



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)

ปริญญา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับปรุงเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11e เพื่อสนับสนุนการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่
IEEE 802.11e Wireless LANs Enhancement for Supporting Variable Bit Rate
Transmission

นามผู้วิจัย นายอภิรักษ์ จันทร์สร้าง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์อนันต์ ผลเพิ่ม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สุรศักดิ์ สงวนพงษ์, M.Eng.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยพร ใจแก้ว, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูงศ์ อุตโยภาส, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับปรุงเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11e เพื่อสนับสนุน
การส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่

IEEE 802.11e Wireless LANs Enhancement for Supporting
Variable Bit Rate Transmission

โดย

นายอภิรักษ์ จันทร์สร้าง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์)

พ.ศ. 2555

อภิรักษ์ จันทร์สร้าง 2555: การปรับปรุงเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11e เพื่อสนับสนุนการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ ปริญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์อนันต์ ผลเพิ่ม, Ph.D. 112 หน้า

ปัจจุบันระบบเครือข่ายไร้สายมีการปรับปรุงให้รองรับคุณภาพการให้บริการในการส่งข้อมูล แต่ไม่สามารถรองรับความแปรปรวนของการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ได้ดี ดังนั้นในงานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการปรับปรุงมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA ให้รองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่อย่างเหมาะสม โดยวิธีการที่นำเสนอประกอบด้วยสองส่วน คือ 1) ส่วนการพัฒนาแบบจำลองสำหรับประเมินผลเวลารอเฉลี่ยของเฟรมข้อมูล และ 2) ส่วนการพัฒนากระบวนการปรับปรุงค่า TXOP แบบพลวัตเพื่อให้เพียงพอต่อการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่

แบบจำลองสำหรับประเมินผลเวลารอเฉลี่ยของเฟรมข้อมูลอ้างอิงรูปแบบการส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อรับเข้าเซสชันข้อมูลที่มีอัตราส่งข้อมูลแตกต่างกัน โดยผลลัพธ์ที่ได้ ยืนยันว่า การรับเซสชันข้อมูลเข้าที่อัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยตามมาตรฐาน ไม่สามารถรับประกันเวลารอตามความต้องการของเฟรมข้อมูลได้ นอกจากนี้สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อหาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดค่าอัตราการส่งข้อมูลเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการรับเซสชันที่มีอัตราไม่คงที่ในกระบวนการรับเข้า

ในการรองรับความแปรปรวนของข้อมูลอัตราไม่คงที่ขณะกำลังส่งข้อมูล งานวิจัยนี้เสนอกระบวนการปรับปรุงค่า TXOP แบบพลวัต ซึ่งอาศัยเครื่องสภาวะจำกัดและข้อมูลป้อนกลับขนาดของแฉกคอยเพื่อหาค่าที่เหมาะสม โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ข้อมูลที่เข้ามาในแฉกคอยถูกส่งออกไปอย่างรวดเร็ว และลดความหน่วงที่เกิดขึ้น การวัดผลประสิทธิภาพของวิธีการที่นำเสนอบนระบบจำลอง ns2 และประเมินผลคุณภาพวิดีโอด้วย Evalvid toolset กับข้อมูลวิดีโอจำนวน 3 กลุ่ม ผลจากการทดลอง พบว่า กระบวนการที่นำเสนอรองรับข้อมูลวิดีโอกลุ่มการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็วได้ดี และรองรับกลุ่มอื่นอย่างเหมาะสม

Aphirak Jansang 2012: IEEE 802.11e Wireless LANs Enhancement for Supporting Variable Bit Rate Transmission. Doctor of Engineering (Computer Engineering), Major Field: Computer Engineering, Department of Computer Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Anan Phonphoem, Ph.D. 112 pages.

Wireless LAN has been currently improved to maintain quality of service. However, the variation of VBR (Variable Bit Rate) transmission is still not properly supported. In this research, the mechanism for enhancing a VBR transmission over IEEE 802.11e HCCA has been proposed. The mechanism composes of two parts: 1) developing an analytical model for expected frame waiting time evaluation 2) designing a TXOP adjustment mechanism to support the variation of VBR traffic.

The proposed analytical model based on IEEE 802.11e HCCA standard transmission mechanism, targets for studying the effect on expected frame waiting time when applying different accepted mean data rates. The results confirm that by accepting each session with requested mean data rate of the standard admission control process cannot guarantee the bounded delay of frame waiting time. Moreover, the model can be applied for suggesting a suitable accepted data rate for VBR session in admission control process.

To support the data rate fluctuation of VBR session during the transmission period, the adaptive TXOP adjustment mechanism based on a finite state machine and feedback queue size has been proposed. The mechanism aims for quick serving for burst arrival packets and also minimizing the packet delay. The mechanism is verified on ns2 by using Evalvid toolset for received video quality evaluation with three video categories. The results reveal that the mechanism can vigorously support for rapid movement category and sufficiently support for other video categories.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้สละเวลา และให้ความเอาใจใส่ ในการถ่ายทอดกระบวนการค้นคว้าวิจัย ประสบการณ์การใช้ชีวิตในทางโลก และทางธรรม การให้โอกาสในการไปร่วมงานประชุมต่างๆ ตั้งแต่ผู้วิจัยเริ่มเรียนระดับปริญญาโท จนกระทั่งถึงระดับปริญญาเอก กระบวนการต่างๆ เหล่านี้ ผู้วิจัยจะนำมาเป็นแบบอย่าง และจะพยายามส่งต่อความรู้และประสบการณ์อันเป็นประโยชน์ให้แก่เพื่อนๆ ในรุ่นต่อไป

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.สุรศักดิ์ สงวนพงษ์ และ ผศ.ดร.ชัยพร ใจแก้ว กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไข วิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณสุธรรม จินดาอุดม นักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการเครือข่ายไร้สาย (IWING) ที่ให้กำลังใจตอนทำงาน ถึงแม้ว่า ตอนนี้พี่สุธรรมจะกลับไปทำงานที่บ้านแล้วก็ตาม แต่ก็เอาใจใส่คอยสอบถามถึงความคืบหน้าของผู้วิจัยอยู่เสมอ ขอขอบคุณน้องๆ ทุกท่าน ภายในห้องปฏิบัติการเครือข่ายไร้สาย ที่ทำให้รู้สึกเหมือนอยู่บ้านที่ไม่เคยเหงา

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ธงชัย สุวรรณสิขินันท์ ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำแนะนำปรึกษา ในด้านการใช้ชีวิตอย่างมีความสุข และสมดุล ในการทำงาน และการใช้ชีวิต

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ Prof. Beatrice Paillassa สถาบัน IRIT/INP-ENSEEIH ที่ดูแล และให้คำปรึกษา ขณะที่ผู้วิจัยเดินทางไปทำวิจัยที่เมืองตูลุส และขอขอบคุณ ดร.ชลทิพย์ ยาวุธ ที่คอยดูแลชีวิตความเป็นอยู่ และให้คำแนะนำการใช้ชีวิตที่เมืองตูลุส ประเทศฝรั่งเศส

ขอขอบคุณ นายสรัญ จันทรสร้าง น้องชายที่เป็นกำลังใจในการทำงานต่างๆ เสมอมา

ด้วยความดี หรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้อบรมสั่งสอน เลี้ยงดู และให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

อภิรักษ์ จันทรสร้าง

มกราคม 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	25
อุปกรณ์	25
วิธีการ	25
ผลและวิจารณ์	60
สรุปและข้อเสนอแนะ	101
สรุป	101
ข้อเสนอแนะ	103
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	104
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	112

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าพารามิเตอร์สำหรับพิจารณาในการปรับแฉกคอยแบบลวงหน้า	17
2	คุณลักษณะงานวิจัยที่ปรับปรุงเพิ่มเติมจากมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA	24
3	รหัสเทียบการคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาส่งเฟรมขั้นตอนที่ 1	34
4	รหัสเทียบการคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาส่งเฟรมขั้นตอนที่ 2	35
5	รหัสเทียบการคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาส่งเฟรมขั้นตอนที่ 3	36
6	ค่าเหตุการณ์สำหรับเซสชัน i ของเครื่องสภาวะจำกัด ATMV1	46
7	ค่าเหตุการณ์สำหรับเซสชัน i ของเครื่องสภาวะจำกัด ATMV2	50
8	รหัสเทียบในการปรับค่า TXOP ของเครื่องสภาวะจำกัด	52
9	รหัสเทียบฟังก์ชัน $getEvent(p, Q)$ สำหรับ ATMV1	53
10	รหัสเทียบฟังก์ชัน $getEvent(p, Q)$ สำหรับ ATMV2	54
11	ความสัมพันธ์ระหว่าง PSNR และ MOS	56
12	ค่าพารามิเตอร์ของแลนไร้สายที่ใช้ในระบบจำลอง ns2	62
13	รหัสเทียบของฟังก์ชัน $getDeltaValue(TSPEC, SI, K, BER)$	72
14	ค่าพารามิเตอร์แลนไร้สายในระบบจำลองสำหรับการทดลองกระบวนการ ATMV	79
15	รายละเอียดจำนวนเฟรมและแพ็กเก็ตของวิดีโอที่ใช้ในการทดลองบนระบบจำลอง	81
16	ค่าเฉลี่ย PSNR _s และ MOS _s ของวิดีโอที่ใช้ในการทดลองจำนวน 5 เรื่อง	89
17	คุณสมบัติของกระบวนการ ATMV1 และ ATMV2	100

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การควบคุมการเข้าใช้งานช่องสัญญาณของ HC	7
2	ช่องว่างระหว่างเฟรมในมาตรฐาน IEEE 802.11	7
3	โครงสร้างการเชื่อมต่อของ QSTA และ QAP บนเซตบริการพื้นฐาน	9
4	ค่าพารามิเตอร์ที่ระบุใน TSPEC	9
5	ลูกโซ่มาร์คอฟของแบบจำลอง Bianchi	18
6	เฟรมข้อมูลที่ QAP อนุญาตให้สถานีแต่ละสถานีส่งข้อมูลในแต่ละรอบ SI	27
7	แบบจำลองสำหรับคำนวณค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรมในชั้น MAC	29
8	แบบจำลองรูปแบบง่ายสำหรับคำนวณค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรมในชั้น MAC	40
9	รูปแบบเวลาการส่งเฟรมระหว่าง QAP และ QSTA	41
10	รายละเอียดของเฟรมข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.11b	42
11	เครื่องสภาวะจำกัดสำหรับปรับค่า TXOP แบบ AMTV1	47
12	เครื่องสภาวะจำกัดสำหรับปรับค่า TXOP แบบ AMTV2	49
13	ผังงานการปรับค่า TXOP ที่ทำงานบน QAP	51
14	ช่วงเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของช่วง HCCA ในแต่ละรอบ SI	51
15	โครงสร้างการทำงานของ Evalvid toolset	57
16	โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่าง Evalvid toolset และ ns2	59
17	รูปแบบการตั้งค่าอุปกรณ์เครือข่ายในระบบจำลอง	61
18	ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม E[W] ในการส่งข้อมูลอัตราเฉลี่ย 160 Kbps	64
19	ค่าอัตราการทิ้งเฟรมข้อมูลที่อัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 1 Mbps	65
20	ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม E[W] ที่อัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 11 Mbps	70
21	ค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเวลารอของเฟรมในชั้น MAC ที่อัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 11 Mbps	71
22	ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม ค่าอัตราการทิ้งเฟรมข้อมูล และค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเวลารอของเฟรมในชั้น MAC ที่ค่า SI=100 มิลลิวินาที และอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 11 Mbps	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
23	ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม ค่าอัตราการทิ้งเฟรมข้อมูล และค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสม เวลารอของเฟรมในชั้น MAC ของการส่งข้อมูลอัตราเฉลี่ย 160 Kbps ที่มีค่า $BER=1 \times 10^{-4}$ และอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 11 Mbps	75
24	ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม ค่าอัตราการทิ้งเฟรมข้อมูล และค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสม เวลารอของเฟรมในชั้น MAC ที่มีค่า $BER=1 \times 10^{-4}$, $SI=100$ มิลลิวินาที และอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 11 Mbps	76
25	จำนวนเซสชันที่ระบบรองรับได้โดยใช้ค่า Δ ที่แนะนำจากแบบจำลอง ที่ค่า $SI=100$ มิลลิวินาที และอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 11 Mbps	77
26	การตั้งค่าอุปกรณ์เครือข่ายในระบบจำลองสำหรับการทดลองกระบวนการ ATMV	78
27	ตัวอย่างเฟรมของวิดีโอทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองจำนวน 5 เรื่อง	80
28	พฤติกรรมปรับค่า TXOP และการใช้งานช่วงเวลา TXOP ในแต่ละช่วง SI ของการส่งข้อมูลวิดีโอ Akiyo ด้วยกระบวนการ Basic, ARROW, ATMV1 และ ATMV2	84
29	ค่าความหน่วงของแพ็กเก็ต และค่าสูญเสีย TXOP ของการส่งข้อมูลวิดีโอทั้ง 5 เรื่อง ด้วยกระบวนการ ARROW, ATMV1 และ ATMV2	86
30	ค่าการครอบครองช่องสัญญาณของการส่งข้อมูลวิดีโอทั้ง 5 เรื่อง ด้วยกระบวนการ Basic, ARROW, ATMV1 และ ATMV2	92
31	ค่า $PSNR_S$ และ MOS_S ของข้อมูลวิดีโอทั้ง 5 เรื่องที่ส่งจากสถานีต้นทาง	94
32	ค่าเฉลี่ย $PSNR_R$ และ MOS_R ของข้อมูลวิดีโอทั้ง 5 เรื่องที่ได้รับ ณ สถานีปลายทาง	96

การปรับปรุงเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11e เพื่อสนับสนุน การส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่

IEEE 802.11e Wireless LANs Enhancement for Supporting Variable Bit Rate Transmission

คำนำ

การใช้งานเครือข่ายไร้สายเป็นที่แพร่หลายมากในปัจจุบัน เช่น การประยุกต์ใช้ในสถานศึกษา โรงพยาบาล ห้องสมุด เป็นต้น เนื่องจากราคาถูก ติดตั้งง่าย มีการเข้ารหัสเพื่อความปลอดภัย และสามารถใช้งานทุกตำแหน่งที่สัญญาณครอบคลุม มาตรฐานของเครือข่ายไร้สายที่ใช้ผลิตภัณฑ์ใช้งานคือ IEEE802.11a, b, g และ n ที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูงสุดที่ 54, 11, 54 และ 300 Mbps ตามลำดับ มาตรฐานเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันในวิธีการเข้ารหัสส่งข้อมูล และความถี่ที่ใช้งาน นอกเหนือจากความเร็วในการรับส่งข้อมูลแล้ว ลักษณะข้อมูลที่นำมาใช้งานก็เป็นอีกปัจจัย

ข้อมูลที่ใช้งานอยู่บนเครือข่ายไร้สายสามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานเป็น 2 ประเภท ได้แก่ 1) ข้อมูลเวลาจริง (real-time data) คือ ข้อมูลที่ต้องการความหน่วงเวลาต่ำ (low delay) การตอบสนองที่เร็ว และต้องการแบนด์วิดท์ที่สูง อนุญาตให้มีข้อมูลสูญหายได้บางส่วน เช่น ข้อมูลวิดีโอ (หรือ วิดีทัศน์) และข้อมูลเสียง 2) ข้อมูลที่ไม่ใช่เวลาจริง (non real-time data) คือ ข้อมูลที่ต้องการความถูกต้องของข้อมูล และทนทานต่อความหน่วงเวลาได้ เช่น การโอนถ่ายไฟล์ข้อมูลเว็บโดยใช้โพรโทคอลเอชทีทีพี และการโอนถ่ายไฟล์ข้อมูลโดยใช้โพรโทคอลเอฟทีพี ในการใช้งานปกติข้อมูลทั้งสองประเภทนี้จะใช้งานที่ช่องสัญญาณหรือความถี่เดียวกัน และต่างมีความสามารถในการแย่งใช้งานช่องสัญญาณเท่าเทียมกัน โดยเมื่อมีปริมาณของข้อมูลหนาแน่นขึ้น จะส่งผลให้ข้อมูลประเภทเวลาจริงไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากค่าความหน่วงเวลาและอัตราการสูญหายของข้อมูลที่เกิดขึ้นเกินกว่าปริมาณที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบการรับส่งข้อมูลที่สามารถรองรับคุณภาพการให้บริการ (QoS: Quality of Service) สำหรับข้อมูลแต่ละประเภทได้

จากความต้องการดังกล่าว สมาคม IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) จึงนำเสนอมาตรฐาน IEEE 802.11e (IEEE Computer Society, 1999, 2005) ในปี พ.ศ. 2548 สำหรับรองรับคุณภาพการให้บริการของข้อมูล โดยกำหนดการเข้าใช้ช่องสัญญาณเป็น 2

รูปแบบคือ 1) แบบ EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) ซึ่งสถานีทั้งหมดที่มีข้อมูลจะแข่งขันกันส่งข้อมูลบนช่องสัญญาณเดียวกัน โดยข้อมูลแต่ละประเภทมีความสามารถในการใช้งานช่องสัญญาณต่างกันตามลำดับความสำคัญ และ 2) แบบ HCCA (HCF Controlled Channel Access) ซึ่งทุกสถานีจะรอคำสั่งอนุญาตให้สามารถใช้งานแบบ HCF (Hybrid Coordinator Function) โดย HC (Hybrid Coordinator) ที่ควบคุมการส่งข้อมูลของสถานีภายในเครือข่ายไร้สายทำงานบนแอคเซสพอยต์ (Access Point)

การทำงานแบบ EDCA จะแบ่งชนิดข้อมูลออกเป็น 4 ประเภทตามลำดับความสำคัญ ได้แก่ 1) AC_BK (Background Traffic) คือ กลุ่มที่มีความสำคัญต่ำสุด เช่น ข้อมูลเพียร์ทูเพียร์ (peer-to-peer) 2) AC_BE (Best-effort Traffic) คือ กลุ่มที่มีความสำคัญในระดับต่ำแต่ไม่ไวต่อความหน่วงเวลา เช่น ข้อมูลเอฟทีพี 3) AC_VI (Video Traffic) คือ กลุ่มที่มีความสำคัญสูง และไวต่อความหน่วงเวลา เช่น ข้อมูลวิดีโอ และ 4) AC_VO (Voice Traffic) คือ กลุ่มที่มีความสำคัญสูงที่สุด และไวต่อความหน่วงเวลามากที่สุด เช่น ข้อมูลเสียง

ภายในแต่ละสถานีจะมีการสร้างระบบแถวคอยหรือคิวจำนวน 4 ชุดเพื่อรองรับข้อมูลแต่ละประเภท โดยแถวคอยของข้อมูลแต่ละประเภทจะมีค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันเพื่อกำหนดความสำคัญ ได้แก่ a) ค่าเอไอเอฟเอส (AIFS: Arbitrary Interframe Space) เป็นค่าช่องว่างระหว่างเฟรมที่แต่ละสถานีต้องใช้ในการรอหลังจากช่องสัญญาณว่างเพื่อแย่งส่งข้อมูล ซึ่งคำนวณได้จากค่า เอไอเอฟเอสเอ็น (AIFSN: AIFS Number) b) ค่าหน้าต่างการแข่งขัน (CW: Contention Window) เป็นค่าที่ใช้สำหรับนับถอยหลังเพื่อรอเข้าใช้ช่องสัญญาณ ซึ่งจะกำหนดค่าน้อยที่สุด (CW_{min}) และค่ามากที่สุด (CW_{max}) ของแถวคอยแต่ละประเภทไว้ และ c) ค่าโอกาสในการส่ง (TXOP: Transmission Opportunity) เป็นค่าที่กำหนดระยะเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณหลังจากที่แย่งสำเร็จ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ AIFS, CW และ TXOP ที่แตกต่างกันส่งผลให้ข้อมูลแต่ละประเภทมีความสามารถในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแตกต่างกัน โดยแอคเซสพอยต์จะประกาศค่าพารามิเตอร์ให้แต่ละสถานีเป็นระยะตามช่วงเวลาบีคอน (Beacon Interval) อย่างไรก็ตาม วิธีการที่กำหนดในมาตรฐานยังมีจุดด้อยคือ เมื่อมีจำนวนสถานีที่ต้องการส่งข้อมูลมากขึ้นจนทำให้ระบบเกิดภาวะโหลตเกิน (overload) ส่งผลให้ระบบไม่สามารถรองรับคุณภาพการให้บริการได้

หลังจากที่ประกาศใช้มาตรฐาน IEEE 802.11e แล้ว มีหลายงานวิจัยพยายามปรับปรุง EDCA ให้รองรับคุณภาพการให้บริการที่ดีขึ้น โดยการเพิ่มกระบวนการควบคุมการรับเข้า (CAC: Call Admission Control) เพื่อให้สถานีที่พร้อมส่งข้อมูลสามารถตัดสินใจที่เริ่มเข้าใช้งานช่องสัญญาณ

โดยพิจารณาจากสถานะของช่องสัญญาณ ตามพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงค่าตามคุณภาพของช่องสัญญาณ จะเห็นได้ว่า รูปแบบการเข้าใช้งาน EDCA มีลักษณะเป็นการแย่งชิงเพื่อเข้าใช้ช่องสัญญาณ โดยข้อมูลที่มีความสำคัญสูงสามารถแย่งใช้ช่องสัญญาณได้ก่อนข้อมูลที่มีความสำคัญต่ำกว่า ขณะเดียวกันข้อมูลที่มีความสำคัญเท่ากันจะแย่งกันด้วยความสามารถเท่าเทียมกัน ซึ่งทำให้ระบบรองรับการส่งข้อมูลที่มีความต้องการขนาดช่องสัญญาณที่แตกต่างกันได้ยาก

ขณะที่การทำงานแบบ HCCA สามารถรองรับการส่งข้อมูลที่มีความต้องการขนาดของช่องสัญญาณแตกต่างกัน โดยสถานีต้นทางต้องดำเนินการร้องขอสิ่งที่จะการล่วงหน้า โดยการส่งลักษณะข้อมูล (TSPEC: Traffic Specification) ให้แก่ HC ในช่วง EDCA หลังจากนั้น HC จะดำเนินการควบคุมการรับเข้า และตอบผลลัพธ์ให้แก่สถานีที่ร้องขอ เมื่อระบบเข้าสู่ช่วง HCCA สถานีที่ทำหน้าที่เป็น HC จะโพล (poll) สถานีที่อยู่ในรายการโพลตามลำดับ โดยอนุญาตให้แต่ละสถานีส่งข้อมูลได้ภายในระยะเวลา TXOP ซึ่งคำนวณจากค่าลักษณะข้อมูลตามการร้องขอของสถานี ค่า TXOP จะเปลี่ยนแปลงก็ต่อเมื่อมีการรับเข้าของสถานีใหม่ที่มีค่าพารามิเตอร์ เช่น ช่วงเวลาการบริการที่รอได้ (SI: Service Interval) แตกต่างจากเดิม วิธีการนี้จึงสามารถรองรับสถานีที่ต้องการขนาดช่องสัญญาณต่างกันตามที่ร้องขอ ซึ่งต่างจาก EDCA ที่แม้ว่าจะกำหนดให้มีความสำคัญกับข้อมูลแต่ละชนิดแตกต่างกัน แต่ไม่สามารถรองรับการกำหนดขนาดของช่องสัญญาณแยกตามความต้องการของข้อมูลแต่ละเซสชันได้

การรับส่งข้อมูลเวลาจริงบนเครือข่ายไร้สายแบบ HCCA สถานีที่ต้องการส่งข้อมูลจะต้องดำเนินการร้องขอ โดยส่งค่าอัตราข้อมูลเฉลี่ย (ขนาดของช่องสัญญาณ) ขนาดของเฟรมข้อมูลเฉลี่ย และช่วงเวลาการบริการที่รอได้ ให้แก่ HC เพื่อใช้ในการตัดสินใจ โดยการส่งข้อมูลที่ร้องขอเข้ามาใหม่จะต้องไม่ทำให้การส่งข้อมูลที่มีอยู่เดิมเสียหาย หรือค่าความหน่วงเวลาเกินกว่าที่จะรองรับได้ ซึ่งวิธีการนี้เหมาะกับข้อมูลเวลาจริงที่มีอัตราการส่งแบบคงที่ (CBR: Constant Bit Rate) แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเวลาจริงที่ต้องการใช้งานช่องสัญญาณอย่างมีประสิทธิภาพ จะดำเนินการบีบอัดข้อมูลหรือตัดทอนข้อมูลลง โดยยังพยายามคงคุณภาพไว้ ซึ่งทำให้ข้อมูลเวลาจริงมีอัตราการส่งแบบไม่คงที่ (VBR: Variable Bit Rate) ดังนั้นการร้องขอเพื่อส่งข้อมูลโดยใช้ค่าอัตราเฉลี่ยสำหรับข้อมูลแบบอัตราส่งไม่คงที่ในแบบ HCCA จึงก่อให้เกิดการล้น (overflow) ของข้อมูลภายในแฉกคอยซึ่งก่อให้เกิดการสูญหายของข้อมูล และความหน่วงเวลาสูงขึ้น เนื่องจากใช้ค่าที่กำหนดเริ่มต้นตอนรับเข้าซึ่งคำนวณจากอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยจะไม่สามารถรองรับความแปรปรวนของข้อมูลที่เข้ามาเป็นจำนวนมากในบางช่วงเวลาได้

งานวิจัยที่ต้องการปรับปรุงการส่งข้อมูลบนเครือข่ายไร้สายแบบ HCCA ให้สามารถรองรับข้อมูลที่มีอัตราไม่คงที่มีค่านิยามการหลายส่วน ได้แก่ การปรับปรุงกระบวนการตัดสินใจรับเข้าให้มีความแม่นยำมากขึ้น การปรับปรุงวิธีการโพลให้เป็นแบบพลวัตตามความต้องการของข้อมูล การปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้กำหนดการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ การเสนอเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการร้องขอและวิธีการที่ใช้ในการพิจารณาการรับเข้า รวมถึงเปลี่ยนรูปแบบวิธีการโพลเฉพาะสำหรับข้อมูลอัตราไม่คงที่ เป็นต้น การปรับปรุงดังกล่าวเพื่อให้ระบบสามารถรองรับการความต้องการในการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ โดยมีอัตราการสูญหายของข้อมูลต่ำ ความหน่วงเวลาต่ำ การพัว (jitter) ต่ำ ตามความต้องการของข้อมูล ขณะเดียวกันต้องรองรับจำนวนข้อมูลที่ส่งพร้อมกันได้เหมาะสม อย่างไรก็ตาม หลายงานวิจัยมีการคำนวณที่ซับซ้อน และต้องการความแม่นยำในการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อให้สามารถจองช่องสัญญาณให้เพียงพอความต้องการข้อมูล

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาวิธีการสำหรับปรับปรุงกระบวนการรับส่งข้อมูลโดยอ้างอิงจากมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA ให้สามารถรองรับข้อมูลเวลาจริงอัตราไม่คงที่ งานวิจัยจะเสนอการปรับปรุงเป็นสองส่วน ในส่วนแรกทำการออกแบบแบบจำลองเพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณากระบวนการรับเข้า ซึ่งตามมาตรฐานจะใช้ค่าอัตราข้อมูลเฉลี่ย ซึ่งเหมาะสมเฉพาะกับข้อมูลที่มีอัตราคงที่ แต่สำหรับข้อมูลอัตราไม่คงที่นั้น จำเป็นต้องใช้ค่าอัตราข้อมูลเฉลี่ยสูงกว่าที่ร้องขอ เนื่องจากมีผลกระทบจากความแปรปรวนของข้อมูล จากผลการประเมินเบื้องต้นพบว่า ค่าที่ใช้ในกระบวนการพิจารณาข้อมูลอัตราไม่คงที่จะต้องใช้ค่าที่เกินกว่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ย เพื่อให้สามารถรองรับความหน่วงเวลาตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม ถ้าข้อมูลมีค่าอัตราส่งที่เปลี่ยนแปลงสูงแต่ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงต่ำ จะส่งผลให้การรับข้อมูลที่มีค่าอัตราส่งเกินในตอนแรกเข้านั้นมีค่าความหน่วงเวลาเกินกว่าที่ต้องการ เพื่อรองรับความแปรปรวนที่เกิดขึ้นขณะส่งข้อมูล ดังนั้นในส่วนที่สองนำเสนอกระบวนการปรับปรุงช่วงเวลา TXOP เพื่อรองรับความต้องการของข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงในขณะส่งข้อมูล จากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับค่า TXOP จะส่งจากสถานีต้นทางไปยัง HC โดยใช้วิธีการแนบค่าพารามิเตอร์พร้อมกับข้อมูลปกติ (piggy back) เพื่อให้ HC ใช้ในการปรับค่า TXOP แบบพลวัตในรอบถัดไป ด้วยวิธีการคำนวณที่ไม่ซับซ้อน การคำนวณและการประเมินค่าของระบบจะกระทำบน HC ที่อยู่บนแอกเซสพอยต์เท่านั้น โดยสถานีที่กำลังส่งข้อมูลอยู่ไม่ต้องทำการคำนวณ หรือเก็บสถานะใดๆ โดยผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ทำให้ระบบเครือข่ายไร้สายแบบ HCCA สามารถรองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ได้ดีขึ้น ด้วยกระบวนการรับข้อมูลเข้าด้วยค่าเริ่มต้นที่เหมาะสม และสามารถรองรับความแปรปรวนของข้อมูลอัตราไม่คงที่ที่เปลี่ยนแปลงสูงขณะกำลังส่งข้อมูลได้

วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและพัฒนาแบบจำลองโดยอ้างอิงตามกระบวนการส่งตามมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA เพื่อหาค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์อัตราการส่งข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับใช้พิจารณาในกระบวนการรับเข้า
2. พัฒนากระบวนการปรับปรุงค่า TXOP แบบพลวัตเพื่อให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลเวลาจริงที่มีอัตราการส่งแบบไม่คงที่ โดยมีความหน่วงเวลาและอัตราการสูญหายของข้อมูลที่เหมาะสมต่อการใช้งานตามคุณภาพการให้บริการ

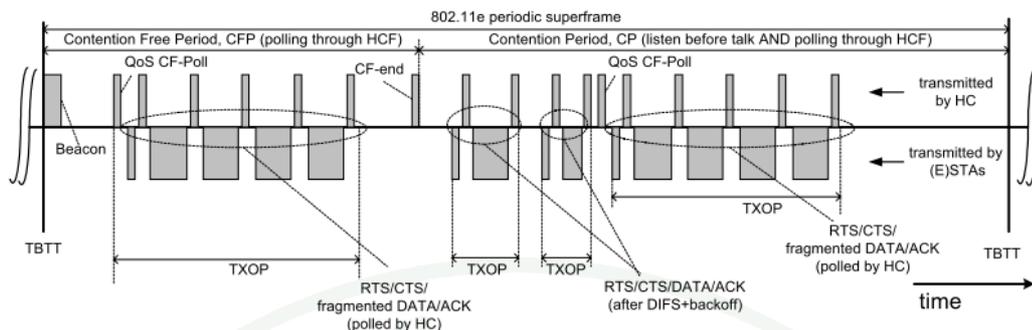
การตรวจเอกสาร

หัวข้อนี้กล่าวถึงภาพรวมของมาตรฐาน IEEE 802.11e ครอบคลุมการส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA ครอบคลุมการพิจารณาการรับเซสชันข้อมูลเข้า แบบจำลองสำหรับการวัดประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย การรองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่บน IEEE 802.11e แบบ HCCA ค่าพารามิเตอร์ป้องกันสำหรับจัดการแฉวคอย และงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

1. มาตรฐาน IEEE 802.11e

จุดมุ่งหมายของมาตรฐาน IEEE 802.11e (IEEE Computer Society, 2005) คือ การกำหนดกระบวนการส่งข้อมูลที่รองรับคุณภาพการให้บริการของข้อมูลแต่ละชนิด เช่น เสียง วิดีโอ ที่มีความต้องการแตกต่างกัน โดยแบ่งการเข้าใช้ช่องสัญญาณเป็น 2 รูปแบบ คือ 1) แบบ EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) ที่กำหนดให้ข้อมูลแต่ละชนิดมีความสามารถในการแย่งชิงช่องสัญญาณที่แตกต่างตามลำดับความสำคัญ ความสำคัญของข้อมูลจะกำหนดโดยช่องว่างระหว่างเฟรม (IFS: Interframe Space) เพื่อเข้าใช้งานช่องสัญญาณ ค่าโอกาสในการส่ง (TXOP: Transmissison Opportunity) และค่าสุ่มหน้าตาการชน (CW: Contention Window) เช่น ข้อมูลเสียงจะมีค่ารระหว่างเฟรมและค่าสุ่มหน้าตาการชนต่ำกว่าข้อมูลเว็บ 2) แบบ HCCA (HCF Controlled Channel Access) ทุกสถานีที่อยู่ภายในระบบเครือข่ายไร้สายจะส่งข้อมูลได้ ก็ต่อเมื่อได้รับคำสั่งอนุญาตให้ใช้งานช่องสัญญาณจากส่วนควบคุม HC (Hybrid Coordinator) ที่ทำงานอยู่บนอุปกรณ์แอคเซสพอยต์

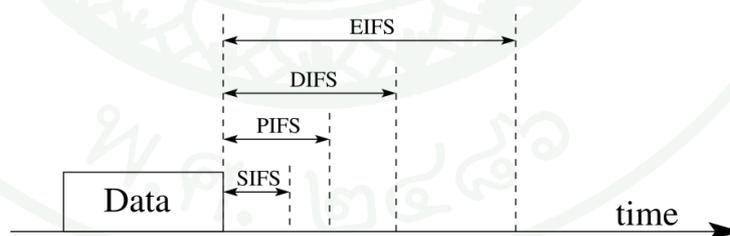
กระบวนการเข้าใช้งานแบบ EDCA มีลักษณะเป็นช่วงเวลาที่ยอมให้มีการชนกันของการส่งข้อมูลได้ (CP: Contention Period) ในขณะที่การเข้าใช้งานแบบ HCCA เป็นช่วงเวลาที่ไม่มีการชนกันในการส่งข้อมูล (CFP: Contention Free Period) เพราะทุกสถานีจะต้องได้รับอนุญาตจาก HC ถึงจะดำเนินการส่งข้อมูลได้ โดยกระบวนการเข้าใช้งานทั้งสองแบบเกิดขึ้นสลับกันภายใต้การควบคุมของ HC การเปลี่ยนรูปแบบการเข้าใช้งานจะอาศัยกลไกของช่องว่างระหว่างเฟรม เพื่อกำหนดให้ทุกสถานีปรับรูปแบบการเข้าใช้งานตามที่ HC ต้องการ การเปลี่ยนเข้าสู่ช่วงเวลา HC ควบคุมช่องสัญญาณสามารถทำได้โดยการส่งเฟรม QoS CF-Poll ให้แก่ทุกสถานี ซึ่งสามารถทำได้ทั้งจากภายในช่วงเวลาแย่งชิง (CP) และช่วงเวลาที่ไม่มีการชนกัน (CFP) ตัวอย่างการควบคุมการเข้าใช้งานช่องสัญญาณของ HC แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การควบคุมการเข้าใช้งานช่องสัญญาณของ HC

ที่มา: Mangold *et al.* (2003)

ช่องว่างระหว่างเฟรม เป็นกลไกที่ระบบเครือข่ายไร้สาย IEEE 802.11 นำมาใช้ในการบริหารการส่งเฟรมข้อมูลที่มีความสำคัญต่างกัน โดยเป็นกลไกหนึ่งที่อยู่รวมอยู่ในโพรโทคอล CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ที่ใช้ในการแย่งเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.11 สำหรับสถานีใดๆ ที่ต้องการส่งข้อมูล จะใช้วิธีฟังช่องสัญญาณก่อนที่จะส่งข้อมูล เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีสถานีอื่นกำลังส่งข้อมูลอยู่ ถ้าตรวจสอบพบว่าช่องสัญญาณว่างด้วยระยะเวลาเท่ากับช่องว่างระหว่างเฟรม (เช่น การส่งเฟรมข้อมูลปกติ จะรอด้วยระยะเวลา DIFS) หลังจากนั้นจึงเริ่มดำเนินการส่งเฟรมข้อมูล แต่ถ้าช่องสัญญาณไม่ว่าง สถานีจะเริ่มสุ่มเวลารอสำหรับการดำเนินการตรวจสอบช่องสัญญาณในเวลาถัดไป



ภาพที่ 2 ช่องว่างระหว่างเฟรมในมาตรฐาน IEEE 802.11

ที่มา: อนันต์ (2550)

ช่องว่างระหว่างเฟรมในมาตรฐาน IEEE 802.11 แบ่งออกเป็น 4 ชนิด (ดังภาพที่ 2) คือ SIFS (Short Interframe Space) เป็นช่องว่างระหว่างเฟรมที่ใช้ในการส่งเฟรมควบคุม เช่น เฟรม

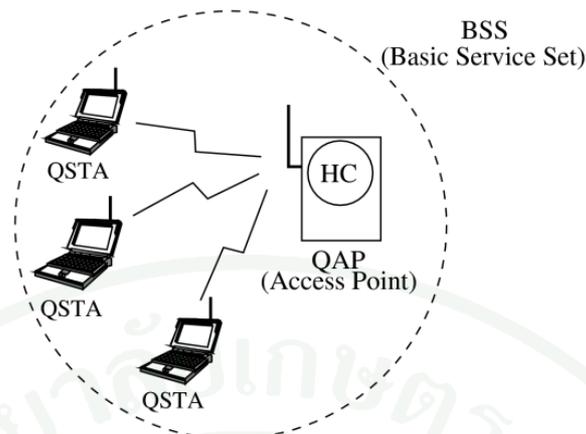
Acknowledgement เฟรม RTS/CTS ส่วน PIFS (PCF Interframe Space) เป็นช่วงระยะเวลาที่ แอ็กเซสพอยต์ใช้ในการรอ เพื่อส่งเฟรม QoS CF-Poll สำหรับกำหนดให้ทุกสถานีเข้าสู่ช่วงเวลาที่ไม่มีการชนกัน ส่วน DIFS (DCF Interframe Space) เป็นช่วงเวลาที่ใช้รอเพื่อส่งเฟรมข้อมูลปกติ และ EIFS (Extended Interframe Space) เป็นช่วงเวลาที่ใช้สำหรับรอส่งเฟรม เมื่อตรวจพบว่า การส่งเฟรมครั้งก่อนหน้าเกิดความผิดพลาดขึ้น ซึ่งลำดับความสำคัญเรียงจากมากไปน้อยของ ช่องว่างระหว่างเฟรมดังนี้ SIFS (ความสำคัญสูงสุด), PIFS, DIFS และ EIFS (ความสำคัญต่ำที่สุด)

HC สามารถกำหนดให้ทุกสถานีเข้าสู่ช่วงเวลาที่ไม่มีการชนกัน โดยเมื่อ HC ตรวจสอบพบ ช่องสัญญาณว่างเป็นระยะเวลา PIFS แล้ว HC จะดำเนินการส่งเฟรม QoS CF-Poll ให้แก่ทุกสถานี ภายในเซตบริการพื้นฐาน (BSS: Basic Service Set) หนึ่งที เพื่อให้รับทราบว่า ขณะนี้กำลังเข้าสู่การ ส่งแบบ HCCA และระบุถึงเซสชันของสถานี พร้อมด้วยช่วงเวลา TXOP มากที่สุดที่อนุญาตให้ส่ง ข้อมูลได้ เมื่อครบกำหนดเวลา TXOP แล้ว HC จะเริ่มดำเนินการโพลเซสชันอื่นๆ ที่อยู่ในรายการโพล ต่อไป ซึ่งทุกสถานีสามารถเปลี่ยนกลับมาอยู่ในช่วงเวลาแย่งชิงก็ต่อเมื่อมีการส่งประกาศช่วงเวลาใหม่ใน เฟรม Beacon หรือได้รับเฟรม QoS CF-End จาก HC

2. กระบวนการทำงานของ IEEE 802.11e แบบ HCCA

การทำงานแบบ HCCA อยู่ในช่วงเวลาที่ไม่มีการชนกัน โดยสถานี QSTA (QoS Station) ทุก สถานีที่อยู่ในเซตบริการพื้นฐานเดียวกันจะรอการให้สัญญาณเพื่อส่งข้อมูลโดย HC ที่ติดตั้งอยู่บน QAP (QoS Access Point) แสดงดังภาพที่ 3 นอกเหนือจากการให้สัญญาณแล้ว HC จะระบุถึงช่วงระยะเวลา TXOP ที่อนุญาตให้ QSTA สามารถส่งข้อมูลได้ ซึ่งจะคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ใน TSPEC (Traffic Specification) ที่ QSTA ร้องขอตอนกระบวนการรับเข้า

การส่งการร้องขอของ QSTA เพื่อขอเข้าใช้งานแบบ HCCA จะกระทำในระยะเวลาแย่งชิง ซึ่งจะ ส่งข้อมูลแบบ EDCA โดย QSTA ที่ต้องการส่งข้อมูลจะต้องแย่งเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งคำร้องขอให้แก่ HC ด้วยเฟรมข้อมูลชนิด ADDTS Request (Add Traffic Specification Request) ค่าพารามิเตอร์ใน การร้องขอระบุตามโครงสร้าง TSPEC แสดงดังภาพที่ 4 โดยค่าพารามิเตอร์ใดที่ไม่ได้ใช้งานจะกำหนดค่า เป็นศูนย์



ภาพที่ 3 โครงสร้างการเชื่อมต่อของ QSTA และ QAP บนเซตบริการพื้นฐาน

ElementID	Length	TS Info	Nominal MSDU Size	Maximum MSDU Size	Minimum Service Interval	Maximum Service Interval	Inactivity Interval	Suspension Interval
(1 octet)	(1 octet)	(3 octets)	(2 octets)	(2 octets)	(4 octets)	(4 octets)	(4 octets)	(4 octets)

Service Start Time	Minimum Data Rate	Mean Data Rate	Peak Data Rate	Burst Size	Delay Bound	Minimum PHY Rate	Surplus Bandwidth Allocation	Medium Time
(4 octets)	(4 octets)	(4 octets)	(4 octets)	(4 octets)	(4 octets)	(4 octets)	(2 octets)	(2 octets)

ภาพที่ 4 ค่าพารามิเตอร์ที่ระบุใน TSPEC

ค่าพารามิเตอร์ที่ HC ใช้สำหรับพิจารณาการรับเข้าตามมาตรฐานมีค่าดังต่อไปนี้

- Mean Data Rate (ρ) คือ ค่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ย (หน่วย: บิตต่อวินาที หรือ bps)
- Nominal MSDU Size (L) คือ ขนาดของเฟรมข้อมูลที่ให้บริการในชั้น MAC (Medium Access Control) (หน่วย: ไบต์)
- Maximum MSDU Size (M) คือ ขนาดของเฟรมข้อมูลที่ใหญ่ที่สุดที่ให้บริการในชั้น MAC (หน่วย: ไบต์)
- Maximum Service Interval (MSI) คือ ช่วงระยะเวลาที่รอรับบริการที่นานที่สุดที่ยอมรับได้ของข้อมูลนั้น (หน่วย: มิลลิวินาที หรือ msec)
- PHY Rate (R) คือ ค่าอัตราการส่งข้อมูลชั้นกายภาพ (ชั้นฟิสิคอลล) ระหว่าง QSTA ที่ร้องขอ กับ HC (หน่วย: เมกะบิตต่อวินาที หรือ Mbps)

กระบวนการพิจารณาการรับเซสชันข้อมูลเข้า (CAC: Call Admission Control) ในขั้นต้น HC จะนำค่า MSI ของเซสชันข้อมูลที่รับเข้าแล้ว และข้อมูลที่กำลังร้องขอเพื่อพิจารณาหาค่าตัวแทนค่า SI สำหรับมาใช้คำนวณ โดยค่า SI คำนวณจาก MSI ที่ต่ำที่สุดซึ่งสามารถรองรับความต้องการของข้อมูลทุกเซสชันได้

