# เทคนิคการจองช่องสัญญาณสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สาย

นายณัฐพล ศิวาโมกข์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0439-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

23 ก.ค. 2546

I20660367

# CHANNEL RESERVATION TECHNIQUES FOR MEDIA ACCESS CONTROL PROTOCOL IN WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

Mr. Nattapon Sivamok

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0439-7

| | |
|---|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | เทคนิคการจองช่องสัญญาณสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สาย |
| โดย | นายณัฐพล ศิวาโมกข์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ |

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)

ณัฐพล ศิวาโมกข์ : เทคนิคการจองช่องสัญญาณสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สาย. (CHANNEL RESERVATION TECHNIQUES FOR MEDIA ACCESS CONTROL PROTOCOL IN WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ, 137 หน้า. ISBN 974-03-0439-7.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาปัญหาการจองช่องสัญญาณสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สาย วิธีการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอมี 7 วิธีคือ CFP, CAP, COP, COP+SPL, CFP+SPL, UNI และ UNI+LA เทคนิคพื้นฐานที่สำคัญซึ่งนำมาใช้ในการพัฒนาวิธีที่เสนอประกอบด้วย การใช้ค่าความน่าจะเป็นในการจองแบบค่าคงที่ การใช้ค่าความน่าจะเป็นในการจองแบบปรับค่าได้ การแบ่งกลุ่มผู้ใช้บริการอย่างสุ่ม การเลือก สล็อตการจองอย่างสุ่ม และการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ วิธีทั้งหมดที่เสนอได้รับการออกแบบให้เหมาะสมโดยเฉพาะสำหรับระบบที่เวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบ (Round-Trip Propagation Delay) ยาวกว่าเวลาประวิงการส่งสัญญาณ (Transmission Delay) สมรรถนะของวิธีแต่ละวิธีที่เสนอถูกประเมินในรูปของจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จ โดยที่ระบบสามารถทราบข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล็อตการจอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การประเมินสมรรถนะของระบบอาศัยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เป็นหลัก ชุดสมการที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลลัพธ์ที่เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบ ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของวิธีการที่นำเสนอได้นำไปเปรียบเทียบกับวิธีการเดิมได้แก่ APB และ AEB พบว่าวิธีที่ถูกพัฒนาขึ้นทั้งหมดมีสมรรถนะเหนือกว่าวิธีที่มีอยู่เดิม นั่นคือค่าวิสัยสามารถของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าวิธี APB และ AEB พิจารณาเฉพาะจำนวนผู้ใช้บริการที่มีอยู่ ในขณะที่วิธีที่เสนอจะพิจารณาทั้งจำนวนสล็อตการจองและจำนวนผู้ใช้บริการ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าข้อมูลที่เพิ่มขึ้นของจำนวนสล็อตการจองมีประโยชน์เพราะข้อมูลนี้สามารถช่วยปรับปรุงสมรรถนะโดยรวมของระบบ เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีที่เสนอทั้งหมดพบว่าวิธี COP+SPL ให้สมรรถนะของระบบสูงสุด อย่างไรก็ตามวิธี COP+SPL มีความซับซ้อนในการทำงานสูงและไม่สามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ วิธีอื่น ๆ ที่เหลือซึ่งมีสมรรถนะต่ำกว่าคือวิธี UNI+LA ถูกพิจารณาว่าเป็นวิธีที่เหมาะสมเพราะให้สมรรถนะที่ดีในขณะที่สามารถนำไปใช้ได้ในทางปฏิบัติ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4170300021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: Channel Reservation / MAC Protocol / Wireless Communication System

NATTAPON SIVAMOK : CHANNEL RESERVATION TECHNIQUES FOR MEDIA ACCESS CONTROL PROTOCOL IN WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS. THESIS ADVISOR: ASSIST. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ. Ph.D., 137 pp. ISBN 974-03-0439-7.

