของการส่งแบบแท็ก
- จำนวนแท็กในระบบ (N) แต่ละกราฟ มีจำนวนแท็ก 4 ค่าคือ
 1. จำนวนแท็ก 20 ตัว
 2. จำนวนแท็ก 30 ตัว
 3. จำนวนแท็ก 40 ตัว
 4. จำนวนแท็ก 50 ตัว

- กราฟ (a), (b), (c) และ (e) เป็นการแสดงค่าจำนวนครั้งการอ่านของสล็อตทั้งหมดแบบแท็ก (overall tag read time) ตามสมการที่ (4.11) ของการส่ง FSA รูปแบบต่างๆ คือ

1. กราฟ (a) เป็นการส่ง FSA แบบปกติ

2. กราฟ (b) เป็นการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 50-50
 3. กราฟ (b) เป็นการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 2 เท่า
 4. กราฟ (b) เป็นการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 3 เท่า
 5. กราฟ (b) เป็นการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 4 เท่า
2. ทำการคำนวณการจัดเก็บทุกรูปแบบเหตุการณ์การที่แท็กจะสุมเข้าสล็อต
3. นำค่าทุกรูปแบบเหตุการณ์ที่ได้จัดเก็บมาคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์และ
- นำมาหาค่าความน่าจะเป็นที่สำเร็จหรือ Success Probability (P_{suc}) (สมการที่ 4.4)
 - แล้วนำค่า P_{suc} มาหาจำนวนของแท็กหรือสล็อตที่สำเร็จต่อเฟรม M_f (สมการที่ 4.7)
 - จากนั้นกำหนดให้ $\alpha = 0.99$ แทนความน่าจะเป็นที่มีแท็กหายไปไม่เกิน 1% ของการส่งแบบแพสซีฟแท็ก จะหาจำนวนเฟรมที่ควรส่งต่ำสุดได้ (สมการที่ 4.10)
 - และนำมาคูณกับขนาดเฟรมที่กำหนดจะได้จำนวนครั้งการอ่านของแท็กทั้งหมดทุกสล็อตที่ทำการส่งแบบแพสซีฟแท็ก (overall tag read time) (สมการที่ 4.11)
4. พล็อตกราฟและทำการวิเคราะห์ผล

จากรูปที่ 4.12 ทั้ง (a), (b), (c), (d) และ (e) เป็นกราฟแสดงจำนวนครั้งการอ่านของแท็กทั้งหมดแบบแพสซีฟแท็ก (overall tag read time) โดยมีขนาดเฟรมที่มีตั้งแต่ 10 ไปจนถึง 120 สล็อต โดย (a) จะเป็นการส่ง FSA แบบปกติ, (b) เป็นการส่งแบบแบ่งกลุ่ม 50-50, (c) เป็นการส่งแบบแบ่งกลุ่มแบบ 2 เท่า, (d) เป็นการส่งแบบแบ่งกลุ่มแบบ 3 เท่า, (e) เป็นการส่งแบบแบ่งกลุ่มแบบ 4 เท่า

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มขนาดเฟรมสูงๆ overall tag read time ก็จะมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้น เราได้ทำการแสดงค่า overall tag read time ที่จุดต่ำสุดของแต่ละจำนวนการส่งแท็กในทุกๆกราฟ โดยมี $N = 20, 30, 40$ และ 50

เมื่อพิจารณาจุดต่ำสุดของ overall tag read time ของกราฟแต่ละจำนวนแท็กในทุกๆกราฟแล้ว พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวนแท็กอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อนำเอาขนาดเฟรมจุดต่ำสุดของ overall tag read time แต่ละจุดมาทำการหารด้วยจำนวนแท็กที่ส่ง ก็จะได้ขนาดเฟรมที่เหมาะสมในการส่งแพสซีฟแท็ก (M_{min_p}) พบว่าในแต่ละการส่งจำนวนแท็กต่างๆมีค่าใกล้เคียงกันดังนี้

ตารางที่ 4.3 ขนาดเฟรมที่เหมาะสมในการส่งแพสซีฟแท็ก (M_{min_p}) จากกราฟรูปที่ 4.12

Tag	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
N = 20	1.45	1.4	1.5	1.4	1.25
N = 30	1.43	1.46	1.5	1.46	1.33
N = 40	1.45	1.45	1.42	1.4	1.25
N = 50	1.44	1.44	1.44	1.44	1.2
เฉลี่ย	1.44	1.43	1.46	1.42	1.25

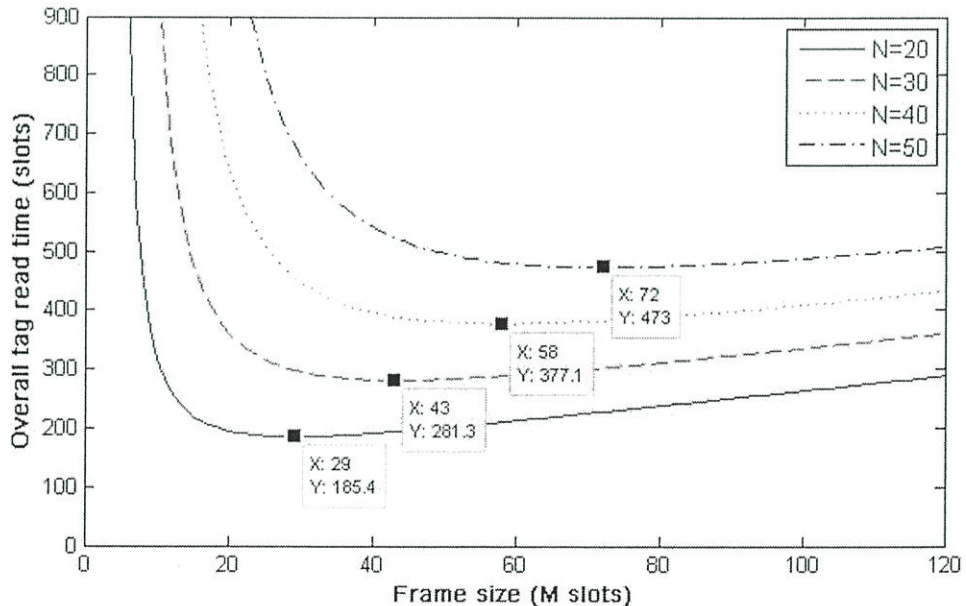
จากตารางที่ 4.3 พบว่า ค่าเฉลี่ยของ M_{min_p} ในแต่ละกราฟหรือแต่ละรูปแบบการส่งมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งกราฟ (e) หรือการส่งแบ่งกลุ่ม 4 เท่า มีค่าต่ำสุดเนื่องจากว่าเราทำการพล็อตกราฟให้ขนาดเฟรมอีกกลุ่มมากกว่าอีกกลุ่มถึง 4 เท่า จึงทำให้ขาดความละเอียดในการจุดต่ำสุดของ

overall tag read time และแต่ละค่า N แต่ละกราฟ จุดต่ำสุดของ overall tag read time ก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น จึงสรุปโดยประมาณได้ว่าขนาดเฟรมที่เหมาะสมในการส่งแพสซีฟแท็ก (M_{\min_p}) ของแต่ละรูปแบบการส่งมีค่าประมาณ $1.4 * N$ หรือมีค่ามากกว่าจำนวนแท็ก 1.4 เท่า นั่นเอง

