



การจัดลำดับความสำคัญสำหรับการส่งข้อมูลเสียงและเอ็มเพ็ก-4
บนเครือข่าย IEEE 802.15.4
Priority Rating for Voice and MPEG-4 Transmissions over
IEEE 802.15.4 Networks

ชราดล วัฒนนาวิน

Thradon Wattananavin

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การจัดลำดับความสำคัญสำหรับการส่งข้อมูลเสียงและเอ็มพีเอก-4

บนเครือข่าย IEEE 802.15.4

ผู้เขียน นายธราดล วัฒนนาวิน

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิกลม ชีรภาพขจรเดช) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐฐา จินดาเพชร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิกลม ชีรภาพขจรเดช)

.....กรรมการ
(ดร.คจดาว บุรณะพานิชย์กิจ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศกุนา เจริญปัญญาศักดิ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีรพล ศิริพงษ์วุฒิกร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมไฟฟ้า

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มี
ส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิกรม ธีรภาพจรเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ

(นายธราดล วัฒนาวิน)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ

(นายธราดล วัฒนาวิน)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การจัดลำดับความสำคัญสำหรับการส่งข้อมูลเสียงและเอ็มพีเอก-4 บนเครือข่าย
IEEE 802.15.4
ผู้เขียน นายธราดล วัฒนาวิน
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอที่มีการบีบอัดข้อมูลแบบเอ็มพีเอก-4 (MPEG-4) โดยวิธีการกำหนดลำดับความสำคัญของข้อมูลที่จะทำการส่ง กำหนดระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณให้เหมาะสมกับชนิดข้อมูลที่จะทำการส่ง โดยมีเงื่อนไขว่าการกำหนดระยะเวลาดังกล่าวต้องให้คุณภาพของข้อมูลเสียงที่ประเมินจากค่า R-factor ต้องได้ค่าเฉลี่ยไม่น้อยกว่า 59 และเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงต้องไม่เกิน 100 มิลลิวินาที นอกจากนี้คุณภาพของข้อมูลวิดีโอซึ่งประเมินจากค่า Peak signal to noise ratio (PSNR) ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 25 dB รวมถึงค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอต้องไม่เกิน 150 มิลลิวินาที ผลจากการจำลองการทำงานแสดงให้เห็นว่าวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 รูปแบบเดิมไม่สามารถรองรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอพร้อมกันให้ได้คุณภาพตรงตามเงื่อนไข ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ได้นำเสนอสามารถรองรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอได้ตรงตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้

คำสำคัญ CSMA/CA, R-factor, PSNR, average end-to-end delay

Thesis Title Priority Rating for Voice and MPEG-4 Transmissions over IEEE 802.15.4 Networks
Author Mr. Thradon Wattananavin
Major Program Electrical Engineering
Academic Year 2014

ABSTRACT

This thesis develops a priority-rating transmission approach for IEEE 802.15.4 to support voice and MPEG-4 in wireless sensor networks. The proposed solution is the medium access control (MAC) level. The priority rating is assigned based on a delay-tolerance level and a quality requirement of each traffic type. How to rate a priority for a different traffic type by setting an appropriate value of the channel access parameters in the carrier sense multiple access/collision avoidance (CSMA/CA) of IEEE 802.15.4 is carefully studied in this thesis.

The main objective of the priority-rating approach is to maintain the voice and MPEG-4 qualities. The voice and MPEG-4 qualities are measured by an R-factor and a peak signal to noise ratio (PSNR), respectively. The R-factor must be greater than 59, and the PSNR must be greater than or equal to 25 dB. Furthermore, the average end-to-end delay for the voice and video transmissions must be lower than 100 ms and 150 ms, respectively.

The simulation results indicate that traditional IEEE 802.15.4 standard cannot provide the required quality of services when both voice and MPEG-4 are transmitted in the networks. In comparison, the priority-rating approach can support both traffic types and meet their service requirements.

Keywords: CSMA/CA, R-factor, PSNR, average end-to-end delay

กิตติกรรมประกาศ

ขอแสดงความขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิกลม ธีรภาพจรเดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้การสนับสนุนและฝึกฝนการทำวิจัย กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ในด้านการทำวิจัย เอกสาร ข้อมูลต่าง ๆ เป็นอย่างดี รวมทั้งขัดเกลากระบวนการคิด และให้กำลังใจในการแก้ปัญหาตลอดจนตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐา จินดาเพ็ชร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำงานวิจัย และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.คุณดาว บุรณะพานิษย์กิจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สกุณา เจริญปัญญาศักดิ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.พีรพล ศิริพงษ์วุฒิกร (ผู้ทรงคุณวุฒิ) ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ วิเคราะห์ผลงาน และตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาให้ทุนการศึกษาแก่ข้าพเจ้าระหว่างการศึกษา

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุก ๆ ท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ มาโดยตลอด จนกระทั่งงานสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ หน่วยบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่าง ๆ

ขอขอบคุณ พี่ ๆ และเพื่อน ๆ รวมทั้งน้อง ๆ นักศึกษามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ส่งเสริมสนับสนุน ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้กำลังใจที่ดีเยี่ยม และทุนทรัพย์แก่ข้าพเจ้าตลอดมา จนกระทั่งทำให้ข้าพเจ้าประสบความสำเร็จ

ธราดล วัฒนาวิน

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(13)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(17)
บทที่ 1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 ประเด็นวิจัย.....	5
1.4 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	6
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	6
1.8 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2. ทฤษฎีและหลักการ.....	7
2.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.4	7
2.1.1 ชนิดของโหนดและรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่าย IEEE 802.15.4.....	7
2.1.2 ชั้นกายภาพ.....	9
2.1.3 ชั้นควบคุมการเข้าใช้งานสื่อกลาง.....	9
2.2 โพรโทคอล CSMA/CA.....	11
2.3 การประเมินช่องสัญญาณ.....	14
2.4 การคำนวณคุณภาพเสียง.....	15
2.5 การบีบอัดข้อมูลวิดีโอและการคำนวณคุณภาพวิดีโอ.....	17
2.6 เครื่องมือ Evalvid	18
2.7 แบบจำลองประกอบการทำงาน.....	20
2.7.1 แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ Two-ray ground reflection	20
2.7.2 แบบจำลองพลังงาน.....	22

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 3. การกำหนดลำดับความสำคัญในการเข้าใช้ช่องสัญญาณของแพ็กเก็ต.....	23
3.1 แนวคิดการกำหนดลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูล.....	23
3.2 การศึกษาการกำหนดค่าระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณที่เหมาะสมกับการส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ.....	25
3.2.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	25
3.2.2 แบบวิจัยเชิงทดลอง.....	25
3.2.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่าย.....	30
3.2.4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล การหาค่า CW และ BE ที่เหมาะสม.....	32
3.2.5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล การยืนยันค่า CW และ BE ที่เหมาะสม.....	54
3.2.6 สรุปผลการทดลอง.....	57
บทที่ 4. การส่งข้อมูลเสียงและวิดีโอบนเครือข่าย IEEE 802.15.4 ที่มีการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูล	59
4.1 บทนำ	59
4.2 การทดสอบสมรรถนะของโปรโตคอล CSMA/CA ที่มีการจัดระดับความสำคัญของข้อมูล	61
4.2.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง.....	61
4.2.2 แบบวิจัยเชิงทดลอง.....	62
4.2.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่าย.....	66
4.2.4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล การเปรียบเทียบสมรรถนะ.....	68
4.2.5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการหาค่าประมาณจำนวนโหนดที่เครือข่ายสามารถรองรับได้	98
4.2.6 สรุปผลการทดลอง.....	101
บทที่ 5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	103
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	103
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	104
5.2.1 ปัญหา.....	106
5.2.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	106

สารบัญ (ต่อ)

5.2.3 ข้อเสนอแนะ.....	105
บรรณานุกรม.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	108

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
2-1	ย่านความถี่และจำนวนช่องสัญญาณของมาตรฐาน IEEE 802.15.4.....	9
2-2	ความสัมพันธ์ระหว่าง MOS กับ R-factor.....	16
2-3	ค่า MOS และระดับคุณภาพของเสียง.....	17
2-4	ความสัมพันธ์ระหว่าง PSNR กับ MOS.....	18
3-1	ระยะเวลาการส่งข้อมูลทิศทางเดียว.....	23
3-2	จำนวนเฟรมและจำนวนแพ็กเก็ตของข้อมูลวิดีโอ.....	27
3-3	อัตราบิตของข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ.....	28
3-4	การกำหนดค่า CW และ BE ของการทดลองหัวข้อ 3.2.4.....	29
3-5	การกำหนดค่า CW และ BE ของการทดลองหัวข้อ 3.2.5.....	30
3-6	ลอจิกสำหรับการเลือกค่า CW และ <i>macMinBE</i> ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียง.	40
3-7	ลอจิกสำหรับการเลือกค่า CW และ <i>macMinBE</i> ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS.....	42
3-8	ลอจิกสำหรับการเลือกค่า CW และ <i>macMinBE</i> ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอ	49
3-9	ลอจิกสำหรับการเลือกค่า CW และ <i>macMinBE</i> ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอ.....	51
3-10	ผลลัพธ์ที่ได้จากการแอนด์ลอจิก.....	53
4-1	พารามิเตอร์สำหรับการแบ่งลำดับความสำคัญ.....	59
4-2	กำลังที่ใช้ในแต่ละ โหมด.....	63
4-3	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	63
4-4	จำนวนเฟรมและจำนวนแพ็กเก็ตของข้อมูลวิดีโอ.....	64
4-5	อัตราบิตของข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอและข้อมูลวิดีโอและข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการ แสดงผลแบบเวลาจริง.....	65
4-6	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของ โหนดส่งข้อมูล Non-real-time กรณี Priority rating.....	92
4-7	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของ โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ กรณี Priority rating.....	92
4-8	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของ โหนดส่งข้อมูลเสียง กรณี Priority rating.....	93

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
4-9	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของ โหนดรับข้อมูล PAN coordinator กรณี Priority rating.....	93
4-10	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของ โหนดส่งข้อมูล Non-real-time กรณี IEEE 802.15.4.....	94
4-11	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของ โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ กรณี IEEE 802.15.4.....	94
4-12	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของ โหนดส่งข้อมูลเสียง กรณี IEEE 802.15.4.....	95
4-13	ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของ โหนดรับข้อมูล PAN coordinator กรณี IEEE 802.15.4.....	95

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
2-1 เครื่องข่ายแบบดาว.....	8
2-2 เครื่องข่ายที่มีการเชื่อมต่อแบบเพียร์ทูเพียร์.....	8
2-3 โครงสร้างซูเปอร์เฟรมของมาตรฐาน IEEE 802.15.4.....	10
2-4 ผังงานขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้น.....	12
2-5 ผังงานขั้นตอนหลักเกี่ยวกับการชนกันของข้อมูล.....	12
2-6 ผังงานขั้นตอนการตรวจสอบช่องสัญญาณ.....	13
2-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง R-factor กับ MOS.....	16
2-8 การเข้ารหัสข้อมูลวิดีโอ.....	19
2-9 การส่งข้อมูลวิดีโอผ่านเครือข่ายไร้สาย.....	19
2-10 ขั้นตอนการประเมินคุณภาพของวิดีโอ.....	20
3-1 ลักษณะเครือข่ายที่ใช้ศึกษาและตำแหน่งของโหนด.....	25
3-2 คุณภาพของวิดีโอกับอัตราบิตของการเข้ารหัส.....	27
3-3 โครงสร้างแพ็กเก็ตข้อมูลเสียงและแพ็กเก็ตข้อมูลวิดีโอ.....	28
3-4 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี CBK เมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	32
3-5 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี IFQ เมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	34
3-6 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี LQI เมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	36
3-7 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียงเมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	38
3-8 ค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลเสียงเมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	39
3-9 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงเมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	40
3-10 ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงเมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	41

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3-11 ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS เมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของ โหนดส่ง ข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	42
3-12 จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี CBK เมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของ โหนดส่ง ข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	43
3-13 จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี IFQ เมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของ โหนดส่ง ข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	45
3-14 จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี LQI เมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของ โหนดส่ง ข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	47
3-15 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอเมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของ โหนดส่งข้อมูล วิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	50
3-16 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอเมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของ โหนดส่งข้อมูล วิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	51
3-17 ค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลวิดีโอเมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของ โหนด ส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง.....	52
3-18 ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอเมื่อ <i>macMinBE</i> และ CW ของ โหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการ เปลี่ยนแปลง.....	53
3-19 ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS.....	54
3-20 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียง.....	55
3-21 ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอ.....	56
3-22 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอ.....	57
4-1 ลักษณะเครือข่ายที่ใช้ศึกษาและตำแหน่งของ โหนด.....	62
4-2 โครงสร้างแพ็กเก็ตข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง.....	64
4-3 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี CBK	69
4-4 จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี CBK	70
4-5 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี LQI	71
4-6 จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี LQI	72
4-7 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียง.....	73

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-8 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอ.....	73
4-9 ค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลเสียง.....	74
4-10 ค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลวิดีโอ.....	74
4-11 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียงกรณีที่ไม่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time.....	75
4-12 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียงกรณีที่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งหมด 6 ตัว.....	75
4-13 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอกรณีที่ไม่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time.....	76
4-14 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอกรณีที่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งหมด 6 ตัว.....	76
4-15 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงจากต้นทางถึงปลายทางของข้อมูลเสียง.....	77
4-16 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงจากต้นทางถึงปลายทางของข้อมูลวิดีโอ.....	78
4-17 ค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลเสียง.....	79
4-18 ค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลวิดีโอ.....	79
4-19 ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง.....	80
4-20 ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอ.....	81
4-21 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานการส่งข้อมูล Non-real-time	82
4-22 ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล Non-real-time	82
4-23 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานการส่งข้อมูล Non-real-time กรณีที่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งหมด 6 ตัว.....	83
4-24 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานการส่งข้อมูล Non-real-time ที่แต่ละหมายเลขของโหนด.....	83
4-25 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time...	84
4-26 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ	85
4-27 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลเสียง	85
4-28 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนด PAN coordinator	86
4-29 จำนวนไบต์ที่โหนดวิดีโอส่งออก	87
4-30 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ	87
4-31 จำนวนไบต์ที่โหนดเสียงส่งออก	88

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4-32 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อ โหนดอยู่ในสถานะส่งของ โหนดส่งข้อมูลเสียง	88
4-33 จำนวนไบต์ที่ โหนด Non-real-time ส่งออก	89
4-34 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อ โหนดอยู่ในสถานะส่งของของ โหนดส่งข้อมูล Non-real-time	89
4-35 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อ โหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยของของ โหนดส่งข้อมูล Non-real-time	90
4-36 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อ โหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยของของ โหนดส่งข้อมูลเสียง	90
4-37 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อ โหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยของของ โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ	91
4-38 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อ โหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยของของ โหนด PAN coordinator	91
4-39 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้เมื่อแยกตามชนิดของ โหนดที่ใช้วิธี Priority-rating	96
4-40 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้เมื่อแยกตามชนิดของ โหนดที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4	96
4-41 ค่าพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย	97
4-42 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน	98
4-43 ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงเมื่อ ใช้วิธี Priority-rating.....	99
4-44 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงเมื่อ ใช้วิธี Priority-rating	100
4-45 ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอเมื่อ ใช้วิธี Priority-rating	100
4-46 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอเมื่อ ใช้วิธี Priority-rating	101

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

ACK	Acknowledgement
AODV	Ad-hoc on-demand distance-vector
BE	Backoff exponent
BI	Beacon interval
BO	Beacon order
BPSK	Binary phase shift keying
CAP	Contention access period
CBR	Constant bit rate
CCA	Clear channel assessment
CFP	Contention free period
CS	Carrier sense
CSMA/CA	Carrier sense multiple access with collision avoidance
CW	Contention window
DSSS	Direct sequence spread spectrum
ED	Energy detection
FFD	Full function device
GOP	Group of pictures
GTSs	Guaranteed time slots
HSV	Hue saturation value
ITU	International telecommunication union
LR-WPANs	Low-rate wireless personal area networks
MAC	Media access control
MOS	Mean opinion score
MPEG	Moving picture experts group
NS-2	Network simulator 2

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

O-QPSK	Offset quadrature phase shift keying
PAN	Personal area network
PDR	Packet delivery ratio
PHY	Physical layer
PSNR	Peak signal to noise ratio
R-factor	Transmission rating factor
RFD	Reduced function device
SD	Superframe duration
SNR	Signal to noise ratio
SO	Superframe order
VBR	Variable bit rate
WPANs	Wireless personal area networks
WSNs	Wireless sensor networks

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks: WSNs) ที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นสำหรับการรับส่งข้อมูลในระยะใกล้ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำ [1] ทำให้ IEEE 802.15.4 ถูกจำกัดการใช้งานประยุกต์ที่มีการสื่อสารข้อมูลที่มีความต้องการแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ในการส่งข้อมูลต่ำและไม่เข้มงวดในเรื่องการแสดงผลแบบเวลาจริง (Real-time) เช่น การส่งข้อมูลอุณหภูมิ การส่งข้อมูลความเข้มแสง และการส่งข้อมูลความชื้น ในระบบเฝ้าสังเกตสภาพแวดล้อม (Environmental monitoring systems) จนกระทั่งเมื่อเร็ว ๆ นี้ได้มีกลุ่มวิจัยที่ให้ความสนใจในการส่งข้อมูลเสียง [2] และข้อมูลวิดีโอ [3-4] ผ่านเครือข่ายไร้สายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 อย่างไรก็ตามมาตรฐานดังกล่าวมีข้อจำกัดในด้านอัตราการรับส่งข้อมูลที่ต่ำซึ่งเป็นข้อจำกัดสำหรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ นอกจากนี้ข้อมูลเสียงและวิดีโอยังมีความต้องการเวลาหน่วง (Delay) ที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ข้อมูลเสียงต้องการเวลาหน่วงที่น้อยกว่าข้อมูลวิดีโอ [5] ยิ่งกว่านั้น ข้อมูลวิดีโอยังมีคุณลักษณะที่แตกต่างออกไปอีกอย่างชัดเจนคือมีปริมาณข้อมูลมาก ทำให้การสื่อสารวิดีโอต้องการแบนด์วิดท์ที่สูง ดังนั้นการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำบนเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 แล้วให้ได้คุณภาพของเสียงและวิดีโออยู่ในระดับที่ยอมรับได้จึงเป็นประเด็นวิจัยที่มีความท้าทายอย่างยิ่ง

มาตรฐาน IEEE 802.15.4 เดิม มีการใช้งาน โพรโทคอล Carrier sense multiple access/collision avoidance (CSMA/CA) ซึ่งเป็นโพรโทคอลการเข้าใช้ช่องสัญญาณสื่อสารที่ถูกออกแบบให้โหนดในเครือข่ายมีความเท่าเทียมกันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ด้วยการกำหนดระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณผ่านทางพารามิเตอร์หลักของโพรโทคอล CSMA/CA ที่เรียกว่า Backoff exponent (BE) และ Contention window (CW) ให้มีค่าเท่ากันสำหรับโหนดทุกตัวในเครือข่ายโดยไม่พิจารณาชนิดของข้อมูลที่จะทำการส่ง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงไม่สามารถใช้งานมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สำหรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอร่วมกับการส่งข้อมูลแบบเดิมของระบบเฝ้าสังเกตสภาพแวดล้อมที่กล่าวแล้วในเบื้องต้นบนเครือข่ายเดียวกันได้อย่างเหมาะสม

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่คำนึงถึงคุณภาพการให้บริการ (Quality of services: QoS)

เพื่อให้รองรับการส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ ด้วยการกำหนดลำดับความสำคัญของข้อมูลที่จะทำการส่งซึ่งคำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วงจากต้นทางไปถึงปลายทางของข้อมูลที่จะทำการส่งเป็นหลัก ประกอบกับการกำหนดพารามิเตอร์ BE และ CW ให้เหมาะสมกับชนิดข้อมูลที่จะทำการส่ง

1.2 การตรวจเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.2.1 E.-J. Kim, M. Kim, S.-K. Youm, S. Choi, and C.-H. Kang, “Priority-based Service Differentiation Scheme for IEEE 802.15.4 Sensor Networks,” AEU - International Journal of Electronics and Communications., vol. 61, no. 2, pp. 69-81, February 2007. [6]

บทความใน [6] เป็นผลงานวิจัยที่เสนอวิธีการการส่งข้อมูลที่มีการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูลเป็นสามลำดับคือ ลำดับสูง ลำดับกลาง และลำดับต่ำ โดยการกำหนดให้ โหนดส่งข้อมูลลำดับสูงมีค่า CW และ BE ที่น้อยกว่าโหนดส่งข้อมูลลำดับกลาง และโหนดส่งข้อมูลลำดับต่ำ ขณะที่โหนดส่งข้อมูลลำดับกลางก็จะมีค่า CW และ BE ที่น้อยกว่าโหนดส่งข้อมูลลำดับต่ำ ซึ่งค่า CW และ BE ที่น้อยจะช่วยเพิ่มโอกาสในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ งานวิจัยใน [6] สร้างตัวแบบเชิงวิเคราะห์จากลูกโซ่มาร์คอฟ เพื่อประเมินผลการจัดลำดับความสำคัญที่ค่า CW และ BE ต่างๆ อย่างไรก็ตามบทความใน [6] ไม่ได้พิจารณาการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ

1.2.2 C. Wang, K. Sohraby, R. Jana, L. Ji, and M. Daneshmand, “Voice Communications over ZigBee Networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 46, pp. 121-127, January 2008. [2]

บทความ [2] ศึกษาการส่งข้อมูลเสียง (VoIP) ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 และประเมินคุณภาพของการส่งข้อมูลเสียงตามข้อเสนอแนะของสหภาพโทรคมนาคมนานาชาติ (International telecommunication union: ITU) ด้วยการคำนวณหาค่า Transmission rating factor (R-factor) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลาหน่วงและการสูญหายของข้อมูล (Packet loss) [2] ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการส่งข้อมูลเสียงให้ได้คุณภาพของเสียงเป็นที่ยอมรับได้นั้น โหนดที่ส่งข้อมูลในเครือข่ายจะต้องมีจำนวนไม่เกินสองตัวในกรณีส่งข้อมูลหนึ่งทอด และไม่เกินหนึ่งตัวในกรณีส่งข้อมูลต่อกันเป็นทอดสองทอด หากการส่งข้อมูลต่อกันเป็นทอดตั้งแต่สามทอดขึ้นไปจะได้คุณภาพของเสียงอยู่ในระดับแย่ อย่างไรก็ตามบทความ [2] ไม่พิจารณาการกำหนดลำดับความสำคัญของการส่งข้อมูล ข้อมูลที่ใช้ส่งมีเพียงชนิดเดียว

1.2.3 A. J. Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez, and J. Garcia-Haro, “Feasibility Study of MPEG-4 Transmission on IEEE 802.15.4 Networks,” Proceedings of IEEE International Conference on Wireless & Mobile Computer, Networking & Communication, pp. 397-403, October 2008. [4]

บทความ [4] เสนอการส่งข้อมูลวิดีโอที่มีการบีบอัดข้อมูลแบบเอ็มเพ็ก-4 บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 และทำการประเมินคุณภาพของการส่งข้อมูลวิดีโอด้วยการคำนวณหาค่าความแตกต่างระหว่างเฟรมภาพต้นฉบับกับเฟรมภาพที่ส่งผ่านเครือข่าย ค่านี้เรียกว่า Peak signal to noise ratio (PSNR) ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบได้กับคุณภาพที่ประเมินด้วยมนุษย์ซึ่งเรียกว่า Mean opinion score (MOS) โดยรูปแบบเครือข่ายที่ใช้เป็นเครือข่ายรูปดาว (Star topology) มีจำนวนโหนดทั้งหมด 7 ตัว ประกอบด้วยโหนดรับข้อมูล 1 ตัว และโหนดส่งข้อมูล 6 ตัว ผลจากการวิจัยในบทความ [4] แสดงให้เห็นว่าการส่งข้อมูลวิดีโอที่มีการบีบอัดข้อมูลแบบเอ็มเพ็ก-4 ที่อัตราการเข้ารหัส 46 กิโลบิตต่อวินาทีและ 54 กิโลบิตต่อวินาที สามารถส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 และให้คุณภาพของวิดีโอเป็นที่ยอมรับได้ เนื่องจากข้อมูลที่ถูกบีบอัดจะมีขนาดของข้อมูลลดลงส่งผลให้ใช้แบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลลดลง อย่างไรก็ตามบทความ [4] ไม่พิจารณาการกำหนดลำดับความสำคัญของการส่งข้อมูล มีข้อมูลที่ใช้ส่งเพียงชนิดเดียว

1.2.4 E. D. N. Ndihi, N. Khaled, and G. D. Micheli, “Analytical Model for the Contention Access Period of the Slotted IEEE 802.15.4 with Service Differentiation,” Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC’09), Dresden, Germany, pp. 1-6, June 2009. [7]

บทความใน [7] นำเสนอตัวแบบเชิงวิเคราะห์ (Analytical model) ด้วยหลักการของลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov chain) เพื่อใช้ประเมินสมรรถนะการส่งข้อมูลที่มีความสำคัญของข้อมูลแตกต่างกัน โดยแบ่งลำดับความสำคัญของการส่งข้อมูลออกเป็นสองลำดับคือ ลำดับสูง และลำดับต่ำ ด้วยการกำหนดให้โหนดที่ส่งข้อมูลที่มีความสำคัญระดับสูงมีค่า CW น้อยกว่าโหนดที่ส่งข้อมูลที่มีความสำคัญระดับต่ำ งานวิจัยใน [7] ศึกษาข้อมูลที่ส่งผ่านเครือข่ายที่มีลำดับความสำคัญต่างกันจำแนกตามอัตราการมาถึงแบบปัวส์ซอง (Poisson arrival rate) อย่างไรก็ตามบทความใน [7] ไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนค่า BE รวมถึงไม่พิจารณาการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ

1.2.5 X. Feng, L. Jie, H. Ruonan, K. Xiangjie and G. Ruixia, “Service Differentiated and Adaptive CSMA/CA over IEEE 802.15.4 for Cyber-Physical Systems,” The Scientific World Journal, August 2013. [8]

บทความ [8] นำเสนอวิธีการส่งข้อมูลที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับโครงข่ายไฟฟ้าอัจฉริยะ (Smart grid) ที่ใช้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ในการส่งข้อมูลให้รองรับคุณภาพการให้บริการ (Quality of services: QoSs) ในเทอมของ อัตราข้อมูลประสิทธิผล (Effective data rate) อัตราการสูญหายของข้อมูล (Packet loss rate) และค่าเฉลี่ยเวลาหน่วง (Average delay) โดยที่จัดลำดับความสำคัญของข้อมูลออกเป็นสามลำดับคือ ลำดับสูง ลำดับกลาง และลำดับต่ำ ด้วยการกำหนดค่า CW และ BE ที่ต่างกัน นอกจากนี้ยังใช้เทคนิคในการปรับเปลี่ยนค่า BE โดยอาศัยพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงปริมาณข้อมูลที่มีอยู่เครือข่าย เพื่อกำหนดค่า BE ให้เหมาะสมกับปริมาณข้อมูลที่อยู่ในเครือข่าย โดยที่ชนิดของข้อมูล (Traffic type) ในแต่ละลำดับเป็นชนิดข้อมูลแบบเลขชี้กำลัง (Exponential traffic type) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยของระยะห่างระหว่างแพ็กเก็ตเท่ากับ 0.25 วินาที ผลจากการวิจัยในบทความ [8] แสดงให้เห็นว่า วิธีการส่งข้อมูลที่นำเสนอตามบทความ [8] จะให้อัตราข้อมูลประสิทธิผล อัตราการสูญหายของข้อมูล และค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงที่ดีกว่าวิธีการส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิม เมื่อโหนดที่ส่งข้อมูลมีจำนวนมากขึ้น อย่างไรก็ตามบทความใน [8] ไม่ได้พิจารณาการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ

1.2.6 C. Mario, S. Gianfranco, and P. Giovanni, “A Priority-Based CSMA/CA to Support Deadline-Aware Scheduling in Home Automation Applications Using IEEE 802.15.4” International Journal of Distributed Sensor Networks, April 2013. [9]

บทความ [9] นำเสนอวิธีการส่งข้อมูลที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบควบคุมบ้านแบบอัตโนมัติ (Home automation system) ที่ใช้บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ด้วยการนำเทคนิค Rate monotonic (RM) [10] มาใช้งานร่วมกับการจองช่วงเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ใช้กลไก Guaranteed time slots (GTSs) ของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 รวมถึงออกแบบให้โพรโทคอล CSMA/CA มีการแบ่งลำดับความสำคัญของข้อมูลที่จะทำการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลออกเป็นสามลำดับคือ ลำดับสูง ลำดับกลาง และลำดับต่ำ ซึ่งจะใช้งานร่วมกับการจองช่วงเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ใช้กลไก GTSs อย่างไรก็ตามบทความใน [9] ไม่ได้พิจารณาการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ

1.3 ประเด็นวิจัย

จากการตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อ 1.2 ซึ่งให้เห็นถึงความพยายามในการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ [2, 4] รวมถึงการแบ่งลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูลบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.15.4 อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ยังไม่พบงานวิจัยใดที่พัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอบนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิจัยต่อยอดจากบทความ [6, 8] โดยใช้การส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ และข้อมูลที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง สำหรับการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 รวมถึงการกำหนดค่า CW และ BE ที่เหมาะสมกับชนิดของข้อมูลที่ทำการส่ง โดยคำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วงของข้อมูลที่จะทำการส่งเป็นหลักแตกต่างจากบทความ [6, 8] ที่ไม่คำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วงของข้อมูลที่จะทำการส่งและไม่มีการส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ โพรโทคอล CSMA/CA ที่ปรับปรุงขึ้นใหม่จะถูกทดสอบสมรรถนะของเครือข่ายด้วย การวัดคุณภาพของเสียง การวัดคุณภาพของวิดีโอ และการใช้พลังงานด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย Network simulator (NS-2)

1.4 วัตถุประสงค์การวิจัย

วิจัยและพัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA สำหรับเครือข่ายไร้สายภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้รองรับข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอและข้อมูลที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง ให้ได้คุณภาพของเสียงและวิดีโออยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ผ่านโปรแกรมจำลองการทำงานระบบเครือข่าย โดยโพรโทคอลที่ได้จะมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากโพรโทคอลเดิมในประเด็นวิจัย ดังนี้

- พัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณให้พิจารณาลำดับความสำคัญของการส่งข้อมูลซึ่งคำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วงของข้อมูลที่จะทำการส่งเป็นหลัก
- กำหนดระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณให้เหมาะสมกับชนิดข้อมูลที่จะทำการส่ง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

พัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้รองรับข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอและข้อมูลที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง โดยมีลักษณะเครือข่ายแบบดาว (Star topology) และมีจำนวนโหนดส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ

อย่างน้อยหนึ่งตัว โหนดทุกตัวในเครือข่ายไม่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งใช้โปรแกรม NS-2 ในการดำเนินการวิจัยให้มีลักษณะเฉพาะตามวัตถุประสงค์การวิจัย

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

- ศึกษาทฤษฎีและหลักการรวมถึงบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัย
- ออกแบบและพัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 สำหรับเครือข่ายไร้สายเฉพาะกิจให้มีลักษณะเฉพาะตามวัตถุประสงค์โครงการ และเปรียบเทียบโพรโทคอลที่นำเสนอกับโพรโทคอลดั้งเดิม
- วิเคราะห์และสรุปผลแบบจำลอง
- ตรวจสอบสรุปผลและเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

วิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่นำเสนอด้วยการกำหนดลำดับความสำคัญของการส่งข้อมูลที่คำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วงจากต้นทางไปถึงปลายทางของข้อมูลที่จะทำการส่ง ทำให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ โดยที่เครือข่ายที่ใช้งานมีลักษณะเครือข่ายแบบดาวและมีจำนวนโหนดส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอได้ไม่เกินอย่างละหนึ่งตัวซึ่งยังเป็นข้อจำกัดอยู่ อย่างไรก็ตามผลงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวคิดเบื้องต้นเพื่อวิจัยและพัฒนาการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ต่อไป

1.8 โครงสร้างของรายงานวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 อธิบายถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ บทที่ 3 อธิบายถึงที่มาและการกำหนดค่าระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล ตลอดจนการกำหนดค่าระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณที่เหมาะสมกับการส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 บทที่ 4 เป็นการทดสอบสมรรถนะของเครือข่ายและการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบโพรโทคอล CSMA/CA ที่ได้นำเสนอ และสุดท้ายบทที่ 5 อธิบายถึงผลสรุปที่ได้จากงานวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้อ้างอิงในการทำวิจัย โดยในบทนี้จะเริ่มต้นด้วยความรู้พื้นฐานของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงหลักการและกระบวนการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA หลังจากนั้นเป็นการอธิบายวิธีการคำนวณคุณภาพเสียง สุดท้ายเป็นความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับภาพและวิดีโอ

2.1 มาตรฐาน IEEE 802.15.4

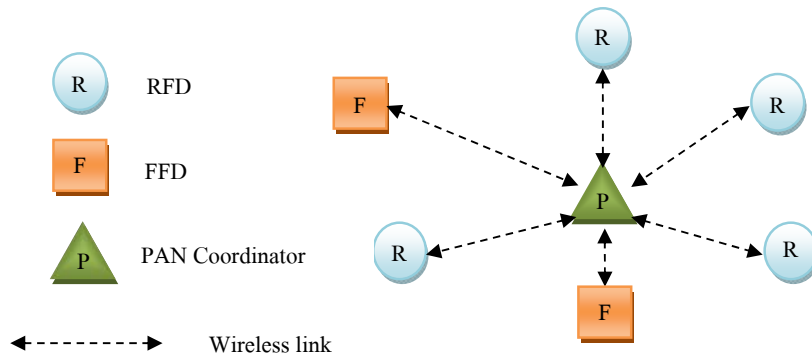
ปัจจุบันเทคโนโลยีเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless sensor networks: WSNs) ได้รับความนิยมน้อย่างกว้างขวาง จึงได้มีการศึกษา วิจัยและพัฒนาเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายอย่างต่อเนื่อง เพื่อที่จะนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับงานด้านต่าง ๆ เช่น งานด้านการเกษตร งานด้านการแพทย์ งานด้านอุตสาหกรรม และงานด้านการทหาร เป็นต้น ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ก็เป็นมาตรฐานหนึ่งที่ได้รับนิยมนำมาใช้กับเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย โดยงานวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจกับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สำหรับเครือข่ายไร้สายระยะใกล้ความเร็วต่ำหรือที่เรียกว่า Low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs) ซึ่งมีอัตราเร็วการรับส่งข้อมูล 250 กิโลบิตต่อวินาที เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มาตรฐานนี้มีข้อดีในด้านการใช้พลังงานน้อย (Low power)

2.1.1 ชนิดของโหนดและรูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่าย IEEE 802.15.4

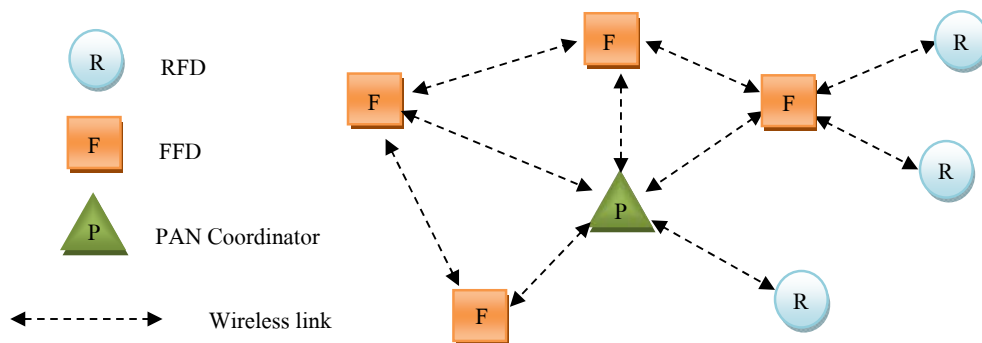
ในเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สามารถจำแนกชนิดของโหนดได้เป็น สองชนิดคือ Reduced function device (RFD) และ Full function device (FFD) [1] โดยที่โหนดชนิด RFD ทำหน้าที่เป็นโหนดปลายทาง (End-device) ได้อย่างเดียว การรับส่งข้อมูลไม่สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างโหนดที่เป็นแบบ RFD ด้วยกันเองได้ หากต้องการจะรับส่งข้อมูลกันจำเป็นต้องส่งข้อมูลผ่านโหนดที่เป็นแบบ FFD ดังนั้นโหนดที่เป็นแบบ RFD จึงใช้งานได้เฉพาะเครือข่ายแบบดาว (Star topology) หรือเป็นโหนดปลายทางในเครือข่ายที่มีการเชื่อมต่อแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer-to-peer topology) สำหรับโหนดชนิด FFD นี้ทำหน้าที่ได้หลากหลายกว่าชนิด RFD ได้แก่ ทำหน้าที่เป็นโหนดเริ่มต้นสร้างและควบคุมเครือข่ายซึ่งถูกเรียกว่า (Personal area network:

PAN coordinator) ทำหน้าที่เป็น โหนดตัวกลางในการส่งต่อข้อมูลภายในเครือข่ายซึ่งถูกเรียกว่า Coordinator และสุดท้ายทำหน้าที่ โหนดปลายทาง ในการรับส่งข้อมูลของ โหนดชนิด FFD นี้สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างโหนดที่เป็นแบบ RFD และโหนดที่เป็นแบบ FFD ด้วยกันเองได้ จึงใช้งานได้ทั้งเครือข่ายแบบดาวและเครือข่ายที่มีการเชื่อมต่อแบบเพียร์ทูเพียร์

