บทที่ 4

ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะเป็นผลการทดสอบระบบที่นำเสนอในแง่มุมต่างๆ โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงกระบวนการทดสอบที่อยู่ในบทนี้ จากนั้นก็จะเป็นส่วนของการวิเคราะห์คุณลักษณะของสัญญาณวิ-ดีโอที่เข้ารหัสด้วยพารามิเตอร์ที่ต่างกัน, การวิเคราะห์ส่วนหัวและขนาดที่พักข้อมูลชั่วคราวของระบบควบคุมความผิดพลาดที่เหมาะสมสำหรับระบบที่นำเสนอ และการทดสอบประสิทธิภาพของระบบเข้ารหัสทั้งด้านความเร็วและคุณภาพ สุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบข้างต้น

4.1 ขั้นตอนการทดสอบ

เพื่อพิจารณาระบบในหลายๆ แง่มุม ไม่ว่าจะเป็นประสิทธิภาพในการปรับอัตราบิตหรือในการส่ง การทดสอบจึงแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

4.1.1 ทดสอบผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราบิตต่อคุณภาพของสัญญาณ

เริ่มต้นจากการทดลองปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ทั้งสามในการเข้ารหัสวิดีโอตัวอย่าง คือ พารามิเตอร์การควอนไทส์, การกระโดดข้ามเฟรม และการเลือกโหมดเข้ารหัส ซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลักในระบบปรับเปลี่ยนอัตราบิต แล้วสังเกตอัตราบิตที่เปลี่ยนแปลง รวมทั้งคุณภาพของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงในรูปของค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบ-กวนที่พารามิเตอร์การควอนไทส์แต่ละตัวและที่แต่ละเฟรม สำหรับวิดีโอตัวอย่างที่ใช้เป็นหลักในการทดสอบนี้ก็คือ Foreman เนื่องจากเป็นชุดที่มีการเคลื่อนไหวปานกลาง และมีความยาวไม่มากและไม่น้อยจนเกินไป นอกจากนั้นเนื่องจากการปรับเปลี่ยนค่าการกระโดดข้ามเฟรมไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่าอัตราส่วนดังกล่าว การทดสอบในส่วนนี้ จึงใช้การให้คะแนนจากการรับชมวิดีโอ จำนวน 200 เฟรม (ประมาณ 7 วินาที) ของผู้รับชมจำนวนหนึ่ง โดยสมมติฐานที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวมีดังนี้

1. *พารามิเตอร์การควอนไทส์* ซึ่งมีทั้งหมด 31 ตัว การทดสอบจะเปลี่ยนหมายเลขของตัวทำควอนไทส์ที่มีความกว้างของขั้น รวมทั้งจำนวนขั้นการควอนไทส์ต่างๆกัน แล้วสังเกตอัตราบิตที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากเมื่อหมายเลขตัวควอนไทส์มากขึ้น จำนวนขั้นของการทำควอนไทส์จะลดลงในขณะเดียวกัน ขนาดของขั้นก็กว้างขึ้นดังนั้น จะส่งผลกระทบต่ออัตราบิตทำให้อัตราบิตลดลง เมื่อเพิ่มหมายเลขตัวทำควอนไทส์ ในทางกลับกันค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะลดลง เนื่องจากความหยาบของการทำควอนไทส์ทำให้จำนวนบิตที่ใช้ต่อภาพน้อยลง และความคมชัดก็ลดลงด้วย ผลดังกล่าวทำให้เรา

สามารถปรับเปลี่ยนค่านี้ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมกับช่องสัญญาณหรือคุณภาพที่ต้องการได้

2. *การกระโดดข้ามเฟรม* ค่าการกระโดดข้ามเฟรม คือ การเลือกเฟรมที่จะเข้ารหัสแบบข้าม กล่าวคือ ไม่ทำการเข้ารหัสทุกๆ เฟรม ส่งผลให้อัตราเฟรมและอัตราบิตลดลง ดังนั้นการเพิ่มจำนวนเฟรมที่กระโดดข้ามจะทำให้อัตราบิตลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าพารามิเตอร์นี้จะไม่ส่งผลกระทบต่อความคมชัดของภาพเหมือนพารามิเตอร์การควอนไทส์ การกระโดดข้ามเฟรมก็ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพสัญญาณในแง่ของความต่อเนื่องของสัญญาณภาพ เพราะมีเฟรมบางเฟรมหายไป การเคลื่อนไหวของภาพจะไม่ต่อเนื่องเหมือนกับภาพต้นแบบ ดังนั้นพารามิเตอร์นี้จะเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งสำหรับผู้ใช้ที่ต้องการรักษาระดับความคมชัด การทดสอบในส่วนนี้นอกจากจะทำควบคู่กับพารามิเตอร์การควอนไทส์แล้ว ยังประกอบกับการให้คะแนนจากผู้ชมวิดีโอตัวอย่างที่เข้ารหัสด้วยพารามิเตอร์ทั้งสองต่างๆ กัน อีกด้วย
3. *การเลือกโหมดการเข้ารหัส* ค่านี้จะกำหนดอัตราการใช้อินทราเฟรมของสัญญาณวิดีโอชุดหนึ่งๆ อัตราการใช้อินทราเฟรมจะส่งผลโดยตรงต่ออัตราบิต เนื่องจากอัตราบิตของอินทราเฟรมจะสูงมากเมื่อเทียบกับอินเตอร์เฟรมซึ่งใช้เพียงเวกเตอร์การเคลื่อนไหวเป็นข้อมูล ค่านี้จึงมีผลมากต่ออัตราบิตและคุณภาพของสัญญาณเฟรมต่อเฟรม เนื่องจากเฟรมที่เข้ารหัสแบบอินทราจะมีคุณภาพสูงกว่า และทำหน้าที่เป็นเฟรมอ้างอิงของเฟรมถัดๆ ไป ดังนั้นผลการทดสอบในส่วนนี้จะเน้นไปที่อัตราบิตต่อเฟรม ซึ่งทำร่วมกับค่าพารามิเตอร์การ ควอนไทส์ และค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฟรมต่อเฟรม
4. *ชนิดของสัญญาณวิดีโอตัวอย่าง* นอกจากจะทดสอบพารามิเตอร์ทั้งสามกับสัญญาณวิดีโอตัวอย่าง Foreman แล้ว ยังมีการทดสอบผลกระทบของการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่อวิดีโอตัวอย่างที่มีการเคลื่อนไหวต่างๆ กันคือ Table Tennis และ Claire อีกด้วย ผลจากการการเคลื่อนไหวมากน้อยของวิดีโอตัวอย่างจะกระทบต่ออัตราบิตของการเข้ารหัสอินเตอร์-เฟรม เนื่องจาก ประสิทธิภาพของการใช้เวกเตอร์การเคลื่อนไหวจะลดลงทันทีที่ การเคลื่อนไหวภาพมีมาก การทดสอบในส่วนนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบกันระหว่างการเข้ารหัสวิดีโอตัวอย่างทั้งสามทั้งในแง่ของอัตราบิต และอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบ-กวนด้วย

การปรับพารามิเตอร์ทั้งสามจะทำให้การปรับเปลี่ยนอัตราบิตเป็นได้หลากหลายวิธีมากขึ้น การทดสอบในส่วนต่อไปจะเป็นการทดสอบส่วนที่พักข้อมูลชั่วคราวของระบบควบคุมความผิดพลาด ARQ ซึ่งต้องทำงานร่วมกับระบบเข้ารหัสวิดีโอ

4.1.2 ทดสอบขนาดของที่พักข้อมูลชั่วคราวกับจำนวนเฟรมที่สามารถบรรจุได้

ในส่วนนี้เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบจำนวนเฟรมที่สามารถบรรจุได้ ในที่พักข้อมูลชั่วคราวสำหรับสัญญาณวิดีโอที่ผ่านการเข้ารหัสแล้ว ด้วยอัตราบิตที่ต่างกัน ผลการทดสอบที่ได้ทำให้สามารถกำหนดขนาดของที่พักข้อมูลที่เหมาะสม เพื่อรองรับช่วงเวลาการลดทอนทั้งสั้นและยาว เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าว ที่พักข้อมูลชั่วคราวจะต้องรับภาระในการเก็บแพ็กเกตที่ไม่สามารถส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีอัตราบิตผิดพลาดสูงในขณะนั้นได้ นอกจากนั้นยังเป็นการเปรียบเทียบจำนวนบิตที่ใช้สำหรับวิดีโอที่มีอัตราบิตต่างกันด้วย

ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการจำลองช่องสัญญาณลดทอนทางเวลา ที่ใช้ในการทดสอบระบบส่งสัญญาณวิดีโอ พารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนได้ของแบบจำลองจะทำให้แบบจำลองสามารถปรับเปลี่ยนอัตราบิตผิดพลาดในช่วงเวลาลดทอนและนอกช่วงเวลาลดทอนตลอดจนความยาวของการลดทอนได้

4.1.3 ทดสอบส่วนหัวที่ใช้ในระบบ Hybrid ARQ

เนื่องจากระบบ ARQ ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นระบบ ARQ แบบ Hybrid กล่าวคือ มีการใช้ส่วนหัวของระบบแก้ไขความผิดพลาดไปข้างหน้าร่วมด้วย การใช้ส่วนหัวดังกล่าวจะเป็นส่วนหัวแบบ Reed-Solomon [34] ซึ่งจะมีการใช้ส่วนหัวอยู่หลายค่า เช่น RS(15,13) จะใช้ส่วนหัวจำนวน 2 บิต ต่อข้อมูลจำนวน 13 บิต รวมเป็น 15 บิต หรือ RS(63,57) จะใช้ส่วนหัวจำนวน 6 บิต ต่อข้อมูลจำนวน 57 บิต รวมเป็น 63 บิต เป็นต้น จะเห็นว่าการใช้ส่วนหัวหลายรูปแบบนั้นมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน ข้อมูลที่ใช้ส่วนหัวขนาดใหญ่จะทำให้อัตราบิตโดยรวมเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการแก้ไขความผิดลาดก็เพิ่มขึ้นด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้าใช่ส่วนหัวขนาดเล็ก หรือใช้จำนวนบิตน้อยเมื่อเทียบกับจำนวนข้อมูลอัตราบิตจะเพิ่มขึ้นไม่มาก แต่ประสิทธิภาพการแก้ไขความผิดพลาดก็จะน้อยลง ดังนั้นในส่วนนี้จึงจะทำการทดสอบขนาดของส่วนหัวที่เหมาะสมสำหรับช่องสัญญาณลดทอน โดยการเปรียบเทียบระดับที่พักข้อมูลชั่วคราวในขณะใดๆ ของสัญญาณที่ใช้ส่วนหัวขนาดต่างๆ กันในช่องสัญญาณที่มีอัตราบิตผิดพลาดในช่วงลดทอนแบบเรเลย์ ขนาดส่วนหัวที่เหมาะสม จะใช้ความจุของที่พักข้อมูลชั่วคราวไม่มากหรือน้อยจนเกินไป ทั้งนี้เพื่อประสิทธิภาพในการใช้ส่วนหัวด้วย

4.1.4 การทดสอบสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวสำหรับการลดทอนที่มีอัตราบิตผิดพลาดต่างๆกัน

จะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของทั้งการใช้ส่วนหัว ที่ได้จากหัวข้อที่แล้ว และความจุที่จำเป็นต้องใช้ของที่พักข้อมูลชั่วคราวกับอัตราบิตผิดพลาดในช่วงลดทอนค่าต่างๆ ระหว่างร้อยละ 1 ถึง 10 จำนวน 4 ค่า โดยการเปรียบเทียบจำนวนข้อมูลที่อยู่ในที่พักข้อมูล

ชั่วคราวเทียบกับข้อมูลขาเข้าซึ่งสอดคล้องกับแกนเวลา ในที่นี้เราจะถือว่าอัตราการส่งสูงกว่าอัตราข้อมูลขาเข้าประมาณ 5 เท่า ทั้งนี้เนื่องจาก ในมาตรฐานการสื่อสารยุคที่ 3 กำหนดอัตราการส่งสูงขึ้นกว่าเดิมจนถึง 2 Mbps นอกจากนั้นอัตราการเข้ารหัสในมาตรฐานนี้ยังไม่สูงมากเนื่องจากความต้องการตัวประมวลผลที่มีศักยภาพสูงมาก ผลการทดลองจะยืนยันความสามารถของการใช้ส่วนหัว ว่าสามารถทำให้ระดับของข้อมูลในที่พักข้อมูลชั่วคราวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

4.1.5 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ

จะเป็นการทดสอบความสามารถในการส่งสัญญาณวิดีโอใน 2 แง่มุม คือ ความเร็วในการส่งและคุณภาพของสัญญาณวิดีโอ ทางด้านความเร็วจะเป็นการเปรียบเทียบระบบที่นำเสนอกับระบบที่เข้ารหัสแบบที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การเข้ารหัส ทั้งในแบบอัตราบิตสูง และแบบอัตราบิตต่ำ โดยเปรียบเทียบสัญญาณที่ส่งถึงยังผู้รับอย่างถูกต้องเทียบกับสัญญาณขาเข้าของที่พักข้อมูลชั่วคราวในระบบ ARQ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับแกนเวลา ดังนั้นจำนวนสัญญาณที่ถึงผู้รับอย่างถูกต้องที่เวลาใดๆ จะแสดงถึงประสิทธิภาพของการส่งของสัญญาณนั้นๆ การวัดประสิทธิภาพในแง่นี้จะใช้ค่าอัตราเฟรมสูงสุด ซึ่งถ้าค่านี้มากแสดงว่าประสิทธิภาพการส่งมากด้วย โดยความเป็นจริงแล้ววิดีโอตัวอย่างจะแสดงผลแบบ 30 เฟรมต่อวินาที ดังนั้นค่าอัตราเฟรมสูงสุดนั้น แท้จริงแล้วยังขึ้นกับความเร็วในการส่งและการเข้ารหัสของตัวเข้ารหัสด้วย กล่าวคือ อัตราการเข้ารหัส, การส่ง, และการถอดรหัสที่แท้จริงรวมกัน ต้องไม่ต่ำกว่า 30 เฟรมต่อวินาที มิเช่นนั้นวิดีโอที่รับได้จะไม่เป็นแบบเวลาจริง ในแง่ของคุณภาพจะทำการเปรียบเทียบสัญญาณชุดเดิมทางด้านอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณเปรียบเทียบกันเฟรมต่อเฟรม การเปรียบเทียบในแง่นี้นอกจากจะสามารถเปรียบเทียบความคมชัดเฟรมต่อเฟรมแล้วยังสามารถสังเกตความต่อเนื่องของสัญญาณวิดีโอที่มีการปรับเปลี่ยนค่าการกระโดดข้ามเฟรม โดยใช้ค่าความหนาแน่นของเฟรมวิดีโอ ซึ่งคือ จำนวนเฟรมที่แสดงผลจริงต่อจำนวนเฟรมของสัญญาณต้นแบบ ถ้าค่านี้มาก แสดงว่าความต่อเนื่องของวิดีโอก็มีมากเช่นกัน

การทดสอบระบบนั้น นอกจากจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งกับกรณีที่สัญญาณถูกเข้ารหัสด้วยพารามิเตอร์ที่คงที่แล้ว ยังมีการเปรียบเทียบระบบนี้ในสภาวะต่างๆ เช่น เมื่ออัตราบิตผิดพลาดในช่วงเวลาลดทอนเปลี่ยนไป ประสิทธิภาพการส่งจะยังคงเหมือนเดิมหรือไม่ หรืออาจจะเปรียบเทียบระบบ เมื่อการตั้งค่าระดับตัดสินใจเปลี่ยนอัตราบิตที่จุดต่างกันอีกด้วย

การปรับเปลี่ยนอัตราบิตที่นำเสนอจะทำอยู่ 2 แนวทาง คือ การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์ และการปรับเปลี่ยนค่าการกระโดดข้ามเฟรม ทั้งสองแนวทาง

ต่างก็สามารถปรับเปลี่ยนอัตราบิตได้ แต่ก็ให้ผลกระทบต่อสัญญาณภาพแตกต่างกัน ดังนั้นการทดสอบข้างต้นจะกระทำกับทั้งสองแนวทาง เพื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์

4.2 ผลการทดสอบผลกระทบของการเปลี่ยนอัตราบิตต่อคุณภาพของสัญญาณ

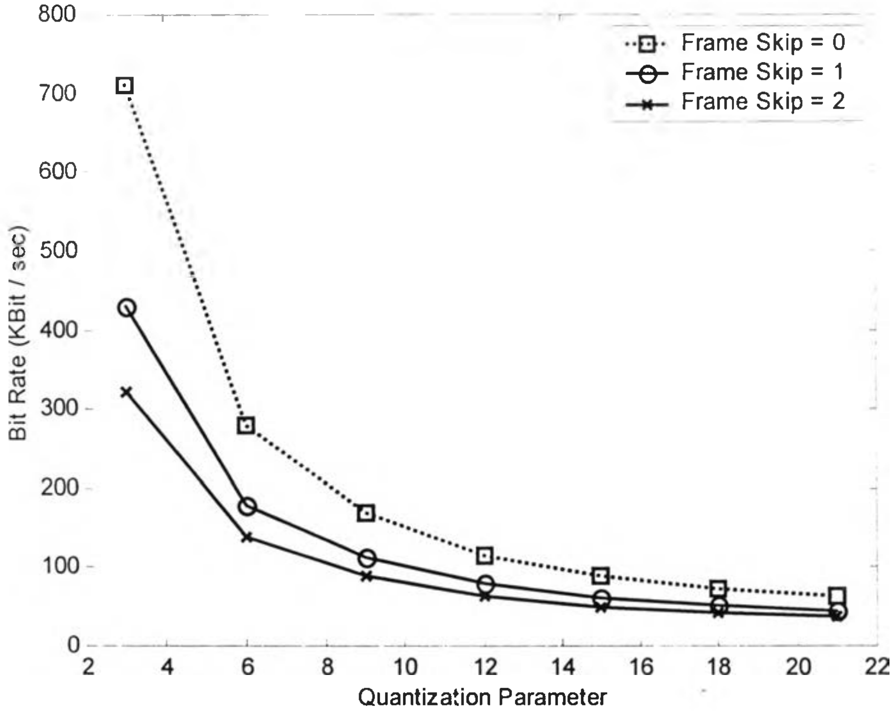
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงอัตราบิตโดยใช้การปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ 3 ตัว