และหากจะพิจารณาว่าในการส่งแพสซีฟแท็กให้ได้ overall tag read time ต่ำสุด รูปแบบการส่งแบบใดสามารถส่งได้โดยใช้ overall tag read time ต่ำที่สุด หรือใช้เวลาส่งเร็วที่สุด นั้นเอง จากตารางที่ 4.4 พบว่าจุดต่ำสุดของ overall tag read time ที่ได้จากกราฟทั้ง 5 รูปแบบการส่ง กราฟที่มีจุดต่ำสุดของ overall tag read time น้อยที่สุดในทุกๆ จำนวนแท็กต่างๆ คือ กราฟ (b) หรือการส่งแบบแบ่งกลุ่ม 50-50 ตามมาด้วย กราฟ (a) หรือการส่งแบบ FSA ปกติ ตามมาด้วย กราฟ (c), (d) และ (e) ซึ่งเป็นการส่งแพสซีฟแท็กแบบแบ่งกลุ่มเป็น 2 เท่า, 3 เท่า และ 4 เท่า ตามลำดับ

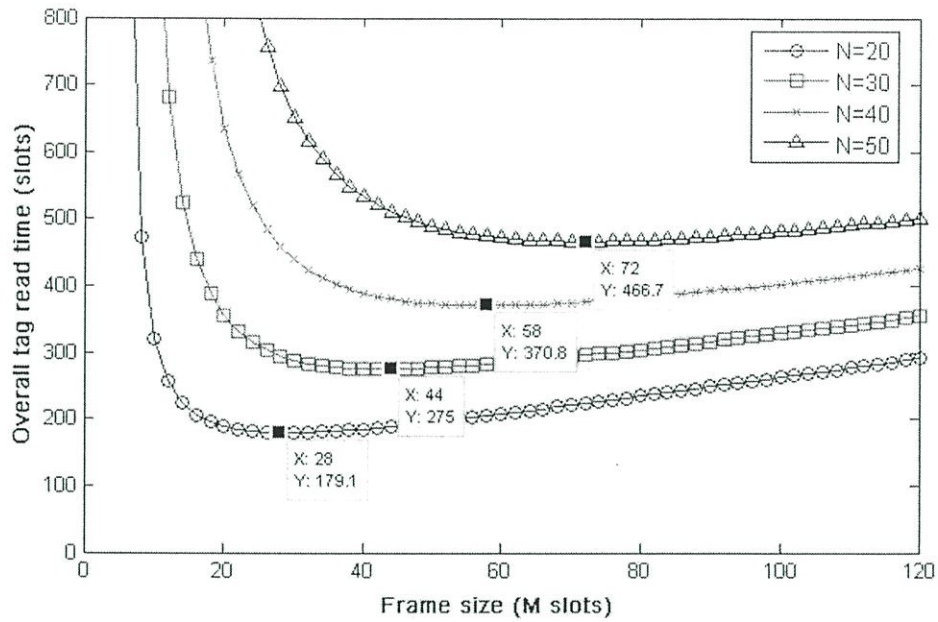
ตารางที่ 4.4 จุดต่ำสุดของ overall tag read time จากกราฟรูปที่ 4.12

Tag	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
$N = 20$	185.4	179.1	194	217.6	239
$N = 30$	281.3	275	297.8	332.2	363.3
$N = 40$	377.1	370.8	401.1	446.7	487.2
$N = 50$	473	466.7	504.5	561.3	611.4

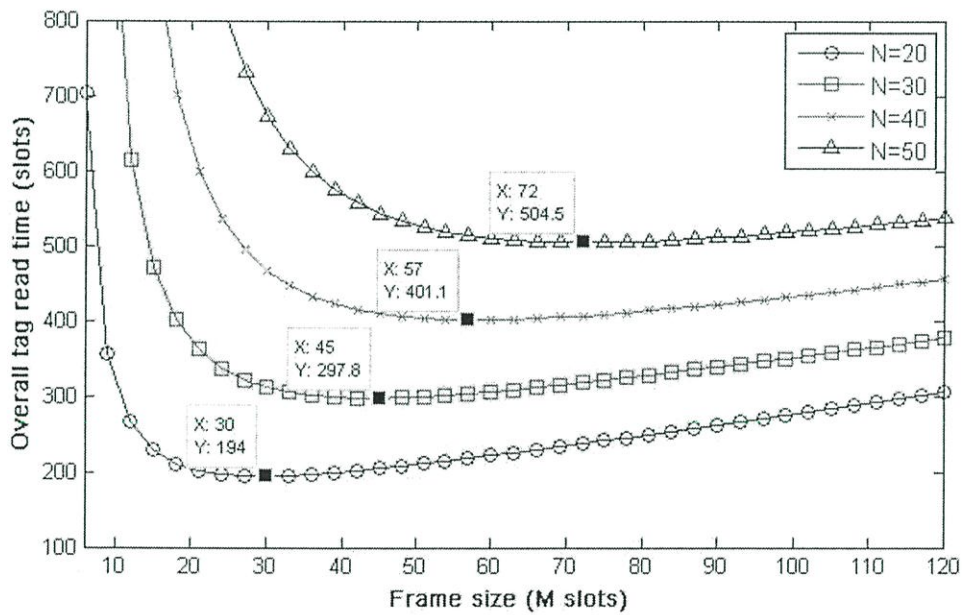


(a)

รูปที่ 4.12 การอ่านแพสซีฟแท็กที่ใช้การกำหนดขนาดเฟรม ($\alpha = 0.99$) : (a) overall tag read time ของการส่ง FSA ปกติ

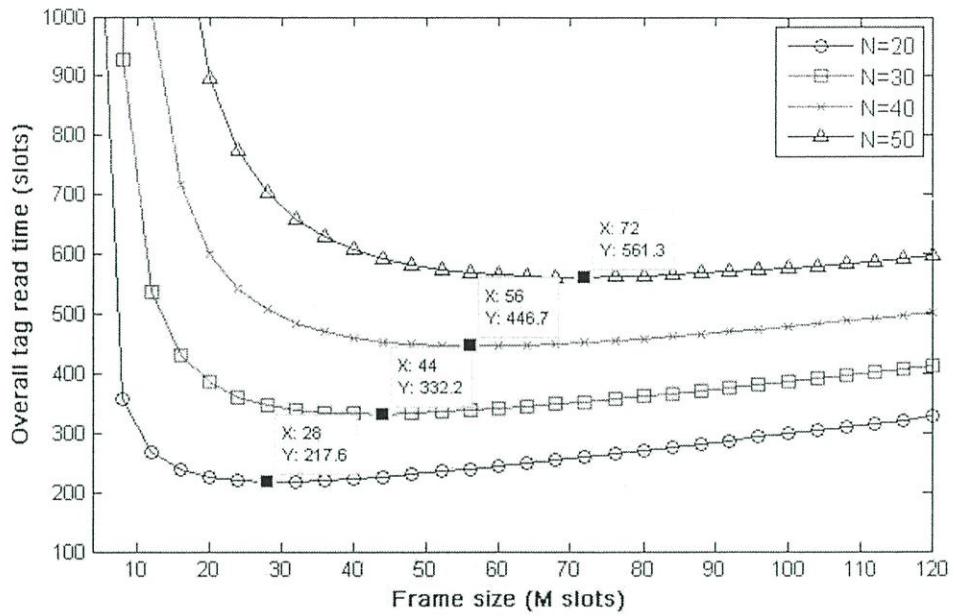


(b)