หลังจากที่ได้ค่า SI แล้ว กระบวนการพิจารณาการรับเข้าข้อมูลเซสชันใหม่ i แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การหาค่าจำนวนเฟรมที่ใช้ส่งข้อมูล (N_i) สำหรับการส่งในช่วง SI คำนวณค่าจากสมการ (1)

$$N_i = \left\lceil \frac{SI \times \rho_i}{L_i} \right\rceil \quad (1)$$

2. นำค่า N_i จากสมการ (1) มาคำนวณค่าเวลา TXOP ที่อนุญาตให้ข้อมูลส่งได้ ในช่วง SI จากสมการ (2) โดยค่า O ที่นำมาคำนวณ คือ ค่าใช้จ่าย (overhead) ที่ต้องใช้เมื่อมีการส่งข้อมูล เช่น เวลาที่ใช้ในการส่งโพล เวลาที่ใช้ในการรอตอบกลับ เป็นต้น

$$TXOP_i = \max \left(\frac{N_i \times L_i}{R_i} + O, \frac{M}{R_i} + O \right) \quad (2)$$

3. การพิจารณาการรับข้อมูลเซสชัน i ที่ร้องขอเข้า HC จะพิจารณาจากเงื่อนไขในสมการ (3) โดยสมมติให้ HC รับข้อมูลก่อนการร้องขอครั้งนี้ไว้จำนวน k เซสชัน และข้อมูลที่ร้องขอใหม่ (i) คือ ข้อมูลลำดับที่ $k + 1$

$$\frac{TXOP_{k+1}}{SI} + \sum_{j=1}^k \frac{TXOP_j}{SI} \leq \frac{T - T_{cp}}{T} \quad (3)$$

โดยค่า

T คือ ช่วงเวลาบีคอน (Beacon)

T_{cp} คือ เวลาในช่วงบีคอนในแบบอีดีซีเอ

HC จะตอบรับข้อมูลเซสชันใหม่ i เข้าในการส่งแบบ HCCA ก็ต่อเมื่อค่าของอสมการ (3) เป็นจริง ถ้าอสมการ (3) เป็นจริง ข้อมูลจะถูกเพิ่มในรายโพลของ HC แต่ในกรณีที่ไม่สามารถรับข้อมูลเข้าในรายการโพลได้ HC จะใช้ค่าเดิมในการโพล โดย HC จะตอบผลลัพธ์ (ตอบรับ หรือตอบปฏิเสธ) กลับให้แก่สถานีที่ร้องขอด้วยเฟรม ADDTS Response (Add Traffic Specification Response)

เมื่อเข้าสู่การรับส่งข้อมูลแบบ HCCA แล้ว HC จะเริ่มดำเนินการโพลโดยพิจารณาจากรายการโพลที่สร้างขึ้น ซึ่งให้เวลาของการส่งของข้อมูลแต่ละเซสชันเท่ากับค่า TXOP ที่คำนวณได้จากสมการ (2)

จากกระบวนการส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA พบว่า กระบวนการโพลเซสชันด้วยค่า TXOP ที่คงที่ (ค่าที่คำนวณตอนกระบวนการพิจารณาการรับเข้าเซสชันข้อมูล) จนกระทั่งจบการส่งข้อมูลจะเหมาะกับการส่งข้อมูลที่มีอัตราการส่งคงที่ เพราะข้อมูลมีความสม่ำเสมอในการใช้งานช่องสัญญาณ (Cowling and Selvakennedy, 2004)

ส่วนการนำข้อมูลอัตราไม่คงที่มาใช้งานบน IEEE 802.11e แบบ HCCA จะไม่สามารถรองรับการทำงานได้ดี เนื่องจากรูปแบบการใช้ค่า TXOP คงที่กับข้อมูลที่มีความแปรปรวนที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลา ทำให้ค่าความหน่วง และความพำของข้อมูลมีค่าสูง รวมถึงเกิดการสูญหายขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงกับคุณภาพของข้อมูลที่ต้องการ (Cowling and Selvakennedy, 2004; Jansang *et al.*, 2009)

ดังนั้นงานวิจัยหลายงานจึงพยายามปรับปรุงมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA ด้วยการเสนอแนวทาง การปรับปรุงกระบวนการตัดสินใจรับเข้าให้มีความแม่นยำมากขึ้น การปรับปรุงวิธีการโพลให้เป็นแบบพลวัตตามความต้องการของข้อมูล การปรับปรุงหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้กำหนดการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ การเสนอเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการร้องขอและวิธีการที่ใช้ในการพิจารณาการรับเข้า รวมถึงเปลี่ยนรูปแบบวิธีการโพลเฉพาะสำหรับข้อมูลอัตราไม่คงที่ เป็นต้น เพื่อให้มาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA สามารถรองรับการส่งข้อมูลแบบอัตราไม่คงที่ได้ โดยรายละเอียดจะแสดงในหัวข้อถัดไป

3. วิธีการตรวจสอบและวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอล

งานวิจัยที่มีการออกแบบโพรโทคอลใหม่ หรือปรับปรุงโพรโทคอลที่มีอยู่เดิม กระบวนการที่สำคัญอีกขั้นหนึ่ง คือ การตรวจสอบการทำงาน และวัดประสิทธิภาพของโพรโทคอล เพื่อยืนยันว่า โพรโทคอลที่ออกแบบมาสามารถทำงานได้ และมีประสิทธิภาพ โดยการตรวจสอบและวัดประสิทธิภาพการทำงานของโพรโทคอล (Jansang and Phonphoem, 2004) สามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ คือ 1) การวัดผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) 2) การวัดผลด้วยระบบจำลอง (Simulation) และ 3) การวัดผลด้วยระบบทดสอบ (Testbed)

การวัดผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เป็นการนำพฤติกรรมของโพรโทคอลที่นำเสนอมา นิยามและวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ ตัวอย่างเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เช่น การวิเคราะห์ระบบแถวคอย (Queueing system) การวิเคราะห์ทฤษฎีความน่าจะเป็น (Probability theory) ด้วยการสร้างแบบจำลองด้วยการตั้งสมมุติฐานจากค่าพารามิเตอร์ที่มีสำคัญ จากนั้นจึงนำมาศึกษาพฤติกรรมของโพรโทคอลจากแบบจำลอง โดยการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่อยู่ในแบบจำลอง และสังเกตผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างของการศึกษาพฤติกรรมด้วยแบบจำลอง เช่น การศึกษาผลกระทบของการเพิ่มจำนวนเซสชันข้อมูลต่อค่าความหน่วงของแพ็กเก็ต การศึกษาผลกระทบของค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลชนกันที่มีผลกระทบต่อค่าปริมาณข้อมูลที่ส่งสำเร็จ (System throughput) ค่าผลลัพธ์จากแบบจำลองสามารถนำมาสรุปแนวโน้มของโพรโทคอลที่นำเสนอได้ แต่มีมุมมองที่จำกัดโดยขึ้นอยู่กับจำนวนพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการออกแบบ

การวัดผลจากระบบจำลอง เป็นการจำลองการทำงานจริงของโพรโทคอลที่ต้องการบนระบบคอมพิวเตอร์เพื่อดูแนวโน้ม หรือพฤติกรรมของระบบเมื่อมีค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เปลี่ยนไป ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้บนระบบจำลองจะมีความใกล้เคียงกับการทำงานจริงมากกว่าแบบจำลอง เช่น สามารถกำหนดพฤติกรรมการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณรูปแบบต่างๆ การเคลื่อนที่ของสถานี และโพรโทคอลการหาเส้นทาง สำหรับระบบจำลองที่นิยมใช้ในการจำลองระบบเครือข่าย คือ Network Simulator 2 (ns2) จาก Information Sciences Institute [ISI] (1999) เพราะนักวิจัยสามารถดาวน์โหลดต้นฉบับโปรแกรมทั้งหมดได้จากเว็บไซต์หลัก (<http://isi.edu/nsnam/ns/index.html>) และมีมอดูลของโพรโทคอลสำคัญที่หลากหลาย ถึงแม้ว่าปัจจุบันนี้จะมีพัฒนา Network Simulator 3 (ns3) แล้ว แต่ยังคงขาดมอดูลที่จำเป็นอีกมาก โดยในหลายงานวิจัย (Ansel *et al.*, 2004, 2006; Abdel-Hady and Ward, 2007; Kim and Cho, 2007; Lee *et al.*, 2007; Ke *et al.*, 2008; Gao *et al.*, 2008) ยังคงวัดผลด้วยระบบจำลอง ns2

การวัดผลด้วยระบบทดสอบ เป็นการนำโพรโทคอลที่ออกแบบขึ้นมาพัฒนาบนแพลตฟอร์มที่เป็นอุปกรณ์และซอฟต์แวร์บนระบบจริง เช่น การพัฒนาส่วนปรับปรุงของโพรโทคอล AODV บนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ (Linux) การพัฒนาระบบโพลบนระบบปฏิบัติการลินุกซ์ การวัดผลบนระบบทดสอบจะมีการควบคุมสิ่งแวดล้อมเพื่อให้มีผลกับการทดลองน้อยที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทดลองส่งข้อมูลบนระบบเครือข่ายไร้สายแบบ IEEE 802.11g จะมีสัญญาณรบกวนพอสมควร เนื่องจากใช้งานความถี่ย่าน ISM (Industrial, Scientific and Medical) ซึ่งมีอุปกรณ์ที่ใช้งานอยู่หลากหลาย เช่น โทรศัพท์ไร้สาย (Cordless phone) อุปกรณ์บลูทูธ (Bluetooth) แอคเซสพอยต์ที่เปิดใช้งานอยู่บริเวณข้างเคียง การวัดผลบนระบบทดสอบจะมีค่าใช้จ่ายสูง เพราะต้องใช้อุปกรณ์จริง สถานที่จริง และการเพิ่มจำนวนอุปกรณ์ในการทดสอบทำได้ยาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาระบบทดสอบสาธารณะขนาดใหญ่เพื่อให้บริการนักวิจัยภายนอก เช่น การพัฒนาระบบ ORBIT (Raychaudhuri *et al.*, 2005) และระบบ PlanetLab (Peterson *et al.*, 2006) เพื่อให้ให้นักวิจัยสามารถนำโพรโทคอลที่ออกแบบมาทดสอบการทำงานบนเครือข่ายระยะไกลที่จัดเตรียมไว้

จากวิธีการการตรวจสอบและวัดประสิทธิภาพทั้งสามแบบ การวัดผลด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้ทรัพยากร และเวลาในการพัฒนาน้อยที่สุด การวัดผลด้วยระบบจำลองจะใช้เวลาในการพัฒนาน้อยกว่าระบบทดสอบ และการวัดผลบนระบบทดสอบจะใช้เวลาในการพัฒนามากที่สุด เพราะผู้พัฒนาจะต้องเข้าใจโครงสร้างกระบวนการทำงานของระบบจริง รวมถึงตำแหน่งที่จะนำโพรโทคอลไปติดตั้ง และวิธีการพัฒนาโพรโทคอล โดยความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์จากระบบทดสอบมีความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์สูงที่สุด เพราะทดสอบบนระบบ และสิ่งแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับการทำงานจริง ส่วนระบบจำลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลการทำงานบนระบบจริงลดลงตามลำดับ

ตัวอย่างวิธีการวัดประสิทธิภาพโพรโทคอลของงานวิจัยบางงาน เช่น งานวิจัยของ Oh and Chen (2007) เสนอแบบจำลองเพื่อหาค่าเวลาหน่วงของแพ็กเก็ตเสี่ยงในการส่งข้อมูลแบบ EDCA โดยวัดผลของแบบจำลองเปรียบเทียบกับระบบจำลอง ส่วน Ramos *et al.* (2007) เสนอการปรับปรุงโพรโทคอลการส่งข้อมูลบนมาตรฐาน IEEE 802.11e โดยอนุญาตให้เซสชันข้อมูลที่ส่งแบบ HCCA สามารถนำมาส่งแบบ EDCA ได้ เพื่อให้รองรับกับความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพของโพรโทคอลนี้ประเมินผลบนระบบทดสอบ งานของ Ghazizadeh and Fan (2010) เสนอแบบจำลองในการประเมินผลการส่งข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA และวัดผลประสิทธิภาพการส่งข้อมูลแบบ HCCA จากค่าผลลัพธ์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองเท่านั้น

ในงานวิทยานิพนธ์นี้แบ่งการปรับปรุงมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเสนอแบบจำลองการทำงานของ IEEE 802.11e แบบ HCCA และวัดผลความถูกต้องของแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระบบจำลอง ส่วนที่สองเสนอกระบวนการปรับค่า TXOP ตามความต้องการของเซสชันข้อมูลที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลา โดยการวัดประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการที่นำเสนอทำบนระบบจำลอง

4. การจัดการแถวคอย (Queue Management)

การรับส่งข้อมูลในระบบเครือข่ายท้องถิ่นที่จะต้องส่งผ่านระหว่างเราเตอร์จากต้นทางถึงปลายทาง โดยเราเตอร์แต่ละตัวจะมีระบบแถวคอยสำหรับพักข้อมูลของตนเอง ในกรณีที่มีข้อมูลไหลเข้ามาเก็บในแถวคอยของเราเตอร์มากกว่าที่จะรองรับได้ เราเตอร์ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการ Drop Tail ซึ่งจะทำให้ข้อมูลเข้ามาใหม่ถูกทิ้ง และเกิดความล่าช้าของการส่งข้อมูล เพราะต้นทางจะต้องส่งข้อมูลที่ถูกรั้งมาใหม่ (Retransmission) ในกรณีที่ต้นทางส่งด้วยโพรโทคอลทีซีพี (TCP: Transmission Control Protocol) ปลายทางที่ได้รับข้อมูลจะตอบกลับด้วย แพ็กเก็ต Acknowledgement ที่ระบุถึงจำนวนข้อมูลที่ได้รับ ซึ่งต้นทางจะตรวจสอบได้ว่า ข้อมูลที่ส่งเกิดสูญหาย ส่งผลให้ต้นทางเริ่มดำเนินการปรับอัตราการส่งข้อมูลตามกระบวนการควบคุมความคับคั่งของเครือข่าย (Network Congestion Control) โดยใช้วิธีการ Fast Retransmission/Fast Recovery เพื่อปรับค่าหน้าต่างการชนให้มีความเหมาะสม

จากวิธีจัดการแถวคอยข้างต้น การทิ้งแพ็กเก็ตที่เข้ามาใหม่จะเกิดขึ้นเมื่อแถวคอยเต็มเท่านั้น ซึ่งเป็นการจัดการแถวคอยแบบตั้งรับ (Passive) โดยรอให้เหตุการณ์เกิดขึ้นก่อนแล้วจึงแก้ไข ดังนั้นจึงเกิดงานวิจัยที่ต้องการจัดการแถวคอยแบบล่วงหน้า (Active) ซึ่งอนุญาตให้เราเตอร์ระหว่างทางสามารถส่งสัญญาณเตือนต้นทางให้ปรับอัตราการส่งข้อมูลก่อนความคับคั่งจะเกิดขึ้น เพื่อลดอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต (Packet loss) ส่งผลให้เกิดการใช้งานช่องสัญญาณ (Link Utilization) ได้อย่างเต็มที่ และมีค่าความหน่วงเวลาต่ำ โดยเสนอวิธีการสำหรับตรวจสอบความคับคั่งของแถวคอย และส่วนการทิ้งหรือทำเครื่องหมายแพ็กเก็ตที่เข้าในแถวคอยเพื่อส่งสัญญาณให้แก่ต้นทางก่อนที่แถวคอยจะเต็ม

งานวิจัยในการจัดการแถวคอยแบบล่วงหน้าสามารถแบ่งตามลักษณะของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบ่งบอกความคับคั่งของแถวคอยออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ 1) แบบแถวคอย (Queue based) โดยนำค่าความยาวของแถวคอยขณะนั้นหรือค่าเฉลี่ยมาพิจารณาความคับคั่ง 2) แบบอัตรา (Rate

based) ใช้วิธีการพิจารณาค่าความคับคั่งของแถวคอยจากอัตราเข้าของข้อมูล 3) แบบผสม (Hybrid: Queue and Rate based) บ่งบอกความคับคั่งจากความยาวของแถวคอย และอัตราเข้าของข้อมูล

การบ่งบอกความคับคั่งของแถวคอยโดยใช้พารามิเตอร์แบบแถวคอย เป็นกระบวนการที่ง่าย ระบบสามารถนำความยาวของแถวคอยมาใช้โดยไม่ต้องผ่านการคำนวณ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการ RED (Floyd and Jacobson, 1993) ซึ่งย่อมาจาก Random Early Drop จะไม่นำมาค่าความยาวแถวคอยมาพิจารณาโดยตรง แต่จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปความยาวแถวคอยเฉลี่ยก่อน เพราะเป็นค่าที่ต้องนำมาใช้ในการพิจารณาสำหรับตั้งค่าอัตราการทิ้งแพ็กเก็ต ซึ่งถ้าค่าความยาวแถวคอยเปลี่ยนแปลงบ่อยจะทำให้ระบบไม่เสถียร และเกิดการทิ้งแพ็กเก็ตโดยไม่จำเป็น โดย RED แบ่งการทำงานโดยใช้ค่า \min_{th} (Min Threshold) และ \max_{th} (Max Threshold) ออกเป็น 3 ช่วง คือ 1) ช่วงปกติ 2) ช่วงทิ้งบางแพ็กเก็ต มีอัตราการทิ้งแพ็กเก็ตเพิ่มแบบสมการเชิงเส้น ตามความยาวของแถวคอยเฉลี่ย และ 3) ช่วงทิ้งทุกแพ็กเก็ต ซึ่งความเร็วในการตอบสนองของระบบต่ออัตราการเข้ามาของแพ็กเก็ตในแถวคอยขึ้นอยู่กับค่า \min_{th} และ \max_{th} ที่กำหนดไว้ ตัวอย่างงานวิจัยที่พัฒนาอยู่บนพื้นฐานของ RED ได้แก่ Adaptive-RED (Floyd *et al.*, 2001) เป็นหลักการที่ใช้ปรับปรุงค่าความชันในช่วงที่ 2 ของ RED ตามความคับคั่งของข้อมูลในขณะนั้น อีกวิธีการที่นำค่าความยาวของแถวคอยมาพิจารณา คือ PI (Hollot *et al.*, 2002) โดยนำค่าความยาวของแถวคอยมาใช้ควบคู่กับค่าพารามิเตอร์อื่น ได้แก่ ค่าจำนวนเซสชันของทีซีพีที่ใช้งานขณะนั้น ค่าเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลไปกลับ (RTT: Round Trip Time) และค่าความจุของสัญญาณ โดยส่งค่าพารามิเตอร์เข้าสู่ระบบควบคุมป้อนกลับเพื่อควบคุมความยาวของแถวคอยไม่ให้เกินค่าที่กำหนด ซึ่งวิธีนี้มี การตอบสนองได้รวดเร็วกว่า RED

การบ่งบอกความคับคั่งของแถวคอยโดยใช้พารามิเตอร์แบบอัตรา จะใช้อัตราเข้าของข้อมูล (Arrival rate) ในการพิจารณา ซึ่งระบบต้องสามารถประมาณค่าของอัตราการส่งข้อมูลได้ ตัวอย่างระบบที่ใช้วิธีการนี้ได้แก่ GREEN (Wydrowski and Zukerman, 2002) เป็นการนำค่าประมาณอัตราเข้าของข้อมูลเปรียบเทียบกับความจุของสัญญาณที่กำหนด เพื่อนำมาคำนวณค่าเพื่อปรับอัตราการทิ้งแพ็กเก็ต โดยอัตราการทิ้งแพ็กเก็ตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเข้าของข้อมูลมากกว่าความจุที่ต้องการ และอัตราการทิ้งแพ็กเก็ตจะลดลงก็ต่อเมื่ออัตราเข้าของข้อมูลอยู่ภายในความจุที่กำหนด ซึ่งเป็นวิธีการที่พยายามปรับให้ความยาวของแถวคอยเป็นศูนย์ โดยความเร็วในการตอบสนองของระบบขึ้นอยู่กับความถี่ในการพิจารณาค่าอัตราเข้าของข้อมูล

การบ่งบอกความคับคั่งของแถวคอยโดยใช้พารามิเตอร์แบบผสม จะใช้อัตราเข้าของข้อมูล และความยาวของแถวคอยเพื่อพิจารณาควบคู่กัน งานวิจัยที่ใช้แบบผสม ได้แก่ REM (Athuraliya *et al.*, 2001; Jinsheng *et al.*, 2008) ย่อมาจาก Random Early Marking โดยนำค่าอัตราเข้าข้อมูล และความยาวแถวคอยมาคำนวณค่าราคา หลังจากนั้นนำค่าราคามาคำนวณเป็นอัตราการทิ้งแพ็กเก็ต โดยอัตราการทิ้งแพ็กเก็ตจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามราคาที่เพิ่มขึ้น จุดมุ่งหมายของ REM คือ ให้ความยาวของแถวคอยและอัตราเข้าของข้อมูลอยู่ในค่าที่กำหนด อีกวิธีการที่สามารถจัดอยู่ในแบบผสมเช่นกัน คือ BLUE (Feng *et al.*, 2002) เป็นวิธีการที่นำค่าความยาวของแถวคอย ค่าการสูญหายของแพ็กเก็ต และการใช้งานช่องสัญญาณ เข้ามาใช้ในการคำนวณเพื่อปรับอัตราการทิ้งแพ็กเก็ต วิธีการนี้จะเพิ่มอัตราการทิ้งแพ็กเก็ตเมื่อเกิดแพ็กเก็ตสูญหาย หรือความยาวแถวคอยขณะนั้นเกินกว่าค่าที่กำหนด และจะลดอัตราการทิ้งแพ็กเก็ตเมื่อแถวคอยว่าง หรือช่องสัญญาณว่าง โดยความเร็วในการตอบสนองของทั้งสองวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความถี่ในการพิจารณาเพื่อปรับค่าอัตราการทิ้งแพ็กเก็ต

จากงานวิจัยสำหรับการจัดการแถวคอยข้างต้นสามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาความคับคั่งของแถวคอยดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งค่าเหล่านี้ใช้สำหรับเป็นตัวบ่งชี้ให้ทราบถึงอัตราการเพิ่มความยาวของแถวคอยทั้งทางตรงและทางอ้อม จะเห็นได้ว่า นอกจากจะใช้พารามิเตอร์ที่เป็นความยาวของแถวคอยแล้ว ผู้วิจัยสามารถนำค่าอัตราการเข้าของข้อมูลนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลที่เข้ามาในแถวคอย รวมถึงกระบวนการที่ใช้ในการปรับลดความคับคั่งของแถวคอย ถ้างานวิจัยสามารถเลือกใช้ค่าได้อย่างเหมาะสมจะส่งผลให้ระบบตอบสนองการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว ใช้งานช่องสัญญาณอย่างเต็มประสิทธิภาพ ความหน่วงเวลาต่ำ และอัตราการทิ้งข้อมูลต่ำ

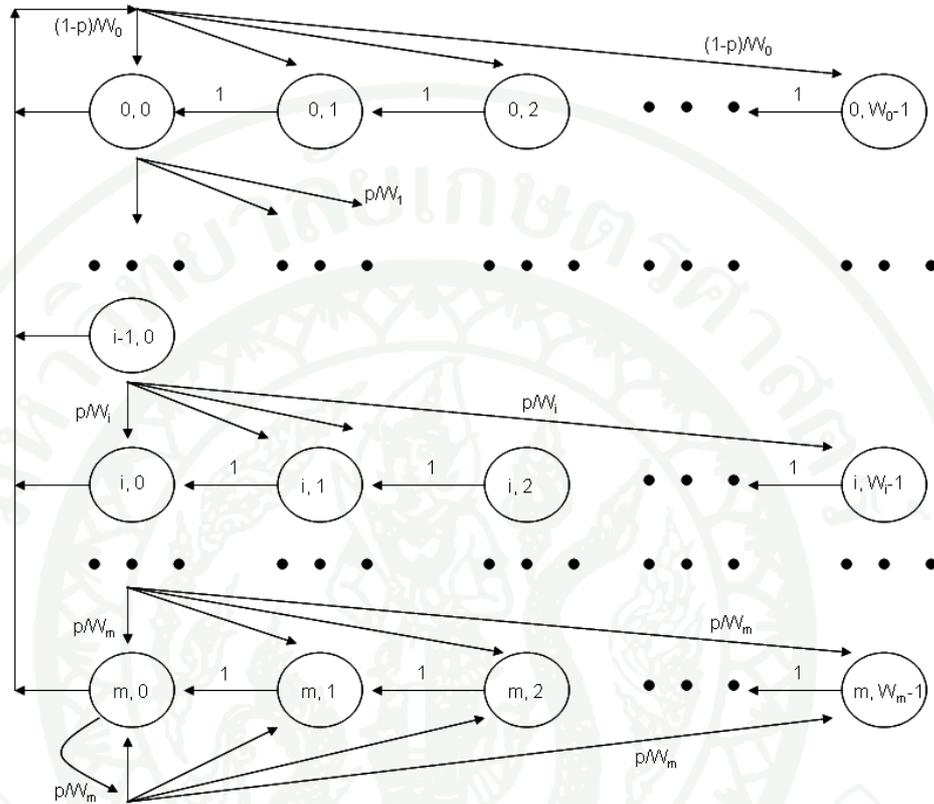
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับพิจารณาในการปรับแฉวคยแบบล่งหน้า

ค่าที่ใช้ในการพิจารณา	RED	Adaptive	BLUE	GREEN	REM	PI
	RED					
ความยาวของแฉวคย (Queue Length)				✓	✓	✓
ความยาวแฉวคยเฉลี่ย (Average Queue Length)	✓	✓				
อัตราการเข้าข้อมูล (Arrival Rate)				✓	✓	
อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต (Packet Loss Rate)			✓			
การใช้งานช่องสัญญาณ (Link Utilization)			✓			
จำนวนเซสชันของทีซีพี (TCP Sessions)						✓

5. แบบจำลองสำหรับการวัดประสิทธิภาพการทำงานของระบบเครือข่ายไร้สาย

แบบจำลอง Bianchi (Bianchi, 2000) ใช้สำหรับการประเมินประสิทธิภาพสถานะอิ่มตัว (Saturation condition) ของระบบเครือข่ายไร้สายแบบกระจาย (DCF: Distributed Coordination Function) บนมาตรฐาน IEEE 802.11 โดยแบบจำลองตั้งเงื่อนไขให้มีการส่งข้อมูลบนช่องสัญญาณที่เป็นอุดมคติ (Ideal channel) ซึ่งไม่มีสัญญาณรบกวน และทุกสถานีสามารถสื่อสารถึงกันได้ แบบจำลอง Bianchi ประกอบด้วยลูกโซ่มาร์คอฟ 2 มิติ (Two-dimensional Markov chain) ซึ่งมีจำนวน $m+1$ ชั้นถอยหลัง (Back-off stage) โดยแต่ละชั้นจะเป็นการนับถอยหลังของสถานี ค่าตัวแปรสถานะ (state variable) ของระบบนิยามด้วยกระบวนการ $\{s(t), b(t)\}$ แสดงดังภาพที่ 5 โดย $s(t)$ คือ กระบวนการสุ่มจำนวนชั้นถอยหลังที่มีค่าใน $\{0, \dots, m\}$ บนสถานีที่กำหนด ณ เวลา t ส่วน $b(t)$ คือ กระบวนการสุ่มตัวนับชั้นถอยหลังบนสถานีที่กำหนด และ W_i คือ ค่าหน้าต่างการชนมากที่สุดของชั้นถอยหลังลำดับที่ i การเปลี่ยนชั้นจะเกิดจากการชน (จากชั้น $i-1$ ไปชั้น i) และการส่งข้อมูลสำเร็จ (เปลี่ยนไปชั้น 0) ค่าการนับถอยหลังจะคำนวณจากหน้าต่างการชนของแต่ละชั้น ในการวิเคราะห์จะกำหนดให้มีจำนวนสถานีคงที่ และทุกสถานีมีแพ็กเก็ตที่รอส่งอยู่

เสมอ ค่าปริมาณงานของระบบ (System throughput) จะคำนวณจากสัดส่วนระหว่างขนาดของข้อมูลเฉลี่ยที่ส่ง (Payload) เทียบกับเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งข้อมูลให้สำเร็จ



ภาพที่ 5 ลูกโซ่มาร์คอฟของแบบจำลอง Bianchi

ที่มา: Bianchi (2000)

แบบจำลอง Bianchi เป็นที่นิยมในการวิเคราะห์การส่งข้อมูลบนระบบเครือข่ายไร้สายแบบกระจาย จึงมีงานวิจัยหลายงาน (Kong *et al.*, 2004; Hui and Devetsikiotis, 2005; Huang and Liao, 2007; Oh and Chen, 2007) ขยายผล และปรับปรุงแบบจำลอง Bianchi เพื่อวิเคราะห์การส่งข้อมูลบน IEEE 802.11e แบบ EDCA โดยงานวิจัยของ Kong *et al.* (2004) ศึกษาปริมาณงานของระบบเมื่อส่งข้อมูลที่มีความสำคัญแตกต่างกันจากค่าเอไอเอฟเอส และค่าหน้าต่างการแข่งขัน ส่วน Huang and Liao (2007) วิเคราะห์ค่าประมาณงานของระบบ ค่าความหน่วง และความพรั่าของการส่งข้อมูลแบบ EDCA ส่วน Oh and Chen (2007) เพิ่มการคำนวณค่าจำกัดในการพยายามส่ง (Retry limit) ของ EDCA เพื่อศึกษาผลกระทบต่อคุณภาพการส่งข้อมูลเสียง นอกจากนี้ Hui and Devetsikiotis (2005) เสนอแบบจำลองใหม่เพื่อคำนวณประสิทธิภาพที่สภาวะอิมตัวของเครือข่ายไร้

สายด้วยการรวมแบบจำลอง Bianchi และ Cali (Cali *et al.*, 1998) ที่มีจุดเด่นแตกต่างกัน เพื่อให้มีความง่าย และมีความแม่นยำในการวิเคราะห์ค่าประมาณงานของระบบ และค่าความหน่วง จากค่าพารามิเตอร์ EDCA ที่แตกต่างกัน

งานวิจัยของ Kuan and Dimyati (2009) นำเสนอแบบจำลองมาร์คอฟแบบ finite time-horizon เพื่อศึกษาปริมาณการใช้งานระบบ (System utilization) ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นการใช้งาน จนกระทั่งถึงช่วงภาวะสถานะคงตัวของระบบที่มีการทำงานแบบ EDCA และ HCCA สลับกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมีเฉพาะค่าการใช้งานระบบเท่านั้น

ส่วน Rashid *et al.* (2008) นำเสนอโครงสร้างการวิเคราะห์ระบบแถวคอยสำหรับการวัดผลประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลแบบ HCCA โดยใช้ตัวแบบ Ph/Ph/1 ที่มีการหยุดพักและมีเวลาให้บริการที่จำกัด การแจกแจงเวลาให้บริการของเฟรมจะขึ้นอยู่กับขนาดของเฟรม และค่าอัตราส่งข้อมูลในชั้นฟิลิคอลล ในงานนี้ค่าอัตราส่งข้อมูลในชั้นฟิลิคอลลกำหนดให้มีค่าคงที่และทำงานบนช่องสัญญาณอุดมคติ นิยามเวลาการเข้ามาและเวลาการให้บริการของเฟรมข้อมูลด้วยการแจกแจงแบบ phase-type (Ph) ระบบแถวคอยที่นำเสนอเป็นแบบลูกโซ่มาร์คอฟชนิดไม่ต่อเนื่อง (Discrete time Markov chain) สำหรับกระบวนการเกิด-ตาย-เสมือน (Quasi-birth-death process) โดยมีเมทริกซ์เปลี่ยนสถานะขนาดใหญ่ที่ภายในประกอบด้วยเมทริกซ์ย่อยจำนวนมาก ลูกโซ่มาร์คอฟจะเปลี่ยนสถานะตามช่วงเวลา (Slot time) การหาค่าการแจกแจงภาวะสถานะคงตัวของแต่ละช่วงเวลาจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Matrix-analytic ซึ่งค่าของเมทริกซ์ย่อยทั้งหมดจะต้องคำนวณให้เรียบร้อยก่อนทุกครั้ง คำตอบที่คำนวณได้จากภาวะสถานะคงตัวจะใช้สำหรับการประเมินผลประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่ การแจกแจงความหน่วงของแพ็กเก็ต การแจกแจงความยาวของแถวคอย และอัตราการสูญหายแพ็กเก็ต

Ghazizadeh and Fan (2010) ออกแบบโครงสร้างระบบแถวคอยสำหรับการวัดผลประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลแบบ HCCA ที่มีโพรโทคอล ARQ (Automatic repeat request) เพื่อจัดการแพ็กเก็ตที่ส่งผิดพลาด ซึ่งปรับปรุงจากงานของ Rashid *et al.* (2008) โดยใช้ลูกโซ่มาร์คอฟชนิดไม่ต่อเนื่องแบบ DMAP/Ph/1 การเข้ามาของแพ็กเก็ตนิยามด้วย DMAP (Discrete-time Markovian Arrival Process) เป็นกระบวนการแบบมาร์คอฟชนิดเวลาไม่ต่อเนื่อง ซึ่งอนุญาตให้เวลาการเข้ามาระหว่างแพ็กเก็ตเกิดสหสัมพันธ์ได้ ซึ่งเหมาะกับการแจกแจงของข้อมูลหลายชนิด ระบบแถวคอยที่นำเสนอรองรับการวิเคราะห์การส่งข้อมูลแบบหลายอัตรา (Multi-rate) บนช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน การปรับอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิลิคอลลจะเลือกจากค่าที่เหมาะสมที่มีอัตราสูญเสีย

หายของแพ็กเก็ตเป็นไปตามค่าที่กำหนด ค่าช่องสัญญาณจะคำนวณจากแบบจำลองลูโกโซมาร์คอฟ สภาวะจำกัดที่กำหนดค่าช่องสัญญาณจางหายซ้ำ และความถี่ต่อเพลอร์คิงที่ การแก้ปัญหาเพื่อหาค่า ภาวะสถานะคงตัวใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ Matrix-analytic กับเมทริกซ์เปลี่ยนสถานะขนาดใหญ่ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระบบแถวคอยของ Ghazizadeh and Fan (2010) จะมีค่าใกล้เคียงกับการทำงานจริงแบบ HCCA แต่การสร้างแบบจำลอง และการคำนวณเพื่อหาผลลัพธ์มีความซับซ้อนสูง

จากแบบจำลองสำหรับการวัดผลการทำงานแบบ HCCA ข้างต้น พบว่า แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับการทำงานจริง และมีวิธีการคำนวณที่ซับซ้อน ในงานวิทยานิพนธ์นี้แนะนำเสนอแบบจำลอง เพื่อคำนวณเวลาเฉลี่ยของเฟรมข้อมูลที่จะต้องรอในชั้น MAC ก่อนจะสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณ ภายใต้การทำงานแบบ IEEE 802.11e แบบ HCCA ซึ่งค่าเวลารอเฉลี่ยข้อมูลเป็นปัจจัยหลักที่มีผลกระทบต่อคุณภาพในการส่งข้อมูล ถึงแม้ว่า จากผลการศึกษาการส่งเฟรมข้อมูลจริงบนระบบ เครือข่ายจะมีคุณลักษณะการขึ้นต่อกันระยะยาว (Long-range dependency) และข้อมูลที่มีความคล้ายตนเอง (Self-similar traffic) ถ้านำคุณลักษณะของข้อมูลมาร่วมพิจารณาในการสร้างแบบจำลอง จะทำให้แบบจำลองมีความใกล้เคียงกับการทำงานจริง แต่จะมีความซับซ้อนในการคำนวณสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสมมุติให้กระบวนการมาถึงมีการแจกแจงแบบปัวซองเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณแบบจำลอง แต่ยังคงสามารถประเมินพฤติกรรมเวลารอของเฟรมข้อมูลที่ต้องการได้

6. การปรับปรุง IEEE 802.11e HCCA ให้รองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่

งานวิจัยที่นำเสนอการปรับปรุงมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA ให้รองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทตามลักษณะวิธีการที่ใช้ ได้แก่ 1) แบบป้อนค่ากลับ เพื่อปรับปรุงค่า TXOP 2) แบบเปลี่ยนวิธีการจัดการส่งข้อมูล 3) แบบข้ามชั้น (Cross-layer) และ 4) แบบผสม

6.1 แบบป้อนกลับ

แบบป้อนกลับเป็นแนวทางที่อนุญาตให้สถานีที่ส่งข้อมูลอยู่ใน HCCA สามารถส่งสัญญาณให้แก่ HC เพื่อดำเนินการปรับปรุงค่า TXOP ให้เหมาะสมตามความต้องการ ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.11e อนุญาตให้สถานีสามารถส่งค่าความยาวของแถวคอยแบบมาในฟิลด์ QoS Control ซึ่งอยู่ในส่วนหัวของ

ข้อมูล (frame header) งานวิจัยของ Ansel *et al.* (2004, 2006) นำเสนอระบบจัดการใหม่ เรียกว่า FHCF (Fair HCF) แทน HCF เดิม โดย FHCF สามารถนำค่าความยาวแฉกคอยที่ส่งมาของแต่ละสถานี เพื่อพิจารณาปรับค่าของ TXOP ให้เพียงพอต่อความต้องการทุกช่วงเริ่มต้นของ SI ในกรณีที่ช่วงเวลาที่ว่างอยู่เหลือใน HCCA ไม่เพียงพอต่อความต้องการที่เพิ่มขึ้น FHCF จะนำช่วงเวลาที่เหลืออยู่นั้นมา แบ่งปันให้แต่ละสถานีตามสัดส่วนที่เหมาะสม FHCF ใช้ค่าสถิติที่ประมาณผิดพลาดในอดีตมาคำนวณร่วมด้วยเพื่อเป็นกลไกที่ใช้ลดความผิดพลาดในการปรับค่าที่ TXOP จุดมุ่งหมายของงานวิจัยคือ ปรับค่าที่ TXOP ให้เพียงพอต่อความต้องการของข้อมูลอัตราส่งไม่คงที่ เพื่อให้แฉกคอยมีความยาวเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้ข้อมูลใช้ระยะเวลารอในแฉกคอยไม่นานก่อนที่จะถูกส่งออก ส่วนงานวิจัยของ Skyrianoglou *et al.* (2006) นำเสนอกระบวนการ ARROW (Adaptive Resource Reservation Over WLAN) เพื่อปรับค่า TXOP ให้เพียงพอต่อความต้องการของเซสชันในขณะนั้น ความต้องการของเซสชันนำมาจากค่าขนาดของแฉกคอยขณะนั้นที่แนบมากับเฟรมข้อมูลแรกหลังจากได้รับโพลจาก HC โดยค่า TXOP ใหม่ที่คำนวณได้อาจมีความผิดพลาดได้ เนื่องจากเป็นค่าความต้องการของเซสชันในรอบ SI ก่อนหน้า ซึ่งอาจจะมีปริมาณข้อมูลเข้ามาในแฉกคอยเพิ่มสูงขึ้น การคัดเลือกลำดับเซสชันที่จะโพลโดย HC จะใช้วิธีการเลือกแบบ EDF (Earliest deadline first) เพื่อให้เซสชันที่ข้อมูลใกล้เส้นตายมากที่สุดได้ส่งข้อมูลก่อน สำหรับงานวิจัยของ Ramos *et al.* (2007) ใช้ความยาวของแฉกคอยในการป้อนกลับให้แก่ HC เช่นกัน โดยแต่ละสถานีจะมีค่า TXOP เท่าเดิมเหมือนตอนกระบวนการรับเข้า หลังจากจบการส่งข้อมูลในช่วง TXOP ปกติแล้ว ถ้า HC ตรวจสอบว่า สถานียังมีข้อมูลเหลืออยู่ในแฉกคอย HC จะโพลสถานีนั้นเพิ่มในช่วงที่เหลืว่างของ HCCA ขณะเดียวกันถ้าช่วงว่างของ HCCA ไม่เพียงพอ และมีการใช้งานในช่วง EDCA น้อย HC จะส่งสัญญาณให้สถานีนั้นสามารถไปแย่งส่งในช่วง EDCA ได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้จะไม่สามารถรองรับคุณภาพของข้อมูลเมื่อมีการใช้งานเครือข่ายไร้สายอย่างคับคั่งทั้งในแบบ EDCA หรือ HCCA ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ไม่สามารถส่งข้อมูลที่เกินเพิ่มขึ้นได้ ส่งผลให้เกิดการตกค้างของข้อมูลในแฉกคอย และเวลาในการรอส่งเพิ่มขึ้น

6.2 แบบเปลี่ยนวิธีการจัดการส่งข้อมูล

แบบเปลี่ยนวิธีการจัดการส่งข้อมูล เป็นแนวทางที่หาค่าพารามิเตอร์ หรือวิธีในการส่งข้อมูลที่ เหมาะสมเพื่อใช้ในการรองรับข้อมูลที่อัตราส่งไม่คงที่ และสามารถประกันค่าความหน่วงเวลาที่ เกิดขึ้น ในงานวิจัยของ Higuchi *et al.* (2007); Foronda *et al.* (2007) เสนอปรับปรุงวิธีการจัดการส่ง ข้อมูลโดยนำหลักการของโทเค็นบักเก็ต (Token bucket) และลาเท็นซี-เรท (Latency-Rate) มาแทน ซึ่งสามารถประกันค่าความหน่วงเวลาได้ โดยสถานีจะส่งค่าพารามิเตอร์ใหม่ให้แก่ HC แทนค่าที่ระบุใน มาตรฐาน ได้แก่ ขนาดของบักเก็ต (Bucket size) อัตราบักเก็ต (Bucket rate) ขนาดของแพ็กเก็ตที่ใหญ่

ที่สุด (Maximum packet size) และค่าความหน่วงเวลาที่มากที่สุดที่ยอมรับได้ (Maximum allowable delay) หลังจากนั้น HC จะนำค่ามาพิจารณาโดยใช้หลักการของลาเท็นซี-เรท สำหรับคำนวณหาค่าประมาณของ SI และ TXOP ที่เหมาะสม เพื่อให้ทุกสถานีใช้งานช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีค่าความหน่วงเวลาที่ยอมรับได้ แต่วิธีการนี้ใช้เวลาในการคำนวณนาน เนื่องจากสมการมีความซับซ้อนสูง

6.3 แบบข้ามชั้น

แบบข้ามชั้น เป็นหลักการที่อนุญาตให้มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างชั้นเพื่อให้มีแต่ละชั้นมีข้อมูลเพียงพอในการตัดสินใจ โดยงานวิจัยของ Shankar and Schaar (2007) เสนอวิธีการ 2 ส่วนคือ 1) กระบวนการรับเข้าควรคำนวณด้วยค่าขนาดของช่องสัญญาณที่ใช้ได้จริงขณะนั้น 2) นำเอาหลักการข้ามชั้นมาใช้งาน โดยเน้นให้โปรแกรมประยุกต์วิดีโอแลกเปลี่ยนข้อมูลกับชั้น MAC ซึ่งโปรแกรมประยุกต์จะต้องแบ่งสายวิดีโอหลักออกเป็นสายย่อย (Sub flow) ตามชนิดของเฟรมวิดีโอที่มีความสำคัญ และมีความทนทานต่อความหน่วงเวลาที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน จากนั้นโปรแกรมประยุกต์จะส่งวิดีโอแบบแยกสายลงมาในชั้น MAC และสถานีจะเริ่มดำเนินการส่งคำร้องขอการส่งวิดีโอของแต่ละสายให้แก่ HC ผลจากงานวิจัยพบว่า การส่งด้วยวิธีนี้ทำให้ระบบสามารถรองรับจำนวนวิดีโอได้มากขึ้น

