



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การถอดรหัสช่องสัญญาณแบบแม่แบบซึ่งปรับค่าได้สำหรับระบบการส่งภาพ เอ็มพีเอก - 4 ไร้สาย

Adaptive MAP Source – Controlled Channel Decoding for MPEG – 4 Imagery Transmission Systems

นามผู้วิจัย นายสิริวัฒน์ หาสจิตโต

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อุศนา ตันฑุลเวศม์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การถอดรหัสช่องสัญญาณแบบแม่แบบซึ่งปรับค่าได้สำหรับระบบการส่งภาพ เอ็มพีเอก - 4 ไร้สาย

Adaptive MAP Source – Controlled Channel Decoding for MPEG – 4 Imagery
Transmission Systems

โดย

นายสิริวัฒน์ หาสจิตโต

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สิริวัฒน์ หาสจิตโต 2553: การถอดรหัสช่องสัญญาณแบบเม็บบซึ่งปรับค่าได้สำหรับระบบการส่งภาพ เอ็มเพ็ก-4 ไร้สาย ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์, Ph.D. 73 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการแสดงวิธีการคำนวณหาค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลของรูปภาพที่มีการบีบอัดด้วยวิธีเอ็มเพ็ก-4 โดยออกแบบการคำนวณเพื่อนำค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ย Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) โดยทดสอบกับช่องสัญญาณที่มีการเสียหายทางขนาดของสัญญาณ ผลการทดสอบที่ได้พบว่ารูปที่มีค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลมากจะมีค่า PSNR ที่เกิดจากการส่งภาพผ่านช่องสัญญาณที่มีการถอดรหัสแบบ ML และแบบ MAP มากกว่ารูปที่มีค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลน้อย โดยในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาจาวามาใช้ในการจำลองระบบ

Siriwat Hasajitto 2010: Adaptive MAP Source – Controlled Channel Decoding for MPEG – 4 Imagery Transmission Systems. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Srijidtra Charoenlarnpopparut, Ph.D. 73 pages.

This research shows the method to compute the Residual redundancy of MPEG-4 image transmission systems. The efficient evaluation of the residual redundancy for the zerotree symbol sequences is crucial and intensively discussed. The first order Markov model is employed for the zerotree symbol sequences of the “Lena” the “Barbara” and “Pancake” images. The system performance is summarized by considering the slow flat Rician fading channels and also block-fading Rician fading channels. The simulation results show some improvement between two images with different residual redundancies.

Student’s signature

Thesis Advisor’s signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีจิตรา เจริญลาภนพรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัย ให้คำปรึกษา แนะนำ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่อง และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุศนา ตัณฑุลเวศม์ และรองศาสตราจารย์ ดร.มงคล รักษาพัชรวงษ์ ที่ช่วยเหลือตรวจสอบพร้อมแนะนำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจมาโดยตลอด ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ในอนาคต ขอขอบคุณ นางสาวอิสริย์ สรรพสิริ โสภณ ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในงานวิจัย และหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อบกพร่องประการใด ข้าพเจ้ายินดีรับข้อเสนอแนะ และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

สิริวัฒน์ হাসজিত্তো

มีนาคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	31
ผลและวิจารณ์	38
ผล	38
วิจารณ์	62
สรุปและข้อเสนอแนะ	63
สรุป	63
ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	66
ภาคผนวก	68
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	73

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงตัวอย่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนอล	10
2	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	39
3	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB	40
4	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB	40
5	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	41
6	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB	42
7	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB	42
8	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	43
9	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB	44
10	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB	44
11	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	45
12	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB	46
13	ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
14 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	47
15 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB	48
16 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB	48
17 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	49
18 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB	50
19 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB	50
20 ค่าการพัฒนาของระบบของรูป Lena , Barbara และ Pancake เมื่อเปรียบเทียบค่า PSNR ระหว่างช่องสัญญาณแบบ ML และ MAP	51
21 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	52
22 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB	52
23 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB	53
24 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยคำนวณค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
25 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยคำนวณค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดย $\gamma = -33$ dB	54
26 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยคำนวณค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดย $\gamma = -23$ dB	55
27 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	56
28 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB	56
29 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB	57
30 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยคำนวณค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB	58
31 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยคำนวณค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB	58
32 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยคำนวณค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
33	ค่าการพัฒนาของระบบของรูป Lena , Barbara เมื่อเปรียบเทียบค่า PSNR ระหว่างการกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบโดยตรงที่ช่องสัญญาณแบบ ML กับช่องสัญญาณแบบ ML	60
34	อัตราส่วนร้อยละของการเปลี่ยนแปลงค่า STPM ระหว่าง ก่อนเข้าในช่องสัญญาณ และหลังออกจากช่องสัญญาณของภาพ “Lena” และ “Barbara”	61

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างระบบส่งข้อมูลภาพในช่องสัญญาณไร้สาย	2
2	ขั้นตอนการแบ่งข้อมูลภาพ	5
3	แผนภาพบล็อกของการเข้ารหัส EZW	6
4	ตำแหน่งการควอนไทซ์ของสัมประสิทธิ์ X และตำแหน่งใกล้เคียง	7
5	บล็อกโคอะแดรมการถอดรหัส EZW	8
6	โครงสร้างพื้นฐานของกลุ่มข้อมูลภาพสัมประสิทธิ์ HFS	8
7	แผนภาพการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนอลแบบ $G(D) = [D + 1, D^2 + D + 1]$	10
8	แผนภาพกระบวนการ Trellis-coded modulation (TCM)	14
9	แบบจำลองของ feedback-free CPE และระบบ MM	21
10	แผนภาพเฟสเทลลิส (Trellis Diagram) ของ 4-ary CPFSK ที่ $h = 1/4$	22
11	แสดงแผนภาพของการเข้ารหัสที่มีอัตราเท่ากับ $2/4$	24
12	แสดงเฟสทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่เกิดจาก $b_{1,k}$ และ $b_{2,k}$	25
13	แผนภาพของการเข้ารหัสทั้งหมด	27
14	แผนภาพเทลลิสของบล็อกในรูปที่ 13	27
15	แผนภาพเทลลิสของการเข้ารหัส $[D + 1, 2D + 1]$ ที่อัตรา $1/2$ ที่ประกอบด้วย CPFSK 4 ส่วนที่ค่า $h=1/4$	29
16	รูปภาพต้นแบบของ Lena ที่ไม่มีสัญญาณรบกวน	35
17	รูปภาพต้นแบบของ Barbara ที่ไม่มีสัญญาณรบกวน	36
18	รูปภาพต้นแบบของ Pancake ที่ไม่มีสัญญาณรบกวน	36

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

EZW	=	Embedded Zerotree Wavelet
DWT	=	Discrete Wavelet Transform
ML	=	Maximum Likelihood
MAP	=	Maximum a posteriori
HFS	=	Higher Frequency Subband
LFS	=	Lowest Frequency Subband
DPCM	=	Differential Pulse Code Modulation
ZTR	=	Zerotree Root
IZ	=	Isolated Zero
VZTR	=	Valued Zerotree Root
VAL	=	Value
CRC	=	Cyclic Redundancy Check
SOT	=	Starting Spatial Orientation Tree
MLSE	=	Maximum Likelihood Sequence Estimator
CPM	=	Continuous Phase Modulation
TCM	=	Trellis-coded Modulation
AWGN	=	Additive White Gaussian Noise
PSNR	=	Peak Signal to Noise Ratio
WER	=	Word Error Rate

การถอดรหัสช่องสัญญาณแบบแอมป์ซึ่งปรับค่าได้สำหรับระบบ การส่งภาพ เอ็มพีเอก – 4 ไร้สาย

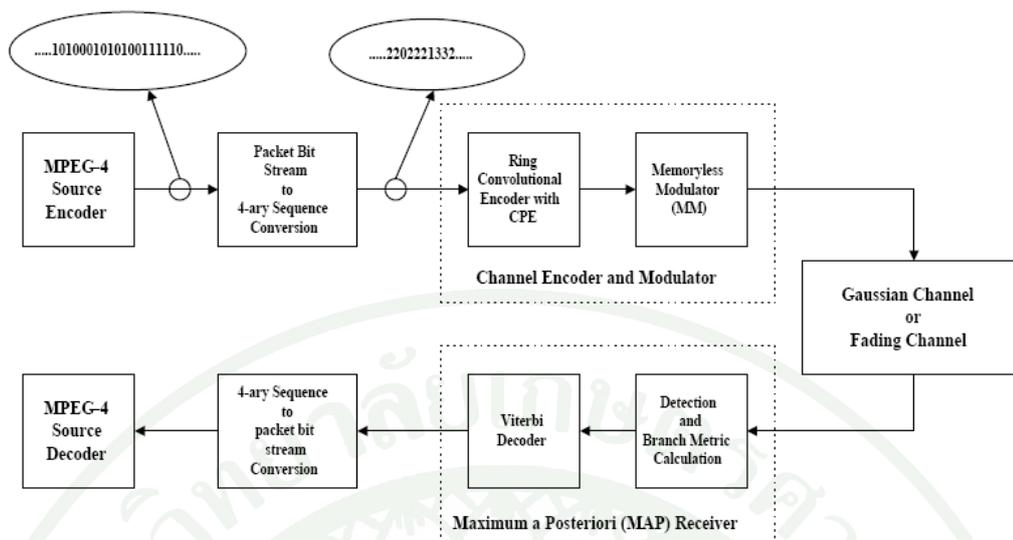
Adaptive MAP Source – Controlled Channel Decoding for MPEG – 4 Imagery Transmission Systems

คำนำ

เอ็มพีเอก – 4 คือ การบีบอัดข้อมูลวิดีโอหรือรูปภาพให้มีขนาดเหมาะสมต่อการส่งผ่านไปยัง การสื่อสารต่างๆทุกประเภท โดยการบีบอัดด้วยวิธีของเอ็มพีเอก – 4 จะได้ภาพที่มีขนาดเล็กกว่า เจ เอ็มพีเอก ซึ่งเป็นผลมาจากการลดขนาดช่วงกว้างของแบนด์วิดท์และรวมเอาไฟล์วิดีโอกับข้อความ กราฟฟิกเข้าไว้ด้วยกัน การส่งผ่านรูปภาพที่มีการบีบอัดด้วยวิธีเอ็มพีเอก – 4 สามารถทำได้ในหลาย ช่องสัญญาณ โดยที่ในแต่ละช่องสัญญาณจะให้คุณภาพของรูปที่แตกต่างกันออกไป จึงทำให้มี นักวิจัยหลายคนให้ความสนใจในการพัฒนาคุณภาพของช่องสัญญาณเพื่อให้ได้รูปภาพที่มีคุณภาพ ที่ดีที่สุด โดยที่การวัดค่าการพัฒนาของช่องสัญญาณสามารถดูได้จากค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูล (Residual Redundancy)

ในการวิจัยนี้จะแสดงถึงวิธีการคำนวณหาค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลของรูปภาพที่มีการบีบอัดด้วยวิธีเอ็มพีเอก – 4 แล้วนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย PSNR ที่เกิดจากการส่งภาพไปใน 2 ช่องสัญญาณคือ ที่ช่องสัญญาณที่มีการถอดรหัสแบบ ML และแบบ MAP อย่างละเอียดเพื่อนำค่าที่ได้ไปตรวจสอบว่า PSNR และค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลมีความสัมพันธ์กันอย่างไร

งานวิจัยนี้สืบเนื่องมาจากงานวิจัยของ (Mahapakulchai and Van Dyck, 2004) โดยมีแนวคิดคือ ต้องการลดการถูกทำลายของข้อมูลภาพที่เกิดจากสัญญาณรบกวนบนช่องสัญญาณ โดยมีการคำนวณค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูล ค่าเฉลี่ย PSNR และค่า Word Error Rate (WER) เพื่อนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ถึงประสิทธิภาพของระบบ ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างของระบบข้อมูลภาพ ประกอบด้วย 5 ส่วนหลักคือ



ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างระบบส่งข้อมูลภาพในช่องสัญญาณไร้สาย

1. ส่วนของการเข้ารหัสและถอดรหัสของข้อมูลภาพแบบ เอ็มพีเอก - 4 เป็นวิธีการบีบอัดข้อมูลภาพที่มีประสิทธิภาพ โดยจะทำการแยกข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ ที่มีความถี่ต่ำ (LFS) และส่วนที่มีความถี่สูง (HFS) กลุ่มข้อมูลของ LFS มีความสำคัญมากเพราะเป็นโครงสร้างหลักของรูปภาพ ส่วน HFS เป็นข้อมูลของรายละเอียดภาพ
2. ส่วนของการเปลี่ยนข้อมูลภาพจากบิตเป็นสัญลักษณ์ โดยที่ 1 สัญลักษณ์เท่ากับ 2 บิต ส่วนของการสลับข้อมูลภาพและการสลับลำดับข้อมูลภาพกลับ เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลเดิมที่อยู่ติดกันแยกออกจากกัน โดยลดจำนวนความผิดพลาดแบบต่อเนื่องของข้อมูลภาพในช่วงเวลาสั้นๆ
3. ส่วนของการเข้าและถอดรหัสช่องสัญญาณแบบเทลีสปประกอบด้วย 2 ส่วนคือ การเข้ารหัสช่องสัญญาณริงคอนโวลูชันนอล และการมอดูเลตแบบที่เฟสของสัญญาณมีความต่อเนื่อง โดยใช้ทฤษฎีการตรวจจับสัญญาณแบบ ML และ MAP เพื่อหาขนาดในแต่ละเส้นทางบนเทลีสรวมทั้งการถอดรหัสแบบวีเทอร์บี
4. ส่วนของช่องสัญญาณแบบที่มีการเลือนหายทางขนาดของสัญญาณเกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ แบบเร็ว และ แบบช้า

วัตถุประสงค์

เพื่อคำนวณหาค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลของรูปภาพที่มีการบีบอัดด้วยวิธี เอ็มพีเอก - 4 และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย PSNR และค่า WER ที่เกิดจากการส่งภาพไปใน 2 ช่องสัญญาณคือ ที่ช่องสัญญาณที่มีการถอดรหัสแบบ ML และแบบ MAP เพื่อตรวจสอบว่าค่าเฉลี่ย PSNR และค่า WER มีความสัมพันธ์อย่างไรกับค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูล



การตรวจเอกสาร

1. บทนำ

ระบบสื่อสารข้อมูลภาพ ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ส่วนแรกคือการจำลองการเข้าและถอดรหัสของข้อมูลภาพ ส่วนที่สองคือการจำลองการเข้าและการถอดรหัสช่องสัญญาณ และส่วนสุดท้ายคือ การจำลองช่องสัญญาณแบบไร้สาย วิธีการเข้าและถอดรหัสข้อมูลภาพแบบ Embedded zerotree wavelet (EZW) เป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพสูง ระบบ EZW เริ่มต้นสร้างโดย Shapiro (1993) เป็นการบีบอัดข้อมูลแบบเอ็มเพ็ก - 4 การเข้ารหัสช่องสัญญาณได้นำงานวิจัยของ Ungerboeck (1982) โดยศึกษาและออกแบบร่วมกับการเข้ารหัสคอนโวลูชันกับการกล้ำสัญญาณ CPFSK จากนั้นเริ่มออกแบบระบบส่งข้อมูลภาพโดย Mahapakulchai and Van dyck (2000) เป็นการนำการถอดรหัสแบบ MAP เข้ามาใช้กับระบบส่งข้อมูลภาพ พบว่าประสิทธิภาพของระบบโดยเฉลี่ยดีขึ้น และ Mahapakulchai and Van dyck (2004) มีการเปลี่ยนแปลงรูปภาพที่ใช้ในการทดสอบ ให้มีความหลากหลายมากขึ้น นอกจากนี้ Mahapakulchai (2007) ออกแบบการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบริงคอนโวลูชันใช้ร่วมกับการถอดรหัสแบบ MAP เพื่อหาตัวถอดรหัสที่ดีที่สุด

การวัดประสิทธิภาพของระบบส่งข้อมูลภาพ สามารถวัดได้จากค่า PSNR และ WER โดยค่า PSNR ถ้ามีค่ามากแสดงว่าระบบมีประสิทธิภาพสูง ส่วนค่า WER ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่าระบบมีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ ค่านี้แล้ว โครงการงานวิจัยนี้ ยังให้ความสนใจกับ ค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูล โดยในโครงการงานวิจัยนี้ใช้วิธี Gauss Elimination เพื่อคำนวณค่า ความซ้ำซ้อนของข้อมูล แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า PSNR และ WER

2. ระบบส่งข้อมูลภาพ

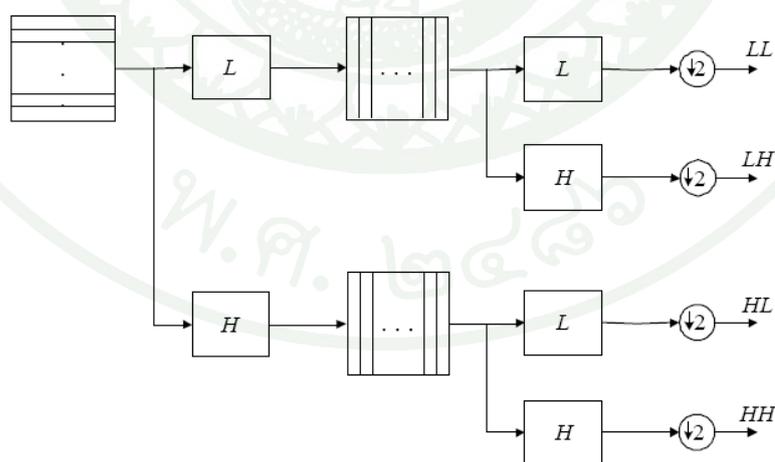
2.1 การเข้ารหัสและการถอดรหัสข้อมูลภาพ

การเข้ารหัสและการถอดรหัสข้อมูลภาพแบบ เอ็มเพ็ก - 4 เป็นวิธีการบีบอัดข้อมูลภาพที่นิยม เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการบีบอัดข้อมูลภาพสูง วิธีการ เอ็มเพ็ก - 4 เริ่มจากการแยกข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ LFS และ HFS ข้อมูลส่วน LFS เป็นตัวแทนข้อมูลโครงสร้างหลักของรูปภาพ ส่วน HFS เป็นตัวแทนข้อมูลรายละเอียดของรูปภาพ การป้องกันข้อมูลทั้ง 2 ส่วนนี้ทำโดย

