การประชุมวิชาการระดับชาติ
มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 5
The 5th NPRU National Academic Conference
2013
Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon Pathom, Thailand

"การวิจัยเพื่อการพัฒนาท้องถิ่นอย่างยั่งยืน
กับการก้าวสู่ประชาคมอาเซียน"

วันที่ 18-19 กรกฎาคม 2556
อาคารโลจิสติกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม จังหวัดนครปฐม

IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY Thailand Chapter

เทคนิคการกล้ำสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายในช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรลีย์โดยใช้แบบจำลองห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่อง

An optimal modulation technique for Wireless Local Area Networks on One-Path Rayleigh fading channel By Using Discrete Markov Chain model

เจษฎา สาททอง [1], สุวิพล สิทธิชีวภาค [2], อดิศร แก้วภักดี [3] และเฉลิมชนม์ ตั้งวชิรพันธุ์ [4]

[1,3,4] *โปรแกรมวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

[1] *sartthong@npru.ac.th,* [3] *adisorn@npru.ac.th and* [4] *shalerm123@yahoo.th*

[2] *ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม*

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2] *kssuvepo@kmitl.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความวิจัยฉบับนี้นำเสนอถึงการหาเทคนิคการกล้ำสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สาย (Wireless Local Area Networks) ในช่องสัญญาณมีการจางหายแบบเรลีย์โดยใช้แบบจำลองห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของโพรโทคอล CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ตามมาตราฐานของ IEEE802.11a ซึ่งเทคนิคการกล้ำสัญญาณที่เราพิจารณาในบทความวิจัยฉบับนี้คือ BPSK QPSK 16-QAM 64-QAM และ 256-QAM ซึ่งการเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแต่ละแบบ เราจะใช้ค่าวิสัยสามารถ (Saturated throughput) ของระบบเป็นตัวชี้วัด จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK และ QPSK มีสมรรถนะที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ 16-QAM 64-QAM และ 256-QAM ในช่องสัญญาณมีการจางหายแบบเรลีย์ เมื่อเราพิจารณากรณีที่ค่าความเร็วในการส่งข้อมูล (Bit Rate) และค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณต่อค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนต่อบิท (Eb/No) ที่เท่ากัน

คำสำคัญ: เทคนิคการกล้ำสัญญาณ, โครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สาย, แบบจำลองห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่อง

Abstract

In this research, we evaluate an optimal modulation technique for wireless local area networks (WLAN) on one-path Rayleigh fading channel by applying discrete Markov chain model. An optimal modulation technique is used for improving the performance of carrier sense multiple accesses with collision avoidance (CSMA/CA) protocol based on IEEE802.11 standard. The performance of all modulation techniques are compared in term of saturated throughput parameters. The BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM and 256-QAM modulation schemes are considered in this research. Our numerical results show that the performance of BPSK and QPSK are better than the 16-QAM, 64-QAM and 256-QAM modulation techniques on one-path Rayleigh fading channel when we fixed the data rate and signal to noise ratio (Eb/No).

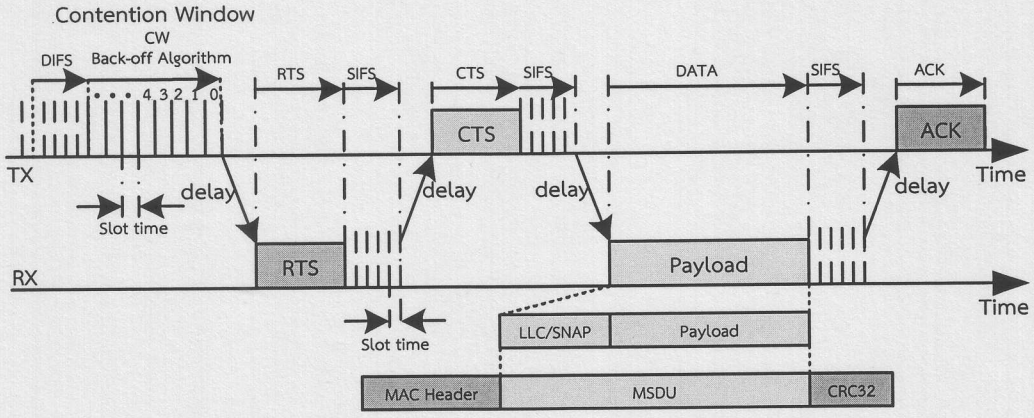
Keyword: Modulation techniques, Wireless local area networks, Discrete Markov chain model

1. บทนำ

ในระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สาย การรับ-ส่ง ข้อมูลระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server or Access Point) กับเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่าย (Client) ซึ่งอาจจะเป็นคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะ (Desktop) หรือคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของการใช้ย่านความถี่และง่ายต่อการออกแบบสายอากาศ ซึ่งคลื่นความถี่ในระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายจะอยู่ที่ประมาณ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11b/g และ 5 กิกะเฮิร์ท สำหรับมาตรฐาน IEEE802.11a/g/n กระบวนการนำสัญญาณข้อมูล (Data signals) ฝากไปกับคลื่นพาห์ (Carrier signals) เราเรียกเทคนิคนี้ว่า การกล้ำสัญญาณ (Modulation technique) ในช่องสัญญาณแบบไร้สายตัวแปรสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลลดต่ำลงคือ ค่าการลดทอนกำลังงานของสัญญาณคลื่นวิทยุต่อระยะทาง (path loss) และค่าการจางหายและความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (fading and multi-path dispersion) ฉะนั้นการเลือกเทคนิคการกล้ำสัญญาณที่เหมาะสม จึงเป็นวิธีการอย่างหนึ่งที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายให้ดียิ่งขึ้น ฉะนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอถึงการหาเทคนิคการกล้ำสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายในช่องสัญญาณมีการจางหายของสัญญาณแบบเรลีย์โดยใช้แบบจำลองห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่อง ในบทความจะแบ่งรายละเอียดดังนี้ ส่วนที่ 2 จะอธิบายเทคนิคการจำลองระบบโดยใช้ทฤษฎีห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Markov Chain model) ส่วนที่ 3 จะอธิบายการคำนวณค่าวิสัยสามารถของระบบ ส่วนที่ 4 จะเป็นผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และสรุปผลจะอยู่ในส่วนที่ 5

2. แบบจำลองห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่อง

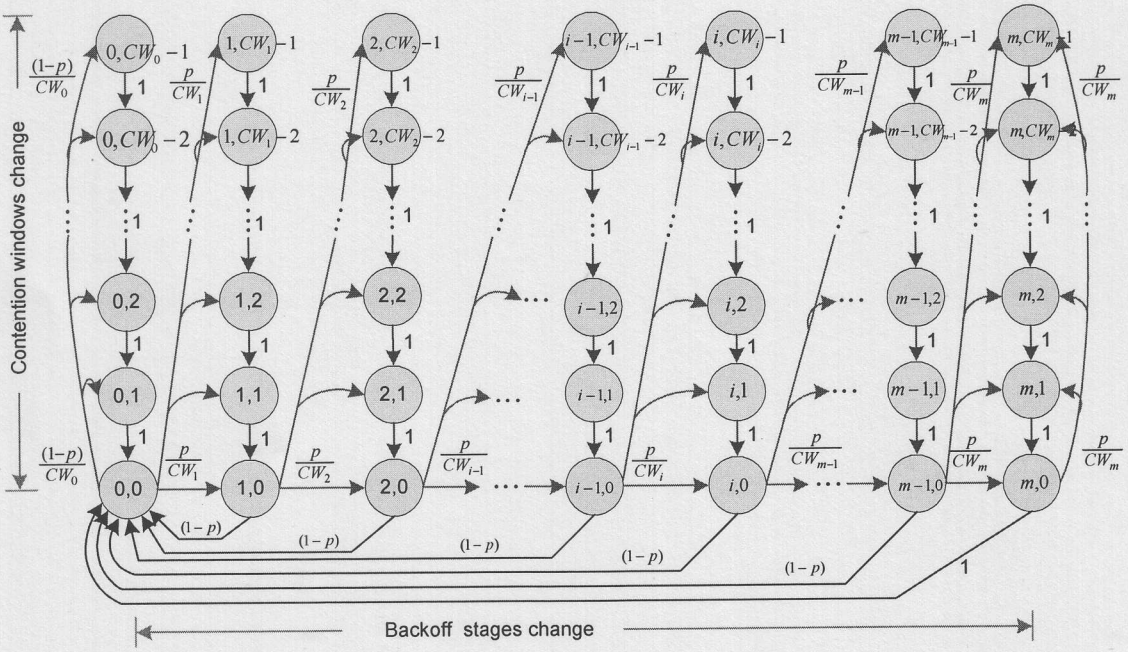
ปัจจุบันการส่งเฟรมข้อมูลในระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายจะใช้โพรโทคอล CSMA/CA ซึ่งจะมีรูปแบบการส่งเฟรมข้อมูลดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1: กระบวนการส่งเฟรมข้อมูลของ CSMA/CA โพรโทคอล

โดยทั่วไปช่องสัญญาณการส่งข้อมูลของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายจะถูกแบ่งออกเป็นช่วงๆ ที่เท่ากัน (slot time) กระบวนการส่งเฟรมข้อมูลของ CSMA/CA โพรโทคอลจะเริ่มจากสถานีลูกข่ายที่มีความต้องการจะส่งเฟรมข้อมูล ทำการตรวจจับช่องสัญญาณ (Carrier sensing) ซึ่งในการส่งเฟรมข้อมูลครั้งแรก กระบวนการส่งจะไม่เข้าสู่โหมดแบ็คออฟอัลกอริทึม เมื่อช่องสัญญาณว่างมากกว่าหรือเท่ากับ DIFS (Distributed Inter Frame Space) คอมพิวเตอร์ที่ต้องการจะส่งเฟรมข้อมูล (TX) จะส่งเฟรมควบคุม RTS (Request to Send) ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ที่จะเป็นผู้รับเฟรมข้อมูลหรือจุดบริการ (RX: Client computer or Access Point) เพื่อทำการจองช่องสัญญาณ ถ้าคอมพิวเตอร์ผู้รับเฟรมข้อมูลพร้อม จะตอบกลับด้วยเฟรมควบคุม CTS (Clear

to Send) ไปยังคอมพิวเตอร์ผู้ส่งเฟรมข้อมูล จากนั้นกระบวนการส่งเฟรมข้อมูล (Data frame or Payload) ก็จะเริ่มขึ้น ถ้าการส่งเฟรมไม่มีข้อผิดพลาด หรือไม่เกิดการชนกันของเฟรมข้อมูล เครื่องคอมพิวเตอร์ที่รับเฟรมข้อมูลหรือจุดบริการจะส่งเฟรม ACK (Acknowledgement) ตอบกลับไปยังคอมพิวเตอร์ที่ส่งเฟรมข้อมูล (TX) ว่าได้รับเฟรมครบถูกต้อง การส่งเฟรมแต่ละครั้งจะถูกคั่นด้วยช่วงระยะเวลาสั้นๆ ที่เรียกว่า SIFS (Shot Inter Frame Space) ถ้าคอมพิวเตอร์ที่ส่งเฟรมข้อมูล (TX) ไม่ได้รับเฟรม ACK ภายในเวลาที่กำหนด จะถูกสันนิษฐานว่าเกิดการชนกันของเฟรมข้อมูล หรือเฟรมข้อมูลสูญหายระหว่างทาง (Unsuccessful) จึงต้องทำการส่งเฟรมข้อมูลนั้นใหม่ (Retransmission) ซึ่งการส่งเฟรมข้อมูลครั้งที่สอง จะต้องเข้าสู่โหมดแบ็คออฟอัลกอริทึม (Backoff Algorithm) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการชนกันหรือสูญหายของเฟรมข้อมูลแบบไม่รู้จบ เมื่อคอมพิวเตอร์ที่ส่งเฟรมข้อมูล (TX) ต้องการจะส่งเฟรมครั้งที่ 2 จะต้องทำการสุ่มค่าเวลาขึ้นมาช่วงหนึ่ง เราเรียกช่วงเวลานี้ว่าหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Contention Windows: CW) ซึ่งค่าของหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบ็คออฟอัลกอริทึมที่ใช้ ในปัจจุบันระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายจะใช้กระบวนการไบนารีเอ็กซ์โพเนนเชียลแบ็คออฟอัลกอริทึม (Binary Exponential Backoff Algorithm: BEB) เพื่อลดอัตราการชนกันของเฟรมข้อมูลในระบบ เมื่อปี 2000 นักวิจัยในเอกสารอ้างอิงที่ [2] [3] [4] และ [5] ได้นำเสนอการจำลองระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สาย โดยใช้ทฤษฎีห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Markov chain model) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2: แบบจำลองห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่องของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายที่ใช้แบ็คออฟอัลกอริทึมแบบ BEB

ต่อมาเรามักจะเรียกแบบจำลองในภาพที่ 2 นี้ว่า Bianchi's model ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายมากที่สุด จากแบบจำลองในภาพที่ 2 นักวิจัยใช้ทฤษฎีคิว (Queuing Theory) ในสภาวะคงตัว หาสมการค่าความน่าจะเป็นที่โหนดหรือคอมพิวเตอร์ลูกข่ายจะทำการส่งเฟรมข้อมูลในแต่ละสล็อตการส่งที่สุ่มเลือกมาแบบแรนดัม ซึ่งได้ดังสมการที่ 1

$$\tau_{Bianchi\ model} = \sum_{i=0}^{m} b_{i,0} = \frac{2(1-2p)}{(1-2p)(CW+1)+pCW(1-(2p)^m)} \qquad (1)$$

ในแบบจำลองของ Bianchi จะใช้ไบนารีเอ็กซ์โพเนนเชียลแบ็คออฟอัลกอริทึม (BEB Algorithm) แก้ปัญหาการชนกันของเฟรมข้อมูล โดยมีหลักการทำงานหลักๆ คือค่าช่วงเวลาหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Contention windows) จะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าต่อการส่งเฟรมข้อมูลซ้ำหนึ่งครั้งดังสมการ

$$CW = 2^i \times CW_{\min} \quad \Rightarrow i = 0,1,2,3...m \quad \text{และ} \quad CW_{\max} = 2^m \times CW_{\min} \tag{2}$$

โดยที่ τ คือค่าความน่าจะเป็นที่โหนดหรือคอมพิวเตอร์ลูกข่ายจะทำการส่งเฟรมข้อมูลในแต่ละสล็อต (Packet Transmission Probability)

i คือจำนวนการส่งเฟรมข้อมูลซ้ำหรือค่าแบคออฟสเตจ (Retransmission or backoff stages)

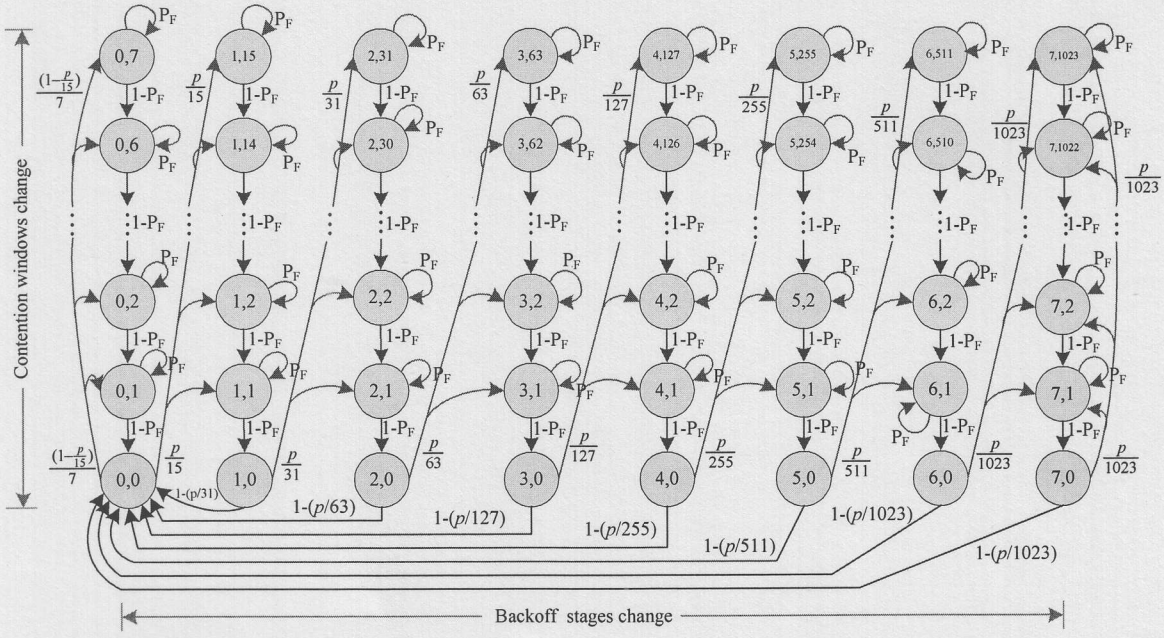
P คือค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของเฟรมข้อมูล (Collision Probability)

CW_i คือค่าช่วงเวลาหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณที่แบคออฟสเตจ i

CW_{min} คือค่าช่วงเวลาหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณต่ำสุดหรือค่าเริ่มต้น (Minimum Contention Window)

CW_{max} คือค่าช่วงเวลาหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณสูงสุด (Maximum Contention Window)

แบบจำลองในภาพที่ 2 เป็นแบบจำลองทั่วไปในช่องสัญญาณที่ไม่มีสัญญาณรบกวนและการลดทอน (Ideal Channel) แต่ช่องสัญญาณที่ใช้ส่งเฟรมข้อมูลในระบบที่ใช้งานจริง (real channel) จะมีค่าการลดทอนกำลังงานของสัญญาณต่อระยะทาง และค่าการจางหายและความผิดเพี้ยนของสัญญาณอยู่ด้วยเสมอ ฉะนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงจำลองระบบใหม่ที่นำผลกระทบของค่าการจางหายของสัญญาณที่มีการแจกแจงเชิงสถิติแบบเรลีย์ (Raleigh Fading) มาร่วมพิจารณา และกำหนดให้ค่าจำนวนการส่งเฟรมข้อมูลซ้ำ (i) และค่าช่วงเวลาหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (CW) มีค่าคงที่ แต่ยังคงใช้ทฤษฎีห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่องเหมือนเดิม ซึ่งเราเรียกเทคนิคการจำลองระบบแบบใหม่นี้ว่า FBFC (Fixed Backoff stages and Fixed Contention Windows sizes technique) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3: การจำลองระบบแบบ FBFC

จากภาพที่ 3 กำหนดให้ค่าจำนวนการส่งเฟรมข้อมูลซ้ำหรือค่าแบ็คออฟสเตจมีค่าเท่ากับ 8 (0-7) และค่าช่วงเวลาหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (*CW*) มีค่าเท่ากับ 1024 (0-1023) สล็อต ถ้าเรากำหนดให้ $b_{i,k}$ คือค่าความน่าจะเป็นที่ระบบจะอยู่ที่แบคออฟสเตจ i และค่าช่วงเวลาหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณ k เราใช้ทฤษฎีคิว (Queuing Theory) ในสภาวะคงตัว (steady state) หาค่าความน่าจะเป็นที่โหนดหรือคอมพิวเตอร์ลูกข่ายจะทำการส่งเฟรมข้อมูลในแต่ละสล็อต (Packet Transmission Probability) ทันทีที่ช่องสัญญาณว่างมากกว่าหรือเท่ากับ DIFS (Distributed Inter Frame Space) ค่าหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณ k ถูกลดค่าลงทีละหนึ่งสล็อตจนเป็นศูนย์ (*CW* or K =0 time slot) และ P_F คือค่าความน่าจะเป็นที่คอมพิวเตอร์ลูกข่ายจะต้องหยุดรอการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (หยุดการลดค่าหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณ K) เมื่อช่องสัญญาณกำลังถูกคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นใช้ส่งเฟรมข้อมูลอยู่ จะต้องรอให้คอมพิวเตอร์ที่กำลังใช้งานช่องสัญญาณส่งข้อมูลให้เสร็จสิ้นก่อน จึงจะสามารถเริ่มกระบวนการลดค่า *CW* ต่อได้ (ลดค่า K ลงทีละหนึ่งสล็อตจนเป็นศูนย์) ฉะนั้นค่าความน่าจะเป็นที่คอมพิวเตอร์ลูกข่ายจะทำการส่งเฟรมข้อมูลในแต่ละแบคออฟสเตจ i ที่สัมพันธ์กับค่าความน่าจะเป็นที่สเตจเริ่มต้น $b_{0,0}$ จะเป็นดังสมการ

$$b_{1,0}=\frac{p}{15}\sum_{L=1}^{15}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L b_{0,0} \qquad b_{2,0}=\frac{p}{31}\sum_{L=1}^{31}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L b_{1,0} \qquad b_{3,0}=\frac{p}{63}\sum_{L=1}^{63}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L b_{2,0} \tag{3}$$

$$b_{4,0}=\frac{p}{127}\sum_{L=1}^{127}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L b_{3,0} \qquad b_{5,0}=\frac{p}{255}\sum_{L=1}^{255}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L b_{4,0} \qquad b_{6,0}=\frac{p}{511}\sum_{L=1}^{511}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L b_{5,0} \tag{4}$$

$$b_{7,0}=\frac{p}{1023}\sum_{L=1}^{1023}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L b_{6,0}+\frac{p}{1023}\sum_{L=1}^{1023}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L b_{7,0} \tag{5}$$

จากทฤษฎีคิวในสภาวะคงตัว (Steady state) ค่าความน่าจะเป็นในแต่ละแบคออฟสเตจ จะต้องรวมกันเท่ากับหนึ่ง นั่นคือค่าความน่าจะเป็นที่โหนดหรือคอมพิวเตอร์ลูกข่ายใดๆ จะทำการส่งเฟรมข้อมูลในหนึ่งสล็อตการส่งจะเท่ากับ

$$\tau_{new}=\sum_{i=0}^{7}b_{i,0}=b_{0,0}+b_{1,0}+b_{2,0}+b_{3,0}+b_{4,0}+b_{5,0}+b_{6,0}+b_{7,0}=1 \tag{6}$$

แทนสมการที่ 3, 4 และ 5 ลงใน 6 จัดสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่าย เราก็จะได้ค่าความน่าจะเป็นที่โหนดหรือคอมพิวเตอร์ลูกข่ายใดๆ จะทำการส่งเฟรมข้อมูลในหนึ่งสล็อตการส่งสำหรับการจำลองระบบแบบ FBFC จะเป็นดังสมการ

$$\tau_{FBFC\,model}=\frac{1}{\left[1+B+BC+BCD+BCDE+BCDEF+BCDEFG+\left[\frac{H}{1-H}\right]BCDEFG\right]} \tag{7}$$

โดยที่

$$B=\frac{p}{15}\sum_{L=1}^{15}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L \qquad C=\frac{p}{31}\sum_{L=1}^{31}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L \qquad D=\frac{p}{63}\sum_{L=1}^{63}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L \qquad E=\frac{p}{127}\sum_{L=1}^{127}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L$$

$$F=\frac{p}{255}\sum_{L=1}^{255}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L \qquad G=\frac{p}{511}\sum_{L=1}^{511}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L \qquad H=\frac{p}{1023}\sum_{L=1}^{1023}\left[\frac{(1-P_F)}{(1-2P_F)}\right]^L$$

3. การคำนวณค่าวิสัยสามารถของระบบ

ในระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สาย ค่าวิสัยสามารถในสภาวะอิ่มตัว ซึ่งหมายความว่าทุกๆสล็อตจะมีคอมพิวเตอร์ลูกข่ายส่งเฟรมข้อมูลอยู่เสมอ (Saturated throughput [2]) ซึ่งค่าวิสัยสามารถนี้เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ใช้ชี้วัดสมรรถนะของระบบได้ ค่าวิสัยสามารถของระบบคำนวณได้จากสมการที่ 8 -14

$$Throughput = S = \frac{P_S P_{tr}(MSDU \times 8) P_{ERROR}^{REYLEIGH\ FADING}}{(1-P_{tr})\sigma + P_{tr}P_S T_S + P_{tr}(1-P_S)T_C} \quad (8)$$

$$P_{tr} = 1-(1-\tau)^n \quad (9)$$

$$P_S = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{P_{tr}} = \frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n} \quad (10)$$

$$P_C = 1-P_S = 1-\frac{n\tau(1-\tau)^{n-1}}{1-(1-\tau)^n} \quad (11)$$

$$T_S = T_{DIFS} + T_{RTS} + T_{CTS} + 3T_{SIFS} + 4\sigma + T_{Data} + T_{ACK} \quad (12)$$

$$T_C = T_{RTS} + T_{DIFS} + \sigma \quad (13)$$

$$T_{DATA} = \frac{MSDU \times 8}{Data\ Rate} \quad (14)$$

ในเอกสารอ้างอิงที่ [7] ได้สรุปค่าความน่าจะเป็นของอัตราข้อผิดพลาดบิตที่ส่ง (BER: Bit Error Rate) ของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ Binary Phase Shift Keying (BPSK) Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) 16 64 และ 256 Quadrature Amplitude Modulation (16-QAM 64-QAM 256-QAM) ในช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรลีย์ (One-Path Rayleigh Fading) จะเป็นดังสมการ

$$BER_{BPSK} = BER_{QPSK} = \frac{1}{2}[1-1/\sqrt{1+1/(E_b/N_0)}] \quad (15)$$

$$BER_{16-QAM} = \frac{3}{8}[1-1/\sqrt{1+5/(2E_b/N_0)}] \quad (16)$$

$$BER_{64-QAM} = \frac{7}{24}[1-1/\sqrt{1+7/(E_b/N_0)}] \quad (17)$$

$$BER_{256-QAM} = \frac{15}{64}[1-1/\sqrt{1+85/(4E_b/N_0)}] \quad (18)$$

และค่าความน่าจะเป็นที่เฟรมข้อมูลจะส่งไม่สำเร็จเนื่องจากการจางหายในช่องสัญญาณแบบเรลีย์จะเป็นดังสมการ

$$P_{ERROR}^{REYLEIGH\ FADING} = 1-(1-BER)^{MSDU \times 8} \quad (19)$$

โดยที่

$MSDU$	คือขนาดของเฟรมข้อมูลที่ส่ง (MAC Service Data Unit sizes)
P_S	คือค่าความน่าจะเป็นที่จะส่งเฟรมข้อมูลได้สำเร็จ (Success probability)
P_C	คือค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดการชนกันของเฟรมข้อมูล (Collision probability)
T_C	คือค่าคาบเวลาที่เกิดการชนของเฟรมข้อมูล (Collision period)
T_S	คือค่าคาบเวลาที่ส่งเฟรมข้อมูลสำเร็จ (Success period)
T_{RTS}	คือค่าคาบเวลาที่ใช้ส่งเฟรมข้อมูล RTS (Request to Send)
T_{CTS}	คือค่าคาบเวลาที่ใช้ส่งเฟรมข้อมูล CTS (Clear to Send)
T_{DATA}	คือค่าคาบเวลาที่ใช้ส่งเฟรมข้อมูล MSDU (Payload)
T_{ACK}	คือค่าคาบเวลาที่ใช้ส่งเฟรมข้อมูล ACK (Acknowledgement)
T_{DIFS}	คือค่าคาบเวลา DIFS (Distributed Inter Frame Space)
T_{SIFS}	คือค่าคาบเวลา SIFS (Shot Inter Frame Space)
σ	คือค่าคาบเวลาหนึ่งสล็อต (aTimeSlot)
n	คือจำนวนโหนดหรือจำนวนคอมพิวเตอร์ลูกข่ายที่ต้องการจะส่งเฟรมข้อมูล

BER ค่าความน่าจะเป็นของอัตราข้อผิดพลาดบิตที่ส่ง

E_b / N_o ค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณต่อค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนต่อบิท (Signal-energy to Noise spectral-density ratio)

$P_{ERROR}^{REYLEIGH\ \ FADING}$ คือค่าความน่าจะเป็นที่เฟรมข้อมูลจะส่งไม่สำเร็จเนื่องจากการจางหายของสัญญาณแบบเรลีย์

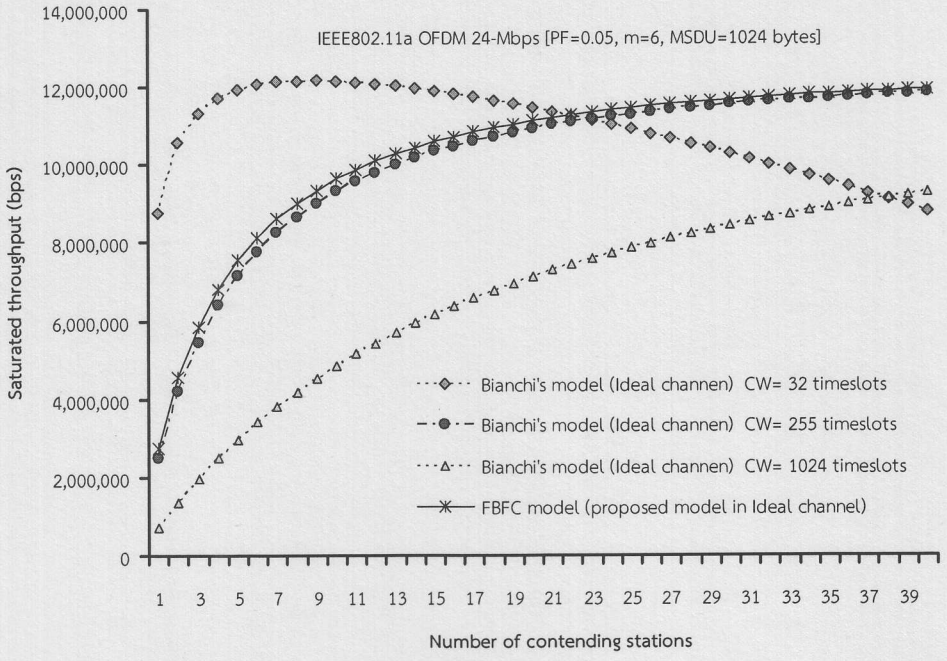
ค่าคาบเวลาของโพรโทคอล CSMA/CA RTS CTS ตามมาตราฐาน IEEE802.11a เป็นดังตารางที่ 1 [1] [2] และ [7]

Periods	IEEE802.11a standard
T_{RTS}	28 μs
T_{CTS}	28 μs
T_{ACK}	28 μs
T_{DATA}	341 μs
T_{DIFS}	34 μs
T_{SIFS}	16 μs
σ	16 μs

ตารางที่ 1: ค่าคาบเวลาของโพรโทคอล CSMA/CA RTS CTS ตามมาตราฐาน IEEE802.11a ที่ความเร็ว 24-Mbps

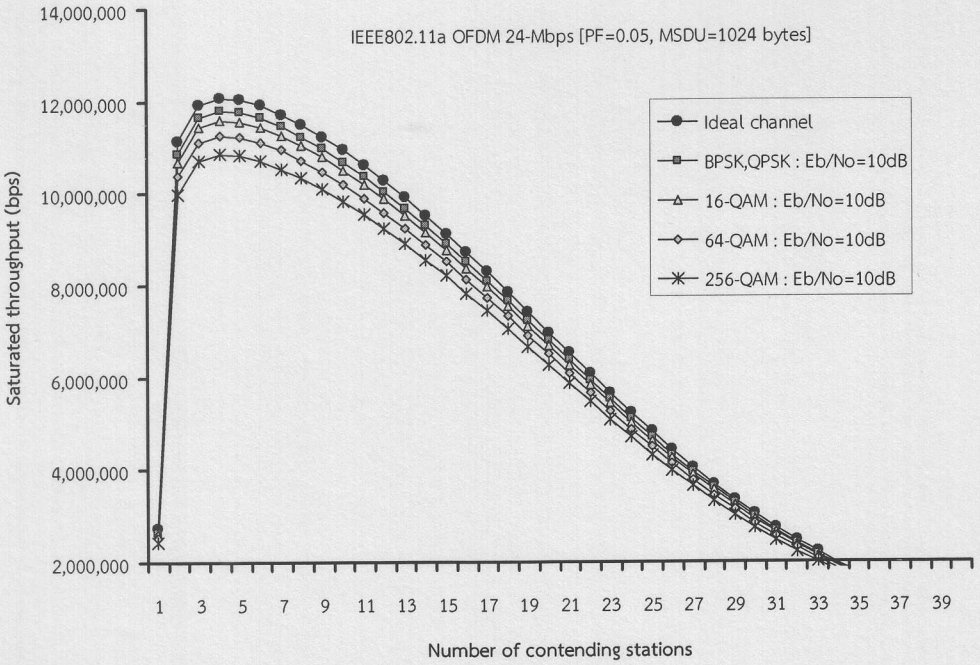
4. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขค่าวิสัยสามารถของระบบโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายที่ใช้เทคนิคการกล้ำสัญญาณแต่ละแบบเราจะใช้ฐานเวลาของ IEEE802.11a เป็นหลัก โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เช่นเดียวกับเอกสารอ้างอิงที่ [8]

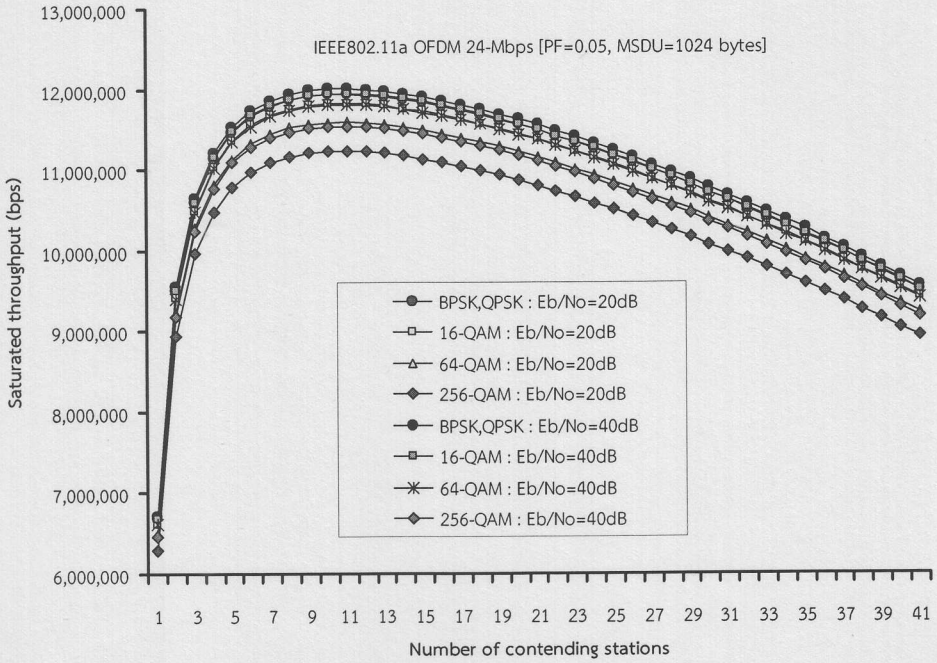


ภาพที่ 4: ค่าวิสัยสามารถที่ใช้การจำลองแบบ Bianchi's model และ FBFC model

จากกราฟในภาพที่ 4 เป็นการเปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถของระบบระหว่างการจำลองแบบ Bianchi' model กับการจำลองแบบ FBFC โดยกำหนดให้มีค่า CW_{min} และ CW_{max} หรือค่าช่วงเวลาหน้าต่างช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณต่ำสุดและสูงสุดที่เท่ากันคือ 8 ถึง 1024 สล็อต ในช่องสัญญาณที่เป็นแบบอุดมคติ (ไม่มีการลดทอน ไม่มีสัญญาณรบกวน และไม่มีการจางหายของสัญญาณ) จากกราฟจะเห็นว่าค่าวิสัยสามารถที่ใช้เทคนิคการจำลองแบบ FBFC model จะเป็นค่าเฉลี่ยของการจำลองแบบ Bianchi' model