6.4 แบบผสม

แบบผสม เป็นแนวทางที่ใช้วิธีการหลายแบบผสมกันเพื่อให้ IEEE 802.11e แบบ HCCA สามารถรองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ งานวิจัยที่ใช้วิธีการแบบป้อนค่ากลับควบคู่กับแบบข้ามชั้น ได้แก่ งานวิจัยของ Kim and Cho (2007) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมเฟรมพิเศษเพิ่มเติมจากมาตรฐานสำหรับส่งในกระบวนการป้อนกลับ โดยสถานีจะส่งข้อมูลป้อนกลับเป็นรายการจำนวนของข้อมูลที่ค้างอยู่ในแถวคอยแยกกลุ่มตามระยะเวลาที่รอคอย ซึ่งเป็นข้อมูลที่ส่งจากชั้นโปรแกรมประยุกต์วิดีโอเอ็มเพก (Mpeg Video) ให้แก่ชั้น MAC หลังจากที HC ได้รายละเอียดป้อนกลับจากทุกสถานีแล้ว ก็จะดำเนินการปรับปรุงค่า TXOP โดยให้ความสำคัญกับข้อมูลในแถวคอยที่รอนานที่สุดก่อน ในกรณีที่มีหลายสถานีต้องการส่งข้อมูลเพิ่ม HC จะดำเนินการกระบวนการปรับค่า TXOP ให้แก่ทุกสถานีอย่างเท่าเทียมกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการนำงานวิจัยมาใช้กับโปรแกรมประยุกต์ชนิดอื่น จะต้องปรับปรุงการทำงานชั้น MAC ของสถานีเพื่อให้สามารถแปลงข้อมูลจากชั้นโปรแกรมประยุกต์เป็นข้อมูลป้อนกลับได้

นอกจากงานที่ปรับปรุง IEEE 802.11e แบบ HCCA ให้รองรับข้อมูลอัตราไม่คงที่ทั้ง 4 แบบ แล้ว งานวิจัยของ Cicconetti *et al.* (2007) เสนอวิธีลดภาระในการประมวลผลของ HC ซึ่งวิธีนี้ประกอบด้วยส่วนการทำงาน 3 ส่วน คือ 1) กระบวนการรับเข้า ซึ่งใช้วิธีการอ้างอิงตามมาตรฐาน 2) การคำนวณตารางเวลาแบบออฟไลน์ (Off-line timetable computation) จะคำนวณเฉพาะกรณีที่มีการรับข้อมูลเข้าใหม่ โดยนำวิธีการ Earliest Deadline First (EDF) ร่วมกับ Stack Resource Policy (SRP) มาพิจารณาเพื่อสร้างตาราง และ 3) กระบวนการบังคับใช้ (Enforcement procedure) เป็นวิธีการที่ใช้ควบคุมการรับส่งข้อมูลให้ทำงานตามตารางเวลาที่คำนวณไว้ โดยวิธีการอ่านค่าจากตารางมีความซับซ้อน $O(1)$ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ไม่คำนึงถึงการรับส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่

จากการเปรียบเทียบคุณลักษณะงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นแสดงดังตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าวิธีการปรับปรุงมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA เพื่อให้รองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่นั้นทำได้หลายรูปแบบ เช่น ปรับปรุงกระบวนการรับเข้า ปรับปรุงวิธีการจัดส่งข้อมูล การปรับปรุงให้ชั้นโปรแกรมประยุกต์ให้สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลกับชั้น MAC เป็นต้น โดยค่าใช้จ่ายที่เสียไป (Trade-off) คือ การคำนวณมีซับซ้อนที่เพิ่มขึ้น ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบวิธีการสำหรับปรับปรุง IEEE 802.11e แบบ HCCA คือ ความซับซ้อนที่เกิดขึ้นจากการประมวลผล และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้น ความรวดเร็วในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล จำนวนเซสชันข้อมูลที่รองรับได้ และความสามารถในการรองรับคุณภาพได้ตามความต้องการของข้อมูล

ตารางที่ 2 คุณลักษณะงานวิจัยที่ปรับปรุงเพิ่มเติมจากมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA

งานวิจัย	คุณลักษณะของการจัดการ			
	กระบวนการรับเข้า	การจัดการส่งข้อมูล	แบบCross-layer	ข้อมูลอัตราไม่คงที่
Ansel <i>et al.</i> (2004); Ansel <i>et al.</i> (2006)	ตามมาตรฐาน	ปรับปรุงค่า TXOP จากข้อมูลป้อนกลับความยาวของแฉวคอย และค่าสถิติความผิดพลาดในอดีต	ไม่ใช่	สนับสนุน
Cicconetti <i>et al.</i> (2007)	ตามมาตรฐาน แต่ลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการคำนวณ	ตามมาตรฐาน	ไม่ใช่	ไม่สนับสนุน
Higuchi <i>et al.</i> (2007); Foronda <i>et al.</i> (2007)	พารามิเตอร์แบบโทเค็นบักเก็ต และพิจารณาโดยลาเท็นซี-เรท	ตามมาตรฐานค่า SI และ TXOP หากพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ตอนรับเข้า	ไม่ใช่	สนับสนุน
Skyrianoglou <i>et al.</i> (2006)	ตามมาตรฐาน	ปรับปรุงค่า TXOP จากข้อมูลป้อนกลับขนาดของแฉวคอยขณะนั้น และเลือกเซสชันโดยใช้ EDF	ไม่ใช่	สนับสนุน
Ramos <i>et al.</i> (2007)	ตามมาตรฐาน	จัดส่งข้อมูลตามมาตรฐาน แต่ถ้าสถานีต้องการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นก็อนุญาตให้ส่งในส่วน HCCA ที่ว่างหรือแย่งส่งในช่วง EDCA	ไม่ใช่	สนับสนุน
Shankar and Schaar (2007)	ตามมาตรฐาน แต่คำนวณจากค่าช่องสัญญาณที่ว่างจริงขณะนั้น	แบ่งข้อมูลวิดีโอออกเป็นสายย่อยๆ แล้วส่งแยกกัน ด้วยวิธีการมาตรฐาน	ใช่	สนับสนุน (เฉพาะวิดีโอ)
Kim and Cho (2007)	ตามมาตรฐาน	ปรับปรุงค่า TXOP จากข้อมูลป้อนกลับพิเศษของแฉวคอยจากสถานีโดยแยกกลุ่มตามเวลาที่รอส่ง	ใช่	สนับสนุน (เฉพาะวิดีโอ)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการทำระบบจำลอง
 - 1.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ รายละเอียดดังนี้
 - หน่วยประมวลผลกลาง Intel Core 2 Quad สัญญาณนาฬิกา 2.0 กิกะเฮิรตซ์
 - หน่วยความจำหลัก 4 กิกะไบต์
 - ฮาร์ดดิสก์ Serial ATA ขนาด 640 กิกะไบต์
2. ซอฟต์แวร์
 - 1.1 ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ ubuntu แบบ 32 บิต รุ่น 11.10
 - 1.2 ระบบจำลอง Network Simulator 2 (ns2) รุ่น 2.2.9 ที่เพิ่มเติมมอดูล ns2hcca และมอดูล Poission สำหรับจำลองการทำงาน IEEE 802.11e แบบ HCCA
 - 1.3 ชุดโปรแกรม Evalvid toolset สำหรับการประเมินคุณภาพวิดีโอ
 - 1.4 โปรแกรม gnuplot สำหรับสร้างกราฟจากผลการทดลอง

วิธีการ

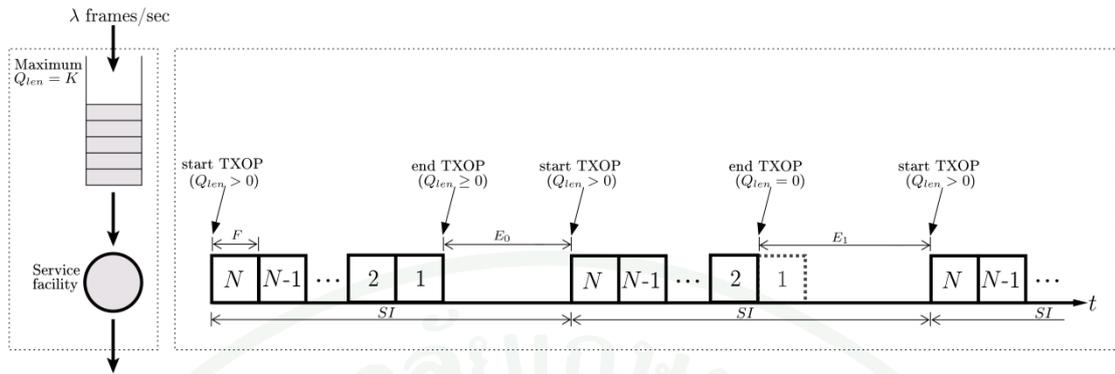
วิธีการสำหรับปรับปรุงมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA เพื่อสนับสนุนการส่งข้อมูลที่มีอัตราไม่คงที่ แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ 1) สร้างแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน IEEE 802.11e แบบ HCCA เพื่อวิเคราะห์ค่าเวลารอคอยเฉลี่ยของเฟรมข้อมูลที่เกิดขึ้น หลังจากรับเข้า ข้อมูลที่มีอัตราการส่งไม่คงที่ ณ ค่าอัตรารับเข้าเท่ากับอัตราการส่งที่ร้องขอ และค่าอัตรารับเข้าที่เพิ่มขึ้น ค่าเวลารอคอยเฉลี่ยที่วิเคราะห์ได้จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรองรับข้อมูลอัตราไม่คงที่ 2) การปรับปรุงกระบวนการรับส่งข้อมูลบน IEEE 802.11e แบบ HCCA เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงปริมาณการส่งข้อมูลที่มีอัตราไม่คงที่

1. แบบจำลองสำหรับวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน IEEE 802.11e แบบ HCCA

แบบจำลองที่นำเสนอออกแบบขึ้นสำหรับคำนวณเวลาเฉลี่ยเฟรมที่ข้อมูลจะต้องใช้ในการรอในชั้น MAC ก่อนจะสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูลภายใต้การทำงานแบบ IEEE 802.11e แบบ HCCA (ส่วนหนึ่งของงานวิจัยขั้นต้นได้รับการตีพิมพ์แล้วในบทความ Jansang *et al.*, 2009) ซึ่งจะมีรายละเอียดการวิเคราะห์พฤติกรรมของแฉกคอยที่ใกล้เคียงการทำงานจริง รายละเอียดของแบบจำลอง ได้แก่ 1) พฤติกรรมเมื่อแฉกคอยของสถานีไม่มีข้อมูลที่จะส่งในช่วงเวลา TXOP ที่ได้รับอันเนื่องมาจากชั้นโปรแกรมประยุกต์มีความไม่สม่ำเสมอในการสร้างข้อมูลให้แก่ชั้น MAC ซึ่งส่งผลให้ไม่มีการใช้งานช่องสัญญาณเพื่อส่งข้อมูล เมื่ออ้างอิงตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEEE 802.11e สถานีที่ไม่มีข้อมูลที่จะส่งจะต้องส่งเฟรม QoS-NULL ให้แก่ QAP เพื่อแจ้งให้ QAP เริ่มดำเนินการโพลสถานีอื่นต่อไป 2) ค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณเวลาส่งข้อมูลแบบ HCCA ที่รวมค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้อง เช่น frame preamble, frame header และช่วงระยะเวลาว่างระหว่างเฟรม ซึ่งทำให้แบบจำลองสามารถคำนวณค่าได้ใกล้เคียงกับระบบจริง 3) ค่าความน่าจะเป็นที่จะส่งเฟรมผิดพลาด (Probability of frame transmission error) ที่เกิดจากการเข้ารหัสสัญญาณ (Modulation scheme) สัญญาณรบกวน (Interference) การจางหายของสัญญาณ (Channel fading) และกระจายคลื่นสัญญาณเป็นหลายวิถี (Multipath propagation) จะส่งผลถึงร้อยละของจำนวนเฟรมที่ส่งสำเร็จที่ถึงสถานีปลายทางบนเงื่อนไขของช่องสัญญาณที่ไม่เป็นอุดมคติ (Non-ideal channel condition)

การส่งข้อมูลจากสถานีใดๆ ในระบบเครือข่ายไร้สายอาจมีการส่งข้อมูลหลายๆ เซสชันพร้อมกันทั้งที่เป็นเวลาจริง และที่ไม่ใช่เวลาจริง เพื่อความง่ายในการนำเสนอและวิเคราะห์แบบจำลองกำหนดให้ 1 สถานีมีการส่งข้อมูล 1 เซสชันเท่านั้น

การส่งข้อมูลของสถานีจะเริ่มต้นหลังจากที่ QAP ตอบรับการร้องขอของเซสชันที่ต้องการส่งข้อมูล และเพิ่มเซสชันนั้นเข้าสู่รายการโพล สถานีนั้นจะได้รับอนุญาตจาก QAP ให้ส่งข้อมูลในระยะเวลา TXOP ของแต่ละรอบ SI แสดงดังภาพที่ 6 (ซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณค่า TXOP อยู่ในส่วนการตรวจเอกสารหัวข้อที่ 2 เรื่องกระบวนการทำงานของ IEEE 802.11e แบบ HCCA)



ภาพที่ 6 เฟรมข้อมูลที่ QAP อนุญาตให้สถานีแต่ละสถานีส่งข้อมูลในแต่ละรอบ SI

กำหนดให้ K คือ จำนวนเฟรมที่มากที่สุดที่แฉวยของเซสชันในสถานีจะรองรับได้ โดยแอปพลิเคชัน (โปรแกรมประยุกต์เวลาจริง) ที่สถานีจะสร้างข้อมูลด้วยอัตราส่งข้อมูลเฉลี่ย ρ บิตต่อวินาที และอัตราการสร้างเฟรมเฉลี่ย λ เฟรมต่อวินาที

กำหนดให้ F คือ เวลาที่ใช้ในการส่งเฟรมที่มีหน่วยเป็นวินาที ณ ค่าอัตราส่งข้อมูลเฉลี่ยในชั้นฟิสิกอล รายละเอียดการคำนวณแสดงในสมการที่ (36) และ N คือ จำนวนของเฟรมที่อนุญาตให้ส่งได้ในแต่ละช่วง SI ที่ได้รับการจัดสรรโดย QAP

กำหนดให้ E_j คือ เวลาที่เซสชันใช้รอเพื่อจะส่งข้อมูลในช่วง SI ถัดไป โดย j คือจำนวนเฟรมที่เหลืออยู่ที่สามารถใช้ในการส่งข้อมูลได้หลังจากได้รับการจัดสรร เช่น ถ้าสถานีใช้จำนวนเฟรมที่ได้รับจัดสรรทั้งหมด จะส่งผลให้ค่า j เป็น 0 ถ้าแฉวยในสถานีว่างก่อนที่จะใช้เฟรมที่ได้รับจัดสรรจนหมด ส่งผลให้ $j > 0$ รายละเอียดในการคำนวณแสดงดังสมการที่ (4)

$$E_j = SI - (N - j) \times F \quad j \in [0, N] \quad (4)$$

กำหนดให้ X คือ ตัวแปรสุ่มสำหรับจำนวนเฟรมที่สร้างขึ้นระหว่างการส่งเฟรมในช่วงเวลา F โดยสมมติให้ X มีการแจกแจงแบบปัวซอง (Poisson distribution) ด้วยความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $P_x(x)$ รายละเอียดดังสมการที่ (5)

$$P_x(x) = \begin{cases} \frac{(\lambda F)^x e^{-\lambda F}}{x!}, & x = 0, 1, 2, \dots \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

กำหนดให้ Y_j คือ ตัวแปรสุ่มสำหรับจำนวนเฟรมที่สร้างขึ้นในช่วงเวลา E_j โดยมีการแจกแจงแบบปัวซอง ด้วยความหนาแน่นความจะเป็น $P_{Y_j}(y)$ รายละเอียดดังสมการที่ (6)

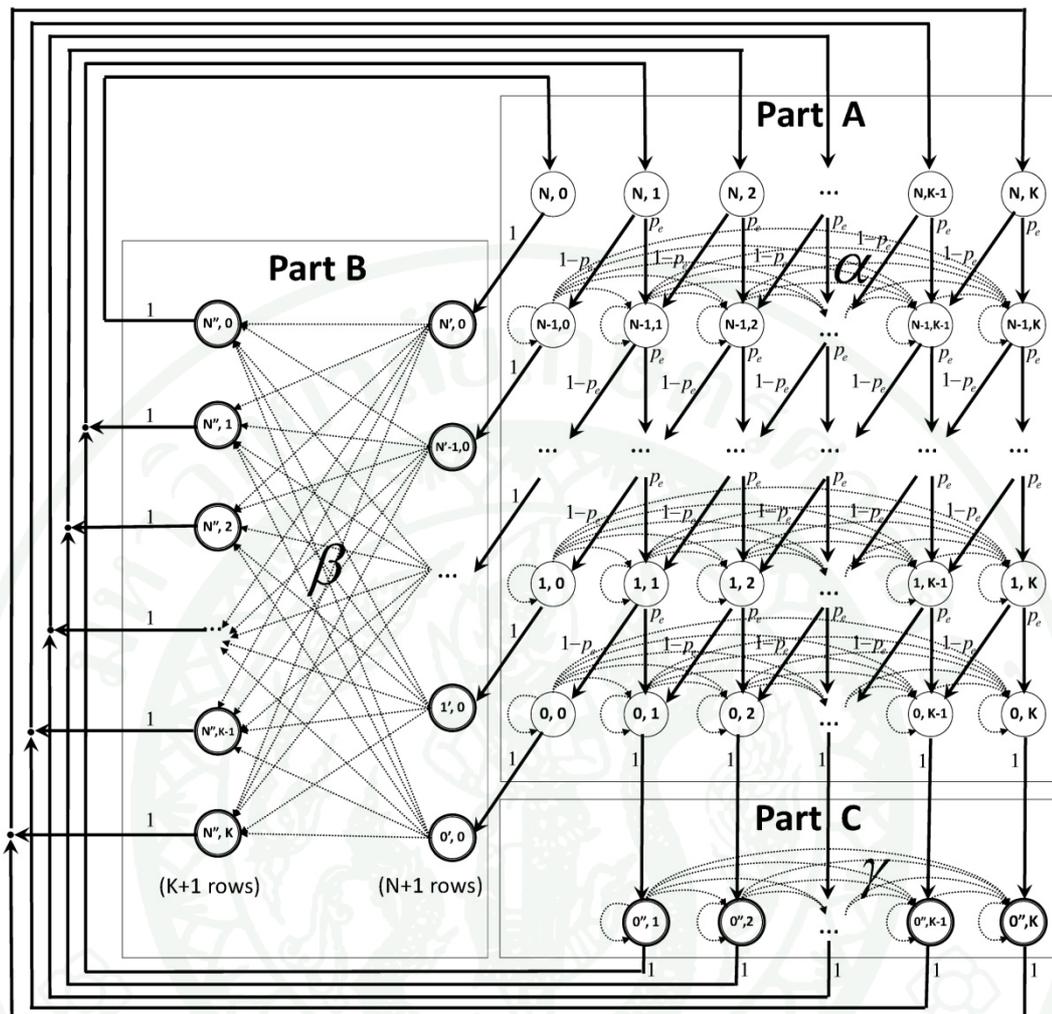
$$P_{Y_j}(y) = \begin{cases} \frac{(\lambda E_j)^y e^{-\lambda E_j}}{y!}, & y = 0, 1, 2, \dots \\ 0 & , \text{ otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

แบบจำลองที่นำเสนอสามารถรองรับการคำนวณทั้งแบบเงื่อนไขแบบอิ่มตัว (Saturated condition) และไม่อิ่มตัว (Non-saturated condition) โดยการคำนวณเงื่อนไขแบบอิ่มตัว คือ การคำนวณบนสมมติฐานว่า ทุกครั้งที่สถานีได้รับอนุญาตให้ส่งข้อมูลจะมีข้อมูลอยู่ในแถวคอยเสมอ ในทางตรงกันข้าม การคำนวณเงื่อนไขไม่อิ่มตัวจะอนุญาตให้มีสถานีมีข้อมูลหรือไม่มีข้อมูลอยู่ในแถวคอยได้เมื่อได้รับอนุญาตให้ส่งข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 6

ในแบบจำลองที่นำเสนอดังภาพที่ 7 ประกอบด้วยส่วนการทำงาน 3 ส่วน (A, B และ C) โดยในส่วน A นำเสนอสถานะในการทำงานการส่งข้อมูลเซสชันในช่วงระยะเวลา TXOP ส่วน B เป็นสถานะของเซสชันที่ไม่มีข้อมูลจะส่งก่อนหมดช่วงระยะเวลา TXOP การเปลี่ยนสถานะภายในส่วน B เกิดจากจำนวนเฟรมข้อมูลที่เข้ามาในช่วงระยะเวลา E_j (ดังภาพที่ 6) ด้วยความน่าจะเป็น $P_{Y_j}(y)$ และส่วน C เป็นสถานะของเซสชันที่หยุดส่งข้อมูลตามช่วงระยะเวลา TXOP ที่กำหนดเพื่อรอส่งข้อมูลในรอบ SI ถัดไป ซึ่งค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะภายในส่วน C มีค่าเป็น $P_{Y_0}(y)$ จากการเข้ามาของเฟรมข้อมูลในช่วงระยะเวลา E_0 (ดังภาพที่ 6)

1.1 ความน่าจะเป็นในการส่งเฟรมผิดพลาด

การส่งผ่านข้อมูลในช่องสัญญาณที่ไม่เป็นอุดมคติมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดความผิดพลาดขึ้นในบิตใดๆ ในเฟรมข้อมูลที่ได้รับ โดยค่าอัตราผิดพลาดของบิต (BER: Bit Error Rate เป็นอัตราเปรียบเทียบระหว่างจำนวนบิตที่ผิดพลาดเทียบกับจำนวนบิตที่ส่งทั้งหมด และไม่มีหน่วย) จะขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบของการเข้ารหัสสัญญาณที่เลือกใช้ ค่าสัญญาณรบกวน และผลกระทบจากการกระจายสัญญาณเป็นหลายวิถี ดังนั้นเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ จึงกำหนดให้ค่าอัตราผิดพลาดของบิตในการส่งเฟรมข้อมูลใดๆ เป็นค่าคงที่ (Lee *et al.*, 2007; AlSabbagh and Amin, 2009)



ภาพที่ 7 แบบจำลองสำหรับคำนวณค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรมในชั้น MAC

กำหนดให้ p_e^{data} และ p_e^{ack} เป็นความน่าจะเป็นในการส่งเฟรมผิดพลาดของเฟรมข้อมูล และเฟรม Acknowledgement ตามลำดับ โดยค่าความน่าจะเป็นทั้งสองค่าจะขึ้นอยู่กับขนาดของเฟรมที่มีค่า L_{data} และ L_{ack} (หน่วยเป็น บิต)

การคำนวณค่า p_e^{data} และ p_e^{ack} แสดงดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$p_e^{data} = 1 - (1 - BER)^{L_{data}} \quad (7)$$

$$p_e^{ack} = 1 - (1 - BER)^{L_{ack}} \quad (8)$$

ค่าความน่าจะเป็นในการส่งเฟรมผิดพลาด p_e ของการส่งเฟรมข้อมูลหนึ่งเฟรม เกิดขึ้นจากเฟรมข้อมูลที่ได้รับเกิดผิดพลาด หรือเฟรม Acknowledgement ผิดพลาด สามารถคำนวณดังแสดงในสมการที่ (9)

$$p_e = 1 - (1 - p_e^{data}) \cdot (1 - p_e^{ack}) \quad (9)$$

อย่างไรก็ตาม ในการส่งข้อมูลขนาดของเฟรม Acknowledge จะมีขนาดเล็ก ซึ่งมีผลน้อยมากกับค่า p_e ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณค่า p_e ที่คงความถูกต้องของผลลัพธ์ที่คำนวณสามารถแสดงวิธีการคำนวณดังแสดงในสมการที่ (10)

$$p_e = 1 - (1 - BER)^{L_{data} + L_{ack}} \quad (10)$$

1.2 รายละเอียดการเปลี่ยนสถานะของแบบจำลอง

ภายในแต่ละช่วงเวลา SI ของเซสชันใดๆ การทำงานจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วง TXOP (ขณะส่งข้อมูล) และช่วง non-TXOP (ขณะไม่มีการส่งข้อมูล)

ช่วง TXOP จะเริ่มต้นจากเหตุการณ์ start-TXOP การเปลี่ยนสถานะในช่วงนี้แสดงดังส่วน A ภาพที่ 7 โดยเส้นทึบจะแสดงการเปลี่ยนสถานะจากการจบช่วงเวลา F สำหรับส่งเฟรมข้อมูล ขณะที่เส้นไขว่ปลาแสดงการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นจากเฟรมข้อมูลเข้าในแถวคอยในช่วงเวลาส่งเฟรมข้อมูลบนช่องสัญญาณ

การจบช่วง TXOP จะเกิดจากเหตุการณ์แถวคอยว่าง (queue-empty) ไม่มีเฟรมข้อมูลเหลืออยู่ในแถวคอย หรือเหตุการณ์จบช่วงเวลา TXOP (end-TXOP) ซึ่งหมดช่วงเวลาที่อนุญาตให้ส่งข้อมูล โดยเหตุการณ์ทั้งสองจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากส่วน A ไปส่วน (B หรือ C) ที่ทำงานในช่วงไม่มีการส่งข้อมูล โดยส่วน B ดูแลเหตุการณ์ที่ออกจากช่วง TXOP เนื่องจากไม่มีเฟรมข้อมูลในแถวคอย และส่วน C ดูแลเหตุการณ์ที่ออกจากช่วง TXOP เนื่องจากหมดช่วงเวลาที่อนุญาต

ช่วงเวลาที่ไม่มีมีการส่งข้อมูลจะมีเฉพาะเหตุการณ์ที่เฟรมเข้าในแถวคอยเท่านั้น ส่วนการหยุดช่วงไม่มีการส่งข้อมูลจะเกิดจากเหตุการณ์ start-TXOP

1.2.1 การเปลี่ยนสถานะเมื่อส่งออกเฟรมบนช่องสัญญาณ (departures)

กำหนดให้ $c(t)$ เป็นกระบวนการสุ่ม (Stochastic process) ที่เป็นตัวแทนจำนวนเฟรมที่มีค่าอยู่ภายใน $\{0, 1, 2, \dots, N\}$ ของแต่ละช่วง SI ใดๆ โดยค่า $c(t)$ จะลดลงทีละหนึ่งเมื่อเฟรมส่งออกไปหนึ่งเฟรม โดยแต่ละเฟรมใช้เวลาในการส่ง F วินาที

กำหนดให้ $q(t)$ เป็นกระบวนการสุ่มที่เป็นตัวแทนความยาวของแถวคอยในสถานีที่มีขนาดอยู่ภายใน $\{0, 1, 2, \dots, K\}$ ในกรณีที่มีข้อมูลภายในแถวคอยเต็ม $q(t) = K$ ข้อมูลที่เข้ามาในแถวคอยจะถูกโยนทิ้ง

ในส่วน A จากภาพที่ 7 กำหนดให้ $d_{ij} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{c(t) = i, q(t) = j\}$ โดย $i \in [0, N]$ และ $j \in [0, K]$ เป็นการแจกแจงคงที่ (stationary distribution) ที่สถานะคงตัว (steady state) แสดงดังสมการที่ (11)

$$d_{i-1,j} = \begin{cases} (1 - p_e) \cdot d_{i,j+1} + p_e \cdot d_{i,j} & i \in [1, N], j \in [1, K - 1] \\ p_e \cdot d_{i,j} & i \in [1, N], j = K \end{cases} \quad (11)$$

สำหรับการเปลี่ยนสถานะจากส่วน A ไปส่วน B กำหนดให้ $g_{i',0} = d_{i,0}$ โดย $i \in [0, N]$ การเปลี่ยนสถานะจากส่วน A ไปส่วน C กำหนดให้ $g_{0'',j} = g_{0,j}$ โดย $j \in [1, K]$ และการเปลี่ยนสถานะจากส่วน B และส่วน C กลับไปส่วน A กำหนดให้ $d_{N,0} = g_{N'',0}$ และ $d_{N,j} = g_{N'',j} + g_{0'',j}$ โดย $j \in [1, K]$

1.2.2 การเปลี่ยนสถานะเมื่อเฟรมเข้ามาในแถวคอย (arrivals)

ในส่วน A ดังภาพที่ 7 ค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะหนึ่งขั้น (only non-zero one-step transition probabilities) แสดงด้วยสัญลักษณ์ α (รูปแบบย่อ คือ $\alpha\{i_1, j_1 | i_0, j_0\} = \alpha\{c(t + \delta) = i_1, q(t + \delta) = j_1 | c(t) = i_0, q(t) = j_0\}$) นิยามค่าดังสมการที่ (12) และ (13)

$$\alpha\{i, j | i, j - m\} = P_X(m) \quad i \in [0, N - 1], m \in [0, j], j \in [0, K - 1] \quad (12)$$

$$\alpha\{i, K|i, j\} = 1 - \sum_{m=0}^{K-j-1} P_X(m) \quad i \in [0, N-1], j \in [0, K] \quad (13)$$

กำหนดให้ T_{α_i} เป็นเมทริกซ์เปลี่ยนสถานะสำหรับ $\forall i \in [0, N-1]$ นิยามดังสมการที่ (14)

$$T_{\alpha_i} = \begin{pmatrix} \alpha\{i, 0|i, 0\} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \alpha\{i, 1|i, 0\} & \alpha\{i, 1|i, 1\} & 0 & \dots & 0 \\ \alpha\{i, 2|i, 0\} & \alpha\{i, 2|i, 1\} & \alpha\{i, 2|i, 2\} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha\{i, K|i, 0\} & \alpha\{i, K|i, 1\} & \alpha\{i, K|i, 2\} & \dots & \alpha\{i, K|i, K\} \end{pmatrix} \quad (14)$$

ในส่วน B ค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะหนึ่งขั้น แสดงด้วยสัญลักษณ์ β (รูปแบบย่อคือ $\beta\{i_1, j_1|i_0, j_0\} = \beta\{c(t+\delta) = i_1, q(t+\delta) = j_1|c(t) = i_0, q(t) = j_0\}$) นิยามค่าดังสมการที่ (15) และ (16)

$$\beta\{N'', j|i', 0\} = P_{Y_{i'}}(j) \quad i \in [0, N], j \in [0, K-1] \quad (15)$$

$$\beta\{N'', K|i', 0\} = 1 - \sum_{m=0}^{K-1} P_{Y_{i'}}(m) \quad i \in [0, N] \quad (16)$$

กำหนดให้ T_{β} เป็นเมทริกซ์เปลี่ยนสถานะ นิยามดังสมการที่ (17)

$$T_{\beta} = \begin{pmatrix} \beta\{N'', 0|0', 0\} & \beta\{N'', 0|1', 0\} & \beta\{N'', 0|2', 0\} & \dots & \beta\{N'', 0|N', 0\} \\ \beta\{N'', 1|0', 0\} & \beta\{N'', 1|1', 0\} & \beta\{N'', 1|2', 0\} & \dots & \beta\{N'', 1|N', 0\} \\ \beta\{N'', 2|0', 0\} & \beta\{N'', 2|1', 0\} & \beta\{N'', 2|2', 0\} & \dots & \beta\{N'', 2|N', 0\} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta\{N'', K|0', 0\} & \beta\{N'', K|1', 0\} & \beta\{N'', K|2', 0\} & \dots & \beta\{N'', K|N', 0\} \end{pmatrix} \quad (17)$$

ในส่วน C ค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะหนึ่งขั้น แสดงด้วยสัญลักษณ์ γ (รูปแบบย่อ คือ $\gamma\{i_1, j_1 | i_0, j_0\} = \gamma\{c(t + \delta) = i_1, q(t + \delta) = j_1 | c(t) = i_0, q(t) = j_0\}$) นิยามค่าดังสมการที่ (18) และ (19)

$$\gamma\{0'', j | 0'', j - m\} = P_{Y_{0''}}(m) \quad j \in [1, K - 1], m \in [0, j] \quad (18)$$

$$\gamma\{0'', K | 0'', j\} = 1 - \sum_{m=0}^{K-j-1} P_{Y_{0''}}(m) \quad j \in [1, K] \quad (19)$$

กำหนดให้ T_γ เป็นเมทริกซ์เปลี่ยนสถานะ นิยามดังสมการที่ (20)

$$T_\gamma = \begin{pmatrix} \gamma\{0'', 1 | 0'', 1\} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \gamma\{0'', 2 | 0'', 1\} & \gamma\{0'', 2 | 0'', 2\} & 0 & \cdots & 0 \\ \gamma\{0'', 3 | 0'', 1\} & \gamma\{0'', 3 | 0'', 2\} & \gamma\{0'', 3 | 0'', 3\} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma\{0'', K | 0'', 1\} & \gamma\{0'', K | 0'', 2\} & \gamma\{0'', K | 0'', 3\} & \cdots & \gamma\{0'', K | 0'', K\} \end{pmatrix} \quad (20)$$

1.3 การนิยามเวกเตอร์สถานะความน่าจะเป็น (State probability vector definition)

กำหนดให้ D_i เป็นเวกเตอร์สถานะความน่าจะเป็นซึ่งมีขนาด $K + 1$ สำหรับสถานะในแถวที่ i ในส่วน A ดังสมการที่ (21)

$$D_i = (d_{i,0} \ d_{i,1} \ d_{i,2} \ \cdots \ d_{i,K})^T \quad i \in [0, N] \quad (21)$$

กำหนดให้ $D_{0''}$ ดังสมการที่ (22) และ $D_{N''}$ ดังสมการที่ (23) คือ เวกเตอร์สถานะความน่าจะเป็นขนาด K และ $K + 1$ ตามลำดับเพื่อใช้คำนวณในส่วน B และส่วน C

$$D_{0''} = (g_{0'',1} \ g_{0'',2} \ g_{0'',3} \ \cdots \ g_{0'',K})^T \quad (22)$$

$$D_{N''} = (g_{N'',0} \ g_{N'',1} \ g_{N'',2} \ \cdots \ g_{N'',K})^T \quad (23)$$

กำหนดให้ $D_{N'}$ คือ เวกเตอร์สถานะความน่าจะเป็นขนาด $N + 1$ ดังสมการที่ (24)

$$D_{N'} = (g_{0',0} \ g_{1',0} \ g_{2',0} \ \dots \ g_{N',0})^T \quad (24)$$

รายละเอียดการคำนวณค่าเวกเตอร์สถานะความน่าจะเป็น D แสดงในหัวข้อการวิเคราะห์ค่าเวลารอเฉลี่ย

1.4 การวิเคราะห์ค่าเวลารอเฉลี่ย (Expected waiting time analysis)

จากแบบจำลองที่นำเสนอแสดงดังภาพที่ 7 ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรมสามารถคำนวณจากรายละเอียดที่ระบุในรหัสเทียม (Pseudo code) ขั้นตอนที่ 1, 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

หลังจากที่ QAP รับเซสชันข้อมูลที่ร้องขอเข้าใช้ช่องสัญญาณด้วยค่ารับเข้าเริ่มต้นจำนวน N เฟรม การคำนวณจะเริ่มจากการให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมด (แสดงดังรหัสเทียมขั้นตอนที่ 1) และแถวคอยของเซสชันว่างเปล่า

ตารางที่ 3 รหัสเทียมการคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาส่งเฟรมขั้นตอนที่ 1

บรรทัดที่	คำสั่งการทำงาน
1:	$D_i \leftarrow 0, \forall_i$
2:	$D_{N'}, D_{N''}, D_{0''} \leftarrow 0$
3:	$d_{N,0} \leftarrow 1$

ในขั้นตอนที่ 2 หลังจากที่ได้รับเฟรม QoS CF-Poll จาก QAP แล้ว QSTA จะเริ่มดึงเฟรมข้อมูลที่ละเฟรมออกจากแถวคอยเพื่อส่งในช่องสัญญาณ การเปลี่ยนสถานะแสดงในส่วน A ทิศทางลงข้างล่าง เมื่อส่งเฟรมเสร็จสิ้นภายในช่วงเวลา F ที่กำหนด เฟรมนั้นจะถูกดึงออกจากแถวคอย และปรับปรุงค่าเวกเตอร์สถานะความน่าจะเป็น

ตารางที่ 4 รหัสเทียมการคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะเวลาจัดส่งเฟรมขึ้นตอนที่ 2

บรรทัดที่	คำสั่งการทำงาน
1:	repeat
2:	$g_{N',0} \leftarrow d_{N,0}; d_{N-1,0} \leftarrow p_e \cdot d_{N,1}$
3:	for $j = 2$ to K do
4:	$d_{N-1,j-1} \leftarrow (1 - p_e) \cdot d_{N,j} + p_e \cdot d_{N,j-1}$
5:	end for
6:	$d_{N-1,K} \leftarrow 0$
7:	for $c = N - 1$ downto 1 do
8:	$D_c \leftarrow T_{\alpha_c} \times D_c$
9:	$g_{c',0} \leftarrow d_{c,0}$
10:	$d_{c-1,0} \leftarrow p_e \cdot d_{c,1}$
11:	for $j = 2$ to K do
12:	$d_{c-1,j-1} \leftarrow (1 - p_e) \cdot d_{c,j} + p_e \cdot d_{c,j-1}$
13:	end for
14:	$d_{c-1,K} \leftarrow 0$
15:	end for
16:	$D_0 \leftarrow T_0 \times D_0$
17:	$g_{0',0} \leftarrow d_{0,0}$
18:	$g_{0'',0} \leftarrow 0$
19:	for $j = 1$ to K do
20:	$g_{0'',j} \leftarrow d_{0,j}$
21:	end for
22:	$D_{N''} \leftarrow T_{\beta} \times D_{N'}$
23:	$D_{0''} \leftarrow T_{\gamma} \times D_{0''}$
24:	$d_{N,0} \leftarrow g_{N'',0}$
25:	for $j = 1$ to K do
26:	$d_{N,j} \leftarrow g_{N'',j} + g_{0'',j}$
27:	end for
28:	until the system is in the steady state (ค่าความแตกต่างของเวกเตอร์สถานะ D_i ในรอบของการทำซ้ำที่ติดกันมีค่าความแตกต่างกันน้อยกว่า 10^{-8})

QSTA จะหยุดกระบวนการดึงเฟรมข้อมูลด้วย 2 เงื่อนไข คือ 1) เมื่อดึงเฟรมข้อมูลออกจากแฉกคอยครบ N เฟรม และ 2) เมื่อแฉกคอยว่างเปล่าก่อนครบ N เฟรม หลังจากนั้น QSTA จะรอเวลาจนถึง SI รอบถัดไปเพื่อจะเริ่มส่งข้อมูล โดยระยะเวลารอ SI ในรอบถัดไปขึ้นอยู่กับว่า QSTA หยุดส่งข้อมูลด้วยเงื่อนไขข้อใดข้อหนึ่งข้างต้น ได้แก่ 1) หยุดส่งข้อมูลเนื่องจากส่งข้อมูลครบจำนวน N เฟรม ซึ่ง QSTA จะรอคอยด้วยช่วงเวลา E_0 และมีการแจกแจงความน่าจะเป็นของการเข้ามาของเฟรมด้วยพารามิเตอร์ γ แสดงในส่วน C 2) หยุดส่งข้อมูลเนื่องจากแฉกคอยว่างเปล่า เมื่อแฉกคอยว่างส่งผลให้เวลารอของ QSTA มีค่าเป็น $E_j, j \neq 0$ โดยการแจกแจงความน่าจะเป็นของเฟรมที่เข้ามาในแฉกคอยด้วยพารามิเตอร์ β แสดงในส่วน B

หลังจากคำนวณค่าความน่าจะเป็นของเวกเตอร์สถานะในส่วนของ B และ C แล้ว ค่าเวกเตอร์สถานะจะถูกนำมารวมกันดังแสดงในบรรทัดที่ 27 ของขั้นตอนที่ 2 จากนั้นจะนำค่าที่ได้ส่งกลับไปเป็นค่าเริ่มต้นของการคำนวณซ้ำของใน ส่วน A ในรอบ SI ถัดไป โดยการคำนวณจะทำซ้ำไปจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสถานะคงตัว ด้วยเงื่อนไข ค่าความแตกต่างของเวกเตอร์สถานะ D_i ในรอบของการทำซ้ำที่ติดกันมีค่าความแตกต่างกันน้อยกว่า 10^{-8} (ตามเงื่อนไข Steady state ของบรรทัดที่ 28)

การทำงานของระบบในแต่ละ SI แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วง TXOP ($N \times F$ วินาที) และช่วง non-TXOP ($SI - N \times F$ วินาที) โดยค่าความยาวเฉลี่ยของแฉกคอยสามารถคำนวณจากค่าความยาวแฉกคอยเฉลี่ยที่คำนวณจากทั้งสองช่วง หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้มาคำนวณค่าระยะเวลาเฉลี่ยที่อยู่ในแฉกคอย ($E[W]$) รายละเอียดการคำนวณแสดงดังขั้นตอนที่ 3 (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 รหัสเทียมการคำนวณหาค่าเฉลี่ยระยะเวลารอส่งเฟรมขั้นตอนที่ 3

บรรทัดที่	คำสั่งการทำงาน
1:	for $i = 0$ to N do
2:	calculate \bar{Q}_i {ดังสมการที่ (25)}
3:	end for
4:	calculate \bar{Q}_{TXOP} {ดังสมการที่ (26)}
5:	calculate $\bar{Q}_{nonTXOP}$ {ดังสมการที่ (27)}
6:	calculate \bar{Q} {ดังสมการที่ (28)}
7:	calculate $E[W]$ {ดังสมการที่ (29)}

หลังจากที่ระบบเข้าสู่สถานะสถานะคงตัว ค่าความยาวแถวคอยเฉลี่ยสำหรับช่วง TXOP (\bar{Q}_{TXOP}) จะคำนวณจากค่า \bar{Q}_i

กำหนดให้ \bar{Q}_i คือ ค่าความยาวเฉลี่ยของแถวที่ i วิธีการคำนวณแสดงดังสมการที่ (25)

$$\bar{Q}_i = \sum_{j=0}^K d_{i,j} \times j \quad i \in [0, N], d_{i,j} \in D_i \quad (25)$$

จากนั้นคำนวณค่า \bar{Q}_{TXOP} จากค่า \bar{Q}_i ที่ได้คำนวณได้ วิธีการคำนวณดังสมการที่ (26)

$$\bar{Q}_{TXOP} = \frac{\sum_{i=0}^N \bar{Q}_i}{N + 1} \quad (26)$$

เมื่อจบช่วงเวลา TXOP ระบบจะเข้าสู่ช่วง non-TXOP โดยการทำงานในช่วงนี้จะไม่มีการส่งข้อมูล แต่มีเฉพาะข้อมูลเข้าสู่แถวคอยเท่านั้น จากการแจกแจงความน่าจะเป็นของการเข้ามาของเฟรมข้อมูล พบว่า ค่าเฉลี่ยของการเข้ามาของเฟรมในช่วง non-TXOP มีค่าเป็น $\frac{(SI - N \times F)}{2} \lambda$ อย่างไรก็ตาม ความยาวของแถวคอยจะเพิ่มขึ้นจากแถวคอยที่เหลืออยู่หลังจากจบช่วง TXOP ซึ่งใช้แทนด้วย \bar{Q}_0 และความยาวของแถวคอยเฉลี่ยของช่วง non-TXOP แทนด้วย $\bar{Q}_{nonTXOP}$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (27)

$$\bar{Q}_{nonTXOP} = \bar{Q}_0 + \frac{(SI - N \times F)}{2} \lambda \quad (27)$$

ค่าความยาวเฉลี่ยของแถวคอย (\bar{Q}) ซึ่งคำนวณจากความยาวเฉลี่ยของแถวคอยในช่วง TXOP และ non-TXOP แสดงดังสมการที่ (28)

$$\bar{Q} = \left(\frac{N \times F}{SI} \right) \bar{Q}_{TXOP} + \left(\frac{SI - N \times F}{SI} \right) \bar{Q}_{nonTXOP} \quad (28)$$