This thesis investigates the problem of channel reservation for media access control protocols in wireless communication systems. Seven channel reservation schemes are proposed, namely, CFP, CAP, COP, COP+SPL, CFP+SPL, UNI and UNI+LA. Key basic techniques applied in developing the schemes include the use of fixed request probability, adaptive request probability, random group splitting, uniform and limited access. All schemes are designed and optimized specifically for the system in which the round-trip propagation delay is comparatively longer than the transmission delay. The performance of each proposed scheme is evaluated in terms of the average number of successful users provided that the number of users and the number of request slots are given.

In this thesis mathematical analysis is extensively used for evaluating the system performance. Mathematical formulations for all schemes are derived in detail to determine the appropriate system parameters so that optimal performance can be achieved. Numerical results of all introduced schemes are presented in comparison to those of known techniques, namely the APB and AEB algorithms. The results show that all developed schemes are superior to the existing techniques, i.e., greater system throughput is obtained. This is as anticipated because the APB and AEB techniques consider only the number of active users whereas the proposed schemes take into account both the number of request slots as well as the number of users. This finding also indicates that the additional information on the number of request slots is useful because such information can help improve the overall system performance. When comparing the performance among the proposed schemes it appears that the COP+SPL offers the highest system performance. However, the COP+SPL scheme is highly sophisticated and can not be realized in practice. Among all other schemes that exhibit lower throughput, the UNI+LA scheme is considered very desirable as it offers useful performance while it is practically realizable.

Department Eletrical Engineering Student's signature Nattapon Sivamok

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature .....

Academic year 2001

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผศ. ดร. ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยด้วยดีเสมอมา นอกจากนี้ท่านยังได้ช่วยเหลือเงินบางส่วนในการไปนำเสนอบทความทางวิชาการ และขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งต่อ Dr. Phillip Rogaway สำหรับคำแนะนำและแนวคิดบางอย่างในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเรื่อยมาจนได้สำเร็จการศึกษา

# สารบัญ


หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฎ

บัญชีสัญลักษณ์..... ฒ

บทที่

1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 3

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 4

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... 4

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ..... 5

2 ความรู้พื้นฐาน..... 6

2.1 โพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง..... 6

2.1.1 โพรโทคอลที่ไม่มีการช่วงชิงช่องสัญญาณ (Contention-Free MAC Protocol)..... 6

2.1.2 โพรโทคอลที่มีการช่วงชิงช่องสัญญาณ (Contention-Based MAC Protocol)..... 6

2.1.3 โพรโทคอลที่ผสมเทคนิคการช่วงชิงและไม่ช่วงชิงช่องสัญญาณ (Contention-Free & Contention-Based MAC Protocol)..... 7