รูปแบบการเชื่อมต่อเครือข่าย (Network topology) แบ่งออกเป็นสองรูปแบบ [1] คือ เครือข่ายรูปแบบที่หนึ่งเครือข่ายแบบดาวเป็นการสื่อสารกันโดยตรงระหว่างโหนดปลายทางกับโหนดการควบคุมส่วนกลางเดี่ยว (Single central controller) ที่เรียกว่า PAN coordinator ซึ่งเป็นโหนดตัวหลักทำหน้าที่ในขับเคลื่อนเครือข่ายและการเก็บรวบรวมข้อมูลของแต่ละโหนด โดยที่โหนดในเครือข่ายชนิดนี้สามารถเป็นได้ทั้งโหนดชนิด RFD และโหนดชนิด FFD ดังภาพประกอบที่ 2-1 เครือข่ายรูปแบบที่สองเครือข่ายแบบเพียร์ทูเพียร์ แต่ละโหนดสามารถสื่อสารกับโหนดข้างเคียงได้โดยตรงเท่าที่ย่านการสื่อสารของโหนดนั้นๆจะสื่อสารไปได้ อย่างไรก็ตามโหนดที่เป็นแบบ RFD แบบเดียวกันหากต้องการจะสื่อสารรับส่งข้อมูลกันจำเป็นต้องส่งข้อมูลผ่านโหนดที่เป็นแบบ FFD ดังภาพประกอบที่ 2-2



ภาพประกอบที่ 2-1 เครือข่ายแบบดาว [1]



ภาพประกอบที่ 2-2 เครือข่ายที่มีการเชื่อมต่อแบบเพียร์ทูเพียร์ [1]

2.1.2 ชั้นกายภาพ

สำหรับชั้นกายภาพของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีหน้าที่รับผิดชอบในการรับและส่งสัญญาณไร้สาย การมอดูเลชัน (Modulation) และการเข้ารหัสระดับช่องสัญญาณ (Channel coding) การเชื่อมต่อแบบไร้สายของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 สามารถใช้งานได้สามย่านความถี่ คือ ย่านความถี่ 868-868.6 เมกะเฮิร์ต มีช่องสัญญาณให้ใช้งาน 1 ช่องสัญญาณที่อัตราบิต (Data rate) 20 กิโลบิตต่อวินาที ความถี่ดังกล่าวใช้งานกันในยุโรป ย่านความถี่ 902-928 เมกะเฮิร์ต มีช่องสัญญาณให้ใช้งาน 10 ช่องสัญญาณที่อัตราบิต 40 กิโลบิตต่อวินาที ความถี่ดังกล่าวใช้งานกันในอเมริกา และย่านความถี่ 2400-2483.5 เมกะเฮิร์ต มีช่องสัญญาณให้ใช้งานมากถึง 16 ช่องสัญญาณที่อัตราบิต 250 กิโลบิตต่อวินาทีความถี่ดังกล่าวเป็นความถี่ที่ใช้งานมากที่สุด ทั้งสามย่านความถี่นี้ใช้เทคโนโลยีในการกระจายสัญญาณแบบดิวิตซ์สูง (Direct sequence spread spectrum: DSSS) สำหรับย่านความถี่ 2400-2483.5 เมกะเฮิร์ต มีการมอดูเลชันแบบ Offset quadrature phase shift keying (O-QPSK) ส่วนย่านความถี่ 868-868.6 เมกะเฮิร์ต และ 902-928 เมกะเฮิร์ต มีการมอดูเลชันแบบ Binary phase shift keying (BPSK) [11]

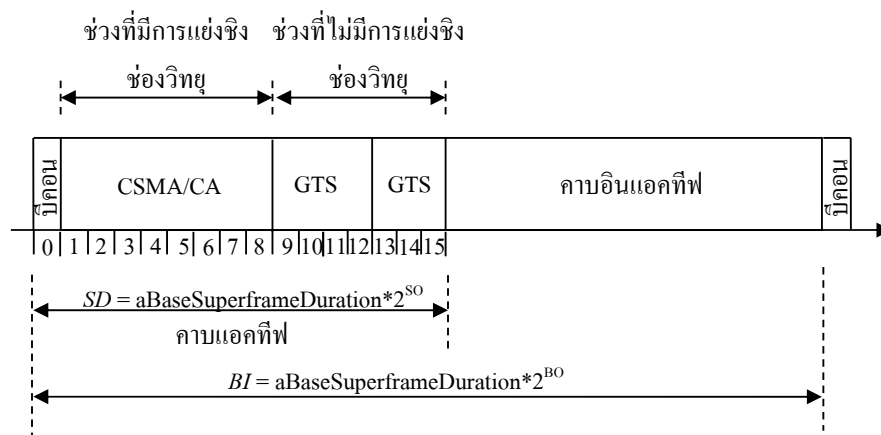
ตารางที่ 2-1 ย่านความถี่และจำนวนช่องสัญญาณของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [1, 11]

ย่านความถี่	2400 MHz	915 MHz	868 MHz
อัตราบิต	250 kbps	40 kbps	20 kbps
จำนวนช่องสัญญาณ	16	10	1
การมอดูเลชัน	O-QPSK	BPSK	BPSK
จำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ (Bit per symbol)	4	1	1
ระยะเวลาที่ใช้ต่อหนึ่งสัญลักษณ์	16 μ s	25 μ s	50 μ s

2.1.3 ชั้นควบคุมการเข้าใช้งานสื่อกลาง

ชั้นการควบคุมการเข้าใช้งานสื่อกลาง (Medium Access Control) ของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีหน้าที่หลักในการจัดการการเข้าใช้ช่องสัญญาณ โดยมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีโหมดการเข้าใช้ช่องสัญญาณให้เลือกใช้งานได้สองโหมดคือ Non-beacon enabled mode และ Beacon enabled mode ทั้งสองโหมดการทำงานจะใช้โปรโตคอล Carrier sense multiple access/collision avoidance (CSMA/CA) ในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ แต่ในโหมดการทำงาน Beacon enabled mode จะมีความพิเศษกว่าโหมดการทำงาน Non-beacon enabled mode ตรงที่สามารถจองช่วงเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณได้เนื่องจากมีกลไกที่เรียกว่า Guaranteed time slots (GTSs) ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยใช้

เฉพาะโหมดการทำงาน Beacon enabled mode แต่จะไม่มีการใช้กลไก GTSs ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงขอกล่าวถึงรายละเอียดของโครงสร้างซูเปอร์เฟรม (Superframe structure) ซึ่งจะถูกใช้งานในโหมดการทำงานดังกล่าว โดยโครงสร้างซูเปอร์เฟรมประกอบด้วยสามส่วนคือ บีคอนเฟรม (Beacon frame) คาบแอคทีฟ (Active period) และคาบอินแอคทีฟ (Inactive period) ดังภาพประกอบที่ 2-3 ซึ่งบีคอนเฟรมจะถูกกระจายสัญญาณ (Broadcast) มาจาก PAN coordinator หรือ Coordinator เพื่อเทียบจังหวะสัญญาณนาฬิกาให้ตรงกัน (Synchronization) กับ โหนดตัวอื่นๆที่อยู่ในรัศมีสัญญาณสื่อสาร นอกจากนี้ยังใช้ในการระบุว่าโหนดใดในเครือข่ายเป็น PAN coordinator



ภาพประกอบที่ 2-3 โครงสร้างซูเปอร์เฟรมของมาตรฐาน IEEE 802.15.4 [1]

โครงสร้างซูเปอร์เฟรมสามารถอธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์สองตัวคือ Beacon order (BO) และ Superframe order (SO) โดยที่ BO เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดความยาวของซูเปอร์เฟรมหรือที่รู้จักกันในชื่อ Beacon interval (BI) ความยาวของซูเปอร์เฟรมนี้คำนวณได้จากสมการ (2-1) และ SO เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดคาบแอคทีฟหรือที่รู้จักกันในชื่อ Superframe duration (SD) คาบแอคทีฟนี้คำนวณได้จากสมการ (2-2) ทั้ง BI และ SD มีหน่วยเป็นสัญลักษณ์ (Symbol)

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \quad (2-1)$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \quad (2-2)$$

เมื่อ $aBaseSuperframeDuration$ มีค่าเท่ากับ 960 สัญลักษณ์ ขณะที่หน่วยสัญลักษณ์สามารถคำนวณให้อยู่ในหน่วยไมโครวินาทีได้ทั้งนี้ขึ้นกับความถี่ที่ใช้งานดังตารางที่ 2-1 พารามิเตอร์ BO และ SO สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้อยู่ในช่วง 0 ถึง 14 ในกรณีที่เป็นโหมดการทำงาน Beacon enabled mode

โดยที่ $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ ในส่วนของคาบแอกทีฟจะถูกแบ่งย่อยออกเป็น 16 Time slots โดยแต่ละ Time slots จะมีความกว้างเท่าๆกันสามารถคำนวณได้จากสมการ (2-3) ซึ่ง Time slot duration มีหน่วยเป็นสัญลักษณ์ (Symbol)

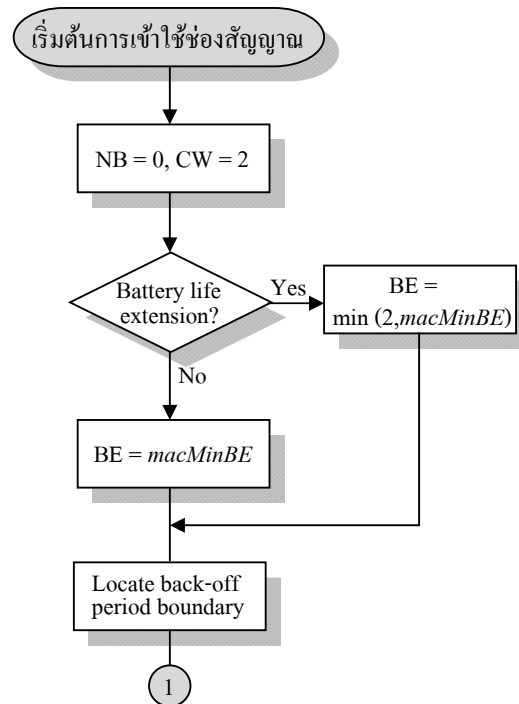
$$\text{Time slot duration} = \frac{SD}{16} \quad (2-3)$$

คาบแอกทีฟสามารถแบ่งย่อยได้เป็นสองส่วนคือ ช่วงที่มีการเข้าใช้แบบแย่งชิง (Contention access period) หรือย่อว่า CAP และช่วงที่ไม่มีมีการเข้าใช้แบบแย่งชิง (Contention free period) หรือย่อว่า CFP โดยที่ CAP จะใช้โพรโทคอล CSMA/CA ในการเข้าใช้ช่องสัญญาณและ CFP จะใช้กลไกที่เรียกว่า GTSs ในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ซึ่งโหนดที่จะใช้งานกลไกดังกล่าวจะทำการร้องขอไปยัง PAN coordinator ซึ่งสามารถใช้งานได้ไม่เกิน 7 Time slots

2.2 โพรโทคอล CSMA/CA (Carrier sense multiple access/collision avoidance)

โพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 สามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้คือ

- 1) ขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์หลักของโพรโทคอล CSMA/CA ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์สามตัวคือ พารามิเตอร์ตัวที่หนึ่งเรียกว่า Number of back-off (NB) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้นับจำนวนครั้งที่โพรโทคอล CSMA/CA ต้องหน่วงแพ็กเก็ตไว้ มีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 0 พารามิเตอร์ตัวที่สองเรียกว่า Back-off exponent (BE) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของแพ็กเก็ต โดยที่ BE จะมีค่าอยู่ในช่วง $macMinBE$ ถึง $macMaxBE$ ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ค่า $macMinBE$ มีค่าเท่ากับ 3 และค่า $macMaxBE$ มีค่าเท่ากับ 5 [1, 3] สุดท้ายพารามิเตอร์ตัวที่สามเรียกว่า Contention window (CW) เป็นพารามิเตอร์กำหนดจำนวนครั้งของการตรวจสอบช่องสัญญาณ ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ CW ให้มีค่าเท่ากับ 2 [1, 3] ฟังก์ชันขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้นแสดงดังภาพประกอบที่ 2-4 จากภาพประกอบที่ 2-4 Battery life extension เป็นทางเลือกเพื่อใช้โหมดประหยัดพลังงาน [1] โดยที่เมื่อเลือกใช้โหมดประหยัดพลังงานจะส่งผลให้ค่าเริ่มต้น BE มีค่าเท่ากับ 2 หลังจากที่กำหนดค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์เสร็จแล้วจะเป็นการกำหนดขอบเขตของการ Back-off

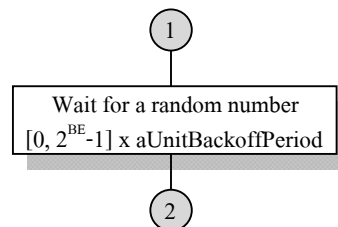


ภาพประกอบที่ 2-4 ฟังก์ชันขั้นตอนการกำหนดค่าเริ่มต้น

2) ขั้นตอนหลักเกี่ยวกับการชนกันของข้อมูล เมื่อโหนดมีข้อมูลพร้อมที่จะทำการส่ง โหนดจะต้องใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลผ่านทางพารามิเตอร์หลักของโปรโตคอล CSMA/CA ที่เรียกว่า Back-off exponent (BE) ระยะเวลาหน่วงดังกล่าวเรียกว่า Back-off time ซึ่งจะใช้วิธีการสุ่มแบบ Uniform distribution ในช่วง 0 ถึง $2^{BE}-1$ แสดงดังจากสมการที่ (2-4)

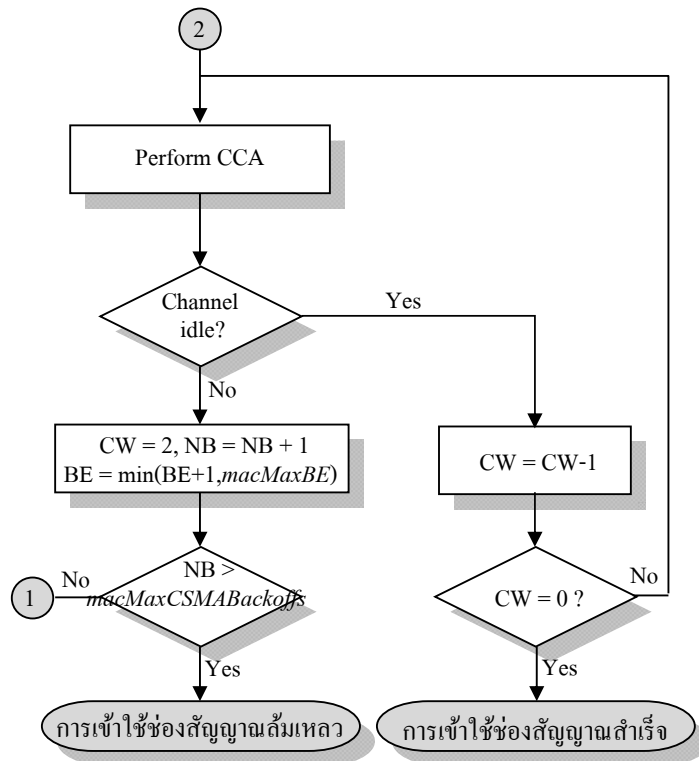
$$\text{Back-off time} = (\text{A random integer number between } 0 \text{ to } 2^{BE}-1) \times \text{aUnitBackoffPeriod} \quad (2-4)$$

โดยที่ค่าของ aUnitBackoffPeriod มีค่าเท่ากับ 20 สัญลักษณ์ หรือมีค่าเท่ากับ 320 ไมโครวินาทีที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ต ฟังก์ชันขั้นตอนหลักเกี่ยวกับการชนกันของข้อมูลแสดงดังภาพประกอบที่ 2-5



ภาพประกอบที่ 2-5 ฟังก์ชันขั้นตอนหลักเกี่ยวกับการชนกันของข้อมูล

3) ขั้นตอนการตรวจสอบช่องสัญญาณ หลังจากที่ใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลแล้ว โหนดที่จะส่งข้อมูลก็จะทำการประเมินช่องสัญญาณ (Clear Channel Assessment) หรือชื่อเรียกย่อว่า CCA ว่าสถานะของช่องสัญญาณที่จะใช้งานว่างหรือไม่ว่าง โดยระยะเวลาในการตรวจสอบช่องสัญญาณของแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับ 8 สัญลักษณ์ [1] หรือเท่ากับ 128 ไมโครวินาทีที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ต ขณะที่จำนวนครั้งของการตรวจสอบช่องสัญญาณจะขึ้นกับพารามิเตอร์ Contention window (CW) ซึ่งตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ได้กำหนดค่า CW ให้มีค่าเท่ากับ 2 [1, 3] นั่นหมายความว่า โหนดจะต้องทำการตรวจสอบช่องสัญญาณและพบว่าช่องสัญญาณไม่ได้ถูกใช้งานอยู่ติดต่อกันสองครั้งของการตรวจสอบช่องสัญญาณถึงจะสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อทำการส่งข้อมูลได้ แต่หากโหนดทำการตรวจสอบช่องสัญญาณแล้วพบว่าช่องสัญญาณกำลังถูกใช้งานอยู่ โหนดก็จะกลับไปใช้ระยะเวลาหน่วง (Back-off time) อีกครั้ง โดยจะเพิ่มค่า BE ขึ้นหนึ่งค่า ซึ่งจะส่งผลให้ออกาสที่ใช้ระยะเวลาหน่วงเพิ่มขึ้นแต่ค่า BE ที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าได้ไม่เกินค่า $macMaxBE$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5 อย่างไรก็ตามหากโหนดใช้เวลาหน่วงห้าครั้งต่อหนึ่งแพ็กเก็ตข้อมูลที่จะทำการส่ง แพ็กเก็ตข้อมูลนั้นก็จะถูกละทิ้งไป ฟังงานขั้นตอนการตรวจสอบช่องสัญญาณแสดงดังภาพประกอบที่ 2-6



ภาพประกอบที่ 2-6 ฟังงานขั้นตอนการตรวจสอบช่องสัญญาณ

2.3 การประเมินช่องสัญญาณ

การประเมินช่องสัญญาณ (Clear Channel Assessment) หรือชื่อเรียกย่อว่า CCA ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งของโพรโทคอล CSMA/CA โดยเริ่มจากขั้นการควบคุมการเข้าใช้งาน ล็อกกลางจะร้องขอไปยังชั้นกายภาพ เพื่อที่จะทำการประเมินช่องสัญญาณให้มั่นใจว่าช่องสัญญาณ ไม่ได้ถูกใช้งานโดยโหนดตัวอื่นๆ ซึ่งการประเมินช่องสัญญาณจะพิจารณาจากผลของ Energy detection (ED) หรือ Carrier sense (CS) เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าช่องสัญญาณที่จะใช้นั้นว่าง หรือไม่ว่าง ระยะเวลาในการตรวจสอบช่องสัญญาณมีค่าเท่ากับ 8 สัญลักษณ์ หรือเท่ากับ 128 ไมโครวินาทีที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ต โดยที่การประเมินช่องสัญญาณมีโหมดการทำงานทั้งหมดสาม โหมด [1] คือ

CCA mode 1: ในโหมดนี้ จะใช้ผลของ ED ในการตัดสินใจว่าช่องสัญญาณที่จะ ใช้นั้นว่างหรือไม่ว่าง ซึ่งพิจารณาจากระดับพลังงาน (Energy level) ของช่องสัญญาณที่ต้องการ ตรวจสอบ หากช่องสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบมีค่าระดับพลังงานสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ (ED threshold) ช่องสัญญาณจะถูกพิจารณาว่าไม่ว่าง ขณะที่ค่าที่กำหนดไว้ถูกตั้งค่าโดยโรงงาน

CCA mode 2: ในโหมดที่สองนี้จะใช้ผลของ CS ในการตัดสินใจว่าช่องสัญญาณที่ จะใช้นั้นว่างหรือไม่ว่าง ซึ่งพิจารณาจากระดับพลังงานของช่องสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบ หาก ช่องสัญญาณที่ต้องการตรวจสอบมีค่าระดับพลังงานสูงกว่าค่า CS threshold ช่องสัญญาณจะถูก พิจารณาว่าไม่ว่าง ต่างกันตรงที่ CS จะมีการถอดรหัสของสัญญาณเพื่อให้ทราบเนื้อหาของข้อมูล

CCA mode 3: ในโหมดนี้จะใช้งานทั้งโหมดที่หนึ่งและสองรวมกันในการตัดสินใจ ว่าช่องสัญญาณที่จะใช้นั้นว่างหรือไม่ว่างโดยการใช้ (AND/OR)

- ถ้าระดับพลังงานที่ตรวจจับได้มีค่ามากกว่า ED threshold และ CS threshold จะ พิจารณาว่าช่องสัญญาณนั้นไม่ว่าง
- ถ้าระดับพลังงานที่ตรวจจับได้มีค่ามากกว่า ED threshold หรือ CS threshold จะ พิจารณาว่าช่องสัญญาณนั้นไม่ว่าง

ในการเลือกโหมดการทำงาน CCA สามารถเลือกได้จากการตั้งค่าที่ตัวแปร *phyCCAMode* ซึ่ง โปรแกรม NS-2 เวอร์ชัน 2.34 มีให้เลือกใช้งานทั้งสามโหมด อย่างไรก็ตามในโหมดที่หนึ่งและสาม ยังไม่สมบูรณ์หากต้องการใช้งานสามารถแก้ไขได้ตาม [12] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โหมดที่ สองในการทำวิจัย

2.4 การคำนวณคุณภาพเสียง

คุณภาพของการสื่อสารเสียงเป็นระดับคุณภาพของเสียงที่เกิดขึ้นระหว่างการสื่อสารของคู่สนทนาหรืออีกนัยหนึ่งอาจหมายถึงคุณภาพของระบบเครือข่ายสื่อสารที่รองรับการให้บริการสื่อสารเสียงนั้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเสียงประกอบด้วยสามตัวแปร ตัวแปรแรกคือ เวลาหน่วง (Delay) เป็นผลรวมของเวลาหน่วงที่เกิดจากการส่งแพ็กเก็ตเกิดจากต้นทางไปยังปลายทาง และเวลาหน่วงที่เกิดจากคิว (Queuing delay) ตัวแปรที่สองคือ การสูญหายของข้อมูล (Packet loss) เป็นการสูญหายของข้อมูลหรือเสียหาย โดยปกติสาเหตุของการสูญหายเกิดขึ้นเนื่องจากการชนกัน (Collision) ของแพ็กเก็ตในเครือข่ายและการส่งแพ็กเก็ตที่ผิดพลาดเมื่อปริมาณข้อมูลในเครือข่ายหนาแน่นหรือมีสัญญาณรบกวน (Noise) สุดท้ายตัวแปรที่สามคือ ค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ต (Jitter) เป็นความแตกต่างระหว่างเวลาหน่วงของแพ็กเก็ตในการสื่อสารจากต้นทางไปยังปลายทาง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินคุณภาพของเสียงด้วยการหาค่า Transmission rating factor (R-factor) ซึ่งเป็นค่าตัวแปรที่บ่งบอกถึงระดับคุณภาพของการสื่อสารเสียงโดยพิจารณาจากปัจจัยสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น เวลาหน่วง การสูญหายของข้อมูล และค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตเป็นต้น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 100 สามารถคำนวณจากสมการที่ (2-5) ดังต่อไปนี้ [2, 13]

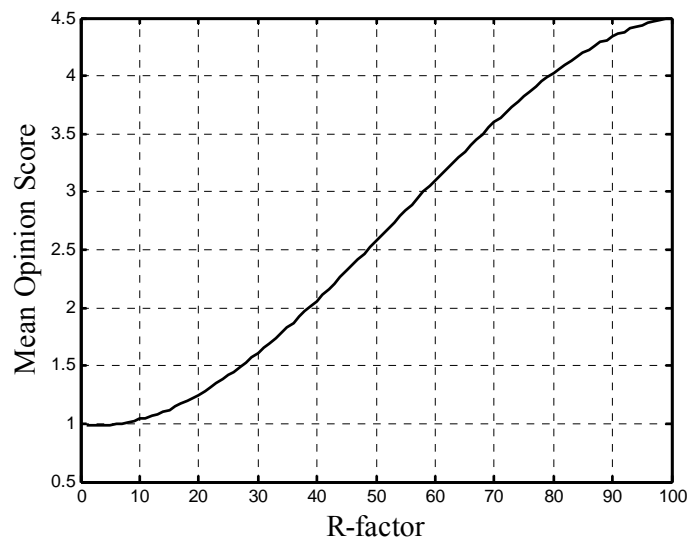
$$R \sim 94.2 - 0.024d + 0.11(d - 177.3)H(d - 177.3) - 11 - 40 \ln(1 - 10e) \quad (2-5)$$

เมื่อ d คือผลรวมของเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายจากต้นทางถึงปลายทาง การเข้ารหัสเสียง และค่าเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นจากการรวบรวมแพ็กเก็ตไว้ในหน่วยความจำของฝั่งผู้รับก่อนที่จะแปลงเป็นสัญญาณเสียง หรือที่เรียกว่า jitter buffer ค่าดังกล่าวจะช่วยลดการกระตุกของเสียงทางฝ่ายรับ โดยค่าเวลาหน่วงจากการเข้ารหัสเสียงมีค่าเท่ากับ 25 มิลลิวินาที อ้างอิงจากการเข้ารหัสและถอดรหัสข้อมูลเสียงชนิด G729a ซึ่งเป็นชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในระบบ VoIP ขณะที่ค่า jitter buffer มีค่าเท่ากับ 60 มิลลิวินาที ในส่วนของ $H(d-177.3)$ คือฟังก์ชันขั้นบันไดของของเฮฟวิไซด์ (Heaviside step function) โดยจะมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ $d-177.3$ มีค่าน้อยกว่า 0 และมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ $d-177.3$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 สุดท้ายส่วนของ e คือค่าอัตราส่วนระหว่างการสูญหายของข้อมูลต่อปริมาณข้อมูลที่ทำการส่ง

ค่า R-factor ที่คำนวณจากสมการที่ (2-5) เชื่อมโยงได้กับค่า Mean Opinion Score (MOS) ดังตารางที่ 2-2 และ ภาพประกอบที่ 2-7 โดยที่ค่า MOS เป็นระดับคุณภาพเสียงที่ประเมิน โดยการพิจารณาเชิงคุณภาพ (Subjective) ด้วยการให้คะแนนจากผู้ทดสอบตามวิธีการอย่างเป็นระบบตามกำหนดโดยสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International telecommunication union: ITU) ค่าที่ได้จะเป็นค่าตัวเลขระหว่าง 1 ถึง 5 โดยที่ 5 หมายถึงคุณภาพที่ดีที่สุด และระดับคุณภาพจะลดลงตามคะแนนที่ต่ำลงจนถึงระดับ 1 หมายถึงคุณภาพที่ไม่สามารถยอมรับได้แสดงดัง ตารางที่ 2-3 อย่างไรก็ตามค่า MOS ที่แนะนำอย่างน้อยที่สุดควรจะไม่ต่ำกว่า 3.0 [2]

ตารางที่ 2-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง R-factor กับ MOS [2, 13]

R-factor	MOS
$R < 0$	1
$R > 100$	4.5
$0 < R < 100$	$1+0.035R+7\times 10^{-6}R(R-60)(100-R)$



ภาพประกอบที่ 2-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง R-factor กับ MOS [13]

ตารางที่ 2-3 ค่า MOS และระดับคุณภาพของเสียง [13]

Mean opinion score (MOS)	คุณภาพ
5	ยอดเยี่ยม
4	ดี
3	พอใช้
2	ไม่ดี
1	แย่มาก

2.5 การบีบอัดข้อมูลวิดีโอและการคำนวณคุณภาพวิดีโอ

การบีบอัดข้อมูลวิดีโอมีจุดประสงค์เพื่อลดขนาดของข้อมูล ซึ่งจะส่งผลให้ลดปริมาณการใช้งานแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลผ่านเครือข่าย ดังนั้นการบีบอัดข้อมูลวิดีโอจึงถือว่ามี ความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับการส่งข้อมูลวิดีโอผ่านเครือข่ายไร้สายที่มีแบนด์วิดท์ที่จำกัด โดย ปัจจุบันมีมาตรฐานสำหรับการบีบอัดข้อมูลวิดีโอให้เลือกใช้งานอยู่หลากหลายมาตรฐาน ซึ่งหนึ่งใน นั้นก็คือมาตรฐานการบีบอัดข้อมูลวิดีโอแบบเอ็มพีเอค-4 มาตรฐานการบีบอัดข้อมูลวิดีโอดังกล่าวได้รับการ พัฒนาโดย Moving picture experts group (MPEG) [14] ซึ่งใช้ทั้งการบีบอัดข้อมูลภายในเฟรม เดียวกัน (Intra frame compression) และการบีบอัดข้อมูลแบบอ้างอิงกับเฟรมอื่น (Inter frame compression) การบีบอัดวิดีโอแบบเอ็มพีเอค-4 ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นการบีบอัดภาพและ ส่วนที่เป็นการบีบอัดเสียง แต่สำหรับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้มาตรฐานเอ็มพีเอค-4 เฉพาะส่วนที่ เป็นการบีบอัดภาพเฟรมของวิดีโอเอ็มพีเอค-4 เท่านั้น โดยที่ข้อมูลวิดีโอที่ได้หลังจากการบีบอัดข้อมูล แบบเอ็มพีเอค-4 สามารถแบ่งเฟรมได้เป็นสามชนิด คือ เฟรม I (Intra frame) เฟรม P (Predictive frame) และเฟรม B (Bi-directionally predictive frame) โดยเฟรม I เกิดขึ้นจากการบีบอัดที่ใช้ข้อมูลเฟรมเดียว เท่านั้น ซึ่งเฟรม I นี้ใช้สำหรับแสดงภาพนิ่ง ในส่วนของเฟรม P เกิดขึ้นจากการบีบอัดที่อ้างอิงข้อมูล ของเฟรม I หรือเฟรม P ที่อยู่ก่อนหน้า ซึ่งเฟรม P นี้ใช้สำหรับแสดงทิศทางการเคลื่อนไหวของวัตถุใน ภาพ นอกจากนี้ขนาดของพื้นที่หน่วยความจำของเฟรม P ยังน้อยกว่าเฟรม I เนื่องจากเฟรม P จะเก็บ ข้อมูลเฉพาะส่วนที่มีความแตกต่างกับเฟรมก่อนหน้า แต่เฟรม I จะเก็บที่มีการบีบอัดทั้งเฟรม และ สุดท้ายเฟรม B เกิดขึ้นจากการบีบอัดข้อมูลที่อ้างอิงข้อมูลของเฟรม P ที่อยู่ก่อนหน้าและถัดไป ซึ่ง เฟรม B นี้ใช้สำหรับการแสดงเส้นและสีของวัตถุในภาพคุณสมบัติมากขึ้น

ค่าที่นิยมนำมาใช้วัดคุณภาพวิดีโอคือ การคำนวณหาค่าความแตกต่างระหว่างเฟรมภาพต้นฉบับกับเฟรมภาพที่ส่งผ่านเครือข่าย ค่านี้เรียกว่า Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) โดยถ้ามีค่า PSNR สูงจะถือว่ามีความประสิทธิภาพที่ดี ซึ่งค่าดังกล่าวนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-6) และ (2-7)

$$PSNR = 10 * \log_{10} \left[\frac{(2^b - 1)^2}{MSE} \right] \quad (2-6)$$

$$MSE = \frac{1}{P_r P_c} \sum_{i=1}^{P_r} \sum_{j=1}^{P_c} (X(i, j) - X'(i, j))^2 \quad (2-7)$$

เมื่อ b คือจำนวนบิตที่ใช้แทนหนึ่งจุดภาพซึ่งในที่นี้ใช้ขนาด 8 บิต ขณะที่ P_r และ P_c คือจำนวนจุดภาพในแนวนอนและแนวตั้ง $X(i, j)$ คือค่าของจุดภาพ ณ ตำแหน่ง (i, j) ของข้อมูลภาพเฟรมภาพต้นฉบับ $X'(i, j)$ คือค่าของจุดภาพ ณ ตำแหน่ง (i, j) ของเฟรมภาพที่ส่งผ่านเครือข่ายไร้สาย ความสัมพันธ์ระหว่าง PSNR กับ MOS แสดงดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง PSNR กับ MOS [15]

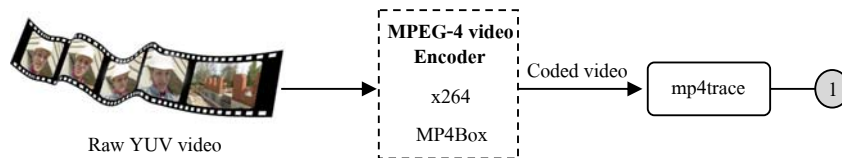
PSNR (dB)	MOS
>37	5 (ยอดเยี่ยม)
31-37	4 (ดี)
25-31	3 (พอใช้)
20-25	2 (ไม่ดี)
<20	1 (แย)

2.6 เครื่องมือ Evalvid

Evalvid [16-17] เป็นกลุ่มเครื่องมือที่นำมาใช้งานร่วมกับ NS-2 เพื่อให้สามารถจำลองการส่งข้อมูลวิดีโอที่มีการบีบอัดแบบเอ็มเพ็ก-4 และประเมินคุณภาพของการส่งข้อมูลวิดีโอแบบเอ็มเพ็ก-4 ซึ่งการใช้งานเครื่องมือ Evalvid ร่วมกับ NS-2 แบ่งออกเป็นสามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) ขั้นตอนการเข้ารหัสข้อมูลวิดีโอต้นฉบับให้กลายเป็นข้อมูลวิดีโอแบบเอ็มเพ็ก-4 ด้วยเครื่องมือเข้ารหัสวิดีโอแบบเอ็มเพ็ก-4 (MPEG-4 video encoder) โดยที่ข้อมูลวิดีโอต้นฉบับที่จะใช้กับเครื่องมือ Evalvid ต้องอยู่ในระบบสี (Color model) แบบ YUV เนื่องจากการประเมิน

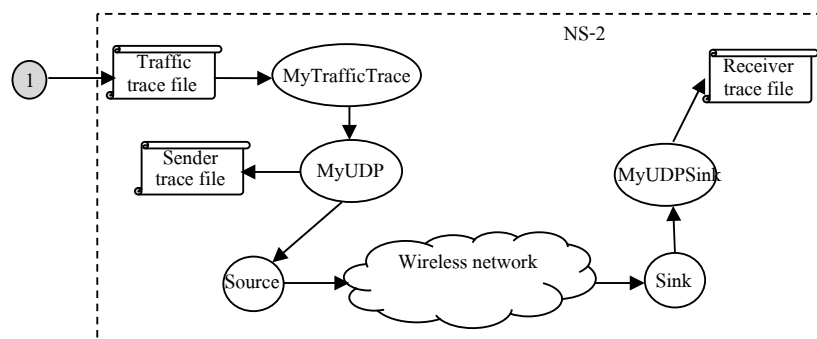
คุณภาพวิดีโอรองรับเฉพาะระบบสี YUV เท่านั้น ในส่วนของขนาดภาพ (Frame size) มีให้เลือกใช้งานได้สองแบบคือ 176x144 จุดภาพ (Pixel) และ 352x288 จุดภาพ ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้ขนาดภาพแบบ 176x144 จุดภาพ เนื่องจากเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีอัตราบิต (Data rate) ที่ต่ำ การเลือกใช้ขนาดภาพ 176x144 จุดภาพจะช่วยให้อัตราปริมาณข้อมูลวิดีโอที่จะทำการส่ง การเข้ารหัสข้อมูลวิดีโอแสดงดังภาพประกอบที่ 2-8



ภาพประกอบที่ 2-8 การเข้ารหัสข้อมูลวิดีโอ [17]

ในส่วนของเครื่องมือการเข้ารหัสวิดีโอแบบเอ็มพีเอช-4 ประกอบไปด้วย x264 และ MP4Box โดยที่เครื่องมือ x264 จะเข้ารหัสข้อมูลวิดีโอที่อยู่ในรูปแบบ YUV ให้เป็นข้อมูลวิดีโอที่อยู่ในรูปแบบ H.264 หลังจากนั้นเครื่องมือ MP4Box จะทำหน้าที่ในการเข้ารหัสข้อมูลวิดีโอที่อยู่ในรูปแบบ H.264 ให้อยู่ในรูปแบบเอ็มพีเอช-4 จากนั้นนำข้อมูลวิดีโอแบบเอ็มพีเอช-4 ที่ได้มาใช้กับเครื่องมือ mp4trace ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวจะทำหน้าที่ในการสร้างไฟล์ข้อมูลวิดีโอเพื่อนำไปใช้สำหรับการจำลองการทำงานบน NS-2

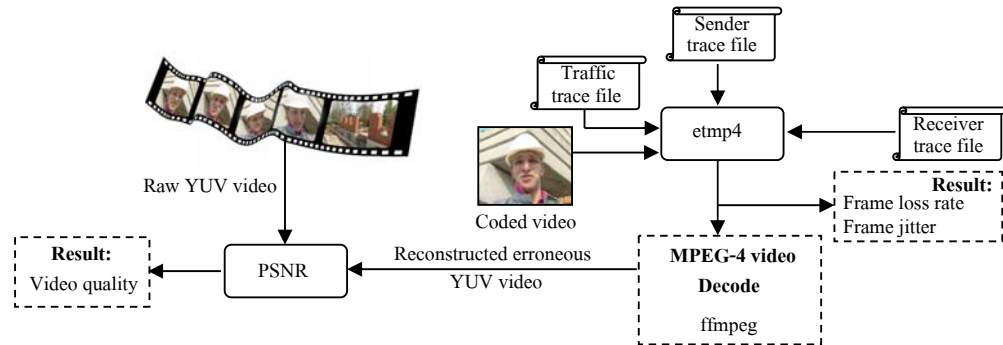
2) ขั้นตอนการส่งข้อมูลวิดีโอแบบเอ็มพีเอช-4 ผ่านเครือข่ายไร้สาย โดยไฟล์ข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือ mp4trace ในขั้นตอนนี้หนึ่งเป็นไฟล์ Traffic trace ซึ่งภายในไฟล์นี้จะอธิบายข้อมูลของ ลำดับของเฟรม (Frame number) ชนิดของเฟรม (Frame type) ขนาดของเฟรม (Frame size) จำนวนของแพ็คเกจ (Number of packets) และเวลาที่ต้องส่งข้อมูล การส่งข้อมูลวิดีโอผ่านเครือข่ายไร้สายแสดงดังภาพประกอบที่ 2-9



ภาพประกอบที่ 2-9 การส่งข้อมูลวิดีโอผ่านเครือข่ายไร้สาย [17]

หลังจากผ่านขั้นตอนที่สองมาแล้วจะทำให้ได้ไฟล์ Sender trace และไฟล์ Receiver trace ซึ่งในไฟล์ดังกล่าวจะอธิบายถึงรายละเอียดของเวลาที่ทำการส่งข้อมูลหรือรับข้อมูล หมายเลขของแพ็กเก็ต (Packet ID) และขนาดของข้อมูลที่ส่งหรือที่รับได้

3) ขั้นตอนการประเมินคุณภาพของวิดีโอด้วยเครื่องมือ etmp4 และเครื่องมือ PSNR แสดงดังภาพประกอบที่ 2-10



ภาพประกอบที่ 2-10 ขั้นตอนการประเมินคุณภาพของวิดีโอ [17]

ข้อมูลที่ได้อุปกรณ์ etmp4 จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับ อัตราการสูญหายของเฟรม (Frame loss rate) และค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างเฟรม (Frame jitter) ในการใช้เครื่องมือ PSNR จะต้องทำการถอดรหัสข้อมูลวิดีโอที่อยู่ในรูปแบบเอ็มพีเอ-4 ให้กลับมาเป็นข้อมูลวิดีโอที่อยู่ในรูปแบบ YUV เสียก่อนด้วยการใช้เครื่องมือถอดรหัสข้อมูลวิดีโอที่เรียกว่า ffmpeg

2.7 แบบจำลองประกอบการจำลองการทำงาน

แบบจำลองที่ใช้สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้มี 2 แบบจำลองคือ แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ (Radio propagation model) และแบบจำลองพลังงาน (Energy model) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.7.1 แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ Two-ray ground reflection

แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ Two-ray ground reflection เป็นหนึ่งในแบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุที่โปรแกรม NS-2 เวอร์ชัน 2.34 มีไว้ให้สามารถเลือกใช้งานได้ โดยที่แบบจำลอง Two-ray ground reflection จะพยากรณ์การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss) เมื่อกำลังของสัญญาณที่รับได้ประกอบไปด้วย กำลังของสัญญาณที่ส่งออกจากโหนดฝ่ายส่งไปยังโหนดฝ่ายรับได้โดยตรง (Line-of-sight) และกำลังของสัญญาณที่ส่งออกที่เกิดการสะท้อนพื้นโลกมายังตัวรับ (Ground reflection) แสดงการคำนวณได้ดังสมการ (2-8)

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4 L} \quad (2-8)$$

เมื่อกำหนดให้ $P_r(d)$ คือกำลังของสัญญาณที่รับได้ที่ระยะทาง d มีหน่วยเป็นวัตต์ P_t คือกำลังของสัญญาณที่ส่งออกมีหน่วยเป็นวัตต์ G_t และ G_r คืออัตราขยายของสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับตามลำดับ h_t และ h_r คือความสูงของสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับตามลำดับมีหน่วยเป็นเมตร d คือระยะห่างของสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับมีหน่วยเป็นเมตร และ L คือ การสูญเสียของระบบ (System loss) โดยที่ $L \geq 1$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุ Two-ray ground reflection จึงจำเป็นต้องคำนวณหาระยะห่างของสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับ เพื่อกำหนดการวางตำแหน่งของโหนดให้ครอบคลุมการรับและส่งสัญญาณ โดยที่กำหนดให้ความไวในการรับสัญญาณ (Receiver sensitivity) มีค่าเท่ากับ -95 dBm และกำลังของสัญญาณที่ส่งออกมีค่าเท่ากับ -25 dBm ขณะที่อัตราขยายของสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับมีค่าเท่ากับหนึ่ง ความสูงของสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับมีค่าเท่ากับ 0.15 เมตร การสูญเสียของระบบมีค่าเท่ากับ 1

คำนวณหาค่ากำลังของสัญญาณที่รับจากหน่วย dBm ให้เป็นหน่วยวัตต์

$$P_r(\text{dBm}) = 10 \log_{10}(P_r(\text{W})/0.001\text{W})$$

$$P_r(\text{W}) = 3.16228 \times 10^{-13} \text{ W}$$

คำนวณหาค่ากำลังของสัญญาณที่ส่งออกจากหน่วย dBm ให้เป็นหน่วยวัตต์

$$P_t(\text{dBm}) = 10 \log_{10}(P_t(\text{W})/0.001\text{W})$$

$$P_t(\text{W}) = 3.16228 \times 10^{-6} \text{ W}$$

แทนค่ากำลังของสัญญาณที่รับ ค่ากำลังของสัญญาณที่ส่งออกที่มีเป็นหน่วยวัตต์ ค่าอัตราขยายของสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับ ความสูงของสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับ และค่าการสูญเสียของระบบลงในสมการ (2-8) เพื่อหาค่าระยะห่างของสายอากาศฝั่งส่งและฝั่งรับ

$$3.16228 \times 10^{-13} = \frac{(3.16228 \times 10^{-6}) \times (1) \times (1) \times (0.15)^2 \times (0.15)^2}{d^4 \times (1)}$$

$$d = 8.435m$$

ดังนั้น ระยะห่างของสายอากาศส่งและฝั่งรับมีค่าเท่ากับ 8.435 เมตร

2.7.2 แบบจำลองพลังงาน (Energy model)

แบบจำลองพลังงานของโปรแกรม NS-2 เป็นแบบจำลองที่บ่งบอกถึงระดับพลังงานที่โหนดใช้ไปในแต่ละโหมดการทำงานประกอบด้วย โหมดรับข้อมูล (Receive mode) โหมดส่งข้อมูล (Transmits mode) และ โหมดนิ่งเฉย (Idle mode) ซึ่งการใช้แบบจำลองพลังงานสามารถกำหนดค่าให้ตัวแปรที่สำคัญได้ในไฟล์นามสกุล Tcl แสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

```
$ns_ node-config -initialEnergy 13000.0 \
                    -idlePower 0.00077 \
                    -rxPower 0.035 \
                    -txPower 0.031 \
```

โดยที่ตัวแปรที่หนึ่งคือ initialEnergy เป็นตัวแปรที่ใช้กำหนดค่าพลังงานเริ่มต้นให้กับโหนดทุก ๆ ตัวที่อยู่ในเครือข่าย มีหน่วยเป็นจูล ตัวแปรที่สองคือ idlePower เป็นตัวแปรที่ใช้กำหนดค่ากำลังที่ใช้ขณะนิ่งเฉย มีหน่วยเป็นวัตต์ ตัวแปรที่สามคือ rxPower เป็นตัวแปรที่ใช้กำหนดค่ากำลังที่ใช้รับข้อมูล มีหน่วยเป็นวัตต์ และตัวแปรที่สี่คือ txPower เป็นตัวแปรที่ใช้กำหนดค่ากำลังที่ใช้ส่งข้อมูลมีหน่วยเป็นวัตต์ ซึ่งการคำนวณพลังงานที่ใช้ในโหมดนิ่งเฉยคำนวณได้จากกำลังที่ใช้ขณะนิ่งเฉยคูณกับระยะเวลาที่นิ่งเฉย การคำนวณได้จากกำลังที่ใช้รับข้อมูลคูณกับระยะเวลาที่ใช้รับข้อมูล และการคำนวณพลังงานที่ใช้ในโหมดส่งข้อมูลสามารถคำนวณได้จากกำลังที่ใช้ส่งข้อมูลคูณกับระยะเวลาที่ใช้ส่งข้อมูล

บทที่ 3

การกำหนดลำดับความสำคัญในการเข้าใช้ช่องสัญญาณของแพ็กเกต

ในบทนี้เป็นรายละเอียดการทดลอง เพื่อศึกษาการกำหนดค่าระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณผ่านทางพารามิเตอร์หลักของโพรโทคอล CSMA/CA ที่เรียกว่า Backoff exponent (BE) และ Contention window (CW) ให้เหมาะสมกับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ

3.1 แนวคิดการกำหนดลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูล

แนวคิดการกำหนดลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูลเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ ผู้ทำวิจัยได้แบ่งข้อมูลออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มที่หนึ่งคือข้อมูลที่เคร่งครัดคุณภาพการให้บริการ (Quality of services: QoSs) ในที่นี้แทนด้วยข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ ข้อมูลในกลุ่มนี้จะคำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วง จากเอกสารอ้างอิงของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ (International telecommunication union: ITU) G.114 มีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับเวลาหน่วงของการส่งข้อมูลเสียง และข้อมูลวิดีโอที่มีผลต่อผู้ใช้งาน แสดงดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ระยะเวลาการส่งข้อมูลทิศทางเดียว (One-way transmission time) [5, 18]

ระยะเวลา	ผลของเวลาหน่วง
0 - 150 มิลลิวินาที	คุณภาพยอมรับได้ และผู้ใช้งานไม่รู้สึถึงเวลาหน่วง
150 - 400 มิลลิวินาที	คุณภาพยอมรับได้ แต่ผู้ใช้งานรู้สึถึงเวลาหน่วงที่เกิดขึ้น
มากกว่า 400 มิลลิวินาที	คุณภาพไม่สามารถยอมรับได้

นอกจากนี้การส่งข้อมูลวิดีโอที่มีทั้งภาพเคลื่อนไหวพร้อมเสียง (Video conference) มีข้อกำหนดความต่างของเวลาระหว่างข้อมูลเสียงและข้อมูลภาพ (Lip synchronization) ไม่เกิน 100 มิลลิวินาที [5] ดังนั้นเพื่อให้เวลาหน่วงอยู่ในช่วง 0 ถึง 150 มิลลิวินาที รวมถึงความต่างของเวลาระหว่างข้อมูลเสียงและข้อมูลภาพ ได้ตรงตามข้อเสนอแนะของสหภาพโทรคมนาคมระหว่างประเทศ ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะกำหนดให้เวลาหน่วงของการส่งข้อมูลเสียงที่น้อยกว่า 100 มิลลิวินาที [5, 19] และเวลาหน่วงของการ

ส่งข้อมูลวิดีโอที่น้อยกว่า 150 มิลลิวินาที [5, 19] กลุ่มที่สองคือข้อมูลที่ไม่ได้เร่งรัดคุณภาพการให้บริการมาก ตัวอย่างข้อมูลชนิดนี้คือข้อมูลอุณหภูมि ข้อมูลในกลุ่มนี้จะไม่คำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วงซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกข้อมูลกลุ่มที่สองนี้ว่าข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง จากข้อมูลสองกลุ่มจะเห็นว่าถ้านำข้อมูลที่จะทำการส่งมาเรียงลำดับความต้องการเวลาหน่วงจากน้อยไปมากจะได้ข้อมูลเสียงซึ่งมีความต้องการเวลาหน่วงน้อยที่สุด ลำดับถัดมาคือข้อมูลวิดีโอ และลำดับสุดท้ายคือข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง ดังนั้นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อจะทำการส่งข้อมูลซึ่งใช้ช่องสัญญาณเดียวกันจึงให้โอกาสกับโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงได้เข้าใช้ช่องสัญญาณเป็นลำดับแรก ลำดับถัดมาคือโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอและลำดับสุดท้ายคือโหนดที่ส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง

การกำหนดโอกาสในการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ทำได้สองวิธีคือ วิธีที่หนึ่งกำหนดระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลผ่านทางพารามิเตอร์ BE ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง $macMinBE$ ถึง $macMaxBE$ ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เดิม ค่า $macMinBE$ มีค่าเท่ากับ 3 และค่า $macMaxBE$ มีค่าเท่ากับ 5 [1, 3] ค่า BE ที่น้อยจะส่งผลให้ใช้ระยะเวลาหน่วงน้อยกว่าค่า BE ที่มากและมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณมากกว่า นอกจากนี้พารามิเตอร์ BE ยังส่งผลกระทบต่อค่าเวลาหน่วงจากต้นทางถึงปลายทาง (End-to-end delay) มากกว่าพารามิเตอร์ CW [6] วิธีที่สองกำหนดระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณผ่านทางพารามิเตอร์ CW ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 เดิม ค่า CW มีค่าเท่ากับ 2 [1, 3] ค่า CW ที่น้อยจะส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบช่องสัญญาณน้อยกว่าค่า CW ที่มากและมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณมากกว่า นอกจากนี้พารามิเตอร์ CW ยังส่งผลกระทบต่อปริมาณงาน (Throughput) มากกว่าพารามิเตอร์ BE ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้วิธีดังกล่าวทั้งสองวิธีร่วมกันเช่นเดียวกับงานวิจัยใน [6, 8] การกำหนดโอกาสในการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 หากใช้งานทั้ง BE และ CW จะเพิ่มโอกาสในการเข้าใช้ช่องสัญญาณให้กับโหนดที่ส่งข้อมูลที่มีลำดับความสำคัญสูงกว่าและลดโอกาสการเข้าใช้ช่องสัญญาณพร้อมกันกับโหนดที่ส่งข้อมูลที่มีลำดับความสำคัญแตกต่างกัน เนื่องจากค่า BE จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล โดยใช้วิธีการสุ่มแบบ Uniform distribution ในช่วง 0 ถึง 2^{BE-1} ค่าที่ได้จากการสุ่มจะเป็นจำนวนเท่าของ 320 ไมโครวินาทีที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ต [1-2] ซึ่งถ้าใช้การจัดลำดับความสำคัญโดยการใช้ BE อย่างเดียว จะส่งผลให้โหนดที่ส่งข้อมูลที่มีลำดับความสำคัญลำดับกลาง หรือ ลำดับต่ำ มีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณพร้อมกับโหนดที่ส่งข้อมูลที่มีลำดับความสำคัญ ลำดับสูง เมื่อค่าที่สุ่มได้จากช่วง 0 ถึง 2^{BE-1} ได้เท่ากัน แต่เมื่อมีการจัดลำดับความสำคัญด้วยการใช้ CW ร่วมด้วยถึงแม้ว่าค่าที่สุ่มได้จากช่วง 0 ถึง 2^{BE-1} จะได้เท่ากัน โหนดที่มีค่า CW น้อย

กว่าที่จะมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนโหนดที่มีค่า CW มากกว่า อย่างไรก็ตามงานวิจัยใน [6, 8] ไม่พิจารณาการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอที่ต้องการแสดงข้อมูลเป็นแบบเวลาจริงจึงไม่ทราบค่า BE และ CW ที่เหมาะสม ดังนั้นในบทที่ 3 นี้จึงได้ทดลองเพื่อศึกษาค่าที่เหมาะสมกับข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอที่ต้องการแสดงข้อมูลเป็นแบบเวลาจริง

3.2 การศึกษาการกำหนดค่าระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณที่เหมาะสมกับการส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ

3.2.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาการกำหนดค่า BE และ CW ของโหนดส่งข้อมูลเสียงและโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ เพื่อให้ได้คุณภาพของข้อมูลเสียงและคุณภาพของวิดีโอเป็นที่ยอมรับ โดยที่คุณภาพของข้อมูลเสียงประเมินจากค่า R-factor ซึ่งค่า R-factor ที่ได้เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า Mean opinion score (MOS) ต้องได้ค่าไม่ต่ำกว่า 3.0 [2] และเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงต้องไม่เกิน 100 มิลลิวินาที [5, 19] นอกจากนี้คุณภาพของข้อมูลวิดีโอซึ่งประเมินจากค่า PSNR ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 25-31 dB เมื่อเปรียบเทียบเป็นค่า MOS จะได้ค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3.0 ขึ้นไปและเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอต้องไม่เกิน 150 มิลลิวินาที [5, 19] กรณีที่การวางตำแหน่งของโหนดมีลักษณะเครือข่ายเป็นรูปดาว (Star topology) และมีจำนวนโหนดส่งข้อมูลเสียงและโหนดส่งข้อมูลวิดีโอไม่เกินอย่างละ 1 ตัว

3.2.2 แบบวิจัยเชิงทดลอง

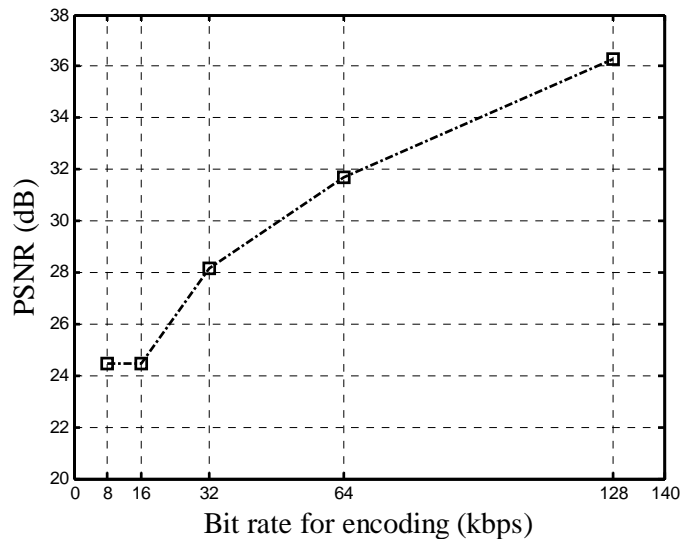
หัวข้อนี้อธิบายวิธีการจำลองการทำงานเพื่อศึกษาการกำหนดค่า BE และ CW ของโหนดส่งข้อมูลเสียงและโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ โดยใช้โปรแกรม Network simulator 2 (NS-2) เวอร์ชัน 2.34 และเครื่องมือ Evalvid [17] การทดลองนี้ประกอบด้วยโหนดทั้งหมด 3 ตัว วางอยู่บนพื้นที่ขนาด 50x50 ตารางเมตร (m^2) กำหนดให้ (x, y) คือพิกัดตำแหน่งของโหนด ทั้ง x และ y มีหน่วยเป็นเมตร โดยที่โหนดส่งข้อมูลวิดีโอวางอยู่ที่พิกัด (17, 25) โหนดส่งข้อมูลเสียงวางอยู่ที่พิกัด (33, 25) และโหนดรับข้อมูลวางอยู่ที่พิกัด (25, 25) ลักษณะเครือข่ายแสดงดังภาพประกอบ 3-1



ภาพประกอบ 3-1 ลักษณะเครือข่ายที่ใช้ศึกษาและตำแหน่งของโหนด

จากภาพประกอบ 3-1 จะเห็นว่าโหนดตัวส่งข้อมูลอยู่ห่างจากโหนดตัวรับข้อมูล 8 เมตร โดยกำหนดความไวในการรับสัญญาณ (Receiver sensitivity) ให้มีค่าเท่ากับ -95 dBm อ้างอิงจากโมดูลสื่อสาร CC2420 Transceiver [20] จากค่าความไวในการรับสัญญาณดังกล่าวสามารถคำนวณหารัศมีในการสื่อสารสูงสุดได้เท่ากับ 8.4 เมตร เมื่อกำลังของสัญญาณที่ส่งออกเท่ากับ -25 dBm โดยใช้โมเดลการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุแบบ Two-ray ground reflection model การคำนวณหารัศมีในการสื่อสารสูงสุดอ่านได้จากบทที่ 2 หัวข้อย่อย 2.6.1 กำหนดระยะ Carrier sense เป็นสองเท่าของรัศมีในการสื่อสารสูงสุด [2] กำหนดขนาดหน่วยความจำ (Buffer size) เท่ากับ 150 แพ็กเกต [3] ให้กับโหนดทุกตัว กำหนดโพรโทคอลจัดหาเส้นทางเป็น Ad hoc on demand distance vector (AODV) แต่มีการแก้ไขให้สามารถใช้งานได้กับเครือข่ายเป็นรูปดาว ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เครือข่ายเป็นรูปดาวเพื่อให้เห็นถึงผลของการเข้าใช้ช่องสัญญาณได้ชัดเจน กำหนดเวลาในการจำลองการทำงานเท่ากับ 90 วินาทีต่อการทดลอง โดยวินาทีที่ 0 ถึง 25 เป็นการเชื่อมต่อเครือข่าย จากนั้นวินาทีที่ 26 โหนดส่งข้อมูลวิดีโอและโหนดส่งข้อมูลเสียงเริ่มส่งข้อมูลจนถึงวินาทีที่ 90 ซึ่งทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยคำนวณช่วงค่าความเชื่อมั่น (Confidence interval) ด้วยความเชื่อมั่นที่ 95%

รายละเอียดของข้อมูลที่จะใช้ในการทดลองของบทที่ 3 ประกอบไปด้วยข้อมูลวิดีโอ และข้อมูลเสียง ซึ่งอธิบายในส่วนต่อไป นี้ ไฟล์ต้นฉบับของข้อมูลวิดีโอที่ใช้มีชื่อเรียกว่า *foreman_qcif.yuv* เป็นไฟล์วิดีโอชนิด YUV ที่ยังไม่มีการบีบอัดข้อมูล [21] ไฟล์วิดีโอดังกล่าวประกอบด้วยเฟรมภาพเรียงต่อกันจำนวน 1500 เฟรม โดยที่แต่ละเฟรมมีความละเอียดเท่ากับ 176x144 จุดภาพ และมีอัตราเฟรมเท่ากับ 25 เฟรมต่อวินาที [3] ทำการบีบอัดไฟล์ต้นฉบับจาก YUV ให้กลายเป็น MPEG-4 ซึ่งมีอัตราบิตแบบไม่คงที่ (Variable bit-rate: VBR) [22] โดยที่อัตราบิต (Bit rate) ที่ใช้เข้ารหัสไฟล์วิดีโอจะมีผลกระทบกับคุณภาพของวิดีโอ ภาพประกอบ 3-2 แสดงคุณภาพของวิดีโอที่แต่ละอัตราบิตของการเข้ารหัสไฟล์วิดีโอ จากกราฟชี้ให้เห็นว่าการเข้ารหัสไฟล์วิดีโอด้วยอัตราบิตเท่ากับ 8 และ 16 กิโลบิตต่อวินาที จะได้คุณภาพของวิดีโอเท่ากับ 24 dB ซึ่งถือว่าเป็นคุณภาพวิดีโอที่ไม่ดี [15] ขณะที่การเข้ารหัสไฟล์วิดีโอด้วยอัตราบิตเท่ากับ 32 และ 64 กิโลบิตต่อวินาที จะได้คุณภาพของวิดีโอเท่ากับ 28 และ 31 dB ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นคุณภาพวิดีโอที่พอใช้ได้ [15] และการเข้ารหัสไฟล์วิดีโอด้วยอัตราบิตเท่ากับ 128 กิโลบิตต่อวินาที จะได้คุณภาพของวิดีโอเท่ากับ 36 dB ซึ่งถือว่าเป็นคุณภาพวิดีโอที่ดี [15] ทั้งนี้คุณภาพของวิดีโอได้จากการส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางที่มีการส่งข้อมูลเพียงหนึ่งทอดและจำนวนโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเพียงหนึ่งโหนด ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การเข้ารหัสไฟล์วิดีโอด้วยอัตราบิตเท่ากับ 32 กิโลบิตต่อวินาที เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่ต้องส่งน้อยกว่าที่อัตราบิต 64 และ 128 กิโลบิตต่อวินาทีและคุณภาพของวิดีโอก็อยู่ในช่วงที่พอใช้ได้



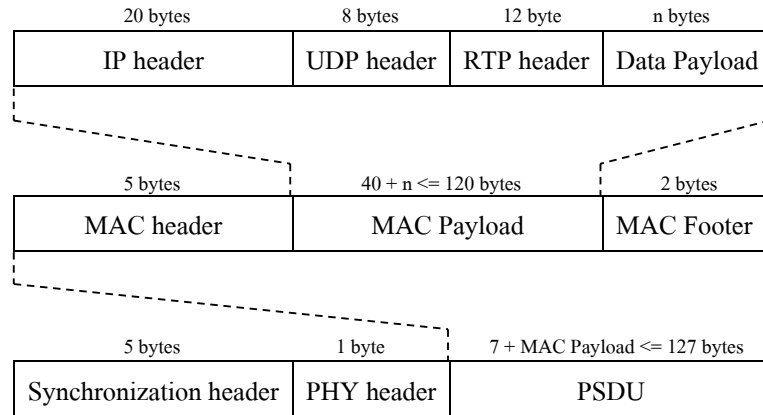
ภาพประกอบที่ 3-2 คุณภาพของวิดีโอกับอัตราบิตของการเข้ารหัส

ข้อมูลของแต่ละเฟรมจะถูกแบ่งเป็นแพ็กเก็ต โดยแต่ละแพ็กเก็ตมีขนาดเท่ากับ 80 ไบต์ จำนวนเฟรม และจำนวนแพ็กเก็ตแสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 จำนวนเฟรมและจำนวนแพ็กเก็ตของข้อมูลวิดีโอ

ชนิดของเฟรม	I-frame	P-frame	B-frame	รวม
จำนวนเฟรม	125	500	875	1500
จำนวนแพ็กเก็ต (32kbps)	2216	1438	1099	4753

สำหรับข้อมูลเสียงใช้มาตรฐานการเข้ารหัสและถอดรหัสแบบ G729A ซึ่งข้อมูลเสียงที่ได้หลังจากการเข้ารหัสจะมีขนาดของแพ็กเก็ตเท่ากับ 20 ไบต์ โดยมีระยะห่างของแต่ละแพ็กเก็ตเท่ากับ 20 มิลลิวินาที เมื่อคำนวณเป็นอัตราบิตจะได้เท่ากับ 24 กิโลบิตต่อวินาที [2] ซึ่งเป็นอัตราบิตแบบคงที่ (Constant bit rate: CBR) โครงสร้างแพ็กเก็ตข้อมูลเสียงและแพ็กเก็ตข้อมูลวิดีโอแสดงภาพประกอบ 3-3 โดยที่โครงสร้างแพ็กเก็ตข้อมูลเสียงในส่วนของ Data Payload จะมีขนาดเท่ากับ 20 ไบต์ ขณะที่โครงสร้างแพ็กเก็ตข้อมูลวิดีโอในส่วนของ Data Payload จะมีขนาดเท่ากับ 80 ไบต์



ภาพประกอบที่ 3-3 โครงสร้างแพ็กเก็ตข้อมูลเสียงและแพ็กเก็ตข้อมูลวิดีโอ

ตารางสรุปอัตราบิตของข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอแสดงดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 อัตราบิตของข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ

ชนิดข้อมูล	อัตราบิต
ข้อมูลเสียง	24 กิโลบิตต่อวินาที
ข้อมูลวิดีโอ	32 กิโลบิตต่อวินาที

จากแนวคิดการกำหนดลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูลจะเห็นว่าข้อมูลในกลุ่มที่หนึ่งคือข้อมูลที่ต้องการแสดงข้อมูลเป็นแบบเวลาจริง ในที่นี้แทนด้วยข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอซึ่งข้อมูลในกลุ่มนี้จะคำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วง โดยที่ข้อมูลเสียงต้องการเวลาหน่วงน้อยกว่าข้อมูลวิดีโอ นอกจากนี้ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง (R-factor) ยังเป็นฟังก์ชันของเวลาหน่วงและการสูญหายของข้อมูล (Packet loss) [2, 13] แตกต่างกับค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอ (PSNR) ซึ่งเป็นเพียงค่าความแตกต่างระหว่างเฟรมภาพต้นฉบับกับเฟรมภาพที่ส่งผ่านเครือข่ายไร้สาย ไม่มีฟังก์ชันของเวลาหน่วงเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อจะทำการส่งข้อมูลจึงให้โอกาสกับโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงได้เข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอ

การทดลองในบทที่ 3 นี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองหัวข้อ โดยหัวข้อ 3.2.4 เป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาค่า CW และ BE ที่เหมาะสม ซึ่งในการทดลองจะกำหนดให้ค่า CW และ BE ในส่วนของค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลเสียงให้มีค่าคงที่เท่ากับ 1 และ 1 ซึ่งจะส่งผลให้โหนดส่งข้อมูลเสียงมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณมากที่สุดและเป็นค่าน้อยที่สุดที่สามารถกำหนดให้ได้ ขณะที่โหนดส่งข้อมูลวิดีโอจะมีการเปลี่ยนแปลงค่า CW และ BE ในส่วนของค่า

$macMinBE$ เพื่อหาค่า CW และค่า BE ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาหัวข้อ 3.2.1 การกำหนดค่า CW และ BE ของการทดลองตอนที่หนึ่งแสดงดังตารางที่ 3-4 โดยการทดลองตอนที่หนึ่งจะใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายประกอบไปด้วย จำนวนแพ็คเกจที่ถูกละทิ้ง (Number of packet drops) ปริมาณงาน (Throughput) เปรอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Packet delivery ratio: PDR) ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วง (Average end-to-end delay) ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง (R-factor) และคุณภาพของวิดีโอ (PSNR) ซึ่งรายละเอียดของตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายแต่ละตัวได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.3

ตารางที่ 3-4 การกำหนดค่า CW และ BE ของการทดลองหัวข้อ 3.2.4

ลำดับที่	ชนิดของโหนดที่ส่งข้อมูล	พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่		พารามิเตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลง	
		CW	BE	CW	BE
1	โหนดส่งข้อมูลเสียง	1	1	-	-
	โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ	1	-	-	1 ถึง 5
2	โหนดส่งข้อมูลเสียง	1	1	-	-
	โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ	2	-	-	1 ถึง 5
3	โหนดส่งข้อมูลเสียง	1	1	-	-
	โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ	3	-	-	1 ถึง 5

หัวข้อ 3.2.5 เป็นการทดลองเพื่อยืนยันว่าการกำหนดค่า BE และ CW ที่มีค่าเท่ากับ 1 และ 1 ตามลำดับ ให้กับโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงเป็นค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของวัตถุประสงค์ของการศึกษาหัวข้อ 3.2.1 โดยที่การกำหนดค่า CW และ BE ของการทดลองตอนที่สองแสดงดังตารางที่ 3-5 การทดลองตอนที่สองจะใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายประกอบไปด้วย ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง (R-factor) คุณภาพของวิดีโอ (PSNR) และค่าเฉลี่ยเวลาหน่วง (Average end-to-end delay) ซึ่งรายละเอียดของตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายแต่ละตัวได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.3

ตารางที่ 3-5 การกำหนดค่า CW และ BE ของการทดลองหัวข้อ 3.2.5

ลำดับที่	ชนิดของโหนดที่ส่งข้อมูล	พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่		พารามิเตอร์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลง	
		CW	BE	CW	BE
1	โหนดส่งข้อมูลเสียง	1	2	-	-
	โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ	3	-	-	1 ถึง 5
2	โหนดส่งข้อมูลเสียง	2	1	-	-
	โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ	3	-	-	1 ถึง 5

*หมายเหตุ การกำหนดค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ สำหรับการทดลองตอนที่สองได้มาจากค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ ที่ผ่านเงื่อนไขตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาหัวข้อ 3.2.1 ของการทดลองตอนที่หนึ่ง

3.2.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่าย

จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้ง (Number of packet drops) คือ จำนวนแพ็กเก็ตที่เกิดปัญหาเนื่องจากการรับหรือส่งข้อมูลล้มเหลว โดยในงานวิจัยนี้มีแพ็กเก็ตถูกละทิ้งที่โปรแกรม NS2 แจ้งให้ทราบอยู่สามกรณี คือ

กรณีที่หนึ่ง CBK (Drop_RTR_MAC_Callback) เป็นแพ็กเก็ตถูกละทิ้งที่โหนดส่งข้อมูล แบ่งได้เป็นสองสาเหตุ สาเหตุที่หนึ่งเกิดจากไม่สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณ เนื่องจากช่องสัญญาณไม่ว่าง สาเหตุที่สองมีการส่งแพ็กเก็ตลำดับเดิมซ้ำ (Retransmission) จนครบสามครั้งตามที่โพรโทคอล CSMA/CA กำหนด แต่แพ็กเก็ตไปไม่ถึงปลายทาง ซึ่งโหนดส่งข้อมูลจะทราบได้เนื่องจากไม่ได้รับแพ็กเก็ต Acknowledgement (ACK) จากโหนดตัวรับ

กรณีที่สอง IFQ (Drop_IFQ_QFull) เป็นแพ็กเก็ตถูกละทิ้ง เนื่องจากอัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่เข้ามายังหน่วยความจำ (Buffer) เร็วกว่าอัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่ออกไปจากหน่วยความจำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้แพ็กเก็ตล้นหน่วยความจำ

กรณีที่สาม LQI (Link_Quality_Indication) เป็นแพ็กเก็ตถูกละทิ้งที่โหนดรับข้อมูลเนื่องจาก Signal to noise ratio (SNR) ของข้อมูลที่รับได้ต่ำกว่า 10 dB [12, 15] สาเหตุจากเกิดการชนกัน (Collision) ของข้อมูลที่รับมา หรือสัญญาณรบกวนจากคู่การสื่อสารข้างเคียง

แพ็กเก็ตถูกละทิ้งในกรณีที่หนึ่งและสองเป็นแพ็กเก็ตที่ไม่มีโอกาสจะไปถึงโหนดปลายทางได้ ขณะที่แพ็กเก็ตถูกละทิ้งในกรณีที่สามยังคงมีโอกาที่แพ็กเก็ตจะไปถึงปลายทางได้ด้วยการส่งแพ็กเก็ตลำดับเดิมซ้ำ อย่างไรก็ตามแพ็กเก็ตถูกละทิ้งในกรณีที่สามหากส่ง

แพ็กเก็ตเดิมซ้ำครบสามครั้งแล้วแพ็กเก็ตไปไม่ถึงปลายทางก็จะการเป็นแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งในกรณี
ที่หนึ่ง

ปริมาณงาน (Throughput) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณข้อมูลที่โหนดปลายทาง
สามารถรับได้ต่อเวลาที่ใช้ส่งข้อมูลทั้งหมด ปริมาณงานมีหน่วยเป็นกิโลบิตต่อวินาที คำนวณได้จาก
สมการที่ (3-1)

$$\text{Throughput} = \frac{(\text{Received Data Packets} * 8) / 1000}{\text{Time}} \quad (3-1)$$

เมื่อ *Received Data Packets* คือ ปริมาณข้อมูลที่รับได้ที่โหนดปลายทางมีหน่วยเป็นไบต์ ขณะที่
Time คือเวลาที่ใช้ในการสื่อสารนับตั้งแต่ข้อมูลอยู่ที่ Application layer ของโหนดส่งข้อมูลจนถึง
Application layer ของโหนดรับข้อมูล

เปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Packet delivery ratio: PDR) คือ
อัตราส่วนระหว่างจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่ปลายทางสามารถรับได้ต่อจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่ส่งจาก
ต้นทาง มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ คำนวณได้จากสมการที่ (3-2)

$$\text{Packet deliver ratio} = \frac{\text{Number of Received Data Packets}}{\text{Number of Sent Data Packets}} \times 100 \quad (3-2)$$

เมื่อ *Number of Received Data Packets* คือจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่โหนดปลายทางรับได้มีหน่วย
เป็นแพ็กเก็ต ขณะที่ *Number of Sent Data Packets* คือจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลที่ส่งจากต้นทาง

ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วง (Average end-to-end delay) คือ ระยะเวลาที่ใช้ส่งข้อมูลจากต้น
ทางไปถึงปลายทาง หน่วยเป็นมิลลิวินาที

$$\text{Average end to end delay} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{Delay}_n \quad (3-3)$$

เมื่อ n คือลำดับของแพ็กเก็ตที่ปลายทางรับได้ N คือจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลทั้งหมดที่ปลายทางรับได้
และ *Delay* คือระยะเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายจากต้นทางถึงปลายทางใน
หนึ่งแพ็กเก็ต จากชั้นแอปพลิเคชัน (Application layer) ของโหนดตัวส่งถึงชั้นแอปพลิเคชันของโหนด
ตัวรับ

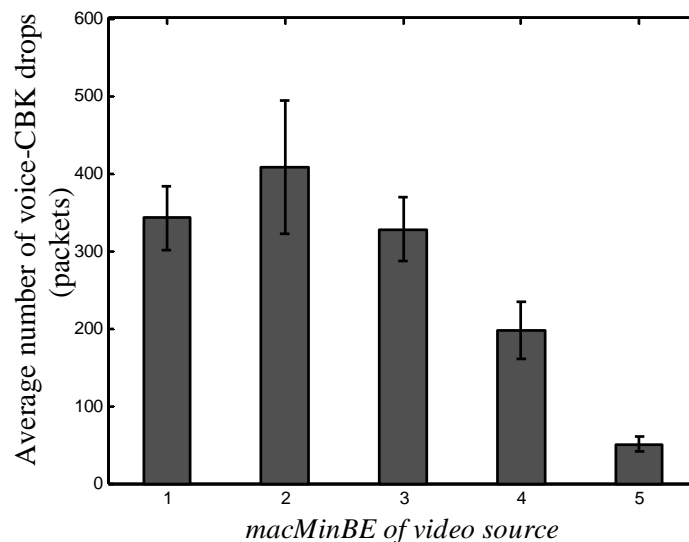
ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง (R-factor) คือ ตัววัดที่บ่งบอกถึงระดับคุณภาพของการ
สื่อสารเสียง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงและการสูญหายของข้อมูล (Packet loss) [2, 13]

ตามมาตรฐานของสหภาพโทรคมนาคมนานาชาติ (International telecommunication union: ITU) G.107

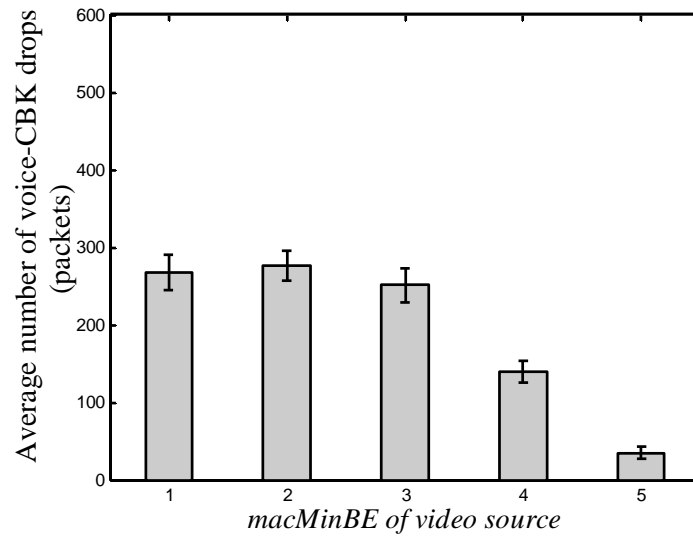
คุณภาพของวิดีโอ (PSNR) คือ ค่าความแตกต่างระหว่างเฟรมภาพต้นฉบับกับเฟรมภาพที่ส่งผ่านเครือข่ายไร้สาย หน่วยเป็น dB [15]

3.2.4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล การหาค่า CW และ BE ที่เหมาะสม

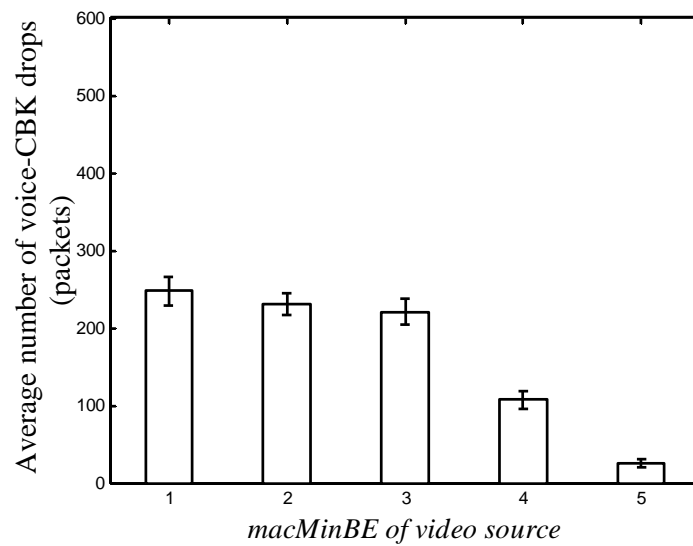
ภาพประกอบ 3-4 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “CBK” แพ็กเก็ตที่ถูกทิ้งในกรณีดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากล้นไหลในการเข้าใช้ช่องสัญญาณหรือส่งแพ็กเก็ตลำดับเดิมซ้ำครบสามครั้งตามที่โพรโทคอล CSMA/CA กำหนด แต่ข้อมูลยังไม่ถึงปลายทางซึ่งโปรแกรม NS2 จะแสดงแพ็กเก็ตที่ถูกทิ้งในกรณีนี้ว่า “CBK” จากกราฟแสดงให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “CBK” มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 1 2 และ 3 อย่างไรก็ตามจำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “CBK” มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 3 4 และ 5 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “CBK” มีค่าลดลง เนื่องจากค่า $macMinBE$ และ CW ที่มากขึ้นส่งผลให้โหนดส่งข้อมูลวิดีโอต้องใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลและระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณนานขึ้น ดังนั้นโหนดส่งข้อมูลเสียงจึงประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณมากขึ้นสังเกตได้จากจำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “CBK” ที่ลดลง



ก) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 1



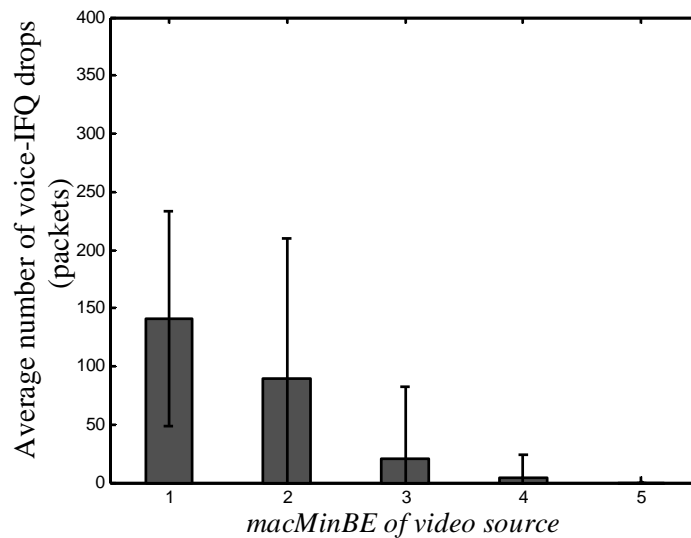
ข) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 2



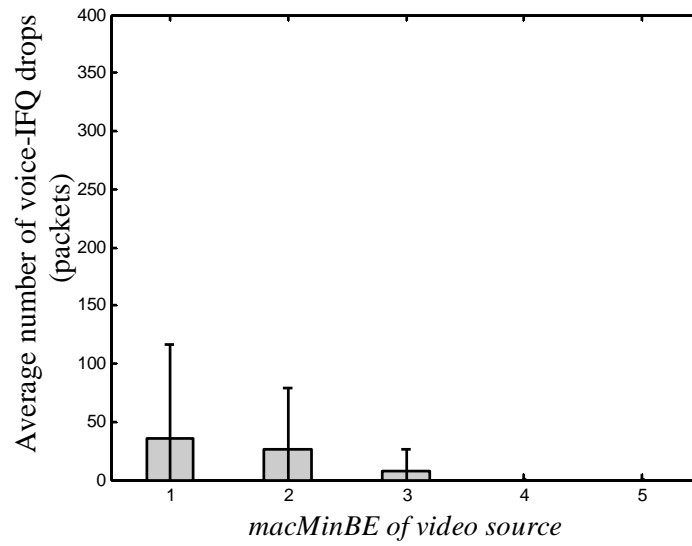
ค) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 3

ภาพประกอบ 3-4 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี CBK เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

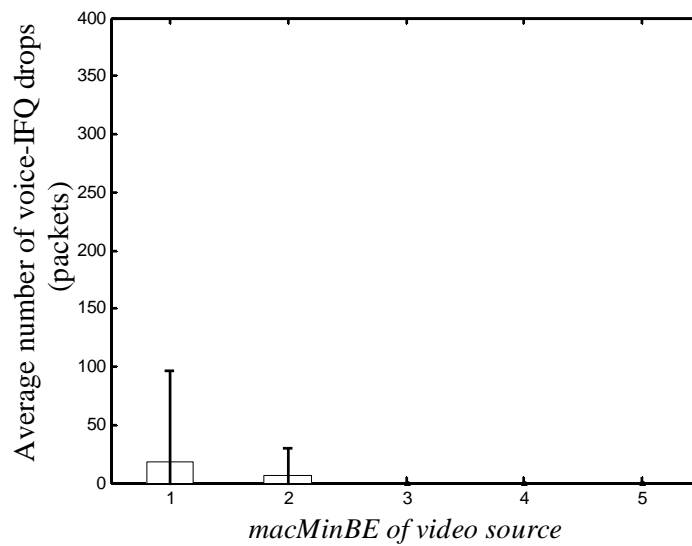
ภาพประกอบ 3-5 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งในกรณี “IFQ” แพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งในกรณีดังกล่าวเกิดขึ้น เนื่องจากอัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่เข้ามายังหน่วยความจำเร็วกว่าอัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่ออกไปจากหน่วยความจำ ส่งผลให้แพ็กเก็ตล้นหน่วยความจำ จากกราฟแสดงให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งในกรณี “IFQ” มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีเท่ากับ 1 2 และ 3 นอกจากนี้จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งในกรณี “IFQ” มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 3 4 และ 5 เนื่องจากค่า *macMinBE* และ CW ที่มากขึ้นส่งผลให้โหนดส่งข้อมูลวิดีโอต้องใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลและระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณนานขึ้น ดังนั้นโหนดส่งข้อมูลเสียงจึงมีโอกาสเข้าใช้ช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่ออกไปจากหน่วยความจำเร็วกว่าอัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่เข้ามายังหน่วยความจำและแพ็กเก็ตล้นหน่วยความจำลดน้อยลง



ก) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 1



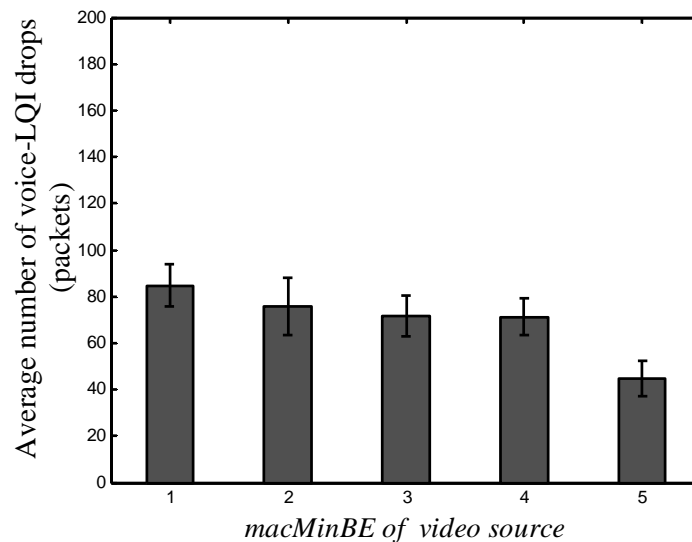
ข) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 2



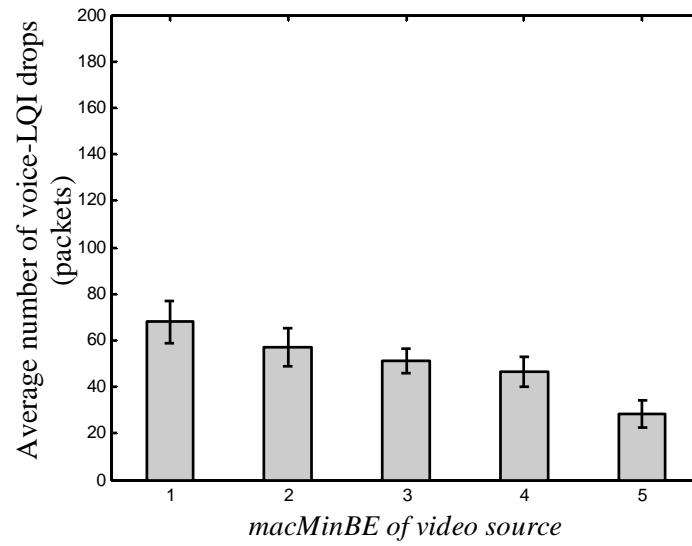
ค) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 3

ภาพประกอบ 3-5 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี IFQ เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

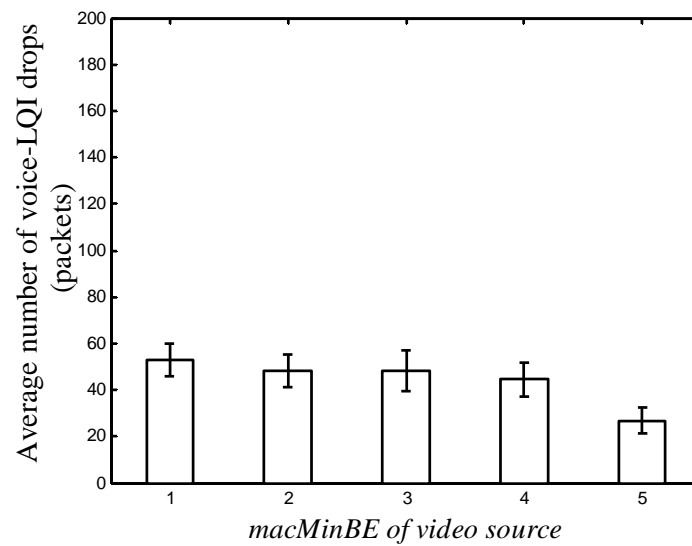
ภาพประกอบ 3-6 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “LQI” ข้อมูลที่ถูกทิ้งในกรณีดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจาก SNR ของสัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้ต่ำกว่า 10 dB เนื่องจากเกิดการชนกันของข้อมูล ซึ่งจะพบบ่อยครั้งในกรณีที่ *macMinBE* มีค่าน้อยและเครือข่ายมีความหนาแน่นของข้อมูล จากกราฟแสดงให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “LQI” มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 1 2 3 และ 4 อย่างไรก็ตามจำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “LQI” จะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 5 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่มีค่าเท่ากับ 1 2 และ 3 ไม่ได้ส่งผลให้จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “LQI” มีค่าลดลงในทางสถิติ เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 1 และ 2 แต่จะมีผลให้จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกทิ้งในกรณี “LQI” มีแนวโน้มลดลง เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 3 4 และ 5



ก) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 1



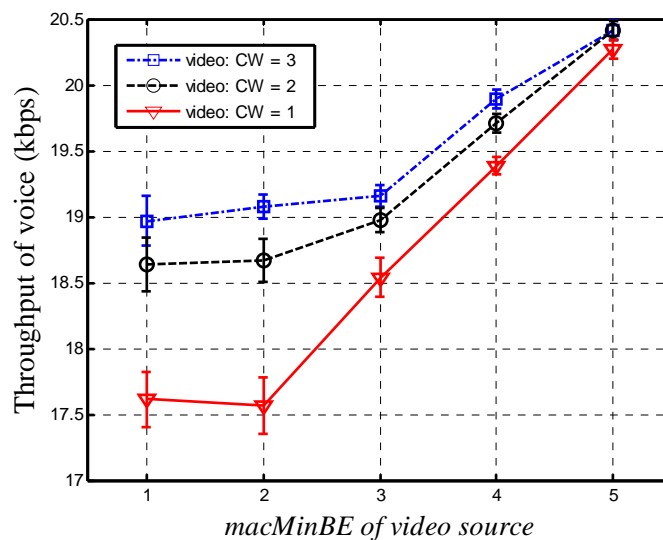
ข) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 2



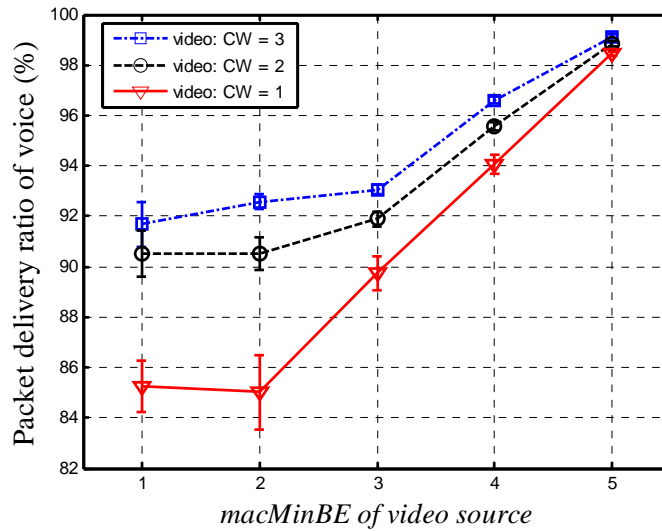
ค) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 3

ภาพประกอบ 3-6 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี LQI เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-7 และ 3-8 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลเสียงที่แต่ละค่า *macMinBE* จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลเสียงมีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 1 และ 2 ซึ่งเปรียบเทียบที่ค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่เท่ากับ 1 และ 2 และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 3 4 และ 5 ที่ค่า CW เท่ากับ 1 2 และ 3 เนื่องจากค่า *macMinBE* ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอต้องใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลมากขึ้น นอกจากนี้ค่า CW ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โหนดส่งข้อมูลวิดีโอต้องใช้ระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณมากขึ้น ดังนั้นโหนดส่งข้อมูลเสียงจึงมีโอกาสที่จะประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณมากขึ้นสังเกตได้จากภาพประกอบ 3-4 และยังสามารถลดแฟล็กเกตสันหน่วยความจำได้สังเกตได้จากภาพประกอบ 3-5 ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลของเสียงเพิ่มมากขึ้น



ภาพประกอบ 3-7 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียง เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง



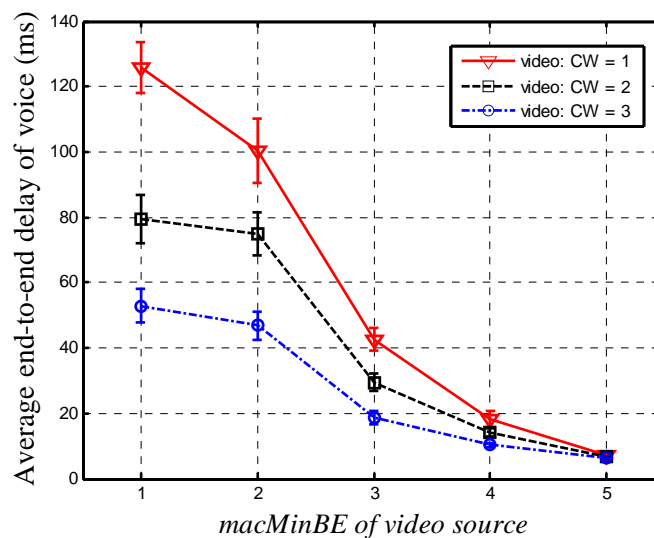
ภาพประกอบ 3-8 ค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลเสียง เมื่อ *macMinBE* และ *CW* ของ โหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-9 แสดงค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงที่แต่ละค่า *macMinBE* จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงมีค่าลดลงเมื่อค่า *macMinBE* และ *CW* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่า *macMinBE* และ *CW* ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โหนดส่งข้อมูลวิดีโอใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลและระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณนานขึ้นขณะที่ค่า *macMinBE* และ *CW* ของโหนดส่งข้อมูลเสียงมีค่าเท่ากับ 1 และ 1 ตามลำดับ ดังนั้นโหนดส่งข้อมูลเสียงจึงมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงลดลง นอกจากนี้จากภาพประกอบ 3-9 สามารถเขียนเป็นตารางลอจิกสำหรับการเลือกค่า *macMinBE* และ *CW* ได้ดังตารางที่ 3-6 โดยที่ลอจิก 0 คือ ไม่ผ่านเงื่อนไขเนื่องจากค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงมีค่ามากกว่าหรือเท่า 100 มิลลิวินาที ซึ่งเกินค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงที่ยอมรับได้ [5, 19] ขณะที่ลอจิก 1 คือ ผ่านเงื่อนไขเนื่องจากค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงมีค่าน้อยกว่า 100 มิลลิวินาที

ตารางที่ 3-6 ลอจิกสำหรับการเลือกค่า CW และ *macMinBE*

คู่ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียง

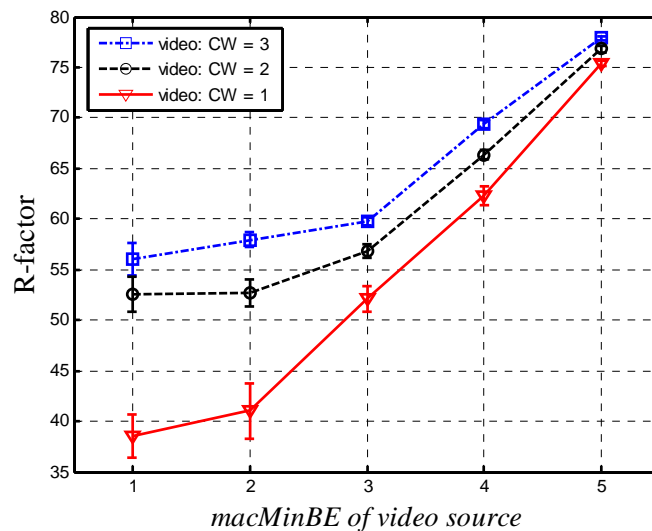
	<i>macMinBE</i>				
	1	2	3	4	5
CW = 1	0	0	1	1	1
CW = 2	1	1	1	1	1
CW = 3	1	1	1	1	1



ภาพประกอบ 3-9 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียง เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-10 แสดงค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงที่แต่ละค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ ในกรณีที่กำหนดค่า CW และ *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลเสียงให้มีค่าเท่ากับ 1 และ 1 ตามลำดับ จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่า *macMinBE* และ CW ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โหนดส่งข้อมูลวิดีโอใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลและระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณนานขึ้น ดังนั้นโหนดส่งข้อมูลเสียงจึงประสบความสำเร็จในการเข้าใช้ช่องสัญญาณมากขึ้นสังเกตได้จากภาพประกอบ 3-4 และยังสามารถลดแพ็กเก็ตเกิดสั้นหน่วยความจำลงได้สังเกตได้จากภาพประกอบ 3-5 ส่งผลให้โหนดส่งข้อมูลเสียงใช้เวลาหน่วง

น้อยลงสังเกตได้จากภาพประกอบ 3-9 และเนื่องจากค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงเป็นฟังก์ชันของเวลา
 หนึ่งและการสูญหายของข้อมูลดั่งสมการที่ (2-5) ดังนั้นเมื่อค่าเวลาหนึ่งของโหนดส่งข้อมูลเสียง
 มีค่าลดลงตามค่า $macMinBE$ และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่เพิ่มมากขึ้นและการสูญหายของ
 ข้อมูลของเสียงลดลงสังเกตได้จากภาพประกอบ 3-8 ส่งผลให้ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงมีค่าเพิ่มมาก
 ขึ้นเมื่อค่า $macMinBE$ และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเพิ่มมากขึ้นดังภาพประกอบ 3-10



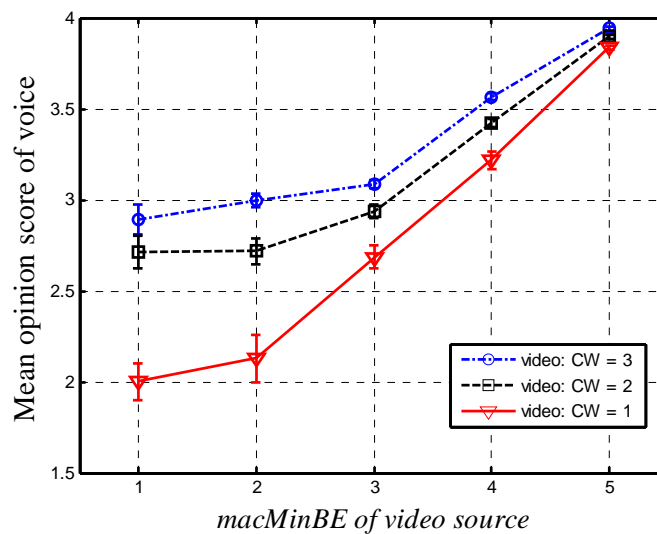
ภาพประกอบ 3-10 ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง เมื่อ $macMinBE$ และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-11 แสดงค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS ที่แต่ละค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ ซึ่งค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วยมนุษย์สามารถคำนวณได้จากค่า R-factor ดังตารางที่ (2-2) จากภาพประกอบ 3-11 สามารถเขียนเป็นตารางลอจิกสำหรับการเลือกค่า $macMinBE$ และ CW ได้ดังตารางที่ 3-7 โดยที่ลอจิก 0 คือ ไม่ผ่านเงื่อนไขเนื่องจากค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS มีค่าน้อยกว่า 3.0 ขณะที่ลอจิก 1 คือ ผ่านเงื่อนไขเนื่องจากค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3.0 ซึ่งเป็นคุณภาพเสียงยอมรับได้ [5, 19] อย่างไรก็ตามการเลือกค่า CW และ $macMinBE$ ที่เหมาะสมยังคงต้องพิจารณาค่าเฉลี่ยเวลาหนึ่งของข้อมูลเสียงไม่ให้เกิน 100 มิลลิวินาที ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอต้องไม่ต่ำกว่า 25 dB และค่าเฉลี่ยเวลาหนึ่งของข้อมูลวิดีโอไม่ให้เกิน 150 มิลลิวินาที

ตารางที่ 3-7 ลอจิกสำหรับการเลือกค่า CW และ $macMinBE$

คู่ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS

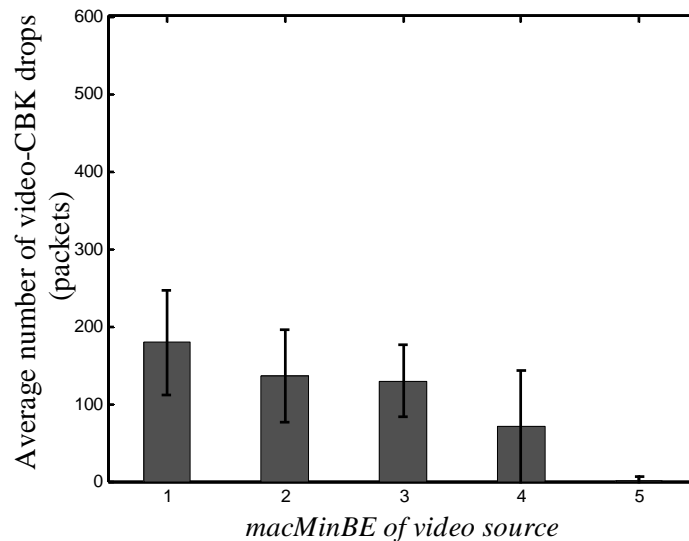
	$macMinBE$				
	1	2	3	4	5
CW = 1	0	0	0	1	1
CW = 2	0	0	0	1	1
CW = 3	0	1	1	1	1



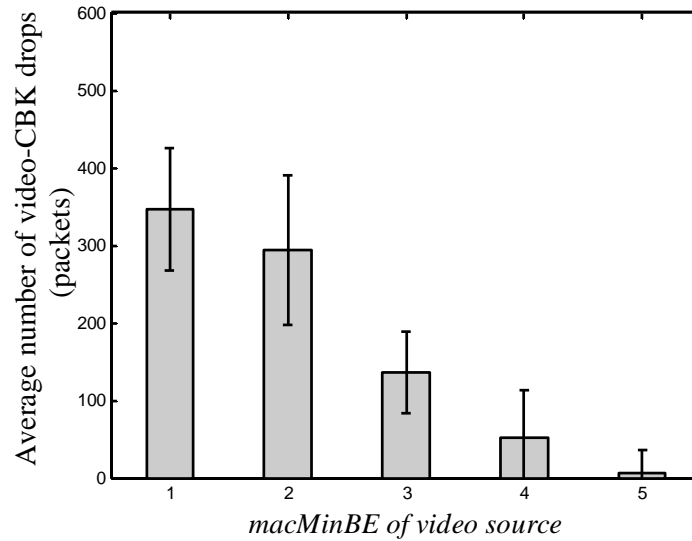
ภาพประกอบ 3-11 ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS เมื่อ $macMinBE$ และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-12 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งในกรณี “CBK” ข้อมูลที่ถูกละทิ้งในกรณีดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากสั้มเหลวในการเข้าใช้ช่องสัญญาณหรือส่งข้อมูลซ้ำครบสี่ครั้งตามที่โพรโทคอล CSMA/CA กำหนดแต่ข้อมูลยังไม่ถึงปลายทางซึ่งโปรแกรม NS2 จะแสดงข้อมูลที่ถูกละทิ้งในกรณีนี้ว่า “CBK” จากกราฟแสดงให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งในกรณี “CBK” ลดลงเมื่อค่า $macMinBE$ เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่า $macMinBE$ จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล โดยใช้วิธีการสุ่มแบบ Uniform distribution ในช่วง 0 ถึง $2^{BE}-1$ ค่าที่ได้จากการสุ่มจะเป็นจำนวนเท่าของ 320 ไมโครวินาทีที่มีความถี่ 2.4 กิโลเฮิร์ตซ์ [1-2] ซึ่งเป็นระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล ตัวอย่างเช่น กรณีของ

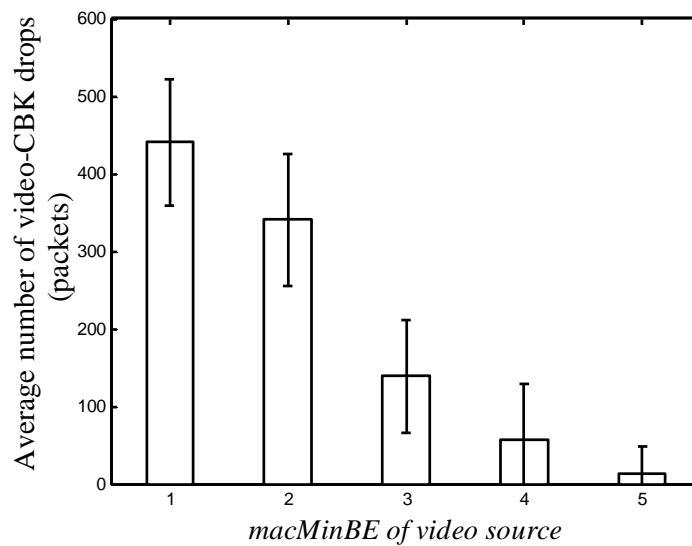
โหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอกำหนดค่า $macMinBE$ เท่ากับ 1 หมายถึงต้องส่งค่าในช่วง 0 ถึง 1 ถ้าค่าที่ส่งมามีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงไม่ต้องใช้ระยะเวลาหน่วงก่อนจะทำการตรวจสอบช่องสัญญาณในทางกลับกันถ้าค่าที่ส่งมามีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงต้องใช้ระยะเวลาหน่วงก่อนจะทำการตรวจสอบช่องสัญญาณซึ่งมีค่าเท่ากับ 320 ไมโครวินาทีที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ต และเมื่อค่า $macMinBE$ มีค่ามากขึ้น โอกาสที่โหนดส่งข้อมูลวิดีโอจะส่งข้อมูลในช่วงที่โหนดส่งข้อมูลเสียงกำลังส่งข้อมูลอยู่ก็จะลดน้อยลงเนื่องจากจะต้องใช้ระยะเวลาหน่วงก่อนจะทำการตรวจสอบช่องสัญญาณนานขึ้น นอกจากนี้เมื่อค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าลดลงจะส่งผลให้จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกทิ้งในกรณี “CBK” ลดลง เนื่องจากค่า CW จะส่งผลกระทบต่อระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณ ตัวอย่างเช่น กรณีของโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอกำหนดค่า CW เท่ากับ 1 หมายถึงต้องใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบช่องสัญญาณ 128 ไมโครวินาทีที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ต ถ้าช่องสัญญาณไม่มีการใช้งานถึงจะเข้าใช้ช่องสัญญาณได้ และถ้าค่า CW มีค่าเท่ากับ 2 หมายถึงต้องใช้ระยะเวลาในการตรวจสอบช่องสัญญาณเท่ากับสองเท่าของ 128 ไมโครวินาทีที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ต ถ้าในช่วงเวลาดังกล่าวช่องสัญญาณไม่ได้ถูกใช้งานจากโหนดตัวอื่นๆอยู่ก็จะสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณได้ ด้วยเหตุนี้ยิ่งค่า CW มีค่าน้อยโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณก็จะมากขึ้นส่งผลให้ค่า “CBK” ลดน้อยลง



ก) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 1



ข) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 2

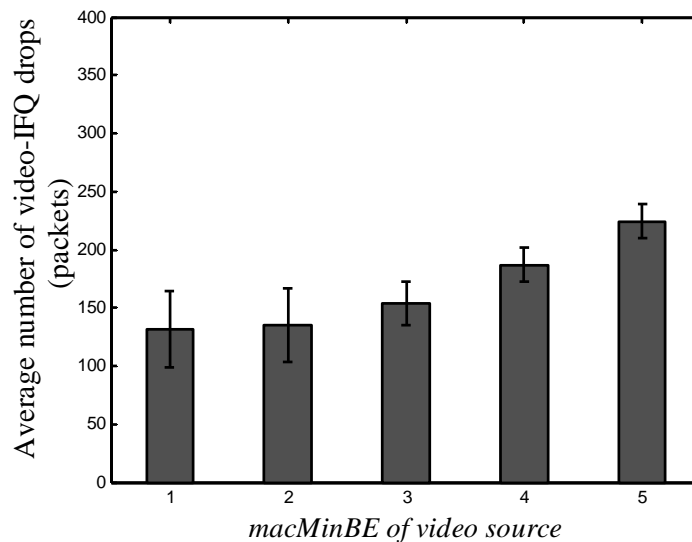


ค) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 3

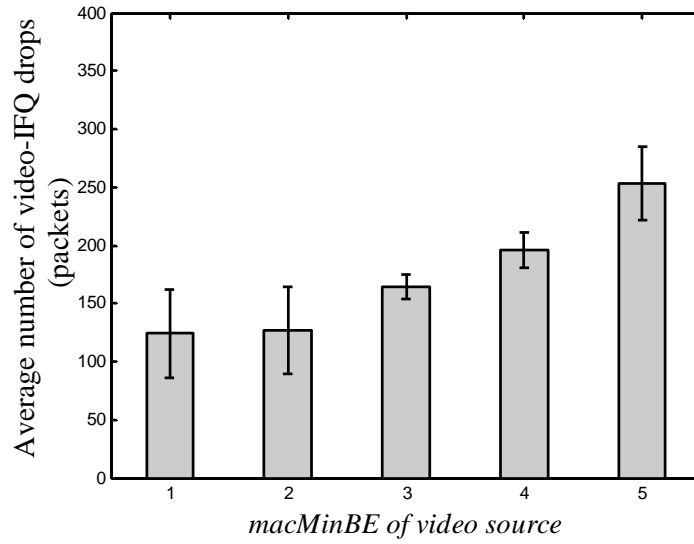
ภาพประกอบ 3-12 จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกทิ้งในกรณี CBK เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-13 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกทิ้งในกรณี “IFQ” แพ็กเก็ตที่ถูกทิ้งในกรณีดังกล่าวเกิดขึ้น เนื่องจากอัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่เข้ามายังหน่วยความจำเร็วกว่าอัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่ออกไปจากหน่วยความจำ ส่งผลให้แพ็กเก็ตส้นหน่วยความจำ จากกราฟ

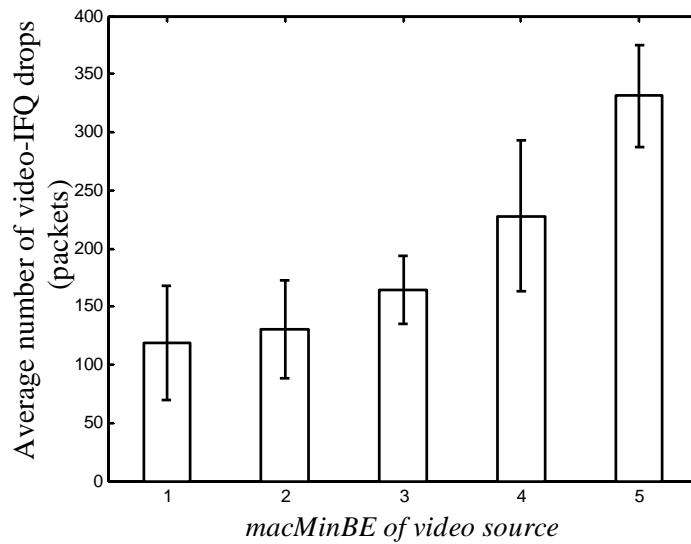
แสดงให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกทิ้งในกรณี “IFQ” มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 1 2 และ 3 อย่างไรก็ตามจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกทิ้งในกรณี “IFQ” มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 3 4 และ 5 ตามลำดับ และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 1 2 และ 3 เนื่องจากค่า *macMinBE* และ CW ที่มากขึ้นส่งผลให้โหนดส่งข้อมูลวิดีโอต้องใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลและระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณนานขึ้น ส่งผลให้อัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่เข้ามายังหน่วยความจำเร็วกว่าอัตราเร็วของแพ็กเก็ตที่ออกไปจากหน่วยความจำ ดังนั้นแพ็กเก็ตที่สิ้นหน่วยความจำจึงมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น



ก) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 1



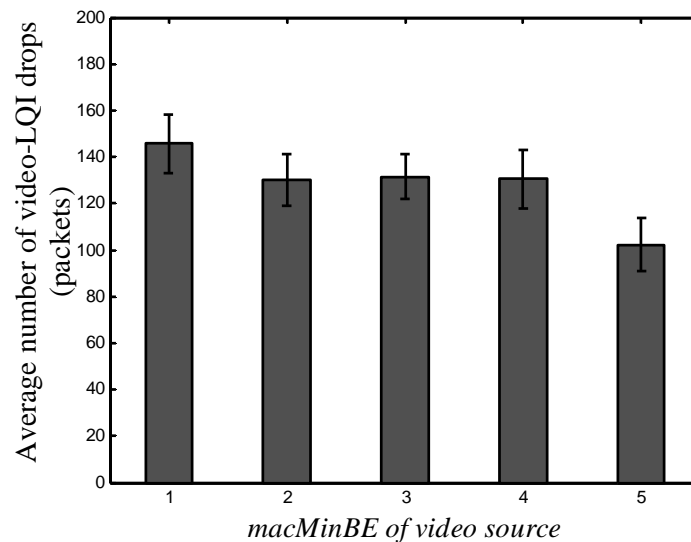
ข) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 2



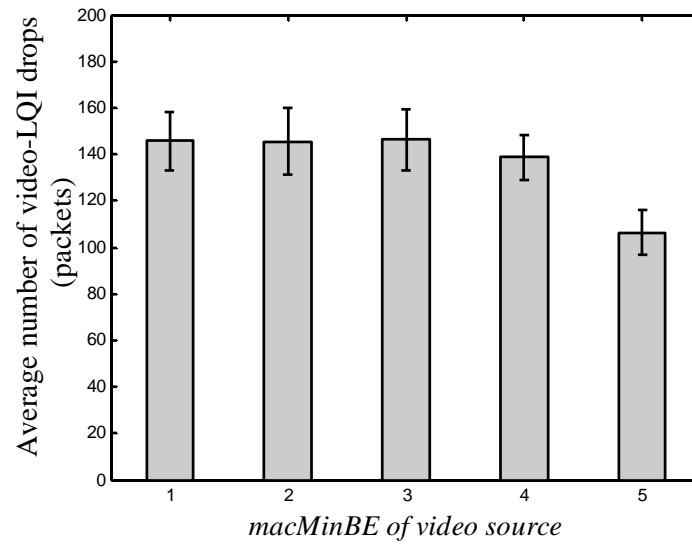
ค) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 3

ภาพประกอบ 3-13 จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกทิ้งที่กรณี IFQ เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

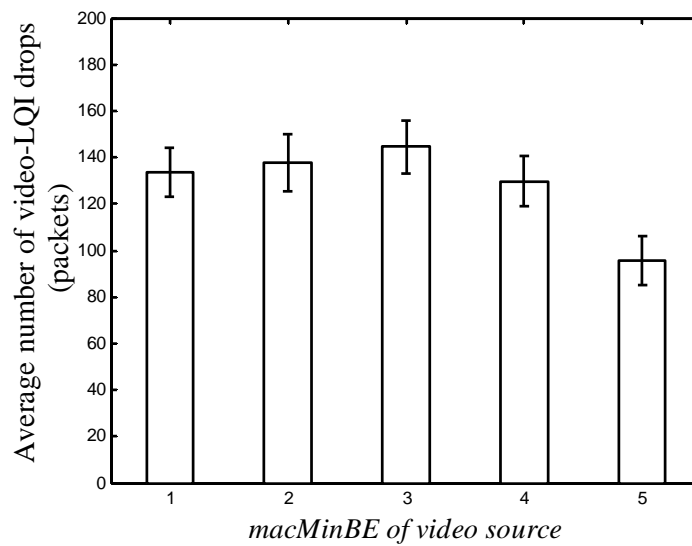
ภาพประกอบ 3-14 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกทิ้งในกรณี “LQI” ข้อมูลที่ถูกทิ้งในกรณีดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจาก SNR ของสัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้ต่ำกว่า 10 dB สาเหตุที่สัญญาณข้อมูลที่ได้รับได้ต่ำกว่า 10 dB เกิดขึ้นจากการชนกันของข้อมูลจะพบบ่อยครั้งในกรณีที่ *macMinBE* มีค่าน้อยและเครือข่ายมีความหนาแน่นของข้อมูล จากกราฟแสดงให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกทิ้งในกรณี “LQI” มีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 1 2 3 และ 4 อย่างไรก็ตามจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกทิ้งในกรณี “LQI” มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 5 เนื่องจากค่า *macMinBE* ที่มากขึ้นส่งผลให้โอกาสที่โหนดส่งข้อมูลวิดีโอจะส่งข้อมูลในช่วงที่โหนดส่งข้อมูลเสียงกำลังส่งข้อมูลอยู่ก็จะลดน้อยลงเพราะจะต้องใช้ระยะเวลาหน่วงก่อนจะทำการตรวจสอบช่องสัญญาณนานขึ้น ขณะที่โหนดส่งข้อมูลเสียงใช้ระยะเวลาหน่วงก่อนจะทำการตรวจสอบช่องสัญญาณนานโดยเฉลี่ยน้อยกว่า



ก) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 1



ข) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 2



ค) CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 3

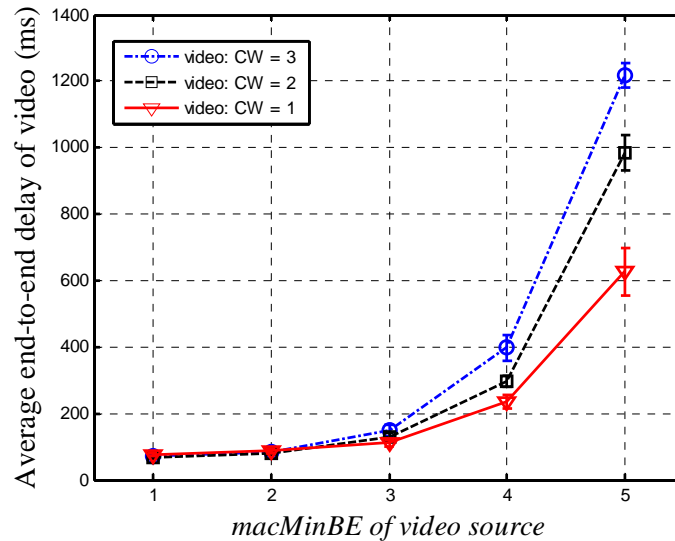
ภาพประกอบ 3-14 จำนวนแพ็คเกจวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี LQI เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-15 แสดงค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอที่แต่ละค่า $macMinBE$ จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า $macMinBE$ และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่า $macMinBE$ และ CW ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้โหนดส่งข้อมูลวิดีโอใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลและระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณนานขึ้นขณะที่ค่า $macMinBE$ และ CW ของโหนดส่งข้อมูลเสียงมีค่าเท่ากับ 1 และ 1 ตามลำดับ ดังนั้นโหนดส่งข้อมูลเสียงจึงมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จากกราฟยังชี้ให้เห็นว่าเมื่อค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่ามากกว่า 3 ขึ้นไปและ CW มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 3 จะส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอมีค่ามากกว่า 150 มิลลิวินาที ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ [5, 19] จากภาพประกอบ 3-15 สามารถเขียนเป็นตารางลอจิกสำหรับการเลือกค่า $macMinBE$ และ CW ได้ดังตารางที่ 3-8 โดยที่ลอจิก 0 คือ ไม่ผ่านเงื่อนไขเนื่องจากค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอมีค่ามากกว่าหรือเท่า 150 มิลลิวินาที ซึ่งเกินค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงที่ยอมรับได้ [5, 19] ขณะที่ลอจิก 1 คือ ผ่านเงื่อนไขเนื่องจากค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอมีค่าน้อยกว่า 150 มิลลิวินาที

ตารางที่ 3-8 ลอจิกสำหรับการเลือกค่า CW และ $macMinBE$

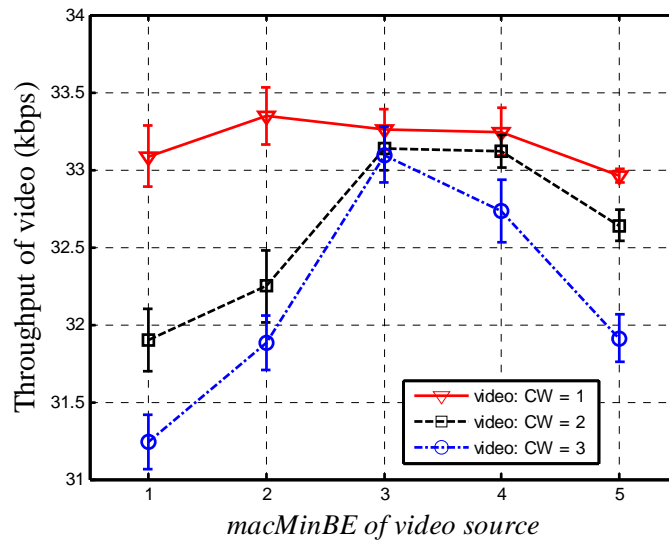
คู่ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอ

	$macMinBE$				
	1	2	3	4	5
CW = 1	1	1	1	0	0
CW = 2	1	1	1	0	0
CW = 3	1	1	1	0	0



ภาพประกอบ 3-15 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอ เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-16 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอที่แต่ละค่า *macMinBE* จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยปริมาณงานมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อ *macMinBE* เมื่อค่า *macMinBE* อยู่ในช่วง 1 ถึง 3 เนื่องจากในช่วงนี้จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” ลดน้อยลงสังเกตได้จากภาพประกอบ 3-12 ส่งผลให้ได้รับจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอเพิ่มมากขึ้น ขณะที่ใช้ระยะเวลาหน่วงไม่ต่างกันมากสังเกตได้จากภาพประกอบ 3-15 จึงทำให้ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอในช่วงค่า *macMinBE* เท่ากับ 1 ถึง 3 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และเมื่อค่า *macMinBE* อยู่ในช่วง 4 ถึง 5 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ค่าระยะเวลาหน่วงมีค่าเพิ่มมากขึ้นยิ่งค่า CW มีค่ามากขึ้นโหนดส่งข้อมูลวิดีโอก็จะใช้ระยะเวลาหน่วงในการส่งข้อมูลเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอในช่วงค่า *macMinBE* เท่ากับ 4 ถึง 5 จึงมีแนวโน้มลดลง



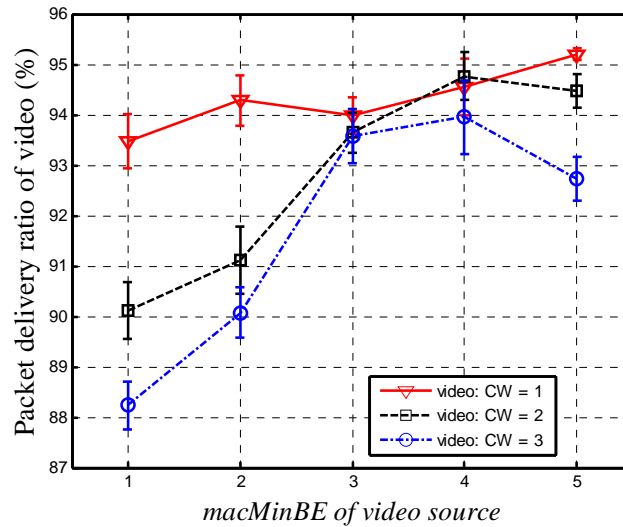
ภาพประกอบ 3-16 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอ เมื่อ *macMinBE* และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-17 แสดงค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลวิดีโอที่แต่ละค่า *macMinBE* จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลเสียงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อ *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเพิ่มมากขึ้นและค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอลดลง เนื่องจากค่า *macMinBE* ที่เพิ่มมากขึ้นและค่า CW ที่ลดลงสามารถลดจำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” ลงสังเกตได้จากภาพประกอบ 3-12

ตารางที่ 3-9 ลอจิกสำหรับการเลือกค่า CW และ *macMinBE*

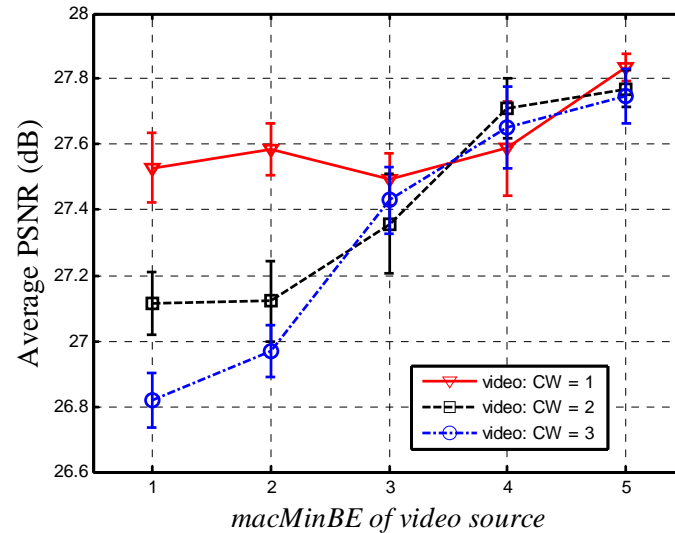
คู่ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอ

	<i>macMinBE</i>				
	1	2	3	4	5
CW = 1	1	1	1	1	1
CW = 2	1	1	1	1	1
CW = 3	1	1	1	1	1



ภาพประกอบ 3-17 ค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลวิดีโอ เมื่อ *macMinBE* และ CW ของ โหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

ภาพประกอบ 3-18 แสดงค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอที่แต่ละค่า *macMinBE* จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า *macMinBE* เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเพิ่มมากขึ้นสังเกตได้จากภาพประกอบ 3-17 ส่งผลให้ได้รับจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลวิดีโอเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่า CW ที่น้อยกว่าในช่วงค่า *macMinBE* เท่ากับ 1 ถึง 2 มีค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอที่มากกว่า เนื่องจากจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลวิดีโอในช่วงดังกล่าวมีค่ามากกว่าสังเกตได้จากภาพประกอบ 3-17 และค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอมีค่าไม่แตกต่างกันในช่วงค่า *macMinBE* เท่ากับ 3 ถึง 4 เนื่องจากในช่วงนี้จำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลวิดีโอมีค่าไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอก็มีค่าอยู่ในช่วง 25-31 dB ซึ่ง MOS ระดับนี้อยู่ในช่วงพอใช้ [15] จากภาพประกอบ 3-18 สามารถเขียนเป็นตารางลोजิกสำหรับการเลือกค่า *macMinBE* และ CW ได้ดังตารางที่ 3-9 โดยที่ลोजิก 0 คือ ไม่ผ่านเงื่อนไขเนื่องจากค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอมีค่าน้อยกว่า 25 dB ขณะที่ลोजิก 1 คือ ผ่านเงื่อนไขเนื่องจากค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 25 dB ซึ่งค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอที่ยอมรับได้ [5, 19]



ภาพประกอบ 3-18 ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอ เมื่อ $macMinBE$ และ CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลง

เนื่องจากการกำหนดค่า $macMinBE$ และ CW ที่เหมาะสม พิจารณาจาก 4 เงื่อนไข คือ 1) คุณภาพของข้อมูลเสียงประเมินจากค่า R-factor ซึ่งค่า R-factor ที่ได้เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า Mean opinion score (MOS) ต้องได้ค่าไม่ต่ำกว่า 3.0 [2] 2) เวลารับของข้อมูลเสียงต้องไม่เกิน 100 มิลลิวินาที [5, 19] 3) คุณภาพของข้อมูลวิดีโอซึ่งประเมินจากค่า PSNR ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 25-31 dB เมื่อเปรียบเทียบเป็นค่า MOS จะได้ค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3.0 ขึ้นไป และ 4) เวลารับของข้อมูลวิดีโอต้องไม่เกิน 150 มิลลิวินาที [5, 19] ดังนั้นจึงนำลอจิกที่ได้จากตารางที่ 3-6 ถึง 3-6 มาช่วยในกำหนดค่า $macMinBE$ และ CW ที่เหมาะสม ด้วยการนำลอจิกจากตารางที่ 3-6 ถึง 3-6 มาแอนดกันทั้งหมด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 3-10

ตารางที่ 3-10 ผลลัพธ์ที่ได้จากการแอนดลอจิก

	$macMinBE$				
	1	2	3	4	5
CW = 1	0	0	0	0	0
CW = 2	0	0	0	0	0
CW = 3	0	1	1	0	0

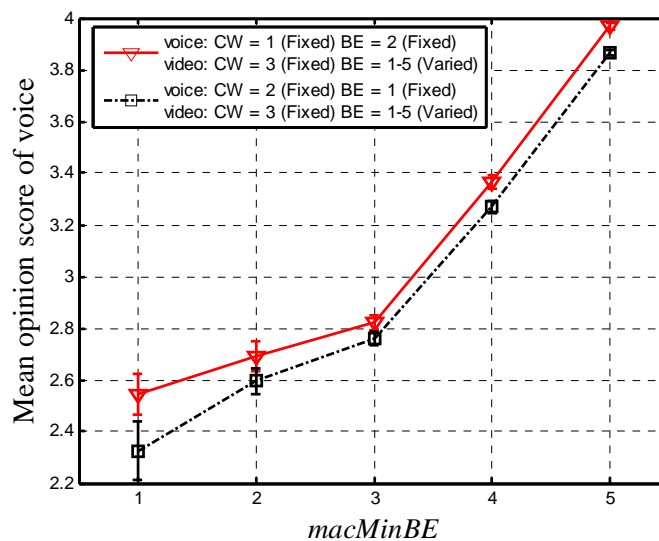
จากตารางที่ 3-10 แสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่า $macMinBE$ และ CW ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ตรงตามเงื่อนไขที่กล่าวมามีอยู่ 2 กรณีคือ

1) กำหนดค่า $macMinBE$ และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลเสียงเท่ากับ 1 และ 1 ตามลำดับ และการกำหนดค่า $macMinBE$ และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ

2) กำหนดค่า $macMinBE$ และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลเสียงเท่ากับ 1 และ 1 ตามลำดับ และการกำหนดค่า $macMinBE$ และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 3 และ 3 ตามลำดับ

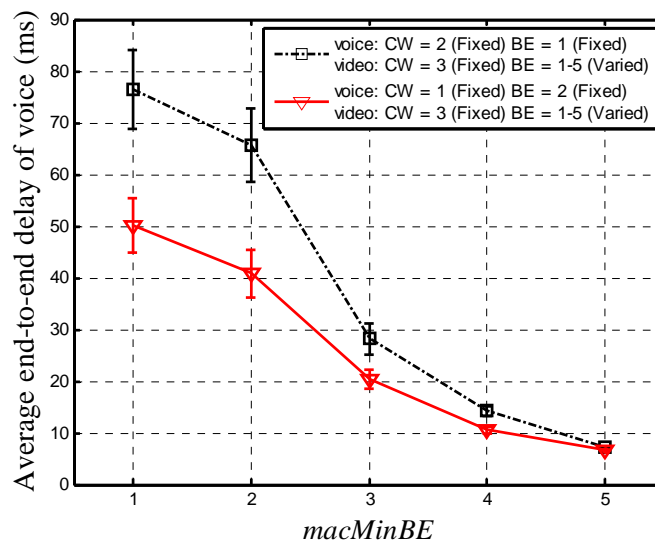
3.2.5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล การยืนยันค่า CW และ BE ที่เหมาะสม

ภาพประกอบ 3-19 แสดงค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS เมื่อค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 3 และมีการเปลี่ยนแปลงค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอตั้งแต่ค่าเท่ากับ 1 ถึง 5 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS มีค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3.0 ซึ่งเป็นค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่สามารถยอมรับได้เมื่อค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่ามากกว่า 3 ขึ้นไป อย่างไรก็ตามยังคงต้องพิจารณาค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงไม่ให้เกิน 100 มิลลิวินาที ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอต้องไม่ต่ำกว่า 25 dB และค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอไม่ให้เกิน 150 มิลลิวินาที



ภาพประกอบ 3-19 ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS

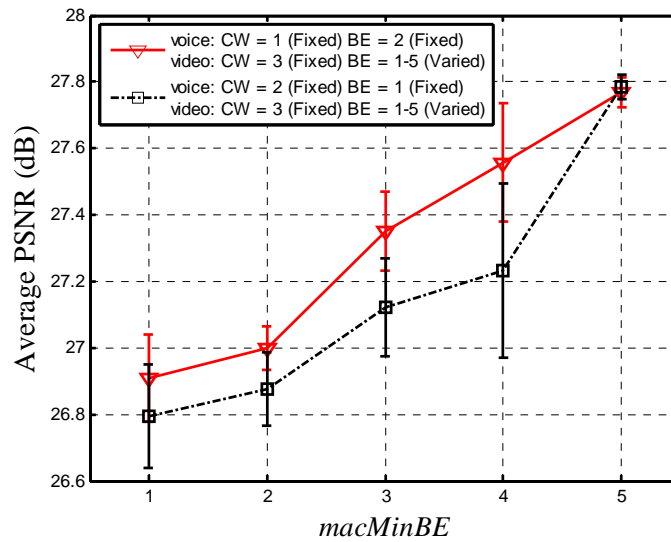
ภาพประกอบ 3-20 แสดงค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงเมื่อค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 3 และมีการเปลี่ยนแปลงค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอตั้งแต่ค่าเท่ากับ 1 ถึง 5 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงมีค่าต่ำกว่า 100 มิลลิวินาที ทุกจุดการทดลอง อย่างไรก็ตามจากภาพประกอบ 3-20 ซึ่งให้เห็นว่าเมื่อค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่ามากกว่า 3 ขึ้นไปถึงจะส่งผลให้ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS มีค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3.0 ซึ่งเป็นค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นถึงแม้ว่าค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 3 จะให้ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงน้อยกว่า 100 มิลลิวินาที แต่ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS ก็มีค่าน้อยกว่า 3.0 นั้นแสดงให้เห็นว่าค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 3 เมื่อค่า CW และ $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลเสียงเท่ากับ 2 และ 1 หรือเมื่อค่า CW และ $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลเสียงเท่ากับ 1 และ 2 ไม่ใช่ค่าที่เหมาะสม



ภาพประกอบ 3-20 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียง

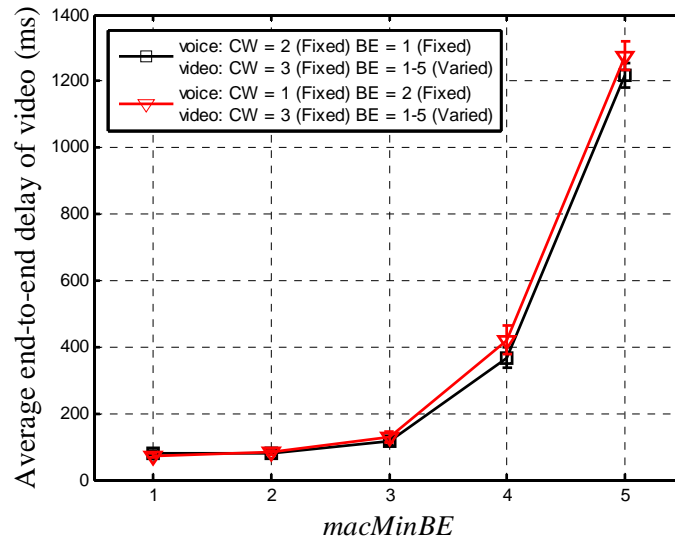
ภาพประกอบ 3-21 แสดงค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอเมื่อค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 3 และมีการเปลี่ยนแปลงค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอตั้งแต่ค่าเท่ากับ 1 ถึง 5 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอทุกๆจุดมีค่าอยู่ในช่วง 25-31 dB ซึ่ง MOS ระดับนี้อยู่ในช่วงพอใช้ [15] แต่ค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่ส่งผลให้ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS มีค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3.0 และค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงมีค่าต่ำกว่า 100 มิลลิวินาที คือค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่มีค่ามากกว่า 3 ขึ้นไป

อย่างไรก็ตามยังคงต้องพิจารณาค่าเฉลี่ยเวลาหนึ่งของข้อมูลวิดีโอว่ามีค่าน้อยกว่า 150 มิลลิวินาทีหรือไม่



ภาพประกอบ 3-21 ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอ

ภาพประกอบ 3-22 แสดงค่าเฉลี่ยเวลาหนึ่งของข้อมูลวิดีโอเมื่อค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าเท่ากับ 3 และมีการเปลี่ยนแปลงค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอตั้งแต่ค่าเท่ากับ 1 ถึง 5 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาหนึ่งของข้อมูลวิดีโอที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 150 มิลลิวินาที เมื่อค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 3 อย่างไรก็ตามค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่ค่าดังกล่าวก็ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ เนื่องจากส่งผลให้ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS มีค่าน้อยกว่า 3.0 นอกจากนี้หากจะใช้งานค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่ค่า 4 หรือ 5 เนื่องจากให้ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS มีค่ามากกว่า 3.0 และค่าเฉลี่ยเวลาน้อยกว่า 100 มิลลิวินาที รวมถึงให้ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโออยู่ในช่วง 25-31 dB อย่างไรก็ตามจากภาพประกอบ 3-22 จะเห็นว่าที่ค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 4 หรือ 5 ให้ค่าค่าเฉลี่ยเวลาหนึ่งของข้อมูลวิดีโอมากกว่า 150 มิลลิวินาที ดังนั้นจากการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า CW หรือ BE ของโหนดส่งข้อมูลเสียงมีค่าเพิ่มขึ้น ไม่มีค่า *macMinBE* ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่เหมาะสมเลย



ภาพประกอบ 3-22 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอ

3.2.6 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการกำหนดค่า BE และ CW ของโหนดส่งข้อมูลเสียงและโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเพื่อให้ได้คุณภาพของข้อมูลเสียงและคุณภาพของวิดีโอเป็นที่ยอมรับ โดยที่คุณภาพของข้อมูลเสียงประเมินจากค่า R-factor ซึ่งค่า R-factor ที่ได้เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า Mean opinion score (MOS) ต้องได้ค่าไม่ต่ำกว่า 3.0 [2] และเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงต้องไม่เกิน 100 มิลลิวินาที [5, 19] นอกจากนี้คุณภาพของข้อมูลวิดีโอซึ่งประเมินจากค่า PSNR ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 25-31 dB เมื่อเปรียบเทียบเป็นค่า MOS จะได้ค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3.0 ขึ้นไปและเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอต้องไม่เกิน 150 มิลลิวินาที [5, 19] ผลจากการทดลองชี้ให้เห็นว่าการกำหนดค่า BE และ CW ของโหนดส่งข้อมูลเสียงและโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเพื่อให้ได้ตรงตาม 4 เงื่อนไขที่กล่าว ในกรณีที่การวางตำแหน่งของโหนดมีลักษณะเครือข่ายเป็นรูปดาวและมีจำนวนโหนดส่งข้อมูลเสียงไม่เกิน 1 ตัว โหนดส่งข้อมูลวิดีโอไม่เกิน 1 ตัว มีอยู่ 2 กรณีคือ

- 1) กำหนดค่า BE และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลเสียงเท่ากับ 1 และ 1 ตามลำดับ และการกำหนดค่า BE และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 3 และ 3 ตามลำดับ
- 2) กำหนดค่า BE และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลเสียงเท่ากับ 1 และ 1 ตามลำดับ และการกำหนดค่า BE และค่า CW ของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอเท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ

ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกกรณีที่สองเป็นการกำหนดค่าที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองครั้งนี้ เนื่องจากให้ค่าคุณภาพของข้อมูลเสียงซึ่งประเมินจากค่า MOS ไม่ต่ำกว่า 3.0 ซึ่งค่าคุณภาพของข้อมูลเสียงมากกว่ากรณีที่ 1 และคุณภาพของข้อมูลวิดีโอซึ่งประเมินจากค่า PSNR ให้อยู่ในช่วง 25-31 dB

นอกจากนี้ยังให้ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วยของการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอไม่เกิน 100 มิลลิวินาที และ 150 มิลลิวินาทีตามลำดับ

บทที่ 4

การส่งข้อมูลเสียงและวิดีโอบนเครือข่าย IEEE 802.15.4 ที่มีการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูล

ในบทนี้เป็นรายละเอียดการทดสอบสมรรถนะของโพรโทคอล Carrier sense multiple access/collision avoidance (CSMA/CA) ซึ่งเป็นโพรโทคอลการเข้าใช้ช่องสัญญาณสื่อสารที่พัฒนาให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ โดยวิธีการกำหนดค่าระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณผ่านทางพารามิเตอร์หลักของโพรโทคอล CSMA/CA ที่เรียกว่า BE และ CW ให้เหมาะสมกับชนิดของข้อมูลที่ต้องการจะส่งผ่านเครือข่ายไร้สาย ซึ่งการกำหนดค่า BE และ CW ที่เหมาะสมได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ที่ผ่านมา

4.1 บทนำ

ในการพัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอและข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริงที่คำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วงของข้อมูลที่จะทำการส่งเป็นหลัก โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งลำดับความสำคัญของการส่งข้อมูลออกเป็นสามลำดับคือ ลำดับสูงสำหรับข้อมูลเสียง ลำดับกลางสำหรับข้อมูลวิดีโอ และลำดับต่ำสำหรับข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง

ตารางที่ 4-1 พารามิเตอร์สำหรับการแบ่งลำดับความสำคัญ

ลำดับความสำคัญ	ชนิดของข้อมูล	<i>macMinBE</i>	<i>macMaxBE</i>	CW
สูง	Voice	1	5	1
กลาง	Video	3	5	3
ต่ำ	Non-real-time data	5	5	4

ตารางที่ 4-1 แสดงพารามิเตอร์สำหรับการแบ่งลำดับความสำคัญ โดยที่การกำหนดค่า *macMinBE* และค่า CW ให้กับโหนดส่งข้อมูลเสียงและโหนดส่งข้อมูลข้อมูลวิดีโอได้มาจากการทดลอง ดังแสดงไว้ในบทที่ 3 ในส่วนของการกำหนดค่า *macMinBE* และค่า CW ให้กับโหนดส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริงไม่ได้เป็นค่าที่ได้มาจากการทดลอง อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าดังกล่าวเป็นการกำหนดค่าที่ผู้ทำวิจัยเห็นว่าเหมาะสม เนื่องจากข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผล

แบบเวลาจริงไม่คำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วง ดังนั้นในการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อจะทำการส่งข้อมูลจึงให้โอกาสกับโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงและโหนดส่งข้อมูลวิดีโอมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนโหนดที่ส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง ซึ่งในการให้โอกาสโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงและโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนสามารถทำได้โดยการกำหนดค่า $macMinBE$ และค่า CW ของโหนดที่ส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริงให้มีค่ามากกว่าโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงและโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอ โดยงานวิจัยนี้จะเรียกวิธีการที่ปรับปรุงการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่มีการจัดลำดับความสำคัญว่า Priority-rating ซึ่งมีรายละเอียดของอัลกอริทึมดังต่อไปนี้

- 1: กระบวนการเริ่มต้น (Initialization) การเข้าใช้ช่องสัญญาณ
- 2: ขั้นตอนการกำหนดเริ่มต้นให้กับตัวแปร
- 3: กำหนดค่าตัวแปร $NB = 0$
- 4: **If** (ชนิดของข้อมูลเป็นข้อมูลเสียง) **Then**
- 5: กำหนดค่าตัวแปร $CW = 1$
- 6: กำหนดค่าตัวแปร $BE = macMinBE = 1$
- 7: **Else if** (ชนิดของข้อมูลเป็นข้อมูลวิดีโอ)
- 8: กำหนดค่าตัวแปร $CW = 3$
- 9: กำหนดค่าตัวแปร $BE = macMinBE = 3$
- 10: **Else if** (ชนิดของข้อมูลเป็นข้อมูล Non-real-time)
- 11: กำหนดค่าตัวแปร $CW = 4$
- 12: กำหนดค่าตัวแปร $BE = macMinBE = 5$
- 13: **Else**
- 14: กำหนดค่าตัวแปร $CW = 2$
- 15: กำหนดค่าตัวแปร $BE = macMinBE = 3$
- 16: **ขั้นตอนหลักเนื่องการชนกันของข้อมูล**
- 17: **ช่วงเวลาเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล = ค่าสุ่มในช่วง $[0, 2^{BE}-1] \times aUnitBackoffPeriod$**
- 18: **ขั้นตอนตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณ**
- Repeat**
- 19: **IF** (ช่องสัญญาณว่าง)
- 20: ลดค่าตัวแปร CW ลด 1 ค่า

21: **IF** (ตัวแปร CW มีค่าเท่ากับศูนย์)
 22: เข้าใช้ช่องสัญญาณ
 23: **Else** (ตัวแปร CW มีค่าไม่เท่ากับศูนย์)
 24: ตรวจสอบสถานะของช่องสัญญาณว่ามีการใช้งานอยู่หรือไม่
 25: **Else** (ช่องสัญญาณไม่ว่าง)
 26: เพิ่มค่าตัวแปร NB ขึ้น 1 ค่า
 27: เพิ่มค่าตัวแปร BE ขึ้น 1 ค่า
 ค่าของตัวแปร BE ที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าไม่เกิน *macMaxBE*
 28: **IF** (ชนิดของข้อมูลเป็นข้อมูลเสียง)
 29: กำหนดค่าตัวแปร CW = 1
 30: **Else if** (ชนิดของข้อมูลเป็นข้อมูลวิดีโอ)
 31: กำหนดค่าตัวแปร CW = 3
 32: **Else if** (ชนิดของข้อมูลเป็นข้อมูล Non-real-time)
 33: กำหนดค่าตัวแปร CW = 4
 34: **Else**
 35: กำหนดค่าตัวแปร CW = 2
 36: **IF** ($NB > macMaxCSMABackoff$)
 37: ล้มเหลวในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ
 38: **Else**
 39: หน่วงเวลาเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล
 = ค่าสุ่มในช่วง $[2^{BE-1}, 2^{BE}-1] \times aUnitBackoffPeriod$
 40: **Until** เข้าใช้ช่องสัญญาณสำเร็จหรือล้มเหลวในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ

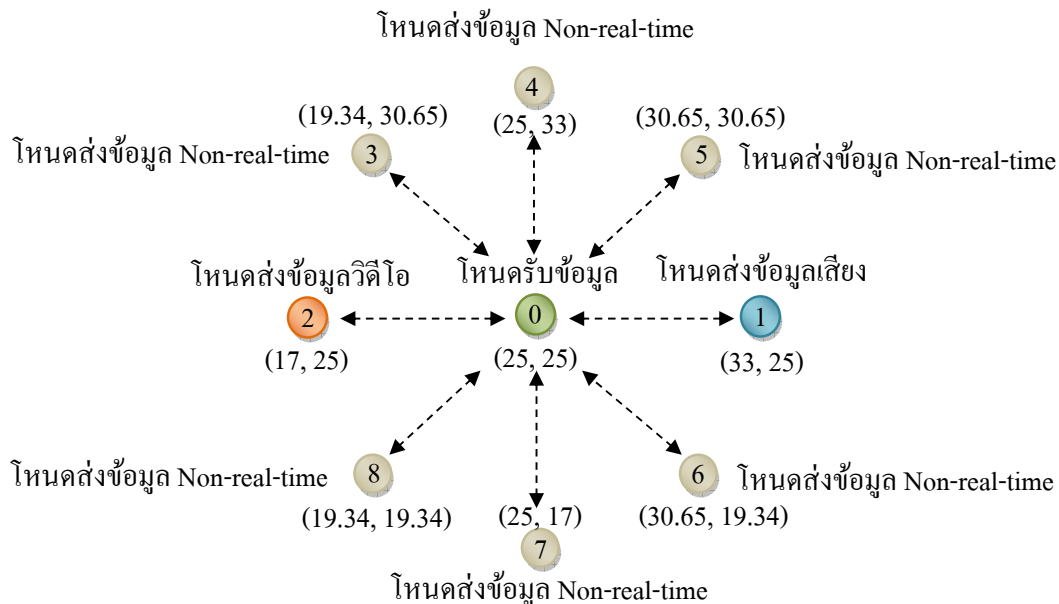
4.2 การทดสอบสมรรถนะของโพรโทคอล CSMA/CA ที่มีการจัดระดับความสำคัญของข้อมูล

4.2.1 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีการที่ปรับปรุงให้มีการจัดลำดับความสำคัญตามตารางที่ 4-1 ซึ่งเรียกว่า Priority-rating กับมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่มีขั้นตอนการทำงานแบบดั้งเดิมซึ่งเรียกว่า IEEE 802.15.4

4.2.2 แบบวิจัยเชิงทดลอง

หัวข้อนี้อธิบายวิธีการจำลองการทำงานเพื่อส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย รวมถึงการส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง โดยใช้โปรแกรม Network simulator 2 (NS-2) เวอร์ชัน 2.34 และเครื่องมือ Evalvid [17] การทดลองนี้ประกอบด้วยโหนดทั้งหมด 9 ตัว วางอยู่บนพื้นที่ขนาด 50x50 ตารางเมตร (m^2) กำหนดให้ (x, y) คือพิกัดตำแหน่งของโหนดทั้ง x และ y มีหน่วยเป็นเมตร โดยที่โหนดส่งข้อมูลวิดีโอวางอยู่ที่พิกัด (17, 25) โหนดส่งข้อมูลเสียงวางอยู่ที่พิกัด (33, 25) โหนดรับข้อมูลวางอยู่ที่พิกัด (25, 25) และข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง วางอยู่ที่พิกัด (19.34, 30.65) (25,33) (30.65, 30.65) (30.65, 19.34) (25, 17) และ (19.34, 19.34) การวางตำแหน่งของโหนดมีลักษณะเครือข่ายเป็นรูปดาว (Star topology) โดยโหนดตัวส่งข้อมูลอยู่ห่างจากโหนดตัวรับข้อมูล 8 เมตร และอยู่ห่างจากโหนดตัวส่งข้างเคียงที่ระยะเท่ากัน ลักษณะเครือข่ายและตำแหน่งของโหนดแสดงดังภาพประกอบ 4-1



ภาพประกอบ 4-1 ลักษณะเครือข่ายที่ใช้ศึกษาและตำแหน่งของโหนด

เนื่องจากการทดลองนี้ได้ศึกษาการใช้พลังงานของโหนด จึงได้มีการใช้แบบจำลองพลังงาน (Energy model) โดยที่แบบจำลองพลังงานจะบ่งบอกถึงระดับการใช้พลังงานของโหนดที่ใช้ในแต่ละสถานะประกอบด้วย สถานะรับข้อมูล (Receive mode) สถานะส่งข้อมูล (Transmit mode) และสถานะนิ่งเฉย (Idle mode) ในการกำหนดพลังงานเริ่มต้นให้กับโหนดทุกตัวที่อยู่ในเครือข่ายสามารถทำได้โดยกำหนดค่าผ่านตัวแปร `initialEnergy` มีหน่วยเป็นจูล ซึ่งการทดลองนี้ได้กำหนดพลังงานเริ่มต้น

ให้กับโหนดทุกตัวในเครือข่ายเท่ากับ 13,000 จูล คำนวณจากถ่านไฟฉายขนาด AA จำนวน 1 ก้อน [12] การคำนวณพลังงานที่ใช้ในโหนดรับข้อมูลสามารถคำนวณได้จากกำลังที่ใช้รับข้อมูลคูณกับระยะเวลาที่ใช้รับข้อมูล การคำนวณพลังงานที่ใช้ในโหนดส่งข้อมูลสามารถคำนวณได้จากกำลังที่ใช้ส่งข้อมูลคูณกับระยะเวลาที่ใช้ส่งข้อมูล และการคำนวณพลังงานที่ใช้ในโหนดนิ่งเฉยคำนวณได้จากกำลังที่ใช้ขณะนิ่งเฉยคูณกับระยะเวลาที่นิ่งเฉย กำลังที่ใช้ส่งข้อมูล รับข้อมูลและนิ่งเฉย แสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 กำลังที่ใช้ในแต่ละ โหมด [20]

	Receive mode	Transmit mode	Idle mode
Power	35.46 mW	31.32 mW	0.77 mW

พารามิเตอร์อื่นๆที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

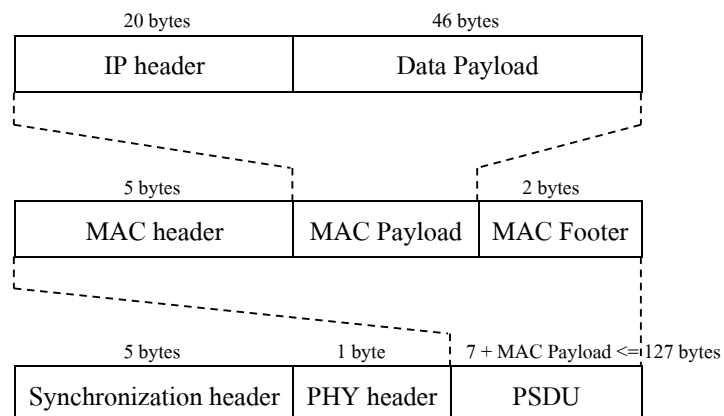
พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
ขนาดพื้นที่	50x50 ตารางเมตร
จำนวน โหนดทั้งเครือข่าย	- โหนดรับข้อมูล 1 ตัว - โหนดส่งข้อมูลเสียง 1 ตัว - โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ 1 ตัว - โหนดส่งข้อมูล Non-real-time 6 ตัว รวมทั้งหมด 9 ตัว
มาตรฐานการทำงานชั้น MAC และ PHY	IEEE 802.15.4
ความถี่ที่ใช้ในชั้น PHY	2.4 GHz
ความไวในการรับสัญญาณ (Receiver sensitivity)	-95 dBm [20]
กำลังของสัญญาณที่ส่งออก	-25 dBm
โมเดลการแพร่กระจายสัญญาณวิทยุแบบ	Two-ray ground reflection model
ขนาดหน่วยความจำ (Buffer size)	150 แพ็กเกต [3]
ชนิดของ โพรโทคอลจัดหาเส้นทาง	AODV
ชนิดของ โพรโทคอลเข้าใช้ช่องสัญญาณ	CSMA/CA
ระยะเวลาในการจำลองการทำงาน	90 วินาที

รายละเอียดของข้อมูลที่จะใช้ในการทดลองของบทที่ 4 ประกอบไปด้วยข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ และข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง ซึ่งอธิบายในส่วนต่อไป นี้ ข้อมูลเสียง ใช้มาตรฐานการเข้ารหัสและถอดรหัสแบบ G729A ซึ่งข้อมูลเสียงที่ได้หลังจากการเข้ารหัสจะมีขนาดของแพ็กเก็ตเท่ากับ 20 ไบต์ โดยมีระยะห่างของแต่ละแพ็กเก็ตเท่ากับ 20 มิลลิวินาที เมื่อคำนวณเป็นอัตราบิตจะได้เท่ากับ 24 กิโลบิตต่อวินาที [2] ซึ่งเป็นอัตราบิตแบบคงที่ (Constant bit rate: CBR) สำหรับข้อมูลวิดีโอไฟล์ต้นฉบับที่ใช้มีชื่อเรียกว่า *foreman_qcif.yuv* เป็นไฟล์วิดีโอชนิด YUV ที่ยังไม่มีการบีบอัดข้อมูล [21] ไฟล์วิดีโอดังกล่าวประกอบด้วยเฟรมภาพเรียงต่อกันจำนวน 1500 เฟรม โดยที่แต่ละเฟรมจะมีความละเอียดเท่ากับ 176x144 จุดภาพ และมีอัตราเฟรมเท่ากับ 25 เฟรมต่อวินาที [3] ทำการบีบอัดไฟล์ต้นฉบับจาก YUV ให้กลายเป็น MPEG-4 ซึ่งมีอัตราบิตแบบไม่คงที่ (Variable bit-rate: VBR) [22] โดยมีอัตราบิต (Bit rate) เท่ากับ 32 กิโลบิตต่อวินาที ข้อมูลของแต่ละเฟรมจะถูกแบ่งเป็นแพ็กเก็ตโดยแต่ละแพ็กเก็ตมีขนาดเท่ากับ 80 ไบต์ จำนวนเฟรมและจำนวนแพ็กเก็ตแสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 จำนวนเฟรมและจำนวนแพ็กเก็ตของข้อมูลวิดีโอ

ชนิดของเฟรม	I-frame	P-frame	B-frame	รวม
จำนวนเฟรม	125	500	875	1500
จำนวนแพ็กเก็ต (32kbps)	2216	1438	1099	4753

ข้อมูลประเภทสุดท้ายคือ ข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง กำหนดให้มีขนาดของแพ็กเก็ตเท่ากับ 46 ไบต์ โดยมีระยะห่างของแต่ละแพ็กเก็ตเท่ากับ 1 วินาที [23] เมื่อคำนวณเป็นอัตราบิตจะได้เท่ากับ 0.528 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งเป็นอัตราบิตแบบคงที่ โครงสร้างแพ็กเก็ตข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริงแสดงภาพประกอบ 4-2



ภาพประกอบที่ 4-2 โครงสร้างแพ็กเก็ตข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง

ตารางสรุปอัตราบิตของข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอและข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง แสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 อัตราบิตของข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอและข้อมูลวิดีโอและข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง

ชนิดข้อมูล	อัตราบิต
ข้อมูลเสียง	24 กิโลบิตต่อวินาที
ข้อมูลวิดีโอ	32 กิโลบิตต่อวินาที
ข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง	0.528 กิโลบิตต่อวินาที

การทดลองในบทที่ 4 นี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองหัวข้อ โดยการทดลองหัวข้อ 4.2.4 เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างโพรโทคอล CSMA/CA ที่มีการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูลซึ่งในงานวิจัยนี้เรียกวิธีนี้ว่า Priority-rating กับโพรโทคอล CSMA/CA ที่ไม่มีการจัดลำดับความสำคัญของข้อมูลซึ่งเป็นโพรโทคอล CSMA/CA แบบดั้งเดิมในงานวิจัยนี้จะเรียกวิธีดังกล่าวว่า IEEE 802.15.4 โดยการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงจำนวน โหนดส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง ตั้งแต่ 1 ไปจนถึง 6 ตัว ในการทดลองวินาทีที่ 0 ถึง 25 เป็นการเชื่อมต่อเครือข่าย จากนั้นวินาทีที่ 26 โหนดส่งข้อมูลเสียง โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ และ โหนดส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง เริ่มส่งข้อมูลจนถึงวินาทีที่ 90 ซึ่งทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยคำนวณช่วงค่าความเชื่อมั่น (Confidence interval) ด้วยความเชื่อมั่นที่ 95% การทดลองตอนที่หนึ่งได้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายประกอบไปด้วย จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้ง (Number of packet drops) ปริมาณงาน (Throughput) เปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Packet delivery ratio: PDR) ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วง (Average end-to-end delay) ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง (R-factor) และคุณภาพของวิดีโอ (PSNR) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายเดียวกันกับการทดลองในบทที่ 3 โดยแต่ละตัวชี้วัดได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.3 นอกจากนี้ยังได้เพิ่มตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายเข้ามาอีกสามตัวชี้วัดได้แก่ ค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ต (Average jitter) ค่าพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย (Energy consumption) และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy efficiency) โดยมีรายละเอียดของตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายที่เพิ่มเติมเข้ามาได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.3

หัวข้อ 4.2.5 เป็นการทดลองเพื่อหาค่าประมาณจำนวน โหนดประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริงสูงสุดที่เครือข่ายมีการวางตำแหน่งของโหนดมีลักษณะเครือข่ายเป็นรูปดาวสามารถรองรับได้ โดยมีเงื่อนไขว่าคุณภาพของข้อมูลเสียงที่ประเมินจากค่า R-factor ซึ่งค่า R-factor ที่ได้เมื่อนำมา

คำนวณเป็นค่า Mean opinion score (MOS) ต้องได้ค่าไม่ต่ำกว่า 3.0 [2] และเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงต้องไม่เกิน 100 มิลลิวินาที [5, 19] นอกจากนี้คุณภาพของข้อมูลวิดีโอซึ่งประเมินจากค่า PSNR ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 25-31 dB เมื่อเปรียบเทียบเป็นค่า MOS จะได้ค่าที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3.0 ขึ้นไปและเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอต้องไม่เกิน 150 มิลลิวินาที [5, 19] โดยการทดลองจะทำการเพิ่มความหนาแน่นของข้อมูลให้กับเครือข่ายด้วยการเปลี่ยนแปลงจำนวนโหนดส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง ตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 60 ตัว ซึ่งจะทำการเพิ่มโหนดส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริงขึ้นทีละ 10 ตัว โดยที่การทดลองวินาทีที่ 0 ถึง 78 เป็นการเชื่อมต่อเครือข่ายจากนั้นวินาทีที่ 79 โหนดส่งข้อมูลเสียง โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ และโหนดส่งข้อมูลประเภทที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง เริ่มส่งข้อมูลจนถึงวินาทีที่ 140 ซึ่งทำการทดลองซ้ำ 30 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย โดยคำนวณช่วงค่าความเชื่อมั่น (Confidence interval) ด้วยความเชื่อมั่นที่ 95% การทดลองครั้งที่สองได้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายประกอบไปด้วย ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง (R-factor) คุณภาพของวิดีโอ (PSNR) และค่าเฉลี่ยเวลาหน่วง (Average end-to-end delay) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายเดียวกันกับในบทที่ 3 โดยมีรายละเอียดของตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายอธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.3

4.2.3 ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่าย

ตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายในบทที่ 4 นี้ได้ใช้ตัวชี้วัดสมรรถนะที่เหมือนกับในบทที่ 3 ประกอบไปด้วย จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้ง (Number of packet drops) ปริมาณงาน (Throughput) เปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล (Packet delivery ratio: PDR) ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วง (Average end-to-end delay) ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง (R-factor) และคุณภาพของวิดีโอ (PSNR) อย่างไรก็ตามการทดลองในบทที่ 4 ได้มีการเพิ่มตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายเพื่อการวิเคราะห์ผลด้านต่างๆเพิ่มเติม โดยมีรายละเอียดของตัวชี้วัดสมรรถนะการทำงานของเครือข่ายดังต่อไปนี้

ค่าเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ต (Average jitter) คือ ความแตกต่างระหว่างเวลาหน่วงของแพ็กเก็ตมีหน่วยเป็นมิลลิวินาที คำนวณได้จากสมการที่ (4-1) [15, 24]

$$\text{jitter} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |Delay_n - Delay_{n-1}| \quad (4-1)$$

เมื่อ n คือลำดับของแพ็กเก็ตที่ปลายทางรับได้ N คือจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลทั้งหมดที่ปลายทางรับได้ และ $Delay$ คือระยะเวลาหน่วงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายจากต้นทางถึงปลายทางในหนึ่งแพ็กเก็ต

พลังงานที่ใช้ในสถานะรับข้อมูล (Energy consumption in the receiving state) คือ ตัววัดที่บ่งบอกถึงระดับพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลมีหน่วยเป็นจูล (Joule) คำนวณได้จากสมการที่ (4-2)

$$\text{Energy consumption in the receiving state} = \text{rxPower} \times \text{receiving time} \quad (4-2)$$

เมื่อ rxPower คือ กำลังที่ใช้ในการรับข้อมูลมีหน่วยเป็นวัตต์ และ receiving time คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการรับข้อมูลมีหน่วยเป็นวินาที

พลังงานที่ใช้ในสถานะส่งข้อมูล (Energy consumption in the transmitting state) คือ ตัววัดที่บ่งบอกถึงระดับพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลมีหน่วยเป็นจูล (Joule) คำนวณได้จากสมการที่ (4-3)

$$\text{Energy consumption in the transmitting state} = \text{txPower} \times \text{transmitting time} \quad (4-3)$$

เมื่อ txPower คือ กำลังที่ใช้ในการส่งข้อมูลมีหน่วยเป็นวัตต์ และ transmitting time คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลมีหน่วยเป็นวินาที

พลังงานที่ใช้ในสถานะนิ่งเฉย (Energy consumption in the idle state) คือ ตัววัดที่บ่งบอกถึงระดับพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยมีหน่วยเป็นจูล (Joule) คำนวณได้จากสมการที่ (4-4)

$$\text{Energy consumption in the idle state} = \text{idlePower} \times \text{idle time} \quad (4-4)$$

เมื่อ idlePower คือ กำลังที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยมีหน่วยเป็นวัตต์ และ idle time คือ ระยะเวลาที่ใช้ที่โหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยมีหน่วยเป็นวินาที

จำนวนไบต์ที่ส่งออก คือ ตัววัดที่บ่งบอกถึงจำนวนไบต์ที่ส่งออกจากโหนดแต่ละชนิด ซึ่งเกิดจากการส่งแพ็กเก็ตข้อมูล แพ็กเก็ตที่ใช้สำหรับจัดเส้นทาง และแพ็กเก็ต ACK มีหน่วยเป็นไบต์

ค่าพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย (Energy consumption) คือ ตัววัดที่บ่งบอกถึงระดับพลังงานที่ใช้โดยรวม ซึ่งเกิดจากการใช้พลังงานจากโหนดทุกตัวในเครือข่ายมีหน่วยเป็นจูล (Joule) คำนวณได้จากสมการที่ (4-5)

$$\text{Energy consumption} = \frac{1}{m} \times \sum_{i=0}^{m-1} E_i \quad (4-5)$$

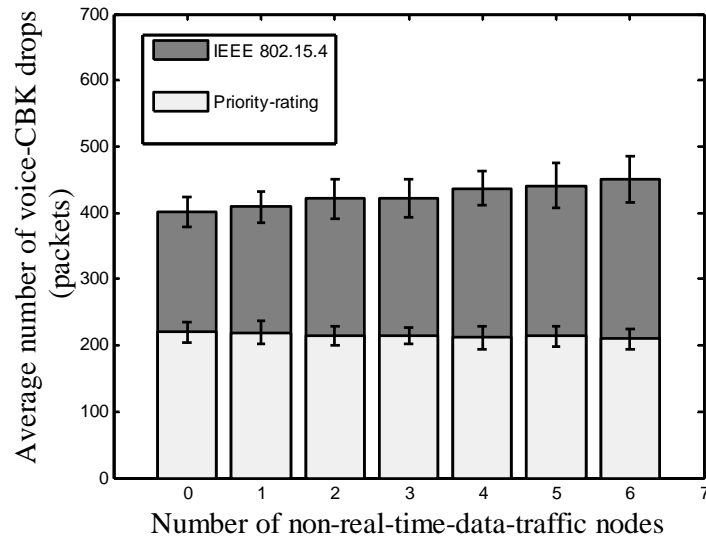
เมื่อตัวแปร E_i คือพลังงานที่ถูกใช้จาก โหนดที่ i และ i คือหมายเลขของ โหนด ตัวแปร m คือจำนวนของ โหนดทั้งเครือข่าย

ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน (Energy efficiency) คือ อัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูล ทั้งหมดที่ปลายทางรับได้ต่อพลังงานที่ใช้โดยรวมมีหน่วยเป็นบิตต่อจูล (Bits per joule) กำหนดได้จาก สมการที่ (4-6)

$$\text{ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน} = \frac{\text{จำนวนบิตข้อมูลที่โหนดปลายทางรับได้ทั้งหมด}}{\text{ค่าพลังงานที่ใช้ทั้งเครือข่าย}} \quad (4-6)$$

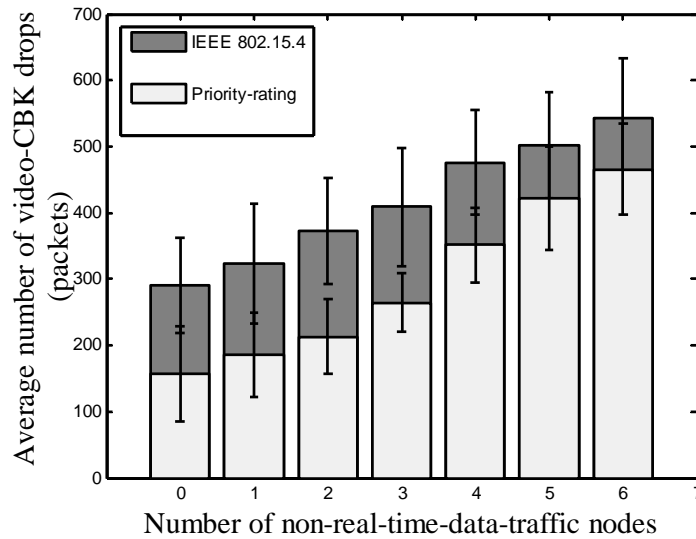
4.2.4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล การเปรียบเทียบสมรรถนะ

ภาพประกอบ 4-3 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” ของข้อมูลเสียง จาก กราฟชี้ให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งของข้อมูลเสียงที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่าน้อยกว่าวิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากค่า CW และค่า $macMinBE$ วิธี Priority-rating ของ โหนดที่ส่งข้อมูลเสียงมีค่าน้อยกว่า ค่า CW และค่า $macMinBE$ ของ โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time สังเกตได้จากตารางที่ 4-1 ส่งผลให้ โหนดที่ส่งข้อมูลเสียงของวิธี Priority-rating มีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณมากกว่าโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time และ โหนดส่งข้อมูลวิดีโอจึงทำให้จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” ของข้อมูล เสียงมีค่าไม่แตกต่างกันในทางสถิติเมื่อจำนวน โหนดส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ในช่วง 0 ถึง 6 ตัว ขณะที่จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” ของข้อมูลเสียงที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 มีแนวโน้มเพิ่ม มากขึ้นเมื่อจำนวน โหนดส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ในช่วง 0 ถึง 6 ตัว เนื่องจากค่า CW และค่า $macMinBE$ ที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 ของโหนดที่ส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ และข้อมูล Non-real-time ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 และ 3 เหมือนกัน ดังนั้นโหนดที่ส่งข้อมูลทุกตัวจึงมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณที่เท่า เทียมกันและเมื่อจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้องการเข้าใช้ ช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยขณะที่ช่องสัญญาณมีแบนด์วิดท์เท่าเดิมทำให้เกิดจำนวนแพ็กเก็ตที่ ถูกละทิ้งกรณี “CBK” ของข้อมูลเสียงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น



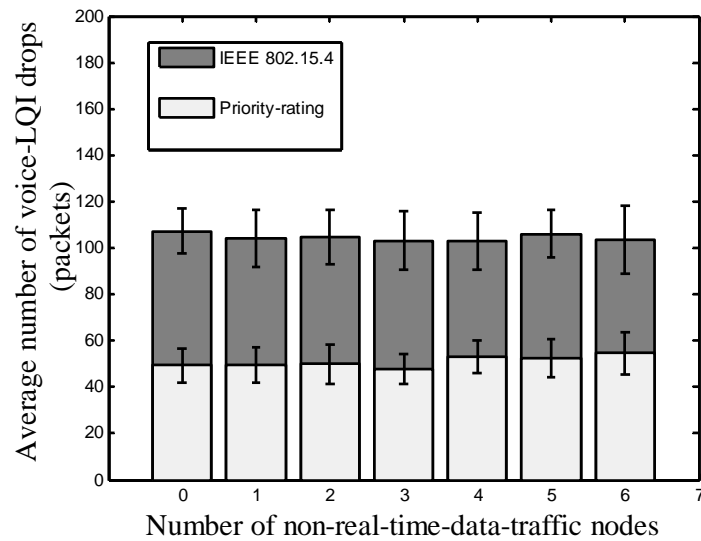
ภาพประกอบ 4-3 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี CBK

ภาพประกอบ 4-4 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” ของข้อมูลวิดีโอ จากกราฟชี้ให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งของข้อมูลวิดีโอที่ใช้วิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจำนวนโหนดส่งข้อมูล Non-real-time ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความต้องการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยขณะที่ช่องสัญญาณมีแบนด์วิดท์เท่าเดิมทำให้เกิดจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” ของข้อมูลวิดีโอมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งของข้อมูลวิดีโอที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่าน้อยกว่าที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 เมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time มีจำนวนตั้งแต่ 0 ถึง 4 ตัว แต่เมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time มีจำนวนเท่ากับ 4 และ 5 ตัว จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งของข้อมูลวิดีโอกรณี “CBK” ก็จะมีค่าไม่แตกต่างกันในเชิงสถิติ สาเหตุที่จำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งของข้อมูลวิดีโอกรณี “CBK” ที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่าน้อยกว่าที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากค่า CW และค่า *macMinBE* วิธี Priority-rating ของโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอมีค่าน้อยกว่าค่า CW และค่า *macMinBE* ของโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time สังเกตได้จากตารางที่ 4-1 ส่งผลให้โหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอที่ใช้วิธี Priority-rating มีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณมากกว่าโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ขณะที่ค่า CW และค่า *macMinBE* วิธี IEEE 802.15.4 ของโหนดที่ส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ และข้อมูล Non-real-time ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 และ 3 เหมือนกัน ดังนั้นโหนดที่ส่งข้อมูลทุกตัวจึงมีโอกาสดำเนินการได้เข้าใช้ช่องสัญญาณที่เท่าเทียมกัน



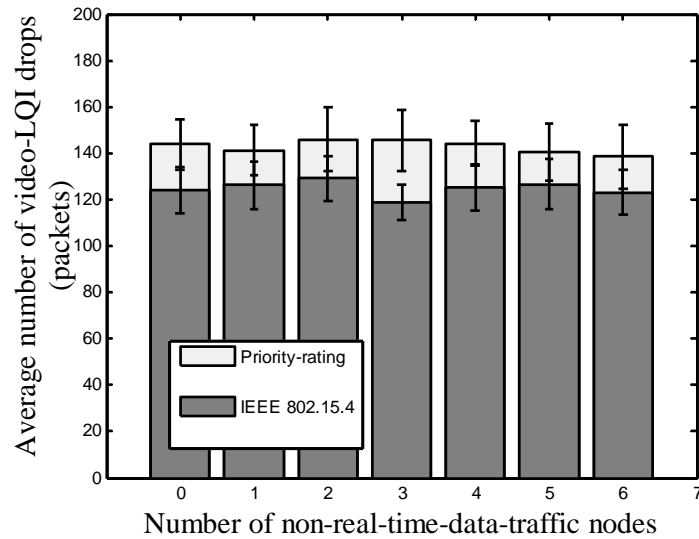
ภาพประกอบ 4-4 จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี CBK

ภาพประกอบ 4-5 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “LQI” ของข้อมูลเสียง จากกราฟชี้ให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งของวิธี Priority-rating มีค่าน้อยกว่าวิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากค่า CW และค่า *macMinBE* ที่ใช้วิธี Priority-rating ของโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอและโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ดังนั้นโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงจึงมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณก่อนโหนดชนิดอื่นๆ และมีโอกาสน้อยที่จะส่งข้อมูลชนกับโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ขณะที่เมื่อใช้วิธี IEEE 802.15.4 ค่า CW และค่า *macMinBE* ของโหนดที่ส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ และข้อมูล Non-real-time มีค่าเท่ากันทุกโหนด จึงทำให้โหนดที่ส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ และข้อมูล Non-real-time มีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณเท่าเทียมกันด้วยเหตุนี้โหนดที่ส่งข้อมูลเสียงจึงมีโอกาสที่จะส่งข้อมูลชนกับโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ได้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธี Priority-rating นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “LQI” ของข้อมูลเสียงที่ใช้วิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 มีแนวโน้มคงที่เมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ในช่วง 0 ถึง 6 ตัว เนื่องจากโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time มีอัตราในการสร้างข้อมูล (Generate data) ที่น้อยเมื่อเทียบกับโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงและโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอประกอบกับจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ยังไม่มากจึงยังไม่ส่งผลกระทบต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “LQI” ของข้อมูลเสียงเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ในช่วง 0 ถึง 6 ตัว



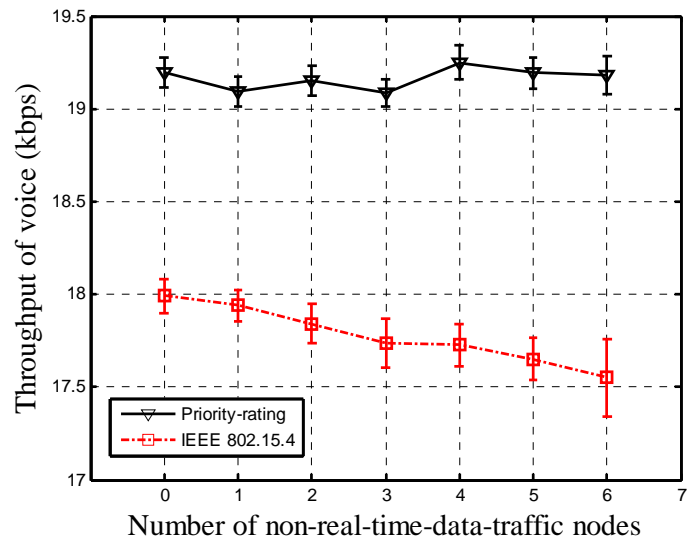
ภาพประกอบ 4-5 จำนวนแพ็กเก็ตเสียงที่ถูกละทิ้งกรณี LQI

ภาพประกอบ 4-6 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “LQI” ของข้อมูลวิดีโอจากกราฟชี้ให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งของวิธี Priority-rating มีค่าไม่แตกต่างในเชิงสถิติกับวิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากค่า *macMinBE* ของโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอทั้งสองวิธีมีค่าเท่ากัน ถึงจะมีค่า CW ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามค่า *macMinBE* ก็มีผลกระทบต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “LQI” มากกว่าค่า CW เนื่องจากค่า *macMinBE* จะส่งผลกระทบต่อเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “LQI” ของข้อมูลวิดีโอที่ใช้วิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 มีแนวโน้มคงที่เมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ในช่วง 0 ถึง 6 ตัว เนื่องจากโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time มีอัตราในการสร้างข้อมูล (Generate data) ที่น้อยเมื่อเทียบกับโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอและโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงประกอบกับจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ยังไม่มากจึงยังไม่ส่งผลกระทบต่อจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “LQI” ของข้อมูลวิดีโอเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ในช่วง 0 ถึง 6 ตัว

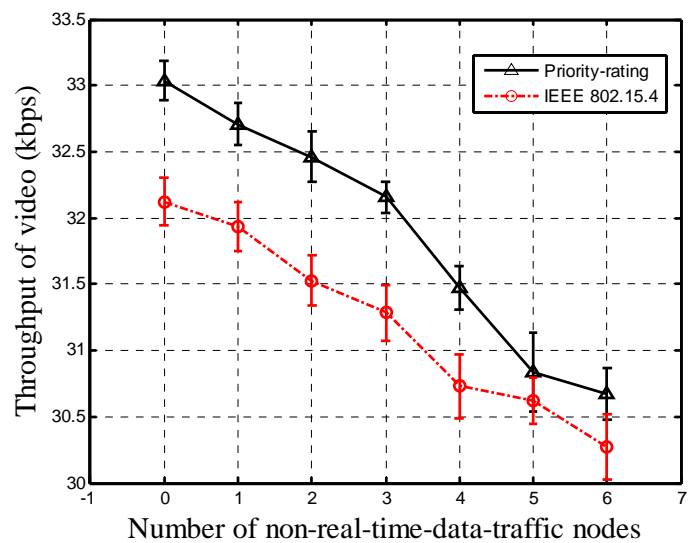


ภาพประกอบ 4-6 จำนวนแพ็กเก็ตวิดีโอที่ถูกละทิ้งกรณี LQI

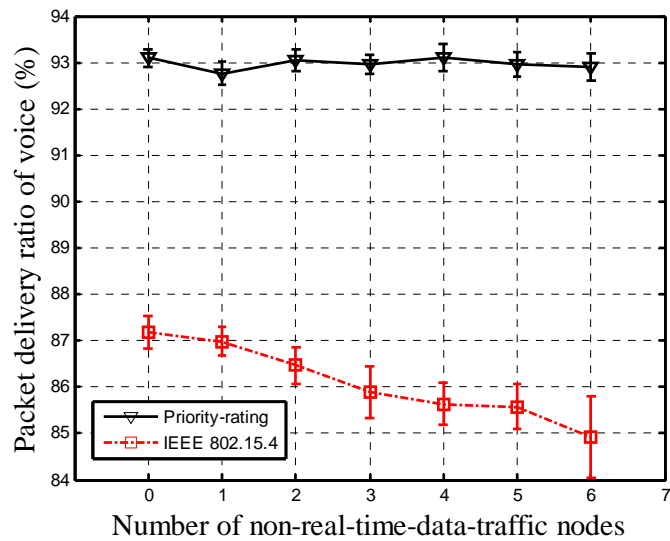
ภาพประกอบ 4-7 ถึง 4-8 และ 4-9 ถึง 4-10 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอตามลำดับที่แต่ละจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการข้อมูลวิดีโอมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้นทั้งวิธี IEEE 802.15.4 และวิธี Priority-rating เนื่องจากจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้องการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยขณะที่ช่องสัญญาณมีแบนด์วิดท์เท่าเดิมทำให้เกิดจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งมากขึ้นสังเกตได้จากภาพประกอบ 4-3 และ 4-4 ในขณะที่ค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลเสียงมีแนวโน้มคงที่เมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้นจาก 0 ถึง 6 ตัว เฉพาะวิธี Priority-rating เนื่องจากโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงในกรณีนี้มีลำดับความสำคัญลำดับสูง ค่า CW และค่า *macMinBE* ที่ใช้ในการเข้าใช้ช่องสัญญาณมีค่าน้อยกว่าโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอและโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ส่งผลให้มีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณเป็นลำดับแรก ดังนั้นจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งของข้อมูลเสียงมีแนวโน้มคงที่เมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ในช่วง 0 ถึง 6 ตัว



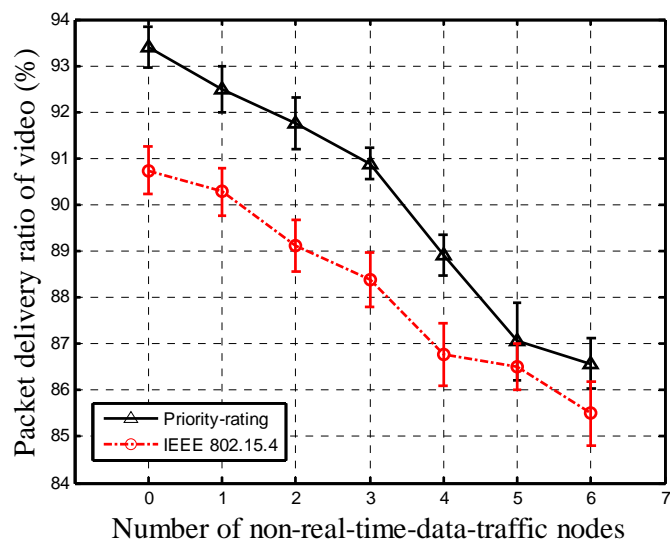
ภาพประกอบ 4-7 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียง



ภาพประกอบ 4-8 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอ

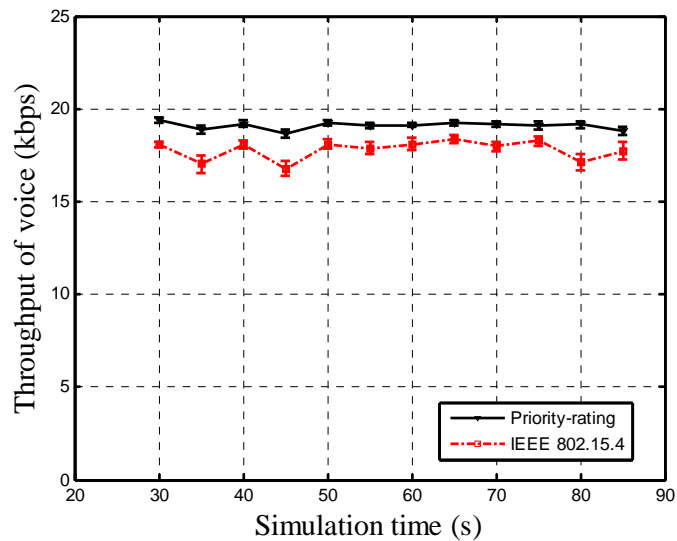


ภาพประกอบ 4-9 ค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลเสียง

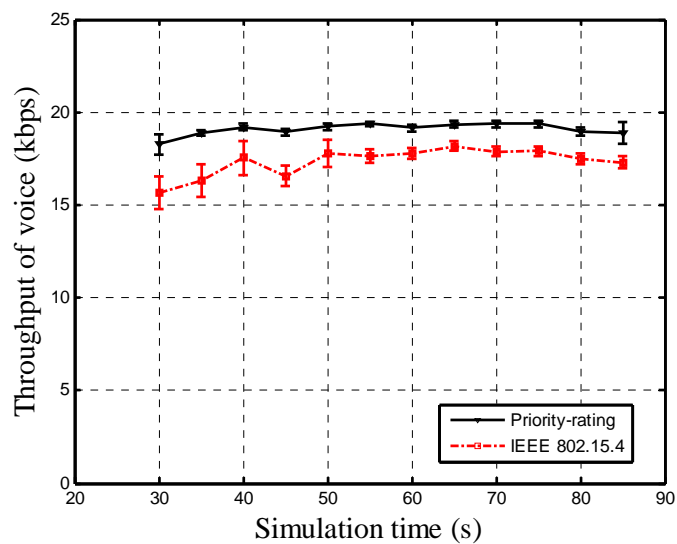


ภาพประกอบ 4-10 ค่าเฉลี่ยอัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลวิดีโอ

ภาพประกอบ 4-11 และ 4-12 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียงกรณีที่ไม่มีการหน่วงที่ส่งข้อมูล Non-real-time และกรณีที่มีหน่วงที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งหมด 6 ตัว เทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียงทั้งวิธี IEEE 802.15.4 และวิธี Priority-rating มีแนวโน้มคงที่ ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 90 วินาทีต่อหนึ่งครั้งที่ทดลองเป็นระยะเวลาที่เพียงพอ



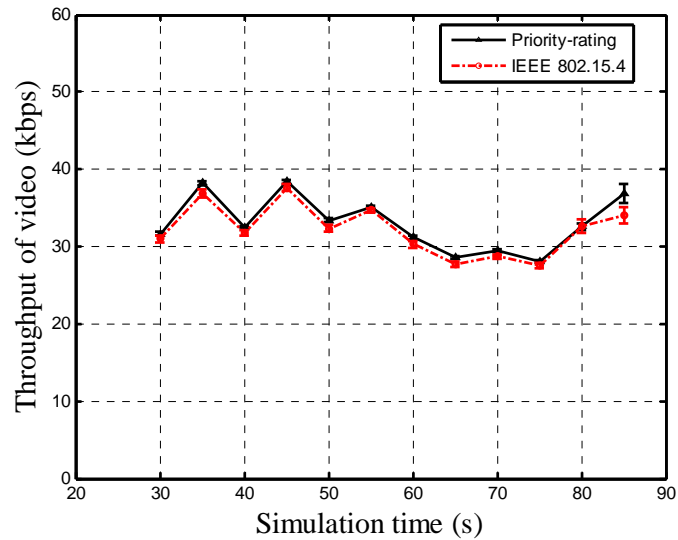
ภาพประกอบ 4-11 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียง
กรณีที่ไม่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time



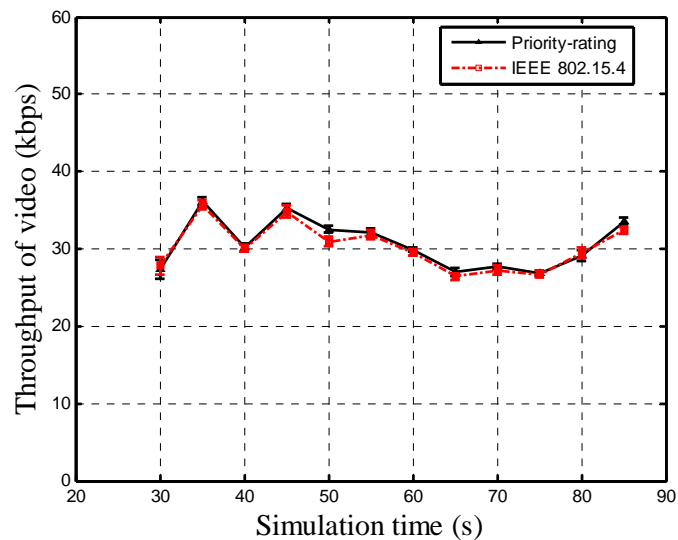
ภาพประกอบ 4-12 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลเสียง
กรณีที่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งหมด 6 ตัว

ภาพประกอบ 4-13 และ 4-14 แสดงค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอกรณีที่ไม่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time และกรณีที่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งหมด 6 ตัว เทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอทั้งวิธี IEEE 802.15.4 และวิธี Priority-rating มีค่าแกว่งอยู่ในช่วง 27 ถึง 37 กิโลบิตต่อวินาที เนื่องจากข้อมูลวิดีโอ

เป็นอัตราบิดแบบไม่คงที่ ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง 90 วินาทีต่อหนึ่งครั้งที่ทดลองเป็นระยะเวลาที่เพียงพอ

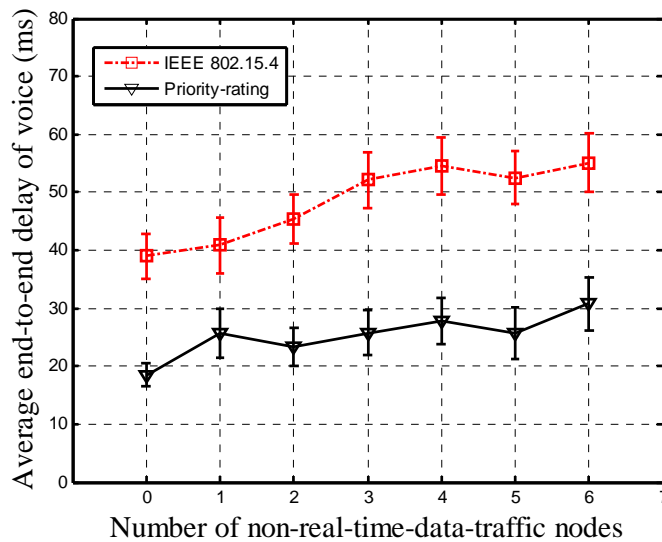


ภาพประกอบ 4-13 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอ
กรณีที่ไม่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time

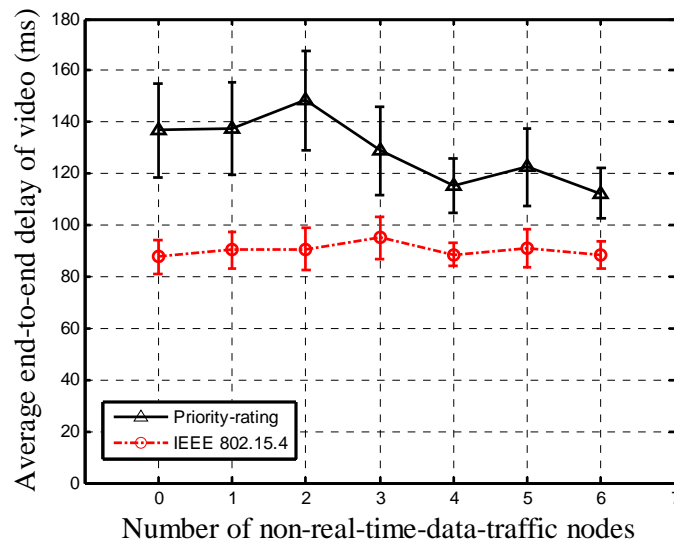


ภาพประกอบ 4-14 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานของข้อมูลวิดีโอ
กรณีที่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งหมด 6 ตัว

เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 4-15 และ 4-16 ซึ่งแสดงค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอที่แต่ละจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 6 ตัว เนื่องจากจำนวน โหนดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ช่องสัญญาณถูกใช้งานเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นหากโหนดตัวใดต้องการจะใช้งานช่องสัญญาณก็ต้องรอนานขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ภาพประกอบ 4-15 ยังแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่าน้อยกว่าที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากค่า CW และค่า $macMinBE$ ของโหนดส่งข้อมูลเสียงที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่าน้อยกว่าวิธี IEEE 802.15.4 ส่งผลให้ใช้เวลารอก่อนเข้าใช้สัญญาณน้อยกว่า ในส่วนของภาพประกอบ 4-16 แสดงให้เห็นค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 มีค่าน้อยกว่าที่ใช้วิธี Priority-rating เนื่องจากค่า CW ของโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 มีค่าน้อยกว่าวิธี Priority-rating ขณะที่ค่า $macMinBE$ มีค่าเท่ากัน ส่งผลให้โหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอใช้เวลาตรวจสอบช่องสัญญาณน้อยกว่า ขณะที่ใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอทั้งสองวิธีมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน [5, 19]

