

การประยุกต์รหัสรีด-โซโลมอนแบบปรับอัตราการรหัสสำหรับการรับส่ง
คลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยใช้เครือข่ายร่างกายไร้สาย

AN APPLICATION OF ADAPTIVE RATE REED-SOLOMON CODES
TO THE TRANSMISSION OF ECG SIGNAL VIA
WIRELESS BODY AREA NETWORK



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบและข้อมูล
วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-DS-M-001-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN APPLICATION OF ADAPTIVE RATE REED-SOLOMON CODES
TO THE TRANSMISSION OF ECG SIGNAL VIA
WIRELESS BODY AREA NETWORK



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION AND SYSTEM ENGINEERING
COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2015-DS-M-001-05



COPYRIGHT 2015

COLLEGE OF DATA STORAGE INNOVATION

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์รหัสรีด-โซโลมอนแบบปรับอัตราการหัสสำหรับการ
รับส่งคลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยใช้เครือข่ายร่างกายไร้สาย

Thesis Title

AN APPLICATION OF ADAPTIVE RATE REED-SOLOMON
CODES TO THE TRANSMISSION OF ECG SIGNAL VIA
WIRELESS BODY AREA NETWORK

นักศึกษา

นายวรรณฤทธิ์ ชัดติยะ

รหัสประจำตัว

54690352

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมระบบและข้อมูล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ชุมช่วย

หมายเลขวิทยานิพนธ์

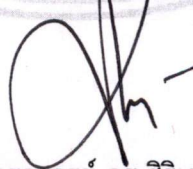
KMITL-2015-DS-M-001-05

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิตี	
รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์	
ดร.เลิศศักดิ์ เลขวัต	
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ วริสาร	
รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ชุมช่วย	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 15 มิถุนายน 2558 เวลา 13.00 - 15.00 น.

สถานที่สอบ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 55 พรรษา สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริเดช บุญแสง)
คณบดี วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล

วันที่ 22 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์รหัสรีด-โซโลมอน แบบปรับอัตรารหัสสำหรับการรับส่งคลื่นไฟฟ้าหัวใจโดยใช้เครือข่ายร่างกายไร้สาย
นักศึกษา	นายวรรณฤทธิ์ ชัตติยะ
รหัสประจำตัว	54690352
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมระบบและข้อมูล
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ชุมช่วย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอรหัสควบคุมความผิดพลาดรีด-โซโลมอนที่มีความสามารถในการปรับอัตรารหัสอัตโนมัติตามระดับความรุนแรงของสัญญาณรบกวนใช้ขนาดกลุ่มข้อมูลของรหัส 255 สัญลักษณ์ในชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อของเครือข่ายร่างกายไร้สาย ด้วยการคำนวณหาอัตราบิดผิดพลาดของการส่งข้อมูล แล้วทำการปรับอัตรารหัสที่เหมาะสม โดยใช้อัตราบิดข้อมูลผิดพลาดที่ยอมรับได้ในทางการแพทย์ที่ 10^{-4} เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาปรับอัตรารหัส เนื่องจากข้อมูลคลื่นไฟฟ้าหัวใจมีความสำคัญกับผู้ป่วย ดังนั้นที่สถานะเริ่มต้นการใช้งานจะใช้อัตรารหัสต่ำสุดก่อน ซึ่งอัตรารหัสเป็นสัดส่วนของความยาวของรหัส (n) ต่อความยาวของข้อมูล (k) อยู่ระหว่าง 0.37 ถึง 0.94 จากนั้น เพื่อปรับอัตรารหัสให้มีความเหมาะสม จะทำการคำนวณหาอัตราบิดผิดพลาดแล้วปรับอัตรารหัสที่ระยะเวลาทุก ๆ 10 วินาที ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณจากลักษณะของร่างกายที่เปลี่ยนไป 3 รูปแบบ คือ การหยุดนิ่ง การเคลื่อนที่ช้า และการเคลื่อนที่เร็ว การทดสอบใช้ชุดข้อมูลของการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจจากฐานข้อมูล MIT-BIH และได้เลือกใช้แบบจำลองช่องสัญญาณโรเซียนและกำหนดค่า k factor มีค่าเท่ากับ 2 เนื่องจากมีความใกล้เคียงกับลักษณะเครือข่ายร่างกายไร้สายมากกว่าแบบจำลองอื่น

ผลของระบบที่ออกแบบทำให้ได้ค่าที่เหมาะสม ระหว่างอัตรารหัสที่ใช้กับอัตราบิดผิดพลาดของระบบ ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระดับ 1 dB ถึง 4 dB ทั้งสองระบบ ให้ค่าอัตราบิดผิดพลาดใกล้เคียงกัน ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระดับ 4 dB ถึง 6 dB ระบบที่ปรับอัตรารหัสได้จะให้อัตราบิดผิดพลาดที่ต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ และจะค่อยลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระดับ 6 dB เป็นต้นไป นอกจากนี้ การวัดประสิทธิภาพการใช้พลังงานพบว่า ระบบที่ปรับอัตรารหัสได้ สามารถลดการใช้พลังงานในการถอดรหัสลง 37.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้อัตรารหัสแบบคงที่

Thesis	An application of adaptive rate reed-solomon codes to the transmission of ecg signal via wireless body area network
Student	Mr.Wannarit Khattiya
Student ID.	54690352
Degree	Master of Engineering
Program	Information and System Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somsak Choomchuay

ABSTRACT

This thesis proposes the application of rate adaptive Reed-Solomon code where the information size can be automatically adjusted according to noise level. With the block size of 255 symbols, the code can utilize MAC layer of Wireless Body Area Networks (WBAN). The code rate will be adjusted by evaluating the Bit Error Rate (BER) at receiver side at 10 seconds cycle. The BER of 10^{-4} is generally an acceptable criterion for medical application. Since Electrocardiography (ECG) is crucial information for all the patients with cardiac disease, the reliability of monitored data is important. Hence data integrity must be ensured. The lowest code rate is preferably set at the initial state. The rate will be adjusted to the appropriateness according to the evaluation of BER. Several MIT-BIH Arrhythmia data sets are used to investigate the performance of the system. The simulation was performed in Rician fading channel with K factor of 2.

Upon the obtained result, the adaptive system works well as BER can be kept in range. At the SNR from 1 dB to 4 dB, both adaptive rate code and fixed rate code deliver similar performance. At the SNR of 4 dB to 6 dB, the adaptive code rate shows better BER performance significantly. At the SNR level of 6 dB and onward, the rate adaptive code still shows good trend with comparable performance when compared to some fixed rate codes. In addition, the rate adaptive system can gain advantage of energy consumption on decoding by 37.5 % reduction, compared with the fixed rate system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ชุมช่วย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะและแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณกรรมการสอบทุกท่านที่ได้ชี้แนะทำให้งานนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณ ดร.อรรถสิทธิ์ อารยางกูร คุณเสกสรรค์ ธิมากุล คุณบัญชา แสนโสภา คุณปรเมตต์ ปราสาร คุณอดิสร ขาวคม คุณวนา พึ่งคำ ห้องวิจัยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องวิจัย วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล อีกทั้งพี่ ๆ น้อง ๆ ที่ไม่ได้เอ่ยชื่อในที่นี้ ที่ช่วยให้คำแนะนำต่าง ๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผ่านลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วรรณฤทธิ์ ชัตติยะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูปภาพ	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	6
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.5 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์	6
บทที่ 2 มาตรฐานเครือข่ายไร้สาย (IEEE 802.15.6)	8
2.1 ชั้นกายภาพ (Physical Layer หรือ PHY).....	8
2.1.1 ชั้นกายภาพแถบความถี่แคบ (Narrowband หรือ NB)	9
2.1.2 ชั้นกายภาพแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra Wideband หรือ UWB)	9
2.1.3 ชั้นกายภาพการสื่อสารผ่านร่างกายมนุษย์ (Human Body Communications หรือ HBC)	10
2.2 ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Media Access Control หรือ MAC).....	11
2.2.1 แบบวิธีในการเข้าถึง.....	12
2.2.1.1 Beacon mode with beacon period	12
2.2.1.2 Non-beacon mode	12
2.2.1.3 Non-beacon mode without super frame.....	13
2.2.2 กรรมวิธีในการเข้าถึง	13
2.2.2.1 Random access	13
2.2.2.2 Improvised access.....	13
2.2.2.3 Scheduled access and scheduled-polling access.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3 ประเภทของเฟรม.....	13
2.2.3.1 เฟรมประเภทจัดการ (Management type frame).....	14
2.2.3.2 เฟรมประเภทควบคุม (Control type frame).....	14
2.2.3.3 เฟรมประเภทข้อมูล (Data type frame).....	14
2.3 การควบคุมและแก้ไขข้อผิดพลาดของมาตรฐาน.....	14
2.3.1 การสื่อสารแถบความถี่แคบ.....	14
2.3.2 การสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่ง.....	16
2.4 การกล้ำสัญญาณ (Modulation).....	18
บทที่ 3 การสื่อสารและรหัสควบคุมความผิดพลาด.....	20
3.1 การสื่อสารและความสำคัญของการเข้ารหัส.....	20
3.1.1 การเข้ารหัสแหล่งกำเนิด (Source Coding).....	20
3.1.2 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Coding).....	21
3.1.2.1 รหัสแก้ไขแบบไปข้างหน้า (Forward Error Correction).....	21
3.1.2.2 รหัสแก้ไขแบบไปข้างหลัง (Backward Error Correction).....	21
3.2 รหัสช่องสัญญาณ.....	22
3.2.1 รหัสบล็อก.....	22
3.2.2 รหัสซีเควนเซียล.....	23
3.2.3 รหัสน้ำพุ.....	24
3.2.4 รหัสบีซีเอส.....	24
3.2.5 การตัดสินใจของการถอดรหัส.....	25
3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณ.....	26
3.3.1 การจางหายและการเดินทางหลายวิถี (Fading and Multipath).....	29
3.3.2 ช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก (AWGN).....	31
3.3.3 ช่องสัญญาณเรย์เลห์ (Rayleigh).....	31
3.3.4 ช่องสัญญาณไรเซียน (Rician).....	32
3.4 รหัสรีต-โซโลมอน.....	34
3.5 รหัสรีต-โซโลมอนอย่างย่อ.....	35
3.6 สนามจำกัดกาลัวร์ (Galois Field).....	35
3.6.1 การบวกและลบ.....	38
3.6.2 การคูณและการหาร.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และทำซ้ำอย่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การเข้ารหัสรีด-โซโลมอน.....	39
3.7.1 การเข้ารหัสเชิงระบบ	40
3.8. การถอดรหัสรีด-โซโลมอน	41
3.8.1 การคำนวณสมการซินโดรม.....	42
3.8.2 การหาพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาดด้วยวิธีเบอร์ลีแคมป์	44
3.8.3 การหารากพหุนามบอกตำแหน่งด้วยวิธีเขียนเซิร์ช	46
3.8.4 การหาขนาดที่ผิดพลาดด้วยวิธีฟอร์เนย์.....	46
3.8.5 การแก้ไขตำแหน่งข้อมูลผิดพลาด	46
3.8.6 พลังงานที่ใช้ในการถอดรหัส	54
3.9 การสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra-Wide Band).....	55
3.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรหัสควบคุมความผิดพลาดและการปรับอัตรารหัส.....	59
3.10.1 “An Overview of Physical Layers on Wireless Body Area Network”	59
3.10.2 “Design of Packet Erasure Mitigation Technique using a Digital Fountain Code for Wearable Wireless Body Area Network”	59
3.10.3 “Highly Reliable Wireless Body Area Network Using Error Correcting Codes.”	60
3.10.4 “Performance Analysis for Hybrid ARQ Error-Controlling Scheme for UWB WBAN.”	61
3.10.5 “Raptor Codes in Wireless Body Area Networks.”	62
3.10.6 “Adaptive Radio Transmit Power in Wireless Body Area Sensor Networks.”	62
3.10.7 “Continuous Health Condition Monitoring by 24x7 Sensing and Transmission of Physiological data over 5-G Cellular Channels.”	62
3.10.8 “Preliminary Evaluation for an ECG Monitoring System.”	63
3.10.9 “Iterative Soft Decoding of Reed-Solomon Codes.”	63

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 รหัสควบคุมความผิดพลาดแบบปรับอัตรารหัสได้.....	66
4.1 การเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจและระยะเวลาที่สำคัญของแต่ละช่วงคลื่น.....	66
4.2 ปัจจัยประกอบการพิจารณาในการปรับอัตรารหัส.....	70
4.3 สมมติฐาน.....	72
4.4 การเลือกใช้อินพุต.....	73
บทที่ 5 การทดลองผลการทดลอง.....	76
5.1 ข้อกำหนดในการทดลอง.....	76
5.2 การทดลอง.....	80
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	89
6.1 การเปรียบเทียบการปรับอัตรารหัส.....	89
6.2 วิจารณ์ผลเทียบกับงานวิจัยอื่น.....	89
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	90
เอกสารอ้างอิง.....	91
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	94
ภาคผนวก ข. ประวัติผู้เขียน.....	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 คุณสมบัติของระบบสื่อสารไร้สายแบบต่าง ๆ.....	4
1.2 คุณสมบัติของเครือข่ายร่างกายไร้สายในการใช้งานต่าง ๆ.....	5
2.1 การกล้าสัญญาณแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในมาตรฐานการสื่อสารร่างกายไร้สาย.....	19
3.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาแบบจำลองช่องสัญญาณ.....	29
3.2 สนามจำกัดกาลัวร์ขนาด 2^4 สมาชิกซึ่งใช้ค่า $p(x) = x^4 + x + 1$	36
3.3 ตัวอย่างของกำลัง α^4 ของ $GF(2^4)$	37
3.4 ตัวอย่างของพหุนามปฐมนิยามใช้กันในอันดับต่าง ๆ.....	37
3.5 คุณสมบัติและการใช้พลังงานของรหัสที่นำมาใช้.....	55
3.6 การเปรียบเทียบรหัสควบคุมความผิดพลาดแบบต่าง ๆ.....	65
4.1 ช่วงเวลาการเกิดรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจในสภาวะปกติ.....	69
4.2 ค่าที่เกี่ยวข้องเมื่อหัวใจเต้นที่ระยะเวลา 10 วินาที.....	72
5.1 ค่ากำหนดเริ่มต้นในการทดสอบระบบ.....	76
5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง.....	78
5.3 ชุดข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลอินพุต.....	81
5.4 พลังงานที่ใช้ในการถอดรหัสดรหัดรารหัสต่าง ๆ.....	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	โครงสร้างประชากรและสัดส่วนผู้สูงอายุของประเทศไทย..... 1
1.2	โครงสร้างของเครือข่ายร่างกายไร้สาย..... 2
1.3	พื้นที่ครอบคลุมการใช้งานของระบบเครือข่ายไร้สายแบบต่าง ๆ 3
2.1	ความสัมพันธ์ของชั้นกายภาพและชั้นควบคุมการเข้าถึงข้อมูล..... 8
2.2	โครงสร้างชั้นกายภาพของแถบความถี่แคบ 9
2.3	โครงสร้างชั้นกายภาพของแถบความถี่กว้างยิ่ง 10
2.4	โครงสร้างชั้นกายภาพการสื่อสารผ่านร่างกายมนุษย์..... 11
2.5	วิธีการจัดสรรการเข้าถึงสื่อข้อมูล 12
2.6	โครงสร้างของเฟรมข้อมูลชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ..... 14
2.7	การสร้าง PLCP ของชั้นกายภาพแถบความถี่แคบ..... 15
2.8	การสร้าง PHR ของชั้นกายภาพแถบความถี่กว้างยิ่ง..... 16
2.9	โครงสร้างของ PSDU ของชั้นกายภาพแถบความถี่กว้างยิ่ง 17
2.10	การสร้าง PSDU จาก MPDU ของชั้นกายภาพแถบความถี่กว้างยิ่ง..... 17
3.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสาร 21
3.2	ประเภทของรหัสควบคุมความผิดพลาดที่เป็นที่นิยม 22
3.3	วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน..... 23
3.4	ภาพจำลองการทำงานของรหัสน้ำพุ..... 24
3.5	ส่วนประกอบหลักของสัญญาณไร้สายที่ได้รับ..... 27
3.6	จุดการวางอุปกรณ์รับส่งสัญญาณของเครือข่ายร่างกายไร้สาย..... 28
3.7	โครงสร้างของรหัสรีด-โซโลมอน..... 34
3.8	ไดอะแกรมการถอดรหัสรีด-โซโลมอน..... 42
3.9	โครงสร้างระบบการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งกับการสื่อสารแถบความถี่แคบ..... 55
3.10	การใช้งานการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งกับการสื่อสารแถบความถี่แคบ 56
3.11	ลักษณะการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งเทียบกับระบบการสื่อสารไร้สายประเภทอื่น..... 57
3.12	ปรากฏการณ์หลายวิถีและผลต่อการสื่อสารแบบความถี่แคบและแบบความถี่กว้าง 58
4.1	องค์ประกอบของหัวใจ 67
4.2	คลื่นไฟฟ้าหัวใจของคนปกติ 68
4.3	การเปรียบเทียบคลื่นไฟฟ้าหัวใจปกติและผิดปกติ 68
4.4	การเต้นของหัวใจระยะเวลา 10 วินาที..... 71
4.5	ตัวอย่างการนำข้อมูลคลื่นไฟฟ้าหัวใจมาใช้เป็นข้อมูลอินพุต 73
4.6	ตัวอย่างไฟล์ส่วนหัวของไฟล์ชื่อ 100m.mat..... 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IX อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ตัวอย่างข้อมูลของชุดข้อมูลหมายเลข 101 จำนวน 10 ค่าแรก	74
4.8 การแปลงข้อมูล MIT จากเลขฐานสิบไปเป็นเลขฐานสองรูปแบบต่าง ๆ	75
5.1 แผนภูมิการทำงานของการทำงานของปรับอัตราหัสอัตโนมัติ	77
5.2 การทดสอบผลการตอบสนองของช่องสัญญาณต่าง ๆ ด้วยข้อมูลแบบสุ่ม	80
5.3 รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูล MIT-BIH ที่นำมาทดสอบ	83
5.4 รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลทดสอบแบบสุ่ม	84
5.5 ผลการตอบสนองต่อการใช้อินพุตแบบสุ่มและ MIT-BIH	84
5.6 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการพิจารณาปรับอัตราหัส	85
5.7 การเปรียบเทียบอัตราบิดผิดพลาดที่ได้ของระบบแบบคงที่กับแบบปรับได้	86
5.8 ระดับพลังงานที่ใช้ในการถอดรหัสของอัตราการเดินหัวใจที่ต่างกัน	87
5.9 การกระจายตัวของอัตราหัสที่ใช้	88



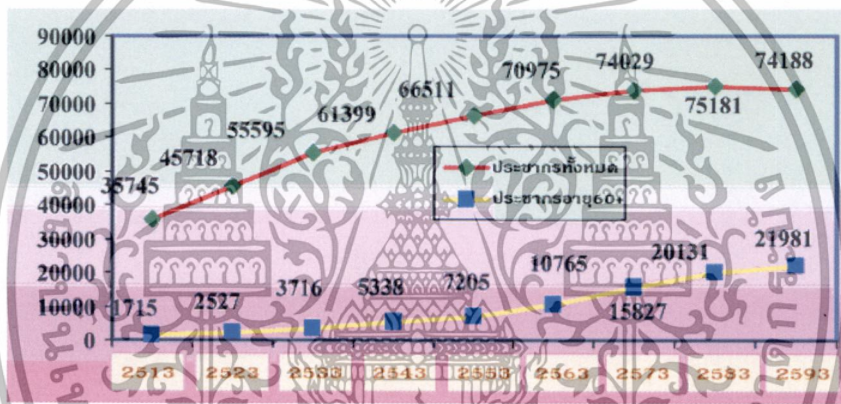
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรสูงอายุทั่วโลกรวมถึงประเทศไทย มีแนวโน้มสูงขึ้นตามฐานข้อมูลประชากร ประเทศไทยก้าวเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุแล้วตั้งแต่ปี พ.ศ.2550 [1] ซึ่งมีสัดส่วนของผู้ที่อายุมากกว่า 60 ปี เป็นจำนวน 10 เปอร์เซ็นต์ของประชากรทั้งหมด และคาดว่าจะกลายเป็นสังคมผู้สูงอายุเต็มตัวคือมีสัดส่วนผู้ที่มีอายุมากกว่า 60 ปี มากกว่า 15 เปอร์เซ็นต์ของประชากรทั้งหมดเมื่อถึงปี พ.ศ.2563 ดังแสดงในรูปที่ 1.1

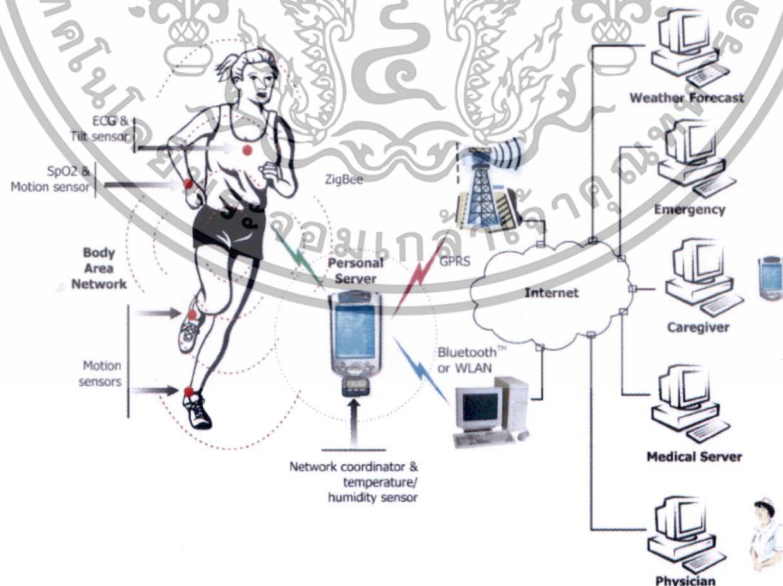


รูปที่ 1.1 โครงสร้างประชากร (1,000) และสัดส่วนผู้สูงอายุของประเทศไทย [1]

โรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจ เป็นสาเหตุหนึ่งของการเสียชีวิตของคนไทยจำนวนมาก และเป็นปัญหาทางสาธารณสุขของประเทศไทยและของโลก รายงานขององค์การอนามัยโลก [2] ระบุว่าปี พ.ศ. 2553 มีผู้เสียชีวิตจากโรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจถึง 7.2 ล้านคน หรือคิดเป็น 12.2 เปอร์เซ็นต์ของสาเหตุการตายทั้งหมด สำหรับประเทศไทย มีผู้เสียชีวิตจากโรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจปีละกว่า 37,000 ราย และในระหว่างปี พ.ศ.2548 ถึง พ.ศ.2552 มีผู้เสียชีวิตจากโรคดังกล่าว ประมาณ 470 รายต่อวัน หรือคิดเป็นเสียชีวิตชั่วโมงละ 2 คน

นอกจากนี้ จำนวนบุคลากรทางการแพทย์ก็มีจำกัด ในขณะที่ค่าใช้จ่ายในการดูแลสุขภาพก็เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย จึงได้มีการพัฒนาระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการเฝ้าระวังและบันทึกผลค่าสุขภาพต่าง ๆ ของร่างกาย เรียกว่าเครือข่ายร่างกายไร้สาย โดยเป็นการพัฒนาเพิ่มเติมจากอุปกรณ์ตรวจวัดปกติ ซึ่งส่วนมากจะประกอบด้วยสายเคเบิลจำนวนหลายชุด รวมทั้งข้อจำกัดเรื่องการเคลื่อนที่ของผู้ป่วยหรือการใช้ชีวิตปกติประจำวัน เครือข่ายดังกล่าวประกอบด้วยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

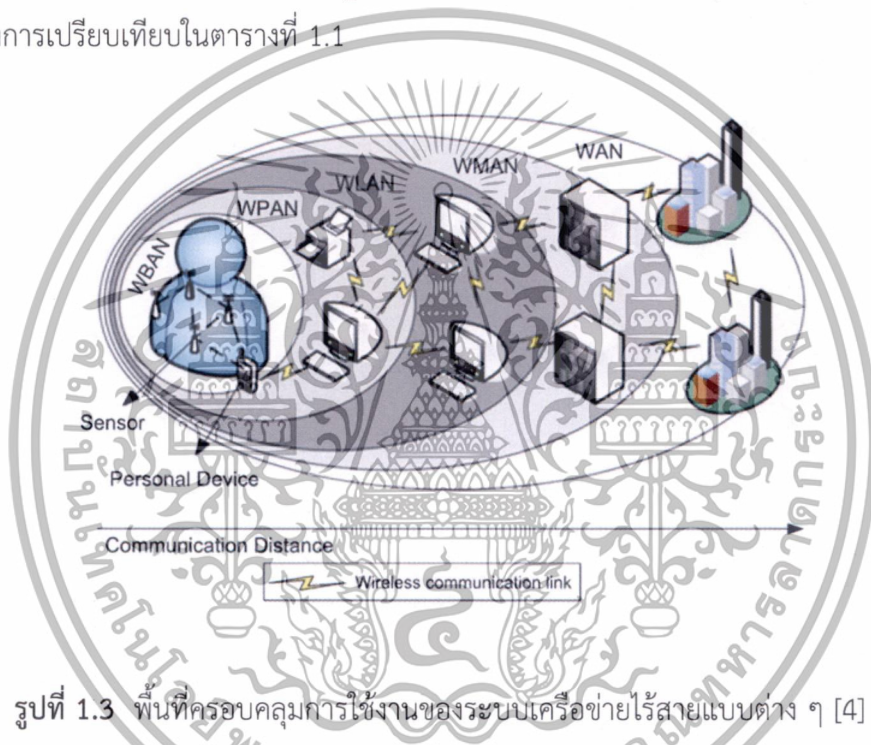
ชุดของอุปกรณ์ที่ประกอบกันขึ้น มีทั้งตัวรับ ตัวส่งสัญญาณ และอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รวมสัญญาณ คุณลักษณะเฉพาะของเครือข่ายจะต้องประหยัดพลังงาน มีความอัจฉริยะพอสมควร ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่มีผลกระทบต่อผิวหนังหรือร่างกายมนุษย์ โดยที่ส่วนประกอบของเครือข่ายอาจจะติดตั้งอยู่ภายในร่างกาย บนร่างกาย หรือรอบ ๆ ตัวของผู้ที่ต้องการเฝ้าระวัง เช่น ผู้ป่วยที่อยู่ในระยะพักฟื้นโดยไม่ต้องอยู่ประจำที่โรงพยาบาล หรือผู้ที่ให้ความสำคัญกับสุขภาพ อุปกรณ์เหล่านี้จะทำการเก็บข้อมูลที่มีความสำคัญต่อผู้ป่วย เช่น การวัดอัตราการเต้นของชีพจร การวัดความดันโลหิต เครื่องช่วยฟัง การวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ การวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง กล้องส่องอวัยวะภายใน นอกจากนี้การมีระบบดังกล่าว ยังช่วยย่นระยะเวลาของการอยู่รักษาตัวในโรงพยาบาลให้สั้นลงได้ เพราะไม่ต้องยึดติดว่าจะต้องวัดค่าต่าง ๆ ที่โรงพยาบาลเท่านั้น ช่วยเพิ่มคุณภาพชีวิตให้ดีขึ้นได้ ลักษณะองค์ประกอบทั่วไปของเครือข่ายแสดงดังรูปที่ 1.2 เนื่องจากคุณลักษณะของเครือข่ายที่ต้องติดอยู่ตามร่างกายของผู้ป่วย ซึ่งอาจจะมีการเคลื่อนที่ไปมาระหว่างการใช้ชีวิตประจำวัน อาจจะทำให้สัญญาณการสื่อสารระหว่างตัวส่งและตัวรับมีความคลาดเคลื่อนหรือผิดพลาด ยิ่งหากช่วงเวลาของการผิดพลาดนั้นตรงกับช่วงการส่งข้อมูลที่มีความสำคัญต่อชีวิตผู้ป่วย ก็อาจจะทำให้การวินิจฉัยโรคผิดเพี้ยนไป การทำให้ระบบมีความน่าเชื่อถือหันต่อสัญญาณรบกวนต่าง ๆ และให้มีความสามารถในการตรวจจับข้อมูลที่ผิดพลาดแล้วทำการแก้ไขได้ด้วย จึงมีความสำคัญต่อระบบเครือข่ายประเภทนี้ นอกจากนี้อัตรารหัสที่ใช้ก็จะมีผลต่อความน่าเชื่อถือของข้อมูล ความเร็วในการส่งข้อมูล และพลังงานที่ใช้ในการส่ง จากลักษณะกายภาพที่เป็นแบบไร้สายซึ่งอุปกรณ์เช่นเซอริจะทำงานโดยอาศัยแบตเตอรี่เป็นหลัก การทำให้ข้อมูลที่ส่งมีความน่าเชื่อถือและใช้พลังงานเท่าที่จำเป็นก็จะเป็นข้อดีของระบบ



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของเครือข่ายร่างกายไร้สาย [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานเครือข่ายร่างกายไร้สาย (IEEE 802.15.6) ได้กำหนดให้มีชั้นการเข้าถึงสื่อหนึ่งชั้น และชั้นกายภาพอีกสามชั้นซึ่งประกอบด้วย การสื่อสารแถบความถี่แคบ (Narrowband) การสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra-Wide Band) และการสื่อสารผ่านร่างกายมนุษย์ (Human Body Communications) การที่จะเลือกใช้ชั้นกายภาพแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของการนำไปใช้งาน เช่น ในสภาพการสื่อสารที่ใช้ในการเฝ้าระวังผู้ป่วยวิกฤติหรือข้อมูลที่ต้องการเวลาจริง การใช้งานในลักษณะนี้จะมีความสำคัญอย่างมากต่อชีวิตผู้ป่วย ซึ่งไม่สามารถยอมรับได้หากมีความผิดพลาดในการสื่อสาร ดังนั้นการสื่อสารแถบกว้างยิ่งจะมีความได้เปรียบชั้นกายภาพอื่นเนื่องจากมีอัตราการสื่อสารข้อมูลที่สูง การประหยัดพลังงานในการรับส่ง อุปกรณ์วงจรและสายอากาศมีขนาดเล็ก ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีไร้สายหลายมาตรฐาน ที่สามารถเทียบเคียงกับการสื่อสารร่างกายไร้สาย ได้ดังแสดงการเปรียบเทียบในตารางที่ 1.1



รูปที่ 1.3 พื้นที่ครอบคลุมการใช้งานของระบบเครือข่ายไร้สายแบบต่าง ๆ [4]

ขอบเขตการสื่อสารและพื้นที่ครอบคลุมของการสื่อสารไร้สายแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 1.3 แม้ว่าเทคโนโลยีไร้สาย (Wifi) หรือ WLAN จะให้แบนด์วิดท์ที่สูงกว่าบลูทูธมากก็ตามแต่ก็ต้องใช้พลังงานมาก ไม่เหมาะกับการใช้งานที่ถูกจำกัดด้วยขนาดและความสามารถของแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตามการสื่อสารร่างกายไร้สายถูกพัฒนาขึ้นอยู่ภายใต้กลุ่มเครือข่ายส่วนบุคคล (IEEE 802.15.x- Personal Network Area) และมีระยะหวังผลการสื่อสารค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับการสื่อสารไร้สายประเภทอื่น ๆ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของระบบสื่อสารไร้สายแบบต่าง ๆ [5]

มาตรฐาน	ZigBee IEEE 802.15.4	Bluetooth IEEE 802.15.1	Wifi IEEE 802.11g	UWB IEEE 802.15.3a	WBAN IEEE 802.15.6
อัตราส่งข้อมูล	250 kbps 40 kbps 20 kbps	1 Mbps	54 Mbps	200 Mbps (4m) 110 Mbps (10m)	0.487-15.6 Mbps (UWB) 57.5-971.4 kbps (NB) 164.1-1312.5 kbps (HBC)
ระยะทาง สูงสุด	30 m	10 m	100 m	10 m	5 m
ความถี่	868 - 868.6 MHz 902 - 928 MHz 2,400 - 2,483.5 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz	3.1 - 10.6 GHz	3,494.4 - 9,984 MHz 402 - 2,483.5 MHz 16 - 27 MHz
แบนด์วิดท์	0.3 MHz 0.6 MHz 2 MHz	1 MHz	25 MHz	500 MHz	499.2 MHz 0.3-1 MHz 4 MHz
จำนวน ช่องสัญญาณ	1 10 16	79	3	1-15	11 230 2
การกล้ำ สัญญาณ	BPSK OQPK	GFSK	OFDM	BPSK QPSK	FSK, PSK PSK FS-Spreader
การส่ง สัญญาณ	DS-SS	DS-FH	OFDM	OFDM	PSK, FSK, OFDM
กำลังส่งสูงสุด	1 W 25 mW 20 mW	1 mW 0.1 mW	1 W 0.1 W	-41.3 dBm/MHz	32 mW

ในการที่จะแก้ไขความผิดพลาดของการสื่อสารนั้นสามารถทำได้ทั้งชั้นกายภาพ และชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อหรือจะทำทั้งสองชั้นเลยก็ได้ โดยที่การแก้ไขข้อผิดพลาดที่ชั้นกายภาพนั้นจะทำให้การเข้ารหัสช่องสัญญาณก่อนทำการกล้ำสัญญาณ ในขณะที่การแก้ไขข้อผิดพลาดของชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ นั้นจะทำให้ระดับเฟรมของข้อมูล

ระบบเครือข่ายร่างกายไร้สายนั้น มีทั้งการใช้งานที่เกี่ยวกับการแพทย์ ระบบช่วยเหลือคนพิการและเพื่อความบันเทิง ในการใช้งานที่แตกต่างกันนั้น คุณลักษณะที่ต้องการก็มีความแตกต่างกัน เช่น อัตราการส่งข้อมูล อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ความปลอดภัยของข้อมูล เป็นต้น [6] ดังแสดงในตารางที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.2 คุณลักษณะของเครือข่ายร่างกายไร้สายในการใช้งานต่าง ๆ [6]

ลักษณะการใช้งาน	ข้อมูลที่วัด	อัตรารับ ส่ง ข้อมูล	การสิ้นเปลือง พลังงาน	ความปลอดภัย ของข้อมูล
ฝังในร่างกาย เกี่ยวกับการแพทย์	วัดปริมาณกลูโคส	ต่ำ kbps	ต่ำมาก	สูง
	ตัวคุมจังหวะหัวใจ	ต่ำ kbps	ต่ำ	สูง
	กล้องชนิดแคปซูล	> 2Mbps	ต่ำ	ปานกลาง
บนร่างกาย เกี่ยวกับการแพทย์	คลื่นไฟฟ้าหัวใจ	3 kbps	ต่ำ	สูง
	ความดันโลหิต	< 10bps	ค่อนข้างสูง	สูง
	ออกซิเจนในโลหิต	32 bps	สูง	สูง
บนร่างกาย เพื่อความบันเทิง	หูฟังสำหรับดนตรี	1.4 Mbps	สูง	ต่ำ
	การเฝ้าระวัง สิ่งของ	256 kbps	ต่ำ	ต่ำ
	เครือข่ายสังคม	< 200 kbps	ต่ำ	สูง

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอวิธีควบคุมความผิดพลาด ที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราหัสข้อมูล โดยใช้รหัสรีด-โซโลมอน เนื่องจากมีขนาดกะทัดรัดทำงานได้เร็วและสามารถตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดได้ดีในสภาพแวดล้อมของสัญญาณรบกวนแบบหลายบิต (burst error) โดยเพิ่มเข้าไปที่ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ สำหรับเครือข่ายร่างกายไร้สายได้ตามแต่ละลักษณะการใช้งาน เพื่อให้ประสิทธิภาพการแก้ไขข้อผิดพลาดและการสิ้นเปลืองพลังงานเป็นไปอย่างเหมาะสม จำลองการทำงานด้วยช่องสัญญาณเรซิน โดยการวัดประสิทธิภาพออกมาในรูปแบบของอัตราบิตผิดพลาด Bit Error Rate (BER) และหน่วยของพลังงานที่ใช้ ทำการทดลองประสิทธิภาพกับแบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายต่าง ๆ โดยใช้ชุดข้อมูลการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจจาก MIT-BIH Arrhythmia จำนวนหลายชุด เป็นข้อมูลอินพุตในการทดสอบ

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษามาตรฐานและการทำงานของระบบเครือข่ายร่างกายไร้สาย
- 2) เพื่อศึกษาการทำงานของรหัสควบคุมความผิดพลาด
- 3) เพื่อศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสาร สำหรับเครือข่ายร่างกายไร้สาย
- 4) นำเสนอและวิจารณ์ผลของรหัสควบคุมความผิดพลาดแบบปรับอัตราหัสได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 แนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาข้อกำหนด ตามมาตรฐานการสื่อสารเครือข่ายร่างกายไร้สายทำให้ทราบว่ามาตรฐานได้กำหนดชั้นกายภาพและชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ ระบบเครือข่ายไร้สายประเภทนี้ถูกนำมาใช้เพื่อทำการเฝ้าระวังและติดตามผู้ป่วย ซึ่งสัญญาณที่สื่อสารนั้นจะผิดพลาดไม่ได้เนื่องจากอาจจะส่งผลกระทบต่อชีวิตของผู้ป่วย และไม่อาจจะขอให้ส่งใหม่หรือส่งซ้ำได้เนื่องจากเวลาได้ผ่านไปแล้ว นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาว่าในระบบการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย สามารถแก้ไขปัญหาการส่งข้อมูลที่ผิดพลาดอาจจะเกิดจากสัญญาณรบกวนระหว่างทางนั้น ด้วยการเพิ่มส่วนตรวจสอบและแก้ไขข้อมูล งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงรหัสควบคุมความผิดพลาดและได้เลือกเอารหัสของรีด-โซโลมอน เนื่องจากมีความกะทัดรัดทำงานได้เร็ว และมีขนาดบล็อกข้อมูลที่ปรับให้ใกล้เคียงกับขนาดข้อมูลที่รับส่งได้ของเครือข่ายร่างกายไร้สาย

1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองและวัดประสิทธิภาพของรหัสควบคุมความผิดพลาด แบบปรับอัตรารหัสได้ โดยสมมติสถานการณ์ของเครือข่ายร่างกายไร้สายที่ใช้ในชีวิตประจำวันประกอบด้วย การเดินปกติ การเดินเร็ว และการพักอยู่กับที่ ใช้ขนาดบล็อกของข้อมูล 255 ไบต์ ด้วยการใช้แบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายไร้เงื่อนไข นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับรอบของการพิจารณาในการปรับเปลี่ยนอัตรารหัส และทำการวิจารณ์ผลที่ได้เพื่อนำไปปรับปรุงการสื่อสารเครือข่ายไร้สายดังกล่าว

1.5 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงจำนวนประชากรและสัดส่วนของผู้สูงอายุ ทั้งทั่วโลกและประเทศไทย ปัญหาสุขภาพและความรุนแรงของโรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจที่ทำให้มีอัตราการตายเป็นอันดับต้น ๆ ของโรคที่ไม่ติดต่อในประเทศไทย การวัดและบันทึกคลื่นไฟฟ้าหัวใจจะช่วยให้บุคลากรทางการแพทย์สามารถวิเคราะห์และช่วยชีวิตผู้ป่วยได้อย่างทันท่วงที ปัจจุบันอุปกรณ์วัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจเป็นเครื่องมือขนาดใหญ่ติดตั้งประจำที่ หากมีอุปกรณ์ที่เป็นลักษณะไร้สายจะช่วยลดข้อจำกัดในการใช้ชีวิตประจำวันของผู้ป่วยลง ทำให้สามารถดูแลสุขภาพได้ดีขึ้น เนื่องจากการใช้เครือข่ายไร้สายมักจะมีอุปสรรคเรื่องสัญญาณรบกวน การปรับปรุงระบบการตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดจะช่วยทำให้การสื่อสารไร้สายมีประสิทธิภาพ และสามารถรับส่งข้อมูลที่สำคัญต่อสุขภาพได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการเพิ่มรหัสควบคุมความผิดพลาดในชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อของเครือข่ายร่างกายไร้สาย เพื่อให้สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดจากการรับส่งข้อมูลแบบไร้สาย โดยได้ศึกษามาตรฐาน IEEE 802.15.6 และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงข้อกำหนดตามมาตรฐานของ IEEE 802.15.6 (Wireless Body Area Networks) ที่ประกอบด้วย ชั้นกายภาพสามรูปแบบคือแบบความถี่แคบ ความถี่กว้างยิ่งและแบบการสื่อสารผ่านร่างกายมนุษย์ และชั้นกายภาพสามรูปแบบดังกล่าวสามารถใช้ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อร่วมกัน และงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงคุณภาพของการแก้ไขข้อผิดพลาดที่ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ

บทที่ 3 กล่าวถึงการสื่อสารและรหัสควบคุมความผิดพลาดที่มีทั้งแบบบล็อก แบบซีเควนเซียล และแบบน้ำพุ ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรหัสควบคุมความผิดพลาดและการปรับอัตรารหัสอัตโนมัติ และนำมาปรับปรุงเป็นงานวิจัยที่นำเสนอ ซึ่งพบว่ารหัสควบคุมความผิดพลาดรีด-โซโลมอนจะมีคุณสมบัติที่ดีโดยใช้ขนาดของสนามกาลัวร์ขนาด 256 ที่ใกล้เคียงขนาดบล็อกข้อมูลของชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อที่มีขนาด 255 ไบต์

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบรหัสควบคุมความผิดพลาดแบบปรับค่าอัตรารหัสได้ โดยใช้รหัสรีด-โซโลมอน พิจารณารอบการปรับอัตรารหัสที่ทุก ๆ 1 10 และ 20 วินาที หากพบว่าอัตราบิตผิดพลาดที่ได้ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ก็จะปรับอัตรารหัสขึ้นครั้งละหนึ่งระดับ และปรับอัตรารหัสลงครั้งละสองระดับ โดยทดสอบระบบด้วยการใช้ข้อมูลอินพุตจากฐานข้อมูล MIT-BIH ร่วมกับช่องสัญญาณไรเซียน วัดประสิทธิภาพของระบบด้วยอัตราบิตผิดพลาดและความสามารถในการประหยัดพลังงาน

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองที่ได้ พบว่าระบบที่นำเสนอสามารถปรับอัตรารหัสให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการใช้งาน และสามารถลดการใช้พลังงานลงถึง 37.5 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับระบบที่อัตรารหัสคงที่

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

มาตรฐานเครือข่ายร่างกายไร้สาย IEEE 802.15.6

มาตรฐานเครือข่ายร่างกายไร้สาย (Body Area Networks – IEEE 802.15.6) ได้ถูกประกาศเป็นมาตรฐานอย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 29 กุมภาพันธ์ 2556 [7] มาตรฐานประกอบไปด้วยข้อกำหนดชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อหนึ่งชั้น และข้อกำหนดการรองรับชั้นกายภาพแบ่งตามย่านความถี่อีกสามรูปแบบคือชั้นแถบความถี่แคบ ชั้นความถี่กว้างยิ่งและชั้นการสื่อสารผ่านร่างกายมนุษย์ ความสัมพันธ์ระหว่างชั้นกายภาพและชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อแสดงได้ดังรูป 2.1

Media Access Control (MAC)		
Narrow Band (NB) PHY	Ultra-wideband (UWB) PHY	Human Body Communications (HBC)PHY

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของชั้นกายภาพและชั้นควบคุมการเข้าถึงข้อมูล

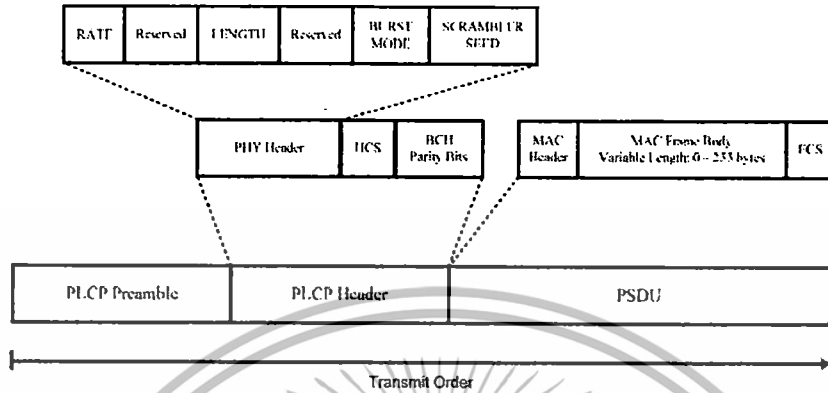
2.1 ชั้นกายภาพ (Physical Layer หรือ PHY)

วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาชั้นกายภาพคือการเชื่อมต่อระหว่างตัวส่งและตัวรับ เพื่อทำการสื่อสารด้วยข้อมูลแบบบิต การกล้ำสัญญาณ การจัดการความถี่ ควบคุมเปิดหรือปิดสัญญาณสื่อสารวิทยุ การจองช่องสัญญาณสื่อสาร การควบคุมการรับส่งข้อมูล ในงานที่เป็นการสื่อสารด้วยวิธีโอความคมชัดสูง เช่นระบบกล้องส่องภายใน ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้ใน WMAN เช่นระบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO) อาจจะไม่เหมาะกับการใช้งานของ WBAN นอกจากนี้การสื่อสารที่ระดับความเร็วมากกว่า 10 Mbps ก็ถือว่าเป็นความท้าทายของ WBAN เนื่องจากถูกจำกัดในเรื่องแบนด์วิดท์ของความถี่ ลักษณะทางกายภาพของการสื่อสารด้วย WBAN เป็นการสื่อสารระยะใกล้ และเป็นการสื่อสารแบบกระจาย (One-hop star) แต่บางครั้งเนื่องจากผลของลักษณะของร่างกายมนุษย์และปรากฏการณ์เงา ซึ่งอาจจะจำเป็นต้องสื่อสารด้วยการสื่อสารผ่านตัวอื่น (Two-hop connection) อุปกรณ์ของชั้นกายภาพ อาจจะสามารถแบ่งออกตามความสามารถได้เป็นสองแบบคือแบบความสามารถเต็ม (Full function device – FFD) และแบบลดความสามารถ (Reduced function device – RFD) อุปกรณ์ที่เป็นแบบ FFD จะสามารถทำหน้าที่ในการควบคุมการสื่อสารได้ด้วย ในขณะที่อุปกรณ์แบบ RFD จะทำหน้าที่เป็นลูกข่ายเท่านั้น ชั้นกายภาพของ WBAN สามารถแบ่งได้ 3 แบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ชั้นกายภาพแบบแถบความถี่แคบ (Narrowband หรือ NB)

การใช้แถบความถี่แคบส่วนใหญ่จะมุ่งไปที่ชุดเซนเซอร์ประเภทสวมใส่ได้ อัตราการสื่อสารข้อมูลอยู่ระหว่าง 75.6 kbps ถึง 971.4 kbps ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการกล้ำสัญญาณ

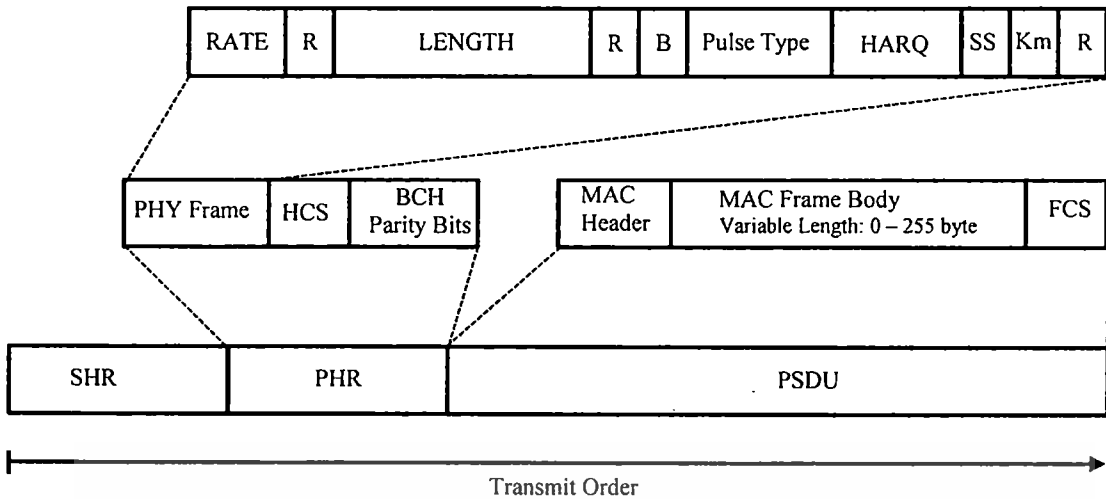


รูปที่ 2.2 โครงสร้างชั้นกายภาพของแถบความถี่แคบ [7]

ชั้นกายภาพนี้รองรับช่องสัญญาณจำนวน 230 ช่อง และทำงานอยู่ 7 ย่านความถี่ชั้นโพรโทคอลกายภาพของแถบความถี่แคบประกอบด้วยสามส่วนหลักคือ ส่วน PSDU Preamble ส่วน PSDU Header และส่วน PSDU โดยที่ส่วนของ Preamble นั้นจะเป็นการเรียงของชุดข้อมูลขนาด 63 บิต และถูกต่อด้วยส่วนขยายอีก 27 บิตด้วยรูปแบบบิต 0101010101101101101101101 รวมเป็น 90 บิต ซึ่งรูปแบบดังกล่าวทำให้ระบบการสื่อสารนี้ สามารถตรวจจับได้ว่าจุดใดเป็นจุดเริ่มต้นของการสื่อสาร

2.1.2 ชั้นกายภาพแบบแถบความถี่กว้างยิ่ง (Ultra-Wideband หรือ UWB)

ชั้นกายภาพนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีความมั่นคง และสามารถรองรับการใช้งานที่หลากหลายมีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่สูง และประหยัดพลังงาน ชั้นนี้ทำงานอยู่สองรูปแบบคือแบบอิมพัลส์ (Impulse Radio-UWB) และแบบกล้ำสัญญาณทางความถี่ (Frequency Modulation -UWB) นอกจากนี้ยังสามารถทำงานได้อีกสองรูปแบบย่อยคือแบบปกติ (Default Mode) และแบบคุณภาพสูง (QoS Mode)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างชั้นกายภาพของแถบความถี่กว้างยิ่ง [7]

หน้าที่หลักของชั้นกายภาพนี้ประกอบด้วย การเปิดปิดช่องสัญญาณ การควบคุมช่องสัญญาณ โครงสร้างของชั้นนี้ประกอบไปด้วย ส่วน Synchronization Header ส่วน Header และชั้นบริการของกายภาพ และที่ชั้นกายภาพนี้เองก็ยังทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณในรูปบิตข้อมูลให้เป็นสัญญาณวิทยุเพื่อทำการสื่อสารออกไปตามอากาศ

ช่วงแรก ๆ การสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งจะรู้จักกันในชื่อวิทยุอิมพัลส์ และกำหนดจากสัดส่วนของสัญญาณที่ขนาดกำลังส่ง 3 dB โดยกำหนดจาก

$$B_{f,3dB} = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (2.1)$$

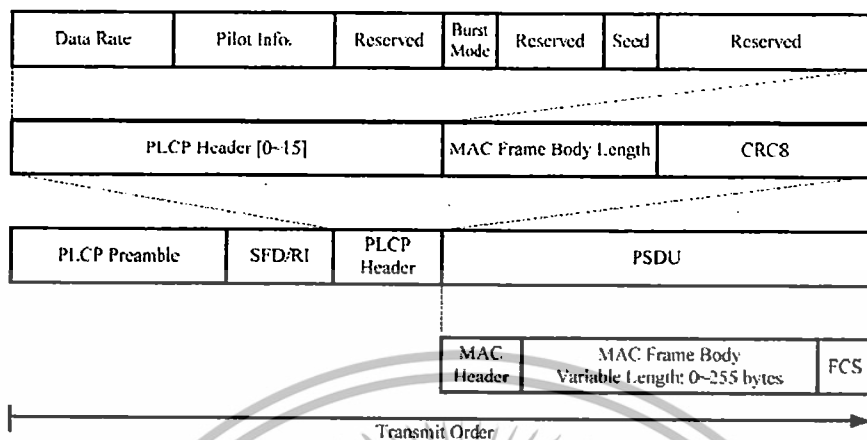
โดยที่ f_H เป็นและ f_L คือความถี่สูงและความถี่ต่ำที่จุด -3 dB ของย่านความถี่ หากสัญญาณของ $B_{f,3dB}$ มากกว่า 25% จะถือว่าเป็นความถี่แถบกว้างยิ่ง และสามารถสื่อสารที่ความเร็ว 0.5 - 10 เมกะบิตต่อวินาที แบ่งตามย่านความถี่ได้สองย่านคือ ย่านต่ำมีย่านความถี่ระหว่าง 3.244 - 4.742 GHz มีจำนวน 3 ช่องสัญญาณ และย่านสูงทำงานอยู่ที่ความถี่ 6.240 - 10.23 GHz มีจำนวน 8 ช่องสัญญาณ รวมทั้งหมด 11 ช่องสัญญาณ

2.1.3 ชั้นกายภาพการสื่อสารผ่านร่างกายมนุษย์ (Human Body Communications หรือ HBC)

ชั้นกายภาพนี้ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยสนามไฟฟ้า (Electric Field Communication) ซึ่งตัวที่ทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณนั้นจะใช้เพียงวงจรรีเลย์ทรอนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น ไม่จำเป็นต้องใช้สายอากาศ ในขณะที่ภาครับก็ไม่ต้องใช้โมดูลวิทยุ ทำให้ประหยัดพลังงาน [7] อัตราการสื่อสารข้อมูลอยู่ระหว่าง 328.1-1,313.5 kbps โครงสร้างของชั้นกายภาพการสื่อสารผ่านร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการแจ้งความผิดกฎหมายหากมีการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มนุษย์ประกอบด้วย ส่วน PLCP Preamble Start Frame Delimiter ส่วน PLCP Header และส่วนที่เป็นข้อมูล

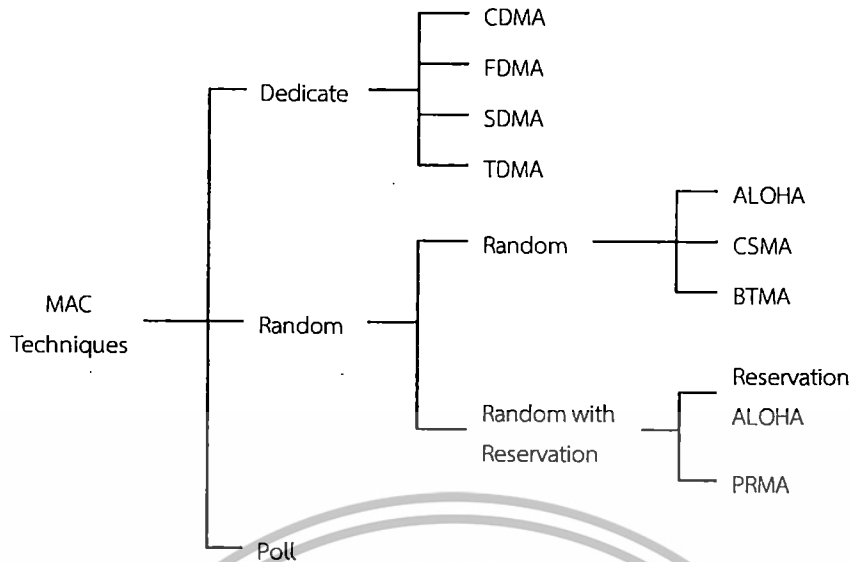


รูปที่ 2.4 โครงสร้างชั้นกายภาพการสื่อสารผ่านร่างกายมนุษย์ [7]

2.2 ชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ (Media Access Control หรือ MAC)

มาตรฐานได้กำหนดชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อประกอบด้วยแบบวิธีในการเข้าถึง กรรมวิธีในการเข้าถึง และประเภทของเฟรมในการควบคุมการเข้าถึงสื่อ โดยชั้นนี้เป็นการควบคุมการเข้าถึงสื่อสำหรับผู้ส่งหลาย ๆ แหล่ง เพื่อให้เข้าใช้สื่อที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสามารถจัดการได้หลายวิธี [8] เช่น การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบแบ่งความถี่ Frequency Division Multiple Access (FDMA) การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา Time Division Multiple Access (TDMA) การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบแบ่งรหัส เป็นต้น นอกจากนี้การจัดสรรการเข้าถึงแบบสุ่มก็เป็นที่ยอมรับซึ่งปกติจะไม่มี การรับประกันคุณภาพ โพรโทคอลแบบสุ่มที่ยอมรับเช่น แบบอะโลฮา (ALOHA) ซึ่งจะส่งข้อมูลออกไปทันทีที่ข้อมูลพร้อมจะส่ง การร่วมใช้ช่องสัญญาณแบบตรวจจับคลื่นพาห์และเสียงการชน Carrier Sense Multiple Access (CSMA) ซึ่งจะบังคับให้ผู้ส่งต้องตรวจสอบว่าสัญญาณพาห์ไม่ได้ถูกใช้งานก่อนการส่งข้อมูล และหากตรวจพบว่าสัญญาณพาห์ถูกใช้งานอยู่จะต้องหยุดรอเป็นระยะเวลาที่เป็นแบบตัวแปรสุ่มก่อนที่จะพยายามส่งอีกครั้ง วิธีการจัดสรรสื่อข้อมูลแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ในการพิจารณาว่าจะใช้เทคนิคการควบคุมเข้าถึงสื่อแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับ ลักษณะงานที่ใช้คุณลักษณะของข้อมูล ความเชื่อถือได้ที่ต้องการ การประหยัดพลังงาน ซึ่งการใช้งานที่เกี่ยวข้องกับทางการแพทย์นั้น จะให้ความสำคัญของความถูกต้องและเชื่อถือได้ของข้อมูลรวมทั้งความล่าช้าของข้อมูล มากกว่าการประหยัดพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วิธีการจัดสรรการเข้าถึงสื่อข้อมูล

2.2.1 แบบวิธีในการเข้าถึง

มาตรฐานได้กำหนดแบบวิธีการเข้าถึงสื่อและสามารถทำงานได้หนึ่งในสามแบบวิธีดังต่อไปนี้

2.2.1.1 Beacon mode with beacon period (Superframe)

ในแบบวิธีนี้ beacon จะถูกส่งจากตัวกลาง (Hub) ออกไปในแต่ละช่วงเวลาของ beacon ยกเว้นในช่วงที่ไม่มีการทำงานหรือถูกสั่งห้ามไว้ และแบ่ง superframe ออกเป็นส่วนย่อย ๆ อย่างเท่า ๆ กัน เพื่อให้ง่ายในการจัดการและเป็นการประหยัดพลังงาน คือ เฟสการเข้าถึงแบบพิเศษ 1 Exclusive Access Phase (EAP1) เฟสการเข้าถึงแบบสุ่ม 1 Random Access Phase (RAP1) เฟสการจัดการ Managed Access Phase (MAP) เฟสการเข้าถึงพิเศษ 2 (EAP2) เฟสการเข้าถึงแบบสุ่ม 2 (RAP2) เฟสช่วงชิงการเข้าถึง Contention Access Phase (CAP) ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณจากด้านส่งมายังตัวกลาง ในช่วงการทำงานตัวกลางจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณ beacon ออกไป และเป็นตัวกลางในการควบคุมการเข้าถึง และเป็นตัวให้จังหวะสัญญาณกับอุปกรณ์รอบข้าง

2.2.1.2 Non-beacon mode

ในสถานการณ์นี้ตัวกลางจะมีเพียงความสามารถในการจัดการเท่านั้น และไม่ได้มีการให้จังหวะด้วยการส่งสัญญาณ Beacon เป็นรูปแบบการสื่อสารที่ไม่มีการรับประกันคุณภาพ มีประโยชน์ในกรณีที่จุดเชื่อมต่อสื่อสารส่วนใหญ่อยู่ในสภาวะหลับและไม่ต้องการรับฟังสัญญาณจากแหล่งอื่น เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน แบบวิธีนี้นิยมใช้งานในกรณีที่มีจำนวนจุดเชื่อมต่อ น้อย ๆ หรืออุปกรณ์ที่ติดตั้งฝังไว้ในร่างกาย หรือเป็นอุปกรณ์ที่ไม่ได้ทำงานต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.3 Non-beacon mode without superframe

ตัวกลางจะทำหน้าที่ให้การสื่อสารสองทาง ซึ่งประกอบด้วยการอนุญาตการเข้าถึง สื่อและหลังจากที่จุดเชื่อมต่อปลายทางจะถูกดูแลช่วงระยะเวลาการเข้าถึงของ EAP1 หรือ RAP1 และจะใช้โปรโทคอล CSMA/CA เพื่อควบคุมการขอใช้สื่อ

2.2.2 กรรมวิธีในการเข้าถึง

ใช้สำหรับควบคุมในแต่ละเฟสการเข้าถึงสื่อของ superframe สามารถแบ่งออกได้เป็น สามรูปแบบดังนี้

2.2.2.1 Random access

ในแบบวิธีที่มีเฟสการเข้าถึงแบบพิเศษ 1 เฟสการเข้าถึงแบบสุ่ม 1 เฟสการเข้าถึงแบบพิเศษ 2 เฟสการเข้าถึงแบบสุ่ม 2 และเฟสช่วงชิงการเข้าถึง วิธีควบคุมการเข้าถึงสื่ออาจจะใช้กรรมวิธีแบบ CSMA/CA หรือ Slotted Aloha โดยที่วิธีแบบ CSMA อาจจะมีปัญหาเรื่องจุดเชื่อมต่อที่ซ่อน (hidden node)

2.2.2.2 Improvised access and unscheduled access

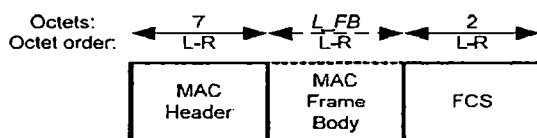
รูปแบบการเข้าถึงแบบนี้อาจจะใช้การควบคุมแบบ best-effort เพื่อส่งการร้องขอในกรณีที่อยู่นอกเหนือจากกำหนดการ หรืออาจจะใช้การควบคุมการเข้าถึงแบบตามเป็นรอบระยะเวลา

2.2.2.3 Improvised access and unscheduled access

รูปแบบนี้อาจจะเลือกใช้กำหนดการเพื่อให้ได้การสื่อสารแบบสองทาง ซึ่งอาจจะใช้ ทุก ๆ ระยะเวลาเฉพาะระหว่าง 1- m ยกเว้นว่าจุดเชื่อมต่อเหล่านั้นจะต้องไม่มีการใช้ทั้ง ระยะเวลา 1 และ m ช่วงเวลา การใช้โพลเป็นการระบุจุดเชื่อมต่อปลายทางที่เจาะจง

2.2.3 ประเภทของเฟรม

เฟรมของชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อจะเป็นตามลำดับเวลา และสื่อสารเพื่อส่งออกไปหรือรับเข้ามาจากชั้นกายภาพ ความยาวของเฟรมมีทั้งส่วนที่ถูกกำหนดความยาวแน่นอนคือส่วนหัว (Header) และส่วนตรวจสอบลำดับเฟรม (Frame Check Sequence) และมีส่วนที่ความยาวเฟรมที่ขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูลที่ส่ง (Frame Body) โครงสร้างเฟรมทั่วไปแสดงดังในรูปที่ 2.6 ประเภทของเฟรมแบ่งออกได้สามประเภทดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเฟรมข้อมูลชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ [7]

2.2.3.1 เฟรมประเภทจัดการ (Management type frame)

ประกอบด้วยเขตข้อมูลที่เป็นทั้งข้อบังคับ และฟิลด์ที่สามารถเลือกว่าจะมีหรือไม่ก็ได้ ประกอบด้วยบิตคอน การเข้าร่วมกับความปลอดภัย การยกเลิกความปลอดภัยรหัสที่ใช้ระหว่างคู่สื่อสาร รหัสที่ใช้สื่อสารระหว่างกลุ่ม การขอเชื่อมต่อ การอนุญาต การยกเลิกการเชื่อมต่อ และเขตข้อมูลคำสั่งอื่น ๆ

2.2.3.2 เฟรมประเภทควบคุม (Control type frame)

ประกอบด้วยส่วนที่เป็นข้อมูลจริงหรือไม่ก็ได้ ส่วนที่เป็นมีข้อมูลจริงจะมีขนาดคงที่หรือเปลี่ยนแปลงก็ได้ เฟรมประเภทนี้สามารถมีเขตข้อมูลดังต่อไปนี้ การตอบรับแบบทันทีทันใด การปฏิเสธการตอบรับ การตอบรับแบบทันทีทันใดรวมกับการใช้โพล การปฏิเสธการตอบรับร่วมกับโพล โพลตามช่วงเวลา และเฟรมแบบ B2

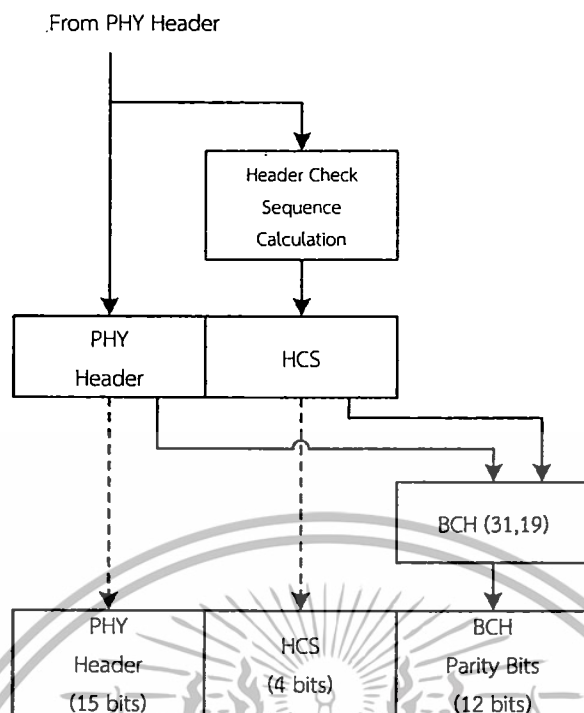
2.2.3.3 เฟรมประเภทข้อมูล (Data type frame)

เฟรมประเภทข้อมูลนี้ประกอบด้วยการส่งแบบเต็มส่วน การแบ่งออกเป็น ส่วนย่อย และแบบไม่มี Media Access Service Unit (MSDU) และถ้ามีการระบุประเภทว่าเป็น ข้อมูลคว่นหรือจัดให้มีความสำคัญในการส่งข้อมูลก็จะถูกระบุสถานะให้รับส่งในทันที

2.3 การควบคุมและแก้ไขข้อผิดพลาดตามมาตรฐาน

2.3.1 การสื่อสารแถบความถี่แคบ จะนำเอารหัสควบคุมความผิดพลาดมาใช้ จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงชั้นกายภาพของความถี่แคบ มีการนำเอารหัส BCH มาใช้สองรูปแบบ คือที่ส่วนของ PLCP Header และ PSDU โดยในส่วนของ PLCP Header นั้นจะมีความยาวขนาด 31 บิตซึ่งประกอบไปด้วย PHY Header HCS และ BCH Parity Bits จะใช้รหัส BCH (31, 19, t = 2) ซึ่งเป็นรหัสอย่างย่อของรหัส BCH (63, 51, t = 2) โดยการเพิ่มบิต 0 จำนวน 32 บิตเข้าไปก่อนทำการเข้ารหัส และจะทำการลบบิตดังกล่าวออกก่อนการส่งข้อมูลไปยังปลายทาง การเข้ารหัสของ PLCP header แสดงดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การสร้าง PLCP ของชั้นกายภาพแถบความถี่แคบ [7]

การเข้ารหัสส่วนของ PSDU มีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณขนาดความยาวบิตทั้งหมดของช่วง

$$N_{PSDU} = (N_{MAC\ header} + N_{MAC\ Frame\ Body} + N_{FCS}) \times 8 \quad (2.2)$$

เมื่อ $N_{MAC\ header}$ คือ ขนาดของส่วนหัว MAC เป็นจำนวนไบต์ และ $N_{MAC\ Frame\ Body}$ คือ ขนาดของส่วน MAC เป็นจำนวนไบต์ และ N_{FCS} เป็นจำนวนของ FCS มีหน่วยเป็นไบต์

2. คำนวณหาจำนวนของคำรหัสของรหัส BCH

$$N_{PSDU} = \left\lceil \frac{N_{PSDU}}{k} \right\rceil \quad (2.3)$$

เมื่อ k คือ จำนวนของบิตข่าวสารของรหัส BCH

3. คำนวณหาบิตที่เหลือสำหรับเติมให้เต็มเพื่อการเข้ารหัส

$$N_{shorten} = N_{CW} \times k - N_{PSDU} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเข้ารหัสที่ส่วนของ PSDU จะใช้รหัส BCH (63, 51, t = 2) โดยใช้พหุนามกำเนิดเป็น

$$g(x) = 1 + x^3 + x^4 + x^5 + x^8 + x^{10} + x^{12} \quad (2.5)$$

และส่วนที่เป็นพาริตีบิต สามารถหาได้จากการคำนวณพหุนามเศษดังนี้

$$r(x) = \sum_{i=0}^{11} r_i x^i = x^{12} m(x) \bmod g(x) \quad (2.6)$$

เมื่อ $m(x)$ คือพหุนามข้อมูล สามารถแสดงได้เป็น

$$m(x) = \sum_{i=0}^{50} m_i x^i \quad (2.7)$$

2.3.2 การสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่ง จากรูปที่ 2.3 ที่แสดงถึงชั้นกายภาพของการสื่อสาร แถบกว้างยิ่ง มีการใช้รหัสควบคุมความผิดพลาดด้วยรหัส BCH สองส่วน คือส่วนของการสร้าง PHR และส่วนของ PSDU โดยในส่วนการสร้าง PHR นั้นจะมีการใช้ก็ต่อเมื่ออยู่ในแบบวิธีของ Hi-QOS ซึ่งจะต้องมีการกำหนดค่าบิตในตำแหน่งของ HARQ มาด้วย ซึ่งขั้นตอนการสร้าง PHR แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การสร้าง PHR ของชั้นกายภาพแถบความถี่กว้างยิ่ง [7]

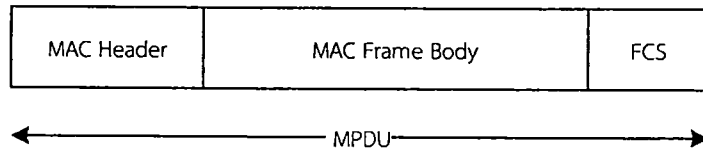
PHR Frame มีขนาด 24 บิต โดยบิตที่ 0 ถึง 3 จะบอกถึงอัตราการส่งข้อมูล บิตที่ 4 ถึงบิตที่ 11 จะบอกความยาวของชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อ บิตที่ 17 และ 18 จะระบุเกี่ยวกับ HARQ บิตที่ 19 และ 20 บอกเกี่ยวกับการกวนสัญญาณ ส่วนบิตที่ 21 ถึงบิตที่ 24 นั้นทำการสำรองไว้ในกรณีอื่น ในส่วนของ HCS จะเป็นการเข้ารหัสตรวจจับข้อผิดพลาดขนาด 4 บิต แบบ ITU CRC-4 โดยการใช้พหุนาม

$$p(x) = 1 + x + x^4 \quad (2.8)$$

สำหรับการเข้ารหัส BCH ที่ PLCP นั้นจะใช้รหัสสองขนาด คือ BCH(63,51) สำหรับแบบวิธีปกติ และใช้ BCH(127,64) สำหรับการสื่อสารในแบบวิธี Hi-QOS

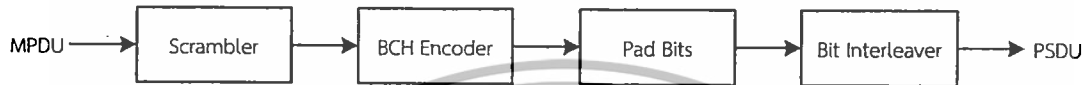
การสร้าง PSDU จะประกอบขึ้นจาก MPDU รวมกับรหัสช่องสัญญาณ BCH ประกอบไปด้วย MAC Header MAC Frame Body และส่วนที่เป็น FCS แสดงดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ PSDU ของชั้นกายภาพแถบความถี่กว้างยิ่ง [7]

ก่อนการส่งจะทำการสร้างเฟรมของ MPDU ให้เป็น PSDU ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสร้าง PSDU จาก MPDU ของชั้นกายภาพแถบความถี่กว้างยิ่ง [7]

การทำงานมีขั้นตอนดังนี้

1. Scrambler จะลดโอกาสของการเกิดบิตที่เป็น 0 หรือเป็น 1 ที่อยู่ติดกันมากเกินไปให้ออกจากกัน ซึ่งการกระจายตัวจะใช้พหุนามกำเนิด และค่าเริ่มต้นจะกำหนดให้ $ss = 0$ จากนั้นจะทำการเพิ่มค่าขึ้นครั้งละหนึ่งในทุก ๆ เฟรม
2. BCH Encoder encoder จะทำการเข้ารหัสของสัญญาณ แบ่งออกเป็นสองขนาดคือ CBH(63,51) จะใช้ในแบบวิธีปกติ และรหัส BCH(126,63) จะใช้ในแบบวิธี H-QOS ซึ่งจำนวนของคำรหัสทำได้ดังนี้

$$N_{CW} = \left\lceil \frac{N'_{PSDU}}{k} \right\rceil \tag{2.9}$$

เมื่อ $N'_{PSDU} = 8(N_{MAC\ header} + N_{MAC\ Frame\ Body} + N_{FCS})$ (2.10)

มีหน่วยเป็นจำนวนบิต $N_{MAC\ header}$ คือ ขนาดของส่วนหัว MAC เป็นจำนวนไบต์ และ $N_{MAC\ Frame\ Body}$ คือขนาดของส่วน MAC เป็นจำนวนไบต์ และ N_{FCS} เป็นจำนวนของ FCS มีหน่วยเป็นไบต์ และถ้าส่วนที่เหลือ $(N'_{PSDU}, k) \neq 0$ คำรหัสสุดท้ายจะต้องมีการเพิ่ม

$$N_{bs} = N_{CW}k - N'_{PSDU} \tag{2.11}$$

ดังนั้นจำนวนบิตทั้งหมดก่อนที่จะทำการเข้ารหัสคือ

$$N_{PSDU} = N'_{PSDU} - N_{bs} \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเข้ารหัส BCH(126,63) จะมีการใช้งานร่วมกับ HARQ ซึ่งใช้พหุนามกำเนิดดังนี้

$$g(x) = 1 + x^2 + x^5 + x^{15} + x^{18} + x^{19} + x^{21} + x^{22} + x^{23} + x^{24} + x^{25} + x^{26} + x^{30} + x^{31} + x^{32} + x^{33} + x^{35} + x^{36} + x^{38} + x^{40} + x^{47} + x^{48} + x^{49} + x^{51} + x^{53} + x^{55} + x^{56} + x^{61} + x^{63} \quad (2.13)$$

3. Pad bits เป็นการเพิ่มบิตเข้าไปในอินพุตเพื่อให้ครบตามจำนวนบิตสำหรับการเข้ารหัส จำนวนบิตที่ต้องใช้ในการเพิ่มเข้าไปสามารถหาได้จาก

$$N_{pad} = \log_2(M) \left\lceil \frac{N_{PSDU} + (n - k)N_{CW}}{\log_2(M)} \right\rceil - [N_{PSDU} + (n - k)N_{CW}] \quad (2.14)$$

เมื่อ M คือ ค่าที่ตัวเลขหลักสำหรับการกล้ำสัญญาณ

4. Bit Interleaving คือการสลับบิตก่อนที่จะมีการกล้ำสัญญาณ เพื่อเป็นการกระจายบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นให้กระจายกันออกไปเพื่อให้มีความทนทานต่อการผิดพลาดแบบต่อเนื่อง สมการสำหรับการสลับบิตแสดงได้ดังนี้

$$\Pi(n) = nb_s \text{ Mod } N_I \quad (2.15)$$

เมื่อ N_I คือ ความยาวของบิตที่ทำการสลับ ปกติกำหนดไว้ที่ 192 และค่า b เป็น 37

2.4 การกล้ำสัญญาณ (Modulation)

การส่งสัญญาณดิจิทัลที่เป็นข้อมูล 0 และ 1 ผ่านไปยังอากาศแบบไร้สาย จะต้องมีการกล้ำสัญญาณดิจิทัลเข้ากับสัญญาณแอนะล็อก เมื่อสัญญาณไปถึงปลายทางก็จะต้องมีการแยกสัญญาณดังกล่าวเพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมือนต้นฉบับกลับมา การเลือกรูปแบบของการกล้ำรหัสมีผลต่อประสิทธิภาพของการสื่อสาร โดยทั่วไปการกล้ำสัญญาณดิจิทัลสามารถแบ่งออกเป็นได้สามแบบ [9] คือการกล้ำสัญญาณแบบเอเอสเค (ASK : amplitude-shift keying) การกล้ำสัญญาณแบบเอฟเอสเค (FSK : frequency-shift keying) และการกล้ำสัญญาณแบบพีเอสเค (PSK : phase-shift keying) การกล้ำสัญญาณแบบเอเอสเคจะมีความซับซ้อนน้อย เพราะใช้หลักการคูณกันของสัญญาณสองสัญญาณ เมื่อมีการกล้ำสัญญาณจะทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณเดิมเปลี่ยนไป แต่มีข้อเสียตรงที่มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนต่ำและถือว่าสมรรถนะด้อยว่าการกล้ำสัญญาณแบบเอฟเอสเคและพีเอสเค การกล้ำสัญญาณเฟสเอสเคจะทำให้ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์เปลี่ยนไป มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าแบบเอเอสเค มีสมรรถนะดีในสภาพแวดล้อมที่มีการจางหายของสัญญาณ แต่ก็ยังมีข้อเสียในเรื่องการใช้แบนด์วิดท์ที่กว้างว่าการกล้ำสัญญาณแบบเอเอสเคเมื่อการใช้งานที่อัตราข้อมูลเท่ากัน การกล้ำสัญญาณแบบพีเอสเคเฟสของสัญญาณจะเปลี่ยนไปหลังจากมีการกล้ำสัญญาณ แบนด์วิดท์ที่ใช้จะน้อยกว่าการกล้ำสัญญาณแบบเฟสเอสเค และนิยมใช้ในการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมัยใหม่ เช่นการสื่อสารดาวเทียม การสื่อสารไมโครเวฟ การสื่อสารแถบความถี่กว้าง มีความสามารถ ในการทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี การกล้าสัญญาณที่มีใช้ในมาตรฐานการสื่อสารร่างกายไร้สาย มีดังแสดงในตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าส่วนใหญ่ใช้การกล้าสัญญาณแบบพีเอสเค ซึ่งมีทั้ง BPSK ที่เป็นไบนารี และ QPSK ที่กล้าสัญญาณด้วยสัญลักษณ์ ยกเว้นในแถบความถี่ 420 – 450 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ใช้การกล้าสัญญาณแบบ (GMSK : gaussian minimum-shift keying) เนื่องจากเป็นการใช้งานใน ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับทางการแพทย์ (MICS : medical implant communications service) และ (WMTS : wireless medical telemetry services) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ฝังเข้าไปใน ร่างกาย เช่นอุปกรณ์ให้จังหวะหัวใจ หรือกล้องส่องอวัยวะภายใน โดยต้องให้มีการแพร่กระจายคลื่น ให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันผลกระทบอื่น ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นกับร่างกาย

ตารางที่ 2.1 การกล้าสัญญาณแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในมาตรฐานการสื่อสารร่างกายไร้สาย [20]

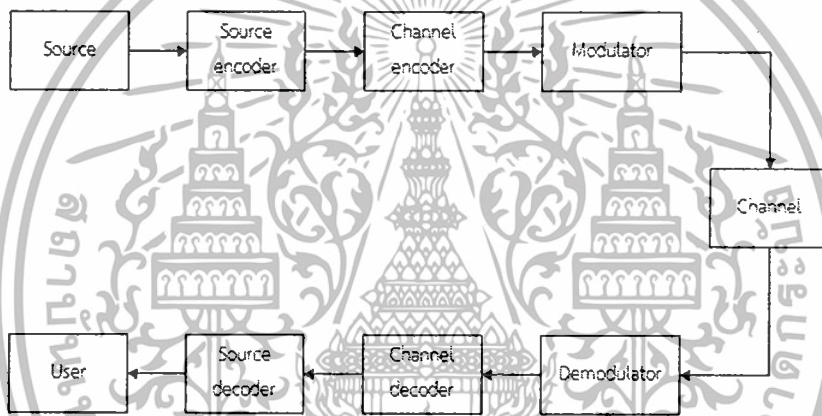
แถบความถี่	ส่วนประกอบ ของข้อมูล	การกล้าสัญญาณ	อัตราสัญลักษณ์ (Kbps)	อัตราข้อมูล (Kbps)
402 – 405 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	187.5	57.5
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	187.5	75.9
	PSDU	$\pi/4$ -DQPSK	187.5	303.6
420 – 450 MHz	PLCP Header	GMSK	187.5	57.5
	PSDU	GMSK	187.5	75.9
	PSDU	GMSK	187.5	151.8
863 – 870 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	250	76.6
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	250	101.2
	PSDU	$\pi/4$ -DQPSK	250	404.8
902 – 928 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	300	91.9
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	300	121.4
	PSDU	$\pi/4$ -DQPSK	300	485.7
950 – 956 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	250	76.6
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	250	101.2
	PSDU	$\pi/4$ -DQPSK	250	404.8
2360 – 2400 MHz 2400 – 2483.6 MHz	PLCP Header	$\pi/2$ -DBPSK	600	91.9
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	600	121.4
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	600	485.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การสื่อสารและรหัสควบคุมความผิดพลาด

ในการสื่อสารผ่านช่องสัญญาณจากด้านส่งไปยังด้านรับนั้น โดยปกติหากไม่มีสัญญาณรบกวนที่ด้านรับก็จะได้รับสัญญาณเหมือนด้านส่งทุกประการ แต่เมื่อมีสัญญาณรบกวนระหว่างทางแล้วสัญญาณที่รับได้นั้น อาจจะเป็นไปหรือไม่สามารถเข้าใจได้ ดังนั้นการออกแบบระบบสื่อสารจึงต้องให้มีอัตราส่วนของกำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนสูง ๆ Signal to noise ratio (SNR) และมีอัตราการผิดพลาดของข้อมูลต่ำ ๆ Bit Error Rate (BER) การปรับปรุงสมรรถนะของระบบการสื่อสารสามารถทำได้หลายวิธี รวมทั้งการเข้ารหัส (Coding) การสื่อสารโดยปกติทั่วไปมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.1 [10]



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบการสื่อสาร

3.1 การสื่อสารและความสำคัญของการเข้ารหัส

การเข้ารหัส มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือในการรับส่งข้อมูลให้มากขึ้น โดยที่รหัสนั้น ๆ ควรจะมีความสามารถในการตรวจสอบข้อมูลที่ได้รับมานั้นว่ามีความผิดพลาดหรือไม่ และอาจหมายถึง ความสามารถในการแก้ไขด้วยการเข้ารหัสแบ่งตามวัตถุประสงค์ได้เป็น 2 ประเภท

3.1.1 การเข้ารหัสแหล่งกำเนิด (Source Coding)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนข้อมูลให้มีรูปแบบที่ไม่ซ้ำกัน หรือการเปลี่ยนลำดับของบิตข้อมูลของต้นทางให้เปลี่ยนเป็นลำดับบิตใหม่ เช่นการเข้ารหัสด้วย MP3 และ MP4 เป็นต้น ซึ่งบางครั้งการเปลี่ยนลำดับบิตอาจจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีขนาดเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Coding)

เป็นกระบวนการป้องกันบิตข้อมูลก่อนส่งผ่านช่องสัญญาณ เพื่อให้มีความทนทานต่อสัญญาณรบกวน การลดทอน การแทรกสอด การจางหาย โดยการแปลงข้อมูลอินพุตให้มีภูมิคุ้มกัน ด้วยการเติมบิตตรวจสอบเข้าไปในข้อมูลเดิม การเข้ารหัสช่องสัญญาณสามารถทำได้สองรูปแบบ

3.1.2.1.1 การแก้ไขความผิดพลาดข้างหน้า Forward Error Correction (FEC) โดยที่ด้านรับนั้นสามารถที่จะตรวจจับและทำการแก้ไขความผิดพลาดได้

3.1.2.1.2 การแก้ไขความผิดพลาดข้างหลัง Backward Error Correction (BEC) หรือบางครั้งเรียกว่าการร้องขอซ้ำอัตโนมัติ Automatic Repeat Request (ARQ) โดยที่ด้านรับนั้น จะทำการตรวจจับความผิดพลาดแต่จะไม่ทำการแก้ไข แต่จะทำการร้องขอกลับไปยังผู้ส่งให้ส่งข้อมูลที่ผิดพลาดนั้นมาใหม่ ทำให้ต้องเสียเวลา ดังนั้น ARQ จึงไม่เหมาะในงานระบบที่ไม่สามารถเสียเวลาของข้อมูลหรือแบบเวลาจริง ARQ แบ่งตามการทำงานได้ดังนี้ แบบ Stop-and-wait เมื่อส่งข้อมูลออกไปแล้ว ผู้ส่งจะรอการตอบกลับจากผู้รับก่อน ถ้าได้รับการตอบกลับจึงจะส่งข้อมูลถัดไป หากไม่ได้รับการยืนยันกลับภายในเวลาที่กำหนดก็จะทำการส่งข้อมูลเดิมที่เก็บไว้ในบัฟเฟอร์ซ้ำออกไป แบบ Go-Back-N ผู้ส่งจะทำการส่งข้อมูลออกไปอย่างต่อเนื่อง แต่หากฝั่งรับตรวจพบข้อผิดพลาด ผู้ส่งจะส่งข้อมูลใหม่โดยย้อนกลับไปตำแหน่ง $N - 1$ ถึงแม้ฝั่งรับจะได้รับข้อมูลบางส่วนไปแล้วก็ตาม แบบ Selective Repeat ผู้ส่งจะส่งเฉพาะเฟรมข้อมูลที่ผิดพลาดเท่านั้น เนื่องจากข้อดีของ ARQ ที่ทำให้การใช้งานช่องสัญญาณมีประสิทธิภาพสูง จึงมีการพัฒนา ARQ ร่วมกับ FEC เรียกว่า Hybrid-ARQ หรือ HARQ ซึ่งการทำงานร่วมกันระหว่างการแก้ไขความผิดพลาดข้างหน้าและการร้องขอซ้ำอัตโนมัติในการทำงานปกติจะส่งเฉพาะส่วนที่เป็นของข้อมูลเท่านั้น ในขณะที่พาริตีบิตจะไม่ถูกส่งออกไปด้วย แต่จะมีการร้องขอให้ส่งเมื่อปลายทางพบว่ามีข้อมูลผิดพลาด HARQ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทดังนี้

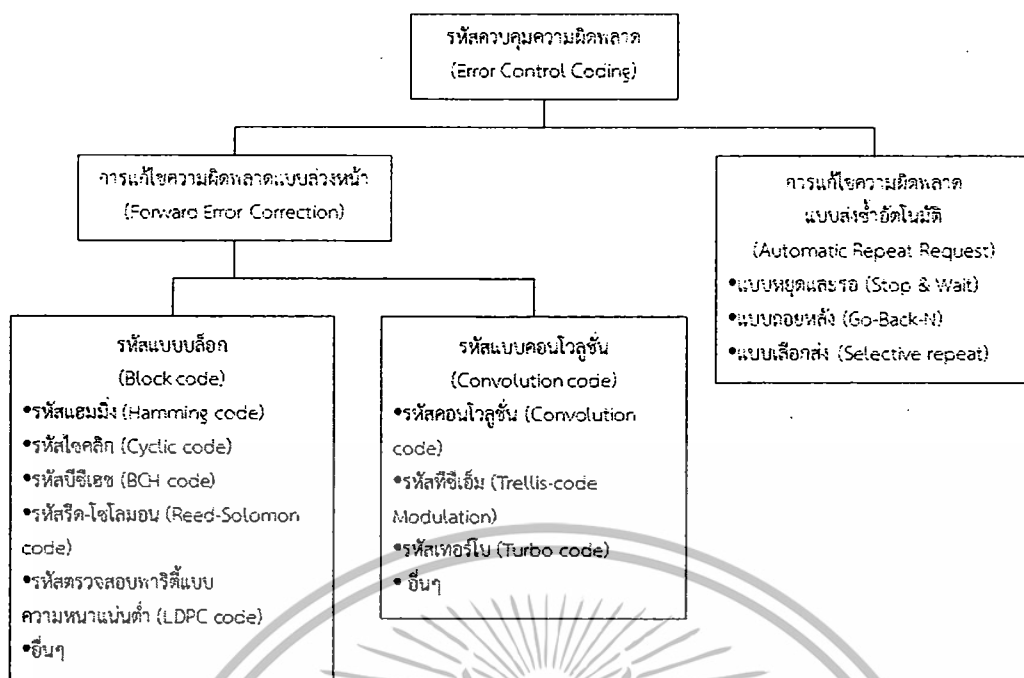
3.1.2.1.2.1 Type-I

เป็นการเพิ่มคุณสมบัติของการตรวจจับข้อผิดพลาดและการแก้ไขข้อผิดพลาดไปพร้อมกันในข้อมูลก่อนการส่ง เมื่อไปถึงปลายทางจะใช้รหัสควบคุมความผิดพลาดก่อนหากพบว่ามีข้อผิดพลาดและข้อผิดพลาดนั้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถแก้ไขได้ก็จะทำการแก้ไข แต่หากว่าปริมาณของข้อมูลในส่วนที่ผิดพลาดมีเกินกว่าความสามารถก็จะใช้รหัสตรวจสอบข้อผิดพลาดแทน และจะทิ้งข้อมูลชุดนั้นแล้วทำการร้องขอให้ส่งใหม่เหมือนกับ ARQ ปกติ

3.1.2.2.2 Type-II

ข้อมูลชุดแรกที่ส่งออกไปจะมีเพียงพาริตีบิตสำหรับตรวจข้อผิดพลาดเท่านั้นที่ส่งรวมไปกับข้อมูล ถ้าข้อมูลที่รับได้ไม่มีข้อผิดพลาดก็จะส่งแบบนี้ไปเรื่อย ๆ แต่หากเมื่อใดก็ตามที่ตรวจพบข้อผิดพลาด แล้วชุดข้อมูลถัดไป จะถูกรวมพาริตีบิตทั้งการตรวจจับและการแก้ไขข้อผิดพลาดไปด้วย หากข้อมูลชุดถัดไปยังมีการตรวจพบข้อผิดพลาดก็จะยังคงส่งพาริตีบิตสำหรับการแก้ไขข้อผิดพลาดไปด้วยอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ประเภทของรหัสควบคุมความผิดพลาดที่เป็นที่นิยม

3.2 รหัสช่องสัญญาณ

3.2.1. รหัสบล็อก (Block Code)

การทำงานจะแบ่งข้อมูลที่ต้องการเข้ารหัสออกเป็นกลุ่ม หรือเรียกว่าบล็อกให้มีขนาดเท่ากับ k จากนั้นข้อมูลแต่ละบล็อกก็จะถูกแปลงให้เป็นคำรหัส (Codeword) ที่มีความยาวเท่ากับ n โดยที่ n จะมีค่ามากกว่า k เสมอ และจะเรียกรหัสแบบนี้ว่าการเข้ารหัส (n, k) โดยปกติแล้วการเข้ารหัสแบบเป็นระบบ (Systematic Encoding) คำรหัสที่ได้นั้นส่วนที่เป็นข้อมูลข่าวสารเดิม k ขนาดจะไม่เปลี่ยนแปลงแต่จะมีส่วนที่เพิ่มเติมเข้าไปด้านท้ายของข้อมูลเรียกว่าพาริตีซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ $n - k$ ที่ด้านรับนั้นมีหน้าที่ในการถอดรหัสออกมาด้วยการคำนวณหาสมการซินโดรมซึ่งหากค่าสมการซินโดรมที่คำนวณได้ไม่เท่ากับศูนย์แสดงว่าคำรหัสที่ได้รับมานั้นจะต้องมีความผิดพลาด ซึ่งจะต้องทำการแก้ไขข้อมูลให้กลับคืนมาด้วยการหาทั้งตำแหน่งที่ผิดพลาดและค่าที่เปลี่ยนไป การเก็บข้อมูลคำรหัสของข้อมูลขนาด k บิต ซึ่งมีรูปแบบที่เป็นไปได้ถึง 2^k รูปแบบจะทำให้ต้องจัดเตรียมหน่วยความจำจำนวนมากและมีความซับซ้อน หากใช้คุณสมบัติเชิงเส้น (linear property) จะทำให้สามารถลดความซับซ้อนของวงจรสร้างรหัสได้มาก

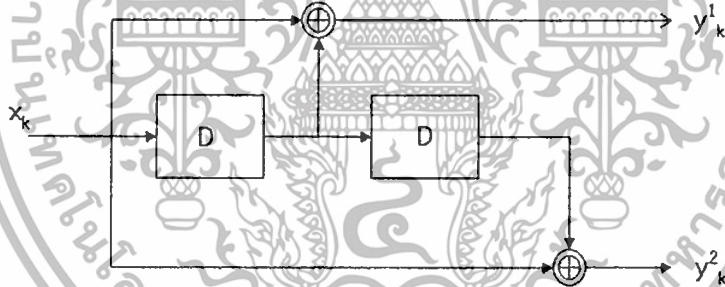
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 รหัสซีเควนเซียล (Sequential Codes) หรือรหัสคอนโวลูชัน (Convolutional Codes)

ข้อมูลที่ต้องการเข้ารหัสจะไม่ถูกแบ่งย่อยออก แต่จะสามารถส่งเข้าวงจรเข้ารหัสได้อย่างต่อเนื่อง การบอกคุณสมบัติของรหัสซีเควนเซียลจะระบุเป็นอัตราส่วนว่าหากป้อนข้อมูลเข้าไปหนึ่งหน่วยจะทำให้คำรหัสที่ได้ยาวขึ้นกลายเป็น n หน่วย เช่น $1/n$ หมายความว่าข้อมูลตั้งต้นหนึ่งหน่วยจะได้คำรหัสหลังจากเข้ารหัสแล้ว n หน่วย หรือ $1/2$ หมายความว่าข้อมูลอินพุตหนึ่งหน่วยจะทำให้ได้คำรหัสขนาดสองหน่วย การเข้ารหัสคอนโวลูชันจะใช้รีจิสเตอร์แบบเลื่อนและวงจรบวกแบบมอดุโล 2 กำหนดให้ D เป็นตัวดำเนินการหน่วงเวลาหนึ่งหน่วย ซึ่งใช้แทนรีจิสเตอร์แบบเลื่อนสามารถเขียนพหุนามกำเนิดของรหัสคอนโวลูชันได้ดังนี้

$$G(D) = \sum_{i=0}^{\mu} g_i D^i \quad (3.1)$$

เมื่อ μ คือ จำนวนหน่วยความจำของวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ซึ่งคือจำนวนของรีจิสเตอร์เลื่อนและ $g_i = 1$ ถ้าบิตของข้อมูลอินพุตถูกหน่วงเวลาไป i หน่วย มีผลต่อการเกิดข้อมูลเอาต์พุต ณ เวลาปัจจุบัน



รูปที่ 3.3 วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน

จากวงจรเข้ารหัสในรูปที่ 3.3 สามารถหาพหุนามกำเนิดได้ดังสมการด้านล่าง

$$G(D) = [G_1(D), G_2(D)] = [1 \oplus D, 1 \oplus D^2] \quad (3.2)$$

เมื่อ \oplus คือ ตัวดำเนินการบวกแบบมอดุโล 2

$G_1(D)$ คือ พหุนามตัวกำเนิดของข้อมูลเอาต์พุต y_k^1

$G_2(D)$ คือ พหุนามตัวกำเนิดของข้อมูลเอาต์พุต y_k^2

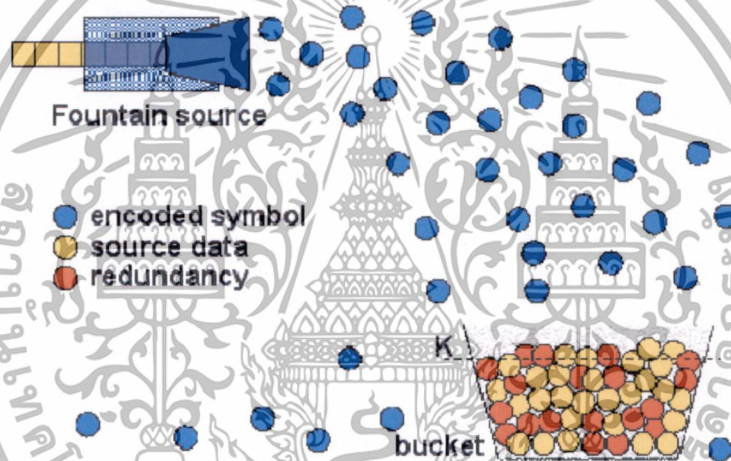
และมีหน่วยความจำ $\mu = 2$ หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์รหัสคอนโวลูชันสามารถใช้เครื่องสถานะจำกัด Finite state machine (FSM) หรือแผนภาพเทรลลิส (trellis diagram) ก็ได้ ซึ่งโดยทั่วไปจะแสดงข้อมูลอินพุต สถานะเริ่มต้น สถานะถัดไป และเอาต์พุตของระบบ

3.2.3 รหัสน้ำพุ (Fountain Codes)

เป็นการเข้ารหัสที่นำข้อมูลที่ต้องการส่ง มาแบ่งขนาดออกเป็นจำนวนขนาดที่ต้องการโดยใช้ฟังก์ชันสุ่ม การส่งข้อมูลจากด้านส่งจะมีลักษณะคล้ายการฉีดสเปรย์ออกไปหรือคล้ายการกระจายตัวออกของน้ำพุ ซึ่งการกระจายออกของน้ำพุนี้จะกระทำอย่างต่อเนื่องไม่มีสิ้นสุด ที่ด้านรับนั้นจะทำการรับให้ได้จำนวนข้อมูลที่มาพอจำนวนหนึ่งคล้าย ๆ กับการนำเอาถังไปรองรับน้ำ โดยที่จำนวนนี้จะมากกว่าจำนวนของข้อมูลที่ถูกแบ่งที่ต้นทาง แล้วทำการแก้ไขข้อมูลกลับจากกลุ่มข้อมูลที่รับได้เหล่านั้น ภาพจำลองหลักการทำงานของรหัสน้ำพุแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ภาพจำลองการทำงานของรหัสน้ำพุ [11]

รหัสน้ำพุจัดเป็นรหัสแบบไม่มีอัตรารหัส เนื่องจากอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ด้านรับจะทำการรับเอาคํารหัสอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะถอดรหัสได้อย่างสมบูรณ์ การเข้ารหัสจะอาศัยหลักการการกระจายของกำลังซึ่งเป็นฟังก์ชันของการกระจายความน่าจะเป็น ว่าแต่ละบิตนั้นมีการเชื่อมโยงกับบิตใดบ้าง แต่ละบิตที่เชื่อมโยงกันนั้นจะถูกทำ X-OR กันก่อน การส่งบิตที่เข้ารหัสแล้วไปยังด้านรับ จะต้องมีข้อมูลที่บ่งบอกได้ว่าบิตดังกล่าวเป็นของข้อมูลชุดใด และข้อมูลของบิตที่เชื่อมโยงกัน

3.2.4 รหัสบีซีเอช (BCH Codes)

รหัสบีซีเอชเป็นรหัสแบบบล็อกประเภทหนึ่ง ซึ่งพัฒนาขึ้นก่อนรหัสรีด-โซโลมอน โดยใช้คณิตศาสตร์สนามจำกัดกาลัวรีในการสร้างคํารหัส คํารหัสที่ถูกสร้างขึ้น $c(x)$ ข้อมูลต้นทาง $m(x)$ และพหุนามกำเนิด $g(x)$ สามารถเขียนเป็นสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c(x) = \sum_{i=0}^{n-1} c_i x^i = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + \dots + c_{n-1} x^{n-1} \quad (3.3)$$

$$m(x) = \sum_{i=0}^{k-1} m_i x^i = m_0 + m_1 x + m_2 x^2 + \dots + m_{k-1} x^{k-1} \quad (3.4)$$

$$g(x) = \sum_{i=0}^{n-k} g_i x^i = 1 + g_1 x + g_2 x^2 + \dots + c_{n-k} x^{n-k} \quad (3.5)$$

ในการเข้ารหัสซีเอสซีที่เป็นระบบ จะทำการเลื่อนข้อมูลที่ต้องการเข้ารหัสไปทางขวามือจำนวน $(n - k)$ ตำแหน่ง ซึ่งคือการทำให้กำลังของข้อมูลเพิ่มไป $(n - k)$ หรืออีกทางหนึ่งก็คือการคูณ $m(x)$ ด้วย x^{n-k} ส่วนด้านหน้าที่ถูกเลื่อนตำแหน่งออกไปแล้วก็นำเอาพหุนามเติมลงไปจะทำให้ได้ค้ำรหัสที่มีพหุนามอยู่ด้านซ้ายมือ โดยส่วนขวามือก็จะเป็นส่วนของข้อมูลตั้งสมการ

$$c(x) = p_0 + p_1 x + p_2 x^2 + \dots + p_{(n-k-1)} x^{(n-k-1)} + m_0 x^{(n-k)} + m_1 x^{(n-k-1)} + \dots + m_{k-1} x^{(n-1)} \quad (3.6)$$

โดยที่การหาพหุนามพหุคูณ $p(x)$ หาได้จากการหาเศษเหลือของการหารพหุนามข้อมูล

$$p(x) = \{x^{(n-k)} m(x)\} \text{mod } g(x) \quad (3.7)$$

โดยที่พหุนามกำเนิด $g(x)$ คือการหา ห.ร.ม. ของพหุนามต่ำสุดที่มีค่าแตกต่างกัน ระหว่าง 1 ถึง $2t$

$$g(x) = \text{LCM}\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_{2t}(x)\} \quad (3.8)$$

ถึงแม้ว่าชื่อของพหุนามกำเนิดจะเรียกเหมือนกันกับการเข้ารหัสรีด-โซโลมอน แต่การหาค่าของพหุนามกำเนิดจะมีวิธีการหาที่ต่างกัน

3.2.5 การตัดสินใจของการถอดรหัส

ที่ด้านรับจะมีกรรมวิธีในการถอดรหัสเพื่อให้สามารถคืนกลับข้อมูลให้มีความใกล้เคียงกับด้านส่งให้มากที่สุด [12] ซึ่งจะเป็นการตัดสินใจประมาณค่าที่รับได้ ว่าข้อมูลที่รับได้นั้นจะออกมาในรูปแบบใด

3.2.5.1 การตัดสินใจแบบหยาบ (Hard Decision) คือการหาค่าประมาณของบิตข้อมูลหรือสัญลักษณ์ ที่ได้จากวงจรการถอดรหัส การตัดสินใจมักจะมีสองระดับ ผลลัพธ์ที่ได้จะเรียกว่า ข่าวสารแบบฮาร์ด เช่นหากสัญญาณที่รับข้อมูลมาพิจารณาแล้วได้ค่าเป็น 0.9 ก็ตัดสินใจว่าบิตข้อมูลที่ถูกส่งออกมามีค่าเป็น 1 ในขณะที่หากสัญญาณที่รับข้อมูลมาพิจารณาแล้วได้ค่าเป็น 0.1 ก็ตัดสินใจว่าบิตข้อมูลที่ถูกส่งออกมามีค่าเป็น 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5.2 การตัดสินใจแบบละเอียด (Soft Decision) เป็นการหาความน่าเชื่อถือของบิตข้อมูลหรือสัญลักษณ์ที่รับได้ หากสัญญาณที่รับได้มีค่าของข่าวสารแบบซอฟต์แวร์มีค่ามาก ก็จะแสดงว่าค่าประมาณของบิตข้อมูลหรือสัญลักษณ์ที่ได้จากวงจรการถอดรหัสมีความน่าเชื่อถือสูง หรือมีความน่าจะเป็นว่าจะถูกต้องสูง โดยปกติแล้วการตัดสินใจแบบละเอียด จะใช้เวลามากกว่าการตัดสินใจแบบหยาบ เนื่องจากจะมีความพยายามพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของข้อมูลหลายครั้ง

3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณ

ในระบบการสื่อสารรวมทั้งระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ช่องสัญญาณมักจะหมายถึงตัวกลางที่สามารถจับต้องได้ เช่น สายเคเบิล สายคู่ตีเกลียว สายเคเบิลใยแก้ว หรือตัวกลางที่เป็นการเชื่อมต่อเสมือน เช่น การส่งผ่านไมโครเวฟ สัญญาณวิทยุ หรืออินฟราเรด โดยทำหน้าที่ในการส่งผ่านข้อมูลที่เป็นสัญญาณ จากผู้ส่งไปยังผู้รับ ซึ่งอาจจะเป็นผู้ส่งเดี่ยวหรือเป็นกลุ่มไปยังผู้รับเดี่ยวหรือหลายผู้รับก็ได้ นอกจากนี้ช่องสัญญาณยังสามารถหมายความได้หลายรูปแบบ เช่น การเชื่อมต่อระหว่างจุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุดของวงจร ทางผ่านของช่องสัญญาณข้อมูลโดยใช้เคเบิลหรือย่านความถี่ พื้นที่ระหว่างร่องหรือย่านของสื่อเก็บข้อมูลที่สามารถอ่านหรือเขียนข้อมูลลงไปได้ ในการสื่อสารไร้สายนั้นเมื่อมีการส่งสัญญาณจากต้นทางไปยังปลายทาง คุณลักษณะของสัญญาณอาจจะเปลี่ยนไปเนื่องจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น ผลของแนวสัญญาณระดับสายตา ผลของการสะท้อนไปมาเนื่องจากมีวัตถุกีดขวางระหว่างทาง การเคลื่อนที่ของคลื่นเนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของด้านส่งและด้านรับ และการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากระยะทางที่ไกลห่างออกไป

แบบจำลองช่องสัญญาณคือการพยายามอธิบายลักษณะของการตอบสนอง เมื่อสัญญาณถูกส่งจากผู้ส่งไปยังผู้รับด้วยสมการทางคณิตศาสตร์หรือฟังก์ชันถ่ายโอน ซึ่งมักจะถูกแสดงด้วยความน่าจะเป็นของเอาต์พุตเมื่อมีการส่งอินพุต สัญญาณที่รับได้สามารถอธิบายจากปรากฏการณ์สองอย่างคือเกิดจากการเปลี่ยนไปของสัญญาณซึ่งเป็นการตอบสนองอิมพัลส์ และเกิดจากการที่มีสัญญาณรบกวนถูกบวกเข้าไป แสดงได้ดังสมการดังนี้

$$y(n) = h(n) * s(n) + w(n) \quad (3.9)$$

เมื่อ $y(n)$ คือ สัญญาณที่รับได้ $h(n)$ เป็นผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณ $s(n)$ เป็นสัญญาณที่ถูกส่งออก และ $w(n)$ เป็นสัญญาณรบกวนที่เป็นบวก

ผลตอบสนองอิมพัลส์ของช่องสัญญาณขึ้นอยู่กับ

1. ความเป็นเชิงเส้น หรือไม่เชิงเส้น
2. สัญญาณขึ้นอยู่กับเวลาหรือไม่

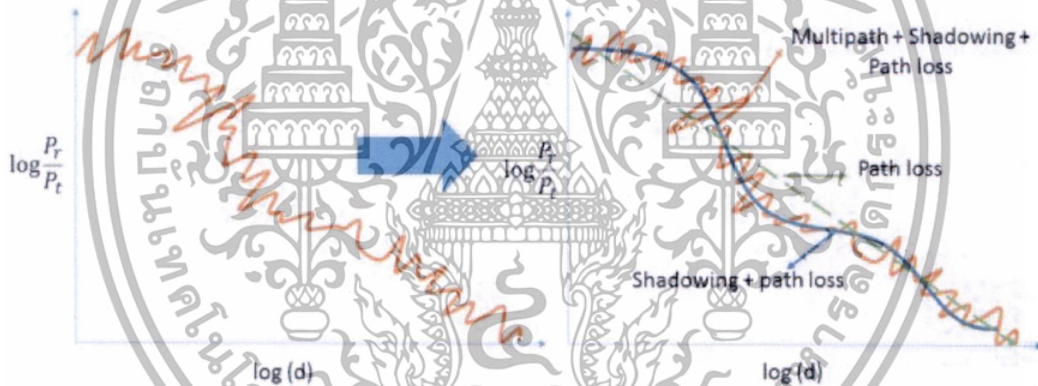
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เป็นสัญญาณที่แอมพลิจูดมีการจางหายเมื่อระยะทางและเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นการจางหายแบบขึ้นอยู่กับความถี่ (selective fading) หรือการจางหายตลอดทุกช่วงคลื่นไม่ขึ้นกับย่านความถี่ (flat fading)

สัญญาณรบกวนที่เป็นบวก สามารถเกิดขึ้นได้จาก

1. เป็นแบบเกาส์หรือไม่
2. สัญญาณรบกวนขึ้นอยู่กับเวลาหรือความถี่หรือไม่
3. สัญญาณเกี่ยวข้องกับมิติอื่นหรือไม่ เช่นระบบสื่อสารแบบหลากหลายสัญญาณส่งและรับ
4. สัญญาณเกี่ยวข้องกับผู้ใช้หลายกลุ่ม

เมื่อสัญญาณเดินทางจากด้านส่งไปยังด้านรับ จะถูกกีดขวางหรือถูกบังโดยวัตถุอื่น บางครั้งกรณีที่ด้านรับมีการเคลื่อนที่ สัญญาณที่ได้ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย สัญญาณที่รับได้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 โดยที่รูปด้านซ้ายจะพบว่าสัญญาณที่ได้จะค่อนข้างเรียงตัวกันแบบสุ่ม เมื่อพิจารณาในรูปคลื่นแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปด้านขวา ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลักสามส่วนดังนี้ [13]



รูปที่ 3.5 ส่วนประกอบหลักของสัญญาณไร้สายที่รับได้ [13]

โดยที่ P_t คือ กำลังงานที่ส่งออก P_r คือ กำลังงานที่รับได้ และ d คือ ระยะทางระหว่างการรับส่ง

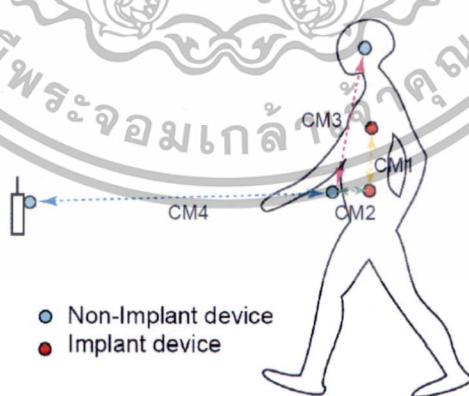
1. การลดทอนสัญญาณตามระยะทาง ซึ่งมักแสดงแทนด้วยลักษณะดังนี้ คือการประมาณการสัญญาณสูญเสียระหว่างด้านส่งกับด้านรับเมื่อไม่มีวัตถุกีดขวางระหว่างทาง ใช้แทนการลดทอนสัญญาณที่ด้านส่งกับด้านรับขึ้นอยู่กับระยะทาง โดยที่แบบจำลองที่มีอ้างถึงคือ แบบจำลองอากาศว่าง Friis แบบจำลองลือกติสแทนท์
2. ผลของปรากฏการณ์เงาหรือ Large scale fading เกิดจากการที่มีวัตถุกีดขวางเช่นต้นไม้ หรือตึก เมื่อคลื่นเดินทางผ่านจะได้รับผลกระทบ ทำให้เกิดการดูดกลืน เลี้ยวเบน และกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ผลของการเคลื่อนที่หลายวิถีหรือ Multi path สัญญาณจากด้านส่งจะเดินทางไปหลายทิศทาง เมื่อเดินทางมาถึงที่ด้านรับจะมีเวลาแตกต่างกัน ทำให้ทั้งเฟสและแอมพลิจูดของแต่ละสัญญาณแตกต่างกันไปด้วย

ช่องสัญญาณจำลองที่นิยมในทางการสื่อสารไร้สาย เช่นแบบจำลองจางหาย (Fading model) โดยที่สัญญาณจะถูกลดทอนลง เนื่องมาจากการส่งสัญญาณจากผู้ส่งไปยังผู้รับจะผ่านหลายเส้นทาง ผลของปรากฏการณ์เงา สัญญาณที่ผ่านสิ่งกีดขวาง การลดทอนสัญญาณ การเลี้ยวเบนของสัญญาณ การเลื่อนความถี่ การกระจัดกระจาย นอกจากนี้แบบจำลองช่องสัญญาณแบบบวกลบก็มักจะถูกอ้างถึงเช่นกันโดยสัญญาณจะถูกลดทอนด้วยสัญญาณรบกวน ที่มีการกระจายแบบเกาส์ ในระบบการสื่อสารไร้สายยังนิยมแบบจำลองของเรย์เลห์ และไรเซียน เช่นเดียวกัน

การสร้างแบบจำลองของช่องสัญญาณ ปกติสามารถสร้างมาจากสมมติฐานสองแบบ คือแบบอาศัยการวัดโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์เวกเตอร์ (Vector Network Analysis) และการสร้างจากสมการทางคณิตศาสตร์ นอกจากนี้การสร้างแบบจำลองยังสามารถแบ่งย่อยออกเป็นสองแบบคือแบบอยู่กับที่ (Static) และแบบเคลื่อนที่ (Dynamic) โดยแบบจำลองการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องกับชีวิตประจำวันมากกว่า ในการสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณของเครือข่ายร่างกายไร้สายนั้นเป็นการวัดลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ส่งออกจากอุปกรณ์ซึ่งมักจะอยู่ใกล้ ๆ หรือฝังอยู่ในร่างกาย เนื่องจากความซับซ้อนของเนื้อเยื่อและโครงสร้างร่างกายมนุษย์ซึ่งส่งผลต่อการเดินทางของคลื่นความถี่วิทยุ ข้อกำหนดในการวางตำแหน่งของอุปกรณ์ แบ่งออกได้เป็นสามลักษณะ ดังนี้ คือฝังในร่างกายอยู่ภายใต้ผิวหนังลงไป อยู่ตามร่างกายซึ่งจะวางอยู่บนผิวหนังหรือห่างไม่เกิน 2 เซนติเมตร และอุปกรณ์ภายนอกซึ่งระยะเกินกว่า 2 เซนติเมตรแต่ไม่เกิน 5 เมตร ตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ของระบบเครือข่ายสามารถแสดงได้อย่างง่ายตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 จุดการวางอุปกรณ์รับส่งสัญญาณของเครือข่ายร่างกายไร้สาย [14]

ช่องสัญญาณที่ใช้ในเครือข่ายร่างกายไร้สายสามารถจำแนกแบบจำลองออกได้เป็น 4

เอกสารฉบับนี้ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ โดยไม่รับผิดชอบต่อเนื้อหาที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ [13] ระเบียบดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองเพื่อหาแบบจำลองช่องสัญญาณ

ลักษณะ	คำอธิบาย	ความถี่ที่ใช้	แบบจำลอง
S1	ระหว่างในร่างกาย กับในร่างกาย	402 – 405 เมกะเฮิร์ตซ์	CM1
S2	ระหว่างในร่างกาย กับบนร่างกาย	402 – 405 เมกะเฮิร์ตซ์	CM2
S3	ระหว่างในร่างกาย กับอุปกรณ์ภายนอก	402 – 405 เมกะเฮิร์ตซ์	CM2
S4	ระหว่างบนร่างกาย กับบนร่างกาย (อยู่ในแนวสายตา)	13.5, 50, 400, 600, 900 เมกะเฮิร์ตซ์ 2.4, 3.1 – 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์	CM3
S5	ระหว่างบนร่างกาย กับบนร่างกาย (ไม่อยู่ในแนวสายตา)	13.5, 50, 400, 600, 900 เมกะเฮิร์ตซ์ 2.4, 3.1 – 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์	CM3
S6	ระหว่างบนร่างกาย กับอุปกรณ์ภายนอก (อยู่ในแนวสายตา)	900 เมกะเฮิร์ตซ์ 2.4, 3.1 – 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์	CM4
S7	ระหว่างบนร่างกาย กับอุปกรณ์ภายนอก (ไม่อยู่ในแนวสายตา)	900 เมกะเฮิร์ตซ์ 2.4, 3.1 – 10.6 กิกะเฮิร์ตซ์	CM4

3.3.1 ช่องสัญญาณจางหาย (Fading Channel)

การจางหาย (Fading) คือการผิดเพี้ยนของสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณการสื่อสาร ซึ่งอาจเกิดจากการที่สัญญาณเผชิญกับปรากฏการณ์ต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในเส้นทางเดินของสัญญาณ ทำให้สัญญาณวิ่งไปหลายวิถี (Multipath) จนกว่าจะไปถึงด้านรับสัญญาณในแต่ละเส้นทางจะเดินทางมาถึงด้านรับไม่พร้อมกัน นอกจากนี้กำลังของสัญญาณก็จะถูกลดทอนลงไม่เท่ากันเนื่องจากความแตกต่างของสภาพแวดล้อมและสิ่งกีดขวางในเส้นทาง สัญญาณที่รับจะเกิดจากการหาผลรวมแบบเวกเตอร์ ซึ่งเป็นไปได้ทั้งการเพิ่มขนาดหากสัญญาณมีการเสริมกันเนื่องจากอยู่ในเฟสเดียวกัน หรือลดขนาดลงหากสัญญาณเกิดการหักล้างกันเองเนื่องจากการกลับเฟสของสัญญาณซึ่งจะเปลี่ยนไปตามเวลา

สาเหตุที่ทำให้เกิดการจางหาย (Fading)

1. ปรากฏการณ์ Doppler shift ซึ่งทำให้เกิดการจางหายอย่างช้า ๆ (slow fading) และการจางหายที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (fast fading)

2. การสะท้อน (Reflection) เกิดขึ้นเมื่อการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบบนวัตถุซึ่งมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวคลื่นของการแพร่กระจายคลื่น เช่น กำแพง ผนัง พื้นอาคาร คลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับ ในขณะที่คลื่นบางส่วนจะเดินทางผ่านวัตถุหากความหนาของวัตถุมีขนาดเท่ากับกับความยาวคลื่น ปริมาณที่สะท้อนกลับจะแปรผกผันกับความยาวคลื่นหรือแปรผันตามความถี่ ดังนั้นเมื่อคลื่นเดินทางผ่านกำแพง คลื่นวิทยุจะถูกลดทอนพลังงานน้อยกว่าคลื่นไมโครเวฟเนื่องจากคลื่นวิทยุมีความยาวคลื่นมากกว่าคลื่นไมโครเวฟมาก ในขณะที่คลื่นที่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นน้อยมาก ๆ เช่นคลื่นย่านอินฟราเรดจะไม่สามารถเดินทางผ่านวัตถุทึบแสง หมอก หรือฝนไปได้

3. การเลี้ยวเบน (Diffraction) เกิดขึ้นเมื่อเส้นทางสัญญาณวิทยุระหว่างภาคส่งและภาครับ ถูกกีดขวางโดยพื้นผิวที่เป็นขอบมุมที่หัก หรือวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมาก ๆ เช่น ภูเขา หรือตึกสูง ผลจากคลื่นอันดับที่สองจากพื้นผิวสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่หลังสิ่งก่อสร้างทำให้เกิดการเลี้ยวของคลื่นรอบสิ่งกีดขวางนั้นโดยเฉพาะบริเวณขอบของวัตถุ ทำให้ไม่มีเส้นทางแนวสายตาระหว่างภาคส่งและภาครับ เสมือนกับว่าคลื่นเดินทางหักเหอ้อมขอบของวัตถุที่กีดขวางได้

4. การกระเจิง (Scattering) เกิดขึ้นเมื่อตัวคลื่นวิ่งผ่านตัวกลางที่เป็นวัตถุที่มีขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น จะส่งผลให้คลื่นเกิดการกระจัดกระจายออกไปหลายทิศทาง ส่งผลให้คลื่นที่เดินทางไปถึงปลายทางจะมีพลังงานลดลงมาก เช่น คลื่นในย่าน 10 - 20 กิกะเฮิรตซ์ที่ใช้ในการสื่อสารดาวเทียมมีความยาวคลื่น ประมาณ 1 - 1.5 เซ็นติเมตร จะเกิดการสูญเสียอย่างมากในสภาพอากาศที่มีฝนตกเนื่องจากขนาดของเม็ดฝนมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่น

ประเภทของการจางหายของสัญญาณ

1. การจางหายแบบมาตราใหญ่ (Large scale fading) คือ การที่ระดับกำลังเฉลี่ยของด้านรับมีการผันผวนอย่างช้า ๆ ในระยะทางสั้น ๆ ประมาณ 5 ถึง 40 เท่าของความยาวคลื่น กำลังเฉลี่ยของสัญญาณด้านรับจะลดลงเมื่อระยะทางระหว่างด้านส่งกับด้านรับเพิ่มขึ้น โดยทั่ว ๆ ไปมักจะแทนด้วยการสื่อสารระดับ macrocell ที่ระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่งห่างกันหลายกิโลเมตร ซึ่งระหว่างเส้นทางการส่งของสัญญาณอาจจะถูกบดบังโดยตึกสูงหรือวัตถุที่มีขนาดใหญ่ ทำให้สัญญาณที่รับได้เกิดจากสัญญาณทางอ้อมเป็นหลัก ปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่าผลกระทบจากการถูกบดบัง (shadow effect) การจางหายมาตราใหญ่สามารถอธิบายได้อีกลักษณะหนึ่งคือ ถ้ากำหนดให้ระยะทางระหว่างด้านส่งกับด้านรับมีระยะคงที่ แต่ทำการเปลี่ยนตำแหน่งของด้านรับไปหลาย ๆ ที่แล้วทำการวัดค่าเฉลี่ยของสัญญาณแต่ละแห่ง จะพบว่ากำลังเฉลี่ยสัญญาณภาครับที่แต่ละจุด จะมีค่าไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าระยะทางระหว่างด้านส่งและด้านรับจะมีค่าเท่ากันก็ตาม เนื่องจากว่ามีสิ่งกีดขวางมาบดบังสัญญาณระหว่างเส้นทางที่แตกต่างกัน

2. การจางหายแบบมาตราเล็ก (Small scale fading) คือ ลักษณะที่กำลังสัญญาณด้านรับมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระยะทางระหว่างด้านส่งกับด้านรับเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในกรณีที่สัญญาณมีการแพร่กระจายแบบหลายเส้นทาง กำลังของสัญญาณด้านรับจะมีความไวสูงต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุรอบ ๆ ด้านรับนั้น การจางหายมาตราเล็กสามารถเกิดขึ้นได้แม้ว่าระยะทางระหว่างด้านส่งและด้านรับไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม เช่นมีการเคลื่อนที่ของวัตถุและสิ่งกีดขวางในเส้นทางเดินของสัญญาณ

นอกจากนี้ สัญญาณที่รับได้ยังมีผลเกี่ยวเนื่องกับการเลือกใช้ประเภทของสายอากาศ ลักษณะของสายอากาศเองก็ยังคงถูกจำกัดด้วยลักษณะการใช้งาน เช่น สายอากาศแบบวงกลมจะถูกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับเครื่องให้จังหวะหัวใจ ลักษณะร่างกายของมนุษย์นั้นไม่เหมาะสมที่จะเป็นตัวกลางในการสื่อสารสัญญาณและมีความแตกต่างกันออกไปในแต่ละบุคคล เช่น ความหนาของร่างกาย คุณสมบัติความเป็นไดอิเล็กทริก และค่าอิมพีแดนซ์ ช่องสัญญาณที่เป็น Small scale fading สามารถแสดงแทนด้วยแบบจำลองเรย์เลห์ หรือ ไรเซียน ขึ้นอยู่กับสัญญาณแฉะระนาบสายตา

3.3.2 ช่องสัญญาณเกาส์เซียนขาวแบบบวก (Additive White Gaussian Noise)

เป็นการจำลองสัญญาณรบกวนพื้นฐานและบวกเข้าไปกับสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณ

$$R(t) = s(t) + n(t) \quad (3.10)$$

โดยที่ $R(t)$ เป็นสัญญาณที่รับได้ $s(t)$ เป็นสัญญาณที่ส่งออก และ $n(t)$ เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ โดยคุณลักษณะสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของตัวแปรสุ่มแบบเกาส์เซียนที่มีการแจกแจงปกติแบบมาตรฐาน คือมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และค่าความแปรปรวนเป็นหนึ่ง สัญญาณรบกวนจะอยู่ในแถบความถี่แสงสีขาวที่ปะปนเข้ากับสัญญาณที่เราต้องการ ในลักษณะการบวกทับเข้าไป ซึ่งปกติช่องสัญญาณนี้จะได้กล่าวถึงการจางหายและการกระจัดกระจายของสัญญาณ ช่องสัญญาณชนิดนี้จะถูกอ้างอิงกับการสื่อสารดาวเทียมและห้วงอวกาศ และอาจจะไม่เหมาะสมในการนำมาอ้างอิง เพื่อแสดงลักษณะการสื่อสารที่มีสภาพที่มีอุปสรรคขัดขวางระหว่างด้านส่งและด้านรับ หรือสภาพแวดล้อมที่มีการสื่อสารแบบหลายเส้นทาง

3.3.3 ช่องสัญญาณเรย์เลห์ (Rayleigh Model)

เป็นแบบจำลองที่ความแรงของสัญญาณจะจางหาย เมื่อสัญญาณมีการเดินทางมากกว่าหนึ่งเส้นทางจากด้านรับและด้านส่งเดียวกัน จะไม่มีสัญญาณแฉะระดับสายตา (LOS) แต่จะได้รับมาจากทิศทางอื่น ๆ แทน อันเนื่องมาจากผลของการสะท้อนกับวัตถุหรือสิ่งกีดขวางอื่นซึ่งคาดการณ์ได้ยากคล้าย ๆ กับการสื่อสารที่ชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียและไอโอโนสเฟีย หรือสถานการณ์ที่มีการสื่อสารในเมืองและเต็มไปด้วยการกีดขวางของตึกสูง สัญญาณที่ส่งออกจะกระจัดกระจาย ถูกลดทอนสะท้อน และสัญญาณที่ด้านรับจะเป็นผลรวมของสัญญาณเดียวกันแต่จะมีความต่างกันเรื่องเฟส และแอมพลิจูด ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของช่องสัญญาณนี้แสดงได้ดังสมการ

$$p(\beta) = \frac{\beta}{\sigma^2} \exp\left[\frac{-\beta^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.11)$$

เมื่อ β เป็นอัตราการลดทอนด้านแอมพลิจูดของสัญญาณ (Amplitude distortion factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 ช่องสัญญาณไรเซียน (Rician Model)

เป็นแบบจำลองช่องสัญญาณแบบหลายทิศทางเหมือนแบบจำลองช่องสัญญาณเรย์เลห์เพียงแต่ต่างกันตรงที่ในแบบจำลองช่องสัญญาณไรเซียนนั้น จะมีสัญญาณแนวเส้นสายตา อย่างน้อยหนึ่งเส้นทาง โดยเส้นทางที่เป็นเส้นทางตรงนั้นเรียกว่า Specular หรือ dominant path และค่าเฉลี่ยของเส้นทางหลักนั้นจะต้องไม่เท่ากับศูนย์ ในขณะที่เส้นทางอื่น ๆ ที่เหลือนั้นเรียกว่า random หรือ scatter ซึ่งค่าเฉลี่ยของเส้นทางอื่นนั้นจะมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ถ้ากำหนดให้ตัวแปรสุ่มเชิงซ้อนจำนวนสองตัวคือ $X \sim N(m_1, \sigma^2)$ และ $Y \sim N(m_2, \sigma^2)$ โดยที่ X แทนที่ด้วยเส้นทางหลักแนวระดับสายตาและมีค่าเฉลี่ยไม่เท่ากับศูนย์ ($m_1 = s$) และ Y แทนด้วยค่าเฉลี่ยที่เท่ากับศูนย์ ($m_2 = 0$) และทั้งสองตัวแปรมีความแปรปรวน σ^2 เท่ากัน กำหนดให้ตัวแปรสุ่มเชิงซ้อน Z คือ

$$Z = X + jY \quad (3.12)$$

และแอมพลิจูดของตัวแปรสุ่มเชิงซ้อน R แสดงได้ดังนี้

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.13)$$

เฟสของสัญญาณหาได้จาก

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right) \quad (3.14)$$

เนื่องจากตัวแปร X และ Y มีค่าเฉลี่ยที่ไม่เท่ากัน จึงกำหนดตัวแปรที่แสดงถึงความไม่เป็นกลาง s ของตัวแปรทั้งสองดังนี้

$$s = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (3.15)$$

อัตราส่วนสัญญาณเส้นทางหลักต่อสัญญาณที่ถูกกลทอนสามารถแสดงแทนด้วยค่า K

$$K = \frac{\text{Power of LOS component}}{\text{Power of NLOS components}} \quad (3.16)$$

หรือสามารถแสดงแทนด้วย

$$K = \frac{\beta^2}{2\sigma^2} \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากผลของค่า K เข้าใกล้ ∞ จะเป็นช่องสัญญาณเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก และหากมีค่าใกล้เคียง 0 จะเป็นช่องสัญญาณเรย์เลห์ [13]

ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นแสดงได้ดังสมการ

$$p(\beta) = \frac{\beta}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{\beta^2 - a^2}{2\sigma^2}\right] I_0\left[\frac{a\beta}{\sigma^2}\right] \quad (3.18)$$

เมื่อ $\beta \geq 0$

เมื่อ $I_0(x)$ คือ ฟังก์ชันเบสเซล (Bessel Function) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการหาคำตอบของสมการอนุพันธ์ที่เป็นคำตอบในรูปอนุกรมหลายพจน์ เพื่อหาค่าที่มีการลู่อู่เข้า

แบบจำลองช่องสัญญาณของการสื่อสารแถบกว้างยังสามารถเขียนแทนด้วยสมการการสูญเสียตามเส้นทาง (path loss) ร่วมกับสมการความล่าช้าของพลังงาน (power delay profile) ดังนี้

สมการสูญเสียตามเส้นทางหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

$$PL(d)[dB] = a \cdot \log_{10}(d) + b + N \quad (3.19)$$

โดยที่ a และ b เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการเทียบเคียงกราฟเชิงเส้น d เป็นระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่ง N เป็นค่าการกระจายตัวแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นศูนย์ สมการความล่าช้าของพลังงานแสดงได้ดังนี้

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \exp(j\phi_l) \delta(t - t_l) \quad (3.20)$$

โดยที่ a_l เป็นค่าแอมพลิจูดของเส้นทาง t_l เป็นเวลาที่สัญญาณมาถึง ϕ_l เป็นเฟสของเส้นลำดับที่ l และ L เป็นจำนวนของเส้นทางที่มาถึง และเป็นฟังก์ชันดิแรก (Dirac function) ที่ให้ค่าส่วนใหญ่เป็นศูนย์ ยกเว้นบริเวณที่แกน x เป็น 0 จะให้ค่าเข้าใกล้อนันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 รหัสรีด-โซโลมอน

เป็นรหัสที่ได้รับการยอมรับและใช้งานอย่างแพร่หลาย เป็นรหัสวนรอบและมีคุณสมบัติที่เป็นเชิงเส้นที่ไม่ใช่เลขฐานสอง (Non-binary Cyclic Code) ถูกพัฒนาต่อมาจากรหัสบีซีเอช โดยการปรับระยะต่ำสุดให้มีขนาดมากขึ้น โดยที่คาร์รหัสสามารถสร้างได้จากการเลื่อนตำแหน่งหรือการรวมกันระหว่างคาร์รหัสสองชุดก็ได้ ทั้งข้อมูลของรหัสและตำแหน่งความผิดพลาดนั้นจะอยู่ในสนามขยาย (Extension Field) แต่ละสัญลักษณ์จะมีขนาด m บิต (ปกติ m จะเป็นบวก และมากกว่า 2) เมื่อมีการส่งข้อมูลแบบแก้ไขไปข้างหน้า พาริตีจะถูกเพิ่มเข้าไปในข้อมูลจริงก่อนที่จะทำการส่ง เมื่อ ข้อมูลมาถึงด้านรับก็จะสามารถตรวจจับข้อผิดพลาดและทำการแก้ไขระยะทางของรหัสต่ำสุด คือ

$$d_{min} = n - k + 1 \quad (3.21)$$

ปกติแล้วความยาวของบล็อกของรหัสรีด-โซโลมอน คือ $2^m - 1$ แต่อาจจะขยายได้มากที่สุดถึง $2^m + 1$ รหัสรีด-โซโลมอนเป็นสับเซตของรหัสบีซีเอช และเป็นรหัสแบบบล็อกซึ่งข้อมูลที่จะเข้ารหัสจะต้องถูกแบ่งออกเป็นบล็อกขนาดเท่า ๆ กัน รหัสรีด-โซโลมอน เขียนแทนด้วย $RS(n, k)$ คือความยาวบล็อก n สัญลักษณ์ และจำนวนข้อมูล k สัญลักษณ์ โดยที่ $(n - k) = 2t$ เมื่อ t คือจำนวนสูงสุดของสัญลักษณ์ที่สามารถแก้ไขได้

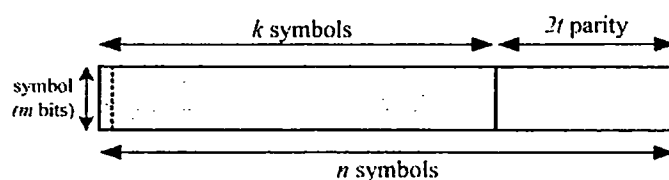
ดังนั้น

$$t = \left(\frac{d_{min} - 1}{2} \right) = \left(\frac{n - k}{2} \right) \quad (3.22)$$

และอัตรารหัส (code rate) สามารถหาได้จาก

$$\text{code rate} = \left(\frac{k}{n} \right) \quad (3.23)$$

ลักษณะของโครงสร้างรหัสรีด-โซโลมอนแสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของรหัสรีด-โซโลมอน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางครั้งตำแหน่งที่ผิดพลาดก็สามารถรู้ล่วงหน้าได้ ซึ่งจะเรียกว่า Erasure ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่ถูกลบไป มักจะใส่ข้อมูลเป็น 0 ไว้ ซึ่งจะรู้เฉพาะตำแหน่งแต่จะไม่รู้ขนาดของข้อมูล โดยที่ความสามารถของรหัสรีด-โซโลมอนจะสามารถแก้ไขได้เป็นจำนวนสองเท่าของ Erasure หากให้ ρ คือ Erasure แล้วรหัสรีด-โซโลมอน จะสามารถแก้ไขได้ คือ

$$\rho = (n - k) = 2t \quad (3.24)$$

หรือ เมื่อ α และ β คือจำนวนสัญลักษณ์ผิดพลาดและจำนวนสัญลักษณ์ที่โดนลบที่แท้จริงตามลำดับ

$$2\alpha + \beta \leq (n - k) \quad (3.25)$$

ปกติแล้วรหัสรีด-โซโลมอน จะใช้ข้อมูล F กับ 2^m เป็นองค์ประกอบ และแต่ละสัญลักษณ์จะแสดงเป็น m บิตค่า ผู้ส่งจะส่งข้อมูลเป็นบล็อกเข้ารหัสและจำนวนสัญลักษณ์ในบล็อกเข้ารหัสเป็น $n = 2^m - 1$ ดังนั้นรหัสรีด-โซโลมอน ที่ทำงานอยู่บนสัญลักษณ์ 8 บิตมีค่า $n = 2^8 - 1 = 255$ สัญลักษณ์ต่อบล็อก

3.5 รหัสรีด-โซโลมอนอย่างย่อ

ในการใช้งานที่ขนาดบล็อกของข้อมูล ไม่ได้เป็นจำนวนที่ลงตัวกับขนาดของรหัสรีด-โซโลมอนแบบปกติ เราสามารถเทียบเคียงขนาดบล็อกข้อมูลที่สั้นกว่าขนาดรหัสรีด-โซโลมอนแบบปกติ ที่ด้านส่งจะทำการเพิ่มบิตเข้าไปในข้อมูลเพื่อให้มีขนาดเท่ากับขนาดของรหัสรีด-โซโลมอนก่อนแล้วทำการเข้ารหัส และก่อนที่จะทำการส่งออกยังด้านรับก็จะทำการตัดบิตของข้อมูลที่เพิ่งใส่เข้าไปก่อนการเข้ารหัส แล้วจึงทำการส่งข้อมูลนี้ไปยังปลายทาง เมื่อข้อมูลมาถึงปลายทางก็จะทำการเพิ่มบิตข้อมูลให้มีความยาวเท่ากับต้นทาง ก็จะทำให้รหัสรีด-โซโลมอนสามารถถอดรหัสได้ โดยปกติแล้วบิตที่เพิ่มเข้าไปจะใช้บิตที่มีค่าเป็น 0 มากกว่าที่จะใช้บิตที่มีค่าเป็น 1

3.6 กาลัวร์ฟิลด์ (Galois Field)

เนื่องจากสัญลักษณ์ของรหัสรีด-โซโลมอนเป็นสมาชิกของสนามจำกัดกาลัวร์ [16] หรือเรียกว่ากาลัวร์ฟิลด์ หรือเขียนอย่างย่อได้เป็น GF ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วย $GF(p^m)$ หรือบางครั้งเขียนเป็น $GF(q)$ เมื่อ p เป็นจำนวนเฉพาะและ m เป็นจำนวนเต็มบวก ฟิลด์ประกอบไปด้วยเซตของสมาชิกที่จำกัดอยู่จำนวน p^m ตัวที่ไม่ซ้ำกัน เช่นสนาม $GF(2^m)$ เป็นเซตที่มีสมาชิกอยู่จำนวน 2^m ที่ไม่ซ้ำกัน โดยที่ m เป็นจำนวนเต็ม สนามจำกัด $GF(p^m)$ จะมีสนามย่อย $GF(p)$ และเรียกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$GF(p^m)$ ว่าเป็นสนามขยายของ $GF(p)$ การหาสมาชิกจำนวน 2^m ตัวของ $GF(2^m)$ สามารถหาได้โดยเริ่มจากการกำหนดค่า พหุนามปฐม (Primitive Polynomial) $p(x)$ อันดับ m ซึ่งเป็นพหุนามที่ลดทอนไม่ได้ ถ้ากำหนดให้ α เป็นรากของพหุนามปฐม จะได้ว่า $p(\alpha) = 0$ ค่ายกกำลังของ α มีค่าได้มากถึง $2^m - 2$ ค่าที่แตกต่างกัน และเมื่อค่า 2^{2^m-1} ก็จะวนเป็นค่า 1 อีกครั้ง ดังนั้นจะได้ว่า $0, 1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{2^m-2}$ จึงเป็นเซตของ $GF(2^m)$ และเรียก $GF(2^m)$ ว่าเป็นฟิลด์ เช่น ใน $GF(5)$ จะมี 2 เป็นสมาชิกปฐมเนื่องจากสมาชิกตัวอื่นในฟิลด์สามารถสร้างจาก 2 ได้ทั้งหมด ดังนั้น $2^1 = 2, 2^2 = 4, 2^3 = 3, 2^4 = 1$ ดังนั้น α มีค่าเป็น 2 และมีสมาชิกเรียกว่าสมาชิกของฟิลด์ โดยที่แต่ละสมาชิกสามารถเขียนแทนได้ด้วยผลรวมของแต่ละสมาชิกในฟิลด์ เช่น $m = 4, p(x) = x^4 + x + 1$ เป็นพหุนามที่ไม่สามารถแยกตัวประกอบได้ของฟิลด์ $GF(2^4)$ และให้ α เป็นรากของพหุนาม $p(x) = x^4 + x + 1$ ดังนั้น $\alpha^4 = \alpha + 1$ จะเห็นว่า α สามารถยกกำลังที่ให้ค่าแตกต่างกัน $2^4 - 2$ ค่า = 14 ดังนั้นการกระจายเทอมกำลังต่าง ๆ ของ α ทำได้ดังตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 สนามจำกัดกาลัวร์ขนาด 2^4 สมาชิกซึ่งใช้ค่า $p(x) = x^4 + x + 1$

i	α^i	Polynomial	Binary	Decimal	Hexadecimal	Minimal Polynomial of α^i , $f(x)$
0	α^0	1	0001	1	1	$x + 1$
1	α^1	x	0010	2	2	$x^4 + x + 1$
2	α^2	x^2	0100	4	4	$x^4 + x + 1$
3	α^3	x^3	1000	8	8	$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$
4	α^4	$x + 1$	0011	3	3	$x^4 + x + 1$
5	α^5	$x^2 + x$	0110	6	6	$x^2 + x + 1$
6	α^6	$x^3 + x^2$	1100	12	C	$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$
7	α^7	$x^3 + x + 1$	1011	11	B	$x^4 + x^3 + 1$
8	α^8	$x^2 + 1$	0101	5	5	$x^4 + x + 1$
9	α^9	$x^3 + x$	1010	10	A	$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$
10	α^{10}	$x^2 + x + 1$	0111	7	7	$x^2 + x + 1$
11	α^{11}	$x^3 + x^2 + x$	1110	14	E	$x^4 + x^3 + 1$
12	α^{12}	$x^3 + x^2 + x + 1$	1111	15	F	$x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$
13	α^{13}	$x^3 + x^2 + 1$	1101	13	D	$x^4 + x^3 + 1$
14	α^{14}	$x^3 + x$	1001	9	9	$x^4 + x^3 + 1$

สมาชิก α นี้จะเรียกว่าสมาชิกปฐม (Primitive Element) ของ $GF(2^m)$ ได้ หากสมาชิกใด ๆ ของ $GF(2^m)$ ที่ค่ายกกำลังของสมาชิกนั้นไม่เท่ากับศูนย์บน $GF(2^m)$ เช่น ค่ายกกำลังของ α ที่ α^4 บน $GF(2^4)$ ในตารางที่ 3.3 จะได้พบว่าทั้ง 15 สมาชิก มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างของกำลัง α^4 ของ $GF(2^4)$

$(\alpha^4)^0 = 1$	$(\alpha^4)^1 = \alpha^4$	$(\alpha^4)^2 = \alpha^8$
$(\alpha^4)^3 = \alpha^{12}$	$(\alpha^4)^4 = \alpha^{16}$	$(\alpha^4)^5 = \alpha^{20} = \alpha^5$
$(\alpha^4)^6 = \alpha^{24} = \alpha^9$	$(\alpha^4)^7 = \alpha^{28} = \alpha^{13}$	$(\alpha^4)^8 = \alpha^{32} = \alpha^2$
$(\alpha^4)^9 = \alpha^{36} = \alpha^6$	$(\alpha^4)^{10} = \alpha^{40} = \alpha^{10}$	$(\alpha^4)^{11} = \alpha^{44} = \alpha^{14}$
$(\alpha^4)^{12} = \alpha^{48} = \alpha^3$	$(\alpha^4)^{13} = \alpha^{52} = \alpha^7$	$(\alpha^4)^{14} = \alpha^{56} = \alpha^{11}$

ดังนั้น α^4 จึงเป็นสมาชิกปฐมของ $GF(2^4)$ ส่วนสมาชิก α^3 ไม่เป็นสมาชิกปฐมเนื่องจากค่า $(\alpha^3)^5$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นพหุนาม $p(x)$ ที่มีอันดับเท่ากับ m ที่สร้างเซตที่มีสมาชิกเท่ากับ 2^m ตัวจะถูกเรียกว่าพหุนามปฐม จะเห็นว่าในแต่ละจำนวนเต็มบวก m จะมีอย่างน้อยหนึ่งค่าที่เป็นพหุนามปฐม พหุนามปฐมที่นิยมใช้กันในอันดับต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างของพหุนามปฐม ที่นิยมใช้กันในอันดับต่าง ๆ

อันดับที่ m	พหุนามปฐม
3	$x^3 + x + 1$
4	$x^4 + x + 1$
5	$x^5 + x^2 + 1$
6	$x^6 + x + 1$
7	$x^7 + x^3 + 1$
8	$x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$
9	$x^9 + x^4 + 1$
10	$x^{10} + x^3 + 1$
11	$x^{11} + x^2 + 1$
12	$x^{12} + x^6 + x^4 + x + 1$
13	$x^{13} + x^4 + x^3 + x + 1$
14	$x^{14} + x^{10} + x^6 + x + 1$
15	$x^{15} + x + 1$

การทำกระทำใด ๆ ต่อสมาชิกของสนามกัลัวร์จะทำให้ได้ค่าของสมาชิกในสนามเท่านั้น เนื่องจากเป็นสนามจำกัด การกระทำดังกล่าวประกอบด้วย การบวก การลบ การคูณ และการหารซึ่งก็คือการคูณด้วยส่วนกลับนั่นเอง การกระทำในฟิลด์นั้นจะเป็นการกระทำแบบโมดูลุ 2 คือผลลัพธ์จากการหารเอาเศษด้วย 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 การบวกและลบ

การบวกและลบกันของสมาชิกในสนามจำกัดการลัวร์ จะมีค่าเหมือนกันเนื่องจากใช้ฟังก์ชันของ X-OR หรือเรียกว่าการบวกและลบแบบมอดุโล 2 ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์จะเป็นไปได้เพียงแค่ว่า 0 หรือ 1 เท่านั้น เช่นหากต้องการบวกเลข 12 และ 15 ใน $GF(16)$ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็น 3 สามารถแสดงด้วยสมการพหุนามดังนี้

$$(x^3 + x^2) + (x^3 + x^2 + x + 1) = x + 1$$

และสามารถแสดงในรูปเลขฐานสองได้ดังนี้

$$1100 \text{ (12)}$$

$$1111 \text{ (15)}$$

$$0011 \text{ (3)}$$

ส่วนการลบก็ได้ผลเช่นเดียวกันเนื่องจากการกระทำแบบมอดุโล 2

3.6.2 การคูณและการหาร

ปกติแล้วการคูณของพหุนามสองตัวที่มีกำลังเท่ากับ $m - 1$ ผลของพหุนามที่ได้จะมีกำลังเท่ากับ $2m - 2$ แต่ในกรณีของสนามจำกัดการลัวร์ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ จะไม่เกินกว่าสมาชิกที่มีค่าสูงสุด ซึ่งเป็นการคูณแบบมอดุโลของพหุนามกำเนิด $p(x)$ คือ ผลลัพธ์จะได้มาจากการหารผลคูณของพหุนามกับพหุนามกำเนิด

ตัวอย่าง เช่น 12 คูณ 15 ในสนามจำกัดการลัวร์ขนาด $GF(16)$ หาได้ดังนี้

$$\text{ขั้นแรกเลือกพหุนามกำเนิด } p(x) = x^4 + x + 1 \text{ ดังนั้น } x^4 = x + 1$$

$$\text{ขั้นที่สองทำการคูณพหุนามทั้งสองตัวแบบปกติ}$$

$$\text{ขั้นที่สามทำการบวกพหุนามที่ได้ด้วยการบวกแบบสนามจำกัด}$$

$$(x^3 + x^2)(x^3 + x^2 + x + 1) = x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2$$

$$= x^6 + x^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า $p(x)$ ลงในผลคูณที่ได้

$$\begin{aligned} &= x^4 \cdot x^2 + x^2 \\ &= (x+1)x^2 + x^2 \\ &= x^3 + x^2 + x^2 \\ &= x^3 \end{aligned}$$

จะเห็นว่าผลลัพธ์จากการคูณกัน เป็นเลขฐานสอง 1000 หรือแปลงเป็นฐานสิบได้ผลลัพธ์ 8

การหารในสนามกาลัวร์นั้นจะมีความใกล้เคียงกับการคูณ โดยในขั้นแรกนั้นจะทำการหาส่วนกลับของตัวหารก่อน จากนั้นก็คูณกันตามขั้นตอนการคูณปกติ เช่น $15/12$ จะเห็นว่าส่วนกลับของ 12 คือ 10 จากนั้นทำการคูณ
จะได้ว่า

$$\frac{15}{12} = 15 \times \frac{1}{12} = 15 \times 10 = 12$$

แปลงเป็นรูปพหุนามได้ดังนี้

$$\begin{aligned} (x^3 + x^2 + x + 1)(x^3 + x) &= x^6 + x^4 + x^5 + x^3 + x^4 + x^2 + x^3 + x \\ &= x^6 + x^5 + x^2 + x \\ &= (x+1)x^2 + (x+1)x + x^2 + x \\ &= x^3 + x^2 + x^2 + x + x^2 + x \\ &= x^3 + x^2 \end{aligned}$$

ผลลัพธ์ที่ได้เป็นเลขฐานสอง 1100 หรือแปลงเป็นฐานสิบได้ผลลัพธ์ 12 ดังนั้น $15/12 = 12$

3.7 การเข้ารหัสรีด-โซโลมอน

พหุนามกำเนิด (Generator polynomial) ของรหัสรีด-โซโลมอน จะถูกนำมาสร้างรหัสซึ่งประกอบไปด้วยตัวประกอบขนาด $n - k = 2t$ เขียนได้ คือ

$$\begin{aligned} g(x) &= (x + \alpha^b)(x + \alpha^{b+1})(x + \alpha^{b+2t-1}) \\ &= x^{2t} + g_{2t-1}x^{2t-1} + g_2x^2 + g_1x + g_0 \end{aligned} \quad (3.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $g_i \in GF(2^m)$ ดีกรีของพหุนามกำเนิดคือ $2t$ ดังนั้นจึงสามารถที่จะกำหนดจากจำนวนรากที่ต่อเนื่องจำนวน $2t$ ราก หรือเมื่อเขียนเป็นรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$g(x) = \prod_{i=j_0}^{j_0+2t-1} x - \alpha^i \quad (3.27)$$

ปกติแล้วจะให้ $j_0 = 1$ แต่บางกรณี $j_0 \neq 1$ ก็ได้ เช่น $2(j_0 + t) = 2m$ ในกรณีต้องการสัมประสิทธิ์ $g(x)$ แบบสมมาตร

3.7.1 การเข้ารหัสเชิงระบบ

เนื่องจากว่ารหัสรีด-โซโลมอน เป็นรหัสวนรอบ การเลื่อน (ไปทางขวา) ของคำรหัสก็ยังคงเป็นคำรหัสอยู่ เช่นนี้ หากลองเลื่อน k ข้อมูลไปจนขวาสุด แล้วเติมส่วน $2t$ ตำแหน่งทางด้านหน้าก็จะได้รหัสรีด-โซโลมอนเชิงระบบ การกระทำดังกล่าวในเชิงคณิตศาสตร์ก็คือการทำ $x^{(n-k)}m(x)$ และหากทำการหาร $x^{(n-k)}m(x)$ ด้วย $g(x)$ ก็จะมีเศษเหลือ ซึ่งก็คือค่าพาริตีนั่นเอง ดังนั้นจะได้ว่า

$$x^{(n-k)}m(x) = Q(x)g(x) + P(x) \quad (3.28)$$

เมื่อ $Q(x)$ คือ ผลหารที่ได้ และ $g(x)$ คือ เศษเหลือ และเมื่อเราสนใจเฉพาะเศษเหลือจึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$p(x) = x^{(n-k)}m(x) \bmod g(x) \quad (3.29)$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนคำรหัสเชิงระบบได้คือ

$$c(x) = p(x) + x^{2t}m(x) \quad (3.30)$$

โดยที่ ค่า $2t$ มาจาก $n - k$

รหัสรีด-โซโลมอน จะสร้างมาจากพหุนามกำเนิดซึ่งจะมีขนาดตัวประกอบจำนวน $2t$ หรือมีขนาดเท่ากับ $n - k$ โดยที่ $g(x)$ หาได้จาก

$$\begin{aligned} g(x) &= (x + \alpha^b)(x + \alpha^{b+1}) \dots (x + \alpha^{b+2t+1}) \\ &= x^{2t} + g_{2t-1}x^{2t-1} + g_{2t-2}x^{2t-2} + \dots + g_0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ α เป็นจำนวนเฉพาะต่ำสุดของสนามจำกัดกาลัวร์ g_0 ถึง g_{2t-1} เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของตัวพหุนามกำเนิด ซึ่งพหุนามกำเนิดของรหัสรีด-โซโลมอนจะเป็นคนละตัวกับพหุนามกำเนิดของสนามจำกัดกาลัวร์ หรือพหุนามกำเนิดของรหัสบีซีเอช

3.8 การถอดรหัสรีด-โซโลมอน

เมื่อต้นทางส่งข้อมูลที่มีการเข้ารหัส หากมีการผิดพลาด เช่นมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นกับข้อมูลที่เข้ารหัสนั้น โดยที่ความผิดพลาดอาจจะเกิดขึ้นกับสัญลักษณ์ตำแหน่งใดก็ได้ ซึ่งสามารถแสดงได้โดย

$$E(x) = E_{n-1}x^{n-1} + E_{n-2}x^{n-2} + \dots + E_2x^2 + E_1x^1 + E_0x^0 \quad (3.32)$$

ที่ด้านรับจะเป็นผลรวมของสัญญาณข้อมูลจริงและส่วนที่เป็นสัญญาณรบกวน หรือส่วนที่ข้อมูลผิดพลาด

$$R(x) = C(x) + E(x) \quad (3.33)$$

$$= (C_{n-1} + E_{n-1})x^{n-1} + (C_{n-2} + E_{n-2})x^{n-2} + \dots + (C_1 + E_1)x^1 + (C_0 + E_0)x^0 \quad (3.29)$$

หรือสามารถเขียนได้ในรูปของพหุนามดังนี้

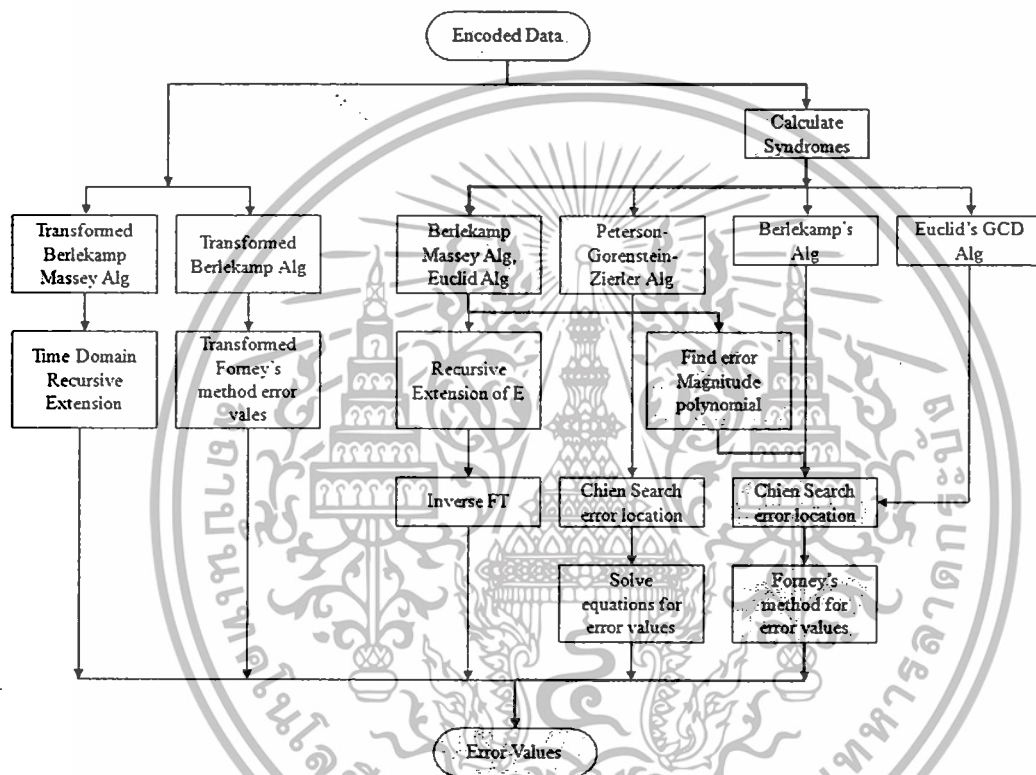
$$R(x) = R_{n-1}x^{n-1} + R_{n-2}x^{n-2} + \dots + R_2x^2 + R_1x^1 + R_0x^0 \quad (3.34)$$

ขั้นตอนการถอดรหัสนั้นจะแบ่งเป็นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกจะตรวจสอบว่าคำรหัสที่ได้รับมานั้นมีข้อผิดพลาดหรือไม่ ส่วนขั้นตอนที่สองนั้นหากมีข้อผิดพลาดจึงจะทำการหาตำแหน่งและค่าที่ผิดพลาดเพื่อแก้ไขให้ถูกต้อง ไดอะแกรมการถอดรหัสแสดงดังรูปที่ 3.8 โดยที่หากคำรหัสที่ได้รับไม่มีข้อผิดพลาด ขั้นตอนการทำงานจะเป็นดังด้านซ้าย แต่หากคำรหัสที่ได้รับมีข้อผิดพลาดจะผ่านขั้นตอนทางด้านขวา ซึ่งมีหลายวิธี ในงานวิจัยนี้จะใช้ขั้นตอนตามเส้นทางและกล่องที่บ ซึ่งมี 5 ขั้นตอนดังนี้ [15]

1. คำนวณหาค่าซินโดรมจากคำรหัสที่ได้รับ หากมีค่าทั้งหมดเป็นศูนย์แสดงว่าไม่มีข้อผิดพลาดแต่หากคำนวณแล้วพบว่าอย่างน้อยหนึ่งตำแหน่งที่ไม่เท่ากับศูนย์ จะหมายถึงคำรหัสที่ได้รับมีข้อผิดพลาด ซึ่งจะต้องมีการหาตำแหน่งและค่าที่ผิดพลาดต่อไป มีหลายวิธีที่จะแก้สมการซินโดรม เช่น วิธีการ Peterson-Gorenstein-Zeirlar วิธี Berlekamp-Massey และวิธียูคลิดส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. คำนวณหาค่าพหุนามบอกตำแหน่งความผิดพลาด (Error locator polynomial) จากสมการซินโดรม โดยปกติจะใช้อัลกอริทึมของ Berlekamp Massey
3. หาค่าตำแหน่งที่ผิดพลาดโดยการหาส่วนกลับของรากจากพหุนามบอกตำแหน่งความผิดพลาด โดยทั่วไปใช้วิธีการของ Chien Search
4. หาค่าที่ผิดพลาดจากพหุนามบอกตำแหน่งความผิดพลาดและสมการซินโดรมโดยใช้วิธีการของ Forney ซึ่งเรียกว่าพหุนามประเมินความผิดพลาด (Error evaluation polynomial)
5. ทำการแก้ไขข้อผิดพลาดของคำรหัสที่ได้รับ



รูปที่ 3.8 ไดอะแกรมการถอดรหัสรีด-โซโลมอน [14]

3.8.1 การคำนวณสมการซินโดรม

เมื่อคำรหัสมาถึงด้านรับ เพื่อให้สามารถตรวจจับข้อผิดพลาดและทำการแก้ไขข้อผิดพลาดนั้นได้ สิ่งแรกที่ต้องทำเพื่อตรวจสอบว่าคำรหัสที่รับมานั้นมีความผิดพลาดหรือไม่ นั่นคือการคำนวณสมการซินโดรม ซึ่งจะต้องคำนวณหาซินโดรมทั้งหมดจำนวน $2t$ ค่า หากค่าทั้งหมดมีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าคำรหัสที่รับมาได้นั้นไม่มีข้อผิดพลาด แต่หากคำนวณแล้วค่าของซินโดรมอย่างน้อยหนึ่งตำแหน่งไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่าคำรหัสที่รับมานั้นมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ในทางปฏิบัติแล้วความผิดพลาดของคำรหัสนั้น เป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้นในส่วนข้อมูลเอง หรืออาจเกิดขึ้นในส่วนของพาริตีก็เป็นไปได้ โดยที่รหัสรีด-โซโลมอนจะสามารถตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดเหล่านั้นได้ หากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีขนาดไม่เกิน $2t$ หรือ $n - k$ สัญลักษณ์ การคำนวณหาค่าซินโดรมสามารถทำได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลายวิธี คือ การหารค่ารหัสด้วยพหุนามกำเนิด ซึ่งการหารนั้นจะได้ค่าผลหารและเศษ หากเศษเท่ากับศูนย์แสดงว่าค่ารหัสที่ได้รับไม่มีข้อผิดพลาด อีกวิธี คือ การแทนค่ารากเพื่อหาค่าซินโดรม วิธีการหาค่าซินโดรมด้วยการหารสามารถหาได้ด้วยสมการดังนี้

$$\frac{R(x)}{g_i(x)} = q_i(x) + \frac{S_i}{g_i(x)} \quad \text{เมื่อ } g_i(x) = (x + \alpha^i) \quad (3.35)$$

โดยที่ค่า S_i แทนซินโดรมแต่ละตำแหน่ง และ i มีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq i \leq (n - k) - 1$

หากใช้วิธีการแทนค่าเพื่อหาค่าซินโดรม สมการ (3.35) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้ โดยที่จะแทน x ด้วย α^i ซึ่งจะทำให้ได้ว่า $q_i \times (x + \alpha^i) = 0$ เนื่องการบวกจำนวนที่มีค่าเท่ากันในสนามจำกัดกาลัวร์ จะมีค่าเป็นศูนย์ จึงได้สมการใหม่เป็น

$$\begin{aligned} S_i &= q_i(x) \times (x + \alpha^i) + R(x) \\ &= q_i(\alpha^i) \times (\alpha^i + \alpha^i) + R(\alpha^i) \\ &= q_i(\alpha^i) \times 0 + R(\alpha^i) \\ &= R(\alpha^i) \\ &= R_{n-1}(\alpha^i)^{n-1} + R_{n-2}(\alpha^i)^{n-2} + \dots + R_2(\alpha^i)^2 + R_1(\alpha^i)^1 + R_0(\alpha^i)^0 \end{aligned}$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการพหุนามได้ดังนี้

$$S(x) = \sum_{i=0}^{2t-1} S_i \alpha^i$$

และสามารถเขียนสมการให้แทนที่ทั้งตำแหน่งและค่าที่มีความผิดพลาด ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S(i) = E(\alpha^i) &= \sum_{l=1}^v Y_l \alpha^{ie_l} \\ &= \sum_{l=1}^v Y_l X_l^i \end{aligned}$$

โดยที่ X_v แทนตำแหน่งที่มีข้อผิดพลาด และ Y_v แทนค่าที่ผิดพลาด และ v แทนจำนวนค่าทั้งหมดที่มีข้อผิดพลาดซึ่งค่านี้อยู่ระหว่าง $v \leq t$ และสามารถเขียนสมการซินโดรมให้อยู่ในรูปของแมตริกส์ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{pmatrix} S_1 & S_2 & S_3 & \dots & S_v \\ S_2 & S_3 & S_4 & \dots & S_{v+1} \\ S_3 & S_4 & S_5 & \dots & S_{v+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_v & S_{v+1} & S_{v+2} & \dots & S_{2v-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Lambda_v \\ \Lambda_{v-1} \\ \Lambda_{v-2} \\ \dots \\ \Lambda_v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -S_{v+1} \\ -S_{v+2} \\ -S_{v+3} \\ \dots \\ -S_{2v} \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

3.8.2 การหาพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาดด้วยวิธีเบอร์ลีแคมป์ (Berlekamp Massey)

ในการแก้สมการซินโดรมนั้น คือ การประเมินจากคำรหัสที่ได้รับ ด้วยรากของพหุนามกำเนิดที่ให้ผลลัพธ์เป็นศูนย์ การแก้สมการซินโดรมนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธี Peterson-Gorenstein-Zeiler ซึ่งเป็นการหาส่วนกลับของแมตริกส์แต่วิธีนี้จะมีประสิทธิภาพต่ำลงเมื่อแมตริกส์นั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นเช่นการเข้ารหัสด้วยรีด-โซโลมอน การแก้สมการซินโดรมด้วยวิธียูคลิดส์ซึ่งใช้หลักการหาค.ร.น. และวิธีการ Berlekamp Massey ซึ่งเป็นการมองปัญหาซินโดรมเหมือนการแก้ปัญหาคิพรีจิสเตอร์ และเป็นอัลกอริทึมแบบทำซ้ำ ผลลัพธ์ของอัลกอริทึม Berlekamp-Massey คือพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาด (Error Locator Polynomial)

จากแมตริกส์ 3.36 กำหนดให้ v เป็นจำนวนสัญลักษณ์ที่จะสามารถแก้ไขความผิดพลาดได้ ดังนั้น $v \leq t$ และจากแมตริกส์จะพบว่า S_{v+1} ขึ้นอยู่กับ $S_1, S_2, S_3, \dots, S_v$ และ S_{v+2} ขึ้นอยู่กับ $S_2, S_3, S_4, \dots, S_{v+1}$ จะเป็นอย่างนี้ไปเรื่อย ๆ และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$S_j = -\sum_{i=1}^v \Lambda_i S_{j-i} \quad \text{สำหรับ } j = v+1, \dots, 2v \quad (3.37)$$

จะได้ว่า Λ คือ สัมประสิทธิ์ ซึ่ง $\Lambda(x)$ คือ พหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาด ซึ่งเขียนเป็นสมการโดย

$$\Lambda(x) = \Lambda_v x^v + \dots + \Lambda_1 x + 1 \quad (3.38)$$

วิธีของเบอร์ลีแคมป์นั้นใช้หลักการสังเคราะห์ซิพรีจิสเตอร์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้น $\Lambda^{(0)}(x) = B^{(0)}(x)$ และ $L_0 = 0$ โดยที่ $\Lambda(x)$ คือรีจิสเตอร์บอกตำแหน่ง และ $B(x)$ คือรีจิสเตอร์สำรอง (Auxiliary Register) และ L เป็นความยาวของรีจิสเตอร์ วิธีการของเบอร์ลีแคมป์จะทำการคำนวณจำนวน $2t$ รอบ และจะทำให้ได้พหุนามบอกตำแหน่งที่มี $\Lambda_0^{2t} = 1$
2. ในแต่ละรอบการคำนวณ r จะกำหนดให้รีจิสเตอร์ที่เก็บพหุนามบอกตำแหน่งที่ความยาว (L) ที่ค่าต่ำ ๆ ก่อน จากนั้นลองคำนวณค่าซินโดรมเพื่อเทียบกับค่าซินโดรมจริง ค่าจากความแตกต่างที่ได้จะเรียกว่า Discrepancy แทนด้วย Δr แต่ละรอบการคำนวณที่ r จะคำนวณสมการซินโดรม คือ

$$S'_j = -\sum_{j=1}^{n-1} \Lambda_j^{(r-1)} S_{r-j} \quad (3.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ S_r คือ ค่าซินโดรมจริง ทำให้สามารถหาค่าความแตกต่างหรือ Δr ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\Delta r &= S_r - S'_r = S_r + \sum_{j=1}^{n-1} \Lambda_j^{(r-1)} S_{r-j} \\ &= - \sum_{j=0}^{n-1} \Lambda_j^{(r-1)} S_{r-j}\end{aligned}\quad (3.40)$$

หากมีค่าที่เกิดความแตกต่างแสดงว่า $\Delta r \neq 0$ หรือความยาวของรีจิสเตอร์ไม่เหมาะสม คือ $2L_{r-1} \leq r-1$ ก็จะมีการเพิ่มความยาวของรีจิสเตอร์ขึ้น แต่หากไม่มีความคลาดเคลื่อนก็就不用มีการปรับค่าใด ๆ โดยกำหนดให้ δ_r แทนตัวทำการปรับปรุงและมีเงื่อนไขการปรับปรุงดังนี้

$$\delta_r = 1 \text{ ถ้าหาก } \Delta r \neq 0 \text{ และ } 2L_{r-1} \leq r-1 \text{ ไม่งั้น } \delta_r = 0$$

และความยาวของรีจิสเตอร์จะเปลี่ยนเป็น

$$L_r = \delta_r(r - L_{r-1}) + (1 - \delta_r)L_{r-1}\quad (3.41)$$

จากนั้นนำค่าความแตกต่างที่ได้ไปปรับปรุงรีจิสเตอร์สำรอง และนำมาหักออกจากค่าในรีจิสเตอร์หลัก ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\Lambda^{(r)}(x) = \Lambda^{(r-1)}(x) - \Delta_r x B^{(r-1)}(x)\quad (3.42)$$

และทำการปรับปรุงรีจิสเตอร์สำรองโดยใช้สองเงื่อนไข

กรณีที่ $\delta_r = 1$ จะทำการปรับค่ารีจิสเตอร์สำรองโดยการหารค่าในรีจิสเตอร์หลักด้วยค่าความแตกต่าง

กรณีที่ $\delta_r = 0$ จะเพิ่มความยาวของรีจิสเตอร์สำรองขึ้นมาอีกหนึ่งลำดับ ค่าของรีจิสเตอร์สำรองหาได้ดังนี้

$$B^{(r)}(x) = \Delta_r^{-1} \delta_r \Lambda^{(r-1)}(x) + (1 - \delta_r) x B^{(r-1)}(x)\quad (3.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.3 การหารากพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาดด้วยวิธีเขียนเส้นรีซ (Chien Search)

การแก้สมการซินโดรมด้วยวิธีของเบอร์ลิแคมป์ จะทำให้ได้พหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาด การหาตำแหน่งที่ผิดพลาดของคำรหัสที่รับได้นั้นจะใช้วิธีการของเขียนเส้นรีซ ซึ่งเป็นการหาคำรากด้วยการแทนค่าของพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาดด้วย α จนถึง $\alpha^{(n-1)}$ จากนั้นนำค่าที่เป็นรากของสมการไปหาส่วนกลับ ส่วนกลับที่ได้นั้นจะเป็นตำแหน่งของคำรหัสที่ผิดพลาด การหารากของวิธีเขียนเส้นรีซนั้นเป็นกระทำได้แบบลองผิดลองถูก (Trial and error)

3.8.4 การหาขนาดที่ผิดพลาดด้วยวิธีฟอร์เนย์ (Forney)

หลังจากผลลัพธ์ของวิธีเขียนเส้นรีซที่ทำให้ได้ตำแหน่งของความผิดพลาด การหาขนาดที่ผิดพลาดไปจากคำรหัสที่รับมาได้ จะกระทำโดยการใชัพหุนามประเมินความผิดพลาด (Error evaluator polynomial) หรือ $\Gamma(x)$ ด้วยวิธีของฟอร์เนย์โดยหาได้จาก

$$\Gamma(x) = \Lambda(x)S(x) \bmod x^{2t} \quad (3.44)$$

ขนาดของความผิดพลาดสามารถหาได้จาก

$$e_i = \frac{\Gamma(\alpha^{-i})}{\Lambda'(\alpha^{-i})} \quad (3.45)$$

โดยที่ e_i คือ ขนาดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง i

เมื่อ $\Lambda'(x)$ เป็นอนุพันธ์ของ $\Lambda(x)$ และ $e(x) = \sum_{i=0}^{N-1} e_i x^i$

3.8.5 การแก้ไขตำแหน่งข้อมูลผิดพลาด

ข้อมูลที่ถูกต้องที่ด้านรับคือผลรวมของข้อมูลที่รับได้และขนาดข้อมูลที่ผิดพลาดไป หากสามารถแก้ไขได้ถูกต้อง ผลรวมที่ได้จะหักล้างกันไปเนื่องจากเป็นการกระทำแบบ X-OR ของสนามจำกัด

$$m(x) = r(x) + e(x) \quad (3.46)$$

ตัวอย่าง การถอดรหัสรีดโซโลมอน โดยกำหนดให้คำรหัสที่ถูกส่งออกจากด้านส่งถูกเข้ารหัสด้วยรีดโซโลมอนขนาด 15 สัญลักษณ์ $\{c_i\} = \{0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0\}$ เมื่อผ่านช่องสัญญาณการสื่อสาร ได้มีสัญญาณรบกวน ที่สัญลักษณ์ตำแหน่งที่ 3 5 และ 12 มีขนาดเปลี่ยนไป และรับได้เป็น 4 11 และ 15 ตามลำดับ ทำให้คำรหัสที่รับได้เป็น $\{v_i\} = \{0,0,0,4,0,11,0,0,0,0,0,0,15,0,0\}$ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงให้อยู่ในรูปพหุนามกำลังได้เป็น $v(x) = 4x^3 + 11x^5 + 15x^{12}$ และแปลงให้อยู่ในรูปจำนวนปฐมได้เป็น $\alpha^2 x^3 + \alpha^7 x^5 + \alpha^{12} x^{12}$ ขั้นตอนการถอดรหัสมี 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าซินโดรม ซึ่งจะต้องหาทั้งหมด $2t$ ค่า

$$S_k = v(\alpha^k) = \sum_{i=0}^{n-1} v_i \alpha^{ik} \quad \text{สำหรับ } 1 \leq k \leq 6$$

เมื่อ k แทนตำแหน่งซินโดรมของซินโดรมแต่ละค่า ซึ่งจะได้ว่า

$$\begin{aligned} S_1 = v(\alpha^1) &= \sum_{i=0}^{n-1} v_i \alpha^{1i} = v_3 \alpha^3 + v_5 \alpha^5 + v_{12} \alpha^{12} \\ &= \alpha^2 \alpha^3 + \alpha^7 \alpha^5 + \alpha^{12} \alpha^{12} \\ &= 6 + 5 + 10 = 3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_2 = v(\alpha^2) &= \sum_{i=0}^{n-1} v_i \alpha^{2i} = v_3 \alpha^6 + v_5 \alpha^{10} + v_{12} \alpha^9 \\ &= \alpha^2 \alpha^6 + \alpha^7 \alpha^{10} + \alpha^{12} \alpha^9 \\ &= 5 + 4 + 12 = 13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_3 = v(\alpha^3) &= \sum_{i=0}^{n-1} v_i \alpha^{3i} = v_3 \alpha^9 + v_5 \alpha^{15} + v_{12} \alpha^6 \\ &= \alpha^2 \alpha^9 + \alpha^7 \alpha^{15} + \alpha^{12} \alpha^6 \\ &= 14 + 11 + 8 = 13 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_4 = v(\alpha^4) &= \sum_{i=0}^{n-1} v_i \alpha^{4i} = v_3 \alpha^{12} + v_5 \alpha^5 + v_{12} \alpha^3 \\ &= \alpha^2 \alpha^{12} + \alpha^7 \alpha^5 + \alpha^{12} \alpha^3 \\ &= 9 + 15 + 1 = 7 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_5 = v(\alpha^5) &= \sum_{i=0}^{n-1} v_i \alpha^{5i} = v_3 \alpha^{15} + v_5 \alpha^{10} + v_{12} \alpha^0 \\ &= \alpha^2 + \alpha^7 \alpha^{10} + \alpha^{12} \\ &= 4 + 4 + 15 = 15 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_6 = v(\alpha^6) &= \sum_{i=0}^{n-1} v_i \alpha^{6i} = v_3 \alpha^3 + v_5 \alpha^0 + v_{12} \alpha^{12} \\ &= \alpha^2 \alpha^3 + \alpha^7 + \alpha^{12} \alpha^{12} \\ &= 6 + 11 + 10 = 7 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าซินโดรมทั้ง 6 ค่าที่ได้คือ $\{S_k\} = \{3, 13, 13, 7, 15, 7\}$

หรือ $S(x) = 3 + 13x + 13x^2 + 7x^3 + 15x^4 + 7x^5$

ขั้นตอนที่ 2 หาพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาดด้วยวิธีเบอร์ลิแคมป์

การหาพหุนามบอกตำแหน่งด้วยวิธีของเบอร์ลิแคมป์นั้น จะต้องทำการคำนวณทั้งหมด $2t$ รอบ เช่นกัน ซึ่งเท่ากับจำนวนของตำแหน่งซินโดรม

กำหนดค่าเริ่มต้น

$$\Lambda^{(0)}(x) = B^{(0)}(x) \text{ และ } L_0 = 0$$

การคำนวณรอบที่ 1 ($r = 1$)

$$\begin{aligned} \Delta r &= \sum_{j=0}^L \Lambda_j^{(r-1)} S_{r-j} \\ &= \Lambda_0 S_1 \\ &= S_1 \\ &= 3 \end{aligned}$$

ซึ่ง $\Lambda_r^{-1} = \frac{1}{3} = 14$

จะเห็นว่า $\Delta r \neq 0$ แต่ $2L_{r-1} = r - 1$ หรือ $(2 \times 0) = (1 - 1)$ ซึ่งจะทำให้ได้ว่า $\delta_r = 1$

จาก $L_r = \delta_r(r - L_{r-1}) + (1 - \delta_r)L_{r-1}$ จึงได้ว่า $L_1 = 1$

และจาก $\begin{bmatrix} \Lambda^{(r)}(x) \\ B^{(r)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta_r x \\ \Lambda_r^{-1} \delta_r & (1 - \delta_r)x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda^{(r-1)}(x) \\ B^{(r-1)}(x) \end{bmatrix}$ จะได้

$$\begin{aligned} \Lambda^{(1)}(x) &= \Lambda^{(0)}(x) - \Delta_r x B^{(0)}(x) \\ &= 1 - 3x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B^{(1)}(x) &= \delta_r \Lambda_r^{-1} \Lambda^{(0)}(x) + (1 - \delta_r)x B^{(0)}(x) \\ &= \Lambda_r^{-1} \Lambda^{(0)}(x) \\ &= (14)(1) = 14 \end{aligned}$$

การคำนวณรอบที่ 2 ($r = 2$)

$$\begin{aligned} \Delta r &= \sum_{j=0}^L \Lambda_j^{(r-1)} S_{r-j} = \sum_{j=0}^1 \Lambda_j^{(1)} S_{2-j} \\ &= \Lambda_0 S_2 + \Lambda_1 S_1 \\ &= S_2 + S_1 \\ &= 13 + (3)(3) \\ &= 13 + 5 = 8 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ซึ่ง } \Lambda_r^{-1} = \frac{1}{8} = 15$$

จะเห็นว่า $\Delta_r \neq 0$ และ $2L_{r-1} \neq r-1$ หรือ $(2 \times 1) > (2-1)$ ซึ่งจะทำให้ได้ว่า $\delta_r = 0$

จาก $L_r = \delta_r(r - L_{r-1}) + (1 - \delta_r)L_{r-1}$ จึงได้ว่า $L_2 = 1$

$$\text{และจาก } \begin{bmatrix} \Lambda^{(r)}(x) \\ B^{(r)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta_r x \\ \Lambda_r^{-1} \delta_r & (1 - \delta_r)x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda^{(r-1)}(x) \\ B^{(r-1)}(x) \end{bmatrix} \text{ จะได้}$$

$$\begin{aligned} \Lambda^{(2)}(x) &= \Lambda^{(1)}(x) - \Delta_r x B^{(1)}(x) \\ &= (1 - 3x) - (8x)(14) \\ &= 1 - 10x \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B^{(2)}(x) &= \delta_r \Lambda_r^{-1} \Lambda^{(1)}(x) + (1 - \delta_r)x B^{(1)}(x) \\ &= x B^{(1)}(x) \\ &= 14x \end{aligned}$$

การคำนวณรอบที่ 3 ($r = 3$)

$$\begin{aligned} \Delta_r &= \sum_{j=0}^L \Lambda_j^{(r-1)} S_{r-j} = \sum_{j=0}^1 \Lambda_j^{(2)} S_{3-j} \\ &= \Lambda_0 S_3 + \Lambda_1 S_2 \\ &= S_3 + (10)S_2 \\ &= 13 + (10)(13) \\ &= 13 + 11 = 6 \end{aligned}$$

$$\text{ซึ่ง } \Lambda_r^{-1} = \frac{1}{6} = 7$$

จะเห็นว่า $\Delta_r \neq 0$ แต่ $2L_{r-1} = r-1$ หรือ $(2 \times 1) = (3-1)$ ซึ่งจะทำให้ได้ว่า $\delta_r = 1$

จาก $L_r = \delta_r(r - L_{r-1}) + (1 - \delta_r)L_{r-1}$ จึงได้ว่า $L_3 = 2$

$$\text{และจาก } \begin{bmatrix} \Lambda^{(r)}(x) \\ B^{(r)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta_r x \\ \Lambda_r^{-1} \delta_r & (1 - \delta_r)x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda^{(r-1)}(x) \\ B^{(r-1)}(x) \end{bmatrix} \text{ จะได้}$$

$$\begin{aligned} \Lambda^{(3)}(x) &= \Lambda^{(2)}(x) - \Delta_r x B^{(2)}(x) \\ &= (1 - 10x) - (6x)(14x) \\ &= 1 - 10x - 2x^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B^{(3)}(x) &= \delta_r \Lambda_r^{-1} \Lambda^{(2)}(x) + (1 - \delta_r)x B^{(2)}(x) \\ &= \Lambda_r^{-1} \Lambda^{(2)}(x) \\ &= 7(1 - 10x) \\ &= 7 - 3x \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณรอบที่ 4 ($r = 4$)

$$\begin{aligned}\Delta r &= \sum_{j=0}^L \Lambda_j^{(r-1)} S_{r-j} = \sum_{j=0}^2 \Lambda_j^{(3)} S_{4-j} \\ &= \Lambda_0 S_4 + \Lambda_1 S_3 + \Lambda_2 S_2 \\ &= S_4 + (10)S_3 + (2)S_2 \\ &= 7 + (10)(13) + (2)(13) \\ &= 7 + 11 + 9 = 5\end{aligned}$$

ซึ่ง $\Lambda_r^{-1} = \frac{1}{5} = 11$

จะเห็นว่า $\Delta_r \neq 0$ และ $2L_{r-1} \neq r - 1$ หรือ $(2 \times 2) > (4 - 1)$ ซึ่งจะทำให้ได้ว่า $\delta_r = 0$

จาก $L_r = \delta_r(r - L_{r-1}) + (1 - \delta_r)L_{r-1}$ จึงได้ว่า $L_4 = 2$

และจาก $\begin{bmatrix} \Lambda^{(r)}(x) \\ B^{(r)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta_r x \\ \Lambda_r^{-1} \delta_r & (1 - \delta_r)x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda^{(r-1)}(x) \\ B^{(r-1)}(x) \end{bmatrix}$ จะได้

$$\begin{aligned}\Lambda^{(4)}(x) &= \Lambda^{(3)}(x) - \Delta_r x B^{(3)}(x) \\ &= (1 - 10x - 2x^2) - (11x)(7 - 3x) \\ &= 1 - 2x - 13x^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B^{(4)}(x) &= \delta_r \Lambda_r^{-1} \Lambda^{(3)}(x) + (1 - \delta_r)x B^{(3)}(x) \\ &= x B^{(3)}(x) \\ &= x(7 - 3x) \\ &= 7x - 3x^2\end{aligned}$$

การคำนวณรอบที่ 5 ($r = 5$)

$$\begin{aligned}\Delta r &= \sum_{j=0}^L \Lambda_j^{(r-1)} S_{r-j} = \sum_{j=0}^2 \Lambda_j^{(4)} S_{5-j} \\ &= \Lambda_0 S_5 + \Lambda_1 S_4 + \Lambda_2 S_3 \\ &= S_5 + (2)S_4 + (13)S_3 \\ &= 15 + (2)(7) + (13)(13) \\ &= 15 + 14 + 14 = 15\end{aligned}$$

ซึ่ง $\Lambda_r^{-1} = \frac{1}{15} = 8$

จะเห็นว่า $\Delta_r \neq 0$ แต่ $2L_{r-1} = r - 1$ หรือ $(2 \times 2) = (5 - 1)$ ซึ่งจะทำให้ได้ว่า $\delta_r = 1$

จาก $L_r = \delta_r(r - L_{r-1}) + (1 - \delta_r)L_{r-1}$ จึงได้ว่า $L_5 = 3$

และจาก $\begin{bmatrix} \Lambda^{(r)}(x) \\ B^{(r)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta_r x \\ \Lambda_r^{-1} \delta_r & (1 - \delta_r)x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda^{(r-1)}(x) \\ B^{(r-1)}(x) \end{bmatrix}$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \Lambda^{(5)}(x) &= \Lambda^{(4)}(x) - \Delta_r x B^{(4)}(x) \\
 &= (1 - 2x - 13x^2) - (15x)(7x - 3x^2) \\
 &= 1 - 2x - 13x^2 - 11x^2 + 2x^3 \\
 &= 1 - 2x - 6x^2 + 2x^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B^{(5)}(x) &= \delta_r \Lambda_r^{-1} \Lambda^{(4)}(x) + (1 - \delta_r) x B^{(4)}(x) \\
 &= 8\Lambda^{(4)}(x) \\
 &= 8(1 - 2x - 13x^2) \\
 &= 8 - 3x - 2x^2
 \end{aligned}$$

การคำนวณรอบที่ 6 ($r = 6$)

$$\begin{aligned}
 \Delta_r &= \sum_{j=0}^L \Lambda_j^{(r-1)} S_{r-j} = \sum_{j=0}^3 \Lambda_j^{(5)} S_{6-j} \\
 &= \Lambda_0 S_6 + \Lambda_1 S_5 + \Lambda_2 S_4 + \Lambda_3 S_3 \\
 &= S_6 + (2)S_5 + (6)S_4 + (2)S_3 \\
 &= 7 + (2)(15) + (6)(7) + (2)(13) \\
 &= 7 + 13 + 1 + 9 = 2
 \end{aligned}$$

ซึ่ง $\Lambda_r^{-1} = \frac{1}{2} = 9$

จะเห็นว่า $\Delta_r \neq 0$ และ $2L_{r-1} \neq r-1$ หรือ $(2 \times 3) > (6-1)$ ซึ่งจะทำให้ได้ว่า $\delta_r = 0$
จาก $L_r = \delta_r(r - L_{r-1}) + (1 - \delta_r)L_{r-1}$ จึงได้ว่า $L_6 = 3$

และจาก $\begin{bmatrix} \Lambda^{(r)}(x) \\ B^{(r)}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta_r x \\ \Lambda_r^{-1} \delta_r & (1 - \delta_r)x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Lambda^{(r-1)}(x) \\ B^{(r-1)}(x) \end{bmatrix}$ จะได้

$$\begin{aligned}
 \Lambda^{(6)}(x) &= \Lambda^{(5)}(x) - \Delta_r x B^{(5)}(x) \\
 &= (1 - 2x - 6x^2 + 2x^3) - (2x)(8 - 3x - 2x^2) \\
 &= 1 - 2x - 6x^2 + 2x^3 - 3x - 6x^2 + 4x^3 \\
 &= 1 - x + 6x^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B^{(6)}(x) &= \delta_r \Lambda_r^{-1} \Lambda^{(5)}(x) + (1 - \delta_r) x B^{(5)}(x) \\
 &= x B^{(5)}(x) \\
 &= x(8 - 3x - 2x^2) \\
 &= 8x - 3x^2 - 2x^3
 \end{aligned}$$

ดังนั้นพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาดคือสัมประสิทธิ์ของ Λ ลำดับที่ $2t$ คือ $1 - x + 6x^3$

หรือ $\Lambda^{(2t)}(x) = 1 - x + 6x^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 3 ทหารากของพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาด ด้วยวิธีเขียนเสิร์ช

เป็นการนำพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาดที่ได้จากวิธีเบอร์ลิแคมป์ $\Lambda^{(2t)}(x) = 1 - x + 6x^3$ มาหารากโดยการทดสอบทุก ๆ ความเป็นไปได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}\Lambda(\alpha) &= 1 - (\alpha) + 6(\alpha^3) = 1 - (2) + 6(8) = 1 - 2 + 5 = 6 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^2) &= 1 - (\alpha^2) + 6(\alpha^2)^3 = 1 - (4) + 6(12) = 1 - 4 + 14 = 11 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^3) &= 1 - (\alpha^3) + 6(\alpha^3)^3 = 1 - (8) + 6(10) = 1 - 8 + 9 = 0 \\ \Lambda(\alpha^4) &= 1 - (\alpha^4) + 6(\alpha^4)^3 = 1 - (3) + 6(15) = 1 - 3 + 4 = 6 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^5) &= 1 - (\alpha^5) + 6(\alpha^5)^3 = 1 - (6) + 6(1) = 1 - 6 + 6 = 1 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^7) &= 1 - (\alpha^7) + 6(\alpha^7)^3 = 1 - (11) + 6(12) = 1 - 11 + 14 = 5 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^8) &= 1 - (\alpha^8) + 6(\alpha^8)^3 = 1 - (5) + 6(10) = 1 - 5 + 9 = 13 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^9) &= 1 - (\alpha^9) + 6(\alpha^9)^3 = 1 - (10) + 6(15) = 1 - 10 + 4 = 15 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^{10}) &= 1 - (\alpha^{10}) + 6(\alpha^{10})^3 = 1 - (7) + 6(1) = 1 - 7 + 6 = 0 \\ \Lambda(\alpha^{11}) &= 1 - (\alpha^{11}) + 6(\alpha^{11})^3 = 1 - (14) + 6(8) = 1 - 14 + 5 = 10 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^{12}) &= 1 - (\alpha^{12}) + 6(\alpha^{12})^3 = 1 - (15) + 6(12) = 1 - 15 + 14 = 0 \\ \Lambda(\alpha^{13}) &= 1 - (\alpha^{13}) + 6(\alpha^{13})^3 = 1 - (13) + 6(10) = 1 - 13 + 9 = 5 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^{14}) &= 1 - (\alpha^{14}) + 6(\alpha^{14})^3 = 1 - (9) + 6(15) = 1 - 9 + 4 = 12 \neq 0 \\ \Lambda(\alpha^{15}) &= 1 - (\alpha^{15}) + 6(\alpha^{15})^3 = 1 - (1) + 6(1) = 1 - 1 + 6 = 6 \neq 0\end{aligned}$$

จากการแทนค่าทำให้ได้รากของพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาดสามค่า คือ α^3 α^{10} และ α^{12} การหาตำแหน่งผิดพลาดที่แท้จริงคือการหาส่วนกลับของรากอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะได้เป็นค่า α^{12} α^5 และ α^3 ดังนั้นตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่ผิดพลาดคือที่ตำแหน่ง 12 5 และ 3 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 4 หาค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนไปจากคำรหัสเดิม ด้วยวิธีของฟอร์เนย์ (Forney) วิธีการของฟอร์เนย์ เป็นการหาขนาดความผิดพลาด โดยใช้พหุนามประเมินความผิดพลาด จากที่ผ่านมามีค่าของซินโดรมและพหุนามบอกตำแหน่งผิดพลาดดังนี้

$$S(x) = 3 + 13x + 13x^2 + 7x^3 + 15x^4 + 7x^5 \text{ และ } \Lambda(x) = 1 - x + 6x^3$$

จาก

$$\begin{aligned}\Gamma(x) &= \Lambda(x)S(x) \bmod x^{2t} \\ &= (1 - x + 6x^3)(3 + 13x + 13x^2 + 7x^3 + 15x^4 + 7x^5) \bmod x^6 \\ &= (x^8 + 4x^7 + 6x^6 + 14x + 3) \bmod x^6 \\ &= 14x + 3\end{aligned}$$

และจาก

$$\Lambda(x) = 1 - x + 6x^3$$

ดังนั้น

$$\Lambda'(x) = 1 + 6x^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของความผิดพลาดหาได้จาก

$$e_i = \frac{\Gamma(\alpha^{-i})}{\Lambda'(\alpha^{-i})}$$

ขนาดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 12

$$e_{12} = \frac{\Gamma(\alpha^{-12})}{\Lambda'(\alpha^{-12})} \quad \text{โดยที่ } \alpha^{-12} = \alpha^3 = 8$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} &= \frac{14(x) + 3}{1 + 6x^2} \\ &= \frac{14(8) + 3}{1 + 6(8)^2} \\ &= \frac{9 + 3}{1 + 14} \\ &= \frac{10}{15} \\ &= 10 \times 15^{-1} \\ &= 10 \times 8 \\ &= 15 \end{aligned}$$

ขนาดความผิดพลาดที่ตำแหน่งสัญลักษณ์ที่ 12 คือ 15

ขนาดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 5

$$e_5 = \frac{\Gamma(\alpha^{-5})}{\Lambda'(\alpha^{-5})} \quad \text{โดยที่ } \alpha^{-5} = \alpha^{10} = 7$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} &= \frac{14(x) + 3}{1 + 6x^2} \\ &= \frac{14(7) + 3}{1 + 6(7)^2} \\ &= \frac{12 + 3}{1 + 7} \\ &= \frac{15}{6} \\ &= 11 \end{aligned}$$

ขนาดความผิดพลาดที่ตำแหน่งสัญลักษณ์ที่ 5 คือ 11

ขนาดความผิดพลาดที่ตำแหน่ง 3

$$e_3 = \frac{\Gamma(\alpha^{-3})}{\Lambda'(\alpha^{-3})} \quad \text{โดยที่ } \alpha^{-3} = \alpha^{12} = 15$$

แทนค่า

$$= \frac{14(x) + 3}{1 + 6x^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{14(15) + 3}{1 + 6(15)^2} \\
 &= \frac{5 + 3}{1 + 9} \\
 &= \frac{6}{8} \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

ขนาดความผิดพลาดที่ตำแหน่งสัญลักษณ์ที่ 3 คือ 4

ดังนั้นขนาดความผิดพลาดที่ประเมินได้ที่ตำแหน่ง 12 5 และ 3 คือ 15 11 และ 4 ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 5 แก้ไขค่ารหัสที่ผิดพลาดให้ถูกต้อง

ค่ารหัสที่ถูกต้องคือผลรวมของจากค่ารหัสที่รับได้กับขนาดของความผิดพลาดที่ประเมินได้

$$m(x) = r(x) + e(x)$$

ที่ตำแหน่งสัญลักษณ์ที่ 12

$$m(x) = 15 + 15 = 0$$

ที่ตำแหน่งสัญลักษณ์ที่ 5

$$m(x) = 11 + 11 = 0$$

ที่ตำแหน่งสัญลักษณ์ที่ 3

$$m(x) = 4 + 4 = 0$$

เมื่อสัญลักษณ์ที่ผิดพลาดถูกตรวจพบและได้รับการแก้ไข ข้อมูลที่รับได้จึงถูกต้องเหมือนต้นทาง $\{m_x\} = \{0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0\}$

3.8.6 พลังงานที่ใช้ในการถอดรหัส

ในการถอดรหัสนั้นเกี่ยวข้องกับการคำนวณ ซึ่งในทางปฏิบัติคือมีการใช้งานฮาร์ดแวร์ จากหัวข้อที่ผ่านมาพบว่า จะต้องมีการคำนวณหาสมการซินโดรมก่อนหากมีข้อผิดพลาดจึงจะทำขั้นตอนถัดไป หากไม่มีข้อมูลผิดพลาดก็จะสิ้นสุดขั้นตอนการถอดรหัส ซึ่งการที่มีขั้นตอนมากหรือน้อยนั้นก็เป็นการใช้งานฮาร์ดแวร์มากน้อยเช่นกัน ในทางปฏิบัตินั้นการกระทำการแบบการคูณจะมีความซับซ้อนทำให้ใช้พลังงานมากกว่าการบวกมาก ดังนั้นในตารางการคำนวณจึงตัดค่าการบวกออก คงไว้เฉพาะการคูณ ค่าคูณสมบัติของรหัสและการใช้แสดงดังตารางต่อไปนี้ [17]

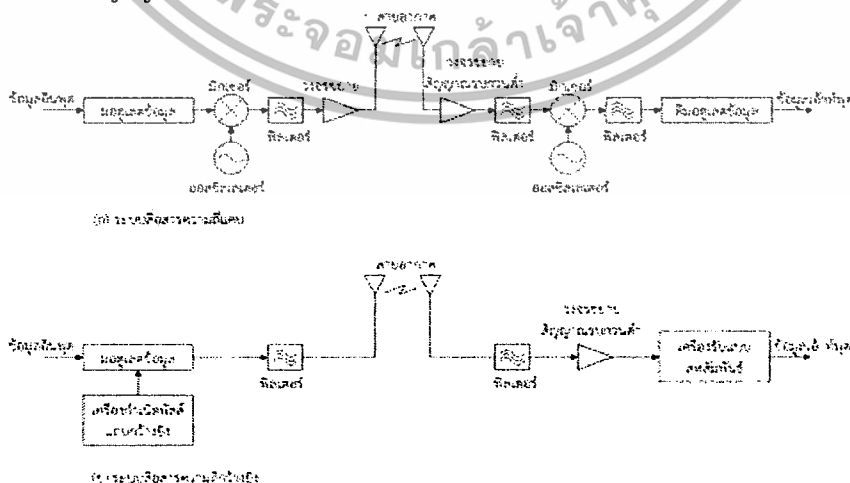
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติและการใช้พลังงานของรหัสที่นำมาใช้

Code(n,k)	RS (255,239)	RS (255,223)	RS (255,191)	RS (255,159)	RS (255,127)	RS (255,111)	RS (255,95)
N (block size)	255	255	255	255	255	255	255
K (Information)	239	223	191	159	127	111	95
Code rate (k/n)	0.94	0.87	0.75	0.62	0.5	0.44	0.37
2t (parity)	16	32	64	96	128	144	160
T (correctable)	8	16	32	48	64	72	80
Dmin (2t+1)	17	33	65	97	129	145	161
Syndrome computation (2nt)	4,080	8,160	16,320	24,480	32,640	36,720	40,800
Berlekamp Algorithm ² (4t)	256	1,024	4,096	9,216	16,384	20,736	25,600
Chien Search (nt)	2,040	4,080	8,160	12,240	16,320	18,360	20,400
Forney Alg ² (2t +t)	136	528	2,080	4,656	8,256	10,440	12,880
Total Energy Consumption	6,512	13,792	30,656	50,592	73,600	86,256	99,680

3.9 การสื่อสารแถบกว้างยิ่ง (Ultra Wide Band)

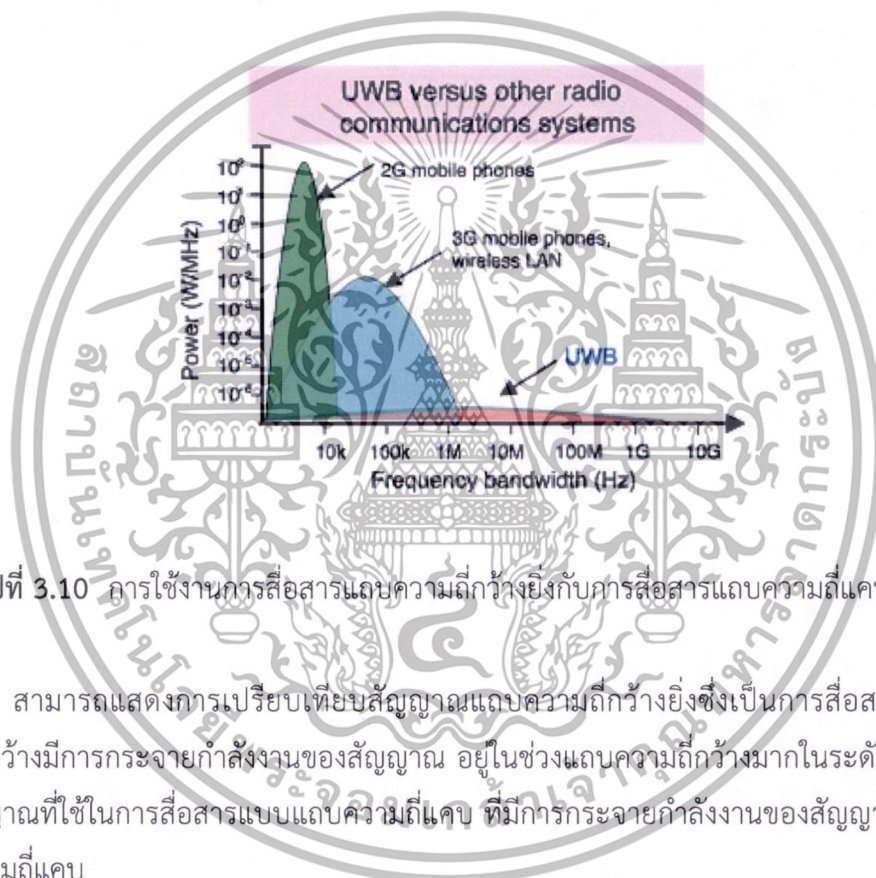
เป็นการสื่อสารที่ใช้พลังงานในการส่งข้อมูลต่ำ ราคาไม่แพงและมีขนาดเล็กเนื่องจากไม่ต้องกล้ำสัญญาณสัญญาณข้อมูลที่ต้องการจะส่งเข้ากับสัญญาณคลื่นพาห์ (Carrier less) โครงสร้างของวงจรรับส่งเมื่อเทียบกับการสื่อสารแถบแคบแสดงดังในรูปที่ 3.9 นอกจากนี้ยังมีการรบกวนการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ในงานดูแลผู้ป่วย การเฝ้าระวังผู้ป่วยแบบเวลาจริงแบบต่อเนื่อง เช่น ระบบการให้ยาแบบอิเล็กทรอนิกส์ การเฝ้าระวังวิเคราะห์คลื่นสมองที่ต้องใช้ความเร็วในการส่งข้อมูลถึง 100 เมกะบิตต่อวินาที ขนาดของสายอากาศมีขนาดเล็ก และที่สำคัญมีอัตราการส่งข้อมูลสูง



รูปที่ 3.9 โครงสร้างระบบการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งเทียบกับการสื่อสารความถี่แคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบความถี่กว้างยิ่งใช้สัญญาณที่มีรูปคลื่นสัญญาณปรากฏเพียงชั่วขณะ หรือเป็นพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณในทางเวลาที่แคบมาก โดยอยู่ในระดับนาโนวินาที (ns) หรือที่ระดับพิโควินาที (ps) มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันกับสัญญาณในอุดมคติที่เรียกว่าสัญญาณอิมพัลส์ (Impulse signal) ในการส่งและรับสัญญาณนั้นไม่ใช่คลื่นพาทีในการผสมสัญญาณเหมือนในระบบการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ แต่จะเป็นการส่งสัญญาณที่มีรูปคลื่นของพัลส์ที่มีรูปคลื่นซึ่งไม่ต่อเนื่องในทางเวลาด้วยอัตราการส่งพัลส์ ในระดับจำนวนหลายร้อยล้านพัลส์ต่อหนึ่งวินาทีในการส่งและรับสัญญาณ ซึ่งทำให้ทำให้พลังงานของสัญญาณถูกกระจายอยู่ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมาก มีสัดส่วนแบนด์วิดท์ในการส่งมากกว่าหรือเท่ากับ 20% ของแถบความถี่กลาง ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งเป็นที่มาของชื่อแถบความถี่กว้างยิ่ง [18]

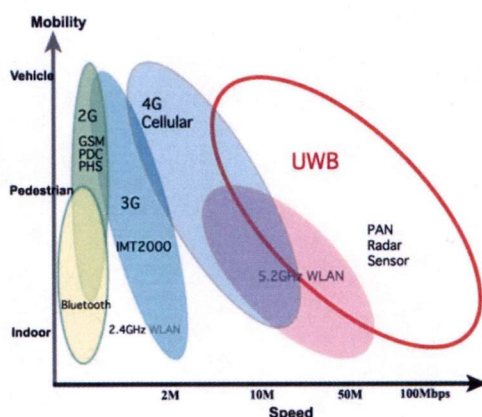


รูปที่ 3.10 การใช้งานการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งกับการสื่อสารแถบความถี่แคบ [18]

สามารถแสดงการเปรียบเทียบสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งซึ่งเป็นการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างมีการกระจายกำลังงานของสัญญาณ อยู่ในช่วงแถบความถี่กว้างมากในระดับกิกะเฮิรตซ์ กับสัญญาณที่ใช้ในการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบ ที่มีการกระจายกำลังงานของสัญญาณอยู่ในช่วงแถบความถี่แคบ

สัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งมิได้ถูกจำกัดเฉพาะกับสัญญาณในรูปแบบอิมพัลส์ ที่ครอบคลุมความถี่ชั่วขณะที่กว้างมากเท่านั้น เทคนิคของสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งยังสามารถแบ่งออกเป็นแบบแถบความถี่เดี่ยว (Single band approach) และแบบหลายแถบความถี่ (Multiband approach) รวมทั้งใช้เรียกเทคนิคการใช้คลื่นพาทย่อยที่ไม่รบกวนกันจำนวนมาก ในการผสมสัญญาณหรือมอดูเลชันแบบที่เรียกว่ามัลติแบนด์โอเอพดีเอ็ม Multiband OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ซึ่งเป็นอีกเทคนิคที่ครอบคลุมการใช้ความถี่เป็นแถบกว้างมาก โดยประยุกต์ใช้ในการส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็วสูงเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



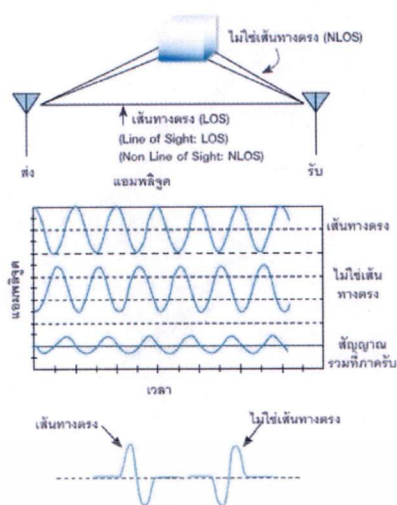
รูปที่ 3.11 ลักษณะการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งเทียบกับระบบการสื่อสารไร้สายประเภทอื่น [18]

สัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งแบบอิมพัลส์และมัลติแบนด์โอเอ็ฟดีเอ็ม ได้รับการพิจารณาเพื่อนำไปใช้สำหรับมาตรฐานเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล Wireless Personal Area Network (WPAN) ของกลุ่มความร่วมมือไวมี่เดีย (WiMedia Alliance) โดยใช้เป็นเทคโนโลยีพื้นฐานสำหรับอุปกรณ์เชื่อมต่อในรูปแบบยูเอสบีความเร็วสูงไร้สาย (High Speed Wireless Universal Serial Bus (USB) interface) ซึ่งลักษณะความสามารถในการสื่อสาร ความถี่และระยะทางของระบบสื่อสารแถบกว้างยิ่ง เปรียบเทียบกับระบบการสื่อสารไร้สายประเภทอื่นได้ดังรูปที่ 3.11

คุณลักษณะเด่นของการใช้สัญญาณพัลส์ที่มีช่วงเวลาของพัลส์แคบมาก ซึ่งใช้ในการสื่อสารแถบกว้างยิ่งทำให้มีข้อดีที่แตกต่างจากการสื่อสารแบบแถบความถี่แคบดังนี้

1. ทนทานต่อปรากฏการณ์หลายวิถี (Multipath phenomenon) เนื่องจากสภาพแวดล้อมของการสื่อสารไร้สายที่คลื่นสามารถแพร่กระจายไปได้ทุกทิศทาง เป็นผลให้สัญญาณการสื่อสารไร้สาย โดยเฉพาะแบบแถบความถี่แคบ มักจะได้รับผลกระทบจากปรากฏการณ์การเดินทางของคลื่นหลายวิถี (Multipath radio propagation) ซึ่งสัญญาณที่ส่งผ่านช่องสัญญาณจะเกิดเป็นสัญญาณหลายชุดเดินทางผ่านช่องสัญญาณ ด้วยระยะเวลาที่แตกต่างกันก่อนที่จะไปถึงเครื่องรับ และเมื่อถึงเครื่องรับเฟสและระดับความแรงของสัญญาณบางชุด มักมีการเปลี่ยนแปลงโดยอาจเกิดการเสริมหรือหักล้างกับสัญญาณในเส้นทางอื่น ทำให้การตรวจจับสัญญาณที่เครื่องรับเป็นไปด้วยความยากลำบาก สำหรับสัญญาณสื่อสารแถบกว้างยิ่งซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์แคบมาก เมื่อแพร่กระจายผ่านช่องสัญญาณหลายเส้นทาง จะทำให้ลูกพัลส์ลูกเดียวกันถูกแยกเป็นหลายพัลส์เมื่อสัญญาณไปถึง เครื่องรับโดยสัญญาณพัลส์หลายชุดที่เดินทางมาถึงเครื่องรับจะมีโอกาสน้อยที่มีการคาบเกี่ยวกันทางเวลา หรือการรบกวนกันของพัลส์เกิดขึ้น เนื่องจากเวลาในการเดินทางผ่านช่องสัญญาณไร้สาย มักมีช่วงเวลาที่นานกว่าความกว้างทางเวลาของพัลส์ ทำให้สัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่งเกิดการลดทอนจากปรากฏการณ์หลายวิธีน้อยกว่า ดังรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ปรัชญาการณหลายวิธีและผลต่อการสื่อสารแบบความถี่แคบและแบบความถี่กว้าง [19]

เมื่อใช้เทคนิคเครื่องรับแบบเรค (Rake receiver) ซึ่งใช้ในระบบซีดีเอ็มเอ Code Division Multiple Access (CDMA) สัญญาณพัลส์ที่ตรวจจับได้จากหลายวิธี จะถูกรวมกันเพื่อเพิ่มระดับของคุณภาพการรับของสัญญาณได้มากยิ่งขึ้น

2. มีความสามารถใช้แถบความถี่ซ้อนทับกับระบบอื่นได้เนื่องด้วยระดับความหนาแน่นของระดับความแรงต่อความถี่ของสัญญาณแถบความถี่กว้างยังมีค่าต่ำ (Low power spectral density) ทำให้ระบบสื่อสารที่ใช้สัญญาณแถบความถี่กว้างยังสามารถทำงานซ้อนทับกับระบบสื่อสารแบบอื่นได้

3. มีความสามารถในการวัดพัลส์ที่มีความเที่ยงตรงสูงด้วยสัญญาณพัลส์ ที่มีช่วงเวลาแคบมาก ในระดับที่ต่ำกว่านาโนวินาทีทำให้สัญญาณแถบความถี่กว้างยังมีความละเอียดสูงที่มาก (Very high resolution) เท่าที่จะสามารถทำได้สำหรับค่าความถี่กลางหนึ่ง ๆ ซึ่งความละเอียดดังกล่าวเป็นคุณสมบัติที่นำมาใช้ในการวัดความแตกต่างของระยะทางได้ เช่นในระบบเรดาร์เมื่อสัญญาณลูกคลื่นพัลส์ของสัญญาณแถบความถี่กว้างยังสะท้อนกลับมายังเครื่องรับ ก็จะสามารถคำนวณหาระยะทางโดยประมาณที่สัญญาณพัลส์ใช้เวลาในการเดินทางได้อย่างเที่ยงตรงมาก

4. มีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพตามข้อกำหนดของคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร หรือเอฟซีซี (FCC) ในเรื่องข้อจำกัดของกำลังส่งที่อนุญาตให้ใช้ได้เป็นผลให้ระบบสัญญาณแถบความถี่กว้างยัง มีการใช้พลังงานที่ต่ำมากเพื่อไม่ให้รบกวนระบบสื่อสารอื่น โดยระดับความแรงของสัญญาณโดยเฉลี่ยอยู่ที่ระดับต่ำกว่า -40 เดซิเบลมิลลิวัตต์ต่อหนึ่งเมกะเฮิรตซ์

5. มีความสามารถในการทะลุทะลวงวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้ดี โดยการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่ำ ในช่วงแถบความถี่ที่กว้างมากของสัญญาณแถบความถี่กว้างยิ่ง จะทำให้สัญญาณสามารถทะลุทะลวงวัสดุชนิดต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้ในการสร้างอาคาร หรือพื้นดินได้ดีกว่าระบบอื่น ๆ ที่ใช้สัญญาณที่มีความถี่สูงเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรหัสควบคุมความผิดพลาดและการปรับอัตราหัสอัตโนมัติ

3.10.1 “An Overview of Physical Layers on Wireless Body Area Network” [20]

งานวิจัยนี้เป็นการพิจารณาในชั้นกายภาพของมาตรฐาน กล่าวไว้ว่ามาตรฐานนี้ในอนาคตจะไม่ได้ถูกจำกัดการใช้งานเพียงแค่ทางการแพทย์เท่านั้น แต่จะมีการขยายไปยังการใช้งานประเภทส่วนบุคคลมากขึ้น หรือผู้ใช้งานอาจจะไม่ใช้บุคลากรทางการแพทย์เท่านั้น เพื่อเสริมความแข็งแกร่งของ PPSU ที่ชั้นกายภาพของการสื่อสารแถบความถี่แคบจะมีการเข้ารหัสเฉพาะ PLCP Header เท่านั้นด้วย BCH(31,19) โดยที่ PLCP Header มีขนาด 31 บิต และ BCH(31,19) เป็นรหัสอย่างย่อมาจาก BCH(63,51) และมีค่า $t = 2$ คือ สามารถแก้ไขบิตผิดพลาดได้เพียง 2 บิต

ที่ชั้นกายภาพของการสื่อสารแถบความถี่กว้างจะแบ่งเป็นสองแบบ คือ แบบปกติจะเข้ารหัส BCH(40,28) ซึ่งเป็นรหัสแบบย่อของ BCH(63,51) ซึ่งแก้ไขบิตผิดพลาดได้จำนวน 2 บิต และแบบ Hi-QOS จะเข้ารหัส BCH(91,28) ซึ่งเป็นรหัสแบบย่อของ BCH(127,64) และแก้ไขบิตผิดพลาดได้จำนวน 9 บิต ในขณะที่ชั้นกายภาพของ HBC ไม่ได้มีการกล่าวถึงรหัสควบคุมความผิดพลาด

จะเห็นว่ามาตรฐานกล่าวถึงรหัส BCH เฉพาะส่วน Header ของ PHY เท่านั้น และความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดก็มีเพียงส่วนน้อย โดยแก้ไขได้ที่จำนวน 2 บิตในการสื่อสารแถบความถี่แคบ และ 9 บิตในชั้นความถี่กว้าง เมื่อเทียบกับขนาดของข้อมูลในชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อที่มีขนาดถึง 2040 บิต

3.10.2 “Design of Packet Erasure Mitigation Technique using a Digital Fountain Code for Wearable Wireless Body Area Network” [21]

งานวิจัยนี้ นำเสนอรหัสน้ำพุ (fountain) โดยเลือกใช้ LT Code เพื่อใช้ในการแก้ไขข้อผิดพลาดที่ชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อที่มีขนาด 255 ไบต์ โดยใช้ช่องแบบจำลองสัญญาณแบบ Erasure ซึ่งได้ทำการสร้างแบบจำลองช่องสัญญาณ ด้วยใช้รูปแบบการใช้ชีวิตแบบการเดินทาง ใช้เซนเซอร์ตัวรับและตัวส่งอย่างละตัว ตัวแรกติดอยู่ที่ข้อมือขวาอีกตัวหนึ่งติดอยู่ที่เอว ผลลัพธ์จากการวัดค่า RSS ด้วยสายอากาศทั้งตัวรับและตัวส่ง ใช้ Signal Generator ส่งสัญญาณเข้าไปที่เซนเซอร์ตัวส่ง รับสัญญาณด้วย Spectrum Analyzer ที่เซนเซอร์ตัวรับ และเลือกใช้ค่าอ้างอิงที่ -80 ดีบี หรือคิดเป็น erasure ratio ที่ 10^{-2}

การออกแบบใช้ LT code แต่มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ (M) ตามความต้องการในงานวิจัยนี้ นำเสนอ 800 1200 และ 1600 บิต จากขนาดคำรหัสทั้งหมด 2040 บิต (255 ไบต์) คิดเป็นอัตราหัส 0.60 0.41 และ 0.22 ตามลำดับ

ผลการทดลองได้ทำการเทียบระหว่างการเข้ารหัสและไม่มีการเข้ารหัส พบว่าที่ $M=800$ ผลที่ได้จะไม่ทำให้ดีกว่าการไม่เข้ารหัส การเพิ่ม M เป็น 1200 ทำให้สามารถเริ่มแก้ไขข้อผิดพลาดได้ แต่ต้องใช้อัตราสื่อสารข้อมูลถึง 1 kbps ถึง 1 Mbps และเมื่อปรับค่า M เป็น 1600 จะสามารถทำให้การสื่อสารที่ได้สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ ซึ่งจะพบว่า การใช้ LT code นั้นจะต้องใช้อัตราหัสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ต่ำมากถึง 0.22 จึงจะสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ และได้อัตราบิดผิดพลาดที่ไม่สูงเพียง 10^{-2} เท่านั้น

3.10.3 “Highly Reliable Wireless Body Area Network Using Error Correcting Codes.”[22]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการลดปัญหาการส่งข้อมูลผิดพลาดโดยใช้ LT Codes ก่อนอื่นทำการทดลองเพื่อหาแบบจำลองช่องสัญญาณด้วยการหาค่า Received Strength Ratio (RSS) โดยได้ทำการติดตั้งตัวรับเป็นสายอากาศแบบแคปซูล และตัวส่งสัญญาณติดอยู่ตามร่างกาย จุดรับสัญญาณจะติดตั้งที่บริเวณอกในขณะที่จุดส่งสัญญาณจะเปลี่ยนไปเรื่อย ๆ ตามตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น หัว ข้อมือซ้าย ข้อมือขวา และระหว่างการวัดสัญญาณจะทำการจำลองการเดินทางหลังจากวัดสัญญาณแล้วพบว่าสัญญาณลดลงประมาณ 20 ดีบี การวัดผลด้วยค่า Packet Error Rate (PER) โดยใช้ระดับอ้างอิงที่ -80ดีบี และใช้กับข้อมูลขนาด 255 ไบต์ที่ขึ้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อพบว่าถ้าจุดรับอยู่ที่บริเวณอกส่วนจุดส่งอยู่ที่หัวหรือเอวจะได้ค่า PER เป็นศูนย์เนื่องจากค่าอ้างอิงอยู่สูงกว่า RSS ในขณะที่ถ้าเพิ่มอัตราส่งข้อมูลจะทำให้ PER ลดลงด้วย แต่ถ้าอัตราส่งข้อมูลอยู่ระหว่าง 50 ถึง 150 kbps แล้วอัตราการส่งข้อมูลจะไม่มีผลต่อการลดค่า PER

LT-Code ใช้ดีกรีของ node ที่ต่ออยู่ด้วยเป็นตัวพิจารณาโดยใช้กราฟแทนเนอร์ โดยเทียบกับรหัสรีต-โซโลมอน ซึ่งใช้ค่าความน่าจะเป็นของอัตราผิดพลาดที่ 10^{-1} และ 10^{-3} ตามลำดับ โดยคุณสมบัติของรหัสรีต-โซโลมอนนั้น จะสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้หากระยะ t มากกว่า e ในทางกลับกันหากค่า t น้อยกว่าค่า e แล้ว รหัสรีต-โซโลมอน จะไม่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบโดยใช้ข้อมูล ระหว่าง LT code และ RS code ตามตารางด้านล่าง

Data rate R_b [kbps]	121.4
One packet length P [bit] [byte]	255
Information length L [bit] [byte]	239
Symbol length [bit]	8
Packet duration T [ms]	16.8

ผลการทดลองจะคำนวณหา throughput โดยหาได้จาก

$$\eta = N_{\text{packet}} \times L_{\text{bit}} / T_n$$

ผลการทดลองพบว่า Throughput ของ รีต-โซโลมอนจะดีกว่าของ LT ในกรณีที่อัตราความผิดพลาดของข้อมูลต่ำกว่าความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดของรีต-โซโลมอน แต่เมื่ออัตราการผิดพลาดของข้อมูลเพิ่มขึ้นจนค่า e มากกว่าค่า t จะทำให้รหัสรีต-โซโลมอนไม่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ งานวิจัยสรุปไว้ว่าค่ากลางในการแก้ไขได้หรือไม่ได้อยู่ที่ 3.1×10^{-2} เพิ่ม โดยที่ถ้า error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำกว่าค่าดังกล่าวข้อมูลทั้งหมดจะสามารถแก้ไขได้ทั้งหมด แต่ถ้ามากกว่านั้นรีด-โซโลมอนจะไม่สามารถแก้ไขได้ทำให้งานวิจัยว่า LT code จะดีกว่า RS

LT code ซึ่งเป็นรหัสที่ใช้หลักการ Ex-OR เนื่องจากมีความไม่ยุ่งยากมากในการคำนวณ ใช้พลังงานต่ำ ชั้นแรกใช้การได้ทำการเปรียบเทียบรหัสควบคุมความผิดพลาดระหว่างรหัส Luby Transform Code (LT Code) เทียบกับ Reed-Solomon-Code (RS-Code) พบว่า LT-code จะมีประสิทธิภาพดีกว่า RS-Code ในขณะที่ RS-Code จะให้ทรูพุดที่ดีกว่า ดังนั้น RS-Code จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในงานที่ต้องการความเร็วเช่นงานประเภทเวลาจริง

3.10.4 “Performance Analysis for Hybrid ARQ Error-Controlling Scheme for UWB WBAN.” [23]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับปรุง throughput ของชั้นกายภาพการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่ง และทำการทดลองที่แบบจำลองช่องสัญญาณที่ 3 (CM3) ที่เป็น on-body to on-body เท่านั้น การเข้ารหัสจะทำเหมือนกันทั้งข้อมูลที่เป็น medical และ non-medical แต่ข้อมูลที่เป็น medical จะทำการเพิ่ม H-ARQ เข้าไปด้วย การเข้ารหัสจะใช้ BCH(63,51) ส่วนด้านรับนั้น หากตรวจพบว่ามีผิดพลาดข้อมูลด้วยการคำนวณสมการซินโดรมจะส่ง NACK ไปยังด้านส่งเพื่อร้องขอพริตตีบิต เฉพาะส่วนที่เป็นข้อมูล Medical เท่านั้นจึงจะมีการขอส่งใหม่แต่จะทำการส่งใหม่ การทำดังกล่าวจะต้องมีการบัพเฟอร์ข้อมูลทั้งส่วนข้อมูลและพริตตีบิตที่ด้านรับ การขอส่งข้อมูลจะสิ้นสุดก็ต่อเมื่อตรวจไม่พบข้อมูลผิดพลาดแล้วหรือจำนวนการขอให้ส่งซ้ำเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบดังตารางด้านล่าง

Channel	IEEE802.15.6 CM3
Pulse shape	Modulated RRC
Bandwidth	500MHz
Mod.Demod.	2PPM, Energy detection
Bit rate	2Mbps
Frame (Message) length	256 bits (1280bits)
Codeword	Data frame : (63,51) BCH codeword Parity frame (15,7) BCH parity bits
Decoding	Bounded distance decoding
ARQ protocol	Selective Repeat ARQ

ในการวัดประสิทธิภาพนั้น ได้กำหนดค่า M คือ Maximum number of transmission เมื่อ M เพิ่มขึ้นจะทำให้ BER ลดลง และเมื่อมีการมีการชนกันของแพคเกจมากขึ้นหรือกรณีมีข้อมูลผิดพลาดถึงข้อจำกัดของการส่งข้อมูลซ้ำแล้วประสิทธิภาพก็จะลดลงอย่างมากก็จะกลายเป็นข้อจำกัดเมื่อข้อมูลส่งถึงปลายทางเรียบร้อยแล้วก็จะส่งทำการลบออกจากบัพเฟอร์ หากพบว่าเวลาที่รอมีค่าเกินค่าที่ยอมรับได้ ค่า Delay จะต้องเพิ่มขึ้น และหากใช้การถอดรหัสที่ปลายทางให้มีความสามารถมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นหรือมีความซับซ้อนยิ่งขึ้นจะทำให้เวลาที่ใช้ในการรอลดลง อย่างไรก็ตามยังมีข้อที่เป็นจุดด้อยคือค่า Error rate ไม่สามารถควบคุมได้

3.10.5 “Raptor Codes in Wireless Body Area Networks.” [24]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการใช้ Raptor Codes ซึ่งเป็นการพัฒนาของรหัสแบบน้ำพุเดิมที่เป็นรหัส LT Code ให้เป็นการเข้ารหัสแบบสองชุดทำงานร่วมกัน เพื่อช่วยในการแก้ไขข้อผิดพลาด โดยประยุกต์ใช้ที่ขึ้นกายภาพของการสื่อสารแถบแคบ และใช้มอดูเลชันแบบ FSK และได้ทำการทดลองโดยใช้ช่องสัญญาณที่มีลักษณะสัญญาณรบกวนแบบต่อเนื่อง Gilbert-Elliott การเข้ารหัส Raptor เป็นรหัสสองแบบที่เชื่อมเข้าด้วยกันมีโดยขั้นตอนแรกจะทำการเข้ารหัสข้อมูลด้วยรหัสที่ระบุขนาด จากนั้นจึงทำการเข้ารหัสด้วยรหัส LT อีกครั้งหนึ่ง งานวิจัยนี้ใช้รหัสชุดในเป็นรหัส LT และใช้รหัสชุดนอกเป็นรหัส LDPC ข้อดีของรหัส Raptor คือสามารถที่จะปรับขนาดของความยาวบล็อกข้อมูลที่จะเข้ารหัสให้สามารถสอดคล้องกับลักษณะของช่องสัญญาณ ทำให้สามารถประหยัดพลังงานลงได้

3.10.6 “Adaptive Radio Transmit Power in Wireless Body Area Sensor Networks.” [25]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับอัตราการใช้พลังงานในการส่งข้อมูล ของเครื่องร่างกายไร้สาย โดยได้ทำการทดลองบนฮาร์ดแวร์ MicaZ ทำงานที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อหาระดับการส่งสัญญาณที่เหมาะสมที่สุด ใช้การวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ECG เป็นข้อมูลประกอบการทดลอง การทดลองใช้การจำลองลักษณะของการเคลื่อนไหวของร่างกายสามารถปรับรูปแบบคือ เดินช้า เดินเร็ว และหยุดนิ่ง การปรับอัตราพลังงานที่ใช้ส่งจะวัดจากค่า Received Signal Strength Indicator (RSSI) ซึ่งใช้เป็นค่าป้อนกลับจากตัวรับ การปรับอัตราพลังงานในการส่งมีขั้นตอนการพิจารณาดังนี้

1. ถ้า $R < T_L$ จะทำการปรับอัตราการส่งไปที่ระดับสูงสุด
2. ถ้า $T_L \leq R \leq T_H$ จะไม่ทำการปรับระดับอัตราการส่ง
3. ถ้าค่า RSSI มีระดับเกินกว่า T_H ไปเป็นระยะเวลาจำนวน N ระบบจะพิจารณาปรับระดับ

พลังงานในการส่งลง ผลการทดลองพบว่าการใช้รูปแบบอัตราการปรับพลังงานส่งสามารถลดพลังงานลงได้ 9% เมื่อเทียบกับอัตราการส่งสูงสุดแบบอัตราพลังงานส่งคงที่

โดยที่ N คือค่าที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ N เท่ากับ 10 วินาที และระดับการปรับพลังที่ละสองระดับ T_H กำหนดไว้ที่ -80 dBm และ T_L กำหนดไว้ที่ -85 dBm

3.10.7 “Continuous Health Condition Monitoring by 24x7 Sensing and Transmission of Physiological data over 5-G Cellular Channels.” [26]

งานวิจัยได้นำเสนอระบบที่เฝ้าระวังและวัดสัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (ECG) ตลอด 24 ชั่วโมง โดยใช้เครือข่ายร่างกายไร้สาย ร่วมกับระบบการสื่อสาร GSM 5-G เพื่อให้สามารถเข้าถึงผู้ป่วยที่อยู่ในพื้นที่ห่างไกลได้ และเป็นการป้องกันปัญหาสุขภาพของโรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจ และระบบที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำเสนอต้องการให้ใช้พลังงานในระดับต่ำ ผู้วิจัยได้นำเสนอการวิธีการลดจำนวนการส่งข้อมูลด้วยการบีบอัดข้อมูลแล้วส่งออกเสมือนกับข้อความ แล้วทำการส่งออกผ่านช่องสัญญาณเสียง (voice channel) เนื่องจากหากทำการส่งข้อมูลที่วัดได้ทั้งหมดออกไปผ่านเครือข่ายไร้สายแล้ว จะทำให้มีการใช้พลังงานที่ใช้ในการส่งมาก ก่อนการส่งเพื่อให้ประหยัดทั้งพื้นที่และพลังงาน ผู้วิจัยได้ทำการจัดเรียงข้อมูลและใช้วิธีการทำนายข้อมูล (predict data) ผลการทดลองสามารถลดปริมาณการส่งข้อมูลลงซึ่งทำให้อัตราการใช้พลังงานของระบบลดลงไปด้วย งานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าระบบการการเฝ้าระวังปัญหาสุขภาพ ถูกพัฒนาให้มีการใช้งานแบบไร้สายเพื่อให้สามารถเข้าถึงผู้ป่วยได้ตลอดเวลา

3.10.8 “Preliminary Evaluation for an ECG Monitoring System.” [27]

งานวิจัยได้นำเสนอระบบรูปแบบการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ด้วยการใช้เครือข่ายร่างกายไร้สาย แต่เป็นรูปแบบของอัตราการส่งข้อมูลต่ำด้วยการสื่อสารผ่านเครือข่าย Zigbee ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการสื่อสารไร้สายที่ใช้อัตราส่งข้อมูลต่ำ IEEE 802.15.4 งานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การเฝ้าระวังและวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจของผู้ป่วย ตลอดเวลา ทุกอิริยาบถ รวมถึงการใช้ชีวิตประจำวันที่บ้าน ผู้วิจัยได้ออกแบบเซนเซอร์สำหรับวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจอย่างง่ายประกอบด้วย อิเล็กโทรดจำนวนสามชุด ตามหลักการของสามเหลี่ยม Einthoven และส่งสัญญาณเพียงช่องเดียว และบรรจุลงบนแผงวงจรขนาด 16×33 มิลลิเมตร เพื่อให้สะดวกในการสวมใส่กับร่างกาย ผลที่ได้พบว่าสัญญาณที่วัดได้มีแรงน้อยมาก เป็นระดับ 2 มิลลิโวลต์ ปัญหาที่พบคือการใช้พลังงานทำให้อายุการใช้งานของระบบมีข้อจำกัด สัญญาณที่วัดได้มีค่าต่ำและมีสัญญาณรบกวนสูง จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่า การวัดสัญญาณทางการแพทย์โดยเฉพาะคลื่นไฟฟ้าหัวใจนั้น จะมีประโยชน์มากหากสามารถใช้ร่วมกับระบบไร้สาย และอุปกรณ์ที่ใช้ไม่เป็นอุปสรรคต่อการใช้ชีวิตประจำวัน และไม่จำกัดเวลาหรือสถานที่ ก็สามารถช่วยให้บุคลากรวิเคราะห์หรือช่วยเหลือผู้ป่วยได้

3.10.9 “Iterative Soft Decoding of Reed-Solomon Codes.” [28]

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการตัดสินใจระหว่าง การตัดสินใจแบบหยาบและการตัดสินใจแบบละเอียด โดยการทดลองที่จำนวนรอบในการพิจารณาตรวจผลข้อผิดพลาดที่ 300 รอบ ทำการทดลองที่รหัส RS(15,7) และ RS(31,25) โดยใช้ช่องสัญญาณเกาส์เซียนสีขาวแบบบวกและช่องสัญญาณเรย์เลห์ ผลการทดลองที่ช่องสัญญาณเรย์เลห์ของรหัส RS(15,7) พบว่าการตัดสินใจแบบละเอียดจะให้ประสิทธิภาพดีกว่าการตัดสินใจแบบหยาบ ทำให้ได้อัตราการขยาย 8.8 dB หากเปรียบเทียบกับอัตราบิดผิดพลาด และจำนวน 5 dB เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราสัญลักษณ์ที่ผิดพลาด ดังแสดงในรูป อย่างไรก็ตามการตัดสินใจแบบละเอียดก็ยังมีข้อด้อย เมื่อใช้งานกับรหัสที่มีความยาวมากขึ้น เช่นที่รหัส RS(63,55) จะทำให้อัตราขยายที่ได้รับลดลงเหลือเพียง 0.6 dB เมื่อเทียบกับการตัดสินใจแบบหยาบ นอกจากนี้ความซับซ้อนของการออกแบบและการพิจารณาปรับรอบก็ยังคงสูงอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

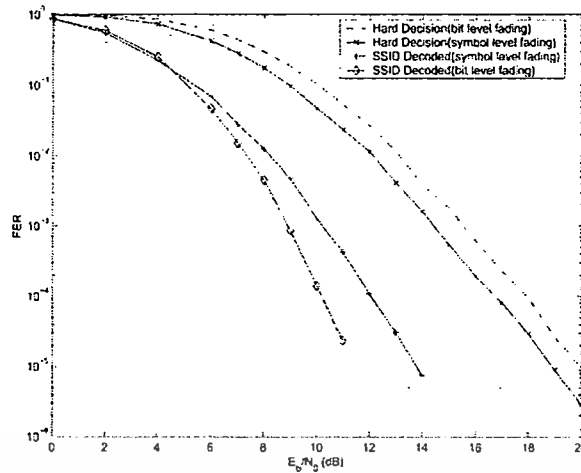


Fig. 2. RS (15,7) code with BPSK modulation over Rayleigh fading channel under SSID decoding.

ปัจจุบันรหัสควบคุมความผิดพลาดมีให้เลือกใช้งานเป็นจำนวนมาก ตามแต่ลักษณะการใช้งานของแต่ละงานประยุกต์ โดยทั่วไปงานประยุกต์ที่ต้องการความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดสูง ก็จะต้องใช้วงจรเข้ารหัสและวงจรถอดรหัสที่มีความซับซ้อนสูงมากเช่นกัน จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเรื่องเครือข่ายร่างกายไร้สายพบว่า ในงานที่ต้องการการสื่อสารที่มีความเร็วสูงนั้น ชั้นกายภาพการสื่อสารแถบความถี่กว้างยิ่งจะเหมาะสมสำหรับงานประเภทนี้ และในการสื่อสารที่เป็นเวลาจริงและมีความสำคัญต่อผู้ป่วยนั้น โดยลักษณะของข้อมูลจะต้องมีความแม่นยำ และหากพบข้อผิดพลาดระบบก็ควรจะสามารถแก้ไขได้โดยไม่ต้องทำการร้องขอเพื่อส่งซ้ำ เนื่องจากสัญญาณบางอย่างนั้นไม่สามารถรอเวลาหรือทำให้เกิดสัญญาณแบบเดิมขึ้นอีกได้ ดังนั้นการมีระบบที่สามารถตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดได้นั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยลักษณะการใช้งานของระบบเครือข่ายไร้สายเองมักจะมีการเคลื่อนที่เนื่องจากติดตามตัวผู้ป่วย ดังนั้นลักษณะสัญญาณรบกวนก็จะเปลี่ยนแปลงไปบ่อยด้วย การปรับอัตรารหัสที่มีความเหมาะสม เช่นเมื่อมีสัญญาณรบกวนต่ำก็ให้รับไปใช้อัตรารหัสที่สูงขึ้นโดยที่ยังคงคุณสมบัติของการผิดพลาดต่ำ ๆ ก็จะทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ และจากงานวิจัยที่ได้ศึกษาพบว่าการสามารถปรับอัตราพลังงานที่ใช้ในการส่งที่เหมาะสมนั้น จะสามารถประหยัดพลังงานลงได้เมื่อเทียบกับอัตราการส่งแบบคงที่

เพื่อพิจารณาอัลกอริทึมการเข้ารหัสที่เหมาะสมจึงได้เปรียบเทียบคุณสมบัติของรหัสควบคุมความผิดพลาดต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 การเปรียบเทียบรหัสควบคุมความผิดพลาดแบบต่าง ๆ

รหัส	ข้อดี	ข้อเสีย
RS	สามารถแก้ไขสัญญาณรบกวนแบบต่อเนื่องได้ดี เนื่องจากการแก้ไขข้อผิดพลาดจะทำให้ได้ทั้งบล็อกถึงแม้ในบล็อกนั้นจะมีข้อมูลหลายบิต	มีความยุ่งยากในการถอดรหัสมากกว่า BCH
BCH	คำรหัสมีค่าเป็นเลขฐานสอง เวลาแก้คืนข้อมูลไม่ต้องทำการหาค่า หาเพียงตำแหน่ง ทำให้ง่ายในการถอดรหัสกว่า RS	ระยะแอมมิงน้อยกว่า รหัสรีด-โซโลมอน
Fountain Code	ไม่ต้องมีการตรวจสอบย้อนกลับระหว่างด้านรับและด้านส่ง เนื่องจากใช้สมมุติฐานว่าหากด้านส่งทำการส่งข้อมูลที่มากพอและด้านรับมีความสามารถรับได้ก็เพียงพอในการแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาด	สิ้นเปลืองพลังงานในการส่งข้อมูล เนื่องจากต้องส่งเพื่อให้มากไว้ก่อน ทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำ
HARQ	ประหยัดพลังงานหากสภาพแวดล้อมมีสัญญาณรบกวนต่ำและอัตราบิตผิดพลาดต่ำ	ต้องมีการเตรียมบัฟเฟอร์ทั้งด้านรับและด้านส่งไม่เหมาะกับงานที่ต้องการตอบสนองทันทีหากสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนมากจะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมลดลง

งานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอกรรมวิธีในการตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาด โดยใช้รหัสรีด-โซโลมอน ในขั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อ ของมาตรฐาน IEEE 802.15.6 ซึ่งมีขนาด 255 ไบต์ ซึ่งเป็นบล็อกข้อมูลขนาดที่ลงตัวกับกาลัวร์ฟิลด์ $GF(256)$ อัตรารหัส (Code rate) จะมีการปรับเปลี่ยนระหว่าง 0.37 ถึง 0.94 โดยจะทำการปรับเปลี่ยนแบบอัตโนมัติขึ้นอยู่กับอัตราบิตผิดพลาด การทดสอบประสิทธิภาพของระบบจะใช้ชุดข้อมูลคลื่นไฟฟ้าหัวใจจาก MIT-BIH Arrhythmia Database และได้ทำการเปรียบเทียบถึงการประหยัดพลังงานของระบบที่นำเสนอ

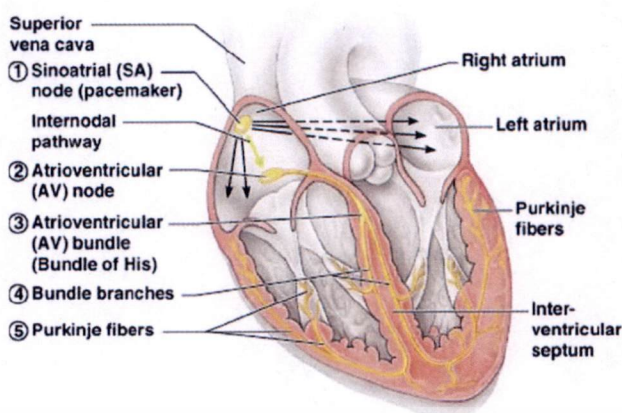
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รหัสควบคุมความผิดพลาดแบบปรับอัตรารหัสได้

การเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นทำให้สามารถตรวจจับ และแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารข้อมูลได้ ความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดขึ้นอยู่กับจำนวนบิตตรวจสอบที่ใส่เพิ่มเข้าไปในข้อมูลเดิม ยิ่งเพิ่มบิตที่ใช้ในการตรวจสอบเข้าไปมากเท่าใด ก็ยิ่งทำให้ความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่จำนวนข้อมูลที่ส่งได้ต่อครั้งจะลดลง ดังนั้นการเลือกค่าที่เหมาะสมระหว่างอัตรารหัสและความเร็วในการสื่อสาร จึงเป็นเรื่องที่ควรพิจารณาและให้ความสำคัญ หากเลือกค่าที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้ได้ทั้งประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดและประสิทธิภาพการสื่อสารข้อมูล

4.1 การเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจและระยะเวลาที่สำคัญของแต่ละช่วงคลื่น

คลื่นไฟฟ้าหัวใจเกิดจากการไหลของกระแสไฟฟ้าในหัวใจ ที่มีการเคลื่อนที่ผ่านจุดต่าง ๆ ของหัวใจตามจังหวะการสูบและฉีดเลือดเพื่อไปเลี้ยงร่างกาย หัวใจของคนแบ่งออกตามลักษณะทางกายภาพได้เป็นสี่ห้อง คือห้องบนด้านซ้ายและขวา และห้องด้านล่างซ้ายและขวาเช่นกัน ด้านบนเรียกว่า Atrium ด้านล่างเรียกว่า Ventricle การสูบฉีดเลือดไปเลี้ยงร่างกายนั้นเริ่มจากห้องหัวใจด้านบนขวา (Right atrium) รับเลือดที่ผ่านการใช้งานแล้วของร่างกายซึ่งจะถูกลำเลียงเข้ามาทางเส้นเลือดดำ แล้วส่งผ่านไปยังห้องหัวใจด้านล่างขวา (Right ventricle) จากนั้นเลือดนี้จะถูกส่งออกไปยังปอดเพื่อฟอกด้วยออกซิเจน เลือดที่ถูกฟอกด้วยออกซิเจนแล้ว จะถูกส่งย้อนกลับเข้ามายังหัวใจอีกครั้งหนึ่งที่ห้องหัวใจด้านบนซ้าย (Left atrium) และส่งผ่านลงไปยังห้องหัวใจด้านล่างซ้ายซึ่งเป็นห้องที่มีขนาดใหญ่กว่าห้องหัวใจอื่น ที่ห้องหัวใจด้านล่างซ้ายนี้จะทำการส่งเลือดไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายผ่านเส้นเลือดแดงออกไป จากการทำงานของหัวใจและการเดินทางของเลือดนั้น สามารถเกิดเป็นคลื่นไฟฟ้าได้ โดยการเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจนั้น จะเกิดมาจากปรากฏการณ์สามแบบคือปรากฏการณ์ Depolarization ซึ่งเป็นการกระตุ้นทางไฟฟ้า ที่กระจายไปทั่วผนังเซลล์ของกล้ามเนื้อหัวใจแล้วแผ่ไปยังเซลล์อื่น ๆ ทำให้ประจุไฟฟ้าที่ผนังเซลล์กลับเป็นตรงข้ามจากเดิม คือผิวเซลล์ด้านนอกจะกลับเป็นประจุลบและผิวเซลล์ด้านในจะกลับเป็นประจุบวก

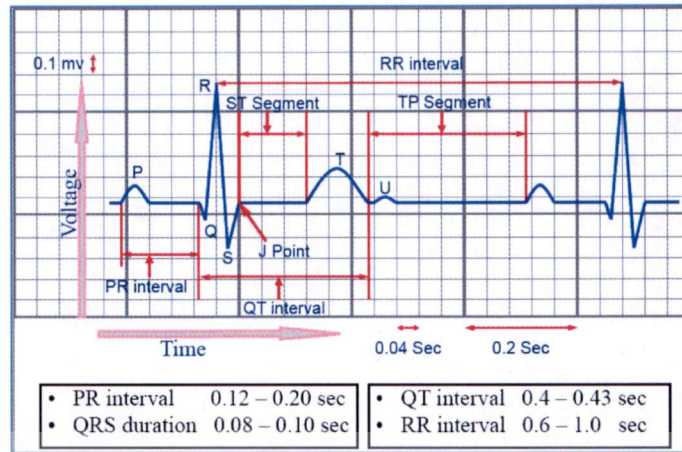


รูปที่ 4.1 องค์ประกอบของหัวใจ [29]

ปรากฏการณ์ Polarization เป็นภาวะปกติธรรมดาขณะพักหรือหยุดนิ่ง ของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ และปรากฏการณ์ Repolarization จะเป็นกรกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลใหม่หลังจากที่ประจุไฟฟ้าได้ผ่านไปทั่วเซลล์แล้ว องค์ประกอบของหัวใจที่ก่อให้เกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแสดงดังรูปที่ 4.1

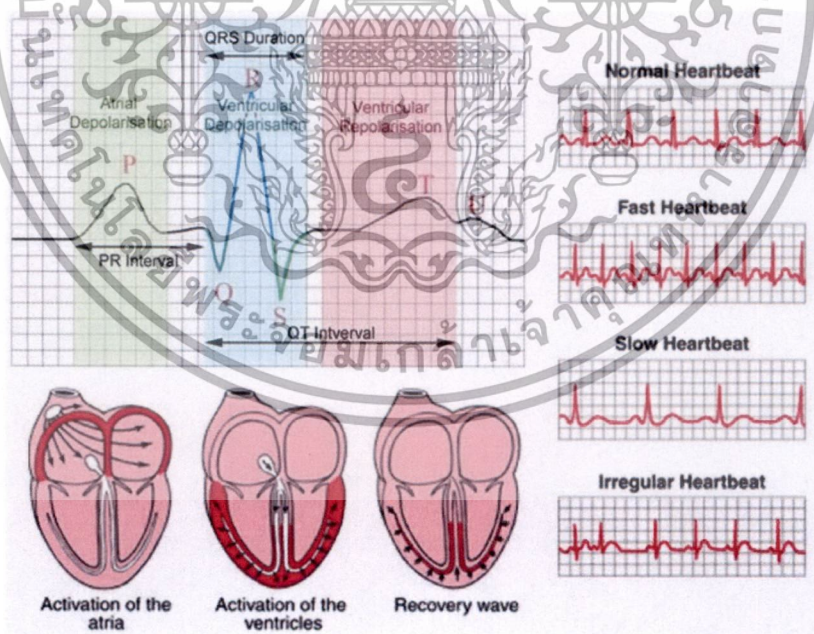
การเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจมีความสัมพันธ์กับการสูบฉีดเลือดของหัวใจเช่นกัน โดยมีจุดกำเนิดเริ่มต้นจาก Sinus node (SA node) ผ่านไปยัง Atrioventricular (AV node) ทำให้เกิด P wave จากนั้น AV node จะทำการหน่วงสัญญาณไฟฟ้าก่อนจึงส่งให้ Bundle of His ซึ่งจะทำให้เกิด PR interval เมื่อสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยัง Bundle branch ทั้งสองข้าง จึงเกิด depolarization ของ Ventricle ทำให้เกิด QRS complex จากนั้นการเกิด repolarization ของ Ventricle จะทำให้ได้ T wave ค่าช่วงเวลาของแต่ละรูปคลื่นในสภาวะหัวใจปกติแสดงดังรูปที่ 4.2 แกนนอนแสดงเป็นหน่วยเวลา โดยช่องที่เล็กที่สุดมีค่า 40 มิลลิวินาที จากรูปจะเห็นว่าส่วนย่อยที่สั้นที่สุดที่สามารถนำไปใช้ในการวินิจฉัยโรคที่ผิดปกติของหัวใจคือส่วนย่อย PR ซึ่งเป็นช่วงสิ้นสุดของปลายคลื่น P ก่อนที่จะเริ่มการเกิดคลื่น QRS ค่าเวลานี้เกิดขึ้นโดยใช้เวลาประมาณ 50 มิลลิวินาที ซึ่งหากเทียบกับแกนนอนจะมีความยาวประมาณหนึ่งช่องหรือมากกว่าในแนวแกนตั้งเป็นการแสดงค่าแอมพลิจูดของคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ซึ่งหน่วยที่วัดเป็นมิลลิโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 คลื่นไฟฟ้าหัวใจของคนปกติ [29]

ความผิดปกติของหัวใจ สามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟการวัดคลื่นหัวใจโดยการพิจารณาช่วงคลื่นต่าง ๆ การผิดปกติของหัวใจนั้นอาจจะแสดงมาในรูปของการขาดหายไปของคลื่น ช่วงใดช่วงหนึ่งหรือการปรากฏคลื่นที่ไม่ควรมีในขณะที่หัวใจทำงานปกติ การเกิดคลื่นที่แคบเกินไปหรือกว้างเกินไปซึ่งบางครั้งอาจจะหายไปเลยตลอดเวลา หรือปรากฏมีบ้างเป็นบางครั้ง กราฟการเต้นของหัวใจปกติและผิดปกติแสดงการเปรียบเทียบดังกราฟคลื่นไฟฟ้าหัวใจได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบคลื่นไฟฟ้าหัวใจปกติและผิดปกติ [29]

ค่าเวลาที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงคลื่นของการเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ แสดงได้ดังในตารางที่ 4.1

คลื่นไฟฟ้าหัวใจที่เกิดจากการทำงานผิดปกติ (Arrhythmia) นั้น เช่น อัตราการเต้นหัวใจอาจจะเร็วกว่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือช้ากว่าคนปกติทั่วไป ซึ่งในคนปกติทั่วไปอัตราการเต้นของหัวใจจะอยู่ระหว่าง 60 ถึง 100 ครั้งต่อนาที หากหัวใจเต้นช้ากว่า 40 ครั้งต่อนาทีจะเข้าข่ายผู้ป่วยหัวใจเต้นช้า (Bradycardia) และหากอัตราการเต้นของหัวใจมากกว่า 120 ครั้งต่อนาทีจะเข้าข่ายผู้ป่วยหัวใจเต้นเร็วผิดปกติ (Tachycardia) นอกจากนี้คลื่นไฟฟ้าหัวใจที่วัดได้ในช่วงใดช่วงหนึ่งอาจจะยาวกว่า หรือสั้นกว่าคลื่นหัวใจคนปกติ บางครั้งอาจจะสูงหรือต่ำผิดปกติ หรืออาจจะขาดหายไปไม่มีคลื่นไฟฟ้า ดังนั้นการออกแบบระบบจะต้องพิจารณาค่าที่เกี่ยวข้อง โดยจะต้องครอบคลุมสถานการณ์ที่เลวร้ายสุด คือเป็นช่วงคลื่นที่แคบที่สุดของคลื่นไฟฟ้าหัวใจและเป็นช่วงที่การเต้นหัวใจช้าที่สุด

ตารางที่ 4.1 ช่วงเวลาการเกิดรูปคลื่นไฟฟ้าหัวใจในสภาวะปกติ

ช่วงคลื่น	คำอธิบาย	ระยะเวลา
ระยะ RR	การวัดค่าระหว่างคลื่นหัวใจ R ซึ่งแสดงถึงอัตราการเต้นของหัวใจ	0.6 – 1.0 วินาที
คลื่น P	การเกิด Atrial depolarization จาก SA node ไปยัง AV node เกิด depolarization ขึ้นที่ atrium ทั้งซ้ายและขวา ก่อนที่ atrium ทั้งสองข้างจะบีบตัว	80 มิลลิวินาที
ระยะ PR	วัดจากจุดเริ่มต้นของ P wave ไปยังจุดเริ่มต้นของ QRS complex ซึ่งเกิดจาก Atrial depolarization และการหน่วงเวลาของ AV junction	120 – 200 มิลลิวินาที
ส่วนย่อย PR	เป็นส่วนที่อยู่ระหว่างปลาย P wave กับ QRS complex	50 – 120 มิลลิวินาที
QRS complex	เกิดจาก Ventricular depolarization ของ Interventricular septum จากซ้ายไปขวาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว	80 – 120 มิลลิวินาที
ส่วนย่อย ST	เป็นระยะรอยต่อระหว่างจุดสิ้นสุดของ QRS complex กับ T wave	80 – 120 มิลลิวินาที
คลื่น T	เกิดจากการ Repolarization ของ Ventricular	160 มิลลิวินาที
ระยะ QT	เป็นระยะที่วัดจากจุดเริ่มต้นของ QRS complex และจุดสิ้นสุดของ T wave	กว้างถึง 440 มิลลิวินาที

ในการใช้คลื่นไฟฟ้าหัวใจประกอบการวินิจฉัยโรคที่เกี่ยวข้องนั้น จะต้องใช้ข้อมูลคลื่นไฟฟ้าหัวใจเต็มช่วงคลื่น ขั้นตอนการวินิจฉัยประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้ [30]

1. การตรวจคุณภาพรวม (General Impression and calibration) เป็นการพิจารณาดูว่าคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่รับมานั้นดูดีเพียงใด หัวใจเต้นช้าไป หรือเร็วไป มีความผิดปกติของรูปคลื่นเพียงใด ในขั้นตอนนี้สามารถทราบถึงอัตราการเต้นของหัวใจ แอมพลิจูดที่ได้สูงหรือต่ำเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหาอัตราการเต้นของหัวใจ (Heart rate หรือ HR) ซึ่งสามารถคำนวณจากระยะเวลาระหว่างคลื่น RR ซึ่งอัตราการเต้นของหัวใจคำนวณได้จาก

$$HR = \frac{60}{R - R \text{ interval in second}} \quad (4.1)$$

ปกติแล้วคลื่นไฟฟ้าหัวใจ R จะมีแอมพลิจูดสูงที่สุดของคลื่นไฟฟ้าหัวใจ หากคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่มีความผิดปกติ หรือเกิดความผิดปกติจากการวัด คืออาจจะทำให้การวินิจฉัยคลาดเคลื่อนได้

3. การประเมินคลื่น QRS (QRS Assessment) การพิจารณานี้จะทำให้ทราบลักษณะของโรคหลายประการ เช่น Bundle Branch Block ซึ่งจะขัดขวางการเคลื่อนที่ของคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ไม่ให้คลื่นสามารถวิ่งผ่านหัวใจไปโดยสะดวก หรือรวมไปถึงลิ้นหัวใจขยายใหญ่เกินไป

4. โรคกล้ามเนื้อหัวใจขยาย (Hypertrophy) ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งห้องหัวใจด้านบนและห้องหัวใจด้านล่าง ลักษณะดังกล่าวสังเกตได้จากแอมพลิจูดของคลื่น R และ S

5. โรคหัวใจขาดเลือด (Ischemia Infarction) เกิดจากการที่เลือดไม่สามารถส่งไปเลี้ยงเส้นใยของหัวใจไม่เพียงพอ

4.2 ปัจจัยประกอบการพิจารณาในการปรับอัตราพัลส์

การวัดประสิทธิภาพของช่องสัญญาณเมื่อส่งสัญญาณจากผู้ส่งไปยังผู้รับ จะวัดออกมาเป็นหน่วยของอัตราบิดผิดพลาด เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเรื่องความเชื่อถือได้ของระบบในการสื่อสารข้อมูล ดังนั้นอัตราพัลส์ข้อมูลจะเริ่มที่อัตราต่ำสุดก่อน เพื่อรับประกันว่าข้อมูลที่ส่งจะถูกตรวจจับและแก้ไขข้อผิดพลาดได้โดยเร็ว ถึงแม้ช่องสัญญาณหรือสภาพแวดล้อมการใช้งานในขณะนั้นจะมีสัญญาณรบกวนมาก

4.2.1 เกณฑ์การพิจารณาในการปรับค่าอัตราพัลส์

จากคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ใช้ประกอบในการวินิจฉัยโรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจ พบว่าจะต้องใช้คลื่นไฟฟ้าหัวใจเต็มช่วงคลื่น [30] ซึ่งการออกแบบระบบจะต้องครอบคลุมทุกลักษณะของหัวใจ ทั้งคนที่หัวใจเต้นช้าที่อัตรา 30 ครั้งต่อนาที ในกินเนสส์บุ๊คว่าคนหัวใจเต้นช้าต่ำสุดถึง 27 ครั้งต่อนาที [31] หากพิจารณาปรับอัตราพัลส์ทุก ๆ หนึ่งช่วงคลื่นการเต้นของหัวใจ เวลาที่ใช้ในการปรับอัตราพัลส์จะเป็น 0.5 วินาที สำหรับคนที่หัวใจเต้นเร็วที่อัตรา 120 ครั้งต่อนาที 1 วินาทีสำหรับคนที่หัวใจเต้นปกติที่อัตรา 60 ครั้งต่อนาที และ 2 วินาทีสำหรับคนที่มีอัตราการเต้นหัวใจช้าที่ 30 ครั้งต่อ ซึ่งหากใช้ค่าอ้างอิงนี้จะพบว่าการพิจารณาปรับอัตราพัลส์เร็วที่สุดที่ทุก ๆ 0.5 วินาที เมื่อเทียบกับอริยาบทของการใช้ชีวิตประจำวันแล้ว ที่ระยะเวลา 0.5 วินาทีร่างกายอาจจะยังมีการเคลื่อนไหวไม่มากนัก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอริยาบทของร่างกายก็คือการเปลี่ยนแปลงของแบบจำลองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อสังเกตตนเอง ในงานวิจัย [25] ได้มีการทดลองวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ ได้มีการกำหนดค่าเวลาในการพิจารณาปรับอัตราการสัที่ทุก ๆ 10 วินาที ซึ่งค่าดังกล่าวได้มาจากการประเมินการใช้ชีวิตประจำวันพบว่า ร่างกายมีอริยาบถอยู่สามรูปแบบคือ หยุดนิ่งไม่เคลื่อนที่ เคลื่อนที่ช้า และเคลื่อนที่เร็วเมื่อประเมินการใช้ชีวิตตลอดทั้งวัน จึงกำหนดค่าการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยอยู่ที่ 10 วินาที อย่างไรก็ตามในการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบที่ค่าเวลาต่าง ๆ ทั้งน้อยกว่า และมากกว่า คือ การพิจารณาที่ 1 วินาที ซึ่งเทียบเท่ากับการเต้นหัวใจของคนปกติ 1 ช่วงคลื่น และที่ระยะเวลา 20 วินาที ซึ่งมีค่าเท่ากับการเต้นหัวใจของคนปกติ 20 ช่วงคลื่น

หากพิจารณาการปรับอัตราการสัที่ทุก ๆ 10 วินาที จะได้จำนวนคลื่นไฟฟ้าหัวใจสำหรับที่อัตราการเต้นต่าง ๆ กันแสดงในรูป 4.4 และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 การเต้นของหัวใจระยะเวลา 10 วินาที

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ระบุว่าอัตราบิตผิดพลาดที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานทางการแพทย์ อยู่ที่อัตรา 10^{-4} ซึ่งหมายถึงการยอมรับความผิดพลาดของข้อมูล จำนวนหนึ่งบิตต่อการส่งข้อมูลหนึ่งหมื่นบิต การพิจารณาปรับอัตราการสัที่ทุก ๆ 10 วินาที และใช้อัตราความถี่สุ่มขนาด 360 เฮิร์ตซ์ ความละเอียดในการสุ่ม 11 บิต และเป็นเครื่องมือแบบสองหัวอ่าน จะทำให้ได้ค่าที่เกี่ยวข้องดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าที่เกี่ยวข้องเมื่อหัวใจเต้นที่ระยะเวลา 10 วินาที

อัตราการเต้นหัวใจ	30 ครั้ง ต่อนาที	60 ครั้งต่อนาที	120 ครั้งต่อนาที
เวลาที่ใช้ในหนึ่งคลื่นหัวใจ (วินาที)	2	1	0.5
จำนวนคลื่นหัวใจในเวลา 10 วินาที	5	10	20
เวลาในการสุ่ม (วินาที)	0.002778	0.002778	0.002778
แบนด์วิดท์ที่ต้องใช้ (bit)	39,600	79,200	158,400
ความเร็วช่องสัญญาณที่ต้องใช้ (bps)	3,960	7,920	15,840

4.3 สมมติฐาน

4.3.1 การเลือกใช้แบบจำลองช่องสัญญาณสื่อสาร จากสภาพการใช้งานของเครือข่ายร่างกายไร้สายซึ่งจะมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก และมักจะเกิดการเลี้ยวเบน การหักเห และการจางหายของคลื่น ทำให้การเคลื่อนที่แบบหลายทิศทางมีโอกาสจะเกิดขึ้นมากกว่าการสื่อสารทางตรง เพราะผลของลักษณะทางกายภาพของร่างกายคน ซึ่งแบบจำลองที่สามารถใช้งานได้จะต้องเป็นประเภทการจางหายมาตรฐานเล็ก ซึ่งเป็นไปได้ทั้งแบบจำลองโรเซียน และแบบจำลองเรย์เลห์ ปัจจัยที่ใช้เลือกแบบจำลองจึงขึ้นอยู่กับค่า k factor แบบจำลองของ โรเซียน เป็นแบบจำลองที่มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับการนำมาใช้งานในเครือข่ายร่างกายไร้สาย [32] เพราะเป็นแบบจำลองที่ได้รวบรวมลักษณะต่าง ๆ ตามที่กล่าวมา

4.3.2 ขนาดบล็อกข้อมูลที่ขึ้นควบคุมการเข้าถึงคือ 255 ไบต์

4.3.3 อัตรารหัสเริ่มต้นที่อัตรารหัสต่ำสุดก่อนที่ 0.37 เนื่องจากต้องการให้ระบบมีความน่าเชื่อถือได้สูง

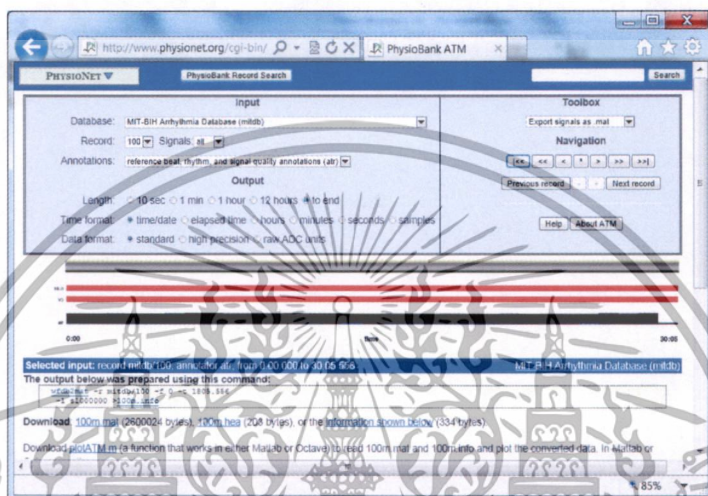
4.3.4 จำนวนรอบในการพิจารณาในการปรับอัตรารหัส พิจารณาที่ทุก ๆ 10 วินาที ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของลักษณะการเคลื่อนไหวของร่างกายทั้งวัน โดยเทียบกับที่ระยะเวลา 1 และ 20 วินาที

4.3.5 ข้อกำหนดในการตัดสินใจพิจารณาปรับอัตรารหัส อ้างอิงอัตราบิดผิดพลาดที่ระดับ 10^{-4}

4.3.6 ปรับอัตรารหัสขึ้นครั้งละหนึ่งระดับ และปรับอัตรารหัสลงครั้งละสองระดับเนื่องจากต้องการให้ปรับอัตรารหัสลงอย่างรวดเร็ว หากการตรวจสอบอัตราบิดผิดพลาดมีค่าสอดคล้องกับข้อกำหนด

4.4 การเลือกใช้ข้อมูลอินพุต

เพื่อเป็นการทดสอบว่ารหัสรีด-โซโลมอนนั้นสามารถทำงานได้ในสภาพข้อมูลจริง จึงได้ใช้ข้อมูลการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่เป็นข้อมูลของผู้ป่วยจริงจาก MIT-BIH Arrhythmia database เพื่อทำการทดสอบ การนำข้อมูลมาใช้นั้นสามารถดาวน์โหลดได้จาก www.physionet.org และเลือกในส่วนที่เป็น PhysioBankATM [33] ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการนำข้อมูลคลื่นไฟฟ้าหัวใจมาใช้เป็นข้อมูลอินพุต [34]

ฐานข้อมูล MIT-BIH Arrhythmia นั้น เป็นการจัดเก็บจากตัวอย่างของผู้ป่วย โดยความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีแห่งแมสซาชูเซตส์ (MIT) ร่วมกับโรงพยาบาล Boston Beth Israel Hospital (BIH) ฐานข้อมูลนี้มี 48 ตัวอย่างชุดข้อมูล โดยเก็บตัวอย่างจากผู้ป่วยจำนวน 47 คน ทำการเก็บข้อมูลระหว่างปี 1975 ถึง 1979 ความยาวในการเก็บข้อมูลชุดละประมาณครึ่งชั่วโมง อัตราการสุ่มที่ใช้ในการบันทึก 360 ตัวอย่างต่อวินาที ด้วยความละเอียด 11 บิต และมีย่านแอมพลิจูดสูงสุด 10mV ในการนำเอาฐานข้อมูลมาใช้งานกับ MATLAB นั้นจะต้องระบุชื่อชุดข้อมูลที่ต้องการความยาวของข้อมูล รูปแบบของข้อมูล จากตัวอย่างนี้เป็นการเลือกใช้ชื่อชุดข้อมูลหมายเลข 100 และเลือกตัวอย่างข้อมูลทั้งหมดคือ 30 นาที และให้ทำการเก็บเป็นไฟล์ชื่อ 100m.mat จะได้ไฟล์ข้อมูลขนาดประมาณ 2.6 เมกะไบต์ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานกับซอฟต์แวร์ MATLAB ได้ทันที ในแต่ละชุดข้อมูล จะมีไฟล์ส่วนหัวเพื่อบอกให้ทราบเกี่ยวกับข้อมูลของชุดข้อมูลนั้น เช่น จากรูปที่ 4.6 เป็นไฟล์ส่วนหัวข้อมูลสำคัญมีดังนี้ จากบรรทัดที่หนึ่ง 100 เป็นชื่อชุดข้อมูล 2 หมายถึงการวัดนี้ใช้เครื่องมือแบบมี 2 หัววัด 360 เป็นอัตราการสุ่มข้อมูลหน่วยเป็นเฮิร์ตซ์ 650,000 เป็นจำนวนข้อมูลที่บันทึกข้อมูลในบรรทัดที่สองและสามคือ ความละเอียดของข้อมูลที่มีการจัดเก็บขนาด 11 บิต บรรทัดที่สี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบุว่าผู้ป่วยเป็นเพศชาย มีอายุ 69 ปี x หมายถึงเป็นผู้ป่วยที่ไม่พบคลื่น P จากการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ บรรทัดที่ห้าแนะนำว่ายาที่ใช้ในการรักษาโรคนี้นี้ชื่อ Aldomet และ Inderal

```
100 2 360 650000
100.dat 212 200 11 1024 995 -22131 0 MLII
100.dat 212 200 11 1024 1011 20052 0 V5
# 69 M 1085 1629 x1
# Aldomet, Inderal
```

รูปที่ 4.6 ตัวอย่างไฟล์ส่วนหัวของ ไฟล์ชื่อ 100m.mat

การนำข้อมูลมาใช้เป็นอินพุต ต้องทำการแปลงข้อมูลที่เป็นเลขฐานสิบ ให้เป็นเลขฐานสองก่อน และเพื่อให้ใกล้เคียงกับขนาดของสนามจำกัดการลัว จึงแปลงเป็นเลขฐานสองขนาด 8 บิต ตัวอย่างของข้อมูลฐานสิบแสดงดังรูปที่ 4.7

955	955	955	955	955	955	955	955	958	960
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

รูปที่ 4.7 ตัวอย่างข้อมูลของชุดข้อมูลหมายเลข 101 จำนวน 10 ค่าแรก

การนำชุดข้อมูลที่เป็นเลขฐานสิบมาใช้งานนั้น จะต้องทำการแปลงให้เป็นเลขฐานสองก่อน เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ใช้รหัสรีด-โซโลมอน ที่มีขนาดของสัญลักษณ์ 8 บิต จึงได้ทำการแปลงข้อมูลเดิมก่อน โดยจะทำการอ่านข้อมูลขนาดที่เท่ากับบล็อกข้อมูล k จากนั้นต้องเทียบเคียงกับค่าสูงสุดทั้งหมดของชุดข้อมูลก่อน เนื่องจากขนาดของข้อมูลฐานสองจำนวนแปดบิต จะสามารถรองรับข้อมูลฐานสิบได้มากที่สุด อยู่ระหว่าง 0 – 255 เท่านั้น จากนั้นแปลงให้อยู่ในรูปเลขฐานสองจำนวนแปดบิต ซึ่งเป็นขนาดเท่ากับ $GF(8)$ ได้พอดี เช่นจำนวน 955 ทำการแปลงเป็นเลขฐานสองขนาด 8 บิต ดังนี้

1. อ่านข้อมูลจากฐานข้อมูลจำนวนเท่ากับ k
2. เทียบกับค่าสูงสุดของข้อมูลทั้งหมดของทุกชุดข้อมูล 1,596
3. ทำการประมาณค่าไม่ให้เกิน 255 ซึ่งจะได้ค่าใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{New value} &= 955 \times \frac{255}{1,596} \\ &= 153 \end{aligned}$$

4. นำค่า 153 ไปแปลงเป็นเลขฐานสองด้วยคำสั่ง bitget จะได้ค่า 1001 1001 โดยบิตที่มีน้ำหนักสูงสุดจะอยู่ด้านขวามือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการแปลงข้อมูลของชุดข้อมูล MIT-BIH ที่อยู่ในรูปของเลขฐานสิบให้เป็นเลขฐานสองนั้น สามารถแสดงการจัดเรียงได้สามรูปแบบ คือ

1. ทำการแปลงเลขฐานสิบแต่ละชุดของชุดข้อมูล MIT ให้สามารถบรรจุอยู่ในข้อมูลเลขฐานสองเลขฐานสองจำนวน 8 บิต ซึ่งจะทำให้สามารถนำเอาข้อมูลไปใช้งานได้ง่าย แต่มีข้อจำกัดคือข้อมูลฐานสองขนาด 8 บิตนั้นจะสามารถแทนข้อมูลที่ไม่ซ้ำกันเพียง 256 ค่า คือ 0 ถึง 255 ดังนั้นก่อนจะทำการแปลงเป็นเลขฐานสอง ข้อมูลฐานสิบแต่ละค่าจะต้องทำการเทียบเคียงกับค่าสูงสุดของข้อมูลก่อน จากนั้นจึงทำการแปลงเป็นเลขฐานสองตามตัวอย่างก่อนหน้า

2. การแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของเลขฐานสองขนาด 11 บิต จากตัวอย่างข้อมูลทั้งหมด 48 ชุด จะพบว่าค่าสูงสุดของข้อมูลคือ 1,596 ซึ่งสามารถแปลงเป็นฐานสองขนาด 11 บิตได้เป็น 00111100011 โดยค่าบิตน้ำหนักสูงสุดอยู่ด้านขวามือ ซึ่งหากใช้การแปลงเป็นเลขขนาด 11 บิตนี้จะทำบิตที่มีค่าเป็น 1 กระจายตัวกันค่อนข้างสม่ำเสมอ และ MIT-BIH เองก็ได้มีการจัดเก็บเป็นเลขฐานสองขนาด 11 บิตด้วยเช่นกัน

3. การแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของเลขฐานสองขนาด 12 บิต ถึงแม้ว่าข้อมูลของ MIT-BIH นั้นหากแปลงเป็นเลขฐานสองขนาด 11 บิต จะมีความใกล้เคียงกับชุดข้อมูลเดิมมากที่สุด แต่หากเทียบกับวงจรแปลงจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลที่นิยมใช้กันในปัจจุบันแล้ว การแปลงข้อมูลให้เป็นเลขฐานสองขนาด 12 บิต อาจจะทำให้หาอุปกรณ์รองรับในท้องตลาดมากกว่า

ตัวอย่างการแปลงข้อมูลที่เก็บอยู่ในรูปเลขฐานสิบของ MIT-BIH ไปเป็นข้อมูลเลขฐานสองในรูปแบบต่าง ๆ กันแสดงดังในรูปที่ 4.8

เลขฐานสิบ	955	955	958	960
เลขฐานสองขนาด 8 บิต ที่มีการจัดเรียงใหม่	11111101	11111101	11111101	11111110
เลขฐานสองขนาด 11 บิต	11101110110	11101110110	11101111100	111100000000
เลขฐานสองขนาด 12 บิต	111011101100	111011101100	111011111000	11110000000000

← ทิศทางการไหลของข้อมูล →

รูปที่ 4.8 การแปลงข้อมูล MIT จากเลขฐานสิบไปเป็นเลขฐานสองรูปแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 ข้อกำหนดในการทดลอง

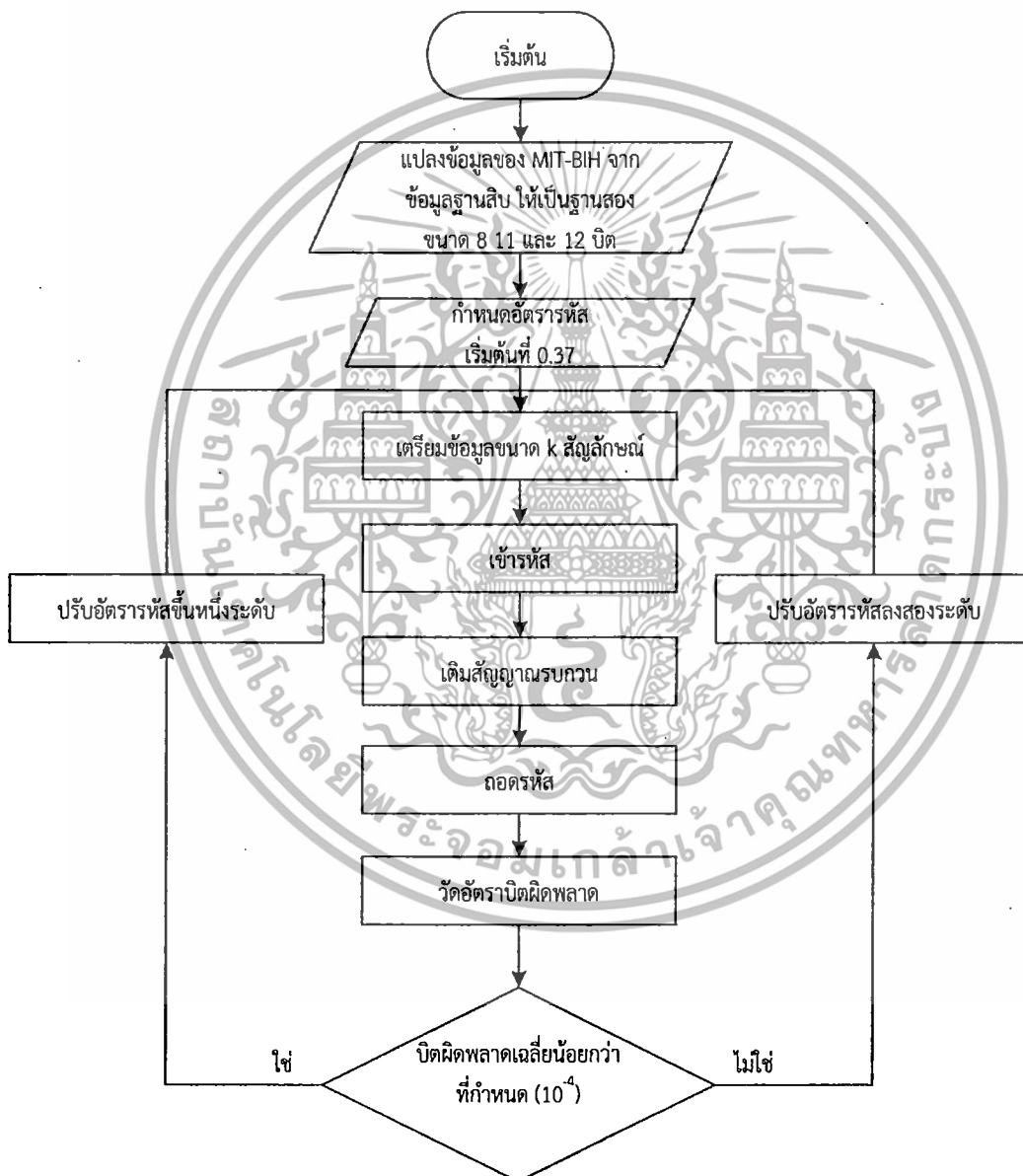
จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้ทราบว่าลักษณะการใช้งานของระบบเครือข่ายร่างกายไร้สายที่สนใจนั้นใกล้เคียงกับช่องสัญญาณแบบโรเซียน และเนื่องจากรูปแบบการนำไปใช้งานนั้นจะคำนึงถึงความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดมากกว่าอัตราการส่งข้อมูล เพราะถึงแม้ว่าการส่งข้อมูลที่อัตราที่ต่ำสุดด้วยอัตราการใช้รหัส 0.37 เมื่อนำไปใช้กับการสื่อสารแบบแถบความถี่กว้างยิ่งแล้ว ยังคงสามารถให้อัตราการสื่อสารข้อมูลที่ 93.1 kbps ซึ่งในงานประยุกต์ของการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่อัตราการเต้น 120 ครั้งต่อนาทีนั้น ต้องการความสามารถในการสื่อสารเพียง 15.8 kbps ก็เพียงพอ และหากเป็นการวัดที่คลื่นไฟฟ้าหัวใจที่อัตราการเต้น 30 ครั้งต่อนาที ก็มีความต้องการอัตราการสื่อสารข้อมูลเพียง 3.96 kbps เท่านั้น ในการออกแบบระบบจึงให้เริ่มต้นการทำงานที่อัตราที่ต่ำสุดก่อนที่ 0.37 และใช้ค่าอ้างอิงผิดพลาดที่ยอมรับได้ของเครือข่ายร่างกายไร้สายที่ไม่เกิน 10^{-4} เป็นการปรับอัตราการใช้รหัส การทดลองใช้เวลาอ้างอิงที่ทุก ๆ 1 10 และ 20 วินาทีในการปรับรอบการทำงาน นอกจากนี้ข้อมูลที่ถูกนำมาเป็นอินพุตเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบ ก็มีการนำมาจากข้อมูลจำลองแบบสุ่มและข้อมูลที่ได้จากการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจจากผู้ป่วยจริงของชุดข้อมูล MIT-BIH ค่ากำหนดในการทดสอบระบบแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่ากำหนดในการทดสอบระบบ

ลำดับ	ชื่อชุดข้อมูล	อัตราที่เริ่มต้น	ข้อพิจารณาการปรับอัตราที่	เงื่อนไขการปรับอัตราที่	เวลาพิจารณาปรับอัตราที่ (วินาที)
1	สุ่ม	0.37	$BER \geq 10^{-4}$	เพิ่มขึ้น 1 ระดับ ลดลง 2 ระดับ	ทุก ๆ 1 10 และ 20 วินาที
2	#116m	0.37	$BER \geq 10^{-4}$	เพิ่มขึ้น 1 ระดับ ลดลง 2 ระดับ	ทุก ๆ 1 10 และ 20 วินาที
3	#200m	0.37	$BER \geq 10^{-4}$	เพิ่มขึ้น 1 ระดับ ลดลง 2 ระดับ	ทุก ๆ 1 10 และ 20 วินาที
4	#205m	0.37	$BER \geq 10^{-4}$	เพิ่มขึ้น 1 ระดับ ลดลง 2 ระดับ	ทุก ๆ 1 10 และ 20 วินาที
5	#213m	0.37	$BER \geq 10^{-4}$	เพิ่มขึ้น 1 ระดับ ลดลง 2 ระดับ	ทุก ๆ 1 10 และ 20 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับอัตรารหัส หากพบว่าค่าอัตราผิดพลาดไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ เพื่อให้ระบบยังคงรักษาความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดและประสิทธิภาพของช่องสัญญาณ จะทำการปรับขึ้นครั้งละหนึ่งระดับ ในขณะที่หากพบอัตราผิดพลาดเกินกว่าค่าที่กำหนด ระบบจะทำการลดอัตรารหัสสองระดับ ทั้งนี้เพื่อให้ระบบรักษาความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดได้อย่างรวดเร็ว ในการทดลองนี้ใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB ในการจำลองผล ทั้งในการเตรียมข้อมูลอินพุต การเข้ารหัส การเพิ่มสัญญาณรบกวน การถอดรหัส การวัดอัตราผิดพลาด รวมถึงการปรับอัตรารหัสด้วย ขั้นตอนในการทดลองแสดงดังแผนภูมิด้านล่าง



รูปที่ 5.1 แผนภูมิการทำงานของ การปรับอัตรารหัสอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำข้อมูลของ MIT-BIH มาเป็นข้อมูลในการทดสอบ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำเข้าไฟล์จากชุดข้อมูลชื่อ ดังนี้ 116m.mat
2. ข้อมูลที่นำเข้ามาจะยังใช้ไม่ได้โดยตรง ต้องเรียกผ่านตัวแปรชื่อ val
3. เก็บข้อมูลจาก val ไว้ในตัวแปรชื่อ DataFromFile
4. แปลงข้อมูลฐานสิบที่ได้ ให้เป็น 8 บิต 11 บิต และ 12 บิต เพื่อนำไปใช้เป็นอินพุตของรหัสรีด-โซโลมอน

5.1.1 การเข้ารหัสรีด-โซโลมอน

ในการเข้ารหัสรีด-โซโลมอนนั้น เนื่องจากชั้นควบคุมการเข้าถึงสื่อนั้นมีขนาด 255 ไบต์ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ GF_{256} พอดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้รหัสรีด-โซโลมอน GF_{256} ในการทดลอง การพิจารณาเลือกอัตราหัตสนั้น ยิ่งอัตราหัตสต่ำ ก็จะทำให้ความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดสูงขึ้น แต่การเลือกอัตราหัตสที่ต่ำเกินไปก็จะทำให้สูญเสียประสิทธิภาพการทำงานของช่องสัญญาณโดยใช่เหตุ การเลือกอัตราหัตสต่ำก็มีข้อดีที่ว่า หากช่องสัญญาณมีสัญญาณรบกวนมากก็ยังคงตรวจจับและแก้ไขได้ทำให้การสื่อสารข้อมูลที่สำคัญ สามารถรับได้ถูกต้องตั้งแต่การเริ่มต้นส่งข้อมูล ด้วยเหตุนี้ในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาเลือกใช้อัตราหัตสเริ่มต้นที่ 0.37 ก่อน ขั้นตอนการเข้ารหัสมีดังนี้

1. กำหนดอัตราหัตสเริ่มต้นที่ 0.37
 2. กำหนดให้ SNR dB ที่ทดสอบเริ่มจาก 1 ถึง 20
 3. อ่านค่าอินพุตที่ต้องการ โดยจำนวนขนาดของข้อมูลจะมีความสัมพันธ์กับค่า อัตราหัตสและ k ซึ่งเป็นค่าส่วนของข้อมูล เริ่มตั้งแต่ 95 111 127 159 191 223 และ 239 ตามลำดับ
- การทดลองประกอบด้วยค่าตัวแปรต่าง ๆ ประกอบการพิจารณาดังนี้ โดยทำการวัดอัตราบิตผิดพลาด ทำการทดลองที่อัตราหัตสตั้งแต่ 0.37 ถึง 0.94 ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองของรหัสรีด-โซโลมอน แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง

รหัส $RS(n, k)$	อัตราหัตส	ขนาดข้อมูล (สัญลักษณ์)	ขนาดพาริตี (สัญลักษณ์)	จำนวนที่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาด (สัญลักษณ์)
RS(255,95)	0.37	95	160	80
RS(255,111)	0.44	111	144	72
RS(255,127)	0.50	127	128	64
RS(255,159)	0.62	159	96	48
RS(255,191)	0.75	191	64	32
RS(255,223)	0.87	223	32	16
RS(255,239)	0.94	239	16	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ซึ่งงานวิจัยและการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การเลือกช่องสัญญาณในการสื่อสาร

เพื่อให้การทดลองมีความใกล้เคียงกับการทำงานของเครือข่ายร่างกายไร้สาย ซึ่งได้ทำการศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณการสื่อสารไร้สายรูปแบบต่าง ๆ พบว่าแบบจำลองของไรเซียน จะมีคุณลักษณะที่ใกล้เคียงมากกว่าแบบจำลองอื่น [32] เนื่องจากลักษณะของการสื่อสารระหว่างตัวรับและตัวส่งนั้น มีการวางใกล้ชิดกับร่างกายทำให้ได้รับผลกระทบหลายอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวของร่างกาย การบดบังเส้นทางการรับส่งสัญญาณจากร่างกายทำให้สัญญาณที่สื่อสารมีหลายวิถี การเคลื่อนที่ของร่างกายเนื่องจากการเปลี่ยนอิริยาบถต่าง ๆ โดยมีค่าตัวแปรที่สำคัญคือ k factor มีค่า 2 ซึ่งค่านี้เป็นตัวบ่งบอกสัดส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณแนวสายตาและ สัญญาณที่ไม่ใช่แนวสายตา ค่านี้หากมีค่าต่ำมากจนกลายเป็นศูนย์ แบบจำลองช่องสัญญาณก็จะเข้าใกล้ลักษณะเป็นช่องสัญญาณเรย์เลห์ และหากค่านี้มีค่าสูง เช่น 20 ขึ้นไป ลักษณะของช่องสัญญาณจะใกล้เคียงช่องสัญญาณเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก

5.1.3 การจำลองการกล้ำสัญญาณ

รูปแบบการกล้ำสัญญาณที่ใช้ในการทดลองนี้เป็น BPSK เพื่อเป็นการสร้างสัญญาณสื่อสารให้มีความคงทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีด้วยการเปลี่ยนเฟสของสัญญาณ ให้ต่างกันครึ่งละ 180 องศา จากเดิมรูปแบบสัญญาณที่มีระดับเพียง 0 หรือ 1 ก็จะทำให้การปรับระดับโดยที่ หากสัญญาณอินพุตเป็น 0 จะถูกแปลงให้เป็นค่า -1 แทน แต่หากสัญญาณอินพุตมีค่าเป็น 1 ก็จะทำให้คงระดับ 1 นี้ไว้ จากมาตรฐานการสื่อสารร่างกายไร้สายที่ส่วนใหญ่ใช้การกล้ำสัญญาณแบบพีเอสเค ยกเว้นช่วงความถี่ 420 – 450 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่มีการใช้การกล้ำสัญญาณแบบ GMSK เนื่องจากการใช้งานในช่วงแถบคลื่นดังกล่าว มักจะเป็นอุปกรณ์ประเภทที่ฝังอยู่ในร่างกาย การพิจารณาจำลองการกล้ำสัญญาณด้วย BPSK เพื่อให้ความสำคัญของการทนทานต่อสัญญาณรบกวนถึงแม้จะให้ประสิทธิภาพของการใช้งานแบนด์วิดท์ลดลง

5.1.4 การเลือกใช้วิธีการตัดสินใจ

การพิจารณาในการตัดสินใจใช้วิธีแบบหยابแทนการตัดสินใจแบบละเอียด เนื่องจากข้อดีของการตัดสินใจแบบหยابนั้น จะทำให้ระบบทำงานได้เร็ว มีเวลาแฝง (latency) น้อยกว่าการตัดสินใจแบบละเอียด สามารถนำไปใช้ในการสร้างวงจรให้มีความซับซ้อนน้อยลงและประหยัดพลังงาน แต่เมื่อการใช้งานที่บล็อกของรหัสมีขนาดมากกว่า $GF64$ จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบด้อยลง [28] ในงานวิจัยนี้ใช้รหัสรีด-โซโลมอนขนาด $GF256$ จึงพิจารณาเลือกใช้การตัดสินใจแบบหยاب

5.1.5 การวัดอัตราผิดพลาด

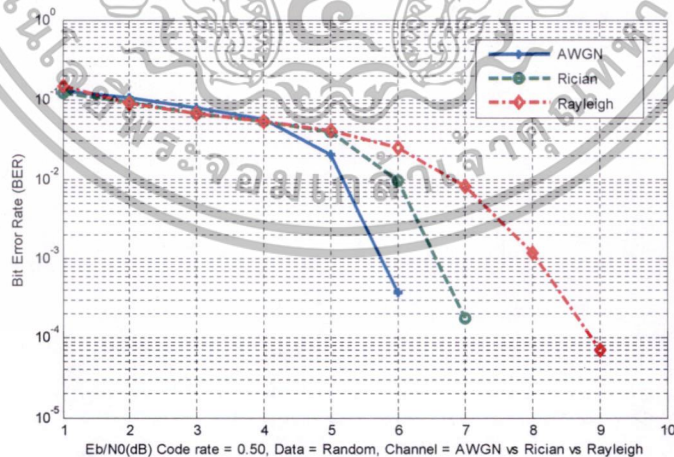
จะทำการวัดอัตราบิตผิดพลาด เมื่อการทำงานครบรอบทุก ๆ 10 วินาที ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบจำนวนบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับจำนวนบิตที่ 39,600 บิต 79,200 บิต และ 118,800 บิต เมื่อสัญญาณที่ได้รับผิดเพี้ยนไปจากที่ส่งมา จะส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดในการคำนวณค่า ไม่ว่าการผิดใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

158,400 บิต ของอัตราการเดินหัวใจที่ 30 60 และ 120 ครั้งต่อนาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับการทำงานที่ระยะเวลา 1 และ 20 วินาทีด้วย เพื่อพิจารณาความแตกต่าง

5.2 การทดลอง

5.2.1 ทดสอบหาช่องสัญญาณที่เหมาะสมกับการทำงานของเครือข่ายร่างกายไร้สาย

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ทำการค้นคว้า ทำให้ทราบว่า การจำลองช่องสัญญาณนั้น เป็นการสร้างจากคุณลักษณะที่ทำให้ข้อมูล เมื่อส่งผ่านตัวกลางแล้วทำให้ข้อมูลที่มีการสื่อสารผ่านไบนารี มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม จากช่องสัญญาณทั้งสามรูปแบบที่นำมาพิจารณา พบว่าช่องสัญญาณ เกาส์เซียนสีขาวแบบบวก จะมีสัญญาณรบกวนที่น้อยที่สุด ช่องสัญญาณโรเซียน จะมีสัญญาณรบกวนปานกลาง และช่องสัญญาณเรย์เลห์ นั้นจะมีสัญญาณรบกวนที่มากที่สุด การทดลองนี้จึงได้ทำการนำสัญญาณอินพุต ทั้งแบบสุ่ม และข้อมูลจาก MIT-BIH ผลการทดลองพบว่าข้อมูลทั้งสองแบบให้ผลตอบสนองไปในทิศทางเดียวกัน และผลตอบสนองของช่องสัญญาณเป็นไปตามลำดับ คือ ช่องสัญญาณเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก ช่องสัญญาณโรเซียน และช่องสัญญาณเรย์เลห์ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ได้ทำการทดลองที่ทุกอัตราหัส ตั้งแต่ 0.37 จนถึง 0.94 ผลที่ได้พบว่า การตอบสนองของช่องสัญญาณมีทิศทางเดียวกัน ตัวอย่างที่แสดงเป็นผลการทดลองที่อัตราหัส 0.5 เนื่องจากเป็นค่าที่อยู่ระหว่างกลาง และมีความสามารถในการแก้อัตราบิตผิดพลาดเป็นศูนย์ได้ โดยที่ช่องสัญญาณเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก อยู่ที่ระดับ 6 dB และช่องสัญญาณโรเซียนอยู่ที่ระดับ 7 dB และช่องสัญญาณเรย์เลห์ อยู่ที่ระดับ 9 dB ตามลำดับ



รูปที่ 5.2 การทดสอบผลการตอบสนองของช่องสัญญาณต่าง ๆ ด้วยข้อมูลแบบสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ทดสอบข้อแตกต่างของข้อมูลที่ใช้ทดสอบ

โดยเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลแบบสุ่ม และข้อมูลที่เป็นรูปแบบของ MIT-BIH อีกจำนวน 4 ชุด ในการเลือกใช้อินพุตเพื่อนำมาทดสอบระบบ จะนำข้อมูลมาจากสองแหล่งคือ ข้อมูลที่สร้างมาจากการสุ่มของซอฟต์แวร์ MATLAB และข้อมูลการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจจริงจากฐานข้อมูล MIT-BIH ตารางด้านล่างแสดงคุณลักษณะของข้อมูล จากฐานข้อมูลทั้งหมดจำนวน 48 ชุด เพื่อให้การทดลองมีความครอบคลุมกลุ่มตัวอย่าง การทดลองนี้ได้ทำการเลือกชุดข้อมูลที่มีความแตกต่างกัน จำนวน 4 ชุด คุณลักษณะของชุดข้อมูลจำแนกได้ดังนี้ ค่าเฉลี่ยต่ำสุดของข้อมูลคือ 837 ค่าเฉลี่ยสูงสุดคือ 1,003 และค่าเฉลี่ยที่เป็นค่ากลางของค่าเฉลี่ยทั้งหมดคือ 956 ค่าความแปรปรวนต่ำสุดอยู่ที่ 1,090 และค่าความแปรปรวนสูงสุดที่ 18,023

ตารางที่ 5.3 ชุดข้อมูลที่ใช้เป็นข้อมูลอินพุต

ชุดข้อมูล	ชื่อชุดข้อมูล	อายุ	เพศ	ค่าต่ำสุด (mV)	ค่าสูงสุด (mV)	ค่าเฉลี่ย	ค่าความแปรปรวน
1	100m	69	ชาย	481	1,311	963	1,493
2	101m	75	หญิง	389	1,508	967	2,728
3	102m	84	หญิง	692	1,299	975	1,451
4	103m	1	ชาย	502	1,649	978	4,143
5	104m	66	ชาย	637	1,419	979	2,507
6	105m	73	หญิง	281	1,624	979	6,564
7	106m	24	หญิง	611	1,538	988	5,419
8	107m	63	ชาย	361	1,717	977	2,945
9	108m	87	หญิง	417	1,497	978	3,619
10	109m	64	ชาย	385	1,650	978	9,967
11	111m	47	หญิง	460	1,499	991	2,643
12	112m	54	ชาย	497	1,188	860	1,999
13	113m	24	หญิง	779	1,534	993	6,810
14	114m	72	หญิง	546	1,387	993	1,174
15	115m	39	หญิง	447	1,506	926	5,283
16	116m	68	ชาย	0	2,047	837	17,642
17	117m	69	ชาย	421	1,166	854	2,284
18	118m	69	ชาย	406	1,503	852	7,329
19	119m	51	หญิง	427	1,524	852	11,470
20	121m	83	หญิง	134	1,304	862	3,632
21	122m	51	ชาย	584	1,274	855	5,354
22	123m	63	หญิง	405	1,436	865	3,375
23	124m	77	ชาย	303	1,543	862	8,532

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

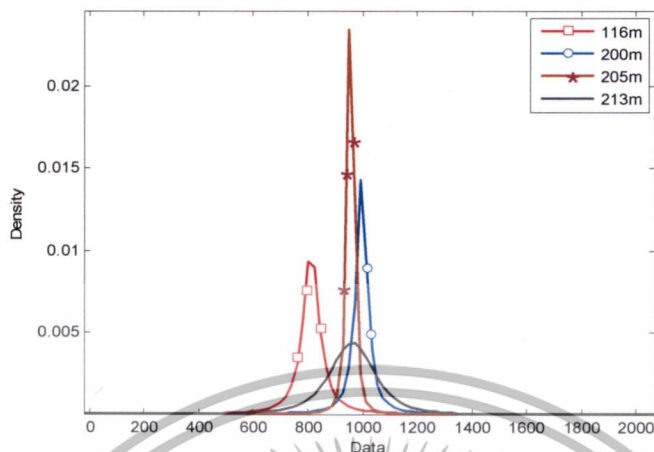
ชุดข้อมูล	ชื่อชุดข้อมูล	อายุ	เพศ	ค่าต่ำสุด (mV)	ค่าสูงสุด (mV)	ค่าเฉลี่ย	ค่าความแปรปรวน
24	200m	64	ชาย	485	1,500	1,003	5,780
25	201m	68	ชาย	716	1,433	992	1,504
26	202m	68	ชาย	473	1,608	990	3,541
27	203m	43	ชาย	163	1,752	990	9,821
28	205m	59	ชาย	589	1,355	963	1,549
29	207m	89	หญิง	233	1,481	990	5,017
30	208m	23	หญิง	327	1,754	991	9,306
31	209m	62	ชาย	733	1,401	991	2,875
32	210m	89	ชาย	700	1,688	993	2,729
33	212m	32	หญิง	653	1,533	993	4,390
34	213m	61	ชาย	518	1,681	980	18,023
35	214m	53	ชาย	478	1,584	992	8,836
36	215m	81	ชาย	748	1,524	994	3,182
37	217m	65	ชาย	351	1,704	991	1,518
38	219m	1	ชาย	570	1,554	907	12,157
39	220m	87	หญิง	599	1,407	916	4,059
40	221m	83	ชาย	746	1,470	991	3,619
41	222m	84	หญิง	800	1,345	993	1,379
42	223m	73	ชาย	362	1,545	923	6,626
43	228m	80	หญิง	549	1,602	996	4,799
44	230m	32	ชาย	397	1,547	990	5,029
45	231m	72	หญิง	753	1,434	992	2,956
46	232m	76	หญิง	800	1,264	994	1,090
47	233m	57	ชาย	427	1,615	993	11,823
48	234m	56	ชาย	501	1,596	992	4,556

การเลือกชุดข้อมูลที่นำมาใช้ในการทดลอง มีข้อพิจารณา ดังนี้

1. เลือกชุดข้อมูลที่มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดของชุดข้อมูลคือ 837 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลหมายเลข 116
2. เลือกชุดข้อมูลที่มีค่าเฉลี่ยสูงสุดของชุดข้อมูลคือ 1,003 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลหมายเลข 200
3. เลือกชุดข้อมูลที่มีค่าเฉลี่ย อยู่ระหว่างกลางของชุดข้อมูลทั้งหมดคือ 956 แต่เนื่องจากไม่มีชุดข้อมูลที่มีค่าเฉลี่ยตรงกับ 956 พอดี จึงเลือกชุดข้อมูลหมายเลข 205 ที่มีค่าเฉลี่ย 963 ซึ่งใกล้เคียงค่ากลางที่สุด
4. เลือกข้อมูลที่มีค่าความแปรปรวนสูงที่สุดคือ 18,023 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลหมายเลข 213

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาจากลักษณะของข้อมูล เปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูล MIT-BIH ทั้ง 4 ชุดกับการกระจายตัวของข้อมูล MIT-BIH แสดงได้ดังรูป 5.3

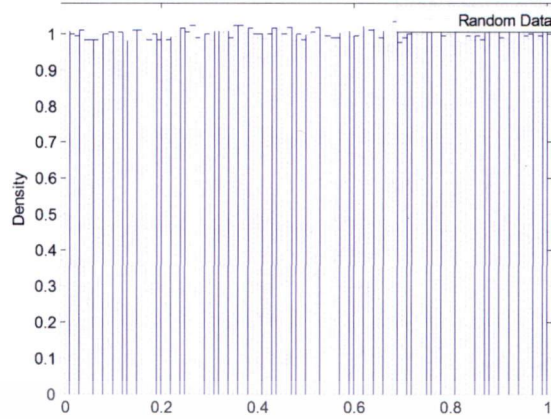


รูปที่ 5.3 รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูล MIT-BIH ที่นำมาทดสอบ

ข้อมูลหมายเลข 116m การกระจายตัวของข้อมูลส่วนใหญ่ค่าแอมพลิจูดที่วัดได้จะอยู่ระหว่าง 800 ถึง 900 mV ช่วงการแกว่งตัวของข้อมูลจะมีสูงมาก คือ ต่ำสุดที่ระดับ 0 และสูงสุดมากกว่า 2,000 mV ข้อมูลหมายเลข 200m การกระจายตัวของข้อมูลส่วนใหญ่ค่าแอมพลิจูดที่วัดได้จะอยู่ช่วง 1,000 mV ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับชุดข้อมูลอื่น ช่วงการแกว่งตัวของข้อมูลจะสูงพอสมควรคืออยู่ระหว่าง 500 ถึง 1,500 mV ข้อมูลหมายเลข 205m การกระจายตัวของข้อมูลส่วนใหญ่ค่าแอมพลิจูดที่วัดได้จะอยู่ช่วง 950 mV และกราฟมีความสมดุลระหว่างค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ช่วงการแกว่งตัวของข้อมูลด้านซ้ายและด้านขวามีปริมาณใกล้เคียงกัน และข้อมูลหมายเลข 213m การกระจายตัวของข้อมูลส่วนใหญ่ค่าแอมพลิจูดที่วัดได้จะอยู่ช่วง 980 mV และกราฟมีลักษณะของข้อมูลจะมีการกระจายกันอย่างมาก โดยค่าต่ำสุดและสูงสุดอยู่ระหว่าง 61 และ 1,681 ข้อมูลส่วนใหญ่จะค่อนข้างมาทางด้านซ้ายของค่าเฉลี่ย

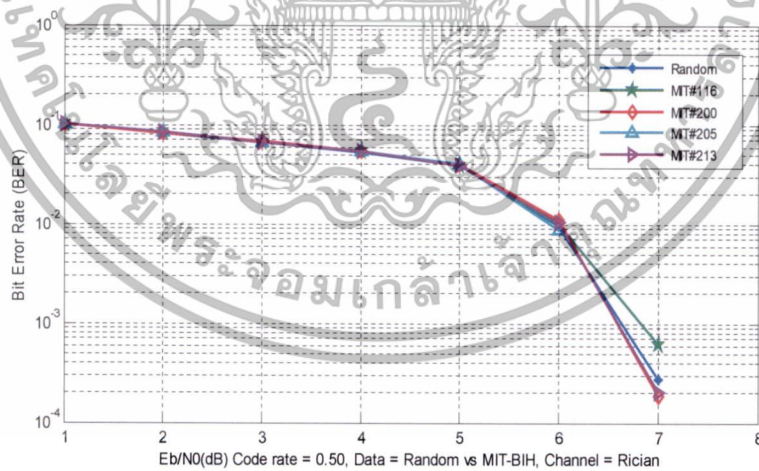
ในขณะที่ข้อมูลทดสอบแบบสุ่มที่ได้จาก MATLAB นั้น การกระจายตัวของข้อมูลจะมีความสม่ำเสมอในทุก ๆ ค่าข้อมูล และค่อนข้างแตกต่างจากชุดข้อมูลที่ได้มาจากฐานข้อมูล MIT-BIH ซึ่งการกระจายตัวของข้อมูลในแต่ละชุดจะมีความแตกต่างกันออกไป การกระจายตัวของข้อมูลแบบสุ่มแสดงดังรูปที่ 5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 รูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลทดสอบแบบสุ่ม

ทำการทดลองใช้ช่องสัญญาณโรเซียน กับสัญญาณอินพุตแบบต่าง ๆ ทั้งแบบสุ่มและชุดข้อมูล MIT จำนวนสี่ชุด พบว่าที่อัตรารหัสต่าง ๆ กัน การตอบสนองต่อช่องสัญญาณของทุกตัวอย่างข้อมูลทั้งแบบสุ่มและชุดข้อมูลของ MIT จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยอัตราบิตผิดพลาดที่จะเริ่มลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ระดับ 6 dB และสามารถแก้ไขอัตราบิตผิดพลาดให้เป็นศูนย์ได้ที่ระดับ 7 dB เป็นต้นไป รูปที่ 5.5 เป็นการแสดงตัวอย่างผลการทดลองการใช้ข้อมูลอินพุตที่แตกต่างกันออกไปที่อัตรารหัสที่ 0.5

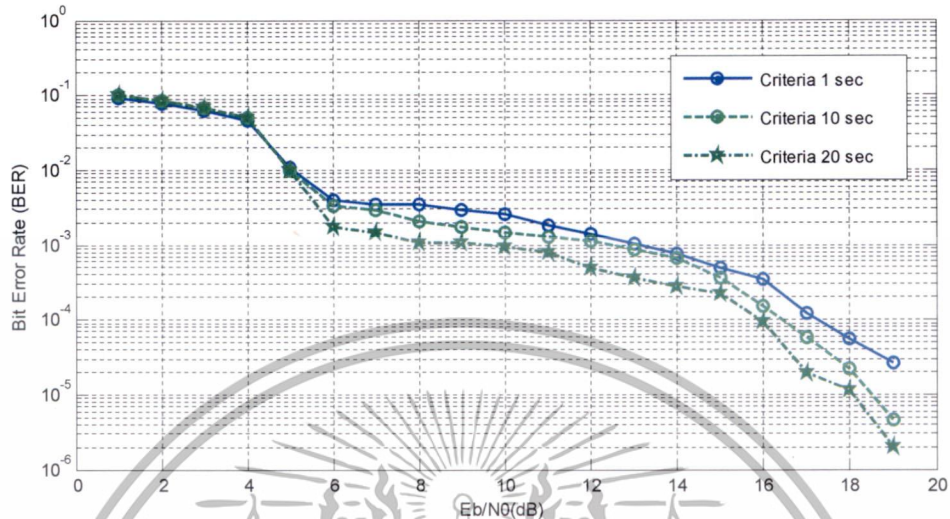


รูปที่ 5.5 ผลการตอบสนองต่อการใช้อินพุตแบบสุ่มและ MIT-BIH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการพิจารณาปรับอัตราหัส

ค่ากลางที่ใช้เป็นทุก ๆ 10 วินาที เพื่อให้ผลการทดลองสมบูรณ์ยิ่งขึ้น จึงได้ทำการพิจารณา ค่าที่ใช้เปรียบเทียบเป็น 1 และ 20 วินาทีด้วย



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการพิจารณาปรับอัตราหัส

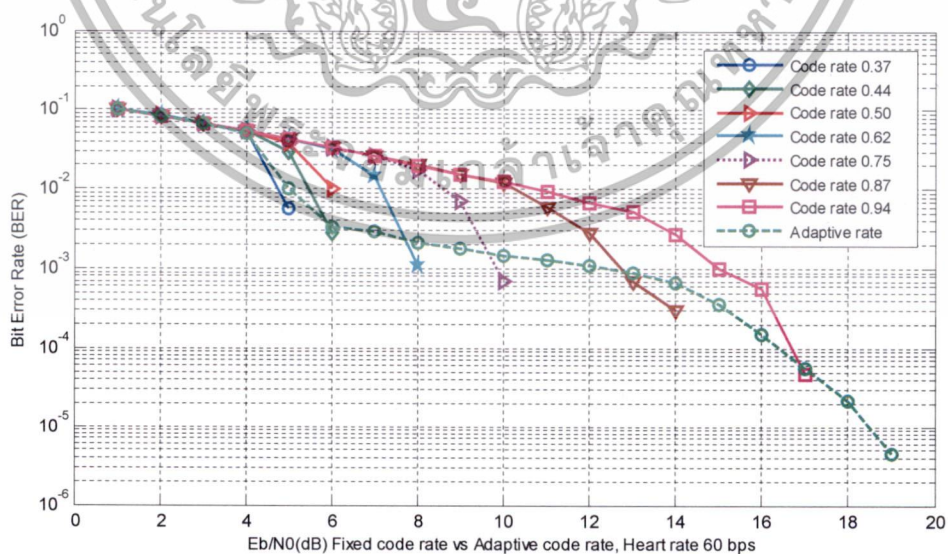
ผลการทดลองพบว่า การใช้ระยะเวลาในการปรับรอบเพื่อพิจารณาปรับอัตราหัสนั้น ค่าที่ใช้ทั้งสามค่า คือ 1 10 และ 20 วินาทีต่อรอบ อัตราบิดผิดพลาดที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันไปตลอดช่วงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ทำการทดลอง ที่ระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ 1 ถึง 5 dB อัตราบิดผิดพลาดของระยะเวลาปรับรอบทั้งสามค่าจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก และเริ่มมีความแตกต่างกันเมื่อระดับสัญญาณตั้งแต่ 6 dB เป็นต้นไป เมื่อระดับสัญญาณอยู่ในช่วง 4 ถึง 6 dB อัตราบิดผิดพลาดที่ได้จะลดลงอย่างมาก ตั้งแต่ระดับสัญญาณที่ 6 dB อัตราบิดผิดพลาดที่ได้จะเริ่มมีความแตกต่างกันแต่ก็ยังมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อัตราบิดผิดพลาดที่ได้จะค่อยลดลงอย่างช้า ๆ ตามลำดับ ที่ระดับสัญญาณ 6 dB ถึง 20 dB การเลือกใช้เวลาคำนวณรอบที่ 20 วินาที จะให้อัตราบิดผิดพลาดที่ต่ำกว่า เวลาพิจารณาปรับรอบที่ 10 และ 20 วินาที ตามลำดับจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้เวลาในการปรับรอบที่ยาวออกไป ทำให้มีจำนวนบิตที่ถูกนำมาหาเพื่อคำนวณหาอัตราบิดผิดพลาดมากขึ้น จึงทำให้ค่าบิดผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้มีค่าต่ำลง ตามรูปที่ 5.6

5.2.4 อัตราบิดผิดพลาดเฉลี่ยที่วัดได้

จากการใช้ระบบแบบปรับอัตราหัสได้เทียบกับ อัตราหัสแบบคงที่ ที่อัตราหัสต่าง ๆ กัน พบว่าอัตราบิดผิดพลาดเฉลี่ยของระบบที่ปรับอัตราหัสได้ ในช่วงที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 1 dB ถึง 4 dB นั้น ระบบแบบปรับอัตราหัสได้และแบบอัตราหัสคงที่จะมีค่าอัตราบิดผิดพลาดที่เท่ากันเนื่องจากทั้งสองแบบใช้อัตราเข้ารหัสที่ต่ำสุดทั้งคู่ ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนอยู่ในช่วง 4 ถึง 6 dB อัตราบิดผิดพลาดของระบบที่สามารถปรับอัตราหัสได้จะลดลงอย่าง

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยระบบบริหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็วและเริ่มลดลงอย่างช้า ๆ ที่ระดับอัตราสัญญาณ 6 dB เป็นต้นไป เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มเป็น 5 dB และ 6 dB ระบบที่สามารถปรับอัตราหัสเองได้จะให้อัตราบิดผิดพลาดที่ต่ำกว่าแบบอัตราหัสคงที่ ยกเว้นเพียงที่อัตราหัส 0.37 และ 0.44 ที่ยังคงให้อัตราบิดผิดพลาดต่ำกว่าระบบแบบปรับอัตราหัสได้ และที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 6 dB เป็นต้นไป ระบบแบบอัตราหัสคงที่ ที่อัตราหัส 0.37 0.44 และ 0.50 จะสามารถให้อัตราบิดผิดพลาดเป็นศูนย์ได้ ในขณะที่ระบบแบบอัตราหัสแบบคงที่ 0.62 0.75 0.87 และ 0.94 จะให้อัตราบิดผิดพลาดเป็นศูนย์ได้ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระดับ 8 dB 10 dB 14 dB และ 17 dB ตามลำดับ ผลของระบบแบบปรับอัตราหัสได้ จะแบ่งได้เป็นสี่รูปแบบคือ ช่วงแรกที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 1 dB ถึง 4 dB อัตราบิดผิดพลาดที่ได้จะเท่ากับกับแบบอัตราหัสแบบคงที่ ช่วงที่สองอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระดับ 5 dB ถึง 6 dB จะให้ค่าอัตราบิดผิดพลาดที่ดีขึ้นอย่างชัดเจนโดยสามารถให้อัตราบิดผิดพลาดเฉลี่ยต่ำลงมาถึง 10^{-3} ช่วงที่สามอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระดับ 6 dB ถึง 14 dB เป็นช่วงที่ระบบแบบปรับอัตราหัสอัตโนมัติให้ผลดีเมื่อเทียบกับระบบแบบอัตราหัสแบบคงที่ ซึ่งส่งผลให้ระบบสามารถรักษาสมดุลย์ระหว่างอัตราบิดผิดพลาดและอัตราหัส และช่วงที่สี่เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระดับ 14 dB เป็นต้นไป อัตราบิดผิดพลาดของระบบที่สามารถปรับอัตราหัสได้ จะเริ่มมีอัตราบิดผิดพลาดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนระดับนี้ อาจจะไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เนื่องจากต้องใช้ระดับพลังงานของอุปกรณ์รับส่งค่อนข้างสูง ผลการทดลองเปรียบเทียบอัตราบิดผิดพลาดที่ได้ของระบบแบบอัตราหัสแบบคงที่กับแบบปรับอัตราหัสได้แสดงดังรูปที่ 5.7

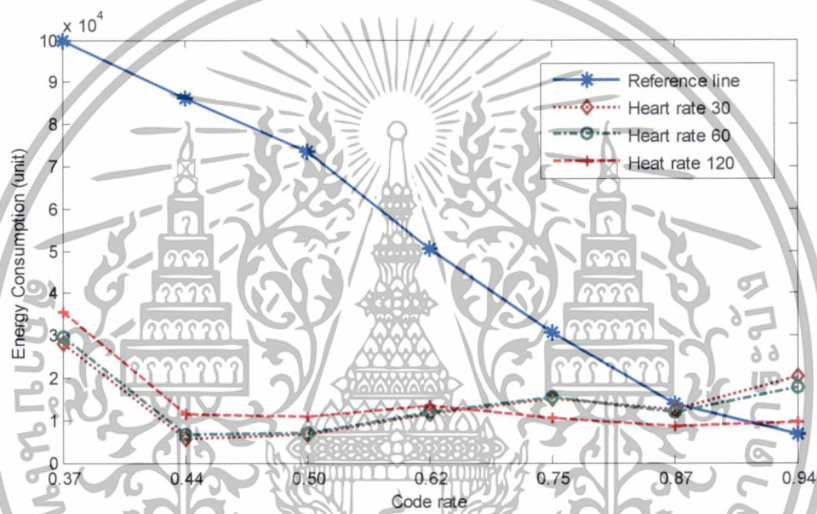


รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบอัตราบิดผิดพลาดที่ได้ของระบบแบบคงที่กับแบบปรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 การเปรียบเทียบพลังงานในการถอดรหัส

จากการคำนวณการใช้พลังงานในการถอดรหัส ของแต่ละอัตราหัดดังแสดงในตารางที่ 3.5 ซึ่งการใช้อัตราหัดที่ต่ำ จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลต่ำ แต่ก็ทำให้ได้รับความน่าเชื่อถือสูง ในขณะที่เดียวกันก็ทำให้การใช้พลังงานสูงตามไปด้วย รูป 5.8 แสดงถึงการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานในการถอดรหัสของที่อัตราการเดินหัวใจต่าง ๆ โดยคิดเป็นสัดส่วน ใช้อัตราการเดินหัวใจที่ 60 ครั้งต่อนาที พบว่าจะใช้อัตราหัด 0.37 คิดเป็น 29.6 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราหัด 0.44 ที่ 6.7 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราหัดที่ 0.50 ที่ 7.1 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราหัดที่ 0.62 ที่ 11.7 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราหัดที่ 0.75 ที่ 15.4 เปอร์เซ็นต์ ใช้อัตราหัดที่ 0.87 ที่ 11.9 เปอร์เซ็นต์ และใช้อัตราหัดที่ 0.94 ที่ 17.6 เปอร์เซ็นต์



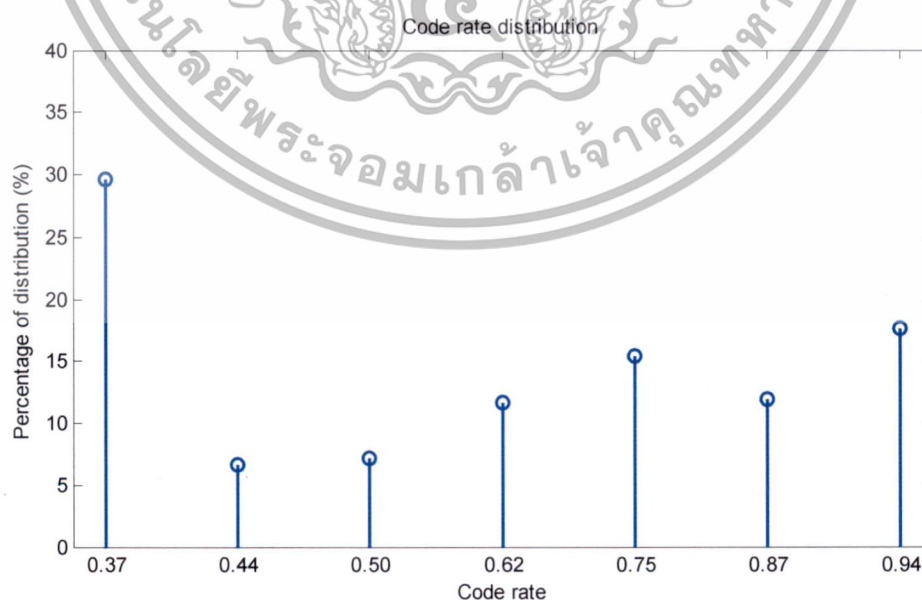
รูปที่ 5.8 ระดับพลังงานที่ใช้ในการถอดรหัสของอัตราการเดินหัวใจที่ต่างกัน

เมื่อเทียบการใช้พลังงานโดยรวม ที่ได้มาจากการทำงานของระบบที่สามารถปรับอัตราหัดได้เทียบกับระบบเดิมที่ไม่ได้มีการปรับอัตราหัดซึ่งใช้ระดับอัตราหัด 0.44 ซึ่งค่านี้เป็นค่าระหว่างกลางจากงานวิจัย [5] ที่ใช้อัตราหัด 0.22 จึงจะทำให้สามารถแก้ไขบิดผิดพลาดของข้อมูลได้ทั้งหมด และในมาตรฐานที่ใช้รหัส BCH(127,64) ซึ่งคิดเป็นอัตราหัดที่ 0.5 ผลการทดสอบแสดงถึงระดับพลังงานเฉลี่ยดังนี้ ซึ่งหากใช้อัตราหัดที่ 0.44 จะคิดเป็นพลังงานที่ต้องใช้ในหนึ่งรอบการทำงานที่ 86,256 หน่วย

ตารางที่ 5.4 พลังงานที่ใช้ไปในแต่ละอัตราหัส

อัตราหัส	สัดส่วน (%)	การใช้พลังงานในการถอดรหัส เต็มจำนวน(หน่วย)	พลังงานที่ใช้ (หน่วย)
อัตราหัส 0.37	29.6	99,680	29,505
อัตราหัส 0.44	6.7	86,256	5,779
อัตราหัส 0.50	7.1	73,600	5,225
อัตราหัส 0.62	11.7	50,592	5,919
อัตราหัส 0.75	15.4	30,656	4,721
อัตราหัส 0.87	11.9	13,792	1,641
อัตราหัส 0.94	17.6	6,512	1,146
การใช้พลังงานรวม	100		53,938

จากผลการทดลองพบว่า การใช้ระบบแบบปรับอัตราหัสได้สามารถทำให้การใช้พลังงานโดยรวมลดลงจาก 86,256 หน่วย เหลือเพียง 53,938 คิดเป็นพลังงานที่สามารถลดลงได้ถึง 37.5 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอัตราหัสที่ใช้ สามารถแสดงดังรูปที่ 5.9 พบว่าอัตราหัส 0.37 จะถูกใช้งานมากที่สุด เนื่องจากทุกครั้งที่มีการเริ่มรอบการทดสอบสำหรับแต่ละค่า SNR จะมีการเริ่มการทำงานที่อัตราหัสนี้ หากไม่นับอัตราหัสดังกล่าวจะพบว่าจะมีการใช้งานที่อัตราหัส 0.94 ซึ่งเป็นอัตราหัสที่สูง ซึ่งมีผลดีโดยรวมต่อระบบทำให้ประหยัดพลังงานในการถอดรหัสและสามารถใช้ประสิทธิภาพของสัญญาณได้สูง



รูปที่ 5.9 การกระจายตัวของอัตราหัสที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นกรณีอื่น มิฉะนั้นให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 การเปรียบเทียบการปรับอัตรารหัส

จากการวัดค่าอัตราบิดผิดพลาด เมื่อเทียบระหว่างการใช้อัตรารหัสแบบปรับได้และอัตรารหัสแบบคงที่ พบว่าในช่วงที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ ที่ 1 ถึง 4 dB ระบบทั้งสองแบบให้อัตราบิดผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากัน เนื่องจากที่ระดับของสัญญาณรบกวนมีมากระบบทั้งสองแบบจึงใช้อัตรารหัสที่ต่ำสุด และที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่า 4 dB ถึง 6 dB ระบบที่ใช้อัตรารหัสแบบปรับได้จะเริ่มให้อัตราบิดผิดพลาดลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่า 6 dB เป็นต้นไป ระบบที่สามารถปรับอัตรารหัสได้จะเริ่มทำงานได้ดี โดยมีการรับอัตรารหัสขึ้นและลงตามลักษณะความรุนแรงของสัญญาณรบกวน ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่า 14 dB เป็นต้นไประบบที่สามารถปรับอัตรารหัสได้จะให้อัตราบิดผิดพลาดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญอีกครั้งหนึ่ง

การเลือกใช้สัญญาณอินพุตที่แตกต่างกัน ทั้งรูปแบบสุ่มหรือรูปแบบที่เป็นลักษณะซ้ำ ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ เนื่องจากรูปแบบข้อมูลของ MIT-BIH ไม่ได้มีความแตกต่างกันมาก แต่ช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลง ไม่ได้เกิดขึ้นสูงมากจนทำให้เกินความสามารถของรหัสรีด-โซโลมอน

การพิจารณาการสิ้นเปลืองพลังงาน เปรียบเทียบระหว่างระบบการปรับอัตรารหัสอัตโนมัติที่นำเสนอและระบบที่ใช้อัตรารหัสแบบคงที่ พบว่าระบบที่นำเสนอสามารถประหยัดพลังงานในการถอดรหัสลงไปได้ถึง 37.5 เปอร์เซ็นต์ โดยเทียบกับอัตรารหัสคงที่ที่ 0.44

6.2 วิจารณ์ผลเทียบกับงานวิจัยอื่น

การประยุกต์ใช้การเข้ารหัสแบบปรับอัตรารหัสอัตโนมัติ นั้น เทียบกับงานวิจัย [20] พบว่าที่อัตรารหัสที่จะเอาชนะสัญญาณรบกวนของรหัสของรหัสน้ำพุ นั้นจะต้องทำการลดอัตรารหัสลงไปถึง 0.22 เทียบกับงานวิจัยนี้ที่ใช้รหัสรีด-โซโลมอน ที่อัตรารหัส 0.37 ก็สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้ทั้งหมด ที่ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 5 dB

เทียบกับงานวิจัย [21] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ปรับปรุงจาก [20] โดยได้ปรับการใช้บิดผิดพลาดอ้างอิงที่ 3.1×10^{-2} ซึ่งเทียบกับงานวิจัยนี้ จะใช้อัตราบิดผิดพลาดอ้างอิงที่ 10^{-4} เนื่องจากงานสื่อสารข้อมูลทางการแพทย์นั้น จะยอมรับอัตราบิดผิดพลาดที่ต่ำ ไม่เช่นนั้น อาจจะทำให้ข้อมูลการวัดที่สำคัญสูญหายไปและอาจทำให้วินิจัยโรคผิดพลาดตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียบกับงานวิจัย [22] ที่นำเสนอ H-ARQ ที่จะต้องมีการจัดเตรียมบัฟเฟอร์ทั้งด้านรับและด้านส่ง ทำให้ระบบมีความยุ่งยากมากขึ้นทั้งในการจัดเตรียมพื้นที่ และการยืนยันระหว่างด้านรับและด้านส่ง นอกจากนี้ที่ระดับอัตราสัญญาณรบกวนสูง ๆ ทำให้ระบบต้องมีการรับส่งบ่อยครั้ง ดังนั้นระบบที่สามารถปรับอัตรารหัสได้ และปรับอัตรารหัสที่ต่ำ ๆ แต่ให้เพียงพอและสามารถเอาชนะสัญญาณรบกวนได้ตามที่งานวิจัยนี้นำเสนอจะมีข้อดีมากกว่า

6.3 ข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้การเข้ารหัสแบบปรับอัตราหสนั้น สามารถพิจารณาระยะเวลาในการปรับอัตรารหัสให้มีความยืดหยุ่นมากกว่านี้ได้โดยขึ้นอยู่กับอิริยาบถต่าง ๆ ของร่างกาย เช่นกรณีร่างกายเคลื่อนไหวเร็ว สามารถพิจารณาปรับลดเวลาในการพิจารณาอัตราหัสลง หรือในช่วงที่ร่างกายหยุดพักสามารถพิจารณาขยายเวลาที่ใช้ในการการพิจารณาให้นานขึ้นได้

การพิจารณาจัดเก็บข้อมูลที่วัดได้ หากมีระบบที่สามารถวิเคราะห์คลื่นไฟฟ้าหัวใจได้ ก็อาจจะสามารถลดพื้นที่ในการจัดเก็บลงได้ เนื่องจากคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่มีความผิดปกตินั้น อาจจะเกิดขึ้นเพียงแค่ช่วงเวลาสั้น ๆ จึงพิจารณาจัดเก็บเฉพาะช่วงเวลาที่มีความผิดปกติได้

สามารถพิจารณาจัดทำระบบฐานข้อมูล เพื่อช่วยย่นระยะเวลาของบุคลากรทางการแพทย์ในการวินิจฉัยโรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจได้ ซึ่งอาจจะพัฒนาร่วมกับระบบรู้จำ หรือปัญญาประดิษฐ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] ฐานข้อมูลประชากร ฝ่ายวิจัยและศูนย์สารสนเทศ “ทำไมสังคมไทยจึงต้องให้ความสนใจเรื่องผู้สูงอายุ” [เอกสารออนไลน์ที่] http://www.cps.chula.ac.th/cps/research_division/article_ageing/ageing_001.html
- [2] “สถานการณ์ผู้ป่วยกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดหรือตายที่มี ST Elevation ในประเทศไทย” [เอกสารออนไลน์ที่] http://www.cdi.thaigov.net/cdi/folder_a/folder_f/1aa.pdf.
- [3] “Wireless Body Area Network” [Online]. Available : <http://www.wica.intec.ugent.be/research/wireless-body-area-networks>.
- [4] Benoit Latre, Bart Braem, Ingrid Moerman, Chris Blondia, and Piet Demeester. “A survey on wireless body area networks.” Wireless Netw, Springer Science+Business Media, November, 2010, pp.17:1-18.
- [5] Michal Miroslaw PIETRZYK. “Error Control Coding Schemes for Ultra-wideband Impulse Radio Systems.” A Doctor Thesis, University of Delft, Kielce, Poland, February, 2010.
- [6] R Kameswara Naga Mahesh. “Design of Ultra-Wide Band Physical Layer (PHY) Transceiver for WBAN (802.15.6) Baseband.” A Master Thesis, Department of Electronics and Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Guwahati, Assam, India, June, 2013.
- [7] IEEE Computer Society. “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.6 : Wireless Body Area Networks.” New York, USA, 29 February 2012.
- [8] Huan-Bang Li, Kamyar Yekkeh Yazdandoost, and Bin Zhen. Wireless Body Area Netowk. River Publishers, 2010.
- [9] ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ “การสื่อสารดิจิทัลกับการประยุกต์ใช้โปรแกรม SCILAB” โปรแกรมวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม 2555.
- [10] William E. Ryan, and Shu Lin. Channel Codes Classical and Modern. Cambridge University Press.
- [11] “Fountain code concept” [Online]. Available : <https://www.youtube.com/watch?v=5w8t-lOa5bM>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์ “การประมวลผลสัญญาณสำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล เล่ม 3 : การออกแบบวงจรภาครับขั้นสูง” ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) 2554.
- [13] Mathuranathan Viswanathan. *Simulation of Digital Communication Systems Using Matlab*. 2nd ED. For Kindle. Amazon. 2013.
- [14] “IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks” Workign Group 6, IEEE P802.15-08-0780-12-0006, November, 2010.
- [15] Sindre Drolsum Flaten. “Energy Efficient Reed-Solomon Error Correction.” A Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway, June, 2013.
- [16] สมศักดิ์ ชุมช่วย “เอกสารประกอบการสอนวิชาทฤษฎีและการประยุกต์รหัส”. [เอกสารออนไลน์ที่] http://www.kmitl.ac.th/~kchsomsa/somsak/crse_ecc/crse_ecc.html.
- [17] Somsak Choomchuay. “Algorithms and Architectures for Reed-Solomon Decoding.” A doctor Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, May, 1993.
- [18] “เทคโนโลยีแบบแถบกว้างยิ่ง” [เอกสารออนไลน์ที่] <http://www.ecti-thailand.org/emagazine/Views/92>. สมาคมวิชาการไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ โทรคมนาคมและสารสนเทศ “อัลตราไวด์แบนด์สำหรับการสื่อสารไร้สาย” [เอกสารออนไลน์ที่] http://www.thaitelcomkm.org/TTE/topic/attach/Ultra_wideband_for_wireless_communications/index.php.
- [19] Miaoxin Li and Mingjie Zhuang. “An Overview of Physical Layers on Wireless Body Area Network.” *Anti-Counterfeiting, Security and Identification (ASID)*, 2012, pp.1-5.
- [20] Kenichi Takizawa and Kiyoshi. “Design of Packet Erasure Mitigation Technique using a Digital Fountain Code for Wearable Wirelss Body Area Network.” 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS, August 31 - September 4, 2010, pp.356-359.
- [21] Yusuke Hamada, Kenichi Takizawa, and Tetsushi Ikegami. “Highly Reliable Wireless Body Area Network Using Error Correcting Codes.” *Radio and Wireless Symposuim (RWS)*, 2012, IEEE, pp.231-234.
- [22] Haruka Suzuki and Ryuji Kohno. “Performance Analysis for Hybrid ARQ Error-Controlling Scheme for UWB WBAN.” 5th International Symposium in Medical Information Technology (ISMICT), 2011, pp.94-97.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] Jamshid Abouei, Siavash Fazeil Dehkordy, Konstantinos N. Plataniotis, and Subbarayan Pasupathy. "Raptor Codes in Wireless Body Area Networks." 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2011, pp.2143-2147.
- [24] Shuo Xiao, Vijay Sivaraman, and Alison Burdett. "Adaptive Radio Transmit Power in Wireless Body Area Sensor Networks." BodyNets '08 Proceedings of the ICST 3rd international conference on Body area networks, Article No.14, Brussels, Belgium.
- [25] Amitabh Mishra and Dharma P. Agrawal. "Continuous Health Condition Monitoring by 24x7 Sensing and Transmission of Physiological data over 5-G Cellular Channels." 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications, February, 2015.
- [26] Marius Corneliu Rosa. "Preliminary Evaluation for an ECG Monitoring System." ECIA International Conference 6th Edition, 23-25 October, 2014, Bucharest, Romania.
- [27] Jing Jiang and Krishna R. Narayanan. "Iterative Soft Decoding of Reed-Solomon Codes." IEEE Communications Letters, Vol.8, No. 4, April, 2004, pp.244-246.
- [28] "การอ่านคลื่นไฟฟ้าหัวใจ(EKG Interpretation)" [เอกสารออนไลน์ที่] <http://www.hospital.tu.ac.th/doc/APN/5-131155pdf>.
- [29] Richard Mengko and Fredrick Sutjiady. "Design and Implementation of 12 Lead ECG Signals Interpretation System." 2013 3rd International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME), Bandung, Indonesia, 7-8 November, 2013.
- [30] Guinness World Records "Lowest heart rate." [Online]. Available : <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/lowest-heart-rate>.
- [31] Saeed Rashwand. "Efficient Wireless Communication in Healthcare Systems; Design and Performance Evaluation." A doctor Thesis, University of Minabota, Canada, July, 2012.
- [32] MIT-BIH Arrhythmia Database "PhysioBank." [Online]. Available : <http://www.physionet.org/physiobank/>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

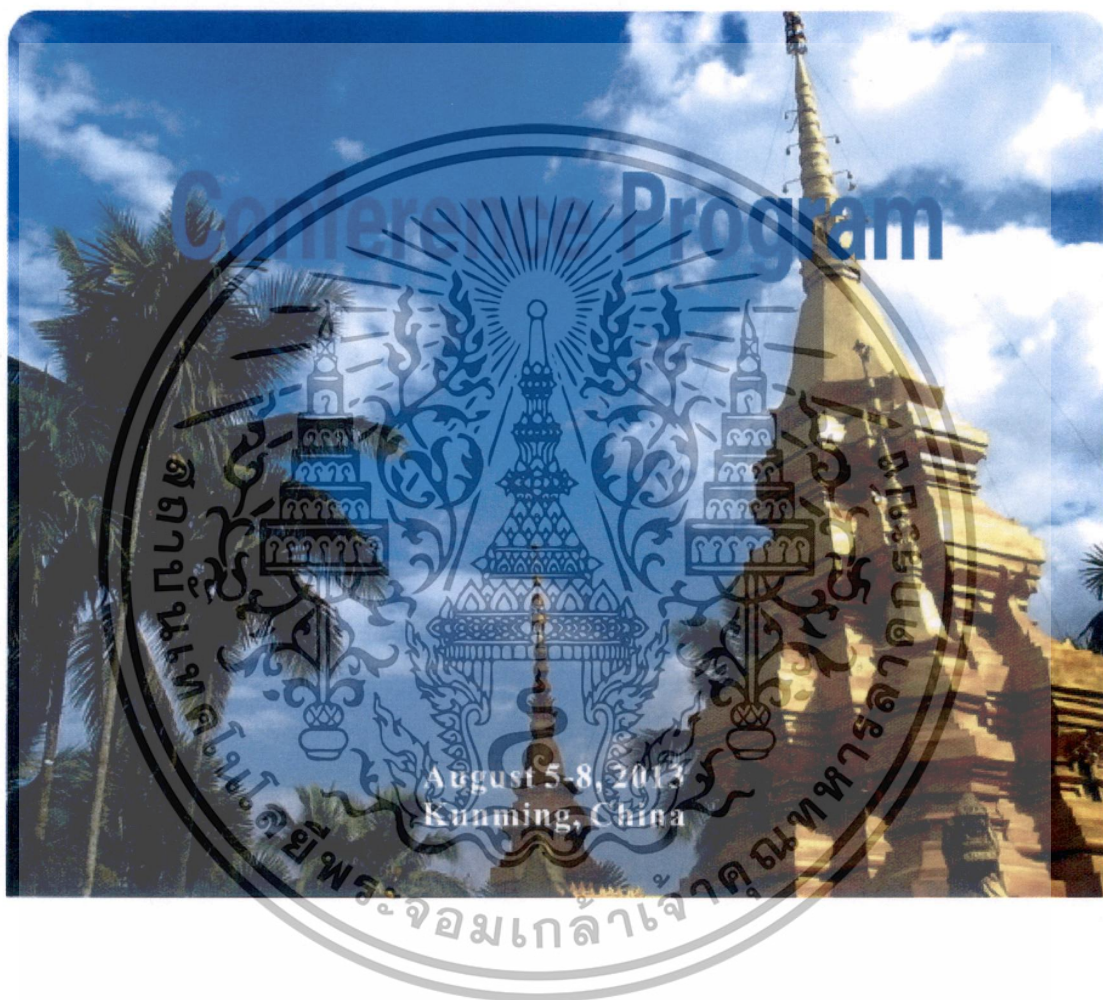
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**IEEE International Conference on
Signal Processing, Communications and Computing
(ICSPCC 2013)**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An Error Control Coding in MAC Layer for UWB WBAN

Wannarit Khattiya
College of Data Storage Innovation,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, 10520, Thailand
kwannarit@gmail.com

Sekson Timakul
College of Data Storage Innovation,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, 10520, Thailand
sekson.timakul@gmail.com

Somsak Choomchuay
Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang,
Bangkok, 10520, Thailand
kchsomsa@kmitl.ac.th

Abstract— Nowadays, Wireless Body Area Network (WBAN) has become an interesting area of researchers since it can facilitate medical experts to provide a real-time health monitoring. The increasing of elder population is the main driven factor in implementing the medical intelligent services. Application of intelligent medical care system in the disaster environment is also not even less important. In such a vital application system as well as other large bandwidth requirement system, such as a cardiogram and heartbeat monitoring, the communication needs not only the reliability but also the real-time action. Considering the physical layer of IEEE 802.15.6 standard, Ultra Wideband offers an advantage in term of bandwidth availability. In this paper we propose the preliminary investigation of the application of error control code to MAC layer data. Of its both random and burst error correction capability, Reed-Solomon codes have been considered. In our investigation, several MIT-BIH Arrhythmia databases are chosen as input data. The coding scheme is applied to the 250 byte payload data. RS(250, k) which is the shorten version of RS(255, k) defined in GF(256) with variable code rate are investigated. AWGN channel and fading channels are employed to examine code's performance.

Index Terms—UWB, Wireless Body Area Network, Error Correction Control.

I. INTRODUCTION

Wireless Body Area Network (WBAN) is a collection of low-power, intelligence, and miniaturized devices attached on or implanted in the body or spread around the body. These devices provide continuous health monitoring and real-time feedback to a medical expert. The transmission of these devices, cover a short range of only meters.

The IEEE 802.15.6 standard defines one Media Access Layer (MAC) and three Physical layers (PHY) which comprise of Narrowband (NB), Ultra wideband (UWB), and Human Body Communications (HBC) layers. The selection of each Physical layer depends on the application requirements. In vital health monitoring environments, the real-time and reliable applications are required. The monitoring signal is very important for the patient that unacceptable for loss, missing, or even damage, and the UWB layer is suitable for these kinds of application. To mitigate errors of WBAN communications, one can implement error correction at either PHY or MAC, or both layers. Error correction implemented in PHY should be

performed at channel coding which can be done before modulation. BCH coding is a binary code and it can identify location of error bit, it is employed at PHY to improve robustness of PLCP header and able to correct up to two erroneous bits. In contrast, the error correction in MAC layer can be performed at a frame level.

Recently, there are many researches attend for mitigation of error occurrences, and it is desirable to use a suitable channel code or Forward Error Correction (FEC). In general, these codes add a systematic redundancy to the transmission packet and allow the receiver to detect a limited number of errors that may occur anywhere in the message, and often to correct these errors without retransmission. [4] proposed a packet error mitigation technique implemented at PHY layer using LT code and compared with RS code. The result shown that, the throughput of RS code was higher than LT code, when the error bits less than correctable bits. [5] stated that the MAC protocol plays a significant role in many functions especially to control and reduce power by mitigation retransmitting request. To mitigate request of retransmission at PHY channel coding level, shorten version of RS-code (28, k, t) over the GF(256) was examined [6]. In medical video transmission application, it requires high reliability and strong error control, the hybrid ARQ error control in UWB was proposed. However such a system required the retransmission process when errors were detected [7].

This paper proposes an error correction mechanism implemented at MAC layer. The coding scheme is applied to the 250 byte payload data. The variable rate RS(250, k) is investigated. The code rates of 0.74 to 0.98 are fairly high and of our interest. Several MIT-BIH arrhythmia databases are chosen as input data. Simulation has employed both AWGN channels and fading channels.

This paper is organized as follows. In section II, we introduce IEEE 802.15.6 standard both MAC and PHY layers. In section III, we describe Reed-Solomon codes and shorten version of such codes, and WBAN channel models. These are the main contribution of this paper. In section IV, we explain the design and the experiment setup. Finally we conclude our achievement in section V.

II. IEEE 802.15.6 STANDARD

IEEE 802.15.6 (Wireless Body Area Networks or WBAN) [1] has been published in February, 2012. It supports one MAC layer and three different physical (PHY) layers as follow:

A. Physical Layer (PHY)

1) Narrowband PHY (NB-PHY): it is responsible for activation/deactivation of the radio transceiver. Clear Channel Assessment (CCA) within the current channel and data transmission/reception.

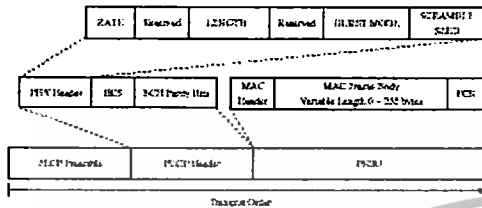


Fig. 1. Standard PPDU Structure for Narrowband.

NB PHY is aimed at communication with the wearable nodes on body and the implantation nodes in the body. NB-PHY can support the rate of 75.9 kbps to 971.4 kbps. The standard defines 230 physical channels and seven operation bands. The PPDU composes of three main components: the PLCP preamble, the PLCP header, and the PSDU. Each PLCP preamble is constructed by concatenating a length-63m-sequence with 010101010101101101101101101 extension sequence. The length of the preamble is therefore 90 bits.

2) Ultra Wideband PHY (UWB): it is designed for high performance, robust, low complexity, and ultra low power operation. There are two different types of UWB technologies. Namely, impulse radio UWB (IR-UWB) and wideband frequency modulation (FM-UWB). The specification defines two modes of operation which are default mode and high quality of service (QoS) mode. The default mode shall be used in medical and non-medical applications, and the high QoS mode shall be used for high-priority medical applications [3]. The PLCP constructs the PHY layer protocol data unit (PPDU) by concatenating the synchronization header (SHR), physical layer header (PHR) and physical layer service data unit (PSDU), respectively.

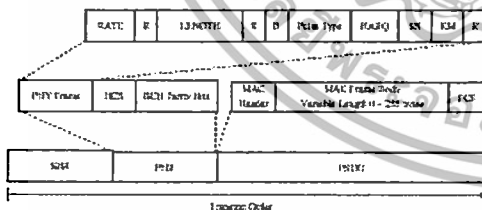


Fig. 2. Standard PPDU Structure for UWB.

3) Human Body Communications PHY (HBC); it uses the electric field communication (EFC) technology. Its transmitter is implemented with only digital circuits and needs one electrode, instead of antenna. The realization of the receiver needs none RF modules, which makes equipment easy to carry and power consumption is very low [2]. The data rates are distributed in 164.1kbps, 328.1kbps, 656.3kbps, or 1312.5kbps respectively. The HBC packet frame format is, composed of PLCP Preamble, Start Frame Delimiter (SFD), PLCP Header, and PHY Payload. PSDU structure as shown below in Fig. 3.

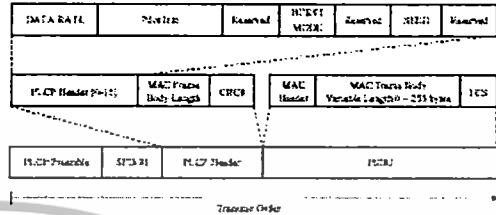


Fig. 3. Standard PPDU Structure for HBC.

B. Media Access Control (MAC)

The standard defines the different access modes, access mechanism, and different type frames as follows;

1) Access Modes; the entire channel in WBAN is divided into superframe which is interchangeable with beacon period used, especially when no beacons are transmitted. Each superframe is bounded by a beacon period of equal length. MAC layer can operate in one of three modes as following:

- Beacon mode with beacon period (superframe): in this mode, the beacons are transmitted by the hub in each beacon period except in inactive superframe or prohibited by regulations. The superframe is divided into exclusive access phase 1 (EAP1), random access phase 1 (RAP1), manage access phase (MAP), exclusive access phase 2 (EAP2), random access phase 2 (RAP2), another manage access phase (MAP), and contention access phase (CAP). In an active superframe (beacon period) a hub shall transmit a beacon and may provide access phases accordingly. In an inactive superframe (beacon period), a hub shall not transmit any beacon and shall not provide any access phases.
- Non-beacon mode with superframe: in this mode, a hub may have only a managed access phase (MAP) in any superframe.
- Non-beacon mode without superframe: in this mode, a hub may provide unscheduled bi-link allocation intervals comprising of type-II polled allocations and/or posted allocations. After determining that the hub for the next frame exchange is operating in non-beacon mode without superframe boundaries, a node may treat any time interval as a portion of EAP1 or RAP1 and employ ACMA/CA based random access to obtain a contended allocation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) Access Mechanism; it is used for each access phases of the superframe and are categorized into three mechanisms as follows;

- Random access: in executive access phase 1 (EAP1), random access phase 1 (RAP1), executive access phase 2 (EAP2), random access phase 2 (RAP2), and contention access phase (CAP), the allocation may only be contended allocations which are non-reoccurring time intervals which valid per instance of access.
- Improvised access and unscheduled access: improvised access may employ as an independent access method to send polls or posts on a best-effort basis, or as a supplemental access method to scheduled access and unscheduled access to send additional polls and posts outside scheduled allocations and unscheduled bi-link allocations, or an enabling access method for scheduled-polling access and unscheduled access.
- Scheduled access and scheduled-polling access: it may employ scheduled access to obtain scheduled uplink allocations and scheduled downlink allocations, and may employ scheduled-polling access to obtain scheduled bilink allocations and polled and posted allocations. Scheduled uplink allocations, scheduled downlink allocations, and scheduled bilink allocations, which are collectively referred to as scheduled allocations, may be 1-periodic or m-periodic allocations, except that a node shall not have both 1-periodic and m-periodic allocations in the same WBAN.

3) MAC frame format; a MAC frame is an ordered sequence of fields delivered to or from the physical layer service access point (PHY SAP). General frame format comprise of a fixed-length MAC header, a variable-length MAC frame body, and a fixed-length Frame Check Sequence (FCS) field as shown in Fig. 4.

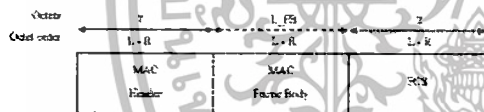


Fig. 4. MAC General Frame Format

A MAC frame type is divided into three sub-types as follows;

- Management type frame: it contains both certain mandatory fixed-length fields and some optional variable length component fields including, beacon, security association, security disassociation, pairwise temporal key, groupwise temporal key, connection request, connection assignment, disconnection, and optionally command field.
- Control type frame: it contains either frame payload or no frame payload, and may contain fixed or variable length frame payload. It may also contain following

field; immediate acknowledgement (I-Ack), block acknowledgement (B-Ack), immediate acknowledgement + poll (I-Ack+Poll), block acknowledgement + poll (B-Ack+Poll), poll, time-poll (T-Poll), wakeup, and B2 frame.

- Data type frame: this type of frame contains a full

a fragmented, or no MSDU. If a data type of emergency subtype or a user priority is set, it will be transmitted to indicate as an emergency or medical implant event report.

C. Modulation Techniques

Modulation is mechanism to carrying binary data through wireless analog medium, at the receiver side it needs to recover back to digital data accordingly. The different technique influences to distance and power consumption, the Phase Shift Keying (PSK) modulation is more suitable than others in term of lower power consumption. The modulation technique of each physical layer shown in Table I to Table III

TABLE I. MODULATION TECHNIQUE OF NB

Frequency	Packet component	Modulation	Information data rate (kbps)	Support
402-405MHz	PLCP Header	m2-DBPSK	57.5	Mandatory
	PSDU	m2-DBPSK	73.9	Mandatory
	PSDU	m2-DBPSK	151.8	Mandatory
	PSDU	m4-QPSK	303.6	Mandatory
	PSDU	m8-DPSK	455.4	Optional
	PLCP Header	GMSEK	57.5	Mandatory
	PSDU	GMSEK	73.9	Mandatory
	PSDU	GMSEK	151.8	Mandatory
	PSDU	GMSEK	187.5	Optional
	563-570MHz, 821-828MHz, 856-858MHz	PLCP Header	m2-DBPSK	76.6
PSDU		m2-DBPSK	101.2	Mandatory
PSDU		m2-DBPSK	202.4	Mandatory
PSDU		m4-QPSK	404.8	Mandatory
PSDU		m8-DPSK	607.1	Optional
2360-2400MHz, 2400-2483.5MHz	PLCP Header	m2-DBPSK	91.9	Mandatory
	PSDU	m2-DBPSK	121.4	Mandatory
	PSDU	m2-DBPSK	242.9	Mandatory
	PSDU	m4-QPSK	485.7	Mandatory

TABLE II. MODULATION TECHNIQUE OF UWB

PHY	Modulation	Information data rate (kbps)	Support
UWB (IR)	on-off signaling	487 - 15,600	Mandatory
UWB (FM)	DBPSK	487 - 7,800	Mandatory
UWB (FM)	DQPSK	15,600	Mandatory

TABLE III. MODULATION TECHNIQUE OF HBC

PHY	Packet component	Modulation	Information data rate (kbps)	Support
HBC	PLCP Header	FS-Spreader	164	Mandatory
	PSDU	FS-Spreader	164	Mandatory
	PSDU	FS-Spreader	338	Optional
	PSDU	FS-Spreader	656	Optional
	PSDU	FS-Spreader	1.312.5	Optional

III. SHORTENED REED-SOLOMON CODES AND CHANNEL MODELS

Reed-Solomon (RS) codes: are non-binary cyclic error-correcting codes invented by Irving S. Reed and Gustave Solomon. The codes are used in various applications from hi-end product to consumer electronics such as CDs, DVDs, and Blu-ray Discs. By adding $2r$ check symbols to the data, then an RS codes can detect any combination of error bits up to $2r$ erroneous symbols, or can correct up to r symbols. The codes are also viewed as cyclic BCH codes, where encoding symbols are derived from the coefficients of a polynomial constructed by multiplying $p(x)$ with a cyclic generator polynomial. The maximum codeword length (n) is $n = 2^m - 1$, where m is a symbol size. In the application that does not require "natural" size of RS codes, or so called "shortened RS" one can produce a smaller code from any desired size of a larger code. By padding zeroes (or other known symbols) to the unused portion before transmit the packet and then re-loaded zeroes (or the same known symbols) at the receiver to resume the message. Due to the limitation of the availability of possible data amount in the payload slot, in this paper we are relied on the code with the length of 250 which is the shortened version of RS(255, k) code.

Channel models refer to the mathematical description or transfer function that trying to represent the characteristic of physical behavior along entire path between sender and receiver. Most channels characteristic is modeled from a transition probability that specifies an output distribution for each possible of inputs sequence. In wireless communications, a random attenuation of the transmitted signal affecting by multipath propagation, or due to shadowing form the obstacles called "fading model" is often be used. Additive White Gaussian Noise (AWGN) is another model that frequent reference, the amplitude will be reduced as Gaussian distribution and the degradation to communication is a linear addition of white noise with a constant spectral density. Channel models on WBAN called "CM", IEEE 802.15.6, working group 6 (wg6) has categorized the CM into 4 types [8]. CM1 models for implant to implant device, CM2 refers to implant to either body surface or external device, CM3 represents body surface to body surface, and CM4 describes models between body surface and external device. These models have been generated from a theoretical or empirical model. The major factors when the signal traveling across or around the body including path loss, shadow effect, and power delay profile.

The model of UWB WBAN can refer to path loss model and power delay profile (PDP) as following [9]:

Path loss model;

$$PL(d)[dB] = a \cdot \log_{10}(d) + b + N \quad (1)$$

where a and b are coefficients of linear fitting, d is distance in mm between Tx and Rx, and N is normal distributed variable with zero mean and standard deviation σ_N .

Power delay profile;

$$h(t) = \sum_{l=0}^{L-1} a_l \exp(j\theta_l) \delta(t - \tau_l) \quad (2)$$

where a_l is path amplitude, τ_l as path arrival time, and θ_l denotes the phase for the l -th path. L is the number of arrival paths, and $\delta(t)$ is the Dirac function.

IV. DESIGN AND SIMULATION

According to IEEE 802.15.6 standard, a MAC layer can contain three sub-types of frame format; management type frame, control type frame, and data type frame. In this paper, we focus on the frame payload that contain in a MAC frame body of the data type frame. Regardless the optional Low-order sequence number and MIC, the frame payload can hold 250 bytes at most. With this regard, we examine RS(250, k) codes by varying k message block size from 186 to 246 bytes. The resulted code rate is made vary from 0.74 to 0.98. The detail parameters are show in table IV below.

TABLE IV. SHORTEN RS-CODES PARAMETERS

Code (n,k)	Short info	Parity bits	Correction (t-m)	Code rate
RS(250,246)	246	4	2	0.98
RS(250,242)	242	8	4	0.97
RS(250,238)	238	12	6	0.95
RS(250,234)	234	16	8	0.94
RS(250,230)	230	20	10	0.92
RS(250,226)	226	24	12	0.9
RS(250,218)	218	32	16	0.87
RS(250,186)	186	64	32	0.74

V. RESULT AND CONCLUSION

In the experiment, we varied the message size (k parameter) of shortened RS codes as described in the previous section and use MIT-BIH arrhythmia databases as input data. The obtained BER graphs are shown in Fig. 5, and Fig. 6 respectively. Obviously, at a particular value of SNR the longer message code (higher code rate) provides larger BER. The BER can be improved significantly when we reduce the message size from 246 bit to 238 bit. Toward the different channel environment, results on AWGN and fading channel were converged to the same trend when SNR is less than 6 dB.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

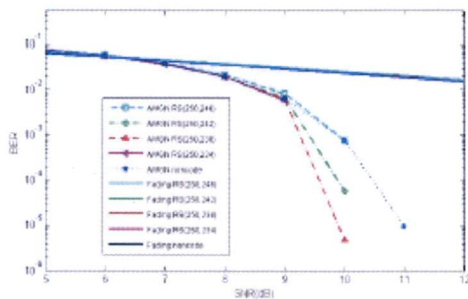


Fig. 5. The BER performance of shortened RS-codes (coder rate = 0.94-0.98)

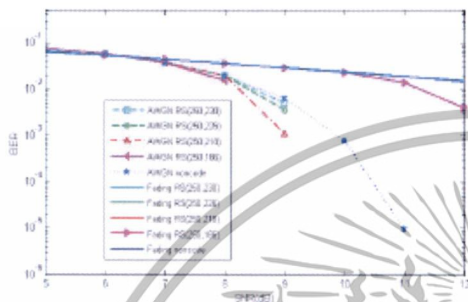


Fig. 6. The BER performance of shortened RS-codes (coder rate = 0.74-0.92)

In this paper we have considered the application of an error control code to the low level communication layer, MAC layer, of an UWB network. The IEEE 802.15.6 (Wireless Body Area Networks or WBAN) has been focused since this type of network shows good future extension, and supports further type of PHY. We also use real data from MIT-BIH arrhythmia databases for testing. It is found that the designed shortened RS(250,k) can accommodate data type frame. Quite general, the bit error rate can be improved when the code rate is made lower. Either other codes or concatenated version of RS codes can be further exploited in order to seek a suitable code for this type of application.

REFERENCES

- [1] "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 15.6: Wireless Body Area Networks," IEEE Computer Society, 3 Park Avenue, New York, USA, 29 February 2012.
- [2] Miaoxin Li and Mingjie Zhuang, "An Overview of Physical Layers on Wireless Body Area Network," Anti-Counterfeiting, Security and Identification (ASID), 2012, pp.1-5.
- [3] Kyung Sup Kwak, Sana Ullah, and Niamat Ullah, "An Overview of IEEE 802.15.6 Standard," 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technology, 2010, pp.1-6.
- [4] Yusuke Hamada, Kenichi Takizawa, and Tetsushi Ikegami, "Highly Reliable Wireless Body Area Network Using Error Correcting Codes," Radio and Wireless Symposium (RWS), 2012, IEEE, pp.231-234.

- [5] Sana Ullah and *et al.*, "A Comprehensive Survey of Wireless Body Area Networks," Journal of Medical Systems, June 2012, Volume 36, Issue 3, pp.1065-1094.
- [6] Richard Mc Sweeney, Christian Spagnol, and Emanuel Popovici, "Comparative Study of Software vs. Hardware Implementations of Shortened Reed-Solomon Code for Wireless Body Area Networks," 27th International Conference on Microelectronics (MEIL 2010), IEEE, pp.323-326.
- [7] Haruka Suzuki and Ryuji Kohno, "Performance Analysis of Hybrid ARQ Error-Controling Scheme for UWB BAN," 5th International Symposium on Medical Information & Communication Technology (ISMICT), 2011, pp.94-97.
- [8] "IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks" Working Group 6, IEEE P802.15-08-0780-12-0006, November, 2010.
- [9] Kenichi Takizawa, Takahiro Aoyagi, Jun-ichi Takada, Norihiko Katayama, Kamya Yekhe Yazdandoost, Takehiko Kobayashi, and Ryuji Kohno, "Channel Models for Wireless Body Area Networks," 30th Annual International IEEE EMBS Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, August 20-24, 2008, pp.1549-1552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายวรรณฤทธิ์ ชัดตียะ
วัน เดือน ปีเกิด 26 พฤษภาคม 2517 ที่จังหวัดชัยภูมิ

ที่อยู่ 11/50 ซอยเคหะร่มเกล้า 64 แขวงคลองสองต้นนุ่น
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร.081-5588405

ประวัติการศึกษา 2542 อดสาทรกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ประสบการณ์การทำงาน
พ.ศ.2550-ปัจจุบัน ตำแหน่งผู้จัดการอาวุโส
ฝ่ายเทคโนโลยีสารสนเทศ
บริษัท ไทยยามาฮ่ามอเตอร์ จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้