หลังจากที่ได้ค่า \bar{Q} จึงสามารถที่จะคำนวณค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรมข้อมูล $E[W]$ ตามกฎของลิตเติล (Little's theorem) แสดงดังสมการที่ (29)

$$E[W] = \frac{\bar{Q}}{\lambda} \quad (29)$$

1.5 การปรับปรุงแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบง่าย (Simplified Model)

จากส่วน B ของแบบจำลองที่นำเสนอในภาพที่ 7 ค่าสถานะ $g_{i',0}$ แต่ละค่าจะต้องคำนวณจากค่าจาก $\beta_{i'}$ ที่ขึ้นอยู่กับค่าเวลารอเพื่อส่งข้อมูล ($E_{i'}$) โดยกระบวนการเพื่อคำนวณหาค่าต่างๆ มีความซับซ้อน ดังนั้นการปรับปรุงกระบวนการคำนวณให้สามารถลดขนาดของเวกเตอร์สถานะได้ โดยที่ยังคงสามารถเก็บรายละเอียดของผลลัพธ์ที่ต้องการ ส่งผลให้การคำนวณมีรูปแบบที่ง่ายขึ้น

แบบจำลองรูปแบบง่ายแสดงดังภาพที่ 8 โดย $g_{N',0}$ คือ สถานะที่รอเวลาเพื่อส่งข้อมูลในรอบ SI ถัดไปนานที่สุด และมีความน่าจะเป็นที่สูงที่สุดในขณะที่ $g_{0',0}$ คือ ค่าสถานะการรอเพื่อส่งข้อมูลในรอบ SI ถัดไปสั้นที่สุด และมีความน่าจะเป็นต่ำที่สุด โดยเวลารอเฉลี่ย (\bar{E}) เป็นค่าประมาณที่เป็นตัวแทนของเวลารอเพื่อส่งข้อมูลสำหรับทุกสถานะ $g_{i',0}$ และค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ ($\bar{\beta}$) สำหรับเป็นตัวแทนของค่า $\beta_{i'}$ รายละเอียดการเปลี่ยนแปลงค่าการเปลี่ยนสถานะและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องสำหรับแบบจำลองรูปแบบง่ายมีดังนี้

- ค่าสถานะทั้งหมด $g_{i',0}$ จะรวมเป็นค่าตัวแทนสถานะค่าเดียว $g_{0'',0}$ แสดงดังสมการที่ (30)

$$g_{0'',0} = \sum_{i=0}^N g_{i',0} \quad (30)$$

- ค่าเวลารอเพื่อส่งข้อมูลก่อน SI รอบถัดไป E_i จะใช้ค่า \bar{E} เป็นตัวแทน แสดงวิธีการคำนวณดังสมการที่ (31)

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \frac{\sum_{i=0}^N E_{j=1}}{N+1} \\ &= \frac{\sum_{i=0}^N (SI - (N - i)) \times F}{N + 1} \\ &= SI - \left(N - \frac{\sum_{i=0}^N i}{N + 1} \right) \times F \\ &= SI - (N - \bar{N}) \times F \\ &= E_{j=\bar{N}} \end{aligned} \quad (31)$$

- ค่าความน่าจะเป็นในการเปลี่ยนสถานะ β_i จะใช้ค่า $\bar{\beta}$ แทน โดยมีการนิยามดังสมการที่ (32) และ (33)

$$\bar{\beta}\{0'', j|0'', 0\} = P_{Y_N}(j) \quad , j \in [0, K-1] \quad (32)$$

$$\bar{\beta}\{0'', K|0'', 0\} = 1 - \sum_{m=0}^{K-1} P_{Y_N}(m) \quad (33)$$

- ค่าเมทริกซ์เปลี่ยนสถานะ T_Y จากของเดิมจะถูกแทนที่โดย T_{new} แสดงดังภาพที่ 8 ในส่วน C ซึ่งสามารถนิยามได้ดังแสดงในสมการที่ (34)

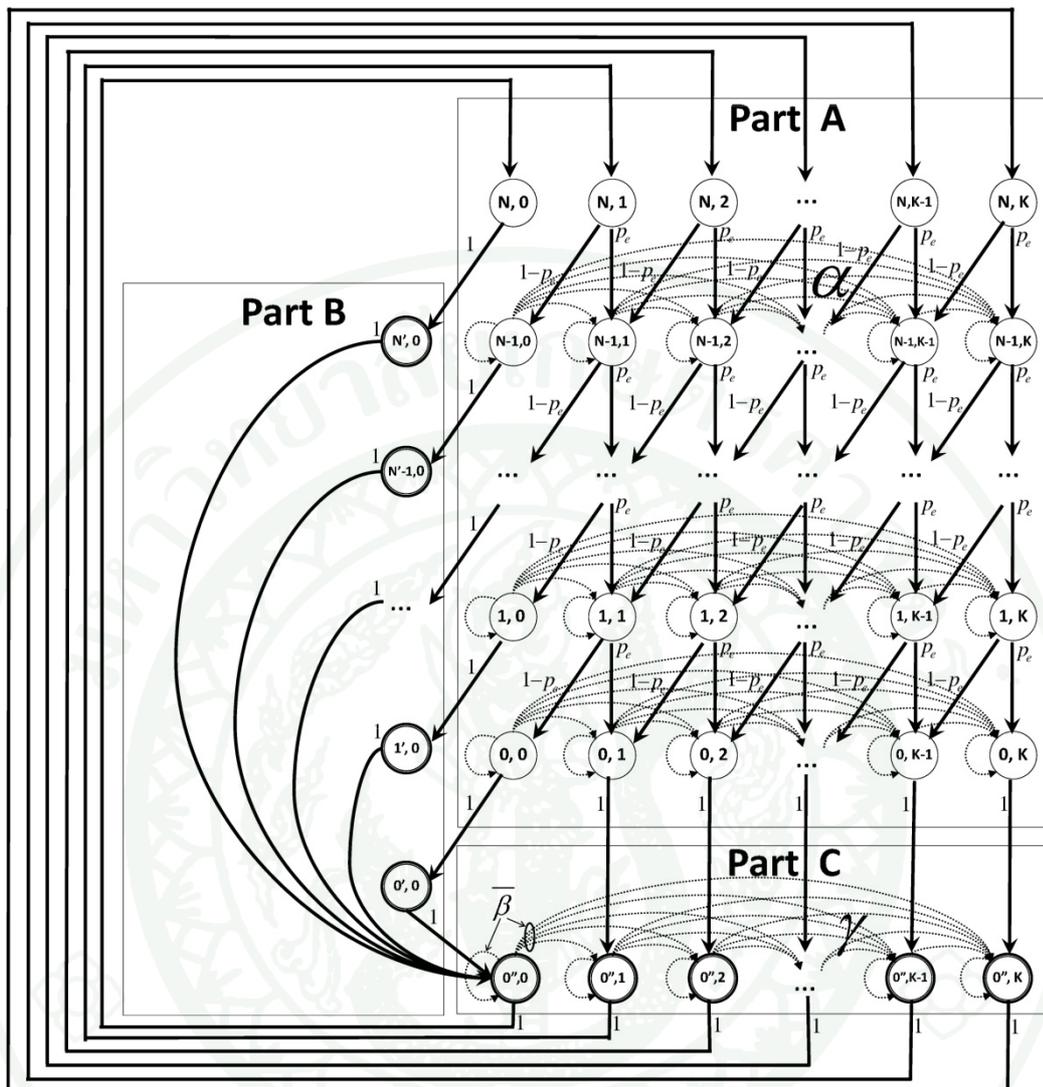
$$T_{new} = \begin{pmatrix} \bar{\beta}\{0'', 0|0'', 0\} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \bar{\beta}\{0'', 1|0'', 0\} & \gamma\{0'', 1|0'', 1\} & 0 & \dots & 0 \\ \bar{\beta}\{0'', 2|0'', 0\} & \gamma\{0'', 2|0'', 1\} & \gamma\{0'', 2|0'', 2\} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{\beta}\{0'', K|0'', 0\} & \gamma\{0'', K|0'', 1\} & \gamma\{0'', K|0'', 2\} & \dots & \gamma\{0'', K|0'', K\} \end{pmatrix} \quad (34)$$

- ปรับปรุงค่าเวกเตอร์สถานะ $D_{0''}$ จากสมการที่ (22) โดยเพิ่มสถานะ $g_{0'',0}$ แสดงดังสมการที่ (35)

$$D_{0''}^{new} = (g_{0'',0} \ g_{0'',1} \ g_{0'',2} \ g_{0'',3} \ \dots \ g_{0'',K})^T \quad (35)$$

- ปรับปรุงกระบวนการหาค่าเวลารอเฉลี่ยในรหัสเทียมขั้นตอนที่ 2 (ตารางที่ 4)
 - บรรทัดที่ 2 เปลี่ยนเป็น $g_{0'',0} \leftarrow d_{N,0}$; $d_{N-1,0} \leftarrow p_e \cdot d_{N,1}$
 - บรรทัดที่ 9 เปลี่ยนเป็น $g_{0'',0} \leftarrow g_{0'',0} + d_{c,0}$
 - บรรทัดที่ 22 - 27 เปลี่ยนเป็น

$$\begin{aligned} D_{0''} &\leftarrow T_{new} \times D_{0''} \\ D_N &\leftarrow D_{0''} \end{aligned}$$



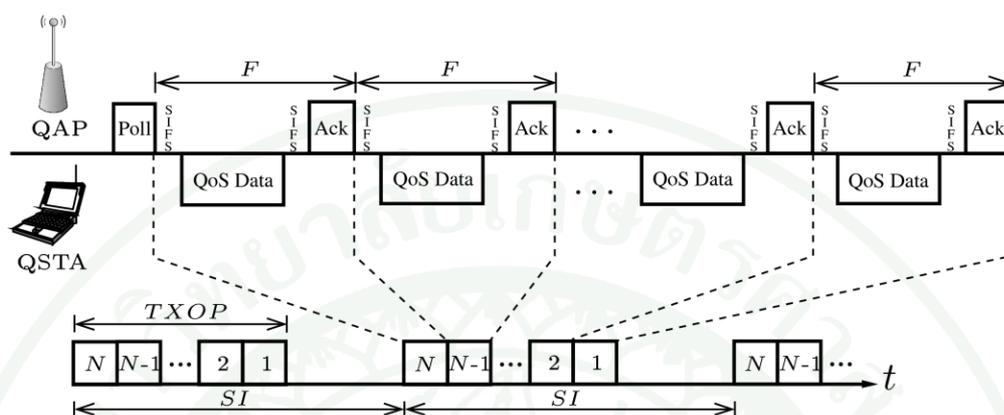
ภาพที่ 8 แบบจำลองรูปแบบง่ายสำหรับคำนวณค่าเวลารอคอยเฉลี่ยของเฟรมในชั้น MAC

1.6 การวิเคราะห์เวลาในการส่งข้อมูลแบบ HCCA

เวลาสำหรับการส่งเฟรมข้อมูล F ต้องทำการศึกษาแบบลงรายละเอียด เพื่อให้ผลการประเมินผลแบบจำลองมีความถูกต้อง โดยรูปแบบเวลาสำหรับการส่งเฟรมระหว่าง QAP และ QSTA แสดงดังภาพที่ 9

กระบวนการส่งข้อมูลจะเริ่มจาก QSTA ได้รับเฟรม QoS CF-Poll จาก QAP และมีข้อมูลกำลังรอส่งอยู่ในแฉวคอย หลังจากนั้น QSTA จะรอคอยด้วยช่วงเวลา SIFS ก่อนจะเริ่มดึงเฟรม

ข้อมูลออกจากแฉกคอย และเริ่มส่งข้อมูลบนช่องสัญญาณ หลังจาก QAP รับข้อมูลเรียบร้อย QAP จะรอช่วงเวลา SIFS ก่อนที่จะตอบเฟรม Acknowledgement ให้แก่ QSTA

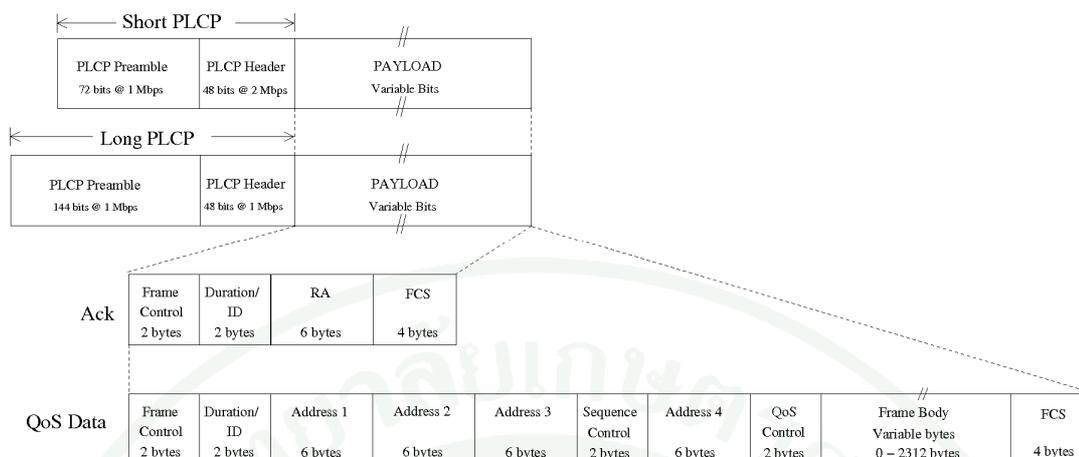


ภาพที่ 9 รูปแบบเวลาการส่งเฟรมระหว่าง QAP และ QSTA

การส่งเฟรมใน IEEE 802.11 จะเริ่มด้วยส่วน Physical Layer Convergence Procedure (PLCP) preamble ส่วน PCLP header และส่วนที่เป็นข้อมูล ดังนั้นเมื่อเฟรมข้อมูลมาถึงสถานี สถานีจะเริ่มตีความข้อมูลจากส่วน PLCP header เนื่องจากเป็นส่วนที่ระบุถึงอัตราเร็ว ความเร็ว และการเข้ารหัสในระดับชั้นฟิสิคอลลของเฟรมในส่วนถัดไป จากนั้นสถานีจึงเริ่มดำเนินการเตรียมการรับเฟรมในส่วนที่เป็นข้อมูล

ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b ส่วนของข้อมูล PCLP แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Long PCLP มีความยาว 144 บิต สำหรับการส่งข้อมูลที่อัตราเร็ว 1 หรือ 2 Mbps และ Short PCLP ความยาว 72 บิตสำหรับการส่งข้อมูลอัตราเร็ว 5.5 ถึง 11 Mbps

การส่งเฟรมข้อมูลแบบ Long PLCP ในส่วนของ preamble และ header จะส่งที่อัตราเร็ว 1 Mbps ส่วนที่เป็นข้อมูลจะส่งที่อัตราเร็วตามระบุไว้ใน header ขณะที่การส่งเฟรมแบบ Short PLCP จะส่ง preamble ที่อัตราเร็ว 1 Mbps และ header ที่อัตราเร็ว 2 Mbps ส่วนข้อมูลจะส่งตามอัตราเร็วตามที่ระบุไว้ใน header รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 รายละเอียดของเฟรมข้อมูลตามมาตรฐาน IEEE 802.11b

วิธีการคำนวณเวลา F (หน่วยเป็นวินาที) สำหรับการส่งเฟรมข้อมูลที่มีขนาด FB ไบต์ แสดงดังสมการที่ (36)

$$F = 2 \times SIFS + T_{QoS_Data} + T_{Ack} \quad (36)$$

สำหรับวิธีการคำนวณค่า T_{QoS_Data} (เวลาที่ใช้ส่งเฉพาะตัวเฟรมข้อมูล) และ T_{Ack} (เวลาที่ใช้ส่งเฉพาะตัวเฟรม Acknowledgement) แสดงดังสมการที่ (37) และ (38) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} T_{QoS_Data} &= T_{PLCP_Preamble} + T_{PLCP_Hdr} + T_{MAC_Hdr} + T_{FrameBody}(FB) \\ &= T_{PLCP_Preamble} + T_{PLCP_Hdr} + \frac{MAC_Hdr \times 8(bits)}{PhyRate_{Data}} + \frac{FB \times 8(bits)}{PhyRate_{Data}} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} T_{Ack} &= T_{PLCP_Preamble} + T_{PLCP_Hdr} + T_{Ack_Hdr} \\ &= T_{PLCP_Preamble} + T_{PLCP_Hdr} + \frac{Ack_Hdr \times 8(bits)}{PhyRate_{Basic}} \end{aligned} \quad (38)$$

กำหนดให้ค่า $T_{PLCP_Preamble}$ คือ เวลาที่ใช้ในการส่ง PLCP preamble ค่า T_{PLCP_Hdr} คือ เวลาที่ใช้ในการส่ง PLCP header ค่า $PhyRate_{Data}$ คือ ค่าอัตราเร็วในการส่งเฟรมข้อมูลชั้นฟิสิคอลล ค่า $PhyRate_{basic}$ คือ ค่าอัตราการส่งเฟรมข้อมูลพื้นฐานในชั้นฟิสิคอลล ค่า MAC_Hdr คือ ขนาดความยาวของส่วนหัวในชั้น MAC และค่า Ack_Hdr คือ ขนาดความยาวของส่วนหัวเฟรม Acknowledgement

2. การปรับปรุงมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA เพื่อรองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่

ตามมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA เมื่อ QAP ตรวจสอบเงื่อนไขดังสมการที่ (3) และรับเซสชันของสถานีเข้าไปในรายการโพลด้วยค่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่ร้องขอมา จากนั้น QAP จะดำเนินการโพลเซสชันนั้นในช่วง SI ถัดไป โดยกำหนดให้ส่งข้อมูลด้วยช่วงระยะเวลา TXOP คงที่ ตามค่าที่กำหนดตอนรับเซสชันเข้า และใช้ค่านั้นจนกระทั่งจบการส่งข้อมูล หรือมีการปรับเปลี่ยนค่า SI

จากรูปแบบการกำหนดค่า TXOP แบบคงที่สำหรับการส่งข้อมูลเซสชันใดๆ ที่มีอัตราไม่คงที่ โดยอัตราการเข้ามาของเฟรมข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา แต่ QAP อนุญาตให้ส่งข้อมูลได้ในแต่ละ SI ด้วยระยะเวลาคงที่ ดังนั้นถ้ามีอัตราการเข้ามาของเฟรมสูง จะทำให้เกิดความคับคั่ง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเวลารอในแถวคอย และอัตราการสูญหายของข้อมูลเนื่องจากแถวคอยเต็ม ในทางตรงกันข้าม ถ้าอัตราการเข้ามาของเฟรมต่ำหรือเท่ากับค่าที่รับเข้า และสถานีสามารถส่งข้อมูลได้ทันภายในค่า TXOP ที่กำหนดให้ ระบบจึงจะสามารถรองรับความต้องการของข้อมูลได้

ลักษณะของข้อมูลอัตราไม่คงที่ มีลักษณะการเข้ามาของปริมาณข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา เช่น ข้อมูลวิดีโอ mpeg-4 ที่มีขนาดของเฟรมวิดีโอแต่ละชนิดแตกต่างกันตามลำดับความสำคัญ ดังนั้นการปรับปรุงกระบวนการรับเข้าโดยการรับเซสชันเข้าสู่รายการโพลโดยใช้อัตราการส่งข้อมูลสูงกว่าค่าที่ร้องขอแบบคงที่ ระบบจะสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลได้ แต่จะมีผลกระทบต่อการใช้งานช่วงเวลาของเซสชันที่ไม่เต็มที่เมื่อมีการเข้ามาของเฟรมข้อมูลน้อย และจำนวนของเซสชันที่รองรับได้พร้อมกันของระบบลดลง

ดังนั้นการปรับปรุงค่า TXOP ให้เหมาะสมตามความต้องการของเซสชันที่มีอัตราไม่คงที่ หลังจากกระบวนการรับเข้าเป็นสิ่งจำเป็น โดยการปรับปรุงค่า TXOP จะต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์จากกระบวนการประเมินความต้องการของเซสชันเพื่อนำมาผ่านกระบวนการกำหนดค่า TXOP ที่เหมาะสม

การประเมินความต้องการของเซสชันจะพิจารณาจากจำนวนเฟรมข้อมูลที่อยู่ในแถวคอย ในกรณีการส่งข้อมูลทิศทางขาลง (Downlink direction) เป็นการส่งข้อมูลจาก QAP ให้แก่ QSTA โดยแถวคอยจะติดตั้งอยู่บน QAP ซึ่ง QAP สามารถตรวจสอบความยาวของแถวคอยของแต่ละเซสชันได้ทันที แต่ในกรณีของการส่งข้อมูลทิศทางขาขึ้น (Uplink direction) แถวคอยของแต่ละเซสชันจะอยู่

ใน QSTA ซึ่ง QAP จะไม่สามารถทราบถึงความยาวของแถวคอยในขณะนั้นได้ ดังนั้นเพื่อให้ QAP ทราบถึงความยาวของแถวคอยที่เกิดขึ้นบนเซสชันใน QSTA ใดๆ กระบวนการส่งค่าพารามิเตอร์ บ้อนกลับจึงถูกนำมาใช้ โดยมีการระบุถึงความยาวของแถวคอยด้วยฟิลด์ `queue_size` ในส่วนหัวของ เฟรมข้อมูลปกติที่ส่งจาก QSTA ตามมาตรฐาน IEEE 802.11e เมื่อ QAP ได้รับข้อมูลความยาว แถวคอยครบทุกเซสชันแล้ว QAP จะเริ่มกระบวนการปรับปรุงค่า TXOP เพื่อให้สามารถรองรับความต้องการอัตราการส่งข้อมูลของเซสชันที่เปลี่ยนไป

2.1 ลักษณะเฉพาะของข้อมูลวิดีโอ

ข้อมูลวิดีโอแต่ละชนิดจะมีลักษณะเฉพาะที่ต่างกันขึ้นอยู่กับวิธีการเข้ารหัสที่ใช้ เช่น mpeg-2 mpeg-4 และประเภทของวิดีโอ เช่น ข่าว กีฬา การต่อสู้ สารคดี โดยข้อมูลวิดีโอประกอบด้วย เฟรม 3 ชนิด คือ I(Intra)-Frame, B(Bidirectional)-Frame และ P(Predicted)-Frame ซึ่ง I-Frame เป็นเฟรมข้อมูลที่สำคัญ และมีขนาดใหญ่ที่สุด เพราะเป็นเฟรมที่เก็บรูปเต็มทีสมบูรณ์หนึ่งภาพในช่วงเวลาใดๆ ในขณะที่ B-Frame และ P-Frame คือ เฟรมย่อยที่มีความสำคัญรองลงมา และมีขนาดเล็กกว่า I-Frame การนำ B-Frame และ P-Frame มาใช้งานจะอ้างอิงข้อมูลจากเฟรมก่อนหน้า

การส่งข้อมูลวิดีโอประกอบด้วยกลุ่มของภาพ (Seeling *et al.*, 2010) ที่เรียกว่า Group of Pictures (GOP) โดยประกอบขึ้นจากลำดับของ I-Frame B-Frame และ P-Frame เช่น GOP(9,3) จะเป็นกลุ่มของเฟรมที่มีลำดับ IBBPBBPBBIBBP... ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่าง I-Frame จำนวน 9 เฟรม โดยเฟรมภายในระหว่าง I-Frame จะเป็น P-Frame ทุกๆ เฟรมที่ 3 ส่วนเฟรมอื่นๆ จะเป็น B-Frame จากกลุ่มของภาพข้างต้น จะพบว่า จำนวนและขนาดของแพ็กเก็ตในการส่งข้อมูลวิดีโอมีขนาดไม่คงที่ และเปลี่ยนไปตามช่วงเวลา

2.2 กระบวนการปรับปรุงค่า TXOP สำหรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่

การประมาณค่า TXOP ที่เหมาะสมแก่เซสชันมีผลกระทบโดยตรงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ การประมาณค่า TXOP ให้สูงเกินกว่าความต้องการจะส่งผลให้การใช้งานช่องสัญญาณอยู่ในระดับต่ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้าประมาณค่า TXOP ให้ต่ำกว่าความต้องการของเซสชัน จะส่งผลให้เซสชันนั้นเกิดค่าความหน่วงที่นานขึ้น และมีอัตราการทิ้งแพ็กเก็ตเพิ่มขึ้น ดังนั้นการประมาณค่า TXOP ให้ใกล้เคียงกับความต้องการของเซสชันจึงมีความสำคัญ

การรับเซสชันเข้าเพื่อส่งข้อมูลใน IEEE 802.11e แบบ HCCA โดยปกติจะพิจารณาจากค่าช่วง TXOP ที่คำนวณจากค่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยของเซสชันที่ร้องขอ โดยช่วงระยะเวลา TXOP ใช้สำหรับส่งข้อมูลที่มีอัตราคงที่ และไม่สามารถรองรับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการส่งข้อมูลตลอดเวลาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัย Jansang *et al.* (2009) จึงนำเสนอการปรับปรุงกระบวนการควบคุมการรับข้อมูลให้รับข้อมูลอัตราไม่คงที่แต่ละเซสชันด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่าค่าเฉลี่ยเล็กน้อย ในกรณีที่ทราบรูปแบบอัตราเข้ามาของข้อมูล เช่น การดูวิดีโอออนไลน์ สามารถรับค่าอัตราข้อมูลที่สูงกว่าอัตราที่ร้องขอแต่ไม่เกินค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แต่กรณีที่ไมทราบรูปแบบการเข้ามาของเซสชัน เช่น การดูวิดีโอถ่ายทอดสด ระบบจำเป็นต้องมีการปรับค่า TXOP ทุกๆ รอบ SI

กระบวนการที่นำเสนอสำหรับปรับปรุงค่า TXOP แบบพลวัต จะใช้แนวทางการแก้ปัญหาแบบฮิวริสติก (heuristic approach) ระบบจะปรับค่า TXOP ให้แต่ละเซสชันจากเครื่องสถานะจำกัด (Finite State Machine) โดยคำนวณจากความยาวของแฉกคอยที่ส่งค่ากลับมาจากสถานีในแต่ละรอบ SI ซึ่งกระบวนการปรับค่า TXOP นี้จะรองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ที่มีลักษณะเฉพาะบนเครือข่าย IEEE 802.11e แบบ HCCA

สำหรับมุมมองการออกแบบระบบเพื่อให้รองรับการส่งข้อมูลทั้งสองทิศทาง คือ 1) การส่งข้อมูลจาก QSTA ให้แก่สถานีที่อยู่นอกเครือข่ายพื้นฐานผ่าน QAP เรียกว่า ข้อมูลขาขึ้น 2) การส่งข้อมูลจากสถานีนอกเครือข่ายพื้นฐานให้แก่ QSTA ผ่าน QAP เรียกว่า ข้อมูลขาลง โดยการส่งข้อมูลขาขึ้น QAP จะต้องได้รับการความยาวของแฉกคอยส่งกลับจาก QSTA แต่ในทางตรงกันข้าม การส่งข้อมูลขาลง QAP จะสามารถอ่านความยาวของแฉกคอยได้โดยตรงจากแฉกคอยที่อยู่บน QAP ในกระบวนการปรับค่า TXOP ของทุกเซสชันจะคำนวณอิสระจากกัน

ในกระบวนการที่นำเสนอ QAP จะเก็บสถานะของแต่ละเซสชันแยกจากกัน โดยการเปลี่ยนสถานะ (state) จะขึ้นอยู่กับเหตุการณ์ (event) ที่นิยามโดยข้อมูลความยาวของแฉกคอย และค่าขีดแบ่ง (threshold) ที่กำหนด การเปลี่ยนค่าสถานะจะคำนวณจากค่าเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น และค่าสถานะปัจจุบันที่กำหนดการทำงานตามเครื่องสถานะจำกัด

กระบวนการตอนเริ่มต้น เซสชันจะส่งคำร้องเพื่อขอส่งข้อมูลแก่ QAP ในกระบวนการควบคุมการรับเข้า ค่า TXOP ของแต่ละเซสชันจะคำนวณจากสมการที่ (1) และ (2) โดยค่า TXOP ที่คำนวณได้จะเป็นค่าเริ่มต้นให้แก่เซสชันเพื่อใช้ในการส่งข้อมูล และจะมีการปรับเปลี่ยนค่าตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น

ส่วนค่า TXOP ที่ปรับปรุงจากเครื่องสภาวะจำกัดในทุกรอบ SI จะไม่ใช่ค่าที่ตรงตามความต้องการ แต่จะปรับปรุงตามเหตุการณ์ และค่าสถานะปัจจุบันที่เกิดขึ้นของแต่ละเซสชัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่า TXOP ที่คำนวณได้อาจจะเป็นค่าที่เท่ากับหรือเกินความต้องการ

2.2.1 กระบวนการปรับค่า TXOP รูปแบบที่ 1 (ATMV1)

กำหนดให้ q_i เป็นค่าบ่อนกลับความยาวของแฉกคอย หน่วยเป็นไบต์ สำหรับเซสชัน i ในรอบ SI ใดๆ และ \bar{q}_i เป็นค่าความยาวแฉกคอยเฉลี่ย หน่วยเป็น ไบต์ ของเซสชัน i เพื่อใช้กำหนดเป็นค่าขีดแบ่ง โดยค่า \bar{q}_i คำนวณจากค่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ย ρ_i ที่ระบุใน TSPEC ณ กระบวนการรับเข้า การคำนวณค่า \bar{q}_i แสดงดังสมการที่ (39)

$$\bar{q}_i = SI \times \rho_i \quad (39)$$

กำหนดให้ e_k สำหรับ $\forall k = 1, 2, 3, 4$ เป็นเหตุการณ์ของเซสชัน i ที่รับมาจากการเปรียบเทียบจากเงื่อนไขระหว่างค่า q_i และค่าขีดแบ่ง \bar{q}_i ดังรายละเอียดในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าเหตุการณ์สำหรับเซสชัน i ของเครื่องสภาวะจำกัด ATMV1

เหตุการณ์ (Event)	เงื่อนไขในการเปรียบเทียบเพื่อระบุเหตุการณ์
e_1	$q_i \leq \delta_1 \bar{q}_i$
e_2	$\delta_1 \bar{q}_i < q_i \leq \delta_2 \bar{q}_i$
e_3	$\delta_2 \bar{q}_i < q_i \leq \delta_3 \bar{q}_i$
e_4	$q_i > \delta_3 \bar{q}_i$

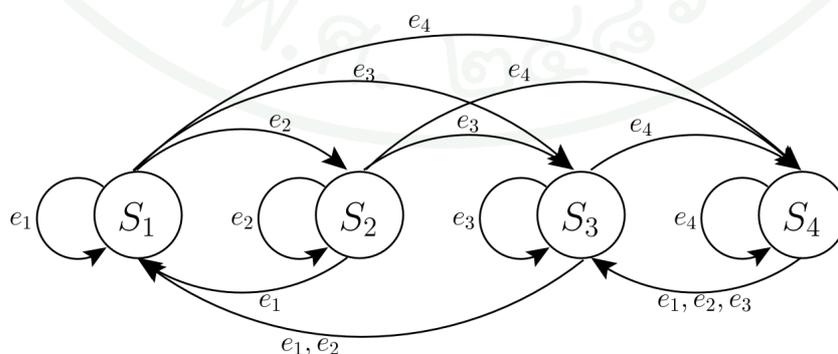
กำหนดให้ δ_k คือ ค่าปัจจัยสัมประสิทธิ์ (Coefficient Factor) เพื่อกำหนดเส้นแบ่งเขตการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ โดยมีค่า $\delta_1 = 1, \delta_2 = 2$ และ $\delta_3 = 2.5$ โดยค่า δ ที่นำมาใช้ได้มาจากการทดลองปรับค่าในเบื้องต้น

วิธีการที่นำเสนอมีจุดประสงค์เพื่อจัดการข้อมูลที่มีอัตราการเข้ามาอย่างรวดเร็ว (Burst traffic) โดยการกำหนดค่า TXOP ต่างๆ ตามสถานะที่คำนวณได้ โดยค่าสถานะแต่ละค่าในเครื่องสภาวะจำกัดใช้สำหรับกำหนดระยะเวลา TXOP เพื่อจัดการกับข้อมูลที่เข้ามาอย่างรวดเร็ว

เครื่องสภาวะจำกัด ATMV1 จะประกอบด้วย 4 สภาวะ กำหนดให้ S_j เป็นสภาวะ j สำหรับ $\forall j = 1, 2, 3, 4$ และ γ_j คือ ค่าปัจจัยสัมประสิทธิ์เพื่อกำหนดเส้นแบ่งเขตในการควบคุมความยาวของแถวคอยขนาดต่างๆ ตามค่าสภาวะ S_j โดยมีค่า $\gamma_1 = 1, \gamma_2 = 1.5, \gamma_3 = 2.5$ และ $\gamma_4 = 3$ สำหรับความหมายของสภาวะ S_1 คือ ค่าช่วงระยะเวลา TXOP สั้นที่สุดที่สัมพันธ์กับค่า q_i และ S_4 คือ ค่าช่วงระยะเวลา TXOP ที่ยาวที่สุดสำหรับควบคุมความยาวของแถวคอยที่เกิดจากอัตราการเข้ามาอย่างรวดเร็ว

การเปลี่ยนสภาวะแสดงดังภาพที่ 11 โดยการเปลี่ยนไปยังสภาวะสูง (ตัวอย่างเช่น เปลี่ยนจาก S_2 ไป S_3) หรืออยู่ในสถานะเดิม หมายถึง การเกิดเหตุการณ์ที่มีข้อมูลอัตราการเข้ามาอย่างรวดเร็ว (โดยเกิดจากการส่งข้อมูล I-Frame ที่มีขนาดใหญ่) ดังนั้นกระบวนการปรับค่า TXOP จะต้องสามารถให้ค่าช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้สามารถรองรับข้อมูลที่มีอัตราการเข้ามาอย่างรวดเร็ว สำหรับการเปลี่ยนไปสภาวะต่ำกว่าจาก S_2 และ S_3 (โดยเกิดจากการส่ง B-Frame และ P-Frame ที่มีขนาดเล็ก) ไปยังสภาวะ S_1 เนื่องจากข้อมูลที่รอคอยอยู่ในแถวคอยมีจำนวนน้อยลงโดยที่ช่วงระยะเวลา TXOP ที่คำนวณจากสภาวะ S_1 สามารถรองรับได้

สำหรับสภาวะ S_4 คือ สภาวะที่ให้ช่วงระยะเวลา TXOP สูงสุดสำหรับจัดการข้อมูลที่รอในแถวคอยที่มีความยาวมาก และถ้าแถวคอยของเซสชัน i ยังคงมีความยาวมากใน SI ถัดไป เครื่องสภาวะจำกัดจะคงอยู่ในสภาวะ S_4 ต่อไป แต่เมื่อแถวคอยมีความยาวลดลง (ค่าป้อนกลับ q_i มีค่าต่ำ) เครื่องสภาวะจำกัดจะเปลี่ยนจากสภาวะ S_4 เป็น S_3 เนื่องจากว่า เครื่องสภาวะจำกัดจะต้องรองรับการเข้ามาของข้อมูลที่กำลังเข้ามาใหม่ (อาจจะเป็น B-Frame หรือ P-Frame ที่ส่งตามหลังจาก I-Frame) โดยมีค่าเท่ากับหรือเกินกว่าที่ต้องการ



ภาพที่ 11 เครื่องสภาวะจำกัดสำหรับปรับค่า TXOP แบบ AMTV1

2.2.2 การคำนวณค่า TXOP สำหรับ ATMV1

การคำนวณค่า TXOP ตามมาตรฐาน IEEE 802.11e จะคำนวณตามรายละเอียดที่ระบุอยู่ในส่วนการตรวจเอกสารหัวข้อที่ 2 เรื่องกระบวนการทำงานของ IEEE 802.11e แบบ HCCA โดยเริ่มจากคำนวณหาค่าจำนวนแพ็กเก็ต N_i ซึ่งเป็นค่าที่ปัดให้เป็นค่าจำนวนเต็มเพดาน (ceiling value) ซึ่งในกระบวนการที่นำเสนอสำหรับคำนวณเวลา TXOP เพื่อให้มีค่าเท่ากับหรือเกินกว่าที่ต้องการ ถ้าวิธีการคำนวณใช้ค่า N_i แบบปกติ จะทำให้ค่าคำนวณเวลา TXOP เกินกว่าค่าที่ต้องการมาก

ดังนั้นการคำนวณค่า TXOP สำหรับ ATMV1 จะใช้ค่าจำนวนแพ็กเก็ตที่ปัดให้เป็นจำนวนเต็มพื้น (floor value) กำหนดให้ N'_i เป็นจำนวนแพ็กเก็ตใหม่ที่เป็นจำนวนเต็มพื้นสำหรับเซสชัน i โดยสมการที่ (40) และ (41) แสดงการคำนวณค่าจำนวนของแพ็กเก็ต และเวลา TXOP สำหรับกระบวนการที่นำเสนอสำหรับสถานะ S_j ตามลำดับ

$$N'_i = \left\lfloor \frac{\gamma_j \bar{q}_i}{L_i} \right\rfloor \quad (40)$$

$$TXOP_i = \max \left(\frac{N'_i \times L_i}{R_i} + O, \frac{M}{R_i} + O \right) \quad (41)$$

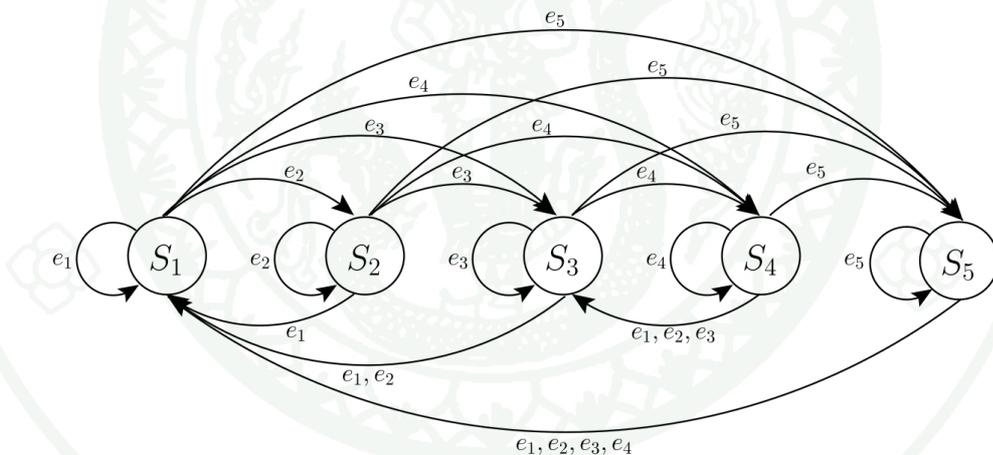
2.2.3 กระบวนการปรับค่า TXOP รูปแบบที่ 2 (ATMV2)

กระบวนการ ATMV1 ที่นำเสนอ QAP สามารถปรับค่าช่วงเวลา TXOP ของแต่ละเซสชัน i ให้เพียงพอต่อความต้องการที่อ้างอิงจากความยาวของแฉกคอย้อนกลับ q_i โดยค่า TXOP ที่กำหนดส่งผลถึงปริมาณของข้อมูลที่ส่งได้ในหนึ่งช่วง SI และค่าความหน่วงที่เกิดขึ้นในการส่งข้อมูลแต่ละแพ็กเก็ต ค่าความหน่วงที่เกิดขึ้นจะมีผลกระทบต่อคุณภาพการให้บริการของข้อมูล

สำหรับการส่งข้อมูลวิดีโอบางชนิดที่ขนาดของ I-Frame มีขนาดใหญ่มาก (สามารถแบ่งเป็นแพ็กเก็ตจำนวนสูงถึง 20 แพ็กเก็ต โดยแต่ละแพ็กเก็ตมีขนาด 1024 ไบต์) ถ้าแพ็กเก็ตทั้งหมดของ I-Frame ไม่สามารถส่งถึงปลายทางได้ทันเวลา ทำให้ I-Frame นั้นถูกโยนทิ้ง และเฟรมที่สร้างตามมา (B-Frame หรือ P-Frame) จะไม่สามารถนำมาใช้งานที่ปลายทางได้

จากกระบวนการ ATMV1 แต่ละเซสชันจะได้รับอนุญาตให้ขนาดของจำนวนของแพ็กเก็ตที่มากที่สุดจำกัดไว้ที่ 3 เท่าของ \bar{q}_i ($\gamma_4 = 3$) โดยนิยามการคำนวณไว้จากค่าที่สภาวะ S_4 การปรับปรุงเพื่อให้ ATMV1 รองรับข้อมูลที่มีอัตราการเข้ามาที่สูงขึ้นทำได้โดยเปลี่ยนแปลงค่า γ_4 ให้สูงขึ้น แต่ถ้าค่าของ q_i สูงกว่า $\delta_3 \bar{q}_i$ เพียงเล็กน้อยจะทำให้เซสชันนั้นได้รับค่า γ_4 สูงเกินความต้องการมาก ส่งผลให้การใช้งานช่องสัญญาณของระบบโดยรวมต่ำ และมีจำนวนของเซสชันที่รองรับการส่งข้อมูลได้น้อย

เพื่อให้กระบวนการที่นำเสนอสามารถรองรับการเข้ามาของเซสชันที่มีการเข้ามาของข้อมูลอย่างรวดเร็วและอัตราสูงขึ้น ผู้วิจัยจึงนำเสนอกระบวนการ ATMV2 ที่มีการปรับปรุงจาก ATMV1 โดยเพิ่มสภาวะ S_5 และค่าปัจจัยสัมพันธ์ $\gamma_5 = 4$ สำหรับจัดการกับข้อมูลที่เข้ามาอย่างรวดเร็วเป็นการเฉพาะ ซึ่งระบบจะอยู่ในสภาวะ S_5 ในช่วงเวลาสั้นและกลับสู่สภาวะปกติทันทีที่เป็นไปได้ เพราะใช้ทรัพยากรโดยรวมที่มาก การเปลี่ยนสภาวะของ ATMV2 แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 เครื่องสภาวะจำกัดสำหรับปรับค่า TXOP แบบ AMTV2

กระบวนการ ATMV2 นิยามเหตุการณ์ใหม่ e_5 โดยจะมีการปรับค่า e_4 และค่าปัจจัยสัมพันธ์ $\delta_4 = 4$ รายละเอียดเงื่อนไขระหว่างค่า q_i และค่าขีดแบ่ง \bar{q}_i ของเครื่องสภาวะ ATMV2 แสดงรายละเอียดในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าเหตุการณ์สำหรับเซสชัน i ของเครื่องสภาวะจำกัด ATMV2

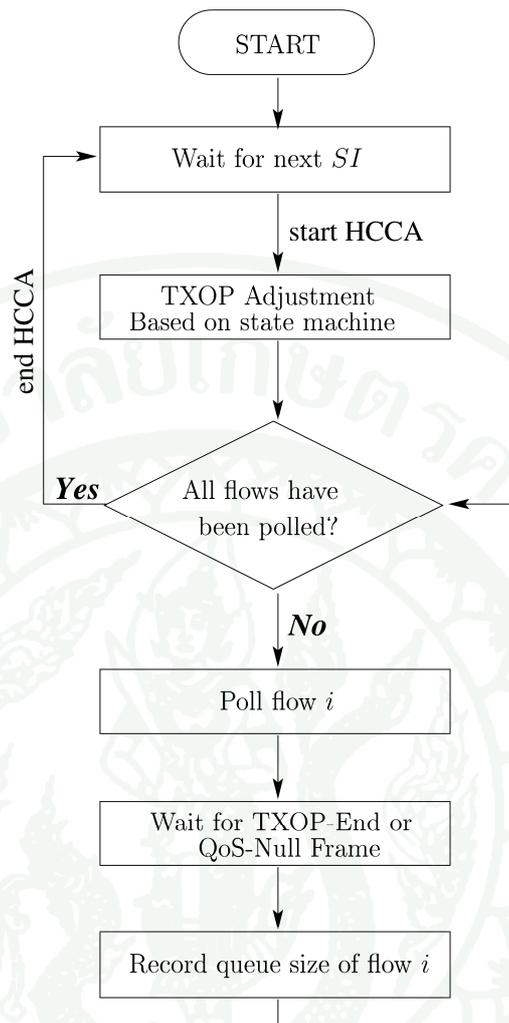
เหตุการณ์ (Event)	เงื่อนไขในการเปรียบเทียบเพื่อระบุเหตุการณ์
e_1	$q_i \leq \delta_1 \bar{q}_i$
e_2	$\delta_1 \bar{q}_i < q_i \leq \delta_2 \bar{q}_i$
e_3	$\delta_2 \bar{q}_i < q_i \leq \delta_3 \bar{q}_i$
e_4	$\delta_3 \bar{q}_i < q_i \leq \delta_4 \bar{q}_i$
e_5	$q_i > \delta_4 \bar{q}_i$

2.2.4 รายละเอียดการพัฒนาเครื่องสภาวะจำกัดในระบบจำลอง

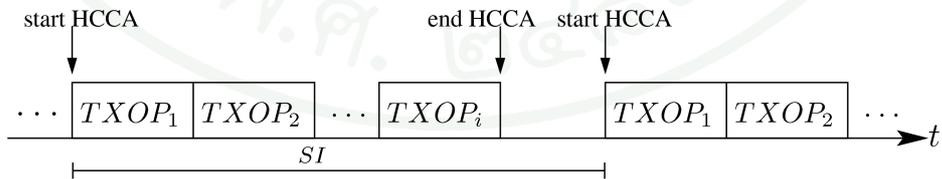
กระบวนการที่นำเสนอจะพัฒนาในระบบจำลองทำงานบน QAP แสดงรายละเอียดดังภาพที่ 13 การทำงานจะเริ่มจาก QAP ประเมินผลสภาวะ S_j , ถัดไปของ S_j และค่าเหตุการณ์ e_i ของเซสชัน i หลังจากนั้น QAP จะโพลแต่ละเซสชันด้วยค่าช่วงเวลา TXOP ที่คำนวณได้ตามสภาวะขณะที่อยู่ในช่วงโพล QAP จะดำเนินการบันทึกค่าความยาวของแฉกคอยที่เหลืออยู่ของแต่ละเซสชันสำหรับนำมาใช้ประเมินค่าเหตุการณ์ e_i ใน SI รอบถัดไป เมื่อโพลครบทุกเซสชันแล้ว QAP จะหยุดช่วงที่ไม่มีการแย่งเข้าใช้งานช่องสัญญาณ (ตำแหน่งลูกศรเขียน “end HCCA” แสดงดังภาพที่ 14) หลังจากนั้น QAP จะรอการเริ่มของช่วงที่ไม่มีการแย่งใช้งานช่องสัญญาณ (ตำแหน่งลูกศรเขียน “start HCCA” แสดงดังภาพที่ 14) ใน SI รอบถัดไปเพื่อเริ่มกระบวนการทำงาน

ขั้นตอนวิธีของการกระบวนการปรับค่า TXOP แสดงดังรหัสเทียมในตารางที่ 8 โดยการประเมินค่าของเหตุการณ์ *event* e_i สำหรับเครื่องสภาวะจำกัด ATMV1 และ ATMV2 แสดงดังรหัสเทียมในตารางที่ 9 และตารางที่ 10 ตามลำดับ

จากรหัสเทียมในตารางที่ 8 บรรทัดที่ 6 ถึง 11 คือ กระบวนการประเมิน และปรับค่า TXOP ของแต่ละเซสชัน พร้อมทั้งหาค่าผลรวมของ TXOP ที่ต้องการทั้งหมดเก็บไว้ในตัวแปร SUM_{txop} เพื่อนำมาใช้ในการตรวจสอบเงื่อนไขเปรียบเทียบกับทรัพยากรที่มีอยู่ทั้งหมด ส่วนบรรทัดที่ 13 ถึง 17 ใช้สำหรับตรวจสอบความต้องการกับทรัพยากรที่มีอยู่ คือ ถ้าผลรวมช่วงเวลาทั้งหมดน้อยกว่าทรัพยากรที่มีอยู่ (มีทรัพยากรเพียงพอ) QAP จะอนุญาตให้ใช้ค่า TXOP ตามที่คำนวณได้ แต่ถ้าทรัพยากรที่มีอยู่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของเซสชันทั้งหมด QAP จะใช้ค่า TXOP ณ สภาวะ S_1 ที่ได้รับอนุมัติจาก QAP ตอนกระบวนการรับเข้า เพื่อนำมาใช้แทนค่าที่คำนวณได้ในรอบ SI นั้น



ภาพที่ 13 ผังงานการปรับค่า TXOP ที่ทำงานบน QAP



ภาพที่ 14 ช่วงเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของช่วง HCCA ในแต่ละรอบ SI

ตารางที่ 8 รหัสเทียมในการปรับค่า TXOP ของเครื่องสภาวะจำกัด

บรรทัดที่	คำสั่งการทำงาน
1:	$PLIST[] \leftarrow \text{Polling List}$
2:	$STATE[] \leftarrow \text{Session State List}$
3:	$Q[] \leftarrow \text{Feedback Queue Size List}$
4:	$TXOP_{curr}[] \leftarrow \text{Current TXOP List}$
5:	$SUM_{txop} \leftarrow 0$
6:	for p in $PLIST$ do
7:	$event \leftarrow \text{getEvent}(p, Q[])$
8:	$STATE[p] \leftarrow \text{evaluateNextState}(p, STATE[], event)$
9:	$TXOP_{curr}[p] \leftarrow \text{calculateTXOP}(p, STATE[])$
10:	$SUM_{txop} \leftarrow SUM_{txop} + TXOP_{curr}[p]$
11:	end for
12:	
13:	if $SUM_{txop} > (SI - T_{cp})$ then
14:	for p in $PLIST$ do
15:	$TXOP_{curr}[p] \leftarrow \text{calculateTXOP}(p, S_1)$
16:	end for
17:	end if

ตารางที่ 9 รหัสเทียมฟังก์ชัน $getEvent(p, Q[])$ สำหรับ ATMV1

บรรทัดที่	คำสั่งการทำงาน
1:	$\delta_1 \leftarrow 1, \delta_2 \leftarrow 1.5, \delta_3 \leftarrow 2.5$
2:	$event \leftarrow 0$
3:	$q \leftarrow Q[p]$
4:	$SI \leftarrow getSI()$
5:	$\bar{q}_i \leftarrow SI * getMeanDataRate(p)$
6:	if ($q \leq \delta_1 \bar{q}$) then
7:	$event \leftarrow e1$
8:	else if ($q \leq \delta_2 \bar{q}$) then
9:	$event \leftarrow e2$
10:	else if ($q \leq \delta_3 \bar{q}$) then
11:	$event \leftarrow e3$
12:	else
13:	$event \leftarrow e4$
14:	end if
15:	return $event$

ตารางที่ 10 รหัสเทียมฟังก์ชัน $getEvent(p, Q[])$ สำหรับ ATMV2

บรรทัดที่	คำสั่งการทำงาน
1:	$\delta_1 \leftarrow 1, \delta_2 \leftarrow 1.5, \delta_3 \leftarrow 2.5, \delta_4 \leftarrow 4$
2:	$event \leftarrow 0$
3:	$q \leftarrow Q[p]$
4:	$SI \leftarrow getSI()$
5:	$\bar{q}_i \leftarrow SI * getMeanDataRate(p)$
6:	if ($q \leq \delta_1 \bar{q}$) then
7:	$event \leftarrow e1$
8:	else if ($q \leq \delta_2 \bar{q}$) then
9:	$event \leftarrow e2$
10:	else if ($q \leq \delta_3 \bar{q}$) then
11:	$event \leftarrow e3$
12:	else if ($q \leq \delta_4 \bar{q}$) then
13:	$event \leftarrow e4$
14:	else
15:	$event \leftarrow e5$
16:	end if
17:	return $event$

2.2.5 การวิเคราะห์ความซับซ้อนในการคำนวณ (Complexity analysis)

จากกระบวนการ ATMV ที่นำเสนอด้วยรหัสเทียมในตารางที่ 8 ขั้นตอนการทำงานที่ QAP สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนการคำนวณค่า TXOP (บรรทัดที่ 6-11) และส่วนการตรวจสอบทรัพยากรที่คงเหลือ (บรรทัดที่ 13-17)

ส่วนการคำนวณค่า TXOP สำหรับเซสชัน i ประกอบด้วยการทำงาน 4 ขั้นตอน คือ 1) ประเมินค่าเหตุการณ์ของเซสชันปัจจุบัน 2) ประเมินค่าสถานะถัดไป 3) คำนวณค่า TXOP จากสถานะใหม่ 4) คำนวณหาผลรวมของค่า TXOP โดยแต่ละขั้นตอนมีความซับซ้อนด้านเวลาคงที่เป็น $O(1)$

กำหนดให้ n เป็นจำนวนเซสชันที่อยู่ในรายการโพลที่กำลังส่งข้อมูลอยู่ ดังนั้นค่าความซับซ้อนในการคำนวณในส่วนแรกมีค่าเป็น $O(n)$

สำหรับส่วนการตรวจสอบทรัพยากรที่คงเหลือ ถ้าเงื่อนไขมีค่าเป็นจริง (ทรัพยากรไม่เพียงพอ) QAP จะตั้งค่า TXOP ที่สถานะ S_0 ให้กับทุกเซสชันด้วยความซับซ้อนด้านเวลาเป็น $O(n)$ แต่ถ้าเงื่อนไขมีค่าเป็นเท็จ (ทรัพยากรเพียงพอ) จะมีค่าความซับซ้อนด้านเวลาเป็น $O(1)$

จากขั้นตอนการทำงาน 2 ส่วนหลักที่ QAP จะได้ว่า ค่าความซับซ้อนการคำนวณในภาพรวมจะมีค่าเป็น $O(n)$

2.3 การประเมินผลคุณภาพวิดีโอ

การประเมินผลคุณภาพการให้บริการของข้อมูลที่ส่งบนระบบเครือข่าย สามารถวัดด้วยค่าเชิงปริมาณในโพรโทคอลที่อยู่ต่ำกว่าระดับชั้นแอปพลิเคชัน ได้แก่ ค่าความหน่วง การพรั้า อัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต และปริมาณของการส่งข้อมูลที่ทำได้ โดยการส่งข้อมูลชนิดเวลาจริง (เช่น ข้อมูลเสียง วิดีโอ) จะให้ความสำคัญกับเวลาหน่วงและอัตราสูญหายของแพ็กเก็ตสูงกว่าข้อมูลที่ไม่ใช่เวลาจริง (เช่น ข้อมูลเอฟทีพี) ดังนั้นการประเมินคุณภาพการให้บริการสำหรับข้อมูลเวลาจริงจะกล่าวถึง ค่าขอบเขตของข้อมูลที่สามารถยอมรับได้ เช่น แพ็กเก็ตของข้อมูลเสียงที่ส่งทางเดียวจากต้นทางถึงปลายทางที่มีคุณภาพจะต้องมีเวลาหน่วงไม่เกิน 300 มิลลิวินาที (International Telecommunication Union [ITU], 1993) และการส่งข้อมูลเสียงที่โต้ตอบกันจะต้องมีความหน่วง 150 มิลลิวินาที ส่วนอัตราสูญหายของแพ็กเก็ตเสียง ถ้าอัตราสูญหายมีปริมาณตั้งแต่ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ (ITU, 2001) จะเริ่มมีผลกับคุณภาพของข้อมูลเสียง

สำหรับข้อมูลวิดีโอ นั้น การวัดค่าความหน่วง และอัตราการสูญหายของข้อมูล เพียงชุดเดียวไม่สามารถระบุถึงค่าคุณภาพของวิดีโอที่ผู้รับปลายทางได้รับ เพราะวิดีโอแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในวิธีการเข้ารหัส ค่าอัตราการสูญหายที่ยอมรับได้ ค่าความหน่วงและค่าความพรั้าที่ต้องการ ซึ่งใน ITU (2002) เสนอการวัดคุณภาพเชิงวัตถุวิสัย (Objective video evaluation) ของการเปลี่ยนแปลงในระดับเฟรมของวิดีโอ โดยการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงแบบเฟรมต่อเฟรม ได้แก่ เฟรมอ้างอิง (เฟรมต้นฉบับที่ไม่ถูกบีบอัด) กับเฟรมที่ถูกบีบอัดที่ต้นทาง และเฟรมอ้างอิงกับเฟรมบีบอัดที่ถึงปลายทาง แล้วนำค่าเชิงคุณภาพที่ต้นทางและปลายทางมาเปรียบเทียบกัน เพื่อพิจารณาถึงความเปลี่ยนแปลงของคุณภาพของข้อมูลวิดีโอที่เกิดขึ้นเมื่อส่งผ่านระบบเครือข่าย

ค่าที่นิยมใช้วัดคุณภาพเชิงวัตถุวิสัยในการส่งวิดีโอ (Yang, 2006) คือ ค่า PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) มีหน่วยเป็น เดซิเบล (dB) ซึ่งเป็นค่าที่เปรียบเทียบระหว่างเฟรมอ้างอิงกับเฟรมที่ถูกบีบอัด ซึ่งถ้า PSNR มีค่าสูงแสดงว่า เฟรมที่ถูกบีบอัดมีคุณภาพใกล้เคียงกับเฟรมอ้างอิง สำหรับการวัดคุณภาพวิดีโอที่เกิดจากการส่งผ่านระบบเครือข่าย จะใช้วิธีการเปรียบเทียบค่า PSNR ของเฟรมต้นทางกับค่า PSNR ของเฟรมปลายทางลักษณะแบบเฟรมต่อเฟรมจนครบทุกเฟรม หรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ PSNR ต้นทางกับปลายทาง โดยถ้า PSNR ของปลายทางมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทางแสดงว่า คุณภาพของวิดีโอปลายทางลดลงเมื่อเทียบกับวิดีโอต้นทาง

ค่า Mean Opinion Score (MOS) (ITU, 2003) เป็นค่าที่นิยมใช้ในการวัดคุณภาพของวิดีโอเชิงจิตวิสัย (Subjective video evaluation) มีวิธีการวัดโดยนำผู้ที่ผ่านการฝึกอบรมไปรับชมวิดีโอที่ต้องการทดสอบแล้วให้คะแนนความพึงพอใจในการรับชมวิดีโอที่ค่าคุณภาพต่างๆ กัน โดยค่า MOS จะเป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 1 ถึง 5 จากงานวิจัย Klaue *et al.* (2003) พบว่า ค่า PSNR มีความสัมพันธ์ค่า MOS โดยความสัมพันธ์ระหว่าง PSNR และ MOS แสดงดังตารางที่ 11

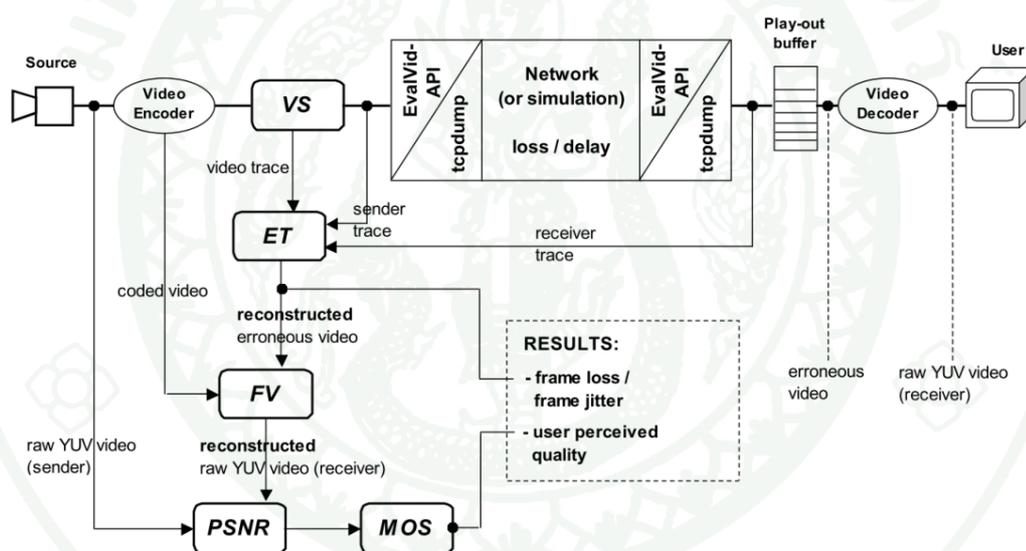
ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่าง PSNR และ MOS

PSNR (เดซิเบล)	MOS
> 37	5 (Excellent)
31 - 37	4 (Good)
25 - 31	3 (Fair)
20 - 25	2 (Poor)
< 20	1 (Bad)

งานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องมือสำหรับการประเมินคุณภาพวิดีโอที่เรียกว่า Evalvid toolset (Klaue *et al.*, 2003) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้สำหรับการทดลองเพื่อวัดผลค่า PSNR และ MOS ในการส่งวิดีโอ ตัวอย่างของงานวิจัยที่ใช้ชุด Evalvid toolset ได้แก่ ในงานวิจัยของ Abdel-Hady and Ward (2007); Ke and Chilamkurti (2008); Lie and Klaue (2008); Venkataraman *et al.* (2009); Choi *et al.* (2010)

โครงสร้างของการทำงานของ Evalvid toolset แสดงดังภาพที่ 15 ประกอบด้วยชุดโปรแกรม 5 โปรแกรม คือ 1) VS (Video Sender) สำหรับส่งวิดีโอบนเครือข่าย โดยนำเฟรมวิดีโอที่ถูก

เข้ารหัสมาตัดแบ่งเป็นเซกเมนต์ (segment) และส่งผ่านเครือข่ายโดยใช้โพรโทคอลยูดีพี (UDP) 2) ET (Evaluate Traces) จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์เมื่อสิ้นสุดการส่งข้อมูล โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ค่าความหน่วง ความพัว และอัตราแพ็กเก็ตสูญหายที่เกิดขึ้นในการส่งข้อมูลวิดีโอตั้งแต่ต้นทางจนกระทั่งถึงปลายทาง 3) FV (Fix Video) ใช้สำหรับสร้างวิดีโอที่ปลายทางได้รับกลับมาจากไฟล์บันทึกเวลาและชนิดแพ็กเก็ตที่ปลายทางได้รับ (receiver trace) และเพิ่มการแทรกเฟรมเปล่า ณ ตำแหน่งที่เกิดเฟรมสูญหาย เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าระหว่างเฟรมอ้างอิงกับเฟรมที่ปลายทางได้รับตรงตามตำแหน่งที่ถูกต้อง 4) PSNR เป็นโปรแกรมสำหรับคำนวณค่า PSNR โดยใช้การเทียบระหว่างวิดีโอต้นทางก่อนเข้ารหัส (sender raw Video YUV) กับวิดีโอที่ได้รับ (receiver raw Video YUV) แบบเฟรมต่อเฟรม และ 5) MOS เป็นโปรแกรมสำหรับคำนวณค่า MOS จากค่า PSNR ที่คำนวณได้จากการเปรียบเทียบวิดีโอแบบเฟรมต่อเฟรม โดยใช้ความสัมพันธ์ของค่า PSNR และ MOS จากตารางที่ 11



ภาพที่ 15 โครงสร้างการทำงานของ Evalvid toolset

ที่มา: Klaue *et al.* (2003)

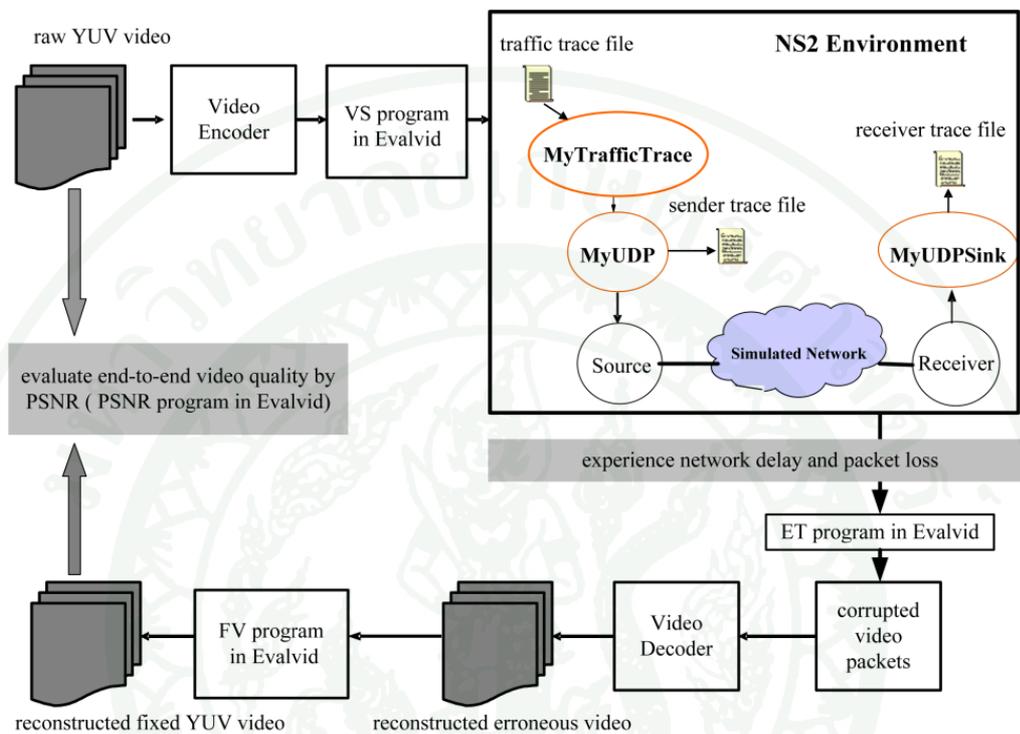
การทำงานของ Evalvid toolset จะเริ่มตั้งแต่การบันทึกข้อมูลต้นทาง (Source) จากกล้องวิดีโอ ส่งผ่านตัวเข้ารหัสวิดีโอ (Video Encoder) ส่งต่อผ่านระบบเครือข่าย (Network) จนถึงปลายทาง และนำไปเก็บไว้ในบัฟเฟอร์ก่อนแสดงผล (Play-out buffer) จากนั้นตัวถอดรหัสวิดีโอ (Video Decoder) จะนำข้อมูลจากบัฟเฟอร์ และแสดงผลแก่ผู้ใช้ (User) โดยข้อมูลที่ Evalvid toolset ต้องการเพื่อประเมินผลคุณภาพวิดีโอ คือ ไฟล์ข้อมูล และไฟล์ติดตามการทำงานต่างๆ ที่สร้างขึ้นใน

ระหว่างขั้นตอนการส่งข้อมูลจากต้นทางจนกระทั่งถึงปลายทาง โดยไฟล์ที่ต้องการจากส่วนต้นทาง ได้แก่ ไฟล์วิดีโอที่ไม่เข้ารหัสต้นทาง (source raw YUV video) ไฟล์วิดีโอที่เข้ารหัส (coded video) ไฟล์บันทึกเวลาและชนิดของแพ็กเก็ตที่ส่ง ส่วนไฟล์ที่ต้องการจากส่วนปลายทาง ได้แก่ ไฟล์บันทึกเวลาและชนิดของแพ็กเก็ตที่ได้รับ ไฟล์วิดีโอเข้ารหัสที่ปลายทางได้รับซึ่งอาจมีข้อมูลบางส่วนผิดพลาด และไฟล์วิดีโอที่ไม่เข้ารหัสปลายทาง (receiver raw YUV video) เมื่อรวบรวมไฟล์ที่ต้องการครบถ้วน ผู้ใช้จะนำไฟล์ที่รวบรวมได้ทั้งหมดมาประมวลผลผ่านโปรแกรมของ Evalvid toolset โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าอัตราสัญญาณของแพ็กเก็ตและเฟรม ค่าความหน่วงความพำของแพ็กเก็ตและเฟรม ค่า PSNR และ MOS ของวิดีโอ

การวัดคุณภาพวิดีโอด้วย Evalvid toolset บนเครือข่ายจริงหรือระบบทดสอบที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้ทันที แต่มีงานวิจัยหลายงานที่พัฒนาโพรโทคอลและวัดประสิทธิภาพบนระบบจำลอง ns2 ซึ่งมีความต้องการที่ประเมินคุณภาพวิดีโอ เพื่อให้สามารถประเมินผลวิดีโอที่ได้จากการส่งในระบบจำลอง Ke *et al.* (2008) จึงพัฒนาชุดมอดูล 3 ชุด คือ MyTrafficTrace, MyUDP และ MyUDPSink ในระบบจำลองเพื่อเป็นส่วนต่อประสานระหว่าง Evalvid toolset และ ns2 ส่วนอ่านรายละเอียดการส่งแพ็กเก็ตวิดีโอ (traffic trace file) และสร้างไฟล์รายละเอียดแพ็กเก็ตที่ปลายทางได้รับ (receiver trace file) ที่มีความจำเป็นในการประเมินคุณภาพวิดีโอ โครงสร้างการเชื่อมต่อแสดงดังภาพที่ 16

วิธีการใช้งาน Evalvid toolset ร่วมกับระบบจำลอง ns2 จะเริ่มต้นจากการนำวิดีโอที่ไม่เข้ารหัสต้นทางมาผ่านตัวเข้ารหัสเพื่อสร้างไฟล์วิดีโอเข้ารหัส จากนั้นโปรแกรม VS จะอ่านเฟรมวิดีโอจากไฟล์วิดีโอที่เข้ารหัส และสร้างไฟล์รายละเอียดเวลาการส่งเฟรมและขนาดของเฟรมทั้งหมด (traffic trace video) จากนั้นมอดูล MyTrafficTrace จะอ่านเวลาการส่งเฟรม ขนาดของเฟรมจากไฟล์รายละเอียดและนำเฟรมมาแบ่งเป็นเซกเมนต์และส่งต่อด้วยโพรโทคอล UDP ผ่านมอดูล MyUDP ซึ่งเป็นส่วนขยายจากมอดูล UDP ติดตั้งอยู่บนสถานีต้นทาง ทำหน้าที่ส่งแพ็กเก็ตข้อมูล พร้อมบันทึกเวลาส่ง ขนาดและหมายเลขของแพ็กเก็ตในสถานีต้นทางลงบนไฟล์ที่ผู้ใช้กำหนด (sender trace file) เมื่อแพ็กเก็ตวิ่งผ่านเครือข่าย (simulated network) จนกระทั่งไปถึงสถานีปลายทาง แพ็กเก็ตจะส่งต่อให้แก่มอดูล MyUDPSink ซึ่งเป็นมอดูลที่ติดตั้งบนสถานีปลายทางสำหรับการบันทึกข้อมูลแพ็กเก็ตที่ถูกส่งมาจาก MyUDP โดยจะบันทึกเวลาที่แพ็กเก็ตมาถึง ขนาดและหมายเลขแพ็กเก็ตลงบนไฟล์ที่ผู้ใช้กำหนด (receiver trace file) เมื่อระบบจำลองจบการทำงาน จะนำ 4 ไฟล์ คือ ไฟล์รายละเอียดเฟรม ไฟล์รายละเอียดการส่งแพ็กเก็ตที่ต้นทาง ไฟล์รายละเอียดแพ็กเก็ตที่ได้รับที่ปลายทาง และไฟล์วิดีโอเข้ารหัสที่ต้นทาง เป็นข้อมูลนำเข้าให้แก่โปรแกรม ET เพื่อสร้างไฟล์วิดีโอเข้ารหัสที่ปลายทางได้รับ จากนั้นนำ

ไฟล์วิดีโอเข้ารหัสที่ปลายทางส่งเข้าตัวถอดรหัสเพื่อสร้างไฟล์วิดีโอที่ไม่เข้ารหัสสำหรับนำไปเปรียบเทียบคุณภาพกับวิดีโอที่ไม่เข้ารหัสต้นทาง โดยพิจารณาจากค่า PSNR และค่า MOS



ภาพที่ 16 โครงสร้างการเชื่อมต่อระหว่าง Evalvid toolset และ ns2

ที่มา: Ke *et al.* (2008)

ผลและวิจารณ์

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการทดลอง และผลการทดลองของวิธีการที่นำเสนอ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ออกแบบขึ้นสำหรับคำนวณเวลาเฉลี่ยเฟรมข้อมูลจะต้องรอในชั้น MAC ก่อนจะสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณภายใต้การทำงานแบบ IEEE 802.11e แบบ HCCA โดยเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลอง และผลที่สกัดได้จากระบบจำลอง ns2 บนพื้นฐานค่าพารามิเตอร์หลักเดียวกัน 2) การทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพกระบวนการ ATMV ด้วยการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ (ข้อมูลวิดีโอ) บนมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA ด้วยระบบจำลอง ns2 โดยค่าที่ใช้ในบ่งบอกถึงประสิทธิภาพมี 2 ชนิด คือ ค่าเชิงปริมาณ เช่น ค่าความหน่วง ค่าอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ต และค่าเชิงคุณภาพ ได้แก่ PSNR และ MOS

1. การวัดผลแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์การส่งข้อมูลใน IEEE 802.11e แบบ HCCA

1.1 การตั้งค่าระบบจำลอง (Simulation Setup)

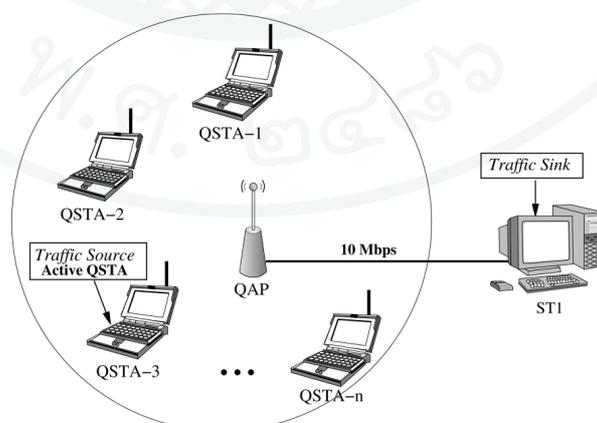
แผนภาพการวางอุปกรณ์ในระบบจำลองแสดงดังภาพที่ 17 ประกอบด้วย สถานี QSTA จำนวน n เครื่อง และสถานี QAP จำนวน 1 เครื่อง ซึ่งเชื่อมต่อกันบนเครือข่ายไร้สายภายในเซตบริการพื้นฐานเดียวกัน ส่วนสถานี ST1 จะอยู่เชื่อมต่อกับสถานีในเครือข่ายไร้สายผ่าน QAP โดย QAP และ ST1 เชื่อมต่อกันโดยใช้สาย UTP ที่ทำงานอัตราเร็ว 10 Mbps ด้วยค่าเวลาประวิงการแพร่กระจาย (propagation delay) 10 มิลลิวินาที โดยกำหนดให้ QSTA เป็นสถานีต้นทางในการส่งข้อมูล (traffic source) และ ST1 เป็นสถานีปลายทางที่รับข้อมูล (traffic sink) เพื่อจำลองการส่งข้อมูลแบบประชุมวิดีโอ หรือข้อมูลจากกล้องเว็บแคมไร้สายในทิศทางขาขึ้น โดยการส่งข้อมูลในทิศทางขาลง (ส่งข้อมูลจาก ST1 ให้แก่ QSTA) ระบบมีพฤติกรรมไม่แตกต่างกัน ในการทดลองด้วยระบบจำลองจะอิงกับการส่งข้อมูลแบบ IEEE 802.11e แบบ HCCA ซึ่งทำงานอยู่บนชั้นฟิสิคอลแบบ IEEE 802.11b โดยช่องสัญญาณในการทดสอบมี 2 แบบ คือ แบบช่องสัญญาณแบบอุดมคติ (ideal channel condition) และช่องสัญญาณที่เกิดความผิดพลาดได้ (ด้วยความน่าจะเป็นในการส่งเฟรมผิดพลาด p_e)

การส่งข้อมูลบนชั้นฟิสิคอลแบบ IEEE 802.11b จะมีอัตราการส่งข้อมูลอยู่ระหว่าง 1 Mbps จนกระทั่งถึง 11 Mbps กระบวนการรับเข้าเซสชันเพื่อส่งข้อมูลจะใช้วิธีการตามมาตรฐาน

IEEE 802.11e แบบ HCCA หลังจากที่ได้รับเซสชันเข้ามาในระบบแล้วจะให้ช่วงระยะเวลา TXOP แก่เซสชันนั้นคงที่ที่ถูกรอบ SI จนกระทั่งจบการส่งข้อมูล ผลลัพธ์ที่นำมาวิเคราะห์แต่ละค่าจะคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 10 ครั้ง โดยการทดลองแต่ละครั้งจะมีค่าสุ่มเริ่มต้น (random seed) ที่ไม่ซ้ำกับการทดลองในครั้งอื่นๆ ระยะเวลาในช่วงการทดลองมีความยาว 15 นาที สถานีต้นทางจะเริ่มส่งข้อมูลที่วินาทีที่ 20 และส่งอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งจบการทดลอง ในการทดลองกำหนดความยาวมากที่สุดของแฉกคอย (K) ของแต่ละสถานีไม่เกิน 50 เฟรม โดยตัวเฟรมข้อมูลมีขนาด (FB) คงที่ 500 ไบต์ซึ่งไม่รวมส่วนของ preamble และ header ซึ่งการคำนวณค่าจากแบบจำลอง และการทดลองด้วยระบบจำลองจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่เป็นความยาวของแฉกคอย (K) และขนาดของเฟรมข้อมูล (FB) ที่เหมือนกัน

ถึงแม้ว่าการส่งข้อมูลในช่วง HCCA จะมีหลายเซสชันกำลังส่งข้อมูลอยู่ ซึ่ง QAP จะกำหนดช่วงเวลา TXOP การส่งข้อมูลแต่ละเซสชันเป็นอิสระต่อกัน ส่งผลให้การวัดผลเพียงหนึ่งเซสชันที่กำลังส่งข้อมูลอยู่เพียงพอกับการทำความเข้าใจพฤติกรรมกรรมการส่งข้อมูลในระบบแบบ HCCA ดังนั้นทุกการทดลองในระบบจำลองจะมีเพียงหนึ่งเซสชันที่กำลังส่งข้อมูลอยู่

ระบบจำลองที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพ คือ Network Simulator 2 (ns2) ใช้รุ่น 2.29.3 (ISI, 1999) ที่มีการติดตั้งส่วนเพิ่มเติมมอดูล ns2hcca (Cicconetti *et al.*, 2005) ให้สามารถทำงานแบบ IEEE 802.11e แบบ HCCA ได้ และเพิ่มมอดูลโปรแกรมประยุกต์สำหรับสร้างข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปัวซองเพื่อเป็นตัวแทนข้อมูลที่อัตราไม่คงที่ ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดใน ns2 สำหรับจำลองการทำงานแสดงดังตารางที่ 12



ภาพที่ 17 รูปแบบการตั้งค่าอุปกรณ์เครือข่ายในระบบจำลอง

ตารางที่ 12 ค่าพารามิเตอร์ของเครือข่ายไร้สายที่ใช้ในระบบจำลอง ns2

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
SIFS	10 μ sec
PIFS	30 μ sec
DIFS	50 μ sec
Slot time	20 μ sec
PHY header	192 bits
MAC header	288 bits
Ack size	304 bits
Data Rate	1, 2, 5.5 and 11 Mbps
Basic Rate	1 Mbps
MAC Protocol	IEEE 802.11e/b
Antenna	Omnidirectional antenna
Mobility	None
IFQ (interface queue)	50 packets

1.2 การตรวจสอบความถูกต้องของเวลารอคอยเฉลี่ยของเฟรมข้อมูล

ค่าเวลารอของเฟรมในแบบจำลอง คือ ช่วงเวลาที่เริ่มนับตั้งแต่เฟรมเข้ามาในแถวคอย (Enqueue) จนกระทั่งถูกดึง (Dequeue) ออกจากแถวคอย QSTA โดยค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรมข้อมูล ($E[W]$) จะคำนวณจากค่าคณิตศาสตร์ของแบบจำลองเมื่อการทำงานเข้าสู่ภาวะสถานะคงตัว (steady state)

นอกเหนือจากความยาวของแถวคอยแล้ว เวลารอเฉลี่ยของเฟรมข้อมูลยังขึ้นอยู่กับอัตราการเข้ามาของเฟรม (λ เฟรมต่อวินาที) โดยคำนวณมาจากค่าอัตราข้อมูลเฉลี่ยที่เซสชันร้องขอ (ρ บิตต่อวินาที) ที่พิจารณาโดย QAP ในกระบวนการรับเข้า โดยปกติค่าอัตราข้อมูลเฉลี่ยของโปรแกรมประยุกต์พวกเวลาจริงจะขึ้นอยู่กับที่ 128, 256 และ 512 Kbps (กิโลบิตต่อวินาที) อย่างไรก็ตาม QAP ไม่สามารถรับเซสชันที่มีค่าที่พอดีกับค่าอัตราการส่งข้อมูลที่ร้องขอได้ ตัวอย่างเช่น อัตราการส่งข้อมูลที่ร้องขอที่ 128 Kbps หลังจากที่ได้คำนวณ และมีการปัดค่าจำนวนเฟรมให้เป็นค่าจำนวนเต็มเพดานจากสมการที่ (1) จะส่งผลให้ QAP รับเซสชันด้วยอัตราการส่งข้อมูลที่สูงกว่าอัตราการการส่งข้อมูลที่ร้อง

ขอ โดยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ FB และ SI ที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นในการตั้งค่าการทดลอง กำหนดให้ค่าอัตราการส่งข้อมูลที่ QAP รับจะมีค่าเป็น 160, 280 และ 520 Kbps สำหรับเป็นตัวแทนของข้อมูลประเภทที่ต้องการคุณภาพ ต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ สำหรับค่า SI ที่เลือกใช้ในการวัดผลของแบบจำลอง และใช้ในการทดลองในระบบจำลอง มีค่าเป็น 100 มิลลิวินาที โดยอ้างอิงจาก ITU-T G.114 (ITU, 1993) ที่กำหนดถึงค่าความหน่วงของการส่งข้อมูลในทางเดียว

กำหนดให้ Δ เป็นค่าจำนวนเฟรมที่รับเพิ่มเติมจากค่าเฟรมที่รับปกติ และ N_{new} เป็นค่าจำนวนเฟรมที่รับปกติ (N) บวกเพิ่มด้วย Δ ซึ่งจะกำหนดให้โดย QAP ในแต่ละรอบ SI โดยค่าจำนวนเฟรมที่รับเพิ่มจากจำนวนเฟรมที่รับปกติ จะทำให้ค่าอัตราการส่งข้อมูลที่ร้องขอของเซสชันเปลี่ยนเป็น ρ' แสดงการคำนวณดังสมการที่ (42)

$$\begin{aligned}\rho' &= \frac{N_{new} \times FB \times 8}{SI} \\ &= \frac{(N + \Delta) \times FB \times 8}{SI}\end{aligned}\quad (42)$$

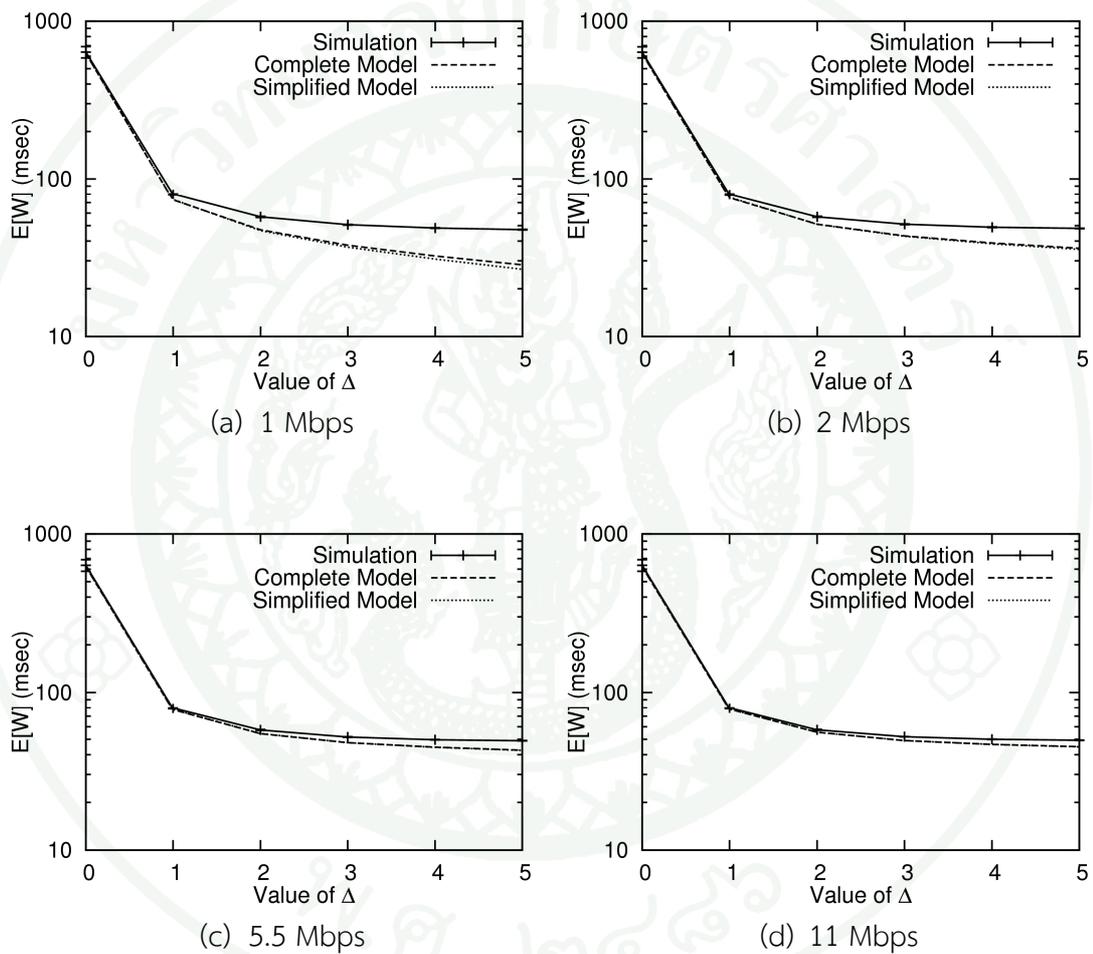
สำหรับการทดลองส่วนนี้จะวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นจากอัตราการส่งข้อมูลในกระบวนการรับเข้าเซสชันโดย QAP แบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้

- กรณี $\Delta = 0$ คือ กรณีที่ QAP รับเซสชันโดยใช้ค่าอัตราการส่งข้อมูลที่ร้องขอ โดยค่า $\rho' = \frac{(N+0) \times FB \times 8}{SI} = \rho$ บิตต่อวินาที
- กรณี $\Delta > 0$ คือ กรณีที่ QAP รับเซสชันโดยใช้ค่าอัตราการส่งข้อมูลสูงกว่าค่าที่ร้องขอ โดยค่า $\rho' = \frac{(N+\Delta) \times FB \times 8}{SI} = \rho + \frac{\Delta \times FB \times 8}{SI}$ บิตต่อวินาที

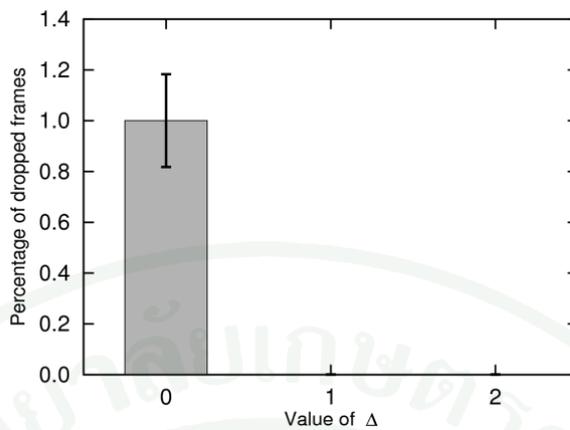
1.3 ผลและวิจารณ์แบบจำลองที่นำเสนอ

ส่วนนี้จะนำค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรมในชั้น MAC จากการคำนวณด้วยแบบจำลองที่นำเสนอ 2 แบบ คือ 1) แบบจำลองรูปแบบสมบูรณ์ (Complete model: แสดงดังภาพที่ 7) และ 2) แบบจำลองรูปแบบง่าย (Simplified model: แสดงดังภาพที่ 8) มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานด้วย ns2 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์หลักเดียวกัน

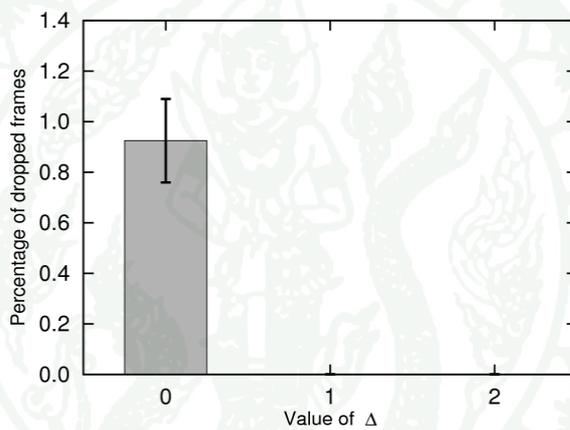
การส่งข้อมูลบนช่องสัญญาณแบบอุดมคติ ผลของค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม ($E[W]$) ของการส่งข้อมูลที่อัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ย 160 Kbps บนช่องสัญญาณที่มีอัตราส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลลที่ 1, 2, 5.5 และ 11 Mbps แสดงดังภาพที่ 18 โดยอัตราการทิ้งเฟรมข้อมูลที่เข้ามาในแถวคอยที่สกัดจากผลการทดลองบนระบบจำลองที่อัตราข้อมูลเฉลี่ย 160, 280 และ 520 Kbps ที่อัตราส่งข้อมูลเฉลี่ยในชั้นฟิสิคอลล 1 Mbps แสดงดังภาพที่ 19



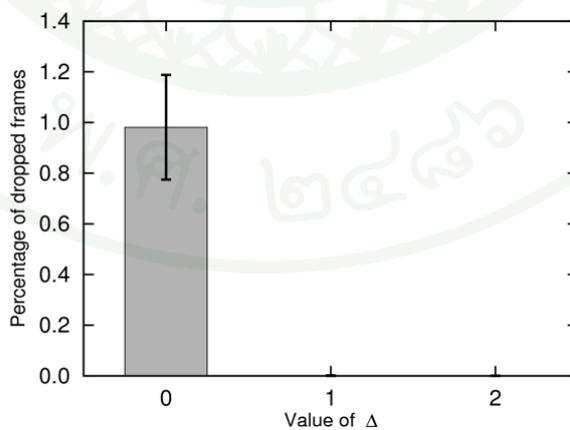
ภาพที่ 18 ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม $E[W]$ ในการส่งข้อมูลอัตราเฉลี่ย 160 Kbps



(a) 160 Kbps



(b) 280 Kbps



(c) 520 Kbps

ภาพที่ 19 ค่าอัตราการทิ้งเฟรมข้อมูลที่อัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิกอล 1 Mbps

สำหรับของกรณี $\Delta = 0$ แสดงดังภาพที่ 18(a) นำเสนอพฤติกรรมของแถวคอยที่มีข้อมูลรอส่ง ที่อัตราส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลลที่ 1 Mbps โดยค่า $E[W]$ จากแบบจำลองทั้งสองสอดคล้องกับค่าที่สกัดจากระบบจำลอง โดยมีค่าอยู่ภายในค่าเฉลี่ยและไม่เกินช่วงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าอัตราการทิ้งเฟรมของแถวคอยที่สกัดได้จากผลการทดลองด้วยระบบจำลอง พบว่า เกิดเหตุการณ์ทิ้งเฟรมขึ้น เนื่องจากไม่สามารถดึงเฟรมข้อมูลออกจากแถวคอยได้ทัน จึงทำให้แถวคอยยาวขึ้นจนไม่สามารถรองรับเฟรมที่เข้าใหม่ได้ ดังแสดงในภาพที่ 19(a) ณ ค่า $\Delta = 0$

ส่วนกรณี $\Delta > 0$ พบว่า ค่า Δ ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า $E[W]$ ลดลง เพราะว่า QAP อนุญาตให้เซสชันสามารถส่งข้อมูลที่อัตราสูงได้มากกว่าที่ร้องขอ ส่งผลให้ระบบสามารถรองรับความแปรปรวนของอัตราการเข้ามาของเฟรม และค่าของ $E[W]$ จะเริ่มมีค่าคงที่เมื่อ $\Delta > 3$ เพราะอัตราการส่งข้อมูลที่ QAP ให้แก่เซสชันมีค่าสูงกว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นของการเข้ามาของเฟรม โดยในแบบจำลองที่นำเสนอ จะคำนวณค่าความยาวเฉลี่ยของแถวคอยที่จุดเริ่มต้นของ SI ซึ่งมีความยาวมากที่สุด ซึ่งส่งผลให้ค่าเวลารอเฉลี่ยนานที่สุด ในขณะที่ตำแหน่งที่หยุดส่งข้อมูล (จบช่วง TXOP) จะมีค่าความยาวแถวคอยเฉลี่ยที่สั้นที่สุด และค่าเวลารอเฉลี่ยที่สั้นที่สุดด้วยเช่นกัน ในขณะที่ค่าจากแบบจำลองจะมีการคำนวณค่าเฉลี่ยจากความยาวของแถวคอยทั้งหมด ซึ่งรวมถึงความยาวของสภาวะแถวคอยว่าง (Empty queue states) ด้วย แต่ค่าที่สกัดจากการทดลองในระบบจำลองนั้น เป็นค่าเวลาของเฟรมที่ใช้ในการเข้าสู่แถวคอยจนกระทั่งออกถูกดึงออกจากแถวคอย ซึ่งช่วงเวลาที่แถวคอยว่างอยู่จะไม่ถูกนำมาเฉลี่ยด้วย ดังนั้นสำหรับกรณี $\Delta > 1$ ค่า $E[W]$ ที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองจึงมีค่าต่ำกว่าค่าที่สกัดจากระบบจำลองดังภาพที่ 18 ส่วนค่า $E[W]$ ที่คำนวณจากแบบจำลองแบบสมบูรณและแบบจำลองรูปแบบง่ายมีค่าใกล้เคียงกัน

ผลการส่งข้อมูลที่อัตราเฉลี่ย 160 Kbps บนช่องสัญญาณที่มีอัตราส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลลมีค่า 2, 5.5 และ 11 Mbps แสดงดังภาพที่ 18(b) ถึง 18(d) ตามลำดับ พบว่า ค่าอัตราการส่งข้อมูลชั้นฟิสิคอลลมีผลกระทบต่อความยาวเฉลี่ยของแถวคอย \bar{Q} และ $E[W]$ ดังนั้นการรับเซสชันโดยมีจำนวนเฟรม N เท่ากัน ณ ค่าอัตราส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลลต่างกัน จะทำให้ค่าช่วง TXOP ที่อนุญาตให้ส่งข้อมูลมีขนาดต่างกัน เช่น ค่าช่วงเวลา TXOP ของอัตราส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 1 Mbps จะมีความยาวกว่าอัตราส่งข้อมูล 11 Mbps

สำหรับกรณีที่ $\Delta = 0$ มีแนวโน้มที่มีจำนวนเฟรมรอส่งอยู่ในแถวคอยค่อนข้างมาก (ค่า \bar{Q} มีขนาดใหญ่) เนื่องจากอัตราการเข้ามาของเฟรมข้อมูลในแถวคอยเฉลี่ยกับอัตราการส่งข้อมูลออกสู่ช่องสัญญาณมีค่าเท่ากัน ($\lambda = N$) สำหรับช่วงเวลา SI คงที่ การเพิ่มช่วงเวลา TXOP ให้ยาวขึ้น จะทำให้

ช่วง non-TXOP สิ้นลง ซึ่งส่งผลให้ความน่าจะเป็นที่มีเฟรมเข้ามาในแถวคอยในช่วง TXOP สูงขึ้น แต่โอกาสที่เฟรมจะได้ส่งออกช่องสัญญาณเท่าเดิม เพราะจำนวนเฟรมที่รออยู่ในแถวคอยมีมากกว่าจำนวนเฟรมที่ส่งได้ในรอบ SI นั้น เมื่อมองระบบแบบภาพรวม ในช่วง SI ใดๆ พบว่า ช่วง TXOP ที่ยาวขึ้น (อัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิกอลที่ลดลง) จะไม่มีผลต่ออัตราการส่งเฟรมข้อมูลออกสู่ช่องสัญญาณ แต่จะมีผลกับเพียงเล็กน้อยกับค่า \bar{Q}_{TXOP} ที่อยู่ในช่วง TXOP และ $\bar{Q}_{nonTXOP}$ ที่อยู่ในช่วง non-TXOP ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่า \bar{Q} ตามสมการที่ (28) ดังนั้นอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิกอลที่แตกต่างกัน (ค่า TXOP ต่างกัน) มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่า \bar{Q} และ $E[W]$ แสดงดังภาพที่ 18(a) ถึง 18(d)

ส่วนกรณีที่ $\Delta > 0$ มีแนวโน้มที่จะมีจำนวนเฟรมที่รอส่งอยู่ในแถวคอยค่อนข้างน้อย โดยค่าช่วงเวลา TXOP จะมีผลต่อค่า \bar{Q} สำหรับช่วงเวลา SI คงที่ ถ้าเวลาช่วง TXOP ยาวขึ้น จะทำให้ช่วง non-TXOP สิ้นลง ส่งผลให้ความน่าจะเป็นที่มีเฟรมเข้ามาในแถวคอยของช่วง TXOP มีค่าเพิ่มขึ้น และมีโอกาสที่จะได้ส่งมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม ความน่าจะเป็นที่มีเฟรมเข้ามาในแถวคอยในช่วง non-TXOP มีค่าลดลงซึ่งทำให้แถวคอยยาวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากค่าขนาดของแถวคอยที่เหลืออยู่หลังจากจบช่วง TXOP (\bar{Q}_0) จากการสังเกตค่า \bar{Q} ในสมการที่ (28) ซึ่งเป็นผลรวมค่าสัดส่วนระหว่าง \bar{Q}_{TXOP} และ $\bar{Q}_{nonTXOP}$ พบว่า \bar{Q} จะมีค่าลดลงเมื่อค่า TXOP เพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าอัตราการส่งข้อมูลชั้นฟิสิกอลสูงขึ้น (ช่วงเวลา TXOP สิ้นลง) จะทำให้ค่า $E[W]$ สูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 18(a) ถึง 18(d)

สำหรับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่า $E[W]$ เมื่อมีอัตราข้อมูลเฉลี่ยที่แตกต่างกัน จากภาพที่ 20(a), 20(b) และ 20(c) คือ ค่า $E[W]$ ที่เกิดจากการส่งข้อมูลด้วยอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่ 160, 280 และ 520 Kbps ตามลำดับ โดยชั้นฟิสิกอลที่มีค่าอัตราส่งข้อมูล 11 Mbps พบว่า สำหรับ $\Delta = 0$ ข้อมูลที่มีอัตราเฉลี่ยที่สูงกว่าจะมีค่า $E[W]$ ที่ต่ำกว่า เพราะข้อมูลที่มีอัตราข้อมูลเฉลี่ยที่สูงกว่าจะทำให้ปริมาณของจำนวนเฟรมในแถวคอยสามารถส่งในช่วง SI ได้ปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้เวลารอของแต่ละเฟรมลดลง ในกรณีที่ $\Delta > 0$ แถวคอยมีแนวโน้มจะมีความยาวสั้นลงด้วยความน่าจะเป็นที่สูงขึ้น ทำให้เฟรมที่เข้ามารอในแถวคอยสามารถส่งออกจากแถวคอยได้ภายในหนึ่งถึงสองรอบ SI ซึ่งค่า $E[W]$ จากผลการทดลองในระบบจำลองจะมีค่าเหมือนกันในทุกค่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แตกต่างกัน ส่วนผลของแบบจำลองข้อมูลที่มีอัตราข้อมูลเฉลี่ยที่สูงขึ้นจะทำให้ค่า $E[W]$ ลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากค่า \bar{Q}_{TXOP} จะน้อยลง เพราะสามารถส่งเฟรมเพิ่มได้ในช่วง TXOP ที่ยาวขึ้น และการเพิ่มของจำนวนเฟรมของในแถวคอยระหว่างช่วง non-TXOP น้อยลง ซึ่งส่งผลให้ \bar{Q} ลดลง

อย่างไรก็ตาม แบบจำลองที่นำเสนอไม่สามารถระบุเวลารอในชั้น MAC แยกตามแต่ละเฟรมได้ ดังนั้นเพื่อสำรวจพฤติกรรมของระบบในมุมมองอื่นเพิ่มเติม ค่าเวลารอของเฟรมจึงสกัดจากผลการทดลองที่ได้จากระบบจำลอง เพื่อคำนวณค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (CDF: Cumulative Distribution Function) โดยเวลารอของเฟรมในชั้น MAC แสดงดังภาพที่ 21 เพื่อให้รองรับความต้องการของข้อมูลเวลาจริง (เช่น ข้อมูลเสียง ข้อมูลวิดีโอ) อย่างมีคุณภาพ ค่าเวลารอของเฟรมข้อมูลในชั้น MAC จะต้องอยู่ภายในขอบเขตค่าที่กำหนด เช่น ตามมาตรฐาน ITU-T G.114 (ITU, 1993) ค่าความหน่วงเวลาแพ็กเก็ตข้อมูลเสียงที่ส่งจากต้นทางถึงปลายทาง จะต้องมีความหน่วงไม่เกิน 150 มิลลิวินาทีจึงสามารถใช้งานได้ จากการทดลองที่ตั้งค่า SI เท่ากับ 100 มิลลิวินาที จึงกำหนดเวลาหน่วงของเฟรมที่รอภายในช่วงเวลา 200 มิลลิวินาที ($2 \times SI$) เพื่อรับประกันว่า ถ้าเฟรมข้อมูลเข้ามาในแถวคอยในช่วง SI ปัจจุบัน และไม่สามารถถูกดึงออกจากแถวคอยได้ในช่วง SI ปัจจุบัน เฟรมนั้นต้องถูกดึงออกจากแถวคอยได้ในช่วง SI ถัดไป

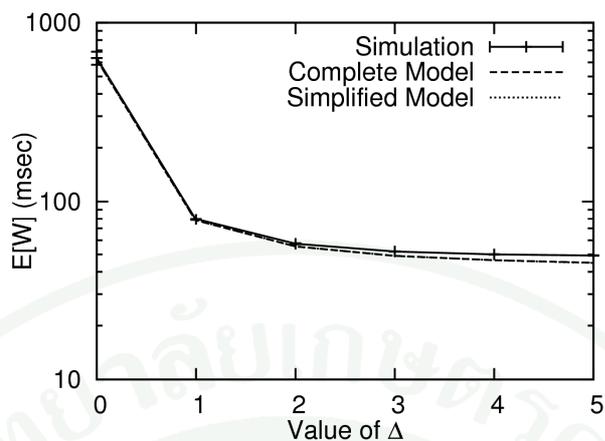
การส่งข้อมูลที่อัตราเฉลี่ย 160 Kbps ดังภาพที่ 21(a) พบว่า ที่ค่า $\Delta = 0$ จะมีเฟรมปริมาณ 11 เฟรมที่อยู่ในช่วงเวลา 200 มิลลิวินาที และที่ค่า $\Delta = 1$ จะมีเฟรมปริมาณ 97 เฟรมเช่นกันอยู่ในช่วงเวลา 200 มิลลิวินาที ดังนั้นถ้าต้องการให้ปริมาณเฟรมเกือบจะ 100 เฟรมเช่นที่อยู่ในช่วงเวลา 200 มิลลิวินาทีจะต้องใช้ค่า $\Delta = 2$ ค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเวลารอของเฟรมในการส่งข้อมูลอัตราเฉลี่ย 280 และ 520 Kbps แสดงดังภาพที่ 21(b) และ 21(c) ตามลำดับ พบว่า ถ้าต้องการให้ปริมาณเฟรมเกือบ 100 เฟรมเช่น (เกือบทั้งหมด) อยู่ในช่วงเวลา 200 มิลลิวินาทีสำหรับข้อมูลอัตราเฉลี่ย 280 และ 520 Kbps จะต้องใช้ค่า $\Delta = 2$

สำหรับการส่งข้อมูลบนช่องสัญญาณที่เกิดความผิดพลาด (non-ideal channel) ค่าความน่าจะเป็นในการส่งข้อมูลผิดพลาด (p_e) ในแบบจำลองจะมีค่าคงที่ โดยการคำนวณจากอัตราผิดพลาดของบิต (BER) รายละเอียดการคำนวณค่า p_e แสดงในสมการที่ (10) ส่วนการทดลองในระบบจำลองจะนำค่า p_e มาตั้งค่าพารามิเตอร์ความน่าจะเป็นของการส่งเฟรมข้อมูลผิดพลาดด้วยการแจกแจงแบบสม่ำเสมอ (uniform distribution) ทำให้การส่งเฟรมข้อมูลมีโอกาสเกิดความผิดพลาดอย่างสม่ำเสมอ โดยค่า BER ที่ใช้ในการทดลอง คือ 1×10^{-5} , 5×10^{-5} , และ 1×10^{-4} เพื่อเป็นตัวแทนของช่องสัญญาณที่เกิดความผิดพลาดของบิตที่ระดับต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ

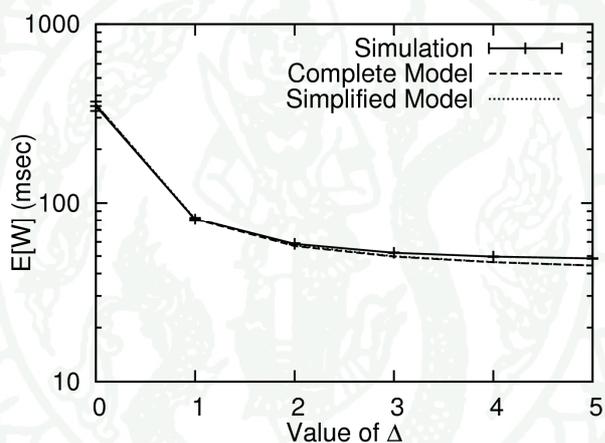
ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองและผลจากระบบจำลองสามารถนำมาเปรียบเทียบจาก 3 มุมมอง คือ 1) มุมมองที่ค่าอัตราผิดพลาดของบิตแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 22 2) มุมมองที่ค่า SI แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 23 และ 3) มุมมองที่อัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยมีค่าแตกต่างกัน แสดงดัง

ภาพที่ 24 โดยผลการเปรียบเทียบค่า $E[W]$ จากสามมุมมอง พบว่า ค่าจากแบบจำลองทั้งสองมีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากระบบจำลอง

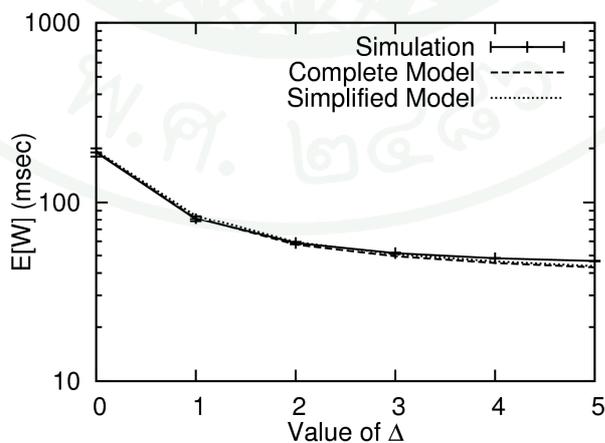




(a) 160 Kbps

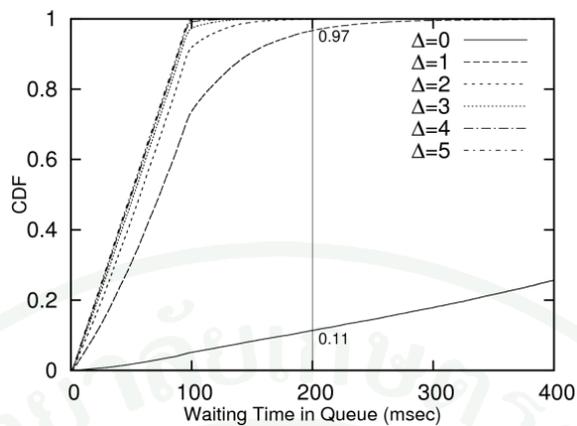


(b) 280 Kbps

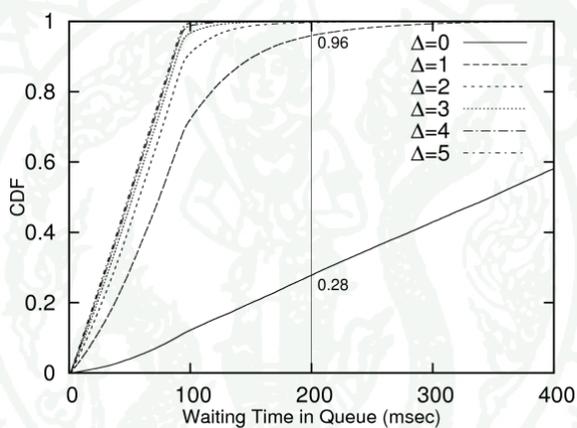


(c) 520 Kbps

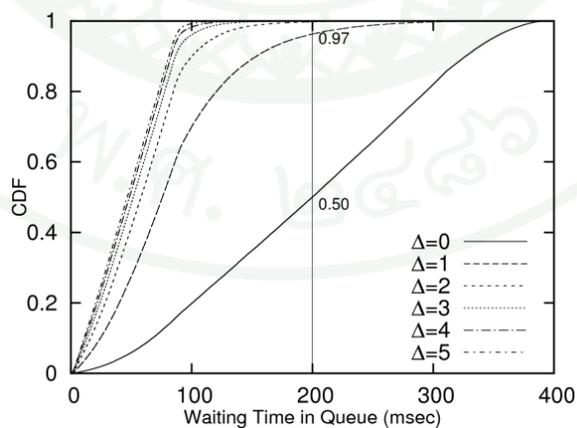
ภาพที่ 20 ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม $E[W]$ ที่อัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิกอล 11 Mbps



(a) 160 Kbps



(b) 280 Kbps



(c) 520 Kbps

ภาพที่ 21 ค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเวลารอของเฟรมในชั้น MAC ที่อัตราการส่งข้อมูล
ในชั้นฟิสิคัล 11 Mbps

1.4 ข้อเสนอแนะสำหรับปรับปรุงกระบวนการรับเข้า

จากผลลัพธ์ที่คำนวณจากแบบจำลองที่นำเสนอ พบว่า ค่า Δ ค่าแรกที่ทำให้ $E[W] \leq SI$ สามารถใช้เป็นค่า Δ แนะนำในกระบวนการรับเซสชันข้อมูลเข้าสำหรับ QAP เพื่อให้สามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการของเวลาหน่วงเฟรมให้อยู่ภายในช่วงเวลาสองเท่าของ SI ตัวอย่างเช่น การส่งอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ย 160 Kbps ที่ค่า BER เท่ากับ 1×10^{-5} และค่า SI เท่ากับ 100 มิลลิวินาที (หรือ 0.1 วินาที) ค่า Δ ที่แนะนำสำหรับการรับเซสชันนี้คือ 1 (แสดงโดยใช้ลูกศรดังภาพที่ 22(a1)) ดังนั้นค่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยใหม่ที่ QAP ใช้รับเซสชันนี้ คือ $\rho + \frac{\Delta \times FB \times 8}{SI} = 160,000 + \frac{1 \times 500 \times 8}{0.1} = 200$ Kbps โดยค่า Δ ที่คำนวณจากแบบจำลองจะสามารถรองรับการส่งข้อมูลที่ต้องการการรับประกันให้ค่าความหน่วงอยู่ในช่วงเวลาสองเท่าของ SI ดังแสดงด้วย CDF มีค่า 0.94 ที่ค่าความหน่วง 200 มิลลิวินาที ดังภาพที่ 22(a3) และไม่เกิดการทิ้งเฟรมข้อมูล ดังภาพที่ 22(a2) โดยค่า Δ ที่แนะนำสำหรับค่า BER มีค่าเท่ากับ 5×10^{-5} และ 1×10^{-4} แสดงโดยใช้ลูกศรกำกับดังภาพที่ 22(b1) และ 22(c1) ตามลำดับ

ค่า Δ ที่แนะนำจากแบบจำลองเพื่อใช้ในกระบวนการรับเข้าจะคำนวณจากฟังก์ชัน *getDeltaValue* ซึ่งถูกออกแบบเพื่อคำนวณหาค่า Δ ด้วยค่าพารามิเตอร์ TSPEC, SI, K และ BER ของเซสชัน *i* รายละเอียดการทำงานแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 รหัสเทียมของฟังก์ชัน *getDeltaValue(TSPEC, SI, K, BER)*

บรรทัดที่	คำสั่งการทำงาน
1:	$\Delta \leftarrow 0$
2:	$E[W] \leftarrow \text{Model Evaluation with Parameters } TSPEC, SI, K, BER, \Delta$
3:	while $E[W] > SI$ do
4:	$\Delta \leftarrow \Delta + 1$
5:	$E[W] \leftarrow \text{Model Evaluation with Parameters } TSPEC, SI, K, BER, \Delta$
6:	end while
7:	return Δ

จากค่า Δ ที่แนะนำสำหรับกรณีที่ส่งข้อมูลด้วยอัตราข้อมูลเฉลี่ย 160 Kbps ด้วยค่า SI ที่แตกต่างกัน (50, 100 และ 200 มิลลิวินาที) แสดงดังภาพที่ 23 พบว่า เมื่อค่า SI เพิ่มขึ้น แบบจำลอง

จะแนะนำให้รับเซสชันที่ร้องขอด้วยค่า Δ ที่สูงขึ้น ส่วนค่า Δ ที่แนะนำสำหรับกรณีที่มีอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่แตกต่างกันแสดงดังภาพที่ 24 พบว่า เมื่ออัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยเพิ่มขึ้น แบบจำลองจะแนะนำให้รับเซสชันที่ร้องขอด้วยค่า Δ ที่สูงขึ้นเช่นกัน จากการที่ QAP ต้องรับข้อมูลแต่ละเซสชันสูงกว่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่ร้องขอ ทำให้ระบบมีจำนวนของเซสชันที่รองรับได้ลดลง ตัวอย่างของจำนวนเซสชันที่ระบบรองรับได้โดยใช้ค่า Δ ที่แนะนำจากแบบจำลองสำหรับข้อมูลอัตราเฉลี่ย 160, 280 และ 520 Kbps ที่ค่าอัตราผิดพลาดของบิต (BER) มีค่าเป็น 0 , 1×10^{-5} , 5×10^{-5} และ 1×10^{-4} แสดงดังภาพที่ 25

กล่าวโดยสรุป นอกเหนือจากการวิเคราะห์ค่า $E[W]$ จากแบบจำลองที่นำเสนอ ผลลัพธ์หลักของแบบจำลอง คือ ความง่ายในการคำนวณเพื่อหาค่า Δ ที่แนะนำ สำหรับนำมาใช้ในกระบวนการรับเข้า ถึงแม้ว่า ค่า Δ ที่แนะนำจะคำนวณจากค่า $E[W]$ ของแต่ละเซสชัน แต่ถ้าพิจารณาพร้อมกับค่า CDF ของเวลารอของเฟรมในชั้น MAC ที่สกัดจากระบบจำลอง พบว่า ค่า Δ ที่แนะนำจากแบบจำลองเพียงพอที่จะประกันเวลารอของเฟรมในชั้น MAC โดยไม่ต้องคำนวณหาค่า CDF

สำหรับการรับเซสชัน i ในกระบวนการรับเข้า กำหนดให้ $TXOP_i^{new}$ คือ ค่า TXOP ใหม่ที่ QAP ใช้สำหรับรับเซสชัน i โดยในขณะที่เริ่มคำนวณค่า TXOP จะนำค่า Δ_i ที่แนะนำบวกเพิ่มจากค่า N_i ดังแสดงในสมการที่ (43)

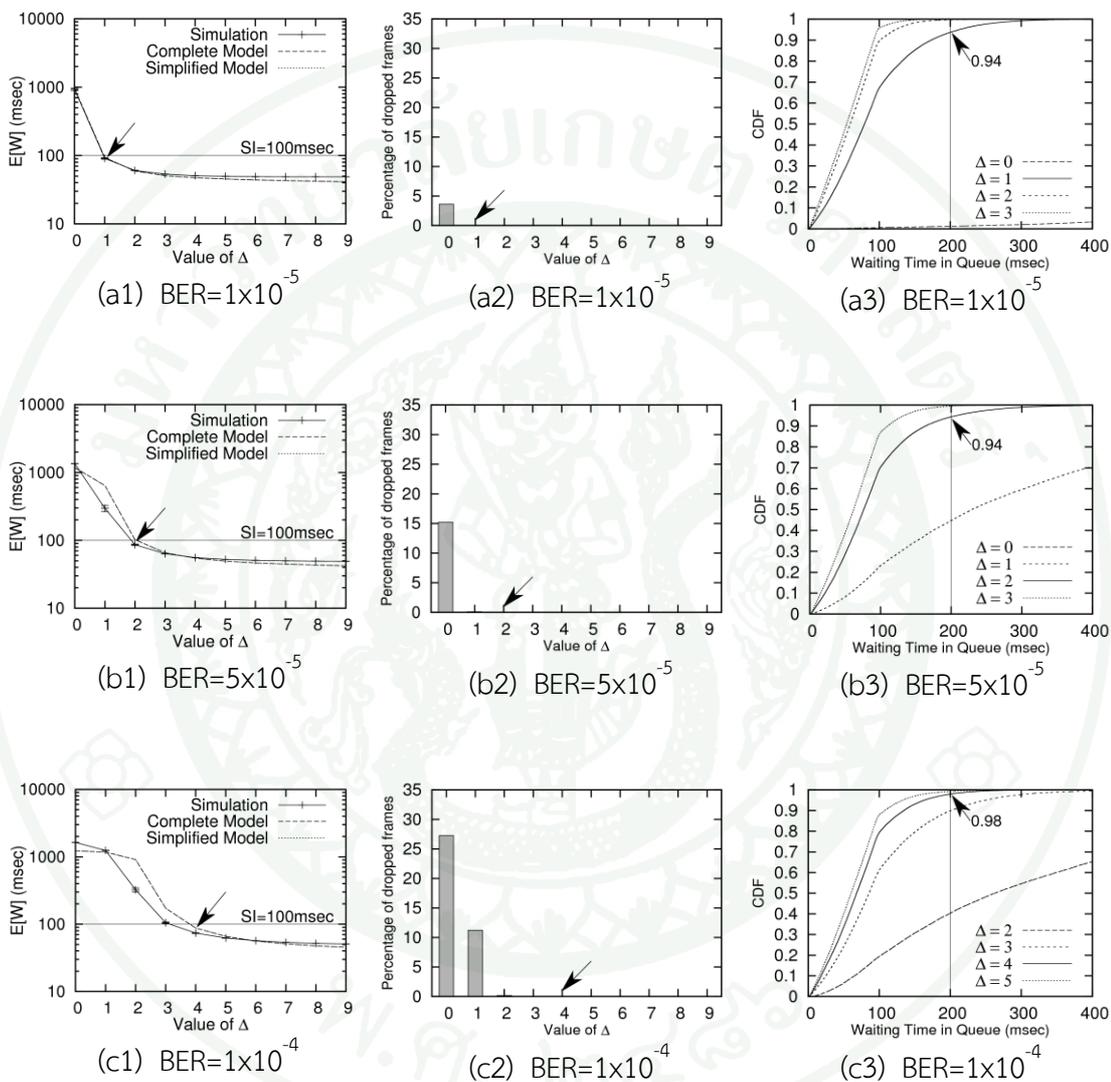
$$TXOP_i^{new} = \max \left(\frac{(N_i + \Delta_i) \times L_i}{PhyRate_{data}} + O, \frac{M}{PhyRate_{data}} + O \right) \quad (43)$$

หลังจากคำนวณค่า $TXOP_i^{new}$ เรียบร้อยแล้ว QAP จะตรวจสอบเงื่อนไขในการรับเซสชัน i ดังสมการที่ (44) โดยถ้าค่า $TXOP_i^{new}$ ของเซสชัน i สามารถทำให้เงื่อนไขของสมการที่ (44) มีค่าเป็นจริง QAP จะรับเซสชัน i เข้าสู่รายการโพล นอกเหนือจากนั้นปฏิเสธการรับเซสชัน i

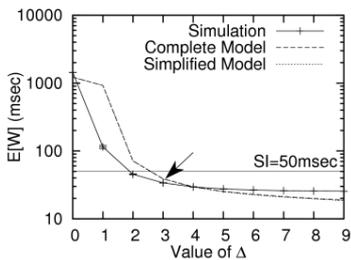
$$\frac{TXOP_i^{new}}{SI} + \sum_{j=1}^k \frac{TXOP_j}{SI} \leq \frac{T - T_{cp}}{T} \quad (44)$$

แบบจำลองที่นำเสนอสามารถรองรับข้อมูลที่ทราบรูปแบบการเข้ามาของแพ็กเก็ตที่ล่วงหน้า เช่น ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปัวซอง ดังนั้นสำหรับข้อมูลเวลาจริงที่ไม่มีรูปแบบการแจกแจงการเข้ามาของแพ็กเก็ตล่วงหน้า เช่น ข้อมูลวิดีโอสดที่มีแพ็กเก็ตหลายๆ ขนาด จำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มเติมจากกระบวนการรับเข้าเพื่อปรับเปลี่ยนค่า TXOP ให้เหมาะสมกับความต้องการ

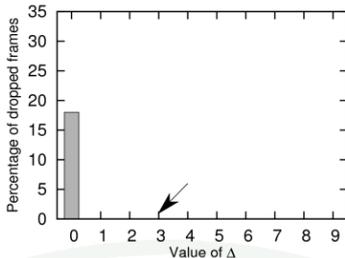
ของข้อมูลที่มีค่าไม่คงที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา อย่างไรก็ตาม ค่า Δ ที่คำนวณจากแบบจำลองสามารถนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นของ TXOP ในตอนรับเข้า เพื่อให้ในช่วงต่อมาสามารถปรับค่า TXOP ให้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการรับเซสชันข้อมูลโดยใช้ค่าที่อ้างอิงตามมาตรฐาน IEEE 802.11e



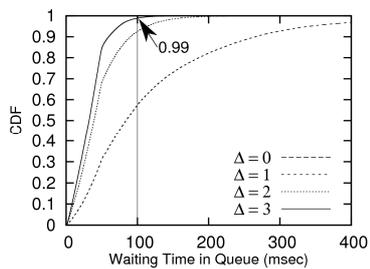
ภาพที่ 22 ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม ค่าอัตราการทิ้งเฟรมข้อมูล และค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเวลารอของเฟรมในชั้น MAC ที่ค่า SI=100 มิลลิวินาที และอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 11 Mbps



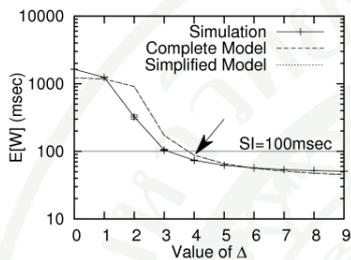
(a1) SI=50 msec



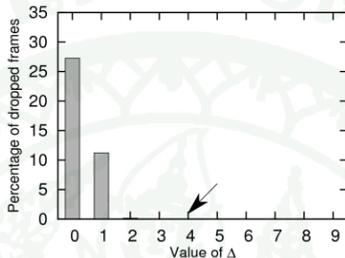
(a2) SI=50 msec



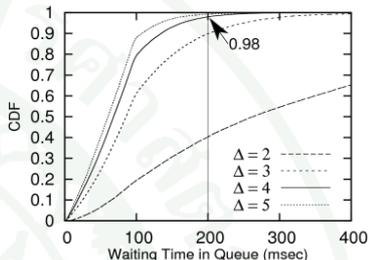
(a3) SI=50 msec



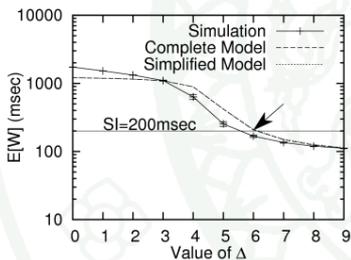
(b1) SI=100 msec



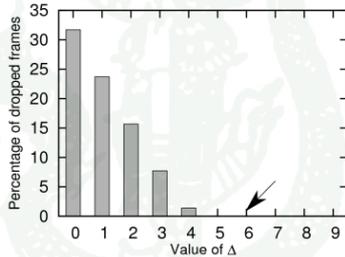
(b2) SI=100 msec



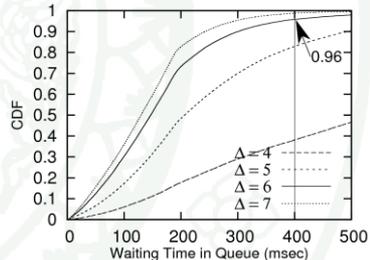
(b3) SI=100 msec



(c1) SI=200 msec

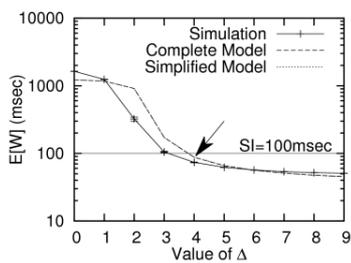


(c2) SI=200 msec

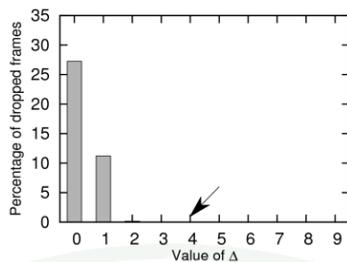


(c3) SI=200 msec

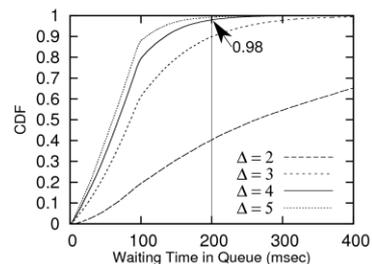
ภาพที่ 23 ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม ค่าอัตราการทิ้งเฟรมข้อมูล และค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเวลารอของเฟรมในชั้น MAC ของการส่งข้อมูลอัตราเฉลี่ย 160 Kbps ที่มีค่า BER=1x10⁻⁴ และอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 11 Mbps



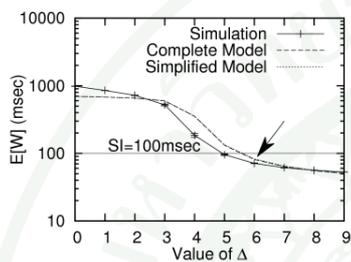
(a1) 160 Kbps



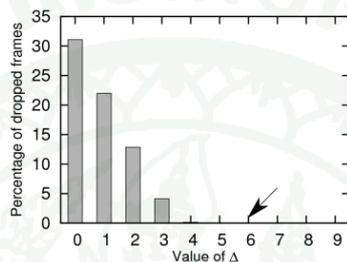
(a2) 160 Kbps



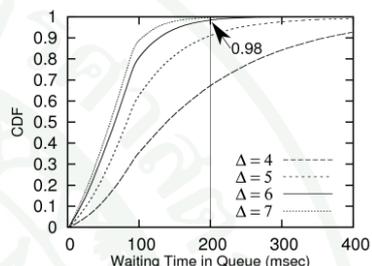
(a3) 160 Kbps



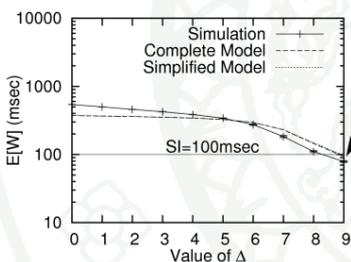
(b1) 280 Kbps



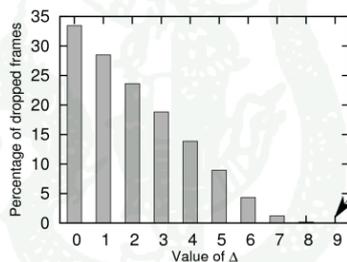
(b2) 280 Kbps



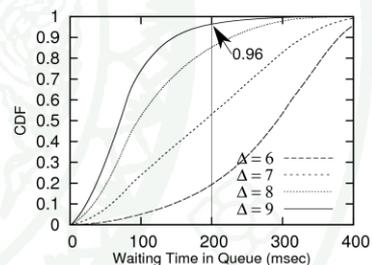
(b3) 280 Kbps



(c1) 520 Kbps

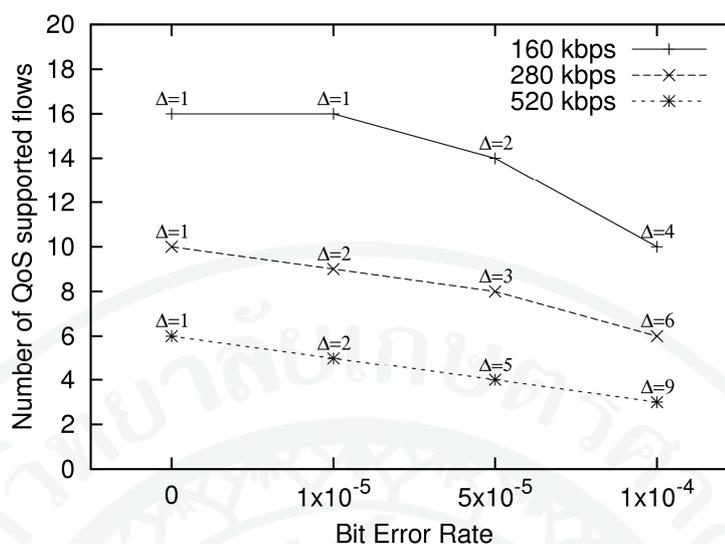


(c2) 520 Kbps



(c3) 520 Kbps

ภาพที่ 24 ค่าเวลารอเฉลี่ยของเฟรม ค่าอัตราการทิ้งเฟรมข้อมูล และค่าฟังก์ชันการแจกแจงสะสมเวลารอของเฟรมในชั้น MAC ที่มีค่า BER= 1×10^{-4} , SI=100 มิลลิวินาที และอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอล 11 Mbps



ภาพที่ 25 จำนวนเซสชันที่ระบบรองรับได้โดยใช้ค่า Δ ที่แนะนำจากแบบจำลอง
ที่ค่า SI=100 มิลลิวินาที และอัตราการส่งข้อมูลในชั้นฟิสิคอลล 11 Mbps

2. การวัดประสิทธิภาพกระบวนการ ATMV ในการรองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่

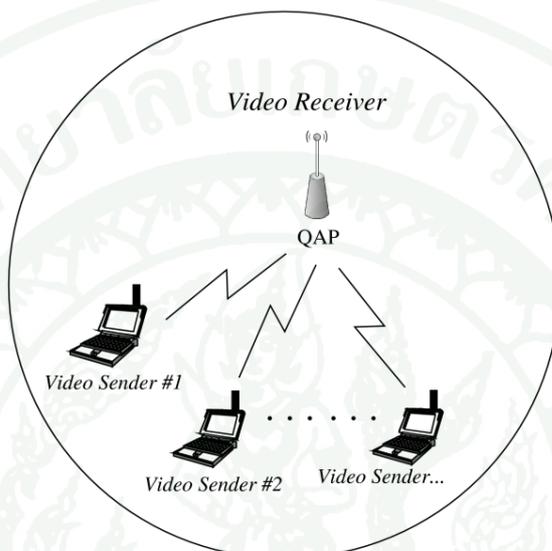
ส่วนนี้เป็นการทดลองเพื่อวัดประสิทธิภาพของกระบวนการ ATMV ในการปรับค่า TXOP เพื่อให้รองรับกับความต้องการของข้อมูลที่มีอัตราไม่คงที่โดยเน้นข้อมูลชนิดวิดีโอ การทดลองทำบนระบบจำลอง ns2 รุ่น 2.29.3 ที่มีการติดตั้งส่วนเพิ่มเติมมอดูล ns2hcca ให้สามารถทำงานแบบ IEEE 802.11e แบบ HCCA และติดตั้งมอดูล MyTrafficTrace เพื่อเชื่อมต่อกับ Evalvid toolset ให้สามารถนำผลการทดลองบนระบบจำลองมาประเมินคุณภาพวิดีโอได้

เพื่อให้ระบบจำลองสามารถทำงานตามกระบวนการ ATMV ได้ มอดูล ATMV จึงพัฒนาเป็นส่วนขยายจาก ns2hcca สำหรับให้ QAP สามารถทำกระบวนการ ATMV1 และ ATMV2 บนระบบจำลอง ns2 ในการปรับค่า TXOP ให้ตอบสนองความต้องการที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลาในการใช้งานช่องสัญญาณของข้อมูลอัตราไม่คงที่ โดยกระบวนการปรับค่า TXOP ทั้งหมดทำงานอยู่บน QAP

2.1 การตั้งค่าระบบจำลอง (Simulation Setup)

แผนภาพของการวางอุปกรณ์ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 26 การตั้งค่าอุปกรณ์เครือข่ายในระบบจำลองสำหรับการทดลองกระบวนการ ATMV ประกอบด้วย QAP จำนวน 1 เครื่อง

และ QSTA จำนวน n เครื่อง โดยสถานีทั้งหมดเชื่อมต่อกันบนเครือข่ายไร้สายภายในเซตบริการ พื้นฐานเดียวกัน และช่องสัญญาณไร้สายแบบอุดมคติ เพื่อเน้นการประเมินผลเฉพาะการทำงานแบบ HCCA จึงกำหนดให้สถานีทั้งหมดทำงานเฉพาะแบบ HCCA โดยไม่มีช่วงเวลาแบบ EDCA (กำหนดให้ช่วงเวลาในการแย่งชิง $T_{cp} = 0$)



ภาพที่ 26 การตั้งค่าอุปกรณ์เครือข่ายในระบบจำลองสำหรับการทดลองกระบวนการ ATMV

ในการทดลอง เริ่มต้นกำหนดให้ QSTA เป็นสถานีต้นทางที่สร้างและส่งข้อมูลวิดีโอ โดยหนึ่งสถานี QSTA จะสามารถส่งข้อมูลวิดีโอได้เพียง 1 เซสชันเท่านั้น เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของมอดูล ns2hcca ที่ใช้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถส่งข้อมูลวิดีโอได้มากกว่า 1 เซสชัน จึงใช้วิธีการเพิ่มจำนวนของ QSTA ที่กำลังส่งเซสชันวิดีโอให้ได้เท่ากับจำนวนเซสชันที่ต้องการแทน เพื่อให้มั่นใจว่าจะมีข้อมูลวิดีโอที่กำลังส่งพร้อมกันในการทดลอง กำหนดให้เวลาเริ่มต้นที่ QSTA ใช้ส่งข้อมูลจะคำนวณจากการสุ่มค่าจากการแจกแจงแบบสมมาตรที่มีค่าอยู่ตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาที ส่วน QAP จะทำหน้าที่เป็นสถานีปลายทางรับข้อมูลวิดีโอ ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในระบบจำลอง ns2 สำหรับจำลองการทำงานแสดงดังตารางที่ 14

การส่งข้อมูลบนระบบบนเครือข่ายไร้สายจะมีข้อมูลที่มีทิศทางทั้งขาลง และขาขึ้น สำหรับข้อมูลทิศทางขาลง QAP จะทราบพารามิเตอร์ทั้งหมดที่เกี่ยวกับเซสชัน และค่าขนาดของแฉวคอยที่ถูกต้องสามารถสกัดจากแฉวคอยที่อยู่บน QAP ได้ทันทีเมื่อต้องการนำมาปรับค่าช่วงเวลา TXOP แต่สำหรับการส่งข้อมูลในทิศทางขาขึ้น การส่งความยาวของแฉวคอยของเซสชันที่อยู่บน

QSTA มาให้แก่ QAP จะใช้วิธีส่งค่ากลับโดยแนบค่าความยาวของแถวคอย ณ ขณะนั้นมากับแพ็กเก็ตข้อมูล โดยข้อมูลความยาวของแถวคอยที่ QAP บันทึกไว้จะไม่ใช้ข้อมูลล่าสุด เพราะเป็นข้อมูลที่ได้มาตอนที่เซสชันกำลังส่งข้อมูลอยู่ซึ่งไม่ได้รวมแพ็กเก็ตใหม่เข้ามาถึงแถวคอยหลังจากนั้น ดังนั้นเพื่อประเมินผลของกระบวนการปรับค่า TXOP โดยใช้เฉพาะข้อมูลที่ป้อนกลับ จึงทดลองเฉพาะการส่งข้อมูลทิศทางขาขึ้นเท่านั้น

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์เครือข่ายไร้สายในระบบจำลองสำหรับการทดลองกระบวนการ ATMV

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
SIFS	10 μ sec
PIFS	30 μ sec
DIFS	50 μ sec
Slot time	20 μ sec
PHY header	192 bits
MAC header	288 bits
Ack size	304 bits
Data Rate	11 Mbps
Basic Rate	1 Mbps
MAC Protocol	IEEE 802.11e/b
Antenna	Omnidirectional antenna
Mobility	None
IFQ (interface queue)	50 packets
SI	50 msec

2.2 รายละเอียดข้อมูลวิดีโอ (Video traffic details)

วิดีโอที่ใช้ในการทดลองมีจำนวน 5 เรื่อง คัดเลือกจากคลังข้อมูลวิดีโอแบบเปิด (open video source library) ที่สนับสนุนโดย Arizona State University (n.d.) วิดีโอในคลังทั้งหมดไม่ถูกบีบอัด และจัดเก็บในรูปแบบ 4:2:0 YUV ที่มีความละเอียด 352x288 CIF การคัดเลือกวิดีโอสำหรับการทดสอบจะแบ่งกลุ่มตามงานวิจัยของ Khan *et al.* (2009) โดยแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม คือ

กลุ่มการเคลื่อนไหวเล็กน้อย (Slightly movement) กลุ่มการเดินแบบปกติ (Gentle walking) และกลุ่มการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว (Rapid movement)

ในการทดลองใช้วิดีโอ Akiyo เป็นตัวแทนของกลุ่มเคลื่อนไหวเล็กน้อย วิดีโอ Container และ Foreman เป็นตัวแทนกลุ่มการเดินปกติ และกลุ่มเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็วใช้วิดีโอ Coastguard และ Highway วิดีโอทั้งหมด มีจำนวนเฟรมทั้งหมด 300 เฟรมยกเว้นวิดีโอ Highway จะมีจำนวนเฟรมทั้งหมด 2000 เฟรม ตัวอย่างเฟรมของวิดีโอทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 27



(a) Akiyo



(b) Container



(c) Foreman



(d) Coastguard



(e) Highway

ภาพที่ 27 ตัวอย่างเฟรมของวิดีโอทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองจำนวน 5 เรื่อง

วิดีโอทั้งหมดที่ใช้ในระบบจำลองจะเข้ารหัสด้วย mpeg-4 โดยตั้งค่าอัตราบิตเป้าหมาย (target bit-rate) ที่ 256 Kbps และใช้ค่า GOP(9,3) โปรแกรมที่ใช้ในการเข้ารหัส คือ ffmpeg (Bellard, 2008) รุ่น SVN-r23131

เฟรมวิดีโอ เช่น I-Frame หรือ P-Frame โดยปกติจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับค่า MTU (Maximum Transfer Unit) ของขนาดแพ็กเก็ต ดังนั้นเฟรมวิดีโอที่ใช้ในการทดลองจะถูกแบ่งย่อยเป็นแพ็กเก็ตวิดีโอที่มีขนาดไม่เกิน 1024 ไบต์

ตัวอย่างรายละเอียดของจำนวนเฟรมวิดีโอที่เข้ารหัส เช่น วิดีโอ Akiyo จะแบ่งเป็นเฟรมวิดีโอชนิด I-Frame จำนวน 34 เฟรม B-Frame จำนวน 199 เฟรม และ P-Frame จำนวน 67 เฟรม

โดยเฟรมชนิด I-Frame, B-Frame และ P-Frame จะแบ่งย่อยเป็นแพ็กเก็ตจำนวน 283, 199 และ 79 แพ็กเก็ตตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยขนาดของแพ็กเก็ตชนิด I, B และ P มีค่าเป็น 956, 179 และ 624 ไบต์ ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยขนาดของแพ็กเก็ตทั้งหมด (638 ไบต์) จะใช้เป็นค่าพารามิเตอร์ L_i ซึ่งเป็นตัวแทนของค่า nominal MSDU ที่ใช้ใน TSPEC เพื่อร้องขอส่งข้อมูลในกระบวนการรับเข้า รายละเอียดเฟรมและแพ็กเก็ตของวิดีโอทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 รายละเอียดจำนวนเฟรมและแพ็กเก็ตของวิดีโอที่ใช้ในการทดลองบนระบบจำลอง

ชื่อวิดีโอ	จำนวนแพ็กเก็ต			จำนวนทั้งหมด (ค่าเฉลี่ยขนาดแพ็กเก็ต หน่วยเป็นไบต์)
	I-Frame	B-Frame	P-Frame	
Aikyo	283	199	79	561
	(956)	(179)	(624)	(638)
Container	276	208	104	588
	(960)	(168)	(600)	(616)
Foreman	164	227	132	523
	(893)	(458)	(760)	(671)
Coastguard	179	224	129	532
	(956)	(400)	(848)	(696)
Highway	1126	1373	701	3200
	(927)	(487)	(690)	(687)

2.3 การประเมินคุณภาพวิดีโอ (Video Quality Evaluation)

ค่าความหน่วงแพ็กเก็ตเฉลี่ย (Mean packet delay) ค่าสูญเสีย TXOP (TXOP loss factor) และค่าการครอบครองช่องสัญญาณ (Channel occupancy) นำมาใช้สำหรับเพื่อพิจารณาประสิทธิภาพของกระบวนการที่นำเสนอ โดยค่าความหน่วงของแพ็กเก็ตเฉลี่ย จะทำการเฉลี่ยจากค่าความหน่วงของแพ็กเก็ตทั้งหมดที่เกิดขึ้นเมื่อเริ่มส่งข้อมูลจากสถานีต้นทาง (QSTA) จนกระทั่งถึงสถานีปลายทาง (QAP) ส่วนค่าสูญเสีย TXOP จะเป็นค่าสัดส่วนระหว่างค่าช่วง TXOP ที่คงเหลือจากการส่งแพ็กเก็ตเทียบกับค่า TXOP ที่ได้รับอนุญาตให้ใช้งานจาก QAP ของข้อมูลแต่ละเซสชัน แสดง

การคำนวณดังสมการที่ (45) ส่วนค่าการใช้งานช่องสัญญาณ คือ ค่าที่ระบุถึงการใช้งานของระบบ ระหว่างค่าผลรวมของ TXOP ที่สำรองให้แต่ละเซสชันใช้งานเทียบกับค่า SI

$$TXOP_{LossFactor} = \frac{\sum TXOP_{allocated} - \sum TXOP_{used}}{\sum TXOP_{allocated}} \quad (45)$$

ส่วนการวัดคุณภาพของวิดีโอเชิงวัตถุวิสัย (Objective video evaluation) ใช้ค่า PSNR และค่าคุณภาพของวิดีโอเชิงจิตวิสัย (Subjective video evaluation) ใช้ค่า MOS โดยเปรียบเทียบค่าของข้อมูลวิดีโอในฝั่งสถานีต้นทาง และค่าของข้อมูลวิดีโอที่สถานีปลายทาง การเปลี่ยนของค่าที่เกิดขึ้นในระหว่างส่งข้อมูล คือ คุณภาพที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อข้อมูลวิดีโอถึงสถานีปลายทาง โดยเครื่องมือที่ใช้วัดค่าคุณภาพวิดีโอคือ Evalvid toolset ที่มีการเชื่อมโยงกับระบบจำลอง ns2

2.4 ผลและวิจารณ์กระบวนการ ATMV ที่นำเสนอ

พฤติกรรมกรปรับค่า TXOP และการใช้งานช่วงเวลา TXOP ในแต่ละช่วง SI ของกระบวนการ ATMV1 และ ATMV2 โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการพื้นฐาน (ที่กำหนดในมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA) กับกระบวนการ ARROW (Skyrianoglou *et al.*, 2006) ของการส่งข้อมูลวิดีโอ Akiyo แสดงดังภาพที่ 28

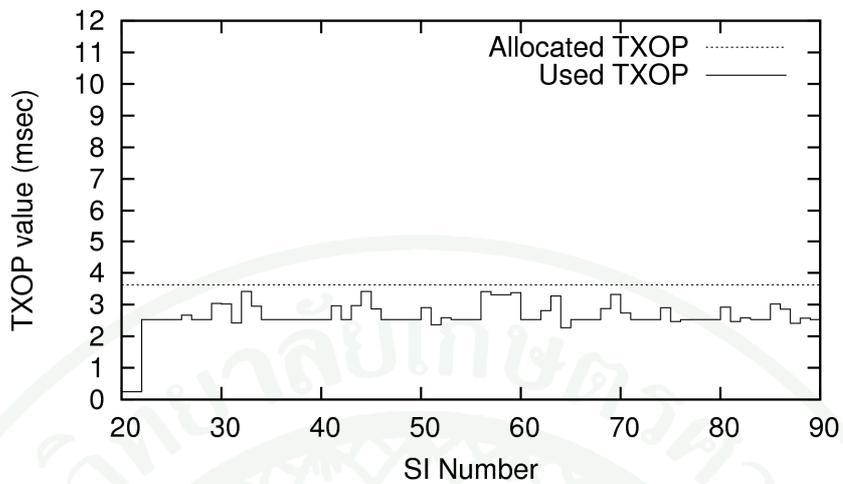
การนำกระบวนการ ATMV มาเปรียบเทียบกับ ARROW เนื่องจากว่า กระบวนการ ARROW ใช้การปรับค่า TXOP จากขนาดของแฉกคอยป้อนกลับจาก QSTA ในแต่ละรอบ SI เช่นเดียวกับ ATMV ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณไม่ซับซ้อน และสามารถตอบสนองความต้องการของข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว โดย ARROW จะปรับค่า TXOP ให้เพียงพอต่อการส่งข้อมูลที่อยู่ในแฉกคอย โดยคำนวณตามค่าขนาดของแฉกคอยป้อนกลับ ส่วน ATMV จะปรับค่า TXOP ตามสถานะปัจจุบันของเครื่องจักรสถานะจำกัด ซึ่งค่า TXOP ที่คำนวณได้จะเพียงพอ หรือมากกว่าความต้องการ

จากภาพที่ 28(a) คือ ผลของกระบวนการพื้นฐาน (Basic) ซึ่ง QAP จะกำหนดช่วงเวลา TXOP ให้กับเซสชันด้วยค่าคงที่ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยที่ระบุอยู่ใน TSPEC ซึ่งอาจจะไม่เพียงพอแก่การส่งแพ็กเก็ตที่รออยู่ในแฉกคอย การใช้งานช่วงเวลา TXOP จะถูกจำกัดอยู่ภายในค่าคงที่ สำหรับกระบวนการกำหนดช่วงเวลา TXOP แบบ ARROW, ATMV1 และ ATMV2 นั้นจะมีการปรับปรุงค่า TXOP เปลี่ยนแปลงตามค่าป้อนกลับขนาดของแฉกคอย โดยเซสชันจะ

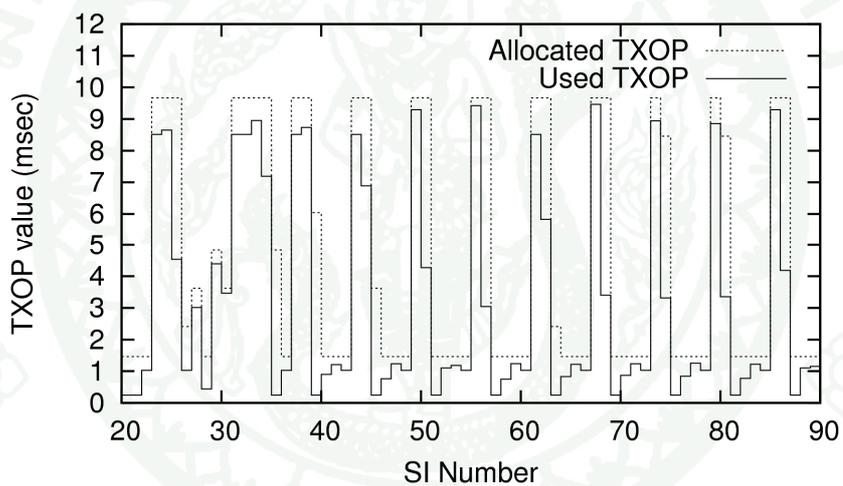
สามารถส่งข้อมูลที่อัตราการส่งข้อมูลที่สูงขึ้นได้ตามค่าปัจจัยสัมประสิทธิ์ที่อนุญาตแสดงดังภาพที่ 28(b) ถึง 28(d)

กระบวนการ ARROW จะกำหนดค่า TXOP ต่ำสุดสำหรับการส่งข้อมูลหนึ่งเซสชัน เป็นค่าช่วงเวลาที่ส่งหนึ่งแพ็กเก็ตที่มีขนาดเท่ากับขนาดที่ใหญ่ที่สุดของ MSDU ในขณะที่ ATMV1 และ ATMV2 กำหนดค่า TXOP ต่ำที่สุดในการส่งข้อมูลมีเท่ากับขนาด γ_{1d_i} จากพฤติกรรมของการปรับ TXOP ที่แตกต่างกันของแต่ละกระบวนการส่งผลให้มีค่าสูญเสีย TXOP แตกต่างกัน รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 29



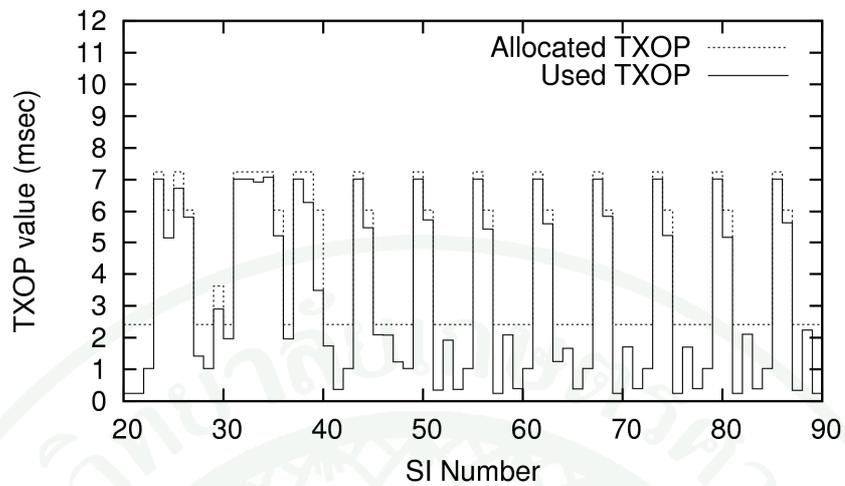


(a) Basic

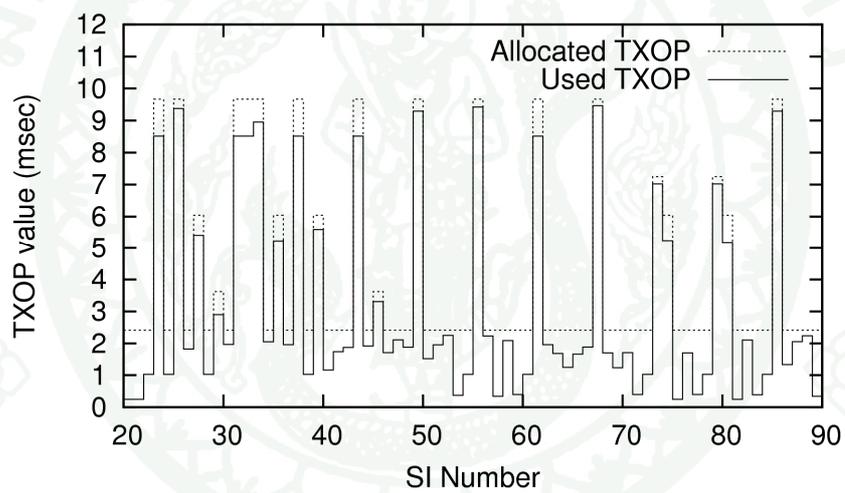


(b) ARROW

ภาพที่ 28 พฤติกรรมการปรับค่า TXOP และการใช้งานช่วงเวลา TXOP ในแต่ละช่วง SI ของการส่งข้อมูลวิดีโอ Akiyo ด้วยกระบวนการ Basic, ARROW, ATMV1 และ ATMV2

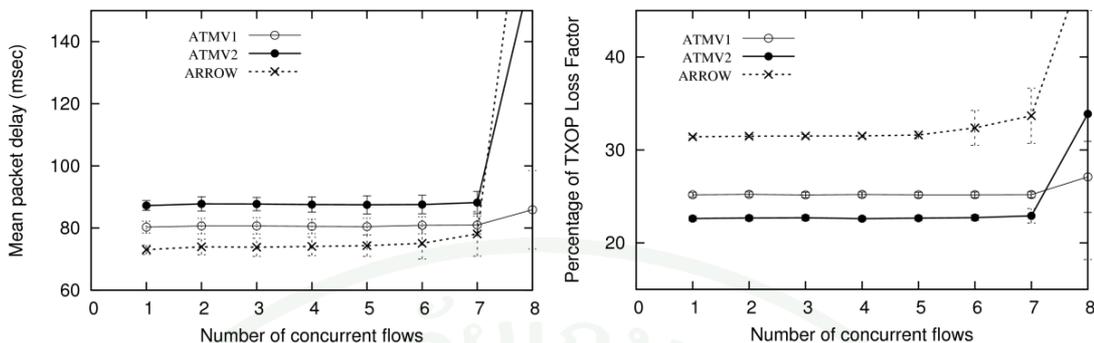


(c) ATMV1

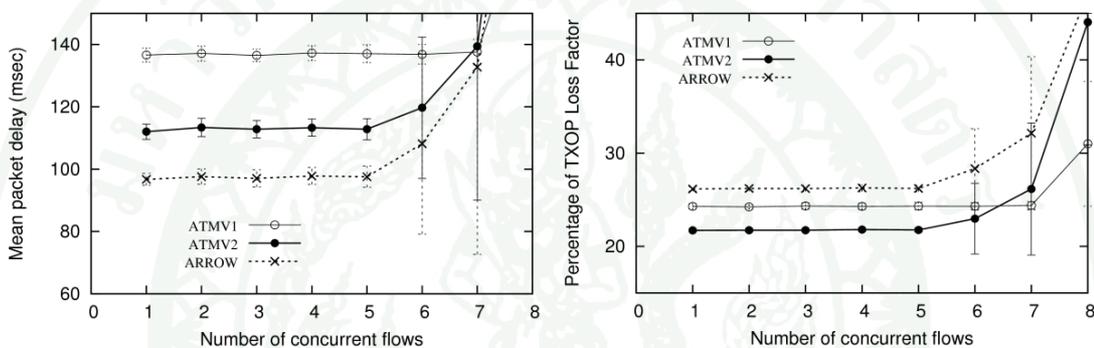


(d) ATMV2

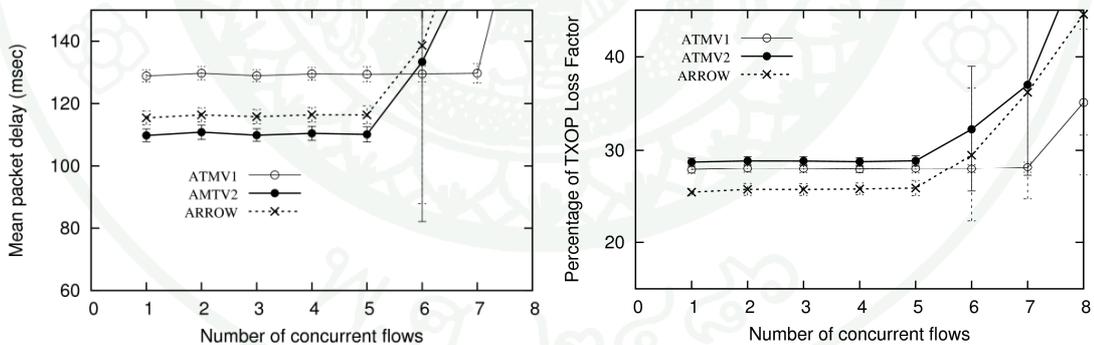
ภาพที่ 28 (ต่อ)



(a) Akiyo

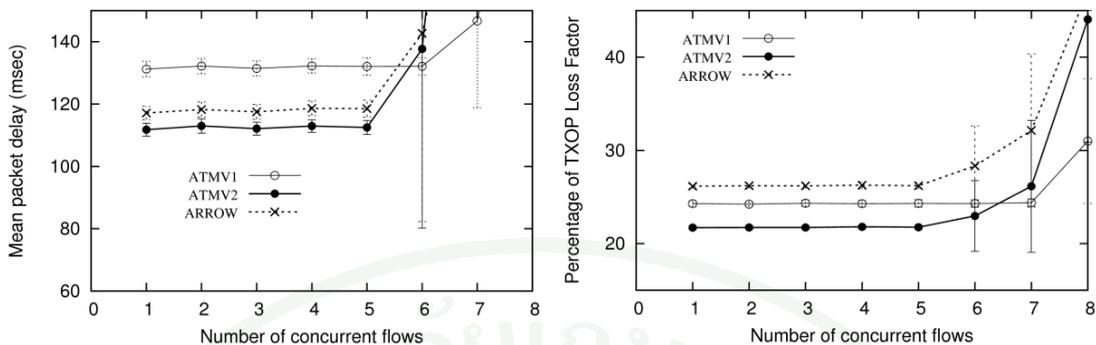


(b) Container

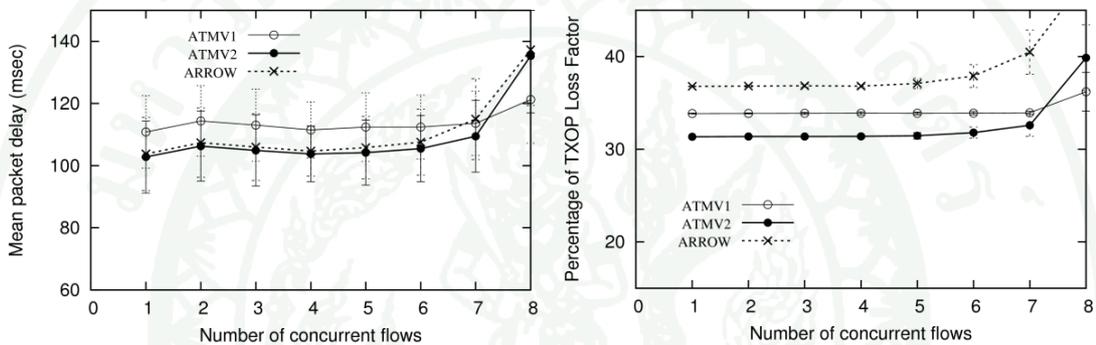


(c) Foreman

ภาพที่ 29 ค่าความหน่วงของแพ็กเก็ต และค่าสูญเสีย TXOP ของการส่งข้อมูลวิดีโอทั้ง 5 เรื่อง ด้วยกระบวนการ ARROW, ATMV1 และ ATMV2



(d) Coastguard



(e) Highway

ภาพที่ 29 (ต่อ)

2.3.1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

ค่าความหน่วงแพ็กเก็ตเฉลี่ย ค่าสูญเสีย TXOP และค่าการครอบครองช่องสัญญาณ จะสกัดและคำนวณจากการทดลองจำนวน 20 ครั้ง โดยการทดลองแต่ละครั้งจะมีค่าสุ่มเริ่มต้นที่ไม่ซ้ำกัน

ค่าความหน่วงแพ็กเก็ตเฉลี่ยและค่าสูญเสีย TXOP ในการส่งข้อมูลวิดีโอทั้งห้าเรื่อง แสดงดังภาพที่ 29 โดยค่าความหน่วงแพ็กเก็ตเฉลี่ยของกระบวนการ Basic ไม่ได้แสดงในภาพที่ 29 เนื่องจากมีค่าความหน่วงสูง (>200 มิลลิวินาที) การพิจารณาจำนวนเซสชันที่กระบวนการรองรับได้จะพิจารณาจากค่าความหน่วงแพ็กเก็ตเฉลี่ย ถ้ากระบวนการสามารถรองรับเซสชันที่ส่งพร้อมกันได้ เช่น วิดีโอ Akiyo สามารถส่งได้จำนวน 7 เซสชันพร้อมกัน ค่าความหน่วงแพ็กเก็ตเฉลี่ยจะมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่ในกรณีที่ความต้องการเริ่มมีมากเกินไปกว่าทรัพยากรที่มีอยู่ ค่าความหน่วงแพ็กเก็ตเฉลี่ยจะเริ่มสูงขึ้น

สำหรับ Akiyo ดังภาพที่ 29(a) เป็นตัวแทนของวิดีโอกลุ่มการเคลื่อนไหวเล็กน้อย ถึงแม้ว่าค่าความหน่วงเฉลี่ยแพ็กเก็ตของ ATMV1 และ ATMV2 จะสูงกว่า ARROW เพียงเล็กน้อย แต่ค่าสูญเสีย TXOP ของกระบวนการทั้งสองต่ำกว่า ARROW (ต่ำกว่า 6% สำหรับ ATMV1 และ 8% สำหรับ ATMV2) เนื่องจาก ARROW เป็นกระบวนการที่ให้ค่า TXOP เกินความต้องการสูง ซึ่งจะมีค่าสูญเสีย TXOP สูงสำหรับวิดีโอที่ข้อมูลระหว่างเฟรมที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย

สำหรับ Container ดังภาพที่ 29(b) เป็นตัวแทนของกลุ่มวิดีโอการเดินแบบปกติ โดยค่าความหน่วงแพ็กเก็ตเฉลี่ยของกระบวนการ ARROW ต่ำกว่า ATMV1 และ ATMV2 ส่วนค่าสูญเสีย TXOP ของ ARROW มีค่าสูงแต่ใกล้เคียงกับ ATMV1 และ ATMV2 เนื่องจากว่าข้อมูลระหว่างเฟรมมีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นเมื่อเทียบกับ Akiyo

สำหรับ Foreman ดังภาพที่ 29(c) ซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มวิดีโอการเดินแบบปกติ โดยเนื้อหาของวิดีโอประกอบด้วยสองฉากหลัก คือ ฉากที่อยู่นิ่งๆ มีการเคลื่อนไหวเล็กน้อย และฉากที่มีการหมุนมุกกล้องซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลระหว่างเฟรมสูง โดยกระบวนการ ATMV1 ไม่สามารถรองรับเซสชันของ Foreman ได้ดีเนื่องจากค่าความหน่วงเฉลี่ยแพ็กเก็ต และค่าสูญเสีย TXOP ที่สูง อย่างไรก็ตามกระบวนการ ATMV2 และ ARROW สามารถรองรับเซสชันได้ เพราะสามารถปรับค่า

TXOP ให้เพียงพอต่อความต้องการของวิดีโอ และมีค่าสูญเสีย TXOP ที่ใกล้เคียงกัน (แตกต่างกันเพียง 2-3%)

สำหรับ Coastguard และ Highway ดังภาพที่ 29(d) และ 29(e) ตามลำดับ ซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มวิดีโอการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว โดยค่าความหน่วงเฉลี่ยแพ็กเก็ตของกระบวนการ ATMV1 สูงกว่า ATMV2 และ ARROW แต่กระบวนการ ATMV2 มีค่าความหน่วงเฉลี่ยแพ็กเก็ต และค่าสูญเสีย TXOP ต่ำที่สุด

ค่าการครอบครองช่องสัญญาณของวิดีโอที่ทดลองทั้งห้าเรื่องจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนของเซสชันวิดีโอที่ส่งพร้อมกันเพิ่มขึ้น ดังแสดงดังภาพที่ 30 โดยผลการทดลองของกระบวนการทั้งหมด แสดงให้เห็นว่า ค่าการครอบครองช่องสัญญาณไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

2.3.2 ผลการประเมินคุณภาพของวิดีโอ

การประเมินคุณภาพวิดีโอพิจารณาจากค่า PSNR และ MOS ซึ่งวิเคราะห์จากเครื่องมือ Evalvid toolset โดยจะคำนวณค่าทั้งสองที่สถานีต้นทาง (QSTA) เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง กำหนดให้ $PSNR_S$ และ MOS_S เป็นค่า PSNR และ MOS ของวิดีโอที่สถานีต้นทาง และ $PSNR_R$ และ MOS_R เป็นค่า PSNR และ MOS ของวิดีโอที่สถานีรับปลายทาง ซึ่งค่า PSNR และ MOS วิดีโอทั้งหมดแสดงค่าแยกแต่ละเฟรม แสดงดังภาพที่ 31 ส่วนค่าเฉลี่ย PSNR และ MOS ของวิดีโอทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าเฉลี่ย $PSNR_S$ และ MOS_S ของวิดีโอที่ใช้ในการทดลองจำนวน 5 เรื่อง

Video clip	$PSNR_S$ (เดซิเบล)	MOS_S
Akiyo	40.13 ± 1.48	5.00 ± 0.00
Container	32.44 ± 3.17	3.69 ± 0.59
Foreman	29.78 ± 3.10	3.23 ± 0.53
Coastguard	27.68 ± 2.14	3.08 ± 0.33
Highway	35.83 ± 1.62	4.17 ± 0.39

เมื่อเฟรมวิดีโอถูกส่งถึงสถานีปลายทาง (QAP) จะนำผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณค่าเฉลี่ย PSNR และ MOS จากค่า $PSNR_R$ และ MOS_R ของเฟรมที่ได้รับ ค่าบัพเฟอร์ก่อนแสดงผลที่สถานีปลายทางกำหนดเป็น 400 มิลลิวินาทีตามค่าพื้นฐานสำหรับค่าความหน่วงในการส่งวิดีโอที่ยอมรับได้ระบุใน ITU-T G.1010 (ITU, 2001) โดยถ้าแพ็กเก็ตมาถึงสถานีปลายทางล่าช้ากว่า 400 มิลลิวินาที แพ็กเก็ตนั้นจะถูกทิ้ง และไม่ได้ถูกนำมารวม ในขั้นตอนการรวมแพ็กเก็ตเพื่อสร้างเฟรมกลับที่สถานีปลายทาง จากนั้นนำค่า $PSNR_R$ และ MOS_R มาเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง $PSNR_S$ และ MOS_S โดยถ้าค่า PSNR และ MOS ของฝั่งต้นทางและปลายทางมีค่าเหมือนกัน แสดงว่า คุณภาพของวิดีโอที่ส่งผ่านระบบเครือข่ายคงเดิมไม่เปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม ในสถานการณ์จริงค่า $PSNR_R$ และ MOS_R จะมีค่าน้อยกว่า $PSNR_S$ และ MOS_S เนื่องจากเกิดแพ็กเก็ตสูญหาย หรือความหน่วงของแพ็กเก็ต ส่งผลให้คุณภาพของวิดีโอลดค่าต่ำลง

จากภาพที่ 32 แสดงค่าเฉลี่ย $PSNR_R$ และ MOS_R ของเซสชันวิดีโอทั้งหมดที่ได้รับที่สถานีปลายทาง ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ย $PSNR_S$ และ MOS_S แสดงดังตารางที่ 16

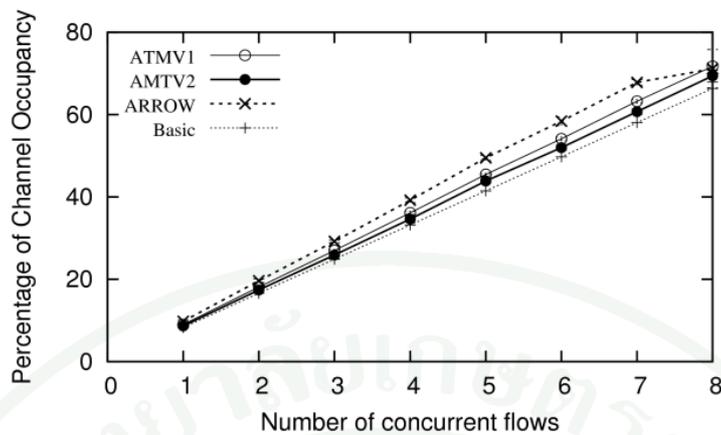
สำหรับ Akiyo ดังภาพที่ 32 ค่าเฉลี่ย $PSNR_R$ และ MOS_R ของข้อมูลวิดีโอทั้ง 5 เรื่องที่ได้รับ ณ สถานีปลายทางพบว่า กระบวนการ ATMV1, ATMV2 และ ARROW ให้ผลของค่า $PSNR$ ($PSNR_R$ เท่ากับ $PSNR_S$) และ MOS (MOS_R เท่ากับ MOS_S) เหมือนกันสำหรับกรณีที่มีจำนวนเซสชันที่ส่งพร้อมกันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 เซสชัน ส่วนกรณีที่ส่งวิดีโอ 8 เซสชันพร้อมกัน กระบวนการ ATMV1 เป็นกระบวนการเดียวที่สามารถรักษาคุณภาพของวิดีโอได้ โดยปกติเมื่อมีจำนวนการส่งข้อมูลวิดีโอมากกว่า 7 เซสชัน ค่า $PSNR_R$ และ MOS_R ของทุกกระบวนการ (ยกเว้นกระบวนการ Basic) จะเริ่มลดค่าต่ำลง เนื่องจากทรัพยากรที่มีอยู่ในระบบไม่เพียงพอต่อการตอบสนองความต้องการของเซสชันทั้งหมด สำหรับค่า $PSNR_R$ และ MOS_R ของกระบวนการ Basic จะมีค่าต่ำและคงที่ เนื่องจากว่าเป็นกระบวนการที่กำหนดค่า TXOP คงที่ตลอดช่วงการส่งข้อมูล

สำหรับ Container ดังภาพที่ 32(b) พบว่า กระบวนการ ATMV2 และ ARROW มีผลคุณภาพเหมือนกันเทียบกับค่าอ้างอิงจนกระทั่งมีการส่งวิดีโอจำนวน 7 เซสชันพร้อมกัน ส่วนกระบวนการ ATMV1 คุณภาพของวิดีโอมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยลดลงประมาณ 1dB (คิดเป็น 3.05% จากค่า $PSNR_S$) สำหรับ $PSNR_R$ และ 0.17 สำหรับค่า MOS_R เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการ ATMV2 และ ARROW

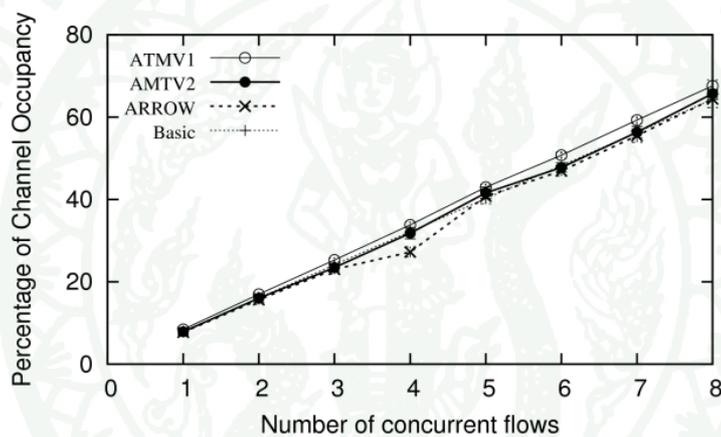
สำหรับ Foreman ดังภาพที่ 32(c) พบว่า กระบวนการ ATMV2 และ ARROW จะมีค่าเหมือนกัน เทียบกับค่าอ้างอิง จนกระทั่งมีการส่งวิดีโอจำนวน 5 เซสชันพร้อมกัน ขณะที่ ATMV1 จะลดคุณภาพลง 5 dB (คิดเป็น 16.79% จากค่า $PSNR_S$) สำหรับ $PSNR_R$ และ 0.8 สำหรับค่า MOS_R เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการ ATMV2 และ ARROW

สำหรับ Coastguard ดังภาพที่ 32(d) พบว่า กระบวนการ ATMV2 และ ARROW มีค่าเหมือนกัน เทียบกับค่าอ้างอิง จนกระทั่งมีการส่งวิดีโอจำนวน 5 เซสชันพร้อมกัน ส่วน ATMV1 จะมีค่า $PSNR_R$ และ MOS_R ลดคุณภาพลง 4 dB (คิดเป็น 14.45% จากค่า $PSNR_S$) และ 0.87 ตามลำดับ

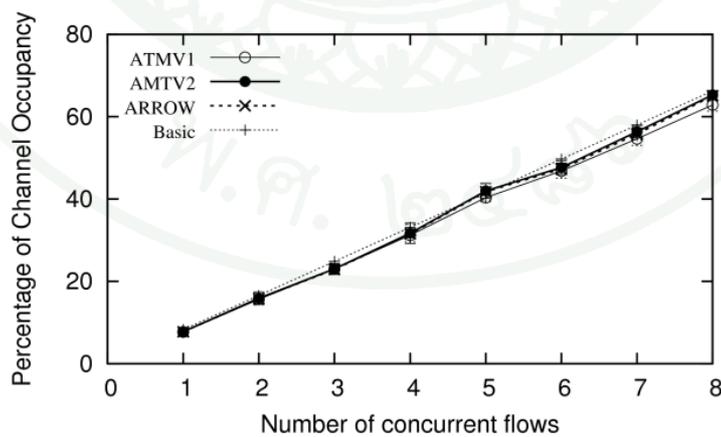
สำหรับ Highway ดังภาพที่ 32(e) พบว่า กระบวนการ ATMV2 และ ARROW มีค่าเหมือนกัน เทียบกับค่าอ้างอิง จนกระทั่งมีการส่งวิดีโอจำนวน 7 เซสชันพร้อมกัน ส่วนกระบวนการ ATMV1 จะลดคุณภาพลงโดยมีค่าเทียบเท่ากับกระบวนการ Basic



(a) Akiyo

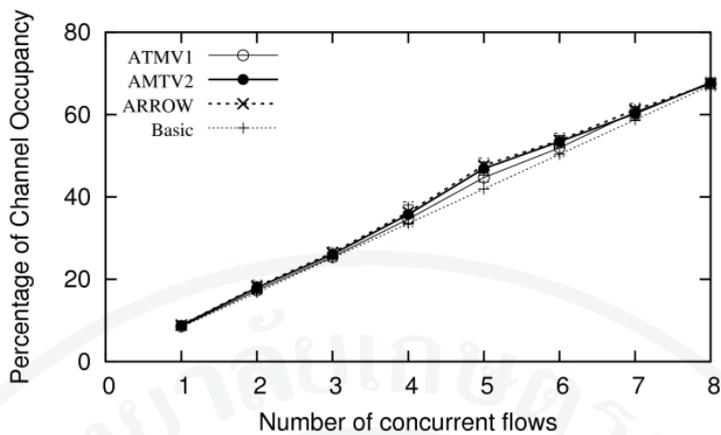


(b) Container

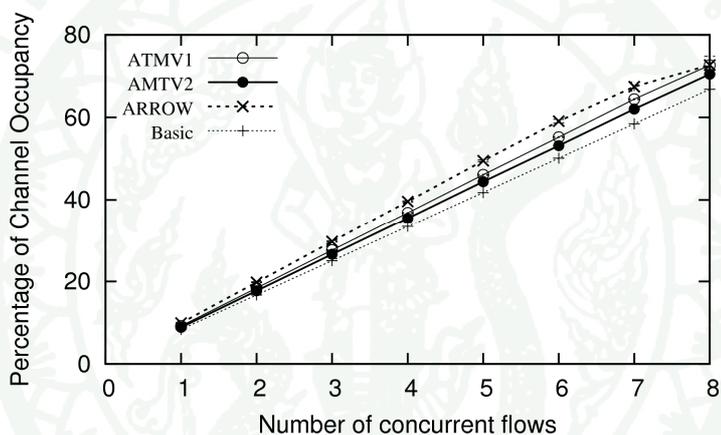


(c) Foreman

ภาพที่ 30 ค่าการครอบครองช่องสัญญาณของการส่งข้อมูลวิดีโอทั้ง 5 เรื่อง ด้วยกระบวนการ Basic, ARROW, ATMV1 และ ATMV2