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงอัตราบิตที่เปลี่ยนเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทั้ง 3 ตัว นั่นคือ พารามิเตอร์การควอนไทส์, การกระโดดข้ามเฟรม, และการเลือกโหมดเข้ารหัส

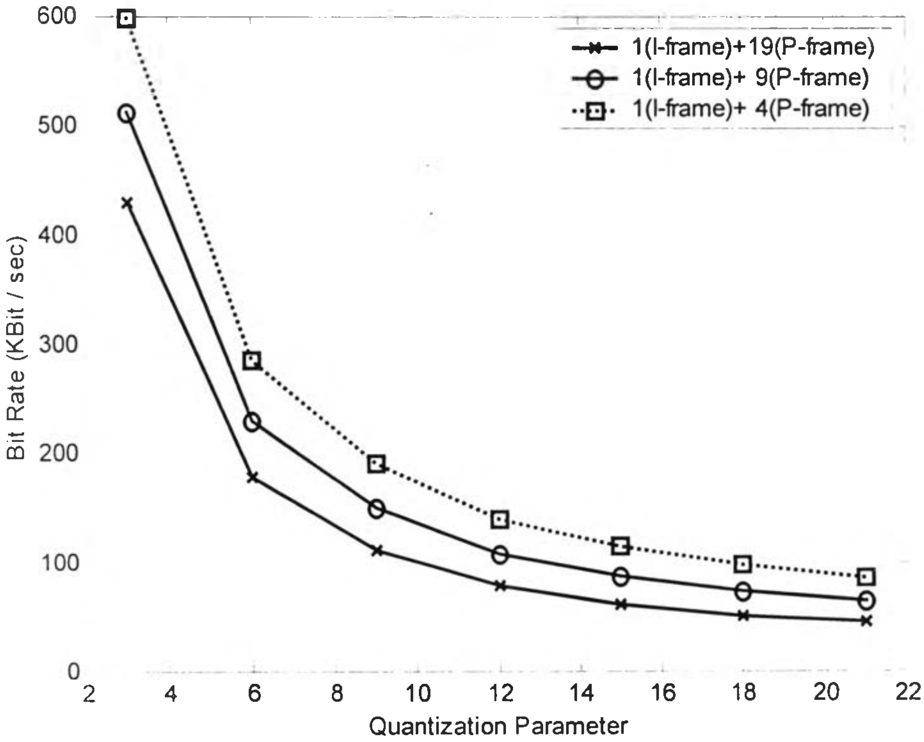
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์กับอัตราบิตแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอตัวอย่าง Foreman จำนวน 20 เฟรม โดยใช้ อินเตอร์เฟรมแบบ P ทั้งหมด ที่ค่าการกระโดดข้ามเฟรม ต่างๆกัน

พิจารณาจากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าอัตราบิตจะลดลงเมื่อพารามิเตอร์การควอนไทส์เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากพารามิเตอร์ดังกล่าวจะบ่งบอกลำดับขั้น หรือความห่างของขั้นของสัญญาณขาออก เมื่อเทียบกับสัญญาณขาเข้า โดยจากรายละเอียดในบทที่ 2 จะเห็นว่าขนาดขั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ส่งผลให้จำนวนบิตที่ใช้ต่อจำนวนข้อมูลคงที่ค่าหนึ่งๆ น้อยลง ทำให้อัตราบิตลดลงดังรูป นอกจากนั้นจะเห็นว่าอัตราบิตจะเปลี่ยนแปลงมากในช่วงที่ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 4 ถึง 12 เนื่องจากในบริเวณนี้มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดขั้นในทุกๆขั้นของสัญญาณ ในขณะที่บริเวณอื่นๆ ของขั้นที่อยู่สูงจะถูกรวมอยู่เป็นขั้นเดียวกัน รายละเอียดของขั้นอยู่ในตารางที่ 2.2 ดังนั้นการเลือกพารา-มิเตอร์อยู่ในช่วงนี้จะทำให้อัตราบิตสามารถเปลี่ยนแปลงได้มาก ในขณะที่คุณภาพอยู่ในระดับค่อนข้างคงที่ นอกจากนั้นเมื่อเปรียบเทียบอัตราบิตระหว่างค่าการกระโดดข้ามเฟรมจะเห็นว่าอัตราบิตจะมีค่าลดลงในระดับหนึ่ง ดังนั้นเพื่อให้ได้ภาพที่ยังคงคมชัดอยู่ บางครั้งเราจึงจะใช้ค่านี้ลดอัตราบิตซึ่งจะมีผลต่อความต่อเนื่องมากกว่าที่จะใช้พารามิเตอร์การควอนไทส์ซึ่งกระทบต่อความคมชัดของภาพ

พิจารณาโหมดการเข้ารหัสแบบอินทรากับอินเตอร์ โหมดทั้งสองก็จะกระทบต่ออัตราบิตเช่นเดียวกัน ดังในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอตัวอย่าง Foreman จำนวน 20 เฟรม โดยมีการกระโดดข้ามเฟรมเป็น 1 และพารามิเตอร์การควอนไทส์เป็น 9 การเปลี่ยนโหมดการเข้ารหัสทุกๆ 20 เฟรม, 10 เฟรม, และ 5 เฟรม ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์กับอัตราบิต สำหรับมาตรฐาน H.263 (Foreman) ที่อัตราการกระโดดข้ามเฟรมต่างๆ



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์กับอัตราบิต สำหรับมาตรฐาน H.263 (Foreman) ที่อัตราการเข้ารหัสเฟรมอ้างอิงต่างๆ

เช่นเดียวกับรูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์นี้ได้จากการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอตัวอย่าง Foreman จำนวน 20 เฟรม จากรูปจะเห็นว่าในกรณีที่เลือกโหมดการเข้ารหัสแบบที่มีการเข้ารหัสภายในทุก ๆ 5 เฟรม จะทำให้อัตราบิตสูงกว่าในกรณีที่ใช้ การเข้ารหัสอินทราเฟรมทุกๆ 10 เฟรม ทั้งนี้เนื่องจากการเข้ารหัสอินทราเฟรมจะต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากกว่ากรณีของอินเตอร์เฟรม ซึ่งต้องการเฉพาะข้อมูลของเวกเตอร์การเคลื่อนไหว อย่างไรก็ตามการเข้ารหัสอินทราเฟรมจะมีผลดีเมื่อเฟรมก่อนหน้าเกิดความผิดพลาดขึ้น ซึ่งถ้าทำการเข้ารหัสเฟรมปัจจุบันแบบอินเตอร์เฟรมจะต้องอาศัยข้อมูลอ้างอิงจากเฟรมก่อนหน้านั้น ทำให้ความผิดพลาดมากขึ้น การเปลี่ยนโหมดมาเป็นอินทราเฟรมจะสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้

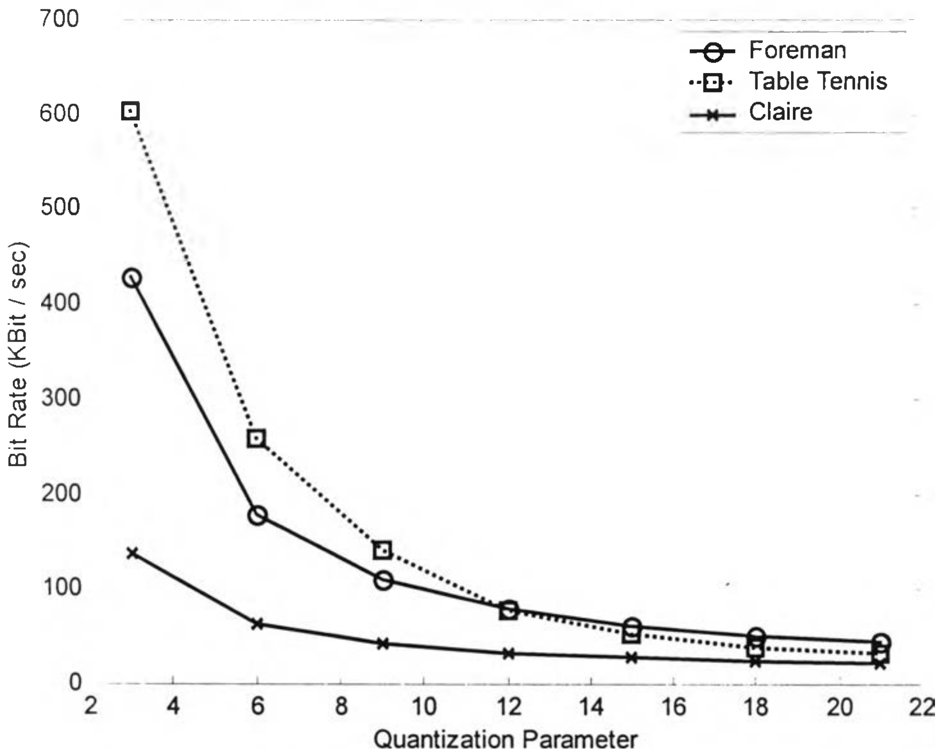
เมื่อทำการเปรียบเทียบการเข้ารหัสตัวอย่างสัญญาณวิดีโอที่มีการเคลื่อนไหวต่างๆ กันจะได้รูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอตัวอย่างที่มีลักษณะการเคลื่อนไหวต่างกัน 3 แบบ จำนวน 20 เฟรม โดยมีการกระโดดข้ามเฟรมเป็น 1 และพารามิเตอร์การควอน-ไทส์เป็น 9 จะเห็นว่าวิดีโอตัวอย่างที่มีบางส่วนมีการเคลื่อนไหวมาก เช่น Table Tennis เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การควอนไทส์จะได้อัตราบิตที่เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงกว้าง ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพของการประมาณการเคลื่อนที่ลดลงเมื่อสัญญาณวิดีโอที่อยู่ในเฟรมติดกันมีลักษณะต่างกันมาก ทำให้เมื่อเราเพิ่มความกว้างของขั้นในการทำควอน-ไทส์ จะมีข้อมูลในรายละเอียดที่หายไปเมื่อเทียบกับในวิดีโอตัวอย่าง Claire ซึ่งการเคลื่อนไหวมีเพียงส่วนหัว อีกทั้งพื้นหลังยังไม่มีการเปลี่ยนแปลง ประสิทธิภาพของการใช้อิน-เตอร์เฟรมก็จะมีสูงกว่า ทำให้สามารถบีบอัดข้อมูลได้มากกว่า อัตราบิตจะเปลี่ยนแปลงไม่มาก และอยู่ในระดับต่ำกว่าวิดีโอตัวอย่างอื่น ดังนั้นการออกแบบระบบเข้ารหัสนั้นจะต้องคำนึงถึงเป้าหมายในการนำไปใช้ นั่นคือ ลักษณะของวิดีโอที่จะเข้ารหัสนั่นเอง

จากผลการทดลองจะเห็นว่า พารามิเตอร์ทั้งสามรวมทั้งชนิดของสัญญาณวิดีโอที่จะเข้ารหัสนั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราบิตของวิดีโอที่เข้ารหัสแล้วในแง่ต่างๆ โดยค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์จะทำการลดและเพิ่มความละเอียดภายในเฟรม ส่วนค่าการกระโดดข้ามเฟรมจะทำการตัดออกหรือเพิ่มความถี่ของเฟรมเข้ารหัส ซึ่งถือได้ว่าทำจากภายนอก เป็นต้น ส่วนถัดไปจะกล่าวถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ที่มีผลกับอัตราบิต ต่อคุณภาพของสัญญาณวิดีโอที่ถูกเข้ารหัส

4.2.2 การปรับเปลี่ยนอัตราบิตกับคุณภาพของสัญญาณ

เนื่องจากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งสามจะมีผลกระทบต่ออัตราบิต ในส่วนนี้จะพิจารณาถึงรายละเอียดของสัญญาณในด้านต่างๆ ที่ถูกกระทบ เนื่องจากการปรับพารามิเตอร์ต่างๆ โดยในที่นี้เราจะเปรียบเทียบผลโดยใช้ค่ากำลังสัญญาณต่อสัญญาณ

รบกวนของส่วนประกอบความสว่าง (Luminance Component) ซึ่งสอดคล้องกับความคมชัดของภาพ เป็นหลักดังนี้



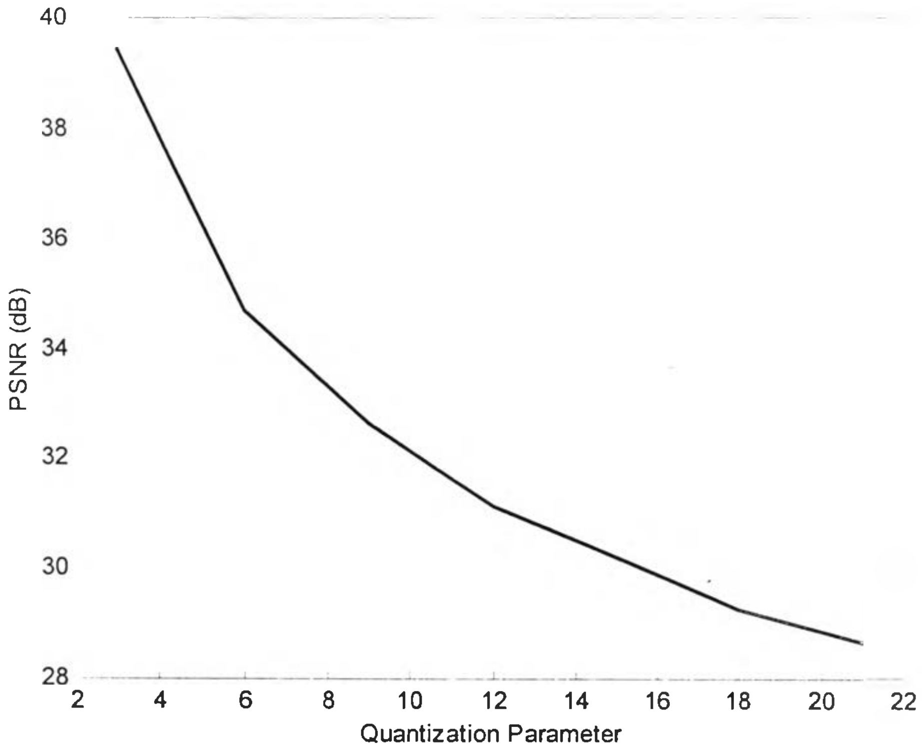
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์กับอัตราบิต สำหรับมาตรฐาน H.263 ระหว่างวิดีโอตัวอย่างที่ต่างกัน

- ค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์

ดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 ค่าพารามิเตอร์นี้จะบ่งบอกถึงความกว้างของระดับชั้น ในการควอนไทส์สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการเข้ารหัส DCT ดังนั้นการเลือกพารามิเตอร์นี้ให้เหมาะสมจะส่งผลดีต่อคุณภาพของสัญญาณด้านความคมชัดด้วย เนื่องจากระดับชั้นที่แคบกว่าจะทำให้ข้อมูลขาออกมีความละเอียดกว่า แต่ปริมาณข้อมูลก็มากกว่าดังความสัมพันธ์กับอัตราบิตในหัวข้อที่แล้ว ความสัมพันธ์ของค่ากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของภาพเคลื่อนไหว เมื่อทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์นี้ เป็นไปตามรูปที่ 4.4

จากรูปจะเห็นว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ นั่นคือเมื่อค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์เพิ่มขึ้น ซึ่งก็หมายถึงความกว้างของระดับชั้นการทำควอนไทส์มากขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนน้อยลง นั่นก็หมายความว่า ความคมชัดของสัญญาณภาพก็จะลดลงด้วย เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ทั้งสองในข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า การเลือกอัตราบิตให้เหมาะสมในส่วนของค่าพารมิเตอร์นี้นั้นจะส่งผลต่อความคมชัดของสัญญาณภาพ ดังนั้นในการปรับเปลี่ยนอัตราบิตจึงต้องมีการแลกเปลี่ยน

คุณภาพในการคมชัดกับคุณภาพของสัญญาณในด้านอื่นๆ เพื่อให้ภาพรวมของสัญญาณยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์กับค่ากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับมาตรฐาน H.263 (Foreman)

- ค่าการกระโดดข้ามเฟรม

เนื่องจากค่านี้หมายถึงการเลือกเข้ารหัสเป็นบางเฟรม กล่าวคือจะเข้ารหัสแบบกระโดดข้าม การเข้ารหัสแบบนี้จะละเลยข้อมูลจากบางเฟรมเพื่อให้ข้อมูลสัญญาณขาออกต่อหน่วยเวลามีขนาดลดลง ส่งผลให้อัตราบิตลดลง อย่างไรก็ตามการที่ค่านี้มีขนาดเพิ่มขึ้นจะทำให้เฟรมที่ถูกละเลยมีมากขึ้น ความต่อเนื่องของภาพก็จะลดลง ทำให้คุณภาพของสัญญาณที่ได้ต่ำลง เนื่องจากคุณภาพที่ต่ำลงไม่ได้ขึ้นกับความละเอียดของลำดับขั้นการควอนไทส์ ความคมชัดของสัญญาณจึงไม่ลดลงแต่อย่างใด แต่จะมีผลต่อความต่อเนื่องเป็นอย่างมากโดยเฉพาะ สัญญาณวิดีโอที่มีการเคลื่อนไหวสูง จะเห็นความผิดพลาดได้ชัดเจนมากขึ้น