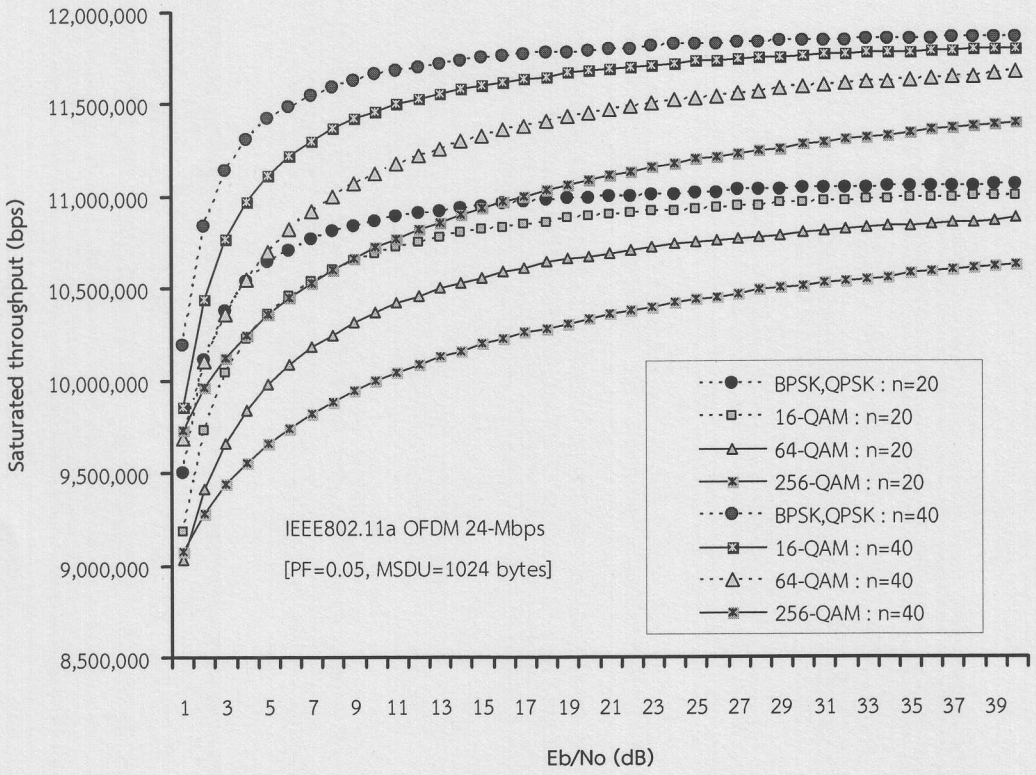


ภาพที่ 5: ค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแต่ละแบบโดยใช้แบบจำลอง FBFC ในช่องสัญญาณแบบอุดมคติกับช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรลีย์และใช้แบ็คออฟแบบ BEB



ภาพที่ 6: ค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแต่ละแบบเมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงจำนวนคอมพิวเตอร์ลูกข่าย

จากกราฟในภาพที่ 5 และ 6 เมื่อเรากำหนดให้ค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณต่อค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนต่อบิทเท่ากับ 10 20 และ 40 dB ตามลำดับ และกำหนดให้ค่าความเร็วในการส่งข้อมูลอยู่ที่ 24-Mbps ตามมาตรฐาน IEEE802.11a ผลจากกราฟจะเห็นว่า ค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK และ QPSK จะมีสมรรถนะที่ดีกว่า (สูงกว่า) เมื่อเทียบกับค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ 16-QAM 64-QAM และ 256-QAM และขณะเดียวกันค่าวิสัยสามารถของระบบจะลดต่ำลงเมื่อเราเพิ่มจำนวนสถานีหรือเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายที่ต้องการส่งเฟรมข้อมูล (Number of contending stations : *n*) โดยเฉพาะผลลัพธ์จากกราฟในภาพที่ 5 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าถ้าเราเพิ่มเครื่องคอมพิวเตอร์ลูกข่ายที่ต้องการส่งเฟรมข้อมูลจนถึง 33 เครื่องจะทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบจะลดลงต่ำกว่า 2 Mbps อันเนื่องมาจาก เกิดการชนกันของเฟรมข้อมูลจำนวนมากและการจางหายของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณนั่นเอง



ภาพที่ 7: ค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแต่ละแบบเมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนแปลงค่า Eb/No

ในภาพที่ 7 เป็นการเปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแต่ละแบบเมื่อเราเปลี่ยนแปลงค่า Eb/No และกำหนดให้จำนวนสถานีหรือคอมพิวเตอร์ลูกข่ายคงที่เท่ากับ 20 และ 40 สถานีตามลำดับ จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเราเพิ่มค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณต่อค่ากำลังงานเฉลี่ยของสัญญาณรบกวนต่อบิท (Eb/No) ให้มากขึ้น ค่าวิสัยสามารถของระบบก็จะเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน และค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK และ QPSK ยังคงดีกว่า ค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ 16-QAM 64-QAM และ 256-QAM อยู่เหมือนเดิม

5. สรุป

จากผลการเปรียบเทียบค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแต่ละแบบ ในช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรลีย์ โดยใช้เทคนิคการจำลองแบบห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่อง และใช้เอ็กซ์โพเนนเชียลแบ็คออฟอัลกอริทึมเพื่อลดอัตราการชนกันของเฟรมข้อมูลในระบบ ค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ BPSK และ QPSK มีประสิทธิ์ภาพที่ดีกว่าค่าวิสัยสามารถของเทคนิคการกล้ำสัญญาณแบบ 16-QAM 64-QAM และ 256-QAM ตามลำดับ ในอนาคตเราจะทำการวิจัยเพื่อหาเทคนิคการกล้ำสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายในช่องสัญญาณ ที่มีค่าการลดทอนกำลังงานของสัญญาณต่อระยะทาง (path loss) และมีสัญญาณรบกวนที่เป็นแบบ AWGN (Additive White Gaussian Noises) รวมถึงค่าการจางหายและความผิดเพี้ยนของสัญญาณ (fading and multi-path dispersion) ในรูปแบบอื่นๆ แต่ยังคงใช้แบบจำลองห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่องเหมือนเดิม

เอกสารอ้างอิง

[1] Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer Extension in the 5 GHz Band, IEEE802.11a WG, September 1999.

[2] Bianchi G., "Performance Analysis of the IEEE802.11 Distributed Coordination Function," IEEE Journal of Selected Areas Communication, 18(3) March, 2000, pp.535-547.

[3] Bianchi G., "IEEE802.11-Saturation Throughput Analysis," IEEE Communication Letters, 2(12), December 1998, pp.318-320.

[4] Bianchi G. and Tinnirello I., "Remarks on IEEE 802.11 DCF Performance Analysis," IEEE Communication Letters, 9(8), August 2005, pp.765-767.

[5] Chatzimisios P., Boucouvalas A.C. and Vitsas V., "Throughput and Delay Analysis of IEEE 802.11 Protocol," Proc. of IEEE International Workshop on Networked Appliances (IWNA) 2002, Liverpool UK, 2002.

[6] June J., Peddabachagari P. and Sichitiu M.,"Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications," Proc. of the Second IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, 2003.

[7] Harada H. and Prasad R., *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*, Artech House, London, 2008.

[8] Pritchard P. J., MathCAD *A Tool for Engineering Problem Solving*, Mc Graw Hill, Manhattan College, 2008.