

การส่งสัญญาณวิดีโอที่มีอัตราบิตต่ำบนเครือข่ายไร้สายแบบจุดต่อจุด



นายณเร็น ศิริธารานุกูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0172-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1 2 ส.อ. 2546

I 19917464

LOW BIT-RATE VIDEO TRANSMISSION ON A WIRELESS
POINT-TO-POINT NETWORK

Mr.Narin Siritaranukul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0172-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การส่งสัญญาณวิดีโอที่มีอัตราบิดต่ำบนเครือข่ายไร้สายแบบจุดต่อจุด

โดย

นาย เณริน ศิริธารานุกูล

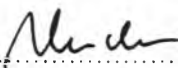
สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษา


รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล

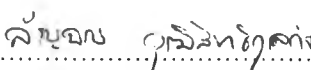
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพัฒน์มงคล)

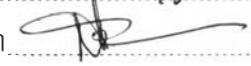

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญากร วุฒิสัทติกุลกิจ)

ณเริน ศิริธารานุกูล : การส่งสัญญาณวิดีโอที่มีอัตราบิตต่ำบนเครือข่ายไร้สายแบบจุดต่อจุด (LOW BIT-RATE VIDEO TRANSMISSION ON A WIRELESS POINT-TO-POINT NETWORK), อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล, 101 หน้า. ISBN 974-13-0172-3

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้พิจารณาการเข้ารหัสวิดีโอ QCIF ที่มีความละเอียด 176 x 144 จุดแบบอัตราบิตต่ำสำหรับการส่งบนช่องสัญญาณไร้สาย เนื่องจากแบนวิidthที่มีอยู่สำหรับการส่งข้อมูลตามมาตรฐานโทรศัพท์ไร้สายยุคที่ 3 ทำให้สามารถส่งข้อมูลได้ที่อัตราการส่งสูงสุดถึง 2 Mbps การเข้ารหัสจึงควรจะปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ เพื่อให้สัญญาณวิดีโอมีคุณภาพดีที่สุดในขณะใดๆ ด้วยธรรมชาติของการส่งข้อมูลบนเครือข่ายไร้สาย คุณภาพของสัญญาณที่ส่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นระยะทางระหว่างผู้ส่งกับผู้รับหรือความเร็วของโทรศัพท์เคลื่อนที่เมื่อเทียบกับสถานีฐาน ในกรณีนี้เราจะพิจารณาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราบิตผิดพลาดตามเวลาที่มีต่อสัญญาณวิดีโอที่เข้ารหัสแล้ว เนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณมีลักษณะเป็นช่วงๆ ระบบขนส่งข้อมูลที่ใช้จึงต้องมีส่วนควบคุมความผิดพลาด ที่จะไม่เพิ่มส่วนหัวสำหรับป้องกันความผิดพลาดมากเกินไป วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการปรับปรุงระบบเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอให้สอดคล้องกับอัตราบิตผิดพลาดของช่องสัญญาณในขณะใดๆ โดยข้อมูลของอัตราบิตผิดพลาดของช่องสัญญาณจะได้รับระดับที่หักข้อมูลชั่วคราวของระบบควบคุมความผิดพลาดแบบ ARQ (Automatic Repeat reQuest) มาตรฐานวิดีโอที่ใช้คือ มาตรฐาน H.263 ของ ITU-T ซึ่งสอดคล้องกับการเข้ารหัสวิดีโอแบบอัตราบิตต่ำ ในมาตรฐานดังกล่าว การเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอจะประกอบด้วยพารามิเตอร์จำนวนมากเพื่อให้ผู้ออกแบระบบสามารถเข้ารหัสวิดีโอได้สอดคล้องกับบริการที่ใช้งาน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการปรับพารามิเตอร์การเข้ารหัส 3 ตัว ประกอบกับเทคนิคการเลือกใช้อินทราเฟรม เพื่อปรับเปลี่ยนอัตราบิต โดยสามารถเลือกคงคุณภาพในส่วนของความคมชัดหรือความต่อเนื่องของสัญญาณภาพได้ ผลการทดลองที่ได้แสดงถึงความสามารถทั้งในด้านการส่งซึ่งได้อัตราเฟรมสูงสุดถึงร้อยละ 80 ถึง 90 ของอัตราเฟรมสูงสุดสำหรับสัญญาณวิดีโออัตราบิตต่ำ และคุณภาพก็อยู่ในระดับร้อยละ 80 ถึง 90 ของอัตราบิตสูง โดยวัดจากค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนและความหนาแน่นเฟรมที่แสดงผล รวมทั้งความยืดหยุ่นของระบบที่มีต่อเวลาที่ใช้ส่งสัญญาณรวมทั้งระดับคุณภาพของสัญญาณที่เวลาต่างๆ ทั้งในช่วงเวลาลดทอนสั้นและยาว

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2543

ลายมือชื่อนิสิต 1/กน ณเริน นุกูล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม.....

4170303921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: VIDEO CODING, ARQ, H.263, ITU-T, and WIRELESS CHANNEL

NARIN SIRITARANUKUL: LOW BIT-RATE VIDEO TRANSMISSION ON A WIRELESS POINT-TO-POINT NETWORK. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.SOMCHAI JITAPUNKUL. Dr.Eng. pp.101 ISBN 974-13-0172-3

This thesis considers the video encoder rate for transmission of encoded QCIF video signals with resolution (176x144 pixel) over wireless channels. Because the bandwidth available for third generation mobile phone allowing multimedia to transmit data at bit rate up to 2 Mbit/s, the encoder rate should be changed properly due to the time-varying channel in order to maintain the signal quality. Considering the nature of wireless channel, the quality of the signal depends on many conditions; for example, the distance between user and base station and the velocity of the user related to the base stations. We consider the impact of bursty fading effect on signal quality. Since the error occurs periodically, the transmission system requires careful control of the error without increasing the overhead for error protection significantly. This thesis introduced the multiple code rate system whose rate can be adjusted due to the capacity of the transmission channel. The level of buffer can indicate the information of the channel in Hybrid ARQ (Automatic Repeat reQuest) system, an error control system that employs both FEC (Forward Error Correction) and Retransmission Request. The video-encoding standard used in this thesis is ITU-T H.263 according to the wireless transmission system used in the thesis. The system, which can encode steps of bit rate, may switch the encoded rate by three major parameters, quantization parameter, frame skip, and encoded mode with the I-frame refreshing technique. Changing parameters of encoder, based on the ITU-T standard, H.263 can vary both the encoded rate and the quality of the moving pictures. Simulation results show that the system does not only lead to the smoothness of changing picture quality which is maintained to 80-90% measured by PSNR and frame density but also reduces the load of the data buffer either in short or long fading period and increases the transmission rate to 80-90% compared with those of high bit rate video.

Department Electrical Engineering

Field of study Electrical Engineering

Academic year 2000

Student's signature *Narin Siritaranukul*

Advisor's signature *Somchai*

Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือของ รศ.ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา, หนังสือ และบทความจากต่างประเทศมากมาย ตลอดจนข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดช่วงเวลาในการทำวิจัย ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณทุนการศึกษาศึกษาวิจัยกักกันกัญญาสำหรับทุนการศึกษาและวิจัยตลอดสองปีแรกของการเรียนในระดับบัณฑิตศึกษา ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยกรรมวิธีสัตวณาดิจิทัลซึ่งเป็นสถานที่ทำการวิจัย รวมถึงเพื่อนๆ นิสิตในกลุ่มการสื่อสารมัลติมีเดีย ที่เอื้อเพื่อความรู้, แหล่งข้อมูลรวมทั้งบทความต่างๆ และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในกลุ่มวิจัยอื่นๆ ที่กรุณาให้ความรู้ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้ง Matlab และ Microsoft Visual C++ ทำให้การทำงานสะดวกยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังขอขอบคุณกำลังใจจากทุกๆ คนตลอดการทำวิจัยในห้องปฏิบัติการวิจัยนี้ด้วย

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.วุฒิพงษ์ อารีกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเพื่อข้อมูลวิดีโอตัวอย่างตลอดจนแบบจำลองการเข้ารหัส ที่ใช้สำหรับทำวิจัย, อาจารย์วิทยากร อัครวิเศษ รวมทั้งอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำวิจัย ขอกราบขอบพระคุณอีกครั้ง

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา สำหรับความเข้าใจและกำลังใจในการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาตลอดเวลา 3 ปีที่ผ่านมา ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 เหตุผลและความเป็นมา.....	1
1.2 มาตรฐานการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอ.....	2
1.3 การแก้ไขความผิดพลาดในช่องสัญญาณ.....	3
1.4 แนวทางที่นำเสนอ.....	3
1.5 วัตถุประสงค์.....	4
1.6 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 แนวทางการดำเนินงาน.....	4
1.8 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	5
2 หลักการทฤษฎี และขั้นตอนวิธีการที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอ.....	6
2.2 มาตรฐานการเข้ารหัสของ ISO.....	9
2.2.1 มาตรฐาน JPEG.....	9
2.2.2 มาตรฐาน MPEG-1.....	12
2.2.3 มาตรฐาน MPEG-2.....	14
2.2.4 มาตรฐาน MPEG-4.....	17
2.2.5 มาตรฐาน MPEG-7.....	20
2.3 มาตรฐานการเข้ารหัสวิดีโอของ ITU-T.....	22
2.3.1 มาตรฐาน H.261.....	22
2.3.2 มาตรฐาน H.263.....	27

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2.4	การวัดคุณลักษณะของสัญญาณวิดีโอ.....	30
2.4.1	อัตราบิต.....	30
2.4.2	ค่าอัตราส่วนกำลังของสัญญาณวิดีโอ ต่อกำลังของสัญญาณรบกวน.....	30
2.4.3	ค่าอัตราบิตผิดพลาด.....	30
2.4.4	ค่าคะแนนการสังเกต.....	30
2.5	ระบบการสื่อสารไร้สาย.....	30
2.5.1	ความเป็นมา.....	30
2.5.2	แบบจำลองระบบและแบบจำลองการลดทอน.....	32
2.6	การควบคุมการส่งข้อมูลที่ผิดพลาดบนช่องการสื่อสารไร้สาย.....	33
2.6.1	การควบคุมความผิดพลาดแบบวงรอบเปิด.....	33
2.6.2	การควบคุมความผิดพลาดแบบวงรอบปิด.....	34
2.7	ปริทัศน์วรรณกรรม (Literature Review).....	34
3	รายละเอียดเกี่ยวกับงานวิจัย.....	36
3.1	ภาพรวมของระบบ.....	36
3.2	ลักษณะสัญญาณขาเข้า.....	36
3.3	ระบบการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอ.....	37
3.4	ระบบป้องกันความผิดพลาดแบบวงรอบปิด.....	40
3.5	การทำงานของระบบที่นำเสนอ.....	42
4	ขั้นตอนการทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
4.1	ขั้นตอนการทดสอบ.....	44
4.1.1	ทดสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลง อัตราบิตต่อคุณภาพของสัญญาณ.....	44
4.1.2	ทดสอบขนาดของที่พักข้อมูลชั่วคราว กับจำนวนเฟรมที่สามารถบรรจุได้.....	46
4.1.3	ทดสอบการจำลองช่องสัญญาณลดทอน.....	46
4.1.4	ทดสอบส่วนหัวที่ใช้ในระบบ Hybrid ARQ.....	46

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.1.5 การทดสอบสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราว สำหรับการลดทอนที่มีอัตราบิดผิผลต่าง ๆ กัน	47
4.1.6 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ	48
4.2 ผลกระทบของการเปลี่ยนอัตราบิดต่อคุณภาพของสัญญาณ	48
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราบิดโดย ใช้การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว	48
4.2.2 การปรับเปลี่ยนอัตราบิดกับคุณภาพของสัญญาณ	50
4.3 ขนาดของที่พักข้อมูลชั่วคราวกับจำนวนเฟรมที่สามารถบรรจุได้	56
4.4 ส่วนหัวที่ใช้ในระบบ Hybrid I ARQ	58
4.5 สภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวสำหรับ การลดทอนที่มีอัตราบิดผิผลต่าง ๆ กัน	60
4.6 ประสิทธิภาพของระบบเข้ารหัสที่นำเสนอ	62
4.6.1 เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าการกระโดดข้ามเฟรม	62
4.6.2 เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์	69
4.7 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง	74
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	78
รายการอ้างอิง	82
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก	86
ภาคผนวก ข	89
ภาคผนวก ค	91
ภาคผนวก ง	97
ประวัติผู้เขียน	101

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างมาตรฐาน MPEG-1 กับ MPEG-2 ในแง่ของการเข้ารหัสวิดีโอ	16
ตารางที่ 2.2 ค่าระดับการทำควอนไตส์ในมาตรฐาน H.261 และ H.263	27
ตารางที่ 4.1 คะแนนจากการสังเกตวิดีโอที่เข้ารหัส ตามมาตรฐาน H.263 ด้วยพารามิเตอร์ต่างๆกัน	53
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเข้ารหัส เพื่อให้ได้อัตราบิตค่าต่างๆ ในรูปที่ 4.8	58
ตารางที่ 4.3 อัตราการเพิ่มของข้อมูลเมื่อเพิ่มส่วนหัวเพื่อการแก้ไขให้ข้อมูล	60

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 วิวัฒนาการของมาตรฐานการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอ.....	8
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบอัตราบิตกับคุณภาพ ของการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอตามมาตรฐานต่างๆ.....	9
รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเข้ารหัสในมาตรฐาน JPEG.....	11
รูปที่ 2.4 การทำงานของอินทราเฟรม, เฟรม P และเฟรม B ในมาตรฐาน MPEG-1.....	13
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนกระบวนการควอนไทส์ตามมาตรฐาน MPEG-2.....	16
รูปที่ 2.6 แผนภาพพื้นฐานของตัวเข้ารหัส MPEG – 4.....	19
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการใช้ Sprite ในการเข้ารหัส สัญญาณวิดีโอตามมาตรฐาน MPEG-4.....	20
รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบข้อมูลผ่านรูปแบบ CIF.....	23
รูปที่ 2.9 ตำแหน่งของส่วนประกอบความสว่าง และส่วนประกอบสีในรูปแบบ CIF.....	24
รูปที่ 2.10 จำนวนบล็อกรวมของจุดในส่วนประกอบต่างๆของมาโครบล็อก ในรูปแบบวิดีโอแบบ CIF.....	24
รูปที่ 2.11 ระดับการทำควอนไทส์ของมาตรฐาน H.261 และ H.263.....	26
รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอตามมาตรฐาน H.263.....	29
รูปที่ 2.13 แบบจำลองสำหรับช่องสัญญาณลดทอน.....	32
รูปที่ 2.14 การกระจายความน่าจะเป็นแบบเรเลย์.....	33
รูปที่ 3.1 ภาพรวมของระบบที่นำเสนอ.....	36
รูปที่ 3.2 สัญญาณวิดีโอตัวอย่างที่ใช้ในวิทยานิพนธ์.....	37
รูปที่ 3.3 ชนิดของอินเตอร์เฟรมในมาตรฐาน H.263.....	38
รูปที่ 3.4 รูปแบบการกระโดดข้ามเฟรมในการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอ.....	39
รูปที่ 3.5 การทำงานของระบบการควบคุมความผิดพลาดแบบวงรอบปิด.....	40
รูปที่ 3.6 การเปรียบเทียบความจุของที่พักข้อมูลชั่วคราว ในระบบ ARQ กรณีที่อัตราบิตต่างกัน.....	41
รูปที่ 3.7 ระเบียบวิธีปรับเปลี่ยนอัตราบิต.....	42

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ การควอนไทล์กับอัตราบิดสำหรับมาตรฐาน H.263 (Foreman) ที่อัตราการกระโดดข้ามเฟรมต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ การควอนไทล์กับอัตราบิดสำหรับมาตรฐาน H.263 (Foreman) ที่อัตราการเข้ารหัสเฟรมอ้างอิงต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ การควอนไทล์กับอัตราบิดสำหรับมาตรฐาน H.263 ระหว่างวิดีโอตัวอย่างที่ต่างกัน.....	51
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ การควอนไทล์กับค่ากำลังสัญญาณต่อสัญญาณ รบกวนสำหรับมาตรฐาน H.263 (Foreman).....	52
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ การควอนไทล์กับค่ากำลังสัญญาณต่อสัญญาณ รบกวนสำหรับมาตรฐาน H.263 (Foreman) ที่อัตราการเข้ารหัสเฟรมอ้างอิงต่างๆ กัน.....	54
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหมายเลขเฟรม กับค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในแต่ละเฟรมสำหรับมาตรฐาน H.263 (Foreman) เมื่ออัตราการเข้ารหัสเฟรมอ้างอิงต่างกัน.....	55
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การควอนไทล์ กับค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในแต่ละเฟรมสำหรับมาตรฐาน H.263 สำหรับวิดีโอตัวอย่างที่ต่างกัน.....	56
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิดกับจำนวนเฟรม ที่สามารถบรรจุได้ในที่พักข้อมูลชั่วคราว ของระบบ ARQ ขนาดต่างๆ.....	57

สารบัญญภาพ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวในช่วงเวลาลดทอน ที่มีอัตราบิดผิพลาตเป็น 0.1727 ของข้อมูล ที่มีความยาวส่วนหัวต่างกัน	59
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวในช่วง เวลาลดทอนที่มีอัตราบิดผิพลาตเป็น 0.0769 ของข้อมูลที่มีความยาวส่วนหัวต่างกัน	60
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวที่สถานะเวลาต่างๆกัน ของช่องสัญญาณลดทอนที่มีอัตราบิดผิพลาตต่างๆกัน	61
รูปที่ 4.12 กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่ง ในด้านความเร็วระหว่างสัญญาณที่ได้รับการเข้ารหัส ด้วยอัตราบิดต่างๆกัน โดยใช้ค่าการกระโดดข้ามเฟรม	64
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในแต่ละเฟรมของสัญญาณที่อัตราบิดต่างๆ	65
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งในด้านความเร็ว เมื่ออัตราบิดผิพลาตในช่องสัญญาณต่างกัน	66
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละเฟรม ของสัญญาณเมื่ออัตราบิดผิพลาตในช่องสัญญาณต่างกัน	67
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงขนาดของข้อมูลที่อยู่ในที่พักข้อมูลชั่วคราว ที่สถานะเวลาต่างๆกันของช่องสัญญาณลดทอน ที่มีช่วงเวลาลดทอนต่างกัน	67
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งในด้านความเร็ว เมื่ออัตราบิดในการเข้ารหัสต่างกันในช่องสัญญาณ ที่มีช่วงเวลาลดทอน 40 มิลลิวินาที	68
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในแต่ละเฟรมของสัญญาณในช่วงเวลาลดทอน 40 มิลลิวินาทีเมื่ออัตราบิดการเข้ารหัสต่างกัน	69
รูปที่ 4.19 รูปเปรียบเทียบระบบที่ปรับเปลี่ยนอัตราบิดได้ กับระบบทั่วไป	70

สารบัญภาพ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งในด้านความเร็ว ระหว่างสัญญาณที่ได้รับการเข้ารหัสด้วยอัตราบิตต่างๆกัน โดยใช้พารามิเตอร์การควอนไทส์.....	71
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในแต่ละเฟรมของสัญญาณ เมื่ออัตราบิตการเข้ารหัสต่างกัน เนื่องจากพารามิเตอร์การควอนไทส์.....	72
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งในด้านความเร็ว ในช่องสัญญาณที่มีช่วงเวลาลดทอน 40 มิลลิวินาที ระหว่างสัญญาณที่ได้รับการเข้ารหัสด้วยอัตราบิต ต่างๆกัน โดยใช้พารามิเตอร์การควอนไทส์.....	73
รูปที่ 4.23 ค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละเฟรม ของสัญญาณที่ส่งในช่องสัญญาณที่มีช่วงเวลาลดทอน 40 มิลลิวินาทีเมื่ออัตราบิตการเข้ารหัสต่างกันเนื่องจาก พารามิเตอร์การควอนไทส์.....	73
รูปที่ 4.24 รูปวิธีโอตัวอย่าง Foreman.....	76
รูปที่ ก.1 โครงสร้างทั่วไปในการสร้างขนาดของสัญญาณ ที่มีการกระจายแบบเรเลย์.....	86
รูปที่ ก.2 การกระจายของความน่าจะเป็นแบบเรเลย์ ($\sigma^2 = 1$).....	88
รูปที่ ค.1 การจำลองระบบการลดทอนแบบเรเลย์.....	92
รูปที่ ค.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิตผิดพลาดใน ช่องสัญญาณแบบเรเลย์เมื่อเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ “0” เทียบกับระดับสัญญาณ “1”และค่าระดับการตัดสินใจ.....	93
รูปที่ ค.3 การวิเคราะห์โอกาสผิดพลาดในระดับบิต สำหรับการลดทอนแบบเรเลย์.....	93
รูปที่ ค.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับสัญญาณ “0” กับค่าระดับการตัดสินใจเมื่อกำหนดค่าอัตราบิตผิดพลาด.....	94
รูปที่ ค.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระดับการตัดสินใจ กับอัตราบิตผิดพลาดเมื่อกำหนดค่าระดับสัญญาณ “0” เป็นช่วงๆ.....	95
รูปที่ ค.6 การจำลองช่องสัญญาณลดทอนทางเวลา.....	96