การปรับเปลี่ยนค่านี้จะมีประโยชน์ต่อการปรับเปลี่ยนอัตราบิตหรือขนาดข้อมูลที่ใช้ต่อเฟรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากลักษณะของวิดีโอที่ใช้ในโทรศัพท์วิดีโอหรือการประชุมทางวิดีโอจะเป็นภาพที่มีการเคลื่อนไหวน้อย โดยเน้นเฉพาะส่วนหัวกับไหล่ จึงสังเกตการกระโดดข้ามเฟรมได้ยากขึ้น หรืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้

จากการทดลองวัดคุณภาพของสัญญาณจากการสังเกตจากผู้สังเกตจำนวน 11 คน แบ่งเป็น ชาย 5 คนและหญิง 6 คน อายุอยู่ระหว่าง 20 ถึง 25 ปี ของสัญญาณวิดีโอForeman ภาพสี ที่เข้ารหัสด้วยพารามิเตอร์การควอนไทส์และการกระโดดข้ามเฟรมต่างๆกัน 9 ชุด โดยคะแนนจะเทียบเป็นร้อยละของคุณภาพสัญญาณเปรียบเทียบกับสัญญาณก่อนเข้ารหัส จะได้ผลการให้คะแนนในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คะแนนจากการสังเกตวิดีโอที่เข้ารหัส

ตามมาตรฐาน H.263 ด้วยพารามิเตอร์ต่างๆกัน

สัญญาณหมายเลข	ตัวควอนไทส์	การกระโดดข้ามเฟรม	ชาย(%)	หญิง(%)	รวม(%)
1	5	0	88.00	81.67	84.55
2	5	1	76.00	72.50	74.09
3	5	2	65.00	66.67	65.91
4	9	0	79.00	65.00	71.36
5	9	1	70.00	49.17	58.64
6	9	2	60.00	40.00	49.09
7	13	0	68.00	40.00	52.73
8	13	1	58.00	25.83	40.46
9	13	2	47.00	16.67	30.46

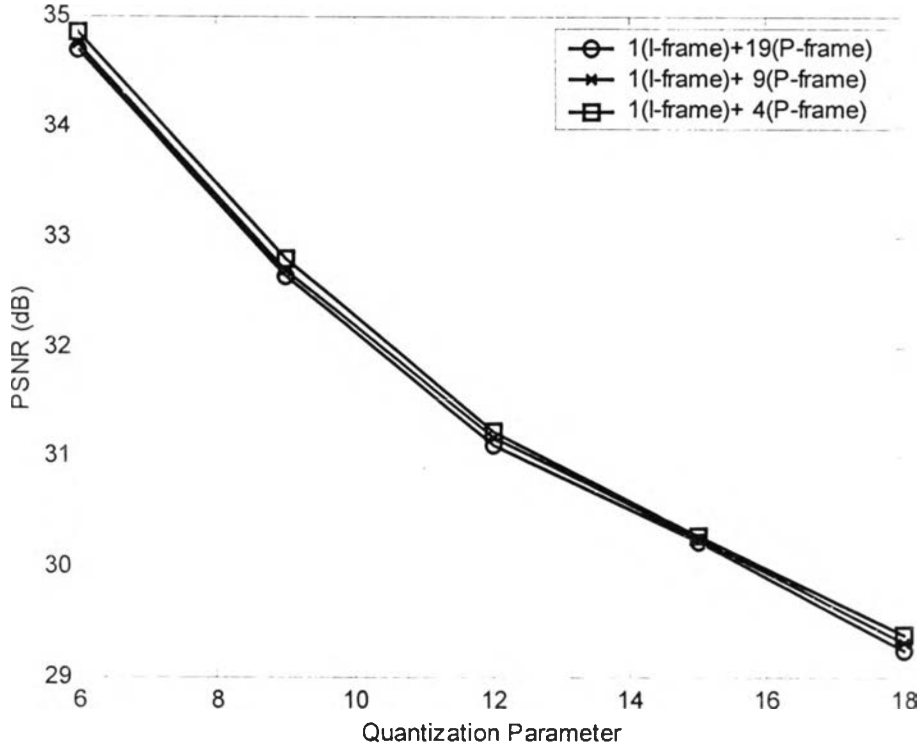
จะเห็นว่า คุณภาพที่ได้รับการประเมินจากการเปลี่ยนแปลงตัวควอนไทส์กับการกระโดดข้ามเฟรมโดยรวม ให้ค่าคะแนนที่ไม่ต่างกันมาก สังเกตได้จากเมื่อตัวควอนไทส์เปลี่ยนจาก 5 เป็น 9 นั่นคือ ขนาดของขั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบกับความคมชัด กับเมื่อเพิ่มระดับการกระโดดข้ามเฟรม ผลที่ได้ไม่ต่างกันมาก กล่าวคือผลของความคมชัดสามารถสังเกตเห็นได้พอๆกับผลของการกระโดดข้ามเฟรม

พิจารณาการรับรู้ของชายกับหญิงจะเห็นว่า ในกรณีของชาย การเปลี่ยนแปลงตัวควอนไทส์มีผลต่อการรับรู้น้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงค่าการกระโดดข้ามเฟรม หมายความว่า ความคมชัดมีผลน้อยกว่าความต่อเนื่องของภาพสำหรับชาย ในทางตรงกันข้ามสำหรับหญิง ผลจะออกมาตรงข้ามกัน สังเกตจากคะแนนที่ลดลงจากร้อยละ 81.667 เป็น 72.500 ในกรณีของการกระโดดข้ามเฟรมและ 65.000 ในกรณีของตัวควอนไทส์ นั่นคือความคมชัดของภาพมีผลต่อการรับรู้ของหญิงมากกว่าความต่อเนื่องของภาพ ดังนั้นการที่ระบบสามารถเลือกปรับค่าอัตราบิตได้จากค่าทั้งสอง จึงเป็นการยืดหยุ่นต่อการรับรู้ของผู้ใช้มาก

กว่าใช้อย่างใดอย่างหนึ่ง นอกจากนั้นระบบที่สามารถปรับคุณลักษณะของสัญญาณได้ จะสามารถใช้ช่องสัญญาณได้สอดคล้องกับลักษณะบริการเช่น บางครั้งผู้ใช้ต้องการความคมชัด การปรับอัตราบิตก็จะใช้การกระโดดข้ามเฟรมเป็นหลัก ในทางตรงกันข้ามถ้าผู้ใช้ต้องการความต่อเนื่องของภาพ ระบบก็จะใช้การเปลี่ยนตัวควอนไทส์เป็นหลักนั่นเอง

- การเลือกเฟรมอ้างอิง

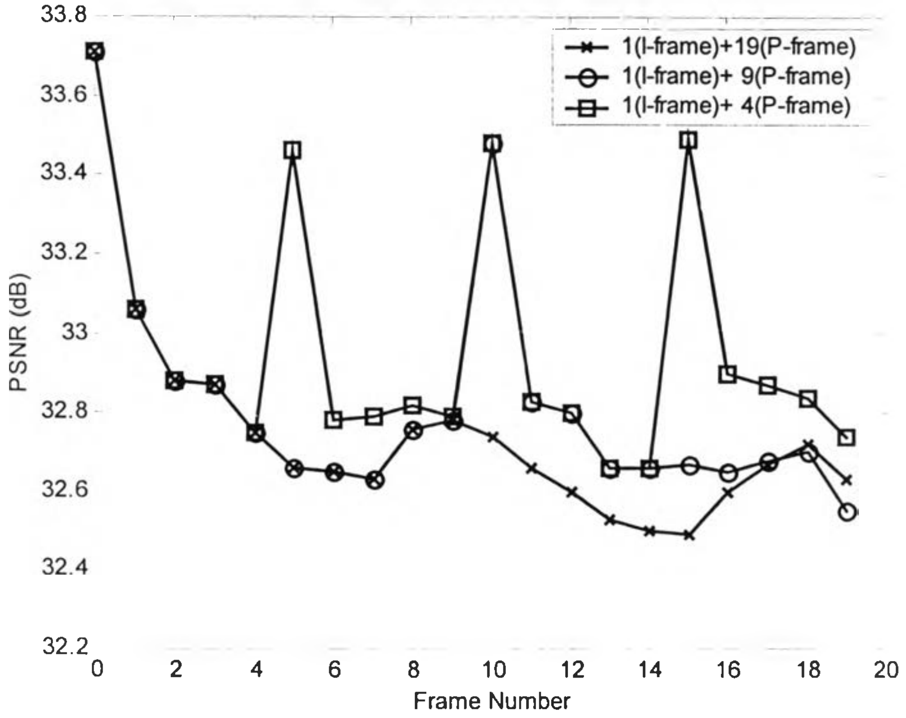
ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การเลือกโหมดการเข้ารหัส ว่าจะเป็นการเข้ารหัสแบบอินเตอร์เฟรมหรืออินทราเฟรมมีผลต่ออัตราบิตของการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลกระทบที่มีต่อความคมชัดของสัญญาณเมื่อทำการเลือกโหมดการเข้ารหัสต่างๆกัน ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอตัวอย่าง Foreman จำนวน 20 เฟรม โดยไม่มีการกระโดดข้ามเฟรมและพารามิเตอร์การควอนไทส์เป็นหมายเลข 9 การเปลี่ยนโหมดการเข้ารหัสทุกๆ 20 เฟรม, 10 เฟรม, และ 5 เฟรมตามลำดับ



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์ กับค่ากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับมาตรฐาน H.263 (Foreman) ที่อัตราการเข้ารหัสเฟรมอ้างอิงต่างๆ กัน

จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนโดยรวมทุกๆ เฟรมของสัญญาณที่มีการเข้ารหัสแบบเปลี่ยนโหมดมีค่าพอๆ กันทั้งนี้เนื่องจากจำนวนของอินทราเฟรมเมื่อเทียบกับจำนวนเฟรมทั้งหมด มีจำนวนน้อย ทำให้ผลที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก แต่

เมื่อพิจารณาความเปลี่ยนแปลงเป็นเฟรมๆ ไปดังรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นการติดตามค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเป็นเฟรมๆ ทั้งหมด 50 เฟรมของการเข้ารหัสที่มีการเปลี่ยนโหมด จะพบว่า ในเฟรมที่เปลี่ยนมาเข้ารหัสแบบอินทราเฟรม คุณภาพของสัญญาณก็จะดีขึ้นอย่างมาก ซึ่งในที่นี้เฟรมที่มีค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงมากเป็นพิเศษก็คือ เฟรมที่เข้ารหัสแบบอินทราเฟรมนั่นเอง เมื่อกลับมาเข้ารหัสแบบอินเตอร์เฟรมอีกครั้งยังให้ภาพที่มีคุณภาพสูง กว่าในกรณีที่เฟรมที่แล้วเป็นอินเตอร์เฟรม สังเกตได้จากเฟรมที่ 11 ของสัญญาณทั้งสาม การที่ได้ผลออกมาอย่างนี้ เนื่องจากอินเตอร์เฟรมนั้นจะไม่อาศัยข้อมูลจากเฟรมที่แล้ว ซึ่งบางครั้งเกิดจากการประมาณอย่างต่อเนื่องมาแล้วหลายเฟรม ความคลาดเคลื่อนจึงมีมาก นอกจากนั้นยังทำการเข้ารหัสจากเฟรมที่เป็นต้นแบบ ทำให้ค่าความคมชัดนั้นสูงกว่าอินทราเฟรม นอกจากนั้นการใช้อินทราเฟรมอย่างถูกวิธีจะทำให้เราได้ความคมชัดกลับมา เมื่อข้อมูลบางส่วนขาดหายไป กล่าวคือการใช้อินทราเฟรมอย่างถูกวิธีจะช่วยแก้ปัญหาการสูญหายของข้อมูลด้วย



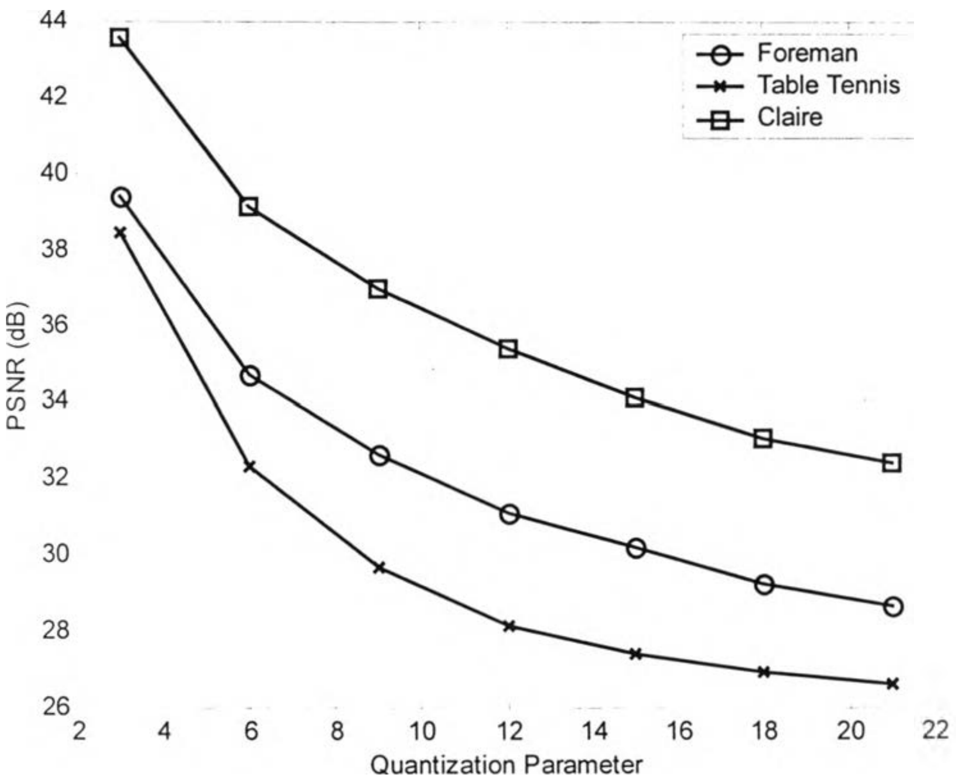
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างหมายเลขเฟรม
กับค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน
ในแต่ละเฟรมเมื่ออัตราการเข้ารหัสเฟรมอ้างอิงต่างกัน

สำหรับการเปรียบเทียบคุณภาพความคมชัดของสัญญาณวิดีโอที่มีลักษณะการเคลื่อนไหวต่างกันจะเป็นรูปที่ 4.7 จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณวิดีโอตัวอย่างที่มีการเคลื่อนไหวน้อยอย่าง Claire จะมีค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของการเข้ารหัสสูงกว่าสัญญาณที่มี

การเคลื่อนไหวสูงกว่า ทั้งๆ ที่ อัตราบิตของการเข้ารหัสต่ำกว่า ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากส่วนใหญ่ของภาพจะเป็นสีพื้นและมีการเคลื่อนไหวน้อย ดังนั้นการประมาณการเคลื่อนไหวจะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง ความผิดพลาดจากการเข้ารหัสจึงเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อเทียบกับในกรณีของภาพที่มีการเคลื่อนไหวสูงทั้งพื้นหลัง และทั้งวัตถุความผิดพลาดจากการประมาณการเคลื่อนไหวจะส่งผลให้ค่ากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งหมายถึงความคมชัดของภาพลดลง

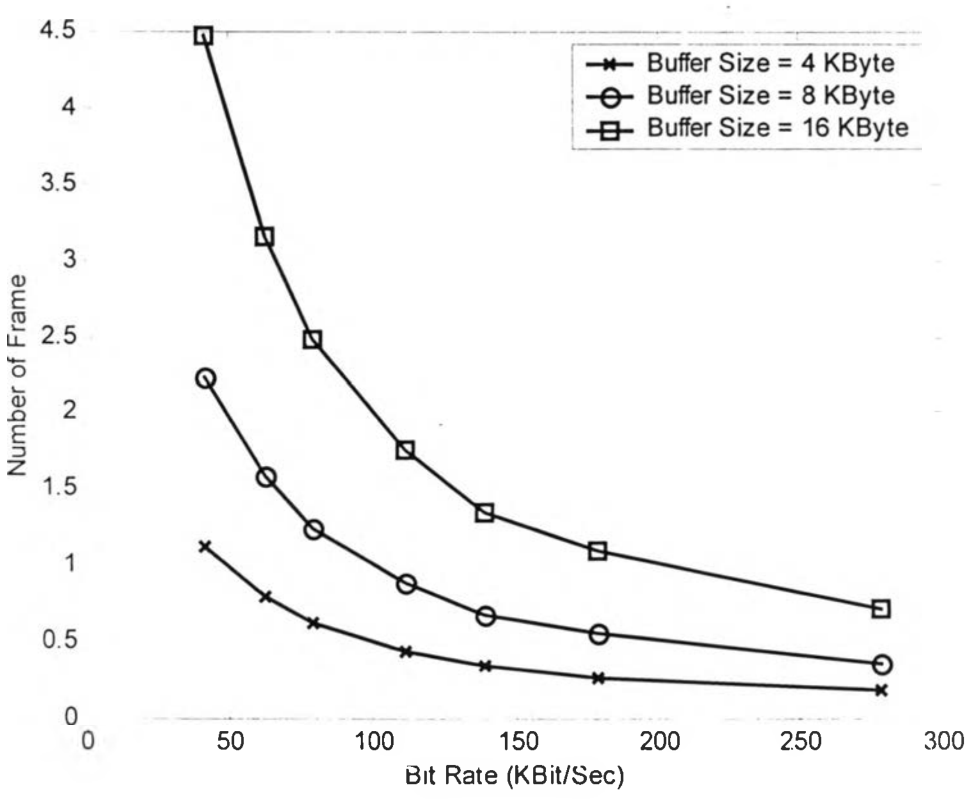
4.3 ขนาดของที่พักข้อมูลชั่วคราวกับจำนวนเฟรมที่สามารถบรรจุได้

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น การปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ในการเข้ารหัสทั้ง 3 ตัว ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสัญญาณในด้านต่างๆ และขนาดข้อมูลที่ใช้ ในส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ถึงจำนวนเฟรมของสัญญาณวิดีโอที่สามารถบรรจุลงในที่พักข้อมูลชั่วคราวขนาดต่างๆ เพื่อประเมินขนาดที่เหมาะสม สำหรับการใช้งานในช่องสัญญาณที่มีการลดทอน ซึ่งอัตราความผิดพลาดสูงเป็นช่วงๆ ที่อัตราบิตต่างๆ กัน พิจารณา รูปที่ 4.8



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การควอนไทส์กับค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละเฟรมสำหรับมาตรฐาน H.263 สำหรับวิดีโอตัวอย่างต่างกัน

จากรูปจะเห็นว่าขนาดของที่พักข้อมูลชั่วคราวมีความสำคัญต่อระบบมาก เพราะระบบจะทำการบรรจุข้อมูลที่กำลังจะส่งลงในที่พักข้อมูลดังกล่าวก่อนที่จะส่ง จนกว่าจะได้รับสัญญาณการรับที่ถูกต้องจากทางด้านรับ ข้อมูลจึงถูกลบออกไปในช่วงเวลาปกติความจุที่ต้องการในระบบดังกล่าวอาจจะไม่มาก เนื่องจากช่องสัญญาณมีความผิดพลาดต่ำ สัญญาณจึงมักไปถึงอย่างถูกต้อง ข้อมูลตกค้างจึงน้อย แต่ในช่วงเวลาที่ช่องสัญญาณมีความผิดพลาดสูงความต้องการดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้าความจุที่มีไม่เพียงพอ แพ็กเกตของข้อมูลสัญญาณวิดีโอก็มีโอกาสที่จะสูญหายได้ง่าย ดังนั้นถ้าการเข้ารหัสอยู่ในโหมดที่อัตราบิตสูงที่พักข้อมูลที่มีขนาดจำกัดจะสามารถบรรจุสัญญาณได้เป็นจำนวนเฟรมไม่มาก ในทางตรงกันข้ามถ้าเข้ารหัสในโหมดที่อัตราบิตต่ำจะแก้ปัญหาดังกล่าวได้ คือ จะสามารถบรรจุในที่พักข้อมูลขนาดเท่ากันได้จำนวนเฟรมมากกว่า แต่คุณภาพก็จะต่ำลง ดังนั้นระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนอัตราได้ตามสถานการณ์ความผิดพลาดของช่องสัญญาณจะทำให้ผู้รับได้รับสัญญาณที่มีอัตราบิตสูงที่สุดเท่าที่ช่องสัญญาณจะรองรับได้นั่นเอง



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราบิตกับจำนวนเฟรม ที่สามารถบรรจุได้ในที่พักข้อมูลชั่วคราวของระบบ ARQ ขนาดต่างๆ

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเข้ารหัส
เพื่อให้ได้อัตราบิตค่าต่างๆ ในรูปที่ 4.8

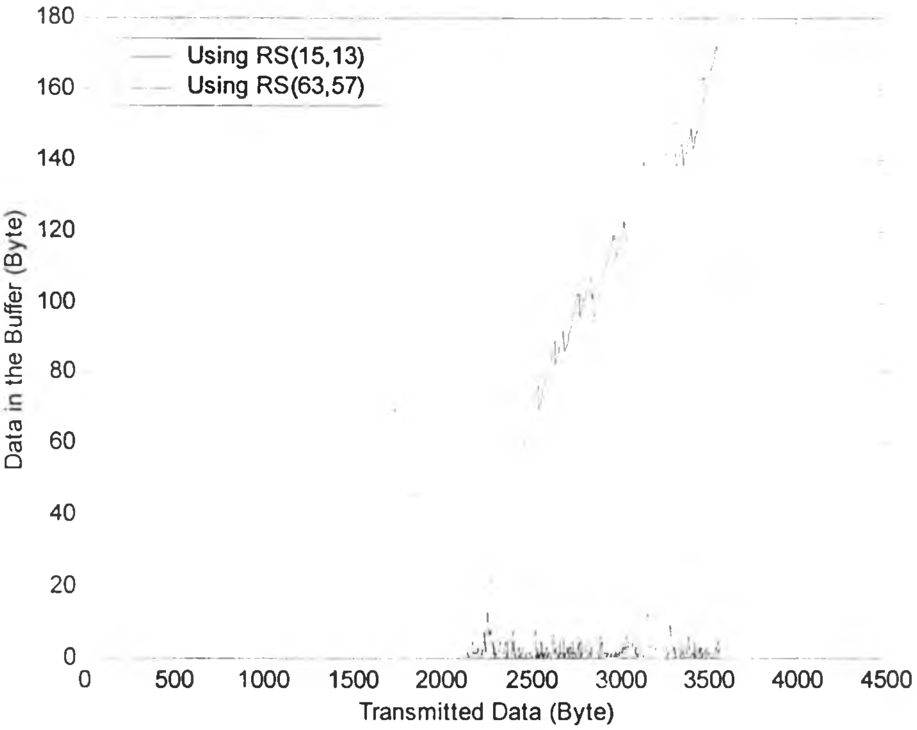
พารามิเตอร์การควอนไทส์	ค่าการกระโดดข้ามเฟรม	อัตราบิตที่ได้รับ (Kbps)	ขนาดข้อมูล (Byte)
18	2	41.84	3661
15	1	62.15	5179
12	1	79.09	6591
9	1	111.74	9312
6	2	138.95	12158
6	1	178.72	14893
6	0	278.57	23214

ในส่วนถัดไปจะเป็นการทดสอบส่วนหัวที่เหมาะสมและสภาพที่พักข้อมูลชั่วคราวของระบบควบคุมความผิดพลาดที่ใช้ ในช่วงเวลาลดทอนที่มีอัตราบิตผิดพลาดต่างๆ จากนั้นจะทดสอบสมรรถนะด้านความเร็ว, คุณภาพ เมื่อทำการส่งวิดีโอในช่องสัญญาณที่มีการลดทอนในช่วงสั้น-ยาว และมีอัตราบิตผิดพลาดช่วงลดทอนต่างๆกัน รายละเอียดของการจำลองอยู่ในภาคผนวก ค.

4.4 ส่วนหัวที่ใช้ในระบบ Hybrid ARQ

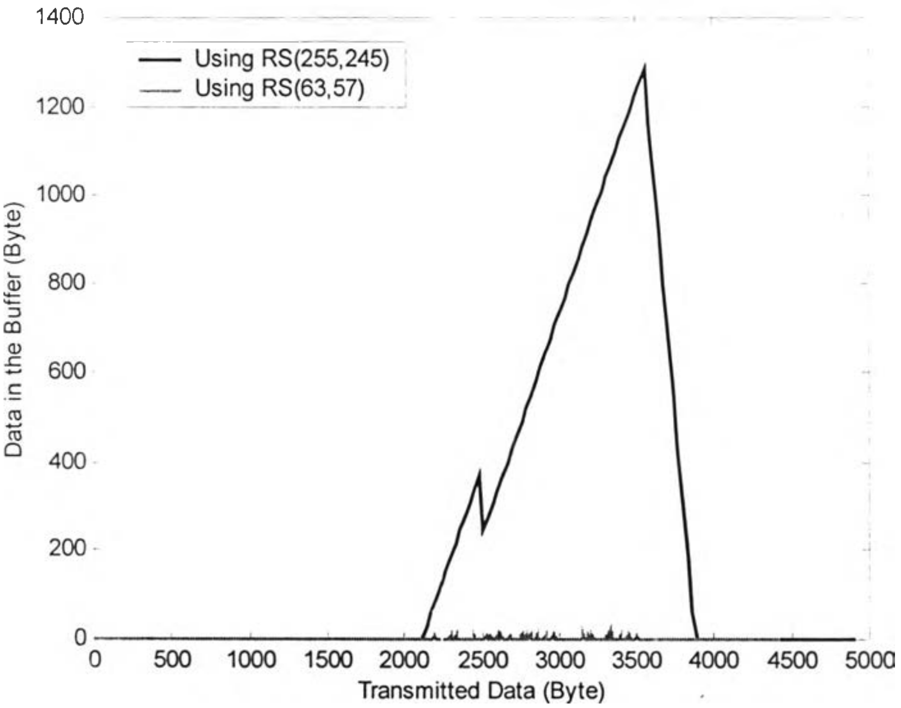
ระบบส่งสัญญาณวิดีโอที่จะใช้ในวิทยานิพนธ์จะเป็นระบบ ARQ ซึ่งจะใช้ส่วนหัวแบบ Reed-Solomon จำนวนหนึ่งเพื่อแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดเพียงเล็กน้อย ส่งผลให้ระบบไม่ต้องทำการส่งแพ็กเกตดังกล่าวใหม่ ในช่วงเวลาที่ความผิดพลาดในช่องสัญญาณมีไม่มาก ในส่วนนี้เราจึงทำการทดสอบเพื่อหาขนาดของส่วนหัวที่เหมาะสมสำหรับอัตราบิตผิดพลาดที่สอดคล้องกับการลดทอนแบบเรเลย์ ซึ่งนำมาจาก [34] พิจารณารูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวที่ใช้ในการส่งสัญญาณวิดีโอผ่านช่องสัญญาณที่มีอัตราบิตผิดพลาดเป็น 0.1727 ซึ่งมากกว่าการลดทอนแบบเรเลย์ในช่วงเวลาลดทอน และ 0.005 ซึ่งน้อยกว่าการลดทอนแบบเรเลย์ในช่วงเวลาอื่นๆ ระหว่างบิตที่ 17100 กับบิตที่ 28500 ซึ่งอยู่ในช่วงกลางของสัญญาณวิดีโอและสอดคล้องกับระยะเวลาการเกิดลดทอนแบบสั้น คือประมาณ 6.15 มิลลิวินาที ภายใต้อัตราการส่งตามมาตรฐาน IMT-2000 คือ 2 Mbps ระหว่างการใช้ส่วนหัวจำนวน 6 บิตต่อสัญญาณจำนวน 57 บิต กับการใช้ส่วนหัวจำนวน 2 บิต ต่อสัญญาณจำนวน 13 บิต และรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวที่ใช้ในการส่งสัญญาณวิดีโอผ่านช่องสัญญาณที่มีอัตราบิตผิดพลาดในช่วงเวลาลดทอนในช่วงเวลาเดียวกันเป็น 0.0769 ซึ่งอยู่ในช่วงของการลดทอนแบบเรเลย์ และ 0.005 ในช่วงเวลาอื่นๆ ระหว่างการใช้ส่วนหัวจำนวน 10 บิต ต่อสัญญาณจำนวน 255 บิต กับการใช้ส่วนหัวจำนวน 6 บิต ต่อสัญญาณจำนวน 57 บิต อัตราการส่งสูงกว่าอัตราการเข้ารหัสประมาณ 5 เท่าตัว จะเห็นว่ารูปทั้งสองมีลักษณะคล้ายกัน คือระดับของข้อมูลในที่พักข้อมูลชั่วคราวใน

กรณีการใช้ส่วนหัวน้อยกว่า จะมีระดับสูงกว่า นอกจากนั้น ยังเป็นการยากที่จะส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายในช่วงที่เกิดการลดทอน สังเกตได้จากรอยหยักของกราฟ ซึ่งแสดงว่ามีข้อมูลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่สามารถผ่านไปได้ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ขนาดของส่วนหัวที่ใช้ ควรจะสอดคล้องกับอัตราบิตผิดพลาดในช่วงลดทอน นั่นคือ อัตราบิตผิดพลาดในช่องสัญญาณจะเป็นข้อมูลที่ทำให้ระบบสามารถตัดสินใจใช้ส่วนหัวที่เหมาะสม เนื่องจากการเพิ่มส่วนหัวให้กับข้อมูลเป็นการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ต้องส่ง ดังนั้นระบบจึงต้องเลือกส่วนหัวที่น้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถยอมรับได้ในระบบ จะเห็นว่าในกรณีของช่องสัญญาณที่มีความผิดพลาดมาก คือ รูปที่ 4.9 ระบบควรจะใช้ส่วนหัวจำนวน 6 บิต ต่อจำนวนข้อมูล 57 บิต เนื่องจากข้อมูลที่ตกค้างในที่พักข้อมูลชั่วคราวอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ในขณะที่ส่วนหัวแบบ 2 บิต ต่อข้อมูลจำนวน 13 บิต จะทำให้ใช้ส่วนหัวมากเกินความจำเป็น



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวในช่วงเวลาลดทอน ที่มีอัตราบิตผิดพลาดเป็น 0.1727 ของข้อมูลที่มีความยาวส่วนหัวต่างกัน

พิจารณาช่องสัญญาณลดทอนที่มีความผิดพลาดระหว่างลดทอนอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.1 จะอยู่ในรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นว่าในกรณีนี้ จำนวนส่วนหัว 10 บิต สำหรับข้อมูลจำนวน 245 บิต สามารถรองรับอัตราบิตผิดพลาดในช่วงนี้ได้ อีกทั้งยังใช้ส่วนหัวได้คุ้มค่าที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้ส่วนหัวแบบนี้ อัตราข้อมูลที่เพิ่มขึ้นสำหรับข้อมูลที่ถูกเพิ่มส่วนหัวอยู่ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวในช่วงเวลาลดทอน ที่มีอัตราบิตผิดพลาดเป็น 0.0769 ของข้อมูลที่มีความยาวส่วนหัวต่างกัน

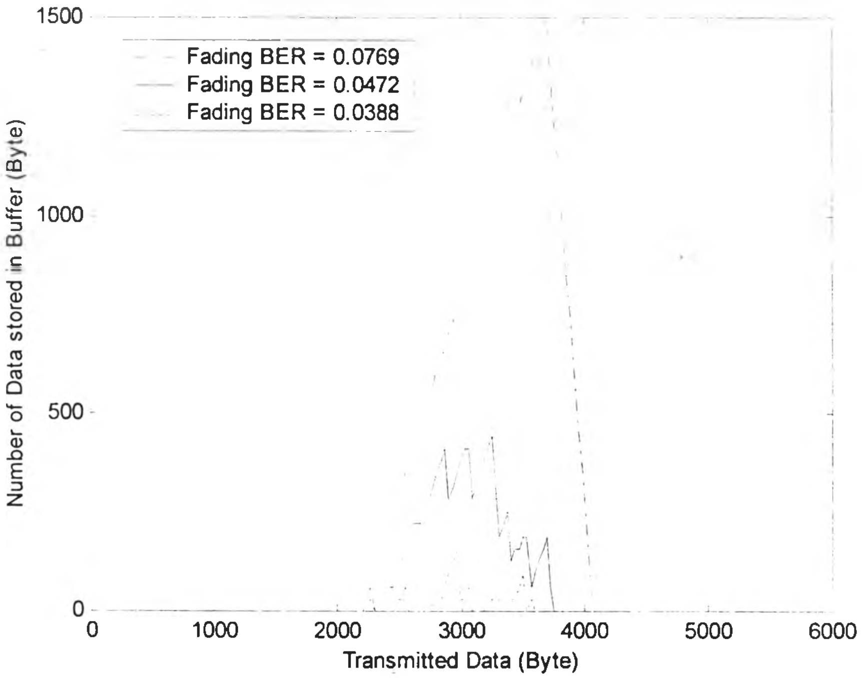
ตารางที่ 4.3 อัตราการเพิ่มของข้อมูลเมื่อเพิ่มส่วนหัวเพื่อการแก้ไขให้ข้อมูล

จำนวนส่วนหัวต่อจำนวนข้อมูล	ร้อยละการใช้ส่วนหัว
2 : 5	40.00
2 : 13	15.40
6 : 57	10.50
10 : 245	4.10

4.5 สภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวสำหรับการลดทอนที่มีอัตราบิตผิดพลาดต่างๆกัน

ในส่วนนี้จะพิจารณาผลกระทบของการลดทอนต่อระบบควบคุมความผิดพลาดแบบ ARQ ซึ่งอาศัยสถานะของที่พักข้อมูลชั่วคราว เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของช่องสัญญาณ โดยจะทำการจำลองการลดทอนแบบต่างๆ ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงอัตราบิตผิดพลาดของช่องสัญญาณด้วยพารามิเตอร์ของช่องสัญญาณ แล้วสังเกตความเปลี่ยนแปลงของระดับข้อมูลในที่พักข้อมูลชั่วคราว รวมทั้งขนาดของข้อมูลที่ได้รับในเวลาหนึ่งๆ โดยใช้สัญญาณวิดีโอ Foreman จำนวน 20 เฟรมที่เข้ารหัสแล้ว แบ่งเป็นแพ็กเกต (Packet) ขนาดต่างๆแล้วทำการเติมส่วนหัวเพื่อเป็นส่วนแก้ไขความผิดพลาดไปข้างหน้า (Forward Error Correction, FEC) แล้วทำการผ่านระบบ ARQ เพื่อส่งสัญญาณวิดีโอดังกล่าวไปยังผู้รับ โดยแกนเวลาจะอยู่บนพื้นฐานของแพ็กเกต (Packet Based) ที่เข้ารหัสแล้ว

พิจารณารูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณวิดีโอจำนวน 20 เฟรมที่เข้ารหัสแล้ว จำนวน 180 แพ็กเกต ที่มีขนาด 245 บิต มีอัตราบิตเป็น 79.09 Kbps ช่วงที่เกิดการลดทอนจะเริ่มจากบิตที่ 17100 ถึงบิตที่ 28500 ซึ่งสอดคล้องกับระยะเวลาการเกิดลดทอนแบบสั้น คือ ประมาณ 6.15 มิลลิวินาที ภายใต้อัตราการส่งตามมาตรฐาน IMT-2000 การแก้ไขความผิดพลาดไปข้างหน้าจะใช้ส่วนหัวที่สามารถแก้ไขความผิดพลาดได้จำนวน 10 บิตโดยมีอัตราความผิดพลาดในช่วงเวลาที่เกิดการลดทอนต่างๆกัน และอัตราการส่งสูงกว่าอัตราการเข้ารหัส 5 เท่าตัว



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงสภาพของที่พักข้อมูลชั่วคราวที่สภานะเวลาต่างๆกัน ของช่องสัญญาณลดทอนที่มีอัตราบิตผิดพลาดต่างๆกัน

จากรูปจะเห็นว่าอัตราบิตผิดพลาดที่เกิดจากการปรับค่าระดับการตัดสินใจของช่องสัญญาณที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย จะทำให้ขนาดของที่พักข้อมูลชั่วคราวที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงเวลาที่เกิดการลดทอนเท่าๆกัน คือประมาณ 2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าว แพ็กเกตที่มีส่วนการแก้ไขความผิดพลาดไม่สามารถแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ กล่าวคือ มีบิตที่ผิดพลาดมากเกินกว่าส่วนหัวดังกล่าวจะแก้ไขได้ มีเพียงบางแพ็กเกตเท่านั้นที่สามารถส่งได้อย่างถูกต้อง ภายหลังช่วงเวลาดังกล่าวแพ็กเกตที่อยู่ในที่พักข้อมูลชั่วคราวจะถูกส่งไปยังผู้รับอย่างถูกต้องหรือผิดพลาดน้อยมาก ทำให้จำนวนแพ็กเกตตกค้างอยู่ในที่พักข้อมูลชั่วคราวลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอัตราการเข้ารหัสซึ่งขึ้นอยู่กับศักยภาพของอุปกรณ์เข้ารหัสช้ากว่าอัตราการส่ง นอกจากนั้นเมื่ออัตราบิตผิดพลาดน้อยลง ประ-

สิทธิภาพในการแก้ไขความผิดพลาดของส่วนหัวจะมีสูงขึ้น ทำให้แพ็กเกตข้อมูลมีโอกาสส่งไปยังผู้รับสูงขึ้น สังเกตได้จากรอยหยักของกราฟในกรณีที่อัตราบิตผิดพลาดในช่วงลดทอนต่ำจะมีมากกว่า ผลการทดลองดังกล่าวยังยืนยันประสิทธิภาพของส่วนหัวที่เพิ่มเข้าไปว่าเพียงพอที่จะแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้บ้าง ถ้าอัตราบิตบิตผิดพลาดในช่วงลดทอนมีไม่มากนัก

4.6 ประสิทธิภาพของระบบเข้ารหัสที่นำเสนอ

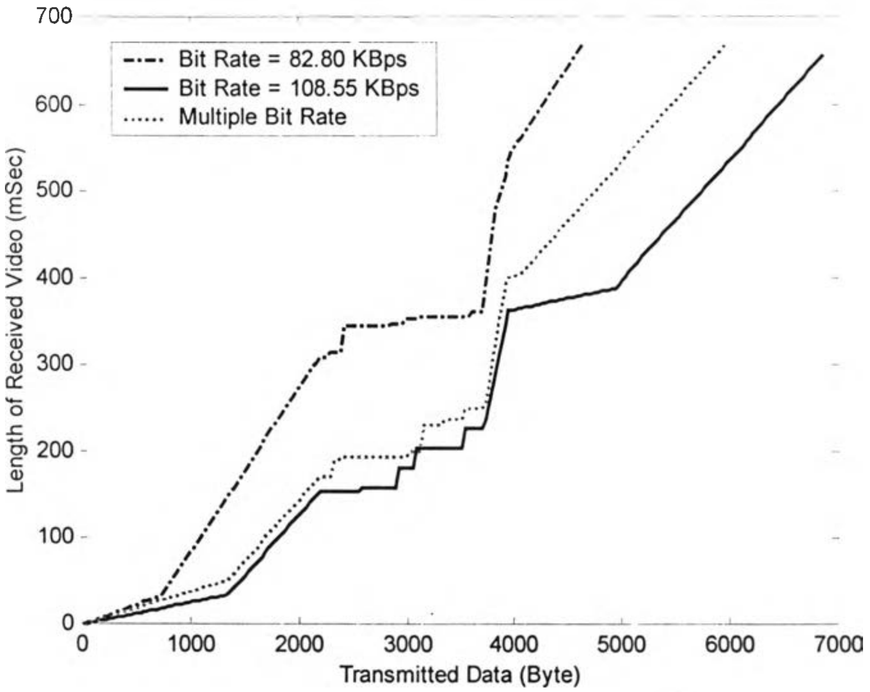
ในส่วนนี้จะพิจารณาประสิทธิภาพของการส่งในแง่ของคุณภาพของสัญญาณและความเร็วของการส่งโดยวัดจากสัญญาณที่ได้รับ เมื่อพิจารณาความยาวของวิดีโอที่ได้รับเมื่อเวลาผ่านไป เมื่ออัตราบิตของสัญญาณเปลี่ยนแปลงตามพารามิเตอร์ดังนี้

4.6.1 เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าการกระโดดข้ามเฟรม

เมื่อการปรับเปลี่ยนอัตราบิตของสัญญาณตามค่าการกระโดดข้ามเฟรมอย่างเดียวจะได้ผลดังรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ส่งถึงทางด้านของผู้รับอย่างถูกต้อง เทียบเป็นความยาวของสัญญาณวิดีโอที่เข้ารหัสแล้ว กับอัตราการเข้ารหัสซึ่งเปรียบเทียบกับเวลาที่ผ่านไปโดยจะเป็นการส่งวีดีโอตัวอย่าง Foreman ที่เข้ารหัสแล้วจำนวน 20 เฟรม ซึ่งเทียบเท่าความยาวประมาณ 667 มิลลิวินาที ที่มีการใช้อินทราเฟรมทุกๆ 10 เฟรม อัตราบิตที่เปลี่ยนไปนั้นเกิดจากการเปลี่ยนค่าการกระโดดข้ามเฟรมเพียงลำพัง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์ ทางด้านของช่องสัญญาณจะมีการลดทอนในช่วงบิตที่ 17100 ถึงบิตที่ 28500 โดยอัตราบิตผิดพลาดในช่วงนั้นเฉลี่ยจะอยู่ที่ 0.0659 จะเห็นว่า ในกรณีของสัญญาณที่มีอัตราบิตต่ำกว่าจะไปถึงยังผู้รับได้เร็วกว่ากรณีของสัญญาณที่มีอัตราบิตสูงกว่าเนื่องจากสัญญาณที่มีอัตราบิตสูงจะมีจำนวนข้อมูลต่อเฟรมมากกว่า กล่าวคือ อัตราการเพิ่มของสัญญาณวิดีโอที่ได้รับหรือความชันของเส้นกราฟจะขึ้นกับอัตราบิตในขณะนั้นๆ ของเฟรมที่กำลังส่ง ถ้าอัตราบิตของเฟรมที่กำลังส่งสูงบริเวณดังกล่าวจะมีความชันน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าอัตราบิตขณะส่งต่ำข้อมูลซึ่งไปถึงฝ่ายรับได้รวดเร็วกว่า ความชันจึงมากกว่าในช่วงนั้นๆ พิจารณากราฟในช่วงแรกจะเห็นว่าอัตราการเพิ่มของสัญญาณวิดีโอที่ได้รับจะพอๆ กันแต่ไม่มากนัก เนื่องจากมีการส่งอินทราเฟรมซึ่งมีอัตราบิตค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับอินเตอร์เฟรม หลังจากนั้นความชันของเส้นกราฟจะสูงขึ้น เพราะการเข้ารหัสเปลี่ยนเป็นอินเตอร์เฟรม ความชันในส่วนนี้จะมากเท่าใดนั้น ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการใช้เวกเตอร์การเคลื่อนไหวซึ่งสอดคล้องกับการเคลื่อนไหวของภาพ จากนั้นความชันก็กลับมาลดลงอีก สืบเนื่องจากอัตราบิตผิดพลาดในช่วงลดทอนทำให้แพ็กเกตข้อมูลที่ไปถึงผู้รับอย่างถูกต้องนั้นช้าลง หลังจากนั้นความชันก็เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากแพ็กเกตที่ตกค้างในที่พักข้อมูลชั่วคราวจำนวนมากในช่วงลดทอนเริ่มสามารถส่งไปได้อย่างถูกต้องภายหลัง

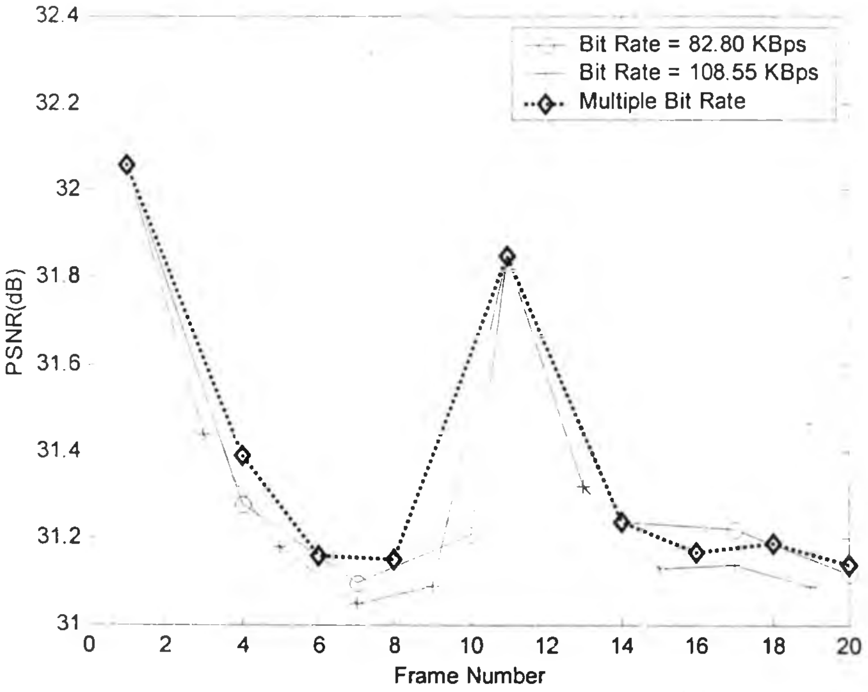
ช่วงเวลาลดทอนทำให้อัตราการส่งข้อมูลสูงขึ้นอย่างมาก นอกจากอัตราบิตจะมีผลต่ออัตราการไปถึงของสัญญาณวิดีโอแล้ว อีกปัจจัยที่มีผลต่อค่าดังกล่าวก็คือ อัตราความผิดพลาดของช่องสัญญาณในช่วงเวลาลดทอน จะเห็นว่าอัตราการเพิ่มต่ำลงในทันที ภายหลังจากช่วงเวลาดังกล่าว อัตราการเพิ่มของสัญญาณที่มีอัตราบิตต่ำกับแบบที่มีอัตราบิตปรับเปลี่ยนได้จะเพิ่มขึ้นเร็วกว่า ในกรณีของสัญญาณที่มีอัตราบิตสูง เนื่องจากในช่วงที่มีการลดทอนระบบที่มีอัตราบิตปรับเปลี่ยนได้จะทำการปรับเปลี่ยนอัตราบิตให้ลดลง โดยเปลี่ยนแปลงค่าการกระโดข้ามเฟรมให้เพิ่มขึ้น ในช่วงหลังจากเวลาการลดทอนแพ็กเกตที่ตกค้างในที่พักข้อมูลชั่วคราวซึ่งมีอัตราบิตต่ำ จึงถูกส่งไปยังผู้รับได้อย่างรวดเร็ว จากผลการทดลองโดยอัตราการส่งอยู่ที่ 2 Mbps จะได้อัตราเฟรมที่ได้รับอย่างถูกต้องเป็น 220.04 เฟรมต่อวินาที ในกรณีอัตราบิตต่ำ 149.42 เฟรมต่อวินาที ในกรณีอัตราบิตสูง และ 171.79 เฟรมต่อวินาที ในกรณีของระบบที่ปรับเปลี่ยนอัตราบิตได้ ซึ่งเป็นการยืนยันความเร็วในการส่งของระบบที่นำเสนอว่าสูงกว่ากรณีอัตราสูงและใกล้เคียงกับกรณีอัตราบิตต่ำ

สำหรับค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในเฟรมต่างๆ จะไม่ต่างกันมากสำหรับในกรณีของอัตราบิตทั้งสาม โดยจะมีบริเวณที่ค่าอัตราส่วนดังกล่าวสูงเป็นพิเศษคือ เฟรมที่ 11 เพราะมีการเข้ารหัสแบบอินทรา ทั้งนี้เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์การควอนไทส์ อย่างไรก็ตามความต่อเนื่องของภาพในกรณีของอัตราบิตสูงจะดีกว่าในกรณีของอัตราบิตต่ำ สังเกตได้จากจุดที่ต่อเนื่องกว่าในรูปที่ 4.13 ส่วนในกรณีของระบบที่นำเสนอ จะมีความต่อเนื่องที่เปลี่ยนแปลงในช่วงที่มีการลดทอนทำให้ค่าความต่อเนื่อง อยู่ในระดับที่ดีกว่าแบบอัตราบิตต่ำแต่ต่ำกว่าแบบอัตราบิตสูง โดยความหนาแน่นของเฟรมที่แสดงผลจริงอยู่ที่ 10 เฟรม สำหรับวิดีโออัตราบิตสูง, 8 เฟรม สำหรับวิดีโออัตราบิตต่ำ, และ 9 เฟรม สำหรับระบบที่นำเสนอ ต่อวิดีโอตัวอย่าง 20 เฟรม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอัตราการส่งโดยรวม อัตราการส่งของระบบที่นำเสนอก็จะเร็วกว่าในกรณีอัตราบิตสูงแต่ช้ากว่าในกรณีที่อัตราบิตต่ำ ผลการทดลองดังกล่าวเป็นการยืนยันความยืดหยุ่นของระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนการเข้ารหัสได้ตามลักษณะของช่องสัญญาณ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในช่วงเวลาหลังการลดทอนเพียงเล็กน้อย สัญญาณที่ไปถึงในกรณีของอัตราบิตสูงเข้าใกล้ในกรณีของระบบที่นำเสนอ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวตรงกับเวลาที่ระบบที่นำเสนอจะเข้ารหัสอินทราเฟรมอีกครั้ง ซึ่งในกรณีของอัตราบิตสูงยังมาไม่ถึง ส่งผลให้อัตราสัญญาณที่ได้รับในช่วงเวลาดังกล่าวอยู่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.12 กราฟการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งในด้านความเร็วระหว่างสัญญาณที่ได้รับการเข้ารหัสด้วยอัตราบิตต่างๆกันโดยใช้ค่าการกระโดดข้ามเฟรม

พิจารณาในกรณีเดียวกันแต่ลดอัตราบิตผิดพลาดของช่องสัญญาณจาก 0.0659 เป็น 0.0388จะได้ผลลัพธ์ในการส่งแบบปรับเปลี่ยนอัตราบิตเปลี่ยนไปเป็นรูปที่ 4.14 ในรูป จะเห็นว่า มีการเปรียบเทียบการตั้งระดับตัดสินใจภายในที่พักข้อมูลชั่วคราวที่ใช้สำหรับเปลี่ยนแปลงอัตราบิต ระหว่างการตั้งค่าไว้ที่ 5 แพ็กเกต และ 8 แพ็กเกต ผลการทดลองที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ช่องสัญญาณมีอัตราบิตผิดพลาดต่ำ คือ 0.0388 ระบบเข้ารหัสจะทำการเข้ารหัสที่อัตราบิตเท่ากับกรณี อัตราบิตสูง เนื่องจากข้อมูลในที่พักข้อมูลชั่ว-คราวยังไม่เกินระดับตัดสินใจ ทำให้การส่งข้อมูลไปถึงช้ากว่าในกรณีที่อัตราบิตผิดพลาดในช่องสัญญาณสูงคืออยู่ที่ 152.98 เฟรมต่อวินาที เทียบกับ 168.20 เฟรมต่อวินาที ของกรณีที่อัตราบิตผิดพลาดเป็น 0.0695 อย่างไรก็ตามการจำลองระบบส่งนี้ ถือว่าความเร็วในการส่งคงที่ตลอดการส่ง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว อัตราบิตผิดพลาดในช่องสัญญาณจะมีผลต่ออัตราการส่งในช่องสัญญาณ กล่าวคือ ความเร็วที่ด้อยกว่าของการส่งในช่องสัญญาณที่มีอัตราบิตผิดพลาดน้อยกว่านั้น แท้จริงแล้วอาจไม่ด้อยกว่ากรณีที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราบิตให้ลดลงเนื่องจากอัตราบิตผิดพลาดสูงก็ได้



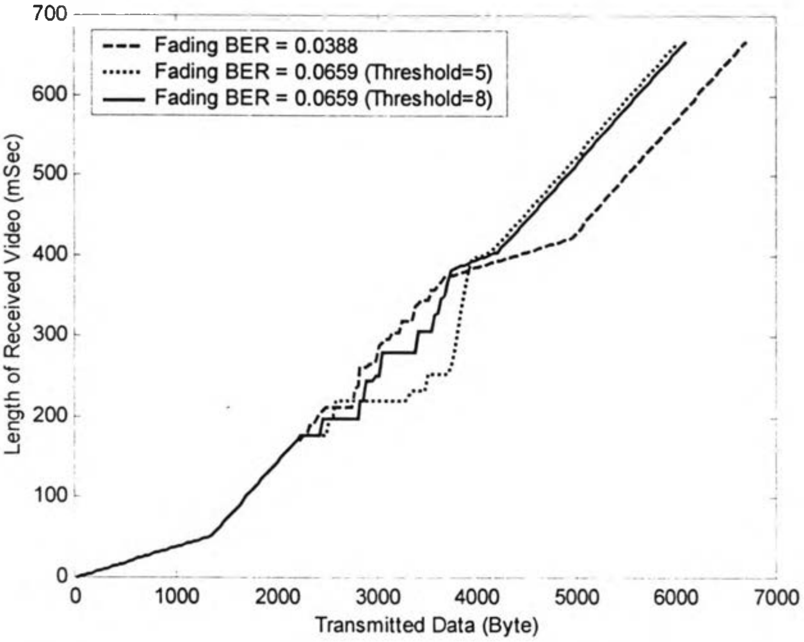
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในแต่ละเฟรมของสัญญาณที่อัตราบิตต่างๆ

ในแง่มุมของการตั้งระดับตัดสินใจจะเห็นว่า เมื่อปรับเปลี่ยนระดับตัดสินใจซึ่งหมายถึง จำนวนของแพ็กเกตตกค้างในที่พักข้อมูลชั่วคราวที่ทำให้ระบบตัดสินใจเปลี่ยนแปลงอัตราบิต จากที่เป็น 5 แพ็กเกต ไปที่ 8 แพ็กเกต ในกรณีหลังสัญญาณสามารถไปถึงที่หมายอย่างสม่ำเสมอกว่าในกรณี 5 แพ็กเกต ด้วยอัตราการส่ง 168.20 เฟรมต่อวินาที เทียบกับ 169.98 เฟรมต่อวินาที ในกรณี 5แพ็กเกต ซึ่งมีส่วนต่างไม่มาก ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนอัตราบิตอยู่ในช่วงที่แคบกว่า นอกจากนั้นความเร็วในการส่งสัญญาณและค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในรูปที่ 4.15 ยังใกล้เคียงกันมาก และความหนาแน่นของเฟรมแสดงผลก็เท่ากัน คือ เป็น10 เฟรมในกรณีอัตราบิตผิดพลาดน้อย และ 9 เฟรมในกรณีที่เหลือต่อ 20 เฟรม ของวิดีโอตัวอย่าง กล่าวคือ การตั้งระดับตัดสินใจให้สอดคล้องกับความผิดพลาดที่เกิดในช่องสัญญาณจะทำให้อัตราบิตของสัญญาณในขณะส่งจะอยู่ในระดับที่สูงที่สุดเท่าที่ช่องสัญญาณจะรับได้

จากผลการทดสอบดังกล่าวจะเห็นว่า ระบบที่นำเสนอนั้นสามารถปรับค่าอัตราบิตได้ สอดคล้องกับสภาพความผิดพลาดในเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพไม่ว่าอัตราบิตผิดพลาดในช่วงลดทอนจะอยู่ในระดับมากหรือน้อย นอกจากนั้นการปรับเปลี่ยนค่าระดับการตัดสินใจภายในที่พักข้อมูลชั่วคราวจะสามารถกำหนดระดับที่สัญญาณยินยอมที่จะลดอัตราบิตลง นั่นคือผู้ใช้สามารถกำหนดเพดานของการเข้ารหัสที่อัตราบิตสูงได้ด้วย

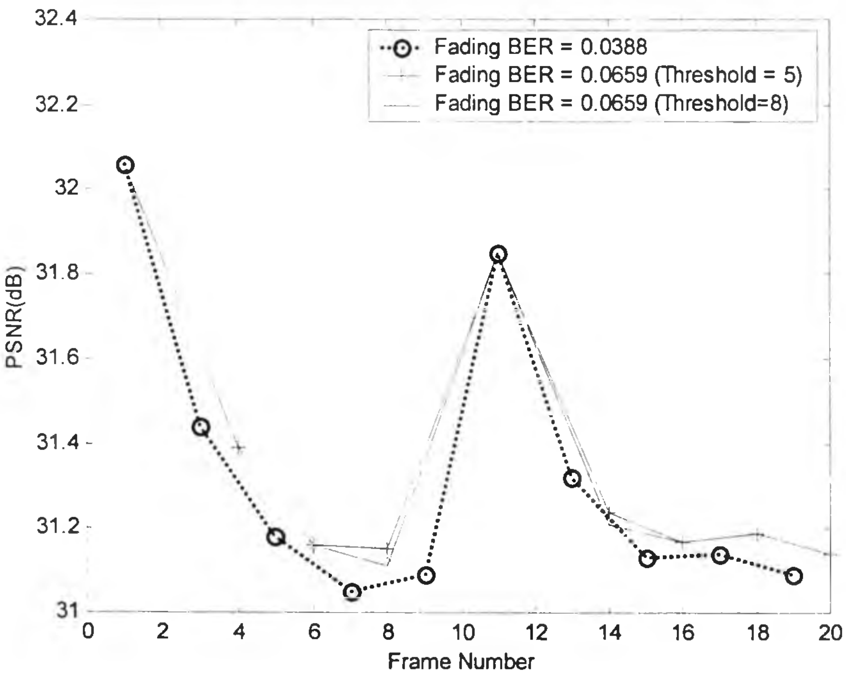
ในกรณีถัดไป พิจารณาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีช่วงเวลาลดทอนต่างๆ กัน ก่อนอื่นพิจารณาสถานะของที่พักข้อมูลชั่วคราว โดยการส่งสัญญาณวิดีโอ Foreman ที่เข้ารหัสแล้วจำนวน 90 เฟรม เพื่อให้สัญญาณวิดีโอมีความยาวเพียงพอที่จะใช้ทดสอบการส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีช่วงของการลดทอนอยู่ที่ 40 และ 5 มิลลิวินาที ตามลำดับ อัตราบิตผิดพลาดในช่วงลดทอนเป็น 0.0769

จากผลการทดลอง จะเห็นว่าเมื่อระยะเวลาของการลดทอนเพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อภาระของที่พักข้อมูลชั่วคราว กล่าวคือ นอกจากความจุในที่พักข้อมูลชั่วคราวจะต้องเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณที่ใช้ในขณะที่ช่วงเวลาการลดทอนน้อยแล้ว ช่วงเวลาที่ต้องการในการส่งข้อมูลจำนวนมากที่อยู่ในที่พักข้อมูลชั่วคราวยังต้องมากอีกด้วย ดังนั้นระบบส่งข้อมูลจึงต้องคำนึงถึงช่วงเวลาลดทอนที่มากที่สุดเพื่อการกำหนดความจุที่ต้องการสำหรับที่พักข้อมูลชั่วคราว อีกทั้งประสิทธิภาพการมัลติเพลกซ์ของที่พักข้อมูลชั่วคราวยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบอีกด้วย

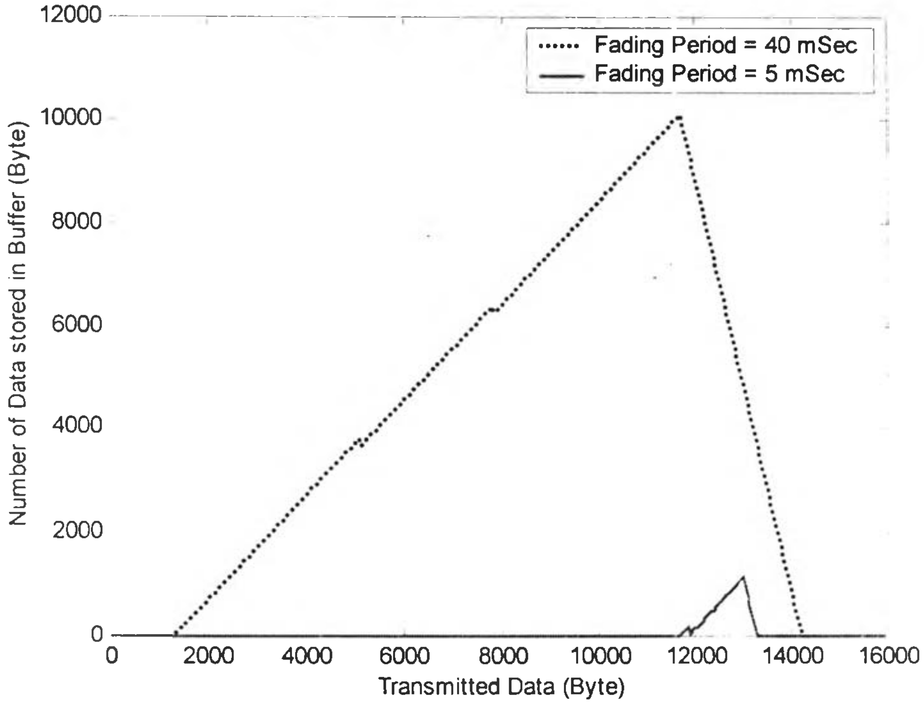


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งในด้านความเร็ว เมื่ออัตราบิตผิดพลาดในช่องสัญญาณต่างกัน

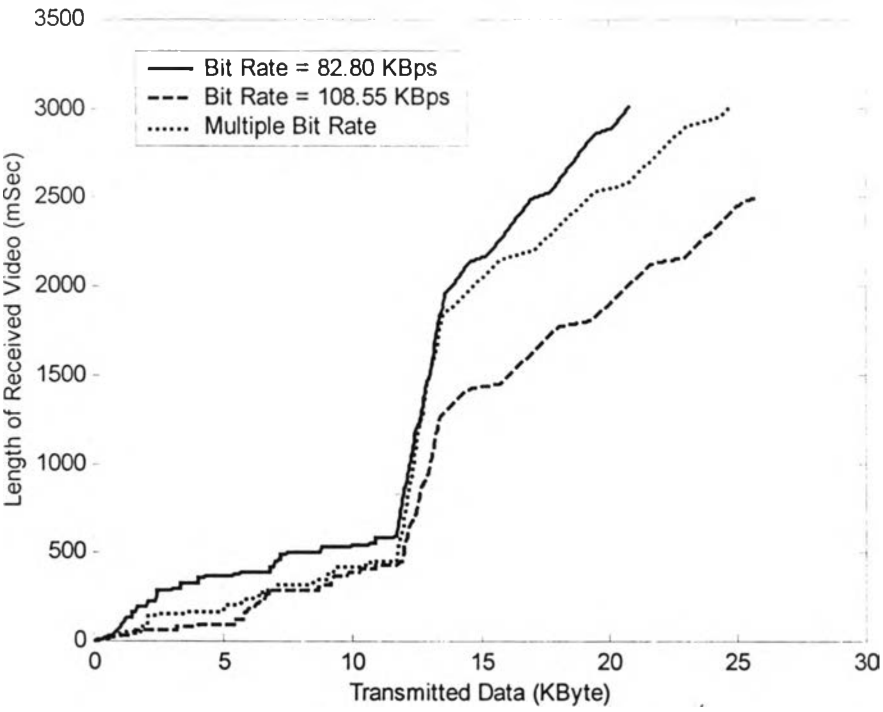
พิจารณาประสิทธิภาพการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีช่วงเวลาลดทอน 40 มิลลิวินาที เปรียบเทียบกันระหว่างการส่งด้วยอัตราบิตสูงคือ 108.55 Kbps กับอัตราบิตต่ำคือ 82.80 Kbps และแบบปรับเปลี่ยนอัตราบิตได้ตามระดับของที่พักข้อมูลชั่วคราวที่ตั้งระดับตัดสินใจอยู่ที่ 5 แพ็กเกต การปรับเปลี่ยนอัตราบิตในที่นี้กระทำโดยการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การกระโดข้ามเฟรม จะได้ผลในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละเฟรม ของสัญญาณเมื่ออัตราบิตผิดพลาดในช่องสัญญาณต่างกัน



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงขนาดของข้อมูลที่อยู่ในที่พักข้อมูลชั่วคราว ที่สภาวะเวลาต่างๆกันของช่องสัญญาณลดทอนที่มีช่วงเวลาลดทอนต่างกัน

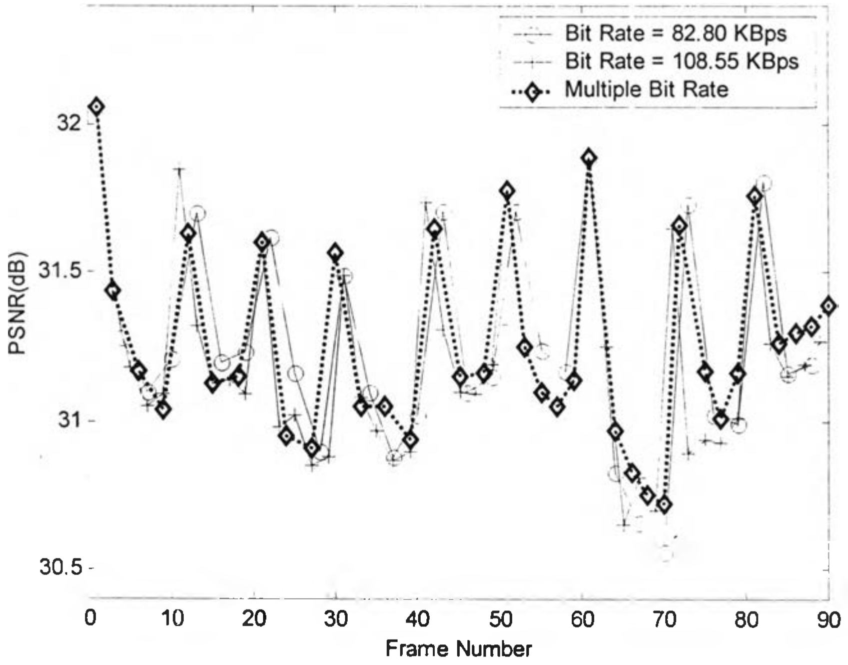


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งในด้านความเร็ว เมื่ออัตราบิตในการเข้ารหัสต่างกันในช่องสัญญาณ ที่มีช่วงเวลาลดทอน 40 มิลลิวินาที

ผลการทดลองที่ได้ แสดงให้เห็นว่าระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนได้จะมีความสามารถในกาส่งข้อมูลไปยังผู้รับสูงกว่า แบบที่เข้ารหัสด้วยอัตราบิตสูงเป็นอย่างมากโดยประสิทธิภาพการส่งจะใกล้เคียงกับแบบที่เข้ารหัสด้วยอัตราบิตต่ำคือ 186.54 เฟรมต่อวินาที เทียบกับ 148.18 เฟรมต่อวินาทีในกรณีอัตราบิตสูง และ 222.07 เฟรมต่อวินาที ในกรณีอัตราบิตต่ำ ขณะที่พิจารณาค่าความชัดเจนกับความต่อเนื่องของภาพในรูปที่ 4.18 จะเห็นว่า ผลลัพธ์ที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก ข้อแตกต่างจะอยู่ที่ความต่อเนื่องของ เฟรมภาพที่ระบบปรับเปลี่ยนอัตราบิต จะมีความต่อเนื่องอยู่ระหว่างแบบที่เข้ารหัสด้วยอัตราบิตต่ำกับแบบที่เข้ารหัสด้วยอัตราบิตสูง โดยค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับการตั้งระดับการตัดสินใจ ถ้าระดับการตัดสินใจ อยู่สูงกว่า นั่นคือสัญญาณส่วนใหญ่เข้ารหัสด้วยอัตราบิตสูง ความต่อเนื่องของภาพก็จะเข้าใกล้กับแบบที่เข้าถูกรหัสด้วยอัตราบิตสูงการส่งก็จะถึงผู้รับช้ากว่า ในทางตรงกันข้าม ถ้าตั้งระดับการตัดสินใจไว้ต่ำ ข้อมูลส่วนใหญ่จะถูกเข้ารหัสด้วยอัตราบิตต่ำ ข้อมูลก็จะมีความต่อเนื่องน้อยลง แต่จะไปถึงผู้รับเร็วขึ้น การตั้งระดับตัดสินใจจึงขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณและคุณภาพที่ผู้รับต้องการด้วย

ในส่วนถัดไปจะเป็นการปรับเปลี่ยนอัตราบิตโดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์โดยค่าการกระโดดข้ามเฟรมยังคงเท่าเดิม วิธีการนี้จะทำควบคู่ไปกับการ

เลือกโหมดเข้ารหัส เฟรมเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์กับกรณีที่ใช้อัตราบิตสูงกับอัตราบิตต่ำ ทั้งในแง่ของอัตราความผิดพลาดของช่องสัญญาณและความยาวของช่วงเวลาลดทอน



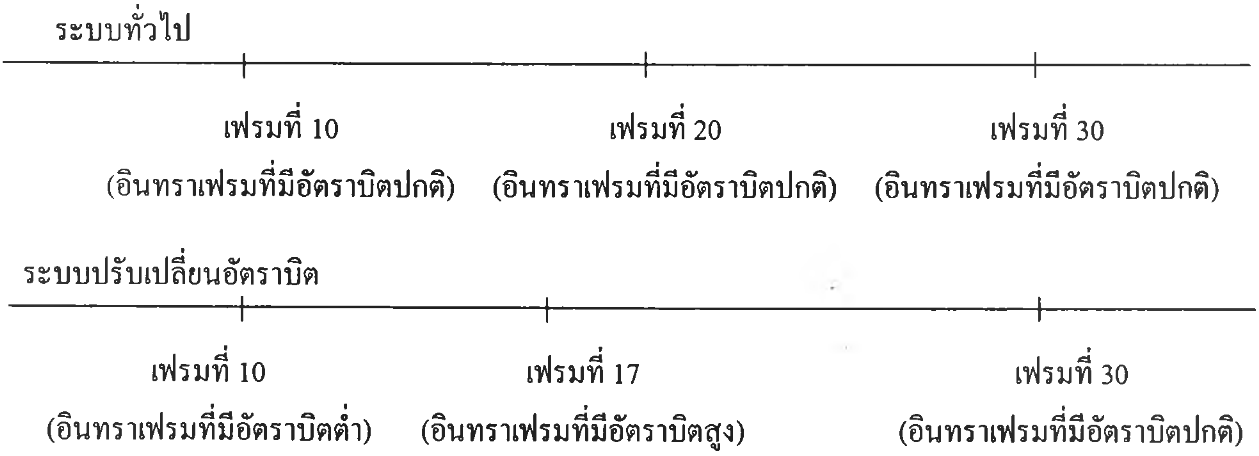
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในแต่ละเฟรมของสัญญาณในช่วงเวลาลดทอน 40 มิลลิวินาทีเมื่ออัตราบิตการเข้ารหัสต่างกัน

4.6.2 เมื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์

ในหัวข้อที่แล้ว ระบบจะใช้พารามิเตอร์การกระโดดข้ามเฟรม ในการปรับเปลี่ยนอัตราบิตของการเข้ารหัส ในส่วนนี้จะทำการปรับเปลี่ยนอัตราบิตดังกล่าวโดยการใช้ พารามิเตอร์อีก 1 ตัวนั่นคือ พารามิเตอร์การควอนไทส์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น พารามิเตอร์ดังกล่าว คือ การบ่งบอกความกว้างของลำดับขั้นในการทำควอนไทส์สัมประสิทธิ์ที่เกิดจากการเข้ารหัส DCT ทำให้พารามิเตอร์ดังกล่าวมีผลต่อรายละเอียดในตัวภาพ กล่าวคือ การปรับค่านี้จะมีผลต่อความคมชัดของภาพนั่นเอง

ในระบบที่นำเสนอ เมื่อทำการปรับค่าอัตราบิตด้วยค่านี้ ระบบจะทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์การควอนไทส์เมื่อข้อมูลในที่พักข้อมูลชั่วคราวถึงระดับตัดสินใจ ส่งผลให้อัตราบิตในขณะนั้นลดลง จากนั้นเมื่อระดับของข้อมูลเริ่มลดลง ผ่านระดับการตัดสินใจ ระบบจะเปลี่ยนพารามิเตอร์ดังกล่าวกลับมาอีกครั้ง โดยการเปลี่ยนโหมดเข้ารหัสเป็นอินทราเฟรมเพื่อสร้างเฟรมอ้างอิงที่มีความละเอียดสูงกลับมา แล้วเลื่อนเฟรมที่จะเข้ารหัสแบบอินทราออกไปอีก จนอัตราการเข้ารหัสเท่ากับการเข้ารหัสแบบปกติดังรูปที่ 4.19

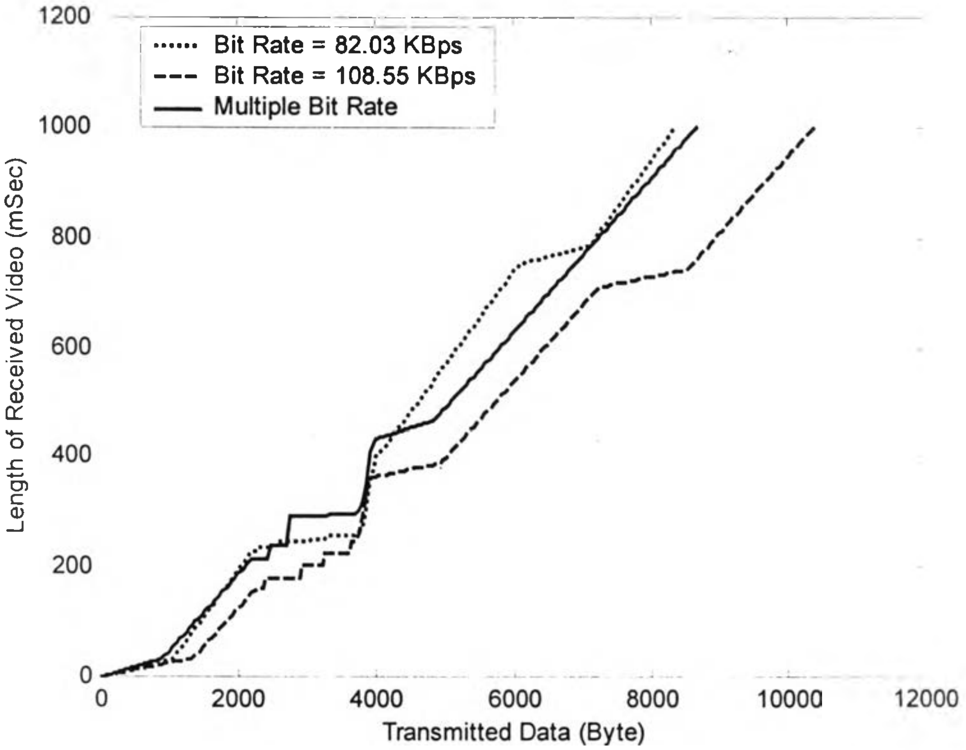
ผลการเปรียบเทียบการส่งวิดีโอที่มีอัตราบิตสูง, อัตราบิตต่ำ, และแบบอัตราบิตปรับเปลี่ยนได้ โดยใช้พารามิเตอร์การควอนไทส์ในการปรับเปลี่ยนอัตราบิต ในด้านความเร็ว แสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณวิดีโอ Foreman จำนวน 30 เฟรม คือประมาณ 1 วินาที ของสัญญาณวิดีโอที่มีการใช้อินทราเฟรมทุกๆ 10 เฟรม อัตราบิตที่เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์การควอนไทส์เพียงอย่างเดียว ส่วนทางด้านของช่องสัญญาณจะมีการลดทอนในช่วงบิตที่ 17100 ถึงบิตที่ 28500 โดยอัตราบิตผิดพลาดในช่วงนั้นเฉลี่ยจะอยู่ที่ 0.0659



รูปที่ 4.19 รูปเปรียบเทียบระบบที่ปรับเปลี่ยนอัตราบิตได้กับระบบทั่วไป

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการส่งในด้านความเร็วแล้ว สัญญาณที่เข้ารหัสแบบปรับเปลี่ยนอัตราบิต จะมีความเร็วใกล้เคียงกับในกรณีสัญญาณที่มีอัตราบิตต่ำ เนื่องจากบริเวณที่มีการใช้อินทราเฟรมจะมีการเพิ่มการกระโดดข้ามเฟรมเพื่อลดอัตราบิตในช่วงนั้น ทำให้อัตราบิตไม่สูงเป็นช่วงๆ นอกจากนั้น การเลือกโหมดเข้ารหัสตามรูปที่ 4.19 จะทำให้อัตราบิตโดยรวมแล้วไม่ต่างจากการเข้ารหัสแบบธรรมดา สิ่งที่สังเกตได้ก็คือ มีช่วงที่มีการเข้ารหัสแบบอินทราติดต่อกันคือช่วงเวลาหลังจากเกิดการลดทอนไม่นาน ในช่วงเวลาดังกล่าวอัตราการส่งของระบบจะลดลงเนื่องจากอัตราบิตที่สูงของอินทราเฟรม จากนั้นหลังจากที่พ้นช่วงเวลาดังกล่าวไม่นาน ข้อมูลที่ตกค้างอยู่ในที่พักข้อมูลชั่วคราวก็จะเริ่มส่งออกมาอย่างถูกต้อง อัตราการรับสัญญาณวิดีโอจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะที่กรณีของวิดีโออัตราบิตต่ำข้อมูลที่ตกค้างอยู่มีไม่มากส่งผลให้อัตราการเพิ่มของข้อมูลในช่วงนั้นด้อยกว่าในกรณีอื่นๆ อัตราการส่งโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 147.82 เฟรมต่อวินาที ในกรณีอัตราบิตสูง, 183.23 เฟรมต่อวินาที ในกรณีอัตราบิตต่ำ, และ 177.16 เฟรมต่อวินาที ในกรณีของระบบปรับเปลี่ยนอัตราบิตที่นำเสนอ

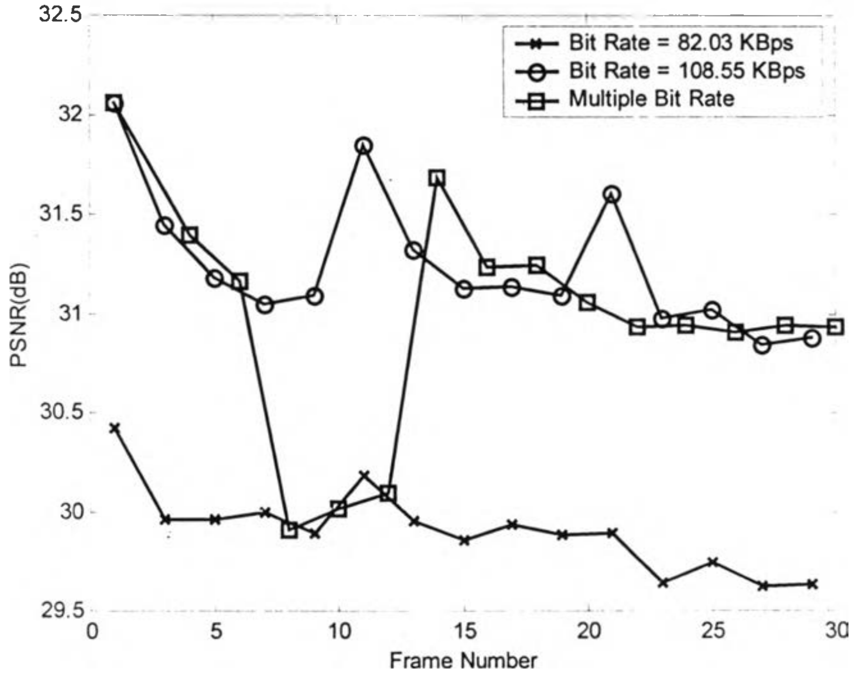
เมื่อเปรียบเทียบในด้านความคมชัดของสัญญาณภาพ ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของสัญญาณที่มีอัตราบิตต่างๆ กัน จะเห็นว่า สัญญาณที่ได้รับการเข้ารหัสแบบปรับเปลี่ยนอัตราบิตได้ จะมีค่าดังกล่าวลดลงในช่วงที่เกิดการลดทอนซึ่งเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เท่านั้น สามารถสังเกตได้จากการลดลงของค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนบริเวณดังกล่าว ในช่วงเวลาอื่นๆ ค่าจะอยู่ในระดับสูงเกือบตลอดเวลา โดยค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนดังกล่าวจะเป็น 31.25 dB ในกรณีอัตราบิตสูง, 29.91 dB ในกรณีอัตราบิตต่ำ และ 30.97 dB ในกรณีของระบบที่นำเสนอซึ่งใกล้เคียงกับในกรณีอัตราบิตสูง ผลลัพธ์นี้ยืนยันถึงประสิทธิภาพในการส่งที่สูงกว่าในทั้งด้านความคมชัดและความเร็วในการส่งของระบบปรับเปลี่ยนอัตราบิตได้ ถึงแม้ว่าการกระโดดข้ามเฟรมที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้อินทราเฟรม จะทำให้ภาพมีความต่อเนื่องน้อยลงในช่วง 1 เฟรม แต่ช่วงเวลาดังกล่าวก็สั้นมากๆ และเป็นห้วงๆ ทำให้ยากต่อการสังเกต



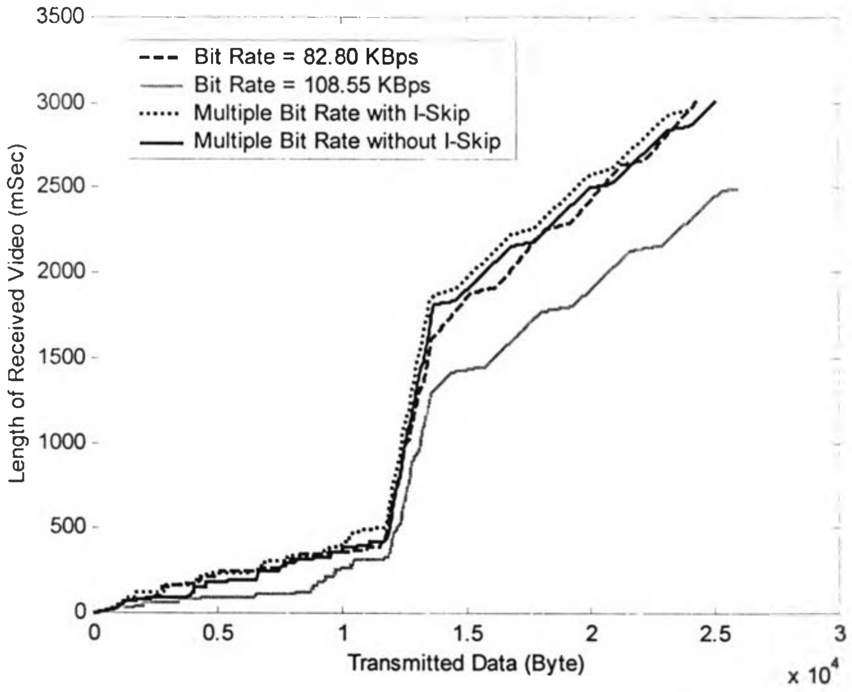
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งในด้านความเร็ว ระหว่างสัญญาณที่ได้รับการเข้ารหัสด้วยอัตราบิตต่างๆกัน โดยใช้พารามิเตอร์การควอนไทส์

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงช่องสัญญาณให้มีช่วงเวลาลดทอนเพิ่มขึ้นเป็น 40 มิลลิวินาที แล้วทำการวัดประสิทธิภาพการส่งเปรียบเทียบกัน จะได้ผลการวัดในรูปที่ 4.22 ซึ่งทำการส่งสัญญาณวิดีโอแบบเดียวกับในรูปที่ 4.20 แต่เพิ่มเป็น 90 เฟรม และเพิ่มกรณีปรับ

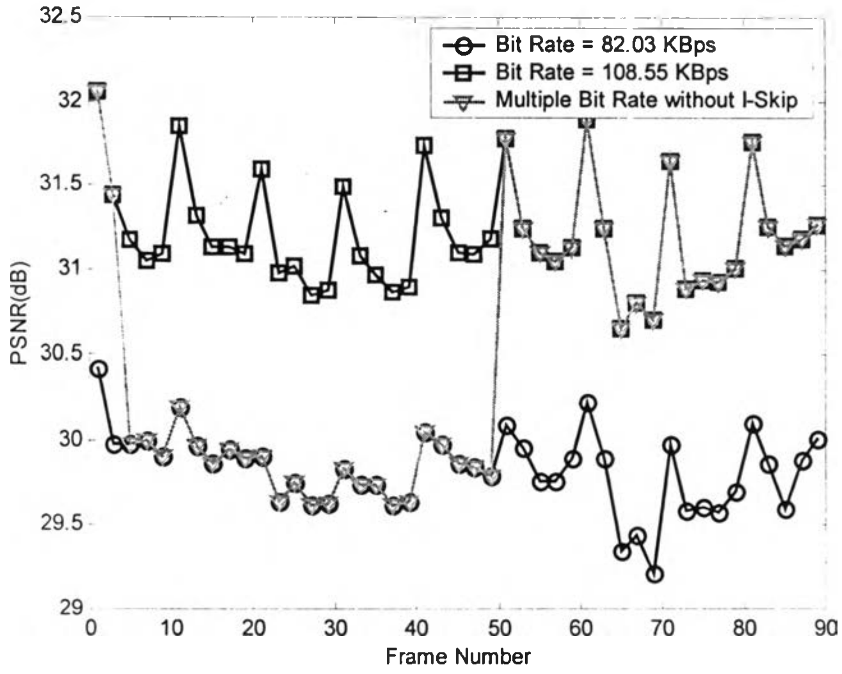
เปลี่ยนอัตราบิตได้แบบที่ไม่มีการเพิ่มการกระโดดข้ามเฟรมสำหรับอินทราเฟรมที่มีอัตราบิตสูง จากรูปจะเห็นว่า โดยเทคนิคการเลือกโหมดเข้ารหัสในแต่ละเฟรม และการลดอัตราบิตลงในช่วงเวลาลดทอนทำให้ความเร็วในการส่งสูงมาก นอกจากนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบระบบที่มีการเพิ่มการกระโดดข้ามเฟรมสำหรับอินทราเฟรมกับแบบที่ไม่ใช้เทคนิคนี้ จะเห็นว่าการใช้เทคนิคดังกล่าวจะเพิ่มความเร็วของการส่งให้มากขึ้นอีกโดยแบบที่ใช้เทคนิคนี้จะมีความเร็วในการส่งที่ 189.72 เฟรมต่อวินาที เปรียบเทียบกับแบบที่ไม่ใช้จะอยู่ที่ 184.16 เฟรมต่อวินาที ในขณะที่วิดีโออัตราบิตสูงอยู่ที่ 148.18 เฟรมต่อวินาที และอัตราบิตต่ำอยู่ที่ 190.22 เฟรมต่อวินาที เนื่องจาก อัตราบิตบริเวณที่ระบบต้องทำการส่งอินทราเฟรมจะลดลง ในขณะที่พิจารณาความคมชัดของภาพในแต่ละเฟรม โดยใช้ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าระบบที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราบิตในขณะลดทอนจะมีค่าความคมชัด หรือค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน อยู่ในระดับสูงเกือบตลอดเวลา ยกเว้นในช่วงที่มีการลดทอน ซึ่งจากรูปที่ 4.23 ช่วงเวลาดังกล่าวจะอยู่ระหว่างเฟรมที่ 4 ถึงเฟรมที่ 49 ในการแสดงผลเทียบกับเวลาประมาณ 1.5 วินาที เท่านั้น ที่ค่าความคมชัดลดลง โดยอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ยจะอยู่ที่ 29.83 dB ในกรณีอัตราบิตต่ำ, 31.20 dB ในกรณีอัตราบิตสูง, และ 30.52 dB ในกรณีของระบบที่นำเสนอโดยไม่ใช้เทคนิคเพิ่มการกระโดดข้ามเฟรม



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ในแต่ละเฟรมของสัญญาณ เมื่ออัตราบิตการเข้ารหัสต่างกัน เนื่องจากพารามิเตอร์การควอนไทส์



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการส่งในด้านความเร็ว ในช่องสัญญาณที่มีช่วงเวลาลดทอน 40 มิลลิวินาทีระหว่างสัญญาณ ที่ได้รับการเข้ารหัสด้วยอัตราบิตต่างๆกัน โดยใช้พารามิเตอร์การควอนไทส์



รูปที่ 4.23 ค่าอัตรากำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในแต่ละเฟรม ของสัญญาณที่ส่งในช่องสัญญาณที่มีช่วงเวลาลดทอน 40 มิลลิวินาที เมื่ออัตราบิตการเข้ารหัสต่างกันเนื่องจากพารามิเตอร์การควอนไทส์

4.7 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

กล่าวโดยสรุปจะเห็นว่า เนื่องจากช่องสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราความผิดพลาดตามเวลา การปรับเปลี่ยนอัตราบิตของสัญญาณวิดีโอ จะช่วยให้อัตราข้อมูลสอดคล้องกับสภาพความคล่องตัวของช่องสัญญาณในเวลานั้นๆ กระบวนวิธีดังกล่าวจะมีเงื่อนไขที่สำคัญอยู่สองจุดก็คือ ระบบต้องการข้อมูลความคล่องตัวของช่องสัญญาณ รวมทั้งต้องการระบบควบคุมความผิดพลาดที่เหมาะสมกับความผิดพลาดเป็นช่วงๆ ตามลักษณะของช่องสัญญาณไร้สาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอระบบป้องกันความผิดพลาด แบบวงรอบปิดที่เรียกว่า Hybrid ARQ ซึ่งระบบในด้านของผู้รับจะพยายามที่จะแก้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยส่วนหัวที่เพิ่มขึ้นมา ถ้าบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นมากเกินจำนวนที่สามารถแก้ไขได้ระบบจะส่งสัญญาณไปขอการส่งข้อมูลอีกครั้ง ระบบนี้มีข้อดีไม่เพียงแต่จะช่วยแก้ความผิดพลาดเล็กน้อยที่เกิดขึ้นระหว่างการสื่อสาร แต่ยังช่วยให้ด้านของผู้ส่งสามารถรู้ประสิทธิภาพของการส่งอย่างคร่าวๆ ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามระบบนี้ยังมีข้อด้อยอยู่หลายข้อ ประการแรก เนื่องจากระบบต้องการที่พักข้อมูลชั่วคราว และการเข้ารหัสป้องกันความผิดพลาด ทำให้เครื่องลูกข่ายของเครือข่ายไร้สายซึ่งมีขนาดเล็ก จะต้องมีตัวเข้ารหัสนี้เพิ่มเติมจากตัวเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอ เพิ่มความซับซ้อนให้การออกแบบเครื่องโทรศัพท์ นอกจากนั้นในแง่ของข้อมูล การเพิ่มส่วนหัวเข้าไป จะเพิ่มจำนวนบิตสำหรับส่งทำให้ระบบมีภาระในการส่งเพิ่มขึ้น

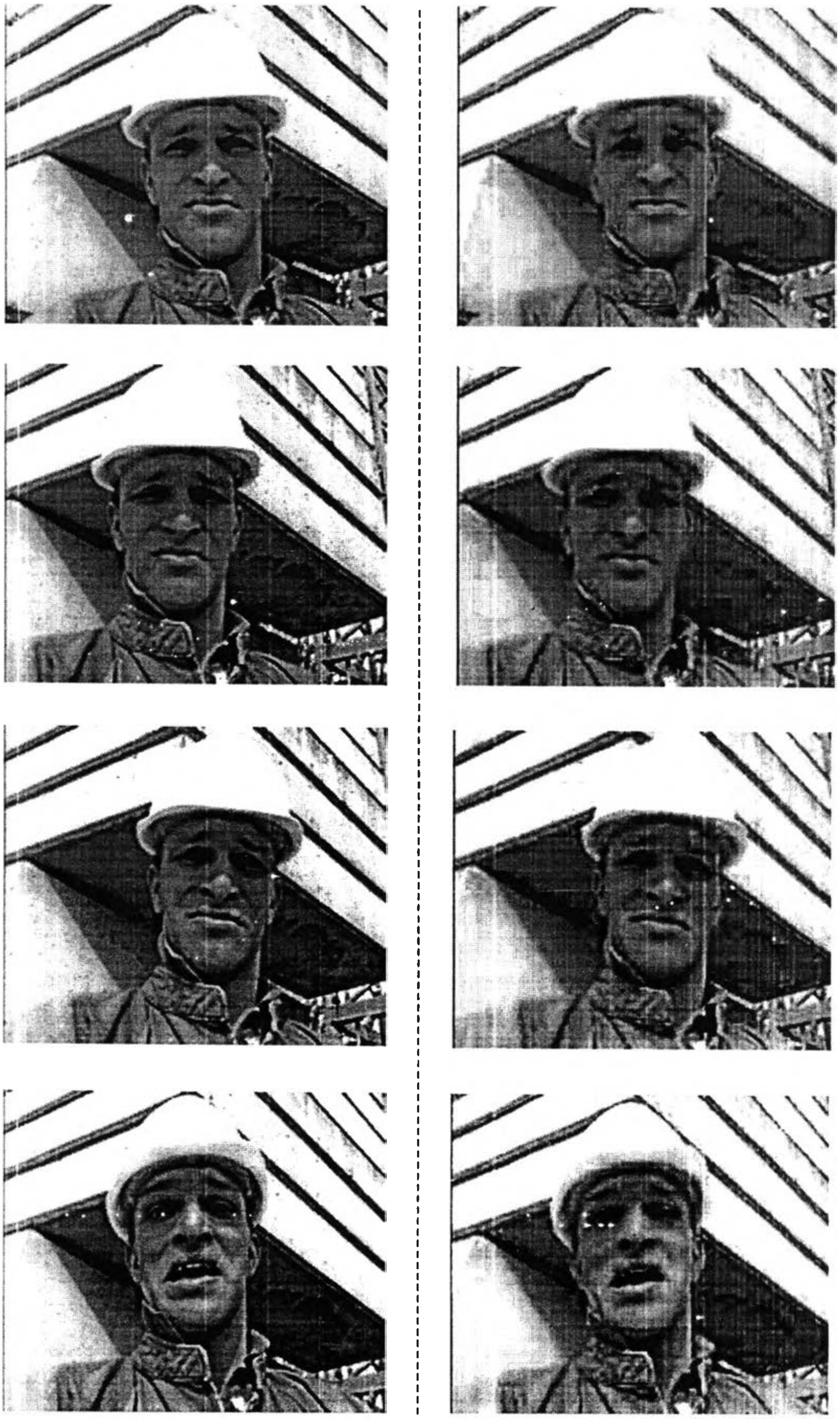
จุดที่สองก็คือการปรับอัตราบิตจะส่งผลให้ผู้รับสามารถสังเกตความเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ผู้ให้บริการไม่ต้องการ ระบบจึงต้องพยายามรักษาระดับคุณภาพในด้านต่างๆ ที่จะไม่รบกวนคู่สนทนาที่กำลังใช้ระบบ ระบบที่นำเสนอจึงเปิดโอกาสให้ผู้ใช้ระบุจุดที่ผู้ใช้ต้องการให้รักษาคุณภาพอยู่สองจุดคือความต่อเนื่องโดยการปรับการกระโดดข้ามเฟรม กับความคมชัดโดยการปรับตัวควอนไทส์ การทำงานลักษณะนี้จะทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นแต่ความซับซ้อนก็เพิ่มขึ้นด้วยเทคนิคที่เพิ่มเข้ามาคือการเลือกใช้เฟรมอ้างอิงเพื่อกู้ความคมชัดกลับมาในกรณีของการเปลี่ยนตัวควอนไทส์ เมื่อความถี่ในการลดทอนสูงอัตราการใช้เฟรมอ้างอิงก็จะสูงด้วย อย่างไรก็ตามเนื่องจากการลดทอนขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม และผลการทดลองที่ได้ก็อยู่ในเวลาสั้นมากๆ คือ 0.667 ถึง 3 วินาที การเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวจึงเป็นไปได้ยากมาก

ในแง่ของตัวเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอ มาตรฐานที่เลือกใช้คือ มาตรฐาน H.263 จะเป็นมาตรฐานที่มีความเหมาะสมกับการเข้ารหัสสัญญาณวิดีโอเพื่อส่งในช่องสัญญาณไร้สายมากที่สุดในปัจจุบันตามเป้าหมายของมาตรฐาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากการเข้ารหัสอยู่ในช่วงอัตราบิตต่ำ ทำให้สัญญาณที่ได้มีคุณภาพที่ยังไม่ดีพอ คือ ยังไม่ต่อเนื่องและคมชัด ถ้าต้องการให้ได้คุณภาพสูงขึ้นอัตราบิตก็จะสูงขึ้นทำให้ข้อมูลเพิ่มจำนวนขึ้น การส่ง

อาจจะไม่เป็นแบบเวลาจริง หรือถ้าเราจะใช้เทคนิคการเข้ารหัสที่เพิ่มเติมขึ้นมา เพื่อเพิ่มอัตราการบีบอัด การเข้ารหัสที่ต้องการตัวประมวลผลที่มีศักยภาพสูงอยู่แล้ว อาจจะต้องการตัวประมวลผลที่สูงขึ้นไปอีก เนื่องจากกผลการทดลองถือว่า อัตราการส่งข้อมูลของช่องสัญญาณเป็น 5 เท่า ของอัตราการเข้ารหัส ผลที่เกิดขึ้นจึงต้องสอดคล้องกับอัตราทั้งสอง ซึ่งถ้าถือว่า อัตราการส่งเป็น 2 Mbps อัตราการเข้ารหัสจะต้องอยู่ที่ประมาณ 400 Kbps จากการทดลองจับเวลาการเข้ารหัสเฉพาะเฟรมอ้างอิง 1เฟรม ของเครื่องคอมพิวเตอร์ระดับเพนเทียม (Intel Pentium) ที่ทำงานที่ 200 MHz จะใช้เวลาประมาณ 0.22 วินาที ได้ข้อมูลประมาณ 20 กิโลบิต ซึ่งความเร็วในการเข้ารหัสอยู่ที่ 90 Kbpsเท่านั้น แต่ถ้าเป็นเพนเทียมที่ความเร็ว 700 MHz จะได้ความเร็วในการเข้ารหัสเพิ่มประมาณ 20 เท่า นอกจากนั้นความเร็วของระบบสื่อสารก็ยังไม่คงที่ ดังนั้นความเร็วทั้งสองเงื่อนไขอาจส่งผลต่อความเร็วของการส่งได้

ในส่วนของช่องสัญญาณลดทอนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะสนใจในแง่ของการลดทอนของกำลังสัญญาณเท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงระบบสื่อสารไร้สายจะต้องประสบปัญหามากมายซึ่งกระทบทั้งในด้านของเวลาหรือความถี่ นอกจากนั้นบางครั้งยังมีการรบกวนเพิ่มเข้ามา อย่างไรก็ตาม ระบบที่ใช้มุ่งความสนใจไปที่อัตราบิตผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นช่วงๆ ซึ่งไม่เจาะจงลงไปว่าเกิดขึ้นจากสาเหตุใด ระบบนี้จึงยังคงใช้ได้ผลอยู่เสมอเมื่อเกิดความผิดพลาดขึ้น

ผลการทดลองที่ผ่านมา ไม่ว่าระบบจะทำการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีอัตราบิตผิดพลาดมากหรือน้อย ตลอดจนมีช่วงเวลาลดทอนน้อยหรือมาก ระบบจะสามารถส่งสัญญาณวิดีโอไปถึงผู้รับได้ดีกว่าในกรณีสัญญาณที่เข้ารหัสด้วยอัตราบิตสูง ในขณะที่คุณภาพอยู่ในระดับใกล้เคียงกันมาก นอกจากนั้น ระบบยังมีความยืดหยุ่นมาก คือ สามารถปรับเปลี่ยนอัตราบิตโดยเลือกว่าผู้ใช้ จะต้องการทำให้ระดับความคมชัดคงที่นั่นคือปรับเปลี่ยนการกระโดดข้ามเฟรม หรือต้องการให้ภาพมีความต่อเนื่อง นั่นคือ ปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การควอนไทส์ ทำให้ระบบดังกล่าวเหมาะสมที่จะนำไปใช้เพื่อการส่งสัญญาณวิดีโอผ่านอุปกรณ์สื่อสารไร้สายในยุคที่ 3 อย่างมีประสิทธิภาพ



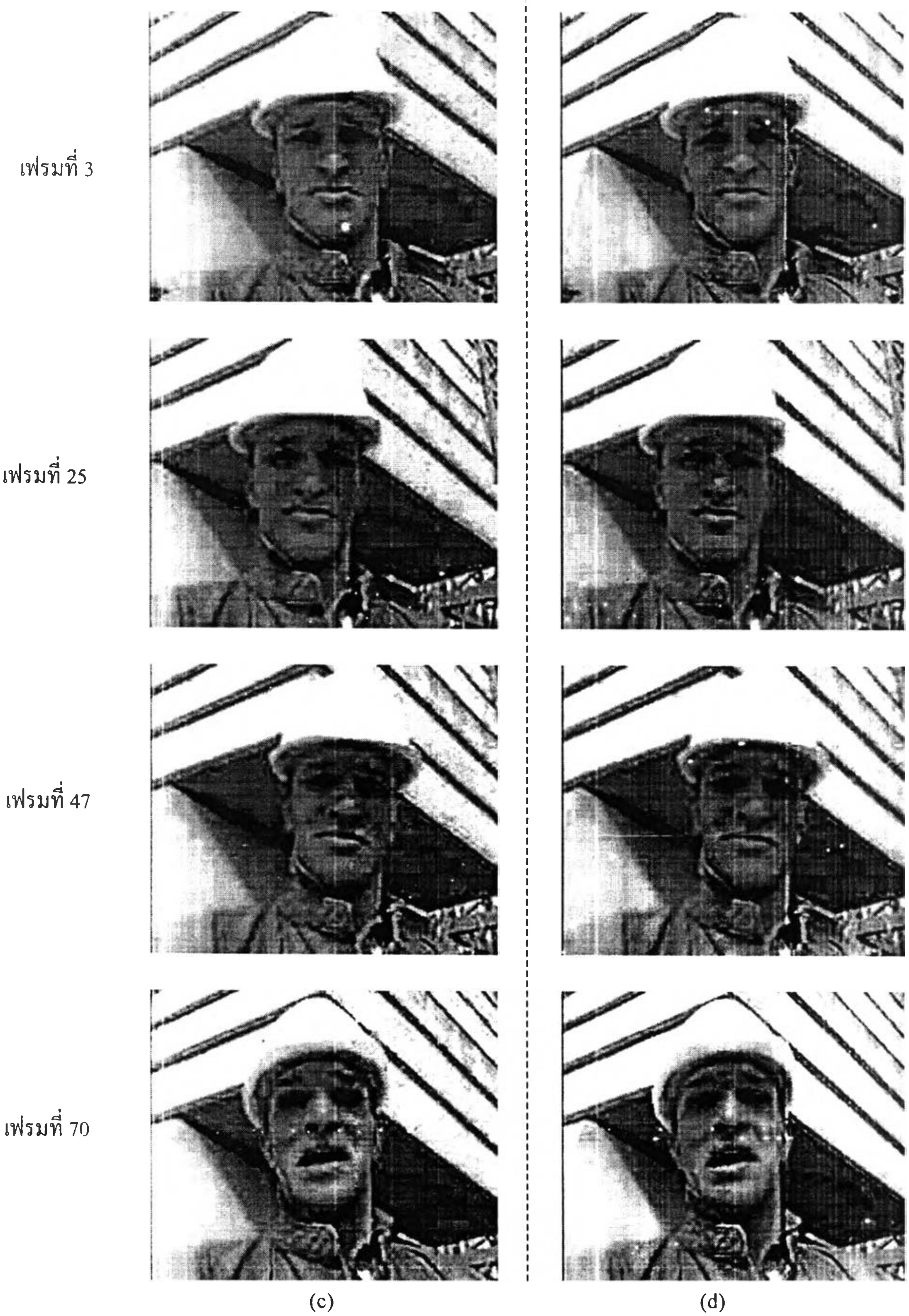
เฟรมที่ 3

เฟรมที่ 25

เฟรมที่ 47

เฟรมที่ 70

(a) (b)



รูปที่ 4.24 รูปวิดีโอตัวอย่าง Foreman ที่ (a) ยังไม่เข้ารหัส (b) ที่อัตราบิตสูง (c) ที่อัตราบิตต่ำ (d) ที่อัตราบิตปรับเปลี่ยนได้ตามพารามิเตอร์