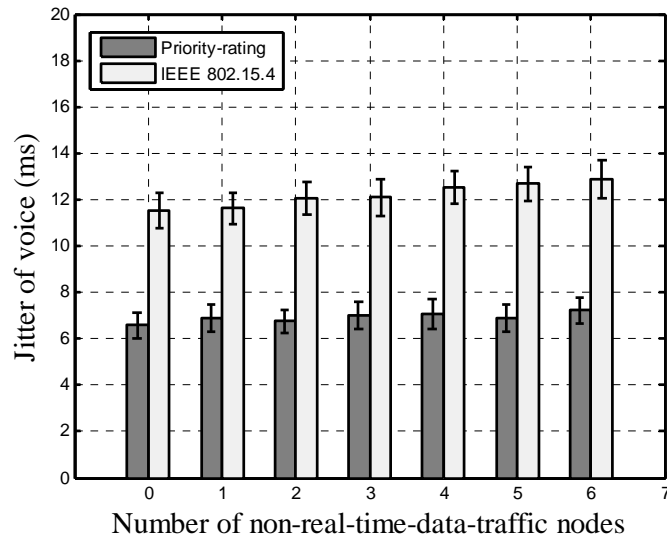


ภาพประกอบ 4-15 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงจากต้นทางถึงปลายทางของข้อมูลเสียง

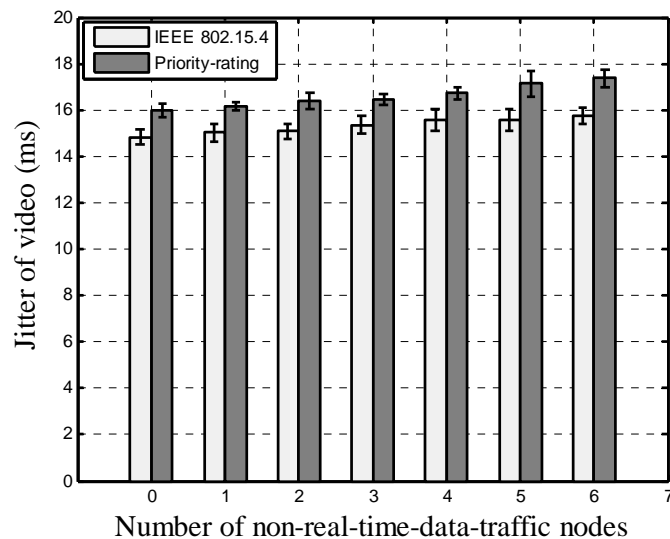


ภาพประกอบ 4-16 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงจากต้นทางถึงปลายทางของข้อมูลวิดีโอ

ภาพประกอบ 4-17 และ 4-18 แสดงค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอที่แต่ละจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 6 ตัว เนื่องจากจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ช่องสัญญาณถูกใช้งานเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นหากโหนดตัวใดต้องการจะใช้งานช่องสัญญาณก็ต้องรอนานขึ้นส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตสูงขึ้น นอกจากนี้ภาพประกอบ 4-17 ยังแสดงให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลเสียงตามวิธี IEEE 802.15.4 มีค่ามากกว่าค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลเสียงตามวิธี Priority-rating ประมาณสองเท่า เนื่องจากค่า CW และค่า *macMinBE* วิธี IEEE 802.15.4 มีค่ามากกว่าวิธี Priority-rating ส่งผลให้ใช้เวลารอก่อนเข้าใช้สัญญาณมากกว่า ในส่วนของภาพประกอบ 4-18 ยังแสดงให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลวิดีโอตามวิธี Priority-rating มีค่ามากกว่าค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลวิดีโอตามวิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากค่า CW วิธี Priority-rating มีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าวิธี IEEE 802.15.4 ที่มีค่า CW เท่ากับ 2 และมีค่า *macMinBE* ที่เท่ากับ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากันส่งผลให้ใช้เวลารอก่อนเข้าใช้สัญญาณมากกว่า ขณะที่ใช้ระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูลไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอทั้งสองกรณีมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน [5, 19]



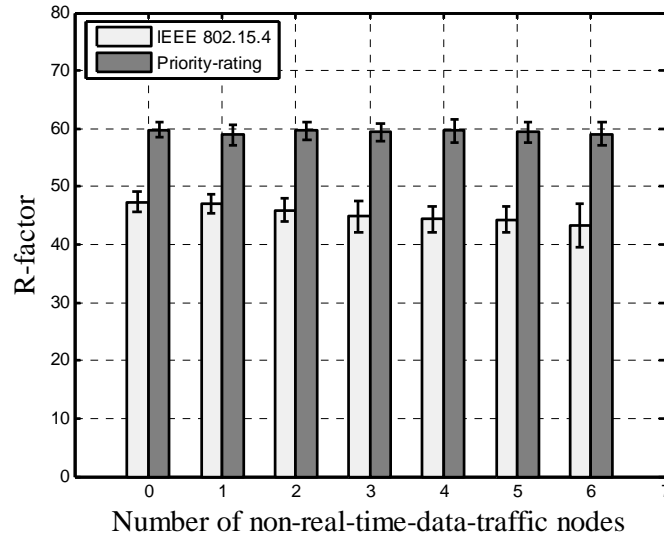
ภาพประกอบ 4-17 ค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลเสียง



ภาพประกอบ 4-18 ค่าเบี่ยงเบนของช่วงเวลาระหว่างแพ็กเก็ตของข้อมูลวิดีโอ

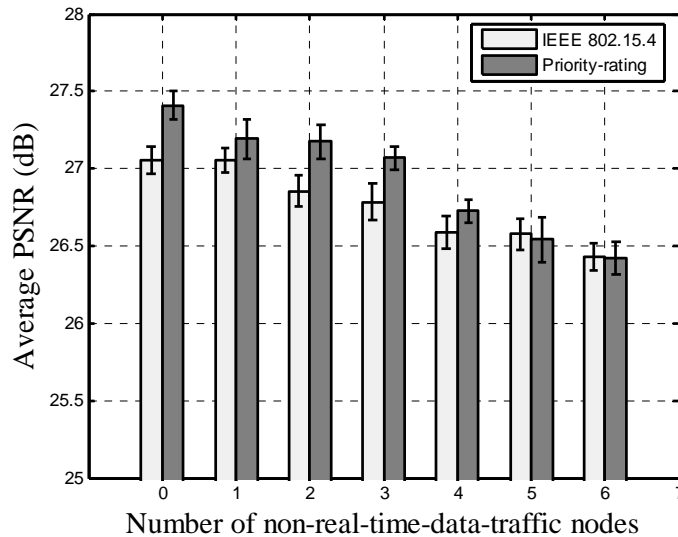
ภาพประกอบ 4-19 แสดงค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงที่แต่ละจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงวิธี Priority-rating มีค่ามากกว่าวิธี IEEE 802.15.4 โดยเฉลี่ย 18.4% เนื่องจากจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” และกรณี “LQI” มีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นว่าค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงวิธี Priority-rating มีค่าคงที่เนื่องจากจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” และกรณี “LQI” มีค่าคงที่ ขณะที่ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงวิธี IEEE 802.15.4 มีค่าลดลงเนื่องจากจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งกรณี “CBK” มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าคุณภาพเสียงเมื่อ

เทียบเป็น MOS [2, 13] ของวิธี Priority-rating อยู่ในช่วงพอใช้ ขณะที่ MOS ตามวิธี IEEE 802.15.4 อยู่ในช่วงแย่



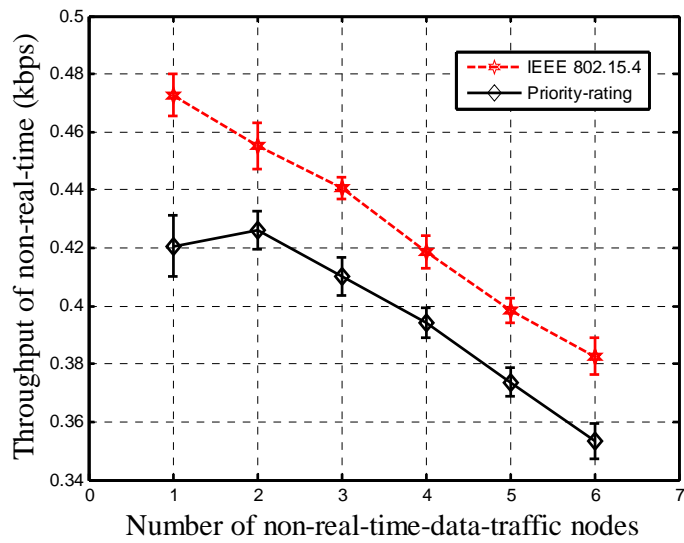
ภาพประกอบ 4-19 ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง

ภาพประกอบ 4-20 แสดงค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอที่แต่ละค่าจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอวิธี Priority-rating มีค่ามากกว่าวิธี IEEE 802.15.4 เมื่อมีจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ตั้งแต่ 0 ถึง 4 ตัว และมีค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อมีจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ตั้งแต่ 5 ถึง 6 ตัว อย่างไรก็ตามค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอวิธี Priority-rating มีค่ามากกว่าวิธี IEEE 802.15.4 โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.6% นอกจากนี้ยังชี้ให้เห็นอีกว่าค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอวิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 มีค่าลดลงเมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากจำนวนแพ็กเก็ตข้อมูลวิดีโอที่รับได้มีค่าลดลงสังเกตได้จากภาพประกอบ 4-10 อย่างไรก็ตามค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอวิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 ก็มีค่าอยู่ในช่วง 25-31 dB ซึ่ง MOS ระดับนี้อยู่ในช่วงพอใช้ [15]

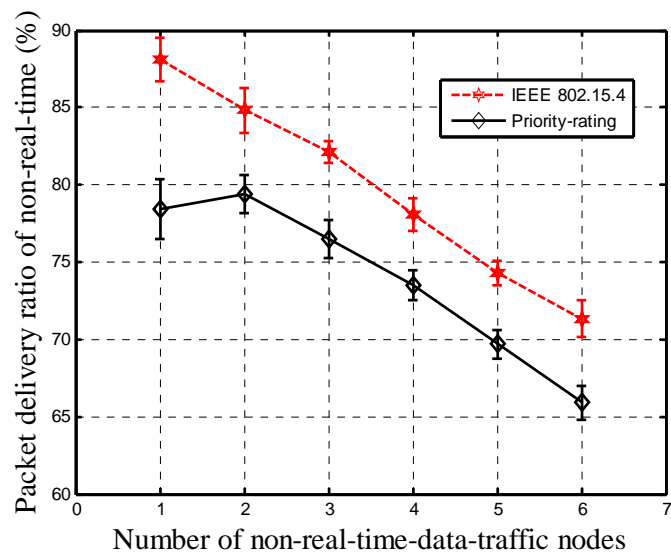


ภาพประกอบ 4-20 ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอ

ผลการวัดค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จของการส่งข้อมูล Non-real-time แสดงดังภาพประกอบ 4-21 และ 4-22 ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าวิธี IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิมให้ค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูลมากกว่าวิธี Priority-rating เนื่องจากวิธี Priority-rating ให้ความสำคัญกับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอมากกว่า จึงได้กำหนดค่า BE และค่า CW ให้กับโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ให้มีค่ามากกว่าโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงและโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอ ส่งผลให้โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time มีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณน้อยกว่าโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงและโหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอ ขณะที่วิธี IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิม โหนดที่ส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอและข้อมูล Non-real-time มีค่า BE และ CW เท่ากันดังนั้นโหนดทุกตัวจึงมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณเท่าเทียมกัน นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่า BE และ CW ของโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งวิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 ซึ่งจะเห็นว่าค่า BE และ CW ของวิธี IEEE 802.15.4 มีค่าน้อยกว่าวิธี Priority-rating ส่งผลให้ค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จของการส่งข้อมูล Non-real-time ของวิธี IEEE 802.15.4 มีค่ามากกว่าวิธี Priority-rating อย่างไรก็ตามทั้งวิธี IEEE 802.15.4 และวิธี Priority-rating ค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จของการส่งข้อมูล Non-real-time มีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 6 ตัว เนื่องจากจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้องการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยขณะที่ช่องสัญญาณมีแบนด์วิดท์เท่าเดิมทำให้เกิดจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกทิ้งมากขึ้น

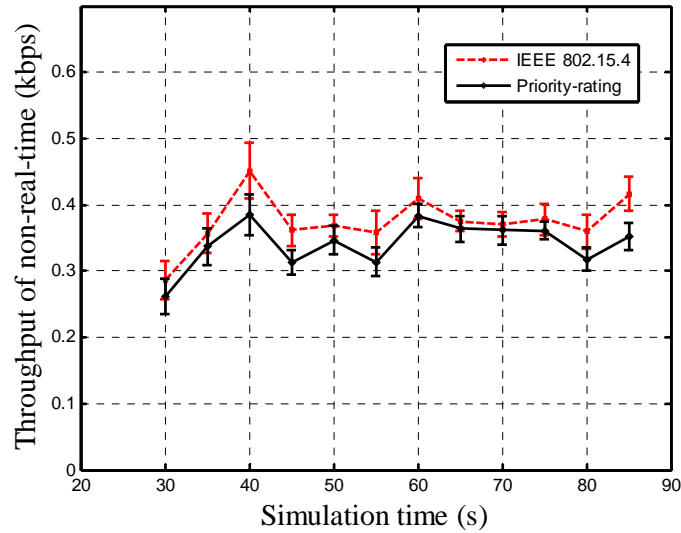


ภาพประกอบ 4-21 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานการส่งข้อมูล Non-real-time



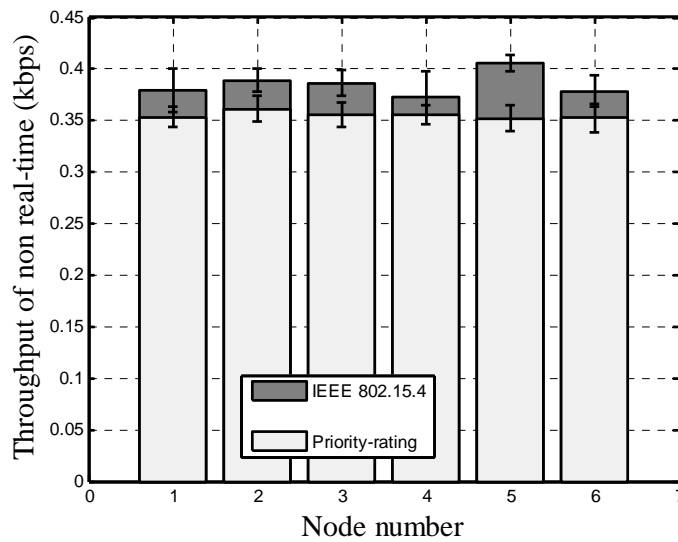
ภาพประกอบ 4-22 ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล Non-real-time

ภาพประกอบ 4-23 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานการส่งข้อมูล Non-real-time กรณีที่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งหมด 6 ตัว เทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการทดลอง จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยปริมาณงานมีค่าแกว่งอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.45 กิโลบิตต่อวินาที



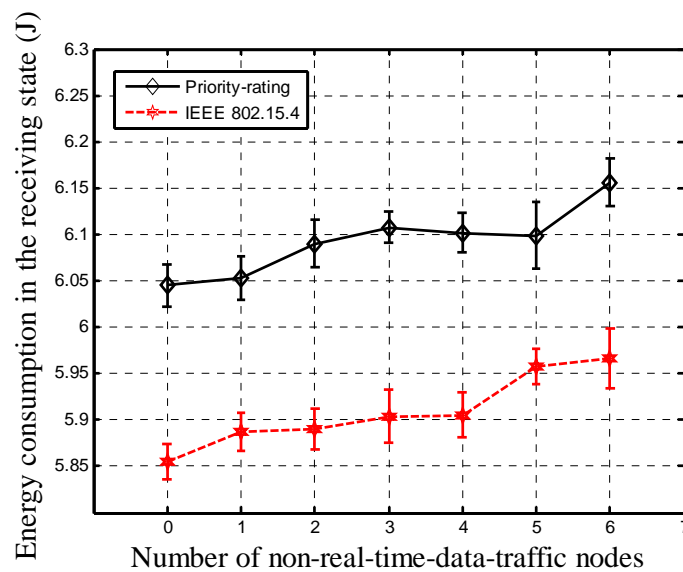
ภาพประกอบ 4-23 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานการส่งข้อมูล Non-real-time
กรณีที่มีโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งหมด 6 ตัว

ภาพประกอบ 4-24 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานการส่งข้อมูล Non-real-time แยกตามหมายเลขของโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟแสดงให้เห็นว่าโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time แต่ละหมายเลขมีค่าเฉลี่ยปริมาณงานที่ใกล้เคียงกัน และไม่มีหลายเลขใดเลยที่มีค่าเฉลี่ยปริมาณงานเป็นศูนย์

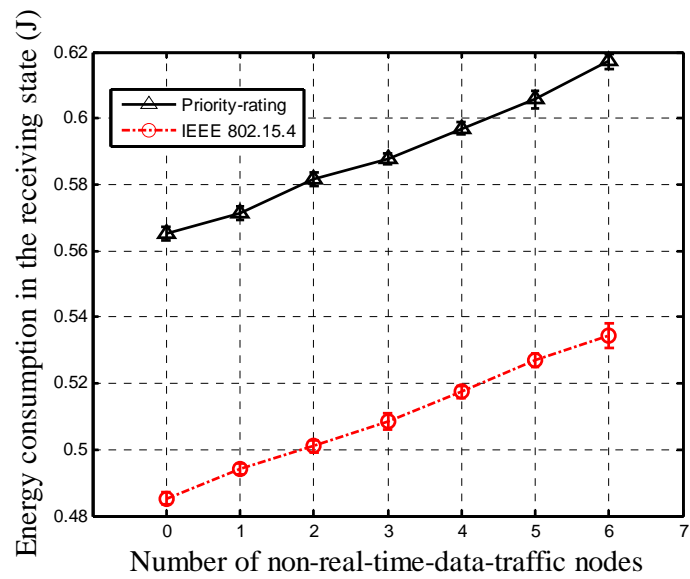


ภาพประกอบ 4-24 ค่าเฉลี่ยปริมาณงานการส่งข้อมูล Non-real-time ที่แต่ละหมายเลขของโหนด

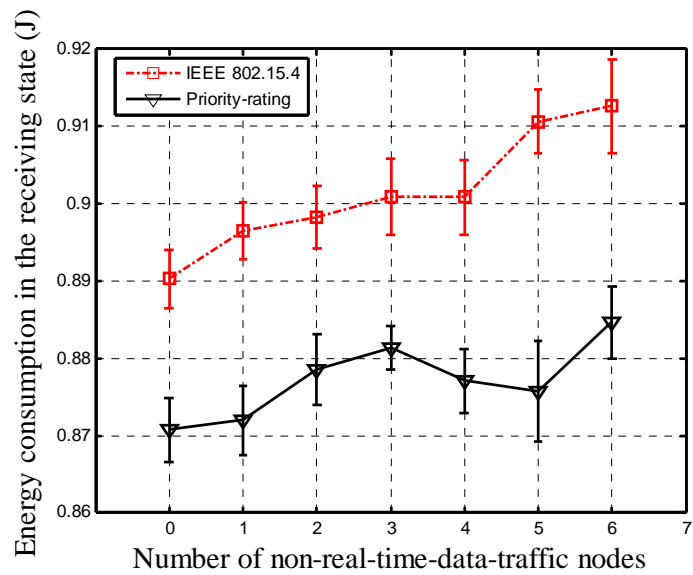
เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 4-25 ถึง 4-28 ซึ่งแสดงค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ โหนดส่งข้อมูลเสียง และ โหนด PAN coordinator ที่แต่ละค่าจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูล มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยที่ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ และ โหนดส่งข้อมูลเสียง เกิดจากการรับแพ็กเก็ต ACK แพ็กเก็ตที่ใช้จัดเส้นทาง และบีคอนเฟรม (Beacon frame) นอกจากนี้ยังเกิดจากการตรวจสอบช่องสัญญาณ ในส่วนของโหนด PAN coordinator ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูล เกิดจากการรับแพ็กเก็ต ACK แพ็กเก็ตที่ใช้จัดเส้นทาง แพ็กเก็ตข้อมูล Non-real-time แพ็กเก็ตข้อมูลวิดีโอ และแพ็กเก็ตข้อมูลเสียง นอกจากนี้ภาพประกอบ 4-25 ถึง 4-27 แสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time และ โหนดส่งข้อมูลวิดีโอที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่ามากกว่าที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากการกำหนดค่า CW จะส่งผลกับระยะเวลาที่โหนดตรวจสอบช่องสัญญาณซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานเมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลยิ่งค่า CW มีค่ามากก็จะใช้พลังงานเมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลมากขึ้น ซึ่งวิธี Priority-rating กำหนดค่า CW ให้กับโหนดส่งข้อมูลวิดีโอและโหนดส่งข้อมูล Non-real-time มากกว่าวิธี IEEE 802.15.4 จึงทำให้โหนดที่ส่งข้อมูลข้อมูลวิดีโอและ โหนดส่งข้อมูล Non-real-time ที่ใช้วิธี Priority-rating ใช้พลังงานเมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลมากกว่าวิธี IEEE 802.15.4 ในขณะที่โหนดส่งข้อมูลเสียงที่ใช้วิธี Priority-rating ใช้พลังงานเมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลน้อยกว่าวิธี IEEE 802.15.4



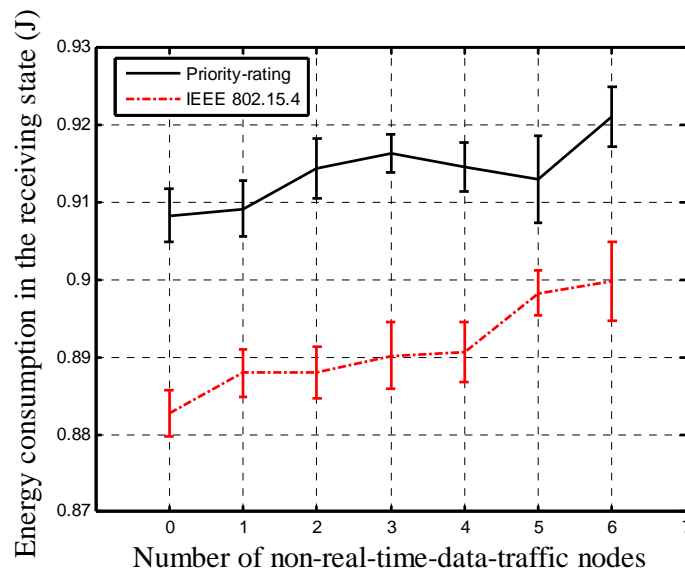
ภาพประกอบ 4-25 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time



ภาพประกอบ 4-26 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ

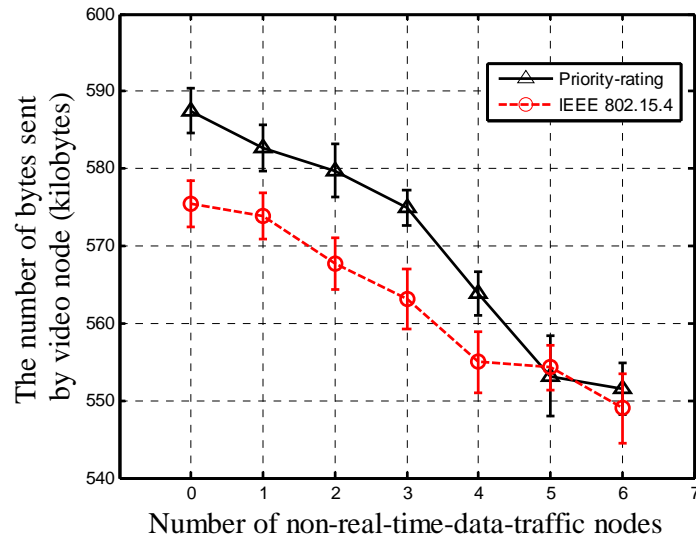


ภาพประกอบ 4-27 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลเสียง

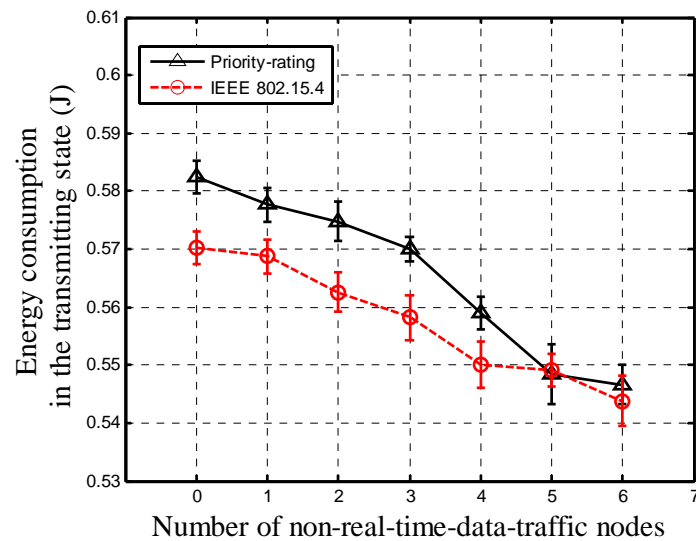


ภาพประกอบ 4-28 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะรับข้อมูลของโหนด PAN coordinator

ผลการวัดจำนวน ไบต์ที่โหนดวิดีโอส่งออกและค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ แสดงดังภาพประกอบ 4-29 และ 4-30 ตามลำดับ จากกราฟชี้ให้เห็นว่าจำนวน ไบต์ที่โหนดวิดีโอส่งออกและค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดวิดีโอมีแนวโน้มลดลง เมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้นทั้งวิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความต้องการเข้าใช้ช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยขณะที่ช่องสัญญาณมีแบนด์วิดท์เท่าเดิมทำให้เกิดจำนวนแพ็กเก็ตที่ถูกละทิ้งที่โหนดส่งข้อมูลวิดีโอเพิ่มมากขึ้น โหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอจึงส่งข้อมูลออกได้น้อยลง ดังนั้นค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอจึงมีแนวโน้มลดลงสังเกตได้จากภาพประกอบ 4-30 นอกจากนี้จำนวน ไบต์ที่โหนดวิดีโอส่งออกที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่ามากกว่าที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 เมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ไม่เกิน 4 ตัว เนื่องจากวิธี Priority-rating มีการจัดลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูล โดยให้โหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณมากกว่าโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time โหนดที่ส่งข้อมูลวิดีโอจึงมีโอกาสได้ส่งข้อมูลมากกว่าโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ขณะที่วิธี IEEE 802.15.4 ไม่มีการจัดลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูล โหนดทุกตัวที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกันจึงมีความเท่าเทียมกันในการส่งข้อมูล



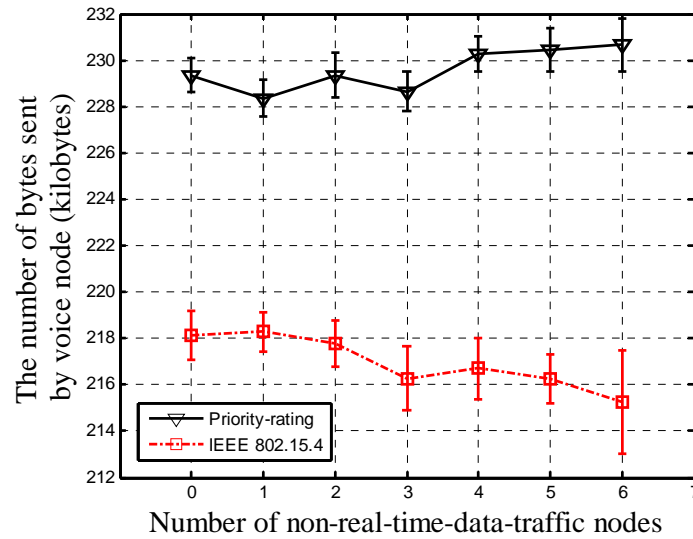
ภาพประกอบ 4-29 จำนวนไบต์ที่โหนดวิดีโอส่งออก



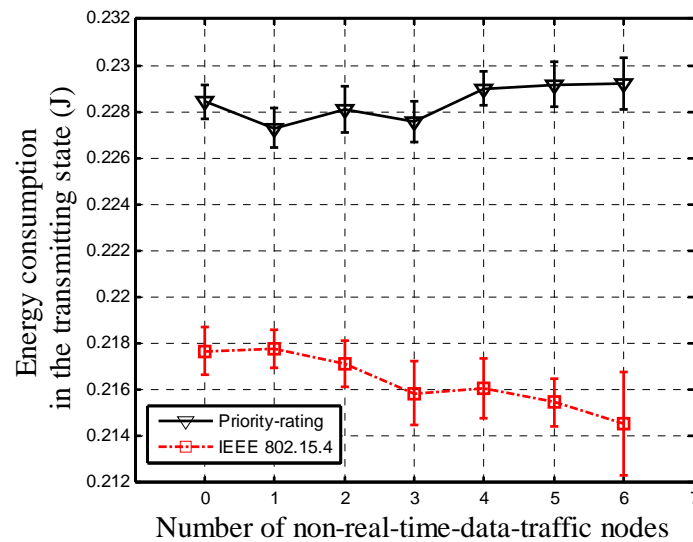
ภาพประกอบ 4-30 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ

ผลการวัดจำนวนไบต์ที่โหนดเสียงส่งออกและค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลเสียง แสดงดังภาพประกอบ 4-31 และ 4-32 ตามลำดับ จากกราฟให้เห็นว่าจำนวนไบต์ที่โหนดเสียงส่งออกและค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดส่งข้อมูลเสียงที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่ามากกว่าที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4 เมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0 ถึง 6 ตัว เนื่องจากวิธี Priority-rating มีการจัดลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูลโดยให้โหนดที่ส่งข้อมูลเสียงมีโอกาสได้เข้าใช้ช่องสัญญาณมากกว่าโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time

โหนดที่ส่งข้อมูลเสียงจึงมีโอกาสได้ส่งข้อมูลมากกว่าโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ขณะที่วิธี IEEE 802.15.4 ไม่มีการจัดลำดับความสำคัญในการส่งข้อมูล โหนดทุกตัวที่อยู่ในเครือข่ายเดียวกันจึงมีความเท่าเทียมกันในการส่งข้อมูล



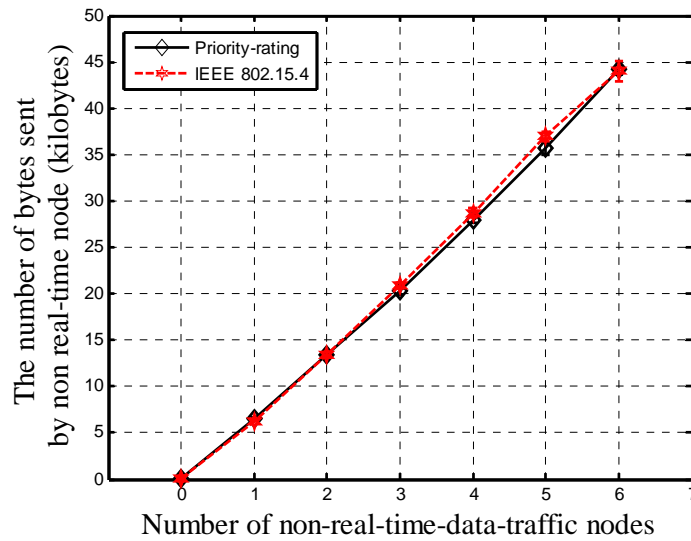
ภาพประกอบ 4-31 จำนวนไบต์ที่โหนดเสียงส่งออก



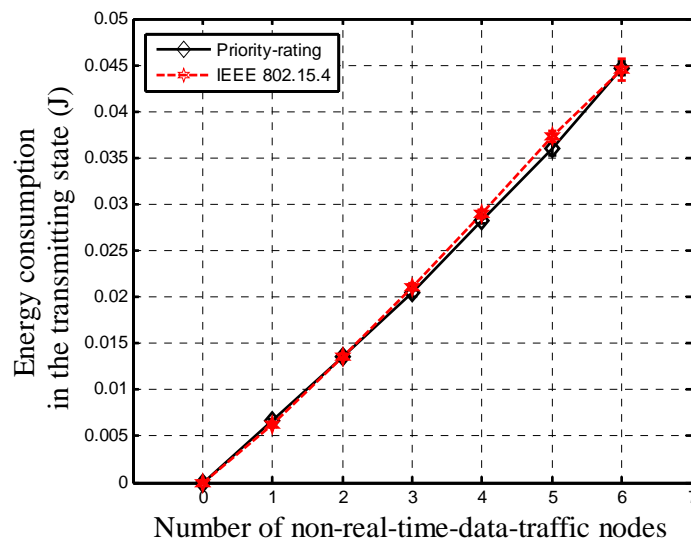
ภาพประกอบ 4-32 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งของโหนดส่งข้อมูลเสียง

ผลการวัดจำนวนไบต์ที่โหนด Non-real-time ส่งออกและค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time แสดงดังภาพประกอบ 4-33 และ 4-34 ตามลำดับ

จากกราฟชี้ให้เห็นว่าจำนวนไบต์ที่โหนด Non-real-time ส่งออกและค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้นทั้งวิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ที่เพิ่มขึ้นทำให้มีจำนวนไบต์ที่จะส่งออกมาขึ้น ดังนั้นจำนวนไบต์ที่โหนด Non-real-time ส่งออกและค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time จึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

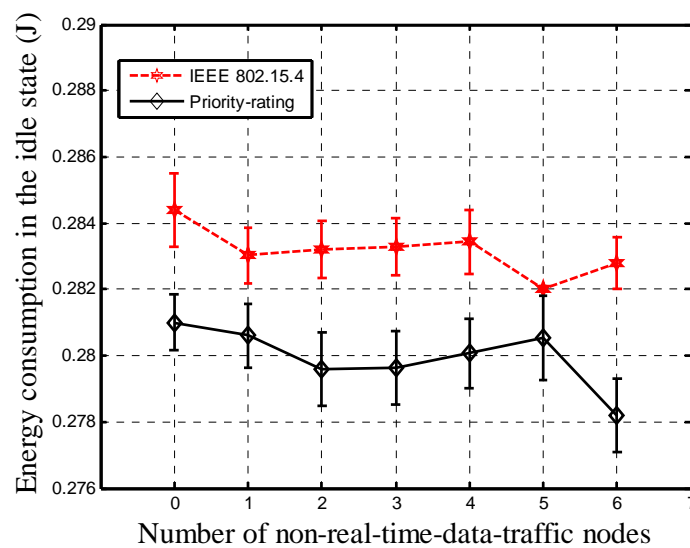


ภาพประกอบ 4-33 จำนวนไบต์ที่โหนด Non-real-time ส่งออก

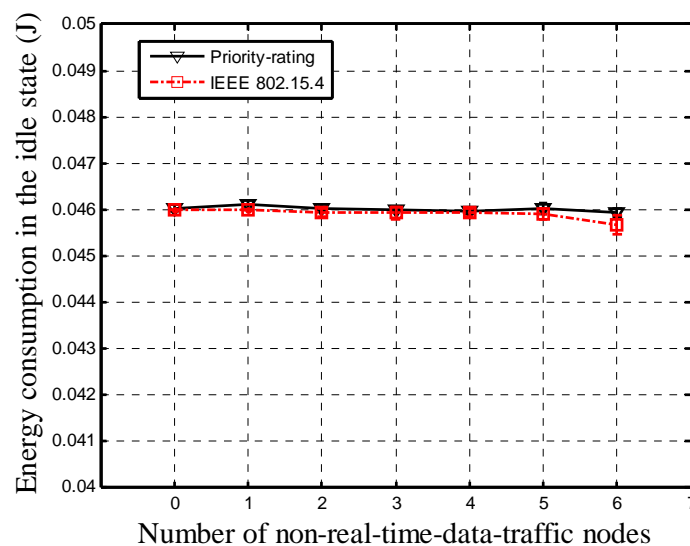


ภาพประกอบ 4-34 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งของของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time

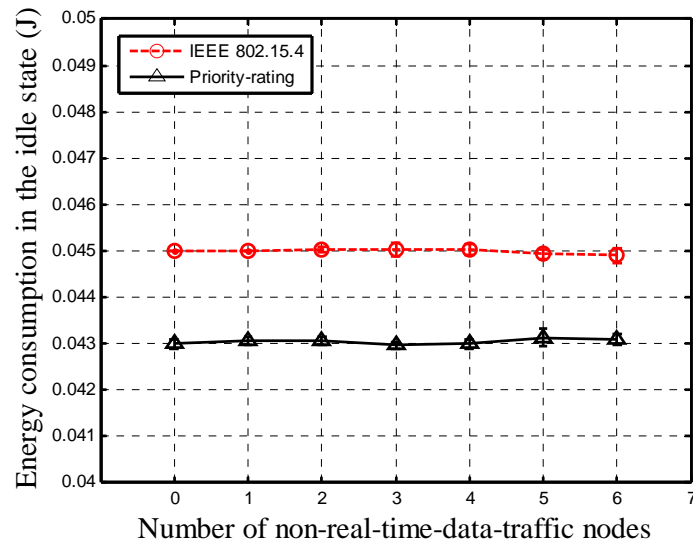
เมื่อพิจารณาภาพประกอบ 4-35 ถึง 4-38 ซึ่งแสดงค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time โหนดส่งข้อมูลเสียง โหนดส่งข้อมูลวิดีโอและโหนด PAN coordinator ตามลำดับ จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉย มีแนวโน้มคงที่ ซึ่งโดยส่วนใหญ่โหนดจะสูญเสียพลังงานไปกับการส่งและรับข้อมูล และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะส่งข้อมูลและสถานะรับข้อมูลก็จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยของโหนดทุกชนิดมีค่าน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องตรงกับกำลังที่ใช้ขณะโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยที่มีค่าน้อยกว่ากำลังที่ใช้ขณะโหนดอยู่ในสถานะส่งและรับข้อมูล



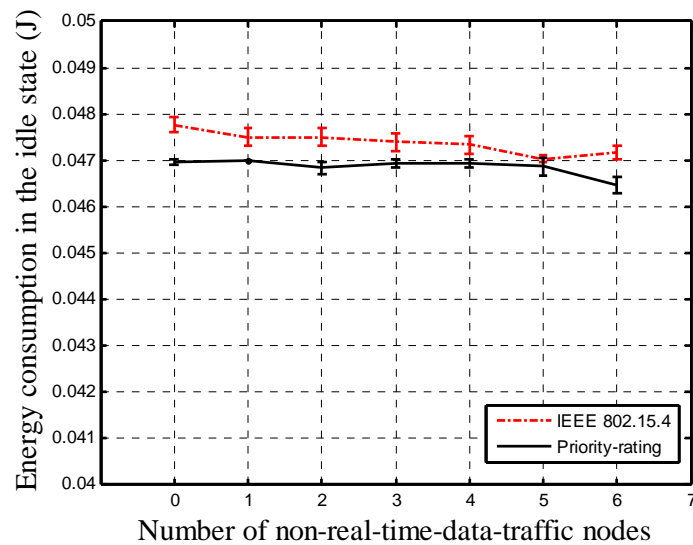
ภาพประกอบ 4-35 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยของโหนดส่งข้อมูล Non-real-time



ภาพประกอบ 4-36 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเฉยของโหนดส่งข้อมูลเสียง



ภาพประกอบ 4-37 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเลขของของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอ



ภาพประกอบ 4-38 ค่าพลังงานที่ใช้เมื่อโหนดอยู่ในสถานะนิ่งเลขของของโหนด PAN coordinator

ตารางที่ 4-6 ถึง 4-13 เป็นตารางสรุปที่แสดงถึงค่าพลังงานที่ใช้แยกตามชนิดของโหนด ซึ่งประกอบไปด้วย โหนดส่งข้อมูล Non-real-time โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ โหนดส่งข้อมูลเสียง และ โหนด PAN coordinator นอกจากนี้ยังแยกค่าพลังงานที่ใช้ตามสถานะอีกด้วย

ตารางที่ 4-12 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของโหนดส่งข้อมูลเสียง

กรณี IEEE 802.15.4

จำนวนโหนดที่ส่ง Non-real-time data		0	1	2	3	4	5	6
พลังงานที่	ค่าเฉลี่ย	0.890	0.897	0.898	0.901	0.901	0.911	0.913
ใช้สถานะ	ช่วงค่าความ	(0.894,	(0.900,	(0.902,	(0.906,	(0.906,	(0.915,	(0.919,
รับข้อมูล (J)	เชื่อมั่น	0.886)	0.893)	0.894)	0.896)	0.896)	0.907)	0.907)
พลังงานที่	ค่าเฉลี่ย	0.218	0.218	0.218	0.216	0.216	0.216	0.215
ใช้สถานะ	ช่วงค่าความ	(0.218,	(0.219,	(0.218,	(0.217,	(0.217,	(0.217,	(0.217,
ส่งข้อมูล (J)	เชื่อมั่น	0.217)	0.217)	0.216)	0.215)	0.215)	0.214)	0.212)
พลังงานที่	ค่าเฉลี่ย	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046	0.046
ใช้สถานะ	ช่วงค่าความ	(0.046,	(0.046,	(0.046,	(0.046,	(0.046,	(0.046,	(0.046,
นิ่งเฉย (J)	เชื่อมั่น	0.046)	0.046)	0.046)	0.046)	0.046)	0.046)	0.046)

ตารางที่ 4-13 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้แยกตามสถานะของโหนดรับข้อมูล PAN coordinator

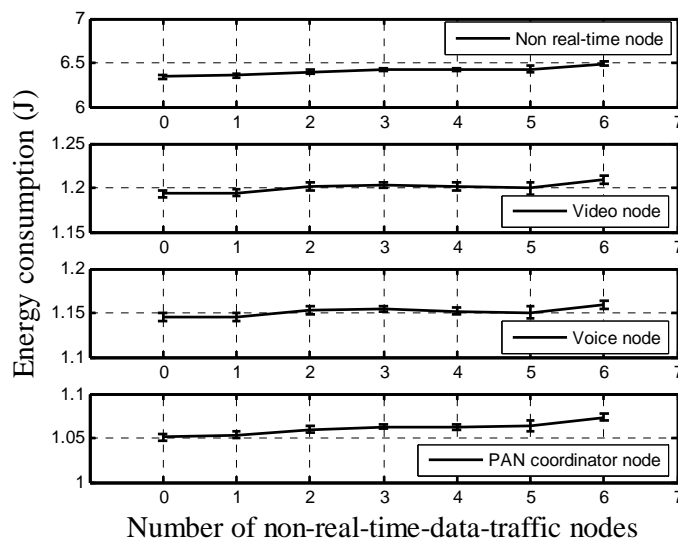
กรณี IEEE 802.15.4

จำนวนโหนดที่ส่ง Non-real-time data		0	1	2	3	4	5	6
พลังงานที่	ค่าเฉลี่ย	0.883	0.888	0.888	0.890	0.891	0.898	0.900
ใช้สถานะ	ช่วงค่าความ	(0.886,	(0.891,	(0.891,	(0.895,	(0.895,	(0.901,	(0.905,
รับข้อมูล (J)	เชื่อมั่น	0.880)	0.885)	0.885)	0.886)	0.887)	0.895)	0.895)
พลังงานที่	ค่าเฉลี่ย	0.094	0.096	0.097	0.098	0.099	0.101	0.103
ใช้สถานะ	ช่วงค่าความ	(0.095,	(0.096,	(0.097,	(0.098,	(0.100,	(0.102,	(0.103,
ส่งข้อมูล (J)	เชื่อมั่น	0.094)	0.095)	0.096)	0.097)	0.099)	0.101)	0.102)
พลังงานที่	ค่าเฉลี่ย	0.048	0.048	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047
ใช้สถานะ	ช่วงค่าความ	(0.048,	(0.048,	(0.048,	(0.048,	(0.048,	(0.047,	(0.047,
นิ่งเฉย (J)	เชื่อมั่น	0.048)	0.047)	0.047)	0.047)	0.047)	0.047)	0.047)

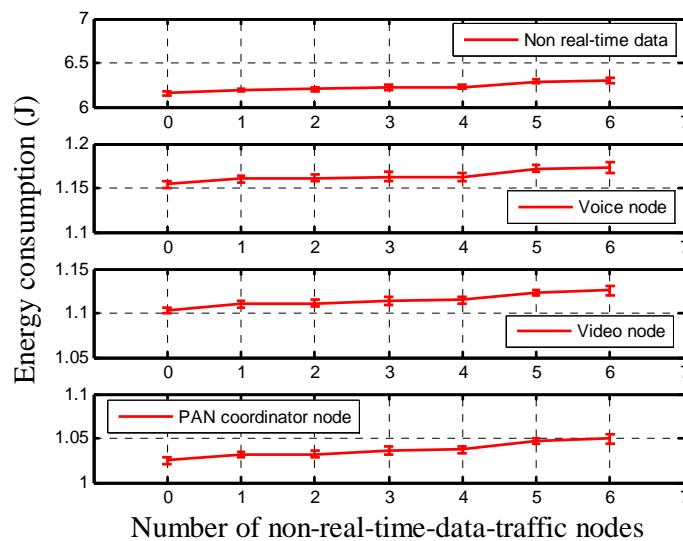
จากตารางที่ 4-6 ถึง 4-13 แสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานที่ถูกใช้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นมาจากโหนดส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งที่ใช้วิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time มีจำนวนมากกว่า นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าโดยส่วนใหญ่แล้วค่าพลังงานที่ใช้สถานะรับ

ข้อมูลมีค่ามากกว่าสถานะส่งและสถานะนิ่งเฉย เนื่องจากกำลังที่ใช้ในสถานะรับข้อมูลมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังที่ใช้ในสถานะส่งข้อมูลและสถานะนิ่งเฉย

ภาพประกอบที่ 4-39 และ 4-40 แสดงค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้เมื่อแยกตามชนิดของโหนดที่ใช้วิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าพลังงานที่ถูกใช้จากโหนดส่งข้อมูล Non-real-time มีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับโหนดชนิดอื่นๆ ทั้งที่ใช้วิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 เนื่องจากจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time มีจำนวนมากกว่า

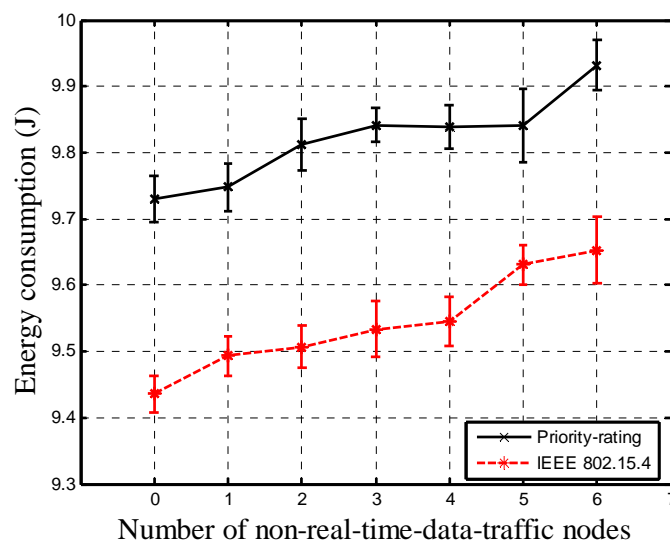


ภาพประกอบ 4-39 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้เมื่อแยกตามชนิดของโหนดที่ใช้วิธี Priority-rating



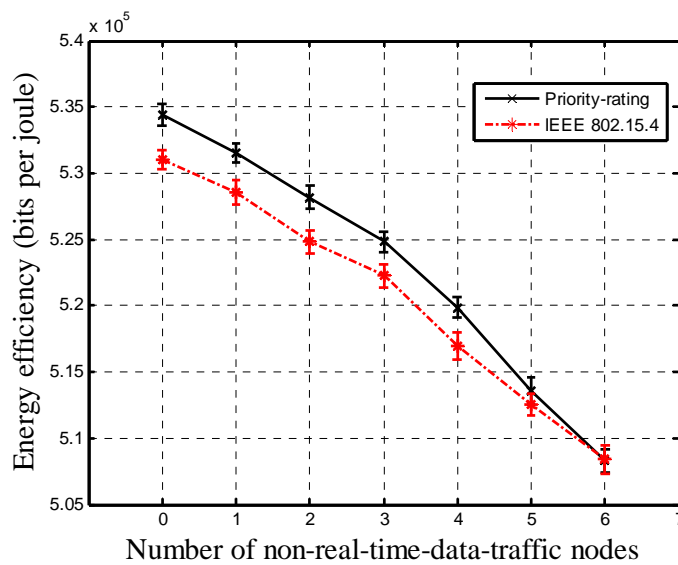
ภาพประกอบ 4-40 ค่าเฉลี่ยพลังงานที่ถูกใช้เมื่อแยกตามชนิดของโหนดที่ใช้วิธี IEEE 802.15.4

ภาพประกอบ 4-41 แสดงค่าพลังงานที่ใช้ในเครือข่ายที่แต่ละค่าจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าพลังงานที่ใช้ในเครือข่ายของวิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 มีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้นจะทำให้เกิดการส่งและรับสัญญาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งพลังงานที่ใช้ในเครือข่ายของการทดลองนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ทั้งวิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 สังเกตได้จากภาพประกอบ 4-39 และ 4-40 เนื่องจากจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time มีจำนวนมากกว่าโหนดที่ส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ นอกจากนี้พลังงานที่ใช้ในเครือข่ายส่วนใหญ่เกิดขึ้นในโหมดการรับข้อมูลทั้งวิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 สังเกตได้จากตารางที่ 4-6 ถึง 4-13 เนื่องจากในโหมดรับข้อมูลจะใช้กำลังมากกว่าโหมดอื่นๆ สอดคล้องกับตารางที่ 4-2 นอกจากนี้ภาพประกอบที่ 4-41 ยังแสดงให้เห็นว่าแสดงค่าพลังงานที่ใช้ในเครือข่ายที่แต่ละค่าจำนวนโหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ของวิธี Priority-rating มีค่ามากกว่าโดยเฉลี่ย 0.002% เมื่อเทียบกับวิธี IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิม เนื่องจากการกำหนดค่า CW จะส่งผลกับระยะเวลาระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานในโหมดรับข้อมูลยิ่งค่า CW มีค่ามากก็จะใช้พลังงานในโหมดรับข้อมูลมากขึ้น ซึ่งวิธี Priority-rating กำหนดค่า CW ให้กับโหนดส่งข้อมูลวิดีโอและโหนดส่งข้อมูล Non-real-time มากกว่าวิธี IEEE 802.15.4 จึงทำให้โหนดที่ส่งข้อมูลข้อมูลวิดีโอและโหนดส่งข้อมูล Non-real-time ที่ใช้วิธี Priority-rating ใช้พลังงานในโหมดรับข้อมูลมากกว่าวิธี IEEE 802.15.4 ในขณะที่โหนดส่งข้อมูลเสียงที่ใช้วิธี Priority-rating ใช้พลังงานในโหมดรับข้อมูลน้อยกว่าวิธี IEEE 802.15.4 สังเกตได้จากตารางที่ 4-6 ถึง 4-13



ภาพประกอบ 4-41 ค่าพลังงานที่ใช้ในเครือข่าย

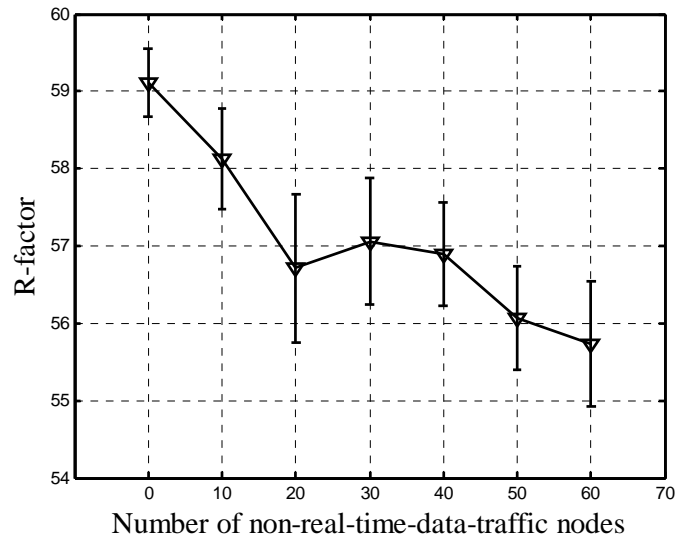
เมื่อพิจารณาจากภาพประกอบ 4-42 แสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่แต่ละค่าจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ของวิธี Priority-rating และวิธี IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิมมีค่าลดลงเมื่อจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณข้อมูลที่ได้รับ โดยรวมของทั้งเครือข่ายลดลง ขณะที่การใช้พลังงาน โดยรวมของทั้งเครือข่ายเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าวิธี Priority-rating ให้ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่ดีกว่าวิธี IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิมเมื่อจำนวนของ โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ไม่เกินสี่ตัว



ภาพประกอบ 4-42 ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

4.2.5 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล การหาค่าประมาณจำนวนโหนดที่เครือข่ายสามารถรองรับได้

ภาพประกอบ 4-43 แสดงค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่แต่ละค่าของจำนวน โหนดส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าชี้วัดคุณภาพเสียงมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวน โหนดส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ในช่วง 0 ถึง 20 ตัว เนื่องจากจำนวน โหนดส่งข้อมูล Non-real-time ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้จำนวนข้อมูลเสียงที่ได้รับได้ลดน้อยลงและใช้ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ใน ช่วง 20 ถึง 60 ตัว ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงมีค่าไม่แตกต่างกัน ในเชิงสถิติ เนื่องจากจำนวนข้อมูลเสียงที่ได้รับและใช้ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงมีค่าไม่แตกต่างกันในเชิงสถิติ นอกจากนี้ จะเห็นว่าเมื่อจำนวน โหนดส่งข้อมูล Non-real-time มีจำนวน 20 ตัวขึ้นไปค่าชี้วัดคุณภาพ (R-factor) อยู่ใน ช่วง 55 ถึง 57 ซึ่งเมื่อคำนวณเป็นค่าชี้วัดคุณภาพเสียงที่ประเมินด้วย MOS จากตารางที่ 2-2 จะได้ค่า MOS น้อยกว่า 3.0 ซึ่งค่าที่ยอมรับได้ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ 3.0 ขึ้นไป

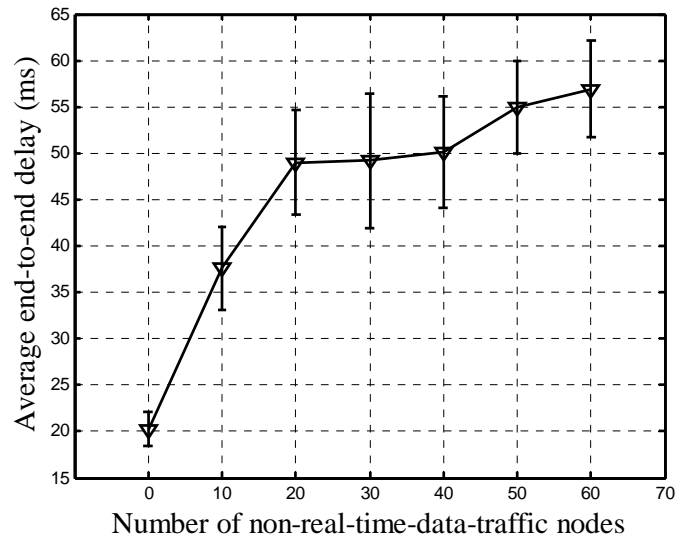


ภาพประกอบ 4-43 ค่าชี้วัดคุณภาพเสียงเมื่อใช้วิธี Priority-rating

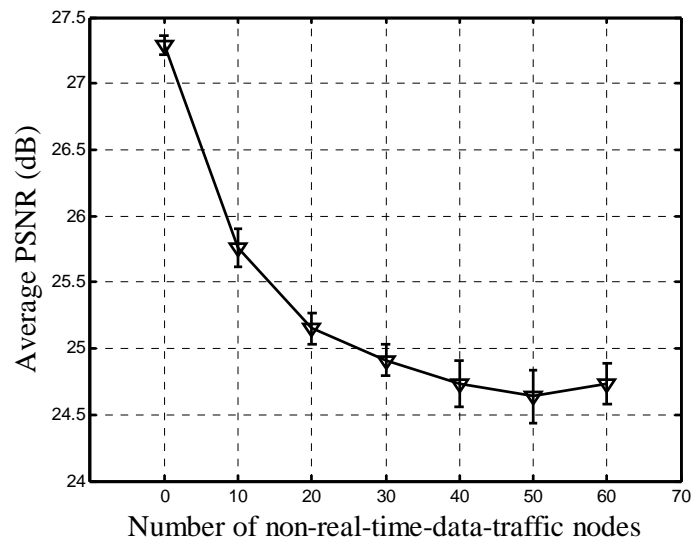
ภาพประกอบ 4-44 แสดงค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงที่แต่ละจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time เพิ่มขึ้นเนื่องจากจำนวน โหนดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ช่องสัญญาณถูกใช้งานเพิ่มมากขึ้นดังนั้นหากโหนดตัวใดต้องการจะใช้งานช่องสัญญาณก็ต้องรอนานขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ภาพประกอบ 4-44 ยังแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงยังคงน้อยกว่า 100 มิลลิวินาที เมื่อมีจำนวน โหนดส่งข้อมูล Non-real-time เท่ากับ 60 ตัว

ภาพประกอบ 4-45 แสดงค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอที่แต่ละจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอจะมีค่าน้อยกว่า 25 dB เมื่อมีจำนวน โหนดส่งข้อมูล Non-real-time ตั้งแต่ 30 ตัวขึ้นไป ซึ่งค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอที่ยอมรับได้ต้องมีค่ามากกว่า 25 dB ขึ้นไป

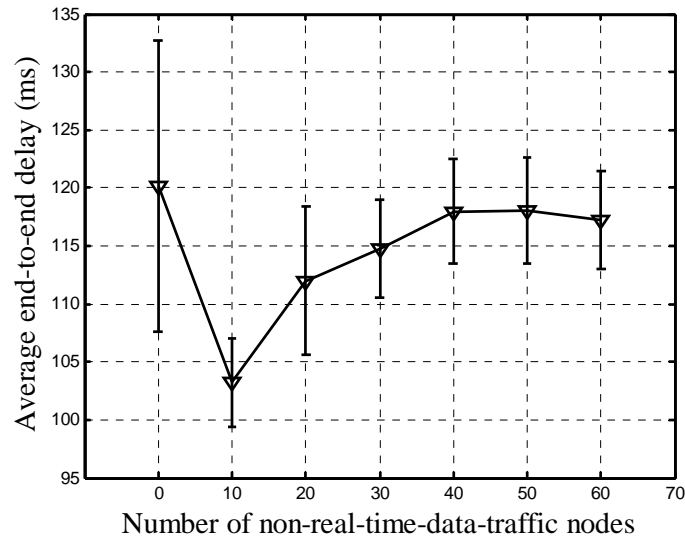
ภาพประกอบ 4-46 แสดงค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอที่แต่ละจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time จากกราฟชี้ให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอยังคงน้อยกว่า 150 มิลลิวินาที เมื่อมีจำนวน โหนดส่งข้อมูล Non-real-time เท่ากับ 60 ตัว



ภาพประกอบ 4-44 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงเมื่อใช้วิธี Priority-rating



ภาพประกอบ 4-45 ค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอเมื่อใช้วิธี Priority-rating



ภาพประกอบ 4-46 ค่าเฉลี่ยเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอเมื่อใช้วิธี Priority-rating

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้วิธี Priority-rating ในการส่งข้อมูลที่เครือข่าย มีลักษณะเครือข่ายเป็นรูปดาว โดยมีโหนดส่งข้อมูลเสียง โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ และโหนดส่งข้อมูล Non-real-time อยู่ในเครือข่าย สามารถรองรับจำนวน โหนดที่ส่งข้อมูล Non-real-time ได้ 10 ตัว ซึ่งมีเงื่อนไขว่าคุณภาพของข้อมูลเสียงที่ประเมินจากค่า R-factor ซึ่งค่า R-factor ที่ได้เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า MOS ต้องได้ค่าเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 3.0 [2] และเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงต้องไม่เกิน 100 มิลลิวินาที [5] นอกจากนี้คุณภาพของข้อมูลวิดีโอซึ่งประเมินจากค่า PSNR ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 25-31 dB เมื่อเปรียบเทียบเป็นค่า MOS จะได้ค่าเท่ากับ 3.0 และเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอต้องไม่เกิน 150 มิลลิวินาที [5]

4.2.6 สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่ามาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่พัฒนาขึ้นให้รองรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอที่ต้องการแสดงข้อมูลเป็นแบบเวลาจริง โดยการกำหนดระดับความสำคัญของการส่งข้อมูลรวมถึงการกำหนดระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณให้กับโหนดที่ส่งข้อมูลแต่ละชนิดอย่างเหมาะสม สามารถลดจำนวนข้อมูลที่สูญหายเนื่องจากการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ส่งผลให้ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียงและค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่ามากขึ้นโดยเฉลี่ย 18.4% และ 0.6% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิม นอกจากนี้วิธี Priority-rating ยังสามารถรองรับจำนวนโหนดส่งข้อมูล Non-real-time ได้ 10 ตัว ซึ่งมีเงื่อนไขว่าคุณภาพของข้อมูลเสียงที่ประเมินจากค่า R-factor ซึ่งค่า R-factor ที่ได้เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า MOS ต้องได้ค่าเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 3.0 และเวลาหน่วง

ของข้อมูลเสียงต้องไม่เกิน 100 มิลลิวินาที นอกจากนี้คุณภาพของข้อมูลวิดีโอซึ่งประเมินจากค่า PSNR ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 25-31 dB เมื่อเปรียบเทียบเป็นค่า MOS จะได้ค่าเท่ากับ 3.0 และเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอต้องไม่เกิน 150 มิลลิวินาที อย่างไรก็ตามวิธี Priority-rating ก็ยังคงมีจุดด้อยในเรื่องค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล Non-real-time ซึ่งให้ค่าน้อยกว่าวิธี IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิม อีกทั้งยังใช้พลังงานโดยรวมมากกว่าวิธี IEEE 802.15.4 อยู่ที่ 2% อย่างไรก็ตามเมื่อคิดถึงคุณภาพของเสียง คุณภาพของวิดีโอ ที่ดีขึ้นและปริมาณข้อมูลที่ได้รับทั้งเครือข่ายเปรียบเทียบกับพลังงาน โดยรวมที่สูญเสียไปการใช้วิธี Priority-rating ก็ยังถือว่าคุ้มค่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและพัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่คำนึงถึงคุณภาพการให้บริการ (Quality of services: QoS) ให้รองรับการส่งข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอและข้อมูลที่ไม่ต้องการแสดงผลแบบเวลาจริง ตามวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย โดยมีรายละเอียดของการวิจัยตามบทที่ 3 และ 4 มาแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย ปัญหาและอุปสรรคในการทำงานวิจัย รวมทั้งวิจารณ์และข้อเสนอแนะสำหรับการออกแบบและพัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาและเป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยทางด้านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาวิจัยแสดงให้เห็นว่า การเข้าใช้ช่องสัญญาณ CSMA/CA เพื่อทำการส่งข้อมูลที่ต่างชนิดกันเช่น ข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอมีผลต่อสมรรถนะของระบบเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย ดังนั้นการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอบนเครือข่ายที่มีอัตราการส่งข้อมูลที่ต่ำบนเครือข่ายที่ใช้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 แล้วให้ได้คุณภาพของเสียงและวิดีโออยู่ในระดับที่ยอมรับได้จึงเป็นประเด็นวิจัยที่มีความท้าทายอย่างยิ่ง จากการศึกษาทบทวนเอกสารตีพิมพ์พบว่า ผลกระทบของการกำหนดค่าระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณผ่านทางพารามิเตอร์หลักของโพรโทคอล CSMA/CA ที่เรียกว่า Backoff exponent (BE) และ Contention window (CW) ให้เหมาะสมกับข้อมูลที่จะทำการส่ง เป็นประเด็นวิจัยที่น่าสนใจและก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในแง่ขององค์ความรู้ที่ได้รวมทั้งการใช้งานโพรโทคอลที่ได้รับการพัฒนา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและพัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ตามประเด็นวิจัยดังกล่าว

สำหรับการทำวิจัย ในการกำหนดค่า BE และ CW ที่เหมาะสมให้กับโหนดที่ส่งข้อมูลต่างชนิดกันจำเป็นต้องศึกษาให้เห็นถึงปัญหาและข้อจำกัดของโพรโทคอลการเข้าใช้ช่องสัญญาณ CSMA/CA โดยใช้วิธีการทดลอง ซึ่งการกำหนดค่า BE และ CW ที่เหมาะสมจะคำนึงถึงความต้องการเวลาหน่วงของข้อมูลที่จะทำการส่งเป็นหลัก และมีเงื่อนไขว่าค่า BE และ CW ที่กำหนดให้กับโหนดส่งข้อมูลเสียง โหนดส่งข้อมูลวิดีโอ จะต้องได้ซึ่งมีเงื่อนไขว่าคุณภาพของข้อมูลเสียงที่ประเมินจากค่า R-factor ซึ่งค่า R-factor ที่ได้เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่า MOS ต้องได้ค่าเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 3.0 [2] และเวลาหน่วงของข้อมูลเสียงต้องไม่เกิน 100 มิลลิวินาที [5] นอกจากนี้คุณภาพของข้อมูลวิดีโอซึ่งประเมินจากค่า PSNR

ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 25-31 dB เมื่อเปรียบเทียบกับเป็นค่า MOS จะได้ค่าเท่ากับ 3.0 และเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอต้องไม่เกิน 150 มิลลิวินาที [5] ซึ่งมีรายละเอียดแสดงไว้ในบทที่ 3

ผลการศึกษาในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าค่า BE และ CW ที่เหมาะสมกับโหนดส่งข้อมูลเสียงคือ 1 และ 1 ตามลำดับ ในส่วนของโหนดส่งข้อมูลวิดีโอค่า BE และ CW ที่เหมาะสมคือ 3 และ 3 ตามลำดับ เมื่อเครือข่ายมีลักษณะเป็นแบบดาวและมีจำนวนโหนดส่งข้อมูลเสียงและวิดีโอ ไม่เกินอย่างละ 1 ตัว ซึ่งจะทำให้ได้คุณภาพและเวลาหน่วงของข้อมูลเสียง รวมถึงคุณภาพและเวลาหน่วงของข้อมูลวิดีโอเป็นไปตามเงื่อนไขที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยค่า BE และ CW ที่เหมาะสมนี้จะนำมาใช้ในบทที่ 4 ซึ่งในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่าวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่พัฒนาขึ้นให้รองรับการส่งข้อมูลเสียงและข้อมูลวิดีโอ โดยการกำหนดลำดับความสำคัญของการส่งข้อมูลรวมถึงการกำหนดระยะเวลาหน่วงเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของข้อมูล และการกำหนดระยะเวลาที่ใช้ตรวจสอบช่องสัญญาณให้กับโหนดที่ส่งข้อมูลแต่ละชนิดอย่างเหมาะสม สามารถลดจำนวนข้อมูลที่สูญหายเนื่องจากการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ส่งผลให้ค่าชี้วัดคุณภาพของเสียง และค่าชี้วัดคุณภาพของวิดีโอที่ใช้วิธี Priority-rating มีค่ามากขึ้น โดยเฉลี่ย 18.4% และ 0.6% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธี IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิม นอกจากนี้วิธี Priority-rating ยังสามารถรองรับจำนวนโหนดส่งข้อมูล Non-real-time ได้ 10 ตัว

อย่างไรก็ตามวิธี Priority-rating ก็ยังคงมีจุดด้อยในเรื่องค่าเฉลี่ยปริมาณงานและค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์อัตราความสำเร็จในการส่งข้อมูล Non-real-time ซึ่งให้ค่าน้อยกว่าวิธี IEEE 802.15.4 แบบดั้งเดิม อีกทั้งยังใช้พลังงานโดยรวมมากกว่าวิธี IEEE 802.15.4 อยู่ที่ 2% อย่างไรก็ตามเมื่อคิดถึงคุณภาพของเสียง คุณภาพของวิดีโอ ที่ดีขึ้นและปริมาณข้อมูลที่ได้รับทั้งเครือข่ายเปรียบเทียบกับพลังงาน โดยรวมที่สูญเสียไปการใช้วิธี Priority-rating ก็ยังถือว่าคุ้มค่า

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

5.2.1 ปัญหา

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวิธีการเข้าใช้ช่องสัญญาณของโพรโทคอล CSMA/CA ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 ต่อยอดจากโพรโทคอลรูปแบบเดิม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมจำลองการทำงาน NS2 ในการทดลองที่เดิมได้ถูกเขียนขึ้นจากผู้อื่น ส่งผลกระทบให้ในขั้นตอนของการศึกษาโปรแกรมก่อนข้างจะยุ่งยากในการทำความเข้าใจโปรแกรม ซึ่งความเข้าใจในโปรแกรมนี้อาจเป็นพื้นฐานในขั้นตอนการแก้ไขและพัฒนาโพรโทคอลการเข้าใช้ช่องสัญญาณ CSMA/CA ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

5.2.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1) ไม่ได้พิจารณาเรื่องการจางหายของสัญญาณ (Fading) และอัตราความผิดพลาดบิต (Bit error rate)
- 2) แก้ไขโพรโทคอลจัดหาเส้นทาง Ad hoc on demand distance vector (AODV) ในฟังก์ชัน recvRequest ไม่ให้มีการส่งต่อแพ็กเก็ต Route request (RREQ) เพื่อให้รองรับเครือข่ายแบบดาว และ โหนดส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางเพียงหนึ่งทอด

5.2.3 ข้อเสนอแนะ

จากการทำวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยพบว่า ข้อเสนอแนะต่อไปนี้จะเป็แนวทางในการพัฒนาโพรโทคอลการเข้าใช้ช่องสัญญาณ CSMA/CA ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากยิ่งขึ้น

- 1) ศึกษาทำความเข้าใจการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C++ เนื่องจากการแก้ไขและพัฒนาโพรโทคอลการเข้าใช้ช่องสัญญาณ CSMA/CA ของโปรแกรม NS2 จำเป็นต้องใช้ภาษาดังกล่าว
- 2) วิธี Priority-rating ที่นำเสนอยังคงมีข้อจำกัดอยู่ นั่นคือลักษณะของเครือข่ายที่ใช้งานใช้ได้เฉพาะเครือข่ายแบบดาว แนวทางในการแก้ไขและพัฒนาคือ การจัดการกับคิว (Queuing) โดยการแบ่งจำนวนของหน่วยความจำ (Buffer) ที่อยู่ระหว่างชั้นกายภาพและชั้นควบคุมการเข้าใช้งานสื่อกลางให้เท่ากับชนิดของข้อมูล จากนั้นทำการจำแนกจัดกลุ่มแพ็กเก็ต (Classification) เพื่อนำแพ็กเก็ตที่ผ่านการจำแนกเข้าสู่หน่วยความจำที่เหมาะสม สุดท้ายแก้ไขการจัดลำดับนำส่งข้อมูล (Scheduling) จากเดิมที่เป็นแบบ First-in First-out (FIFO) ให้กลายเป็นแบบ Weighted Fair Queuing (WFQ)

บรรณานุกรม

- [1] S. Farahini, “ZigBee Wireless Networks and Transceivers”, Burlington, USA, 2008.
- [2] C. Wang, K. Sohraby, R. Jana, L. Ji, and M. Daneshmand, “Voice Communications over ZigBee Networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 46, pp. 121-127, January 2008.
- [3] A. J. Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez, J. Garcia-Haro, and F. Losilla, “A Cross-layer Solution for Enabling Real-time Video Transmission over IEEE 802.15.4 Networks,” Multimedia Tool and Applications, vol. 51, no.3, pp. 1069-1104, February 2010.
- [4] A. J. Garcia-Sanchez, F. Garcia-Sanchez, and J. Garcia-Haro, “Feasibility Study of MPEG-4 Transmission on IEEE 802.15.4 Networks,” Proceedings of IEEE International Conference on Wireless & Mobile Computer, Networking & Communication, pp. 397-403, October 2008.
- [5] C. Yan, F. Toni, and Y. Nong, “QoS Requirements of Network Applications on the Internet,” Information Knowledge Systems Management, vol. 4, pp. 55-76, January 2004.
- [6] E.-J. Kim, M. Kim, S.-K. Youm, S. Choi, and C.-H. Kang, “Priority-based Service Differentiation Scheme for IEEE 802.15.4 Sensor Networks,” AEU - International Journal of Electronics and Communications., vol. 61, no. 2, pp. 69-81, February 2007.
- [7] E. D. N. Ndihi, N. Khaled, and G. D. Micheli, “Analytical Model for the Contention Access Period of the Slotted IEEE 802.15.4 with Service Differentiation,” Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'09), Dresden, Germany, pp. 1-6, June 2009.
- [8] X. Feng, L. Jie, H. Ruonan, K. Xiangjie and G. Ruixia, “Service Differentiated and Adaptive CSMA/CA over IEEE 802.15.4 for Cyber-Physical Systems,” The Scientific Word Journal, August 2013.
- [9] C. Mario, S. Gianfranco, and P. Giovanni, “A Priority-Based CSMA/CA to Support Deadline-Aware Scheduling in Home Automation Applications Using IEEE 802.15.4” International Journal of Distributed Sensor Networks, April 2013.
- [10] G. C. Buttazzo, Hard Real-Time Computing Systems—Predictable Scheduling Algorithms and Applications, Springer, 3rd edition, 2011.
- [11] E. Callaway, P. Gorday, L. Hester, J. A. Gutierrez, M. Naeve, B. Heile, and V. Bahl, “Home networking with IEEE 802.15.4: A developing standard for low-rate wireless personal area networks,” IEEE Commun. Mag., pp. 69–77, August. 2002.
- [12] P. V. Rao, “The simulative Investigation of Zigbee/IEEE 802.15.4,” Master’s Thesis, Department of Electrical Engineering and Information Technology, Dresden University of Technology, 2005.
- [13] R. Cole and J. Rosenbluth, “Voice over IP Performance Monitoring,” Proceedings of the ACM SIGCOMM, pp. 9–24, 2001.
- [14] I. E. G. Richardson, H.264 and MPEG-4 Video Compression, The Atrium, Southern Gate, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [15] I. Zainaldin, I. Lambadaris and B. Nandy, “Video over Wireless Zigbee Networks: Multi-channel Multi-radio Approach,” Proceedings of Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp. 882-887, August 2008.
- [16] A. Lie and J. Klaue, “Evalvid-RA: trace driven simulator of rate adaptive MPEG-4 VBR video,” Multimedia System, vol. 4, no. 1, pp. 33-50, November 2008.
- [17] J. Klaue, B. Rathke and A. Wolisz, “EvalVid – A Framework for Video Transmission and Quality Evaluation,” Proceedings of the 13th International Conference on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation, pp. 255-272, September 2003.

- [18]ITU-T Recommendation G.114, "One-way transmission time," February 1996.
- [19]S. A. Hassan and Y. Li "Medical Quality-of-Service Optimization in Wireless Telemedicine System Using Optimal Smoothing Algorithm," E-Health Telecommunication Systems and Networks, January 2013.
- [20]CC2420 Datasheet. Homepage. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>
- [21]Foreman video sequence may be discharged in the following website: <http://www.tkn.tu-berlin.de/research/evalvid/qcif.html>
- [22] G. A. Shah, W. Liang, and O. B. Akan, "Cross-Layer Framework for QoS Support in Wireless Multimedia Sensor Networks", IEEE Transactions on Multimedia, vol.14, no.5, pp.1442-1455, October 2012.
- [23] L. Young-Dong, J. Do-Un, and L. Hoon-Jae, "Empirical Analysis of The Reliability of Low-rate Wireless U-healthcare Monitoring Applications," International Journal of Communication Systems., vol. 26, pp. 505-514, October 2011.
- [24] ITU-T Recommendation P.800, "Methods for Subjective Determination of Transmission Quality Voice Quality," 1996.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	ชราดล วัฒนนาวิน	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5210120074	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษากันกุลฎิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

ชราดล วัฒนนาวิน และ วิกลม ชีรภาพจรเดช “การส่งข้อมูลเสียง VoIP และวิดีโอ MPEG-4 บนเครือข่าย IEEE 802.15.4 ที่มีการจัดระดับความสำคัญของข้อมูล,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36 (EECON-36), pp.523-526, 11-13 ธันวาคม 2556