การเข้ารหัสและถอดรหัสช่องสัญญาณแบบเทลลิส เพื่อให้อาจส่งผ่านช่องสัญญาณได้ และมีความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งอาจทำแยกและใช้วิธีที่แตกต่างกัน

เทคนิค EZW เป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการบีบอัดข้อมูลภาพ โดยแบ่งข้อมูลภาพออกเป็น ส่วนๆ ข้อมูลภาพที่ทำการแปลงแล้วจะถูกแทนด้วยสัมประสิทธิ์เวฟเลต เทคนิคนี้มีประสิทธิภาพในการนำข้อมูลกลับ และมีความสามารถในการแก้ปัญหาหลายรูปแบบ ทำให้ได้รับความนิยมในการแปลงสัมประสิทธิ์เวฟเลตของข้อมูลภาพดิจิทัล โดยวิธีการแปลงแบบ Discrete Wavelet Transform (DWT) เริ่มจากแบ่งข้อมูลภาพในช่วงความถี่ย่านที่ต่างกัน จากนั้นใช้เทคนิค Iterated Filtering และ Downsampling เป็นตัวกรองเพื่อแยกความถี่ของข้อมูลภาพในย่านความถี่ที่ต้องการ โดยใช้สเกลในการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์เวฟเลตของกระบวนการ Downsampling ซึ่งมีการกำหนดสเกล 2 แบบ คือ Coarse และ Fine ใช้ในการเรียกสเกลที่มีขนาดใหญ่และ สเกลที่มีขนาดเล็กตามลำดับ

กระบวนการแบ่งแยกข้อมูลภาพแบบ 2 มิติ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน เริ่มจากการแบ่งข้อมูลภาพในแนวนอนหรือ แลว ผ่านตัวกรอง จากนั้นแบ่งข้อมูลภาพในแนวตั้งฉากหรือ คอลัมน์ผ่านตัวกรอง โดยตัวกรองมีการกรองความถี่ 2 แบบ คือ ตัวกรองความถี่ต่ำหรือ Low-pass Filter และ ตัวกรองความถี่สูงหรือ High-pass Filter สามารถแสดงขั้นตอนการแบ่งข้อมูลภาพดังภาพที่ 2

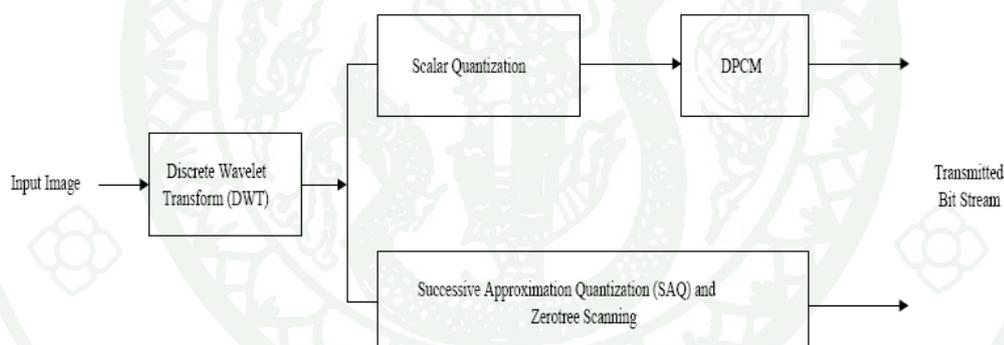


ภาพที่ 2 ขั้นตอนการแบ่งข้อมูลภาพ

รหัสเอ็มเพ็ก - 4 EZW เป็นขั้นตอนวิธีที่มีต้นแบบมาจาก EZW และ SPIHT โดยทำการเข้ารหัสจากการแปลงภาพด้วย DWT โดยใช้ Daubechies (9,15) Tap Biorthogonal Filters ที่มีการแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 ระดับ เพื่อแยกข้อมูลภาพออกเป็นสัมประสิทธิ์ LFS และ HFS เป็นผลทำให้การป้องกันความผิดพลาดของสัมประสิทธิ์มีประสิทธิภาพต่างกัน

2.1.1 การเข้ารหัสข้อมูลภาพ

การเข้ารหัสข้อมูลภาพ เพื่อแปลงข้อมูลภาพสัมประสิทธิ์ LFS เริ่มจากกระบวนการ Scalar Quantization จากนั้นส่งค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ไปยังกระบวนการ Differential Pulse Code Modulation หรือ DPCM และ การเข้ารหัสข้อมูลภาพสัมประสิทธิ์ HFS จะใช้กระบวนการ Successive Approximation Quantization และ Zerotree Scanning สามารถแสดงขั้นตอนการเข้ารหัสของทั้ง 2 กระบวนการดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนภาพบล็อกของการเข้ารหัส EZW

การเข้ารหัสข้อมูลภาพสัมประสิทธิ์ LFS เริ่มจากการนำสัมประสิทธิ์ LFS ผ่านกระบวนการควอนไทซ์โดย Scalar Quantization จากนั้นส่งไปยังกระบวนการ DPCM เพื่อทำนายค่าสัมประสิทธิ์ของการควอนไทซ์ (X) จากสัมประสิทธิ์ใกล้เคียงอีก 3 ตัว ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์ A,B และ C ดังภาพที่ 4 โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ตกค้าง หาได้จากผลต่างระหว่างค่าที่ทำนาย (\hat{X}) กับ X โดยกำหนดเงื่อนไขดังนี้

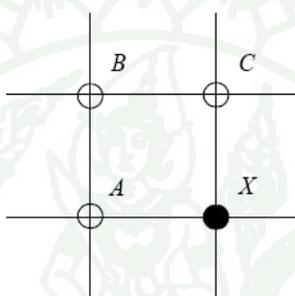
$$\text{IF } (|A - B|) < (|A - C|),$$

$$\text{then } \hat{X} = C$$

$$\text{else } \hat{X} = A$$

$$\text{The residual} = X - \hat{X}$$

โดยทั่วไปการเข้ารหัสเอ็มเพ็ก - 4 จะใช้ค่าน้อยที่สุดเป็นการตั้งค่าออฟเซตของสัมประสิทธิ์ตกค้าง ซึ่งมีค่าเป็นบวก จากนั้นผ่านกระบวนการเข้ารหัส Adaptive Arithmetic ทำการเลื่อนสัมประสิทธิ์ตกค้าง จากค่าออฟเซตที่ใช้ในการส่ง โดยเลือกจากความสำคัญของสัมประสิทธิ์

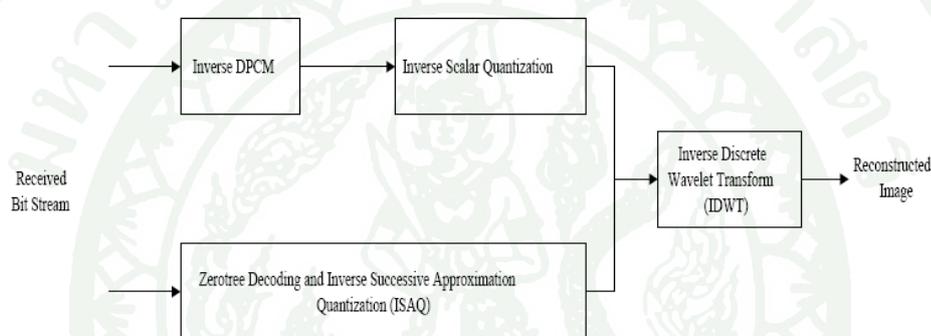


ภาพที่ 4 ตำแหน่งการควอนไทซ์ของสัมประสิทธิ์ X และตำแหน่งใกล้เคียง

การเข้ารหัสข้อมูลภาพสัมประสิทธิ์ HFS แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ Single Quantization และ Multi-Quantization ในงานวิจัยนี้ใช้การเข้ารหัสแบบ Single Quantization โดยใช้ Multi-level Quantizer และทำการควอนไทซ์เพียงครั้งเดียว โดยลำดับข้อมูลที่ได้อาจไม่มีคุณสมบัติของ Embedded Code เนื่องจากบิตที่มีความสำคัญไม่ได้ทำการส่งเป็นบิตแรก โครงสร้างต้นไม้เริ่มต้นจากสเกล Coarsest ที่มีสัมประสิทธิ์ในย่านความถี่ HL3, LH3 และ HH3 ที่ SOT เดียวกัน โดยใช้บิตข้อมูล SOTs เพื่อทำการสแกนลำดับ ดังนั้นสัมประสิทธิ์จะถูกแบ่งเป็น 4 แบบ คือ Zerotree Root หรือ ZTR, Isolated Zero หรือ IZ, Valued Zerotree Root หรือ VZTR และ Value หรือ VAL ตามเงื่อนไขดังนี้ คือ ถ้าสัมประสิทธิ์มีค่าน้อยกว่าขีดแบ่ง สัมประสิทธิ์ที่ได้จะอยู่ในกลุ่ม ZTR ถ้าสัมประสิทธิ์ที่ได้อย่างน้อย 1 ตัว มีค่ามากกว่าขีดแบ่ง สัมประสิทธิ์ที่ได้จะอยู่ในกลุ่ม IZ ถ้าสัมประสิทธิ์ที่ได้ไม่ตรงตามเงื่อนไขข้างต้น สัมประสิทธิ์ที่ได้จะอยู่ในกลุ่ม VZTR หรือ VAL โดยที่สัมประสิทธิ์ที่ได้มีค่ามากกว่าขีดแบ่งอยู่ในกลุ่ม VZTR และถ้าสัมประสิทธิ์ที่ได้อย่างน้อย 1 ตัวมีค่ามากกว่าขีดแบ่งจะอยู่ในกลุ่ม VAL อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในรูปแบบของ VAL และ IZ

ต้องมีความสอดคล้องกับรูปแบบของต้นไม้ เมื่อทำกระบวนการดังกล่าวเสร็จสิ้นแล้ว จะวนกลับมาเพื่อเริ่มกระบวนการต้นไม้ถัดไป

การเข้ารหัสข้อมูลภาพสัมประสิทธิ์ HFS โดยใช้ Multi – Quantization จะนำค่าสัมประสิทธิ์เวฟเลตเปรียบเทียบกับขีดแบ่ง จากนั้นทำการกำหนดรูปแบบของสัญลักษณ์ 4 แบบ คือ ZTR, IZ, VZTR และ VAL โดยใช้หลักการในการกำหนดรูปแบบของสัญลักษณ์แบบเดียวกับการเข้ารหัสข้อมูลภาพแบบ Single Quantization และทำการปรับค่าขีดแบ่งโดยกำหนดให้เป็นครึ่งหนึ่งของ ขีดแบ่ง Current เพื่อใช้ในการสแกนรอบถัดไป



ภาพที่ 5 บล็อกไดอะแกรมการถอดรหัส EZW

การถอดรหัสข้อมูลภาพสัมประสิทธิ์ HFS เริ่มจากนำขีดแบ่งเริ่มต้น และสัญลักษณ์ซีโรทรีเข้ามาในกระบวนการ จากนั้นเซตค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมดให้เป็นศูนย์ ถ้าสัญลักษณ์ที่รับมานั้นเป็น VZTR และ VAL จะใช้ค่าขีดแบ่งเพิ่มค่าของสัมประสิทธิ์นั้น แต่ถ้าสัมประสิทธิ์ที่รับมาเป็น ZTR และ IZ ค่าของสัมประสิทธิ์นั้นจะมีค่าเท่าเดิม (โดยที่ ZTR และ VZTR จะไม่มีการถอดรหัส) และ ต้องปรับค่าของขีดแบ่งก่อนที่จะทำการถอดรหัสครั้งต่อไป โดยค่าที่ใช้กำหนดค่าตามเดิมของการเข้ารหัส จากนั้นใช้กระบวนการ Inverse DWT เพื่อแปลงสัมประสิทธิ์เวฟเลตกลับเป็นรูปภาพตามเดิม ภาพที่ 5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการถอดรหัส EZW

Resynch Marker	Starting SOT	Number of SOTs	Number of Zerotrees	Zerotree Symbols	Non-zero Values	CRC
----------------	--------------	----------------	---------------------	------------------	-----------------	-----

ภาพที่ 6 โครงสร้างพื้นฐานของกลุ่มข้อมูลภาพสัมประสิทธิ์ HFS

ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของกลุ่มข้อมูลภาพสัมประสิทธิ์ HFS สำหรับ Single Quantization โดย 20 บิตแรกแทน Header ของการ Resynchronization Maker ที่ใช้เป็นตัวบอกจุดเริ่มต้นของแต่ละกลุ่มข้อมูล 10 บิตถัดไปเป็นบิต SOT เพื่อใช้บอกจุดเริ่มต้นของแต่ละทรี 8 บิตถัดไปเป็นบิตของ SOTs ใช้บอกจำนวนของทรีที่อยู่ในแต่ละกลุ่มข้อมูล และ 4 บิตสุดท้ายคือ Cyclic Redundancy Check ใช้ในการตรวจเช็คความถูกต้องของการส่งกลุ่มข้อมูล การใช้ Multi-Quantization จะใช้บิตของ SOTs และ CRC จำนวน 10 บิต และ 4 บิต ตามลำดับ สำหรับข้อมูลที่มีการถอดรหัสแบบ MAP จะมีการแยกส่วนของซีโร่ทรีและ Nonzero Value ออกจากกัน

2.1.2 การเข้ารหัสช่องสัญญาณ

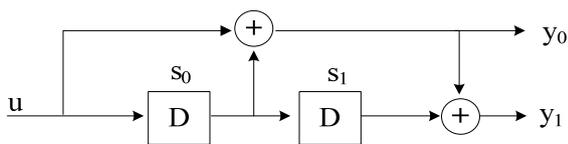
การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนอล (Convolutional Encoder) (n, k, m) เป็นวิธีการรูปแบบหนึ่งที่ป้องกันความผิดพลาดจากการส่งข้อมูล โดยกำหนดเงื่อนไขสัญลักษณ์ n คือจำนวนข้อมูลขาเข้า k คือจำนวนข้อมูลขาออก และ m คือจำนวนชั้นของรีจิสเตอร์ และมีอัตราส่วนการเข้ารหัสคือ k/n และความยาวของรหัสคือ $(m+1)k$ รหัสคอนโวลูชันนอลสามารถเขียนแทนด้วย Matrix Generator ที่สามารถแสดงค่า อินพุต และ เอาต์พุต ที่กำหนดเป็น Semi-Finite ในเทอมของ Unit Time Delay (D) ได้ดังสมการ

$$u(D) = u_0 + u_1D + u_2D^2 + \dots \quad (1)$$

และ

$$y(D) = y_0 + y_1D + y_2D^2 + \dots \quad (2)$$

โดยที่ $u_i = (u_{0,i}, u_{1,i}, \dots, u_{k-1,i})$ และ $y_i = (y_{0,i}, y_{1,i}, \dots, y_{n-1,i})$ โดยที่ Generator Matrix, $G(D)$ ของรหัสคอนโวลูชันนอลสามารถกำหนดให้เป็น rank- k , ซึ่งเป็นเมตริกซ์พหุนามขนาด $k \times n$ ในเทอมของ D ดังนั้นความสัมพันธ์ของ อินพุต และ เอาต์พุต ของรหัสคอนโวลูชันนอลคือ $y(D) = u(D)G(D)$ ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นรหัสคำ (Codeword) ที่สร้างจาก $G(D)$ ซึ่งมีค่าสอดคล้องตามค่าอินพุต ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างของการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนอลโดยตัวแปร S_0 และ S_1 คือรีจิสเตอร์ตัวที่หนึ่งและสองตามลำดับ และตัวแปร SN หมายถึงเลขชี้สถานะ (State Number) โดยเอาต์พุตตัวแรกคือ y_0 และเอาต์พุตตัวที่สองคือ y_1 โดยเอาต์พุตจะถูกกำหนดตามชั้นสถานะและค่าอินพุต โดยเริ่มต้นกำหนดชั้นสถานะเท่ากับศูนย์ และถ้าอินพุตคือ 0 ดังนั้นจะได้เอาต์พุตคือ $y_0 = 0$ และ $y_1 = 0$



ภาพที่ 7 แสดงแผนภาพการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนอลแบบ $G(D) = [D + 1, D^2 + D + 1]$

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนอล

u	SN ₁	SN ₀	SN	y ₁	y ₀
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1
0	0	1	1	1	0
1	0	1	1	0	1
0	1	0	2	1	1
1	1	0	2	0	0
0	1	1	3	0	1
1	1	1	3	1	0

2.2 การถอดรหัสช่องสัญญาณ

การถอดรหัสคอนโวลูชันนอล (Convolutional Decoder) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การถอดรหัสแบบพีชคณิต และการถอดรหัสแบบความน่าจะเป็น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การถอดรหัสแบบความน่าจะเป็นที่เรียกว่า การถอดรหัสแบบวิเทอร์บี (Viterbi Decoder) (Viterbi, 1967) ซึ่งการถอดรหัสแบบวิเทอร์บีจะเป็นวิธีที่เหมาะสม เนื่องจากการถอดรหัสแบบวิเทอร์บีสามารถแก้ไขความผิดพลาดจากการรบกวนข้อมูลแบบเดี่ยวได้ โดยกระบวนการถอดรหัสจะหาเส้นทางของข้อมูลที่ได้รับให้มีความใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุดและสามารถแก้ปัญหาในการหาลำดับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแบบ maximum a posteriori probability (MAP) ในกระบวนการ Markov ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาและมีสถานะจำกัด ซึ่งกระบวนการที่กล่าวได้ว่าเป็นกระบวนการแบบ Markov คือมีค่าความน่าจะเป็นของสถานะ x_k ที่เวลา k โดยกำหนดให้ทุกๆสถานะที่เวลา 0 ถึง $k-1$ ขึ้นอยู่กับสถานะที่ x_{k-1} ที่เวลา $k-1$ ดังสมการ

$$P(x_k|x_0, x_1, \dots, x_{k-1}) = P(x_k|x_{k-1}) \quad (3)$$

การเข้ารหัสคอนโวลูชันนอลที่อัตราการเข้ารหัส k/n สามารถมองเป็นกระบวนการ Markov ที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลาและมีสถานะจำกัดได้โดยที่แผนภาพสถานะของการเข้ารหัสคอนโวลูชันนอลสามารถแสดงเส้นทางเชื่อมต่อทุกๆเส้นทางระหว่างสถานะก่อนหน้า x_{k-1} ที่เวลา $k-1$ และสถานะปัจจุบัน x_k ที่เวลา k ซึ่งความน่าจะเป็น $P(x_k|x_{k-1})$ ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น $P(u_k|u_{k-1})$ โดย u_k คือ บิตข้อมูล ซึ่งปัญหาในการหาลำดับของการถอดรหัสแบบ MAP คือต้องหาลำดับสถานะที่ $P(x|z)$ มีค่ามากที่สุด โดยที่ z คือลำดับที่สังเกตที่สัมพันธ์กับสถานะ x หรือการหาลำดับสถานะที่ $P(x, z) = P(x|z)P(z) = P(z|x)P(x)$ มีค่ามากที่สุด โดยความน่าจะเป็นที่เกิดขึ้นร่วมกันของสถานะ x แสดงดังสมการ

$$\begin{aligned} P(x) &= P(x_0, x_1, \dots, x_{K-1}) \\ &= P(x_{K-1}|x_{K-2}, \dots, x_0)P(x_{K-2}|x_{K-3}, \dots, x_0) \cdots P(x_1|x_0)P(x_0) \end{aligned} \quad (4)$$