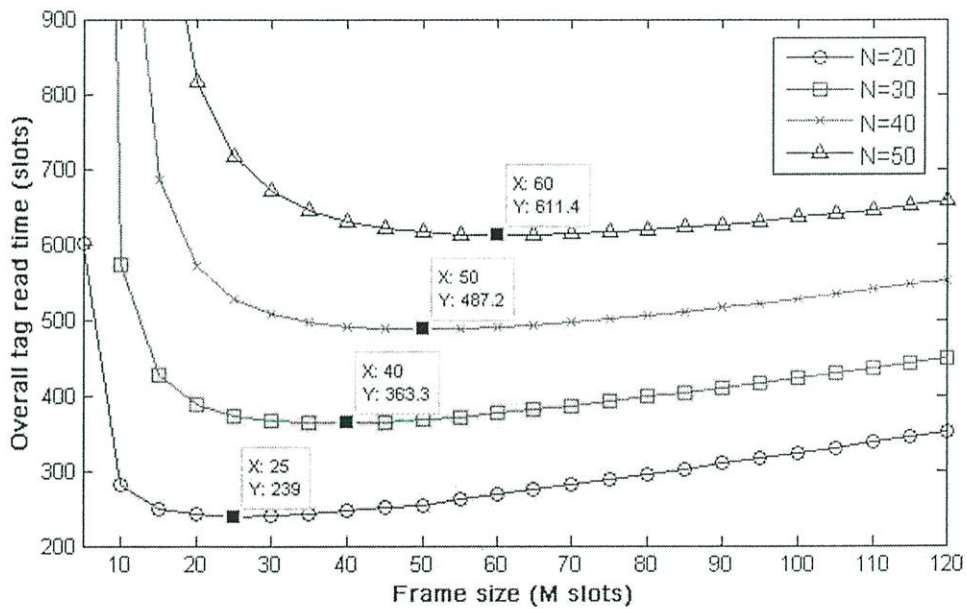


(c)

รูปที่ 4.12 การอ่านแท็กซีฟแท็กที่ใช้การกำหนดขนาดเฟรม ($\alpha = 0.99$) : (b) overall tag read time ของการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 50-50, (c) overall tag read time ของการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 2 เท่า



(d)



(e)

รูปที่ 4.12 การอ่านแท็กซีฟแท็กที่ใช้การกำหนดขนาดเฟรม ($\alpha = 0.99$) : (d) overall tag read time ของการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 3 แท้, (e) overall tag read time ของการส่ง FSA แบบแบ่งกลุ่ม 4 แท้

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ระบบ RFID ที่ส่งข้อมูลเข้าถึงแบบหลากหลายทางโดยใช้โปรโตคอลป้องกันการชนกันแบบเฟรมสล็อตอะโลฮา ซึ่งได้นำสมการความน่าจะเป็นแบบพหุนามหรือมัลติโนเมียลมาใช้ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของทุกเหตุการณ์ที่จะสามารถส่งแท็กในแต่ละสล็อตสำเร็จ ส่วนในการศึกษาและวิเคราะห์ประสิทธิภาพนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 รูปแบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของเฟรมสล็อตอะโลฮาโดยใช้สมการมัลติโนเมียล จะเน้นถึงรูปแบบวิธีการเลือกและจัดเรียงค่าของทุกเหตุการณ์เป็นไปได้ที่แท็กจะส่งเข้าสล็อต โดยจะใช้ค่าทุกเหตุการณ์นี้มาทำการคำนวณค่าความน่าจะเป็นโดยใช้สมการความน่าจะเป็นแบบมัลติโนเมียลและการวิเคราะห์ผลที่แสดงความน่าจะเป็นของแต่ละเหตุการณ์ที่ส่งแท็กได้แต่ละจำนวน โดยจะพิจารณาค่าพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อระบบคือจำนวนแท็กและขนาดเฟรม และ ส่วนที่ 2 รูปแบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของการแบ่งกลุ่มเฟรมสล็อตอะโลฮา จะกล่าวถึงการนำรูปแบบการวิเคราะห์ที่ได้เสนอในส่วนแรก มาใช้ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบที่แท็กในระบบมีความสามารถในการส่งเข้าหาสล็อตที่ต่างกันหรือแยกจากกัน โดยพิจารณาประสิทธิภาพของรูปแบบการแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ กับการส่ง FSA แบบปกติ ในสภาพขนาดเฟรมที่ต่างกัน และทำการวิเคราะห์ขนาดเฟรมที่เหมาะสมสำหรับการส่งแพสซิฟแท็กที่ใช้การแบ่งกลุ่มขนาดต่างๆ และขนาดเฟรมที่จะทำการส่งได้รวดเร็วที่สุดที่วัดจากจำนวนการตอบสนองของแท็ก หรือจำนวนครั้งการอ่านของแท็กทั้งหมดทุกสล็อตที่ทำการส่งแบบแพสซิฟแท็ก (overall tag read time)

ส่วนที่ 1 รูปแบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของเฟรมสล็อตอะโลฮา โดยใช้สมการมัลติโนเมียล เมื่อนำค่าของทุกเหตุการณ์เป็นไปได้ที่แท็กจะส่งเข้าสล็อตมาคำนวณค่าความน่าจะเป็นแบบมัลติโนเมียล ก็จะสามารถแสดงค่าของทุกเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ที่จะส่งแต่ละจำนวนแท็กสำเร็จ โดยค่าความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จก็แสดงให้เห็นว่าที่ขนาดเฟรมเท่าๆ กันยิ่งจำนวนแท็กในระบบมีค่ามากเท่าไร โอกาสในการส่งแท็กให้ประสบความสำเร็จต่อเฟรมยังมีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากการแย่งชิงสล็อตที่มีจำนวนแท็กมากขึ้นทำให้เกิดการชนกันของแท็กสูง และที่จำนวนแท็กเท่าๆ กันถ้าขนาดเฟรมมีค่าน้อยเท่าไร โอกาสในการส่งแท็กให้ประสบความสำเร็จต่อเฟรมก็จะยิ่งน้อยตาม ซึ่งเป็นผลมาจากการแย่งชิงสล็อตที่มีจำนวนสล็อตน้อยลงทำให้เกิดการชนกันของแท็กสูงขึ้นนั่นเอง ตามตารางที่ 5.1 ที่มาจากกราฟที่ 3.7 และ 3.8 ในบทที่ 3

ตารางที่ 5.1 ความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จสูงสุดต่อเฟรมจากบทที่ 3 กราฟที่ 3.7 และ 3.8

Tag \ Frame size=20	Psuc สูงสุดที่จุด K (slot)	Frame size \ Tag = 50	Psuc สูงสุดที่จุด K (slot)
N = 30	7	M = 15	ประมาณ 1 ถึง 2
N = 40	5	M = 20	4
N = 50	4	M = 25	7
N = 60	3	M = 30	9

ส่วนที่ 2 รูปแบบและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ของการแบ่งกลุ่มเฟรมสล็อตอะโลฮา จะพบว่าประสิทธิภาพของระบบที่มีการแบ่งกลุ่มให้อีกกลุ่มมีขนาดต่างจากอีกกลุ่มมากๆ จะมีประสิทธิภาพดีกว่าแบบแบ่งกลุ่มให้ขนาดต่างกันน้อยหรือแบบ FSA ปกติในช่วงที่ขนาดสล็อตมีค่า 0.56 เท่าของจำนวนแท็ก หรือในสภาพที่ยังมีการแย่งชิงสล็อตที่สูง แต่ในการแย่งชิงสล็อตที่ต่ำหรือขนาดเฟรมสูงๆ การแบ่งกลุ่มแบบ 50-50 หรือการส่ง FSA ปกติจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า และขนาดเฟรมที่เหมาะสมต่อการส่งแพสซิฟแท็กเพื่อให้ระบบทำการส่งได้รวดเร็วที่สุดคือ 1.4 เท่าของจำนวนแท็ก ซึ่งสำหรับการใช้ขนาดเฟรมเป็น 1.4 เท่า ของแท็ก การส่งแพสซิฟแท็กที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดคือการส่งแบบแบ่งกลุ่มเป็น 50-50 ดังตารางที่ 5.2 และ 5.3

ตารางที่ 5.2 ขนาดเฟรมที่เหมาะสมในการส่งแพสซิฟแท็ก (M_{min_p}) จากกราฟรูปที่ 4.12 ในบทที่ 4

Tag	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
N = 20	1.45	1.4	1.5	1.4	1.25
N = 30	1.43	1.46	1.5	1.46	1.33
N = 40	1.45	1.45	1.42	1.4	1.25
N = 50	1.44	1.44	1.44	1.44	1.2
เฉลี่ย	1.44	1.43	1.46	1.42	1.25

ตารางที่ 5.3 จุดต่ำสุดของ overall tag read time จากกราฟรูปที่ 4.12 ในบทที่ 4

Tag	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
N = 20	185.4	179.1	194	217.6	239
N = 30	281.3	275	297.8	332.2	363.3
N = 40	377.1	370.8	401.1	446.7	487.2
N = 50	473	466.7	504.5	561.3	611.4

จากการทดลองทั้ง 2 ตอนจะพบว่าเราได้ใช้ประโยชน์จากรูปแบบการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นแบบพหุนามหรือมัลติโนเมียล มาใช้ในการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการส่งแท็กแบบเฟรมสล็อตอะโลฮาในการส่งรูปแบบต่างๆ ที่แท็กมีความสามารถในการสุ่มแท็กที่แตกต่างกัน ซึ่งการใช้สมการทวินามวิเคราะห์ความน่าจะเป็นแบบเดิมๆ ที่มีการนำเสนอมาในบทความวิจัยต่างๆ ยังไม่มีการนำเสนอมาก่อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

รูปแบบการวิเคราะห์แบบพหุนามที่เราได้ทำการนำเสนอไปนั้น ได้มีการวิเคราะห์การส่งเฟรมสล็อตอะโลฮาแบบแบ่งกลุ่มเพียง 2 กลุ่ม ให้แท็กทั้ง 2 กลุ่มมีค่าเท่ากัน และเป็นกรวิเคราะห์ขนาดเฟรมของแพสซิฟแท็กเท่านั้น ซึ่งทั้งนี้ผู้ทำวิจัยคิดว่ารูปแบบการวิเคราะห์นี้ยังสามารถมาใช้วิเคราะห์การแบ่งกลุ่มที่มากกว่า 2 กลุ่ม หรือการแบ่งกลุ่มที่จำนวนแท็กแต่ละกลุ่มไม่เท่ากันได้อีก นอกจากนี้ยังมีการส่งแท็กแบบแอ็กทีฟ ซึ่งเป็นแท็กที่ความสามารถสูงกว่าแพสซิฟ เนื่องจากเมื่อเครื่องอ่านสามารถอ่านแท็กใดได้แล้ว แท็กก็จะเปลี่ยนไปสถานะหลับ ไม่ต้องทำการส่งทุกรอบการส่งแบบแพสซิฟแท็ก และยังมีมีการนำเสนอแนวคิดอื่น ๆ มาคำนวณประสิทธิภาพอีก เช่น การเกิด capture effect ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลทับกันของแท็ก แต่ไม่เกิดการสูญเสีย เนื่องจากกำลังการส่งที่สูงกว่าของแท็ก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Klaus Finkenzeller. 2010. RFID handbook: fundamentals and applications in contactless smart cards, radio frequency identification and near-field communication, Third edition. West Sussex : John Wiley & Sons.
- [2] ประสิทธิ์ ทิมพุดิ และไพโรจน์ ไววานิชกิจ. 2549. เทคโนโลยี RFID. กรุงเทพฯ : ดอกหญ้า.
- [3] ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์, วีระศักดิ์ ชื่นตามสัญญา ควรคิด, วิโรจน์ บัวงาม และหฤทัย ดิ้นสกุล. 2552. ระบบบ่งชี้ด้วยความถี่วิทยุ. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [4] Rom, R., and M. Sidi. 1998. Multiple Access Protocols Performance and Analysis. New York: Springer-Verlag.
- [5] William Feller. 1968. An Introduction to probability Theory and its Applications. Vol.1. Third Edition. New York : John Wiley & Sons.
- [6] วินัส พิษวณิชย์ และชินนะพงษ์ บำรุงทรัพย์. 2547. ทฤษฎีความน่าจะเป็นพื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ : ปรกาศพริก.
- [7] สุวิพล สิริชีวะภาค. 2551. ความน่าจะเป็นตัวแปรสุ่มและกระบวนการเฟ้นสุ่ม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : วิ.เจ.พรินติ้ง.
- [8] วีระศักดิ์ ชื่นตา, สัญญา ควรคิด และปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์. “เทคโนโลยีอาร์เอฟไอดีและการประยุกต์ใช้งาน.” [Online]. Available : [http://www.ecti-thailand.org/emagazine/ views/60](http://www.ecti-thailand.org/emagazine/views/60). 2557.
- [9] กนกพร อินทร์ทอง. “รู้จักกับ RFID.” [Online]. Available : <http://share.psu.ac.th/blog/recreation/22790>. 2555.
- [10] Apitrack. “Identificadores RFID.” [Online]. Available : http://www.apitrack.com/servicios/rfid_es_open.htm. 2014.
- [11] ศิริภาววรรณ บรรยง และเสนา ณ อยุธยา. “RFID และการประยุกต์ใช้งาน.” [Online]. Available : <http://bosstwowgun.exteen.com/>. 2552.
- [12] Ponent2002. “Tags.” [Online]. Available : <http://www.ponent2002.com/2012/02/etiquetes .html>. 2014.
- [13] ธวัชชัย บุญช่วยชีพ. “ส่วนประกอบของRFID.” [Online]. Available : <http://www.xsense.co.th /th/node/207>. 2557.
- [14] Maxell. “Small RFID Tag: Coil-on-Chip RFID System.” [Online]. Available : http://biz.maxell.com/en/product_security/?pci=7&pn=sp0006. 2557.
- [15] Bin Zhen, Mamoru Kobayashi and Masashi Shimizu. “Frame ALOHA for Multiple RFID Objects Identification,” Proceeding of IEICE Trans Communications. Vol.E88-B, No. 3, March 2005. pp. 991-999

- [16] Su-Ryun Lee, Sung-Don Joo, and Chae-Woo Lee. "An Enhanced Dynamic Framed Slotted ALOHA Algorithm for RFID Tag Identification," **The Proceeding of the 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems**. 2005.
- [17] D.K. Klair, K. Chin and R. "Read. On the Suitability of Framed Slotted Aloha based RFID Anti-collision Protocols for Use in RFID-Enhanced WSNs," **Proceeding of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks ICCCN 2007**. Aug 2007. pp 583-590
- [18] Seungnam Kang and Zornitza Prodanoff (2011). "RFID Model for Simulating Framed Slotted ALOHA Based Anti-Collision Protocol for Muti-Tag Identification," **Current Trends and Challenges in RFID**. Prof. Cornel Turcu(Ed.), InTech, July 2011. pp 279 - 304
- [19] Der-Jiunn Deng and Hsuan-Wei Tsao. "Optimal Dynamic Framed Slotted ALOHA Based Anti-collision Algorithm for RFID Systems," **Wireless Personal Communications**. Volume 59, Issue 1. July 2011. pp 109 – 122.
- [20] Xu Huang and Son Le. "Efficient Dynamic Framed Slotted ALOHA for RFID Passive Tags," **Advanced Communication Technology**. No 9, vol 1, Feb 2007. pp 94 – 97.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] ณัฐพล มุลศิริ และ สุวิพล สิทธีชีวะภาค. “การวิเคราะห์ผลการทำงานของการแจกแจงแบบพหุนามของเฟรมอะโลฮาสำหรับ RFID หลายช่องสัญญาณ” การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 36 (EECON 36).” ปีที่ 36 ฉบับที่ 2 วันที่ 11 – 13 ธันวาคม 2556. หน้า 519 – 522
- [2] Bancha Lertmaneeakarn, Natthapol Moolsiri, Thanyawarat Pawasopon and Suvepon Sittichivapak. “Performance Analysis of Multinomial Distribution of Group Assignment Framed ALOHA for Multiple RFID,” International Conference Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2014). May 2014.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36

The 36th Electrical Engineering Conference (EECON 36)

11-13 ธันวาคม 2556

ณ เฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท จ.กาญจนบุรี



มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
72 ปี
2488-2560

Volume 2

- (CM) ไฟฟ้าสื่อสาร
- (EL) อิเล็กทรอนิกส์
- (PH) ไฟโตนิคส์
- (CT) ระบบควบคุม
และการวัดคุม
- (DS) การประมวล
สัญญาณดิจิทัล
- (CP) คอมพิวเตอร์
และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- (GN) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
กับวิศวกรรมไฟฟ้า
- (BE) วิศวกรรมชีวการแพทย์

Electrical Engineering Dept.

Faculty of Engineering

Kasetsart University

50 Ngamwongwan Road Laksi

Chatuchak Bangkok 10900

Tel: 02-797-0999 ext 1503; 1504

Fax: 02-579-7566



L&E



การวิเคราะห์ผลการทำงานของการแจกแจงแบบพหุนามของเฟรมอะโลฮาสำหรับ RFID หลายช่องสัญญาณ

Performance Analysis of Multinomial Distribution of Framed ALOHA for Multiple RFID

ณัฐพล มุลศิริ สุวิพล สิริชีวะภาค

ภาควิชาโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2737-2500-47 ต่อ 5028 E-mail: argamool@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอรูปแบบการวิเคราะห์ใหม่โดยการใช้การแจกแจงแบบพหุนามหรือมัลติโนเมียลเป็นพื้นฐานในการสร้างรูปแบบเพื่อการวิเคราะห์การทำงานของ RFID แบบหลายช่องสัญญาณซึ่งใช้โปรโตคอลเฟรมสล็อตอะโลฮาในการรับส่งข้อมูล อัลกอริทึมที่ใช้ในการรวบรวมค่าในการส่งสำเร็จในแต่ละรูปแบบได้ถูกนำเสนอเพื่อใช้คำนวณหาความน่าจะเป็นของแต่ละสล็อตที่ส่งสำเร็จ

คำสำคัญ: อาร์เอฟไอดี, เฟรมสล็อตอะโลฮา, การแจกแจงแบบพหุนาม

Abstract

This paper presents a new analytical model based on multinomial distribution for analyzing the performance of multichannel RFID which uses frame slotted ALOHA protocol for data transmission and reception. The proposed algorithm is used to collect successful transmission in each pattern for calculating the probability of each successful slots.

Keyword: RFID, framed slotted ALOHA, multinomial distribution.

1. บทนำ

Radio Frequency Identification (RFID) คือ ระบบ ระบุลักษณะของวัตถุด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่มีการพัฒนาจากระบบบาร์โค้ดโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการสัมผัสเพราะลักษณะการส่งผ่านกำลังงานและข้อมูลระหว่างแท็กและเครื่องอ่านจะอาศัยคลื่นความถี่วิทยุ เป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้งานหลายด้าน เช่น โลจิสติกส์ ระบบคลังสินค้า ร้านค้าปลีก สาขาการผลิตในโรงงานและอื่นๆอีกมากมาย

ปัญหาที่พบในระบบ RFID นี้คือ การชนกันของข้อมูลซึ่งมักเกิดขึ้นเมื่อมีแท็กจำนวนมากเข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของ

ตัวเครื่องอ่าน ดังนั้นจึงได้มีโปรโตคอลที่จะป้องกันการเกิดการชนกันขึ้นซึ่งโปรโตคอลที่นิยมใช้คือ โปรโตคอลอะโลฮาได้แก่ pure ALOHA, slotted ALOHA และ frame slotted ALOHA [4],[5] และจะใช้สมการโบนีเมียลในการหาความน่าจะเป็นของการส่ง

ในบทความนี้เป็นการศึกษาระบบ RFID ที่ใช้โปรโตคอล frame slotted ALOHA ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 2 และได้ใช้สมการมัลติโนเมียล[3] ในการออกแบบและจำลองระบบเพื่อทำการคำนวณหาความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จของระบบในแต่ละช่วงที่มีการช่วงซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 3 ต่อไป และหัวข้อที่ 4 เป็นผลการวิเคราะห์ระบบ หัวข้อที่ 5 เป็นการสรุปผล

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

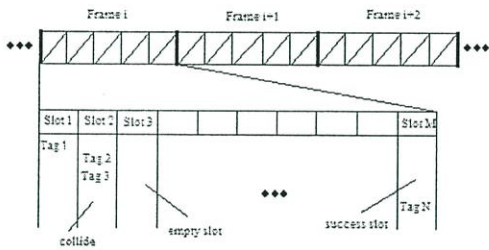
2.1 ระบบ RFID

สถาปัตยกรรมของระบบ RFID โดยทั่วไปประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ระบบสื่อสารส่วนหน้าและระบบซอฟต์แวร์ส่วนหลัง ในส่วนของระบบสื่อสารส่วนหน้าประกอบด้วย แท็ก ตัวอ่านข้อมูล สายอากาศ (Antenna) และโปรโตคอลในระบบ RFID โดยทั่วไปแท็กสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ แท็กชนิดพาสซีฟ (Passive tags) ซึ่งไม่มีแหล่งพลังงานเป็นของตัวเอง ทำงานโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากการเหนี่ยวนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวอ่านข้อมูล ส่วนแท็กชนิดเซมิพาสซีฟ (Semi-Passive tags) มีแหล่งกำเนิดพลังงานเป็นของตัวเอง เช่น แบตเตอรี่ในตัว หรือต่อแหล่งจ่ายจากภายนอก และแท็กชนิดแอคทีฟ (Active tags) มีแหล่งกำเนิดพลังงานเป็นของตัวเองและมีความสามารถในการสื่อสารแบบฟูลดูเพล็กซ์ได้ ตัวอ่านแท็กทำหน้าที่ตรวจจับและอ่านหรือบันทึกข้อมูลแท็กที่อยู่ภายในของตัวอ่าน (Interrogation region) สายอากาศทำหน้าที่รับหรือส่งสัญญาณคลื่นวิทยุระหว่างแท็กกับตัวอ่านระบบซอฟต์แวร์ส่วนหลังประกอบด้วย Middleware และการประยุกต์สนับสนุนด้านการเก็บข้อมูลการประมวลผลข้อมูล และอื่นๆ [1]

2.2 Frame Slotted Aloha of RFID System

ปริมาณแท็กจำนวนมากเข้ามาอยู่ในบริเวณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดการแข่งกันในการแข่งชิงเข้าถึงมากขึ้น เป็นผลให้เกิดการชนกันของข้อมูลมากขึ้นตาม ทำให้สมรรถนะของระบบลดลง การจะรับข้อมูลแท็กหลายอันนั้นทั้งแท็กและเครื่องอ่านต้องได้รับการออกแบบให้รองรับสถานะที่มีแท็กมากกว่า 1 ไม่นั้นแล้วสัญญาณพาหะก็จะมีการส่งออกในเวลาเดียวกันทำให้เกิดการชนกันของสัญญาณ (collision) จะทำให้ไม่มีข้อมูลใดๆส่งถึงตัวเครื่องอ่านเลย

เฟรมสล็อตอะโลฮา(FSA)เป็นโปรโตคอลที่ได้รับการพัฒนาจากระบบเฟรมอะโลฮา และสล็อตอะโลฮา[2] โดย FSA มีหลักการคือจะทำการแบ่งช่วงเวลาเล็ก ๆ การส่งข้อมูลจะทำการส่งเมื่อมีการเริ่มต้นของสล็อตและต้องเสร็จสิ้นเมื่อสิ้นสุดสล็อตนั้นๆ สำหรับ FSA จะมีการรวมสล็อตเป็นกลุ่มเข้าไปเป็น 1 เฟรม ซึ่งแท็กแต่ละตัวจะส่งข้อมูลได้ 1 ครั้งต่อ 1 เฟรม เมื่อเกิดการชนกัน แท็กจะทำการหน่วงเวลาแบบสุ่มรอในเฟรมถัดไป โดยที่ขนาดของเฟรมจะเป็นแบบตายตัวหรือเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการใช้งาน



รูปที่ 1 The Frame slotted ALOHA scheme

จากรูปแบบการทำงานของโปรโตคอล FSA ได้ถูกนำมาใช้เป็นวิธีการป้องกันการชนกัน [4],[5] และในแต่ละรอบสามารถคำนวณการตอบสนองของระบบได้โดยสมการโบนีเยล และในส่วนของงานวิจัยนี้ได้มีการใช้วิธีการที่จะลดการชนกันของแท็กโดยใช้หลักการหาความน่าจะเป็นแบบมัลติโบนีเยล ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

3. รูปแบบการวิเคราะห์ระบบ

สำหรับแบบวิเคราะห์การช่วงชิงสล็อตสำหรับ RFID ของเราได้มีวิธีการเลือกสล็อตตามทฤษฎีความน่าจะเป็นแบบมัลติโบนีเยล[3] เพื่อให้แสดงถึงความน่าจะเป็นในการช่วงชิงสล็อตของแต่ละสล็อต โดยมีขั้นตอนการพิจารณาดังนี้

3.1 รูปแบบวิธีการเชิงตัวเลข

บทความนี้ได้พัฒนาความน่าจะเป็นในการเข้าถึงข้อมูลโดยให้จำนวนแท็กทั้งหมดคือ N, จำนวนสล็อตที่มีการช่วงชิงในแต่ละเฟรมคือ M และให้ K คือแท็กที่ทำการส่งในสล็อตช่วงชิงสำเร็จ โดยที่จำนวนของแท็กในสล็อตที่ 1 ถึงสล็อตที่ K มีสล็อตละ 1 จำนวนของแท็กในสล็อตที่ K+1 ไปจนถึงสล็อตที่ M มีค่าไม่เท่ากับ 1 และจำนวนแท็กในสล็อตที่ K+1 ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ K+1+1 ไปเรื่อยๆจนถึงสล็อตที่ M

ตารางที่ 1 Successful Patterns

Slot No. Possible pattern	1	2	3	...	K	K+1	K+2	...	M
1	1	1	1	...	1	$a_{1,K+1}$	$a_{1,K+2}$	...	$a_{1,M}$
2	1	1	1	...	1	$a_{2,K+1}$	$a_{2,K+2}$	...	$a_{2,M}$
3	1	1	1	...	1	$a_{3,K+1}$	$a_{3,K+2}$	...	$a_{3,M}$
...						...			
i	1	1	1	...	1	$a_{i,K+1}$	$a_{i,K+2}$	...	$a_{i,M}$

จำนวนของแท็กในสล็อต K + 1 ในแถวแรกคือ N - K และจำนวนของแท็กในสล็อต K + 2 ถึง M คือ 0 จากนั้นแถวต่อไปจำนวนของแท็กในสล็อต K + 1 คือ N - K - 1 ไปเรื่อยๆ จำนวนแท็กในสล็อตของ K + 2 ก็จะมีค่าเป็นจำนวนที่เหลือนอกจาก K และ K + 1 และจะทำการเก็บค่าทั้งแถวใน output เฉพาะที่มีแท็กในสล็อตไม่เท่ากับ 1 และ แท็กใน K + 1 ต้องมากกว่าแท็กในสล็อตถัดไปตามลำดับจนถึง M จากนั้นก็จะเก็บค่าทั้งแถวที่มีจำนวนแท็กใน K + 1 มากกว่า 1 และจำนวน K + 2 มากกว่า 3 ลงใน suboutput เพื่อที่จะนำมาทำตามขั้นตอนเดียวกันใน K + 2, K + 3 ... M โดยมีข้อแม้เดียวกันว่าทุกสล็อตห้ามเป็น 1 และสล็อตหลังต้องมีจำนวนน้อยกว่าหรือเท่ากับสล็อตหน้าและเก็บค่าลงใน output ดังตัวอย่างในตารางที่ 2 ที่สมมุติให้ N = 14, M = 10, K = 6 โดยผลสำเร็จแล้วจะได้ output ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการเก็บค่า output และ suboutput

Slot No Pattern	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เก็บค่าที่
1	1	1	1	1	1	1	8	0	0	0	out
2	1	1	1	1	1	1	7	1	0	0	ไม่เก็บ
3	1	1	1	1	1	1	6	2	0	0	out
4	1	1	1	1	1	1	5	3	0	0	out
5	1	1	1	1	1	1	4	4	0	0	s&o
6	1	1	1	1	1	1	3	5	0	0	sub
7	1	1	1	1	1	1	2	6	0	0	sub

ตารางที่ 3 Example Successful Patterns

Slot No \ Pattern	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	1	1	1	8	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	6	2	0	0
3	1	1	1	1	1	1	5	3	0	0
4	1	1	1	1	1	1	4	4	0	0
5	1	1	1	1	1	1	4	2	2	0
6	1	1	1	1	1	1	3	3	2	0
7	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2

3.2 รูปแบบที่ใช้วิเคราะห์

การวิเคราะห์หาค่าความน่าจะเป็นเราสามารถใช้สมการมัลติโนเมียล[3] โดยกำหนดให้ N แท็กเข้าถึง M สล็อต ความน่าจะเป็นที่ N แท็กจะเลือกสล็อตคือ

$$\text{Prob}(N \text{ tags access to arbitrary slot}) = \frac{N!}{a_1! a_2! \dots a_M!} \quad (1)$$

เมื่อ a_1, a_2, \dots, a_M คือจำนวนของแท็กในแต่ละสล็อตตั้งแต่สล็อตที่ 1 ถึง M และความน่าจะเป็นที่ M สล็อตถูกรอครอบครองโดยแท็กคือ

$$\text{Prob}(M \text{ slots have been occupied by arbitrary tags}) = \frac{M!}{b_1! b_2! \dots b_N!} \quad (2)$$

เมื่อ b_1, b_2, \dots, b_N คือจำนวนของสล็อตที่มีจำนวนแท็กเท่ากับ 1 ในแต่ละสล็อต เช่น a_1, a_2, a_3 มีจำนวนแท็กเท่ากับ 1 จะได้ $b_1 = 3$

จากสมการ(1),(2) เมื่อ N คือจำนวนแท็กในระบบและ M คือจำนวนสล็อตใน 1 เฟรม จะหาความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ของแต่ละเฟรมได้ดังนี้

$$P\{a_1, a_2, \dots, a_M\} = \frac{N!}{a_1! a_2! \dots a_M!} \frac{M!}{b_1! b_2! \dots b_N!} P_1, P_2, \dots, P_N \quad (3)$$

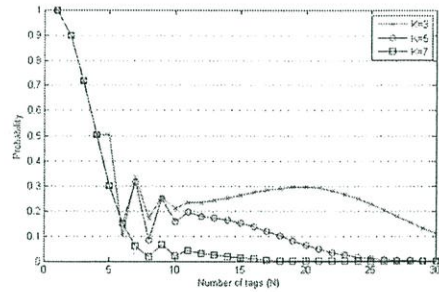
โดยที่ P_1, P_2, \dots, P_N คือความน่าจะเป็นของแต่ละสล็อต ซึ่งเราจะพิจารณาเฉพาะรูปแบบที่ประสบความสำเร็จ นั่นคือกรณีที่จำนวนแท็กที่เข้าถึงสล็อตที่ 1 ถึง สล็อตที่ K เท่ากับ 1 นั่นคือ $a_1 = a_2 = \dots = a_K = 1$ และในสล็อตอื่นๆไม่เท่ากับ 1 นั่นคือ $a_{K+1}, a_{K+2}, \dots, a_M \neq 1$ จะได้ความน่าจะเป็นที่จะประสบความสำเร็จ (Success probability P_{suc}) คือผลรวมของความน่าจะเป็นของแต่ละรูปแบบที่เป็นไปได้ที่จะประสบความสำเร็จทั้งหมด $P\{a_1, a_2, \dots, a_M\}$

$$P_{suc} = \sum_{a_1 = a_2 = \dots = a_K = 1, a_{K+1}, a_{K+2}, \dots, a_M \neq 1} P\{a_1, a_2, \dots, a_M\} \quad (4)$$

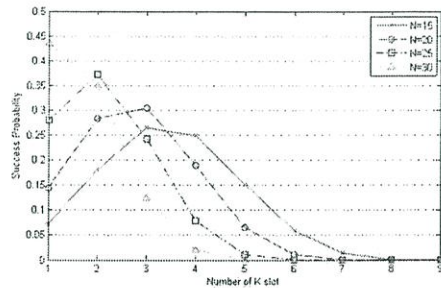
4. ผลการวิเคราะห์ระบบ

ในหัวข้อนี้จะทำวิเคราะห์จากความน่าจะเป็นของการส่งข้อมูลสำเร็จ(4) ว่าแต่ละแท็กที่ส่งข้อมูลสำเร็จมีผลอย่างไรต่อการเพิ่มขึ้นและลดลงของจำนวนสล็อตและจำนวนแท็ก