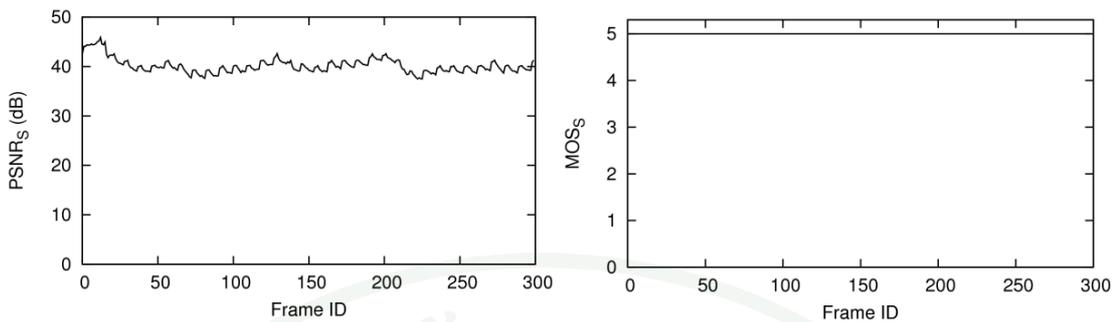


(d) Coastguard

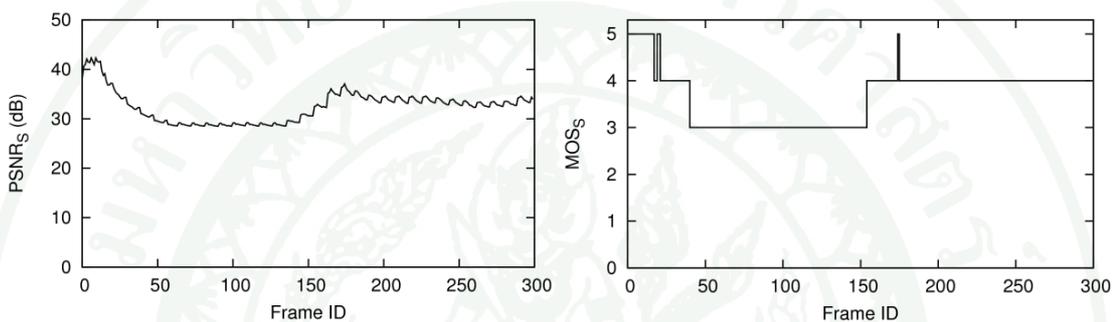


(e) Highway

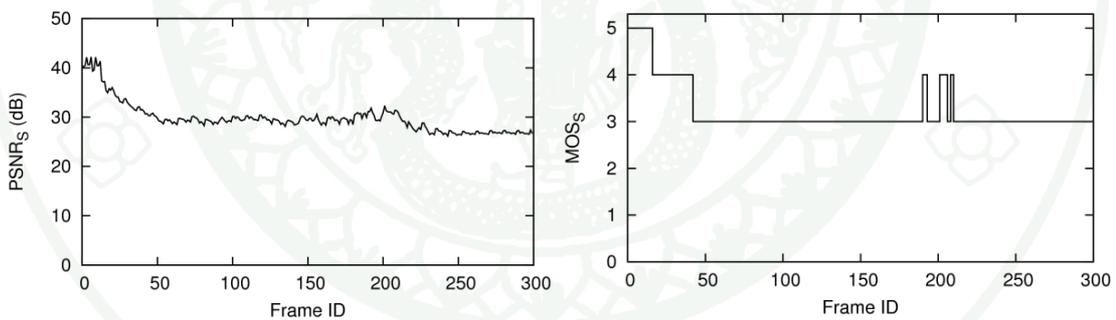
ภาพที่ 30 (ต่อ)



(a) Akiyo

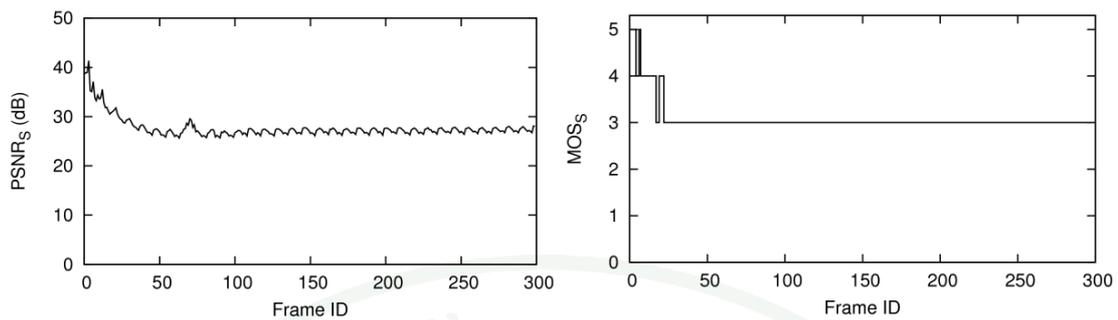


(b) Container

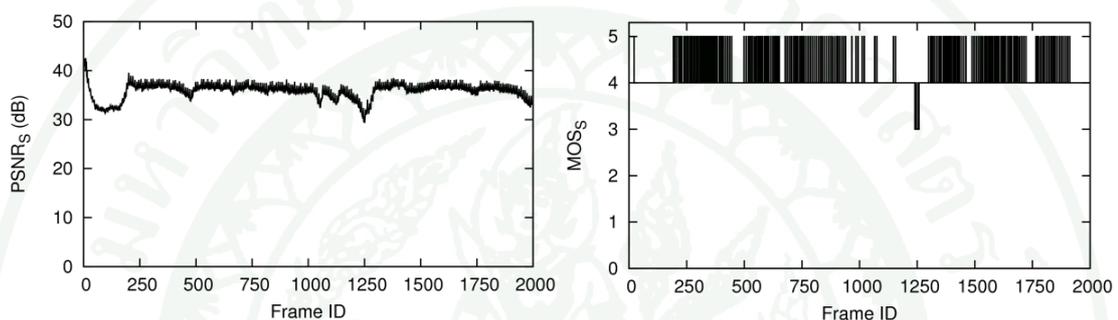


(c) Foreman

ภาพที่ 31 ค่า PSNR_S และ MOS_S ของข้อมูลวิดีโอทั้ง 5 เรื่องที่ส่งจากสถานีต้นทาง

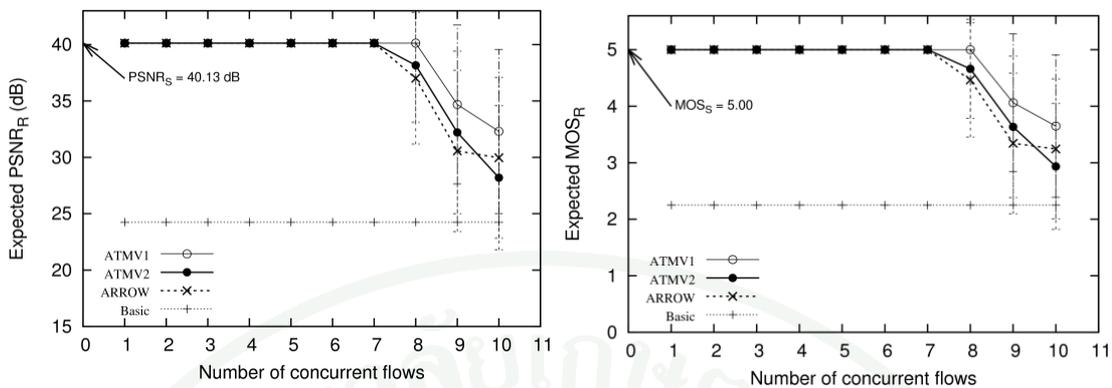


(c) Coastguard

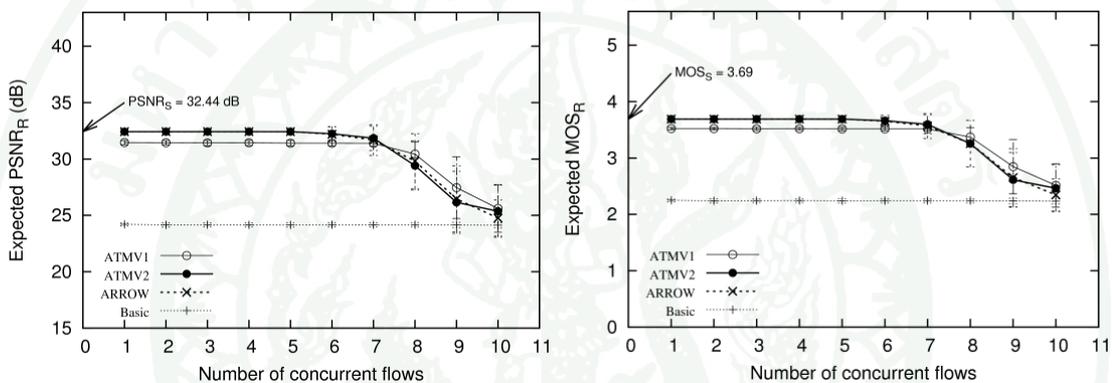


(d) Highway

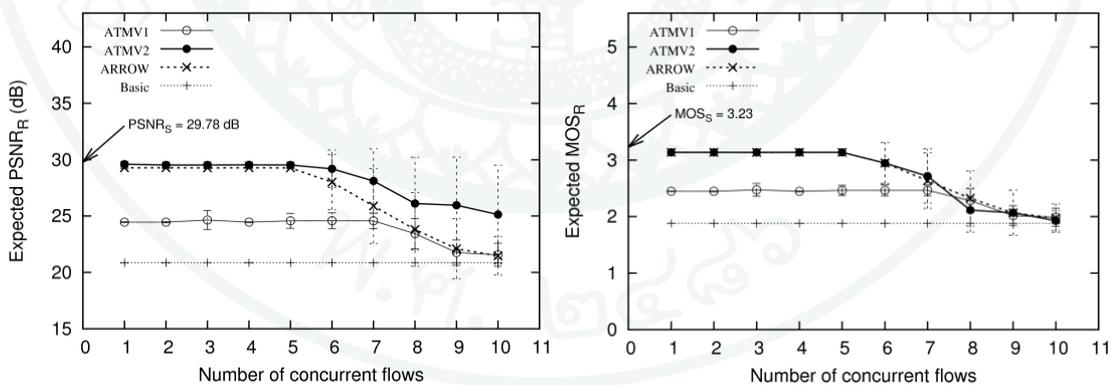
ภาพที่ 31 (ต่อ)



(a) Akiyo

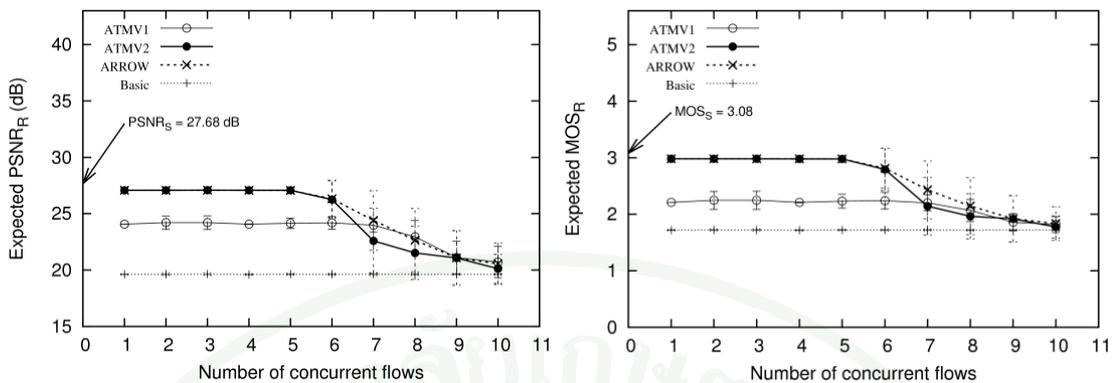


(b) Container

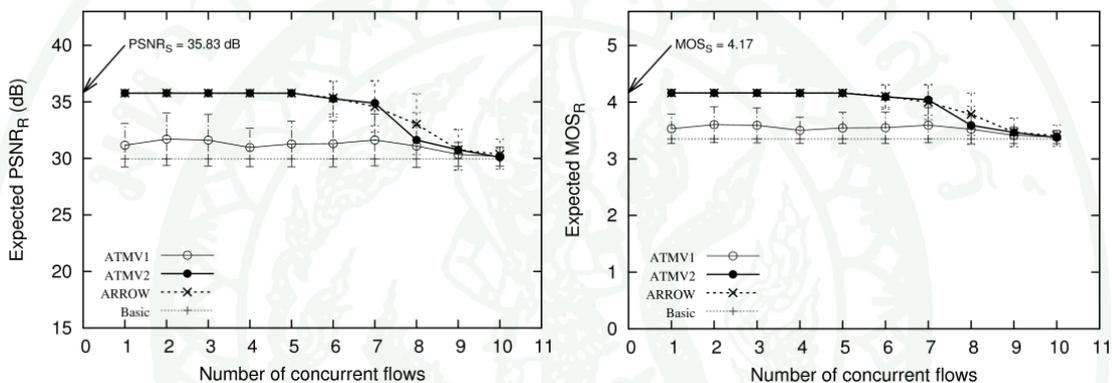


(c) Foreman

ภาพที่ 32 ค่าเฉลี่ย PSNR_R และ MOS_R ของข้อมูลวิดีโอทั้ง 5 เรื่องที่ได้รับ ณ สถานีปลายทาง



(d) Coastguard



(e) Highway

ภาพที่ 32 (ต่อ)

2.5 วิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับกระบวนการปรับค่า TXOP

ส่วนนี้นำเสนอกระบวนการ ATMV เพื่อรองรับการรับส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ (เช่น ข้อมูลวิดีโอ) บน IEEE 802.11e แบบ HCCA ซึ่งการปรับค่า TXOP ของแต่ละเซสชันจะคำนวณจากค่าสถานะของเครื่องสถานะจำกัด โดยใช้ค่าบ่อนกลับความยาวของแฉวคอยสำหรับข้อมูลขาขึ้นจาก QSTA หรือค่าความยาวของแฉวคอยที่อยู่บน QAP สำหรับข้อมูลขาลง จุดมุ่งหมายของกระบวนการที่นำเสนอ เพื่อตอบสนองการเข้ามาของแพ็กเก็ตอย่างรวดเร็ว ขั้นตอนการปรับค่า ใช้กระบวนการ ATMV1 และ ATMV2 ที่ประกอบด้วยเครื่องจักรสถานะจำกัดแบบ 4 สถานะ และ 5 สถานะ ตามลำดับ ส่วนรายละเอียดคุณสมบัติของ ATMV1 และ ATMV2 แสดงดังตารางที่ 17 ในด้านการวัดประสิทธิภาพการทำงานของกระบวนการทั้งสอง จะทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการพื้นฐาน และ ARROW ด้วยชุดวิดีโอทดสอบทั้งหมดห้าเรื่อง ซึ่งแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม คือ กลุ่มการเคลื่อนไหวเล็กน้อย กลุ่มการเดินแบบปกติ และกลุ่มการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว

จากผลการทดลองพบว่า กระบวนการ ATMV1, ATMV2 และ ARROW ให้ผลการทำงานดีกว่ากระบวนการพื้นฐาน ทั้งในด้านของประสิทธิภาพของระบบและคุณภาพของวิดีโอทุกกลุ่ม

กระบวนการ ATMV1 ให้ผลดีกับวิดีโอกลุ่มการเคลื่อนไหวเล็กน้อย โดยสามารถรองรับการส่งวิดีโอได้ถึง 8 เซสชันพร้อมกัน ส่วนการใช้งานกับวิดีโอกลุ่มอื่นให้ผลคุณภาพของวิดีโอต่ำลง

กระบวนการ ATMV2 และ ARROW เหมาะสมกับวิดีโอทุกกลุ่มด้วยคุณภาพที่ไม่ลดต่ำลง และสามารถรองรับการส่งวิดีโอได้ถึง 7, 5-6 และ 5 เซสชันพร้อมกันสำหรับวิดีโอกลุ่มการเคลื่อนไหวเล็กน้อย กลุ่มการเดินแบบปกติ และกลุ่มการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็วตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ATMV2 มีประสิทธิภาพในด้านความหน่วงเฉลี่ยและค่าสูญเสีย TXOP สูงที่สุดสำหรับวิดีโอกลุ่มการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว ในกลุ่มการเคลื่อนไหวเล็กน้อย ATMV2 มีค่าสูญเสีย TXOP ที่ดีกว่า ARROW แต่มีค่าความหน่วงเฉลี่ยสูงกว่าเล็กน้อย (แต่ยังอยู่ภายใน 100 มิลลิวินาที) สำหรับกลุ่มการเดินแบบปกติ ATMV2 และ ARROW มีผลการทำงานที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันทั้งในด้านความหน่วงเฉลี่ย และค่าสูญเสีย TXOP โดยค่าความหน่วงแพ็กเก็ตเฉลี่ยของกระบวนการทั้งสองต่ำกว่า 120 มิลลิวินาที

จากผลการทดลอง พบว่า กระบวนการที่นำเสนอ ATMV1 และ ATMV2 เหมาะกับกลุ่มวิดีโอที่แตกต่างกัน โดยข้อมูลแต่ละเซสชันที่กำลังส่งพร้อมกันอาจจะอยู่ในวิดีโอกลุ่มเดียวกัน หรือต่าง

กลุ่มกันได้ สำหรับการประยุกต์ ATMV เพื่อใช้งานจริงจะต้องรองรับการส่งข้อมูลวิดีโอที่ทราบกลุ่มและไม่ทราบกลุ่มได้ ในกรณีที่ทราบกลุ่มวิดีโอของเซสชันที่จะส่งข้อมูล QAP จะเพิ่มกระบวนการคัดเลือกเพื่อเรียกใช้ฟังก์ชัน “getEvent” และ “evaluateNextState” ในตารางที่ 8 รหัสเทียมในการปรับค่า TXOP ของเครื่องสภาวะจำกัด บรรทัดที่ 7-8 อย่างเหมาะสม ตัวอย่างเช่น QAP จะเลือกใช้ฟังก์ชัน “getEvent” ของ ATMV1 จากตารางที่ 9 เมื่อต้องการคำนวณค่าของวิดีโอกลุ่มกลุ่มการเคลื่อนไหวเล็กน้อย และจะเลือกใช้ฟังก์ชัน “getEvent” ของ ATMV2 จากตารางที่ 10 เมื่อต้องการคำนวณค่าของวิดีโอกลุ่มการเดินแบบปกติ และกลุ่มการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว ซึ่งกระบวนการ ATMV1 และ ATMV2 สามารถนำมาใช้พร้อมกันได้ที่ QAP โดยคำนวณค่า TXOP ของแต่ละเซสชันแยกออกจากกัน ส่วนกรณีที่ทราบกลุ่มวิดีโอของเซสชันที่จะส่งข้อมูล QAP จะเลือกฟังก์ชันที่กำหนดเป็นกระบวนการปริยายมาใช้งาน (เช่น กำหนดให้กระบวนการปริยาย คือ ATMV1) สำหรับให้บริการเซสชันนั้นก่อน จากนั้น QAP จะเริ่มเฝ้าสังเกตเซสชันนั้น ถ้าสถานะของเซสชันเข้าสู่ S_4 ในหลายช่วง SI ที่ติดกัน แสดงว่า มีอัตราการเข้ามาของข้อมูลในเซสชันนั้นสูงมาก ซึ่ง QAP จะเริ่มเปลี่ยนมาใช้กระบวนการ ATMV2 แทน ATMV1 ในการปรับค่า TXOP ของเซสชันนั้น

ตารางที่ 17 คุณสมบัติของกระบวนการ ATMV1 และ ATMV2

คุณสมบัติของกระบวนการ	ATMV1	ATMV2
จำนวนสถานะ	เครื่องสถานะจำกัด 4 สถานะ	เครื่องสถานะจำกัด 5 สถานะ
คุณลักษณะของวิดีโอ	การเข้ามาของเฟรมปริมาณ สูง	การเข้ามาของเฟรม ปริมาณสูงมาก
กลุ่มของวิดีโอที่กระบวนการ รองรับ	- กลุ่มการเคลื่อนไหว เล็กน้อย	- กลุ่มการเดินแบบปกติ - กลุ่มการเคลื่อนไหวอย่าง รวดเร็ว
ค่าปัจจัยสัมประสิทธิ์เพื่อกำหนด เส้นแบ่งเขตการเกิดเหตุการณ์ ต่างๆ	$\delta_1 = 1$ $\delta_2 = 1.5$ $\delta_3 = 2.5$	$\delta_1 = 1$ $\delta_2 = 1.5$ $\delta_3 = 2.5$ $\delta_4 = 4$
ค่าปัจจัยสัมประสิทธิ์เพื่อกำหนด เส้นแบ่งเขตในการควบคุมความ ยาวของแถวคอยขนาดต่างๆ	$\gamma_1 = 1$ $\gamma_2 = 1.5$ $\gamma_3 = 2.5$ $\gamma_4 = 3$	$\gamma_1 = 1$ $\gamma_2 = 1.5$ $\gamma_3 = 2.5$ $\gamma_4 = 3$ $\gamma_5 = 4$
ค่า TXOP ที่มากที่สุดสำหรับ เซสชัน i	$TXOP_i = \frac{\lfloor \frac{\gamma_4 \bar{q}_i}{L_i} \rfloor \times L_i}{R_i} + O$	$TXOP_i = \frac{\lfloor \frac{\gamma_5 \bar{q}_i}{L_i} \rfloor \times L_i}{R_i} + O$
ความซับซ้อนในการคำนวณ	$O(n)$ โดยค่า n คือค่าจำนวนเซสชันในรายการโพล	

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการปรับปรุงมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA ให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ได้ดีขึ้น โดยข้อมูลอัตราไม่คงที่มีการใช้งานช่องสัญญาณที่มีลักษณะแปรปรวน เช่น ข้อมูลวิดีโอมีบางช่วงเวลาที่ใช้ช่องสัญญาณมาก และบางช่วงเวลาที่ใช้ช่องสัญญาณน้อย ขึ้นอยู่กับชนิดของเฟรมวิดีโอที่เกิดขึ้น ซึ่งลักษณะวิธีการกำหนดช่วงเวลาส่งข้อมูล TXOP คงที่ตามค่าที่คำนวณจากค่า TSPEC ในกระบวนการรับเข้าจะไม่สามารถรองรับความต้องการที่เปลี่ยนแปลงได้

วิธีการที่นำเสนอสำหรับปรับปรุง IEEE 802.11e แบบ HCCA แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์เวลารอคอยเฉลี่ยของเฟรมข้อมูลในการส่งข้อมูลบน IEEE 802.11e แบบ HCCA และส่วนการปรับปรุงการส่งข้อมูลบน IEEE 802.11e แบบ HCCA เพื่อรองรับความเปลี่ยนแปลงของปริมาณการส่งข้อมูลที่มีอัตราไม่คงที่

ส่วนแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ค่าเวลารอคอยเฉลี่ยของเฟรม ใช้การอ้างอิงวิธีการส่งตามมาตรฐาน IEEE 802.11e แบบ HCCA ที่กระบวนการรับเซสชันเข้าจะทำงานที่ QAP และค่า TXOP สำหรับเซสชันใดๆ ที่ร้องขอจะคำนวณจากค่า TSPEC ของเซสชันนั้น แบบจำลองที่นำเสนอมี 2 แบบ คือ รูปแบบเต็ม และรูปแบบง่าย การวัดผลแบบจำลองจะใช้ผลทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระบบจำลอง ns2 ที่มีพารามิเตอร์หลักเหมือนกัน ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองเป็นข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปัวซอง เงื่อนไขช่องสัญญาณที่ใช้ในการวัดผลมีทั้งแบบช่องสัญญาณแบบอุดมคติ และช่องสัญญาณที่เกิดความผิดพลาดได้ จากการทดลองพบว่า แบบจำลองทั้งสองมีผลสอดคล้องกับค่าจากระบบจำลอง และการรับเซสชันด้วยค่าอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยตามที่ร้องขอไม่สามารถรองรับการส่งข้อมูลที่มีอัตราไม่คงที่ เพราะค่าเวลารอคอยเฉลี่ยที่มีค่าสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ (เช่น มากกว่าสองเท่าของ SI)

จากผลลัพธ์ของแบบจำลองที่มีผลสอดคล้องกับค่าจากระบบจำลอง ผู้วิจัยจึงเสนอวิธีการประยุกต์แบบจำลองเพื่อหาค่า Δ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการรับเซสชันข้อมูลเข้าบน QAP เพื่อให้สามารถรองรับการส่งข้อมูลที่มีอัตราไม่คงที่ให้มีค่าเวลารอคอยเฉลี่ยอยู่ในค่าที่ต้องการ และไม่มีการสูญหายของข้อมูลเนื่องจากแถวคอยเต็ม โดยจะเริ่มหาค่า Δ และนำจากค่าพารามิเตอร์ใน TSPEC

ของเซสชันที่ร้องขอก่อนที่จะเริ่มตัดสินใจรับเซสชันเข้ามาในรายการโพล เมื่อได้ค่า Δ แนะนำแล้วจึงนำมาคำนวณค่า $TXOP_{new}$ สำหรับเซสชัน และนำมาพิจารณาในกระบวนการรับเข้า

ส่วนการปรับปรุงการส่งข้อมูลบน IEEE 802.11e แบบ HCCA เสนอกระบวนการ ATMV ในการปรับค่า $TXOP$ โดยพิจารณาค่าความยาวแฉกคอยของแต่ละเซสชัน และเครื่องสภาวะจำกัด โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อรองรับการความต้องการของข้อมูลอัตราไม่คงที่ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามช่วงเวลา การรวบรวมค่าความยาวของแฉกคอย ขึ้นอยู่กับทิศทางในการส่งข้อมูล โดยข้อมูลขาขึ้น (ส่งจาก QSTA ไป QAP) จะใช้วิธีการแนบค่าพารามิเตอร์ในส่วนหัวของข้อมูลปกติส่งให้ QAP ในขณะที่ข้อมูลขาลง (ส่งจาก QAP ไป QSTA) QAP สามารถอ่านค่าความยาวจากแฉกคอยที่ตั้งอยู่บน QAP ได้เอง

กระบวนการ ATMV มีจุดมุ่งหมายในการปรับค่า $TXOP$ ให้มีค่าเท่ากับ หรือมากกว่าค่าที่เซสชันต้องการ เพื่อให้สามารถบริหารการส่งข้อมูลที่รออยู่ในแฉกคอย และข้อมูลที่กำลังเข้ามาในแฉกคอยได้มีประสิทธิภาพ โดย ATMV1 ใช้เครื่องจักรสภาวะจำกัดที่มี 4 สภาวะ สำหรับรองรับการเข้ามาของข้อมูลปริมาณสูง ส่วน ATMV2 ใช้เครื่องจักรสภาวะจำกัดที่มี 5 สภาวะ เพื่อรองรับการเข้ามาของข้อมูลปริมาณสูงมาก ตัวแทนของข้อมูลอัตราไม่คงที่ที่ใช้ในการทดสอบ คือ ข้อมูลวิดีโอจำนวน 5 เรื่อง โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มการเคลื่อนไหวเล็กน้อย กลุ่มการเดินแบบปกติ และกลุ่มการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็ว การวัดผลทดสอบบนระบบจำลอง ns2 ที่มีการเชื่อมต่อกับเครื่องมือสำหรับวัดคุณภาพวิดีโอ Evalvid toolset จากผลการทดลอง พบว่า ATMV1 รองรับการส่งวิดีโอกลุ่มการเคลื่อนไหวเล็กน้อยได้ดี ในขณะที่ ATMV2 รองรับกลุ่มการเดินแบบปกติ และกลุ่มการเคลื่อนไหวอย่างรวดเร็วได้ดี จากผลที่ได้จากการทดลอง เพื่อให้กระบวนการ ATMV สามารถรองรับการส่งข้อมูลอัตราไม่คงที่ที่ไม่ทราบกลุ่มได้ โดยเสนอให้ปรับปรุงกระบวนการรับเข้าที่ QAP รับเซสชันข้อมูลใหม่ที่ไม่ทราบกลุ่มด้วยกระบวนการปริยายก่อน (เช่น กระบวนการ ATMV1) จากนั้น QAP จะเฝ้าดูสภาวะของเซสชัน ถ้าเซสชันนั้นอยู่ในสภาวะสูงต่อเนื่องกัน (S_4) เนื่องจากมีการเข้ามาของข้อมูลสูงมาก QAP จะนำกระบวนการ ATMV2 มาปรับใช้กับเซสชันนั้น

จากงานวิจัยที่นำเสนอทั้งสองส่วน ผลลัพธ์ที่ได้ คือ ค่าเริ่มต้นของอัตราการส่งข้อมูลเฉลี่ยโดยคำนวณจากค่า Δ แนะนำสำหรับให้ QAP ใช้ในการรับเซสชันเข้าสู่รายการโพล เพื่อให้สามารถรองรับข้อมูลอัตราไม่คงที่ที่ทราบรูปแบบการเข้ามาล่วงหน้า และกระบวนการสำหรับปรับค่า $TXOP$ เพื่อให้รองรับข้อมูลอัตราไม่คงที่ที่มีความแปรปรวนในการเข้ามาของข้อมูลที่สูงระหว่างการส่งข้อมูล

งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงในองค์กร โดยการติดตั้งเฟิร์มแวร์มอดูลของงานวิจัย เข้ากับอุปกรณ์แอสเซมบลีที่ให้บริการตามปกติ ทำให้ระบบเครือข่ายแลนไร้สายมีความสามารถเพิ่มในการควบคุมการเข้าใช้งานเพื่อรองรับการส่งข้อมูลแบบวิดีโอ เช่น การจัดการประชุมทางไกลด้วยภาพและเสียง (Video conferenece) มีค่าความหน่วงเวลาและอัตราการสูญหายของแพ็กเก็ตต่ำ ส่งผลให้การสื่อสารทั้งภาพและเสียงในการประชุมได้อย่างคุณภาพ

ข้อเสนอแนะ

สำหรับแบบจำลองคำนวณเวลาเฉลี่ยเฟรมข้อมูลจะต้องรอในชั้น MAC เสนอว่า ควรปรับปรุงแบบจำลองให้รองรับข้อมูลอัตราไม่คงที่ที่มีคุณลักษณะการขึ้นต่อกันระยะยาว (Long-range dependency) และข้อมูลที่มีความคล้ายตนเอง (Self-similar traffic) และเพิ่มการปรับปรุงกระบวนการรับเข้าให้สามารถรับข้อมูลอัตราไม่คงที่ที่มีลักษณะเฉพาะแตกต่างกัน

สำหรับกระบวนการ ATMV เสนอให้ศึกษาและปรับปรุงค่าปัจจัยสัมประสิทธิ์เพื่อกำหนดเส้นแบ่งเขตในการควบคุมความยาวของแถวคอยให้สามารถปรับเปลี่ยนแบบพลวัตตามลักษณะของเนื้อหาของวิดีโอที่เปลี่ยนไปตามช่วงเวลา เพื่อให้สามารถรองรับวิดีโอที่ไม่ทราบกลุ่มข้อมูล หรือวิดีโอที่รวมจากหลายกลุ่ม ปรับปรุงกระบวนการรับเข้าที่ QAP ที่มีการทำงานของ ATMV ให้สามารถจำกัดปริมาณจำนวนเซสชันที่รับ เพื่อให้ระบบยังคงรักษาคุณภาพในการส่งข้อมูลได้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

อนันต์ ผลเพิ่ม. 2550. **แลนไร้สาย**. พิมพ์ครั้งที่ 1 บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

Abdel-Hady, M. and R. Ward. 2007. A Framework for Evaluating Video Transmission over Wireless Ad Hoc Networks, pp. 78-81. *In Proceedings of IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PacRim 2007)*. 22-24 August 2007. Victoria, B.C., Canada.

AlSabbagh, H.M. and A. Amin. 2009. Influence of Retransmissions on the Estimating Number of Users Associate in a WLAN Using Error-Prone Channel, pp. 1-4. *In Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. 24-26 September 2009. Beijing, China.

Ansel, P., Q. Ni and T.Turletti. 2004. An efficient scheduling scheme for IEEE 802.11e. *In Proceeding of WiOpt: Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*. 24 - 26 March 2004. University of Cambridge, UK

Ansel, P., Q. Ni and T. Turletti. 2006. FHCF: a simple and efficient scheduling scheme for IEEE 802.11e wireless LAN. *Mob. Netw. Appl.* 11(3): 391-403.

Arizona State University. n.d. **YUV video sequences (CIF)**. Available Source: <http://trace.eas.asu.edu/yuv/index.html>, November 3, 2011.

Athuraliya, S., S. H. Low, V. H. Li and Y. Qinghe. 2001. REM: active queue management. *IEEE Network* 15(3): 48-53.

Bellard, F. 2008. **FFmpeg**. Available Source: <http://ffmpeg.mplayerhq.hu>, November 3, 2011.

- Bianchi, G. 2000. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications** 18(3): 535-547.
- Cali, F., M. Conti and E. Gregori. 1998. IEEE 802.11 wireless LAN: capacity analysis and protocol enhancement, pp. 142-149. *In Proceedings of IEEE INFOCOM'98*. 29 March - 2 April 1998. San Francisco, CA, USA.
- Cicconetti, C., L. Lenzini, E. Mingozzi and G. Stea. 2005. A Software Architecture for Simulating IEEE 802.11e HCCA, pp. 97-104. *In Proceedings of the 3rd International Workshop on Internet Performance, Simulation, Monitoring and Measurement*. 14-15 March 2005. Warsaw, Poland.
- _____, _____, _____ and _____. 2007. Design and performance analysis of the Real-Time HCCA scheduler for IEEE 802.11e WLANs. **Computer Networks** 51(9): 2311-2325.
- Choi, M., M. Samokhina, K. Moklyuk, S. Choi, J. Heo and S.J. Oh. 2010. VPAL: Video Packet Adaptation Layer for reliable video multicast over IEEE 802.11n WLAN. **Computer Communications** 33(18): 2271-2281.
- Cowling, J. and S. Selvakennedy. 2004. A detailed investigation of the IEEE 802.11e HCF reference scheduler for VBR traffic. *In Proceedings of the 13th International Conference on Computer Communications and Networks*. 11-13 October 2004. Chicago, USA.
- Feng, W., K. G. Shin, D. D. Kandlur and D. Saha. 2002. The Blue Active Queue Management Algorithms. **IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)** 10(4): 513-528.

Floyd, S. and V. Jacobson. 1993. Random early detection gateways for congestion avoidance. **IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)** 1(4): 397-413.

_____, R. Gummadi and S. Shenker. 2001. **Adaptive RED: An algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management**. Technical Report. 12. (<http://www.icir.org/floyd/papers/adaptiveRed.pdf>)

Foronda, A., Y. Higuchi, C. Ohta, M. Yoshimoto and Y. Okada. 2007. Service Interval Optimization with Delay Bound Guarantee for HCCA in IEEE 802.11e WLANs. **IEICE Transactions On Communications** 90-B(11): 3158-3169.

Gao, D., J. Cai, and C.W. Chen. 2008. Admission Control Based on Rate-Variance Envelop for VBR Traffic Over IEEE 802.11e HCCA WLANs. **IEEE Transactions on Vehicular Technology** 57(3): 1778-1788.

Ghazizadeh, R., and P. Fan. 2010. Queuing Analysis of HCCA for Multi-Rate Wireless LANs with Truncated ARQ Protocol. **Wirel. Pers. Commun.** 55(4): 607-630.

Higuchi, Y., A. Foronda, C. Ohta, M. Yoshimoto and Y. Okada. 2007. Delay Guarantee and Service Interval Optimization for HCCA in IEEE 802.11e WLANs, pp. 2080-2085. *In Proceeding in Wireless Communications and Networking Conference 2007 (WCNC2007)*. 11-15 March 2007. Hongkong.

Hollot, C. V., V. Misra, D. Towsley and G. Weibo. 2002. Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows. **IEEE Transaction On Automatic Control** 47(8): 945-959.

Huang, C.L. and W. Liao. 2007. Throughput and delay performance of IEEE 802.11e enhanced distributed channel access (EDCA) under saturation condition. **IEEE Transactions on Wireless Communications** 6(1): 136-145.

Hui, J. and M. Devetsikiotis. 2005. A unified model for the performance analysis of IEEE 802.11e EDCA. *IEEE Transactions on Communications* 53(9): 1498-1510.

IEEE Computer Society. 2005. **IEEE Standard 802.11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Medium access control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements, IEEE 802.11e Standard.**

_____. 1999. **IEEE Standard 802.11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, IEEE 802.11 Standard.**

Information Sciences Institute (ISI). 1999. **The network simulator – ns-2.** Available Source: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, November 3, 2011.

International Telecommunication Union. 1993. **ITU-T Recommendation G.114: One-way transmission time.** International Telecommunication Union.

_____. 2001. **ITU-T Recommendation G.1010: End-user Multimedia QoS Categories.** International Telecommunication Union.

_____. 2002. **ITU-T BT.500-11: Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures.** International Telecommunication Union.

_____. 2003. **ITU-T P.800: Mean Opinion Score (MOS) terminology.** International Telecommunication Union.

Jansang, A. and A. Phonphoem. 2004. Framework Architecture for WLAN Testbed, pp. 96-100. *In Proceeding of 3rd Asian International Mobile Computing Conference (AMOC 2004).* 26-28 May 2004. Bangkok, Thailand.

- Jansang, A., A. Phonphoem and B. Paillassa. 2009. Analytical Model for Expected Packet Delay Evaluation in IEEE 802.11e, pp. 344-348. *In Proceeding of IEEE International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC2009)*. 6-8 January 2009. Kunming, China.
- Jinsheng, S., M. Zukermant and M. Palaniswamit. 2008. An Adaptive REM for Improving AQM Performance, pp. 75-79. *In Proceeding of IEEE International Conference on Communications (ICC 2008)*. 19-23 May 2008. Beijing, China.
- Ke, C.H. and N. Chilamkurti. 2008. A new framework for MPEG video delivery over heterogeneous networks. *Computer Communications* 31(11): 2656-2668.
- _____, C.K. Shieh, W.S. Hwang and A. Ziviani. 2008. An evaluation framework for more realistic simulations of MPEG video transmission. *Journal of Information Science and Engineering* 24(2): 425-440.
- Khan, A., L. Sun and E. Ifeachor. 2009. Content-Based Video Quality Prediction for MPEG4 Video Streaming over Wireless Networks. *Journal of Multimedia* 4(4): 228-239.
- Kim, S.M. and Y.J. Cho. 2007. Channel time allocation scheme based on feedback information in IEEE 802.11e wireless LANs. *Computer Networks* 51(10): 2771-2787.
- Klaue, J., B. Rathke and A. Wolisz. 2003. EvalVid - A Framework for Video Transmission and Quality Evaluation, pp. 255-272. *In Proceedings of the 13th Conference on Modelling Techniques and Tools for Computer Performance Evaluation*. 2-5 September 2003. Urbana, IL, USA.

- Kong, Z., D.H.K. Tsang, B. Bensaou and D. Gao. 2004. Performance analysis of IEEE 802.11e contention-based channel access. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications** 22(10): 2095- 2106.
- Kuan, C. and K. Dimiyati. 2009. Finite time-horizon Markov model for IEEE 802.11e. **Journal of Zhejiang University - Science A** 10(10): 1383-1388.
- Lee, H., I. Tinnirello, J. Yu and S. Choi. 2007. Throughput and Delay Analysis of IEEE 802.11e Block ACK with Channel Errors, pp. 1-7. *In Proceedings of 2nd International Conference on Communication Systems Software and Middleware (COMSWARE 2007)*. 7-12 January 2007. Bangalore, India.
- Lie, A. and J. Klaue. 2008. Evalvid-RA: trace driven simulation of rate adaptive MPEG-4 VBR video. **Multimedia Systems** 14(1): 33-50.
- Mangold, S., S. Choi, G.R. Hiertz, O. Klein and B. Walke. 2003. Analysis of IEEE 802.11e for QoS support in wireless LANs. **IEEE Wireless Communications** 10(6): 40-50
- Oh, B.J., and C.W. Chen. 2007. Analysis of Retry Limit for Supporting VoIP in IEEE 802.11e EDCA WLANs, pp. 464-469. *In Proceedings of 16th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2007)*. 13-16 August 2007. Honolulu, Hawaii, USA.
- Ramos, N., D. Panigrahi and S. Dey. 2007. Dynamic adaptation policies to improve quality of service of real-time multimedia applications in IEEE 802.11e WLAN networks. **Wirel. Netw.** 13(4): 511-535.
- Rashid, M.M., E. Hossain and V.K. Bhargava. 2008. Controlled Channel Access Scheduling for Guaranteed QoS in 802.11e-Based WLANs. **IEEE Transactions on Wireless Communications** 7(4): 1287-1297.

- Raychaudhuri, D., I. Seskar, M. Ott, S. Ganu, K. Ramachandran, H. Kremo, R. Siracusa, H. Liu, M. Singh. 2005. Overview of the ORBIT radio grid testbed for evaluation of next-generation wireless network protocols, pp. 1664- 1669. *In Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2005)*. 13-17 March 2005. New Orleans, LA, USA.
- Peterson, L., A. Bavier, M.E. Fiuczynski, S. Muir. 2006. Experiences Implementing PlanetLab, pp. 351–366. *In Proceedings of 7th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI'06)*. 6-8 November 2006. Seattle, WA, USA.
- Seeling, P., F. Fitzek and M. Reisslein. 2007. **Video Traces for Network Performance Evaluation**. Springer Science+Business Media, Germany.
- Shankar, S. and M. Schaar. 2007. Performance Analysis of Video Transmission Over IEEE 802.11a/e WLANs. **IEEE Transaction on Vehicular Technology** 56(4): 2346-2362.
- Skyrianoglou, D., N. Passas and A.K. Salkintzis. 2006. ARROW: An Efficient Traffic Scheduling Algorithm for IEEE 802.11e HCCA. **IEEE Transactions on Wireless Communications** 5(12): 3558-3567.
- Venkataraman, M., M. Chatterjee and S. Chattopadhyay. 2009. Evaluating Quality of Experience for Streaming Video in Real Time, pp. 1-6. *In Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2009)*. 30 November 2009 - 4 December 2009. Honolulu, Hawaii, USA.
- Wydrowski, B. and M. Zukerman. 2002. GREEN: an active queue management algorithm for a self managed Internet, pp. 2368-2372. *In Proceeding of IEEE International Conference on Communications (ICC 2002)*. 28 April - 2 May 2002. New York City, USA.

Wang, Y. 2006. *A Survey of Objective Video Quality Measurements*. Worcester Polytechnic Institute. Technical Report. 7.



ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายอภิรักษ์ จันทร์สร้าง
เกิดวันที่	16 พฤษภาคม 2522
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดภูเก็ต
ประวัติการศึกษา	วศ.ม. (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วศ.บ. (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) เกียรตินิยมอันดับ 2 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	- รางวัลรองชนะเลิศอันดับ 3 การแข่งขันติดตั้ง ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ระดับชาติ ครั้งที่ 1 รุ่นประชาชน ปี พ.ศ. 2544 จัดโดย NECTEC
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนการศึกษาจากโครงการบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ปี พ.ศ. 2550 – 2552)