เนื่องจากคุณสมบัติของกระบวนการ Markov ในสมการที่ (3) ดังนั้นสมการที่ (4) สามารถลดรูปได้ดังสมการ

$$P(x) = P(x_{K-1}|x_{K-2})P(x_{K-2}|x_{K-3}) \cdots P(x_1|x_0)P(x_0) \quad (5)$$

และจากคุณสมบัติของกระบวนการ Markov และสัญชาตญาณรบกวนแบบที่ไม่มีหน่วยความจำได้ดังสมการ

$$\arg \max_x P(z|x)P(x) = \arg \max_x \prod_{k=1}^{K-1} P(z_k|x_k, x_{k-1})P(x_k|x_{k-1}) \quad (6)$$

เนื่องจากฟังก์ชัน Natural log, $\ln(\cdot)$ เป็น Monotonic Function ดังนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ (6) โดยไม่ทำให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสมการด้านขวาของสมการที่ (6) เปลี่ยนเป็น

$$\arg \max_x \sum_{k=1}^{K-1} \ln P(z_k|x_k, x_{k-1}) + \ln P(x_k|x_{k-1}) \quad (7)$$

นอกจากนี้ถ้ามีการกำหนดให้แต่ละเมตริกซ์ของแต่ละเส้นทางเป็น

$$\lambda(x_k, x_{k-1}) \triangleq -\ln P(z_k | x_k, x_{k-1}) - \ln P(x_k | x_{k-1}) \quad (8)$$

ทำให้สมการที่ (7) สามารถเปลี่ยนรูปสมการเป็น

$$\arg \min_x \sum_{k=1}^{K-1} \lambda(x_k, x_{k-1}) \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) จะเห็นได้ว่าอัลกอริทึมของการถอดรหัสวีเทอร์บีมีความเกี่ยวข้องเนื่องกับการหาค่าระยะทางที่สั้นที่สุดในแผนภาพแบบเทลลิส

2.3 การมอดูเลชันและการดีมอดูเลชัน

ในงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการกล้ำสัญญาณแบบเฟสต่อเนื่อง Continuous phase modulation (CPM) (Rimoldi, 1988) เป็นวิธีการกล้ำสัญญาณข้อมูลดิจิทัลแบบไม่เชิงเส้นแบบมีหน่วยความจำ เนื่องจากเฟสของสัญญาณแบบ CPM มีความต่อเนื่องกันดังนั้นสัญญาณจึงขึ้นกับข้อมูลที่ถูกส่ง การกล้ำสัญญาณแบบ CPM จึงเป็นที่นิยมและยังเป็นวิธีการที่เหมาะสม เนื่องจากมีความต้านทานต่อสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสารผ่านช่องสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยทั่วไปการกล้ำสัญญาณแบบ CPM จะส่งสัญญาณในรูปแบบของ

$$sm(t, \underline{\alpha}) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(2\pi f_0 t + \varphi(t, \underline{\alpha}) + \varphi_0) \quad (10)$$

โดยที่ $\underline{\alpha}$ คือ ลำดับของสัญลักษณ์แบบ M -ary ที่ไม่สัมพันธ์กัน และ $\alpha_i \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1)\}$ โดยเฟสที่ใช้ในการส่งข้อมูล $\varphi(t, \underline{\alpha})$ สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\varphi(t, \underline{\alpha}) = 2\pi h \sum_{i=-\infty}^{\infty} \alpha_i f(t - iT), \quad -\infty < t < \infty \quad (11)$$

โดย h คือ Modulation Index และ $f(t)$ คือ ผลตอบสนองเชิงเฟสที่แถบความถี่ฐานในเทอมของพัลส์ความถี่ $g(t)$ โดย $f(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau$, $-\infty < t < \infty$ และในกรณีที่ CPM เป็นรูปแบบสมมาตร $g(t)$ ต้องจะอยู่ในเกณฑ์ $g(t) = 0$, $t < 0$, $t > LT$ และ $g(t) \neq 0$, $0 \leq t \leq LT$ ดังนั้นสามารถแสดงเฟสที่ใช้ในการส่งข้อมูลภายในช่วงข้อมูลทั้งหมดได้ดังสมการที่

$$\varphi(t, \underline{\alpha}) = \pi h \sum_{i=-\infty}^{n-L} \alpha_i + 2\pi h \sum_{i=n-L+1}^n \alpha_i f(t - iT), \quad nT \leq t \leq (n+1)T \quad (12)$$

แบบแผน CPM จะถูกกำหนดค่าโดยตัวแปร h , M และ $g(t)$ (or $f(t)$) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้ $g(t)$ ในรูปแบบของ Rectangular (L -REC)

$$g(t) = \begin{cases} \frac{1}{2LT}, & 0 \leq t \leq LT \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

หรือฟังก์ชัน raised cosine (L -RC)

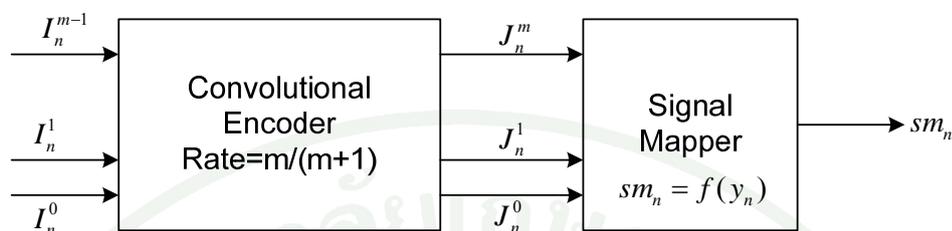
$$g(t) = \begin{cases} \frac{1}{2LT} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{LT}\right) \right], & 0 \leq t \leq LT \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

ถ้าค่า $L=1$ เรียกว่า *full response* CPM และถ้าค่า $L>1$ จะเรียกว่า *partial response* CPM ซึ่งการกล้าสัญญาณแบบ CPFSK จะเป็นกรณีพิเศษของการกล้าสัญญาณแบบ *full response* CPM ที่ผลตอบแทนของเชิงเฟสเชิงเส้นที่แถบความถี่ฐาน

2.3.1 การมอดูเลตรหัสเทลลิสของกระบวนการ CPM

กระบวนการ Trellis-coded modulation (TCM) เป็นเทคนิคที่มีการรวมการเข้ารหัสและกล้าสัญญาณเข้าไว้ด้วยกัน เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลดิจิทัล กระบวนการ TCM เป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้กับช่องสัญญาณที่มีอยู่อย่างจำกัด หน้าที่ของวิธีการ TCM คือสร้างแถวสัญญาณที่ถูกเข้ารหัสโดยวิธีการรวมการเข้ารหัสแบบจำกัดขั้น (Finite-state) และการเลือกสัญญาณมอดูเลต หลักการของการออกแบบวิธีการ TCM คือ การออกแบบกระบวนการเข้ารหัสและกระบวนการกล้าสัญญาณร่วมกัน โดยการขยายขีดสูงสุดของระยะทางสั้นที่สุดที่เรียกว่า “free distance” ของแถวรหัสสัญญาณ ทำให้เกิดการสร้างรหัสสัญญาณที่มีค่า free distance ทั้งหมดมากกว่าระยะห่างน้อยสุดระหว่างสัญญาณที่ไม่ได้เข้ารหัสที่อัตราการส่งข้อมูลเดียวกันและค่าความกว้างช่องสัญญาณเดียวกัน ภาพที่ 8 แสดงแผนภาพของกระบวนการ TCM โดยแถวข้อมูลกำหนดเป็น $\underline{I} = (I_0, I_1, \dots, I_n, \dots)$ โดยที่ $I_n = (I_n^0, I_n^1, \dots, I_n^{m-1})$ การเข้ารหัสคอนโวลูชันนอลที่มี

อัตราการใช้รหัสข้อมูลเท่ากับ $m/m+1$ จะสร้างแถวข้อมูลที่ถูกเข้ารหัส $\underline{J} = (J_0, J_1, \dots, J_n, \dots)$ โดยที่ $J_n = (J_n^0, J_n^1, \dots, J_n^{m+1})$ จากนั้นนำรหัสที่ได้ไปจับคู่กับ $\underline{sm} = (sm_0, sm_1, \dots, sm_n, \dots)$



ภาพที่ 8 แสดงแผนภาพกระบวนการ Trellis-coded modulation (TCM)

2.3.2 รหัสโพลีโนเมียลริงคอนโวลูชันเทลลิส

ก่อนทำกระบวนการเข้าและถอดรหัสสัญญาณแบบเทลลิส TCM จะเปลี่ยนข้อมูลจาก 1 บิตเป็นสัญลักษณ์ โดยที่สัญลักษณ์ 1 สัญลักษณ์เท่ากับ 2 บิต เพื่อสามารถให้ผ่านการเข้ารหัสแบบริงได้ การเข้ารหัสแบบริง มีผลดี คือ สามารถออกแบบให้รวมกับการกล้ำสัญญาณแบบที่เฟสของสัญญาณมีความต่อเนื่อง เช่น การมอดูเลตแบบ CPM การเข้ารหัสของสัญญาณแบบเทลลิส ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การเข้ารหัสของสัญญาณแบบริงคอนโวลูชันนอล และการกล้ำสัญญาณแบบที่เฟสของสัญญาณมีความต่อเนื่อง เนื่องจากเป็นการมอดูเลตที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณไร้สาย ซึ่งมีช่วงกว้างแถบความถี่ที่ต่ำ นอกจากนี้การเลือกใช้การเข้ารหัสของสัญญาณแบบริงคอนโวลูชันนอลสามารถรวมกับการกล้ำสัญญาณได้อย่างเป็นธรรมชาติ การถอดรหัสของสัญญาณแบบเทลลิสเลือกใช้การถอดรหัสแบบวีเทอร์บี เป็นเทคนิคที่สามารถตรวจจับบิตที่ผิดพลาดได้ดีที่สุด นอกจากนี้การใช้จำนวนค่าขนาดในแต่ละเส้นทางบนเทลลิสจะใช้ทฤษฎีการตรวจจับสัญญาณแบบ ML และ MAP สำหรับการนำไปใช้ในช่องสัญญาณไร้สายนั้น ต้องการกระบวนการกล้ำสัญญาณที่มีการใช้ช่วงความถี่อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะใช้การกล้ำสัญญาณแบบที่เฟสของสัญญาณมีความต่อเนื่อง โดยมีดัชนีการกล้ำสัญญาณที่ 1/4 ซึ่งสัญญาณที่ได้นั้นมีการใช้ช่วงความถี่เท่ากับกระบวนการ MSK โดยกระบวนการกล้ำสัญญาณแบบที่เฟสของสัญญาณมีความต่อเนื่องจะแยกออกเป็น CPE และ MM ซึ่งทั้งหมดจะรวมกันอยู่ภายในกระบวนการเข้ารหัสของสัญญาณแบบริงคอนโวลูชันนอลที่อัตราการใช้รหัสเท่ากับ 1/2

2.4 ช่องสัญญาณแบบไร้สาย

ช่องสัญญาณแบ่งออกเป็น ช่องสัญญาณแบบ Additive White Gaussian Noise หรือ AWGN และ ช่องสัญญาณที่มีการเคลื่อนหายของสัญญาณดังนี้

2.4.1 ช่องสัญญาณแบบ Additive White Gaussian Noise (AWGN)

แบบจำลองช่องสัญญาณแบบ Additive White Gaussian Noise (AWGN) ซึ่งโดยทั่วไปเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความร้อน (Thermal Noise) และมีความหนาแน่นเชิงความถี่ (Spectral Density) เกิดขึ้นอย่างชัดเจนบนช่วงของความถี่ ซึ่งสัญญาณรบกวนนั้นจะถูกเรียกว่าสัญญาณรบกวนสีขาว (White Noise) สามารถอธิบายได้โดยใช้หลักกระบวนการสุ่มแบบเกาส์เซียน ซึ่งสามารถแสดงค่า Power Spectral Density (PSD) ของสัญญาณดังกล่าวได้ดังสมการ

$$S_n(\omega) = \frac{N_0}{2} \quad \text{watts / Hz} \quad (15)$$

และสามารถแสดงสมการ Autocorrelation ของสัญญาณรบกวนสีขาวได้ดังสมการ

$$R_m(\tau) = F^{-1}(S_n(\omega)) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau) \quad (16)$$

โดยโอเปอเรเตอร์ $F^{-1}(\cdot)$ คือ การแปลงกลับฟูเรียร์ และจากสมการที่ (16) ทำให้ทราบว่าสัญญาณ 2 ค่าที่แตกต่างกันของค่า Zero Mean Gaussian White Noise จะไม่สัมพันธ์กันและเป็นอิสระต่อกัน ในระบบสื่อสารข้อมูลดิจิทัลนั้น ข้อมูลดิจิทัลจะถูกส่งโดยการใส่รูปคลื่น M สัญญาณ ซึ่งสามารถเขียนแทนโดย $s_m(t), m = 1, 2, \dots, M$ โดยที่แต่ละสัญญาณจะถูกส่งภายในช่วงเวลาสัญลักษณ์ T และถูกรบกวนโดย AWGN ดังนั้นสามารถแสดงสมการสัญญาณที่ได้รับในช่วงเวลา $0 \leq t \leq T$ ได้ดังสมการ

$$r(t) = s_m(t) + n_\omega(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (17)$$

โดย $n_\omega(t)$ แทนฟังก์ชันของกระบวนการ AWGN ที่มี PSD ดังสมการที่ (17) และสามารถแสดงสมการของสัญญาณแถบความถี่ป้อยผ่าน $s_m(t)$ ดังสมการ

$$s_m(t) = \text{Re}[s_{ml}(t)e^{j\omega_c t}] \quad (18)$$

โดยที่โอเปอเรเตอร์ $\text{Re}[x]$ คือจำนวนจริงของค่า x และ $s_{ml}(t)$ ซึ่งปกติมักจะอยู่ในรูปของ Complex envelope ของ $s_m(t)$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการสมมูลความถี่ต่ำผ่านของสัญญาณที่ได้รับได้ดังสมการ

$$r_l(t) = s_{ml}(t) + n_{wl}(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (19)$$

โดยที่ n_{wl} คือ Complex Envelope ของ $n_w(t)$

2.4.2 ช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายของสัญญาณ (Fading Channel)

แบบจำลองช่องสัญญาณที่มีการเลือนหาย (Fading Channel) เป็นการจำลองช่องสัญญาณแบบไร้สายซึ่งศึกษาถึงคุณลักษณะช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายของสัญญาณ โดยแบบจำลองการเลือนหายที่เป็นที่นิยม คือ แบบจำลองการเลือนหายแบบไรเซียน (Rician Fading) และ แบบจำลองการเลือนหายแบบเรย์ลี (Rayleigh Fading) ซึ่งแบบจำลองทั้งสองแบบสัญญาณที่มาถึงฝั่งรับจะเป็นสัญญาณที่มาจากหลายเส้นทางซึ่งอาจเกิดจากการสะท้อนหรือหักเหจากละอองน้ำในอากาศ หรือโครงสร้างอาคาร และอย่างน้อยสัญญาณจากหนึ่งเส้นทางเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือถูกลดทอน โดยจุดแตกต่างกันระหว่างแบบจำลองทั้งสองคือ ในการเลือนหายแบบไรเซียนจะมีองค์ประกอบของสัญญาณที่มีความแข็งแรงมากกว่าสัญญาณอื่นอยู่ อย่างเช่น สัญญาณที่มาจากเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (line of sight Signal) ซึ่งในการเลือนหายแบบเรย์ลีจะไม่มีองค์ประกอบดังกล่าวอยู่ นอกจากนั้นการเลือนหายของสัญญาณสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะคือ การเลือนหายของสัญญาณเชิงขนาด (Flat Fading) และการเลือนหายของสัญญาณในเชิงความถี่ (Frequency-Selective Fading) ซึ่งการเลือนหายเชิงขนาดนั้นทุกองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณถูกลดทอนโดยค่าคงที่ค่าหนึ่งและสามารถเกิดขึ้นได้ใน 2 ลักษณะคือแบบช้า (Slow Flat Fading) โดยการเปลี่ยนแปลงในเชิงขนาดมีค่าคงที่อย่างน้อยภายในช่วงสัญญาณข้อมูลหนึ่งข้อมูล และแบบเร็ว (Fast Flat Fading) ซึ่งเกิดในทางตรงกันข้ามกล่าวคือการเปลี่ยนแปลงในเชิงขนาดมีค่าเปลี่ยนไปภายในช่วงสัญญาณข้อมูลนั้นๆ ซึ่งสามารถเขียนสมการแสดงสัญญาณที่ฝั่งรับในกรณีการเลือนหายเชิงขนาดแบบช้าได้ดังสมการ

$$r(t) = (\sqrt{2S} + \sqrt{x_i^2(t) + x_q^2(t)}) \cos(\omega_c t + \theta(t)) + n_w(t) \quad (20)$$