2.1.3.1 โพรโทคอลแบบไฮบริด (Hybrid Protocol)..... 7

2.1.3.2 โพรโทคอลแบบปรับตัว (Adaptive Protocol)..... 8

2.2 พื้นฐานการจองช่องสัญญาณ..... 9

2.3 การกำหนดความน่าจะเป็นในการเข้าจอง (ที่ผ่านมา)..... 13

| บทที่ | | | หน้า |
|---|---|---|---|
| | | 2.3.1 วิธี Exponential Backoff..... | 13 |
| | | 2.3.2 วิธี Pseudo-Bayesian..... | 14 |
| | 2.4 | เวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบ..... | 14 |
| | 2.5 | การปรับค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจอง..... | 16 |
| 3 | | เทคนิคการจองช่องสัญญาณ..... | 18 |
| | 3.1 | ข้อกำหนดและแบบจำลอง..... | 20 |
| | 3.2 | แนวทางในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์..... | 22 |
| | | 3.2.1 ระบบที่มีผู้ใช้บริการเพียงคนเดียว..... | 22 |
| | | 3.2.2 ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน..... | 26 |
| | | 3.2.3 ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 3 คน..... | 29 |
| | | 3.2.4 ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 4 คน..... | 33 |
| | 3.3 | เทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่..... | 39 |
| | | 3.3.1 วิธี Cascade Fixed Probability (CFP)..... | 39 |
| | | 3.3.2 การหาสมรรถนะของวิธี CFP ด้วย Recursive Formula ในรูปของ Pr..... | 40 |
| | | 3.3.3 การหาสมรรถนะของวิธี CFP ด้วย Recursive Formula ในรูปของ T..... | 45 |
| | 3.4 | เทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบปรับค่าได้..... | 48 |
| | | 3.4.1 วิธี Cascade Adaptive Probability (CAP) ..... | 48 |
| | | 3.4.2 วิธี Cascade Optimal Probability (COP) ..... | 51 |
| | 3.5 | เทคนิคการแบ่งกลุ่มย่อยอย่างสุ่ม..... | 55 |
| | | 3.5.1 วิธี Cascade Optimal Probability with Split (COP+SPL)..... | 55 |
| | | 3.5.2 วิธี Cascade Fixed Probability with Split (CFP+SPL)..... | 58 |
| | 3.6 | เทคนิคการเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่ม..... | 60 |
| | | 3.6.1 วิธี Uniform (UNI)..... | 60 |
| | 3.7 | เทคนิคการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ..... | 63 |
| | | 3.7.1 วิธี Uniform with Limited Access (UNI+LA) ..... | 63 |
| | 3.8 | การประยุกต์ใช้วิธีที่เคยถูกนำเสนอ..... | 65 |
| | | 3.8.1 วิธี Applied Pseudo Bayesian (APB)..... | 65 |

| บทที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| | 3.8.2 วิธี Applied Exponential Backoff (AEB)..... | 68 |
| 4 | ผลทดสอบและการวิเคราะห์..... | 70 |
| | 4.1 ผลทดสอบและการวิเคราะห์กรณีศึกษา..... | 72 |
| | 4.2 ผลทดสอบและการวิเคราะห์วิธี CFP..... | 82 |
| | 4.3 ผลทดสอบและการวิเคราะห์วิธี CAP..... | 86 |
| | 4.4 ผลทดสอบและการวิเคราะห์วิธี COP..... | 90 |
| | 4.5 ผลทดสอบและการวิเคราะห์วิธี COP+SPL..... | 95 |
| | 4.6 ผลทดสอบและการวิเคราะห์วิธี CFP+SPL..... | 98 |
| | 4.7 ผลทดสอบและการวิเคราะห์วิธี UNI..... | 101 |
| | 4.8 ผลทดสอบและการวิเคราะห์วิธี UNI+LA..... | 103 |
| | 4.9 การเปรียบเทียบสมรรถนะของวิธีที่นำเสนอกับวิธี APB และ AEB..... | 106 |
| | 4.9.1 กรณีที่จำนวนผู้ใช้บริการน้อยกว่าจำนวนสล็อตการจอง..... | 106 |
| | 4.9.2 กรณีที่จำนวนผู้ใช้บริการมากกว่าจำนวนสล็อตการจอง..... | 109 |
| 5 | บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... | 116 |
| | 5.1 บทสรุป..... | 116 |
| | 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 119 |
| รายการอ้างอิง..... | | 120 |
| ภาคผนวก..... | | 124 |
| บทความทางวิชาที่ได้รับการเผยแพร่..... | | 125 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | | 137 |

# สารบัญตาราง


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| ตารางที่ 4.1 | การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธีที่นำเสนอกับวิธี APB และ AEB เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 64 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต | 113 |
| ตารางที่ 5.1 | การเปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่ต้องการของวิธีที่นำเสนอกับวิธี APB และ AEB | 118 |

# สารบัญภาพ


| ภาพประกอบ | | หน้า |
|---|---|---|
| รูปที่ 1.1 | ระบบสื่อสารไร้สายในพื้นที่ให้บริการหนึ่ง..... | 1 |
| รูปที่ 2.1 | โครงสร้างเฟรมของโพรโทคอล ALOHA Reservation..... | 8 |
| รูปที่ 2.2 | กลไกการทำงานของโพรโทคอลแบบไฮบริด เมื่อใช้พื้นฐานการจองแบบ Slotted ALOHA ..... | 10 |
| รูปที่ 2.3 | การทำงานของโพรโทคอล ALOHA Reservation..... | 11 |
| รูปที่ 2.4 | กลไกการทำงานของโพรโทคอลแบบไฮบริด เมื่อใช้ค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจอง..... | 12 |
| รูปที่ 2.5 | โครงสร้างเฟรมและการทำงานเมื่อเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่าน้อย..... | 15 |
| รูปที่ 2.6 | โครงสร้างเฟรมและการทำงานเมื่อเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่ามาก..... | 15 |
| รูปที่ 3.1 | เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 1 คน และจำนวนสล็อตการจอง 4 สล็อต.. | 23 |
| รูปที่ 3.2 | เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน และจำนวนสล็อตการจอง 4 สล็อต.. | 27 |
| รูปที่ 3.3 | ช่วงการจองถูกแบ่งเป็น 3 ส่วน..... | 41 |
| รูปที่ 3.4 | เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของวิธี CAP เมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน และสล็อตการจอง 4 สล็อต..... | 49 |
| รูปที่ 3.5 | เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของวิธี COP เมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน และสล็อตการจอง 4 สล็อต..... | 52 |
| รูปที่ 4.1 | ความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ 1 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต..... | 73 |
| รูปที่ 4.2 | ความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต..... | 75 |
| รูปที่ 4.3 | ความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ 3 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต..... | 77 |
| รูปที่ 4.4 | ความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ 4 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต..... | 78 |

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.5 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จ และค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจอง เมื่อมีจำนวนสล็อตการจอง 1, 2, 4, 8, 16, 32 สล็อต..... 81
รูปที่ 4.6 ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งแพ็กเกตการจองของวิธี CFP เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1, 2, 4, 8, 16 คน และสล็อตการจอง 1 ถึง 32 สล็อต..... 84
รูปที่ 4.7 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี CFP เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1, 2, 4, 8, 16 คน และสล็อตการจอง 1 ถึง 32 สล็อต..... 84
รูปที่ 4.8 ค่าวิสัยสามารถของวิธี CFP เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 128 คน และสล็อตการจอง 1, 2, 4, 8, 16, 32 สล็อต..... 85
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถและปริมาณโหลดของวิธี CFP เมื่อมีจำนวนสล็อตการจอง 1, 2, 4, 8, 16, 32 สล็อต..... 85
รูปที่ 4.10 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี CAP เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1, 2, 4, 8, 16 คน และสล็อตการจอง 1 ถึง 32 สล็อต..... 87
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี CFP กับ CAP เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1, 2, 4, 8, 16 คน และสล็อตการจอง 1 ถึง 32 สล็อต..... 88
รูปที่ 4.12 ค่าวิสัยสามารถของวิธี CAP เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 128 คน และสล็อตการจอง 1, 2, 4, 8, 16, 32 สล็อต..... 88
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถและปริมาณโหลดของวิธี CAP เมื่อมีจำนวนสล็อตการจอง 1, 2, 4, 8, 16, 32 สล็อต..... 89
รูปที่ 4.14 ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งแพ็กเกตการจองของวิธี COP เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1, 2, 4, 8, 16 คน และสล็อตการจอง 1 ถึง 32 สล็อต..... 92
รูปที่ 4.15 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี COP เมื่อมีผู้ใช้บริการ 1, 2, 4, 8, 16 คน และสล็อตการจอง 1 ถึง 32 สล็อต..... 92
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี CAP กับ COP เมื่อมีผู้ใช้บริการ 1, 2, 4, 8, 16 คน และสล็อตการจอง 1 ถึง 32 สล็อต..... 93
รูปที่ 4.17 ค่าวิสัยสามารถของวิธี COP เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 128 คน และ สล็อตการจอง 1, 2, 4, 8, 16, 32 สล็อต..... 93

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถและปริมาณโหลดของวิธี COP เมื่อมีจำนวนสล็อตการจอง 1, 2, 4, 8, 16, 32 สล็อต..... 94
รูปที่ 4.19 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี COP+SPL เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการจำนวน 1 ถึง 32 คน และสล็อตการจอง16 สล็อต โดยแบ่งกลุ่มเป็น 1, 2, 4, 8, 16 กลุ่ม..... 96
รูปที่ 4.20 ค่าวิสัยสามารถของวิธี COP+SPL เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการจำนวน 1 ถึง 128 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต โดยแบ่งกลุ่มเป็น 1, 2, 4, 8, 16 กลุ่ม..... 97
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถและปริมาณโหลดของวิธี COP+SPL เมื่อมีจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต โดยแบ่งกลุ่มเป็น 1, 2, 4, 8, 16 กลุ่ม..... 97
รูปที่ 4.22 ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งแพ็กเกตการจองของวิธี CFP+SPL เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต โดยแบ่งกลุ่มเป็น 1, 2, 4, 8,16 กลุ่ม..... 99
รูปที่ 4.23 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี CFP+SPL เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการจำนวน 1 ถึง 32 คน และสล็อตการจอง16 สล็อต โดยแบ่งกลุ่มเป็น 1, 2, 4, 8, 16 กลุ่ม..... 100
รูปที่ 4.24 ค่าวิสัยสามารถของวิธี CFP+SPL เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการจำนวน 1 ถึง 128 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต โดยแบ่งกลุ่มเป็น 1, 2, 4, 8, 16 กลุ่ม..... 100
รูปที่ 4.25 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี UNI เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสล็อตการจอง 2, 4, 8, 16 สล็อต..... 102
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถและปริมาณโหลดของวิธี UNI เมื่อมีจำนวนสล็อตการจอง 2, 4, 8, 16 สล็อต..... 102
รูปที่ 4.27 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี UNI+LA เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสล็อตการจอง 2, 4, 8, 16 สล็อต..... 104
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธี UNI กับ UNI+LA เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสล็อตการจอง 2, 4, 8, 16 สล็อต..... 104
รูปที่ 4.29 ค่าวิสัยสามารถของวิธี UNI+LA เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการจำนวน 1 ถึง 128 คน และสล็อตการจอง 2, 4, 8, 16 สล็อต..... 105

ภาพประกอบ หน้า

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าวิสัยสามารถและปริมาณโหลดของวิธี UNI+LA เมื่อมีจำนวนสล็อตการจอง 2, 4, 8, 16 สล็อต..... 105
รูปที่ 4.31 การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธีที่นำเสนอกับวิธี APB และ AEB เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต..... 112
รูปที่ 4.32 การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของวิธีที่นำเสนอกับวิธี APB และ AEB เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 16 ถึง 64 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต..... 113
รูปที่ 4.33 การเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจองของวิธี COP และ APB เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 64 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต..... 115
รูปที่ 4.34 การเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการของวิธี UNI+LA และ ค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจองของวิธี CFP+SPL เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 64 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต..... 115

# บัญชีสัญลักษณ์

| | |
|---|---|
| $B$ | ความน่าจะเป็นแบบทวินาม (Binomial) |
| $g$ | จำนวนกลุ่ม |
| $k$ | จำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จ |
| $m$ | จำนวนผู้ใช้บริการที่เหลืออยู่ในแต่ละสล็อตการจองที่กำลังพิจารณา |
| $M$ | จำนวนผู้ใช้บริการทั้งหมด ณ เวลาเริ่มต้นของแต่ละเฟรม |
| $n$ | จำนวนสล็อตการจองที่เหลืออยู่ในแต่ละสล็อตการจองที่กำลังพิจารณา |
| $N$ | จำนวนสล็อตการจองทั้งหมดในแต่ละเฟรม |
| $p$ | ค่าความน่าจะเป็นในการส่งแพ็กเกตการจอง |
| Pr | ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการจะประสบความสำเร็จในการจอง |
| $T$ | จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จ |
| $y$ | จำนวนผู้ใช้บริการที่ตัดสินใจเข้าจองในกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง |