

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบบลูทูธด้วยการควบคุมการไหล  
ในช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN

PERFORMANCE EVALUATION OF BLUETOOTH SYSTEM WITH FLOW  
CONTROL VIA AWGN CHANNELS



วพ.  
ณ 119 ก  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 67441  
วัน,เดือน,ปี..... 15 S.A. 2549

b. 11671063  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ISBN 974-15-2829-9  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PERFORMANCE EVALUATION OF BLUETOOTH SYSTEM WITH FLOW  
CONTROL VIA AWGN CHANNELS**



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

**2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ISBN 974-15-2829-9  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2006**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของระบบบลูทูธด้วยการควบคุมการไหลและการเข้ารหัสในช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN
นักศึกษา	นายณัฐพนธ์ กิติโกพะ
รหัสนักศึกษา	47061009
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2549
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุวิพล ลิทธิชีวีภาค

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอเกี่ยวกับระบบบลูทูธซึ่งเป็นระบบที่ใช้พลังงานต่ำในการสื่อสารแบบไร้สาย ในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ ซึ่งถูกรบกวนการทำงานจากสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณแบบ AWGN ในวิทยานิพนธ์ ได้ทำการจำลองรูปแบบการทำงานของบลูทูธ การปรับปรุงประสิทธิภาพการสื่อสารระบบบลูทูธเพื่อค่าวิสัยสามารถเพิ่มขึ้น และวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอการปรับปรุงระบบบลูทูธด้วยการใช้ การควบคุมการไหลข้อมูลแบบ TCP ร่วมกับการเข้ารหัสข้อมูลแบบรีด โซโลมอนในการส่ง เพื่อแก้ปัญหา การสูญหายของชุดข้อมูล และ การผิดพลาดของชุดข้อมูลอันเป็นผลจากช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN ซึ่ง TCP และการเข้ารหัสแบบรีด โซโลมอน มีประสิทธิภาพสูงในด้านการส่งข้อมูลในระบบบลูทูธ ได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มสูงขึ้น

<b>Thesis Title</b>	Performance Evaluation of Bluetooth System with Flow Control and Coding via AWGN Channels.
<b>Student</b>	Mr. Natapon Kitikora
<b>Student ID.</b>	47061009
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Telecommunications Engineering
<b>Year</b>	2006
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Suvepon Sittichivapak

### ABSTRACT

This thesis studies performance of Bluetooth system which is wireless standard for low power wireless communications between mobile devices in Additive White Gaussian Noise (AWGN). In this thesis, the physical layer of the system is modeled by using component-based architecture. In addition, TCP and Reed Solomon code (RS code) are proposed for solving packet loss and packet correcting due to AWGN Channels in Bluetooth system. The TCP and RS code provide the high efficiency and have a major role in data transmission for Bluetooth system. Therefore, TCP and RS code were chosen in order to propose the throughput with view towards enhancing the performance of Bluetooth system for AWGN channel in this thesis.

# กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สุวิพล สิทธีชีวภาค ที่ให้ คำปรึกษา และความรู้ในการทำงานวิจัย  
ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำเนิด อบรมสั่งสอน โอกาส และกำลังใจในการศึกษาทำ  
วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ อีกทั้งช่วยเหลือค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ ใจ  
และแรง ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ อาจารย์ พี พิณุกนิค และพีเก่ง ที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำด้านภาษาอังกฤษ

ขอขอบคุณ เพื่อนโทรคม8ทุกคน พี่โจชยา พี่โจหญิง พี่แป็บ พี่จูน พี่ป๊วย พี่แพท พี่หน้อย พี่  
เป็ด พี่ตาล จีบ อีกทั้ง สมาชิกห้อง T304 ทุกคน ที่ช่วยให้คำแนะนำ มิตรภาพ และกำลังใจในการทำ  
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐพนธ์ กิติโกพะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **III** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 กล่าวนำ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 เทคโนโลยีบลูทูธ.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 เทคโนโลยีระบบบลูทูธ IEEE 802.15.....	5
2.2.1 โครงสร้างระบบบลูทูธ.....	6
2.2.2 ระดับกำลังงานระบบบลูทูธ.....	8
2.2.3 ช่วงเวลา.....	9
2.2.4 การเชื่อมต่อข้อมูลเสียงและข้อมูลดิจิทัล.....	10
2.2.4.1 การเชื่อมต่อข้อมูลเสียง.....	10
2.2.4.2 การเชื่อมต่อข้อมูลดิจิทัล.....	10
2.3 แพคเกจของระบบบลูทูธ.....	11
2.3.1 โครงสร้างแพคเกจบลูทูธ.....	11
2.3.1.1 ส่วนรหัสการเข้าถึง.....	11
2.3.1.2 ส่วนหัว.....	14
2.3.1.3 ส่วนข้อมูล.....	16
2.3.2 ชนิดของแพคเกจบลูทูธ.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IV ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.1	แพคเกตที่ใช้ทั้งในการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสและแบบอะซิงโครนัส.....	18
2.3.2.2	แพคเกตที่ใช้ในการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัส.....	18
2.4	บทสรุปของแพคเกตบลูทูธ.....	19
บทที่ 3	ความรู้พื้นฐาน.....	21
3.1	ช่องสัญญาณรบกวนขาวววกเกาส์ (AWGN).....	21
3.2	การมอดูเลตแบบ Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK).....	22
3.3	การควบคุมการไหลแบบ TCP สำหรับการสื่อสารไร้สาย.....	22
3.3.1	ทรานสมิสชันคอนโทรลโพรโทคอล (Transmission Control Protocol: TCP).....	23
3.3.2	การใช้งาน TCP บนเครือข่ายไร้สาย.....	28
3.3.3	การตรวจตรา.....	31
3.3.4	การตรวจตราในเวลาเดียวกัน.....	33
3.4	ทฤษฎีการเข้าคิวแบบ M/M/1.....	34
3.4.1	ค่าพารามิเตอร์และค่าการเริ่มต้นในการคำนวณสำหรับการเข้าคิวแบบ M/M/1.....	35
3.4.2	เวลาในระบบหรือเวลาการเข้าคิว (Time-in-System or Queuing Time).....	36
3.4.3	เวลาการรอ (Waiting Time).....	37
3.5	การวัดค่าทางสถิติของแบบจำลอง.....	37
3.6	การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (TDMA).....	39
บทที่ 4	การเข้ารหัส.....	41
4.1	กล่าวนำ.....	41
4.2	รหัสลิเนียร์บล็อก (Linear block code).....	43
4.2.1	ค่าพารามิเตอร์ของรหัสลิเนียร์บล็อก.....	44
4.2.2	ความสามารถในการตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดของรหัสลิเนียร์บล็อก.....	45
4.3	รหัสโบเช-โชคชูรี-ฮ็อกเคิ่งเฮ็ม (Bose – Chaudhuri – Hocqenghem: BCH).....	47
4.4	รหัสรีค โซโลมอน (Reed Solomon : RS codes).....	47
บทที่ 5	แบบจำลองและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำลองแบบ.....	54
5.1	บทนำ.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 แบบจำลองระบบบดลูทที่มีการใช้งาน TCP โพรโตคอล.....	55
5.2.1 ภาคการรบกวน.....	56
5.2.2 การทำงานของ TCP โพรโตคอล.....	57
5.3 แบบจำลองระบบบดลูทที่มีการใช้งาน TCP โพรโตคอล ร่วมกับ REED SOLOMON CODE.....	59
5.3.1 ภาครหัสรีค โซโลมอน.....	61
5.4 ผลการจำลองแบบ.....	63
5.4.1 ประสิทธิภาพการทำงานในสภาวะการรบกวน.....	63
5.4.2 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบในสภาวะรบกวน ที่ทำงานร่วมกับ TCP โพรโตคอล.....	64
5.4.3 ประสิทธิภาพการทำงานของรหัสรีค โซโลมอน ต่อการทำงานของระบบบดลูท ที่สภาวะการรบกวนแบบ AWGN.....	65
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	72
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก.....	76
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	82

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ย่านความถี่ ISM.....	6
2.2 ประเภทของ Packet type ในการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสและแบบอะซิงโครนัส.....	16
2.3 แพคเกจที่ใช้ควบคุมการเชื่อมต่อ.....	20
2.4 แพคเกจแบบซิงโครนัส.....	20
2.5 แพคเกจแบบอะซิงโครนัส.....	20
4.1 ตัวอย่างสภาวะบิตตรวจดู.....	43
4.2 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างคำรหัส.....	44
4.3 คำรหัสสัญลักษณ์.....	49
4.4 ตารางสรุปคำตอบรหัสของ RS(7,3).....	50
4.5 ค่าการวิเคราะห์ของรหัสรีดไซโลมอน.....	53



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การติดต่อสื่อสารภายในโครงข่ายแบบพีโคเน็ตแบบจุดถึงจุด และ แบบจุดถึงหลายจุด.....	6
2.2 การติดต่อสื่อสารภายในโครงข่ายแบบสแตทอร์เน็ต.....	7
2.3 การรวมกันของอุปกรณ์ที่ใช้ระดับกำลังงานแตกต่างกันในแต่ละพีโคเน็ต.....	8
2.4 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา.....	9
2.5 การกระโดดเปลี่ยนความถี่ของแพคเกจ.....	10
2.6 โครงสร้างแพคเกจบลูทูธ.....	11
2.7 โครงสร้างส่วนของรหัสการเข้ารหัสของแพคเกจบลูทูธ.....	12
2.8 โครงสร้างส่วนซิงโครไนซ์.....	12
2.9 บิตข้อมูลเทลเลอร์ (ก)เทลเลอร์เมื่อส่วนของการซิงโครไนซ์บิตสุดท้ายเป็น 0 .....	13
(ข)เทลเลอร์เมื่อส่วนของการซิงโครไนซ์บิตสุดท้ายเป็น 1.....	13
2.10 โครงสร้างของส่วนหัวของแพคเกจ.....	14
2.11 โครงสร้างส่วนข้อมูลของแพคเกจ.....	17
3.1 กระบวนการการเกิดสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ.....	21
3.2 การสื่อสารแบบปลายถึงปลายของ TCP.....	23
3.3 TCP ไทม์เอาท์และการส่งซ้ำ.....	24
3.4 ฟิลด์เบื้องต้นของ TCP เฮดเดอร์.....	25
3.5 การส่งข้อมูลพื้นฐานและ ACKs.....	26
3.6 การสูญหายและการส่งซ้ำข้อมูล.....	27
3.7 การเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายไร้สายและมีสาย.....	28
3.8 การทำงานของ TCP ระหว่างเครือข่ายมีสายไร้สาย.....	29
3.9 การส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อนของ TCP บนเครือข่ายไร้สาย (ก) การส่งจาก BS ไป MH.....	30
(ข)การส่งจาก MH ไป BS.....	30
3.10 วิธีการตรวจตราพร้อม.....	32
3.11 ประสิทธิภาพการส่งของวิธีการตรวจแบบพร้อมกัน.....	32
3.12 วิธีการตรวจตราในขณะเดียวกัน.....	33
3.13 ประสิทธิภาพการส่งของวิธีการตรวจแบบพร้อมกัน.....	34
3.14 ค่าพารามิเตอร์ของการเข้าคิวแบบ M/M/1.....	35
3.15 เวลาในระบบของการเข้าคิวแบบ M/M/1.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แล VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แผนภาพของภาครับ-ส่งสัญญาณดิจิทัล.....	42
4.2 การเข้ารหัสบล็อก $(n,k)$ .....	44
4.3 การตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาด.....	45
4.4 แสดงบล็อกโคออดิเนตของรหัสรีด โซโลมอน.....	48
4.5 ผังการเข้ารหัสรีด โซโลมอน.....	50
4.6 วงจรการเข้ารหัส RS(7,3).....	50
5.1 แบบจำลองการทำงานระบบบลูทูธในช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN.....	54
5.2 ผังการทำงานระบบบลูทูธที่ทำงานผ่านช่องสัญญาณรบกวนแบบ AWGN.....	55
5.3 แบบจำลองการทำงานของการส่งข้อมูลผ่านการรบกวนแบบ AWGN.....	56
5.4 ค่าความผิดพลาดของข้อมูลเมื่อเจอสัญญาณรบกวนที่มีขนาดต่างกัน.....	56
5.5 จำนวนรอบเฉลี่ยของการส่งซ้ำ.....	58
5.6 ผังการทำงานระบบบลูทูธที่ทำงานผ่านช่องสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่มีการใช้การเข้ารหัสแบบรีด โซโลมอนร่วมด้วย.....	59
5.7 บล็อกโคออดิเนตของระบบ.....	61
5.8 ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดบิตผิดพลาดของรหัสรีด โซโลมอน $(n, k)$ (ข).....	62
5.9 ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณต่อค่าวิสัยสามารถ.....	63
5.10 ค่าวิสัยสามารถเมื่อนำ TCP โพรโตคอลร่วมกับการส่งข้อมูล.....	64
5.11 แสดงการเปรียบเทียบเมื่อมีการนำ TCP โพรโตคอลร่วมกับการส่งข้อมูล.....	65
5.12 ค่าวิสัยสามารถของรหัสรีด โซโลมอนขนาด RS(7,3).....	66
5.13 ค่าวิสัยสามารถของรหัสรีด โซโลมอนขนาด RS(15,7).....	67
5.14 ค่าวิสัยสามารถของรหัสรีด โซโลมอนขนาด RS(31,16).....	67
5.15 เปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถที่ SNR = 9dB การเปลี่ยนแปลงขนาดรหัสรีด โซโลมอน.....	68
5.16 เปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถที่ SNR = 10dBการเปลี่ยนแปลงขนาดรหัสรีด โซโลมอน.....	68
5.17 เปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถที่ SNR = 11dBการเปลี่ยนแปลงขนาดรหัสรีด โซโลมอน.....	69
5.18 วิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถที่มีการทำงานของ TCP และ รหัสรีด โซโลมอน ที่ SNR = 9dB.....	70
5.19 วิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถที่มีการทำงานของ TCP และ รหัสรีด โซโลมอน ที่ SNR = 10dB.....	70
5.20 วิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถที่มีการทำงานของ TCP และ รหัสรีด โซโลมอน ที่ SNR = 11dB.....	71

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารมีความจำเป็นต่อชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ตัวอย่างเช่น โทรศัพท์ อินเทอร์เน็ต เป็นต้น และเมื่อเทคโนโลยีด้านการสื่อสารได้มีความจำเป็นมากขึ้นก็ได้มีการพัฒนาให้เทคโนโลยีการสื่อสารให้มีความสะดวกมากขึ้น จากที่การสื่อสารเหล่านี้ต้องมีการใช้ระบบสาย ได้ถูกพัฒนาให้มีความสะดวกมากขึ้น โดย ไม่จำเป็นต้องใช้ระบบสาย กลายเป็นระบบการสื่อสารแบบไร้สาย ในการสื่อสารระบบไร้สายก็ได้มีการพัฒนาออกมามากหลายรูปแบบ ซึ่งการสื่อสารไร้สายที่ได้รับความนิยมและน่าสนใจในปัจจุบันนี้คือ ระบบบลูทูธ เหตุผลที่ระบบนี้ได้รับความนิยมเพราะว่า เป็นระบบไร้สายที่ราคาถูก ติดตั้งอุปกรณ์ได้ง่าย สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก อีกทั้งในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ทันสมัยก็ได้รับการติดตั้งและออกแบบมาให้ใช้งานกับระบบบลูทูธ ตัวอย่างเช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์แบบพกพา เครื่องพิมพ์ และ เครื่องสแกนเนอร์ เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้มีความจำเป็นในการใช้งานมากขึ้นในสำนักงาน

ในการใช้งานเทคโนโลยีบลูทูธ ได้รับการพัฒนาและวิจัยกันอย่างแพร่หลายเพื่อศึกษาปัญหาด้านต่างๆที่เกิดมาจาก ปัญหาด้านระยะทางของการติดต่อ ปัญหาการสูญหายของข้อมูล ปัญหาเหล่านี้ได้รับการศึกษาและแก้ไข หลากหลายวิธี ในปัญหาข้างต้นเกิดได้จากหลายสาเหตุ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ ได้สนใจปัญหาที่มีสาเหตุมาจากการรบกวนในช่องสัญญาณอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนขาวววกเกาส์ (Additive White Gaussian Noise: AWGN) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สนใจศึกษาและทำการปรับปรุง ด้วยการใช้นโยบายเทคโนโลยี TCP โพรโตคอล และ การเข้ารหัส มาศึกษาร่วมด้วยเพื่อให้ประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษารูปแบบการทำงานพื้นฐานของระบบบลูทูธ
- 2) เพื่อศึกษาปัญหาในการรับ-ส่งข้อมูลของระบบบลูทูธเมื่อเจอปัญหาการรบกวนในช่องสัญญาณ
- 3) เพื่อทำการศึกษาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลในระบบไร้สาย
- 4) เพื่อศึกษาวิธีการแก้ปัญหาอันมีผลมาจากสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อมีการใช้งานการสื่อสารในระบบบลูทูธในสำนักงานที่มีการใช้งานระบบพร้อมกัน ในบางสภาวะความถี่ใช้งานใกล้เคียงกันของระบบบลูทูธอาจเกิดการรบกวนและส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง และในสภาวะแวดล้อมที่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนขาวบวเกาส์ ดังนั้นการสื่อสารไร้สายในระบบบลูทูธได้รับผลกระทบทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษาวีธีแก้ไขโดยการควบคุมการไหลและการเข้ารหัสร่วมกัน เพื่อให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการสูญหายของแพคเกจลดลงและระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบบลูทูธที่มีการติดต่อสื่อสารในระบบโครงข่ายส่วนบุคคล โดยทำการส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ที่ปฏิบัติตัวเป็นมาสเตอร์กับสเลฟ โดยทำการมอดูเลตแบบ Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK) โดยทำการแปลงสัญญาณดิจิทัลออกมาในรูปคลื่นวิทยุในย่านความถี่ 2.4 จิกะเฮิร์ต โดยให้มีการควบคุมการไหลของข้อมูลโดยใช้เทคโนโลยีTCPโปรโตคอล และ ใช้การเข้ารหัสแบบ ริดโซโลมอน เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของระบบเมื่อเจอกับปัญหาการรบกวนในช่องสัญญาณจากสัญญาณรบกวนขาวบวเกาส์

### 1.5 ขอบเขตของงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษางานของระบบบลูทูธที่มีการติดต่อสื่อสารในโครงข่ายแบบพีโคเน็ตที่มีขนาดการติดต่อสูงสุดคือสเลฟจำนวน 7 เครื่องและมาสเตอร์ 1 เครื่อง โดยมีขอบเขตการติดต่อในรัศมี 10 เมตรจัดอยู่ในระดับ 3 เป็นระดับที่ใช้พลังงานน้อยที่สุดคือ 1 มิลลิวัตต์ซึ่งเป็นระบบที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ในระบบเราทำการให้มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนขาวบวเกาส์เพียงอย่างเดียวโดยปัญหาการชนกันของข้อมูลถูกทำการแก้ไขโดยการใช้ TCP โปรโตคอล ส่วนปัญหาการสูญหายของแพคเกจเราทำการแก้ไขด้วยการเข้ารหัส โดยกำหนดให้ เมื่อมีการเกิดการสูญหายของแพคเกจ หรือ แพคเกจข้อมูลเกิดการผิดพลาด ให้มีการร้องขอการส่งซ้ำจากผู้รับโดยอัตโนมัติ เมื่อ ผู้ส่งได้รับการร้องขอจะทำการส่งซ้ำทันที โดยสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณเรากำหนดโดยใช้อัตราสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) โดยทำการศึกษาในช่วง 9 เดซิเบล 10 เดซิเบล และ 11 เดซิเบล ซึ่งเป็นช่วงที่มีการเกิดปัญหา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในระดับปานกลางของสัญญาณรบกวนขาวววกเกาส์ และกำหนดการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา ระหว่างส่งข้อมูลเป็นตัวแปรในการกำหนดประสิทธิภาพในการส่ง โดยใช้ค่าวิสัยสามารถ (Throughputs) เป็นดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพ

## 1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงการทำงานพื้นฐานของเทคโนโลยีบลูทูธ ได้แก่ โครงสร้างของระบบ ลักษณะของแพ็คเกจ การเชื่อมต่อของระบบ ชนิดของแพ็คเกจ เป็นต้น

บทที่ 3 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ในบทนี้กล่าวถึง การมอดูเลต สัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณวิทยุ การทำงานของ TCP โพรโตคอลเพื่อควบคุมการไหลของข้อมูล และการเกิดสัญญาณรบกวน อันเป็นพื้นฐานของวิทยานิพนธ์

บทที่ 4 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของการเข้ารหัสเพื่อแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากปัญหาสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณ

บทที่ 5 แบบจำลองและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำลองแบบ

บทที่ 6 บทสรุปและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

## บทที่ 2

# เทคโนโลยีบลูทูธ

### 2.1 บทนำ

ในปัจจุบันบลูทูธเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก สามารถเห็นได้จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความจำเป็นในการสื่อสารส่วนใหญ่ ได้มีการพัฒนาเพื่อรองรับเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระบบนี้ ดังนั้นบลูทูธถือเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารอีกขั้นหนึ่ง บลูทูธถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในการใช้แทนที่การสื่อสารด้วยระบบสายระหว่างอุปกรณ์ ตัวอย่างเช่น การสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา กับ เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา หรือ การใช้ เครื่องพิมพ์ร่วม ระหว่างคอมพิวเตอร์ในสำนักงาน เป็นต้น เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายระบบบลูทูธ มีค่าใช้จ่ายต่ำ ใช้กำลังงานน้อย และใช้ย่านความถี่แคบ เป็นเหตุให้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

โดยมีประวัติการพัฒนามาจาก ในปี ค.ศ. 1994 บริษัทอิริคสัน (Ericsson) ซึ่งเป็นบริษัทสื่อสารที่ก่อตั้งที่ประเทศสวีเดน ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้สัญญาณวิทยุเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่ กับ อุปกรณ์เสริม โดยใช้กำลังงานต่ำและมีค่าใช้จ่ายน้อย โดยวัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาการใช้สายเคเบิล ระหว่าง โทรศัพท์เคลื่อนที่กับการ์ดพีซี คอมพิวเตอร์แบบพกพา หรืออุปกรณ์อื่น การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการที่ศึกษาผลจากการนำอุปกรณ์หลายชนิด ทำการเชื่อมต่อระหว่างระบบเน็ตเวิร์กเซลลูล่ากับ โทรศัพท์เคลื่อนที่ สุดท้ายการศึกษานี้ได้เลือกใช้การเชื่อมต่อด้วยสัญญาณวิทยุคลื่นสั้นเป็นการเชื่อมต่อสุดท้ายกับอุปกรณ์

การศึกษากการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของบริษัท อิริคสัน ได้รับความสนใจจาก บริษัทไอบีเอ็ม (IBM), บริษัทอินเทล (Intel), บริษัทโนเกีย (Nokia), และ บริษัทโตชิบา (Toshiba) จึงได้ร่วมก่อตั้งกลุ่มเพื่อศึกษาและวิจัยระบบบลูทูธขึ้นในเดือนพฤษภาคม ปี ค.ศ. 1998 ซึ่งได้เจริญเติบโตขึ้นกระทั่งมีสมาชิกมากกว่า 1500 บริษัท ภายในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2000 นับกว่ามีการเจริญเติบโตเร็วกว่าการก่อตั้งสมาคม หรือ กลุ่มการศึกษาด้านการสื่อสารไร้สายอื่น บริษัทเหล่านี้ได้ร่วมพัฒนามาตรฐานของระบบบลูทูธ 1.0 และได้นำออกเผยแพร่สู่สาธารณะเมื่อ เดือน กรกฎาคม ปี ค.ศ. 1999 โดยมาตรฐานนี้ประกอบด้วยเอกสารสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการกำหนดมาตรฐานการออกแบบ โดยระบุรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ เช่น ส่วนของการส่งสัญญาณวิทยุ สัญญาณเบสแบนด์ การจัดการเชื่อมต่อ และ การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ด้วยโปรโตคอลการสื่อสารที่ต่างชนิดกัน ส่วนที่สองกล่าวถึงข้อมูลโครงสร้างของการเชื่อมต่ออุปกรณ์โปรโตคอลและกระบวนการประยุกต์ใช้บลูทูธแบบต่างๆ [1,2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 เทคโนโลยีระบบบลูทูธ IEEE 802.15

วัตถุประสงค์หลักของการเทคโนโลยีบลูทูธ สร้างเพื่อแทนที่การใช้งานสายเคเบิลกับอุปกรณ์ต่างๆ นอกจากนั้นแล้วการใ้บลูทูธยังมีความสะดวก ใช้ง่าย ยืดหยุ่น คุ้มค่าการลงทุน ใช้ง่ำลังงานต่ำ และสามารถติดต่อสื่อสารได้ทั้งสัญญาณเสียงและสัญญาณข้อมูลดิจิทัลเนื่องจากระบบบลูทูธออกแบบมาเพื่อใช้กำลังงานต่ำ โดยระดับกำลังงานที่ถูกออกแบบมาถูกแบ่งออกเป็น 3 ระดับ โดยมีระดับการใช้กำลังงานน้อยสุดสามารถสื่อสารได้รัศมี 10 เมตร ด้วยเหตุผลต่างๆ ทำให้ระบบบลูทูธเหมาะสมกับการสื่อสารในระยะใกล้ระหว่างอุปกรณ์ที่มีการเคลื่อนที่บ่อย เช่น การสื่อสารระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่กับโครงข่ายโทรศัพท์สาธารณะ [3]

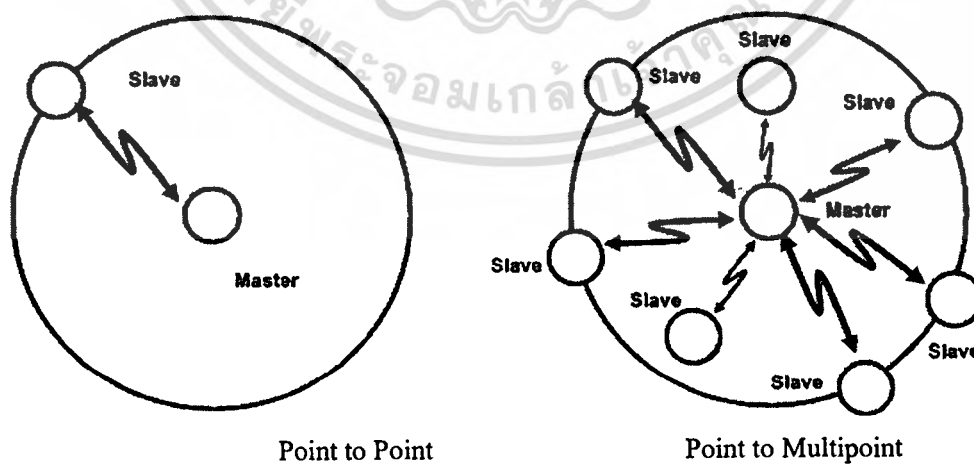
ระบบบลูทูธตามมาตรฐาน IEEE 802.15 กำหนดใช้งานย่านความถี่ประมาณ 2.4 จิกะเฮตซ์ (GHz) ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่สามารถใช้งานได้ทั่วโลกโดยไม่ต้องขออนุญาต ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่สำรองเอาไว้เพื่อใช้งานกับด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และทางการแพทย์ (Industrial scientific and medical band: ISM) ถึงแม้ว่ามีผู้ใช้งานในย่านความถี่เดียวกันนี้จำนวนมาก แต่ด้วยเทคโนโลยีบลูทูธมีคุณสมบัติเด่นในด้านการทนต่อสัญญาณรบกวนในระดับหนึ่ง ซึ่งการใช้งานในย่านความถี่นี้แสดงได้ดังตารางที่ 2.1 แต่ละช่องสัญญาณของระบบบลูทูธจะมีขนาด 1 เมกะเฮิร์ต (MHz) และอัตราข้อมูลเท่ากับ 1 เมกะซิมบอลต่อวินาที (Msymbol/sec) ซึ่งทำให้มีแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณสูงสุด การมอดูเลตของระบบบลูทูธใช้การมอดูเลตดิจิทัลความถี่แบบเกาส์ (Gaussian frequency shift keying : GFSK) ด้วยอัตราเร็ว 1 เมกะบิตต่อวินาที (Mbit/sec) เมื่อทำการส่งแพ็คเกจแล้วอุปกรณ์รับและส่งจะทำการกระโดดเปลี่ยนความถี่ที่ใช้งานใหม่ให้ตรงกันใหม่อีกครั้ง หรือ การเปลี่ยนจากช่องสัญญาณหนึ่ง ไปอีกช่องสัญญาณหนึ่ง ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการมอดูเลตสเปกตรัมแผ่แบบกระโดดเปลี่ยนความถี่ ( Frequency hopping spread spectrum: FHSS) ด้วยวิธีการนี้จะทำให้อุปกรณ์บลูทูธใช้งานได้ครอบคลุมทุกความถี่ในย่าน 2.4 GHz เมื่อแพ็คเกจ ในช่องสัญญาณหนึ่งมีการรบกวนเกิดขึ้นจนก่อให้เกิดการส่งแพ็คเกจผิดพลาด สำหรับการส่งแพ็คเกจซ้ำระบบได้ทำการส่งในช่องสัญญาณอื่น ซึ่งความน่าจะเป็นที่จะมีการรบกวนอยู่ในระดับต่ำและทำให้ความผิดพลาดเกิดขึ้นน้อยลง ในแต่ละช่วงเวลา (Time slot) ของระบบบลูทูธใช้เวลา 625 ไมโครวินาที และในแต่ละแพ็คเกจจะทำการกระโดดเปลี่ยนความถี่ (Hopping) 1 ครั้ง [1]

## ตารางที่ 2.1 ย่านความถี่ ISM

พื้นที่	ย่านความถี่ ISM (จิกะเฮิรตซ์)	ช่วงป้องกัน ความถี่ต่ำ (เมกะเฮิรตซ์)	ช่วงป้องกัน ความถี่สูง (เมกะเฮิรตซ์)	ช่วงสัญญาณ
ฝรั่งเศส	2.4465-2.4835	7.5	7.5	23
ประเทศอื่น (รวมทั้ง ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา และ ยุโรป)	2.4000-2.4835	2	3.5	79

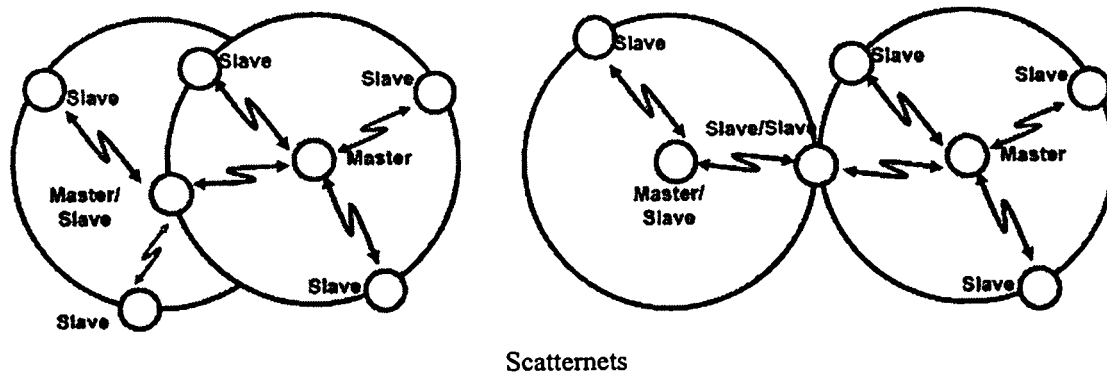
### 2.2.1 โครงสร้างระบบบลูทูธ

หน่วยโครงสร้างย่อยในระบบบลูทูธเรียกว่า พิคเน็ต (Piconet) แสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ มาสเตอร์ (Master) 1 เครื่อง และ สเลฟ (Slave) สูงสุดจำนวน 7 เครื่อง โดยอุปกรณ์ บลูทูธแต่ละเครื่องสามารถปฏิบัติตัวเป็นได้ทั้ง มาสเตอร์ และ สเลฟ อุปกรณ์ที่ปฏิบัติตัวเป็น มาสเตอร์จะทำการกำหนดลำดับการกระโดดเปลี่ยนความถี่ (Hop sequence) ส่วนอุปกรณ์ที่เป็นสเลฟทำการซิงค์กับมาสเตอร์เพื่อทำตามลำดับการกระโดดเปลี่ยนความถี่ของมาสเตอร์ทั้งทางด้านเวลาและความถี่ มาสเตอร์แต่ละเครื่องจะมีแอดเดรส (Address) และ นาฬิกา (Clock) เป็นของตัวเองเพื่อใช้ในการคำนวณลำดับการกระโดดเปลี่ยนความถี่ ภายในพิคเน็ต อุปกรณ์ที่เป็น สเลฟ สามารถติดต่อได้กับมาสเตอร์ได้เท่านั้น ไม่สามารถติดต่อโดยตรงระหว่างสเลฟด้วยกันได้



รูปที่ 2.1 การติดต่อสื่อสารภายในโครงข่ายแบบพิคเน็ตแบบจุดถึงจุด และ แบบจุดถึงหลายจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การติดต่อสื่อสารภายในโครงข่ายแบบสแคเทอร์เน็ต

สำหรับกรณีที่มีพื้นที่ที่ต้องการติดต่อสื่อสารขนาดใหญ่หรือมีอุปกรณ์ที่ต้องการสื่อสารจำนวนมากสามารถทำการติดต่อถึงกัน ได้ด้วยการเชื่อมต่อระหว่างฟิโคโนดหลายๆฟิโคโนดเข้าด้วยกัน ซึ่งการเชื่อมต่อถึงกันแบบนี้เรียกว่า สแคเทอร์เน็ต (Scatternet) และอุปกรณ์บางตัวสามารถเป็นสมาชิกได้มากกว่าหนึ่งฟิโคโนด ดังรูปที่ 2 จะพบว่าเมื่ออุปกรณ์หนึ่งเป็นสมาชิกมากกว่า หนึ่งฟิโคโนดแล้ว อุปกรณ์นั้นต้องทำการแบ่งเวลาในการส่งแพคเกตบางส่วนให้กับฟิโคโนดหนึ่งและบางส่วนให้กับอีกฟิโคโนด รูปที่ 2 ซ้าย แสดงการทำหน้าที่เป็นสเลฟให้กับฟิโคโนดหนึ่ง และเป็นมาสเตอร์ให้กับอีกฟิโคโนด ส่วนรูปที่ 2 ขวา แสดงให้เห็นอุปกรณ์หนึ่งปฏิบัติตัวเป็นสเลฟทั้งสองฟิโคโนด ในเวลาเดียวกันอุปกรณ์หนึ่งจะไม่สามารถเป็น มาสเตอร์ให้กับ 2 ฟิโคโนดพร้อมกันได้เนื่องจากสเลฟทุกตัวในฟิโคโนดจะทำการชิงลำดับการกระโดดเปลี่ยนความถี่กับมาสเตอร์นั้นคืออุปกรณ์ทุกตัว ที่มีมาสเตอร์ตัวเดียวกันจะต้องอยู่ในฟิโคโนดเดียวกัน

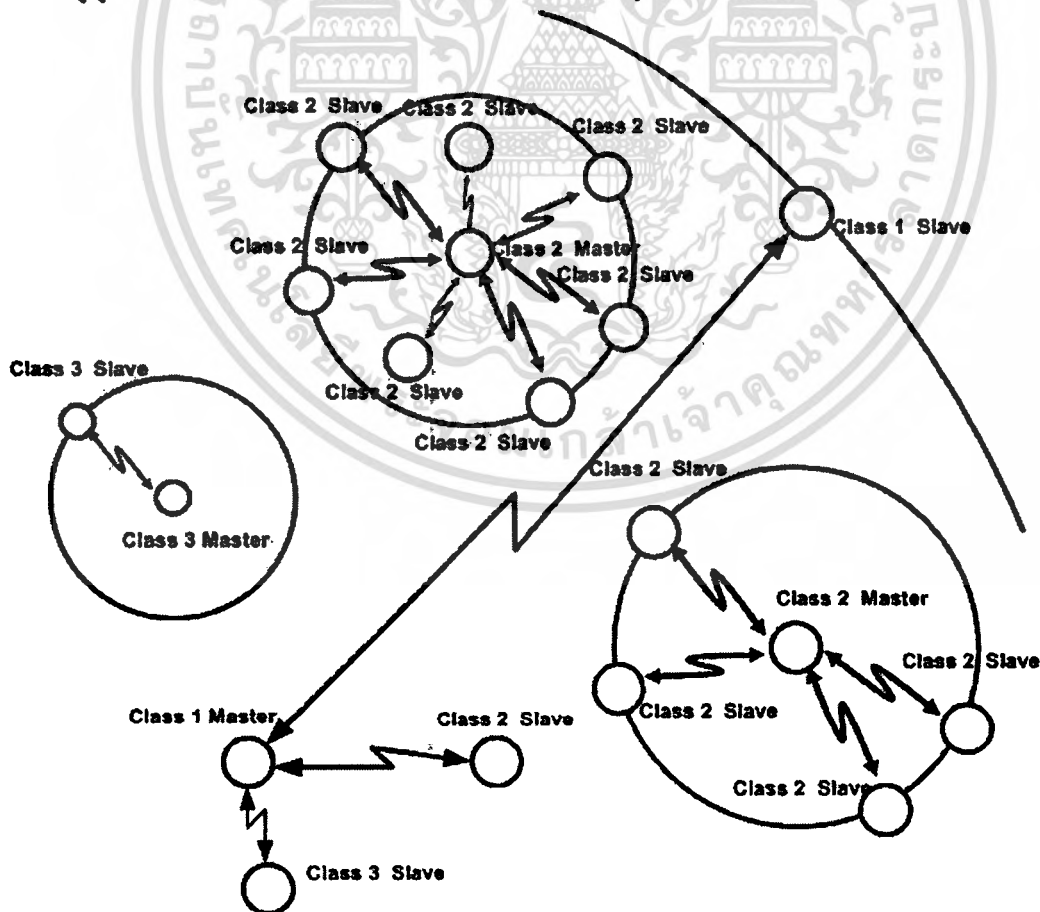
สำหรับกระบวนการ ส่งแพคเกต มาสเตอร์จะอนุญาตให้สเลฟส่งแพคเกตข้อมูลแบบเสียงหรือข้อมูลแบบดิจิทัล สำหรับการส่งข้อมูลแบบดิจิทัลนั้น สเลฟจะได้รับอนุญาตให้ส่งแพคเกตเมื่อได้รับการตอบรับจากมาสเตอร์เท่านั้น ส่วนการส่งข้อมูลเสียง สเลฟสามารถทำการส่งข้อมูลได้อย่างต่อเนื่องในช่องเวลาสำรองถึงแม้ว่าจะได้รับหรือไม่ได้รับการตอบกลับจากมาสเตอร์ก็ตาม อีกทั้งมาสเตอร์สามารถทำการควบคุมการแบ่งแบนด์วิดท์ไปให้กับสเลฟ ด้วยการตัดสินใจว่าจะทำการติดต่อสื่อสารกับสเลฟเมื่อไหร่ และจำนวนครั้งในการติดต่อสื่อสารควรเป็นเท่าไร โดยจำนวนของช่องเวลาที่สเลฟแต่ละตัวจะได้รับขึ้นอยู่กับความต้องการในการส่งข้อมูล ระบบที่ใช้ในการจัดสรรช่องเวลาระหว่างอุปกรณ์หลายๆตัวเรียกว่า การ มัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time division multiplex: TDM)

### 2.2.2 ระดับกำลังงานระบบบลูทูธ

มาตรฐานบลูทูธกำหนดให้ใช้กำลังงานในการส่งสัญญาณได้ 3 ระดับ

1. ระดับที่ 1      100 มิลลิวัตต์
2. ระดับที่ 2      2.5 มิลลิวัตต์
3. ระดับที่ 3      1 มิลลิวัตต์

การที่บลูทูธมีระดับกำลังงานได้หลายระดับทำให้อุปกรณ์บลูทูธสามารถติดต่อสื่อสารในระยะทางที่แตกต่างกัน แต่โดยส่วนมากผู้ผลิตอุปกรณ์บลูทูธจะใช้กำลังงานระดับที่ 3 ซึ่งเป็นกำลังงานที่น้อยที่สุดเพียง 1 มิลลิวัตต์และสามารถติดต่อสื่อสารได้ 10 เมตร หรือประมาณ 30 ฟุต อย่างไรก็ตามการสื่อสารภายในห้องที่มีวัตถุที่สามารถดูดซับสัญญาณได้ดี จะทำให้ระยะทางของการสื่อสารเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการสื่อสารภายในอาคารทั่วไปโดยใช้กำลังงานส่ง 1 มิลลิวัตต์จะสามารถรับส่งสัญญาณได้ดีในระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ส่งและอุปกรณ์รับ มากที่สุด 5 เมตร และการเพิ่มกำลังงานส่งสูงๆ จะช่วยเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมการสื่อสารได้มากขึ้น ในกรณีที่อุปกรณ์ส่งและอุปกรณ์รับ อยู่ใกล้กันมากจะทำให้เครื่องรับเกิดสภาวะอิ่มตัว (Saturate) ดังนั้นระยะห่างระหว่างอุปกรณ์รับและส่งที่น้อยที่สุดของระบบบลูทูธอยู่ที่ประมาณ 10 เซนติเมตร ในหนึ่งฟิโคโนด อุปกรณ์บลูทูธสามารถใช้ระดับกำลังงานที่แตกต่างกันได้ดังรูปที่ 3

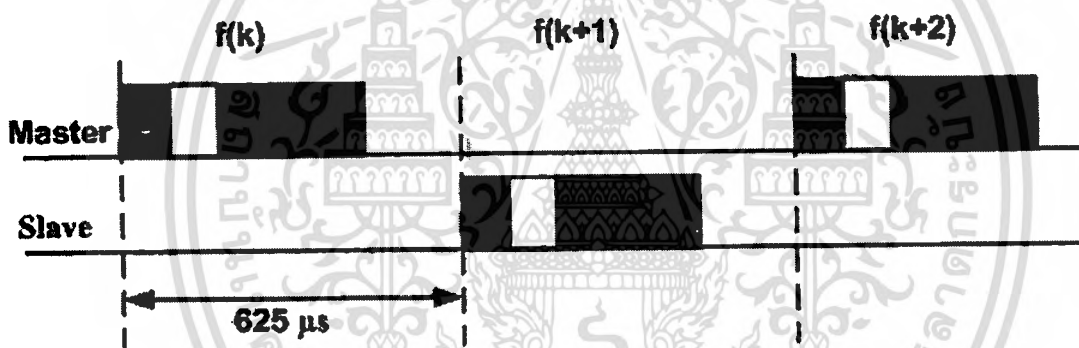


รูปที่ 2.3 การรวมกันของอุปกรณ์ที่ใช้ระดับกำลังงานแตกต่างกันในแต่ละฟิโคโนด

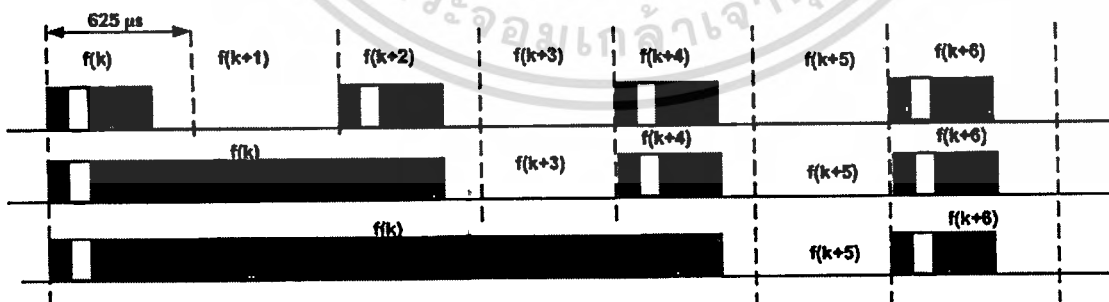
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 ช่องเวลา

เนื่องจากระบบลูทรมีการแบ่งช่องสัญญาณออกเป็นช่องเวลาสั้นๆ จำนวนมากแต่ละช่องเวลายาว 625 ไมโครวินาที หมายเลขช่องเวลาถูกตั้งตามนาฬิกาของมาสเตอร์ในทีโคเนตจะมีตั้งแต่ช่องเวลาหมายเลข 0 ถึง  $2^{27}-1$  ดังนั้นในหนึ่งรอบจะมีหมายเลขช่องเวลา  $2^{27}$  หมายเลข การรับ-ส่งแพ็คเกจ ระหว่างมาสเตอร์ กับ สเลฟ มีการนำทฤษฎีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลามาใช้ ซึ่งมาสเตอร์และสเลฟ จะสลับกันส่งและรับแพ็คเกจ นอกจากนั้นมาสเตอร์จะใช้ช่องเวลาหมายเลขคู่ในการส่ง และ รับแพ็คเกจเท่านั้น ส่วนช่องเวลาหมายเลขคี่จะถูกใช้งานโดยสเลฟ ดังรูปที่ 4 แต่ละแพ็คเกจที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างมาสเตอร์และสเลฟสามารถใช้ช่องเวลาได้มากที่สุด 5 ช่องเวลา โดยความถี่จะไม่มีเปลี่ยนแปลงตลอดการรับส่งแพ็คเกจ สำหรับแพ็คเกจที่ใช้ 1 ช่องเวลาในการสื่อสารนั้นความถี่ที่ใช้ในการกระ โดดเปลี่ยนความถี่จะคำนวณจากนาฬิกาของมาสเตอร์ สำหรับแพ็คเกจที่ใช้หลายๆ ช่องเวลา ความถี่ที่ใช้ตลอดการส่งทั้งแพ็คเกจนั้นถูกคำนวณจากค่าของนาฬิกาในช่องเวลาแรกของเวลาแรกของแพ็คเกจเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 2.4 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา



รูปที่ 2.5 การกระ โดดเปลี่ยนความถี่ของแพ็คเกจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 การเชื่อมต่อข้อมูลเสียงและข้อมูลดิจิทัล

เทคโนโลยีบรอดแบนด์มีการสื่อสารได้ทั้งแบบเสียงและแบบข้อมูล โดยรูปแบบของการเชื่อมต่อ จะทำการตกลงกันระหว่างมาสเตอร์และสเลฟ สำหรับการสื่อสารแบบเสียงจะใช้การเชื่อมต่อแบบซิงโครนัส (Synchronous connection orient: SCO) และการสื่อสารแบบข้อมูลดิจิทัลจะเชื่อมต่อแบบอซิงโครนัส (Asynchronous connectionless: ACL)

### 2.2.4.1 การเชื่อมต่อข้อมูลเสียง

ข้อมูลเสียงในระบบบรอดแบนด์จะใช้การเชื่อมต่อแบบซิงโครนัส ทำให้แบนด์วิดท์ช่องสัญญาณระหว่างมาสเตอร์และสเลฟจะต้องเท่ากันทั้งในทิศทางการส่งสัญญาณและรับสัญญาณ ดังนั้นการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสทำให้มีการเชื่อมต่อแบบสวิตช์วงจร (Circuit-switched connection) เกิดขึ้นเมื่อมีการแลกเปลี่ยนข้อมูล มาสเตอร์หนึ่งเครื่องสามารถเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสกับสเลฟเครื่องเดียวหรือหลายเครื่อง และมาสเตอร์หนึ่งตัวสามารถเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสกับสเลฟเครื่องเดียวกันหรือสเลฟคนละเครื่องมากที่สุด 3 การเชื่อมต่อเนื่องจากแพ็คเกจแบบซิงโครนัสไม่มีการส่งข้อมูลใหม่

การเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสถูกกำหนดด้วยคำสั่งการจัดการเชื่อมต่อหรือคำสั่งแอลเอ็ม (Link manager: LM) ซึ่งเป็นคำสั่งที่ส่งจากมาสเตอร์ไปยังสเลฟ โดยข้อมูลที่ส่งไปจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่กำหนดเกี่ยวกับเวลาในช่องตอบรับสำรอง เช่น ระยะเวลาของการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสและค่าออฟเซตเริ่มต้น (Starting offset) สำหรับการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสจะเริ่มจากการที่มาสเตอร์จะทำการส่งแพ็คเกจแบบซิงโครนัสไปยังสเลฟด้วยระยะเวลาที่คงที่ และสเลฟก็จำเป็นต้องได้รับอนุญาตให้รับแพ็คเกจแบบซิงโครนัสไปยังสเลฟด้วยระยะเวลาที่คงที่ และสเลฟก็จะได้รับอนุญาตให้รับแพ็คเกจที่ช่องตอบรับสำรอง ยกเว้นเมื่อพบว่าแอดเดรสของแพ็คเกจที่รับไม่ตรงกับที่สเลฟต้องการ และเมื่อการถอดรหัสข้อมูลของแพ็คเกจไม่ถูกต้องอันเนื่องมาจากเกิดความผิดพลาดขึ้น สเลฟสามารถตอบกลับไปยังมาสเตอร์ด้วยช่องตอบรับสำรอง ซึ่งโดยทั่วไปมาสเตอร์จะไม่อนุญาตให้สเลฟใช้ช่องตอบรับสำรอง ยกเว้นมีการส่งข้อมูลไปยังสเลฟทุกเครื่องด้วยการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสหรือกรณีพิเศษเท่านั้น

### 2.2.4.2 การเชื่อมต่อข้อมูลดิจิทัล

ในการสื่อสารด้วยข้อมูลดิจิทัลระบบบรอดแบนด์จะใช้การเชื่อมต่อแบบซิงโครนัส โดยการเชื่อมต่อจะเกิดขึ้นเมื่อมาสเตอร์และสเลฟทำการเชื่อมต่อเพื่อการรับส่งข้อมูลเท่านั้น มาสเตอร์หนึ่งตัวสามารถมีการเชื่อมต่อแบบอะซิงโครนัสได้หลายการเชื่อมต่อกับสเลฟหลายตัวในเวลาเดียวกัน แต่ในหนึ่งช่วงเวลาจะมีเพียงหนึ่งการเชื่อมต่อเท่านั้นที่สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างมาสเตอร์กับสเลฟ และมาสเตอร์สามารถส่งข้อมูลไปยังสเลฟหลายเครื่องได้ ทำให้การเชื่อมต่อแบบอะซิงโครนัสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือ มีกระบวนการตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับแพ็คเกจและมีกระบวนการส่งข้อมูลใหม่ เพื่อให้การส่งข้อมูลมีความถูกต้องมากที่สุด

ในกระบวนการรับส่งข้อมูลนั้นเมื่อสเลฟได้รับแพ็คเกจแบบอะซิงโครนัสที่มีแอดเดรสตรงกับข้อมูลที่ส่งมาจากมาสเตอร์เพื่อบอกให้ทราบก่อนหน้านี้นี้ สเลฟจะทำการตอบกลับไปยังมาสเตอร์ในช่องสำหรับการส่งข้อมูลจากสเลฟไปยังมาสเตอร์ช่องต่อไป ในกรณีที่สเลฟไม่สามารถถอดรหัสและตรวจสอบถึงแอดเดรสของสเลฟปลายทางในการส่งแพ็คเกจได้ จะทำให้สเลฟที่ได้รับแพ็คเกจไม่สามารถรู้ได้ว่าเป็นแพ็คเกจที่ส่งมาให้ตัวเองหรือไม่ จึงไม่มีการตอบกลับไปยังมาสเตอร์ในกรณีนี้ มาสเตอร์จะทำการส่งแพ็คเกจมาให้ใหม่อีกครั้ง

## 2.3 แพ็คเกจของระบบบลูทูธ

### 2.3.1 โครงสร้างแพ็คเกจบลูทูธ

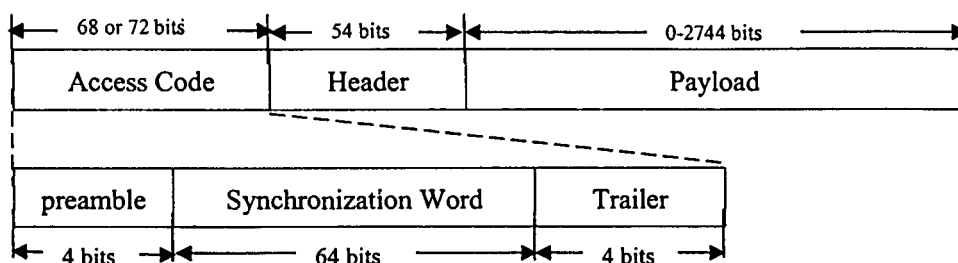
ในส่วนนี้จะเป็นการนำเสนอแพ็คเกจบลูทูธชนิดต่างๆ ซึ่งถูกใช้ในการติดต่อสื่อสารในการเชื่อมต่อแบบอะซิงโครนัสและแบบซิงโครนัส โครงสร้างแพ็คเกจนี้ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนของรหัสการเข้าถึง (Access code) ส่วนหัว (Header) และส่วนข้อมูล (Payload) ดังรูปที่ 2.6 โดยส่วนของรหัสการเข้าถึงถูกใช้ในการตีเทคต์แพ็คเกจและแสดงแอดเดรสของแพ็คเกจ ตัวอย่างเช่นสเลฟตีเทคต์แพ็คเกจได้จะทำการเปรียบเทียบข้อมูลในรหัสการเข้าถึงของแพ็คเกจกับรหัสการเข้าถึงของมาสเตอร์ที่เก็บเอาไว้ว่าตรงกันหรือไม่ ส่วนหัวประกอบไปด้วยข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมแพ็คเกจและการเชื่อมต่อ และส่วนสุดท้ายคือ ส่วนข้อมูลประกอบด้วยข้อมูลที่มาสเตอร์ต้องการสื่อสารกับสเลฟ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างแพ็คเกจบลูทูธ

#### 2.3.1.1 ส่วนรหัสการเข้าถึง

หน้าที่สำคัญของส่วนรหัสการเข้าถึง คือ เมื่อมีการเชื่อมต่อเกิดขึ้นส่วนของรหัสการเข้าถึงจะเป็นตัวชี้ว่าแพ็คเกจนี้ถูกส่งมาจากมาสเตอร์หรือกำลังส่งไปให้มาสเตอร์ ซึ่งเป็นการช่วยป้องกันการรับและส่งแพ็คเกจผิดพลาด ส่วนของรหัสการเข้าถึงเป็นส่วนแรกของแพ็คเกจประกอบไปด้วยส่วนของพรีแอมเบิล ส่วนซิงโครไนซ์ (Synchronization word หรือ sync word) และเทลเลอร์ (Tailer)



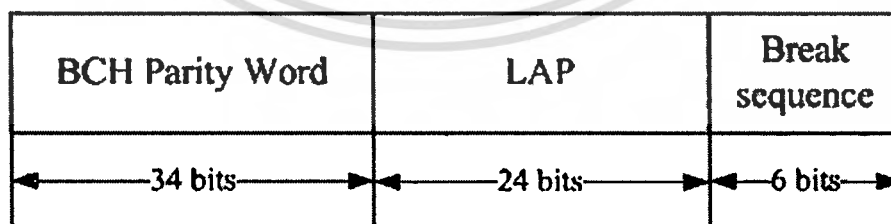
รูปที่ 2.7 โครงสร้างส่วนขอรหัสการเข้าของแพคเกจบลูทูธ

1) 프리แอมเบิล

ส่วนแรกของรหัสการเข้าถึง คือ ส่วนของฟรีแอมเบิลขนาด 4 บิต ซึ่งใช้ในการดีเทกต์ขอบเขตของแพคเกจที่รับ โดยฟรีแอมเบิลเป็นลำดับข้อมูลที่กำหนดไว้แน่นอน ได้แก่ 0101 หรือ 1010 อย่างใดอย่างหนึ่งขึ้นอยู่กับค่าบิตแรกของส่วนซิงโครไนซ์ของแพคเกจ

2) ส่วนซิงโครไนซ์

ส่วนซิงโครไนซ์เป็นส่วนที่ใช้ซิงก์เวลากับอุปกรณ์รับในการดีเทกต์ข้อมูล เช่น ค่าจุดเริ่มเปลี่ยนดิซี (DC Threshold) และการสร้างสัญญาณนาฬิกาใหม่ (Clock recovery) ส่วนซิงโครไนซ์มีโครงสร้างดังรูปที่ 8 ส่วนของการซิงโครไนซ์นี้มีขนาด 64 บิต ซึ่งได้มาจากบิตข้อมูล 24 บิต ของส่วน LAP (Lower address part) ในแอดเดรสของอุปกรณ์บลูทูธ โดยเริ่มจากนำบิตข้อมูล 6 บิตซึ่งเรียกว่าลำดับบิตมาเกอร์ มาใส่ต่อบิตข้อมูลของ LAP เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ของการซิงโครไนซ์ และทำการเอ็กซ์ครุซีฟออร์ (XOR) ตั้งแต่บิตที่ 34 ถึง 63 (30 บิต) จากนั้นทำการเข้ารหัสด้วย BCH (Bose – Chaudhuri - Hocquenghem) ด้วยอัตรา (63/30) เพื่อให้มีบิตสถานะเสมอมูล (Parity) ขนาด 34 บิต และทำการเอ็กซ์ครุซีฟออร์อีกครั้งเพื่อนำคุณสมบัติของการเข้ารหัสแบบบล็อก (Block code) ออกจากบิต

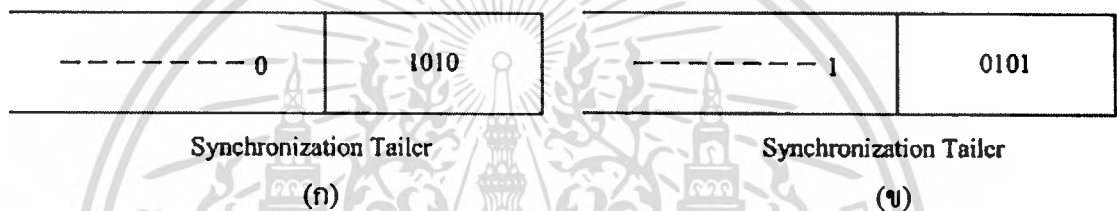


รูปที่ 2.8 โครงสร้างส่วนซิงโครไนซ์

### 3) เทลเลอร์

ส่วนสุดท้ายของรหัสการเข้าถึง คือ เทลเลอร์ บิตข้อมูลในเทลเลอร์มีหน้าที่ช่วยกำหนดค่าจุดเริ่มเปลี่ยนคีย์ และการสร้างสัญญาณนาฬิกาใหม่ให้มีความถูกต้องมากขึ้นเช่นเดียวกับบิตข้อมูลในพีรีแอมเบิล แพกเกตของบลูทูธอาจมีหรือไม่มีส่วนเทลเลอร์ก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของแพกเกตที่ใช้ในกรณีที่มีส่วนเทลเลอร์ขนาดของรหัสการเข้าถึงทั้งหมดจะเป็น 72 บิต ถ้าไม่มีส่วนเทลเลอร์ขนาดของรหัสการเข้าถึงจะเป็น 68 บิต

เทลเลอร์จะมีรูปแบบของบิตที่แน่นอน 4 บิต คือ 0101 หรือ 1010 ขึ้นอยู่กับบิตสุดท้ายของส่วนซิงโครไนซ์ ถ้าบิตสุดท้ายของการซิงโครไนซ์เป็นบิต 0 เทลเลอร์จะเป็น 1010 หรือถ้าบิตสุดท้ายเป็นบิต 1 เทลเลอร์จะเป็น 0101 นอกจากนั้นแล้วบิตข้อมูลในเทลเลอร์ 4 บิตยักรวมกับบิตข้อมูลในส่วนซิงโครไนซ์ 3 บิตเพื่อใช้ในการขยายการซดเซยค่าคีย์



**รูปที่ 2.9** บิตข้อมูลเทลเลอร์ (ก)เทลเลอร์เมื่อส่วนของการซิงโครไนซ์บิตสุดท้ายเป็น 0  
(ข) เทลเลอร์เมื่อส่วนของการซิงโครไนซ์บิตสุดท้ายเป็น 1

ชนิดของรหัสการเข้าถึงสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

1) รหัสการเข้าถึงช่องสัญญาณ (Channel access code: CAC) เป็นตัวแสดงให้ทราบถึงตำแหน่งพิกอนตที่ใช้งาน ซึ่งแต่ละพิกอนตจะมีรหัสการเข้าถึงช่องสัญญาณเฉพาะ และทุกแพกเกตที่เริ่มต้นส่งเป็นครั้งแรกในพิกอนตเดียวกันจะมีรหัสการเข้าถึงช่องสัญญาณเหมือนกัน

2) รหัสการเข้าถึงอุปกรณ์ (Device access code: DAC) ใช้สำหรับการส่งสัญญาณแบบพิเศษ เช่น การเพจจิง (Paging) และการตอบสนองการเพจจิง นอกจากนั้นยังใช้เซดอ์พอุปกรณ์ที่อยู่ในพื้นที่สื่อสาร เมื่ออุปกรณ์ดังกล่าวตอบรับแสดงว่าการเชื่อมต่อเพื่อการสื่อสารได้ทำการเซดอ์พเรียบร้อยแล้ว

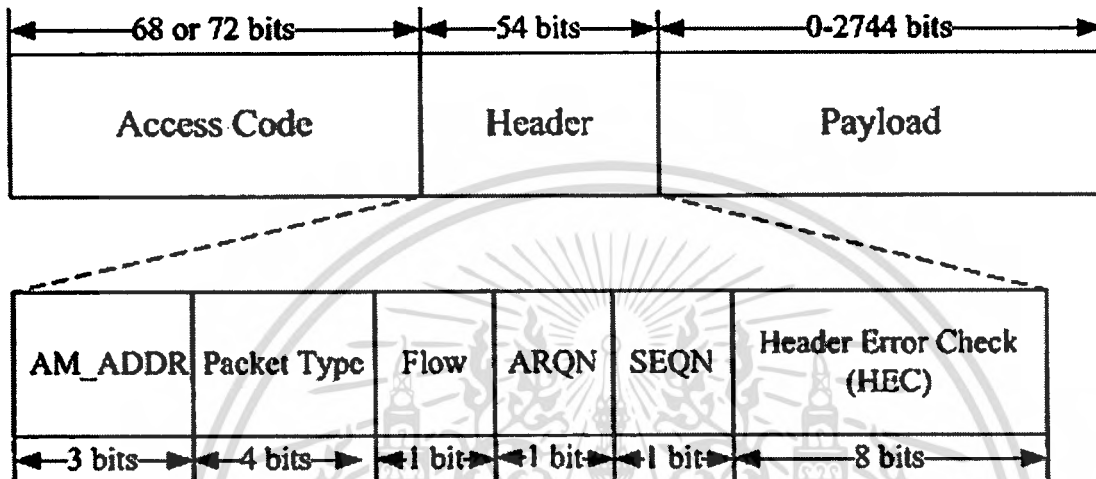
3) รหัสการเข้าถึงค้นหาทั่วไป (General inquiry access code: GIAC) เป็นชนิดของรหัสการเข้าถึงที่ใช้ทั่วไปกับทุกๆอุปกรณ์บลูทูธเพื่อค้นหาอุปกรณ์บลูทูธอื่นๆ ในพื้นที่ที่มีการสื่อสาร

4) รหัสการเข้าถึงค้นหาละเอียด (Delicate inquiry access code: DIAC) ใช้เพื่อค้นหาอุปกรณ์บลูทูธในพื้นที่ที่มีการสื่อสารภายในกลุ่มที่ร่วมกันใช้อุปกรณ์บางชนิดด้วยกัน เช่น การใช้งานปรีนเตอร์ร่วมกัน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1.2 ส่วนหัว

ส่วนหัวประกอบไปด้วยข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมแพคเกจขนาด 18 บิต ซึ่งมีการป้องกันความผิดพลาดด้วยการเข้ารหัสแบบ Forward error correction (FEC) ในอัตรา 1/3 และทำการซ้ำบิตข้อมูลทั้งสามครั้ง ดังนั้นส่วนของหัวมีความยาวทั้งหมด 54 ไมโครวินาที และประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้ [1]



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของส่วนหัวของแพคเกจ

#### 1) AM\_ADDR (Active member address)

ใช้แสดงแอดเดสของอุปกรณ์และบอกให้มาสเตอร์รู้ว่ามียุโรปกรณ์ตัวใดบ้างในฟิโคโนเนตอยู่ในสถานะแอกทีฟ และเพื่อเป็นการจำแนกสถานะของสเลฟแต่ละตัวได้ถูกต้อง จึงมีการกำหนด AM\_ADDR ขนาด 3 บิต ให้กับสเลฟเมื่อสเลฟอยู่ในสถานะแอกทีฟ และแพคเกจที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลระหว่างมาสเตอร์กับสเลฟจะปรากฏบิต AM\_ADDR ด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่า AM\_ADDR ของสเลฟจะอยู่ในแพคเกจที่ส่งจากมาสเตอร์มายังสเลฟและที่ส่งจากสเลฟไปยังมาสเตอร์ ส่วนแพคเกจใดที่ AM\_ADDR เป็นศูนย์ทั้งหมดหมายความว่า เป็นแพคเกจที่มาสเตอร์ทำการส่งไปยังสเลฟทุกตัวในฟิโคโนเนต สำหรับกรณีที่สเลฟไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับมาสเตอร์ สเลฟจะลบบิตใน AM\_ADDR ทิ้ง และเมื่อต้องการจะทำการเชื่อมต่อกับมาสเตอร์อีกครั้งจะได้รับ AM\_ADDR ใหม่จากมาสเตอร์

#### 2) Packet type

มีขนาด 4 บิตจะบอกให้ทราบถึงชนิดของแพคเกจที่ใช้โดยการตีความจากบิตใน Packet type ว่าเป็นแพคเกจชนิดใดซึ่งจะสัมพันธ์กับชนิดของการเชื่อมต่อ เช่น แบบซิงโครนัสหรือแบบอซิงโครนัส เป็นต้น นอกจากนี้ Packet type ยังบอกให้ทราบถึงจำนวนช่องสัญญาณที่แพคเกจใช้ใน

การสื่อสารเนื่องจากในการรับ-ส่งแพ็คเกจแต่ละครั้งสามารถใช้ช่องสัญญาณในการส่งแพ็คเกจได้แตกต่างกัน เช่น 1 ช่องสัญญาณ, 3 ช่องสัญญาณ หรือ 5 ช่องสัญญาณ

Packet type สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ดังตารางที่ 2.2 ประเภทที่ 1 เป็นประเภทที่เก็บเอาไว้ให้กับแพ็คเกจควบคุมทั้ง 4 ชนิด เพื่อใช้กับการเชื่อมต่อทุกๆ แบบ ประเภทที่ 2 จะใช้กับแพ็คเกจที่ใช้ช่องสัญญาณในการสื่อสารเพียง 1 ช่องสัญญาณ ประเภทที่ 3 ใช้กับแพ็คเกจที่ใช้ 3 ช่องสัญญาณในการสื่อสาร และประกอบประเภทที่ 4 ใช้กับแพ็คเกจที่ใช้ 4 ช่องสัญญาณในการสื่อสาร

### 3) Flow

เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแพ็คเกจบนการเชื่อมต่อแบบอะซิงโครนัสมีขนาด 1 บิต เมื่อบัพเฟอร์ของสเลฟเต็มจะส่งสัญญาณให้หยุดการส่งแพ็คเกจชั่วคราวด้วยการส่งแพ็คเกจที่มี Flow = 0 ไปยังมาสเตอร์ เมื่อบัพเฟอร์ของสเลฟว่างและพร้อมที่จะรับแพ็คเกจอีกครั้ง สเลฟจะส่งสัญญาณให้มาสเตอร์เริ่มส่งแพ็คเกจใหม่ด้วยการส่งแพ็คเกจที่มี Flow = 1 ไปยังมาสเตอร์ในกรณีที่สเลฟไม่ได้รับแพ็คเกจหรือส่วนหัวของแพ็คเกจที่รับเกิดความผิดพลาด สเลฟจะส่งแพ็คเกจที่มี Flow = 0 ไปยังมาสเตอร์

### 4) ARQN (Automatic repeat request)

ส่วนของ ARQN มีขนาด 1 บิต ใช้แจ้งให้อุปกรณ์ทราบผลของการส่งข้อมูลว่าทำการส่งได้สำเร็จหรือไม่ การแสดงผลของ ARQN สามารถแสดงได้ทั้งการตอบรับแบบถูกต้อง (Positive acknowledgment: ACK) หรือการตอบรับแบบปฏิเสธ (Negative acknowledgment: NAK) เมื่อทำการรับข้อมูลได้สำเร็จอุปกรณ์รับจะส่งการตอบรับแบบถูกต้อง แต่ถ้าไม่สำเร็จจะส่งการตอบรับแบบปฏิเสธ ไปยังอุปกรณ์ส่ง แต่ถ้าอุปกรณ์ส่งไม่ได้รับแพ็คเกจตอบรับใดๆ อุปกรณ์ส่งจะเข้าใจว่าส่งการตอบรับแบบปฏิเสธ

### 5) SEQN (Sequence number)

มีขนาด 1 บิต เพื่อแสดงให้อุปกรณ์รับทราบว่าแพ็คเกจที่ได้รับนี้เป็นแพ็คเกจใหม่หรือเป็นแพ็คเกจเดิม สำหรับแพ็คเกจใหม่บิต SEQN จะมีค่าตรงข้ามกับบิต SEQN เดิมเมื่ออุปกรณ์รับได้รับแพ็คเกจก็จะทำการตรวจสอบบิต SEQN ถ้าหากบิต SEQN ใหม่ที่ได้รับซ้ำกับบิต SEQN เดิมก็จะทำการกำจัดแพ็คเกจที่ได้รับซึ่งเป็นการช่วยป้องกันการส่งแพ็คเกจซ้ำซ้อน แต่เมื่อตรวจสอบบิต SEQN แล้วไม่ซ้ำกับบิต SEQN เดิมก็จะทำการดีเทกต์ข้อมูลที่ส่งมากับแพ็คเกจใหม่

### 6) HEC (Header error check)

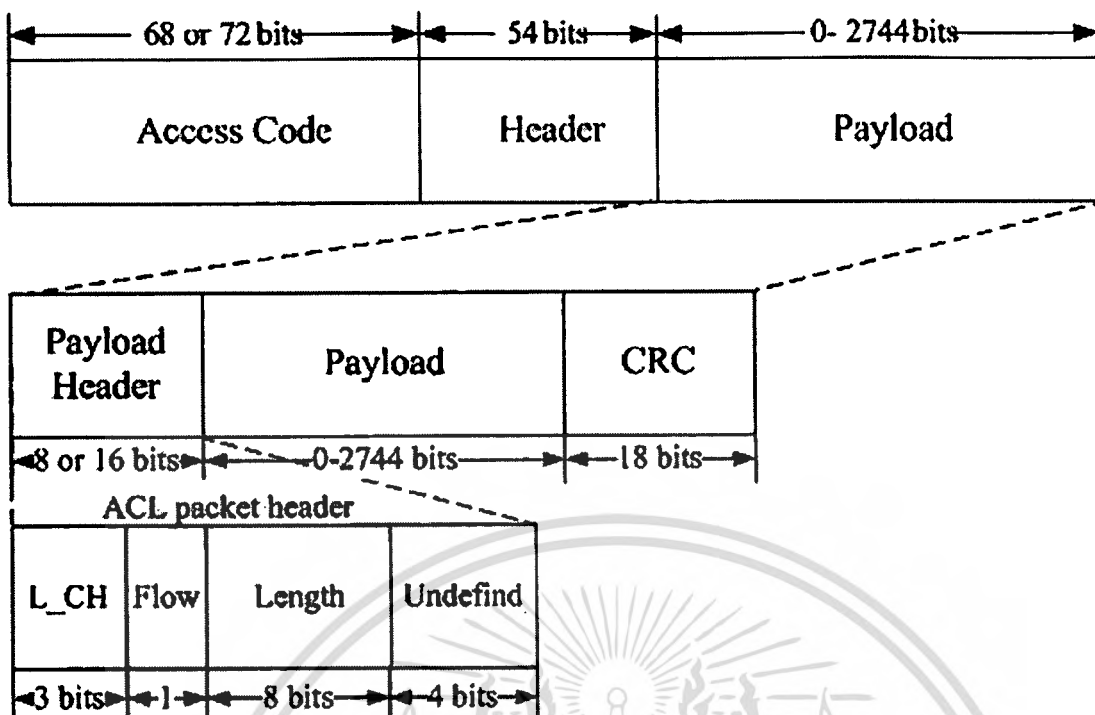
ใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องในส่วนหัวมีขนาด 8 บิต ค่าของ HEC ถูกคำนวณจากบิตในส่วนหัว เมื่ออุปกรณ์ได้รับแพ็คเกจจะทำการคำนวณค่า HEC จากบิตส่วนหัวและเปรียบเทียบกับค่า HEC ของแพ็คเกจที่รับได้

ตารางที่ 2.2 ประเภทของ Packet type ในการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสและแบบอะซิงโครนัส

ประเภท	Packet type	จำนวนช่องสัญญาณ	เชื่อมต่อแบบซิงโครนัส	เชื่อมต่อแบบอะซิงโครนัส
1	0000	1	NULL	NULL
	0001	1	POLL	POLL
	0010	1	FHS	FHS
	0011	1	DM1	DM1
2	0100	1	ไม่ใช่	DH1
	0101	1	HV1	ไม่ใช่
	0110	1	HV2	ไม่ใช่
	0111	1	HV3	ไม่ใช่
	1000	1	DV	ไม่ใช่
	1001	1	ไม่ใช่	AUX1
3	1010	3	ไม่ใช่	DM3
	1011	3	ไม่ใช่	DH3
	1100	3	ไม่ใช่	ไม่ใช่
	1101	3	ไม่ใช่	ไม่ใช่
4	1110	5	ไม่ใช่	DM5
	1111	5	ไม่ใช่	DH5

### 2.3.1.3 ส่วนข้อมูล

ส่วนสุดท้ายของแพ็คเกจบลูทูธคือ ส่วนข้อมูล ซึ่งมี 2 ประเภท ได้แก่ ส่วนของข้อมูลเสียง (สำหรับแพ็คเกจแบบซิงโครนัส) และส่วนข้อมูลดิจิทัล (สำหรับแพ็คเกจแบบอะซิงโครนัส) ซึ่ง ส่วนของข้อมูลจะมีทั้งส่วนของข้อมูลเสียงและข้อมูลดิจิทัลอยู่ในแพ็คเกจเดียวกัน สำหรับ ส่วนข้อมูลของแพ็คเกจจะประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนหัวของส่วนข้อมูล (Payload header) ส่วนข้อมูลสื่อสาร (Payload body) และ CRC



รูปที่ 2.11 โครงสร้างส่วนข้อมูลของแพคเกจ

1) ส่วนหัวของข้อมูล

ในแพคเกจของบลูทูธจะมีเพียงส่วนข้อมูลเท่านั้นที่มีส่วนหัวเฉพาะ โดยขนาดส่วนหัวของส่วนข้อมูลอาจเป็น 1 หรือ 2 ไบต์ขึ้นอยู่กับจำนวนช่องสัญญาณที่แต่ละแพคเกจใช้ เช่น แพคเกจที่ใช้ 1 ช่องสัญญาณจะมีขนาดของส่วนหัวของส่วนข้อมูลเท่ากับ 1 ไบต์ แต่ถ้าแพคเกจที่ใช้มากกว่า 1 ช่องสัญญาณจะมีขนาดส่วนหัวของส่วนข้อมูลเป็น 2 ไบต์ ส่วนหัวของส่วนข้อมูลจะทำหน้าที่ระบุรายละเอียดของช่องสัญญาณ ควบคุมการกำหนดบิต FLOW ของช่องสัญญาณ และแสดงความยาวของส่วนข้อมูลสื่อสาร

2) ส่วนข้อมูลสื่อสาร

ส่วนข้อมูลสื่อสารจะเป็นส่วนที่บรรจุข้อมูลที่ต้องการส่งจากอุปกรณ์ส่งไปยังอุปกรณ์รับ โดยความยาวของข้อมูลสื่อสารจะแสดงไว้ในส่วนหัวของส่วนข้อมูล

3) CRC

บิตข้อมูลใน CRC ถูกคำนวณจากข้อมูลที่ทำการส่ง เมื่อคำนวณเสร็จเรียบร้อยแล้วจะนำมาใส่ต่อจากส่วนของข้อมูลสื่อสาร โดย CRC เป็นกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลในแพคเกจ ซึ่งค่าของ CRC จะถูกคำนวณก่อนการตีเทคต์ส่วนข้อมูลสื่อสาร

## 2.3.2 ชนิดของแพ็คเกจบลูทูธ

### 2.3.2.1 แพ็คเกจที่ใช้ทั้งในการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัสและแบบอะซิงโครนัส

#### 1) แพ็คเกจแบบ NULL

แพ็คเกจแบบ NULL จะไม่มีส่วนข้อมูล ดังนั้นในแพ็คเกจจะประกอบไปด้วยส่วนของรหัสการเข้าถึงและส่วนหัวเท่านั้น ทำให้แพ็คเกจแบบ NULL มีขนาด 126 บิต แพ็คเกจแบบ NULL ใช้ส่งข้อมูลกลับไปยังอุปกรณ์ส่ง เพื่อให้อุปกรณ์ส่งทราบว่าส่งแพ็คเกจได้สำเร็จหรือไม่หรือใช้แสดงสถานะบัฟเฟอร์อุปกรณ์รับ เมื่อทำการส่งแพ็คเกจแบบ NULL แล้วอุปกรณ์รับไม่ต้องทำการยอมรับแบบถูกต้องไปยังอุปกรณ์ส่ง

#### 2) แพ็คเกจแบบ POLL

แพ็คเกจแบบ POLL คล้ายกับแพ็คเกจแบบ NULL คือเป็นแพ็คเกจที่ไม่มีส่วนข้อมูลแต่แพ็คเกจแบบ POLL ต้องการการตอบกลับจากอุปกรณ์รับซึ่งต่างจากแพ็คเกจแบบ NULL ที่ไม่ต้องการใช้การตอบรับการส่งแพ็คเกจไปยังอุปกรณ์ส่ง

#### 3) แพ็คเกจแบบ FHS

แพ็คเกจแบบ FHS เป็นแพ็คเกจควบคุมพิเศษซึ่งแสดงให้ทราบถึงแอดเดรสและนาฬิกาของอุปกรณ์ส่ง ส่วนข้อมูลประกอบไปด้วยบิตข้อมูลสื่อสาร 144 บิต รวมกับ CRC ขนาด 16 บิต และทำการเข้ารหัสด้วย FEC ในอัตรา 2/3 ซึ่งจะทำให้ส่วนข้อมูลมีขนาดทั้งหมด 240 บิต แพ็คเกจแบบ FHS ใช้เพียง 1 ช่องเวลาในการส่งแพ็คเกจ

#### 4) แพ็คเกจแบบ DM1

แพ็คเกจแบบ DM1 อยู่ในแพ็คเกจประเภทที่ 1 เนื่องจากใช้ส่งข้อมูลที่ใช้ในการควบคุมในทุกๆแบบ ของการเชื่อมต่อถึงอย่างไรก็ตามแพ็คเกจแบบ DM1 สามารถรับส่งข้อมูลต่างๆไปได้

### 2.3.2.2 แพ็คเกจที่ใช้ในการเชื่อมต่อแบบซิงโครนัส

แพ็คเกจแบบซิงโครนัสจะไม่มีส่วน CRC และเมื่อการส่งแพ็คเกจเกิดการผิดพลาดขึ้นจะไม่มีกรส่งแพ็คเกจใหม่ นอกจากนั้นแล้วแพ็คเกจนี้จะส่งไปด้วยอัตราเร็ว 64 กิโลบิตต่อวินาที

#### 1) แพ็คเกจแบบ HV1

แพ็คเกจแบบนี้สามารถบรรจุข้อมูลที่ต้องการส่งได้ 10 ไบต์ โดยไม่มีส่วนหัวของส่วนข้อมูล และใช้การเข้ารหัสแบบ FEC ด้วยอัตรา 1/3 เป็นการป้องกันความผิดพลาดข้อมูล แพ็คเกจแบบ HV1 ไม่ใช้ CRC

#### 2) แพ็คเกจแบบ HV2

แพ็คเกจแบบ HV2 สามารถบรรจุข้อมูลได้ 20 ไบต์ โดยไม่มีส่วนหัว มีการป้องกันความผิดพลาดของข้อมูลด้วยการเข้ารหัสแบบ FEC ด้วยอัตรา 2/3 และไม่มีกรใช้ CRC

### 3) แพคเกตแบบ HV3

แพคเกตแบบ HV3 สามารถบรรจุข้อมูลได้ 30 ไบต์ โดยไม่มีส่วนหัว ไม่มีการใช้ทั้ง FEC และ CRC

### 4) แพคเกตแบบ DV

แพคเกตแบบ DV เป็นแพคเกตที่มีทั้งส่วนของข้อมูลแบบเสียงและข้อมูลแบบดิจิทัล โดยข้อมูลเสียงมีขนาด 80 บิต และ ไม่มีการใช้ FEC ในขณะที่ข้อมูลแบบดิจิทัลมีขนาด 150 บิต ประกอบไปด้วยข้อมูลที่ต้องการสื่อสาร 80 บิต (รวมส่วนหัวของส่วนข้อมูลขนาด 8 บิต) และ CRC ขนาด 16 บิต ข้อมูลแบบดิจิทัลมีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด FEC ด้วยอัตรา 2/3 นอกจากนี้แล้วยังมีการเพิ่มบิตศูนย์เข้าไปในส่วนข้อมูลแบบดิจิทัลเพื่อให้จำนวนบิตข้อมูลเป็นจำนวนเท่าของ 10 ก่อนการเข้ารหัสแบบ FEC แพคเกตแบบ DV จะทำการแยกส่วนของข้อมูลเสียงและดิจิทัลออกจากกัน โดยส่วนของข้อมูลเสียงถูกปฏิบัติเหมือนข้อมูลเชิงโครมัสและไม่มีการส่งข้อมูลใหม่เมื่อพบความผิดพลาด

### 5) แพคเกตแบบ DH5

แพคเกตแบบ DH5 คล้ายกับแพคเกตแบบ DM5 ยกเว้นแพคเกตแบบ DH5 ไม่มีการเข้ารหัสแบบ FEC แพคเกต DH5 มีขนาด 341 ไบต์ (รวมส่วนหัวของส่วนข้อมูล 2 ไบต์) และ CRC ขนาด 16 บิต แพคเกตแบบ DH5 ใช้ช่วงเวลา และขณะที่ส่งหรือรับแพคเกต DH5 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ตลอดช่วง 5 ช่องเวลา โดยช่วงเวลาแรกจะมีการส่งข้อมูลรหัสช่วงเวลา

### 6) แพคเกตแบบ AUX1

แพคเกตแบบ AUX1 คล้ายกับแพคเกตแบบ DH1 แต่แพคเกตแบบ AUX1 ไม่มีการใช้ CRC นอกจากนี้แล้วแพคเกตนี้มีขนาดข้อมูลเท่ากับ 30 ไบต์ (รวมส่วนหัวของส่วนข้อมูล 1 ไบต์) และใช้เพียง 1 ช่องเวลาในการส่งแพคเกต

## 2.4 บทสรุปของแพคเกตบลูทูธ

ข้อมูลของแพคเกตและคุณสมบัติต่างๆของแพคเกตแสดงดังตารางที่ 3, 4 และ 5 โดยส่วนข้อมูลที่ไม่ได้รวมส่วนของ FEC, CRC และส่วนหัวของส่วนข้อมูล

ตารางที่ 2.3 แพคเกจที่ใช้ควบคุมการเชื่อมต่อ

ชนิด	ขนาดข้อมูลสื่อสาร (ไบต์)	FEC	CRC	อัตราการส่งข้อมูล แบบสมมาตร	การส่งข้อมูลแบบไม่ สมมาตร
ID	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
NULL	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
POLL	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
PHS	18	2/3	ใช่	ไม่มี	ไม่มี

ตารางที่ 2.4 แพคเกจแบบซิงโครนัส

ชนิด	ขนาดส่วนหัวของ ข้อมูลสื่อสาร (ไบต์)	ขนาดข้อมูล สื่อสาร (ไบต์)	FEC	CRC	อัตราการส่งข้อมูลแบบ สมมาตร (กิโลบิต/วินาที)
HV1	ไม่มี	10	1/3	ไม่มี	ไม่มี
HV2	ไม่มี	20	2/3	ไม่มี	ไม่มี
HV3	ไม่มี	30	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี

ตารางที่ 2.5 แพคเกจแบบอะซิงโครนัส

ชนิด	ขนาดข้อมูล สื่อสาร (ไบต์)	ขนาดข้อมูล สื่อสาร (ไบต์)	FEC	CRC	อัตราการส่ง ข้อมูลแบบ สมมาตร (กิโลบิต/วินาที)	อัตราการส่งข้อมูล แบบไม่สมมาตร (กิโลบิต/วินาที)	
						ไป	กลับ
DM1	1	0-17	2/3	ใช่	108.8	108.8	108.8
DH1	1	0-27	ไม่มี	ใช่	172.8	172.8	172.8
DM3	2	0-121	2/3	ใช่	258.1	387.2	54.4
DH3	2	0-183	ไม่มี	ใช่	390.4	585.6	86.4
DM5	2	0-224	2/3	ใช่	286.7	477.8	36.3
DH5	2	0-339	ไม่มี	ใช่	433.9	723.2	57.6
AUX1	1	0-29	ไม่มี	ไม่มี	185.6	185.6	185.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## ความรู้พื้นฐาน

### 3.1 ช่องสัญญาณรบกวนขาวววกเกาส์ (AWGN)

ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ สัญญาณจะส่งผ่านสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่อยู่โดยรอบทำให้เกิดสัญญาณรบกวน การหน่วงเวลา และการจางหายเนื่องจากสัญญาณที่ถูกสะท้อนจากสิ่งกีดขวาง (Scatterer) รวมถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมอื่นๆ เช่น สัญญาณรบกวนขาวววก (AWGN) ดังนั้นการจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์สมรรถนะจะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เป็นผลมาจากช่องสัญญาณด้วย

ในการจำลองช่องสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับนั้น จะกำหนดให้สัญญาณได้รับการรบกวนจากสัญญาณรบกวน AWGN ดังรูปที่ 3.1 จะได้สมการดังนี้

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (3.1)$$

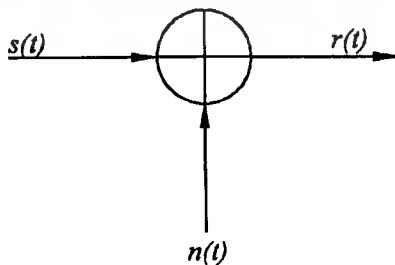
เมื่อ  $r(t)$  คือสัญญาณที่เครื่องรับ

$s(t)$  คือสัญญาณจากเครื่องส่ง

$n(t)$  คือสัญญาณรบกวน ที่มีค่า Power Spectrum density ดังสมการต่อไปนี้

$$\Phi_{nn}(f) = \frac{1}{2} N_0 [W / Hz] \quad (3.2)$$

เมื่อ  $N_0$  คือค่าคงที่หรือความหนาแน่นของพลังงานรบกวน และในการจำลองกำหนดให้  $n(t)$  มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ มีความแปรปรวนเท่ากับหนึ่ง



รูปที่ 3.1 กระบวนการการเกิดสัญญาณรบกวนที่เครื่องรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่เครื่องรับจะเกิดความผิดพลาดเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน AWGN ทำให้การคืนสัญญาณเดิมเกิดความผิดพลาดขึ้น โดยสัญญาณรบกวนจะส่งผลต่อการเกิดบิตผิดพลาดขึ้นเนื่องมาจากการตรวจจับสัญญาณ ไบนารีที่ผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวน AWGN อาจ เสริมหรือหักล้างกับสัญญาณที่ส่งมาจากเครื่องส่งก็ได้

### 3.2 การมอดูเลตแบบ Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK)

Gaussian Frequency Shift Keying หรือ GFSK เป็นการมอดูเลชันทางความถี่แบบเกาส์ ซึ่งข้อมูลมีลักษณะสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมร่วมกับเกาส์พัลส์ ก่อนที่จะนำไปมอดูเลชันทางความถี่กับคลื่นพาหะมีลักษณะเฟสแบบต่อเนื่อง และส่งไปในรูปแบบความถี่ซึ่งสามารถเขียนสมการคณิตศาสตร์ของสัญญาณได้เป็น [4]

$$s(t, a) = A \cos(2\pi f_c t + \phi(t, a)) \quad (3.3)$$

โดยที่  $A = \sqrt{\frac{2E_b}{T}}$ ,  $E_b$  คือ พลังงานต่อบิตข้อมูล  $f_c$  คือ ความถี่คลื่นพาหะ และ  $a$  คือค่านำเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องในรูปแบบกลุ่มประกอบเป็น บิตข้อมูล  $\alpha_i$ ;  $\phi(t, a)$  คือข้อมูลเฟสเบี่ยงเบนส่งออก

$$\begin{aligned} \phi(t, a) = & 2\pi f_c \sum_{i=n-L+1}^n \alpha_i q(t-iT) \\ & + \pi h f_c \sum_{i=-\infty}^{n-L} \alpha_i \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

สมการที่ 3.4 คือค่าผลรวมสะสมเฟสของสัญลักษณ์ และเรียกว่าช่วงเฟส สมการที่ 3.5 คือส่วนประกอบสมการที่สอง

### 3.3 การควบคุมการไหลแบบ TCP สำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย

ขั้นแรกคือทำความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานในงานวิจัยคือการนำ TCP ไปใช้งานในระบบทั้งมีสายและไร้สาย จากนั้นพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น เมื่อนำ TCP มาใช้งานบนเครือข่ายไร้สายและทำการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการเข้าคิวซึ่งถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบการทำงานดังนั้นควรศึกษาทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับ TCP

เนื่องจาก TCP ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานบนเครือข่ายมีสายเป็นหลักดังนั้นเมื่อมีการ

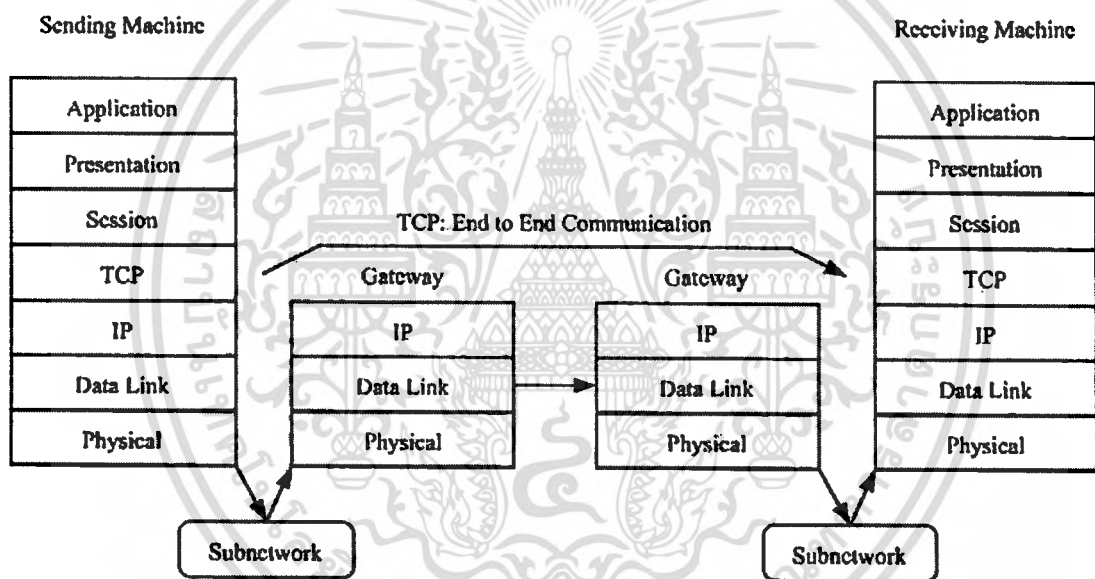
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเผยแพร่ความรู้ในประโยชน์ของสังคม  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TCP ลดลงเนื่องจากมีความไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน จึงต้องทำการศึกษาดังลักษณะ

ของ TCP)

### 3.3.1 ทราบนสมิตชั้นคอนโทรลโปรโตคอล (Transmission Control Protocol: TCP)

TCP เป็นโปรโตคอลที่ได้เตรียมการบริการต่างๆ ไว้เพื่อรองรับการใช้งานในชั้นที่สูงกว่าหรือต่ำกว่า เช่น IP (Internet Protocol) โดย TCP เป็นโปรโตคอลแบบคอนเนคชันโอเรียนเตด (Connection-Oriented Protocol) ซึ่งทำให้การส่งข้อมูลบนเครือข่ายมีความน่าเชื่อถือและทำให้แน่ใจว่า สามารถที่จะส่งข้อมูลถึงปลายทางได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ โดย TCP จะทำหน้าที่คล้ายกับเป็น โปรโตคอลที่มีหน้าที่ตรวจสอบข้อความว่าถูกต้องหรือไม่ โดยถ้าข้อมูลที่ส่งไปที่ปลายทาง มีการสูญหายหรือไม่ครบถ้วน TCP ก็จะทำการส่งซ้ำข้อมูลที่สูญหาย ซึ่งในชั้นอื่นๆจะไม่มีการทำงานในลักษณะนี้ [5]



รูปที่ 3.2 การสื่อสารแบบปลายถึงปลายของ TCP

รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของ TCP ในมาตรฐานการสื่อสารในระบบเปิด (Open Systems Interconnection: OSI) จะเห็นได้ว่า TCP อยู่ในชั้นของ ทราบนสมิตเลเยอร์ และ ข้อมูลที่ส่งผ่าน TCP ถูกเรียกว่าดาตาแกรม (Datagram) โดย TCP จะติดตั้งอยู่ที่อุปกรณ์ที่มีการจัดการเกี่ยวกับดาตาแกรม เท่านั้น เพื่อให้มั่นใจว่าดาตาแกรมสามารถที่จะถูกส่งจากต้นทางไปถึงปลายทางได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ จากภาพที่ 3.2 จะเห็นว่า TCP ไม่ได้ติดตั้งอยู่ในระดับเกตเวย์ (Gateway) ซึ่งมีหน้าที่หาเส้นทางให้ดาตาแกรมเท่านั้น

เนื่องจาก TCP เป็นโปรโตคอลแบบคอนเนคชันโอเรียนเตด เพื่อให้มั่นใจว่าสามารถส่งข้อมูล จากต้นทางสู่ปลายทางได้อย่างถูกต้อง โดย TCP จะได้รับข้อความจากปลายทางซึ่งจะแจ้งให้ต้นทางทราบว่าข้อมูลที่ส่งออกไปได้ไปถึงปลายทางอย่างถูกต้องแล้ว โดยการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างต้นทางกับปลายทางของ TCP จะมีการสร้างวงจรเสมือนซึ่งง่ายต่อการสร้างสัญญาณตอบรับหรือตัวเลขลำดับดาตาแกรม

### 1) วิธีการสร้างความน่าเชื่อถือของ TCP

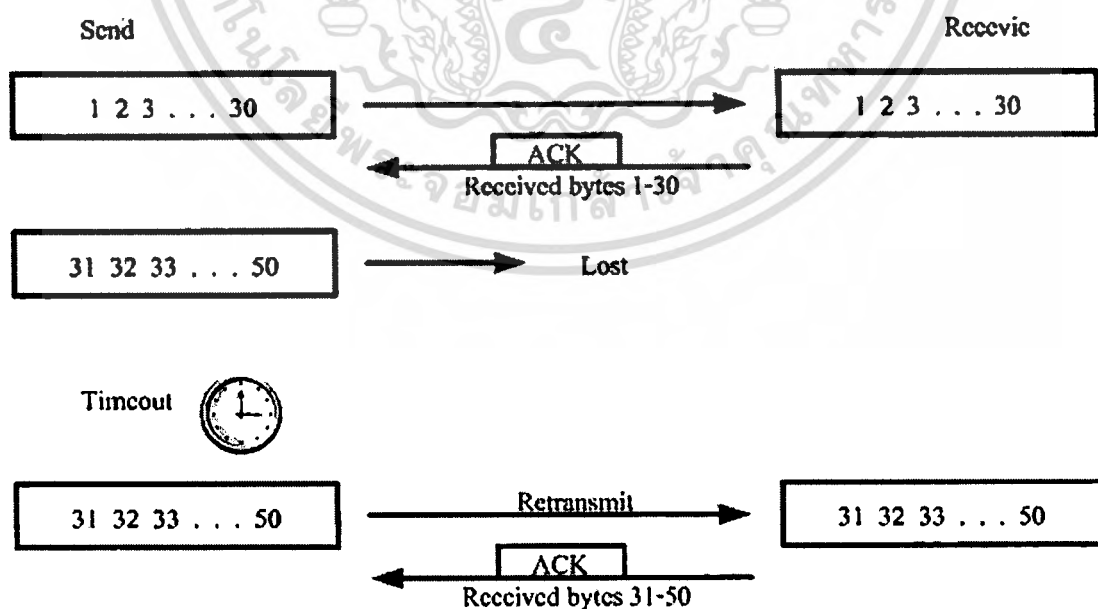
ในส่วนี้ จะกล่าวถึงวิธีการที่ TCP ใช้สร้างความน่าเชื่อถือในการส่งข้อมูล ซึ่งทำให้ไม่เกิดการสูญหายและการส่งซ้ำข้อมูล

#### 1.1) เลขลำดับและการตอบรับ

TCP จะใช้เลขลำดับและการตอบรับ (ACK) ในการสร้างความน่าเชื่อถือของการส่งข้อมูล โดยทุกไบต์ข้อมูลที่ถูกส่งในการเชื่อมต่อของ TCP จะถูกมองเป็นลำดับตัวเลขที่เรียงต่อกัน ซึ่งในส่วนหัว (Header) ของ TCP จะบรรจุตัวเลขที่เป็นลำดับเรียงกันของข้อมูลไบต์แรกไว้ในเชกเมนต์นั้น [6]

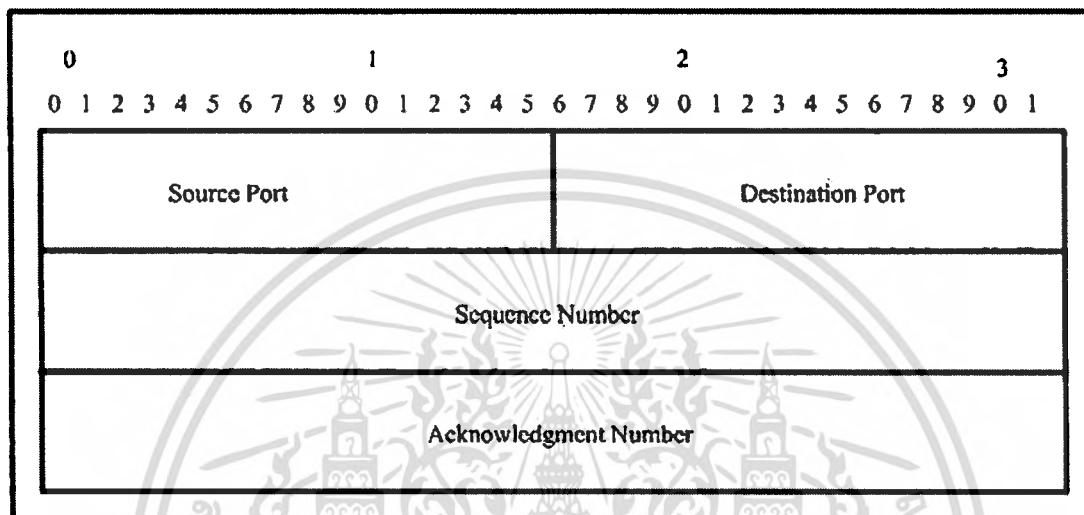
ทางฝั่งผู้รับจะได้รับการคาดหวังว่า จะต้องส่ง ACK ของข้อมูลที่ได้รับไปแล้วไปให้ทางฝั่งผู้ส่งโดยถ้าสัญญาณ ACK ไม่ได้ถูกส่งไปถึงต้นทางภายในระยะเวลาที่กำหนดหรือไทม์เอาท์ ข้อมูลเดิมก็จะถูกส่งมาใหม่อีกครั้งหนึ่ง วิธีการนี้เรียกว่า การตอบรับทางบวกกับการส่งซ้ำ (Positive Acknowledgement with Retransmission)

TCP ทางฝั่งผู้รับจะคอยดูว่าลำดับตัวเลขของข้อมูลที่มาถึงมีลำดับที่ถูกต้องหรือไม่ เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีความผิดพลาดในการส่งข้อมูล แต่ในบางครั้งสัญญาณ ACK ก็อาจจะเกิดการสูญหายหรือไปถึงช้า จึงอาจทำให้เกิดการส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อนและสามารถขจัดทิ้งไปได้ รายละเอียดที่กล่าวมาแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 TCP ไทม์เอาท์และการส่งซ้ำ

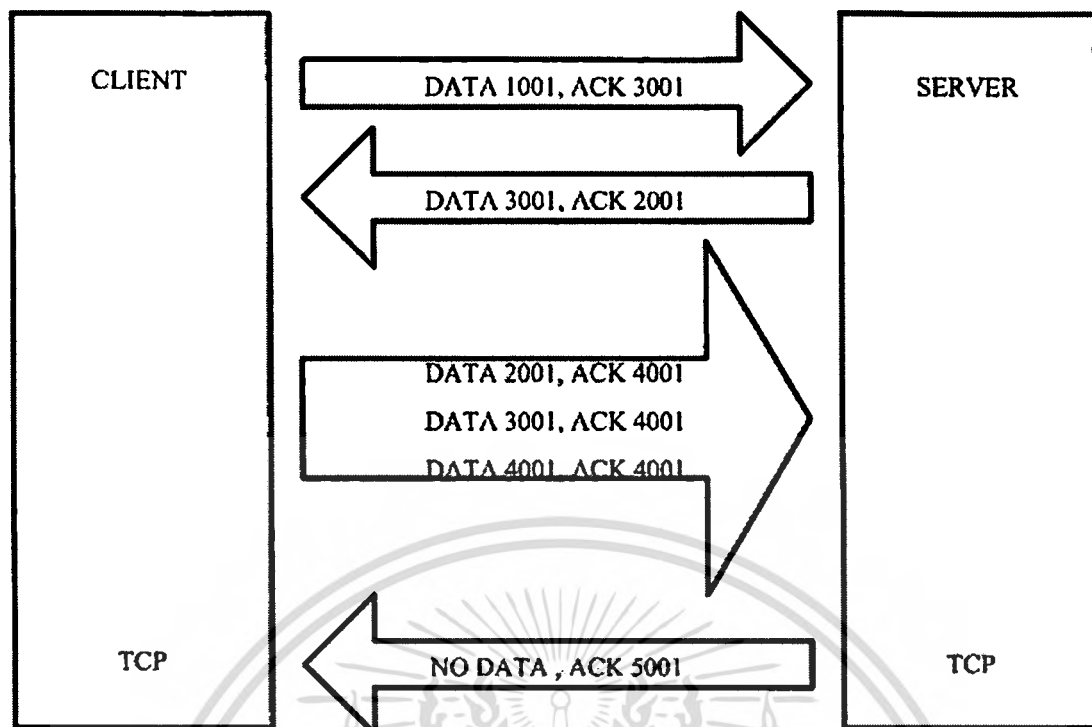
รูปที่ 3.4 แสดง TCP เฮดเดอร์ฟิลด์หรือส่วนแรกที่ใช้เก็บรายละเอียดในการส่งข้อมูลของ TCP จะเห็นได้ว่าในฟิลด์ของ TCP เฮดเดอร์ได้จัดเตรียมพื้นที่สำหรับพอร์ตต้นทางและพอร์ตปลายทาง ตัวเลขที่เรียงลำดับไบต์แรกของข้อมูลที่ส่งมาด้วยและตัวเลขของสัญญาณตอบรับ ซึ่งจะบรรจุเลขลำดับของไบต์ถัดไปที่คาดว่าจะส่งต่อไป ยกตัวอย่างเช่น ถ้า TCP ได้รับข้อมูลถึงไบต์ที่ 30 ก็อาจจะเขียน 31 ลงไปในฟิลด์การตอบรับ (Acknowledgement Field)



รูปที่ 3.4 ฟิลด์เบื้องต้นของ TCP เฮดเดอร์

มีสิ่งหนึ่งที่น่าสนใจ สมมติว่า ACK ส่งข้อมูลไบต์ที่ 1 ถึงไบต์ที่ 50 แล้วไม่มีข้อมูลที่ต้องการจะส่งในกรณีเช่นนี้เมื่อ TCP ได้รับ ACK จากฝั่งตรงข้ามก็จะส่งเฉพาะ TCP เฮดเดอร์ไป โดยไม่มีข้อมูลโดยปกติในเฮดเดอร์จะบรรจุค่าของ ACK ซึ่งในที่นี้ก็คือ 51 เพื่อเป็นการบอกให้ฝั่งตรงข้ามรู้ว่าข้อมูลที่จะส่งในครั้งต่อไปก็คือ 51

รูปที่ 3.5 แสดงการส่งข้อมูลระหว่าง TCP ซึ่งในตัวอย่างจะใช้ข้อมูลขนาด 1,000 ไบต์ และในแต่ละ TCP เฮดเดอร์เซกเมนต์จะบรรจุด้วย ACK ฟิลด์ ซึ่งแสดงตัวเลขลำดับของไบต์ถัดไปที่คาดว่าจะส่งมาจากอีกฝ่ายหนึ่ง



รูปที่ 3.5 การส่งข้อมูลพื้นฐานและ ACKs

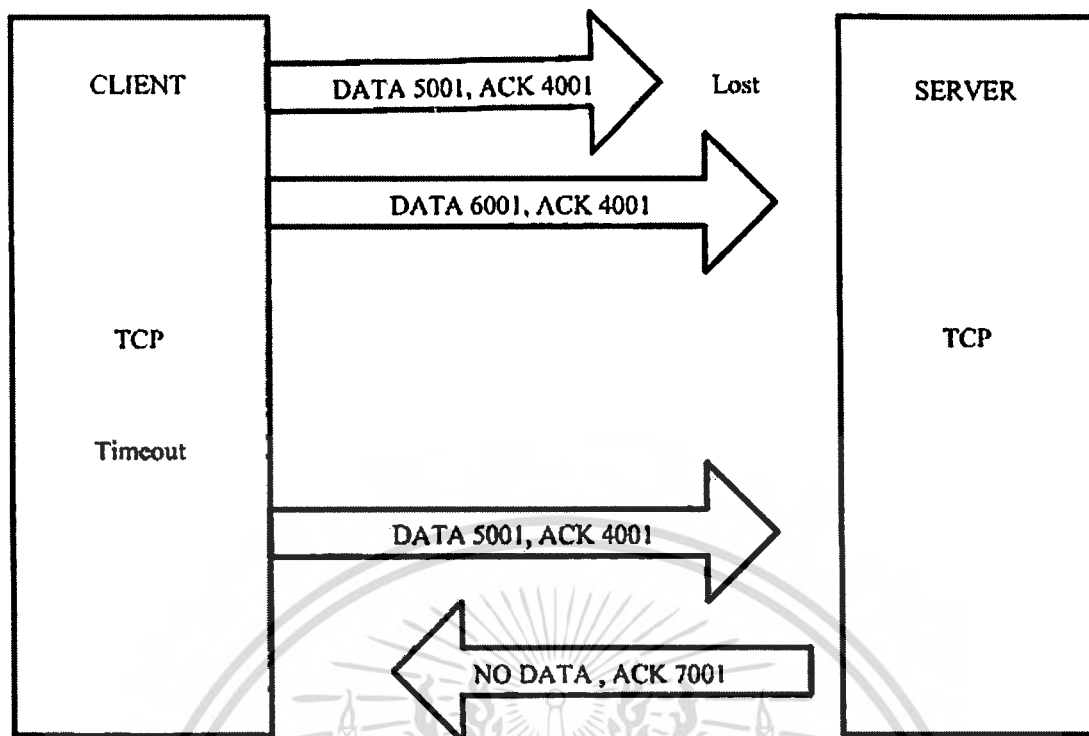
เซกเมนต์แรกจะส่งจากฝั่งลูกข่าย (Client) โดยมีไบต์ที่ 1001 ถึง 2000 โดย ACK ฟิลด์จะเป็น 3001 ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นไบต์ถัดไปที่ฝั่งแม่ข่าย (Server) จะส่งมา

แม่ข่ายจะทำการตอบกลับมาด้วยเซกเมนต์ซึ่งมีข้อมูล 1,000 ไบต์ (เริ่มต้นที่ 3001) ซึ่ง ACK ฟิลด์ใน TCP เซกเตอร์จะแสดงให้เห็นว่าไบต์ที่ 1001 ถึง 2001 ที่ฝั่งแม่ข่ายได้รับข้อมูลอย่างสมบูรณ์แล้วจะเห็นว่าเลขลำดับของไบต์ถัดไปที่คาดว่าจะได้รับข้อมูลจากฝั่งลูกข่ายคือไบต์ที่ 2001

ถัดมาลูกข่ายจะส่งเซกเมนต์ที่เริ่มต้นที่ไบต์ 2001 3001 และ 4001 โดยส่งอย่างต่อเนื่องซึ่งฝั่งลูกข่ายไม่จำเป็นที่จะต้องรอสัญญาณ ACK ของแต่ละเซกเมนต์ก่อนในการส่งแต่ละเซกเมนต์โดยสามารถส่งได้จนกว่าบัฟเฟอร์ฝั่งตรงข้ามจะเต็ม

ในฝั่งแม่ข่ายจะทำการส่งสัญญาณ ACK มาเพียงสัญญาณเดียว ก็สามารถที่จะแสดงให้เห็นว่าข้อมูลทั้งหมดได้รับอย่างถูกต้องสมบูรณ์ ทั้งที่ส่งมาเพียง ACK เดียวนั้น ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดแบนด์วิดท์

รูปที่ 3.6 แสดงการส่งข้อมูลในกรณีที่เซกเมนต์แรกเกิดการสูญเสียบางส่วน ซึ่งหลังจากเกินช่วงเวลาไทม์เอาต์ เซกเมนต์จะถูกส่งซ้ำอีกหนึ่งครั้ง จะเห็นว่าเมื่อเซกเมนต์ที่ส่งไม่สำเร็จในครั้งแรกมาถึงฝั่งผู้รับก็สามารถที่จะส่งสัญญาณ ACK เพียงครั้งเดียว ก็สามารถที่จะบอกได้ว่าทั้ง 2 เซกเมนต์ได้รับอย่างถูกต้อง



รูปที่ 3.6 การสูญหายและการส่งซ้ำข้อมูล

### 1.3) ตัวจับเวลาของ TCP

TCP ใช้การจับเวลาหลายแบบเพื่อให้แน่ใจว่าจะไม่เกิดดีเลย์มากเกินไปในขณะการสื่อสาร ซึ่งตัวจับเวลาเหล่านี้จะจัดการแก้ปัญหาต่างๆ ได้เป็นอย่างดีแต่อาจจะยังไม่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในการวิเคราะห์ในครั้งแรก ซึ่งในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นว่าตัวจับเวลาของ TCP ทำหน้าที่ส่งข้อมูลให้ไปถึงปลายทางได้อย่างถูกต้อง

#### - ตัวจับเวลาการส่งซ้ำ

ตัวจับเวลาการส่งซ้ำจะทำหน้าที่จัดการกับไทม์เอาต์ การส่งซ้ำ (Retransmission Timeouts: RTOs) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลไปยังปลายทางและสัญญาณ ACK มาถึงต้นทางมากกว่าค่าที่กำหนด โดยค่าไทม์เอาต์จะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของเครือข่ายซึ่งมีความเร็วที่ต่างกัน เมื่อตัวจับเวลาถึงค่าที่กำหนดข้อมูลจะถูกส่งซ้ำและทำการปรับค่า RTO ซึ่งโดยปกติจะทำการปรับค่าแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลไปจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดเกิดขึ้นแสดงว่าการเชื่อมต่อล้มเหลว

โดยค่าสำหรับ ไทม์เอาต์จะถูกพิจารณาโดยการวัดเวลาเฉลี่ยของข้อมูลที่ถูกส่งออกไปและสัญญาณ ACK ที่ตอบกลับมาก ซึ่งเรียกว่าเวลาการเดินทางวนรอบ (Round Trip Time: RTT)

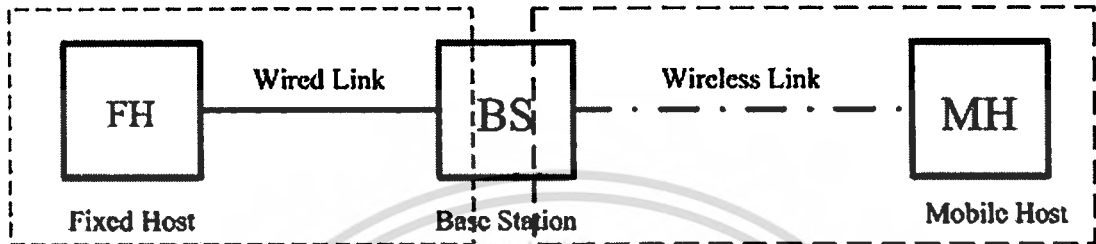
#### - ตัวจับเวลารักษาการเชื่อมต่อและตัวจับเวลารอกการทำงาน (Keep-Alive Timer and Idle Timer)

ทั้งตัวจับเวลารักษาการเชื่อมต่อและรอกการทำงานเป็นฟังก์ชันที่ถูกเพิ่มเข้ามาใน TCP

ภายหลัง โดยตัวจับเวลารักษาการเชื่อมต่อจะส่งแพคเกจว่างในช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีกรณียุติกัน อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารระหว่างต้นทางและปลายทางจะยังคงทำงานอยู่ แต่ถ้าไม่มีการตอบสนองภายหลังจากการส่งข้อความตามช่วงเวลาตัวจับเวลารอการทำงานก็จะหมดเวลาทำให้สันนิษฐานได้ว่าการสื่อสารยกเลิก

ค่าของตัวจับเวลารักษาการเชื่อมต่อโดยปกติจะตั้งค่าโดยแอปพลิเคชันต่างๆ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 4 ถึง 45 วินาที และค่าตัวจับเวลารอการทำงานโดยปกติคือ 360 วินาที



รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายไร้สายและมีสาย

### 3.3.2 การใช้งาน TCP บนเครือข่ายไร้สาย

จากภาพ 3.7 จะเห็นว่าเมื่อนำเครือข่ายไร้สายมาต่อเข้ากับเครือข่ายมีสายจะประกอบไปด้วยเครือข่าย 3 ส่วน ส่วนแรกคือโฮสต์อยู่กับที่ (Fixed Host: FH) ส่วนที่สองสถานีฐาน (Base Station: BS) และส่วนที่สามโฮสต์เคลื่อนที่ (Mobile Host: MH) โดย FH จะเชื่อมต่อไปยัง BS จะทำหน้าที่เป็นประตูหรือเกตเวย์ที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายไร้สายและมีสาย รวมทั้งทำการส่งข้อมูลและแก้ไขความผิดพลาดในการส่งข้อมูลไปยัง MH ด้วย โดย BS จะมีตัวจับเวลาในการส่งข้อมูล ถ้าข้อมูลที่ส่งไปยัง MH ไม่ได้รับสัญญาณตอบกลับในเวลาที่กำหนด ก็จะทำการส่งซ้ำข้อมูลไปยัง MH [7]

จะเห็นว่าเมื่อมีการนำเอา TCP มาใช้งานบนเครือข่ายไร้สาย ก็ได้นำมาดัดตั้งที่ต้นทางและปลายทางเหมือนเดิม ก็คือ FH และ MH แต่จะมีส่วนที่เพิ่มขึ้นมาต่างจากเครือข่ายมีสายปกติคือ BS ซึ่งการทำงานของ TCP บนเครือข่ายไร้สายแสดงในรูปที่ 3.8

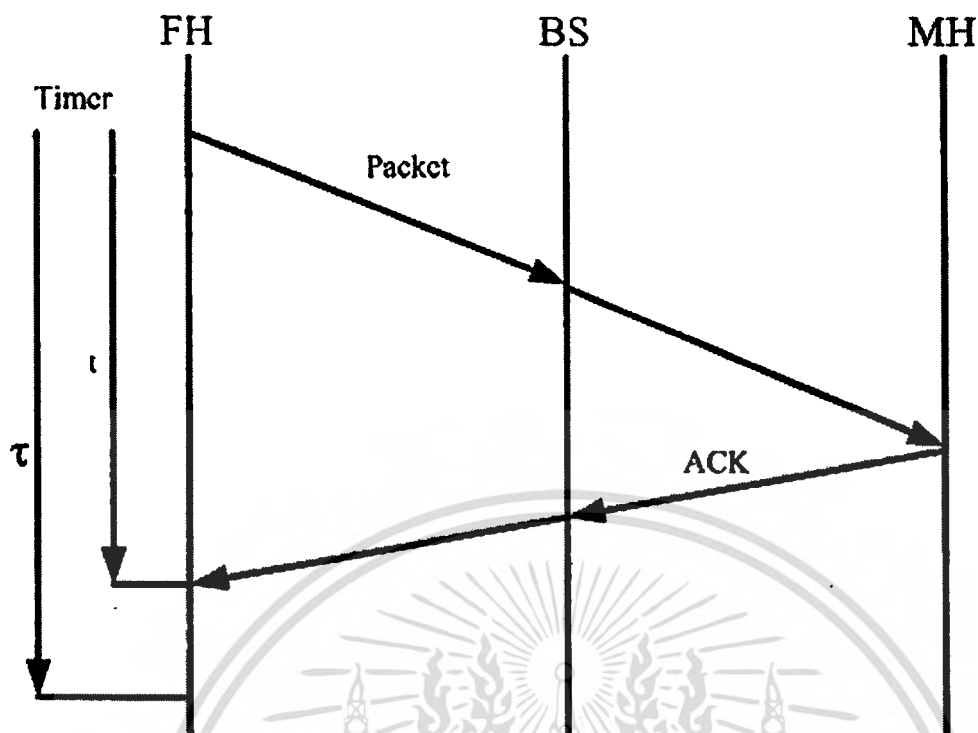
ซึ่งจะเห็นว่าการทำงานเหมือนกับ TCP ที่ใช้ในเครือข่ายแบบมีสายคือ ข้อมูลจะถูกส่งจาก FH ไปยัง BS ผ่านเครือข่ายมีสาย จากนั้น BS ก็จะทำการส่งข้อมูลต่อไปยัง MH โดยผ่านเครือข่ายไร้สาย และ MH ก็ส่งสัญญาณตอบกลับหรือ ACK ไปยัง BS จากนั้น BS ก็จะทำการส่งต่อไปยังโฮสต์อยู่กับที่ผ่านเครือข่ายมีสายโดย

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากต้นทางไปถึงปลายทางรวมเวลาในการส่งสัญญาณ ACK

$T$  คือ ค่าเวลาไทม์เอาท์

สังเกตรูปที่ 3.8 เห็นได้ว่า ข้อมูลส่งสำเร็จภายในเวลาไทม์เอาท์

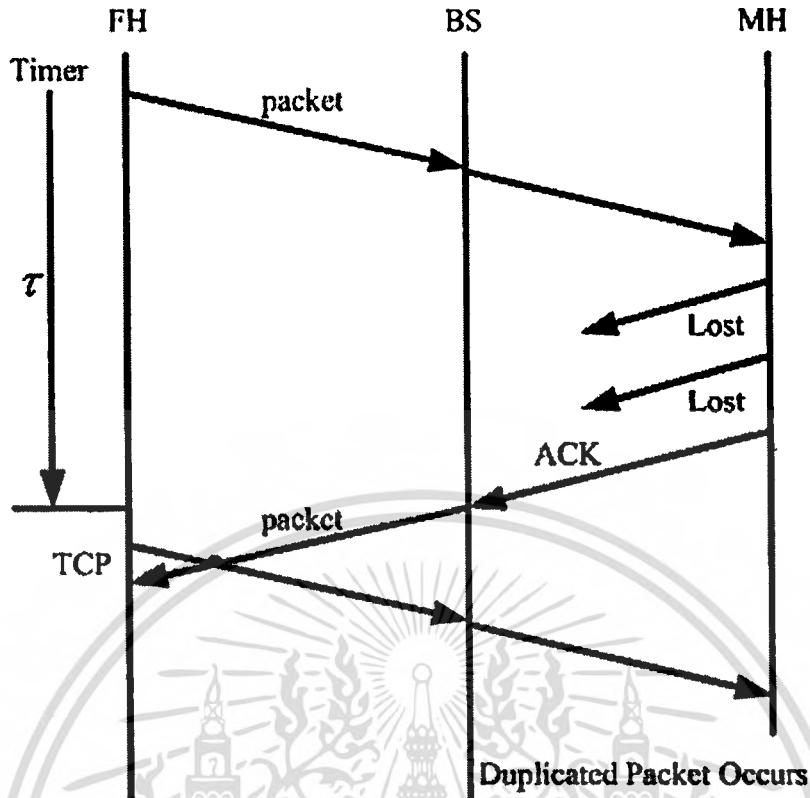
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



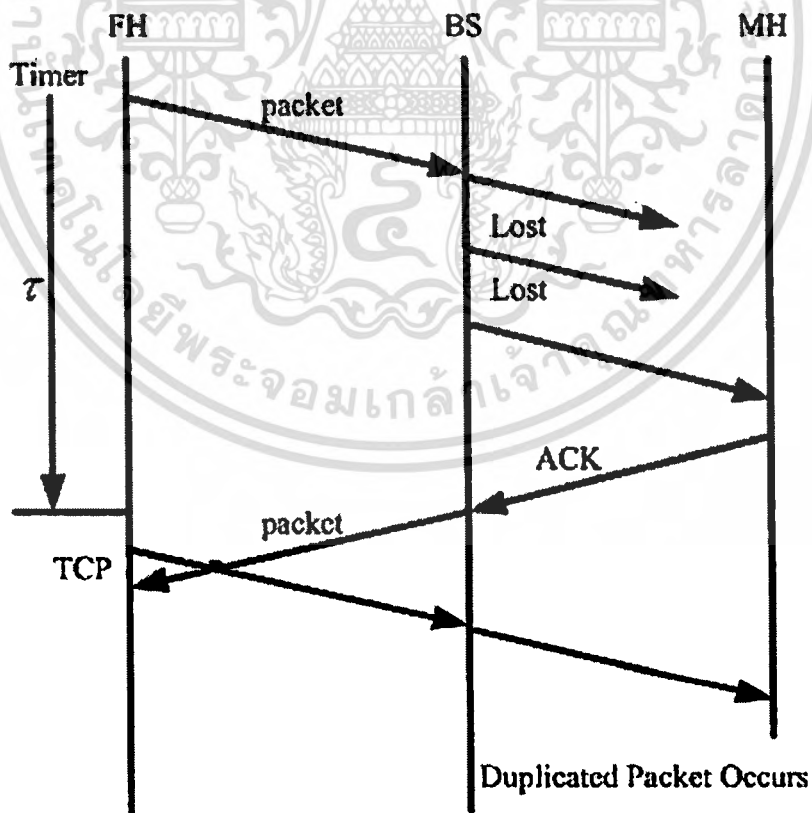
รูปที่ 3.8 การทำงานของ TCP ระหว่างเครือข่ายไร้สาย

#### - ปัญหาเมื่อใช้งาน TCP บนเครือข่ายไร้สาย

จะเห็นว่า TCP ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานบนเครือข่ายมีสาย ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อข้อมูลไม่สามารถไปถึงปลายทาง มักจะเกิดจากความแออัดของการส่งข้อมูลเป็นหลักแต่เมื่อมีการนำมาใช้งานบนเครือข่ายไร้สายปัญหาของการส่งข้อมูลบนเครือข่ายไร้สายจะเกิดจากการผิดพลาดของตัวช่องทางในการส่งข้อมูลนั่นเอง ซึ่งปกติจะมีสัญญาณรบกวนสูงและผิดพลาดได้ง่ายจะเห็นว่าสาเหตุของความผิดพลาดในการส่งข้อมูลของ 2 ระบบนี้ต่างกัน



(ก) การส่งจาก BS ไป MH



(ข) การส่งจาก MH ไป BS

รูปที่ 3.9 การส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อนของ TCP บนเครือข่ายไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 แสดงให้เห็นถึงปัญหาการส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อนเมื่อนำ TCP มาใช้งานบนเครือข่ายแบบไร้สายซึ่งจะพบว่าในขณะที่มีการส่งข้อมูลจาก BS ไปยัง MH รูปที่ 2.8(ก) หรือจาก MH ไปยัง BS นั้นรูปที่ 2.8(ข) ในบางครั้งอาจเกิดการสูญหายหรือส่งไม่สำเร็จ ซึ่ง BS จะทำการแก้ไขโดยทำการส่งซ้ำซึ่งในระหว่างนั้นบางครั้งก็เกิดไทม์เอาท์ขึ้นที่ FH ทำให้เกิดการส่งข้อมูลซ้ำออกมาแต่ในระหว่างนั้นข้อมูลจาก BS ก็อาจจะส่งสำเร็จไปยัง MH และกำลังส่งสัญญาณ ACK กลับไปยัง FH ซึ่งจะเห็นว่าทำให้เกิดการส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อน (Duplicated Packet) ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของ TCP ลดลง

เห็นได้ว่าสิ่งที่แตกต่างกันของการใช้งาน TCP บนเครือข่ายมีสายและเครือข่ายไร้สายก็คือสถานะฐาน เนื่องจากสถานะฐานมีขั้นตอนการส่งซ้ำข้อมูลไปยังโฮสต์เคลื่อนที่จึงทำให้เกิดการทำงานซ้ำซ้อนกันระหว่าง TCP กับสถานะฐาน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พยายามแก้ปัญหาการส่งข้อมูลที่ซ้ำซ้อนในจุดนี้

### 3.3.3 การตรวจตราร่วม

วิธีการนี้แสดงในรูปที่ 3.10 โดยที่ในการรับแต่ละบล็อก ถ้าหากรับได้อย่างถูกต้องจะส่ง ACK (สัญญาณยืนยัน) กลับ และเมื่อทางด้านรับ รับ ACK แล้วก็จะส่งบล็อกต่อไป และถ้าทางด้านตรวจรับพบความผิดพลาด จะส่ง NAK (สัญญาณปฏิเสธ) กลับ ซึ่งจะทำให้มีการส่งบล็อกเดิมกลับมาใหม่ [8]

เมื่ออัตราบิดผิดพลาดในเส้นทางส่งมีค่า  $P$  ขนาดของบล็อกมีค่า  $N$  และแต่ละบิตมีอิสระต่อกันแล้วละก็อัตราแล้วละก็ตรวจรับบล็อกผิดพลาดสามารถหาได้จาก

$$P = 1 - (1 - p)^N \quad (3.6)$$

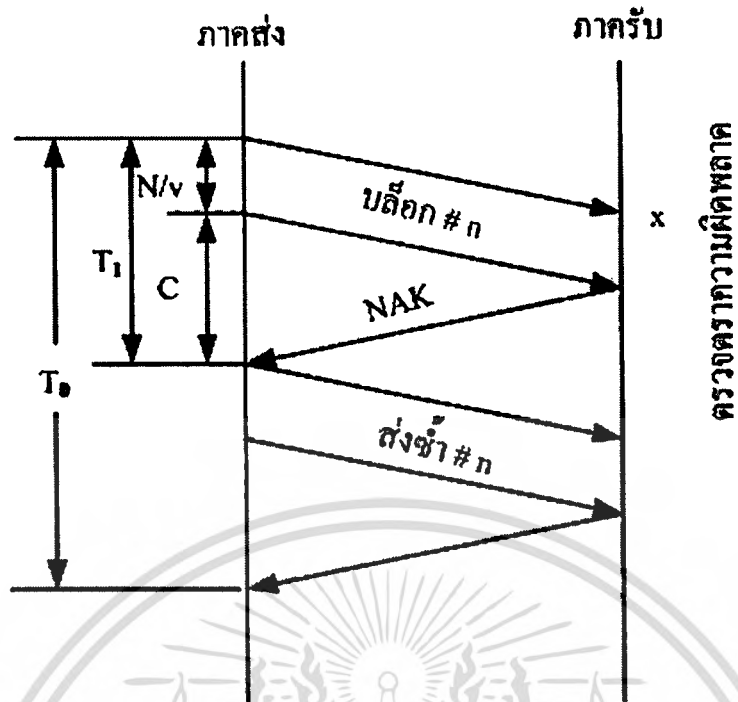
ถ้าให้ความเร็วในการส่ง  $v$  (b/s) และช่วงเวลาจนกระทั่งรับ ACK หรือ NAK หลังจากที่ส่งเรียบร้อยแล้วมีค่า  $C$  ดังนั้นเวลาที่มีประสิทธิภาพในการส่งอย่างถูกต้องจะมีค่า  $T_0 = N/v + C$  สำหรับกรณีที่เกิดการผิดพลาดและจำเป็นที่จะต้องส่งซ้ำนั้นขณะส่งอาจมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ถ้าหากสามารถรับได้ถูกต้องเมื่อส่งไป  $i$  ครั้งแล้วเวลาที่ส่งจริงจะมีค่า  $T_i = (i + 1)T_0$  และถ้าค่าความเป็นได้เท่ากับ  $p^i(1 - p)$  จะได้ว่าค่าเฉลี่ยการส่งคือ

$$\begin{aligned} T_s &= (1 - P)T_0 \sum_{i=0}^{\infty} (i + 1)P^i \\ &= \frac{N/v + C}{1 - P} \end{aligned} \quad (3.7)$$

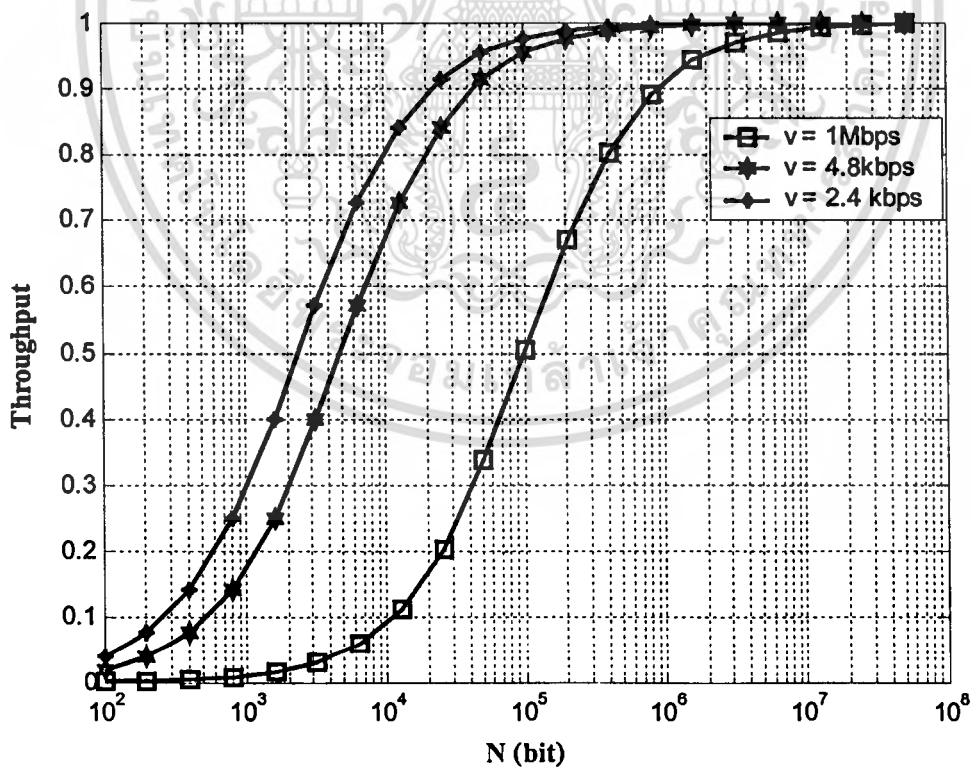
และนั่นเอง ประสิทธิภาพในการส่งจะมีค่า

$$\eta_s = (N/v) / T_s$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.8) การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 วิธีการตรวจตราพร้อม



รูปที่ 3.11 ประสิทธิภาพการส่งของวิธีการตรวจแบบร่วมกัน

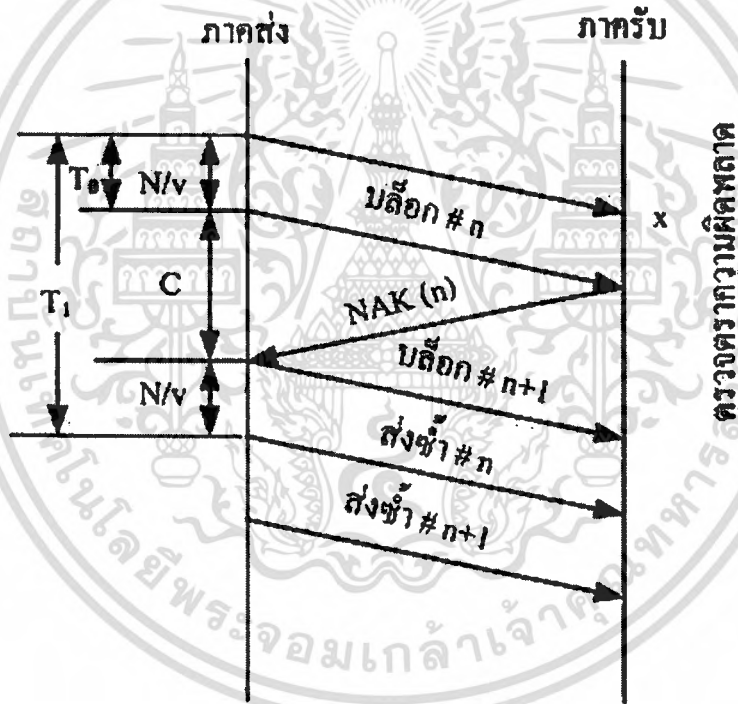
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11 เป็นตัวอย่างจากการคำนวณ การตรวจตราว่านั่นถ้าหาก N มีค่ามากปริมาณ ข่าวสารที่ส่งจะมาก และค่าความผิดพลาดบล็อกจะมีความมากด้วย เพื่อต้องการประสิทธิภาพในการ ส่งจะสูงสุด จะกำหนดได้จากขนาดของบล็อก

1/2  
↓

3.3.4 การตรวจตราในเวลาเดียวกัน

ทำการแสดงวิธีการแสดงในรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าทางด้านส่งจะไม่มีการรอรับการ ยืนยันและมีการส่งข้อมูลออกอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นเมื่อทางด้านรับส่ง ACK หรือ NAK ซึ่งมี หมายเลขบล็อกที่รับได้ส่งไปยังทางด้านส่งแล้ว ถ้าหากมีความผิดพลาดเกิดขึ้น บล็อกที่ส่งมา ทั้งหมดจะได้ทำการส่งซ้ำ ถ้าหากไม่มีความผิดพลาดเวลาที่ใช้ส่งจะมีค่า  $T_0 = N/v$  และถ้าเวลา ที่ใช้ส่งซ้ำจำนวน i ครั้งจนสำเร็จนั้น มีค่า  $T_i = (i+1)T_0 + iC$  แล้วละก็ ค่าเฉลี่ยของเวลาในการ ส่ง  $T_c$  และค่าประสิทธิภาพในการส่ง  $\eta_c$  จะได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.12 วิธีการตรวจตราในขณะที่เดียวกัน

$$T_s = (1 - P) \sum_{i=0}^{\infty} [(i+1)T_0 + iC] P^i$$

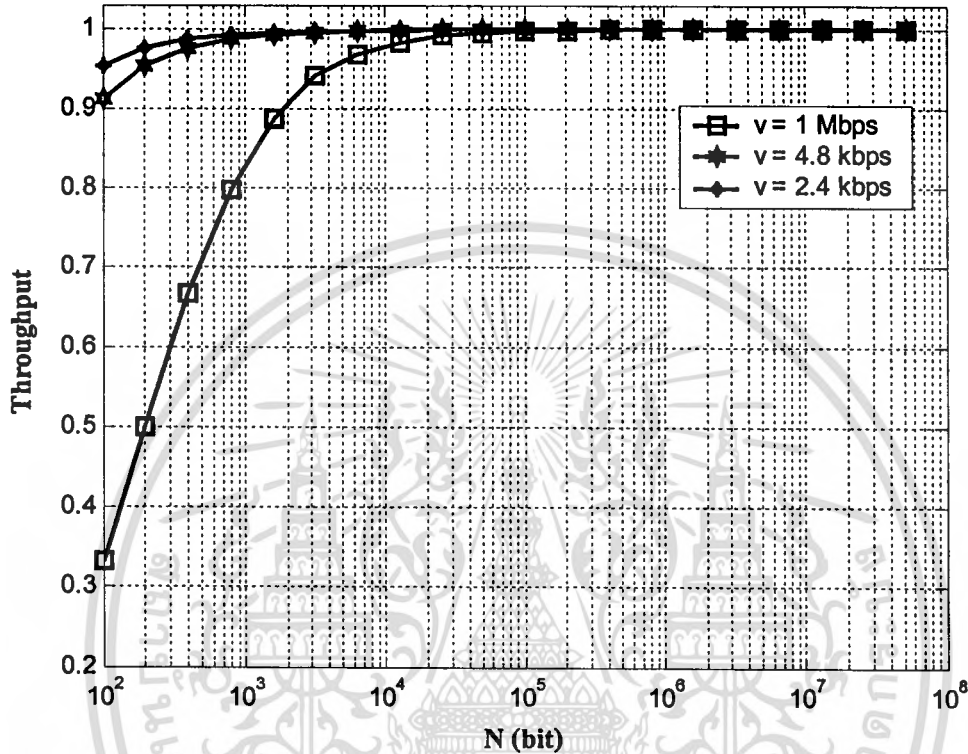
$$= \frac{N/v + Cp}{1 - P} \tag{3.9}$$

$$\eta_c = (N/v) / T_c$$

$$= \frac{N(1 - P)}{N + CvP} \tag{3.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณแสดงในรูปที่ 3.13 วิธีการตรวจตราในเวลาเดียวกันนี้ ปริมาณข่าวสารในการส่งต่อหน่วยเวลาจะเท่ากัน ถ้าหาค่า  $N$  มีค่ามากบดล็อกความผิดพลาด  $P$  จะดีขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการส่งต่ำลง



รูปที่ 3.13 ประสิทธิภาพการส่งของวิธีการตรวจแบบร่วมกัน

### 3.4 ทฤษฎีการเข้าคิวแบบ M/M/1

แบบจำลองของระบบการเข้าคิวแบบ M/M/1 เป็นแบบจำลองที่มีผู้ใช้งานมาก นอกจากนี้ยังใช้เป็นระบบที่เริ่มต้นในการศึกษาเกี่ยวกับการเข้าคิว ความหมายของ M/M/1 คือ [9]

M ตัวแรก หมายถึง รูปแบบการถึงในที่นี้ก็คือเวลาระหว่างการมาถึงเป็นการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential Distribution) และมีรูปแบบการมาถึงเป็นแบบสุ่ม โดยมีแจกแจงแบบพัวซอง (Poisson distribution)

M ตัวที่สอง หมายถึง การแจกแจงเวลาการบริการในที่นี้ก็คือการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

1 หมายถึง จำนวนแม่ข่าย ซึ่งก็คือ 1 แม่ข่าย

โดยแบบจำลอง M/M/1 จะมีรูปแบบที่เป็นข้อกำหนดดังนี้ [9]

-อัตราการมาถึงเป็นแบบสุ่ม โดยมีการแจกแจงแบบพัวซอง ซึ่งก็คือมีรูปแบบการมาถึงไม่

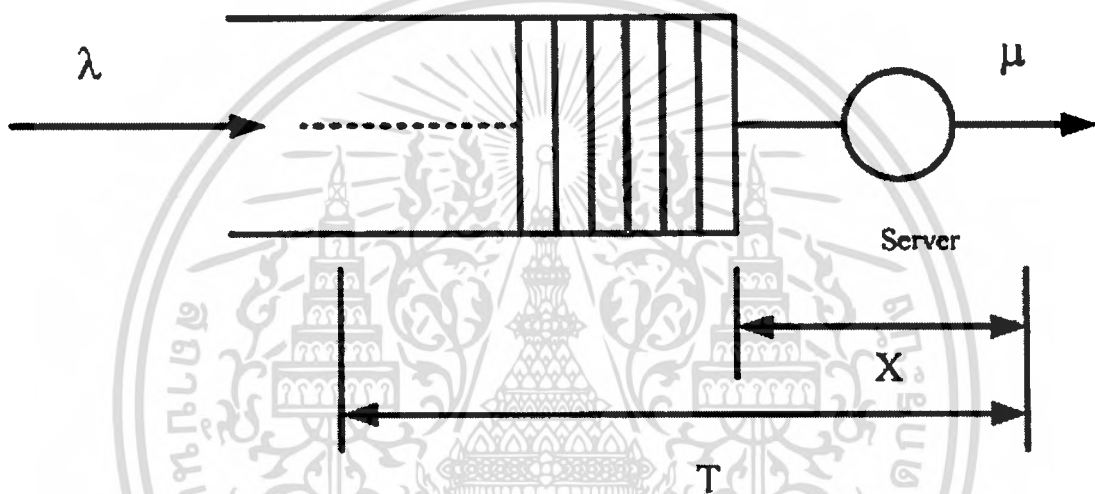
เอกสพร้อมกัน และระยะเวลาในการมาถึงไม่แน่นอน การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เวลาในการบริการเป็นการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
- ผู้ใช้บริการที่เป็นไปได้มีขนาดไม่จำกัด ซึ่งก็คืออัตราที่ผู้ใช้บริการมาถึงไม่มีผลต่อจำนวนผู้ใช้บริการที่รออยู่ในคิวและกำลังได้รับบริการอยู่ในขณะนั้น
- แบบแผนการเข้าคิวจะเป็นแบบมาถึงก่อนบริการก่อน (First Come First Served: FCFS)

### 3.4.1 ค่าพารามิเตอร์และค่าการเริ่มต้นในการคำนวณสำหรับการเข้าคิวแบบ M/M/1

ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการเข้าคิวแบบ M/M/1 แสดงในรูปที่ 3.14 ดังนี้

- อัตราการมาถึงของผู้ใช้บริการเฉลี่ย  $\lambda$  เช่น ผู้ใช้บริการต่อนาที
- เวลาในการบริการเฉลี่ย  $X$  เช่น 2 นาที โดย  $X$  จะมีค่าเท่ากับ  $1/\mu$



รูปที่ 3.14 ค่าพารามิเตอร์ของการเข้าคิวแบบ M/M/1

จะพบว่าการระบุหน่วยเวลาจะไม่ค่อยมีความสำคัญนัก เมื่ออัตราการมาถึงและอัตราการบริการใช้หน่วยเวลาเดียวกัน ในบางครั้งเพื่อความง่ายในการดูความสัมพันธ์ในระบบการเข้าคิว จะทำการสมมติให้  $X=1$  หน่วยเวลา ซึ่งทำให้เหลือเพียงแต่การเปลี่ยนแปลงอัตราการมาถึงทำให้มองได้เทียบเท่ากับประสิทธิภาพของแม่ข่าย

เมื่อมีการกำหนดค่าให้กับ  $\lambda$  และ  $X$  สิ่งต่อไปที่จะทำการคำนวณก็คือ ประสิทธิภาพของแม่ข่าย โดยค่าหรือช่วงประสิทธิภาพของแม่ข่ายคือ 0 ถึง 1

- 0 หมายถึง แม่ข่ายว่างตลอดเวลา คือ ไม่มีผู้เข้ามาใช้บริการ
- 1 หมายถึง แม่ข่ายมีการบริการตลอดเวลา

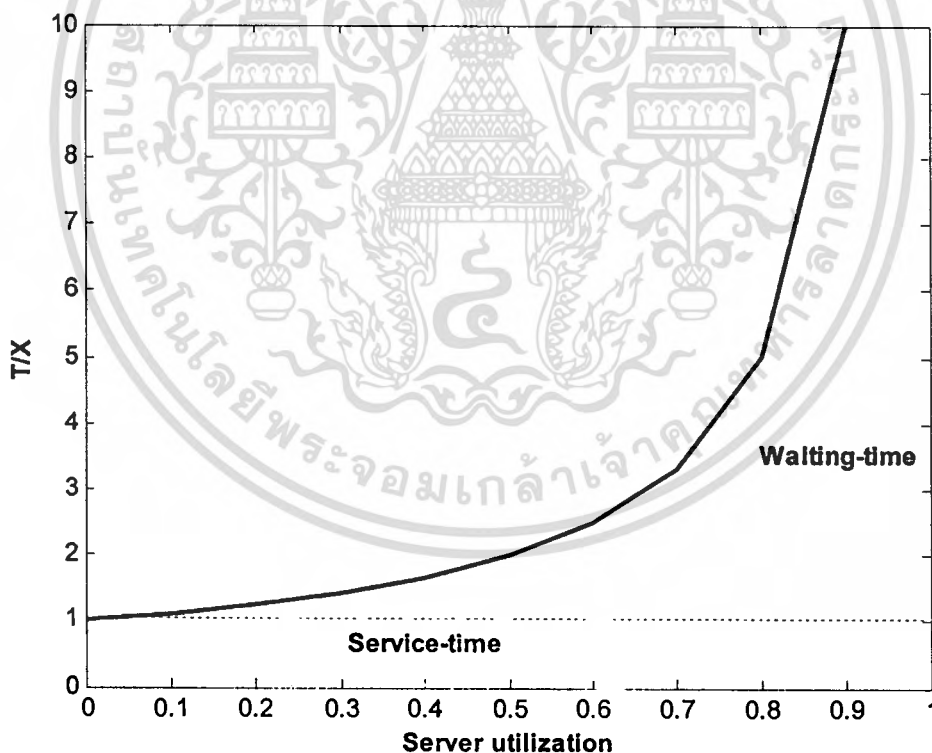
ในบางครั้งก็มีการแสดงค่าประสิทธิภาพของแม่ข่ายในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์เช่นกัน แต่โดยปกติเวลาในการคำนวณจะใช้ค่า 0 ถึง 1 แล้วจึงทำการแสดงผลในตอนสุดท้ายเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูตรการคำนวณค่าประสิทธิภาพของแม่ข่าย (Server Utilization) ดังนี้

$$\rho = \lambda X \quad (3.11)$$

เมื่อ  $\rho$  คือค่าประสิทธิภาพของแม่ข่าย

สิ่งสำคัญที่ต้องทำการตรวจสอบสำหรับค่าประสิทธิภาพของแม่ข่ายคือ  $\rho < 1$  ซึ่งก็คือจะต้องไม่เกิดอาการภาระเกิน (Overload) กับแม่ข่าย ซึ่งจะทำให้คิวหรือจำนวนของผู้ใช้บริการที่รอการบริการอยู่เพิ่มขึ้นไปเรื่อยโดยไม่มีข้อกำหนด ทั้งนี้เป็นไปตามข้อกำหนดของระบบที่ว่าความนิยมของผู้ใช้บริการไม่จำกัดและแบบแผนการเข้ามาถึงไม่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากสถานะของคิว จากจุดนี้พบว่าผู้บริการจะยังคงเข้ามาที่คิวตามอัตราความมาถึงเช่นเดิม แม้ว่าแม่ข่ายจะไม่สามารถบริการได้ตามอัตรานั้นก็ตาม ในส่วนที่ค่า  $\rho = 1$  ก็ไม่ค่อยจะมีความเสถียรเช่นกัน

### 3.4.2 เวลาในระบบหรือเวลาการเข้าคิว (Time-in-System or Queuing Time)



รูปที่ 3.15 เวลาในระบบของการเข้าคิวแบบ M/M/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{X}{1-\rho} \quad (3.12)$$

เมื่อ  $T$  คือเวลาในระบบหรือเวลาในการเข้าคิว

$X$  คือเวลาในการบริการเฉลี่ย

โดยรูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ของสมการ

### 3.4.3 เวลาการรอ (Waiting Time)

ในบางครั้งจะมีการพิจารณาในเรื่องเวลาการรอมากกว่าเวลาในระบบ โดยเวลาในการรอเฉลี่ยจะได้จากสมการดังนี้

$$W = \frac{\rho X}{1-\rho} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $W$  คือเวลาการรอ

ซึ่งเวลาในระบบเฉลี่ย เวลาการรอเฉลี่ยและเวลาการบริการเฉลี่ยจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T = W + X \quad (3.14)$$

ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$T = \frac{\rho X}{1-\rho} + X = \frac{X}{1-\rho} \quad (3.15)$$

### 3.5 การวัดค่าทางสถิติของแบบจำลอง

สมมติให้เวลาของระบบทั้งหมด คือ  $T$  จำนวนลูกค้าที่เข้ามาถึงทั้งหมดคือ  $A$  และจำนวนที่ให้บริการเสร็จแล้วคือ  $C$  จะได้ว่า อัตราการเข้ามาถึง (Arrival Rate)

$$\lambda = \frac{A}{T} \quad (3.16)$$

และงานที่ได้หรือค่าวิสัยสามารถ (Throughput Rate)

$$X = \frac{C}{T} \quad (3.17)$$

ในการพิจารณาระบบจริงอาจจะมีลูกค้ารับบริการอยู่ตลอดเวลาจุดเริ่มต้นและเวลาจุดสิ้นสุดของช่วงเวลาที่วัด อย่างไรก็ตามถ้าสมมุติว่าเวลานั้นยาวนานพอ จะพบว่าจำนวนลูกค้าที่เข้ามาควรใกล้เคียงกับจำนวนลูกค้าที่ได้รับบริการ นั่นก็คือสมมุติให้  $\lambda = X$  ข้อสมมุตินี้เรียกว่า Fow Valance จากข้อสมมุตินั้นจำเป็นต้องนับจำนวนของการเข้ามาถึงหรือจำนวนที่ได้รับบริการอย่างใดอย่างหนึ่ง และในการวัดสนใจค่าเฉลี่ยของเวลาให้บริการ (Server Busy Time)  $B$  จะได้ว่า การใช้ประโยชน์ของผู้ให้บริการ (Server Utilization) เป็น

$$U = \frac{B}{T} \quad (3.18)$$

และค่าเฉลี่ยเวลาให้บริการลูกค้า (Mean Service Time/Customer)

$$Ts = \frac{B}{C} \quad (3.19)$$

เมื่อพิจารณา Utilization Law นำสมการที่ (2.29) (2.30) และ (2.31) มารวมกันจะได้ดังนี้

$$U = \frac{B}{T} = \frac{B}{(C/X)} = \frac{BX}{C} = XT_s \quad (3.20)$$

หรือถ้าสมมุติตาม Fow Balance

$$U = \lambda Ts \quad (3.21)$$

จะสามารถอธิบายได้ว่า Utilization ของผู้ให้บริการคือผลคูณของค่าวิสัยสามารถ (Throughput Rate) กับเวลาการบริการเฉลี่ย ( $T_s$ )

พิจารณา Little's Law กำหนดให้  $L$  แทนค่าเฉลี่ยของจำนวนลูกค้าในระบบในช่วงเวลาที่วัด และ  $W$  คือเวลาเฉลี่ยที่ลูกค้าใช้ในระบบ กำหนดให้  $w_i$  เป็นเวลาที่ใช้ในระบบโดยลูกค้าคนที่  $i$ th จะได้ว่า  $W = \sum w_i / C$  จากที่ 2.9 จะได้ว่าจำนวนลูกค้าโดยเฉลี่ยในระบบเท่ากับค่าเฉลี่ยความสูงของกราฟ หรือค่าของพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยช่วงเวลาที่ทั้งหมด ลูกค้าแต่ละคนจะสร้างพื้นที่ขนาด  $1 \times w_i$  ผลรวมของพื้นที่คือ  $\sum w_i$  ของจำนวนลูกค้าทั้งหมดที่รับบริการในช่วงเวลาการจำลองแบบ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $WC$  จำนวนลูกค้าเฉลี่ยคือพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยเวลาทั้งหมด  $L = WC / T$  ดังนั้นจาก  $C/T = X$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการค้า  $L = \frac{X}{W}$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.22) การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ Flow Balance

$$L = \lambda W \quad (3.23)$$

สามารถอธิบายได้ว่าจำนวนเฉลี่ยของลูกค้าในระบบคือผลคูณของ System's Throughput Rate และ เวลาเฉลี่ยที่ลูกค้าใช้ในระบบ ถ้ากำหนดให้  $Lq$  ค่าเฉลี่ยของจำนวนลูกค้าที่เข้าคิวในระบบ (ยังไม่ได้รับบริการ) และให้  $Wq$  เวลาเฉลี่ยที่รอในคิวสามารถประยุกต์ใช้ Little's Law ได้ว่า

$$Lq = \lambda Wq \quad (3.24)$$

### 3.6 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (TDMA)

ในระบบการเข้าถึงแบบแบ่งเวลา (TDMA) [10] เสาปทรีมของสัญญาณวิทยุจะถูกแบ่งเป็น ช่วงเวลา (time slot) ในแต่ละช่วงเวลา (slot) ของผู้ใช้ที่ทำการรับหรือส่ง ซึ่งผู้ใช้แต่ละคนนั้นจะครอบครองเวลาในแต่ละช่วง ดังนั้นช่องสัญญาณจะถูกใช้เฉพาะช่วงเวลานั้นๆ โดยที่  $N$  คือช่วงเวลาของเฟรม ในระบบ TDMA จะส่งข้อมูลด้วยวิธีการของ buffer-and-burst ดังนั้นการส่งในทุกผู้ใช้จะไม่ต่อเนื่อง นั้นแสดงว่าต่างจากระบบ FDMA ที่เป็นแบบอนาล็อกที่ส่งด้วยการมอดูเลตแบบ FM ส่วนในระบบ TDMA เป็นแบบดิจิทัลและใช้การมอดูเลตแบบดิจิทัล เฟรมแต่ละเฟรมประกอบไปด้วยช่วงเฟรม ข่าวสาร และท้ายเฟรม ในระบบ TDMA/TDD ครึ่งหนึ่งของช่วงเวลาเป็นข่าวสารที่ใช้สำหรับการส่งในช่องสัญญาณขาขึ้น และอีกครึ่งหนึ่งใช้ในช่องสัญญาณขากลับ

ใน TDMA เฟรมประกอบไปด้วย Address และการซิงโครไนซ์ของการสื่อสารที่เครื่องรับของผู้ใช้ ส่วนการ์ดโมเด็มจะใช้ประโยชน์ในการซิงโครไนซ์ในการรับสัญญาณระหว่างช่วงเวลาและเฟรมคุณลักษณะของการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลามีดังนี้

1) ระบบ TDMA จะใช้ความถี่คลื่นพาร่วมกันกับผู้ใช้คนอื่นได้ แต่ต้องไม่มีการซ้อนทับของช่วงเวลา จำนวนช่วงเวลานั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรของการมอดูเลต และความเหมาะสมของแบนด์วิดท์

2) การส่งข้อมูลสำหรับผู้ใช้ในระบบ TDMA เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องจึงต้องมีเบิร์สต์ (Bursts) เพื่อซิงโครไนซ์ระบบ นอกจากนี้ระบบ TDMA ยังใช้พลังงานน้อย

3) ระบบ TDMA จะต้องมีการปรับปรุงช่องสัญญาณในการสื่อสารมากเมื่อเปรียบเทียบกับช่องสัญญาณแบบ FDMA

4) ในระบบ TDMA การ์ดโมเด็มต้องน้อย เมื่อส่งสัญญาณจะใช้ช่วงเวลาสั้นๆ และ การส่งเป็นแบบการแผ่สเปกตรัม ทำให้ลดการแทรกสอดเมื่ออยู่ในช่องสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยไม่หวังผลกำไรเพื่อส่งเสริมความรู้และประโยชน์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) การสื่อสารในระบบ TDMA นั้นแบ่งเป็นช่วงเวลาต้องใช้ burst ในการชิงโครโนซ์ระบบ โดยที่เครื่องรับจะทำการร้องขอ burst ข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนที่มีความแตกต่างกันของช่วงเวลาในแต่ละเฟรมของผู้ใช้ ความจุของแบนด์วิคท์ในระบบ TDMA ขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้และความยาวของช่วงเวลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การเข้ารหัส

#### 4.1 กล่าวนำ

สิ่งสำคัญสำหรับระบบการสื่อสารคือ ความสามารถในการสื่อสาร โดยทั่วไปหากไม่มีสัญญาณรบกวน เราสามารถทำการส่งสัญญาณอย่างไร เราจะได้รับสัญญาณเช่นเดิมอย่างถูกต้อง แม้ว่ากำลังได้เกิดการลดทอนอันมีผลมาจากระยะทางก็ตาม แต่ถ้ามีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น จะส่งผลให้สัญญาณนั้นผิดเพี้ยนไป หรือ เกิดการสูญหาย หากกรณีที่สัญญาณรบกวนมีกำลังมากกว่า ดังนั้นต้องออกแบบระบบสื่อสารที่มีการทำงานดี หรือ มีอัตราส่วนกำลังงานของสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) สูง สำหรับกรณีที่เครื่องมือสื่อสารระบบอนาล็อกมีอัตราส่วนกำลังของสัญญาณต่อกำลังสัญญาณของสัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้นนั้น แสดงว่าเครื่องมือสื่อสารนั้นสามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ดี สำหรับพารามิเตอร์ในการวัดความสามารถในการทำงานของระบบสื่อสารดิจิทัลคือ อัตราความผิดพลาด (Error Rate) ซึ่งอัตราการส่งสัญลักษณ์ข้อมูล (Symbol Rate) จะเท่ากับอัตราการส่งบิต (Bit Rate) เมื่อเป็นการส่งข้อมูลแบบรหัสฐานสอง (Binary) ดังนั้นในการออกแบบต้องให้มีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนหรือ SNR มีค่าสูง และมีค่าอัตราความผิดพลาดน้อยมีค่าต่ำ (Bit Error Rate: BER)

การปรับปรุงสมรรถนะของระบบสื่อสารสามารถทำได้หลายวิธี

1) การใช้เทคนิคไดเวอร์ซิตี เช่น การรวมอัตราส่วนสูง (Maximal Ratio Combining) ไดเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency Diversity) และไดเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity)

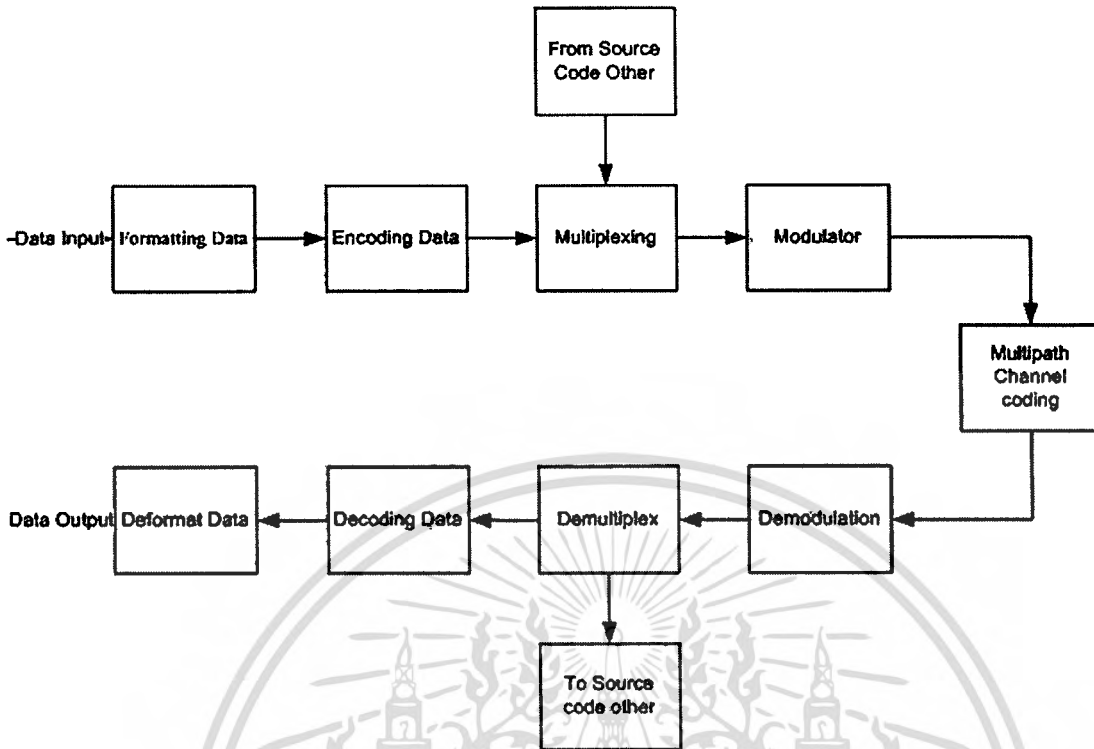
2) การเข้ารหัส (Coding) เช่น รหัสลิเนียร์บล็อก รหัสประสาน เป็นต้น ซึ่งกระบวนการเข้ารหัสสามารถแบ่งออกตามวัตถุประสงค์ได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.1) การเข้ารหัสแหล่งกำเนิด (Source coding)

2.2) การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel coding)

ในรูปที่ 1 แสดงแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบสื่อสารแบบดิจิทัลจากรูปแสดงให้เห็นว่าข่าวสารสามารถกำเนิดในรูปแบบอนาล็อกก็ได้ถ้าอยู่ในอนาล็อกก็ผ่านการจัดรูปแบบ (Formatting) โดยการยกตัวอย่างการควอนไทซ์ และ แปลงเป็นสัญญาณพีซีเอ็ม จากนั้นข้อมูลจะผ่านเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณ โดยเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณนี้จะทำการแปลงข้อมูลให้ส่งผ่านช่องสัญญาณ โดยมีความผิดพลาดน้อย และเป็นการช่วยเพิ่มอัตราข้อมูล ขั้นตอนการเข้ารหัสช่องสัญญาณนี้จะอยู่ระหว่างการเข้ารหัสแหล่งกำเนิดและการมอดูเลต ซึ่งการเข้ารหัสช่องสัญญาณสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แผนภาพของภาครับ-ส่งสัญญาณดิจิทัล

1) การเข้ารหัสรูปคลื่น (Waveform coding) เป็นการสร้างรูปคลื่นใหม่ขึ้นมาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีกว่ารูปคลื่นเดิม เช่น การส่งสัญญาณ M ระดับ การส่งสัญญาณตั้งฉาก (Orthogonal) สัญญาณตรงข้ามกัน (Antipodal) สัญญาณตั้งฉากกันสองขั้ว (Biorthogonal)

2) การเข้ารหัสแบบจัดลำดับโครงสร้างของข้อมูล (Structure Sequences) เป็นการเพิ่มบิตเข้าไปรวมกับบิตของข้อมูล เพื่อช่วยในการตรวจสอบความผิดพลาดของบิตข้อมูลอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณ ตัวอย่างของการเข้ารหัสแบบนี้ เช่น การเข้ารหัสบล็อก (Linear block code) และการเข้ารหัสประสาน (Convolution)

ข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสของสัญญาณแล้วจะถูกมัลติเพล็กซ์ จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งไปยังการมอดูเลตตามระบบดิจิทัลมอดูเลตแล้วผ่านช่องสัญญาณ ซึ่งจะถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน AWGN เกาส์เซียนช่องสื่อสารจะเป็นตัวกลางใดๆ ก็ได้แล้วแต่ความต้องการของงาน เช่น อากาศ สายใยแก้ว และเส้นใยแสง เมื่อข้อมูลมาถึงปลายทางก็จะถูกดีมอดูเลตและดีมัลติเพล็กซ์ จากนั้นจะถูกถอดรหัสของสัญญาณ (Channel decoding) สัญญาณที่ได้จะผ่านการถอดรหัสแหล่งกำเนิดเพื่อให้ได้สัญญาณดิจิทัล และ จะถูกแปลงกลับเป็นอนาล็อกหรือคงอยู่ในรูปดิจิทัลแล้วแต่ว่าสัญญาณเดิมที่ส่งเป็นอนาล็อกหรือดิจิทัล

จุดประสงค์ของการเข้ารหัส เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือในการรับส่งข้อมูลให้มากขึ้น ดังนั้น รหัสที่สร้างขึ้นจึงต้องมีการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้รับ ไปประมวลผลในขั้นตอนต่อไป หากเกิดความผิดพลาดขึ้นก็อาจให้ด้านส่ง ทำการส่งข้อมูลเดิมมาใหม่ ในการตรวจสอบความผิดพลาดที่เครื่องรับนั้นมีวิธีที่สามารถตรวจสอบได้ว่า ข้อมูลที่รับเข้ามาเกิดความผิดพลาดหรือไม่ แต่ไม่สามารถจะบอกได้ว่าผิดพลาดที่ตำแหน่งใด ซึ่งจะเรียกรหัสตรวจสอบความผิดพลาดนี้ว่ารหัสตรวจคู่ (Parity check code) หลักการของรหัสตรวจคู่คือ จะทำการเติมบิตต่อท้ายตามข่าวสาร (Information bit) ที่ทางด้านส่งเพื่อให้ผลบวกเลขฐานสองของบิตทั้งหมด (รวมทั้งบิตที่เพิ่มด้วย) เป็น 0 หรือ 1 แล้วแต่ว่าเป็นภาวะคู่หรือภาวะคี่ (Even/Odd parity) บิตที่ทำการเพิ่มเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดนี้เรียกว่าบิตตรวจคู่ (Parity check bit)

#### ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างสภาวะบิตตรวจคู่

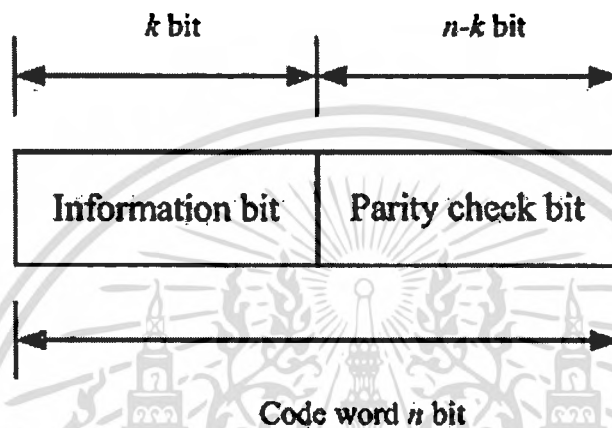
บิตที่ส่ง	1 1 1 0 0 0 1 0 = 0	สภาวะคู่
บิตที่รับ	1 1 1 0 1 0 1 0 = 1	ผิดพลาดเพราะผลบวกเลขฐานสองเป็นเลขคี่

วิธีการดังกล่าวสามารถที่จะทำการตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลได้ง่าย โดยการคำนวณผลบวกเลขฐานสองของจำนวนบิตทั้งหมดที่ได้รับว่าเป็นเลขคู่ 0 หรือ เลขคี่ 1 ตามที่ตกลงกันหรือไม่ ถ้าไม่ก็แสดงว่าเกิดความผิดพลาดของข้อมูล สมมติบิตที่รับได้เป็นภาวะคู่และบิตที่ผิดพลาดคือ บิตที่ 5 เป็น 1 แทนที่จะเป็น 0 ผลบวกเลขฐานสองของบิตทั้งหมดจะได้ 1 ก็จะทราบได้ทันทีว่าข้อมูลเกิดผิดพลาดแต่ไม่สามารถตรวจสอบได้ว่าบิตไหนผิด ฉะนั้นรหัสตรวจคู่จึงควรใช้ในกรณีที่มีบิตผิดไม่เกินกว่า 1 บิต

#### 4.2 รหัสลิเนียร์บล็อก (Linear block code)

เป็นรหัสที่ประกอบด้วยเวกเตอร์ที่มีขนาดความยาวจำกัด ซึ่งจะถูกเรียกว่าคำรหัส (Code word) ความยาวของคำรหัสคือ จำนวนตัวประกอบทั้งหมดที่มีอยู่ในเวกเตอร์ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $n$  โดยตัวประกอบแต่ละตัวจะเรียกว่า บิต ซึ่งคำรหัสจะเลือกจากจำนวนตัวเลขทั้งหมด  $q$  หมายเลขถ้าหากตัวประกอบในเวกเตอร์ประกอบด้วยค่าเพียงสองค่าคือ 1 และ 0 รหัสนี้ถูกเรียกว่าไบนารี หาก  $q > 2$  รหัสนี้จะถูกเรียกว่านอน ไบนารี ในส่วนของสัญญาณทางด้านเอาต์พุตที่มาจากตัวเข้ารหัสแหล่งกำเนิดซึ่งมีลักษณะเป็นลำดับข้อมูล ไบนารีจะถูกแบ่งออกเป็นบล็อกเพื่อนำไปเข้ารหัสช่องสัญญาณแต่ละบล็อกประกอบไปด้วย ข่าวสารจำนวน  $k$  บิต ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลที่มีรหัสตัวเลขไม่เหมือนกันจำนวน  $2^k$  ข้อมูล ตัวเข้ารหัสจะแปลงข้อมูลแต่ละบล็อกที่มีข่าวสารจำนวน  $k$  บิต ให้เป็นลำดับรหัสที่ยาวขึ้นเป็น  $n$  บิต รหัสข่าวสารที่ถูกเข้ารหัสใหม่นี้เรียกว่า คำรหัส (Code word) และชุดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรหัสข้อมูลที่แตกต่างกันจำนวน  $2^k$  ข้อมูลนี้จะเรียกว่า [11] รหัสบล็อก (Block code) ส่วนบิตที่เพิ่มเติมจำนวน  $n-k$  บิต ที่เรียกว่าบิตตรวจสอบ (Parity check bit) โดยบิตตรวจสอบมีหน้าที่ในการแก้รหัสข้อมูลที่ผิดและไม่มีส่วนที่เป็นข่าวสารอยู่รหัสที่ได้เรียกว่า รหัส  $(n,k)$  และมีอัตราการเข้ารหัส (Code rate) แทนด้วยสัญลักษณ์  $r$  หากค่าได้จาก  $r = k/n$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในคำรหัส อัตราการเข้ารหัสนี้จะเป็นตัวบ่งบอกประสิทธิภาพของระบบการเข้ารหัสด้วยปกติแล้วอัตราการเข้ารหัสจะอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 1 ดังแสดงในรูปที่ 2 แสดงการเข้ารหัสบล็อก  $(n,k)$



รูปที่ 4.2 การเข้ารหัสบล็อก  $(n,k)$

#### 4.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของรหัสลิเนียร์บล็อก

ในการเข้ารหัสของข้อมูลซึ่งมีขนาดความยาวเท่ากับ  $k$  บิต หลังจากถูกเข้ารหัสจะได้ความยาวของคำรหัสมีค่า  $n$  บิต ซึ่งมีขนาด  $n-k$  บิต เป็นบิตที่เพิ่มรวมเข้าไปกับข้อมูลจะถูกเรียกว่าพาริตีบิตตรวจสอบ โดยรหัสที่ได้จะถูกเรียกเป็นรหัส  $(n,k)$  ซึ่งอัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูลกับความยาวของคำรหัส  $k/n = R_c$  เรียกว่าอัตราการเข้ารหัส (Code rate)

ตัวพารามิเตอร์อีกค่าหนึ่ง ที่มีความสำคัญในการเข้ารหัสนั่นคือ น้ำหนักแฮมมิง (Hamming weight) หมายถึงจำนวนบิตของรหัสซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ เช่น รหัส 101000 จะมีน้ำหนักเท่ากับ 2 แล้วหากมีรหัสลิเนียร์บล็อก 2 ค่า คือ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแตกต่างระหว่างคำรหัส

คำรหัสที่ $i$	$C_i = 10011010$	ตำแหน่งของบิตที่ $i$
คำรหัสที่ $j$	$C_j = 11110000$	ตำแหน่งของบิตที่ $j$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาค่าความแตกต่างระหว่างคำรหัสทั้งสองนี้ จะวัดได้จากจำนวนบิตหรือตำแหน่งของบิตที่มีค่าแตกต่างกัน ซึ่งจะเรียกค่าที่ได้นี้ว่าระยะแฮมมิง (Hamming distance) เขียนได้เป็น  $d_{ij}$  ดังตารางที่ 2 โดยที่  $i = j$  จากตัวอย่างข้างต้นจะพบว่าค่าระยะแฮมมิงเท่ากับ 4 โดยที่ค่าของระยะแฮมมิงมีค่าระหว่าง  $0 < d_{ij} < n$  ค่าต่ำที่สุดของ  $d_{ij}$  สำหรับรหัสใดๆจะเรียกว่าระยะความแตกต่างต่ำสุด (Maximum distance) ของรหัสเขียนได้เป็น  $d_{\min}$

การเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอนจะมีอัตรารหัส (Code rate) ย่านกว้าง (Wideband) นั่นคือสามารถเลือกการเข้ารหัสที่เหมาะสมกับประสิทธิภาพของแบนด์วิด (Bandwidth efficiency) ด้วยการเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่เข้ารหัส Non-binary block code ประกอบด้วยเซตที่มีความยาวคำรหัสแน่นอนซึ่ง Element ของคำรหัสถูกเลือกจาก Alphabet ของ  $q$  symbol แสดงโดย  $\{0, 1, 2, \dots, q-1\}$  โดยทั่วไป  $q=2^k$  นั่นคือ  $k$ -information bit ถูก map ใน 1 ของ  $q$  symbol โดยที่

$n$  คือ ความยาวของคำรหัสนอนไบนารี

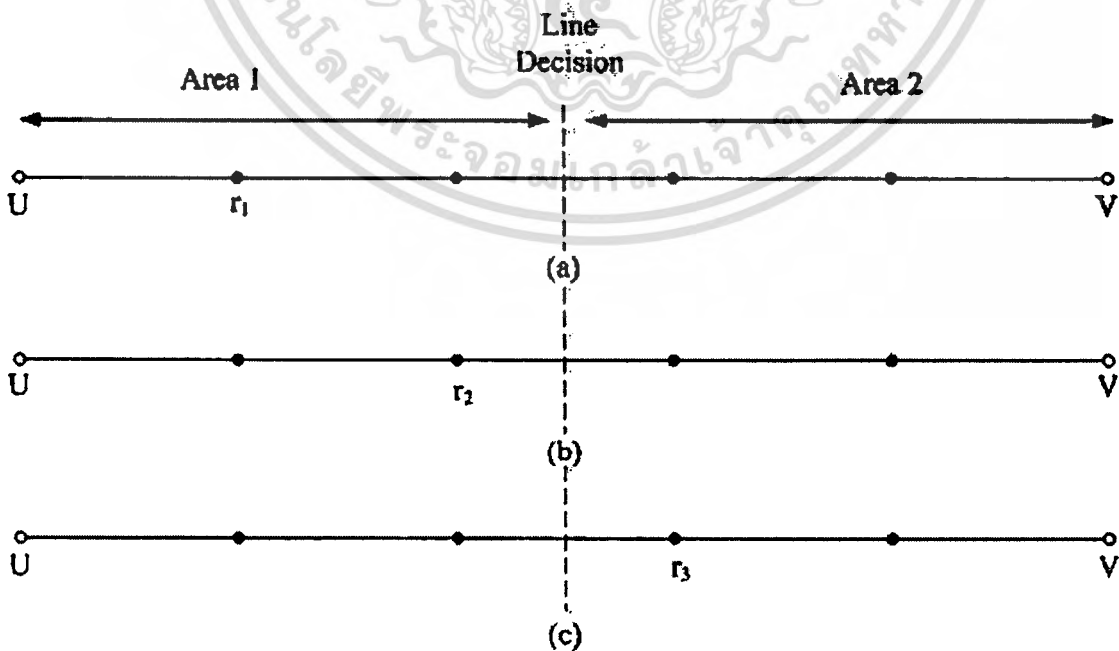
$k$  คือ จำนวนของข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสในบล็อกของ  $n$  symbol

$D_{\min}$  คือ ค่า minimum distance ของการเข้ารหัสนอนไบนารี

Systematic  $(n, k)$  block code ประกอบด้วย  $k$  information symbol และ  $n-k$  parity check symbol

#### 4.2.2 ความสามารถในการตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดของรหัสลิเนียร์บล็อก

รหัสลิเนียร์บล็อกสามารถตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลได้โดยการตรวจสอบกับซินโดรม ( $S=RH^T$ ) ว่าถ้า  $S=0$  ก็แสดงว่ารหัสที่ได้รับนั้นไม่ผิดพลาดของข้อมูลรหัสลิเนียร์บล็อกนั้นจะต้องใช้สิ่งเหล่านี้วัดความสามารถ เช่น น้ำหนักแฮมมิง (Hamming weight) ของคำรหัส และค่าระยะแฮมมิง (Hamming distance) ระหว่างคำรหัส 2 คำ ซึ่งกล่าวไว้ในตอนต้น



รูปที่ 4.3 การตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3 แสดงถึงค่าระยะแรมมิงของรหัสสองรหัส คือ U กับ V โดยจุดคำที่อยู่บนเส้น หมายถึงการที่คำของรหัสถูกรบกวนจากรูปที่ 4.3(a) แสดงถึงด้านรับ รับสัญญาณที่แวกเตอร์  $r_1$  ซึ่งมีระยะห่างจาก U เท่ากับ 1 และระยะห่างจาก V เท่ากับ 4 การแก้ไขความผิดพลาดทำได้โดยอาศัยความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด นั่นคือ ในกรณีนี้จะทำการเลือกสัญญาณ U เมื่อได้รับ  $r_1$  นั่นคือ  $r_1$  เกิดจากการที่เกิดความผิดพลาดขึ้น 1 บิตจากสัญญาณ U ในระหว่างการส่งสัญญาณแต่ทางด้านรับก็สามารถที่จะแก้ไขความผิดพลาดนี้ได้ เช่นเดียวกันหากเกิดความผิดพลาดขึ้น 2 บิตเนื่องจากการส่งสัญญาณ U ซึ่งผลทำให้ด้านรับ รับสัญญาณ  $r_2$  ซึ่งจะมีระยะห่างจาก U เท่ากับ 2 และระยะห่างจาก V เท่ากับ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (b) การถอดรหัสยังคงเลือกกว่าสัญญาณ  $r_2$  ที่ได้รับเกิดจากการส่งสัญญาณ U นั่นเอง ในกรณีที่เกิดความผิดพลาดขึ้น 3 บิต ของการส่งสัญญาณ U ซึ่งด้านรับแวกเตอร์  $r_3$  ซึ่งมีระยะห่างจาก U เท่ากับ 3 และห่างจาก V เท่ากับ 2 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3 (c) ในกรณีนี้ตัวถอดรหัส จะทำการเลือกสัญญาณ V ว่าเป็น สัญญาณที่ส่งมาจากด้านส่งนั่นคือเกิดความผิดพลาดในการถอดรหัส

จากรูปที่ 4.3 สามารถสรุปได้ว่า การตรวจสอบความผิดพลาด จะสามารถตรวจสอบได้ในกรณีที่มีความผิดพลาดขึ้น 1, 2, 3 และ 4 บิต ซึ่งจะเป็นจุดสีดำในกรณีที่ความผิดพลาดเกิดขึ้น 5 บิต เป็นผลทำให้ด้านรับจะได้รับสัญญาณแวกเตอร์ V จากการส่งสัญญาณแวกเตอร์ U ซึ่งเมื่อเกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นด้านรับจะไม่สามารถตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้

จะเห็นได้ว่าความสามารถในการตรวจสอบและแก้ไขความผิดพลาดของการเข้ารหัสจะมีความสัมพันธ์กับระยะความแตกต่างต่ำสุด ระหว่างแวกเตอร์ทั้งสอง จากรูปที่ 4.3 หากแวกเตอร์ด้านรับ  $r$  อยู่ในพื้นที่ 1 จะทำการเลือกสัญญาณ U เป็นสัญญาณด้านส่งหากแวกเตอร์ด้านรับ  $r$  อยู่ในพื้นที่ส่วนที่ 2 จะทำการเลือกสัญญาณ V เป็นสัญญาณด้านส่ง จะพบว่าแวกเตอร์ U และ V จะมีระยะความแตกต่างต่ำสุด ( $d_{\min}$ ) เท่ากับ 5 ซึ่งจะสามารถแก้ไขความผิดพลาดได้ 2 ตำแหน่งดังนั้นความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดของรหัสจะมีค่าเท่ากับ

$$t = \left\lfloor \frac{(d_{\min} - 1)}{2} \right\rfloor \quad (4.1)$$

โดย  $t$  คือ ความสามารถในการแก้รหัสให้ถูกต้องได้

ในพวกรอนไบนาเรียบล็อกโค้ดจะมีการเข้ารหัสรีดโซโลมอนที่เป็นซับเซตของ BCH code และอยู่ในประเภท Cyclic – code ซึ่งการเข้ารหัสถูกอธิบายโดยพารามิเตอร์ [12]

$$n = q - 1 = 2^k - 1$$

$$k = 1, 2, 3, \dots, n - 1$$

$$D_{\min} = n - k + 1$$

$$Rc = \frac{k}{n}$$

ความสามารถในการแก้ไขของการเข้ารหัสขึ้นอยู่กับ Symbol error

$$t = \left\lfloor \frac{1}{2}(D_{\min} - 1) \right\rfloor = \left\lfloor \frac{1}{2}(n - k) \right\rfloor \quad (4.2)$$

ถ้าจำนวนความผิดพลาดที่ด้านรับมีค่ามากกว่าความสามารถในการแก้ไขให้ถูกต้อง ( $t$ ) ดังนั้นตัวถอดรหัสจะไม่สามารถแก้ไขตรวจสอบค่าความถูกต้องและเรียกว่าการถอดรหัสผิดพลาด (Decoder failure)

### 4.3 รหัสโบเซ-โชดฮูรี-ฮ็อกเค็งแฮม (Bose – Chaudhuri – Hocqenghem: BCH)

การออกแบบรหัสแก้ไขความผิดพลาดจะประกอบด้วย การออกแบบรหัส โดยมีความยาวของบล็อกสั้นที่สุด ( $n$ ) ที่ค่าความยาวค่าหนึ่งที่ทำให้บล็อกข่าวสาร ( $k$ ) และระยะทางสั้นที่สุด ( $d_{\min}$ ) ที่ต้องการสำหรับรหัสนั้นหรือสำหรับความยาวของรหัสค่าหนึ่งที่กำหนดให้ ( $n$ ) และอัตรารหัส ( $k/n$ ) เราต้องการออกแบบให้รหัสมีค่า  $d_{\min}$  มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นั่นคือ จะออกแบบรหัสให้มีความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดได้ดีที่สุด รหัส BCH เป็นรหัสวงเวียนที่นิยมใช้และมีประสิทธิภาพในการแก้ไขความผิดพลาดได้ดีที่สุด รหัส BCH เป็นชั้นรหัสชั้นใหญ่ของรหัสวงเวียนที่ประกอบด้วย [6]

$$\text{ความยาวของบล็อก} : n = 2^m - 1$$

$$\text{จำนวนบิตตรวจดู} : n - k \leq mt$$

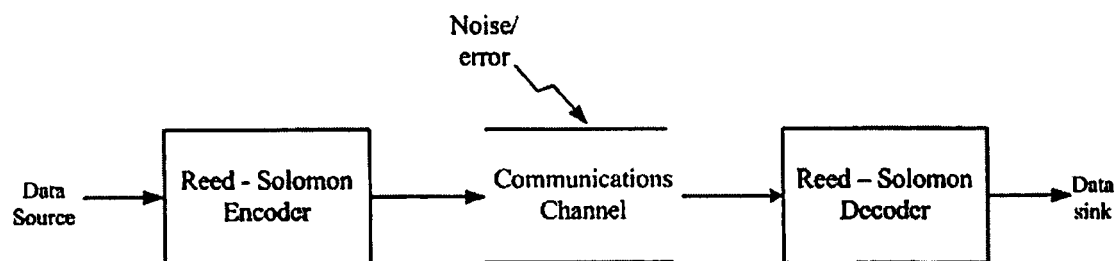
$$\text{ระยะทางสั้นที่สุด} : d_{\min} \geq 2t + 1$$

เมื่อ  $m$  และ  $t$  เป็นค่าจำนวนเต็มใดๆที่เป็นบวก

### 4.4 รหัสรีดโซโลมอน (Reed Solomon : RS codes)

โดยปกติแล้วสิ่งแรกที่ควรพิจารณาถึงนั่นคือ ย่านความถี่ของ Narrow sense primitive [13] ซึ่งเป็นรหัส BCH แบบไบนารี รหัสนี้จะเป็น superset ของรหัส Reed Solomon อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสแบบบล็อก โดยหลักๆแล้วจะถูกใช้ในลักษณะของการกระจายเสียงที่เป็นการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอนเท่านั้น จึงได้ทำการรวบรวมรูปแบบหลายๆส่วนในแหล่งอ้างอิงต่างๆและมาตรฐานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของหนังสือต่างประเทศ บนหลักการหรือทฤษฎีของการเข้ารหัส เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจดังนั้นในเบื้องต้นจะทำการอธิบายในรูปแบบรหัส BCH



รูปที่ 4.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของรหัสรีด โซโลมอน

รหัสรีด โซโลมอนประกอบด้วย ค่าที่มีขีดความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดของระบบการเข้ารหัสเชิงเส้น ซึ่งใช้เป็นหลายๆสัญลักษณ์และมีค่าความสามารถในการจับของการแก้ไขและตรวจจับสัญลักษณ์ที่มีการผิดพลาด ในการตรวจแก้ไขข้อผิดพลาด ของรหัสรีด โซโลมอนนั้น กำหนดให้บล็อกของข้อมูลคือ  $RS(n, k, t, d)$  ซึ่งหาได้จากค่า  $GF(2^m)$  โดย  $n$  คือความยาวรหัส  $k$  คือจำนวนสัญลักษณ์ของข่าวสาร  $t$  คือความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาด  $d$  คือระยะต่ำสุดของแฮมมิง ในจำนวนบิตข้อมูลที่เป็นกลุ่มจัดเข้าไปเป็นจำนวน  $m$  บิต สัญลักษณ์คุณสมบัติเหล่านี้ จะทำให้เห็นชนิดของรหัส  $RS(n, k, t, d)$  สร้างมาจากรหัส  $BCH(n, k)$  ที่มีค่าตัวแปรบน  $GF(q)$  เดียวกันประกอบด้วย  $n = q - 1$ ,  $r = n - k$  และ  $d = n - k + 1 = 2t + 1$  โดยกำเนิดค่าโพลิโนเมียลมีการกำหนดว่าไม่มีค่าส่วนกลับ โครงสร้างของรหัสรีด โซโลมอนต้องการเพียงขอบเขตที่เหมาะสมและการเลือกค่าฐานมาจาก  $\alpha^i$  ถึง  $\alpha^{i+2t-1}$  [14, 15]

$$g(X) = (X - \alpha^i)(X + \alpha^{i+1}) \dots (X + \alpha^{i+2t-1}) \quad (4.4)$$

สมการที่ 4 คือโพลิโนเมียลฟังก์ชันของรหัสรีด โซโลมอน ข้อแตกต่างระหว่างรหัส BCH กับรหัสรีด โซโลมอนคือค่า  $i$  ไม่แสดงถึงมิติ หรือ ค่าต่ำสุดของความยาวรหัสเพราะรหัสนี้ไม่มีค่าส่วนกลับ

**ตัวอย่าง** การเข้ารหัสรีด โซโลมอนที่ต้องการความยาวรหัสเท่ากับ 7

**ภาคการเข้ารหัส**

โครงสร้างโพลิโนเมียลรหัสรีด โซโลมอนที่มีความยาวรหัสเท่ากับ 7 RS Code คือ  $GF(8)$  โดยมีสมการโพลิโนเมียลพื้นฐานคือ  $X^3 + X + 1$  เลือก  $i = 0$  แทนค่ารากจาก  $\alpha^0$  ถึง  $\alpha^3$  จะได้สมการโพลิโนเมียลคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ โพลิโนเมียลพื้นฐานได้ว่า

$$g(X) = (X + \alpha^0)(X + \alpha^1)(X + \alpha^2)(X + \alpha^3)$$

$$g(X) = X^4 + (\alpha^0 + \alpha^1 + \alpha^2 + \alpha^3)X^3 + (\alpha^1 + \alpha^2 + \alpha^3 + \alpha^4 + \alpha^5)X^2 + (\alpha^3 + \alpha^4 + \alpha^5 + \alpha^6)X + \alpha^6$$

$$g(X) = X^4 + \alpha^2 X^3 + \alpha^5 X^2 + \alpha^5 X + \alpha^6$$

$\therefore$  ได้ค้ำรหัดเป็น  $\alpha^0 \alpha^2 \alpha^5 \alpha^5 \alpha^6$

ตารางที่ 4.3 ค้ำรหัดสัญลักษณ์

Element	Polynomial
0	000
$\alpha^0$	001
$\alpha^1$	010
$\alpha^2$	100
$\alpha^3$	011
$\alpha^4$	110
$\alpha^5$	111
$\alpha^6$	101

ต้องการทำการเข้ารหัดข้อมูลเลขฐานสองค้ำไปนี้ 11001111 จากตาราง 4.3 ค้ำรหัดสัญลักษณ์ สามารถเขียนรหัดใหม่ค้ำเป็น  $\alpha^5 \alpha^0 \alpha^5$  เราต้องการเข้ารหัดรีดโซโลมอนขนาด RS(7,4) ค้ำนั้นเราทำการเพิ่มค้ำศูนย์ท้ายรหัดข้างค้ำนสี่ตัวแล้วทำการหารค้ำด้วยค้ำรหัดค้ำงค้ำไปนี้

$$\begin{array}{r}
 \alpha^5 0 \alpha^2 \\
 \alpha^0 \alpha^2 \alpha^5 \alpha^5 \alpha^6 \Big) \alpha^5 \alpha^0 \alpha^5 0 0 0 0 \\
 \underline{\alpha^5 \alpha^0 \alpha^3 \alpha^3 \alpha^4} \\
 \alpha^2 \alpha^3 \alpha^4 0 0 \\
 \underline{\alpha^2 \alpha^4 \alpha^0 \alpha^0 \alpha^1} \\
 \alpha^6 \alpha^5 \alpha^0 \alpha^1
 \end{array}$$

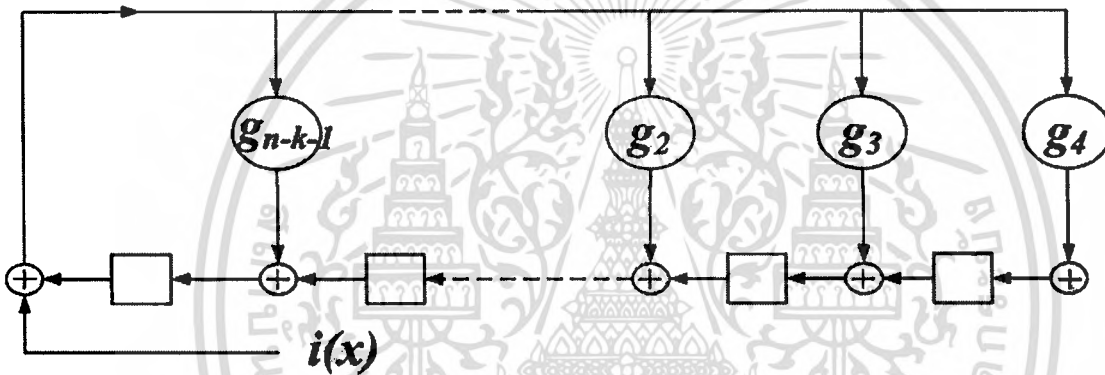
เราค้ำค่า  $\alpha^5 0 \alpha^2$  เป็นค้ำที่ค้ำงค้ำการคูณและ  $\alpha^6 \alpha^5 \alpha^0 \alpha^1$  ค้ำค้ำเศษเหลือ ค้ำนั้นจะค้ำได้รหัด

เอกสารนี้ค้ำเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญค้ำให้นำไปใช้ประโยชน์ค้ำงการค้ำไม่ว่ากรณีค้ำงค้ำอื่น อี้กค้ำงค้ำมีให้ค้ำดแปลงเนื้อหา และค้ำงค้ำงค้ำถึงเจ้าของเอกสารค้ำงค้ำที่มี้การนำค้ำไปใช้

เป็น  $\alpha^5\alpha^0\alpha^5\alpha^6\alpha^5\alpha^0\alpha^1$  เมื่อแปลงให้อยู่ในรูปเลขฐานสองจะได้ว่า 11100111101111001010 โดยสามารถสรุปคำตอบได้ดังแสดงในตาราง 4.4

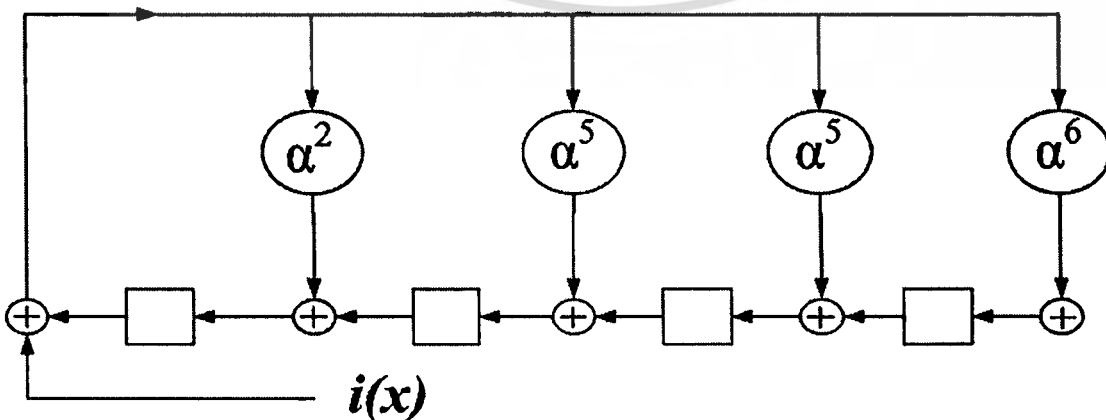
ตาราง 4.4 ตารางสรุปคำตอบรหัสของ RS(7,4)

ค่าป้อนเข้า	ค่าส่งกลับ	ค่าการคูณ	$X^3$	$X^2$	$X^1$	$X^0$
			$\alpha^2$	$\alpha^5$	$\alpha^5$	$\alpha^6$
			0	0	0	0
$\alpha^5$	$\alpha^5$		$\alpha^0$	$\alpha^3$	$\alpha^3$	$\alpha^4$
$\alpha^0$	0		$\alpha^3$	$\alpha^3$	$\alpha^4$	0
$\alpha^5$	$\alpha^2$		$\alpha^6$	$\alpha^5$	$\alpha^0$	$\alpha^1$



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันเข้ารหัสรีดโซโลมอน

วงจรการเข้ารหัสสำหรับรหัสรีดโซโลมอนดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยค่าของ  $g_0$  ไม่จำเป็นว่ามีค่าเท่ากับ 1 และในทุกค่าการคูณมีการเชื่อมต่อย้อนกลับ โดยจะมีการเชื่อมต่อหรือไม่เชื่อมต่อขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี ในทางทฤษฎีในภาคการส่งกลับจะมีค่าไม่เท่ากับศูนย์สำหรับรหัสรีดโซโลมอนสามารถนำมาเขียนวงจรการเข้ารหัส RS(7,4) ได้ดังรูปที่ 4.6 และจากการเข้ารหัสจะได้ว่า  $\alpha^6\alpha^5\alpha^0\alpha^1$  คือรหัสสัญลักษณ์ที่ทำการเข้า



รูปที่ 4.6 วงจรการเข้ารหัส RS(7,3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคการถอดรหัส

ในการคำนวณความผิดพลาดสามารถทำได้โดยใช้วิธีของ ฟอว์นีย์ (Forney algorithm) ดังแสดงในสมการที่ 5

$$\Lambda(z)E(z) = f(z)z^{2t} + \Omega(z) \quad (4.5)$$

ที่  $\Lambda(z)$  คือการเชื่อมต่อโพลิโนเมียล,  $E(z)$  สามารถจัดให้อยู่ในกลุ่มความถี่ในรูปของโพลิโนเมียลฟังก์ชัน และ  $\Omega(z)$  คือค่าโพลิโนเมียลฟังก์ชันกำลัง  $t-1$  เราสามารถคำนวณหาค่าความผิดพลาดและค่า  $\Lambda'(z)$  ในรูปอนุพันธ์ของสมการ โพลิโนเมียล คือ

$$\begin{aligned} (\text{Even } t) \quad & \Lambda_{t-1}z^{t-2} + \Lambda_{t-3}z^{t-4} + \dots + \Lambda_1 \\ (\text{Odd } t) \quad & \Lambda_t z^{t-1} + \Lambda_{t-2}z^{t-3} + \dots + \Lambda_1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

ทำการกำจัดค่าสัมประสิทธิ์ของ  $\Lambda$  และทำการกำหนดค่าในเทอมเลขคู่จัดอยู่ในรูปอนุกรมถึงศูนย์ ค่าความผิดพลาดตำแหน่ง  $m$  ดังแสดงในสมการที่ 7

$$e_m = \Omega(z) / z^{(t-1)} \Lambda'(z) \quad (4.7)$$

ทำการคำนวณค่าที่  $z = \alpha^{-m}$  ตัวแปร  $i$  คือค่าเริ่มต้นของรากโพลิโนเมียลฟังก์ชัน

จากรหัสรีดโซโลมอนที่ทำการเข้ารหัสเรียบร้อยแล้วคือ  $\alpha^5 \alpha^0 \alpha^5 \alpha^6 \alpha^5 \alpha^0 \alpha^1$  สำหรับ RS(7,3) สมมติให้มีการผิดพลาดที่ตำแหน่งที่ 5 และ 3 ได้ว่า  $\alpha^5 \alpha^4 \alpha^5 \alpha^3 \alpha^5 \alpha^0 \alpha^1$  เขียนให้อยู่ในรูปแถวลำดับเทอมความถี่ได้เป็น

$$\begin{aligned} S_0 &= \alpha^5 + \alpha^4 + \alpha^5 + \alpha^3 + \alpha^5 + \alpha^0 + \alpha^1 = \alpha^0 \\ S_1 &= \alpha^5 \cdot \alpha^6 + \alpha^4 \cdot \alpha^5 + \alpha^5 \cdot \alpha^4 + \alpha^3 \cdot \alpha^3 + \alpha^5 \cdot \alpha^2 + \alpha^0 \cdot \alpha^1 + \alpha^1 = \alpha^1 \\ S_2 &= \alpha^5 \cdot \alpha^5 + \alpha^4 \cdot \alpha^3 + \alpha^5 \cdot \alpha^1 + \alpha^3 \cdot \alpha^6 + \alpha^5 \cdot \alpha^4 + \alpha^0 \cdot \alpha^2 + \alpha^1 = \alpha^0 \\ S_3 &= \alpha^5 \cdot \alpha^4 + \alpha^4 \cdot \alpha^1 + \alpha^5 \cdot \alpha^5 + \alpha^3 \cdot \alpha^2 + \alpha^5 \cdot \alpha^6 + \alpha^0 \cdot \alpha^3 + \alpha^1 = 0 \end{aligned}$$

ทำการแทนค่าคำตอบลงในสมการได้ว่า

$$\begin{aligned} \alpha^0 \Lambda_2 + \alpha^1 \Lambda_1 + \alpha^0 &= 0 \\ \alpha^1 \Lambda_2 + \alpha^0 \Lambda_1 &= 0 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\alpha^6 \Lambda_1 &= \alpha^1 \\ \Lambda_1 &= \alpha^2 \quad \Lambda_2 = \alpha^1 \\ \Lambda_{(z)} &= \alpha^1 z^2 + \alpha^2 z + 1\end{aligned}$$

รากของการเชื่อมต่อสมการโพลิโนเมียลคือ  $\alpha^4$  จาก  $(\alpha^1 \alpha^8 + \alpha^2 \alpha^4 + 1 = 0)$  และ  $\alpha^2$  จาก  $(\alpha^1 \alpha^4 + \alpha^2 \alpha^2 + 1 = 0)$  มีค่ารากของโพลิโนเมียล 2 ค่าจากสมการกำลัง 2 ทำการตรวจจับข้อมูลผิดพลาดได้สำเร็จที่ตำแหน่ง -4 และ -2 นั่นคือ ตำแหน่ง 5 และ 3 จากนั้นทำการคำนวณค่าความผิดพลาดตามสมการโพลิโนเมียล ค่ากำลังจาก 0 ถึง  $i-1$  ของ  $S(z)\Lambda(z)$

$$\begin{aligned}\Omega(z) &= (S_0 \Lambda_1 + S_1 \Lambda_0)z + S_0 \Lambda_0 \\ \Omega(z) &= (\alpha^1 + \alpha^3 + \alpha^0)z^2 + (\alpha^2 + \alpha^1)z + \alpha^0 \\ \Omega(z) &= \alpha^4 z + \alpha^0\end{aligned}$$

สำหรับการกำหนดให้  $g(X)$  ซึ่ง  $i=0$  เราต้องการค่า  $z\Lambda'(z)$  ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $\Lambda(z)$  โดยทุกสัมประสิทธิ์ของสมการมีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นจะได้ว่า

$$e_m = \frac{\Omega(z)}{z\Lambda'(z)} \Big|_{z=\alpha^m} = \frac{\alpha^4 z + \alpha^0}{\alpha^2 z} \Big|_{z=\alpha^m}$$

หาค่าที่  $m=3$  และ  $m=5$  ได้ว่า

$$\begin{aligned}e_3 &= \frac{\alpha^4 \alpha^{-3} + \alpha^0}{\alpha^2 \alpha^{-3}} = \frac{\alpha^3}{\alpha^{-1}} = \alpha^4 \\ e_5 &= \frac{\alpha^4 \alpha^{-5} + \alpha^0}{\alpha^2 \alpha^{-5}} = \frac{\alpha^2}{\alpha^{-3}} = \alpha^5\end{aligned}$$

สัญลักษณ์ที่ได้รับคือ  $\alpha^3$  ที่ตำแหน่ง 3 ถูกทำการแก้ไขให้ถูกต้องได้เป็น  $\alpha^6$  และสัญลักษณ์ที่รับได้คือ  $\alpha^4$  ที่ตำแหน่ง 5 แล้วทำการแก้ไขให้ถูกต้องได้เป็น  $\alpha^0$  และนี่คือผลสรุปคำตอบในการถอดรหัสของ RS(7,4)

ตารางที่ 4.5 ค่าการวิเคราะห์ของรหัสรีดโซโลมอน

Code size	Original Code	Min dist.	Code Rate
7	(7,4,1) GF(8)	4	57%
15	(15,7,4) GF(16)	9	46%
31	(31,16,7) GF(32)	16	51%
63	(63,31,16) GF(64)	33	47%
127	(127,64,31) GF(128)	64	50%
108	(108,53,27) GF(256)	59	48%

จากขั้นตอนดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 คือค่าการวิเคราะห์ค่าการเข้ารหัส ค่าแรกเริ่มการเข้ารหัส ค่าระยะทางต่ำสุดที่สามารถแก้ไขได้ และอัตราการเข้ารหัส [16]

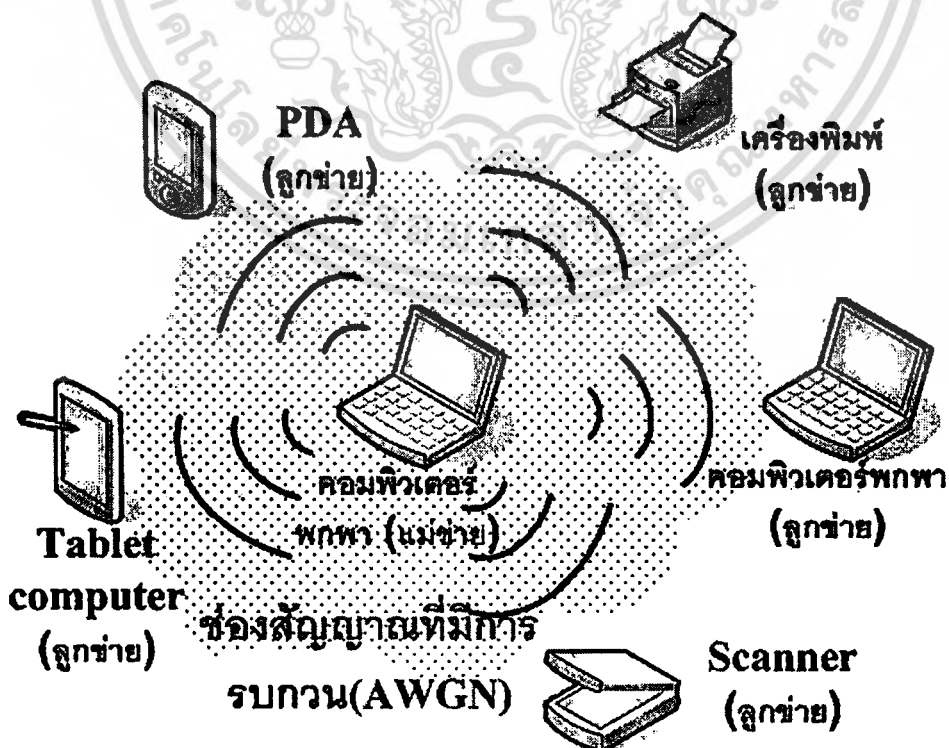


## บทที่ 5

# แบบจำลองและผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการจำลองแบบ

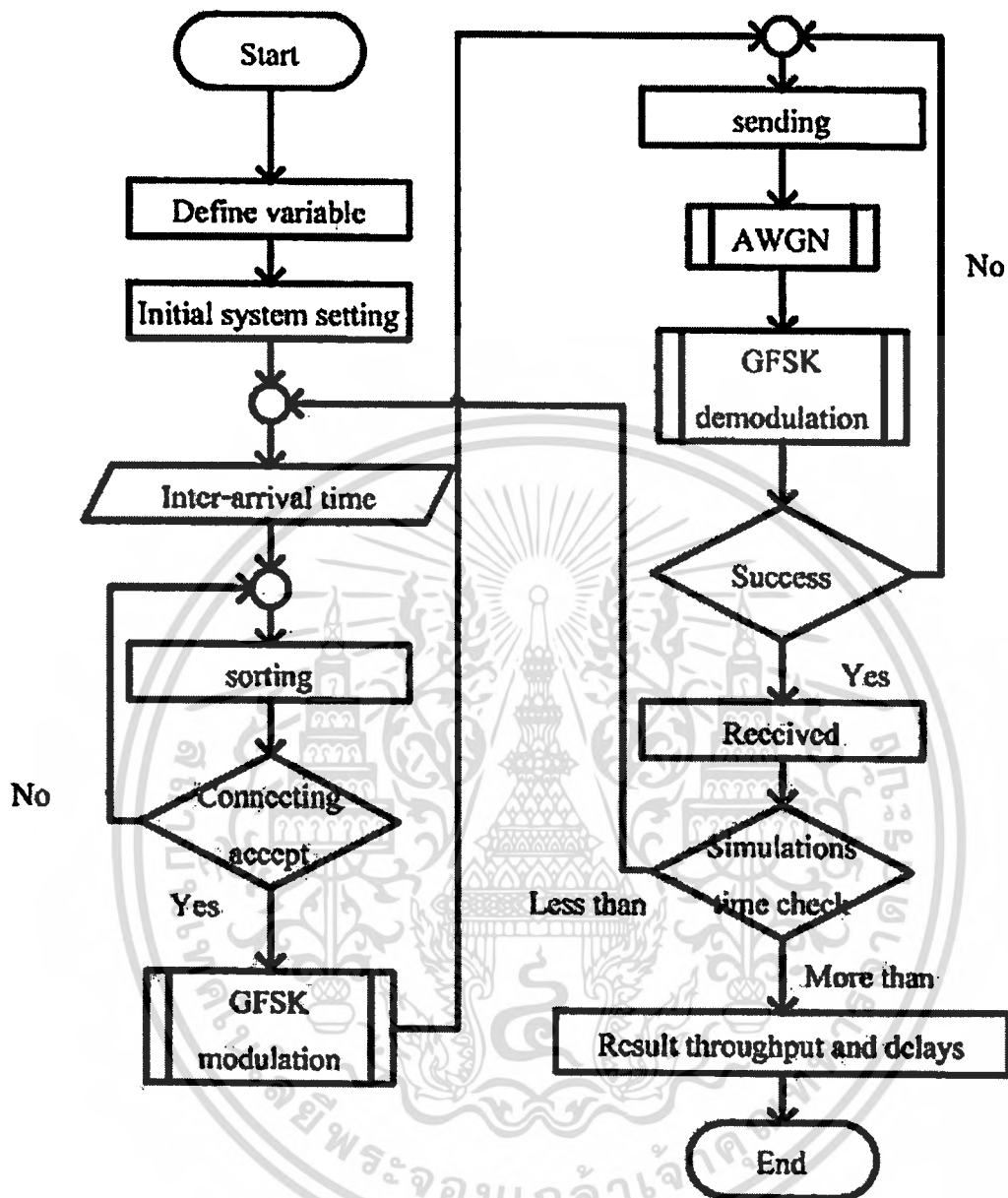
### 5.1 บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อเพิ่มความสะดวกในการสื่อสาร และพัฒนาความเร็วในการส่งข้อมูลให้ได้ปริมาณและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ซึ่งการใช้ระบบบลูทูธเป็นการสื่อสารที่ได้รับความนิยมสูงเพราะว่าการออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์ได้ง่าย ราคาถูก สามารถเคลื่อนย้ายได้ง่าย เหมาะกับการสื่อสารในสำนักงานที่มีขนาดย่อม ซึ่งมีพื้นที่จำกัด คุณสมบัติพื้นฐานของบลูทูธคือ การมอดูเลตแบบ GFSK อัตราการส่งข้อมูล 1Mbps แถบความถี่ที่ใช้คือ 2.4 GHz ความถี่คลื่นพาห์จำนวน 79 ความถี่ ความกว้างของแถบความถี่คือ 1 MHz ใช้กำลังงาน 0.1 mw ในการส่งออกอากาศ การสื่อสารไร้สายระบบบลูทูธทำการส่งสัญญาณข่าวสารแบบ Broadcast ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจการสื่อสารของโครงข่ายขนาดเล็กนั้นคือ Piconet โดยสามารถมีลูกข่าย (Slave) สูงสุดได้ 7 เครื่อง โดยทำการส่งสัญญาณข่าวสารที่สภาวะการรบกวนแบบ AWGN ดังแสดงในรูปที่ 5.1 คือตัวอย่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบันที่มีการรองรับระบบบลูทูธ โดยมีรูปแบบและหน้าที่ในการทำงานที่แตกต่างกันแต่สามารถทำการรับส่งข้อมูลได้ในระบบบลูทูธ ปัญหาดังกล่าวเป็นสิ่งที่น่าสนใจเพื่อทำการศึกษา [1,2,10]



เอกสารรูปที่ 5.1 แบบจำลองการทำงานระบบบลูทูธในช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN ด้านการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 แบบจำลองระบบบลูทูธที่มีการใช้งาน TCP โพรโทคอล



รูปที่ 5.2 แผนผังการทำงานระบบบลูทูธที่ทำงานผ่านช่องสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

จากรูปที่ 5.2 แสดงขั้นตอนการทำงานของระบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ทำการสร้างชุดข้อมูลของผู้ใช้บริการ โดยมีการกำหนดช่วงเวลาการเกิดของชุดข้อมูลแต่ละผู้ให้บริการแบบสุ่ม กำหนดให้แต่ละชุดข้อมูลไม่มีการเกิดในเวลาเดียวกัน กำหนดพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

Simulation time = 1,000,000 sec

Time slot length = 625  $\mu$ s

เอกสารนี้เป็น **Transmission rate** สำหรับ  $r = 1$  Mbps เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

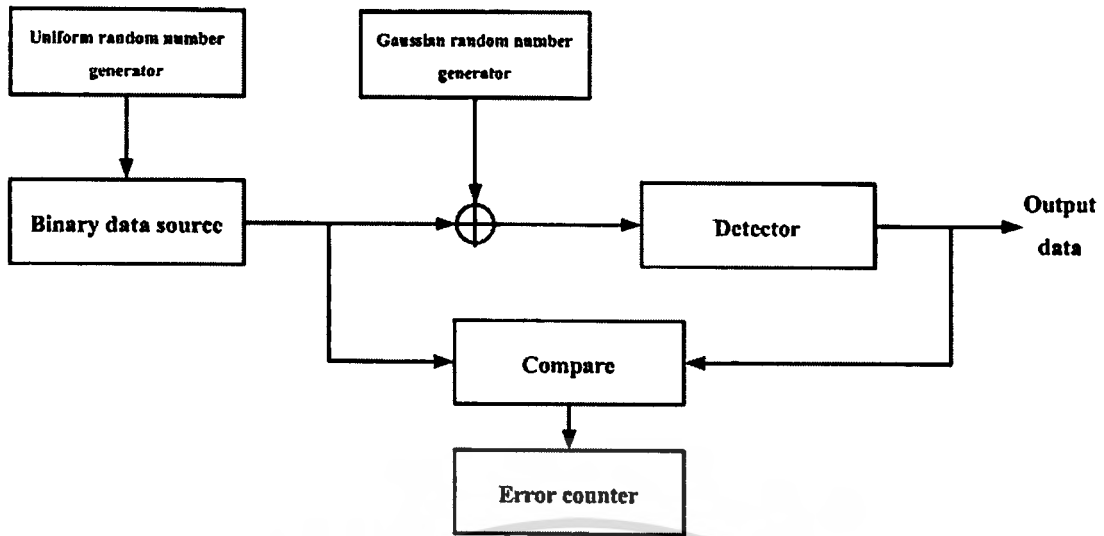
- |                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| Signal to Noise Ratio | = 9-11 dB           |
| Time arrival rate     | = 650-1,100 $\mu$ s |
| Time service          | = 650 $\mu$ s       |
| Master                | = 1 เครื่อง         |
| Slave                 | = 7 เครื่อง         |
2. ทำการจัดเรียงชุดข้อมูลของผู้ใช้บริการตามเวลาการเกิดที่เป็นแบบสุ่ม โดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ซึ่งไม่มีโอกาสมีเวลาการเกิดที่พร้อมกันของชุดข้อมูล
  3. ทำการตรวจสอบช่องสัญญาณที่ทำการให้บริการว่าว่างหรือไม่ในครั้งแรกระบบเซตทุกช่องสัญญาณว่าง เมื่อช่องสัญญาณมีใช้งานเต็มทุกช่องสัญญาณ ชุดข้อมูลถัดไปต้องรอในระบบคิวตามรูปแบบ M/M/1
  4. ช่องสัญญาณว่างชุดข้อมูลพร้อมทำการส่งโดยผ่านขั้นตอนการมอดูเลตแบบ GFSK จากสัญญาณ Digital ให้เป็นสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณข่าวสารผ่านการรบกวนแบบ AWGN ที่มีระดับแตกต่างกัน ช่องสัญญาณที่มีการรบกวนนี้ทำการจำลองอัตราการรบกวนคงที่
  5. ทำการแปลงสัญญาณข่าวสารจาก Analog เป็น Digital ด้วยการดีมอดูเลชันแบบ GFSK
  6. ตรวจสอบความเสียหายของข้อมูลหากข้อมูลเกิดการผิดพลาดกำหนดให้ระบบทำการส่งซ้ำชุดข้อมูลเดิม (Retransmission) เป็นไปตามรูปแบบการทำงานของ TCP โพรโตคอล เมื่อข้อมูลเกิดความผิดพลาดจะมีการส่ง NAK กลับไปยัง ภาคส่งเพื่อขอการส่งซ้ำ และเมื่อข้อมูลทำการส่งมีความสมบูรณ์ ภาครับจะทำการส่ง ACK กลับไปยังภาคส่งเช่นกันเพื่อขึ้นชั้นการส่งเสร็จสิ้น [17]
  7. ทำการคำนวณค่าวิสัยสามารถในการส่ง

### 5.2.1 ภาคการรบกวน

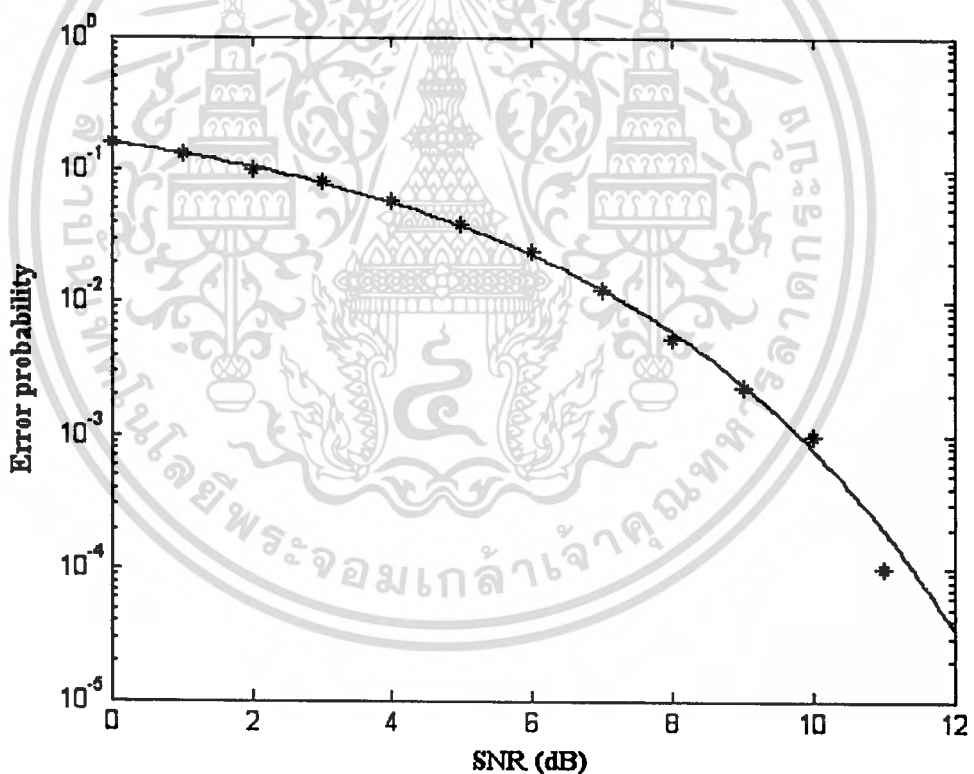
จากรูปที่ 5.2 ผังการทำงานระบบบลูทูธที่ทำงานผ่านช่องสัญญาณรบกวนแบบ AWGN นั้นมีส่วนการทำงานที่ผ่านการรบกวนแบบ AWGN ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนตามธรรมชาติ มีรูปแบบการรบกวนแบบสุ่ม สามารถเขียนแผนผัง Flow Chart การทำงานได้ดังรูปที่ 5.3 [18]

อธิบายได้ว่าเมื่อระบบข้างต้นทำการสร้างชุดข้อมูลแล้วทำการส่งข่าวสารออกไปในสถานะที่มีการรบกวนตามความรุนแรงตามที่กำหนด ซึ่งข่าวสารมีขนาด 1,000 บิตผ่านไปยังภาครับ โดยกำหนดให้มีการรบกวนจาก 0 dB ถึง 12 dB สังเกตผลจากภาครับเปรียบเทียบกับข่าวสารต้นแบบได้ผลดังแสดงในรูปที่ 5.4 คือเกิดความน่าจะเป็นที่มีความผิดพลาดสูงเมื่อระบบถูกการรบกวนในสถานะที่รุนแรงและเมื่อสถานะการรบกวนแบบ AWGN มีขนาดลดลงจะได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 แบบจำลองการทำงานของการส่งข้อมูลผ่านการรบกวนแบบ AWGN

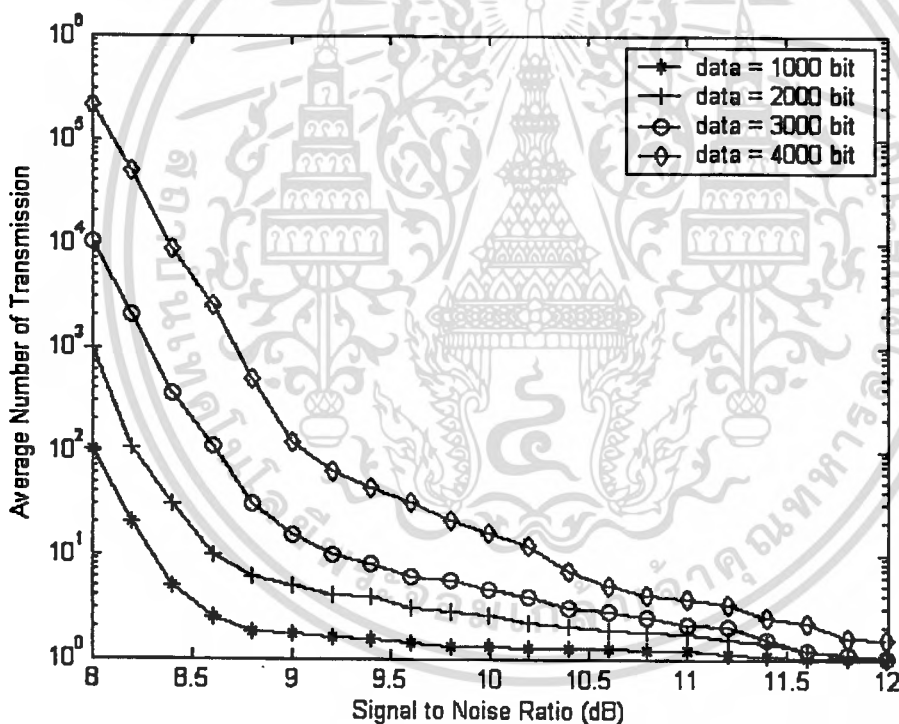


รูปที่ 5.4 ค่าความผิดพลาดของข้อมูลเมื่อเจอสัญญาณรบกวนที่มีขนาดต่างกัน

### 5.2.2 การทำงานของ TCP โพรโทคอล

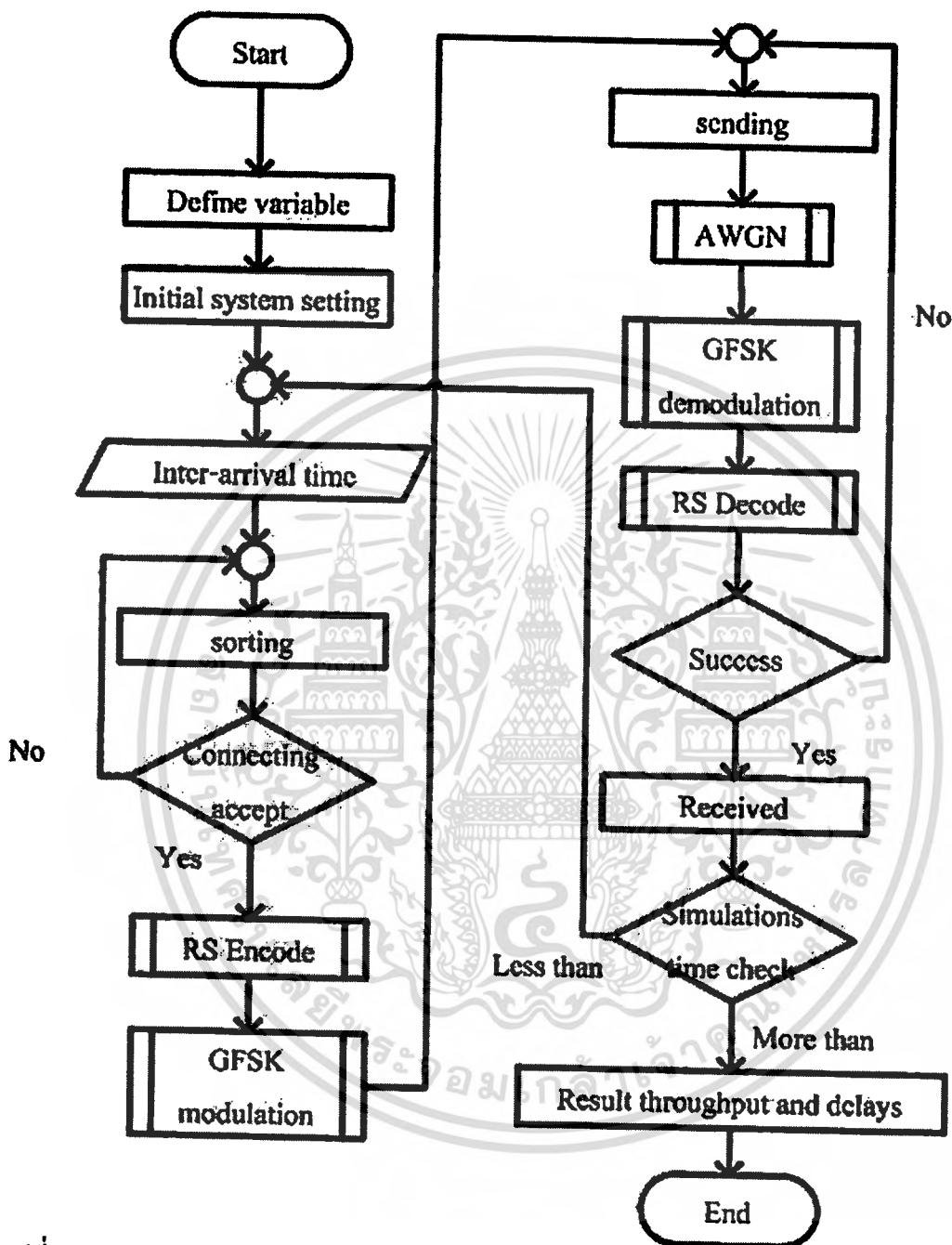
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการใช้ TCP โพรโทคอลในการควบคุมการไหลของระบบเพื่อป้องกันการเสียหายอันมีผลมาจากการชนกันของข้อมูล เราทำการทดลองส่งข้อมูลในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเซอร์เซ็นเซอร์ค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องสัญญาณที่มีความรบกวนที่แตกต่างกันจาก 8 dB ถึง 12 dB เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยเราทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนข้อมูลในการส่งนั้นหมายถึงระยะเวลาในการส่งข้อมูลจำนวน 1,000 บิต ถึง 4,000 บิต ตามลำดับ แกน Y แสดงจำนวนการส่งซ้ำเฉลี่ย เป็นผลเฉลี่ยจากการทำงาน 10 ครั้ง จากรูปที่ 5.5 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อสัญญาณรบกวนที่รุนแรงส่งผลให้ระบบการทำงานต้องมีการ ส่งซ้ำสูง และเมื่อค่าความรบกวนในช่องสัญญาณลดลง ที่ SNR เท่ากับ 12 dB ผลการส่งซ้ำเฉลี่ยเท่ากับ 1 กล่าวคือได้รับผลกระทบน้อยมาก จากรูปที่ 5.5 เราทำการเลือกช่วง SNR เท่ากับ 9 dB 10 dB และ 11 dB เป็นระดับการรบกวนที่ใช้ในการศึกษา เพราะมีการส่งซ้ำอยู่ในระดับที่สามารถแก้ไขได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจัยของจำนวนรอบการส่งซ้ำประกอบด้วย ค่า SNR และ ขนาดของข้อมูล เพราะ เมื่อต้องการทำการส่งข้อมูลที่มีขนาดใหญ่และเกิดการรบกวนในช่องสัญญาณส่งผลให้ต้องทำการส่งซ้ำสูงตามปริมาณข้อมูลที่ต้องการทำการส่งตามลำดับ



รูปที่ 5.5 จำนวนรอบเฉลี่ยของการส่งซ้ำ

5.3 แบบจำลองระบบบดุงที่มีการใช้งาน TCP โพรโทคอล ร่วมกับ REED SOLOMON CODE



รูปที่ 5.6 แผนผังการทำงานระบบบดุงที่ทำงานผ่านช่องสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่มีการใช้การเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอนร่วมด้วย

จากผังการทำงานรูปที่ 5.6 มีลักษณะคล้ายกับผังการทำงานรูปที่ 5.2 โดยที่รูป 5.6 ทำการเพิ่มส่วนของการทำงานของการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน เข้าไปในขั้นตอนการทำงานลำดับที่ 4 และ 7 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบบดุง สามารถอธิบายการทำงานได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทำการสร้างชุดข้อมูลของผู้ใช้บริการ โดยมีการกำหนดช่วงเวลาการเกิดของชุดข้อมูลแต่ละผู้ใช้บริการแบบสุ่ม กำหนดให้แต่ละชุดข้อมูลไม่มีการเกิดในเวลาเดียวกัน กำหนดพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

Simulation time = 1,000,000 sec

Time slot length = 625  $\mu$ s

Transmission rate = 1 Mbps

Signal to Noise Ratio = 9-11 dB

Time arrival rate = 650-1,100  $\mu$ s

Time service = 650  $\mu$ s

Master = 1 เครื่อง

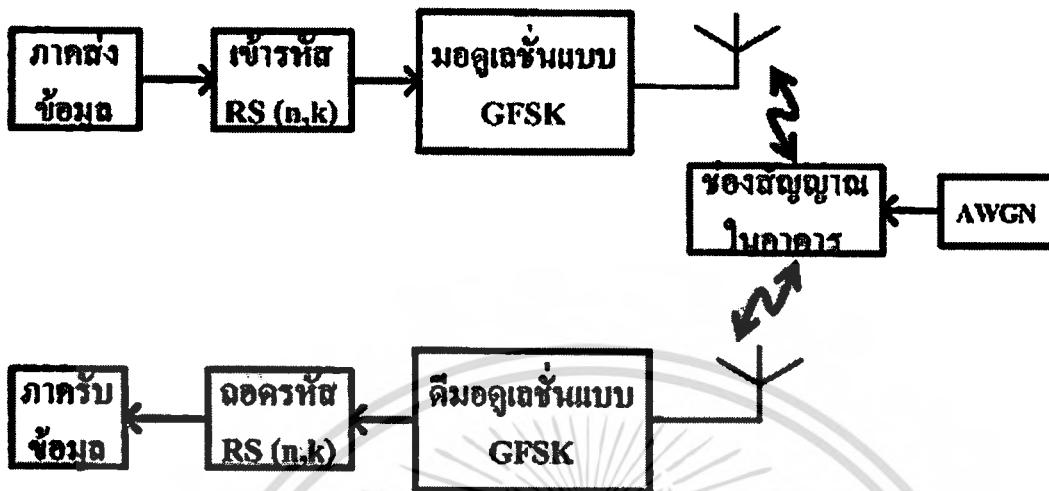
Slave = 7 เครื่อง

Reed Solomon Code Size = RS(7,4), RS(15,7), RS(31,16)

2. ทำการจัดเรียงชุดข้อมูลของผู้ใช้บริการตามเวลาการเกิดที่เป็นแบบสุ่ม โดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ซึ่งไม่มีโอกาสมีเวลาการเกิดที่พร้อมกันของชุดข้อมูล
3. ทำการตรวจสอบช่องสัญญาณที่ทำการให้บริการว่าว่างหรือไม่ในครั้งแรกระบบเซตทุกช่องสัญญาณว่าง เมื่อช่องสัญญาณมีใช้งานเต็มทุกช่องสัญญาณ ชุดข้อมูลถัดไปต้องรอในระบบคิวตามรูปแบบ M/M/1
4. ทำการเข้ารหัสรีดโซโลมอน โดยการทำให้ข้อมูลเลขฐานสองให้อยู่ในรูปสัญลักษณ์เพื่อส่งต่อไปยังขั้นตอนการมอดูเลชัน
5. ช่องสัญญาณว่างชุดข้อมูลพร้อมทำการส่งโดยผ่านขั้นตอนการมอดูเลตแบบ GFSK จากสัญญาณ Digital ให้เป็นสัญญาณ Analog เป็นสัญญาณข่าวสารผ่านการรบกวนแบบ AWGN ที่มีระดับแตกต่างกัน ช่องสัญญาณที่มีการรบกวนนี้ทำการจำลองอัตราการรบกวนที่
6. ทำการแปลงสัญญาณข่าวสารจาก Analog เป็น Digital ด้วยการมอดูเลชันแบบ GFSK
7. ทำการถอดรหัสสัญลักษณ์ของรหัสรีดโซโลมอน และทำการตรวจสอบแก้ไขความผิดพลาดของชุดข้อมูลที่ได้รับได้โดยรหัสรีดโซโลมอนสามารถทำการแก้ไขชุดข้อมูลที่ผิดพลาดได้ในระดับหนึ่ง
8. ตรวจสอบความเสียหายของข้อมูลเป็นการตรวจสอบสำหรับข้อมูลที่เกิดการสูญหายจากการส่งซึ่งแตกต่างจากวิธีแรก หากข้อมูลเกิดการสูญหายภาครับจะทำการส่ง NAK ไปยังภาคส่งเพื่อขอชุดข้อมูลที่มีการสูญหายนั่นคือ การร้องขอเพื่อส่งซ้ำชุดข้อมูลเดิมที่สูญหาย (Retransmission) เป็นไปตามรูปแบบการทำงานของ TCP โพรโตคอล และ เมื่อภาคส่งทำการส่งซ้ำโดยสามารถรับชุดข้อมูลที่ส่งซ้ำได้สมบูรณ์ ภาครับจะทำการส่ง ACK กลับไปยังภาคส่งเช่นกันเพื่อยืนยันการส่งเสร็จสิ้น

### 9. ทำการคำนวณค่าวิสัยสามารถในการส่ง

จากผังการทำงานข้างต้นสามารถสรุปให้อยู่ในรูปของ บล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 5.7

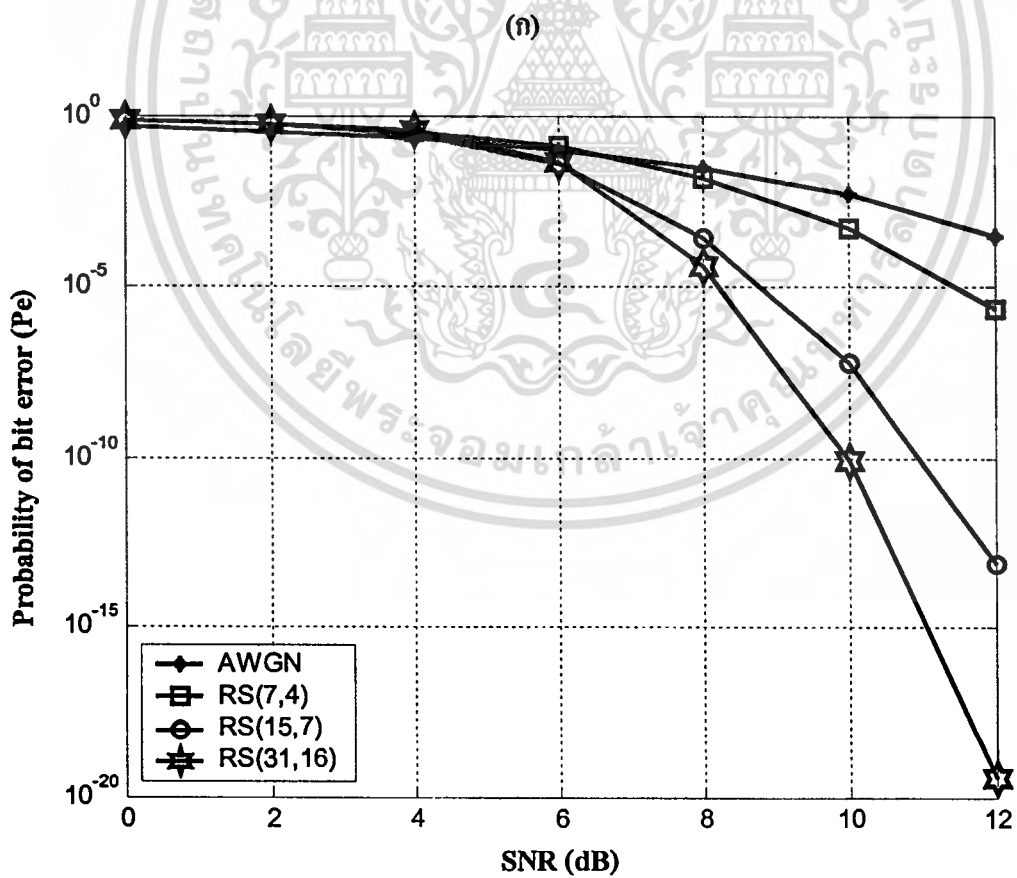
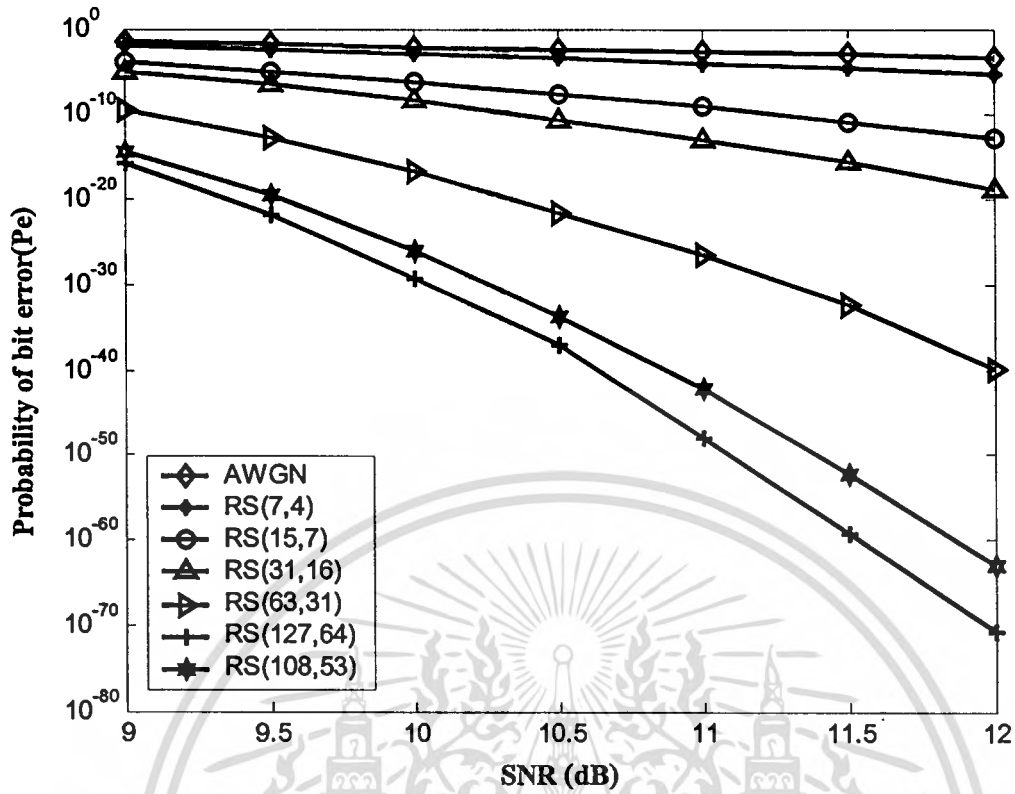


รูปที่ 5.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

#### 5.3.1 ภาครหัสรีดไซโลมอน

ในส่วนของรหัสรีดไซโลมอนเราทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาขนาดที่เหมาะสมในการใช้งาน โดยทำการจำลองการทำงานของรหัสรีดไซโลมอนในสภาวะที่เกิดสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ดังแสดงในรูปที่ 5.8 (ก) และ (ข) เราได้ทำการศึกษาการทำงานในสภาวะที่มีสัญญาณรบกวนตั้งแต่ SNR เท่ากับ 9dB ถึง 12dB เป็นช่วงที่ทำการศึกษาและทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของรหัสรีดไซโลมอน จากตารางที่ 4.5 ทำการจำลองการทำงานและแสดงดังรูปที่ 5.8 (ก)

ทำการวิเคราะห์เลือกขนาดของรหัสรีดไซโลมอนที่เหมาะสมจากรูปที่ 5.8 (ก) สังเกตได้ว่าขนาดของรหัสรีดไซโลมอนมีผลอย่างมากต่อค่าความน่าจะเป็นของการเกิดบิตผิดพลาดเมื่อขนาดของรหัสรีดไซโลมอนมีขนาดใหญ่ ผลคือค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดบิตผิดพลาดน้อยมาก แต่เราไม่สามารถนำรหัสที่มีขนาดใหญ่มาใช้ได้เนื่องจากหากทำการนำรหัสที่มีขนาดใหญ่มาใช้หมายความว่าข้อมูลที่เราต้องการทำการส่งต้องมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย และอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ กล่าวคือข้อมูลหนึ่งชุดจะต้องมีขนาดใหญ่และเมื่อเกิดการการสูญหายระบบถูกออกแบบให้ทำการส่งซ้ำข้อมูลที่สูญหาย ส่งผลให้เกิดการหน่วงเวลาและประสิทธิภาพการทำงานจะลดลงไปด้วย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการเลือกใช้รหัสรีดไซโลมอนขนาด RS(7,4) RS(15,7) และ RS(31,16) ทั้งสามขนาดเป็นรหัสที่มีขนาดเล็ก โดยยังคงมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง [15,19,20]



(ง)

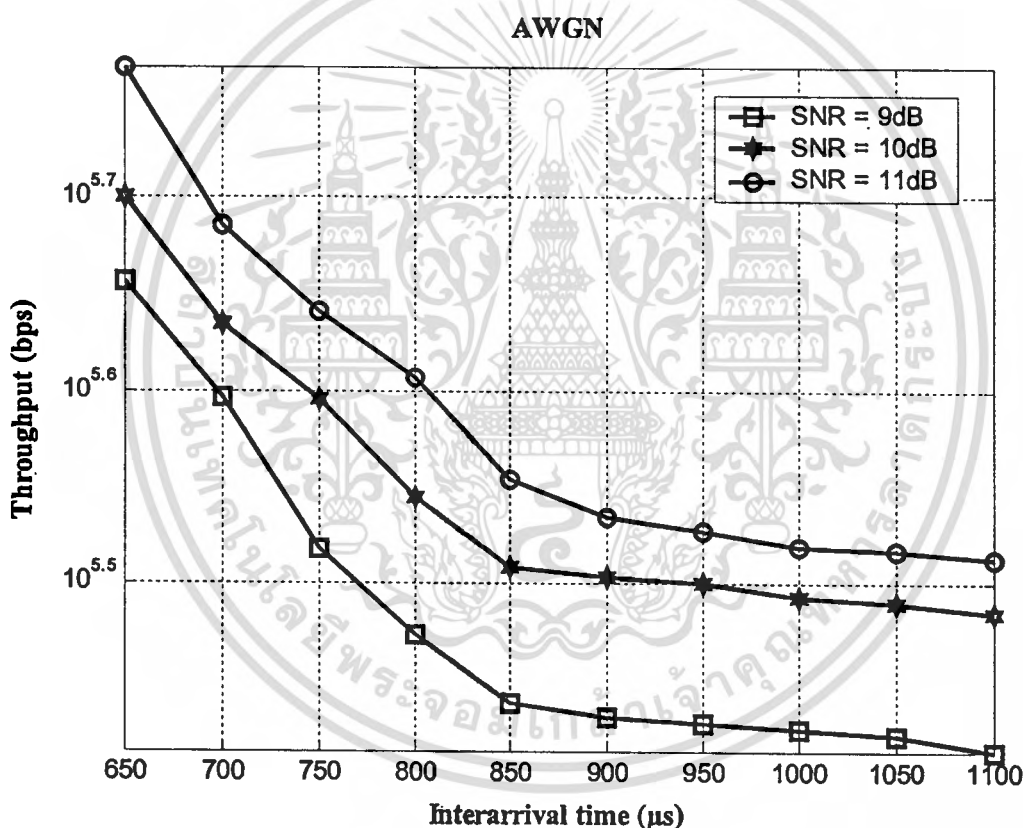
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**รูปที่ 5.8** ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดบิตผิดพลาดของรหัสรีดิวซ์โบลอน  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 ผลการจำลองแบบ

ในหัวข้อที่ 5.5 การจำลองแบบทำการแบ่งการทดลองออกเป็นสามหัวข้อคือ

- 1) ผลกระทบจากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN
- 2) ผลการจำลองการนำ TCP โพรโตคอลเข้ามาช่วยแก้ปัญหาการชนกันของชุดข้อมูลและเพิ่มประสิทธิภาพการส่งชุดข้อมูลซ้ำ
- 3) ผลการจำลองด้วยการนำ การเข้ารหัสแบบ Reed Solomon Code (RS Code) ร่วมกับ TCP โพรโตคอลในการแก้ปัญหาการรบกวนในช่องสัญญาณแบบ AWGN

### 5.4.1 ประสิทธิภาพการทำงานในสถานะการรบกวน



รูปที่ 5.9 ผลกระทบจากสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณต่อค่าวิสัยสามารถ

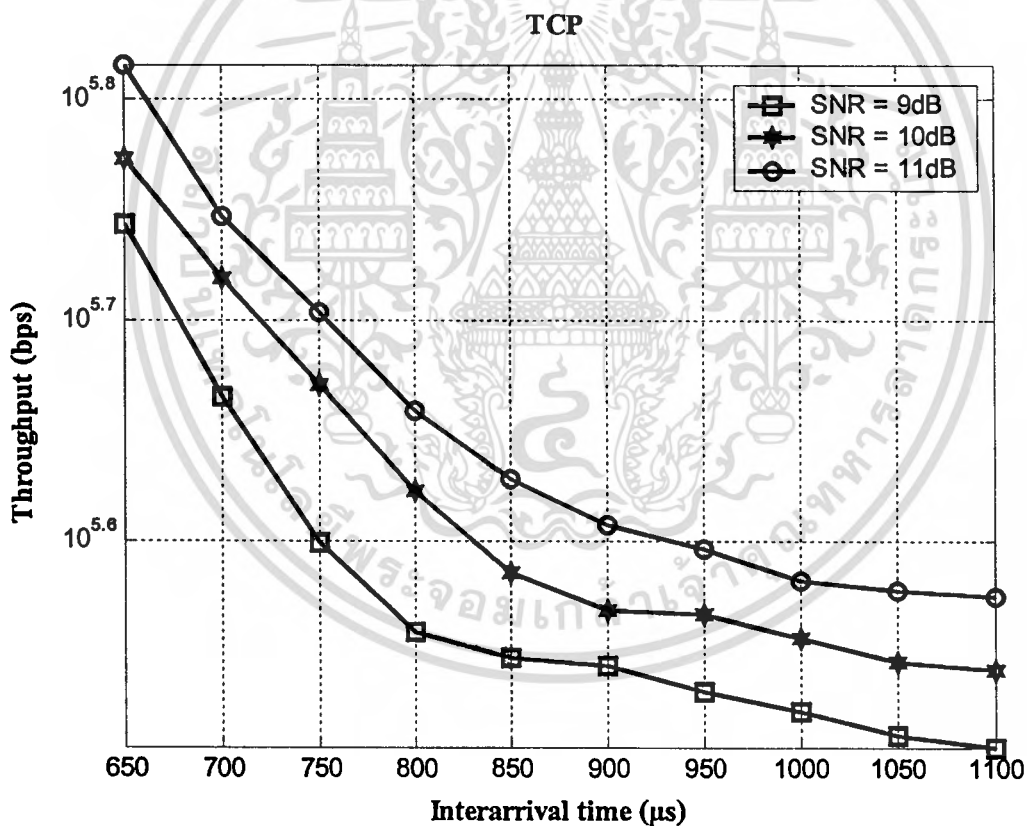
ในหัวข้อที่ 5.5.1 คือการจำลองการทำงานของระบบบลูทูธที่สถานะการรบกวนในช่องสัญญาณแบบ AWGN ในระดับ 9dB 10 dB และ 11 dB ตามลำดับเพื่อสังเกตผลกระทบต่อ การรับส่งข่าวสารระหว่างแม่ข่ายกับลูกข่าย ดังแสดงในรูปที่ 5.9 โดยสามารถอธิบายถึงผลจากการทำงานในสถานะที่มี การรบกวนได้เป็นอย่างดี เมื่อเราทำการเปลี่ยนแปลงค่า การเข้าของชุดข้อมูล (Time arrival) จาก 650 ไมโครวินาที ถึง 1,100 ไมโครวินาที เมื่อระบบถูกรบกวนที่ระดับไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9dB ส่งผลให้ค่าวิสัยสามารถมีค่าสูงสุด ณ ค่าการเข้าถึงของชุดข้อมูล ที่ 650 ไมโครวินาที คือ 453kbps. และมีค่าลดลงดังแสดงในรูป เมื่อค่าการเข้าของชุดข้อมูลเพิ่มขึ้นนั้นหมายความว่า เวลาที่สามารถทำการส่งชุดข้อมูลน้อยลงไปเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้ค่าวิสัยสามารถลดลง ณ ตำแหน่งเวลาการเข้าของชุดข้อมูลที่สูงและจะมีค่าคงที่ โดยค่าวิสัยสามารถของการทำงานที่สภาวะรบกวนที่ 11 dB มีค่าสูงสุดณตำแหน่งที่ 650 ไมโครวินาทีเช่นกัน

#### 5.4.2 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบในสภาวะรบกวน ที่ทำงานร่วมกับ

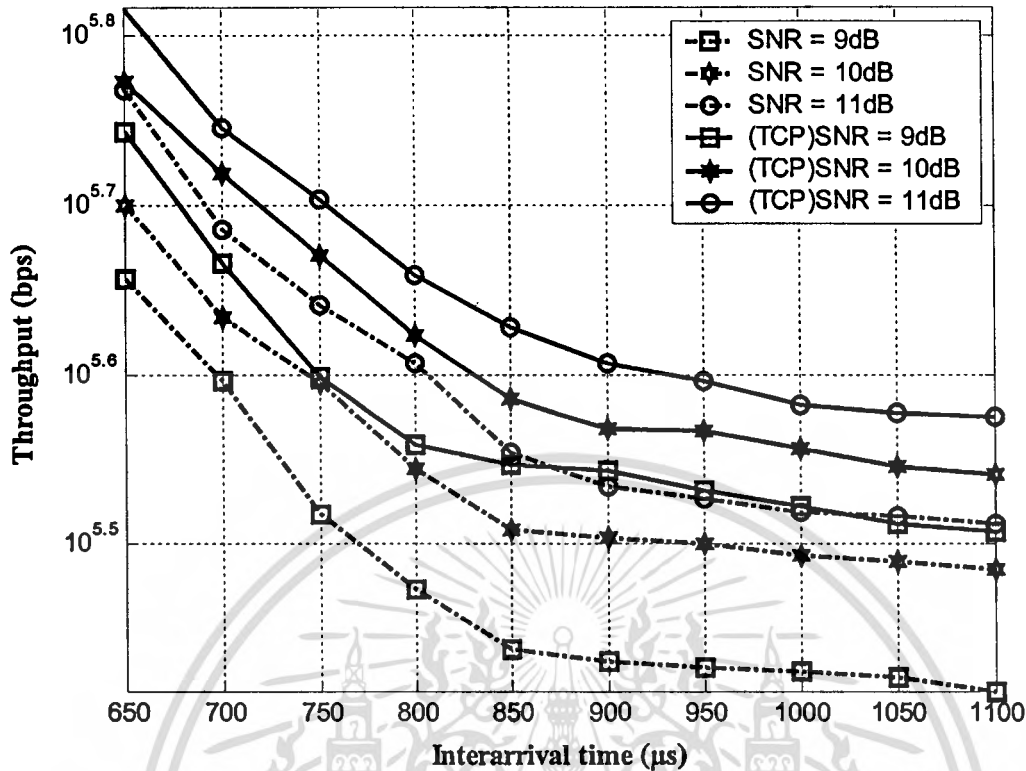
##### TCP โพรโตคอล

ในหัวข้อนี้ทำการแสดงผลการจำลองแบบของระบบเมื่อทำการนำ TCP โพรโตคอลเข้ามาใช้ร่วมเพื่อควบคุมการไหลของชุดข้อมูล ในสภาวะที่มีการรบกวนต่อการสื่อสารแบบ AWGN ดังแสดงผลการจำลองแบบของการทำงานในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ค่าวิสัยสามารถเมื่อนำ TCP โพรโตคอลร่วมกับการส่งข้อมูล

## AWGN-TCP



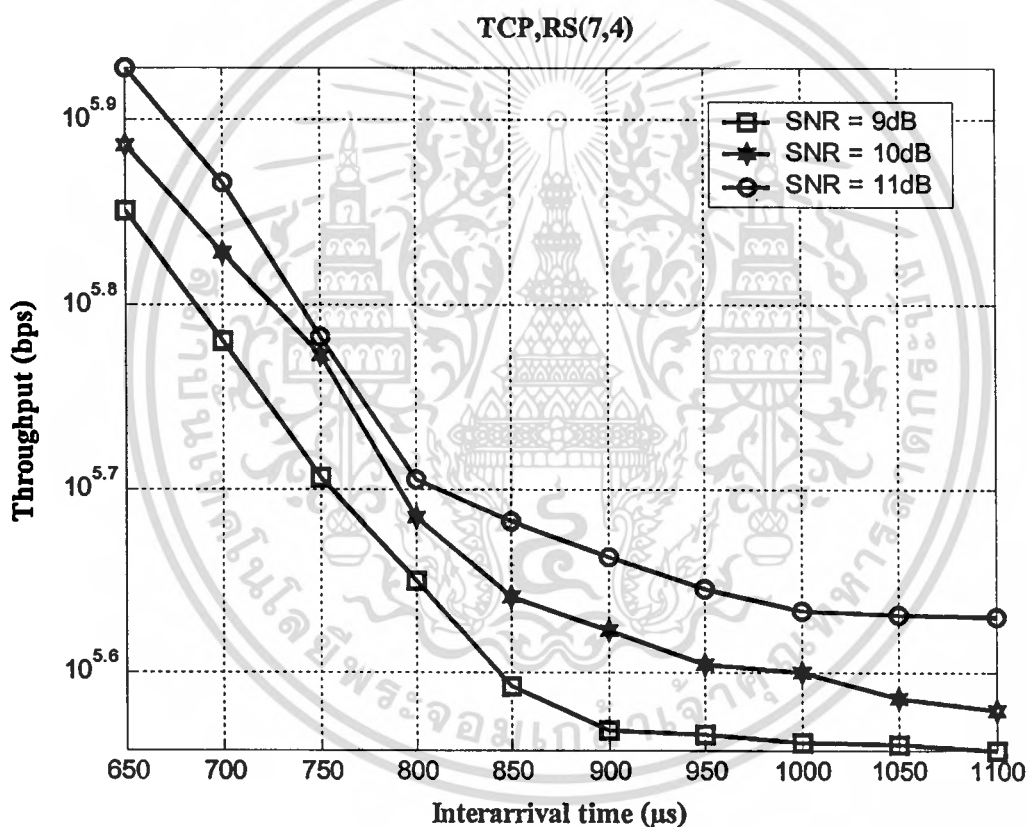
รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบเมื่อมีการนำ TCP โปรโตคอลร่วมกับการส่งข้อมูล

รูปที่ 5.11 ทำการเปรียบเทียบระหว่างก่อนและหลังการนำการควบคุมการไหลของชุดข้อมูลเข้ามาใช้ในระบบ จากรูปที่ 5.11 คือผลการจำลองแบบของระบบบลูทูธที่ทำการสื่อสารระหว่าง เครื่องแม่ข่าย (Master) กับ ลูกข่าย (Slave) โดยทำการรับและส่งชุดข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีรูปแบบการรบกวนแบบ AWGN ที่มีขนาด 9dB 10dB และ 11dB จากรูปที่ 5.11 เส้นประ (SNR = 9dB 10dB และ 11dB) คือเส้นกราฟแสดงการทำงานของระบบบลูทูธที่ก่อนทำการปรับปรุง เส้นทึบ ((TCP) SNR = 9dB 10dB และ 11dB) คือเส้นกราฟแสดงการทำงานของระบบที่มีการใช้งาน TCP โปรโตคอล โดยค่าวิสัยสามารถของระบบที่สภาวะสัญญาณรบกวน 9 dB มีค่าวิสัยสามารถเพิ่มจาก 453 kbps. ไปเป็น 554 kbps. ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อเราทำการควบคุมการไหลของชุดข้อมูลแล้วนั้นสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานได้

#### 5.4.3 ประสิทธิภาพการทำงานของรหัสรีดโซโลมอน ต่อการทำงานของระบบบลูทูธ ที่สภาวะการรบกวนแบบ AWGN

จากที่ได้ทำการแสดงถึงหลักการทำงานของ การเข้าและถอดรหัสรีดโซโลมอนในหัวข้อที่ 4.4 แล้วนั้น ในหัวข้อที่ 5.4.3 ได้ทำการนำการเข้ารหัสรีดโซโลมอนมาใช้งานร่วมกับ การควบคุมการไหล (TCP โปรโตคอล) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการทำงานต่อระบบบลูทูธที่มีการรบกวน การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบ AWGN ในระดับต่างๆ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษา การใช้งานรหัสรีดโซโลมอนที่มีขนาดต่างกันสามระดับคือ RS(7,4) RS(15,7) และ RS(31,16) จากผลการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 5.3.1 โดยทำการออกแบบให้มีการรับส่งข้อมูลระหว่าง แม่ข่าย กับ ลูกข่าย 7 เครื่อง โดยออกแบบให้มีการใช้งานตลอดเวลาการจำลองการทำงาน และระบบจะทำการส่งซ้ำเมื่อข้อมูลเกิดการผิดพลาด หรือ สูญหายซึ่งในขั้นแรกทำการเข้ารหัสรีดโซโลมอนแก่ชุดข้อมูลให้อยู่ในรูปสัญลักษณ์ ก่อนทำการมอดูเลชันแบบ GFSK และส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN ในระดับ 9dB 10dB และ 11dB สามเหตุการณ์ โดยทั้งสามเหตุการณ์มีการทำงานแยกจากกันและในการรบกวนเป็นลักษณะการรบกวนแบบสุ่ม ได้ผลลัพธ์จากการจำลองแบบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.12 รูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ตามลำดับ



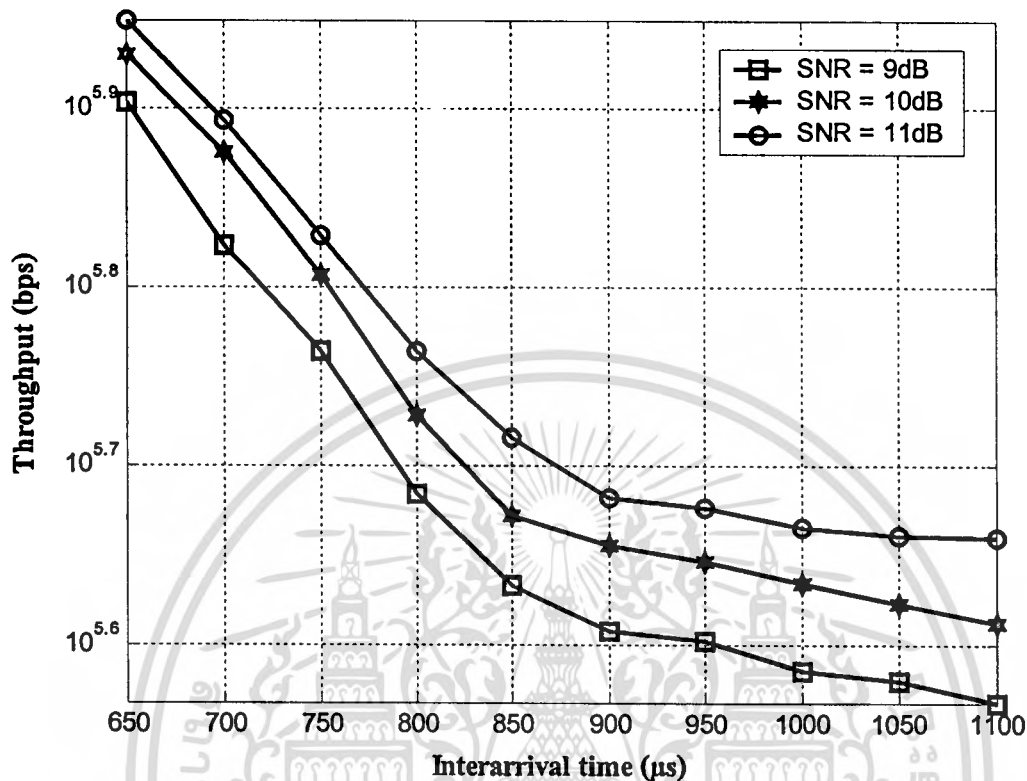
รูปที่ 5.12 ค่าวิสัยสามารถของรหัสรีดโซโลมอนขนาด RS(7,4)

รูปที่ 5.12 คือกราฟแสดงค่าวิสัยสามารถของการทำงานร่วมกันระหว่างรหัสรีดโซโลมอนขนาด RS(7,4) กับ TCP โปรโตคอล ในรูปที่ 5.13 คือกราฟแสดงค่าวิสัยสามารถของการทำงานร่วมกันระหว่างรหัสรีดโซโลมอนขนาด RS(15,7) กับ TCP โปรโตคอล และรูปที่ 5.14 คือกราฟแสดงค่าวิสัยสามารถของการทำงานร่วมกันระหว่างรหัสรีดโซโลมอนขนาด RS(7,4) กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

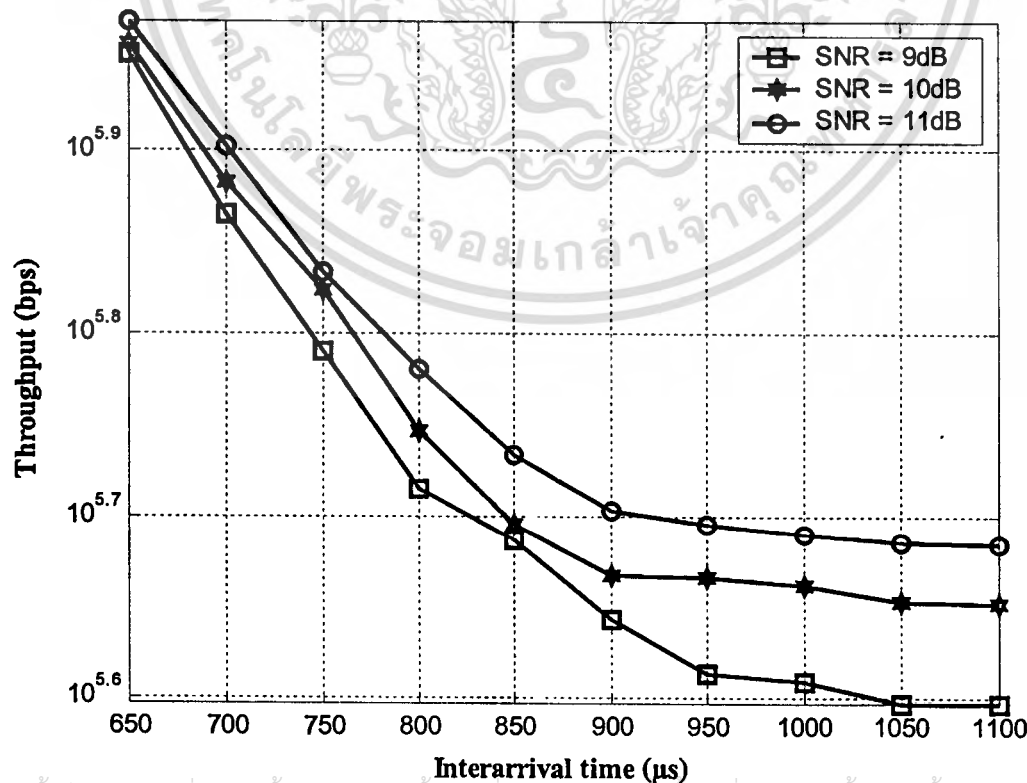
TCP โปรโตคอล ทั้งสามรูปแบบแสดงค่าวิสัยสามารถไปในทางเดียวกัน โดยมีประสิทธิภาพในการทำงานที่แตกต่างกันไปแปรผันตามขนาดของรหัสรีดโซโลมอนและค่าการเข้าของชุดข้อมูล

TCP,RS(15,7)



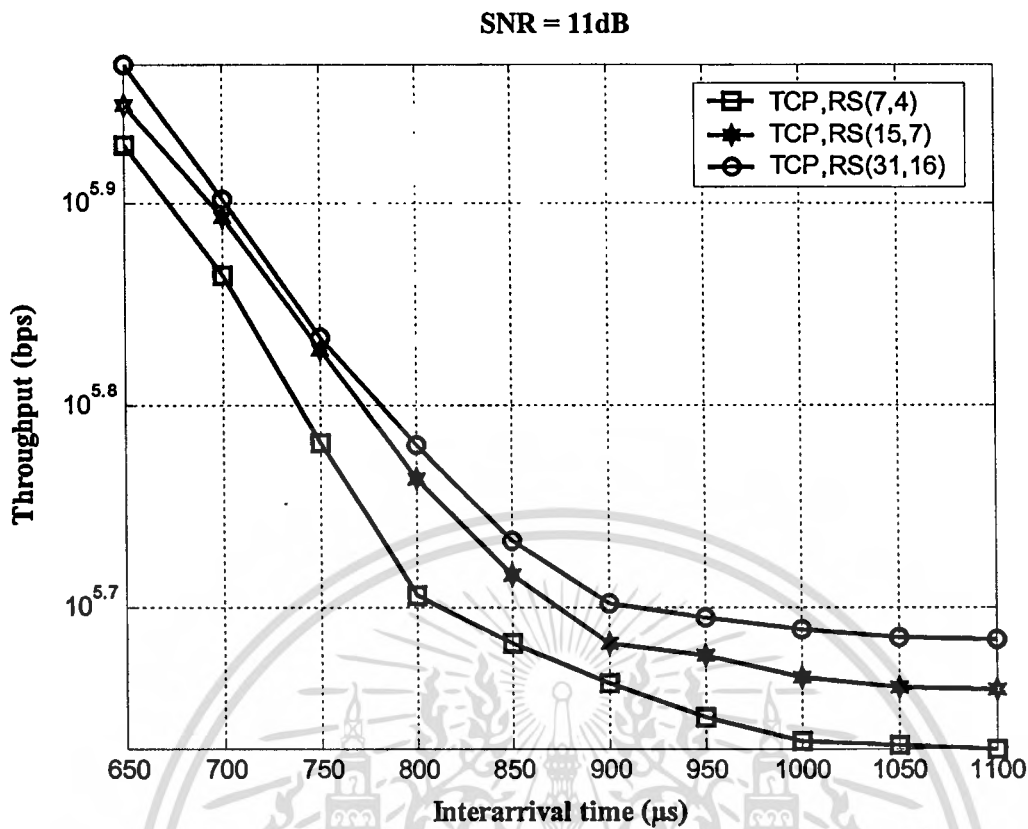
รูปที่ 5.13 ค่าวิสัยสามารถของรหัสรีดโซโลมอนขนาด RS(15,7)

TCP,RS(31,16)



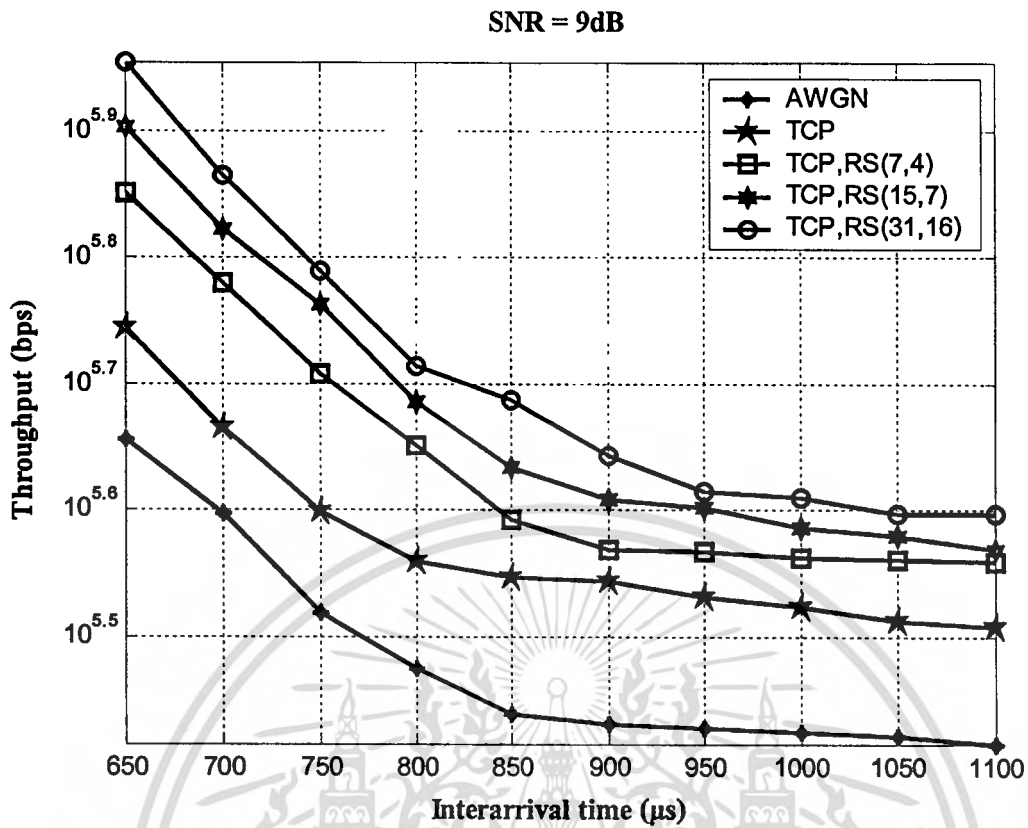
รูปที่ 5.14 ค่าวิสัยสามารถของรหัสรีดโซโลมอนขนาด RS(31,16)



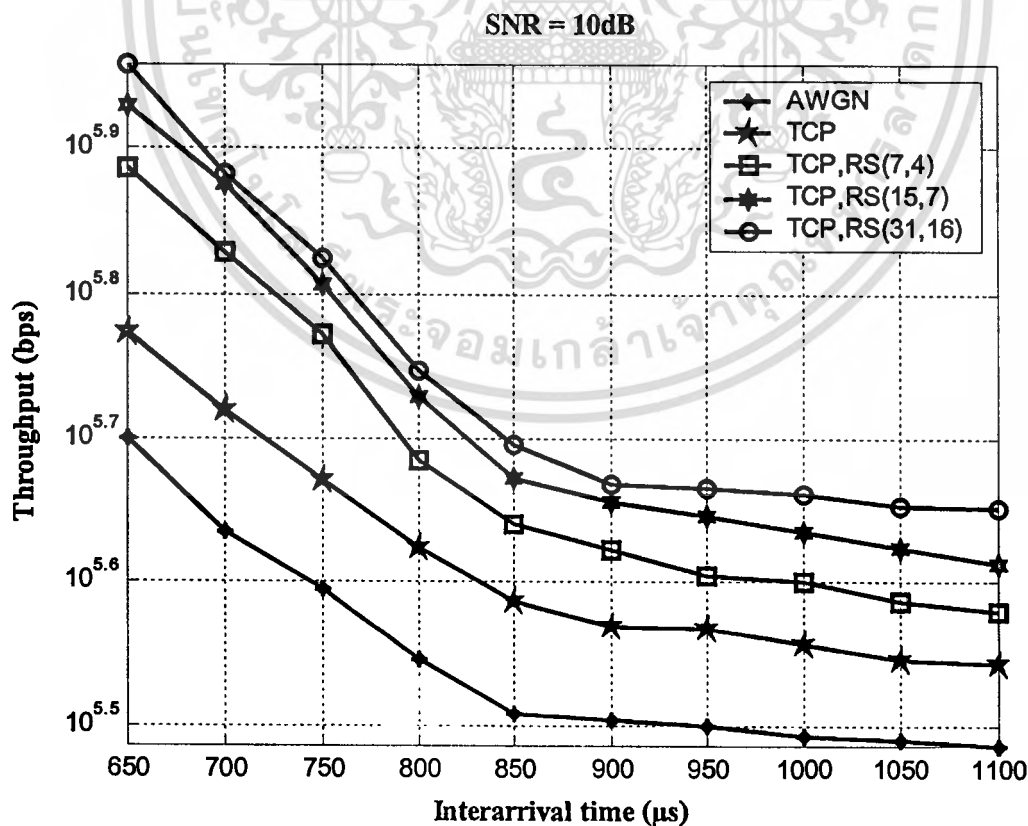


รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถที่ SNR = 11dB การเปลี่ยนแปลงขนาดรหัสรีดโซโลมอน

ในรูปที่ 5.15 รูปที่ 5.16 และ รูปที่ 5.17 คือรูปกราฟแสดงการเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นถึงค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อค่าวิสัยสามารถของระบบการทำงานระหว่างแม่ข่าย กับ ลูกข่ายของระบบบลูทูธ จากรูปที่ 5.17 อธิบายได้ว่าเมื่อทำการใช้งานรหัสรีดโซโลมอนที่มีขนาดใหญ่ คือ RS(31,16) ส่งเสริมให้ค่าวิสัยสามารถเพิ่มได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับขนาดของรหัสรีดทั้งหมดที่ได้ทำการทดลอง (RS(15,7) และ RS(7,4)) แต่สังเกตได้ว่า ณ เวลา 700 และ 750 ไมโครวินาที นั้นมีผลกระทบมาจากสถานะของสัญญาณรบกวนที่มีการทำงานแบบสุ่ม และช่วงเวลาดังกล่าวของการใช้งาน RS(31,16) ได้รับความเสียหายส่งผลให้ต้องทำการส่งซ้ำชุดข้อมูลดังกล่าวจาก ชุดข้อมูลดังกล่าวเป็นการใช้งานรหัสรีดโซโลมอนที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ค่าวิสัยสามารถลดลง

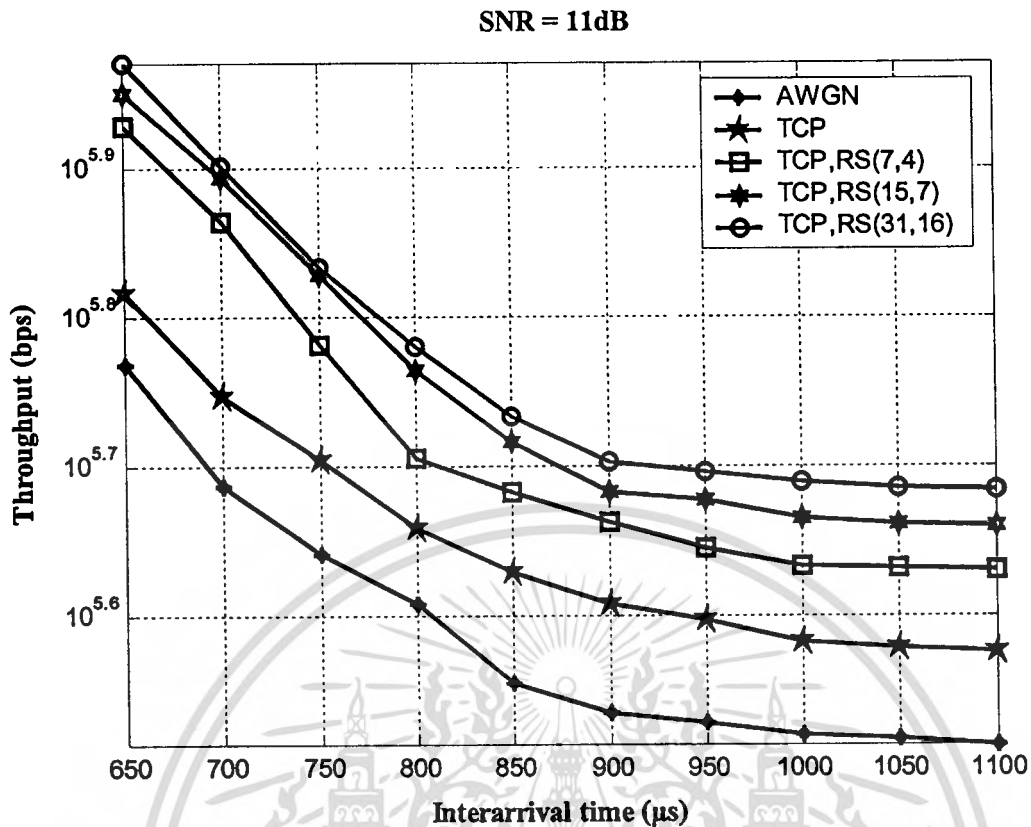


รูปที่ 5.18 วิเคราะห์ค่าวิสัยความสามารถที่มึการทำงานของ TCP และ รหัสรีดโซโลมอน  
ที่ SNR = 9dB



รูปที่ 5.19 วิเคราะห์ค่าวิสัยความสามารถที่มึการทำงานของ TCP และ รหัสรีดโซโลมอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ที่ SNR = 10dB  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.20 วิเคราะห์ค่าวิสัยที่สามารถที่มึการทำงานของ TCP และ รหัสรีดโซโลมอน  
ที่ SNR = 11dB

รูปที่ 5.17 รูปที่ 5.18 และ รูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบเพื่อความชัดเจน ถึง ระดับการทำงานเมื่อมีทำการใช้งาน TCP และ รหัสรีดโซโลมอนที่มีขนาดต่างกัน ในแต่ละสภาวะการรบกวนจากรูปที่ 5.19 ที่สภาวะการรบกวนที่ 11dB แสดงให้เห็นว่าการใช้งานรหัสรีดโซโลมอนร่วมกับการควบคุมการไหลนั้นมีค่าวิสัยสามารถอยู่ในกลุ่มเดียวกัน หากมีการใช้งาน TCP เพื่อควบคุมการไหลของระบบเพียงอย่างเดียวนั้นสามารถช่วยให้ค่าวิสัยสามารถเพิ่มขึ้นได้ในระดับหนึ่ง แต่ในบางครั้งอาจไม่เพียงพอหากเกิดการรบกวนที่รุนแรงขึ้น

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในปัจจุบันการสื่อสารไร้สายเป็นสิ่งจำเป็นต่อการสื่อสารข้อมูลคงเห็นได้จาก ได้มีการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆให้มีความสามารถในการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย อาทิเช่น คอมพิวเตอร์พกพา โทรศัพท์เคลื่อนที่ สมุดบันทึกอิเล็กทรอนิกส์ และ เครื่องพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งการสื่อสารแบบไร้สายได้รับการออกแบบรูปแบบการส่งข้อมูลอย่างหลากหลาย โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้สนใจการทำงานของระบบการส่งแบบ ระบบลูทูล ด้วยว่าเป็นระบบที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ในปัจจุบันส่วนใหญ่มีการนำเทคโนโลยีลูทูลมาใช้เพื่อ ทำการส่งข้อมูลระหว่างโทรศัพท์เคลื่อนที่ กับ โทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือ โทรศัพท์เคลื่อนที่ กับ เครื่องพิมพ์ เป็นต้น และจากระบบลูทูลเป็นการทำการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุในย่านความถี่ 2.4 GHz นี้เองอาจได้รับการรบกวนในการสื่อสารได้ในบางครั้งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม และวิธีการใช้งาน จากเหตุผลข้างต้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สนใจปัญหาอันเกิดจาก ช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN ซึ่งเป็นการรบกวนมีอยู่โดยปกติ ซึ่งมีลักษณะกำลังการรบกวนที่แตกต่างกันออกไป ที่มีผลกระทบต่อระบบการสื่อสารในระบบลูทูล และทำการหา รูปแบบวิธีการช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพของการทำงานในระบบต่อไป

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการศึกษางานของระบบลูทูล ที่มีการสื่อสารระหว่างเครื่องแม่ข่าย (Master) กับเครื่องลูกข่าย (Slave) โดยมีเครื่องลูกข่ายสูงสุด 7 เครื่อง ซึ่งจัดเป็นโครงข่ายแบบ Piconet ใช้กำลังงานในการส่งคือ 100 มิลลิวัตต์ จัดอยู่ในระดับ 1 คือมีความสามารถสื่อสารได้รัศมี 10 เมตร ทำการสื่อสารในช่องสัญญาณที่มีการรบกวนแบบ AWGN ตามกรณี คือ ที่ค่า Signal to Noise Ratio เท่ากับ 9dB 10dB และ 11dB ตามลำดับ ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงค่าประสิทธิภาพการทำงานของระบบ จาก ค่าวิสัยสามารถที่เกิดจากข้อมูลที่ทำการส่งได้สำเร็จต่อค่าเวลาการทำงาน ซึ่งค่าความสำเร็จที่สามารถส่งข้อมูลได้สำเร็จมาจากชุดข้อมูลที่ภาครับได้นั้นมีความถูกต้อง หากเกิดการสูญหาย หรือผิดพลาดขึ้น ระบบจะทำการส่งซ้ำและด้วยเหตุนี้ค่าวิสัยสามารถจึงมีค่าลดลง โดยเราทำการศึกษาเพื่อทำการลดการส่งซ้ำอันเกิดมาจากผลของการเกิดการรบกวนในช่องสัญญาณแบบ AWGN ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งขั้นการทดลองออกเป็นสามระดับ คือ ขั้นแรกทำการศึกษาผลกระทบต่อค่าวิสัยสามารถ ของการรับ ส่ง ข้อมูลสรุปได้ว่าเมื่อระบบได้รับความรบกวนในระดับดังกล่าวแล้วนั้น ค่าวิสัยสามารถจะมีค่าลดลงตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 5.9 ขั้นที่สองทำการศึกษา การนำเทคโนโลยีการควบคุมการไหลแบบ TCP โพรโตคอลเข้าร่วมด้วยซึ่งเทคโนโลยี TCP โพรโตคอลมีความสามารถในการควบคุมการไหลของระบบไร้สายได้เป็นอย่างดี และได้มีการทดลองนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบการสื่อสารไร้สายในระบบอื่นๆ ได้ผลการทำงานที่ดีขึ้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ให้ความสนใจในการ

ประยุกต์ใช้การทำงานของ โพรโตคอลดังกล่าวเพื่อช่วยในการควบคุมการไหลของชุดข้อมูลในระบบบอลลูท และได้ผลบ่งชี้ว่าค่าวิสัยสามารถเพิ่มขึ้นในระดับหนึ่งดังสังเกตได้จากรูปที่ 5.11 ในขั้นที่สาม เป็นการศึกษาเพื่อทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้มีค่าที่สูงขึ้น ได้สนใจการใส่รหัสเข้าไปในชุดข้อมูลเพื่อความปลอดภัยป้องกันความผิดพลาดอันเกิดจากการรบกวนในช่องสัญญาณที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น โดยเลือกใช้การเข้ารหัสแบบ ริดโซโลมอน ซึ่งเป็นรหัสที่มีความสามารถในการแก้ไขชุดข้อมูลที่เกิดความผิดพลาดในระดับหนึ่ง อีกทั้งรหัสริดโซโลมอนยังมีขนาดของชุดรหัสที่หลากหลายสามารถเลือกใช้งาน ได้อย่างเหมาะสม ในขั้นที่สามนี้เองเราได้้นำเอาการควบคุมการไหล TCP โพรโตคอล และการเข้ารหัสแบบริดโซโลมอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้มากขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าวิสัยสามารถเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยแปรผันกับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอันได้แก่ กำลังการรบกวนในช่องสัญญาณ ขนาดของรหัสริดโซโลมอน และช่วงเวลาการเข้าของชุดข้อมูล สามารถสรุปลำดับการปรับปรุงระบบบอลลูทได้ว่าการทำงานร่วมกันของการเข้ารหัสและการควบคุมการไหลนั้น สามารถเพิ่มค่าวิสัยสามารถให้สูงขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.18 5.19 และ 5.20 ตามลำดับ ซึ่งแบ่งตามลำดับการศึกษาในสถานการณ์การรบกวน

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นเทคนิคหนึ่งเท่านั้นที่ช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบบอลลูท ยังมีวิธีการปรับปรุงการทำงานที่น่าสนใจอยู่อีกมาก อาทิเช่น การปรับปรุงสายอากาศภาครับ และภาคส่ง อีกทั้งรูปแบบการเข้ารหัสข้อมูลนั้น ได้มีการสร้างรูปแบบการเข้ารหัสมากมาย อีกทั้งสัญญาณรบกวนในระบบการทำงานก็ขึ้นกับสภาพแวดล้อม อาจมีสัญญาณรบกวนอื่นที่มีผลต่อการทำงาน หากเมื่อทำการนำปัจจัยต่างๆ มาศึกษาเพิ่มเติมระบบบอลลูทจะมีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] J. Bray and C.F. Sturman, **Bluetooth Connect Without Cable**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2001.
- [2] J. Misic and V.B. Misic, **Performance Modeling and Analysis of Bluetooth Networks**. New York: Auerbach Publications, 2006.
- [3] J. Geier, **Wireless LANs Implementing Interoperable Networks**. USA: Macmillan Technical Publishing, 1999.
- [4] A. Soltanian and R. E. Van Dyck “Performance of the Bluetooth System in Fading Dispersive Channels and Interference” IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'01), Vol. 6, pp.3499-3503, 2001.
- [5] T. Parker, **Teach Yourself TCP/IP in 14 Days**. SAMS Publishing, 1996
- [6] S. Feit, **TCP/IP Architecture, Protocol and Implementation with Ipv6 and IP Security**. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [7] W. Stallings. **Wireless Communication and Networking**. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002.
- [8] ชาร์ โอ อะกิมารุ, สุวิพล สิทธิชีวภาค, **โครงข่ายสื่อสารระบบและโปรโตคอล**. กรุงเทพมหานคร: บ. โมทิฟ ครีเอท แอนด์ แอดเวอร์ไทซิง จำกัด, 2539
- [9] M. Tanner, **Practical Queuing Analysis**. UK: McGraw-Hill International Ltd. 1995.
- [10] M. Hassan and R. Jain, **High Performance TCP/IP Networking**. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004
- [11] I.A. Glouver, P.M. Grant, **Data Communication**. England, Pearson Education Limited, 2004.
- [12] J.G. Proakis, **Digital Communications**. New York, McGraw-Hill, 1995
- [13] M. Garik and P. Keith, **Coding and Modulation for Digital Television**. USA: Kluwer Academic, 2001
- [14] S.B. Wicker, **Error Control Systems for Digital Communication and Storage**, New Jersey: Prentice Hall International, 1995.
- [15] P. Sweeney, **Error Control Coding From Theory to Practice**. UK: John Wiley & Sons, 2002.
- [16] H.Labioud, “Performance of Reed Solomon Error Correcting Codes on Fading Channels”, IEEE International Conference, pp.259-263. 1999

- [17] F. Gallo and D. Siorpaes, "TCP performance Evaluation during Handover among Bluetooth Network Access Points". 7<sup>th</sup> International Symposium Computers and Communications 2002. Proceedings (ISCC 2002), pp.155–160, 2002.
- [18] J. G. Proakis and M. Salehi, **Contemporary Communication Systems Using Matlab**, Boston: PWS Publishing Company, 1998.
- [19] L. Yin, J.-H. Lu, K.B Letaief and Y.-S Wu, "A fast decoding algorithm for Reed-Solomon codes with enhanced burst correcting capability," IEEE VTS 54<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference, Vol.3, pp. 1447 – 1481, 2001



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. N. Kitikora, S. Sittichivapak and K. Vonglodjanaporn “**PERFORMACE OF BLUETOOTH SYSTEM FOR AWGN CHANNELS WITH REED SOLOMON CODE,**” Proceedings of the 2006 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) International Conference, pp.627-630, Ubon Ratchathani, Thailand, May 10-13, 2006.
2. **ณัฐพนธ์ กิติโกพะ, สุวิพล สิทธิชีวะภาค และ เกรียงไกร วงโรจนภรณ์ “การปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานระบบบลูทูธด้วยการควบคุมการไหล และ เข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 9 – 10 พฤศจิกายน 2549**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Performance of Bluetooth System for AWGN Channels Using Reed Solomon Code

Natapon Kitikora, Suvepon Sittichivapak and Kriengkrai Vonglodjanaporn

Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Bangkok, Thailand 10520 Tel +66-2737-2500 Ext.5028  
Email: natjor2000@yahoo.com, natapon.kitikora@gmail.com

## ABSTRACT

Bluetooth is a standard for low power wireless communications between mobile devices. The Bluetooth systems are degraded by Additive White Gaussian Noise. In this paper, we simulate the system using component-based architecture to model the Physical layer. The system performance can be assessed using throughput. This paper investigates into an approach to use TCP and Reed Solomon code (RS code) for solving packet loss and packet corrupt correction due to AWGN Channels in Bluetooth system. The TCP and RS code provide the high efficiency and have a major role in data transmission for Bluetooth system. Therefore, TCP and RS code are chosen in order to propose the throughput with view towards enhancing the performance of Bluetooth system for AWGN channel in this paper.

**Keywords:** Bluetooth, TCP, Reed Solomon code and AWGN Channels.

## 1. INTRODUCTION

The prosperity of wireless communication technologies has been creating wide communication areas and various mobile services. Tremendous growth in the popularity of wireless mobile devices increasingly requires efficient communications between ubiquitous heterogeneous personal devices (PDA, Notebook, PC, Scanner, Printer etc.). The increasing demands for modality in the modern world have created requirement for a "Bluetooth" radio system to act as replacement and communication mechanism of a Personal Area Network (PAN) Communication is performance via an inexpensive, short range (10-100 m) transceiver that can operate without any license in the frequency band: 2.4-2.484 GHz [1].

The main contribution of this paper is to evaluate the Bluetooth performance in hostile environments. The problems are packet delays, transmission errors and packet loss as shown in Fig. 1. The Causes of problems are Additive White Gaussian Noise (AWGN). The AWGN channels are natural noise in environments. The

problems solved by TCP integration and RS Code in wireless are a challenging problem. Many solutions have been proposed to solve the problems of TCP over wireless: packet delays, transmission errors and packet loss.

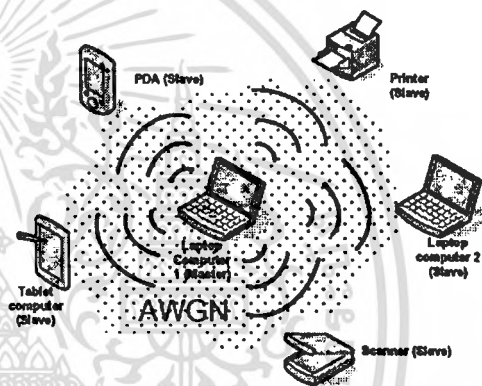


Fig.1: Communication of Bluetooth system in AWGN Channels.

## 2. BLUETOOTH

Bluetooth is a specification for the wireless communication of voice and data using short-range radio. The modulation is Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK). The operating band is divided into 1MHz-speed channels, each signaling data at 1 Mega symbol per second so as to obtain the maximum available channel bandwidth. With the chosen modulation scheme of GFSK, this equates to 1Mb/s. Using GFSK, a binary 1 gives rise to a positive frequency deviation from the nominal carrier frequency, while a binary 0 gives rise to a negative frequency deviation [1]. The Bluetooth communication protocol is a slotted time-division duplex transmission scheme, where each slot is 625  $\mu$ s in length. Two slots from one frame: A request from the "Master" is followed by a response from a "Slave" [2].

## 2.1 THE PROTOCOL STACK

All transmissions are synchronized to this slot grid and are completely controlled by one of the units defined as the piconet master. The master Bluetooth systems are scheduled by the Master-driven time division duplex (TDD) scheme, and their time slots are distributed alternatively between the Master and Slaves. A Master can send 'Poll' packets to a Slave in even-numbered slots, while the Slave can only send packets to the Master in from the Master. Thus the Scheduling in Bluetooth systems is executed on the Master-Slave papers. Since Bluetooth employs a Master-driven TDD based scheduling algorithm, which is basically operated with the by exchanges of round-robin policy, many be wasted by exchanges of POLL or NULL packets even when there no data waiting for transmission in queues. In a piconet, the Master will transmit and receive from each of the Slaves, which are allocated an AM address and are active at that time. If there is nothing to send, the Master may either omit that Slave or transmit a NULL packet.

## 2.2 GFSK

Gaussian Frequency Shift Keying is a form of frequency modulation where the data bits are convolved with a rectangular signal and then with a Gaussian pulse before being used to frequency modulate carrier. This leads to phase continuity at the edges of the symbols and hence containment in frequency. Mathematically can write as

$$s(t, a) = A \cos(2\pi f_c t + \phi(t, a)) \quad (1)$$

Where  $A = \sqrt{\frac{2E_b}{T}}$ ,  $E_b$  is the energy per data bit,  $f_c$  is the carrier frequency, and  $a$  is random input stream, comprised of the data bit  $\alpha_i$ ;  $\phi(t, a)$  is the output phase deviation [3]

$$\phi(t, a) = 2\pi f \sum_{i=n-L+1}^n \alpha_i q(t-iT) + \pi h f \sum_{i=-\infty}^{n-L} \alpha_i \quad (2)$$

The second sum is the accumulate phase of all previous symbol, and it is called the phase stage.

$$q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau \quad (3)$$

## 3. REED SOLOMON CODE

Reed-Solomon codes [4-5] constitute an efficient class of linear codes using multi-bit symbols and having the capability of correcting/detecting symbol error.

Error correcting non-binary Reed-Solomon codes  $RS(n, k, t, d)$  are block codes defined over  $GF(2^m)$  and are characterized by four parameters: ' $n$ ' as the codeword length, ' $k$ ' as the number of information symbols, ' $t$ ' as the error-correcting capability and ' $d$ ' as the minimum Hamming distance. Bits are grouped into ' $m$ ' bit-symbols. This characteristic makes this kind of code particularly powerful to combat transmission burst errors. An  $RS(n, k, t, d)$  code is a non-binary BCH( $n, k, t, d$ ) code built over  $GF(q)$  with [4]:

$$\begin{aligned} \text{Information block size} & n = q-1 \\ \text{Redundancy bits number} & r = n-k \\ \text{Minimum Hamming distance} & d = n-k+1 = 2t+1 \end{aligned}$$

An  $RS(n, k)$  code, when  $n$  is the total length of the codeword and  $K$  is the number of information symbols, and code rate  $k/n$ , respectively can correct up to random symbol  $t = \lfloor (n-k)/2 \rfloor$  errors where  $\lfloor k \rfloor$  represent the largest integer not exceeding  $k$ , or detect up to  $(n-k)$  symbol errors. Moreover, it is capable of correcting  $t$  or less random symbol errors, simultaneously, provided that  $2t \leq (n-k)$ . Typically "Error corrections check" decodes. Hence, it is advantageous to determine the reliability of the received RS-coded symbols.

Following the analysis described, we investigate the performance of an RS error correcting codes operating at approximately half rate but having different block lengths (see Table 1)[6].

Table 1: Reed Solomon Code Table

Code size	Original Code	GF	Min dist.	Code Rate
7	(7,4,1)	GF(8)	4	57%
15	(15,7,4)	GF(16)	9	46%
31	(31,16,7)	GF(32)	16	51%
63	(63,31,16)	GF(64)	33	47%
127	(127,64,31)	GF(128)	64	50%
108	(108,53,27)	GF(256)	59	48%

## 4. SIMULATION

In this paper, we simulate the connecting channel between Master and Slave in Bluetooth over wireless communication system as shown in Fig.2. It consists of 1) Transmitter 2) Noise and 3) Receiver, respectively.

Method of the transmitter is described as follows. The input data are encoded by RS and then modulated using GFSK modulation. Outputs from the transmitter are sent to the receiver. The received signal includes the effect of AWGN channels, with zero mean and 1-sided

power spectral density. In the receiver, the received signals are demodulated and sent to decoding module. This received data stems are compared with the input data stems from the transmitter. The difference from the comparison is used for calculating the Bit Error Rate (BER).

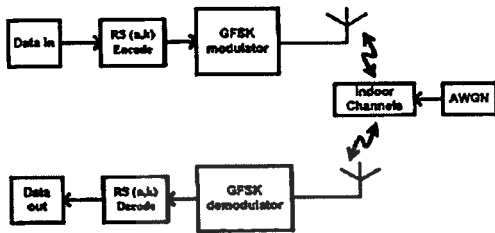


Fig.2: Block diagram of system.

This paper uses TCP for flow control. Packet loss and packet corruption are problems in Bluetooth system. We solve these problems using TCP. An acknowledgment (ACK) is generated only by the receiving TCP and after the data correctly is received by receiver. TCP transmitter is guaranteed that the data have reached the receiver correctly when it receives an ACK. Also, Negative Acknowledgement (NAK) is generated by the packet loss or packet corruption. The transmitter retransmits the loss packet or packet corruption. We consider the packet corrupts correction for decreasing retransmission. The bit error correction is a characteristic of RS code. The packet corruption is corrected by RS code. In the case that the RS code can not correct the packet corrupt, the NAK packet is send out to the transmitter for request retransmission packet. Then, the transmitter retransmits the packet until it corrects.

Fig.3 shows diagram of the simulation which has eight parts. The details of these parts are shown as follows:

- 1) Transaction generation for the Slave.
- 2) Transaction sorting in the Slave from small to large of the birth time.
- 3) The connection check between Master and Slave.
- 4) The channels send the data by using RS encoding and GFSK modulation to broadcast.
- 5) This is the AWGN interference in channels.
- 6) The simulation transfers the data from analog to digital by GFSK demodulation and decode by RS decoding.
- 7) When data successes. That is received complete. If data unsuccessful. The system retransmitted data.
- 8) The system throughput is computed.

Fig. 4 shows RS code that is solved BER of Bluetooth system. The RS(7,4), RS(15,7) and RS(31,6) are code sizes of RS code. BER is decreased by RSn code. Thus, we choose the RS(7,4), RS(15,7) and

RS(31,16) for this paper. In addition, the noise of environment is 9 dB and 11 dB.

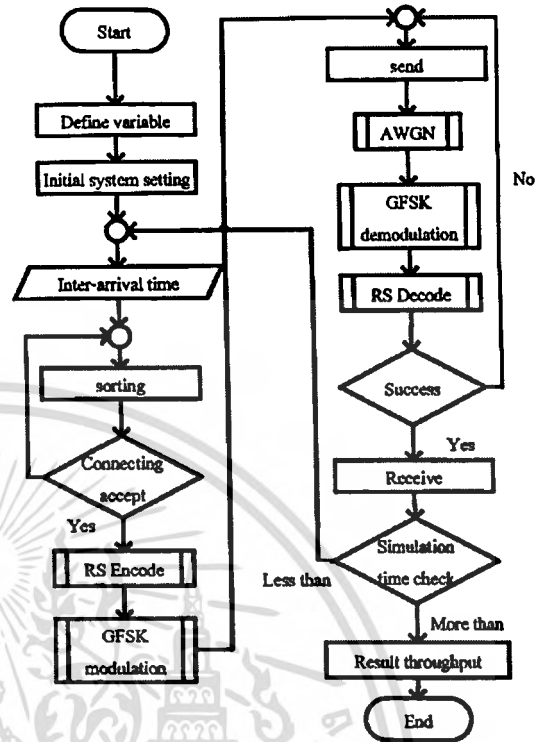


Fig.3: Flow chart of Bluetooth with TCP/IP and Reed Solomon Code for AWGN channels.

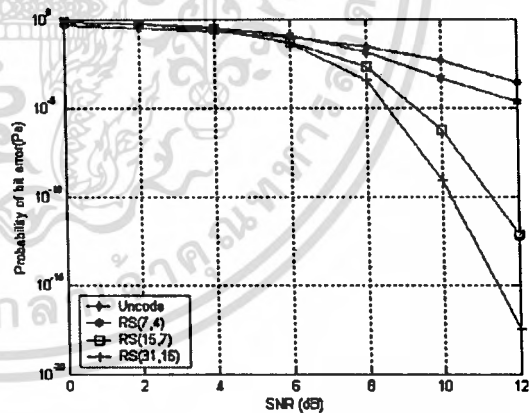


Fig.4: Probability of bit error versus SNR when varying RS code.

### 5. SIMULATION RESULTS

In this section, we present simulation results that show the performance improvement when using TCP and RS code. In simulation results, we propose the throughput of noise effect. For the environment having

AWGN, we propose three levels that are SNR equal to 11 dB and 9 dB.

The Bluetooth performances using TCP and RS code are shown in Fig.5 and Fig.6. The throughput is succeeding packets complete in transmission per simulation time. They illustrate the throughput of AWGN, TCP and RS code in environment that has effect of noise. The x-axis is interarrival time (sec); y-axis is throughput (bit per sec) of system. The curve of AWGN is throughput of system that has effected of AWGN in channels and not be performance. The curve of TCP presents throughput of system that has performed by TCP in flow control. The other curves present system that has performed by TCP and RS codes.

According to Fig.5, AWGN curve presents the low level of throughput that is the cause of low data transmission. When the system is performed by TCP, the throughputs increase more than AWGN curves. Furthermore, when we perform the system by TCP and RS code, throughput is increased more than TCP and AWGN curve. If, RS code size changes from RS(7,4) to RS(15,7) and RS(31,16), the result of simulation increases respectively. However, the performance will be degraded for higher interarrival time. When signal to noise ratio is 9 dB (Fig.6), the all of curves have lower level than Fig.5.

The code size is a parameter of implement in system. The code size include RS(7,4), RS(15,7) and RS(31,16). This paper investigates the performance of the Bluetooth radio by using TCP and RS code. According to the results we conclude that they are high performance in AWGN channels.

## 6. CONCLUSION

In this paper, we present a simulation of procedure to evaluate the throughput of Bluetooth system in corrupted indoor channel. The results show that the throughput decreases as the interarrival time increases. In addition, the results are agreement with TCP and RS code. The results illustrate that the throughput increases when RS code has large size. Finally, TCP and RS code are high performance for Bluetooth in AWGN channels.

## 7. REFERENCES

- [1] J.Bray and C.F. Sturman, *Bluetooth Connect Without Cable*, New Jersey, Prentice Hall, 2001.
- [2] F. Gallo and D. Siorpaes, "TCP performance Evaluation during Handover among Bluetooth Network Access Points". *7<sup>th</sup> International Symposium Computers and Communications 2002. Proceedings (ISCC 2002)*, pp.155–160, 2002.
- [3] A. Soltanian and R. E. Van Dyck "Performance of the Bluetooth System in Fading Dispersive Channels

and Interference" *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'01)*, Vol. 6, pp.3499–3503, 2001.

- [4] M. Nafie, A. Gatherer and A. Dabak "Decision feedback equalization for Bluetooth Systems". *IEEE Proceedings of International Conference Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP '01)*, 2001 on Vol. 2, pp.909 – 912, 2001.
- [5] Liuguo Yin, Jianhua Lu, K.B Letaief and Youshou Wu, "A fast decoding algorithm for Reed-Solomon codes with enhanced burst correcting capability," *IEEE VTS 54<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference*, Vol.3, pp. 1447 – 1481, 2001.
- [6] H.Labiod, "Performance of Reed Solomon Error Correcting Codes on Fading Channels", *IEEE International Conference*, pp.259-263. 1999,

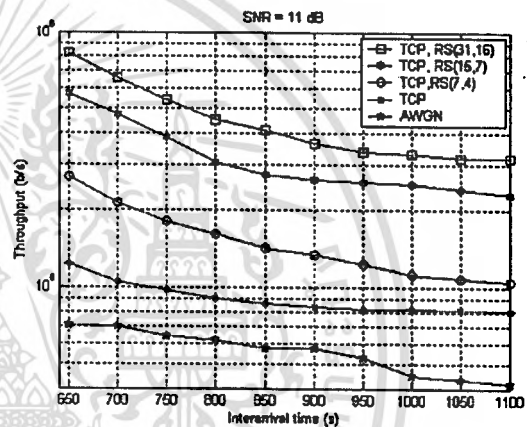


Fig.5: Throughput when varying interarrival time and RS code.

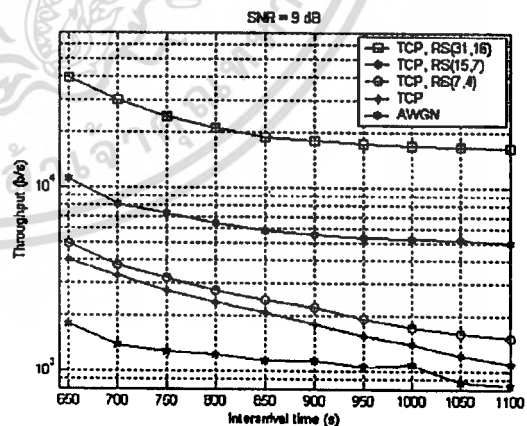


Fig.6: Throughput when varying interarrival time and RS code.

## ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพงษ์ กิติโกพะ เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม จากสำนักวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้