โดย $x_i(t)$ และ $x_q(t)$ คือองค์ประกอบอินเฟสและควอดเรเจอร์เฟส (In-phase and Quadrature phase) ของสัญญาณกระเจิง ที่ตัวแปรสุ่มแบบเกาส์เซียนที่ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์และค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ σ^2 โดย S คือกำลังสัญญาณ (Signal power) และ $n_{ol}(t)$ สัญญาณรบกวนสีขาวแบบเกาส์เซียน (White Gaussian noise) ที่ความเข้มเชิงสเปกตรัม $N_0/2$ และถ้าสัญญาณเชิงความถี่ฐานที่ถูกส่งคือ $s_l(t)$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการสมมูลตัวกรองความถี่ต่ำผ่านได้ดังสมการ

$$r_l(t) = (1 + \beta e^{-j\phi})s_l(t) + n_{ol}(t), \quad 0 \leq t \leq T \quad (21)$$

โดยที่ $n_{ol}(t)$ คือค่าเชิงซ้อนของสัญญาณรบกวนที่มีกระบวนการสุ่มแบบเกาส์เซียน และเนื่องจากกำหนดให้ช่องสัญญาณเป็นแบบซ้ำ ดังนั้นสามารถจัดค่าการเลื่อนเฟส, ϕ จากสัญญาณทางฝั่งรับได้และถ้ากำหนดค่า ϕ เท่ากับศูนย์ ตัวแปร β จะถูกกำหนดโดย

$$\beta = \sqrt{\left[\frac{x_i(t)}{\sqrt{2S}}\right]^2 + \left[\frac{x_q(t)}{\sqrt{2S}}\right]^2} \quad (22)$$

กำหนดให้ γ_b เป็น $(1 + \beta)^2 E_s/N_0$ ดังนั้นความน่าจะเป็นของ γ_b สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$p(\gamma_b) = \frac{1 + \gamma}{\gamma_b} \exp(-\gamma - (1 + \gamma)\gamma_b/\bar{\gamma}_b) I_0\left(2\sqrt{\frac{\gamma(1 + \gamma)\gamma_b}{\bar{\gamma}_b}}\right) \quad (23)$$

โดย

$$\bar{\gamma}_b = E[(1 + \beta^2)] \frac{E_s}{N_0} = \frac{1 + \gamma}{\gamma} E_s/N_0 \quad (24)$$

และ $\gamma = S/\sigma^2$ เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังส่งในเส้นทางตรงและกำลังส่งในเส้นทางกระเจิง และถ้าสัญญาณในเส้นทางตรงถูกกีดขวางจะเป็นช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายแบบเรย์ลี ซึ่งสามารถทดสอบโดยให้ตัวแปร S มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณของเส้นทางกระเจิง, σ^2

2.4.3 การถอดรหัสแบบ MAP บนช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณ

สมมติให้การเลื่อนหายของสัญญาณเชิงขนาดแบบซ้ำมีค่าการเลื่อนทางเฟสมีเท่ากับศูนย์ดังนั้นสมการสมมูลตัวกรองความถี่ต่ำผ่านได้สมการที่ (21) จะถูกลดรูปดังสมการ

$$r_l(t) = (1 + \beta)s_{ml}(t) + n_{wl}(t) \quad (25)$$

และเพื่อสร้างการถอดรหัสแบบ MAP สำหรับกระบวนการ CPFSK นั้นจะต้องสังเกตจากตัวอย่างข้อมูล $z_{k,i}$ ในช่วงเวลา $kT \leq t \leq (k+1)T$ แสดงได้ดังสมการ $z_{k,i} = (1 + \beta)sm_{k,i} + n_{k,i}$ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$ สำหรับช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหาย ตัวแปร β มีค่าคงที่ระหว่างช่วงเวลาของแต่ละสัญญาณ และสมมติให้ค่าการเลื่อนหายสามารถกำหนดได้โดยการประมาณค่า Channel State Information (CSI) ดังนั้นข้อมูลจะถูกรวมเข้ากับเมตริกซ์ของการถอดรหัส และค่าความน่าจะเป็นของ CSI สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$P(z_k | x_{2,k+1}, x_{2,k}) = P(z_k | sm_k) = \frac{1}{(\sqrt{\pi N_0})^N} \exp \left[-\sum_{i=1}^N \frac{(z_{k,i} - \alpha sm_{k,i})^2}{N_0} \right] \quad (26)$$

โดยที่ $\alpha = (1 + \beta)$ เมื่อนำสมการที่ (28) แทนในสมการที่ (8) จะได้การคำนวณค่าขนาดในแต่ละเส้นทางบนเทลลิส $\lambda(sm_k)$ คือ

$$\lambda(sm_k) = -\sum_{i=1}^N z_{k,i} sm_{k,i} - \frac{N_0}{2\alpha} \ln P(x_{2,k+1} | x_{2,k}) \quad (27)$$

และเนื่องจากข้อมูลอินพุต u ถูกแบ่งโดยกระบวนการ Markov จะได้เส้นทางเทลลิสใหม่คือ

$$\lambda(sm_k) = -\sum_{i=1}^N z_{k,i} sm_{k,i} - \frac{N_0}{2\alpha} \ln P(u_k | u_{k-1}) \quad (28)$$

ในการรวมส่วนของการเข้ารหัสภายนอกเข้ามาในระบบ จะต้องพิจารณาความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข $P(z_k | S_{0,k+1}, S_{0,k})$ แทน $P(z_k | x_{2,k+1}, x_{2,k})$ ซึ่งทำให้มีผลกับขนาดของการเลื่อนหายของสัญญาณ และจากความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข $P(z_k | S_{0,k+1}, S_{0,k})$ ที่สัมพันธ์ของสมการที่ (28) จะได้สมการการคำนวณค่าขนาดในแต่ละเส้นทางบนเทลลิสดังนี้

$$\lambda(sm_k) = -\alpha_1 \sum_{i=1}^N z_{k,i} sm_{k,i} - \alpha_2 \sum_{i=N+1}^{2N} z_{k,i} sm_{k,i} - \frac{N_0}{2} \ln P(S_{0,k+1}|S_{0,k}) \quad (29)$$

โดยที่ α_1 และ α_2 เป็นค่าขนาดของเป็นการเลื่อนหายของสัญญาณของช่วงเวลาของ 2 สัญญาณ

3. การคำนวณค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูล

การคำนวณค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลของรูปภาพที่มีการบีบอัดด้วยวิธี เอ็มเพก - 4 ค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลของรูปภาพสามารถบ่งบอกถึงค่าการพัฒนาได้ มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลเช่น Sayood และ Borkenhagen (Sayood and Borkenhagen, 1991) ทำการศึกษาเกี่ยวกับค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลรูปภาพในระบบ differential pulse code modulation (DPCM) ส่วน Alajaji, Plamdo, Farvardin และ Fuja (Alajaji, Phamdo, Farvardin and Fuja, 1996) ก็ศึกษาในเรื่องของค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลเช่นกันและได้กล่าวว่าค่าทั้งหมดของความซ้ำซ้อนของข้อมูลของรูปภาพ ρ_T สามารถเขียนอยู่ในรูปของผลบวกระหว่าง ρ_D กับ ρ_M โดยที่ ρ_D คือการกระจายตัวแบบไม่ปกติและ ρ_M คือการกระจายตัวแบบมีหน่วยความจำ ค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลของรูปภาพสามารถคำนวณได้จาก $R-H(\underline{I})$ โดยที่ R คือ Fixed Rate และ $H(\underline{I})$ คือ เอนโทรปีซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$H(\underline{I}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} H(I_1, I_2, \dots, I_n), \quad (30)$$

โดยที่ $H(I_1, I_2, \dots, I_n)$ คือ เอนโทรปีรวมของกระบวนการสุ่ม $\{I_i\}$ โดยถ้าการสุ่มตัวแปร I_1, I_2, \dots, I_n ของกระบวนการสุ่มเป็นอิสระแต่กระจายตัวไม่เหมือนกัน เราจะได้ว่า

$$H(I_1, I_2, \dots, I_n) = \sum_{i=1}^n H(I_i), \quad (31)$$

โดยที่ $H(I_i)$ คือ เอนโทรปีของตัวแปรสุ่ม I_i แบบไม่ต่อเนื่อง เห็นได้ชัดว่าถ้าตัวแปรสุ่มเป็นแบบอิสระและมีการกระจายตัวเหมือนกันจะทำให้ $H(\underline{I})$ มีค่าเท่ากับ $H(I_1)$ โดยใช้กฎของเชนรู (Chain Rule) แต่ถ้าเป็นการกระบวนการสุ่มแบบไม่เคลื่อนที่ (แบบมีหน่วยความจำ) เราจะได้ว่าเอนโทรปีรวม $H(I_1, I_2, \dots, I_n)$ คือ (Cover and Thomas, 1991)

$$H(I_1, I_2, \dots, I_n) = \sum_{i=1}^n H(I_i | I_{n-1}, \dots, I_1) \quad (32)$$

โดยที่ในที่นี่ $H(I_i | I_{n-1}, \dots, I_1)$ คือ เอนโทรปีแบบมีเงื่อนไข ในกรณีนี้ค่าของ $H(\underline{I})$ คือ $\lim_{n \rightarrow \infty} H(I_i | I_{n-1}, \dots, I_1)$ วิธีการพิสูจน์ได้จากทฤษฎี 4.2.3 ใน (Cover and Thomas, 1991) สำหรับ มาร์คอฟเชน (Markov chain) และการกระจายของ μ ที่ประกอบด้วยค่าความน่าจะเป็นของแต่ละชั้น และความน่าจะเป็นของการส่งผ่านของเมทริกซ์ P ที่แสดงโดย p_{ij} ทำให้เราได้สมการใหม่ขึ้นมา

$$H(\underline{I}) = \lim_{n \rightarrow \infty} H(I_n | I_{n-1}) = H(I_2 | I_1) \quad (33)$$

$$= \sum_{ij} \mu_i p_{ij} \log \frac{1}{p_{ij}} \quad (34)$$

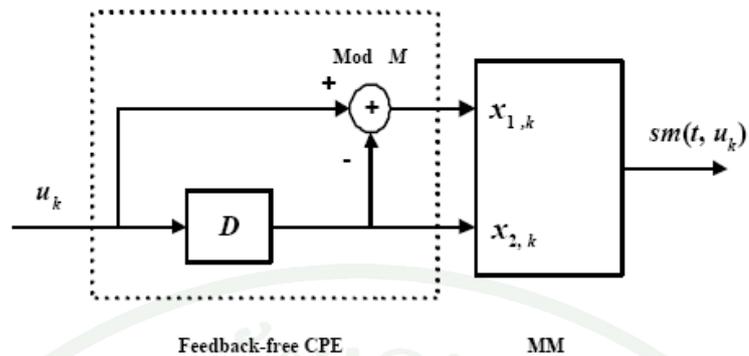
โดยที่ μ_i คือค่าความน่าจะเป็นของการส่งผ่านในชั้นที่ i และ p_{ij} คือความน่าจะเป็นของการส่งผ่านในตำแหน่งที่ ij

เมื่อได้ค่า $H(\underline{I})$ แล้ว สามารถหาค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลได้จาก $R - H(\underline{I})$

4. การทำ MAP Decoding สำหรับระบบ CPFSK

Forney (Forney, 1973) ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการวิเทอร์บี (Viterbi) ที่เป็นวิธีการแก้ปัญหาของการประมาณค่า MAP ของลำดับสถานะของกระบวนการ Markov กระบวนการจะถือว่าเป็น Markov ได้ก็ต่อเมื่อความน่าจะเป็นของการเกิดในสถานะเป็น x_{k+1} ที่เวลา $k + 1$ จากเวลาทั้งหมดที่ 0 ถึง k โดยขึ้นอยู่กับชั้น x_k ที่เวลา k เท่านั้น

$$P(x_{k+1} | x_0, x_1, \dots, x_k) = P(x_{k+1} | x_k) \quad (35)$$



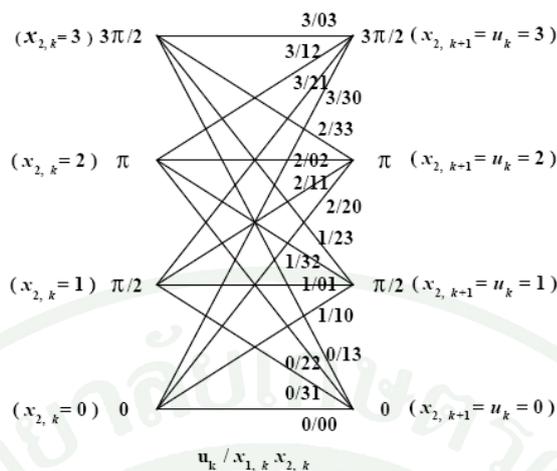
ภาพที่ 9 แสดงแบบจำลองของ feedback-free CPE และระบบ MM

ณ ช่วงเวลาคงที่ ที่เวลา kT คำนวณได้ $2\pi h x_{2,k}$ และ *physical tilted phase* Ψ_k อธิบายโดย Yang และ Taylor (Yang and Taylor, 1994) ดังสมการนี้

$$\Psi_k = R_{2\pi} \left[2\pi h \left(x_{2,k} + x_{1,k} \frac{t - kT}{T} \right) \right], \quad kT \leq t \leq (k+1)T \quad (36)$$

โดยที่ $x_{1,k} = R_{2\pi}(\mu_k - x_{2,k})$ และ $\mu_k = x_{2,k+1}$ ค่าของ Ψ_k ขึ้นอยู่กับสถานะปัจจุบัน $2\pi h x_{2,k}$ และสถานะถัดไป $2\pi h x_{2,k+1}$ เท่านั้น แต่หลังจากกำหนดค่าข้อมูล h สถานะเฟสจะขึ้นอยู่กับค่าของ $x_{2,k}$ เท่านั้น ดังนั้นเราจะอ้างอิงถึงค่า $x_{2,k} \in 0, 1, \dots, M-1$ ในขณะที่สถานะของระบบ CPFSK จะดูที่เวลา kT สำหรับตัวอย่าง

พิจารณาระบบ 4-ary CPFSK ที่ $h = \frac{1}{4}$ ในกรณีนี้ $\mu_k, x_{1,k}$ และ $x_{2,k}$ มีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 0, 1, 2 และ 3 ส่วนค่า Ψ_k แสดงในภาพที่ 10 ข้อสังเกตที่เวลา $(k+1)T$ สถานะของ $x_{2,k+1}$ มีค่าเท่ากับค่าอินพุทก่อนหน้า μ_k



ภาพที่ 10 แสดงแผนภาพเฟสเทลลิส (Trellis Diagram) ของ 4-ary CPFSK ที่ $h=1/4$

กำหนด $x_2 = (x_{2,0}, x_{2,2}, \dots, x_{2,K-1})$ เป็นลำดับของสถานะ โดยที่ $x_{2,k}$ เป็นสถานะที่ $t = kT$ ในทางเดียวกัน กำหนด $z = (z_0, z_1, \dots, z_{K-1})$ เป็นลำดับของสัญญาณที่ใช้ส่งเกต โดยที่ z_k คือ สัญญาณต่อเนื่องระหว่างช่วงเวลา $kT \leq t \leq (k+1)T$

จากหัวข้อ 3.2 (Mahapakulchai, 2004) เป้าหมายของกระบวนการ MAP คือการกำหนดลำดับของสถานะ x_2 ในขณะที่มีค่าความน่าจะเป็น $P(z|x_2)P(x_2)$ มีค่าสูงสุดจากที่แสดงในหัวข้อ 3.2 (Mahapakulchai, 2004) เราจะได้ว่า

$$\arg \max_x P(z|x_2) = \max_x \left[- \sum_{k=0}^{K-2} \lambda(x_{2,k+1}, x_{2,k}) \right] \quad (37)$$

โดยที่ $\arg \max$ คือกระบวนการที่ทำให้เราได้ค่าของลำดับของสถานะ x_2 ที่ทำให้ความน่าจะเป็น $P(z|x_2)$ มีค่าสูงสุด กำหนดแต่ละข้อมูลตัวอย่างของ z_k แทนด้วย $z_{k,i}$ โดยที่ $i = 1, 2, \dots, N$ และ $z_{k,i} = sm_{k,i} + n_{k,i}$ โดยที่ $sm_{k,i}$ คือ ตัวอย่างสัญญาณข้อมูลระหว่างเวลา $kT \leq t \leq (k+1)T$ และ $sm_{k,i}$ สามารถมองให้อยู่ในรูปของการส่งผ่านระหว่างคู่ของสถานะ $x_{2,k+1}, x_{2,k}$ ส่วน $n_{k,i}$ คือตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่มีค่าการกระจายแบบ zero-mean Gaussian และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ $N_0/2$ ดังนั้น $z_{k,i}$ จะเป็นการกระจายแบบ Gaussian ที่มีค่ามาตรฐานเท่ากับ $sm_{k,i}$ และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ $N_0/2$ ดังนั้นเราจะได้สมการใหม่เป็น

$$P(z_k | x_{2,k+1}, x_{2,k}) = P(z_k | sm_k) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}^N} \exp \left[- \sum_{i=1}^N \frac{z_{k,i} - sm_{k,i}}{N_0} \right] \quad (38)$$

รายละเอียดของการพิสูจน์สูตรนี้ได้จาก (McDonough and Whalen, 1995) นำสมการที่ (38) ไปใส่ในสมการที่ (3.12) (Mahapakulchai, 2004) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\lambda(sm_k) = \ln \left[\frac{1}{\sqrt{\pi N_0}^N} \right] + \sum_{i=1}^N \frac{z_{k,i}^2}{N_0} + \sum_{i=1}^N \frac{sm_{k,i}^2}{N_0} - \sum_{i=1}^N \frac{2z_{k,i}sm_{k,i}}{N_0} - \ln P(x_{2,k+1} | x_{2,k}) \quad (39)$$

และเนื่องจากค่าของ 3 ตัวแรกของสมการที่ (39) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับลำดับของสถานะ x_2 ที่ได้จากสมการที่ (37) ทำให้เราสามารถลดรูปสมการได้เป็น

$$\lambda(sm_k) = - \sum_{i=1}^N z_{k,i} sm_{k,i} - \frac{N_0}{2} \ln P(x_{2,k+1} | x_{2,k}) \quad (40)$$

โดยที่ค่าของตัวแรก เป็นผลภายในที่เกิดจากสัญญาณส่งเท่ากับสัญญาณการส่งผ่านในระหว่างเวลา $kT \leq t \leq (k+1)T$ เมื่อไหร่ก็ตามที่เราใช้ค่าของตัวแรกตัวเดียวในการถอดรหัสเราจะเรียกการถอดรหัสนั้นว่า การถอดรหัสแบบ Maximum-likelihood (ML)

ต่อมากำหนด u คือลำดับอินพุตที่สร้างขึ้นให้สอดคล้องกับค่าต้นกำเนิดการส่งผ่าน C ที่มีองค์ประกอบ $c_{i,j} = P(u_{k+1} = j | u_k = i)$ และ $i, j = 0, 1, \dots, M-1$ สิ่งที่สำคัญในส่วนนี้คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของต้นกำเนิดกับสถานะของเฟส $x_{2,k}$ และจากแผนภาพ feedback-free CPFSK ในรูปที่ 9 เห็นได้ชัดว่า $u_k = x_{2,k+1}$ และ $u_{k-1} = x_{2,k}$ ดังนั้น

$$P(x_{2,k+1} | x_{2,k}) = P(u_k | u_{k-1}) = P(u_{k-1} | u_k) \quad (41)$$

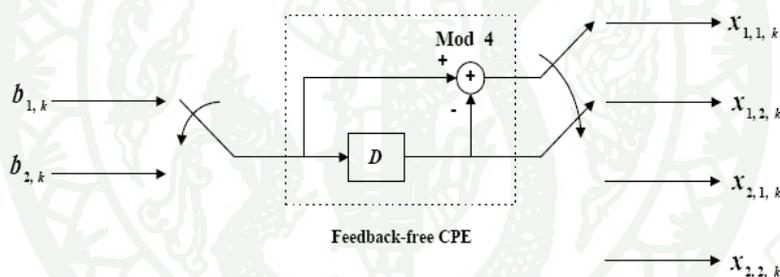
นำสมการที่ (41) ไปใส่ในสมการที่ (40) เราจะได้สมการใหม่เป็น

$$\lambda(sm_k) = - \sum_{i=1}^N z_{k,i} sm_{k,i} - \frac{N_0}{2} \ln P(u_{k+1} | u_k) \quad (42)$$

เราจะสังเกตได้ว่าค่าของสัญญาณรบกวน N_0 ต้องมีค่าตามที่ระบบต้องการเพื่อให้ได้ค่าการถอดรหัส MAP ที่เหมาะสม

4.1 การทำ MAP Decoding ในระบบ CPFSK ร่วมกับตัวเข้ารหัสแบบคอโวลูชันนอลจากภายนอก (convolutional encoder)

เมื่อการเข้ารหัสคอโวลูชันนอลจากภายนอก (CE) ถูกนำมาใช้ร่วมกับระบบ CPFSK (CPE + CE) สถานะของการเข้ารหัสทั้งหมด (CE+CPE) เป็นสิ่งที่เราสนใจ อัตราของ CE และ CPE ที่ใช้คือ $1/2CE$ และ $1/2CPE$ เราสามารถคำนวณค่าของ CE และ CPE ในรูปของระบบถอดรหัสแบบเดี่ยวได้ สิ่งจำเป็นลำดับแรกของเราคือต้องทำการเปลี่ยน CPE ให้มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $2/4$ เพื่อให้ให้เห็นภาพ ลำดับแรกเราจะพูดถึงรายละเอียดของการเปลี่ยนแปลงแล้วหลังจากนั้นจะแสดงถึงการคำนวณอัตรา $1/2CE$ ที่มีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $2/4$ และผลของการเข้ารหัสทั้งหมดที่มีอัตราเท่ากับ $1/4$ จากแผนภาพที่แสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงแผนภาพของการเข้ารหัสที่มีอัตราเท่ากับ $2/4$

เราจะได้ 4 สมการที่มีความสัมพันธ์กับค่าเออร์ฟูร์ 4 ค่าคือ $x_{1,1,k}, x_{1,2,k}, x_{2,1,k}$ และ $x_{2,2,k}$ ดังนี้

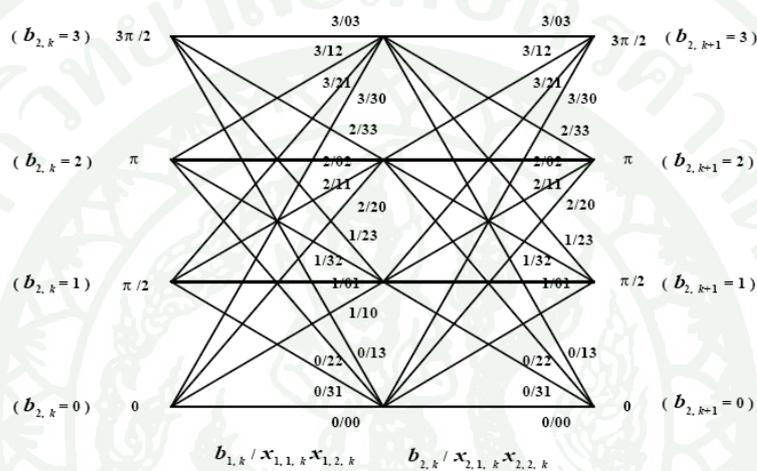
$$x_{1,1,k} = b_{1,k} - b_{2,k-1} \tag{43}$$

$$x_{1,2,k} = b_{2,k-1} \tag{44}$$

$$x_{2,1,k} = b_{2,k} - b_{1,k} \tag{45}$$

$$x_{2,2,k} = b_{1,k} \tag{46}$$

สังเกตที่ค่า $b_{2,k-1}$ ที่เป็นค่าเริ่มต้นที่ถูกเก็บไว้ที่ตัวหน่วงเหนี่ยว (Delay) D มันคือเหตุผลที่ทำให้เราได้ 2 สมการแรกมาคือสมการที่ 43 และ 44 นอกจากนั้นการมอดูโล (modulo) ผลบวกของ สมการที่ 43 และ 44 และทำผลลัพธ์ให้อยู่ในรูปของ $b_{1,k}$ ($b_{1,k} = x_{1,1,k} + x_{1,2,k} \text{ mod } 4$) และการมอดูโล ผลบวกของสมการที่ 45 และ 46 จะทำให้เราได้ค่า $b_{2,k} = x_{2,1,k} + x_{2,2,k} \text{ mod } 4$ ภาพที่ 12 แสดงเฟสทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่เกิดจาก $b_{1,k}$ และ $b_{2,k}$ เราสังเกตได้ว่าค่าของ $b_{2,k}$ มีความเกี่ยวข้องกับค่าสถานะเฟสที่เวลา kT



ภาพที่ 12 แสดงเฟสทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่เกิดจาก $b_{1,k}$ และ $b_{2,k}$

ในหัวข้อนี้สัญลักษณ์ของเฟส $b_{2,k}$ ที่ใช้วิธีการใช้เหมือนกับเฟส $x_{2,k}$ ที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2 แต่มีความแตกต่างกันอยู่เล็กน้อยคือค่าของ $b_{2,k}$ จะมีการปรับเปลี่ยนทุกๆ 2 สัญญาณที่เข้ามา ในขณะที่ค่า $x_{2,k}$ จะมีการปรับเปลี่ยนในทุกๆ สัญญาณที่เข้ามา ดังนั้นในขณะนี้เราจะให้ความสนใจในการหาค่า $b_{2,k}$ ที่มีค่าความน่าจะเป็น $P(z_k | b_{2,k+1}, b_{2,k})$ สูงสุด โดยที่ค่าของ z_k คือค่าของสัญญาณสังเกตที่เข้าไปทุกๆ 2 สัญญาณที่เข้ามา จากข้อมูลที่พูดมาทั้งหมดในหัวข้อนี้ทำให้เราสามารถดัดแปลงสมการที่ (39) ได้เป็นดังนี้

$$\lambda(sm_k) = -\sum_{i=1}^{2N} z_{k,i} sm_{k,i} - \frac{N_0}{2} \ln P(b_{2,k+1} | b_{2,k}) \quad (47)$$

ในกรณีนี้จำนวนวิธีที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้ของแผนภาพเทลลิสที่ต้องการเพื่อนำไปคำนวณ บรานซ์เมทริกซ์ (branch matrix) คือ 64 และค่าของ $sm_{k,i}$ คือการส่งสัญญาณในทุกๆ 2

ช่วงสัญญาณส่วนความสัมพันธ์ของ 4 ตัวแปรอินพุทและเออร์พุทได้แสดงไปแล้วในสมการที่ (43) - (46) 4 สมการนี้สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปแบบอื่นได้ดังนี้ การเปลี่ยนก็เหมือนๆกับการเปลี่ยนรูปของ z ที่เราได้ทำมาแล้วใน 4 สมการก่อนหน้านี้เพียงแต่ครั้งนี้เราใช้ตัวแปร D แทนที่จะใช้ตัวแปร z ดังนั้นตัวแปร D จะไม่ใช่ตัวแปรซับซ้อนแต่เป็นตัวแปรหน่วงเหนี่ยว

$$X_{1,1}(D) = b_1(D) - Db_2(D) \quad (48)$$

$$X_{1,2}(D) = Db_2(D) \quad (49)$$

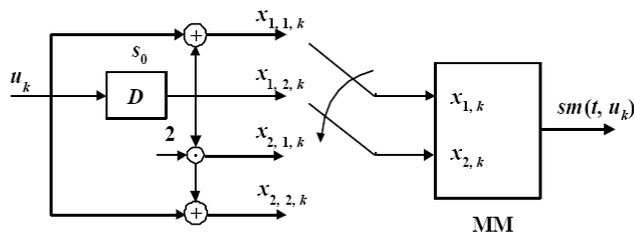
$$X_{2,1}(D) = b_2(D) - b_1(D) \quad (50)$$

$$X_{2,2}(D) = b_1(D) \quad (51)$$

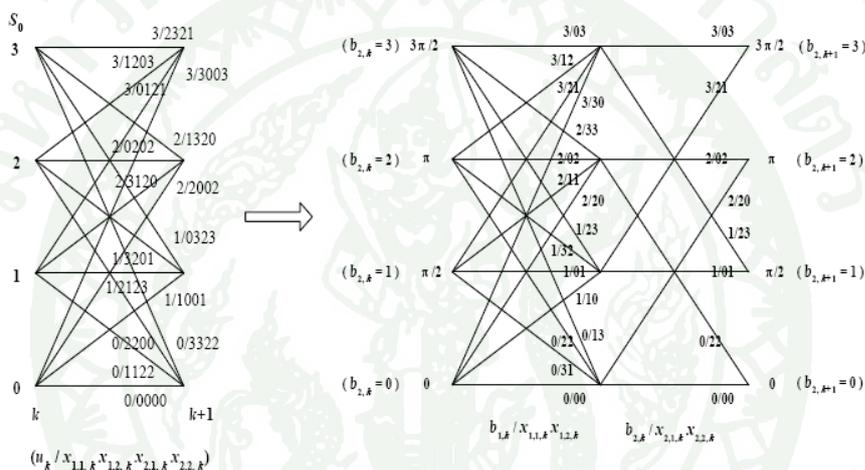
ดังนั้น เราจะได้ฟังก์ชันการถ่ายโอน (Yang and D. P. Taylor, 1994) ดังนี้

$$X = B \begin{bmatrix} 1 & 0 & 3 & 1 \\ 3D & D & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (52)$$

โดยที่ X และ B คือแถวของเวกเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรเออร์พุท $[X_{1,1}(D)X_{1,2}(D)X_{2,1}(D)X_{2,2}(D)]$ และตัวแปรอินพุท $[B_1(D)B_2(D)]$ ตามลำดับ ส่วนเลข 3 ในสมการที่ (52) มาจากการนำ -1 มอดูโล 4 ตัวอย่าง ถ้าตัวแถวของเวกเตอร์อินพุท $B = [2D+1 \ 1]$ เราจะได้แถวของเวกเตอร์เออร์พุทเป็น $X = [D+1 \ D \ 2D \ 2D+1]$ แผนภาพของการเข้ารหัสของ X ทั้งหมดแสดงในรูปที่ 13 ข้อสังเกตจากความเข้าใจในเรื่องของการเข้ารหัสทั้งหมดจะแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุท u_k กับตัวแปร $x_{1,1,k}, x_{1,2,k}, x_{2,1,k}$ และ $x_{2,2,k}$ โดยปราศจากการแสดงค่าของตัวแปร $b_{1,k}$ และ $b_{2,k}$ แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถคำนวณค่าเหล่านี้ได้จากสมการที่ (43) - (46) ที่ได้อธิบายไปก่อนหน้านี้



ภาพที่ 13 แสดงแผนภาพของการเข้ารหัสทั้งหมด



ภาพที่ 14 แสดงแผนภาพเทลลิสของบล็อกในภาพที่ 13

ในตัวอย่างนี้จำนวนสถานะทั้งหมดคือ 4 ส่วนจำนวนวิธีทั้งหมดคือ 16 และส่วนที่เราต้องให้ความสำคัญคือแต่ละวิธีของแผนภาพเทลลิสต้องสอดคล้องกันกับเฟสของการส่งผ่านของเวลา 2 ช่วงสัญญาณและ S_0 มีค่าเหมือนกันกับของ b_2 เพราะฉะนั้นเราจะสามารถเขียนบรานซ์เมตริกซ์ของสมการที่ (47) ได้ใหม่เป็น

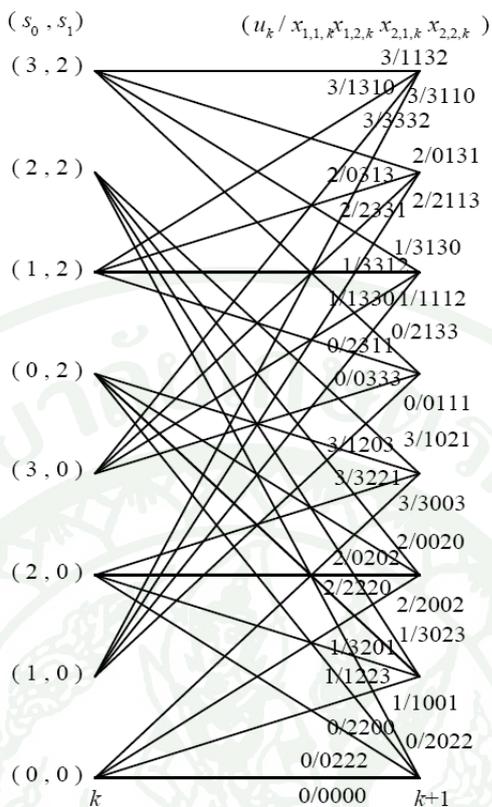
$$\lambda(sm_k) = -\sum_{i=1}^{2N} z_{k,i} sm_{k,i} - \frac{N_0}{2} \ln P(S_{0,k+1} | S_{0,k}) \quad (53)$$

ต่อมาเราจะหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร S_0 กับตัวแปร u โดยสังเกตจากโครงสร้างของการเข้ารหัสทั้งหมดที่แสดงในรูปที่ 13 เราจะพบว่า $S_{0,k+1} = u_k$ คำนี้นี้เราสามารถสังเกตได้ในอีกทาง

จากรูปที่ 14 เราจะเห็นว่าทุกๆบรานซ์ที่เข้าสู่สถานะ $S_{0,k+1}$ มีความสอดคล้องกับค่าตัวแปรเออร์พุท $u_k = S_{0,k+1}$ ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการที่ (53) ใหม่ได้เป็น

$$\lambda(sm_k) = -\sum_{i=1}^{2N} z_{k,i} sm_{k,i} - \frac{N_0}{2} \ln P(u_k | u_{k-1}) \quad (54)$$

เมื่อจำนวนสถานะของการเข้ารหัสทั้งหมดมีค่ามากกว่า 4 นี้มีความหมายว่าเราจะต้องใช้ $P(u_k | u_{k-1})$ มากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้เห็นภาพว่าเราจะสามารถนำค่า $P(u_k | u_{k-1})$ มารวมกันกับบรานซ์เมตริกซ์ได้อย่างไร เราจะเริ่มสังเกตที่โครงสร้างของการเข้ารหัสทั้งหมด ประกอบด้วยตัวบวกและตัวคูณต่ออยู่กับฟังก์ชันการถ่ายโอนของ $G_{all}(D)$ เท่านั้นไม่มีตัวห่วงเหนี่ยวเป็นองค์ประกอบ ตัวคูณจากภายนอก a_1, \dots, a_{m-1} มีความจำเป็นก็ต่อเมื่อเกิดการลดลงของจำนวนสถานะทั้งหมดเกิดขึ้น จะเห็นว่าตัวห่วงเหนี่ยวตัวแรก S_0 จะประกอบไปด้วยค่าของอินพุทที่เกิดขึ้นก่อนคือ u_{k-1} แสดงให้เห็นว่าเมื่อไหร่ก็ตามที่เรารู้ค่าของ S_0 เราก็จะรู้ค่าอินพุทที่เกิดขึ้นก่อนด้วยเช่นกัน และยังแสดงให้เห็นว่าในแต่ละสถานะบรานซ์ที่เข้ามาทุกค่ามีความเชื่อมโยงมาจากอินพุทตัวเดียวกัน ข้อมูลทั้งหมดนี้ทำให้เราสามารถนำค่าความน่าจะเป็น $P(u_k | u_{k-1})$ เข้าไปในแต่ละบรานซ์เมตริกซ์ได้



ภาพที่ 15 แสดงแผนภาพเทลลิสของการเข้ารหัส $[D + 1, 2D + 1]$ ที่อัตรา $1/2$ ที่ประกอบด้วย CPFSK 4 ส่วนที่ค่า $h=1/4$

ภาพที่ 15 นี้นำมาเพื่อเป็นตัวอย่างเท่านั้น จากภาพที่ 15 มีเพียงอินพุตชนิดเดียวเท่านั้นที่ส่งไปเข้ารหัสในแต่ละสถานะ ดังนั้นค่าบรานซ์เมตริกซ์ที่เหมาะสมเราสามารถกำหนดได้อย่างง่ายดายสำหรับตัวอย่าง บรานซ์เมตริกซ์ที่เชื่อมโยงสถานะ (2,0) ไปยังสถานะ (0,0) ถูกอธิบายโดยค่า $0/2200$ และค่าความน่าจะเป็นที่ใช้คือ $P(u_k = 0 | u_{k-1} = 2)$ ส่วนเหตุผลที่ต้องใช้ค่าความน่าจะเป็นนี้คือสำหรับสถานะ (2,0) บรานซ์ทั้งหมดที่เข้ามา มีความสอดคล้องกับค่าอินพุต $u_{k-1} = 2$ ยิ่งไปกว่านั้นเออร์พุตค่า 2200 มีความสอดคล้องกับเฟสการถ่ายโอนของ 2 ช่วงสัญญาณ CPFSK ที่แสดงในภาพที่ 12 สำหรับเทลลิสมีจำนวนสถานะทั้งหมดมากกว่าจึงต้องมีการใช้ $P(u_k | u_{k-1})$ มากกว่า 1 ครั้ง

เทคนิคที่เราใช้สำหรับกำหนดจำนวนของสถานะ SN และค่าของ S_0 สามารถคำนวณได้จาก

$$S_0 = SN \bmod 4 \tag{55}$$

โดยที่ mod คือการแสดงการดำเนินการของมอดุโล สำหรับตัวอย่างเมื่อจำนวนสถานะมีค่าเท่ากับ 5 ค่าของ S_0 จะกลายเป็น $5 \bmod 4 = 1$ จำนวนสถานะ SN สามารถคำนวณได้โดย

$$SN = S_0 + S_1 D_1 + S_2 D_2^2 + \dots + S_{m-1} D_{m-1}^{m-1} \quad (56)$$

โดยที่

$$D_i = \begin{cases} 2, & i = k, k+1, \dots, m-1 \\ 4, & i < k \end{cases} \quad (57)$$

และ $k =$ คัดนี้ i ที่น้อยที่สุด ตัวอย่างเช่น $a_i = 2$ สังเกตในกรณีเมื่อไม่มีตัวคูณจากภายนอกตัวไหนเลยที่มีค่าเท่ากับ 2 จะทำให้ค่า $D_i = 4$ ในทุกๆค่าของ i

เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของสมการ (55) เราจะทำการพิสูจน์โดยนำสมการที่ (56) ไปแทนลงในสมการที่ (55) หลังจากนั้นแสดงว่าสมการใหม่ที่ได้มาสามารถลดรูปกลับมาให้เป็น S_0 สังเกตพจน์ $S_2 D_2^2, S_3 D_3^3, \dots, S_{m-1} D_{m-1}^{m-1}$ จะประกอบด้วยตัวประกอบของ 4 เนื่องจาก D_i เป็นได้ทั้ง 2 หรือ 4 จากผลของการมอดุโลด้วย 4 ของแต่ละพจน์มีค่าเหมือนกันคือเท่ากับ 0 ส่วนพจน์ $S_1 D_1$ เราแบ่งได้ 2 กรณี

1. กรณีที่เมื่อ $D_1 = 4$: พจน์ $S_1 D_1$ ประกอบด้วยตัวประกอบของ 4 ดังนั้นเมื่อทำการมอดุโลด้วย 4 จะได้เท่ากับ 0
2. กรณีที่เมื่อ $D_1 = 2$: จากนิยามของ D_i ทำให้เรารู้ว่าค่า $a_i = 2$ ในกรณีนี้ S_1 สามารถมีค่าได้แค่ 0 และ 2 เนื่องจากกระบวนการเข้ารหัสทั้งหมดของต้องประกอบด้วยตัวประกอบของ a_i ดังนั้น พจน์ $S_1 D_1$ ก็จะประกอบด้วยตัวประกอบของ 4 ด้วยเช่นกันดังนั้นเมื่อทำการมอดุโลด้วย 4 จะได้เท่ากับ 0

หลังจากที่เรารู้ค่าของ $S_{0,k}$ เราสามารถใช้ค่านี้เหมือนกับค่าของ u_{k-1} ดังนั้นที่จำนวนสถานะ SN บรานซ์เมทริกซ์ที่สอดคล้องกับค่าอินพุต u_k เราสามารถนำไปรวมกับค่าความน่าจะเป็นได้ดังนี้ $P(u_k | u_{k-1}) = P(S_{0,k-1} | S_{0,k})$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
2. ซอฟต์แวร์
 - JCreator
 - Java SE Development Kit (JDK)
3. รูปภาพ Lena ขนาด 512×512 Pixel
4. รูปภาพ Barbara ขนาด 512×512 Pixel
5. รูปภาพ Pancake ขนาด 512×512 Pixel

วิธีการ

งานวิจัยนี้นำระบบส่งข้อมูลภาพต้นแบบ (Mahapakulchai and Van Dyck, 2004) โดยนำวิธีการคำนวณหาค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลมาใช้กับระบบ โครงสร้างของระบบส่งข้อมูลภาพ ซึ่งการออกแบบของระบบจะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การออกแบบของระบบต้นแบบ การออกแบบวิธีการคำนวณหาค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูล และการจำลองช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณในเชิงขนาดแบบซ้ำ

1. การออกแบบระบบการส่งข้อมูลภาพของระบบต้นแบบ

การเข้ารหัสและถอดรหัสข้อมูลภาพแบบ เอ็มพีค - 4 ของรูปภาพ Lena และรูป Barbara เป็นการบีบอัดข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ เริ่มจากการแยกข้อมูลออกเป็น 2 ส่วนคือ กลุ่มสัมประสิทธิ์ LFS และ กลุ่มสัมประสิทธิ์ HFS การเปลี่ยนข้อมูลภาพจากบิตเป็นสัญลักษณ์ แต่ละกลุ่มสัญลักษณ์มีความยาวไม่เท่ากัน ประกอบด้วย Zerotree, Non-Zero Values, Cyclic Redundancy Check และ Header สำหรับรูป Lena แบ่งออกเป็น 102 กลุ่ม โดยแบ่งเป็นกลุ่มสัมประสิทธิ์ LFS 1 กลุ่ม และกลุ่มสัมประสิทธิ์ HFS 101 กลุ่ม ส่วนรูป Barbara แบ่งออกเป็น 128 กลุ่ม โดยแบ่งเป็นกลุ่มสัมประสิทธิ์ LFS 1 กลุ่ม และกลุ่มสัมประสิทธิ์ HFS 127 กลุ่ม

การเปลี่ยนข้อมูลภาพจากบิตเป็นสัญลักษณ์โดยสัญลักษณ์ 1 ค่าเท่ากับ 2 บิต สัญลักษณ์ มีด้วยกันทั้งสิ้น 4 รูปแบบ คือ 0,1,2 และ 3 บิต 00 แทนด้วยสัญลักษณ์ 0 บิต 01 แทนด้วยสัญลักษณ์ 1 บิต 10 แทนด้วยสัญลักษณ์ 2 และบิต 11 แทนด้วยสัญลักษณ์ 3 เพื่อให้เหมาะสมกับการเข้ารหัสแบบริงคอนโวลูชัน

การเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบเทลลิส ประกอบด้วย 2 ส่วน คือการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบริงคอนโวลูชัน และการมอดูเลตแบบที่เฟสของสัญญาณมีความต่อเนื่อง การถอดรหัสวีเทอร์บี การคำนวณหาเส้นทางบนเทลลิสใช้ทฤษฎีการตรวจจับสัญญาณแบบ ML และ MAP การเข้ารหัสของกระบวนการ CPE ที่มีอัตรา 1/2 ดังสมการ

$$G_{CPE} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 3 & 1 \\ 3D & D & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

งานวิจัยนี้ได้นำการเข้ารหัสโพลีโนเมียลริงคอนโวลูชัน 32 ชั้น โดยการกระทำกระบวนการ RCE ที่อัตรา = 1/2 คู่กับการทำกระบวนการ CPE ที่อัตรา = 2/4 จะได้ Generator Matrix ของการเข้ารหัสแบบริงคอนโวลูชัน สมการที่

$$G_{all}(D) = \begin{bmatrix} 1+D+2D^3 \\ 2+D \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 3 & 1 \\ 3D & D & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (59)$$

$$= \begin{bmatrix} 1+3D+3D^2+2D^3 \\ 2D+D^2 \\ 1+2D^3 \\ 1+D+2D^3 \end{bmatrix} \quad (60)$$

การคำนวณหาเส้นทางบนเทลลิส โดยใช้ทฤษฎีการตรวจจับสัญญาณแบบ MAP จะใช้กับสัญลักษณ์ซีโรทรืเท่านั้น ดังนั้นจึงมีการเพิ่มบิตตัวบ่งชี้หรือ Flag เข้าไป เพื่อใช้เป็นบิตตรวจสอบเงื่อนไขในการคำนวณหาเส้นทางบนเทลลิส

การจำลองช่องสัญญาณไร้สาย มีรูปแบบการเลือนหายของสัญญาณในเชิงขนาดที่เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะ คือ แบบช้า และ แบบเร็ว โดยในระบบต้นแบบได้มีการจำลองช่องสัญญาณไร้สายแบบการเลือนหายของสัญญาณในเชิงขนาดแบบเร็วมาก่อนแล้ว

2. การคำนวณค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูล

ตัวอย่างการคำนวณ พิจารณาค่าความน่าจะเป็นของการส่งผ่านเมทริกซ์ P ของรูป Barbara เมื่อนำรูปมาบาร่าไปเข้าโปรแกรม Java ที่เขียนไว้จะทำให้ได้ค่าความน่าจะเป็นของรูป ดังนี้

$$P = \begin{bmatrix} 3951 & 3979 & 688 & 316 \\ 3938 & 4544 & 785 & 581 \\ 765 & 703 & 1652 & 1223 \\ 280 & 622 & 1218 & 890 \end{bmatrix}$$

เมื่อได้ค่าความน่าจะเป็นแล้วให้นำค่าความน่าจะเป็นมาคำนวณต่อให้เป็นค่าความน่าจะเป็นของการส่งผ่าน (Source Transition Matrix ,STPM) วิธีการคำนวณทำได้โดยนำค่าที่ได้ในแต่ละแถวมาบวกกันแล้วนำไปหารในแต่ละตำแหน่ง ตัวอย่างเช่นแถวที่ 1 นำค่าในแถวที่ 1 ทั้งหมดมารวมกันจะได้ 8934 แล้วนำค่านี้ไปหารในแต่ละตำแหน่งในแถวที่ 1 จะได้ 0.44224 , 0.44538 , 0.07701 , 0.03537 ตามลำดับ ทำตามขั้นตอนนี้ไปเรื่อยๆจนได้ครบทั้ง 4 แถว เราจะได้ค่าของค่าความน่าจะเป็นของการส่งผ่าน ดังนี้

$$P = \begin{bmatrix} 0.44224 & 0.44538 & 0.07701 & 0.03537 \\ 0.39988 & 0.46141 & 0.07971 & 0.05900 \\ 0.17615 & 0.16187 & 0.38038 & 0.28160 \\ 0.09302 & 0.20664 & 0.40465 & 0.29568 \end{bmatrix}$$

ความน่าจะเป็นของแต่ละชั้น 0,1,2 และ 3 แทนด้วย μ_0, μ_1, μ_2 และ μ_3 ตามลำดับ ค่าความน่าจะเป็นคำนวณได้จากสมการ $\mu P = \mu$ และสมการ $\mu_0 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$ โดยที่ $\mu = [\mu_0 \mu_1 \mu_2 \mu_3]$ มีหลายวิธีที่คำนวณหาค่าของความน่าจะเป็น แต่ในงานวิจัยนี้เราจะใช้วิธีของ Gauss Elimination (Ben noble and James W. Daniel, 1987) จากสมการ $\mu P = \mu$ เราจะได้ 4 สมการดังนี้

$$-0.55776\mu_0 + 0.39988\mu_1 + 0.17615\mu_2 + 0.09302\mu_3 = 0 \quad (61)$$

$$0.44538\mu_0 - 0.53859\mu_1 + 0.16187\mu_2 + 0.20664\mu_3 = 0 \quad (62)$$

$$0.07701\mu_0 + 0.05900\mu_1 - 0.61962\mu_2 + 0.40465\mu_3 = 0 \quad (63)$$

$$0.03537\mu_0 + 0.05900\mu_1 + 0.28160\mu_2 - 0.70432\mu_3 = 0 \quad (64)$$

เรามี 4 สมการต่อไปใช้วิธีของ Gauss Elimination เพื่อหาคำตอบ

$$\begin{bmatrix} -0.55776 & 0.39988 & 0.17615 & 0.09302 & 0 \\ 0.44538 & -0.53859 & 0.16187 & 0.20664 & 0 \\ 0.07701 & 0.07971 & -0.61962 & 0.40465 & 0 \\ 0.03537 & 0.05900 & 0.28160 & -0.70432 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_0 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{bmatrix}$$

↓

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.71694 & -0.31581 & -0.16677 & 0 \\ 0 & 0.21928 & -0.30252 & -0.28092 & 0 \\ 0 & -0.13492 & 0.59530 & -0.41749 & 0 \\ 0 & -0.08436 & -0.29277 & 0.69842 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_0 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{bmatrix}$$

↓

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.71694 & -0.31581 & -0.16678 & 0 \\ 0 & 1 & -1.37964 & -1.28114 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1.44286 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_0 \\ \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \end{bmatrix}$$

เมื่อใช้วิธี Gauss Elimination แล้วจะทำให้เราได้ 4 สมการใหม่ขึ้นมา นำไปคำนวณกับสมการเดิมที่มีอยู่

$$0\mu_3 = 0 \quad (65)$$

$$\mu_2 - 1.44281\mu_3 = 0 \quad (66)$$

$$\mu_1 - 1.37965\mu_2 - 1.28110\mu_3 = 0 \quad (67)$$

$$\mu_0 - 0.71694\mu_1 - 0.31581\mu_2 - 0.16677\mu_3 = 0 \quad (68)$$

$$\mu_0 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1 \quad (69)$$

เมื่อกำหนดเสร็จจะได้ $\mu_0 = 0.34184$, $\mu_1 = 0.37681$, $\mu_2 = 0.16618$, $\mu_3 = 0.11517$ จากสมการที่ (34) เราคำนวณเอนโทรปีได้เท่ากับ 1.63415 เพราะฉะนั้นค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลของรูปภาพมีค่าเท่ากับ 0.36585

3. การทดสอบระบบข้อมูลภาพ

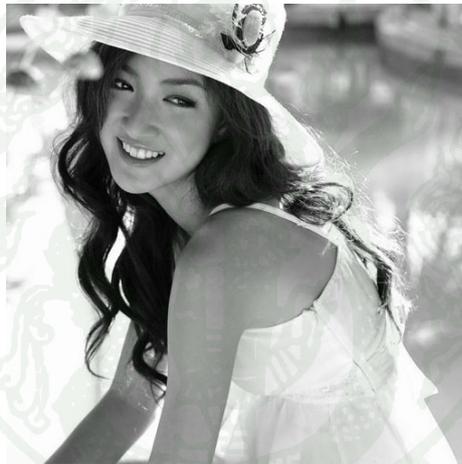
รูปภาพที่ใช้ในการทดลองคือ รูปภาพ Lena และ Barbara ขนาด 512 x 512 จุดภาพ จำนวน 200 รูปภายในช่วง $\overline{\gamma}_b = 3.75, 5.00$ และ 6.25 dB โดยผ่านกระบวนการบีบอัดข้อมูลภาพ ด้วยวิธีการ EZW เพื่อแยกข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนข้อมูลสัมประสิทธิ์ LFS และ HFS ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 ระดับ จากนั้นนำส่วนของข้อมูล HFS ผ่านกระบวนการบีบค้อนไตซ์จะได้ บิตข้อมูล และแบ่งบิตข้อมูลเป็นกลุ่มซึ่งแต่ละกลุ่มมีความยาวของบิตข้อมูลไม่เท่ากัน ในส่วนของการเข้ารหัสช่องสัญญาณ เลือกรหัสการเข้ารหัสช่องสัญญาณแบบริงคอนไวลูชัน ที่มีจำนวน 32 ชั้น และอัตรา $1/2$ ใช้ร่วมกับระบบข้อมูลภาพ ที่ทดสอบกับช่องสัญญาณแบบการเลื่อนหายของสัญญาณในเชิงขนาดแบบช้า และ แบบเร็ว มีการกระจายแบบไรเซี่ยลที่มี $\gamma = -43, -33$ และ -23 dB โดยที่ถ้า $\gamma \rightarrow -\infty$ จะทำให้ช่องสัญญาณมีการกระจายแบบเร่หรือ Rayleigh ขึ้นตอนถัดไปเป็นการคำนวณเส้นทางบนทลีส โดยใช้การตรวจจับความผิดพลาดแบบ ML และ MAP จากนั้นทำการสลับข้อมูลกลับเพื่อทำการถอดรหัสวีเทอร์บี และขั้นตอนสุดท้ายคือการถอดรหัสข้อมูลภาพ ในกรณีที่ไม่มีการรบกวนของสัญญาณรบกวนเมื่อส่งข้อมูลภาพผ่านช่องสัญญาณทั้ง 2 แบบ ประสิทธิภาพของระบบวัดค่า PSNR ของรูป Lena เท่ากับ 31.83 dB ส่วน Barbara เท่ากับ 27.44 dB และ Pancake เท่ากับ 31.12 dB



ภาพที่ 16 แสดงรูปภาพต้นแบบของ Lena ที่ไม่มีสัญญาณรบกวน



ภาพที่ 17 แสดงรูปภาพต้นแบบของ Barbara ที่ไม่มีสัญญาณรบกวน



ภาพที่ 18 แสดงรูปภาพต้นแบบของ Pancake ที่ไม่มีสัญญาณรบกวน

4. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ

4.1 การคำนวณค่า Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

PSNR คือ ค่าสูงสุดของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณและสัญญาณรบกวน บอกถึงประสิทธิภาพของระบบ โดยระบบที่ดีต้องมีค่า PSNR ใกล้เคียงกับต้นแบบมากที่สุด การหาค่า PSNR เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i, j) - K(i, j)\|^2 \quad (70)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{MAX_i^2}{MSE} \right) \quad (71)$$

โดยค่า MAX_i คือค่าจุดภาพสูงสุดของรูปภาพ หรือ $2^B - 1$ ซึ่ง B คือ จำนวนของ Bits/Sample และ $\|I(i, j) - K(i, j)\|$ คือ ค่าความผิดพลาดของผลต่างระหว่างภาพต้นแบบและภาพที่รับได้

4.2 การคำนวณค่า Word Error Rate (WER)

Word Error Rate คือ ค่าเฉลี่ยอัตราการผิดพลาดของข้อมูลแบบ ระบบที่ดีต้องมีค่า WER ต่ำหรือเข้าใกล้ศูนย์ การหาค่า WER เป็นดังสมการ

$$WER = \frac{\text{จำนวนสัญลักษณ์ที่ผิดพลาด}}{\text{จำนวนสัญลักษณ์ทั้งหมด}} \quad (72)$$

ผลและวิจารณ์

ผล

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ รูปภาพที่ใช้ในการทดสอบระบบหลักๆมีด้วยกัน 3 รูป คือ รูปภาพ Lena ขนาด 512 x 512 จุดภาพ รูปภาพ Barbara ขนาด 512 x 512 จุดภาพ และ รูปภาพ Pancake ขนาด 512 x 512 จุดภาพ เพื่อทดสอบระบบโดยใช้เทคนิค EZW ในการบีบอัด ข้อมูลภาพ แบ่งข้อมูลภาพออกเป็น 5 ระดับ และแยกออกเป็นสัมประสิทธิ์ LFS และ HFS จากนั้น ส่งไปยังกระบวนการควอนไทซ์จะได้บิตของข้อมูลภาพ การเข้ารหัสของสัญญาณจะใช้การเข้ารหัส ริงคอนโวลูชัน 32 ชั้น จากนั้นมอดูเลตสัญญาณ และ ส่งผ่านไปยังช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหาย ทางขนาดของสัญญาณทางด้านรับ ประกอบด้วยการดีมอดูเลต การสลับลำดับสัญลักษณ์กลับ การคำนวณหาเส้นทางบนเทลลิส และ การถอดรหัสวีเทอร์บี ปัจจัยการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อวัด ประสิทธิภาพของระบบส่งข้อมูลภาพ ประกอบด้วยค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ในกรณีที่ไม่มี สัญญาณรบกวนต่อระบบ ค่า PSNR ของ Lena มีค่าเท่ากับ 31.83 dB ภาพ Barbara มีค่า PSNR = 27.44 dB และภาพ Pancake มีค่าเท่ากับ 31.13 dB

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การคำนวณค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูล และ การคำนวณค่า PSNR ซึ่งแต่ละค่าจะนำมาวิเคราะห์ในส่วนที่แตกต่างกัน ค่า Residual Redundancy จะนำมาวิเคราะห์ถึงผลการพัฒนาที่เกิดขึ้นจากการส่งภาพผ่านช่องสัญญาณและใช้การตรวจจับแบบ ML และ MAP ส่วนค่า PSNR จะนำมาวิเคราะห์คุณภาพของรูปที่ถูกส่งผ่านช่องสัญญาณว่ามี คุณภาพดีเพียงใด

1. ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลกับค่า PSNR

1.1. ผลการคำนวณค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูล

1.1.1 ผลการคำนวณค่า ความซ้ำซ้อนของข้อมูล รูปภาพ Lena มีค่าเท่ากับ 0.2892

1.1.2 ผลการคำนวณค่า ความซ้ำซ้อนของข้อมูล รูปภาพ Barbara มีค่าเท่ากับ 0.3658

1.1.3 ผลการคำนวณค่า ความซ้ำซ้อนของข้อมูล รูปภาพ Pancake มีค่าเท่ากับ 0.2854

1.2 ผลการทดสอบค่า PSNR และ WER

1.2.1 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ย PSNR และ WER โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในการนำรูปกลับของรูป Lena

ตารางที่ 2, 3 และ 4 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Lena จำนวน 200 รูปผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซียม โดยกำหนดการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญญาณ 1 สัญญาณที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ ML เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Lena โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML (WER)
3.75	25.0147 (0.00083)
5.00	28.6672 (0.00026)
6.25	30.4816 (0.00009)

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Lena โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML (WER)
3.75	21.7679 (0.00170)
5.00	26.4655 (0.00053)
6.25	29.3918 (0.00018)

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Lena โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML (WER)
3.75	20.6816 (0.00210)
5.00	25.5244 (0.00067)
6.25	28.9050 (0.00023)

1.2.2 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ย PSNR และ WER โดยใช้ในการถอดรหัสแบบ MAP ในการนำรูปกลับของรูป Lena

ตารางที่ 5 , 6 และ 7 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Lena จำนวน 200 รูป ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซียม โดยกำหนดการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญญาณที่ 1 สัญญาณที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ MAP เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Lena โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP (WER)
3.75	25.205426 (0.00075)
5.00	28.758296 (0.00024)
6.25	30.509915 (0.00009)

ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Lena โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP (WER)
3.75	22.058419 (0.00151)
5.00	26.584957 (0.00050)
6.25	29.468689 (0.00017)

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Lena โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP (WER)
3.75	20.922546 (0.00193)
5.00	25.672709 (0.00062)
6.25	28.975954 (0.00022)

1.2.3 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ย PSNR และ WER โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในการนำรูปกลับของรูป Barbara

ตารางที่ 8 , 9 และ 10 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Barbara จำนวน 200 รูป ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซเชิล โดยกำหนดการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญญาณที่ 1 สัญญาณที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ ML เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Barbara โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML (WER)
3.75	19.757 (0.00214)
5.00	23.874 (0.000061)
6.25	25.843 (0.000019)

ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Barbara โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML (WER)
3.75	20.787 (0.00165)
5.00	24.478 (0.000046)
6.25	26.198 (0.000015)

ตารางที่ 10 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Barbara โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML (WER)
3.75	23.254 (0.000075)
5.00	25.818 (0.00002)
6.25	26.853 (0.000007)

1.2.4 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ย PSNR และ WER โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในการนำรูปกลับของรูป Barbara

ตารางที่ 11 , 12 และ 13 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Barbara จำนวน 200 รูป ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซเชล โดยกำหนดการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญญาณที่ สัญญาณที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ MAP เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Barbara โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP (WER)
3.75	19.975 (0.00177)
5.00	24.088 (0.000052)
6.25	25.921 (0.000017)

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Barbara โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP (WER)
3.75	21.037 (0.00137)
5.00	24.653 (0.000041)
6.25	26.255 (0.000014)

ตารางที่ 13 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Barbara โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP (WER)
3.75	23.472 (0.000064)
5.00	25.898 (0.000019)
6.25	26.863 (0.000007)

1.2.5 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ย PSNR และ WER โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในการนำรูปกลับของรูป Pancake

ตารางที่ 14 , 15 และ 16 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Pancake จำนวน 200 รูป ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซเชิล โดยกำหนดการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญญาณ 1 สัญญาณ ที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ ML เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 14 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Pancake โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML (WER)
3.75	24.482 (0.00075)
5.00	27.981 (0.00022)
6.25	29.734 (0.00083)

ตารางที่ 15 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Pancake โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML (WER)
3.75	21.440 (0.0016)
5.00	25.940 (0.00047)
6.25	28.751 (0.00015)

ตารางที่ 16 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ ML ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Pancake โดยใช้การถอดรหัสแบบ ML (WER)
3.75	20.393 (0.00208)
5.00	25.136 (0.0006)
6.25	28.156 (0.0002)

1.2.6 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ย PSNR และ WER โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในการนำรูปกลับของรูป Pancake

ตารางที่ 17, 18 และ 19 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Pancake จำนวน 200 รูป ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซเชิล โดยกำหนดการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญญาณที่ 1 สัญญาณที่ $\gamma = -43$ dB, -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB, 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ MAP เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 17 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Pancake โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP (WER)
3.75	24.704 (0.0007)
5.00	28.081 (0.00021)
6.25	29.746 (0.000085)

ตารางที่ 18 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Pancake โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP (WER)
3.75	21.677 (0.00149)
5.00	26.085 (0.00045)
6.25	28.804 (0.00016)

ตารางที่ 19 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Pancake กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP ในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของภาพ Pancake โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP (WER)
3.75	20.576 (0.0019)
5.00	25.293 (0.00058)
6.25	28.248 (0.0002)

ตารางที่ 20 แสดงผลการพัฒนาของระบบของรูป Lena , Barbara และ Pancake เมื่อเปรียบเทียบค่า PSNR ระหว่างช่องสัญญาณแบบ ML และ MAP โดยกำหนดการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญลักษณ์ 1 สัญลักษณ์ ที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB

ตารางที่ 20 ค่าการพัฒนาของระบบของรูป Lena , Barbara และ Pancake เมื่อเปรียบเทียบค่า PSNR ระหว่างการถอดรหัสแบบ แบบ ML และ MAP

γ (dB)	$\bar{\gamma}_b$ (dB)	Δ PSNR ของรูป “Lena” (dB)	Δ PSNR ของรูป “Barbara” (dB)	Δ PSNR ของรูป “Pancake” (dB)
-43	3.75	0.218	0.218	0.220
	5.00	0.170	0.214	0.100
	6.25	0.046	0.046	0.010
-33	3.75	0.264	0.250	0.230
	5.00	0.128	0.175	0.140
	6.25	0.078	0.057	0.050
-23	3.75	0.204	0.218	0.180
	5.00	0.033	0.080	0.160
	6.25	0.011	0.010	0.090

2. ผลการทดสอบระบบระหว่างการกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบการถอดรหัสโดยตรง กับ การส่งค่า STPM เข้าไปในช่องสัญญาณก่อนส่งต่อไปในระบบการถอดรหัส

ตารางที่ 21, 22 และ 23 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Lena จำนวน 200 รูป ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซเชิล โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบการถอดรหัสโดยตรง และการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญลักษณ์ 1 สัญลักษณ์ ที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ MAP เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 21 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของรูป Lena ที่ช่องสัญญาณแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง	
	(WER)	
3.75	21.109	(0.00194)
5.00	25.795	(0.00060)
6.25	28.767	(0.00022)

ตารางที่ 22 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของรูป Lena ที่ช่องสัญญาณแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง	
	(WER)	
3.75	22.217	(0.00153)
5.00	26.535	(0.00048)
6.25	29.287	(0.00020)

ตารางที่ 23 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทาง ขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของรูป Lena ที่ช่องสัญญาณแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง	
	(WER)	
3.75	25.216	(0.00072)
5.00	28.692	(0.00023)
6.25	30.435	(0.00009)

ตารางที่ 24, 25 และ 26 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Lena จำนวน 200 รูป ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซิล โดยส่งค่า STPM เข้าไปในช่องสัญญาณก่อนส่งค่า STPM ต่อไปที่การถอดรหัส และการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญลักษณ์ 1 สัญลักษณ์ ที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ MAP เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 24 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่งค่า STPM เข้าไปในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของรูป Lena โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่ง STPM เข้าไปในช่องสัญญาณ (WER)
3.75	20.992 (0.00216)
5.00	25.670 (0.00063)
6.25	28.743 (0.00023)

ตารางที่ 25 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่งค่า STPM เข้าไปในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดย $\gamma = -33$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของรูป Lena โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่ง STPM เข้าไปในช่องสัญญาณ (WER)
3.75	22.065 (0.00162)
5.00	26.409 (0.00050)
6.25	29.254 (0.00017)

ตารางที่ 26 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Lena กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่งค่า STPM เข้าไปในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว $\gamma = -23$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของรูป Lena	
	โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่ง STPM เข้าไปในช่องสัญญาณ (WER)	
3.75	25.069	(0.00076)
5.00	28.653	(0.00023)
6.25	30.418	(0.00009)

ตารางที่ 27, 28 และ 29 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Barbara จำนวน 200 รูป ผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซี่ยล โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบโดยตรง และการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญลักษณ์ 1 สัญลักษณ์ ที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ MAP เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 27 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบการถอดรหัสโดยตรงในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของรูป Barbara ที่ช่องสัญญาณแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง	
	(WER)	
3.75	19.655	(0.00178)
5.00	23.515	(0.00055)
6.25	25.657	(0.00019)

ตารางที่ 28 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบการถอดรหัสโดยตรงในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -33$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของรูป Barbara ที่ช่องสัญญาณแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง	
	(WER)	
3.75	20.658	(0.00137)
5.00	24.023	(0.00041)
6.25	25.893	(0.00014)

ตารางที่ 29 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบการถอดรหัสโดยตรงในช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -23$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของรูป Barbara	
	ที่ช่องสัญญาณแบบ MAP โดยกำหนดค่า STPM เข้าไปโดยตรง	
3.75		(WER)
	23.192	(0.00064)
5.00	25.588	(0.00012)
	26.660	(0.00007)

ตารางที่ 30, 31 และ 32 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการส่งภาพ Barbara จำนวน 200 รูปผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลือนหายของสัญญาณแบบเร็วมีการกระจายแบบไรเซเชิล โดยส่งค่า STPM เข้าไปในช่องสัญญาณก่อนส่งค่า STPM ต่อไปที่การถอดรหัส และการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญญาณ 1 สัญญาณ ที่ $\gamma = -43$ dB, -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB, 5.00 dB และ 6.25 dB ใช้การถอดรหัสแบบ MAP เพื่อหาค่าเฉลี่ย PSNR และ WER

ตารางที่ 30 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่งค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดยที่ $\gamma = -43$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของรูป Barbara	
	โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่ง STPM เข้าไปในช่องสัญญาณ	
	(WER)	
3.75	19.497	(0.00206)
5.00	23.389	(0.00062)
6.25	25.589	(0.00020)

ตารางที่ 31 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่งค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว โดย $\gamma = -33$ dB

γ_b (dB)	PSNR(dB) ของรูป Barbara	
	โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่ง STPM เข้าไปในช่องสัญญาณ	
	(WER)	
3.75	20.469	(0.00167)
5.00	23.900	(0.00047)
6.25	25.849	(0.00016)

ตารางที่ 32 ค่าเฉลี่ย PSNR และ WER ของการนำรูปภาพ Barbara กลับโดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่งค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดแบบเร็ว $\gamma = -23$ dB

$\bar{\gamma}_b$ (dB)	PSNR(dB) ของรูป Barbara	
	โดยใช้การถอดรหัสแบบ MAP โดยส่ง STPM เข้าไปในช่องสัญญาณ (WER)	
3.75	23.030	(0.00075)
5.00	25.526	(0.00021)
6.25	26.655	(0.00007)

ตารางที่ 33 ค่าการพัฒนาของระบบของรูป Lena , Barbara เมื่อเปรียบเทียบค่า PSNR ระหว่างการกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบโดยตรง กับ การคำนวณแล้วส่งค่าเข้าไปในระบบ ในช่องสัญญาณแบบ ML และ MAP โดยกำหนดการสุ่มค่าของแอลฟา 1 ค่า มีผลต่อช่วงของสัญลักษณ์ 1 สัญลักษณ์ ที่ $\gamma = -43$ dB , -33 dB และ -23 dB พิจารณาที่ $\bar{\gamma}_b = 3.75$ dB , 5.00 dB และ 6.25 dB

ตารางที่ 33 ค่าการพัฒนาของระบบของรูป Lena , Barbara เมื่อเปรียบเทียบค่า PSNR ระหว่างการกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบการถอดรหัสโดยตรงกับการส่งค่า STPM เข้าไปในช่องสัญญาณก่อนส่งค่า STPM ต่อไปที่การถอดรหัส

γ (dB)	γ_b (dB)	Δ PSNR	Δ PSNR
		สำหรับรูป Lena (dB)	สำหรับรูป Barbara (dB)
-43	3.75	0.117	0.207
	5.00	0.168	0.198
	6.25	0.075	0.084
-33	3.75	0.243	0.223
	5.00	0.159	0.158
	6.25	0.069	0.062
-23	3.75	0.191	0.228
	5.00	0.083	0.086
	6.25	0.021	0.008

ตารางที่ 34 แสดงอัตราส่วนร้อยละของการเปลี่ยนแปลงค่า STPM ระหว่าง ก่อนเข้าในช่องสัญญาณและหลังจากออกจากช่องสัญญาณของภาพ "Lena" และ "Barbara" โดยที่จำนวนข้อมูลของ STPM มีทั้งหมด 160 ตัว ทำการทดลองส่งภาพทั้งหมด 200 รอบดังนั้นจำนวนข้อมูลทั้งหมดคือ 32,000 ตัว

ตารางที่ 34 อัตราส่วนร้อยละของการเปลี่ยนแปลงค่า STPM ระหว่าง ก่อนเข้าในช่องสัญญาณและ หลังออกจากช่องสัญญาณของภาพ “Lena” และ “Barbara”

γ (dB)	$\bar{\gamma}_b$ (dB)	อัตราส่วนร้อยละของการ	อัตราส่วนร้อยละของการ
		เปลี่ยนแปลงค่า STPM ของภาพ “Lena” (จำนวนข้อมูลที่ เปลี่ยนแปลง)	เปลี่ยนแปลงค่า STPM ของภาพ “Barbara” (จำนวนข้อมูลที่ เปลี่ยนแปลง)
-43	3.75	0.00069 (22)	0.00034 (11)
	5.00	0.0009 (3)	0.00016 (5)
	6.25	0.00003 (1)	0.00003 (1)
-33	3.75	0.00134 (43)	0.00125 (40)
	5.00	0.00040 (13)	0.00025 (8)
	6.25	0.00009 (3)	0.00016 (5)
-23	3.75	0.00190 (61)	0.00188 (60)
	5.00	0.00028 (15)	0.00028 (9)
	6.25	0.00013 (4)	0.00022 (7)

วิจารณ์

1. การทดสอบระบบบนช่องสัญญาณที่มีที่มีการเลื่อนหายทางขนาดของสัญญาณแบบเร็ว ในการถอดรหัสบนช่องสัญญาณแบบ ML และ MAP จะเห็นว่าค่า PSNR ของช่องสัญญาณแบบ MAP มีค่ามากกว่า อาจเนื่องมาจาก การเลือกเส้นทางบนวิเทอบีของการถอดรหัสบนช่องสัญญาณแบบ MAP มีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจาก มีการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของเส้นทางที่สั้นที่สุด แต่ใน ML ไม่มีการคำนวณค่าความน่าจะเป็นแต่กำหนดว่าทุกจุดมีค่าความน่าจะเป็นเท่ากันหมด

2. การทดสอบระบบบนช่องสัญญาณที่มีที่มีการเลื่อนหายทางขนาดของสัญญาณแบบเร็ว ในการถอดรหัสบนช่องสัญญาณแบบ ML และ MAP จะเห็นว่าค่าการพัฒนาของระบบเมื่อเปรียบเทียบจากการถอดรหัสแบบ ML กับ MAP ของ Barbara มีค่าการพัฒนาที่ดีกว่า อาจเนื่องมาจากรูป Barbara ใช้การถอดรหัสแบบ MAP มากกว่ารูป Lena โดย Barbara ใช้การถอดรหัสแบบ MAP ถึง 50 เฟอร์เซ็นต์ ส่วน Lena ใช้การถอดรหัสแบบ MAP เพียงแค่ 41 เฟอร์เซ็นต์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การทดสอบระบบส่งข้อมูลภาพ ประกอบด้วย การเข้ารหัสภาพ การเปลี่ยนข้อมูลภาพจากบิตเป็นสัญลักษณ์ การเข้ารหัสรีทริกอนโวลูชันนอล การสลับลำดับสัญลักษณ์ และการมอดูเลตสัญญาณ เพื่อส่งไปยังช่องสัญญาณไร้สาย ด้านรับ ประกอบด้วย การดีมอดูเลต การสลับลำดับสัญลักษณ์กลับ การคำนวณหาเส้นทางบนเทลลิส การถอดรหัสวีเทอร์บี การเปลี่ยนข้อมูลภาพจากสัญลักษณ์เป็นบิต และการถอดรหัสภาพ การทดสอบระบบ ในการส่งภาพผ่านช่องสัญญาณที่มีการเลื่อนหายทางขนาดของสัญญาณแบบเร็ว มีการกระจายแบบไรเซเชิล ของรูป Lena, Barbara และ Pancake ที่ช่องสัญญาณแบบ ML และ MAP สามารถสรุปได้ว่า

1. ค่าเฉลี่ย PSNR ในช่องสัญญาณแบบ MAP มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ย PSNR ช่องสัญญาณแบบ ML ในทุกรูปและทุกๆกรณี แสดงให้เห็นว่า การถอดรหัสช่องสัญญาณแบบ MAP ให้ผลที่ดีกว่าการถอดรหัสบนช่องสัญญาณแบบ ML
2. ค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลภาพ Lena , Barbara และ Pancake มีค่าเท่ากับ 0.2892, 0.36585 และ 0.2854 ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความซ้ำซ้อนของข้อมูลของรูป Barbara มีค่ามากที่สุด นั่นมีผลทำให้ ค่าการพัฒนาของการส่งระหว่างช่องสัญญาณแบบ ML และ MAP ของรูป Barbara มีค่าดีที่สุด
3. ค่าเฉลี่ย PSNR ของระบบที่มีการกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบ มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ย PSNR ของระบบที่คำนวณค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ โดยรูป Lena มีค่าเฉลี่ย PSNR เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 0.075 dB ส่วน Barbara มีค่าเฉลี่ย PSNR เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 0.104 dB

ข้อเสนอแนะ

1. การใช้ระบบที่มีการกำหนดค่า STPM เข้าไปในระบบโดยตรง ให้ผลที่ดีกว่าการใช้ระบบที่มีการคำนวณค่า STPM แล้วส่งเข้าไปในระบบ
2. ถ้าต้องการระบบที่มีการถอดรหัสที่มีประสิทธิภาพ ควรเลือกใช้ การถอดรหัส แบบ MAP เนื่องจากผลที่ได้ดีกว่าแบบ ML
3. ในงานวิจัยนี้ใช้รูปในการทดลองทั้งหมด 3 รูปคือ Lena , Barbara และ Pancake มีการทดลองเพียง 3 รูปเนื่องจาก ข้อจำกัดของ โปรแกรมไม่สามารถอ่านรูปได้ทุกรูป ได้มีการนำรูปอื่นๆ มาทดลองในโปรแกรมได้ผลดังนี้

รูป	ข้อผิดพลาด
 <p>รูป Clown.pgm</p>	<p>สามารถอ่านภาพได้ ได้ผลดังนี้ average psnr=24.84099457171515 average wer=0.0</p>
 <p>รูป Goldhill.pgm</p>	<p>สามารถอ่านภาพได้ ได้ผลดังนี้ average psnr=6.366163711355586 average wer=0.0 แต่มีความผิดพลาดที่ การแปลงรูปกลับ ทำให้ค่าเฉลี่ย PSNR มีค่าน้อยมาก</p>

รูป

ข้อผิดพลาด



รูป Girlface.pgm

สามารถอ่านภาพได้ ได้ผลดังนี้
average psnr=32.51191738936646
average wer=0.0



รูป tank2.pgm

สามารถอ่านภาพได้ ได้ผลดังนี้
average psnr=26.432405263336683
average wer=0.0

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Alajaji, F., N. Phamdo, N. Farvardin and T.E. Fuja. Jan 1996. Detection of binary Markov sources over channels with additive Markov noise. **IEEE Trans. Inform Theory** 42 (1): 230 - 239.
- Cover, T.M. and J. A. Thomas. 2006. **ElementsofInformationTheory**. 2 ed. JohnWiley & Sons, New York.
- Forney, G.D. March 1973. The viterbi algorithm. **Proc. of the IEEE** 61 (3): 268 - 278.
- Mahapakulchai, S. 2007. MAP decoding for polynomial ring convolutional trellis codes for MPEG-4 image transmission system over Rician fading channel. **Proceeding of the ECTI2007** 2: 655-658.
- Mahapakulchai, S. 2009. **Image Transmission Systems for Wireless Channels: Theories, Algorithms and Applications**. 1 ed. VDM Verlag Dr. Müller, Germany.
- Mahapakulchai, S. and R.E. Van Dyck. 2001. Design of Ring Convolutional Trellis Codes for MAP Decoding for MPEG-4 Imagery. **IEEE International Conference on ICC 2001** (3): 959 - 963.
- Mahapakulchai, S. and R.E. Van Dyck. July 2004. Design of ring convolutional trellis codes for MAP decoding of MPEG-4 images. **IEEE Trans. Comm.** 52: 1033-1037.
- McDonough, A.N. and A.D. Whalen. 1995. **Detection of Signals in Noise**. 2 ed. Academic Press, SanDiego, CA.
- Noble, B. and J.W. Daniel. 1987. **Applied Linear Algebra**. 3 ed. Prentice Hall, Upper Saddle, NJ.

- Rimoldi, B.E. 1988. A decomposition approach to CPM, pp. 260-270. **vol. 34, no. 2. IEEE Trans. Info. Theory.**
- Sayood, K. and J. C. Borkenhagen. Jun 1991. Use of residual redundancy in the design of joint source channel coders. **IEEE Trans. Commun** 6 (39): 838 – 846.
- Shapiro, J.M. 1993. Embedded Image Coding using Zerotrees of Wavelete Coefficients. **IEEE Trans. Signal Processing** 12 (41): 3445 - 3462.
- Van Dyck, R.E. 2000. MPEG-4 image transmission using MAP source-controlled channel decoding. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications** 6 (18): 1087 - 1098.
- Viterbi, A.J. 1967. Error Bounds for Convolutional Codes and Asymptotically Optimum Decoding Algorithm. **IEEE Trans. Inform. Theory** 2 (13): 260 - 269.
- Yang, R.H. and D.P. Taylor. Jul 1994. Trellis-coded continuous-phase frequency-shift keying with ring convolutional codes. **IEEE Trans. Information Theory** 40 (4): 1057 - 1067.



โปรแกรมภาษาจาว่ากระบวนการคำนวณค่าความซ้ำซ้อน

```

import java.io.*;
import java.lang.*;
import java.math.*;
import java.awt.Event.*;
import java.util.*;
import java.io.*;
import java.lang.*;
import java.math.*;
import java.awt.Event.*;
import java.util.*;
//-----CLASS-----
class realRedundancy {
    String w = "w";
    double a=0;
    double b=0;
    double c=0;
    double d=0;
    double e=0;
    double f=0;
    double g=0;
    double h=0;
    double k=0;
    double u0=0;
    double u1=0;
    double u2=0;
    double u3=0;
    double result = 0;
    double result1 = 0;
    double result2 = 0;
    double result3 = 0;
    double u[] = {u0,u1,u2,u3};
    double num1[][] = {{0,0,0,0},
                       {0,0,0,0},
                       {0,0,0,0},
                       {0,0,0,0}};

    public static void main(String args[]) throws IOException {
        realRedundancy Callmethod = new realRedundancy();
        Callmethod.Calredundancy();
    } // main
    public void Calredundancy() throws IOException {
        sim1_params params = new sim1_params();
        packet_array parray = new packet_array(params);
        meztencode test = new meztencode(params, parray);
        test.read_image();
        double num[][] = test.encode();
    }
}

```

```

NumberFormat formatter = NumberFormat.getNumberInstance();
formatter.setMaximumFractionDigits(5);
formatter.setMinimumFractionDigits(5);
result = num[0][0]+num[0][1]+num[0][2]+num[0][3] ;
result1 = num[1][0]+num[1][1]+num[1][2]+num[1][3] ;
result2 = num[2][0]+num[2][1]+num[2][2]+num[2][3] ;
result3 = num[3][0]+num[3][1]+num[3][2]+num[3][3] ;
num1[0][0] = num[0][0] = num[0][0]/result;
num1[0][1] = num[0][1] = num[0][1]/result;
num1[0][2] = num[0][2] = num[0][2]/result;
num1[0][3] = num[0][3] = num[0][3]/result;
num1[1][0] = num[1][0] = num[1][0]/result1;
num1[1][1] = num[1][1] = num[1][1]/result1;
num1[1][2] = num[1][2] = num[1][2]/result1;
num1[1][3] = num[1][3] = num[1][3]/result1;
num1[2][0] = num[2][0] = num[2][0]/result2;
num1[2][1] = num[2][1] = num[2][1]/result2;
num1[2][2] = num[2][2] = num[2][2]/result2;
num1[2][3] = num[2][3] = num[2][3]/result2;
num1[3][0] = num[3][0] = num[3][0]/result3;
num1[3][1] = num[3][1] = num[3][1]/result3;
num1[3][2] = num[3][2] = num[3][2]/result3;
num1[3][3] = num[3][3] = num[3][3]/result3;
num[0][0] = num[0][0] - 1 ;
num[1][1] = num[1][1] - 1 ;
num[2][2] = num[2][2] - 1 ;
num[3][3] = num[3][3] - 1 ;
num[1][0] = num[1][0]/num[0][0];
num[2][0] = num[2][0]/num[0][0];
num[3][0] = num[3][0]/num[0][0];
num[0][0] = num[0][0]/num[0][0];
a = num[0][0]*num[0][1];
b = num[1][0]*num[0][1];
c = num[2][0]*num[0][1];
d = num[3][0]*num[0][1];
num[0][1] = a-num[0][1];
num[1][1] = b-num[1][1];
num[2][1] = c-num[2][1];
num[3][1] = d-num[3][1];
a = num[0][0]*num[0][2];
b = num[1][0]*num[0][2];
c = num[2][0]*num[0][2];
d = num[3][0]*num[0][2];
num[0][2] = a-num[0][2];
num[1][2] = b-num[1][2];
num[2][2] = c-num[2][2];
num[3][2] = d-num[3][2];
a = num[0][0]*num[0][3];

```

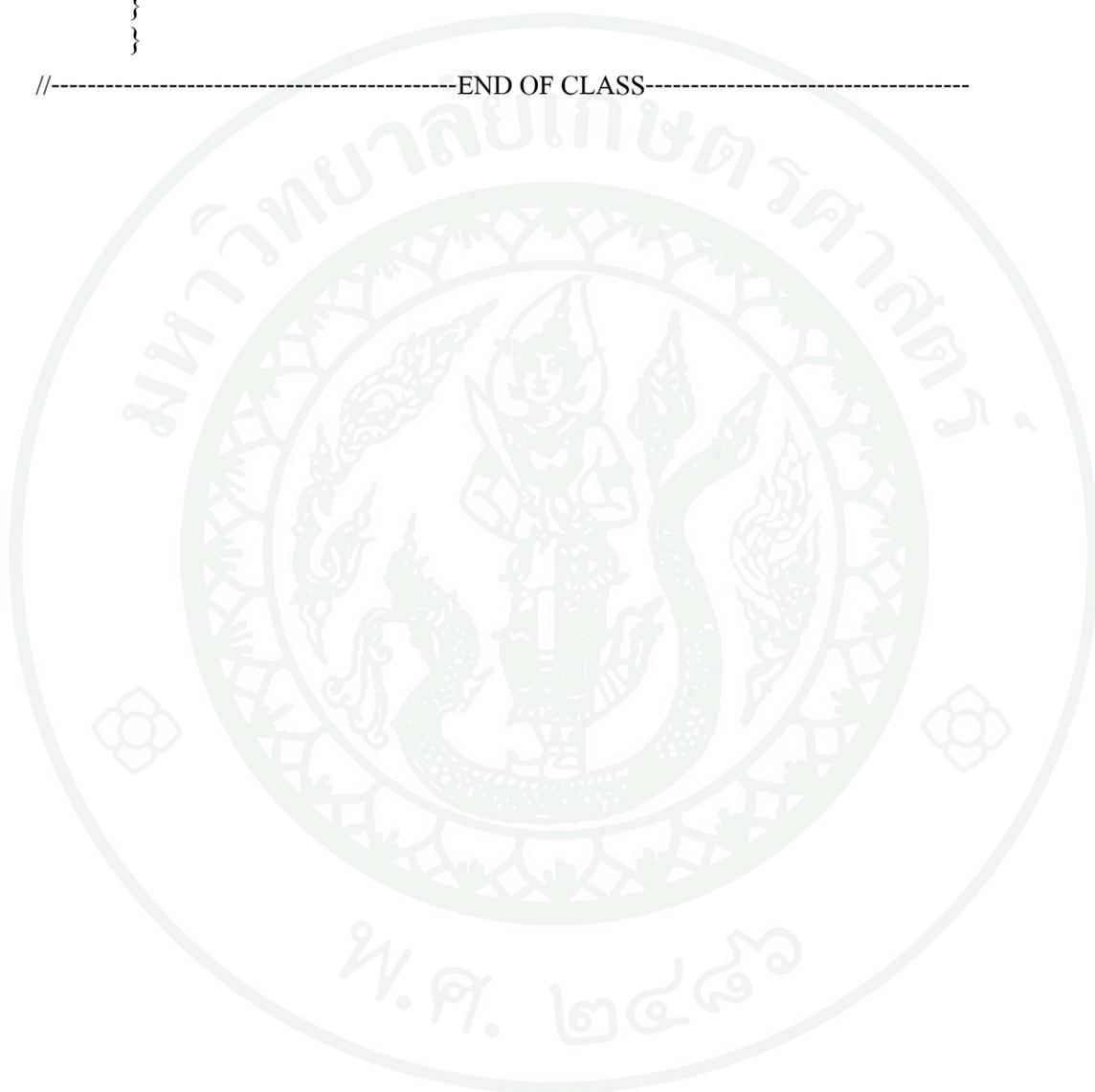
```

b = num[1][0]*num[0][3];
c = num[2][0]*num[0][3];
d = num[3][0]*num[0][3];
num[0][3] = a-num[0][3];
num[1][3] = b-num[1][3];
num[2][3] = c-num[2][3];
num[3][3] = d-num[3][3];
num[2][1] = num[2][1]/num[1][1];
num[3][1] = num[3][1]/num[1][1];
num[1][1] = num[1][1]/num[1][1];
a = num[1][1]*num[1][2];
b = num[2][1]*num[1][2];
c = num[3][1]*num[1][2];
num[1][2] = num[1][2]-a;
num[2][2] = num[2][2]-b;
num[3][2] = num[3][2]-c;
a = num[1][1]*num[1][3];
b = num[2][1]*num[1][3];
c = num[3][1]*num[1][3];
num[1][3] = a-num[1][3];
num[2][3] = b-num[2][3];
num[3][3] = c-num[3][3];
num[3][2] = num[3][2]/num[2][2];
num[2][2] = num[2][2]/num[2][2];
a = num[2][2]*num[2][3];
b = num[3][2]*num[2][3];
num[2][3] = a-num[2][3];
num[3][3] = b-num[3][3];
for (int j=0;j<4; j++){
for (int i = 0; i < 4 ; i++){
}
e = -1*num[3][2];
num[2][1] = -1*num[2][1];
num[3][1] = -1*num[3][1];
a= num[2][1]*e;
b= a+num[3][1];
f= b;
b = b*num[1][0];
b = -1*b;
c = e*num[2][0];
c = -1*c;
d = num[3][0];
d = -1*d;
a = b+c+d;
g = a;
a = 1+e+f+g;
a = 1/a;
u0 = u[0] = a*g;

```

```
u1 = u[1] = a*f;  
u2 = u[2] = a*e;  
u3 = u[3] = a;  
for (int i=0;i<4; i++){  
for (int j = 0; j < 4 ; j++){  
k = u[i]*num1[i][j]*Math.log(1/num1[i][j])/Math.log(2);  
h = h+k;}  
}  
}
```

//-----END OF CLASS-----



ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายสิริวัฒน์ หาสจิตโต
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 3 กันยายน 2527
สถานที่เกิด	บุรีรัมย์
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	อาคารวิศวกรรมศาสตร์ 60 ปี ชั้น 5 ห้อง 505/5
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	ได้รับการตีพิมพ์ผลงานเรื่อง” Adaptive MAP Source – Controlled Channel Decoding for MPEG – 4 Imagery Transmission Systems” ในงานประชุมวิชาการ ISCIT CON 2009 และ “Mismatched source transition probability matrix for adaptive MAP decoding in MPEG-4 imagery wireless transmission systems” ในงาน ประชุมวิชาการ PIMRC CON 2009
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-