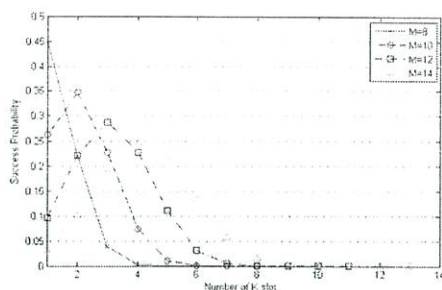
การทดลองแรกเราต้องการเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นของแต่ละแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่ง ในเหตุการณ์จำนวนสล็อตเท่ากัน จึงได้กำหนดสล็อตในเหตุการณ์เป็น 10 สล็อต ให้จำนวนแท็กตั้งแต่ 1 ถึง 30 และกำหนดให้มีสล็อตที่ประสบความสำเร็จในการส่งเป็น 3, 5 และ 7 สล็อตตามลำดับ จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนแท็กในแกน x มีมากขึ้นความน่าจะเป็นที่ประสบความสำเร็จจะมีค่าค่อยๆลดลงตามลำดับ เนื่องจากมีการชนกันมากตามการแข่งขันของแท็กที่มากขึ้น นอกจากนี้จะเห็นว่าในแต่ละจำนวนแท็กที่เท่ากับกราฟเส้นที่ K = 3 จะมีค่าสูงสุด ตามด้วย K = 5 และ 7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนแท็กที่ประสบความสำเร็จในการส่งมีจำนวนมากขึ้น ค่าความน่าจะเป็นที่ประสบความสำเร็จก็จะมีค่าน้อยลง



รูปที่ 2 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่มีจำนวนแท็กตั้งแต่ 1 ถึง 30 และมี K เป็น 3, 5 และ 7



รูปที่ 3 กราฟแสดงความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จ เมื่อกำหนดให้ M เท่ากับ 10, N เท่ากับ 15, 20, 25 และ 30



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสำเร็จในการส่งข้อมูลสำเร็จ เมื่อกำหนดให้ N เท่ากับ 25, M เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14

จากรูปที่ 3 เราต้องการเปรียบเทียบความสำเร็จในการส่งแท็กสำเร็จในแต่ละระบบที่จำนวนแท็กต่างกันแต่จำนวนสล็อตเท่ากัน ทำการวิเคราะห์ระบบโดยกำหนดให้จำนวนสล็อตเท่ากับ 10 และจำนวนแท็กในระบบมี 4 ค่า คือ 15, 20, 25, 30 จากกราฟแสดงความสำเร็จในการส่งแท็กสำเร็จแต่ละค่าจะเห็นได้ว่าในช่วง K เท่ากับ 4 ไปถึง 9 เส้นที่แทนจำนวนแท็กเท่ากับ 15 มีความน่าจะเป็นที่ประสบความสำเร็จมากที่สุด ตามด้วยจำนวนแท็กเท่ากับ 20, 25, 30 ตามลำดับ แต่ถ้าดูจากช่วง K เท่ากับ 1 ถึง 3 จะเห็นได้ว่าเริ่มจาก K เท่ากับ 1 จำนวนแท็กเท่ากับ 30 จะมีค่าความสำเร็จที่ประสบความสำเร็จมากที่สุด ตามด้วยจำนวนแท็กเท่ากับ 25, 20, 15 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่จำนวนสล็อตเท่ากันยิ่งแท็กในระบบมีจำนวนน้อยโอกาสที่จะส่งแท็กได้มากก็จะสูงขึ้น และถ้าแท็กในระบบมีจำนวนมากโอกาสในการส่งแท็กได้น้อยก็จะมากขึ้นตาม ซึ่งเป็นผลมาจากการแย่งชิงสล็อตของจำนวนแท็กในระบบที่มากขึ้น

จากรูปที่ 4 เราต้องการเปรียบเทียบความสำเร็จในการส่งแท็กสำเร็จในแต่ละระบบที่จำนวนสล็อตต่างกันจำนวนแท็กเท่ากัน โดยกำหนดให้จำนวนแท็กในระบบเท่ากับ 25 และจำนวนสล็อตมี 4 ค่า คือ 8, 10, 12 และ 14 จากกราฟแสดงความสำเร็จในการส่งแท็กสำเร็จแต่ละค่าจะเห็นได้ว่าในช่วง K เท่ากับ 4 เป็นต้นไป เส้นที่แทนจำนวนสล็อตเท่ากับ 14 มีความน่าจะเป็นที่ประสบความสำเร็จมากที่สุด ตามด้วยจำนวนสล็อตเท่ากับ 12, 10, 8 ตามลำดับ แต่เมื่อ K เท่ากับ 1 ถึง 3 จะกลับกันคล้ายกับกราฟรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถ้าแท็กในระบบเท่ากันแล้วยิ่งสล็อตมีจำนวนมากโอกาสในการส่งแท็กได้มากก็จะสูงขึ้น และถ้าสล็อตมีจำนวนน้อยโอกาสในการส่งแท็กได้น้อยก็จะมากขึ้นตาม ซึ่งเป็นผลจากการแย่งชิงสล็อตของแท็กในระบบที่จำนวนสล็อตน้อยนั่นเอง

5. สรุป

บทความนี้ได้เสนอรูปแบบการวิเคราะห์หาความน่าจะเป็นในการส่ง RFID แบบหลายช่องสัญญาณที่ได้ใช้โปรโตคอล frame slotted

ALOHA ในการส่ง และใช้สมการมัลติโนเมียลในการวิเคราะห์เพื่อหาความน่าจะเป็นของแต่ละสล็อตที่ทำการส่งสำเร็จ ทำให้เห็นถึงความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลสำเร็จในแต่ละสล็อตที่ทำการส่งสำเร็จของแต่ละเหตุการณ์แย่งชิงสล็อตต่างๆ ซึ่งต่างจากแบบไปโนเมียลที่หาความน่าจะเป็นได้เพียงที่ละการช่วงชิงเท่านั้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Finkenellere, "RFID Handbook Fundamentals and Application in Contactless Smart Cards and Identification", C2003.
- [2] Rom, R., and M. Sidi, Multiple Access Protocols Performance and Analysis, New York: Springer-Verlag,1998.
- [3] William Feller, "An Introduction to probability Theory and its Applications Vol.I Third Edition" John Wiley & Sons, Inc., 1968
- [4] D.K. Klair, K. Chin and R. Read, On the Suitability of Framed Slotted AloHa based RFID Anti-collision Protocols for Use in RFID-Enhanced WSNs, Proceeding of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks ICCCN 2007, page 583-590, 13-16 Aug.2007.
- [5] Bin Zhen, Mamoru Kobayashi and Masashi Shimizu, Frame ALOHA for Multiple RFID Objects Identification, Proceeding of IEICE Trans Communications, Vol. E88-B, No. 3, age 91-999, March, 2005



นายณัฐพล มุลศิริ สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วศ.บ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2552 ปัจจุบันกำลังศึกษาปริญญาโทที่สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ งานวิจัยที่สนใจคือการผลิตสารสนเทศของข้อมูลในการสื่อสารไร้สาย



รศ.ดร. สุวิท สิทธีชีวภาค สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก Ph.D จากมหาวิทยาลัยโคเบะ ปี 2534 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจคือการผลิตสารสนเทศของข้อมูลในการสื่อสารไร้สาย

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพล มุลศิริ เกิดเมื่อวันที่ 18 เดือน ตุลาคม ปี พ.ศ. 2530 ที่ อำเภอเมือง จังหวัดเลย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2552 และจากนั้นปี พ.ศ. 2554 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในสาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง