สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าฉลาดกระบัง

โปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลซึ่งป้องกันความผิดพลาดผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

ERROR CORRECTING CODE DEMONSTRATION SOFTWARE FOR APPLICATION IN AWGN CHANNEL

โดย

นายจิรวัฒน์ ศรีสว่าง

นายภควัตต์ วัฒนะโชติ

วพ
QC102
.W24

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62823
วัน,เดือน,ปี 23 ส.ค. 2549

b 11632501
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

ERROR CORRECTING CODE DEMONSTRATION SOFTWARE FOR APPLICATION IN AWGN CHANNEL

BY

MR. JIRAWAT SEESAWANG

MR. PAKAWAT WATTANACHOT

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF

THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2005

หัวข้อปริญญานิพนธ์	โปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลซึ่งป้องกันความผิดพลาดผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN
ชื่อนักศึกษา	นายจิรวัฒน์ ศรีสว่าง รหัสประจำตัว 45010122
	นายภควัตต์ วัฒนะโชติ รหัสประจำตัว 45010569
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.นภพินทุ์ อนันตรศิริชัย
	ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2548

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความเห็นชอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

(รศ.นภพินทุ์ อนันตรศิริชัย)
อาจารย์ที่ปรึกษา

หัวข้อปริญญานิพนธ์	โปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลซึ่งป้องกันความผิดพลาดผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN
ชื่อนักศึกษา	นายจีรวัฒน์ ศรีสว่าง รหัสประจำตัว 45010122
	นายภควัตต์ วัฒนะโชติ รหัสประจำตัว 45010569
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. นภพินทุ์ อนันตรศิริชัย
	ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
ปีการศึกษา	2548

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นกล่าวถึงการทำโปรแกรมจำลองการใช้รหัสสำหรับแก้ไขความผิดพลาดเพื่อส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN โดยโปรแกรมจะทำการจำลองให้ผู้ใช้สามารถเลือกข้อมูลได้ ซึ่งในโครงงานนี้ใช้ข้อมูลประเภทไฟล์รูปภาพ แล้วนำข้อมูลหรือไฟล์รูปภาพนั้นมาแบ่งออกเป็นส่วนย่อย ๆ นำแต่ละส่วนย่อยของข้อมูลไปเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด จากนั้นนำไปทำการ มอดูเลต (Modulate) แบบ BPSK และเรียกใช้ฟังก์ชันจำลองสัญญาณรบกวน ในโครงงานนี้จะใช้การรบกวนแบบ AWGN จากนั้นทำการ ดีมอดูเลต (demodulate) และถอดรหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด แล้วจึงนำข้อมูลกลับมารวมกันเป็นข้อมูลต้นฉบับ โดยโปรแกรมจะแสดงภาพต้นฉบับกับภาพที่ทำการส่งผ่านระบบจำลอง โดยผู้ใช้งานโปรแกรมสามารถปรับระดับความแรงของสัญญาณรบกวนได้

Thesis Title	Error Correcting code demonstration software for application in AWGN channel
Student	Mr. Jirawat Seesawang ID 45010122
	Mr. Pakawat Wattanachot ID 45010569
Advisor	Assoc.Prof. Noppin Anantrasirichai
	Dr. Keattisak Sripimanwat
Graduate Level	Bachelor Degree of Information Engineering
Department	Information Engineering
Academic Year	2005

ABSTRACT

This thesis is concerned about creating the program simulation by using Error Correcting Code for sending the information through the additive white gaussian noise channel (AWGN). This program has initiation that the user can choose the information which is the information about the picture file. The program will divide information (picture file) into small parts, and will encode by error correcting coding method for each small part of the information. After that, the program will modulate in BPSK and use the noise simulation function to add noise in the information. In this project, we will use the additive white gaussian noise and then demodulate and decode to fix the error, and finally we will combine all of information (picture file) together as the original. The program will show the original picture and simulation picture, the users who use this program can also adjust the level of noise.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลาย ๆ ฝ่ายซึ่งผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณทุก ๆ ท่านที่มีส่วนร่วม ช่วยเหลือ และแนะนำในทุก ๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณ รศ. นภพินทุ์ อนันตรศิริชัย และ ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ได้เสียสละเวลาให้คำปรึกษา และข้อเสนอที่เป็นประโยชน์ จึงทำให้การทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ คุณดิสพล ฉ่ำเฉียวกุล ที่ได้ให้คำปรึกษา เสนอแนะแนวทางในการจัดทำ และแนะนำวิธีการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ จนทำให้สามารถจัดทำปริญญานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการจัดทำ และตรวจสอบปริญญานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้โอกาสและคอยให้กำลังใจเสมอมา

นายจิรวัฒน์ ศรีสว่าง

นายภควัตต์ วัฒนะโชติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย	ก
บทคัดย่ออังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ด
บทที่1 บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีระบบสื่อสาร	5
2.1 ชนิดของสัญญาณ	5
2.2 โมเดลของระบบสื่อสาร	5
2.2.1 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยแชนนอน	6
2.2.2 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยฟาโน	7
2.3 เทคโนโลยีการมอดูเลชัน (Modulation)	9
2.4 สัญญาณรบกวน (Noise)	11
2.4.1 การวิเคราะห์สัญญาณรบกวน	11
2.4.2 สัญญาณรบกวนแบบ AWGN	13
บทที่ 3 ทฤษฎีการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดและการบีบอัดรูปภาพ	14
3.1 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ	14
3.2 รหัสคอนโวลูชัน (Convolution Code)	16
3.2.1 การเข้ารหัสคอนโวลูชัน	16
3.2.2 ตัวอย่างการเข้ารหัสคอนโวลูชัน	17
3.2.3 แผนภาพไดอะแกรมสถานะ (State Diagram)	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 ไดอะแกรมทรีริส (Trellis Diagram)	21
3.3 การถอดรหัสคอนโวลูชัน ด้วย Viterbi Algorith	22
3.4 การเข้ารหัสภาพ JPEG	27
บทที่ 4 การออกแบบโครงงาน	28
4.1 การออกแบบโครงงาน	28
4.2 การจำลองสัญญาณรบกวนแบบ AWGN	29
4.3 โปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลซึ่งไม่มีการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาด	30
4.4 โปรแกรมการเข้าและถอดรหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาด	31
4.5 ฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีการเข้ารหัส เพื่อป้องกันความผิดพลาด	36
4.6 โดเมนโมเดล (Domain Model)	38
4.7 Graphic User Interface	39
บทที่ 5 ผลการทดลอง	41
5.1 วิเคราะห์ฟังชันก์สัญญาณรบกวน	41
5.1.1 กราฟการกระจายความน่าจะเป็นการสุ่มค่าแบบ Uniform	41
5.1.2 กราฟการกระจายความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN	42
5.2 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน โดยไม่มีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด	45
5.3 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน โดยไม่มีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด	46
5.3.1 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพประเภท JPG	46
5.3.2 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพประเภท BMP	53
5.4 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลที่มีการเข้ารหัสคอนโวลูชัน ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน	58
5.4.1 เข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2	58
5.4.2 เข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3	60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพที่มีการเข้ารหัสคอนโวลูชัน
ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน 63
5.5.1 ทดลองเข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 63
5.5.1.1อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 , Constraint Length เท่ากับ 3 63
5.5.1.2 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 , Constraint Length เท่ากับ 4 70
5.4.1.3 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 , Constraint Length เท่ากับ 5 77
5.4.1.4 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 , Constraint Length เท่ากับ 7 84
5.4.2 ทดลองเข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 91
5.4.2.1 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 , Constraint Length เท่ากับ 3 91
5.4.2.2 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 , Constraint Length เท่ากับ 4 98
5.4.2.3 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 , Constraint Length เท่ากับ 5 105
5.4.2.4 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 , Constraint Length เท่ากับ 7 112
บทที่ 6 สรุป 119
6.1 สรุปการวิเคราะห์ฟังชันก์สัญญาณรบกวน 119
6.2 สรุปการทดลองจำลองการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน 119
6.2.1 กรณีไม่มีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด แบบรหัสคอนโวลูชัน 119
6.2.2 กรณีมีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด แบบรหัสคอนโวลูชัน 119
6.3 สรุปการทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน 119
6.3.1 กรณีไม่มีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด แบบรหัสคอนโวลูชัน 119
6.3.1.1 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพประเภท JPG 119
6.3.1.2 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพประเภท BMP 120
6.3.2 กรณีมีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด แบบรหัสคอนโวลูชัน 120
6.4 ประโยชน์ที่ได้รับ 120
6.5 ปัญหาและแนวทางแก้ไข 121
6.6 แนวทางในการพัฒนาต่อ 121
บรรณานุกรม 122

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยแชนนอน	6
รูปที่ 2.2 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยฟาโน	7
รูปที่ 2.3 โครงสร้างการ Modulation และ Demodulation	9
รูปที่ 2.4 รูปสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบ ASK , FSK และ PSK	9
รูปที่ 2.5 สัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตแบบ BPSK	10
รูปที่ 3.1 โครงสร้างการเข้ารหัสและถอดรหัสข้อมูล	14
รูปที่ 3.2 โครงสร้างวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน	16
รูปที่ 3.3 วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่ค่า R เท่ากับ 1/2 และค่า K เท่ากับ 3	17
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างขั้นตอนการเข้ารหัสคอนโวลูชัน	18
รูปที่ 3.5 แสดงไดอะแกรมสถานะ	20
รูปที่ 3.6 แสดงการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นและคำรหัสที่ได้	20
รูปที่ 3.7 แสดงไดอะแกรมทรีริส (Trellis Diagram)	21
รูปที่ 3.8 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการเข้ารหัสคอนโวลูชัน	22
รูปที่ 3.0 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi	23
รูปที่ 3.10 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi	24
รูปที่ 3.11 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi	24
รูปที่ 3.12 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi	25
รูปที่ 3.13 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi	25
รูปที่ 3.14 แสดงเส้นทางที่มีระยะแฮมมิงน้อยที่สุดของการถอดรหัสแบบ Viterbi	26
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทำงานของการบีบอัดภาพ JPEG	27
รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองขั้นตอนการส่งข้อมูล	28
รูปที่ 4.2 แสดงโฟว์ชาร์ทการจำลองสัญญาณรบกวนแบบ AWGN	29
รูปที่ 4.3 แสดงโฟว์ชาร์ทตัวอย่างโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล	30
รูปที่ 4.4 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของคลาส Main	31
รูปที่ 4.5 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของ Method encode	32
รูปที่ 4.6 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของ Method getCode	33
รูปที่ 4.7 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของ Method findOutput	34
รูปที่ 4.8 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของ Method decoding	35

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 ยูสเคส ไดอะแกรม 37
รูปที่ 4.10 โดเมนโมเดล 38
รูปที่ 4.11 แสดงโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล 39
รูปที่ 4.12 แสดงโปรแกรมส่วนแสดงรูปภาพจากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูล 39
รูปที่ 4.13 แสดงโปรแกรมส่วนแสดงผลจากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูล 40
รูปที่ 5.1 กราฟ PDF ของการสุ่มค่าแบบ Uniform 41
รูปที่ 5.2 กราฟ PDF ของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่ Eb/N0 = 0 42
รูปที่ 5.3 กราฟ PDF ของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่ Eb/N0 = 5 42
รูปที่ 5.4 กราฟ PDF ของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่ Eb/N0 = 10 43
รูปที่ 5.5 กราฟ PDF ของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่ Eb/N0 = 20 43
รูปที่ 5.6 กราฟ PDF ของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่ Eb/N0 = 50 44
รูปที่ 5.7 กราฟ PDF ของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่ Eb/N0 = 100 44
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล 45
รูปที่ 5.9 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 46
รูปที่ 5.10 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 46
รูปที่ 5.11 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 47
รูปที่ 5.12 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 47
รูปที่ 5.13 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 47
รูปที่ 5.14 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 48
รูปที่ 5.15 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 48
รูปที่ 5.16 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 48
รูปที่ 5.17 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 49
รูปที่ 5.18 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 49
รูปที่ 5.19 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 49
รูปที่ 5.20 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 50
รูปที่ 5.21 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 50
รูปที่ 5.22 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 50
รูปที่ 5.23 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 51

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.24 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 51
รูปที่ 5.25 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 51
รูปที่ 5.26 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 52
รูปที่ 5.27 รูปประเภท JPG จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 52
รูปที่ 5.28 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 53
รูปที่ 5.29 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 53
รูปที่ 5.30 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 53
รูปที่ 5.31 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 54
รูปที่ 5.32 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 54
รูปที่ 5.33 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 54
รูปที่ 5.34 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 54
รูปที่ 5.35 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 55
รูปที่ 5.36 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 55
รูปที่ 5.37 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 55
รูปที่ 5.38 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 55
รูปที่ 5.39 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 56
รูปที่ 5.41 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 56
รูปที่ 5.42 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 56
รูปที่ 5.43 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 56
รูปที่ 5.44 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 57
รูปที่ 5.45 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 57
รูปที่ 5.46 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 โดยไม่มีการเข้ารหัส 57
รูปที่ 5.47 รูปประเภท BMP จากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 โดยไม่มีการเข้ารหัส 57
รูปที่ 5.47 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส
เท่ากับ 1/2 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 3 58
รูปที่ 5.48 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส
เท่ากับ 1/2 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 4 58

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.49 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/2 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 5 59

รูปที่ 5.50 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/2 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 7 59

รูปที่ 5.51 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 3 , 4 , 5 และ 7 59

รูปที่ 5.52 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 3 60

รูปที่ 5.53 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 4 61

รูปที่ 5.54 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 5 61

รูปที่ 5.55 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 7 62

รูปที่ 5.56 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 3 , 4 , 5 และ 7 62

รูปที่ 5.57 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 , $K = 3$ 63

รูปที่ 5.58 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 63

รูปที่ 5.59 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 64

รูปที่ 5.60 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 64

รูปที่ 5.61 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 64

รูปที่ 5.62 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 65

รูปที่ 5.63 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 65

รูปที่ 5.64 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 65

รูปที่ 5.65 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 66

รูปที่ 5.66 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 66

รูปที่ 5.67 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$ 66

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.68 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$	67
รูปที่ 5.69 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$	67
รูปที่ 5.70 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$	67
รูปที่ 5.71 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$	68
รูปที่ 5.72 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$	68
รูปที่ 5.73 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$	68
รูปที่ 5.74 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$	69
รูปที่ 5.75 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$	69
รูปที่ 5.76 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 3$	69
รูปที่ 5.77 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 , $K = 4$	70
รูปที่ 5.78 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	70
รูปที่ 5.79 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	71
รูปที่ 5.80 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	71
รูปที่ 5.81 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	71
รูปที่ 5.82 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	72
รูปที่ 5.83 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	72
รูปที่ 5.84 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	72
รูปที่ 5.85 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	73
รูปที่ 5.86 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	73
รูปที่ 5.87 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	73
รูปที่ 5.88 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	74
รูปที่ 5.89 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	74
รูปที่ 5.90 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	74
รูปที่ 5.91 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	75
รูปที่ 5.92 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	75
รูปที่ 5.93 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	75
รูปที่ 5.94 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	76
รูปที่ 5.95 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$	76

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.96 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 4$ 76

รูปที่ 5.97 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 , $K = 5$ 77

รูปที่ 5.98 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 77

รูปที่ 5.99 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 78

รูปที่ 5.100 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 78

รูปที่ 5.101 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 78

รูปที่ 5.102 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 79

รูปที่ 5.103 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 79

รูปที่ 5.104 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 79

รูปที่ 5.105 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 80

รูปที่ 5.106 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 80

รูปที่ 5.107 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 80

รูปที่ 5.108 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 81

รูปที่ 5.109 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 81

รูปที่ 5.110 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 81

รูปที่ 5.111 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 82

รูปที่ 5.112 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 82

รูปที่ 5.113 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 82

รูปที่ 5.114 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 83

รูปที่ 5.115 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 83

รูปที่ 5.116 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 5$ 83

รูปที่ 5.117 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 , $K = 7$ 84

รูปที่ 5.118 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , K = 7 84

รูปที่ 5.119 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 85

รูปที่ 5.120 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 85

รูปที่ 5.121 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 85

รูปที่ 5.122 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 86

รูปที่ 5.123 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 86

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.124 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 86

รูปที่ 5.125 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 87

รูปที่ 5.126 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 87

รูปที่ 5.127 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 87

รูปที่ 5.128 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 88

รูปที่ 5.129 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 88

รูปที่ 5.130 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 88

รูปที่ 5.131 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 89

รูปที่ 5.132 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 89

รูปที่ 5.133 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 89

รูปที่ 5.134 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 90

รูปที่ 5.135 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 90

รูปที่ 5.136 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/2 , $K = 7$ 90

รูปที่ 5.137 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 , $K = 3$ 91

รูปที่ 5.138 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 91

รูปที่ 5.139 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 92

รูปที่ 5.140 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 92

รูปที่ 5.141 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 92

รูปที่ 5.142 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 93

รูปที่ 5.143 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 93

รูปที่ 5.144 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 93

รูปที่ 5.145 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 94

รูปที่ 5.146 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 94

รูปที่ 5.147 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 94

รูปที่ 5.148 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 95

รูปที่ 5.149 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 95

รูปที่ 5.150 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 95

รูปที่ 5.151 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$ 96

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.152 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$	96
รูปที่ 5.153 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$	96
รูปที่ 5.154 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$	97
รูปที่ 5.155 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$	97
รูปที่ 5.156 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 3$	97
รูปที่ 5.157 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 , $K = 4$	98
รูปที่ 5.158 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	98
รูปที่ 5.159 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	99
รูปที่ 5.160 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	99
รูปที่ 5.161 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	99
รูปที่ 5.162 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	100
รูปที่ 5.163 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	100
รูปที่ 5.164 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3- , $K = 4$	100
รูปที่ 5.165 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	101
รูปที่ 5.166 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	101
รูปที่ 5.167 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	101
รูปที่ 5.168 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	102
รูปที่ 5.169 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	102
รูปที่ 5.170 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	102
รูปที่ 5.171 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	103
รูปที่ 5.172 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	103
รูปที่ 5.173 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	103
รูปที่ 5.174 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	104
รูปที่ 5.175 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	104
รูปที่ 5.176 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 4$	104
รูปที่ 5.177 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 , $K = 5$	105
รูปที่ 5.178 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$	105
รูปที่ 5.179 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$	106

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.180 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 106

รูปที่ 5.181 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 106

รูปที่ 5.182 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 107

รูปที่ 5.183 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 107

รูปที่ 5.184 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 107

รูปที่ 5.185 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 108

รูปที่ 5.186 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 108

รูปที่ 5.187 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 108

รูปที่ 5.188 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 109

รูปที่ 5.189 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 109

รูปที่ 5.190 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 109

รูปที่ 5.191 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 110

รูปที่ 5.192 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 110

รูปที่ 5.193 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 110

รูปที่ 5.194 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 111

รูปที่ 5.195 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 111

รูปที่ 5.196 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 5$ 111

รูปที่ 5.197 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 , $K = 7$ 112

รูปที่ 5.198 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , K = 7 112

รูปที่ 5.199 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 113

รูปที่ 5.200 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 113

รูปที่ 5.201 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 113

รูปที่ 5.202 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 114

รูปที่ 5.203 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 114

รูปที่ 5.204 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 114

รูปที่ 5.205 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 115

รูปที่ 5.206 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 115

รูปที่ 5.207 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 115

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.208 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 116
รูปที่ 5.209 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/23 , $K = 7$ 116
รูปที่ 5.210 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 116
รูปที่ 5.211 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 117
รูปที่ 5.212 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 117
รูปที่ 5.213 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 117
รูปที่ 5.214 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 118
รูปที่ 5.215 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 118
รูปที่ 5.216 รูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ที่อัตราการเข้ารหัส 1/3 , $K = 7$ 118

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ	4
ตารางที่ 2.1 แสดงตารางแสดงสถานะจากการเข้ารหัสโดยใช้วงจรในรูปที่	19

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำ

ในระบบสื่อสารปัจจุบันย่อมมีการผิดเพี้ยน การลดทอน ที่เกิดขึ้นโดยมีสาเหตุมาจากสัญญาณรบกวน หรือด้วยสาเหตุอื่นใดก็ตาม โดยได้มีความพยายามในการแก้ไขปัญหาเหล่านี้ด้วยการคิดค้นการเข้ารหัสข้อมูลเพื่อแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำข้อมูลมาเปลี่ยนแปลงโดยอาจมีการเพิ่มข้อมูลบางส่วนเข้าไป เพื่อเป็นส่วนที่ใช้ในการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยในโครงงานนี้จะเป็นการทำโปรแกรมสำหรับจำลองระบบสื่อสารที่มีการรบกวนแบบ AWGN โดยจะมีการเข้ารหัสข้อมูลเพื่อแก้ไขความผิดพลาด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของรหัสประเภทต่าง ๆ โดยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะวิเคราะห์กับข้อมูลรูปภาพที่มีการบีบอัดด้วยวิธีต่าง ๆ แล้ว

โดยในส่วนของโปรแกรมจำลองข้อมูลที่ทำขึ้นมานี้จะใช้วิธีการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดแบบคอนโวลูชัน ซึ่งเป็นการนำข้อมูลที่ต้องการส่งมาผ่านการคำนวณทางด้านคณิตศาสตร์ โดยข้อมูลที่ได้ก็จะเป็นข้อมูลที่ใช้ส่งผ่านช่องสัญญาณ ในส่วนของด้านรับก็จะทำการหาข้อมูลที่ถูกต้องโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุทของสมการที่ใช้ในการเข้ารหัส โดยเป้าหมายหลักของโครงงานนี้เพื่อการวิเคราะห์ความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดของแต่ละสมการที่ใช้ในการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน

เมื่อมีการนำการเข้ารหัสและถอดรหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดมาใช้สิ่งที่จะได้มานั้นก็คือข้อมูลที่ได้รับจะมีความถูกต้องมากขึ้น เพราะข้อมูลส่วนที่มีความผิดพลาดที่อยู่ภายในขอบเขตที่รหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดสามารถที่จะแก้ไขข้อมูลให้มีความถูกต้องได้ ข้อมูลส่วนที่ผิดพลาดนั้นก็จะถูกแก้ไขให้มีความถูกต้อง ทำให้เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องโดยรวมของระบบสื่อสารมากขึ้น นำมาซึ่งคุณภาพของการสื่อสาร ถึงแม้ว่าในบางระบบสื่อสารจะยอมให้มีการส่งข้อมูลใหม่ถ้าข้อมูลไม่ถูกต้อง แต่ก็ทำให้เสียเวลาในการส่งข้อมูลมากขึ้น ดังนั้นวิธีการเข้าและถอดรหัสความผิดพลาดยังช่วยลดเวลาและทรัพยากรในระบบสื่อสารลงด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการเข้ารหัสและถอดรหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดด้วยการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution code)

1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการในการสื่อสาร และหลักการจำลองระบบสื่อสาร

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่มีต่อข้อมูล

1.2.4 เข้าใจพื้นฐานของการบีบอัดข้อมูลรูปภาพเบื้องต้น

1.2.5 สามารถสร้างโปรแกรมที่ทำงานใน Graphic mode และ Text mode ที่รองรับการนำไปใช้ และพัฒนาต่อในอนาคตได้

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.3.1 จำลองการสื่อสารโดยใช้การมอดูเลต (Modulate) แบบ BPSK

1.3.2 จำลองสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

1.3.3 ใช้วิธีการเข้ารหัสและถอดรหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดแบบ คอนโวลูชัน

1.3.4 โปรแกรมสามารถปรับค่าระดับของสัญญาณรบกวนได้

1.3.5 สร้างโปรแกรมคำนวณค่า BER ของข้อมูล

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

1.4.1 ศึกษาพื้นฐาน Digital communications และหลักการเบื้องต้นใช้รหัสสำหรับแก้ไขความผิดพลาด บอกหลักการจำลองระบบสื่อสาร

1.4.2 ทดลองใช้โปรแกรมจำลองระบบสื่อสารภาษา C (BPSK, AWGN) เพื่อหากราฟ BER และคุณสมบัติของตัวแปรสุ่ม

1.4.3 ศึกษาหลักการของการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน

1.4.4 สร้างโปรแกรมกำเนิดตัวแปรสุ่มแบบ Uniform กับ Gaussian

1.4.5 สร้างโปรแกรมคำนวณค่า BER โดยให้โปรแกรมสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ ได้

1.4.6 เริ่มสร้างฟังก์ชันเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน และภาคถอดรหัสแบบ Viterbi decoding และทำฟังก์ชันสำหรับการทดสอบไฟล์รูปภาพ

1.4.7 ทดสอบฟังก์ชันกับไฟล์รูปภาพ

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจวิธีการในการเข้ารหัสข้อมูลเพื่อแก้ไขความผิดพลาด

1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจกระบวนการของระบบสื่อสาร

1.5.3 มีความรู้ความเข้าใจผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนที่มีต่อข้อมูล

1.5.4 ได้ข้อมูลผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่มีต่อรูปภาพที่ใช้การบีบอัดแบบต่าง ๆ

1.6 ขั้นตอนในการดำเนินการ

ID	Task Name	2005							2006		
		Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar
1	Problem Definition & Get Requirment										
2	Analysis & Design										
3	Software Design										
4	User Interface Design										
5	Implementation										
6	Convolution Code										
7	Sequential Code										
8	Help Program										
9	Test & Debug										
10	Documentation										

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินการ

บทที่ 2
ทฤษฎีระบบสื่อสาร

2.1 ชนิดของสัญญาณ

ชนิดของสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารนั้น เมื่อพิจารณาจากแหล่งกำเนิดของสัญญาณแล้วอาจแบ่งออกอย่างกว้าง ๆ เป็น 3 แบบด้วยกัน คือ

- สัญญาณอนาล็อก
- สัญญาณดิจิตอล
- สัญญาณรบกวน

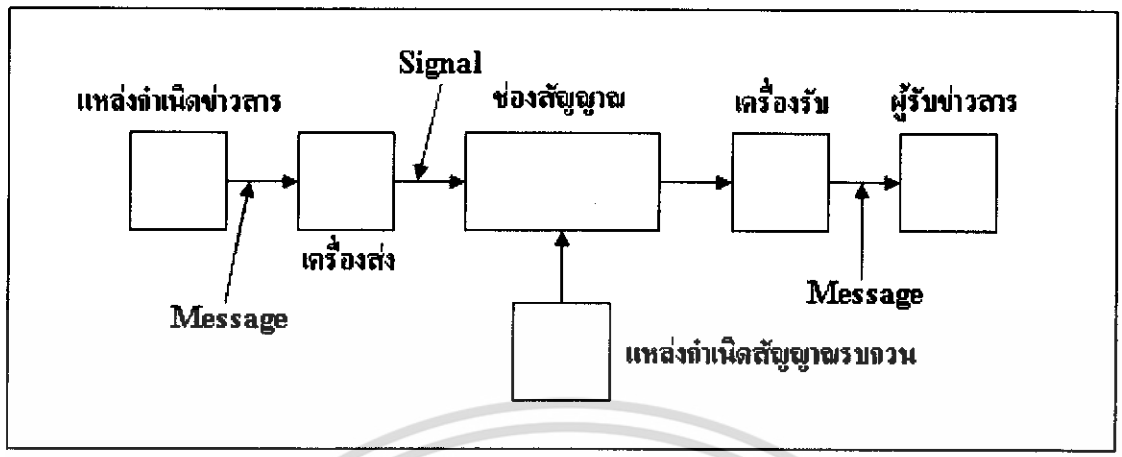
สัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณที่ระดับแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งต่างจากสัญญาณดิจิตอลเพราะสัญญาณดิจิตอลจะมีจำนวนระดับสัญญาณเป็น 2 ระดับหรือเป็นจำนวนเต็มที่มีค่าจำกัดค่าหนึ่ง ตัวอย่างของสัญญาณอนาล็อกก็คือสัญญาณเสียง และสัญญาณภาพเป็นต้น

ส่วนสัญญาณดิจิตอลนั้นมีแหล่งกำเนิดจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิตอลที่ใช้อยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์โดยทั่วไป เครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์รอบข้างทั้งหลายจะทำงานโดยใช้สัญญาณดิจิตอลทั้งหมด กล่าวคือ สัญญาณตัวอักษร และสัญญาณควบคุมทั้งหลายจะอยู่ในรูปสัญญาณดิจิตอลทั้งหมด นอกจากนั้นสัญญาณดิจิตอลอาจจะถูกสร้างมาจากสัญญาณอนาล็อก เช่น สัญญาณดิจิตอลในระบบ PCM (Pulse Code Modulation)

สำหรับสัญญาณรบกวนนั้นเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างสุ่ม และจะเกิดอยู่ในระบบสื่อสารอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

2.2 โมเดลของระบบสื่อสาร

การส่งข่าวสารคือการส่งผ่านข่าวสารจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่ง อย่างไรก็ตามเพื่อให้สามารถทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของระบบสื่อสารได้อย่างถูกต้องและตรงประเด็น แชนนอน (C.E.Shannon) ได้เสนอโมเดลของระบบสื่อสารขึ้นเป็นคนแรกใน ค.ศ.1948 โดยแบ่งระบบสื่อสารออกเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ตามหน้าที่ และต่อมาในปี ค.ศ.1961 ฟาโน (R.M.Fano) ได้เสนอโมเดลของระบบสื่อสารที่ละเอียดขึ้นไปกว่าของแชนนอนและเป็นโมเดลที่ยอมรับมากที่สุดในปัจจุบัน



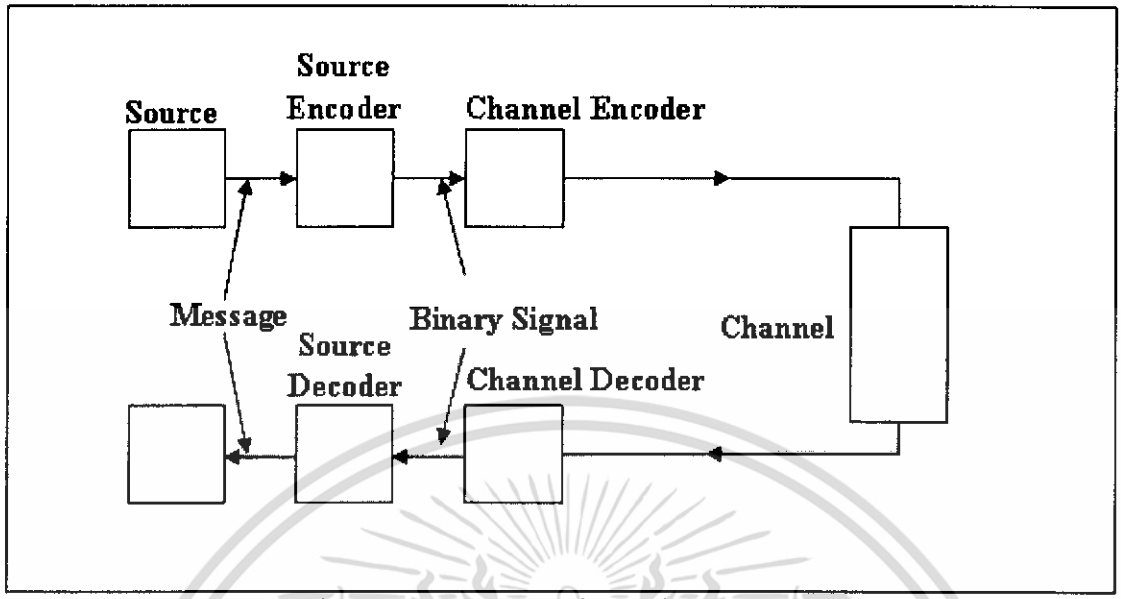
รูปที่ 2.1 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยแชนนอน

2.2.1 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยแชนนอน

แชนนอนได้เสนอโมเดลของระบบสื่อสารไว้ตามที่แสดงไว้ในรูป โดยแบ่งระบบสื่อสารออกเป็นส่วนประกอบหลัก ๆ คือ แหล่งกำเนิดข่าวสาร (Information Source) เครื่องส่งสัญญาณ (Transmitter) ช่องสัญญาณ (Channel) เครื่องรับสัญญาณ (Receiver) และผู้รับข่าวสารปลายทาง (Destination) แหล่งกำเนิดข่าวสารจะเป็นแหล่งที่ให้กำเนิดข่าวสาร (Message) ซึ่งข่าวสารนั้นอาจจะเป็นตัวอักษรที่เรียงกันเป็นคำและมีความหมาย หรือเป็นเสียงพูด เป็นต้น ช่องสัญญาณนั้นก็หมายถึงตัวกลางที่จะให้สัญญาณผ่านไปซึ่งจะหมายถึงตั้งแต่ออกจากเครื่องส่งจนถึงเครื่องรับ สัญญาณรบกวนจะเข้าสู่ช่องสัญญาณในระหว่างทาง

สำหรับเครื่องส่งนั้นจะทำหน้าที่ในการแปลงข่าวสารให้อยู่ในรูปสัญญาณที่เหมาะสมที่จะส่งผ่านช่องสัญญาณ แชนนอนได้เรียกขั้นตอนนี้ว่า "การเข้ารหัส" (Coding) สัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นนี้เมื่อส่งผ่านไปตามช่องสัญญาณก็จะมีสัญญาณรบกวนเข้ามาปะปน และก็ส่งผ่านถึงเครื่องรับในสภาพที่สัญญาณรบกวนปะปนอยู่ เครื่องรับนั้นก็จะทำหน้าที่ย้อนขั้นตอนของเครื่องส่ง คือ แปลงสัญญาณที่รับเข้ามาได้กลับไปเป็นข่าวสาร ในขั้นตอนดังกล่าวนี้ถ้าสัญญาณที่รับเข้ามาเป็นสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวนปะปนอยู่ เครื่องรับก็อาจจะทำงานได้อย่างสมบูรณ์แบบ คือ แปลงสัญญาณให้กลับมาอยู่ในรูปของข่าวสารได้อย่างถูกต้อง แต่ในสภาพที่มีสัญญาณรบกวนปะปนอยู่นั้น เครื่องรับที่ดีก็คือเครื่องรับที่แปลงสัญญาณกลับมาเป็นข่าวสารโดยมีการผิดพลาดน้อยที่สุด

ขั้นตอนในการแปลงสัญญาณกลับมาเป็นข่าวสารนี้ เรียกว่า "การถอดรหัส" (Decoding) ในระบบการสื่อสารที่ดีนั้นการเข้ารหัสจะต้องทำให้สัญญาณที่ได้มีความสามารถในการต่อต้านสัญญาณรบกวนสูง ในขณะเดียวกันก็ต้องเอื้ออำนวยต่อการถอดรหัสที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดต่ำสุด การเข้ารหัสแบบที่ใช้รหัสแก้ความผิดพลาด (Error Correcting Code) ที่ใช้ในระบบสื่อสารข้อมูลก็จัดว่าเป็นการเข้ารหัสที่เอื้ออำนวยให้การถอดรหัสมีความผิดพลาดน้อยที่สุด



รูปที่ 2.2 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยฟาโน

2.2.2 โมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอโดยฟาโน

ในปี ค.ศ.1961 ฟาโนได้เสนอโมเดลของระบบสื่อสารโดยดัดแปลงโมเดลของแชนนอน และเรียกโมเดลนี้ว่าโมเดลของระบบสื่อสารข้อมูล รูปที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบของโมเดลดังกล่าวนี้ ลักษณะเฉพาะของโมเดลก็คือ ฟาโนได้แยกส่วนที่เป็นเครื่องส่งในโมเดลของแชนนอนออกเป็นเครื่องเข้ารหัสข่าวสาร (Source encoder) และเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Encoder) ในขณะเดียวกันก็แยกเครื่องรับในโมเดลของแชนนอนเป็น เครื่องถอดรหัสช่องสัญญาณ (Channel Decoder) และเครื่องถอดรหัสข่าวสาร (Source Decoder) นอกจากนั้นสัญญาณในช่วงระหว่างเครื่องเข้ารหัสข่าวสารและเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณก็พิจารณาในรูปของสัญญาณไบนารี ดังนั้นเครื่องเข้ารหัสข่าวสารก็จะต้องทำการแปลงข่าวสารให้ออกมาในรูปของสัญญาณไบนารี ต่อจากนั้นเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณก็จะจัดการกับสัญญาณไบนารีนั้นให้อยู่ในรูปสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับส่งผ่านช่องสัญญาณต่อไป

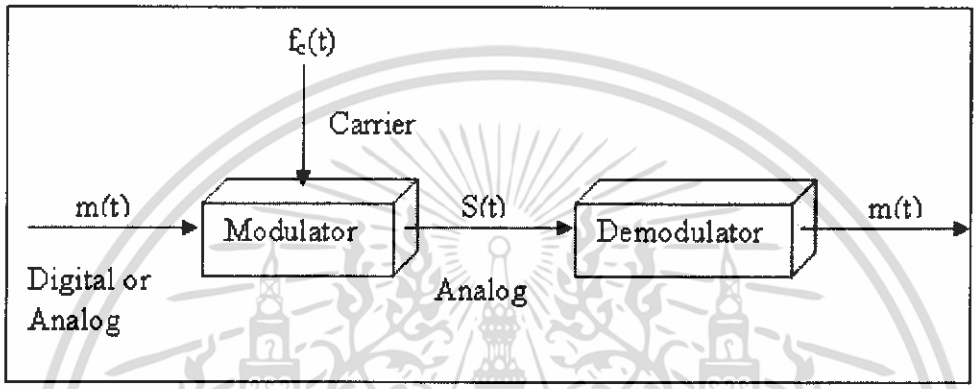
การที่ฟาโนแบ่งเครื่องส่งและเครื่องรับออกเป็น 2 ส่วนดังกล่าวนี้ ก็เพราะเล็งเห็นว่าการเข้ารหัสข่าวสารและการถอดรหัสข่าวสารนั้นเป็นขั้นตอนที่ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของความน่าจะเป็นของการเกิดของข่าวสาร ในขณะที่การเข้ารหัสช่องสัญญาณและการถอดรหัสช่องสัญญาณนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของช่องสัญญาณที่ส่งผ่านสัญญาณไป การแยกเป็น 1 ส่วนอย่างชัดเจนเช่นนี้ทำให้เห็นได้เด่นชัดขึ้นว่า ในส่วนของการเข้ารหัสข่าวสารนั้นเมื่อเลือกวิธีที่เหมาะสมกับความน่าจะเป็นของการเกิดข่าวสารก็จะทำให้เราสามารถใช้ความยาวโดยเฉลี่ยของสัญญาณไบนารีที่สั้นที่สุดในการส่งข่าวสารได้ นั่นคือมีโอกาสอัดข่าวสารได้ สำหรับในส่วนของการเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นก็หมายถึงเราจะสามารถเลือกรูปแบบของการส่งสัญญาณที่เหมาะสมกับ

ช่องสัญญาณที่มีอยู่เพื่อให้สัญญาณที่ได้จากเครื่องถอดรหัสช่องสัญญาณปลายทางมีการผิดพลาดน้อยที่สุด

สรุปคือโมเดลของฟาโนนี้ได้แยกหน้าที่หลัก 2 ประการของระบบสื่อสารคือ ประการแรกการส่งข่าวสารอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพสูงให้เป็นหน้าที่ของเครื่องเข้ารหัสข่าวสาร และอีกประการหนึ่งคือ การส่งสัญญาณให้มีความถูกต้องสูงให้กับเครื่องเข้ารหัสช่องสัญญาณ การแบ่งหน้าที่กันอย่างชัดเจนนี้ นอกจากจะมีประโยชน์ทางด้านทฤษฎีแล้วยังมีประโยชน์อย่างยิ่งในการออกแบบระบบสื่อสารในภาคปฏิบัติ นอกจากนั้นการที่ฟาโนเรียกโมเดลของระบบสื่อสารที่เสนอขึ้นนี้ว่าโมเดลของระบบสื่อสารข้อมูล ก็เป็นเพราะว่าฟาโนได้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ข่าวสารที่ต้องการส่งจะเป็นสัญญาณที่มีค่าต่อเนื่อง เช่น สัญญาณเสียง และสัญญาณภาพ เป็นต้น เครื่องเข้ารหัสข่าวสารก็จะสามารถแปลงให้สัญญาณนั้นอยู่ในรูปของสัญญาณไบนารีเสมอ ดังนั้นโมเดลของฟาโนนี้จึงเป็นโมเดลที่ถูกใช้โดยทั่วไปในขณะนี้

2.3 เทคโนโลยีการมอดูเลชัน (Modulation)

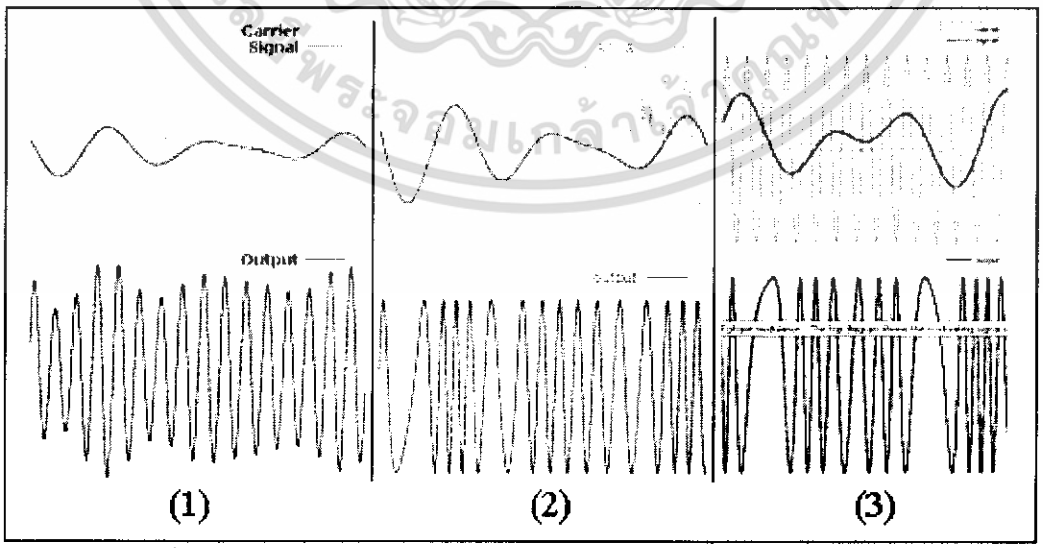
การมอดูเลตสัญญาณ หมายถึง การนำสัญญาณไฟฟ้าทางด้านต้นทาง ผสมเข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาห์ เพื่อฝากข่าวสารที่มีอยู่ในสัญญาณไฟฟ้าเข้าไปกับสัญญาณคลื่นพาห์ ซึ่งมีความถี่สูงกว่ามาก ๆ ดังนั้น การมอดูเลตจึงเป็นการแปลงความถี่ของสัญญาณให้อยู่ในความถี่สูง เพื่อความสะดวกในการส่งสัญญาณออกไป จากรูปที่ 2.3 เป็นการแสดงตัวอย่างการมอดูเลตและดีมอดูเลต



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างการ Modulation และ Demodulation

จากรูปสัญญาณ m(t) อาจเรียกว่า Baseband Signal ผ่านกระบวนการมอดูเลต จะได้สัญญาณ S(t) เรียกว่า Modulated Signal หรือ Bandpass

เทคโนโลยีการมอดูเลต มี 3 แบบ คือ การมอดูเลตแบบแอมปลิจูดชิฟท์คีย์อิง (Amplitude Shift Keying) การมอดูเลตแบบฟรีเควนซีชิฟท์คีย์อิง (Frequency-Shift Keying) และ การมอดูเลตแบบเฟสชิฟท์คีย์อิง (Phase-Shife Keying)



รูปที่ 2.4 แสดงรูปสัญญาณที่ทำการมอดูเลตแบบ ASK , FSK และ PSK

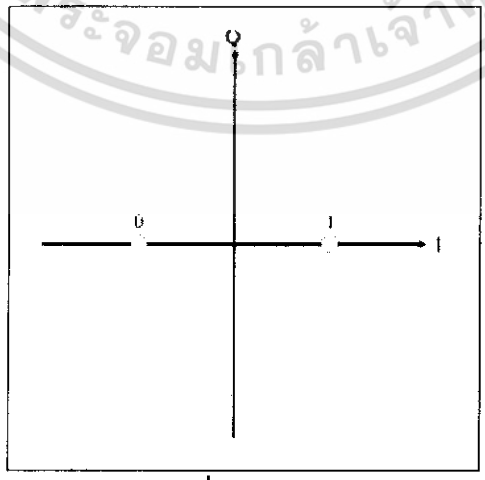
จากรูปที่ 2.4 ส่วนบนจะแสดงรูปของสัญญาณพาห์และสัญญาณข่าวสาร และส่วนล่างเป็นรูปของสัญญาณที่ได้หลังจากทำการมอดูเลตแล้ว โดยรูปที่ (1) เป็นการมอดูเลตแบบแอมปลิจูดชิฟท์คีย์อิง (ASK) คือ แอมปลิจูดของสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตจะขึ้นอยู่กับระดับแอมปลิจูดของสัญญาณข่าวสาร รูปที่ (2) เป็นการมอดูเลตแบบฟรีเดวนซีชิฟท์คีย์อิง (FSK) คือ ความถี่ของสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตจะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณข่าวสาร โดยแอมปลิจูดของสัญญาณพาห์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง และรูปที่ (3) เป็นการมอดูเลตแบบเฟสชิฟท์คีย์อิง (PSK) คือเฟสของสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตจะเปลี่ยนไปตามระดับของสัญญาณข่าวสาร โดยแอมปลิจูดและความถี่ของสัญญาณพาห์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง

สำหรับการมอดูเลชันข้อมูลดิจิตอลที่มีระดับของสัญญาณเพียง 2 ระดับ นั้นรูปแบบ การมอดูเลตที่ใช้โดยมากจะเป็นแบบ ไบนารีเฟสชิฟท์คีย์อิง (Binary Phase Shift Keying) ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของการมอดูเลตแบบเฟสชิฟท์คีย์อิง โดยที่การมอดูเลตแบบไบนารีเฟสชิฟท์คีย์อิง (BPSK) นั้นจะแสดงสัญญาณไบนารีด้วยสัญญาณ 2 เฟส ซึ่งเฟสทั้งสองมีมุมต่างกัน 180° ดังรูปที่ 2.5 โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$\text{BPSK} \qquad S(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) \\ A\cos(2\pi f_c t + \pi) \end{cases} = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{binary1} \\ -A\cos(2\pi f_c t) & \text{binary0} \end{cases}$$

ถ้ากำหนดให้ฟังก์ชัน d(t) เป็น Discrete Function โดยจะมีค่าเป็น +1 แทน บิต 1 และ -1 แทน บิต 0 จะสามารถเขียนสมการได้ใหม่ ดังนี้

$$\text{BPSK} \qquad S(t) = Ad(t)\cos(2\pi f_c t)$$



รูปที่ 2.5 แสดงสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตแบบ BPSK

2.4 สัญญาณรบกวน (Noise)

สัญญาณรบกวนเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นเสมอในระบบสื่อสาร และจะเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ด้วย ทั้งนี้สัญญาณรบกวนเกิดจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้อยู่ เช่น ความต้านทาน ทรานซิสเตอร์ และไดโอด เป็นต้น ล้วนเป็นต้อนกำเนิดของสัญญาณรบกวนทั้งสิ้น นอกจากนี้สัญญาณรบกวนยังเกิดจากการรบกวนจากภายนอก (Interference) อีกด้วย

2.4.1 ทฤษฎีทางด้านสถิติและความน่าจะเป็นที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนมีผลให้ข้อมูลข่าวสารมีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยสัญญาณรบกวนจะมีลักษณะเป็นสัญญาณสุ่ม ดังนั้นในการวิเคราะห์จะใช้ทฤษฎีทางด้านสถิติและความน่าจะเป็นมาประยุกต์ ดังนี้

2.4.1.1 ตัวแปรสุ่ม คือ ฟังก์ชันที่ประกอบด้วยข้อมูลแต่ละจุดของสัญญาณรบกวน โดยค่าของตัวแปรสุ่มต้องอยู่ในขอบเขตของสัญญาณรบกวน

2.4.1.2 ค่าเฉลี่ย ถ้าให้สัญญาณรบกวนเป็นฟังก์ชัน n(t) มีค่าอยู่ในช่วง t_1 ถึง t_2 จะได้สมการหาค่าเฉลี่ย ดังนี้

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบอนาล็อก

$$\bar{n} = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t1}^{t2} n(t)dt$$

ถ้าในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบดิสครีต ให้สัญญาณรบกวนทั้งหมด N จุด โดยมีค่าเป็น n_i เมื่อ i = 1,2,…,N จะได้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนเป็น

$$\bar{n} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} ni$$

2.4.1.3 ความแปรปรวน

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบอนาล็อก

$$\sigma^2 = \frac{1}{t_2 - t_1}\int_{t1}^{t2} [n(t) - \bar{n}]^2 dt$$

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบดิสครีต

$$\sigma^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[n_i - \bar{n}]^2$$

2.4.1.4 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบอนาล็อก

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{t2-t1}\int_{t1}^{t2}[n(t)-\bar{n}]^2\,dt}$$

ในกรณีที่สัญญาณเป็นแบบดิสครีต

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(n_i - \bar{n})^2}$$

2.4.1.5 การแจกแจงความน่าจะเป็น คือ ความน่าจะเป็นในการเกิด P(x) ใด เมื่อ $X \le x$ โดยใช้สัญลักษณ์ $F_x(x)$ ซึ่ง

$$F_x(x) = P\{X \le x\}$$

โดยคุณสมบัติที่สำคัญของค่า $F_x(x)$ คือ

(1) $F_x(-\infty) = 0$

(2) $F_x(\infty) = 1$

(3) $0 \le F_x(x) \le 1$

(4) $F_x(x_1) \le F_x(x_2)$ เมื่อ $x_1 < x_2$

(5) $P\{x_1 < x \le x_2\} = F_x(x_2) - F_x(x_1)$

(6) $F_x(x^+) = F_x(x)$

2.4.1.6 ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ อนุพันธ์ของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ อนุพันธ์ของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น

$$f_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx}$$

โดยคุณสมบัติที่สำคัญของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น คือ

(1) $0 \le f_x(x)$

(2) $\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x)dx = 1$

(3) $F_x(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_x(\lambda)d\lambda$

(4) $P\{x_1 < x \le x_2\} = F_x(x_2) - F_x(x_1) = \int_{x1}^{x2} f_x(\lambda)d\lambda$

2.4.2 สัญญาณรบกวนแบบ AWGN

สัญญาณรบกวนแบบ AWGN คือ สัญญาณรบกวนแบบที่มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นในรูปของสมการ

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \varepsilon^{\frac{-(x-\bar{x})^2}{(2\sigma^2)}}$$

และมีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น คือ

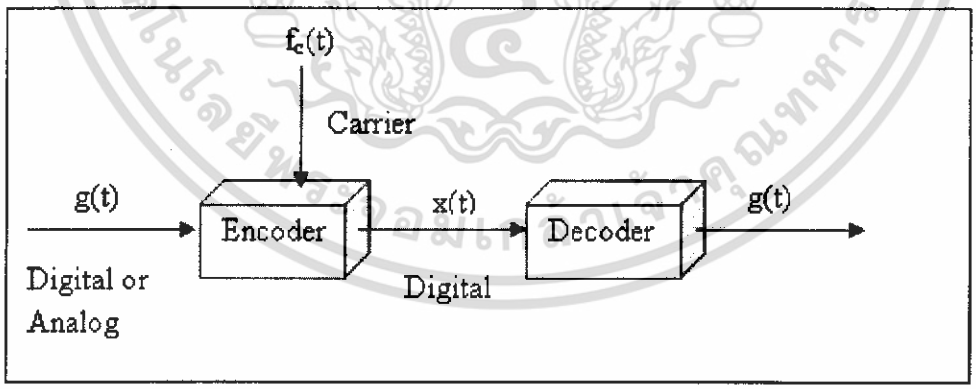
$$F_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{(\lambda-\bar{x})^2}{(2\sigma^2)}} d\lambda$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\frac{(x-\bar{x})}{\sigma}} e^{\frac{-\lambda^2}{2}} d\lambda$$

บทที่ 3
ทฤษฎีการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดและการบีบอัดรูปภาพ

3.1 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ

การส่งผ่านสัญญาณดิจิตอลในระบบสื่อสารโดยทั่วไป มักจะเกิดปัญหาการผิดเพี้ยนของรูปสัญญาณเนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่เป็นอุดมคติของช่องสัญญาณ หรือเนื่องจากผลกระทบของสัญญาณรบกวนภายนอกในรูปแบบต่าง ๆ ปัญหาเหล่านี้อาจส่งผลให้ข้อมูลที่รับได้ที่ภาครับมีความผิดพลาดเกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้ระบบสื่อสารในปัจจุบันซึ่งต้องการความถูกต้องและแน่นอนในการส่งข้อมูล มักจะมีการนำข้อมูลไปผ่านกระบวนการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Coding) ก่อนที่จะทำการส่งออก เพื่อให้การรับส่งมีความผิดพลาดน้อยลงและอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มจำนวนของบิตที่จะส่งออกโดยบิตพิเศษที่เพิ่มเข้ามาจะช่วยให้ภาครับสามารถที่จะตรวจจับความผิดพลาดได้ (Error Detection) หรือหากมีการเพิ่มจำนวนบิตเข้าไปเป็นจำนวนที่มากพอภาครับก็อาจจะแก้ไขความผิดพลาด (Error Correction) ของข้อมูลได้ด้วย สังเกตว่าการเข้ารหัสช่องสัญญาณมีผลทำให้อัตราบิตข้อมูลที่ต้องส่งจริงมีขนาดสูงขึ้น ซึ่งหมายถึงว่าช่องสัญญาณที่ใช้ส่งก็จะต้องมีแบนด์วิดท์ที่ใหญ่ขึ้นด้วย หรือถ้าพิจารณาในทางกลับกันหากช่องสัญญาณมีแบนด์วิดท์ที่จำกัดและต้องการให้การรับส่งข้อมูลมีความถูกต้องมากขึ้น ก็จะต้องลดอัตราการส่งบิตข้อมูลของผู้ใช้ลง



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างการเข้ารหัสและถอดรหัสข้อมูล

จากรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงกระบวนการเข้าและถอดรหัส โดยข้อมูลเริ่มต้นเป็น g(t) เป็นสัญญาณดิจิตอล หรือสัญญาณอนาล็อกเมื่อถูกเข้ารหัสจะได้เป็นสัญญาณ x(t) โดยรูปแบบของ x(t) ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีการเข้ารหัส โดยการเลือกเทคโนโลยีการเข้ารหัสอาจเลือกโดยคำนึงถึงการประหยัด แบนด์วิดท์ หรือประสิทธิภาพในการลดความผิดพลาด

สิ่งที่ตัดสินใจว่าภาครับจะประสบความสำเร็จในการแปลความหมายสัญญาณ นั้นมีหลายค่าที่ใช้วัด คือ Signal-to-Noise Ratio(SNR) , Data Rate และ Bandwidth โดยถ้ามีการเพิ่ม Data Rate ก็จะเป็นการเพิ่ม Bit Error Rate(BER) การเพิ่ม Signal-to-Noise Ratio(SNR) ก็จะเป็นการลดอัตรา Bit Error Rate(BER) การเพิ่ม Bandwidth ก็จะทำให้สามารถเพิ่มค่า Data Rate ได้

การเข้ารหัสช่องสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- การเข้ารหัสแบบบล็อก (Block codes)
- การเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolutional codes)

การเข้ารหัสแบบบล็อกจะแบ่งบิตข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสออกเป็นกลุ่ม หรือที่เรียกว่าบล็อกขนาด k บิต จากนั้นบิตข้อมูลแต่ละบล็อกจะถูกแปลงให้กลายเป็นคำรหัส (Codeword) ที่มีความยาวเท่ากับ n บิต โดยที่ n > k ดังนั้นจึงมักเรียกการเข้ารหัสนี้ว่า (n,k) โดยปกติแล้วชุดรหัสที่ได้จากการเข้ารหัสนั้นจะยังคงประกอบด้วยส่วนของบิตข้อมูลเดิมจำนวน k บิต และส่วนของบิตพิเศษที่เพิ่มเข้าไปอีกจำนวน n-k บิต หรือที่เรียกว่าบิตเช็ค (Check Bit) เพื่อใช้สำหรับตรวจสอบว่ามีความผิดพลาดในบิตข้อมูลในระหว่างที่ส่งผ่านช่องสัญญาณหรือไม่ ในขณะที่ภาครับก็จะมีวงจรที่ทำหน้าที่ถอดรหัสเพื่อดึงบิตข้อมูลเดิมออกมา พร้อมกันนั้นก็จะให้ค่าที่เรียกว่า ซินโดรม (Syndrome) ออกมาด้วย โดยค่าซินโดรมนั้นมีไว้สำหรับบ่งบอกว่ามีความผิดพลาดเกิดขึ้นในข้อมูลหรือไม่ หรืออาจใช้ในการบ่งบอกถึงตำแหน่งของบิตที่ผิดด้วย

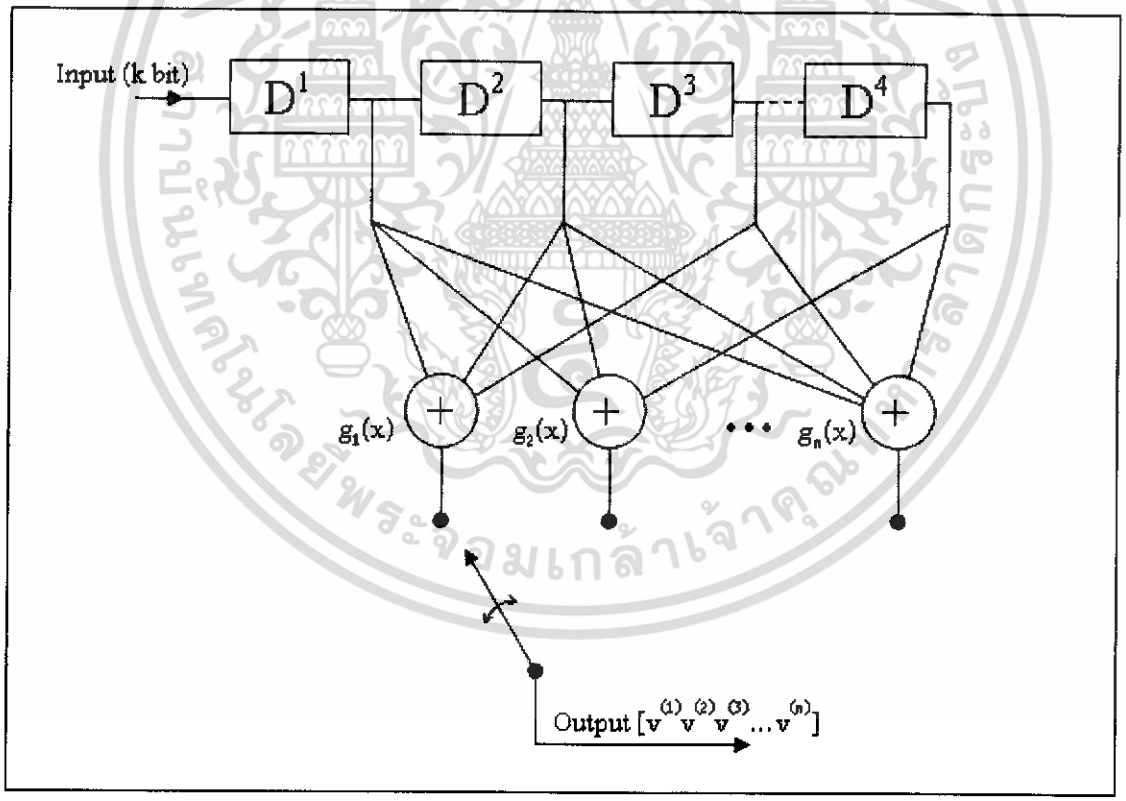
การเข้ารหัสคอนโวลูชันแตกต่างจากการเข้ารหัสแบบบล็อกตรงที่ ข้อมูลที่จะเข้ารหัสไม่จำเป็นต้องนำมาแบ่งออกเป็นบล็อกที่มีขนาดความยาวตายตัวก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการเข้ารหัส เราสามารถป้อนข้อมูลเข้าสู่วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชันได้อย่างต่อเนื่อง และกระบวนการเข้ารหัสจะดำเนินต่อไปจนกว่าจะหยุดการป้อนข้อมูลเข้าไป ดังนั้นจุดแตกต่างที่สำคัญคือ รหัสคอนโวลูชันจะไม่นิยามชุดรหัสในรูปของ (n,k) เนื่องจากไม่มีการระบุขอบเขตความยาวของข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสที่แน่นอน การนิยามคุณสมบัติของรหัสคอนโวลูชันจึงแสดงในรูปของอัตราส่วนการเข้ารหัส เช่น 1/n แทน กล่าวคือ เมื่อเราป้อนข้อมูล 1 บิตเข้าสู่วงจรเข้ารหัส จะได้เป็นรหัสที่มีความยาวเพิ่มขึ้น n เท่า อัตราการเข้ารหัสอาจมีค่าแตกต่างไปจากนี้ได้ เช่น การป้อนข้อมูล 2 บิต แล้วให้ผลเป็นรหัสที่มีความยาว 3 บิต อัตราส่วนการเข้ารหัสในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 2/3 เป็นต้น

3.2 รหัสคอนโวลูชัน (Convolution Code)

3.2.1 การเข้ารหัสคอนโวลูชัน

การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน ที่ทำให้ข้อมูลเกิดการผิดพลาดมาก ๆ นิยมใช้การเข้ารหัสสำหรับแก้ไขการผิดพลาดล่วงหน้า คือ การเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolution Code) ซึ่งเป็นกระบวนการเข้ารหัสที่ไม่จำเป็นต้องมีการแบ่งบิตข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสออกเป็นบล็อก ๆ คือ การเข้ารหัสสามารถป้อนชุดบิตข้อมูลขนาดความยาวเท่าใดก็ได้เข้าสู่วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน และผลลัพธ์ที่ได้จากการเข้ารหัสจะเป็นชุดคำรหัสที่มีความยาวเป็นจำนวนเท่าของชุดบิตข้อมูลที่ป้อนเข้า

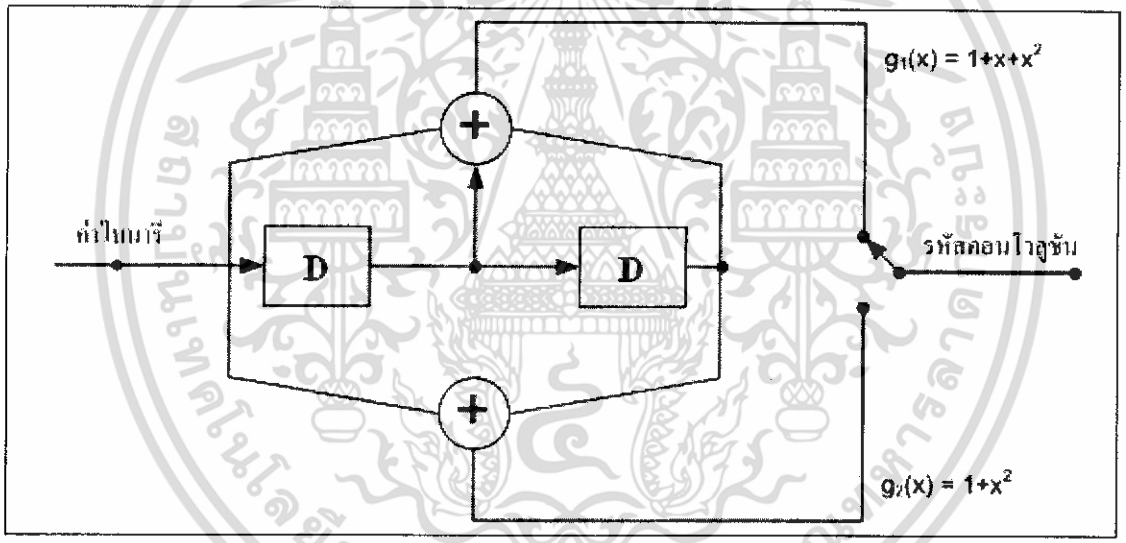
การเข้ารหัสคอนโวลูชัน เป็นการหาความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูลอินพุตที่เรียงลำดับอย่างต่อเนื่อง โดยวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ซึ่งประกอบด้วยตัวรีจิสเตอร์ที่ทำหน้าที่หน่วงเวลา (Shift Register) และ เอ็กคูซีฟออ (Exclusive OR)



รูปที่ 3.2 โครงสร้างวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน

การทำงานของการเข้ารหัสคอนโวลูชันแสดงในรูปที่ 3.2 โดยการเข้ารหัสแต่ละครั้งจะต้องป้อนข้อมูลอินพุตจำนวน k บิต เข้าวงจรเข้ารหัสแบบต่อเนื่อง โดยข้อมูลเอาต์พุตของการเข้ารหัส จะเกิดจากการนำข้อมูลอินพุตและข้อมูลในรีจิสเตอร์ มาเอ็กคูซีฟออกัน โดยมี Generator Polynomial (g(x)) แสดงตำแหน่งที่จะนำมาเอ็กคูซีฟออกัน ซึ่งเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างบิตข้อมูลที่ต่อเนื่องกัน โดยความกว้างของข้อมูลที่ต่อเนื่องกันนี้เรียกว่า Constraint Length (K) การอ่านค่าเอาต์พุตของการเข้ารหัสจะอ่านค่า $v^{(1)}$, $v^{(2)}$, $v^{(3)}$ ... $v^{(n)}$ ทีละบิตไปจนกระทั่งครบทั้ง n บิต โดยข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสจะมีความยาวเป็น n เท่าของข้อมูลก่อนทำการเข้ารหัส ส่วนค่าอัตราการเข้ารหัส (R) เป็นอัตราส่วนของจำนวนข้อมูลอินพุต (k) ต่อจำนวนเอาต์พุต (n) หรือ k/n

3.2.2 ตัวอย่างการเข้ารหัสคอนโวลูชัน

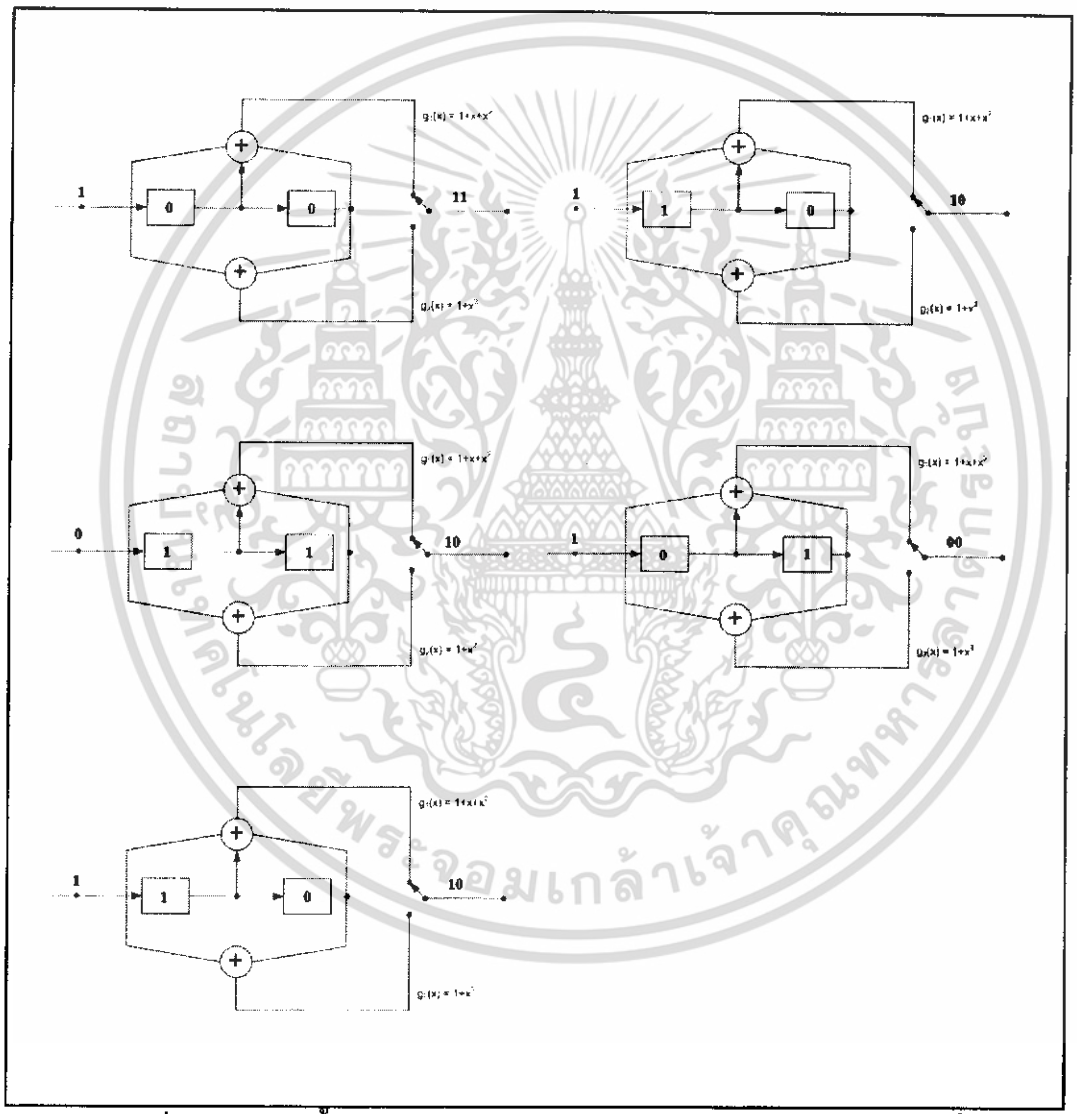


รูปที่ 3.3 วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่ค่า *R* เท่ากับ 1/2 และค่า *K* เท่ากับ 3

ในการทำความเข้าใจกับกลไกการทำงานของวิธีการเข้ารหัสคอนโวลูชัน เราจะอาศัยวงจรเข้ารหัสที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 Constraint Length เท่ากับ 3 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ $1+x+x^2$ และ g_2 คือ $1+x^2$ ในรูปที่ 3.3 เป็นตัวอย่างในการอธิบาย จากวงจรในรูปจะเห็นว่า k=1 ดังนั้นจำนวนบิตที่เลื่อนเข้าในการเข้ารหัสแต่ละครั้งจะมีเพียง 1 บิต ค่า Constraint Length(K) = 3 หมายความว่าต้องใช้รีจิสเตอร์จำนวน 2 ชุด

62823

การเข้ารหัสข้อมูลแต่ละบิตจะให้เป็นคำรหัสจำนวน 2 บิต โดยค่าคำรหัสจะได้จากขาออกของวงจรพหุนามของ $g_1(x)$ และ $g_2(x)$ โดยกระบวนการอ่านค่าเหล่านี้จะวนสลับกันไป ยกตัวอย่าง เช่น ถ้าบิตข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสมีค่าเป็น 11011 คำรหัสที่ได้จากวงจรเข้ารหัสจะมีค่าเท่ากับ 11 10 10 00 10



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างขั้นตอนการเข้ารหัสข้อมูล 11011 โดยใช้วงจรเข้ารหัสรูปที่ 3.3

3.2.3 แผนภาพไดอะแกรมสถานะ (State Diagram)

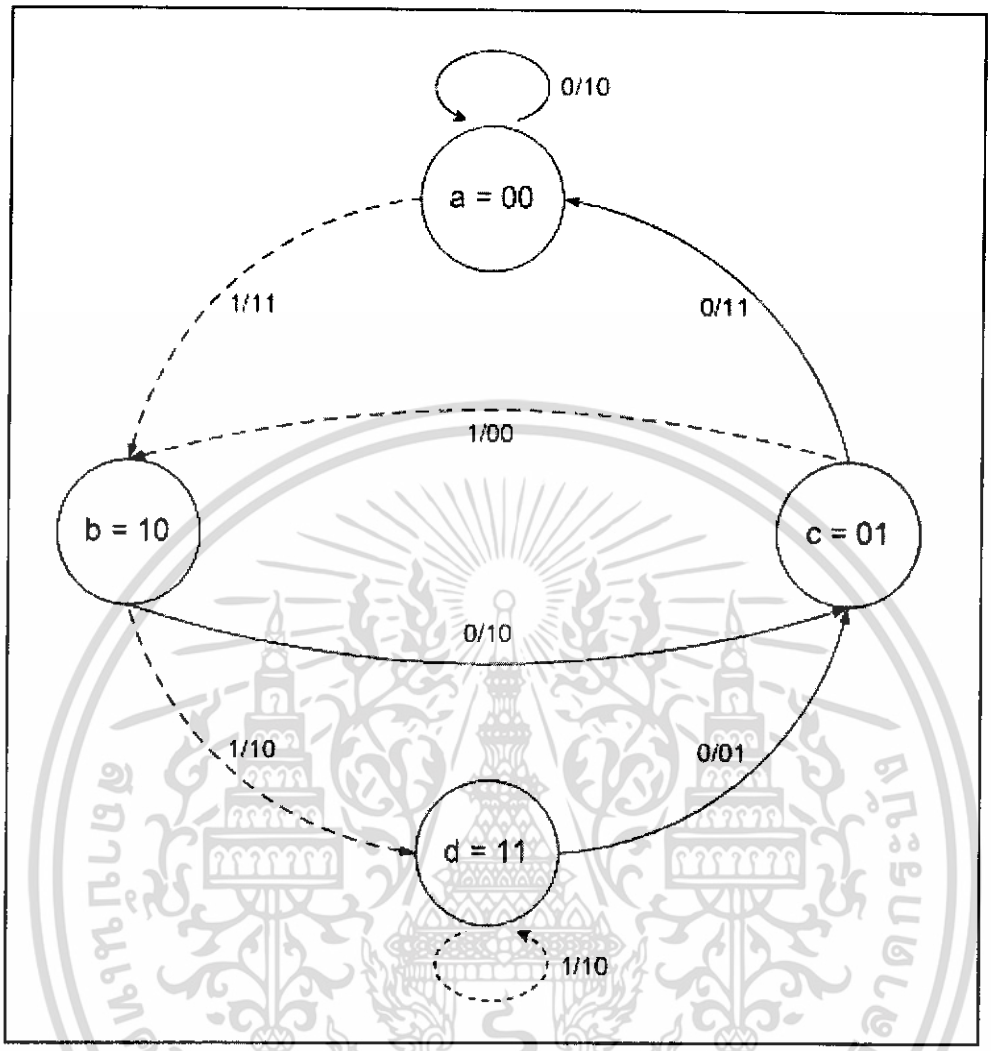
ในการพิจารณาและการเข้าถึงคุณลักษณะของวงจรเข้ารหัสเราสามารถใช้แผนภาพแสดงการเปลี่ยนสถานะ (State Diagram) ช่วยในการอธิบาย จากวงจรในรูปที่ 3.3 วงจรใช้รีจิสเตอร์จำนวน 2 ตัว สถานะของข้อมูลที่บรรจุอยู่ในรีจิสเตอร์มีได้ $2^2 = 4$ สถานะ คือ a = 00 , b = 10 , c = 01 , d = 11

สถานะ	อินพุต	เอาต์พุต	สถานะต่อไป
a = 00	0	0 0	a
	1	1 1	b
b = 10	0	1 0	c
	1	0 1	d
c = 01	0	1 1	a
	1	0 0	b
d = 11	0	0 1	c
	1	1 0	d

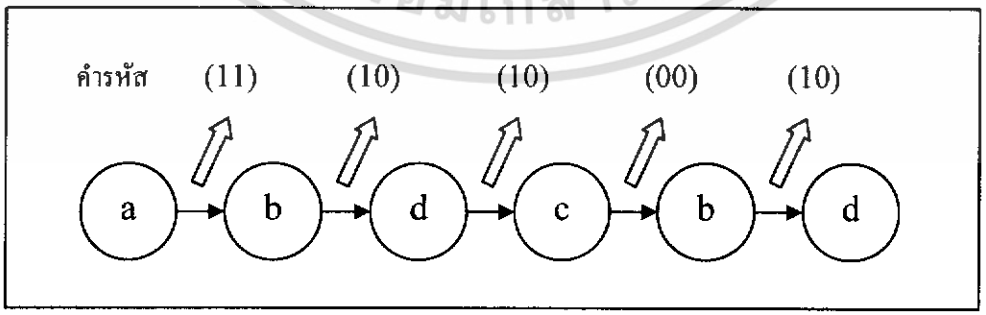
ตารางที่ 2.1 แสดงตารางแสดงสถานะจากการเข้ารหัสโดยใช้วงจรในรูปที่ 3.3

จากตารางสามารถเขียนไดอะแกรมของสถานะแทนได้ดังรูปที่ 3.5 ค่าในวงกลมแสดงสถานะของข้อมูลที่อยู่ในรีจิสเตอร์แต่ละตัว และเส้นที่เชื่อมระหว่างวงกลมแสดงการเปลี่ยนสถานะซึ่งขึ้นอยู่กับอินพุตที่เป็น 0 หรือ 1

ยกตัวอย่าง เช่น การเข้ารหัสที่มีข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสมีค่าเป็น 11011 วงจรเข้ารหัสอยู่ในสถานะ a เมื่อได้รับการป้อนข้อมูลบิตแรกที่มีค่าเท่ากับ 1 เข้าสู่วงจรส่งผลให้วงจรเปลี่ยนสถานะจาก a ไปเป็น b เมื่อป้อนข้อมูลบิตที่สองที่มีค่าเป็น 1 เข้าไปในวงจร ผลที่เกิดขึ้นคือวงจรเปลี่ยนจากสถานะ b ไปเป็น d บิตที่สามที่ป้อนเข้าวงจรมีค่าเป็น 0 ระบบจึงเปลี่ยนสถานะจาก d ไปสู่สถานะ c บิตที่สี่ที่ป้อนเข้าวงจรมีค่าเป็น 1 ระบบจึงเปลี่ยนสถานะจาก c ไปสู่สถานะ b และบิตสุดท้ายคือบิตที่ห้าที่มีค่าเป็น 1 เข้าไปในวงจร ผลที่เกิดขึ้นคือวงจรเปลี่ยนจากสถานะ b ไปเป็น d หากนำลำดับตามเวลาจะได้ผลแสดงในรูปที่ 3.6



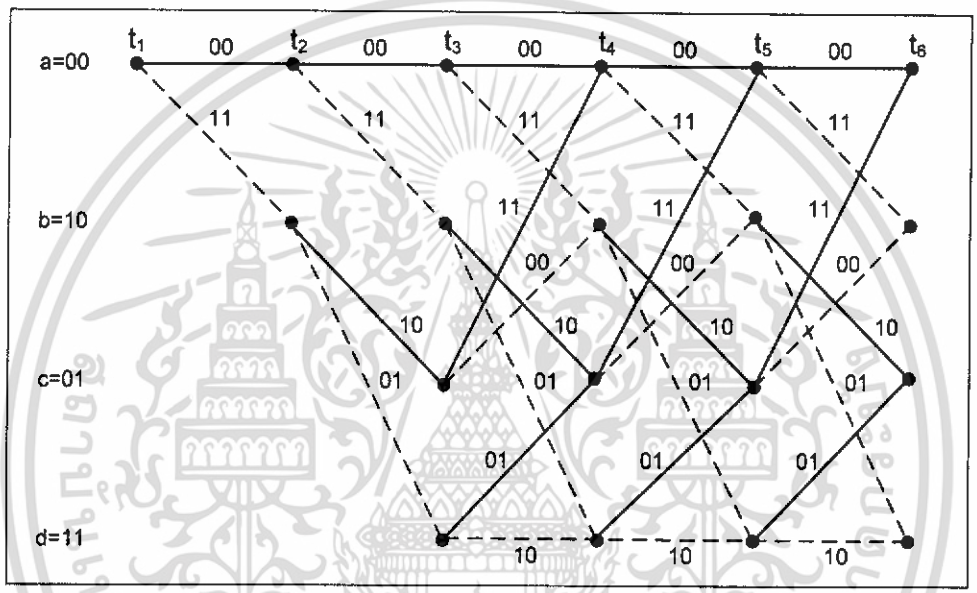
รูปที่ 3.5 แสดงไดอะแกรมสถานะของวงจรรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.6 แสดงการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นและคำรหัสที่ได้

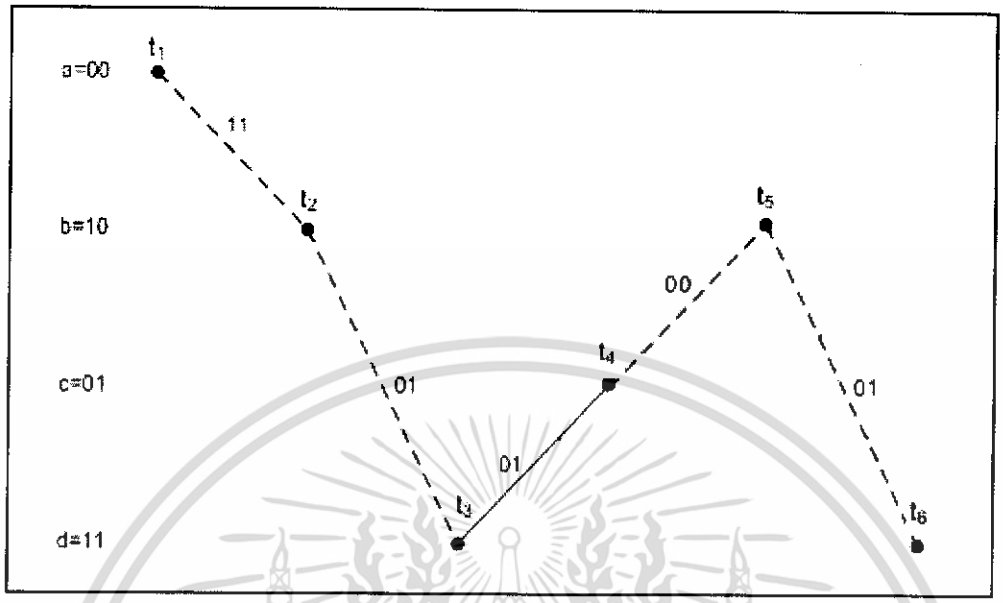
3.2.4 ไดอะแกรมทรีริส (Trellis Diagram)

จากแผนภาพแสดงการเปลี่ยนสถานะ ถ้าเราเพิ่มแกนทางเวลาในลักษณะที่คล้ายคลึงกับ รูปที่ 3.6 เพียงแต่มีการแสดงสถานะของระบบทั้งหมดในแต่ละเวลาอย่างเป็นระบบผลที่ได้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.7 แผนภาพที่กล่าวถึงนี้มีชื่อเรียกว่า ไดอะแกรมทรีริส (Trellis Diagram) สังเกตว่าจุดเริ่มต้นของภาพจะอยู่ที่สถานะ a เสมอจากนั้นบิตข้อมูลที่ป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสจะทำให้วงจรเปลี่ยนสถานะไป จากรูปจะเห็นว่าโครงสร้างของไดอะแกรมทรีริส จะเริ่มซ้ำจากบิตที่ 3



รูปที่ 3.7 แสดงไดอะแกรมทรีริส (Trellis Diagram)

สำหรับตัวอย่างการเข้ารหัสข้อมูล 11011 ที่อธิบายไว้ในข้างต้นเราสามารถแสดงรายละเอียดของไดอะแกรมทรีริส ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สังเกตว่าวงจรเข้ารหัสจะเริ่มต้นจากสถานะ a เสมอ



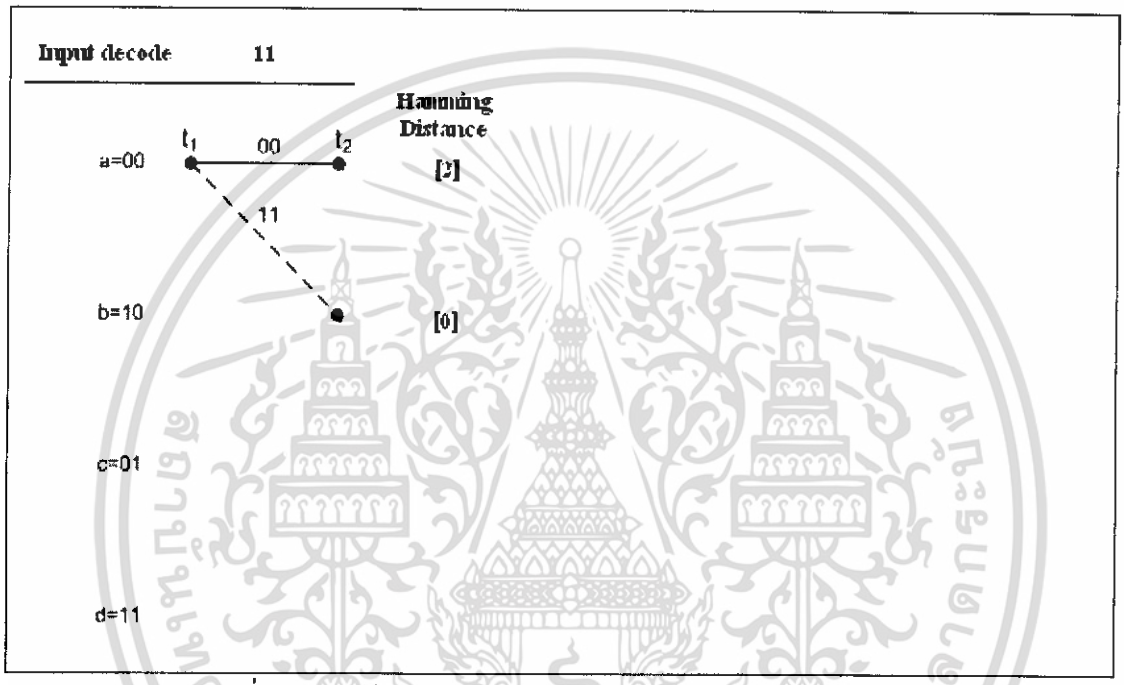
รูปที่ 3.8 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการเข้ารหัสคอนโวลูชันในตัวอย่าง 3.2.2

3.3 การถอดรหัสคอนโวลูชัน ด้วย Viterbi Algorith

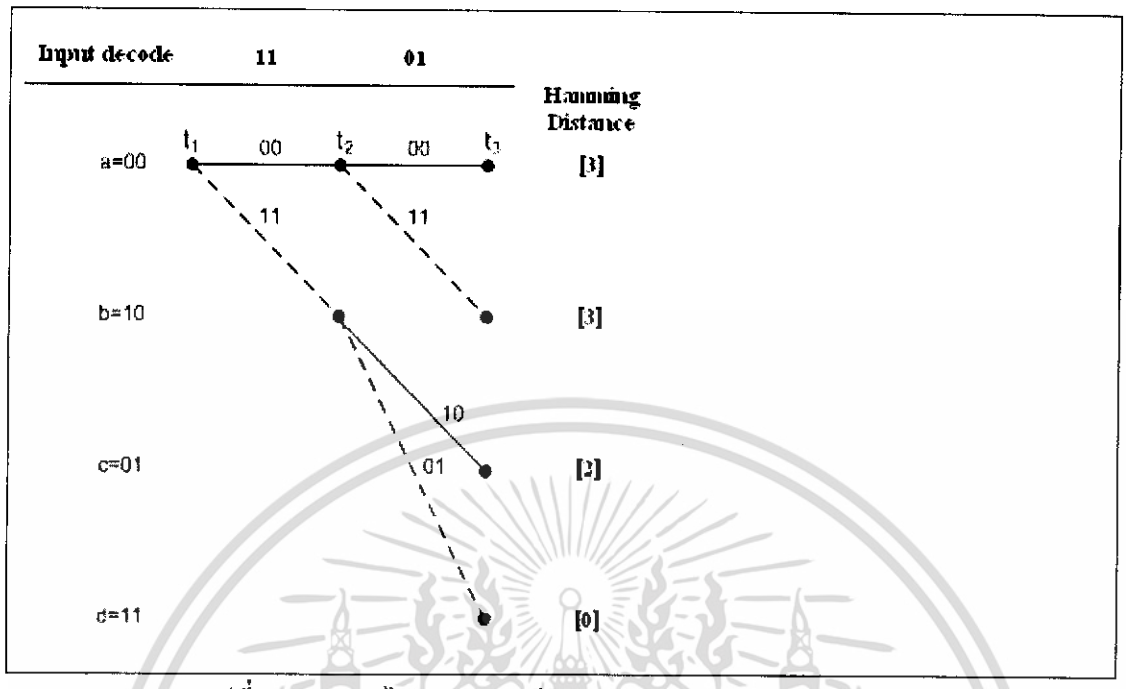
การถอดรหัสคอนโวลูชันนั้นมีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่าวิธีการเข้ารหัสมาก ซึ่งการถอดรหัสมีหลายวิธีแต่การถอดรหัสด้วย Viterbi Algorithm นั้นเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพสูง ซึ่งลักษณะการทำงานของ Viterbi Algorithm เป็นแบบ Maximum Likelihood Decoding โดยอาศัยไดอะแกรมทรีริสเป็นกลไกพื้นฐานในกระบวนการถอดรหัส ผลลัพธ์ที่ได้จากการถอดรหัสจะเป็นเส้นทางเพียงเส้นทางเดียวที่มีความน่าจะเป็นสูงสุดจากเส้นทางทั้งหมดในไดอะแกรมทรีริส ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับข้อมูลที่ถูกส่งมากที่สุด

วิธีการถอดรหัสแบบ Viterbi นั้นจากที่เราทราบพฤติกรรมหรือเส้นทางของการเข้ารหัสจากไดอะแกรมทรีริสที่ค่าเอาต์พุตของการเข้ารหัสอยู่บนกิ่งทรีริส ดังนั้นในการถอดรหัสเราสามารถนำข้อมูลที่รับมาได้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่บนแต่ละกิ่งของทรีริส และเลือกเส้นทางที่เหมือนกันมากที่สุด (Maximum Likelihood) โดยพิจารณาจากระยะแฮมมิง และเมื่อได้เส้นทางบนทรีริสแล้วจึงหาว่าเส้นทางนั้นเข้ารหัสมาจากข้อมูลใด

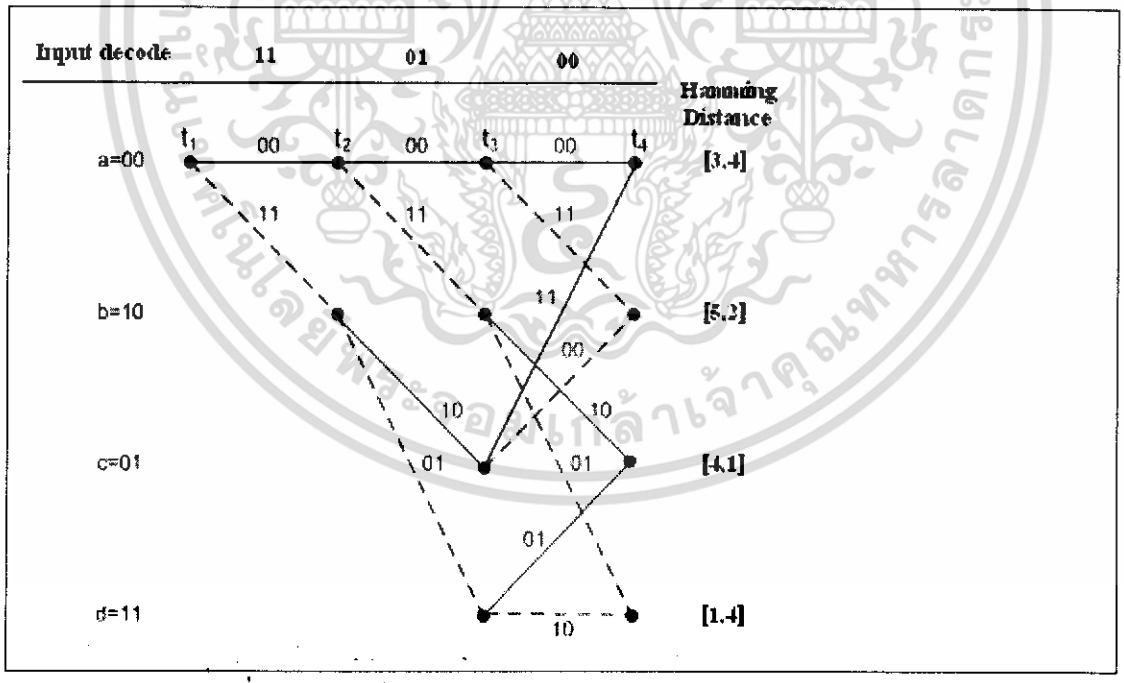
เราจะอาศัยตัวอย่างการถอดรหัสของคำรหัสที่มีขนาดสั้น ๆ เพื่อช่วยในการอธิบายวิธีการถอดรหัสแต่ละขั้นโดยละเอียด คำรหัสตัวอย่างที่ใช้ในการถอดรหัส คือ 11 01 01 00 01 ซึ่งได้จากการเข้ารหัสข้อมูล 11011 โดยอาศัยวงจรในรูปที่ 3.3 เพื่อให้เห็นภาพว่ารหัสคอนโวลูชันมีขีดความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการส่งผ่านช่องสัญญาณ ดังนั้นจะสมมุติให้ชุดบิตที่จะนำไปผ่านการถอดรหัสมีค่าเท่ากับ 11 01 00 00 01



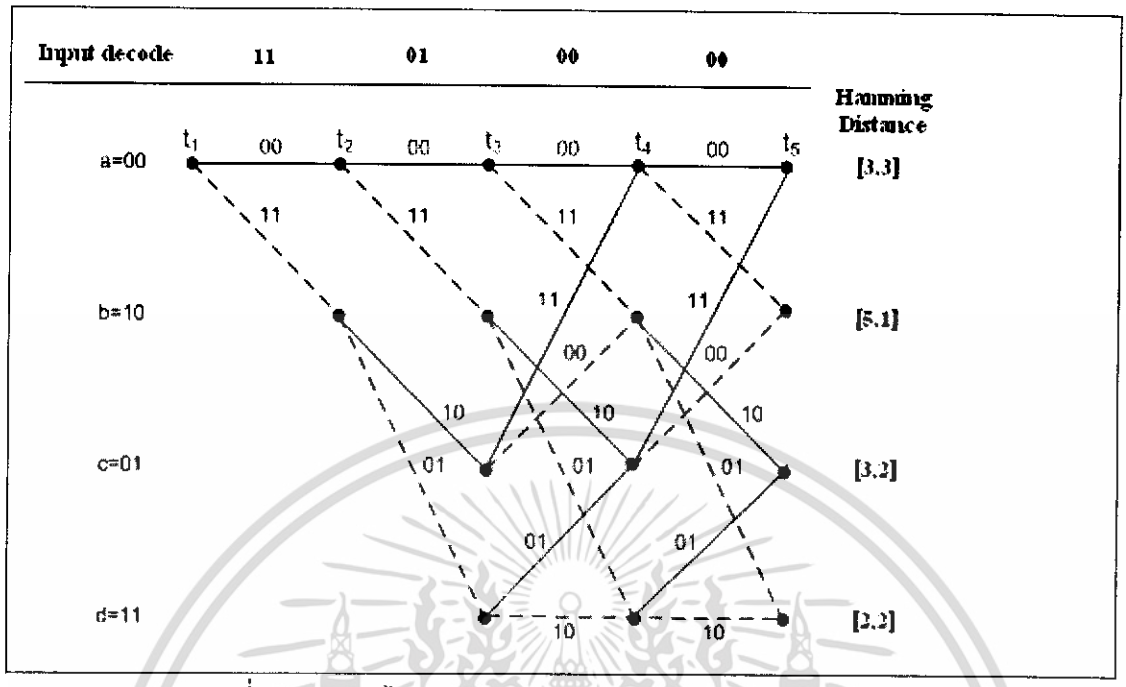
รูปที่ 3.9 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi ที่มีข้อมูลที่ทำการถอดรหัสเป็น 11



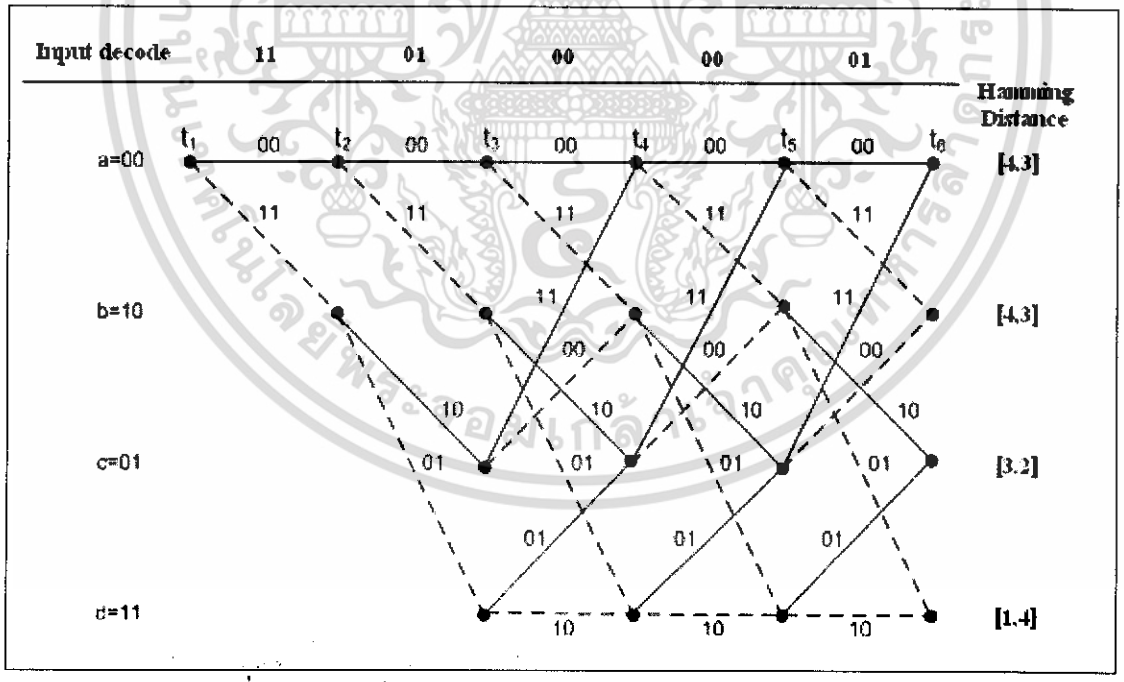
รูปที่ 3.10 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi ที่มีข้อมูลที่ทำการถอดรหัสเป็น 11 01



รูปที่ 3.11 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi ที่มีข้อมูลที่ทำการถอดรหัสเป็น 11 01 00

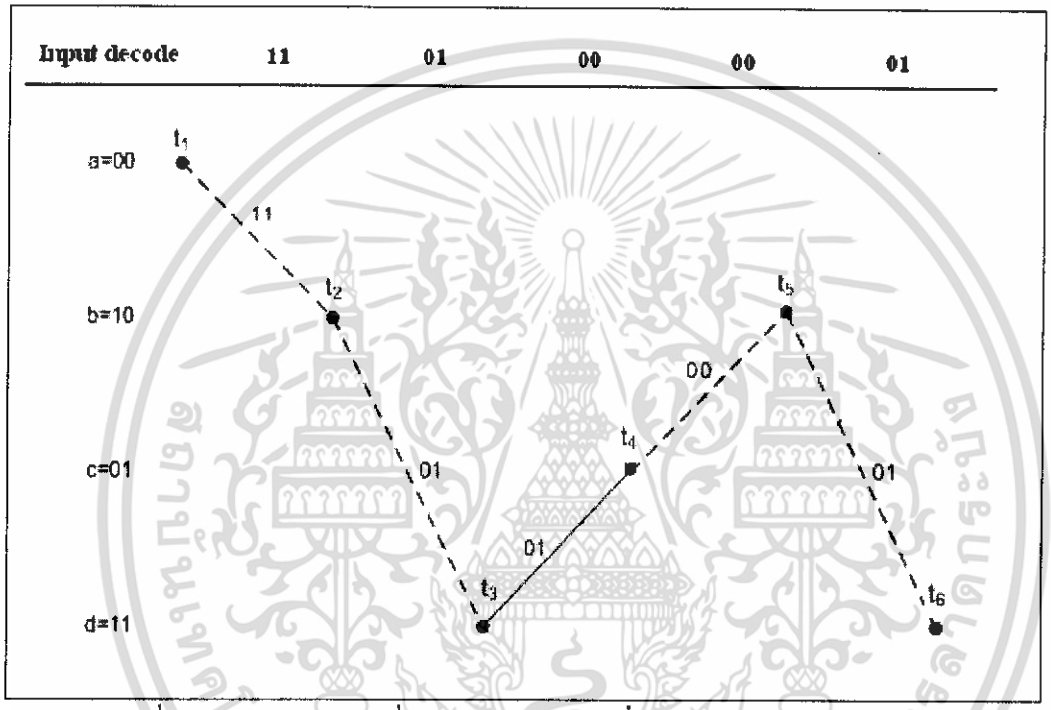


รูปที่ 3.12 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi
ที่มีข้อมูลที่ทำการถอดรหัสเป็น 11 01 00 00



รูปที่ 3.13 แสดงไดอะแกรมทรีริสของการถอดรหัสแบบ Viterbi
ที่มีข้อมูลที่ทำการถอดรหัสเป็น 11 01 00 00 01

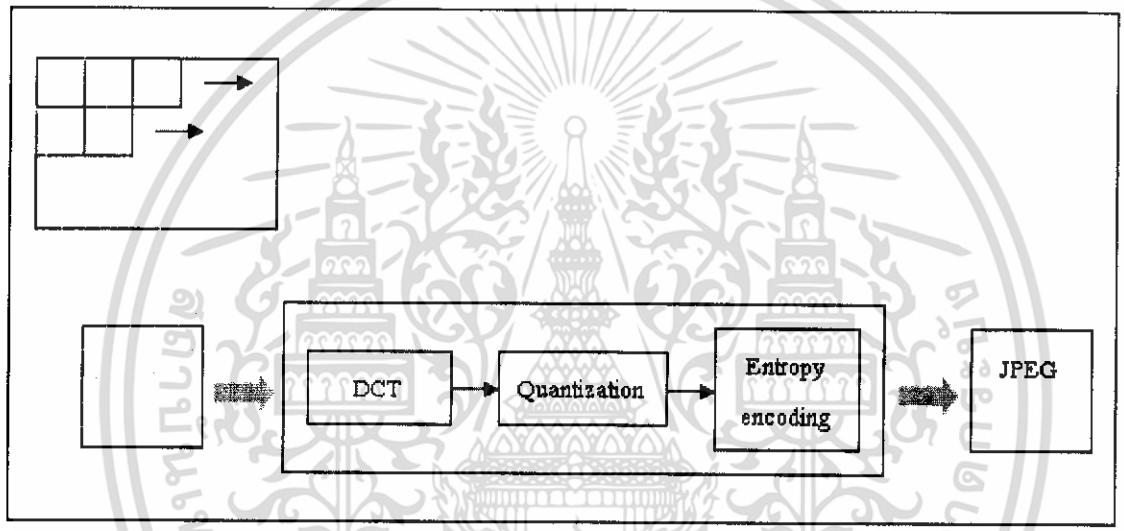
จากรูปแสดงขั้นตอนการหาระยะแฮมมิงโดยเปรียบเทียบข้อมูลที่จะนำมาทำการถอดรหัสกับค่าที่อยู่บนกิ่งทรีริสแต่ละกิ่ง โดยการเลือกเส้นทางในการถอดรหัสนั้นจะเลือกเส้นทางที่มีระยะแฮมมิงน้อยที่สุด ซึ่งแสดงเส้นทางได้ดังรูปที่ แล้วหาว่าเส้นทางนั้นเข้ารหัสมาจากข้อมูลใด ซึ่งได้เท่ากับ 11011 ซึ่งหมายความว่าข้อมูลที่สมมุติให้มีความผิดพลาดระหว่างการส่งผ่านช่องสัญญาณได้แก้ไขให้ถูกต้องแล้ว



รูปที่ 3.14 แสดงเส้นทางที่มีระยะแฮมมิงน้อยที่สุดของการถอดรหัสแบบ Viterbi ที่มีข้อมูลที่ทำการถอดรหัสเป็น 11 01 00 00 01 ซึ่งเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันตามวงจรในรูปที่ 3.3

3.4 การเข้ารหัสภาพ JPEG

JPEG เป็นมาตรฐานการบีบอัดภาพนิ่งประเภทหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาโดยกลุ่มผู้เชี่ยวชาญที่มีชื่อเรียกว่า Joint Photographic Experts Group มีขีดความสามารถในการบีบอัดได้ทั้งภาพสีและภาพเกรย์สเกล (grey scale) การบีบอัดภาพ JPEG จัดว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง ไฟล์ภาพที่ได้จากการบีบอัดมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับไฟล์ต้นฉบับ อย่างไรก็ตามภาพที่ได้จะไม่เหมือนกับต้นฉบับ 100% แม้คุณภาพของรูปที่เห็นจะใกล้เคียงกับภาพต้นฉบับมาก ดังนั้นการบีบอัดชนิดนี้จัดว่าอยู่ในตระกูลการบีบอัดที่มีการสูญเสีย (lossy compression)



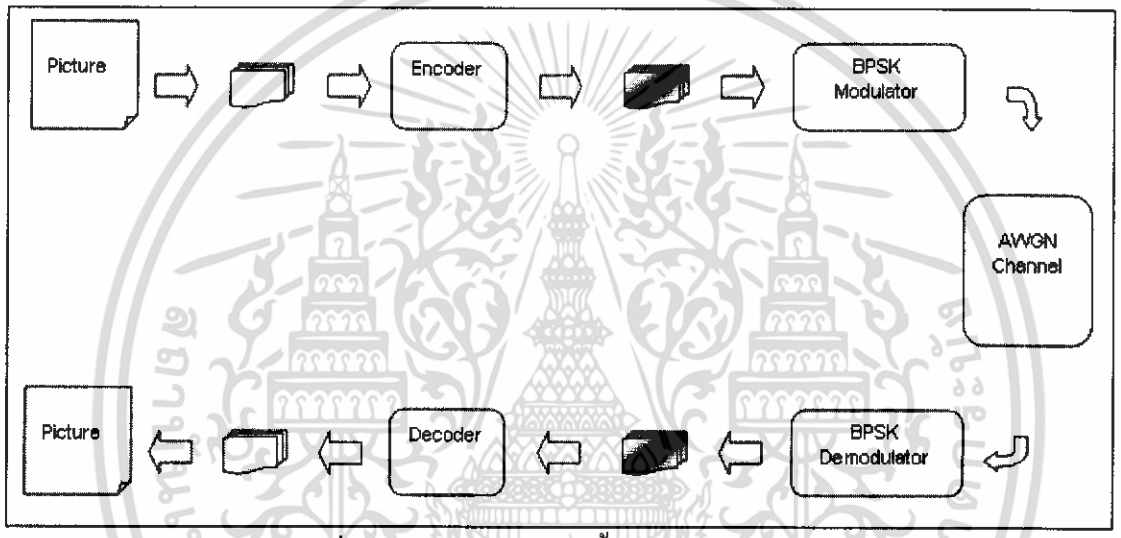
รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการทำงานของการบีบอัดภาพ JPEG

การบีบอัดภาพของ JPEG มีขั้นตอนการทำงานดังในรูปที่ 3.15 ขั้นแรกจะนำสัญญาณภาพต้นฉบับมาแบ่งออกเป็นบล็อกขนาดเล็ก ๆ แล้วนำไปผ่านกระบวนการแปลงด้วยกรรมวิธีการแปลง DCT (Discrete Cosine Transform) ให้เป็นชุดสัมประสิทธิ์ทางความถี่ จากนั้นให้นำสัมประสิทธิ์ที่ได้ไปผ่านกระบวนการควอนไทเซชัน (Quantization) ก่อนจะป้อนเข้าสู่วงจรเข้ารหัสเอนโทรปี (Entropy encoder) เป็นลำดับต่อไป

บทที่ 4
การออกแบบโครงงาน

4.1 การออกแบบโครงงาน

ผู้เขียนได้ทำการออกแบบและเขียนโปรแกรมสำหรับจำลองการส่งข้อมูลที่มีการเข้ารหัสซึ่งป้องกันความผิดพลาด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัส เมื่อมีการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเป็นดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงแบบจำลองขั้นตอนการส่งข้อมูล

จากรูป 4.1 เป็นการแสดงการทำงานของโปรแกรม ซึ่งจะเป็นการจำลองการส่งไฟล์ข้อมูลประเภทรูปภาพ เพื่อให้สามารถแสดงผลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมนั้นจะแบ่งเป็นด้านส่งข้อมูลและด้านรับข้อมูล ซึ่งการทำงานในด้านส่งข้อมูลนั้นจะทำการตัดแบ่งไฟล์รูปภาพออกเป็นส่วนย่อย ๆ แล้วทำการเข้ารหัสข้อมูลในส่วนย่อย ๆ แต่ละส่วน แล้วจึงทำการมอดูเลต และส่งเข้าไปในช่องสัญญาณที่ทำการจำลองขึ้น ส่วนด้านรับข้อมูลจะนำข้อมูลที่ได้จากช่องสัญญาณมาทำการดีมอดูเลต แล้วทำการถอดรหัส ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการถอดรหัสนั้นจะถูกนำมารวมกันกลับเป็นไฟล์รูปภาพ ซึ่งการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลก่อนที่จะทำการจำลองการส่งข้อมูล และหลังจากการจำลองการส่งข้อมูล มาทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัสซึ่งป้องกันความผิดพลาด

4.2 การจำลองสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

การสร้างสัญญาณรบกวนแบบ AWGN นั้นจะเป็นการสร้างมาจากทฤษฎีการเกิดสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสัญญาณรบกวนหาได้ตามสมการ ดังนี้

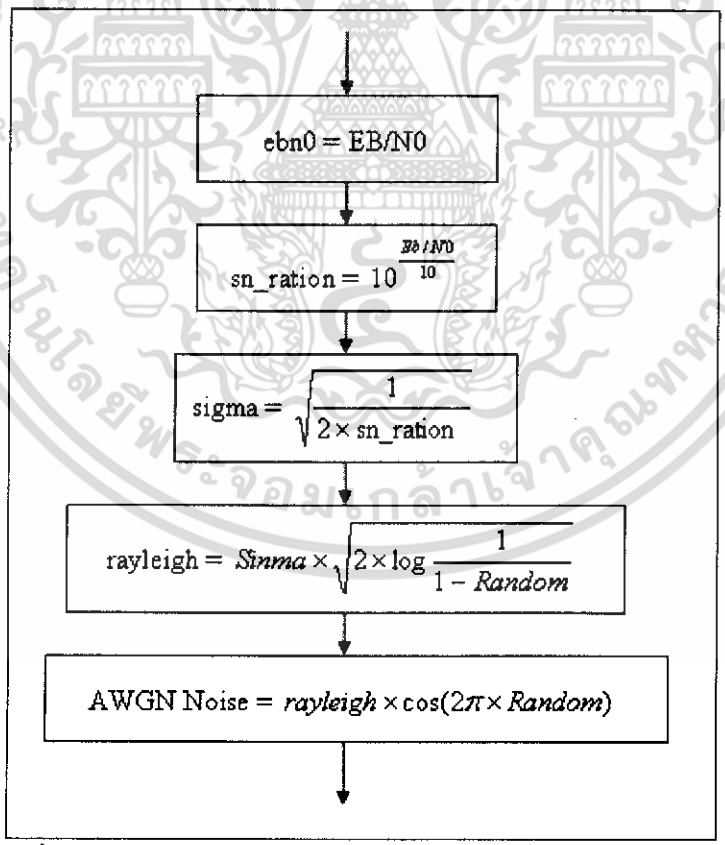
$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \varepsilon^{\frac{-(x-\bar{x})^2}{(2\sigma^2)}}$$

และมีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น คือ

$$F_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{\frac{(\lambda-\bar{x})^2}{(2\sigma^2)}} d\lambda$$

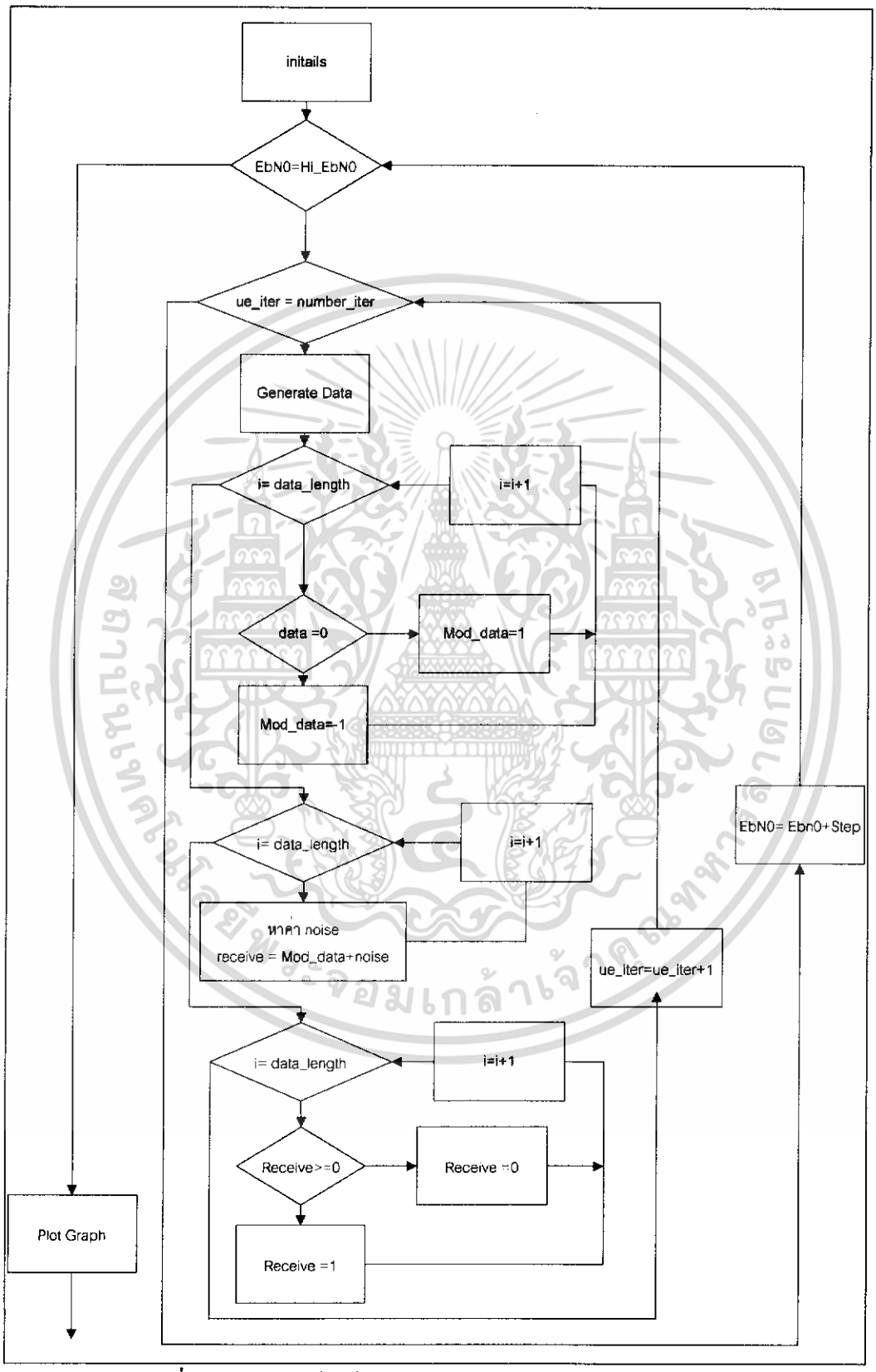
$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\frac{(x-\bar{x})}{\sigma}} e^{\frac{-\lambda^2}{2}} d\lambda$$

โดยค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณนี้จะใช้ค่าที่ได้จากการสุ่มแบบ Uniform



รูปที่ 4.2 แสดงโฟว์ชาร์ทการจำลองสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

4.3 โปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลซึ่งไม่มีการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาด



รูปที่ 4.3 แสดงโฟว์ชาร์ทตัวอย่างโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล

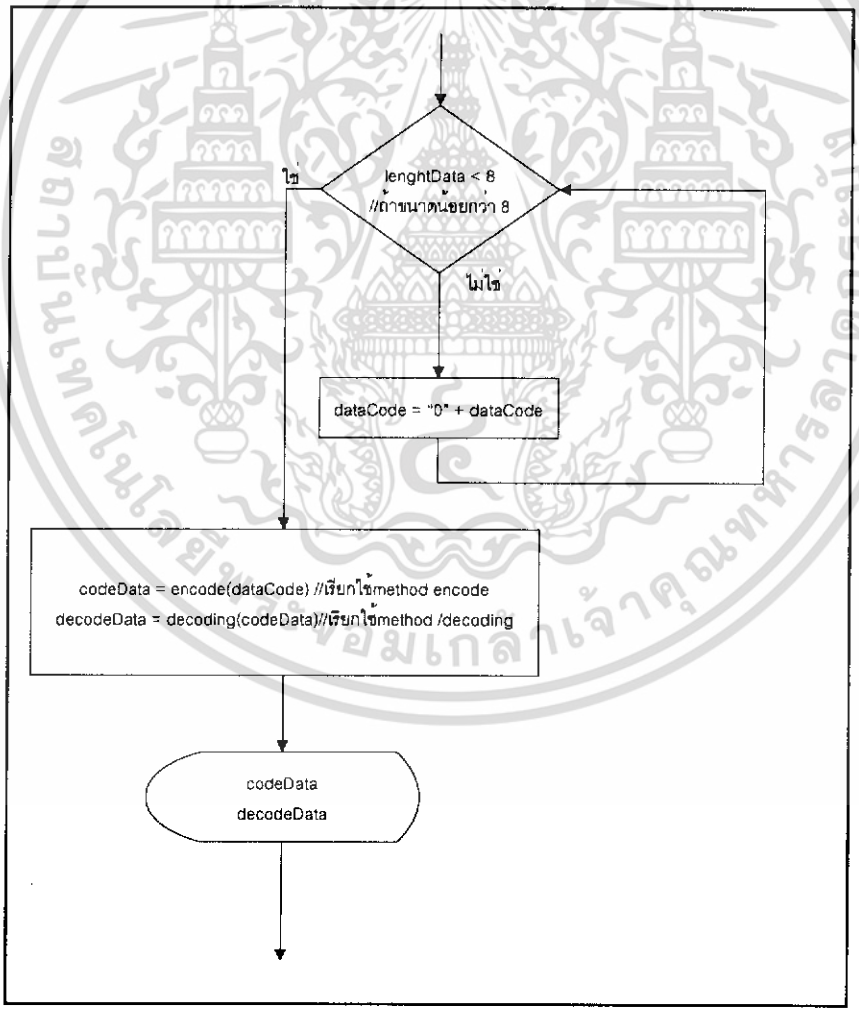
4.4 โปรแกรมการเข้าและถอดรหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาด

การเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาดนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ในโครงงานนี้จะใช้วิธีการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน เพื่อการวิเคราะห์ความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดของแต่ละสมการที่ใช้ในการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน โดยในส่วนของการถอดรหัสนั้นจะเป็นการถอดรหัสแบบ Viterbi Decoding

การออกแบบตัวโปรแกรมเข้าและถอดรหัสคอนโวลูชันจะประกอบด้วยคลาสต่าง ๆ ทั้งหมด 3 คลาส คือ Main Class , EncodingConvolution Class และ DecodingConvolution Class

4.4.1 คลาส Main

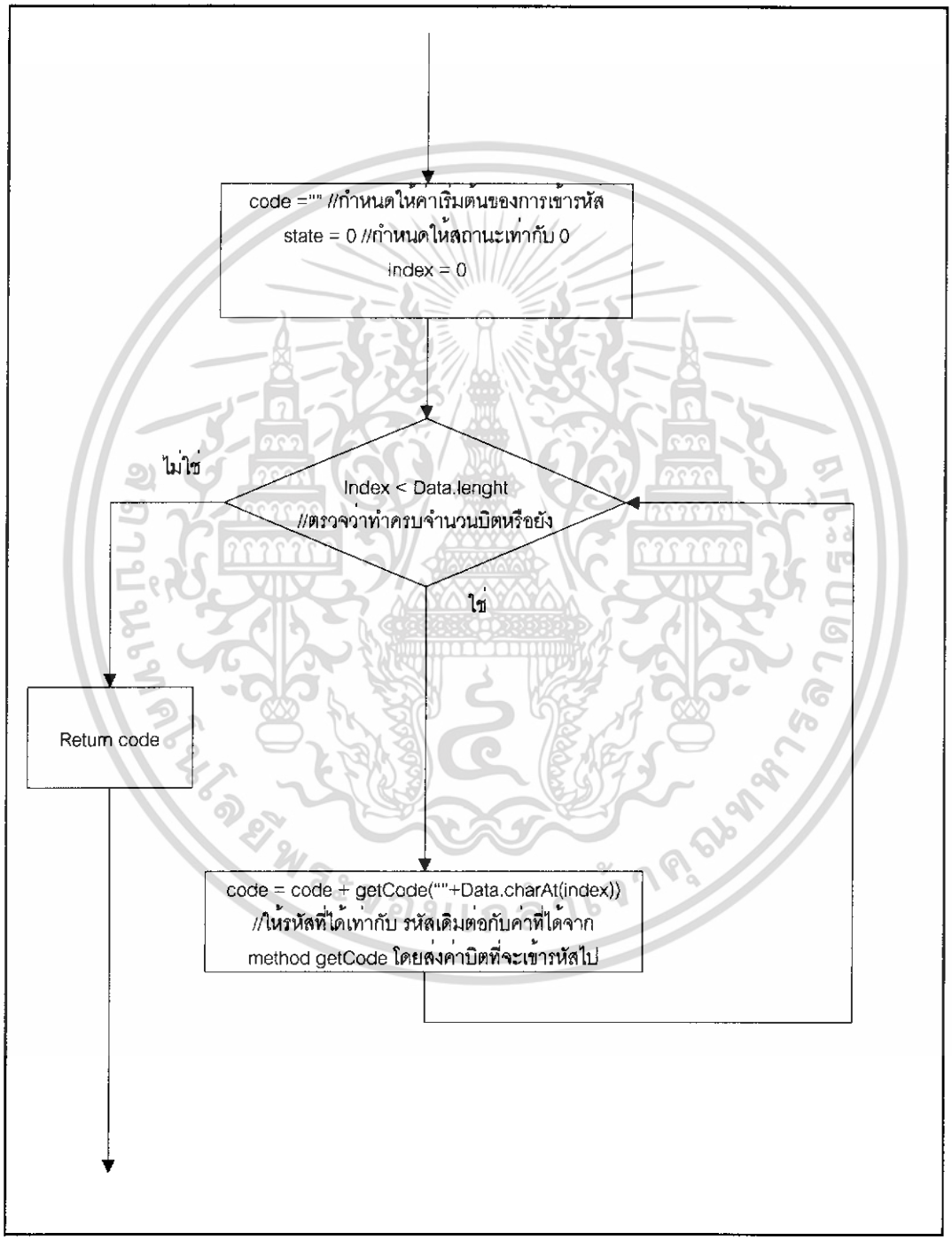
คลาส Main เป็นคลาสเริ่มต้นในการทำงานใช้เรียกใช้คลาสอื่นให้ทำงาน



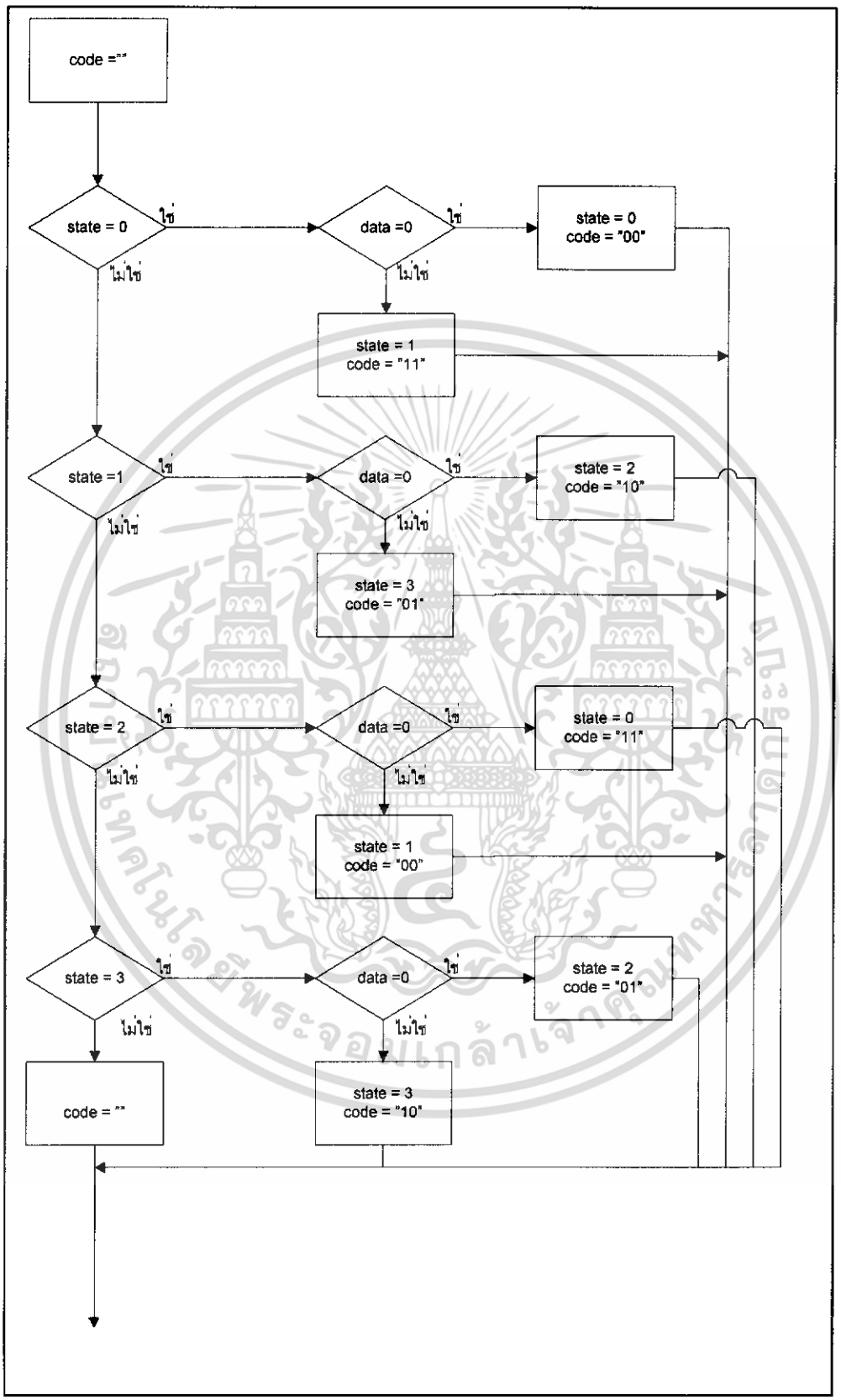
รูปที่ 4.4 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของคลาส Main

4.4.2 คลาส EncodingCovolution

คลาส EncodingCovolution การทำงานภายในคลาสจะเป็นการเข้ารหัสข้อมูลแบบคอนโวลูชัน



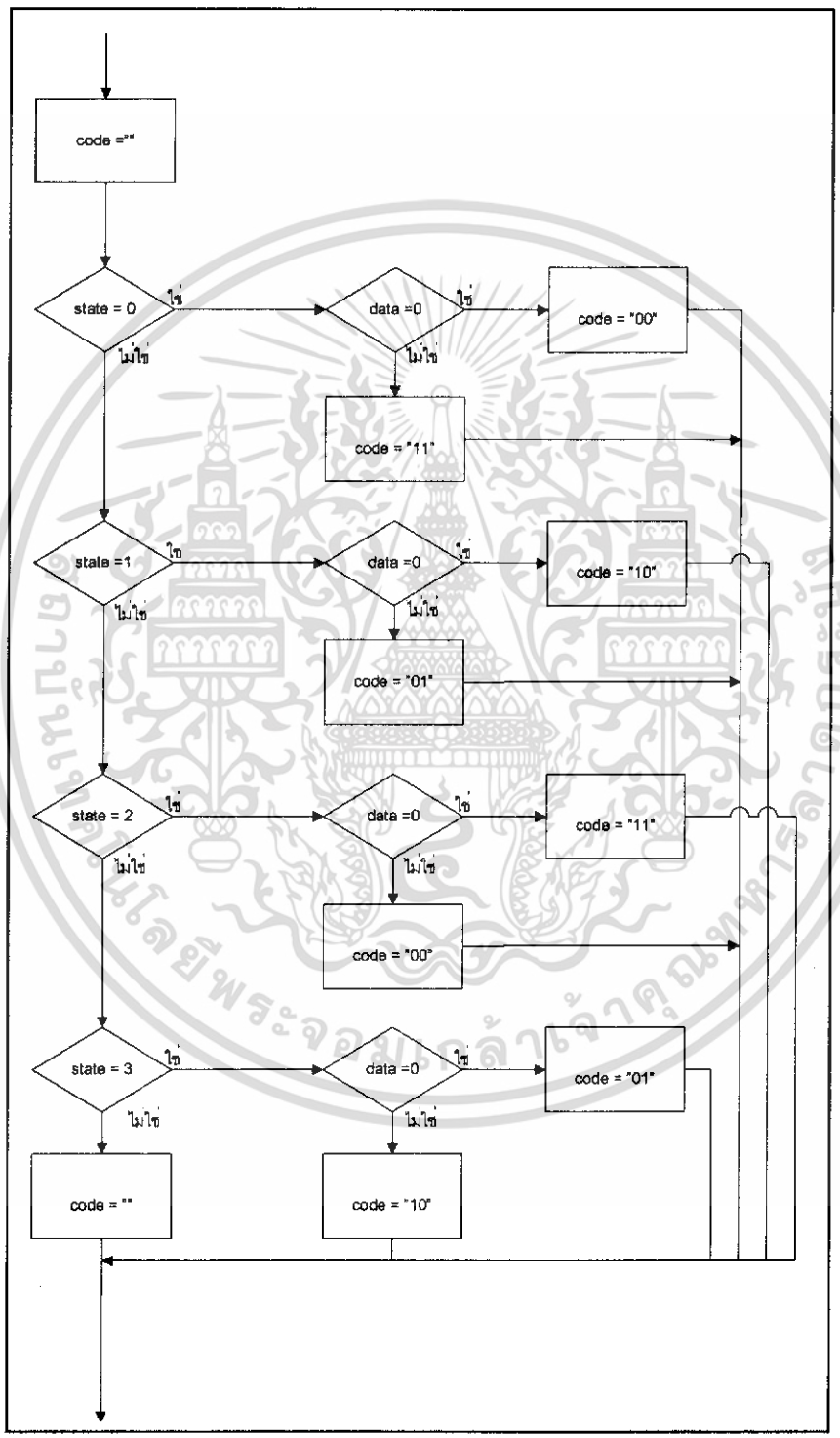
รูปที่ 4.5 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของ Method encode ในคลาส EncodingCovolution



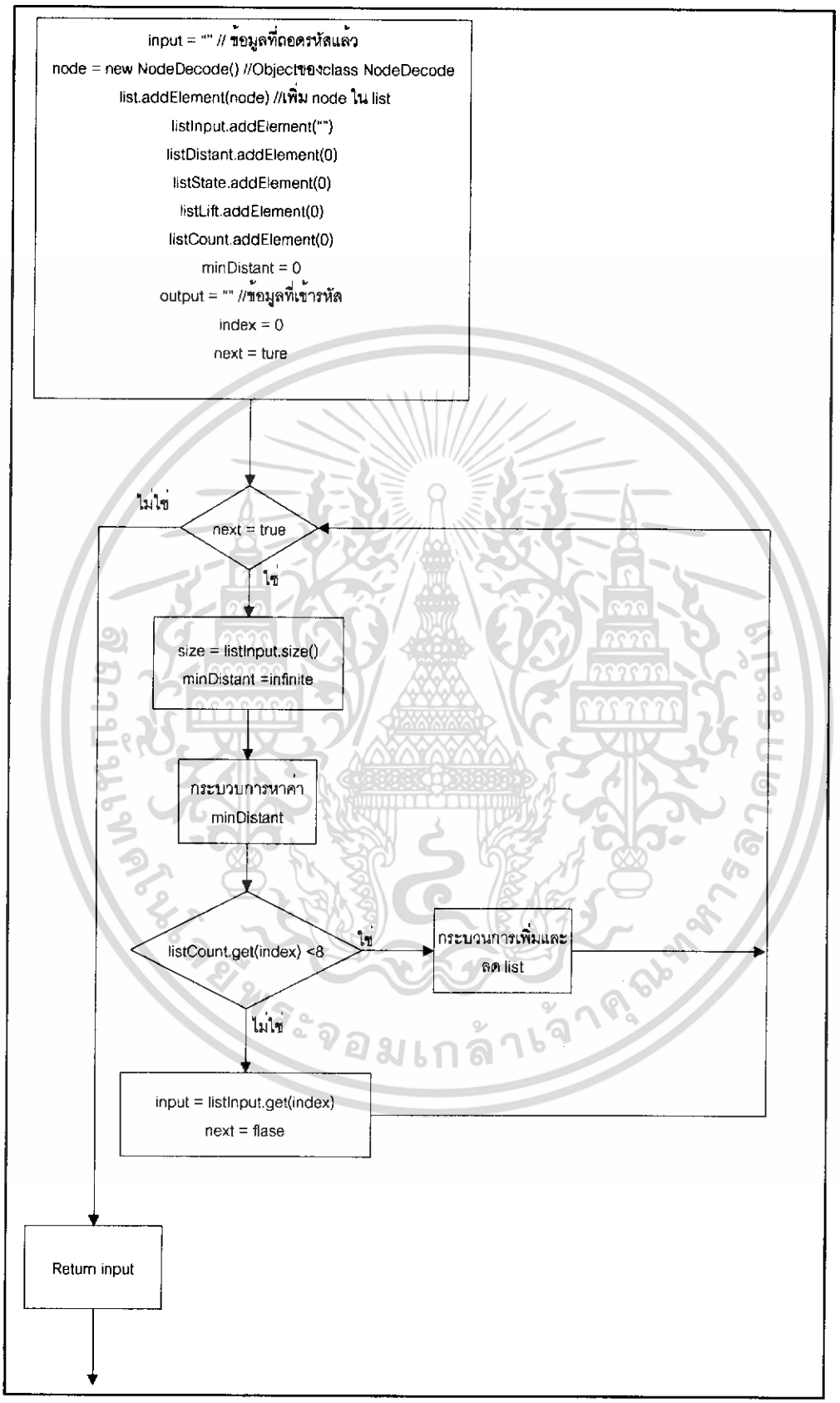
รูปที่ 4.6 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของ Method getCode ทำหน้าที่ในการเข้ารหัส

4.4.3 คลาส DecodingCovolution

คลาส DecodingConvolution ทำหน้าที่ในการถอดรหัสข้อมูลที่ทำการเข้ารหัสแบบแบบคอนโวลูชันโดยใช้วิธีการถอดรหัสแบบ Viterbi Decoding



รูปที่ 4.7 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของ Method findOutput ทำหน้าที่ในการหาผลการถอดรหัส



รูปที่ 4.8 แสดงโฟว์ชาร์ทการทำงานของ Method decoding ทำหน้าที่ในการถอดรหัส

4.5 ฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาด

โครงงานนี้ จะเป็นการทำโปรแกรมสำหรับจำลองการส่งข้อมูล โดยหัวข้อหลักในโครงงานนี้จะเน้นในเรื่องของการเข้าและถอดรหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด โดยรายละเอียดของโปรแกรม มีดังนี้

4.5.1 โปรแกรมต้องสามารถจำลองการส่งข้อมูลโดยในโครงงานนี้จะใช้ข้อมูลเป็นไฟล์รูปภาพที่ผ่านการบีบอัดในรูปแบบต่าง ๆ โดยที่โปรแกรมต้องสามารถให้ผู้ใช้ทำการเลือกข้อมูลที่ต้องการทดลองได้

4.5.2 โปรแกรมมีสามารถรับคำสั่งในการทำการจำลองข้อมูลจากผู้ใช้ได้

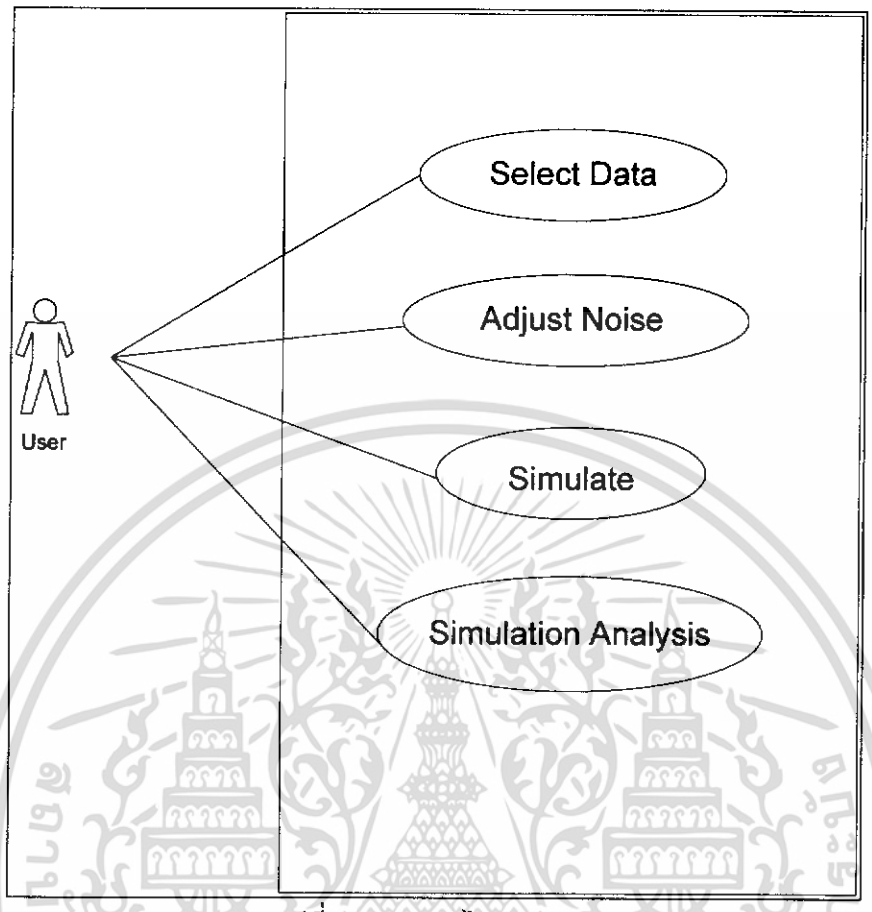
4.5.3 โปรแกรมมีสามารถวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลที่ภาคส่งและภาครับได้

4.5.4 โปรแกรมอนุญาตให้ผู้ใช้ปรับระดับของสัญญาณรบกวนได้

4.5.5 โปรแกรมอนุญาตให้ผู้ใช้สามารถเลือกสมการในการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันเพื่อแก้ไขความผิดพลาดจากผลของสัญญาณรบกวนได้

4.5.6 กระบวนการจำลองของโปรแกรมเริ่มจากการรับข้อมูลจากผู้ใช้ จากนั้นนำข้อมูลมาเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดแบบคอนโวลูชัน เมื่อเข้ารหัสเรียบร้อยแล้วก็จะทำการมอดูเลตข้อมูลแบบ BPSK จากนั้นก็จะนำสัญญาณที่ได้จากการมอดูเลตมาทำการบวกด้วยสัญญาณรบกวนในโครงงานนี้จะใช้สัญญาณรบกวนแบบ AWGN เพื่อจำลองว่ามีการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณแบบ AWGN หลังจากที่เพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในข้อมูลเรียบร้อยแล้วจึงนำข้อมูลมาทำการดีมอดูเลต แล้วจึงทำการถอดรหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดจากข้อมูลที่ดีมอดูเลตได้ ซึ่งข้อมูลที่ได้ออกมาก็คือข้อมูลที่ภาครับสามารถรับได้นั้นเอง

จากรายละเอียดของโปรแกรมสามารถนำมาเขียนแสดงเป็น ยูสเคสไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.9

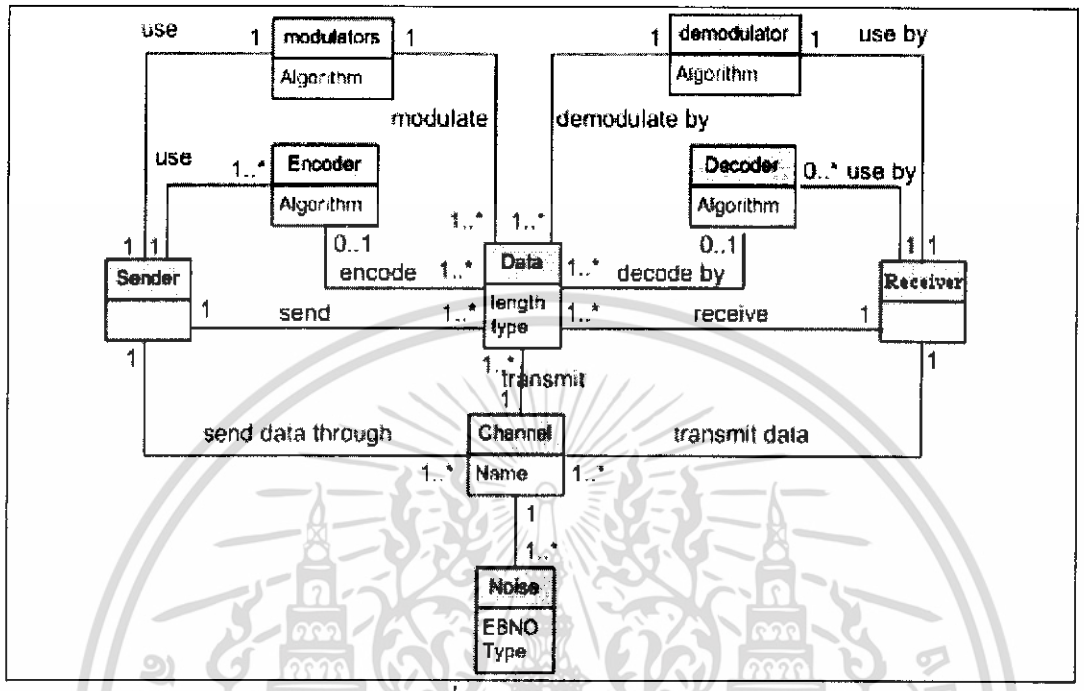


รูปที่ 4.9 ยูสเคส ไดอะแกรม

จากรูปที่ 4.9 เป็นการออกแบบโปรแกรมโดยที่ผู้ใช้สามารถเลือกข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการจำลองการส่งข้อมูลได้ (Select Data) โดยที่ข้อมูลนั้นจะเป็นข้อมูลประเภทรูปภาพที่มีการบีบอัดในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อวิเคราะห์ผลจากสัญญาณรบกวน ต่อภาพที่มีการบีบอัดในหลายๆรูปแบบ

นอกจากนี้ผู้ใช้งานยังสามารถปรับระดับของสัญญาณรบกวนได้ (Adjust Noise) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการเข้ารหัส เมื่อเกิดสัญญาณรบกวนในระดับต่าง ๆ และระบบสามารถแสดงนำรายละเอียดที่ได้จากการจำลองข้อมูลครั้งล่าสุดมาแสดงให้ผู้ใช้ทราบได้ (Simulation Analysis) โดยมีการแสดงรูปภาพก่อนที่จะการจำลองการส่งข้อมูล และรูปภาพหลังการทำการจำลองการส่งข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบความผิดพลาดจากการจำลองการส่งข้อมูล

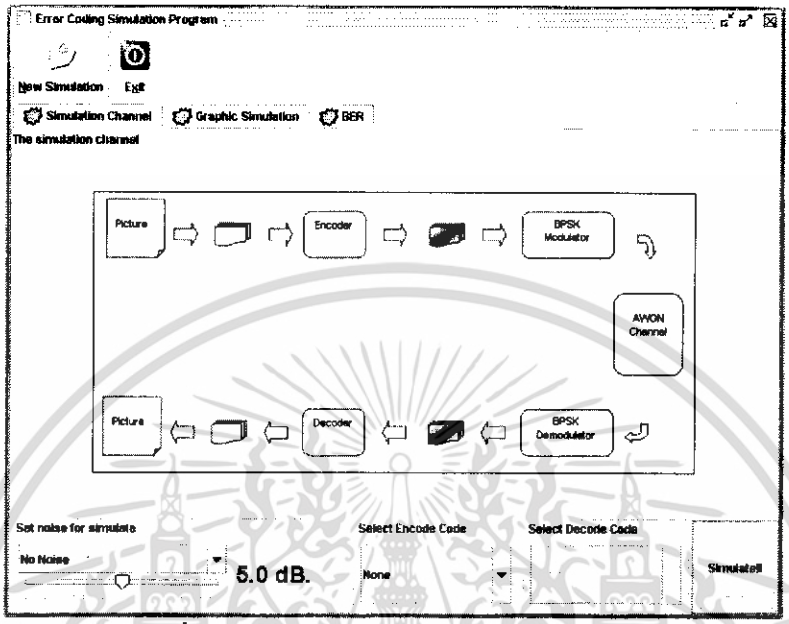
4.6 โดเมนโมเดล (Domain Model)



รูปที่ 4.10 โดเมนโมเดล

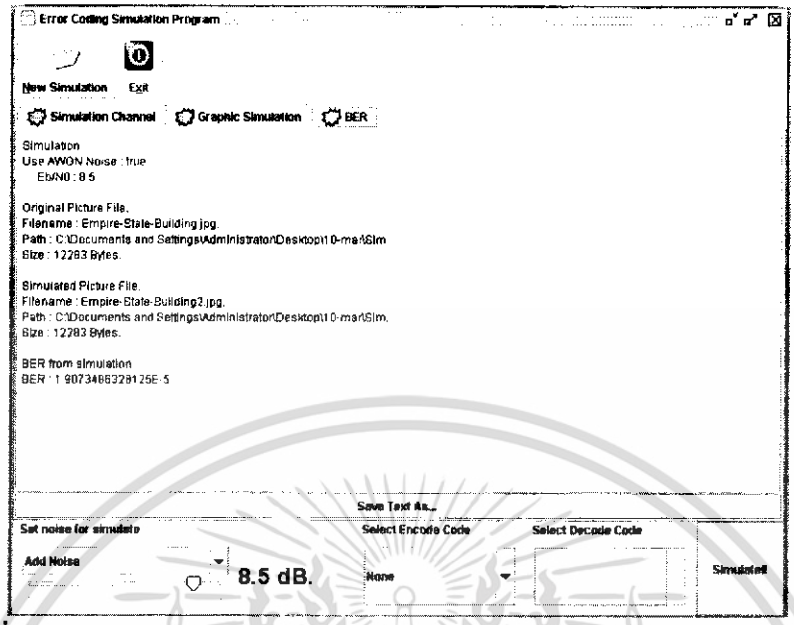
จากรูปที่ 4.10 เป็นการออกแบบโดเมนโมเดล ซึ่งการทำงานของโปรแกรมคือ จะจำลองการส่งข้อมูล โดยที่ด้านส่งข้อมูล (Sender) จะมีการนำข้อมูล (Data) มาทำการเข้ารหัส (Encode) และมอดูเลต (Modulate) แล้วจึงส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีการจำลองสัญญาณรบกวนขึ้น ส่วนที่ด้านรับ (Receiver) จะนำข้อมูลที่รับได้มาทำการดีมอดูเลต และถอดรหัส (Decode)

4.7 Graphic User Interface



รูปที่ 4.11 แสดงโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล

รูปที่ 4.12 แสดงโปรแกรมส่วนแสดงรูปภาพก่อนและหลังการทดลองการจำลองการส่งข้อมูล



รูปที่ 4.13 แสดงโปรแกรมส่วนแสดงผลจากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูล

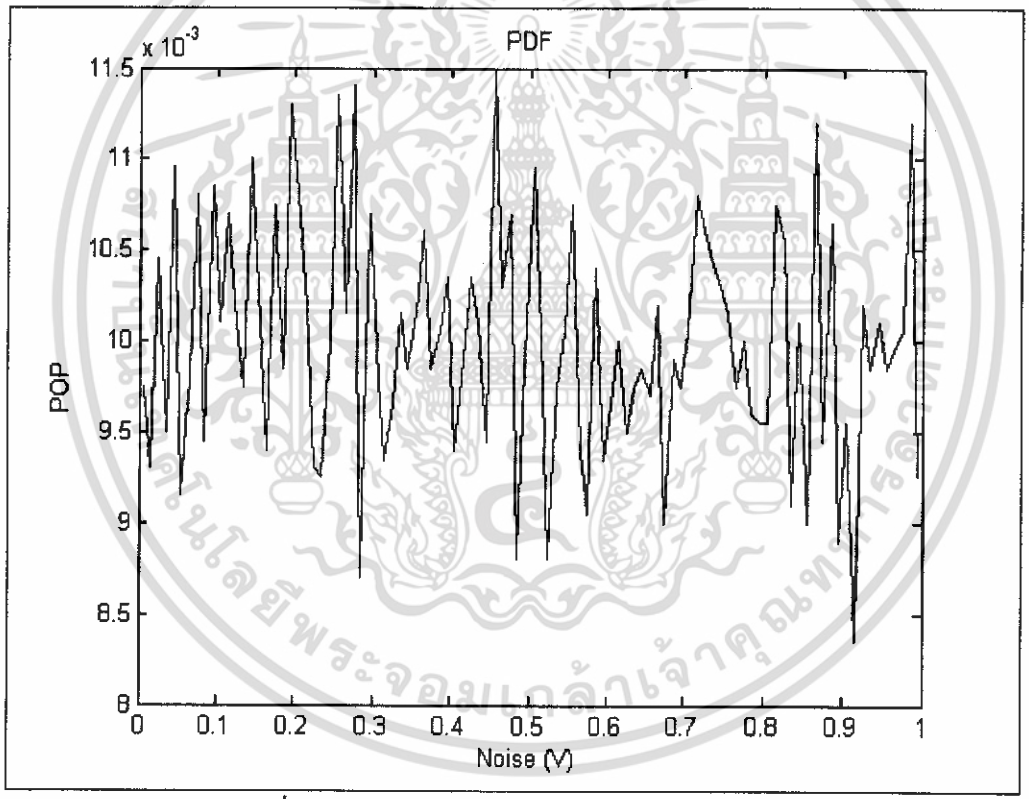
บทที่ 5

ผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์ฟังชันก์สัญญาณรบกวน

ในการวิเคราะห์ฟังชันก์สัญญาณรบกวนนี้ จะเป็นการหากราฟการกระจายความน่าจะเป็น (Probability Density Function (PDF)) โดยจะมีการสุ่มค่าแบบ Uniform เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งผลการทดลองสุ่มค่าแบบ Uniform นี้ แสดงได้ดังรูปที่ 5.1

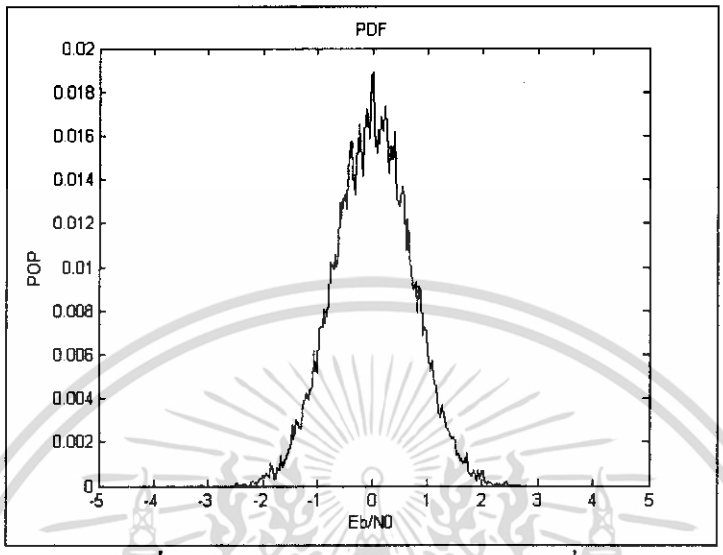
5.1.1 กราฟการกระจายความน่าจะเป็นการสุ่มค่าแบบ Uniform



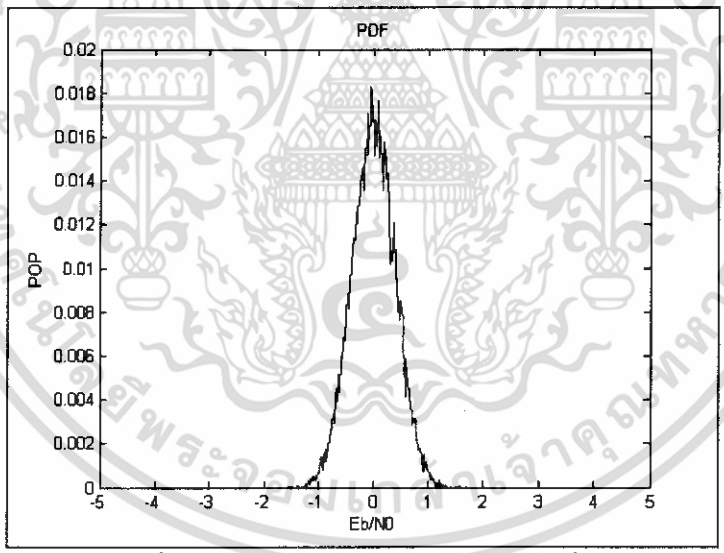
รูปที่ 5.1 กราฟ PDF ของการสุ่มค่าแบบ Uniform

จากรูปที่ 6.1 เป็นการทดลองฟังก์ชันสุ่มแบบ Uniform จะเห็นว่าความหนาแน่นความน่าเป็นในการเกิดค่าต่าง ๆ จะมีค่าความน่าจะเป็นเท่า ๆ กัน โดยจะนำฟังก์ชันสุ่มแบบ Uniform นี้ไปทำการสร้างสัญญาณรบกวนแบบ AWGN

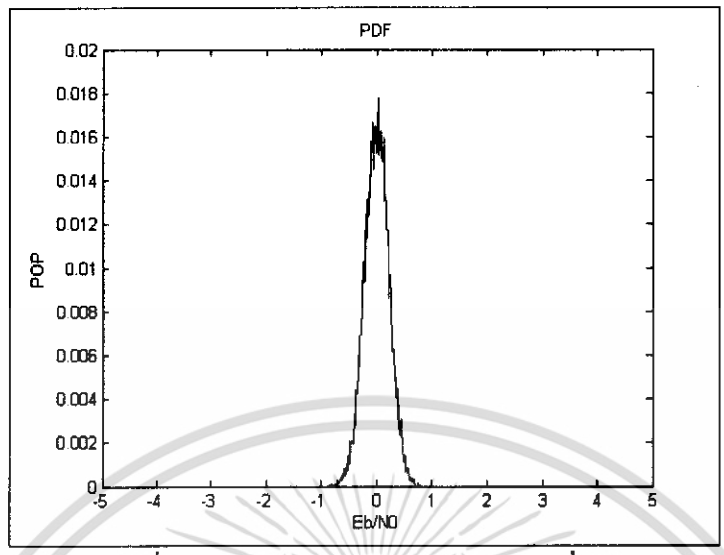
5.1.2 กราฟการกระจายความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนแบบ AWGN



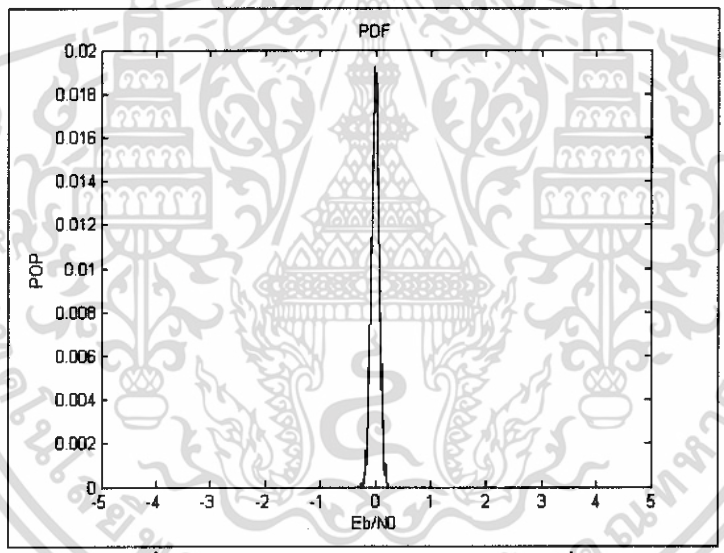
รูปที่ 5.2 กราฟ PDF ของ AWGN noise ที่ Eb/N0 = 0



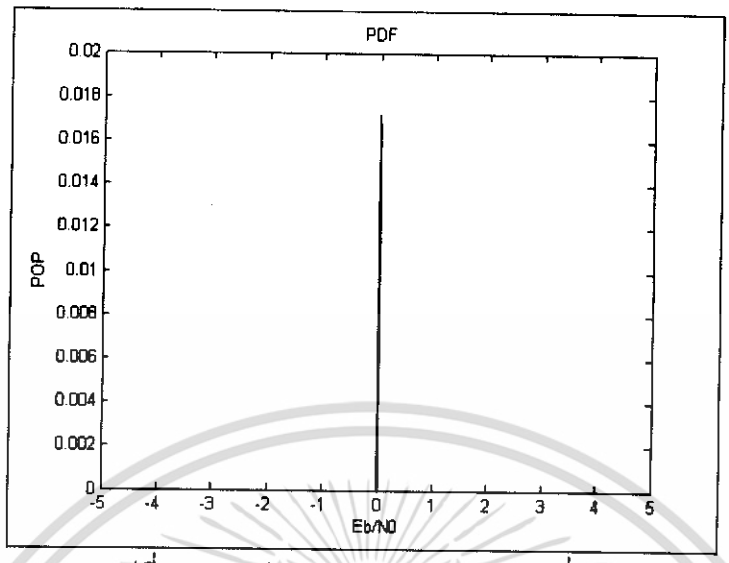
รูปที่ 5.3 กราฟ PDF ของ AWGN noise ที่ Eb/N0 = 5



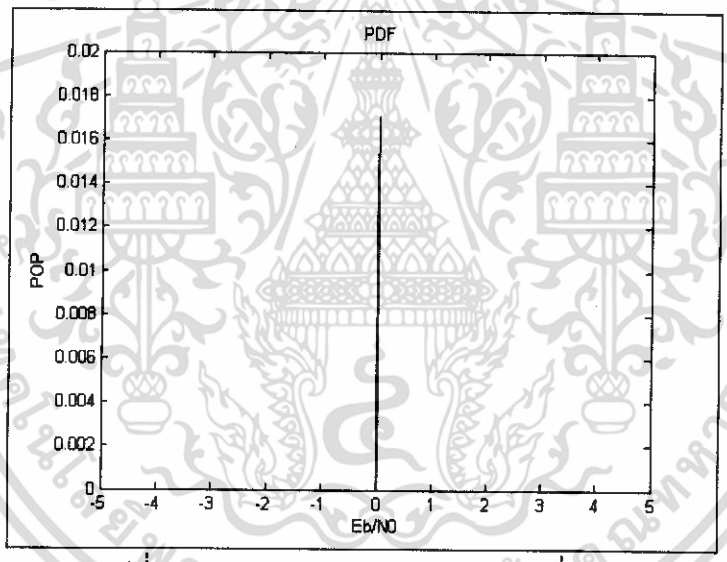
รูปที่ 5.4 กราฟ PDF ของ AWGN noise ที่ Eb/N0 = 10



รูปที่ 5.5 กราฟ PDF ของ AWGN noise ที่ Eb/N0 = 20



รูปที่ 5.6 กราฟ PDF ของ AWGN noise ที่ Eb/N0 = 50

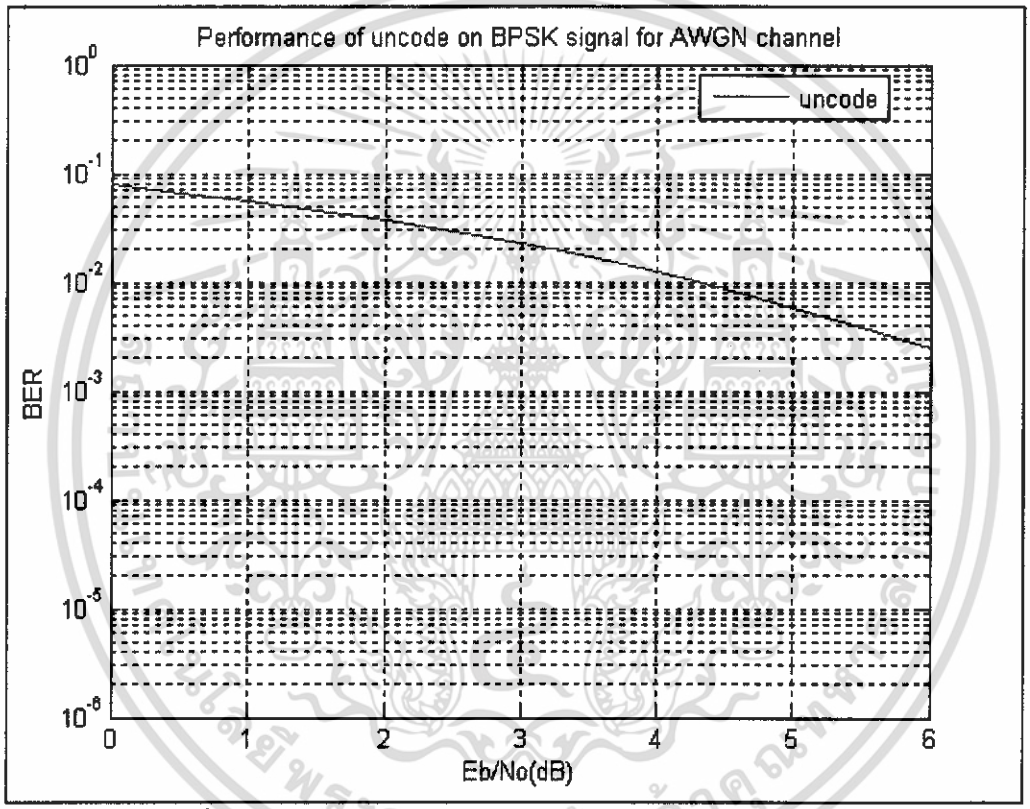


รูปที่ 5.7 กราฟ PDF ของ AWGN noise ที่ Eb/N0 = 100

จากการทดลองสร้างสัญญาณรบกวนแบบ AWGN จะเห็นว่าความหนาแน่นความน่าเป็นในการเกิดสัญญาณรบกวนจะมีค่ามากที่บริเวณสัญญาณรบกวนมีค่าเป็น 0 และเมื่อมีการเพิ่มค่า Eb/N0 จะทำให้การกระจายความน่าจะเป็นในการเกิดสัญญาณรบกวนแคบลง เป็นผลให้ความแรงของสัญญาณรบกวนน้อยลง

5.2 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน โดยไม่มีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด

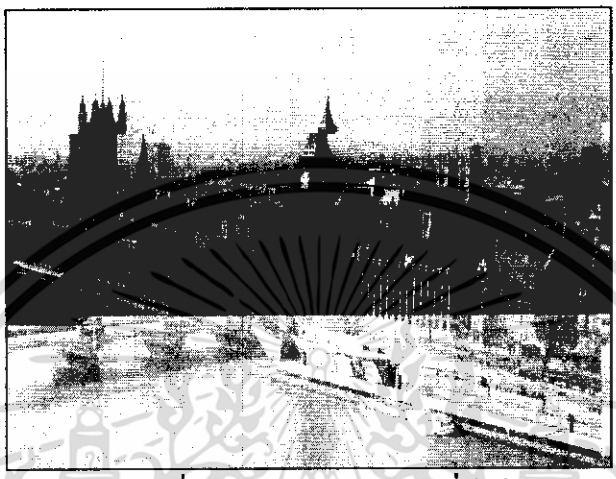
จากการทดลองโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่ไม่มีการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาดผ่านช่องสัญญาณที่มีการรบกวน แล้วนำมาวิเคราะห์หาค่า Bit Error Rate (BER) ซึ่งสามารถนำผลของการวิเคราะห์มาแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า Eb/N0 มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า Bit Error Rate มีค่าลดลง นั่นคือข้อมูลที่รับได้มีคุณภาพดีขึ้น



รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูล

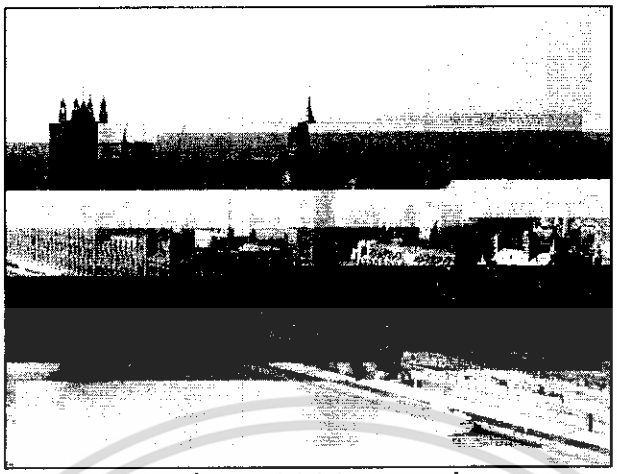
5.3 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน โดยไม่มีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด

5.3.1 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพประเภท JPG

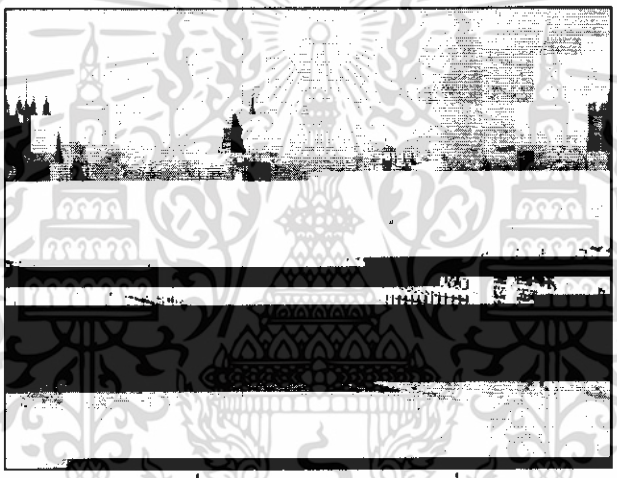


รูปที่ 5.9 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 6.675×10^{-6}

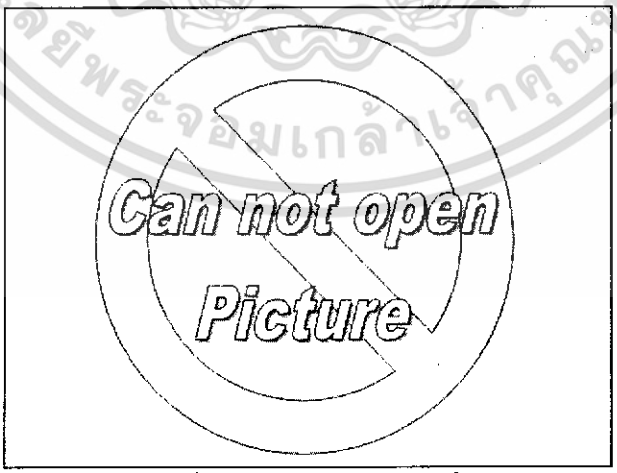
รูปที่ 5.10 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 9.536×10^{-6}



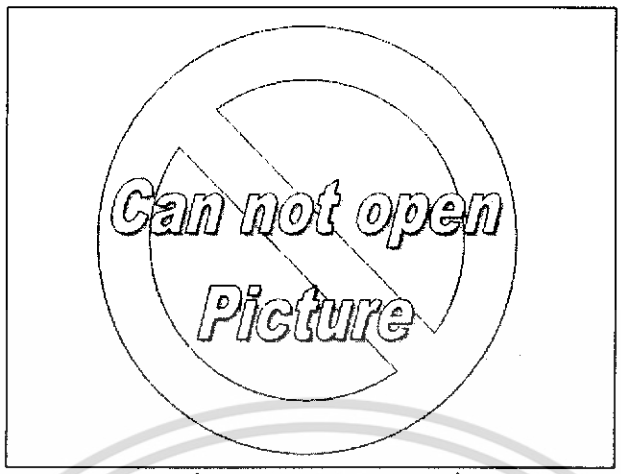
รูปที่ 5.11 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.479×10^{-5}



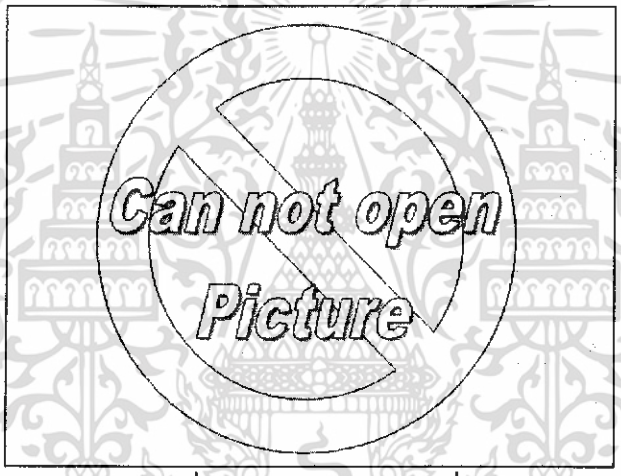
รูปที่ 5.12 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.039×10^{-4}



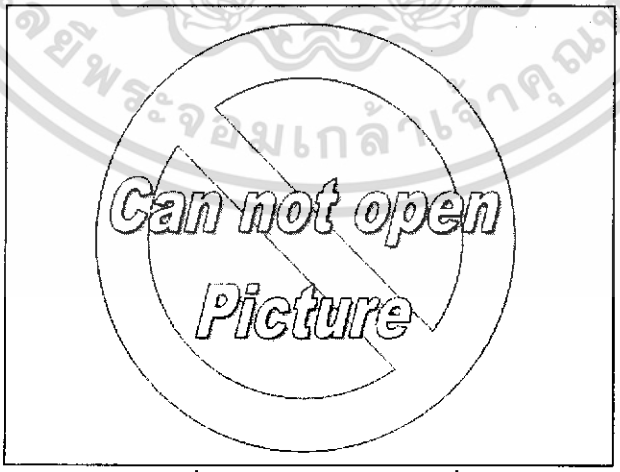
รูปที่ 5.13 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.802×10^{-4}



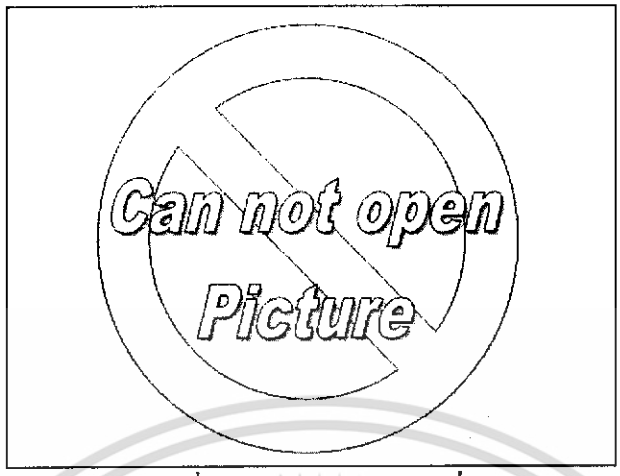
รูปที่ 5.14 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.062×10^{-4}



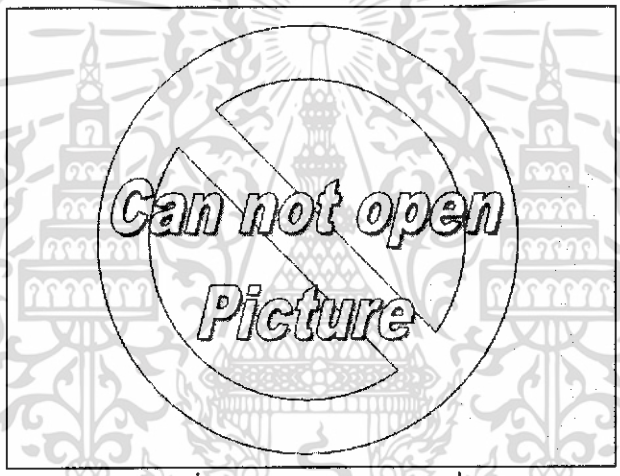
รูปที่ 5.15 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 7.667×10^{-4}



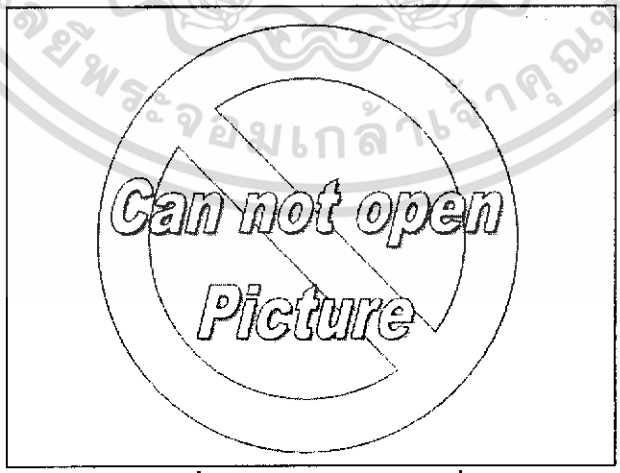
รูปที่ 5.16 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.429×10^{-3}



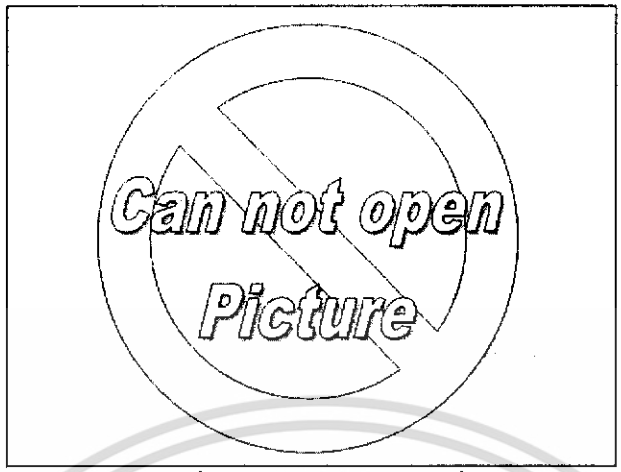
รูปที่ 5.17 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.399×10^{-3}



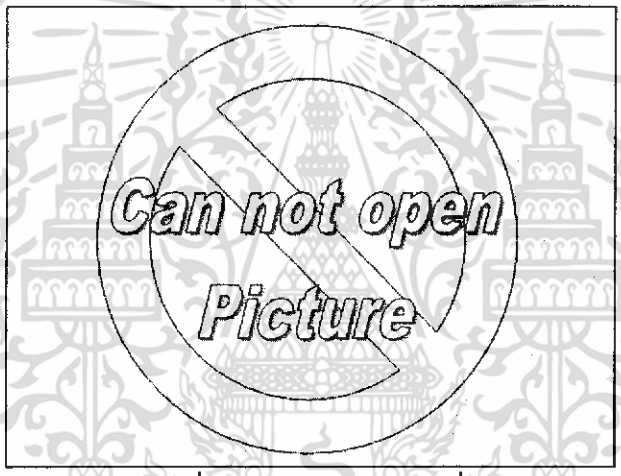
รูปที่ 5.18 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.817×10^{-3}



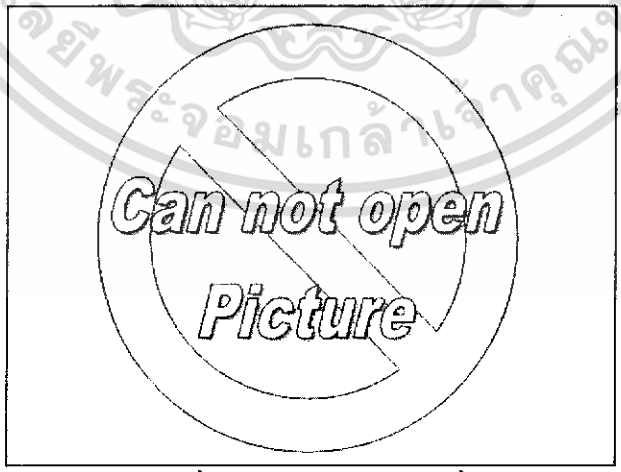
รูปที่ 5.19 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 6.121×10^{-3}



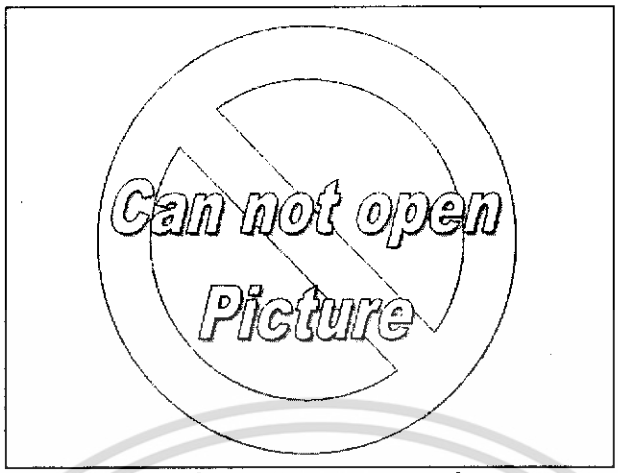
รูปที่ 5.20 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 8.723×10^{-3}



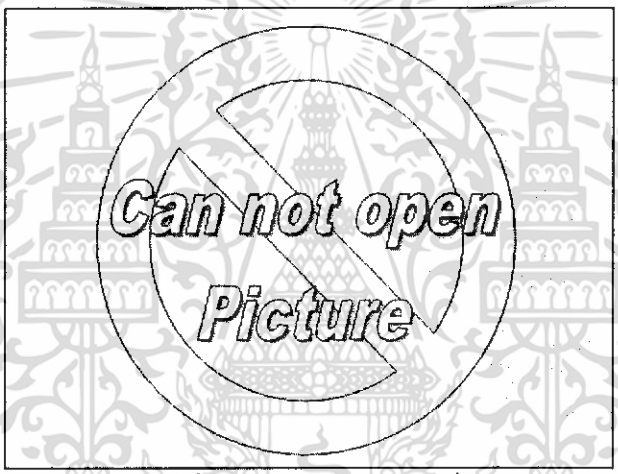
รูปที่ 5.21 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.237×10^{-2}



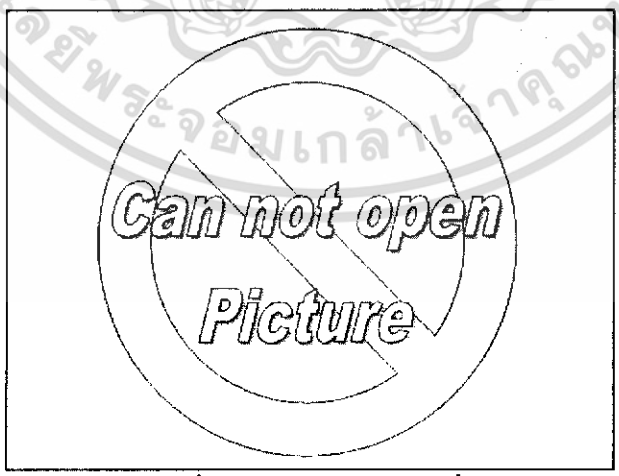
รูปที่ 5.22 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.698×10^{-2}



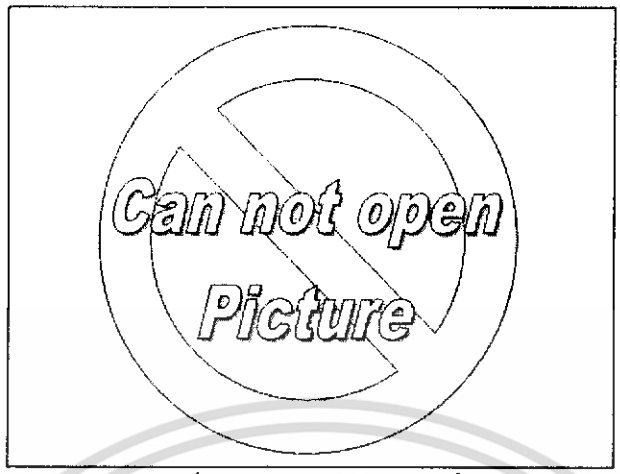
รูปที่ 5.23 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.291×10^{-2}



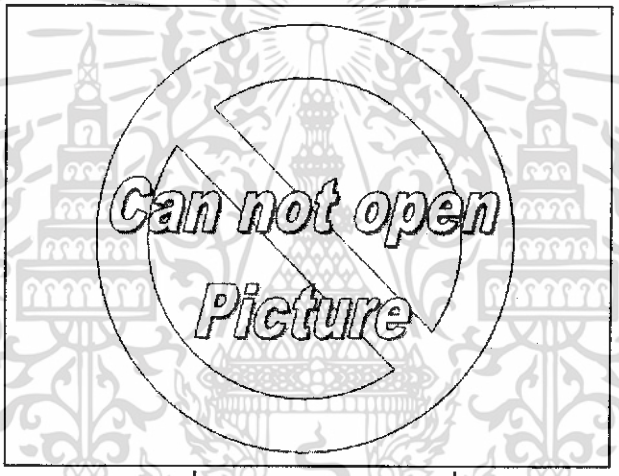
รูปที่ 5.24 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.964×10^{-2}



รูปที่ 5.25 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.737×10^{-2}



รูปที่ 5.26 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.615×10^{-2}



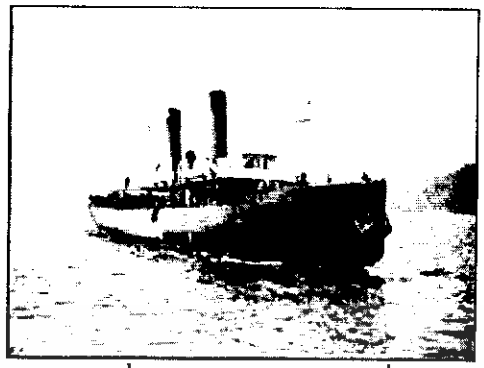
รูปที่ 5.27 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 5.637×10^{-2}

5.3.2 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพประเภท BMP

รูปที่ 5.28 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 6.675×10^{-6}

รูปที่ 5.29 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 9.536×10^{-6}

รูปที่ 5.30 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.433×10^{-5}

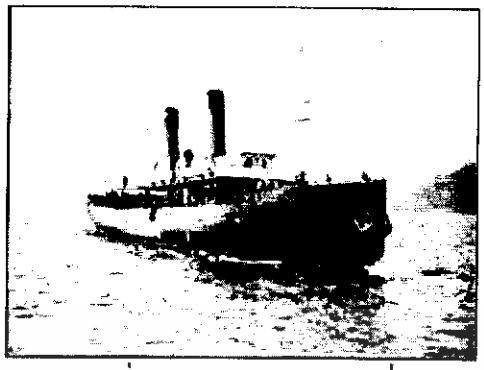


รูปที่ 5.31 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 7.724×10^{-5}

รูปที่ 5.32 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.916×10^{-4}

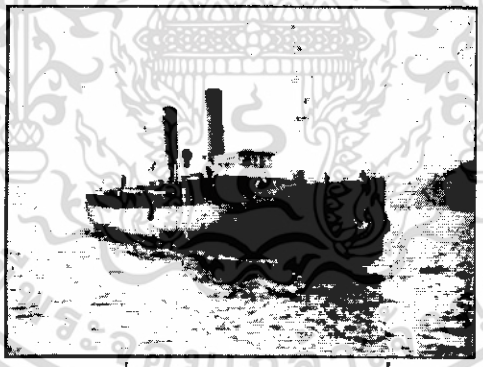
รูปที่ 5.33 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.005×10^{-4}

รูปที่ 5.34 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 7.705×10^{-4}

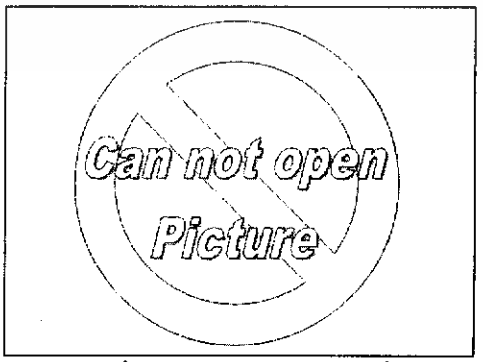


รูปที่ 5.35 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.371×10^{-3}

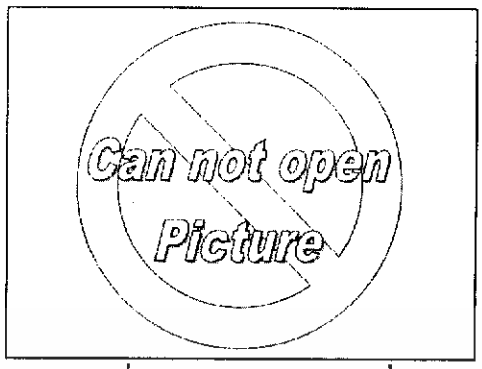
รูปที่ 5.36 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.305×10^{-3}



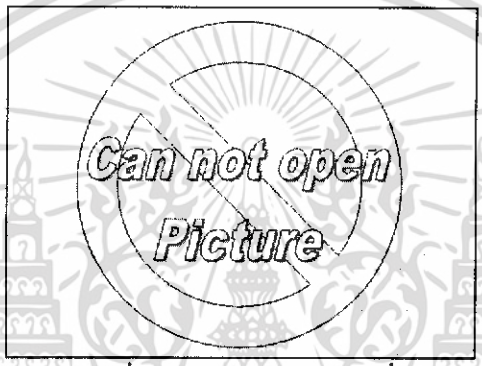
รูปที่ 5.37 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.814×10^{-3}



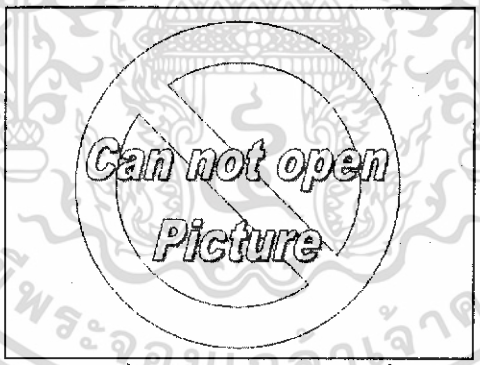
รูปที่ 5.38 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 6.000×10^{-3}



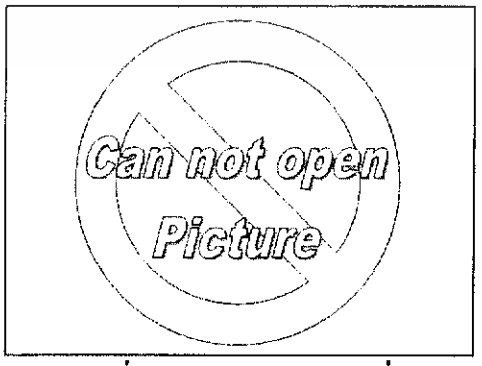
รูปที่ 5.39 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 8.746×10^{-3}



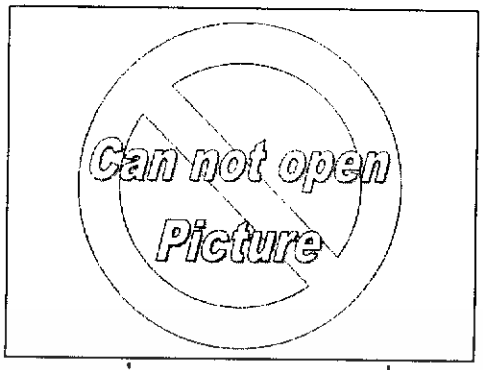
รูปที่ 5.40 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.233×10^{-2}



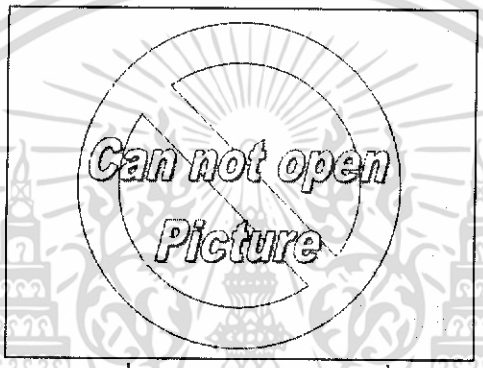
รูปที่ 5.41 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.720×10^{-2}



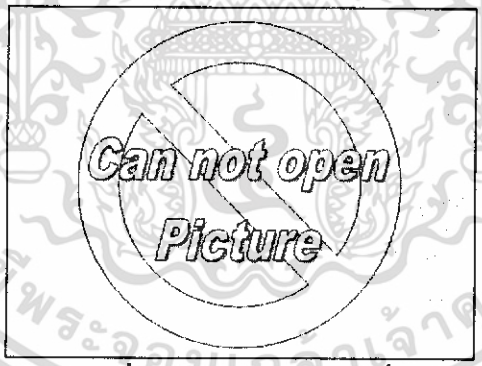
รูปที่ 5.42 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.270×10^{-2}



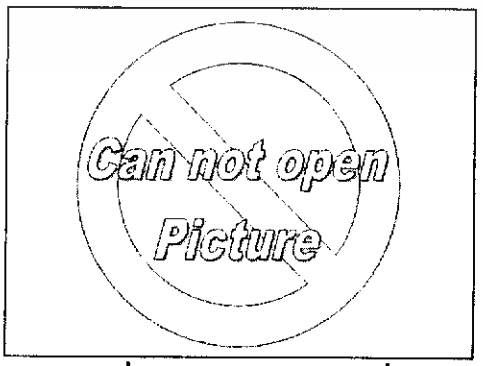
รูปที่ 5.43 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.974×10^{-2}



รูปที่ 5.44 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.726×10^{-2}



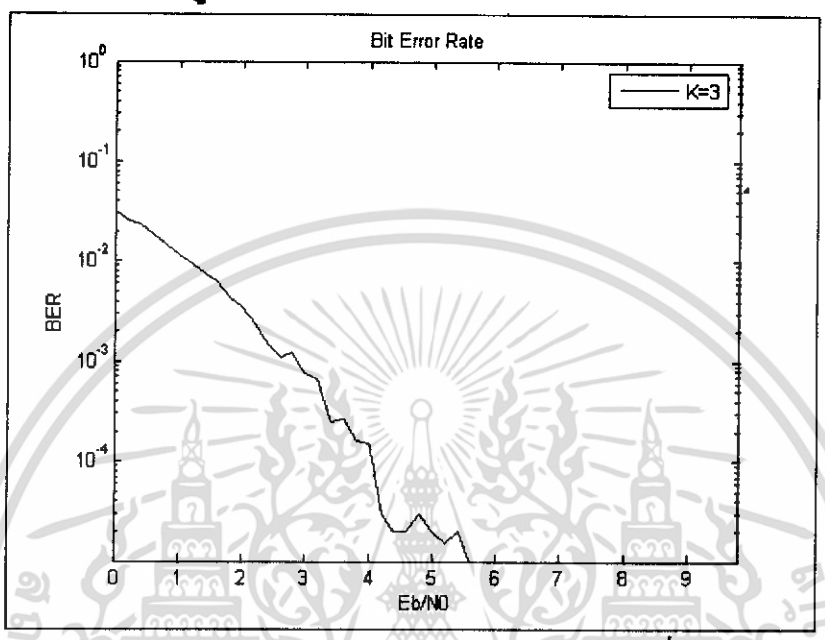
รูปที่ 5.45 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.662×10^{-2}



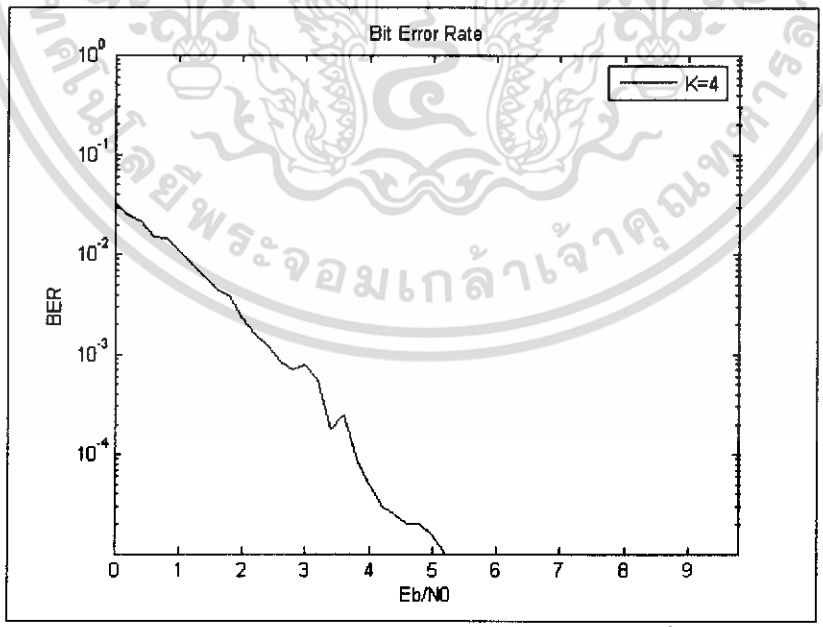
รูปที่ 5.46 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 5.643×10^{-2}

5.4 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลที่มีการเข้ารหัสคอนโวลูชัน ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน

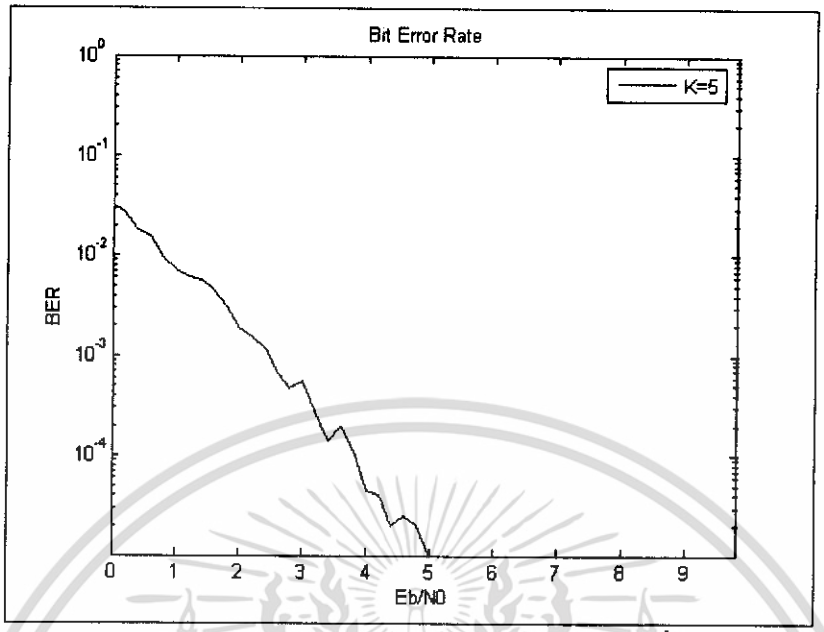
5.4.1 เข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2



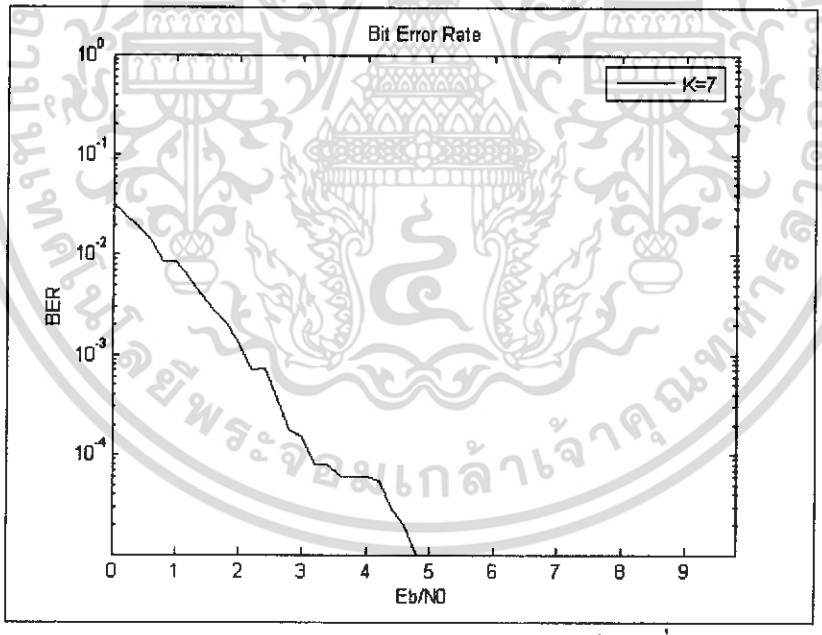
รูปที่ 5.47 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 3



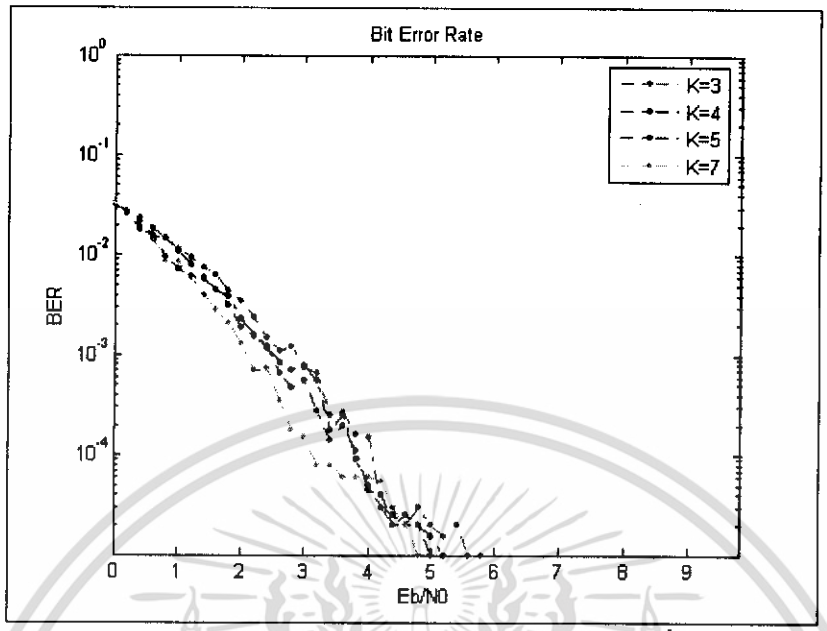
รูปที่ 5.48 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 4



รูปที่ 5.49 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/2 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 5

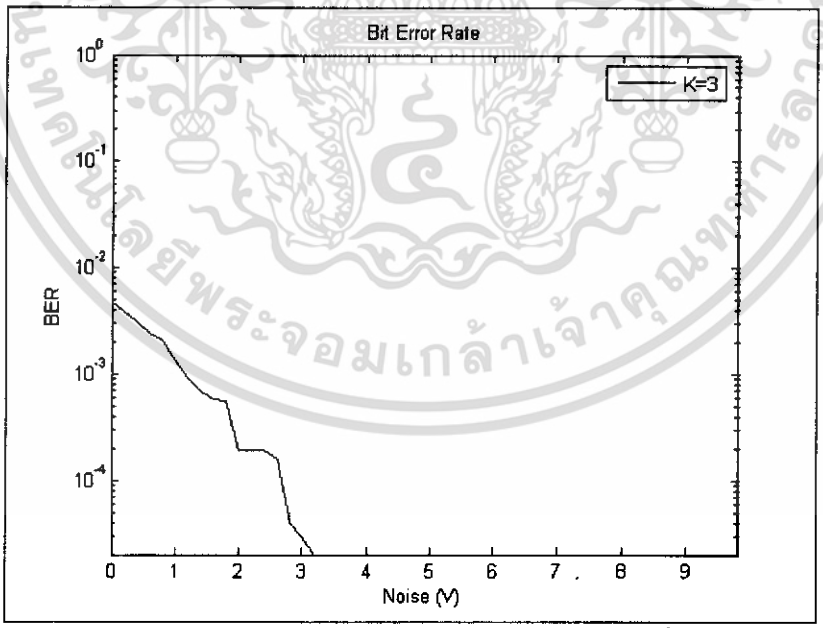


รูปที่ 5.50 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/2 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 7

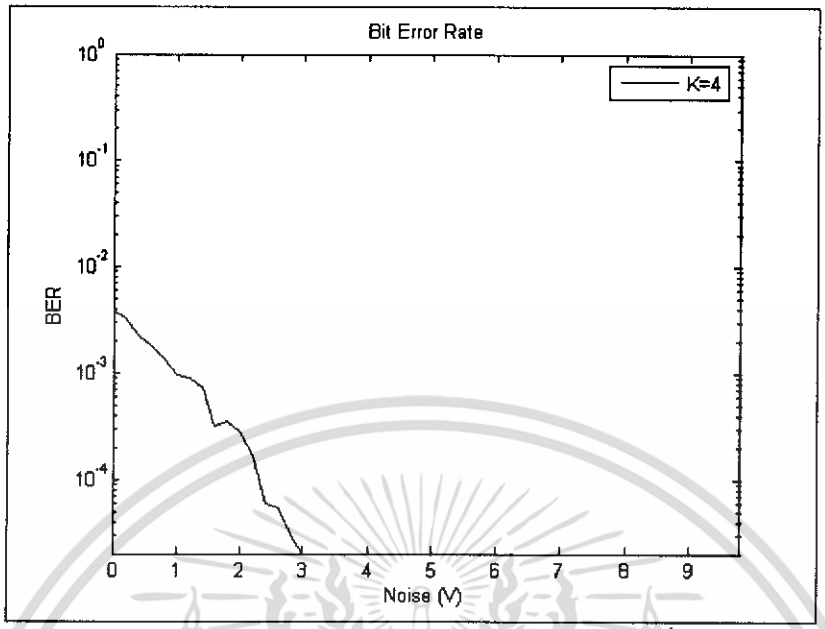


รูปที่ 5.51 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 3 , 4 , 5 และ 7

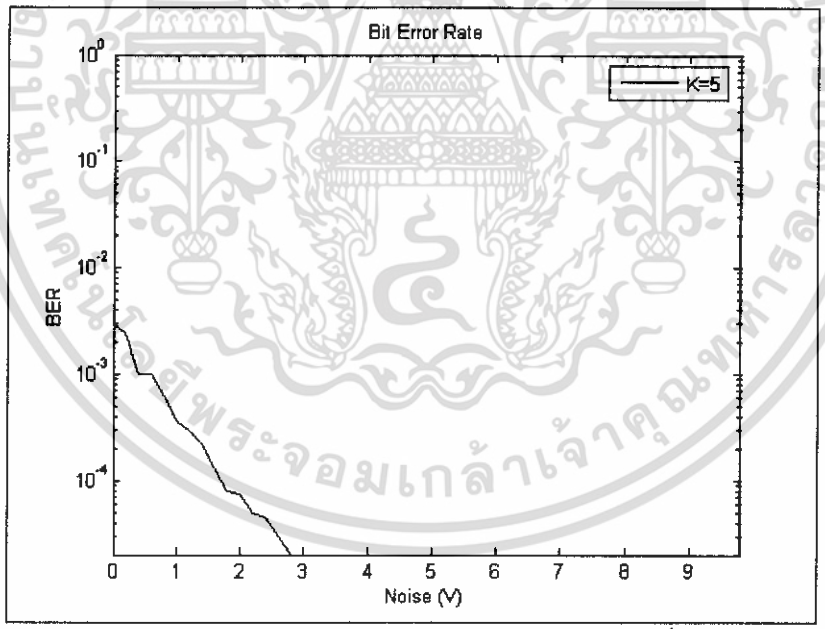
5.4.2 เข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3



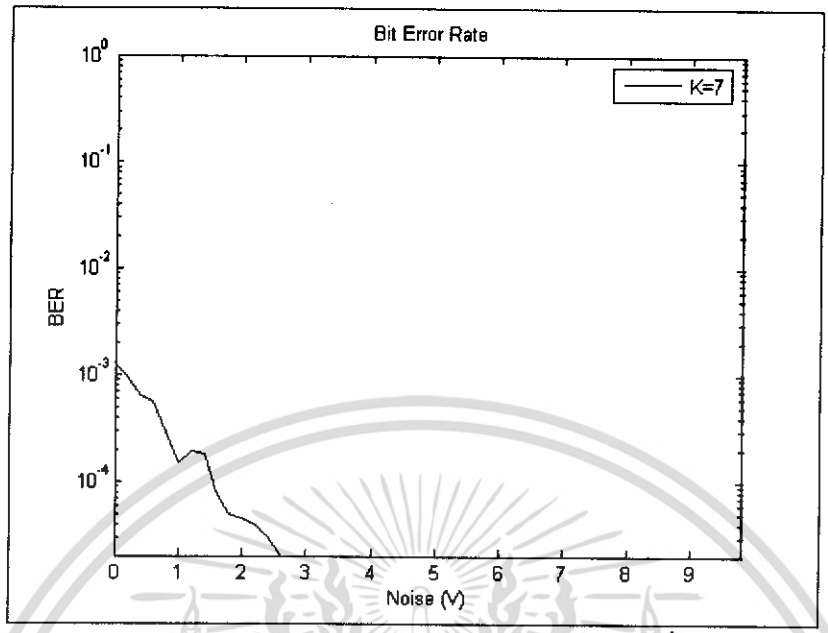
รูปที่ 5.52 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 3



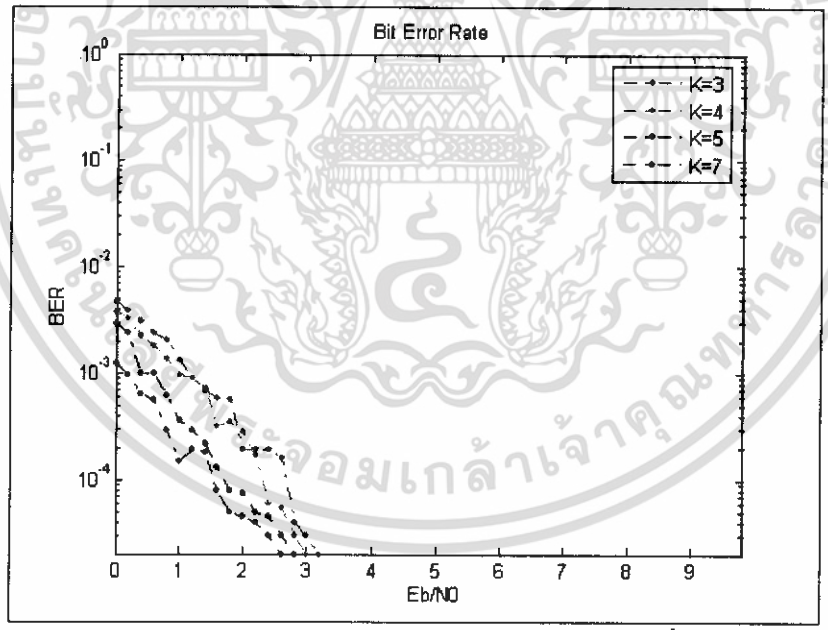
รูปที่ 5.53 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 4



รูปที่ 5.54 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 5



รูปที่ 5.55 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 7



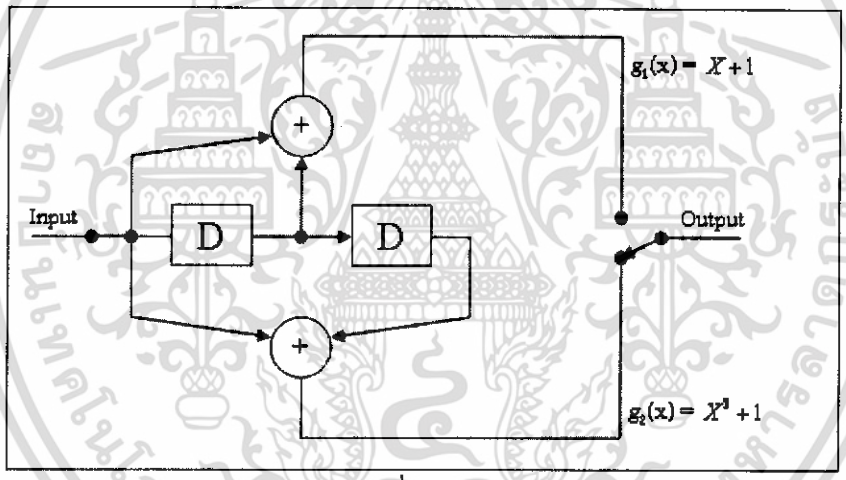
รูปที่ 5.56 กราฟแสดงค่า BER จากโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีอัตราการเข้ารหัส เท่ากับ 1/3 และ Constraint Length (K) เท่ากับ 3 , 4 , 5 และ 7

5.5 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพที่มีการเข้ารหัสคอนโวลูชัน ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน

5.5.1 ทดลองเข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2

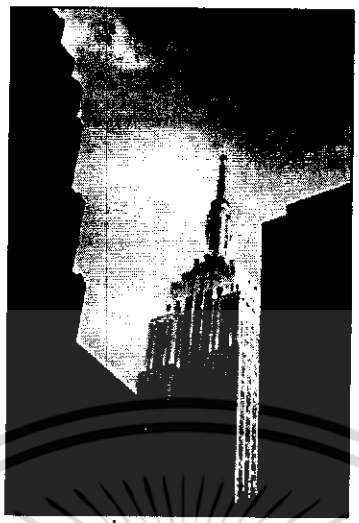
5.5.1.1 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และ Constraint Length(K) เท่ากับ 3

จากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูลประเภทรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่า Eb/N0 ที่ระดับต่างๆ โดยทำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และค่า Constraint Length(K) เท่ากับ 3 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ $X+1$ และ g_2 คือ X^2+1 โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.58 ถึงรูปที่ 5.76



รูปที่ 5.57 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และค่า K เท่ากับ 3

รูปที่ 5.58 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0



รูปที่ 5.59 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.60 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

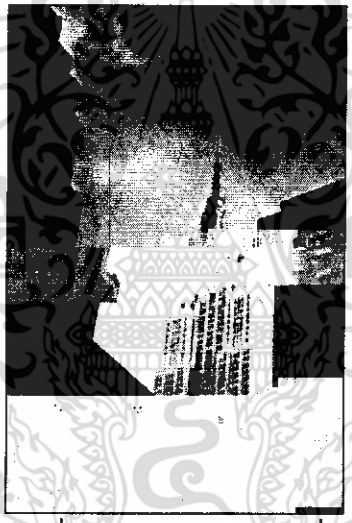
รูปที่ 5.61 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.62 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

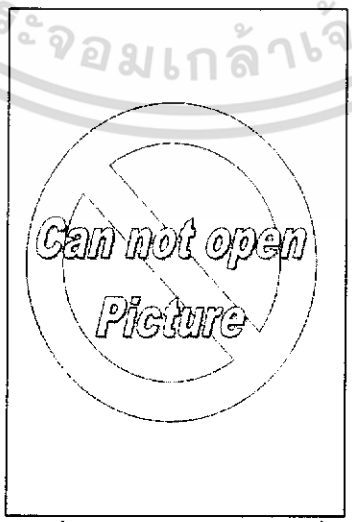
รูปที่ 5.63 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.64 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

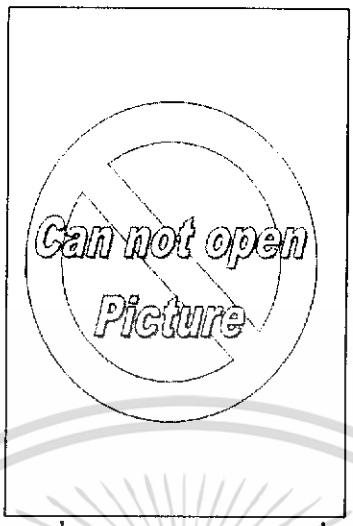
รูปที่ 5.65 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.425×10^{-4}



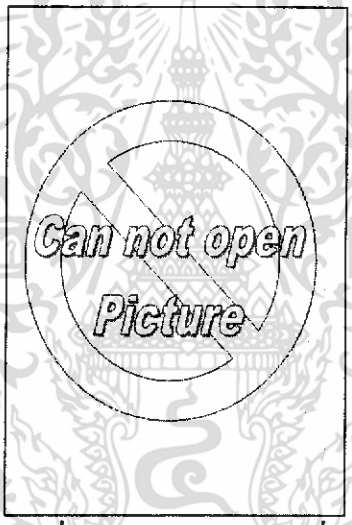
รูปที่ 5.66 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.532×10^{-3}



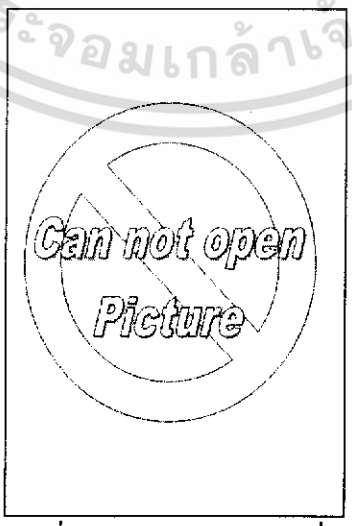
รูปที่ 5.67 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.328×10^{-3}



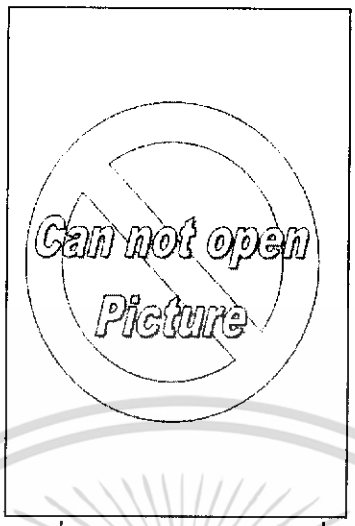
รูปที่ 5.68 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.108×10^{-2}



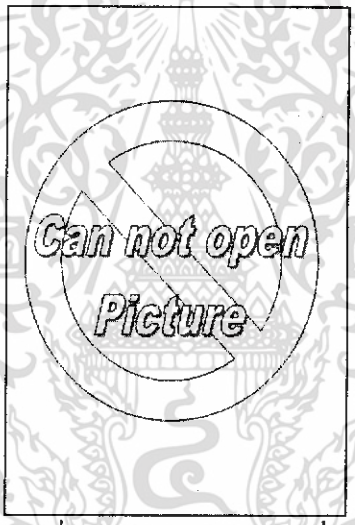
รูปที่ 5.69 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.637×10^{-2}



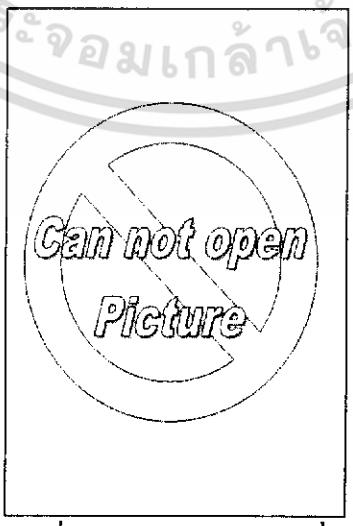
รูปที่ 5.70 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.329×10^{-2}



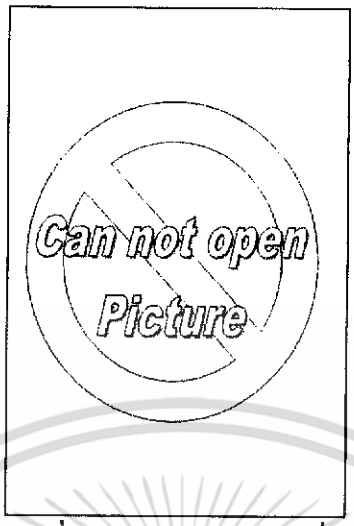
รูปที่ 5.71 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.244×10^{-2}



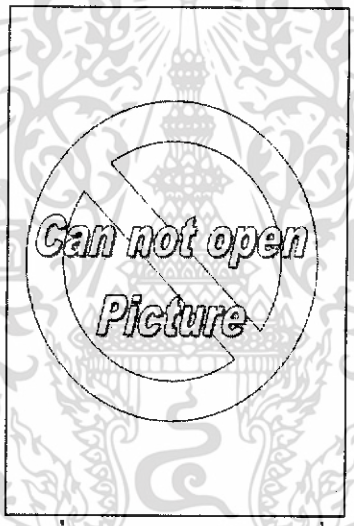
รูปที่ 5.72 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 5.465×10^{-2}



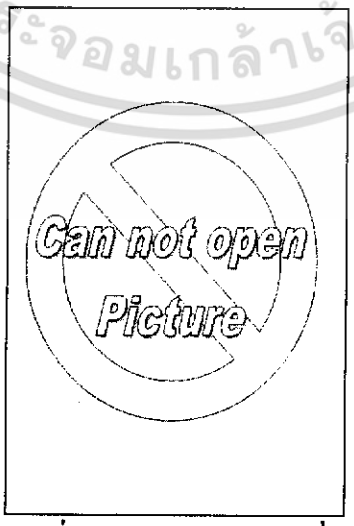
รูปที่ 5.73 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 6.912×10^{-2}



รูปที่ 5.74 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 7.194×10^{-2}



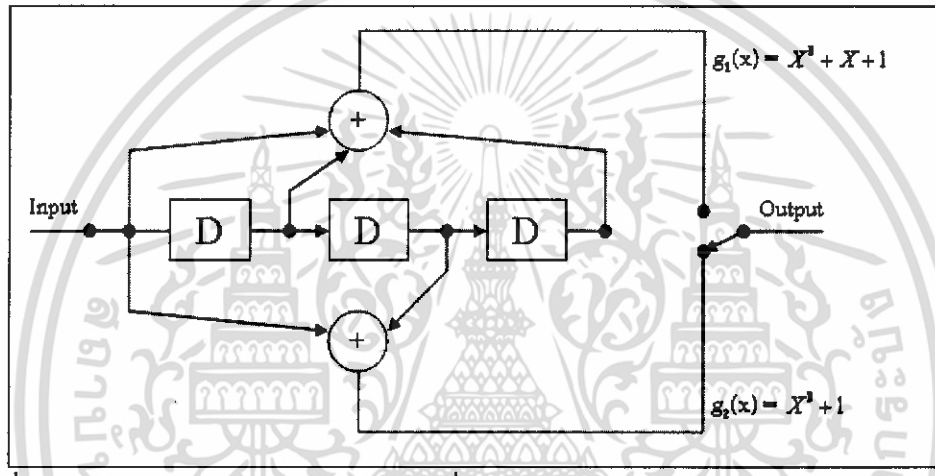
รูปที่ 5.75 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 8.279×10^{-2}



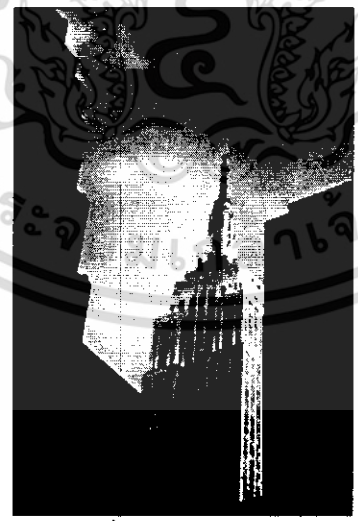
รูปที่ 5.76 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 8.173×10^{-2}

5.5.1.2 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และ Constraint Length(K) เท่ากับ 4

จากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูลประเภทรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่า Eb/N0 ที่ระดับต่างๆ โดยทำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และค่า Constraint Length(K) เท่ากับ 4 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ X^3+X+1 และ g_2 คือ X^2+1 โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.78 ถึงรูปที่ 5.86



รูปที่ 5.77 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และค่า K เท่ากับ 4



รูปที่ 5.78 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.79 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.80 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.81 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.82 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.83 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.84 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.85 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.86 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

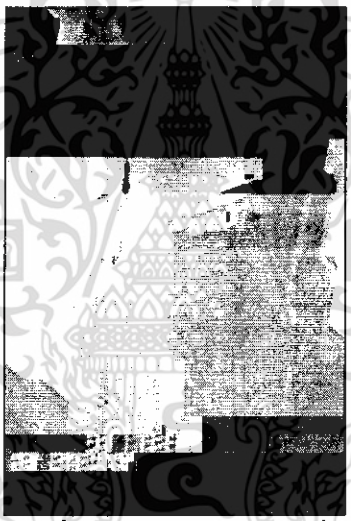
รูปที่ 5.87 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.88 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

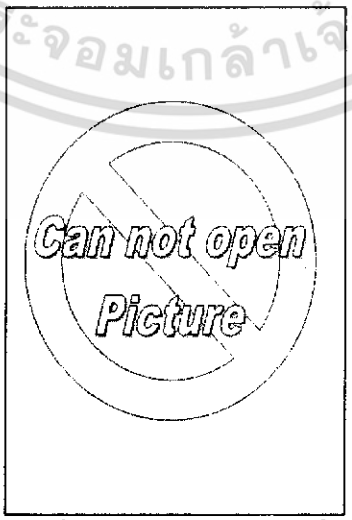
รูปที่ 5.89 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.098×10^{-5}

รูปที่ 5.90 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 5.340×10^{-5}

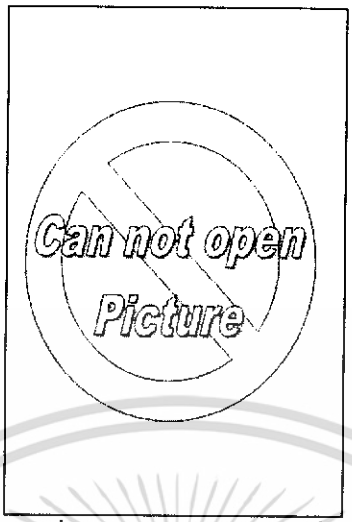
รูปที่ 5.91 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.577×10^{-5}



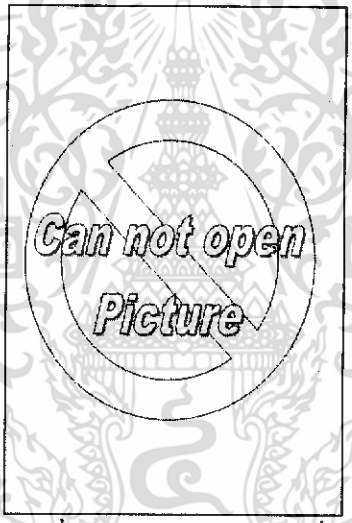
รูปที่ 5.92 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.811×10^{-4}



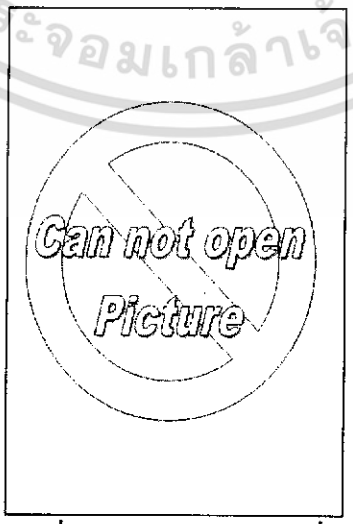
รูปที่ 5.93 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.833×10^{-4}



รูปที่ 5.94 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 8.258×10^{-4}



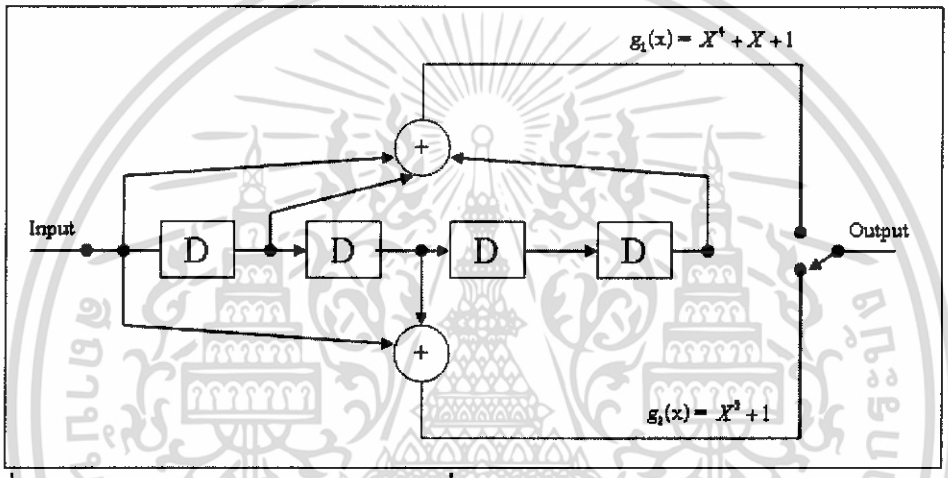
รูปที่ 5.95 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.371×10^{-3}



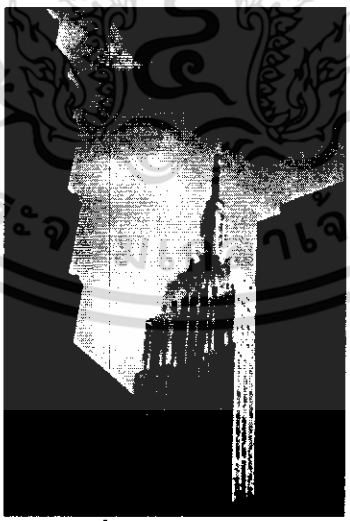
รูปที่ 5.96 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.386×10^{-3}

5.4.1.3 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และ Constraint Length(K) เท่ากับ 5

จากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูลประเภทรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่า Eb/N0 ที่ระดับต่างๆ โดยทำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และค่า Constraint Length(K) เท่ากับ 5 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ X^4+X+1 และ g_2 คือ X^2+1 โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.88 ถึงรูปที่ 5.106

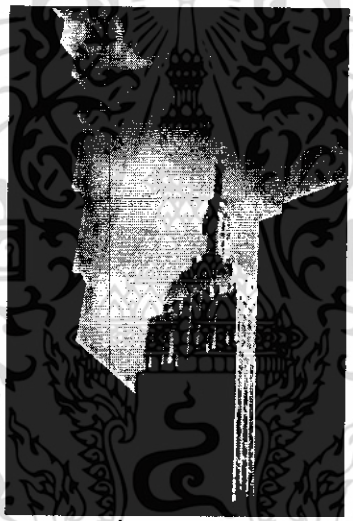


รูปที่ 5.97 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และค่า K เท่ากับ 5



รูปที่ 5.98 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.99 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0



รูปที่ 5.100 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.101 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.102 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.103 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.104 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

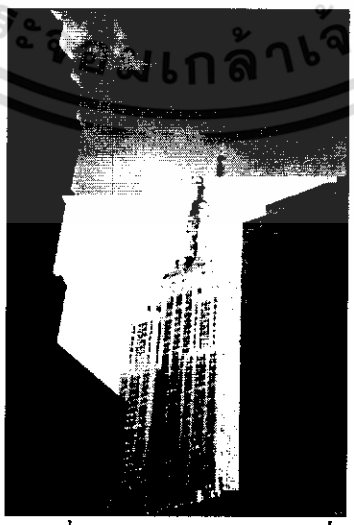
รูปที่ 5.105 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.106 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.107 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

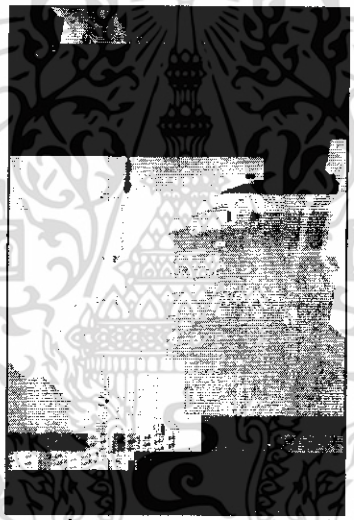
รูปที่ 5.108 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.109 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.814×10^{-6}

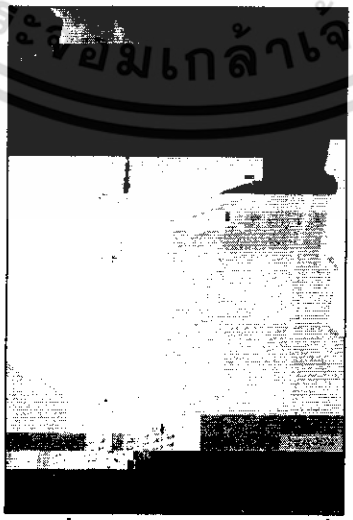


รูปที่ 5.110 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.716×10^{-5}

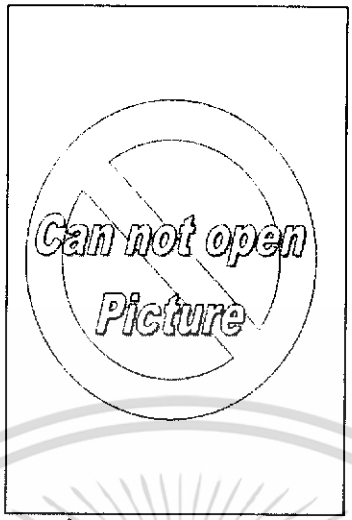
รูปที่ 5.111 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.814×10^{-5}



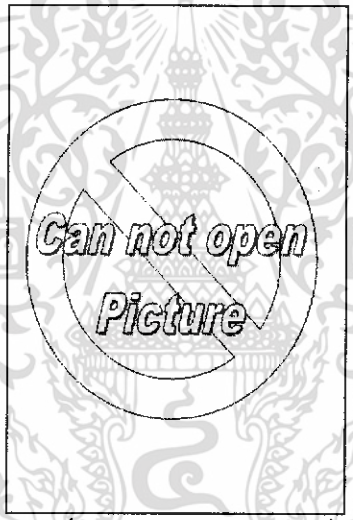
รูปที่ 5.112 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 7.057×10^{-5}



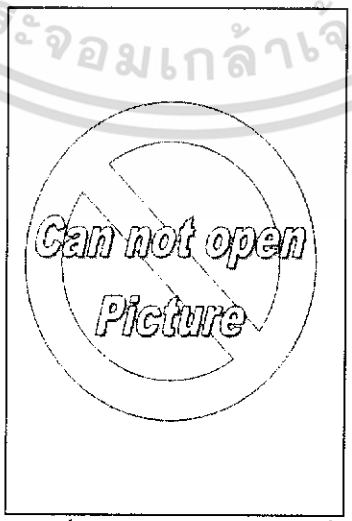
รูปที่ 5.113 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.964×10^{-4}



รูปที่ 5.114 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 6.561×10^{-4}



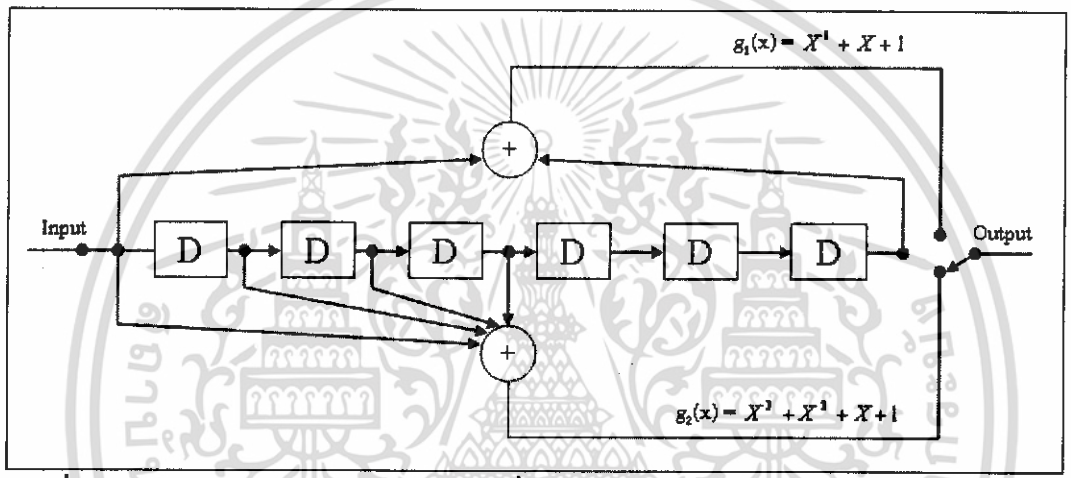
รูปที่ 5.115 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.035×10^{-3}



รูปที่ 5.116 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.901×10^{-3}

5.4.1.4 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และ Constraint Length(K) เท่ากับ 7

จากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูลประเภทรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่า Eb/N0 ที่ระดับต่างๆ โดยทำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และค่า Constraint Length(K) เท่ากับ 7 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ X^6+X+1 และ g_2 คือ X^3+X^2+X+1 โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.108 ถึงรูปที่ 5.126



รูปที่ 5.117 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และค่า K เท่ากับ 7

รูปที่ 5.118 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.119 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.120 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.121 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.122 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

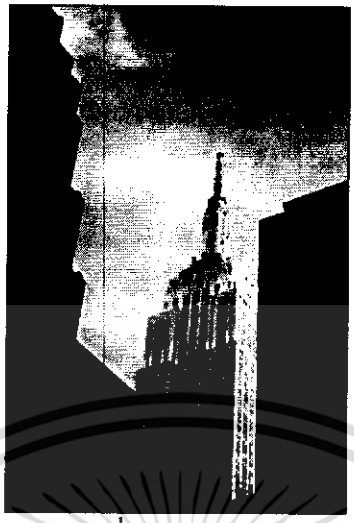
รูปที่ 5.123 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.124 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.125 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.126 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.127 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

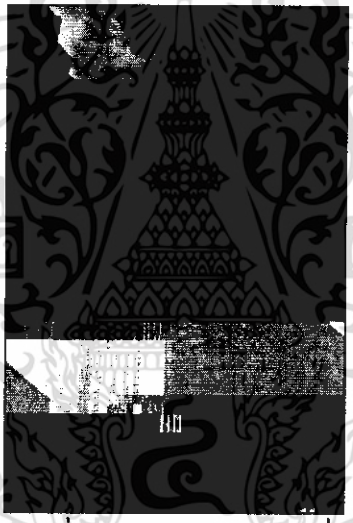


รูปที่ 5.128 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

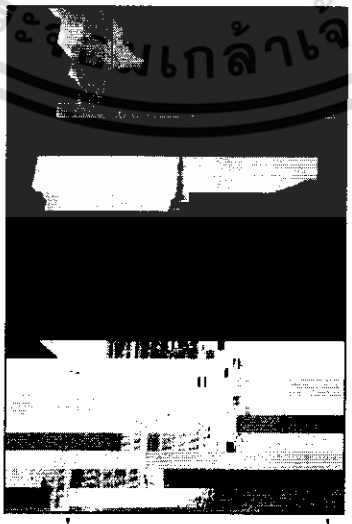
รูปที่ 5.129 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.130 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

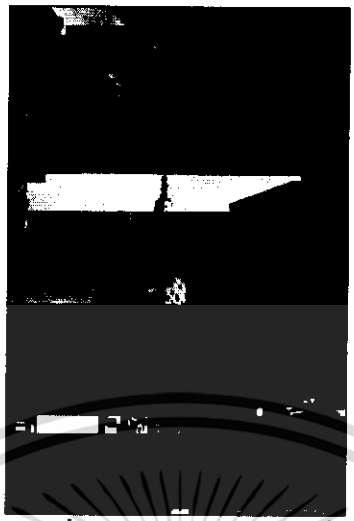
รูปที่ 5.131 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.386×10^{-5}



รูปที่ 5.132 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 8.010×10^{-5}

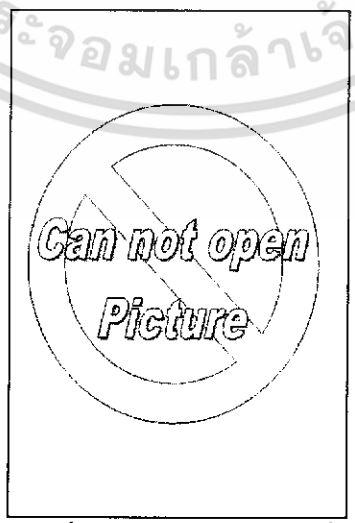


รูปที่ 5.133 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.136×10^{-4}



รูปที่ 5.134 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.653×10^{-4}

รูปที่ 5.135 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.111×10^{-3}

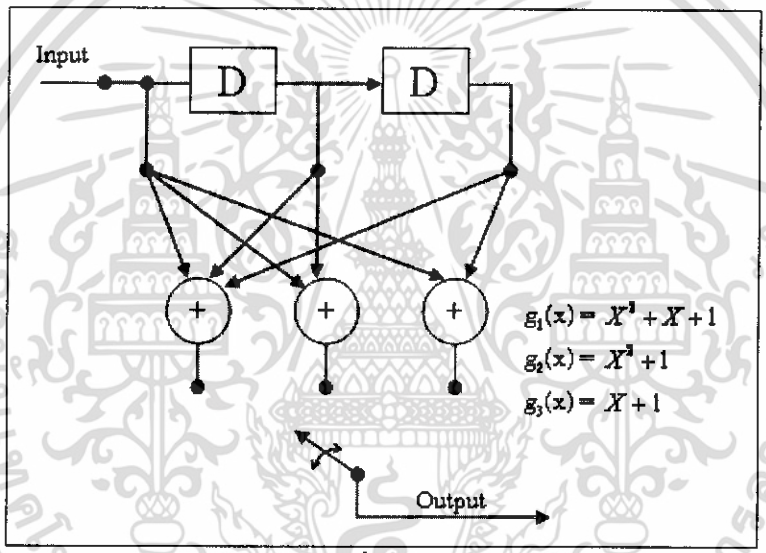


รูปที่ 5.136 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.882×10^{-3}

5.4.2 ทดลองเข้ารหัสคอนโวลูชันที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3

5.4.2.1 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และ Constraint Length(K) เท่ากับ 3

จากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูลประเภทรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่า Eb/N0 ที่ระดับต่างๆ โดยทำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และค่า Constraint Length(K) เท่ากับ 3 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ X^2+X+1 g_2 คือ X^2+1 และ g_3 คือ $X+1$ โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.128 ถึงรูปที่ 5.146



รูปที่ 5.137 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และค่า K เท่ากับ 3

รูปที่ 5.138 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.139 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.140 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.141 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.142 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.143 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.144 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.145 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.146 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.147 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.148 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.149 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.150 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

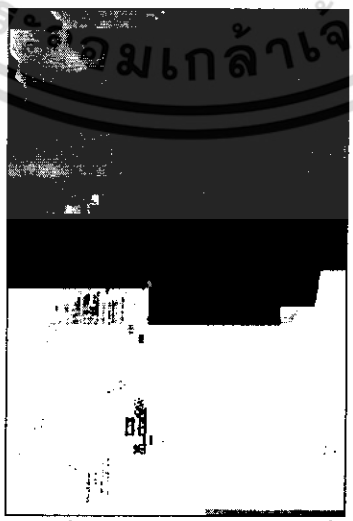
รูปที่ 5.151 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.814×10^{-6}

รูปที่ 5.152 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.335×10^{-5}

รูปที่ 5.153 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.907×10^{-5}

รูปที่ 5.154 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.386×10^{-5}

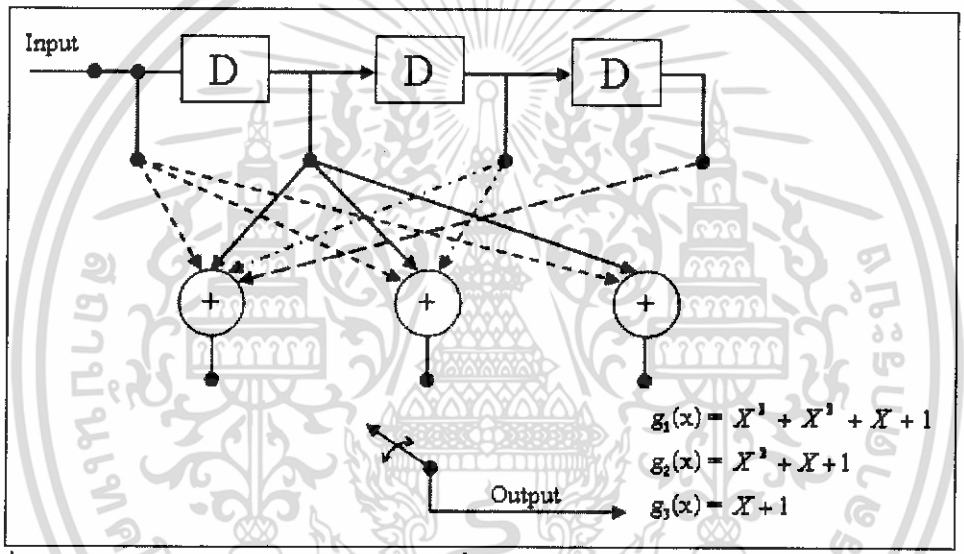
รูปที่ 5.155 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.163×10^{-4}



รูปที่ 5.156 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.792×10^{-4}

5.4.2.2 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และ Constraint Length(K) เท่ากับ 4

จากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูลประเภทรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่า Eb/N0 ที่ระดับต่างๆ โดยทำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และค่า Constraint Length(K) เท่ากับ 4 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ X^3+X^2+X+1 g_2 คือ X^2+X+1 และ g_3 คือ $X+1$ โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.148 ถึงรูปที่ 5.166



รูปที่ 5.157 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และค่า K เท่ากับ 4

รูปที่ 5.158 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.159 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.160 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.161 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.162 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.163 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.164 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.165 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.166 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

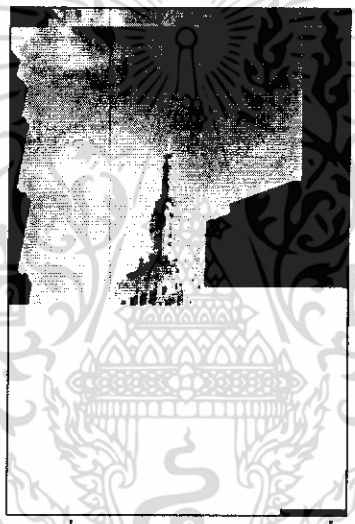
รูปที่ 5.167 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.168 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.169 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

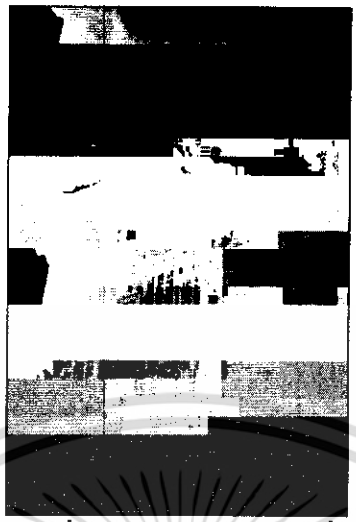
รูปที่ 5.170 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.171 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.288×10^{-5}



รูปที่ 5.172 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 4.386×10^{-5}

รูปที่ 5.173 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.106×10^{-4}



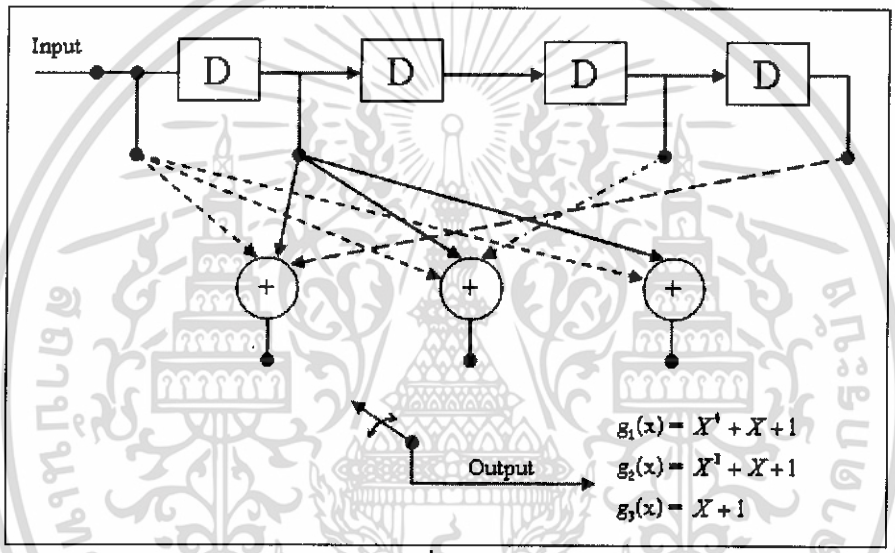
รูปที่ 5.174 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.117×10^{-4}

รูปที่ 5.175 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.757×10^{-4}

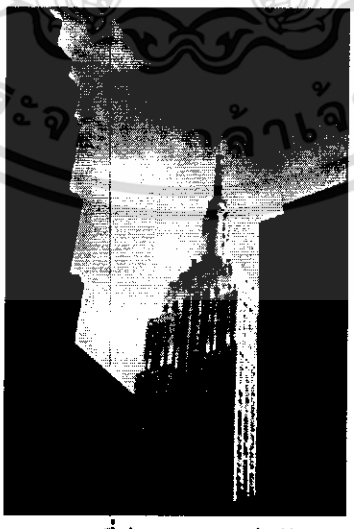
รูปที่ 5.176 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 7.095×10^{-4}

5.4.2.3 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และ Constraint Length(K) เท่ากับ 5

จากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูลประเภทรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่า Eb/N0 ที่ระดับต่างๆ โดยทำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และค่า Constraint Length(K) เท่ากับ 5 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ X^4+X+1 g_2 คือ X^3+X+1 และ g_3 คือ $X+1$ โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.168 ถึงรูปที่ 5.186



รูปที่ 5.177 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และค่า K เท่ากับ 5



รูปที่ 5.178 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.179แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.180 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

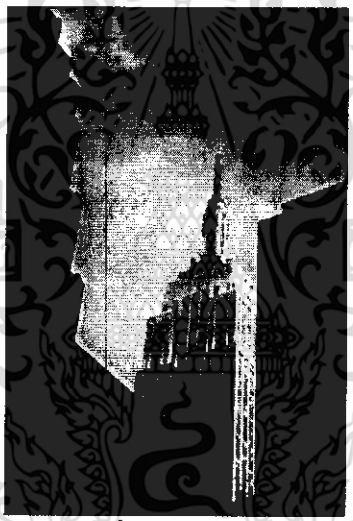
รูปที่ 5.181 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.182 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.183 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.184 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.185 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0



รูปที่ 5.186 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.187 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.188 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

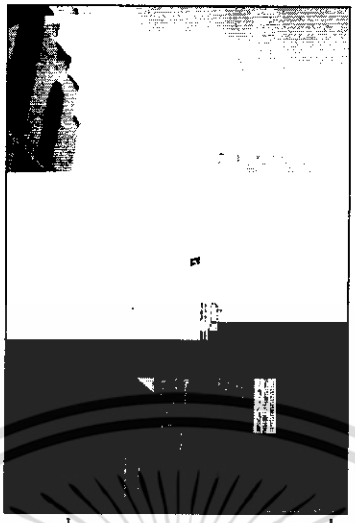
รูปที่ 5.189 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.190 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.191 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.192 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 7.629×10^{-6}

รูปที่ 5.193 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.525×10^{-5}



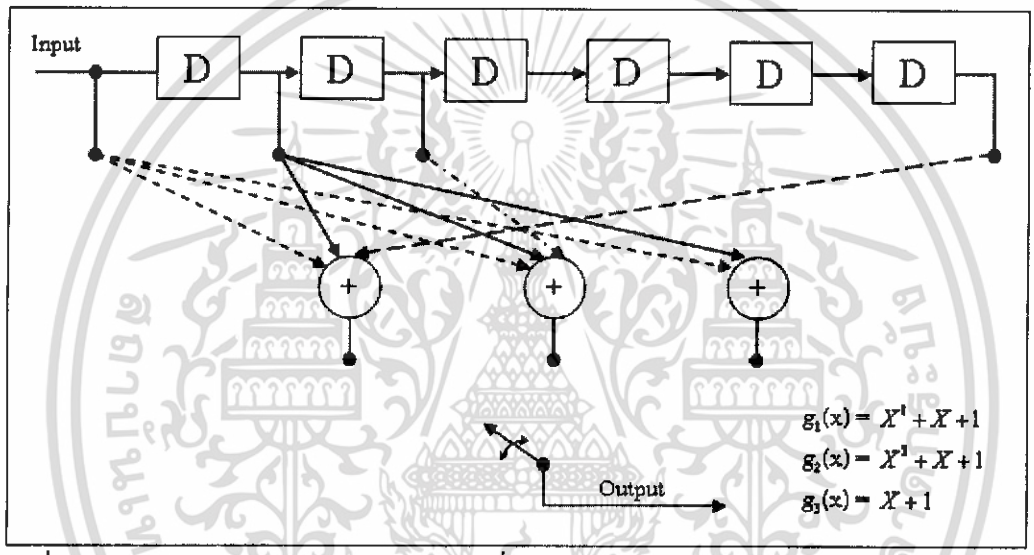
รูปที่ 5.194 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 8.010×10^{-5}

รูปที่ 5.195 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.678×10^{-4}

รูปที่ 5.196 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.784×10^{-4}

5.4.2.4 อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และ Constraint Length(K) เท่ากับ 7

จากการทดลองการจำลองการส่งข้อมูลประเภทรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่า Eb/N0 ที่ระดับต่างๆ โดยทำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันเพื่อป้องกันความผิดพลาดของข้อมูล ซึ่งใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และค่า Constraint Length(K) เท่ากับ 7 และมีค่า Generator Polynomials g_1 คือ X^6+X+1 g_2 คือ X^2+X+1 และ g_3 คือ $X+1$ โดยผลที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ ถึงรูปที่



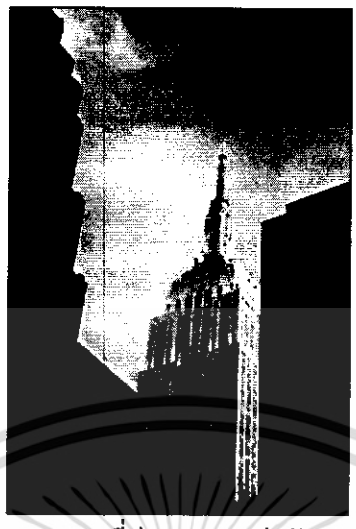
รูปที่ 5.197 แสดงวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 และค่า K เท่ากับ 7

รูปที่ 5.198 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 10.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

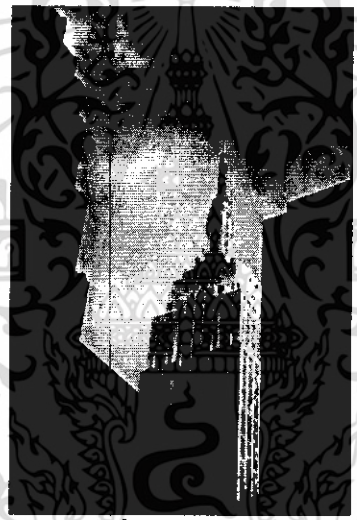
รูปที่ 5.199 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.200 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 9.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.201 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0



รูปที่ 5.202 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 8.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0



รูปที่ 5.203 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.204 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 7.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.205 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.206 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 6.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.207 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.208 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 5.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

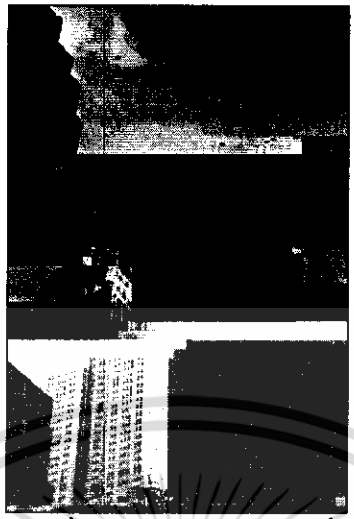
รูปที่ 5.209 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.210 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 4.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

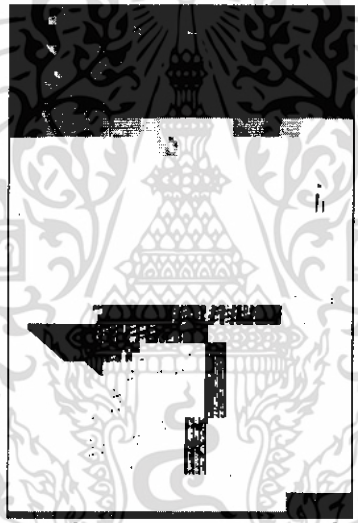
รูปที่ 5.211 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 0.0

รูปที่ 5.212 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 3.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.907×10^{-5}

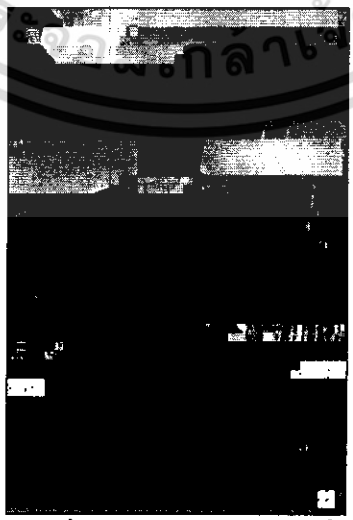
รูปที่ 5.213 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 1.144×10^{-5}



รูปที่ 5.214 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 2.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 3.242×10^{-5}



รูปที่ 5.215 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.5 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 8.392×10^{-5}



รูปที่ 5.216 แสดงรูปจากการทดลองที่ค่า Eb/N0 เท่ากับ 1.0 ซึ่งได้ค่า BER เท่ากับ 2.021×10^{-4}

บทที่ 6
สรุป

6.1 สรุปการวิเคราะห์ฟังชันก์สัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนแบบ Uniform จะมีความน่าจะเป็นในการเกิดสัญญาณรบกวนที่ความแรงต่าง ๆ จะเท่ากัน ส่วนสัญญาณรบกวนแบบ AWGN จะมีความน่าจะเป็นในการเกิดสัญญาณรบกวนที่บริเวณที่มีความแรงน้อยกว่าบริเวณที่มีความแรงมาก โดยเมื่อมีค่า Eb/N0 น้อยลง ความน่าจะเป็นในการเกิดสัญญาณที่ความแรงมากจะมีค่ามากขึ้น

6.2 สรุปการทดลองจำลองการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน

6.2.1 กรณีไม่มีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด แบบรหัสคอนโวลูชัน

การส่งข้อมูลในกรณีนี้จะให้ค่า BER ที่สูงกว่าแบบที่ใช้รหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด

6.2.2 กรณีมีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด แบบรหัสคอนโวลูชัน

การส่งข้อมูลในกรณีนี้จะให้ค่า BER ที่ต่ำกว่าแบบที่ไม่ใช้รหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด โดยถ้าอัตราการเข้ารหัสมีค่ามากขึ้นค่ามี BER ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าค่า BER ที่มีอัตราการเข้ารหัสน้อย เช่น การเข้ารหัสที่อัตรา 1:3 จะได้ค่า BER ที่น้อยกว่าการเข้ารหัสที่อัตรา 1:2 และในกรณีที่ใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากัน การเข้ารหัสที่ใช้ค่า Constraint Length(K) มากจะให้ค่า BER ที่น้อยกว่าการเข้ารหัสที่ใช้ค่า Constraint Length(K) น้อย

6.3 สรุปการทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพ ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน

6.3.1 กรณีไม่มีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด แบบรหัสคอนโวลูชัน

6.3.1.1 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพประเภท JPG

ในกรณีนี้โอกาสในการเกิดความผิดพลาดจะเริ่มเห็นได้ชัดเจนที่ระดับของค่า Eb/N0 เท่ากับ 10 และจะมีโอกาสไม่สามารถเปิดภาพได้ที่ระดับของค่า Eb/N0 ประมาณ 8 ซึ่งค่าจะสูงกว่ากรณีที่ใช้รหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด นั่นคือข้อมูลมีโอกาสเกิดความผิดพลาดมากกว่ากรณีที่ใช้รหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด

6.3.1.2 การทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพประเภท BMP

จากการทดลองจำลองการส่งข้อมูลรูปภาพประเภท BMP ช่วงที่เห็นถึงความเพี้ยนของภาพได้ชัดเจนจะอยู่ที่ระดับของค่า Eb/N0 ประมาณ 7 และจะมีโอกาสไม่สามารถเปิดภาพได้ที่ระดับของค่า Eb/N0 ประมาณ 5 นั่นคือข้อมูลรูปภาพประเภท BMP มีโอกาสเกิดความเพี้ยนของภาพน้อยกว่ารูปภาพประเภท JPG

6.3.2 กรณีมีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด แบบรหัสคอนโวลูชัน

ในกรณีนี้ที่มีการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด แบบรหัสคอนโวลูชัน โอกาสที่ข้อมูลเกิดความผิดพลาดจะเริ่มเห็นได้ชัดเจนที่ Eb/N0 น้อยกว่าแบบที่ไม่มีการใช้รหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด โดยที่ระดับของ Eb/N0 ที่ทำให้ข้อมูลเกิดความผิดพลาดจะมีค่าน้อยแค่ไหนนั้นขึ้นอยู่กับอัตราการเข้ารหัสและค่า Constraint Length(K) คือ ถ้าใช้การเข้ารหัสที่มีอัตราการเข้ารหัสมาก ค่า Eb/N0 ที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดก็จะมีค่าน้อยลง แต่มีข้อเสียคือถ้าใช้อัตราการเข้ารหัสมากก็จะต้องใช้แบนด์วิธในการส่งข้อมูลมากขึ้นด้วย และเมื่อทำการเปรียบเทียบในกรณีที่ใช้อัตราการเข้ารหัสที่เท่ากัน แต่ที่ค่า Constraint Length(K) ต่าง ๆ กัน จะเห็นว่าที่ค่า Constraint Length(K) มากจะให้ระดับของ Eb/N0 ที่จะทำให้ข้อมูลเกิดความผิดพลาดก็จะมีค่าน้อยกว่าที่ Constraint Length(K) น้อย แต่ที่ค่า Constraint Length(K) มากจะมีข้อเสีย คือ จะใช้เวลาในการเข้ารหัสและถอดรหัสมากกว่าที่ค่า Constraint Length(K) น้อย

6.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

6.4.1 มีความรู้ความเข้าในในกระบวนการสื่อสาร

6.4.2 มีความรู้ความเข้าใจการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาดแบบ คอนโวลูชัน

6.4.3 มีความรู้ความเข้าใจในการเขียนโปรแกรมโดยภาษาจาวา

6.4.4 สามารถทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเข้ารหัสแบบ คอนโวลูชัน จากค่า BER ได้

6.4.5 สามารถทดสอบและเปรียบเทียบคุณภาพการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ทั้งที่มีการใช้รหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด และไม่ใช้รหัสเพื่อแก้ไขความผิดพลาด

6.5 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

การทำงานของโปรแกรมจำลองการส่งข้อมูลที่มีการเข้ารหัสเพื่อป้องกันความผิดพลาดนั้น จะใช้เวลาในการเข้ารหัส และถอดรหัสมาก ดังนั้นเพื่อที่จะให้การทำงานเร็วขึ้นจึงควรเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีตัวประมวลผลกลาง (CPU) ที่มีความเร็วสูง และหน่วยความจำที่มาก

6.6 แนวทางในการพัฒนาต่อ

ทำให้สามารถส่งข้อมูลผ่านระบบการสื่อสารที่ใช้อยู่จริง เพื่อเปรียบเทียบผลจากสัญญาณรบกวนจริงที่มีอยู่ในระบบการสื่อสาร กับสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่จำลองขึ้น และเพื่อศึกษาการนำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันไปใช้ในระบบสื่อสารจริง

บรรณานุกรม

1. ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ , "วิศวกรรมการสื่อสาร (Communication Engineering)" , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2546
2. อ.กฤดากร กล่อมการ , "การสื่อสารข้อมูล (Data Communication)" สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2545
3. ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ , "เทคโลโลยีโทรคมนาคม ทฤษฎีข่าวสารและการเข้ารหัส" , สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2546
4. รศ.บัณฑิต โรจน์อารยานนท์ , "หลักการไฟฟ้าสื่อสาร (Principles of Communication Systems" , สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2541
5. Deitel, Harvey M. , "JAVA HOW TO PROGRAM " , Prentice Hall , 1999
6. Deitel, Harvey M. , "ADVANCE JAVA 2 PLATPORM HOW TO PROGRAM " , Prentice Hall , 2001